



N32A455 系列

32-bit ARM[®] Cortex[®]-M4 微控制器

用户手册 V0.9

目录

| | |
|---|-----------|
| 1 文中的缩写 | 31 |
| 1.1 寄存器位操作缩写列表..... | 31 |
| 1.2 可用外设 | 31 |
| 2 中断和事件 | 32 |
| 2.1 嵌套向量中断寄存器..... | 32 |
| 2.1.1 SysTick 校准值寄存器..... | 32 |
| 2.1.2 中断和异常向量..... | 32 |
| 2.2 外部中断/事件控制器（EXTI）..... | 35 |
| 2.2.1 简介..... | 35 |
| 2.2.2 主要特性..... | 35 |
| 2.2.3 功能描述..... | 36 |
| 2.2.4 EXTI 线路映射..... | 37 |
| 2.3 EXTI 寄存器 | 38 |
| 2.3.1 EXTI 寄存器总览..... | 38 |
| 2.3.2 EXTI 中断屏蔽寄存器（EXTI_IMASK） | 38 |
| 2.3.3 EXTI 事件屏蔽寄存器（EXTI_EMASK） | 39 |
| 2.3.4 EXTI 上升沿触发配置寄存器（EXTI_RT_CFG） | 39 |
| 2.3.5 EXTI 下降沿触发配置寄存器（EXTI_FT_CFG） | 39 |
| 2.3.6 EXTI 软件中断事件寄存器（EXTI_SWIE） | 40 |
| 2.3.7 EXTI 挂起寄存器（EXTI_PEND） | 40 |
| 2.3.8 EXTI 时间戳触发源选择寄存器（EXTI_TS_SEL） | 41 |
| 3 存储器和总线架构 | 42 |
| 3.1 系统架构 | 42 |
| 3.1.1 总线架构..... | 42 |
| 3.1.2 总线地址映射..... | 43 |
| 3.1.3 启动管理..... | 44 |
| 3.2 存储系统（MEMORY SYSTEM） | 45 |
| 3.2.1 FLASH 规格..... | 45 |
| 3.2.2 iCache | 55 |
| 3.2.3 SRAM | 56 |
| 3.2.4 R-SRAM（Retention SRAM） | 56 |
| 3.2.5 FLASH 寄存器..... | 57 |
| 4 电源控制（PWR） | 66 |
| 4.1 通用描述 | 66 |
| 4.1.1 电源..... | 66 |
| 4.1.2 电压监控..... | 68 |
| 4.2 功耗模式 | 70 |
| 4.2.1 SLEEP 模式..... | 74 |

| | |
|---|-----------|
| 4.2.2 STOP0 模式..... | 74 |
| 4.2.3 STOP2 模式..... | 75 |
| 4.2.4 STANDBY 模式..... | 76 |
| 4.2.5 VBAT 模式..... | 77 |
| 4.3 低功耗自动唤醒 (AWU) 模式 | 77 |
| 4.4 PWR 寄存器..... | 78 |
| 4.4.1 PWR 寄存器总览..... | 78 |
| 4.4.2 电源控制寄存器 (PWR_CTRL) | 78 |
| 4.4.3 电源控制状态寄存器 (PWR_CTRLSTS) | 80 |
| 4.4.4 电源控制寄存器 2 (PWR_CTRL2) | 81 |
| 4.4.5 电源控制寄存器 3 (PWR_CTRL3) | 81 |
| 5 备份寄存器 (BKP) | 83 |
| 5.1 简介 | 83 |
| 5.2 主要特性 | 83 |
| 5.3 功能描述 | 83 |
| 5.4 BKP 寄存器 | 83 |
| 5.4.1 BKP 寄存器总览..... | 83 |
| 5.4.2 备份数据寄存器 x (BKP_DATx) (x = 1 ... 42) | 86 |
| 5.4.3 备份控制寄存器 (BKP_CTRL) | 86 |
| 5.4.4 备份控制/状态寄存器 (BKP_CTRLSTS) | 87 |
| 6 复位和时钟控制(RCC) | 88 |
| 6.1 复位控制单元 | 88 |
| 6.1.1 电源复位..... | 88 |
| 6.1.2 系统复位..... | 88 |
| 6.1.3 备份域复位..... | 89 |
| 6.2 时钟控制单元 | 90 |
| 6.2.1 时钟树..... | 91 |
| 6.2.2 HSE 时钟..... | 91 |
| 6.2.3 HSI 时钟..... | 92 |
| 6.2.4 PLL 时钟..... | 92 |
| 6.2.5 LSE 时钟 | 93 |
| 6.2.6 LSI 时钟 | 93 |
| 6.2.7 系统时钟(SYSLK)选择 | 93 |
| 6.2.8 时钟安全系统(CLKSS) | 94 |
| 6.2.9 RTC 时钟..... | 94 |
| 6.2.10 看门狗时钟 | 94 |
| 6.2.11 时钟输出(MCO) | 94 |
| 6.3 RCC 寄存器 | 95 |
| 6.3.1 寄存器总览..... | 95 |
| 6.3.2 时钟控制寄存器(RCC_CTRL) | 96 |
| 6.3.3 时钟配置寄存器(RCC_CFG) | 97 |
| 6.3.4 时钟中断寄存器(RCC_CLKINT) | 100 |

| | |
|--|------------|
| 6.3.5 APB2 外设复位寄存器(RCC_APB2PRST)..... | 103 |
| 6.3.6 APB1 外设复位寄存器(RCC_APB1PRST)..... | 104 |
| 6.3.7 AHB 外设时钟使能寄存器(RCC_AHBPCLKEN) | 107 |
| 6.3.8 APB2 外设时钟使能寄存器 (RCC_APB2PCLKEN)..... | 108 |
| 6.3.9 APB1 外设时钟使能寄存器(RCC_APB1PCLKEN)..... | 110 |
| 6.3.10 备份域控制寄存器(RCC_BDCTRL)..... | 113 |
| 6.3.11 控制/状态寄存器(RCC_CTRLSTS) | 114 |
| 6.3.12 AHB 外设复位寄存器(RCC_AHBP_RST)..... | 116 |
| 6.3.13 时钟配置寄存器 2 (RCC_CFG2) | 117 |
| 6.3.14 时钟配置寄存器 3 (RCC_CFG3) | 119 |
| 7 GPIO 和 AFIO | 120 |
| 7.1 概述 | 120 |
| 7.2 IO 功能描述..... | 121 |
| 7.2.1 IO 模式配置 | 121 |
| 7.2.2 复位后状态..... | 125 |
| 7.2.3 单独的位设置和位清除..... | 126 |
| 7.2.4 外部中断/唤醒线 | 126 |
| 7.2.5 复用功能..... | 126 |
| 7.2.6 外设的 IO 配置 | 136 |
| 7.2.7 GPIO 锁定机制..... | 138 |
| 7.3 GPIO 寄存器 | 139 |
| 7.3.1 GPIO 寄存器总览..... | 139 |
| 7.3.2 GPIO 端口低配置寄存器 (GPIOx_PL_CFG) | 140 |
| 7.3.3 GPIO 端口高配置寄存器 (GPIOx_PH_CFG) | 141 |
| 7.3.4 GPIO 端口输入数据寄存器 (GPIOx_PID) | 142 |
| 7.3.5 GPIO 端口输出数据寄存器 (GPIOx_POD) | 142 |
| 7.3.6 GPIO 端口位设置/清除寄存器 (GPIOx_PBSC) | 143 |
| 7.3.7 GPIO 端口位清除寄存器 (GPIOx_PBC) | 143 |
| 7.3.8 GPIO 端口锁定配置寄存器 (GPIOx_PLOCK_CFG) | 144 |
| 7.3.9 GPIO 驱动能力配置寄存器 (GPIOx_DS_CFG) | 144 |
| 7.3.10 GPIO 翻转率配置寄存器 (GPIOx_SR_CFG) | 145 |
| 7.4 AFIO 寄存器 | 145 |
| 7.4.1 AFIO 寄存器总览 | 145 |
| 7.4.2 AFIO 事件控制寄存器 (AFIO_ECTRL) | 146 |
| 7.4.3 AFIO 复用重映射配置寄存器 (AFIO_RMP_CFG) | 147 |
| 7.4.4 AFIO 外部中断配置寄存器 1 (AFIO_EXTI_CFG1) | 151 |
| 7.4.5 AFIO 外部中断配置寄存器 2 (AFIO_EXTI_CFG2) | 151 |
| 7.4.6 AFIO 外部中断配置寄存器 3 (AFIO_EXTI_CFG3) | 152 |
| 7.4.7 AFIO 外部中断配置寄存器 4 (AFIO_EXTI_CFG4) | 153 |
| 7.4.8 AFIO 复用重映射配置寄存器 3 (AFIO_RMP_CFG3) | 154 |
| 7.4.9 AFIO 复用重映射配置寄存器 4 (AFIO_RMP_CFG4) | 157 |
| 7.4.10 AFIO 复用重映射配置寄存器 5 (AFIO_RMP_CFG5) | 159 |

| | |
|---|------------|
| 8 DMA 控制器 | 162 |
| 8.1 简介 | 162 |
| 8.2 主要特性 | 162 |
| 8.3 功能框图 | 163 |
| 8.4 功能描述 | 163 |
| 8.4.1 DMA 操作 | 163 |
| 8.4.2 通道优先级和仲裁器 | 164 |
| 8.4.3 DMA 通道和传输数量 | 164 |
| 8.4.4 可编程的数据位宽 | 164 |
| 8.4.5 外设/内存地址递增 | 166 |
| 8.4.6 通道配置流程 | 166 |
| 8.4.7 流量控制 | 166 |
| 8.4.8 循环模式 | 167 |
| 8.4.9 错误管理 | 167 |
| 8.4.10 中断 | 167 |
| 8.4.11 DMA 请求映像 | 168 |
| 8.5 DMA 寄存器 | 172 |
| 8.5.1 DMA 寄存器总览 | 172 |
| 8.5.2 DMA 中断状态寄存器 (DMA_INTSTS) | 174 |
| 8.5.3 DMA 中断标志清除寄存器 (DMA_INTCLR) | 174 |
| 8.5.4 DMA 通道 x 配置寄存器 (DMA_CHCFGx) | 175 |
| 8.5.5 DMA 通道 x 传输数量寄存器 (DMA_TXNUMx) | 177 |
| 8.5.6 通道 x 外设地址寄存器 (DMA_PADDRx) | 177 |
| 8.5.7 通道 x 存储器地址寄存器 (DMA_MADDRx) | 178 |
| 8.5.8 DMA1 通道 x 通道选择寄存器 (DMA1_CHSELx) | 178 |
| 8.5.9 DMA2 通道 x 通道选择寄存器 (DMA2_CHSELx) | 180 |
| 8.5.10 DMA 通道 MAP 使能寄存器 (DMA_CHMAPEN) | 181 |
| 9 模拟数字转换 (ADC) | 182 |
| 9.1 简述 | 182 |
| 9.2 ADC 主要特征 | 182 |
| 9.3 ADC 功能描述 | 183 |
| 9.3.1 ADC 时钟 | 184 |
| 9.3.2 ADC 开关控制 | 185 |
| 9.3.3 通道选择 | 185 |
| 9.3.4 内部通道 | 188 |
| 9.3.5 单次转换模式 | 188 |
| 9.3.6 连续转换模式 | 188 |
| 9.3.7 时序图 | 188 |
| 9.3.8 模拟看门狗 | 189 |
| 9.3.9 扫描模式 | 190 |
| 9.3.10 注入通道管理 | 190 |
| 9.3.11 间断模式 | 191 |

| | |
|--|------------|
| 9.4 校准 | 191 |
| 9.5 数据对齐 | 192 |
| 9.6 可编程的通道采样时间 | 193 |
| 9.7 外部触发转换 | 193 |
| 9.8 DMA 请求 | 194 |
| 9.9 ADC 模式 | 195 |
| 9.9.1 独立模式 | 196 |
| 9.9.2 同步规则模式 | 196 |
| 9.9.3 同步注入模式 | 197 |
| 9.9.4 快速交叉模式 | 198 |
| 9.9.5 慢速交叉模式 | 199 |
| 9.9.6 交替触发模式 | 200 |
| 9.9.7 混合的规则+注入同步模式 | 201 |
| 9.9.8 混合的同步规则+交替触发模式 | 201 |
| 9.9.9 混合同步注入 + 交叉模式 | 202 |
| 9.10 温度传感器 | 203 |
| 9.10.1 测量温度值 | 204 |
| 9.11 中断 | 204 |
| 9.12 ADC 寄存器 | 204 |
| 9.12.1 ADC 寄存器总览 | 204 |
| 9.12.2 ADC 状态寄存器 (ADC_STS) | 206 |
| 9.12.3 ADC 控制寄存器 1 (ADC_CTRL1) | 207 |
| 9.12.4 ADC 控制寄存器 2 (ADC_CTRL2) | 209 |
| 9.12.5 ADC 采样时间寄存器 1 (ADC_SAMPT1) | 211 |
| 9.12.6 ADC 采样时间寄存器 2 (ADC_SAMPT2) | 212 |
| 9.12.7 ADC 注入通道数据偏移寄存器 x (ADC_JOFFSETx) (x=1..4) | 212 |
| 9.12.8 ADC 看门狗高阈值寄存器 (ADC_WDGHIGH) | 213 |
| 9.12.9 ADC 看门狗低阈值寄存器 (ADC_WDGLOW) | 213 |
| 9.12.10 ADC 规则序列寄存器 1 (ADC_RSEQ1) | 214 |
| 9.12.11 ADC 规则序列寄存器 2 (ADC_RSEQ2) | 214 |
| 9.12.12 ADC 规则序列寄存器 3 (ADC_RSEQ3) | 215 |
| 9.12.13 ADC 注入序列寄存器 (ADC_JSEQ) | 215 |
| 9.12.14 ADC 注入数据寄存器 x (ADC_JDATx) (x=1..4) | 216 |
| 9.12.15 ADC 规则数据寄存器 (ADC_DAT) | 216 |
| 9.12.16 ADC 差分模式选择寄存器 (ADC_DIFSEL) | 217 |
| 9.12.17 ADC 校正因子 (ADC_CALFACT) | 217 |
| 9.12.18 ADC 控制寄存器 3 (ADC_CTRL3) | 218 |
| 9.12.19 ADC 采样时间寄存器 3 (ADC_SAMPT3) | 219 |
| 10 数字/模拟转换 (DAC) | 220 |
| 10.1 DAC 介绍 | 220 |
| 10.2 DAC 主要特性 | 220 |
| 10.3 DAC 功能描述与操作说明 | 222 |
| 10.3.1 DAC 开启 | 222 |

| | |
|--|------------|
| 10.3.2 DAC 输出缓存..... | 222 |
| 10.3.3 DAC 数据格式..... | 222 |
| 10.3.4 DAC 触发..... | 223 |
| 10.3.5 DAC 转换..... | 224 |
| 10.3.6 DAC 输出电压..... | 224 |
| 10.3.7 DMA 请求..... | 225 |
| 10.3.8 噪声产生..... | 225 |
| 10.3.9 三角波产生..... | 226 |
| 10.4 DAC 双通道转换操作..... | 227 |
| 10.4.1 不使用波形发生器的独立触发..... | 227 |
| 10.4.2 产生相同噪声的独立触发..... | 227 |
| 10.4.3 产生不同噪声的独立触发..... | 228 |
| 10.4.4 产生相同三角波的独立触发..... | 228 |
| 10.4.5 产生不同三角波的独立触发..... | 229 |
| 10.4.6 同时软件启动..... | 229 |
| 10.4.7 不使用波形发生器的同步触发..... | 229 |
| 10.4.8 产生相同噪声的同步触发..... | 229 |
| 10.4.9 产生不同噪声的同步触发..... | 230 |
| 10.4.10 产生相同三角波的同步触发..... | 230 |
| 10.4.11 产生不同三角波的同步触发..... | 230 |
| 10.5 DAC 寄存器 | 231 |
| 10.5.1 DAC 寄存器总览..... | 231 |
| 10.5.2 DAC 控制寄存器 (DAC_CTRL) | 232 |
| 10.5.3 DAC 软件触发寄存器 (DAC_SOTTR) | 234 |
| 10.5.4 DAC1 的 12 位右对齐数据保持寄存器 (DAC_DR12CH1) | 235 |
| 10.5.5 DAC 通道 1 的 12 位左对齐数据保持寄存器 (DAC_DL12CH1) | 235 |
| 10.5.6 DAC1 的 8 位右对齐数据保持寄存器 (DAC_DR8CH1) | 235 |
| 10.5.7 DAC2 的 12 位右对齐数据保持寄存器 (DAC_DR12CH2) | 236 |
| 10.5.8 DAC 通道 2 的 12 位左对齐数据保持寄存器 (DAC_DL12CH2) | 236 |
| 10.5.9 DAC2 的 8 位右对齐数据保持寄存器 (DAC_DR8CH2) | 237 |
| 10.5.10 双 DAC 的 12 位右对齐数据保持寄存器 (DAC_DR12DCH) | 237 |
| 10.5.11 双 DAC 的 12 位左对齐数据保持寄存器 (DAC_DL12DCH) | 237 |
| 10.5.12 双 DAC 的 8 位右对齐数据保持寄存器 (DAC_DR8DCH) | 238 |
| 10.5.13 DAC1 的数据输出寄存器 (DAC_DATO1) | 238 |
| 10.5.14 DAC2 的数据输出寄存器 (DAC_DATO2) | 239 |
| 11 高级控制定时器 (TIM1 和 TIM8) | 240 |
| 11.1 TIM1 和 TIM8 简介..... | 240 |
| 11.2 TIM1 和 TIM8 主要特性..... | 240 |
| 11.3 TIM1 和 TIM8 功能描述..... | 241 |
| 11.3.1 时基单元..... | 241 |
| 11.3.2 计数器模式..... | 242 |
| 11.3.3 重复计数器..... | 247 |
| 11.3.4 时钟选择..... | 250 |

| | |
|---|------------|
| 11.3.5 捕获/比较通道 | 253 |
| 11.3.6 输入捕获模式 | 256 |
| 11.3.7 PWM 输入模式 | 257 |
| 11.3.8 强制输出模式 | 258 |
| 11.3.9 输出比较模式 | 258 |
| 11.3.10 PWM 模式 | 260 |
| 11.3.11 单脉冲模式 | 262 |
| 11.3.12 在外部事件上清除 OCxREF 信号 | 264 |
| 11.3.13 互补输出和死区插入 | 264 |
| 11.3.14 刹车功能 | 266 |
| 11.3.15 调试模式 | 268 |
| 11.3.16 TIMx 定时器和外部触发的同步 | 268 |
| 11.3.17 定时器同步 | 271 |
| 11.3.18 产生六步 PWM 输出 | 271 |
| 11.3.19 编码器接口模式 | 272 |
| 11.3.20 与霍尔传感器的接口 | 274 |
| 11.4 TIMx 寄存器 (x=1,8) | 276 |
| 11.4.1 寄存器总览 | 276 |
| 11.4.2 控制寄存器 1 (TIMx_CTRL1) | 277 |
| 11.4.3 控制寄存器 2 (TIMx_CTRL2) | 279 |
| 11.4.4 从模式控制寄存器 (TIMx_SMCTRL) | 281 |
| 11.4.5 DMA/中断使能寄存器 (TIMx_DINTEN) | 283 |
| 11.4.6 状态寄存器 (TIMx_STS) | 284 |
| 11.4.7 事件产生寄存器 (TIMx_EVTGEN) | 286 |
| 11.4.8 捕获/比较模式寄存器 1 (TIMx_CCMOD1) | 287 |
| 11.4.9 捕获/比较模式寄存器 2 (TIMx_CCMOD2) | 290 |
| 11.4.10 捕获/比较使能寄存器 (TIMx_CCEN) | 291 |
| 11.4.11 计数器 (TIMx_CNT) | 294 |
| 11.4.12 预分频器 (TIMx_PSC) | 294 |
| 11.4.13 自动重装载寄存器 (TIMx_AR) | 295 |
| 11.4.14 重复计数寄存器 (TIMx_REPCNT) | 295 |
| 11.4.15 捕获/比较寄存器 1 (TIMx_CCDAT1) | 295 |
| 11.4.16 捕获/比较寄存器 2 (TIMx_CCDAT2) | 296 |
| 11.4.17 捕获/比较寄存器 3 (TIMx_CCDAT3) | 296 |
| 11.4.18 捕获/比较寄存器 4 (TIMx_CCDAT4) | 296 |
| 11.4.19 刹车和死区寄存器 (TIMx_BKDT) | 297 |
| 11.4.20 DMA 控制寄存器 (TIMx_DCTRL) | 298 |
| 11.4.21 连续模式的 DMA 地址 (TIMx_DADDR) | 299 |
| 11.4.22 捕获/比较寄存器 (TIMx_CCMOD3) | 300 |
| 11.4.23 捕获/比较寄存器 5 (TIMx_CCDAT5) | 300 |
| 11.4.24 捕获/比较寄存器 6 (TIMx_CCDAT6) | 300 |
| 12 通用定时器 (TIM2、TIM3、TIM4 和 TIM5) | 302 |
| 12.1 TIM2、TIM3、TIM4 和 TIM5 简介 | 302 |

| | |
|---|-----|
| 12.2 TIM2、TIM3、TIM4 和 TIM5 主要特性 | 302 |
| 12.3 TIM2、TIM3、TIM4 和 TIM5 功能描述 | 303 |
| 12.3.1 时基单元 | 303 |
| 12.3.2 计数器模式 | 304 |
| 12.3.3 时钟选择 | 309 |
| 12.3.4 捕获/比较通道 | 313 |
| 12.3.5 输入捕获模式 | 316 |
| 12.3.6 PWM 输入模式 | 317 |
| 12.3.7 强制输出模式 | 318 |
| 12.3.8 输出比较模式 | 318 |
| 12.3.9 PWM 模式 | 320 |
| 12.3.10 单脉冲模式 | 322 |
| 12.3.11 在外部事件上清除 OCxREF 信号 | 324 |
| 12.3.12 调试模式 | 324 |
| 12.3.13 TIMx 定时器和外部触发的同步 | 324 |
| 12.3.14 定时器同步 | 325 |
| 12.3.15 编码器接口模式 | 329 |
| 12.3.16 与霍尔传感器的接口 | 331 |
| 12.4 TIMx 寄存器 (x=2,3,4 和 5) | 331 |
| 12.4.1 寄存器总览 | 331 |
| 12.4.2 控制寄存器 1 (TIMx_CTRL1) | 333 |
| 12.4.3 控制寄存器 2 (TIMx_CTRL2) | 335 |
| 12.4.4 从模式控制寄存器 (TIMx_SMCTRL) | 336 |
| 12.4.5 DMA/中断使能寄存器 (TIMx_DINTEN) | 338 |
| 12.4.6 状态寄存器 (TIMx_STS) | 339 |
| 12.4.7 事件产生寄存器 (TIMx_EVTGEN) | 340 |
| 12.4.8 捕获/比较模式寄存器 1 (TIMx_CCMOD1) | 341 |
| 12.4.9 捕获/比较模式寄存器 2 (TIMx_CCMOD2) | 344 |
| 12.4.10 捕获/比较使能寄存器 (TIMx_CCEN) | 345 |
| 12.4.11 计数器 (TIMx_CNT) | 346 |
| 12.4.12 预分频器 (TIMx_PSC) | 346 |
| 12.4.13 自动重装载寄存器 (TIMx_AR) | 347 |
| 12.4.14 捕获/比较寄存器 1 (TIMx_CCDAT1) | 347 |
| 12.4.15 捕获/比较寄存器 2 (TIMx_CCDAT2) | 347 |
| 12.4.16 捕获/比较寄存器 3 (TIMx_CCDAT3) | 348 |
| 12.4.17 捕获/比较寄存器 4 (TIMx_CCDAT4) | 348 |
| 12.4.18 DMA 控制寄存器 (TIMx_DCTRL) | 349 |
| 12.4.19 连续模式的 DMA 地址 (TIMx_DADDR) | 349 |
| 13 基本定时器 (TIM6 和 TIM7) | 351 |
| 13.1 简介 | 351 |
| 13.2 主要特性 | 351 |
| 13.3 功能描述 | 351 |
| 13.3.1 时基单元 | 351 |

| | |
|---------------------------------------|------------|
| 13.3.2 计数模式..... | 352 |
| 13.3.3 时钟选择..... | 355 |
| 13.3.4 调试模式..... | 355 |
| 13.4 TIMx 寄存器 (x=6/7) | 355 |
| 13.4.1 寄存器总览..... | 355 |
| 13.4.2 控制寄存器 1 (TIMx_CTRL1)..... | 356 |
| 13.4.3 控制寄存器 2 (TIMx_CTRL2)..... | 357 |
| 13.4.4 DMA/中断使能寄存器 (TIMx_DINTEN)..... | 358 |
| 13.4.5 状态寄存器 (TIMx_STS)..... | 358 |
| 13.4.6 事件产生寄存器 (TIMx_EVTGEN) | 358 |
| 13.4.7 计数器 (TIMx_CNT)..... | 359 |
| 13.4.8 预分频器 (TIMx_PSC)..... | 359 |
| 13.4.9 自动重装载寄存器 (TIMx_AR) | 359 |
| 14 实时时钟(RTC)..... | 361 |
| 14.1 简介 | 361 |
| 14.1.1 主要特性..... | 361 |
| 14.2 RTC 功能描述..... | 362 |
| 14.2.1 RTC 框图..... | 362 |
| 14.2.2 RTC 控制的 GPIO..... | 363 |
| 14.2.3 RTC 寄存器写保护..... | 363 |
| 14.2.4 RTC 时钟和预分频..... | 363 |
| 14.2.5 RTC 日历..... | 363 |
| 14.2.6 日历初始化和配置..... | 364 |
| 14.2.7 日历读取..... | 364 |
| 14.2.8 校准时钟输出..... | 365 |
| 14.2.9 可编程闹钟..... | 365 |
| 14.2.10 闹钟配置..... | 365 |
| 14.2.11 闹钟输出..... | 366 |
| 14.2.12 周期性自动唤醒..... | 366 |
| 14.2.13 唤醒定时器配置..... | 366 |
| 14.2.14 时间戳功能..... | 366 |
| 14.2.15 夏时令功能配置..... | 367 |
| 14.2.16 RTC 亚秒寄存器位移操作..... | 367 |
| 14.2.17 RTC 数字时钟精密校准..... | 367 |
| 14.2.18 RTC 低功耗模式..... | 368 |
| 14.3 RTC 寄存器..... | 369 |
| 14.3.1 RTC 寄存器总览..... | 369 |
| 14.3.2 RTC 日历时间寄存器 (RTC_TSH) | 370 |
| 14.3.3 RTC 日历日期寄存器 (RTC_DATE) | 370 |
| 14.3.4 RTC 控制寄存器(RTC_CTRL)..... | 371 |
| 14.3.5 RTC 初始状态寄存器 (RTC_INITSTS)..... | 373 |
| 14.3.6 RTC 预分频寄存器(RTC_PRE)..... | 375 |
| 14.3.7 RTC 唤醒定时器寄存器(RTC_WKUPT)..... | 375 |

| | |
|--|------------|
| 14.3.8 RTC 闹钟 A 寄存器(RTC_ALARMA) | 376 |
| 14.3.9 RTC 闹钟 B 寄存器 (RTC_ALARMB)..... | 377 |
| 14.3.10 RTC 写保护寄存器(RTC_WRP)..... | 378 |
| 14.3.11 RTC 亚秒寄存器(RTC_SUBS) | 378 |
| 14.3.12 RTC 平移控制寄存器(RTC_SCTRL)..... | 379 |
| 14.3.13 RTC 时间戳时间寄存器 (RTC_TST)..... | 379 |
| 14.3.14 RTC 时间戳日期寄存器 (RTC_TSD)..... | 380 |
| 14.3.15 RTC 时间戳亚秒寄存器(RTC_TSSS) | 380 |
| 14.3.16 RTC 校准寄存器(RTC_CALIB) | 381 |
| 14.3.17 RTC 闹钟 A 亚秒寄存器(RTC_ALRMASS) | 382 |
| 14.3.18 RTC 闹钟 B 亚秒寄存器 (RTC_ALRMBSS) | 382 |
| 14.3.19 RTC 选项寄存器 (RTC_OPT) | 383 |
| 15 CRC 计算单元 | 384 |
| 15.1 简介 | 384 |
| 15.2 主要特性 | 384 |
| 15.2.1 CRC32..... | 384 |
| 15.2.2 CRC16..... | 384 |
| 15.3 功能描述 | 385 |
| 15.3.1 CRC32..... | 385 |
| 15.3.2 CRC16..... | 385 |
| 15.4 CRC 寄存器 | 386 |
| 15.4.1 CRC 寄存器总览..... | 386 |
| 15.4.2 CRC32 数据寄存器 (CRC_CRC32DAT) | 386 |
| 15.4.3 CRC32 独立数据寄存器 (CRC_CRC32IDAT) | 386 |
| 15.4.4 CRC32 控制寄存器 (CRC_CRC32CTRL) | 387 |
| 15.4.5 CRC16 控制寄存器 (CRC_CRC16CTRL) | 387 |
| 15.4.6 CRC16 待校验数据寄存器 (CRC_CRC16DAT) | 388 |
| 15.4.7 CRC 循环冗余校验码寄存器 (CRC_CRC16D) | 388 |
| 15.4.8 LRC 校验值寄存器 (CRC_LRC) | 389 |
| 16 独立看门狗 (IWDG) | 390 |
| 16.1 简介 | 390 |
| 16.2 主要特征 | 390 |
| 16.3 功能描述 | 391 |
| 16.3.1 寄存器访问保护 | 391 |
| 16.3.2 调试模式 | 391 |
| 16.4 用户界面 | 392 |
| 16.4.1 操作流程 | 392 |
| 16.4.2 IWDG 配置流程 | 393 |
| 16.5 IWDG 寄存器 | 393 |
| 16.5.1 IWDG 寄存器总览 | 393 |
| 16.5.2 IWDG 密钥寄存器 (IWDG_KEY) | 393 |
| 16.5.3 IWDG 预分频寄存器 (IWDG_PREDIV) | 394 |

| | |
|--------------------------------------|------------|
| 16.5.4 IWDG 重装载寄存器 (IWDG_RELV) | 394 |
| 16.5.5 IWDG 状态寄存器 (IWDG_STS) | 395 |
| 17 窗口看门狗 (WWDG) | 396 |
| 17.1 简介 | 396 |
| 17.2 主要特征 | 396 |
| 17.3 功能描述 | 396 |
| 17.4 刷新看门狗和中断产生的时序 | 397 |
| 17.5 调试模式 | 398 |
| 17.6 用户界面 | 398 |
| 17.6.1 WWDG 配置流程 | 398 |
| 17.7 WWDG 寄存器 | 398 |
| 17.7.1 WWDG 寄存器总览 | 398 |
| 17.7.2 WWDG 控制寄存器 (WWDG_CTRL) | 399 |
| 17.7.3 WWDG 配置寄存器 (WWDG_CFG) | 399 |
| 17.7.4 WWDG 状态寄存器 (WWDG_STS) | 400 |
| 18 SDIO 接口 (SDIO) | 401 |
| 18.1 SDIO 主要功能 | 401 |
| 18.2 SDIO 总线拓扑 | 401 |
| 18.3 SDIO 功能描述 | 403 |
| 18.3.1 SDIO 适配器 | 404 |
| 18.3.2 SDIO AHB 接口 | 412 |
| 18.4 卡功能描述 | 413 |
| 18.4.1 工作电压范围确认 | 413 |
| 18.4.2 卡复位 | 414 |
| 18.4.3 卡识别模式 | 414 |
| 18.4.4 卡识别过程 | 414 |
| 18.4.5 写数据块 | 415 |
| 18.4.6 读数据块 | 416 |
| 18.4.7 数据流操作 (只适用于多媒体卡) | 416 |
| 18.4.8 擦除 | 417 |
| 18.4.9 宽总线选择和解除选择 | 418 |
| 18.4.10 保护管理 | 418 |
| 18.4.11 卡状态寄存器 | 421 |
| 18.4.12 SD 的 I/O 模式 | 427 |
| 18.5 命令与响应 | 428 |
| 18.5.1 应用相关命令和通用命令 | 428 |
| 18.5.2 多媒体卡/SD 卡模块的命令 | 429 |
| 18.5.3 命令类型 | 431 |
| 18.5.4 命令格式 | 431 |
| 18.5.5 响应格式 | 432 |
| 18.6 硬件流控制 | 435 |
| 18.7 SDIO 寄存器 | 435 |

| | |
|---|------------|
| 18.7.1 SDIO 寄存器总览 | 435 |
| 18.7.2 SDIO 电源控制寄存器 (SDIO_PWRCTRL) | 436 |
| 18.7.3 SDIO 时钟控制寄存器 (SDIO_CLKCTRL) | 437 |
| 18.7.4 SDIO 参数寄存器 (SDIO_CMDARG) | 438 |
| 18.7.5 SDIO 命令寄存器 (SDIO_CMDCTRL) | 438 |
| 18.7.6 SDIO 命令响应寄存器 (SDIO_CMDRESP) | 439 |
| 18.7.7 SDIO 响应 1..4 寄存器 (SDIO_RESPONSEx) | 440 |
| 18.7.8 SDIO 数据定时器寄存器 (SDIO_DTIMER) | 440 |
| 18.7.9 SDIO 数据长度寄存器 (SDIO_DATLEN) | 441 |
| 18.7.10 SDIO 数据控制寄存器 (SDIO_DATCTRL) | 441 |
| 18.7.11 SDIO 数据计数器寄存器 (SDIO_DATCOUNT) | 443 |
| 18.7.12 SDIO 状态寄存器 (SDIO_STS) | 443 |
| 18.7.13 SDIO 清除中断寄存器 (SDIO_INTCLR) | 444 |
| 18.7.14 SDIO 中断使能寄存器 (SDIO_INTEN) | 445 |
| 18.7.15 SDIO FIFO 计数器寄存器 (SDIO_FIFOCOUNT) | 448 |
| 18.7.16 SDIO 数据 FIFO 寄存器 (SDIO_DATFIFO) | 448 |
| 19 控制器局域网(CAN) | 450 |
| 19.1 CAN 简介 | 450 |
| 19.2 CAN 的主要特性 | 450 |
| 19.3 CAN 整体介绍 | 450 |
| 19.3.1 CAN 模块 | 451 |
| 19.3.2 CAN 工作模式 | 451 |
| 19.3.3 发送邮箱 | 453 |
| 19.3.4 接收过滤器 | 453 |
| 19.3.5 接收 FIFO | 453 |
| 19.3.6 CAN 测试模式 | 455 |
| 19.3.7 CAN 调试模式 | 457 |
| 19.4 CAN 功能描述 | 457 |
| 19.4.1 发送处理 | 457 |
| 19.4.2 时间触发通信模式 | 458 |
| 19.4.3 非自动重传模式 | 458 |
| 19.4.4 接收管理 | 458 |
| 19.4.5 标识符过滤 | 460 |
| 19.4.6 消息存储 | 463 |
| 19.4.7 位时序 | 464 |
| 19.5 CAN 中断 | 467 |
| 19.5.1 错误管理 | 468 |
| 19.5.2 总线关闭恢复 | 468 |
| 19.6 CAN 配置流程 | 468 |
| 19.7 CAN 寄存器 | 469 |
| 19.7.1 寄存器描述 | 470 |
| 19.7.2 CAN 寄存器总览 | 470 |
| 19.7.3 CAN 控制和状态寄存器 | 473 |

| | |
|--|------------|
| 19.7.4 CAN 邮箱寄存器..... | 483 |
| 19.7.5 CAN 过滤器寄存器..... | 488 |
| 20 串行外设接口/内置音频总线 (SPI/I2S) | 492 |
| 20.1 SPI/I2S 简介 | 492 |
| 20.2 SPI 和 I ² S 主要特性 | 492 |
| 20.2.1 SPI 主要特性..... | 492 |
| 20.2.2 I ² S 主要特性..... | 492 |
| 20.3 SPI 功能描述 | 493 |
| 20.3.1 通用描述..... | 493 |
| 20.3.2 SPI 工作模式..... | 496 |
| 20.3.3 状态标志..... | 502 |
| 20.3.4 关闭 SPI..... | 503 |
| 20.3.5 使用 DMA 进行 SPI 通讯..... | 503 |
| 20.3.6 CRC 计算..... | 504 |
| 20.3.7 错误标志位..... | 505 |
| 20.3.8 SPI 中断..... | 506 |
| 20.4 I ² S 功能描述 | 507 |
| 20.4.1 支持的音频协议..... | 508 |
| 20.4.2 时钟发生器..... | 514 |
| 20.4.3 I ² S 发送和接收流程..... | 515 |
| 20.4.4 状态标识..... | 517 |
| 20.4.5 错误标志位..... | 518 |
| 20.4.6 I ² S 中断..... | 518 |
| 20.4.7 DMA 功能..... | 518 |
| 20.5 SPI 和 I ² S 寄存器 | 519 |
| 20.5.1 SPI 寄存器总览..... | 519 |
| 20.5.2 SPI 控制寄存器 1 (SPI_CTRL1) (不能用于 I2S 模式) | 519 |
| 20.5.3 SPI 控制寄存器 2 (SPI_CTRL2) | 521 |
| 20.5.4 SPI 状态寄存器 (SPI_STS) | 522 |
| 20.5.5 SPI 数据寄存器 (SPI_DAT) | 523 |
| 20.5.6 SPI CRC 多项式寄存器 (SPI_CRCPOLY) (不能用于 I2S 模式) | 524 |
| 20.5.7 SPI 接收 CRC 寄存器 (SPI_CRCRDAT) (不能用于 I ² S 模式) | 524 |
| 20.5.8 SPI 发送 CRC 寄存器 (SPI_CRCTDAT) | 524 |
| 20.5.9 SPI_I ² S 配置寄存器 (SPI_I2SCFG) | 525 |
| 20.5.10 SPI_I ² S 预分频寄存器 (SPI_I2SPREDIV) | 526 |
| 21 I²C 接口 | 528 |
| 21.1 简介 | 528 |
| 21.2 主要特性 | 528 |
| 21.3 功能描述 | 528 |
| 21.3.1 SDA/SCL 控制..... | 528 |
| 21.3.2 软件通讯流程..... | 529 |
| 21.3.3 错误条件..... | 538 |

| | |
|--|-----|
| 21.3.4 DMA 应用..... | 539 |
| 21.3.5 包错误校验 (PEC) | 540 |
| 21.3.6 SMBus..... | 541 |
| 21.4 调试模式 | 543 |
| 21.5 中断请求 | 543 |
| 21.6 I2C 寄存器 | 544 |
| 21.6.1 I2C 寄存器总览..... | 544 |
| 21.6.2 I2C 控制寄存器 1 (I2C_CTRL1)..... | 545 |
| 21.6.3 I2C 控制寄存器 2 (I2C_CTRL2)..... | 547 |
| 21.6.4 I2C 自身地址寄存器 1 (I2C_OADDR1)..... | 548 |
| 21.6.5 I2C 自身地址寄存器 2 (I2C_OADDR2)..... | 548 |
| 21.6.6 I2C 数据寄存器 (I2C_DAT) | 549 |
| 21.6.7 I2C 状态寄存器 1 (I2C_STS1) | 549 |
| 21.6.8 I2C 状态寄存器 2 (I2C_STS2) | 552 |
| 21.6.9 I2C 时钟控制寄存器 (I2C_CLKCTRL) | 553 |
| 21.6.10 I2C 上升时间寄存器 (I2C_TMRISE) | 554 |
| 22 通用同步异步收发器(USART) | 555 |
| 22.1 简介 | 555 |
| 22.2 主要特性 | 555 |
| 22.3 功能框图 | 556 |
| 22.4 功能描述 | 556 |
| 22.4.1 USART 帧格式..... | 557 |
| 22.4.2 发送器..... | 558 |
| 22.4.3 接收器..... | 560 |
| 22.4.4 分数波特率计算..... | 563 |
| 22.4.5 USART 接收器容忍时钟的变化..... | 564 |
| 22.4.6 校验控制..... | 565 |
| 22.4.7 DMA 通信..... | 565 |
| 22.4.8 硬件流控..... | 567 |
| 22.4.9 多处理器通信..... | 569 |
| 22.4.10 同步模式..... | 570 |
| 22.4.11 单线半双工模式..... | 572 |
| 22.4.12 串行 IrDA 红外编解码模式..... | 573 |
| 22.4.13 LIN 模式..... | 574 |
| 22.4.14 智能卡模式 (ISO7816) | 576 |
| 22.5 中断请求 | 578 |
| 22.6 模式配置 | 579 |
| 22.7 USART 寄存器..... | 579 |
| 22.7.1 USART 寄存器总览 | 579 |
| 22.7.2 USART 状态寄存器 (USART_STS) | 580 |
| 22.7.3 USART 数据寄存器(USART_DAT) | 582 |
| 22.7.4 USART 波特率配置寄存器 (USART_BRCF) | 582 |
| 22.7.5 USART 控制寄存器 1(USART_CTRL1) | 582 |

| | |
|--|------------|
| 22.7.6 USART 控制寄存器 2(USART_CTRL2) | 584 |
| 22.7.7 USART 控制寄存器 3(USART_CTRL3) | 586 |
| 22.7.8 USART 保护时间和预分频寄存器(USART_GTP) | 587 |
| 23 四线串行外设接口 (QSPI) | 589 |
| 23.1 QSPI 简介 | 589 |
| 23.2 QSPI 主要特性 | 589 |
| 23.3 功能描述 | 590 |
| 23.4 QSPI 命令序列 | 590 |
| 23.5 操作流程 | 591 |
| 23.5.1 QSPI 间接模式 | 591 |
| 23.5.2 QSPI 间接发送操作 | 592 |
| 23.5.3 QSPI 间接接收操作 | 593 |
| 23.6 QSPI 寄存器 | 596 |
| 23.6.1 QSPI 寄存器总览 | 596 |
| 23.6.2 QSPI 控制寄存器 0 (QSPI_CTRL0) | 598 |
| 23.6.3 QSPI 控制寄存器 1 (QSPI_CTRL1) | 600 |
| 23.6.4 QSPI 使能寄存器 (QSPI_EN) | 600 |
| 23.6.5 QSPI MW 控制寄存器 (QSPI_MW_CTRL) | 601 |
| 23.6.6 QSPI 从设备使能寄存器 (QSPI_SLAVE_EN) | 601 |
| 23.6.7 QSPI 波特率选择寄存器 (QSPI_BAUD) | 602 |
| 23.6.8 QSPI 发送缓存阈值寄存器 (QSPI_TXFT) | 602 |
| 23.6.9 QSPI 接收缓存阈值寄存器 (QSPI_RXFT) | 603 |
| 23.6.10 QSPI 发送缓存数据量寄存器 (QSPI_TXFN) | 603 |
| 23.6.11 QSPI 接收缓存数据量寄存器 (QSPI_RXFN) | 603 |
| 23.6.12 QSPI 状态寄存器 (QSPI_STS) | 604 |
| 23.6.13 QSPI 中断屏蔽寄存器 (QSPI_IMASK) | 605 |
| 23.6.14 QSPI 中断状态寄存器 (QSPIISTS) | 605 |
| 23.6.15 QSPI 原始中断状态寄存器 (QSPI_RISTS) | 606 |
| 23.6.16 QSPI 发送缓存上溢中断清除寄存器 (QSPI_TXFOI_CLR) | 607 |
| 23.6.17 QSPI 接收缓存上溢中断清除寄存器 (QSPI_RXFOI_CLR) | 607 |
| 23.6.18 QSPI 接收缓存下溢中断清除寄存器 (QSPI_RXFUI_CLR) | 608 |
| 23.6.19 QSPI 多主冲突中断清除寄存器 (QSPI_MMCI_CLR) | 608 |
| 23.6.20 QSPI 中断清除寄存器 (QSPI_ICLR) | 609 |
| 23.6.21 QSPI DMA 控制寄存器 (QSPI_DMA_CTRL) | 609 |
| 23.6.22 QSPI DMA 发送水位控制寄存器 (QSPI_DMATDL_CTRL) | 609 |
| 23.6.23 QSPI DMA 接收水位控制寄存器 (QSPI_DMARDL_CTRL) | 610 |
| 23.6.24 QSPI 数据寄存器 (QSPI_DATx) | 610 |
| 23.6.25 QSPI 接收采样延迟寄存器 (QSPI_RS_DELAY) | 611 |
| 23.6.26 QSPI 增强型 SPI 模式控制寄存器 (QSPI_ENH_CTRL0) | 611 |
| 23.6.27 QSPI 发送驱动边沿寄存器 (QSPI_DDR_TXDE) | 612 |
| 23.6.28 QSPI XIP MODE BITS 寄存器 (QSPI_XIP_MODE) | 613 |
| 23.6.29 QSPI XIP INCR 传输操作码寄存器 (QSPI_XIP_INCR_TOC) | 613 |
| 23.6.30 QSPI XIP WRAP 传输操作码寄存器 (QSPI_XIP_WRAP_TOC) | 613 |

| | |
|---|------------|
| 23.6.31 QSPI XIP 控制寄存器 (QSPI_XIP_CTRL) | 614 |
| 23.6.32 QSPI XIP 从设备使能寄存器 (QSPI_XIP_SLAVE_EN) | 615 |
| 23.6.33 QSPI XIP 接收缓存上溢中断清除寄存器 (QSPI_XIP_RXFOI_CLR) | 616 |
| 23.6.34 QSPI XIP 连续传输超时寄存器 (QSPI_XIP_TOUT) | 616 |
| 24 比较器 (COMP) | 617 |
| 24.1 COMP 系统连接框图 | 617 |
| 24.2 COMP 特性 | 620 |
| 24.3 COMP 配置流程 | 620 |
| 24.4 COMP 工作模式 | 621 |
| 24.4.1 窗口模式 | 621 |
| 24.4.2 独立比较器 | 621 |
| 24.5 比较器互联关系 | 621 |
| 24.6 中断 | 622 |
| 24.7 COMP 寄存器 | 623 |
| 24.7.1 COMP 寄存器总览 | 623 |
| 24.7.2 COMP 控制状态寄存器 (COMPx_CTRL) | 625 |
| 24.7.3 COMP 窗口比较寄存器 (COMP_WINMODE) | 626 |
| 24.7.4 COMP 锁寄存器 (COMP_LOCK) | 626 |
| 24.7.5 COMP 中断使能寄存器 (COMP_INTEN) | 627 |
| 24.7.6 COMP 中断状态寄存器 (COMP_INTSTS) | 628 |
| 24.7.7 COMP 滤波寄存器 (COMPx_FILC) | 628 |
| 24.7.8 COMP 滤波分频寄存器 (COMPx_FILP) | 628 |
| 24.7.9 COMP 电压参考寄存器 (COMP_VREFSCL) | 629 |
| 25 运算放大器 (OPAMP) | 630 |
| 25.1 OPAMP 特性 | 630 |
| 25.1.1 OPAMP 功能描述 | 630 |
| 25.1.2 OPAMP 与 COMP 的内部的连接 | 632 |
| 25.2 OPAMP 工作模式 | 635 |
| 25.2.1 OPAMP 独立运算放大器模式 | 635 |
| 25.2.2 OPAMP 跟随模式 | 635 |
| 25.2.3 OPAMP 内部可编程增益 (PGA) 模式 | 636 |
| 25.2.4 OPAMP 带滤波内部增益模式 | 637 |
| 25.2.5 OPAMP 校正 | 638 |
| 25.2.6 OPAMP 独立写保护 | 638 |
| 25.2.7 OPAMP TIMER 控制切换模式 | 638 |
| 25.3 OPAMP 寄存器 | 638 |
| 25.3.1 OPAMP 寄存器总览 | 638 |
| 25.3.2 OPAMP 控制状态寄存器 (OPAMPx_CS) | 639 |
| 25.3.3 OPAMP 锁寄存器 (OPAMP_LOCK) | 641 |
| 26 调试支持 (DBG) | 642 |
| 26.1 简介 | 642 |

| | |
|--|------------|
| 26.2 JTAG/SWD 功能 | 643 |
| 26.2.1 切换 JTAG/SWD 接口 | 643 |
| 26.2.2 引脚分配 | 643 |
| 26.3 MCU 调试功能 | 644 |
| 26.3.1 低功耗模式支持 | 644 |
| 26.3.2 外设调试支持 | 644 |
| 26.4 寄存器 | 644 |
| 26.4.1 <i>DBG</i> 寄存器总览 | 644 |
| 26.4.2 <i>ID</i> 寄存器 (<i>DBG_ID</i>) | 645 |
| 26.4.3 调试控制寄存器 (<i>DBG_CTRL</i>) | 645 |
| 27 唯一设备序列号 (UID) | 648 |
| 27.1 简介 | 648 |
| 27.2 <i>UID</i> 寄存器 | 648 |
| 27.3 <i>UCID</i> 寄存器 | 648 |
| 28 版本历史 | 649 |
| 29 声明 | 650 |

表目录

| | |
|--|-----|
| 表 2-1 向量表..... | 32 |
| 表 2-2 EXTI 寄存器总览..... | 38 |
| 表 3-1 启动模式列表..... | 45 |
| 表 3-2 存储总线地址列表..... | 46 |
| 表 3-3 选项字节列表..... | 49 |
| 表 3-4 读保护配置列表..... | 51 |
| 表 3-5 存储区读写擦 ⁽¹⁾ 权限控制表..... | 52 |
| 表 3-6 SRAM 容量配置表..... | 57 |
| 表 3-7 FLASH 寄存器总览..... | 57 |
| 表 4-1 功耗模式..... | 70 |
| 表 4-2 模块运行状态 ⁽¹⁾ | 72 |
| 表 4-3 PWR 寄存器总览..... | 78 |
| 表 5-1 BKP 寄存器总览..... | 84 |
| 表 6-1 RCC 寄存器总览..... | 95 |
| 表 7-1 IO 模式和配置关系..... | 121 |
| 表 7-2 IO 不同配置的输入输出特性..... | 122 |
| 表 7-3 调试端口映像..... | 129 |
| 表 7-4 ADC1 外部触发注入转换复用功能重映射..... | 129 |
| 表 7-5 ADC1 外部触发规则转换复用功能重映射..... | 130 |
| 表 7-6 ADC2 外部触发注入转换复用功能重映射..... | 130 |
| 表 7-7 ADC2 外部触发规则转换复用功能重映射..... | 130 |
| 表 7-8 ADC3 外部触发注入转换复用功能重映射..... | 130 |
| 表 7-9 ADC3 外部触发规则转换复用功能重映射..... | 130 |
| 表 7-10 ADC4 外部触发注入转换复用功能重映射..... | 130 |
| 表 7-11 ADC4 外部触发规则转换复用功能重映射..... | 130 |
| 表 7-12 TIM5 复用功能重映射..... | 130 |
| 表 7-13 TIM4 复用功能重映射..... | 131 |
| 表 7-14 TIM3 复用功能重映射..... | 131 |
| 表 7-15 TIM2 复用功能重映射..... | 131 |
| 表 7-16 TIM1 复用功能重映射..... | 131 |

| | |
|------------------------------|-----|
| 表 7-17 TIM8 复用功能重映射 | 131 |
| 表 7-18 CAN1 复用功能重映射 | 132 |
| 表 7-19 CAN2 复用功能重映射 | 132 |
| 表 7-20 USART1 复用功能重映射 | 132 |
| 表 7-21 USART2 复用功能重映射 | 133 |
| 表 7-22 USART3 复用功能重映射 | 133 |
| 表 7-23 UART4 复用功能重映射 | 133 |
| 表 7-24 UART5 复用功能重映射 | 133 |
| 表 7-25 UART6 复用功能重映射 | 133 |
| 表 7-26 UART7 复用功能重映射 | 134 |
| 表 7-27 I2C1 管脚重映射 | 134 |
| 表 7-28 I2C2 管脚重映射 | 134 |
| 表 7-29 I2C3 管脚重映射 | 134 |
| 表 7-30 I2C4 管脚重映射 | 134 |
| 表 7-31 SPI1 管脚重映射 | 135 |
| 表 7-32 SPI2/I2S2 管脚重映射 | 135 |
| 表 7-33 SPI3/I2S3 管脚重映射 | 135 |
| 表 7-34 SDIO 管脚重映射 | 135 |
| 表 7-35 QSPI 管脚重映射 | 136 |
| 表 7-36 ADC/DAC | 136 |
| 表 7-37 TIM1/TIM8 | 136 |
| 表 7-38 TIM2/3/4/5 | 136 |
| 表 7-39 BxCAN | 136 |
| 表 7-40 USART | 137 |
| 表 7-41 I2C | 137 |
| 表 7-42 SPI | 137 |
| 表 7-43 I2S | 137 |
| 表 7-44 SDIO | 138 |
| 表 7-45 QSPI | 138 |
| 表 7-46 其他 | 138 |
| 表 7-47 GPIO 寄存器总览 | 140 |
| 表 7-48 AFIO 寄存器总览 | 146 |

| | |
|--|-----|
| 表 8-1 可编程的数据宽度和大小端操作(当 PINC = MINC = 1)..... | 164 |
| 表 8-2 流量控制表..... | 167 |
| 表 8-3 DMA 中断请求..... | 168 |
| 表 8-4 各个通道的 DMA1 请求映射表..... | 169 |
| 表 8-5 各个通道的 DMA2 请求映射表..... | 171 |
| 表 8-6 DMA 寄存器总览..... | 172 |
| 表 9-1 ADC 引脚..... | 184 |
| 表 9-2 模拟看门狗开启的通道..... | 189 |
| 表 9-3 数据右对齐..... | 192 |
| 表 9-4 数据左对齐..... | 192 |
| 表 9-5 ADC1 和 ADC2 的规则通道的外部触发 | 193 |
| 表 9-6 ADC3 和 ADC4 的规则通道的外部触发 | 193 |
| 表 9-7 ADC1 和 ADC2 的注入通道的外部触发 | 194 |
| 表 9-8 ADC3 和 ADC4 用于注入通道的外部触发 | 194 |
| 表 9-9 ADC 中断..... | 204 |
| 表 9-10 ADC 寄存器映像和复位值..... | 204 |
| 表 10-1 DAC 引脚 | 221 |
| 表 10-2 DAC 外部触发..... | 223 |
| 表 10-3 DAC 寄存器总览..... | 231 |
| 表 11-1 计数方向与编码器信号的关系 | 273 |
| 表 11-2 TIM1 和 TIM8 寄存器总览..... | 276 |
| 表 11-3 TIMx 内部触发连接 | 283 |
| 表 11-4 带刹车功能的互补输出通道 OCx 和 OCxN 的控制位..... | 293 |
| 表 12-1 计数方向与编码器信号的关系 | 330 |
| 表 12-2 TIM2、TIM3、TIM4、TIM5 and TIM9 寄存器总览..... | 331 |
| 表 12-3 TIMx 内部触发连接 | 337 |
| 表 12-4 标准 OCx 的输出控制位..... | 346 |
| 表 13-1 寄存器总览..... | 355 |
| 表 14-1 RTC 功能支持 | 361 |
| 表 14-2 RTC 寄存器总览 | 369 |
| 表 15-1 CRC 寄存器总览 | 386 |
| 表 16-1 IWDG 计数最大和最小复位时间 | 392 |

| | |
|------------------------------------|-----|
| 表 16-2 IWDG 寄存器总览 | 393 |
| 表 17-1 WWDG 的最大和最小计数时间 | 398 |
| 表 17-2 WWDG 寄存器总览 | 398 |
| 表 18-1 MMC/SD/SD I/O 卡总线引脚定义 | 405 |
| 表 18-2 命令通道状态标志 | 408 |
| 表 18-3 数据令牌格式 | 411 |
| 表 18-4 发送 FIFO 状态标志 | 412 |
| 表 18-5 接收 FIFO 状态标志 | 412 |
| 表 18-6 上锁/解锁数据结构 | 419 |
| 表 18-7 卡状态 | 421 |
| 表 18-8 SD 状态 | 424 |
| 表 18-9 速度类型代码 | 425 |
| 表 18-10 移动性能代码 | 426 |
| 表 18-11 AU_SIZE 代码 | 426 |
| 表 18-12 最大的 AU 长度 | 426 |
| 表 18-13 ERASE_SIZE 代码 | 426 |
| 表 18-14 擦除超时代码 | 427 |
| 表 18-15 擦除偏移代码 | 427 |
| 表 18-16 基于块传输的写命令 | 429 |
| 表 18-17 基于块传输的写保护命令 | 429 |
| 表 18-18 擦除命令 | 430 |
| 表 18-19 I/O 模式命令 | 430 |
| 表 18-20 上锁命令 | 430 |
| 表 18-21 应用相关命令 | 431 |
| 表 18-22 命令格式 | 431 |
| 表 18-23 短响应格式 | 432 |
| 表 18-24 长响应格式 | 432 |
| 表 18-25 R1 响应 | 432 |
| 表 18-26 R2 响应 | 433 |
| 表 18-27 R3 响应 | 433 |
| 表 18-28 R4 响应 | 433 |
| 表 18-29 R4b 响应 | 434 |

| | |
|---|-----|
| 表 18-30 R5 响应 | 434 |
| 表 18-31 R6 响应 | 434 |
| 表 18-32 SDIO 寄存器总览..... | 435 |
| 表 18-33 响应类型和 SDIO_RESPONSEx 寄存器..... | 440 |
| 表 19-1 过滤器编号示例..... | 462 |
| 表 19-2 发送邮箱寄存器列表 | 463 |
| 表 19-3 接收邮箱寄存器列表 | 464 |
| 表 19-4 CAN 寄存器总览..... | 470 |
| 表 20-1 SPI 中断请求 | 506 |
| 表 20-2 使用标准的 8MHz HSE 时钟得到精确的音频频率..... | 515 |
| 表 20-3 I ² S 中断请求 | 518 |
| 表 20-4 SPI 寄存器总览..... | 519 |
| 表 21-1 SMBus 与 I ² C 的比较..... | 541 |
| 表 21-2 I ² C 中断请求..... | 543 |
| 表 21-3 I ² C 寄存器总览..... | 544 |
| 表 22-1 停止位配置 | 558 |
| 表 22-2 噪声检测的数据采样 | 562 |
| 表 22-3 设置波特率时的误差计算..... | 564 |
| 表 22-4 当 DIV_Decimal =0 时, USART 接收器的容忍度 | 564 |
| 表 22-5 当 DIV_Decimal !=0 时, USART 接收器的容忍度 | 565 |
| 表 22-6 帧格式..... | 565 |
| 表 22-7 USART 中断请求 | 578 |
| 表 22-8 USART 模式设置 ⁽¹⁾ | 579 |
| 表 22-9 USART 寄存器总览 | 579 |
| 表 23-1 QSPI 寄存器总览 | 596 |
| 表 24-1 COMP 寄存器总览..... | 623 |
| 表 25-1 OPAMP 寄存器总览..... | 638 |
| 表 26-1 调试端口引脚 | 643 |
| 表 26-2 DBG 寄存器总览..... | 645 |

图目录

| | |
|-------------------------------------|-----|
| 图 2-1 外部中断/事件控制器框图 | 36 |
| 图 2-2 外部中断通用 I/O 映射 | 37 |
| 图 3-1 总线架构图 | 42 |
| 图 3-2 总线地址映射图 | 43 |
| 图 4-1 电源框图 | 68 |
| 图 4-2 上电复位和掉电复位的波形图 | 69 |
| 图 4-3 PVD 阈值波形图 | 70 |
| 图 6-1 复位电路 | 89 |
| 图 6-2 时钟树 | 91 |
| 图 6-3 HSE/LSE 时钟源 | 92 |
| 图 7-1 I/O 端口的基本结构 | 121 |
| 图 7-2 输入浮空/上拉/下拉配置 | 122 |
| 图 7-3 输出模式配置 | 123 |
| 图 7-4 复用功能配置 | 124 |
| 图 7-5 高阻抗的模拟模式配置 | 125 |
| 图 8-1 DMA 框图 | 163 |
| 图 8-2 DMA1 请求映像 | 169 |
| 图 8-3 DMA2 请求映像 | 171 |
| 图 9-1 ADC 框图 | 183 |
| 图 9-2 ADC 时钟 | 185 |
| 图 9-3 ADC1 和 ADC2 通道引脚连接 | 186 |
| 图 9-4 ADC3 和 ADC4 通道引脚连接 | 187 |
| 图 9-5 时序图 | 189 |
| 图 9-6 注入转换延时 | 191 |
| 图 9-7 校准时序图 | 192 |
| 图 9-8 双 ADC 框图 | 196 |
| 图 9-9 16 个通道的同步规则模式转换示意图 | 197 |
| 图 9-10 4 个通道的同步注入模式转换示意图 | 198 |
| 图 9-11 1 个通道的连续转换的快速交叉模式转换示意图 | 199 |
| 图 9-12 1 个通道的慢速交叉模式转换示意图 | 200 |

| | |
|---|-----|
| 图 9-13 交替触发: 注入通道组 | 200 |
| 图 9-14 交替触发: 在间断模式下注入通道组 | 201 |
| 图 9-15 交替模式和规则同步模式组合 | 202 |
| 图 9-16 在注入转换期间发生注入触发 | 202 |
| 图 9-17 交叉的单通道转换被注入序列 CH3 和 CH4 中断 | 203 |
| 图 9-18 温度传感器和 V_{REFINT} 通道框图 | 203 |
| 图 10-1 DAC 结构框图 | 221 |
| 图 10-2 DAC 独立输出时的数据格式 | 222 |
| 图 10-3 DAC 同步输出时的数据格式 | 223 |
| 图 10-4 触发禁用时转换的时间框图 | 224 |
| 图 10-5 DAC LFSR 算法 | 225 |
| 图 10-6 带 LFSR 波形生成的 DAC 转换 (使能软件触发) | 226 |
| 图 10-7 DAC 三角波生成 | 226 |
| 图 10-8 带三角生成的 DAC 转换 (使能软件触发) | 227 |
| 图 11-1 TIMx($x=1/8$)框图 | 241 |
| 图 11-2 当预分频的参数从 1 到 4, 计数器的时序图 | 242 |
| 图 11-3 当内部时钟分频因子 = $2/N$ 时, 向上计数的时序图 | 243 |
| 图 11-4 当 $ARPEN=0/1$ 产生更新事件时, 向上计数的时序图 | 244 |
| 图 11-5 内部时钟分频因子 = $2/N$ 时, 向下计数时序图 | 245 |
| 图 11-6 内部时钟分频因子 = $2/N$, 中央对齐时序图 | 246 |
| 图 11-7 包含计数器上溢和下溢的中央对齐时序图($ARPEN=1$) | 247 |
| 图 11-8 向下计数模式下的重复计数时序图 | 248 |
| 图 11-9 向上计数模式下的重复计数时序图 | 249 |
| 图 11-10 中央对齐模式下的重复计数时序图 | 249 |
| 图 11-11 正常模式下的控制电路, 内部时钟除以 1 | 250 |
| 图 11-12 TI2 外部时钟连接示例 | 251 |
| 图 11-13 外部时钟模式 1 的控制电路 | 252 |
| 图 11-14 外部触发输入框图 | 252 |
| 图 11-15 外部时钟模式 2 的控制电路 | 253 |
| 图 11-16 捕获/比较通道 (例如: 通道 1 输入级) | 254 |
| 图 11-17 捕获/比较通道 1 主电路 | 255 |
| 图 11-18 通道 x 的输出部分 ($x=1,2,3$; 以通道 1 为例子) | 256 |

| | |
|---|-----|
| 图 11-19 通道 x 的输出部分 (x= 4) | 256 |
| 图 11-20 PWM 输入模式时序..... | 258 |
| 图 11-21 输出比较模式, 开启 OC1..... | 259 |
| 图 11-22 中央对齐的 PWM 波形 (AR=8) | 261 |
| 图 11-23 边沿对齐 PWM 波形 (AR=8) | 262 |
| 图 11-24 单脉冲模式示例 | 263 |
| 图 11-25 清除 TIMx 的 OCxREF..... | 264 |
| 图 11-26 带死区插入的互补输出 | 265 |
| 图 11-27 响应刹车的输出行为..... | 267 |
| 图 11-28 复位模式下的控制电路 | 268 |
| 图 11-29 触发器模式下的控制电路 | 269 |
| 图 11-30 门控模式下的控制电路 | 270 |
| 图 11-31 外部时钟模式 2+触发模式下的控制电路 | 271 |
| 图 11-32 产生六步 PWM, 使用 COM 的例子 (OSSR=1) | 272 |
| 图 11-33 编码器模式下的计数器操作实例 | 273 |
| 图 11-34 IC1FP1 反相的编码器接口模式实例 | 274 |
| 图 11-35 霍尔传感器接口的实例 | 275 |
| 图 12-1 TIMx (x=2,3,4 and 5) 框图..... | 303 |
| 图 12-2 当预分频的参数从 1 到 4, 计数器的时序图 | 304 |
| 图 12-3 当内部时钟分频因子 = 2/N 时, 向上计数的时序图 | 305 |
| 图 12-4 当 ARPEN=0/1 产生更新事件时, 向上计数的时序图..... | 306 |
| 图 12-5 内部时钟分频因子 = 2/N 时, 向下计数时序图 | 307 |
| 图 12-6 内部时钟分频因子 = 2/N, 中央对齐时序图 | 308 |
| 图 12-7 包含计数器上溢和下溢的中央对齐时序图(ARPEN=1) | 309 |
| 图 12-8 正常模式下的控制电路, 内部时钟除以 1 | 310 |
| 图 12-9 TI2 外部时钟连接示例 | 311 |
| 图 12-10 外部时钟模式 1 的控制电路 | 312 |
| 图 12-11 外部触发输入框图 | 312 |
| 图 12-12 外部时钟模式 2 的控制电路 | 313 |
| 图 12-13 捕获/比较通道 (例如: 通道 1 输入级) | 314 |
| 图 12-14 捕获/比较通道 1 主电路 | 315 |
| 图 12-15 通道 x 的输出部分 (以通道 4 为例子) | 316 |

| | |
|---|-----|
| 图 12-16 PWM 输入模式时序 | 318 |
| 图 12-17 输出比较模式, 开启 OC1..... | 319 |
| 图 12-18 中央对齐的 PWM 波形 (AR=8)..... | 321 |
| 图 12-19 边沿对齐 PWM 波形 (AR=8)..... | 322 |
| 图 12-20 单脉冲模式示例 | 323 |
| 图 12-21 清除 TIMx 的 OCxREF..... | 324 |
| 图 12-22 主/从定时器的例子 | 325 |
| 图 12-23 定时器 2 由定时器 1 的 OC1REF 门控..... | 326 |
| 图 12-24 定时器 2 由定时器 1 的使能门控 | 327 |
| 图 12-25 使用定时器 1 的更新触发定时器 2 | 328 |
| 图 12-26 使用定时器 1 的 TI1 输入触发定时器 1 和定时器 2..... | 329 |
| 图 12-27 编码器模式下的计数器操作实例 | 330 |
| 图 12-28 IC1FP1 反相的编码器接口模式实例 | 331 |
| 图 13-1 TIMx 的框图 (x = 6/7) | 351 |
| 图 13-2 预分频器分频从 1 到 4 的计数器时序图 | 352 |
| 图 13-3 向上计数时序图, 内部时钟分频因子 = 2/N | 353 |
| 图 13-4 ARPEN=0/1 时向上计数、更新事件的时序图..... | 354 |
| 图 13-5 正常模式下的控制电路, 内部时钟分频系数为 1 | 355 |
| 图 14-1 RTC 功能框图 | 362 |
| 图 15-1 CRC 计算单元框图 | 385 |
| 图 16-1 独立看门功能框图 | 391 |
| 图 17-1 窗口看门狗功能框图 | 396 |
| 图 17-2 WWDG 的刷新窗口和中断时序 | 397 |
| 图 18-1 SDIO “无响应” 和 “无数据” 操作 | 402 |
| 图 18-2 SDIO (多) 数据块读操作 | 402 |
| 图 18-3 SDIO (多) 数据块写操作 | 402 |
| 图 18-4 SDIO 连续读操作 | 403 |
| 图 18-5 SDIO 连续写操作 | 403 |
| 图 18-6 SDIO 框图 | 404 |
| 图 18-7 SDIO 适配器 | 404 |
| 图 18-8 控制单元 | 406 |
| 图 18-9 SDIO 适配器命令单元 | 406 |

| | |
|--|-----|
| 图 18-10 命令单元状态机 (CPSM) | 407 |
| 图 18-11 SDIO 命令传输..... | 408 |
| 图 18-12 数据通道..... | 409 |
| 图 18-13 数据通道状态机 (DPSM) | 410 |
| 图 19-1 CAN 网络拓扑..... | 451 |
| 图 19-2 CAN 工作模式..... | 453 |
| 图 19-3 双 CAN 框图 | 454 |
| 图 19-4 回环模式..... | 455 |
| 图 19-5 静默模式..... | 456 |
| 图 19-6 回环静默模式..... | 456 |
| 图 19-7 发送邮箱状态 | 458 |
| 图 19-8 接收邮箱状态..... | 459 |
| 图 19-9 过滤器位宽设置-寄存器组织..... | 461 |
| 图 19-10 过滤机制示例..... | 463 |
| 图 19-11 位时序 | 465 |
| 图 19-12 各类帧格式..... | 466 |
| 图 19-13 事件标志和中断产生..... | 467 |
| 图 19-14 CAN 错误状态框图..... | 468 |
| 图 20-1 SPI 框图 | 493 |
| 图 20-2 硬件/软件的从选择管理..... | 494 |
| 图 20-3 单主和单从应用..... | 494 |
| 图 20-4 数据时钟时序图..... | 496 |
| 图 20-5 主机全双工模式下连续传输时, SPI_STS.TE/RNE/BUSY 的变化示意图 | 497 |
| 图 20-6 主机单向只发送模式下连续传输时, SPI_STS.TE/BUSY 变化示意图 | 498 |
| 图 20-7 只接收模式 (BIDIRMODE = 0 且 RONLY = 1) 下连续传输时, RNE 变化示意图 | 499 |
| 图 20-8 从机全双工模式下连续传输时, SPI_STS.TE/RNE/BUSY 的变化示意图 | 500 |
| 图 20-9 从机单向只发送模式下连续传输时, SPI_STS.TE/BUSY 变化示意图 | 500 |
| 图 20-10 BIDIRMODE = 0, RONLY = 0 非连续传输发送时, SPI_STS.TE/BUSY 变化示意图 | 502 |
| 图 20-11 使用 DMA 发送 | 504 |
| 图 20-12 使用 DMA 接收 | 504 |
| 图 20-13 I ² S 框图 | 507 |
| 图 20-14 I ² S 飞利浦协议波形 (16/32 位全精度, CLKPOL = 0) | 509 |

| | |
|---|-----|
| 图 20-15 I ² S 飞利浦协议标准波形 (24 位帧, CLKPOL = 0) | 509 |
| 图 20-16 I ² S 飞利浦协议标准波形 (16 位扩展至 32 位包帧, CLKPOL = 0) | 510 |
| 图 20-17 MSB 对齐 16 位或 32 位全精度, CLKPOL = 0 | 510 |
| 图 20-18 MSB 对齐 24 位数据, CLKPOL = 0 | 511 |
| 图 20-19 MSB 对齐 16 位数据扩展到 32 位包帧, CLKPOL = 0 | 511 |
| 图 20-20 LSB 对齐 16 位或 32 位全精度, CLKPOL = 0 | 512 |
| 图 20-21 LSB 对齐 24 位数据, CLKPOL = 0 | 512 |
| 图 20-22 LSB 对齐 16 位数据扩展到 32 位包帧, CLKPOL = 0 | 513 |
| 图 20-23 PCM 标准波形 (16 位) | 513 |
| 图 20-24 PCM 标准波形 (16 位扩展到 32 位包帧) | 514 |
| 图 20-25 I ² S 时钟发生器结构 | 514 |
| 图 20-26 音频采样频率定义 | 515 |
| 图 21-1 I ² C 功能框图 | 530 |
| 图 21-2 I ² C 总线协议 | 530 |
| 图 21-3 从发送器传送序列 | 533 |
| 图 21-4 从机接收器传送序列 | 534 |
| 图 21-5 主发送器传送序列 | 536 |
| 图 21-6 主接收器传送序列图 | 538 |
| 图 22-1 USART 框图 | 556 |
| 图 22-2 字长=8 设置 | 557 |
| 图 22-3 字长=9 设置 | 558 |
| 图 22-4 停止位配置 | 559 |
| 图 22-5 发送时 TXC/TXDE 的变化情况 | 560 |
| 图 22-6 起始位检测 | 561 |
| 图 22-7 DMA 发送 | 566 |
| 图 22-8 DMA 接收 | 567 |
| 图 22-9 两个 USART 间的硬件流控制 | 567 |
| 图 22-10 RTS 流控制 | 568 |
| 图 22-11 CTS 流控制 | 568 |
| 图 22-12 静默模式下的空闲总线检测 | 569 |
| 图 22-13 静默模式下的地址标识检测 | 570 |
| 图 22-14 USART 同步传输示例 | 571 |

| | |
|--|-----|
| 图 22-15 USART 数据时钟时序示例 (WL=0) | 571 |
| 图 22-16 USART 数据时钟时序示例 (WL=1) | 572 |
| 图 22-17 RX 数据采样/保持时间 | 572 |
| 图 22-18 IrDA SIR ENDEC-框图 | 574 |
| 图 22-19 IrDA 数据调制 (3/16)-正常模式 | 574 |
| 图 22-20 LIN 模式下的断开检测 (11 位断开帧长度-设置了 LINBDL 位) | 575 |
| 图 22-21 LIN 模式下的断开检测与帧错误的检测 | 576 |
| 图 22-22 ISO7816-3 异步协议 | 577 |
| 图 22-23 使用 1.5 停止位检测奇偶检验错误 | 578 |
| 图 23-1 QSPI 功能框图 | 590 |
| 图 23-2 QSPI 命令序列 | 591 |
| 图 24-1 比较器 1 和比较器 2 系统连接图 | 617 |
| 图 24-2 比较器 3 和比较器 4 系统连接图 | 618 |
| 图 24-3 比较器 5, 比较器 6, 比较器 7 系统连接图 | 619 |
| 图 25-1 OPAMP1 和 OPAMP2 连接图框图 | 631 |
| 图 25-2 OPAMP3 和 OPAMP4 连接图框图 | 632 |
| 图 25-3 模拟模块联动关系 1 | 633 |
| 图 25-4 模拟模块联动关系 2 | 634 |
| 图 25-5 OPAMP 独立运算放大器模式 | 635 |
| 图 25-6 OPAMP 跟随模式 | 636 |
| 图 25-7 内部可编程增益模式 | 637 |
| 图 25-8 带滤波内部增益模式 | 637 |
| 图 26-1 N32A455 级别和 Cortex TM -M4F 级别的调试框图 | 642 |

1 文中的缩写

1.1 寄存器位操作缩写列表

以下缩写用于寄存器描述：

| | |
|-------------------------------|---------------------------------|
| read/write(rw) | 支持软件读写该位 |
| read-only(r) | 支持软件只读该位 |
| write-only(w) | 支持软件只写该位, 软件读返回复位值 |
| read/clear(rc_w1) | 支持软件读该位, 写 1 清除该位, 写 0 无效 |
| read/clear(rc_w0) | 支持软件读该位, 写 0 清除该位, 写 1 无效 |
| read/clear by read(rc_r) | 支持软件读该位, 读操作将清除该位, 写 0 无效 |
| read/set(rs) | 支持软件读或者设置该位, 写 0 无效 |
| read-only write trigger(rt_w) | 支持软件读该位, 写 0 或 1 触发一个事件但不改变该位数值 |
| toggle(t) | 支持软件写 1 翻转该位, 写 0 无效 |
| Reserved(Res.) | 保留位, 必须保持默认值不变 |

1.2 可用外设

有关 N32A455 微控制器系列全部型号, 某外设存在与否及其数目, 请查阅相应型号的数据手册。

2 中断和事件

2.1 嵌套向量中断寄存器

特性

- 86 个可屏蔽中断通道（不包含 16 个 Cortex-M4 的中断线）。
- 16 个可编程的优先等级（使用了 4 位中断优先级）；
- 低延迟的异常和中断处理；
- 电源管理控制；
- 系统控制寄存器的实现；

嵌套向量中断控制器（NVIC）和处理器核的接口紧密相连，可以实现低延迟的中断处理和高效地处理晚到的中断。嵌套向量中断控制器管理着包括内核异常等中断。

2.1.1 SysTick 校准值寄存器

系统嘀嗒校准值固定为 18000，当系统嘀嗒时钟设定为 18MHz (HCLK/8 的最大值)，产生 1ms 时间基准。

2.1.2 中断和异常向量

表 2-1 向量表

| 位置 | 优先级 | 优先级类型 | 名称 | 说明 | 地址 |
|----|-----|-------|---------------------|----------------------------------|-----------------------------|
| | - | - | - | 保留 | 0x0000_0000 |
| | -3 | 固定 | Reset | 复位 | 0x0000_0004 |
| | -2 | 固定 | NMI | 不可屏蔽中断 RCC时钟安全系统（CSS）联接到NMI向量 | 0x0000_0008 |
| | -1 | 固定 | 硬件失效 (HardFault) | 所有类型的失效 | 0x0000_000C |
| | 0 | 可设置 | 存储管理 (MemManage) | 存储器管理 | 0x0000_0010 |
| | 1 | 可设置 | 总线错误 (BusFault) | 预取指失败，存储器访问失败 | 0x0000_0014 |
| | 2 | 可设置 | 错误应用 (UsageFault) | 未定义的指令或非法状态 | 0x0000_0018 |
| | - | - | - | 保留 | 0x0000_001C ~0x0000_002B |
| | 3 | 可设置 | SVCall | 通过SWI指令的系统服务调用 | 0x0000_002C |
| | 4 | 可设置 | 调试监控 (DebugMonitor) | 调试监控器 | 0x0000_0030 |
| | - | - | - | 保留 | 0x0000_0034 |
| | 5 | 可设置 | PendSV | 可挂起的系统服务 | 0x0000_0038 |
| | 6 | 可设置 | SysTick | 系统嘀嗒定时器 | 0x0000_003C |
| 0 | 7 | 可设置 | WWDG | 窗口定时器中断 | 0x0000_0040 |
| 1 | 8 | 可设置 | PVD | 连到EXTI线16的电源电压检测 (PVD) | 0x0000_0044 |

| 位置 | 优先级 | 优先级类型 | 名称 | 说明 | 地址 |
|----|-----|-------|--------------|----------------------------|-------------|
| | | | | 中断 | |
| 2 | 9 | 可设置 | TAMPER | 侵入检测中断 | 0x0000_0048 |
| 3 | 10 | 可设置 | RTC_WKUP | 连接到EXTI线20的实时时钟 (RTC) 唤醒中断 | 0x0000_004C |
| 4 | 11 | 可设置 | FLASH | 闪存全局中断 | 0x0000_0050 |
| 5 | 12 | 可设置 | RCC | 复位和时钟控制 (RCC) 中断 | 0x0000_0054 |
| 6 | 13 | 可设置 | EXTI0 | EXTI线0中断 | 0x0000_0058 |
| 7 | 14 | 可设置 | EXTI1 | EXTI线1中断 | 0x0000_005C |
| 8 | 15 | 可设置 | EXTI2 | EXTI线2中断 | 0x0000_0060 |
| 9 | 16 | 可设置 | EXTI3 | EXTI线3中断 | 0x0000_0064 |
| 10 | 17 | 可设置 | EXTI4 | EXTI线4中断 | 0x0000_0068 |
| 11 | 18 | 可设置 | DMA1通道1 | DMA1通道1全局中断 | 0x0000_006C |
| 12 | 19 | 可设置 | DMA1通道2 | DMA1通道2全局中断 | 0x0000_0070 |
| 13 | 20 | 可设置 | DMA1通道3 | DMA1通道3全局中断 | 0x0000_0074 |
| 14 | 21 | 可设置 | DMA1通道4 | DMA1通道4全局中断 | 0x0000_0078 |
| 15 | 22 | 可设置 | DMA1通道5 | DMA1通道5全局中断 | 0x0000_007C |
| 16 | 23 | 可设置 | DMA1通道6 | DMA1通道6全局中断 | 0x0000_0080 |
| 17 | 24 | 可设置 | DMA1通道7 | DMA1通道7全局中断 | 0x0000_0084 |
| 18 | 25 | 可设置 | ADC1_2 | ADC1和ADC2全局中断 | 0x0000_0088 |
| 19 | 26 | 可设置 | CAN1_TX | CAN1发送中断 | 0x0000_008C |
| 20 | 27 | 可设置 | CAN1_RX0 | CAN1接收0中断 | 0x0000_0090 |
| 21 | 28 | 可设置 | CAN1_RX1 | CAN1接收1中断 | 0x0000_0094 |
| 22 | 29 | 可设置 | CAN_SCE | CAN1 SCE中断 | 0x0000_0098 |
| 23 | 30 | 可设置 | EXTI9_5 | EXTI线[9:5]中断 | 0x0000_009C |
| 24 | 31 | 可设置 | TIM1_BRK | TIM1刹车中断 | 0x0000_00A0 |
| 25 | 32 | 可设置 | TIM1_UP | TIM1更新中断 | 0x0000_00A4 |
| 26 | 33 | 可设置 | TIM1_TRG_COM | TIM1触发和通信中断 | 0x0000_00A8 |
| 27 | 34 | 可设置 | TIM1_CC | TIM1捕获比较中断 | 0x0000_00AC |
| 28 | 35 | 可设置 | TIM2 | TIM2全局中断 | 0x0000_00B0 |
| 29 | 36 | 可设置 | TIM3 | TIM3全局中断 | 0x0000_00B4 |
| 30 | 37 | 可设置 | TIM4 | TIM4全局中断 | 0x0000_00B8 |
| 31 | 38 | 可设置 | I2C1_EV | I2C1事件中断 | 0x0000_00BC |
| 32 | 39 | 可设置 | I2C1_ER | I2C1错误中断 | 0x0000_00C0 |
| 33 | 40 | 可设置 | I2C2_EV | I2C2事件中断 | 0x0000_00C4 |
| 34 | 41 | 可设置 | I2C2_ER | I2C2错误中断 | 0x0000_00C8 |
| 35 | 42 | 可设置 | SPI1 | SPI1全局中断 | 0x0000_00CC |
| 36 | 43 | 可设置 | SPI2_I2S2 | SPI2/I2S2全局中断 | 0x0000_00D0 |
| 37 | 44 | 可设置 | USART1 | USART1全局中断 | 0x0000_00D4 |
| 38 | 45 | 可设置 | USART2 | USART2全局中断 | 0x0000_00D8 |
| 39 | 46 | 可设置 | USART3 | USART3全局中断 | 0x0000_00DC |

| 位置 | 优先级 | 优先级类型 | 名称 | 说明 | 地址 |
|----|-----|-------|--------------|--------------------|-------------|
| 40 | 47 | 可设置 | EXTI15_10 | EXTI线[15:10]中断 | 0x0000_00E0 |
| 41 | 48 | 可设置 | RTCAlarm | 连接到EXTI线17的RTC闹钟中断 | 0x0000_00E4 |
| 42 | 49 | 可设置 | 保留 | 保留 | 0x0000_00E8 |
| 43 | 50 | 可设置 | TIM8_BRK | TIM8刹车中断 | 0x0000_00EC |
| 44 | 51 | 可设置 | TIM8_UP | TIM8更新中断 | 0x0000_00F0 |
| 45 | 52 | 可设置 | TIM8_TRG_COM | TIM8触发和通信中断 | 0x0000_00F4 |
| 46 | 53 | 可设置 | TIM8_CC | TIM8捕获比较中断 | 0x0000_00F8 |
| 47 | 54 | 可设置 | ADC3_4 | ADC3和ADC4全局中断 | 0x0000_00FC |
| 48 | 55 | 可设置 | 保留 | 保留 | 0x0000_0100 |
| 49 | 56 | 可设置 | SDIO | SDIO全局中断 | 0x0000_0104 |
| 50 | 57 | 可设置 | TIM5 | TIM5全局中断 | 0x0000_0108 |
| 51 | 58 | 可设置 | SPI3_I2S3 | SPI3/I2S3全局中断 | 0x0000_010C |
| 52 | 59 | 可设置 | UART4 | UART4全局中断 | 0x0000_0110 |
| 53 | 60 | 可设置 | UART5 | UART5全局中断 | 0x0000_0114 |
| 54 | 61 | 可设置 | TIM6 | TIM6全局中断 | 0x0000_0118 |
| 55 | 62 | 可设置 | TIM7 | TIM7全局中断 | 0x0000_011C |
| 56 | 63 | 可设置 | DMA2通道1 | DMA2通道1全局中断 | 0x0000_0120 |
| 57 | 64 | 可设置 | DMA2通道2 | DMA2通道2全局中断 | 0x0000_0124 |
| 58 | 65 | 可设置 | DMA2通道3 | DMA2通道3全局中断 | 0x0000_0128 |
| 59 | 66 | 可设置 | DMA2通道4 | DMA2通道4全局中断 | 0x0000_012C |
| 60 | 67 | 可设置 | DMA2通道5 | DMA2通道5全局中断 | 0x0000_0130 |
| 61 | 68 | 可设置 | 保留 | 保留 | 0x0000_0134 |
| 62 | 69 | 可设置 | 保留 | 保留 | 0x0000_0138 |
| 63 | 70 | 可设置 | CAN2_TX | CAN2发送中断 | 0x0000_013C |
| 64 | 71 | 可设置 | CAN2_RX0 | CAN2接收0中断 | 0x0000_0140 |
| 65 | 72 | 可设置 | CAN2_RX1 | CAN2接收1中断 | 0x0000_0144 |
| 66 | 73 | 可设置 | CAN2_SCE | CAN2的SCE中断 | 0x0000_0148 |
| 67 | 74 | 可设置 | QSPI | QSPI全局中断 | 0x0000_014C |
| 68 | 75 | 可设置 | DMA2通道6 | DMA2通道6全局中断 | 0x0000_0150 |
| 69 | 76 | 可设置 | DMA2通道7 | DMA2通道7全局中断 | 0x0000_0154 |
| 70 | 77 | 可设置 | I2C3_EV | I2C3事件中断 | 0x0000_0158 |
| 71 | 78 | 可设置 | I2C3_ER | I2C3错误中断 | 0x0000_015C |
| 72 | 79 | 可设置 | I2C4_EV | I2C4事件中断 | 0x0000_0160 |
| 73 | 80 | 可设置 | I2C4_ER | I2C4错误中断 | 0x0000_0164 |
| 74 | 81 | 可设置 | UART6 | UART6全局中断 | 0x0000_0168 |
| 75 | 82 | 可设置 | UART7 | UART7全局中断 | 0x0000_016C |
| 76 | 83 | 可设置 | DMA1通道8 | DMA1通道8全局中断 | 0x0000_0170 |
| 77 | 84 | 可设置 | DMA2通道8 | DMA2通道8全局中断 | 0x0000_0174 |
| 78 | 85 | 可设置 | 保留 | 保留 | 0x0000_0178 |
| 79 | 86 | 可设置 | SAC | SAC全局中断 | 0x0000_017C |

| 位置 | 优先级 | 优先级类型 | 名称 | 说明 | 地址 |
|----|-----|-------|------------|-----------------------|-------------|
| 80 | 87 | 可设置 | MMU | MMU全局中断 | 0x0000_0180 |
| 81 | 88 | 可设置 | 保留 | 保留 | 0x0000_0184 |
| 82 | 89 | 可设置 | COMP_1_2_3 | COMP1、COMP2、COMP3全局中断 | 0x0000_0188 |
| 83 | 90 | 可设置 | COMP_4_5_6 | COMP4、COMP5、COMP6全局中断 | 0x0000_018C |
| 84 | 91 | 可设置 | COMP7 | COMP7全局中断 | 0x0000_0190 |
| 85 | 92 | 可设置 | R-SRAM | R-SRAM错误中断 | 0x0000_0194 |

2.2 外部中断/事件控制器 (EXTI)

2.2.1 简介

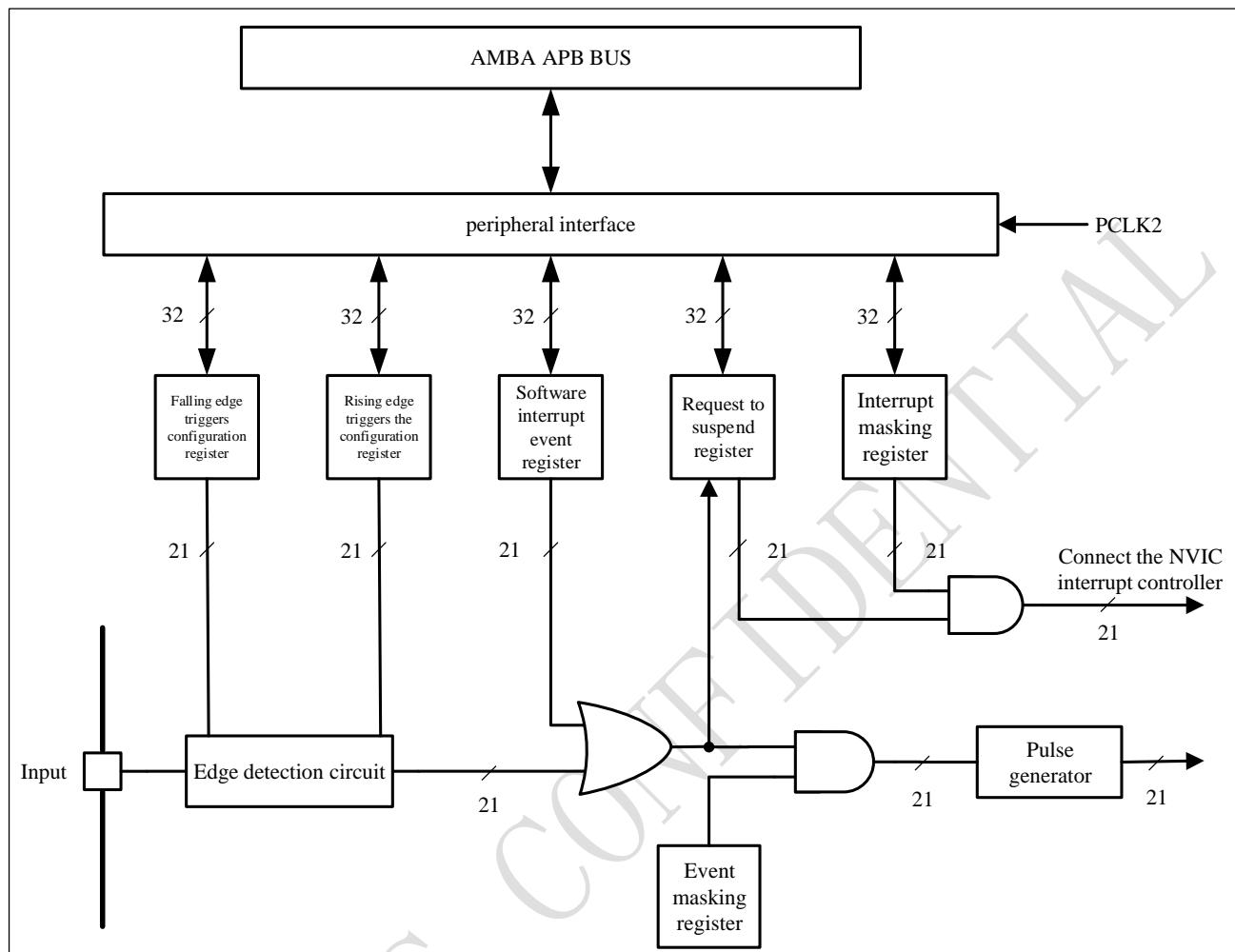
外部中断/事件控制器包含 21 个产生中断/事件触发的边沿检测电路，每条输入线可以独立地配置脉冲或挂起输入类型，以及上升沿、下降沿或者双边沿 3 种触发事件类型，也可以独立地被屏蔽。挂起寄存器保持着状态线的中断请求，可通过在挂起寄存器的对应位写'1'操作，清除中断请求。

2.2.2 主要特性

EXTI 控制器的主要特性如下：

- 支持 21 个软件中断/事件请求
- 每条输入线对应的中断/事件都能独立配置触发或屏蔽
- 每条中断线都有独立的状态位
- 支持脉冲或挂起输入类型
- 支持三种触发事件：上升沿、下降沿或双边沿
- 可唤醒退出低功耗模式

图 2-1 外部中断/事件控制器框图



2.2.3 功能描述

EXTI 包含 21 条中断线，其中 16 条来自 I/O 管脚，另 5 条来自内部模块。要产生中断，必须配置外部中断控制器的 NVIC 中断通道使能相应的中断线。通过边沿触发配置寄存器 EXTI_RT_CFG 和 EXTI_FT_CFG 选择上升沿、下降沿或双边沿触发事件类型，并将中断屏蔽寄存器 EXTI_IMASK 的相应位写'1'开放允许中断请求。当外部中断线上检测到预设的边沿触发极性，将产生一个中断请求，对应的挂起位也随之被置'1'。在挂起寄存器的对应位写'1'，将清除该中断请求。

要产生事件，必须配置并使能对应的事件线。根据需要的边沿检测极性，设置上升/下降沿触发配置寄存器，同时在事件屏蔽寄存器的相应位写'1'允许中断请求。当事件线上发生预设的边沿时，将产生一个事件请求脉冲，对应的挂起位不被置'1'。

另外，通过在软件中断/事件寄存器写'1'，也可以通过软件产生中断/事件请求。

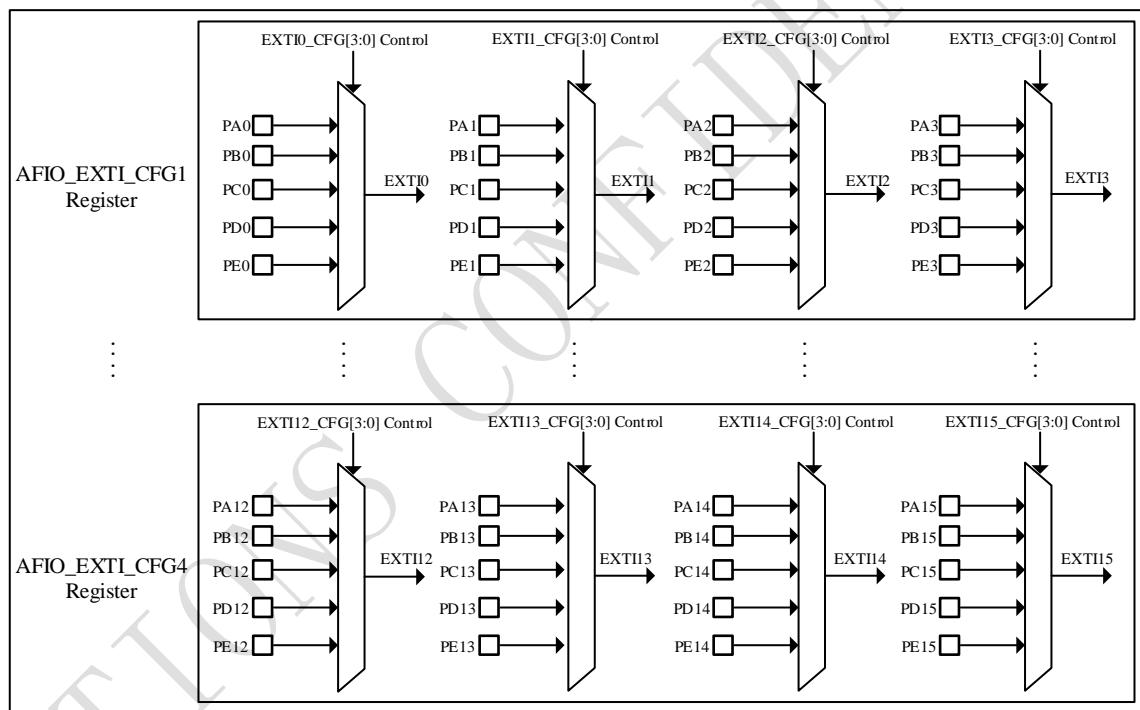
■ 硬件中断配置，根据需要选择配置 21 条线路作为中断源：

- ◆ 配置 21 条中断线的屏蔽位 (EXTI_IMASK)；
- ◆ 配置所选中断线的触发配置位 (EXTI_RT_CFG 和 EXTI_FT_CFG)；

- ◆ 配置对应到外部中断控制器的 NVIC 中断通道的使能和屏蔽位，使 21 条中断线中的请求可以被正确地响应。
- 硬件事件配置，根据需要选择配置 21 条线路作为事件源：
 - ◆ 配置 21 条事件线的屏蔽位 (EXTI_EMASK)；
 - ◆ 配置所选事件线的触发配置位 (EXTI_RT_CFG 和 EXTI_FT_CFG)。
- 软件中断/事件配置，根据需要选择配置 21 条线路作为软件中断/事件线：
 - ◆ 配置 21 条中断/事件线屏蔽位 (EXTI_IMASK,EXTI_EMASK)；
 - ◆ 配置软件中断事件寄存器的请求位 (EXTI_SWIE)。

2.2.4 EXTI 线路映射

图 2-2 外部中断通用 I/O 映射



通过 AFIO_EXTI_CFGy 配置 GPIO 线上的外部中断/事件，必须先使能 AFIO 时钟。通用 I/O 端口以上图的方式连接到 16 条外部中断/事件线上。另外 3 条 EXTI 线的连接方式如下：

- EXTI 线 16 预留
- EXTI 线 17 连接到 RTC 闹钟事件
- EXTI 线 18 预留
- EXTI 线 19 预留
- EXTI 线 20 连接到 RTC 唤醒事件

2.3 EXTI 寄存器

EXTI 基地址: 0x40010400

2.3.1 EXTI 寄存器总览

表 2-2 EXTI 寄存器总览

| Offset | Register | 31 | 30 | 29 | 28 | 27 | 26 | 25 | 24 | 23 | 22 | 21 | 20 | 19 | 18 | 17 | 16 | 15 | 14 | 13 | 12 | 11 | 10 | 9 | 8 | 7 | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | 0 |
|--------|-------------|----------|--------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 000h | EXTI_IMASK | Reserved | IMASK[20:0] | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Reset Value | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | | |
| 004h | EXTI_EMASK | Reserved | EMASK[20:0] | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Reset Value | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | | |
| 008h | EXTI_RT_CFG | Reserved | RT_CFG[20:0] | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Reset Value | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | | |
| 00Ch | EXTI_FT_CFG | Reserved | FT_CFG[20:0] | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Reset Value | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | | |
| 010h | EXTI_SWIE | Reserved | SWIE[20:0] | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Reset Value | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | | |
| 014h | EXTI_PEND | Reserved | PEND[20:0] | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Reset Value | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | | |
| 018h | EXTI_TS_SEL | Reserved | TSSEL[3:0] | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Reset Value | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | | |

2.3.2 EXTI 中断屏蔽寄存器 (EXTI_IMASK)

偏移地址: 0x00

复位值: 0x0000 0000

| 31 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---------|---------|---------|---------|---------|---------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|----|----|----|----|----|----|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|--|
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 15 | 14 | 13 | 12 | 11 | 10 | 9 | 8 | 7 | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | 0 | 15 | 14 | 13 | 12 | 11 | 10 | 9 | 8 | 7 | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | 0 | |
| IMASK15 | IMASK14 | IMASK13 | IMASK12 | IMASK11 | IMASK10 | IMASK9 | IMASK8 | IMASK7 | IMASK6 | IMASK5 | IMASK4 | IMASK3 | IMASK2 | IMASK1 | IMASK0 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

| 位域 | 名称 | 描述 |
|-------|----------|--|
| 31:21 | Reserved | 保留, 必须保持复位值。 |
| 20:0 | IMASKx | 线 x 上的中断屏蔽 0: 屏蔽来自线 x 上的中断请求; 1: 开放来自线 x 上的中断请求。 |

2.3.3 EXTI 事件屏蔽寄存器 (EXTI_EMASK)

偏移地址: 0x04

复位值: 0x0000 0000

| 31 | Reserved | | | | | | | | | | | | | | 21 | 20 | 19 | 18 | 17 | 16 |
|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 15 | 14 | 13 | 12 | 11 | 10 | 9 | 8 | 7 | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | 0 | | | | | |
| EMASK 15 | EMASK 14 | EMASK 13 | EMASK 12 | EMASK 11 | EMASK 10 | EMASK 9 | EMASK 8 | EMASK 7 | EMASK 6 | EMASK 5 | EMASK 4 | EMASK 3 | EMASK 2 | EMASK 1 | EMASK 0 | EMASK 20 | EMASK 19 | EMASK 18 | EMASK 17 | EMASK 16 |
| RW | RW | RW | RW | RW | RW | RW | RW | RW | RW | RW | RW | RW | RW | RW | RW | RW | RW | RW | RW | |

| 位域 | 名称 | 描述 |
|-------|----------|--|
| 31:21 | Reserved | 保留, 必须保持复位值。 |
| 20:0 | EMASKx | 线 x 上的事件屏蔽 0: 屏蔽来自线 x 上的事件请求; 1: 开放来自线 x 上的事件请求。 |

2.3.4 EXTI 上升沿触发配置寄存器 (EXTI_RT_CFG)

偏移地址: 0x08

复位值: 0x0000 0000

| 31 | Reserved | | | | | | | | | | | | | | 21 | 20 | 19 | 18 | 17 | 16 |
|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| 15 | 14 | 13 | 12 | 11 | 10 | 9 | 8 | 7 | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | 0 | | | | | |
| RT _CFG15 | RT _CFG14 | RT _CFG13 | RT _CFG12 | RT _CFG11 | RT _CFG10 | RT _CFG9 | RT _CFG8 | RT _CFG7 | RT _CFG6 | RT _CFG5 | RT _CFG4 | RT _CFG3 | RT _CFG2 | RT _CFG1 | RT _CFG0 | RT _CFG20 | RT _CFG19 | RT _CFG18 | RT _CFG17 | RT _CFG16 |
| RW | RW | RW | RW | RW | RW | RW | RW | RW | RW | RW | RW | RW | RW | RW | RW | RW | RW | RW | RW | |

| 位域 | 名称 | 描述 |
|-------|----------|--|
| 31:21 | Reserved | 保留, 必须保持复位值。 |
| 20:0 | RT_CFGx | 线 x 上的上升沿触发配置位 0: 禁止输入线 x 上的上升沿触发 (中断和事件) 1: 允许输入线 x 上的上升沿触发 (中断和事件) |

2.3.5 EXTI 下降沿触发配置寄存器 (EXTI_FT_CFG)

偏移地址: 0x0C

复位值: 0x0000 0000

| 31 | Reserved | | | | | | | | | | | | | | 21 | 20 | 19 | 18 | 17 | 16 |
|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| 15 | 14 | 13 | 12 | 11 | 10 | 9 | 8 | 7 | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | 0 | | | | | |
| FT _CFG15 | FT _CFG14 | FT _CFG13 | FT _CFG12 | FT _CFG11 | FT _CFG10 | FT _CFG9 | FT _CFG8 | FT _CFG7 | FT _CFG6 | FT _CFG5 | FT _CFG4 | FT _CFG3 | FT _CFG2 | FT _CFG1 | FT _CFG0 | FT _CFG20 | FT _CFG19 | FT _CFG18 | FT _CFG17 | FT _CFG16 |
| RW | RW | RW | RW | RW | RW | RW | RW | RW | RW | RW | RW | RW | RW | RW | RW | RW | RW | RW | RW | |

| 位域 | 名称 | 描述 |
|-------|----------|--|
| 31:21 | Reserved | 保留，必须保持复位值。 |
| 20:0 | FT_CFGx | 线 x 上的下降沿触发配置位 0: 禁止输入线 x 上的下降沿触发（中断和事件） 1: 允许输入线 x 上的下降沿触发（中断和事件） |

2.3.6 EXTI 软件中断事件寄存器 (EXTI_SWIE)

偏移地址: 0x10

复位值: 0x0000 0000

| 位域 | 名称 | 描述 |
|-------|----------|--|
| 31:21 | Reserved | 保留, 必须保持复位值。 |
| 20:0 | SWIEx | 线 x 上的软件中断 当该位为'0'时, 写'1'将设置 EXTI_PEND 中相应的挂起位。如果在 EXTI_IMASK 和 EXTI_EMASK 中允许产生该中断, 此时将产生一个中断。 注: 通过写入'1'清除 EXTI_PEND 的对应位, 可以清除该位为'0'。 |

2.3.7 EXTI 挂起寄存器 (EXTI_PEND)

偏移地址: 0x14

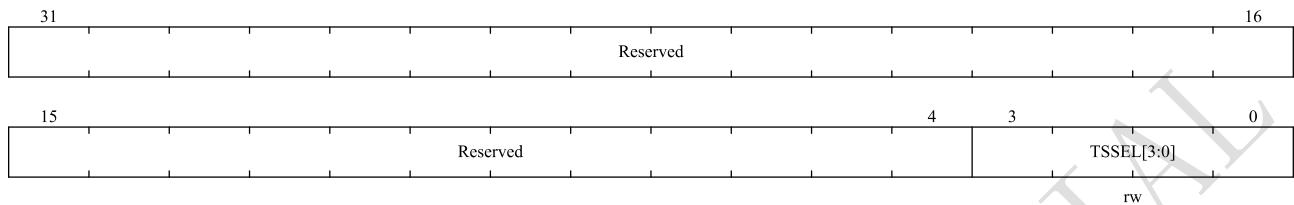
复位值: 0x0000 0000

| 位域 | 名称 | 描述 |
|-------|----------|---|
| 31:21 | Reserved | 保留, 必须保持复位值。 |
| 20:0 | PENDx | <p>线 x 上的挂起位</p> <p>0: 没有发生挂起请求</p> <p>1: 发生了挂起触发请求</p> <p>当外部中断线上发生了选择的边沿触发事件, 该位被置'1'。在该位中写入'1'可以清除它, 也可以通过改变边沿检测的极性清除此位。</p> |

2.3.8 EXTI 时间戳触发源选择寄存器 (EXTI_TS_SEL)

偏移地址: 0x18

复位值: 0x0000 0000



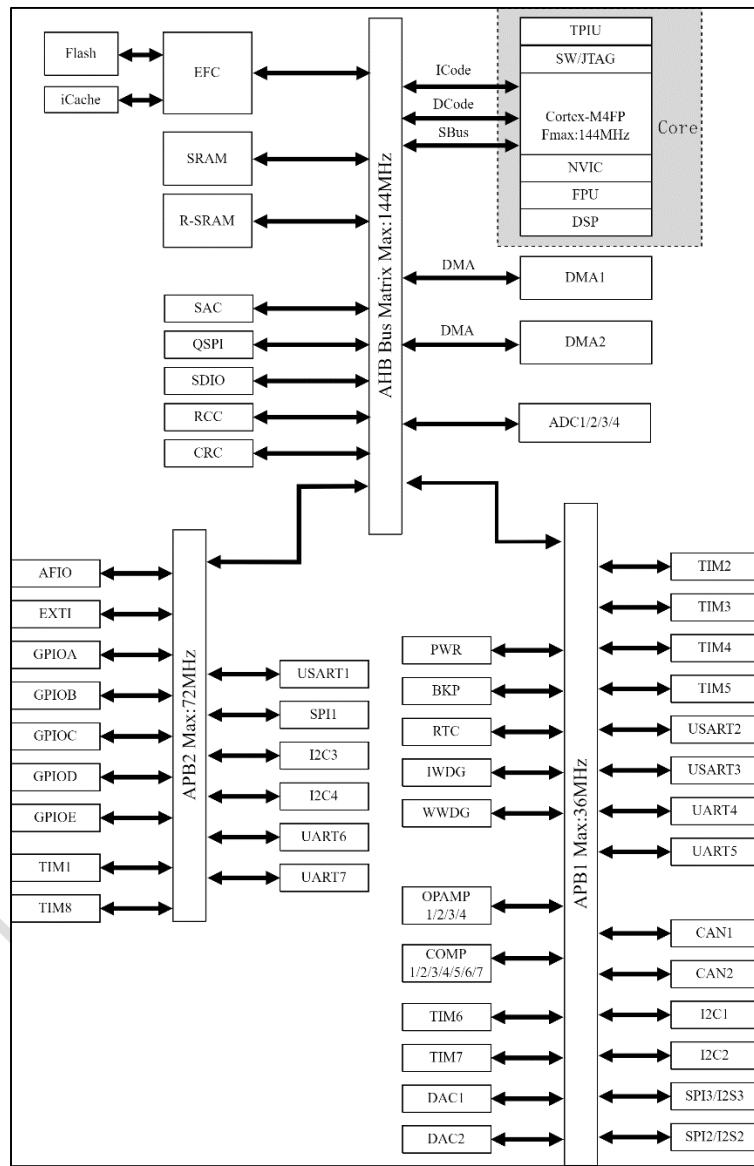
| 位域 | 名称 | 描述 |
|------|------------|--|
| 31:4 | Reserved | 保留, 必须保持复位值。 |
| 3:0 | TSSEL[3:0] | 选择外部中断输入作为时间戳事件的触发源 0: 选择 EXTI0 作为时间戳事件的触发源; 1: 选择 EXTI1 作为时间戳事件的触发源; 15: 选择 EXTI15 作为时间戳事件的触发源。 |

3 存储器和总线架构

3.1 系统架构

3.1.1 总线架构

图 3-1 总线架构图



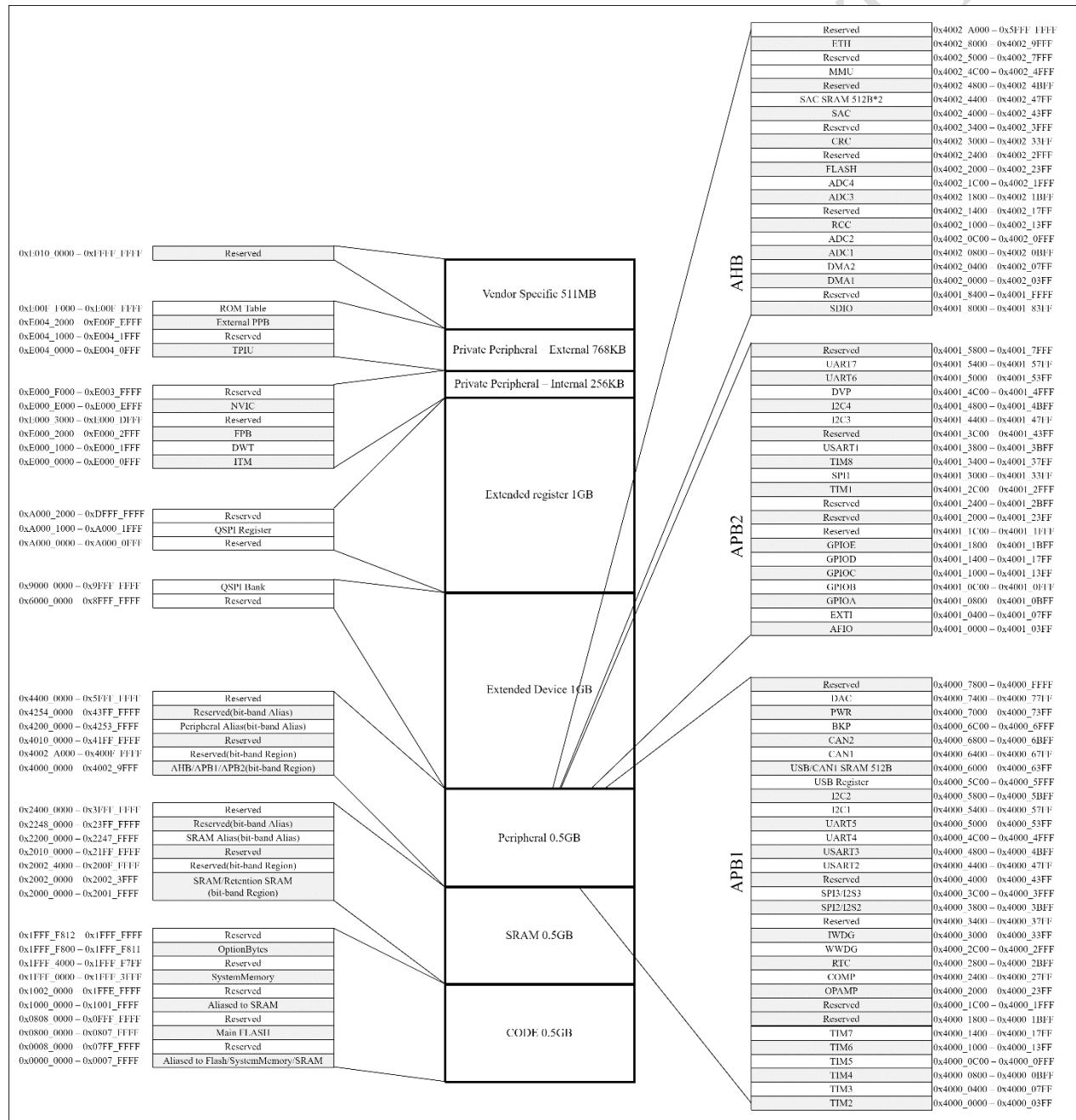
- ICode 总线: 将 Cortex™-M4FP 内核的 ICode 总线与闪存指令接口相连接。指令预取在此总线上完成。
 - DCode 总线将 Cortex™-M4FP 内核的 DCode 总线与闪存存储器的数据接口相连接 (常量加载和调试访问)。
 - SBus 总线连接 Cortex™-M4FP 内核的 SBus 总线 (外设总线) 到总线矩阵, 总线矩阵协调着内核和 DMA 间的访问。

- SAC/CRC 设计了矩阵互联，支持软件触发的方式进行 DMA 传输。
- 系统包含 2 个 AHB2APB 桥，即 AHB2APB1 和 AHB2APB2。其中 APB1 包含 26 个低速 APB 外设，PCLK1 的最高速度为 36MHz；APB2 包含 18 个高速 APB 外设，PCLK2 最高速度等于 72MHz。

3.1.2 总线地址映射

总线地址映射包括所有 AHB 和 APB 外设：AHB 外设、APB1 外设、APB2 外设、Flash、SRAM、SystemMemory 等。SRAM 的地址空间位于 SRAM 的 bit-band 区，可以通过 bit-band Alias 进行原子访问，以完成唯一性的读-改-写操作。所有 APB 和 AHB 外设的地址空间均位于外设的 bit-band 区，可以通过 bit-band Alias 位带别名进行原子访问，以完成唯一性的读-改-写操作。具体映射如下：

图 3-2 总线地址映射图



3.1.2.1 Bit banding

Cortex™-M4FP 存储器映像包括两个位段 (bit-band) 区。这两个位段区将别名存储器区中的每个字映射到位段存储器区的一个位，在别名存储区写入一个字具有对位段区目标位执行读-改-写操作的相同效果。

外设寄存器和 SRAM 都被映射到一个位段区里，这允许执行单一的位段区写和读操作。

下面的映射公式给出了别名区中的每个字节是如何对应位段区的相应位的：

$\text{bitband_byte_addr} = \text{bitband_base} + (\text{byte_offset} \times 32) + (\text{bit_number} \times 4)$

其中：

bitband_byte_addr 是别名存储器区中字节的地址，它映射到某个目标位；

bitband_base 是别名区的起始地址；

byte_offset 是包含目标位的字节在位段里的序号；

bit_number 是目标位所在位置 (0-7)。

举个例子：

下面的例子说明如何映射别名区中 SRAM 地址为 0x20000400 的字节中的位 4：

$0x22008010 = 0x22000000 + (0x400 \times 32) + (4 \times 4)$.

对 0x22008010 地址的写操作与对 SRAM 中地址 0x20000400 字节的位 4 执行读-改-写操作有着相同的效果。

读 0x22008010 地址返回 SRAM 中地址 0x20000400 字节的位 4 的值 (0x01 或 0x00)。请参考《Cortex™-M4 技术参考手册》以了解更多有关位段的信息。

3.1.3 启动管理

3.1.3.1 启动地址

在系统启动时，可以通过 BOOT1 和 BOOT0 引脚来选择在复位后的启动模式，在系统复位后或从待机模式退出时，BOOT 引脚的值将被重新锁存。经过启动延迟之后，CPU 从地址 0x0000_0000 获取堆栈顶的地址，并从地址 0x0000_0004 指示的复位向量地址开始执行代码。由于 Cortex-M4FP 始终通过 ICode 总线从地址 0x0000_0000 和 0x0000_0004 获取堆栈顶指针和复位向量，所以启动仅适合于从 CODE 代码区开始，设计上需要对启动空间进行地址重映射。有三种启动模式可选：

- 从主闪存存储器(Main Flash)启动：
 - ◆ 主闪存存储器被映射到启动空间 (0x0000_0000);
 - ◆ 主闪存存储器可在两个地址区域访问, 0x0000_0000 或 0x0800_0000 (ICode/DCode/DMA1/DMA2);
- 从系统存储器(System Memory)启动：
 - ◆ 系统存储器被映射到启动空间 (0x0000_0000);
 - ◆ 系统存储器可在两个地址区域访问, 0x0000_0000 或 0x1FFF_0000 (ICode/DCode/DMA1/DMA2);
- 从内置 SRAM 启动：
 - ◆ 内置 SRAM 被映射到启动空间 (0x0000_0000);

- ◆ 内置 SRAM 可在两个地址区域访问, 0x0000_0000 或 0x2000_0000 (ICode/DCode/SBus/DMA1/DMA2);

3.1.3.2 启动配置

另外, SRAM 还可以通过虚拟地址段 0x1000_0000 进行存取访问, 这使得 CPU 从 Main Flash 或 System Memory 启动后, 可跳转到 SRAM 通过 ICode/DCode 运行程序 (注意不是从 SRAM 启动程序, 不属于启动模式)。除了 BOOT 引脚配置启动程序外, 还有两种方式可以在 SRAM 运行程序:

- 直接跳转到 SRAM 的物理地址段 0x2000_0000 运行程序, 此时将通过 SBus 运行程序;
- 跳转到 SRAM 的虚拟地址段 0x1000_0000, 内部重映射到物理地址段 0x2000_0000 运行程序, 此时将通过 ICode/DCode 高效运行程序。

表 3-1 启动模式列表

| 启动模式 选择引脚 | | 启动模式 | 对应启动模式下, 访问内存空间的起始地址 | | |
|--------------|-------|---------------------|----------------------------|----------------------------|---|
| BOOT1 | BOOT0 | | Main Flash | System Memory | SRAM |
| X | 0 | Main Flash 启动 | 0x0000_0000 0x0800_0000 | 0x1FFF_0000 | 0x1000_0000 0x2000_0000 |
| 0 | 1 | System Memory 启动 | 0x08000000 | 0x0000_0000 0x1FFF_0000 | 0x1000_0000 0x2000_0000 |
| 1 | 1 | SRAM 启动 | 0x08000000 | 0x1FFF_0000 | 0x0000_0000 0x1000_0000 0x2000_0000 |

3.1.3.3 内嵌启动程序

内嵌的自举程序存放在系统存储器 System Memory 内, 用于通过 USART1 对闪存存储器进行重新编程。而 USART1 接口除了可以依靠上述的 8 个频率的外部时钟 (HSE) 外, 还可以依靠内部 8MHz 振荡器 (HSI) 运行。进一步的细节请查询自举程序手册。

3.2 存储系统 (Memory system)

程序存储器、数据存储器、寄存器和输入输出端口被组织在同一个 4GB 的线性地址空间内。数据字节以小端格式存放在存储器中, 一个字里的最低地址字节被认为是该字的最低有效字节, 而最高地址字节是最高有效字节。对程序存储器和数据存储器的规格说明如下。

3.2.1 FLASH 规格

Flash 由主存储区、信息区组成, 以下分别进行说明: (以下说明中的容量值不含 ECC)

- 主存储区为 512KB, 也称作主闪存存储器, 包含 256 个 Page, 用于用户程序的存放和运行, 以及数据存储。
- 信息区为 20KB, 包含 10 个 Page, 由系统存储区 (16KB)、系统配置区 (2KB)、选项字节区 (2KB) 组成:
 - ◆ 系统存储区为 16KB, 包含 8 个 Page, 也称作 System Memory, 用于引导程序 (BOOT) 的存放和

运行。

- ◆ 系统配置区为 2KB，包含 1 个 Page。
- ◆ 选项字节区为 2KB，包含 1 个 Page，也称作 OptionByte，有效空间为 18B，BOOT 程序、用户程序均可以读写擦。

3.2.1.1 存储地址

主存储区、信息区都分配了总线地址空间。

表 3-2 存储总线地址列表

| 存储区 | 页名称 | 地址范围 | 大小 |
|--------------|--------------|---------------------------|------|
| 主存储区 | 页 0 | 0x0800_0000 – 0x0800_07FF | 2KB |
| | 页 1 | 0x0800_0800 – 0x0800_0FFF | 2KB |
| | 页 2 | 0x0800_1000 – 0x0800_17FF | 2KB |
| | ⋮ | ⋮ | ⋮ |
| | 页 255 | 0x0807_F800 – 0x0807_FFFF | 2KB |
| 信息区 | 系统存储区 | 0x1FFF_0000 – 0x1FFF_3FFF | 16KB |
| | 系统配置区 | 0x1FFF_F000 – 0x1FFF_F7FF | 2KB |
| | 选项字节区 | 0x1FFF_F800 – 0x1FFF_F811 | 18B |
| 存储区接口 寄存器 | FLASH_AC | 0x4002_2000 – 0x4002_2003 | 4B |
| | FLASH_KEY | 0x4002_2004 – 0x4002_2007 | 4B |
| | FLASH_OPTKEY | 0x4002_2008 – 0x4002_200B | 4B |
| | FLASH_STS | 0x4002_200C – 0x4002_200F | 4B |
| | FLASH_CTRL | 0x4002_2010 – 0x4002_2013 | 4B |
| | FLASH_ADD | 0x4002_2014 – 0x4002_2017 | 4B |
| | 保留 | 0x4002_2018 – 0x4002_201B | 4B |
| | FLASH_OB | 0x4002_201C – 0x4002_201F | 4B |
| | FLASH_WRP | 0x4002_2020 – 0x4002_2023 | 4B |
| | FLASH_ECC | 0x4002_2024 – 0x4002_2027 | 4B |
| | 保留 | 0x4002_2028 – 0x4002_202B | 4B |
| | FLASH_RDN | 0x4002_202C – 0x4002_202F | 4B |
| | FLASH_CAHR | 0x4002_2030 – 0x4002_2033 | 4B |

闪存存储器被组织成 32 位宽的存储器单元，可以存放代码和数据常数。

信息区分为三个部分：

- 系统存储区是用于存放在系统存储器自举模式下的启动程序，启动程序使用 USART1 串行接口实现对闪存存储器的编程。
- 系统配置区，包含芯片基本信息。
- 选项字节区，对主存储器和信息块的写入由内嵌的闪存编程/擦除控制器管理。

闪存存储器有两种保护方式防止非法的访问（读、写、擦除）：

- 页写入保护 (WRP)
- 读出保护 (RDP)

在执行闪存写操作时, 任何对闪存的读操作都会锁住总线, 在写操作完成后读操作才能正确地进行; 即在进行写或擦除操作时, 不能进行代码或数据的读取操作。

进行闪存编程操作时 (写或擦除), 必须打开内部的 RC 振荡器 (HSI)。

注: 在低功耗模式下, 所有闪存存储器的操作都被中止。

3.2.1.2 读写操作

Flash 写操作仅支持 32 位操作, 写操作之前先擦除 Flash, 擦除最小块大小是一个页 2KB。写操作分为编程和擦除阶段。

读 Flash 时, 读的等待周期数可以通过寄存器配置。使用时, 需要结合 AHB 接口时钟频率进行计算。比如: 当 $HCLK \leq 32MHz$ 时, 等待周期数最小为 0; 当 $32MHz < HCLK \leq 64MHz$ 时, 等待周期数最小为 1; 当 $64MHz < HCLK \leq 96MHz$ 时, 等待周期数最小为 2; 当 $96MHz < HCLK \leq 128MHz$ 时, 等待周期数最小为 3; 当 $128MHz < HCLK \leq 144MHz$ 时, 等待周期数最小为 4。

注意: 无论等待周期数是否不为零, 启用预取缓冲功能都可以提高整体效率。

3.2.1.3 Flash 解锁操作

复位后, Flash 模块是被保护的, 不能写入 FLASH_CTRL 寄存器, 以防因电气干扰等原因产生对 Flash 的意外操作。通过写入特定的键值序列到 FLASH_KEY 寄存器, 可以开启对 FLASH_CTRL 寄存器的操作权限, 这个特定的序列是: 第一次在 Flash 密钥寄存器 (FLASH_KEY) 中写入 KEY1 = 0x45670123, 第二次则在 Flash 密钥寄存器 (FLASH_KEY) 中写入 KEY2 = 0xCDEF89AB。

如果顺序出现错误或键值出现错误, 将返回总线错误并锁定 FLASH_CTRL 寄存器, 直到下一次复位, 软件可以通过查看 FLASH_CTRL.LOCK 位来确认 Flash 是否已解锁。若需要进行正常的锁定设置, 可以通过软件将 FLASH_CTRL.LOCK 位置 1 来实现, 此后可以通过在 FLASH_KEY 中写入正确的键值系列来对 Flash 解锁。

3.2.1.4 擦除和编程

3.2.1.4.1 主存储区擦除

主存储区可以按页擦除或者整片擦除

页擦除

页擦除流程:

- 通过检查 FLASH_STS.BUSY 位来确保没有正在进行闪存操作;
- 设置 FLASH_CTRL.PER 为'1';
- 将要擦除的页起始地址写入 FLASH_ADD 寄存器;
- 设置 FLASH_CTRL.START 为'1';
- 等待 FLASH_STS.BUSY 变为'0';
- 读出被擦除页的内容检查是否被擦除。

片擦除

片擦除流程:

- 通过检查 FLASH_STS.BUSY 位来确保没有正在进行闪存操作;
- 设置 FLASH_CTRL.MER 为'1';
- 设置 FLASH_CTRL.START 为'1';
- 等待 FLASH_STS.BUSY 位变为'0';
- 读出所有被擦除页的内容检查是否被擦除。

3.2.1.4.2 主存储区编程

对主存储区编程每次可以写入 32 位。当 FLASH_CTRL.PG 为'1'时, 在一个闪存地址写入一个字将启动一次编程; 写入任何半字的数据, 都会产生总线错误。在编程过程中(FLASH_STS.BUSY 为'1'), 任何读写闪存的操作都会使 CPU 暂停, 直到此次闪存编程结束。

主存储区编程流程:

- 通过检查 FLASH_STS.BUSY 位来确保没有正在进行闪存操作;
- 设置 FLASH_CTRL.PG 为'1';
- 在指定的地址写入要编程的字;
- 等待 FLASH_STS.BUSY 变为'0';
- 读出写入地址的数据检查是否正确。

注意: 当 FLASH_STS.BUSY 为'1'时, 不能对任何 Flash 寄存器执行写操作。

3.2.1.4.3 选项字节区擦除和编程

对选项字节区的编程与主存储区不同。选项字节的数目只有 9 个字节(4 个字节作为写保护, 2 个字节作为读保护, 1 个字节为配置选项, 2 个字节存储用户数据)。对 Flash 解锁后, 必须分别写入 KEY1 和 KEY2(见 3.2.1.3)到 FLASH_OPTKEY 寄存器, 再设置 FLASH_CTRL.OPTWE 为'1', 此时可以对选项字节区进行编程: 设置 FLASH_CTRL.OPTPG 为'1'后写入字到指定的地址。

对选项字节区字编程时, 使用半字中的低字节并自动地计算出高字节(高字节为低字节的补码), 并开始编程操作, 这将保证选项字节和它的补码始终是正确的。

选项字节区擦除过程:

- 通过检查 FLASH_STS.BUSY 位来确保没有正在进行闪存操作;
- 解锁 FLASH_CTRL.OPTWE;
- 设置 FLASH_CTRL.OPTER 为'1';
- 设置 FLASH_CTRL.START 为'1';
- 等待 FLASH_STS.BUSY 变为'0';
- 读出被擦除选项字节的内容检查是否被擦除。

选项字节区编程流程:

- 通过检查 FLASH_STS.BUSY 位来确保没有正在进行闪存操作;

- 解锁 FLASH_CTRL.OPTWE;
- 设置 FLASH_CTRL.OPTPG 为'1';
- 在指定的地址写入要编程的字;
- 等待 FLASH_STS.BUSY 变为'0';
- 读出写入地址的数据检查是否正确。

3.2.1.5 ECC 功能

Flash 模块支持 ECC 功能，实现 1-bit 检错和 1-bit 纠错。ECC 编码、解码（纠错、检错）由硬件自动执行，如果检测到错误，置错误位并产生中断。

3.2.1.6 指令预取

Flash 模块的指令预取功能，支持 16B 的预取 Buffer。通过指令预取操作，可提高 CPU 的指令执行效率。指令预取功能可以通过寄存器配置为使能或除能，默认使能。

3.2.1.7 选项字节

选项字节块主要用于配置读写保护、软件/硬件看门狗配置、启动模式配置以及系统处于 STANDBY/STOP0/STOP2 模式下的复位选项，并分配了总线地址空间，可以进行读写访问。它们由 9 个选项字节组成：4 个字节作为写保护，2 个字节作为读保护，1 个字节作为配置选项，2 个字节由用户定义，这 9 个字节需要通过总线写入。选项字节块同时还包含与这 9 个选项字节相对应的补码，这些补码需要在总线写入选项字节时，由硬件自动计算出来，一起写入 Flash，并用于选项字节读取时的验证。

默认状态下，选项字节块始终是可以读且被写保护。要想对选项字节块进行写操作（编程/擦除），首先要解锁 Flash，然后解锁选项字节：在 FLASH_OPTKEY 中写入正确的键值序列（KEY1 = 0x45670123，KEY2 = 0xCDEF89AB），随后对选项字节块的写操作将被允许。如果顺序出现错误或键值出现错误，将返回总线错误并锁定选项字节，直到下一次复位。若需要正常进行锁定设置，可以通过软件将 FLASH_CTRL.OPTWE 位写 0 来实现，此后可以通过在 FLASH_OPTKEY 中写入正确的键值系列来对选项字节解锁。

每次系统复位后，从 Flash 的选项字节块中读出选项字节数据，并保存在具有只读属性的选项字节寄存器（FLASH_OB/FLASH_WRP）中；同时一起读出来的选项字节补码数据，将用于验证选项字节数据是否正确，如果不匹配，将产生一个选项字节错误标志（FLASH_OB.OBERR）。当发生选项字节错误时，对应的选项字节被强置为 0xFF。当选项字节和它的补码均为 0xFF 时（擦除后的状态），则略过上述验证步骤，无需进行验证。

表 3-3 选项字节列表

| 地址 | [31:24] 补码 | [23:16] 选项字节 | [15:8] 补码 | [7:0] 选项字节 |
|-------------|---------------|-----------------|--------------|---------------|
| 0x1FFF_F800 | nUSER | USER | nRDP1 | RDP1 |
| 0x1FFF_F804 | nData1 | Data1 | nData0 | Data0 |
| 0x1FFF_F808 | nWRP1 | WRP1 | nWRP0 | WRP0 |
| 0x1FFF_F80C | nWRP3 | WRP3 | nWRP2 | WRP2 |
| 0x1FFF_F810 | - | - | nRDP2 | RDP2 |

- 读保护 L1 等级：RDP1
 - ◆ 保护存储在闪存中的代码；

- ◆ 当写入正确的数值时，将禁止读出闪存存储器；
- ◆ RDP1 是否开启的结果，可通过 FLASH_OB[1]查询；
- 用户配置选项: USER
 - ◆ USER[7:3]: Reserved;
 - ◆ USER[2]: nRST_STDBY 配置选项，可通过 FLASH_OB[4]查询
 - 0: 当进入 Standby 模式时产生复位
 - 1: 进入 Standby 模式时不产生复位
 - ◆ USER[1]: nRST_STOP 配置选项，可通过 FLASH_OB[3]查询
 - 0: 当进入 STOP0/STOP2 模式时产生复位
 - 1: 进入 STOP0/STOP2 模式时不产生复位
 - ◆ USER[0]: WDG_SW 配置选项，可通过 FLASH_OB[2]查询
 - 0: 硬件看门狗
 - 1: 软件看门狗
- 2 字节用户数据: Datax
 - ◆ Data1 (FLASH_OB[25:18])
 - ◆ Data0 (FLASH_OB [17:10])
- 写保护选项字节: WRP0 ~ 3，可通过寄存器 FLASH_WRP[31:0]查询
 - ◆ WRP0: 第 0 ~ 15 页的写保护，bit[0]对应 Page0/1, ……, bit[7]对应 Page14/15;
 - ◆ WRP1: 第 16~31 页的写保护，bit[0]对应 Page16/17, ……, bit[7]对应 Page30/31;
 - ◆ WRP2: 第 32~47 页的写保护，bit[0]对应 Page32/33, ……, bit[7]对应 Page46/47;
 - ◆ WRP3: 第 48~255 页的写保护，bit[0]对应 Page48/49, ……, bit[6]对应 Page60/61, bit[7]对应 Page62~255;
- 读保护 L2 等级: RDP2
 - ◆ 在 L1 的基础上增加保护功能，具体见 3.2.1.9 读保护的详细描述；
 - ◆ RDP2 是否开启的结果，可通过 FLASH_OB[31]查询；

3.2.1.8 写保护

可以对 Flash 主存储区 (512KB) 的所有 Page 配置写保护，以防在程序跑飞或电气干扰等原因导致的意外写操作，写保护的基本单位是：对于 Page0~61，每 2 页为一个基本保护单元，对于 Page62~255，共同作为一个保护单元。写保护可以通过设置选项字节块中的 WRP0~3 来进行配置；每次进行配置后，需要进行一次系统复位，配置的值才能生效。如果对一个受保护的页面进行编程或擦除操作，FLASH_STS 中将会返回一个保护错误标志。

系统信息区中的系统存储块 (16KB)，存放了 BOOT 程序，不可更改。

系统信息区中的系统配置块 (2KB)，存放了芯片基本信息，不可更改。

系统信息区中的选项字节块 (2KB), 存放了用户可配置选项字节信息, 将 FLASH_CTRL.OPTWE 写 0 使能选项字节块的写保护, 之后通过在 FLASH_OPTKEY 中写入正确的键值序列, 来对选项字节解除写保护。

3.2.1.9 读保护

Flash 中的用户代码可以通过设置读保护来防止被非法读取。读保护主要是针对芯片完成封口操作后, 保护主存储区和选项字节块的访问操作。读保护通过配置选项字节块中的 RDP 字节进行设置, 可以配置 3 种不同的读保护级别, 如下列表:

表 3-4 读保护配置列表

| 读保护等级 | RDP1 | nRDP1 | nRDP2 | RDP2 |
|----------|---------|-------|-------------------------------|------|
| L1 level | 0xFF | 0xFF | RDP2 != 0xCC nRDP2 != 0x33 | |
| 未保护 | 0xA5 | 0x5A | RDP2 != 0xCC nRDP2 != 0x33 | |
| L2 level | 0xXX | 0xXX | 0x33 | 0xCC |
| L1 level | 非以上三种配置 | | | |

■ L0 等级:

- ◆ 处于未保护状态, $(RDP1 == 0xA5 \& nRDP1 == 0x5A) \&& (RDP2 != 0xCC \& nRDP2 != 0x33)$
- ◆ 主存储区和选项字节可以被任意读取
- ◆ 主存储区和选项字节可以进行编程和擦除, 可配置读写保护

■ L1 等级:

- ◆ $\sim ((RDP1 == 0xA5 \& nRDP1 == 0x5A) \&& (RDP2 != 0xCC \& nRDP2 != 0x33)) \mid (RDP2 == 0xCC \& nRDP2 == 0x33)$
- ◆ 只允许从用户代码中对主存储区的读操作, 即以非调试方式从主闪存存储器启动程序的情况才允许对主存储区的读操作
- ◆ 第 0~1 页被自动加上了写保护;
- ◆ 其它 Page 可以通过在主闪存存储器中执行的代码进行编程 (实现 IAP 或数据存储等功能)
- ◆ 全部主存储区页不允许在调试模式下或从内部 SRAM 启动后执行写或擦除操作 (整片擦除除外)
- ◆ 所有通过 JTAG/SWD 向内置 SRAM 装载代码并执行代码的功能依然有效, 亦可以通过 JTAG/SWD 从内置 SRAM 启动, 这个功能可以用来解除读保护;
- ◆ 当读保护的选项字节被改写为未保护的 L0 级别时, 将会自动擦除全部主存储区, 执行的过程如下: (擦除选项字节块不会导致自动的整片擦除操作, 因为擦除的结果是 0xFF, 相当于仍然处于 L1 级别的保护状态)
 - 在 FLASH_OPTKEY 中写入正确的键值序列解锁选项字节区;
 - 总线发起命令擦除整个选项字节区 (Page 擦);
 - 总线写入读保护选项字节 0xA5;
 - 内部自动擦除全部主存储区;
 - 内部自动写入 0xA5 到读保护选项字节;
 - 进行系统复位 (如软件复位等), 选项字节块 (包括新的 RDP 值 0xA5) 将被重新加载到系

统中，读保护被解除；

- ◆ 以下对闪存的访问操作都将被禁止：
 - 通过从内置 SRAM 启动执行代码（包括使用 DMA）访问主闪存存储器；
 - 通过 JTAG、SWV（串行线观察器）、SWD（串行线调试）和边界扫描方式访问主闪存存储器；
- L2 等级：除了 SRAM 启动被禁止、调试模式被禁止、选项字节写/页擦被禁止、保护级别不可修改（不可逆）之外，其余特性同 L1 级别。L2 级别通过配置另一个选项字节 RDP2 来实现，不管 RDP1 为何值，只要满足（RDP2=0xCC & nRDP2=0x33）即为 L2 级别

表 3-5 存储区读写擦⁽¹⁾权限控制表

| 保护 级别 | 启动模式 | Main Flash | | | 修改保护级别 |
|----------|----------------------------|-------------------|------------|---------------|--------|
| | 执行用户 访问区域 | JTAG/ SWD | Main Flash | System Memory | |
| L0级别 | Flash主存储区4KB前 | 读写擦 | 读写擦 | 读写擦 | 读写擦 |
| | Flash主存储区4KB后 | 读写擦 | 读写擦 | 读写擦 | 读写擦 |
| | Flash主存储区片擦 ⁽²⁾ | 允许 | 允许 | 允许 | 允许 |
| | Flash选项字节区 | 读写擦 | 读写擦 | 读写擦 | 读写擦 |
| | Flash系统存储区 | 禁止 | 禁止 | 读写擦 | 禁止 |
| | SRAM (All) | 读写 | 读写 | 读写 | 读写 |
| L1级别 | Flash主存储区4KB前 | 禁止 | 只读 | 只读 | 只读 |
| | Flash主存储区4KB后 | 禁止 | 读写擦 | 读写擦 | 读写擦 |
| | Flash主存储区片擦 ⁽²⁾ | 允许 | 允许 | 允许 | 允许 |
| | Flash选项字节区 | 读写擦 | 读写擦 | 读写擦 | 读写擦 |
| | Flash系统存储区 | 禁止 | 禁止 | 读写擦 | 禁止 |
| | SRAM (All) | 读写 | 读写 | 读写 | 读写 |
| L2级别 | Flash主存储区4KB前 | JTAG/SWD 接口被禁止 | 只读 | 只读 | 只读 |
| | Flash主存储区4KB后 | | 读写擦 | 读写擦 | 读写擦 |

| | | | | | | |
|------|----------------------------|------------------|------------|---------------|------|--------------------------------------|
| | Flash主存储区片擦 ⁽²⁾ | | 允许 | 允许 | 允许 | |
| | Flash选项字节区 | | 只读 | 只读 | 只读 | |
| | Flash系统存储区 | | 禁止 | 读写擦 | 禁止 | |
| | SRAM (All) | | 读写 | 读写 | 读写 | |
| 启动模式 | | | | | | |
| 保护级别 | 启动模式 | SRAM | | | | 修改保护级别 |
| | 执行用户访问区域 | JTAG/SWD | Main Flash | System Memory | SRAM | |
| L0级别 | Flash主存储区4KB前 | 读写擦 | 读写擦 | 读写擦 | 读写擦 | 允许改为L1或L2 修改后，主存储区将被自动擦除。 |
| | Flash主存储区4KB后 | 读写擦 | 读写擦 | 读写擦 | 读写擦 | |
| | Flash主存储区片擦 ⁽²⁾ | 允许 | 允许 | 允许 | 允许 | |
| | Flash选项字节区 | 读写擦 | 读写擦 | 读写擦 | 读写擦 | |
| | Flash系统存储区 | 禁止 | 禁止 | 读写擦 | 禁止 | |
| | SRAM (All) | 读写 | 读写 | 读写 | 读写 | |
| L1级别 | Flash主存储区4KB前 | 禁止 | 只读 | 只读 | 禁止 | 允许改为 L0 或 L2。 修改后，主存储区将被自动擦除。 |
| | Flash主存储区4KB后 | 禁止 | 读写擦 | 读写擦 | 禁止 | |
| | Flash主存储区片擦 ⁽²⁾ | 允许 | 允许 | 允许 | 允许 | |
| | Flash选项字节区 | 读写擦 | 读写擦 | 读写擦 | 读写擦 | |
| | Flash系统存储区 | 禁止 | 禁止 | 禁止 | 禁止 | |
| | SRAM (All) | 读写 | 读写 | 读写 | 读写 | |
| L2级别 | Flash主存储区4KB前 | L2保护级别，无法从SRAM启动 | | | | 不允许修改。 JTAG/SWD 被禁止。 |
| | Flash主存储区4KB后 | | | | | |
| | Flash主存储区片擦除 | | | | | |
| | Flash选项字节区 | | | | | |

| | | | | | | |
|----------|----------------------------|-------------------|------------|---------------|------|--|
| | Flash系统存储区 | | | | | |
| | SRAM (All) | | | | | |
| 保护 级别 | 启动模式 | System Memory | | | | 修改保护级别 |
| | 执行用户 访问区域 | JTAG/ SWD | Main Flash | System Memory | SRAM | |
| L0级别 | Flash主存储区4KB前 | 读写擦 | 读写擦 | 读写擦 | 读写擦 | 允许改为L1或L2 |
| | Flash主存储区4KB后 | 读写擦 | 读写擦 | 读写擦 | 读写擦 | |
| | Flash主存储区片擦 ⁽²⁾ | 允许 | 允许 | 允许 | 允许 | |
| | Flash选项字节区 | 读写擦 | 读写擦 | 读写擦 | 读写擦 | |
| | Flash系统存储区 | 禁止 | 禁止 | 读写擦 | 禁止 | |
| | SRAM (All) | 读写 | 读写 | 读写 | 读写 | |
| L1级别 | Flash主存储区4KB前 | 禁止 | 只读 | 只读 | 只读 | 允许改为 L0 或 L2。 改为L0时，主存储区 将被自动擦除。 |
| | Flash主存储区4KB后 | 禁止 | 读写擦 | 读写擦 | 读写擦 | |
| | Flash主存储区片擦 ⁽²⁾ | 允许 | 允许 | 允许 | 允许 | |
| | Flash选项字节区 | 读写擦 | 读写擦 | 读写擦 | 读写擦 | |
| | Flash系统存储区 | 禁止 | 禁止 | 读写擦 | 禁止 | |
| | SRAM (All) | 读写 | 读写 | 读写 | 读写 | |
| L2级别 | Flash主存储区4KB前 | JTAG/SWD 接口被禁止 | 只读 | 只读 | 只读 | 不允许修改 |
| | Flash主存储区4KB后 | | 读写擦 | 读写擦 | 读写擦 | |
| | Flash主存储区片擦 ⁽²⁾ | | 允许 | 允许 | 允许 | |
| | Flash选项字节区 | | 只读 | 只读 | 只读 | |
| | Flash系统存储区 | | 禁止 | 读写擦 | 禁止 | |
| | SRAM (All) | | 读写 | 读写 | 读写 | |

注: 1.这里的擦是指 Flash 页擦除;

2. Flash 主存储区片擦除是指 mass erase。

3.2.2 iCache

为了达到更高的系统性能, 高速 CPU 与低速 Flash 之间需要增加指令缓存器, 以提高指令执行效率。由于指令缓存器的存在, CPU 将可以工作在更高的主频。当 CPU 请求的指令在指令缓存器里面时, CPU 将可以无延时地获得指令、实现零等待执行。当前指令序列、指令预取序列、指令缓存器均未命中时, 将重新读取 Flash, 并回填更新 Cache 缓存; 依此, 相当于 Cache 中只存储了程序的跳转头。

指令缓存器的主要特性如下:

- 8KB iCache
- 支持相联方式: 4WAY

3.2.2.1 软件接口

- 使能
 - ◆ 提供软件使能/关闭 Icache 的配置。开关切换条件无限制 (见 FLASH_AC.ICAHEN 位)。
- 复位
 - ◆ 提供软件清空 iCache 接口, 必须在 iCache 关闭时才发起。复位与切换不可同时切换, 先关闭 FLASH_AC.ICAHEN, 然后 FLASH_AC.ICAHRST 写 1, 然后就可打开 FLASH_AC.ICAHEN。
- 锁定
 - ◆ 支持 iCache 锁定机制, 软件配置将程序放入其指定的 way 中。当所有 way 均锁定完成后, 新的数据将不会写入 cache 中。软件复位 cache 后, 锁定状态自动清除。
- 补充说明
 - ◆ 不支持 iCache 替换算法选择。
 - ◆ 为指令 Cache, 不存在 CPU 写操作时 WB/WT 选择。

3.2.2.2 寄存器描述

FLASH_AC.ICAHEN 及 FLASH_AC.ICAHRST, 其分别为 iCache 使能开关以及 iCache 数据清零开关。

FLASH_CAH.R.LOCKSTRT 及 FLASH_CAH.R.LOCKSTOP, 其分别为 iCache 对应方式锁定的开始锁存和停止锁存。iCache 复位后, FLASH_CAH 寄存器自动恢复为复位值。iCache 锁定的详细使用方法见 3.2.2.3.3 ICache 锁定。

3.2.2.3 操作流程

3.2.2.3.1 iCache 启用与禁用

用户软件可以随时开关 iCache。如果用户程序需要在主存储区和其它存储区之间跳转时, 必须关闭 iCache 并且将 iCache 数据清零, 否者会产生指令获取错误。

3.2.2.3.2 iCache 数据刷新

iCache 设计为指令 Cache, 当指令被应用软件更新或者指令在主存储区和其它存储区之间跳转时, 软件必须

将 FLASH_AC.ICAHRST 位置 1 来清除指令 Cache 内的数据。

注意: FLASH_AC.ICAHRST 位是只写位, 读该位时返回为 0。

3.2.2.3.3 iCache 锁定

用户软件控制 FLASH_CAHR 寄存器来将一些重复使用的代码锁存在 iCache 中来提高代码执行的效率。iCache 模块有 4 个锁存通道, 每个通道的大小为整个 Cache 的 1/4。在使用单个通道时, 必须确保需要锁存的代码量小于每个通道的大小。否者需要用更多的通道来锁存代码。可以按照下面的控制流程来使用锁存功能:

1. 将 FLASH_CAHR.LOCKSTRT[0]置 1;
2. 执行需要锁存在通道 0 的函数 1 (函数 1 的代码量应该小于单个通道的大小);
3. 函数 1 执行完成后, 将 FLASH_CAHR.LOCKSTOP[0]置 1;
4. 接着将 FLASH_CAHR.LOCKSTRT[1]置 1;
5. 执行需要锁存在通道 1 的函数 2 (函数 2 的代码量应该小于单个通道的大小);
6. 函数 2 执行完成后, 将 FLASH_CAHR.LOCKSTOP[1]置 1;

注意: 1. 通道锁存时寄存器操作必须要按照固定的流程 – 先设置 FLASH_CAHR.LOCKSTRT – 再设置 FLASH_CAHR.LOCKSTOP;

2. 通道锁存的顺序必须要按照 0~3, 否者会降低执行效率。

3.2.3 SRAM

SRAM 主要用于代码运行, 存放程序执行过程中的变量和数据或堆栈, 容量为 128KB。

SRAM 支持字节、半字、字的读写访问。

SRAM 支持代码运行 (支持 SBus 和 ICode、DCode 的访问), 可以在 SRAM 全速运行程序。SRAM 的最大地址范围是 0x2000_0000~0x2001_FFFF。

SRAM 在 Stop2、Standby 和 VBAT 模式下数据不能保持; 其他工作模式 (Run/Sleep/Stop0) 数据可以正常保持。

主要特性如下:

- 容量总共为 128KB
- 支持字节/半字/字读写
- I/D/S/DMA1/DMA2 均可访问
- I/D BUS 可以 Remap 到 SRAM 全速运行程序

3.2.4 R-SRAM (Retention SRAM)

R-SRAM 也是主要用于代码运行, 存放程序执行过程中的变量和数据或堆栈, 容量总共为 16KB。R-SRAM 的总线地址与 SRAM 是连续相接的, 应用上, 可以把 SRAM 和 R-SRAM 当做一块 SRAM 来处理。最大情况下, R-SRAM 的 0 号物理地址对应总线起始地址为 0x2002 0000, 对应的总线地址范围为 0x2002 0000~0x2002 3FFF。R-SRAM 支持字节、半字、字的读写访问, 支持 SBus、DMA1、DMA2 的访问。

因为 R-SRAM 的总线地址与 SRAM 是连续相接的，而对于不同的产品型号，SRAM 可供有效使用的容量是不同的，所以对于不同的产品型号来说，R-SRAM 的总线起始地址是不一样的。

R-SRAM 支持 Retention，在 VBAT、Standby 模式下可以保持数据（可以配置为保持或不保持）；其他工作模式（RUN/SLEEP/STOP0/ STOP2）数据默认保持；需要 PWR 对其 Retention 进行控制管理。

表 3-6 SRAM 容量配置表

| SRAM 容量 | R-SRAM 容量 | SRAM 总线地址范围 | R-SRAM 总线地址范围 |
|---------|-----------|-------------------------|-------------------------|
| 64KB | 16KB | 0x2000 0000~0x2000 FFFF | 0x2001 0000~0x2001 3FFF |
| 128KB | 16KB | 0x2000 0000~0x2001 FFFF | 0x2002 0000~0x2002 3FFF |

R-SRAM 主要特性如下：

- 容量总共为 16KB（支持奇偶校验，使用前需初始化）
- 字节/半字/字读写
- SBus/DMA1/DMA2 均可访问
- 总线起始地址与主存储器 SRAM 连续相接
- 总线起始地址跟随主存储器 SRAM 容量变化
- 可以 Retention，在 Stop2 和 Standby 模式下仍需保持数据（可配置为不保持）

3.2.5 FLASH 寄存器

必须以字（32 位）的方式操作寄存器。

3.2.5.1 FLASH 寄存器总览

表 3-7 FLASH 寄存器总览

| Offset | Register | 31 | 30 | 29 | 28 | 27 | 26 | 25 | 24 | 23 | 22 | 21 | 20 | 19 | 18 | 17 | 16 | 15 | 14 | 13 | 12 | 11 | 10 | 9 | 8 | 7 | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | 0 |
|--------|--------------|----------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|--------|--------|---------|--------|----------|---------|----------|---------|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 000h | FLASH_AC | Reserved | | | | | | | | | | | | | | | | ICAHEN | ICAHFS | PRFTFS | PRFTFE | Reserved | LATENCY | | | | 0 | | | | | | |
| | Reset Value | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 004h | FLASH_KEY | FKEY | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Reset Value | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| 008h | FLASH_OPTKEY | OPTKEY | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Reset Value | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| 00Ch | FLASH_STS | Reserved | | | | | | | | | | | | | | | | ECCERR | EVERR | EOP | WRPERR | PVERR | LATENCY | | | | 0 | | | | | | |
| | Reset Value | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 010h | FLASH_CTRL | Reserved | | | | | | | | | | | | | | | | LOCK | EOPIE | FERRITE | ERRITE | OPTWE | OPTPG | Reserved | LATENCY | | | | 0 | | | | |
| | Reset Value | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 014h | FLASH_ADD | FADD | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Reset Value | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| 018h | | Reserved | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

3.2.5.2 FLASH 控制和状态寄存器

有关寄存器说明中的缩写, 请见 1.1 节

3.2.5.2.1 FLASH 访问控制寄存器 (FLASH_AC)

偏移地址: 0x00

复位值: 0x0000 0030

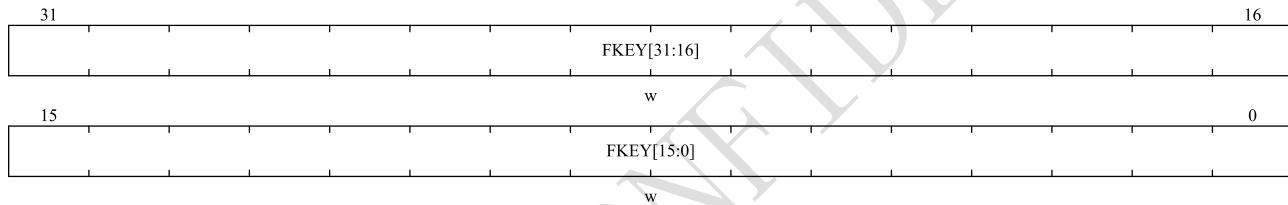
| 位域 | 名称 | 描述 |
|------|----------|---|
| 31:8 | Reserved | 保留, 必须保持复位值。 |
| 7 | ICAHEN | Icache 使能 0: 关闭 Icache; 1: 启用 Icache。 |
| 6 | ICAHRST | Icache 复位 0: 写'0'无效; 1: 写'1'复位。 |
| 5 | PRFTBFS | 预取缓冲区状态 该位指示预取缓冲区的状态 0: 预取缓冲区关闭; 1: 预取缓冲区开启。 |
| 4 | PRFTBFE | 预取缓冲区使能 0: 关闭预取缓冲区; |

| 位域 | 名称 | 描述 |
|-----|----------|--|
| | | 1: 启用预取缓冲区。 |
| 3 | Reserved | 保留, 必须保持复位值。 |
| 2:0 | LATENCY | <p>时延</p> <p>这些位表示 SYSCLK (系统时钟) 周期与闪存访问时间的比例</p> <p>000: 零周期时延, 当 $0 < \text{SYSCLK} \leq 32\text{MHz}$</p> <p>001: 一个周期时延, 当 $32\text{MHz} < \text{SYSCLK} \leq 64\text{MHz}$</p> <p>010: 两个周期时延, 当 $64\text{MHz} < \text{SYSCLK} \leq 96\text{MHz}$</p> <p>011: 三个周期时延, 当 $96\text{MHz} < \text{SYSCLK} \leq 128\text{MHz}$</p> <p>100: 四个周期时延, 当 $128\text{MHz} < \text{SYSCLK} \leq 144\text{MHz}$</p> <p>其他值: 保留</p> |

3.2.5.2.2 FLASH 键寄存器 (FLASH_KEY)

偏移地址: 0x04

复位值: 0xXXXX XXXX

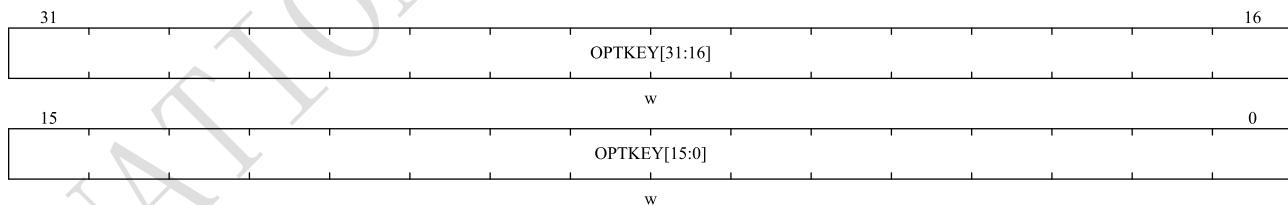


| 位域 | 名称 | 描述 |
|------|------|------------------------|
| 31:0 | FKEY | 用于解锁 FLASH_CTRL.LOCK 位 |

3.2.5.2.3 FLASH OPTKEY 寄存器 (FLASH_OPTKEY)

偏移地址: 0x08

复位值: 0xXXXX XXXX



| 位域 | 名称 | 描述 |
|------|--------|-------------------------|
| 31:0 | OPTKEY | 用于解锁 FLASH_CTRL.OPTWE 位 |

3.2.5.2.4 FLASH 状态寄存器 (FLASH_STS)

偏移地址: 0x0C

复位值: 0x0000 0000

| | | | | | | | | | | | | | | | |
|----|----------|--|--|--|--|--|--|--------|-------|-----|--------|-------|-------|----------|------|
| 31 | Reserved | | | | | | | | | | | | | | 16 |
| 15 | Reserved | | | | | | | ECCERR | EVERR | EOP | WRPERR | PVERR | PGERR | Reserved | BUSY |

rc_w1 rc_w1 rc_w1 rc_w1 rc_w1 rc_w1 rc_w1 r

| 位域 | 名称 | 描述 |
|------|----------|--|
| 31:8 | Reserved | 保留, 必须保持复位值 |
| 7 | ECCERR | ECC 错误 读 FLASH 时报错, 硬件设置这位为'1', 写入'1'可以清除这位状态。 |
| 6 | EVERR | 擦除校验错误 当页擦除后校验时报错, 硬件设置这位为'1', 写入'1'可以清除这位状态。 |
| 5 | EOP | 操作结束 当闪存操作 (编程/擦除) 完成时, 硬件设置这位为'1', 写入'1'可以清除这位状态。 注: 每次成功的编程或擦除都会设置 EOP 状态。 |
| 4 | WRPERR | 写保护错误 试图对写保护的闪存地址编程时, 硬件设置这位为'1', 写入'1'可以清除这位状态。 |
| 3 | PVERR | 编程校验错误 当编程后校验时报错, 硬件设置这位为'1', 写入'1'可以清除这位状态。 |
| 2 | PGERR | 编程错误 试图对内容不是'0xFFFF_FFFF'的地址编程时, 硬件设置这位为'1', 写入'1'可以清除这位状态。 注: 进行编程操作之前, 必须先清除 FLASH_CTRL.START 位。 |
| 1 | Reserved | 保留, 必须保持复位值 |
| 0 | BUSY | 忙 该位指示闪存操作正在进行。在闪存操作开始时, 该位被设置为'1'; 在操作结束或发生错误时该位被清除为'0'。 |

3.2.5.2.5 FLASH 控制寄存器 (FLASH_CTRL)

偏移地址: 0x10

复位值: 0x0000 0080

| | | | | | | | | | | | | | | | |
|----|----------|----|----|----|----|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----|
| 31 | Reserved | | | | | | | | | | | | | | 16 |
| 15 | 14 | 13 | 12 | 11 | 10 | 9 | 8 | 7 | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | 0 |

| | | | | | | | | | | | | | | | |
|----------|----------|--------|---------|--------|-------|--------|------|-------|-------|-------|----------|-----|-----|----|--|
| Reserved | ECERRITH | EOPITE | FERRITE | ERRITE | OPTWE | SMPSEL | LOCK | START | OPTER | OPTPG | Reserved | MER | PER | PG | |
| | rw | rw | rw | rw | rw | rw | rw | rw | rw | rw | | rw | rw | rw | |

| 位域 | 名称 | 描述 |
|-------|----------|-------------|
| 31:14 | Reserved | 保留, 必须保持复位值 |
| 13 | ECERRITE | ECC 错误中断 |

| 位域 | 名称 | 描述 |
|----|----------|---|
| | | 该位允许在 FLASH_STS.ECCERR 位变为'1'时产生中断。 0: 禁止产生中断; 1: 允许产生中断。 |
| 12 | EOPITE | 允许操作完成中断 该位允许在 FLASH_STS.EOP 位变为'1'时产生中断。 0: 禁止产生中断 1: 允许产生中断 |
| 11 | FERRITE | 擦除/编程校验错误中断 该位允许在 FLASH_STS.EVERR/PVERR 位变为'1'时产生中断。 0: 禁止产生中断; 1: 允许产生中断。 |
| 10 | ERRITE | 允许错误状态中断 该位允许在发生 Flash 错误时产生中断 (当 FLASH_STS.PGERR/WRPERR 置为'1'时)。 0: 禁止产生中断 1: 允许产生中断 |
| 9 | OPTWE | 允许写选项字节 当该位为'1'时, 允许对选项字节进行编程操作。当在 FLASH_OPTKEY 寄存器写入正确的键序列后, 该位被置为'1'。 软件可清除此位。 |
| 8 | SMPSEL | Flash 编程模式选项 0: SMP1 模式。在进行编程之前, 需要先读出编程所在地址的内容, 并检查是否已被擦除过, 若尚未被擦除则不执行编程操作, 并置起 FLASH_STS.PGERR 警告位; 1: SMP2 模式。在进行编程之前, 不会判断编程所在地址的内容是否已经被擦除过, Flash 会直接启动编程。如果编程地址之前已经写入过数据, 使用 SMP2 模式编程该地址时只能写入相同数据, 否则无法保证数据写入正确。 |
| 7 | LOCK | 锁定 只能写'1'。当该位为'1'时表示 Flash 和 FLASH_CTRL 被锁住。在检测到正确的解锁序列后, 硬件清除此位为'0'。 在一次不成功的解锁操作后, 下次系统复位前, 该位不能再被改变。 |
| 6 | START | 开始 当该位为'1'时将触发一次擦除操作。该位只可由软件置为'1'并在 FLASH_STS.BUSY 变为'1'时清除为'0'。 |
| 5 | OPTER | 擦除选项字节 0: 不开启选项字节擦除模式 1: 开启选项字节擦除模式 |
| 4 | OPTPG | 编程选项字节 0: 不开启选项字节编程模式 1: 开启选项字节编程模式 |
| 3 | Reserved | 保留, 必须保持复位值 |

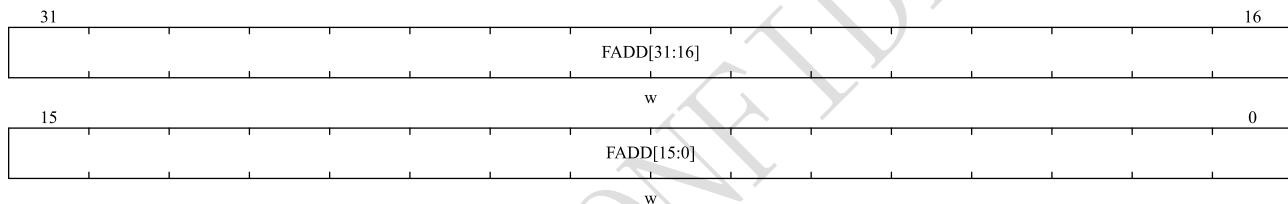
| 位域 | 名称 | 描述 |
|----|-----|----------------------------------|
| 2 | MER | 片擦除 0: 不开启片擦除模式 1: 开启片擦除模式 |
| 1 | PER | 页擦除 0: 不开启页擦除模式 1: 开启页擦除模式 |
| 0 | PG | 编程 0: 不开启编程模式 1: 开启编程模式 |

注:关于编程及擦除请参考 3.2.1.4 节。

3.2.5.2.6 FLASH 地址寄存器 (FLASH_ADD)

偏移地址: 0x14

复位值: 0x0000 0000

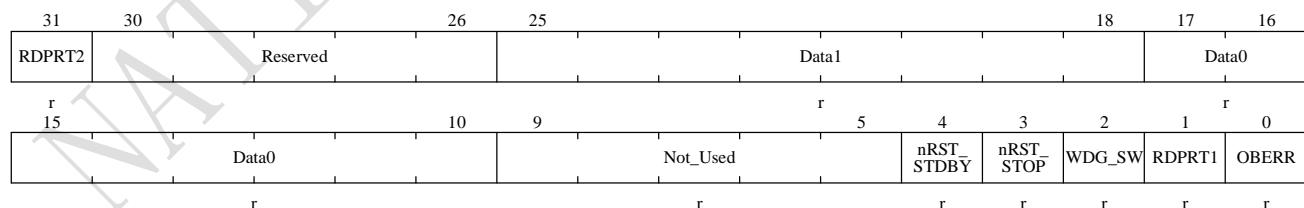


| 位域 | 名称 | 描述 |
|------|------|---|
| 31:0 | FADD | 闪存地址 当进行编程时选择要编程的地址, 当进行页擦除时选择要擦除的页。 注意: 当 FLASH_STS.BUSY 位为'1'时, 不能写这个寄存器。 |

3.2.5.2.7 选项字节寄存器 (FLASH_OB)

偏移地址: 0x1C

复位值: 0x03FF FFFC



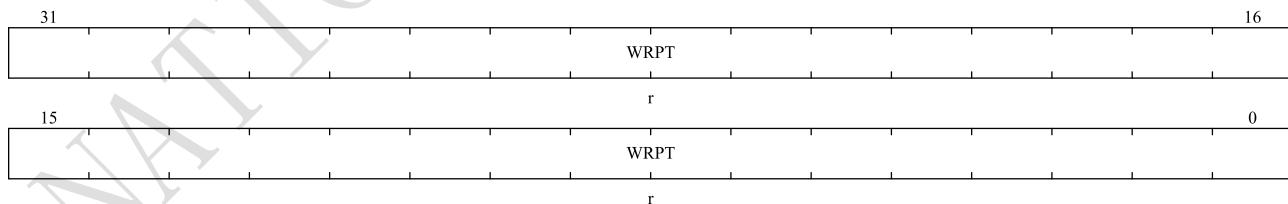
| 位域 | 名称 | 描述 |
|-------|----------|---|
| 31 | RDPORT2 | 读保护 L2 级别 0: 读保护 L2 级别未使能 1: 读保护 L2 级别使能 注: 只读位。 |
| 30:26 | Reserved | 保留, 必须保持复位值 |

| 位域 | 名称 | 描述 |
|-------|------------|---|
| 25:18 | Data1[7:0] | Data1 注: 只读位。 |
| 17:10 | Data0[7:0] | Data0 注: 只读位。 |
| 9:5 | Not_Used | 没有使用, 硬件保持为 1。 |
| 4 | nRST_STDBY | 进入 Standby 模式复位配置 0: 进入 Standby 模式后立即产生复位; 1: 进入 Standby 模式后不产生复位。 注: 该位为只读。 |
| 3 | nRST_STOP | 进入 STOP0/STOP2 模式复位配置 0: 进入 STOP0/STOP2 模式后立即产生复位; 1: 进入 STOP0/STOP2 模式后不产生复位。 注: 该位为只读。 |
| 2 | WDG_SW | 看门狗设置 0: 硬件看门狗 1: 软件看门狗 注: 只读位。 |
| 1 | RDPRT1 | 读保护 L1 级别 0: 读保护 L1 级别未使能 1: 读保护 L1 级别使能 注: 只读位。 |
| 0 | OBERR | 选项字节错误 当该位为'1'时表示选项字节和它的补码不匹配 注: 只读位。 |

3.2.5.2.8 写保护寄存器 (FLASH_WRP)

偏移地址: 0x20

复位值: 0xFFFF FFFF

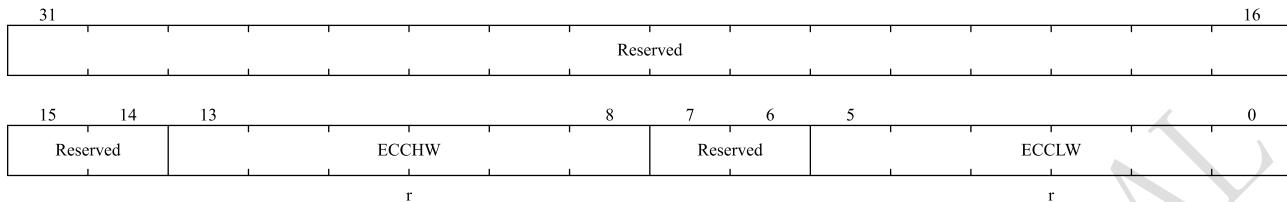


| 位域 | 名称 | 描述 |
|------|------|---|
| 31:0 | WRPT | 写保护 该寄存器包含由选项字节区加载的写保护选项字节。 0: 写保护生效; 1: 写保护失效。 注: 只读位。 |

3.2.5.2.9 ECC 寄存器 (FLASH_ECC)

偏移地址: 0x24

复位值: 0x0000 0000

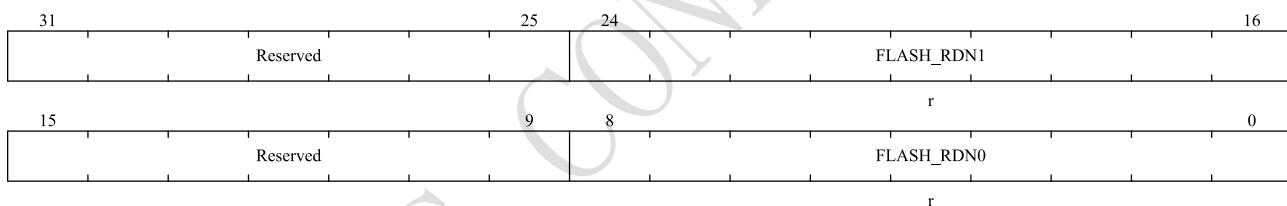


| 位域 | 名称 | 描述 |
|-------|----------|---|
| 31:14 | Reserved | 保留, 必须保持复位值。 |
| 13:8 | ECCHW | 向一个 32 位 Flash 地址写字后, 对应的高 6-bit ECC 值。 |
| 7:6 | Reserved | 保留, 必须保持复位值。 |
| 5:0 | ECCLW | 向一个 32 位 Flash 地址写字后, 对应的低 6-bit ECC 值。 |

3.2.5.2.10 RDN 寄存器 (FLASH_RDN)

偏移地址: 0x2C

复位值: 0x0000 0000

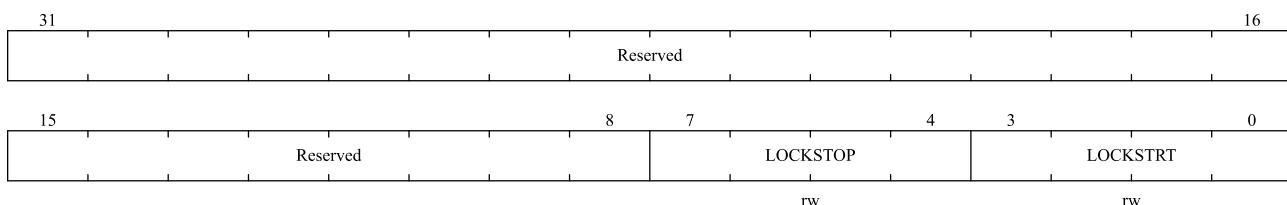


| 位域 | 名称 | 描述 |
|-------|------------|------------------|
| 31:25 | 保留 | 保留, 必须保持复位值。 |
| 24:16 | FLASH_RDN1 | Flash 冗余块页 1 的地址 |
| 15:9 | 保留 | 保留, 必须保持复位值。 |
| 8:0 | FLASH_RDN0 | Flash 冗余块页 0 的地址 |

3.2.5.2.11 CAHR 寄存器 (FLASH_CAHR)

偏移地址: 0x30

复位值: 0x0000 0000



| 位域 | 名称 | 描述 |
|------|---------------|--|
| 31:8 | Reserved | 保留, 必须保持复位值 |
| 7:4 | LOCKSTOP[3:0] | iCache 锁定停止 (详细操作说明见 3.2.2.3.3 iCache 锁定章节) 0: 不使能 1: 使能 |
| 3:0 | LOCKSTRT[3:0] | iCache 锁定开始 0: 不使能 1: 使能 |

4 电源控制 (PWR)

4.1 通用描述

PWR 是用于控制不同模块在不同功耗模式下的状态的电源管理单元。它的主要功能是控制 MCU 进入不同的功耗模式，并在事件或中断发生时唤醒。MCU 支持 RUN、SLEEP、STOP0、STOP2、STANDBY 和 VBAT 模式。

4.1.1 电源

- ✧ MCU 工作电压 (VDD) 为 1.8V~3.6V。它主要有 3 个模拟/数字电源区域 (VDD、VBAT、VDDA)。具体请参考图 4-1 电源框图。为了说明不同的电源域的功能，下面将对一些电源区域进行介绍，本文档将在后面的章节介绍电源区域的数字部分。
 - V_{DD} 域：电压输入范围为 1.8V~3.6V，主要为 MR, CPU, AHB, APB, SRAM, FLASH 及大部分数字外设接口供电。
 - V_{BAT} 区域：输入电压范围为 1.8V~3.6V，为 BKR 和一些特殊的 IO (PC13, PC14, PC15) 口供电。当 VDD 掉电时，开关把供电系统 VDD 切换到 VBAT。
 - V_{DDA} 域：电压输入范围为 1.8V~3.6V，主要为时钟及复位系统、大部分模拟外设供电。
- ✧ BKR 和 MR 是内部的电压调节器可以为数字模块供电系统提供电源。VDD 和 VBAT 一般由外部直接供电，VBAT 由电池供电来保持备份区域的内容，而 VDD 则由其他的外部供电系统供电。另外如果不接电池，那么 VBAT 必须直接连接到 VDD。

● MR

MR 是内部的主电源控制器，主要用在 RUN 模式、SLEEP 模式以及 STOP0 模式。MR 有两种模式，正常模式和低功耗模式，低功耗模式用于 STOP0 来进一步降低功耗。

当 MR 进入低功耗模式时，CPU 会进入深度睡眠状态。此时应设置 PWR_CTRL.PDS 位为 0，PWR_CTRL.LPS 位为 1。当 MR 进入正常模式，此时需要设置 PWR_CTRL.PDS 位为 0，PWR_CTRL.LPS 位也为 0。

● BKR

BKR 是内部备电域电源控制器，用在 STOP2、STANDBY 和 VBAT 模式。在 STOP2 模式，CPU 状态是保持的，另外给数字备电区域、GPIO 和 EXTI 供电。当 CPU 进入深度睡眠，此时应设置 PWR_CTRL2.STOP2S 位为 1。

数字备电区域主要模块包括 PWR、IO (PA0_WAKUP, PC13_TAMPER, PC14, PC15)、R-SRAM、RTC、BKR 和 RCC_BDCTRL 寄存器。SW3 开关打开时，CPU 会进入深度睡眠状态。当 SW1 把供电系统切换到 VBAT 时，表明 VDD 此时已经掉电了。

- ✧ 复位时，SW1 会把供电系统切换到 VDD 供电区域。在 STOP2、STANDBY 和 VBAT 模式，内部电压调整器 BKR 将给数字备电区域供电。
 - 在 VDD 上升阶段或者 PDR 被检测到时，在 VBAT 和 VDD 之间的开关保持连接到 VBAT 区域。
 - 在启动阶段，如果 VDD 快速建立，并且 VDD > VBAT + 0.6V，电流可以通过内部二极管连接注入

到 VBAT。如果连接到 VBAT 的电源或者电池不支持这种电流的注入。强烈建议在该电源和 VBAT 引脚之间加一个低压的二极管。

如果应用中没有外部电池。建议 VBAT 引脚连接到 VDD 上, 同时并一个 100nF 的陶瓷电容。在 RUN、SLEEP、STOP0 模式, 备电区域由 VDD 供电 (SW1 连接到 VDD), 下述功能可用:

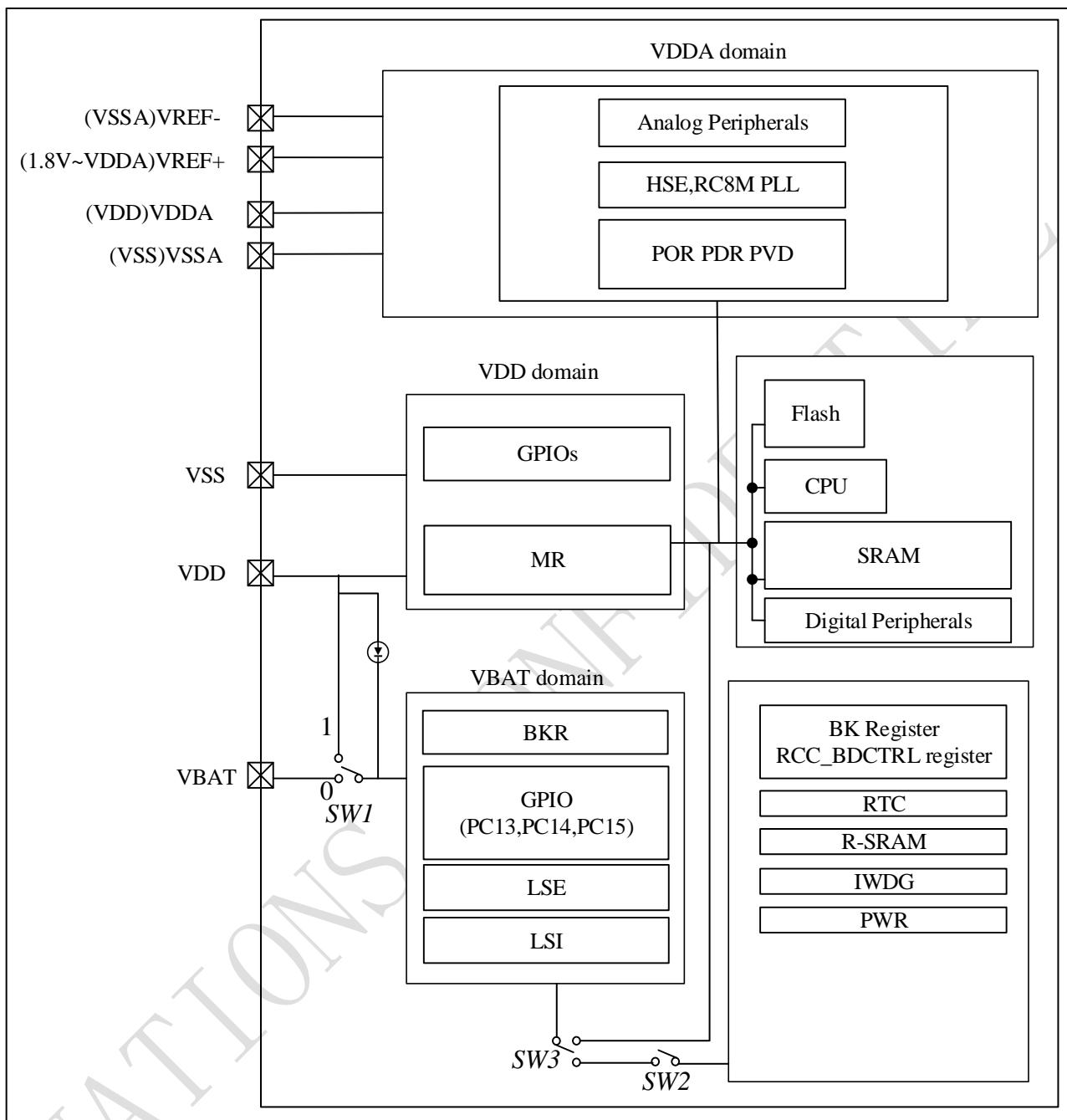
- PC14 和 PC15 可以被用于普通的 IO 口或者 LSE 管脚
 - PC13 可以被用于普通的 IO 口, TAMPER 管脚, RTC 校验时钟引脚, RTC 闹钟和周期性唤醒输出
- 注意:

由于事实上 SW1 和 SW2 流过的电流是受限制的, 最大为 3mA。所以 PA0_WAKUP、PC13 到 PC15 这些 IO 输出模式是受限制的, 在外挂 30PF 的电容时, 最大的输出速度为 2MHz。另外这些 IO 不能当电流驱动, 比如不能去驱动 LED。SW2 的电流会维持在 3mA 或者更低, 因为 GPIO、EXTI 工作都会共同消耗电流。

当 VBAT 为备电区域供电时, 此时可以使用以下功能:

- PC14 和 PC15 只能用于 LSE 管脚
- PC13 被用于 TAMPER 管脚, RTC 闹钟或者周期性唤醒输出

图 4-1 电源框图



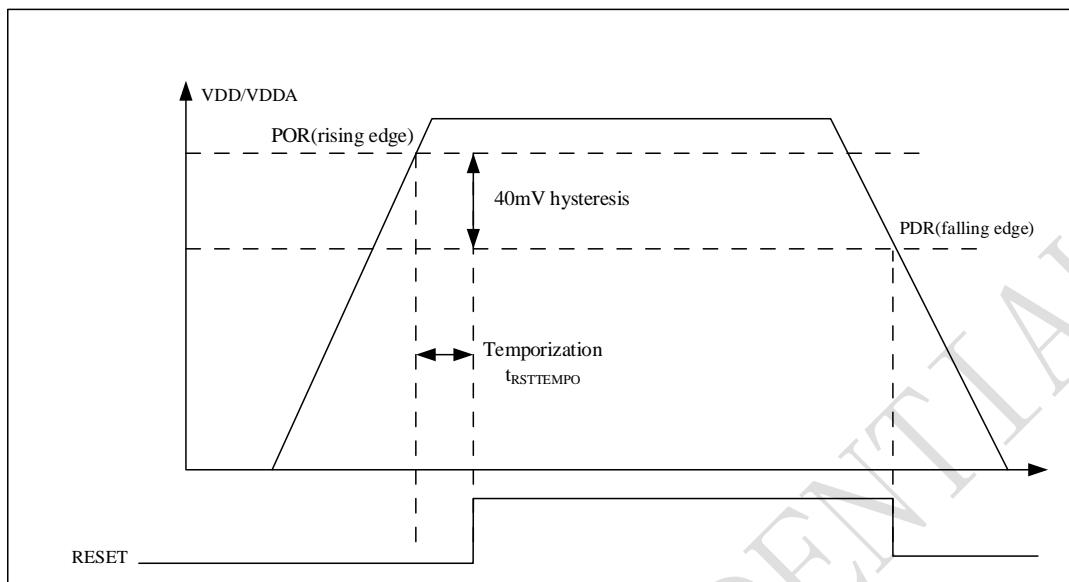
4.1.2 电压监控

4.1.2.1 上电复位 (POR) 和下电复位 (PDR)

上电复位 (POR) 和与下电复位 (PDR) 电路集成在芯片内部。可以工作在最低 1.8V 的电压。不需要外部的复位电路，当 VDD 或者 VDDA 低于规定的阈值 ($V_{POR/PDR}$) 时，芯片会保持复位状态。

有关开关电源复位阈值的详细信息，请参阅相关数据手册电气特性部分。

图 4-2 上电复位和掉电复位的波形图



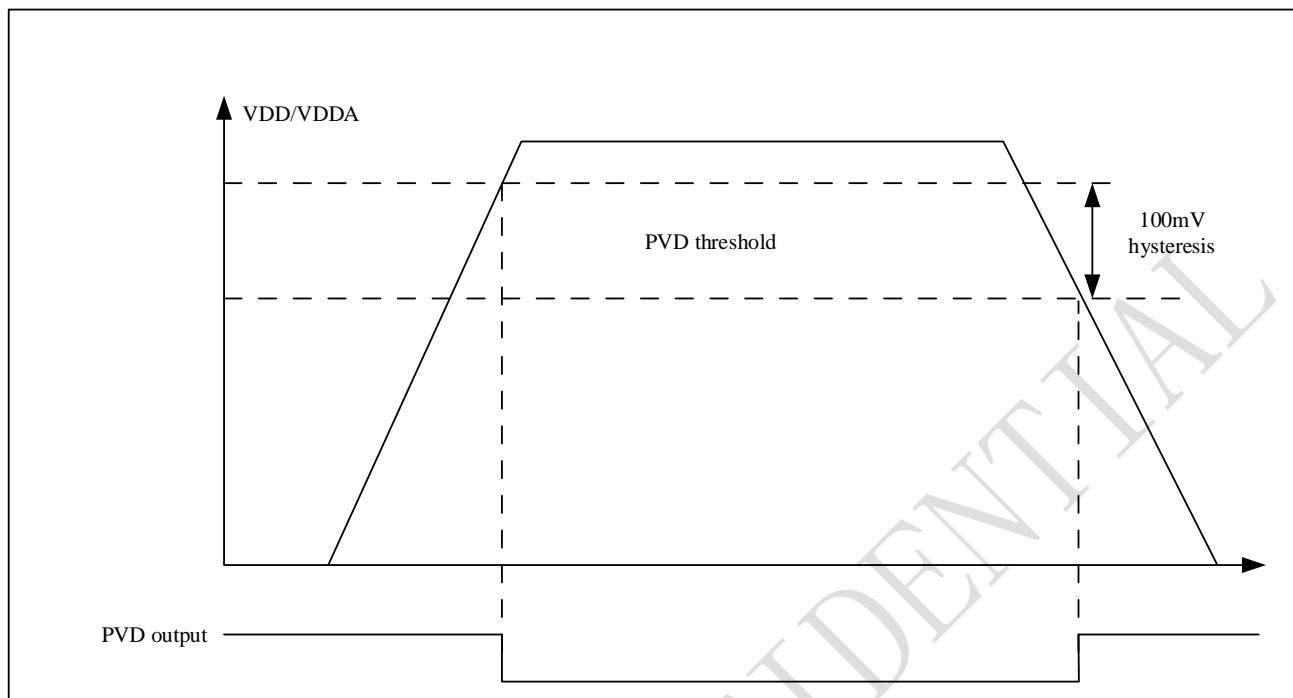
4.1.2.2 可编程电压监测器 (PVD)

通过与电源控制寄存器 PWR_CTRL.PRS[2:0]位设置的阈值进行比较, PVD 可用于监控 VDD/VDDA 电源。通过设置 PWR_CTRL.PVDEN 启用 PVD。

PWR_CTRLSTS.PVDO 标志用于指示 VDD/VDDA 是否高于/低于 PVD 电压阈值。该事件在内部连接到外部中断的中断线 16, 如果在外部中断寄存器中使能了中断, 则会产生中断。根据外部中断线 16 的上升/下降沿触发设置, 当 VDD/VDDA 下降到 PVD 阈值以下或 VDD/VDDA 上升到 PVD 阈值以上时, 会发生 PVD 中断。例如, 此功能可用于执行紧急关机任务。

注意: N32A455 PVD 阈值需要配合寄存器 PWR_CTRL3 中位 EXMODE 配置。具体请参考寄存器 PWR_CTRL 中位 MSB 和 PRS[2:0], 它们的组合可以组成 4 位 PVD 阈值配置。

图 4-3 PVD 阈值波形图



4.1.2.3 Brown_out 复位 (BOR)

BOR 是器件内置的掉电复位控制器，当 VDD 电压低于 1.62V (典型值) 时，器件将保持为复位状态。

4.2 功耗模式

MCU 共有 6 种功耗模式：RUN、SLEEP、STOP0、STOP2、STANDBY 和 VBAT，不同的模式具有不同的性能和功耗。MCU 功耗模式总结如下所示。

表 4-1 功耗模式

| 模式 | 条件 | 进入 | 退出 |
|----------------------|--|--|--|
| RUN | CPU 启动 外设配置 | 上电，系统复位，低功耗唤醒 | 进入睡眠、STOP0、STOP2、待机和 VBAT 模式 |
| SLEEP | CPU 进入睡眠模式，内核停止。所有的外设配置，电压调节器仍在运行。任一中断和事件都可以唤醒 CPU | 1) SCB_SCR.SLEEPDEEP = 0, SCB_SCR.SLEEPONEXIT = 0, WFI/WFE 2) SCB_SCR.SLEEPDEEP = 0, SCB_SCR.SLEEPONEXIT = 1, 没有中断等待，CPU 返回来自 ISR | 唤醒： 1) 如果通过 WFI 进入或者设置 SCB_SCR.SLEEPONEXIT = 1，任一 NVIC 中断都可以退出 2) 如果通过 WFE 或者设置 SCB_SCR.SEVONPEND=1，任一外设中断都可以退出 SCB_SCR.SEVONPEND=0，外部中断线退出 |
| STOP0 ^[1] | CPU 深度睡眠方式： 外设时钟，所有数字模块和电压调节器仍 | WFI / WFE: 1) SCB_SCR.SLEEPDEEP | 唤醒： 1) 如果由 WFI 进入，任何来自 |

| 模式 | 条件 | 进入 | 退出 |
|----------------------|---|---|---|
| | <p>运行。HSE / HSI / PLL 关闭。</p> <p>LSE / LSI, RTC 或者其他外设可以配置用来唤醒。</p> <p>所有的 SRAM 保持数据，所有的 IO 口，IWDG 和 RTC 可以用来唤醒 CPU。</p> <p>唤醒之后开启 HSI，代码从挂起的地方启动。</p> | <p>= 1, PWR_CTRL.PDS=0,</p> <p>2) PWR_CTRL.LPS=0/1, 选择主电压调节器工作模式</p> | <p>外部中断/事件线（NVIC 启用），它可以是外部中断或内部外设</p> <p>2) 如果由 WFE 进入，SCB_SCR.SEVONPEND=0, 任何来自外部事件线</p> <p>3) 如果由 WFE 进入，SCB_SCR.SEVONPEND=1, 任何来自外部中断或内部外设中断</p> |
| STOP2 ^[2] | <p>CPU 深度睡眠方式：</p> <p>CPU 寄存器保持，所有的核心数字逻辑区域电源全部关闭。</p> <p>主电压调节器（MR）关闭，HSE/HSI/PLL 关闭。LSE/LSI 可配置，GPIO 保持，外设 IO 复用不保持。16KB R-SRAM 保持，其他的 SRAM 和寄存器数据都丢失。</p> <p>84B BK 寄存器保持。</p> <p>GPIOs 和 EXTI 开启。</p> | <p>WFI/WFE:</p> <p>1) SCB_SCR.SLEEPDEEP = 1</p> <p>2) PWR_CTRL2.STOP2S = 1</p> | <p>唤醒：</p> <p>1) 如果由 WFI 进入，任何来自外部中断/事件线（NVIC 启用），它可以是外部中断或内部外设</p> <p>2) 如果由 WFE 进入，SCB_SCR.SEVONPEND=0, 任何来自外部事件线</p> <p>3) 如果由 WFE 进入，SCB_SCR.SEVONPEND=1, 任何来自外部中断或内部外设中断</p> |
| STANDBY | <p>主电压调节器关闭，HSE/HSI/PLL 关闭。</p> <p>LSE/LSI 可配置。</p> <p>16KB 字节 R-SRAM 保持，通过 PWR_CTRL2.SR2STBRET 配置。其他的 SRAM 和寄存器数据都丢失。</p> <p>除了以下 NRST/PA0_WKUP/PC13-TAMPER/PC14-OSC32_IN/PC15-OSC32_OUT，其他 IO 都是高阻态。</p> <p>84 字节的 BK 寄存器仍保持数据值，IWDG, RTC/PA0WKUP/NRST/TAMPER 可以唤醒 CPU。</p> | <p>WFI/WFE:</p> <p>1) SCB_SCR.SLEEPDEEP = 1</p> <p>中断/事件</p> <p>2) PWR_CTRL.PDS=1</p> | <p>WKUP 上升沿，RTC alarm 上升沿，NRST 复位，IWDG 复位</p> |
| VBAT | <p>CPU 关闭，所有的外设关闭，主电压调节器关闭，LSE/LSI 可配置，HSE/HSI/PLL 关闭。除了 NRST/PC13-TAMPER/PC14-OSC32_IN/PC15-OSC32_OUT，大部分 IO 口处于高阻态。</p> | VDD 关闭 | VDD 开启 |

注意：

1. STOP0 模式，在唤醒后，代码可以从停止位置继续运行。
2. STOP2 模式，在唤醒后，在 R-SRAM 区的堆和全局变量可以从停止的位置恢复和继续，此时外设需要重新初始化。

不同模块在不同功耗模式下的运行使能情况如下表所示：

表 4-2 模块运行状态⁽¹⁾

| Peripheral | Run | Sleep | Stop 0 | | Stop 2 | | Standby | | VBAT |
|-------------------|-----|----------|----------|-------------------|--------|-------------------|---------|-------------------|------|
| | | | - | Wakeup capability | - | Wakeup capability | - | Wakeup capability | |
| MR | Y | Y | (3) | - | OFF | - | OFF | - | OFF |
| BKR | Y | Y | Y | - | Y | - | Y | - | Y |
| POR | Y | Y | Y | - | Y | - | Y | Y | |
| PDR | Y | Y | Y | - | Y | - | Y | Y | - |
| PVD | O | O | O | O | O | O | - | - | - |
| BKPOR/PDR | Y | Y | Y | - | Y | - | Y | - | Y |
| CPU | Y | HCLK (O) | HCLK (O) | - | - | - | OFF | - | OFF |
| Flash | O | O | (4) | - | OFF | - | OFF | - | OFF |
| SRAM | Y | Y | Y | - | OFF | - | OFF | - | OFF |
| R-SRAM | Y | O | Y | - | O | - | O | - | O |
| Backup Registers | Y | Y | Y | - | Y | - | Y | - | Y |
| DMA | O | O | - | - | - | - | - | - | - |
| HSI | O | O | OFF | - | OFF | - | OFF | - | OFF |
| HSE | O | O | OFF | - | OFF | - | OFF | - | OFF |
| LSI | O | O | O | - | O | - | O | - | O |
| LSE | O | O | O | - | O | - | O | - | O |
| CSS | O | O | - | - | - | - | - | - | - |
| RTC / Auto wakeup | O | O | O | O | O | O | O | O | O |

| Peripheral | Run | Sleep | Stop 0 | | Stop 2 | | Standby | | VBAT |
|---------------------------|-----|-------|--------|-------------------|--------|-------------------|---------|-------------------|------|
| | | | - | Wakeup capability | - | Wakeup capability | - | Wakeup capability | |
| Number of RTC Tamper pins | 1 | 1 | 1 | O | 1 | O | 1 | O | 1 |
| USART1/2/3 | O | O | - | - | - | - | - | - | - |
| UART4/5/6/7 | O | O | - | - | - | - | - | - | - |
| I2C1/2/3/4 | O | O | - | - | - | - | - | - | - |
| SPI1/2/3 | O | O | - | - | - | - | - | - | - |
| CAN1/2 | O | O | - | - | - | - | - | - | - |
| QSPI | O | O | - | - | - | - | - | - | - |
| SDMMC | O | O | - | - | - | - | - | - | - |
| ADC | O | O | - | - | - | - | - | - | - |
| DAC | O | O | - | - | - | - | - | - | - |
| OPAMP | O | O | - | - | - | - | - | - | - |
| COMP | O | O | O | O | - | - | - | - | - |
| Tempsensor | O | O | - | - | - | - | - | - | - |
| TIMx | O | O | - | - | - | - | - | - | - |
| IWDG | O | O | O | O | O | O | O | O | - |
| WWDG | O | O | - | - | - | - | - | - | - |
| SysTick | O | O | - | - | - | - | - | - | - |
| SAC | O | O | - | - | - | - | - | - | - |
| RNG | O | O | - | - | - | - | - | - | - |
| CRC | O | O | - | - | - | - | - | - | - |

| Peripheral | Run | Sleep | Stop 0 | | Stop 2 | | Standby | | VBAT |
|------------|-----|-------|--------|-------------------|--------|-------------------|---------|-------------------|------|
| | | | - | Wakeup capability | - | Wakeup capability | - | Wakeup capability | |
| GPIOs | O | O | O | O | O | O | Y | 2pins | - |

注意：

1. Y 表示 Yes (使能), O 表示 Option (可选), - 表示无效, OFF 表示关闭,
2. 2pins 代表 2 个唤醒 IO, PA0_WKUP 和 NRST
3. MR 处于为低功耗模式
4. FLASH 处于睡眠 (Flash 自身) 模式

4.2.1 SLEEP 模式

CPU 停止, 所有外围设备, 包括 Cortex®-M4F 内核周围的外围设备 (如 NVIC、SysTick 等) 都可以运行, 在中断或事件发生时唤醒 CPU。在 SLEEP 模式下, 所有 I/O 引脚保持与运行模式下相同的状态/功能。

4.2.1.1 进入 SLEEP 模式

通过执行 WFI (等待中断) 或 WFE (等待事件) 指令和 SCB_SCR.SLEEPDEEP=0 进入 SLEEP 模式。根据 SCB_SCR.SLEEPONEXIT, 进入 SLEEP 模式有两种方式:

- SLEEP-NOW: 如果 SCB_SCR.SLEEPONEXIT=0, 则立即执行 WFI 或 WFE 指令, 系统立即进入 SLEEP 模式。
- SLEEP-ON-EXIT: 如果 SCB_SCR.SLEEPONEXIT=1, 系统从最低优先级 ISR 退出时立即进入 SLEEP 模式。

在 SLEEP 模式下, 所有 I/O 引脚保持与运行模式下相同的状态/功能。

4.2.1.2 退出 SLEEP 模式

如果使用 WFI 指令进入 SLEEP 模式, 任何 NVIC 中断都可以将设备从 SLEEP 模式唤醒。

如果使用 WFE 指令进入 SLEEP 模式, MCU 将在事件发生时立即退出 SLEEP 模式。唤醒事件可以通过以下方式生成:

- 在外设控制寄存器而不是 NVIC 中使能中断, 并使能 SCB_SCR.SEVONPEND。当 MCU 被 WFE 唤醒时, 外设中断挂起位和外设 NVIC 中断通道挂起位 (在 NVIC 中断清除挂起寄存器中) 必须清零。
- 配置外部或内部 EXTI 事件模式。当 MCU 唤醒时, 不需要清除外设中断挂起位和外设 NVIC 中断通道挂起位 (在 NVIC 中断清除挂起寄存器中), 因为没有设置事件线对应的挂起位。该模式提供最短的唤醒时间, 因为没有时间花在中断进入或退出上。

4.2.2 STOP0 模式

STOP0 模式基于 Cortex®-M4 深度睡眠模式, 并结合外设时钟控制机制。电压调整器可以配置为正常或低功

耗模式。在 STOP0 模式下，核心域中的时钟源大多数都是禁用的，如 PLL、HSI 和 HSE。但是 SRAM、R-SRAM 和所有寄存器内容都被保存。

在 STOP0 模式下，所有 I/O 引脚都保持与运行模式相同的状态。

4.2.2.1 进入 STOP0 模式

进入 STOP0 模式时，主要的区别是设置 SCB_SCR.SLEEPDEEP= 1，PWR_CTRL.PDS=0。另一个不同之处在于，MR 可以运行在正常模式或者低功耗模式，通过配置寄存器 PWR_CTRL.LPS。当 PWR_CTRL.LPS = 1 时，MR 运行在低功耗模式。

当 PWR_CTRL.LPS = 0 时，MR 运行在正常模式。

在 STOP0 模式下，所有 I/O 引脚保持与运行模式下相同的状态和功能。

如果正在进行 FLASH 操作，则进入 STOP0 模式的时间将被延迟，直到完成内存访问。

如果对 APB 区域的访问正在进行，则进入 STOP0 模式的时间将被延迟，直到 APB 访问完成。

在 STOP0 模式下，通过对各个控制位进行编程来选择以下特性：

- 独立看门狗 (IWDG)：在它相关寄存器软件写入或者硬件操作时，独立看门狗将被启动，一旦启动将一直工作，直到产生一个复位信息
- RTC：可以通过寄存器 RCC_BDCTRL.RTCEN 位来开启
- 内部 RC 振荡器 (LSI RC)：可以通过寄存器 RCC_CTRLSTS.LSIEN 位来开启
- 外部的 32.768kHz 晶振 (LSE OSC)：可以通过寄存器 RCC_BDCTRL.LSEEN 位来开启

ADC 或 DAC 也可以在 STOP0 模式下耗电，可以在进入 STOP0 模式之前禁用 ADC 和 DAC。

注意：如果应用程序需要在进入停止模式之前禁用外部时钟，则必须首先禁用 RCC_CTRL.HSEEN 位，然后将系统时钟切换到 HSI。否则，如果在进入停止模式时，RCC_CTRL.HSEEN 位保持使能，并且去掉外部时钟（外部振荡器），则必须启用时钟安全系统 (CSS) 功能，以检测任何外部振荡器故障，并避免进入停止模式时出现故障行为。

4.2.2.2 退出 STOP0 模式

当产生中断或唤醒事件退出 STOP0 模式时，选择 HSI RC 振荡器作为系统时钟。

当电压调整器在低功率模式下工作时，从 STOP0 模式中唤醒时会产生额外的启动延迟。在 STOP0 模式下，通过内部调节器处于普通模式，这样可以减少启动时间，但相应的功耗会增加。

4.2.3 STOP2 模式

STOP2 模式基于 Cortex®-M4F 深度睡眠模式，所有的核心数字逻辑区域电源全部关闭。主电压调节器 (MR) 关闭，HSE/HSI/PLL 关闭。CPU 寄存器保持、LSE/LSI 可配置，GPIO 保持，外设 IO 复用不保持。16K 字节 R-SRAM 保持，其他的 SRAM 和寄存器数据都丢失。84 字节备份寄存器保持。GPIOs 和 EXTI 开启。

4.2.3.1 进入 STOP2 模式

要进入 STOP2 模式，寄存器位应配置为：SCB_SCR.SLEEPDEEP = 1，PWR_CTRL2.STOP2S=1，PWR_CTRL.PDS=0，PWR_CTRL.LPS=0。

在 STOP2 模式下，如果 FLASH 正在操作，进入 STOP2 模式的时间将延迟到内存访问完成。

如果正在访问 APB 区域，则进入 STOP2 模式的时间将延迟到 APB 访问完成。

在 STOP2 模式下，可以使用以下外设：

- 独立看门狗(IWDG)可选：一旦启用，它将一直计数，直到产生复位。
- RTC 可选：可以通过 RCC_BDCTRL.RTCEN 开启。
- 内部 RC 振荡器 (LSI RC) 可选：可以通过 RCC_CTRLSTS.LSIEN 开启。
- 外部 32.768kHz 晶振 (LSE OSC) 可选：可通过 RCC_BDCTRL.LSEEN 开启。

注：如果进入 STOP2 还想保持数据（全局变量、栈等），应当将其放到 R-SRAM 里。

4.2.3.2 退出 STOP2 模式

当通过产生中断或唤醒事件退出 STOP2 模式时，选择 HSI RC 振荡器作为系统时钟，代码也将从停止的位置继续执行。

4.2.4 STANDBY 模式

STANDBY 模式是基于 Cortex®-M4 的 Deep-Sleep 模式。核心域完全关闭，备电区域打开，为 BKR 供电。

4.2.4.1 进入 STANDBY 模式

当进入 STANDBY 模式。主要的区别是设置 SCB_SCR.SLEEPDEEP=1, PWR_CTRL.PDS=1。

在 STANDBY 模式中，除 NRST、PA0_WKUP、PC13_TAMPER、PC14、PC15 外，所有 I/O 引脚都保持高阻状态。

如果正在对 FLASH 进行操作时，则进入 STANDBY 模式的时间将被延迟，直到完成内存访问。

如果对 APB 区域的访问正在进行，则进入 STANDBY 模式的时间将被延迟，直到 APB 访问完成。

在 STANDBY 模式下，通过对各个控制位进行编程来选择以下特性：

- 独立看门狗(IWDG)可选：一旦启用，它将一直计数，直到产生复位。
- RTC 可选：可以通过 RCC_BDCTRL.RTCEN 开启。
- 内部 RC 振荡器 (LSI RC) 可选：可以通过 RCC_CTRLSTS.LSIEN 开启。
- 外部 32.768kHz 晶振 (LSE OSC) 可选：可通过 RCC_BDCTRL.LSEEN 开启。
- R-SRAM 数据保持，可以通过寄存器 PWR_CTRL2.SR2STBRET 位来开启

4.2.4.2 退出 STANDBY 模式

当外部复位 (NRST 引脚)、IWDG 复位、WKUP 引脚的上升沿或 RTC 闹钟事件上升沿发生时，MCU 退出 STANDBY 模式。除电源状态寄存器 (PWR_CTRLSTS) 外，所有寄存器在从 STANDBY 状态唤醒后都会被复位。

从 STANDBY 模式唤醒后，代码执行与复位相同 (检测 BOOT 引脚、获取复位向量等)。PWR_CTRLSTS.SBF 状态标志表示 MCU 退出 STANDBY 模式。

4.2.5 VBAT 模式

在 VBAT 模式下 CPU 关闭，所有的外设关闭，主电压调节器关闭，LSE/LSI 可配置，HSE/HSI/PLL 关闭。除了 NRST/PC13-TAMPER/PC14-OSC32_IN/PC15-OSC32_OUT，大部分 IO 口处于高阻态。

在 VBAT 模式下，根据 VDD 掉电之前的配置，可以使用以下特性：

- RTC：可以通过寄存器 RCC_BDCTRL.RTCEN 位来开启
- 内部 RC 振荡器（LSI RC）：可以通过寄存器 RCC_CTRLSTS.LSIEN 位来开启
- 外部的 32.768kHz 晶振（LSE OSC）：可以通过寄存器 RCC_BDCTRL.LSEEN 位来开启
- R-SRAM 数据保持，可以通过寄存器 PWR_CTRL2.SR2VBRET 位来开启

4.2.5.1 进入 VBAT 模式

当 VDD 掉电时，将在任何时候进入 VBAT 模式。

4.2.5.2 退出 VBAT 模式

当 VDD 恢复到上电复位阈值时，MCU 退出 VBAT 模式。在 VDD 恢复后，MCU 核心区域将完整的按照上电顺序执行。从 VBAT 模式中醒来后，代码执行等同于复位后的执行。PWR_CTRLSTS.VBATF 状态标志表明 MCU 由 VBAT 模式退出。

4.3 低功耗自动唤醒（AWU）模式

自动唤醒模式下，RTC 可以用于从不同的低功耗模式中唤醒，而不需要依赖外部中断。RTC 提供了一个可编程的时钟基准，用于从 STOP0、STOP2 和 STANDBY 模式中定时唤醒。为此，可以通过软件编程 RCC_BDCTRL.RTCSEL[1:0] 来选择三个可选的 RTC 时钟源中的如下两个：

- 32.768kHz 外部晶振时钟（LSE OSC）
这个时钟源提供了一个精确的时钟基准，并且有非常低的功耗。
- RC 内部晶振时钟（LSI RC）
这个时钟源具有节省 32.768 kHz 晶振成本的优势，但是时钟精准度比 LSE 差。

若要使用 RTC 闹钟事件从 STOP0/STOP2 模式唤醒，需要：

- 配置 EXTI 17 上升沿触发
- 配置 RTC 开启 RTC 闹钟事件

若要使用 RTC 闹钟事件从 STANDBY 模式中唤醒，不需要配置 EXTI 17。

VBAT 模式无法通过 RTC 唤醒。

4.4 PWR 寄存器

4.4.1 PWR 寄存器总览

表 4-3 PWR 寄存器总览

| Offset | Register | 31 | 30 | 29 | 28 | 27 | 26 | 25 | 24 | 23 | 22 | 21 | 20 | 19 | 18 | 17 | 16 | 15 | 14 | 13 | 12 | 11 | 10 | 9 | 8 | 7 | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | 0 |
|--------|-------------|-------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|-----------|--------------|----------|----|---------|-----------|----------|--------|--------|-----|---|---|---|---|
| 000h | PWR_CTRL | Reserved | | | | | | | | | | | | | | | | | | MSB | DBKP | PRS[2:0] | | | PVDEN | CSBVBAT | CWKUP | PDS | LPS | | | | |
| | | Reset Value | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 004h | PWR_CTRLSTS | Reserved | | | | | | | | | | | | | | | | | | WKUPEN | Reserved | | | VBATF | PVDO | SBF | PDS | WKUPF | | | | | |
| | | Reset Value | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 008h | PWR_CTRL2 | Reserved | | | | | | | | | | | | | | | | | | IWDGRSTEN | LSITRIM[4:0] | | | TMPWPEN | SR2STBRET | SR2VBRET | STOP2S | EXMODE | | | | | |
| | | Reset Value | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 00Ch | PWR_CTRL3 | Reserved | | | | | | | | | | | | | | | | | | IWDGWOPEN | LSITRIM[4:0] | | | VBATF | PVDO | SBF | PDS | WKUPF | | | | | |
| | | Reset Value | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

4.4.2 电源控制寄存器 (PWR_CTRL)

偏移地址: 0x000

复位值: 0x0000 0000 (从 STANDBY 模式唤醒时清除)

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|----|----------|------|----------|----|----|-------|-------|----|---------|----|------|----|-----------|----------|--------|--------|----|----|----|
| 31 | Reserved | | | | | | | | | | | | | | | | | | 16 |
| 15 | Reserved | | | | | | | | | | | | | | | | | | 0 |
| 10 | MSB | DBKP | PRS[2:0] | | | 5 | PVDEN | 3 | CSBVBAT | 2 | PVDO | 1 | SR2STBRET | SR2VBRET | STOP2S | EXMODE | | | 0 |
| 9 | rw | rw | rw | rw | rw | rc_w1 | rc_w1 | rw | rw | rw | rw | rw | rw | rw | rw | rw | rw | rw | rw |

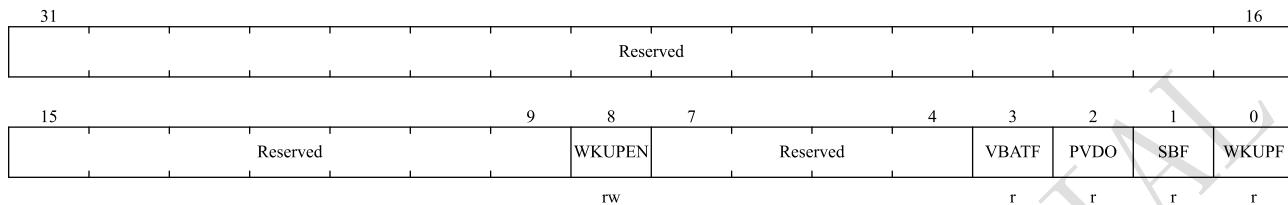
| 位域 | 名称 | 描述 | | | | | | | | | | | | |
|-----------|----------|---|-----------|----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 31:10 | Reserved | 保留, 必须保持复位值。 | | | | | | | | | | | | |
| 9 | MSB | 4 比特位 PVD 阈值设置位。 PWR_CTRL3.EXMODE = 1 时, 该位可操作。 因此需要先配置 PWR_CTRL3.EXMODE 位。 当 MSB 位为 0 时, 阈值如下: <table border="1" data-bbox="627 1740 1056 1987"> <tr> <th>寄存器 (4 位)</th> <th>电压</th> </tr> <tr> <td>0000</td> <td>2.2v</td> </tr> <tr> <td>0001</td> <td>2.3v</td> </tr> <tr> <td>0010</td> <td>2.4v</td> </tr> <tr> <td>0011</td> <td>2.5v</td> </tr> <tr> <td>0100</td> <td>2.6v</td> </tr> </table> | 寄存器 (4 位) | 电压 | 0000 | 2.2v | 0001 | 2.3v | 0010 | 2.4v | 0011 | 2.5v | 0100 | 2.6v |
| 寄存器 (4 位) | 电压 | | | | | | | | | | | | | |
| 0000 | 2.2v | | | | | | | | | | | | | |
| 0001 | 2.3v | | | | | | | | | | | | | |
| 0010 | 2.4v | | | | | | | | | | | | | |
| 0011 | 2.5v | | | | | | | | | | | | | |
| 0100 | 2.6v | | | | | | | | | | | | | |

| 位域 | 名称 | 描述 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|-----------|----------|---|------|------|------|------|------|------|-----------|----|------|-------|------|-------|------|-------|------|-------|------|-------|------|-------|------|-------|------|-------|
| | | <table border="1" style="display: inline-table; vertical-align: middle;"> <tr><td>0101</td><td>2.7v</td></tr> <tr><td>0110</td><td>2.8v</td></tr> <tr><td>0111</td><td>2.9v</td></tr> </table> <p>当 MSB 位为 1 时, 阈值如下:</p> <table border="1" style="display: inline-table; vertical-align: middle;"> <tr><td>寄存器 (4 位)</td><td>电压</td></tr> <tr><td>1000</td><td>1.78v</td></tr> <tr><td>1001</td><td>1.88v</td></tr> <tr><td>1010</td><td>1.98v</td></tr> <tr><td>1011</td><td>2.08v</td></tr> <tr><td>1100</td><td>3.28v</td></tr> <tr><td>1101</td><td>3.38v</td></tr> <tr><td>1110</td><td>3.48v</td></tr> <tr><td>1111</td><td>3.58v</td></tr> </table> | 0101 | 2.7v | 0110 | 2.8v | 0111 | 2.9v | 寄存器 (4 位) | 电压 | 1000 | 1.78v | 1001 | 1.88v | 1010 | 1.98v | 1011 | 2.08v | 1100 | 3.28v | 1101 | 3.38v | 1110 | 3.48v | 1111 | 3.58v |
| 0101 | 2.7v | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0110 | 2.8v | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0111 | 2.9v | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 寄存器 (4 位) | 电压 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1000 | 1.78v | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1001 | 1.88v | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1010 | 1.98v | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1011 | 2.08v | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1100 | 3.28v | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1101 | 3.38v | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1110 | 3.48v | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1111 | 3.58v | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 8 | DBKP | <p>取消备电域的写保护。</p> <p>在复位状态下, RTC 和备电域寄存器要保护起来, 防止非法写入。必须设置此位以启用对这些寄存器的写访问。</p> <p>0: 禁用对 RTC 和备份寄存器的访问 1: 启用对 RTC 和备份寄存器的访问</p> <p>注意: 如果 RTC 时钟为 HSE/128, 这个位必须保持为 1。</p> | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 7:5 | PRS[2:0] | <p>PVD 监测电压选择。</p> <p>不同位的组合代表电压检测器不同的电压阈值。</p> <p>这些位需要结合 MSB 位进行配置, 具体电压阈值见 MSB 位的描述。</p> <p>注意: 详细说明参见数据手册中的电气特性部分。</p> | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 4 | PVDEN | <p>电源电压监测器 (PVD) 使能。</p> <p>0: 禁止 PVD 1: 开启 PVD</p> | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 3 | CSVBAT | <p>清除 STANDBY/VBAT 位。</p> <p>始终读出为 0</p> <p>0: 无效 1: 清除 PWR_CTRLSTS.SBF 和 PWR_CTRLSTS.VBATF 待机位 (写)</p> | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 2 | CWKUP | <p>清除唤醒位。</p> <p>始终读出为 0</p> <p>0: 无效 1: 2 个系统时钟周期后清除 PWR_CTRLSTS.WKUPF 唤醒位 (写)</p> | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1 | PDS | <p>掉电深睡眠位。</p> <p>与 LPS 位协同操作</p> <p>0: 当 CPU 进入深睡眠时进入停机模式, 调压器的状态由 LPS 位控制。 1: CPU 进入深睡眠时进入待机模式。</p> | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0 | LPS | <p>深睡眠下的低功耗。</p> <p>PDS=0 时, 与 PDS 位协同操作</p> <p>0: 在停机模式下电压调压器开启 1: 在停机模式下电压调压器处于低功耗模式</p> | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

4.4.3 电源控制状态寄存器 (PWR_CTRLSTS)

偏移地址: 0x04

复位值: 0x0000 0000(从待机模式唤醒时不被清零)



| 位域 | 名称 | 描述 |
|------|----------|--|
| 31:9 | Reserved | 保留, 必须保持复位值。 |
| 8 | WKUPEN | <p>使能 WKUP 引脚位</p> <p>0: WKUP 引脚为通用 I/O。WKUP 引脚上的事件不能将 CPU 从待机模式唤醒</p> <p>1: WKUP 引脚用于将 CPU 从待机模式唤醒, WKUP 引脚被强置为输入下拉的配置 (WKUP 引脚上的上升沿将系统从待机模式唤醒)</p> <p>注意: 在系统复位时清除这一位。</p> |
| 7:4 | Reserved | 保留, 必须保持复位值。 |
| 3 | VBATF | <p>VBAT 标志位。</p> <p>该位由硬件设置, 仅通过 POR 或者 PDR (电源上电复位/电源掉电复位) 清除或由 PWR_CTRL.CSBVBAT 位置位来设置。</p> <p>0: 设备未处于 VBAT 模式</p> <p>1: 设备已处于 VBAT 模式</p> |
| 2 | PVDO | <p>PVD 输出。</p> <p>当 PVD 被 PWR_CTRL.PVDEN 位使能后该位才有效</p> <p>0: VDD/VDDA 高于由 PWR_CTRL.PRS[2:0]选定的 PVD 阈值</p> <p>1: VDD/VDDA 低于由 PWR_CTRL.PRS[2:0]选定的 PVD 阈值</p> <p>注意: 在待机模式下 PVD 被停止。因此, 待机模式后或复位后, 直到设置 PWR_CTRL.PVDEN 位之前, 该位为 0。</p> |
| 1 | SBF | <p>待机标志位。</p> <p>该位由硬件设置, 并只能由 POR/PDR (上电/掉电复位) 或设置 PWR_CTRL.CSBVBAT 位清除。</p> <p>0: 系统不在待机模式</p> <p>1: 系统进入待机模式</p> |
| 0 | WKUPF | <p>唤醒标志位。</p> <p>该位由硬件设置, 并只能由 POR/PDR (上电/掉电复位) 或设置 PWR_CTRL.CWKUP 位清除。</p> <p>0: 没有发生唤醒事件</p> <p>1: 在 WKUP 引脚上发生唤醒事件或出现 RTC 闹钟事件。</p> <p>注: 当 WKUP 引脚已经是高电平时, 在 (通过设置 WKUPEN 位) 使能 WKUP 引脚时, 会检测到一个额外的事件。</p> |

4.4.4 电源控制寄存器 2 (PWR_CTRL2)

偏移地址: 0x08

复位值: 0x0000 06E4 (从待机模式唤醒时清除)

| | | | | | | | | | | | | | | | |
|----|----------|----|------------|-----------|---|---|--------------|---|----------|---|------------|---|-----------|---|----|
| 31 | Reserved | | | | | | | | | | | | | | 16 |
| 15 | Reserved | 11 | IWDG RSTEN | IWDG WPEN | 9 | 8 | LSITRIM[4:0] | 4 | TMP WPEN | 3 | SR2 STBRET | 2 | SR2 VBRET | 1 | 0 |
| | | | | | | | | | | | | | | | |

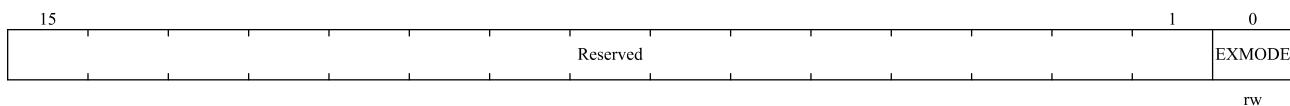
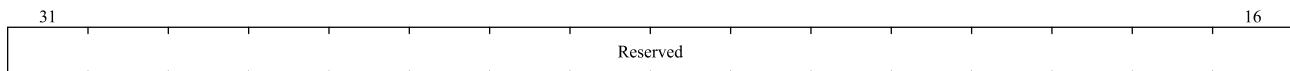
rw rw rw rw rw rw rw rw

| 位域 | 名称 | 描述 |
|-------|--------------|---|
| 31:11 | Reserved | 保留, 必须保持复位值。 |
| 10 | IWDGRSTEN | 独立看门狗复位使能。 0: 独立看门狗不能产生复位给 RCC 1: 独立看门狗能产生复位给 RCC |
| 9 | IWDGWPEN | 独立看门狗唤醒使能。 0: 独立看门狗唤醒禁止 1: 独立看门狗唤醒使能 |
| 8:4 | LSITRIM[4:0] | LSI 修正值 |
| 3 | TMPWPEN | TAMPER 唤醒使能。 0: 禁止 1: 开启 |
| 2 | SR2STBRET | R-SRAM 在待机模式下保持使能位。 0: 在待机模式下, R-SRAM 保持禁止 1: 在待机模式下, R-SRAM 保持开启 |
| 1 | SR2VBRET | R-SRAM 在 VBAT 模式下保持使能位。 0: 在 VBAT 模式下, R-SRAM 保持禁止 1: 在 VBAT 模式下, R-SRAM 保持开启 |
| 0 | STOP2S | STOP2 模式使能位。 0: 无使用 1: 开启 STOP2 模式 |

4.4.5 电源控制寄存器 3 (PWR_CTRL3)

偏移地址: 0x0C

复位值: 0x0000 5B70



| 位域 | 名称 | 描述 |
|------|----------|--------------------------------|
| 31:1 | Reserved | 保留, 必须保持复位值。 |
| 0 | EXMODE | 扩展模式控制位。 0: 普通模式 1: 扩展模式 |

5 备份寄存器 (BKP)

5.1 简介

备份存储器位于备份域里，电源 V_{DD} 关闭后由 V_{BAT} 供电维持。BKP 共有 42 个 16 位的寄存器，可用来存储并保护用户应用数据。这 84 个字节不受系统待机模式唤醒或系统复位的影响。

此外，BKP 控制寄存器具有入侵检测功能。

当系统发生复位，为保护备份域防止意外操作，所有的写操作都被禁止。如需使能，首先设置寄存器 `RCC_APB1PCLKEN.PWREN` 和 `RCC_APB1PCLKEN.BKPEN` 位打开电源和后备接口时钟，然后设置 `PWR_CTRL.DBKP` 位使能对备份寄存器的写操作。

5.2 主要特性

- 仅需 V_{BAT} 供电维持 84 字节数据备份寄存器
- 入侵源的有效电平可配
- 可实现入侵检测中断或事件的控制 (BKP_CTRLSTS)

5.3 功能描述

- 掉电备份
- 入侵检测

入侵检测事件会清除所有备份数据寄存器内容。配置 `BKP_CTRL.TP_EN` 位可使能 TAMPER 管脚的检测功能。需要注意的是，入侵检测信号是电平检测信号与 `BKP_CTRL.TP_EN` 位的逻辑与，因此入侵检测应该在 TAMPER 管脚使能前配置。

当检测到入侵事件时，`BKP_CTRLSTS.TEF` 位被置‘1’。如果入侵检测中断使能(`BKP_CTRLSTS.TPINT_EN` 位置‘1’)，会产生一个中断。

为避免软件在入侵检测管脚上仍然有入侵事件时对备份数据寄存器进行写操作，当清除入侵事件后，应关闭入侵检测引脚 TAMPER 的检测功能。备份数据寄存器操作结束后再对 `BKP_CTRL.TP_EN` 位置‘1’。

`BKP_CTRL.TP_ALEV` 用于设定入侵检测事件的有效电平。当 `BKP_CTRL.TP_ALEV=0` 或 `1`，如果 TAMPER 引脚在使能之前已经为高或低，尽管 TAMPER 引脚上没有上升或下降沿信号，仍会发送一个额外的入侵事件。因此，TAMPER 引脚应该在片外连接到正确的电平。

5.4 BKP 寄存器

5.4.1 BKP 寄存器总览

BKP 寄存器是 16 位的可寻址寄存器。

表 5-1 BKP 寄存器总览

| Offset | Register | 31 | 30 | 29 | 28 | 27 | 26 | 25 | 24 | 23 | 22 | 21 | 20 | 19 | 18 | 17 | 16 | 15 | 14 | 13 | 12 | 11 | 10 | 9 | 8 | 7 | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | 0 |
|--------|-------------|----------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|------------|----|-----------|----|----------|----|----|----|----|----|----------|----|---------|---|--------|---|--------|---|---|---|---|---|
| 000h | | Reserved | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 004h | BKP_DAT1 | Reserved | | | | | | | | | | DAT[15:0] | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Reset Value | | | | | | | | | | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | | | | |
| 008h | BKP_DAT2 | Reserved | | | | | | | | | | DAT[15:0] | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Reset Value | | | | | | | | | | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | | | | |
| 00Ch | BKP_DAT3 | Reserved | | | | | | | | | | DAT[15:0] | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Reset Value | | | | | | | | | | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | | | | |
| 010h | BKP_DAT4 | Reserved | | | | | | | | | | DAT[15:0] | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Reset Value | | | | | | | | | | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | | | | |
| 014h | BKP_DAT5 | Reserved | | | | | | | | | | DAT[15:0] | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Reset Value | | | | | | | | | | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | | | | |
| 018h | BKP_DAT6 | Reserved | | | | | | | | | | DAT[15:0] | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Reset Value | | | | | | | | | | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | | | | |
| 01Ch | BKP_DAT7 | Reserved | | | | | | | | | | DAT[15:0] | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Reset Value | | | | | | | | | | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | | | | |
| 020h | BKP_DAT8 | Reserved | | | | | | | | | | DAT[15:0] | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Reset Value | | | | | | | | | | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | | | | |
| 024h | BKP_DAT9 | Reserved | | | | | | | | | | DAT[15:0] | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Reset Value | | | | | | | | | | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | | | | |
| 028h | BKP_DAT10 | Reserved | | | | | | | | | | DAT[15:0] | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Reset Value | | | | | | | | | | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | | | | |
| 02Ch | | Reserved | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 030h | BKP_CTRL | Reserved | | | | | | | | | | TP_ALEV | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Reset Value | | | | | | | | | | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | | | | |
| 034h | BKP_CTRLSTS | Reserved | | | | | | | | | | TPINT_TINT | | TPINT_TEF | | Reserved | | | | | | TPINT_EN | | CLRTINT | | CLRITE | | CLRITE | | | | | |
| | Reset Value | | | | | | | | | | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | | | | |
| 038h | | Reserved | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 03Ch | | Reserved | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 040h | BKP_DAT11 | Reserved | | | | | | | | | | DAT[15:0] | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Reset Value | | | | | | | | | | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | | | | |
| 044h | BKP_DAT12 | Reserved | | | | | | | | | | DAT[15:0] | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Reset Value | | | | | | | | | | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | | | | |
| 048h | BKP_DAT13 | Reserved | | | | | | | | | | DAT[15:0] | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Reset Value | | | | | | | | | | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | | | | |
| 04Ch | BKP_DAT14 | Reserved | | | | | | | | | | DAT[15:0] | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Reset Value | | | | | | | | | | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | | | | |

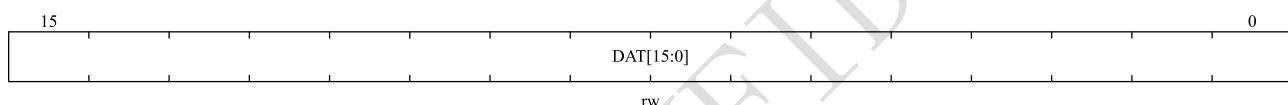
| Offset | Register | 31 | 30 | 29 | 28 | 27 | 26 | 25 | 24 | 23 | 22 | 21 | 20 | 19 | 18 | 17 | 16 | 15 | 14 | 13 | 12 | 11 | 10 | 9 | 8 | 7 | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | 0 |
|--------|-------------|----------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|-----------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 050h | BKP_DAT15 | Reserved | | | | | | | | | | | | DAT[15:0] | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Reset Value | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | | | | |
| 054h | BKP_DAT16 | Reserved | | | | | | | | | | | | DAT[15:0] | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Reset Value | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | | | | |
| 058h | BKP_DAT17 | Reserved | | | | | | | | | | | | DAT[15:0] | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Reset Value | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | | | | |
| 05Ch | BKP_DAT18 | Reserved | | | | | | | | | | | | DAT[15:0] | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Reset Value | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | | | | |
| 060h | BKP_DAT19 | Reserved | | | | | | | | | | | | DAT[15:0] | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Reset Value | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | | | | |
| 064h | BKP_DAT20 | Reserved | | | | | | | | | | | | DAT[15:0] | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Reset Value | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | | | | |
| 068h | BKP_DAT21 | Reserved | | | | | | | | | | | | DAT[15:0] | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Reset Value | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | | | | |
| 06Ch | BKP_DAT22 | Reserved | | | | | | | | | | | | DAT[15:0] | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Reset Value | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | | | | |
| 070h | BKP_DAT23 | Reserved | | | | | | | | | | | | DAT[15:0] | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Reset Value | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | | | | |
| 074h | BKP_DAT24 | Reserved | | | | | | | | | | | | DAT[15:0] | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Reset Value | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | | | | |
| 078h | BKP_DAT25 | Reserved | | | | | | | | | | | | DAT[15:0] | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Reset Value | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | | | | |
| 07Ch | BKP_DAT26 | Reserved | | | | | | | | | | | | DAT[15:0] | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Reset Value | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | | | | |
| 080h | BKP_DAT27 | Reserved | | | | | | | | | | | | DAT[15:0] | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Reset Value | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | | | | |
| 084h | BKP_DAT28 | Reserved | | | | | | | | | | | | DAT[15:0] | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Reset Value | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | | | | |
| 088h | BKP_DAT29 | Reserved | | | | | | | | | | | | DAT[15:0] | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Reset Value | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | | | | |
| 08Ch | BKP_DAT30 | Reserved | | | | | | | | | | | | DAT[15:0] | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Reset Value | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | | | | |
| 090h | BKP_DAT31 | Reserved | | | | | | | | | | | | DAT[15:0] | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Reset Value | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | | | | |
| 094h | BKP_DAT32 | Reserved | | | | | | | | | | | | DAT[15:0] | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Reset Value | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | | | | |
| 098h | BKP_DAT33 | Reserved | | | | | | | | | | | | DAT[15:0] | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Reset Value | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | | | | |
| 09Ch | BKP_DAT34 | Reserved | | | | | | | | | | | | DAT[15:0] | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Reset Value | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | | | | |
| 0A0h | BKP_DAT35 | Reserved | | | | | | | | | | | | DAT[15:0] | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Reset Value | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | | | | |
| 0A4h</ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--------|-------------|----------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|-----------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Offset | Register | 31 | 30 | 29 | 28 | 27 | 26 | 25 | 24 | 23 | 22 | 21 | 20 | 19 | 18 | 17 | 16 | 15 | 14 | 13 | 12 | 11 | 10 | 9 | 8 | 7 | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | 0 | |
| | Reset Value | | | | | | | | | | | | | | | | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0ACh | BKP_DAT38 | Reserved | | | | | | | | | | | DAT[15:0] | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Reset Value | | | | | | | | | | | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | | | | |
| 0B0h | BKP_DAT39 | Reserved | | | | | | | | | | | DAT[15:0] | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Reset Value | | | | | | | | | | | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | | | | |
| 0B4h | BKP_DAT40 | Reserved | | | | | | | | | | | DAT[15:0] | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Reset Value | | | | | | | | | | | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | | | | |
| 0B8h | BKP_DAT41 | Reserved | | | | | | | | | | | DAT[15:0] | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Reset Value | | | | | | | | | | | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | | | | |
| 0BCh | BKP_DAT42 | Reserved | | | | | | | | | | | DAT[15:0] | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Reset Value | | | | | | | | | | | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | | | | |

5.4.2 备份数据寄存器 x (BKP_DATx) (x = 1 … 42)

地址偏移: 0x04 到 0x28, 0x40 到 0xBC

复位值: 0x0000 0000

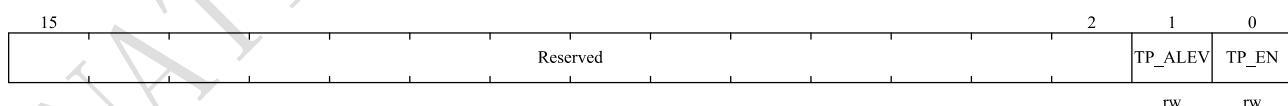


| 位域 | 名称 | 描述 |
|------|-----------|--|
| 15:0 | DAT[15:0] | 备份数据 这些位可以被用来写入用户数据。 注: BKP_DATx 寄存器不会被系统复位、电源复位、从待机模式唤醒所复位。它们可以由备份域复位来复位或(如果入侵检测引脚 TAMPER 功能被开启时)由入侵引脚事件复位。 |

5.4.3 备份控制寄存器 (BKP_CTRL)

偏移地址: 0x30

复位值: 0x0000 0000



| 位域 | 名称 | 描述 |
|------|----------|--|
| 15:2 | Reserved | 保留, 必须保持复位值。 |
| 1 | TP_ALEV | 入侵检测 TAMPER 引脚有效电平 0: 入侵检测 TAMPER 引脚上的高电平会清除所有数据备份寄存器 1: 入侵检测 TAMPER 引脚上的低电平会清除所有数据备份寄存器 |
| 0 | TP_EN | 启动入侵检测 TAMPER 引脚 0: 入侵检测 TAMPER 引脚作为通用 IO 口使用 1: 开启入侵检测引脚作为入侵检测使用 |

注：同时设置 *BKP_CTRL.TP_ALEV* 和 *BKP_CTRL.TP_EN* 位总是安全的。然而，同时清除两者会产生一个假的入侵事件。因此，推荐只在 *BKP_CTRL.TP_EN* 为 0 时才改变 *BKP_CTRL.TP_ALEV* 位的状态。

5.4.4 备份控制/状态寄存器 (BKP_CTRLSTS)

偏移地址：0x34

复位值：0x0000 0000

| | | | | | | | | | | | | | | | | |
|----|----------|----|-------|---|-----|---|---|---|----------|---|----------|---|---------|---|-------|---|
| 15 | Reserved | 10 | TINTF | 9 | TEF | 8 | | 7 | Reserved | 3 | TPINT_EN | 2 | CLRTINT | 1 | CLRTE | 0 |
| | | | | | | | r | | | | rw | | rw | | rw | |

| 位域 | 名称 | 描述 |
|-------|----------|--|
| 15:10 | Reserved | 保留，必须保持复位值。 |
| 9 | TINTF | <p>入侵中断标志</p> <p>当检测到有入侵事件且 TPINT_EN 位为 1 时，此位由硬件置 1。通过向 CLRTINT 位写 1 来清除此标志位（同时也清除了中断）。如果 TPINT_EN 位被清除，则此位也会被清除。</p> <p>0：无入侵中断 1：产生入侵中断</p> <p>注：仅当系统复位或由待机模式唤醒后才复位该位</p> |
| 8 | TEF | <p>入侵事件标志</p> <p>当检测到入侵事件时此位由硬件置 1。通过向 CLRTE 位写 1 可清除此标志位</p> <p>0：无入侵事件 1：检测到入侵事件</p> <p>注：入侵事件会复位所有的 <i>BKP_DATx</i> 寄存器。只要 TEF 为 1，所有的 <i>BKP_DATx</i> 寄存器就一直保持复位状态。当此位被置 1 时，若对 <i>BKP_DATx</i> 进行写操作，写入的值不会被保存。</p> |
| 7:3 | Reserved | 保留，必须保持复位值。 |
| 2 | TPINT_EN | <p>允许入侵 TAMPER 引脚中断</p> <p>0：禁止入侵检测中断 1：允许入侵检测中断（<i>BKP_CTRL</i> 寄存器的 TP_EN 位也必须被置 1）</p> <p>注 1：入侵中断无法将系统内核从低功耗模式唤醒。</p> <p>注 2：仅当系统复位或由待机模式唤醒后才复位该位。</p> |
| 1 | CLRTINT | <p>清除入侵检测中断</p> <p>此位只能写入，读出值为 0。</p> <p>0：无效 1：清除入侵检测中断和 TINTF 入侵检测中断标志</p> |
| 0 | CLRTE | <p>清除入侵检测事件</p> <p>此位只能写入，读出值为 0。</p> <p>0：无效 1：清除 TEF 入侵检测事件标志（并复位入侵检测器）。</p> |

6 复位和时钟控制(RCC)

6.1 复位控制单元

支持以下三种复位方式：

- 电源复位
- 系统复位
- 备份域复位

6.1.1 电源复位

在以下情况下会发生电源重置：

- 上电复位 (POR 复位)
- 掉电复位 (PDR 复位)
- 从 STANDBY 模式中返回

电源复位将复位除了备份区域外的所有寄存器。(见图 4-1 电源框图)。

图中复位源将最终作用于 NRST 引脚，并在复位过程中保持低电平。复位入口矢量被固定在地址 0x0000_0004。更多细节，参阅表 2-1 向量表。

6.1.2 系统复位

除了控制/状态寄存器(RCC_CTRLSTS)中的复位标志和备份域中的寄存器(参见图 4-1)，系统复位会将所有寄存器设置为其复位值。

发生以下事件之一时会产生系统复位：

- NRST 引脚上的低电平 (外部复位)
- 窗口看门狗计数终止 (WWDG 复位)
- 独立看门狗计数终止 (IWDG 复位)
- 软件复位 (SW 复位)
- 低功耗管理复位
- 电源复位
- MMU 保护复位
- RAM 奇偶校验出错复位
- 备份域 EMC 复位
- 保持域 EMC 复位
- BOR 复位

可通过查看RCC_CTRLSTS控制状态寄存器中的复位状态标志位识别复位事件来源。

6.1.2.1 软件复位

可以通过设置 Cortex™-M4 应用中断和复位控制寄存器中的 SYSRESETREQ 位来产生软件复位。有关详细信息, 请参阅 Cortex™-M4 技术参考手册。

6.1.2.2 低功耗管理复位

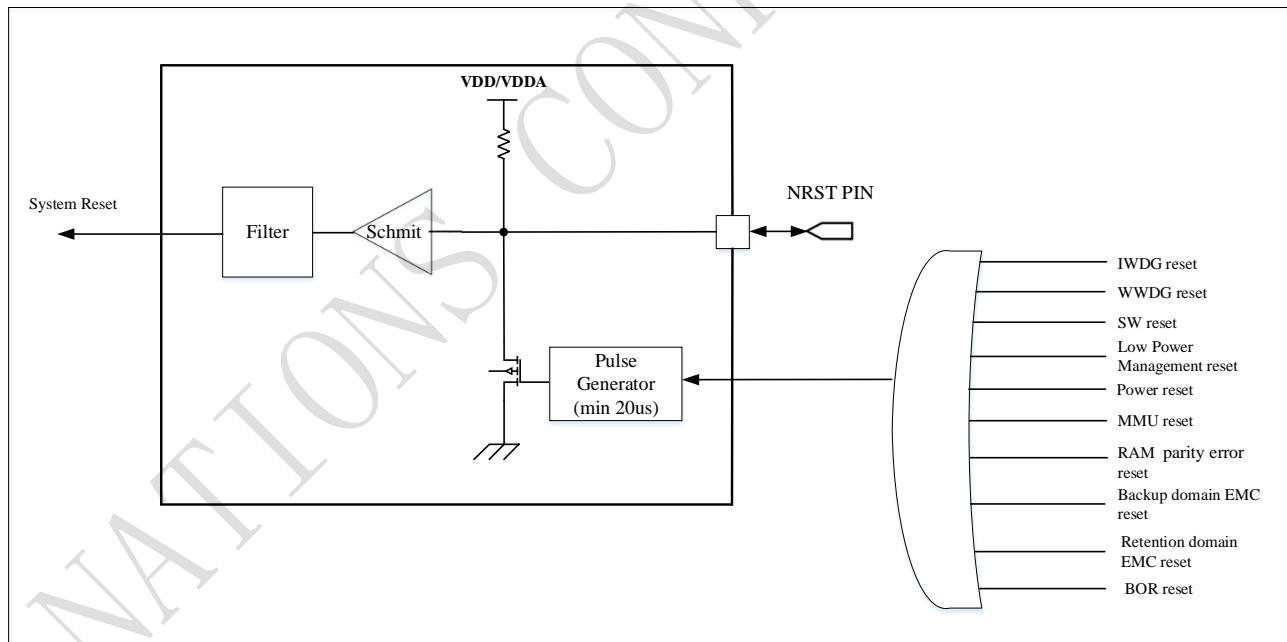
可以通过以下方式产生低功耗管理复位:

- 在进入 STANDBY 模式时产生低功耗管理复位: 通过将用户选项字节中的 nRST_STDBY 位置 1 将使能该复位。这时, 即使执行了进入 STANDBY 模式的过程, 系统将被复位而不是进入 STANDBY 模式。
- 在进入 STOP0/STOP2 模式时产生低功耗管理复位: 通过将用户选项字节中的 nRST_STOP 位置 1 将使能该复位。这时, 即使执行了进入 STOP0/STOP2 模式的过程, 系统将被复位而不是进入 STOP0/STOP2 模式。

提供给芯片的系统复位信号会在 NRST 引脚上输出。脉冲发生器保证每个复位源 (外部或内部) 的复位脉冲至少持续时间 20μs。对于外部复位, 当 NRST 引脚置为低电平时会产生复位脉冲。

下图展示了复位电路:

图 6-1 复位电路



6.1.3 备份域复位

备份区域拥有两个专门的复位, 它们只影响备份区域 (见图 4-1 电源框图)。

发生以下事件之一时会产生备份域复位:

- 软件复位: 备份域复位可由设置 RCC_BDCTRL.BDSFTRST 位产生。

- 在 V_{DD} 和 V_{BAT} 两者掉电的前提下, V_{DD} 或 V_{BAT} 上电才会引发备份区域复位。

6.2 时钟控制单元

可以使用三种不同的时钟源来驱动系统时钟(SYSCLK):

- HSI 振荡器时钟;
- HSE 振荡器时钟;
- PLL 时钟。

有两种二级时钟源:

- LSI: 40kHz 低速内部 RC, 可以用于驱动独立看门狗和通过程序选择驱动 RTC。RTC 用于从 STOP0/STOP2/STANDBY 模式下自动唤醒系统。
- LSE: 32.768kHz 低速外部晶体, 也可用来通过程序选择驱动 RTC (RTCCLK)。

每个时钟源可以在不被使用时独立打开或关闭, 以此优化系统功耗。

多个预分频器可用于配置 AHB、高速 APB(APB2)和低速 APB(APB1)的频率。AHB、APB2 和 APB1 的最大频率分别为 144MHz、72MHz 和 36MHz。SDIO 接口的时钟频率固定为 HCLK/2。

RCC 为 Cortex 系统定时器(SysTick)提供外部时钟: AHB 时钟(HCLK)8 分频。可以通过编程 SysTick 控制和状态寄存器来选择上述时钟或 Cortex 时钟(HCLK)来驱动 SysTick。ADC 时钟由 AHB 时钟或 PLL 时钟分频产生。

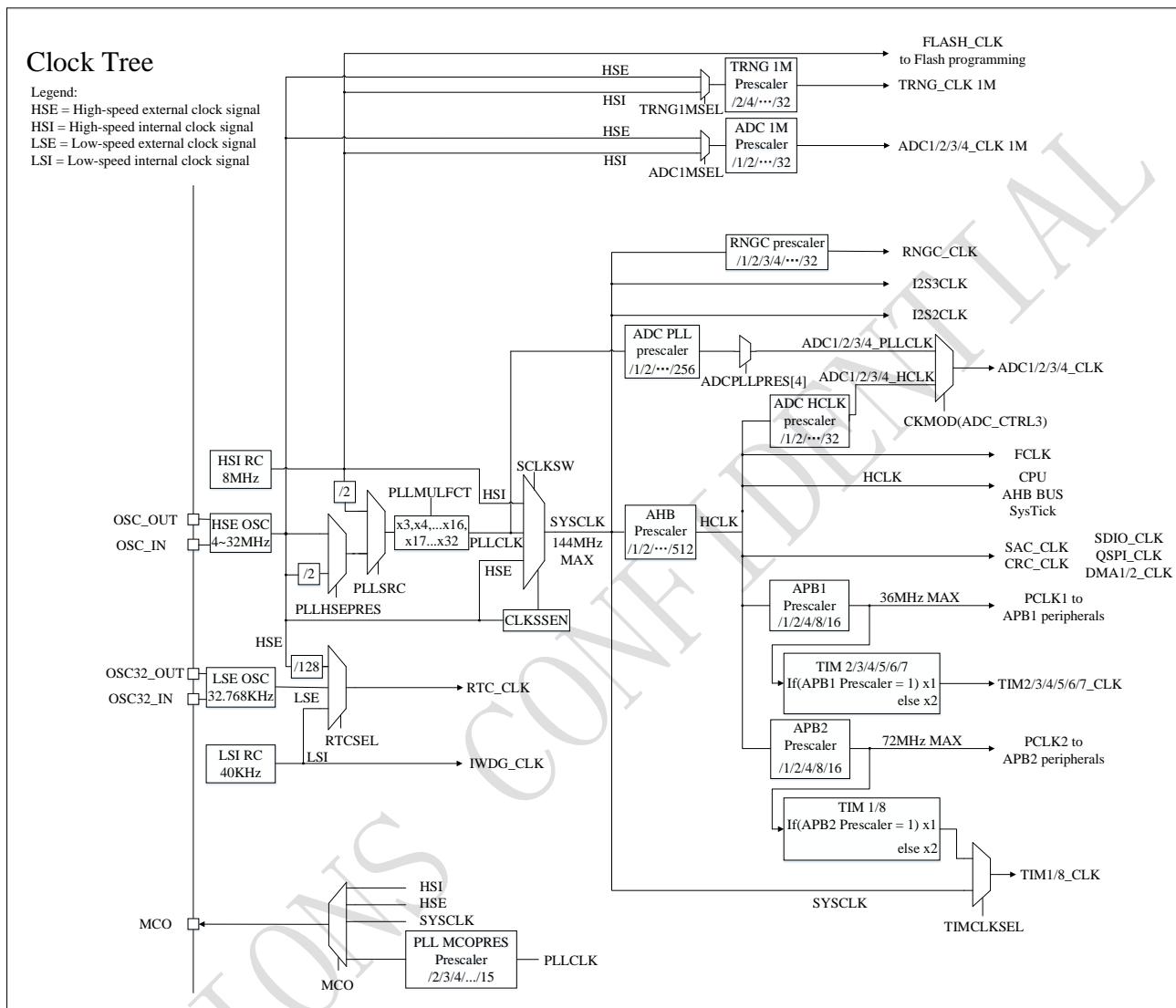
定时器的时钟频率由硬件自动设置, 分以下两种情况:

- 如果 APB 预分频为 1, 则定时器时钟频率与定时器所在的 APB 频率相同。
- 如果 APB 预分频不为 1, 则定时器时钟频率是定时器所在的 APB 频率的 2 倍。

FCLK 是 CortexTM-M4F 的自由运行时钟。有关更多详细信息, 请参阅 ARM CortexTM-M4 技术参考手册。

6.2.1 时钟树

图 6-2 时钟树



- 当 HSI 被用于作为 PLL 时钟的输入时，系统时钟能得到的最大频率是 128MHz。
- 有关内部和外部时钟源特性的详细信息，请参阅产品数据手册中的“电气特性”部分。

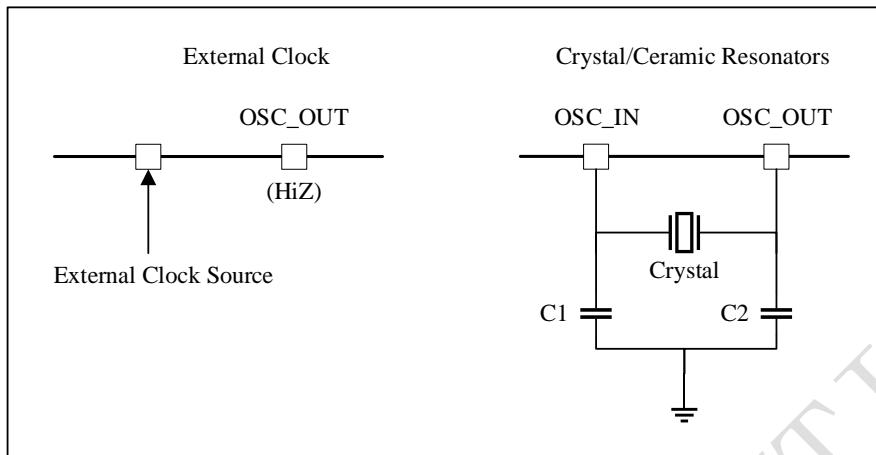
6.2.2 HSE 时钟

高速外部时钟信号 (HSE) 可以由以下两个时钟源产生：

- HSE外部晶体/陶瓷谐振器
- HSE用户外部时钟

为了减少时钟输出的失真和缩短启动稳定时间，晶体/陶瓷谐振器和负载电容器必须尽可能地靠近振荡器引脚。负载电容值必须根据所选择的振荡器来调整。

图 6-3 HSE/LSE 时钟源



6.2.2.1 外部时钟源(HSE 旁路模式)

在这种模式下，用户必须提供外部时钟源。它的频率最高可达 32MHz。用户可以通过设置 RCC_CTRL.HSEBP 和 RCC_CTRL.HSEEN 位来选择该模式。外部时钟信号（50% 占空比的方波、正弦波或三角波）必须连接到 OSC_IN 引脚，而 OSC_OUT 引脚必须悬空(Hi-Z)。见图 6-3。

6.2.2.2 晶体/陶瓷谐振器(HSE 晶体模式)

4~32MHz 外部振荡器具有为系统产生更准确的主时钟的优势。相关的硬件配置如图 6-3 所示。更多详细信息，请参阅数据手册的电气特性部分。

RCC_CTRL.HSERDF 位指示高速外部振荡器是否稳定。在启动时，直到该位被硬件设置，时钟才会被释放。如果在时钟中断寄存器(RCC_CLKINT)中使能对应位，则可以产生中断。

通过设置 RCC_CTRL.HSEEN 位可以打开和关闭 HSE 时钟。

6.2.3 HSI 时钟

HSI（高速内部）时钟信号由内部 8MHz RC 振荡器产生，可直接作为系统时钟或 2 分频后作为 PLL 输入。HSI RC 振荡器无需任何外部设备即可提供时钟源。它启动时间比 HSE 晶体振荡器更短。然而，即使经过校准它的频率精度仍较差。

每个芯片的 HSI 时钟频率在出厂前已经被校准到 1% (25°C)。系统复位后，出厂校准值会加载到 RCC_CTRL.HSICAL[7:0]里。

由于用户的应用场景会受到电压或温度变化的影响，这也会影晌 RC 振荡器的频率精度。用户可以使用 RCC_CTRL.HSITRIM[4:0]位调整 HSI 频率。

RCC_CTRL.HSIRDF 位指示内部 RC 振荡器是否稳定。在启动时，直到该位被硬件设置，HSI 输出时钟才会被释放。可以通过设置 RCC_CTRL.HSIEN 位打开和关闭 HSI 时钟。

如果 HSE 晶体振荡器失效，HSI 时钟会被作为备用时钟源。参考 6.2.8 节时钟安全系统。

6.2.4 PLL 时钟

内部 PLL 可用于倍频 HSI 或 HSE 时钟频率，参考图 6-2 时钟树。必须在使能 PLL 之前完成配置（选择 PLL 输入时钟（HSI/HSE 及分频）和配置倍频因子）。一旦 PLL 被使能，这些参数就不能改变。通过 RCC_CTRL

和 RCC_CFG 寄存器中的控制位来配置 PLL。

如果 PLL 中断在时钟中断寄存器里被允许，当 PLL 准备就绪时，可产生中断申请。

6.2.5 LSE 时钟

LSE 晶体是一个 32.768KHz 的低速外部晶体或陶瓷谐振器。它为实时时钟或者其他定时功能提供一个低功耗且精确的时钟源。

LSE 时钟通过 RCC_BDCTRL.LSEEN 位启动和关闭。

RCC_BDCTRL.LSERD 位指示 LSE 时钟是否稳定。在启动阶段，直到这个位被硬件置 1 后，LSE 时钟信号才被释放出来。如果在时钟中断寄存器里被允许，可产生中断请求。

6.2.5.1 LSE 外部时钟源(LSE 旁路)

在这种模式下，可以提供频率高达 1MHz 的外部时钟源。用户可以通过设置 RCC_BDCTRL.LSEBP 和 RCC_BDCTRL.LSEEN 位来选择该模式。占空比为 50% 的外部时钟信号（方波、正弦波或三角波）必须连接到 OSC32_IN 引脚，而 OSC32_OUT 引脚必须悬空（Hi-Z）。

6.2.6 LSI 时钟

LSI RC 可以在 STOP0/STOP2 和 STANDBY 模式下为 IWDG 和 AWU 提供时钟。LSI 时钟频率约为 40kHz。进一步信息请参考数据手册中有关电气特性部分。

通过 RCC_CTRLSTS.LSIEN 位打开或关闭 LSI 时钟。

RCC_CTRLSTS.LSIRD 位指示 LSI 时钟是否稳定。在启动时，直到该位被硬件设置，时钟才会被释放。如果在时钟中断寄存器(RCC_CLKINT)中使能对应位，则可以产生中断。

6.2.6.1 LSI 校准

可以通过校准补偿内部低速振荡器 LSI 频率误差，以获得更高精度的 RTC 时基和 IWDG 超时（当这些外设由 LSI 提供时钟时）。

校准可以通过使用 TIM5 的时钟(TIM5_CLK)测量 LSI 时钟频率来实现。测量由 HSE 的准确性保证，软件可以通过调整 RTC 的 20 位预分频器来获得准确的 RTC 时钟基准，以及通过计算获得准确的 IWDG 超时时间。

LSI 校准步骤如下：

1. 打开 TIM5，设置通道 4 为输入捕获模式；
2. 设置 AFIO_RMP_CFG.TIM5CH4_RMP 位为 1，将 LSI 内部连接到 TIM5 的通道 4；
3. 通过 TIM5 捕获/比较 4 事件或中断测量 LSI 时钟频率；
4. 根据测量结果和所需的 RTC 时基和独立的看门狗超时，设置 20 位预分频器。

6.2.7 系统时钟(SYSCLK)选择

系统复位后，HSI 振荡器被选为系统时钟。当时钟源被直接或通过 PLL 间接作为系统时钟时，它将不能被停止。

只有当目标时钟源准备就绪了（经过启动稳定阶段的延迟或 PLL 稳定），从一个时钟源到另一个时钟源的切换才会发生。在被选择时钟源没有就绪时，系统时钟的切换不会发生，直至目标时钟源就绪，才发生切换。在时钟控制寄存器 (RCC_CTRL) 里的状态位指示哪个时钟已经准备好了，哪个时钟目前被用作系统时钟。

6.2.8 时钟安全系统(CLKSS)

时钟安全系统可以通过软件通过设置 RCC_CTRL.CLKSSEN 位来激活。一旦被激活，时钟检测器在 HSE 振荡器的启动延时后被启用，并在 HSE 时钟关闭时被禁用。

如果 HSE 时钟出现故障，HSE 振荡器将自动关闭，时钟失效事件将发送到高级定时器 (TIM1 和 TIM8) 的刹车输入端，并产生时钟安全系统中断 CLKSSIF，允许软件执行营救措施。CLKSSIF 中断连接到 Cortex™-M4F 的 NMI (不可屏蔽) 中断。

一旦 CLKSS 被激活，并且 HSE 时钟出现故障，CLKSS 中断就产生，并且 NMI 也自动产生。NMI 将连续执行，直到 CLKSSIF 中断挂起位被清除。因此，需要通过在 NMI 处理程序中设置 RCC_CLKINT.CLKSSICLR 位来清除中断。

如果 HSE 振荡器直接或间接用作系统时钟（间接的意思是：HSE 用作 PLL 输入时钟，PLL 时钟用作系统时钟），时钟失效会导致系统时钟切换到 HSI 振荡器，并且外部 HSE 振荡器被禁用。如果选择 HSE 时钟（分频或不分频）作为 PLL 输入时钟，那么当 HSE 时钟故障时，PLL 将被关闭。

6.2.9 RTC 时钟

通过对 RCC_BDCTRL.RTCSEL[1:0]位进行编程，RTCCLK 时钟源可以是 HSE/128、LSE 或 LSI 时钟。除非备份域复位，否则无法修改此选择。

LSE 时钟在备份域里，但 HSE 和 LSI 时钟不是。因此：

- 如果 LSE 被选为 RTC 时钟：
 - ◆ 只要 V_{BAT} 维持供电，尽管 V_{DD} 供电被切断，RTC 仍继续工作。
- 如果 LSI 被选为自动唤醒单元 (AWU) 时钟：
 - ◆ 如果 V_{DD} 供电被切断，AWU 状态不能被保证。有关 LSI 校准，详见 6.2.6 节 LSI 时钟。
- 如果 HSE 时钟 128 分频后作为 RTC 时钟：
 - ◆ 如果 V_{DD} 供电被切断或内部电压调压器被关闭 (1.8V 域的供电被切断)，则 RTC 状态不确定。
 - ◆ 必须设置电源控制寄存器 PWR_CTRL.DBKP 位（见 4.4.2 节）（取消备电域的写保护）为 1。

6.2.10 看门狗时钟

如果 IWDG 由硬件选项或软件访问启动，LSI 振荡器将被强制开启并且不能被禁用。LSI 振荡器稳定后，时钟被提供给 IWDG。

6.2.11 时钟输出(MCO)

微控制器时钟输出(MCO)功能允许将时钟信号输出到外部 MCO 引脚。

对应的 GPIO 口寄存器必须配置为对应的功能。可以选择以下 4 个时钟信号作为 MCO 时钟：

- SYSCLK
 - HSI
 - HSE
 - PLL 时钟分频

时钟选择由 RCC_CFG.MCO[2:0]位控制。

6.3 RCC 寄存器

RCC 寄存器可通过 AHB 总线访问，寄存器说明如下。

6.3.1 寄存器总览

表 6-1 RCC 寄存器总览

| Offset | Register | | | | |
|--------|----------------|--------------|--------------|-------------|--------|
| 0000h | RCC_CTRL | | 31 | 30 | 29 |
| | Reset Value | Reserved | 28 | 27 | 26 |
| 004h | RCC_CFG | MCOPRES[3:0] | PLL.MULFC[4] | PLLRDF | PLL.EN |
| | Reset Value | 0 0 1 0 | 0 0 0 0 | 0 0 | 24 |
| 008h | RCC_CLKINT | Reserved | Reserved | Reserved | 23 |
| | Reset Value | 0 0 0 0 | 0 0 0 0 | 0 0 | 22 |
| 00Ch | RCC_APB2PRST | Reserved | Reserved | Reserved | 21 |
| 010h | RCC_APB1PRST | Reserved | Reserved | PLL.RD[3:0] | 20 |
| | Reset Value | 0 0 0 0 | 0 0 0 0 | 0 0 | 19 |
| 014h | RCC_AHBCLKEN | Reserved | Reserved | CLK.SSEN | 18 |
| | Reset Value | 0 0 0 0 | 0 0 0 0 | 0 0 | 17 |
| 018h | RCC_APB2PCLKEN | Reserved | Reserved | HSERDF | 16 |
| | Reset Value | 0 0 0 0 | 0 0 0 0 | 0 0 | 15 |
| 01Ch | RCC_APB1PCLKEN | OPAMPEN | OPAMPEN | HS.EEN | 14 |
| | Reset Value | 0 0 | 0 0 | 0 0 | 13 |
| | | Reserved | Reserved | HSICAL[7:0] | 12 |
| | | Reserved | Reserved | HSICAL[7:0] | 11 |
| | | Reserved | Reserved | HSICAL[7:0] | 10 |
| | | Reserved | Reserved | HSICAL[7:0] | 9 |
| | | Reserved | Reserved | HSICAL[7:0] | 8 |
| | | Reserved | Reserved | HSICAL[7:0] | 7 |
| | | Reserved | Reserved | HSICAL[7:0] | 6 |
| | | Reserved | Reserved | HSICAL[7:0] | 5 |
| | | Reserved | Reserved | HSICAL[7:0] | 4 |
| | | Reserved | Reserved | HSICAL[7:0] | 3 |
| | | Reserved | Reserved | HSICAL[7:0] | 2 |
| | | Reserved | Reserved | HSICAL[7:0] | 1 |
| | | Reserved | Reserved | HSICAL[7:0] | 0 |

| Offset | Register | 31 | 30 | 29 | 28 | 27 | 26 | 25 | 24 | 23 | 22 | 21 | 20 | 19 | 18 | 17 | 16 | |
|--------|-------------|----------|-----------|---------------|---------|---------|----------|----------|-----------|----------|-----------------|---------|---------|---------|-------------------|----------------|---------|---|
| 020h | RCC_BDCTRL | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Reset Value | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 024h | RCC_CTRLSTS | LPWRSTF | WWDRSTF | IWDGRSTF | SFTRSTF | PORRSTF | PINRSTF | MMURSTF | RMRSTF | RAMRSTF | Reserved | BKPEMCF | RETEMCF | RTTENCF | RTCSSEL[1:0] | LSFBP | LSIRD | |
| | Reset Value | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | |
| 028h | RCC_AHBPRT | | | | | | | | | | | | | | | | LSERDIF | |
| | Reset Value | | | | | | | | | | | | | | | | LSIEN | |
| 02Ch | RCC_CFG2 | Reserved | TIMCLKSEL | RNGCPRES[4:0] | | | Reserved | | | | ADC1MPRES[4:0] | | | | ADCPPLLPPRES[4:0] | | | |
| | Reset Value | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| 030h | RCC_CFG3 | Reserved | | | | | | TRNGIMEN | TRNGIMSEL | Reserved | TRNG1MPRES[4:0] | | | | ADCIMSEL | ADCHPPRES[3:0] | | |
| | Reset Value | | | | | | | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |

6.3.2 时钟控制寄存器(RCC_CTRL)

偏移地址: 0x00

复位值: 0x0000 0083

| | | | | | | | | | | |
|----|-------------|---------|--------|----|--------------|----------|----------|---------|--------|----|
| 31 | Reserved | 26 | 25 | 24 | 23 | 20 | 19 | 18 | 17 | 16 |
| | | PLL RDF | PLL EN | | Reserved | CLK SSEN | HSE BP | HSE RD | HSE EN | |
| 15 | r | rw | 8 | 7 | | rw | rw | r | rw | |
| | HSICAL[7:0] | | | | HSITRIM[4:0] | | Reserved | HSIR DF | HSIEN | |
| | r | | | | rw | | r | rw | | |

| 位域 | 名称 | 描述 |
|-------|----------|--|
| 31:26 | Reserved | 保留, 必须保持复位值 |
| 25 | PLL RDF | PLL 时钟就绪标志位 PLL 时钟就绪后由硬件置位。 0:PLL 未就绪 1:PLL 已就绪 |
| 24 | PLL EN | PLL 使能位 由软件置位和清零。进入 STOP0/STOP2/STANDBY 模式时, 由硬件清零。当 PLL 用作系统时钟时, 该位不能清零。 当 HSI/HSE 作为 PLL 的时钟源时, PLL 不会被打开直到 HSI/HSE 时钟就绪 0: 禁用 PLL 1: 使能 PLL |
| 23:20 | Reserved | 保留, 必须保持复位值 |
| 19 | CLK SSEN | 时钟安全系统使能位 由软件置位和清零。 |

| 位域 | 名称 | 描述 |
|------|--------------|--|
| | | 0: 禁用时钟检测器 1: 如果 HSE 振荡器就绪, 则使能时钟检测器 |
| 18 | HSEBP | 外部高速时钟旁路使能位 由软件置位和清零。该位只能在 HSE 振荡器被禁止时写入。 0: 禁止 HSE 振荡器的旁路功能 1: 使能 HSE 振荡器的旁路功能 |
| 17 | HSERDF | 外部高速时钟就绪标志位 HSE 就绪后由硬件置位。该位在 HSEEN 位清零后需要 6 个 HSE 时钟周期来清零。 0: HSE 未就绪 1: HSE 就绪 |
| 16 | HSEEN | 外部高速时钟使能位 由软件置位和清零。进入 STOP0/STOP2 或 STANDBY 模式时, 由硬件清零。 当 HSE 直接或间接用作系统时钟时, 该位不能被清零。 0: 禁止 HSE 振荡器 1: 使能 HSE 振荡器 |
| 15:8 | HSICAL[7:0] | 内部高速时钟校准值 这些位在上电启动时自动初始化。 |
| 7:3 | HSITRIM[4:0] | 内部高速时钟修正值 由软件写入。这些位的值将被添加到 HSICAL[7:0]位, 以形成校准内部 HSI RC 振荡器频率的最终值。两个连续 HSICAL 步进之间的微调步进约为 40kHz, 默认值为 16, 可将 HSI 调整为 $8\text{MHz} \pm 1\%$ 。 |
| 2 | Reserved | 保留, 必须保持复位值 |
| 1 | HSIRDF | 内部高速时钟就绪标志位 HSI 就绪后由硬件置位。HSIEN 位清零后, 该位需要 6 个内部 8MHz 振荡器时钟周期才能清零。 0: HSI 未就绪 1: HSI 就绪 |
| 0 | HSIEN | 内部高速时钟使能 由软件置位和清零。当 HSI 用作系统时钟时, 该位不能清零。当从 STOP0/STOP2 或 STANDBY 模式返回或发生 HSE 故障时, 由硬件置位以启用 HSI 振荡器。如果 HSI 直接或间接用作系统时钟, 则该位不能复位。 0: 禁止 HSI 振荡器 1: 使能 HSI 振荡器 |

6.3.3 时钟配置寄存器(RCC_CFG)

偏移地址: 0x04

复位值: 0x2000 0000

| | | | | | | | | | | |
|----------|---------------|--------------|---------------|----------|---------------|----|----------------|-------------|--------|----|
| 31 | 28 | 27 | 26 | 24 | 23 | 22 | 21 | 18 | 17 | 16 |
| | MCOPRES[3:0] | PLLMULFCT[4] | | MCO[2:0] | Reserved | | PLLMULFCT[3:0] | PLLHSE PRES | PLLSRC | |
| 15 | 14 | rw | 13 | rw | 11 | 10 | rw | 8 | 7 | rw |
| Reserved | APB2PRES[2:0] | | APB1PRES[2:0] | | AHPBPRES[3:0] | | SCLKSTS[1:0] | SCLKSW[1:0] | | |
| | rw | | rw | | rw | | rw | r | rw | rw |

| 位域 | 名称 | 描述 |
|-------|----------------|--|
| 31:28 | MCOPRES[3:0] | <p>MCO 预分频。</p> <p>软件设置或清零。</p> <p>0010: 由 PLL 时钟 2 分频作为 MCO 时钟 0011: 由 PLL 时钟 3 分频作为 MCO 时钟 0100: 由 PLL 时钟 4 分频作为 MCO 时钟 0101: 由 PLL 时钟 5 分频作为 MCO 时钟 0110: 由 PLL 时钟 6 分频作为 MCO 时钟 0111: 由 PLL 时钟 7 分频作为 MCO 时钟 1000: 由 PLL 时钟 8 分频作为 MCO 时钟 1001: 由 PLL 时钟 9 分频作为 MCO 时钟 1010: 由 PLL 时钟 10 分频作为 MCO 时钟 1011: 由 PLL 时钟 11 分频作为 MCO 时钟 1100: 由 PLL 时钟 12 分频作为 MCO 时钟 1101: 由 PLL 时钟 13 分频作为 MCO 时钟 1110: 由 PLL 时钟 14 分频作为 MCO 时钟 1111: 由 PLL 时钟 15 分频作为 MCO 时钟 其它值: 不允许设置 </p> |
| 27 | PLLMULFCT[4] | 该位与位[21:18]组合形成 PLL 倍频因子。描述请参考 PLLMULFCT[3:0]。 |
| 26:24 | MCO[2:0] | <p>微控制器时钟输出选择</p> <p>由软件置位和清零。</p> <p>0xx: 无时钟输出 100: 选择系统时钟 (SYSCLK) 输出 101: 选择内部高速时钟 (HSI) 输出 110: 选择外部高速时钟 (HSE) 输出 111: 选择 PLL 分频后的输出</p> <p>注意: 该时钟输出在启动和切换 MCO 时钟源时可能会被截断。 在系统时钟作为输出至 MCO 引脚时, 应保证输出时钟频率不超过 50MHz (I/O 口最高频率)。</p> |
| 23:22 | Reserved | 保留, 必须保持复位值 |
| 21:18 | PLLMULFCT[3:0] | <p>PLL 倍频系数(包括 bit27)</p> <p>倍频系数由软件写入。这些位只能在 PLL 被禁用时写入。PLL 输出频率不得超过 144MHz。</p> <p>00000:PLL 输入时钟 ×2 00001:PLL 输入时钟 ×3 00010:PLL 输入时钟 ×4</p> |

| 位域 | 名称 | 描述 |
|-------|---------------|--|
| | | 00011:PLL 输入时钟×5 00100:PLL 输入时钟×6 00101:PLL 输入时钟×7 00110:PLL 输入时钟×8 00111:PLL 输入时钟×9 01000:PLL 输入时钟×10 01001:PLL 输入时钟×11 01010:PLL 输入时钟×12 01011:PLL 输入时钟×13 01100:PLL 输入时钟×14 01101:PLL 输入时钟×15 01110:PLL 输入时钟×16 01111:PLL 输入时钟×16 10000:PLL 输入时钟×17 10001:PLL 输入时钟×18 10010:PLL 输入时钟×19 10011:PLL 输入时钟×20 10100:PLL 输入时钟×21 10101:PLL 输入时钟×22 10110:PLL 输入时钟×23 10111:PLL 输入时钟×24 11000:PLL 输入时钟×25 11001:PLL 输入时钟×26 11010:PLL 输入时钟×27 11011:PLL 输入时钟×28 11100:PLL 输入时钟×29 11101:PLL 输入时钟×30 11110:PLL 输入时钟×31 11111:PLL 输入时钟×32 |
| 17 | PLLHSEPRE | PLL 输入的 HSE 预分频器 由软件置位和清零，配置进入 PLL 之前 HSE 的分频。该位只能在 PLL 禁用时写入。 0: HSE 时钟不分频 1: HSE 时钟 2 分频 |
| 16 | PLLSRC | PLL 时钟源 由软件置位和清零，配置选择 PLL 时钟源。该位只能在 PLL 禁用时写入。 0: 选择 2 分频后的 HSI 时钟作为 PLL 输入时钟 1: 选择 HSE 时钟作为 PLL 输入时钟 |
| 15:14 | Reserved | 保留，必须保持复位值 |
| 13:11 | APB2PRES[2:0] | APB 高速(APB2)预分频器 由软件置位和清零，配置 APB2 时钟(PCLK2)的分频系数。需确保 PCLK2 不超过 72MHz。 |

| 位域 | 名称 | 描述 |
|------|---------------|--|
| | | 0xx:HCLK 不分频 100:HCLK 2 分频 101:HCLK 4 分频 110:HCLK 8 分频 111:HCLK 16 分频 |
| 10:8 | APB1PRES[2:0] | APB 低速(APB1)预分频器 由软件置位和清零, 配置 APB1 时钟(PCLK1)的分频系数。需确保 PCLK1 不超过 36MHz。 0xx:HCLK 不分频 100:HCLK 2 分频 101:HCLK 4 分频 110:HCLK 8 分频 111:HCLK 16 分频 |
| 7:4 | AHBPRES[3:0] | AHB 预分频器 由软件置位和清零, 配置 AHB 时钟(HCLK)的分频系数。 0xxx:SYSCLK 不分频 1000:SYSCLK 2 分频 1001:SYSCLK 4 分频 1010:SYSCLK 8 分频 1011:SYSCLK 16 分频 1100:SYSCLK 64 分频 1101:SYSCLK 128 分频 1110:SYSCLK 256 分频 1111:SYSCLK 512 分频 |
| 3:2 | SCLKSTS[1:0] | 系统时钟切换状态 由硬件置位和清零以指示使用哪个时钟源作为系统时钟 00: 系统时钟来自 HSI 01: 系统时钟来自 HSE 10: 系统时钟来自 PLL 输出 11: 不可用 |
| 1:0 | SCLKSW[1:0] | 系统时钟切换 由软件置位和清零以选择系统时钟源。 当退出 STOP0/STOP2 或 STANDBY 模式或 HSE 振荡器发生故障 (RCC_CTRL.CLKSSEN 启用) 时, 由硬件设置以强制选择 HSI。 00: 选择 HSI 作为系统时钟 01: 选择 HSE 作为系统时钟 10: 选择 PLL 输出作为系统时钟 11: 不可用 |

6.3.4 时钟中断寄存器(RCC_CLKINT)

偏移地址: 0x08

复位值: 0x0000 0000

| | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|----------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------|----------|----------|---------------|----------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----|----|
| 31 | Reserved | | | | | | | | 24 | 23 | 22 | 21 | 20 | 19 | 18 | 17 | 16 |
| | | | | | | | | | CLKSSI CLR | Reserved | PLL RDI CLR | HSE RDI CLR | HSI RDI CLR | LSERD I CLR | LSIRD I CLR | | |
| 15 | 13 | 12 | 11 | 10 | 9 | 8 | 7 | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | 0 | | | |
| Reserved | PLL RDI EN | HSE RDI EN | HSI RDI EN | LSERD I EN | LSIRD I EN | CLKSSIF | Reserved | PLL RDIF | HSE RDIF | HSI RDIF | LSERD I IF | LSIRD I IF | | | | | |

rw rw rw rw rw r r r r r r r r r r r

| 位域 | 名称 | 描述 |
|-------|-------------|---|
| 31:24 | Reserved | 保留, 必须保持复位值 |
| 23 | CLKSSI CLR | 时钟安全系统中断清除 由软件置位以清除 CLKSSIF 标志。 0: 无效果 1: 清除 CLKSSIF 标志 |
| 22:21 | Reserved | 保留, 必须保持复位值 |
| 20 | PLL RDI CLR | PLL 就绪中断清除 由软件置位以清除 PLL RDIF 标志。 0: 无效果 1: 清除 PLL RDIF 标志 |
| 19 | HSE RDI CLR | HSE 就绪中断清除 由软件置位以清除 HSE RDIF 标志。 0: 无效果 1: 清除 HSE RDIF 标志 |
| 18 | HSI RDI CLR | HSI 就绪中断清除 由软件置位以清除 HSI RDIF 标志。 0: 无效果 1: 清除 HSI RDIF 标志 |
| 17 | LSERD I CLR | LSE 就绪中断清除 由软件置位以清除 LSE RDIF 标志。 0: 无效果 1: 清除 LSE RDIF 标志 |
| 16 | LSIRD I CLR | LSI 就绪中断清除 由软件置位以清除 LSI RDIF 标志。 0: 无效果 1: 清除 LSI RDIF 标志 |
| 15:13 | Reserved | 保留, 必须保持复位值 |
| 12 | PLL RDI EN | PLL 就绪中断使能 由软件置位和清零以启用和禁用 PLL 就绪中断 0: 禁用 PLL 就绪中断 1: 使能 PLL 就绪中断 |

| 位域 | 名称 | 描述 |
|-----|----------|--|
| 11 | HSERDIEN | HSE 就绪中断使能 由软件置位和清零以启用和禁用 HSE 就绪中断。 0: 禁用 HSE 就绪中断 1: 使能 HSE 就绪中断 |
| 10 | HSIRDIEN | HSI 就绪中断使能 由软件置位和清零以启用和禁用 HSI 就绪中断。 0: 禁止 HSI 就绪中断 1: 使能 HSI 就绪中断 |
| 9 | LSERDIEN | LSE 就绪中断使能 由软件置位和清零以启用和禁用 LSE 就绪中断。 0: 禁用 LSE 就绪中断 1: 使能 LSE 就绪中断 |
| 8 | LSIRDIEN | LSI 就绪中断使能 由软件置位和清零以启用和禁用 LSI 就绪中断。 0: 禁用 LSI 就绪中断 1: 使能 LSI 就绪中断 |
| 7 | CLKSSIF | 时钟安全系统中断标志 当在外部 HSE 振荡器中检测到故障时由硬件置位。 0: 无 HSE 时钟故障引起的时钟安全系统中断 1: HSE 时钟故障引起的时钟安全系统中断 |
| 6:5 | Reserved | 保留, 必须保持复位值 |
| 4 | PLL RDIF | PLL 就绪中断标志 当 PLLRDIEN 置位且 PLL 时钟准备好时, 该位由硬件置位。 该位由软件通过设置 PLLRDICLRL 位来清除。 0: 无由 PLL 锁定引起的时钟就绪中断 1: 由 PLL 锁定引起的时钟就绪中断 |
| 3 | HSERDIF | HSE 就绪中断标志 当 HSERDIEN 置位且 HSE 时钟准备好时由硬件置位。 该位由软件通过设置 HSERDICLRL 位来清除。 0: 无由 HSE 振荡器引起的时钟就绪中断 1: HSE 振荡器引起的时钟就绪中断 |
| 2 | HSIRDIF | HSI 就绪中断标志 当 HSIRDIEN 置位且 HSI 时钟准备好时由硬件置位。 该位由软件通过设置 HSERDICLRL 位来清除。 0: 无由 HSI 振荡器引起的时钟就绪中断 1: 由 HSI 振荡器引起的时钟就绪中断 |
| 1 | LSERDIF | LSE 就绪中断标志 当 LSERDIEN 置位且 LSE 时钟准备好时由硬件置位。 该位由软件通过设置 LSERDICLRL 位来清除。 0: 无由 LSE 振荡器引起的时钟就绪中断 1: 由 LSE 振荡器引起的时钟就绪中断 |

| 位域 | 名称 | 描述 |
|----|---------|---|
| 0 | LSIRDIF | LSI 就绪中断标志 当 LSIRDEN 置位且 LSI 时钟就绪时由硬件置位。 该位由软件通过设置 LSIRDICLR 位来清除。 0: 无由 LSI 振荡器引起的时钟就绪中断 1: LSI 振荡器引起的时钟就绪中断 |

6.3.5 APB2 外设复位寄存器(RCC_APB2PRST)

偏移地址: 0x0c

复位值: 0x0000 0000

| 31 | Reserved | | | | | | | | | | | | 21 | 20 | 19 | 18 | 17 | 16 |
|----------|-----------|---------|---------|---------|----------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|----------|---------|----|----|----|----|
| 15 | 14 | 13 | 12 | 11 | 10 | 9 | 8 | 7 | 6 | 5 | rw | rw | rw | rw | rw | rw | rw | |
| Reserved | USART1RST | TIM8RST | SPI1RST | TIM1RST | Reserved | IOPGRST | IOPFRST | IOPERST | IOPDRST | IOPCRST | IOPBRST | IOPARST | Reserved | AFIORST | | | 0 | |

| 位域 | 名称 | 描述 |
|-------|-----------|---|
| 31:21 | Reserved | 保留, 必须保持复位值 |
| 20 | I2C4RST | I2C4 复位。 软件置位或清零。 0: 清除复位 1: 复位 I2C4 |
| 19 | I2C3RST | I2C3 复位。 软件置位或清零。 0: 清除复位 1: 复位 I2C3 |
| 18 | UART7RST | UART7 复位 软件置位和清零 0: 清除复位 1: 复位 UART7 |
| 17 | UART6RST | UART6 复位 软件置位和清零 0: 清除复位 1: 复位 UART6 |
| 16:15 | Reserved | 保留, 必须保持复位值 |
| 14 | USART1RST | USART1 复位 软件置位和清零 0: 清除复位 1: 复位 USART1 |
| 13 | TIM8RST | TIM8 复位 软件置位和清零 0: 清除复位 |

| 位域 | 名称 | 描述 |
|------|-----------|---|
| | | 1: 复位 TIM8 |
| 12 | SPI1RST | SPI1 复位 软件置位和清零 0: 清除复位 1: 复位 SPI1 |
| 11 | TIM1RST | TIM1 复位 软件置位和清零 0: 清除复位 1: 复位 TIM1 |
| 10:7 | Reserved | 保留, 必须保持复位值 |
| 6 | IOPERST | GPIO 端口 E 复位。 软件置 1 或清零。 0: 清除复位 1: 复位 GPIO 端口 E |
| 5 | IOPDRST | GPIO 端口 D 复位。 软件置 1 或清零。 0: 清除复位 1: 复位 GPIO 端口 D |
| 4 | IOPCRST | GPIO 端口 C 复位。 软件置 1 或清零。 0: 清除复位 1: 复位 GPIO 端口 C |
| 3 | IOPBRST | GPIO 端口 B 复位。 软件置 1 或清零。 0: 清除复位 1: 复位 GPIO 端口 B |
| 2 | IOPAMPRST | GPIO 端口 A 复位。 软件置 1 或清零。 0: 清除复位 1: 复位 GPIO 端口 A |
| 1 | Reserved | 保留, 必须保持复位值 |
| 0 | AFIORST | AFIO 复位 软件置位和清零 0: 清除复位 1: 复位 AFIO |

6.3.6 APB1 外设复位寄存器(RCC_APB1PRST)

偏移地址: 0x10

复位值: 0x0000 0000

| | | | | | | | | | | | | | | | |
|----------|---------|----------|----------|---------|---------|----------|----------|---------|---------|-----------|-----------|------------|------------|----------|----------|
| 31 | 30 | 29 | 28 | 27 | 26 | 25 | 24 | 23 | 22 | 21 | 20 | 19 | 18 | 17 | 16 |
| Reserved | DACRST | PWRRST | BKPRST | CAN2RST | CAN1RST | Reserved | Reserved | I2C2RST | I2C1RST | UART5 RST | UART4 RST | USART3 RST | USART2 RST | Reserved | Reserved |
| 15 | 14 | rw 13 | rw 12 | rw 11 | rw 10 | rw | | rw 6 | rw 5 | rw 4 | rw 3 | rw 2 | rw 1 | rw | 0 |
| SPI3RST | SPI2RST | Reserved | WWDG RST | | | Reserved | | TIM7RST | TIM6RST | TIM5RST | TIM4RST | TIM3RST | TIM2RST | | |
| rw | rw | | rw | | | | | rw | rw | rw | rw | rw | rw | rw | rw |

| 位域 | 名称 | 描述 |
|-------|----------|---|
| 31:30 | Reserved | 保留, 必须保持复位值 |
| 29 | DACRST | DAC 接口复位。 软件置位或清零。 0: 清除复位 1: 复位 DAC 接口 |
| 28 | PWRRST | 电源接口复位 软件置位和清零。 0: 清除复位 1: 复位电源接口 |
| 27 | BKPRST | 备份接口复位。 软件置 1 或清零。 0: 清除复位 1: 备份接口 |
| 26 | CAN2RST | CAN2 复位。 软件置 1 或清零。 0: 清除复位 1: 复位 CAN2 |
| 25 | CAN1RST | CAN1 复位 软件置位和清零。 0: 清除复位 1: 复位 CAN1 |
| 24:23 | Reserved | 保留, 必须保持复位值 |
| 22 | I2C2RST | I2C2 复位 软件置位和清零。 0: 清除复位 1: 复位 I2C2 |
| 21 | I2C1RST | I2C1 复位 软件置位和清零。 0: 清除复位 1: 复位 I2C1 |
| 20 | UART5RST | UART5 复位。 软件置 1 或清零。 0: 清除复位 1: 复位 UART5 |
| 19 | UART4RST | UART4 复位。 软件置 1 或清零。 |

| 位域 | 名称 | 描述 |
|-------|-----------|--|
| | | 0: 清除复位 1: 复位 UART4 |
| 18 | USART3RST | USART3 复位。 软件置位或清零。 0: 清除复位 1: 复位 USART3 |
| 17 | USART2RST | USART2 复位 软件置位和清零. 0: 清除复位 1: 复位 USART2 |
| 16 | Reserved | 保留, 必须保持复位值 |
| 15 | SPI3RST | SPI3 复位。 软件置 1 或清零。 0: 清除复位 1: 复位 SPI3 |
| 14 | SPI2RST | SPI2 复位。 软件置 1 或清零。 0: 清除复位 1: 复位 SPI2 |
| 13:12 | Reserved | 保留, 必须保持复位值 |
| 11 | WWDGRST | 窗口看门狗复位 软件置位和清零 0: 清除复位 1: 复位窗口看门狗 |
| 10:6 | Reserved | 保留, 必须保持复位值 |
| 5 | TIM7RST | TIM7 定时器复位。 软件置 1 或清零。 0: 清除复位 1: 复位 TIM7 定时器 |
| 4 | TIM6RST | TIM6 复位 软件置位和清零. 0: 清除复位 1: 复位 TIM6 |
| 3 | TIM5RST | TIM5 复位 软件置位和清零. 0: 清除复位 1: 复位 TIM5 |
| 2 | TIM4RST | TIM4 复位 软件置位和清零. 0: 清除复位 1: 复位 TIM4 |
| 1 | TIM3RST | TIM3 复位 |

| 位域 | 名称 | 描述 |
|----|---------|--|
| | | 软件置位和清零。 0: 清除复位 1: 复位 TIM3 |
| 0 | TIM2RST | TIM2 复位 软件置位和清零。 0: 清除复位 1: 复位 TIM2 |

6.3.7 AHB 外设时钟使能寄存器(RCC_AHBCLKEN)

偏移地址: 0x14

复位值: 0x0000 0014

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|----|----------|--------|--------|--------|-------|--------|--------|----------|-------|----------|---------|----------|--------|--------|--------|--------|----------|----|
| 31 | Reserved | | | | | | | | | | | | | | | 18 | 17 | 16 |
| 15 | ADC4EN | ADC3EN | ADC2EN | ADC1EN | SACEN | SDIOEN | RNGCEN | Reserved | CRCEN | Reserved | FLITFEN | Reserved | SRAMEN | DMA2EN | DMA1EN | QSPIEN | Reserved | |
| | rw | rw | rw | rw | rw | rw | rw | | rw | | rw | | rw | rw | rw | rw | rw | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | rw | 1 | 0 |

| 位域 | 名称 | 描述 |
|-------|----------|--|
| 31:18 | Reserved | 保留, 必须保持复位值 |
| 17 | QSPIEN | QSPI 时钟使能。 软件置 1 或清零。 0: 关闭 QSPI 时钟 1: 使能 QSPI 时钟 |
| 16 | Reserved | 保留, 必须保持复位值 |
| 15 | ADC4EN | ADC4 时钟使能。 软件置 1 或清零。 0: 关闭 ADC4 时钟 1: 使能 ADC4 时钟 |
| 14 | ADC3EN | ADC3 时钟使能。 软件置 1 或清零。 0: 关闭 ADC3 时钟 1: 使能 ADC3 时钟 |
| 13 | ADC2EN | ADC2 时钟使能。 软件置 1 或清零。 0: 关闭 ADC2 时钟 1: 使能 ADC2 时钟 |
| 12 | ADC1EN | ADC1 时钟使能 软件置位和清零. 0: ADC1 时钟禁能 1: ADC1 时钟使能 |

| 位域 | 名称 | 描述 |
|-----|----------|--|
| 11 | SACEN | SAC 时钟使能。 软件置位或清零。 0: 关闭 SAC 时钟 1: 使能 SAC 时钟 |
| 10 | SDIOEN | SDIO 时钟使能。 软件置 1 或清零。 0: 关闭 SDIO 时钟 1: 使能 SDIO 时钟 |
| 9 | RNGCEN | RNGC 时钟使能。 软件置 1 或清零。 0: 关闭 RNGC 时钟 1: 使能 RNGC 时钟 |
| 8:7 | Reserved | 保留, 必须保持复位值 |
| 6 | CRCEN | CRC 时钟使能 软件置位和清零. 0: CRC 时钟禁能 1: CRC 时钟使能 |
| 5 | Reserved | 保留, 必须保持复位值 |
| 4 | FLITFEN | 闪存接口电路时钟使能。 软件置位或清零。 0: 关闭闪存接口电路时钟 1: 使能闪存接口电路时钟 |
| 3 | Reserved | 保留, 必须保持复位值 |
| 2 | SRAMEN | SRAM 时钟使能 在 SLEEP 模式下, 软件置位和清零以启用/禁用 SRAM 时钟。 0: 在 SLEEP 模式下 SRAM 时钟禁能 1: 在 SLEEP 模式下 SRAM 时钟使能 |
| 1 | DMA2EN | DMA2 时钟使能。 软件置位或清零。 0: 关闭 DMA2 时钟 1: 使能 DMA2 时钟 |
| 0 | DMA1EN | DMA1 时钟使能 软件置位和清零. 0: DMA1 时钟禁能 1: DMA1 时钟使能 |

6.3.8 APB2 外设时钟使能寄存器 (RCC_APB2PCLKEN)

偏移地址: 0x18

复位值: 0x0000 0000

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|----------|----------|--------|--------|--------|----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------|---------|---------|----------|
| 31 | Reserved | | | | | | | | | | | | | | I2C4EN | I2C3EN | UART7EN | UART6EN | Reserved |
| 15 | 14 | 13 | 12 | 11 | 10 | 9 | 8 | 7 | 6 | 5 | ^{rw} 4 | ^{rw} 3 | ^{rw} 2 | ^{rw} 1 | ^{rw} 0 | | | | |
| Reserved | USART1EN | TIM8EN | SPI1EN | TIM1EN | Reserved | IOPGEN | IOPFEN | IOPEEN | IOPDEN | IOPCEN | IOPBEN | IOPAEN | Reserved | AFIOEN | | | | | |

| 位域 | 名称 | 描述 |
|-------|----------|---|
| 31:21 | Reserved | 保留, 必须保持复位值 |
| 20 | I2C4EN | I2C4 时钟使能。 软件置 1 或清零。 0: 关闭 I2C4 时钟 1: 使能 I2C4 时钟 |
| 19 | I2C3EN | I2C3 时钟使能。 软件置 1 或清零。 0: 关闭 I2C3 时钟 1: 使能 I2C3 时钟 |
| 18 | UART7EN | UART7 时钟使能。 软件置 1 或清零。 0: 关闭 UART7 时钟 1: 使能 UART7 时钟 |
| 17 | UART6EN | UART6 时钟使能。 软件置 1 或清零。 0: 关闭 UART6 时钟 1: 使能 UART6 时钟 |
| 16:15 | Reserved | 保留, 必须保持复位值 |
| 14 | USART1EN | USART1 时钟使能 软件置位和清零。 0: USART1 时钟禁能 1: USART1 时钟使能 |
| 13 | TIM8EN | TIM8 时钟使能 软件置位和清零。 0: TIM8 时钟禁能 1: TIM8 时钟使能 |
| 12 | SPI1EN | SPI1 时钟使能 软件置位和清零。 0: SPI1 时钟禁能 1: SPI1 时钟使能 |
| 11 | TIM1EN | TIM1 时钟使能 软件置位和清零。 0: TIM1 时钟禁能 1: TIM1 时钟使能 |
| 10:7 | Reserved | 保留, 必须保持复位值 |
| 6 | IOPEEN | GPIO 端口 E 时钟使能。 |

| 位域 | 名称 | 描述 |
|----|----------|---|
| | | 软件置位或清零。 0: 关闭 GPIO 端口 E 的时钟 1: 使能 GPIO 端口 E 的时钟 |
| 5 | IOPDEN | GPIO 端口 D 时钟使能。 软件置位或清零。 0: 关闭 GPIO 端口 D 的时钟 1: 使能 GPIO 端口 D 的时钟 |
| 4 | IOPCEN | GPIO 端口 C 时钟使能。 软件置位或清零。 0: 关闭 GPIO 端口 C 的时钟 1: 使能 GPIO 端口 C 的时钟 |
| 3 | IOPBEN | GPIO 端口 B 时钟使能。 软件置位或清零。 0: 关闭 GPIO 端口 B 的时钟 1: 使能 GPIO 端口 B 的时钟 |
| 2 | IOPAMPEN | GPIO 端口 A 时钟使能。 软件置位或清零。 0: 关闭 GPIO 端口 A 的时钟 1: 使能 GPIO 端口 A 的时钟 |
| 1 | Reserved | 保留, 必须保持复位值 |
| 0 | AFIOEN | AFIO 时钟使能 软件置位和清零。 0: AFIO 时钟禁能 1: AFIO 时钟使能 |

6.3.9 APB1 外设时钟使能寄存器(RCC_APB1PCLKEN)

偏移地址: 0x1c

复位值: 0x0000 0000

| 31 | 30 | 29 | 28 | 27 | 26 | 25 | 24 | 23 | 22 | 21 | 20 | 19 | 18 | 17 | 16 |
|-------------|----------|----------|-------------|----------|----------------|---------|----------|---------|---------|---------|---------|--------------|--------------|----------|----|
| OPAMP EN | Reserved | DACEN | PWREN | BKREN | CAN2EN | CAN1EN | Reserved | I2C2EN | I2C1EN | UART5EN | UART4EN | USART3 EN | USART2 EN | Reserved | |
| rw 15 | rw 14 | rw 13 | rw 12 | rw 11 | rw 10 | rw 8 | rw 7 | rw 6 | rw 5 | rw 4 | rw 3 | rw 2 | rw 1 | rw 0 | |
| SPI3EN | SPI2EN | Reserved | WWWDG EN | Reserved | COMP FILTEN | COMPEN | TIM7EN | TIM6EN | TIM5EN | TIM4EN | TIM3EN | TIM2EN | | | |
| rw | rw | | rw | | rw | rw | rw | rw | rw | rw | rw | rw | rw | rw | rw |

| 位域 | 名称 | 描述 |
|----|---------|---|
| 31 | OPAMPEN | OPAMP 时钟使能。 软件置位或清零。 0: 关闭 OPAMP 时钟 1: 使能 OPAMP 时钟 |

| 位域 | 名称 | 描述 |
|-------|----------|--|
| 30 | Reserved | 保留, 必须保持复位值 |
| 29 | DACEN | DAC 接口时钟使能。 软件置位或清零。 0: 关闭 DAC 接口时钟 1: 使能 DAC 接口时钟 |
| 28 | PWREN | 电源接口时钟使能 软件置位和清零。 0: 电源接口时钟禁能 1: 电源接口时钟使能 |
| 27 | BKPen | 备份接口时钟使能。 软件置 1 或清零。 0: 关闭备份接口时钟 1: 使能备份接口时钟 |
| 26 | CAN2EN | CAN2 时钟使能。 软件置 1 或清零。 0: 关闭 CAN2 时钟 1: 使能 CAN2 时钟 |
| 25 | CAN1EN | CAN1 时钟使能 软件置位和清零。 0: CAN1 时钟禁能 1: CAN1 时钟使能 |
| 24:23 | Reserved | 保留, 必须保持复位值 |
| 22 | I2C2EN | I2C2 时钟使能 软件置位和清零。 0: I2C2 时钟禁能 1: I2C2 时钟使能 |
| 21 | I2C1EN | I2C1 时钟使能 软件置位和清零。 0: I2C1 时钟禁能 1: I2C1 时钟使能 |
| 20 | UART5EN | UART5 时钟使能。 软件置 1 或清零。 0: 关闭 UART5 时钟 1: 使能 UART5 时钟 |
| 19 | UART4EN | UART4 时钟使能。 软件置 1 或清零。 0: 关闭 UART4 时钟 1: 使能 UART4 时钟 |
| 18 | USART3EN | USART3 时钟使能。 软件置位或清零。 0: 关闭 USART3 时钟 1: 使能 USART3 时钟 |

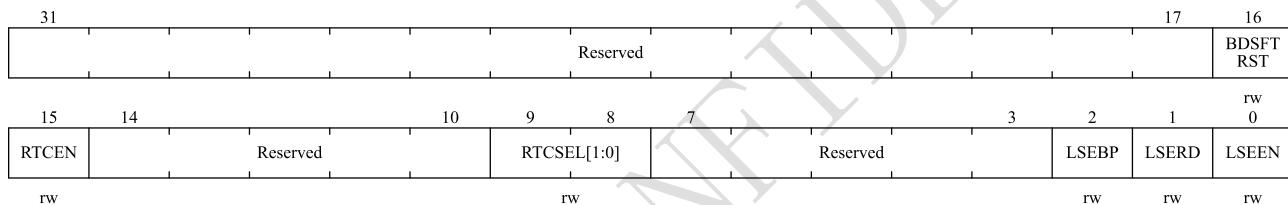
| 位域 | 名称 | 描述 |
|-------|------------|---|
| 17 | USART2EN | USART2 时钟使能 软件置位和清零。 0: USART2 时钟禁能 1: USART2 时钟使能 |
| 16 | Reserved | 保留, 必须保持复位值 |
| 15 | SPI3EN | SPI3 时钟使能。 软件置 1 或清零。 0: 关闭 SPI3 时钟 1: 使能 SPI3 时钟 |
| 14 | SPI2EN | SPI2 时钟使能。 软件置 1 或清零。 0: 关闭 SPI2 时钟 1: 使能 SPI2 时钟 |
| 13:12 | Reserved | 保留, 必须保持复位值 |
| 11 | WWDGEND | 窗口看门狗时钟使能 软件置位和清零。 0: 窗口看门狗时钟禁能 1: 窗口看门狗时钟使能 |
| 10:8 | Reserved | 保留, 必须保持复位值 |
| 7 | COMPFILTEN | COMP 滤波器时钟使能 软件置位和清零。 0: COMP 滤波器时钟禁能 1: COMP 滤波器时钟使能 |
| 6 | COMPEN | COMP 时钟使能 软件置位和清零。 0: COMP 时钟禁能 1: COMP 时钟使能 |
| 5 | TIM7EN | TIM7 定时器时钟使能。 软件置 1 或清零。 0: 关闭 TIM7 定时器时钟 1: 使能 TIM7 定时器时钟 |
| 4 | TIM6EN | TIM6 时钟使能 软件置位和清零。 0: TIM6 时钟禁能 1: TIM6 时钟使能 |
| 3 | TIM5EN | TIM5 时钟使能 软件置位和清零。 0: TIM5 时钟禁能 1: TIM5 时钟使能 |
| 2 | TIM4EN | TIM4 时钟使能 软件置位和清零。 0: TIM4 时钟禁能 |

| 位域 | 名称 | 描述 |
|----|--------|---|
| | | 1: TIM4 时钟使能 |
| 1 | TIM3EN | TIM3 时钟使能 软件置位和清零。 0: TIM3 时钟禁能 1: TIM3 时钟使能 |
| 0 | TIM2EN | TIM2 时钟使能 软件置位和清零。 0: TIM2 时钟禁能 1: TIM2 时钟使能 |

6.3.10 备份域控制寄存器(RCC_BDCTRL)

偏移地址: 0x20

复位值: 0x0000 0000



| 位域 | 名称 | 描述 |
|-------|-------------|--|
| 31:17 | Reserved | 保留, 必须保持复位值 |
| 16 | BDSFTRST | 备份域软件复位。 软件置 1 或清零。 0: 无作用 1: 复位整个备份域 |
| 15 | RTCEN | RTC 时钟使能 软件置位和清零。 0: 禁能 RTC 时钟 1: 使能 RTC 时钟 |
| 14:10 | Reserved | 保留, 必须保持复位值 |
| 9:8 | RTCSEL[1:0] | RTC 时钟源选择 由软件设置以选择 RTC 时钟源。一旦选择了 RTC 时钟源, 在下次备份域复位之前无法更改。这些位可以通过设置 BDSFTRST 位来复位。 00: 无时钟 01: 选择 LSE 振荡器作为 RTC 时钟 10: 选择 LSI 振荡器作为 RTC 时钟 11: 选择 HSE 振荡器 128 分频为 RTC 时钟 |
| 7:3 | Reserved | 保留, 必须保持复位值 |
| 2 | LSEBP | 外部低速振荡器旁路 在调试模式下, 软件置位和清零旁路振荡器。该位只能在外部低速振荡器禁 |

| 位域 | 名称 | 描述 |
|----|-------|---|
| | | 用时写入。 0: LSE 振荡器未旁路 1: LSE 振荡器旁路 |
| 1 | LSERD | 外部低速时钟振荡器就绪 由硬件置位和清零以指示 LSE 振荡器是否就绪。LSEEN 位清零后, LSERD 在 LSE 时钟的 6 个周期后清零。 0: 外部低速振荡器未就绪 1: 外部低速振荡器就绪 |
| 0 | LSEEN | 外部低速时钟振荡器使能 软件置位和清零。 0: 禁止外部低速振荡器 1: 使能外部低速振荡器。 |

注意: RCC_BDCTRL.LSEEN、RCC_BDCTRL.LSEBP、RCC_BDCTRL.RTCSEL 和 RCC_BDCTRL.RTCEN 位处于备份域。因此, 这些位在复位后是写保护的, 只有在 PWR_CTRL.DBKP 位置位后才能更改。这些位只能由备份域复位清除。任何内部或外部复位都不会影响这些位。

6.3.11 控制/状态寄存器(RCC_CTRLSTS)

偏移地址: 0x24

复位值: 0x0C000003

| 31 | 30 | 29 | 28 | 27 | 26 | 25 | 24 | 23 | 22 | 21 | 20 | 19 | 18 | 16 | |
|--------------|--------------|--------------|-------------|-------------|---------|-------------|--------|-------------|----------|-------------|-------------|-------------|----------|-------|-------|
| LPWR RSTF | WWDG RSTF | IWDG RSTF | SFT RSTF | POR RSTF | PINRSTF | MMU RSTF | RMRSTF | RAM RSTF | Reserved | BKP EMCF | RET EMCF | BOR RSTF | Reserved | | |
| r | r | r | r | r | r | r | rw | r | | r | r | r | | | |
| 15 | | | | | | | | | | | | | 2 | 1 | 0 |
| | | | | | | | | | | | | | | LSIRD | LSIEN |
| | | | | | | | | | | | | | | r | rw |

| 位域 | 名称 | 描述 |
|----|----------|--|
| 31 | LPWRRSTF | 低功耗复位标志 当发生低功耗管理复位时由硬件设置。 软件通过写入 RMRSTF 位清零。 0: 未发生低功耗管理复位 1: 发生低功耗管理复位 |
| 30 | WWDGRSTF | 窗口看门狗复位标志 发生窗口看门狗复位时由硬件置位。 软件通过写入 RMRSTF 位清零。 0: 未发生窗口看门狗复位 1: 发生窗口看门狗复位 |
| 29 | IWDGRSTF | 独立看门狗复位标志 发生独立看门狗复位时由硬件置位 软件通过写入 RMRSTF 位清零。 0: 未发生独立看门狗复位 |

| 位域 | 名称 | 描述 |
|----|----------|--|
| | | 1: 发生独立看门狗复位 |
| 28 | SFTRSTF | 软件复位标志 发生软件复位时由硬件置位。 软件通过写入 RMRSTF 位清零。 0: 未发生软件复位 1: 发生软件复位 |
| 27 | PORRSTF | 上电/掉电复位标志 发生上电/掉电复位时由硬件置位 软件通过写入 RMRSTF 位清零。 0: 未发生上电/断电复位 1: 发生上电/掉电复位 |
| 26 | PINRSTF | 外部引脚复位标志 当 NRST 引脚发生复位时由硬件置位。 软件通过写入 RMRSTF 位清零。 0: 未发生 NRST 引脚复位 1: 发生 NRST 引脚复位 |
| 25 | MMURSTF | MMU 复位标志 发生 MMU 复位时由硬件置位。 软件通过写入 RMRSTF 位清零。 0: 未发生 MMU 复位 1: 发生 MMU 复位 |
| 24 | RMRSTF | 清除复位标志 软件通过置 1 该位来清除所有复位标志。 0: 无作用 1: 清除复位标志 |
| 23 | RAMRSTF | RAM 复位标志。 在 RAM 复位发生时由硬件置 1, 软件通过写 RMRSTF 位清除。 0: 无 RAM 复位发生 1: 有 RAM 复位发生 |
| 22 | Reserved | 保留, 必须保持复位值 |
| 21 | BKPEMCF | 备份域 EMC 复位标志。 在备份域 EMC 复位发生时由硬件置 1, 软件通过写 RMRSTF 位清除。 0: 无备份域 EMC 复位发生 1: 有备份域 EMC 复位发生 |
| 20 | RETEMCF | 保持域 EMC 复位标志。 在保持域 EMC 复位发生时由硬件置 1, 软件通过写 RMRSTF 位清除。 0: 无保持域 EMC 复位发生 1: 有保持域 EMC 复位发生 |
| 19 | BORRSTF | BOR 复位标志。 在 BOR 复位发生时由硬件置 1, 软件通过写 RMRSTF 位清除。 0: 无 BOR 复位发生 1: 有 BOR 复位发生 |

| 位域 | 名称 | 描述 |
|------|----------|--|
| 18:2 | Reserved | 保留, 必须保持复位值 |
| 1 | LSIRD | <p>内部低速振荡器就绪</p> <p>由硬件置位和清零以指示内部 RC 40KHz 振荡器是否就绪。LSIEN 清零后, LSIRD 在 3 个内部 RC 40KHz 振荡器时钟周期后清零。</p> <p>0: 内部 40KHz RC 振荡器时钟未就绪 1: 内部 40KHz RC 振荡器时钟就绪</p> |
| 0 | LSIEN | <p>内部低速振荡器使能</p> <p>软件置位和清零。</p> <p>0: 禁用内部 RC 40kHz 振荡器 1: 使能内部 RC 40kHz 振荡器</p> |

6.3.12 AHB 外设复位寄存器(RCC_AHBPRST)

偏移地址: 0x28

复位值: 0x0000 0000

| | | | | | | | | | | | | | | |
|---------|----------|---------|---------|--------|----------|---------|---|--|--|--|---------|----------|----|---|
| 31 | Reserved | | | | | | | | | | 18 | 17 | 16 | |
| | | | | | | | | | | | QSPIRST | Reserved | | |
| 15 | 14 | 13 | 12 | 11 | 10 | 9 | 8 | | | | | | rw | 0 |
| ADC4RST | ADC3RST | ADC2RST | ADC1RST | SACRST | Reserved | RNGCRST | | | | | | Reserved | | |
| rw | rw | rw | rw | rw | rw | rw | | | | | | | | |

| 位域 | 名称 | 描述 |
|-------|----------|---|
| 31:18 | Reserved | 保留, 必须保持复位值 |
| 17 | QSPIRST | QSPI 复位。 软件置 1 或清零。 0: 清除复位 1: 复位 QSPI |
| 16 | Reserved | 保留, 必须保持复位值 |
| 15 | ADC4RST | ADC4 复位。 软件置 1 或清零。 0: 清除复位 1: 复位 ADC4 |
| 14 | ADC3RST | ADC3 复位。 软件置 1 或清零。 0: 清除复位 1: 复位 ADC3 |
| 13 | ADC2RST | ADC2 复位。 软件置 1 或清零。 0: 清除复位 1: 复位 ADC2 |
| 12 | ADC1RST | ADC1 复位 |

| 位域 | 名称 | 描述 |
|-----|----------|---|
| | | 软件置位和清零。 0: 清除复位 1: 复位 ADC1 |
| 11 | SACRST | SAC 复位。 软件置位或清零。 0: 清除复位 1: 复位 SAC |
| 10 | Reserved | 保留, 必须保持复位值 |
| 9 | RNGCRST | RNGC 复位。 软件置位或清零。 0: 清除复位 1: 复位 RNGC |
| 8:0 | Reserved | 保留, 必须保持复位值 |

6.3.13 时钟配置寄存器 2 (RCC_CFG2)

偏移地址: 0x2c

复位值: 0x0000 3800

| | | | | | | |
|----------------|------------|---------------|----------|----------------|----------|---------------|
| 31 | 30 | 29 | 28 | 24 | 23 | 16 |
| Reserved | TIMCLK SEL | RNGCPRES[4:0] | | | Reserved | |
| rw | | rw | | rw | | rw |
| 15 | | 11 | 10 | 9 | 8 | 0 |
| ADC1MPRES[4:0] | | ADC1M SEL | Reserved | ADCPLLRES[4:0] | | ADCHPRES[3:0] |
| rw | | rw | | rw | | rw |

| 位域 | 名称 | 描述 |
|-------|----------------|---|
| 31:30 | Reserved | 保留, 必须保持复位值 |
| 29 | TIMCLKSEL | TIM1/8 时钟源选择 软件置位和清零。 0: 如果 APB2 预分频器为 1, 则选择 PCLK2 作为 TIM1/8 时钟源。否则, 选择 PCLK2×2 1: SYSCLK 输入时钟被选择为 TIM1/8 时钟源 |
| 28:24 | RNGCPRES[4:0] | RNGC 预分频。 软件设置或清除这些位来配置 RNGC 时钟的预分频系数。 00000: SYSCLK 不分频 00001: SYSCLK 2 分频 00010: SYSCLK 3 分频 ... 11110: SYSCLK 31 分频 11111: SYSCLK 32 分频 |
| 23:16 | Reserved | 保留, 必须保持复位值 |
| 15:11 | ADC1MPRES[4:0] | ADC 1M 时钟分频 |

| 位域 | 名称 | 描述 |
|-----|----------------|---|
| | | 软件置位和清零这些位来配置 ADC1M 时钟源的预分频系数。 00000: ADC 1M 时钟源不分频 00001: ADC 1M 时钟源 2 分频 00010: ADC 1M 时钟源 3 分频 ... 11110: ADC 1M 时钟源 31 分频 11111: ADC 1M 时钟源 32 分频 备注: ADC 该时钟必须配置成 1M |
| 10 | ADC1MSEL | ADC 1M 时钟源选择。 软件置位或清零。 0: 选择 HSI 振荡器时钟作为 ADC 1M 的输入时钟 1: 选择 HSE 振荡器时钟作为 ADC 1M 的输入时钟 |
| 9 | Reserved | 保留, 必须保持复位值 |
| 8:4 | ADCPLLRES[4:0] | ADC PLL 预分频 软件置位和清零这些位以配置 PLL 时钟到 ADC 的分频系数。 0xxxx: ADC PLL 时钟被禁用 10000: PLL 时钟不分频 10001: PLL 时钟 2 分频 10010: PLL 时钟 4 分频 10011: PLL 时钟 6 分频 10100: PLL 时钟 8 分频 10101: PLL 时钟 10 分频 10110: PLL 时钟 12 分频 10111: PLL 时钟 16 分频 11000: PLL 时钟 32 分频 11001: PLL 时钟 64 分频 11010: PLL 时钟 128 分频 11011: PLL 时钟 256 分频 其他: PLL 时钟 256 分频 |
| 3:0 | ADCHPRES[3:0] | ADC HCLK 预分频 软件置位和清零这些位以配置 HCLK 时钟到 ADC 的分频系数。 0000: HCLK 时钟不分频 0001: HCLK 时钟 2 分频 0010: HCLK 时钟 4 分频 0011: HCLK 时钟 6 分频 0100: HCLK 时钟 8 分频 0101: HCLK 时钟 10 分频 0110: HCLK 时钟 12 分频 0111: HCLK 时钟 16 分频 1000: HCLK 时钟 32 分频 其他: HCLK 时钟 32 分频 |

6.3.14 时钟配置寄存器 3 (RCC_CFG3)

偏移地址: 0x30

复位值: 0x0000 3840

| | | | | | | | | | | | | | | |
|----|-----------------|----|----|----------|---|---|---|--|--|--|--------------|---------------|----|----------|
| 31 | Reserved | | | | | | | | | | 19 | 18 | 17 | 16 |
| | | | | | | | | | | | TRNG1M EN | TRNG1M SEL | | Reserved |
| 15 | TRNG1MPRES[4:0] | 11 | 10 | Reserved | 7 | 6 | 5 | | | | rw | rw | | 0 |
| | | | | | | | | | | | Reserved | | | |

| 位域 | 名称 | 描述 |
|-------|-----------------|--|
| 31:19 | Reserved | 保留, 必须保持复位值 |
| 18 | TRNG1MEN | TRNG 模拟接口时钟使能。 软件置 1 或清零。 0: 关闭 TRNG 模拟接口 1: 使能 TRNG 模拟接口时钟 |
| 17 | TRNG1MSEL | TRNG 1M 时钟选择。 软件置 1 或清零。 0: 选择 HSI 振荡器作为 TRNG 1M 输入时钟 1: 选择 HSE 振荡器作为 TRNG 1M 输入时钟 |
| 16 | Reserved | 保留, 必须保持复位值 |
| 15:11 | TRNG1MPRES[4:0] | TRNG 1M 时钟预分频。 软件设置或清除这些位以生成 TRNG 1M 时钟。 0000x: TRNG 1M 时钟源 2 分频 0001x: TRNG 1M 时钟源 4 分频 0010x: TRNG 1M 时钟源 6 分频 0011x: TRNG 1M 时钟源 8 分频 0100x: TRNG 1M 时钟源 10 分频 ... 1111x: TRNG 1M 时钟源 32 分频 |
| 10:7 | Reserved | 保留, 必须保持复位值 |
| 6 | BORRSTEN | BOR 复位使能。 软件置 1 或清零。 0: 不使能 BOR 复位 1: 使能 BOR 复位 |
| 5:0 | Reserved | 保留, 必须保持复位值 |

7 GPIO 和 AFIO

7.1 概述

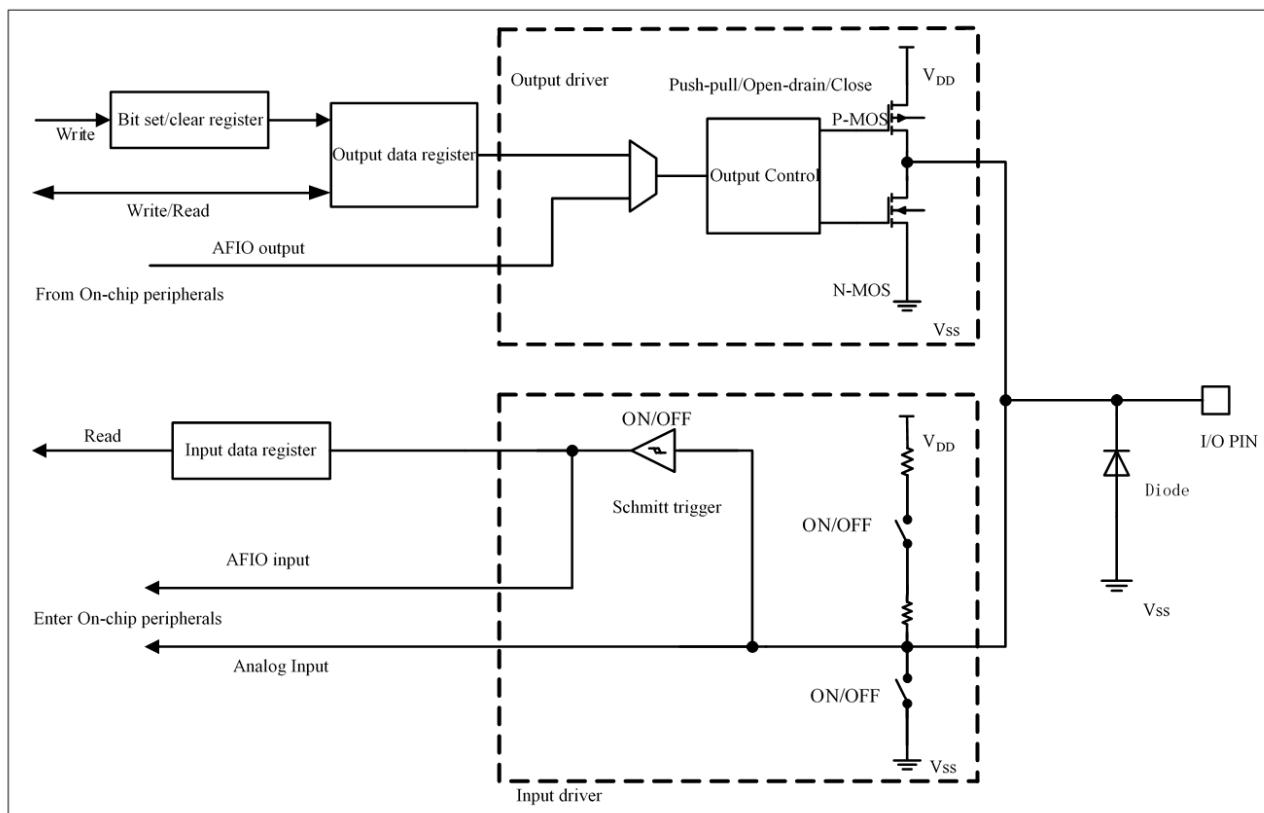
GPIO (General purpose input/output) 即通用型 I/O, AFIO (Alternate-function input/output) 即复用功能 I/O。芯片最多支持 80 个 GPIO, 共被分为 5 组 (GPIOA/GPIOB/GPIOC/GPIOD/GPIOE), 每组 16 个端口。GPIO 端口和其他的复用外设共用引脚, 用户可以根据需求灵活配置。每个 GPIO 引脚都可以独立配置成输出、输入或复用的外设功能端口。除了模拟功能引脚外, 其他的 GPIO 引脚都有大电流通过能力。

GPIO 端口可由软件分别配置成以下模式:

- 输入浮空
- 输入上拉
- 输入下拉
- 模拟功能
- 开漏输出
- 推挽输出
- 推挽复用功能
- 开漏复用功能

每个 I/O 端口位可以任意编程, 但必须按照 32 位字访问 I/O 端口寄存器 (不允许 16 位半字或 8 位字节访问)。下图给出了一个 I/O 端口的基本结构。

图 7-1 I/O 端口的基本结构



7.2 IO 功能描述

7.2.1 IO 模式配置

IO 的模式控制由配置寄存器 GPIOx_PL_CFG, GPIOx_PH_CFG 以及输出寄存器 GPIOx_POD(x=A,B,C,D,E) 来设置，不同的操作模式下的配置如下表所示：

表 7-1 IO 模式和配置关系

| 配置模式 | | PCFG1 | PCFG0 | PMODE1 | PMODE0 | PODx寄存器 | | |
|--------|-----------------|-------|-------|--|------------------------------|---------|--|--|
| 通用输出 | 推挽 (Push-Pull) | 0 | 0 | 01: 最大10MHz 10: 最大2MHz 11: 最大50MHz | 0 或 1 0 或 1 不使用 不使用 | 0 或 1 | | |
| | 开漏 (Open-Drain) | | 1 | | | 0 或 1 | | |
| 复用功能输出 | 推挽 (Push-Pull) | 1 | 0 | | | 不使用 | | |
| | 开漏 (Open-Drain) | | 1 | | | 不使用 | | |
| 输入 | 模拟模式 | 0 | 0 | 00: 保留 | 不使用 不使用 0 1 | 不使用 | | |
| | 浮空输入 | | 1 | | | 不使用 | | |
| | 下拉输入 | 1 | 0 | | | 0 | | |
| | 上拉输入 | | | | | 1 | | |

IO 在不同的配置下的输入输出特性如下表所示：

表 7-2 IO 不同配置的输入输出特性

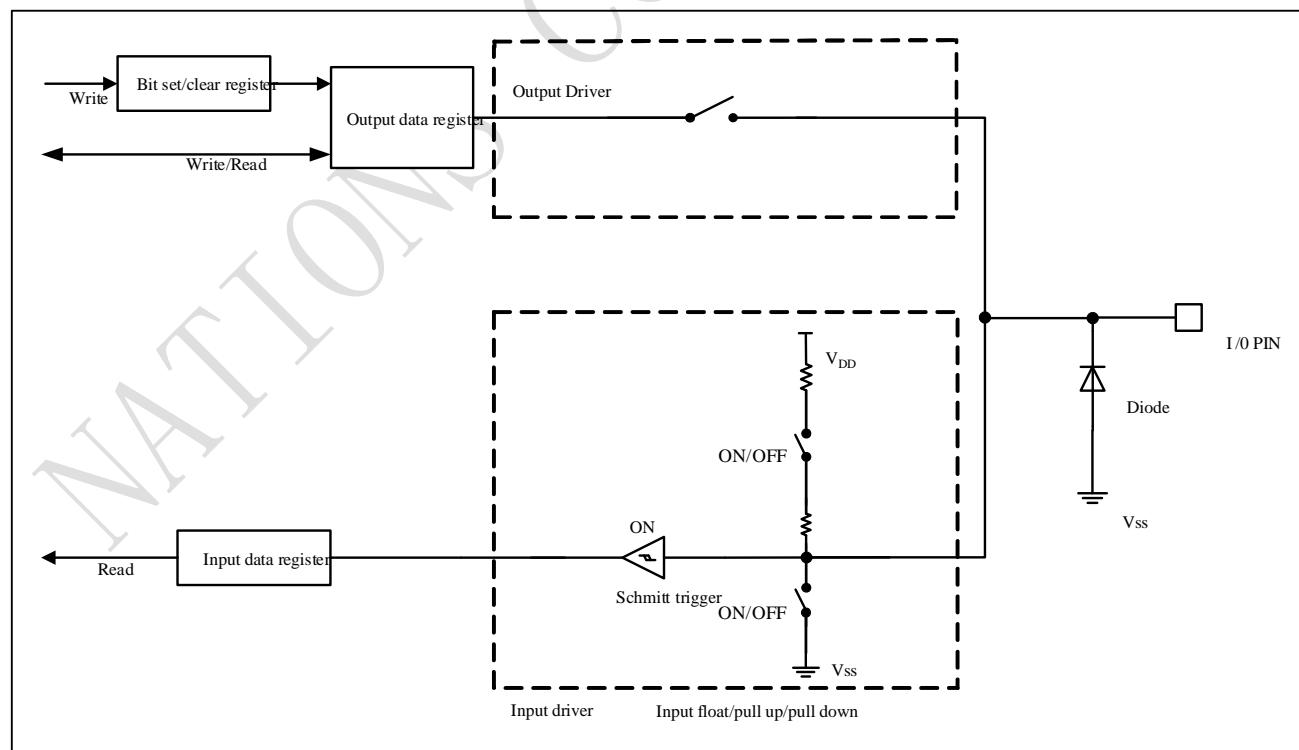
| 特性 | GPIO输入 | GPIO输出 | 模拟模式 | 外设复用 |
|----------------|--------|---|----------------|--|
| 输出缓冲器 | 禁能 | 使能 | 禁能 | 根据外设功能配置 |
| 施密特触发器 | 使能 | 使能 | 禁能 输出值被强制为0 | 根据外设功能配置 |
| 上下拉/浮空 | 可配 | 禁能 | 禁能 | 根据外设功能配置 |
| 开漏模式 | 禁能 | 可配, 输出数据为"0"时GPIO 输出0, "1"时GPIO高阻 | 禁能 | 可配, 输出数据为"0"时 GPIO输出0, "1"时GPIO高 阻 |
| 输入数据寄存器 (IO状态) | 可读写 | 可读 | 读出为0 | 可读 |
| 输出数据寄存器 (写入值) | 无效 | 可读写 | 无效 | 可读 |

7.2.1.1 输入模式

当 I/O 端口配置为输入模式时：

- 出现在 I/O 脚上的数据在每个 APB2 时钟被采样到输入数据寄存器
- 对输入数据寄存器的访问可以得到 I/O 状态
- 输出缓冲器被禁止
- 施密特触发输入被激活
- 根据输入配置 (上拉, 下拉或浮空) 的不同, 弱上拉和下拉电阻被连接

图 7-2 输入浮空/上拉/下拉配置

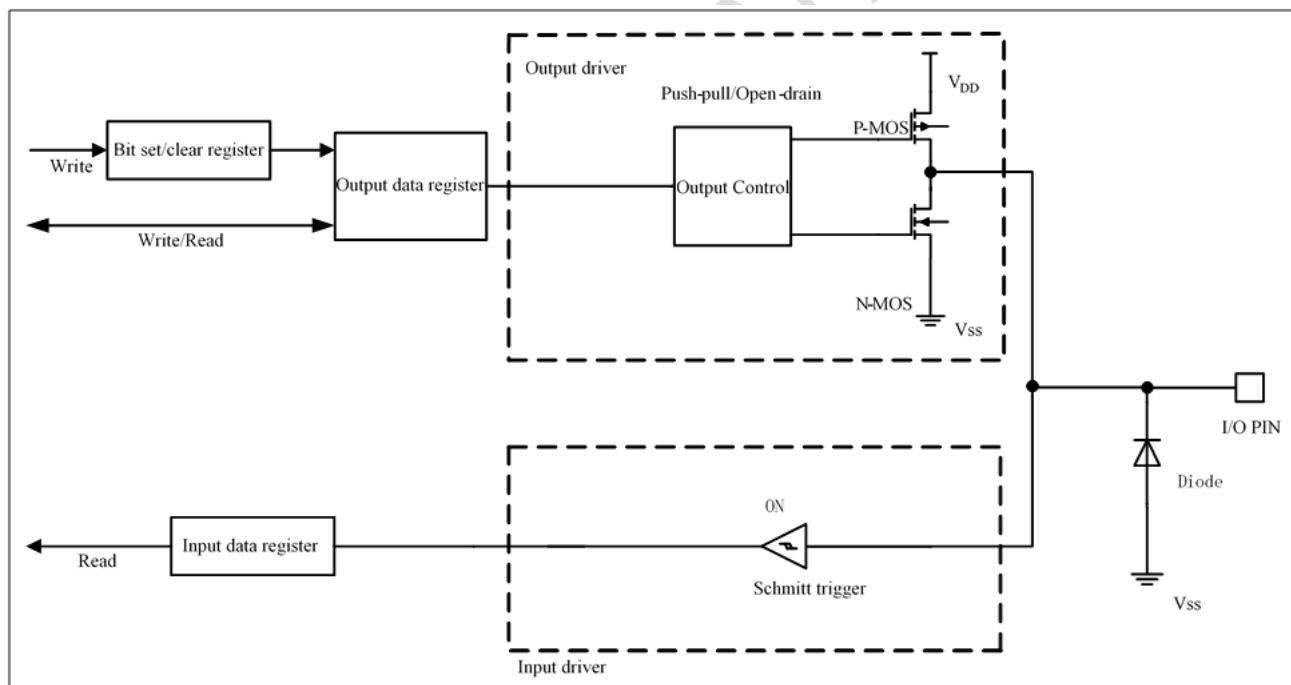


7.2.1.2 输出模式

当 I/O 端口配置为输出时：

- 施密特触发输入被激活
- 弱上拉和下拉电阻被禁止
- 输出缓冲器被激活
 - ◆ 开漏模式：输出寄存器上的'0'激活 N-MOS，引脚输出低电平
输出寄存器上的'1'使端口置于高阻状态（P-MOS 从不被激活）
 - ◆ 推挽模式：输出寄存器上的'0'激活 N-MOS，引脚输出低电平
输出寄存器上的'1'激活 P-MOS，引脚输出高电平
- 出现在 I/O 脚上的数据在每个 APB2 时钟被采样到输入数据寄存器
- 对输入数据寄存器的读访问可得到 I/O 状态
- 对输出数据寄存器的读访问得到最后写入的值

图 7-3 输出模式配置



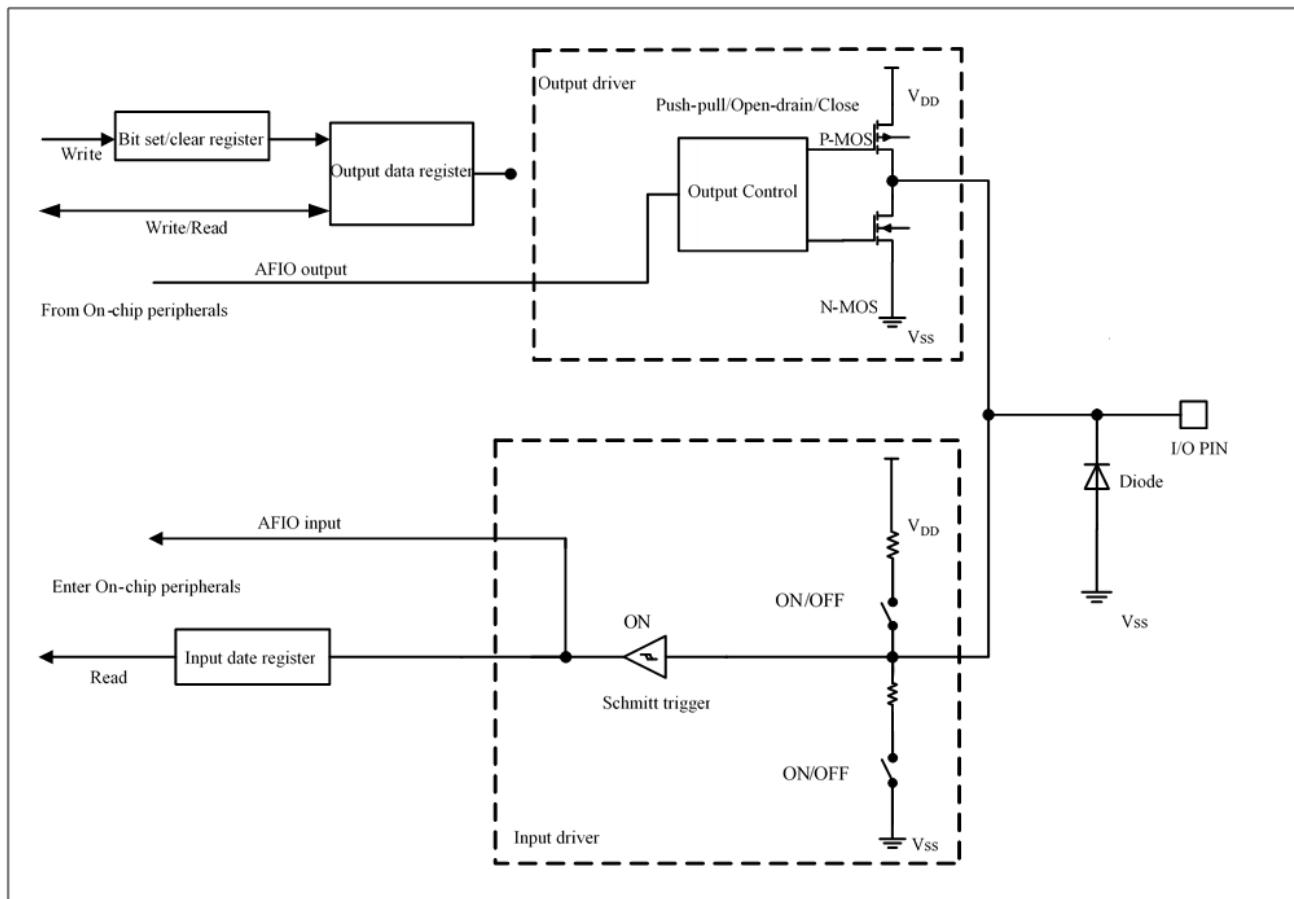
7.2.1.3 复用功能模式

当 I/O 端口配置为复用功能时：

- 施密特触发输入被激活
- 弱上拉和下拉电阻被禁止
- 在开漏或推挽式配置中，输出缓冲器被打开
- 内置外设的信号驱动输出缓冲器

- 在每个 APB2 时钟周期，对输入数据寄存器的访问可以得到 I/O 状态
- 对输入数据寄存器的读访问可得到 I/O 状态
- 对输出数据寄存器的读访问得到最后一次写的值

图 7-4 复用功能配置

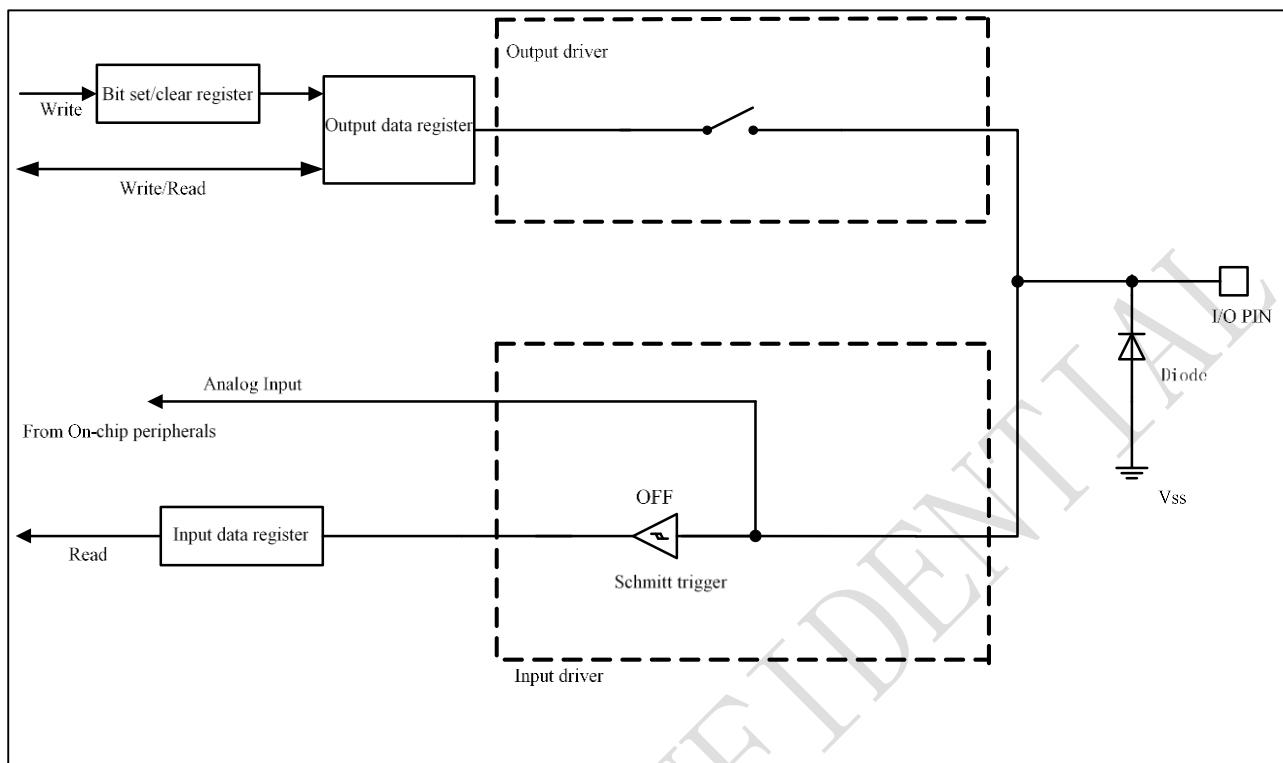


7.2.1.4 模拟模式

当 I/O 端口被配置为模拟模式时：

- 弱上拉和下拉电阻被禁止
- 读取输入数据寄存器时数值为'0'
- 输出缓冲器被禁止
- 施密特触发输入被禁止，输出值被强置为'0'（实现了每个模拟 I/O 引脚上的零消耗）

图 7-5 高阻抗的模拟模式配置



7.2.2 复位后状态

复位期间和刚复位后，复用功能未开启，I/O 端口被配置成模拟功能模式（PCFGy[1:0]=00b，PMODEy[1:0]=00b）。但有以下几个例外的信号：

- BOOT0、NRST、OSC_IN、OSC_OUT 默认无 GPIO 功能：
 - ◆ BOOT0 引脚默认输入下拉
 - ◆ NRST 上拉输入输出
- 复位后，调试系统相关的引脚默认状态为启动 SWD-JTAG，JTAG 引脚被置于输入上拉或下拉模式：
 - ◆ PA15:JTDI 置于输入上拉模式
 - ◆ PA14:JTCK 置于输入下拉模式
 - ◆ PA13:JTMS 置于输入上拉模式
 - ◆ PB4:NJTRST 置于输入上拉模式
 - ◆ PB3:JTD0 置于推挽输出无上下拉
- PD0 和 PD1：
 - ◆ PD0 和 PD1 在 80 及以上引脚封装默认为模拟模式
 - ◆ PD0 和 PD1 在 80 以下引脚封装复用到 OSC_IN/OUT
- PC13、PC14、PC15：

- ◆ PC13~15 为备电域下的三个 IO, 备份域初次上电默认为模拟模式;
- PB2/BOOT1:
 - ◆ PB2/BOOT1 默认处于下拉输入状态;
 - ◆ BOOT0 默认输入下拉, 参照下表, 若 BOOT 的引脚未连接, 则默认选择 Flash 主存储区。

| 启动模式选择引脚 | | 启动模式 | 说明 |
|----------|-------|--------|--------------|
| BOOT1 | BOOT0 | | |
| x | 0 | 主闪存存储器 | 主闪存存储器作为启动区域 |
| 0 | 1 | 系统存储器 | 系统存储器作为启动区域 |
| 1 | 1 | 内置SRAM | 内置SRAM作为启动区域 |

7.2.3 单独的位设置和位清除

通过将置位寄存器 (GPIOx_PBSC) 和复位寄存器 (GPIOx_PBC) 中要改变的位写“1”，可以实现数据寄存器 (GPIOx_POD) 的单独位操作，可以设置/复位一个或多个位，写入‘1’的位相应置位或清除，未写入‘1’的位不会改变。软件不需要禁止中断，并且在单次 APB2 写操作里完成。

7.2.4 外部中断/唤醒线

所有端口都有外部中断能力，可以在 EXTI 模块中配置：

- 端口必须配置成输入模式
- 所有端口可配置用于 SLEEP/STOP0/STOP2 模式唤醒，支持上升或下降沿可配
- PA0 可用于 STANDBY 模式唤醒
- 通用 I/O 端口以图 2-2 的方式连接到 16 个外部中断/事件线上，由寄存器 AFIO_EXTI_CFGx 配置

7.2.5 复用功能

当 I/O 端口配置为复用功能模式时，使用前必须对端口位配置寄存器 (GPIOx_PL_CFG/ GPIOx_PH_CFG) 编程，具体如下：

- 复用的输入功能：端口必须配置成输入模式（浮空、上拉或下拉）且输入引脚必须由外部驱动。
- 复用输出功能：端口必须配置成复用功能输出模式（推挽或开漏）。
- 双向复用功能：端口位必须配置复用功能输出模式（推挽或开漏）。此时，输入驱动器被配置成浮空输入模式。

端口在复用输出模式下，引脚和输出数据寄存器断开，并和片上外设的输出信号连接。如果软件把一个 GPIO 脚配置成复用输出功能，但是外设没有被激活，它的输出将不确定。

7.2.5.1 时钟输出 MCO

微控制器允许输出时钟信号到外部 MCO 引脚 (PA8)。PA8 必须被配置为复用推挽输出功能模式。以下四个时钟信号可被选作 MCO 时钟，时钟的选择由时钟配置寄存器 RCC_CFG.MCO[2:0]位控制：

- 分频的 SYSCLK

- HSI
- HSE
- 分频的 PLL 时钟

7.2.5.2 软件重新映射 I/O 复用功能

为拓展不同器件封装下的复用外设功能灵活性，可以把一些外设复用功能重新映射到其他引脚上。可以通过软件配置相应的寄存器 (AFIO_RMP_CFG, AFIO_RMP_CFGx) 来完成。这时，复用功能就和他原来的引脚断开，重新映射到新的引脚上了。

7.2.5.3 备份域 PC13~PC15 功能重映射

7.2.5.3.1 备份域 PC13~PC15 功能描述

PC13~PC15 三个引脚位于备份域下，可以作为 GPIO 模式或复用功能模式：

- 当备份区域由 VDD (内部模拟开关连到 VDD) 供电时，下述功能可用：
 - ◆ PC14 和 PC15 可以用于 GPIO 或 LSE 引脚
 - ◆ PC13 可以作为通用 I/O 口、TAMPER 引脚、RTC 校准时钟、RTC 闹钟或秒输出 (参见备份寄存器 5.4 章节)

注：因为模拟开关只能通过少量的电流 (3mA)，在输出模式下使用 PC13,PC14,PC15 的 I/O 口功能是有限制的：速度必须限制在 2MHz 以下，最大负载为 30pF，而且这些 I/O 口绝对不能当作电流源 (如驱动 LED)。

- 当后备区域由 VBAT 供电时 (VDD 消失后模拟开关连到 VBAT)，可以使用下述功能：
 - ◆ PC14 和 PC15 只能用于 LSE 引脚
 - ◆ PC13 可以作为 TAMPER 引脚、RTC 闹钟或秒输出 (参见 14.2.8，在 PC13 引脚 (当该引脚不用于入侵检测时) 上输出 RTC 校准时钟，RTC 闹钟脉冲或者秒脉冲。为方便测量，RTC 时钟可以经 64 分频输出到入侵检测引脚 TAMPER 上。通过设置 RTC_CTRL.COEN 位来开启这一功能。)

7.2.5.3.2 PC13~PC15 功能映射

根据前面的描述，整理了 PC13~PC15 不同模式的配置条件如下：

| PC14和PC15 | 条件 | PAD模式配置 |
|-----------|--|---------------|
| GPIO模式 | LSE关闭，且备份域由VDD供电，且不进入低功耗模式 (STANDBY, STOP2) 关闭 1.1V 电源时，才能用于 GPIO 模式 | GPIO 的模式由应用决定 |
| LSE模式 | LSE优先级高，上述条件不满足即进入 LSE 模式 | 模拟模式 |
| PC13 | 条件 | PAD模式配置 |
| GPIO模式 | 备份域由VDD供电，且不进入低功耗模式 (STANDBY, STOP2) 关闭 1.1V 电源时，才能用于 GPIO 模式 | GPIO 的模式由应用决定 |
| TAMPER引脚 | 任何时候均可配置于此项输入 | 浮空输入 |
| RTC校准时钟， | 当该引脚不用于入侵检测时，可用于输出 | 复用推挽输出 |

| PC14和PC15 | 条件 | PAD模式配置 |
|--------------|---|---------|
| RTC闹钟脉冲或者秒脉冲 | RTC校准时钟, RTC闹钟脉冲或者秒脉冲, 因此优先级比TAMPER功能低。 | |

由上, PC13~PC15 三个引脚管理的电源域划分:

■ GPIOx_PH_CFG/GPIOx_PID/GPIOx_POD/GPIOx_PBSC/GPIOx_PBC/GPIOx_PLOCK_CFG 等 GPIO 相关的配置寄存器都在 Core 电源域;

■ 这三个引脚的 Mux 逻辑在 VBAT 域, 默认为 GPIO 浮空输入模式; PC14 和 PC15 根据 LSEEN、备份域供电电源控制信号、芯片模式信号、GPIOC_PH_CFG 、 TAMPER 和时钟输出控制决定处于何种模式以及 Mux。

注: 备份域由 VDD 供电还是 VBAT 供电的控制信号, 由 PWR 模块自动切换, 应该是 VDD 域的 POR 信号得到。

7.2.5.4 把 OSC_IN/OSC_OUT 引脚作为 GPIO 端口 PD0/PD1

如应用中未开启外部高速振荡器, 引脚 OSC_IN/OSC_OUT 可以用做 GPIO 的 PD0/PD1, 通过设置复用重映射和调试 I/O 配置寄存器 (AFIO_RMP_CFG) 实现, 如下描述:

| | |
|-----|--|
| 位15 | <p>PD01_RMP : PD0/PD1映射到OSC_IN/OSC_OUT (PD0/PD1 mapping on OSC_IN/OSC_OUT)</p> <p>该位可由软件置'1'或置'0'。它控制PD0和PD1的GPIO功能映像。当不使用主振荡器HSE时 (系统运行于内部的8MHz阻容振荡器), PD0和PD1可以映像到OSC_IN和OSC_OUT引脚。</p> <p>0: 不进行PD0和PD1的重映像;</p> <p>1: PD0映像到OSC_IN, PD1映像到OSC_OUT。</p> <p>此功能只能适用于48和64引脚的封装 (在80、100脚和128脚的封装上有PD0和PD1, 不必重映像)。</p> |
|-----|--|

注: 外部中断/事件功能没有被重映射。在 48 和 64 引脚的封装上, PD0 和 PD1 不能用来产生外部中断/事件。即对于 LQFP48/64 封装, 只有 OSC_IN 和 OSC_OUT 两个引脚 (没有 PD0 和 PD1), 当不用外部晶振的时候, 可以映射为 PD0 和 PD1; 对于 80 脚和以上 封装, PD0 和 PD1 两个脚有了, OSC_IN 和 OSC_OUT 也有了, 不需要重新将 PD0/PD1 映射到 OSC_IN/OSC_OUT。

7.2.5.5 JTAG/SWD 复用功能重映射

芯片上电默认使能 SWD-JTAG 调试接口, 调试接口被映射到 GPIO 端口上, 如下表所示。

| 复用功能 | GPIO端口 |
|------------|--------|
| JTMS/SWDIO | PA13 |
| JTCK/SWCLK | PA14 |
| JTDI | PA15 |
| JTDO | PB3 |
| NJTRST | PB4 |

如调试期间需要使用其 GPIO 功能, 可通过设置 AFIO_RMP_CFG.SW_JTAG_CFG[2:0]位, 可以改变上述重映像配置。参见下表。

表 7-3 调试端口映像

| SW_JTAG_CFG[2:0] | 可能的调试端口 | SWD_JTAG I/O引脚分配 | | | | |
|------------------|---|-------------------------|-------------------------|------------|--------------|----------------|
| | | PA13/ JTMS/ SWDIO | PA14/ JTCK/ SWCLK | PA15/ JTDI | PB3/ JTDO | PB4/ NJTRST |
| 000 | 完全SWD_JTAG (JTAG-DP + SW-DP) (复位状态) | I/O不可用 | I/O不可用 | I/O不可用 | I/O不可用 | I/O不可用 |
| 001 | 完全SWD_JTAG (JTAG-DP + SW-DP) 但没有NJTRST | I/O不可用 | I/O不可用 | I/O不可用 | I/O不可用 | I/O可用 |
| 010 | 关闭JTAG-DP, 启用SW-DP | I/O不可用 | I/O不可用 | I/O可用 | I/O可用 | I/O可用 |
| 100 | 关闭JTAG-DP, 关闭SW-DP | I/O可用 | I/O可用 | I/O可用 | I/O可用 | I/O可用 |
| 其它 | 禁用 | | | | | |

7.2.5.5.1 SWJ_CFG 配置事项

当 APB 桥的写缓冲区满了的时候, 在写 AFIO_RMP_CFG 寄存器时需要多用一个 APB 周期。这是因为 SWD_JTAG 脚的释放需要两个 APB 周期完成, 以保证 NJTRST 和 JTCK 的输入信号为一个干净的电平。

第一个周期: 输入 1 / 0 的 SWD_JTAG 输入到内核的信号被接为 0 或 1(NJTRST/TDI/TMS 接 1, JTCK 接 0);

第二个周期: 由 IOM 控制 SWD_JTAG 引脚的控制信号 (比如方向, 上下拉, 施密特输入等)。

7.2.5.5.2 上下拉配置

由于 JTAG 的引脚直接连接到内部的调试寄存器上(JTCK/SWCLK 直接连接到时钟端), 因此必须保证 JTAG 的输入引脚不能处于浮空态。为了避免任何非可控的 I/O 电平, JTAG 的输入引脚固定内部的上下拉:

- NJTRST: 内部上拉
- JTDI: 内部上拉
- JTMS/SWDIO: 内部上拉
- JTCK/SWCLK: 内部下拉

7.2.5.6 ADC 外部触发复用功能重映射

ADC 的注入转换和规则转换的外部触发源支持重映射, 参阅复用重映射和调试 I/O 配置寄存器 (AFIO_RMP_CFG)。

表 7-4 ADC1 外部触发注入转换复用功能重映射

| 复用功能 | ADC1_ETRI = 0 | ADC1_ETRI = 1 |
|------------------|-----------------------|-----------------------------|
| ADC1外部触发注入 转换 | ADC1外部触发注入转换与EXTI15相连 | ADC1外部触发注入转换与 TIM8_CH4相连 |

表 7-5 ADC1 外部触发规则转换复用功能重映射

| 复用功能 | ADC1_ETRR = 0 | ADC1_ETRR = 1 |
|--------------|-----------------------|--------------------------|
| ADC1外部触发规则转换 | ADC1外部触发规则转换与EXTI11相连 | ADC1外部触发规则转换与TIM8_TRGO相连 |

表 7-6 ADC2 外部触发注入转换复用功能重映射

| 复用功能 | ADC2_ETRI = 0 | ADC2_ETRI = 1 |
|--------------|-----------------------|-------------------------|
| ADC2外部触发注入转换 | ADC2外部触发注入转换与EXTI15相连 | ADC2外部触发注入转换与TIM8_CH4相连 |

表 7-7 ADC2 外部触发规则转换复用功能重映射

| 复用功能 | ADC2_ETRR = 0 | ADC2_ETRR = 1 |
|--------------|-----------------------|--------------------------|
| ADC2外部触发规则转换 | ADC2外部触发规则转换与EXTI11相连 | ADC2外部触发规则转换与TIM8_TRGO相连 |

表 7-8 ADC3 外部触发注入转换复用功能重映射

| 复用功能 | ADC3_ETRI = 0 | ADC3_ETRI = 1 |
|--------------|-----------------------|-------------------------|
| ADC3外部触发注入转换 | ADC3外部触发注入转换与EXTI14相连 | ADC3外部触发注入转换与TIM5_CH4相连 |

表 7-9 ADC3 外部触发规则转换复用功能重映射

| 复用功能 | ADC3_ETRR = 0 | ADC3_ETRR = 1 |
|--------------|-----------------------|-------------------------|
| ADC3外部触发规则转换 | ADC3外部触发规则转换与EXTI10相连 | ADC3外部触发规则转换与TIM5_CH3相连 |

表 7-10 ADC4 外部触发注入转换复用功能重映射

| 复用功能 | ADC4_ETRI = 0 | ADC4_ETRI = 1 |
|--------------|-----------------------|-------------------------|
| ADC4外部触发注入转换 | ADC4外部触发注入转换与EXTI14相连 | ADC4外部触发注入转换与TIM5_CH4相连 |

表 7-11 ADC4 外部触发规则转换复用功能重映射

| 复用功能 | ADC4_ETRR = 0 | ADC4_ETRR = 1 |
|--------------|-----------------------|-------------------------|
| ADC4外部触发规则转换 | ADC4外部触发规则转换与EXTI10相连 | ADC4外部触发规则转换与TIM5_CH3相连 |

7.2.5.7 TIMx 复用功能重映射

表 7-12 TIM5 复用功能重映射

| 复用功能 | TIM5CH4_RMP = 0 | TIM5CH4_RMP = 1 |
|----------|-------------------|-------------------------------|
| TIM5_CH4 | TIM5_CH4 与 PA3 相连 | LSI 内部振荡器与TIM5_CH4相连以对LSI进行校准 |

表 7-13 TIM4 复用功能重映射

| 复用功能 | TIM4_RMP = 0 | TIM4_RMP = 1 |
|----------|---------------|--------------|
| TIM4_ETR | PE0 (不受重映射影响) | |
| TIM4_CH1 | PB6 | PD12 |
| TIM4_CH2 | PB7 | PD13 |
| TIM4_CH3 | PB8 | PD14 |
| TIM4_CH4 | PB9 | PD15 |

表 7-14 TIM3 复用功能重映射

| 复用功能 | TIM3_RMP[1:0] = 00 (没有重映像) | TIM3_RMP[1:0] = 10 (部分重映像) | TIM3_RMP[1:0] = 11 (完全重映像) |
|----------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| TIM3_ETR | PD2 (不受重映射影响) | | |
| TIM3_CH1 | PA6 | PB4 | PC6 |
| TIM3_CH2 | PA7 | PB5 | PC7 |
| TIM3_CH3 | PB0 | | |
| TIM3_CH4 | PB1 | | |

表 7-15 TIM2 复用功能重映射

| 复用功能 | TIM2_RMP[1:0] = 00 (没有重映像) | TIM2_RMP[1:0] = 01 (部分重映像) | TIM2_RMP[1:0] = 10 (部分重映像) | TIM2_RMP[1:0] = 11 (完全重映像) |
|--------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| TIM2_CH1_ETR | PA0 | PA15 | PA0 | PA15 |
| TIM2_CH2 | PA1 | PB3 | PA1 | PB3 |
| TIM2_CH3 | PA2 | | | PB10 |
| TIM2_CH4 | PA3 | | | PB11 |

表 7-16 TIM1 复用功能重映射

| 复用功能 | TIM1_RMP[1:0] = 00 (没有重映像) | TIM1_RMP[1:0] = 01 (部分重映像) | TIM1_RMP[1:0] = 10 (部分重映像) | TIM1_RMP[1:0] = 11 (完全重映像) |
|-----------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| TIM1_ETR | PA12 | | | PE7 |
| TIM1_CH1 | PA8 | | | PE9 |
| TIM1_CH2 | PA9 | | | PE11 |
| TIM1_CH3 | PA10 | | | PE13 |
| TIM1_CH4 | PA11 | | | PE14 |
| TIM1_BKIN | PB12 | PA6 | PB5 | PE15 |
| TIM1_CH1N | PB13 | PA7 | PB13 | PE8 |
| TIM1_CH2N | PB14 | PB0 | PB14 | PE10 |
| TIM1_CH3N | PB15 | PB1 | PB15 | PE12 |

表 7-17 TIM8 复用功能重映射

| 复用功能 | TIM8_RMP[1:0] = 00 (没有重映像) | TIM8_RMP[1:0] = 01 (部分重映像) | TIM8_RMP[1:0] = 11 (完全重映像) |
|----------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| TIM8_ETR | PA0 | PB4 | PB4 |
| TIM8_CH1 | PC6 | PC6 | PD14 |

| 复用功能 | TIM8_RMP[1:0] = 00 (没有重映像) | TIM8_RMP[1:0] = 01 (部分重映像) | TIM8_RMP[1:0] = 11 (完全重映像) |
|-----------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| TIM8_CH2 | PC7 | PC7 | PD15 |
| TIM8_CH3 | PC8 | PC8 | PC8 |
| TIM8_CH4 | PC9 | PC9 | PC9 |
| TIM8_BKIN | PA6 | PB3 | PB3 |
| TIM8_CH1N | PA7 | PA15 | PA15 |
| TIM8_CH2N | PB0 | PC12 | PC12 |
| TIM8_CH3N | PB1 | PD2 | PD2 |

7.2.5.8 CAN 复用功能重映射

7.2.5.8.1 CAN1 复用功能重映射

CAN1 信号可以被映射到端口 A、端口 B 或端口 D 上，如下表所示。对于端口 D，在 48 和 64 引脚的封装上没有重映射功能（这些封装上没有 PD0 和 PD1）。

表 7-18 CAN1 复用功能重映射

| 复用功能 | CAN1_RMP[1:0] = 00 | CAN1_RMP[1:0] = 01 | CAN1_RMP[1:0] = 10 | CAN1_RMP[1:0] = 11 |
|---------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| CAN1_RX | PA11 | PD8 | PB8 | PD0 |
| CAN1_TX | PA12 | PD9 | PB9 | PD1 |

7.2.5.8.2 CAN2 复用功能重映射

CAN2 信号可以被映射到端口 B 或端口 D 上，如下表所示。

表 7-19 CAN2 复用功能重映射

| 复用功能 | CAN2_RMP[1:0] = 00 | CAN2_RMP[1:0] = 01 | CAN2_RMP[1:0] = 11 |
|---------|--------------------|--------------------|--------------------|
| CAN2_RX | PB12 | PB5 | PD10 |
| CAN2_TX | PB13 | PB6 | PD11 |

7.2.5.9 USARTx 复用功能重映射

7.2.5.9.1 USART1 管脚重映射

USART1/2/3 三个接口具有重映射功能，参见复用重映射配置寄存器 (AFIO_RMP_CFG)。

表 7-20 USART1 复用功能重映射

| 复用功能 | USART1_RMP = 0 | USART1_RMP = 1 |
|------------|----------------|----------------|
| USART1_CTS | | PA11 |
| USART1_RTS | | PA12 |
| USART1_TX | PA9 | PB6 |
| USART1_RX | PA10 | PB7 |
| USART1_CK | | PA8 |

7.2.5.9.2 USART2 管脚重映射

表 7-21 USART2 复用功能重映射

| 复用功能 | USART2_RMP[1:0] = 00 | USART2_RMP[1:0] = 01 | USART2_RMP[1:0] = 10 | USART2_RMP[1:0] = 11 |
|------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| USART2_CTS | PA0 | PD3 | PC6 | PA15 |
| USART2_RTS | PA1 | PD4 | PC7 | PB3 |
| USART2_TX | PA2 | PD5 | PC8 | PB4 |
| USART2_RX | PA3 | PD6 | PC9 | PB5 |
| USART2_CK | PA4 | PD7 | / | PA4 |

7.2.5.9.3 USART3 管脚重映射

表 7-22 USART3 复用功能重映射

| 复用功能 | USART3_RMP[1:0] = 00 | USART3_RMP[1:0] = 01 | USART3_RMP[1:0] = 11 |
|------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| USART3_TX | PB10 | PC10 | PD8 |
| USART3_RX | PB11 | PC11 | PD9 |
| USART3_CK | PB12 | PC12 | PD10 |
| USART3_CTS | PB13 | | PD11 |
| USART3_RTS | PB14 | | PD12 |

7.2.5.10 UARTx 复用功能重映射

UART4/5/6/7 三个接口具有重映射功能，参见复用重映射配置寄存器 (AFIO_RMP_CFG3)。

7.2.5.10.1 UART4 管脚重映射

表 7-23 UART4 复用功能重映射

| 复用功能 | UART4_RMP[1:0] = 00 | UART4_RMP[1:0] = 01 | UART4_RMP[1:0] = 10 | UART4_RMP[1:0] = 11 |
|----------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| UART4_TX | PC10 | PB2 | PA13 | PD0 |
| UART4_RX | PC11 | PE7 | PA14 | PD1 |

7.2.5.10.2 UART5 管脚重映射

表 7-24 UART5 复用功能重映射

| 复用功能 | UART5_RMP[1:0] = 00 | UART5_RMP[1:0] = 01 | UART5_RMP[1:0] = 10 | UART5_RMP[1:0] = 11 |
|----------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| UART5_TX | PC12 | PB13 | PE8 | PB8 |
| UART5_RX | PD2 | PB14 | PE9 | PB9 |

7.2.5.10.3 UART6 管脚重映射

表 7-25 UART6 复用功能重映射

| 复用功能 | UART6_RMP[1:0] = 00 | UART6_RMP[1:0] = 10 | UART6_RMP[1:0] = 11 |
|----------|---------------------|---------------------|---------------------|
| UART6_TX | PE2 | PC0 | PB0 |
| UART6_RX | PE3 | PC1 | PB1 |

7.2.5.10.4 UART7 管脚重映射

表 7-26 UART7 复用功能重映射

| 复用功能 | UART7_RMP[1:0] = 00 | UART7_RMP[1:0] = 10 |
|----------|---------------------|---------------------|
| UART7_TX | PC4 | PC2 |
| UART7_RX | PC5 | PC3 |

7.2.5.11 I2C 复用功能重映射

7.2.5.11.1 I2C1 管脚重映射

参见复用重映射配置寄存器 (AFIO_RMP_CFG)。

表 7-27 I2C1 管脚重映射

| 复用功能 | I2C1_RMP=0 | I2C1_RMP=1 |
|-----------|------------|------------|
| I2C1_SCL | PB6 | PB8 |
| I2C1_SDA | PB7 | PB9 |
| I2C1_SMBA | PB5 | |

7.2.5.11.2 I2C2 管脚重映射

参见复用重映射配置寄存器 (AFIO_RMP_CFG3)。

表 7-28 I2C2 管脚重映射

| 复用功能 | I2C2_RMP[1:0] = 00 | I2C2_RMP[1:0] = 11 |
|-----------|--------------------|--------------------|
| I2C2_SCL | PB10 | PA4 |
| I2C2_SDA | PB11 | PA5 |
| I2C2_SMBA | PB12 | |

7.2.5.11.3 I2C3 管脚重映射

参见复用重映射配置寄存器 (AFIO_RMP_CFG3)。

表 7-29 I2C3 管脚重映射

| 复用功能 | I2C3_RMP[1:0] = 00 | I2C3_RMP[1:0] = 11 |
|----------|--------------------|--------------------|
| I2C3_SCL | PC0 | PC4 |
| I2C3_SDA | PC1 | PC5 |

7.2.5.11.4 I2C4 管脚重映射

参见复用重映射配置寄存器 (AFIO_RMP_CFG3)。

表 7-30 I2C4 管脚重映射

| 复用功能 | I2C4_RMP[1:0] = 00 | I2C4_RMP[1:0] = 01 | I2C4_RMP[1:0] = 11 |
|----------|--------------------|--------------------|--------------------|
| I2C4_SCL | PC6 | PD14 | PA9 |
| I2C4_SDA | PC7 | PD15 | PA10 |

7.2.5.12 SPI/I2S 复用功能重映射

7.2.5.12.1 SPI1 管脚重映射

参见复用重映射配置寄存器 (AFIO_RMP_CFG)。

表 7-31 SPI1 管脚重映射

| 复用功能 | SPI1_RMP[1:0] = 00 | SPI1_RMP[1:0] = 01 | SPI1_RMP[1:0] = 10 | SPI1_RMP[1:0] = 11 |
|-----------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| SPI1_NSS | PA4 | PA15 | PB2 | PB2 |
| SPI1_SCLK | PA5 | PB3 | PA5 | PE7 |
| SPI1_MISO | PA6 | PB4 | PA6 | PE8 |
| SPI1_MOSI | PA7 | PB5 | PA7 | PE9 |

7.2.5.12.2 SPI2/I2S2 管脚重映射

参见复用重映射配置寄存器 (AFIO_RMP_CFG3)。

表 7-32 SPI2/I2S2 管脚重映射

| 复用功能 | SPI2_RMP[1:0] = 00 | SPI2_RMP[1:0] = 01 | SPI2_RMP[1:0] = 11 |
|-------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| SPI2_NSS/I2S2_WS | PB12 | PC6 | PE10 |
| SPI2_SCK/I2S2_CK | PB13 | PC7 | PE11 |
| SPI2_MISO | PB14 | PC8 | PE12 |
| SPI2_MOSI/I2S2_SD | PB15 | PC9 | PE13 |

7.2.5.12.3 SPI3/I2S3 管脚重映射

参见复用重映射配置寄存器 (AFIO_RMP_CFG3)。

表 7-33 SPI3/I2S3 管脚重映射

| 复用功能 | SPI3_RMP[1:0] = 00 | SPI3_RMP[1:0] = 01 | SPI3_RMP[1:0] = 10 | SPI3_RMP[1:0] = 11 |
|-------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| SPI3_NSS/I2S3_WS | PA15 | PD2 | PD8 | PC2 |
| SPI3_SCK/I2S3_CK | PB3 | PC10 | PD9 | PC3 |
| SPI3_MISO | PB4 | PC11 | PD11 | PA0 |
| SPI3_MOSI/I2S3_SD | PB5 | PC12 | PD12 | PA1 |

7.2.5.13 SDIO 复用功能重映射

参见复用重映射配置寄存器 (AFIO_RMP_CFG3)。

表 7-34 SDIO 管脚重映射

| 复用功能 | SDIO_RMP = 0 | SDIO_RMP = 1 |
|--------|--------------|--------------|
| SDIO_0 | PC8 | PE8 |
| SDIO_1 | PC9 | PE9 |
| SDIO_2 | PC10 | PE10 |
| SDIO_3 | PC11 | PE11 |
| SDIO_4 | PB8 | |
| SDIO_5 | PB9 | |
| SDIO_6 | PC6 | |

| 复用功能 | SDIO_RMP = 0 | SDIO_RMP = 1 |
|----------|--------------|--------------|
| SDIO_7 | | PC7 |
| SDIO_CK | PC12 | PE12 |
| SDIO_CMD | PD2 | PE13 |

7.2.5.14 QSPI 复用功能重映射

QSPI 只支持主机模式，且不支持多主模式。单线模式下 QSPI_IO1 作为 MISO，支持推挽复用输出，还可以支持浮空输入或上拉输入。参见复用重映射配置寄存器 (AFIO_RMP_CFG3)。

表 7-35 QSPI 管脚重映射

| 复用功能 | QSPI_RMP[1:0] = 00 | QSPI_RMP[1:0] = 11 |
|----------|--------------------|--------------------|
| QSPI_NSS | PA4 | PC10 |
| QSPI_CLK | PA5 | PC11 |
| QSPI_IO0 | PA6 | PC12 |
| QSPI_IO1 | PA7 | PD0 |
| QSPI_IO2 | PC4 | PD1 |
| QSPI_IO3 | PC5 | PD2 |

7.2.6 外设的 IO 配置

表 7-36 ADC/DAC

| ADC/DAC引脚 | GPIO配置 |
|-----------|--------|
| ADC | 模拟模式 |
| DAC | 模拟模式 |

表 7-37 TIM1/TIM8

| TIM1/TIM8引脚 | 配置 | PAD配置模式 |
|-------------|----------|---------|
| TIM1/8_CHx | 输入捕获通道x | 浮空输入 |
| | 输出比较通道x | 推挽复用输出 |
| TIM1/8_CHxN | 互补输出通道x | 推挽复用输出 |
| TIM1/8_BKIN | 刹车输入 | 浮空输入 |
| TIM1/8_ETR | 外部触发时钟输入 | 浮空输入 |

表 7-38 TIM2/3/4/5

| TIM2/3/4/5引脚 | 配置 | PAD配置模式 |
|----------------|----------|---------|
| TIM2/3/4/5_CHx | 输入捕获通道x | 浮空输入 |
| | 输出比较通道x | 推挽复用输出 |
| TIM2/3/4/5_ETR | 外部触发时钟输入 | 浮空输入 |

表 7-39 BxCAN

| BxCAN引脚 | GPIO配置 |
|---------|------------|
| CAN_TX | 推挽复用输出 |
| CAN_RX | 浮空输入或带上拉输入 |

表 7-40 USART

| USART引脚 | 配置 | GPIO配置 |
|------------|---------|--------------|
| USARTx_TX | 全双工模式 | 推挽复用输出 |
| | 半双工同步模式 | 推挽复用输出 |
| USARTx_RX | 全双工模式 | 浮空输入或带上拉输入 |
| | 半双工同步模式 | 未用, 可作为通用I/O |
| USARTx_CK | 同步模式 | 推挽复用输出 |
| USARTx_RTS | 硬件流量控制 | 推挽复用输出 |
| USARTx_CTS | 硬件流量控制 | 浮空输入或带上拉输入 |

表 7-41 I2C

| I2C引脚 | 配置 | GPIO配置 |
|-----------|--------|--------|
| I2Cx_SCL | I2C时钟 | 开漏复用输出 |
| I2Cx_SDA | I2C数据 | 开漏复用输出 |
| I2Cx_SMBA | SMBA数据 | 推挽复用输出 |

表 7-42 SPI

| SPI引脚 | 配置 | GPIO配置 |
|-----------|---------------|-----------------------------------|
| SPIx_SCK | 主模式 | 推挽复用输出 |
| | 从模式 | 浮空输入 |
| SPIx_MOSI | 全双工模式/主模式 | 推挽复用输出 |
| | 全双工模式/从模式 | 浮空输入或带上拉输入或推挽复用输出 |
| | 简单的双向数据线/主模式 | 推挽复用输出 |
| | 简单的双向数据线/从模式 | 未用, 可作为通用I/O |
| SPIx_MISO | 全双工模式/主模式 | 浮空输入或带上拉输入或推挽复用输出 |
| | 全双工模式/从模式 | 推挽复用输出 |
| | 简单的双向数据线/主模式 | 未用, 可作为通用I/O |
| | 简单的双向数据线/从模式 | 推挽复用输出 |
| SPIx_NSS | 硬件主/从模式 | 浮空输入或带上拉输入或带下拉输入 |
| | 硬件主模式/NSS输出使能 | 推挽复用输出 (作为主机时NSS可选择idle高阻或idle为1) |
| | 软件模式 | 未用, 可作为通用I/O |

表 7-43 I2S

| I2S引脚 | 配置 | GPIO配置 |
|----------|-----|------------------|
| I2Sx_WS | 主模式 | 推挽复用输出 |
| | 从模式 | 浮空输入 |
| I2Sx_CK | 主模式 | 推挽复用输出 |
| | 从模式 | 浮空输入 |
| I2Sx_SD | 发送器 | 推挽复用输出 |
| | 接收器 | 浮空输入或带上拉输入或带下拉输入 |
| I2Sx_MCK | 主模式 | 推挽复用输出 |

| I2S引脚 | 配置 | GPIO配置 |
|-------|-----|--------------|
| | 从模式 | 未用, 可作为通用I/O |

表 7-44 SDIO

| SDIO引脚 | GPIO配置 |
|-------------|--------|
| SDIO_CLK | 推挽复用输出 |
| SDIO_CMD | 推挽复用输出 |
| SDIO[D7:D0] | 推挽复用输出 |

表 7-45 QSPI

| QSPI引脚 | GPIO配置 | 备注 |
|----------|--------|-----------------------|
| QSPI_IO3 | 推挽复用输出 | QSPI只支持主机模式, 且不支持多主模式 |
| QSPI_IO2 | 推挽复用输出 | |
| QSPI_IO1 | 推挽复用输出 | |
| QSPI_IO0 | 推挽复用输出 | |
| QSPI_CLK | 推挽复用输出 | |
| QSPI_NSS | 推挽复用输出 | |

表 7-46 其他

| 引脚 | 复用功能 | GPIO配置 |
|------------|--------|----------------------------------|
| TAMPER-RTC | RTC输出 | 当配置BKP_CR和BKP_RTCCR寄存器时, 由硬件强制设置 |
| | 侵入事件输入 | |
| MCO | 时钟输出 | 推挽复用输出 |
| EXTI输入线 | 外部中断输入 | 浮空输入或带上拉输入或带下拉输入 |

7.2.7 GPIO 锁定机制

锁定机制用于冻结 IO 配置以防止被意外更改。当在一个端口位上执行了锁定 (LOCK) 程序, 在下一次复位之前, 不能再更改端口的配置, 参考端口配置锁定寄存器 GPIOx_PLOCK_CFG。

- PLOCKK_CFG 即 GPIOx_PLOCK_CFG.PLOCKK_CFG[16], 只有在对 PLOCKK_CFG 按照正确的序列 w1->w0->w1->r0 (此处 r0 必须有) 操作之后, 才会变为 1; 之后只有在进行系统复位才会变为 0。
- PLOCK_CFGy 即 GPIOx_PLOCK_CFG.PLOCK_CFG[15:0], 只有在 PLOCKK_CFG=0 也就是未锁定的时候才能进行修改。
- PLOCKK_CFG 只有在和非 0 的 GPIOx_PLOCK_CFG.PLOCK_CFG[15:0] 同时写入的情况下, 序列 w1->w0->w1->r0 才会有效; 序列写入的过程中, GPIOx_PLOCK_CFG.PLOCK_CFG[15:0] 必须不能改变;
- 只要 PLOCKK_CFG=0 , GPIOx_PH_CFG/GPIOx_PL_CFG 位都能修改, 不受 GPIOx_PLOCK_CFG.PLOCK_CFG[15:0] 配置的影响。
- PLOCKK_CFG=1, GPIOx_PH_CFG/GPIOx_PL_CFG 受 GPIOx_PLOCK_CFG.PLOCK_CFG[15:0] 的控制, 对应 PLOCK_CFGy (y = 0...15) =1, 为锁定配置, 不可修改, PLOCK_CFGy=0, 可以修改。
- 假如序列操作错误, 必须重新进行 w1->w0->w1->r0 才能再次发起锁定操作。

7.3 GPIO 寄存器

必须以 32 位字的方式操作这些外设寄存器。

7.3.1 GPIO 寄存器总览

GPIOA 基地址: 0x40010800

GPIOB 基地址: 0x40010C00

GPIOC 基地址: 0x40011000

GPIOD 基地址: 0x40011400

GPIOE 基地址: 0x40011800

表 7-47 GPIO 寄存器总览

| Offset | Register | | | |
|--------|-----------------|-----------------------|----------|--|
| 000h | GPIOx_PL_CFG | | | |
| | Reset Value | x=B x=A,C,D,E | | |
| 004h | GPIOx_PH_CFG | | | |
| | Reset Value | x=A x=B,C,D,E | | |
| 008h | GPIOx_PID | | | |
| | Reset Value | Reserved | | |
| 00Ch | GPIOx_POD | | | |
| | Reset Value | x=A x=B x=C,D,E | | |
| 010h | GPIOx_PBSC | | | |
| | Reset Value | Reserved | | |
| 014h | GPIOx_PBC | | | |
| | Reset Value | Reserved | | |
| 018h | GPIOx_PLOCK_CFG | | | |
| | Reset Value | Reserved | | |
| 01Ch | Reserved | | Reserved | |
| 020h | GPIOx_DS_CFG | | | |
| | | x=A,B,C,D,E | | |
| 024h | GPIOx_SR_CFG | | Reserved | |
| | | x=A,B,C,D,E | | |

7.3.2 GPIO 端口低配置寄存器 (GPIOx_PL_CFG)

偏移地址: 0x00

复位值: 0x0000 0000 (x=A,C,D,E); 0x0008 0800 (x=B)

| | | | | | | | | | | | | | | | |
|------------|-------------|----|------------|----|-------------|----|------------|----|-------------|----|------------|----|-------------|----|----|
| 31 | 30 | 29 | 28 | 27 | 26 | 25 | 24 | 23 | 22 | 21 | 20 | 19 | 18 | 17 | 16 |
| PCFG7[1:0] | PMODE7[1:0] | | PCFG6[1:0] | | PMODE6[1:0] | | PCFG5[1:0] | | PMODE5[1:0] | | PCFG4[1:0] | | PMODE4[1:0] | | |
| rw | rw | rw | rw | rw | rw | rw | rw | rw | rw | rw | rw | rw | rw | rw | rw |
| 15 | 14 | 13 | 12 | 11 | 10 | 9 | 8 | 7 | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | 0 |
| PCFG3[1:0] | PMODE3[1:0] | | PCFG2[1:0] | | PMODE2[1:0] | | PCFG1[1:0] | | PMODE1[1:0] | | PCFG0[1:0] | | PMODE0[1:0] | | |
| rw | rw | rw | rw | rw | rw | rw | rw | rw | rw | rw | rw | rw | rw | rw | rw |

| 位域 | 名称 | 描述 |
|-------|-------------|---|
| 31:30 | PCFGy[1:0] | 端口 x 配置位 (y = 0...7) PMODE[1:0]=00 输入模式时： 00: 模拟功能模式 (复位后的状态) 01: 浮空输入模式 10: 上拉/下拉输入模式 (注意：配置上拉/下拉输入模式时，需要置位/复位相应的 GPIOx_POD 寄存器) 11: 保留 |
| 27:26 | | PMODE[1:0]>00 输出模式时： 00: 通用推挽输出模式 01: 通用开漏输出模式 10: 复用功能推挽输出模式 11: 复用功能开漏输出模式 |
| 23:22 | | |
| 19:18 | | |
| 15:14 | | |
| 11:10 | | |
| 7:6 | | |
| 3:2 | | |
| 29:28 | PMODEy[1:0] | 端口 x 的模式位 (y = 0...7) 00: 输入模式 (复位后的状态) 01: 输出模式，最大速度 2MHz 10: 输出模式，最大速度 10MHz 11: 输出模式，最大速度 50MHz |
| 25:24 | | |
| 21:20 | | |
| 17:16 | | |
| 13:12 | | |
| 9:8 | | |
| 5:4 | | |
| 1:0 | | |

7.3.3 GPIO 端口高配置寄存器 (GPIOx_PH_CFG)

偏移地址: 0x04

复位值: 0x8880 0000 (x=A); 0x0000 0000 (x=B,C,D,E)

| | | | | | | | | | | | | | | | |
|-------------|--------------|----|-------------|----|--------------|----|-------------|----|--------------|----|-------------|----|--------------|----|----|
| 31 | 30 | 29 | 28 | 27 | 26 | 25 | 24 | 23 | 22 | 21 | 20 | 19 | 18 | 17 | 16 |
| PCFG15[1:0] | PMODE15[1:0] | | PCFG14[1:0] | | PMODE14[1:0] | | PCFG13[1:0] | | PMODE13[1:0] | | PCFG12[1:0] | | PMODE12[1:0] | | |
| rw | rw | rw | rw | rw | rw | rw | rw | rw | rw | rw | rw | rw | rw | rw | rw |
| 15 | 14 | 13 | 12 | 11 | 10 | 9 | 8 | 7 | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | 0 |
| PCFG11[1:0] | PMODE11[1:0] | | PCFG10[1:0] | | PMODE10[1:0] | | PCFG9[1:0] | | PMODE9[1:0] | | PCFG8[1:0] | | PMODE8[1:0] | | |
| rw | rw | rw | rw | rw | rw | rw | rw | rw | rw | rw | rw | rw | rw | rw | rw |

| 位域 | 名称 | 描述 |
|-------|------------|---|
| 31:30 | PCFGy[1:0] | 端口 x 配置位 (y = 8...15) |
| 27:26 | | PMODE[1:0]=00 输入模式时： 00: 模拟功能模式 (复位后的状态) |
| 23:22 | | |

| 位域 | 名称 | 描述 |
|-------|-------------|--|
| 19:18 | | 01: 浮空输入模式 |
| 15:14 | | 10: 上拉/下拉输入模式 (注意: 配置上拉/下拉输入模式时, 需要置位/复位相应的 GPIOx_POD 寄存器) |
| 11:10 | | 11: 保留 |
| 7:6 | | MODE[1:0]>00 输出模式时: |
| 3:2 | | 00: 通用推挽输出模式 01: 通用开漏输出模式 10: 复用功能推挽输出模式 11: 复用功能开漏输出模式 |
| 29:28 | PMODEy[1:0] | 端口 x 的模式位 (y = 8...15) 00: 输入模式 (复位后的状态) 01: 输出模式, 最大速度 2MHz 10: 输出模式, 最大速度 10MHz 11: 输出模式, 最大速度 50MHz |
| 25:24 | | |
| 21:20 | | |
| 17:16 | | |
| 13:12 | | |
| 9:8 | | |
| 5:4 | | |
| 1:0 | | |

7.3.4 GPIO 端口输入数据寄存器 (GPIOx_PID)

偏移地址: 0x08

复位值: 0x0000 0000

| | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|-------|----------|-------|-------|-------|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|---|----|
| 31 | Reserved | | | | | | | | | | | | | | | | 16 |
| 15 | 14 | 13 | 12 | 11 | 10 | 9 | 8 | 7 | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | 0 | | |
| PID15 | PID14 | PID13 | PID12 | PID11 | PID10 | PID9 | PID8 | PID7 | PID6 | PID5 | PID4 | PID3 | PID2 | PID1 | PID0 | | |
| r | r | r | r | r | r | r | r | r | r | r | r | r | r | r | r | r | r |

| 位域 | 名称 | 描述 |
|-------|----------|---|
| 31:16 | Reserved | 保留, 必须保持复位值。 |
| 15:0 | PIDy | 端口输入数据 (y = 0...15) 这些位为只读并只能以 16 位字的形式读出, 读出的值为对应 I/O 口的状态。 |

7.3.5 GPIO 端口输出数据寄存器 (GPIOx_POD)

偏移地址: 0x0C

复位值: 0x0000 A000 (x=A); 0x0000 0010 (x=B); 0x0000 0000 (x=C,D,E)

| 31 | | | | | | | | | | | | | | | 16 |
|----------|-------|-------|-------|-------|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Reserved | | | | | | | | | | | | | | | |
| 15 | 14 | 13 | 12 | 11 | 10 | 9 | 8 | 7 | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | 0 |
| POD15 | POD14 | POD13 | POD12 | POD11 | POD10 | POD9 | POD8 | POD7 | POD6 | POD5 | POD4 | POD3 | POD2 | POD1 | POD0 |
| rw | rw | rw | rw | rw | rw | rw | rw | rw | rw | rw | rw | rw | rw | rw | rw |

| 位域 | 名称 | 描述 |
|-------|----------|---|
| 31:16 | Reserved | 保留, 必须保持复位值。 |
| 15:0 | PODy | 端口输出数据 (y = 0...15) 这些位只能以 16 位字的形式读或写操作。对 GPIOx_PBSC (x = A...G), 可以对相应的 POD 位进行独立的设置/清除。 |

7.3.6 GPIO 端口位设置/清除寄存器 (GPIOx_PBSC)

偏移地址: 0x10

复位值: 0x0000 0000

| 31 | 30 | 29 | 28 | 27 | 26 | 25 | 24 | 23 | 22 | 21 | 20 | 19 | 18 | 17 | 16 |
|---------|---------|---------|---------|---------|---------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| PBC15 | PBC14 | PBC13 | PBC12 | PBC11 | PBC10 | PBC9 | PBC8 | PBC7 | PBC6 | PBC5 | PBC4 | PBC3 | PBC2 | PBC1 | PBC0 |
| w 15 | w 14 | w 13 | w 12 | w 11 | w 10 | w 9 | w 8 | w 7 | w 6 | w 5 | w 4 | w 3 | w 2 | w 1 | w 0 |
| PBS15 | PBS14 | PBS13 | PBS12 | PBS11 | PBS10 | PBS9 | PBS8 | PBS7 | PBS6 | PBS5 | PBS4 | PBS3 | PBS2 | PBS1 | PBS0 |
| w | w | w | w | w | w | w | w | w | w | w | w | w | w | w | w |

| 位域 | 名称 | 描述 |
|-------|------|--|
| 31:16 | PBCy | 清除端口 GPIOx 的位 y (y = 0...15) 这些位只能写入并只能以字 (16 位) 的形式操作。 0: 对相应的 PODy 位不产生影响 1: 清除对应的 PODy 位为 0 注: 如果同时设置了 PBSy 和 PBCy 的对应位, PBSy 位起作用。 |
| 15:0 | PBSy | 设置端口 GPIOx 的位 y (y = 0...15) 这些位只能写入并只能以字 (16 位) 的形式操作。 0: 对相应的 PODy 位不产生影响 1: 设置对应的 PODy 位为 1 |

7.3.7 GPIO 端口位清除寄存器 (GPIOx_PBC)

偏移地址: 0x14

复位值: 0x0000 0000

| 31 | 14 | 13 | 12 | 11 | 10 | 9 | 8 | 7 | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | 0 | |
|----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | PBC15 | PBC14 | PBC13 | PBC12 | PBC11 | PBC10 | PBC9 | PBC8 | PBC7 | PBC6 | PBC5 | PBC4 | PBC3 | PBC2 | PBC1 | PBC0 |
| w | w | w | w | w | w | w | w | w | w | w | w | w | w | w | w | |

| 位域 | 名称 | 描述 |
|-------|----------|--|
| 31:16 | Reserved | 保留, 必须保持复位值。 |
| 15:0 | PBCy | <p>清除端口 GPIOx 的位 y (y = 0...15)</p> <p>这些位只能写入并只能以字 (16 位) 的形式操作。</p> <p>0: 对相应的 PODy 位不产生影响</p> <p>1: 清除对应的 PODy 位为 0</p> |

7.3.8 GPIO 端口锁定配置寄存器 (GPIOx_PLOCK_CFG)

偏移地址: 0x18

复位值: 0x0000 0000

| 31 | 14 | 13 | 12 | 11 | 10 | 9 | 8 | 7 | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | 17 | 16 |
|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|-------------|----|
| Reserved | | | | | | | | | | | | | | | PLOCKKK_CFG | |
| PLOCK_CFG15 | PLOCK_CFG14 | PLOCK_CFG13 | PLOCK_CFG12 | PLOCK_CFG11 | PLOCK_CFG10 | PLOCK_CFG9 | PLOCK_CFG8 | PLOCK_CFG7 | PLOCK_CFG6 | PLOCK_CFG5 | PLOCK_CFG4 | PLOCK_CFG3 | PLOCK_CFG2 | PLOCK_CFG1 | PLOCK_CFG0 | |
| rw | rw | rw | rw | rw | rw | rw | rw | rw | rw | rw | rw | rw | rw | rw | rw | rw |

| 位域 | 名称 | 描述 |
|-------|-------------|--|
| 31:17 | Reserved | 保留, 必须保持复位值。 |
| 16 | PLOCKKK_CFG | <p>锁键。该位可随时读出, 它只可通过锁键写入序列修改。</p> <p>0: 端口配置锁键位激活</p> <p>1: 端口配置锁键位被激活, 下次系统复位前 GPIOx_PLOCK_CFG 寄存器被锁住。锁键的写入序列:</p> <p>写 1 -> 写 0 -> 写 1 -> 读 0 -> 读 1</p> <p>最后一个读可省略, 但可以用来确认锁键已被激活。</p> <p>注: 在操作锁键的写入序列时, 不能改变 PLOCK_CFG[15:0] 的值。操作锁键写入序列中的任何错误将不能激活锁键。</p> |
| 15:0 | PLOCK_CFGy | <p>端口 GPIOx 的配置锁定位 y (y = 0...15)</p> <p>这些位可读可写但只能在 PLOCKKK_CFG 位为 0 时写入。</p> <p>0: 不锁定端口的配置</p> <p>1: 锁定端口的配置</p> |

7.3.9 GPIO 驱动能力配置寄存器 (GPIOx_DS_CFG)

偏移地址: 0x20

复位值: 0x0000 FFFF (x = A,B,C,D,E)

| 31 | Reserved | | | | | | | | | | | | | | | | 16 |
|----|----------|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|----|
|----|----------|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|----|

| 15 | 14 | 13 | 12 | 11 | 10 | 9 | 8 | 7 | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | 0 |
|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| DS _CFG15 | DS _CFG14 | DS _CFG13 | DS _CFG12 | DS _CFG11 | DS _CFG10 | DS _CFG9 | DS _CFG8 | DS _CFG7 | DS _CFG6 | DS _CFG5 | DS _CFG4 | DS _CFG3 | DS _CFG2 | DS _CFG1 | DS _CFG0 |

rw rw

| 位域 | 名称 | 描述 |
|-------|----------|--|
| 31:16 | Reserved | 保留, 必须保持复位值。 |
| 15:0 | DS_CFGy | 端口 GPIOx 的驱动能力配置位 y (y = 0...15) 这些位只能以 16 位字的形式读或写操作。 0: 2mA 1: 由 GPIOx_PH_CFG/GPIOx_PL_CFG 的 PMODEy 控制。 PMODE:00/01 时, 4mA; PMODEy:10 时, 8mA; PMODEy:11 时, 12mA。 |

7.3.10 GPIO 翻转率配置寄存器 (GPIOx_SR_CFG)

偏移地址: 0x24

复位值: 0x0000 FFFF (x=A,B,C,D,E)

| 31 | Reserved | | | | | | | | | | | | | | | | 16 |
|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|--|----|
| SR _CFG15 | SR _CFG14 | SR _CFG13 | SR _CFG12 | SR _CFG11 | SR _CFG10 | SR _CFG9 | SR _CFG8 | SR _CFG7 | SR _CFG6 | SR _CFG5 | SR _CFG4 | SR _CFG3 | SR _CFG2 | SR _CFG1 | SR _CFG0 | | |

rw rw

| 位域 | 名称 | 描述 |
|-------|----------|--|
| 31:16 | Reserved | 保留, 必须保持复位值。 |
| 15:0 | SR_CFGy | 端口 GPIOx 的翻转率配置位 y (y = 0...15) 这些位只能以 16 位字的形式读或写操作。 0: 快速翻转 1: 慢速翻转 |

7.4 AFIO 寄存器

7.4.1 AFIO 寄存器总览

AFIO 基地址: 0x40010000

表 7-48 AFIO 寄存器总览

| Offset | Register | AFIO_ECTRL | | | | | | | | | | | |
|--------|----------------|-----------------------------|---|---------------|---|---|----------------|---|---|----------------|---|---|---|
| 000h | AFIO_ECTRL | Reserved | | | | | | | | | | | |
| 004h | AFIO_RMP_CFG | Reserved | | | | | | | | | | | |
| 008h | AFIO_EXTI_CFG1 | Reserved | | | | | | | | | | | |
| 00Ch | AFIO_EXTI_CFG2 | Reserved | | | | | | | | | | | |
| 010h | AFIO_EXTI_CFG3 | Reserved | | | | | | | | | | | |
| 014h | AFIO_EXTI_CFG4 | Reserved | | | | | | | | | | | |
| 01Ch | | Reserved | | | | | | | | | | | |
| 020h | AFIO_RMP_CFG3 | 0 | 0 | TIM8_RMP[1:0] | 0 | 0 | UART7_RMP[1:0] | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 024h | AFIO_RMP_CFG4 | Reserved | | 0 | 0 | 0 | QSPI_MISO | 0 | 0 | UART6_RMP[1:0] | 0 | 0 | 0 |
| 028h | AFIO_RMP_CFG5 | Reserved | | 0 | 0 | 0 | SP1_NSS | 0 | 0 | UART5_RMP[1:0] | 0 | 0 | 0 |
| | Reset Value | 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 | | | | | | | | | | | |

7.4.2 AFIO 事件控制寄存器 (AFIO_ECTRL)

偏移地址: 0x00

复位值: 0x0000 0000

| | | | | | | | | | | | |
|----|----------|--|--|--|--|-----|---------------|---|--------------|---|----|
| 31 | Reserved | | | | | | | | | | 16 |
| 15 | Reserved | | | | | 8 | 7 | 6 | 4 | 3 | 0 |
| | | | | | | EOE | PORT_SEL[2:0] | | PIN_SEL[3:0] | | |
| | | | | | | rw | rw | | rw | | |

| 位域 | 名称 | 描述 |
|------|---------------|--|
| 31:8 | Reserved | 保留, 必须保持复位值。 |
| 7 | EOE | <p>事件输出使能位。 当设置该位后, Cortex 的事件输出信号将连接到由 PORT_SEL[2:0]和 PIN_SEL[3:0]选定的 I/O 口。</p> <p>0: 输出禁止 1: 输出使能</p> |
| 6:4 | PORT_SEL[2:0] | <p>端口选择位 选择用于输出 Cortex 的事件输出信号的端口:</p> <p>000: 选择 Port A 001: 选择 Port B 010: 选择 Port C 011: 选择 Port D 100: 选择 Port E</p> |
| 3:0 | PIN_SEL[3:0] | <p>引脚选择位 选择用于输出 Cortex 的事件输出信号的引脚, (x=A...E) 与 PORT_SEL[2:0]选定的 I/O 对应。</p> <p>0000: 选择 Px0 0001: 选择 Px1 0010: 选择 Px2 0011: 选择 Px3 0100: 选择 Px4 0101: 选择 Px5 0110: 选择 Px6 0111: 选择 Px7 1000: 选择 Px8 1001: 选择 Px9 1010: 选择 Px10 1011: 选择 Px11 1100: 选择 Px12 1101: 选择 Px13 1110: 选择 Px14 1111: 选择 Px15</p> |

7.4.3 AFIO 复用重映射配置寄存器 (AFIO_RMP_CFG)

偏移地址: 0x04

复位值: 0x0000 0000

| | | | | | | | | | | | | | | | |
|----------|----------|----------|----------|----------|----|------------------|----|------------|--------------|------------|-----------|------------|-----------|-------------|------|
| 31 | Reserved | | | | 27 | 26 | 24 | 23 | 21 | 20 | 19 | 18 | 17 | 16 | |
| | | | | | | SW_JTAG_CFG[2:0] | | Reserved | | ADC2_ETRR | ADC2_ETRI | ADC1_ETRR | ADC1_ETRI | TIM5CH4_RMP | |
| 15 | 14 | 13 | 12 | 11 | 10 | w 9 | 8 | 7 | 6 | 5 | rw 4 | rw 3 | rw 2 | rw 1 | rw 0 |
| PD01_RMP | CAN1_RMP | TIM4_RMP | TIM3_RMP | TIM2_RMP | | TIM1_RMP | | USART3_RMP | USART2_RMP_0 | USART1_RMP | I2C1_RMP | SPI1_RMP_0 | | | |
| rw | rw | rw | rw | rw | | rw | | rw | rw | rw | rw | rw | rw | rw | rw |

| 位域 | 名称 | 描述 |
|-------|------------------|---|
| 31:27 | Reserved | 保留, 必须保持复位值。 |
| 26:24 | SW_JTAG_CFG[2:0] | <p>串行线 JTAG 配置 (Serial wire JTAG configuration)</p> <p>这些位只可由软件写 (读这些位, 将返回未定义的数值), 用于配置 SWD_JTAG 复用功能的 I/O 口。SWD_JTAG (串行线 JTAG) 支持 JTAG 或 SWD 访问 Cortex 的调试端口。系统复位后的默认状态是启用 SWD_JTAG, 这种状态下可以通过 JTMS/JTCK 脚上的特定信号选择 JTAG 或 SW (串行线) 模式。</p> <p>000: 完全 SWD_JTAG (JTAG-DP + SW-DP): 复位状态;</p> <p>001: 完全 SWD_JTAG (JTAG-DP + SW-DP) 但没有 NJTRST;</p> <p>010: 关闭 JTAG-DP, 启用 SW-DP;</p> <p>100: 关闭 JTAG-DP, 关闭 SW-DP;</p> <p>其它值: 无作用。</p> |
| 23:21 | Reserved | 保留, 必须保持复位值。 |
| 20 | ADC2_ETRR | <p>ADC2 规则转换外部触发重映射</p> <p>该位可由软件置'1'或置'0'。它控制与 ADC2 规则转换外部触发相连的触发输入。</p> <p>0: ADC2 规则转换外部触发与 EXTI11 相连</p> <p>1: ADC2 规则转换外部触发与 TIM8_TRGO 相连</p> |
| 19 | ADC2_ETRI | <p>ADC2 注入转换外部触发重映射</p> <p>该位可由软件置'1'或置'0'。它控制与 ADC2 注入转换外部触发相连的触发输入。</p> <p>0: ADC2 注入转换外部触发与 EXTI15 相连</p> <p>1: ADC2 注入转换外部触发与 TIM8_CH4 相连。</p> |
| 18 | ADC1_ETRR | <p>ADC1 规则转换外部触发重映射</p> <p>该位可由软件置'1'或置'0'。它控制与 ADC1 规则转换外部触发相连的触发输入。</p> <p>0: ADC1 规则转换外部触发与 EXTI11 相连</p> <p>1: ADC1 规则转换外部触发与 TIM8_TRGO 相连</p> |
| 17 | ADC1_ETRI | <p>ADC1 注入转换外部触发重映射</p> <p>该位可由软件置'1'或置'0'。它控制与 ADC1 注入转换外部触发相连的触发输入。</p> <p>0: ADC1 注入转换外部触发与 EXTI15 相连</p> <p>1: ADC1 注入转换外部触发与 TIM8_CH4 相连</p> |
| 16 | TIM5CH4_RMP | <p>TIM5 通道 4 内部重映射</p> <p>该位可由软件置'1'或置'0'。它控制 TIM5_CH4 内部映像。</p> <p>0: TIM5_CH4 与 PA3 相连</p> <p>1: LSI 内部振荡器与 TIM5_CH4 相连, 目的是对 LSI 进行校准</p> |
| 15 | PD01_RMP | <p>PDO/PD1 映像到 OSC_IN/OSC_OUT (PD0/PD1 mapping on OSC_IN/OSC_OUT)</p> <p>该位可由软件置'1'或置'0'。它控制 PD0 和 PD1 的 GPIO 功能映像。当不使用主振荡器 HSE 时 (系统运行于内部的 8MHz 阻容振荡器), PD0 和 PD1 可以映像到 OSC_IN 和 OSC_OUT 引脚。此功能只能适用于 80 以下</p> |

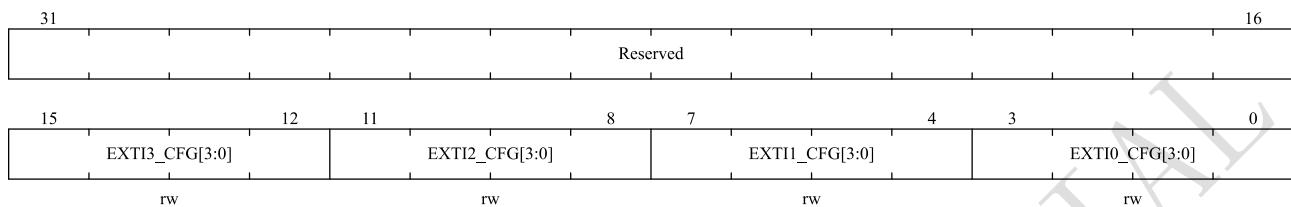
| 位域 | 名称 | 描述 |
|-------|---------------|---|
| | | <p>引脚的封装 (PD0 和 PD1 出现在 80 及以上引脚的封装上, 不必重映像)。</p> <p>0: 不进行 PD0 和 PD1 的重映像;</p> <p>1: PD0 映像到 OSC_IN, PD1 映像到 OSC_OUT。</p> |
| 14:13 | CAN1_RMP[1:0] | <p>CAN1 复用功能重映像</p> <p>这些位可由软件置'1'或置'0', 在只有单个 CAN1 接口的产品上控制复用功能 CAN1_RX 和 CAN1_TX 的重映像。</p> <p>00: CAN1_RX 映像到 PA11, CAN1_TX 映像到 PA12;</p> <p>01: CAN1_RX 映像到 PD8, CAN1_TX 映像到 PD9;</p> <p>10: CAN1_RX 映像到 PB8, CAN1_TX 映像到 PB9 (不能用于 36 脚的封装);</p> <p>11: CAN1_RX 映像到 PD0, CAN1_TX 映像到 PD1。</p> |
| 12 | TIM4_RMP | <p>定时器 4 的重映像</p> <p>该位可由软件置'1'或置'0', 控制将 TIM4 的通道 1-4 映射到 GPIO 端口上。</p> <p>0: 没有重映像 (TIM4_CH1/PB6, TIM4_CH2/PB7, TIM4_CH3/PB8, TIM4_CH4/PB9);</p> <p>1: 完全映像 (TIM4_CH1/PD12, TIM4_CH2/PD13, TIM4_CH3/PD14, TIM4_CH4/PD15)。</p> <p>注: 重映像不影响在 PE0 上的 TIM4_ETR。</p> |
| 11:10 | TIM3_RMP[1:0] | <p>定时器 3 的重映像</p> <p>这些位可由软件置'1'或置'0', 控制定时器 3 的通道 1 至 4 在 GPIO 端口的映像。</p> <p>00: 没有重映像 (CH1/PA6, CH2/PA7, CH3/PB0, CH4/PB1);</p> <p>01: 未用组合;</p> <p>10: 部分映像 (CH1/PB4, CH2/PB5, CH3/PB0, CH4/PB1);</p> <p>11: 完全映像 (CH1/PC6, CH2/PC7, CH3/PC8, CH4/PC9)。</p> <p>注: 重映像不影响在 PD2 上的 TIM3_ETR。</p> |
| 9:8 | TIM2_RMP[1:0] | <p>定时器 2 的重映像</p> <p>这些位可由软件置'1'或置'0', 控制定时器 2 的通道 1 至 4 和外部触发 (ETR) 在 GPIO 端口的映像。</p> <p>00: 没有重映像 (CH1/ETR/PA0, CH2/PA1, CH3/PA2, CH4/PA3);</p> <p>01: 部分映像 (CH1/ETR/PA15, CH2/PB3, CH3/PA2, CH4/PA3);</p> <p>10: 部分映像 (CH1/ETR/PA0, CH2/PA1, CH3/PB10, CH4/PB11);</p> <p>11: 完全映像 (CH1/ETR/PA15, CH2/PB3, CH3/PB10, CH4/PB11)。</p> |
| 7:6 | TIM1_RMP[1:0] | <p>定时器 1 的重映像</p> <p>这些位可由软件置'1'或置'0', 控制定时器 1 的通道 1 至 4、1N 至 3N、外部触发 (ETR) 和刹车输入 (BKIN) 在 GPIO 端口的映像。</p> <p>00: 没有重映像 (ETR/PA12, CH1/PA8, CH2/PA9, CH3/PA10, CH4/PA11, BKIN/PB12, CH1N/PB13, CH2N/PB14, CH3N/PB15);</p> <p>01: 部分映像 (ETR/PA12, CH1/PA8, CH2/PA9, CH3/PA10,</p> |

| 位域 | 名称 | 描述 |
|-----|-----------------|--|
| | | CH4/PA11, BKIN/PA6, CH1N/PA7, CH2N/PB0, CH3N/PB1); 10: 部分映像(ETR/PA12, CH1/PA8, CH2/PA9, CH3/PA10, CH4/PA11, BKIN/PB5, CH1N/PB13, CH2N/PB14, CH3N/PB15); 11: 完全映像 (ETR/PE7, CH1/PE9, CH2/PE11, CH3/PE13, CH4/PE14, BKIN/PE15, CH1N/PE8, CH2N/PE10, CH3N/PE12)。 |
| 5:4 | USART3_RMP[1:0] | USART3 的重映像 这些位可由软件置'1'或置'0', 控制 USART3 的 CTS、RTS、CK、TX 和 RX 复用功能在 GPIO 端口的映像。 00: 没有重映像 (TX/PB10, RX/PB11, CK/PB12, CTS/PB13, RTS/PB14); 01: 部分映像 (TX/PC10, RX/PC11, CK/PC12, CTS/PB13, RTS/PB14); 10: 未用组合; 11: 完全映像 (TX/PD8, RX/PD9, CK/PD10, CTS/PD11, RTS/PD12)。 |
| 3 | USART2_RMP_0 | USART2 的重映像 这些位可由软件置'1'或置'0', 与 USART2_RMP_1 配合使用, 组成 USART2_RMP[1:0], 控制 USART2 的 CTS、RTS、CK、TX 和 RX 复用功能在 GPIO 端口的映像。 00: 没有重映像 (CTS/PA0、RTS/PA1、TX/PA2, RX/PA3, CK/PA4); 01: 重映像 (CTS/PD3、RTS/PD4、TX/PD5, RX/PD6, CK/PD7); 10: 重映像 (CTS/PC6、RTS/PC7、TX/PC8, RX/PC9, CK/-); 11: 重映像 (CTS/PA15、RTS/PB3, TX/PB4, RX/PB5, CK/PA4)。 注: 10 时不支持同步模式 |
| 2 | USART1_RMP[1:0] | USART1 的重映像 该位可由软件置'1'或置'0', 控制 USART1 的 TX 和 RX 复用功能在 GPIO 端口的映像。 0: 没有重映像 (TX/PA9, RX/PA10); 1: 重映像 (TX/PB6, RX/PB7)。 |
| 1 | I2C1_RMP | I2C1 的重映像 该位可由软件置'1'或置'0', 控制 I2C1 的 SCL 和 SDA 复用功能在 GPIO 端口的映像。 0: 没有重映像 (SCL/PB6, SDA/PB7); 1: 重映像 (SCL/PB8, SDA/PB9)。 |
| 0 | SPI1_RMP_0 | SPI1 的重映像 该位可由软件置'1'或置'0', 与 SPI1_RMP_1 配合使用, 组成 SPI1_RMP[1:0], 控制 SPI1 的 NSS、SCK、MISO 和 MOSI 复用功能在 GPIO 端口的映像。 00: 没有重映射(NSS/PA4, SCK/PA5, MISO/PA6, MOSI/PA7); 01: 重映射(NSS/PA15, SCK/PB3, MISO/PB4, MOSI/PB5); 10: 重映射(NSS/PB2, SCK/PA5, MISO/PA6, MOSI/PA7); 11: 重映射(NSS/PB2, SCK/PE7, MISO/PE8, MOSI/PE9); |

7.4.4 AFIO 外部中断配置寄存器 1 (AFIO_EXTI_CFG1)

偏移地址: 0x08

复位值: 0x0000 0000

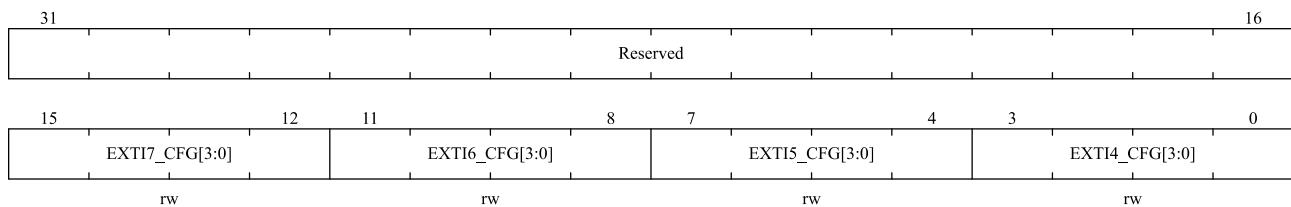


| 位域 | 名称 | 描述 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--------------|----------------|--|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|----------|----------|--|--|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|----------|----------|--|--|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|----------|----------|--|--|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|----------|----------|--|--|
| 31:16 | Reserved | 保留, 必须保持复位值。 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 15:0 | EXTIx_CFG[3:0] | <p>EXTIx 配置 (x = 0 ... 3) 这些位可由软件读写, 用于选择 EXTIx 外部中断的输入源。</p> <p>EXTI0 配置:</p> <table> <tr><td>0000: PA0 引脚</td><td>0001: PB0 引脚</td><td>0010: PC0 引脚</td></tr> <tr><td>0011: PD0 引脚</td><td>0100: PE0 引脚</td><td>0101: 保留</td></tr> <tr><td>0110: 保留</td><td></td><td></td></tr> </table> <p>EXTI1 配置:</p> <table> <tr><td>0000: PA1 引脚</td><td>0001: PB1 引脚</td><td>0010: PC1 引脚</td></tr> <tr><td>0011: PD1 引脚</td><td>0100: PE1 引脚</td><td>0101: 保留</td></tr> <tr><td>0110: 保留</td><td></td><td></td></tr> </table> <p>EXTI2 配置:</p> <table> <tr><td>0000: PA2 引脚</td><td>0001: PB2 引脚</td><td>0010: PC2 引脚</td></tr> <tr><td>0011: PD2 引脚</td><td>0100: PE2 引脚</td><td>0101: 保留</td></tr> <tr><td>0110: 保留</td><td></td><td></td></tr> </table> <p>EXTI3 配置:</p> <table> <tr><td>0000: PA3 引脚</td><td>0001: PB3 引脚</td><td>0010: PC3 引脚</td></tr> <tr><td>0011: PD3 引脚</td><td>0100: PE3 引脚</td><td>0101: 保留</td></tr> <tr><td>0110: 保留</td><td></td><td></td></tr> </table> | 0000: PA0 引脚 | 0001: PB0 引脚 | 0010: PC0 引脚 | 0011: PD0 引脚 | 0100: PE0 引脚 | 0101: 保留 | 0110: 保留 | | | 0000: PA1 引脚 | 0001: PB1 引脚 | 0010: PC1 引脚 | 0011: PD1 引脚 | 0100: PE1 引脚 | 0101: 保留 | 0110: 保留 | | | 0000: PA2 引脚 | 0001: PB2 引脚 | 0010: PC2 引脚 | 0011: PD2 引脚 | 0100: PE2 引脚 | 0101: 保留 | 0110: 保留 | | | 0000: PA3 引脚 | 0001: PB3 引脚 | 0010: PC3 引脚 | 0011: PD3 引脚 | 0100: PE3 引脚 | 0101: 保留 | 0110: 保留 | | |
| 0000: PA0 引脚 | 0001: PB0 引脚 | 0010: PC0 引脚 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0011: PD0 引脚 | 0100: PE0 引脚 | 0101: 保留 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0110: 保留 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0000: PA1 引脚 | 0001: PB1 引脚 | 0010: PC1 引脚 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0011: PD1 引脚 | 0100: PE1 引脚 | 0101: 保留 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0110: 保留 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0000: PA2 引脚 | 0001: PB2 引脚 | 0010: PC2 引脚 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0011: PD2 引脚 | 0100: PE2 引脚 | 0101: 保留 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0110: 保留 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0000: PA3 引脚 | 0001: PB3 引脚 | 0010: PC3 引脚 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0011: PD3 引脚 | 0100: PE3 引脚 | 0101: 保留 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0110: 保留 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

7.4.5 AFIO 外部中断配置寄存器 2 (AFIO_EXTI_CFG2)

偏移地址: 0x0C

复位值: 0x0000 0000

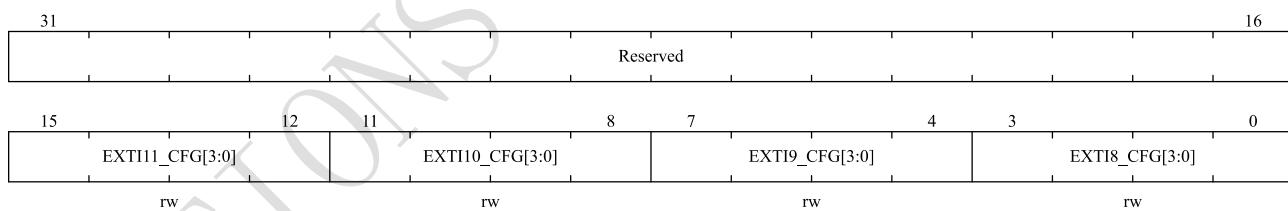


| 位域 | 名称 | 描述 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--------------|----------------|---|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|----------|----------|--|--|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|----------|----------|--|--|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|----------|----------|--|--|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|----------|----------|--|--|
| 31:16 | Reserved | 保留, 必须保持复位值。 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 15:0 | EXTIx_CFG[3:0] | <p>EXTIx 配置 ($x = 4 \dots 7$) 这些位可由软件读写, 用于选择 EXTIx 外部中断的输入源。</p> <p>EXTI4 配置:</p> <table> <tr><td>0000: PA4 引脚</td><td>0001: PB4 引脚</td><td>0010: PC4 引脚</td></tr> <tr><td>0011: PD4 引脚</td><td>0100: PE4 引脚</td><td>0101: 保留</td></tr> <tr><td>0110: 保留</td><td></td><td></td></tr> </table> <p>EXTI5 配置:</p> <table> <tr><td>0000: PA5 引脚</td><td>0001: PB5 引脚</td><td>0010: PC5 引脚</td></tr> <tr><td>0011: PD5 引脚</td><td>0100: PE5 引脚</td><td>0101: 保留</td></tr> <tr><td>0110: 保留</td><td></td><td></td></tr> </table> <p>EXTI6 配置:</p> <table> <tr><td>0000: PA6 引脚</td><td>0001: PB6 引脚</td><td>0010: PC6 引脚</td></tr> <tr><td>0011: PD6 引脚</td><td>0100: PE6 引脚</td><td>0101: 保留</td></tr> <tr><td>0110: 保留</td><td></td><td></td></tr> </table> <p>EXTI7 配置:</p> <table> <tr><td>0000: PA7 引脚</td><td>0001: PB7 引脚</td><td>0010: PC7 引脚</td></tr> <tr><td>0011: PD7 引脚</td><td>0100: PE7 引脚</td><td>0101: 保留</td></tr> <tr><td>0110: 保留</td><td></td><td></td></tr> </table> | 0000: PA4 引脚 | 0001: PB4 引脚 | 0010: PC4 引脚 | 0011: PD4 引脚 | 0100: PE4 引脚 | 0101: 保留 | 0110: 保留 | | | 0000: PA5 引脚 | 0001: PB5 引脚 | 0010: PC5 引脚 | 0011: PD5 引脚 | 0100: PE5 引脚 | 0101: 保留 | 0110: 保留 | | | 0000: PA6 引脚 | 0001: PB6 引脚 | 0010: PC6 引脚 | 0011: PD6 引脚 | 0100: PE6 引脚 | 0101: 保留 | 0110: 保留 | | | 0000: PA7 引脚 | 0001: PB7 引脚 | 0010: PC7 引脚 | 0011: PD7 引脚 | 0100: PE7 引脚 | 0101: 保留 | 0110: 保留 | | |
| 0000: PA4 引脚 | 0001: PB4 引脚 | 0010: PC4 引脚 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0011: PD4 引脚 | 0100: PE4 引脚 | 0101: 保留 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0110: 保留 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0000: PA5 引脚 | 0001: PB5 引脚 | 0010: PC5 引脚 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0011: PD5 引脚 | 0100: PE5 引脚 | 0101: 保留 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0110: 保留 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0000: PA6 引脚 | 0001: PB6 引脚 | 0010: PC6 引脚 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0011: PD6 引脚 | 0100: PE6 引脚 | 0101: 保留 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0110: 保留 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0000: PA7 引脚 | 0001: PB7 引脚 | 0010: PC7 引脚 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0011: PD7 引脚 | 0100: PE7 引脚 | 0101: 保留 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0110: 保留 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

7.4.6 AFIO 外部中断配置寄存器 3 (AFIO_EXTI_CFG3)

偏移地址: 0x10

复位值: 0x0000 0000



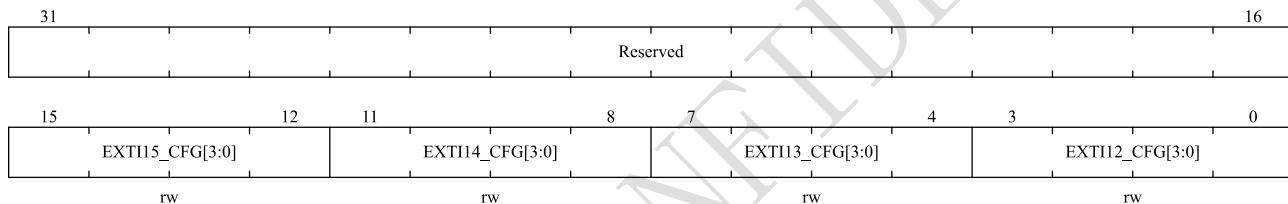
| 位域 | 名称 | 描述 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--------------|----------------|--|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|----------|----------|--|--|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|----------|----------|--|--|
| 31:16 | Reserved | 保留, 必须保持复位值。 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 15:0 | EXTIx_CFG[3:0] | <p>EXTIx 配置 ($x = 8 \dots 11$) 这些位可由软件读写, 用于选择 EXTIx 外部中断的输入源。</p> <p>EXTI8 配置:</p> <table> <tr><td>0000: PA8 引脚</td><td>0001: PB8 引脚</td><td>0010: PC8 引脚</td></tr> <tr><td>0011: PD8 引脚</td><td>0100: PE8 引脚</td><td>0101: 保留</td></tr> <tr><td>0110: 保留</td><td></td><td></td></tr> </table> <p>EXTI9 配置:</p> <table> <tr><td>0000: PA9 引脚</td><td>0001: PB9 引脚</td><td>0010: PC9 引脚</td></tr> <tr><td>0011: PD9 引脚</td><td>0100: PE9 引脚</td><td>0101: 保留</td></tr> <tr><td>0110: 保留</td><td></td><td></td></tr> </table> | 0000: PA8 引脚 | 0001: PB8 引脚 | 0010: PC8 引脚 | 0011: PD8 引脚 | 0100: PE8 引脚 | 0101: 保留 | 0110: 保留 | | | 0000: PA9 引脚 | 0001: PB9 引脚 | 0010: PC9 引脚 | 0011: PD9 引脚 | 0100: PE9 引脚 | 0101: 保留 | 0110: 保留 | | |
| 0000: PA8 引脚 | 0001: PB8 引脚 | 0010: PC8 引脚 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0011: PD8 引脚 | 0100: PE8 引脚 | 0101: 保留 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0110: 保留 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0000: PA9 引脚 | 0001: PB9 引脚 | 0010: PC9 引脚 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0011: PD9 引脚 | 0100: PE9 引脚 | 0101: 保留 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0110: 保留 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

| 位域 | 名称 | 描述 |
|----|----|--|
| | | 0110: 保留 EXTI10 配置: 0000: PA10 引脚 0001: PB10 引脚 0010: PC10 引脚 0011: PD10 引脚 0100: PE10 引脚 0101: 保留 0110: 保留 EXTI11 配置: 0000: PA11 引脚 0001: PB11 引脚 0010: PC11 引脚 0011: PD11 引脚 0100: PE11 引脚 0101: 保留 0110: 保留 |

7.4.7 AFIO 外部中断配置寄存器 4 (AFIO_EXTI_CFG4)

偏移地址: 0x14

复位值: 0x0000 0000



| 位域 | 名称 | 描述 |
|-------|----------------|---|
| 31:16 | Reserved | 保留, 必须保持复位值。 |
| 15:0 | EXTIx_CFG[3:0] | EXTIx 配置 (x = 12 ... 15) 这些位可由软件读写, 用于选择 EXTIx 外部中断的输入源。 EXTI12 配置: 0000: PA12 引脚 0001: PB12 引脚 0010: PC12 引脚 0011: PD12 引脚 0100: PE12 引脚 0101: 保留 0110: 保留 EXTI13 配置: 0000: PA13 引脚 0001: PB13 引脚 0010: PC13 引脚 0011: PD13 引脚 0100: PE13 引脚 0101: 保留 0110: 保留 EXTI14 配置: 0000: PA14 引脚 0001: PB14 引脚 0010: PC14 引脚 0011: PD14 引脚 0100: PE14 引脚 0101: 保留 0110: 保留 EXTI15 配置: 0000: PA15 引脚 0001: PB15 引脚 0010: PC15 引脚 0011: PD15 引脚 0100: PE15 引脚 0101: 保留 0110: 保留 |

7.4.8 AFIO 复用重映射配置寄存器 3 (AFIO_RMP_CFG3)

偏移地址: 0x20

复位值: 0x0000 0000

| | | | | | | | | | | | | | | | |
|---------------|---------------|----|----------------|----------------|----|----------------|----------------|---------------|------------|----------|---------------|----|----------|----|----|
| 31 | 30 | 29 | 28 | 27 | 26 | 25 | 24 | 23 | 22 | 21 | 20 | 19 | 18 | 17 | 16 |
| TIM8_RMP[1:0] | Reserved | | UART7_RMP[1:0] | UART6_RMP[1:0] | | UART5_RMP[1:0] | UART4_RMP[1:0] | USART2_RMP_1 | SPI1_RMP_1 | | Reserved | | | | |
| 15 | rw | 14 | 13 | 12 | rw | 11 | 10 | rw | 8 | 7 | rw | 6 | 5 | rw | 3 |
| SPI3_RMP[1:0] | SPI2_RMP[1:0] | | I2C4_RMP[1:0] | I2C3_RMP[1:0] | | I2C2_RMP[1:0] | | QSPI_RMP[1:0] | | Reserved | CAN2_RMP[1:0] | | SDIO_RMP | | 0 |
| | rw | | rw | | rw | | rw | | rw | | rw | | rw | | rw |

| 位域 | 名称 | 描述 |
|-------|----------------|--|
| 31:30 | TIM8_RMP[1:0] | 定时器 8 的重映像 这些位可由软件置'1'或置'0', 控制定时器 8 的通道 1 至 2 在 GPIO 端口的映像。 00: 没有重映像 (ETR/PA0, CH1/PC6, CH2/PC7, CH3/PC8, CH4/PC9,BKIN/PA6, CH1N/PA7, CH2N/PB0,CH3N/PB1); 01: 部分映像 (ETR/PB4, CH1/PC6, CH2/PC7, CH3/PC8, CH4/PC9, BKIN/PB3, CH1N/PA15, CH2N/PC12, CH3N/PD2); 10: 未用组合; 11: 部分映像 (ETR/PB4, CH1/PD14, CH2/PD15, CH3/PC8, CH4/PC9, BKIN/PB3, CH1N/PA15, CH2N/PC12, CH3N/PD2)。 |
| 29:28 | Reserved | 保留, 必须保持复位值。 |
| 27:26 | UART7_RMP[1:0] | UART7 的重映像 这些位可由软件置'1'或置'0', 控制 UART7 的 TX 和 RX 复用功能在 GPIO 端口的映像。 00: 没有重映像 (TX/PC4, RX/PC5); 01: 重映像 (TX/PC2, RX/PC3); 10: 未用组合; 11: 未用组合。 |
| 25:24 | UART6_RMP[1:0] | UART6 的重映像 这些位可由软件置'1'或置'0', 控制 UART6 的 TX 和 RX 复用功能在 GPIO 端口的映像。 00: 没有重映像 (TX/PE2, RX/PE3); 01: 未用组合; 10: 重映像 (TX/PC0, RX/PC1); 11: 重映像 (TX/PB0, RX/PB1)。 |
| 23:22 | UART5_RMP[1:0] | UART5 的重映像 这些位可由软件置'1'或置'0', 控制 UART5 的 TX 和 RX 复用功能在 GPIO 端口的映像。 00: 没有重映像 (TX/PC12, RX/PD2); 01: 重映像 (TX/PB13, RX/PB14); 10: 重映像 (TX/PE8, RX/PE9); |

| 位域 | 名称 | 描述 |
|-------|----------------|--|
| | | 11: 重映像 (TX/PB8, RX/PB9)。 |
| 21:20 | UART4_RMP[1:0] | <p>UART4 的重映像</p> <p>这些位可由软件置'1'或置'0', 控制 UART4 的 TX 和 RX 复用功能在 GPIO 端口的映像。</p> <p>00: 没有重映像 (TX/PC10, RX/PC11);</p> <p>01: 重映像 (TX/PB2, RX/PE7);</p> <p>10: 重映像 (TX/PA13, RX/PA14);</p> <p>11: 重映像 (TX/PD0, RX/PD1)。</p> |
| 19 | USART2_RMP_1 | <p>USART2 的重映像</p> <p>这些位可由软件置'1'或置'0', 与 USART2_RMP_0 配合使用, 组成 USART2_RMP[1:0], 控制 USART2 的 CTS、RTS、CK、TX 和 RX 复用功能在 GPIO 端口的映像。</p> <p>00: 没有重映像 (CTS/PA0、RTS/PA1、TX/PA2, RX/PA3、CK/PA4);</p> <p>01: 重映像 (CTS/PD3、RTS/PD4、TX/PD5, RX/PD6、CK/PD7);</p> <p>10: 重映像 (CTS/PC6、RTS/PC7、TX/PC8, RX/PC9、CK/-);</p> <p>11: 重映像 (CTS/PA15、RTS/PB3、TX/PB4, RX/PB5、CK/PA4)。</p> <p>注: 10 时不支持同步模式</p> |
| 18 | SPI1_RMP_1 | <p>SPI1 的重映像</p> <p>该位可由软件置'1'或置'0', 与 SPI1_RMP_0 配合使用, 组成 SPI1_RMP[1:0], 控制 SPI1 的 NSS、SCK、MISO 和 MOSI 复用功能在 GPIO 端口的映像。</p> <p>00: 没有重映射(NSS/PA4, SCK/PA5, MISO/PA6, MOSI/PA7);</p> <p>01: 重映射(NSS/PA15, SCK/PB3, MISO/PB4, MOSI/PB5);</p> <p>10: 重映射(NSS/PB2, SCK/PA5, MISO/PA6, MOSI/PA7);</p> <p>11: 重映射(NSS/PB2, SCK/PE7, MISO/PE8, MOSI/PE9);</p> |
| 17:16 | Reserved | 保留, 必须保持复位值。 |
| 15:14 | SPI3_RMP[1:0] | <p>SPI3 的重映像</p> <p>该位可由软件置'1'或置'0', 控制 SPI3 的 NSS、SCK、MISO 和 MOSI 复用功能在 GPIO 端口的映像。</p> <p>00: 没有重映像 (NSS/WS/PA15, SCK/CK/PB3, MISO/PB4, MOSI/PB5);</p> <p>01: 重映像 (NSS/WS/PD2, SCK/CK/PC10, MISO/PC11, MOSI/PC12);</p> <p>10: 重映像 (NSS/WS/PD8, SCK/CK/PD9, MISO/PD11, MOSI/PD12);</p> <p>11: 重映像 (NSS/WS/PC2, SCK/CK/PC3, MISO/PA0, MOSI/PA1)。</p> |
| 13:12 | SPI2_RMP[1:0] | <p>SPI2 的重映像</p> <p>该位可由软件置'1'或置'0', 控制 SPI2 的 NSS、SCK、MISO 和 MOSI 复用功能在 GPIO 端口的映像。</p> <p>00: 没有重映像 (NSS/WS/PB12, SCK/CK/PB13, MISO/PB14, MOSI/PB15);</p> <p>01: 重映像 (NSS/WS/PC6, SCK/CK/PC7, MISO/PC8, MOSI/PC9);</p> <p>10: 未用组合;</p> <p>11: 重映像 (NSS/WS/PE10, SCK/CK/PE11, MISO/PE12, MOSI/PE13)。</p> |
| 11:10 | I2C4_RMP[1:0] | I2C4 的重映像 |

| 位域 | 名称 | 描述 |
|-----|---------------|---|
| | | <p>该位可由软件置'1'或置'0'，控制 I2C4 的 SDA、SCL 复用功能在 GPIO 端口的映像。</p> <p>00: 没有重映像 (SCL/PC6, SDA/PC7); 01: 重映像 (SCL/PD14, SDA/PD15); 10: 未用组合; 11: 重映像 (SCL/PA9, SDA/PA10)。</p> |
| 9:8 | I2C3_RMP[1:0] | <p>I2C3 的重映像</p> <p>该位可由软件置'1'或置'0'，控制 I2C3 的 SDA、SCL 复用功能在 GPIO 端口的映像。</p> <p>00: 没有重映像 (SCL/PC0, SDA/PC1); 01: 未用组合; 10: 未用组合;; 11: 重映像 (SCL/PC4, SDA/PC5)。</p> |
| 7:6 | I2C2_RMP[1:0] | <p>I2C2 的重映像</p> <p>该位可由软件置'1'或置'0'，控制 I2C2 的 SDA、SCL 复用功能在 GPIO 端口的映像。</p> <p>00: 没有重映像 (SCL/PB10, SDA/PB11); 01: 未用组合;; 10: 未用组合; 11: 重映像 (SCL/PA4, SDA/PA5)。</p> |
| 5:4 | QSPI_RMP[1:0] | <p>QSPI 的重映像</p> <p>该位可由软件置'1'或置'0'，控制 QSPI 的 IO0、IO1、IO2、IO3、CLK、NSS 复用功能在 GPIO 端口的映像。</p> <p>00: 没有重映像 (NSS/PA4, SCK/PA5, IO0/PA6, IO1/PA7, IO2/PC4, IO3/PC5); 01: 未用组合; 10: 未用组合;; 11: 重映像 (NSS/PC10, SCK/PC11, IO0/PC12, IO1/PD0, IO2/PD1, IO3/PD2)。</p> |
| 3 | Reserved | 保留，必须保持复位值。 |
| 2:1 | CAN2_RMP[1:0] | <p>CAN2 的重映像</p> <p>该位可由软件置'1'或置'0'，控制 CAN2 的 CAN2_RX、CAN2_TX 复用功能在 GPIO 端口的映像。</p> <p>00: 没有重映像 (RX/PB12, TX/PB13); 01: 重映像 (RX/PB5, TX/PB6); 10: 未用组合; 11: 重映像 (RX/PD10, TX/PD11)。</p> |
| 0 | SDIO_RMP | <p>SDIO 的重映像</p> <p>该位可由软件置'1'或置'0'，控制复用功能端口的映像，D4/PB8, D5/PB9, D6/PC6, D7/PC7 不重映像。</p> <p>0: 没有重映像 (DO/PC8, D1/PC9, D2/PC10, D3/PC11, CK/PC12, CMD/PD2);</p> |

| 位域 | 名称 | 描述 |
|----|----|---|
| | | 1: 重映像 (DO/PE8, D1/PE9, D2/PE10, D3/PE11, CK/PE12, CMD/PE13); |

7.4.9 AFIO 复用重映射配置寄存器 4 (AFIO_RMP_CFG4)

偏移地址: 0x24

复位值: 0x0000 0000

| | | | | | | | | | | | | | | | | |
|-----------|-----------|----------|-----------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----|----------|-------------|----------|-----------|-----------|----|
| 31 | Reserved | | | | | 26 | 25 | 24 | 23 | 22 | 21 | 20 | 19 | 18 | 17 | 16 |
| | | | | | | QSPI_MISO | SPI3_NSS | SPI2_NSS | SPI1_NSS | | Reserved | QSPI_XIP_EN | Reserved | ADC4_ETRR | ADC4_ETRI | |
| 15 | 14 | 13 | 12 | 11 | 10 | rw | 9 | rw | rw | 7 | rw | 6 | 5 | 4 | rw | rw |
| ADC3_ETRR | ADC3_ETRI | Reserved | COMP7_RMP | COMP6_RMP[1:0] | COMP5_RMP[1:0] | COMP4_RMP[1:0] | COMP3_RMP[1:0] | COMP2_RMP[1:0] | COMP1_RMP[1:0] | | | | | | | |
| rw | rw | rw | rw | rw | rw | rw | rw | rw | rw | rw | rw | rw | rw | rw | rw | rw |

| 位域 | 名称 | 描述 |
|-------|-------------|--|
| 31:26 | Reserved | 保留, 必须保持复位值。 |
| 25 | QSPI_MISO | QSPI 的 IO1 脚在标准单线模式下相当于 MISO, 管脚属性可配置为: 0: 由 QSPI 模块自动控制是输入还是输出 1: 固定为浮空输入 |
| 24 | SPI3_NSS | SPI3 的 NSS 模式位 (NSS 配置为 AFIO 推挽时)。 0: 空闲时 NSS 为高阻 1: 空闲时 NSS 为 1 |
| 23 | SPI2_NSS | SPI2 的 NSS 模式位 (NSS 配置为 AFIO 推挽时)。 0: 空闲时 NSS 为高阻 1: 空闲时 NSS 为 1 |
| 22 | SPI1_NSS | SPI1 的 NSS 模式位 (NSS 配置为 AFIO 推挽时)。 0: 空闲时 NSS 为高阻 1: 空闲时 NSS 为 1 |
| 21:20 | Reserved | 保留, 必须保持复位值。 |
| 19 | QSPI_XIP_EN | QSPI XIP 内存映射模式使能控制 0: 禁止 1: 使能 |
| 18 | Reserved | 保留, 必须保持复位值。 |
| 17 | ADC4_ETRR | ADC4 规则转换外部触发重映射 该位可由软件置'1'或置'0'。它控制与 ADC4 规则转换外部触发相连的触发输入。 0: ADC4 规则转换外部触发与 EXTI10 相连 1: ADC4 规则转换外部触发与 TIM5_CH3 相连 |
| 16 | ADC4_ETRI | ADC4 注入转换外部触发重映射 该位可由软件置'1'或置'0'。它控制与 ADC4 注入转换外部触发相连的触发输入。 0: ADC4 注入转换外部触发与 EXTI14 相连 |

| 位域 | 名称 | 描述 |
|-------|----------------|--|
| | | 1: ADC4 注入转换外部触发与 TIM5_CH4 相连。 |
| 15 | ADC3_ETRR | ADC3 规则转换外部触发重映射 该位可由软件置'1'或置'0'。它控制与 ADC3 规则转换外部触发相连的触发输入。 0: ADC3 规则转换外部触发与 EXTI10 相连 1: ADC3 规则转换外部触发与 TIM5_CH 3 相连 |
| 14 | ADC3_ETRI | ADC3 注入转换外部触发重映射 该位可由软件置'1'或置'0'。它控制与 ADC3 注入转换外部触发相连的触发输入。 0: ADC3 注入转换外部触发与 EXTI14 相连 1: ADC3 注入转换外部触发与 TIM5_CH 4 相连 |
| 13 | Reserved | 保留, 必须保持复位值。 |
| 12 | COMP7_RMP | COMP7_OUT 的重映像 该位可由软件置'1'或置'0'。 0: 没有重映像 (COMP7_OUT/PC2); 1: 重映像 (COMP7_OUT/PD12)。 |
| 11:10 | COMP6_RMP[1:0] | COMP6_OUT 的重映像 该位可由软件置'1'或置'0'。 00: 没有重映像 (COMP6_OUT/PC9); 01: 重映像 (COMP6_OUT/PA12); 10: 未用组合; 11: 重映像 (COMP6_OUT/PB7)。 |
| 9:8 | COMP5_RMP[1:0] | COMP5_OUT 的重映像 该位可由软件置'1'或置'0'。 00: 没有重映像 (COMP5_OUT/PB0); 01: 重映像 (COMP5_OUT/PB11); 10: 重映像 (COMP5_OUT/PB6); 11: 重映像 (COMP5_OUT/PA11)。 |
| 7:6 | COMP4_RMP[1:0] | COMP4_OUT 的重映像 该位可由软件置'1'或置'0'。 00: 没有重映像 (COMP4_OUT/PC5); 01: 重映像 (COMP4_OUT/PB12); 10: 未用组合; 11: 重映像 (COMP4_OUT/PC11)。 |
| 5:4 | COMP3_RMP[1:0] | COMP3_OUT 的重映像 该位可由软件置'1'或置'0'。 00: 没有重映像 (COMP3_OUT/PB10); 01: 重映像 (COMP3_OUT/PC10); 10: 未用组合; 11: 重映像 (COMP3_OUT/PA2)。 |
| 3:2 | COMP2_RMP[1:0] | COMP2_OUT 的重映像 该位可由软件置'1'或置'0'。 |

| 位域 | 名称 | 描述 |
|-----|----------------|---|
| | | 00: 没有重映像 (COMP2_OUT/PA6); 01: 重映像 (COMP2_OUT/PA7); 10: 重映像 (COMP2_OUT/PA12); 11: 重映像 (COMP2_OUT/PB9)。 |
| 1:0 | COMP1_RMP[1:0] | COMP1_OUT 的重映像 该位可由软件置'1'或置'0'。 00: 没有重映像 (COMP1_OUT/PA0); 01: 重映像 (COMP1_OUT/PB1); 10: 重映像 (COMP1_OUT/PA11); 11: 重映像 (COMP1_OUT/PB8)。 |

7.4.10 AFIO 复用重映射配置寄存器 5 (AFIO_RMP_CFG5)

偏移地址: 0x28

复位值: 0x0000 0000

| | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|----|----------------|----------------|----------------|----------------|-------------|-------------|-------------|-------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| 31 | Reserved | | | | | | | | 24 | 23 | 22 | 21 | 20 | 19 | 18 | 17 | 16 |
| 15 | ECLAMP4_DET_EN | ECLAMP3_DET_EN | ECLAMP2_DET_EN | ECLAMP1_DET_EN | EGB4_RST_EN | EGB3_RST_EN | EGB2_RST_EN | EGB1_RST_EN | 8 | 7 | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | 0 |
| 14 | | | | | | | | | rw | |
| 13 | | | | | | | | | rw | |
| 12 | | | | | | | | | rw | |
| 11 | | | | | | | | | rw | |
| 10 | | | | | | | | | rw | |
| 9 | | | | | | | | | rw | |
| 8 | | | | | | | | | rw | |

| 位域 | 名称 | 描述 |
|-------|--------------|---|
| 31:24 | Reserved | 保留, 必须保持复位值。 |
| 23 | EGB4_DET_EN | EMC GB4 检测使能位 (地弹检测)。 0: 禁止 1: 使能 |
| 22 | EGB3_DET_EN | EMC GB3 检测使能位。 0: 禁止 1: 使能 |
| 21 | EGB2_DET_EN | EMC GB2 检测使能位。 0: 禁止 1: 使能 |
| 20 | EGB1_DET_EN | EMC GB1 检测使能位。 0: 禁止 1: 使能 |
| 19 | EGBN4_DET_EN | EMC GBN4 检测使能位。 0: 禁止 1: 使能 |
| 18 | EGBN3_DET_EN | EMC GBN3 检测使能位。 0: 禁止 1: 使能 |

| 位域 | 名称 | 描述 |
|----|----------------|--|
| 17 | EGBN2_DET_EN | EMC GBN2 检测使能位。 0: 禁止 1: 使能 |
| 16 | EGBN1_DET_EN | EMC GBN1 检测使能位。 0: 禁止 1: 使能 |
| 15 | ECLAMP4_DET_EN | 针对 VDD_4 的 EMC CLAMP4 检测使能位。 0: 禁止 1: 使能 |
| 14 | ECLAMP3_DET_EN | 针对 VDD_3 的 EMC CLAMP3 检测使能位。 0: 禁止 1: 使能 |
| 13 | ECLAMP2_DET_EN | 针对 VDD_2 的 EMC CLAMP2 检测使能位。 0: 禁止 1: 使能 |
| 12 | ECLAMP1_DET_EN | 针对 VDD_1 的 EMC CLAMP1 检测使能位。 0: 禁止 1: 使能 |
| 11 | EGB4_RST_EN | 当 EMC GB4 检测到时, 系统复位使能位。 0: 禁止 1: 使能 |
| 10 | EGB3_RST_EN | 当 EMC GB3 检测到时, 系统复位使能位。 0: 禁止 1: 使能 |
| 9 | EGB2_RST_EN | 当 EMC GB2 检测到时, 系统复位使能位。 0: 禁止 1: 使能 |
| 8 | EGB1_RST_EN | 当 EMC GB1 检测到时, 系统复位使能位。 0: 禁止 1: 使能 |
| 7 | EGBN4_RST_EN | 当 EMC GBN4 检测到时, 系统复位使能位。 0: 禁止 1: 使能 |
| 6 | EGBN3_RST_EN | 当 EMC GBN3 检测到时, 系统复位使能位。 0: 禁止 1: 使能 |
| 5 | EGBN2_RST_EN | 当 EMC GBN2 检测到时, 系统复位使能位。 0: 禁止 1: 使能 |
| 4 | EGBN1_RST_EN | 当 EMC GBN1 检测到时, 系统复位使能位。 0: 禁止 1: 使能 |

| 位域 | 名称 | 描述 |
|----|----------------|---|
| 3 | ECLAMP4_RST_EN | 当 EMC CLAMP4 检测到时, 系统复位使能位。 0: 禁止 1: 使能 |
| 2 | ECLAMP3_RST_EN | 当 EMC CLAMP3 检测到时, 系统复位使能位。 0: 禁止 1: 使能 |
| 1 | ECLAMP2_RST_EN | 当 EMC CLAMP2 检测到时, 系统复位使能位。 0: 禁止 1: 使能 |
| 0 | ECLAMP1_RST_EN | 当 EMC CLAMP1 检测到时, 系统复位使能位。 0: 禁止 1: 使能 |

8 DMA 控制器

8.1 简介

DMA 控制器总共可以访问 7 个 AHB 从机：Flash、SRAM、ADC、SDIO、QSPI、ABP1 和 APB2。DMA 控制器由 CPU 控制以执行从源到目的的快速数据移动。配置完成后，无需 CPU 干预即可传输数据。因此，可以释放 CPU 用于其他计算/控制任务或节省整体系统功耗。

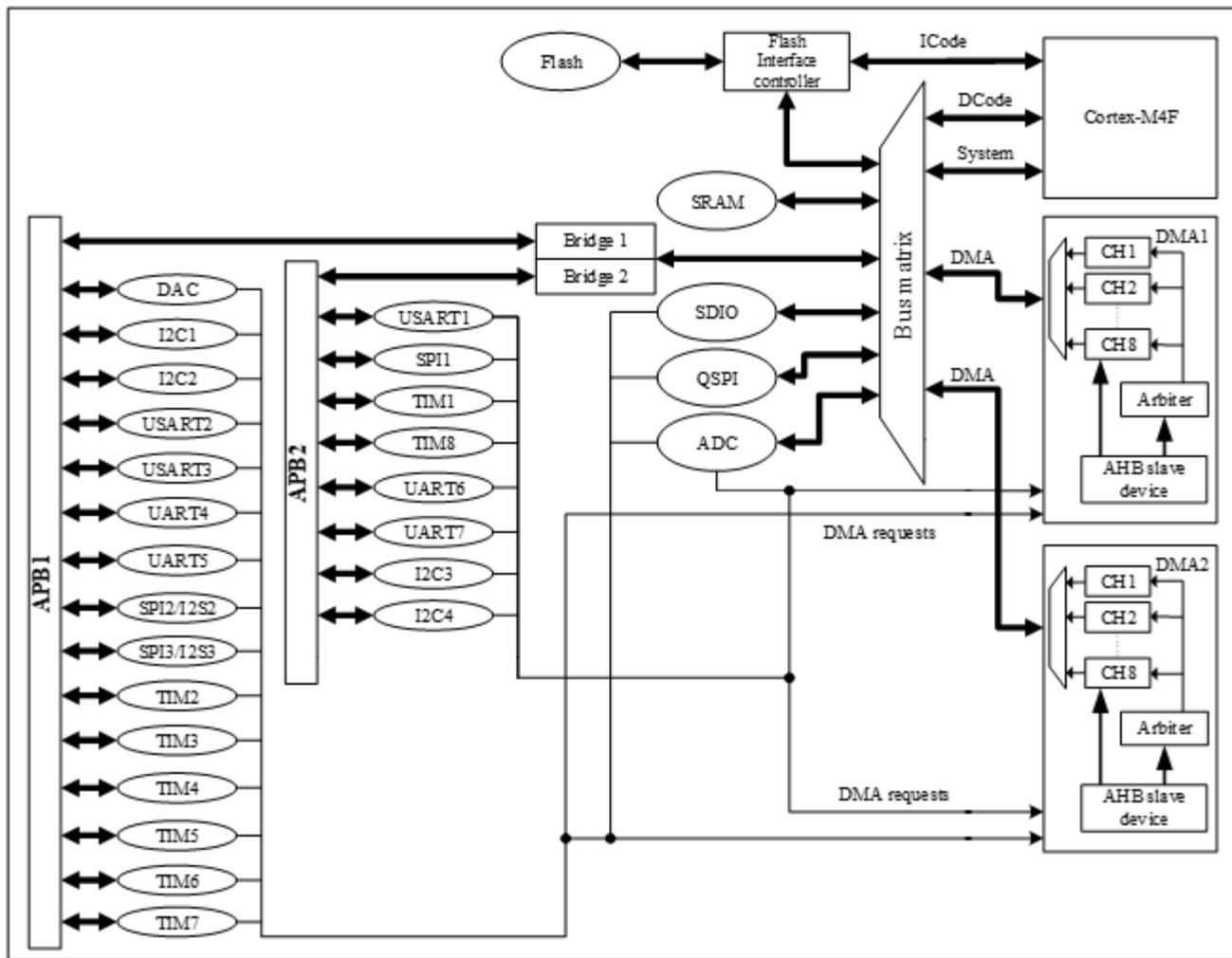
芯片有两个 DMA（DMA1、DMA2）控制器，每个 DMA 控制器有 8 个逻辑通道。每个逻辑通道用于服务来自单个或多个外设的内存访问请求。内部仲裁器控制不同 DMA 通道的优先级。

8.2 主要特性

- 16 个可独立配置的 DMA 通道：DMA1 和 DMA2 各有 8 个通道
- 支持内存到内存、内存到外设和外设到内存三种传输类型
- 每个 DMA 通道支持硬件请求和软件触发来启动传输，并由软件配置
- 每个 DMA 通道都有专用的软件优先级（DMA_CHCFGx.PRIOLVL[1:0]位，对应 4 个优先级），可以单独配置。具有相同软件优先级的通道将进一步比较硬件索引（通道号）以确定最终优先级（索引号越低的通道优先级越高）
- 可配置的源和目标大小。地址设置应与数据大小相对应
- 每个通道可配置循环传输模式
- 每个通道有 3 个独立的事件标志和中断（传输完成、半传输、传输错误）和 1 个全局中断标志（由 3 个事件的逻辑或设置）。
- 共访问 7 个 AHB 从机：Flash、SRAM、ADC、SDIO、QSPI、ABP1 和 APB2
- 可配置数据传输数（0~65535）

8.3 功能框图

图 8-1 DMA 框图



8.4 功能描述

DMA 控制器和 Cortex™-M4F 内核共享相同的系统数据总线。当 CPU 和 DMA 同时访问同一个目标（RAM 或外设）时，DMA 请求会暂停 CPU 访问系统总线几个周期，由总线仲裁器进行循环调度。这允许 CPU 获得至少一半的系统总线（内存或外围设备）带宽。

8.4.1 DMA 操作

DMA 请求可以由硬件外设或软件触发，DMA 控制器根据通道的优先级处理请求。根据配置的传输地址和位宽从源地址读取数据，然后将读取的数据存储在目的地址空间中。一次操作后，控制器计算剩余传输次数，并更新下一次传输的源地址和目的地址。

每个 DMA 数据传输包括三个操作：

- 数据访问：根据传输方向确定源地址（DMA_PADDRx 或 DMA_MADDRx），从源地址读取数据。

- 数据存储：根据传输方向确定目的地址 (DMA_PADDRx 或 DMA_MADDRx)，将读取的数据存储到目的地址空间。
- 计算未完成操作的数量，对 DMA_TXNUMx 寄存器进行减量操作，更新下一个操作的源地址和目的地址。

8.4.2 通道优先级和仲裁器

DMA 使用仲裁策略来处理来自不同通道的多个请求。每个通道的优先级可在通道控制寄存器 (DMA_CHCFGx) 中进行编程。

4 个优先级：

- ◆ 非常高优先级
- ◆ 高优先级
- ◆ 中优先级
- ◆ 低优先级

默认情况下，如果编程的优先级相同，则索引较低的通道具有较高的优先级。

8.4.3 DMA 通道和传输数量

每个通道都可以在指定地址的外设寄存器和内存地址之间进行 DMA 传输。DMA 传输的数据数量是可编程的，最大支持值为 65535。DMA_TXNUM 寄存器在每次传输后递减。

8.4.4 可编程的数据位宽

外设和内存传输数据位宽支持字节、半字和字，可以通过 DMA_CHCFGx.PSIZE 和 DMA_CHCFGx.MSIZE 进行编程。

当 DMA_CHCFGx.PSIZE 和 DMA_CHCFGx.MSIZE 不同时，DMA 模块根据表 8-1 对齐数据。

表 8-1 可编程的数据宽度和大小端操作(当 PINC = MINC = 1)

| Source width (bit) | Destina- tion width (bit) | Number of transfer (bit) | Source: Address / data | Transfer operations (R: Read, W: Write) | Destination: Address / data |
|--------------------|---------------------------|--------------------------|------------------------|--|-----------------------------|
| 8 | 8 | 4 | 0x0 / B0 | 1: R B0 [7:0] @0x0, W B0 [7:0] @0x0 | 0x0 / B0 |
| | | | 0x1 / B1 | 2: R B1 [7:0] @0x1, W B1 [7:0] @0x1 | 0x1 / B1 |
| | | | 0x2 / B2 | 3: R B2 [7:0] @0x2, W B2 [7:0] @0x2 | 0x2 / B2 |
| | | | 0x3 / B3 | 4: R B3 [7:0] @0x3, W B3 [7:0] @0x3 | 0x3 / B3 |
| 8 | 16 | 4 | 0x0 / B0 | 1: R B0 [7:0] @0x0, W 00B0 [15:0] @0x0 | 0x0 / 00B0 |
| | | | 0x1 / B1 | 2: R B1 [7:0] @0x1, W 00B1 [15:0] @0x2 | 0x2 / 00B1 |
| | | | 0x2 / B2 | 3: R B2 [7:0] @0x2, W 00B2 [15:0] @0x4 | 0x4 / 00B2 |
| | | | 0x3 / B3 | 4: R B3 [7:0] @0x3, W 00B3 [15:0] @0x6 | 0x6 / 00B3 |

| Source width (bit) | Destina- tion width (bit) | Number of transfer (bit) | Source: Address / data | Transfer operations (R: Read, W: Write) | Destination: Address / data |
|--------------------|------------------------------|--------------------------|--|--|--|
| 8 | 32 | 4 | 0x0 / B0 0x1 / B1 0x2 / B2 0x3 / B3 | 1: R B0 [7:0] @0x0, W 000000B0 [31:0] @0x0 2: R B1 [7:0] @0x1, W 000000B1 [31:0] @0x4 3: R B2 [7:0] @0x2, W 000000B2 [31:0] @0x8 4: R B3 [7:0] @0x3, W 000000B3 [31:0] @0xC | 0x0 / 000000B0 0x4 / 000000B1 0x8 / 000000B2 0xC / 000000B3 |
| 16 | 8 | 4 | 0x0 / B1B0 0x2 / B3B2 0x4 / B5B4 0x6 / B7B6 | 1: R B1B0 [15:0] @0x0, W B0 [7:0] @0x0 2: R B3B2 [15:0] @0x2, W B2 [7:0] @0x1 3: R B5B4 [15:0] @0x4, W B4 [7:0] @0x2 4: R B7B6 [15:0] @0x6, W B6 [7:0] @0x3 | 0x0 / B0 0x1 / B2 0x2 / B4 0x3 / B6 |
| 16 | 16 | 4 | 0x0 / B1B0 0x2 / B3B2 0x4 / B5B4 0x6 / B7B6 | 1: R B1B0 [15:0] @0x0, W B1B0 [15:0] @0x0 2: R B3B2 [15:0] @0x2, W B3B2 [15:0] @0x2 3: R B5B4 [15:0] @0x4, W B5B4 [15:0] @0x4 4: R B7B6 [15:0] @0x6, W B7B6 [15:0] @0x6 | 0x0 / B1B0 0x2 / B3B2 0x4 / B5B4 0x6 / B7B6 |
| 16 | 32 | 4 | 0x0 / B1B0 0x2 / B3B2 0x4 / B5B4 0x6 / B7B6 | 1: R B1B0 [15:0] @0x0, W 0000B1B0 [31:0] @0x0 2: R B3B2 [15:0] @0x2, W 0000B3B2 [31:0] @0x4 3: R B5B4 [15:0] @0x4, W 0000B5B4 [31:0] @0x8 4: R B7B6 [15:0] @0x6, W 0000B7B6 [31:0] @0xC | 0x0 / 0000B1B0 0x4 / 0000B3B2 0x8 / 0000B5B4 0xC / 0000B7B6 |
| 32 | 8 | 4 | 0x0 / B3B2B1B0 0x4 / B7B6B5B4 0x8 / BBBAB9B8 0xC / BFBEBDBC | 1: R B3B2B1B0 [31:0] @0x0, W B0 [7:0] @0x0 2: R B7B6B5B4 [31:0] @0x4, W B4 [7:0] @0x1 3: R BBBAB9B8 [31:0] @0x8, W B8 [7:0] @0x2 4: R BFBEBDBC [31:0] @0xC, W BC [7:0] @0x3 | 0x0 / B0 0x1 / B4 0x2 / B8 0x3 / BC |
| 32 | 16 | 4 | 0x0 / B3B2B1B0 0x4 / B7B6B5B4 0x8 / BBBAB9B8 0xC / BFBEBDBC | 1: R B3B2B1B0 [31:0] @0x0, W B1B0 [15:0] @0x0 2: R B7B6B5B4 [31:0] @0x4, W B5B4 [15:0] @0x2 3: R BBBAB9B8 [31:0] @0x8, W B9B8 [15:0] @0x4 4: R BFBEBDBC [31:0] @0xC, W BDBC [15:0] @0x6 | 0x0 / B1B0 0x2 / B5B4 0x4 / B9B8 0x6 / BDBC |
| 32 | 32 | 4 | 0x0 / B3B2B1B0 0x4 / B7B6B5B4 0x8 / BBBAB9B8 0xC / BFBEBDBC | 1: R B3B2B1B0 [31:0] @0x0, W B3B2B1B0 [31:0] @0x0 2: R B7B6B5B4 [31:0] @0x4, W B7B6B5B4 [31:0] @0x4 3: R BBBAB9B8 [31:0] @0x8, W BBBAB9B8 [31:0] @0x8 4: R BFBEBDBC [31:0] @0xC, W BFBEBDBC [31:0] @0xC | 0x0 / B3B2B1B0 0x4 / B7B6B5B4 0x8 / BBBAB9B8 0xC / BFBEBDBC |

注意：

DMA 总是向 HWDATA[31:0]提供完整的 32 位数据，无论它是什么目标大小 (HSIZE 仍然遵循设备支持字节/半字操作的目标大小设置)。它提供的 HWDATA[31:0]遵循以下规则：

- 当源大小小于目标大小时，DMA 用 0 填充 MSB，直到它们的大小匹配并将其复制为 32 位。例如，源是 8 位数据 0x55，目标大小是 16 位。DMA 用 0 填充源数据使其成为 16 位 0x0055，然后将其复制为 32 位数据 0x0055_0055 并提供给 HWDATA[31:0]；(如果目标大小为 32 位，则 DMA 只会用 0 填充源数据)。
- 当源大小大于或等于目标大小且小于 32 位时，DMA 将源数据复制到 32 位数据。例如，源数据为 8 位数据 0x1F，HWDATA[31:0] = 0x1F1F_1F1F。如果源数据是 16 位数据 0x2345，则 HWDATA[31:0] = 0x2345_2345。

这保证了仅支持字操作的外设不会产生总线错误，并且所需的数据仍然可以通过额外的位（即 0 填充）移动到我们想要的位置。如果用户想要配置一个 8 位寄存器但与 32 位地址边界对齐，则源大小应设置为 8 位，目标大小应设置为 32 位，因此额外的位将用 0 填充。

8.4.5 外设/内存地址递增

DMA_CHCFGx.PINC 和 DMA_CHCFGx.MINC 分别控制外设地址和内存地址是否使能自动递增模式。软件在传输过程中不能（可以读）写地址寄存器。

- 在自动递增模式下，下一个要传输的地址在每次传输后根据数据位宽（1、2 或 4）自动增加。第一次传输的地址存储在 DMA_PADDRx 或 DMA_MADDRx 寄存器中。
- 在固定模式下，地址始终固定为初始地址。

在传输结束时（即传输计数变为 0），将根据当前是否工作于循环模式进行不同的处理。

- 在非循环模式下，DMA 在传输完成后停止。要开始新的 DMA 传输，需要在禁用 DMA 通道的情况下重写 DMA_TXNUMx 寄存器中的传输数量。
- 在循环模式下，在传输结束时，DMA_TXNUMx 寄存器的内容会自动重新加载其初始值，并且当前内部外设或内存地址也会重新加载 DMA_PADDRx 或 DMA_MADDRx 寄存器设置的初始基地址。

8.4.6 通道配置流程

详细配置流程如下：

1. 配置中断屏蔽位，1：启用中断，0：禁用中断。
2. 配置通道外设地址和内存地址以及传输方向。
3. 配置通道优先级，0：最低，3：最高。
4. 配置外设和内存地址增量。
5. 配置通道传输块大小。
6. 如有必要，配置循环模式。
7. 如果是存储器到存储器，配置 MEM2MEM 模式。
8. 在通道 1~8 上重复第 1~8 步。
9. 最后使能相应通道。

如果使用软件提供中断服务，则软件必须查询中断状态寄存器以检查发生了哪个中断（软件需要向中断标志清除位写 1 来清除相应的中断）。在使能通道之前，应清除该通道对应的所有中断。

如果中断是传输完成中断，软件可以配置下一次传输，或者向用户报告该通道传输完成。

8.4.7 流量控制

支持三种主要的流量控制：

- 存储器到存储器

- 存储器到外设
- 外设到存储器

流控制由每个 DMA 通道配置寄存器中的两个寄存器位控制。流控制用于控制 DMA 通道的源/目标和方向。

表 8-2 流量控制表

| DMA_CHCFGx.MEM2MEM | DMA_CHCFGx.DIR | Source | Destination | Transfer |
|--------------------|----------------|----------------|----------------|--|
| 1 | x | Memory | Memory | AHB read to AHB write, can do back2back transfer |
| 0 | 1 | Memory | AHB Peripheral | AHB read to AHB write, single transfer |
| | | | APB Peripheral | AHB read to APB write, single transfer |
| 0 | 0 | AHB Peripheral | Memory | AHB read to AHB write, single transfer |
| | | | | APB read to AHB write, single transfer |

8.4.8 循环模式

循环模式用于处理循环缓冲区和连续数据传输(如 ADC 扫描模式)。DMA_CHCFGx.CIRC 用于启用此功能。激活循环模式时, 如果要传输的数据数变为 0, 则在配置通道时会自动恢复到初始值, 继续进行 DMA 操作。

如果用户想关闭循环模式, 用户需要向 DMA_CHCFGx.CHEN 写入 0 以禁用 DMA 通道, 然后向 DMA_CHCFGx.CIRC 写入 0 (当 DMA_CHCFGx.CHEN 为 1 时, DMA_CHCFGx 寄存器中的其他位不能被改写)。

8.4.9 错误管理

对保留地址区域的 DMA 访问会导致 DMA 传输错误。发生错误时, 设置传输错误标志, 硬件自动清除当前 DMA 通道使能位 (DMA_CHCFGx.CHEN), 通道操作停止。如果在 DMA_CHCFGx 寄存器中设置了传输错误中断使能位, 则会产生中断。

8.4.10 中断

● 传输完成中断:

通道数据传输完成时会产生中断。中断是一个电平信号。每个通道都有其专用的中断、中断屏蔽控制和中断状态位。当中断标志清除位被设置时, 中断状态位被清除。

● 半传输中断:

当传输了一半的通道数据时会产生中断。中断是一个电平信号。每个通道都有其专用的中断、中断屏蔽控制和中断状态位。当中断标志清除位被设置时, 中断状态位被清除。

● 传输错误中断:

总线返回错误时产生中断。中断是一个电平信号。每个通道都有其专用的中断、中断屏蔽控制和中断状态位。当中断标志清除位被设置时, 中断状态位被清除。

表 8-3 DMA 中断请求

| 中断事件 | 事件标志位 | 使能控制位 |
|------|-------|-------|
| 传输过半 | HTXF | HTXIE |
| 传输完成 | TXCF | TXCIE |
| 传输错误 | ERRF | ERRIE |

8.4.11 DMA 请求映像

8.4.11.1 DMA1 控制器

DMA1 请求映像如下图所示。通过配置对应外设的寄存器，每个外设的 DMA 请求均可以独立的开启或关闭，并根据通道优先级，同一时间只有一个请求有效。

图 8-2 DMA1 请求映像

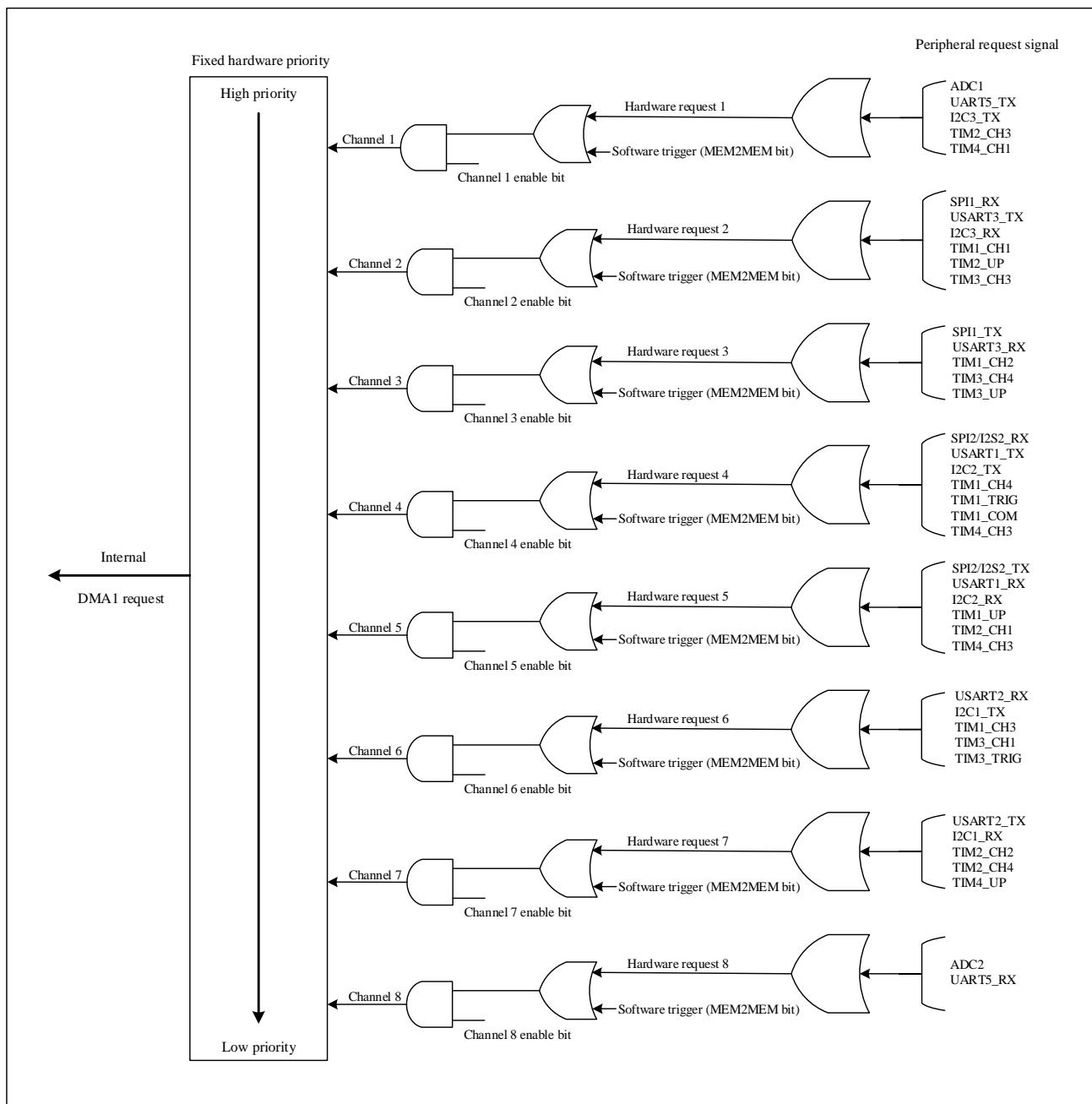


表 8-4 各个通道的 DMA1 请求映射表

| 外设 | 通道 1 | 通道 2 | 通道 3 | 通道 4 | 通道 5 | 通道 6 | 通道 7 | 通道 8 |
|---------|----------|-----------|-----------|-----------------------------------|--------------|-----------|-----------|----------|
| ADC | ADC1 | - | - | - | - | - | - | ADC2 |
| SPI/I2S | - | SPI1_RX | SPI1_TX | SPI2/I2S2_RX | SPI2/I2S2_TX | - | - | - |
| USART | UART5_TX | USART3_TX | USART3_RX | USART1_TX | USART1_RX | USART2_RX | USART2_TX | UART5_RX |
| I2C | I2C3_TX | I2C3_RX | | I2C2_TX | I2C2_RX | I2C1_TX | I2C1_RX | |
| TIM1 | - | TIM1_CH1 | TIM1_CH2 | TIM1_CH4 TIM1_TRIG TIM1_COM | TIM1_UP | TIM1_CH3 | - | - |

| 外设 | 通道 1 | 通道 2 | 通道 3 | 通道 4 | 通道 5 | 通道 6 | 通道 7 | 通道 8 |
|------|----------|----------|---------------------|----------|----------|-----------------------|----------------------|------|
| TIM2 | TIM2_CH3 | TIM2_UP | - | - | TIM2_CH1 | - | TIM2_CH2 TIM2_CH4 | - |
| TIM3 | - | TIM3_CH3 | TIM3_CH4 TIM3_UP | - | - | TIM3_CH1 TIM3_TRIG | - | - |
| TIM4 | TIM4_CH1 | - | - | TIM4_CH2 | TIM4_CH3 | - | TIM4_UP | - |

8.4.11.2 DMA2 控制器

DMA2 请求映像如下图所示。通过配置对应外设的寄存器，每个外设的 DMA 请求均可以独立的开启或关闭，并根据通道优先级，同一时间只有一个请求有效。

图 8-3 DMA2 请求映像

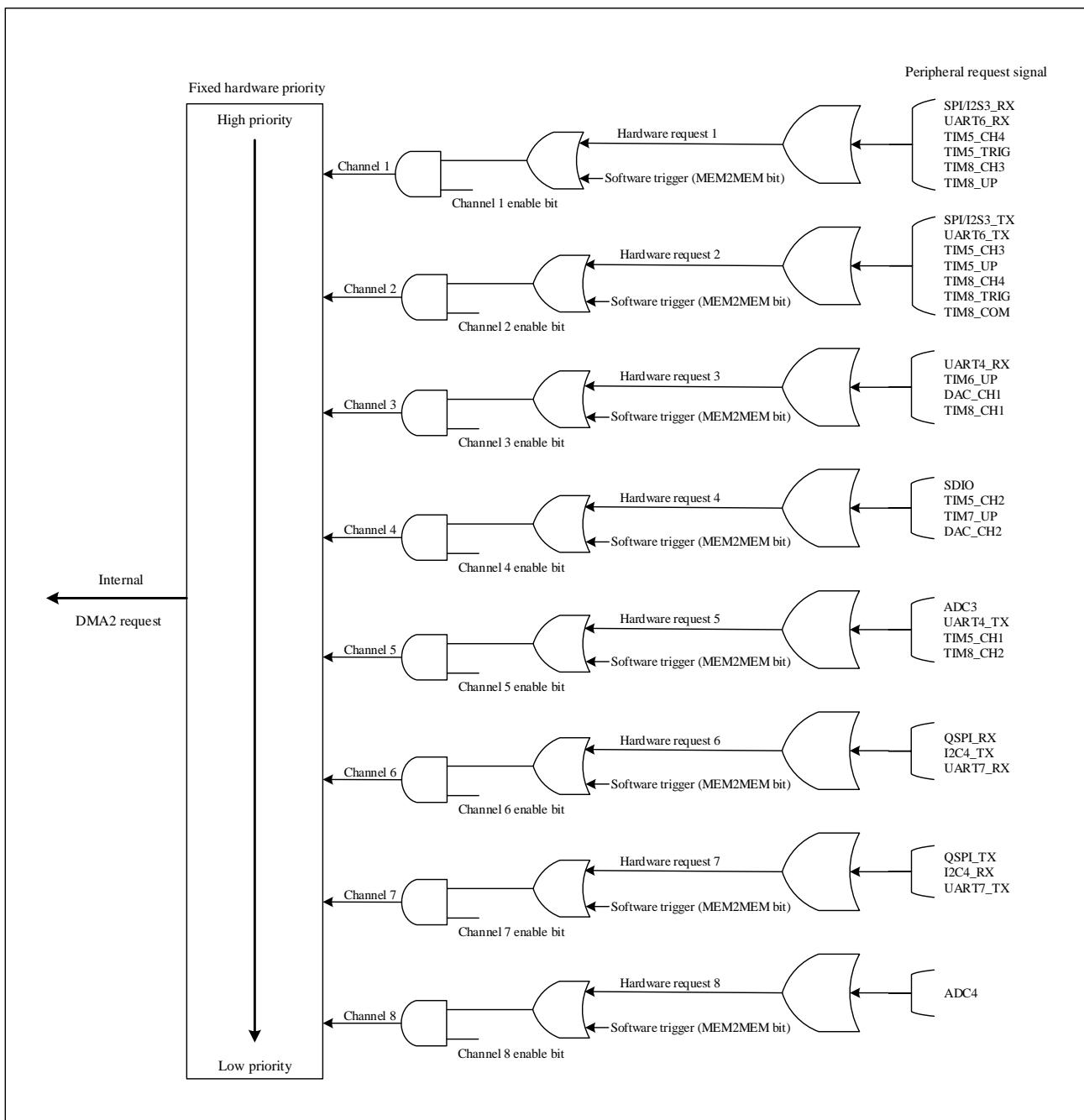


表 8-5 各个通道的 DMA2 请求映射表

| 外设 | 通道 1 | 通道 2 | 通道 3 | 通道 4 | 通道 5 | 通道 6 | 通道 7 | 通道 8 |
|---------|--------------|--------------|----------|----------|----------|----------|----------|------|
| ADC | - | - | - | - | ADC3 | - | - | ADC4 |
| SPI/I2S | SPI3/I2S3_RX | SPI3/I2S3_TX | - | - | - | QSPI_RX | QSPI_TX | - |
| I2C4 | - | - | - | - | - | I2C4_TX | I2C4_RX | - |
| UART | UART6_RX | UART6_TX | UART4_RX | - | UART4_TX | UART7_RX | UART7_TX | - |
| SDIO | - | - | - | SDIO | - | - | - | - |
| TIM5 | TIM5_CH4 | TIM5_CH3 | - | TIM5_CH2 | TIM5_CH1 | - | - | - |

| 外设 | 通道 1 | 通道 2 | 通道 3 | 通道 4 | 通道 5 | 通道 6 | 通道 7 | 通道 8 |
|----------|-------------------------------------|-------------------------------------|--------------------|--------------------|----------|------|------|------|
| | TIM5_TRIGGER | TIM5_UP | | | | | | |
| TIM6/DAC | - | - | TIM6_UP DAC_CH1 | - | - | - | - | - |
| TIM7/DAC | - | - | - | TIM7_UP DAC_CH2 | - | - | - | - |
| TIM8 | TIM8_CH3 TIM8_TRIGGER TIM8_UP | TIM8_CH4 TIM8_TRIGGER TIM8_UP | TIM8_CH1 | - | TIM8_CH2 | - | - | - |

8.5 DMA 寄存器

DMA1 基地址: 0x4002_0000;

DMA2 基地址: 0x4002_0400。

8.5.1 DMA 寄存器总览

表 8-6 DMA 寄存器总览

| | | |
|--------|--------------|-------------|
| Offset | Register | Value |
| 000h | DMA_INTSTS | 0x0000_0000 |
| | Reset Value | 0x0000_0000 |
| 004h | DMA_INTCLR | 0x0000_0000 |
| | Reset Value | 0x0000_0000 |
| 008h | DMA_CHCFG1 | 0x0000_0000 |
| | Reset Value | 0x0000_0000 |
| | Reserved | 0x0000_0000 |
| | MEM2MEM | 0x0000_0000 |
| | PRIOLVL[1:0] | 0x0000_0000 |
| | MSIZE[1:0] | 0x0000_0000 |
| | PSIZE[1:0] | 0x0000_0000 |
| | MINC | 0x0000_0000 |
| | PINC | 0x0000_0000 |
| | DIR | 0x0000_0000 |
| 01Ch | DMA_CHCFG2 | 0x0000_0000 |
| | Reset Value | 0x0000_0000 |
| | Reserved | 0x0000_0000 |
| | MEM2MEM | 0x0000_0000 |
| | PRIOLVL[1:0] | 0x0000_0000 |
| | MSIZE[1:0] | 0x0000_0000 |
| | PSIZE[1:0] | 0x0000_0000 |
| | MINC | 0x0000_0000 |
| | PINC | 0x0000_0000 |
| | DIR | 0x0000_0000 |
| 020h | DMA_TXNUM2 | 0x0000_0000 |
| | Reset Value | 0x0000_0000 |
| | Reserved | 0x0000_0000 |
| | NDTX[15:0] | 0x0000_0000 |
| | 0 | 0x0000_0000 |
| 024h | DMA_PADDR2 | 0x0000_0000 |
| | Reset Value | 0x0000_0000 |
| | ADDR[31:0] | 0x0000_0000 |
| | 0 | 0x0000_0000 |
| 028h | DMA_MADDR2 | 0x0000_0000 |
| | Reset Value | 0x0000_0000 |
| | ADDR[31:0] | 0x0000_0000 |
| | 0 | 0x0000_0000 |
| 02Ch | DMA_CHSEL2 | 0x0000_0000 |
| | Reset Value | 0x0000_0000 |
| | Reserved | 0x0000_0000 |
| | CH_SEL[5:0] | 0x0000_0000 |
| | 0 | 0x0000_0000 |
| 030h | DMA_CHCFG3 | 0x0000_0000 |
| | Reset Value | 0x0000_0000 |
| | Reserved | 0x0000_0000 |
| | NDTX[15:0] | 0x0000_0000 |
| | 0 | 0x0000_0000 |
| 034h | DMA_TXNUM3 | 0x0000_0000 |
| | Reset Value | 0x0000_0000 |
| | Reserved | 0x0000_0000 |
| | NDTX[15:0] | 0x0000_0000 |
| | 0 | 0x0000_0000 |
| 038h | DMA_PADDR3 | 0x0000_0000 |
| | Reset Value | 0x0000_0000 |
| | ADDR[31:0] | 0x0000_0000 |
| | 0 | 0x0000_0000 |

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--------|-------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|------------|------------|----|----|----|----|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|--|--|--|--|--|--|--|
| Offset | Register | 31 | 30 | 29 | 28 | 27 | 26 | 25 | 24 | 23 | 22 | 21 | 20 | 19 | 18 | 17 | 16 | 15 | 14 | 13 | 12 | 11 | 10 | 9 | 8 | 7 | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | 0 | | | | | | | |
| 03Ch | DMA_MADDR3 | | | | | | | | | | | | | | | | | ADDR[31:0] | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Reset Value | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | | | | | | | | | |
| 040h | DMA_CHSEL3 | | | | | | | | | | | | | | | | | Reserved | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Reset Value | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 044h | DMA_CHCFG4 | | | | | | | | | | | | | | | | | Reserved | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Reset Value | | | | | | | | | | | | | | | | | | MEM2MEM | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 048h | DMA_TXNUM4 | | | | | | | | | | | | | | | | | Reserved | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Reset Value | | | | | | | | | | | | | | | | | | NDTX[15:0] | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 04Ch | DMA_PADDR4 | | | | | | | | | | | | | | | | | ADDR[31:0] | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Reset Value | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | | | | | | | | | |
| 050h | DMA_MADDR4 | | | | | | | | | | | | | | | | | ADDR[31:0] | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Reset Value | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | | | | | | | | | |
| 054h | DMA_CHSEL4 | | | | | | | | | | | | | | | | | Reserved | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Reset Value | | | | | | | | | | | | | | | | | | NDTX[15:0] | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 058h | DMA_CHCFG5 | | | | | | | | | | | | | | | | | Reserved | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Reset Value | | | | | | | | | | | | | | | | | | MEM2MEM | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 05Ch | DMA_TXNUM5 | | | | | | | | | | | | | | | | | Reserved | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Reset Value | | | | | | | | | | | | | | | | | | NDTX[15:0] | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 060h | DMA_PADDR5 | | | | | | | | | | | | | | | | | ADDR[31:0] | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Reset Value | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | | | | | | | | | |
| 064h | DMA_MADDR5 | | | | | | | | | | | | | | | | | ADDR[31:0] | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Reset Value | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | | | | | | | | | |
| 068h | DMA_CHSEL5 | | | | | | | | | | | | | | | | | Reserved | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Reset Value | | | | | | | | | | | | | | | | | | NDTX[15:0] | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 06Ch | DMA_CHCFG6 | | | | | | | | | | | | | | | | | Reserved | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Reset Value | | | | | | | | | | | | | | | | | | MEM2MEM | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 070h | DMA_TXNUM6 | | | | | | | | | | | | | | | | | Reserved | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Reset Value | | | | | | | | | | | | | | | | | | NDTX[15:0] | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 074h | DMA_PADDR6 | | | | | | | | | | | | | | | | | ADDR[31:0] | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Reset Value | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | | | | | | | | | |
| 078h | DMA_MADDR6 | | | | | | | | | | | | | | | | | ADDR[31:0] | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Reset Value | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | | | | | | | | | |
| 07Ch | DMA_CHSEL6 | | | | | | | | | | | | | | | | | Reserved | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Reset Value | | | | | | | | | | | | | | | | | | NDTX[15:0] | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 080h | DMA_CHCFG7 | | | | | | | | | | | | | | | | | Reserved | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Reset Value | | | | | | | | | | | | | | | | | | MEM2MEM | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 084h | DMA_TXNUM7 | | | | | | | | | | | | | | | | | Reserved | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Reset Value | | | | | | | | | | | | | | | | | | NDTX[15:0] | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 088h | DMA_PADDR7 | | | | | | | | | | | | | | | | | ADDR[31:0] | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Reset Value | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | | | | | | | | | |
| 08Ch | DMA_MADDR7 | | | | | | | | | | | | | | | | | ADDR[31:0] | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Reset Value | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | | | | | | | | | |
| 090h | DMA_CHSEL7 | | | | | | | | | | | | | | | | | Reserved | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Reset Value | | | | | | | | | | | | | | | | | | NDTX[15:0] | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 094h | DMA_CHCFG8 | | | | | | | | | | | | | | | | | Reserved | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Reset Value | | | | | | | | | | | | | | | | | | MEM2MEM | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 098h | DMA_TXNUM8 | | | | | | | | | | | | | | | | | Reserved | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Reset Value | | | | | | | | | | | | | | | | | | NDTX[15:0] | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 09Ch | DMA_PADDR8 | | | | | | | | | | | | | | | | | ADDR[31:0] | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Reset Value | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | | | | | | | | |
| 0A0h | DMA_MADDR8 | | | | | | | | | | | | | | | | | ADDR[31:0] | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Reset Value | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | | | | | | | | |
| 0A4h | DMA_CHSEL8 | | | | | | | | | | | | | | | | | Reserved | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Reset Value | | | | | | | | | | | | | | | | | | NDTX[15:0] | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0A8h | DMA_CHMAPEN | | | | | | | | | | | | | | | | | Reserved | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Reset Value | | | | | | | | | | | | | | | | | | MAP_EN | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

8.5.2 DMA 中断状态寄存器 (DMA_INTSTS)

偏移地址: 0x00

复位值: 0x0000 0000

| 31 | 30 | 29 | 28 | 27 | 26 | 25 | 24 | 23 | 22 | 21 | 20 | 19 | 18 | 17 | 16 |
|---------|---------|---------|---------|---------|---------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| ERRF8 | HTXF8 | TXCF8 | GLBF8 | ERRF7 | HTXF7 | TXCF7 | GLBF7 | ERRF6 | HTXF6 | TXCF6 | GLBF6 | ERRF5 | HTXF5 | TXCF5 | GLBF5 |
| r 15 | r 14 | r 13 | r 12 | r 11 | r 10 | r 9 | r 8 | r 7 | r 6 | r 5 | r 4 | r 3 | r 2 | r 1 | r 0 |
| ERRF4 | HTXF4 | TXCF4 | GLBF4 | ERRF3 | HTXF3 | TXCF3 | GLBF3 | ERRF2 | HTXF2 | TXCF2 | GLBF2 | ERRF1 | HTXF1 | TXCF1 | GLBF1 |
| r | r | r | r | r | r | r | r | r | r | r | r | r | r | r | r |

| 位域 | 名称 | 描述 |
|-----------------------|-------|---|
| 31/27/23/19/15/11/7/3 | ERRFx | 通道 x(x = 1...8)的传输错误标志。 发生传输错误时, 硬件设置该位。该位由软件通过向 DMA_INTCLR.CERRFx 位写 1 清零。 0: 通道 x 上没有发生传输错误。 1: 通道 x 上发生传输错误。 |
| 30/26/22/18/14/10/6/2 | HTXFx | 通道 x(x = 1...8)的半传输标志。 当半传输完成时, 硬件设置该位。该位由软件通过向 DMA_INTCLR.CHTXFx 位写 1 清零。 0: 通道 x 上的半传输尚未完成。 1: 通道 x 上的半传输已完成。 |
| 29/25/21/17/13/9/5/1 | TXCFx | 通道 x(x = 1...8)的传输完成标志。 当传输完成时, 硬件设置该位。该位由软件通过向 DMA_INTCLR.CTXCFx 位写 1 清零。 0: 通道 x 上的传输尚未完成。 1: 通道 x 上的传输已完成。 |
| 28/24/20/16/12/8/4/0 | GLBFx | 通道 x(x = 1...8)的全局标志。 当该通道中发生任何中断事件时, 硬件设置该位。该位由软件通过向 DMA_INTCLR.CGLBFx 位写 1 清零。 0: 通道 x 上没有发生传输错误、半传输或传输完成事件。 1: 通道 x 上发生传输错误、半传输或传输完成事件之一。 |

8.5.3 DMA 中断标志清除寄存器 (DMA_INTCLR)

偏移地址: 0x04

复位值: 0x0000 0000

| 31 | 30 | 29 | 28 | 27 | 26 | 25 | 24 | 23 | 22 | 21 | 20 | 19 | 18 | 17 | 16 |
|----------|----------|----------|----------|----------|----------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| CERRF8 | CHTF8 | CTXCF8 | CGLBF8 | CERRF7 | CHTF7 | CTXCF7 | CGLBF7 | CERRF6 | CHTF6 | CTXCF6 | CGLBF6 | CERRF5 | CHTF5 | CTXCF5 | CGLBF5 |
| rw 15 | rw 14 | rw 13 | rw 12 | rw 11 | rw 10 | rw 9 | rw 8 | rw 7 | rw 6 | rw 5 | rw 4 | rw 3 | rw 2 | rw 1 | rw 0 |
| CERRF4 | CHTF4 | CTXCF4 | CGLBF4 | CERRF3 | CHTF3 | CTXCF3 | CGLBF3 | CERRF2 | CHTF2 | CTXCF2 | CGLBF2 | CERRF1 | CHTF1 | CTXCF1 | CGLBF1 |
| rw | rw | rw | rw | rw | rw | rw | rw | rw | rw | rw | rw | rw | rw | rw | rw |

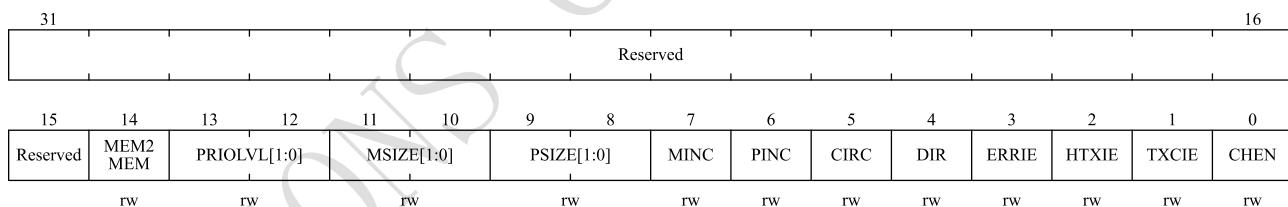
| 位域 | 名称 | 描述 |
|-----------------------|--------|---|
| 31/27/23/19/15/11/7/3 | CERRFx | 清除通道 x(x = 1...8)的传输错误标志。 软件可以设置该位来清除相应通道的 ERRF。 0: 无动作。 1: 复位相应通道的 DMA_INTSTS.ERRF 位。 |
| 30/26/22/18/14/10/6/2 | CHTXFx | 清除通道 x(x = 1...8)的半传输标志。 软件可以设置该位来清除相应通道的 HTXF。 0: 无动作。 1: 复位相应通道的 DMA_INTSTS.HTXF 位。 |
| 29/25/21/17/13/9/5/1 | CTXCFx | 清除通道 x(x = 1...8)的传输完成标志。 软件可以设置该位来清除相应通道的 TXCF。 0: 无动作。 1: 复位相应通道的 DMA_INTSTS.TXCF 位。 |
| 28/24/20/16/12/8/4/0 | CGLBFx | 清除通道 x(x = 1...8)的全局事件标志。 软件可以设置该位来清除相应通道的 GLBF。 0: 无动作。 1: 复位相应通道的 DMA_INTSTS.GLBF 位。 |

8.5.4 DMA 通道 x 配置寄存器 (DMA_CHCFGx)

x 为通道号, x=1 ... 8

地址偏移: 0x08 + 20 * (x - 1)

复位值: 0x0000 0000



| 位域 | 名称 | 描述 |
|-------|--------------|--|
| 31:15 | Reserved | 保留, 必须保持复位值。 |
| 14 | MEM2MEM | 存储器到存储器模式。 当通道尚未使能时, 软件可以将此通道配置为存储器到存储器传输。 0: 存储器和外设之间的通道传输。 1: 通道设置为存储器到存储器间的传输。 |
| 13:12 | PRIOLVL[1:0] | 通道优先级。 当通道未使能时, 软件可以编程通道优先级。 00: 低 01: 中 10: 高 11: 非常高 |
| 11:10 | MSIZE[1:0] | 存储器数据大小。 |

| 位域 | 名称 | 描述 |
|-----|------------|--|
| | | 软件可以配置从/向存储器地址读取/写入的数据大小。 00: 8 位 01: 16 位 10: 32 位 11: 保留 |
| 9:8 | PSIZE[1:0] | 外设数据大小。 软件可以配置从/向外设地址读取/写入的数据大小。 00: 8 位 01: 16 位 10: 32 位 11: 保留 |
| 7 | MINC | 存储器地址递增模式。 软件可以使能/禁能存储器地址递增模式。 0: 内存地址不会随着每次传输而递增。 1: 内存地址随着每次传输而递增。 |
| 6 | PINC | 外设地址增量模式。 软件可以使能/禁能外设地址递增模式。 0: 外设地址不会随着每次传输而递增。 1: 外设地址随每次传输而递增。 |
| 5 | CIRC | 循环模式。 软件可以设置/清除该位。 0: 经过一轮传输后通道停止。 1: 通道配置为循环模式。 |
| 4 | DIR | 数据传输方向 软件可以设置/清除该位。 0: 从外设到存储器的数据传输 1: 从存储器到外设的数据传输。 |
| 3 | ERRIE | 传输错误中断使能。 软件可以使能/禁能传输错误中断。 0: 禁止通道 x 的传输错误中断。 1: 使能通道 x 的传输错误中断。 |
| 2 | HTXIE | 半传输中断使能。 软件可以使能/禁能半传输中断。 0: 禁止通道 x 的半传输中断。 1: 使能通道 x 的半传输中断。 |
| 1 | TXCIE | 传输完成中断使能。 软件可以使能/禁能传输完成中断。 0: 禁止通道 x 的传输完成中断。 1: 使能通道 x 的传输完成中断。 |
| 0 | CHEN | 通道使能。 软件可以设置/复位该位。 0: 禁用通道。 |

| 位域 | 名称 | 描述 |
|----|----|----------|
| | | 1: 使能通道。 |

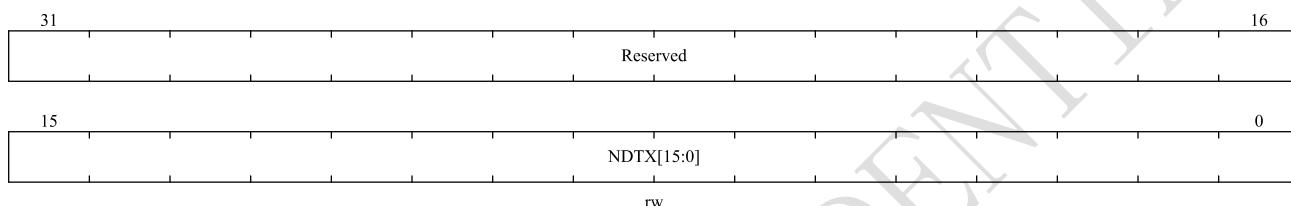
8.5.5 DMA 通道 x 传输数量寄存器 (DMA_TXNUMx)

x 为通道号, x=1 ... 8

地址偏移: 0x0C + 20 * (x - 1)

复位值: 0x0000 0000

只有在禁用通道(DMA_CHCFGx.CHEN = 0)时才能写该寄存器。



| 位域 | 名称 | 描述 |
|-------|----------|---|
| 31:16 | Reserved | 保留, 必须保持复位值。 |
| 15:0 | NDTX | 数据传输数量。 要传输的数据数量 (0~65535)。软件可以在通道禁用时写入/读出传输数量, 并且通道使能后该位为只读。相应的 DMA 通道每次成功传输后, 该寄存器就会减 1。如果使能循环模式, 它会在达到零时自动重新加载预设值。否则它将保持为零并复位通道使能位。 |

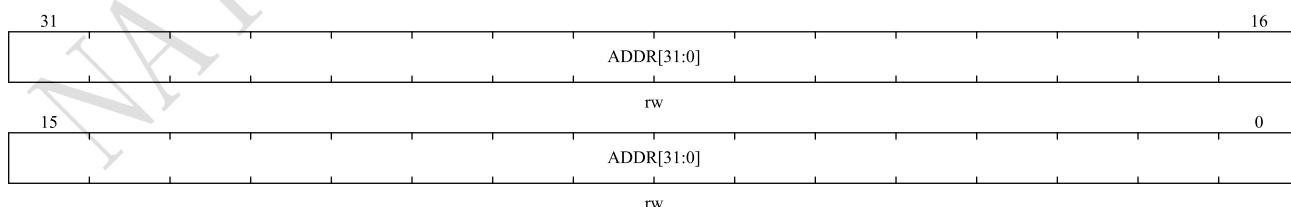
8.5.6 通道 x 外设基地址寄存器 (DMA_PADDRx)

x 为通道号, x=1 ... 8

地址偏移: 0x10 + 20 * (x - 1)

复位值: 0x0000 0000

只有在禁用通道(DMA_CHCFGx.CHEN = 0)时才能写该寄存器。



| 位域 | 名称 | 描述 |
|------|------|---|
| 31:0 | ADDR | 外设基地址。 DMA 读取/写入的外设起始地址。 地址的递增由 DMA_CHCFGx.PSIZE 决定。 DMA_CHCFGx.PSIZE 等于‘01’, DMA 忽略 PADDR 的第 0 位。 |

| 位域 | 名称 | 描述 |
|----|----|--|
| | | DMA_CHCFGx.PSIZE 等于‘10’， DMA 将忽略 PADDR 的第 0 位和第 1 位。 |

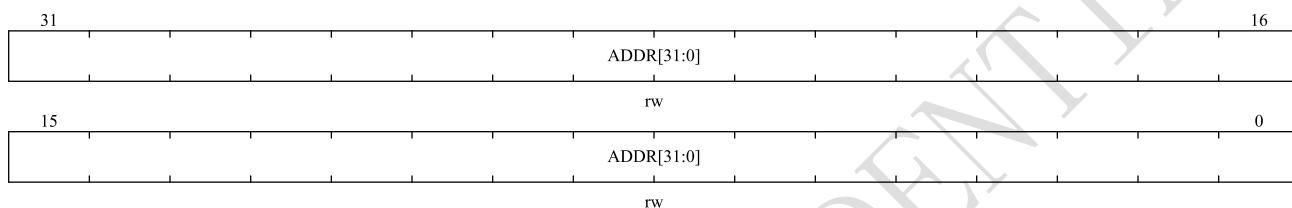
8.5.7 通道 x 存储器基地址寄存器 (DMA_MADDRx)

x 为通道号, x=1 ... 8

地址偏移: 0x14 + 20 * (x - 1)

复位值: 0x0000 0000

只有在禁用通道(DMA_CHCFGx.CHEN = 0)时才能写该寄存器。



| 位域 | 名称 | 描述 |
|------|------|---|
| 31:0 | ADDR | 存储器基地址。 DMA 读取/写入的存储器起始地址。 地址的递增由 DMA_CHCFGx.MSIZE 决定。 DMA_CHCFGx.MSIZE 等于‘01’， DMA 忽略 MADDR 的第 0 位。 DMA_CHCFGx.MSIZE 等于‘10’， DMA 将忽略 MADDR 的第 0 位和第 1 位。 |

8.5.8 DMA1 通道 x 通道选择寄存器 (DMA1_CHSELx)

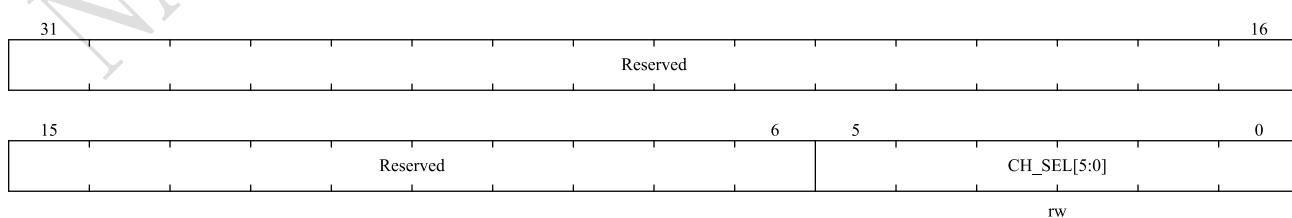
x 为通道号, x=1 ... 8

地址偏移: 0x18 + 20 * (x - 1)

复位值: 0x0000 0000

当通道 MAP 使能 (DMA_CHMAPEN.MAP_EN=1) 时写该寄存器才有效。该寄存器用来管理 DMA1 外设请求映射的 DMA1 的通道。

注意: 通道 MAP 使能后, DMA 通道选择寄存器会变为默认值, 需要为每一个已经使用的通道配置相应的映射, 若没有重新配置, DMA1 所有通道将会只响应 ADC1 的 DMA 请求。



| 位域 | 名称 | 描述 |
|------|----------|--------------|
| 31:6 | Reserved | 保留, 必须保持复位值。 |

| 位域 | 名称 | 描述 |
|-----|-------------|---|
| 5:0 | CH_SEL[5:0] | DMA1 通道请求选择 40: UART5_RX 39: ADC2 38: I2C1_RX 37: TIM4_UP 36: TIM2_CH4 35: TIM2_CH2 34: USART2_TX 33: I2C1_TX 32: TIM3_TRIG 31: TIM3_CH1 30: TIM1_CH3 29: USART2_RX 28: I2C2_RX 27: TIM4_CH3 26: TIM2_CH1 25: SPI2/I2S2_TX 24: TIM1_UP 23: USART1_RX 22: I2C2_TX 21: SPI2/I2S2_RX 20: TIM4_CH2 19: TIM1_COM 18: TIM1_TRIG 17: TIM1_CH4 16: USART1_TX 15: SPI1_TX 14: TIM3_UP 13: TIM3_CH4 12: TIM1_CH2 11: USART3_RX 10: SPI1_RX 9: TIM3_CH3 8: TIM2_UP 7: TIM1_CH1 6: I2C3_RX 5: USART3_TX 4: TIM4_CH1 3: TIM2_CH3 2: I2C3_TX 1: UART5_TX 0: ADC1 |

8.5.9 DMA2 通道 x 通道选择寄存器 (DMA2_CHSELx)

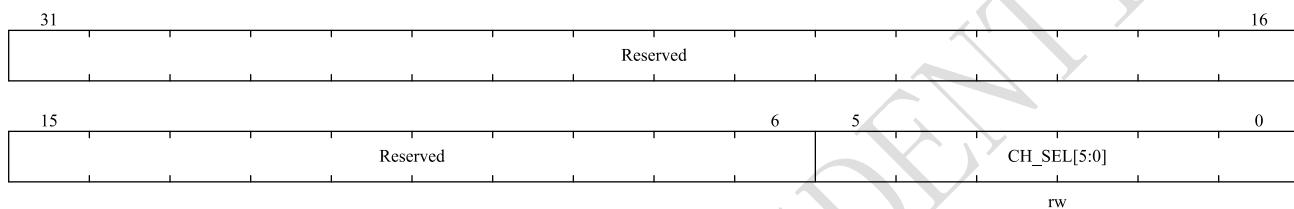
x 为通道号, x=1 ... 8

地址偏移: 0x18 + 20 * (x - 1)

复位值: 0x0000 0000

当通道 MAP 使能 (DMA_CHMAPEN.MAP_EN=1) 时写该寄存器才有效。该寄存器用来管理 DMA2 外设请求映射的 DMA2 的通道。

注意: 通道 MAP 使能后, DMA 通道选择寄存器会变为默认值, 需要为每一个已经使用的通道配置相应的映射, 若没有重新配置, DMA2 所有通道将会只响应 TIM5_CH4 的 DMA 请求。



| 位域 | 名称 | 描述 |
|------|-------------|---|
| 31:6 | Reserved | 保留, 必须保持复位值。 |
| 5:0 | CH_SEL[5:0] | DMA2 通道请求选择 31: ADC4 30: UART7_TX 29: I2C4_RX 28: QSPI_TX 27: UART7_RX 26: I2C4_TX 25: QSPI_RX 24: UART4_TX 23: TIM5_CH1 22: TIM8_CH2 21: ADC3 20: DAC2 19: TIM7_UP 18: SDIO 17: TIM5_CH2 16: DAC1 15: TIM6_UP 14: UART4_RX 13: TIM8_CH1 12: UART6_TX 11: SPI3/I2S3_TX 10: TIM5_UP 9: TIM5_CH3 |

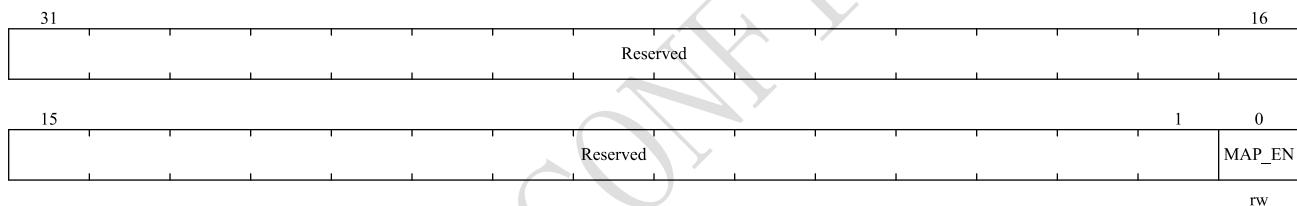
| 位域 | 名称 | 描述 |
|----|----|--|
| | | 8: TIM8_COM 7: TIM8_TRIG 6: TIM8_CH4 5: UART6_RX 4: SPI3/I2S3_RX 3: TIM8_UP 2: TIM8_CH3 1: TIM5_TRIG 0: TIM5_CH4 |

8.5.10 DMA 通道 MAP 使能寄存器 (DMA_CHMAPEN)

地址偏移: 0xA8

复位值: 0x0000 0000

注意: MAP 使能后 DMA 将根据选择寄存器的配置来响应 DMA 请求, 需要配置外设的通道请求选择, 若未配置, DMA 将只响应通道选择寄存器的默认值 (DMA1 为 ADC1, DMA2 为 TIM5_CH4)。



| 位域 | 名称 | 描述 |
|------|----------|--|
| 31:1 | Reserved | 保留, 必须保持复位值。 |
| 0 | MAP_EN | 通道 MAP 使能。 0: 禁止通道 MAP 1: 使能通道 MAP |

9 模拟数字转换 (ADC)

9.1 简述

12 位 ADC 是使用逐次逼近的高速模数转换器。它有多个通道，每个通道的 A/D 转换有四种执行模式：单次、连续、扫描或间断。ADC 转换值存储（左对齐/右对齐）在 16 位数据寄存器中。可以通过模拟看门狗检测输入电压是否在用户定义的高/低阈值内，并且 ADC 的输入时钟的最大频率为 72MHz。

9.2 ADC 主要特征

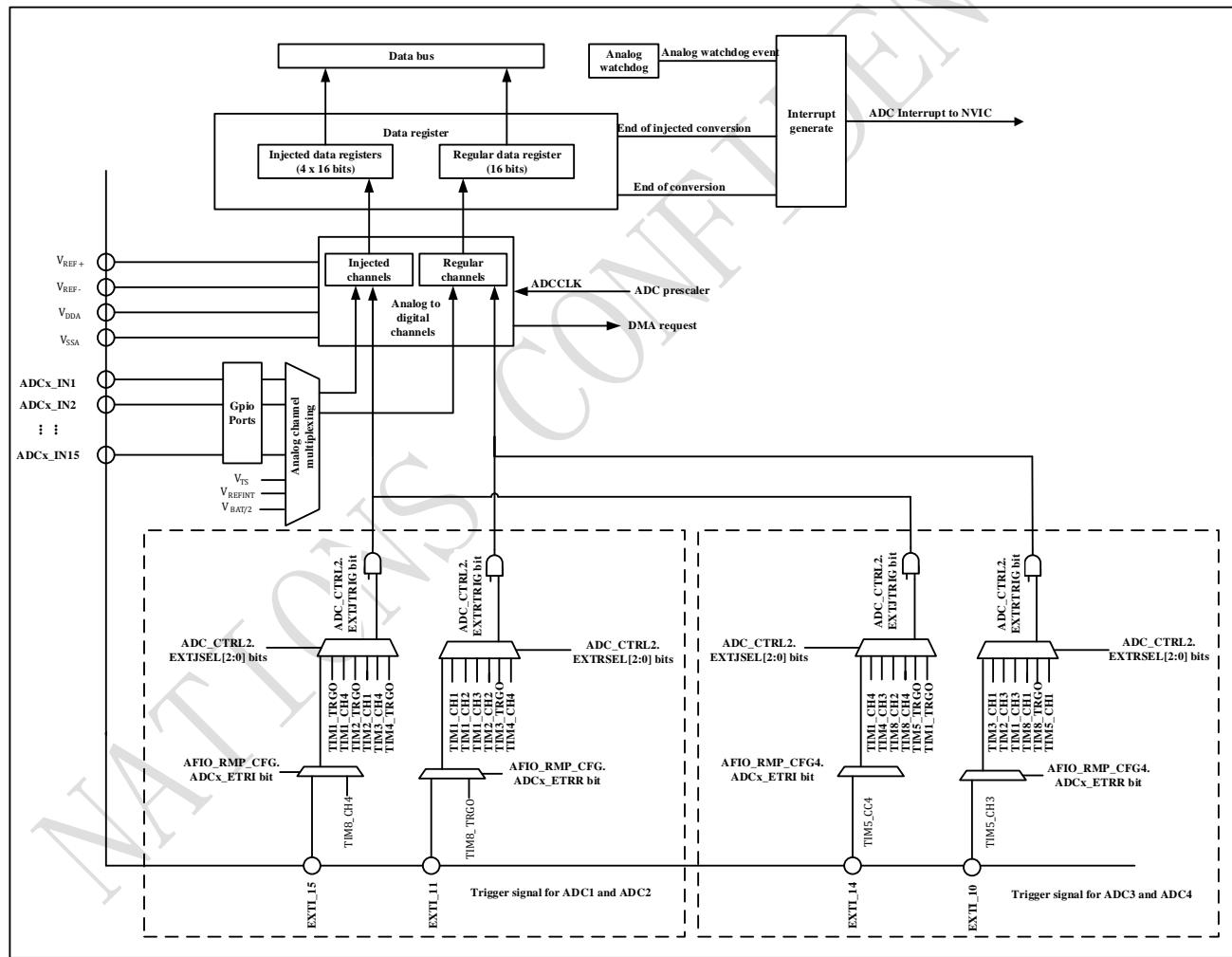
- 支持最多 4 个 ADC，支持单端输入和差分输入，可测量 40 个外部和 7 个内部信号源
- ADC1 支持 11 个外部通道，ADC2 支持 13 个外部通道，ADC3 支持 15 个外部通道，ADC4 支持 13 个外部通道
- 支持 12 位、10 位、8 位、6 位分辨率
 - ◆ 12bit 分辨率下最高采样速率 5.14MSPS
 - ◆ 10bit 分辨率下最高采样速率 6MSPS
 - ◆ 8bit 分辨率下最高采样速率 7.2MSPS
 - ◆ 6bit 分辨率下最高采样速率 9MSPS
- ADC 时钟源分为工作时钟源、采样时钟源和计时时钟源
 - ◆ 仅可配置 AHB_CLK 作为工作时钟源，最高可到 144MHz
 - ◆ 可配置 PLL 作为采样时钟源，最高可到 72MHz，支持分频 1,2,4,6,8,10,12,16,32,64,128,256
 - ◆ 可配置 AHB_CLK 作为采样时钟源，最高可到 72MHz，支持分频 1,2,4,6,8,10,12,16,32
 - ◆ 计时时钟用于内部计时功能，频率必须配置成 1MHz
- 支持触发采样，包括 EXTI/TIMER
- 各通道的采样时间间隔可编程
- 支持扫描模式
- 支持单次转换
- 支持连续转换
- 支持间断模式
- 支持自校准
- 支持 DMA
- 中断生成
 - ◆ 转换结束
 - ◆ 注入转换结束

- ◆ 模拟看门狗事件
 - 带内嵌数据一致性的数据对齐
 - 可以外部触发注入转换和规则转换
 - ADC 的工作电压在 1.8V 到 3.6V 之间
 - ADC 支持转换的电压在 V_{REF} 和 V_{REF+} 之间
 - 双 ADC 模式, ADC1 和 ADC2 组合、ADC3 和 ADC4 组合

9.3 ADC 功能描述

ADC 的框图和引脚描述如下：

图 9-1 ADC 框图



注意: ADC1 和 ADC2, ADC3 和 ADC4 的规则转换和注入转换触发参考具体的寄存器定义。

表 9-1 ADC 引脚

| 名称 | 信号类型 | 描述 |
|------------|------------|---|
| V_{REF+} | 输入, 模拟参考正极 | ADC 正极参考电压, $1.8V \leq V_{REF+} \leq V_{DDA}$ |
| V_{REF-} | 输入, 模拟参考负极 | $V_{REF-} = V_{SSA}$ |
| V_{DDA} | 输入, 模拟电源 | 模拟电源等效于 V_{DD} 且: $1.8V \leq V_{DDA} \leq V_{DD}(3.6V)$ |
| V_{SSA} | 输入, 模拟电源地 | 模拟电源地等效于 V_{SS} |
| ADCx_IN | 模拟输入信号 | 外部通道 |

注意:

1. V_{DDA} 和 V_{SSA} 应该分别连接到 V_{DD} 和 V_{SS} 。
2. 如果有 V_{REF-} 引脚 (取决于封装), 必须和 V_{SSA} 相连接。
3. 如果没有 V_{REF+} 引脚 (取决于封装), 尽量保证 V_{DDA} 和 V_{DD} 的电压值一致, 否则会影响 ADC 精度。
4. 具体外部通道请参考数据手册引脚复用表。

9.3.1 ADC 时钟

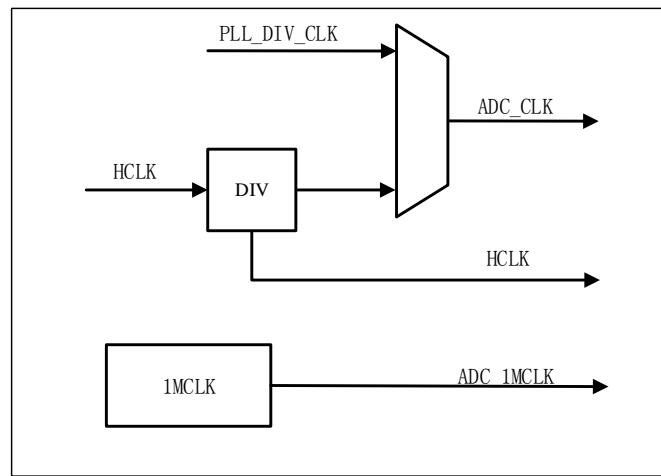
ADC 需要三个时钟, ADC_CLK, HCLK, ADC_1MCLK。

- HCLK 用于寄存器的访问时钟。
- ADC_CLK 为 ADC 的工作时钟, ADC_CLK 有两个源 (HCLK 的分频或 PLL 的分频), HCLK 分频与系统是同步时钟, PLL 的分频与系统是异步时钟, 用同步时钟的好处是在触发 ADC 响应触发时, 没有不确定性, 用 PLL 的分频时钟的好处是可以独立处理 ADC 的工作时钟, 不会影响到挂在 HCLK 的其他模块
- ADC_1MCLK 用于内部计时功能, 在 RCC 中配置, 频率大小必须配置成 1MHz

注意

1. 配置 PLL 作为时钟源时, 最高可到 72M, 支持分频 1, 2, 4, 6, 8, 10, 12, 16, 32, 64, 128, 256。
2. 配置 AHB_CLK 分频作为工作时钟最高可到 72M, 支持分频 1, 2, 4, 6, 8, 10, 12, 16, 32。
3. 切换 ADC_1M 时钟源时, 需要保证 HSI 时钟开启。

图 9-2 ADC 时钟



9.3.2 ADC 开关控制

只有在上电过程完成后，您才能进行下一步。您可以通过轮询 ADC_CTRL3.RDY 来检查上电是否完成。

您可以设置 ADC_CTRL2.ON 来打开 ADC。第一次设置 ADC_CTRL2.ON 时，它将 ADC 从断电状态唤醒。在 ADC 的上电延迟(tSTAB)之后，当 ADC_CTRL2.ON 再次置位时，转换开始。

可以通过清除 ADC_CTRL2.ON 将 ADC 置于断电模式来停止转换。在这种模式下，ADC 几乎不消耗功率（仅几 μ A）。可以通过轮询 ADC_CTRL3.PDRDY 来检查掉电情况。

在 ADC Disable 的时候默认都是 PowerDown 模式，这个模式下只要不断电，不需要重新校正，校正值会在 ADC 自动保持。为了进一步的降低功耗，ADC 有设计一个深睡眠模式。会在 ADC Disable 进入深睡眠模式，ADC 内部的校正值会丢失，需要重新校正。深睡眠模式可以省大概 0.2 μ A 的功耗。

注意：当在双 ADC 模式时，最好双 ADC 都选同一种睡眠模式。控制 ADC 深睡眠模式的寄存器 ADC_CTRL3.DPWMOD。

9.3.3 通道选择

每个通道可以配置为规则序列和注入序列。

注入序列由多次转换组成，最多 4 次。ADC_JSEQ 寄存器指定注入通道和注入通道的转换顺序。ADC_JSEQ.JLEN[1:0]指定注入序列长度。

规则序列由多次转换组成，最多 16 次。ADC_RSEQx 寄存器指定规则通道和规则通道的转换顺序。ADC_RSEQ1.LEN[3:0]指定规则通道序列长度。

注意：在转换期间，禁止更改 ADC_RSEQx 或 ADC_JSEQ 寄存器；ADC_RSEQx 或 ADC_JSEQ 寄存器只能在 ADC 空闲时更改。

图 9-3 ADC1 和 ADC2 通道引脚连接

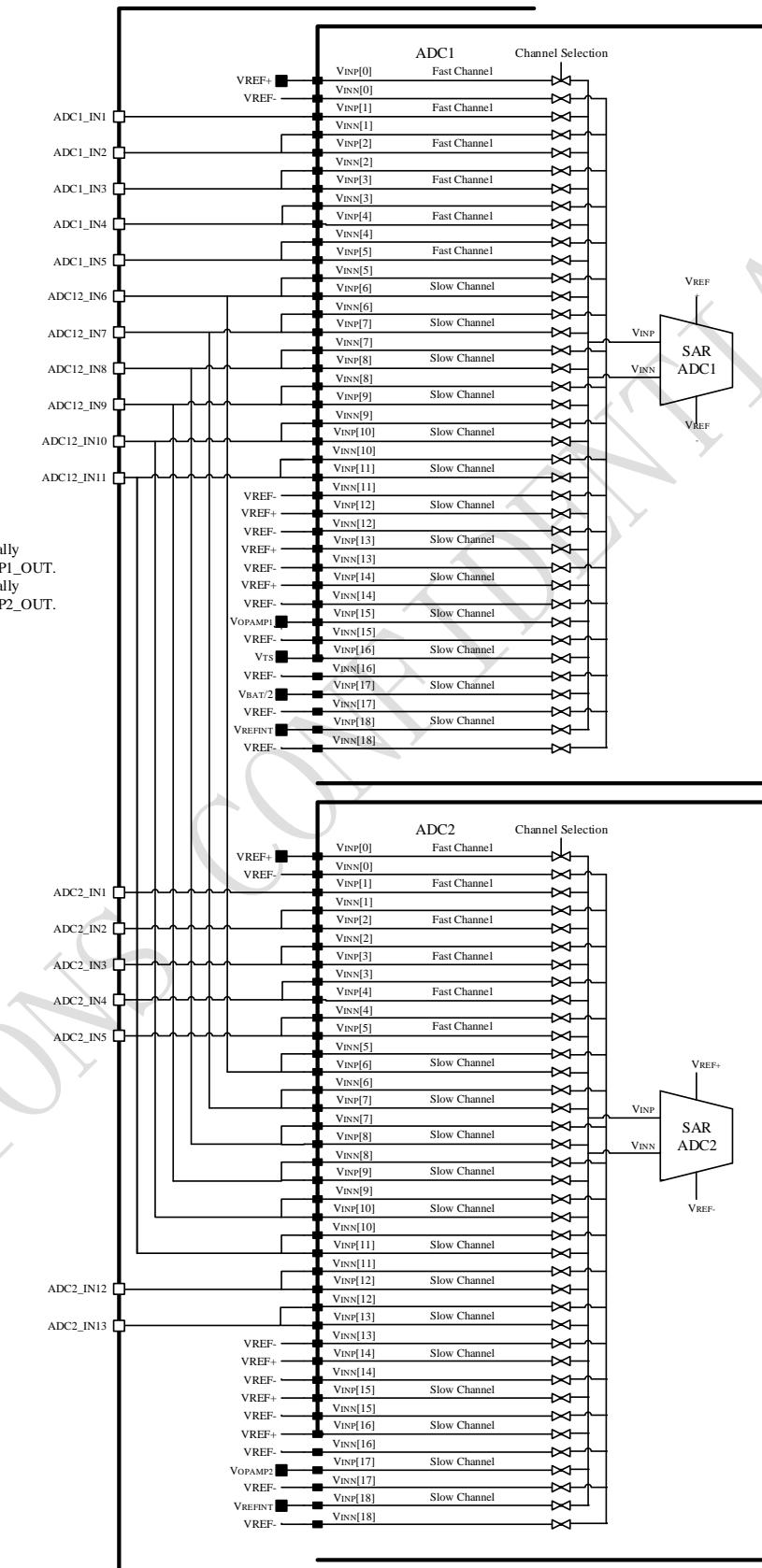
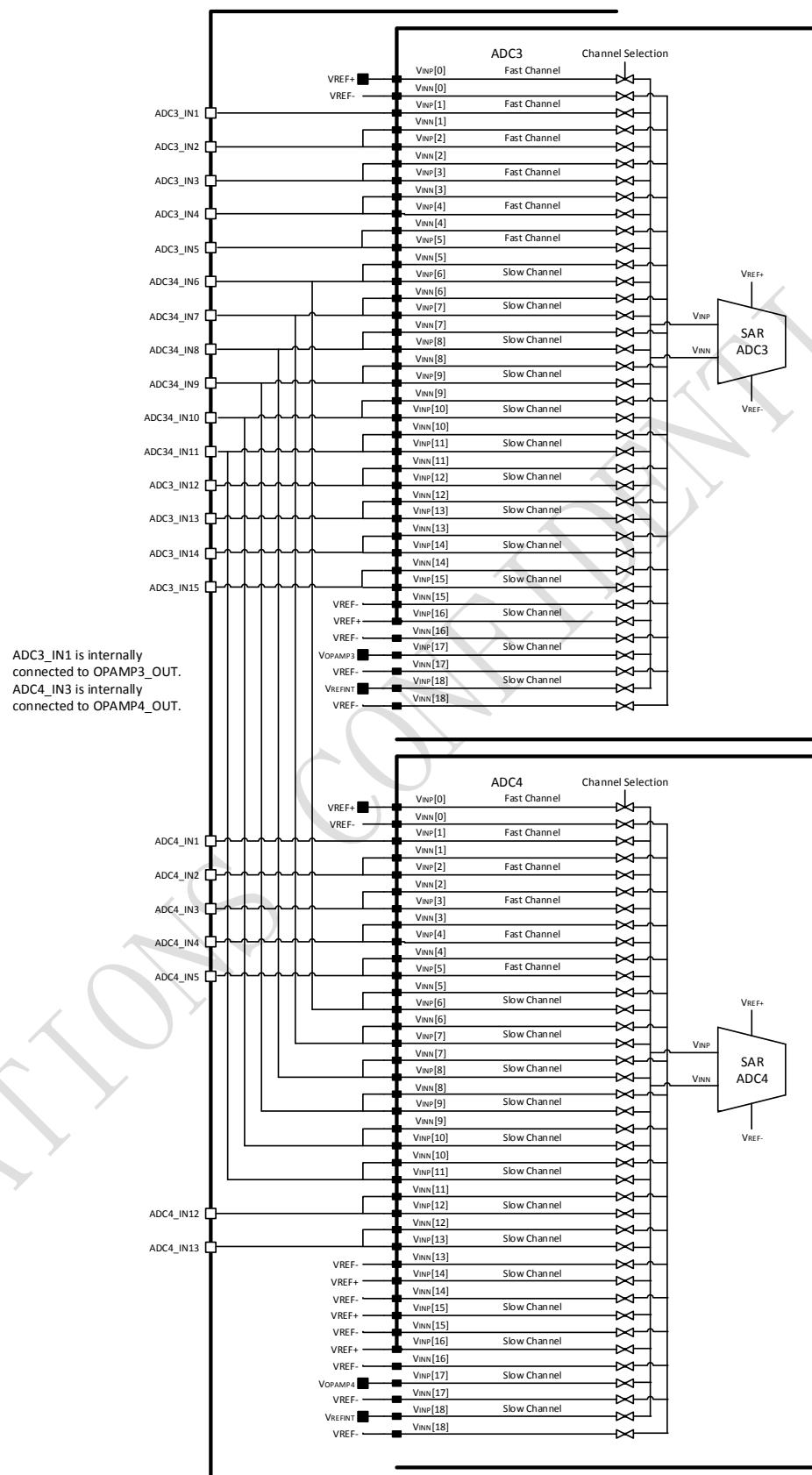


图 9-4 ADC3 和 ADC4 通道引脚连接



9.3.4 内部通道

- 温度传感器连接到通道 ADC1_IN16
- $V_{BAT}/2$ 连接到通道 ADC1_IN17
- 内部参照电压 V_{REFINT} 连接到通道 ADCx_IN18
- $V_{OPIOOUT}$ 输出连接到通道 ADC1_IN3
- V_{OP2OUT} 输出连接到通道 ADC2_IN3
- V_{OP3OUT} 输出连接到通道 ADC3_IN1
- V_{OP4OUT} 输出连接到通道 ADC4_IN3

ADC 内部通道可以按规则或者注入通道的方式进行转换。

注意：温度传感器， $V_{BAT}/2$ 只能在主 ADC1 中使用。

9.3.5 单次转换模式

ADC 可以通过配置 ADC_CTRL2.CTU 为 0 进入单次转换模式。在该模式下，外部触发（适用于规则或注入通道）或设置 ADC_CTRL2.ON=1（仅适用于规则通道）可以启动 ADC 启动转换，ADC 只进行一次转换。

转换开始后，当一个注入通道转换完成时，注入通道转换结束标志（ADC_STS.JENDC）将被设置为 1。如果注入通道转换结束中断使能（ADC_CTRL1.JENDCIEN）位被设置为 1，一个中断将生成，转换后的数据将存储在 ADC_JDATx 寄存器中。

转换开始后，当一个规则通道转换完成时，规则通道转换结束标志（ADC_STS.ENDC）将被置 1。如果规则通道转换结束中断使能（ADC_CTRL1.ENDCIEN）位被置 1，则一个中断将生成，转换后的数据将存储在 ADC_DAT 寄存器中。

单次转换后，ADC 停止。

9.3.6 连续转换模式

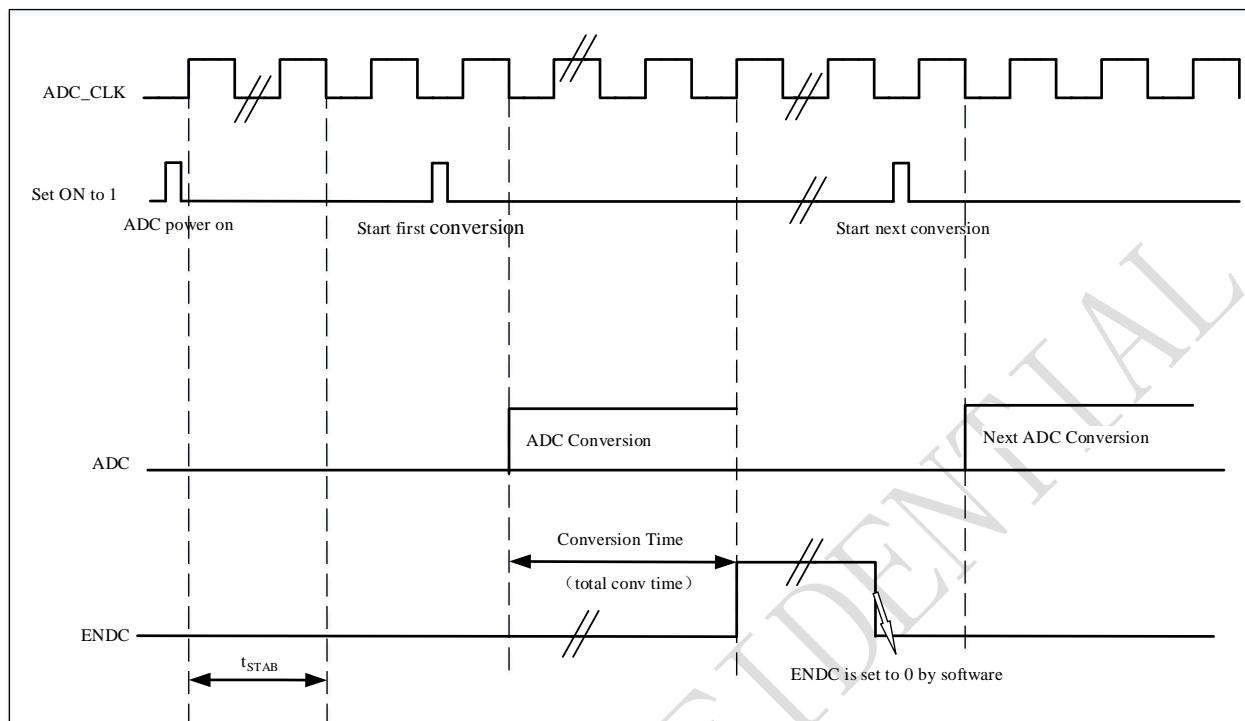
ADC 可以通过配置 ADC_CTRL2.CTU 为 1 进入连续转换模式。在该模式下，外部触发或设置 ADC_CTRL2.ON 为 1 可以启动 ADC 开始转换，ADC 会持续转换选择的通道。连续模式仅对规则通道有效，对注入通道无效。

转换开始后，当规则通道转换完成时，规则通道转换结束标志位（ADC_STS.ENDC）将设置为 1。如果规则通道转换结束中断位使能（ADC_CTRL1.ENDCIEN）设置为 1，将产生一个中断。转换后的数据将存储在 ADC_DAT 寄存器中

9.3.7 时序图

ADC_CTRL2.ON 首次设置为 1 时，ADC 上电。ADC 上电后，ADC 需要时间 t_{STAB} 来保证其稳定性。ADC 稳定后，再次对 ADC_CTRL2.ON 写 1，ADC 开始转换，转换结束标志位将在转换完成后设置为 1。

图 9-5 时序图



9.3.8 模拟看门狗

可以通过设置 `ADC_CTRL1.AWDGERCH` 为 1 在规则通道上打开模拟看门狗，也可以通过将 `ADC_CTRL1.AWDGEJCH` 设置为 1 在注入通道上启用模拟看门狗。可以通过配置 `ADC_WDGHIGH.HTH` 设置模拟看门狗的高阈值，模拟看门狗的低阈值可以通过 `ADC_WDGLOW.LTH` 来设置。模拟看门狗的阈值与数据对齐的方式无关，因为 ADC 的转换值与阈值的比较是在对齐之前完成。当 ADC 转换的值高于模拟看门狗的高阈值或低于模拟看门狗的低阈值时，如果 `ADC_CTRL1.AWDGIEN` 已配置，则模拟看门狗标志 (`ADC_STS.AWDG`) 将被置为 1，此时会产生中断。通过配置 `ADC_CTRL1.AWDGSGLEN` 和 `ADC_CTRL1.AWDGCH[4:0]`，可以控制模拟看门狗作用于一个或多个通道。

表 9-2 模拟看门狗开启的通道

| 模拟看门狗开启的通道 | ADC_CTRL1 寄存器控制位 | | |
|------------|------------------|----------|----------|
| | AWDGSGLEN | AWDGERCH | AWDGEJCH |
| 无 | 任意值 | 0 | 0 |
| 所有注入通道 | 0 | 0 | 1 |
| 所有规则通道 | 0 | 1 | 0 |
| 所有注入和规则通道 | 0 | 1 | 1 |
| 单一的注入通道 | 1 | 0 | 1 |
| 单一的规则通道 | 1 | 1 | 0 |
| 单一的注入或规则通道 | 1 | 1 | 1 |

9.3.9 扫描模式

通过配置 ADC_CTRL1.SCAMD 为 1 可以开启扫描转换模式，通过配置四个寄存器 ADC_RSEQ1、ADC_RSEQ2、ADC_RSEQ3、ADC_JSEQ 可以选择转换通道序列，ADC 会对所有选择的规则或注入通道进行扫描转换。转换开始后，通道将一个一个转换。如果此时 ADC_CTRL2.CTU 为 1，则在所有选中的规则通道的转换完成后，将从转换序列的第一个通道重新开始转换。注入通道不支持连续转换。DMA 功能可以通过设置 ADC_CTRL2.ENDMA 为 1 来开启，DMA 会在规则通道转换完成后将数据传输到 SRAM 中。注入通道转换的数据总是存储在 ADC_JDATx 寄存器中。

注意：双ADC 模式时，ADC2 的规则通道上 DMA 功能需要通过 ADC1 的 DMA 来完成，ADC4 的规则通道上 DMA 功能需要通过 ADC3 的 DMA 来完成

9.3.10 注入通道管理

9.3.10.1 自动注入

如果设置了 ADC_CTRL1.AUTOJC 位，则 ADC_JSEQ 选择的注入通道将在 ADC_RSEQx 选中的规则通道转换完成后自动转换，最多可以转换 16+4 个通道。设置 ADC_CTRL2.CTU 转换序列将被连续转换。

开启该功能时，需要关闭注入通道的外部触发。

此功能不能与中断模式同时使用。

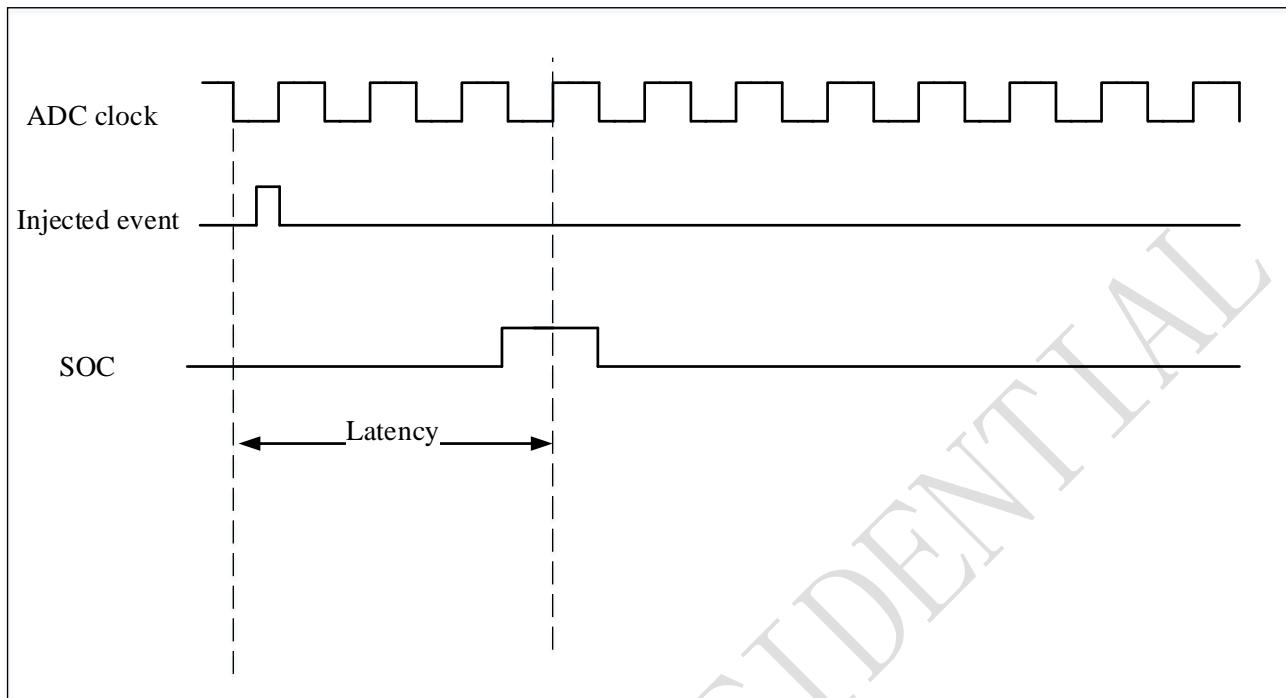
当 ADC 时钟预分频因子为 2 时，当转换序列从规则变为注入或注入变为规则时，会有 2 个 ADC 时钟间隔的延迟。当 ADC 时钟预分频因子为 4 到 8 时，当转换序列从规则变为注入或注入变为规则时，会有 1 个 ADC 时钟间隔的延迟。

9.3.10.2 触发注入

将 ADC_CTRL1.AUTOJC 设置为 0 并将 ADC_CTRL1.SCAMD 设置为 1 以开启触发注入功能。在此功能中，通过设置 ADC_CTRL2.ON 或通过外部触发连续转换的规则通道。规则通道转换时，如果产生外部注入触发，则暂停当前转换，注入序列通道开始转换。当注入序列通道转换完成后，将恢复中断的规则序列通道转换。如果在注入转换过程中产生了规则事件，则规则序列通道将在注入序列通道转换完成后开始转换。

使用此功能时，注入通道触发的时间间隔需要大于注入序列完成转换所需的时间。

图 9-6 注入转换延时



注意：最大延迟数值请参考数据手册中有关电气特性部分。

9.3.11 间断模式

9.3.11.1 规则通道

配置 ADC_CTRL1.DREGCH 为 1，开启规则通道的间断模式，通过配置 ADC_RSEQ1、ADC_RSEQ2、ADC_RSEQ3 获取规则转换序列，配置 ADC_CTRL1.DCTU[2:0]控制每次触发后转换 n 个通道。

当触发信号产生时，对规则序列的 n 个通道进行转换然后停止，直到下一个触发信号产生，从上一次转换停止的地方开始继续转换 n 个通道，直到规则序列的所有通道被转换（如果最后一个触发发生并且转换序列中的剩余通道小于 n，则只转换剩余未转换的通道并停止转换），并且转换结束标志位也将被设置为 1.当转换序列中所有通道的转换完成后，下一个触发信号出现时，再次从规则序列的第一个通道开始转换。

9.3.11.2 注入通道

配置 ADC_CTRL1.DJCH 为 1，开启注入通道的间断模式，通过配置 ADC_JSEQ 获取注入转换序列。

当触发信号产生时，它将转换注入转换序列的 1 个通道，然后停止。直到下一个触发信号产生，它会从上一次转换停止的通道处继续转换 1 个通道，直到注入序列的所有通道都被转换，并且转换结束标志位也将设置为 1。当转换序列中所有通道的转换完成时，下一个触发信号出现时，再次从注入序列的第一个通道开始转换。

同时间只能设置规则转换和注入转换其中一种为间断模式，不能同时设置自动注入模式和间断模式。

9.4 校准

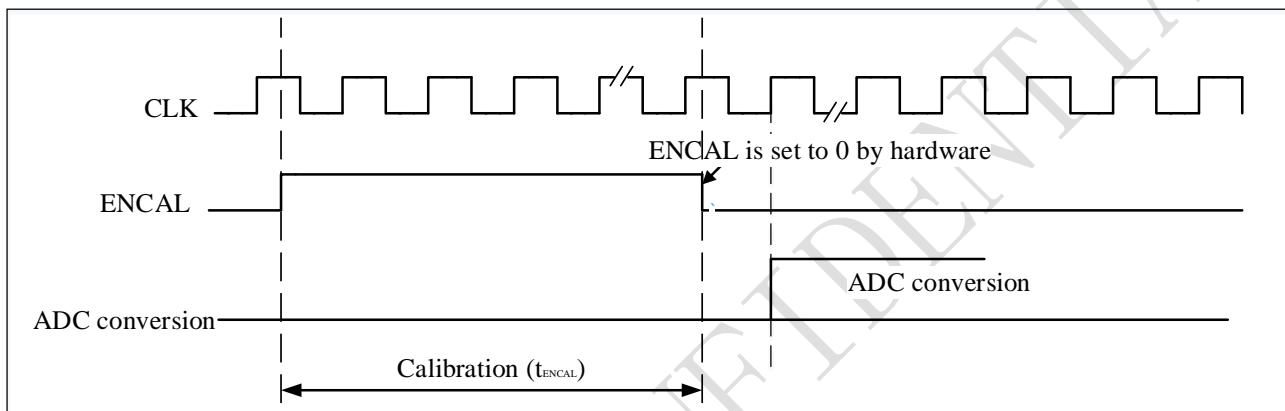
为了减少误差，ADC 具有内置的自校准机制。在 A/D 转换之前，计算每个电容器的误差修正值。该值用于

消除转换期间内部电容器组引起的误差。将 ADC_CTRL2.ENCAL 位设置为 1 以启动自校准。在校准过程中, ADC_CTRL2.ENCAL 位保持为 1。校准后, ADC_CTRL2.ENCAL 位由硬件清零, 然后可以开始 A/D 转换。

注意:

1. 建议每次上电后进行校准。如果 ADC 已经转换并处于连续转换模式, 则无法完成校准操作。
2. 默认为单端校正, 需要进行双端自动校正, 必须设置 ADC_CTRL3.CALDIF 为 1。然后将 ADC_CTRL2.ENCAL 位写入 1, 等待校正完成 (ADC_CTRL2.ENCAL 位清 0 修正后自动)

图 9-7 校准时序图



9.5 数据对齐

转换后的数据有两种对齐方式: 左对齐和右对齐。对齐可以通过 ADC_CTRL2.ALIG 位设置。ADC_CTRL2.ALIG=0 为右对齐, 如表 9-3 所示, ADC_CTRL2.ALIG=1 为左对齐, 如表 9-4 所示。

对于注入序列, SYM 位是扩展的符号值, 寄存器中存储的数据是转换结果减去 ADC_JOFFSETx 寄存器中用户定义的偏移量, 所以结果可以是负值; 对于规则序列, 不需要减去偏移值。

表 9-3 数据右对齐

注入序列

| | | | | | | | | | | | | | | | |
|-----|-----|-----|-----|-----|-----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| SYM | SYM | SYM | SYM | D11 | D10 | D9 | D8 | D7 | D6 | D5 | D4 | D3 | D2 | D1 | D0 |
|-----|-----|-----|-----|-----|-----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|

规则序列

| | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|-----|-----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| 0 | 0 | 0 | 0 | D11 | D10 | D9 | D8 | D7 | D6 | D5 | D4 | D3 | D2 | D1 | D0 |
|---|---|---|---|-----|-----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|

表 9-4 数据左对齐

注入序列

| | | | | | | | | | | | | | | | |
|-----|-----|-----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|---|---|---|
| SYM | D11 | D10 | D9 | D8 | D7 | D6 | D5 | D4 | D3 | D2 | D1 | D0 | 0 | 0 | 0 |
|-----|-----|-----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|---|---|---|

规则序列

| | | | | | | | | | | | | | | | |
|-----|-----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|---|---|---|---|
| D11 | D10 | D9 | D8 | D7 | D6 | D5 | D4 | D3 | D2 | D1 | D0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
|-----|-----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|---|---|---|---|

注意：转换位数为 10、8、6 位时参考转换位数为 12 位的对齐方式

9.6 可编程的通道采样时间

ADC 使用若干个 ADC_CLK 周期对输入电压采样，采样周期数目可以通过 ADC_SAMPTx.SAMPx[2:0]更改。每个通道可以分别用不同的时间采样。总转换时间如下计算：

$$T_{CONV} = \text{采样时间} + 12.5 \text{ 个周期}$$

例如：

当 ADCCLK=72MHz，采样时间为 1.5 周期

$$T_{CONV} = 1.5 + 12.5 = 14 \text{ 周期} = 0.1944\mu\text{s}$$

9.7 外部触发转换

对于规则序列，软件将 ADC_CTRL2.EXTRTRIG 位设置为 1，则规则通道可以使用外部事件的上升沿触发启动转换，然后软件通过配置 ADC_CTRL2.EXTRSEL[2:0]来选择规则序列的外部触发源。外部触发源选择如下表所示。如果选择 EXTI_line11 或 TIM8_TRGO 作为外部触发源，可以通过设置 AFIO_RMP_CFG.ADC1_ETRR 或 AFIO_RMP_CFG.ADC2_ETRR 位来实现；如果选择 EXTI_line10 或 TIM5_CC3 作为外部触发源，可以通过设置 AFIO_RMP_CFG4.ADC3_ETRR 或 AFIO_RMP_CFG4.ADC4_ETRR 位来实现；如果选择 SWSTRRCH 作为外部触发源，则可以通过将 ADC_CTRL2.SWSTRRCH 设置为 1 来启动规则通道转换。

表 9-5 ADC1 和 ADC2 的规则通道的外部触发

| EXTRSEL[2:0] | 触发源 | 触发类型 |
|--------------|-------------------------|-------------------|
| 000 | TIM1_CC1事件 | 来自片上定时器的内部信号 |
| 001 | TIM1_CC2事件 | |
| 010 | TIM1_CC3事件 | |
| 011 | TIM2_CC2事件 | |
| 100 | TIM3_TRGO事件 | |
| 101 | TIM4_CC4事件 | |
| 110 | EXTI line11/TIM8_TRGO事件 | 外部引脚/来自片上定时器的内部信号 |
| 111 | SWSTRRCH | 软件控制位 |

表 9-6 ADC3 和 ADC4 的规则通道的外部触发

| EXTRSEL [2:0] | 触发源 | 触发类型 |
|---------------|-------------|--------------|
| 000 | TIM3_CC1事件 | 来自片上定时器的内部信号 |
| 001 | TIM2_CC3事件 | |
| 010 | TIM1_CC3事件 | |
| 011 | TIM8_CC1事件 | |
| 100 | TIM8_TRGO事件 | |
| 101 | TIM5_CC1事件 | |

| EXTRSEL [2:0] | 触发源 | 触发类型 |
|---------------|------------------------|-------|
| 110 | EXTI line10/TIM5_CC3事件 | |
| 111 | SWSTRRCH | 软件控制位 |

对于注入序列，软件将 ADC_CTRL2.EXTJTRIG 位设置为 1，则注入通道可以使用外部事件的上升沿触发启动转换，软件将通过配置 ADC_CTRL2.EXTJSEL[2:0]选择注入序列的外部触发源。外部触发源选择如下表所示。如果选择 EXTI_line15 或 TIM8_CC4 作为外部触发源，可以设置 AFIO_RMP_CFG.ADC1_ETRI 或 AFIO_RMP_CFG.ADC2_ETRI 位来实现；如果选择 EXTI_line14 或 TIM5_CC4 作为外部触发源，可以设置 AFIO_RMP_CFG4.ADC3_ETRI 或 AFIO_RMP_CFG4.ADC4_ETRI 位来实现；如果选择 SWSTRJCH 作为外部触发源，则可以通过将 ADC_CTRL2.SWSTRJCH 设置为 1 来启动注入通道转换

表 9-7 ADC1 和 ADC2 的注入通道的外部触发

| EXTJSEL[2:0] | 触发源 | 触发类型 |
|--------------|------------------------|-------------------|
| 000 | TIM1_TRGO事件 | 来自片上定时器的内部信号 |
| 001 | TIM1_CC4事件 | |
| 010 | TIM2_TRGO事件 | |
| 011 | TIM2_CC1事件 | |
| 100 | TIM3_CC4事件 | |
| 101 | TIM4_TRGO事件 | |
| 110 | EXTI line15/TIM8_CC4事件 | |
| 111 | SWSTRJCH | 外部引脚/来自片上定时器的内部信号 |

表 9-8 ADC3 和 ADC4 用于注入通道的外部触发

| EXTJSEL[2:0] | 触发源 | 触发类型 |
|--------------|------------------------|--------------|
| 000 | TIM1_TRGO事件 | 来自片上定时器的内部信号 |
| 001 | TIM1_CC4事件 | |
| 010 | TIM4_CC3事件 | |
| 011 | TIM8_CC2事件 | |
| 100 | TIM8_CC4事件 | |
| 101 | TIM5_TRGO事件 | |
| 110 | EXTI line14/TIM5_CC4事件 | |
| 111 | SWSTRJCH | 软件控制位 |

注意：注入触发可以打断规则转换。

9.8 DMA 请求

为避免多个规则通道转换时数据过多，导致 ADC_DAT 寄存器中保存的规则通道转换结果丢失，可以将 ADC_CTRL2.ENDMA 位设置为 1，以此使用 DMA。当 ADC 规则通道转换结束时，会产生一个 DMA 请求。DMA 收到请求后，会将转换后的数据从 ADC_DAT 寄存器传送到用户指定的目标地址。

注意：独立 ADC 模式时，ADC1, ADC2, ADC3, ADC4 拥有 DMA 功能。双 ADC 模式时，由 ADC2 转化的数据在 ADC1 的数据寄存器中，由 ADC4 转化的数据在 ADC3 的数据寄存器中。

9.9 ADC 模式

ADC1（主）和 ADC2（从），ADC3（主）和 ADC4（从）可以组成双 ADC 模式。

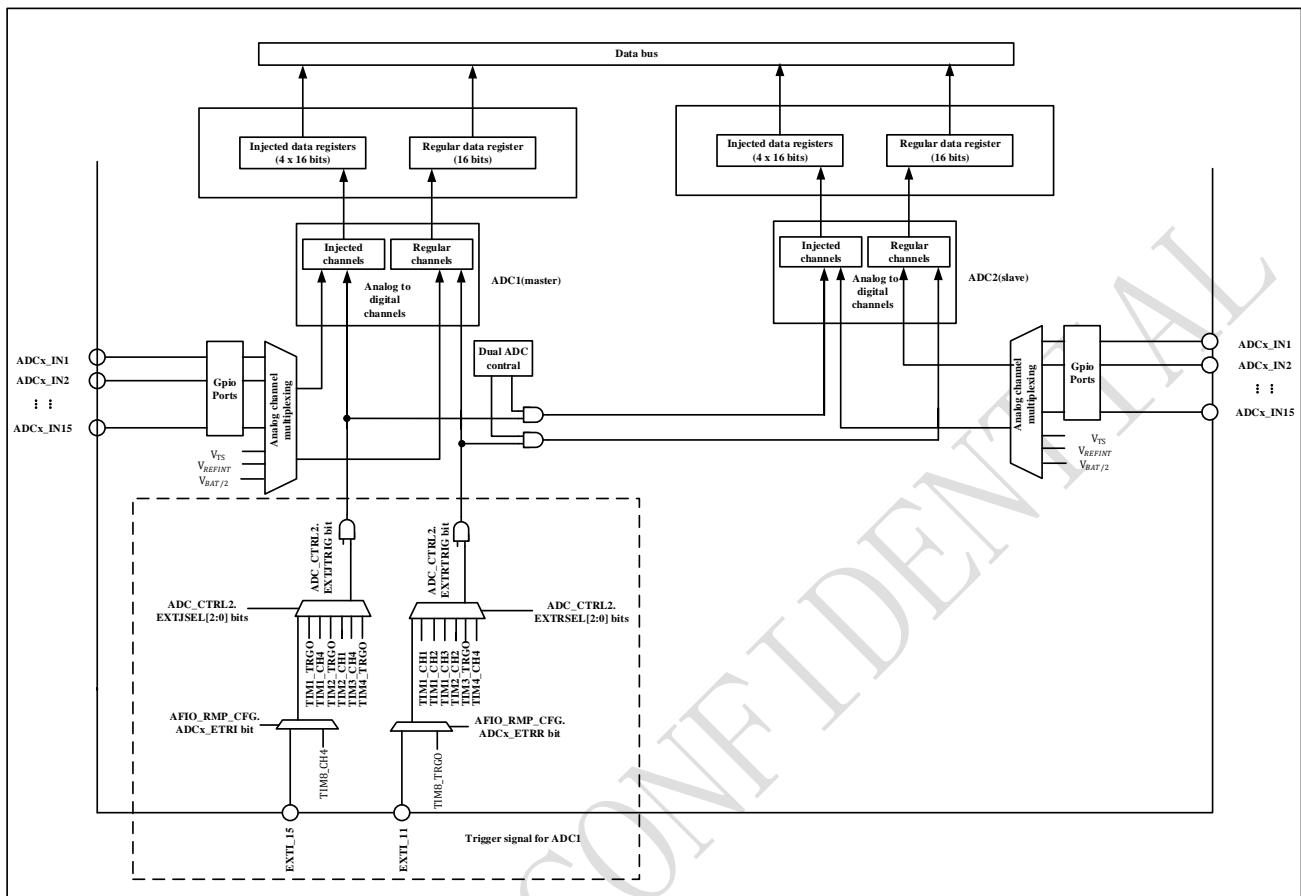
可以通过配置 ADC_CTRL1.DUSEL[3:0]选择 ADC 工作的模式，可以配置为独立模式或者双 ADC 模式，ADC 模式可配置为以下几种工作方式：

- 独立模式
- 同步注入模式
- 同步规则模式
- 快速交叉模式
- 慢速交叉模式
- 交替触发模式
- 同步注入模式 + 同步规则模式
- 同步规则模式 + 交替触发模式
- 同步注入模式 + 交叉模式

注意：

1. 当配置双ADC 模式时，如果需要外部事件触发，需要配置主ADC 外部事件触发，从ADC 软件触发，主ADC 和从ADC 外部触发需同时使能，这样可以避免从ADC 错误的触发转换。
2. 在双ADC 模式工作时，即使不使用DMA 传输数据，也需要将DMA 使能，从ADC 的转换数据可通过主ADC 的数据寄存器读取。

图 9-8 双 ADC 框图



9.9.1 独立模式

此模式里，每个 ADC 都独立工作。

9.9.2 同步规则模式

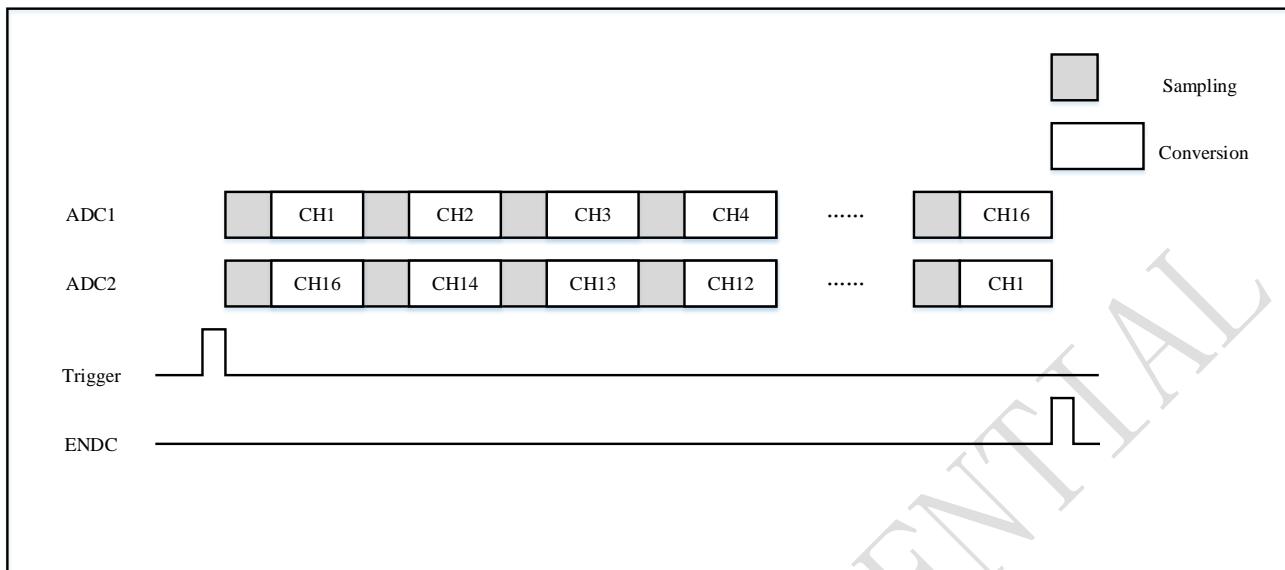
在此模式下转换一个规则序列，外部触发来源于 ADC1 的多路开关，由 ADC_CTRL2.EXTRSEL[2:0]决定，ADC2 会被同步触发。

如果 ADC1 或者 ADC2 置位了 ADC_CTRL1.ENDCIEN，当 ADC1 和 ADC2 的规则序列转换完毕时，会产生一个 ENDC 中断，转换的数据会被存储在 ADC_DAT 寄存器中，ADC_DAT 的高半字是 ADC2 的转换数据，ADC_DAT 的低半字是 ADC1 的转换数据，32 位的 DMA 可以用来将 ADC_DAT 的数据传送到 SRAM。

注意：

- 不要在 2 个 ADC 上转换相同的通道（两个 ADC 在同一通道上的采样时间不能重叠）。
- 在同步规则模式下，ADC1 和 ADC2 同步转换的规则序列需要设置为一样的时间，或者触发信号的间隔大于转换时间较长的序列。如果触发信号的间隔小于转换时间较长的序列，时间较长的序列未转换完毕时，较短的序列可能会重新开始转换。

图 9-9 16 个通道的同步规则模式转换示意图



9.9.3 同步注入模式

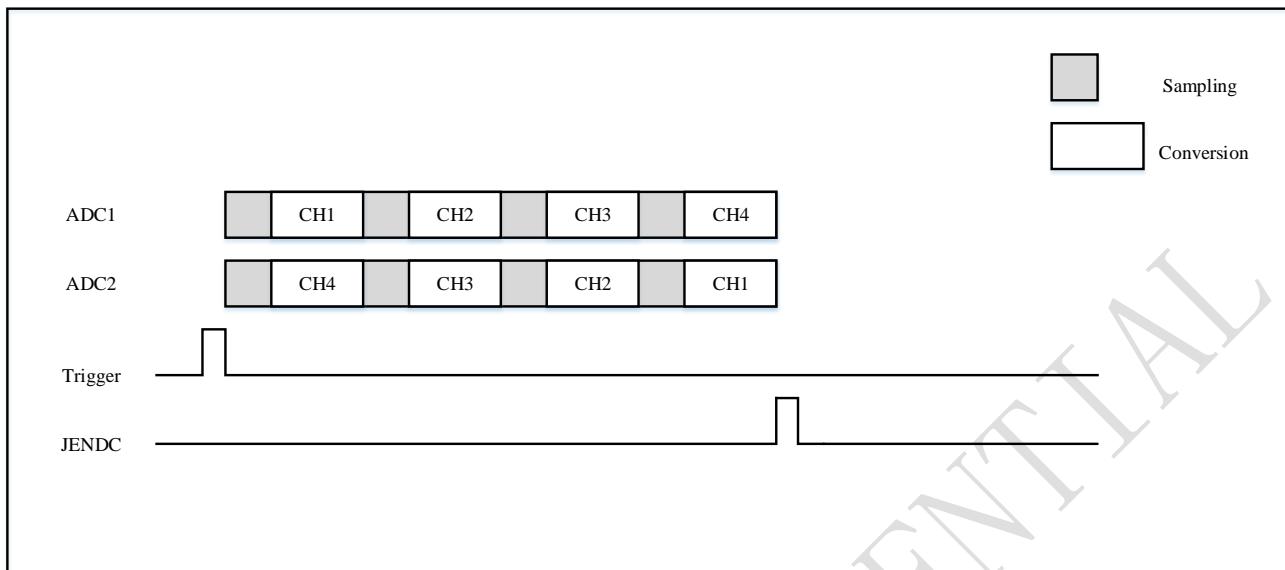
在此模式下转换一个注入序列，外部触发来源于 ADC1 的多路开关，由 ADC_CTRL2.EXTJSEL[2:0]决定，ADC2 会被同步触发。

如果 ADC1 或者 ADC2 置位了 ADC_CTRL1.JENDCIEN，当 ADC1 和 ADC2 的注入序列转换完毕时，会产生一个 JENDC 中断，转换的数据会被存储在各自的 ADC_JDATx 寄存器中。

注意：

1. 不要在 2 个 ADC 上转换相同的通道（两个 ADC 在同一通道上的采样时间不能重叠）。
2. 在同步注入模式下，ADC1 和 ADC2 同步转换的注入序列需要设置为一样的时间，或者触发信号的间隔大于转换时间较长的序列。如果触发信号的间隔小于转换时间较长的序列，时间较长的序列未转换完毕时，较短的序列可能会重新开始转换。

图 9-10 4 个通道的同步注入模式转换示意图



9.9.4 快速交叉模式

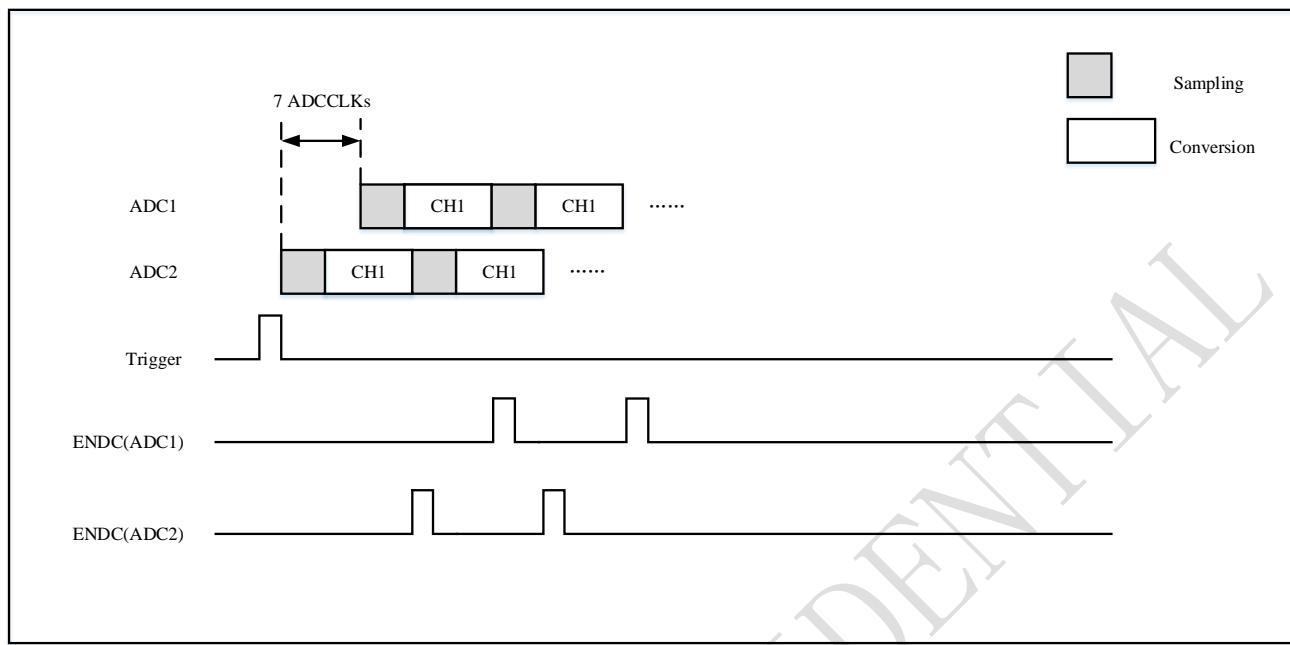
此模式适用于规则序列（通常为一个通道）。外部触发来源于 ADC1 的多路开关，由 ADC_CTRL2.EXTRSEL[2:0]决定。当触发产生时，ADC2 立即转换，ADC1 会在 7 个 ADC 时钟周期后开始转换。如果 ADC1 和 ADC2 的 ADC_CTRL2.CTU 被置位，那么被选中的规则序列会连续转换。

转换的数据会被存储在 ADC_DAT 寄存器中，ADC_DAT 的高半字是 ADC2 的转换数据，ADC_DAT 的低半字是 ADC1 的转换数据。如果 ADC1 或者 ADC2 置位了 ADC_CTRL1.ENDCIEN，当 ADC1 和 ADC2 的规则序列转换完毕时，会产生一个 ENDC 中断，此时如果 ADC_CTRL2.ENDDMA 被置位，可以产生一个 DMA 传输请求，ADC_DAT 的数据可以通过 DMA 传送到 SRAM。

注意：

1. 使用快速交叉模式时，需保证没有注入通道被外部触发。
2. 采样时间必须小于 7 个 ADC 时钟周期，避免 ADC1 和 ADC2 转换相同通道时出现采样周期重叠。

图 9-11 1 个通道的连续转换的快速交叉模式转换示意图



9.9.5 慢速交叉模式

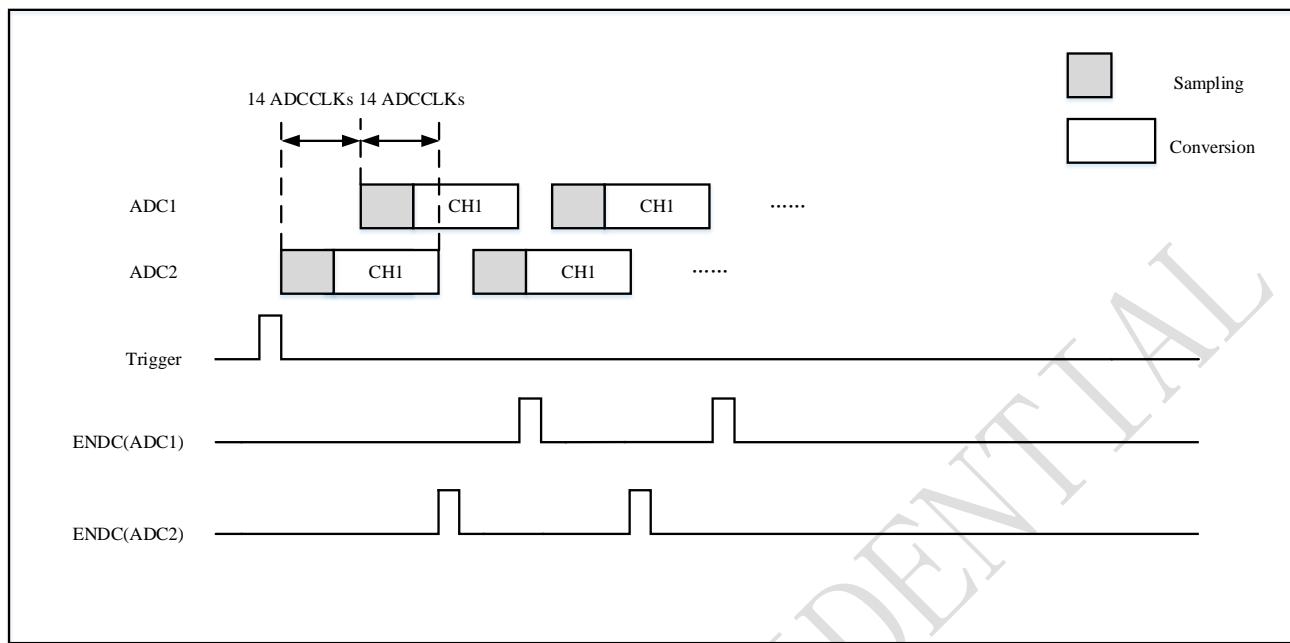
此模式适用于规则序列（通常为一个通道）。外部触发来源于 ADC1 的多路开关，由 ADC_CTRL2.EXTRSEL[2:0]决定。当触发产生时，ADC2 立即转换，14 个 ADC 时钟周期后 ADC1 开始转换，14 个 ADC 时钟周期后 ADC2 再次开始转换，依此循环。该模式会自动连续转换规则序列，不需要置位 ADC_CTRL2.CTU。

转换的数据会被存储在 ADC_DAT 寄存器中，ADC_DAT 的高半字是 ADC1 的转换数据，ADC_DAT 的低半字是 ADC2 的转换数据，如果 ADC1 或者 ADC2 置位了 ADC_CTRL1.ENDCIEN，当 ADC1 和 ADC2 的规则序列转换完毕时，会产生一个 ENDC 中断，此时如果 ADC_CTRL2.ENDMA 被置位，可以产生一个 DMA 传输请求，ADC_DAT 的数据可以通过 DMA 传送到 SRAM。

注意：

1. 使用慢速交叉模式时，需保证没有注入通道被外部触发。
2. 采样时间必须小于 14 个 ADC 时钟周期，避免 ADC1 和 ADC2 转换相同通道时出现采样周期重叠。

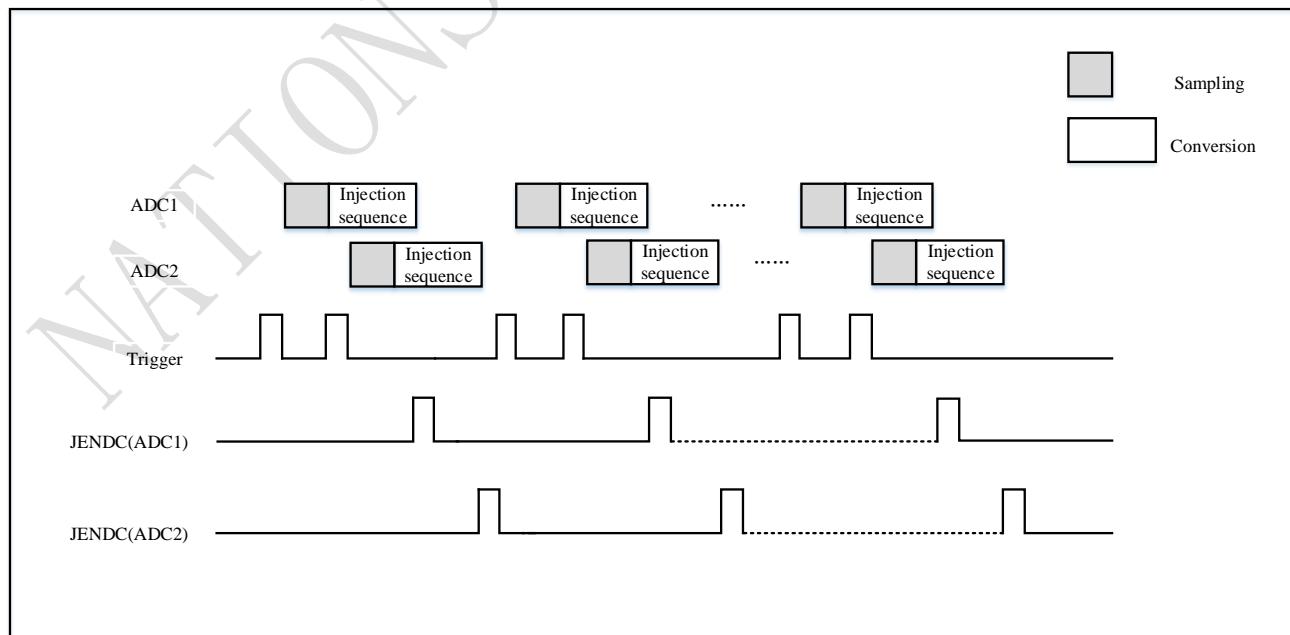
图 9-12 1 个通道的慢速交叉模式转换示意图



9.9.6 交替触发模式

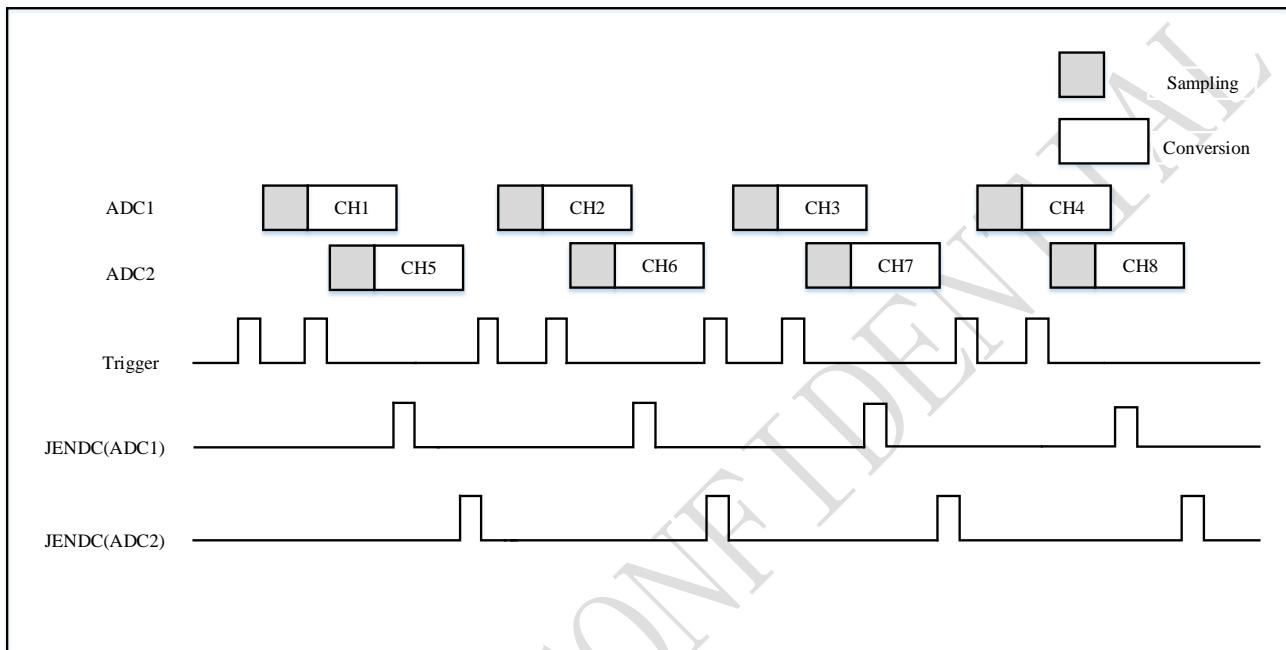
此模式适用于注入序列。外部触发来源于 ADC1 的多路开关，由 ADC_CTRL2.EXTJSEL[2:0]决定。当第一次触发产生，ADC1 所有的注入通道被转换，当第二次触发产生，ADC2 所有的注入通道被转换，依此循环。如果 ADC1 或者 ADC2 置位了 ADC_CTRL1.JENDCIEN，当 ADC1 或 ADC2 的注入序列转换完毕时，会产生一个 JENDC 中断。当所有注入序列都转换完后，另一个外部触发产生，那么交替触发会重新开始。

图 9-13 交替触发：注入通道组



如果 ADC1 和 ADC2 上同时使用了注入中断模式, 当第一次触发产生, ADC1 的第一组注入通道被转换, 当第二次触发产生, ADC2 的第一组注入通道被转换, 当第三次触发产生, ADC1 的第二组注入通道被转换, 当第四次触发产生, ADC2 的第二组注入通道被转换, 依此循环。如果 ADC1 或者 ADC2 置位了 ADC_CTRL1.JENDCIEN, 当 ADC1 或 ADC2 的注入序列转换完毕时, 会产生一个 JENDC 中断。当所有注入序列都转换完后, 另一个外部触发产生, 那么交替触发会重新开始。

图 9-14 交替触发: 在间断模式下注入通道组



9.9.7 混合的规则+注入同步模式

在此模式下, 同步注入通道的转换可以打断同步规则通道的转换。

注意: 在此模式下, ADC1 和 ADC2 同步转换的序列需要设置为一样的时间, 或者触发信号的间隔大于转换时间较长的序列。如果触发信号的间隔小于转换时间较长的序列, 时间较长的序列未转换完毕时, 较短的序列可能会重新开始转换。

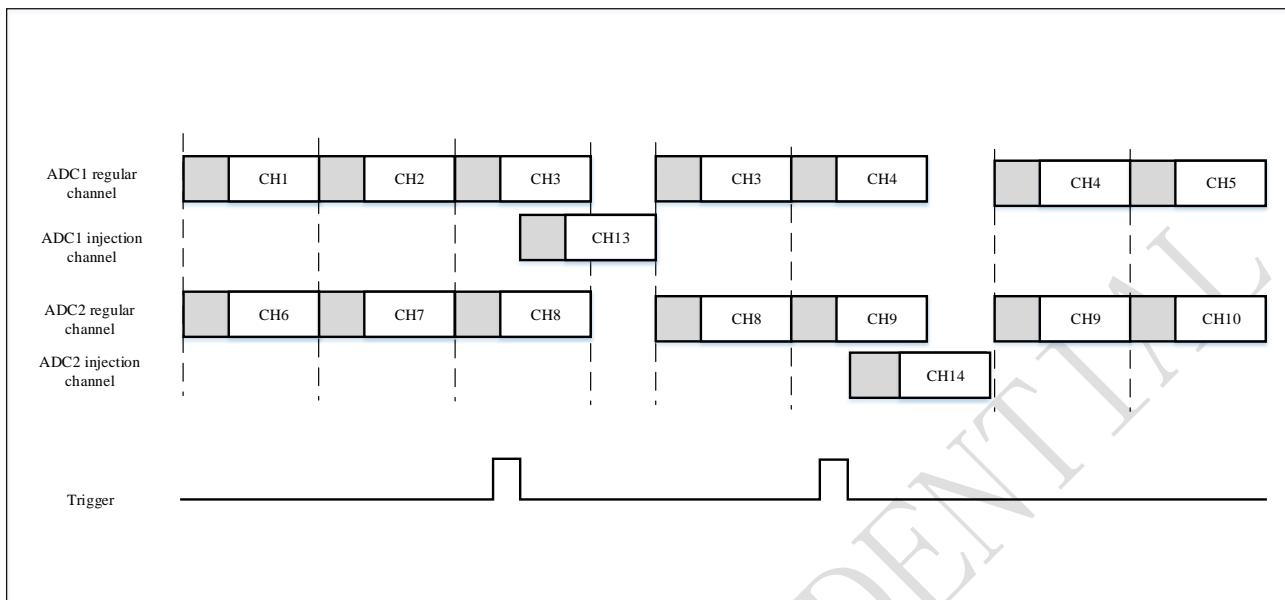
9.9.8 混合的同步规则+交替触发模式

注入通道的交替触发转换可以打断同步规则通道的转换。

当注入通道事件出现时, 注入交替转换立刻启动。如果规则转换正在进行, 主 ADC 和从 ADC 的规则转换都会停止, 以保证规则转换在注入转换完成后可以同步恢复。

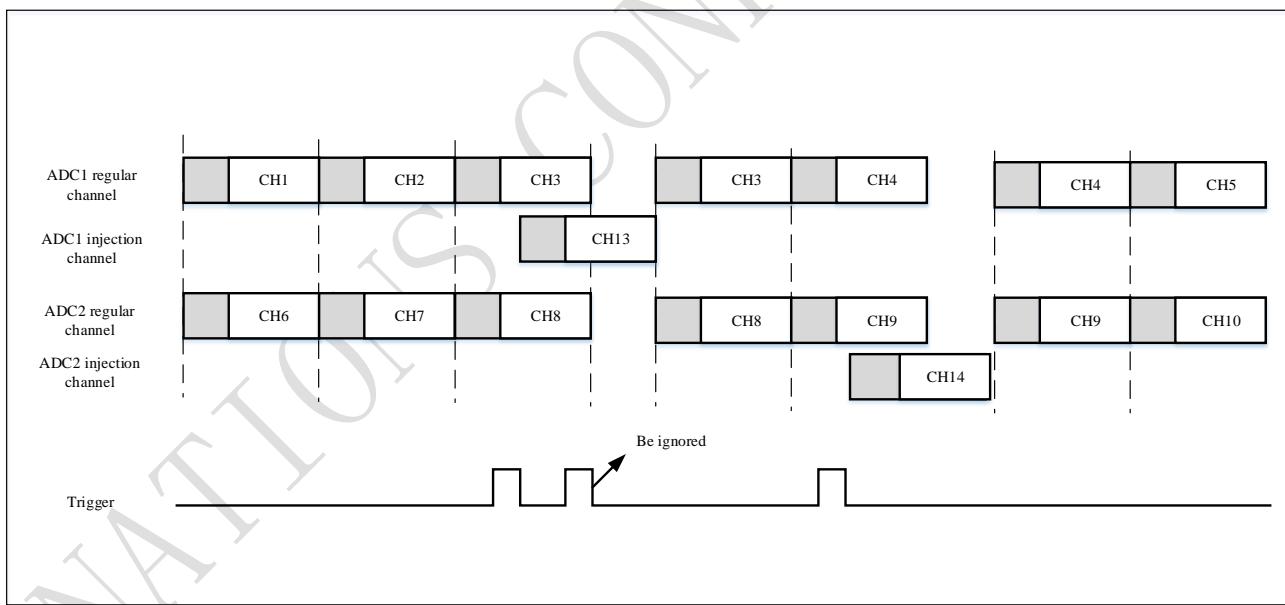
注意: 在此模式下, ADC1 和 ADC2 同步转换的序列需要设置为一样的时间, 或者触发信号的间隔大于转换时间较长的序列。如果触发信号的间隔小于转换时间较长的序列, 时间较长的序列未转换完毕时, 较短的序列可能会重新开始转换。

图 9-15 交替模式和规则同步模式组合



如果在注入转换期间产生了另一个注入触发，这个触发将被忽略。如下图所示

图 9-16 在注入转换期间发生注入触发

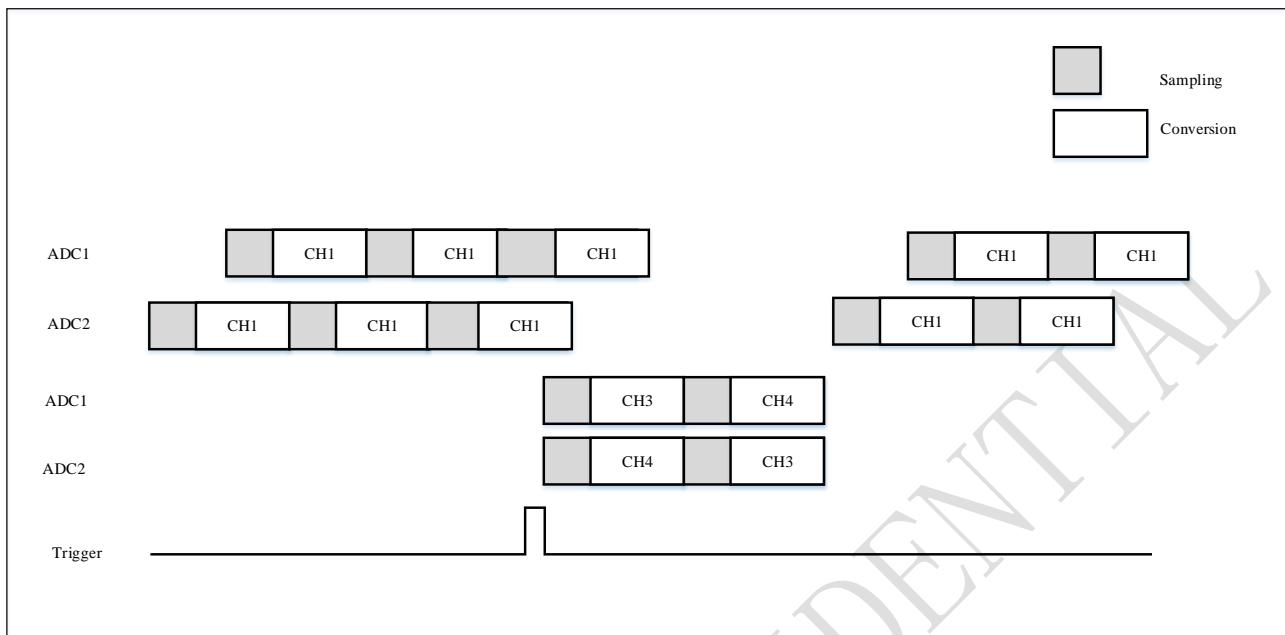


9.9.9 混合同步注入 + 交叉模式

在此模式下，当注入触发产生时，交叉转换会被中断，注入转换会启动，在注入转换完成后，交叉转换会被恢复。

注：当ADC 时钟预分频系数设置为4 时，交叉模式恢复后不会均匀地分配采样时间，采样间隔是8 个ADC 时钟周期与6 个ADC 时钟周期轮替，而不是均匀的7 个ADC 时钟周期。

图 9-17 交叉的单通道转换被注入序列 CH3 和 CH4 中断

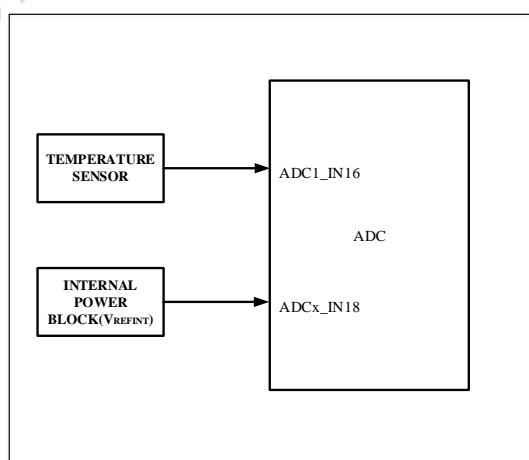


9.10 温度传感器

设置 ADC_CTRL2.TEMPEN 位为 1, 使能温度传感器和 V_{REFINT}, 设备工作时使用温度传感器检测环境温度。温度传感器采样的输出电压通过 ADC1_IN16 通道转换为数字值。温度传感器工作时, 理想的采样时间为 17.1us; 当温度传感器不工作时, ADC_CTRL2.TEMPEN 位可通过软件清零以降低功耗。图 9-18 是温度传感器的框图。

温度传感器的输出电压随温度线性变化。不同的芯片由于生产工艺的不同, 在温度曲线上会有不同的偏移量。通过测试, 发现最大偏移为 3° C。这一特性使得内部温度传感器更适合检测温度变化。不适合测量绝对温度。当需要精确的温度测量时, 应使用外部温度传感器。

图 9-18 温度传感器和 V_{REFINT} 通道框图



9.10.1 测量温度值

1. 配置通道 (ADC1_IN16) 和通道的采样时间为 17.1us。
2. 将 ADC_CTRL2.TEMPEN 位设置为 1 以启用温度传感器和 V_{REFINT}。
3. 设置 ADC_CTRL2.ON 位为 1 以启动 ADC 转换 (或通过外部触发)。
4. 读取 ADC 数据寄存器中的温度数据, 通过以下公式计算温度值:

$$\text{温度} (\text{C}) = \{(V_{30} - V_{\text{SENSE}}) / \text{Avg_Slope}\} + 30 \cdot T_{\text{offset}}$$

其中:

V_{30} = 30 摄氏度时的 V_{SENSE}

Avg_Slope = 温度和 V_{SENSE} 曲线的平均斜率(单位为 mV/ °C 或 μ V/°C)

T_{offset} = 温度误差补偿经验值 (单位为 °C)

参考数据手册的电气特性章节中 V_{30} 和 Avg_Slope 的实际值。

注意: 在传感器从断电模式唤醒到正确输出 V_{SENSE} 之前, 有一个建立时间; ADC 上电后还有一个建立时间, 所以为缩短延迟, ADC_CTRL2.TEMPEN 和 ADC_CTRL2.ON 位应该同时置位。

9.11 中断

ADC 中断可以来自规则或注入序列转换的结束、输入电压不在模拟看门狗设置的范围、任一规则或注入通道转换的结束。这些中断具有独立的中断使能位。

ADC_STS 寄存器中有 2 个状态标志: 注入序列通道转换启动(JSTR)和规则序列通道转换启动(STR)。但是 ADC 中没有与这两个标志相关的中断。

注: ADC1 和 ADC2 共享一个中断入口, 而 ADC3 和 ADC4 共享一个中断入口。

表 9-9 ADC 中断

| 中断事件 | 事件标志 | 使能控制位 |
|-------------|--------|-----------|
| 规则或注入序列转换结束 | ENDC | ENDCIEN |
| 注入序列转换结束 | JENDC | JENDCIEN |
| 超出模拟看门狗阈值 | AWDG | AWDGIEN |
| 任何通道转换结束 | ENDCA | ENDCAIEN |
| 任何注入通道转换结束 | JENDCA | JENDCAIEN |

9.12 ADC 寄存器

9.12.1 ADC 寄存器总览

表 9-10 ADC 寄存器映像和复位值

| Offset | Register | 31 | 30 | 29 | 28 | 27 | 26 | 25 | 24 | 23 | 22 | 21 | 20 | 19 | 18 | 17 | 16 | 15 | 14 | 13 | 12 | 11 | 10 | 9 | 8 | 7 | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | 0 | | |
|--------|----------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|--|--|
| 000h | ADC_STS | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

| Offset | Register | 31 | 30 | 29 | 28 | 27 | 26 | 25 | 24 | 23 | 22 | 21 | 20 | 19 | 18 | 17 | 16 | 15 | 14 | 13 | 12 | 11 | 10 | 9 | 8 | 7 | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | 0 | |
|--------|-------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|--|
| 05Ch | ADC_SAMPT3 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Reset Value | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

9.12.2 ADC 状态寄存器 (ADC_STS)

地址偏移: 0x00

复位值: 0x0000 0000

| | | | | | | | | | | | | | | | | |
|----|----------|--|--|--|--|--|--|--|--------|-------|-----|------|-------|------|------|----|
| 31 | Reserved | | | | | | | | | | | | | | | 16 |
| 15 | Reserved | | | | | | | | JENDCA | ENDCA | STR | JSTR | JENDC | ENDC | AWDG | |

| 位域 | 名称 | 描述 |
|-------|----------|---|
| 31:15 | Reserved | 保留, 必需保持复位值。 |
| 6 | JENDCA | 任意注入通道转换结束位 (Any injected channel end of conversion flag) 在任意注入通道转换结束时被硬件设置为1, 软件写0清除。 0: 转换没有完成; 1: 转换完成。 |
| 5 | ENDCA | 任意通道转换结束位 (Any end of conversion flag) 任意规则或注入通道转换结束时被硬件设置为1, 软件写0清除。 0: 转换没有完成; 1: 转换完成。 |
| 4 | STR | 规则通道开始位 (Regular channel start flag) 规则通道转换开始时该位被硬件设置为1, 软件写0清除。 0: 规则通道转换未开始; 1: 规则通道转换已开始。 |
| 3 | JSTR | 注入通道开始位 (Injected channel start flag) 注入通道转换开始时被硬件设置为1, 软件写0清除。 0: 注入通道转换未开始; 1: 注入通道转换已开始。 |
| 2 | JENDC | 注入通道转换结束位 (Injected channel end of conversion) 注入通道序列转换结束时被硬件设置为1, 软件写0清除。 0: 转换未完成; 1: 转换完成。 |
| 1 | ENDC | 转换结束位 (End of conversion) 规则或注入通道序列转换结束时被硬件设置为1, 软件写0清除。 0: 转换未完成; 1: 转换完成。 |

| 位域 | 名称 | 描述 |
|----|------|---|
| 0 | AWDG | 模拟看门狗标志位 (Analog watchdog flag) 转换的电压值超出了ADC_LTR和ADC_HTR寄存器定义的范围时被硬件设置为1，软件写0清除。 0: 没有发生模拟看门狗事件； 1: 发生模拟看门狗事件。 |

9.12.3 ADC 控制寄存器 1 (ADC_CTRL1)

地址偏移: 0x04

复位值: 0x0000 0000

| 位域 | 名称 | 描述 |
|-------|------------|--|
| 31:24 | Reserved | 保留, 必需保持复位值。 |
| 23 | AWDGERCH | 在规则通道上开启模拟看门狗 (Analog watchdog enable on regular channels) 该位由软件设置和清除。 0: 在规则通道上关闭模拟看门狗; 1: 在规则通道上开启模拟看门狗。 |
| 22 | AWDGEJCH | 在注入通道上开启模拟看门狗 (Analog watchdog enable on injected channels) 该位由软件设置和清除。 0: 在注入通道上关闭模拟看门狗; 1: 在注入通道上开启模拟看门狗。 |
| 21:20 | Reserved | 保留, 必需保持复位值。 |
| 19:16 | DUSEL[3:0] | 模式选择 (Dual mode selection) 配置这些位可以选择ADC的工作模式。 0000: 独立模式; 0001: 混合的同步规则+同步注入模式; 0010: 混合的同步规则+交替触发模式; 0011: 混合同步注入+快速交叉模式; 0100: 混合同步注入+慢速交叉模式; 0101: 注入同步模式; 0110: 规则同步模式; 0111: 快速交叉模式; 1000: 慢速交叉模式; 1001: 交替触发模式。 注意: 在ADC2和ADC4中这些位为保留位, 在双ADC模式时改变通道的配置会产生一个重新开始的条件, 建议在改变配置前先关闭双ADC模式, 以避免同步丢失。 |

| 位域 | 名称 | 描述 |
|-------|-----------|---|
| 15:13 | DCTU[2:0] | 间断模式通道计数 (Discontinuous mode channel count) 这些位可以配置收到外部触发后转换通道的数目。 000: 1个通道; 001: 2个通道; 111: 8个通道。 |
| 12 | DJCH | 在注入通道上的间断模式 (Discontinuous mode on injected channels) 由软件设置和清除。 0: 注入通道序列上禁用间断模式; 1: 注入通道序列上使用间断模式。 |
| 11 | DREGCH | 在规则通道上的间断模式 (Discontinuous mode on regular channels) 该位由软件设置和清除。 0: 规则通道序列上禁用间断模式; 1: 规则通道序列上使用间断模式。 |
| 10 | AUTOJC | 自动的注入通道序列转换 (Automatic injected group conversion) 该位由软件设置和清除, 用于规则通道序列转换结束后注入通道序列转换的开启或关闭 0: 关闭自动的注入通道序列转换; 1: 开启自动的注入通道序列转换。 |
| 9 | AWDGSGLEN | 扫描模式中在一个单一的通道上使用看门狗 (Enable the watchdog on a single channel in scan mode) 该位由软件设置和清除, 用于AWDGCH[4:0]位指定的通道上的模拟看门狗功能开启或所有通道上模拟看门狗功能开启。 0: 在所有的通道上使用模拟看门狗; 1: 在单一通道上使用模拟看门狗。 |
| 8 | SCANMD | 扫描模式 (Scan mode) 该位由软件设置和清除以启用或禁用扫描模式。在扫描模式下, 转换由ADC_RSEQx或ADC_JSEQ 寄存器选定的通道。 0: 禁用扫描模式; 1: 启用扫描模式。 注意: 如果单独设置 ADC_CTRL1.ENDCIEN 或 ADC_CTRL1.JENDCIEN 位, ADC_STS.ENDC 或ADC_STS.JENDC 中断仅在最后一个通道转换后发生。 |
| 7 | JENDCIEN | 注入通道的中断使能 (Interrupt enable for injected channels) 该位由软件设置和清除, 在所有注入通道转换完成后禁止或允许中断。 0: 禁止JENDC中断; 1: 使能JENDC中断。 |
| 6 | AWDGIEN | 模拟看门狗中断使能 (Analog watchdog interrupt enable) 该位由软件设置和清除, 禁止或允许模拟看门狗产生中断。在扫描模式下, 如果看门狗检测到超出范围的值, 则仅当该位置位时才会中止扫描。 0: 禁止模拟看门狗中断; 1: 使能模拟看门狗中断。 |

| 位域 | 名称 | 描述 |
|-----|-------------|--|
| 5 | ENDCIEN | ENDC的中断使能 (Interrupt enable for ENDC) 该位由软件设置和清除, 以禁止或允许在规则或注入转换序列转换结束后发生中断。 0: 禁止ENDC中断; 1: 使能ENDC中断。 |
| 4:0 | AWDGCH[4:0] | 模拟看门狗通道选择位 (Analog watchdog channel select bits) 这些位由软件设置和清除以选择模拟看门狗保护的输入通道。 00000: ADC模拟输入通道0; 00001: ADC模拟输入通道1; ... 01111: ADC模拟输入通道15; 10000: ADC模拟输入通道16; 10001: ADC模拟输入通道17; 10010: ADC模拟输入通道18; 保留所有其他值。 |

9.12.4 ADC 控制寄存器 2 (ADC_CTRL2)

地址偏移: 0x08

复位值: 0x0000 0000

| | | | | | | | | | | | | | | | | |
|----|----------|--------------|----|----|----|----|---|---|----|----|----|----|----|----|----|----|
| 31 | Reserved | | | | | | | | 24 | 23 | 22 | 21 | 20 | 19 | 17 | 16 |
| 15 | EXTJTRIG | EXTJSEL[2:0] | 14 | 12 | 11 | 10 | 9 | 8 | rw |
| 15 | EXTJTRIG | EXTJSEL[2:0] | 14 | 12 | 11 | 10 | 9 | 8 | rw |
| 15 | EXTJTRIG | EXTJSEL[2:0] | 14 | 12 | 11 | 10 | 9 | 8 | rw |

| 位域 | 名称 | 描述 |
|-------|----------|---|
| 31:24 | Reserved | 保留, 必需保持复位值。 |
| 23 | TEMPEN | 温度传感器和V _{REFINT} 开启 (Temperature sensor and V _{REFINT} enable) 该位由软件设置和清除以开启或关闭温度传感器和V _{REFINT} 通道。 0: 关闭温度传感器和V _{REFINT} ; 1: 开启温度传感器和V _{REFINT} 。 |
| 22 | SWSTRRCH | 开始转换规则通道 (Start conversion of regular channels) 该位由软件设置以启动转换, 并在转换开始后由硬件清零。如果在ADC_CTRL2.EXTRSEL[2:0] 位中选择 SWSTRRCH 作为触发事件, 该位用于启动一组规则通道的转换。 0: 复位状态; 1: 开始转换规则通道。 |
| 21 | SWSTRJCH | 开始转换注入通道 (Start conversion of injected channels) 该位由软件设置以启动转换, 并且可以在转换开始后立即由软件或硬件清零。如果在ADC_CTRL2.EXTRSEL[2:0]位中选择 SWSTRJCH作为触发事件, 该位用于启动一组注入通道的转换 0: 复位状态; |

| 位域 | 名称 | 描述 |
|-------|--------------|--|
| | | 1: 开始转换注入通道。 |
| 20 | EXTRTRIG | 规则通道的外触发转换模式 (External trigger conversion mode for regular channels) 该位由软件设置和清零, 以启用或禁用可以启动规则序列转换的外部触发事件。 0: 禁用外部事件启动转换; 1: 启用外部事件启动转换。 |
| 19:17 | EXTRSEL[2:0] | 选择启动规则通道序列转换的外部事件 (External event select for regular group) 这些位选择外部事件以启动规则序列转换。 ADC1和ADC2的触发配置: 000: 定时器1的CC1事件; 100: 定时器3的TRGO事件; 001: 定时器1的CC2事件; 101: 定时器4的CC4事件; 010: 定时器1的CC3事件; 110: EXTI线11/TIM8_TRGO事件; 011: 定时器2的CC2事件; 111: SWSTRRCH。 ADC3和ADC4的触发配置: 000: 定时器3的CC1事件; 100: 定时器8的TRGO事件; 001: 定时器2的CC3事件; 101: 定时器5的CC1事件; 010: 定时器1的CC3事件; 110: EXTI线10/定时器5的CC3事件; 011: 定时器8的CC1事件; 111: SWSTRRCH。 |
| 16 | Reserved | 保留, 必需保持复位值。 |
| 15 | EXTJTRIG | 注入通道的外部触发转换模式 (External trigger conversion mode for injected channels) 该位由软件设置和清零, 以启用或禁用可以启动注入序列转换的外部触发事件。 0: 禁用外部事件启动转换; 1: 启用外部事件启动转换。 |
| 14:12 | EXTJSEL[2:0] | 选择启动注入通道序列转换的外部事件 (External event select for injected group) 这些位选择用于触发注入序列转换的外部事件。 ADC1和ADC2的触发配置: 000: 定时器1的TRGO事件; 100: 定时器3的CC4事件; 001: 定时器1的CC4事件; 101: 定时器4的TRGO事件; 010: 定时器2的TRGO事件; 110: EXTI线15/定时器8的CC4事件; 011: 定时器2的CC1事件; 111: SWSTRJCH。 ADC3和ADC4的触发配置: 000: 定时器1的TRGO事件; 100: 定时器8的CC4事件; 001: 定时器1的CC4事件; 101: 定时器5的TRGO事件; 010: 定时器4的CC3事件; 110: EXTI线14/定时器5的CC4事件; 011: 定时器8的CC2事件; 111: SWSTRJCH。 |
| 11 | ALIG | 数据对齐 (Data alignment) 该位由软件设置和清除。请参阅表9-3和表9-4。 0: 右对齐; 1: 左对齐。 |
| 10:9 | Reserved | 保留, 必需保持复位值。 |
| 8 | ENDMA | 直接存储器访问模式 (Direct memory access mode) 该位由软件设置和清除。有关详细信息, 请参见DMA控制器章节。 0: 不使用DMA模式; |

| 位域 | 名称 | 描述 |
|-----|----------|--|
| | | 1: 使用DMA模式。 |
| 7:3 | Reserved | 保留, 必需保持复位值。 |
| 2 | ENCAL | A/D 校准 (A/D Calibration) 该位由软件设置以开始校准, 并在校准结束时由硬件清零。 0: 校准完成; 1: 开始校准。 |
| 1 | CTU | 连续转换 (Continuous conversion) 该位由软件设置和清除。如果该位置位, 则转换将继续, 直到该位被清除。 0: 单次转换模式; 1: 连续转换模式。 |
| 0 | ON | A/D 转换器开/关 (A/D converter ON/OFF) 该位由软件设置和清除。当该位为“0”时, 写入“1”会将ADC从断电模式中唤醒。 当该位为“1”时, 写入“1”开始转换。应注意, 转换器上电与转换开始之间存在延迟 t_{STAB} , 请参见图9-5。 0: 关闭ADC转换/校准并进入掉电模式; 1: 启动ADC并开始转换。 注意: 如果该寄存器中的其他位随着ON发生变化, 则不会触发转换。这是为了防止触发错误的转换。 |

9.12.5 ADC 采样时间寄存器 1 (ADC_SAMPT1)

地址偏移: 0x0C

复位值: 0x0000 0000

| | | | | | | | | | | | | | |
|--------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|--|----|----|----|----|----|----|----|
| 31 | Reserved | | | | | | 24 | 23 | 21 | 20 | 18 | 17 | 16 |
| 15 | 14 | 12 | 11 | 9 | 8 | | rw | 6 | 5 | rw | 3 | 2 | rw |
| SAMP 15_0 | SAMP14[2:0] | SAMP13[2:0] | SAMP12[2:0] | SAMP11[2:0] | SAMP10[2:0] | | rw |

| 位域 | 名称 | 描述 |
|-------|------------|---|
| 31:24 | Reserved | 保留, 必需保持复位值。 |
| 23:0 | SAMPx[2:0] | 通道x采样时间选择 (Channel x Sample time selection) 这些位用于独立选择每个通道的采样时间。通道选择位在采样期间必须保持不变。 ADC_SAMPT3.SAMPSEL = 0, 采样时间设置如下: 000: 1.5周期; 100: 41.5周期; 001: 7.5周期; 101: 55.5周期; 010: 13.5周期; 110: 71.5周期; 011: 28.5周期; 111: 239.5周期。 ADC_SAMPT3.SAMPSEL = 1, 采样时间设置如下: 000: 1.5周期; 100: 19.5周期; 001: 2.5周期; 101: 61.5周期; 010: 4.5周期; 110: 181.5周期; |

| 位域 | 名称 | 描述 |
|----|----|---------------------------|
| | | 011: 7.5周期; 111: 601.5周期。 |

9.12.6 ADC 采样时间寄存器 2 (ADC_SAMPT2)

地址偏移: 0x10

复位值: 0x0000 0000

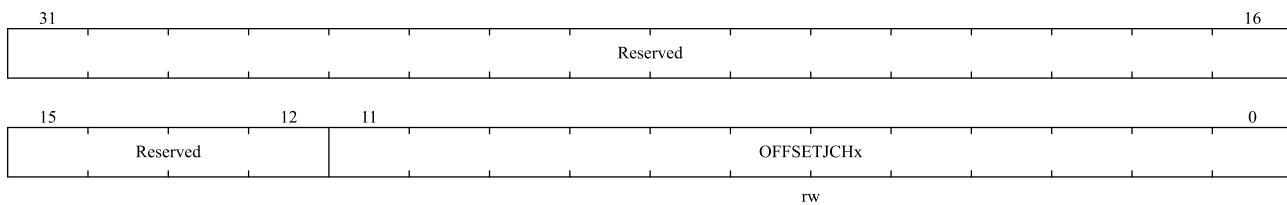
| | | | | | | | | | | | |
|----------|----|------------|----|------------|----|------------|----|------------|----|------------|----|
| 31 | 30 | 29 | 27 | 26 | 24 | 23 | 21 | 20 | 18 | 17 | 16 |
| Reserved | | SAMP9[2:0] | | SAMP8[2:0] | | SAMP7[2:0] | | SAMP6[2:0] | | SAMP5[2:1] | |
| 15 | 14 | | rw | 12 | 11 | rw | 9 | 8 | rw | 6 | 5 |
| SAMP5_0 | | SAMP4[2:0] | | SAMP3[2:0] | | SAMP2[2:0] | | SAMP1[2:0] | | SAMP0[2:0] | |
| rw | | rw | | rw | | rw | | rw | | rw | |

| 位域 | 名称 | 描述 | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--------------|---------------|---|-------------|--------------|-------------|--------------|--------------|--------------|--------------|---------------|-------------|--------------|-------------|--------------|-------------|---------------|-------------|---------------|
| 31:30 | Reserved | 保留, 必需保持复位值。 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 29:0 | SAMPx[2:0] | <p>通道x采样时间选择 (Channel x Sample time selection)</p> <p>这些位用于独立选择每个通道的采样时间。通道选择位在采样期间必须保持不变。</p> <p>ADC_SAMPT3.SAMPSEL = 0, 采样时间设置如下:</p> <table> <tbody> <tr><td>000: 1.5周期;</td><td>100: 41.5周期;</td></tr> <tr><td>001: 7.5周期;</td><td>101: 55.5周期;</td></tr> <tr><td>010: 13.5周期;</td><td>110: 71.5周期;</td></tr> <tr><td>011: 28.5周期;</td><td>111: 239.5周期。</td></tr> </tbody> </table> <p>ADC_SAMPT3.SAMPSEL = 1, 采样时间设置如下:</p> <table> <tbody> <tr><td>000: 1.5周期;</td><td>100: 19.5周期;</td></tr> <tr><td>001: 2.5周期;</td><td>101: 61.5周期;</td></tr> <tr><td>010: 4.5周期;</td><td>110: 181.5周期;</td></tr> <tr><td>011: 7.5周期;</td><td>111: 601.5周期。</td></tr> </tbody> </table> | 000: 1.5周期; | 100: 41.5周期; | 001: 7.5周期; | 101: 55.5周期; | 010: 13.5周期; | 110: 71.5周期; | 011: 28.5周期; | 111: 239.5周期。 | 000: 1.5周期; | 100: 19.5周期; | 001: 2.5周期; | 101: 61.5周期; | 010: 4.5周期; | 110: 181.5周期; | 011: 7.5周期; | 111: 601.5周期。 |
| 000: 1.5周期; | 100: 41.5周期; | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 001: 7.5周期; | 101: 55.5周期; | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 010: 13.5周期; | 110: 71.5周期; | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 011: 28.5周期; | 111: 239.5周期。 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 000: 1.5周期; | 100: 19.5周期; | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 001: 2.5周期; | 101: 61.5周期; | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 010: 4.5周期; | 110: 181.5周期; | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 011: 7.5周期; | 111: 601.5周期。 | | | | | | | | | | | | | | | | | |

9.12.7 ADC 注入通道数据偏移寄存器 x (ADC_JOFFSETx) (x=1..4)

地址偏移: 0x14-0x20

复位值: 0x0000 0000

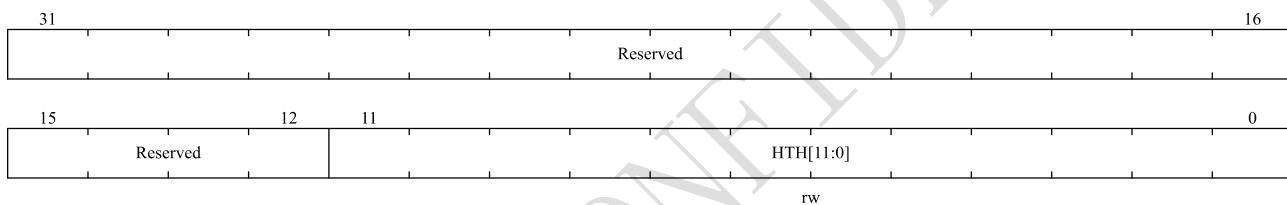


| 位域 | 名称 | 描述 |
|-------|------------------|---|
| 31:12 | Reserved | 保留, 必需保持复位值。 |
| 11:0 | OFFSETJCHx[11:0] | 注入通道x的数据偏移 (Data offset for injected channel x) 这些位定义在将转换注入通道时用于从原始转换数据中减去的值。转换结果可以在ADC_JDATx寄存器中读取。 |

9.12.8 ADC 看门狗高阈值寄存器 (ADC_WDGHIGH)

地址偏移: 0x24

复位值: 0x0000 0FFF

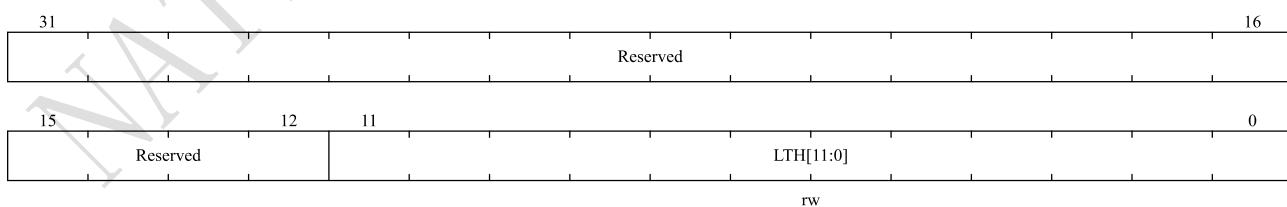


| 位域 | 名称 | 描述 |
|-------|-----------|--|
| 31:12 | Reserved | 保留, 必需保持复位值。 |
| 11:0 | HTH[11:0] | 模拟看门狗高阈值 (Analog watchdog high threshold) 这些位定义模拟看门狗的高阈值。 |

9.12.9 ADC 看门狗低阈值寄存器 (ADC_WDGLOW)

地址偏移: 0x28

复位值: 0x0000 0000



| 位域 | 名称 | 描述 |
|-------|-----------|---|
| 31:12 | Reserved | 保留, 必需保持复位值。 |
| 11:0 | LTH[11:0] | 模拟看门狗低阈值 (Analog watchdog low threshold) 这些位定义模拟看门狗的低阈值。 |

9.12.10 ADC 规则序列寄存器 1 (ADC_RSEQ1)

地址偏移: 0x2C

复位值: 0x0000 0000

| | | | | | | | | | | | | | | | | |
|----|----------|---------|------------|----|---|------------|---|---|------------|----|----------|----|----|----|------------|----|
| 31 | Reserved | | | | | | | | 24 | 23 | LEN[3:0] | | 20 | 19 | SEQ16[4:1] | 16 |
| 15 | 14 | SEQ16_0 | SEQ15[4:0] | 10 | 9 | SEQ14[4:0] | 5 | 4 | SEQ13[4:0] | 0 | rw | rw | rw | rw | rw | rw |
| | | | | | | | | | | | | | | | | |

| 位域 | 名称 | 描述 |
|-------|------------|---|
| 31:24 | Reserved | 保留, 必需保持复位值。 |
| 23:20 | LEN[3:0] | 规则通道序列长度 (Regular channel sequence length) 这些位由软件定义规则序列转换中的通道数。 0000: 1个转换; 0001: 2个转换; ... 1111: 16个转换。 |
| 19:15 | SEQ16[4:0] | 规则序列中的第16个转换 (16th conversion in regular sequence) 这些位由软件定义转换序列中的第16个转换通道的编号 (0~18)。 |
| 14:10 | SEQ15[4:0] | 规则序列中的第15个转换 (15th conversion in regular sequence) |
| 9:5 | SEQ14[4:0] | 规则序列中的第14个转换 (14th conversion in regular sequence) |
| 4:0 | SEQ13[4:0] | 规则序列中的第13个转换 (13th conversion in regular sequence) |

9.12.11 ADC 规则序列寄存器 2 (ADC_RSEQ2)

地址偏移: 0x30

复位值: 0x0000 0000

| | | | | | | | |
|----------|----|------------|------------|------------|-----------|----|----|
| 31 | 30 | 29 | 25 | 24 | 20 | 19 | 16 |
| Reserved | | SEQ12[4:0] | SEQ11[4:0] | SEQ10[4:1] | | | |
| 15 | 14 | SEQ10_0 | SEQ9[4:0] | SEQ8[4:0] | SEQ7[4:0] | 0 | rw |

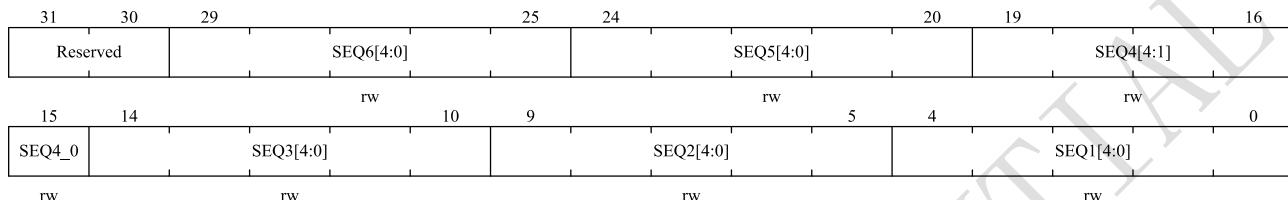
| 位域 | 名称 | 描述 |
|-------|------------|---|
| 31:30 | Reserved | 保留, 必需保持复位值。 |
| 29:25 | SEQ12[4:0] | 规则序列中的第12个转换 (12th conversion in regular sequence) 这些位由软件定义转换序列中的第12个转换通道的编号 (0~18)。 |
| 24:20 | SEQ11[4:0] | 规则序列中的第11个转换 (11th conversion in regular sequence) |
| 19:15 | SEQ10[4:0] | 规则序列中的第10个转换 (10th conversion in regular sequence) |
| 14:10 | SEQ9[4:0] | 规则序列中的第9个转换 (9th conversion in regular sequence) |
| 9:5 | SEQ8[4:0] | 规则序列中的第8个转换 (8th conversion in regular sequence) |

| 位域 | 名称 | 描述 |
|-----|-----------|--|
| 4:0 | SEQ7[4:0] | 规则序列中的第7个转换 (7th conversion in regular sequence) |

9.12.12 ADC 规则序列寄存器 3 (ADC_RSEQ3)

地址偏移: 0x34

复位值: 0x0000 0000

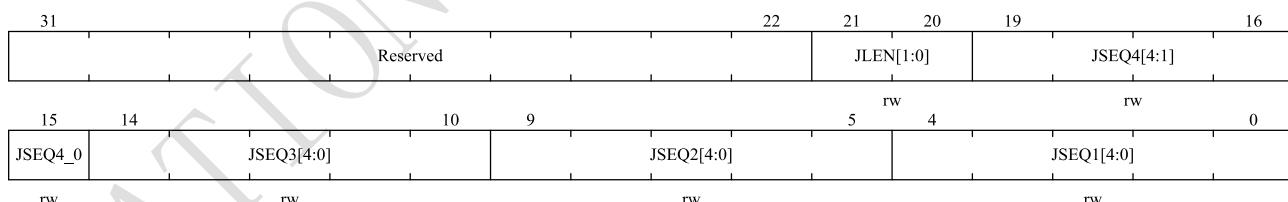


| 位域 | 名称 | 描述 |
|-------|-----------|--|
| 31:30 | Reserved | 保留, 必需保持复位值。 |
| 29:25 | SEQ6[4:0] | 规则序列中的第6个转换 (6th conversion in regular sequence) 这些位由软件定义转换序列中的第6个转换通道的编号 (0~18)。 |
| 24:20 | SEQ5[4:0] | 规则序列中的第5个转换 (5th conversion in regular sequence) |
| 19:15 | SEQ4[4:0] | 规则序列中的第4个转换 (4th conversion in regular sequence) |
| 14:10 | SEQ3[4:0] | 规则序列中的第3个转换 (3rd conversion in regular sequence) |
| 9:5 | SEQ2[4:0] | 规则序列中的第2个转换 (2nd conversion in regular sequence) |
| 4:0 | SEQ1[4:0] | 规则序列中的第1个转换 (1st conversion in regular sequence) |

9.12.13 ADC 注入序列寄存器 (ADC_JSEQ)

地址偏移: 0x38

复位值: 0x0000 0000



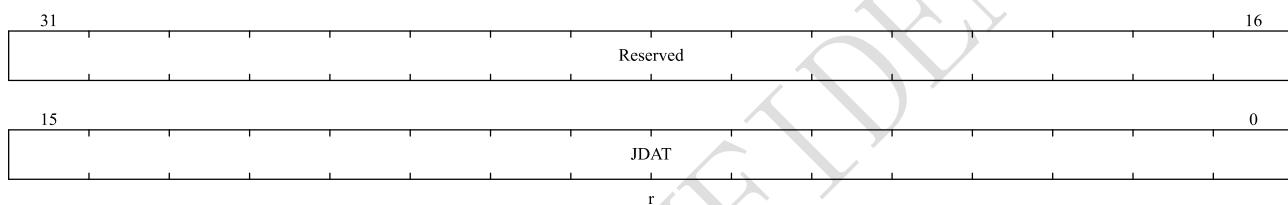
| 位域 | 名称 | 描述 |
|-------|-----------|--|
| 31:22 | Reserved | 保留, 必需保持复位值。 |
| 21:20 | JLEN[1:0] | 注入通道序列长度 (Injected sequence length) 这些位由软件定义为注入通道转换序列中的通道数。 00: 1个转换; 01: 2个转换; 10: 3个转换; 11: 4个转换。 |

| 位域 | 名称 | 描述 |
|-------|------------|--|
| 19:15 | JSEQ4[4:0] | 注入序列中的第4个转换 (4th conversion in injected sequence) 这些位由软件定义为转换序列中第4个转换通道的编号 (0~18)。 注意: 与规则转换序列不同, 如果ADC_JSEQ.JLEN[1:0]的长度小于4, 则转换序列从(4-JLEN)开始。例如, ADC_JSEQ[21:0] = 10 00011 00011 00111 00010 表示扫描转换将按照以下通道顺序进行转换: 7、3、3 而不是 2、7、3。 |
| 14:10 | JSEQ3[4:0] | 注入序列中的第3个转换 (3rd conversion in injected sequence) |
| 9:5 | JSEQ2[4:0] | 注入序列中的第2个转换 (2nd conversion in injected sequence) |
| 4:0 | JSEQ1[4:0] | 注入序列中的第1个转换 (1st conversion in injected sequence) |

9.12.14 ADC 注入数据寄存器 x (ADC_JDATx) (x=1..4)

地址偏移: 0x3C – 0x48

复位值: 0x0000 0000

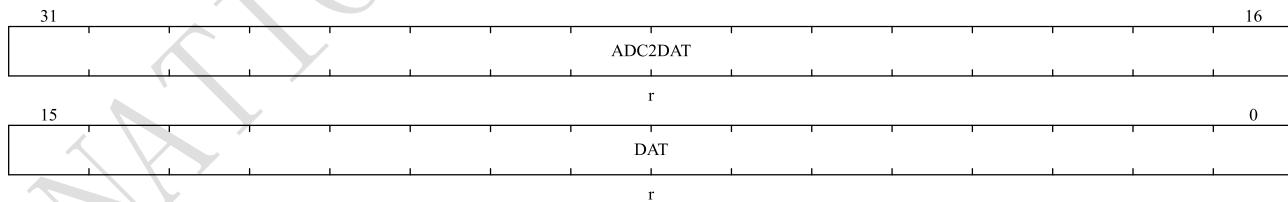


| 位域 | 名称 | 描述 |
|-------|------------|--|
| 31:16 | Reserved | 保留, 必需保持复位值。 |
| 15:0 | JDAT[15:0] | 注入转换的数据 (Injected data) 这些位是只读的, 包含注入通道的转换结果。数据左对齐或右对齐。 |

9.12.15 ADC 规则数据寄存器 (ADC_DAT)

地址偏移: 0x4C

复位值: 0x0000 0000

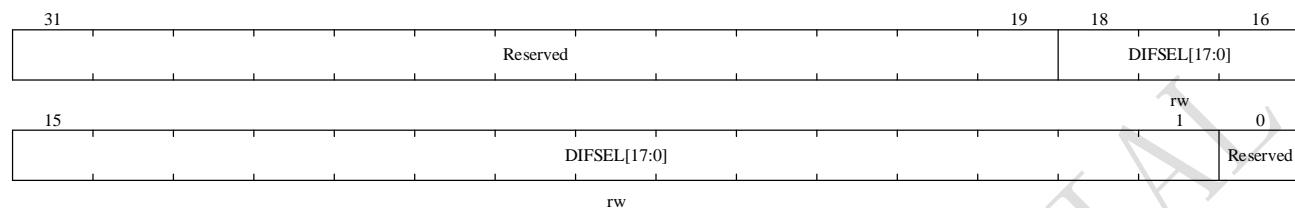


| 位域 | 名称 | 描述 |
|-------|---------------|--|
| 31:16 | ADC2DAT[15:0] | ADC2/ADC4转换的数据 (ADC2 data, ADC4 data) 在ADC1和ADC3中: 双ADC模式下, 这些位包含了ADC2和ADC4转换的规则通道数据。 在ADC2和ADC4中: 不使用这些位。 |
| 15:0 | DAT[15:0] | 规则转换的数据 (Regular data) 这些位是只读的, 包含规则通道的转换结果。数据左对齐或右对齐。 |

9.12.16 ADC 差分模式选择寄存器 (ADC_DIFSEL)

地址偏移: 0x50

复位值: 0x0000 0000

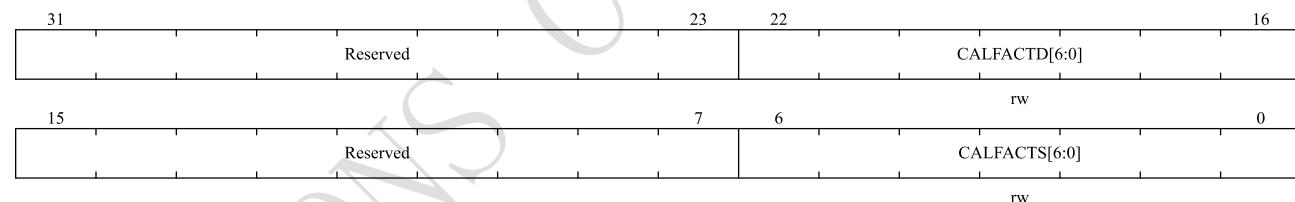


| 位域 | 名称 | 描述 |
|-------|--------------|---|
| 31:19 | Reserved | 保留, 必需保持复位值。 |
| 18:1 | DIFSEL[17:0] | 差分模式通道18—1选择 (Differential mode for channels 18 to 1) DIFSEL[i] = 0:ADC通道输入i+1配置成单端模式; DIFSEL[i] = 1:ADC通道输入i+1配置成差分模式。 |
| 0 | Reserved | 保留, 必需保持复位值。 |

9.12.17 ADC 校正因子 (ADC_CALFACT)

地址偏移: 0x54

复位值: 0x0000 0000



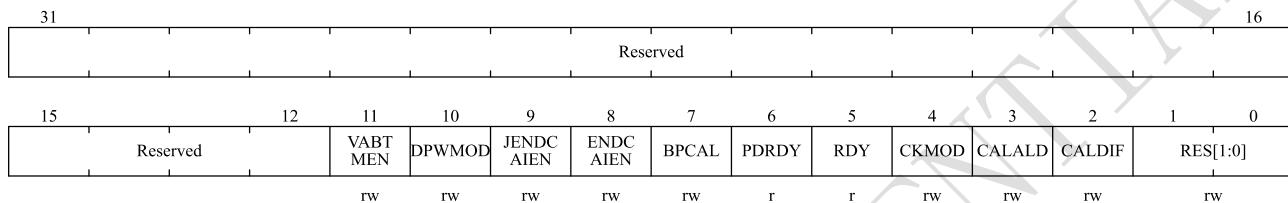
| 位域 | 名称 | 描述 |
|-------|---------------|--|
| 31:23 | Reserved | 保留, 必需保持复位值。 |
| 22:16 | CALFACTD[6:0] | 差分模式校正因子 (Calibration Factors in differential mode) 该位可由硬件或软件写入。 差分输入校准完成后, 硬件会根据校准系数进行更新。 软件可以使用新的校准因子写入这些位。如果新的校准系数与模拟ADC中存储的当前系数不同, 则将在启动新的差分校准时应用该系数。 注意: 软件只允许在ADC_CTRL2.ON = 1, ADC_STS.STR = 0, ADC_STS.JSTR = 0 时写入 (ADC 没有处理转换或开始转换)。 |
| 15:7 | Reserved | 保留, 必需保持复位值。 |
| 6:0 | CALFACTS[6:0] | 单端模式校正因子 (Calibration Factors in Single-Ended mode) 该位可由硬件或软件写入。 单端输入校准完成后, 硬件会根据校准系数进行更新。 软件可以使用新的校准因子写入这些位。如果新的校准系数与模拟ADC中存储的当前系 |

| 位域 | 名称 | 描述 |
|----|----|--|
| | | 数不同，则将在启动新的单端校准后应用该系数。 注：软件只允许在ADC_CTRL2.ON =1, ADC_STS.STR =0, ADC_STS.JSTR =0时写入 (ADC没有处理转换或开始转换)。 |

9.12.18 ADC 控制寄存器 3 (ADC_CTRL3)

地址偏移: 0x58

复位值: 0x0000 0043



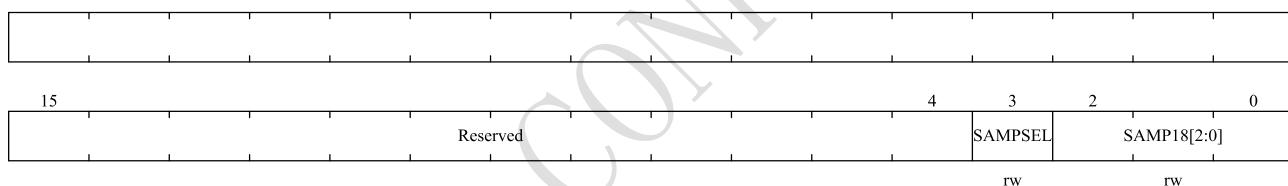
| 位域 | 名称 | 描述 |
|-------|-----------|--|
| 31:12 | Reserved | 保留，必需保持复位值。 |
| 11 | VBATMEN | Vbat监测使能 (Vbat monitor enable) 0: 禁止 1: 使能 |
| 10 | DPWMOD | 深度睡眠模式 (Deep Power Mode) 0: 当ADC不使能时，ADC 进入PowerDown模式； 1: 当ADC不使能时，ADC 进入深度睡眠模式。 |
| 9 | JENDCAIEN | 任何注入通道中断使能 (Interrupt enable for any injected channels) 该位由软件设置和清除以启用/禁用注入通道转换结束中断。 0: ADC_STS.JENDCA 中断禁用； 1: ADC_STS.JENDCA 中断启用。 |
| 8 | ENDCAIEN | 任何通道中断使能 (Interrupt enable for any regular channels) 该位由软件设置和清除以启用/禁任意通道转换结束中断。 0: ADC_STS.ENDCA 中断禁用； 1: ADC_STS.ENDCA 中断启用。 |
| 7 | BPCAL | 旁路校准 (Bypass calibration) 0: 禁用； 1: 启用。 |
| 6 | PDRDY | ADC低功耗准备好 (Power down ready) 0: 没有准备好； 1: 准备好。 |
| 5 | RDY | ADC准备好 (Ready) 0: 没有准备好； 1: 准备好。 |
| 4 | CKMOD | 时钟模式 (Clock Mode) 0: 同步时钟选择AHB； 1: 异步时钟选择PLL。 |

| 位域 | 名称 | 描述 |
|-----|----------|--|
| 3 | CALALD | 校准自动载入 (calibration auto load) 0: 禁止; 1: 启用。 |
| 2 | CALDIF | 差分模式校准 (Differential mode for calibration) 该位由软件设置和清除, 以配置校准的单端或差分输入模式。 0: 写入ENCAL位将在单端输入模式下启动校准; 1: 写入ENCAL位将在差分输入模式下启动校准。 |
| 1:0 | RES[1:0] | 数据分辨率 (Data resolution) 该位由软件设置和清除, 选择转换的分辨率。 00: 6位; 01: 8位; 10: 10位; 11: 12位。 |

9.12.19 ADC 采样时间寄存器 3 (ADC_SAMPT3)

地址偏移: 0x5C

复位值: 0x0000 0000



| 位域 | 名称 | 描述 |
|------|-------------|--|
| 31:4 | Reserved | 保留, 必需保持复位值。 |
| 3 | SAMPSEL | 采样时间选择(Sample time selection) SAMPSEL位为0时, 采样时间配置SAMPx[2:0]的取值如下 000: 1.5周期; 100: 41.5周期; 001: 7.5周期; 101: 55.5周期; 010: 13.5周期; 110: 71.5周期; 011: 28.5周期; 111: 239.5周期。 SAMPSEL位为1时, 采样时间配置SAMPx[2:0]的取值如下 000: 1.5周期; 100: 19.5周期; 001: 2.5周期; 101: 61.5周期; 010: 4.5周期; 110: 181.5周期; 011: 7.5周期; 111: 601.5周期。 |
| 2:0 | SAMP18[2:0] | 通道采样时间(Channel Sample time) 通道采样时间定义和ADC_SAMPT2一致 |

10 数字/模拟转换 (DAC)

10.1 DAC 介绍

DAC 是数字/模拟转换器，主要是数字输入，电压输出。DAC 数据有 8 位或 12 位两种模式，支持 DMA 传输数据。当 DAC 配置为 12bit 模式时，DAC 数据可以左对齐或者右对齐；当 DAC 配置为 8bit 模式时，DAC 数据可以右对齐。DAC 输出通道有 2 个，每一个都有独立的转换器。两个通道可以配置成独立转换或者同时进行转换同步更新输出。 V_{REF+} 通过引脚输入作为 DAC 参考电压，使 DAC 的转换数据精确度更高。

10.2 DAC 主要特性

- 2 个独立的 DAC 转换器，各自对应 1 个输出通道
- 单调输出
- 支持 8 位或 12 位输出，数据在 12 位模式下分右对齐和左对齐两种模式
- 同步更新
- 噪声波形、三角波形生成
- 两个 DAC 通道同步或者独立转换
- 每个通道都支持 DMA 传输数据
- 输入参考电压 V_{REF+}
- 外部事件触发转换

DAC 结构框图和引脚说明如下。

图 10-1 DAC 结构框图

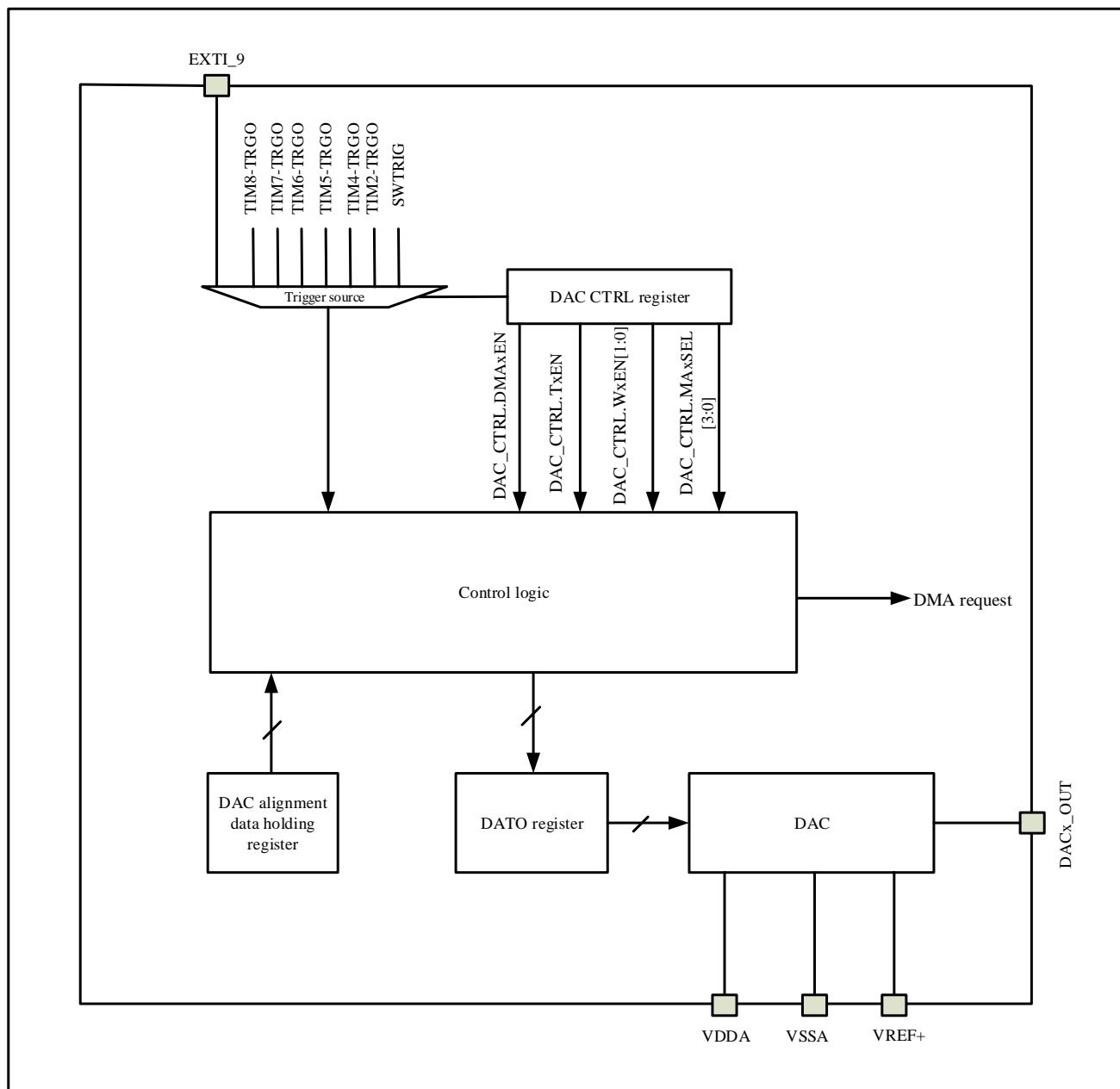


表 10-1 DAC 引脚

| 名称 | 信号类型 | 描述 |
|---------------------|-------------|--|
| V _{REF+} | 输入, 正模拟参考电压 | DAC使用的正参考电压, $2.4V \leq V_{REF+} \leq V_{DDA}$ (3.3V) |
| V _{DDA} | 输入, 模拟电源 | 模拟电源 |
| V _{SSA} | 输入, 模拟电源地 | 模拟电源地 |
| DAC _{OUTx} | 模拟输出信号 | DAC输出 |

注意: 使能DACx时, PA4或者PA5需要配置为模拟输入模式, PA4或PA5会自动连接到DACx的输出。

10.3 DAC 功能描述与操作说明

10.3.1 DAC 开启

给 DAC 上电可通过配置 DAC_CTRL.CHxEN=1 完成，DAC 需要一段时间 t_{WAKEUP} 打开。

10.3.2 DAC 输出缓存

通过配置 DAC_CTRL.BxEN 开启或关闭 DAC 的输出缓存，输出缓存开启，输出阻抗降低，驱动能力增强，可以在没有外部运放的条件下驱动外部负载。

10.3.3 DAC 数据格式

依据数据对齐配置方式，数据配置对应寄存器如下：

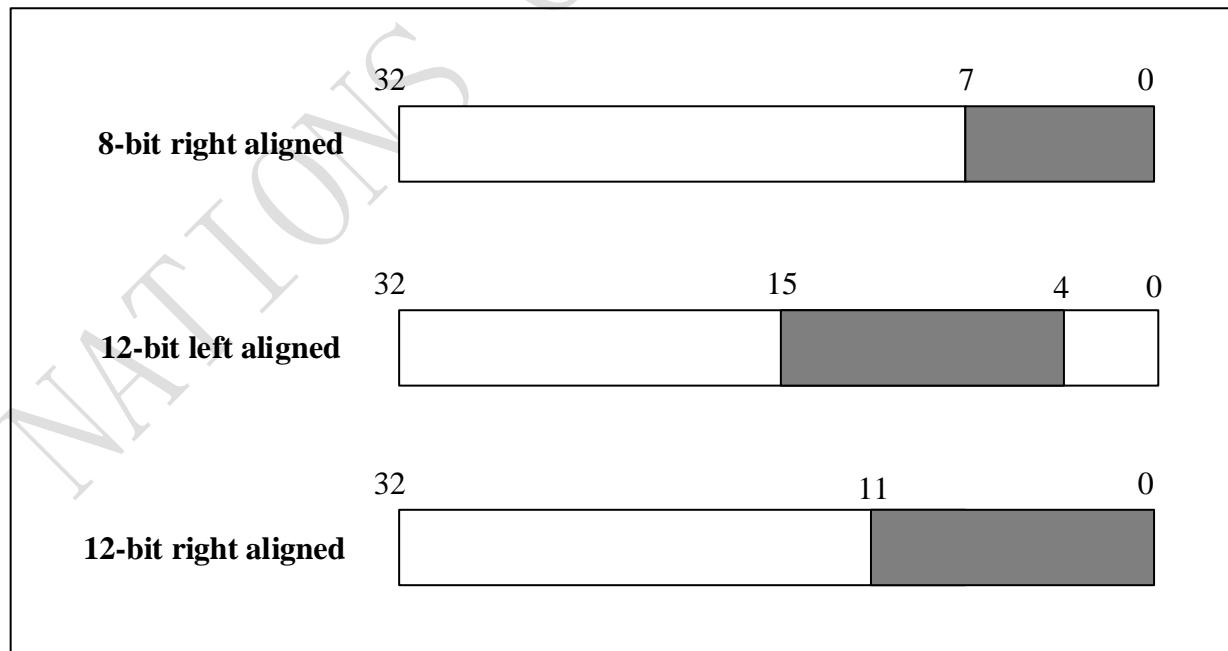
当 DAC 独立输出时，有 3 种情况：

配置数据写入 DAC_DR12CHx 寄存器时，数据写入 DAC_DR12CHx[11:0],12 位数据右对齐。（实际是存入寄存器 DACCHxD[11:0]位，DACCHxD 是内部的数据保存寄存器）。

配置数据写入 DAC_DL12CHx 寄存器时，数据写入 DAC_DL12CHx[15:4],12 位数据左对齐。（实际是存入寄存器 DACCHxD[11:0]位，DACCHxD 是内部的数据保存寄存器）。

配置数据写入 DAC_DR8CHx 寄存器时，数据写入 DAC_DR8CHx[7:0],8 位数据右对齐。（实际是存入寄存器 DACCHxD[11:4]位，DACCHxD 是内部的数据保存寄存器）。

图 10-2 DAC 独立输出时的数据格式



当 DAC 同步输出时，有 3 种情况：

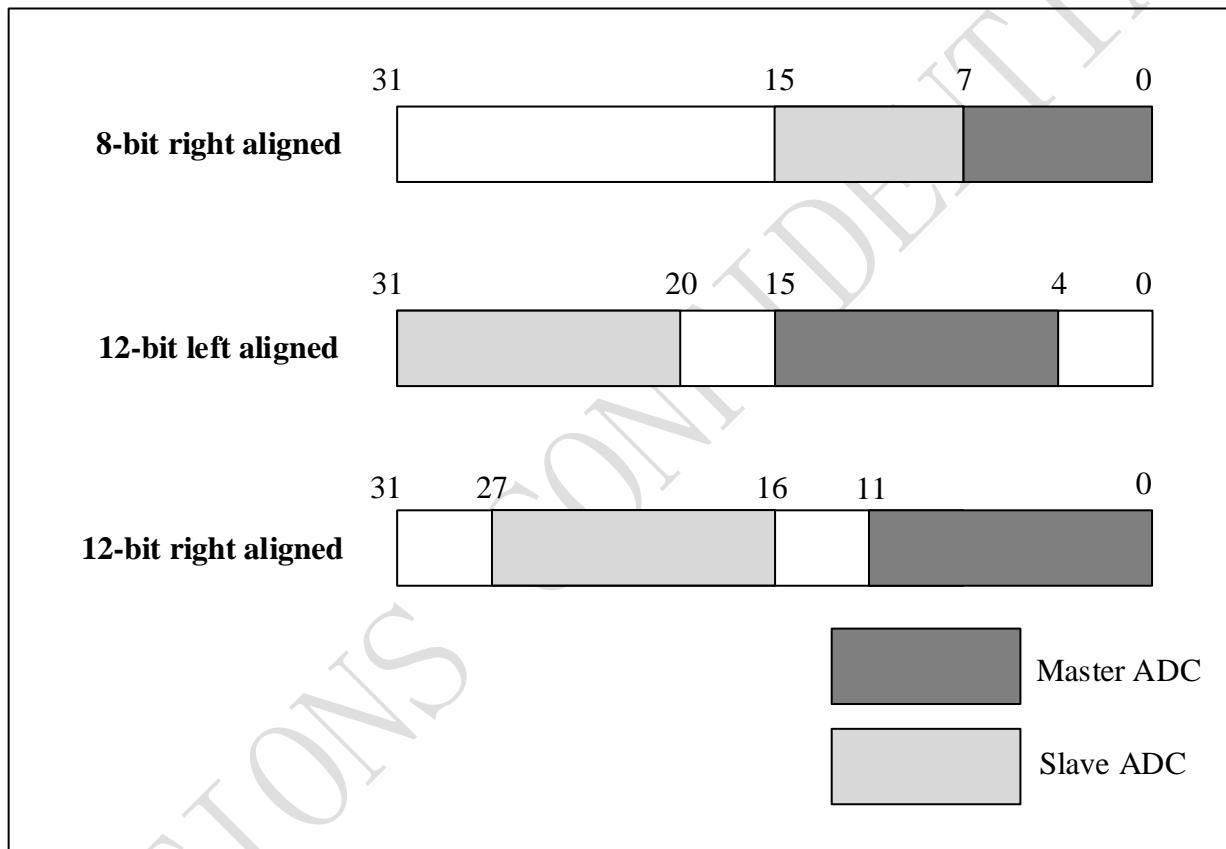
配置数据写入 DAC_DR12DCH 寄存器时，DAC1 数据写入 DAC_DR12DCH[11:0]（实际是存入寄存器

DACCH1D[11:0]位, DACCH1D 是内部的数据保存寄存器), DAC2 数据写入 DAC_DR12DCH[27:16] (实际是存入寄存器 DACCH2D[11:0]位, DACCH2D 是内部的数据保存寄存器), 12 位数据右对齐。

配置数据写入 DAC_DR12DCH 寄存器时, DAC1 数据写入 DAC_DR12DCH[15:4] (实际是存入寄存器 DACCH1D[11:0]位, DACCH1D 是内部的数据保存寄存器), DAC2 数据写入 DAC_DR12DCH[31:20] (实际是存入寄存器 DACCH2D[11:0]位, DACCH2D 是内部的数据保存寄存器), 12 位数据左对齐。

配置数据写入 DAC_DR8DCH 寄存器时, DAC1 数据写入 DAC_DR8DCH[7:0] (实际是存入寄存器 DACCH1D[11:4]位, DACCH1D 是内部的数据保存寄存器), DAC2 数据写入 DAC_DR8DCH[15:8] (实际是存入寄存器 DACCH2D[11:4]位, DACCH2D 是内部的数据保存寄存器), 8 位数据左对齐。

图 10-3 DAC 同步输出时的数据格式



10.3.4 DAC 触发

配置 DAC_CTRL.TxEN=1 可以使能 DAC 的外部触发, 通过配置 DAC_CTRL.TxSEL[2:0]来选择一个外部触发事件作为 DAC 的外部触发源。

表 10-2 DAC 外部触发

| 触发源 | 类型 | TxSEL[2:0] |
|---------------|--------------|------------|
| 定时器 6 TRGO 事件 | 来自片上定时器的内部信号 | 0 |
| 定时器 8 TRGO 事件 | | 1 |
| 定时器 7 TRGO 事件 | | 10 |
| 定时器 5 TRGO 事件 | | 11 |

| | | |
|---------------|-------|-----|
| 定时器 2 TRGO 事件 | | 100 |
| 定时器 4 TRGO 事件 | | 101 |
| EXTI line 9 | 外部引脚 | 110 |
| SWTRIG (软件触发) | 软件控制位 | 111 |

当 DAC 的触发源为定时器输出或者 EXTI line 9 的上升沿时, 当触发产生, 对齐数据保持寄存器的数据会被传送到 DAC_DATOx 寄存器中, 这个数据传输过程需要 3 个 APB1 时钟周期的时间。

配置 DAC_SOTTR.TRxEN=1 可以使能 DAC 软件触发, 当 DAC 由软件触发时, 对齐数据保持寄存器的数据会被传送到 DAC_DATOx 寄存器中, DAC_SOTTR.TRxEN 在数据传输后硬件自动清 0。

注意:

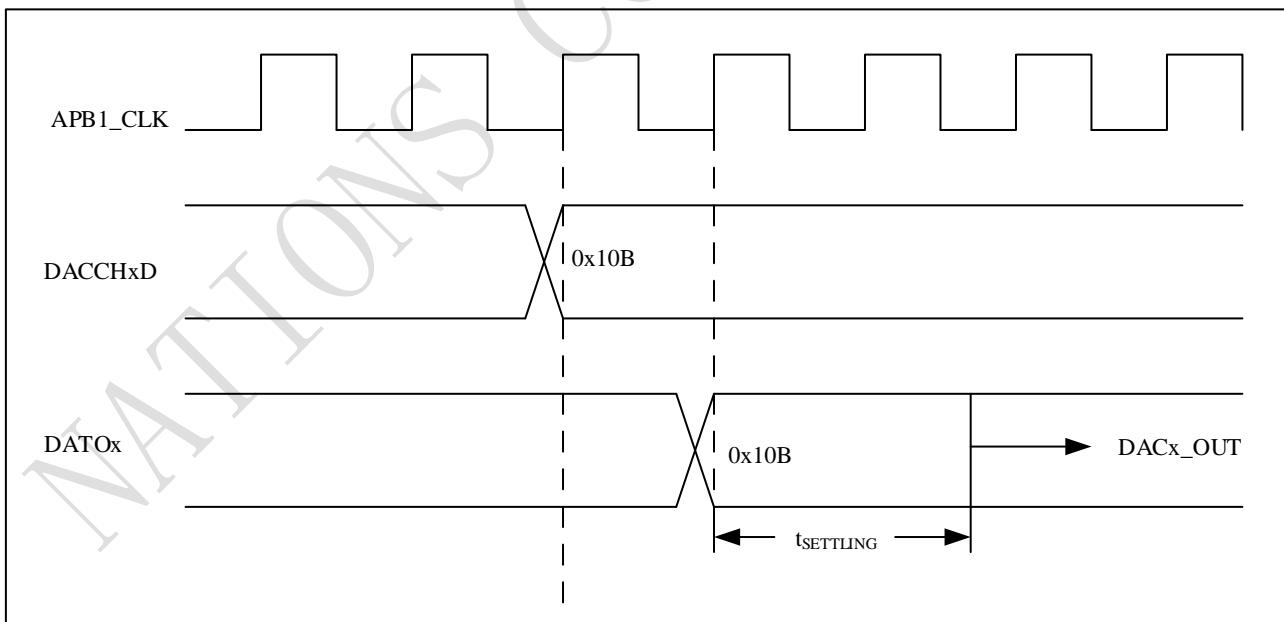
1. DAC 使能状态下禁止改变 DAC_CTRL.TxSEL[2:0] 位。
2. 软件触发时对齐数据保持寄存器的数据被传送到 DAC_DATO 寄存器中需要 1 个 APB1 时钟周期的时间。

10.3.5 DAC 转换

如果 DAC 触发开启, 那么根据选择的触发事件, 硬件触发发生时, DAC 对齐数据保持寄存器的数据会在三个 APB1 周期后将数据传送至 DAC_DATOx 寄存器, 软件触发发生时, DAC 对齐数据保持寄存器的数据会在一个 APB1 周期后将数据传送至 DAC_DATOx 寄存器。

当 DAC 对其数据保持寄存器将数据传送至 DAC_DATOx 寄存器后, 经过时间 $t_{SETTLING}$ 输出才有效, 这个时间与电源电压及模拟输出负载相关。

图 10-4 触发禁用时转换的时间框图



10.3.6 DAC 输出电压

数字输入通过 DAC 模块转换为模拟电压输出, 它们之间呈线性关系, 输出范围为 0 到 VREF+。以下是 DAC 的输出电压计算公式:

DAC 输出 = $V_{REF} \times (DATO / 4095)$ 。

10.3.7 DMA 请求

配置 `DAC_CTRL.DMAxEN=1` 来开启 DMA 功能，2 个 DMA 通道分别对应两个 DAC，有外部触发发生时（不是软件触发），生成一个 DMA 请求，随后对齐数据保持寄存器的数据被传输到 `DAC_DATOx` 寄存器。

在开启双 DAC 模式时，只需要一个 DMA 来传输数据，所以只使用一个 DAC 开启 DMA 功能，开启两个会有两个 DMA 请求出现。

注意：DAC 的 DMA 请求没有累计功能，当第 2 个外部触发发生在响应第 1 个外部触发之前，则不能处理第 2 个 DMA 请求，也没有报告错误机制。

10.3.8 噪声产生

DAC 可以生成噪声，通过配置 `DAC_CTRL.WxEN[1:0]` 为“01”开启噪声功能，通过配置 `DAC_CTRL.MAXSEL[3:0]` 来选择屏蔽线性反馈移位寄存器（LFSR）的哪些位，LFSR 寄存器的值与 DAC 对齐数据保持寄存器的值相加后写入到 `DAC_DATOx` 寄存器中（溢出位被舍弃）。LFSR 的初始值为 `0xAAA`，LFSR 的值更新于触发事件发生后的 3 个 APB1 周期之后。

图 10-5 DAC LFSR 算法

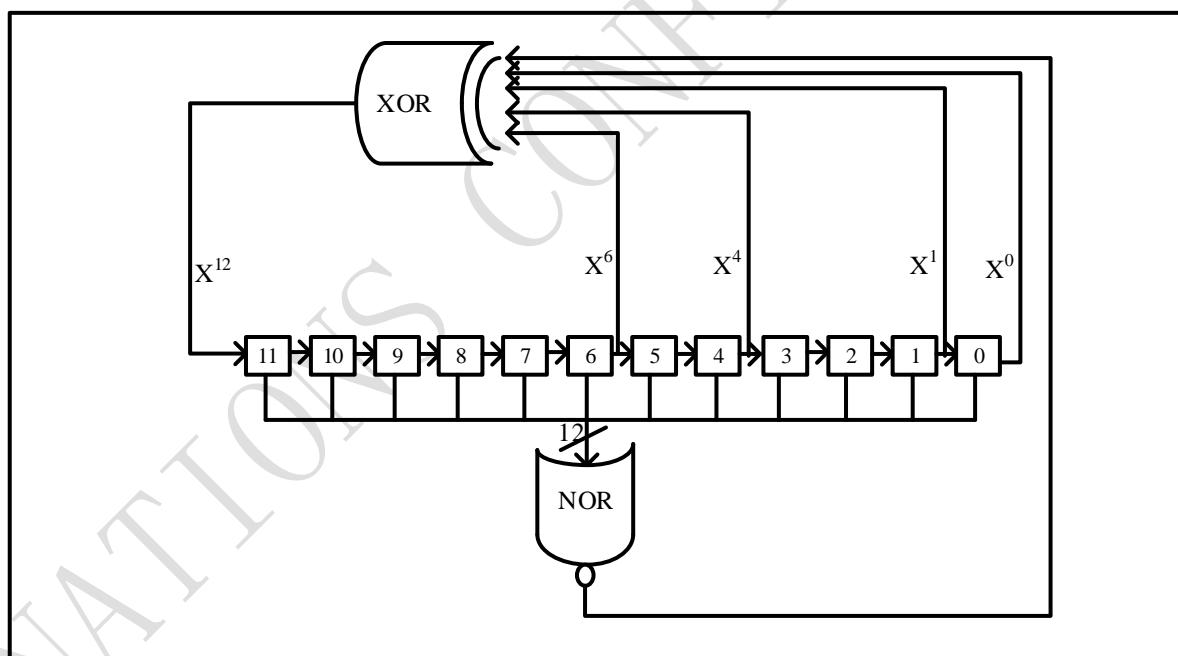
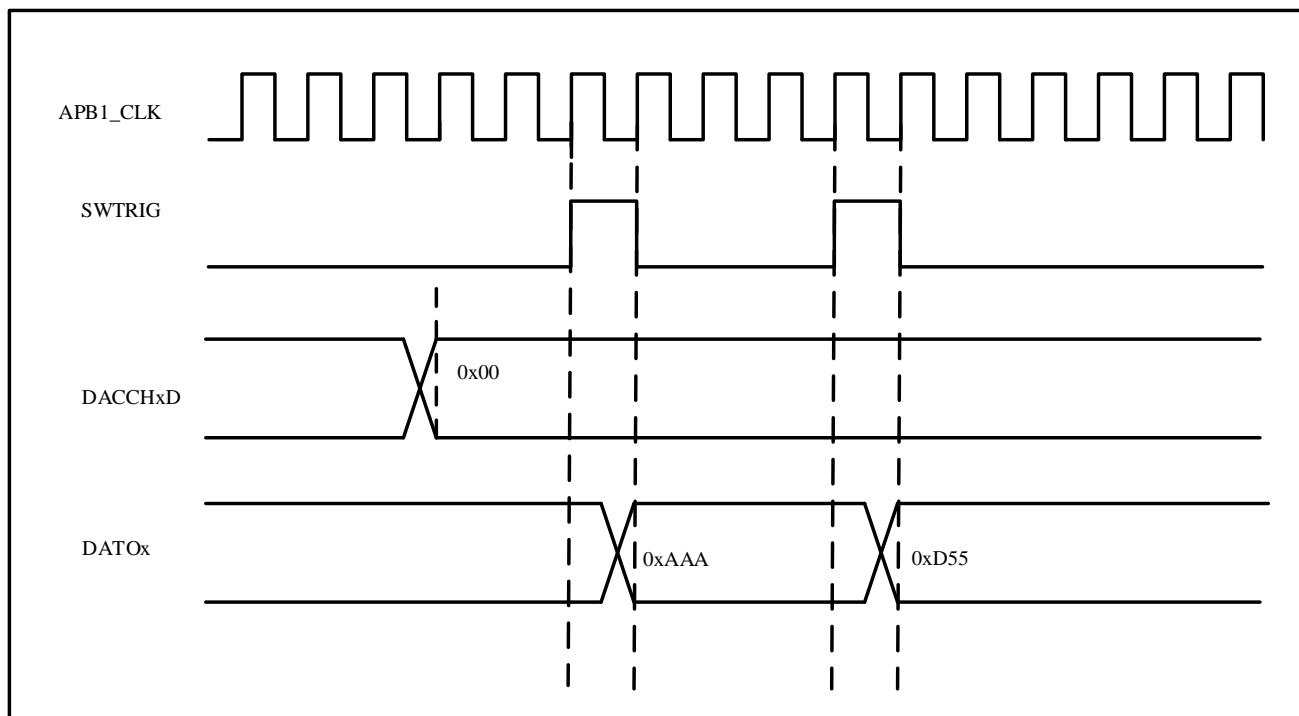


图 10-6 带 LFSR 波形生成的 DAC 转换 (使能软件触发)



注意: DAC 配置为触发才能产生噪声。

10.3.9 三角波产生

DAC 可以生成三角波, 通过配置 DAC_CTRL.WxEN[1:0] 为“10”开启三角波功能, 通过配置 DAC_CTRL.MAXSEL[3:0]来选择三角波的幅值, 内部的三角波计数器值与 DAC 对齐数据保持寄存器的值相加后写入到 DAC_DATOx 寄存器中(溢出位被舍弃)。三角波计数器的值更新于触发事件发生后 3 个 APB1 周期, 三角波计数器会累加到设置的最大幅值, 然后递减到 0, 依此循环。

图 10-7 DAC 三角波生成

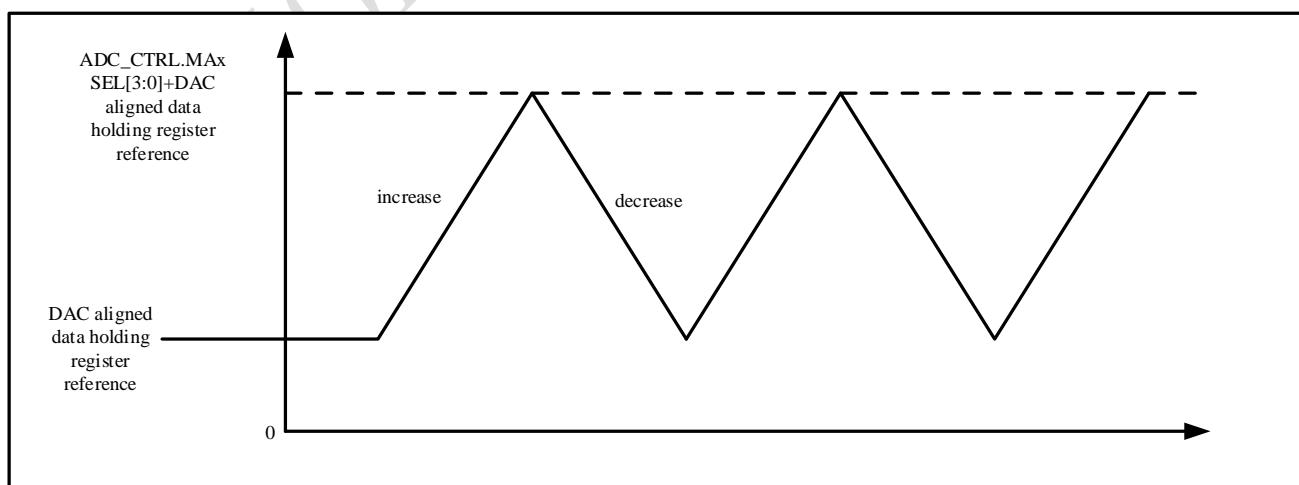
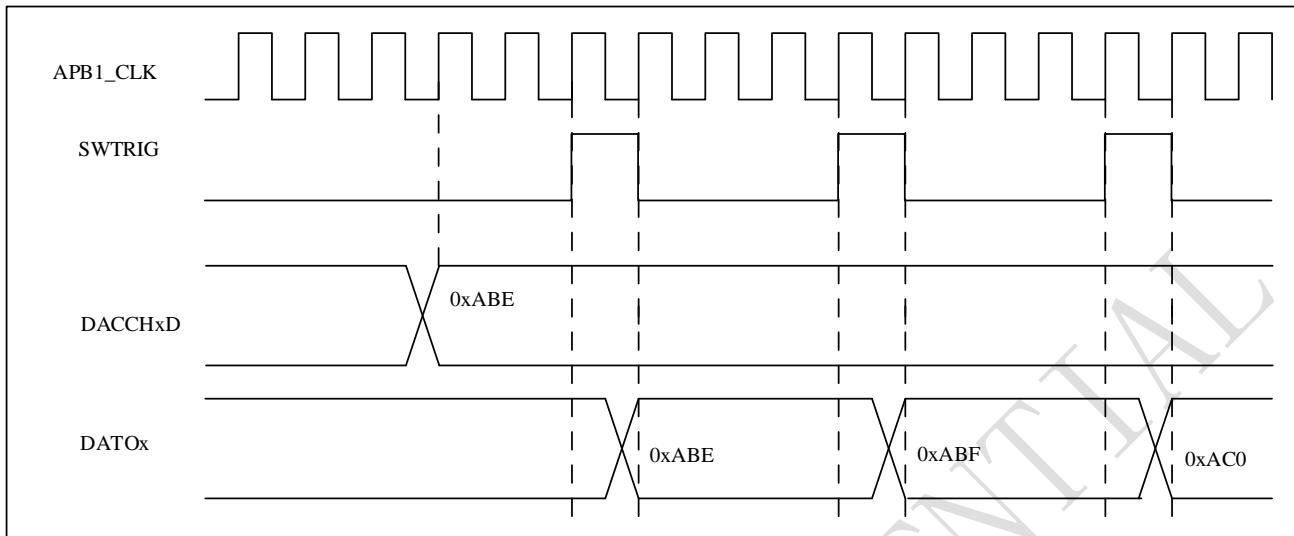


图 10-8 带三角生成的 DAC 转换（使能软件触发）



注意：

1. DAC 配置为触发才能产生产生三角波
2. 不允许在 DAC 使能后设置 DAC_CTRL.MAXSEL[3:0]。

10.4 DAC 双通道转换操作

DAC 两个通道既可以单独工作，也可以同时工作。该模式下，有 DAC_DR12DCH、DAC_DL12DCH 和 DAC_DR8DCH 总共 3 个寄存器可以使用，可以高效的利用总线带宽，每个寄存器都可以同时对 2 路 DAC 进行操作。

双 DAC 通道同时开启转换，总共有 11 种模式，在只使用一路 DAC 转换的情况下，另外一路 DAC 仍可以独立进行操作。具体请参考下面的章节描述。

10.4.1 不使用波形发生器的独立触发

配置流程如下：

- ◆ 配置 DAC_CTRL.T1EN 和 DAC_CTRL.T2EN 来开启 DAC1 和 DAC2 的触发使能。
- ◆ 配置 DAC_CTRL.T1SEL[2:0]和 DAC_CTRL.T2SEL[2:0]为不同值来选择不同触发源。
- ◆ 将所需转换的数据放入对应的对齐数据保持寄存器中。

当 DAC1 触发事件产生时，对齐数据保持寄存器的值将在延迟 3 个 APB1 时钟周期后传入寄存器 DAC_DATO1。当 DAC2 触发事件产生时，对齐数据保持寄存器的值将在延迟 3 个 APB1 时钟周期后传入寄存器 DAC_DATO2。

10.4.2 产生相同噪声的独立触发

配置流程如下：

- ◆ 配置 DAC_CTRL.T1EN 和 DAC_CTRL.T2EN 来开启 DAC1 和 DAC2 的触发使能。

- ◆ 配置 DAC_CTRL.T1SEL[2:0]和 DAC_CTRL.T2SEL[2:0]为不同值来选择不同触发源。
- ◆ 配置 DAC_CTRL.W1EN[1:0]和 DAC_CTRL.W2EN[1:0]为“01”来选择噪声生成使能。
- ◆ 配置 DAC_CTRL.MA1SEL3:0]和 DAC_CTRL.MA2SEL3:0]为相同值，以得到相同的 LFSR 寄存器屏蔽位。
- ◆ 将所需转换的数据放入对应的对齐数据保持寄存器中。

当 DAC1 触发事件产生时，LFSR 寄存器 1 的计数器值与对应数据保持寄存器数值相加，此相加值在延迟 3 个 APB1 时钟周期后传入寄存器 DAC_DATO1，LFSR 寄存器 1 的计数器值此时会更新。当 DAC2 触发事件产生时，LFSR 寄存器 2 的计数器值与对应数据保持寄存器数值相加，此相加值在延迟 3 个 APB1 时钟周期后传入寄存器 DAC_DATO2，LFSR 寄存器 2 的计数器值此时会更新。

10.4.3 产生不同噪声的独立触发

配置流程如下：

- ◆ 配置 DAC_CTRL.T1EN 和 DAC_CTRL.T2EN 来开启 DAC1 和 DAC2 的触发使能。
- ◆ 配置 DAC_CTRL.T1SEL[2:0]和 DAC_CTRL.T2SEL[2:0]为不同值来选择不同触发源。
- ◆ 配置 DAC_CTRL.W1EN[1:0]和 DAC_CTRL.W2EN[1:0]为“01”来选择噪声生成使能。
- ◆ 配置 DAC_CTRL.MA1SEL3:0]和 DAC_CTRL.MA2SEL3:0]为不同值，以得到不同的 LFSR 寄存器屏蔽位。
- ◆ 将所需转换的数据放入对应的对齐数据保持寄存器中。

当 DAC1 触发事件产生时，LFSR 寄存器 1 的计数器值与对应数据保持寄存器数值相加，此相加值在延迟 3 个 APB1 时钟周期后传入寄存器 DAC_DATO1，LFSR 寄存器 1 的计数器值此时会更新。当 DAC2 触发事件产生时，LFSR 寄存器 2 的计数器值与对应数据保持寄存器数值相加，此相加值在延迟 3 个 APB1 时钟周期后传入寄存器 DAC_DATO2，LFSR 寄存器 2 的计数器值此时会更新。

10.4.4 产生相同三角波的独立触发

配置流程如下：

- ◆ 配置 DAC_CTRL.T1EN 和 DAC_CTRL.T2EN 来开启 DAC1 和 DAC2 的触发使能。
- ◆ 配置 DAC_CTRL.T1SEL[2:0]和 DAC_CTRL.T2SEL[2:0]为不同值来选择不同触发源。
- ◆ 配置 DAC_CTRL.W1EN[1:0]和 DAC_CTRL.W2EN[1:0]为“1x”来选择三角波生成使能。
- ◆ 配置 DAC_CTRL.MA1SEL3:0]和 DAC_CTRL.MA2SEL3:0]为相同值，以得到相同的三角波幅值。
- ◆ 将所需转换的数据放入对应的对齐数据保持寄存器中。

当 DAC1 触发事件产生时，DAC1 的三角波幅值与对应数据保持寄存器数值相加，此相加值在延迟 3 个 APB1 时钟周期后传入寄存器 DAC_DATO1，DAC1 的三角波的计数器值此时会更新。当 DAC2 触发事件产生时，DAC2 的三角波幅值与对应数据保持寄存器数值相加，此相加值在延迟 3 个 APB1 时钟周期后传入寄存器 DAC_DATO2，DAC2 的三角波的计数器值此时会更新。

10.4.5 产生不同三角波的独立触发

配置流程如下：

- ◆ 配置 DAC_CTRL.T1EN 和 DAC_CTRL.T2EN 来开启 DAC1 和 DAC2 的触发使能。
- ◆ 配置 DAC_CTRL.T1SEL[2:0]和 DAC_CTRL.T2SEL[2:0]为不同值来选择不同触发源。
- ◆ 配置 DAC_CTRL.W1EN[1:0]和 DAC_CTRL.W2EN[1:0]为“1x”来选择三角波生成使能。
- ◆ 配置 DAC_CTRL.MA1SEL3:0]和 DAC_CTRL.MA2SEL3:0]为不同值，以得到不同的三角波幅值。
- ◆ 将所需转换的数据放入对应的对齐数据保持寄存器中。

当 DAC1 触发事件产生时，DAC1 的三角波幅值与对应数据保持寄存器数值相加，此相加值在延迟 3 个 APB1 时钟周期后传入寄存器 DAC_DATO1，DAC1 的三角波的计数器值此时会更新。当 DAC2 触发事件产生时，DAC2 的三角波幅值与对应数据保持寄存器数值相加，此相加值在延迟 3 个 APB1 时钟周期后传入寄存器 DAC_DATO2，DAC2 的三角波的计数器值此时会更新。

10.4.6 同时软件启动

配置流程如下：

- ◆ 配置 DAC_CTRL.T1EN 和 DAC_CTRL.T2EN 来开启 DAC1 和 DAC2 的触发使能。
- ◆ 配置 DAC_CTRL.TR1EN 和 DAC_CTRL.TR2EN 来选择软件触发。
- ◆ 将所需转换的数据放入对应的对齐数据保持寄存器中。

DAC1 的对齐数据保持寄存器的值将在延迟 1 个 APB1 时钟周期后传入寄存器 DAC_DATO1。

DAC2 的对齐数据保持寄存器的值将在延迟 1 个 APB1 时钟周期后传入寄存器 DAC_DATO2。

10.4.7 不使用波形发生器的同步触发

配置流程如下：

- ◆ 配置 DAC_CTRL.T1EN 和 DAC_CTRL.T2EN 来开启 DAC1 和 DAC2 的触发使能。
- ◆ 配置 DAC_CTRL.T1SEL[2:0]和 DAC_CTRL.T2SEL[2:0]为相同值来选择相同触发源。
- ◆ 将所需转换的数据放入对应的对齐数据保持寄存器中。

触发事件产生时，DAC1 的对齐数据保持寄存器的值将在延迟 3 个 APB1 时钟周期后传入寄存器 DAC_DATO1；DAC2 的对齐数据保持寄存器的值将在延迟 3 个 APB1 时钟周期后传入寄存器 DAC_DATO2。

10.4.8 产生相同噪声的同步触发

配置流程如下：

- ◆ 配置 DAC_CTRL.T1EN 和 DAC_CTRL.T2EN 来开启 DAC1 和 DAC2 的触发使能。
- ◆ 配置 DAC_CTRL.T1SEL[2:0]和 DAC_CTRL.T2SEL[2:0]为相同值来选择相同触发源。
- ◆ 配置 DAC_CTRL.W1EN[1:0]和 DAC_CTRL.W2EN[1:0]为“01”来选择噪声生成使能。

- ◆ 配置 DAC_CTRL.MA1SEL3:0]和 DAC_CTRL.MA2SEL3:0]为相同值, 以得到相同的 LFSR 寄存器屏蔽位。
- ◆ 将所需转换的数据放入对应的对齐数据保持寄存器中。

当触发事件产生时, LFSR 寄存器 1 的计数器值与对应数据保持寄存器数值相加, 此相加值在延迟 3 个 APB1 时钟周期后传入寄存器 DAC_DATO1, LFSR 寄存器 1 的计数器值此时会更新; LFSR 寄存器 2 的计数器值与对应数据保持寄存器数值相加, 此相加值在延迟 3 个 APB1 时钟周期后传入寄存器 DAC_DATO2, LFSR 寄存器 2 的计数器值此时会更新。

10.4.9 产生不同噪声的同步触发

配置流程如下:

- ◆ 配置 DAC_CTRL.T1EN 和 DAC_CTRL.T2EN 来开启 DAC1 和 DAC2 的触发使能。
- ◆ 配置 DAC_CTRL.T1SEL[2:0]和 DAC_CTRL.T2SEL[2:0]为不同值来选择不同触发源。
- ◆ 配置 DAC_CTRL.W1EN[1:0]和 DAC_CTRL. W2EN[1:0]为“01”来选择噪声生成使能。
- ◆ 配置 DAC_CTRL.MA1SEL3:0]和 DAC_CTRL.MA2SEL3:0]为相同值, 以得到相同的 LFSR 寄存器屏蔽位。
- ◆ 将所需转换的数据放入对应的对齐数据保持寄存器中。

当触发事件产生时, LFSR 寄存器 1 的计数器值与对应数据保持寄存器数值相加, 此相加值在延迟 3 个 APB1 时钟周期后传入寄存器 DAC_DATO1, LFSR 寄存器 1 的计数器值此时会更新; LFSR 寄存器 2 的计数器值与对应数据保持寄存器数值相加, 此相加值在延迟 3 个 APB1 时钟周期后传入寄存器 DAC_DATO2, LFSR 寄存器 2 的计数器值此时会更新。

10.4.10 产生相同三角波的同步触发

配置流程如下:

- ◆ 配置 DAC_CTRL.T1EN 和 DAC_CTRL.T2EN 来开启 DAC1 和 DAC2 的触发使能。
- ◆ 配置 DAC_CTRL.T1SEL[2:0]和 DAC_CTRL.T2SEL[2:0]为相同值来选择相同触发源。
- ◆ 配置 DAC_CTRL.W1EN[1:0]和 DAC_CTRL. W2EN[1:0]为“1x”来选择三角波生成使能。
- ◆ 配置 DAC_CTRL.MA1SEL3:0]和 DAC_CTRL.MA2SEL3:0]为相同值, 以得到相同的三角波幅值。
- ◆ 将所需转换的数据放入对应的对齐数据保持寄存器中。

当触发事件产生时, DAC1 的三角波幅值与对应数据保持寄存器数值相加, 此相加值在延迟 3 个 APB1 时钟周期后传入寄存器 DAC_DATO1, DAC1 的三角波的计数器值此时会更新; DAC2 的三角波幅值与对应数据保持寄存器数值相加, 此相加值在延迟 3 个 APB1 时钟周期后传入寄存器 DAC_DATO2, DAC2 的三角波的计数器值此时会更新。

10.4.11 产生不同三角波的同步触发

配置流程如下:

- ◆ 配置 DAC_CTRL.T1EN 和 DAC_CTRL.T2EN 来开启 DAC1 和 DAC2 的触发使能。
 - ◆ 配置 DAC_CTRL.T1SEL[2:0]和 DAC_CTRL.T2SEL[2:0]为相同值来选择相同触发源。
 - ◆ 配置 DAC_CTRL.W1EN[1:0]和 DAC_CTRL.W2EN[1:0]为“1x”来选择三角波生成使能。
 - ◆ 配置 DAC_CTRL.MA1SEL3:0]和 DAC_CTRL.MA2SEL3:0]为不同值，以得到不同的三角波幅值。
 - ◆ 将所需转换的数据放入对应的对齐数据保持寄存器中。

当触发事件产生时, DAC1 的三角波幅值与对应数据保持寄存器数值相加, 此相加值在延迟 3 个 APB1 时钟周期后传入寄存器 DAC_DATO1, DAC1 的三角波的计数器值此时会更新; DAC2 的三角波幅值与对应数据保持寄存器数值相加, 此相加值在延迟 3 个 APB1 时钟周期后传入寄存器 DAC_DATO2, DAC2 的三角波的计数器值此时会更新。

10.5 DAC 寄存器

10.5.1 DAC 寄存器总览

表 10-3 DAC 寄存器总览

10.5.2 DAC 控制寄存器 (DAC_CTRL)

偏移地址: 0x00

复位值: 0x0000 0000

| | | | | | | | | | | | |
|----------|--------|----|-------------|----|-----------|----|------------|----|------|------|-------|
| 31 | 29 | 28 | 27 | 24 | 23 | 22 | 21 | 19 | 18 | 17 | 16 |
| Reserved | DMA2EN | | MA2SEL[3:0] | | W2EN[1:0] | | T2SEL[2:0] | | T2EN | B2EN | CH2EN |
| 15 | 13 | rw | 12 | rw | 8 | 7 | rw | 5 | rw | 2 | rw |
| Reserved | DMA1EN | | MA1SEL[3:0] | | W1EN[1:0] | | T1SEL[2:0] | | TIEN | BIEN | CH1EN |
| | | rw | | rw | | rw | | rw | rw | rw | rw |

| 位域 | 名称 | 描述 |
|-------|-------------|--|
| 31:29 | Reserved | 保留, 必需保持复位值。 |
| 28 | DMA2EN | DAC2 的 DMA 功能开启/禁用 该位由软件置 1 和清零。 0: 禁用 DAC2 的 DMA 功能 1: 开启 DAC2 的 DMA 功能 |
| 27:24 | MA2SEL[3:0] | DAC2 屏蔽/幅值选择器。 这些位由软件配置, 可以设置噪声功能的 LFSR 屏蔽位和三角波的幅值。 0000: 不屏蔽 LFSR 位 0 / 三角波幅值等于 1; 0001: 不屏蔽 LFSR 位[1:0] / 三角波幅值等于 3; 0010: 不屏蔽 LFSR 位[2:0] / 三角波幅值等于 7; 0011: 不屏蔽 LFSR 位[3:0] / 三角波幅值等于 15; 0100: 不屏蔽 LFSR 位[4:0] / 三角波幅值等于 31; 0101: 不屏蔽 LFSR 位[5:0] / 三角波幅值等于 63; 0110: 不屏蔽 LFSR 位[6:0] / 三角波幅值等于 127; 0111: 不屏蔽 LFSR 位[7:0] / 三角波幅值等于 255; 1000: 不屏蔽 LFSR 位[8:0] / 三角波幅值等于 511; 1001: 不屏蔽 LFSR 位[9:0] / 三角波幅值等于 1023; 1010: 不屏蔽 LFSR 位[10:0] / 三角波幅值等于 2047; ≥1011: 不屏蔽 LFSR 位[11:0] / 三角波幅值等于 4095。 |
| 23:22 | W2EN[1:0] | DAC2 噪声/三角波功能选择。 这些位由软件置 1 和清零。 00: 禁用噪声和三角波; 01: 开启噪声功能; 1x: 开启三角波功能。 |
| 21:19 | T2SEL[2:0] | DAC2 触发选择。 这些位用于 DAC2 外部触发的选择。 000: TIM6 TRGO 事件; 001: TIM8 TRGO 事件; 010: TIM7 TRGO 事件; 011: TIM5 TRGO 事件; 100: TIM2 TRGO 事件; |

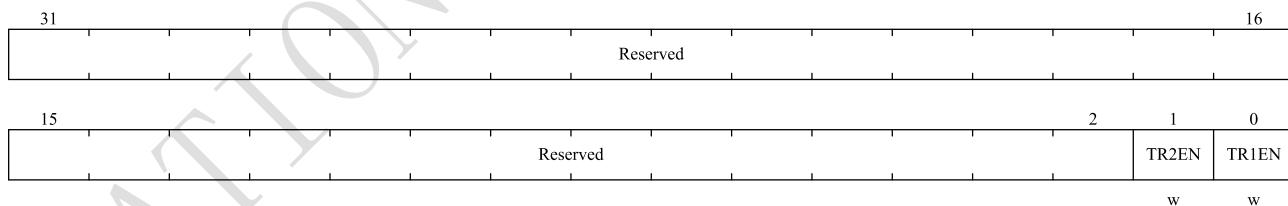
| 位域 | 名称 | 描述 |
|-------|-------------|---|
| | | <p>101: TIM4 TRGO 事件; 110: 外部中断线 9; 111: 软件触发。 注意: 这些位只能在 DAC2 触发使能时设置。</p> |
| 18 | T2EN | <p>DAC2 触发使能。 该位由软件置 1 和清零, 用来开启/禁用 DAC2 的触发。 0: 禁用 DAC 触发; 1: 开启 DAC 触发。</p> |
| 17 | B2EN | <p>DAC2 输出缓存。 该位由软件置 1 和清零, 用来开启/禁用 DAC2 的输出缓存。 0: 禁用 DAC2 输出缓存; 1: 开启 DAC2 输出缓存。</p> |
| 16 | CH2EN | <p>DAC2 开启。 该位由软件置 1 和清零, 用来开启/禁用 DAC2。 0: 禁用 DAC2; 1: 开启 DAC2。</p> |
| 15:13 | Reserved | 保留, 必需保持复位值。 |
| 12 | DMA1EN | <p>DAC1 的 DMA 功能开启/禁用 该位由软件置 1 和清零。 0: 禁用 DAC1 的 DMA 功能; 1: 开启 DAC1 的 DMA 功能。</p> |
| 11:8 | MA1SEL[3:0] | <p>DAC1 屏蔽/幅值选择器。 这些位由软件配置, 可以设置噪声功能的 LFSR 屏蔽位和三角波的幅值。 0000: 不屏蔽 LFSR 位 0 / 三角波幅值等于 1; 0001: 不屏蔽 LFSR 位[1:0] / 三角波幅值等于 3; 0010: 不屏蔽 LFSR 位[2:0] / 三角波幅值等于 7; 0011: 不屏蔽 LFSR 位[3:0] / 三角波幅值等于 15; 0100: 不屏蔽 LFSR 位[4:0] / 三角波幅值等于 31; 0101: 不屏蔽 LFSR 位[5:0] / 三角波幅值等于 63; 0110: 不屏蔽 LFSR 位[6:0] / 三角波幅值等于 127; 0111: 不屏蔽 LFSR 位[7:0] / 三角波幅值等于 255; 1000: 不屏蔽 LFSR 位[8:0] / 三角波幅值等于 511; 1001: 不屏蔽 LFSR 位[9:0] / 三角波幅值等于 1023; 1010: 不屏蔽 LFSR 位[10:0] / 三角波幅值等于 2047; ≥1011: 不屏蔽 LFSR 位[11:0] / 三角波幅值等于 4095。</p> |
| 7:6 | W1EN[1:0] | <p>DAC1 噪声/三角波功能选择。 这些位由软件置 1 和清零。 00: 禁用噪声和三角波; 01: 开启噪声功能; 1x: 开启三角波功能。</p> |
| 5:3 | T1SEL[2:0] | DAC1 触发选择。 这些位用于 DAC1 外部触发的选择。 |

| 位域 | 名称 | 描述 |
|----|-------|--|
| | | 000: TIM6 TRGO 事件; 001: TIM8 TRGO 事件; 010: TIM7 TRGO 事件; 011: TIM5 TRGO 事件; 100: TIM2 TRGO 事件; 101: TIM4 TRGO 事件; 110: 外部中断线 9; 111: 软件触发。 注意: 这些位只能在 DAC1 触发使能时设置。 |
| 2 | T1EN | DAC1 触发使能。 该位由软件置 1 和清零, 用来开启/禁用 DAC1 的触发。 0: 禁用 DAC1 触发; 1: 开启 DAC1 触发。 |
| 1 | B1EN | DAC1 输出缓存。 该位由软件置 1 和清零, 用来开启/禁用 DAC1 的输出缓存。 0: 禁用 DAC1 输出缓存; 1: 开启 DAC1 输出缓存。 |
| 0 | CH1EN | DAC1 开启。 该位由软件置 1 和清零, 用来开启/禁用 DAC1。 0: 禁用 DAC1; 1: 开启 DAC1。 |

10.5.3 DAC 软件触发寄存器 (DAC_SOTTR)

偏移地址: 0x04

复位值: 0x0000 0000



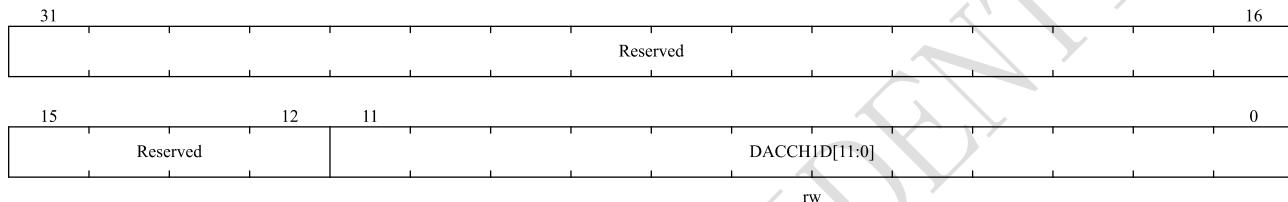
| 位域 | 名称 | 描述 |
|------|----------|--|
| 31:2 | Reserved | 保留, 必需保持复位值。 |
| 1 | TR2EN | DAC2 软件触发开启。 该位由软件置 1, 用来开启/禁用软件触发。 0: 禁用 DAC2 软件触发; 1: 开启 DAC2 软件触发。 注意: 对齐数据保持寄存器将数据传送至 DAC_DATO2 寄存器之后, 一个 APB1 时钟之后该位会由硬件清 0. |
| 0 | TR1EN | DAC1 软件触发开启。 |

| 位域 | 名称 | 描述 |
|----|----|---|
| | | <p>该位由软件置 1, 用来开启/禁用软件触发。</p> <p>0: 禁用 DAC1 软件触发; 1: 开启 DAC1 软件触发。</p> <p>注意: 对齐数据保持寄存器将数据传送至 <i>DAC_DATO1</i> 寄存器之后, 一个 <i>APB1</i> 时钟之后该位会由硬件清 0.</p> |

10.5.4 DAC1 的 12 位右对齐数据保持寄存器 (DAC_DR12CH1)

偏移地址: 0x08

复位值: 0x0000 0000

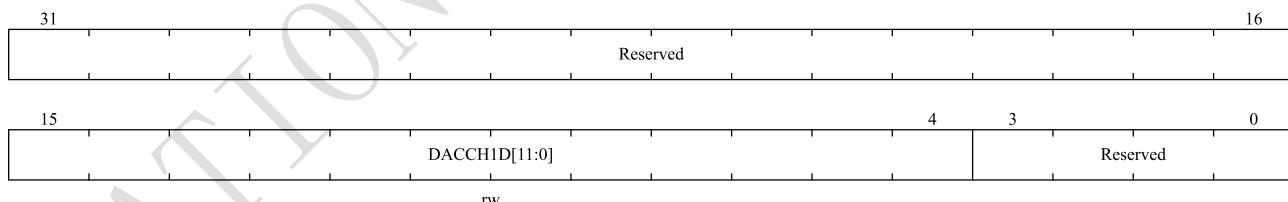


| 位域 | 名称 | 描述 |
|-------|---------------|---|
| 31:12 | Reserved | 保留, 必需保持复位值。 |
| 11:0 | DACCH1D[11:0] | <p>DAC1 的 12 位右对齐数据</p> <p>这些位由软件配置, DAC1 转换这些数据。</p> |

10.5.5 DAC 通道 1 的 12 位左对齐数据保持寄存器 (DAC_DL12CH1)

偏移地址: 0x0C

复位值: 0x0000 0000

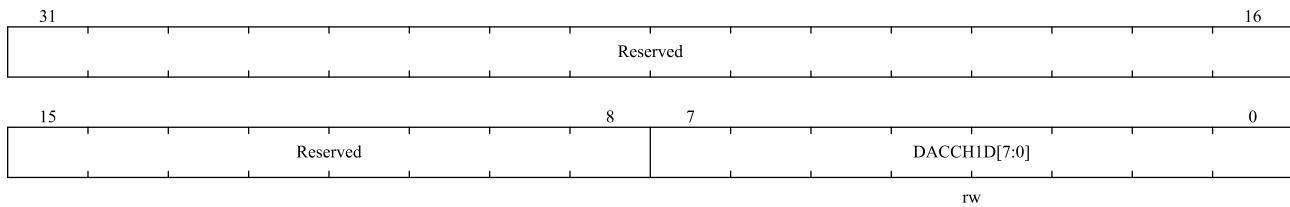


| 位域 | 名称 | 描述 |
|-------|---------------|---|
| 31:16 | Reserved | 保留, 必需保持复位值。 |
| 15:4 | DACCH1D[11:0] | <p>DAC1 的 12 位左对齐数据</p> <p>这些位由软件配置, DAC1 转换这些数据。</p> |
| 3:0 | Reserved | 保留, 必需保持复位值。 |

10.5.6 DAC1 的 8 位右对齐数据保持寄存器 (DAC_DR8CH1)

偏移地址: 0x10

复位值: 0x0000 0000

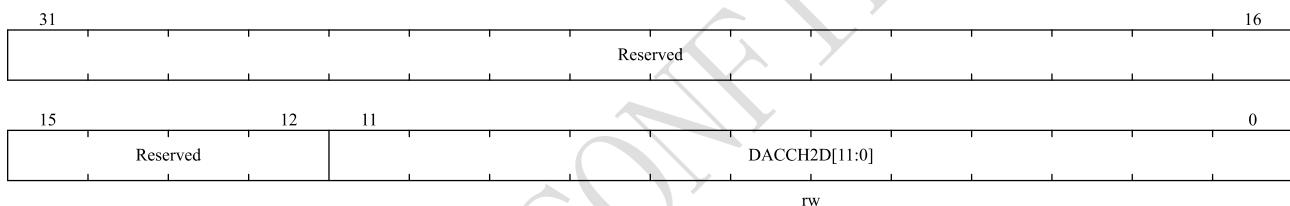


| 位域 | 名称 | 描述 |
|------|--------------|---|
| 31:8 | Reserved | 保留, 必需保持复位值。 |
| 7:0 | DACCH1D[7:0] | DAC1 的 8 位右对齐数据 这些位由软件配置, DAC1 转换这些数据。 |

10.5.7 DAC2 的 12 位右对齐数据保持寄存器 (DAC_DR12CH2)

偏移地址: 0x14

复位值: 0x0000 0000

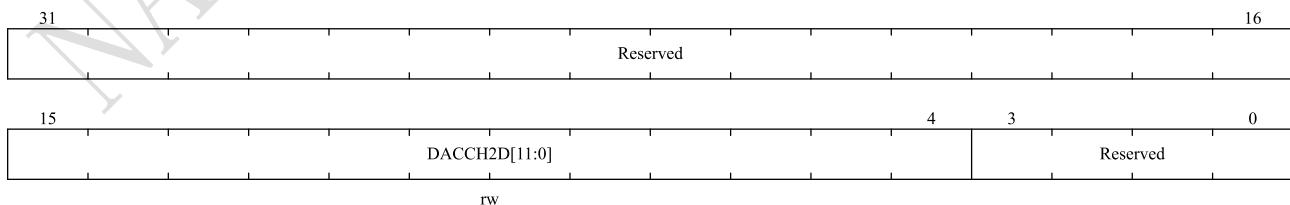


| 位域 | 名称 | 描述 |
|-------|---------------|--|
| 31:12 | Reserved | 保留, 必需保持复位值。 |
| 11:0 | DACCH2D[11:0] | DAC2 的 12 位右对齐数据 这些位由软件配置, DAC2 转换这些数据。 |

10.5.8 DAC 通道 2 的 12 位左对齐数据保持寄存器 (DAC_DL12CH2)

偏移地址: 0x18

复位值: 0x0000 0000



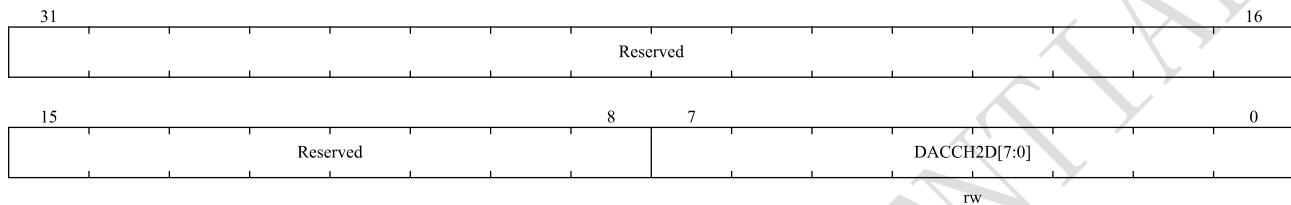
| 位域 | 名称 | 描述 |
|-------|---------------|------------------|
| 31:16 | Reserved | 保留, 必需保持复位值。 |
| 15:4 | DACCH2D[11:0] | DAC2 的 12 位左对齐数据 |

| 位域 | 名称 | 描述 |
|-----|----------|------------------------|
| | | 这些位由软件配置, DAC2 转换这些数据。 |
| 3:0 | Reserved | 保留, 必需保持复位值。 |

10.5.9 DAC2 的 8 位右对齐数据保持寄存器 (DAC_DR8CH2)

偏移地址: 0x1C

复位值: 0x0000 0000

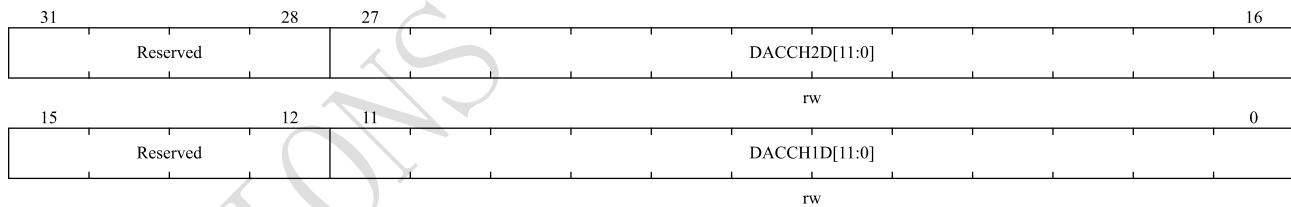


| 位域 | 名称 | 描述 |
|------|--------------|---|
| 31:8 | Reserved | 保留, 必需保持复位值。 |
| 7:0 | DACCH2D[7:0] | DAC2 的 8 位右对齐数据 这些位由软件配置, DAC2 转换这些数据。 |

10.5.10 双 DAC 的 12 位右对齐数据保持寄存器 (DAC_DR12DCH)

偏移地址: 0x20

复位值: 0x0000 0000

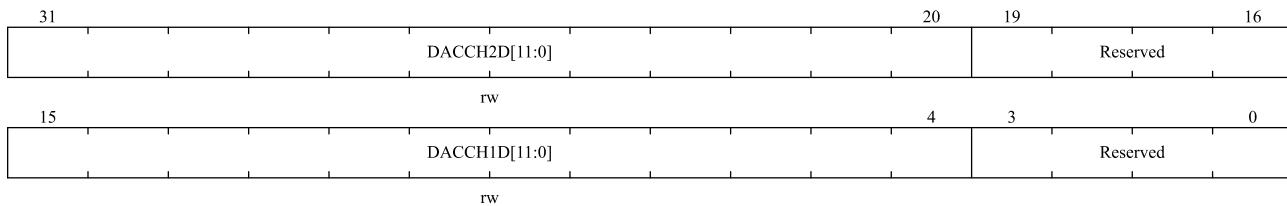


| 位域 | 名称 | 描述 |
|-------|---------------|--|
| 31:28 | Reserved | 保留, 必需保持复位值。 |
| 27:16 | DACCH2D[11:0] | DAC2 的 12 位右对齐数据。 这些位由软件配置, DAC2 转换这些数据。 |
| 15:12 | Reserved | 保留, 必需保持复位值。 |
| 11:0 | DACCH1D[11:0] | DAC1 的 12 位右对齐数据。 这些位由软件配置, DAC1 转换这些数据。. |

10.5.11 双 DAC 的 12 位左对齐数据保持寄存器 (DAC_DL12DCH)

偏移地址: 0x24

复位值: 0x0000 0000

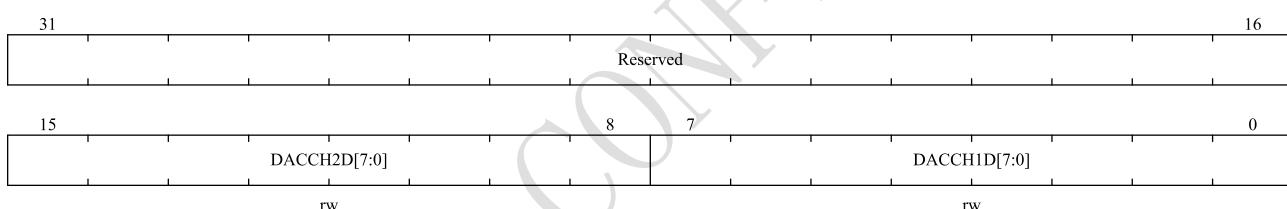


| 位域 | 名称 | 描述 |
|-------|---------------|---|
| 31:20 | DACCH2D[11:0] | DAC2 的 12 位左对齐数据。 这些位由软件配置, DAC2 转换这些数据。 |
| 19:16 | Reserved | 保留, 必需保持复位值。 |
| 15:4 | DACCH1D[11:0] | DAC1 的 12 位左对齐数据。 这些位由软件配置, DAC1 转换这些数据。 |
| 3:0 | Reserved | 保留, 必需保持复位值。 |

10.5.12 双 DAC 的 8 位右对齐数据保持寄存器 (DAC_DR8DCH)

偏移地址: 0x28

复位值: 0x0000 0000

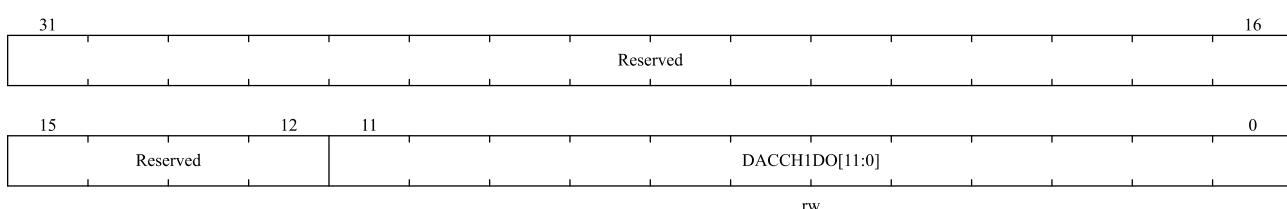


| 位域 | 名称 | 描述 |
|-------|--------------|--|
| 31:16 | Reserved | 保留, 必需保持复位值。 |
| 15:8 | DACCH2D[7:0] | DAC2 的 8 位右对齐数据。 这些位由软件配置, DAC2 转换这些数据。 |
| 7:0 | DACCH1D[7:0] | DAC1 的 8 位右对齐数据。 这些位由软件配置, DAC1 转换这些数据。 |

10.5.13 DAC1 的数据输出寄存器 (DAC_DATO1)

偏移地址: 0x2C

复位值: 0x0000 0000

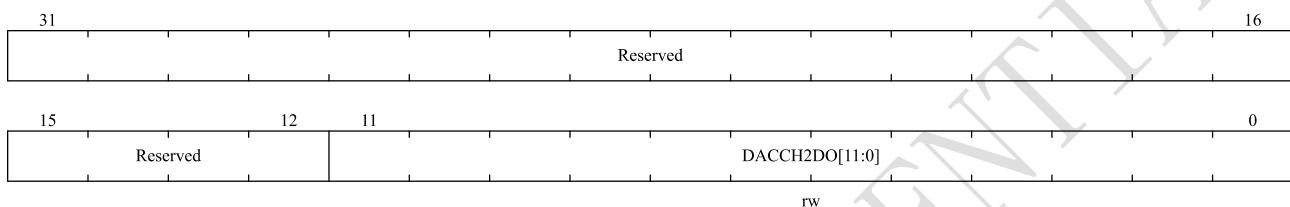


| 位域 | 名称 | 描述 |
|-------|----------------|-------------------------------------|
| 31:12 | Reserved | 保留, 必需保持复位值。 |
| 11:0 | DACCH1DO[11:0] | DAC1 数据输出。 这些位为只读, 表示 DAC1 的输出数据 |

10.5.14 DAC2 的数据输出寄存器 (DAC_DATO2)

偏移地址: 0x30

复位值: 0x0000 0000



| 位域 | 名称 | 描述 |
|-------|----------------|-------------------------------------|
| 31:12 | Reserved | 保留, 必需保持复位值。 |
| 11:0 | DACCH2DO[11:0] | DAC2 数据输出。 这些位为只读, 表示 DAC2 的输出数据 |

11 高级控制定时器 (TIM1 和 TIM8)

11.1 TIM1 和 TIM8 简介

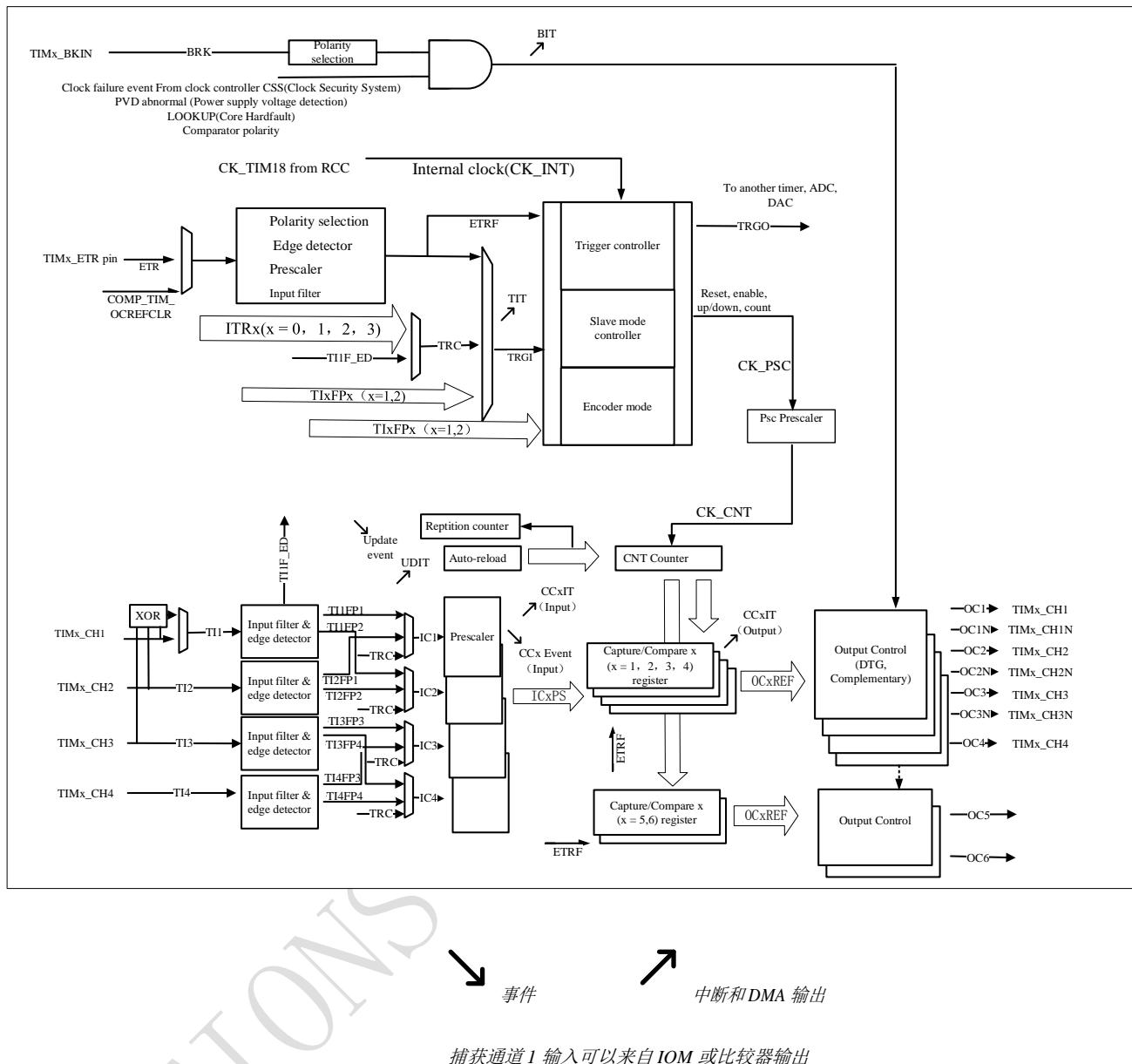
高级控制定时器 (TIM1 和 TIM8) 主要用于以下场合：对输入信号进行计数、测量输入信号的脉冲宽度和产生输出波形等。

高级定时器具有互补输出功能、死区插入和刹车功能。适用于电机控制。

11.2 TIM1 和 TIM8 主要特性

- 16 位自动装载计数器。(可实现向上计数、向下计数、向上/下计数)。
- 16 位可编程预分频器。(分频系数可配置为 1 到 65536 之间的任意值)
- 可编程重复计数器
- TIM1 最多 6 个通道, TIM8 最多 6 个通道
- 4 个捕获/比较通道, 工作模式为: PWM 输出、输出比较、单脉冲模式输出、输入捕获
- 如下事件发生时产生中断/DMA:
 - ◆ 更新事件
 - ◆ 触发事件
 - ◆ 输入捕获
 - ◆ 输出比较
 - ◆ 刹车信号输入
- 死区时间可编程的互补输出
 - 对于 TIM1、TIM8, 通道 1、2、3 支持此功能
- 可通过外部信号控制定时器
- 多个定时器连接, 以实现定时器同步或链接
- TIM1_CC5 和 TIM8_CC5 用于比较器消隐
- TIM1_CC6 用于 OPAMP1 和 OPAMP2 的输入通道切换; TIM8_CC6 用于 OPAMP3 和 OPAMP4 的输入通道切换;
- 增量 (正交) 编码器接口: 用于追踪运行轨迹和解析旋转方位
- 霍尔传感器接口: 用于三相电机控制

图 11-1 TIMx(x=1/8)框图



11.3 TIM1 和 TIM8 功能描述

11.3.1 时基单元

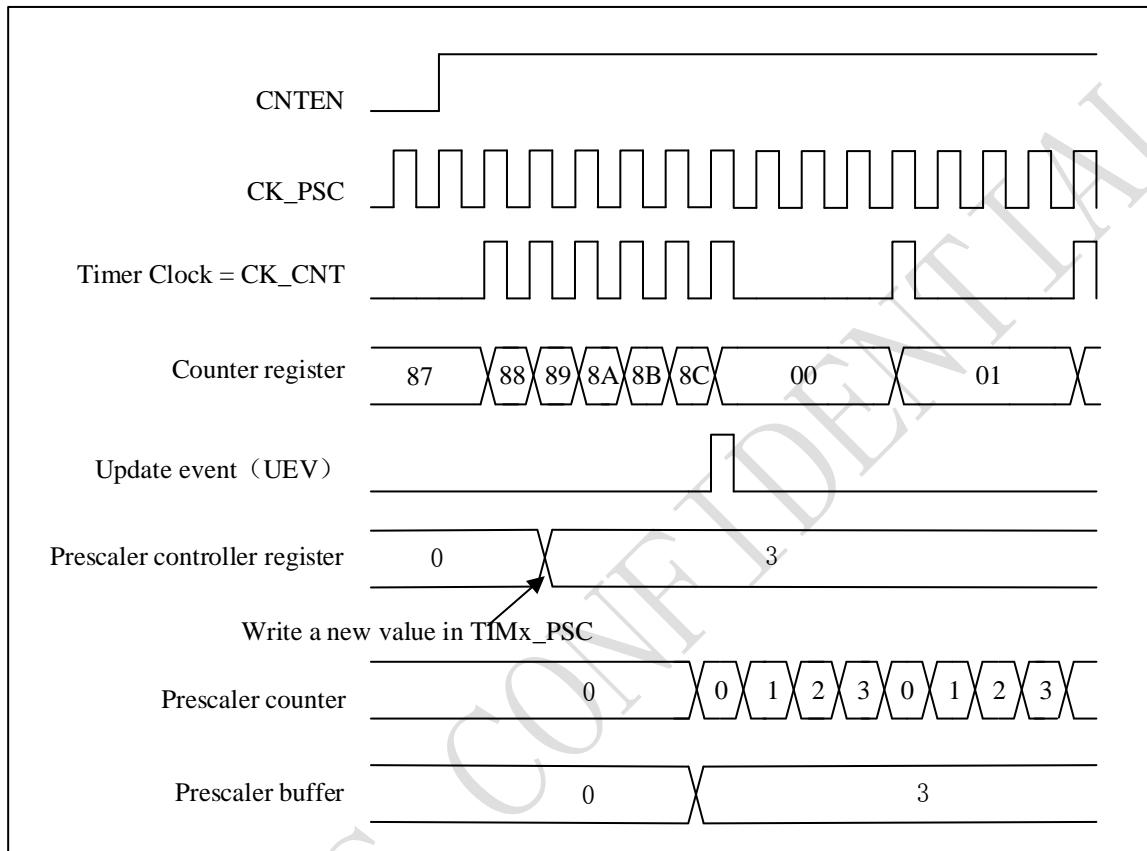
高级控制器的时基单元主要包括：预分频器、计数器、自动重装载寄存器和重复计数器。当时基单元工作时，软件可以随时读取和写入相应的寄存器（TIMx_PSC、TIMx_CNT、TIMx_AR 和 TIMx_REPCNT）。

根据自动重装载预装载使能位（TIMx_CTRL1.AR PEN）的设置，预装载寄存器的值会立即或在每次更新事件 UEV 时传输到影子寄存器。TIMx_CTRL1.UPDIS=0 时，计数器上溢/下溢或软件设置 TIMx_EVTGEN.UDGN 将生成更新事件。计数器 CK_CNT 仅在 TIMx_CTRL1.CNTEN 位被设置时有效。计数器在 TIMx_CTRL.CNTEN 位被设置后一个时钟周期之后开始计数。

11.3.1.1 预分频器描述

TIMx_PSC 寄存器由一个 16 位计数器组成，可用于计数器时钟频率按 1 和 65536 之间的任意分频。因为这个控制器带有缓冲器，可以在运行时动态改变。新的预分频器值只有在下次更新事件中才会被采用。

图 11-2 当预分频的参数从 1 到 4，计数器的时序图



11.3.2 计数器模式

11.3.2.1 向上计数模式

使用向上计数模式，计数器将从 0 计数到寄存器 TIMx_AR 的值，然后重置为 0。并产生一个计数器溢出事件。

如果设置 TIMx_CTRL1.UPRS 位(选择更新请求)和 TIMx_EVTGEN.UDGN 位, 将产生一个更新事件(UEV)。但是 TIMx_STS.UDITF 不会被硬件置起，因此不会产生更新中断或 DMA 更新请求。这是为了避免清除计数器时产生更新中断。

取决于 TIMx_CTRL1.UPRS 的配置，当发生更新事件时，TIMx_STS.UDITF 被设置，所有寄存器都会更新：

- 重复计数器被重新加载为 TIMx_REPCNT 的内容
- 当 TIMx_CTRL1.AR PEN = 1，预装载寄存器(TIMx_AR)的值被更新到自动装载影子寄存器
- 预加载值 (TIMx_PSC) 被重新加载到预分频器影子寄存器中

为了避免在向预装载寄存器中写入新值时更新影子寄存器，可以通过设置 TIMx_CTRL1.UPDIS=1 来禁止更新事件。

当产生一个更新事件时,计数器仍将被清除,预分频器计数器也将被设置为0(但预分频器值将保持不变)。

下图给出一些示例,展示了向上计数模式计数器在不同分频因子下的动作。

图 11-3 当内部时钟分频因子 = 2/N 时, 向上计数的时序图

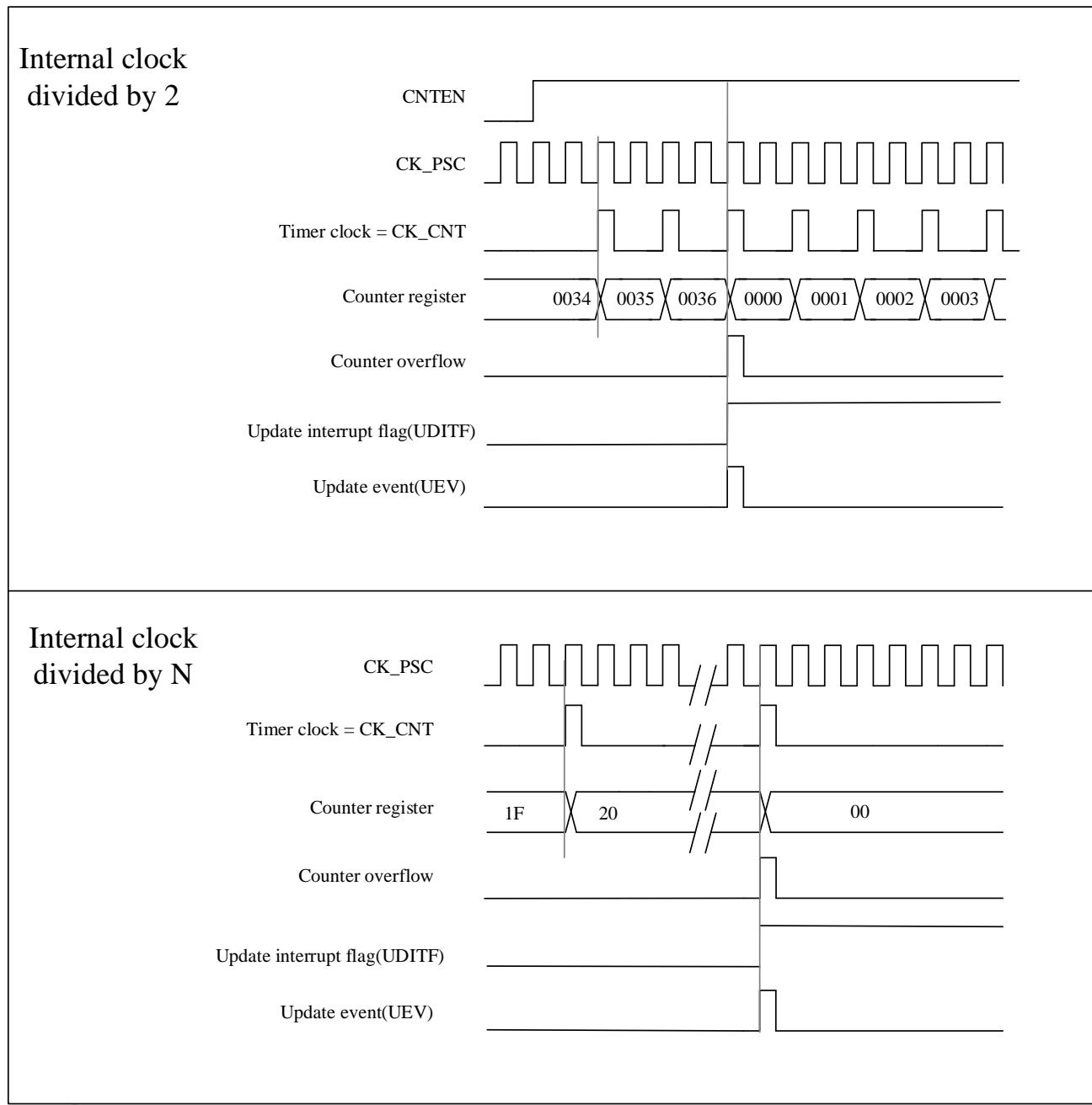
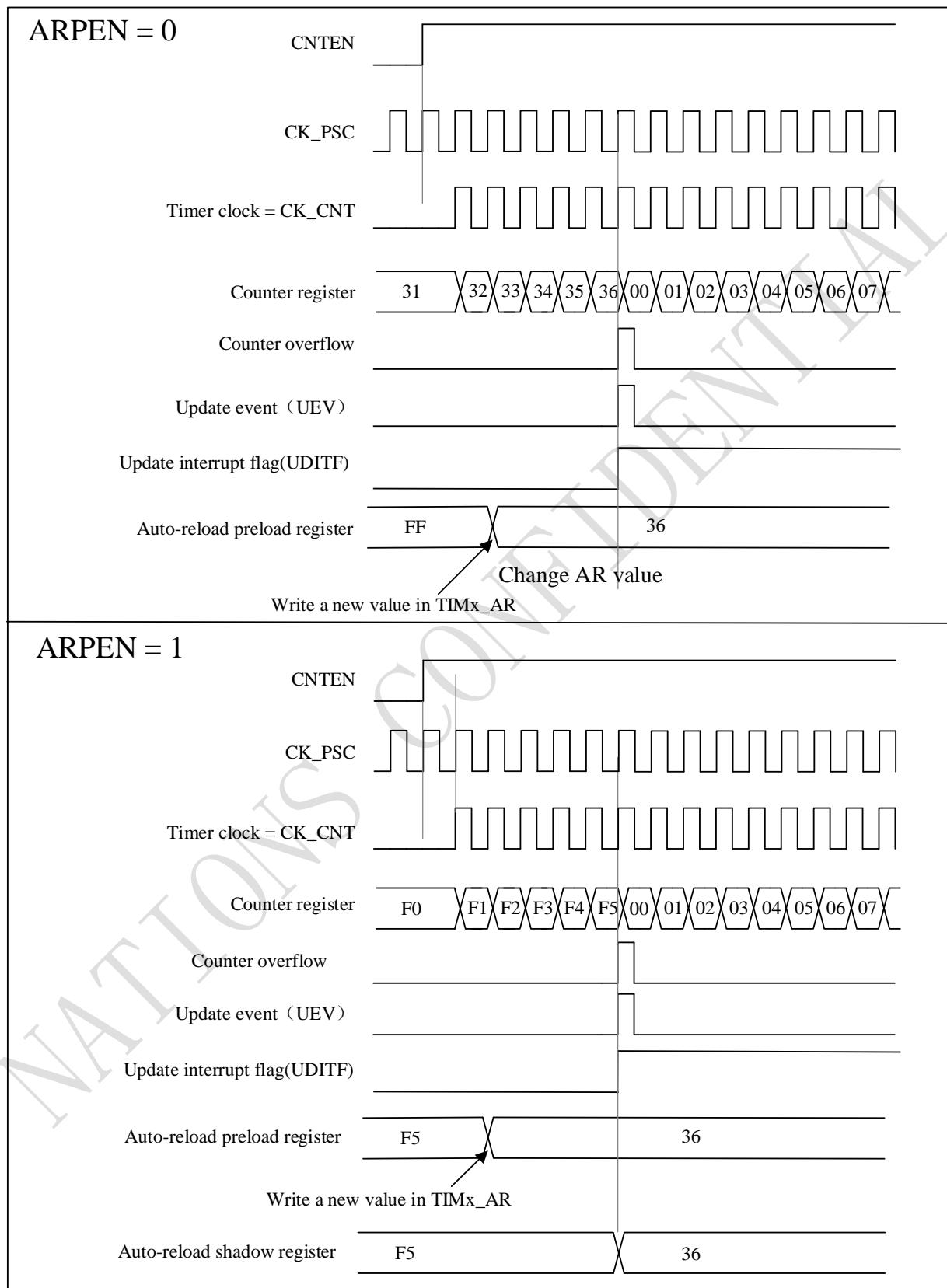


图 11-4 当 ARDEN=0/1 产生更新事件时，向上计数的时序图



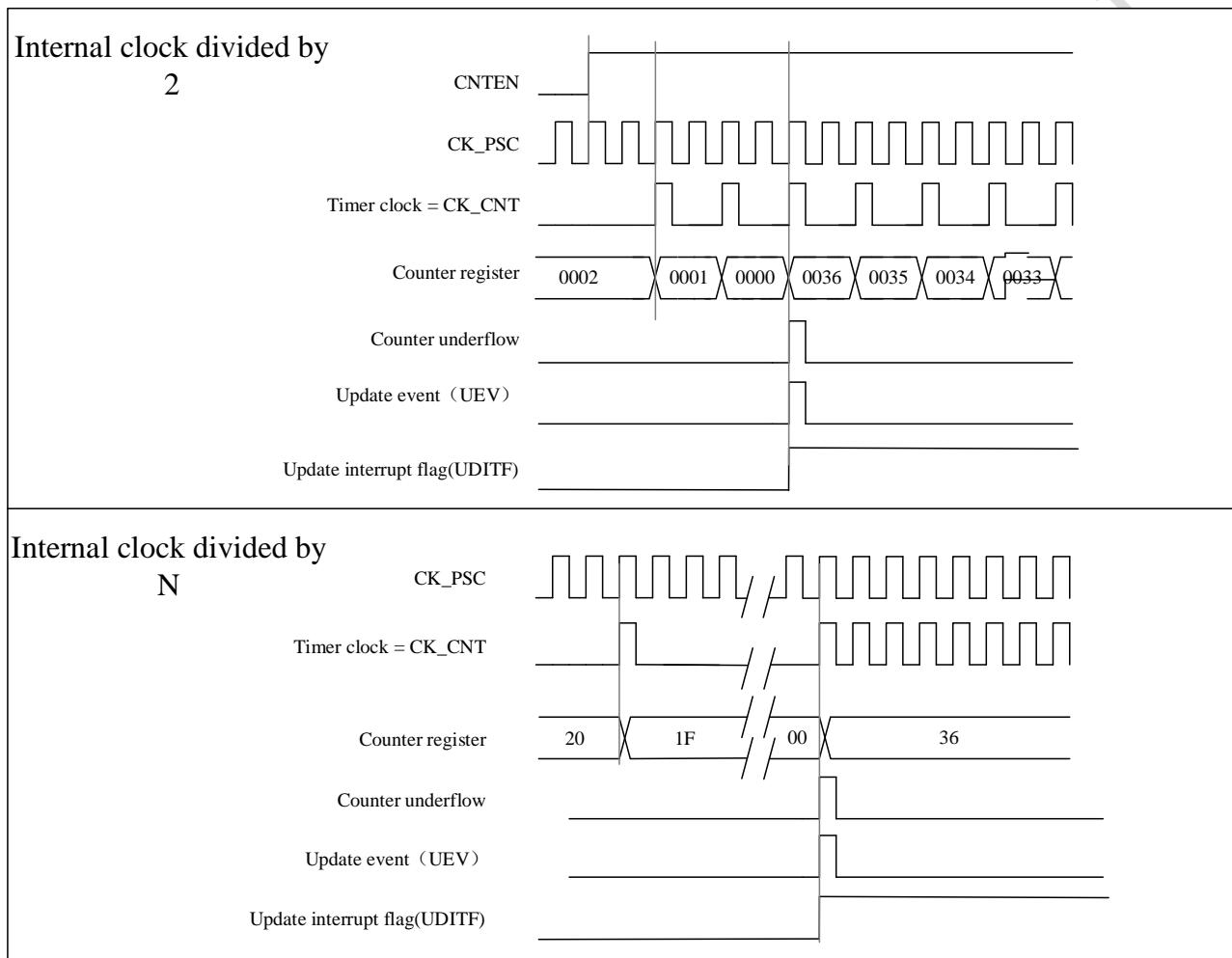
11.3.2.2 向下计数模式

向下计数模式，计数器将从寄存器 `TIMx_AR` 的值减至 0，然后从自动重装载值重新开始，并产生计数器向下溢出事件。

向下计数模式和向上计数模式配置更新事件和更新寄存器的过程相同，请查阅 11.3.2.1 章节。

下图给出一些示例，展示了向下计数模式计数器在不同分频因子下的动作。

图 11-5 内部时钟分频因子 = 2/N 时，向下计数时序图



11.3.2.3 中央对齐模式

在中央对齐模式下，计数器从 0 增加到值 (`TIMx_AR`) -1，产生计数器溢出事件。然后，它从自动重装载值 (`TIMx_AR`) 向下计数到 1，并生成一个计数器向下溢出事件。然后计数器重置为 0 并再次开始计数。

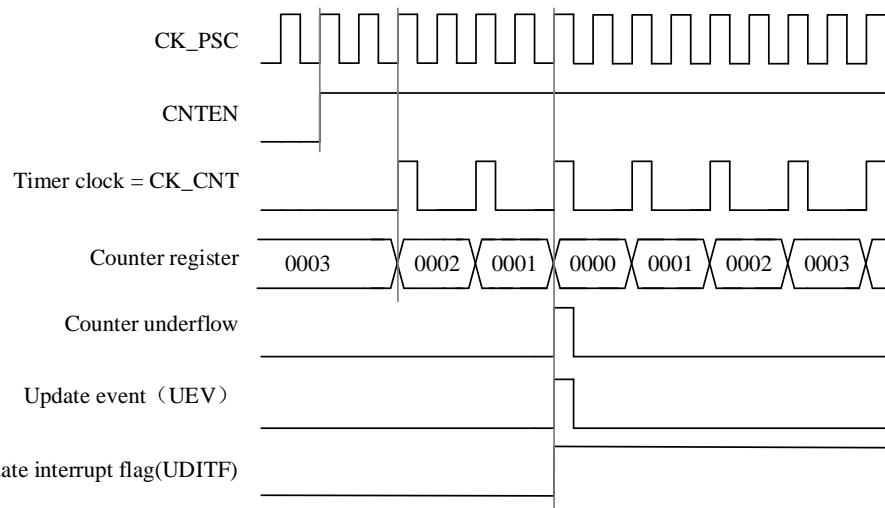
在这种模式下，`TIMx_CTRL1.DIR` 方向位无效，由硬件更新和指定当前计数方向。当 `TIMx_CTRL1.CAMSEL` 位不等于“00”时，中央对齐模式有效。

每次计数上溢和计数下溢时都会生成更新事件。或者，也可以通过设置 `TIMx_EVTGEN.UDGN` 位（通过软件或使用从模式控制器）来生成更新事件。在这种情况下，计数器从 0 重新开始计数，预分频器的计数器也从 0 重新开始计数。

注：如果因为计数器溢出而产生更新，自动重装载将在计数器重新载入之前被更新。

图 11-6 内部时钟分频因子 = 2/N, 中央对齐时序图

Internal clock divided by 2



Internal clock divided by N

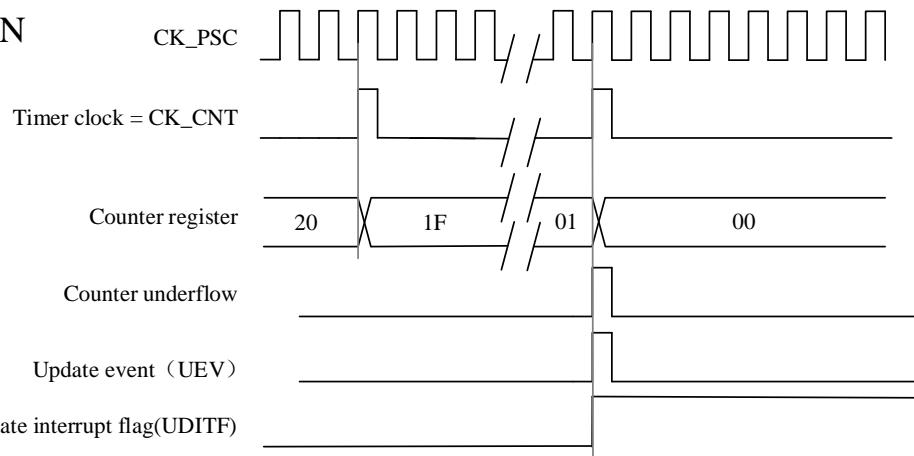
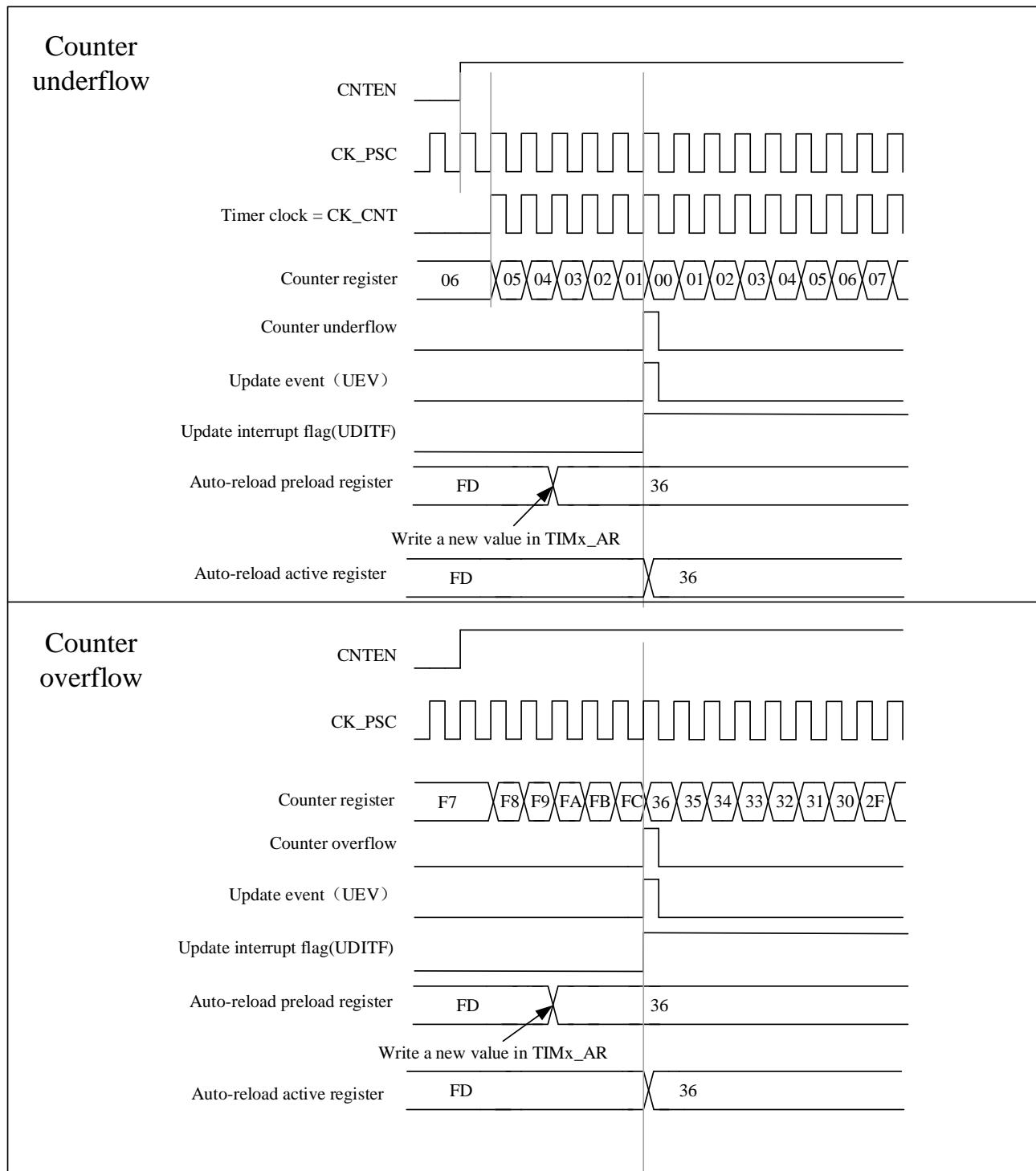


图 11-7 包含计数器上溢和下溢的中央对齐时序图(ARPEN=1)



11.3.3 重复计数器

第 11.3.1 章节的基本单元描述了生成更新事件 (UEV) 的条件。更新事件 (UEV) 实际上仅在重复计数器达到零时生成，这对于生成 PWM 信号非常有用。

这意味着每 $N+1$ 计数器溢出或下溢一次，数据就会从预加载寄存器传输到影子寄存器，其中 N 是

TIMx_REPCNT 中的值。

重复计数器递减：

- 在向上计数模式下，每次计数器达到最大值时，都会发生溢出
- 在向下计数模式下，每次计数器减至最小值时，都会发生下溢
- 在中央对齐模式下，每次计数上溢或下溢时

其重复率由 TIMx_REPCNT 寄存器的值定。

重复计数器具有自动重新加载功能。无论重复计数器的值如何，更新事件（通过从模式控制器设置 TIMx_EVTGEN.UDGN 或硬件生成）都会立即发生。

图 11-8 向下计数模式下的重复计数时序图

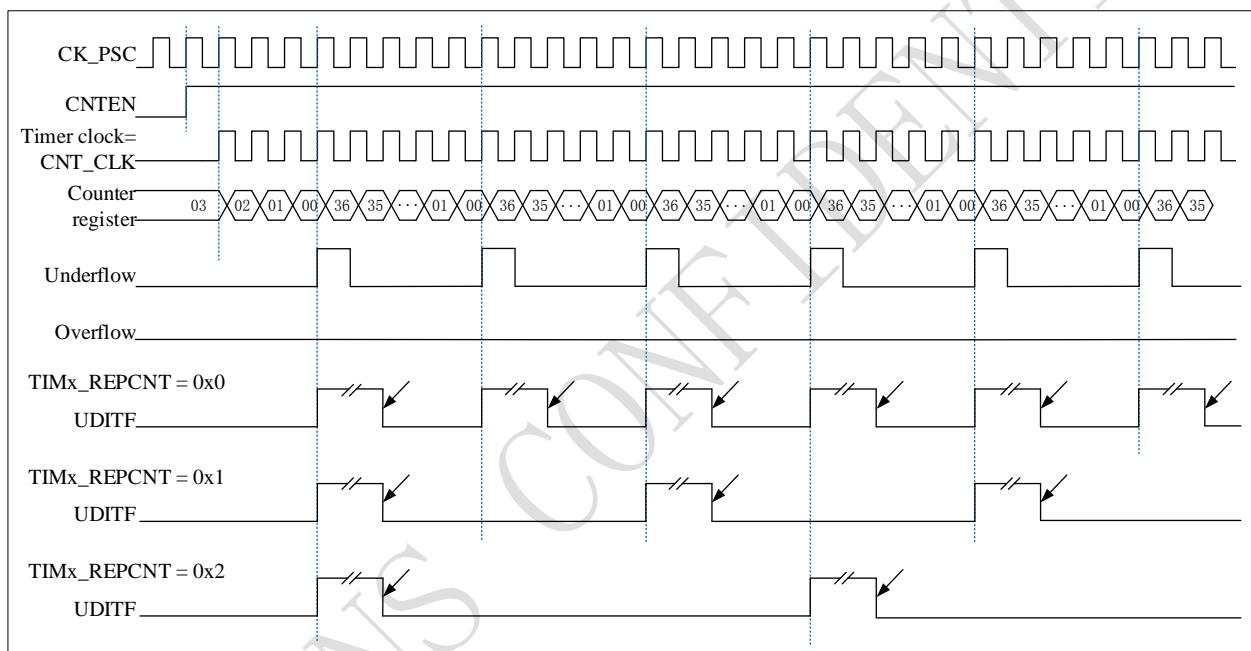
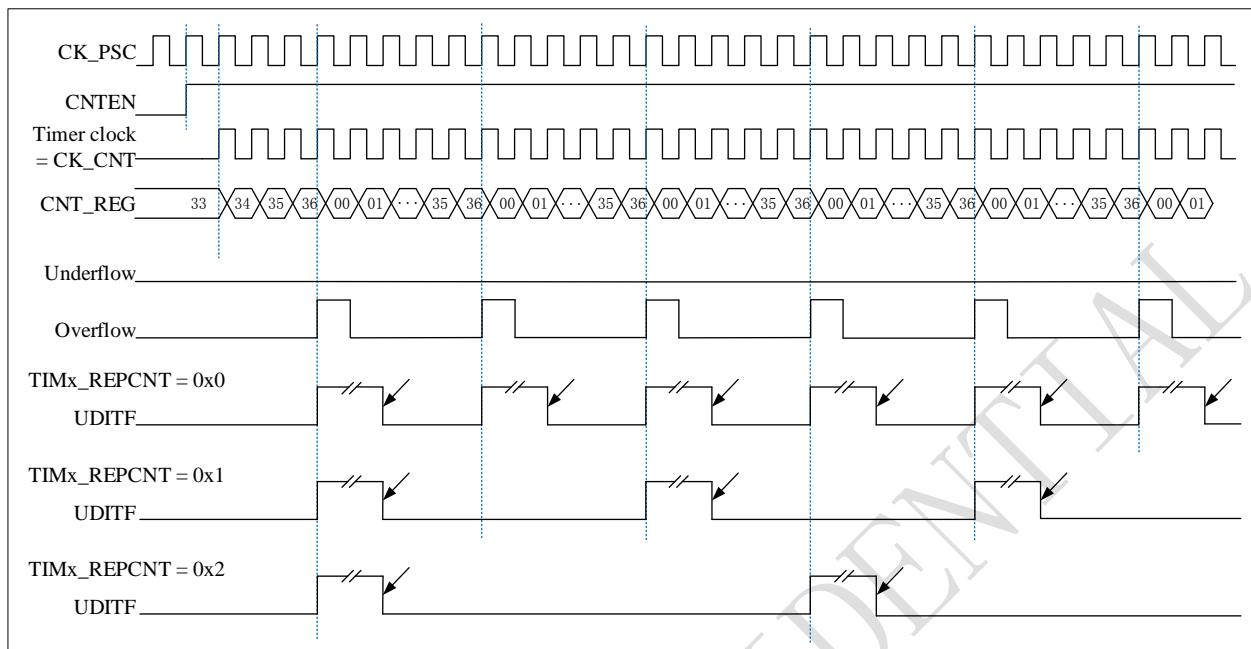
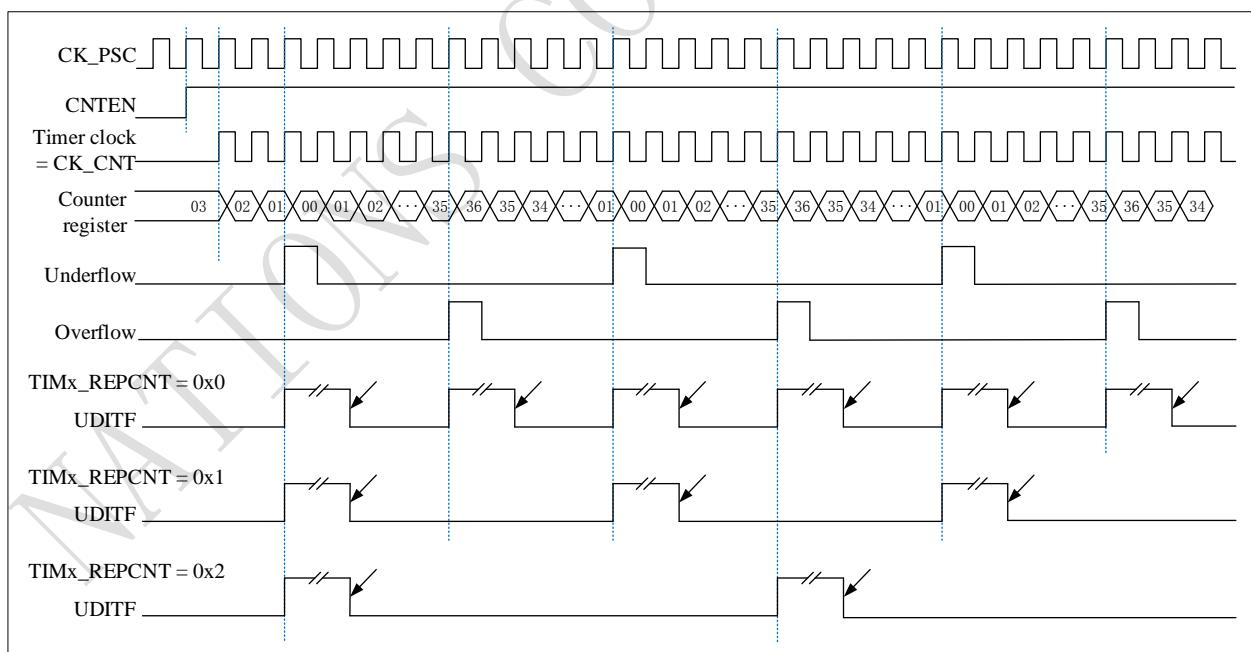


图 11-9 向上计数模式下的重复计数时序图



软件清除

图 11-10 中央对齐模式下的重复计数时序图



软件清除

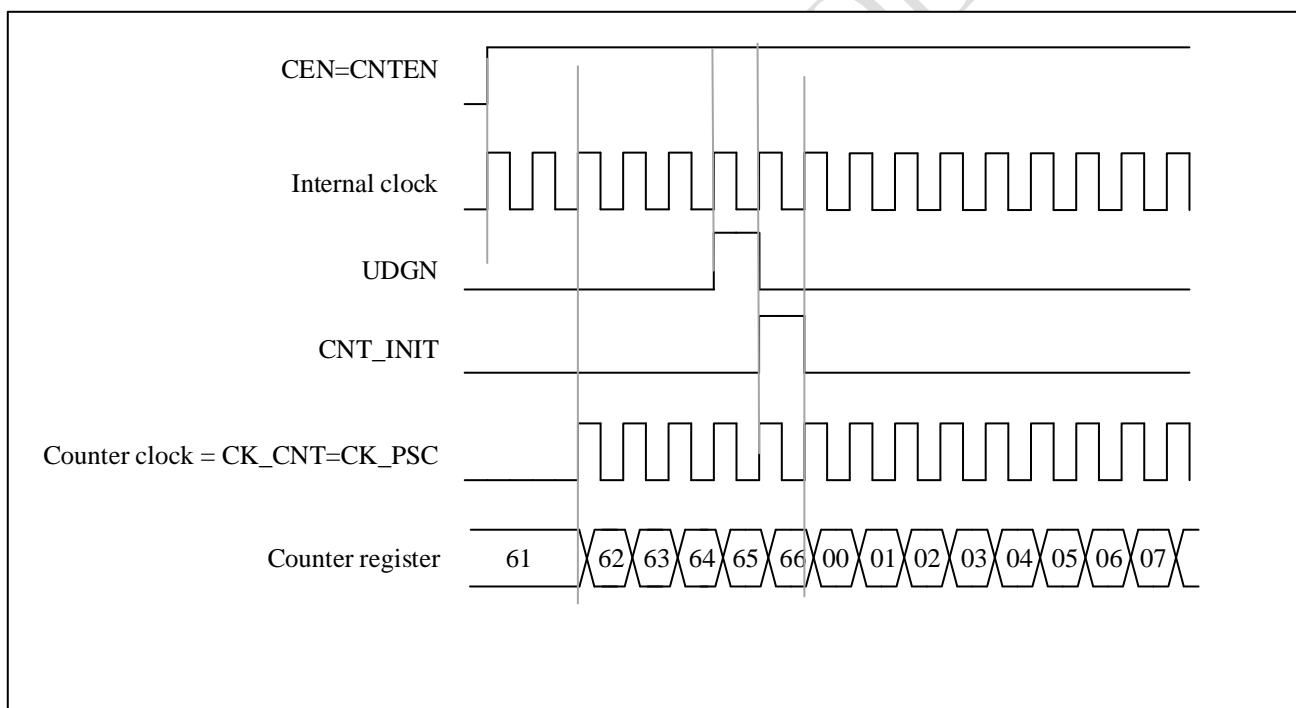
11.3.4 时钟选择

- 高级控制定时器的内部时钟: CK_INT:
- 两种外部时钟模式:
 - 外部输入引脚
 - 外部触发输入 ETR
- 内部触发输入 (ITRx): 一个定时器用作另一个定时器的预分频器

11.3.4.1 内部时钟源(CK_INT)

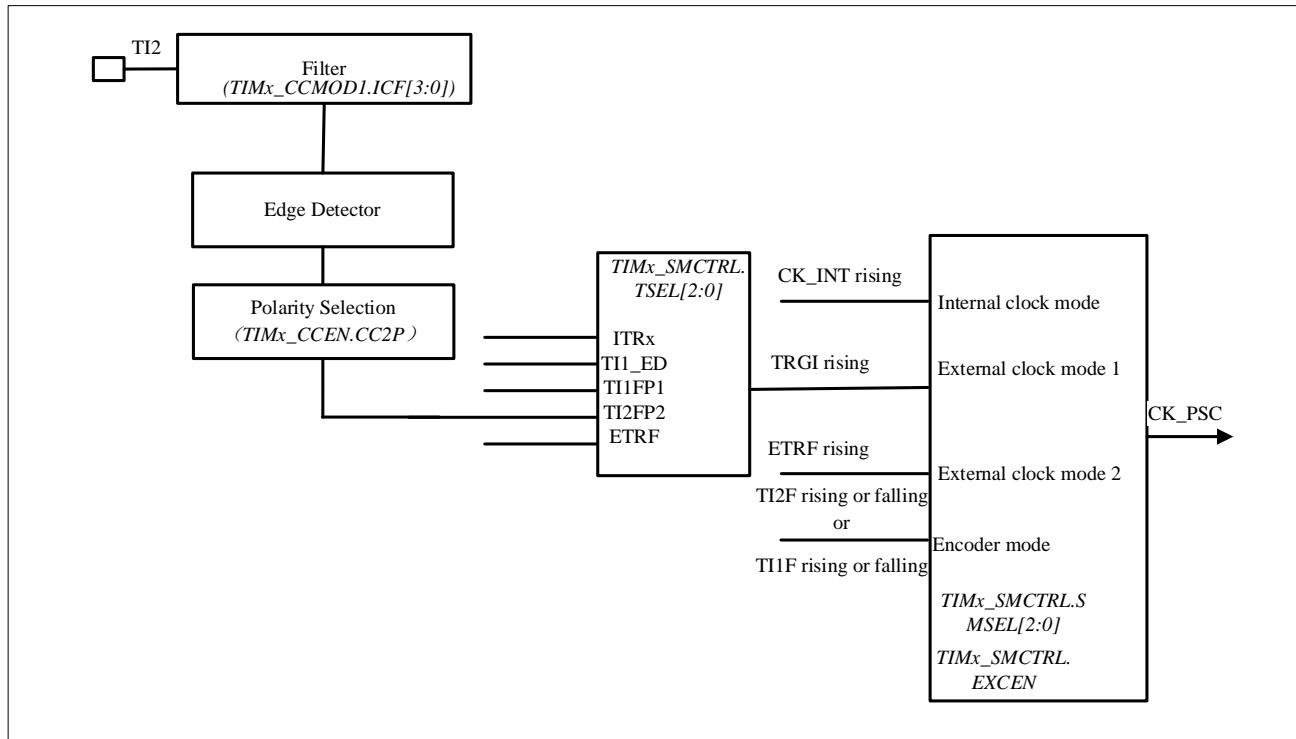
当 `TIMx_SMCTRL.SMSEL` 等于“000”时, 从模式控制器被禁用。这三个控制位 (`TIMx_CTRL1.CNTEN`、`TIMx_CTRL1.DIR`、`TIMx_EVTGEN.UDGN`) 只能由软件改变 (`TIMx_EVTGEN.UDGN` 除外, 它保持自动清零)。前提是 `TIMx_CTRL1.CNTEN` 位被软写为'1', 预分频器的时钟源由内部时钟 CK_INT 提供。

图 11-11 正常模式下的控制电路, 内部时钟除以 1



11.3.4.2 外部时钟源模式 1

图 11-12 TI2 外部时钟连接示例



通过配置 $\text{TIMx_SMCTRL.SMSEL}=111$ 选择该模式。计数器可以配置为在所选输入的时钟上升沿或下降沿进行计数。

例如，配置向上计数模式在 TI2 输入的时钟上升沿计数，配置步骤如下：

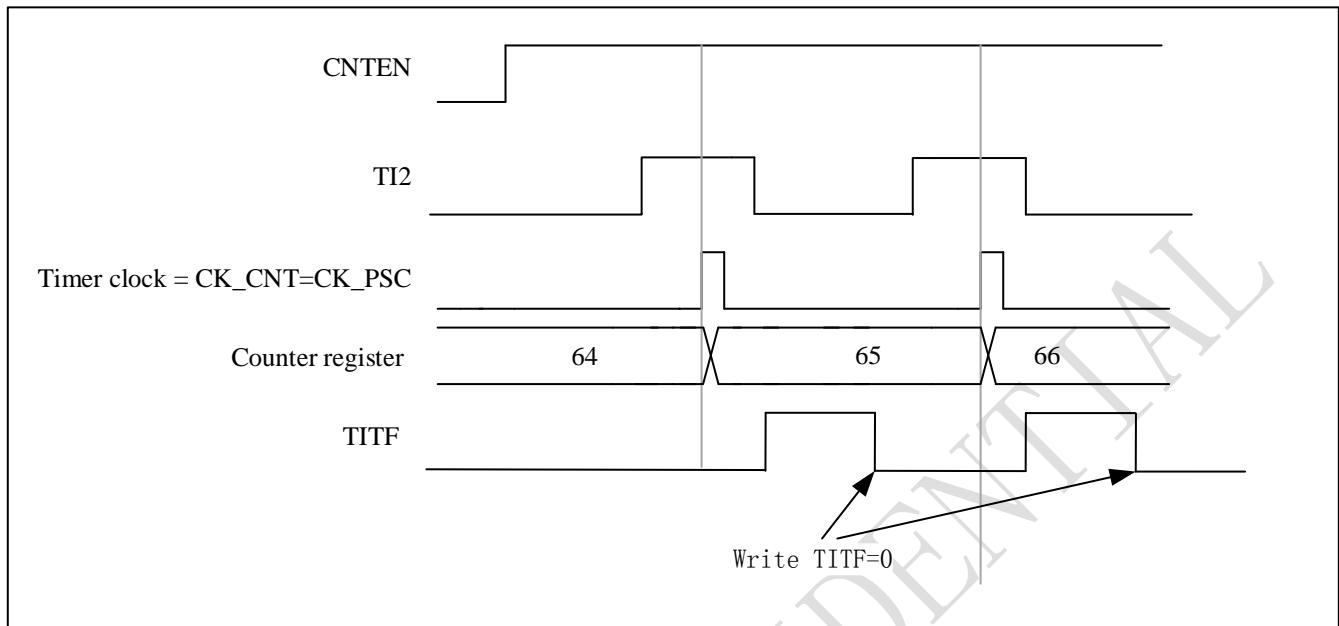
- 配置 $\text{TIMx_CCMOD1.CC2SEL}$ 等于‘01’，CC2 通道配置为输入，IC2 映射到 TI2
- 配置 TIMx_CCEN.CC2P 等于‘0’，选择时钟上升沿极性
- 通过配置 $\text{TIMx_CCMOD1.IC2F[3:0]}$ 选择输入滤波器带宽（如果不需滤波器，保持 IC2F 位为‘0000’）
- 配置 TIMx_SMCTRL.SMSEL 等于‘111’，选择定时器外部时钟模式 1
- 配置 TIMx_SMCTRL.TSEL 等于‘110’，选择 TI2 作为触发输入源
- 配置 TIMx_CTRL1.CNTEN 等于 ‘1’ 以启动计数器

注意：捕获预分频器不用于触发，所以不需要配置

当定时器时钟的上升沿出现在 $\text{TI2}=1$ 时，计数器计数一次并且 TIMx_STS.TITF 标志被拉高。

TI2 的上升沿与计数器实际时钟之间的延迟取决于 TI2 输入端的再同步电路。

图 11-13 外部时钟模式 1 的控制电路

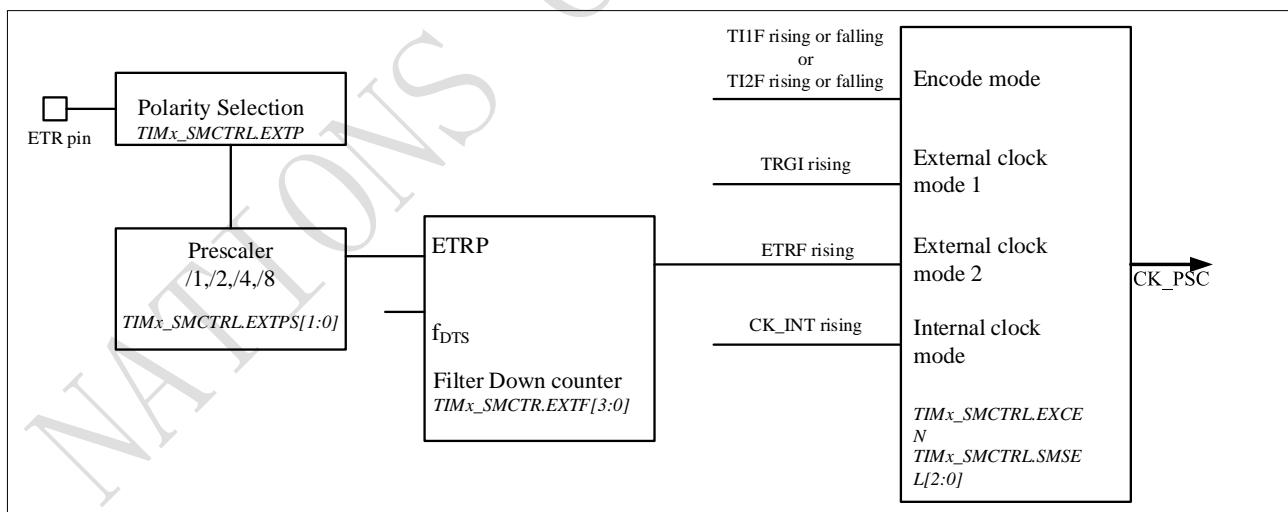


11.3.4.3 外部时钟源模式 2

此模式由 **TIMx_SMCTRL.EXCEN** 选择等于 1。计数器可以在外部触发输入 ETR 的每个上升沿或下降沿计数。

下图为外部时钟源模式 2 的外部触发输入模块示意图。

图 11-14 外部触发输入框图



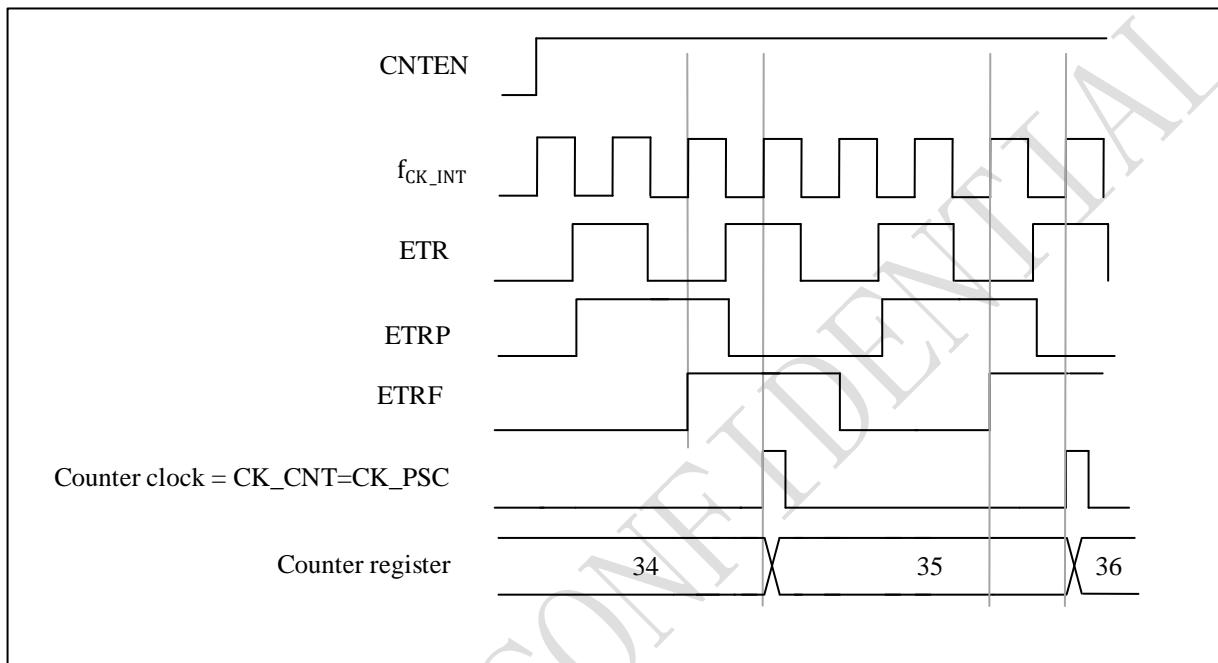
例如，使用以下配置步骤使向上计数器在 ETR 上每 2 个上升沿计数一次。

- 由于在这种情况下不需要过滤器，因此使 **TIMx_SMCTRL.EXTF[3:0]** 等于‘0000’
- 通过使 **TIMx_SMCTRL.EXTPS[1:0]** 等于 ‘01’ 来配置预分频器
- 通过设置 **TIMx_SMCTRL.EXTP** 等于‘0’来选择 ETR 引脚的极性，ETR 的上升沿有效

- 外部时钟模式 2 通过设置 `TIMx_SMCTRL.EXCEN` 等于‘1’来选择
- 通过设置 `TIMx_CTRL1.CNTEN` 等于“1”启动计数器。

计数器每 2 个 ETR 上升沿计数一次。ETR 的上升沿与计数器的实际时钟之间的延迟是由于 ETRP 信号上的再同步电路造成的。

图 11-15 外部时钟模式 2 的控制电路

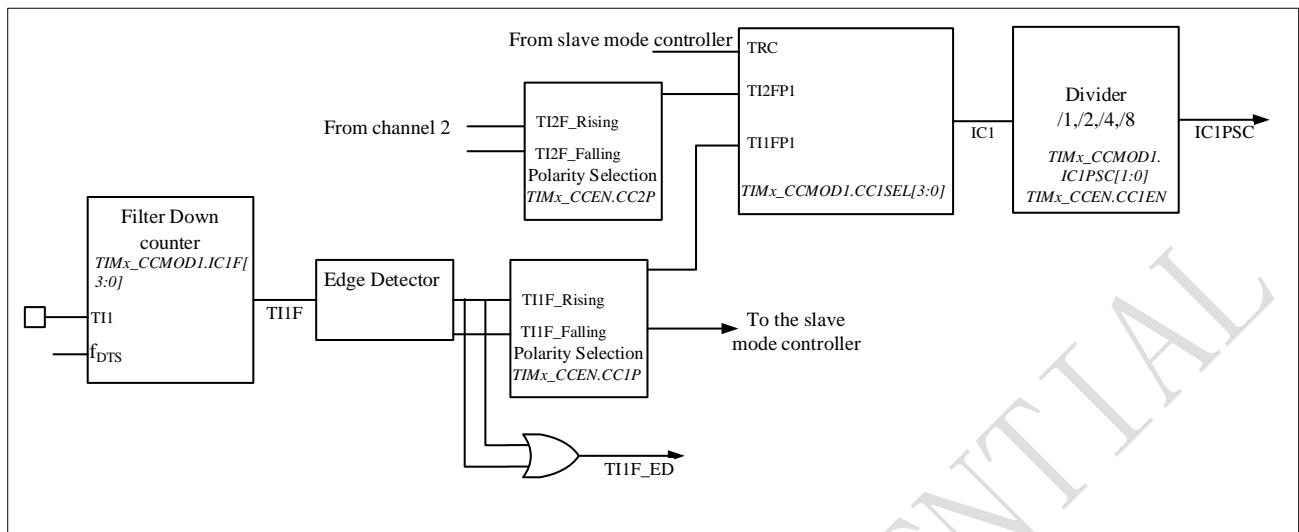


11.3.5 捕获/比较通道

捕获/比较通道包括捕获/比较寄存器和影子寄存器。输入部分由数字滤波器、多路复用器和预分频器组成。输出部分包括比较器和输出控制。

输入信号 `TIx` 被采样和滤波以产生信号 `TIxF`。然后由极性选择功能的边沿检测器生成信号 (`TIxF_rising` 或 `TIxF_falling`)，其极性由 `TIMx_CCEN.CCxP` 位选择。该信号可用作从模式控制器的触发输入。同时，信号 `ICx` 经过分频后送入捕获寄存器。下图显示了捕获/比较通道的框图。

图 11-16 捕获/比较通道（例如：通道 1 输入级）



输出部分生成一个中间波形 OCxRef (高电平有效) 作为参考。极性作用在链的末端。

图 11-17 捕获/比较通道 1 主电路

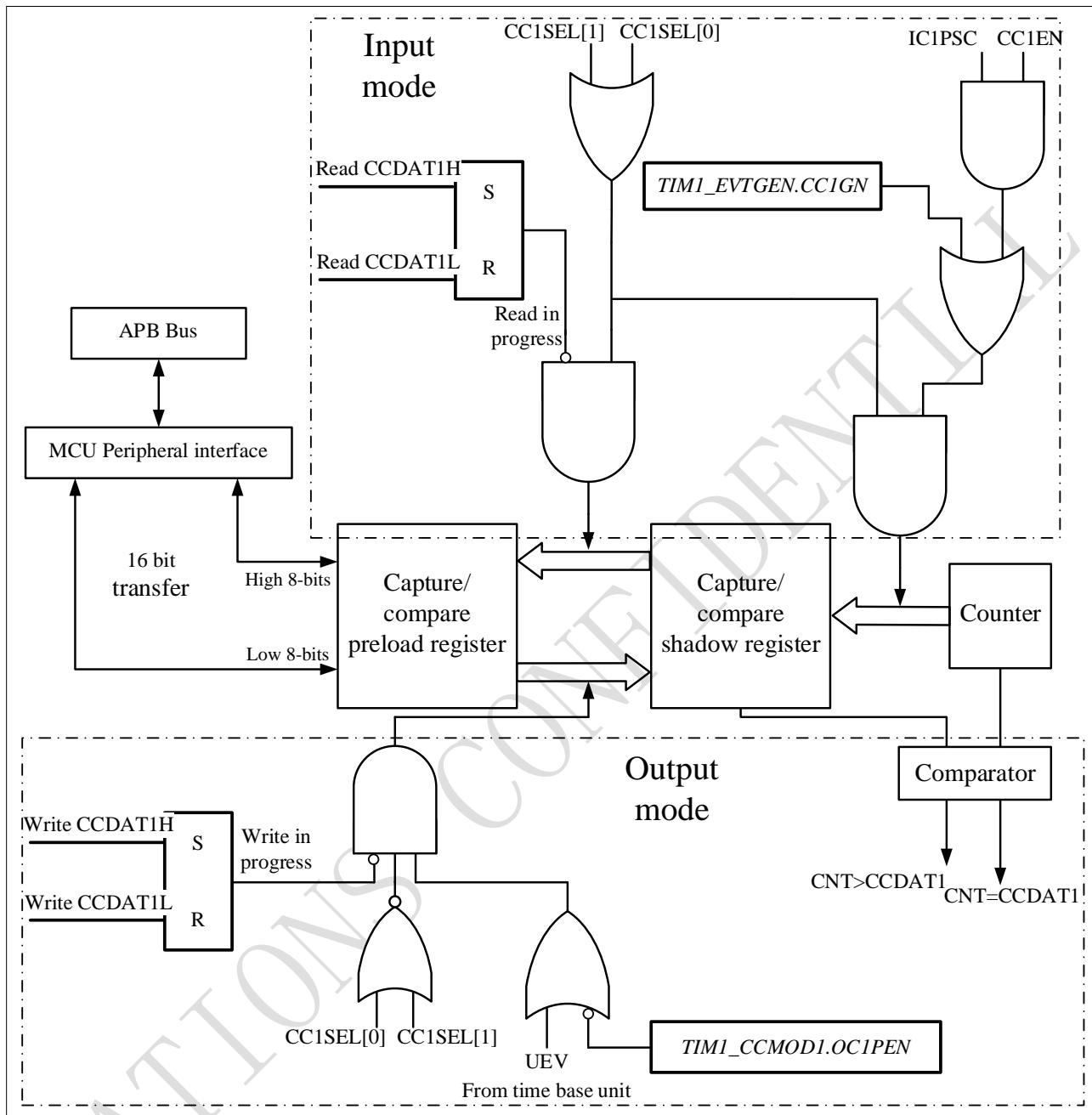


图 11-18 通道 x 的输出部分 (x= 1,2,3; 以通道 1 为例子)

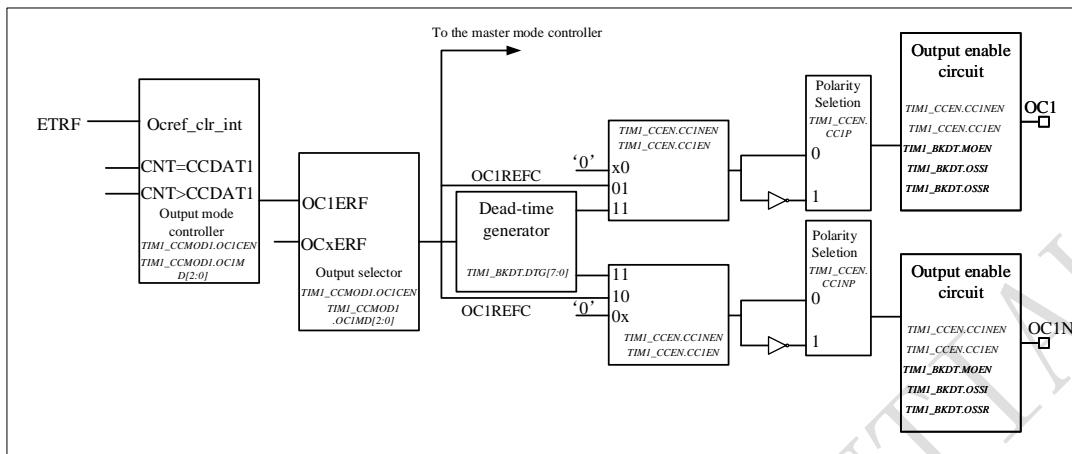
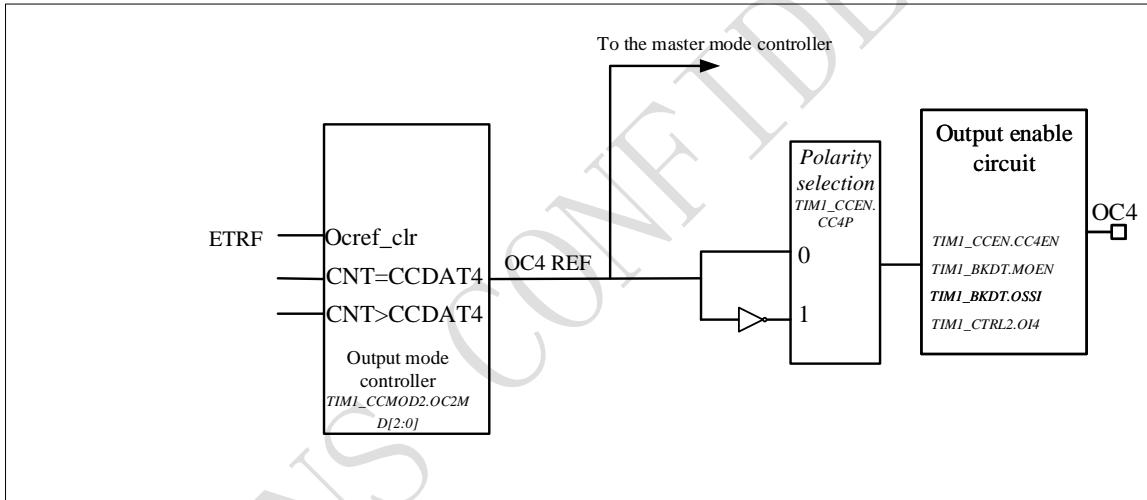


图 11-19 通道 x 的输出部分 (x= 4)



在捕获/比较时，读取和写入始终访问预加载的寄存器。两个具体工作流程如下：

在捕获模式下，捕获实际上是在影子寄存器中完成的，然后将影子寄存器中的值复制到预加载寄存器中。

在比较模式下，与捕获模式相反，预加载寄存器的值被复制到影子寄存器中，并与计数器进行比较。

11.3.6 输入捕获模式

在捕获模式下，`TIMx_CCDAFx` 寄存器用于在检测到 `ICx` 信号后锁存计数器值。

有一个捕获中断标志 `TIMx_STS.CCxITF`，如果相应的中断使能被拉高，它可以发出中断或 DMA 请求。

`TIMx_STS.CCxITF` 位在发生捕获事件时由硬件设置，并由软件或读取 `TIMx_CCDAFx` 寄存器清零。

当 `TIMx_CCDAFx` 寄存器中的计数器值被捕获并且 `TIMx_STS.CC1ITF` 被拉高时，重复捕获标志 `TIMx_STS.CCxOCF` 设置为 1。与前者不同，`TIMx_STS.CCxOCF` 通过向其写入 0 来清除。

为实现 TI1 输入的上升沿将计数器值捕获到 `TIMx_CCDA1` 寄存器中，配置流程如下：

- 选择有效输入：

将 `TIMx_CCMOD1.CC1SEL` 配置为“01”。此时输入为 CC1 通道，IC1 映射到 TI1。

- 编程所需的输入滤波器持续时间：

通过配置 `TIMx_CCMODx.ICxF` 位来定义 TI1 输入的采样频率和数字滤波器的长度。示例：如果输入信号抖动多达 5 个内部时钟周期，我们必须选择比这 5 个时钟周期更长的滤波器持续时间。当检测到具有新电平的 8 个连续样本（以 f_{DTS} 频率采样）时，我们可以验证 TI1 上的转换。然后配置 `TIMx_CCMOD1.IC1F` 到“0011”

- 通过配置 `TIMx_CCEN.CC1P=0`，选择上升沿作为 TI1 通道的有效跳变极性
- 配置输入预分频器。在本例中，配置 `TIMx_CCMOD1.IC1PSC=‘00’` 以禁用预分频器，因为我们想要捕获每个有效转换
- 通过配置 `TIMx_CCEN.CC1EN = ‘1’` 启用捕获。

如果要使能 DMA 请求，可以配置 `TIMx_DINTEN.CC1DEN=1`。如果要使能相关中断请求，可以配置 `TIMx_DINTEN.CC1IEN =1`。

11.3.7 PWM 输入模式

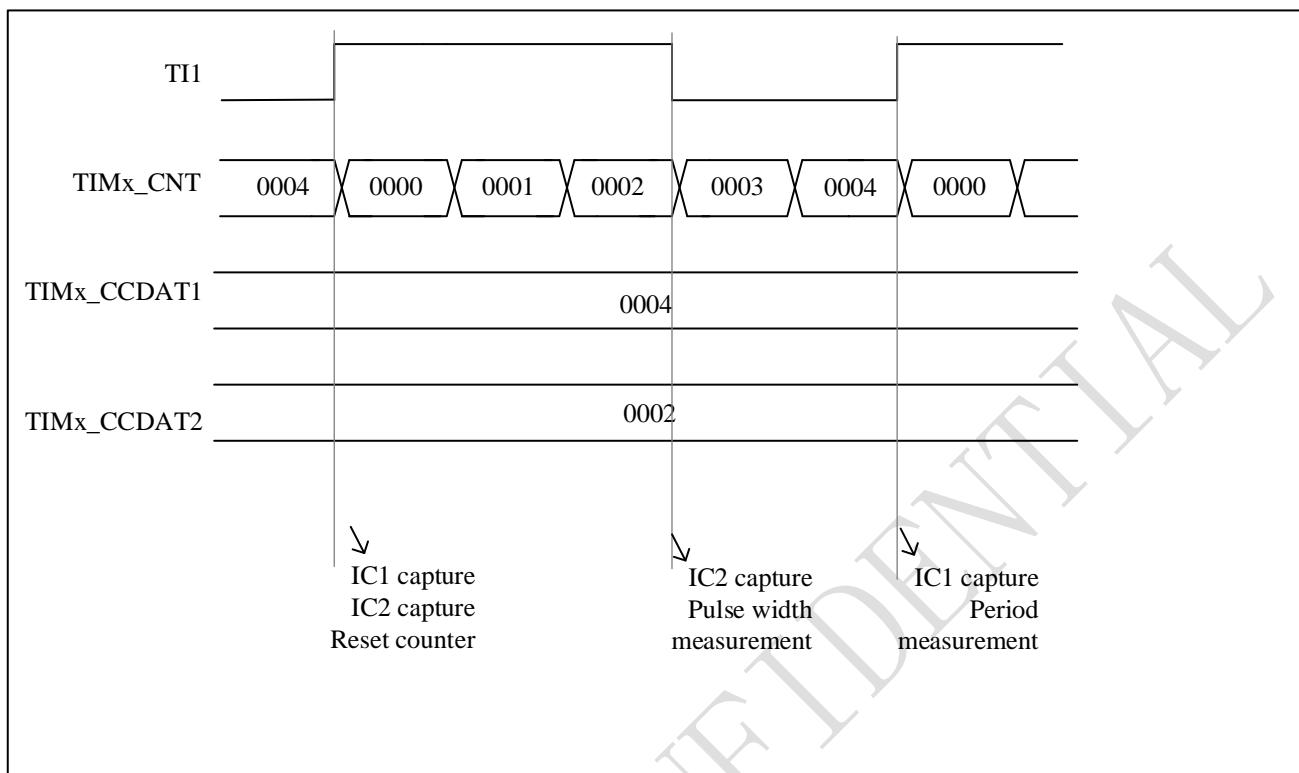
PWM 输入模式和普通输入捕获模式有一些区别，包括：

- 两个 ICx 信号映射到同一个 TIx 输入
- 两个 ICx 信号在极性相反的边沿有效
- 选择两个 TIxFP 信号之一作为触发输入
- 从机模式控制器配置为复位模式

例如，下面的配置流程可以用来知道 TI1 上 PWM 信号的周期和占空比（这取决于 CK_INT 的频率和预分频器的值）。

- 配置 `TIMx_CCMOD1.CC1SEL` 等于 ‘01’ 以选择 TI1 作为 `TIMx_CCDAT1` 的有效输入
- 配置 `TIMx_CCEN.CC1P` 等于 ‘0’ 选择滤波定时器输入 1(TI1FP1) 的有效极性，在上升沿有效
- 配置 `TIMx_CCMOD1.CC2SEL` 等于 ‘10’ 选择 TI1 作为 `TIMx_CCDAT2` 的有效输入
- 配置 `TIMx_CCEN.CC2P` 等于 1 选择滤波定时器输入 2(TI1FP2) 的有效极性，下降沿有效
- 配置 `TIMx_SMCTRL.TSEL=101` 选择 Filtered timer input 1 (TI1FP1) 作为有效触发输入
- 配置 `TIMx_SMCTRL.SMSEL=100` 配置从模式控制器为复位模式
- 配置 `TIMx_CCEN.CC1EN=1` 和 `TIMx_CCEN.CC2EN=1` 以启用捕获

图 11-20 PWM 输入模式时序



由于只有滤波器定时器输入 1(TI1FP1) 和滤波器定时器输入 2(TI2FP2) 连接到从模式控制器，因此 PWM 输入模式只能与 TIMx_CH1/TIMx_CH2 信号一起使用。

11.3.8 强制输出模式

在输出模式 (TIMx_CCMODx.CCxSEL=00) 下，软件可以直接将输出比较信号强制为有效或无效电平。

用户可以设置 TIMx_CCMODx.OCxMD=101 强制输出比较信号为有效电平。OCxREF 将被强制为高电平，OCx 得到与 CCxP 极性位相反的值。另一方面，用户可以设置 TIMx_CCMODx.OCxMD=100 强制输出比较信号为无效电平，即 OCxREF 被强制为低电平。

在此模式下，TIMx_CC DATx 影子寄存器和计数器的值仍然相互比较。

输出比较寄存器 TIMx_CC DATx 和计数器 TIMx_CNT 之间的比较对 OCxREF 没有影响。并且仍然可以设置标志。因此，仍然可以发送中断和 DMA 请求。

11.3.9 输出比较模式

用户可以使用此模式来控制输出波形，或指示一段时间已过。

当捕获/比较寄存器和计数器的值相同时，输出比较函数的操作如下：

- TIMx_CCMODx.OCxMD 为输出比较模式，TIMx_CCEN.CCxP 为输出极性。当比较匹配时，如果设置 TIMx_CCMODx.OCxMD=000，则输出管脚将保持其电平；如果设置 TIMx_CCMODx.OCxMD=001，则设置输出管脚有效；如果设置 TIMx_CCMODx.OCxMD=010，则输出管脚将为设置为无效；如果设置 TIMx_CCMODx.OCxMD=011，则输出引脚将设置为翻转。

- 设置 TIMx_STS.CCxITF
- 如果用户设置了 TIMx_DINTEN.CCxIEN，将产生相应的中断
- 如果用户设置 TIMx_DINTEN.CCxDEN 并设置 TIMx_CTRL2.CCDSEL 选择 DMA 请求，将发送 DMA 请求

用户可以设置 TIMx_CCMODx.OCxPEN 来选择是否使用捕获/比较预加载寄存器 (TIMx_CCDATx) 来选择捕获/比较影子寄存器。

时间分辨率是计数器的一个计数周期。

在单脉冲模式下，输出比较模式也可用于输出单脉冲。

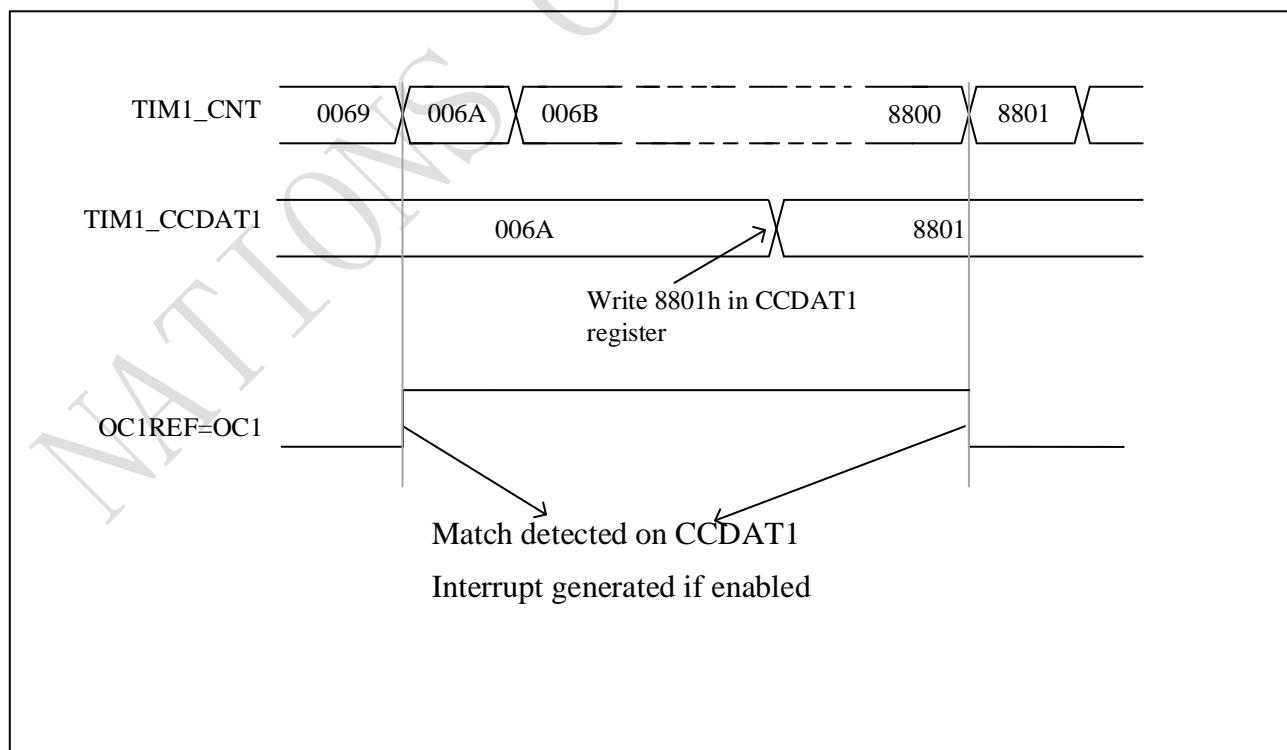
以下是输出比较模式的配置步骤：

- 首先，用户应该选择计数器时钟
- 其次，用所需数据设置 TIMx_AR 和 TIMx_CCDATx
- 如果用户需要产生中断，设置 TIMx_DINTEN.CCxIEN
- 然后通过设置 TIMx_CCEN.CCxP、TIMx_CCMODx.OCxMD、TIMx_CCEN.CCxEN 等选择输出模式
- 最后，设置 TIMx_CTRL1.CNTEN 启用计数器

用户可以随时通过设置 TIMx_CCDATx 来更新输出波形，只要不启用预加载寄存器。否则，TIMx_CCDATx 影子寄存器将在下一次更新事件中更新。

例如：

图 11-21 输出比较模式，开启 OC1



11.3.10 PWM 模式

用户可以使用 PWM 模式产生一个信号，其占空比由 TIMx_CCDATx 寄存器的值决定，其频率由 TIMx_AR 寄存器的值决定。并且取决于 TIMx_CTRL1.CAMSEL 的值，TIM 可以在边沿对齐模式或中央对齐模式下产生 PWM 信号。

用户可以通过设置 TIMx_CCMODx. OCxMD=110 或设置 TIMx_CCMODx.OCxMD=111 来设置 PWM 模式 1 或 PWM 模式 2。要使能预加载寄存器，用户必须设置相应的 TIMx_CCMODx.OCxPEN。然后设置 TIMx_CTRL1.AR PEN 自动重装载预加载寄存器。

用户可以通过设置 TIMx_CCEN.CCxP 来设置 OCx 的极性。另一方面，要使能 OCx 的输出，用户需要在 TIMx_CCEN 和 TIMx_BKDT 中设置 CCxEN、CCxNEN、MOEN、OSSI 和 OSSR 的值的组合。

当 TIM 处于 PWM 模式时，TIMx_CNT 和 TIMx_CCDATx 的值总是相互比较。

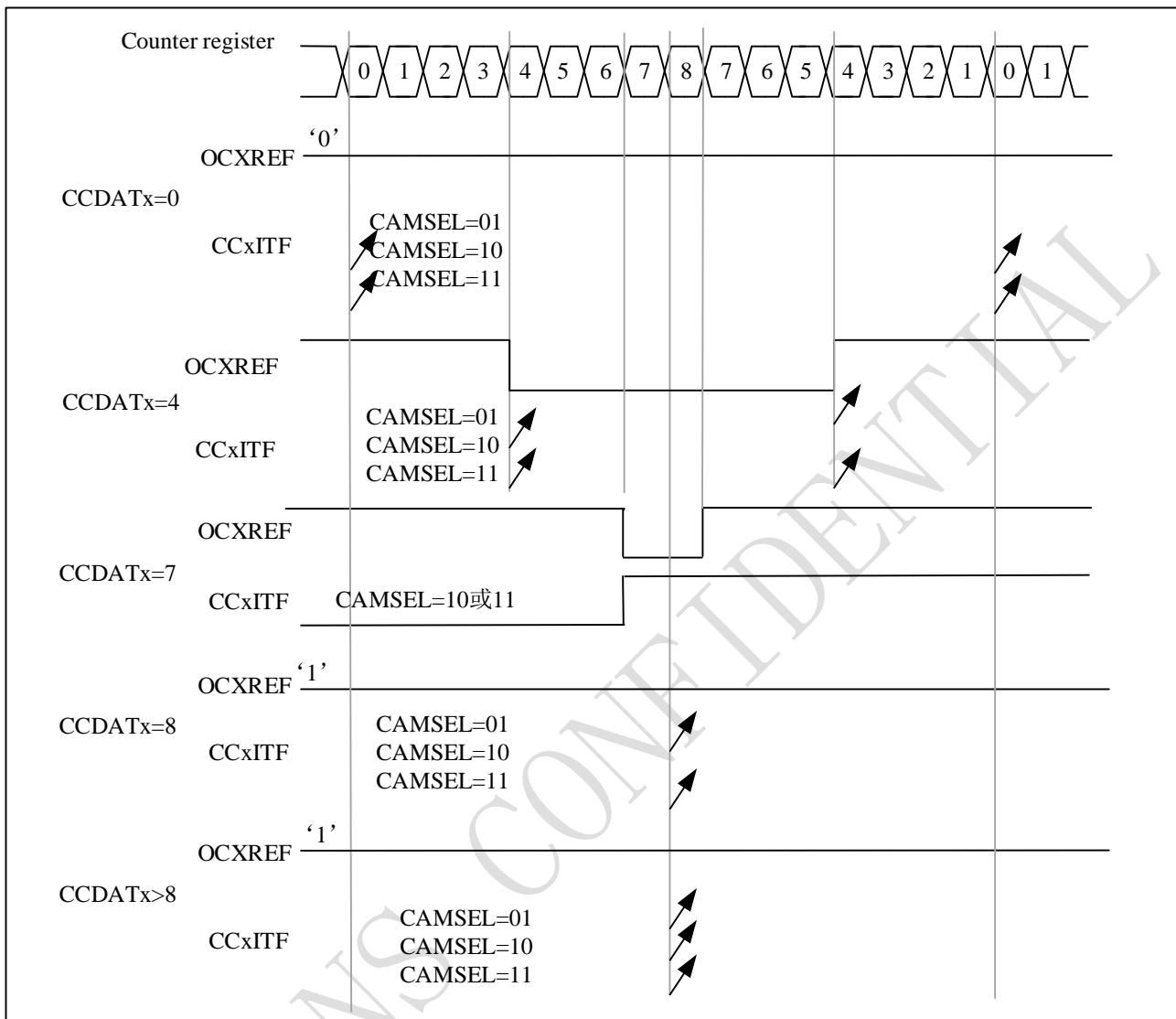
只有当更新事件发生时，预加载寄存器才会转移到影子寄存器。因此，用户必须在计数器开始计数之前通过设置 TIMx_EVTGEN.UDGN 来复位所有寄存器。

11.3.10.1 PWM 中央对齐模式

如果用户设置 TIMx_CTRL1.CAMSEL 等于 01、10 或 11，PWM 中央对齐模式将被激活。比较标志的设置取决于 TIMx_CTRL1.CAMSEL 的值。设置比较标志的情况有 3 种，仅当计数器向上计数时，仅当计数器向下计数时，或当计数器向上计数和向下计数时。用户不应通过软件修改 TIMx_CTRL1.DIR，它是由硬件更新的。

中央对齐 PWM 波形示例如下，波形设置为：TIMx_AR=8，PWM 模式 1，当计数器向下计数对应 TIMx_CTRL1.CAMSEL=01 时设置比较标志。

图 11-22 中央对齐的 PWM 波形 (AR=8)



使用中央对齐模式时用户应注意的事项如下：

- 计数器向上或向下计数取决于 TIMx_CTRL1.DIR 的值。注意不要同时更改 DIR 和 CAMSEL 位
- 用户在中央对齐模式下不要写计数器，否则会导致意想不到的结果。例如：
 - ◆ 如果写入计数器的值为 0 或者是 TIMx_AR 的值，则方向会被更新，但不会产生更新事件
 - ◆ 如果写入计数器的值大于自动重载的值，则方向不会更新
- 为了安全起见，建议用户在启动计数器之前设置 TIMx_EVTGEN.UDGN 以通过软件生成更新，并且在计数器运行时不要写入计数器

11.3.10.2 PWM 边沿对齐模式

边沿对齐模式有两种配置，向上计数和向下计数。

- 向上计数

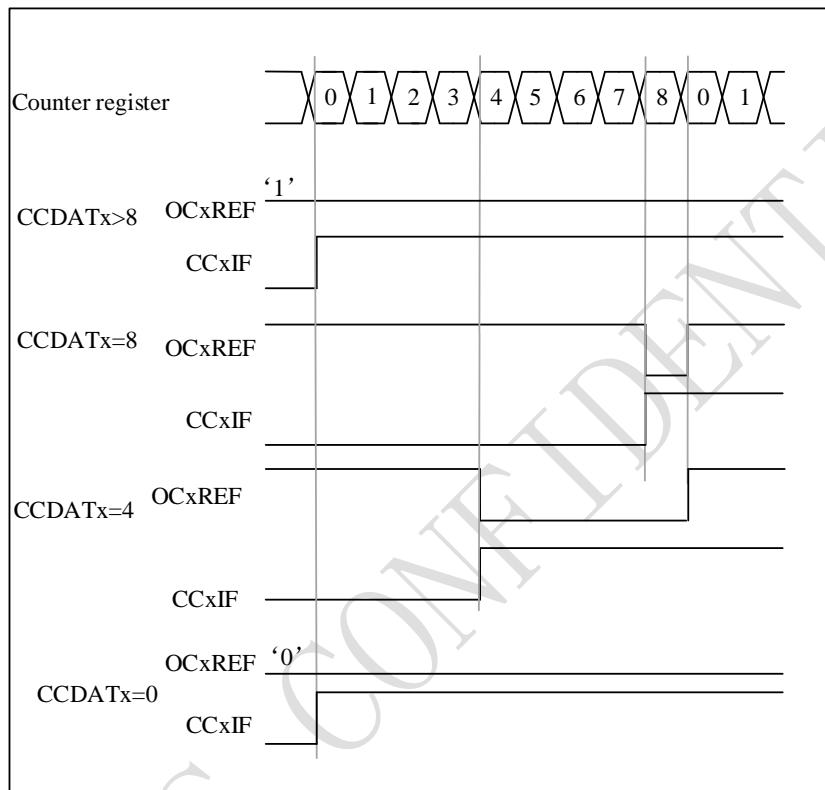
用户可以设置 TIMx_CTRL1.DIR=0 使计数器向上计数。

PWM 模式 1 的示例：

当 $\text{TIMx_CNT} < \text{TIMx_CCDAtx}$ 时, OCxREF 为高电平, 否则为低电平。如果 TIMx_CCDAtx 中的比较值大于自动重载值, 则 OCxREF 将保持为 1。相反, 如果比较值为 0, 则 OCxREF 将保持为 0。

当 $\text{TIMx_AR}=8$ 时, PWM 波形如下:

图 11-23 边沿对齐 PWM 波形 (AR=8)



- 向下计数

用户可以设置 $\text{TIMx_CTRL1.DIR} = 1$ 使计数器向下计数。

PWM 模式 1 的示例:

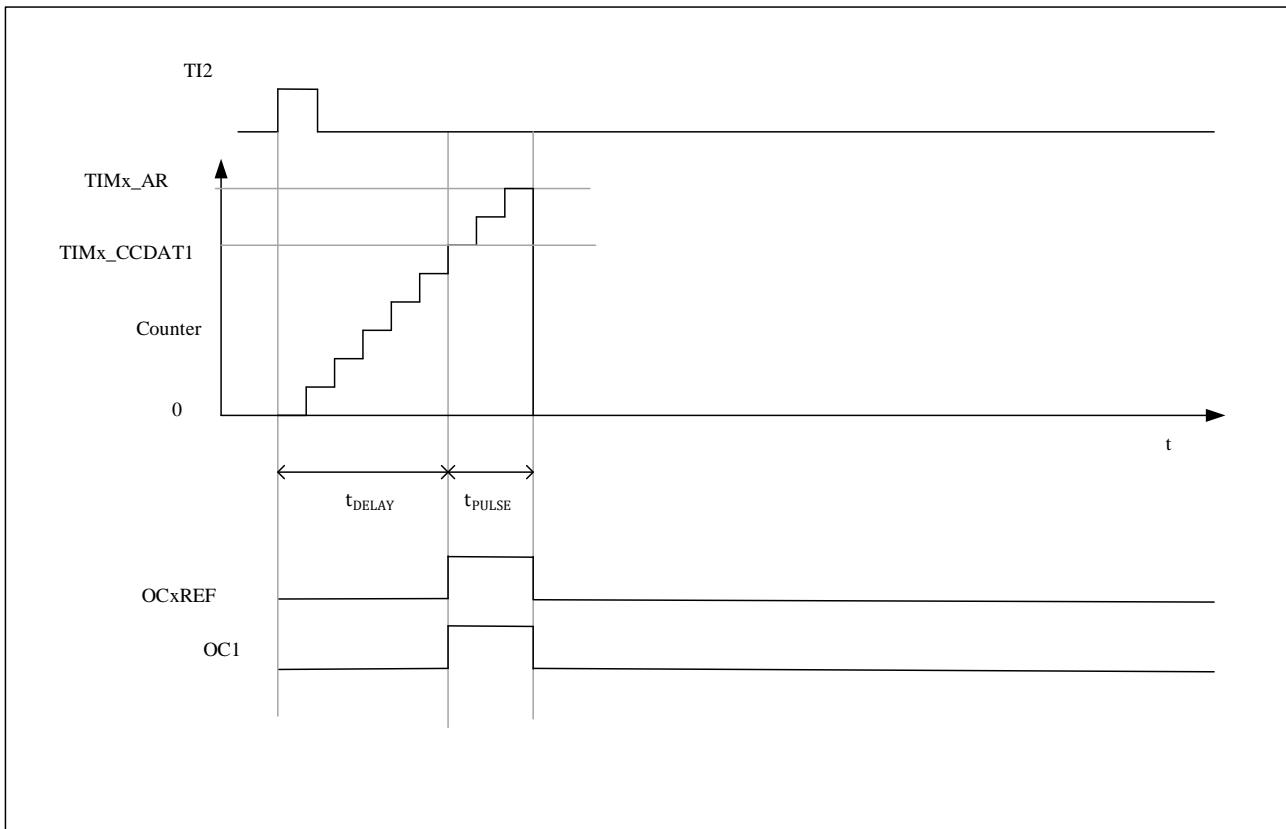
当 $\text{TIMx_CNT} > \text{TIMx_CCDAtx}$ 时, OCxREF 为低电平, 否则为高电平。如果 TIMx_CCDAtx 中的比较值大于自动重载值, 则 OCxREF 将保持为 1。

注：若第 n 个 PWM 周期 $CCDATx$ 影子寄存器 $\geq AR$ 值，第 $n+1$ 个 PWM 周期 $CCDATx$ 的影子寄存器值是 0。在第 $n+1$ 个 PWM 周期的计数器为 0 的时刻，虽然计数器 = $CCDATx$ 影子寄存器的值 = 0， $OCxREF = '0'$ ，但不会产生比较事件。

11.3.11 单脉冲模式

在单脉冲模式(ONEPM)中,接收到触发信号,经过可控延迟 t_{DELAY} 后产生脉宽可控的脉冲 t_{PULSE} 。输出模式需要配置为输出比较模式或 PWM 模式。选择单脉冲模式后,计数器会在更新事件 UEV 产生后停止计数。

图 11-24 单脉冲模式示例



以下是单脉冲模式的示例：

从 TI2 输入检测到上升沿触发，延迟 t_{DELAY} 后在 OC1 上产生宽度为 t_{PULSE} 的脉冲。

1. 计数器配置：向上计数，计数器 $TIMx_CNT < TIMx_CCDAT1 \leq TIMx_AR$ ；
2. TI2FP2 映射到 TI2, $TIMx_CCMOD1.CC2SEL = '01'$; TI2FP2 配置为上升沿检测, $TIMx_CCEN.CC2P = '0'$;
3. TI2FP2 充当从模式控制器的触发器 (TRGI) 并启动计数器, $TIMx_SMCTRL.TSEL = '110'$, $TIMx_SMCTRL.SMSEL = '110'$ (触发模式);
4. $TIMx_CCDAT1$ 写入要延迟的计数值 (t_{DELAY}), $TIMx_AR - TIMx_CCDAT1$ 为脉宽 t_{PULSE} 的计数值;
5. 配置 $TIMx_CTRL1.ONEPM=1$ 使能单脉冲模式, 配置 $TIMx_CCMOD1.OC1MD = '111'$ 选择 PWM2 模式;
6. 等待 TI2 有外部触发事件, OC1 输出一个单脉冲波形;

11.3.11.1 特殊情况：OCx 快速使能：

在单脉冲模式下，通过 TIx 输入检测到一个边沿，并触发计数器开始计数到比较值，然后输出一个脉冲。这些操作限制了可以达到的最小延迟 t_{DELAY} 。

您可以设置 $TIMx_CCMODx.OCxFEN=1$ 开启 OCx 快速使能，在触发上升沿后，OCxREF 信号将被强制转换为与比较匹配立即发生的电平相同的电平，而不管比较结果如何。OCxFEN 快速使能仅在通道模式配置为 PWM1 和 PWM2 模式时生效。

11.3.12 在外部事件上清除 OCxREF 信号

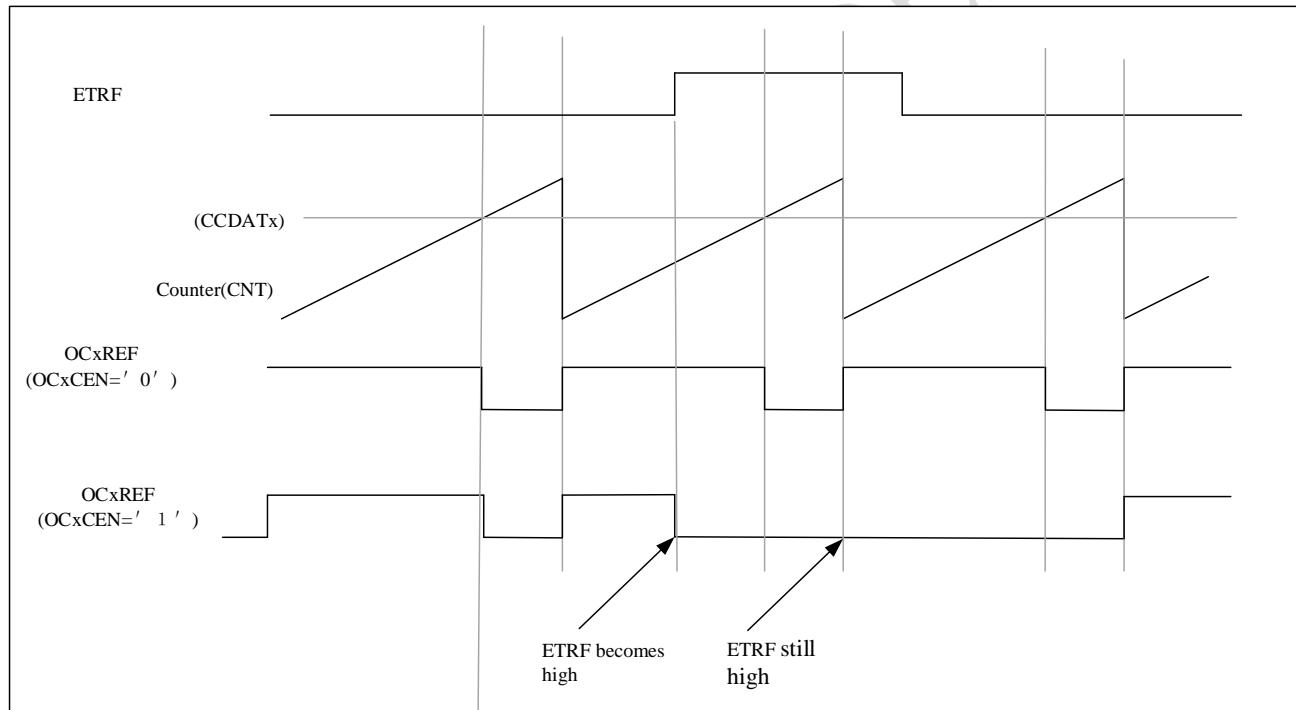
如果用户设置 `TIMx_CCMODx.OCxCEN=1`, `ETRF` 输入的高电平可用于驱动 `OCxREF` 信号为低电平, `OCxREF` 信号将保持低电平, 直到下一次 `UEV` 发生。只有输出比较和 `PWM` 模式可以使用该功能。在强制模式下不能使用。

例如: 为了控制电流, 用户可以将 `ETR` 信号连接到比较器的输出端, `ETR` 的操作如下:

- 设置 `TIMx_SMCTRL.EXTPS=00` 禁用外部触发预分频器。
- 设置 `TIMx_SMCTRL.EXCEN=0` 禁用外部时钟模式 2。
- 设置 `TIMx_SMCTRL.EXTP` 和 `TIMx_SMCTRL.EXTF`, 根据需要配置外触发极性和外触发滤波器。

例: 当 `ETRF` 输入变高时, `OCxREF` 信号对于不同的 `OCxCEN` 值的行为。在这种情况下, 定时器设置为 `PWM` 模式。

图 11-25 清除 TIMx 的 `OCxREF`



11.3.13 互补输出和死区插入

高级控制定时器可以输出两个互补信号, 并管理输出的关闭和打开。这称为死区时间。用户应根据连接到输出的设备及其特性调整死区时间。

用户可以通过设置 `TIMx_CCEN.CCxP` 和 `TIMx_CCEN.CCxNP` 来选择输出的极性。并且此选择对于每个输出都是独立的。

用户可以通过设置几个控制位的组合来控制互补信号 `OCx` 和 `OCxN`, 它们分别是 `TIMx_CCEN.CCxEN`、`TIMx_CCEN.CCxNEN`、`TIMx_BKDT.MOEN`、`TIMx_CTRL2.OIx`、`TIMx_CTRL2.OIxN`、`TIMx_BKDT.OSSI` 和 `TIMx_BKDT.OSSR`。当切换到空闲状态时, 死区时间将被激活。

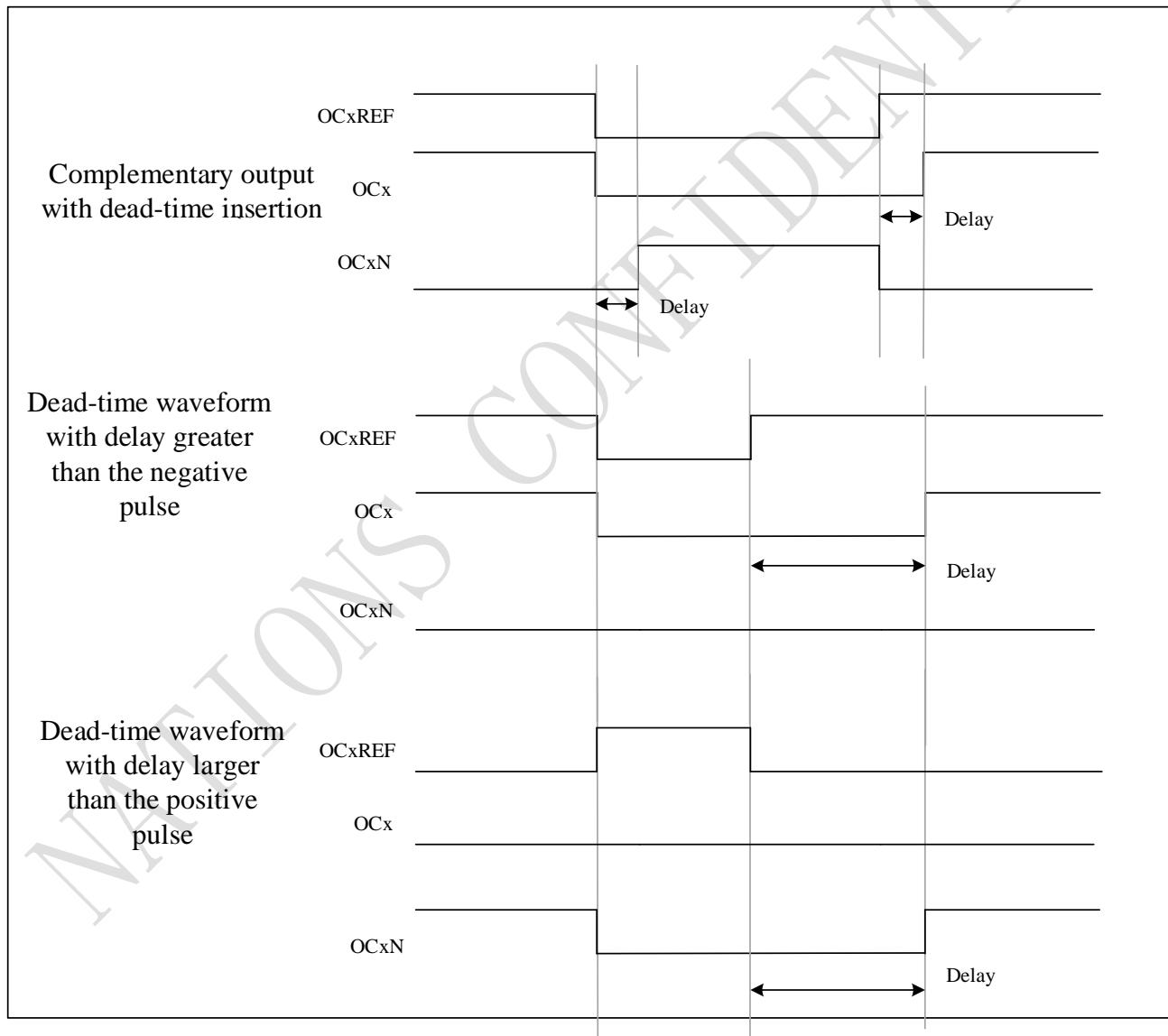
如果用户同时设置 `TIMx_CCEN.CCxEN` 和 `TIMx_CCEN.CCxNEN`, 则会插入死区时间。如果有刹车, 还要设置 `TIMx_BKDT.MOEN`。每个通道都有 10 位死区时间发生器。

参考波形 `OCxREF` 可以生成 2 个输出 `OCx` 和 `OCxN`。如果 `OCx` 和 `OCxN` 为高电平有效, 则 `OCx` 输出信号与参考信号相同, 而 `OCxN` 输出信号与参考信号相反。但是, `OCx` 输出信号将相对于参考上升沿延迟, 而 `OCxN` 输出信号将相对于参考下降沿延迟。如果延迟大于有效 `OCx` 或 `OCxN` 输出的宽度, 则不会产生相应的脉冲。

死区时间发生器的输出信号与参考信号 `OCxREF` 之间的关系如下。

假设 `TIMx_CCEN.CCxP=0`, `TIMx_CCEN.CCxNP=0`, `TIMx_BKDT.MOEN=1`, `TIMx_CCEN.CCxEN=1`, `TIMx_CCEN.CCxNEN=1`。

图 11-26 带死区插入的互补输出



用户可以设置 `TIMx_BKDT.DTGN` 来编程每个通道的死区时间延迟。

11.3.13.1 重定向 OCxREF 到 OCx 或 OCxN

在输出模式下，用户可以设置 `TIMx_CCEN.CCxEN` 和 `TIMx_CCEN.CCxNEN` 以将 `OCxREF` 重定向到 `OCx` 输出或 `OCxN` 输出。

这里有两种使用这个功能的方法。当互补保持在其无效电平时，用户可以使用此功能发送特定波形，例如 `PWM` 或静态有效电平。用户还可以使用此功能将两个输出设置为无效电平，或将两个输出都设置为有效，两者互补且带死区。

如果用户设置 `TIMx_CCEN.CCxEN=0` 和 `TIMx_CCEN.CCxNEN=1`，两者不互补，当 `OCxREF` 为高电平时 `OCxN` 将变为有效。另一方面，如果用户设置 `TIMx_CCEN.CCxEN=1` 和 `TIMx_CCEN.CCxNEN=1`，当 `OCxREF` 为高电平时，`OCx` 将变为有效。相反，当 `OCxREF` 为低电平时，`OCxN` 将变为有效。

11.3.14 刹车功能

使用刹车功能时，设置相应的控制位时会修改输出使能信号和无效电平。但是，无论何时，`OCx` 和 `OCxN` 的输出都不能同时处于有效电平，即需要满足 $(CCxP \wedge OIx) \wedge (CCxNP \wedge OIxN) = 0$ 。

当启用多个刹车信号时，每个刹车信号构成一个 `OR` 逻辑。这里有一些信号可能是刹车的来源。

- 刹车输入引脚
- 时钟失效事件，由时 RCC 中的时钟安全系统 (CSS) 生成。
- PVD 事件。
- 内核 Hardfault 事件。
- 比较器的输出信号（在比较器模块中配置，高电平刹车）。
- 软件设置 `TIMx_EVTGEN.BGN`。

复位后刹车电路将被禁用。`MOEN` 位将为低电平。用户可以设置 `TIMx_BKDT.BKEN` 来启用刹车功能。通过设置 `TIMx_BKDT.BKP` 可以选择刹车输入信号的极性。用户可以同时修改 `TIMx_BKDT.BKEN` 和 `TIMx_BKDT.BKP`。用户设置 `TIMx_BKDT.BKEN` 和 `TIMx_BKDT.BKP` 后，生效前有 1 个 APB 时钟周期延迟。因此，用户需要等待 1 个 APB 时钟周期才能读回写入位的值。

`MOEN` 的下降沿可以是异步的，所以在实际信号和同步控制位之间设置了一个再同步电路。该电路将导致异步和同步信号之间的延迟。当用户设置 `TIMx_BKDT.MOEN` 为低电平时，用户需要在读取该值之前插入一个延迟。因为写入了异步信号，但用户读取了同步信号。

刹车发生后的行为如下：

- `TIMx_BKDT.MOEN` 将被异步清除，然后输出将进入无效状态、空闲状态或复位状态。通过设置 `TIMx_BKDT.OSSI` 选择输出状态。即使 MCU 振荡器关闭，这也会生效。
- 一旦 `TIMx_BKDT.MOEN=0`，每个输出通道的输出将使用 `TIMx_CTRL2.OIx` 中编程的电平驱动。如果 `TIMx_BKDT.OSSI=0`，定时器将释放使能输出（由 GPIO 控制器接管），否则将保持高电平。
- 如果用户选择使用互补输出，TIM 的行为如下
 - 取决于极性，输出将首先设置为复位状态。它是一个异步选项，因此即使没有为计时器提供时钟，它仍然可以工作。
 - 如果仍然提供定时器时钟，死区发生器将重新激活，当 $(CCxP \wedge OIx) \wedge (CCxNP \wedge OIxN) = 0$ ，

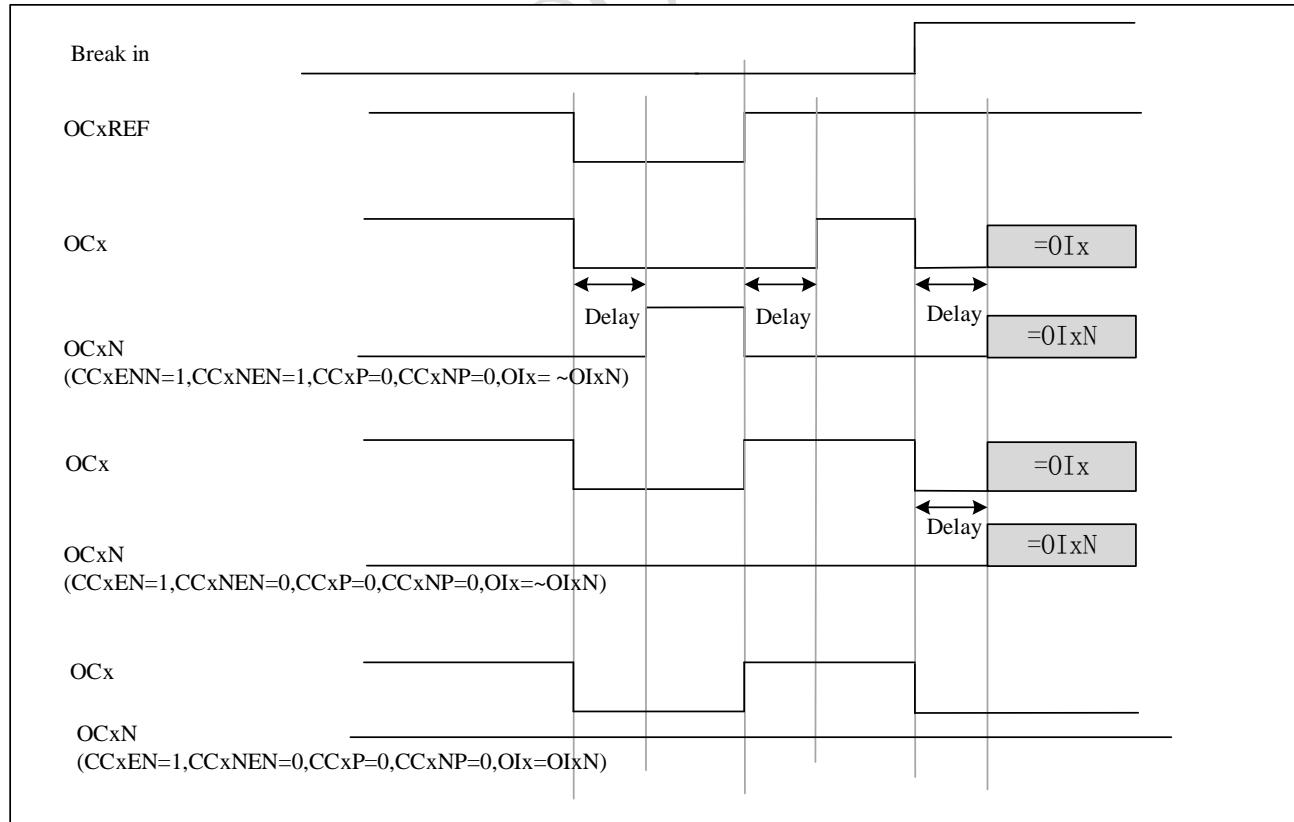
即 OCx 和 OCxN 仍然不能同时被驱动到有效电平，在死区时间后时根据 TIMx_CTRL2.OIx 和 TIMx_CTRL2.OIxN 的值驱动输出。请注意，由于 MOEN 上的重新同步（大概 2 个 ck_tim 周期），死区时间将比平时长。

- 如果 $\text{TIMx_BKDT.OSSI}=0$, 定时器将释放输出控制。否则, 如果使能输出为高电平, 它将保持为高电平。如果为低电平, 则在 TIMx_CCEN.CCxEN 或 TIMx_CCEN.CCxNEN 为高电平时变为高电平。
 - 如果 $\text{TIMx_DINTEN.BIEN}=1$, 当 $\text{TIMx_STS.BITF}=1$ 时, 会产生中断。
 - 如果用户设置了 TIMx_BKDT.AOEN , TIMx_BKDT.MOEN 将在下一次 UEV 发生时自动设置。用户可以使用它来调节。如果用户未设置 TIMx_BKDT.AOEN , 则 TIMx_BKDT.MOEN 将保持低电平, 直到再次设置为 1。在这种情况下, 用户可以使用它来保证安全。用户可以将刹车输入连接到热传感器、电源驱动器警报或其他安全组件。
 - 刹车输入有效时, TIMx_BKDT.MOEN 不能自动置位或软件同时置位, TIMx_STS.BITF 也不能清零。因为刹车输入在电平上处于有效状态。

为保证应用安全, 刹车电路具有写保护功能, 并有刹车输入输出管理。它允许用户冻结一些参数, 例如死区持续时间、OCx/OCxN 极性和禁用时的状态、OCxMD 配置、刹车启用和极性。用户可以通过设置 `TIMx_BKDT.LCKCFG` 选择使用 3 种保护级别之一。但是, `TIMx_BKDT.LCKCFG` 只能在 MCU 复位后写入一次。

响应刹车的输出行为示例如下

图 11-27 响应刹车的输出行为



11.3.15 调试模式

当微控制器处于调试模式 (Cortex-M4 内核停止) 时, 根据 `DBG_CTRL.TIMx_STOP` 配置, `TIMx` 计数器可以继续正常工作或停止。详见 26.4.3。

11.3.16 TIMx 定时器和外部触发的同步

`TIMx` 定时器可以通过从模式 (复位、触发和门控) 中的触发器进行同步。

11.3.16.1 从模式: 复位模式

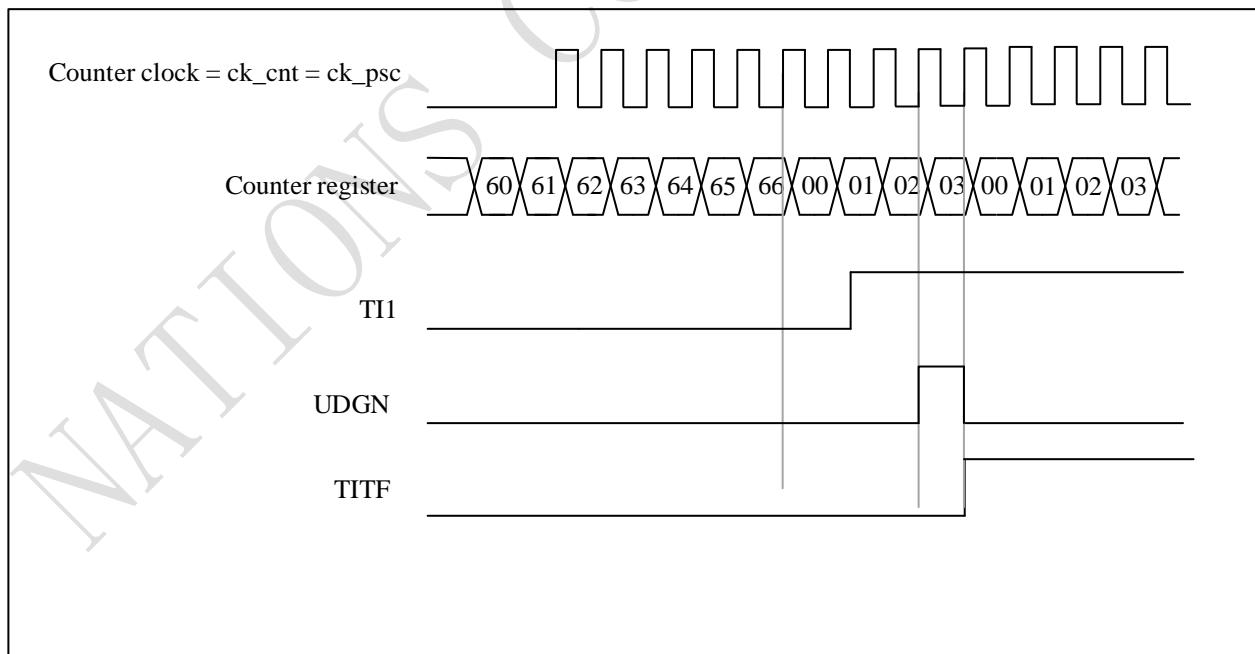
在复位模式下, 触发事件可以复位计数器和预分频器。更新预加载寄存器 `TIMx_AR`、`TIMx_CC DATx`, 并产生更新事件 `UEV` (`TIMx_CTRL1.UPRS=0`)。

以下是复位模式的示例:

1. 通道 1 配置为输入检测 `TI1` 的上升沿 (`TIMx_CCMOD1.CC1SEL=01`, `TIMx_CCEN.CC1P=0`);
2. 从模式选择为复位模式 (`TIMx_SMCTRL.SMSEL=100`), 触发输入选择为 `TI1` (`TIMx_SMCTRL.TSEL=101`);
3. 启动计数器 (`TIMx_CTRL1.CNTEN = 1`)

启动定时器后, 当 `TI1` 检测到上升沿时, 计数器复位并重新开始计数, 并设置触发标志 (`TIMx_STS.TITF=1`); `TI1` 的上升沿与实际计数器复位之间的延迟是由于 `TI1` 输入的重新同步电路引起的。

图 11-28 复位模式下的控制电路



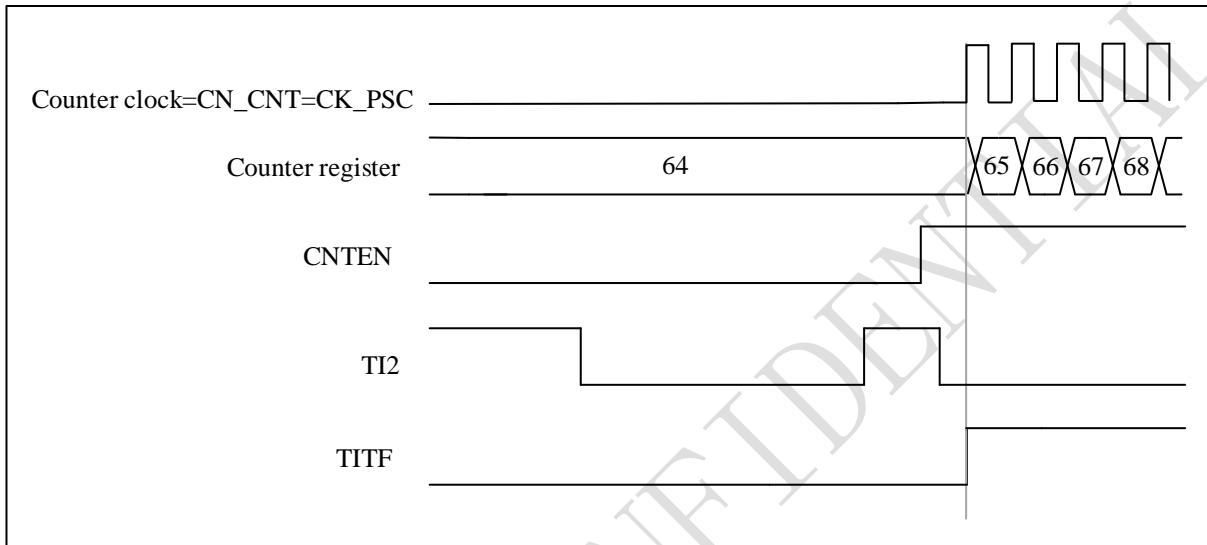
11.3.16.2 从模式: 触发模式

在触发模式下, 输入端口的触发事件 (上升沿/下降沿) 可以触发计数器开始计数。

以下是触发模式的示例:

1. 通道 2 配置为输入，检测 TI2 的上升沿 (TIMx_CCMOD1.CC2SEL=01, TIMx_CCEN.CC2P=0);
 2. 选择从模式为触发模式 (TIMx_SMCTRL.SMSEL=110), 触发输入选择 TI2 (TIMx_SMCTRL.TSEL=110);
- 当 TI2 检测到上升沿时，计数器开始计数，触发标志置位 (TIMx_STS.TITF=1);
 TI2 的上升沿与实际计数器启动之间的延迟是由于 TI2 输入的重新同步电路引起的。

图 11-29 触发器模式下的控制电路



11.3.16.3 从模式：门控模式

在门控模式下，输入端口的电平极性可以控制计数器是否计数。

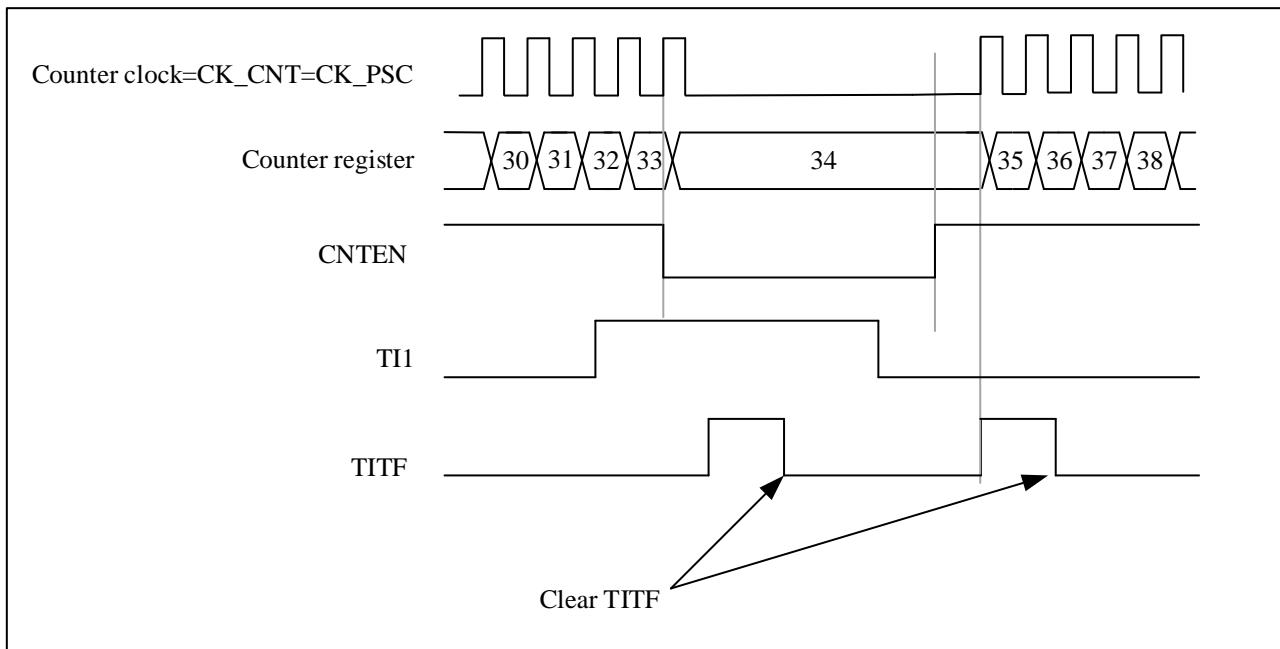
以下是门控模式的示例：

1. 通道 1 配置为 TI1 上的输入检测低电平有效 (TIMx_CCMOD1.CC1SEL=01, TIMx_CCEN.CC1P=1);
2. 选择从模式为门控模式 (TIMx_SMCTRL.SMSEL=101)，选择 TI1 作为 TRGI (TIMx_SMCTRL.TSEL=101);
3. 启动计数器 (TIMx_CTRL1.CNTEN = 1)

当 TI1 检测到电平由低变高时，计数器停止计数，当 TI1 检测到电平由高变低时，计数器开始计数，开始或停止计数时触发标志置位 (TIMx_STS.TITF=1);

TI1 的上升沿与实际计数器停止之间的延迟是由于 TI1 输入的重新同步电路引起的。

图 11-30 门控模式下的控制电路



11.3.16.4 从模式：触发模式 + 外部时钟模式 2

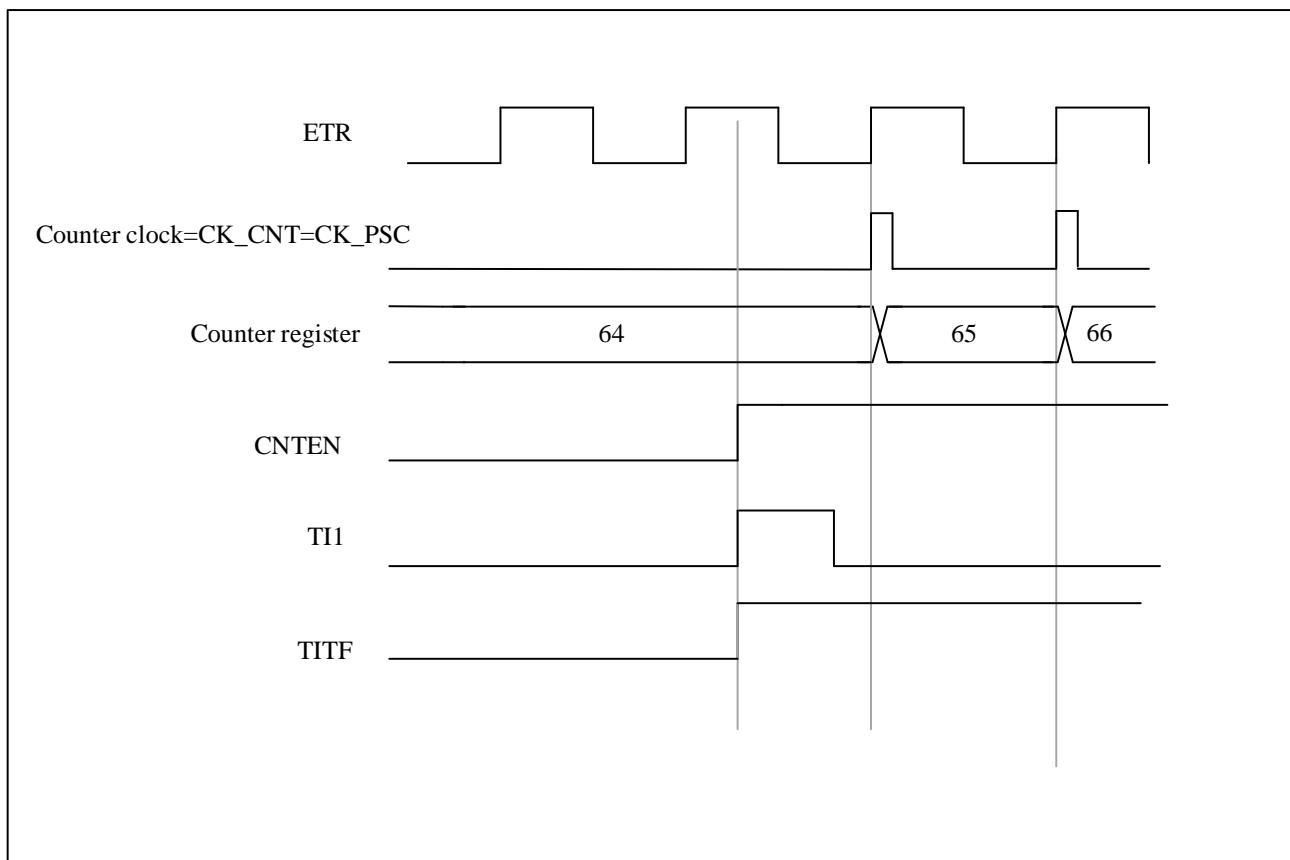
在复位模式、触发模式和门控模式下，计数器时钟可选择为外部时钟模式 2，ETR 信号作为外部时钟源输入。这时候触发选择需要选择非 ETRF (TIMx_SMCTRL.TSEL=111)。

这是一个例子：

1. 通道 1 配置为输入检测 TI1 的上升沿 (TIMx_CCMOD1.CC1SEL=01, TIMx_CCEN.CC1P=0);
2. 使能外部时钟模式 2 (TIMx_SMCTRL.EXCEN=1), 外部触发极性选择上升沿 (TIMx_SMCTRL.EXTP=0), 触发模式作为从模式 (TIMx_SMCTRL.SMSEL=110), TRGI 选择 TI1 (TIMx_SMCTRL.TSEL=101);

当 TI1 检测到上升沿时，计数器在 ETR 的上升沿开始计数，并设置触发标志 (TIMx_STS.TITF=1);

图 11-31 外部时钟模式 2+触发模式下的控制电路



11.3.17 定时器同步

所有 TIM 定时器在内部相连，用于定时器同步或链接。详见 12.3.14 章节。

11.3.18 产生六步 PWM 输出

为了同时修改所有通道的配置，可以提前设置下一步的配置（预加载位为 OCxMD、CCxEN 和 CCxNEN）。当发生 COM 换相事件时，OCxMD、CCxEN 和 CCxNEN 预加载位被传送到影子寄存器位。

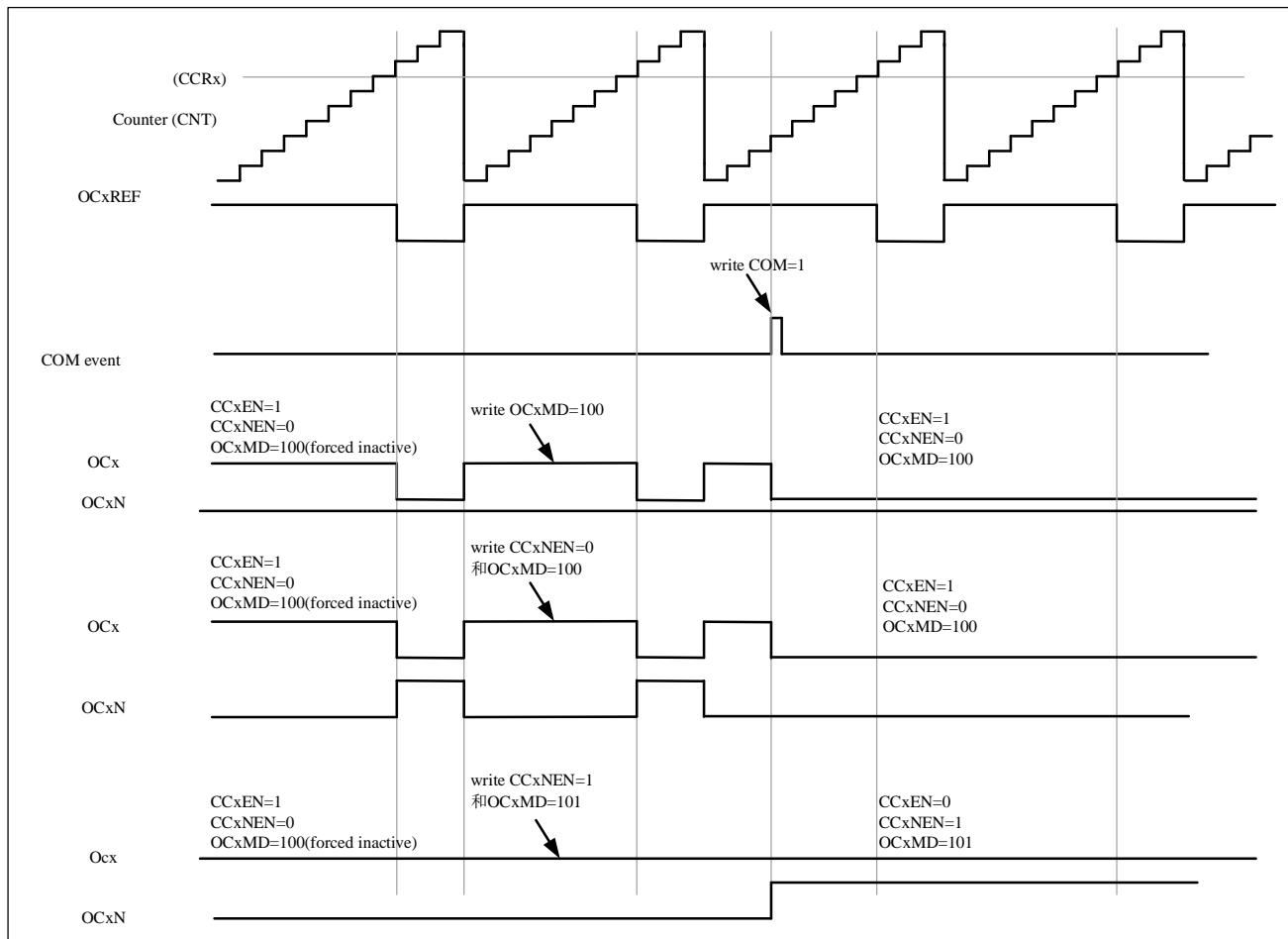
COM 换相事件生成方法：

1. 软件设置 TIMx_EVTGEN.CCUDGN；
2. 在 TRGI 的上升沿由硬件产生；

当 COM 换相事件发生时，TIMx_STS.COMITF 标志将被设置，启用中断 (TIMx_DINTEN.COMIEN) 将产生中断，启用 DMA 请求 (TIMx_DINTEN.COMDEN) 将产生 DMA 请求。

下图显示了三种不同配置下发生 COM 换向事件时 OCx 和 OCxN 的输出时序图：

图 11-32 产生六步 PWM，使用 COM 的例子 (OSSR=1)



11.3.19 编码器接口模式

编码器使用两个输入 TI1 和 TI2 作为接口，计数器对 TI1FP1 或 TI2FP2 上的每个边沿变化进行计数。计数方向由硬件 TIMx_CTRL1.DIR 自动控制。编码器计数模式共有三种：

1. 计数器只在 TI1 的边沿计数，TIMx_SMCTRL.SMSEL = '001'；
2. 计数器只在 TI2 的边沿计数，TIMx_SMCTRL.SMSEL = '010'；
3. 计数器同时在 TI1 和 TI2 的边沿计数，TIMx_SMCTRL.SMSEL = '011'；

编码器接口相当于使用带方向选择的外部时钟，计数器只在 0 和自动重载值 (TIMx_AR.AR [15:0]) 之间连续计数。因此，需要提前配置自动重载寄存器 TIMx_AR。

注意：编码器模式和外部时钟模式 2 不兼容，不能同时选择。

计数方向与编码器信号的关系如下表：

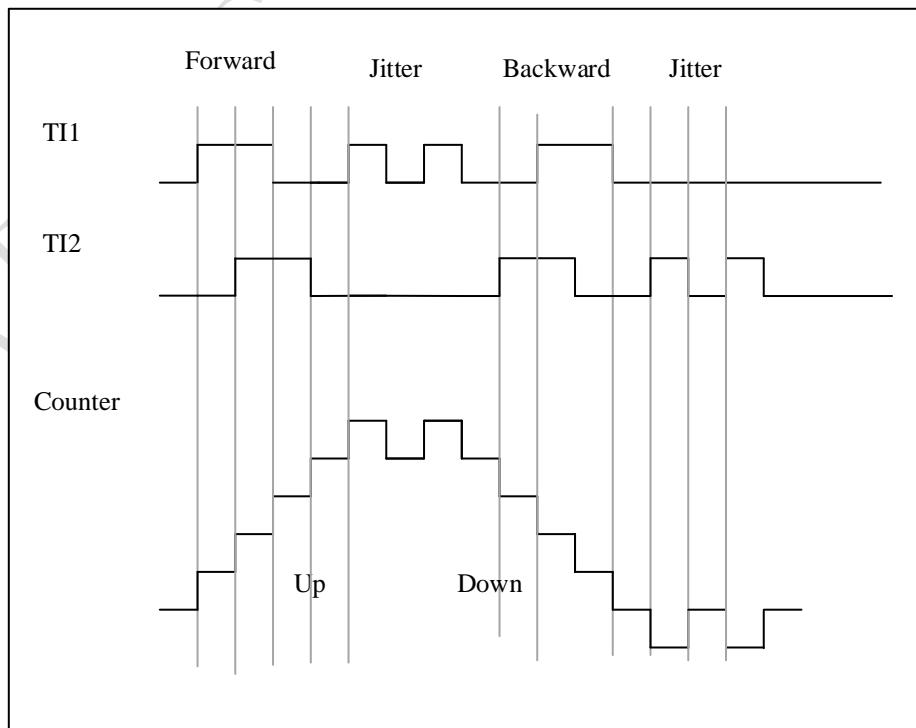
表 11-1 计数方向与编码器信号的关系

| 有效边沿 | 相对信号的电平 (TI1FP1对应TI2, TI2FP2对应TI1) | TI1FP1信号 | | TI2FP2信号 | |
|-------------|--|----------|------|----------|------|
| | | 上升 | 下降 | 上升 | 下降 |
| 仅在TI1计数 | 高 | 向下计数 | 向上计数 | 不计数 | 不计数 |
| | 低 | 向上计数 | 向下计数 | 不计数 | 不计数 |
| 仅在TI2计数 | 高 | 不计数 | 不计数 | 向上计数 | 向下计数 |
| | 低 | 不计数 | 不计数 | 向下计数 | 向上计数 |
| 在TI1和TI2上计数 | 高 | 向下计数 | 向上计数 | 向上计数 | 向下计数 |
| | 低 | 向上计数 | 向下计数 | 向下计数 | 向上计数 |

以下是选择了双边沿触发以抑制输入抖动的编码器示例：

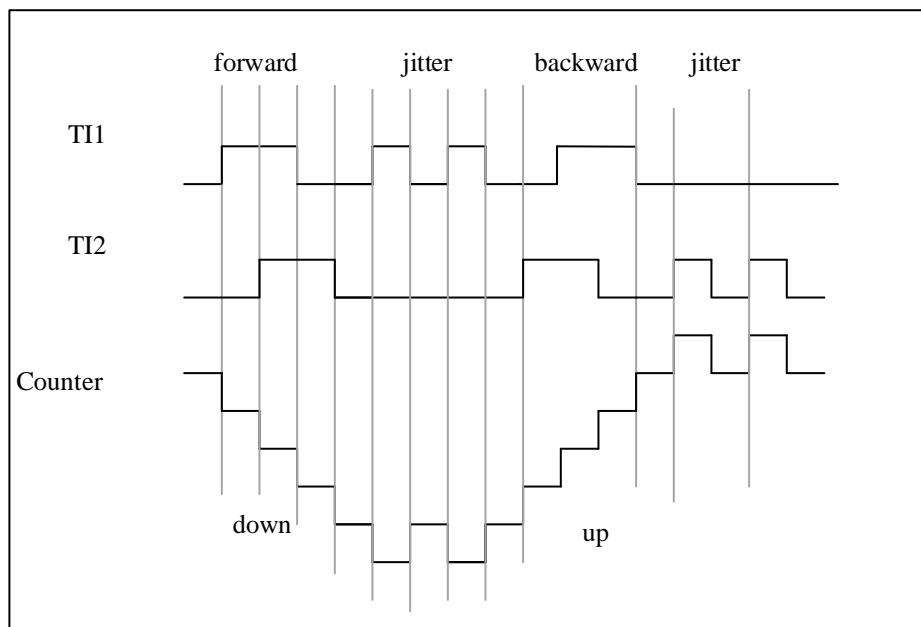
1. IC1FP1 映射到 TI1 (TIMx_CCMOD1.CC1SEL='01'), IC1FP1 不反相 (TIMx_CCEN.CC1P='0');
2. IC1FP2 映射到 TI2 (TIMx_CCMOD2.CC2SEL='01'), IC2FP2 不反相 (TIMx_CCEN.CC2P='0');
3. 输入在上升沿和下降沿均有效 (TIMx_SMCTRL.SMSEL='011');
4. 启用计数器 TIMx_CTRL1.CNTEN='1';

图 11-33 编码器模式下的计数器操作实例



下图为 IC1FP1 极性反转时的计数器行为示例 (CC1P='1', 其他配置同上)

图 11-34 IC1FP1 反相的编码器接口模式实例



11.3.20 与霍尔传感器的接口

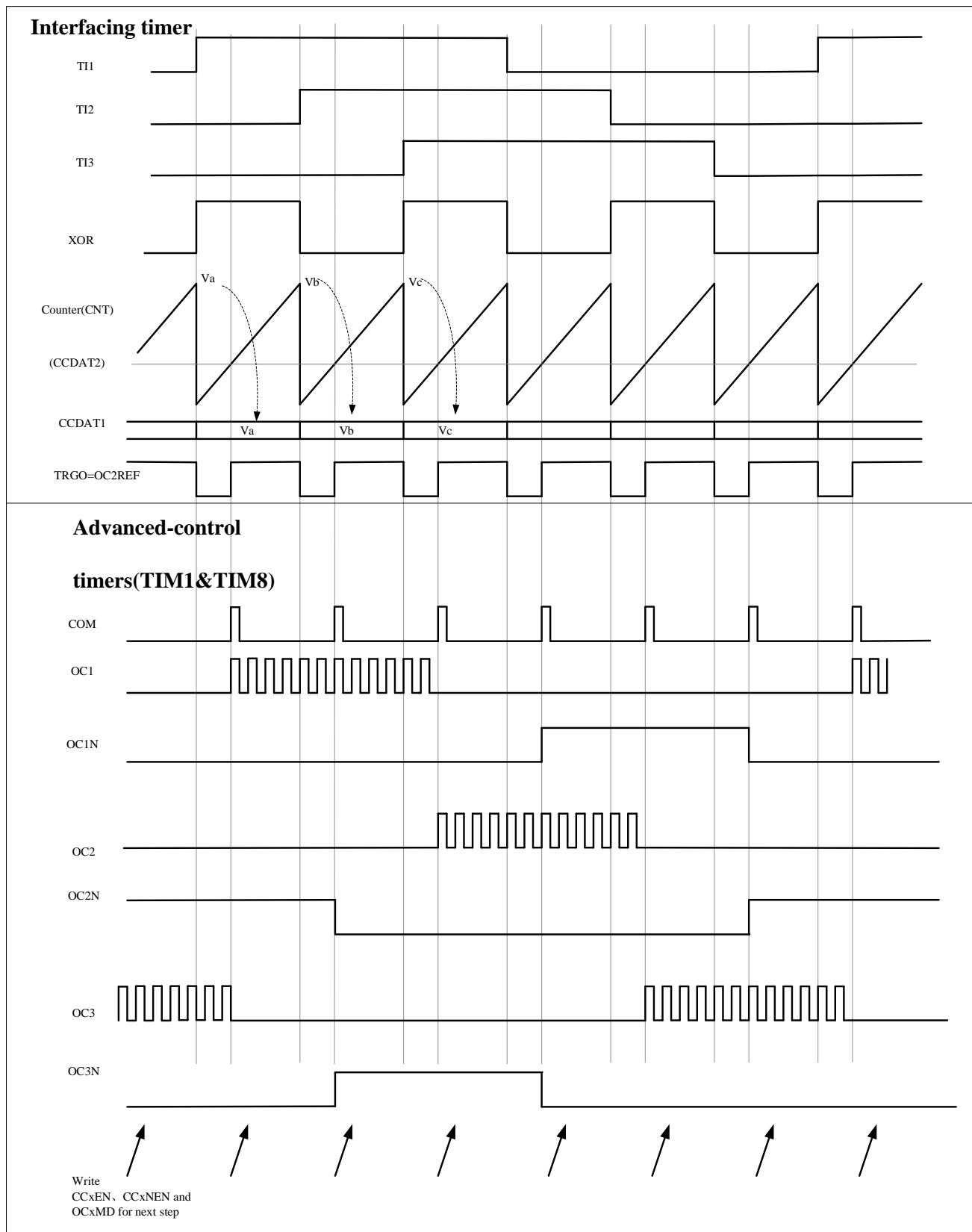
将霍尔传感器连接到定时器的三个输入引脚 (CC1、CC2 和 CC3)，然后选择异或功能将 TIMx_CH1、TIMx_CH2 和 TIMx_CH3 的输入通过异或门作为 TI1 的输出到通道 1 进行捕捉信号。

定时器需要配置为从模式下的复位模式 (TIMx_SMCTRL.SMSEL='100')；触发选择 TI1 的边沿触发 TI1F_ED (TIMx_SMCTRL.TSEL='100')，霍尔 3 输入的任何变化都会触发计数器重新计数，因此用作时间参考；捕获/比较通道 1 配置为捕获模式下的 TRC 信号 (TIMx_CCMOD1.CC1SEL='11')，用于计算两个输入时间间隔，从而反映电机速度。

选择定时器通道 2 向高级定时器输出脉冲，触发高级定时器的 COM 事件，更新输出 PWM 的控制位。高级定时器的触发选择需要选择对应的内部触发信号 (TIMx_SMCTRL.TSEL="ITRx")，捕获/比较预加载控制位需要配置为支持预加载 (TIMx_CTRL2.CCPCTL=1) 并支持上升沿 TRGI 边沿触发更新 (TIMx_CTRL2.CCUSEL=1)。

此示例如下图所示。

图 11-35 霍尔传感器接口的实例



11.4 TIMx 寄存器 (x=1,8)

关于在寄存器描述里面所用到的缩写，详见第 1.1 节。

可以用半字（16 位）或字（32 位）的方式操作这些外设寄存器。

11.4.1 寄存器总览

表 11-2 TIM1 和 TIM8 寄存器总览

| Offset | Register | 31 | 30 | 29 | 28 | 27 | 26 | 25 | 24 | 23 | 22 | 21 | 20 | 19 | 18 |
|--------|-------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| 000h | TIMx_CTRL1 | | | | | | | | | | | | | | |
| | Reset Value | | | | | | | | | | | | | | |
| 004h | TIMx_CTRL2 | | | | | | | | | | | | | | |
| | Reset Value | | | | | | | | | | | | | | |
| 008h | TIMx_SMCTRL | | | | | | | | | | | | | | |
| | Reset Value | | | | | | | | | | | | | | |
| 00Ch | TIMx_DINTEN | | | | | | | | | | | | | | |
| | Reset Value | | | | | | | | | | | | | | |
| 010h | TIMx_STS | | | | | | | | | | | | | | |
| | Reset Value | | | | | | | | | | | | | | |
| 014h | TIMx_EVTGEN | | | | | | | | | | | | | | |
| | Reset Value | | | | | | | | | | | | | | |
| 018h | TIMx_CCMOD1 | | | | | | | | | | | | | | |
| | Reset Value | | | | | | | | | | | | | | |
| 01Ch | TIMx_CCMOD1 | | | | | | | | | | | | | | |
| | Reset Value | | | | | | | | | | | | | | |
| 01Ch | TIMx_CCMOD2 | | | | | | | | | | | | | | |
| | Reset Value | | | | | | | | | | | | | | |
| 020h | TIMx_CCEN | | | | | | | | | | | | | | |
| | Reset Value | | | | | | | | | | | | | | |
| 024h | TIMx_CNT | | | | | | | | | | | | | | |
| | Reset Value | | | | | | | | | | | | | | |
| 028h | TIMx_PSC | | | | | | | | | | | | | | |
| | Reset Value | | | | | | | | | | | | | | |

| Offset | Register | 31 | 30 | 29 | 28 | 27 | 26 | 25 | 24 | 23 | 22 | 21 | 20 | 19 | 18 | 17 | 16 | 15 | 14 | 13 | 12 | 11 | 10 | 9 | 8 | 7 | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | 0 |
|--------|-------------|----------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|---|---|---|---|--------------|-------------|---|---|---|---|
| 02Ch | TIMx_AR | Reserved | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | AR[15:0] | | | | | |
| | Reset Value | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 030h | TIMx_REPCNT | Reserved | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | REPCNT[7:0] | | | | |
| | Reset Value | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 034h | TIMx_CCDAT1 | Reserved | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | CCDAT1[15:0] | | | | | |
| | Reset Value | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | | | | | | | | | | | | | |
| 038h | TIMx_CCDAT2 | Reserved | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | CCDAT2[15:0] | | | | | |
| | Reset Value | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | | | | | | | | | | | | | |
| 03Ch | TIMx_CCDAT3 | Reserved | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | CCDAT3[15:0] | | | | | |
| | Reset Value | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | | | | | | | | | | | | | |
| 040h | TIMx_CCDAT4 | Reserved | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | CCDAT4[15:0] | | | | | |
| | Reset Value | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | | | | | | | | | | | | | |
| 044h | TIMx_BKDT | Reserved | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | DTGN[7:0] | | | | | |
| | Reset Value | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | | | | | | | | | | | | | |
| 048h | TIMx_DCTRL | Reserved | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | DBLEN[4:0] | | | | | |
| | Reset Value | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | | | | | | | | | | | | | |
| 04Ch | TIMx_DADDR | Reserved | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | BURST[15:0] | | | | | |
| | Reset Value | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | | | | | | | | | | | | | |
| 050h | TIMx_CCMOD3 | Reserved | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | CCDAT5[15:0] | | | | | |
| | Reset Value | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | | | | | | | | | | | | | |
| 054h | TIMx_CCDAT5 | Reserved | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | CCDAT6[15:0] | | | | | |
| | Reset Value | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | | | | | | | | | | | | | |
| 058h | TIMx_CCDAT6 | Reserved | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | CCDAT6[15:0] | | | | | |
| | Reset Value | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | | | | | | | | | | | | | |

11.4.2 控制寄存器 1 (TIMx_CTRL1)

偏移地址: 0x00

复位值: 0x0000 0000

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|----|--------|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|
| 31 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 15 | CLRSEL | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 14 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 12 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 11 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 10 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 9 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 8 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 7 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 6 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 5 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 4 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 3 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 2 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

| 位域 | 名称 | 描述 |
|-------|-------------|---|
| 16 | LBKPEN | 锁存作为BRK使能 (LockUp as brk Enable) (Core Hardfault) 0: 禁止 1: 使能 注: 操作此位前必须开启芯片的扩展模式 (置位PWR_CTRL3.EXMODE) |
| 15 | CLRSEL | OCxRef选择 (OCxRef selection) 0: 选择外部Ocxclr (ETR) 信号 1: 选择内部OCxclr (来自COMP) 信号 注: 操作此位前必须开启芯片的扩展模式 (置位PWR_CTRL3.EXMODE) |
| 14:12 | Reserved | 保留, 必须保持复位值 |
| 11 | C1SEL | 通道1选择 (Channel 1 selection) 0: 选择外部CH1 (来自IOM) 信号 1: 选择内部CH1 (来自COMP) 信号 注: 操作此位前必须开启芯片的扩展模式 (置位PWR_CTRL3.EXMODE) |
| 10 | IOMBKPEN | IOM作为BRK使能 (IOM as brk Enable) 0: 使能。选择外部刹车信号 (来自IOM) 1: 禁止。选择内部刹车信号 (来自COMP) 注: 操作此位前必须开启芯片的扩展模式 (置位PWR_CTRL3.EXMODE) |
| 9:8 | CLKD[1:0] | 时钟分频因子 (Clock division) CLKD[1:0] 表示 CK_INT (定时器时钟) 和 DTS (用于死区时间发生器和数字滤波器 (ETR、TIx) 的时钟) 之间的分频比。 00: tDTS = tCK_INT 01: tDTS = 2 x tCK_INT 10: tDTS = 4 x tCK_INT 11: 保留, 不要使用这个配置 |
| 7 | ARPEN | 自动重装载预装载允许位 (Auto-reload preload enable) 0: TIMx_AR 寄存器的影子寄存器禁用 1: TIMx_AR 寄存器的影子寄存器使能 |
| 6:5 | CAMSEL[1:0] | 选择中央对齐模式 (Center-aligned mode selection) 00: 边缘对齐模式。 TIMx_CTRL1.DIR 指定向上计数或向下计数。 01: 中央对齐模式1。 计数器在中央对齐模式下计数, 向下计数时输出比较中断标志位设置为 1。 10: 中央对齐模式2。计数器在中央对齐模式下计数, 向上计数时输出比较中断标志位设置为1。 11: 中央对齐模式3。计数器在中央对齐模式下计数, 向上计数或向下计数时输出比较中断标志位设置为 1。 注意: 当计数器仍然启用时 (TIMx_CTRL1.CNTEN = 1), 不允许从边缘对齐模式切换到中央对齐模式。 |
| 4 | DIR | 方向 (Direction) 0: 计数器向上计数; 1: 计数器向下计数。 注: 当计数器配置为中央对齐模式或编码器模式时, 该位为只读。 |
| 3 | ONEPM | 单脉冲模式 (One pulse mode) |

| 位域 | 名称 | 描述 |
|----|-------|--|
| | | 0: 禁用单脉冲模式, 发生更新事件时不影响计数器计数。 1: 使能单脉冲模式, 下次更新事件发生时计数器停止计数 |
| 2 | UPRS | 更新请求源 (Update request source) 该位用于通过软件选择 UEV 事件源。 0: 如果更新中断或 DMA 请求使能, 以下任何事件都会产生更新中断或 DMA 请求: – 计数器上溢/下溢 – TIMx_EVTGEN.UDGN 位被设置 – 从模式控制器的更新生成 1: 如果更新中断或 DMA 请求使能, 只有计数器上溢/下溢会产生更新中断或 DMA 请求。 |
| 1 | UPDIS | 更新禁用 (Update disable) 该位用于启用/禁用软件生成的更新事件 (UEV) 事件。 0: 启用。 如果满足以下条件之一, 将生成 UEV: – 计数器上溢/下溢 – TIMx_EVTGEN.UDGN 位被设置 – 从模式控制器的更新生成 影子寄存器将使用预加载值进行更新。 1: UEV 禁用。 不生成更新事件, 影子寄存器 (AR、PSC 和 CCData) 保持它们的值。 如果 TIMx_EVTGEN.UDGN 位置位或从模式控制器发出硬件复位, 则重新初始化计数器和预分频器。 |
| 0 | CNTEN | 使能计数器 (Counter enable) 0: 禁止计数器; 1: 使能计数器。 注: 在软件设置了CNTEN位后, 外部时钟、门控模式和编码器模式才能工作。 触发模式可以自动地通过硬件设置CNTEN位。 |

11.4.3 控制寄存器 2 (TIMx_CTRL2)

偏移地址: 0x04

复位值: 0x0000 0000

| | | | | | | | | | | | | | | | | |
|----------|----------|------|-----|------|-----|------|-----|--------|----|------------|--------|--------|----------|--------|----|----|
| 31 | Reserved | | | | | | | | | | | | 19 | 18 | 17 | 16 |
| 15 | 14 | 13 | 12 | 11 | 10 | 9 | 8 | 7 | 6 | 4 | 3 | rw | 2 | 1 | rw | 0 |
| Reserved | OI4 | OI3N | OI3 | OI2N | OI2 | OI1N | OI1 | TI1SEL | | MMSEL[2:0] | CCDSEL | CCUSEL | Reserved | CCPCTL | | |
| | rw | rw | rw | rw | rw | rw | rw | rw | rw | rw | rw | rw | rw | rw | rw | rw |

| 位域 | 名称 | 描述 |
|-------|----------|-------------------------|
| 31:19 | Reserved | 保留, 必须保持复位值 |
| 18 | OI6 | 输出空闲状态6 (OC6输出)。参见OI1位。 |
| 17 | Reserved | 保留, 必须保持复位值 |
| 16 | OI5 | 输出空闲状态5 (OC5输出)。参见OI1位。 |

| 位域 | 名称 | 描述 |
|-----|------------|---|
| 15 | Reserved | 保留, 必须保持复位值 |
| 14 | OI4 | 输出空闲状态4 (OC4输出)。参见OI1位。 |
| 13 | OI3N | 输出空闲状态3 (OC3N输出)。参见OI1N位。 |
| 12 | OI3 | 输出空闲状态3 (OC3输出)。参见OI1位。 |
| 11 | OI2N | 输出空闲状态2 (OC2N输出)。参见OI1N位。 |
| 10 | OI2 | 输出空闲状态2 (OC2输出)。参见OI1位。 |
| 9 | OI1N | 输出空闲状态1 (OC1N输出) (Output Idle state 1) 0: 当MOEN=0时, 死区后OC1N=0; 1: 当MOEN=0时, 死区后OC1N=1。 |
| 8 | OI1 | 输出空闲状态1 (OC1输出) (Output Idle state 1) 0: 当MOEN=0时, 如果实现了OC1N, 则死区后OC1=0; 1: 当MOEN=0时, 如果实现了OC1N, 则死区后OC1=1。 |
| 7 | TI1SEL | TI1选择 (TI1 selection) 0: TIMx_CH1引脚连到TI1输入; 1: TIMx_CH1、TIMx_CH2和TIMx_CH3引脚经异或后连到TI1输入。 |
| 6:4 | MMSEL[2:0] | 主模式选择 这 3 位用于选择在主模式下发送到从定时器的同步信息 (TRGO)。可能的组合如下: 000: 复位 - 当 TIMx_EVTGEN.UDGN 置位或从模式控制器产生复位时, 将出现 TRGO 脉冲。在后一种情况下, TRGO 上的信号与实际复位相比有所延迟。 001: 使能 - TIMx_CTRL1.CNTEN 位用作触发输出 (TRGO)。有时需要同时启动多个定时器或者在一段时间内开启从定时器。 当 TIMx_CTRL1.CNTEN 位置位或门控模式下的触发输入为高电平时, 计数器使能信号置位。 当计数器使能信号由触发输入控制时, TRGO 上有一个延迟, 除非选择了主/从模式 (参见 TIMx_SMCTRL.MSMD 位的说明)。 010: 更新 - 选择更新事件作为触发输出 (TRGO)。例如, 主定时器时钟可用作从定时器预分频器。 011: 比较脉冲 - 当 TIMx_STS.CC1ITF 被设置时 (即使它已经是高电平), 即捕获或比较成功时, 触发输出发送一个正脉冲 (TRGO)。 100: 比较 - OC1REF 信号用作触发输出 (TRGO)。 101: 比较 - OC2REF 信号用作触发输出 (TRGO)。 110: 比较 - OC3REF 信号用作触发输出 (TRGO)。 111: 比较 - OC4REF 信号用作触发输出 (TRGO)。 |
| 3 | CCDSEL | 捕获/比较的DMA选择 (Capture/compare DMA selection) 0: 当发生CCx事件时, 送出CCx的DMA请求; 1: 当发生更新事件时, 送出CCx的DMA请求。 |
| 2 | CCUSEL | 捕获/比较控制更新选择 (Capture/compare control update selection) 0: 如果捕获/比较控制位是预装载的 (CCPCTL =1), 只能通过设置CCUDGN位更新它们; 1: 如果捕获/比较控制位是预装载的 (CCPCTL =1), 可以通过设置CCUDGN位或TRGI 上的一个上升沿更新它们。 注: 该位只对具有互补输出的通道起作用。 |

| 位域 | 名称 | 描述 |
|----|----------|---|
| 1 | Reserved | 保留, 必须保持复位值 |
| 0 | CCPCTL | 捕获/比较预装载控制位 (Capture/compare preloaded control) 0: CCxEN, CCxNEN和OCxMD位不是预装载的; 1: CCxEN, CCxNEN和OCxMD位是预装载的; 设置该位后, 它们只在设置了CCUDGN位后被更新。 注: 该位只对具有互补输出的通道起作用。 |

11.4.4 从模式控制寄存器 (TIMx_SMCTRL)

偏移地址: 0x08

复位值: 0x0000

| | | | | | | | | | | | |
|------|-------|------------|----|-----------|------|-----------|----------|------------|---|---|---|
| 15 | 14 | 13 | 12 | 11 | 8 | 7 | 6 | 4 | 3 | 2 | 0 |
| EXTP | EXCEN | EXTPS[1:0] | | EXTF[3:0] | MSMD | TSEL[2:0] | Reserved | SMSEL[2:0] | | | |

| 位域 | 名称 | 描述 |
|-------|------------|--|
| 15 | EXTP | 外部触发极性 (External trigger polarity) 该位选择是用ETR还是ETR的反相来作为触发操作 0: ETR高电平或上升沿有效; 1: ETR低电平或下降沿有效。 |
| 14 | EXCEN | 外部时钟使能位 (External clock enable) 该位启用外部时钟模式2。启用后, 计数器由ETRF信号上的任意有效边沿驱动。 0: 禁止外部时钟模式2; 1: 使能外部时钟模式2。 注1: 当同时使能外部时钟模式1和外部时钟模式2时, 外部时钟的输入为ETRF。 注2: 以下从机模式可以与外部时钟模式2同时使用: 复位模式、门控模式和触发模式; 但是, TRGI 无法连接到 ETRF (TIMx_SMCTRL.TSEL ≠ '111')。 注3: 设置 TIMx_SMCTRL.EXCEN 位与选择外部时钟模式1并将 TRGI 连接到 ETRF (TIMx_SMCTRL.SMSEL = 111 和 TIMx_SMCTRL.TSEL = 111) 的效果相同 |
| 13:12 | EXTPS[1:0] | 外部触发预分频 (External trigger prescaler) 外部触发信号ETRP的频率必须最多为TIMxCLK频率的1/4。当输入更快的外部时钟时, 可以使用预分频器来降低ETRP的频率。 00: 关闭预分频; 01: ETRP频率除以2; 10: ETRP频率除以4; 11: ETRP频率除以8。 |
| 11:8 | EXTF[3:0] | 外部触发滤波 (External trigger filter) 这些位用于定义ETRP信号的采样频率和ETRP数字滤波的带宽。实际上, 数字滤波器是一个事件计数器, 在记录连续N个事件后生成验证输出。 0000: 无滤波器, 以fDTS采样 1000: 采样频率fSAMPLING=fDTS/8, N=6 0001: 采样频率fSAMPLING=fCK_INT, N=2 1001: 采样频率fSAMPLING=fDTS/8, N=8 0010: 采样频率fSAMPLING=fCK_INT, N=4 1010: 采样频率fSAMPLING=fDTS/16, |

| 位域 | 名称 | 描述 |
|-----|------------|---|
| | | <p>N=5</p> <p>0011: 采样频率fSAMPLING=fCK_INT, N=8 1011: 采样频率fSAMPLING=fDTS/16, N=6</p> <p>0100: 采样频率fSAMPLING=fDTS/2, N=6 1100: 采样频率fSAMPLING=fDTS/16, N=8</p> <p>0101: 采样频率fSAMPLING=fDTS/2, N=8 1101: 采样频率fSAMPLING=fDTS/32, N=5</p> <p>0110: 采样频率fSAMPLING=fDTS/4, N=6 1110: 采样频率fSAMPLING=fDTS/32, N=6</p> <p>0111: 采样频率fSAMPLING=fDTS/4, N=8 1111: 采样频率fSAMPLING=fDTS/32, N=8</p> |
| 7 | MSMD | <p>主/从模式 (Master/slave mode)</p> <p>0: 无作用;</p> <p>1: 触发输入 (TRGI) 上的事件被延迟了, 以允许在当前定时器 (通过TRGO) 与它的从定时器间的完美同步。这对要求把几个定时器同步到一个单一的外部事件时是非常有用的。</p> |
| 6:4 | TSEL[2:0] | <p>触发选择 (Trigger selection)</p> <p>这3位选择用于同步计数器的触发输入。</p> <p>000: 内部触发0 (ITR0) 100: TI1的边沿检测器 (TI1F_ED)</p> <p>001: 内部触发1 (ITR1) 101: 滤波后的定时器输入1 (TI1FP1)</p> <p>010: 内部触发2 (ITR2) 110: 滤波后的定时器输入2 (TI2FP2)</p> <p>011: 内部触发3 (ITR3) 111: 外部触发输入 (ETRF)</p> <p>更多有关ITRx的细节, 参见表11-3。</p> <p>注: 这些位只能在未用到 (如SMSEL=000) 时被改变, 以避免在改变时产生错误的边沿检测。</p> |
| 3 | Reserved | 保留, 必须保持复位值 |
| 2:0 | SMSEL[2:0] | <p>从模式选择 (Slave mode selection)</p> <p>当选择了外部信号, 触发信号 (TRGI) 的有效边沿与选中的外部输入极性相关 (见输入控制寄存器和控制寄存器的说明)</p> <p>000: 关闭从模式 – 如果CNTEN=1, 则预分频器直接由内部时钟驱动。</p> <p>001: 编码器模式1 – 根据TI2FP2的电平, 计数器在TI1FP1的边沿向上/下计数。</p> <p>010: 编码器模式2 – 根据TI1FP1的电平, 计数器在TI2FP2的边沿向上/下计数。</p> <p>011: 编码器模式3 – 根据另一个信号的输入电平, 计数器在TI1FP1和TI2FP2的边沿向上/下计数。</p> <p>100: 复位模式 – 在选定触发输入 (TRGI) 的上升沿, 计数器重新初始化并更新影子寄存器。</p> <p>101: 门控模式 – 当触发输入 (TRGI) 为高时, 计数器的时钟开启。一旦触发输入变为低, 则计数器停止 (但不复位)。计数器的启动和停止都是受控的。</p> <p>110: 触发模式 – 计数器在触发输入TRGI的上升沿启动 (但不复位), 只有计数器的启动是受控的。</p> <p>111: 外部时钟模式1 – 选中的触发输入 (TRGI) 的上升沿驱动计数器。</p> <p>注: 如果TI1F_ED被选为触发输入 (TSEL=100) 时, 不要使用门控模式。这是因为,</p> |

| 位域 | 名称 | 描述 |
|----|----|--|
| | | <i>TIIF_ED</i> 在每次 <i>TIIF</i> 变化时输出一个脉冲, 然而门控模式是要检查触发输入的电平。 |

表 11-3 TIMx 内部触发连接

| Slave timer | ITR0 (TSEL = 000) | ITR1 (TSEL = 001) | ITR2 (TSEL = 010) | ITR3 (TSEL = 011) |
|-------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| TIM1 | TIM5 | TIM2 | TIM3 | TIM4 |
| TIM8 | TIM1 | TIM2 | TIM4 | TIM5 |

11.4.5 DMA/中断使能寄存器 (TIMx_DINTEN)

偏移地址: 0x0C

复位值: 0x0000

| 15 | 14 | 13 | 12 | 11 | 10 | 9 | 8 | 7 | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | 0 |
|----------|------|--------|--------|--------|--------|--------|------|------|------|--------|--------|--------|--------|--------|------|
| Reserved | TDEN | COMDEN | CC4DEN | CC3DEN | CC2DEN | CC1DEN | UDEN | BIEN | TIEN | COMIEN | CC4IEN | CC3IEN | CC2IEN | CC1IEN | UIEN |

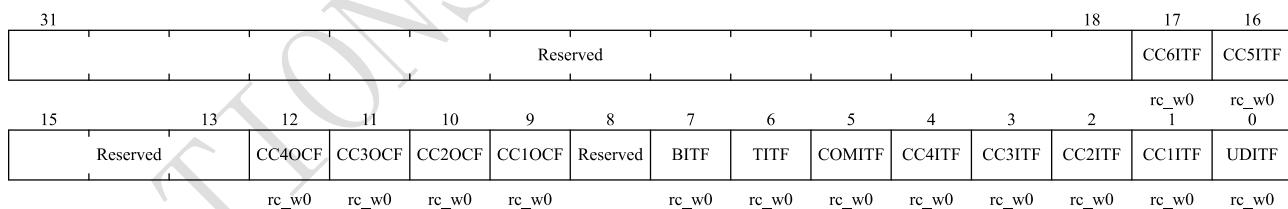
| 位域 | 名称 | 描述 |
|----|----------|---|
| 15 | Reserved | 保留, 必须保持复位值 |
| 14 | TDEN | 允许触发DMA请求 (Trigger DMA request enable) 0: 禁止触发DMA请求; 1: 允许触发DMA请求。 |
| 13 | COMDEN | 允许COM的DMA请求 (COM DMA request enable) 0: 禁止COM的DMA请求; 1: 允许COM的DMA请求。 |
| 12 | CC4DEN | 允许捕获/比较4的DMA请求 (Capture/Compare 4 DMA request enable) 0: 禁止捕获/比较4的DMA请求; 1: 允许捕获/比较4的DMA请求。 |
| 11 | CC3DEN | 允许捕获/比较3的DMA请求 (Capture/Compare 3 DMA request enable) 0: 禁止捕获/比较3的DMA请求; 1: 允许捕获/比较3的DMA请求。 |
| 10 | CC2DEN | 允许捕获/比较2的DMA请求 (Capture/Compare 2 DMA request enable) 0: 禁止捕获/比较2的DMA请求; 1: 允许捕获/比较2的DMA请求。 |
| 9 | CC1DEN | 允许捕获/比较1的DMA请求 (Capture/Compare 1 DMA request enable) 0: 禁止捕获/比较1的DMA请求; 1: 允许捕获/比较1的DMA请求。 |
| 8 | UDEN | 允许更新的DMA请求 (Update DMA request enable) 0: 禁止更新的DMA请求; 1: 允许更新的DMA请求。 |
| 7 | BIEN | 允许刹车中断 (Break interrupt enable) 0: 禁止刹车中断; 1: 允许刹车中断。 |

| 位域 | 名称 | 描述 |
|----|--------|---|
| 6 | TIEN | 触发中断使能 (Trigger interrupt enable) 0: 禁止触发中断; 1: 使能触发中断。 |
| 5 | COMIEN | 允许COM中断 (COM interrupt enable) 0: 禁止COM中断; 1: 允许COM中断。 |
| 4 | CC4IEN | 允许捕获/比较4中断 (Capture/Compare 4 interrupt enable) 0: 禁止捕获/比较4中断; 1: 允许捕获/比较4中断。 |
| 3 | CC3IEN | 允许捕获/比较3中断 (Capture/Compare 3 interrupt enable) 0: 禁止捕获/比较3中断; 1: 允许捕获/比较3中断。 |
| 2 | CC2IEN | 允许捕获/比较2中断 (Capture/Compare 2 interrupt enable) 0: 禁止捕获/比较2中断; 1: 允许捕获/比较2中断。 |
| 1 | CC1IEN | 允许捕获/比较1中断 (Capture/Compare 1 interrupt enable) 0: 禁止捕获/比较1中断; 1: 允许捕获/比较1中断。 |
| 0 | UIEN | 允许更新中断 (Update interrupt enable) 0: 禁止更新中断; 1: 允许更新中断。 |

11.4.6 状态寄存器 (TIMx_STS)

偏移地址: 0x10

复位值: 0x0000 0000



| 位域 | 名称 | 描述 |
|-------|----------|--|
| 31:18 | Reserved | 保留, 必须保持复位值 |
| 17 | CC6ITF | 捕获/比较6中断标记 (Capture/Compare 6 interrupt flag) 参考CC1ITF描述。 |
| 16 | CC5ITF | 捕获/比较5中断标记 (Capture/Compare 5 interrupt flag) 参考CC1ITF描述。 |
| 15:13 | Reserved | 保留, 必须保持复位值 |
| 12 | CC4OCF | 捕获/比较4重复捕获标记 (Capture/Compare 4 overcapture flag) 参见CC1OCF描述。 |

| 位域 | 名称 | 描述 |
|----|----------|--|
| 11 | CC3OCF | 捕获/比较3重复捕获标记 (Capture/Compare 3 overcapture flag) 参见CC1OCF描述。 |
| 10 | CC2OCF | 捕获/比较2重复捕获标记 (Capture/Compare 2 overcapture flag) 参见CC1OCF描述。 |
| 9 | CC1OCF | 捕获/比较1重复捕获标记 (Capture/Compare 1 overcapture flag) 仅当相应的通道被配置为输入捕获时, 该标记可由硬件置1。写0可清除该位。 0: 无重复捕获产生; 1: 计数器的值被捕获到TIMx_CCDAT1寄存器时, CC1ITF的状态已经为'1'。 |
| 8 | Reserved | 保留, 必须保持复位值 |
| 7 | BITF | 刹车中断标记 (Break interrupt flag) 一旦刹车输入有效, 由硬件对该位置'1'。如果刹车输入无效, 则该位可由软件清'0'。 0: 无刹车事件产生; 1: 刹车输入上检测到有效电平。 |
| 6 | TITF | 触发器中断标记 (Trigger interrupt flag) 当发生触发事件 (当从模式控制器处于除门控模式外的其它模式时, 在TRGI输入端检测到有效边沿, 或门控模式下的任一边沿) 时由硬件对该位置'1'。它由软件清'0'。 0: 无触发器事件产生; 1: 触发中断等待响应。 |
| 5 | COMITF | COM中断标记 (COM interrupt flag) 一旦产生COM事件 (当捕获/比较控制位: CCxEN、CCxNEN、OCxMD已被更新) 该位由硬件置'1'。它由软件清'0'。 0: 无COM事件产生; 1: COM中断等待响应。 |
| 4 | CC4ITF | 捕获/比较4中断标记 (Capture/Compare 4 interrupt flag) 参考CC1ITF描述。 |
| 3 | CC3ITF | 捕获/比较3中断标记 (Capture/Compare 3 interrupt flag) 参考CC1ITF描述。 |
| 2 | CC2ITF | 捕获/比较2中断标记 (Capture/Compare 2 interrupt flag) 参考CC1ITF描述。 |
| 1 | CC1ITF | 捕获/比较1中断标记 (Capture/Compare 1 interrupt flag) 如果通道CC1配置为输出模式: 除中央对齐模式外, 当计数器值与比较值相同时, 该位由硬件设置 (参见TIMx_CTRL1.CAMSEL 位描述)。该位由软件清零。 0: 未发生匹配。 1: TIMx_CNT 的值与 TIMx_CCDAT1 的值相同。 当 TIMx_CCDAT1 的值大于 TIMx_AR 的值时, 如果计数器溢出 (在向上计数和向上/向下计数模式下) 和向下计数模式下溢, 则 TIMx_STS.CC1ITF 位将变为高电平。 如果通道CC1配置为输入模式: 当捕捉事件发生时, 该位由硬件设置。该位由软件或读取 TIMx_CCDAT1 清零。 0: 未发生输入捕捉。 1: 发生输入捕捉。计数器值已在 TIMx_CCDAT1 中捕获。在 IC1 上检测到与所选极性相同的边沿。 |

| 位域 | 名称 | 描述 |
|----|-------|--|
| 0 | UDITF | <p>更新中断标志 (Update interrupt flag)</p> <p>当在以下条件下发生更新事件时, 该位由硬件设置:</p> <ul style="list-style-type: none"> 当 $\text{TIMx_CTRL1.UPDIS} = 0$ 时, 并且重复计数器值上溢或下溢 (当重复计数器等于 0 时生成更新事件UEV)。 当 $\text{TIMx_CTRL1.UPRS} = 0$ 时, $\text{TIMx_CTRL1.UPDIS} = 0$, 并通过软件设置 TIMx_EVTGEN.UDGN 位以重新初始化 CNT。 当 $\text{TIMx_CTRL1.UPRS} = 0$ 时, $\text{TIMx_CTRL1.UPDIS} = 0$, 并且计数器 CNT 由触发事件重新初始化。 (参见 TIMx_SMCTRL 寄存器说明) <p>该位由软件清零。</p> <p>0: 未发生更新事件 1: 发生更新中断</p> |

11.4.7 事件产生寄存器 (TIMx_EVTGEN)

偏移地址:0x14

复位值:0x0000

| | | | | | | | | | | |
|----|----------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 15 | Reserved | 8 | 7 | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | 0 |
| | | | | | | | | | | |

| 位域 | 名称 | 描述 |
|------|----------|---|
| 15:8 | Reserved | 保留, 必须保持复位值 |
| 7 | BGN | <p>产生刹车事件 (Break generation)</p> <p>当由软件设置时, 该位可以产生一个刹车事件。而此时 $\text{TIMx_BKDT.MOEN} = 0$, $\text{TIMx_STS.BITF} = 1$, 如果相应的中断和DMA被使能, 就会产生相应的中断和DMA。该位由硬件自动清零。</p> <p>0: 无动作 1: 产生刹车事件</p> |
| 6 | TGN | <p>产生触发事件 (Trigger generation)</p> <p>当由软件置位时, 该位可以产生一个触发事件。而此时 $\text{TIMx_STS.TITF} = 1$, 如果相应的中断和DMA被使能, 就会产生相应的中断和DMA。该位由硬件自动清零。</p> <p>0: 无动作 1: 产生触发事件</p> |
| 5 | CCUDGN | <p>捕获/比较事件, 产生控制更新 (Capture/Compare control update generation)</p> <p>该位由软件设置。如果此时 $\text{TIMx_CTRL2.CCPCTL} = 1$, 则允许更新 CCxEN、CCxNEN 和 OCxMD 位。该位由硬件自动清零。</p> <p>0: 无动作 1: 产生一个COM事件</p> <p>注意: 该位仅对具有互补输出的通道有效。</p> |
| 4 | CC4GN | <p>产生捕获/比较4事件 (Capture/Compare 4 generation)</p> <p>参考CC1GN描述。</p> |
| 3 | CC3GN | <p>产生捕获/比较3事件 (Capture/Compare 3 generation)</p> <p>参考CC1GN描述。</p> |

| 位域 | 名称 | 描述 |
|----|-------|--|
| 2 | CC2GN | 产生捕获/比较2事件 (Capture/Compare 2 generation) 参考CC1GN描述。 |
| 1 | CC1GN | 产生捕获/比较1事件 (Capture/Compare 1 generation) 当由软件设置时, 该位可以产生一个捕获/比较事件。 该位由硬件自动清零。 CC1对应通道为输出模式时: TIMx_STS.CC1ITF 标志将被拉高, 如果相应的中断和 DMA 被使能, 就会产生相应的中断和 DMA。 CC1对应通道为输入模式时: TIMx_CCDAT1 将捕获当前计数器值, 并将 TIMx_STS.CC1ITF 标志拉高, 如果相应的中断和 DMA 被使能, 则会产生相应的中断和 DMA。 如果 TIMx_STS.CC1ITF 已经拉高, 则拉高 TIMx_STS.CC1OCF。 0: 无动作 1: 生成 CC1 捕获/比较事件 |
| 0 | UDGN | 产生更新事件 (Update generation) 该位由软件置'1', 由硬件自动清'0'。 当由软件设置时, 该位可以生成更新事件。 而此时计数器会重新初始化, 预分频计数器会被清零, 计数器在中央对齐或向上计数模式下会被清零, 但在向下计数模式下取 TIMx_AR 寄存器的值。 该位由硬件自动清零。 0: 无动作 1: 生成更新事件 |

11.4.8 捕获/比较模式寄存器 1 (TIMx_CCMOD1)

偏移地址: 0x18

复位值: 0x0000

通道可用于输入（捕获模式）或输出（比较模式），通道的方向由相应的 CCxSEL 位定义。该寄存器其它位的作用在输入和输出模式下不同。OCx 描述了通道在输出模式下的功能，ICx 描述了通道在输入模式下的功能。因此必须注意，同一个位在输出模式和输入模式下的功能是不同的。

输出比较模式：

| 15 | 14 | 12 | 11 | 10 | 9 | 8 | 7 | 6 | 4 | 3 | 2 | 1 | 0 |
|--------|------------|----|--------|--------|-------------|--------|---|------------|---|--------|--------|-------------|---|
| OC2CEN | OC2MD[2:0] | | OC2PEN | OC2FEN | CC2SEL[1:0] | OC1CEN | | OC1MD[2:0] | | OC1PEN | OC1FEN | CC1SEL[1:0] | |

rw rw

| 位域 | 名称 | 描述 |
|-------|-------------|--|
| 15 | OC2CEN | 输出比较2清0使能 (Output Compare 2 clear enable) |
| 14:12 | OC2MD[2:0] | 输出比较2模式 (Output Compare 2 mode) |
| 11 | OC2PEN | 输出比较2预装载使能 (Output Compare 2 preload enable) |
| 10 | OC2FEN | 输出比较2快速使能 (Output Compare 2 fast enable) |
| 9:8 | CC2SEL[1:0] | 捕获/比较2选择。 (Capture/Compare 2 selection) 该位定义通道的方向（输入/输出），及输入脚的选择： 00: CC2通道被配置为输出； 01: CC2通道被配置为输入， IC2映射在TI2上； 10: CC2通道被配置为输入， IC2映射在TI1上； 11: CC2通道被配置为输入， IC2映射在TRC上。此模式仅工作在内部触发输入被选中 |

| 位域 | 名称 | 描述 |
|-----|-------------|--|
| | | 时 (由TIMx_SMCTRL寄存器的TSEL位选择)。 注: CC2SEL仅在通道关闭时 (TIMx_CCEN寄存器的CC2EN=0) 才是可写的。 |
| 7 | OC1CEN | 输出比较1清'0'使能 (Output Compare 1 clear enable) 0: OC1REF 不受ETRF输入的影响; 1: 一旦检测到ETRF输入高电平, 清除OC1REF=0。 |
| 6:4 | OC1MD[2:0] | 输出比较1模式 (Output Compare 1 mode) 这些位用于管理输出参考信号 OC1REF, 它决定了 OC1 和 OC1N 的值, 在高电平有效, 而 OC1 和 OC1N 的有效电平取决于 TIMx_CCEN.CC1P 和 TIMx_CCEN.CC1NP 位。 000: 冻结。 TIMx_CCDAT1 寄存器和计数器 TIMx_CNT 之间的比较对 OC1REF 信号没有影响。 001: 将通道 1 设置为匹配时的有效电平。当 TIMx_CCDAT1 = TIMx_CNT 时, OC1REF 信号将被强制为高电平。 010: 将通道 1 设置为匹配时的无效电平。当 TIMx_CCDAT1 = TIMx_CNT 时, OC1REF 信号将被强制为低电平。 011: 翻转。当 TIMx_CCDAT1 = TIMx_CNT 时, OC1REF 信号将被翻转。 100: 强制无效电平。 OC1REF 信号被强制为低电平。 101: 强制有效电平。 OC1REF 信号被强制为高电平。 110: PWM 模式 1 - 在向上计数模式下, 如果 TIMx_CNT < TIMx_CCDAT1, 则通道 1 的 OC1REF 信号为高电平, 否则为低电平。在向下计数模式下, 如果 TIMx_CNT > TIMx_CCDAT1, 则通道 1 的 OC1REF 信号为低电平, 否则为高电平。 111: PWM 模式 2 - 在向上计数模式下, 如果 TIMx_CNT < TIMx_CCDAT1, 则通道 1 的 OC1REF 信号为低电平, 否则为高电平。在向下计数模式下, 如果 TIMx_CNT > TIMx_CCDAT1, 则通道 1 的 OC1REF 信号为高电平, 否则为低电平。 注 1: 在 PWM 模式 1 或 PWM 模式 2 中, OC1REF 电平仅在比较结果改变或输出比较模式从冻结模式切换到 PWM 模式时才会改变。 |
| 3 | OC1PEN | 输出比较 1 预加载使能 (Output Compare 1 preload enable) 0: 禁用 TIMx_CCDAT1 寄存器的预加载功能。 支持随时对TIMx_CCDAT1寄存器进行写操作, 写入的值立即生效。 1: 使能 TIMx_CCDAT1 寄存器的预加载功能。 仅对预加载寄存器进行读写操作。当更新事件发生时, TIMx_CCDAT1 的值被加载到影子寄存器中。 注 1: 只有当 TIMx_CTRL1.ONEPM = 1 (在单脉冲模式下) 时, 才能使用 PWM 模式而不验证预加载寄存器, 否则无法预测其他行为。 |
| 2 | OC1FEN | 输出比较1 快速使能 (Output Compare 1 fast enable) 该位用于加快CC输出对触发输入事件的响应。 0: 根据计数器与CCDAT1的值, CC1正常操作, 即使触发器是打开的。当触发器的输入有一个有效沿时, 激活CC1输出的最小延时为5个时钟周期。 1: 输入到触发器的有效沿的作用就像发生了一次比较匹配。因此, OC1被设置为比较电平而与比较结果无关。采样触发器的有效沿和CC1输出间的延时被缩短为3个时钟周期。 OCxFEN只在通道被配置成PWM1或PWM2模式时起作用。 |
| 1:0 | CC1SEL[1:0] | 捕获/比较1 选择。 (Capture/Compare 1 selection) |

| 位域 | 名称 | 描述 |
|----|----|--|
| | | <p>这2位定义通道的方向（输入/输出），及输入脚的选择：</p> <p>00: CC1通道被配置为输出；</p> <p>01: CC1通道被配置为输入， IC1映射在TI1上；</p> <p>10: CC1通道被配置为输入， IC1映射在TI2上；</p> <p>11: CC1通道被配置为输入， IC1映射在TRC上。此模式仅工作在内部触发输入被选中时（由TIMx_SMCTRL寄存器的TSEL位选择）。</p> <p>注: CC1SEL仅在通道关闭时 (TIMx_CCEN寄存器的CC1EN=0) 才是可写的。</p> |

输入捕获模式:

| | | | | | | | | | | | |
|----|-----------|----|-------------|---|-------------|---|-----------|---|-------------|---|-------------|
| 15 | 12 | 11 | 10 | 9 | 8 | 7 | 4 | 3 | 2 | 1 | 0 |
| | IC2F[3:0] | | IC2PSC[1:0] | | CC2SEL[1:0] | | IC1F[3:0] | | IC1PSC[1:0] | | CC1SEL[1:0] |

rw rw rw rw rw rw

| 位域 | 名称 | 描述 | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|--|--|---------------------------|---|---|---|---|--|---|--|---|--|---|--|---|--|---|--|
| 15:12 | IC2F[3:0] | 输入捕获2滤波器 (Input capture 2 filter) | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 11:10 | IC2PSC[1:0] | 输入/捕获2预分频器 (Input capture 2 prescaler) | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 9:8 | CC2SEL[1:0] | <p>捕获/比较2选择 (Capture/Compare 2 selection)</p> <p>这2位定义通道的方向（输入/输出），及输入脚的选择：</p> <p>00: CC2通道被配置为输出；</p> <p>01: CC2通道被配置为输入， IC2映射在TI2上；</p> <p>10: CC2通道被配置为输入， IC2映射在TI1上；</p> <p>11: CC2通道被配置为输入， IC2映射在TRC上。此模式仅工作在内部触发输入被选中时（由TIMx_SMCTRL寄存器的TSEL位选择）。</p> <p>注: CC2SEL仅在通道关闭时 (TIMx_CCEN寄存器的CC2EN=0) 才是可写的。</p> | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 7:4 | IC1F[3:0] | <p>输入捕获1滤波器 (Input capture 1 filter)</p> <p>这几位定义了TI1输入的采样频率及数字滤波器长度。数字滤波器由一个事件计数器组成，它记录到N个事件后会产生一个输出的跳变：</p> <table> <tr> <td>0000: 无滤波器，以f_{DTS}采样</td> <td>1000: 采样频率$f_{SAMPLING}=f_{DTS}/8$, N=6</td> </tr> <tr> <td>0001: 采样频率$f_{SAMPLING}=f_{CK_INT}$, N=2</td> <td>1001: 采样频率$f_{SAMPLING}=f_{DTS}/8$, N=8</td> </tr> <tr> <td>0010: 采样频率$f_{SAMPLING}=f_{CK_INT}$, N=4</td> <td>1010: 采样频率$f_{SAMPLING}=f_{DTS}/16$, N=5</td> </tr> <tr> <td>0011: 采样频率$f_{SAMPLING}=f_{CK_INT}$, N=8</td> <td>1011: 采样频率$f_{SAMPLING}=f_{DTS}/16$, N=6</td> </tr> <tr> <td>0100: 采样频率$f_{SAMPLING}=f_{DTS}/2$, N=6</td> <td>1100: 采样频率$f_{SAMPLING}=f_{DTS}/16$, N=8</td> </tr> <tr> <td>0101: 采样频率$f_{SAMPLING}=f_{DTS}/2$, N=8</td> <td>1101: 采样频率$f_{SAMPLING}=f_{DTS}/32$, N=5</td> </tr> <tr> <td>0110: 采样频率$f_{SAMPLING}=f_{DTS}/4$, N=6</td> <td>1110: 采样频率$f_{SAMPLING}=f_{DTS}/32$, N=6</td> </tr> <tr> <td>0111: 采样频率$f_{SAMPLING}=f_{DTS}/4$, N=8</td> <td>1111: 采样频率$f_{SAMPLING}=f_{DTS}/32$, N=8</td> </tr> </table> | 0000: 无滤波器，以 f_{DTS} 采样 | 1000: 采样频率 $f_{SAMPLING}=f_{DTS}/8$, N=6 | 0001: 采样频率 $f_{SAMPLING}=f_{CK_INT}$, N=2 | 1001: 采样频率 $f_{SAMPLING}=f_{DTS}/8$, N=8 | 0010: 采样频率 $f_{SAMPLING}=f_{CK_INT}$, N=4 | 1010: 采样频率 $f_{SAMPLING}=f_{DTS}/16$, N=5 | 0011: 采样频率 $f_{SAMPLING}=f_{CK_INT}$, N=8 | 1011: 采样频率 $f_{SAMPLING}=f_{DTS}/16$, N=6 | 0100: 采样频率 $f_{SAMPLING}=f_{DTS}/2$, N=6 | 1100: 采样频率 $f_{SAMPLING}=f_{DTS}/16$, N=8 | 0101: 采样频率 $f_{SAMPLING}=f_{DTS}/2$, N=8 | 1101: 采样频率 $f_{SAMPLING}=f_{DTS}/32$, N=5 | 0110: 采样频率 $f_{SAMPLING}=f_{DTS}/4$, N=6 | 1110: 采样频率 $f_{SAMPLING}=f_{DTS}/32$, N=6 | 0111: 采样频率 $f_{SAMPLING}=f_{DTS}/4$, N=8 | 1111: 采样频率 $f_{SAMPLING}=f_{DTS}/32$, N=8 |
| 0000: 无滤波器，以 f_{DTS} 采样 | 1000: 采样频率 $f_{SAMPLING}=f_{DTS}/8$, N=6 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0001: 采样频率 $f_{SAMPLING}=f_{CK_INT}$, N=2 | 1001: 采样频率 $f_{SAMPLING}=f_{DTS}/8$, N=8 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0010: 采样频率 $f_{SAMPLING}=f_{CK_INT}$, N=4 | 1010: 采样频率 $f_{SAMPLING}=f_{DTS}/16$, N=5 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0011: 采样频率 $f_{SAMPLING}=f_{CK_INT}$, N=8 | 1011: 采样频率 $f_{SAMPLING}=f_{DTS}/16$, N=6 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0100: 采样频率 $f_{SAMPLING}=f_{DTS}/2$, N=6 | 1100: 采样频率 $f_{SAMPLING}=f_{DTS}/16$, N=8 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0101: 采样频率 $f_{SAMPLING}=f_{DTS}/2$, N=8 | 1101: 采样频率 $f_{SAMPLING}=f_{DTS}/32$, N=5 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0110: 采样频率 $f_{SAMPLING}=f_{DTS}/4$, N=6 | 1110: 采样频率 $f_{SAMPLING}=f_{DTS}/32$, N=6 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0111: 采样频率 $f_{SAMPLING}=f_{DTS}/4$, N=8 | 1111: 采样频率 $f_{SAMPLING}=f_{DTS}/32$, N=8 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 3:2 | IC1PSC[1:0] | <p>输入/捕获1预分频器 (Input capture 1 prescaler)</p> <p>这2位定义了CC1输入 (IC1) 的预分频系数。</p> <p>一旦TIMx_CCEN.CC1EN=0，则预分频器复位。</p> <p>00: 无预分频器，捕获输入上检测到的每一个边沿都触发一次捕获；</p> <p>01: 每2个事件触发一次捕获；</p> <p>10: 每4个事件触发一次捕获；</p> <p>11: 每8个事件触发一次捕获。</p> | | | | | | | | | | | | | | | | |

| 位域 | 名称 | 描述 |
|-----|-------------|---|
| 1:0 | CC1SEL[1:0] | <p>捕获/比较1选择 (Capture/Compare 1 Selection)</p> <p>这2位定义通道的方向 (输入/输出), 及输入脚的选择:</p> <p>00: CC1通道被配置为输出;</p> <p>01: CC1通道被配置为输入, IC1映射在TI1上;</p> <p>10: CC1通道被配置为输入, IC1映射在TI2上;</p> <p>11: CC1通道被配置为输入, IC1映射在TRC上。此模式仅工作在内部触发输入被选中时 (由TIMx_SMCTRL寄存器的TSEL位选择)。</p> <p>注: CC1SEL仅在通道关闭时 (TIMx_CCEN寄存器的CC1EN=0) 才是可写的。</p> |

11.4.9 捕获/比较模式寄存器 2 (TIMx_CCMOD2)

偏移地址: 0x1C

复位值: 0x0000 0000

参看以上 CCMOD1 寄存器的描述

输出比较模式:

| 15 | 14 | 12 | 11 | 10 | 9 | 8 | 7 | 6 | 4 | 3 | 2 | 1 | 0 |
|--------|------------|--------|--------|-------------|--------|------------|--------|--------|-------------|---|---|---|---|
| OC4CEN | OC4MD[2:0] | OC4PEN | OC4FEN | CC4SEL[1:0] | OC3CEN | OC3MD[2:0] | OC3PEN | OC3FEN | CC3SEL[1:0] | | | | |

| 位域 | 名称 | 描述 |
|-------|-------------|---|
| 15 | OC4CEN | 输出比较4清0使能 (Output compare 4 clear enable) |
| 14:12 | OC4MD[2:0] | 输出比较4模式 (Output compare 4 mode) |
| 11 | OC4PEN | 输出比较4预装载使能 (Output compare 4 preload enable) |
| 10 | OC4FEN | 输出比较4快速使能 (Output compare 4 fast enable) |
| 9:8 | CC4SEL[1:0] | <p>捕获/比较4选择 (Capture/Compare 4 selection)</p> <p>该2位定义通道的方向 (输入/输出), 及输入脚的选择:</p> <p>00: CC4通道被配置为输出;</p> <p>01: CC4通道被配置为输入, IC4映射在TI4上;</p> <p>10: CC4通道被配置为输入, IC4映射在TI3上;</p> <p>11: CC4通道被配置为输入, IC4映射在TRC上。此模式仅工作在内部触发输入被选中时 (由TIMx_SMCTRL寄存器的TSEL位选择)。</p> <p>注: CC4SEL仅在通道关闭时 (TIMx_CCEN寄存器的CC4EN=0) 才是可写的。</p> |
| 7 | OC3CEN | 输出比较3清0使能 (Output compare 3 clear enable) |
| 6:4 | OC3MD[2:0] | 输出比较3模式 (Output compare 3 mode) |
| 3 | OC3PEN | 输出比较3预装载使能 (Output compare 3 preload enable) |
| 2 | OC3FEN | 输出比较3快速使能 (Output compare 3 fast enable) |
| 1:0 | CC3SEL[1:0] | <p>捕获/比较3选择 (Capture/Compare 3 selection)</p> <p>这2位定义通道的方向 (输入/输出), 及输入脚的选择:</p> <p>00: CC3通道被配置为输出;</p> <p>01: CC3通道被配置为输入, IC3映射在TI3上;</p> <p>10: CC3通道被配置为输入, IC3映射在TI4上;</p> <p>11: CC3通道被配置为输入, IC3映射在TRC上。此模式仅工作在内部触发输入被选中时 (由TIMx_SMCTRL寄存器的TSEL位选择)。</p> |

| 位域 | 名称 | 描述 |
|----|----|--|
| | | 注: CC3SEL 仅在通道关闭时 (TIMx_CCEN 寄存器的CC3EN=0) 才是可写的。 |

输入捕获模式:

| | | | | | | | | | | | |
|-----------|-------------|-------------|----|-----------|---|-------------|-------------|---|---|---|---|
| 15 | 12 | 11 | 10 | 9 | 8 | 7 | 4 | 3 | 2 | 1 | 0 |
| IC4F[3:0] | IC4PSC[1:0] | CC4SEL[1:0] | | IC3F[3:0] | | IC3PSC[1:0] | CC3SEL[1:0] | | | | |
| rw | rw | rw | | rw | | rw | rw | | | | |

| 位域 | 名称 | 描述 |
|-------|-------------|---|
| 15:12 | IC4F[3:0] | 输入捕获4滤波器 (Input capture 4 filter) |
| 11:10 | IC4PSC[1:0] | 输入/捕获4预分频器 (Input capture 4 prescaler) |
| 9:8 | CC4SEL[1:0] | 捕获/比较4选择 (Capture/Compare 4 selection) 这2位定义通道的方向(输入/输出), 及输入脚的选择: 00: CC4通道被配置为输出; 01: CC4通道被配置为输入, IC4映射在TI4上; 10: CC4通道被配置为输入, IC4映射在TI3上; 11: CC4通道被配置为输入, IC4映射在TRC上。此模式仅工作在内部触发输入被选中时 (由TIMx_SMCTRL寄存器的TSEL位选择)。 注: CC4SEL 仅在通道关闭时 (TIMx_CCEN 寄存器的CC4EN=0) 才是可写的。 |
| 7:4 | IC3F[3:0] | 输入捕获3滤波器 (Input capture 3 filter) |
| 3:2 | IC3PSC[1:0] | 输入/捕获3预分频器 (Input capture 3 prescaler) |
| 1:0 | CC3SEL[1:0] | 捕获/比较3选择 (Capture/compare 3 selection) 这2位定义通道的方向(输入/输出), 及输入脚的选择: 00: CC3通道被配置为输出; 01: CC3通道被配置为输入, IC3映射在TI3上; 10: CC3通道被配置为输入, IC3映射在TI4上; 11: CC3通道被配置为输入, IC3映射在TRC上。此模式仅工作在内部触发输入被选中时 (由TIMx_SMCTRL寄存器的TSEL位选择)。 注: CC3SEL 仅在通道关闭时 (TIMx_CCEN 寄存器的CC3EN=0) 才是可写的。 |

11.4.10 捕获/比较使能寄存器 (TIMx_CCEN)

偏移地址: 0x20

复位值: 0x0000 0000

| | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|----------|----------|-------|-------|--------|------|-------|-------|--------|------|-------|-------|--------|------|----------|------|-------|----|
| 31 | Reserved | | | | | | | | | | 22 | 21 | 20 | 19 | 18 | 17 | 16 |
| | | | | | | | | | | | CC6P | CC6EN | | Reserved | CC5P | CC5EN | |
| 15 | 14 | 13 | 12 | 11 | 10 | 9 | 8 | 7 | 6 | rw | 5 | rw | 4 | 3 | 2 | rw | 0 |
| Reserved | CC4P | CC4EN | CC3NP | CC3NEN | CC3P | CC3EN | CC2NP | CC2NEN | CC2P | CC2EN | CC1NP | CC1NEN | CC1P | CC1EN | | | |
| | rw | rw | rw | rw | rw | rw | rw | rw | rw | rw | rw | rw | rw | rw | rw | rw | |

| 位域 | 名称 | 描述 |
|-------|----------|--|
| 31:22 | Reserved | 保留, 必须保持复位值 |
| 21 | CC6P | 捕获/比较6输出极性 (Capture/Compare 6 output polarity) 参考TIMx_CCEN.CC1P的描述。 |
| 20 | CC6EN | 捕获/比较6输出使能 (Capture/Compare 6 output enable) |

| 位域 | 名称 | 描述 |
|--------|----------|--|
| | | 参考TIMx_CCEN.CC1EN 的描述 |
| 19:18 | Reserved | 保留, 必须保持复位值 |
| 17 | CC5P | 捕获/比较5输出极性 (Capture/Compare 5 output polarity) 参考TIMx_CCEN.CC1P的描述。 |
| 16 | CC5EN | 捕获/比较5输出使能 (Capture/Compare 5 output enable) 参考TIMx_CCEN.CC1EN 的描述 |
| 15: 14 | Reserved | 保留, 必须保持复位值 |
| 13 | CC4P | 捕获/比较4输出极性 (Capture/Compare 4 output polarity) 参考TIMx_CCEN.CC1P的描述。 |
| 12 | CC4EN | 捕获/比较4输出使能 (Capture/Compare 4 output enable) 参考TIMx_CCEN.CC1EN 的描述。 |
| 11 | CC3NP | 捕获/比较3互补输出极性 (Capture/Compare 3 complementary output polarity) 参考TIMx_CCEN.CC1NP的描述。 |
| 10 | CC3NEN | 捕获/比较3互补输出使能 (Capture/Compare 3 complementary output enable) 参考TIMx_CCEN.CC1NEN的描述。 |
| 9 | CC3P | 捕获/比较3输出极性 (Capture/Compare 3 output polarity) 参考TIMx_CCEN.CC1P的描述。 |
| 8 | CC3EN | 捕获/比较3输出使能 (Capture/Compare 3 output enable) 参考TIMx_CCEN.CC1E 的描述。 |
| 7 | CC2NP | 捕获/比较2互补输出极性 (Capture/Compare 2 complementary output polarity) 参考TIMx_CCEN.CC1NP的描述。 |
| 6 | CC2NEN | 捕获/比较2互补输出使能 (Capture/Compare 2 complementary output enable) 参考TIMx_CCEN.CC1NEN的描述。 |
| 5 | CC2P | 捕获/比较2输出极性 (Capture/Compare 2 output polarity) 参考TIMx_CCEN.CC1P的描述。 |
| 4 | CC2EN | 捕获/比较2输出使能 (Capture/Compare 2 output enable) 参考TIMx_CCEN.CC1EN的描述。 |
| 3 | CC1NP | 捕获/比较1互补输出极性 (Capture/Compare 1 complementary output polarity) 0: OC1N高电平有效; 1: OC1N低电平有效。 |
| 2 | CC1NEN | 捕获/比较1互补输出使能 (Capture/Compare 1 complementary output enable) 0: 禁用 - 禁用输出 OC1N 信号。 OC1N 的电平取决于TIMx_BKDT.MOEN、 TIMx_BKDT.OSSI、TIMx_BKDT.OSSR、TIMx_CTRL2.OI1、TIMx_CTRL2.OI1N 和 TIMx_CCEN.CC1EN 的值。 1: 使能 - 使能输出 OC1N 信号。 OC1N 的电平取决于TIMx_BKDT.MOEN、 TIMx_BKDT.OSSI、TIMx_BKDT.OSSR、TIMx_CTRL2.OI1、TIMx_CTRL2.OI1N 和 TIMx_CCEN.CC1EN 的值。 |
| 1 | CC1P | 捕获/比较1输出极性 (Capture/Compare 1 output polarity) CC1对应通道为输出模式时: 0: OC1 高电平有效 1: OC1 低电平有效 CC1对应通道为输入模式时: |

| 位域 | 名称 | 描述 |
|----|-------|---|
| | | <p>此时, 该位用于选择是使用IC1还是IC1的反相信号作为触发信号或捕捉信号。</p> <p>0: 非反相: 当 IC1 产生上升沿时发生捕获动作。 当用作外部触发时, IC1 是非反相的。</p> <p>1: 反相: 当 IC1 产生下降沿时发生捕获动作。 当用作外部触发时, IC1 被反相。</p> |
| 0 | CC1EN | <p>捕获/比较1输出使能 (Capture/Compare 1 output enable)</p> <p>CC1通道配置为输出:</p> <p>0: 关闭— OC1禁止输出, 因此OC1的输出电平依赖于MOEN、OSSI、OSSR、OI1、OI1N和CC1NEN位的值。</p> <p>1: 开启— OC1信号输出到对应的输出引脚, 其输出电平依赖于MOEN、OSSI、OSSR、OI1、OI1N和CC1NEN位的值。</p> <p>CC1通道配置为输入:</p> <p>该位决定了计数器的值是否能捕获入TIMx_CCDAT1寄存器。</p> <p>0: 捕获禁止;</p> <p>1: 捕获使能。</p> |

表 11-4 带刹车功能的互补输出通道 OCx 和 OCxN 的控制位

| 控制位 | | | | | 输出状态 ⁽¹⁾ | |
|------|------|------|-------|--------|---|--|
| MOEN | OSSI | OSSR | CCxEN | CCxNEN | OCx 输出状态 | OCxN 输出状态 |
| 1 | X | 0 | 0 | 0 | 输出禁止 (与定时器断开) OCx=0, OCx_EN=0 | 输出禁止 (与定时器断开) OCxN=0, OCxN_EN=0 |
| | | 0 | 0 | 1 | 输出禁止 (与定时器断开) OCx=0, OCx_EN=0 | OCxREF + 极性, OCxN= OCxREF xor CCxNP, OCxN_EN=1 |
| | | 0 | 1 | 0 | OCxREF + 极性, OCx= OCxREF xor CCxP, OCx_EN=1 | 输出禁止 (与定时器断开) OCxN=0, OCxN_EN=0 |
| | | 0 | 1 | 1 | OCxREF + 极性 + 死区, OCx_EN=1 | OCxREF 反相 + 极性 + 死区, OCxN_EN=1 |
| | | 1 | 0 | 0 | 输出禁止 (与定时器断开) OCx=CCxP, OCx_EN=0 | 输出禁止 (与定时器断开) OCxN=CCxNP, OCxN_EN=0 |
| | | 1 | 0 | 1 | 关闭状态 (输出使能且为无效电平) OCx=CCxP, OCx_EN=1 | OCxREF + 极性, OCxN= OCxREF xor CCxNP, OCxN_EN=1 |
| | | 1 | 1 | 0 | OCxREF + 极性, OCx= OCxREF xor CCxP, OCx_EN=1 | 关闭状态 (输出使能且为无效电平) OCxN=CCxNP, OCxN_EN=1 |

| 控制位 | | | | | 输出状态 ⁽¹⁾ | |
|------|------|------|-------|--------|--|-----------------------------------|
| MOEN | OSSI | OSSR | CCxEN | CCxNEN | OCx 输出状态 | OCxN 输出状态 |
| | | 1 | 1 | 1 | OCxREF + 极性 + 死区, OCx_EN=1 | OCxREF 反相 + 极性 + 死区, OCxN_EN=1 |
| 0 | 0 | X | 0 | 0 | 输出禁止 (与定时器断开) | |
| | 0 | | 0 | 1 | 异步: OCx=CCxP, OCx_EN=0, OCxN=CCxNP, OCxN_EN=0; | |
| | 0 | | 1 | 0 | 若时钟存在: 假设 (CCxP ^ OIx) ^ (CCxNP^OIxN)! = 0, | |
| | 0 | | 1 | 1 | 经过一个死区时间后 OCx=OIx, OCxN=OIxN | |
| | 1 | | 0 | 0 | 关闭状态 (输出使能且为无效电平) | |
| | 1 | | 0 | 1 | 异步: OCx=CCxP, OCx_EN=1, OCxN=CCxNP, OCxN_EN=1; | |
| | 1 | | 1 | 0 | 若时钟存在: 假设 (CCxP ^ OIx) ^ (CCxNP^OIxN)! = 0, | |
| | 1 | | 1 | 1 | 经过一个死区时间后 OCx=OIx, OCxN=OIxN, | |

1. 如果一个通道的 2 个输出都没有使用 (CCxEN = CCxNEN = 0), 那么 OIx, OIxN, CCxP 和 CCxNP 都必须清零。

注: 引脚连接到互补的 OCx 和 OCxN 通道的外部 I/O 引脚的状态, 取决于 OCx 和 OCxN 通道状态和 GPIO 以及 AFIO 寄存器。

11.4.11 计数器 (TIMx_CNT)

偏移地址: 0x24

复位值: 0x0000

| | | |
|----|-----------|---|
| 15 | CNT[15:0] | 0 |
| rw | | |

| 位域 | 名称 | 描述 |
|------|-----------|-----------------------|
| 15:0 | CNT[15:0] | 计数器的值 (Counter value) |

11.4.12 预分频器 (TIMx_PSC)

偏移地址: 0x28

复位值: 0x0000

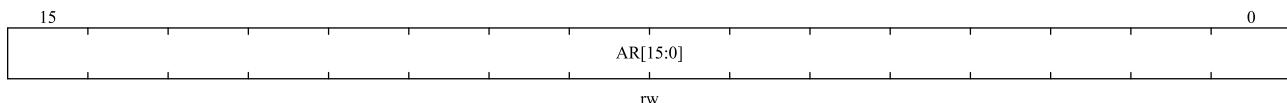
| | | |
|----|-----------|---|
| 15 | PSC[15:0] | 0 |
| rw | | |

| 位域 | 名称 | 描述 |
|------|-----------|--|
| 15:0 | PSC[15:0] | 预分频器的值 (Prescaler value) 计数器时钟 $f_{CK_CNT} = f_{CK_PSC} / (PSC[15:0] + 1)$ 。 每次发生更新事件时, PSC 值都会加载到预分频器的影子寄存器中。 |

11.4.13 自动重装载寄存器 (TIMx_AR)

偏移地址: 0x2C

复位值: 0xFFFF

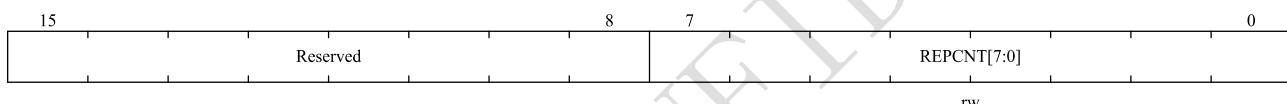


| 位域 | 名称 | 描述 |
|------|----------|--|
| 15:0 | AR[15:0] | <p>自动重装载的值 (Auto-reload value)</p> <p>AR包含了将要装载入实际的自动重装载寄存器的值。详细参考11.3.1节：有关AR的更新和动作。</p> <p>当自动重装载的值为空时，计数器不工作。</p> |

11.4.14 重复计数寄存器 (TIMx_REPCNT)

偏移地址: 0x30

复位值: 0x0000

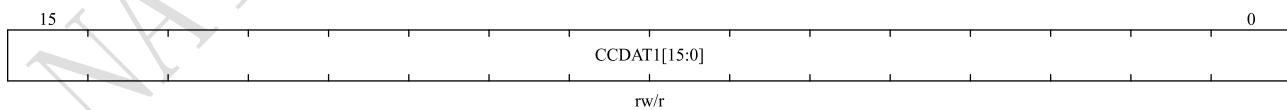


| 位域 | 名称 | 描述 |
|------|-------------|--|
| 15:8 | Reserved | 保留，必须保持复位值 |
| 7:0 | REPCNT[7:0] | <p>重复计数器的值 (Repetition counter value)</p> <p>重复计数器仅在给定数量 (N+1) 个计数器周期后用于生成更新事件或更新定时器寄存器，其中 N 是 TIMx_REPCNT.REPCNT 的值。在向上计数模式下，每次计数器溢出，向下计数模式下每次计数器下溢或中央对齐模式下每次计数器溢出和每次计数器下溢时，重复计数器都会递减。设置 TIMx_EVTGEN.UDGN 位将重新加载 TIMx_REPCNT.REPCNT 的内容并生成更新事件。</p> |

11.4.15 捕获/比较寄存器 1 (TIMx_CCDAT1)

偏移地址: 0x34

复位值: 0x0000 0000



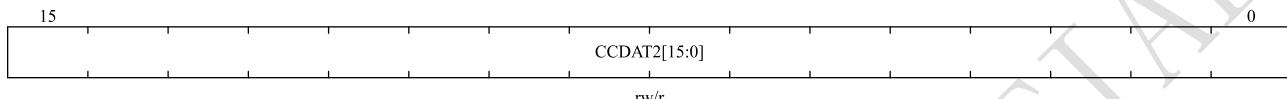
| 位域 | 名称 | 描述 |
|------|--------------|--|
| 15:0 | CCDAT1[15:0] | <p>捕获/比较通道1的值 (Capture/Compare 1 value)</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ CC1 通道配置为输出: <p>CCDAT1 包含要与计数器 TIMx_CNT 比较的值，在 OC1 输出上发出信号。</p> <p>如果未在 TIMx_CCMOD1.OC1PEN 位中选择预加载功能，则写入的值会立即传输到有效寄存器。否则，仅当更新事件发生时，此预加载值才会传输到活动寄存器。</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ CC1 通道配置为输入: |

| 位域 | 名称 | 描述 |
|----|----|---|
| | | CCDAT1 包含由最后一个输入捕获 1 事件 (IC1) 传输的计数器值。 当配置为输入模式时, 寄存器 CCDAT1 和 CCDDAT1 只能读取。 当配置为输出模式时, 寄存器 CCDAT1 和 CCDDAT1 是可读写的。 |

11.4.16 捕获/比较寄存器 2 (TIMx_CC DAT2)

偏移地址: 0x38

复位值: 0x0000 0000

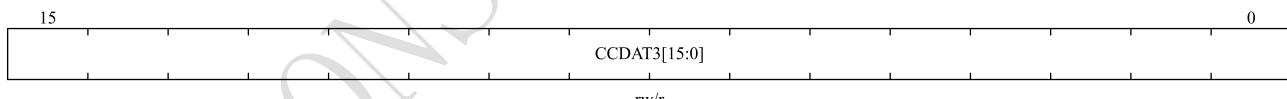


| 位域 | 名称 | 描述 |
|------|--------------|--|
| 15:0 | CCDAT2[15:0] | 捕获/比较通道2的值 (Capture/Compare 2 value) ■ CC2 通道配置为输出: CCDAT2 包含要与计数器 TIMx_CNT 比较的值, 在 OC2 输出上发出信号。 如果未在 TIMx_CCMOD1.OC2PEN 位中选择预加载功能, 则写入的值会立即传输到有效寄存器。否则, 仅当更新事件发生时, 此预加载值才会传输到活动寄存器。 ■ CC2 通道配置为输入: CCDAT2 包含由最后一个输入捕获 2 事件 (IC2) 传输的计数器值。 当配置为输入模式时, 寄存器 CCDAT2 和 CCDDAT2 只能读取。 当配置为输出模式时, 寄存器 CCDAT2 和 CCDDAT2 是可读写的。 |

11.4.17 捕获/比较寄存器 3 (TIMx_CC DAT3)

偏移地址: 0x3C

复位值: 0x0000 0000



| 位域 | 名称 | 描述 |
|------|--------------|--|
| 15:0 | CCDAT3[15:0] | 捕获/比较通道3的值 (Capture/Compare 3 value) ■ CC3 通道配置为输出: CCDAT3 包含要与计数器 TIMx_CNT 比较的值, 在 OC3 输出上发出信号。 如果未在 TIMx_CCMOD2.OC3PEN 位中选择预加载功能, 则写入的值会立即传输到有效寄存器。否则, 仅当更新事件发生时, 此预加载值才会传输到活动寄存器。 ■ CC3 通道配置为输入: CCDAT3 包含由最后一个输入捕获 3 事件 (IC3) 传输的计数器值。 当配置为输入模式时, 寄存器 CCDAT3 和 CCDDAT3 只能读取。 当配置为输出模式时, 寄存器 CCDAT3 和 CCDDAT3 是可读写的。 |

11.4.18 捕获/比较寄存器 4 (TIMx_CC DAT4)

偏移地址: 0x40

复位值: 0x0000 0000

| | | |
|------|--------------|---|
| 15 | CCDAT4[15:0] | 0 |
| rw/r | | |

| 位域 | 名称 | 描述 |
|------|--------------|--|
| 15:0 | CCDAT4[15:0] | <p>捕获/比较通道4的值 (Capture/Compare 4 value)</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ CC4 通道配置为输出: CCDAT4 包含要与计数器 TIMx_CNT 比较的值, 在 OC4 输出上发出信号。如果未在 TIMx_CCMOD2.OC4PEN 位中选择预加载功能, 则写入的值会立即传输到有效寄存器。否则, 仅当更新事件发生时, 此预加载值才会传输到活动寄存器。 ■ CC4 通道配置为输入: CCDAT4 包含由最后一个输入捕获 4 事件 (IC4) 传输的计数器值。当配置为输入模式时, 寄存器 CCDAT4 和 CCDDAT4 只能读取。当配置为输出模式时, 寄存器 CCDAT4 和 CCDDAT4 是可读写的。 |

11.4.19 刹车和死区寄存器 (TIMx_BKDT)

偏移地址: 0x44

复位值: 0x0000

| | | | | | | | | | |
|------|------|-----|------|------|------|-------------|---|-----------|---|
| 15 | 14 | 13 | 12 | 11 | 10 | 9 | 8 | 7 | 0 |
| MOEN | AOEN | BKP | BKEN | OSSR | OSSI | LCKCFG[1:0] | | DTGN[7:0] | |
| rw | rw | rw | rw | rw | rw | rw | | rw | |

注释: 根据锁定设置, AOEN、BKP、BKEN、OSSR、OSSI 和 DTGN[7:0] 位均可被写保护, 有必要在第一次写入 TIMx_BKDT 寄存器时对它们进行配置。

| 位域 | 名称 | 描述 |
|----|------|--|
| 15 | MOEN | <p>主输出使能 (Main output enable)</p> <p>该位可由软件或硬件根据 TIMx_BKDT.AOEN 位设置, 一旦刹车输入有效, 该位由硬件异步清零。它仅对配置为输出的通道有效。</p> <p>0: OC 和 OCN 输出被禁用或强制进入空闲状态。</p> <p>1: 如果设置了 TIMx_CCEN.CCxEN 或 TIMx_CCEN.CCxNEN 位, 则使能 OC 和 OCN 输出。有关更多详细信息, 请参见第 11.4.10 节捕获/比较使能寄存器 (TIMx_CCEN)。</p> |
| 14 | AOEN | <p>自动输出使能 (Automatic output enable)</p> <p>0: 只有软件可以设置 TIMx_BKDT.MOEN;</p> <p>1: 软件设置 TIMx_BKDT.MOEN; 或者如果刹车输入未激活, 则在下一次更新事件发生时, 硬件自动设置 TIMx_BKDT.MOEN。</p> |
| 13 | BKP | <p>刹车输入极性 (Break polarity)</p> <p>0: 刹车输入低电平有效;</p> <p>1: 刹车输入高电平有效。</p> <p>注: 任何对该位的写操作都需要一个APB时钟的延迟以后才能起作用。</p> |
| 12 | BKEN | <p>刹车功能使能 (Break enable)</p> <p>0: 禁止刹车输入 (BRK及CCS时钟失效事件);</p> <p>1: 开启刹车输入 (BRK及CCS时钟失效事件)。</p> <p>注: 任何对该位的写操作都需要一个APB时钟的延迟以后才能起作用。</p> |

| 位域 | 名称 | 描述 |
|-----|-------------|---|
| 11 | OSSR | <p>当 TIMx_BKDT.MOEN=1 且通道为互补输出时使用该位。 没有互补输出的定时器中不存在 OSSR 位。</p> <p>0: 当定时器不工作时, 禁止OC/OCN输出 (OC/OCN使能输出信号=0) ; 1: 当定时器不工作时, 一旦CCxEN=1或CCxNEN=1, 首先开启OC/OCN并输出无效电平, 然后置OC/OCN使能输出信号=1。</p> <p>有关更多详细信息, 请参见第11.4.10节, 捕获/比较启用寄存器 (TIMx_CCEN)。</p> |
| 10 | OSSI | <p>空闲模式下“关闭状态”选择 (Off-state selection for Idle mode)</p> <p>当 TIMx_BKDT.MOEN=0 且通道配置为输出时使用该位。</p> <p>0: 当定时器不工作时, 禁止OC/OCN输出 (OC/OCN使能输出信号=0) ; 1: 当定时器不工作时, 一旦CCxEN=1 或CCxNEN=1, OC/OCN首先输出其空闲电平, 然后OC/OCN使能输出信号=1。</p> <p>有关更多详细信息, 请参见第11.4.10 节, 捕获/比较启用寄存器 (TIMx_CCEN)。</p> |
| 9:8 | LCKCFG[1:0] | <p>锁定设置 (Lock configuration) 该位为防止软件错误而提供写保护。 这些位提供针对软件错误的写保护。</p> <p>00: – 没有写保护。</p> <p>01: – 锁定级别 1 TIMx_BKDT.DTGN、TIMx_BKDT.BKEN、TIMx_BKDT.BKP、TIMx_BKDT.AOEN、 TIMx_CTRL2.OIx、TIMx_CTRL2.OIxN 位启用写保护。</p> <p>10: – 锁定 2 级 除了 LOCK Level 1 模式下的寄存器写保护外, TIMx_CCEN.CCxP 和 TIMx_CCEN.CCxNP (如果相应通道配置为输出模式), TIMx_BKDT.OSSR 和 TIMx_BKDT.OSSI 位也使能写保护。</p> <p>11: – 锁定 3 级 除了 LOCK Level 2 中的寄存器写保护外, TIMx_CCMODx.OCxMD 和 TIMx_CCMODx.OCxPEN 位 (如果相应通道配置为输出模式) 也启用写保护。 注意: 系统复位后, LCKCFG 位只能写一次。一旦写入 TIMx_BKDT 寄存器, LCKCFG 将受到保护, 直到下一次复位。</p> |
| 7:0 | DTGN[7:0] | <p>死区发生器设置 (Dead-time generator setup)</p> <p>这些位定义插入的互补输出之间的死区持续时间。 DTGN值与死区时间的关系如下:</p> <p>DTGN[7:5]=0xx => DT=DTGN[7:0] × T_{dtgn}, T_{dtgn} = T_{DTS};</p> <p>DTGN[7:5]=10x => DT=(64+DTGN[5:0]) × T_{dtgn}, T_{dtgn} = 2 × T_{DTS};</p> <p>DTGN[7:5]=110 => DT=(32+DTGN[4:0]) × T_{dtgn}, T_{dtgn} = 8 × T_{DTS};</p> <p>DTGN[7:5]=111 => DT=(32+DTGN[4:0]) × T_{dtgn}, T_{dtgn} = 16 × T_{DTS};</p> |

11.4.20 DMA 控制寄存器 (TIMx_DCTRL)

偏移地址: 0x48

复位值: 0x0000

| | | | | | | | |
|----------|----|------------|---|----------|---|-------------|---|
| 15 | 13 | 12 | 8 | 7 | 5 | 4 | 0 |
| Reserved | | DBLEN[4:0] | | Reserved | | DBADDR[4:0] | |

rw

rw

| 位域 | 名称 | 描述 |
|-------|-------------|---|
| 15:13 | Reserved | 保留, 必须保持复位值 |
| 12:8 | DBLEN[4:0] | <p>DMA连续传送长度 (DMA burst length) 该位字段定义 DMA 将访问 (写入/读取) TIMx_DADDR 寄存器的次数。 00000: 1次传输 00001: 2次传输 00010: 3次传输 ... 10001: 18次传输</p> |
| 7:5 | Reserved | 保留, 必须保持复位值 |
| 4:0 | DBADDR[4:0] | <p>DMA基地址 (DMA base address) 该位字段定义 DMA 访问 TIMx_DADDR 寄存器的第一个地址。 当第一次通过 TIMx_DADDR 完成访问时, 该位域指定您刚刚访问的地址。 然后第二次访问TIMx_DADDR, 会访问到“DMA Base Address + 4”的地址 00000: TIMx_CTRL1, 00001: TIMx_CTRL2, 00010: TIMx_SMCTRL, </p> |

11.4.21 连续模式的 DMA 地址 (TIMx_DADDR)

偏移地址: 0x4C

复位值: 0x0000

| | | |
|----|-------------|---|
| 15 | BURST[15:0] | 0 |
|----|-------------|---|

rw

| 位域 | 名称 | 描述 |
|------|-------------|---|
| 15:0 | BURST[15:0] | <p>DMA 访问缓冲区。 当对该寄存器分配读或写操作时, 将访问位于地址范围 (DMA base address + DMA burst length \times 4) 的寄存器。 DMA base address = The address of TIM_CTRL1 + TIMx_DCTRL. DBADDR * 4; DMA burst len = TIMx_DCTRL.DBLEN + 1. 例子: 如果 TIMx_DCTRL.DBLEN = 0x3 (4 次传输), TIMx_DCTRL.DBADDR = 0xD (TIMx_CCDAT1), DMA 数据长度 = 半字, DMA 存储器地址 = SRAM 中的缓冲区地址, DMA 外设地址 = TIMx_DADDR 地址。 当事件发生时, TIMx 将向 DMA 发送请求, 并传输 4 次数据。 第一次, 对 TIMx_DADDR 寄存器的 DMA 访问将映射到访问 TIMx_CCDAT1 寄存器; 第二次, 对 TIMx_DADDR 寄存器的 DMA 访问将映射到访问 TIMx_CCDAT2 寄存器;</p> |

| 位域 | 名称 | 描述 |
|----|----|---|
| | | <p>器；</p> <p>.....</p> <p>第四次，对 TIMx_DADDR 寄存器的 DMA 访问将映射到访问 TIMx_CCDAT4 寄存器；</p> |

11.4.22 捕获/比较寄存器 (TIMx_CCMOD3)

偏移地址: 0x54

复位值: 0x0000

| 位域 | 名称 | 描述 |
|-------|------------|--|
| 15 | OC6CEN | 输出比较6清0使能 (Output compare 6 clear enable) |
| 14:12 | OC6MD[2:0] | 输出比较6模式 (Output compare 6 mode) |
| 11 | OC6PEN | 输出比较6预装载使能 (Output compare 6 preload enable) |
| 10 | OC6FEN | 输出比较6快速使能 (Output compare 6 fast enable) |
| 9:8 | Reserved | 保留, 必须保持复位值 |
| 7 | OC5CEN | 输出比较5清0使能 (Output compare 3 clear enable) |
| 6:4 | OC5MD[2:0] | 输出比较5模式 (Output compare 3 mode) |
| 3 | OC5PEN | 输出比较5预装载使能 (Output compare 5 preload enable) |
| 2 | OC5FEN | 输出比较5快速使能 (Output compare 5 fast enable) |
| 1:0 | Reserved | 保留, 必须保持复位值 |

11.4.23 捕获/比较寄存器 5 (TIMx_CC5)

偏移地址: 0x58

复位值: 0x0000

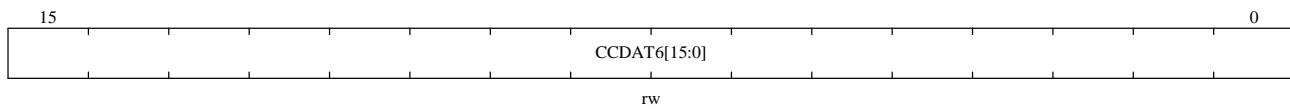
Diagram of a 16-bit register labeled **CCDAT5[15:0]**. The register has a width of **rw** bits, with the most significant bit at index 15 and the least significant bit at index 0. The register is currently empty, indicated by a white box.

| 位域 | 名称 | 描述 |
|------|--------------|--|
| 15:0 | CCDAT5[15:0] | <p>捕获/比较通道5的值 (Capture/Compare 5 value)</p> <p>■ CC5 通道只能配置为输出:</p> <p>CCDAT5 包含要与计数器 TIMx_CNT 比较的值，在 OC5 输出上发出信号。</p> <p>如果未在 TIMx_CCMOD3.OC5PEN 位中选择预加载功能，则写入的值会立即传输到有效寄存器。否则，仅当更新事件发生时，此预加载值才会传输到活动寄存器。</p> <p>CC5 用于比较器消隐。</p> |

11.4.24 捕获/比较寄存器 6 (TIMx_CC DAT6)

偏移地址: 0x5C

复位值: 0x0000



| 位域 | 名称 | 描述 |
|------|--------------|--|
| 15:0 | CCDAT6[15:0] | <p>捕获/比较通道6的值 (Capture/Compare 6 value)</p> <p>■ CC6 通道只能配置为输出：</p> <p>CCDAT6 包含要与计数器 TIMx_CNT 比较的值，在 OC6 输出上发出信号。</p> <p>如果未在 TIMx_CCMOD3.OC6PEN 位中选择预加载功能，则写入的值会立即传输到有效寄存器。否则，仅当更新事件发生时，此预加载值才会传输到活动寄存器。</p> <p>TIM1_CC6 用于 OPAMP1 和 OPAMP2 的输入通道切换；TIM8_CC6 用于 OPAMP3 和 OPAMP4 的输入通道切换；</p> |

12 通用定时器 (TIM2、TIM3、TIM4 和 TIM5)

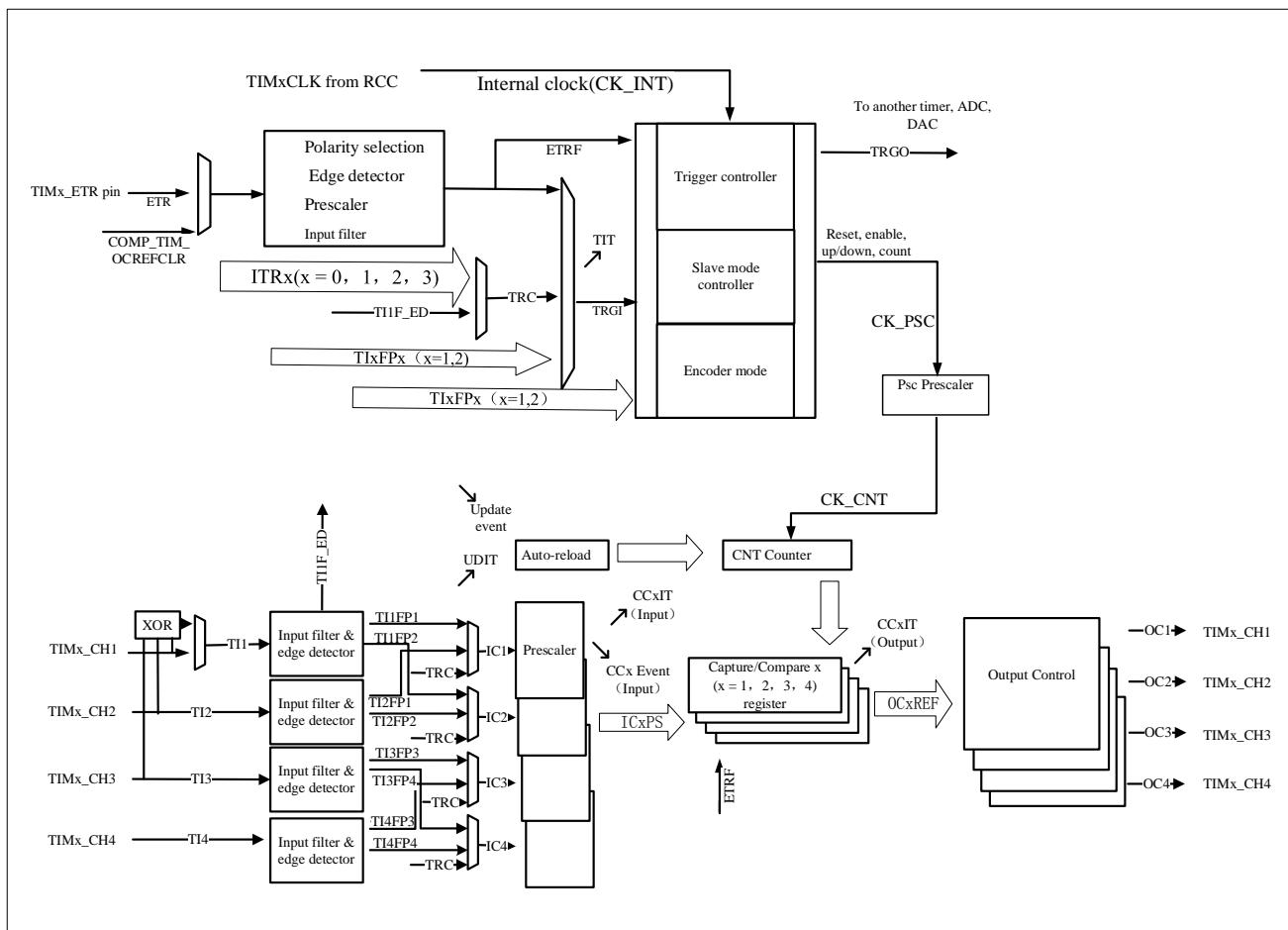
12.1 TIM2、TIM3、TIM4 和 TIM5 简介

通用定时器 (TIM2、TIM3、TIM4 和 TIM5) 主要用于以下场合：对输入信号进行计数、测量输入信号的脉冲宽度和产生输出波形等。

12.2 TIM2、TIM3、TIM4 和 TIM5 主要特性

- 16 位自动装载计数器。(可实现向上计数、向下计数、向上/下计数)。
- 16 位可编程预分频器。(分频系数可配置为 1 到 65536 之间的任意值)
- TIM2、TIM3、TIM4 和 TIM5 最多支持 4 个通道
- 通道工作模式：PWM 输出、输出比较、单脉冲模式输出、输入捕获
- 如下事件发生时产生中断/DMA：
 - ◆ 更新事件
 - ◆ 触发事件
 - ◆ 输入捕获
 - ◆ 输出比较
- 可通过外部信号控制定时器
- 多个定时器连接，以实现定时器同步或链接
- 增量（正交）编码器接口：用于追踪运行轨迹和解析旋转方位
- 霍尔传感器接口：用于三相电机控制
- 支持捕获内部比较器输出信号。

图 12-1 TIMx (x=2,3,4 and 5) 框图



↓ The event

↗ Interrupt and DMA output

捕获通道 1/2/3/4 输入可以来自 IOM 或比较器输出, TIM5 的 CH4 除外 (只能来自 IOM)

ETR 输入到 IOM 的映射, 见 7.2.5.7

12.3 TIM2、TIM3、TIM4 和 TIM5 功能描述

12.3.1 时基单元

通用器的时基单元主要包括：预分频器、计数器和自动重装载寄存器。当时基单元工作时，软件可以随时读取和写入相应的寄存器 (TIMx_PSC、TIMx_CNT 和 TIMx_AR)。

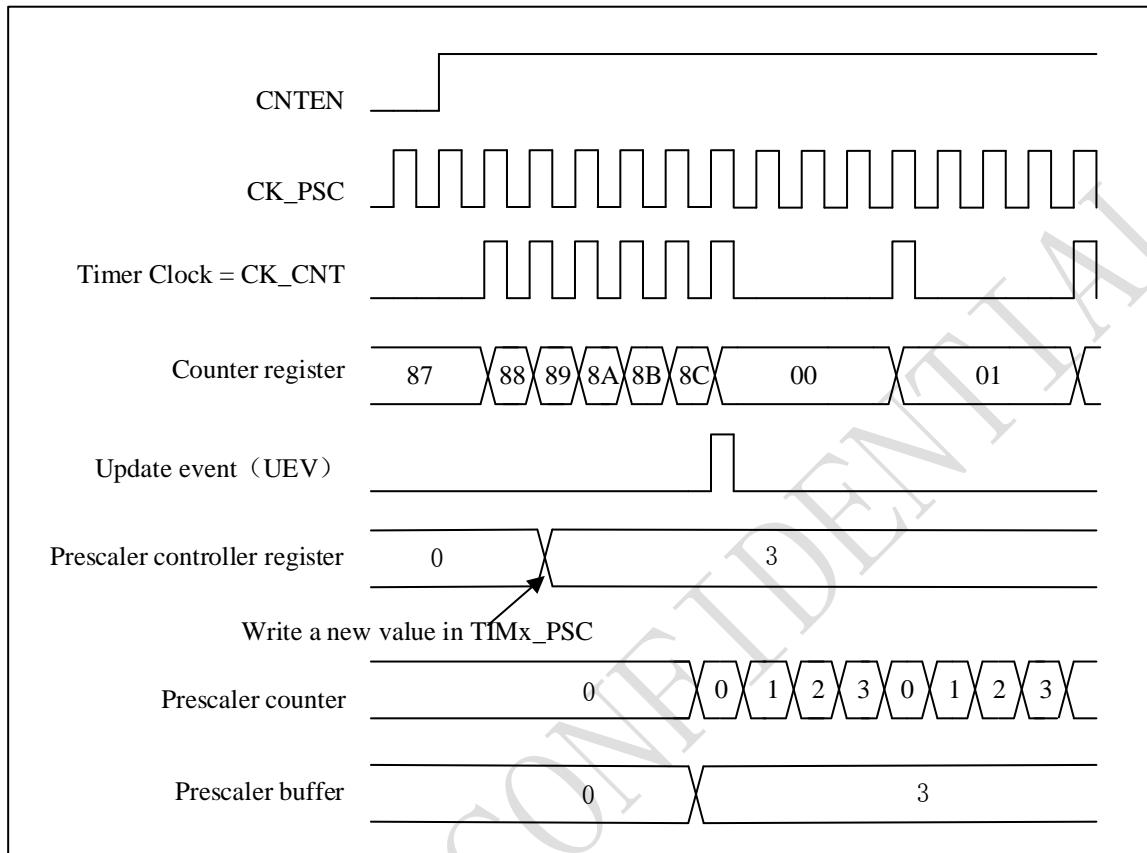
根据自动重装载预装载使能位 (TIMx_CTRL1.AR PEN) 的设置，预装载寄存器的值会立即或在每次更新事件 UEV 时传输到影子寄存器。TIMx_CTRL1.UPDIS=0 时，当计数器上溢/下溢或软件设置 TIMx_EVTGEN.UDGN，将生成更新事件。计数器 CK_CNT 仅在 TIMx_CTRL1.CNTEN 位被设置时有效。计数器在 TIMx_CTRL.CNTEN 位被设置后一个时钟周期之后开始计数。

12.3.1.1 预分频器描述

TIMx_PSC 寄存器由一个 16 位计数器组成，可用于计数器时钟频率按 1 和 65536 之间的任意分频。因为这

个控制器带有缓冲器，可以在运行时动态改变。新的预分频器值只有在下次更新事件中才会被采用。

图 12-2 当预分频的参数从 1 到 4，计数器的时序图



12.3.2 计数器模式

12.3.2.1 向上计数模式

使用向上计数模式，计数器将从 0 计数到寄存器 TIMx_AR 的值，然后重置为 0。并产生一个计数器溢出事件。

如果设置 TIMx_CTRL1.UPRS 位(选择更新请求)和 TIMx_EVTGEN.UDGN 位，将产生一个更新事件(UEV)。但是 TIMx_STS.UDITF 不会被硬件置起，因此不会产生更新中断或 DMA 更新请求。这是为了避免清除计数器时产生更新中断。

取决于 TIMx_CTRL1.UPRS 的配置，当发生更新事件时，TIMx_STS.UDITF 被设置，所有寄存器都会更新：

- 当 TIMx_CTRL1.AR PEN = 1，预装载寄存器(TIMx_AR)的值被更新到自动装载影子寄存器
- 预加载值 (TIMx_PSC) 被重新加载到预分频器影子寄存器中

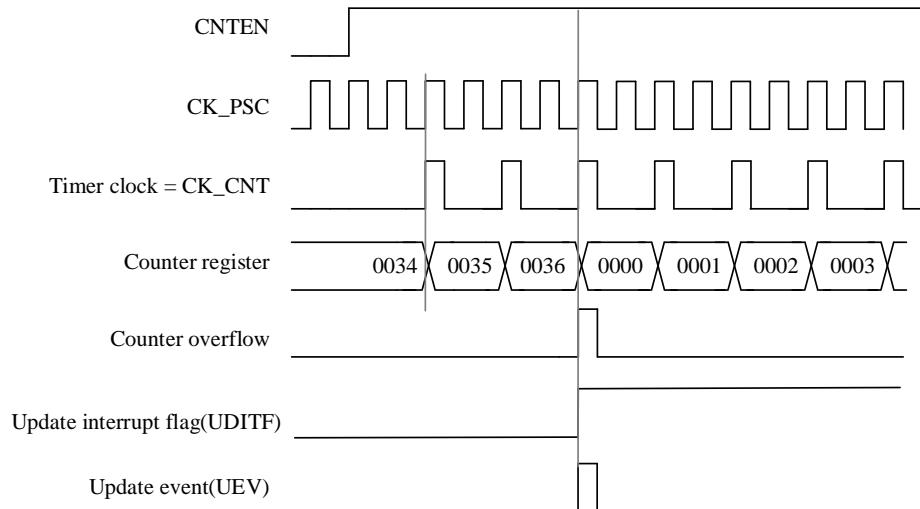
为了避免在向预装载寄存器中写入新值时更新影子寄存器，可以通过设置 TIMx_CTRL1.UPDIS=1 来禁止更新事件。

当产生一个更新事件时，计数器仍将被清除，预分频器计数器也将被设置为 0 (但预分频器值将保持不变)。

下图给出一些示例，展示了向上计数模式计数器在不同分频因子下的动作。

图 12-3 当内部时钟分频因子 = 2/N 时, 向上计数的时序图

Internal clock divided by 2



Internal clock divided by N

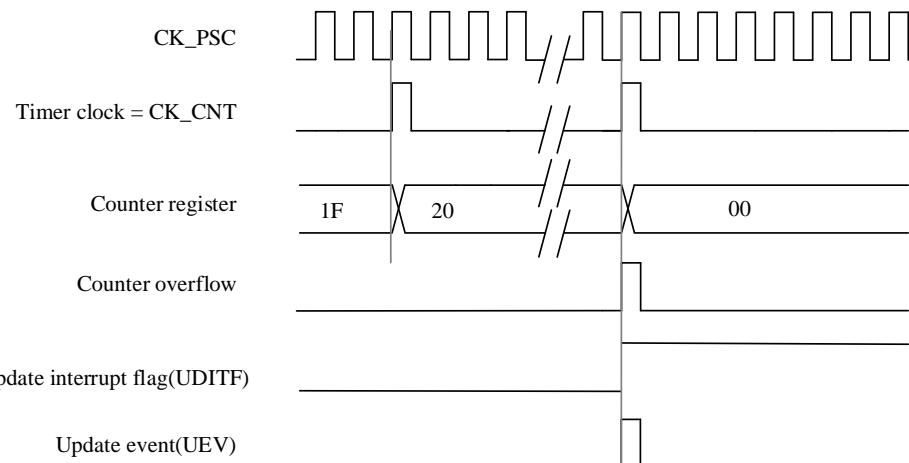
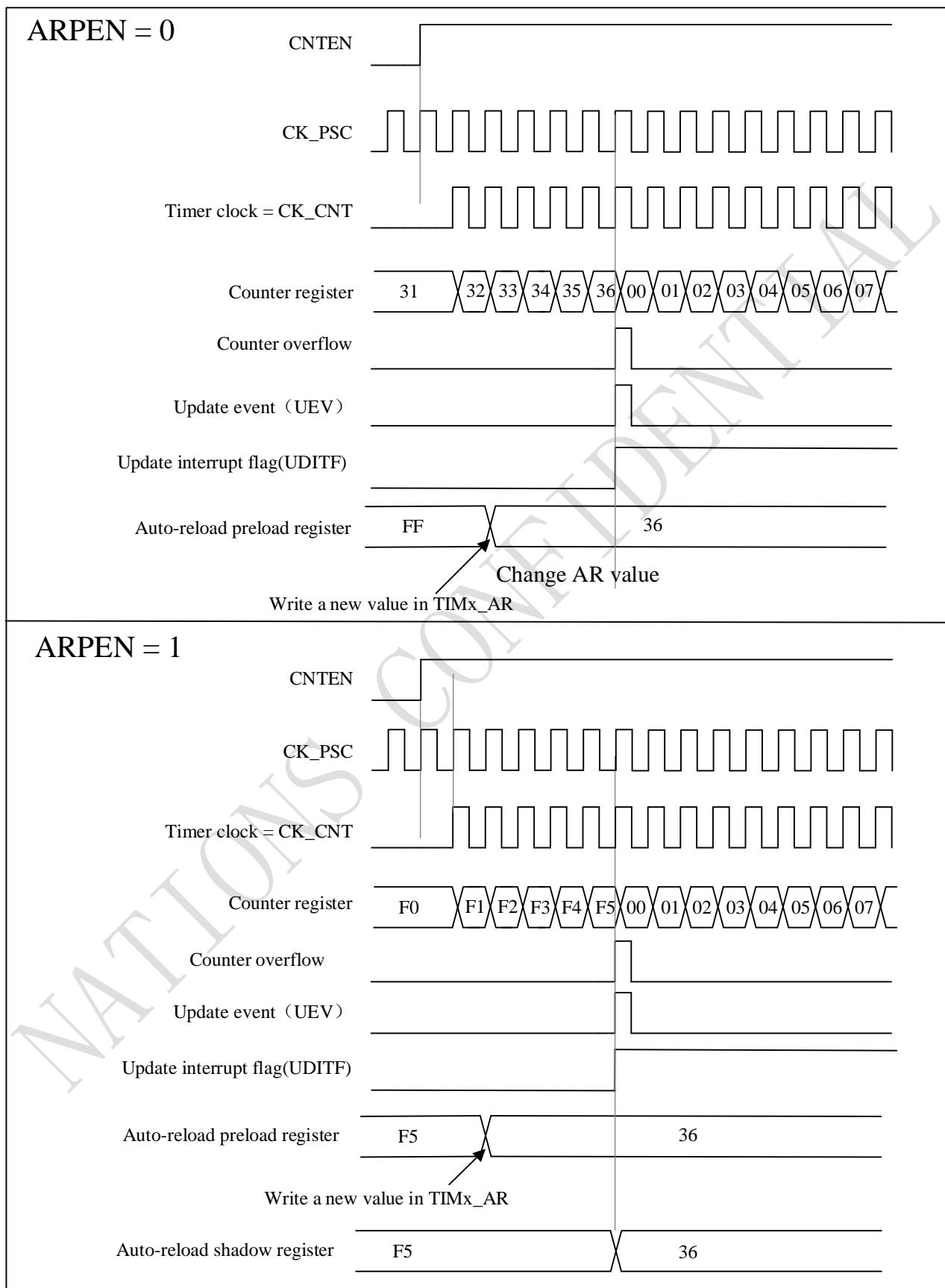


图 12-4 当 ARPEN=0/1 产生更新事件时，向上计数的时序图



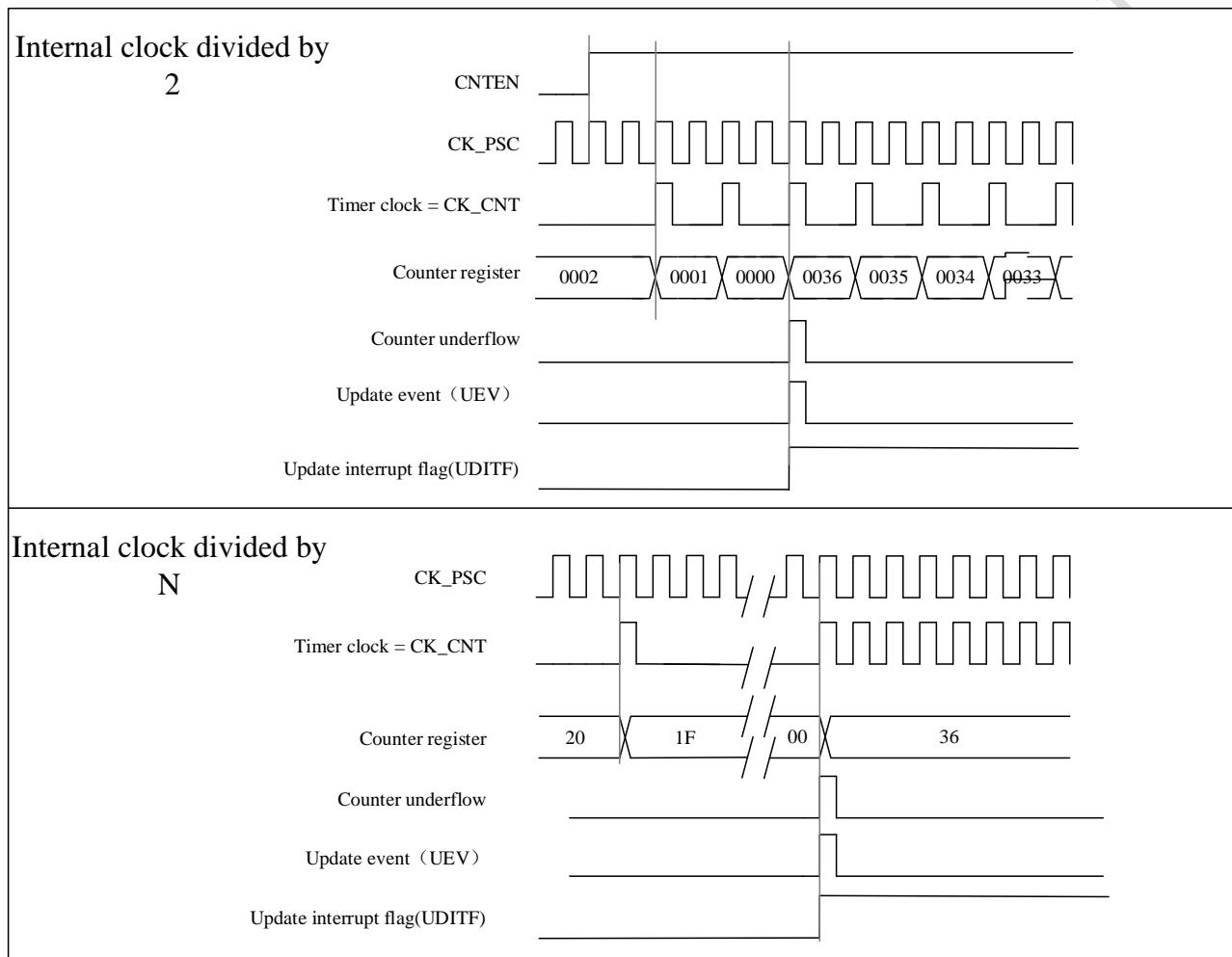
12.3.2.2 向下计数模式

向下计数模式，计数器将从寄存器 `TIMx_AR` 的值减至 0，然后从自动重装载值重新开始，并产生计数器向下溢出事件。

向下计数模式和向上计数模式配置更新事件和更新寄存器的过程相同，请查阅 12.3.2.1 章节。

下图给出一些示例，展示了向下计数模式计数器在不同分频因子下的动作。

图 12-5 内部时钟分频因子 = 2/N 时，向下计数时序图



12.3.2.3 中央对齐模式

在中央对齐模式下，计数器从 0 增加到值 (`TIMx_AR`) -1，产生计数器溢出事件。然后，它从自动重装载值 (`TIMx_AR`) 向下计数到 1，并生成一个计数器向下溢出事件。然后计数器重置为 0 并再次开始计数。

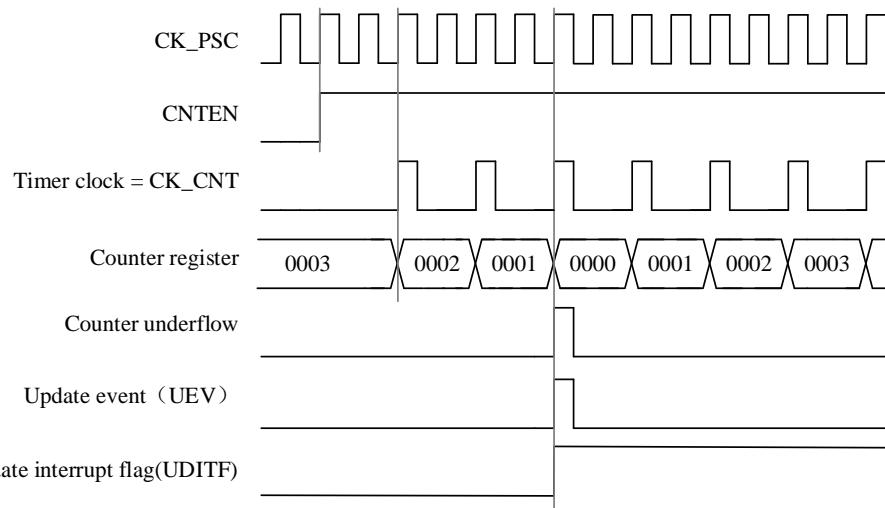
在这种模式下，`TIMx_CTRL1.DIR` 方向位无效，由硬件更新和指定当前计数方向。当 `TIMx_CTRL1.CAMSEL` 位不等于“00”时，中央对齐模式有效。

每次计数上溢和计数下溢时都会生成更新事件。或者，也可以通过设置 `TIMx_EVTGEN.UDGN` 位（通过软件或使用从模式控制器）来生成更新事件。在这种情况下，计数器从 0 重新开始计数，预分频器的计数器也从 0 重新开始计数。

注：如果因为计数器溢出而产生更新，自动重装载将在计数器重新载入之前被更新。

图 12-6 内部时钟分频因子 = 2/N, 中央对齐时序图

Internal clock divided by 2



Internal clock divided by N

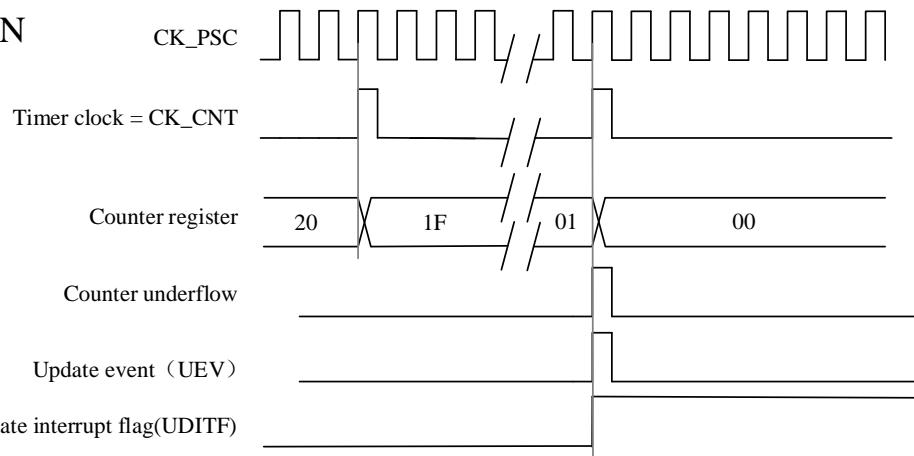
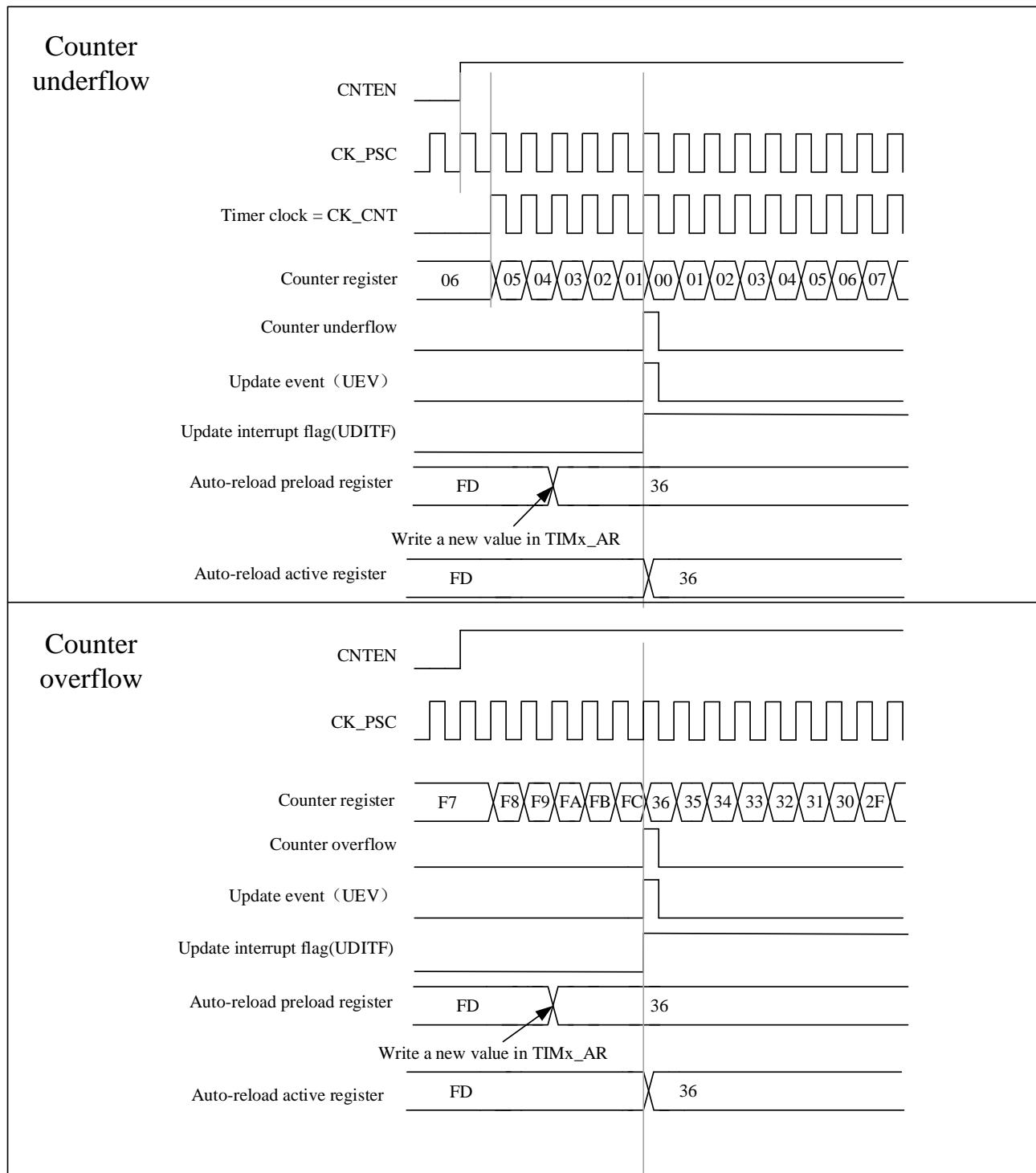


图 12-7 包含计数器上溢和下溢的中央对齐时序图(ARPEN=1)



12.3.3 时钟选择

■ 通用定时器的内部时钟: CK_INT:

■ 两种外部时钟模式:

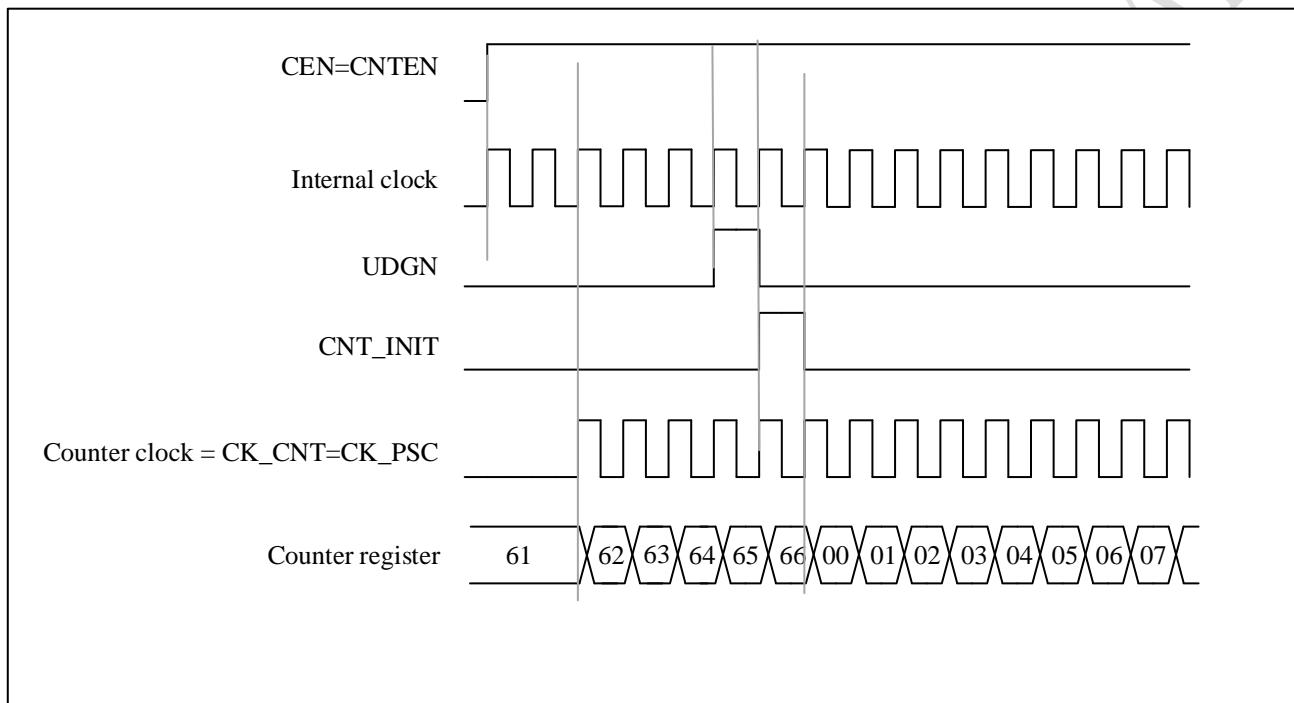
■ 外部输入引脚

- 外部触发输入 ETR
- 内部触发输入 (ITRx): 一个定时器用作另一个定时器的预分频器

12.3.3.1 内部时钟源(CK_INT)

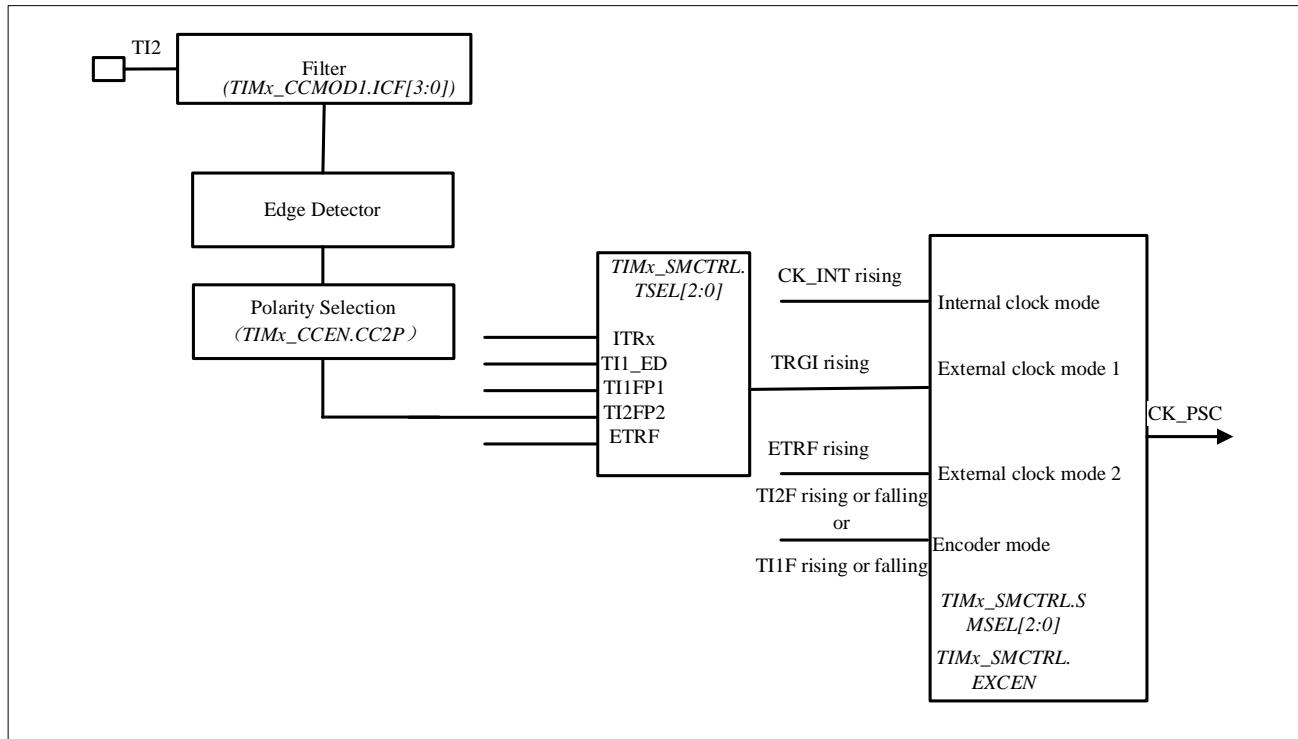
当 TIMx_SMCTRL.SMSEL 等于“000”时, 从模式控制器被禁用。这三个控制位 (TIMx_CTRL1.CNTEN 、 TIMx_CTRL1.DIR 、 TIMx_EVTGEN.UDGN) 只能由软件改变 (TIMx_EVTGEN.UDGN 除外, 它保持自动清零)。前提是 TIMx_CTRL1.CNTEN 位被软写为'1', 预分频器的时钟源由内部时钟 CK_INT 提供。

图 12-8 正常模式下的控制电路, 内部时钟除以 1



12.3.3.2 外部时钟源模式 1

图 12-9 TI2 外部时钟连接示例



通过配置 $\text{TIMx_SMCTRL.SMSEL}=111$ 选择该模式。计数器可以配置为在所选输入的时钟上升沿或下降沿进行计数。

例如，配置向上计数模式在 TI2 输入的时钟上升沿计数，配置步骤如下：

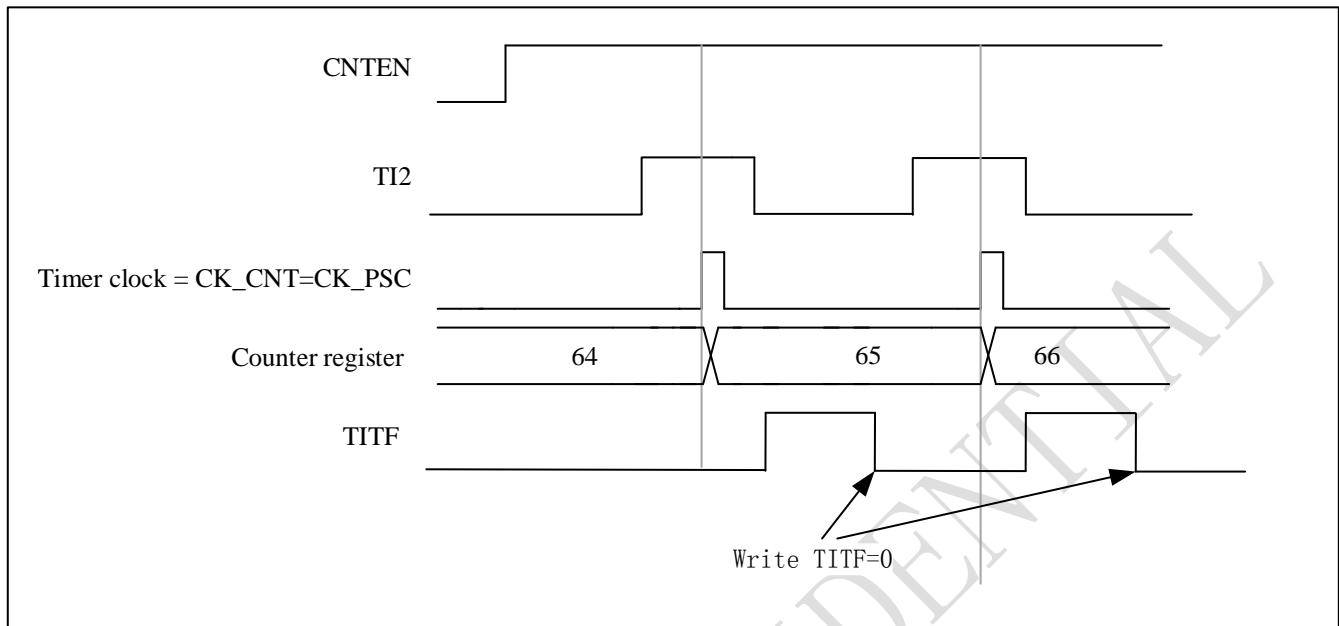
- 配置 $\text{TIMx_CCMOD1.CC2SEL}$ 等于‘01’，CC2 通道配置为输入，IC2 映射到 TI2
- 配置 TIMx_CCEN.CC2P 等于‘0’，选择时钟上升沿极性
- 通过配置 $\text{TIMx_CCMOD1.IC2F}[3:0]$ 选择输入滤波器带宽（如果不需滤波器，保持 IC2F 位为‘0000’）
- 配置 TIMx_SMCTRL.SMSEL 等于‘111’，选择定时器外部时钟模式 1
- 配置 TIMx_SMCTRL.TSEL 等于‘110’，选择 TI2 作为触发输入源
- 配置 TIMx_CTRL1.CNTEN 等于 ‘1’ 以启动计数器

注意：捕获预分频器不用于触发，所以不需要配置

当定时器时钟的上升沿出现在 $\text{TI2}=1$ 时，计数器计数一次并且 TIMx_STS.TITF 标志被拉高。

TI2 的上升沿与计数器实际时钟之间的延迟取决于 TI2 输入端的再同步电路。

图 12-10 外部时钟模式 1 的控制电路

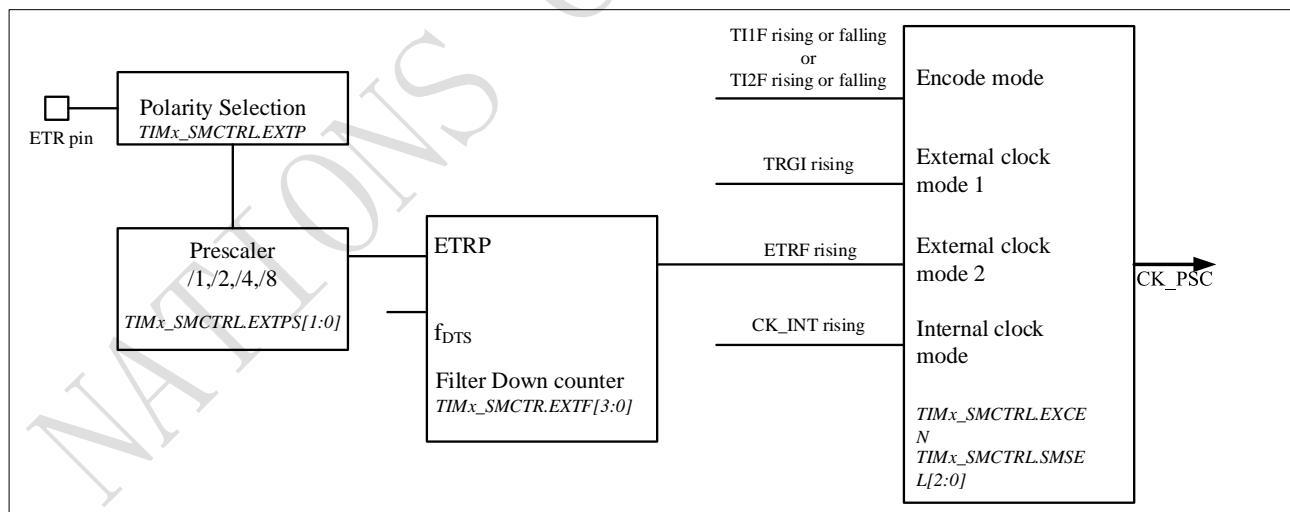


12.3.3.3 外部时钟模式 2

此模式由 `TIMx_SMCTRL.EXCEN` 选择等于 1。计数器可以在外部触发输入 ETR 的每个上升沿或下降沿计数。

下图为外部时钟源模式 2 的外部触发输入模块示意图。

图 12-11 外部触发输入框图



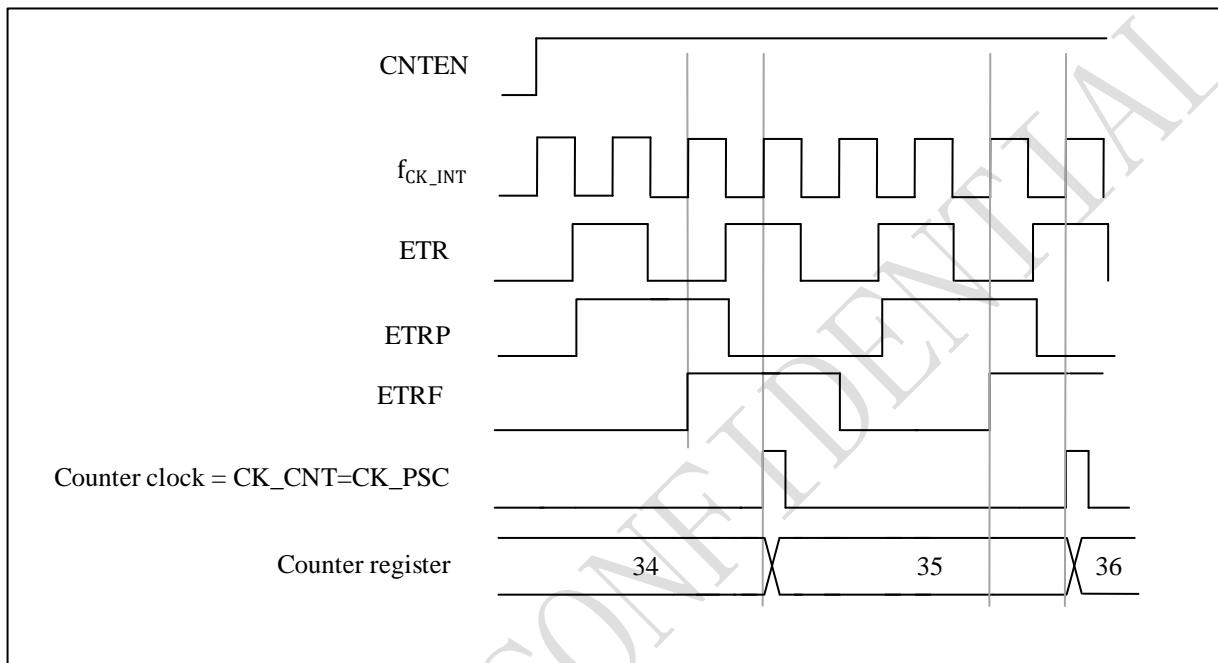
例如，使用以下配置步骤使向上计数器在 ETR 上每 2 个上升沿计数一次。

- 由于在这种情况下不需要过滤器，因此使 `TIMx_SMCTRL.EXTF[3:0]` 等于‘0000’
- 通过使 `TIMx_SMCTRL.EXTPS[1:0]` 等于 ‘01’ 来配置预分频器
- 通过设置 `TIMx_SMCTRL.EXTP` 等于‘0’来选择 ETR 引脚的极性，ETR 的上升沿有效

- 外部时钟模式 2 通过设置 `TIMx_SMCTRL.EXCEN` 等于‘1’来选择
- 通过设置 `TIMx_CTRL1.CNTEN` 等于“1”启动计数器。

计数器每 2 个 ETR 上升沿计数一次。ETR 的上升沿与计数器的实际时钟之间的延迟是由于 ETRP 信号上的再同步电路造成的。

图 12-12 外部时钟模式 2 的控制电路

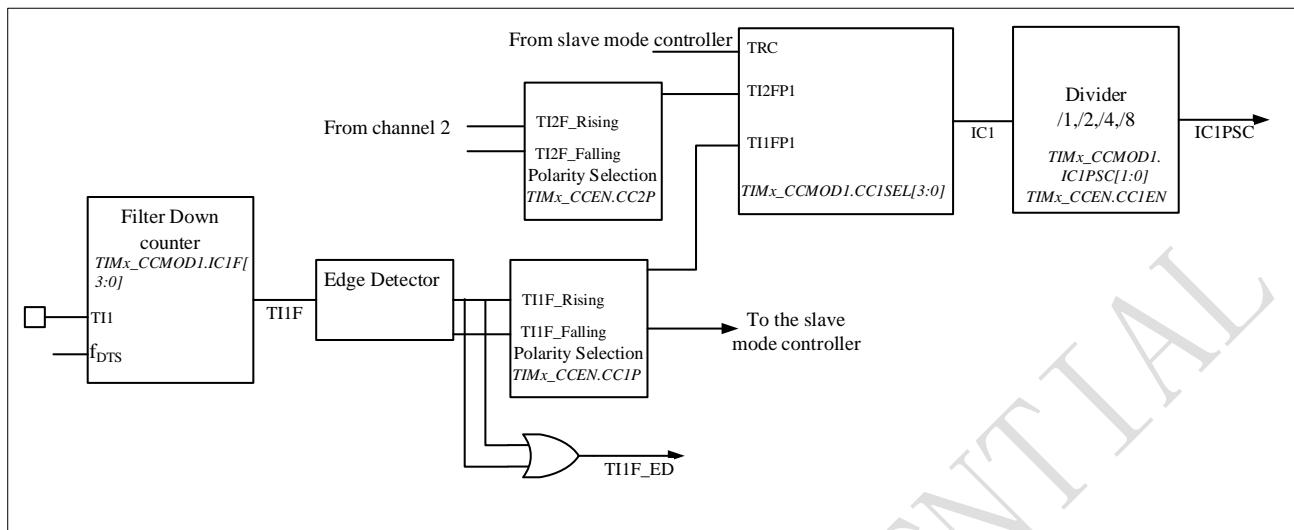


12.3.4 捕获/比较通道

捕获/比较通道包括捕获/比较寄存器和影子寄存器。输入部分由数字滤波器、多路复用器和预分频器组成。输出部分包括比较器和输出控制。

输入信号 `TIx` 被采样和滤波以产生信号 `TIxF`。然后由极性选择功能的边沿检测器生成信号 (`TIxF_rising` 或 `TIxF_falling`)，其极性由 `TIMx_CCEN.CCxP` 位选择。该信号可用作从模式控制器的触发输入。同时，信号 `ICx` 经过分频后送入捕获寄存器。下图显示了捕获/比较通道的框图。

图 12-13 捕获/比较通道（例如：通道 1 输入级）



输出部分生成一个中间波形 OCxRef (高电平有效) 作为参考。极性作用在链的末端。

图 12-14 捕获/比较通道 1 主电路

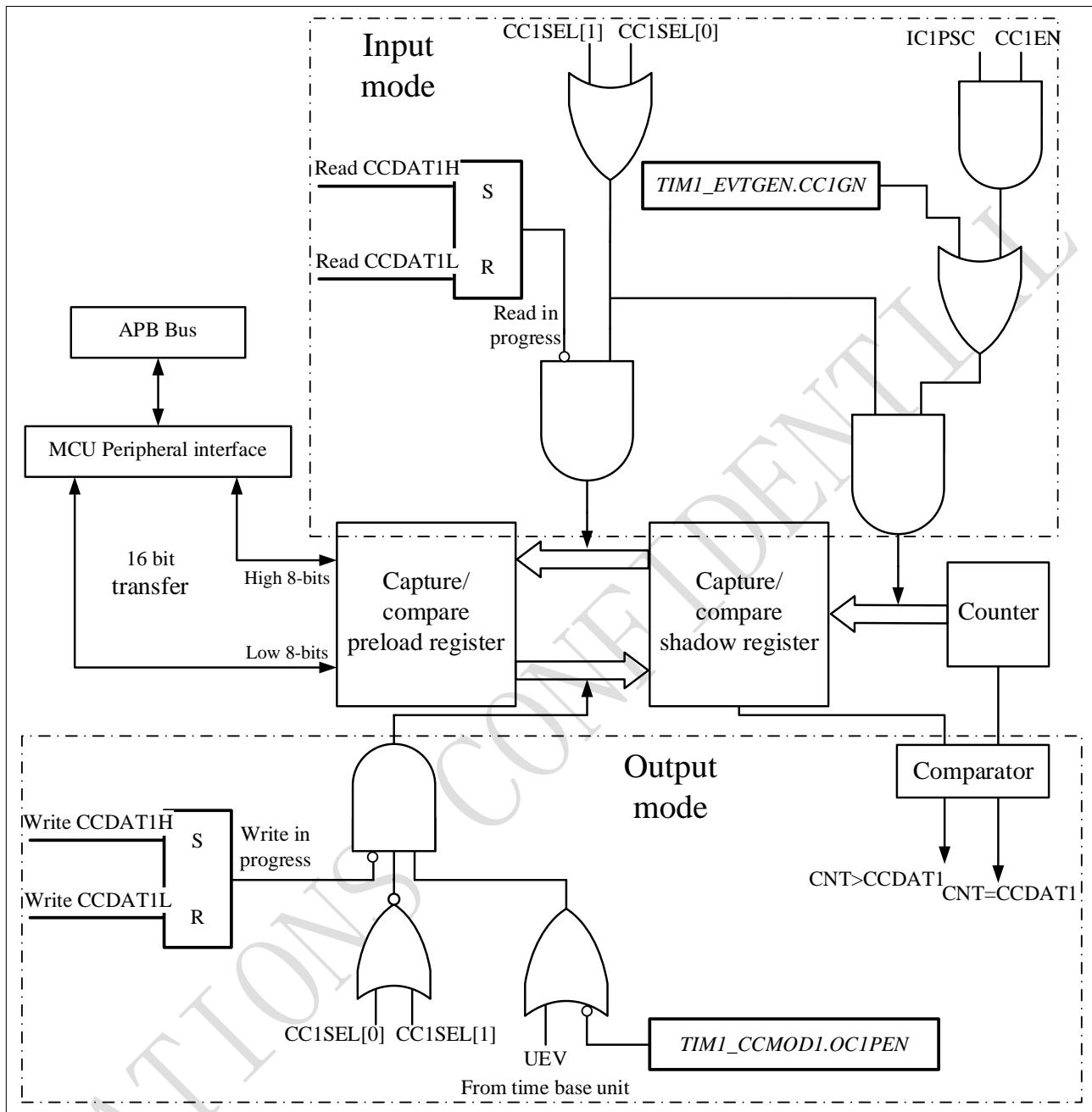
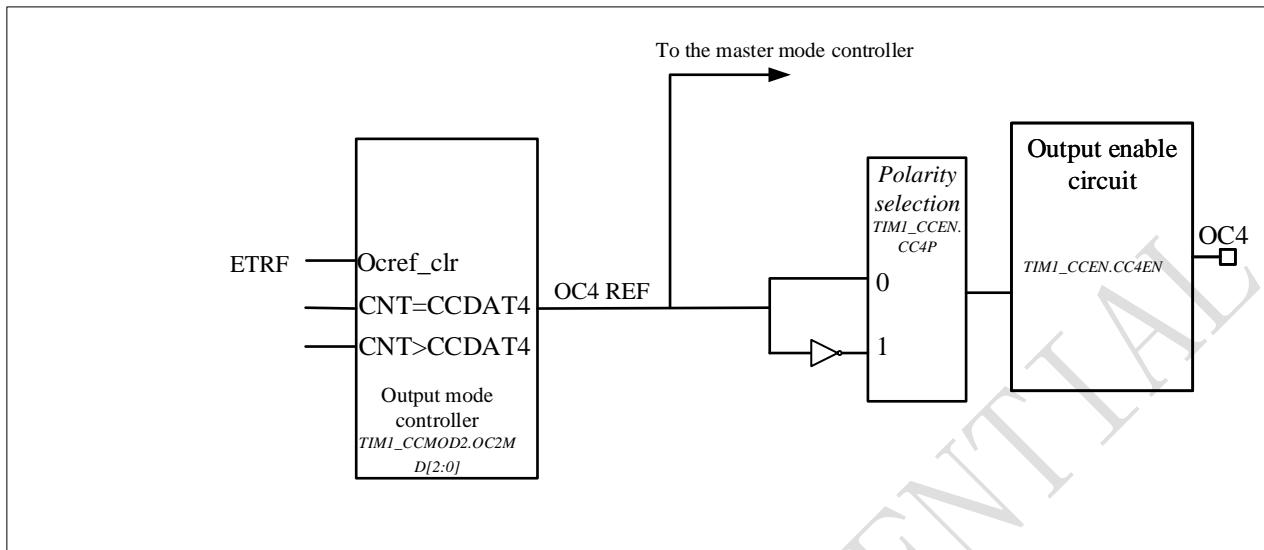


图 12-15 通道 x 的输出部分（以通道 4 为例子）



在捕获/比较时，读取和写入始终访问预加载的寄存器。两个具体工作流程如下：

在捕获模式下，捕获实际上是在影子寄存器中完成的，然后将影子寄存器中的值复制到预加载寄存器中。

在比较模式下，与捕获模式相反，预加载寄存器的值被复制到影子寄存器中，并与计数器进行比较。

12.3.5 输入捕获模式

在捕获模式下， TIMx_CCDATx 寄存器用于在检测到 ICx 信号后锁存计数器值。

有一个捕获中断标志 TIMx_STS.CCxITF ，如果相应的中断使能被拉高，它可以发出中断或 DMA 请求。

TIMx_STS.CCxITF 位在发生捕获事件时由硬件设置，并由软件或读取 TIMx_CCDATx 寄存器清零。

当 TIMx_CCDATx 寄存器中的计数器值被捕获并且 TIMx_STS.CC1ITF 已经被拉高时，重复捕获标志 TIMx_STS.CCxOCF 设置为 1。与前者不同， TIMx_STS.CCxOCF 通过向其写入 0 来清除。

为实现 TI1 输入的上升沿将计数器值捕获到 TIMx_CCDAT1 寄存器中，配置流程如下：

■ 选择有效输入：

将 $\text{TIMx_CCMOD1.CC1SEL}$ 配置为“01”。此时输入为 CC1 通道， IC1 映射到 TI1 。

■ 编程所需的输入滤波器持续时间：

通过配置 TIMx_CCMODx.ICxF 位来定义 TI1 输入的采样频率和数字滤波器的长度。示例：如果输入信号抖动多达 5 个内部时钟周期，我们必须选择比这 5 个时钟周期更长的滤波器持续时间。当检测到具有新电平的 8 个连续样本（以 f_{DTS} 频率采样）时，我们可以验证 TI1 上的转换。然后配置 TIMx_CCMOD1.IC1F 到“0011”

■ 通过配置 TIMx_CCEN.CC1P=0 ，选择上升沿作为 TI1 通道的有效跳变极性

■ 配置输入预分频器。在本例中，配置 $\text{TIMx_CCMOD1.IC1PSC} = '00'$ 以禁用预分频器，因为我们想要捕获每个有效转换

■ 通过配置 $\text{TIMx_CCEN.CC1EN} = '1'$ 启用捕获。

如果要使能 DMA 请求，可以配置 `TIMx_DINTEN.CC1DEN=1`。如果要使能相关中断请求，可以配置 `TIMx_DINTEN.CC1IEN =1`。

12.3.6 PWM 输入模式

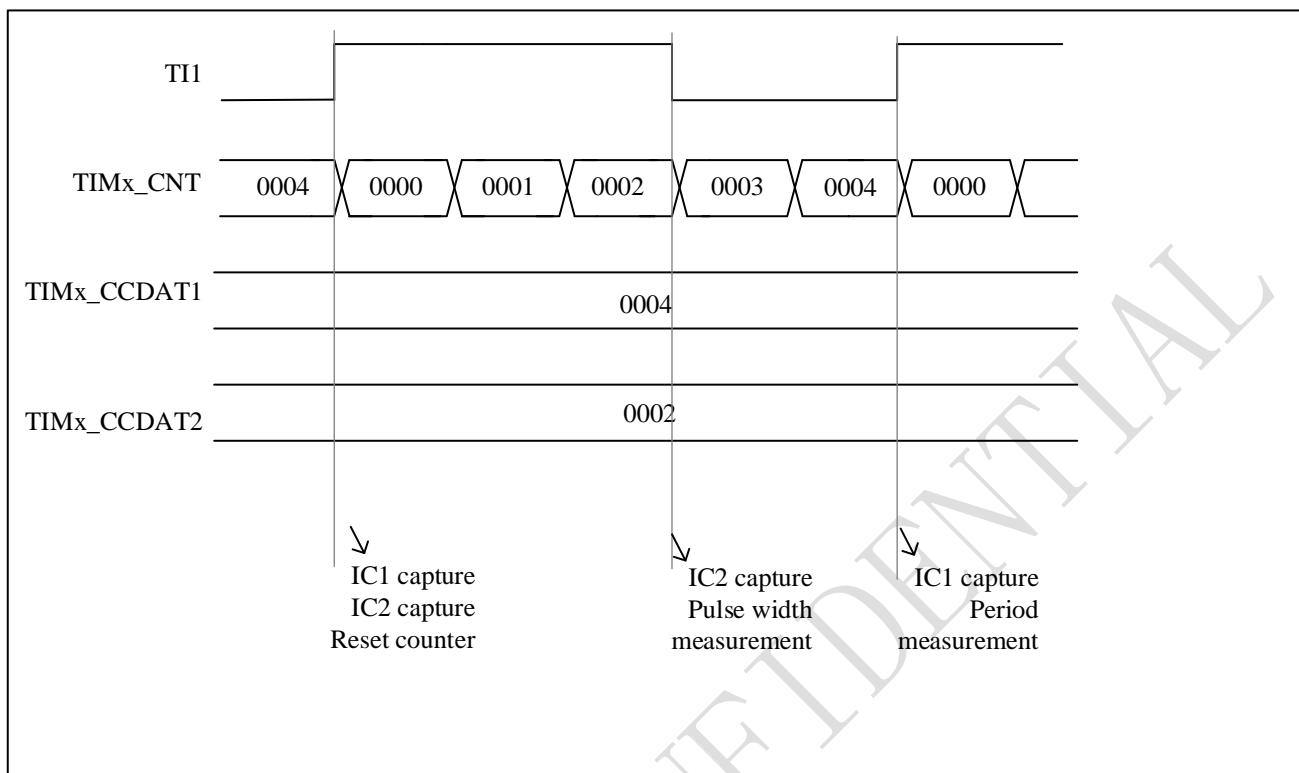
PWM 输入模式和普通输入捕获模式有一些区别，包括：

- 两个 IC_x 信号映射到同一个 TI_x 输入
- 两个 IC_x 信号在极性相反的边沿有效
- 选择两个 TI_xFP 信号之一作为触发输入
- 从机模式控制器配置为复位模式

例如，下面的配置流程可以用来知道 TI1 上 PWM 信号的周期和占空比（这取决于 CK_INT 的频率和预分频器的值）。

- 配置 `TIMx_CCMOD1.CC1SEL` 等于 ‘01’ 以选择 TI1 作为 `TIMx_CCDAT1` 的有效输入
- 配置 `TIMx_CCEN.CC1P` 等于 ‘0’ 选择滤波定时器输入 1(TI1FP1) 的有效极性，在上升沿有效
- 配置 `TIMx_CCMOD1.CC2SEL` 等于 ‘10’ 选择 TI1 作为 `TIMx_CCDAT2` 的有效输入
- 配置 `TIMx_CCEN.CC2P` 等于 1 选择滤波定时器输入 2(TI1FP2)的有效极性，下降沿有效
- 配置 `TIMx_SMCTRL.TSEL=101` 选择 Filtered timer input 1 (TI1FP1) 作为有效触发输入
- 配置 `TIMx_SMCTRL.SMSEL=100` 配置从模式控制器为复位模式
- 配置 `TIMx_CCEN.CC1EN=1` 和 `TIMx_CCEN.CC2EN=1` 以启用捕获

图 12-16 PWM 输入模式时序



由于只有滤波器定时器输入 1(TI1FP1) 和滤波器定时器输入 2(TI2FP2) 连接到从模式控制器，因此 PWM 输入模式只能与 TIMx_CH1/TIMx_CH2 信号一起使用。

12.3.7 强制输出模式

在输出模式 (TIMx_CCMODx.CCxSEL=00) 下，软件可以直接将输出比较信号强制为有效或无效电平。

用户可以设置 TIMx_CCMODx.OCxMD=101 强制输出比较信号为有效电平。OCxREF 将被强制为高电平，OCx 得到与 CCxP 极性位相反的值。另一方面，用户可以设置 TIMx_CCMODx.OCxMD=100 强制输出比较信号为无效电平，即 OCxREF 被强制为低电平。

在此模式下，TIMx_CC DATx 影子寄存器和计数器的值仍然相互比较。

输出比较寄存器 TIMx_CC DATx 和计数器 TIMx_CNT 之间的比较对 OCxREF 没有影响。并且仍然可以设置标志。因此，仍然可以发送中断和 DMA 请求。

12.3.8 输出比较模式

用户可以使用此模式来控制输出波形，或指示一段时间已过。

当捕获/比较寄存器和计数器的值相同时，输出比较函数的操作如下：

- TIMx_CCMODx.OCxMD 为输出比较模式，TIMx_CCEN.CCxP 为输出极性。当比较匹配时，如果设置 TIMx_CCMODx.OCxMD=000，则输出管脚将保持其电平；如果设置 TIMx_CCMODx.OCxMD=001，则设置输出管脚有效；如果设置 TIMx_CCMODx.OCxMD=010，则输出管脚将为设置为无效；如果设置 TIMx_CCMODx.OCxMD=011，则输出引脚将设置为翻转。

- 设置 `TIMx_STS.CCxITF`
- 如果用户设置了 `TIMx_DINTEN.CCxIEN`, 将产生相应的中断
- 如果用户设置 `TIMx_DINTEN.CCxDEN` 并设置 `TIMx_CTRL2.CCDSEL` 选择 DMA 请求, 将发送 DMA 请求

用户可以设置 `TIMx_CCMODx.OCxPEN` 来选择是否使用捕获/比较预加载寄存器 (`TIMx_CCDATx`) 来选择捕获/比较影子寄存器。

时间分辨率是计数器的一个计数周期。

在单脉冲模式下, 输出比较模式也可用于输出单脉冲。

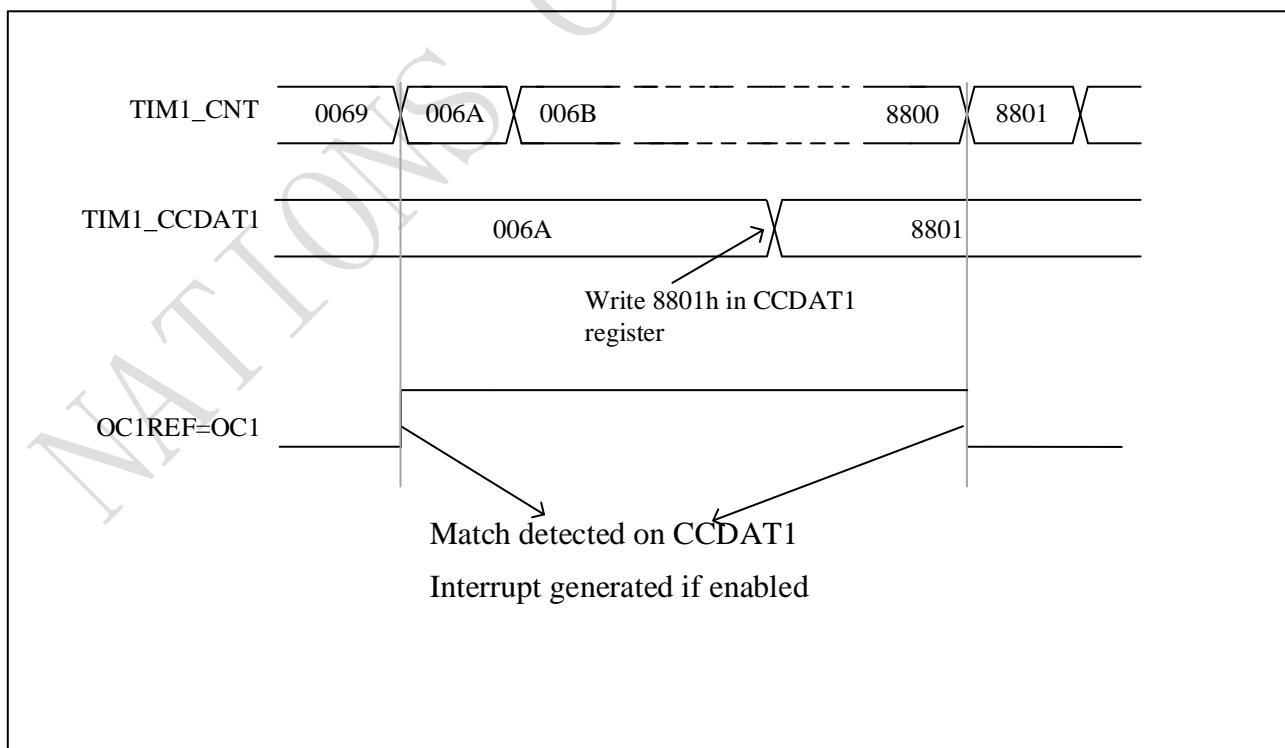
以下是输出比较模式的配置步骤:

- 首先, 用户应该选择计数器时钟
- 其次, 用所需数据设置 `TIMx_AR` 和 `TIMx_CCDATx`
- 如果用户需要产生中断, 设置 `TIMx_DINTEN.CCxIEN`
- 然后通过设置 `TIMx_CCEN.CCxP`、`TIMx_CCMODx.OCxMD`、`TIMx_CCEN.CCxEN` 等选择输出模式
- 最后, 设置 `TIMx_CTRL1.CNTEN` 启用计数器

用户可以随时通过设置 `TIMx_CCDATx` 来更新输出波形, 只要不启用预加载寄存器。否则, `TIMx_CCDATx` 影子寄存器将在下一次更新事件中更新。

例如:

图 12-17 输出比较模式, 开启 OC1



12.3.9 PWM 模式

用户可以使用 PWM 模式产生一个信号，其占空比由 TIMx_CCDATx 寄存器的值决定，其频率由 TIMx_AR 寄存器的值决定。并且取决于 TIMx_CTRL1.CAMSEL 的值，TIM 可以在边沿对齐模式或中央对齐模式下产生 PWM 信号。

用户可以通过设置 TIMx_CCMODx.OCxMD=110 或设置 TIMx_CCMODx.OCxMD=111 来设置 PWM 模式 1 或 PWM 模式 2。要使能预加载寄存器，用户必须设置相应的 TIMx_CCMODx.OCxPEN。然后设置 TIMx_CTRL1.AR PEN 自动重装载预加载寄存器。

用户可以通过设置 TIMx_CCEN.CCxCp 来设置 OCx 的极性。

当 TIM 处于 PWM 模式时，TIMx_CNT 和 TIMx_CCDATx 的值总是相互比较。

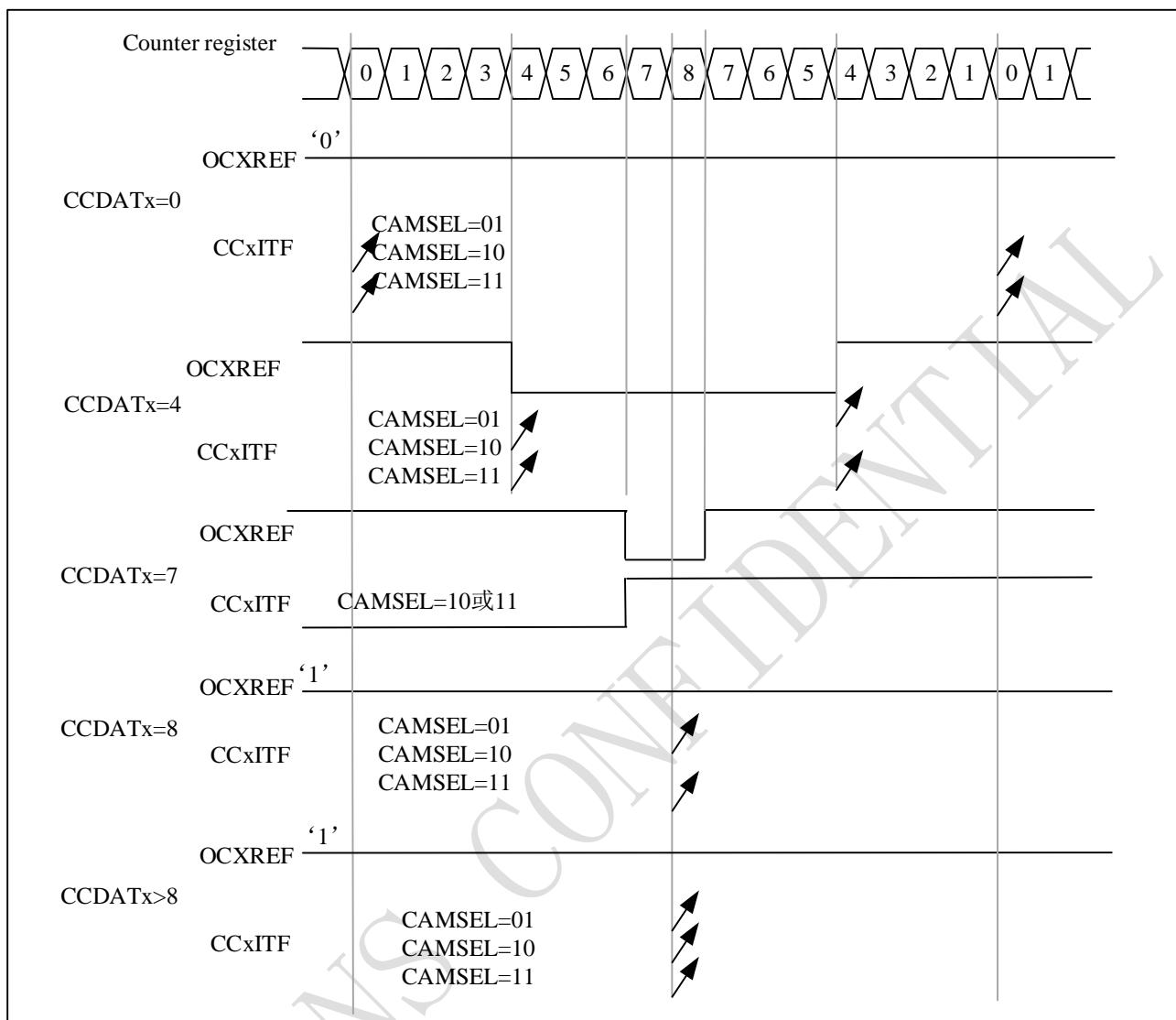
只有当更新事件发生时，预加载寄存器才会转移到影子寄存器。因此，用户必须在计数器开始计数之前通过设置 TIMx_EVTGEN.UDGN 来复位所有寄存器。

12.3.9.1 PWM 中央对齐模式

如果用户设置 TIMx_CTRL1.CAMSEL 等于 01、10 或 11，PWM 中央对齐模式将被激活。比较标志的设置取决于 TIMx_CTRL1.CAMSEL 的值。设置比较标志的情况有 3 种，仅当计数器向上计数时，仅当计数器向下计数时，或当计数器向上计数和向下计数时。用户不应通过软件修改 TIMx_CTRL1.DIR，它是由硬件更新的。

中央对齐 PWM 波形示例如下，波形设置为：TIMx_AR=8，PWM 模式 1，当计数器向下计数对应 TIMx_CTRL1.CAMSEL=01 时设置比较标志。

图 12-18 中央对齐的 PWM 波形 (AR=8)



使用中央对齐模式时用户应注意的事项如下：

- 计数器向上或向下计数取决于 TIMx_CTRL1.DIR 的值。注意不要同时更改 DIR 和 CAMSEL 位
- 用户在中央对齐模式下不要写计数器，否则会导致意想不到的结果。例如：
 - ◆ 如果写入计数器的值为 0 或者是 TIMx_AR 的值，则方向会被更新，但不会产生更新事件
 - ◆ 如果写入计数器的值大于自动重载的值，则方向不会更新
- 为了安全起见，建议用户在启动计数器之前设置 TIMx_EVTGEN.UDGN 以通过软件生成更新，并且在计数器运行时不要写入计数器

12.3.9.2 PWM 边沿对齐模式

边沿对齐模式有两种配置，向上计数和向下计数。

- 向上计数

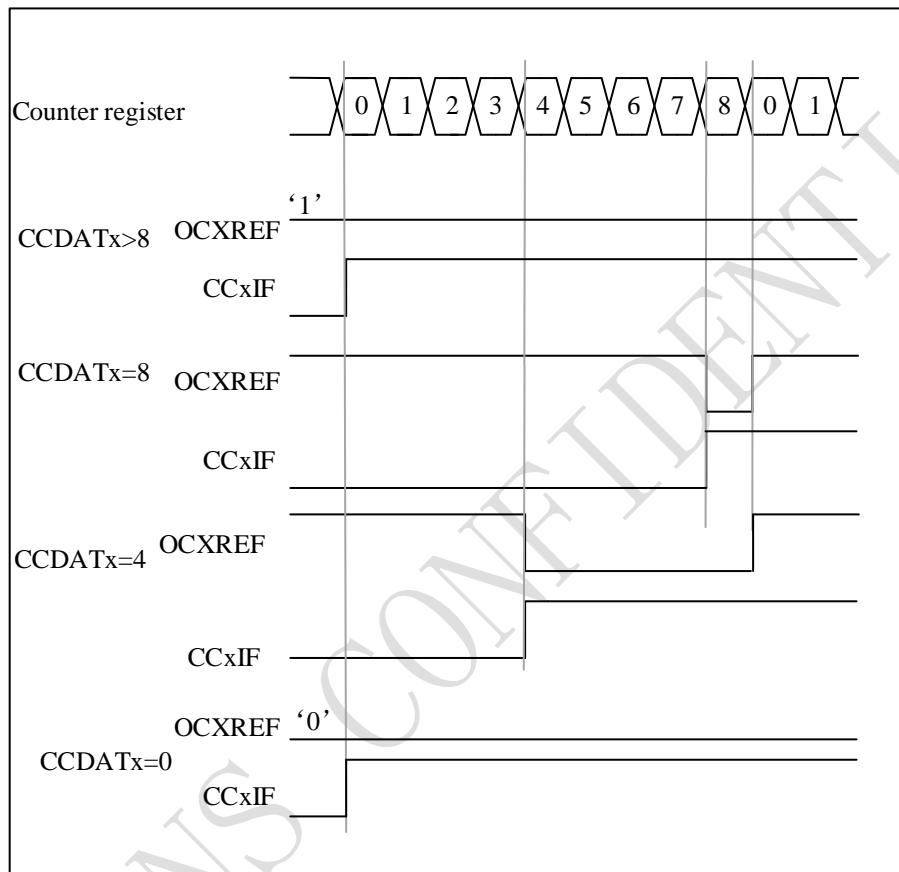
用户可以设置 TIMx_CTRL1.DIR=0 使计数器向上计数。

PWM 模式 1 的示例：

当 $\text{TIMx_CNT} < \text{TIMx_CCDATx}$ 时， OCxREF 为高电平，否则为低电平。如果 TIMx_CCDATx 中的比较值大于自动重载值，则 OCxREF 将保持为 1。相反，如果比较值为 0，则 OCxREF 将保持为 0。

当 $\text{TIMx_AR}=8$ 时，PWM 波形如下：

图 12-19 边沿对齐 PWM 波形 (AR=8)



● 向下计数

用户可以设置 $\text{TIMx_CTRL1.DIR}=1$ 使计数器向下计数。

PWM 模式 1 的示例：

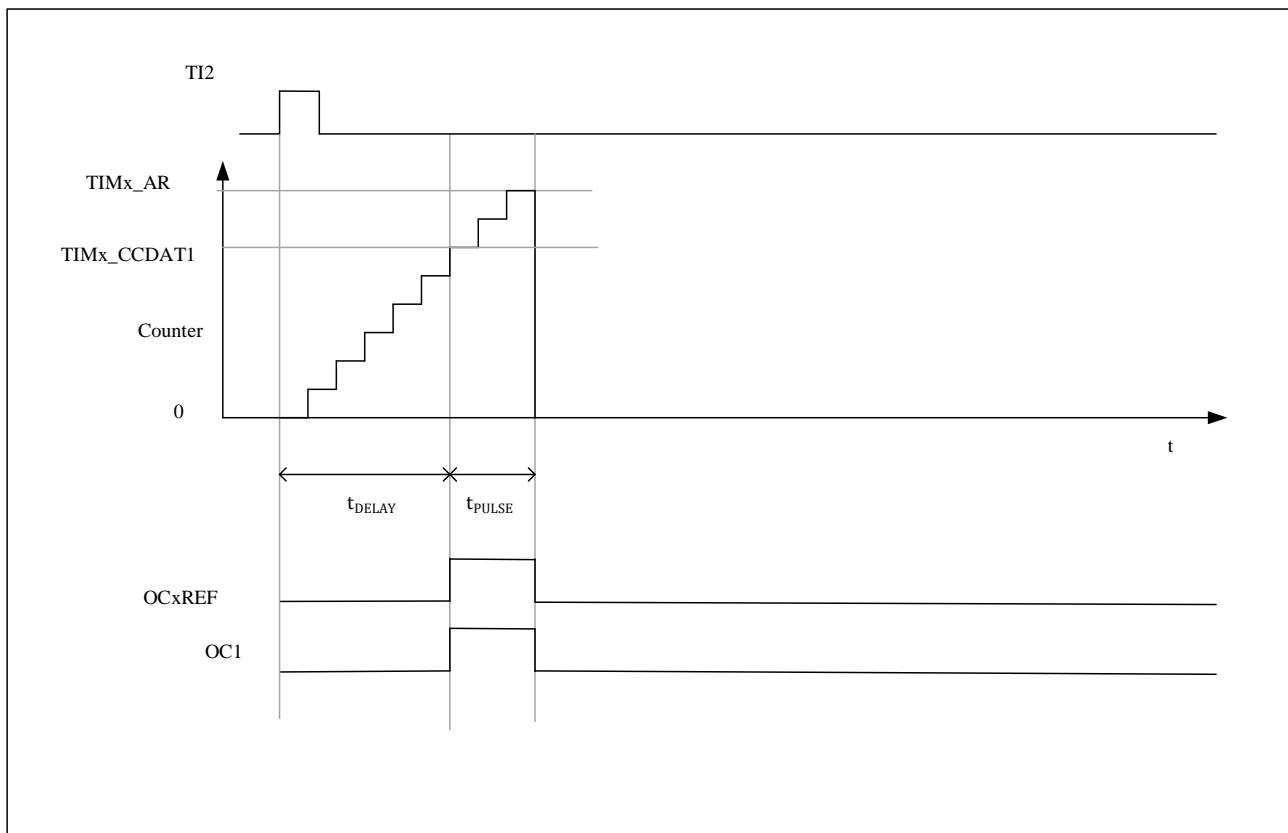
当 $\text{TIMx_CNT} > \text{TIMx_CCDATx}$ 时， OCxREF 为低电平，否则为高电平。如果 TIMx_CCDATx 中的比较值大于自动重载值，则 OCxREF 将保持为 1。

注：若第 n 个 PWM 周期 CCDATx 影子寄存器 $\geq \text{AR}$ 值，第 $n+1$ 个 PWM 周期 CCDATx 的影子寄存器值是 0。在第 $n+1$ 个 PWM 周期的计数器为 0 的时刻，虽然计数器 = CCDATx 影子寄存器的值 = 0， $\text{OCxREF} = '0'$ ，但不会产生比较事件。

12.3.10 单脉冲模式

在单脉冲模式(ONEPM)中，接收到触发信号，经过可控延迟 t_{DELAY} 后产生脉宽可控的脉冲 t_{PULSE} 。输出模式需要配置为输出比较模式或 PWM 模式。选择单脉冲模式后，计数器会在更新事件 UEV 产生后停止计数。

图 12-20 单脉冲模式示例



以下是单脉冲模式的示例：

从 TI2 输入检测到上升沿触发，延迟 t_{DELAY} 后在 OC1 上产生宽度为 t_{PULSE} 的脉冲。

1. 计数器配置：向上计数，计数器 $TIMx_CNT < TIMx_CCDAT1 \leq TIMx_AR$ ；
2. TI2FP2 映射到 TI2, $TIMx_CCMOD1.CC2SEL=‘01’$; TI2FP2 配置为上升沿检测, $TIMx_CCEN.CC2P=‘0’$;
3. TI2FP2 充当从模式控制器的触发器 (TRGI) 并启动计数器, $TIMx_SMCTRL.TSEL=‘110’$, $TIMx_SMCTRL.SMSEL=‘110’$ (触发模式);
4. $TIMx_CCDAT1$ 写入要延迟的计数值 (t_{DELAY}), $TIMx_AR-TIMx_CCDAT1$ 为脉宽 t_{PULSE} 的计数值;
5. 配置 $TIMx_CTRL1.ONEPM=1$ 使能单脉冲模式, 配置 $TIMx_CCMOD1.OC1MD=‘111’$ 选择 PWM2 模式;
6. 等待 TI2 有外部触发事件, OC1 输出一个单脉冲波形;

12.3.10.1 特殊情况：OCx 快速使能：

在单脉冲模式下，通过 TIx 输入检测到一个边沿，并触发计数器开始计数到比较值，然后输出一个脉冲。这些操作限制了可以达到的最小延迟 t_{DELAY} 。

您可以设置 $TIMx_CCMODx.OCxFEN=1$ 开启 OCx 快速使能，在触发上升沿后，OCxREF 信号将被强制转换为与比较匹配立即发生的电平相同的电平，而不管比较结果如何。OCxFEN 快速使能仅在通道模式配置为 PWM1 和 PWM2 模式时生效。

12.3.11 在外部事件上清除 OCxREF 信号

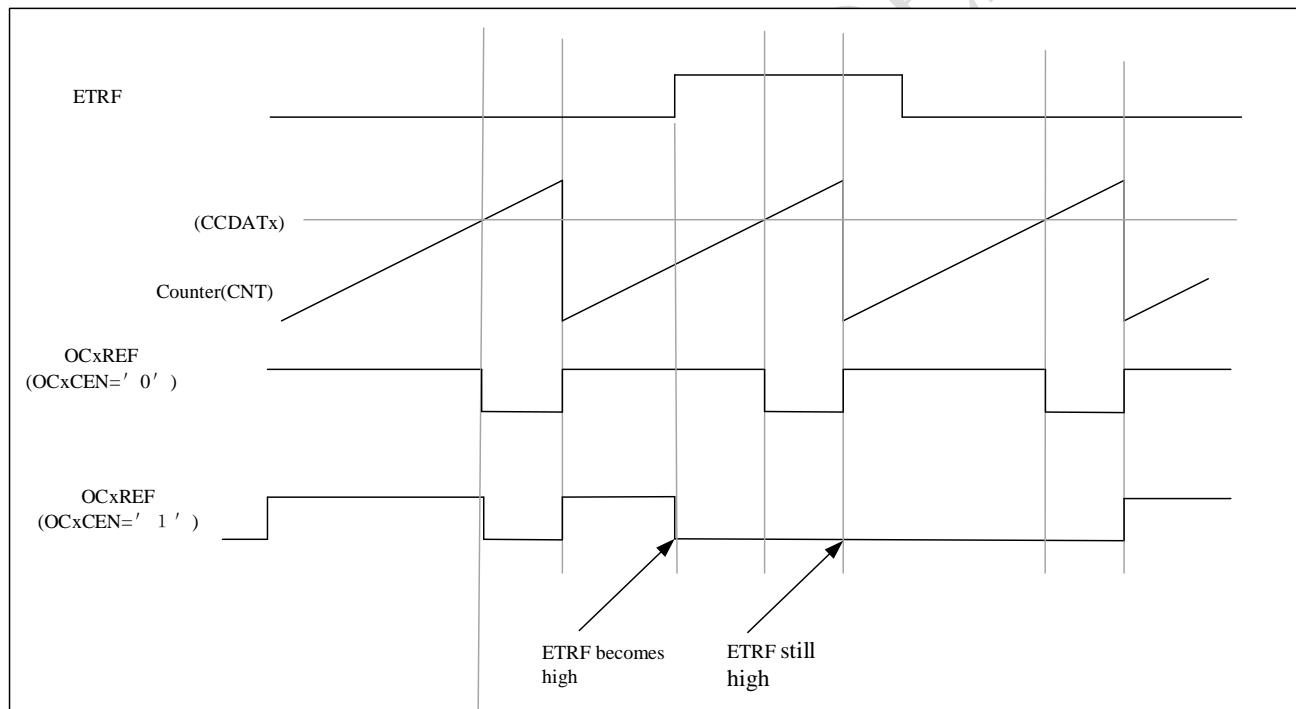
如果用户设置 `TIMx_CCMODx.OCxCEN=1`, `ETRF` 输入的高电平可用于驱动 `OCxREF` 信号为低电平, `OCxREF` 信号将保持低电平, 直到下一次 `UEV` 发生。只有输出比较和 `PWM` 模式可以使用该功能。在强制模式下不能使用。

例如: 为了控制电流, 用户可以将 `ETR` 信号连接到比较器的输出端, `ETR` 的操作如下:

- 设置 `TIMx_SMCTRL.EXTPS=00` 禁用外部触发预分频器。
- 设置 `TIMx_SMCTRL.EXCEN=0` 禁用外部时钟模式 2。
- 设置 `TIMx_SMCTRL.EXTP` 和 `TIMx_SMCTRL.EXTF`, 根据需要配置外触发极性和外触发滤波器。

例: 当 `ETRF` 输入变高时, `OCxREF` 信号对于不同的 `OCxCEN` 值的行为。在这种情况下, 定时器设置为 `PWM` 模式。

图 12-21 清除 TIMx 的 `OCxREF`



12.3.12 调试模式

当微控制器处于调试模式 (Cortex-M4 内核停止) 时, 根据 `DBG_CTRL.TIMx_STOP` 配置, `TIMx` 计数器可以继续正常工作或停止。详见 26.4.3 章节。

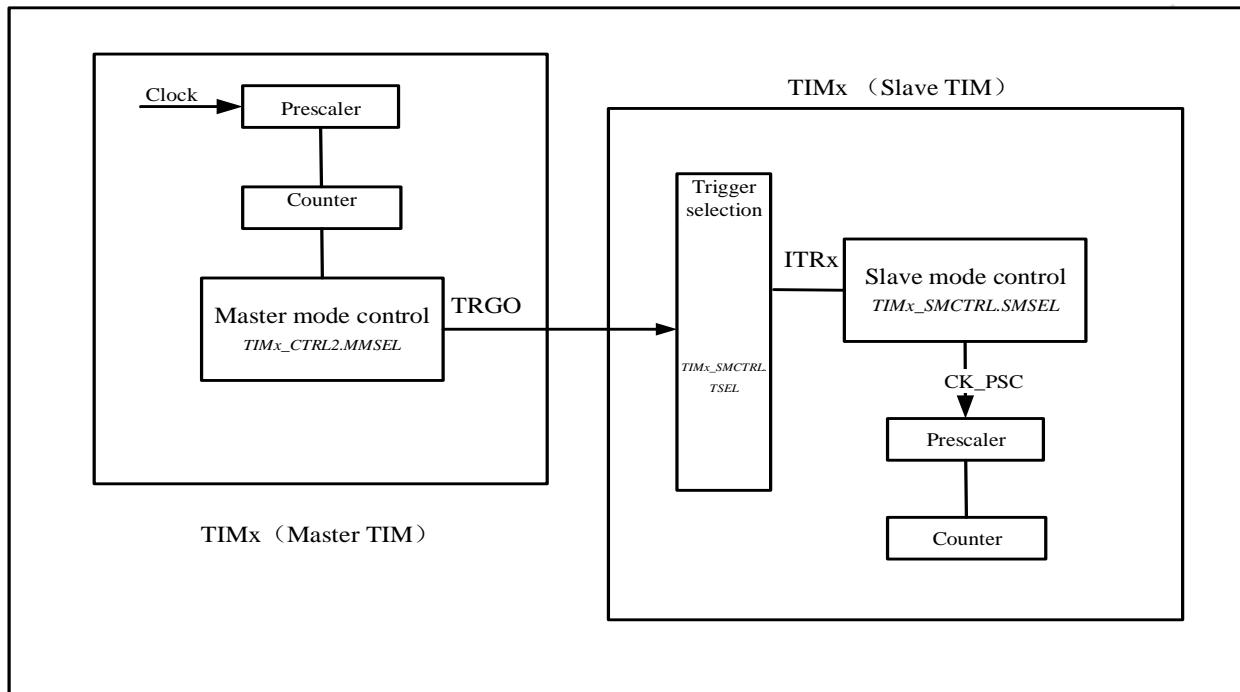
12.3.13 TIMx 定时器和外部触发的同步

与高级定时器相同, 见 11.3.16。

12.3.14 定时器同步

所有 TIMx 定时器都在内部相互连接。该实现允许任何主定时器提供触发以复位、启动、停止或其他从定时器提供时钟。主时钟用于内部计数器，可以预分频。下图为定时器互连框图。同步功能不支持连接的动态变化。用户应在启用主定时器的触发器或时钟之前配置并启用从定时器。

图 12-22 主/从定时器的例子



12.3.14.1 主定时器作为另一个定时器的预分频器

定时器 1 作为定时器 2 的预分频器。TIM1 是主，TIM2 是从。

用户需要为此配置执行以下步骤。

- 设置 `TIM1_CTRL2.MMSEL='010'` 以使用 TIM1 的更新事件作为触发输出。
 - 配置 `TIM2_SMCTRL.TSEL='000'`，将 TIM1 的 TRGO 连接到 TIM2。
 - 配置 `TIM2_SMCTRL.SMSEL = '111'`，从模式控制器将配置为外部时钟模式 1。
 - 通过设置 `TIM2_CTRL1.CNTEN = "1"`，启动 TIM2。
 - 通过设置 `TIM1_CTRL1.CNTEN = "1"`，启动 TIM1。

注：如果用户通过配置 $MMSEL = '1xx'$ 选择 OCx 作为 $TIM1$ 的触发输出，则 OCx 上升沿将用于驱动 $timer2$ 。

12.3.14.2 主定时器使能另一个定时器

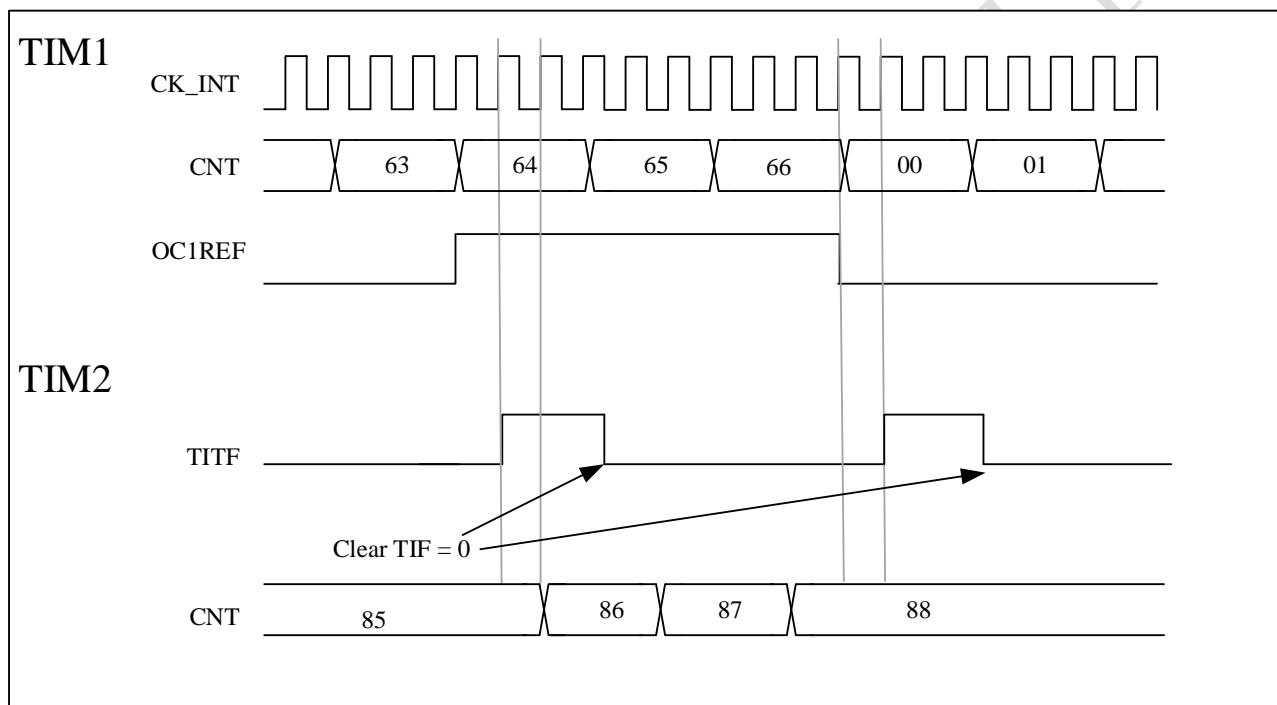
在本例中, TIM2 通过 TIM1 的输出比较使能。 TIM1 的 OC1REF 输出为高电平后, TIM2 计数器将开始计数。 两个计数器的时钟均基于 CK_INT, 通过预分频器除以 3 (fCK_CNT = fCK_INT/3)。

配置步骤如下所示。

- 设置 `TIM1_CTRL2.MMSEL='100'` 以使用 `TIM1` 的 `OC1REF` 作为触发输出。
- 配置 `TIM1_CCMOD1` 寄存器来配置 `OC1REF` 输出波形。
- 设置 `TIM2_SMCTRL.TSEL = '000'` 将 `TIM1` 触发输出连接到 `TIM2`。
- 设置 `TIM2_SMCTRL.SMSEL = '101'` 将 `TIM2` 设置为门控模式。
- 设置 `TIM2_CTRL1.CNTEN = '1'` 来启动 `TIM2`。
- 设置 `TIM1_CTRL1.CNTEN = '1'` 以启动 `TIM1`。

注: `TIM2` 时钟与 `TIM1` 时钟不同步, 该模式仅影响 `TIM2` 计数器使能信号。

图 12-23 定时器 2 由定时器 1 的 `OC1REF` 门控



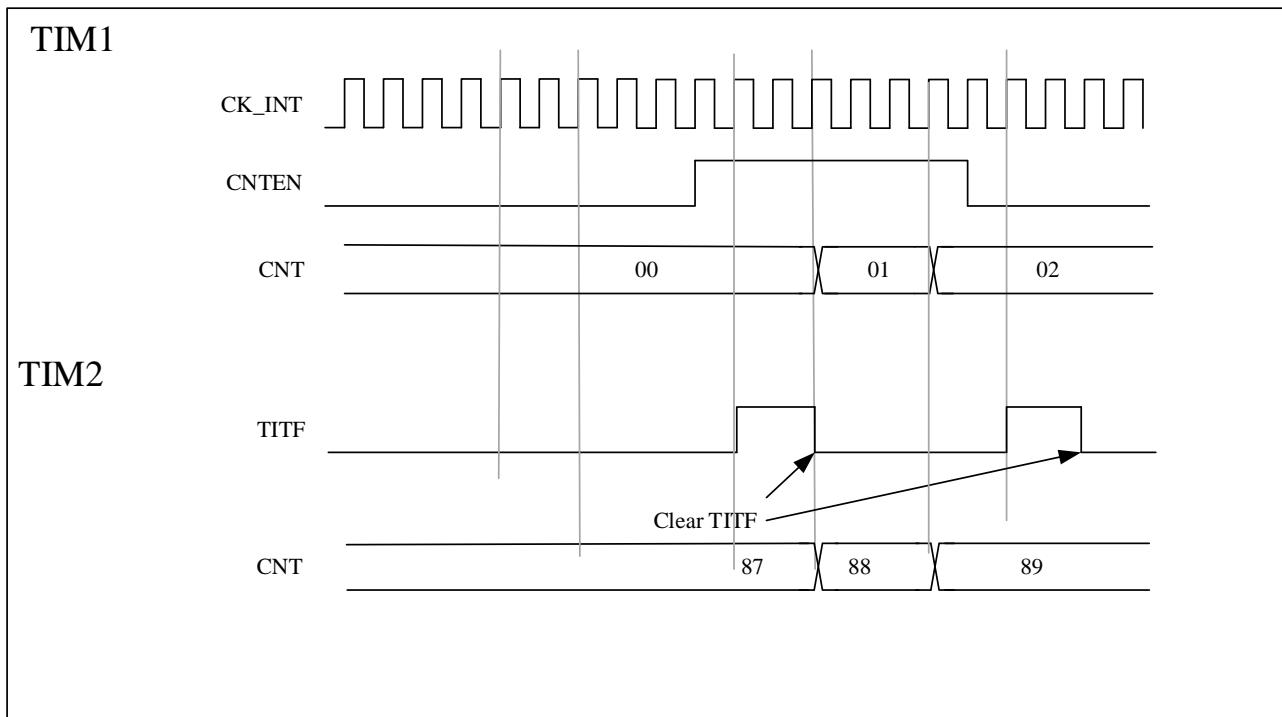
在下一个示例中, 用 `TIM1` 的使能信号门控 `TIM2`, 设置 `TIM1_CTRL1.CNTEN = '0'` 以停止 `TIM1`。

仅当 `TIM1` 使能时, `TIM2` 才基于分频的内部时钟计数。两个计数器的时钟均基于 `CK_INT`, 通过预分频器除以 3 ($f_{CK_CNT} = f_{CK_INT}/3$)。

配置步骤如下所示

- 设置 `TIM1_CTRL2.MMSEL='001'` 使用 `TIM1` 的使能信号作为触发输出
- 设置 `TIM2_SMCTRL.TSEL = '000'` 配置 `TIM2` 从 `TIM1` 获取触发输入
- 设置 `TIM2_SMCTRL.SMSEL = '101'` 将 `TIM2` 配置为门控模式。
- 设置 `TIM2_CTRL1.CNTEN = '1'` 来启动 `TIM2`。
- 设置 `TIM1_CTRL1.CNTEN = '1'` 以启动 `TIM1`。
- 设置 `TIM1_CTRL1.CNTEN = '0'` 以停止 `TIM1`。

图 12-24 定时器 2 由定时器 1 的使能门控



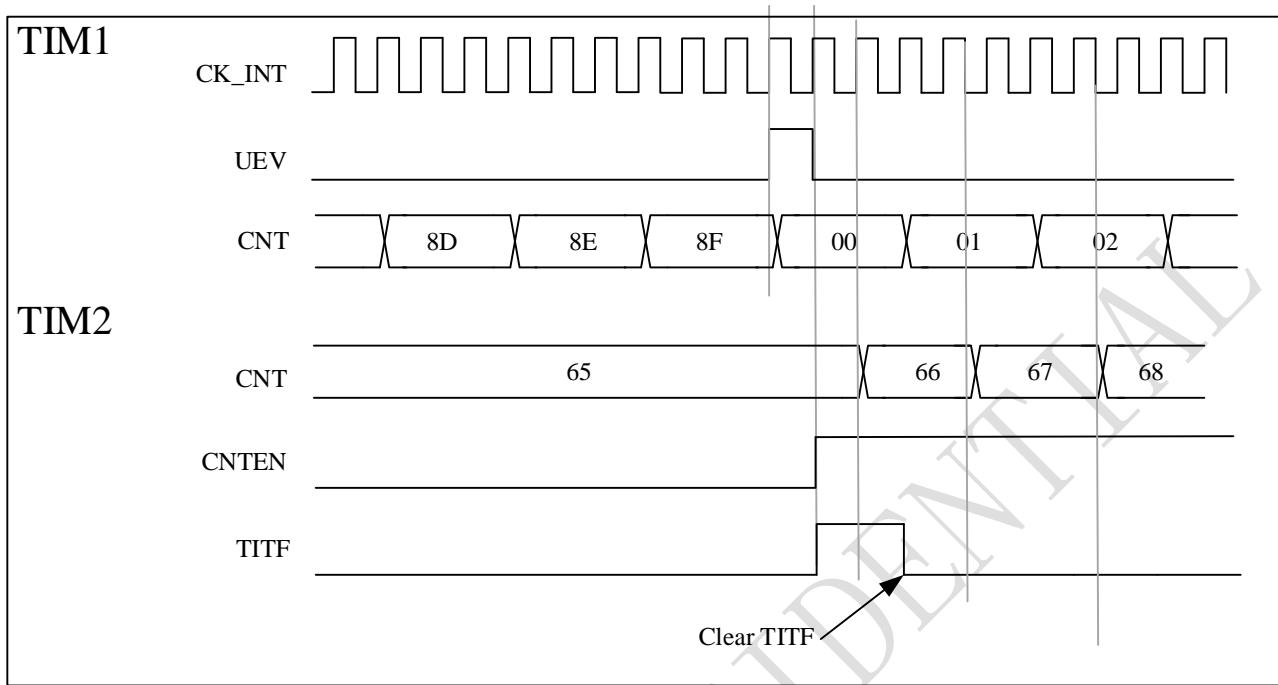
12.3.14.3 主定时器启动另一个定时器

在这个例子中，我们可以使用更新事件作为触发源。TIM1 是主，TIM2 是从。

配置步骤如下图所示：

- 设置 TIM1_CTRL2.MMSEL='010' 使用 TIM1 的更新事件作为触发输出
- 配置 TIM1_AR 寄存器设置输出周期。
- 设置 TIM2_SMCTRL.TSEL='000' 将 TIM1 触发输出连接到 TIM2。
- 设置 TIM2_SMCTRL.SMSEL='110' 将 TIM2 设置为触发模式。
- 设置 TIM1_CTRL1.CNTEN=1 启动 TIM1。

图 12-25 使用定时器 1 的更新触发定时器 2



12.3.14.4 使用一个外部触发同步地启动 2 个定时器

在本例中, TIM1 的 TI1 输入上升时使能 TIM1, 使能 TIM1 时使能 TIM2。为确保计数器对齐, TIM1 必须配置为主/从模式。对于 TI1, TIM1 是从; 对于 TIM2, TIM1 是主。

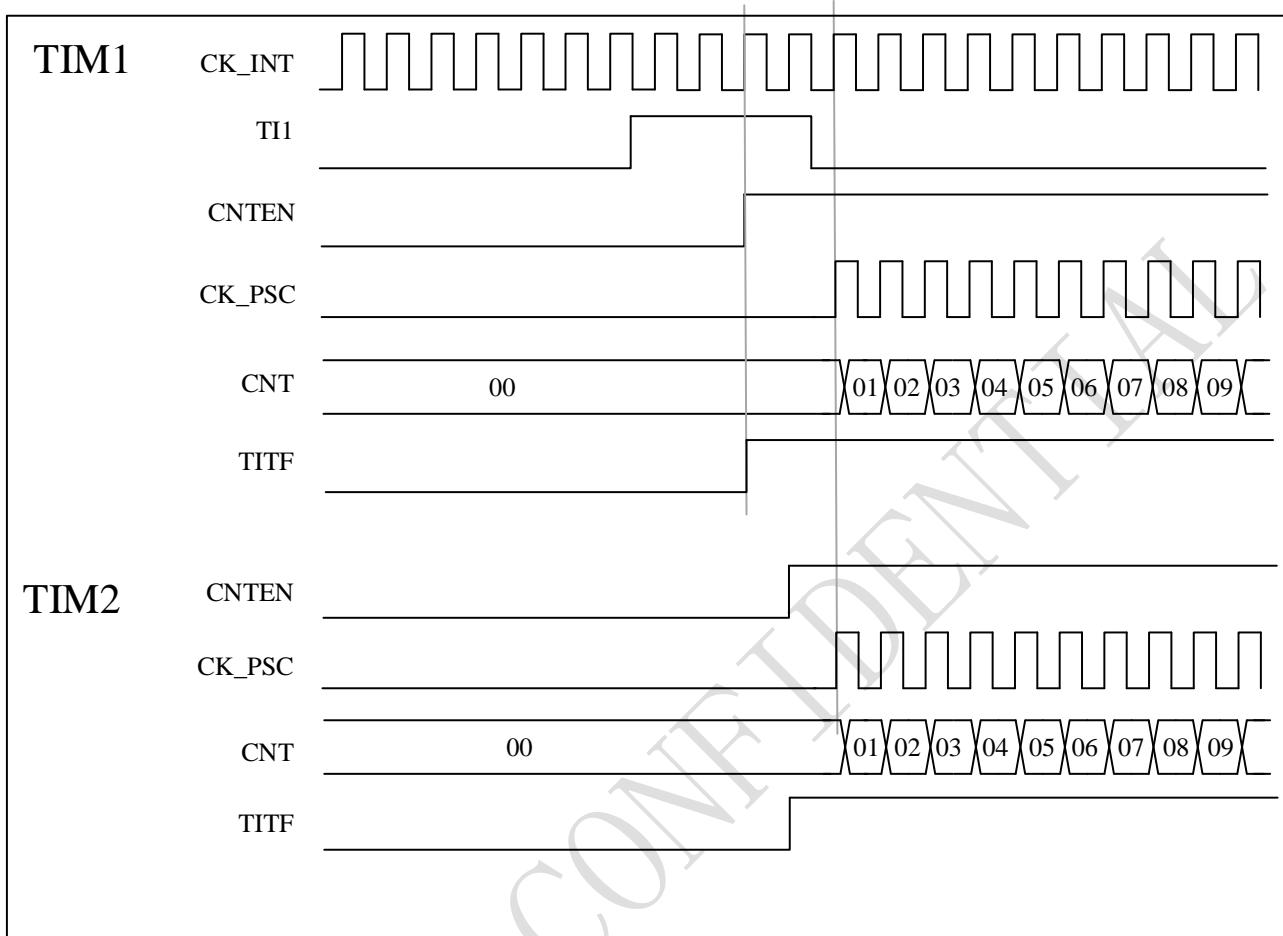
配置步骤如下图所示:

- 设置 TIM1.MMSEL = '001' 使用使能信号作为触发输出
- 设置 TIM1_SMCTRL.TSEL = '100' 将 TIM1 配置为从模式并接收 TI1 的触发输入。
- 设置 TIM1_SMCTRL.SMSEL = '110' 将 TIM1 配置为触发模式。
- 设置 TIM1_SMCTRL.MSMD = '1' 将 TIM1 配置为主/从模式。
- 设置 TIM2_SMCTRL.TSEL = '000' 将 TIM1 触发输出连接到 TIM2。
- 设置 TIM2_SMCTRL.SMSEL = '110' 将 TIM2 配置为触发模式。

当 TI1 上升沿到来时, 两个定时器开始根据内部时钟同步计数, 两个 TITF 标志同时置位。

注: 下图显示了在主/从模式下 CNTEN 和 TIM1 的 CK_PSC 之间的延迟。

图 12-26 使用定时器 1 的 TI1 输入触发定时器 1 和定时器 2



12.3.15 编码器接口模式

编码器使用两个输入 TI1 和 TI2 作为接口，计数器对 TI1FP1 或 TI2FP2 上的每个边沿变化进行计数。计数方向由硬件 TIMx_CTRL1.DIR 自动控制。编码器计数模式共有三种：

4. 计数器只在 TI1 的边沿计数，`TIMx_SMCTRL.SMSEL = '001'`；
5. 计数器只在 TI2 的边沿计数，`TIMx_SMCTRL.SMSEL = '010'`；
6. 计数器同时在 TI1 和 TI2 的边沿计数，`TIMx_SMCTRL.SMSEL = '011'`；

编码器接口相当于使用带方向选择的外部时钟，计数器只在 0 和自动重载值 (`TIMx_AR.AR [15:0]`) 之间连续计数。因此，需要提前配置自动重载寄存器 `TIMx_AR`。

注意：编码器模式和外部时钟模式 2 不兼容，不能同时选择。

计数方向与编码器信号的关系如下表：

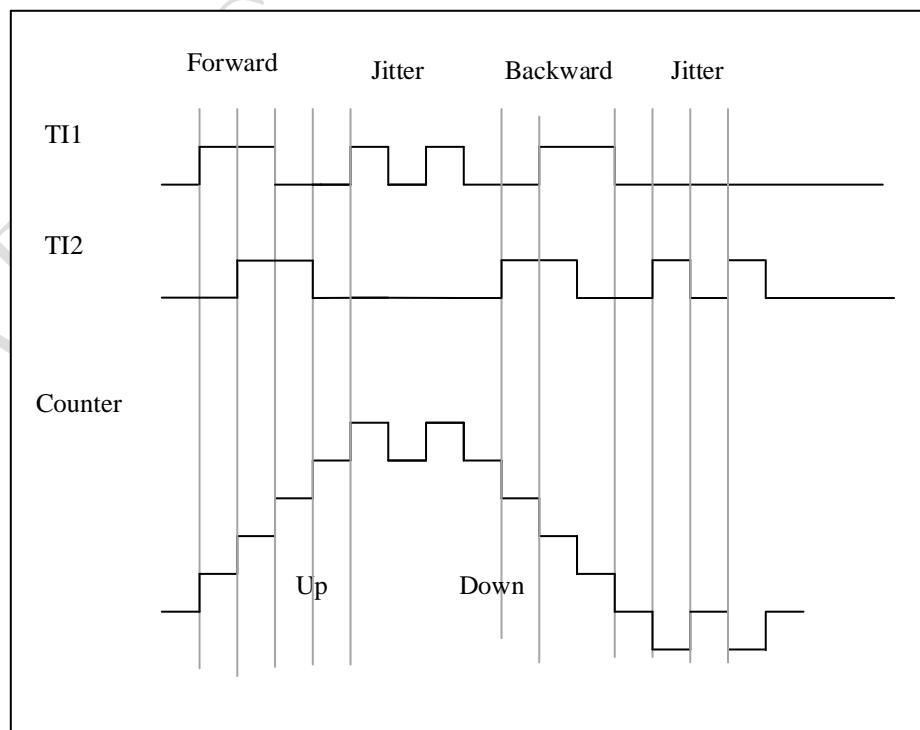
表 12-1 计数方向与编码器信号的关系

| 有效边沿 | 相对信号的电平 (TI1FP1对应TI2, TI2FP2对应TI1) | TI1FP1信号 | | TI2FP2信号 | |
|-------------|--|----------|------|----------|------|
| | | 上升 | 下降 | 上升 | 下降 |
| 仅在TI1计数 | 高 | 向下计数 | 向上计数 | 不计数 | 不计数 |
| | 低 | 向上计数 | 向下计数 | 不计数 | 不计数 |
| 仅在TI2计数 | 高 | 不计数 | 不计数 | 向上计数 | 向下计数 |
| | 低 | 不计数 | 不计数 | 向下计数 | 向上计数 |
| 在TI1和TI2上计数 | 高 | 向下计数 | 向上计数 | 向上计数 | 向下计数 |
| | 低 | 向上计数 | 向下计数 | 向下计数 | 向上计数 |

以下是选择了双边沿触发以抑制输入抖动的编码器示例：

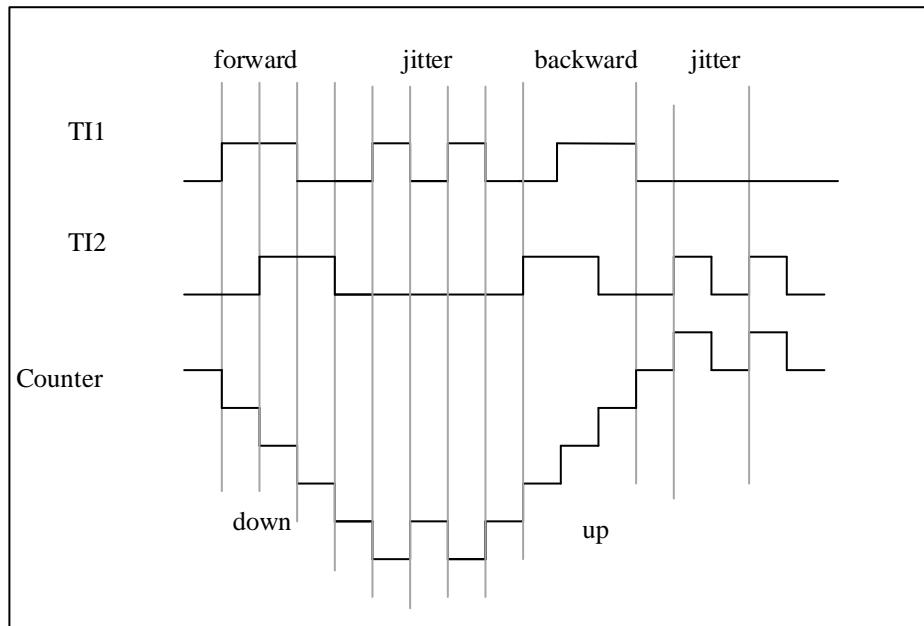
1. IC1FP1 映射到 TI1 (TIMx_CCMOD1.CC1SEL= '01'), IC1FP1 不反相 (TIMx_CCEN.CC1P= '0');
2. IC1FP2 映射到 TI2 (TIMx_CCMOD2.CC2SEL= '01'), IC2FP2 不反相 (TIMx_CCEN.CC2P= '0');
3. 输入在上升沿和下降沿均有效 (TIMx_SMCTRL.SMSEL = '011');
4. 启用计数器 TIMx_CTRL1.CNTEN= '1';

图 12-27 编码器模式下的计数器操作实例



下图为 IC1FP1 极性反转时的计数器行为示例 (CC1P='1', 其他配置同上)

图 12-28 IC1FP1 反相的编码器接口模式实例



12.3.16 与霍尔传感器的接口

请查阅11.3.20

12.4 TIMx 寄存器 (x=2,3,4 和 5)

关于在寄存器描述里面所用到的缩写，详见第 1.1 节。

可以用半字(16位)或字(32位)的方式操作这些外设寄存器。

12.4.1 寄存器总览

表 12-2 TIM2、TIM3、TIM4、TIM5 and TIM9 寄存器总览

12.4.2 控制寄存器 1 (TIMx_CTRL1)

偏移地址: 0x00

复位值: 0x0000

| | | | | | | | | | | | | | | | | |
|----|----------|-------|-------|-------|-------|----------|-----------|-------|-------------|-----|-------|------|-------|-------|----|----|
| 31 | Reserved | | | | | | | | | | | | | | | 16 |
| 15 | CLRSEL | C4SEL | C3SEL | C2SEL | C1SEL | Reserved | CLKD[1:0] | ARPEN | CAMSEL[1:0] | DIR | ONEPM | UPRS | UPDIS | CNTEN | | 0 |
| | rw | rw | rw | rw | rw | | rw | rw | rw | rw | rw | rw | rw | rw | rw | rw |

| 位域 | 名称 | 描述 |
|-------|-----------|--|
| 31:16 | Reserved | 保留, 必须保持复位值 |
| 15 | CLRSEL | <p>OCxREF clear selection</p> <p>0: 选择外部OCxREF clear (来自 ETR) 1: 选择OCxREF clear (来自比较器)</p> <p>注: TIM5置1无效。 操作此位前必须开启芯片的扩展模式 (置位PWR_CTRL3.EXMODE)</p> |
| 14 | C4SEL | <p>Channel 4 Selection</p> <p>0: 选择外部CH4信号 (来自 IOM) 1: 选择内部CH4信号 (来自比较器)</p> <p>注: TIM5置1无效 操作此位前必须开启芯片的扩展模式 (置位PWR_CTRL3.EXMODE)</p> |
| 13 | C3SEL | <p>Channel 3 Selection</p> <p>0: 选择外部CH3 信号(来自 IOM) 1: 选择内部CH3 信号 (来自比较器)</p> <p>注: 操作此位前必须开启芯片的扩展模式 (置位PWR_CTRL3.EXMODE)</p> |
| 12 | C2SEL | <p>Channel 2 Selection</p> <p>0: 选择外部 CH2 (来自IOM) signal 1: 选择内部 CH2 (来自比较器) signal</p> <p>注: 操作此位前必须开启芯片的扩展模式 (置位PWR_CTRL3.EXMODE)</p> |
| 11 | C1SEL | <p>Channel 1 selection</p> <p>0: 选择外部 CH1 (来自 IOM) signal 1: 选择内部 CH1 (来自比较器) signal</p> <p>注: 操作此位前必须开启芯片的扩展模式 (置位PWR_CTRL3.EXMODE)</p> |
| 10 | Reserved | 保留, 必须保持复位值 |
| 9:8 | CLKD[1:0] | <p>时钟分频因子 (Clock division)</p> <p>CLKD[1:0] 表示 CK_INT (定时器时钟) 和 DTS (用于死区时间发生器和数字滤波器 (ETR、TIx) 的时钟) 之间的分频比。</p> <p>00: tDTS = tCK_INT 01: tDTS = 2 x tCK_INT 10: tDTS = 4 x tCK_INT 11: 保留, 不要使用这个配置</p> |
| 7 | ARPEN | 自动重装载预装载允许位 (Auto-reload preload enable) 0: TIMx_AR 寄存器的影子寄存器禁用 |

| 位域 | 名称 | 描述 |
|-----|-------------|---|
| | | 1: TIMx_AR 寄存器的影子寄存器使能 |
| 6:5 | CAMSEL[1:0] | <p>选择中央对齐模式 (Center-aligned mode selection)</p> <p>00: 边缘对齐模式。 TIMx_CTRL1.DIR 指定向上计数或向下计数。</p> <p>01: 中央对齐模式1。 计数器在中央对齐模式下计数，向下计数时输出比较中断标志位设置为 1。</p> <p>10: 中央对齐模式2。 计数器在中央对齐模式下计数，向上计数时输出比较中断标志位设置为1。</p> <p>11: 中央对齐模式3。 计数器在中央对齐模式下计数，向上计数或向下计数时输出比较中断标志位设置为 1。</p> <p>注意: 当计数器仍然启用时 (TIMx_CTRL1.CNTEN = 1) , 不允许从边缘对齐模式切换到中央对齐模式。</p> |
| 4 | DIR | <p>方向 (Direction)</p> <p>0: 计数器向上计数;</p> <p>1: 计数器向下计数。</p> <p>注: 当计数器配置为中央对齐模式或编码器模式时, 该位为只读。</p> |
| 3 | ONEPM | <p>单脉冲模式 (One pulse mode)</p> <p>0: 禁用单脉冲模式, 发生更新事件时不影响计数器计数。</p> <p>1: 使能单脉冲模式, 下次更新事件发生时计数器停止计数</p> |
| 2 | UPRS | <p>更新请求源 (Update request source)</p> <p>该位用于通过软件选择 UEV 事件源。</p> <p>0: 如果更新中断或 DMA 请求使能, 以下任何事件都会产生更新中断或 DMA 请求:</p> <ul style="list-style-type: none"> - 计数器上溢/下溢 - TIMx_EVTGEN.UDGN 位被设置 - 从模式控制器的更新生成 <p>1: 如果更新中断或 DMA 请求使能, 只有计数器上溢/下溢会产生更新中断或 DMA 请求。</p> |
| 1 | UPDIS | <p>更新禁用 (Update disable)</p> <p>该位用于启用/禁用软件生成的更新事件 (UEV) 事件。</p> <p>0: 启用。 如果满足以下条件之一, 将生成 UEV:</p> <ul style="list-style-type: none"> - 计数器上溢/下溢 - TIMx_EVTGEN.UDGN 位被设置 - 从模式控制器的更新生成 <p>影子寄存器将使用预加载值进行更新。</p> <p>1: UEV 禁用。 不生成更新事件, 影子寄存器 (AR、PSC 和 CC DATx) 保持它们的值。 如果 TIMx_EVTGEN.UDGN 位置位或从模式控制器发出硬件复位, 则重新初始化计数器和预分频器。</p> |
| 0 | CNTEN | <p>使能计数器 (Counter enable)</p> <p>0: 禁止计数器;</p> <p>1: 使能计数器。</p> <p>注: 在软件设置了CNTEN位后, 外部时钟、门控模式和编码器模式才能工作。触发模式可以自动地通过硬件设置CNTEN位。</p> |

12.4.3 控制寄存器 2 (TIMx_CTRL2)

偏移地址: 0x04

复位值: 0x0000

| | | | | | | | | | |
|----|----------|---|---|--------|--------|------------|--------|---|----------|
| 15 | Reserved | 9 | 8 | 7 | 6 | 4 | 3 | 2 | 0 |
| | | | | ETRSEL | TI1SEL | MMSEL[2:0] | CCDSEL | | Reserved |
| | | | | rw | rw | rw | rw | | |

| 位域 | 名称 | 描述 |
|-------|------------|--|
| 15: 9 | Reserved | 保留, 必须保持复位值 |
| 8 | ETRSEL | <p>ETR选择(ETR Selection) 0: 选择外部ETR信号(来自IOM); 1: Reserve; 注: ETR输入到IOM的映射, 见7.2.5.7 操作此位前必须开启芯片的扩展模式 (置位PWR_CTRL3.EXMODE)</p> |
| 7 | TI1SEL | <p>TI1选择 (TI1 selection) 0: TIMx_CH1引脚连到TI1输入; 1: TIMx_CH1、TIMx_CH2和TIMx_CH3引脚经异或后连到TI1输入。</p> |
| 6:4 | MMSEL[2:0] | <p>主模式选择 这 3 位 (TIMx_CTRL2.MMSEL [2:0]) 用于选择在主模式下发送到从定时器的同步信息 (TRGO)。可能的组合如下: 000: 复位 - 当 TIMx_EVTGEN.UDGN 置位或从模式控制器产生复位时, 将出现 TRGO 脉冲。在后一种情况下, TRGO 上的信号与实际复位相比有所延迟。 001: 使能 - TIMx_CTRL1.CNTEN 位用作触发输出 (TRGO)。有时需要同时启动多个定时器或者在一段时间内开启从定时器。 当 TIMx_CTRL1.CNTEN 位置位或门控模式下的触发输入为高电平时, 计数器使能信号置位。 当计数器使能信号由触发输入控制时, TRGO 上有一个延迟, 除非选择了主/从模式 (参见 TIMx_SMCTRL.MSMD 位的说明)。 010: 更新 - 选择更新事件作为触发输出 (TRGO)。例如, 主定时器时钟可用作从定时器预分频器。 011: 比较脉冲 - 当 TIMx_STS.CC1ITF 被设置时 (即使它已经是高电平), 即捕获或比较成功时, 触发输出发送一个正脉冲 (TRGO)。 100: 比较 - OC1REF 信号用作触发输出 (TRGO)。 101: 比较 - OC2REF 信号用作触发输出 (TRGO)。 110: 比较 - OC3REF 信号用作触发输出 (TRGO)。 111: 比较 - OC4REF 信号用作触发输出 (TRGO)。</p> |
| 3 | CCDSEL | <p>捕获/比较的DMA选择 (Capture/compare DMA selection) 0: 当发生CCx事件时, 送出CCx的DMA请求; 1: 当发生更新事件时, 送出CCx的DMA请求。</p> |
| 2:0 | Reserved | 保留, 必须保持复位值 |

12.4.4 从模式控制寄存器 (TIMx_SMCTRL)

偏移地址: 0x08

复位值: 0x0000

| | | | | | | | | | | | | |
|----|----|----|----|----|-----------|----|---|----|---|----|---|----|
| 15 | 14 | 13 | 12 | 11 | EXTF[3:0] | 8 | 7 | 6 | 4 | 3 | 2 | 0 |
| rw | rw | rw | | rw | | rw | | rw | | rw | | rw |

| 位域 | 名称 | 描述 |
|-------|------------|---|
| 15 | EXTP | <p>外部触发极性 (External trigger polarity) 该位选择是用ETR还是ETR的反相来作为触发操作 0: ETR高电平或上升沿有效; 1: ETR低电平或下降沿有效。</p> |
| 14 | EXCEN | <p>外部时钟使能位 (External clock enable) 该位启用外部时钟模式2。启用后, 计数器由ETRF信号上的任意有效边沿驱动。 0: 禁止外部时钟模式2; 1: 使能外部时钟模式2。</p> <p>注1: 当同时使能外部时钟模式1和外部时钟模式2时, 外部时钟的输入为ETRF。 注2: 以下从机模式可以与外部时钟模式2同时使用: 复位模式、门控模式和触发模式; 但是, TRGI 无法连接到ETRF (TIMx_SMCTRL.TSEL ≠ '111')。 注3: 设置TIMx_SMCTRL.EXCEN位与选择外部时钟模式1并将TRGI连接到ETRF (TIMx_SMCTRL.SMSEL = 111 和 TIMx_SMCTRL.TSEL = 111) 的效果相同</p> |
| 13:12 | EXTPS[1:0] | <p>外部触发预分频 (External trigger prescaler) 外部触发信号ETRP的频率必须最多为TIMxCLK频率的1/4。当输入更快的外部时钟时, 可以使用预分频器来降低ETRP的频率。 00: 关闭预分频; 01: ETRP频率除以2; 10: ETRP频率除以4; 11: ETRP频率除以8。</p> |
| 11:8 | EXTF[3:0] | <p>外部触发滤波 (External trigger filter) 这些位用于定义ETRP信号的采样频率和ETRP数字滤波的带宽。实际上, 数字滤波器是一个事件计数器, 在记录连续N个事件后生成验证输出。</p> <p>0000: 无滤波器, 以fDTS采样 1000: 采样频率fSAMPLING=fDTS/8, N=6 0001: 采样频率fSAMPLING=fCK_INT, N=2 1001: 采样频率fSAMPLING=fDTS/8, N=8 0010: 采样频率fSAMPLING=fCK_INT, N=4 1010: 采样频率fSAMPLING=fDTS/16, N=5 0011: 采样频率fSAMPLING=fCK_INT, N=8 1011: 采样频率fSAMPLING=fDTS/16, N=6 0100: 采样频率fSAMPLING=fDTS/2, N=6 1100: 采样频率fSAMPLING=fDTS/16, N=8 0101: 采样频率fSAMPLING=fDTS/2, N=8 1101: 采样频率fSAMPLING=fDTS/32, N=5 0110: 采样频率fSAMPLING=fDTS/4, N=6 1110: 采样频率fSAMPLING=fDTS/32,</p> |

| 位域 | 名称 | 描述 |
|-----|------------|---|
| | | <p>N=6</p> <p>0111: 采样频率fSAMPLING=fDTS/4, N=8 1111: 采样频率fSAMPLING=fDTS/32, N=8</p> |
| 7 | MSMD | <p>主/从模式 (Master/slave mode)</p> <p>0: 无作用;</p> <p>1: 触发输入 (TRGI) 上的事件被延迟了, 以允许在当前定时器 (通过TRGO) 与它的从定时器间的完美同步。这对要求把几个定时器同步到一个单一的外部事件时是非常有用的。</p> |
| 6:4 | TSEL[2:0] | <p>触发选择 (Trigger selection)</p> <p>这3位选择用于同步计数器的触发输入。</p> <p>000: 内部触发0 (ITR0) 100: TI1的边沿检测器 (TI1F_ED)</p> <p>001: 内部触发1 (ITR1) 101: 滤波后的定时器输入1 (TI1FP1)</p> <p>010: 内部触发2 (ITR2) 110: 滤波后的定时器输入2 (TI2FP2)</p> <p>011: 内部触发3 (ITR3) 111: 外部触发输入 (ETRF)</p> <p>更多ITRx的细节参见表12-3。</p> <p>注: 这些位只能在未用到 (如SMSEL=000) 时被改变, 以避免在改变时产生错误的边沿检测。</p> |
| 3 | Reserved | 保留, 必须保持复位值 |
| 2:0 | SMSEL[2:0] | <p>从模式选择 (Slave mode selection)</p> <p>当选择了外部信号, 触发信号 (TRGI) 的有效边沿与选中的外部输入极性相关 (见输入控制寄存器和控制寄存器的说明)</p> <p>000: 关闭从模式 – 如果CNTEN=1, 则预分频器直接由内部时钟驱动。</p> <p>001: 编码器模式1 – 根据TI2FP2的电平, 计数器在TI1FP1的边沿向上/下计数。</p> <p>010: 编码器模式2 – 根据TI1FP1的电平, 计数器在TI2FP2的边沿向上/下计数。</p> <p>011: 编码器模式3 – 根据另一个信号的输入电平, 计数器在TI1FP1和TI2FP2的边沿向上/下计数。</p> <p>100: 复位模式 – 选中的触发输入 (TRGI) 的上升沿, 计数器重新初始化并更新影子寄存器。</p> <p>101: 门控模式 – 当触发输入 (TRGI) 为高时, 计数器的时钟开启。一旦触发输入变为低, 则计数器停止 (但不复位)。计数器的启动和停止都是受控的。</p> <p>110: 触发模式 – 计数器在触发输入TRGI的上升沿启动 (但不复位), 只有计数器的启动是受控的。</p> <p>111: 外部时钟模式1 – 选中的触发输入 (TRGI) 的上升沿驱动计数器。</p> <p>注: 如果TI1F_ED被选为触发输入 (TSEL=100) 时, 不要使用门控模式。这是因为, TI1F_ED在每次TI1F变化时输出一个脉冲, 然而门控模式是要检查触发输入的电平。</p> |

表 12-3 TIMx 内部触发连接

| Slave timer | ITR0 (TSEL = 000) | ITR1 (TSEL = 001) | ITR2 (TSEL = 010) | ITR3 (TSEL = 011) |
|-------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| TIM2 | TIM1 | TIM8 | TIM3 | TIM4 |
| TIM3 | TIM1 | TIM2 | TIM5 | TIM4 |
| TIM4 | TIM1 | TIM2 | TIM3 | TIM8 |
| TIM5 | TIM2 | TIM3 | TIM4 | TIM8 |

12.4.5 DMA/中断使能寄存器 (TIMx_DINTEN)

偏移地址: 0x0C

复位值: 0x0000

| | | | | | | | | | | | | | | | |
|----------|------|----------|--------|--------|--------|--------|------|----------|------|----------|--------|--------|--------|--------|------|
| 15 | 14 | 13 | 12 | 11 | 10 | 9 | 8 | 7 | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | 0 |
| Reserved | TDEN | Reserved | CC4DEN | CC3DEN | CC2DEN | CC1DEN | UDEN | Reserved | TIEN | Reserved | CC4IEN | CC3IEN | CC2IEN | CC1IEN | UIEN |

rw rw

| 位域 | 名称 | 描述 |
|----|----------|---|
| 15 | Reserved | 保留, 必须保持复位值 |
| 14 | TDEN | 允许触发DMA请求 (Trigger DMA request enable) 0: 禁止触发DMA请求; 1: 允许触发DMA请求。 |
| 13 | Reserved | 保留, 必须保持复位值 |
| 12 | CC4DEN | 允许捕获/比较4的DMA请求 (Capture/Compare 4 DMA request enable) 0: 禁止捕获/比较4的DMA请求; 1: 允许捕获/比较4的DMA请求。 |
| 11 | CC3DEN | 允许捕获/比较3的DMA请求 (Capture/Compare 3 DMA request enable) 0: 禁止捕获/比较3的DMA请求; 1: 允许捕获/比较3的DMA请求。 |
| 10 | CC2DEN | 允许捕获/比较2的DMA请求 (Capture/Compare 2 DMA request enable) 0: 禁止捕获/比较2的DMA请求; 1: 允许捕获/比较2的DMA请求。 |
| 9 | CC1DEN | 允许捕获/比较1的DMA请求 (Capture/Compare 1 DMA request enable) 0: 禁止捕获/比较1的DMA请求; 1: 允许捕获/比较1的DMA请求。 |
| 8 | UDEN | 允许更新的DMA请求 (Update DMA request enable) 0: 禁止更新的DMA请求; 1: 允许更新的DMA请求。 |
| 7 | Reserved | 保留, 必须保持复位值 |
| 6 | TIEN | 触发中断使能 (Trigger interrupt enable) 0: 禁止触发中断; 1: 使能触发中断。 |
| 5 | Reserved | 保留, 必须保持复位值 |
| 4 | CC4IEN | 允许捕获/比较4中断 (Capture/Compare 4 interrupt enable) 0: 禁止捕获/比较4中断; 1: 允许捕获/比较4中断。 |
| 3 | CC3IEN | 允许捕获/比较3中断 (Capture/Compare 3 interrupt enable) 0: 禁止捕获/比较3中断; 1: 允许捕获/比较3中断。 |
| 2 | CC2IEN | 允许捕获/比较2中断 (Capture/Compare 2 interrupt enable) 0: 禁止捕获/比较2中断; 1: 允许捕获/比较2中断。 |

| 位域 | 名称 | 描述 |
|----|--------|---|
| 1 | CC1IEN | 允许捕获/比较1中断 (Capture/Compare 1 interrupt enable) 0: 禁止捕获/比较1中断; 1: 允许捕获/比较1中断。 |
| 0 | UIEN | 允许更新中断 (Update interrupt enable) 0: 禁止更新中断; 1: 允许更新中断。 |

12.4.6 状态寄存器 (TIMx_STS)

偏移地址: 0x10

复位值: 0x0000

| | | | | | | | | | | | | | | |
|----------|--------|--------|--------|--------|----------|------|----------|--------|--------|--------|--------|-------|-------|-------|
| 15 | 13 | 12 | 11 | 10 | 9 | 8 | 7 | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | 0 |
| Reserved | CC4OCF | CC3OCF | CC2OCF | CC1OCF | Reserved | TITF | Reserved | CC4ITF | CC3ITF | CC2ITF | CC1ITF | UDITF | rc_w0 | rc_w0 |

| 位域 | 名称 | 描述 |
|-------|----------|---|
| 15:13 | Reserved | 保留, 必须保持复位值 |
| 12 | CC4OCF | 捕获/比较4重复捕获标记 (Capture/Compare 4 overcapture flag) 参见CC1OCF描述。 |
| 11 | CC3OCF | 捕获/比较3重复捕获标记 (Capture/Compare 3 overcapture flag) 参见CC1OCF描述。 |
| 10 | CC2OCF | 捕获/比较2重复捕获标记 (Capture/Compare 2 overcapture flag) 参见CC1OCF描述。 |
| 9 | CC1OCF | 捕获/比较1重复捕获标记 (Capture/Compare 1 overcapture flag) 仅当相应的通道被配置为输入捕获时, 该标记可由硬件置1。写0可清除该位。 0: 无重复捕获产生; 1: 计数器的值被捕获到TIMx_CCDAT1寄存器时, CC1ITF的状态已经为‘1’。 |
| 8:7 | Reserved | 保留, 必须保持复位值 |
| 6 | TITF | 触发器中断标记 (Trigger interrupt flag) 当发生触发事件 (当从模式控制器处于除门控模式外的其它模式时, 在TRGI输入端检测到有效边沿, 或门控模式下的任一边沿) 时由硬件对该位置‘1’。它由软件清‘0’。 0: 无触发器事件产生; 1: 触发中断等待响应。 |
| 5 | Reserved | 保留, 必须保持复位值 |
| 4 | CC4ITF | 捕获/比较4中断标记 (Capture/Compare 4 interrupt flag) 参考CC1ITF描述。 |
| 3 | CC3ITF | 捕获/比较3中断标记 (Capture/Compare 3 interrupt flag) 参考CC1ITF描述。 |
| 2 | CC2ITF | 捕获/比较2中断标记 (Capture/Compare 2 interrupt flag) 参考CC1ITF描述。 |
| 1 | CC1ITF | 捕获/比较1中断标记 (Capture/Compare 1 interrupt flag) 如果通道CC1配置为输出模式: 除中央对齐模式外, 当计数器值与比较值相同时, 该位由硬件设置 (参见 |

| 位域 | 名称 | 描述 |
|----|-------|--|
| | | <p>TIMx_CTRL1.CAMSEL 位描述)。 该位由软件清零。</p> <p>0: 未发生匹配。</p> <p>1: TIMx_CNT 的值与 TIMx_CCDAT1 的值相同。</p> <p>当 TIMx_CCDAT1 的值大于 TIMx_AR 的值时, 如果计数器溢出(在向上计数和向上/向下计数模式下)和向下计数模式下溢, 则 TIMx_STS.CC1ITF 位将变为高电平。</p> <p>如果通道CC1配置为输入模式:</p> <p>当捕捉事件发生时, 该位由硬件设置。 该位由软件或读取 TIMx_CCDAT1 清零。</p> <p>0: 未发生输入捕捉。</p> <p>1: 发生输入捕捉。 计数器值已在 TIMx_CCDAT1 中捕获。 在 IC1 上检测到与所选极性相同的边沿。</p> |
| 0 | UDITF | <p>更新中断标志 (Update interrupt flag)</p> <p>当在以下条件下发生更新事件时, 该位由硬件设置:</p> <ul style="list-style-type: none"> 当 TIMx_CTRL1.UPDIS = 0 时, 计数器上/下溢。 当 TIMx_CTRL1.UPRS = 0 时, TIMx_CTRL1.UPDIS = 0, 并通过软件设置 TIMx_EVTGEN.UDGN 位以重新初始化 CNT。 当 TIMx_CTRL1.UPRS = 0 时, TIMx_CTRL1.UPDIS = 0, 并且计数器 CNT 由触发事件重新初始化。 (参见 TIMx_SMCTRL 寄存器说明) <p>该位由软件清零。</p> <p>0: 未发生更新事件</p> <p>1: 发生更新中断</p> |

12.4.7 事件产生寄存器 (TIMx_EVTGEN)

偏移地址:0x14

复位值:0x0000

| | | | | | | | | | |
|----|----------|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 15 | Reserved | 7 | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | 0 |
| | | | | | | | | | |

| 位域 | 名称 | 描述 |
|------|----------|--|
| 15:7 | Reserved | 保留, 必须保持复位值 |
| 6 | TGN | <p>产生触发事件 (Trigger generation)</p> <p>当由软件置位时, 该位可以产生一个触发事件。 而此时 TIMx_STS.TITF = 1, 如果相应的中断和DMA被使能, 就会产生相应的中断和DMA。 该位由硬件自动清零。</p> <p>0: 无动作</p> <p>1: 产生触发事件</p> |
| 5 | Reserved | 保留, 必须保持复位值 |
| 4 | CC4GN | <p>产生捕获/比较4事件 (Capture/Compare 4 generation)</p> <p>参考CC1GN描述。</p> |
| 3 | CC3GN | <p>产生捕获/比较3事件 (Capture/Compare 3 generation)</p> <p>参考CC1GN描述。</p> |
| 2 | CC2GN | <p>产生捕获/比较2事件 (Capture/Compare 2 generation)</p> <p>参考CC1GN描述。</p> |

| 位域 | 名称 | 描述 |
|----|-------|---|
| 1 | CC1GN | <p>产生捕获/比较1事件 (Capture/Compare 1 generation) 当由软件设置时, 该位可以产生一个捕获/比较事件。 该位由硬件自动清零。</p> <p>CC1对应通道为输出模式时: TIMx_STS.CC1ITF 标志将被拉高, 如果相应的中断和 DMA 被使能, 就会产生相应的中断和 DMA。</p> <p>CC1对应通道为输入模式时: TIMx_CCDAT1 将捕获当前计数器值, 并将 TIMx_STS.CC1ITF 标志拉高, 如果相应的中断和 DMA 被使能, 则会产生相应的中断和 DMA。 如果 TIMx_STS.CC1ITF 已经拉高, 则拉高 TIMx_STS.CC1OCF。</p> <p>0: 无动作 1: 生成 CC1 捕获/比较事件</p> |
| 0 | UDGN | <p>产生更新事件 (Update generation) 该位由软件置'1', 由硬件自动清'0'。 当由软件设置时, 该位可以生成更新事件。 而此时计数器会重新初始化, 预分频计数器会被清零, 计数器在中央对齐或向上计数模式下会被清零, 但在向下计数模式下取 TIMx_AR 寄存器的值。 该位由硬件自动清零。</p> <p>0: 无动作 1: 生成更新事件</p> |

12.4.8 捕获/比较模式寄存器 1 (TIMx_CCMOD1)

偏移地址: 0x18

复位值: 0x0000

通道可用于输入（捕获模式）或输出（比较模式），通道的方向由相应的 CCxSEL 位定义。该寄存器其它位的作用在输入和输出模式下不同。OCx 描述了通道在输出模式下的功能，ICx 描述了通道在输入模式下的功能。因此必须注意，同一个位在输出模式和输入模式下的功能是不同的。

输出比较模式：

| 15 | 14 | 12 | 11 | 10 | 9 | 8 | 7 | 6 | 4 | 3 | 2 | 1 | 0 |
|--------|----|------------|--------|--------|-------------|--------|---|------------|---|--------|--------|-------------|---|
| OC2CEN | | OC2MD[2:0] | OC2PEN | OC2FEN | CC2SEL[1:0] | OC1CEN | | OC1MD[2:0] | | OC1PEN | OC1FEN | CC1SEL[1:0] | |

rw rw

| 位域 | 名称 | 描述 |
|-------|-------------|---|
| 15 | OC2CEN | 输出比较2清0使能 (Output Compare 2 clear enable) |
| 14:12 | OC2MD[2:0] | 输出比较2模式 (Output Compare 2 mode) |
| 11 | OC2PEN | 输出比较2预装载使能 (Output Compare 2 preload enable) |
| 10 | OC2FEN | 输出比较2快速使能 (Output Compare 2 fast enable) |
| 9:8 | CC2SEL[1:0] | <p>捕获/比较2选择。 (Capture/Compare 2 selection) 该位定义通道的方向（输入/输出），及输入脚的选择：</p> <p>00: CC2通道被配置为输出； 01: CC2通道被配置为输入， IC2映射在TI2上； 10: CC2通道被配置为输入， IC2映射在TI1上； 11: CC2通道被配置为输入， IC2映射在TRC上。此模式仅工作在内部触发输入被选中时（由 TIMx_SMCTRL 寄存器的 TSEL 位选择）。</p> <p>注: CC2SEL 仅在通道关闭时 (TIMx_CCEN 寄存器的 CC2EN=0) 才是可写的。</p> |

| 位域 | 名称 | 描述 |
|-----|-------------|---|
| 7 | OC1CEN | <p>输出比较1清'0'使能 (Output Compare 1 clear enable)</p> <p>0: OC1REF 不受ETRF输入的影响；</p> <p>1: 一旦检测到ETRF输入高电平，清除OC1REF=0。</p> |
| 6:4 | OC1MD[2:0] | <p>输出比较1模式 (Output Compare 1 mode)</p> <p>这些位用于管理输出参考信号 OC1REF，它决定了 OC1 和 OC1N 的值，在高电平有效，而 OC1 和 OC1N 的有效电平取决于 TIMx_CCEN.CC1P 和 TIMx_CCEN.CC1NP 位。</p> <p>000: 冻结。 TIMx_CCDAT1 寄存器和计数器 TIMx_CNT 之间的比较对 OC1REF 信号没有影响。</p> <p>001: 将通道 1 设置为匹配时的有效电平。当 TIMx_CCDAT1 = TIMx_CNT 时，OC1REF 信号将被强制为高电平。</p> <p>010: 将通道 1 设置为匹配时的无效电平。当 TIMx_CCDAT1 = TIMx_CNT 时，OC1REF 信号将被强制为低电平。</p> <p>011: 翻转。当 TIMx_CCDAT1 = TIMx_CNT 时，OC1REF 信号将被翻转。</p> <p>100: 强制无效电平。 OC1REF 信号被强制为低电平。</p> <p>101: 强制有效电平。 OC1REF 信号被强制为高电平。</p> <p>110: PWM 模式 1 - 在向上计数模式下，如果 TIMx_CNT < TIMx_CCDAT1，则通道 1 的 OC1REF 信号为高电平，否则为低电平。在向下计数模式下，如果 TIMx_CNT > TIMx_CCDAT1，则通道 1 的 OC1REF 信号为低电平，否则为高电平。</p> <p>111: PWM 模式 2 - 在向上计数模式下，如果 TIMx_CNT < TIMx_CCDAT1，则通道 1 的 OC1REF 信号为低电平，否则为高电平。在向下计数模式下，如果 TIMx_CNT > TIMx_CCDAT1，则通道 1 的 OC1REF 信号为高电平，否则为低电平。</p> <p><i>注 1: 在 PWM 模式 1 或 PWM 模式 2 中，OC1REF 电平仅在比较结果改变或输出比较模式从冻结模式切换到 PWM 模式时才会改变。</i></p> |
| 3 | OC1PEN | <p>输出比较 1 预加载使能 (Output Compare 1 preload enable)</p> <p>0: 禁用 TIMx_CCDAT1 寄存器的预加载功能。 支持随时对 TIMx_CCDAT1 寄存器进行写操作，写入的值立即生效。</p> <p>1: 使能 TIMx_CCDAT1 寄存器的预加载功能。 仅对预加载寄存器进行读写操作。当更新事件发生时，TIMx_CCDAT1 的值被加载到影子寄存器中。</p> <p><i>注 1: 只有当 TIMx_CTRL1.ONEPM = 1 (在单脉冲模式下) 时，才能使用 PWM 模式而不验证预加载寄存器，否则无法预测其他行为。</i></p> |
| 2 | OC1FEN | <p>输出比较1 快速使能 (Output Compare 1 fast enable)</p> <p>该位用于加快CC输出对触发输入事件的响应。</p> <p>0: 根据计数器与CCDAT1的值，CC1正常操作，即使触发器是打开的。当触发器的输入有一个有效沿时，激活CC1输出的最小延时为5个时钟周期。</p> <p>1: 输入到触发器的有效沿的作用就像发生了一次比较匹配。因此，OC1被设置为比较电平而与比较结果无关。采样触发器的有效沿和CC1输出间的延时被缩短为3个时钟周期。</p> <p>OCxFEN只在通道被配置成PWM1或PWM2模式时起作用。</p> |
| 1:0 | CC1SEL[1:0] | <p>捕获/比较1 选择。 (Capture/Compare 1 selection)</p> <p>这2位定义通道的方向 (输入/输出)，及输入脚的选择：</p> <p>00: CC1通道被配置为输出；</p> |

| 位域 | 名称 | 描述 |
|----|----|---|
| | | <p>01: CC1通道被配置为输入, IC1映射在TI1上;</p> <p>10: CC1通道被配置为输入, IC1映射在TI2上;</p> <p>11: CC1通道被配置为输入, IC1映射在TRC上。此模式仅工作在内部触发输入被选中时（由TIMx_SMCTRL寄存器的TSEL位选择）。</p> <p>注: <i>CC1SEL</i>仅在通道关闭时 (TIMx_CCEN寄存器的CC1EN=0) 才是可写的。</p> |

输入捕获模式：

| | | | | | | | | | | | |
|-----------|-------------|-------------|----|---|-----------|---|-------------|-------------|---|---|---|
| 15 | 12 | 11 | 10 | 9 | 8 | 7 | 4 | 3 | 2 | 1 | 0 |
| IC2F[3:0] | IC2PSC[1:0] | CC2SEL[1:0] | | | IC1F[3:0] | | IC1PSC[1:0] | CC1SEL[1:0] | | | |

| 位域 | 名称 | 描述 | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|--|---|----------------------------|---|---|---|---|--|---|--|---|--|---|--|---|--|---|--|
| 15:12 | IC2F[3:0] | 输入捕获2滤波器 (Input capture 2 filter) | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 11:10 | IC2PSC[1:0] | 输入/捕获2预分频器 (Input capture 2 prescaler) | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 9:8 | CC2SEL[1:0] | <p>捕获/比较2选择 (Capture/Compare 2 selection)</p> <p>这2位定义通道的方向 (输入/输出), 及输入脚的选择:</p> <p>00: CC2通道被配置为输出;</p> <p>01: CC2通道被配置为输入, IC2映射在TI2上;</p> <p>10: CC2通道被配置为输入, IC2映射在TI1上;</p> <p>11: CC2通道被配置为输入, IC2映射在TRC上。此模式仅工作在内部触发输入被选中时 (由TIMx_SMCTRL寄存器的TSEL位选择)。</p> <p>注: CC2SEL仅在通道关闭时 (TIMx_CCEN寄存器的CC2EN=0) 才是可写的。</p> | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 7:4 | IC1F[3:0] | <p>输入捕获1滤波器 (Input capture 1 filter)</p> <p>这几位定义了TI1输入的采样频率及数字滤波器长度。数字滤波器由一个事件计数器组成, 它记录到N个事件后会产生一个输出的跳变:</p> <table> <tbody> <tr> <td>0000: 无滤波器, 以f_{DTS}采样</td> <td>1000: 采样频率$f_{SAMPLING}=f_{DTS}/8$, N=6</td> </tr> <tr> <td>0001: 采样频率$f_{SAMPLING}=f_{CK_INT}$, N=2</td> <td>1001: 采样频率$f_{SAMPLING}=f_{DTS}/8$, N=8</td> </tr> <tr> <td>0010: 采样频率$f_{SAMPLING}=f_{CK_INT}$, N=4</td> <td>1010: 采样频率$f_{SAMPLING}=f_{DTS}/16$, N=5</td> </tr> <tr> <td>0011: 采样频率$f_{SAMPLING}=f_{CK_INT}$, N=8</td> <td>1011: 采样频率$f_{SAMPLING}=f_{DTS}/16$, N=6</td> </tr> <tr> <td>0100: 采样频率$f_{SAMPLING}=f_{DTS}/2$, N=6</td> <td>1100: 采样频率$f_{SAMPLING}=f_{DTS}/16$, N=8</td> </tr> <tr> <td>0101: 采样频率$f_{SAMPLING}=f_{DTS}/2$, N=8</td> <td>1101: 采样频率$f_{SAMPLING}=f_{DTS}/32$, N=5</td> </tr> <tr> <td>0110: 采样频率$f_{SAMPLING}=f_{DTS}/4$, N=6</td> <td>1110: 采样频率$f_{SAMPLING}=f_{DTS}/32$, N=6</td> </tr> <tr> <td>0111: 采样频率$f_{SAMPLING}=f_{DTS}/4$, N=8</td> <td>1111: 采样频率$f_{SAMPLING}=f_{DTS}/32$, N=8</td> </tr> </tbody> </table> | 0000: 无滤波器, 以 f_{DTS} 采样 | 1000: 采样频率 $f_{SAMPLING}=f_{DTS}/8$, N=6 | 0001: 采样频率 $f_{SAMPLING}=f_{CK_INT}$, N=2 | 1001: 采样频率 $f_{SAMPLING}=f_{DTS}/8$, N=8 | 0010: 采样频率 $f_{SAMPLING}=f_{CK_INT}$, N=4 | 1010: 采样频率 $f_{SAMPLING}=f_{DTS}/16$, N=5 | 0011: 采样频率 $f_{SAMPLING}=f_{CK_INT}$, N=8 | 1011: 采样频率 $f_{SAMPLING}=f_{DTS}/16$, N=6 | 0100: 采样频率 $f_{SAMPLING}=f_{DTS}/2$, N=6 | 1100: 采样频率 $f_{SAMPLING}=f_{DTS}/16$, N=8 | 0101: 采样频率 $f_{SAMPLING}=f_{DTS}/2$, N=8 | 1101: 采样频率 $f_{SAMPLING}=f_{DTS}/32$, N=5 | 0110: 采样频率 $f_{SAMPLING}=f_{DTS}/4$, N=6 | 1110: 采样频率 $f_{SAMPLING}=f_{DTS}/32$, N=6 | 0111: 采样频率 $f_{SAMPLING}=f_{DTS}/4$, N=8 | 1111: 采样频率 $f_{SAMPLING}=f_{DTS}/32$, N=8 |
| 0000: 无滤波器, 以 f_{DTS} 采样 | 1000: 采样频率 $f_{SAMPLING}=f_{DTS}/8$, N=6 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0001: 采样频率 $f_{SAMPLING}=f_{CK_INT}$, N=2 | 1001: 采样频率 $f_{SAMPLING}=f_{DTS}/8$, N=8 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0010: 采样频率 $f_{SAMPLING}=f_{CK_INT}$, N=4 | 1010: 采样频率 $f_{SAMPLING}=f_{DTS}/16$, N=5 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0011: 采样频率 $f_{SAMPLING}=f_{CK_INT}$, N=8 | 1011: 采样频率 $f_{SAMPLING}=f_{DTS}/16$, N=6 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0100: 采样频率 $f_{SAMPLING}=f_{DTS}/2$, N=6 | 1100: 采样频率 $f_{SAMPLING}=f_{DTS}/16$, N=8 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0101: 采样频率 $f_{SAMPLING}=f_{DTS}/2$, N=8 | 1101: 采样频率 $f_{SAMPLING}=f_{DTS}/32$, N=5 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0110: 采样频率 $f_{SAMPLING}=f_{DTS}/4$, N=6 | 1110: 采样频率 $f_{SAMPLING}=f_{DTS}/32$, N=6 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0111: 采样频率 $f_{SAMPLING}=f_{DTS}/4$, N=8 | 1111: 采样频率 $f_{SAMPLING}=f_{DTS}/32$, N=8 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 3:2 | IC1PSC[1:0] | <p>输入/捕获1预分频器 (Input capture 1 prescaler)</p> <p>这2位定义了CC1输入 (IC1) 的预分频系数。</p> <p>一旦TIMx_CCEN.CC1EN=0, 则预分频器复位。</p> <p>00: 无预分频器, 捕获输入口上检测到的每一个边沿都触发一次捕获;</p> <p>01: 每2个事件触发一次捕获;</p> <p>10: 每4个事件触发一次捕获;</p> <p>11: 每8个事件触发一次捕获。</p> | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1:0 | CC1SEL[1:0] | <p>捕获/比较1选择 (Capture/Compare 1 Selection)</p> <p>这2位定义通道的方向 (输入/输出), 及输入脚的选择:</p> <p>00: CC1通道被配置为输出;</p> <p>01: CC1通道被配置为输入, IC1映射在TI1上;</p> | | | | | | | | | | | | | | | | |

| 位域 | 名称 | 描述 |
|----|----|---|
| | | 10: CC1通道被配置为输入, IC1映射在TI2上; 11: CC1通道被配置为输入, IC1映射在TRC上。此模式仅工作在内部触发输入被选中时 (由TIMx_SMCTRL寄存器的TSEL位选择)。 注: CC1SEL仅在通道关闭时 (TIMx_CCEN寄存器的CC1EN=0) 才是可写的。 |

12.4.9 捕获/比较模式寄存器 2 (TIMx_CCMOD2)

偏移地址: 0x1C

复位值: 0x0000

参看以上 CCMOD1 寄存器的描述

输出比较模式:

| | | | | | | | | | | | | | |
|--------|------------|--------|--------|-------------|--------|---|------------|--------|--------|-------------|---|---|---|
| 15 | 14 | 12 | 11 | 10 | 9 | 8 | 7 | 6 | 4 | 3 | 2 | 1 | 0 |
| OC4CEN | OC4MD[2:0] | OC4PEN | OC4FEN | CC4SEL[1:0] | OC3CEN | | OC3MD[2:0] | OC3PEN | OC3FEN | CC3SEL[1:0] | | | |

rw rw

| 位域 | 名称 | 描述 |
|-------|-------------|---|
| 15 | OC4CEN | 输出比较4清0使能 (Output compare 4 clear enable) |
| 14:12 | OC4MD[2:0] | 输出比较4模式 (Output compare 4 mode) |
| 11 | OC4PEN | 输出比较4预装载使能 (Output compare 4 preload enable) |
| 10 | OC4FEN | 输出比较4快速使能 (Output compare 4 fast enable) |
| 9:8 | CC4SEL[1:0] | 捕获/比较4选择 (Capture/Compare 4 selection) 该2位定义通道的方向 (输入/输出), 及输入脚的选择: 00: CC4通道被配置为输出; 01: CC4通道被配置为输入, IC4映射在TI4上; 10: CC4通道被配置为输入, IC4映射在TI3上; 11: CC4通道被配置为输入, IC4映射在TRC上。此模式仅工作在内部触发输入被选中时 (由TIMx_SMCTRL寄存器的TSEL位选择)。 注: CC4SEL仅在通道关闭时 (TIMx_CCEN寄存器的CC4EN=0) 才是可写的。 |
| 7 | OC3CEN | 输出比较3清0使能 (Output compare 3 clear enable) |
| 6:4 | OC3MD[2:0] | 输出比较3模式 (Output compare 3 mode) |
| 3 | OC3PEN | 输出比较3预装载使能 (Output compare 3 preload enable) |
| 2 | OC3FEN | 输出比较3快速使能 (Output compare 3 fast enable) |
| 1:0 | CC3SEL[1:0] | 捕获/比较3选择 (Capture/Compare 3 selection) 该2位定义通道的方向 (输入/输出), 及输入脚的选择: 00: CC3通道被配置为输出; 01: CC3通道被配置为输入, IC3映射在TI3上; 10: CC3通道被配置为输入, IC3映射在TI4上; 11: CC3通道被配置为输入, IC3映射在TRC上。此模式仅工作在内部触发输入被选中时 (由TIMx_SMCTRL寄存器的TSEL位选择)。 注: CC3SEL仅在通道关闭时 (TIMx_CCEN寄存器的CC3EN=0) 才是可写的。 |

输入捕获模式:

| | | | | | | | | | | | | | | | | |
|-----------|-------------|--|----|-------------|----|----|----|---|---|---|----|---|---|---|---|---|
| 15 | IC4F[3:0] | rw | 12 | IC4PSC[1:0] | rw | 11 | 10 | 9 | 8 | 7 | rw | 4 | 3 | 2 | 1 | 0 |
| | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 位域 | 名称 | 描述 | | | | | | | | | | | | | | |
| 15:12 | IC4F[3:0] | 输入捕获4滤波器 (Input capture 4 filter) | | | | | | | | | | | | | | |
| 11:10 | IC4PSC[1:0] | 输入/捕获4预分频器 (Input capture 4 prescaler) | | | | | | | | | | | | | | |
| 9:8 | CC4SEL[1:0] | <p>捕获/比较4选择 (Capture/Compare 4 selection) 这2位定义通道的方向(输入/输出), 及输入脚的选择: 00: CC4通道被配置为输出; 01: CC4通道被配置为输入, IC4映射在TI4上; 10: CC4通道被配置为输入, IC4映射在TI3上; 11: CC4通道被配置为输入, IC4映射在TRC上。此模式仅工作在内部触发输入被选中时 (由TIMx_SMCTRL寄存器的TSEL位选择)。 注: CC4SEL仅在通道关闭时(TIMx_CCEN寄存器的CC4EN=0)才是可写的。</p> | | | | | | | | | | | | | | |
| 7:4 | IC3F[3:0] | 输入捕获3滤波器 (Input capture 3 filter) | | | | | | | | | | | | | | |
| 3:2 | IC3PSC[1:0] | 输入/捕获3预分频器 (Input capture 3 prescaler) | | | | | | | | | | | | | | |
| 1:0 | CC3SEL[1:0] | <p>捕获/比较3选择 (Capture/compare 3 selection) 这2位定义通道的方向(输入/输出), 及输入脚的选择: 00: CC3通道被配置为输出; 01: CC3通道被配置为输入, IC3映射在TI3上; 10: CC3通道被配置为输入, IC3映射在TI4上; 11: CC3通道被配置为输入, IC3映射在TRC上。此模式仅工作在内部触发输入被选中时 (由TIMx_SMCTRL寄存器的TSEL位选择)。 注: CC3SEL仅在通道关闭时(TIMx_CCEN寄存器的CC3EN=0)才是可写的。</p> | | | | | | | | | | | | | | |

12.4.10 捕获/比较使能寄存器 (TIMx_CCEN)

偏移地址: 0x20

复位值: 0x0000

| | | | | | | | | | | | | | | | |
|----------|------|-------|----------|------|-------|----------|------|-------|----------|------|-------|---|----|----|---|
| 15 | 14 | 13 | 12 | 11 | 10 | 9 | 8 | 7 | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | 0 |
| Reserved | CC4P | CC4EN | Reserved | CC3P | CC3EN | Reserved | CC2P | CC2EN | Reserved | CC1P | CC1EN | | | | |
| | rw | rw | | rw | rw | |

| | | |
|-----------|-----------|--|
| 位域 | 名称 | 描述 |
| 15:14 | Reserved | 保留, 必须保持复位值. |
| 13 | CC4P | 捕获/比较4输出极性 (Capture/Compare 4 output polarity) 参考TIMx_CCEN.CC1P的描述。 |
| 12 | CC4EN | 捕获/比较4输出使能 (Capture/Compare 4 output enable) 参考TIMx_CCEN.CC1EN 的描述。 |
| 11:10 | Reserved | 保留, 必须保持复位值 |
| 9 | CC3P | 捕获/比较3输出极性 (Capture/Compare 3 output polarity) 参考TIMx_CCEN.CC1P的描述。 |
| 8 | CC3E | 捕获/比较3输出使能 (Capture/Compare 3 output enable) 参考TIMx_CCEN.CC1E 的描述。 |

| 位域 | 名称 | 描述 |
|-----|----------|---|
| 7:6 | Reserved | 保留, 必须保持复位值 |
| 5 | CC2P | 捕获/比较2输出极性 (Capture/Compare 2 output polarity) 参考TIMx_CCEN.CC1P的描述。 |
| 4 | CC2EN | 捕获/比较2输出使能 (Capture/Compare 2 output enable) 参考TIMx_CCEN.CC1EN的描述。 |
| 3:2 | Reserved | 保留, 必须保持复位值 |
| 1 | CC1P | 捕获/比较1输出极性 (Capture/Compare 1 output polarity) CC1对应通道为输出模式时: 0: OC1 高电平有效 1: OC1 低电平有效 CC1对应通道为输入模式时: 此时, 该位用于选择是使用IC1还是IC1的反相信号作为触发信号或捕捉信号。 0: 非反相: 当 IC1 产生上升沿时发生捕获动作。 当用作外部触发时, IC1 是非反相的。 1: 反相: 当 IC1 产生下降沿时发生捕获动作。 当用作外部触发时, IC1 被反相。 |
| 0 | CC1EN | 捕获/比较1输出使能 (Capture/Compare 1 output enable) CC1通道配置为输出: 0: 关闭 - OC1禁止输出。 1: 开启 - OC1信号输出到对应的输出引脚。 CC1通道配置为输入: 该位决定了计数器的值是否能捕获入TIMx_CCDAT1寄存器。 0: 捕获禁止; 1: 捕获使能。 |

表 12-4 标准 OCx 的输出控制位

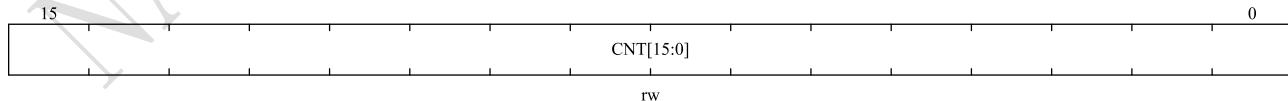
| CCxEN | OCx output status |
|-------|-------------------------|
| 0 | Disable output (OCx=0) |
| 1 | OCx = OCxREF + polarity |

注: 连接到标准 OCx 通道的外部 I/O 引脚的状态取决于 OCx 通道状态以及 GPIO 和 AFIO 寄存器。

12.4.11 计数器 (TIMx_CNT)

偏移地址: 0x24

复位值: 0x0000

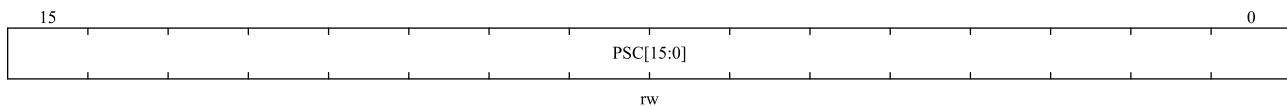


| 位域 | 名称 | 描述 |
|------|-----------|-----------------------|
| 15:0 | CNT[15:0] | 计数器的值 (Counter value) |

12.4.12 预分频器 (TIMx_PSC)

偏移地址: 0x28

复位值: 0x0000

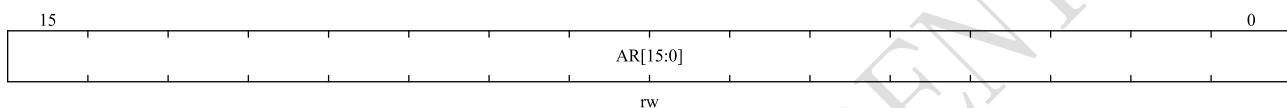


| 位域 | 名称 | 描述 |
|------|-----------|--|
| 15:0 | PSC[15:0] | 预分频器的值 (Prescaler value) 计数器时钟 $f_{CK_CNT} = f_{CK_PSC} / (PSC[15:0] + 1)$ 。 每次发生更新事件时, PSC 值都会加载到预分频器的影子寄存器中。 |

12.4.13 自动重装载寄存器 (TIMx_AR)

偏移地址: 0x2C

复位值: 0xFFFF

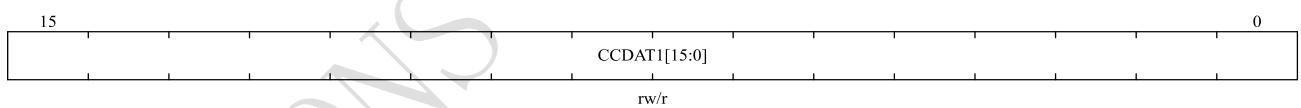


| 位域 | 名称 | 描述 |
|------|----------|---|
| 15:0 | AR[15:0] | 自动重装载的值 (Auto-reload value) AR包含了将要装载入实际的自动重装载寄存器的值。详细参考11.3.1节: 有关AR的更新和动作。 当自动重装载的值为空时, 计数器不工作。 |

12.4.14 捕获/比较寄存器 1 (TIMx_CC DAT1)

偏移地址: 0x34

复位值: 0x0000

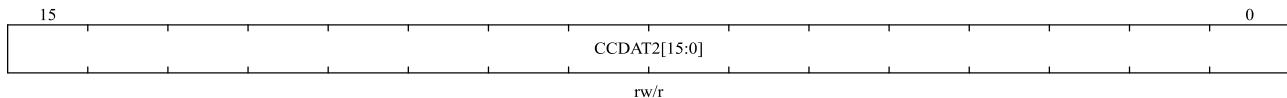


| 位域 | 名称 | 描述 |
|------|--------------|--|
| 15:0 | CCDAT1[15:0] | 捕获/比较通道1的值 (Capture/Compare 1 value) ■ CC1 通道配置为输出: CCDAT1 包含要与计数器 TIMx_CNT 比较的值, 在 OC1 输出上发出信号。 如果未在 TIMx_CCMOD1.OC1PEN 位中选择预加载功能, 则写入的值会立即传输到有效寄存器。否则, 仅当更新事件发生时, 此预加载值才会传输到活动寄存器。 ■ CC1 通道配置为输入: CCDAT1 包含由最后一个输入捕获 1 事件 (IC1) 传输的计数器值。 当配置为输入模式时, 寄存器 CCDAT1 只能读取。 当配置为输出模式时, 寄存器 CCDAT1 是可读写的。 |

12.4.15 捕获/比较寄存器 2 (TIMx_CC DAT2)

偏移地址: 0x38

复位值: 0x0000

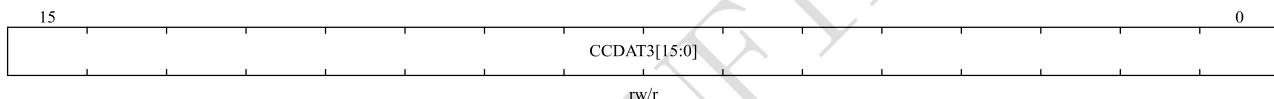


| 位域 | 名称 | 描述 |
|------|--------------|---|
| 15:0 | CCDAT2[15:0] | <p>捕获/比较通道2的值 (Capture/Compare 2 value)</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ CC2 通道配置为输出: CCDAT2 包含要与计数器 TIMx_CNT 比较的值，在 OC2 输出上发出信号。如果未在 TIMx_CCMOD1.OC2PEN 位中选择预加载功能，则写入的值会立即传输到有效寄存器。否则，仅当更新事件发生时，此预加载值才会传输到活动寄存器。 ■ CC2 通道配置为输入: CCDAT2 包含由最后一个输入捕获 2 事件 (IC2) 传输的计数器值。当配置为输入模式时，寄存器 CCDAT2 只能读取。 当配置为输出模式时，寄存器 CCDAT2 是可读写的。 |

12.4.16 捕获/比较寄存器 3 (TIMx_CC DAT3)

偏移地址: 0x3C

复位值: 0x0000

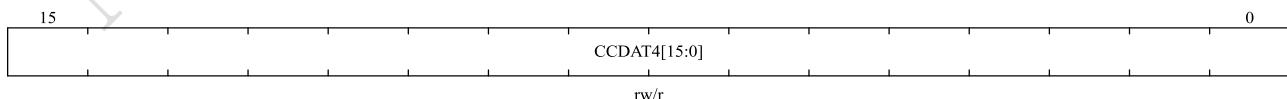


| 位域 | 名称 | 描述 |
|------|--------------|---|
| 15:0 | CCDAT3[15:0] | <p>捕获/比较通道3的值 (Capture/Compare 3 value)</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ CC3 通道配置为输出: CCDAT3 包含要与计数器 TIMx_CNT 比较的值，在 OC3 输出上发出信号。如果未在 TIMx_CCMOD2.OC3PEN 位中选择预加载功能，则写入的值会立即传输到有效寄存器。否则，仅当更新事件发生时，此预加载值才会传输到活动寄存器。 ■ CC3 通道配置为输入: CCDAT3 包含由最后一个输入捕获 3 事件 (IC3) 传输的计数器值。当配置为输入模式时，寄存器 CCDAT3 只能读取。 当配置为输出模式时，寄存器 CCDAT3 是可读写的。 |

12.4.17 捕获/比较寄存器 4 (TIMx_CC DAT4)

偏移地址: 0x40

复位值: 0x0000



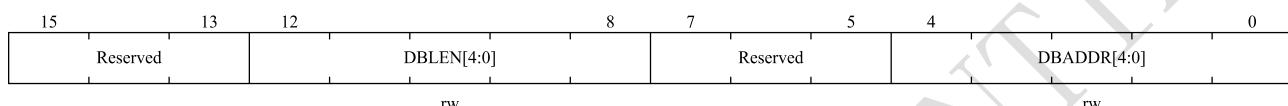
| 位域 | 名称 | 描述 |
|------|--------------|---|
| 15:0 | CCDAT4[15:0] | <p>捕获/比较通道4的值 (Capture/Compare 4 value)</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ CC4 通道配置为输出: CCDAT4 包含要与计数器 TIMx_CNT 比较的值，在 OC4 输出上发出信号。如果未在 TIMx_CCMOD2.OC4PEN 位中选择预加载功能，则写入的值会立即传输到有效 |

| 位域 | 名称 | 描述 |
|----|----|--|
| | | <p>寄存器。否则，仅当更新事件发生时，此预加载值才会传输到活动寄存器。</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ CC4 通道配置为输入： <p>CCDAT4 包含由最后一个输入捕获 4 事件 (IC4) 传输的计数器值。</p> <p>当配置为输入模式时，寄存器 CCDAT4 只能读取。</p> <p>当配置为输出模式时，寄存器 CCDAT4 是可读写的。</p> |

12.4.18 DMA 控制寄存器 (TIMx_DCTRL)

偏移地址: 0x48

复位值: 0x0000

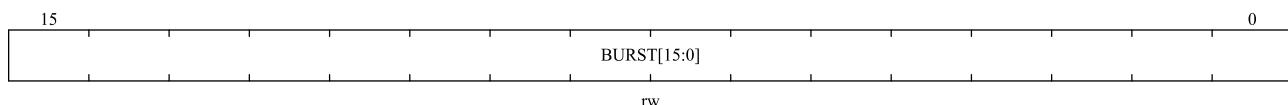


| 位域 | 名称 | 描述 |
|-------|-------------|---|
| 15:13 | Reserved | 保留，必须保持复位值 |
| 12:8 | DBLEN[4:0] | <p>DMA 连续传送长度 (DMA burst length)</p> <p>该位字段定义 DMA 将访问 (写入/读取) TIMx_DADDR 寄存器的次数。</p> <p>00000: 1次传输 00001: 2次传输 00010: 3次传输 ... 10001: 18次传输</p> |
| 7:5 | Reserved | 保留，必须保持复位值 |
| 4:0 | DBADDR[4:0] | <p>DMA 基地址 (DMA base address)</p> <p>该位字段定义 DMA 访问 TIMx_DADDR 寄存器的第一个地址。</p> <p>当第一次通过 TIMx_DADDR 完成访问时，该位域指定您刚刚访问的地址。然后第二次访问 TIMx_DADDR，会访问到“DMA Base Address + 4”的地址</p> <p>00000: TIMx_CTRL1, 00001: TIMx_CTRL2, 00010: TIMx_SMCTRL,</p> |

12.4.19 连续模式的 DMA 地址 (TIMx_DADDR)

偏移地址: 0x4C

复位值: 0x0000



| 位域 | 名称 | 描述 |
|------|-------------|---|
| 15:0 | BURST[15:0] | <p>DMA 访问缓冲区。</p> <p>当对该寄存器分配读或写操作时，将访问位于地址范围 (DMA base address + DMA burst</p> |

| 位域 | 名称 | 描述 |
|----|----|--|
| | | <p>length \times 4) 的寄存器。</p> <p>DMA base address = The address of TIMx_CTRL1 + TIMx_DCTRL.DBADDR * 4; DMA burst len = TIMx_DCTRL.DBLEN + 1.</p> <p>例子：</p> <p>如果 TIMx_DCTRL.DBLEN = 0x3 (4 次传输), TIMx_DCTRL.DBADDR = 0xD (TIMx_CCDAT1), DMA 数据长度 = 半字, DMA 存储器地址 = SRAM 中的缓冲区地址, DMA 外设地址 = TIMx_DADDR 地址。</p> <p>当事件发生时, TIMx 将向 DMA 发送请求, 并传输 4 次数据。</p> <p>第一次, 对 TIMx_DADDR 寄存器的 DMA 访问将映射到访问 TIMx_CCDAT1 寄存器;</p> <p>第二次, 对 TIMx_DADDR 寄存器的 DMA 访问将映射到访问 TIMx_CCDAT2 寄存器;</p> <p>.....</p> <p>第四次, 对 TIMx_DADDR 寄存器的 DMA 访问将映射到访问 TIMx_CCDAT4 寄存器;</p> |

13 基本定时器 (TIM6 和 TIM7)

13.1 简介

基本定时器 TIM6 和 TIM7 各包含一个 16 位自动装载计数器。

这 2 个定时器是互相独立的，不共享任何资源。

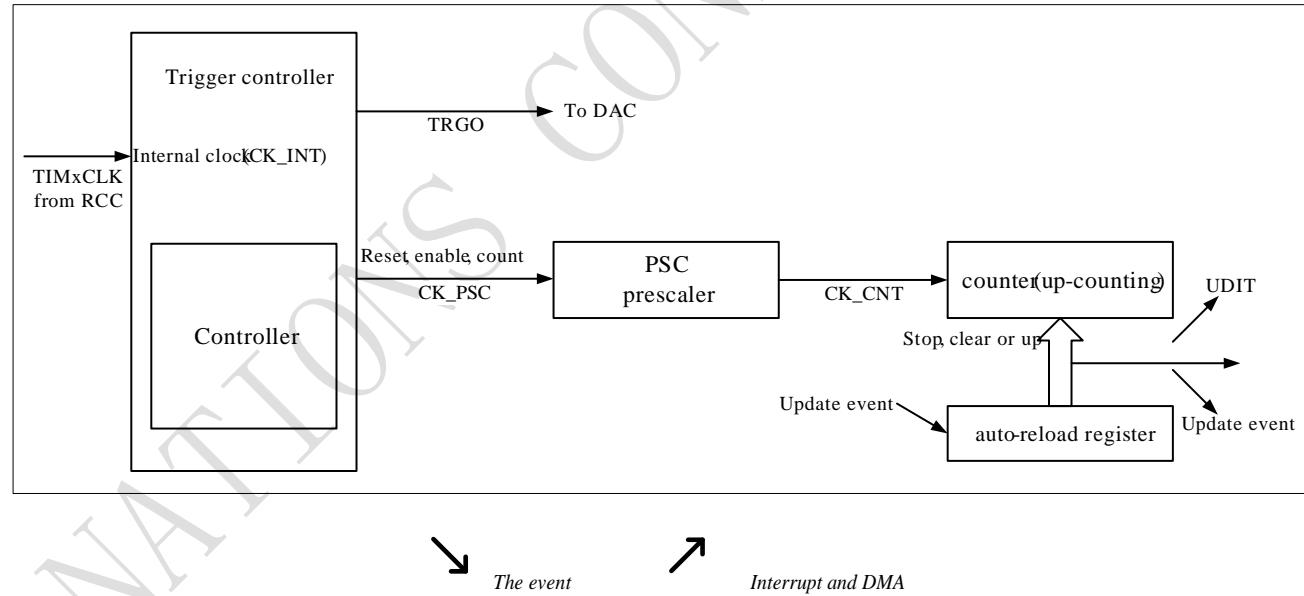
基本定时器可以为通用定时器提供时间基准，特别地可以为数模转换器(DAC)提供时钟。

基本定时器在芯片内部直接连接到 DAC 并通过触发输出直接驱动 DAC。

13.2 主要特性

- 16 位自动重载向上计数计数器。
- 16 位可编程预分频器。(分频系数可配置为 1 到 65536 之间的任意值)
- 触发 DAC 的同步电路
- 产生中断/DMA 的事件如下：
 - ◆ 更新事件

图 13-1 TIMx 的框图 (x = 6/7)



13.3 功能描述

13.3.1 时基单元

时基单元主要包括：预分频器、计数器、自动重载和重复计数器。当时基单元工作时，软件可以随时读写相应的寄存器 (TIMx_PSC、TIMx_CNT 和 TIMx_AR)。

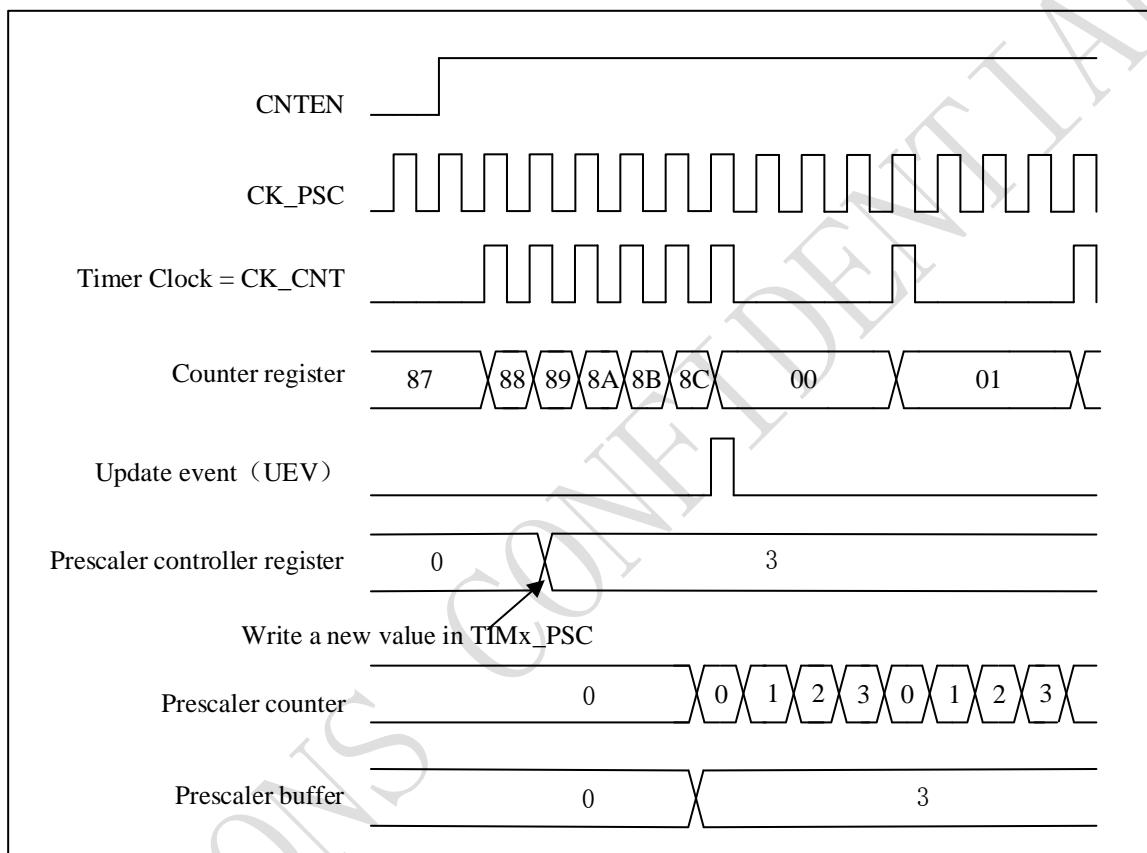
根据自动重载预加载使能位(TIMx_CTRL1.AR PEN)的设置，预加载寄存器的值会立即或在每次更新事件

UEV 时传输到影子寄存器。TIMx_CTRL1.UPDIS=0 时，当计数器达到上溢条件或软件设置 TIMx_EVTGEN.UDGN 位，将生成更新事件。仅当 TIMx_CTRL1.CNTEN 位置位时，计数器 CK_CNT 才有效。计数器在 TIMx_CTRL1.CNTEN 位置位后一个时钟周期开始计数。

13.3.1.1 预分频器描述

TIMx_PSC 寄存器包含一个 16 位计数器，可用于将计数器时钟频率除以 1 到 65536 之间的任何因子。它可以在缓冲时动态更改。仅在下一次更新事件时才考虑预分频器值。

图 13-2 预分频器分频从 1 到 4 的计数器时序图



13.3.2 计数模式

13.3.2.1 向上计数模式

在向上计数模式下，计数器会从 0 计数到寄存器 TIMx_AR 的值，然后复位为 0。并产生计数器溢出事件。

如果设置了 TIMx_CTRL1.UPRS 位(选择更新请求)和 TIMx_EVTGEN.UDGN 位，则会生成更新事件(UEV)，并且不会由硬件设置 TIMx_STS.UDITF。因此，不会产生更新中断或更新 DMA 请求。此设置用于您想要清除计数器但不想产生更新中断的场景。

取决于 TIMx_CTRL1.UPRS 的配置，当更新事件发生时，TIMx_STS.UDITF 被设置，所有寄存器都被更新：

- 当 TIMx_CTRL1.AR PEN =1 时，使用预加载值(TIMx_AR)更新自动重载影子寄存器。
- 预分频器影子寄存器重新加载预加载值(TIMx_PSC)。

为避免在将新值写入预加载寄存器时更新影子寄存器，您可以通过设置 TIMx_CTRL1.UPDIS=1 来禁用更新。

当更新事件发生时，计数器仍将被清零，预分频器计数器也将设置为 0（但预分频器值将保持不变）。

下图显示了向上计数模式下不同除法因子的计数器行为和更新标志的一些示例。

图 13-3 向上计数时序图，内部时钟分频因子 = 2/N

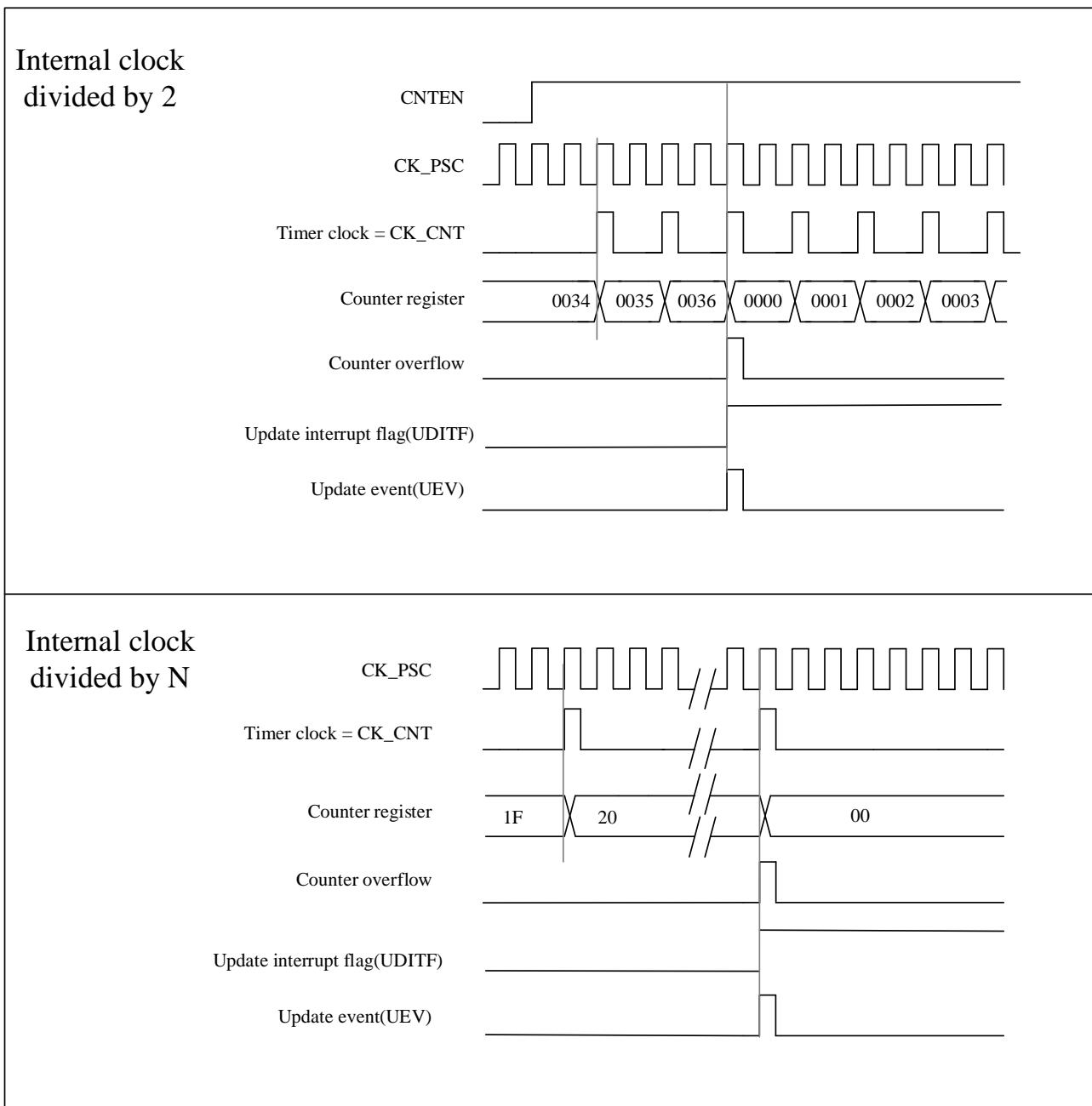
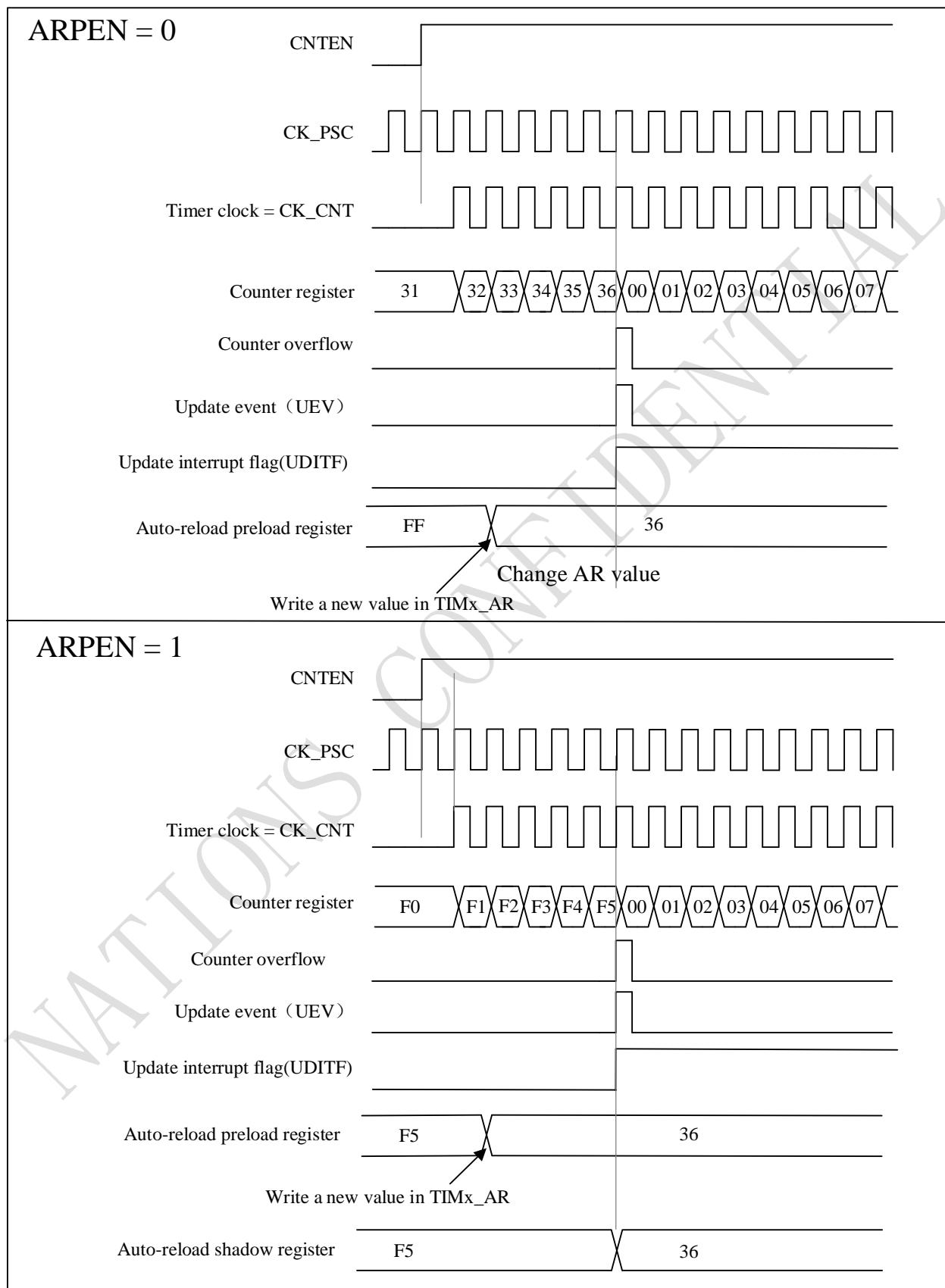


图 13-4 ARPEN=0/1 时向上计数、更新事件的时序图



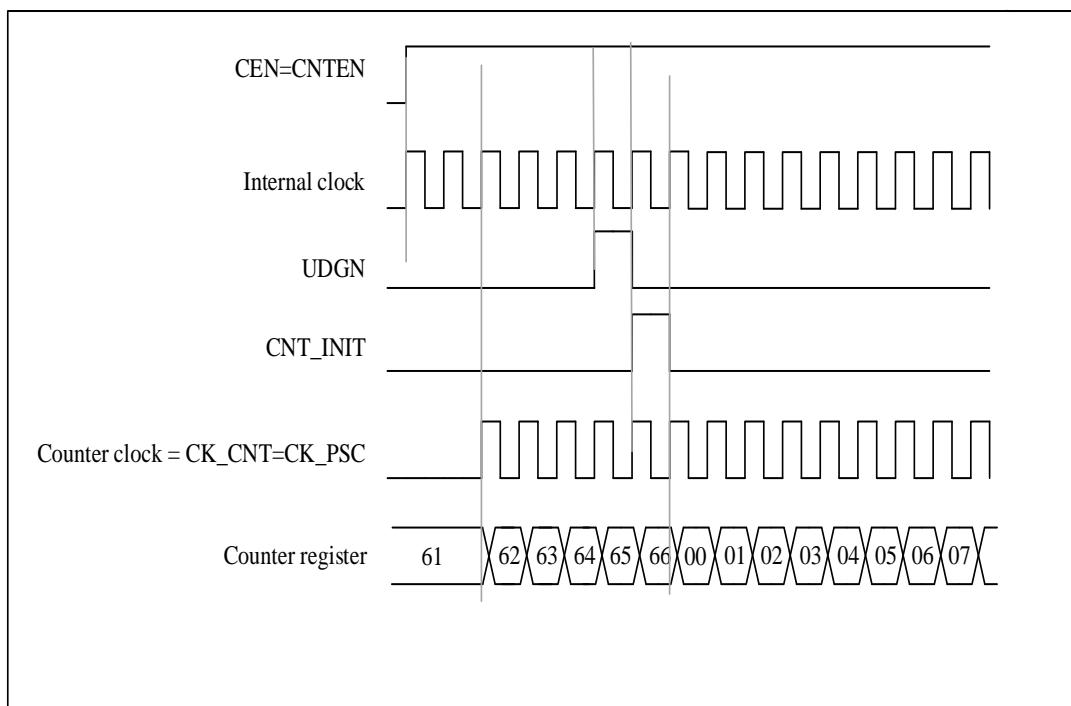
13.3.3 时钟选择

- 定时器内部时钟: CK_INT

13.3.3.1 内部时钟源 (CK_INT)

前提是 TIMx_CTRL1.CNTEN 位由软件写为'1', 预分频器的时钟源由内部时钟 CK_INT 提供。

图 13-5 正常模式下的控制电路, 内部时钟分频系数为 1



13.3.4 调试模式

当微控制器处于调试模式 (Cortex-M4 内核停止) 时, 根据 DBG_CTRL.TIMx_STOP 配置, TIMx 计数器可以继续正常工作或停止。有关详细信息, 请参阅 26.4.3 节。

13.4 TIMx 寄存器 (x=6/7)

有关寄存器中使用的缩写, 请参阅第 1.1 节

这些外设寄存器可以作为半字 (16 位) 或一个字 (32 位) 操作。

13.4.1 寄存器总览

表 13-1 寄存器总览

| Offset | Register | 31 | 30 | 29 | 28 | 27 | 26 | 25 | 24 | 23 | 22 | 21 | 20 | 19 | 18 | 17 | 16 | 15 | 14 | 13 | 12 | 11 | 10 | 9 | 8 | 7 | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | 0 | |
|--------|-------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|--|
| 000h | TIMx_CTRL1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Reset Value | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

| Offset | Register | 31 | 30 | 29 | 28 | 27 | 26 | 25 | 24 | 23 | 22 | 21 | 20 | 19 | 18 | 17 | 16 | 15 | 14 | 13 | 12 | 11 | 10 | 9 | 8 | 7 | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | 0 |
|--------|-------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 004h | TIMx_CTRL2 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Reset Value | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 008h | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 00Ch | TIMx_DINTEN | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Reset Value | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 010h | TIMx_STS | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Reset Value | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 014h | TIMx_EVTGEN | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Reset Value | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 018h | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 01Ch | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 020h | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 024h | TIMx_CNT | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Reset Value | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 028h | TIMx_PSC | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Reset Value | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 02Ch | TIMx_AR | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Reset Value | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

13.4.2 控制寄存器 1 (TIMx_CTRL1)

地址偏移: 0x00

复位值: 0x0000

| 15 | Reserved | 8 | 7 | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | 0 |
|----|----------|---|---|-------|----------|---|-------|------|-------|-------|
| | | | | ARPEN | Reserved | | ONEPM | UPRS | UPDIS | CNTEN |

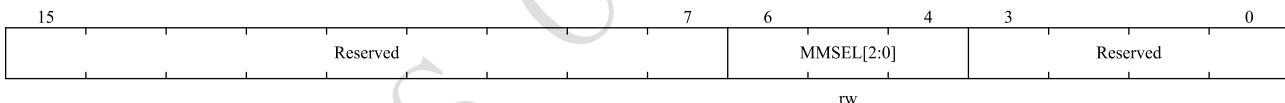
| 位域 | 名称 | 描述 |
|------|----------|--|
| 15:8 | Reserved | 保留, 必须保持复位值 |
| 7 | ARPEN | 自动重装载预装载允许位 (Auto-reload preload enable) 0: TIMx_AR 寄存器的影子寄存器禁用 1: TIMx_AR 寄存器的影子寄存器使能 |
| 6:4 | Reserved | 保留, 必须保持复位值 |
| 3 | ONEPM | 单脉冲模式 (One pulse mode) 0: 禁用单脉冲模式, 发生更新事件时不影响计数器计数。 1: 使能单脉冲模式, 计数器在下一次更新事件发生时停止计数 (清 TIMx_CTRL1.CNTEN 位)。 |
| 2 | UPRS | 更新请求源 (Update request source) |

| 位域 | 名称 | 描述 |
|----|-------|--|
| | | <p>该位用于通过软件选择 UEV 事件源。</p> <p>0: 如果更新中断或 DMA 请求使能, 以下任何事件都会产生更新中断或 DMA 请求:</p> <ul style="list-style-type: none"> - 计数器溢出 - TIMx_EVTGEN.UDGN 位被设置 <p>1: 如果更新中断或 DMA 请求使能, 只有计数器溢出会产生更新中断或 DMA 请求</p> |
| 1 | UPDIS | <p>禁止更新 (Update disable)</p> <p>该位用于启用/禁用软件生成的更新事件 (UEV) 事件。</p> <p>0: 启用UEV。如果满足以下条件之一, 将生成UEV:</p> <ul style="list-style-type: none"> - 计数器溢出 - TIMx_EVTGEN.UDGN 位被设置 <p>影子寄存器将使用预加载值进行更新。</p> <p>1: UEV禁用。不生成更新事件, 影子寄存器 (AR、PSC) 保持其值。如果设置了 TIMx_EVTGEN.UDGN位, 则重新初始化计数器和预分频器。</p> |
| 0 | CNTEN | <p>使能计数器 (Counter enable)</p> <p>0: 禁止计数器;</p> <p>1: 使能计数器。</p> |

13.4.3 控制寄存器 2 (TIMx_CTRL2)

偏移地址: 0x04

复位值: 0x0000



| 位域 | 名称 | 描述 |
|------|------------|---|
| 15:7 | Reserved | 保留, 必须保持复位值 |
| 6:4 | MMSEL[2:0] | <p>主模式选择 (Master mode selection)</p> <p>这 3 位用于选择在主模式下发送到从定时器的同步信息 (TRGO)。可能的组合如下:</p> <p>000: 复位 - 当 TIMx_EVTGEN.UDGN 置位或从模式控制器产生复位时, 将出现 TRGO 脉冲。在后一种情况下, TRGO 上的信号与实际复位相比有所延迟。</p> <p>001: 使能 - TIMx_CTRL1.CNTEN 位用作触发输出 (TRGO)。有时需要同时启动多个定时器或者在一段时间内开启从定时器。</p> <p>当 TIMx_CTRL1.CNTEN 位置位或门控模式下的触发输入为高电平时, 计数器使能信号置位。</p> <p>010: 更新 - 选择更新事件作为触发输出 (TRGO)。例如, 主定时器时钟可用作从定时器预分频器。</p> <p>011: 比较脉冲 - 当 TIMx_STS.CC1ITF 被设置时 (即使它已经是高电平), 即捕获或比较成功时, 触发输出发送一个正脉冲 (TRGO)。</p> |
| 3:0 | Reserved | 保留, 必须保持复位值 |

13.4.4 DMA/中断使能寄存器 (TIMx_DINTEN)

地址偏移: 0x0C

复位值: 0x0000

| | | | | | | | |
|----|----------|---|---|---|----------|---|----|
| 15 | Reserved | 9 | 8 | 7 | Reserved | 1 | 0 |
| rw | | | | | | | rw |

| 位域 | 名称 | 描述 |
|------|----------|---|
| 15:9 | Reserved | 保留, 必须保持复位值 |
| 8 | UDEN | 更新DMA请求使能 (Update DMA request enable) 0: 禁止更新DMA请求 1: 使能更新DMA请求 |
| 7:1 | Reserved | 保留, 必须保持复位值 |
| 0 | UIEN | 更新中断使能 (Update interrupt enable) 0: 禁止更新中断 1: 使能更新中断 |

13.4.5 状态寄存器 (TIMx_STS)

地址偏移: 0x10

复位值: 0x0000

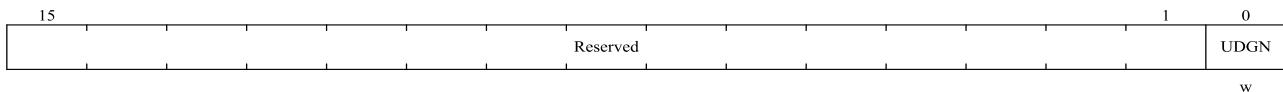
| | | | |
|-------|----------|---|-------|
| 15 | Reserved | 1 | 0 |
| rc_w0 | | | UDITF |

| 位域 | 名称 | 描述 |
|------|----------|--|
| 15:1 | Reserved | 保留, 必须保持复位值 |
| 0 | UDITF | 更新中断标志 (Update interrupt flag) 当在以下条件下发生更新事件时, 该位由硬件设置: - 当 TIMx_CTRL1.UPDIS = 0 且计数器值溢出时。 - 当 TIMx_CTRL1.UPRS = 0 时, TIMx_CTRL1.UPDIS = 0, 并通过软件设置 TIMx_EVTGEN.UDGN 位以重新初始化 CNT。 该位由软件清零。 0: 未发生更新事件 1: 发生更新中断 |

13.4.6 事件产生寄存器 (TIMx_EVTGEN)

地址偏移: 0x14

复位值: 0x0000

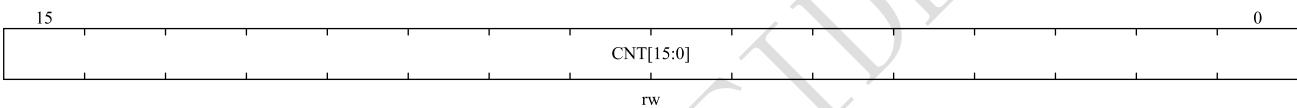


| 位域 | 名称 | 描述 |
|-------|----------|---|
| 15: 1 | Reserved | 保留, 必须保持复位值 |
| 0 | UDGN | 产生更新事件 (Update generation) 软件可以设置该位来更新配置寄存器的值, 硬件会自动清除它。 0: 无效果。 1: 定时器计数器将重新启动, 所有影子寄存器将被更新。它也将重新启动预分频器计数器。 |

13.4.7 计数器 (TIMx_CNT)

地址偏移: 0x24

复位值: 0x0000

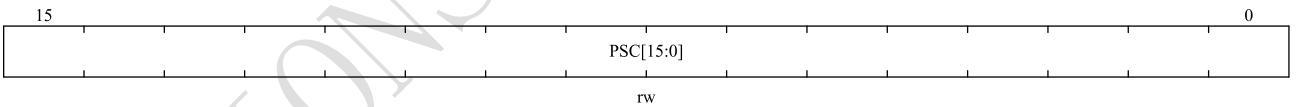


| 位域 | 名称 | 描述 |
|------|-----------|-----------------------|
| 15:0 | CNT[15:0] | 计数器数值 (Counter value) |

13.4.8 预分频器 (TIMx_PSC)

地址偏移: 0x28

复位值: 0x0000

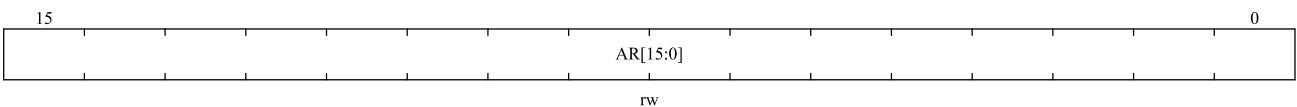


| 位域 | 名称 | 描述 |
|------|-----------|--|
| 15:0 | PSC[15:0] | 预分频器数值 (Prescaler value) PSC寄存器值将在更新事件时更新到预分频器寄存器。计数器时钟频率是输入时钟分频 PSC+1。 |

13.4.9 自动重装载寄存器 (TIMx_AR)

地址偏移: 0x2C

复位值: 0xFFFF



| 位域 | 名称 | 描述 |
|------|----------|---|
| 15:0 | AR[15:0] | <p>自动重装载数值（Auto-reload value）</p> <p>这些位定义将加载到实际自动重载寄存器中的值。</p> <p>有关详细信息，请参阅 13.3.1。</p> <p>当TIMx_AR.AR [15:0]值为空时，计数器不工作。</p> |

NATIONS CONFIDENTIAL

14 实时时钟(RTC)

14.1 简介

- 实时时钟 (RTC) 是一个独立的 BCD 定时器/计数器
- 软件支持夏时令补偿
- 可编程周期性自动唤醒定时器
- 两个 32 位寄存器包含时、分、秒、年、月、日 (几号)、星期 (星期几)
- 独立的 32 位寄存器包含亚秒
- 两个编程闹钟
- 两个 32 位寄存器包含编程闹钟时、分、秒、年、月、日 (几号)、星期 (星期几)
- 两个独立的 32 位寄存器包含编程闹钟亚秒
- 数字精密校准功能
- 时间戳功能
- 在 Backup 域复位后，所有 RTC 寄存器都受到保护，以防止可能的意外写访问
- 多个中断/事件唤醒源，包括闹钟 A、闹钟 B、唤醒定时器、时间戳
- RCC 寄存器使能 RTC 模块且电压保持在工作范围内，RTC 在任何模式下都不会停止(包括 RUN 模式、SLEEP 模式、STOP0 模式、STOP2 模式和 STANDBY 模式)
- RTC 提供多种唤醒源可以使 MCU 从所有的低功耗模式下唤醒 (SLEEP 模式，STOP0 模式，STOP2 模式和 STANDBY 模式)

14.1.1 主要特性

表 14-1 RTC 功能支持

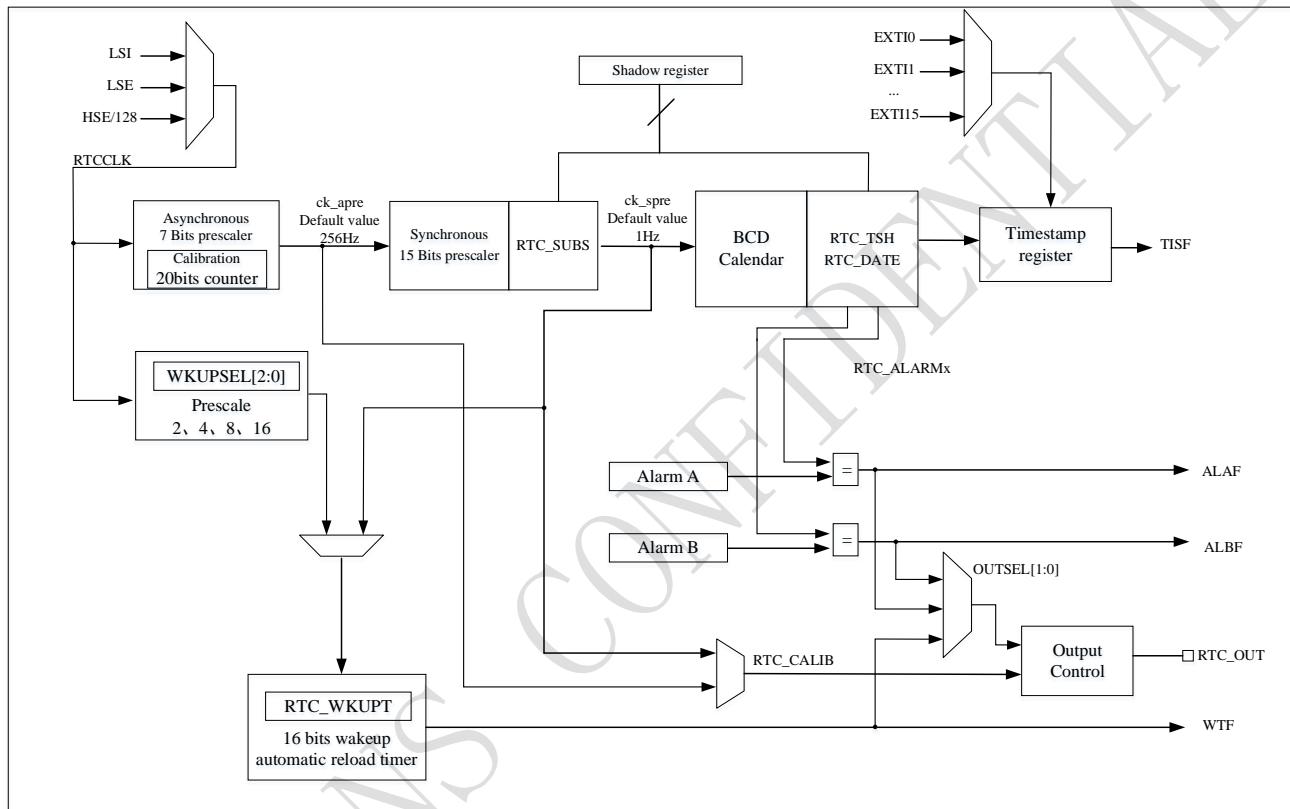
| 主要功能 | 描述 |
|-------|--|
| 时钟 | RTC 时钟源可以选择 LSI、LSE 或 HSE/128 |
| 复位 | APB 接口被系统复位， RTC 模块通过 APB 同步的一些寄存器会被复位 RTC 内核可以通过备份域复位而复位 |
| 日历 | 日历包含亚秒、秒、分、时 (12 小时或 24 小时制)、星期、日、月、年，这些数据都存在 APB 模块的影子寄存器中。 |
| 唤醒计数器 | 输出寄存器 RTC_OUT 可以配置为发送唤醒事件到 GPIO，同时我们可以选择中断/事件来唤醒 CPU 的 SLEEP、STOP0、STOP2 模式。 |
| 闹钟 | RTC_OUT 配置输出到 GPIO，也可以唤醒 CPU 或触发 PWR 在匹配发生时从 SLEEP、STOP0、STOP2 和 STANDBY 模式中唤醒 |
| 时间戳 | GPIO 事件可触发保存时间戳功能。 |
| 中断/事件 | 闹钟 A/闹钟 B 中断/事件 唤醒中断/事件 |

| 主要功能 | 描述 |
|------|----------|
| | 时间戳中断/事件 |

14.2 RTC 功能描述

14.2.1 RTC 框图

图 14-1 RTC 功能框图



RTC 包括以下功能模块：

- Alarm A 和 Alarm B 事件/中断
- 时间戳事件/中断
- RTC 输出功能：
 - ◆ 256 Hz 或者 1Hz 时钟输出(当 LSE 频率是 32.768 kHz)
 - ◆ 闹钟输出 (极性可配置)，闹钟 A 和闹钟 B 可选
 - ◆ 自动唤醒输出 (极性可配置)
- RTC 输入功能：
 - ◆ 时间戳事件检测
- 通过配置输出寄存器控制 PC13：
 - ◆ 设置 RTC_OPT.TYPE 位配置 PC13 开漏/推挽输出

14.2.2 RTC 控制的 GPIO

时间戳输入来自 IOM (映射到 PC13) 或者 EXTI 模块, 如果是 EXTI 模块, 具体请参考时间戳触发源选择 (EXTI_TS_SEL)。

RTC_OUT (闹钟、唤醒事件或者校准输出 (256Hz 或者 1Hz)) 映射到 PC13, 不管 PC13 GPIO 是什么配置, PC13 的引脚配置由 RTC 控制为输出。

14.2.3 RTC 寄存器写保护

PWR_CTRL.DBKP 位(见电源控制部分) 默认被清除, 所以 PWR_CTRL.DBKP 必须置 1 去使能 RTC 寄存器写功能。一旦备份域复位, 所有的 RTC 写保护寄存器都会写保护, 所有的 RTC 写保护寄存器需要按如下步骤去解锁写保护:

- 将 0xCA 写入 RTC_WRP 寄存器
- 将 0x53 写入 RTC_WRP 寄存器

在解锁这些寄存器后, 可以通过清除 PWR_CTRL.DBKP 位激活写保护。解锁机制只检查 RTC_WRP 寄存器的写操作。在解锁过程中、解锁前、解锁后, 对其他寄存器的写操作不会影响解锁结果。

14.2.4 RTC 时钟和预分频

RTC 时钟源:

- LSE 时钟
- LSI 时钟
- HSE/128 时钟

为了降低功耗, 将预分频器分为异步预分频器和同步预分频器。如果同时使用两个预分频器, 建议异步预分频器的值尽可能大。

- 7 位异步预分频器由 RTC_PRE.DIVA[6:0] 位控制
- 15 位同步预分频器由 RTC_PRE.DIVS[14:0] 位控制

f_{ck_apre} 和 f_{ck_spre} 公式如下:

$$f_{ck_apre} = \frac{f_{RTCCLK}}{RTC_PRE.DIVA[6:0]+1}$$

$$f_{ck_spre} = \frac{f_{RTCCLK}}{(RTC_PRE.DIVS[14:0]+1)*(RTC_PRE.DIVA[6:0]+1)}$$

ck_apre 时钟用于对 RTC_SUBS 亚秒递减计数器提供时钟。当到达 0 时, 用 RTC_PRE.DIVS[14:0]的值重新加载 RTC_SUBS。

14.2.5 RTC 日历

这里有三个影子寄存器, 分别是 RTC_DATE, RTC_TSH 和 RTC_SUBS。RTC 时间和日期寄存器可以通过影

子寄存器访问。也可以直接访问，以避免等待同步时间。这三个影子寄存器如下：

- RTC_DATE: 设置和读取日期
- RTC_TSH: 设置和读取时间
- RTC_SUBS: 读取亚秒

每隔两个 RTCCLK 周期之后，将当前的日历值复制到影子寄存器中，并将 RTC_INITSTS.RSYF 位置为 1。此过程在低功耗(停止和待机)模式下不执行。当退出这些模式时，影子寄存器在 2 个 RTCCLK 周期后更新值。

默认情况下，当用户尝试访问日历寄存器时，它将访问影子寄存器的内容。用户可以通过设置 RTC_CTRL.BYPS 位直接访问日历寄存器。

当 RTC_CTRL.BYPS=0，日历从影子寄存器获取值，当读 RTC_SUBS、RTC_TSH 或 RTC_DATE 寄存器时，有必要确保 APB1 时钟的频率(f_{APB1})至少 7 倍于 RTC 时钟频率(f_{RTCCLK})，而且不允许出现 APB1 时钟频率低于 RTC 时钟频率的情况。系统复位将复位影子寄存器。

14.2.6 日历初始化和配置

预分频值和日历值可通过以下步骤进行初始化：

- 通过设置 RTC_INITSTS.INITM 位为 1 进入初始模式，然后等待 RTC_INITSTS.INITF 位被置 1
- 设置 RTC_PRE.DIVS[14:0] 和 RTC_PRE.DIVA[6:0] 位
- 写入初始日历值，包括时间和日期到影子寄存器 (RTC_TSH 和 RTC_DATE)，通过 RTC_CTRL.HFMT 位配置时间格式 (12 小时或 24 小时制)
- 通过清除 RTC_INITSTS.INITM 位退出初始化模式

日历计数器的值将在 4 个 RTCCLK 时钟周期后自动从影子寄存器加载，然后重新启动日历计数器。

14.2.7 日历读取

1. 当 RTC_CTRL.BYPS=0 时读取日历

如果 RTC_CTRL.BYPS=0，则从影子寄存器读取日历值。为了正确读取 RTC 日历寄存器(RTC_SUBS, RTC_TSH 和 RTC_DATE)，APB1 时钟频率必须设置为大于 RTC 时钟频率的 7 倍。在任何情况下，APB1 时钟频率都不能小于 RTC 时钟频率。

如果 APB1 时钟频率不大于或不等于 RTC 时钟频率的 7 倍，请参考下面的步骤读取日历值：

- 读取 RTC_SUBS、RTC_TSH 和 RTC_DATE 值两次
- 比较两次读到的数据，如果相等，则认为读到的数据是正确的，如果不相等，需要读第三次数据
- 第三次读到的数据可以认为是正确的

影子寄存器(RTC_SUBS, RTC_TSH 和 RTC_DATE)每两个 RTCCLK 周期更新一次。如果用户希望在短时间内(小于两个 RTCCLK 周期)读取日历值，则第一次读取后必须软件清除 RTC_INITSTS.RSYF 位。

在一些情况下，在读取日历之前需要等待 RTC_INITSTS.RSYF 位被置 1。

- 从低功耗模式(停机或待机模式)唤醒后，清除 RTC_INITSTS.RSYF 位，然后等待 RTC_INITSTS.RSYF

位重新置 1。

- 系统复位。
- 日历完成初始化。
- 日历完成同步。

2. 当 RTC_CTRL.BYPS=1 时读取日历

如果 RTC_CTRL.BYPS=1，直接从日历计数器中读取日历值。这种配置的优点是，从低功耗模式唤醒后读取日历值没有延迟，缺点是 RTC_SUBS、RTC_TSH 和 RTC_DATE 的这些数据可能不是同一时刻的。

为了保证读取的日历值的正确性，需要分别读取 RTC_SUBS、RTC_TSH 和 RTC_DATE 两次，然后对两次读取的数据进行比较，如果两者相等，则认为读取的数据是正确的。

14.2.8 校准时钟输出

当 RTC_CTRL.COEN 位置 1，PC13 引脚将输出校准时钟。如果 RTC_CTRL.CALOSEL=0 和 RTC_PRE.DIVA[6:0] = 0x7F，RTC_CALIB 频率结果为 $f_{RTCCLK}/RTC_PRE.DIVA[6:0]$ 。当 RTCCLK 频率为 32.768 kHz 时，校准输出 256Hz。由于下降沿有轻微的抖动，建议使用上升沿。

当 RTC_CTRL.CALOSEL=1，"RTC_PRE.DIVS[14:0]+1"是 256 的非零整数倍，RTC_CALIB 频率由公式 $f_{RTCCLK}/(256 * (DIVA+1))$ 给出。当 RTCCLK 频率为 32.768 kHz 和 RTC_PRE.DIVA[6:0] = 0x7F 时，校准输出 1Hz。

注意：当选择 RTC_CALIB 或 RTC_ALARM 输出时，RTC_OUT 引脚(PC13)被自动配置为输出。

14.2.9 可编程闹钟

RTC 有 2 个可编程闹钟：闹钟 A 和闹钟 B。

通过 RTC_CTRL.ALxEN 位可以使能或关闭 RTC 闹钟。如果 Alarm 值与日历值相匹配，则 RTC_INITSTS.ALxF 标志被置 1。如果 RTC_CTRL.ALxIEN 使能，可以选择任意日历字段来触发闹钟中断。

闹钟输出：当 RTC_CTRL.OUTSEL[1:0]配置后，闹钟 A 或闹钟 B 可以映射到 RTC_ALxRM 输出，可以通过 RTC_CTRL.OPOL 位配置输出极性。

注意：当秒字段被选择(RTC_ALARMx.MASK1 位复位)，RTC_PRE.DIVS[14:0]必须大于 3，以保证正确操作。

14.2.10 闹钟配置

闹钟 A 和闹钟 B 配置步骤如下：

- 通过清除 RTC_CTRL.ALAIN/RTC_CTRL.ALBEN 位失能闹钟 A/闹钟 B
- 配置闹钟 x 寄存器 (RTC_ALRMxSS/RTC_ALARMx)
- 通过设置 RTC_CTRL.ALAIEN/RTC_CTRL.ALBIEN 位为 1 使能闹钟 A/闹钟 B 中断（这一步根据需要添加）
- 通过设置 RTC_CTRL.ALAIN/RTC_CTRL.ALBEN 位为 1 使能闹钟 A/闹钟 B

14.2.11 闹钟输出

当 RTC_CTRL.OUTSEL[1:0] !=0, RTC_ALARM 输出功能开启。根据 RTC_CTRL.OUTSEL[1:0]的值选择闹钟 A 输出、闹钟 B 输出或者唤醒输出。

RTC_CTRL.OPOL 位控制闹钟 A、闹钟 B 或唤醒输出的极性。

RTC_OPT.TYPE 位控制 RTC_ALARM 引脚开漏或者推挽输出。

选择 RTC_CALIB 或 RTC_ALARM 输出时, RTC_OUT 引脚 (PC13) 会自动配置为输出。

14.2.12 周期性自动唤醒

16 位可编程自动加载计数器可以在达到 0 时产生周期性唤醒标志。它也可以将唤醒定时器的范围扩展到 17 位。通过设置 RTC_CTRL.WTEN 可以启用周期性自动唤醒功能。

可以选择两种唤醒输入时钟源:

- 2、4、8 或 16 分频的 RTC 时钟 (RTCCLK)。

假设 RTCCLK 来自 LSE (32.768KHz), 分辨率为 61us, 可以配置唤醒中断周期为 122us ~ 32s。

- 内部时钟 ck_spre.

- ◆ 假设 ck_spre 频率为 1Hz, 可用唤醒时间范围为 2s ~ 18h, 分辨率为 1 秒
- ◆ 当 RTC_CTRL.WKUPSEL [2:0] = 10x, 周期范围为 2s 到 18h

当 RTC_CTRL.WTEN 位设置为 1 之后, 向下计数器正在运行, 当它达到 0 时, RTC_INITSTS.WTF 位会被置 1, 通过设置 RTC_CTRL.WTIEN 位为 1, 当周期性唤醒中断被启用触发时, 设备可以退出除 Standby 模式外低功耗模式。

周期性唤醒输出: 当 RTC_CTRL.OUTSEL[1:0]选择周期性唤醒后可以映射到 RTC_ALxRM 输出, 自动将 RTC_OUT 引脚(PC13)配置为输出, 输出极性可由 RTC_CTR.OPOL 位配置。

14.2.13 唤醒定时器配置

唤醒计时器自动重新加载值配置如下:

- 通过清除 RTC_CTRL.WTEN 关闭唤醒定时器, 然后等待 RTC_INITSTS.WTWF 标志位被置 1
- 通过设置 RTC_CTRL.WKUPSEL[2:0]选择唤醒定时器时钟
- 通过设置 RTC_WKUPT.WKUPT[15:0]配置唤醒自动重加载值
- 通过设置 RTC_CTRL.WTIEN 位使能唤醒中断 (此步可根据需要选择)
- 通过设置 RTC_CTRL.WTEN 位开启唤醒定时器

14.2.14 时间戳功能

时间戳可以通过将 RTC_CTRL.TSEN 位设置为 1 来启用。当在 RTC_TS 引脚上检测到时间戳事件时, 该事件的日历值将存储在时间戳寄存器 (RTC_TSSS、RTC_TST、RTC_TSD) 中, 并且 RTC_INITSTS.TISF 位被设置为 1。如果在 RTC_INITSTS.TISF 已经设置为 1 时检测到新的时间戳事件, 则硬件将

RTC_INITSTS.TISOVF 标志设置为 1，并且时间戳寄存器 (RTC_TST 和 RTC_TSD) 将继续保存前一个事件的值，这意味着当 RTC_INITSTS.TISF=1 时，时间戳寄存器 (RTC_TST 和 RTC_TSD) 数据不会改变。

在同步过程引起的时间戳事件再次发生后，RTC_INITSTS.TISF 在 2 个 RTC_CLK 周期内设置为 1。RTC_INITSTS.TISOVF 的生成没有延迟。这意味着如果两个时间戳事件非常接近，这可能导致 RTC_INITSTS.TISOVF 为“1”而 RTC_INITSTS.TISF 为“0”。因此，在检测到 RTC_INITSTS.TISF 为“1”后，再检测 RTC_INITSTS.TISOVF 位。

如果启用时间戳事件，时间戳将在时间戳寄存器中捕获读取的日历。时间戳事件可以在 EXTI 选择的 16 个 GPIO 端口中的任何一个上生成。通过设置相应的 EXTI_TS_SEL.TSSEL[3:0] 位来选择任一端口的 GPIO 引脚。

14.2.15 夏时令功能配置

夏令时功能可通过 RTC_CTRL.SU1H、RTC_CTRL.AD1H 和 RTC_CTRL.BAKP 位控制。设置 RTC_CTRL.SU1H 位为 1 时日历会减一小时，设置 RTC_CTRL.AD1H 为 1 时会增加一小时。RTC_CTRL.BAKP 位可用于记住或不记住此调整。

14.2.16 RTC 亚秒寄存器位移操作

当日历的值与外部精密时钟相比有亚秒级的偏差时，可以使用移位功能来提高日历的精度。

日历可以使用 RTC_SCTRL.SUB1S 和 RTC_SCTRL.ADFS[14:0] 位来控制最大延迟或提前 1s。调整分辨率为 $1/(RTC_PRE.DIVS[14:0]+1)$ ，表示 RTC_PRE.DIVS[14:0] 的值越大，分辨率越高。为了使同步预分频器输出保持在 1Hz，RTC_PRE.DIVS[14:0] 越高意味着 RTC_PRE.DIVA[6:0] 越低，则功耗越大。

注意：在开始移位操作之前，用户必须检查 RTC_SUBS.SS[15] 位是否为 0。

每当写入 RTC_SCTRL 寄存器时，硬件都会设置 RTC_INITSTS.SHOPF 标志，表明平移操作处于挂起状态。一旦平移操作完成，该位由硬件清零。

14.2.17 RTC 数字时钟精密校准

数字精密校准是通过调整校准周期内的 RTC 时钟脉冲数来实现的。数字精度校准分辨率为 0.954 PPM，范围为 -487.1 PPM 到 +488.5 PPM。

当输入频率为 32768 Hz 时，校准周期可配置为 2^{20} 个 RTCCLK 周期或 32 秒。精密校准寄存器 (RTC_CALIB) 表示将在指定周期内减少 RTC_CALIB.CM[8:0] 个 RTCCLK 时钟周期。

RTC_CALIB.CM[8:0] 的值表示在指定周期内要减少的 RTCCLK 脉冲数。RTC_CALIB.CP 可用于增加 488.5 PPM，每 2^{11} 个 RTCCLK 周期将插入一个 RTCCLK 脉冲。

当 RTC_CALIB.CM[8:0] 和 RTC_CALIB.CP 组合使用时，增加的周期范围为 -511 到 +512 个 RTCCLK 周期，校准范围为 -487.1 ppm 到 +488.5 ppm，分辨率约为 0.954 ppm。

有效校准频率 (f_{CAL}) 可使用以下公式计算：

$$f_{CAL} = f_{RTCCLK} * \left(1 + \frac{RTC_CALIB.CP * 512 - RTC_CALIB.CM[8:0]}{2^{20} + RTC_CALIB.CM[8:0] - RTC_CALIB.CP * 512}\right)$$

当 RTC_PRE.DIVA[6:0]<3 时校准

当异步预分频器值 (RTC_PRE.DIVA[6:0]) 小于 3 时, 不能将 RTC_CALIB.CP 设置为 1, 如果 RTC_CALIB.CP 值已设置为 1, 则将被忽略。

假设 RTCCLK 频率为 32768Hz, 当 RTC_PRE.DIVA[6:0]<3 时, RTC_PRE.DIVS[14:0]的值应该减小:

- 当 RTC_PRE.DIVA[6:0] =2, RTC_PRE.DIVS[14:0]=8189.
- 当 RTC_PRE.DIVA[6:0] =1, RTC_PRE.DIVS[14:0]=16379.
- 当 RTC_PRE.DIVA[6:0] =0, RTC_PRE.DIVS[14:0]=32759.

有效校准频率 (f_{CAL}) 可使用以下公式计算:

$$f_{CAL} = f_{RTCCLK} * \left(1 + \frac{256 - RTC_CALIB.CM[8:0]}{2^{20} + RTC_CALIB.CM[8:0] - 265} \right)$$

验证 RTC 校准

RTC 输出 1Hz 波形, 用于测量和验证 RTC 精度。

在有限测量周期内测量 RTC 频率时, 最多可能出现 2 个 RTCCLK 周期测量误差。如果测量周期与校准周期相同, 则可以消除误差。

- 校准周期为 32 秒 (默认)

使用精确的 32 秒周期测量 1Hz 校准输出可以确保测量误差在 0.447ppm 以内 (32 秒内为 0.5 个 RTCCLK 周期)。

- 校准周期为 16 秒。

使用精确的 16 秒周期测量 1Hz 校准输出可以确保测量误差在 0.954ppm 以内 (16 秒内为 0.5 个 RTCCLK 周期)。

- 校准周期为 8 秒。

使用精确的 8 秒周期测量 1Hz 校准输出可以确保测量误差在 1.907ppm 以内 (8 秒内为 0.5 个 RTCCLK 周期)。

动态重新校准

当 RTC_INITSTS.INITF=0 时, RTC_CALIB 寄存器可以通过以下步骤更新:

- 等待 RTC_INITSTS.RECPF=0
- 一个新值被写入 RTC_CALIB, 然后 RTC_INITSTS.RECPF 位自动置 1
- 新的校准设置将在数据写入 RTC_CALIB 后的 3 个 ck_apre 周期内生效

14.2.18 RTC 低功耗模式

RTC 在低功耗模式下的工作状态。

| 低功耗模式 | RTC 工作状态 | 退出低功耗模式 |
|-------|--------------------------|----------------------|
| SLEEP | 正常工作 | RTC 中断 |
| STOP0 | RTC 时钟源为 LSE 或 LSI 时正常工作 | 闹钟 A、闹钟 B、定期唤醒和时间戳事件 |
| STOP2 | RTC 时钟源为 LSE 或 LSI 时正常工作 | 闹钟 A、闹钟 B、定期唤醒和时间戳事件 |

| 低功耗模式 | RTC 工作状态 | 退出低功耗模式 |
|---------|--------------------------|-----------------|
| STANDBY | RTC 时钟源为 LSE 或 LSI 时正常工作 | 闹钟 A、闹钟 B、时间戳事件 |

14.3 RTC 寄存器

14.3.1 RTC 寄存器总览

表 14-2 RTC 寄存器总览

| Offset | Register | 31 | 30 | 29 | 28 | 27 | 26 | 25 | 24 | 23 | 22 | 21 | 20 | 19 | 18 | 17 | 16 | 15 | 14 | 13 | 12 | 11 | 10 | 9 | 8 | 7 | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | 0 | | | | |
|--------|-------------|--------------|--------------|----|----|----------|----------|----|----|-----------|-----------|----|----|----|------|------|----------|---------|----|----|----|----|----|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|--|--|--|--|
| 03Ch | RTC_CALIB | Reserved | | | | | | | | | | | | CP | CW8 | CW16 | Reserved | CM[8:0] | | | | | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | | | | | |
| | | Reset Value | | | | | | | | | | | | | 0 | 0 | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | RTC_ALRMASS | Reserved | MASKSSA[3:0] | | | | Reserved | | | | SSV[14:0] | | | | | | | | | | | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | | | | | | |
| 044h | RTC_ALRMBSS | | 0 0 0 0 | | | | Reserved | | | | SSV[14:0] | | | | | | | | | | | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | | | | | | |
| | Reserved | MASKSSB[3:0] | | | | Reserved | | | | SSV[14:0] | | | | | | | | | | | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | | | | | | | |
| | | RTC_OPT | Reserved | | | | | | | | | | | | TYPE | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | Reset Value | Reserved | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

14.3.2 RTC 日历时间寄存器 (RTC_TSH)

偏移地址: 0x00

复位值: 0x0000 0000

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|----------|----------|----------|----|----------|--|----------|----------|----------|----|----------|--|----------|----------|----|----|----------|----|----|
| 31 | Reserved | | | | | | | | | | | | 23 | 22 | 21 | 20 | 19 | 16 |
| 15 | MIT[2:0] | | 14 | MIU[3:0] | | 12 | Reserved | | 11 | SCT[2:0] | | 8 | HOT[1:0] | | 7 | HOU[3:0] | | |
| rw | | rw | | rw | | rw | | rw | | rw | | rw | | rw | | rw | | |
| Reserved | | MIT[2:0] | | MIU[3:0] | | Reserved | | SCT[2:0] | | HOT[1:0] | | HOU[3:0] | | rw | | rw | | |

| 位域 | 名称 | 描述 |
|-------|------------|---|
| 31:23 | Reserved | 保留, 必须保持复位值 |
| 22 | APM | AM/PM 格式。 0: AM 格式或者 24 小时格式 1: PM 格式 |
| 21:20 | HOT[1:0] | 小时的十位(BCD 格式)。 |
| 19:16 | HOU[3:0] | 小时的个位(BCD 格式)。 |
| 15 | Reserved | 保留, 必须保持复位值。 |
| 14:12 | MIT [2: 0] | 分钟的十位(BCD 格式)。 |
| 11:8 | MIU[3:0] | 分钟的个位(BCD 格式)。 |
| 7 | Reserved | 保留, 必须保持复位值。 |
| 6:4 | SCT[2:0] | 秒的十位(BCD 格式)。 |
| 3:0 | SCU[3:0] | 秒的个位(BCD 格式)。 |

14.3.3 RTC 日历日期寄存器 (RTC_DATE)

偏移地址: 0x04

复位值: 0x0000 2101

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|----------|----------|----|----------|---|----------|---|----------|---|----------|----|----------|---|--|--|----|----|----------|----|
| 31 | Reserved | | | | | | | | 24 | 23 | YRT[3:0] | | | | 20 | 19 | YRU[3:0] | 16 |
| 15 | 13 | 12 | 11 | 8 | 7 | 6 | r | 5 | 4 | 3 | r | 0 | | | | | | |
| WDU[2:0] | MOT | | MOU[3:0] | | Reserved | | DAT[1:0] | | DAU[3:0] | | | | | | | | | |
| r | r | r | r | | | | r | | r | | r | | | | | | | |

| 位域 | 名称 | 描述 |
|-------|----------|---|
| 31:24 | Reserved | 保留, 必须保持复位值。 |
| 23:20 | YRT[3:0] | 年的十位(BCD 格式)。 |
| 19:16 | YRU[3:0] | 年的个位(BCD 格式)。 |
| 15:13 | WDU[2:0] | 星期几 000: 禁止 001: 星期一 ... 111: 星期天 |
| 12 | MOT | 月的十位(BCD 格式)。 |
| 11:8 | MOU[3:0] | 月的个位(BCD 格式)。 |
| 7:6 | Reserved | 保留, 必须保持复位值。 |
| 5:4 | DAT[1:0] | 日期的十位(BCD 格式)。 |
| 3:0 | DAU[3:0] | 日期的个位(BCD 格式)。 |

14.3.4 RTC 控制寄存器(RTC_CTRL)

偏移地址: 0x08

复位值: 0x0000 0000

| | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|----------|----------|--------|--------|------|------|-------|-------|----------|------|------|----------|-------|----|--------------|----|----|----|
| 31 | Reserved | | | | | | | | 24 | 23 | 22 | 21 | 20 | 19 | 18 | 17 | 16 |
| 15 | 14 | 13 | 12 | 11 | 10 | 9 | 8 | rw | 7 | rw | 6 | rw | 5 | rw | 4 | rw | 3 |
| Reserved | WTIEN | ALBIEN | ALAIEN | TSEN | WTEN | ALBEN | ALAEN | Reserved | HFMT | BYPS | Reserved | TSPOL | | WKUPSEL[2:0] | | | rw |
| | rw | rw | rw | rw | rw | rw | rw | | rw | rw | | rw | | rw | | rw | |

| 位域 | 名称 | 描述 |
|-------|-------------|---|
| 31:24 | Reserved | 保留, 必须保持复位值。 |
| 23 | COEN | 校准输出使能。 0: 校准输出禁止 1: 校准输出开启 |
| 22:21 | OUTSEL[1:0] | 输出选择位。 该位用来选择要连接到 RTC_ALARM 输出的标志。 00: 输出禁止 01: 闹钟 A 输出开启 10: 闹钟 B 输出开启 11: 唤醒输出开启 |

| 位域 | 名称 | 描述 |
|----|----------|---|
| 20 | OPOL | <p>输出极性位。</p> <p>此位用于配置 RTC_ALARM 输出的极性。</p> <p>0: 当 ALAF/ALBF/WTF 标志位置 1(取决于 OUTSEL [1:0]), 该引脚输出高电平 1: 当 ALAF/ALBF/WTF 标志位置 1(取决于 OUTSEL [1:0]), 该引脚输出低电平</p> |
| 19 | CALOSEL | <p>校准输出选择位。</p> <p>当 COEN=1 时, 该位选择在 RTC_CALIB 上输出哪个信号。</p> <p>在 RTCCLK 为 32.768 kHz 且预分频为默认值(RTC_PRE.DIVA[6:0]=127 和 RTC_PRE.DIVS[14:0]=255)的条件下, 这些频率有效。</p> <p>0: 校准输出 256Hz(默认预分频设置) 1: 校准输出 1Hz(默认预分频设置)</p> |
| 18 | BAKP | 这个位可以由用户写入, 以记住是否执行了夏令时的更改。 |
| 17 | SU1H | <p>减去 1 小时位(冬季时间更改)。</p> <p>当设置此位时, 如果当前小时不是 0, 则从日历时间中减去 1 小时。这个位总是被读取为 0。当当前小时为 0 时, 设置此位无效。</p> <p>0: 无使用 1: 用当前时间减去 1 小时。这可以用于冬季改变户外初始化模式</p> |
| 16 | AD1H | <p>加 1 小时位(夏季时间更改)。</p> <p>设置此位后, 将 1 小时添加到日历时间中。这个位总是被读为 0。</p> <p>0: 无使用 1: 用当前时间加上 1 小时。这可以用于夏季改变户外初始化模式</p> |
| 15 | Reserved | 保留, 必须保持复位值。 |
| 14 | WTIEN | <p>唤醒定时器中断使能位。</p> <p>0: 唤醒定时器中断禁止 1: 唤醒定时器中断开启</p> |
| 13 | ALBIEN | <p>闹钟 B 中断使能位。</p> <p>0: 闹钟 B 中断禁止 1: 闹钟 B 中断开启</p> |
| 12 | ALAIEN | <p>闹钟 A 中断使能位。</p> <p>0: 闹钟 A 中断禁止 1: 闹钟 A 中断开启</p> |
| 11 | TSEN | <p>时间戳使能位。</p> <p>0: 时间戳禁止 1: 时间戳开启</p> |
| 10 | WTEN | <p>唤醒定时器使能位。</p> <p>0: 唤醒定时器禁止 1: 唤醒定时器开启</p> |
| 9 | ALBEN | <p>闹钟 B 使能位。</p> <p>0: 闹钟 B 禁止 1: 闹钟 B 开启</p> |
| 8 | ALAEN | <p>闹钟 A 使能位。</p> <p>0: 闹钟 A 禁止 1: 闹钟 A 开启</p> |

| 位域 | 名称 | 描述 |
|-----|--------------|---|
| 7 | Reserved | 保留, 必须保持复位值。 |
| 6 | HFMT | 小时格式位。 0: 24 小时格式 1: AM/PM 格式 |
| 5 | BYPS | 旁路影子寄存器位。 0: 日历值(从 RTC_SUBS、RTC_TSH 和 RTC_DATE 读取时)取自影子寄存器, 影子寄存器每两个 RTCCLK 周期更新一次。 1: 日历值(从 RTC_SUBS、RTC_TSH 和 RTC_DATE 读取时)直接从日历计数器中获取。 注意: 如果 APB1 时钟的频率小于 RTCCLK 的 7 倍, 则 BYPS 必须设置为 1 |
| 4 | Reserved | 保留, 必须保持复位值。 |
| 3 | TSPOL | 时间戳事件触发沿配置位。 0: RTC_TS 输入上升沿生成一个时间戳事件 1: RTC_TS 输入下降沿生成一个时间戳事件 注意: 更改 TSPOL 时必须重置 RTC_CTRL.TSEN, 以避免 RTC_INITSTS.TISF 意外置 1。 |
| 2:0 | WKUPSEL[2:0] | 唤醒时钟选择位。 000: 选择 RTC/16 时钟 001: 选择 RTC/8 时钟 010: 选择 RTC/4 时钟 011: 选择 RTC/2 时钟 10x: 选择 ck_spre(通常 1Hz)时钟 |

14.3.5 RTC 初始状态寄存器 (RTC_INITSTS)

偏移地址: 0x0C

复位值: 0x0000 0007

| | | | | | | | | | | | | | | | | |
|----------|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|------|-------|-------|---|----|----|
| 31 | Reserved | | | | | | | | | | | | | | 17 | 16 |
| 15 | 13 | 12 | 11 | 10 | 9 | 8 | 7 | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | 0 | r | r |
| Reserved | TISOVF | TISF | WTF | ALBF | ALAF | INITM | INITF | RSYF | INITSF | SHOPF | WTWF | ALBWF | ALAWF | | | |
| | rc_w0 | rc_w0 | rc_w0 | rc_w0 | rc_w0 | rw | r | rc_w0 | r | r | r | r | r | r | | |

| 位域 | 名称 | 描述 |
|-------|----------|--|
| 31:17 | Reserved | 保留, 必须保持复位值。 |
| 16 | RECPF | 重新校准挂起标志位。 当软件写入 RTC_CALIB 寄存器时, RECPF 状态标志自动设置为 1, 表示 RTC_CALIB 寄存器被阻塞。当考虑到新的校准设置时, 这个位将恢复为 0。 |
| 15:13 | Reserved | 保留, 必须保持复位值。 |
| 12 | TISOVF | 时间戳溢出标志位。 当时间戳事件发生的同时 TISF 位已经被置 1 时, 硬件将此标志置 1。建议在清 |

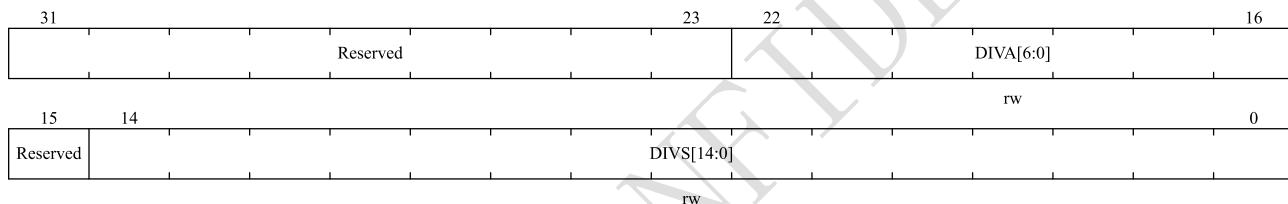
| 位域 | 名称 | 描述 |
|----|--------|---|
| | | 除 TISF 位之后再检查并清除 TISOVF 位。否则，如果时间戳事件恰好在清除 TISF 位之前刚刚发生，则溢出事件可能会被漏掉。 |
| 11 | TISF | 时间戳标志位。 当发生时间戳事件时，硬件将设置此标志。此标志通过写入 0 被软件清除。 |
| 10 | WTF | 唤醒定时器标志位。 当唤醒自动重载计数器达到 0，硬件将设置此标志。此标志通过写入 0 被软件清除。在 WTF 再次设置为 1 之前，此标志必须由软件至少在 1.5 RTCCLK 周期内清除。 |
| 9 | ALBF | 闹钟 B 标志位。 当时间/日期寄存器(RTC_TSH 和 RTC_DATE)与闹钟 B 寄存器(RTC_ALARMB)匹配时，硬件将设置此标志。此标志通过写入 0 被软件清除。 |
| 8 | ALAF | 闹钟 A 标志位。 当时间/日期寄存器(RTC_TSH 和 RTC_DATE)与闹钟 A 寄存器(RTC_ALARMA)匹配时，硬件将设置此标志。此标志通过写入 0 被软件清除。 |
| 7 | INITM | 进入初始化模式 0：自由运行模式 1：进入初始化模式，设置日历时间值、日期值、预分频值。 |
| 6 | INITF | 初始标志位。 当这个位设置为 1 时，RTC 处于初始化状态，可以更新时间、日期和预分频寄存器。 0：日历寄存器更新禁止 1：日历寄存器更新允许 |
| 5 | RSYF | 寄存器同步标志位。 当日历值被复制到影子寄存器中时，该标志由硬件设置为“1”。当处于初始化模式、移位操作挂起 (SHOPF=1) 或处于旁路影子寄存器模式 (RTC_CTRL.BYPS=1) 时，该位由硬件清零，该位也可以通过软件清零。 在初始化模式下，该位通过软件或硬件清除。 0：日历影子寄存器尚未同步 1：日历影子寄存器同步 |
| 4 | INITSF | 初始状态标志位。 当日历年字段不等于 0 (备份域复位状态)时，由硬件设置此位。 0：日历没有被初始化 1：日历已经被初始化 |
| 3 | SHOPF | 平移操作挂起标志位。 当向 RTC_SCTRL 寄存器写入一个平位操作时，硬件立即设置此标志。当执行相应的平移操作时，硬件将清除它。写入 SHOPF 位不起作用。 0：没有位移操作挂起 1：有位移操作挂起 |
| 2 | WTWF | 唤醒定时器写标志位。 0：唤醒时间配置更新不允许 1：唤醒时间配置更新允许 |
| 1 | ALBWF | 闹钟 B 写标志。 |

| 位域 | 名称 | 描述 |
|----|-------|--|
| | | 当 RTC_CTRL.ALBEN 位设置为 0, 同时闹钟 B 值可更改时, 硬件将该位置 1。 它在初始化模式下被硬件清除。 0: 闹钟 B 更新不允许 1: 闹钟 B 更新允许 |
| 0 | ALAWF | 闹钟 A 写标志。 当 RTC_CTRL.ALAREN 位设置为 0, 同时闹钟 A 可更改时, 硬件将该位置 1。 它在初始化模式下被硬件清除。 0: 闹钟 A 更新不允许 1: 闹钟 A 更新允许 |

14.3.6 RTC 预分频寄存器(RTC_PRE)

偏移地址: 0x10

复位值: 0x007F 00FF

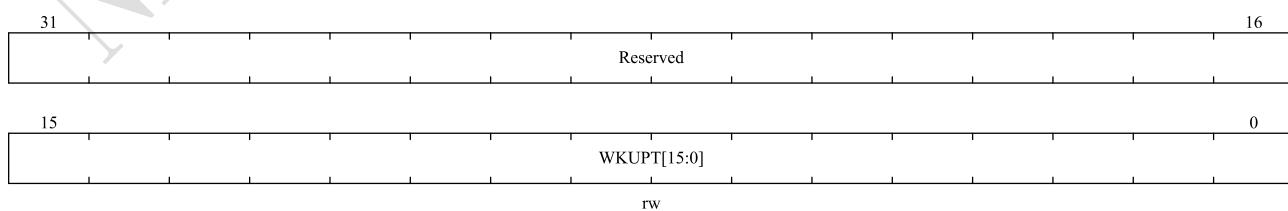


| 位域 | 名称 | 描述 |
|-------|------------|---|
| 31:23 | Reserved | 保留, 必须保持复位值。 |
| 22:16 | DIVA[6:0] | 异步分频参数位。 $f_{ck_apre} = \text{RTCCLK}/(\text{DIVA}[6:0]+1)$ |
| 15 | Reserved | 保留, 必须保持复位值。 |
| 14:0 | DIVS[14:0] | 同步分频位。 $f_{ck_spre} = f_{ck_apre}/(\text{DIVS}[14:0]+1)$ |

14.3.7 RTC 唤醒定时器寄存器(RTC_WKUPT)

偏移地址: 0x14

复位值: 0x0000 FFFF



| 位域 | 名称 | 描述 |
|-------|----------|--------------|
| 31:16 | Reserved | 保留, 必须保持复位值。 |

| 位域 | 名称 | 描述 |
|------|-------------|---|
| 15:0 | WKUPT[15:0] | <p>唤醒自动重载值位</p> <p>当 RTC_CTRL.WTEN=1 时, 每 (WKUPT[15:0] + 1) 个 ck_wut 周期设置 RTC_INITSTS.WTF 标志。当 RTC_CTRL.WKUPSEL[2]=1 时, 唤醒定时器变为 17 位。</p> <p>注意:</p> <p>这个寄存器的变化 (如第二次设置或以后的设置) 需要在唤醒中断中进行更改, 否则更改后的设置不会立即生效, 而是在下次唤醒后生效; 特别是当 RTC_CTRL.WKUPSEL[2:0] 设置为 010 时, 修改后的设置不会立即生效, 而是在下一个周期唤醒后生效。</p> |

14.3.8 RTC 闹钟 A 寄存器(RTC_ALARMA)

偏移地址: 0x1C

复位值: 0x0000 0000

| | | | | | | | | | | | |
|----------|----------|----------|----------|----------|----------|---------|----------|---------|----------|----|----|
| 31 | 30 | 29 | 28 | 27 | 24 | 23 | 22 | 21 | 20 | 19 | 16 |
| MASK4 | WKDSEL | DTT[1:0] | | DTU[3:0] | MASK3 | APM | HOT[1:0] | | HOU[3:0] | | |
| rw 15 | rw 14 | rw 12 | rw 11 | rw 8 | rw 7 | rw 6 | rw 4 | rw 3 | rw 0 | | |
| MASK2 | MIT[2:0] | | MIU[3:0] | MASK1 | SET[2:0] | | SEU[3:0] | | | | |
| rw | rw | | rw | rw | rw | rw | rw | rw | rw | | |

| 位域 | 名称 | 描述 |
|-------|----------|--|
| 31 | MASK4 | 闹钟日期掩码位。 0: 日期/日匹配 1: 日期/日不匹配 |
| 30 | WKDSEL | 星期几选择位。 0: DTU[3:0]代表日期的个位 1: DTU[3:0]代表星期几。DTT[1:0]为无关位 |
| 29:28 | DTT[1:0] | 日期的十位(BCD 格式)。 |
| 27:24 | DTU[3:0] | 日期的个位(BCD 格式) |
| 23 | MASK3 | 闹钟小时掩码位。 0: 小时匹配 1: 小时不匹配 |
| 22 | APM | AM/PM 符号位。 0: AM 或 24 小时制 1: PM |
| 21:20 | HOT[1:0] | 小时的十位(BCD 格式)。 |
| 19:16 | HOU[3:0] | 小时的个位(BCD 格式)。 |
| 15 | MASK2 | 闹钟分钟掩码位。 0: 分钟匹配 1: 分钟不匹配 |
| 14:12 | MIT[2:0] | 分钟的十位(BCD 格式)。 |

| 位域 | 名称 | 描述 |
|------|----------|------------------------------|
| 11:8 | MIU[3:0] | 分钟的个位(BCD 格式)。 |
| 7 | MASK1 | 闹钟秒掩码位。 0: 秒匹配 1: 秒不匹配 |
| 6:4 | SET[2:0] | 秒的十位(BCD 格式)。 |
| 3:0 | SEU[3:0] | 秒的个位(BCD 格式)。 |

14.3.9 RTC 闹钟 B 寄存器 (RTC_ALARMB)

偏移地址: 0x20

复位值: 0x0000 0000

| | | | | | | | | | | | |
|----------|----------|----------|----------|----------|---------|----------|---------|----------|----------|----------|---------|
| 31 | 30 | 29 | 28 | 27 | 24 | 23 | 22 | 21 | 20 | 19 | 16 |
| MASK4 | WKDSEL | DTT[1:0] | | DTU[3:0] | | MASK3 | APM | HOT[1:0] | | HOU[3:0] | |
| rw 15 | rw 14 | rw 12 | rw 11 | rw 8 | rw 7 | rw 6 | rw 4 | rw 3 | rw | rw | rw 0 |
| MASK2 | MIT[2:0] | | MIU[3:0] | | MASK1 | SET[2:0] | | | SEU[3:0] | | |
| rw | rw | | rw | | rw | rw | | rw | | rw | |

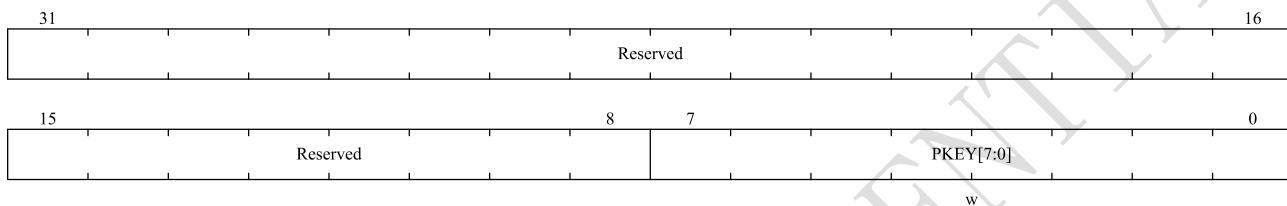
| 位域 | 名称 | 描述 |
|-------|----------|--|
| 31 | MASK4 | 闹钟日期掩码位。 0: 日期/日匹配 1: 日期/日不匹配 |
| 30 | WKDSEL | 星期几选择位。 0: DTU[3:0]代表日期的个位 1: DTU[3:0]代表星期几。DTT[1:0]为无关位 |
| 29:28 | DTT[1:0] | 日期的十位(BCD 格式)。 |
| 27:24 | DTU[3:0] | 日期的个位(BCD 格式) |
| 23 | MASK3 | 闹钟小时掩码位。 0: 小时匹配 1: 小时不匹配 |
| 22 | APM | AM/PM 符号位。 0: AM 或 24 小时制 1: PM |
| 21:20 | HOT[1:0] | 小时的十位(BCD 格式)。 |
| 19:16 | HOU[3:0] | 小时的个位(BCD 格式)。 |
| 15 | MASK2 | 闹钟分钟掩码位。 0: 分钟匹配 1: 分钟不匹配 |
| 14:12 | MIT[2:0] | 分钟的十位(BCD 格式)。 |
| 11:8 | MIU[3:0] | 分钟的个位(BCD 格式)。 |
| 7 | MASK1 | 闹钟秒掩码位。 0: 秒匹配 |

| 位域 | 名称 | 描述 |
|-----|----------|---------------|
| | | 1: 秒不匹配 |
| 6:4 | SET[2:0] | 秒的十位(BCD 格式)。 |
| 3:0 | SEU[3:0] | 秒的个位(BCD 格式)。 |

14.3.10 RTC 写保护寄存器(RTC_WRP)

偏移地址: 0x24

复位值: 0x0000 0000

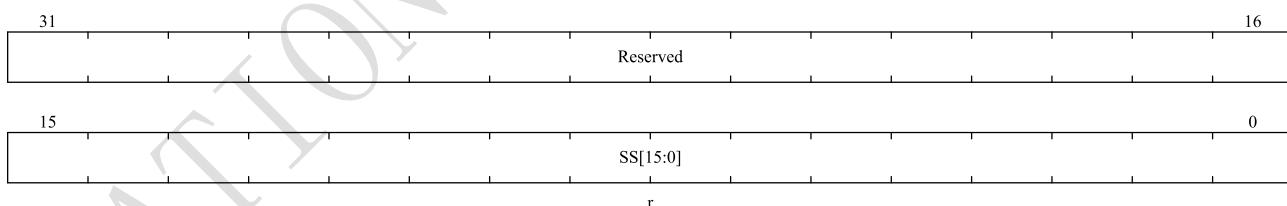


| 位域 | 名称 | 描述 |
|------|-----------|--|
| 31:8 | Reserved | 保留, 必须保持复位值。 |
| 7:0 | PKEY[7:0] | <p>写保护秘钥</p> <p>读取该字节总是返回 0x00。</p> <p>有关如何解锁 RTC 寄存器写保护的详细信息, 请参阅 RTC 写保护寄存器章节。</p> |

14.3.11 RTC 亚秒寄存器(RTC_SUBS)

偏移地址: 0x28

复位值: 0x0000 0000

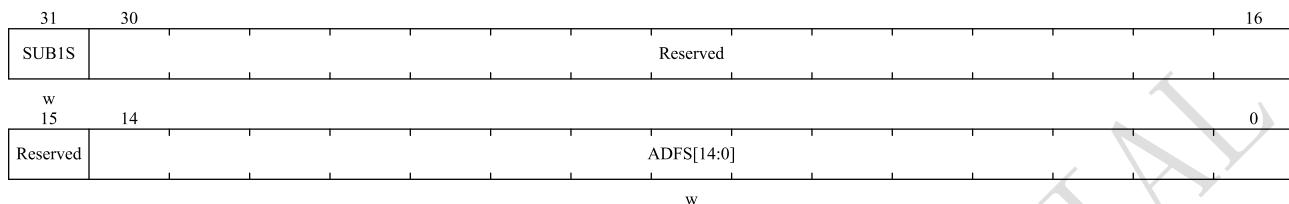


| 位域 | 名称 | 描述 |
|-------|----------|--|
| 31:16 | Reserved | 保留, 必须保持复位值。 |
| 15:0 | SS[15:0] | <p>亚秒值。</p> <p>该值是同步预分频器计数器值。此亚秒值由以下公式计算:</p> $\text{亚秒值} = (\text{RTC_PRE_DIVS}[14:0]-\text{SS})/(\text{RTC_PRE_DIVS}[14:0]+1)$ <p>注意: SS[15:0] 只有在移位操作完成后才能大于 RTC_PRE_DIVS[14:0]。在这种情况下, 正确的时间/日期比 RTC_TSH/RTC_DATE 指示的时间/日期慢一秒。</p> |

14.3.12 RTC 平移控制寄存器(RTC_SCTRL)

偏移地址: 0x2C

复位值: 0x0000 0000

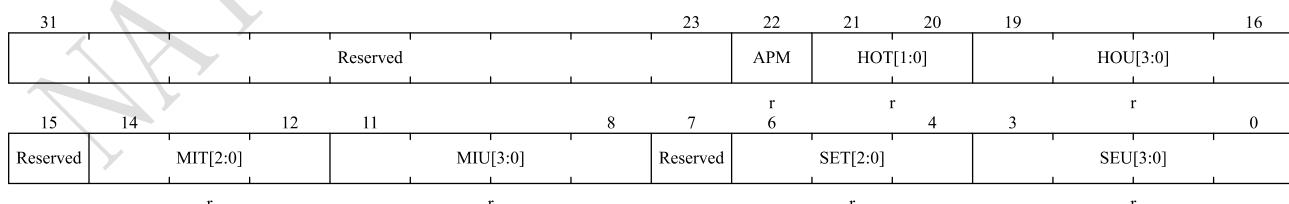


| 位域 | 名称 | 描述 |
|-------|------------|---|
| 31 | SUB1S | 减一秒 0: 不减一秒。 1: 时钟/日历减去一秒 该位只能写入且读取为零。当 RTC_INITSTS.SHOPF=1 时, 写入该位没有影响。 |
| 30:15 | Reserved | 保留, 必须保持复位值。 |
| 14:0 | ADFS[14:0] | 增加亚秒值位 这些位只能写入且读取为零。当 RTC_INITSTS.SHOPF=1 时, 写入该位没有影响。写入 ADFS[14:0]的值将被同步预分频器计数器减掉。 由于该计数器递减计数, 此操作可有效地从时钟加快以下时间: $\text{加快 (秒)} = \text{ADFS [14:0]} / (\text{DIVS[14:0]} + 1)$ SUB1S 位可以与 ADFS[14:0]位一起使用: $\text{延迟 (秒)} = 1 - (\text{ADFS[14:0]} / (\text{DIVS[14:0]} + 1))$ 注意: 对 ADFS[14:0]执行写操作之前, 需要对 RTC_SUBS 寄存器进行读操作, 保证 ADFS[14:0] < RTC_SUBS.SS[15:0]; |

14.3.13 RTC 时间戳时间寄存器 (RTC_TST)

偏移地址: 0x30

复位值: 0x0000 0000



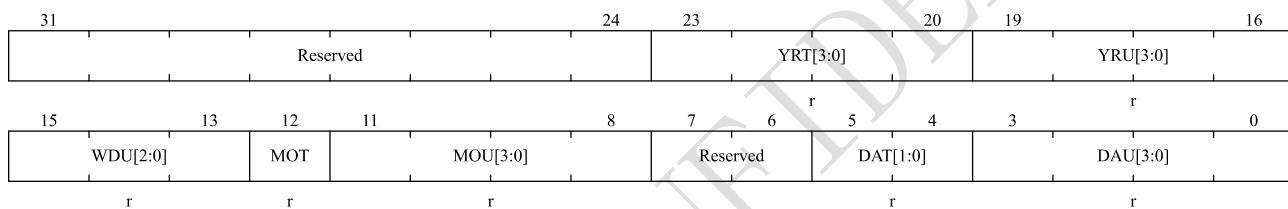
| 位域 | 名称 | 描述 |
|-------|----------|---------------------------------------|
| 31:23 | Reserved | 保留, 必须保持复位值。 |
| 22 | APM | AM/PM 符号位。 0: AM 或 24 小时制 1: PM |

| 位域 | 名称 | 描述 |
|-------|----------|----------------|
| 21:20 | HOT[1:0] | 小时的十位(BCD 格式)。 |
| 19:16 | HOU[3:0] | 小时的个位(BCD 格式)。 |
| 15 | Reserved | 保留, 必须保持复位值。 |
| 14:12 | MIT[2:0] | 分钟的十位(BCD 格式)。 |
| 11:8 | MIU[3:0] | 分钟的个位(BCD 格式)。 |
| 7 | Reserved | 保留, 必须保持复位值。 |
| 6:4 | SET[2:0] | 秒的十位(BCD 格式)。 |
| 3:0 | SEU[3:0] | 秒的个位(BCD 格式)。 |

14.3.14 RTC 时间戳日期寄存器 (RTC_TSD)

偏移地址: 0x34

复位值: 0x0000 0000

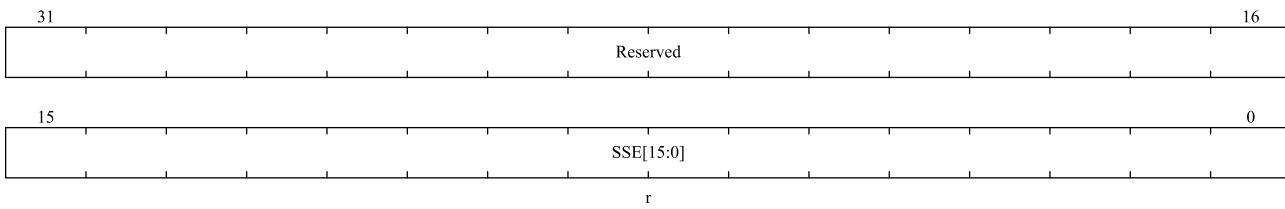


| 位域 | 名称 | 描述 |
|-------|----------|---|
| 31:24 | Reserved | 保留, 必须保持复位值。 |
| 23:20 | YRT[3:0] | 年的十位(BCD 格式)。 |
| 19:16 | YRU[3:0] | 年的个位(BCD 格式)。 |
| 15:13 | WDU[2:0] | 星期几 000: 禁止 001: 星期一 ... 111: 星期天 |
| 12 | MOT | 月份的十位(BCD 格式)。 |
| 11:8 | MOU[3:0] | 月份的个位(BCD 格式)。 |
| 7:6 | Reserved | 保留, 必须保持复位值。 |
| 5:4 | DAT[1:0] | 日期的十位(BCD 格式)。 |
| 3:0 | DAU[3:0] | 日期的个位(BCD 格式)。 |

14.3.15 RTC 时间戳亚秒寄存器(RTC_TSSS)

偏移地址: 0x38

复位值: 0x0000 0000

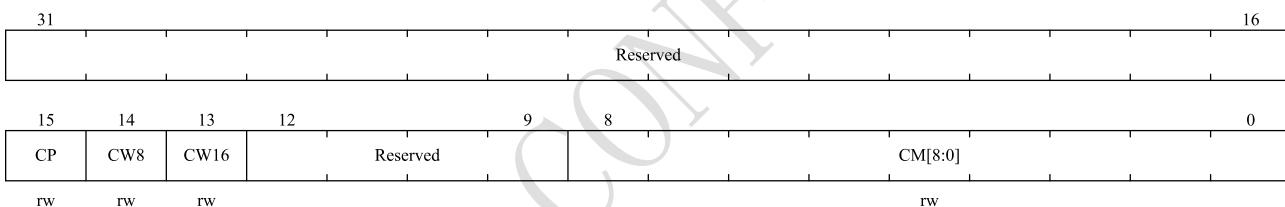


| 位域 | 名称 | 描述 |
|-------|-----------|--|
| 31:16 | Reserved | 保留, 必须保持复位值。 |
| 15:0 | SSE[15:0] | <p>亚秒值</p> <p>SSE[15:0] 是同步预分频计数器中的值。 亚秒值由以下公式提供:</p> $\text{亚秒值} = (\text{RTC_PRE.DIVS}[14:0] - \text{SSE}[15:0]) / (\text{RTC_PRE.DIVS}[14:0] + 1)$ <p>注意: SSE[15:0] 只能在移位操作后大于 RTC_PRE.DIVS[14:0]。 在这种情况下, 正确的时间/日期比 RTC_TSH/RTC_DATE 指示的时间少一秒。</p> |

14.3.16 RTC 校准寄存器(RTC_CALIB)

偏移地址: 0x3C

复位值: 0x0000 0000



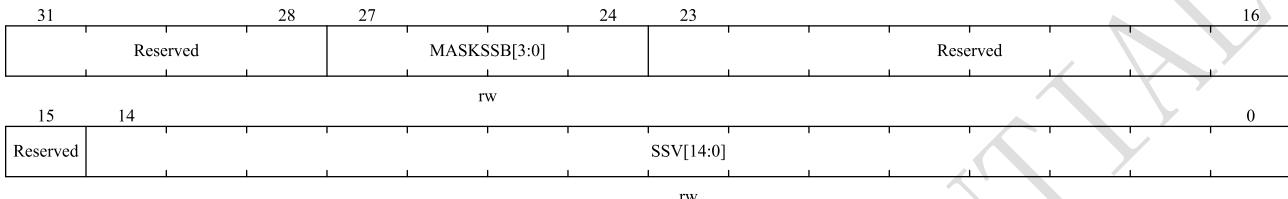
| 位域 | 名称 | 描述 |
|-------|----------|--|
| 31:16 | Reserved | 保留, 必须保持复位值。 |
| 15 | CP | <p>将 RTC 频率提高 488.5 ppm。</p> <p>此功能与 CM[8:0]一起使用。当 RTCCLK 频率为 32768 Hz 时, 在 32 秒窗口期间添加的 RTCCLK 脉冲数为 $((512 * CP) - CM[8:0])$。</p> <p>0: 不增加 RTCCLK 脉冲</p> <p>1: 每 2^{11} 个脉冲有效插入一个 RTCCLK 脉冲</p> |
| 14 | CW8 | <p>使用 8 秒校准周期位。</p> <p>0: 不使用</p> <p>1: 选择 8 秒校准周期</p> <p>注意: 当 CW8 = 1 时, CM[1:0]将始终保持为'00'</p> |
| 13 | CW16 | <p>使用 16 秒校准周期位。</p> <p>0: 不使用</p> <p>1: 选择 16 秒校准周期, 如果 CW8 = 1, 则不能将该位置 1</p> <p>注意: 当 CW16 = 1 时, CM[0]将始终保持为'0'</p> |
| 12:9 | Reserved | 保留, 必须保持复位值。 |
| 8:0 | CM[8:0] | <p>负校准位。</p> <p>2^{20} 个 RTCCLK 脉冲中的屏蔽脉冲数。这有效地降低了分辨率为 0.9537 ppm 的</p> |

| 位域 | 名称 | 描述 |
|----|----|-------|
| | | 日历频率。 |

14.3.17 RTC 闹钟 A 亚秒寄存器(RTC_ALRMASS)

偏移地址: 0x44

复位值: 0x0000 0000

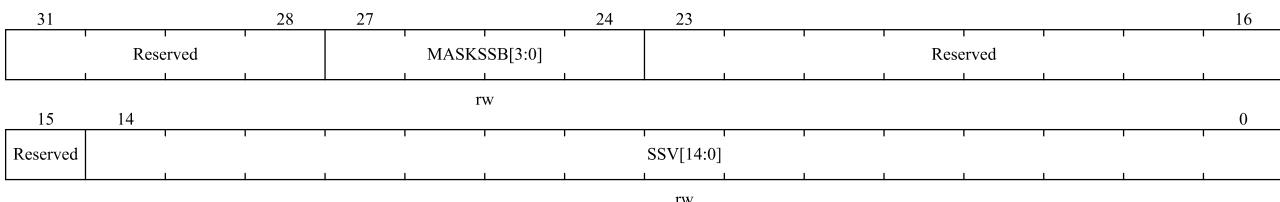


| 位域 | 名称 | 描述 |
|-------|--------------|--|
| 31:28 | Reserved | 保留, 必须保持复位值。 |
| 27:24 | MASKSSB[3:0] | <p>屏蔽此位开始的最高有效位。</p> <p>0x0: 闹钟的亚秒不比较。当秒单位增加时设置闹钟 (假设其余字段匹配)。</p> <p>0x1: 只比较 SS[0], 不比较其他位。</p> <p>0x2: 仅比较 SS[1:0], 不比较其他位。</p> <p>0x3: 仅比较 SS[2:0], 不比较其他位。</p> <p>...</p> <p>0xC: 仅比较 SS[11:0], 不比较其他位。</p> <p>0xD: 仅比较 SS[12:0], 不比较其他位。</p> <p>0xE: 仅比较 SS[13:0], 不比较其他位。</p> <p>0xF: 比较 SS[14:0]</p> <p>从不比较同步计数器 RTC_SUBS.SS[15]位。</p> |
| 23:15 | Reserved | 保留, 必须保持复位值。 |
| 14:0 | SSV[14:0] | <p>亚秒值。</p> <p>该值与同步预分频计数器 RTC_SUBS.SS[14:0]进行比较, 比较的位数由 MASKSSB[3:0]控制。</p> |

14.3.18 RTC 闹钟 B 亚秒寄存器 (RTC_ALRMBSS)

偏移地址: 0x48

复位值: 0x0000 0000

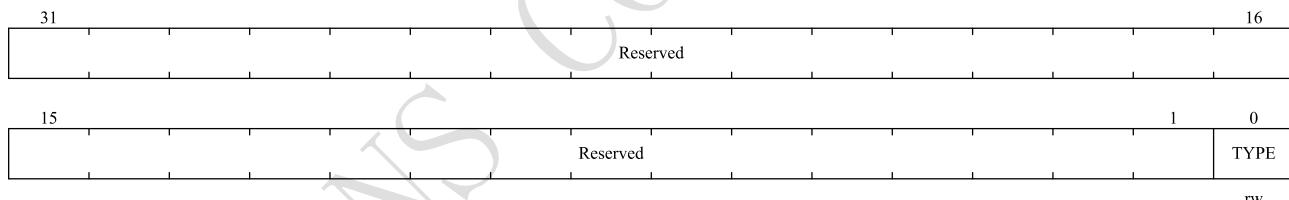


| 位域 | 名称 | 描述 |
|-------|--------------|--|
| 31:28 | Reserved | 保留, 必须保持复位值。 |
| 27:24 | MASKSSB[3:0] | <p>屏蔽此位开始的最高有效位。</p> <p>0x0: 闹钟的亚秒不比较。 当秒单位增加时设置闹钟 (假设其余字段匹配)。</p> <p>0x1: 只比较 SS[0], 不比较其他位。</p> <p>0x2: 仅比较 SS[1:0], 不比较其他位。</p> <p>0x3: 仅比较 SS[2:0], 不比较其他位。</p> <p>...</p> <p>0xC: 仅比较 SS[11:0], 不比较其他位。</p> <p>0xD: 仅比较 SS[12:0], 不比较其他位。</p> <p>0xE: 仅比较 SS[13:0], 不比较其他位。</p> <p>0xF: 比较 SS[14:0]。</p> <p>从不比较同步计数器 RTC_SUBS.SS[15]位。</p> |
| 23:15 | Reserved | 保留, 必须保持复位值。 |
| 14:0 | SSV[14:0] | <p>亚秒值</p> <p>该值与同步预分频计数器 RTC_SUBS.SS[14:0]进行比较, 比较的位数由 MASKSSB[3:0] 控制。</p> |

14.3.19 RTC 选项寄存器 (RTC_OPT)

偏移地址: 0x4C

复位值: 0x0000 0000



| 位域 | 名称 | 描述 |
|------|----------|---|
| 31:1 | Reserved | 保留, 必须保持复位值。 |
| 0 | TYPE | <p>PC13 上的 RTC_ALARM 输出类型位。</p> <p>0: 开漏输出</p> <p>1: 推挽输出</p> |

15 CRC 计算单元

15.1 简介

该模块集成了 CRC32 和 CRC16 的功能，循环冗余校验（CRC）计算单元根据固定的生成多项式得到任意 CRC 计算结果。在其他应用中，CRC 技术主要用于验证数据传输或数据存储的正确性和完整性。EN/IEC 60335-1 提供了一种验证闪存完整性的方法。CRC 计算单元可以在程序运行时计算出软件的标识符，然后与连接时产生的参考标识符进行比较，然后存储在指定的内存空间中。

15.2 主要特性

15.2.1 CRC32

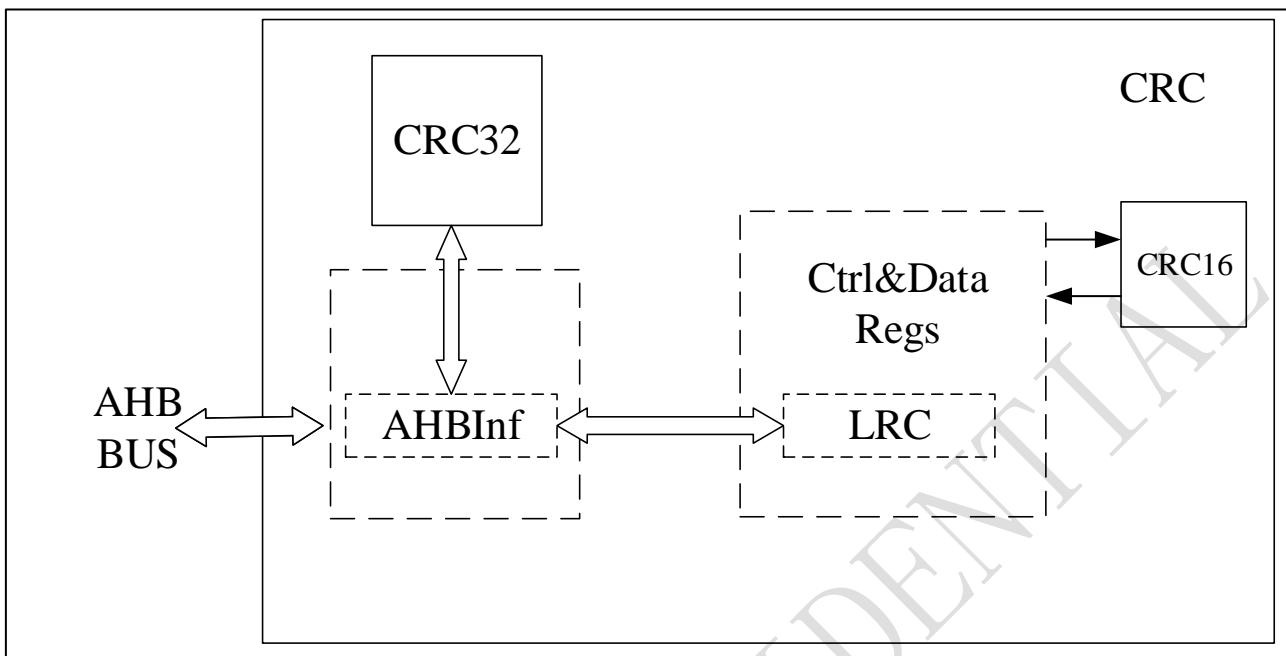
- CRC32($X^{32} + X^{26} + X^{23} + X^{22} + X^{16} + X^{12} + X^{11} + X^{10} + X^8 + X^7 + X^5 + X^4 + X^2 + X + 1$)
- 32 位待校验数据和 32 位输出校验码
- CRC 计算时间：1 个 AHB 时钟周期 (HCLK)
- 通用 8 位寄存器（可用于存放临时数据）

15.2.2 CRC16

- CRC16($X^{16} + X^{15} + X^2 + 1$)
- 8 位待校验数据和 16 位输出校验码
- CRC 计算时间：1 个 AHB 时钟周期 (HCLK)
- 可配置校验初始值，可配置待校验数据的大小端
- 支持 8bit LRC 校验值生成

下图为 CRC 计算单元框图

图 15-1 CRC 计算单元框图



15.3 功能描述

15.3.1 CRC32

CRC 计算单元含有 1 个 32 位数据寄存器:

- 写该寄存器, 作为 CRC 计算的输入
- 读该寄存器, 作为 CRC 计算的结果

对该数据寄存器的每一次写操作都会触发用前一个计算结果来计算这个新数据 (CRC 计算是针对整个 32 位字而不是逐字节进行的)。

支持背靠背写入或者连续地写-读操作。

CRC_CRC32DAT 可以通过设置 CRC_CRC32CTRL.RESET 重新初始化为 0xFFFF FFFF。该操作不影响寄存器 CRC_CRC32IDAT 中的数据。

15.3.2 CRC16

通过 CRC_CRC16CTRL.ENDHL 位来控制校验数据的小端或大端。

要清除最后一次 CRC 操作的结果, 请将 CRC_CRC16CTRL.CLR 设置为 1 或 CRC_CRC16D 设置为 0。

CRC 计算的初始值可以通过写 CRC_CRC16D 寄存器来配置。默认情况下, 初始值是上一次计算的结果。

LRC 计算与 CRC 计算相同。两者同时进行。可根据需要读出 CRC 或 LRC。如果需要设置初始值, 首先要配置 LRC 寄存器。

15.4 CRC 寄存器

15.4.1 CRC 寄存器总览

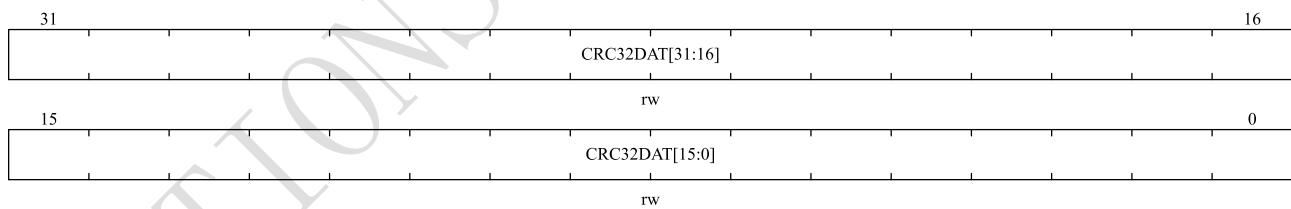
表 15-1 CRC 寄存器总览

| Offset | Register | 31 | 30 | 29 | 28 | 27 | 26 | 25 | 24 | 23 | 22 | 21 | 20 | 19 | 18 | 17 | 16 | 15 | 14 | 13 | 12 | 11 | 10 | 9 | 8 | 7 | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | 0 | | | | | | | | | | | |
|--------|-------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|---|---|---|---|---|---|---|-----|-------|---------------|---|---|---|---|---|---|---|--|--|--|--|
| 000h | CRC32DAT | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Reset Value | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | | | | | | | | | | | | | |
| 004h | CRC32IDAT | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Reset Value | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 008h | CRC32CTRL | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | RESET | | | | | | | | | | | | |
| | Reset Value | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 0 | | | | | | | | | | | | |
| 00Ch | CRC16CTRL | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | CLR | ENDHL | Reserved | | | | | | | | | | | |
| | Reset Value | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 0 | 0 | 0 | | | | | | | | | | | |
| 010h | CRC16DAT | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | CRC16DAT[7:0] | | | | | | | | | | | |
| | Reset Value | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | | | | | | |
| 014h | CRC16D | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Reset Value | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | | | | |
| 018h | LRC | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Reset Value | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

15.4.2 CRC32 数据寄存器 (CRC_CRC32DAT)

地址偏移: 0x00

复位值: 0xFFFF FFFF

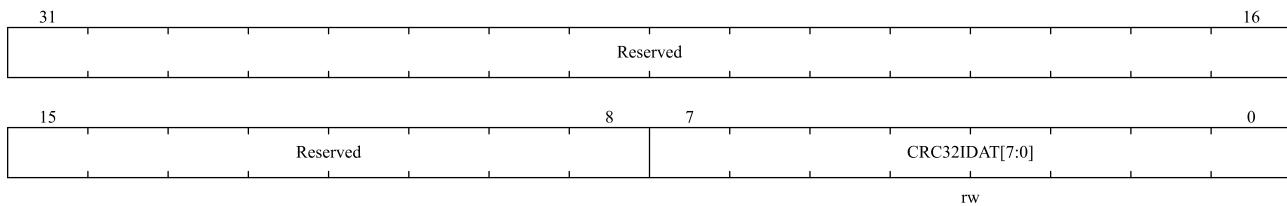


| 位域 | 名称 | 描述 |
|------|----------------|---|
| 31:0 | CRC32DAT[31:0] | CRC32 数据寄存器。 写入的数据为 CRC 待校验值。读取的数据为 CRC 计算结果。仅支持 32 位操作。 |

15.4.3 CRC32 独立数据寄存器 (CRC_CRC32IDAT)

地址偏移: 0x04

复位值: 0x0000 0000



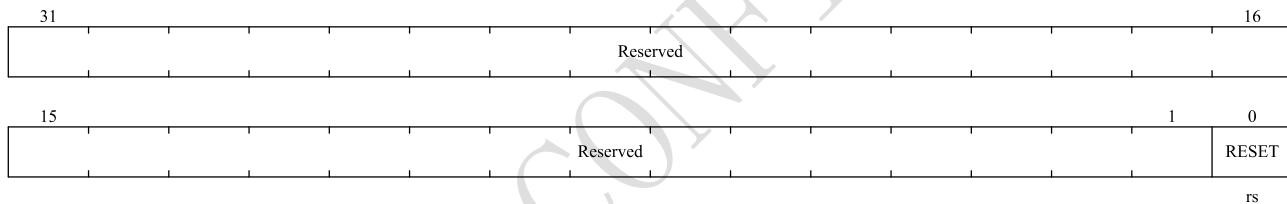
| 位域 | 名称 | 描述 |
|------|----------------|---|
| 31:8 | Reserved | 保留, 必须保持复位值。 |
| 7:0 | CRC32IDAT[7:0] | 8 位独立数据寄存器。 通用 8 位数据寄存器。它用于临时存储 1 字节数据。CRC_CRC32CTRL.RESET 复位信号不会影响该寄存器。 |

注：该寄存器不是 CRC 计算的一部分，可用于存储任何数据。

15.4.4 CRC32 控制寄存器 (CRC_CRC32CTRL)

地址偏移: 0x08

复位值: 0x0000 0000

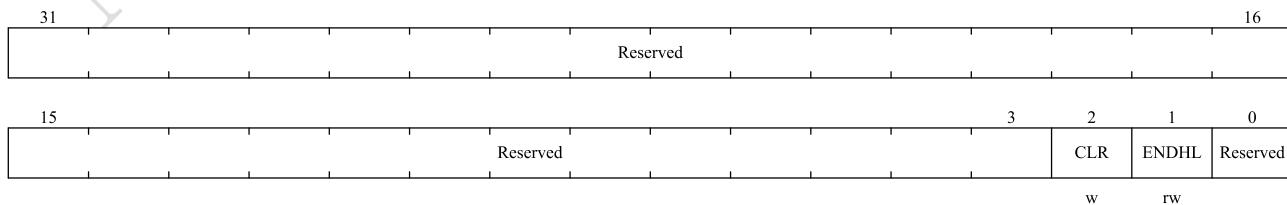


| 位域 | 名称 | 描述 |
|------|----------|--|
| 31:1 | Reserved | 保留, 必须保持复位值。 |
| 0 | RESET | RESET 信号。 它可以复位 CRC32 模块并将数据寄存器设置为 0xFFFF_FFFF。这个复位只能写 1, 硬件会自动清 0。 |

15.4.5 CRC16 控制寄存器 (CRC_CRC16CTRL)

地址偏移: 0x0C

复位值: 0x0000 0000



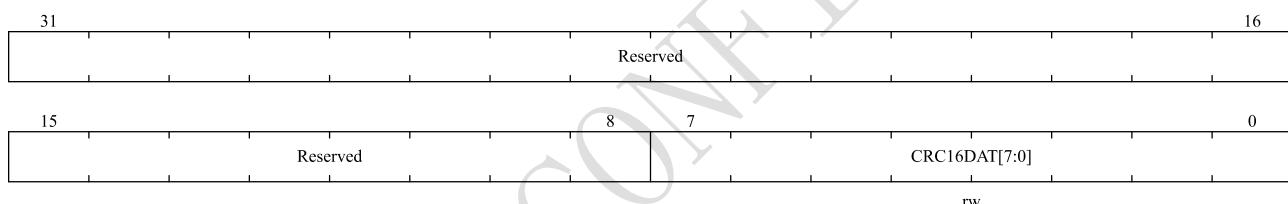
| 位域 | 名称 | 描述 |
|------|----------|---|
| 31:3 | Reserved | 保留, 必须保持复位值。 |
| 2 | CLR | 清除 CRC16 结果。 0: 不清除 1: 清除为默认值 0x0000。将此位设置为 1 只会维持 1 时钟周期, 硬件会自动清零。 (软件读取始终为 0)。 |
| 1 | ENDHL | 要验证的数据从 MSB 或 LSB 开始计算 (配置大小端)。 0: 从 MSB 到 LSB 1: 从 LSB 到 MSB 该位仅用于要验证的数据。 |
| 0 | Reserved | 保留, 必须保持复位值。 |

注: 支持 8 位、16 位、32 位操作

15.4.6 CRC16 待校验数据寄存器 (CRC_CRC16DAT)

地址偏移: 0x10

复位值: 0x0000 0000



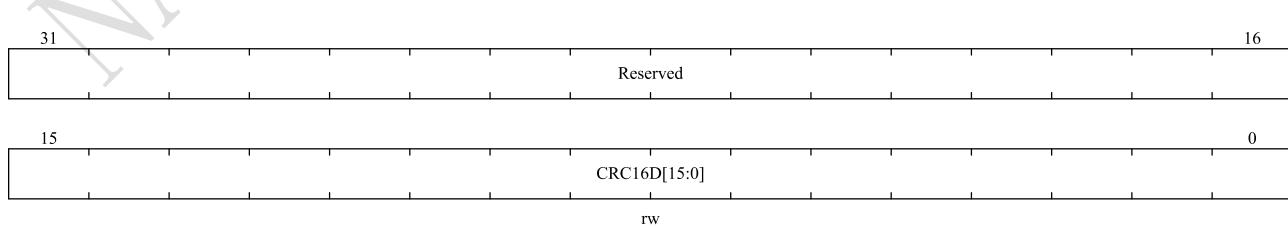
| 位域 | 名称 | 描述 |
|------|---------------|--------------|
| 31:8 | Reserved | 保留, 必须保持复位值。 |
| 7:0 | CRC16DAT[7:0] | 待校验的数据。 |

注: 支持 8 位、16 位、32 位操作

15.4.7 CRC 循环冗余校验码寄存器 (CRC_CRC16D)

地址偏移: 0x14

复位值: 0x0000 0000



| 位域 | 名称 | 描述 |
|-------|----------|--------------|
| 31:16 | Reserved | 保留, 必须保持复位值。 |

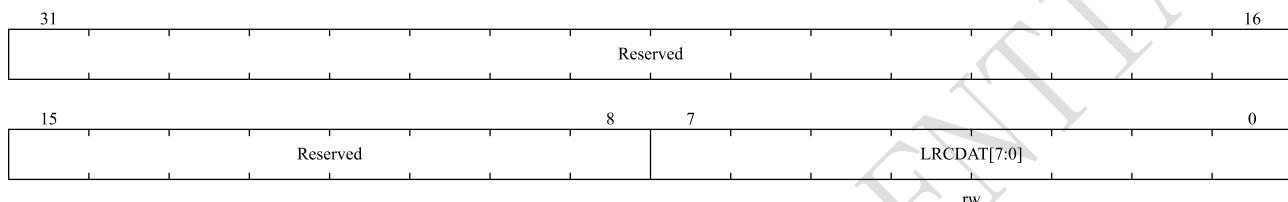
| 位域 | 名称 | 描述 |
|------|--------------|---|
| 15:0 | CRC16D[15:0] | 16 位循环冗余结果值。 每次软件写入 CRC16DAT 寄存器时，来自 CRC16 的 16 位计算数据都会在该寄存器中更新。 |

注：支持 8 位、16 位和 32 位操作（8 位操作必须连续执行两次才能保证 16 位初始值配置正确）

15.4.8 LRC 校验值寄存器 (CRC_LRC)

地址偏移：0x18

复位值：0x0000 0000



| 位域 | 名称 | 描述 |
|------|-------------|---|
| 31:8 | Reserved | 保留，必须保持复位值。 |
| 7:0 | LRCDAT[7:0] | LRC 校验值。 软件使用前需要写入初始值。然后每次写入 CRC_CRC16DAT 的数据都会与 CRC_LCR 寄存器的值进行异或。结果将存储在 CRC_LCR 中。软件读取结果，下次使用前应清除。 |

16 独立看门狗 (IWDG)

16.1 简介

N32A455 内置独立看门狗 (IWDG) 和窗口看门狗 (WWDG) 定时器, 解决软件错误导致的问题。看门狗定时器使用非常灵活, 提高了系统的安全性和定时控制的准确性。

独立看门狗 (IWDG) 由运行在 40KHz 的低速内部时钟 (LSI 时钟) 驱动, 在死循环事件或 MCU 卡死发生时, 它仍然可以运行。这可以提供更高的安全级别、定时精度和看门狗的灵活性。它可以通过重置来解决由于软件故障引起的系统故障。IWDG 最适合需要看门狗在主应用程序之外作为完全独立进程运行但时序精度限制较低的应用程序。

当电源控制寄存器 PWR_CTRL2.IWDGRSTEN 位置‘1’, IWDG 计数器达到 0 时, 会产生系统复位 (若该位置‘0’, IWDG 会计数但不产生复位)。当 PWR_CTRL2.IWDGWPEN 位置‘1’, IWDG 计数器达到 0 时, 能够唤醒低功耗 (若该位置‘0’, IWDG 会计数、复位但只能唤醒 SLEEP/STOP0, 无法唤醒 STOP2/STANDBY)。

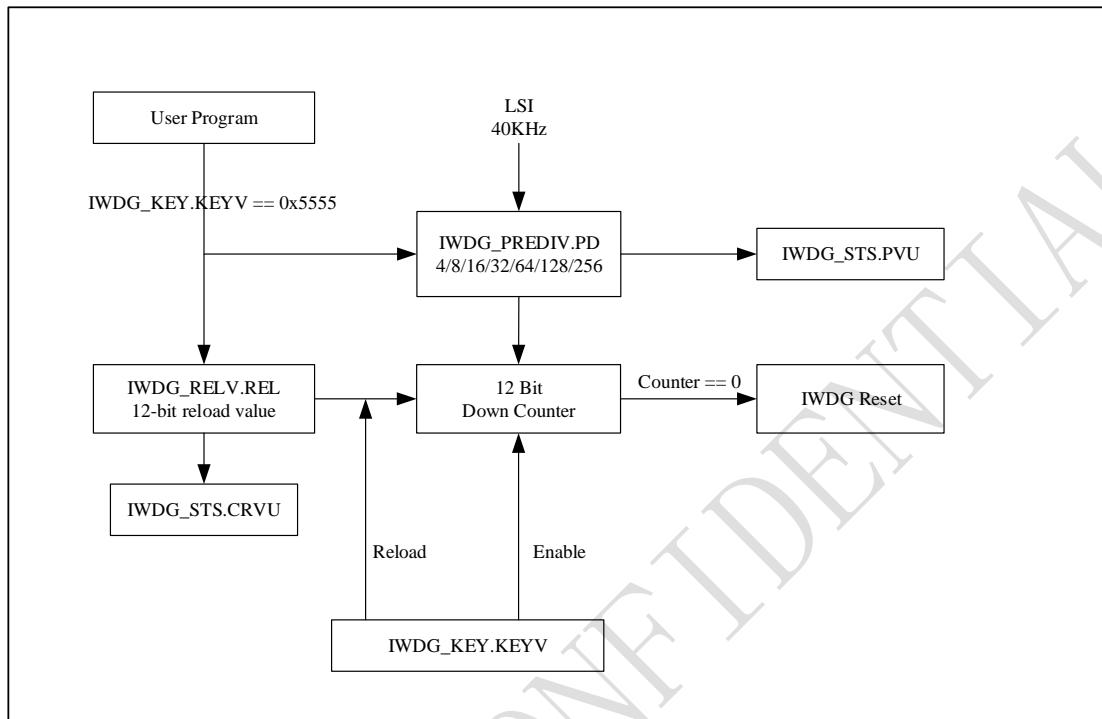
注: 本章基于系统默认值 *IWDGRSTEN=1, IWDGWPEN=1* 讨论。

16.2 主要特征

- 独立的 12 位递减计数器
- RC 振荡器提供独立的时钟源, 可以工作在 SLEEP、STOP0、STOP2 和 STANDBY 模式
- 可以匹配复位和低功耗唤醒
- 当递减计数器达到 0x000 时, 系统复位 (如果激活了看门狗)

16.3 功能描述

图 16-1 独立看门功能框图



注意：看门狗功能在 VDD 供电区，在 SLEEP、STOP0、STOP2 和 STANDBY 模式下仍能正常工作。

要启用 IWDG，我们需要将 0xCCCC 写入 IWDG_KEY.KEYV[15:0]位，计数器开始递减计数。当计数器计数到 0x000 时，它会向 MCU 产生一个复位信号 (IWDG_RESET)。除此之外，只要在复位前将 0xAAAA (重装载请求) 写入 IWDG_KEY.KEYV[15:0]位，计数器值就会设置为 IWDG_RELV.REL[11:0]位中的重装载值并防止看门狗复位整个设备。

如果通过选项字节使能“硬件看门狗定时器”功能，则看门狗将在系统上电后自动开始运行并产生系统复位，除非软件在计数器到达‘0’之前重新加载计数器。

16.3.1 寄存器访问保护

IWDG_PREDIV 和 IWDG_RELV 寄存器是写保护的。要修改这两个寄存器的值，用户需要将 0x5555 写入 IWDG_KEY.KEYV[15:0]位。写入其他值会再次启用写保护。IWDG_STS.PVU 表示预分频值更新是否正在进行，IWDG_STS.CRVU 表示 IWDG 是否正在更新重装载值。当预分频值和/或重装载值正在更新时，硬件设置 IWDG_STS.PVU 位和/或 IWDG_STS.CRVU 位。预分频值和/或重装载值更新完成后，硬件清除 IWDG_STS.PVU 位和/或 IWDG_STS.CRVU 位。

重新加载操作（把 0xAAAA 写入 IWDG_KEY.KEYV[15:0]）也将导致寄存器再次变为写保护。

16.3.2 调试模式

在调试模式下 (Cortex-M4 内核停止)，IWDG 计数器将继续正常工作或停止，具体取决于调试模块中的 DBG_CTRL.IWDG_STOP 位。如果该位设置为“1”，则计数器停止。该位为“0”时，计数器正常工作。详见

26.3.2 调试模块章节。

16.4 用户界面

IWDG 模块用户界面包含 4 个寄存器：密钥寄存器 (IWDG_KEY)、预分频寄存器 (IWDG_PREDIV)、重装载寄存器 (IWDG_RELV) 和状态寄存器 (IWDG_STS)。

16.4.1 操作流程

当 IWDG 从软件（将 0xAAAA 写入 IWDG_KEY.KEYV[15:0] 位）或硬件（清零 FLASH_OB.WDG_SW 位）复位启用时。它从 0xFFFF 开始递减计数。向下计数间隙由预分频 LSI 时钟确定。重新加载计数器后，新一轮递减计数器的值将从 IWDG_RELV.REL[11:0] 中的值开始，而不是 0xFFFF。

程序正常运行时，软件需要在计数器到达 0 前喂狗，开始新一轮的递减计数。当计数器达到 0 时，表示程序故障。IWDG 在这种情况下产生复位信号。

如果用户想要配置 IWDG 预分频和重装载值寄存器，需要先将 0x5555 写入 IWDG_KEY.KEYV[15:0]。然后确认 IWDG_STS.CRVU 位和 IWDG_STS.PVU 位。IWDG_STS.CRVU 位指示重装载值更新正在进行，IWDG_STS.PVU 表示预分频值更新正在进行。只有当这两位为 0 时，用户才能更新相应的值。当更新正在进行时，硬件将相应位设置为 1。此时，读取 IWDG_PREDIV.PD[2:0] 或 IWDG_RELV.REL[11:0] 无效，因为数据需要同步到 LSI 时钟域。从 IWDG_PREDIV.PD[2:0] 或 IWDG_RELV.REL[11:0] 读取的值将在硬件清除 IWDG_STS.PVU 位或 IWDG_STS.CRVU 位后才有效。

如果应用程序使用多个重装载值或预分频值，则必须等到 IWDG_STS.CRVU 位复位后才能更改重装载值，IWDG_STS.PVU 位复位后才能更改预分频值。但是，在更新预分频值和重装载值后，或只更新预分频值后，或只更新重装载值后，无需等到 IWDG_STS.CRVU 位或 IWDG_STS.PVU 位复位后才能继续执行代码（即使在进低功耗模式的情况下，写入操作也会被考虑并完成）。

预分频寄存器和重装载寄存器控制产生复位的时间，如表 16-1。

表 16-1 IWDG 计数最大和最小复位时间

| 预分频因子 | PD[2:0] | 最小时长 (ms) | 最大时长 (ms) |
|-------|---------|------------|-----------------|
| | | RL[11:0]=0 | RL[11:0]=0xFFFF |
| /4 | 000 | 0.1 | 409.6 |
| /8 | 001 | 0.2 | 819.2 |
| /16 | 010 | 0.4 | 1638.4 |
| /32 | 011 | 0.8 | 3276.8 |
| /64 | 100 | 1.6 | 6553.6 |
| /128 | 101 | 3.2 | 13107.2 |
| /256 | 11x | 6.4 | 26214.4 |

16.4.2 IWDG 配置流程

软件配置流程:

1. 将 0x5555 写入 IWDG_KEY.KEYV[15:0]位以启用对 IWDG_PREDIV 和 IWDG_RELV 寄存器的写访问；
 2. 检查 IWDG_STS.PVU 位或 IWDG_STS.CRVU 位，如果为 0，则继续下一步；
 3. 配置 IWDG_PREDIV.PD[2:0]位以选择预分频值；
 4. 配置 IWDG_RELV.REL[11:0]位重装载值；
 5. 将 0xAAAA 写入 IWDG_KEY.KEYV[15:0]位，用重装载值更新计数器；
 6. 通过软件或硬件将 0xCCCC 写入 IWDG_KEY.KEYV[15:0]位来启用看门狗

如果用启想改变预分频值和重装载值，重复步骤 1~5。如果没有，只需按照第 5 步喂狗。

16.5 IWDG 寄存器

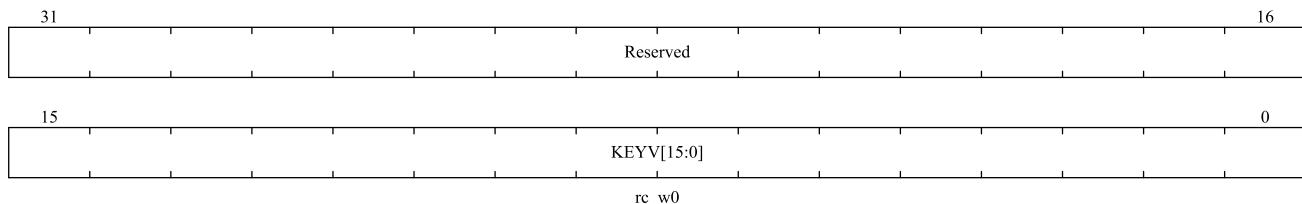
16.5.1 IWDG 寄存器总览

表 16-2 IWDG 寄存器总览

16.5.2 IWDG 密钥寄存器 (IWDG_KEY)

偏移地址: 0x00

复位值: 0x00000000

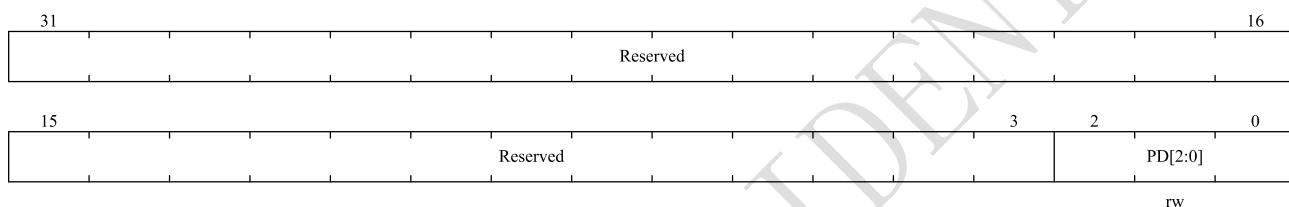


| 位域 | 名称 | 描述 |
|-------|------------|--|
| 31:16 | 保留 | 保留, 必须保持复位值。 |
| 15:0 | KEYV[15:0] | 密钥寄存器: 只有特定的值才能发挥特定的作用 0xCCCC: 启动看门狗计数器, 如果硬件看门狗使能则无效, (如果选择了硬件看门狗, 则不受该命令字限制) 0xAAAA: 用 IWDG_RELV 寄存器中的 REL 值重新加载计数器以防止复位 0x5555: 禁用 IWDG_PREDIV 和 IWDG_RELV 寄存器的写保护 |

16.5.3 IWDG 预分频寄存器 (IWDG_PREDIV)

偏移地址: 0x04

复位值: 0x00000000

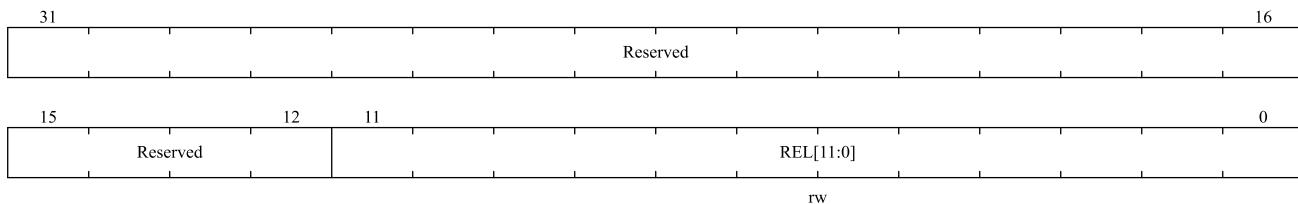


| 位域 | 名称 | 描述 |
|------|---------|--|
| 31:3 | 保留 | 保留, 必须保持复位值。 |
| 2:0 | PD[2:0] | 预分频因子 当 IWDG_KEY.KEYV[15:0]不是 0x5555 时具有写访问保护。IWDG_STS.PVU 位必须为 0, 否则 PD[2:0]值无法更改。分频系数如下: 000: 预分频因子=4 001: 预分频因子=8 010: 预分频因子=16 011: 预分频因子=32 100: 预分频因子=64 101: 预分频因子=128 其他: 预分频因子=256 注意: 读取该寄存器将返回来自 VDD 电压域的预分频值。如果正在进行写操作, 则回读值可能无效。因此, 读取值仅在 IWDG_STS.PVU 位为 0 时有效。 |

16.5.4 IWDG 重装载寄存器 (IWDG_RELV)

偏移地址: 0x08

复位值: 0x00000FFF

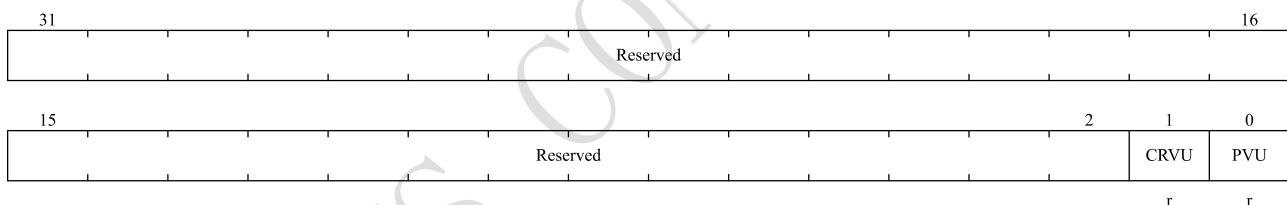


| 位域 | 名称 | 描述 |
|-------|-----------|--|
| 31:12 | 保留 | 保留, 必须保持复位值。 |
| 11:0 | REL[11:0] | <p>看门狗计数器重装载值。</p> <p>带写保护。定义看门狗计数器的重装载值, 每次将 0xAAAA 写入 IWDG_KEY.KEYV[15:0] 位时将其加载到计数器。然后计数器从该值开始倒计时。看门狗超时周期可以根据这个重装载值和时钟预分频值计算, 参考表 16-1。</p> <p>该寄存器只能在 IWDG_STS.CRVU 位为 0 时修改。</p> <p>注意: 读取该寄存器将返回来自 VDD 电压域的重装载值。如果正在进行写操作, 则回读值可能无效。因此, 读取值仅在 IWDG_STS.CRVU 位为 0 时有效。</p> |

16.5.5 IWDG 状态寄存器 (IWDG_STS)

偏移地址: 0x0C

复位值: 0x00000000



| 位域 | 名称 | 描述 |
|------|------|--|
| 31:2 | 保留 | 保留, 必须保持复位值。 |
| 1 | CRVU | <p>看门狗重装载值更新</p> <p>重装载值更新: 该位表示正在更新重装载值。硬件置位, 硬件清零。软件只能在 IWDG_KEY.KEYV[15:0] 位的值为 0x5555 且该位为 0 时尝试更改 IWDG_RELV.REL[11:0] 的值。</p> |
| 0 | PVU | <p>看门狗预分频值更新</p> <p>预分频值更新: 该位表示正在更新预分频值。硬件置位, 硬件清零。软件只能在 IWDG_KEY.KEYV[15:0] 位的值为 0x5555 且该位为 0 时尝试更改 IWDG_PREDIV.PD[2:0] 的值。</p> |

17 窗口看门狗 (WWDG)

17.1 简介

窗口看门狗 (WWDG) 的时钟是由 APB1 时钟频率除以 4096 得到的，通过时间窗口的配置来检测程序运行是否异常。因此，WWDG 适用于精确定时，常用于监控因外部干扰或无法预见的逻辑条件导致应用程序偏离其正常操作顺序的软件故障。当 WWDG 递减计数器在达到窗口寄存器值之前或 WWDG_CTRL.T6 位变为 0 之后刷新时，系统复位发生。

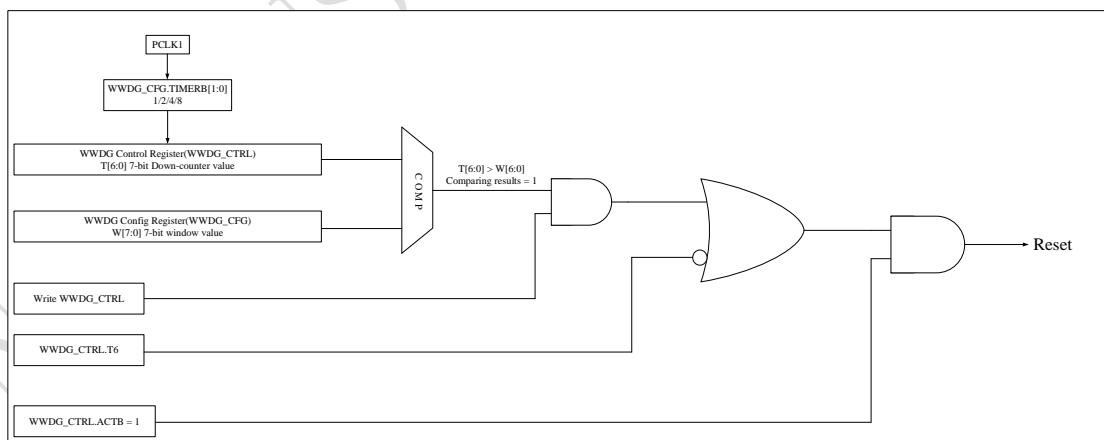
17.2 主要特征

- 7 位独立递减计数器可编程
- WWDG 启用后，在以下情况下会发生复位
 - ◆ 递减计数器的值小于 0x40
 - ◆ 当递减后的计数器值大于窗口寄存器的值时，重新加载
- 提前唤醒中断：如果看门狗启动并且中断使能，当计数值达到 0x40 时会产生唤醒中断 (WWDG_CFG.EWINT)

17.3 功能描述

如果看门狗被激活 (WWDG_CTRL.ACTB)，当 7 位 (WWDG_CTRL.T[6:0]) 递减计数器到达 0x3F (WWDG_CTRL.T6 位清零)，或者软件重新加载计数器时计数器值大于窗口寄存器的值，将产生系统复位。为了避免系统复位，软件在正常运行时必须定期刷新窗口中的计数器值。

图 17-1 窗口看门狗功能框图



设置 WWDG_CTRL.ACTB 位以启用看门狗，此后，WWDG 将保持打开状态，直到发生复位。7 位递减计数器独立运行，无论 WWDG 是否使能，计数器都会持续递减计数。因此，使能看门狗前，需要将 WWDG_CTRL.T[6]位设置为 1，以防止在启用后立即复位。由时钟 APB1 和 WWDG_CFG.TIMERB[1:0]位设置的预分频器值决定了计数器的递减速度。WWDG_CFG.W[6:0]位设置窗口的上限。

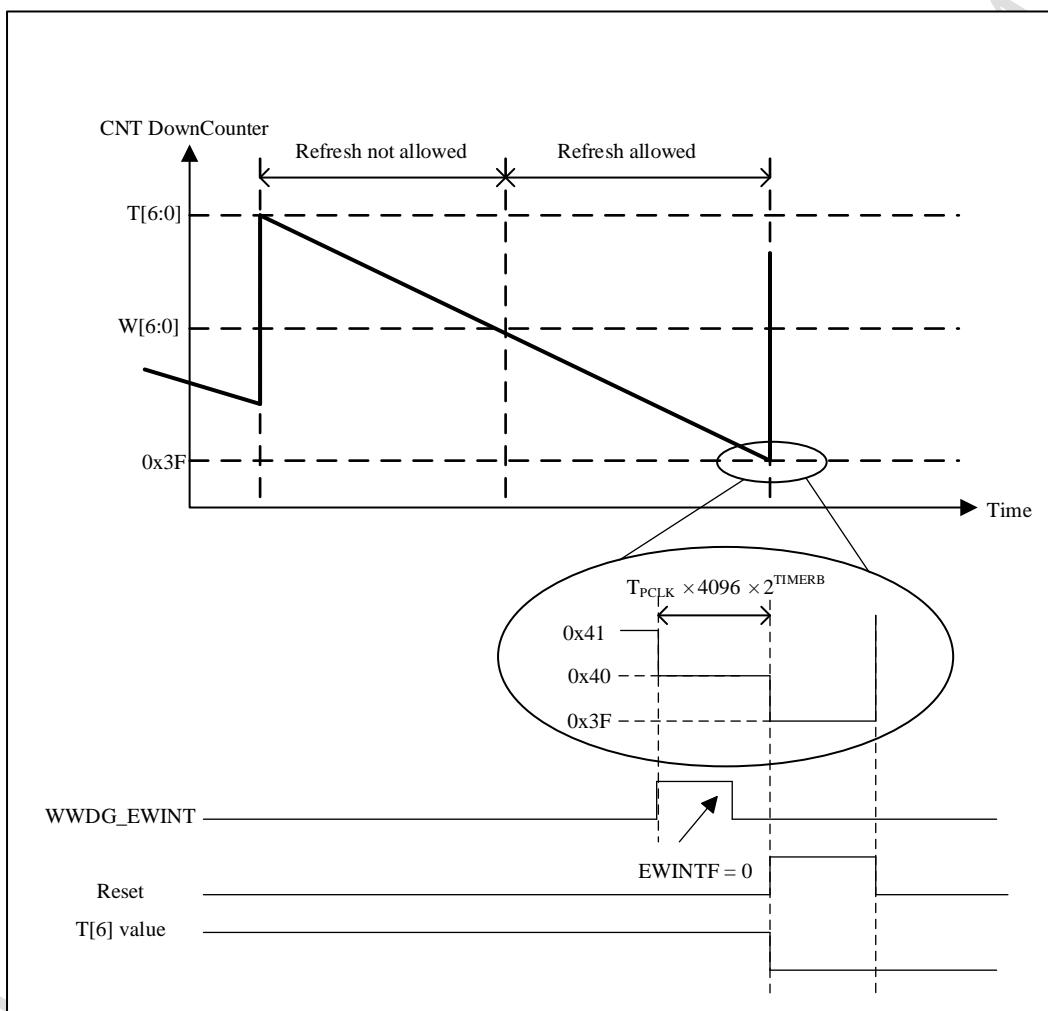
当递减计数器在达到窗口寄存器值之前或 WWDG_CTRL.T6 位变为 0 之后刷新，将产生系统复位。图 17-2

描述了窗口寄存器的工作过程。

设置 WWDG_CFG.EWINT 位以启用提前唤醒中断。当递减计数器到达 0x40 时，将产生中断。您可以分析软件故障的原因或将重要数据保存在相应的中断服务程序（ISR）中，并重新加载计数器以防止 WWDG 复位。将“0”写入 WWDG_STS.EWINTF 位以清除中断。

17.4 刷新看门狗和中断产生的时序

图 17-2 WWDG 的刷新窗口和中断时序



看门狗刷新窗口在 WWDG_CFG.W[6:0] 值（最大值 0x7F）和 0x3F 之间，在此窗口外刷新将向 MCU 生成复位请求。计数器使用分频后的 APB1 时钟从 0x7F 向下计数到 0x3F，最大计数时间和最小计数时间如表 17-1 所示（假设 APB1 时钟为 36MHz），计算公式为：

$$T_{WWDG} = T_{PCLK1} \times 4096 \times 2^{TMRB} \times (T[5:0] + 1)$$

其中：

T_{WWDG}: WWDG 超时

T_{PCLK1} :APB1 时钟间隔, 单位为: ms

PCLK1=36MHz 时的最小-最大超时时长

表 17-1 WWDG 的最大和最小计数时间

| TIMERB | 最大超时 (ms) | 最小超时 (ms) |
|--------|-----------|-----------|
| 0 | 7.28 | 0.113 |
| 1 | 14.56 | 0.227 |
| 2 | 29.12 | 0.455 |
| 3 | 58.25 | 0.910 |

17.5 调试模式

在调试模式下 (Cortex-M4 内核停止), WWDG 计数器将继续正常工作或停止, 具体取决于调试模块中的 DBG_CTRL.WWDG_STOP 位。如果该位设置为“1”, 则计数器停止。该位为“0”时, 计数器正常工作。详见 26.3.2 调试模块章节。

17.6 用户界面

17.6.1 WWDG 配置流程

1. 配置 RCC_APB1PCLKEN.WWDGEN[11]位使能 WWDG 模块的时钟
2. 软件设置 WWDG_CFG.TIMERB[8:7]位来配置 WWDG 的预分频因子
3. 软件配置 WWDG_CTRL.T[6:0]位, 设置计数器的起始值。需要将 WWDG_CTRL.T[6]位设置为 1, 以防止在启用后立即复位
4. 配置 WWDG_CFG.W[6:0]位配置上边界窗口值
5. 设置 WWDG_CTRL.ACTB[7]位使能 WWDG
6. 软件操作 WWDG_STS.EWINTF[0]位清除唤醒中断标志
7. 配置 WWDG_CFG.EWINT[9]位使能提前唤醒中断

17.7 WWDG 寄存器

17.7.1 WWDG 寄存器总览

表 17-2 WWDG 寄存器总览

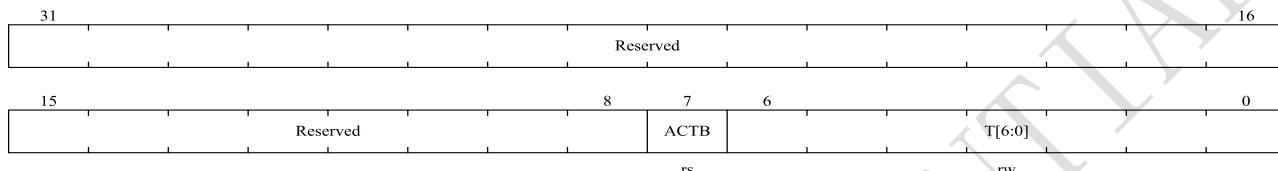
| Offset | Register | 31 | 30 | 29 | 28 | 27 | 26 | 25 | 24 | 23 | 22 | 21 | 20 | 19 | 18 | 17 | 16 | 15 | 14 | 13 | 12 | 11 | 10 | 9 | 8 | 7 | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | 0 |
|--------|-----------|----------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|---|---|---|---|--------|---|---|---|---|---|
| 000h | WWDG_CTRL | Reserved | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | T[6:0] | | | | | |
| | | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 004h | WWDG_CFG | Reserved | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | W[6:0] | | | | | |
| | | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

| Offset | Register | 31 | 30 | 29 | 28 | 27 | 26 | 25 | 24 | 23 | 22 | 21 | 20 | 19 | 18 | 17 | 16 | 15 | 14 | 13 | 12 | 11 | 10 | 9 | 8 | 7 | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | 0 | | | |
|--------|-------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|--|--|--------|
| 008h | WWDG_STS | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | EWINTF |
| | Reset Value | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 0 |

17.7.2 WWDG 控制寄存器 (WWDG_CTRL)

偏移地址: 0x00

复位值: 0x00000007F

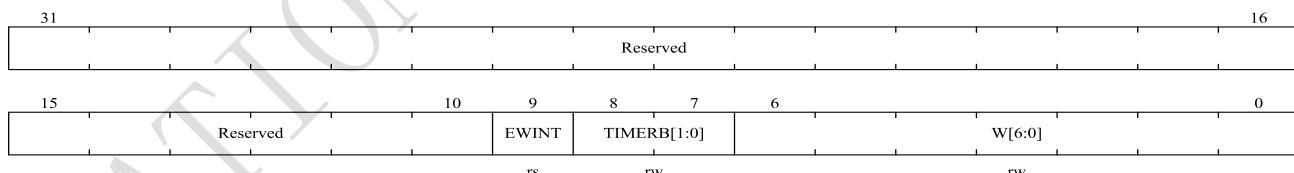


| 位域 | 名称 | 描述 |
|------|--------|---|
| 31:8 | 保留 | 保留, 必须保持复位值。 |
| 7 | ACTB | 激活位 当 ACTB=1 时, 看门狗可以产生复位。该位由软件置位, 仅在复位后由硬件清零。当 ACTB=1 时, 看门狗可以产生复位。 0: 禁用看门狗 1: 启用看门狗 |
| 6:0 | T[6:0] | 这些位包含看门狗计数器的值。它每($4096 \times 2^{\text{TIMERB}}$)个 PCLK1 周期递减。当它从 0x40 翻转到 0x3F (T6 清零) 时, 会产生一个复位。 |

17.7.3 WWDG 配置寄存器 (WWDG_CFG)

偏移地址: 0x04

复位值: 0x00000007F



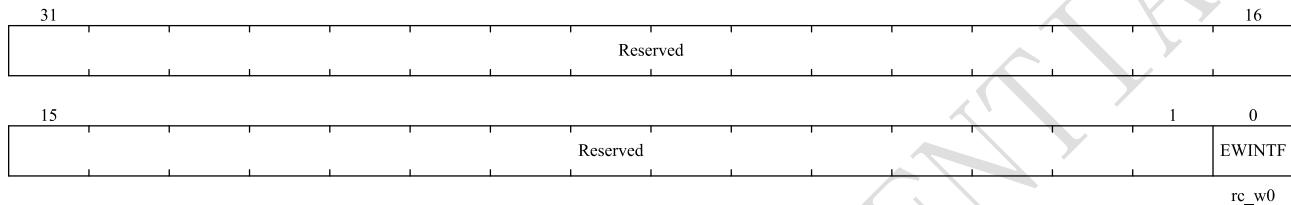
| 位域 | 名称 | 描述 |
|-------|-------------|---|
| 31:10 | 保留 | 保留, 必须保持复位值。 |
| 9 | EWINT | 提前唤醒中断 设置后, 只要计数器达到值 0x40, 就会发生中断。此中断仅在复位后由硬件清除。 |
| 8:7 | TIMERB[1:0] | 时基 预分频器的时基可以修改如下: 00: CK 计数器时钟 (PCLK1 除以 4096) 除以 1 01: CK 计数器时钟 (PCLK1 除以 4096) 除以 2 10: CK 计数器时钟 (PCLK1 除以 4096) 除以 4 |

| 位域 | 名称 | 描述 |
|-----|---------|-----------------------------------|
| | | 11: CK 计数器时钟 (PCLK1 除以 4096) 除以 8 |
| 6:0 | W[13:0] | 7 位窗口值 这些位包含要与递减计数器比较的窗口值。 |

17.7.4 WWDG 状态寄存器 (WWDG_STS)

偏移地址: 0x08

复位值: 0x0000



| 位域 | 名称 | 描述 |
|------|--------|---|
| 31:1 | 保留 | 保留, 必须保持复位值。 |
| 0 | EWINTF | 提前唤醒中断标志 当计数器达到值 0x40 时, 该位由硬件设置。它必须由软件通过写入“0”来清零。写入“1”无效。如果中断未使能, 该位也会置位。 |

18 SDIO 接口 (SDIO)

18.1 SDIO 主要功能

SDIO 接口定义了 SD 卡、SD I/O 卡、多媒体卡 (MMC) 主机接口。它提供了 AHB 外设总线和 SD 存储卡、SDIO 卡、多媒体卡 (MMC) 和 CE-ATA 设备之间的数据传输。其中，所支持的多媒体卡系统规格书由 MMCA 技术委员会发布，可以在多媒体卡协会的网站上 (www.mmca.org) 获得，所支持的 CE-ATA 系统规格书可以在 CE-ATA 工作组的网站上 (www.ce-ata.org) 获得，所支持的 SD 存储卡和 SD I/O 卡系统规格书可以通过 SD 卡协会网站 (www.sdcards.org) 获得。

SDIO 的主要功能如下：

- SD 卡：与 SD 存储卡规格版本 2.0 全兼容。
- SD I/O：与 SD I/O 卡规格版本 2.0 全兼容，有两种不同的数据总线模式：1 位（默认）和 4 位。
- MMC：与多媒体卡系统规格书版本 4.2 及之前的版本全兼容。有三种不同的数据总线模式：1 位（默认）、4 位和 8 位。
- CE-ATA：与 CE-ATA 数字协议版本 1.1 全兼容，完全支持 CE-ATA 功能。
- 在 8 位数据总线模式下可达 48MHz 数据传输速率。
- 支持中断和 DMA 请求。
- 支持用于控制外部双向驱动器的数据和命令输出使能信号。

注意：

1、SDIO 没有 SPI 兼容的通信模式

2、在多媒体卡系统规格书版本 2.11 中，定义 SD 存储卡协议只支持 I/O 模式的 SD 卡或复合卡中的 I/O 部分，不支持 SD 存储设备中很多需要的命令，比如擦除等一些命令在 SDI/O 设备中不起作用，因此 SDIO 也不支持这些命令。另外，SD 存储卡和 SD I/O 卡中有些命令是不同的，SDIO 也不支持这些命令。

SDIO 在同一时间仅支持一个 SD/SDIO/MMC 4.2 卡或 CE-ATA 设备，但可以支持多个 MMC 版本 4.1 或以前版本的卡

18.2 SDIO 总线拓扑

通过传送命令和数据实现 SDIO 总线上的通信。上电复位之后，主机必须通过特殊的基于消息的总线协议来初始化卡。每个消息都是命令/响应结构，另外，某些消息还具有数据令牌。消息各部分具体描述如下：

- 命令：命令串行传输在 CMD 线上，是启动一个操作的令牌，从主机发送到卡
- 响应：响应串行传输在 CMD 线上，作为先前接收到的命令的回应，从卡发送到主机。
- 数据：数据通过数据线传送。数据可以从卡传输到主机或者从主机传输到卡。用于数据传输的数据线的数目可以是 1 (SDIO_DAT0)、4 (SDIO_DAT[3:0]) 或 8 (SDIO_DAT[7:0])。

命令，响应和数据块的结构在卡功能描述章节中介绍。一次数据传输就是一个总线操作。一般操作总是包含一个命令和响应。此外，一些操作还有一个数据令牌。还有一些其他操作直接将他们的信息包含在命令或响应结构中。在这种情况下，操作没有数据令牌。

数据传输命令有两种类型：数据块和数据流。在 SD/SDIO 存储器卡和 CE-ATA 设备上传送的数据是以数据块的形式传输；在 MMC 上传送的数据是以数据块或数据流的形式传输；

数据流和数据块传输定义如下：

- 数据流：命令发起连续的数据流，只有当 CMD 信号线上出现停止命令时，数据传输终止。该模式将命令的开销减少到最低（仅支持 MMC）。
- 数据块：命令成功发送一个数据块后紧跟一个 CRC 校验。读和写操作允许单个或多个块传输。与连续读相同，当 CMD 信号线上出现停止命令时，多块传输终止。

SDIO 总线上的基本操作是命令/响应操作，这种类型的总线事务直接在命令或响应结构中传递它们的信息。另外，有些操作还有数据令牌。卡与设备之间的数据传输通过块完成。各传输类型如下图所示：

图 18-1 SDIO “无响应” 和 “无数据” 操作

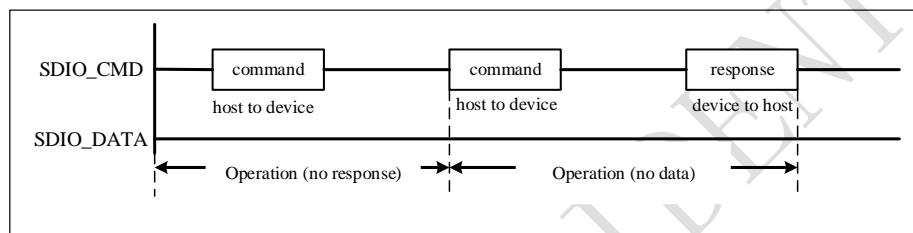


图 18-2 SDIO (多) 数据块读操作

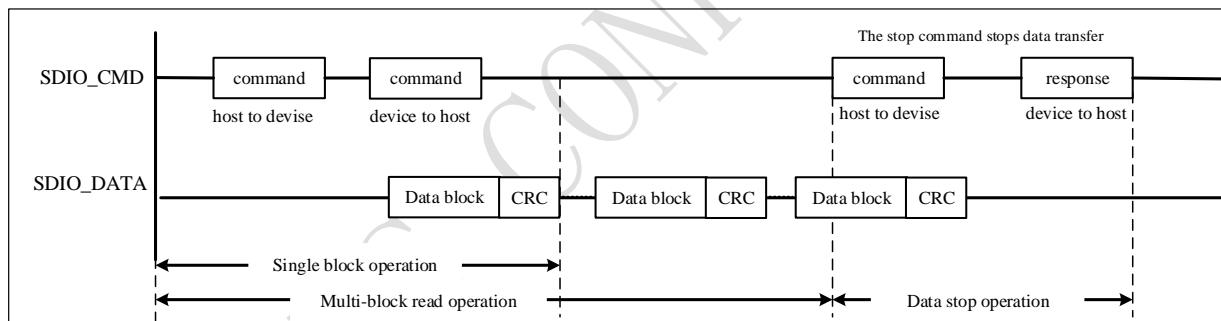
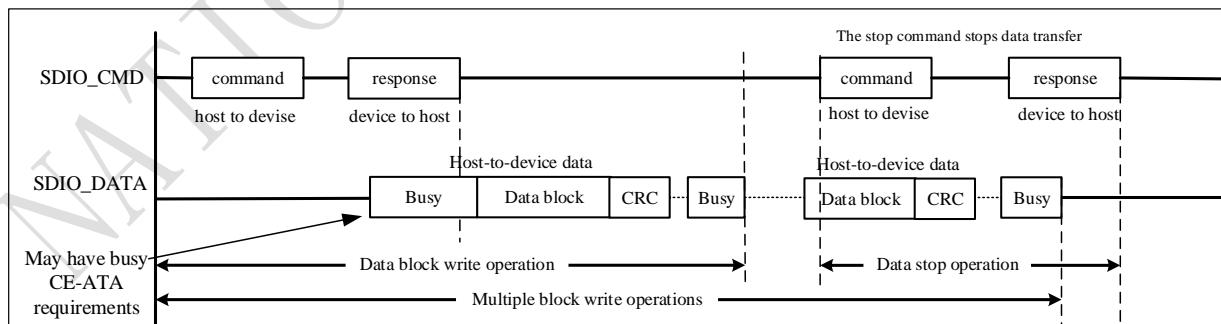


图 18-3 SDIO (多) 数据块写操作



注：当有 Busy (繁忙) 信号时，SDIO (SDIO_DATA 被拉低) 将不会发送任何数据

图 18-4 SDIO 连续读操作

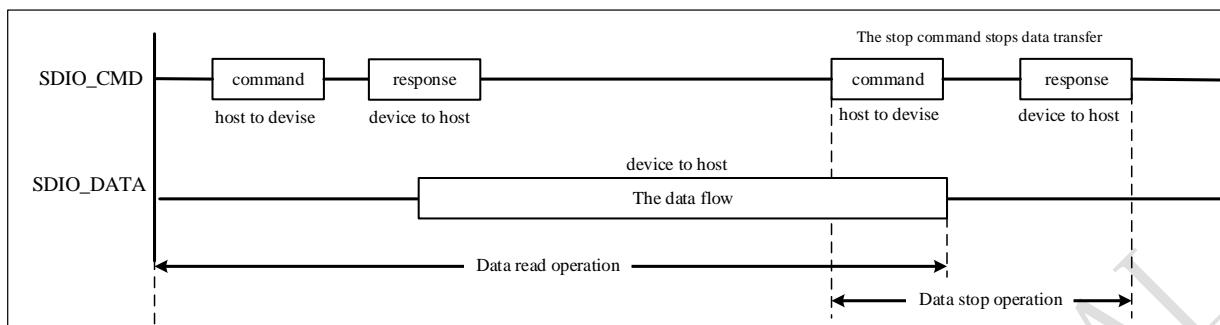
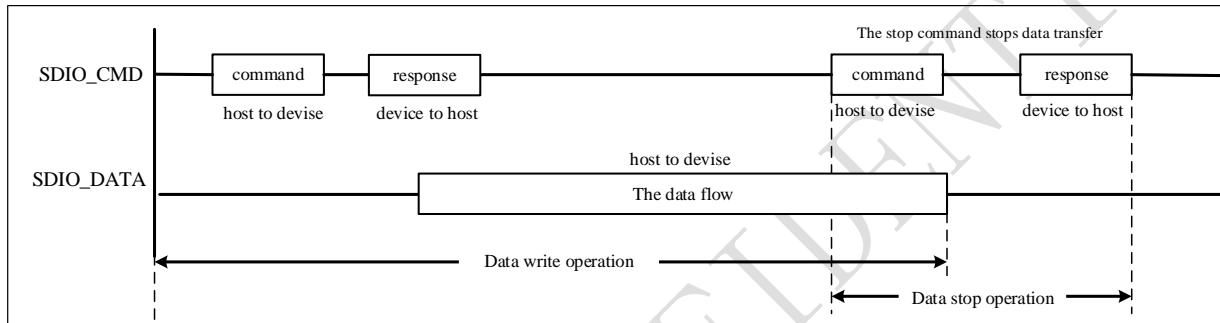


图 18-5 SDIO 连续写操作

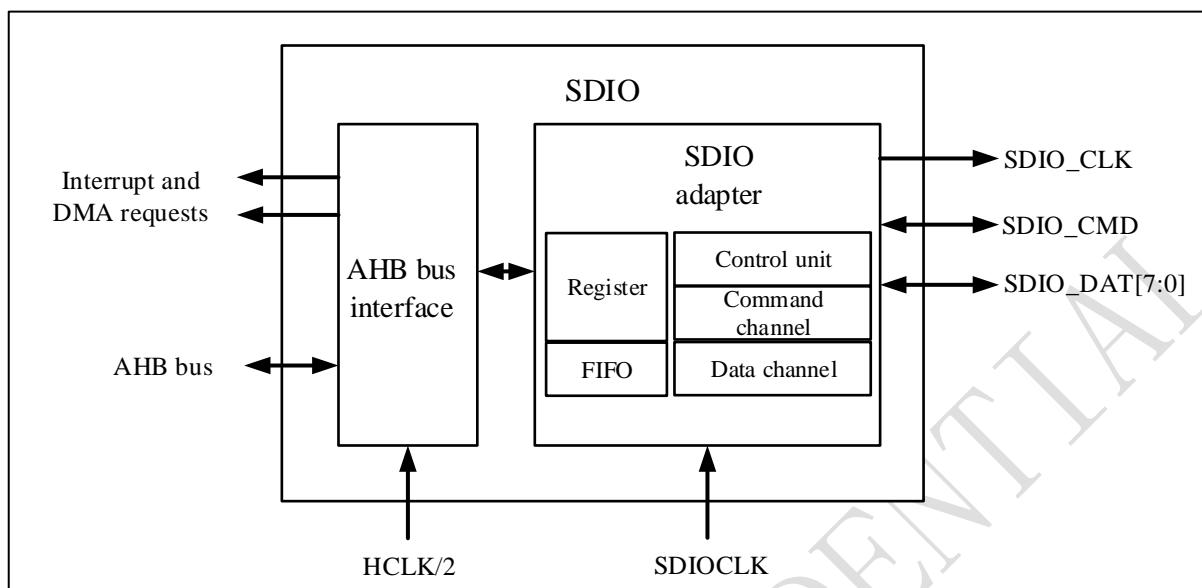


18.3 SDIO 功能描述

图 18-6 为 SDIO 结构框图:

- SDIO 适配器: 由控制单元、命令单元和数据单元组成, 控制单元产生时钟信号, 命令单元和数据单元分别管理命令和数据的传输, 由此来实现 MMC/SD/SD I/O 卡的相关功能。
- AHB 总线接口: 用于操作 SDIO 适配器模块中的寄存器, 控制数据传输的 FIFO 单元, 并产生中断和 DMA 请求信号。

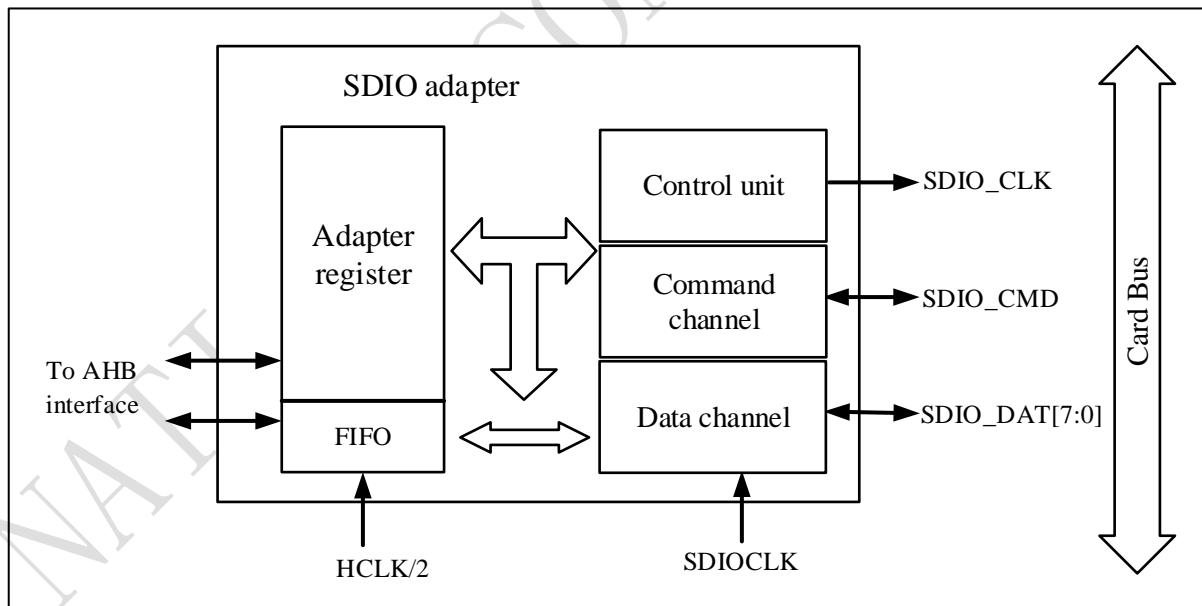
图 18-6 SDIO 框图



18.3.1 SDIO 适配器

下图是简化的 SDIO 适配器框图：

图 18-7 SDIO 适配器



AHB 总线的 HCLK/2 作为适配器寄存器和 FIFO 的时钟，SDIOCLK（等于 HCLK）作为控制单元、命令通道和数据通道的时钟。

SDIO 适配器包含控制单元、适配器寄存器模块、命令单元、数据单元和数据 FIFO 5 个部分。输出到卡总线的信号如下：

- SDIO_DAT[7:0]: 数据信号线使用推挽模式。默认情况下，上电或者复位后仅 SDIO_DAT0 用于数据传

输。SDIO 适配器在初始化主机后可以配置更宽的数据总线用于数据传输，使用 DAT0-DAT3 或者 DAT0-DAT7（仅适用于 MMC V4.2）。注意 MMC 版本 V3.31 和之前版本的协议只支持 1 位数据线（只能用 SDIO_DAT0）。当 SD 或 SD I/O 卡连接到总线时，可以通过主机配置数据传输使用 SDIO_DAT0 或 SDIO_DAT[3:0]。

- SDIO_CMD，两种操作模式：
 - ◆ 用于初始化时的开漏模式（仅用于 MMC 版本 V3.31 或之前版本）
 - ◆ 用于命令传输的推挽模式（SD/SD I/O 卡和 MMC V4.2 在初始化时也使用推挽驱动）
- SDIO_CLK：SDIO 控制器提供给卡的时钟。每个时钟周期在命令线(SDIO_CMD)和所有的数据线上直接发送一位命令或数据。对于不同卡时钟频率的变化范围不同，具体如下：
 - ◆ MMC V3.31 协议，可选 0MHz 至 20MHz 间的时钟频率；
 - ◆ MMC V4.0/4.2 协议，可选 0MHz 至 48MHz 间的时钟频率；
 - ◆ SD 或 SD I/O 卡，可选 0MHz 至 25MHz 间的时钟频率时。

下表是 MMC/SD/SD I/O 卡总线引脚定义：

表 18.1 MMC/SD/SD I/O 卡总线引脚定义

| 引脚 | 方向 | 说明 |
|---------------|----|------------------------------|
| SDIO_CLK | 输出 | MMC/SD/SDIO 卡时钟，从主机至卡的时钟线 |
| SDIO_CMD | 双向 | MMC /SD/SDIO 卡命令，双向的命令/响应信号线 |
| SDIO_DAT[7:0] | 双向 | MMC/SD/SDIO 卡数据，双向的数据总线 |

18.3.1.1 适配器寄存器模块

适配器寄存器模块包含所有 SDIO 相关的寄存器。

18.3.1.2 控制单元

控制单元包含电源管理功能和时钟管理功能用于存储卡时钟。

电源管理是由 SDIO_PWRCTRL 寄存器控制的，实现电源的掉电和上电。共有三种电源阶段：电源关闭、电源启动和电源开。

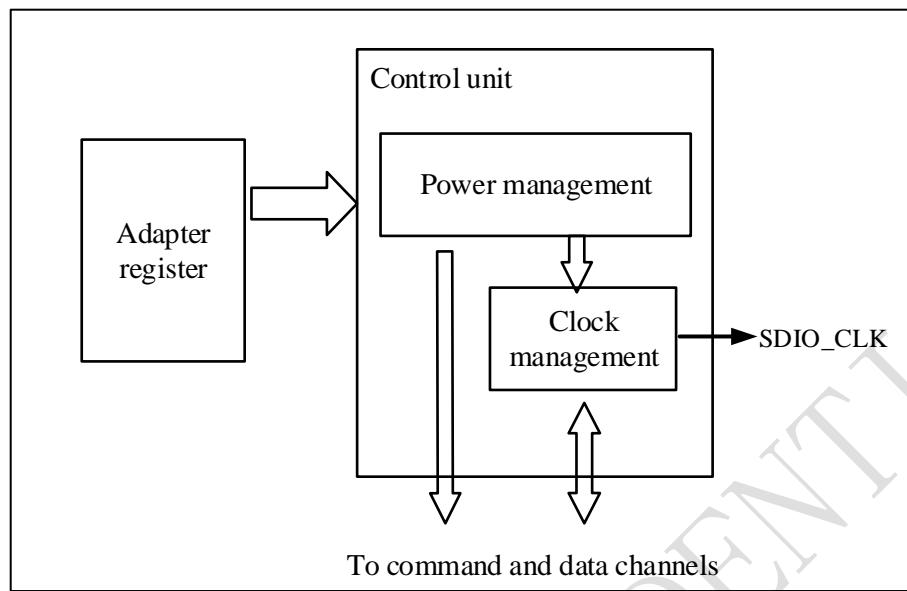
通过设置 SDIO_CLKCTRL.PWRCFG 位来配置省电模式，实现当总线空闲时，关闭 SDIO_CLK。当 SDIO_CLKCTRL.CLKBYP 位为 0 时，SDIO_CLK 由 SDIOCLK 分频得到；当 SDIO_CLKCTRL.CLKBYP 位为 1 时，SDIO_CLK 直接为 SDIOCLK。

通过设置 SDIO_CLKCTRL.HWCLKEN 位使能硬件时钟控制。该功能用于避免 FIFO 下溢和上溢错误，硬件根据系统总线是否繁忙，控制 SDIO_CLK 的开关。当 FIFO 不能接收或发送数据，主机将会关闭 SDIO_CLK 并冻结 SDIO 状态机来避免相关错误。只有状态机能被冻结，但 AHB 接口仍在工作。所以，FIFO 可以通过 AHB 总线访问。

时钟管理子单元产生和控制 SDIO_CLK 信号。SDIO_CLK 输出支持：时钟分频或者时钟旁路模式。

在复位后、电源关闭和电源启动阶段或者启动了省电模式并且卡总线处于空闲状态（命令通道和数据通道子单元进入空闲阶段后的 8 个时钟周期）时，这三种情形下 SDIO_CLK 时钟没有输出。

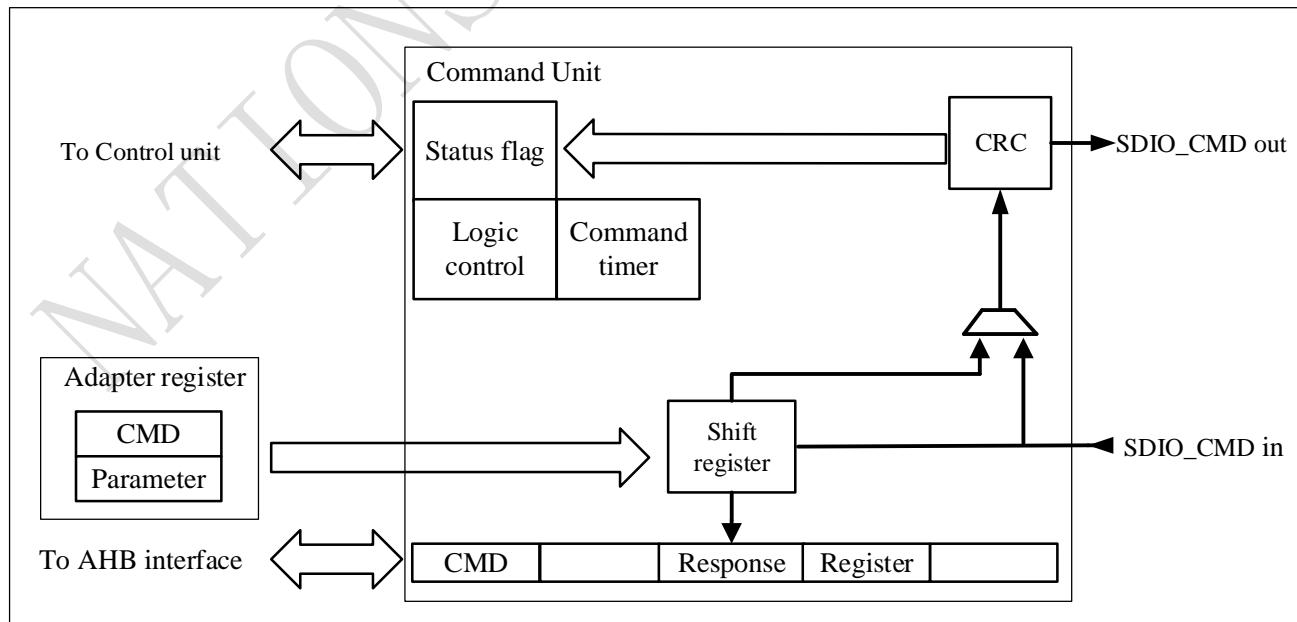
图 18-8 控制单元



18.3.1.3 命令单元

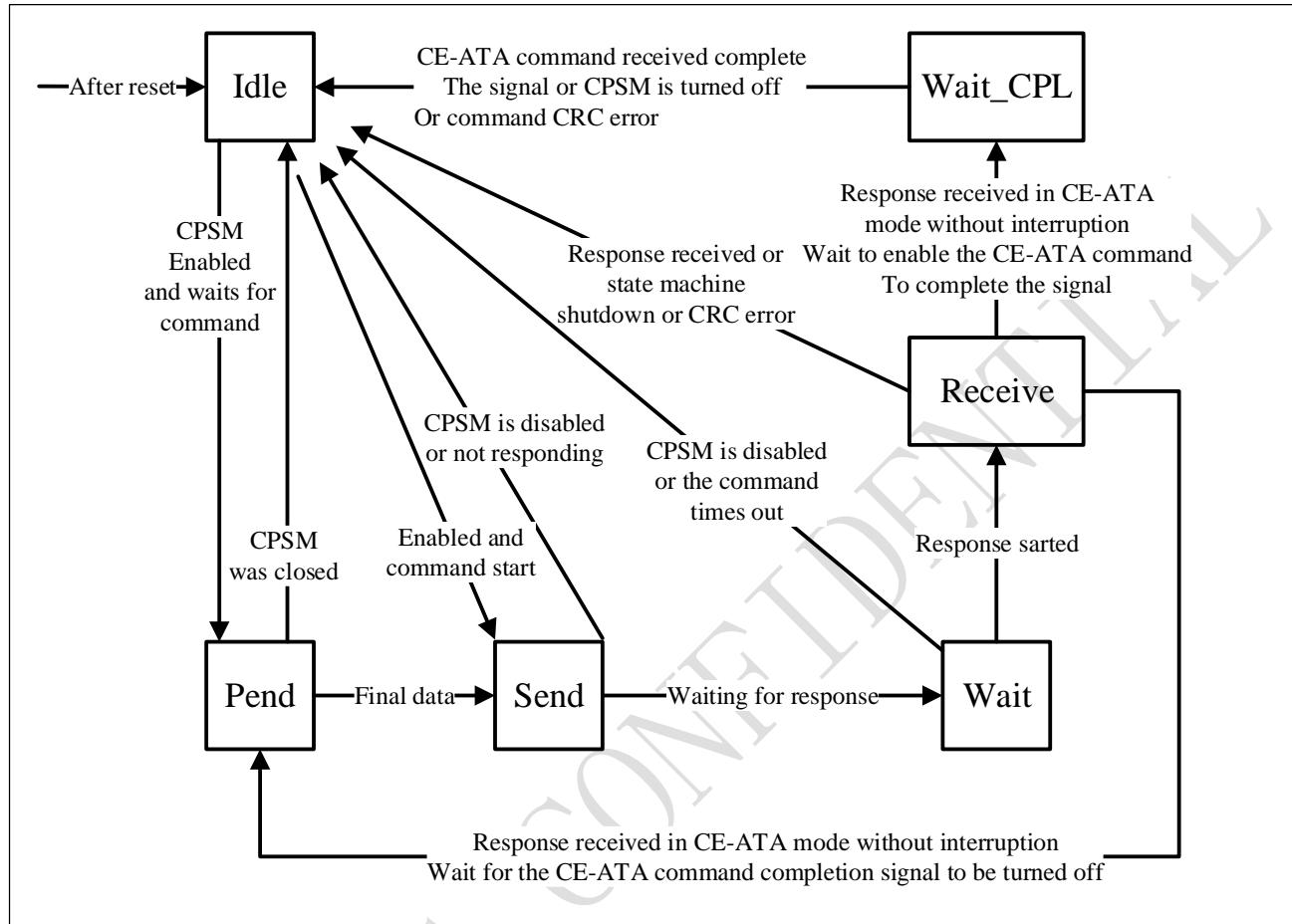
命令单元与卡进行命令发送与接收。命令通道的数据传输流由命令状态机 (CPSM) 控制。在将 SDIO_CMDCTRL.CPSMEN 位设置为 1 并对其进行一次写操作后，命令传输开始。首先通过 SDIO_CMD 线向卡发送一个包含 48 位的命令，每个 SDIO_CLK 发送一个比特数据。这 48 位命令包含 1 位起始位、1 位传输位、6 位命令索引 (由 SDIO_CMDCTRL.CMDIDX 位定义)、32 位参数 (由 SDIO_CMDARG 定义)、7 位 CRC 和 1 位停止位。然后在 SDIO_CMDCTRL.CMDIDX 位不为 0b00 或 0b10 的情况下接收来自卡的响应，响应分为 48 位的短响应和 136 位的长响应，响应都存在 SDIO_RESPONSE0~SDIO_RESPONSE3 寄存器中。命令单元同样可以产生成命令状态标志，这些状态位在 SDIO_STS 寄存器中定义。

图 18-9 SDIO 适配器命令单元



■ 命令单元状态机 (CPSM)

图 18-10 命令单元状态机 (CPSM)



◆ 空闲 (Idle)

该状态为空闲状态, 在系统复位后准备发送命令或者命令状态机(CPSM)被关闭后的状态都属于 Idle 状态, 当命令状态机(CPSM)被使能的时候, 等待数据传输结束位(SDIO_CMDCTRL.WDATEND)使能或者失能都可以进入 Pend 状态。

注意: 命令状态机在空闲状态至少保持 8 个 SDIO_CLK 周期, 以满足 NCC 和 NRC 时序限制。NCC 是两个主机命令之间的最小时间间隔, NRC 是主机命令与卡响应之间的最小时间间隔。

◆ 挂起 (Pend)

该状态为挂起状态, 等待数据传输结束。当数据传输完成后命令状态机由 Pend 状态进入 Send 状态; 当命令状态机(CPSM)被关闭后, CPSM 进入 Idle 状态。

◆ 发送 (Send)

该状态为发送状态, 表示正在发送命令, 如果命令发送后有响应, 则命令状态机进入 Wait 状态, 如果命令发送后无响应, 则命令状态机进入 Idle 状态。

◆ 等待 (Wait)

该状态为等待状态, 等待响应起始位。当进入等待 (Wait) 状态时, 命令定时器开始运行; 如果接收到响应,

即检测到起始位，命令状态机（CPSM）进入 Receive 状态，当命令状态机（CPSM）进入接收（Receive）状态之前，产生了超时，则设置超时标志并进入空闲（Idle）状态。

注意：命令超时时间固定为 64 个 SDIO_CLK 时钟周期。

◆ 接收（Receive）

该状态为接收状态，接收响应并检测 CRC。

在 CE-ATA 模式下收到响应，失能 CE-ATA 中断并且等待 CE-ATA 设备命令完成信号使能后进入 Wait_CPL 状态。

在 CE-ATA 模式下收到响应，失能 CE-ATA 中断并且等待 CE-ATA 设备命令完成信号失能后进入 Pend 状态。

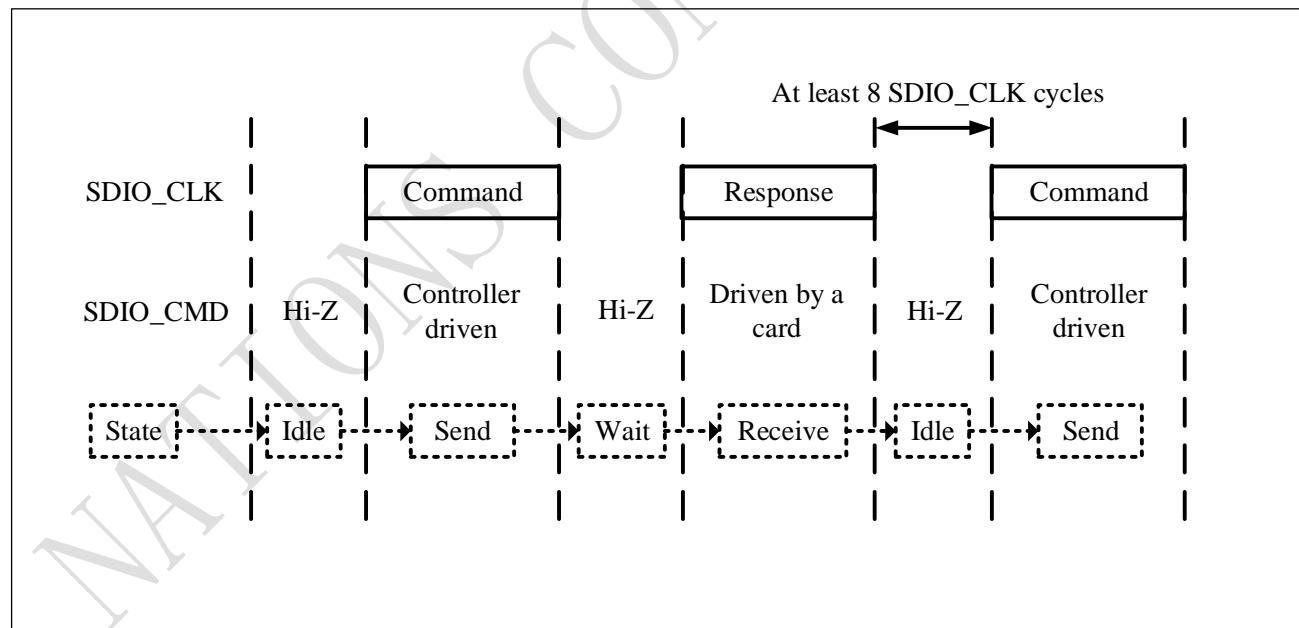
CPSM 被关闭、收到响应或者命令 CRC 检测失败都会进入 Idle 状态。

◆ Wait_CPL

在该状态等待 CE-ATA 设备命令完成信号，当收到 CE-ATA 命令完成信号后进入 Idle 状态。CPSM 被关闭或者命令 CRC 检测失败也会进入 Idle 状态

如果在命令寄存器设置了中断位，则关闭定时器，CPSM 等待某一个卡发出的中断请求。如果命令寄存器中设置挂起位，CPSM 进入挂起（Pend）状态并等待数据通道子单元发出的 CmdPend 信号，在检测到 CmdPend 信号时，CPSM 进入发送（Send）状态，这将触发数据计数器发送停止命令的功能。

图 18-11 SDIO 命令传输



■ 命令寄存器

发至卡的 6 位命令索引和命令类型保存在命令寄存器；命令类型（见 18.7.4 节）决定了是否响应以及响应的类型（48 位还是 136 位）。

表 18-2 命令通道状态标志

| 标志 | 说明 |
|----|----|
|----|----|

| | |
|----------------------|------------------|
| SDIO_STS.CMDRESPRECV | 响应的 CRC 正确 |
| SDIO_STS.CCRCERR | 响应的 CRC 错误 |
| SDIO_STS.CMDSEND | 命令（不需要响应的命令）已经送出 |
| SDIO_STS.CMDTIMEOUT | 响应超时 |
| SDIO_STS.CMDRUN | 正在发送命令 |

CRC 发生器计算 CRC 码之前所有位的 CRC 校验和，包括开始位、发送位、命令索引和命令参数（或卡状态）。对于长响应格式，CRC 校验和计算的是 CID 或 CSD 的前 120 位；注意，长响应格式中的开始位、传输位和 6 个保留位不参与 CRC 计算。

CRC 校验和是一个 7 位的数值：

$$\text{CRC}[6:0] = \text{余数}[(M(x) * x^7) / G(x)]$$

$$G(x) = x^7 + x^3 + 1$$

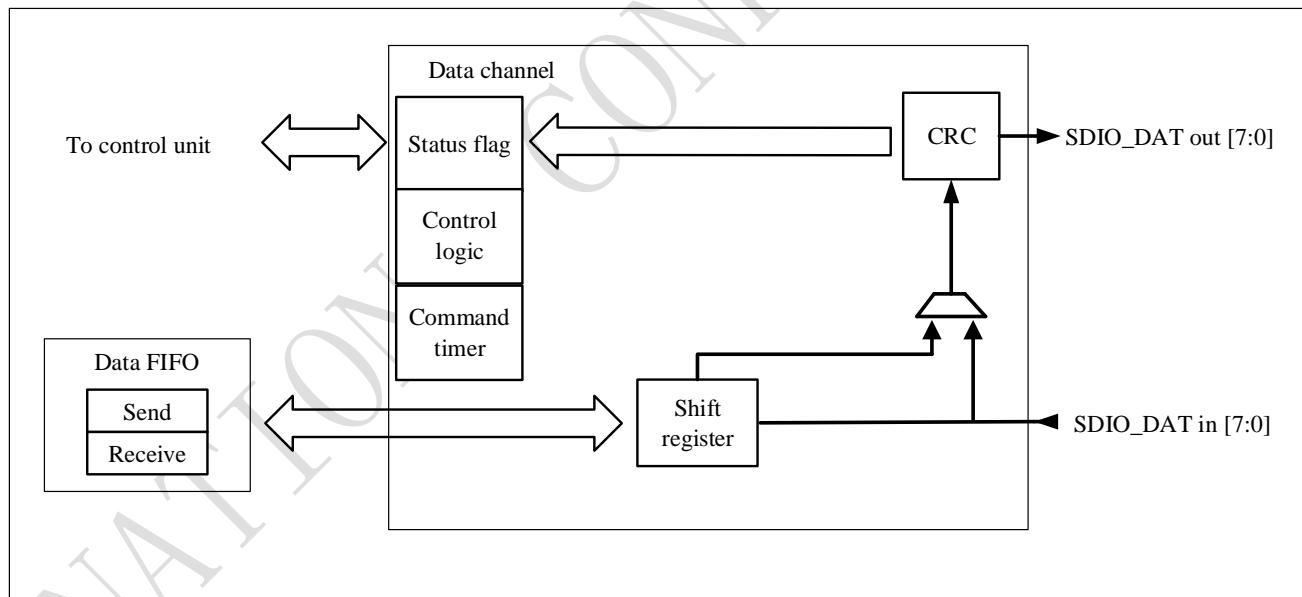
$$M(x) = (\text{开始位}) * x^{39} + \dots + (\text{CRC 前的最后一位}) * x^0, \text{ 或}$$

$$M(x) = (\text{开始位}) * x^{119} + \dots + (\text{CRC 前的最后一位}) * x^0。$$

18.3.1.4 数据通道

主机与卡之间数据是通过数据通道传输。

图 18-12 数据通道



在时钟控制寄存器（SDIO_CLKCTRL）中可以配置卡的数据总线宽度。当数据宽度为 4 位（SDIO_CLKCTRL.BUSMODE 位为 0b01）时，每个时钟周期 SDIO_DAT[3:0] 四条数据信号线上将传输 4 位数据；当数据宽度为 8 位（SDIO_CLKCTRL.BUSMODE 位为 0b10）时，则每个时钟周期 SDIO_DAT[7:0] 八条数据信号线上将传输 8 位数据；当数据宽度为 1 位（SDIO_CLKCTRL.BUSMODE 位为 0b00）或者没有选择总线模式时，每个时钟周期只在 SDIO_DAT0 上传输 1 位数据。

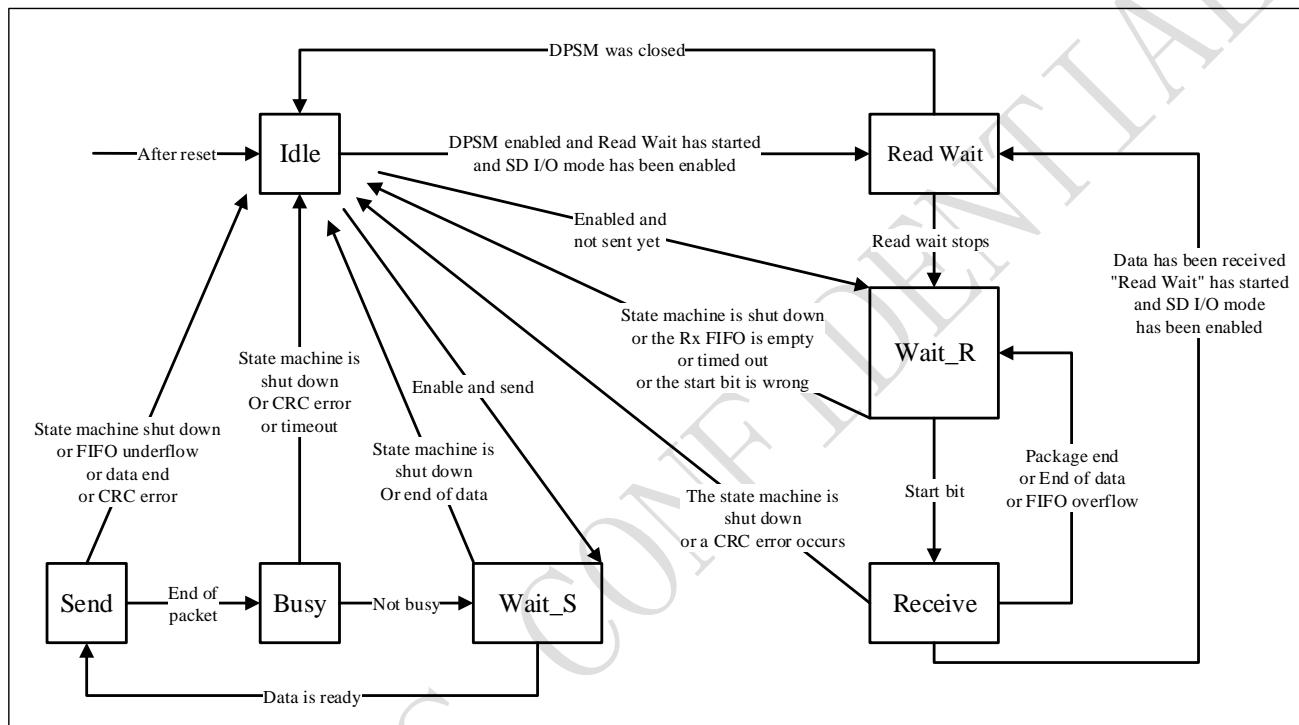
数据传输流由数据通道状态机（DPSM）控制。在对 SDIO_DATCTRL 寄存器进行一次写操作并将 SDIO_DATCTRL.DATEN 位置为 1，数据传输开始。当 SDIO_DATCTRL.DATDIR 位为 0 时，数据是从控制器到卡，DPSM 进入 Wait_S 状态，如果发送 FIFO 中有数据，则 DPSM 进入发送状态，同时数据通道子

单元开始向卡发送数据；当 DATDIR 位为 1 时，数据是从卡到控制器，DPSM 进入 Wait_R 状态，当收到开始位时，则 DPSM 进入接收状态并等待开始位，同时数据通道子单元开始从卡接收数据。数据单元同样可以产生数据状态标志（在 SDIO_STS 寄存器中定义）。

18.3.1.5 数据通道状态机 (DPSM)

数据通道状态机 (DPSM) 工作在 SDIO_CLK 频率，卡总线信号与 SDIO_CLK 的上升沿同步。DPSM 有 6 个状态，如下图所示：

图 18-13 数据通道状态机 (DPSM)



■ 空闲 (Idle):

在该状态，数据通道不工作，等待发送和接收数据，SDIO_DAT[7:0]输出处于高阻状态。当写入数据控制寄存器并设置使能位时，DPSM 为数据计数器加载新的数值，当数据传输方向为主机到卡时进入 Wait_S 状态，当数据传输方向为卡到主机进入 Wait_R 状态。当 DPSM 使能并且读等待已经开始并且使能了 SD I/O 模式进入 Read Wait 状态。

■ 等待接收 (Wait_R):

在该状态，DPSM 等待接收数据的起始位。如果数据超时（计数器等于 0，当接收 FIFO 为空）DPSM 进入到空闲 (Idle) 状态。如果数据计数器不等于 0，DPSM 等待 SDIO_DAT 上的开始位；如果 DPSM 在超时之前接收到一个开始位，它会进入接收 (Receive) 状态并加载数据块计数器。如果 DPSM 在检测到一个开始位前出现超时，或发生开始位错误，DPSM 将进入空闲状态并设置超时状态标志。

■ 接收 (Receive):

该状态 DPSM 接收卡的数据并将其写入数据 FIFO。根据数据控制寄存器中传输模式位的设置，数据传输模式可以是块传输或流传输。

◆ 在块模式下，当数据块计数器达到 0 时，DPSM 等待接收 CRC 码，如果接收到的代码与内部产生

的 CRC 码匹配，则 DPSM 进入 Wait_R 状态，否则设置 CRC 失败状态标志同时 DPSM 进入到空闲状态。

- ◆ 在流模式下，当数据计数器不为 0 时，DPSM 接收数据；当计数器为 0 时，将移位寄存器中的剩余数据写入数据 FIFO，同时 DPSM 进入 Wait_R 状态。如果产生了 FIFO 上溢错误，DPSM 设置 FIFO 的错误标志并进入空闲状态。
- 等待发送 (Wait_S):

在该状态，DPSM 等待数据 FIFO 为空标志无效或者数据传输结束。如果数据计数器为 0，DPSM 进入空闲状态；否则 DPSM 等待数据 FIFO 空标志消失后，进入发送状态。

注意：DPSM 会在 Wait_S 状态保持至少 2 个时钟周期，以满足 NWR 的时序要求，NWR 是接收到卡的响应至主机开始数据传输的间隔。

- 发送 (Send):
- 在该状态，DPSM 开始发送数据到卡设备。根据数据控制寄存器中传输模式位的设置，数据传输模式可以是块传输或流传输：

 - ◆ 在块模式下，当数据块计数器达到 0 时，DPSM 发送内部产生的 CRC 码，然后是结束位，并进入繁忙状态。
 - ◆ 在流模式下，当使能位为高同时数据计数器不为 0 时，DPSM 向卡设备发送数据，然后进入空闲状态。
 - ◆ 如果产生了 FIFO 下溢错误，DPSM 设置 FIFO 的错误标志并进入空闲状态。

- 繁忙 (Busy):

在该状态，DPSM 等待 CRC 状态标志：

- ◆ 如果没有接收到正确的 CRC 状态，则 DPSM 进入空闲状态并设置 CRC 失败状态标志。
- ◆ 如果接收到正确的 CRC 状态，并且卡不繁忙时 (SDIO_DAT0 不为低) DPSM 进入 Wait_S 状态。
- ◆ 如果没有接收到正确的 CRC 状态，则 DPSM 进入空闲状态并设置 CRC 失败状态标志。
- ◆ 如果数据超时 DPSM 则设置数据超时标志并进入空闲状态。
- ◆ 当 DPSM 处于 Wait_R 或繁忙状态时，数据定时器被使能，并能够产生数据超时错误。
- ◆ 发送数据时，如果 DPSM 处于繁忙状态超过程序设置的超时间隔，则产生超时。
- ◆ 接收数据时，如果未收完所有数据，并且 DPSM 处于 Wait_R 状态超过程序设置的超时间隔，则产生超时。

18.3.1.6 数据

数据可以从主机传送到卡，也可以反向传输。

数据在数据线上传输。数据存储在一个 32 字深度的 FIFO 中，每个字为 32 位宽。

表 18-3 数据令牌格式

| 说明 | 开始位 | 数据 | CRC16 | 结束位 |
|-----|-----|----|-------|-----|
| 块数据 | 0 | - | 有 | 1 |

| | | | | |
|-----|---|---|---|---|
| 流数据 | 0 | - | 无 | 1 |
|-----|---|---|---|---|

18.3.1.7 数据 FIFO

数据 FIFO 单元有一个数据缓冲区，用于发送和接收数据缓冲。FIFO 包含一个数据缓冲区以及发送与接收电路，其中缓冲区大小为每字 32 位宽、共 32 个字（深度为 32 字）。数据 FIFO 工作在 AHB 时钟区域（HCLK/2），所有与 SDIO 时钟区域（SDIOCLK）连接的信号都进行了重新同步。

依据 SDIO_STS.TXRUN 和 SDIO_STS.RXRUN 标志，可以关闭 FIFO、使能发送或使能接收。SDIO_STS.TXRUN 和 SDIO_STS.RXRUN 由数据通道子单元设置而且是互斥的：

- 当 SDIO_STS.TXRUN 有效时，发送 FIFO 代表发送电路和数据缓冲区
- 当 SDIO_STS.RXRUN 有效时，接收 FIFO 代表接收电路和数据缓冲区

发送 FIFO：当使能了 SDIO 的发送功能，数据可以通过 AHB 接口写入发送 FIFO。发送 FIFO 有 32 个连续的地址。发送 FIFO 中有一个数据输出寄存器，包含读指针指向的数据字。当数据通道子单元装填了移位寄存器后，它移动读指针至下个数据并传输出数据。如果未使能发送 FIFO，所有的状态标志均处于无效状态。当发送数据时，数据通道子单元设置 SDIO_STS.TXRUN 为有效。

表 18-4 发送 FIFO 状态标志

| 标志 | 说明 |
|--------------------|---|
| SDIO_STS.TFIFOF | 当所有 32 个发送 FIFO 字都有有效的数据时，该标志为高。 |
| SDIO_STS.TFIFOE | 当所有 32 个发送 FIFO 字都没有有效的数据时，该标志为高。 |
| SDIO_STS.TFIFOHE | 当 8 个或更多发送 FIFO 字为空时，该标志为高。该标志可以作为 DMA 请求。 |
| SDIO_STS.TDATVALID | 当发送 FIFO 包含有效数据时，该标志为高。该标志的意思刚好与 TFIFOE 相反。 |
| SDIO_STS.TXURERR | 当发生下溢错误时，该标志为高。写入 SDIO 清除寄存器时清除该标志。 |

接收 FIFO：当数据通道子单元接收到一个数据字，它会把数据写入 FIFO，写操作结束后，写指针自动加一；在另一端，有一个读指针始终指向 FIFO 中的当前数据。如果关闭了接收 FIFO，所有的状态标志会被清除，读写指针也被复位。在接收到数据时数据通道子单元设置 SDIO_STS.RXRUN。下表列出了接收 FIFO 的状态标志。通过 32 个连续的地址可以访问接收 FIFO。

表 18-5 接收 FIFO 状态标志

| 标志 | 说明 |
|--------------------|---|
| SDIO_STS.RFIFOF | 当所有 32 个发送 FIFO 字都有有效的数据时，该标志为高。 |
| SDIO_STS.RFIFOE | 当所有 32 个发送 FIFO 字都没有有效的数据时，该标志为高。 |
| SDIO_STS.RFIFOHF | 当 8 个或更多发送 FIFO 字为空时，该标志为高。该标志可以作为 DMA 请求。 |
| SDIO_STS.RDATVALID | 当发送 FIFO 包含有效数据时，该标志为高。该标志的意思刚好与 TFIFOE 相反。 |
| SDIO_STS.RXURERR | 当发生下溢错误时，该标志为高。写入 SDIO 清除寄存器时清除该标志。 |

18.3.2 SDIO AHB 接口

AHB 接口实现了访问 SDIO 寄存器、数据 FIFO 和生成中断和 DMA 请求。包括数据通道、寄存器译码器和中断/DMA 控制逻辑。

18.3.2.1 SDIO 中断

当至少有一个选中的状态标志为高时，中断控制逻辑产生中断请求。中断使能寄存器允许中断逻辑产生相应

的中断。

18.3.2.2 SDIO/DMA 接口

DMA 接口提供一种方法，可以快速地在 SDIO 数据 FIFO 和存储器之间直接进行数据传输。

下面的例子详细描述了如何实现这种方法。主机控制器使用 CMD24 (WRITE_BLOCK) 从主机传送 512 字节到 MMC 卡，DMA 控制器用于从存储器向 SDIO 的 FIFO 填充数据。

1. 完成卡识别过程
2. 提高 SDIO_CLK 时钟频率
3. 发送 CMD7 命令用于选择卡并配置总线宽度
4. DMA1 的配置过程如下：
 - a) 使能 DMA1 控制器并清除所有的中断标志位
 - b) 用存储器缓冲区的基地址来设置 DMA1 通道 3 的源地址寄存器，用 SDIO_FIFO 寄存器的地址来配置 DMA1 通道 3 的目的地址寄存器。
 - c) 设置 DMA1 通道 3 的控制寄存器（存储器地址指针递增，外设地址指针固定，存储器和外设的数据宽度为字宽度）
 - d) 使能 DMA1 通道 3
5. 写数据块 (CMD24) 的过程如下：
 - a) 设置 SDIO 数据长度寄存器，以字节的形式将数据大小写入到 SDIO_DATLEN 寄存器中，以字节的形式块大小写入到 SDIO_DATCTRL 寄存器中，然后主机以每个块大小 (BLKSIZE) 发送数据。
 - b) 向 SDIO 参数寄存器 SDIO_CMDARG 中写入数据的地址，该地址为卡中需要传送数据的地址
 - c) 设置 SDIO 命令控制寄存器 (SDIO_CMDCTRL)：SDIO_CMDCTRL.CMDIDX 置为 24 (WRITE_BLOCK)；SDIO_CMDCTRL.CMDRESP[1:0] 置为 1 (SDIO 卡主机等待响应)；SDIO_CMDCTRL.CMDRESP 置为 1 (SDIO 卡主机等待短响应)；SDIO_CMDCTRL.CPSMEN 置为 1 (使能 SDIO 卡主机发送命令)，其它字段为其复位值。
 - d) 等待 SDIO_STS.CMDRESPRECV 置位，然后配置 SDIO 数据控制寄存器：SDIO_DATCTRL.DATEN 置为 1 (SDIO 卡主机发送数据使能)；SDIO_DATCTRL.DATDIR 置为 0 (传输方向从控制器到卡)；SDIO_DATCTRL.TRANSMOD 置为 0 (块数据传送)；SDIO_DATCTRL.DMAEN 置为 1 (DMA 使能)；SDIO_DATCTRL.BLKSIZE 置为 9 (512 字节)；其它字段不用设置。
 - e) 等待状态寄存器 SDIO_STS.DATBLKEND 标志位置位。
6. 查询 DMA 通道的使能状态寄存器，确认没有通道仍处于使能状态。

18.4 卡功能描述

18.4.1 工作电压范围确认

所有的卡都可以使用规定范围内的任何电压与 SDIO 卡主机通信，可支持的最小和最大电压 VDD 数值由卡上的操作条件寄存器 (OCR) 定义。在主机和卡之间开始通信时，主机可能不知道卡支持的电压，并且卡可能

不知道主机能否提供其支持的电压。为了验证电压，需要一系列特殊的命令，这些特殊的命令都在相关规范中定义。

在协议规范中定义的命令包括：CMD1 (SEND_OP_COND，用于 MMC)、ACMD41 (SD_APP_OP_COND，用于 SD 存储卡) 和 CMD5 (IO_SEND_OP_COND，用于 SD I/O 卡)。这些命令提供给主机一种机制去识别和拒绝那些不匹配主机所需的 VDD 范围的卡。这是因为内部存储器存储了卡识别号 (CID) 和卡特定数据 (CSD) 的卡，仅能在数据传输 VDD 条件下传送这些信息。当 SDIO 卡主机模块与卡的 VDD 范围不一致时，卡将不能完成识别周期，也不能发送 CSD 数据；因此，在 VDD 范围不匹配时，SDIO 卡主机可以用这些特殊命令去识别和拒绝卡。SDIO 卡主机在执行这几个命令时会产生需要的 VDD 电压。不能在指定的电压范围进行数据传输的卡，将从总线断开并进入非激活状态。

如果该卡不能工作在所提供的电压下，它不返回响应，并保持在空闲状态。初始化 SD 卡时强制性的在 ACMD41 命令之前发送 CMD8。收到 CMD8 是让该卡知道主机支持物理层 2.00 协议及卡支持高版本的功能。如果该卡可以工作在所提供的电压下，响应将返回供电电压和在命令参数中设置的检查模式。

18.4.2 卡复位

CMD0 命令 (GO_IDLE_STATE) 是一个软件复位命令，它设置多媒体卡 (MMC) 和 SD 存储卡进入空闲状态 (Idle State)。不管当前卡的状态是什么。复位命令 (CMD0) 仅用于存储器或组合卡的存储器部分。CMD52 命令 (IO_RW_DIRECT) 复位 SD I/O 卡。在非激活状态 (Inactive State) 的卡不受此命令的影响。

主机上电后，所有的卡都处于空闲状态 (Idle State)，包括之前已在非激活状态 (Inactive State) 的卡。上电后或执行 CMD0 后，所有卡的输出端都处于高阻状态。所有卡的 CMD 线处于输入模式，等待下一个命令的起始位，同时所有卡都被初始化至一个默认的相对卡地址 (RCA=0x0001)，并用默认 400kHz 的时钟频率驱动器 (最低的速度，最大的电流驱动能力)。

18.4.3 卡识别模式

主机复位后进入卡识别模式，寻找总线上的新卡。在卡识别模式下，主机复位所有的卡，验证工作电压范围，识别卡并询问每个卡的相对卡地址 (RCA)。这个操作是在每个卡自己的命令信号线 CMD 上分别完成的。在卡识别模式中的所有数据通信只使用命令信号线 (CMD)。在卡识别过程中，卡应该工作在时钟频率为时钟速率 F_{OD} (400 kHz) 的情况下。

18.4.4 卡识别过程

不同卡的识别过程是不一样的；对于多媒体卡，卡识别过程以时钟频率 F_{OD} 开始，所有 SDIO_CMD 输出为开路驱动，允许在这个过程中的卡的并行连接。

多媒体卡识别过程如下：

1. 总线被使能
2. SDIO 卡主机广播发送 CMD1 (SEND_OP_COND) 命令，并接收操作条件，得到所有卡的操作条件寄存器内容的“线与”
3. 如果卡不兼容则会被置于非激活状态
4. SDIO 卡主机广播发送 CMD2 命令 (ALL_SEND_CID) 至所有激活的卡，所有激活的卡同时串行地发送他们的 CID 号，那些检测到输出的 CID 位与命令线上的数据不相符的卡必须停止发送，并等待下一

个识别周期。最终只有一个卡能够成功地传送完整的 CID 至 SDIO 卡主机并进入识别状态。

5. SDIO 卡主机发送 CMD3 命令 (SET_RELATIVE_ADDR) 至这个卡, 这个新的地址被称为相对卡地址 (RCA), 它比 CID 短, 用于对卡寻址。至此, 这个卡转入待机状态, 并不再响应新的识别过程, 同时它的输出驱动从开路转变为推挽模式。
6. SDIO 卡主机重复上述步骤 4 和步骤 5, 直到收到超时条件。

SD 卡识别过程以时钟频率 F_{od} 开始, 所有 SDIO_CMD 输出为推挽驱动而不是开路驱动, 识别过程如下:

1. 总线被使能
2. SDIO 卡主机广播发送 ACMD41 (SEND_APP_OP_COND) 命令, 得到所有卡的操作条件寄存器的内容
3. 如果卡不兼容, 则会被置于非激活状态
4. SDIO 卡主机广播发送 CMD2 (ALL_SEND_CID) 至所有激活的卡, 所有激活的卡返回他们唯一卡识别号 (CID) 并进入识别状态。
5. SDIO 卡主机发送 CMD3 (SET_RELATIVE_ADDR) 命令和一个地址到一个激活的卡, 这个新的地址被称为相对卡地址 (RCA), 它比 CID 短, 用于对卡寻址。至此, 这个卡转入待机状态。SDIO 卡主机可以再次发送该命令更改 RCA, 卡的 RCA 将是最后一次的赋值。
6. SDIO 卡主机对所有激活的卡重复上述步骤 4 和步骤 5, 直到收到超时条件。

SD I/O 卡识别过程如下:

1. 总线被使能
2. SDIO 卡主机发送 CMD5 (IO_SEND_OP_COND) 命令, 得到卡的操作条件寄存器的内容
3. 如果卡不兼容则会被置于非激活状态
4. SDIO 卡主机发送 CMD3 (SET_RELATIVE_ADDR) 命令和一个地址到一个激活的卡, 这个新的地址被称为相对卡地址 (RCA), 它比 CID 短, 用于对卡寻址。至此, 这个卡转入待机状态。SDIO 卡主机可以再次发送该命令更改 RCA, 卡的 RCA 将是最后一次的赋值。

18.4.5 写数据块

执行写数据块命令 (CMD24-27) 时, 一个或多个数据块从主机传送到卡中, 数据块由起始位 (1 位或 4 位低电平), 数据块, CRC 和结束位 (1 位或 4 位高电平) 组成。如果 CRC 校验错误, 卡通过 SDIO_DAT 信号线指示传输失败, 传送的数据被丢弃而不被写入, 并且所有后续 (在多块写模式下) 传送的数据块将被忽略。

如果主机传送部分数据, 而累计的数据长度未与数据块对齐, 并且块错位是不允许的 (未设置 CSD 的参数 WRITE_BLK_MISALIGN), 卡将在第一个未对齐块的开始之前检测块错位错误 (设置状态寄存器中的 ADDRESS_ERROR 错误位), 并同时忽略后续的数据传输。当主机试图写一个写保护区域时, 写操作也会被中止, 在这种情况下, 卡将设置状态寄存器中 WP_VIOLATION 位。

设置 CID 和 CSD 寄存器不需要事先设置块长度, 传送的数据也是通过 CRC 保护的。如果 CSD 或 CID 寄存器的一部分是存储在 ROM 中, 那么这个不可改变的部分必须与接收缓冲区的对应部分相匹配, 如果有不一致之处, 卡将报告一个错误同时不修改任何寄存器的内容。

有些卡可能需要很长的或者不可预计的时间完成一个数据块的写入, 在接收一个数据块并完成 CRC 检验后, 卡将开始写操作, 如果写缓冲区已经满并且不能再从新的 WRITE_BLOCK 命令接受新的数据时, 它会把

SDIO_DAT 信号线拉低。主机可以在任何时候使用 SEND_STATUS (CMD13) 查询卡的状态，并且卡将返回当前状态。状态位 READY_FOR_DATA 指示卡是否可以接受新的数据或写操作是否还在进行。主机可以通过发送 CMD7 命令不选中该卡（选择另一个卡），而把这个卡置于断开状态，这样可以释放 SDIO_DAT 信号线而不中断未完成的写操作；当重新选择了一个卡，如果写操作仍然在进行并且写缓冲区仍不能使用，它会重新通过拉低 SDIO_DAT 信号线指示忙的状态。

18.4.6 读数据块

读数据块是基于块的数据传输，数据传输的基本单元是数据块，块的大小在 CSD 中 (READ_BL_LEN) 定义。如果 READ_BL_PARTIAL 被设置时，较小的数据块也可以被传输，其开始和结束地址完全包含在 512 个字节的边界中，READ_BL_LEN 定义了物理块的大小。

CMD17 (READ_SINGLE_BLOCK) 表示开始读一个数据块，在传输结束后卡返回到发送状态。CMD18 (READ_MULTIPLE_BLOCK) 开始读连续多个数据块。为了保证数据传输的完整性，每个数据块后都有一个 CRC 校验码。

块长度由 CMD16 设置，可以设置为 512 字节而忽略 READ_BL_LEN 的设置。

主机可以在多数据块读操作的任何时候中止操作，而不管操作的类型。发送停止传输命令 (CMD12) 即可中止操作。由于串行命令传输原因，停止命令有一个执行的延迟。在停止命令的结束位之后停止数据传输。

当使用 CMD18 读到用户区的最后一个块时，主机应该忽略可能会出现的 OUT_OF_RANGE 错误，即使序列是正确的。

如果在多数据块读操作中（任一种类型）卡检测到错误（例如：越界、地址错位或内部错误），它将停止数据传输并仍处于数据状态；此时主机必须发送停止传输命令中止操作。在停止传输命令的响应中报告读错误。如果主机发送停止传输命令时，卡已经传输完一个确定数目的多个数据块操作中的最后一个数据块，因为此时卡已经不在数据状态，主机会得到一个非法命令的响应。如果主机传输的部分块的累积长度不是块对齐并且不允许块错位，卡将在第一个未对齐块的开始检测出块错位，并在状态寄存器中设置 ADDRESS_ERROR 错误标志，中断传输和等待在数据状态的停止命令。

18.4.7 数据流操作（只适用于多媒体卡）

数据流操作包括数据流写和数据流读。在数据流模式，数据按字节传输，同时每个数据块后没有 CRC。

18.4.7.1 数据流写

数据流写 CMD20 (WRITE_DAT_UNTIL_STOP) 开始将数据从主机传输至卡，从起始地址开始连续传输，直到主机发出停止命令。如果允许部分数据块传输 (CSD 参数 WRITE_BL_PARTIAL 被设置)，数据流可以在卡的地址空间中的任意地址启动和停止，否则数据流应只能在数据块的边界启动和停止。由于不预先确定要传输的数据量，所以不能使用 CRC 校验。如果发送数据时达到了存储器的最大地址，即使 SDIO 卡主机没有发送停止命令，随后传输的数据也会被丢弃。

如果主机提供了一个超出范围的地址作为参数传递给 CMD20，卡将拒绝该命令，留在传输状态，并将 ADDRESS_OUT_OF_RANGE 置位；需要注意的是数据流写命令只适用于 1 位总线配置 (SDIO_DAT0 信号线上)。如果 CMD20 在其它总线配置中发出的，它被认为是非法的命令。

数据流写入操作最大的时钟频率由下面给出的公式计算：

$$Max_Write_Frequency = \min(TRAN_SPEED, \frac{8 \times 2^{WRITE_BL_LEN} - 100 \times NSAC}{TAAC \times R2W_FACTOR})$$

- Max_Write_Frequency : 最大写频率
- TRAN_SPEED : 最大的总线时钟频率
- WRITE_BL_LEN : 最大写数据块长度
- NSAC : 以 CLK 周期计算的数据读操作时间 2
- TAAC: 数据读操作时间 1
- R2W_FACTOR: 写速度因子

所有的参数在 CSD 寄存器中定义。如果主机试图使用更高的频率，卡可能无法对数据进行处理，并停止编程，同时将状态寄存器中的错误位 SDIO_STS.RXORERR 置 1，并忽略所有后续的数据传输，等待（在接收数据状态）停止命令。如果主机试图在写保护区域写入数值，写操作将被中止，同时卡将 WP_VIOLATION 位置 1。

18.4.7.2 数据流读

数据流数据传输由 READ_DAT_UNTIL_STOP (CMD11) 命令控制。

这个命令要求卡从指定的地址读出数据，直到 SDIO 卡主机发送一个 STOP_TRANSMISSION (CMD12) 命令为止。由于串行命令传输的延迟，停止命令的执行会有一定的延迟，所以，在停止命令的结束位后数据传送才会停止。如果主机提供了一个超出范围的地址作为参数传递给 CMD11，卡将拒绝该命令，留在传输状态，SDIO 卡主机没有发送停止命令，随后传输的数据也被视为是无效数据。

还有一点需要注意的是数据流读取命令只工作在 1 位总线模式 (SDIO_DAT0 信号线)。如果在其它总线配置中发出 CMD11，则该命令被认为是非法的命令。

数据流读操作的最大时钟频率可以通过下式计算：

$$Max_Read_Frequency = \min(TRAN_SPEED, \frac{8 \times 2^{READ_BL_LEN} - 100 \times NSAC}{TAAC \times R2W_FACTOR})$$

- Max_Read_Frequency: 最大读频率
- TRAN_SPEED: 最大数据传输率
- READ_BL_LEN: 最大读数据块长度
- NSAC: 以 CLK 周期计算的数据读操作时间 2
- TAAC: 数据读操作时间 1
- R2W_FACTOR: 写速度因子

如果主机试图使用更高的频率，卡将不能处理数据传输，此时卡在状态寄存器中设置 SDIO_STS.TXURERR 错误位，中止数据传输并在数据状态等待停止命令。

18.4.8 擦除

擦除包括成组擦除和扇区擦除。多媒体卡的擦除单位是擦除组，卡的基本写入单位是写数据块，擦除组是以写数据块计算的。擦除组的大小是卡的特定参数，在 CSD 中定义。

主机可以擦除连续范围的擦除组，开始擦除操作包含三个步骤。首先，主机使用 ERASE_GROUP_START (CMD35) 命令定义连续范围内的起始地址，然后使用 ERASE_GROUP_END (CMD36) 命令定义连续范围的结束地址，最后发送擦除命令 ERASE (CMD38) 启动擦除操作。在擦除命令中，地址域是以字节为单位的擦除组地址。卡会舍弃未与擦除组大小对齐的部分，把地址边界对齐到擦除组的边界。

如果未按照上述步骤接收到擦除命令 (CMD35、CMD36、CMD38)，卡应该将卡状态寄存器中的 ERASE_SEQ_ERROR 位置位，并重新开始擦除操作 (等待第一个步骤)。

如果收到了除 SEND_STATUS 和擦除命令之外的其它命令，卡应该将状态寄存器中的 ERASE_RESET 置位，重置擦除序列并执行新的命令。

如果擦除范围包含了写保护数据块，则写保护区域不被擦除，只有非保护块才可被擦除，同时卡应该将状态寄存器中的 WP_ERASE_SKIP 状态位置位。

如果主机提供了一个超出范围的地址作为参数传递给 CMD35 或 CMD36，卡将拒绝该命令，同时将状态寄存器中的 ADDRESS_OUT_OF_RANGE 位置位，并重置整个擦除序列。

在整个擦除过程中，卡拉低 SDIO_DAT 信号。实际的擦除时间可能很长，主机可以发送 CMD7 命令解除对卡的选择。

18.4.9 宽总线选择和解除选择

卡在上电后或 GO_IDLE_STATE (CMD0) 命令后默认的总线宽度为 1 位。在主机已经验证了总线上的功能管脚、卡初始化后总线宽度可以被改变。

可以通过 SET_BUS_WIDTH (ACMD6) 命令选择宽总线 (4 位总线宽度) 操作模式，需要注意 SET_BUS_WIDTH (ACMD6) 命令仅在传输状态时才有效，这表明只有在使用 SELECT/DESELECT_CARD (CMD7) 命令选择了卡后才能改变总线宽度。

18.4.10 保护管理

主机支持三种卡保护方式保护数据使其不被擦除或改写：

1. 卡内部写保护
2. 物理写保护开关
3. 密码管理的卡锁操作

18.4.10.1 内部卡的写保护

通过在 CSD 中永久地或临时地设置写保护位，用户可以永久地对整个卡施行写保护以防止卡的数据不被覆盖或擦除。有些卡通过设置 CSD 的 WP_GRP_ENABLE 位设置一组扇区的写保护，这样可以选择只有部分数据被保护。写保护可以通过程序改变。写保护的基本单位是 CSD 参数 WP_GRP_SIZE 个扇区，用户可以通过配置 WP_GRP_SIZE 的值来自定义写保护区域的大小。SET_WRITE_PROT 命令设置指定写保护组的写保护，和 CLR_WRITE_PROT 命令清除指定写保护组的写保护，SEND_WRITE_PROT 命令请求设备发送写保护位的状态，该命令与单数据块读命令类似，卡送出一个包含 32 个写保护位的数据块，该数据块表示从指定地址开始的 32 个写保护组，最后跟着一个 16 位的 CRC 码。写保护命令的地址字段是一个以字节为单位的组地址，卡将截断所有组大小之外的地址。

18.4.10.2 物理写保护开关

在卡的侧面有一个机械的滑动开关，提供给用户设置是否对卡进行写保护。当滑动开关置于小窗口打开的位置时，卡处于写保护状态，当滑动开关置于小窗口关闭的位置时卡没有写保护，用户可以修改卡中内容。在卡的插槽上的对应部位也有一个开关，用来指示卡是否处于写保护状态，需要注意的是这个指示是针对SDIO卡主机模块的，卡的内部电路不知道写保护开关的位置。

18.4.10.3 密码保护

密码保护功能指主机模块可以使用密码对卡实行上锁或解锁。其中密码存储在128位的PWD寄存器中，密码的长度存储在PWDS_LEN的8位寄存器中。这些寄存器是非易失性的，所以掉电后它们的内容也不会丢失。已经上锁的卡支持所有的基本命令，比如SDIO卡主机模块发送的复位、初始化和查询状态等命令都是可以响应的，但是不允许操作卡中的数据。如果卡之前已经设置了密码（即PWDS_LEN的数值不为0），那么在每次上电后卡会自动上锁。

与CSD和CID寄存器写命令相同，上锁/解锁命令也只在传输状态下才有效，这也意味着使用上锁/解锁命令前卡必须先被选中，且在该命令中是没有地址参数的。

卡的上锁/解锁命令的结构和总线操作类型与卡的单数据块写命令相同，命令传输的数据块包含命令所需要的信息，比如密码设置模式、PWD内容和上锁/解锁指示等。在发送卡的上锁/解锁命令之前，SDIO卡主机模块已经定义好了命令数据块的长度，命令的结构见表18-6。

表18-6 上锁/解锁数据结构

| Byte | Bit7 | Bit6 | Bit5 | Bit4 | Bit3 | Bit2 | Bit1 | Bit0 |
|------------|-----------|------|------|------|-------|-------------|---------|---------|
| 0 | 保留（全设置为0） | | | | ERASE | LOCK_UNLOCK | CLR_PWD | SET_PWD |
| 1 | PWDS_LEN | | | | | | | |
| 2 | 密码数据(PWD) | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| PWDS_LEN-1 | | | | | | | | |

- ERASE:** 该位为1将执行强制擦除，所有其它位必须为0。这种情况只发送命令字节，所有该命令的其他字节将被卡忽略。
- LOCK_UNLOCK:** 该位为1表示卡上锁，为0表示解锁。此位可以与SET_PWD同时设置，但不可以与CLR_PWD同时设置。
- CLR_PWD:** 该位置1清除密码数据。
- SET_PWD:** 该位置1保存密码数据至存储器。
- PWDS_LEN:** 这个参数定义了密码的长度，以字节为单位。
- PWD:** 密码数据，依不同的命令，密码数据有所不同。比如，在设置一个新的密码的情况下，它包含这个新的密码，在修改密码的时候，它包含旧的密码和设置的新密码。

以下几节列出了设置/清除密码、上锁/解锁和强制擦除的命令序列。

18.4.10.4 设置密码

1. 如果卡之前未被选中，使用 CMD7 (SELECT/DESELECT_CARD) 命令选择一个卡。
2. 使用 CMD16 (SET_BLOCKLEN) 定义数据块长度，8 位卡上锁/解锁模式，8 位的 PWDS_LEN (以字节为单位)，新密码的字节数。当密码替换完成后，发送命令的数据块的大小必须同时考虑新旧密码的长度。
3. 在数据线上，以合适的数据块长度发送 CMD42 (LOCK/UNLOCK) 命令，并包含 16 位的 CRC 码。数据块包含了操作模式 (SET_PWD=1)、密码长度 (PWDS_LEN) 和密码数据本身 (PWD)。当密码替换完成后，密码长度数值 (PWDS_LEN) 应为新旧两个密码的长度之和，密码数据字段 (PWD) 前面是旧的密码 (正在使用的)，后面是新的密码。
4. 当发送的旧密码不正确 (大小或内容与期望值不匹配)，状态寄存器中的 LOCK_UNLOCK_FAILED 会被置位，并且旧的密码不会改变。如果旧的密码匹配，新的密码数据和长度会分别保存在 PWD 和 PWDS_LEN 中。

密码长度域 (PWDS_LEN) 可以指示当前是否设置了密码，如果该域为零，则表示没有使用密码，只有在该域不为零的时候卡才会在上电时自动上锁。如果设置了密码，在不断电的情况下想立即锁住卡，可以通过设置 LOCK_UNLOCK 位或者发送一个额外的上锁命令。

18.4.10.5 清除密码

1. 如果卡之前未被选中，使用 CMD7 (SELECT/DESELECT_CARD) 命令选择一个卡。
2. 使用 CMD16 (SET_BLOCKLEN) 定义数据块长度，8 位卡上锁/解锁模式，8 位的 PWDS_LEN (以字节为单位)，当前使用的密码的字节数。
3. 在数据线上，以合适的数据块长度发送 CMD42 (LOCK/UNLOCK) 命令，并包含 16 位的 CRC 码。数据块包含了操作模式 (CLR_PWD)、密码长度 (PWDS_LEN) 和密码数据本身 (PWD)。如果密码匹配后，PWD 的内容会被清除，同时 PWDS_LEN 被设为 0。如果 PWD 和 PWDS_LEN 的内容与发送的密码和其大小不匹配，则设置状态寄存器中的 LOCK_UNLOCK_FAILED 错误位，同时密码不变。

18.4.10.6 卡上锁

1. 如果卡之前未被选中，使用 CMD7 (SELECT/DESELECT_CARD) 命令选择一个卡。
2. 使用 CMD16 (SET_BLOCKLEN) 定义数据块长度，8 位卡上锁/解锁模式，8 位的 PWDS_LEN 表示当前使用的密码的字节数。
3. 在数据线上，以合适的数据块长度发送 CMD42 (LOCK/UNLOCK) 命令，并包含 16 位的 CRC 码。数据块包含了操作模式 (LOCK_UNLOCK=1)、密码长度 (PWDS_LEN) 和密码数据本身 (PWD)。
4. 如果 PWD 内容等于发送的密码，卡将被上锁，并将状态寄存器中的 CARD_IS_LOCKED 状态位置位。如果送出的密码与期望的密码 (长度或内容) 不吻合，则状态寄存器中的 LOCK_UNLOCK_FAILED 错误位被置位，同时上锁操作失败。

设置密码和为卡上锁可以在同一个操作序列中同时进行，这种情况下卡主机模块先按照前述的步骤设置密码，需要注意的是在发送新密码命令的第 3 步要设置 LOCK_UNLOCK 位。

只有曾经设置过密码 (PWDS_LEN 不为 0) 的卡在上电复位时才会自动上锁。对已经上锁的卡或者对没有密码的卡执行上锁操作会失败，并将状态寄存器中的 LOCK_UNLOCK_FAILED 错误位置位。

18.4.10.7 卡解锁

1. 如果卡之前未被选中，使用 CMD7 (SELECT/DESELECT_CARD) 命令选择一个卡。
2. 使用 CMD16 (SET_BLOCKLEN) 定义数据块长度，8 位卡上锁/解锁模式，8 位的 PWDS_LEN (以字节为单位)，当前使用的密码的字节数。
3. 在数据线上，以合适的数据块长度发送 CMD42 (LOCK/UNLOCK) 命令，并包含 16 位的 CRC 码。数据块包含了操作模式 (LOCK_UNLOCK=0)、密码长度 (PWDS_LEN) 和密码数据本身 (PWD)。
4. 如果送出的密码与期望的密码 (长度或内容) 不吻合，则将状态寄存器中的 LOCK_UNLOCK_FAILED 错误位置 1，同时卡仍保持上锁状态。当密码匹配后，卡锁被解除，同时将状态寄存器中的 CARD_IS_LOCKED 位清除。

如果解锁状态只在当前的供电过程中有效，只要不清除 PWD，下次上电后卡还是会自动上锁。

试图对已经解锁的卡执行解锁操作会导致操作失败，并将状态寄存器中的 LOCK_UNLOCK_FAILED 错误位置 1。

18.4.10.8 强制擦除

强制擦除操作可以擦除卡中所有的数据和密码。如果用户忘记了密码，可以通过强制擦除操作使卡重新可用。

1. 如果卡之前未被选中，使用 CMD7 (SELECT/DESELECT_CARD) 命令选择一个卡。
2. 使用 CMD16 (SET_BLOCKLEN) 定义数据块长度，8 位卡上锁/解锁模式，8 位的 PWDS_LEN 表示当前使用的密码的字节数。
3. 在数据线上以合适的数据块长度发送 CMD42 (LOCK/UNLOCK) 命令，并包含 16 位的 CRC 码。数据块包含了操作模式 (ERASE=1)，所有其它位为 0。
4. 当且仅当数据域中 ERASE 位是 1 时，卡中的所有内容将被擦除，包括 PWD 和 PWDS_LEN 域。擦除完后卡不再被上锁。如果有任何其它位不为 0，将状态寄存器中的 LOCK_UNLOCK_FAILED 错误位置位，卡中的数据保持不变，同时卡仍保持上锁状态。

注意：试图对已经解锁的卡执行擦除操作会导致操作失败，并将状态寄存器中的 LOCK_UNLOCK_FAILED 错误位置位。

18.4.11 卡状态寄存器

18.4.11.1 卡状态寄存器

卡状态指执行命令的错误和状态信息，在响应中指示。

一般情况下，卡接收到命令后会返回与该命令相关的信息给卡主机。这些状态信息有可能存在本地的状态寄存器中。这些状态信息叫做卡的状态域，响应格式 R1 就包含了一个名为卡状态的 32 位字段。

表 18-7 定义了不同的状态信息。

表 18-7 卡状态

| 位 | 名称 | 类型 | 数值 | 说明 | 清除条件 |
|----|----------------------|-----|---------|--------------------|------|
| 31 | ADDRESS_OUT_OF_RANGE | EXR | '0'=无错误 | 命令中的地址参数超出了卡的允许范围。 | C |

| 位 | 名称 | 类型 | 数值 | 说明 | 清除条件 |
|----|--------------------|----|--------------------|--|------|
| | | | ‘1’=错误 | 一个数据块或数据流读/写操作（即使从一个合法的地址开始）试图读或写超出卡的容量的部分。 | |
| 30 | ADDRESS_MISALIGN | | ‘0’=无错误 ‘1’=错误 | 命令中的地址参数（与当前的数据块长度对照）定义的第一个数据块未与卡的物理块对齐。 一个数据块或数据流读/写操作（即使从一个合法的地址开始）试图读或写未与物理块对齐的数据块。 | C |
| 29 | BLOCK_LEN_ERROR | | ‘0’=无错误 ‘1’=错误 | SET_BLOCKLEN 命令的参数超出了卡的最大允许范围，或先前定义的数据块长度对于当前命令来说是非法的（例如：主机发出一个写命令，当前的块长度小于卡所允许的最小长度，同时又不允许写入部分数据块）。 | C |
| 28 | ERASE_SEQ_ERROR | | ‘0’=无错误 ‘1’=错误 | 发送擦除命令的顺序错误。 | C |
| 27 | ERASE_PARAM | EX | ‘0’=无错误 ‘1’=错误 | 擦除时选择了非法的擦除组。 | C |
| 26 | WP_VIOLATION | EX | ‘0’=无错误 ‘1’=错误 | 试图对一个写保护的数据块编程。 | C |
| 25 | CARD_IS_LOCKED | SR | ‘0’=卡未锁 ‘1’=卡已锁 | 当设置了该位，表示卡已经被锁住。 | A |
| 24 | LOCK_UNLOCK_FAILED | EX | ‘0’=无错误 ‘1’=错误 | 在上锁/解锁中有命令的顺序错误或检测到密码错误。 | C |
| 23 | COM_CRC_ERROR | ER | ‘0’=无错误 ‘1’=错误 | 之前的命令中 CRC 校验错误。 | B |
| 22 | ILLEGAL_COMMAND | ER | ‘0’=无错误 ‘1’=错误 | 对于当前的卡状态，命令非法。 | B |
| 21 | CARD_ECC_FAILED | EX | ‘0’=成功 ‘1’=失败 | 卡的内部实施了 ECC 校验，但在更正数据时失败。 | C |
| 20 | CC_ERROR | ER | ‘0’=无错误 ‘1’=错误 | （标准中未定义）卡内部发生错误，与主机的命令无关。 | C |
| 19 | ERROR | EX | ‘0’=无错误 ‘1’=错误 | 产生了与执行上一个主机命令相关的（标准中未定义）卡内部的错误（例如：读或写错误）。 | C |
| 18 | 保留 | | | | |
| 17 | 保留 | | | | |
| 16 | CID/CSD_OVERWRITE | EX | ‘0’=无错误 ‘1’=错误 | 可以是任何一个下述的错误： 已经写入了 CID 寄存器，不能覆盖 CSD 的只读部分与卡的内容不匹配 试图进行拷贝或永久写保护的反向操作，即恢复原状或解除写保护。 | C |
| 15 | WP_ERASE_SKIP | EX | ‘0’=未保护 ‘1’=已保护 | 遇到已经存在的写保护数据块，仅有部分地址空间被擦除 | C |

| 位 | 名称 | 类型 | 数值 | 说明 | 清除条件 |
|------|-------------------|----|---|---|------|
| 14 | CARD_ECC_DISABLED | SX | '0'=允许 '1'=不允许 | 执行命令时没有使用内部的 ECC。 | A |
| 13 | ERASE_RESET | | '0'=清除 '1'=设置 | 因为收到一个擦除顺序之外的命令 (非 CMD35、CMD36、CMD38 或 CMD13 命令), 进入擦除过程的序列被中止。 | C |
| 12:9 | CURRENT_STATE | SR | '0'=空闲 '1'=就绪 '2'=识别 '3'=待机 '4'=发送 '5'=数据 '6'=接收 '7'=编程 '8'=断开 '9'=忙测试 '10~15'=保留 | 当收到命令时卡内状态机的状态。如果命令的执行导致状态的变化, 这个变化将会在下个命令的响应中反映出来。这四个位按十进制数 0 至 15 解释。 | B |
| 8 | READY_FOR_DATA | SR | '0'=未就绪 '1'=就绪 | 与总线上的缓冲器空的信号相对应。 | |
| 7 | SWITCH_ERROR | ER | '0'=无错误 '1'=转换错 | 卡没有按照 SWITCH 命令的要求转换到希望的模式。 | B |
| 6 | 保留 | | | | |
| 5 | APP_CMD | SR | '0'=不允许 '1'=允许 | 卡期望 ACMD, 或指示命令已经被解释为 ACMD 命令。 | C |
| 4 | 保留给 SDI/O 卡 | | | | |
| 3 | AKE_SEQ_ERROR | ER | '0'=无错误 '1'=错误 | 验证的顺序有错误。 | C |
| 2 | 保留给与应用相关的命令 | | | | |
| 1,0 | 保留给生产厂家的测试模式 | | | | |

表中有关类型和清除条件域的缩写定义如下:

类型:

- E: 错误位。向主机发送错误条件。这些位一旦响应 (报告错误) 被发出去就会清除。
- S: 状态位。这些位仅作为信息字段, 并不因为对命令的响应而改变。这些位是持久性的, 它们根据卡状态被设置或被清除。
- R/X: R 和 X 都是检测位, 区别在于 R 表示卡在命令解释和验证阶段 (响应模式) 检测到异常, 而 X 表示卡在命令执行阶段 (执行模式) 检测到异常。

SDIO 卡主机可以通过发送状态命令读出这些位来查询卡的状态。

清除条件:

- A: 依据卡的当前状态
- B: 始终与之前的命令相关。接收到正确的命令即可清除, 这种方式具有一个命令的延迟。
- C: 读可清除

18.4.11.2 SD 状态寄存器

SD 状态不仅包含了与 SD 存储器卡特定功能相关状态位, 还包含了一些与未来应用相关状态位。SD 状态的长度是一个 512 位的数据块。收到 ACMD13 命令 (CMD55, 然后是 CMD13) 后, SD 状态寄存器的内容被传送到 SDIO 卡主机。但是需要注意的是 ACMD13 命令只能在卡处于传输状态时 (卡已被选择) 才可以被发送。

表 18-8 定义了不同的 SD 状态寄存器信息。

表 18-8 SD 状态

| 位 | 名称 | 类型 | 数值 | 说明 | 清除条件 |
|---------|------------------------|----|--|---|------|
| 511:510 | DAT_BUS_WIDTH | SR | ‘00’=1 (默认) ‘01’=保留 ‘10’=4 位宽 ‘11’=保留 | 由 SET_BUS_WIDTH 命令定义的当前数据总线宽度。 | A |
| 509 | SECURED_MODE | SR | ‘0’=未处于保密模式 ‘1’=处于保密模式 | 卡处于保密操作模式 (详见“SD 保密规范”)。 | A |
| 508:496 | 保留 | | | | |
| 495:480 | SD_CARD_TYPE | SR | ‘00xxh’=在物理规范版本 1.01~2.00 的 SD 存储器卡 ('x' 表示任意值)。已定义的卡有: ‘0000’=通用 SD 读写卡 ‘0001’=SD ROM 卡 | 这个域的低 8 位可以在未来定义 SD 存储卡的不同变种 (每个位可以用于定义不同的 SD 类型)。高 8 位可以用于定义那些不遵守当前的 SD 物理层规范的 SD 卡。 | A |
| 479:448 | SIZE_OF_PROTECTED_AREA | SR | 受保护的区域大小 (见以下说明) | (见以下说明) | A |
| 447:440 | SPEED_CLASS | SR | 卡的速度类型 (见以下说明) | (见以下说明) | A |
| 439:432 | PERFORMANCE_MOVE | SR | 以 1MB/秒为单位的传输性能 (见以下说明) | (见以下说明) | A |
| 431:428 | AU_SIZE | SR | AU 的大小 (见以下说明) | (见以下说明) | A |
| 427:424 | 保留 | | | | |
| 423:408 | ERASE_SIZE | SR | 一次可以擦除的 AU 数目 | (见以下说明) | A |
| 407:402 | ERASE_TIMEOUT | SR | ERASE_AU 单元指定的范围的超时数值 | (见以下说明) | A |
| 401:400 | ERASE_OFFSET | SR | 在擦除时增加的固定偏移数值 | (见以下说明) | A |

| 位 | 名称 | 类型 | 数值 | 说明 | 清除条件 |
|---------|---------|----|----|----|------|
| 399:312 | 保留 | | | | |
| 311:0 | 保留给生产厂商 | | | | |

表中有关类型和清除条件域的缩写定义如下：

类型：

- E：错误位。向主机发送错误条件。这些位一旦响应（报告错误）被发出去就会清除。
- S：状态位。这些位仅作为信息字段，并不因为对命令的响应而改变。这些位是持久性的，它们根据卡状态被设置或被清除。
- R/X：R 和 X 都是检测位，区别在于 R 表示卡在命令解释和验证阶段（响应模式）检测到异常，而 X 表示卡在命令执行阶段（执行模式）检测到异常。

SDIO 卡主机通过发送状态命令读出这些位而查询卡的状态。

清除条件：

- A：依据卡的当前状态
- B：始终与之前的命令相关。接收到正确的命令即可清除，这种方式具有一个命令的延迟。
- C：读可清除

SIZE_OF_PROTECTED_AREA

对于标准容量卡和高容量卡，该位的设置方式不同。

标准容量卡受保护区域的容量计算方式如下：

受保护区域=SIZE_OF_PROTECTED_AREA * MULT * BLOCK_LEN

SIZE_OF_PROTECTED_AREA 以 MULT * BLOCK_LEN 为单位。

高容量卡受保护区域的容量计算方式如下：

受保护区域 = SIZE_OF_PROTECTED_AREA

SIZE_OF_PROTECTED_AREA 以字节为单位。

SPEED_CLASS

这 8 位指示速度的类型和可以通过计算 $P_w/2$ 的数值 (P_w 是写的性能)。

表 18-9 速度类型代码

| SPEED_CLASS | 数值定义 |
|-------------|------|
| 00h | 类型 0 |
| 01h | 类型 2 |
| 02h | 类型 4 |
| 03h | 类型 6 |
| 04h~FFh | 保留 |

PERFORMANCE_MOVE

这 8 位指示移动性能 (Pm)，单位为 1MB/秒。如果卡不用 RU (纪录单位) 移动数据，应该认为 Pm 是无穷大。当这个域为 FFh 时表示 Pm 无穷大。

表 18-10 移动性能代码

| PERFORMANCE_MOVE | 数值定义 |
|------------------|---------|
| 00h | 未定义 |
| 01h | 1MB/秒 |
| 02h | 2MB/秒 |
| | |
| FEh | 254MB/秒 |
| FFh | 无穷大 |

AU_SIZE

这 4 位指示 AU 的长度，数值是 (16K 字节) $\times 2^{(AU_SIZE-1)}$ 。

表 18-11 AU_SIZE 代码

| AU_SIZE | 数值定义 |
|---------|-------|
| 00h | 未定义 |
| 01h | 16KB |
| 02h | 32KB |
| 03h | 64KB |
| 04h | 128KB |
| 05h | 256KB |
| 06h | 512KB |
| 07h | 1MB |
| 08h | 2MB |
| 09h | 4MB |
| Ah~Fh | 保留 |

最大的 AU 长度由卡的容量决定。卡可以在 RU 长度和最大的 AU 长度之间设置任意的 AU 长度。

表 18-12 最大的 AU 长度

| 容量 | 16MB~64MB | 128MB~256MB | 512MB | 1GB~32GB |
|-----------|-----------|-------------|-------|----------|
| 最大的 AU 长度 | 512KB | 1MB | 2MB | 4MB |

ERASE_SIZE

这 16 位域表示 NERASE，当 NERASE 个 AU 被擦除时，超时时间由 ERASE_TIMEOUT 定义。主机应该确定在一次操作中要被擦除的 AU 的适当数目，这样主机可以显示擦除操作的进度。如果该域为 0，则不支持擦除的超时计算。

表 18-13 ERASE_SIZE 代码

| ERASE_SIZE | 数值定义 |
|------------|------------|
| 0000h | 不支持擦除的超时计算 |
| 0001h | 1 个 AU |

| ERASE_SIZE | 数值定义 |
|------------|------------|
| 0002h | 2 个 AU |
| 0003h | 3 个 AU |
| | |
| FFFFh | 65535 个 AU |

ERASE_TIMEOUT

这 6 位表示 TERASE, 当 ERASE_SIZE 指示的多个 AU 被擦除时, 这个数值给出了从偏移量算起的擦除超时时间。ERASE_TIMEOUT 的范围最多可以定义到 63 秒, 卡的生产商可以根据具体实现选择 ERASE_SIZE 与 ERASE_TIMEOUT 的任意组合, 一旦 ERASE_TIMEOUT 确定, 那么 ERASE_SIZE 也就确定了, 如果 ERASE_SIZE 字段被设置为 0, 则 ERASE_TIMEOUT 也应该设置为 0。

表 18-14 擦除超时代码

| ERASE_TIMEOUT | 数值定义 |
|---------------|------------|
| 00 | 不支持擦除的超时计算 |
| 01 | 1 秒 |
| 02 | 2 秒 |
| 03 | 3 秒 |
| | |
| 63 | 63 秒 |

ERASE_OFFSET

这 2 位给出了 TOFFSET, 可以选择下表所示的四个数值之一。当 ERASE_SIZE 和 ERASE_TIMEOUT 同为 0 时, 该数值没有意义。

表 18-15 擦除偏移代码

| ERASE_OFFSET | 数值定义 |
|--------------|------|
| 0 | 0 秒 |
| 1 | 1 秒 |
| 2 | 2 秒 |
| 3 | 3 秒 |

18.4.12 SD 的 I/O 模式

18.4.12.1 I/O 中断

SD 接口上有一个具有中断功能的引脚 (第 8 脚), 它能够让 SD I/O 卡中断多媒体卡/SD 模块, 在 4 位 SD 模式下这个脚是 SDIO_DAT1, 通过它, 卡向多媒体卡/SD 模块提出中断申请。对于每一个卡或卡内的功能, 中断功能是可选的。

SD I/O 的中断是电平有效, 即中断信号线必须保持有效电平 (低), 才可以被多媒体卡/SD 模块识别并响应, 并且在中断过程结束后保持无效电平 (高)。在中断请求被多媒体卡/SD 模块服务后, 可以通过一个 I/O 写操作将适当的位写到 SD I/O 卡的内部寄存器来清除中断状态位。

SD I/O 卡的中断输出都是低电平有效, 多媒体卡/SD 模块在所有数据线 (SDIO/D[3:0]) 上提供上拉电阻。多媒体卡/SD 模块只有在中断阶段才对第 8 脚 (SDIO_DAT/IRQ) 采样并进行中断检测, 其它时间则忽略该

信号线上的数值。

I/O 操作和存储器操作都有中断阶段，单个数据块操作与多个数据块传输操作的中断阶段定义是不一样的。

18.4.12.2 I/O 暂停和恢复

在一个多功能的 SD I/O 卡中，或者在一个同时具有 I/O 和存储器功能的卡中，多个设备（I/O 和存储器）共享 MMC/SD 总线。为了使多个设备能够共用 MMC/SD 模块中的总线，SD I/O 卡和复合卡可以有选择地实现暂停/恢复的概念；在支持暂停/恢复的卡中，MMC/SD 模块能够暂停一个功能或存储器的数据传输操作，以此让出总线给其它具有更高优先级的功能或存储器，并且在这个具有更高优先级的功能或存储器传输完成后，再恢复原先暂停的传输。

是否支持暂停/恢复的操作是可选的。以下为在 MMC/SD 总线上执行暂停/恢复操作的步骤：

1. 确定数据线（SDIO_DAT[3:0]）的当前功能
2. 请求暂停低优先级或者慢的操作
3. 等待暂停操作完成，并确认设备已经暂停
4. 开始高优先级设备的传输
5. 等待高优先级设备传输结束
6. 从暂停操作中恢复

18.4.12.3 I/O 读等待（ReadWait）

读等待操作是可选的，只适用于 SD 卡的 1 位或 4 位模式。读等待操作指当一个卡正在读多个寄存器（IO_RW_EXTENDED, CMD53）时，MMC/SD 模块可以要求它暂时停止数据传输，且同时允许 MMC/SD 模块发送命令到 SD I/O 设备中的其他功能。MMC/SD 模块通过检测卡的内部寄存器可以判断一个卡是否支持读等待协议。读等待的时间与中断阶段相关。

18.5 命令与响应

18.5.1 应用相关命令和通用命令

SD 卡主机模块系统是一个标准接口，该接口适用于多种应用类型，同时又要兼顾特定用户和应用，因此标准中定义了两类通用命令：应用相关命令（ACMD）和通用命令（GEN_CMD）。

当卡收到 APP_CMD (CMD55) 命令时，卡期待下一个命令是应用相关命令。应用相关命令（ACMD）和普通多媒体卡命令的格式结构相同，并且它们也可以使用相同的 CMD 号码。因为它是出现在 APP_CMD (CMD55) 后面，所以卡把它识别为 ACMD 命令。如果在 APP_CMD (CMD55) 命令之后不是一个已经定义的应用相关命令，则识别为标准命令；例如：如果在紧随 APP_CMD (CMD55) 之后收到了 CMD13（应用中有定义 SD_STATUS(ACMD13)），它将被解释为 SD_STATUS(ACMD13)；但是如果卡在紧随 APP_CMD (CMD55) 之后收到 CMD7，而这个卡没有定义 ACMD7，则它将被解释为一个标准的 CMD7 (SELECT/DESELECT_CARD) 命令。

如果要使用生产厂商自定义的 ACMD，SD 卡主机需要做以下操作：

1. 发送 APP_CMD (CMD55) 命令
2. 卡返回响应给多媒体/SD 卡模块，响应指示设置了 APP_CMD 位并等待 ACMD 命令。

3. 发送指定的 ACMD
4. 卡返回响应给多媒体/SD 卡模块，响应指示设置了 APP_CMD 位，收到的命令已经正确地按照 ACMD 命令解析；如果收到的命令不是 ACMD 命令，卡将按照普通的多媒体卡命令处理，同时将状态寄存器的 APP_CMD 位清除。

如果发送的命令非法，将按照标准的非法多媒体卡命令进行错误处理。GEN_CMD 命令的总线操作过程，与单数据块读写命令（WRITE_BLOCK, CMD24 或 READ_SINGLE_BLOCK, CMD17）相同；这时命令的参数表示数据传输的方向而不是地址，数据块具有用户自定义的格式和意义。

发送 GEN_CMD (CMD56) 命令之前，状态机必须处于传输状态，即卡必须被选中，数据块的长度 SET_BLOCKLEN (CMD16) 定义。GEN_CMD (CMD56) 命令的响应是 R1b 格式。

18.5.2 多媒体卡/SD 卡模块的命令

表 18-16 基于块传输的写命令

| CMD 索引 | 类型 | 参数 | 响应格式 | 缩写 | 说明 |
|--------|------|---------------------------|------|----------------------|---|
| CMD23 | ac | [31:16]=0 [15:0]=数据块数目 | R1 | SET_BLOCK_COUNT | 定义在随后的多块读或写命令中需要传输块的数目。 |
| CMD24 | adtc | [31:0]=数据地址 | R1 | WRITE_BLOCK | 按照 SET_BLOCKLEN 命令选择的长度写一个块。 |
| CMD25 | adtc | [31:0]=数据地址 | R1 | WRITE_MULTIPLE_BLOCK | 收到一个 STOP_TRANSMISSION 命令或达到了指定的块数目之前，连续地写数据块。 |
| CMD26 | adtc | [31:0]=填充位 | R1 | PROGRAM_CID | 对卡的识别寄存器编程。对于每个卡只能发送一次这个命令。卡中有硬件机制防止多次的编程操作。通常该命令保留在生产厂商。 |
| CMD27 | adtc | [31:0]=填充位 | R1 | PROGRAM_CSD | 对卡的 CSD 中可编程的位编程。 |
| CMD28 | ac | [31:0]=数据地址 | R1b | SET_WRITE_PROT | 如果卡具有写保护功能，该命令设置指定组的写保护位。写保护特性设置在卡的特殊数据区 (WP_GRP_SIZE)。 |
| CMD29 | ac | [31:0]=数据地址 | R1b | CLR_WRITE_PROT | 如果卡具有写保护功能，该命令清除指定组的写保护位。 |
| CMD30 | adtc | [31:0]=写保护数据地址 | R1 | SEND_WRITE_PROT | 如果卡具有写保护功能，该命令要求卡发送写保护位的状态。 |
| CMD31 | | | | 保留 | |

表 18-17 基于块传输的写保护命令

| CMD 紹引 | 类型 | 参数 | 响应格式 | 缩写 | 说明 |
|--------|----|-------------|------|----------------|----------------------------------|
| CMD28 | ac | [31:0]=数据地址 | R1b | SET_WRITE_PROT | 如果卡具有写保护功能，该命令设置指定组的写保护位。写保护特性设置 |

| CMD 紴引 | 类型 | 参数 | 响应格式 | 缩写 | 说明 |
|--------|------|----------------|------|-----------------|------------------------------|
| | | | | | 在卡的特殊数据区 (WP_GRP_SIZE)。 |
| CMD29 | ac | [31:0]=数据地址 | R1b | CLR_WRITE_PROT | 如果卡具有写保护功能, 该命令清除指定组的写保护位。 |
| CMD30 | adtc | [31:0]=写保护数据地址 | R1 | SEND_WRITE_PROT | 如果卡具有写保护功能, 该命令要求卡发送写保护位的状态。 |
| CMD31 | 保留 | | | | |

表 18-18 擦除命令

| CMD 紹引 | 类型 | 参数 | 响应格式 | 缩写 | 说明 |
|--------|-----------------------------------|-------------|------|-------------------|----------------------------|
| CMD32 | | | | | |
| CMD34 | 保留。为了与旧版本的对媒体卡协议向后兼容, 不能使用这些命令代码。 | | | | |
| CMD35 | ac | [31:0]=数据地址 | R1 | ERASE_GROUP_START | 在选择的擦除范围内, 设置第一个擦除组的地址。 |
| CMD36 | ac | [31:0]=数据地址 | R1 | ERASE_GROUP_END | 在选择的连续擦除范围内, 设置最后一个擦除组的地址。 |
| CMD37 | 保留。为了与旧版本的对媒体卡协议向后兼容, 不能使用这个命令代码。 | | | | |
| CMD38 | ac | [31:0]=填充位 | R1 | ERASE | 擦除之前选择的数据块。 |

表 18-19 I/O 模式命令

| CMD 紹引 | 类型 | 参数 | 响应格式 | 缩写 | 说明 |
|--------|-----|--|------|--------------|---|
| CMD39 | ac | [31:16] =RCA [15]=寄存器写标志 [14:8]=寄存器地址 [7:0]=寄存器数据 | R4 | FAST_IO | 用于写和读 8 位 (寄存器) 数据域。该命令指定一个卡和寄存器, 如果设置了写标志还提供写入的数据。R4 响应包含从指定寄存器读出的数据。该命令访问未在多媒体卡标准中定义的与应用相关的寄存器。 |
| CMD40 | bcr | [31:0]=数据地址 | R5 | GO_IRQ_STATE | 置系统于中断模式。 |
| CMD41 | 保留 | | | | |

表 18-20 上锁命令

| CMD 紹引 | 类型 | 参数 | 响应格式 | 缩写 | 说明 |
|--------|-------|------------|------|-------------|--|
| CMD42 | adtc | [31:0]=填充位 | R1b | LOCK_UNLOCK | 设置/清除密码或对卡上锁/解锁。数据块的长度由 SET_BLOCKLEN 命令设置。 |
| CMD43 | | | | | |
| CMD54 | 保留 | | | | |

表 18-21 应用相关命令

| CMD 索引 | 类型 | 参数 | 响应格式 | 缩写 | 说明 |
|-------------------------|------|---------------------------|------|---------|--|
| CMD55 | ac | [31:16]=RCA [15:0]=填充位 | R1 | APP_CMD | 指示卡下一个命令是应用相关命令而不是一个标准命令。 |
| CMD56 | adtc | [31:1]=填充位 [0]=RD/WR | | | 在通用或应用相关命令中, 或者用于向卡中传输一个数据块, 或者用于从卡中读取一个数据块。数据块的长度由 SET_BLOCKLEN 命令设置。 |
| CMD57 CMD59 | | | | 保留 | |
| CMD60 CMD63 | | | | 保留给生产厂商 | |

18.5.3 命令类型

ACMD 和 GEN_CMD 包含四种不同的类型:

1. 广播命令 (BC): 发送到所有卡, 没有响应。
2. 带响应的广播命令 (BCR): 发送到所有卡, 同时从所有卡收到响应;
3. 带寻址 (点对点) 的命令 (AC): 发送到寻址的卡, SDIO_DAT 信号线上没有数据传输。
4. 带寻址 (点对点) 的数据传输命令 (AC): 发送到寻址的卡, SDIO_DAT 信号线进行数据传输。

18.5.4 命令格式

命令格式由命令和响应两部分组成。

命令: 命令是用于开始一项操作。主机向一个指定的卡或所有的卡发出带地址的命令或广播命令 (广播命令只适合于 MMC V3.31 或之前的版本)。所有命令的长度固定为 48 位, 在 CMD 线上串行传送。下表给出了多媒体卡、SD 存储卡和 SDIO 卡上一般的命令格式

CE-ATA 命令是 MMC V4.2 命令的扩充, 所以具有相同的格式。

命令通道工作于半双工模式, 这样命令和响应可以分别发送和接收。如果 CPSM 不处在发送状态, SDIO_CMD 输出处于高阻状态, 如图 18-11 所示。 SDIO_CMD 上的数据与 SDIO_CLK 的上升沿同步。

表 18-22 命令格式

| 位 | 宽度 | 数值 | 说明 |
|---------|----|----|------|
| 47 | 1 | 0 | 开始位 |
| 46 | 1 | 1 | 传输位 |
| [45:40] | 6 | - | 命令索引 |
| [39:8] | 32 | - | 参数 |
| [7:1] | 7 | - | CRC7 |
| 0 | 1 | 1 | 结束位 |

响应：响应是对先前接收到命令的一个应答，是由一个被指定地址的卡发送到主机，对于 MMC V3.31 或以前版本所有的卡同时发送响应；响应在 CMD 线上串行传送。

SDIO 支持两种响应类型：48 位短响应和 136 位长响应。这两种类型都有 CRC 错误检测：

注意：如果响应不包含 CRC (如 CMD1 的响应)，设备驱动应该忽略 CRC 失败状态。

表 18-23 短响应格式

| 位 | 宽度 | 数值 | 说明 |
|---------|----|----|------------------|
| 47 | 1 | 0 | 开始位 |
| 46 | 1 | 0 | 传输位 |
| [45:40] | 6 | - | 命令索引 |
| [39: 8] | 32 | - | 参数 |
| [7: 1] | 7 | - | CRC7 (或 111111b) |
| 0 | 1 | 1 | 结束位 |

表 18-24 长响应格式

| 位 | 宽度 | 数值 | 说明 |
|-----------|-----|--------|-----------------------|
| 135 | 1 | 0 | 开始位 |
| 134 | 1 | 0 | 传输位 |
| [133:128] | 6 | 111111 | 保留 |
| [127:1] | 127 | - | CID 或 CSD (包含内部 CRC7) |
| 0 | 1 | 1 | 结束位 |

18.5.5 响应格式

所有的响应都是通过 CMD 信号线发送。响应传输总是从对应响应字串的 MSB 开始。响应字串的长度依赖于响应类型。

每个响应都包含一个起始位 (始终为 0)，跟随着传输的方向位 (卡=0)。下表中 x 表示一个可变的部分。除了 R3 响应类型外，所有的响应都有 CRC 保护。每一个命令码字都有一个结束位 (始终为 1)。

共有 5 种响应类型，它们的格式定义如下：

R1 (普通响应命令)

R1 响应的代码长度为 48 位。其中位 45:40 指示要响应的命令索引，它的数值介于 0 至 63 之间。卡的状态由 32 位进行编码。

表 18-25 R1 响应

| 位 | 域宽度 | 数值 | 说明 |
|---------|-----|----|------|
| 47 | 1 | 0 | 开始位 |
| 46 | 1 | 0 | 传输位 |
| [45:40] | 6 | X | 命令索引 |
| [39:8] | 32 | X | 卡状态 |
| [7:1] | 7 | X | CRC7 |
| 0 | 1 | 1 | 结束位 |

R1b

R1b 与 R1 格式相同, 区别是 R1b 可以选择在数据线上发送一个繁忙信号。收到这些命令后, 依据收到命令之前的状态, 卡可能变为繁忙状态, 主机应在响应中检查繁忙状态。

R2 (CID、CSD 寄存器)

R2 代码长度为 136 位。CMD2 和 CMD10 的响应保存在 CID 寄存器中发出。CMD9 的响应保存在 CSD 寄存器中发出。卡只响应并发送 CID 和 CSD 的位[127…1], 在接收端, 这两个寄存器保留位[0]替换为响应的结束位。实际擦除操作的时间可能很长, 主机可以发送 CMD7 命令取消对该卡的选中。

表 18-26 R2 响应

| 位 | 域宽度 | 数值 | 说明 |
|-----------|-----|----------|------|
| 135 | 1 | 0 | 开始位 |
| 134 | 1 | 0 | 传输位 |
| [133:128] | 6 | ‘111111’ | 命令索引 |
| [127:1] | 127 | X | 卡状态 |
| 0 | 1 | 1 | 结束位 |

R3 (OCR 寄存器)

R3 代码长度为 48 位。CMD1 的响应保存在 OCR 寄存器中发出。电平代码的定义是: 限制的电压窗口为低, 卡繁忙为低。

表 18-27 R3 响应

| 位 | 域宽度 | 数值 | 说明 |
|---------|-----|-----------|---------|
| 47 | 1 | 0 | 开始位 |
| 46 | 1 | 0 | 传输位 |
| [45:40] | 6 | ‘111111’ | 保留 |
| [39:8] | 32 | X | OCR 寄存器 |
| [7:1] | 7 | ‘1111111’ | 保留 |
| 0 | 1 | 1 | 结束位 |

R4 (快速 I/O)

R4 代码长度为 48 位, 仅适用于 MMC 卡。参数域包括指定卡的 RCA、需要读出或写入寄存器的地址、和它的内容。

表 18-28 R4 响应

| 位 | 域宽度 | 数值 | 说明 |
|------------|---------|-----------|---------|
| 47 | 1 | 0 | 开始位 |
| 46 | 1 | 0 | 传输位 |
| [45:40] | 6 | ‘111111’ | 保留 |
| [39:8] 参数域 | [31:16] | 16 | RCA |
| | [15:8] | 8 | 寄存器地址 |
| | [7:0] | 8 | 读寄存器的内容 |
| [7:1] | 7 | ‘1111111’ | CRC7 |
| 0 | 1 | | 结束位 |

R4b

R4b 仅适用于 SD I/O 卡，代码长度为 48 位。SDIO 卡收到 CMD5 命令后将返回一个唯一的 SDIO 响应 R4。

表 18-29 R4b 响应

| 位 | 域宽度 | 数值 | 说明 |
|-----------|---------|----|----------|
| 47 | 1 | 0 | 开始位 |
| 46 | 1 | 0 | 传输位 |
| [45:40] | 6 | x | 保留 |
| [39:8]参数域 | 39 | 1 | 卡已就绪 |
| | [38:36] | 3 | I/O 功能数目 |
| | 35 | 1 | 当前存储器 |
| | [34:32] | 3 | 填充位 |
| | [31:8] | 24 | I/O ORC |
| [7:1] | 7 | x' | 保留 |
| 0 | 1 | 1 | 结束位 |

当 SD I/O 卡收到命令 CMD5 命令，卡的 I/O 部分被使能并能够正常地响应所有后续的命令。I/O 卡的使能状态将一直保持到下一次复位、断电或收到 I/O 复位的 CMD52 命令为止。注意，一个只包含存储器功能的 SD 卡的正确响应可以是：当前存储器为 1，I/O 功能数目为 0。按照 SD 存储器卡规范版本 1.0 设计的只包含存储器功能的 SD 卡将检测到的 CMD5 命令视为一个非法命令并不响应它。可以处理 I/O 卡的主机将发送 CMD5 命令，如果卡返回响应 R4，则主机会依据 R4 响应中的数据确定卡的配置。

R5 (中断请求)

R5 仅适用于多媒体卡。代码长度为 48 位。当这个响应由主机产生的时候参数中的 RCA 域为 0x0。

表 18-30 R5 响应

| 位 | 域宽度 | 数值 | 说明 |
|-----------|---------|----------|-------|
| 47 | 1 | 0 | 开始位 |
| 46 | 1 | 0 | 传输位 |
| [45:40] | 6 | '111111' | CMD40 |
| [39:8]参数域 | [31:16] | 16 | x |
| | [15:0] | 16 | x |
| [7:1] | 7 | x | CRC7 |
| 0 | 1 | 1 | 结束位 |

R6 (中断请求)

R6 仅适用于 SD I/O 卡。代码长度为 48 位。位[45:40]表示对 CMD3 响应的命令索引。参数字段的 16 个最高位比特用于已发布的 RCA 号。这是存储器设备对 CMD3 命令的正常响应。

表 18-31 R6 响应

| 位 | 域宽度 | 数值 | 说明 |
|---------|-----|----------|-------|
| 47 | 1 | 0 | 开始位 |
| 46 | 1 | 0 | 传输位 |
| [45:40] | 6 | '101000' | CMD40 |

| 位 | 域宽度 | 数值 | 说明 |
|-----------|---------|--------|-----------------------|
| [39:8]参数域 | [31:16] | 16 | x 成功的卡或主机的 RCA[31:16] |
| | [15:0] | 16 | x 未定义。可以作为中断数据。 |
| [7:1] | 7 | x CRC7 | |
| 0 | 1 | 1 | 结束位 |

当发送 CMD3 命令到只有 I/O 功能的卡时, 卡的状态位[23:8]会改变, 并且响应中的 16 位是只有 I/O 功能的 SD 卡中的数值, 位 15 为 COM_CRC_ERROR, 位 14 为 ILLEGAL_COMMAND, 位 13 为 ERROR, 位[12:0]保留。

18.6 硬件流控制

使用硬件流控制功能可以避免 FIFO 下溢 (发送模式) 和上溢 (接收模式) 的错误。

硬件流控制的操作过程是停止 SDIO_CLK 并冻结 SDIO 状态机, 在 FIFO 不能进行发送和接收数据时, 数据传输暂停。需要注意, 只有由 CLKCTRL 驱动的状态机被冻结, AHB 接口仍然是工作的。即使在流控制起作用时, 仍然可以读出或写入 FIFO。

必须将 SDIO_CLKCTRL.HWCLKEN 位设置为 ‘1’, 才能使能硬件流控制。复位后, 硬件流控制功能自动关闭。

18.7 SDIO 寄存器

设备通过控制寄存器与系统进行通信。控制寄存器的宽度为 32 位宽, 可以在 AHB 总线上操作这些寄存器, 注意, 必须以字 (32 位) 的方式操作这些外设寄存器。

18.7.1 SDIO 寄存器总览

表 18-32 SDIO 寄存器总览

| Offset | Register | 31 | 30 | 29 | 28 | 27 | 26 | 25 | 24 | 23 | 22 | 21 | 20 | 19 | 18 | 17 | 16 | 15 | 14 | 13 | 12 | 11 | 10 | 9 | 8 | 7 | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | 0 | | | | | |
|--------|----------------|----------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----------------------|----|-------------|---|---------|---|----------------------|---|--------|---|---------|---|---------|--|-----|--|--|
| 000h | SDIO_PWRCTRL | Reserved | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | PWR CTRL | | 0 0 | | | | | | | | | | | | | | |
| | Reset Value | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 004h | SDIO_CLKCTRL | Reserved | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | DIV[7:0] | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Reset Value | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | DIV[8] | | HWCLKEN | | CLKEDGE | | BUS MODE [1:0] | | CLKBYP | | PWRCFG | | CLOCKEN | | | | |
| 008h | SDIO_CMDARG | CMDARG | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Reset Value | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | | | | | |
| 00Ch | SDIO_CMDCTRL | Reserved | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | CMD RESP [1:0] | | CMDIDX[5:0] | | | | | | | | | | | | | | |
| | Reset Value | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | CEATAEN | | INTDIS | | ENCMDF | | SUSPEND | | CPSMEN | | WDATEND | | WINTREQ | | | | |
| 010h | SDIO_CMDRESP | Reserved | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | RESPCMDIDX[5:0] | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Reset Value | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 0 0 | | 0 0 | | 0 0 | | 0 0 | | 0 0 | | 0 0 | | 0 0 | | 0 0 | | |
| 014h | SDIO_RESPONSE1 | CARDSTS1[31:0] | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Reset Value | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | | | | |
| 018h | SDIO_RESPONSE2 | CARDSTS2[31:0] | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Reset Value | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | | | | |
| 01Ch | SDIO_RESPONSE3 | CARDSTS3[31:0] | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Reset Value | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | | | | |
| 020h | SDIO_RESPONSE4 | CARDSTS4[31:0] | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Reset Value | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | | | | |

18.7.2 SDIO 电源控制寄存器 (SDIO_PWRCTRL)

地址偏移: 0x00

复位值: 0x0000 0000

| 位域 | 名称 | 描述 |
|------|----------|--|
| 31:2 | Reserved | 保留，必须保持复位值。 |
| 1:0 | PWRCTRL | <p>电源控制位 (Power supply control bits)</p> <p>定义卡时钟的当前功能状态：</p> <p>00: 电源关闭，卡的时钟停止。</p> <p>01: 保留。</p> <p>10: 保留，上电状态。</p> <p>11: 上电状态，卡的时钟开启。</p> |

注意：写数据后的 7 个 *HCLK* 时钟周期内，不能写入这个寄存器。

18.7.3 SDIO 时钟控制寄存器 (SDIO_CLKCTRL)

地址偏移: 0x04

复位值: 0x0000 0000

SDIO_CLKCTRL 寄存器控制 SDIO_CLK 输出时钟。

| | | | | | | | | | | | | | | | |
|----|----------|----------|----------|--------------|---------|---------|----------|--|--|--|--|--|--|----------|----|
| 31 | Reserved | | | | | | | | | | | | | | 16 |
| 15 | DIV[8] | HWCLK EN | CLK EDGE | BUSMODE[1:0] | CLK BYP | PWR CFG | CLOCK EN | | | | | | | DIV[7:0] | 0 |
| rw | rw | rw | rw | rw | rw | rw | rw | | | | | | | rw | |

| 位域 | 名称 | 描述 |
|-------|----------|---|
| 31:16 | Reserved | 保留，必须保持复位值。 |
| 15 | DIV[8] | 时钟分频系数最高位，扩展模式时使用。 |
| 14 | HWCLKEN | 硬件流控制使能 (HW Flow Control enable) 0: 关闭硬件流控制 1: 使能硬件流控制 当使能硬件流控制后，关于 SDIO_STS.TFIFOE 和 SDIO_STS.RFIFOF 中断信号的意义请参考 18.7.12 节的 SDIO 状态寄存器的定义。 |
| 13 | CLKEDGE | SDIO_CLK 相位选择位 (SDIO_CLK dephasing selection bit) 0: 在主时钟 SDIOCLK 的上升沿产生 SDIO_CLK。 1: 在主时钟 SDIOCLK 的下降沿产生 SDIO_CLK。 |
| 12:11 | BUSMODE | 宽总线模式使能位 (Wide bus mode enable bit) 00: 默认总线模式，使用 SDIO_DAT0。 01: 4 位总线模式，使用 SDIO_DAT[3:0]。 10: 8 位总线模式，使用 SDIO_DAT[7:0]。 |
| 10 | CLKBYP | 旁路时钟分频器 (Clock divider bypass enable bit) 0: 关闭旁路：驱动 SDIO_CLK 输出信号之前，依据 DIV 数值对 SDIOCLK 分频。 1: 使能旁路：SDIOCLK 直接驱动 SDIO_CLK 输出信号。 |
| 9 | PWRCFG | 省电配置位 (Power saving configuration bit) 为了省电，当总线为空闲时，设置 PWRCFG 位可以关闭 SDIO_CLK 时钟输出。 0: 始终输出 SDIO_CLK。 1: 仅在有总线活动时才输出 SDIO_CLK。 |
| 8 | CLOCKEN | 时钟使能位 (Clock enable bit) 0: SDIO_CLK 关闭。 1: SDIO_CLK 使能。 |
| 7:1 | DIV | 时钟分频系数 (Clock divide factor) 这个域定义了输入时钟 (SDIOCLK) 与输出时钟 (SDIO_CLK) 间的分频系数： SDIO_CLK 频率 = SDIOCLK/[DIV + 2]。 |

注意:

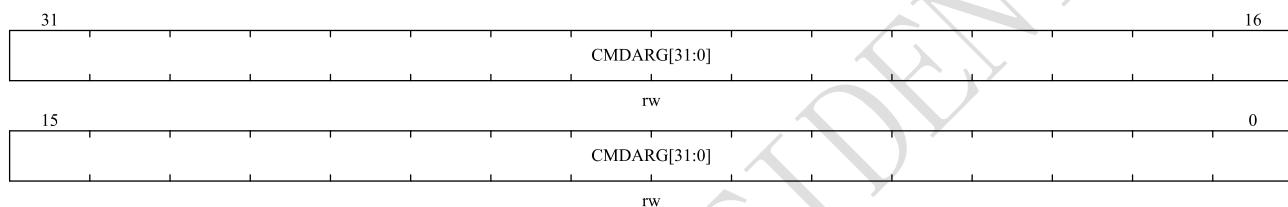
1. 当 SD/SDIO 卡或多媒体卡在识别模式, SDIO_CLK 的频率必须低于 400kHz。
2. 当所有卡都被赋予了相应的地址后, 时钟频率可以改变到卡总线允许的最大频率。
3. 写数据后的 7 个 HCLK 时钟周期内不能写入这个寄存器。对于 SD I/O 卡, 在读等待期间可以停止 SDIO_CLK, 此时 SDIO_CLKCTRL 寄存器不控制 SDIO_CLK。

18.7.4 SDIO 参数寄存器 (SDIO_CMDARG)

地址偏移: 0x08

复位值: 0x0000 0000

SDIO_CMDARG 寄存器包含 32 位命令参数, 它将作为命令的一部分发送到卡中。



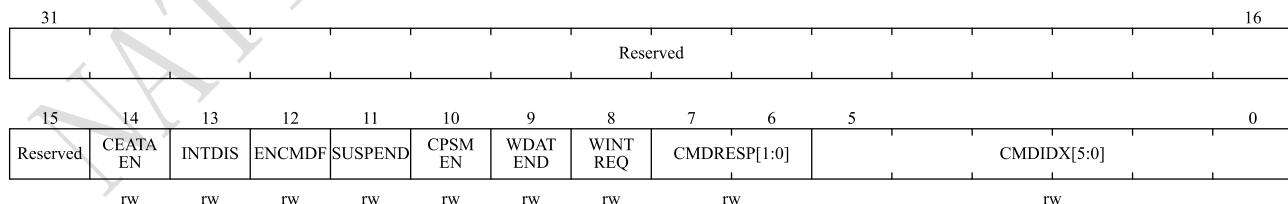
| 位域 | 名称 | 描述 |
|------|--------|---|
| 31:0 | CMDARG | 命令参数 (Command argument) 命令参数是发送到卡中命令的一部分, 如果一个命令包含一个参数, 必须在写命令到命令寄存器之前加载这个寄存器。 |

18.7.5 SDIO 命令寄存器 (SDIO_CMDCTRL)

地址偏移: 0x0C

复位值: 0x0000 0000

SDIO_CMDCTRL 寄存器包含命令索引和命令类型位。命令索引是作为命令的一部分发送到卡中。命令类型位控制命令通道状态机 (CPSM)。



| 位域 | 名称 | 描述 |
|-------|----------|---|
| 31:15 | Reserved | 保留, 必须保持复位值。 |
| 14 | CEATAEN | CE-ATA 命令 (CE-ATA command) 如果设置该位, CPSM 将传输 CMD61。 |
| 13 | INTDIS | 不使能中断 (not interrupt enable) |

| 位域 | 名称 | 描述 |
|-----|---------|---|
| | | 如果未设置该位，则使能 CE-ATA 设备的中断。 |
| 12 | ENCMDF | 使能 CMD 完成 (Enable CMD completion) 如果设置该位，则使能命令完成信号。 |
| 11 | SUSPEND | SD I/O 暂停命令 (SD I/O suspend command) 如果设置该位，则将要发送的命令是一个暂停命令 (只能用于 SD IO 卡)。 |
| 10 | CPSMEN | 命令通道状态机 (CPSM) 使能位 (Command path state machine (CPSM) Enable bit) 如果设置该位，则使能 CPSM。 |
| 9 | WDATEND | CPSM 等待数据传输结束 (CmdPend 内部信号) (CPSM Waits for ends of data transfer (CmdPend internal signal)) 如果设置该位，则 CPSM 在开始发送一个命令之前等待数据传输结束。 |
| 8 | WINTREQ | CPSM 等待中断请求 (CPSM waits for interrupt request) 如果设置该位，则 CPSM 关闭命令超时控制并等待中断请求。 |
| 7:6 | CMDRESP | 等待响应位 (Wait for response bits) 这 2 位指示 CPSM 是否需要等待响应，如果需要等待响应，则指示响应类型。 00: 无响应，除了 SDIO_STS.CMDSEND 标志 01: 短响应，除了 SDIO_STS.CMDRESPRECV 或 SDIO_STS.CCRCERR 标志 10: 无响应，除了 SDIO_STS.CMDSEND 标志 11: 长响应，除了 SDIO_STS.CMDRESPRECV 或 SDIO_STS.CCRCERR 标志 |
| 5:0 | CMDIDX | 命令索引 (Command index) 命令索引是作为命令的一部分发送到卡中。 |

注意：

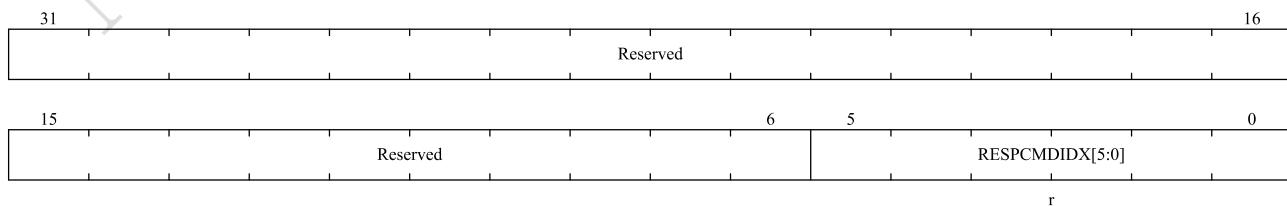
- 写数据后的 7 个 HCLK 时钟周期内不能写入这个寄存器。
- 多媒体卡可以发送 2 种响应：48 位长的短响应，或 136 位长的长响应。SD 卡和 SD I/O 卡只能发送短响应，参数可以根据响应的类型而变化，软件将根据发送的命令区分响应的类型。CE-ATA 设备只发送短响应。

18.7.6 SDIO 命令响应寄存器 (SDIO_CMDRESP)

地址偏移：0x10

复位值：0x0000 0000

SDIO_CMDRESP 寄存器包含最后收到的命令响应中的命令索引。如果传输的命令响应不包含命令索引 (长响应或 OCR 响应)，尽管它应该包含 111111b (响应中的保留域值)，但 RESPCMDIDX 域的内容未知。



| 位域 | 名称 | 描述 |
|------|----------|-------------|
| 31:6 | Reserved | 保留，必须保持复位值。 |

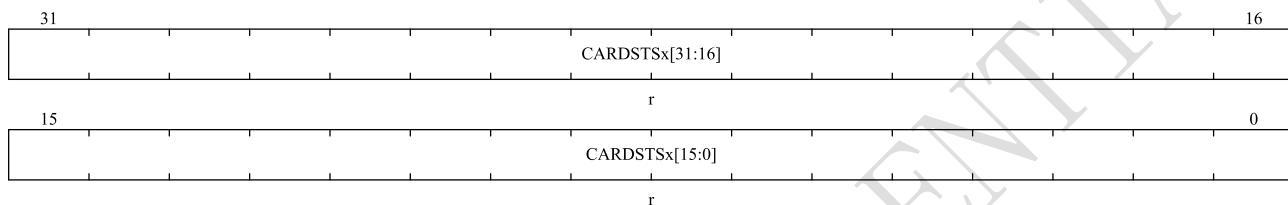
| 位域 | 名称 | 描述 |
|-----|------------|---|
| 5:0 | RESPCMDIDX | 响应的命令索引 (Response command index) 只读位, 包含最后收到的命令响应中的命令索引。 |

18.7.7 SDIO 响应 1.4 寄存器 (SDIO_RESPONSEx)

地址偏移: 0x14 + 4*(x-1), 其中 x = 1..4

复位值: 0x0000 0000

SDIO_RESPONSE1/2/3/4 寄存器包含卡的状态, 即收到响应的部分信息。



| 位域 | 名称 | 描述 |
|------|----------|------|
| 31:0 | CARDSTSx | 见下表。 |

根据响应状态, 卡的状态长度是 32 位或 127 位。

表 18-33 响应类型和 SDIO_RESPONSEx 寄存器

| 寄存器 | 短响应 | 长响应 |
|----------------|-----------|-------------|
| SDIO_RESPONSE1 | 卡状态[31:0] | 卡状态[127:96] |
| SDIO_RESPONSE2 | 不用 | 卡状态[95:64] |
| SDIO_RESPONSE3 | 不用 | 卡状态[63:32] |
| SDIO_RESPONSE4 | 不用 | 卡状态[31:1] |

总是先收到卡状态的最高位, SDIO_RESPONSE3 寄存器的最低位始终为 0。

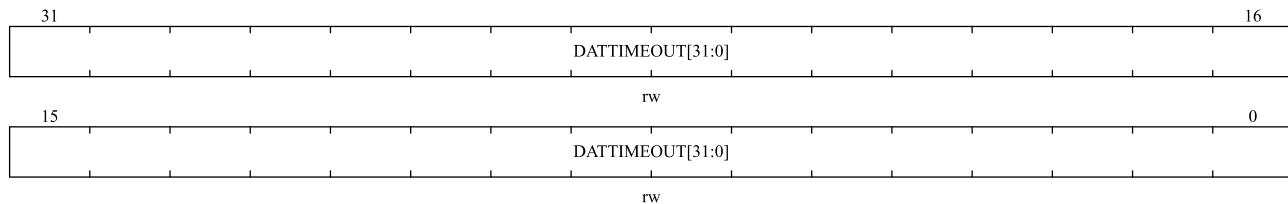
18.7.8 SDIO 数据定时器寄存器 (SDIO_DTIMER)

地址偏移: 0x24

复位值: 0x0000 0000

SDIO_DTIMER 寄存器包含以卡总线时钟周期为单位的数据超时时间。

一个计数器从 SDIO_DTIMER 寄存器加载数值, 并在数据通道状态机 (DPSM) 进入 Wait_R 或繁忙状态时进行递减计数, 当 DPSM 处在这些状态时, 如果计数器减为 0, 则设置超时标志。



| 位域 | 名称 | 描述 |
|------|------------|---|
| 31:0 | DATTIMEOUT | 数据超时时间 (Data timeout period) 以卡总线时钟周期为单位的数据超时时间。 |

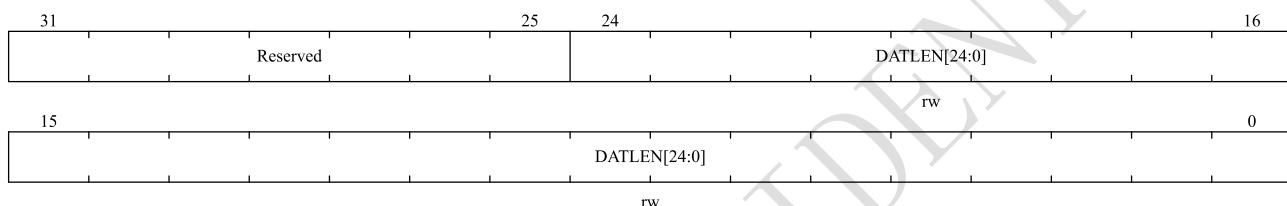
注意：在写入数据控制寄存器进行数据传输之前，必须先写入数据定时器寄存器和数据长度寄存器。

18.7.9 SDIO 数据长度寄存器 (SDIO_DATLEN)

地址偏移：0x28

复位值：0x0000 0000

SDIO_DATLEN 寄存器包含需要传输的数据字节长度。当数据传输开始时，这个数值被加载到数据计数器中。



| 位域 | 名称 | 描述 |
|-------|----------|---|
| 31:25 | Reserved | 保留，必须保持复位值。 |
| 24:0 | DATLEN | 数据长度 (Data length value) 要传输的数据字节数目。 |

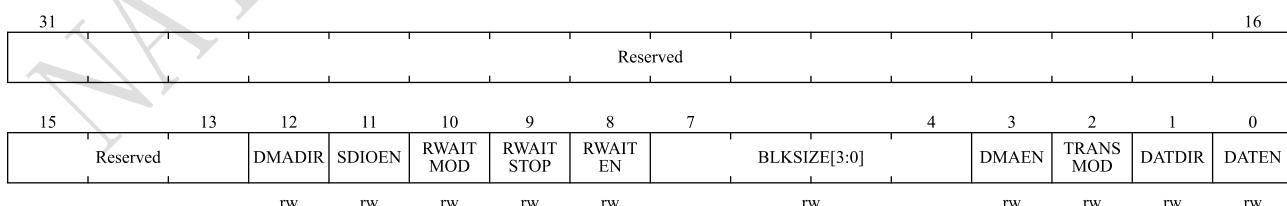
注意：对于块数据传输，数据长度寄存器中的数值必须是数据块长度（见 SDIO_DATCTRL）的倍数。在写入数据控制寄存器进行数据传输之前，必须先写入数据定时器寄存器和数据长度寄存器。

18.7.10 SDIO 数据控制寄存器 (SDIO_DATCTRL)

地址偏移：0x2C

复位值：0x0000 0000

SDIO_DATCTRL 寄存器控制数据通道状态机 (DPSM)。



| 位域 | 名称 | 描述 |
|-------|----------|--|
| 31:13 | Reserved | 保留，必须保持复位值。 |
| 12 | DMADIR | DMA 模式下数据输出搬运到外部设备时配置为 1，外部设备数据输入时配置为 0。 |
| 11 | SDIOEN | SD I/O 使能功能 (SD I/O enable functions) |

| 位域 | 名称 | 描述 |
|-----|--------------|--|
| | | 如果设置了该位，则 DPSM 执行 SD I/O 卡特定的操作。 |
| 10 | RWAITMOD | 读等待模式 (Read wait mode) 0: 停止 SDIO_CLK 控制读等待; 1: 使用 SDIO_DAT2 控制读等待。 |
| 9 | RWAITSTOP | 读等待停止 (Read wait stop) 0: 如果设置了 RWAITEN, 执行读等待; 1: 如果设置了 RWAITEN, 停止读等待。 |
| 8 | RWAITEN | 读等待开始 (Read wait start) 设置该位开始读等待操作。 |
| 7:4 | BLKSIZE[3:0] | 数据块长度 (Data block size) 当选择了块数据传输模式, 该域定义数据块长度: 0000: 块长度 = $2^0 = 1$ 字节; 0001: 块长度 = $2^1 = 2$ 字节; 0010: 块长度 = $2^2 = 4$ 字节; 0011: 块长度 = $2^3 = 8$ 字节; 0100: (十进制 4) 块长度 = $2^4 = 16$ 字节; 0101: (十进制 5) 块长度 = $2^5 = 32$ 字节; 0110: (十进制 6) 块长度 = $2^6 = 64$ 字节; 0111: 块长度 = $2^7 = 128$ 字节; 1000: 块长度 = $2^8 = 256$ 字节; 1001: 块长度 = $2^9 = 512$ 字节; 1010: 块长度 = $2^{10} = 1024$ 字节; 1011: 块长度 = $2^{11} = 2048$ 字节; 1100: 块长度 = $2^{12} = 4096$ 字节; 1101: 块长度 = $2^{13} = 8192$ 字节; 1110: 块长度 = $2^{14} = 16384$ 字节; 1111: 保留。 |
| 3 | DMAEN | DMA 使能位 (DMA enable bit) 0: 关闭 DMA; 1: 使能 DMA。 |
| 2 | TRANSMOD | 数据传输模式 (Data transfer mode selection) 0: 块数据传输; 1: 流数据传输。 |
| 1 | DATDIR | 数据传输方向 (Data transfer direction selection) 0: 控制器至卡; 1: 卡至控制器。 |
| 0 | DATEN | 数据传输使能位 (Data transfer enabled bit) 如果设置该位为 1, 则开始数据传输。根据 DATDIR 方向位, DPSM 进入 Wait_S 或 Wait_R 状态, 如果在传输的一开始就设置了 RWAITEN 位, 则 DPSM 进入读等待状态。不需要在数据传输结束后清除使能位, 但必须更改 SDIO_DATCTRL 以允许新的数据传输。 |

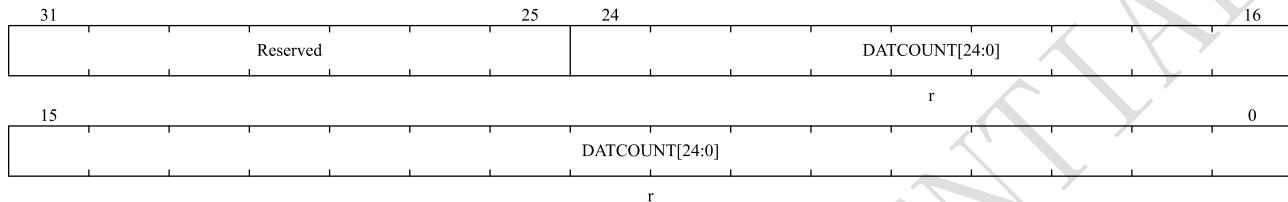
注意: 写数据后的 7 个 HCLK 时钟周期内不能写入这个寄存器。

18.7.11 SDIO 数据计数器寄存器 (SDIO_DATCOUNT)

地址偏移: 0x30

复位值: 0x0000 0000

当 DPSM 从空闲状态进入 Wait_R 或 Wait_S 状态时, SDIO_DATCOUNT 寄存器从数据长度寄存器加载数值 (见 SDIO_DATLEN), 在数据传输过程中, 该计数器的数值递减直到减为 0, 然后 DPSM 进入空闲状态并设置数据状态结束标志 SDIO_STS.DATEND。



| 位域 | 名称 | 描述 |
|-------|----------|---|
| 31:25 | Reserved | 保留, 必须保持复位值。 |
| 24:0 | DATCOUNT | 数据计数数值 (Data count value) 读这个寄存器时返回待传输的数据字节数, 写这个寄存器无作用。 |

注意: 只能在数据传输结束时读这个寄存器。

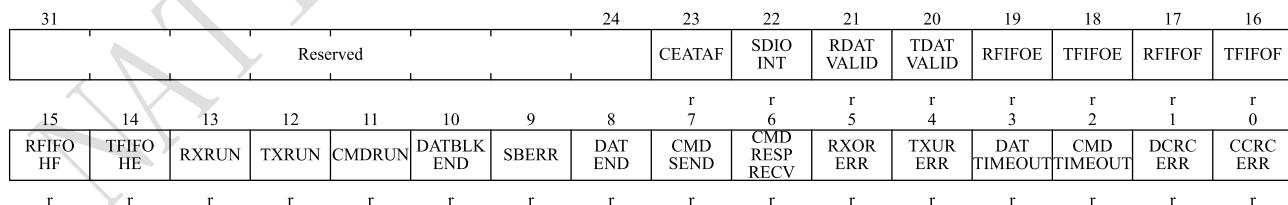
18.7.12 SDIO 状态寄存器 (SDIO_STS)

地址偏移: 0x34

复位值: 0x0000 0000

SDIO_STS 是一个只读寄存器, 它包含两类标志:

- 静态标志 (位[23:22、10:0]): 写入 SDIO 中断清除寄存器 (见 SDIO_INTCLR), 可以清除这些位。
- 动态标志 (位[21:11]): 这些位的状态变化根据它们对应的那部分逻辑而变化 (例如: FIFO 满和空标志变高或变低随 FIFO 的数据写入变化)。



| 位域 | 名称 | 描述 |
|-------|-----------|---|
| 31:24 | Reserved | 保留, 必须保持复位值。 |
| 23 | CEATAF | 在 CMD61 接收到 CE-ATA 命令完成信号 (CE-ATA command completion signal received for CMD61) |
| 22 | SDIOINT | 收到 SDIO 中断 (SDIO interrupt received) |
| 21 | RDATVALID | 在接收 FIFO 中的数据可用 (Data available in receive FIFO) |

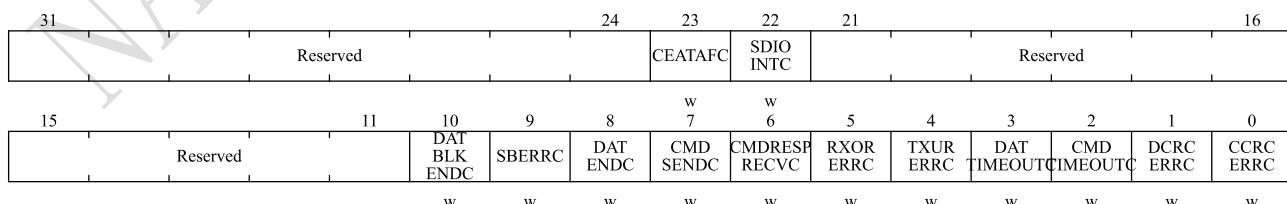
| 位域 | 名称 | 描述 |
|----|-------------|--|
| 20 | TDATVALID | 在发送 FIFO 中的数据可用 (Data available in transmit FIFO) |
| 19 | RFIFOE | 接收 FIFO 空 (Receive FIFO empty) |
| 18 | TFIFOE | 发送 FIFO 空 (Transmit FIFO empty) 若使用了硬件流控制, 当 FIFO 包含 2 个字时, TFIFOE 信号变为有效。 |
| 17 | RFIFOF | 接收 FIFO 满 (Receive FIFO full) 若使用了硬件流控制, 当 FIFO 还差 2 个字满时, RFIFOF 信号变为有效。 |
| 16 | TFIFOF | 发送 FIFO 满 (Transmit FIFO full) |
| 15 | RFIFOHF | 接收 FIFO 半满 (Receive FIFO half full): FIFO 中至少还有 8 个字。 |
| 14 | TFIFOHE | 发送 FIFO 半空 (Transmit FIFO half empty): FIFO 中至少还可以写入 8 个字。 |
| 13 | RXRUN | 正在接收数据 (Data receive in progress) |
| 12 | TXRUN | 正在发送数据 (Data transmit in progress) |
| 11 | CMDRUN | 正在传输命令 (Command transfer in progress) |
| 10 | DATBLKEND | 已发送/接收数据块 (CRC 检测成功) (Data block sent/received (CRC check passed)) |
| 9 | SBERR | 在宽总线模式, 没有在所有数据信号上检测到起始位 (Start bit not detected on all data signals in wide bus mode) |
| 8 | DATEND | 数据结束 (数据计数器, SDIO_DCOUNT = 0) |
| 7 | CMDSEND | 命令已发送 (不需要响应) (Command sent (no response required)) |
| 6 | CMDRESPRECV | 已接收到响应 (CRC 检测成功) (Command response(CRC check passed)) |
| 5 | RXORERR | 接收 FIFO 上溢错误 (Received FIFO overrun error) |
| 4 | TXURERR | 发送 FIFO 下溢错误 (Transmit FIFO underrun error) |
| 3 | DATTIMEOUT | 数据超时 (Data timeout) |
| 2 | CMDTIMEOUT | 命令响应超时 (Command response timeout) 命令超时时间是一个固定的值, 为 64 个 SDIO_CLK 时钟周期。 |
| 1 | DCRCERR | 已发送/接收数据块 (CRC 检测失败) (Data block sent/received(CRC check failed)) |
| 0 | CCRCERR | 已收到命令响应 (CRC 检测失败) (Command response received(CRC check failed)) |

18.7.13 SDIO 清除中断寄存器 (SDIO_INTCLR)

地址偏移: 0x38

复位值: 0x0000 0000

SDIO_INTCLR 是一个只写寄存器, 在对应寄存器位写 '1' 将清除 SDIO_STS 状态寄存器中的对应位。



| 位域 | 名称 | 描述 |
|-------|----------|--------------------------------------|
| 31:24 | Reserved | 保留, 必须保持复位值。 |
| 23 | CEATAFC | CEATAF 标志清除位 (CEATAF flag clear bit) |

| 位域 | 名称 | 描述 |
|-------|-------------|--|
| | | 软件设置该位以清除 SDIO_STS.CEATAF 标志。 |
| 22 | SDIOINTC | SDIOINT 标志清除位 (SDIOINT flag clear bit) 软件设置该位以清除 SDIO_STS.SDIOINT 标志。 |
| 21:11 | Reserved | 保留, 必须保持复位值。 |
| 10 | DATBLKENDC | DATBLKEND 标志清除位 (DATBLKEND flag clear bit) 软件设置该位以清除 SDIO_STS.DATBLKEND 标志。 |
| 9 | SBERRC | SBERR 标志清除位 (SBERR flag clear bit) 软件设置该位以清除 SDIO_STS.SBERR 标志。 |
| 8 | DATENDC | DATEND 标志清除位 (DATEND flag clear bit) 软件设置该位以清除 SDIO_STS.DATEND 标志。 |
| 7 | CMDSEENDC | CMDSEND 标志清除位 (CMDSEND flag clear bit) 软件设置该位以清除 SDIO_STS.CMDSEND 标志。 |
| 6 | CMDRESPRECV | CMDRESPRECV 标志清除位 (CMDRESPRECV flag clear bit) 软件设置该位以清除 SDIO_STS.CMDRESPRECV 标志。 |
| 5 | RXORERRC | RXORERR 标志清除位 (RXORERR flag clear bit) 软件设置该位以清除 SDIO_STS.RXORERR 标志。 |
| 4 | TXURERRC | TXURERR 标志清除位 (TXURERR flag clear bit) 软件设置该位以清除 SDIO_STS.TXURERR 标志。 |
| 3 | DATTIMEOUTC | DATTIMEOUT 标志清除位 (DATTIMEOUT flag clear bit) 软件设置该位以清除 SDIO_STS.DATTIMEOUT 标志。 |
| 2 | CMDTIMEOUTC | CMDTIMEOUT 标志清除位 (CMDTIMEOUT flag clear bit) 软件设置该位以清除 SDIO_STS.CMDTIMEOUT 标志。 |
| 1 | DCRCERRC | DCRCERR 标志清除位 (DCRCERR flag clear bit) 软件设置该位以清除 SDIO_STS.DCRCERR 标志。 |
| 0 | CCRCERRC | CCRCERR 标志清除位。(CCRCERR clear bit) 软件设置该位以清除 SDIO_STS.CCRCERR 标志。 |

18.7.14 SDIO 中断使能寄存器 (SDIO_INTEN)

地址偏移: 0x3C

复位值: 0x0000 0000

在对应位置 ‘1’, SDIO_INTEN 中断使能寄存器决定哪一个状态位产生中断。

| | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|----|------------|------------|----------|----------|-----------|--------------|----------|-----------|------|------|------|------|------|------|------|------|----|
| 31 | Reserved | | | | | | | | 24 | 23 | 22 | 21 | 20 | 19 | 18 | 17 | 16 |
| 15 | RFIFO HFEN | TFIFO HEEN | RXRUN EN | TXRUN EN | CMDRUN EN | DATBLK ENDEN | SBERR EN | DAT ENDEN | rw 7 | rw 6 | rw 5 | rw 4 | rw 3 | rw 2 | rw 1 | rw 0 | |
| 14 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 13 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 12 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 11 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 10 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 9 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 8 | | | | | | | | | | | | | | | | | |

| 位域 | 名称 | 描述 |
|-------|----------|--------------|
| 31:24 | Reserved | 保留, 必须保持复位值。 |

| 位域 | 名称 | 描述 |
|----|-------------|--|
| 23 | CEATAFEN | 允许接收到 CE-ATA 命令完成信号产生中断 (CE-ATA command completion signal received interrupt enable) 由软件设置/清除该位, 允许/关闭在收到 CE-ATA 命令完成信号产生中断功能。 0: 收到 CE-ATA 命令完成信号时不产生中断 1: 收到 CE-ATA 命令完成信号时产生中断 |
| 22 | SDIOINTEN | 允许 SDIO 模式中断已接收中断 (SDIO mode interrupt received interrupt enable) 由软件设置/清除该位, 允许/关闭 SDIO 模式中断已接收中断功能。 1: SDIO 模式中断已接收不产生中断 0: SDIO 模式中断已接收产生中断 |
| 21 | RDATVALIDEN | 接收 FIFO 中的数据有效产生中断 (Data available in Rx FIFO interrupt enable) 由软件设置/清除该位, 允许/关闭接收 FIFO 中的数据有效中断。 0: 接收 FIFO 中的数据有效不产生中断 1: 接收 FIFO 中的数据有效产生中断 |
| 20 | TDATVALIDEN | 发送 FIFO 中的数据有效产生中断 (Data available in Rx FIFO interrupt enable) 由软件设置/清除该位, 允许/关闭发送 FIFO 中的数据有效中断。 0: 发送 FIFO 中的数据有效不产生中断 1: 发送 FIFO 中的数据有效产生中断 |
| 19 | RFIFOEEN | 接收 FIFO 空产生中断 (Rx FIFO empty interrupt enable) 由软件设置/清除该位, 允许/关闭接收 FIFO 空中断。 0: 接收 FIFO 空不产生中断 1: 接收 FIFO 空产生中断 |
| 18 | TFIFOEEN | 发送 FIFO 空产生中断 (Tx FIFO empty interrupt enable) 由软件设置/清除该位, 允许/关闭发送 FIFO 空中断。 0: 发送 FIFO 空不产生中断 1: 发送 FIFO 空产生中断 |
| 17 | RFIFOFEN | 接收 FIFO 满产生中断 (Rx FIFO full interrupt enable) 由软件设置/清除该位, 允许/关闭接收 FIFO 满中断。 0: 接收 FIFO 满不产生中断 1: 接收 FIFO 满产生中断 |
| 16 | TFIFOFEN | 发送 FIFO 满产生中断 (Tx FIFO full interrupt enable) 由软件设置/清除该位, 允许/关闭发送 FIFO 满中断。 0: 发送 FIFO 满不产生中断 1: 发送 FIFO 满产生中断 |
| 15 | RFIFOHFEN | 接收 FIFO 半满产生中断 (Rx FIFO half full interrupt enable) 由软件设置/清除该位, 允许/关闭接收 FIFO 半满中断。 0: 接收 FIFO 半满不产生中断 1: 接收 FIFO 半满产生中断 |
| 14 | TFIFOHEEN | 发送 FIFO 半空产生中断 (Tx FIFO half empty interrupt enable) 由软件设置/清除该位, 允许/关闭发送 FIFO 半空中断。 0: 发送 FIFO 半空不产生中断 1: 发送 FIFO 半空产生中断 |
| 13 | RXRUNEN | 正在接收数据产生中断 (Data receive acting interrupt enable) |

| 位域 | 名称 | 描述 |
|----|---------------|---|
| | | 由软件设置/清除该位, 允许/关闭正在接收数据中断。 0: 正在接收数据不产生中断 1: 正在接收数据产生中断 |
| 12 | TXRUNEN | 正在发送数据产生中断 (Data transmit acting interrupt enable) 由软件设置/清除该位, 允许/关闭正在发送数据中断。 0: 正在发送数据不产生中断 1: 正在发送数据产生中断 |
| 11 | CMDRUNEN | 正在传输命令产生中断 (Command acting interrupt enable) 由软件设置/清除该位, 允许/关闭正在传输命令中断。 0: 正在传输命令不产生中断 1: 正在传输命令产生中断 |
| 10 | DATBLKENDEN | 数据块传输结束产生中断 (Data block end interrupt enable) 由软件设置/清除该位, 允许/关闭数据块传输结束中断。 0: 数据块传输结束不产生中断 1: 数据块传输结束产生中断 |
| 9 | SBERREN | 起始位错误产生中断 (Start bit error interrupt enable) 由软件设置/清除该位, 允许/关闭起始位错误中断。 0: 起始位错误不产生中断 1: 起始位错误产生中断 |
| 8 | DATENDEN | 数据传输结束产生中断 (Data end interrupt enable) 由软件设置/清除该位, 允许/关闭数据传输结束中断。 0: 数据传输结束不产生中断 1: 数据传输结束产生中断 |
| 7 | CMDSENDEN | 命令已发送产生中断 (Command sent interrupt enable) 由软件设置/清除该位, 允许/关闭命令已发送中断。 0: 命令已发送不产生中断 1: 命令已发送产生中断 |
| 6 | CMDRESPRECVEN | 接收到响应产生中断 (Command response received interrupt enable) 由软件设置/清除该位, 允许/关闭接收到响应中断。 0: 接收到响应不产生中断 1: 接收到响应产生中断 |
| 5 | RXORERREN | 接收 FIFO 上溢错误产生中断 (Rx FIFO overrun error interrupt enable) 由软件设置/清除该位, 允许/关闭接收 FIFO 上溢错误中断。 0: 接收 FIFO 上溢错误不产生中断 1: 接收 FIFO 上溢错误产生中断 |
| 4 | TXURERREN | 发送 FIFO 下溢错误产生中断 (Tx FIFO underrun error interrupt enable) 由软件设置/清除该位, 允许/关闭发送 FIFO 下溢错误中断。 0: 发送 FIFO 下溢错误不产生中断 1: 发送 FIFO 下溢错误产生中断 |
| 3 | DATTIMEOUTEN | 数据超时产生中断 (Data timeout interrupt enable) 由软件设置/清除该位, 允许/关闭数据超时中断。 0: 数据超时不产生中断 |

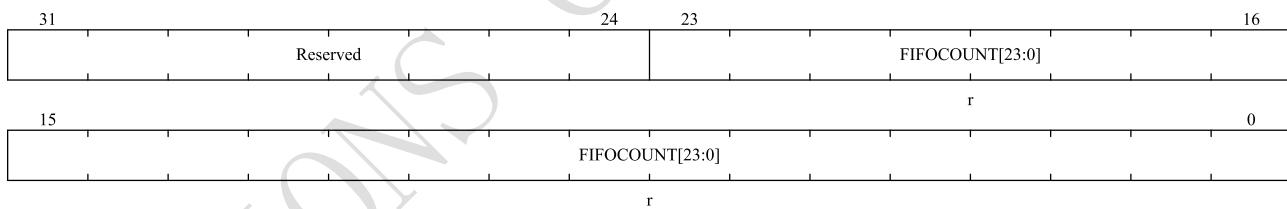
| 位域 | 名称 | 描述 |
|----|--------------|--|
| | | 1: 数据超时产生中断 |
| 2 | CMDTIMEOUTEN | 命令超时产生中断 (Command timeout interrupt enable) 由软件设置/清除该位, 允许/关闭命令超时中断。 0: 命令超时不产生中断 1: 命令超时产生中断 |
| 1 | DCRCERREN | 数据块 CRC 检测失败产生中断 (Data CRC fail interrupt enable) 由软件设置/清除该位, 允许/关闭数据块 CRC 检测失败中断。 0: 数据块 CRC 检测失败不产生中断 1: 数据块 CRC 检测失败产生中断 |
| 0 | CCRCERREN | 命令 CRC 检测失败产生中断 (Command CRC fail interrupt enable) 由软件设置/清除该位, 允许/关闭命令 CRC 检测失败中断。 0: 命令 CRC 检测失败不产生中断 1: 命令 CRC 检测失败产生中断 |

18.7.15 SDIO FIFO 计数器寄存器 (SDIO_FIFOCOUNT)

地址偏移: 0x48

复位值: 0x0000 0000

SDIO_FIFOCOUNT 寄存器包含还未写入 FIFO 或还未从 FIFO 读出的数据字数目。当设置了 SDIO_DATCTRL.DATEN 位, 并且 DPSM 处于空闲状态时, FIFO 计数器从数据长度寄存器 (见 SDIO_DATLEN) 加载数值。如果数据长度未与字对齐 (4 的倍数), 则最后剩下的 1~3 个字节被当成一个字处理。



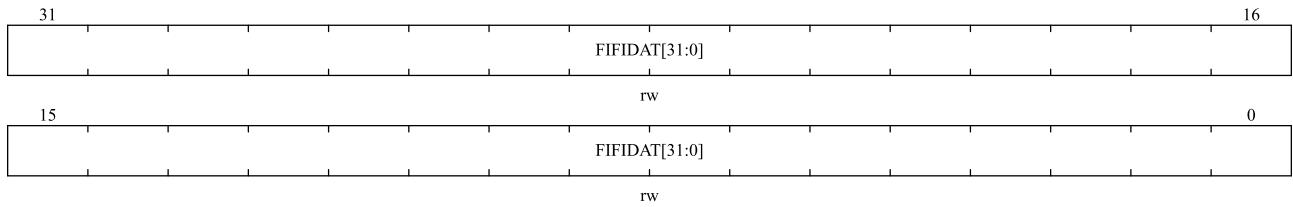
| 位域 | 名称 | 描述 |
|-------|-----------|-------------------------------|
| 31:24 | Reserved | 保留, 必须保持复位值。 |
| 23:0 | FIFOCOUNT | 将要写入 FIFO 或将要从 FIFO 读出数据字的数目。 |

18.7.16 SDIO 数据 FIFO 寄存器 (SDIO_DATFIFO)

地址偏移: 0x80

复位值: 0x0000 0000

接收和发送 FIFO 是 32 位的宽度读或写一组寄存器, 它在连续的 32 个地址上包含 32 个寄存器, CPU 可以使用 FIFO 读写多个操作数。



| 位域 | 名称 | 描述 |
|------|---------|--|
| 31:0 | FIFIDAT | 接收或发送 FIFO 数据 (Receive and transmit FIFO data) FIFO 数据占据 32 个 32 位的字, 地址为: (SDIO 基址 + 0x80) 至 (SDIO 基址 + 0xFC) |

19 控制器局域网(CAN)

19.1 CAN 简介

作为 CAN 网络接口，基本扩展 CAN 支持 CAN 协议 2.0A 和 2.0B。它可以高效地处理大量接收到的消息，大大降低 CPU 资源的消耗。报文发送的优先级特性可以通过软件进行配置，CAN 的硬件功能可以支持时间触发的通信方式，适用于一些对安全性要求较高的应用。

19.2 CAN 的主要特性

- 波特率最高支持 1Mbit/s
- 支持 CAN 协议 2.0A/B.
- 支持时间触发通讯功能
- 支持独立的中断控制
- CAN Core 管理 CAN 和 512 字节 SRAM 存储器之间的通信（参见图 19-3）
- 双 CAN: CAN1 和 CAN2 各带 512 字节的 SRAM

时间触发通信模式

- 16 位自由运行定时器
- 禁止自动重传模式。
- 可配置最后 2 个数据字节为发送时间戳。

发送

- 有三个发送邮箱。
- 记录发送 SOF 时间的时间戳功能
- 软件可以配置发送消息的优先级特性。

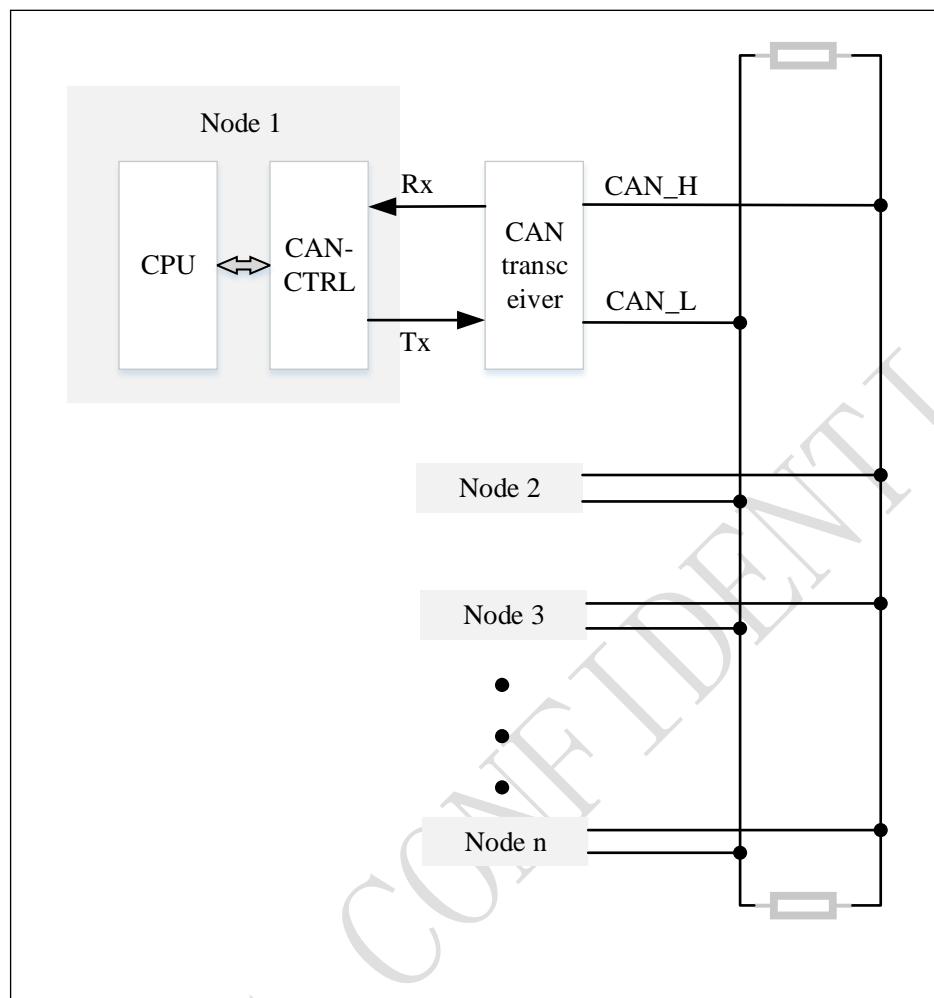
接收

- 过滤组支持标识符列表模式
- 每个 CAN 有两个接收 FIFO，每个深度为 3 级
- 共有 14 个过滤器组（每个 CAN 模块单独拥有）
- 可配置的 FIFO 溢出处理方法
- 记录接收 SOF 时间的时间戳功能

19.3 CAN 整体介绍

随着 CAN 的广泛应用，CAN 网络的节点数量迅速增长，多个 CAN 节点通过 CAN 网络连接。随着 CAN 节点数量的增加，CAN 网络中的报文也急剧增加，会占用大量的 CPU 资源。在这个 CAN 控制器中，增加了接收 FIFO 和过滤机制作为 CPU 消息处理的硬件支持，降低了 CAN 消息的实时响应要求。

图 19-1 CAN 网络拓扑



19.3.1 CAN 模块

CAN 模块可自动收发 CAN 报文，支持标准标识符（11 位）和扩展标识符（29 位）。

19.3.2 CAN 工作模式

初始化、正常和睡眠模式是 CAN 的三种主要工作模式。CANTX 引脚的内部上拉电阻在硬件复位后被激活，CAN 工作在睡眠模式以降低功耗。

软件可以设置 CAN_MCTRL.INIRQ 和 CAN_MCTRL.SLPRQ 位来配置 CAN 进入初始化或睡眠模式。软件读 CAN_MSTS.INIAK 或 CAN_MSTS.SLPAK 位的值来确认是否进入初始化或睡眠模式，此时 CANTX 引脚的内部上拉电阻被禁用。

当 CAN_MSTS.INIAK 和 CAN_MSTS.SLPAK 位都为“0”时，CAN 处于正常模式，它必须与 CAN 总线同步才能进入正常模式。当在 CANRX 引脚上监测到 11 个连续的隐性位时，CAN 总线处于空闲状态，同步完成。

19.3.2.1 正常模式

初始化完成后，软件配置 CAN 进入正常模式。清除 CAN_MCTRL.INIRQ 位并等待硬件清除 CAN_MSTS.INIRQ 位以确认 CAN 进入正常模式。只有与 CAN 总线同步完成后，CAN 才能正常收发报文。

过滤器组的位宽和模式的设置必须在过滤器处于初始化模式 (CAN_FMC.FINITM 位为 1) 时完成。过滤器初始值的设置必须在未激活时完成 (对应的 CAN_FA1.FAC 位为 0)。

19.3.2.2 初始化模式

软件只有在 CAN 处于初始化模式时才能进行初始化配置。设置 CAN_MCTRL.INIRQ 位并清除 CAN_MCTRL.SLPRQ 位，并等待硬件设置 CAN_MSTS.INIAK 位以确认 CAN 进入初始化模式。进入初始化模式时，寄存器配置不受影响。CAN 处于初始化模式时，报文收发被禁止，CANTX 引脚输出一个隐性位（高电平）。要退出初始化模式，清除 CAN_MCTRL.INIRQ 位，并等待硬件清除 CAN_MSTS.INIAK 位以确认 CAN 退出初始化模式。

通过软件对 CAN 进行初始化配置，至少需要配置位时间特性寄存器 (CAN_BTIM) 和控制寄存器 (CAN_MCTRL)。软件需要设置 CAN_FMC.FINITM 位来初始化配置 CAN 的过滤器组 (模式、位宽、FIFO 关联、激活和过滤器值)。配置 CAN 的过滤器组不一定需要处于初始化模式。

需要注意的是当 CAN_FMC.FINITM=1 时，禁止接收报文。如果要修改对应过滤器的值，需要先清除过滤器激活位 (在 CAN_FA1 中)。有必要保持未使用的过滤器组处于非活动状态 (将其 CAN_FA1.FAC 位保持为“0”)。

19.3.2.3 睡眠模式 (低功耗)

要进入睡眠模式，需要设置 CAN_MCTRL.SLPRQ 位，并等待硬件设置 CAN_MSTS.SLPAK 位以确认 CAN 进入睡眠模式。在未使用时 CAN 可以配置为睡眠模式以降低功耗。在睡眠模式下，CAN 的时钟停止工作，但软件仍然可以访问发送/接收邮箱寄存器。当 CAN 处于睡眠模式时，CAN_MCTRL.INIRQ 位必须置 1，并且 CAN_MCTRL.SLPRQ 位必须同时清零才能进入初始化模式。

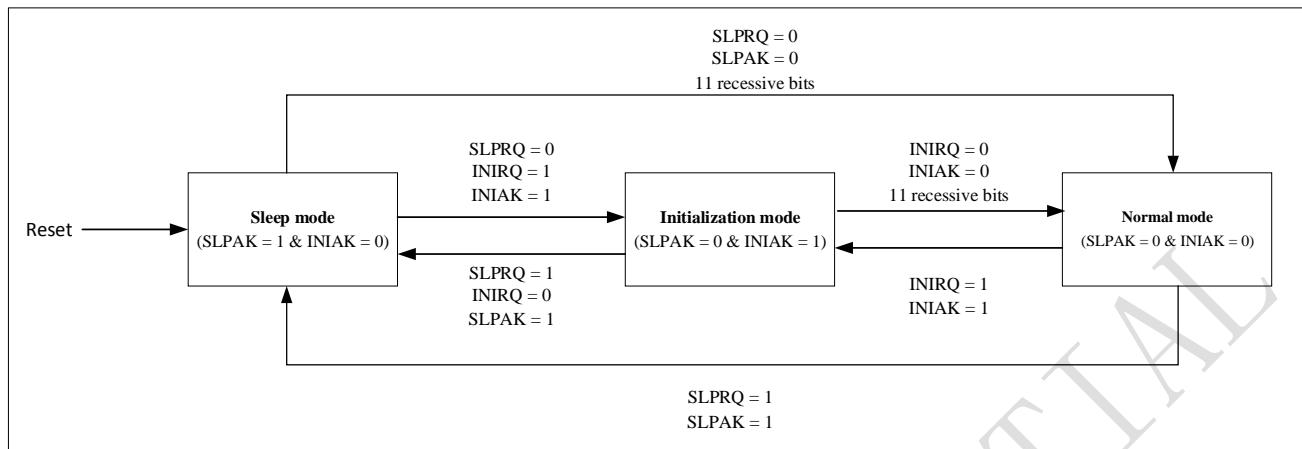
唤醒 CAN 有两种方式 (CAN 退出睡眠模式)：

- 当 CAN_MCTRL.AWKUM 位被置位 (使能硬件自动唤醒) 时，一旦检测到 CAN 总线的活动，硬件将自动清除 CAN_MSTS.SLPRQ 位以唤醒 CAN。
- 当 CAN_MCTRL.AWKUM 位清零 (使能软件唤醒)，并且唤醒中断发生时，软件必须清零 CAN_MCTRL.SLPRQ 位才能退出睡眠状态。

如果唤醒中断 (设置 CAN_INTE.WKUITE 位) 使能，一旦检测到 CAN 总线活动，将产生唤醒中断，无论硬件是否使能自动唤醒 CAN。

在进入正常模式之前，CAN 必须与 CAN 总线同步等到 CAN_MSTS.SLPAK 位清零以确认已退出睡眠模式。请参考图 19-2。

图 19-2 CAN 工作模式



注：硬件设置 `CAN_MSTS.INIAK` 或 `CAN_MSTS.SLPAK` 位以响应睡眠或初始化请求的状态。

19.3.3 发送邮箱

应用程序可以通过三个发送邮箱发送消息，发送三个邮箱消息的顺序是由发送调度器根据消息的优先级决定的，优先级可以由消息的标识符决定，也可以由发送请求的顺序决定。

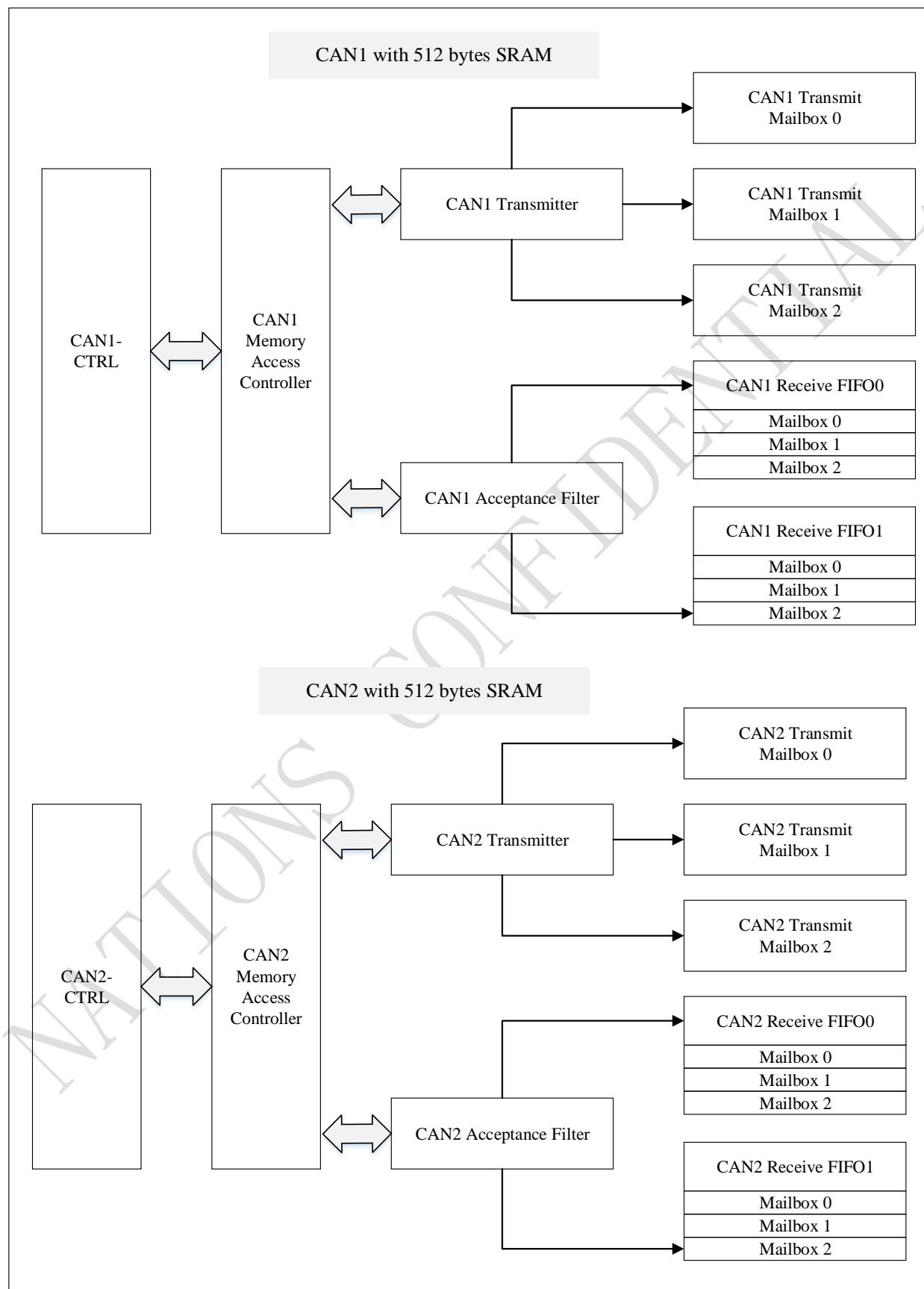
19.3.4 接收过滤器

每个 CAN 有 14 个可配置的标识符过滤器组。应用配置标识符过滤器组后，接收邮箱会自动接收需要的邮件，丢弃其他邮件。

19.3.5 接收 FIFO

每个 CAN 有两个接收 FIFO，每个 FIFO 可以存储三个完整的报文。无需应用程序管理，由硬件管理。

图 19-3 双 CAN 框图



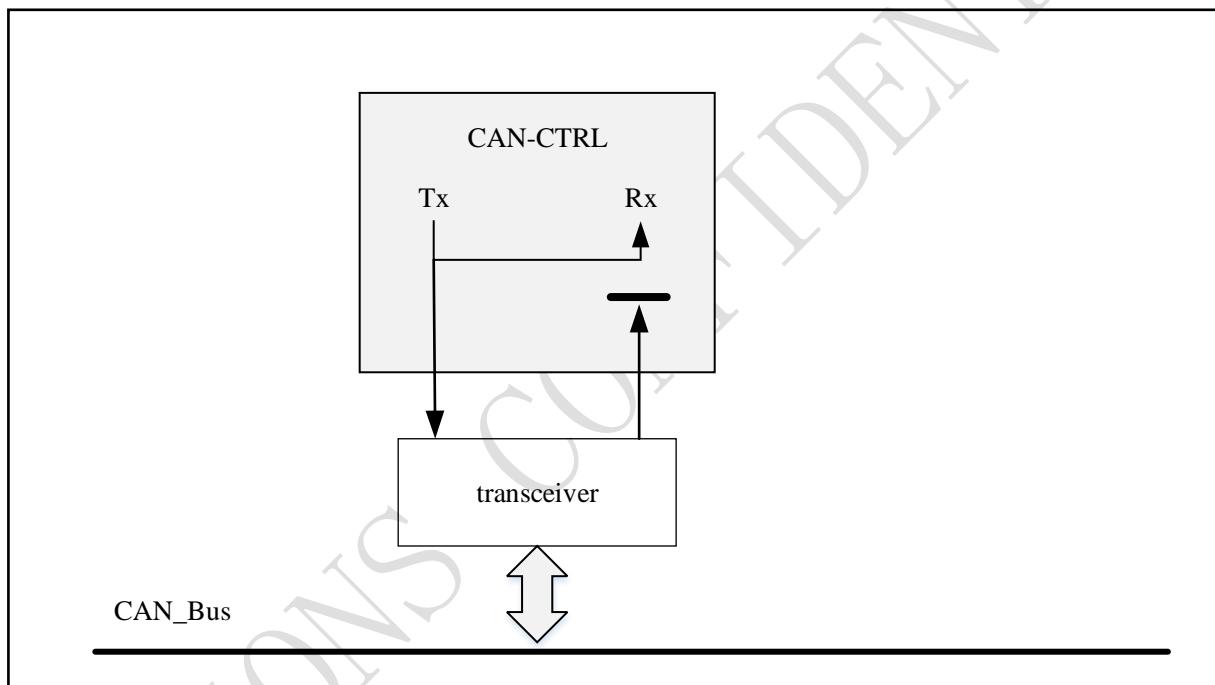
19.3.6 CAN 测试模式

在初始化模式下，必须通过组合 CAN_BTIM.SLM 位和 CAN_BTIM.LBM 位来选择测试模式。选择测试模式后，软件需要清除 CAN_MCTRL.INIRQ 位退出初始化模式，进入测试模式。

19.3.6.1 回环模式

回环模式可用于自检。在回环模式下，CAN 将发送的消息作为接收消息保存在接收邮箱中（如果可以通过接收过滤）。在回环模式下，CAN 在内部将 Tx 输出反馈到 Rx 输入，完全忽略 CANRX 引脚的实际状态。可以在 CANTX 引脚上检测到发送的消息。为了避免外部影响，CAN 内核忽略了确认错误（在数据/远程帧确认位的时刻，不检测是否有显性位）。要进入回环模式，应清除 CAN_BTIM.SLM 位并设置 CAN_BTIM.LBM 位。

图 19-4 回环模式

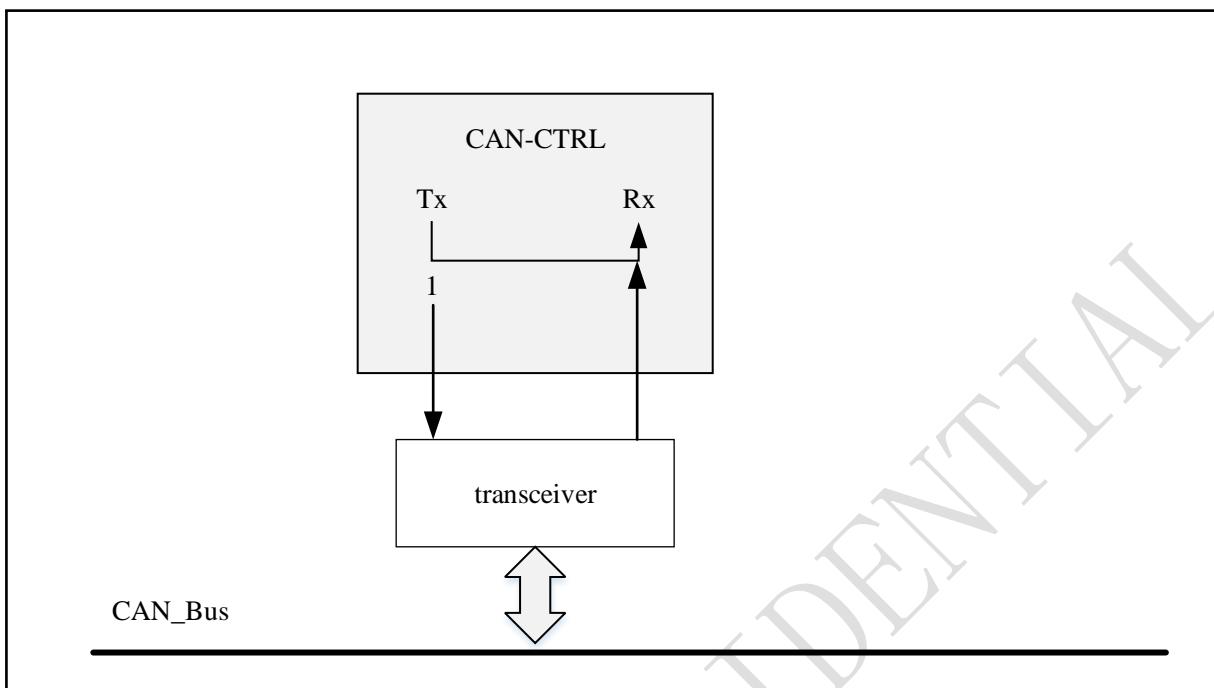


19.3.6.2 静默模式

在静默模式下，CAN 可以正常接收数据帧和远程帧，但只能发送隐性位，不能真正发送消息。如果 CAN 需要发送过载标志、主动错误标志或 ACK 位（这些是显性位），这些显性位在内部连接回来以便被 CAN 内核检测到。同时，CAN 总线不会受到影响，仍然保持在隐性位状态。因此，静默模式通常用于分析 CAN 总线的活动，而不影响总线，因为显性位实际上并未发送到总线。

要进入静默模式，应设置 CAN_BTIM.SLM 位并清除 CAN_BTIM.LBM 位。

图 19-5 静默模式

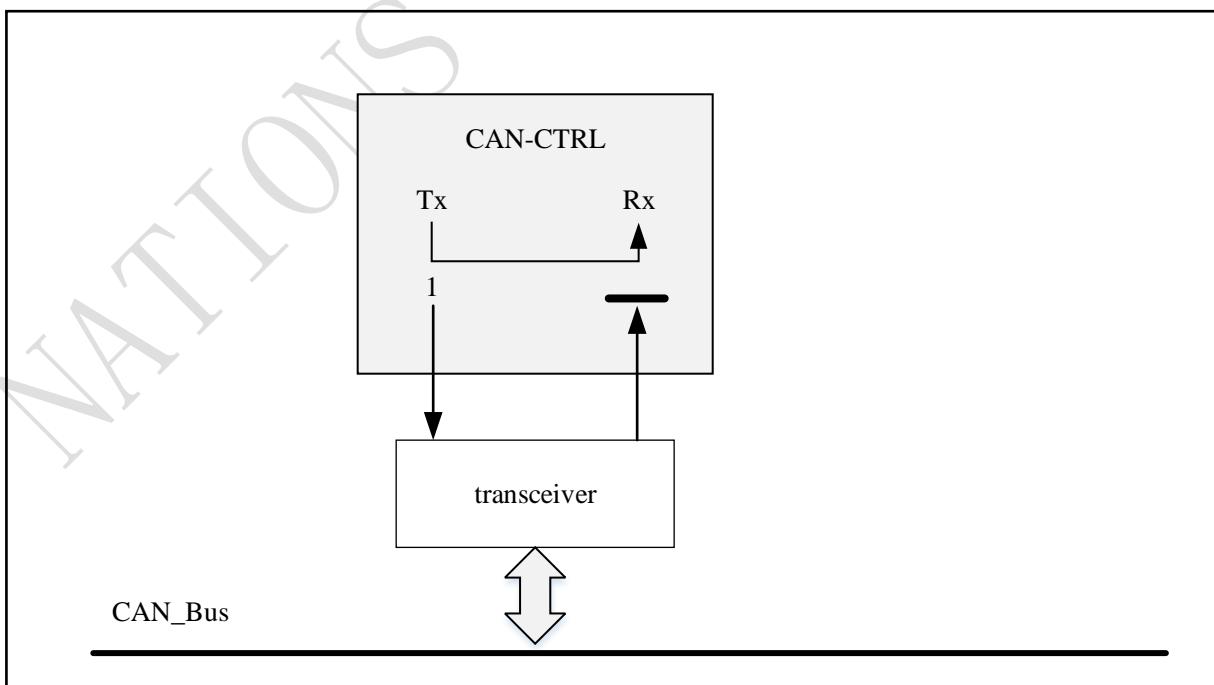


19.3.6.3 回环静默模式

在回环静默模式下, CANRX 引脚与 CAN 总线断开, 而 CANTX 引脚被驱动为隐性位状态。它可用于“热自检”, 就像可以在回环模式下测试 CAN 一样, 但不影响 CANTX 和 CANRX 连接的整个 CAN 系统。

要进入回环静默模式, 应设置 CAN_BTIM.SLM 位和 CAN_BTIM.LBM 位.

图 19-6 回环静默模式



19.3.7 CAN 调试模式

CAN 可以根据以下配置位的状态继续正常工作或停止工作:

- 调试支持(DBG)模块中 CAN1 的 DBG_CTRL.CAN1_STOP 位或 CAN2 的 DBG_CTRL.CAN2_STOP 位。
参见第 19 章 节: 外设调试支持。
- CAN_MCTRL.DBGF 位见 19.7.3.1 节:CAN_MCTRL。

当微控制器处于调试模式时, Cortex-M4F 内核处于挂起状态。

19.4 CAN 功能描述

19.4.1 发送处理

发送消息的流程如下:

- 应用程序选择一个空的发送邮箱;
- 将标识符、数据长度和要发送的数据写入发送邮箱寄存器;
- 设置 CAN_TMIx.TXRQ 位请求发送 (设置 CAN_TMIx.TXRQ 后邮箱不再是空邮箱, 软件无权写入邮箱寄存器);
- 邮箱进入 pending 状态, 等待成为最高优先级, 见 19.4.1.1 发送优先级;
- 邮箱成为最高优先级邮箱后, 转为就绪状态;
- CAN 总线一进入空闲状态就发送就绪邮箱中的消息, 然后进入发送状态。
- 邮箱中的消息发送成功后变为空邮箱;
- 硬件设置 CAN_TSTS 寄存器中对应邮箱的 RQCPM 和 TXOKM 位, 表示发送成功。

需要注意的是, 如果发送失败, CAN_TSTS.ALSTM 位被设置表示失败是由仲裁引起的, 或者 CAN_TSTS.TERRM 位被设置表示是传输错误引起的 (具体错误请查看错误状态寄存器 CAN_ESTS 的 LEC[2:0]错误代码位)。

19.4.1.1 发送优先级

由发送请求的顺序决定:

设置 CAN_MCTRL.TXFP 位, 发送邮箱可以配置为发送 FIFO。此时, 发送的优先级由发送请求的顺序决定。这种模式对于分段传输很有用。

由标识符决定:

根据 CAN 协议, 具有最低标识符的消息具有最高优先级。如果标识符的值相等, 则先发送邮箱号小的消息。当注册多个发送邮箱时, 发送顺序由邮箱中邮件的标识符决定。

19.4.1.2 取消发送

设置 CAN_TSTS.ABRQM 位可以中止发送请求。如果邮箱就绪或挂起, 发送请求将立即中止。如果邮箱处于发送状态, 请求中止可能会导致两种结果:

- 如果邮箱中的消息发送失败，邮箱变为就绪状态，则发送请求中止，邮箱变为空邮箱并清除 CAN_TSTS.TXOKM 位；
- 如果邮箱中的消息发送成功，邮箱变为空邮箱，CAN_TSTS.TXOKM 位将由硬件设置为 1。

因此，当发送邮箱处于发送状态时，无论发送结果如何，发送操作完成后邮箱都会变成空邮箱。

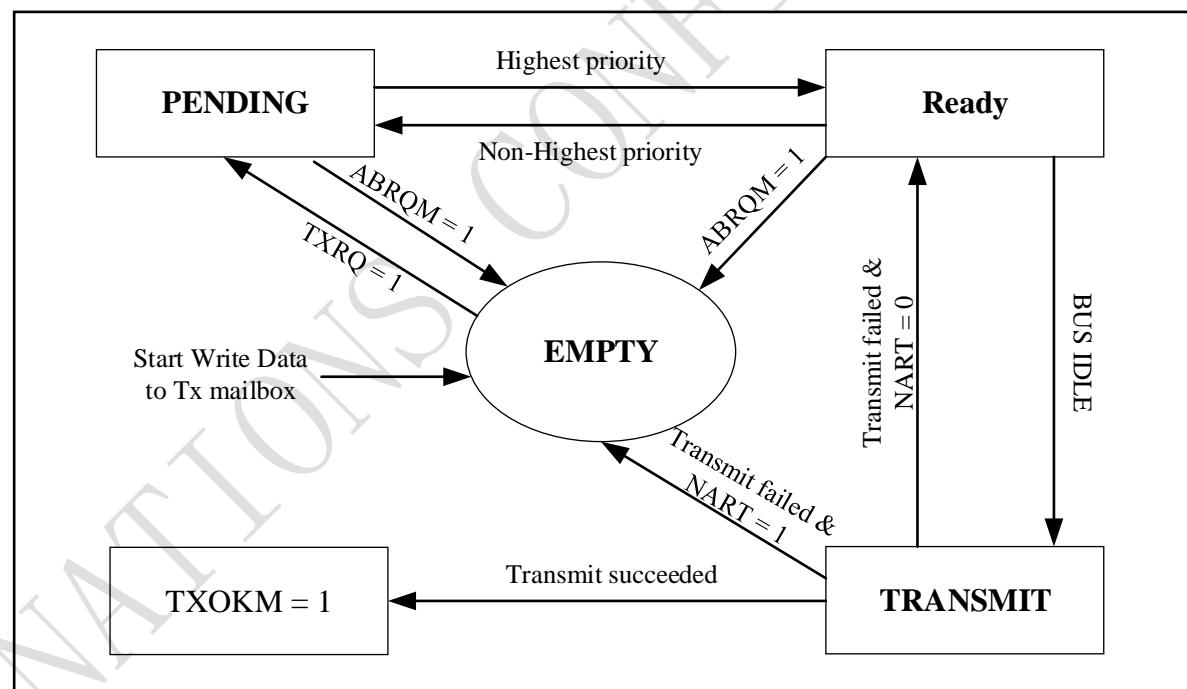
19.4.2 时间触发通信模式

CAN 的内部定时器在时间触发通信模式下被激活。它在每个 CAN 位时间递增（参见第 19.4.7 节）。CAN 在收发帧起始位的采样点位置对内部定时器的值进行采样，采样值即为收发邮箱的时间戳。内部定时器生成的时间戳将分别存储在 CAN_RMDTx/CAN_TMDTx 寄存器中。

19.4.3 非自动重传模式

要启用非自动重传模式，应设置 CAN_MCTRL.NART 位。该模式对应 CAN 标准中时间触发通信选项的功能。在非自动重传模式下，发送操作只会执行一次。如果发送操作失败，无论是仲裁丢失还是错误，硬件都不会自动再次发送报文。发送操作结束时，硬件判定发送请求已经完成，硬件设置 CAN_TSTS.RQCPM 位。同时，传输结果可以查询 CAN_TSTS.TXOKM、CAN_TSTS.ALSTM 和 CAN_TSTS.TERRM 位。

图 19-7 发送邮箱状态



19.4.4 接收管理

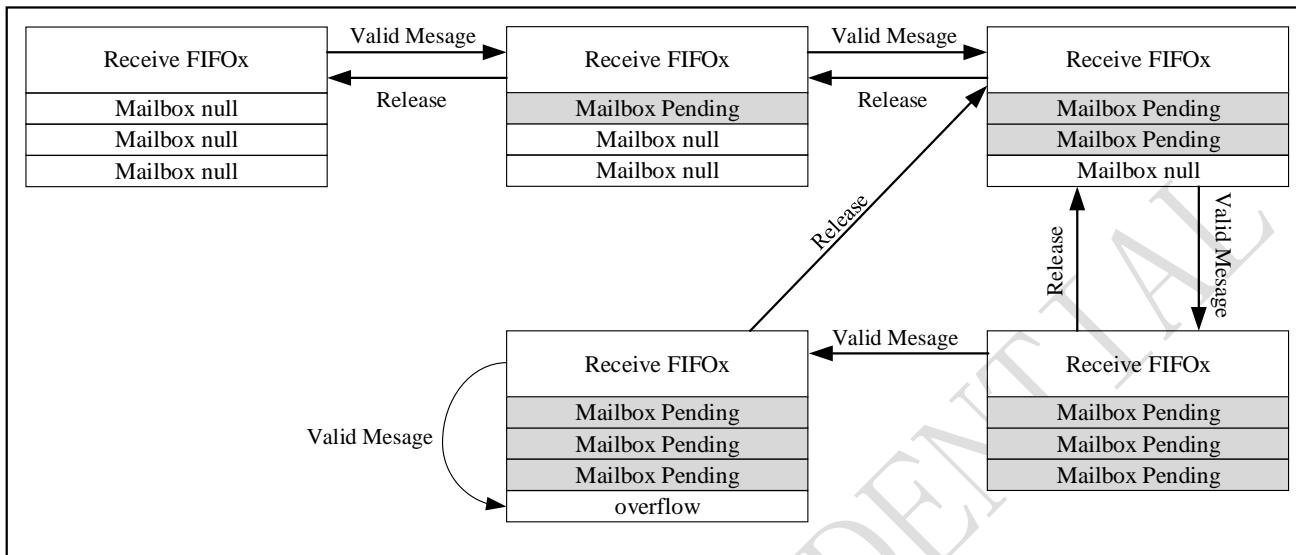
具有 3 级深度的 FIFO 用于存储接收到的消息。当应用程序读取 FIFO 输出邮箱时，它会读取 FIFO 中第一个接收到的消息。FIFO 完全由硬件管理，可以简化应用程序，保证数据的一致性，减少 CPU 的处理时间。

19.4.4.1 有效报文

根据 CAN 协议，当消息被正确接收（直到 EOF 字段的最后一位没有错误发送）并通过标识符过滤时，则该

消息被标记为有效消息。请参考 19.4.5 章节：标识符过滤。

图 19-8 接收邮箱状态



19.4.4.2 FIFO 接收

一个 FIFO 包含三级深度的邮箱，初始状态为空。接收到第一个有效消息后，其中一个邮箱将被挂起，硬件会将 CAN_RFF.FFMP[1:0]位设置为 1，表示收到有效消息。在释放邮箱之前再次收到有效消息。这时候会同时挂起两个邮箱，硬件会将 CAN_RFF.FFMP[1:0]位设置为 2，表示有两个有效的报文处于挂起状态。如上所述，第三条有效消息将暂停所有三个邮箱并将 CAN_RFF.FFMP[1:0]位设置为 3。

当 FIFO 的三级邮箱全部挂起时，再次接收到有效报文会导致邮箱溢出丢失报文，硬件会将 CAN_RFF.FFOVR 位设置为 1，表示事件发生。丢失消息的规则取决于 FIFO 的配置。如果禁用 FIFO 锁定功能（清除 CAN_MCTRL.RFLM 位），则 FIFO 中接收的最后一条消息将被新消息覆盖。这样最新接收到的报文不会被丢弃；如果启用 FIFO 锁定功能（设置 CAN_MCTRL.RFLM 位），那么新接收到的报文将被丢弃，软件可以读取 FIFO 中的前三个报文。

19.4.4.3 FIFO 释放

存储在 FIFO 中的消息将通过相应的接收邮箱读取。软件读取邮箱报文并通过设置 CAN_RFR.RFOM 位为 1 释放邮箱，CAN_RFF.FFMP[1:0]位减 1 直到为 0。

19.4.4.4 接收相关中断

当消息存储在接收 FIFO 中时，硬件将更新 CAN_RFF.FFMP[1:0]位。如果当前使能了 FIFO 报文挂起中断 (CAN_INTE.FMPITE 位置位)，则将产生挂起中断请求。

当存储第三条消息时，FIFO 变满，然后 CAN_RFF.FFULL 位将被置位，如果当前使能 FIFO 满中断 (CAN_INTE.FFITE 位置位)，将产生一个 FIFO 满中断请求。

当 FIFO 溢出时，FFOVR 位将被设置。如果当前使能 FIFO 溢出中断 (CAN_INTE.FOVITE 位置位)，将产生 FIFO 溢出中断请求。

19.4.5 标识符过滤

在 CAN 网络中，当 CAN 处于发送器状态时，它通过向总线发送消息的方式向各个节点广播消息；当 CAN 处于接收者状态时，节点收到报文后根据报文的标识来判断是否需要该报文。如果报文有效，CAN 内核将报文复制到 SRAM (CAN 自身的 SRAM)；如果不需要，该消息将被丢弃。此过程不需要软件干预。与软件过滤相比，硬件过滤降低了 CPU 使用率。CAN 控制器为应用程序提供了 14 个位宽可变的可配置过滤器组 (0~13) 来满足这一需求，这些过滤器组用于接收仅软件所需的那些消息。每个过滤器组 x 包含两个 32 位寄存器，即 CAN_FxR0 和 CAN_FxR1。

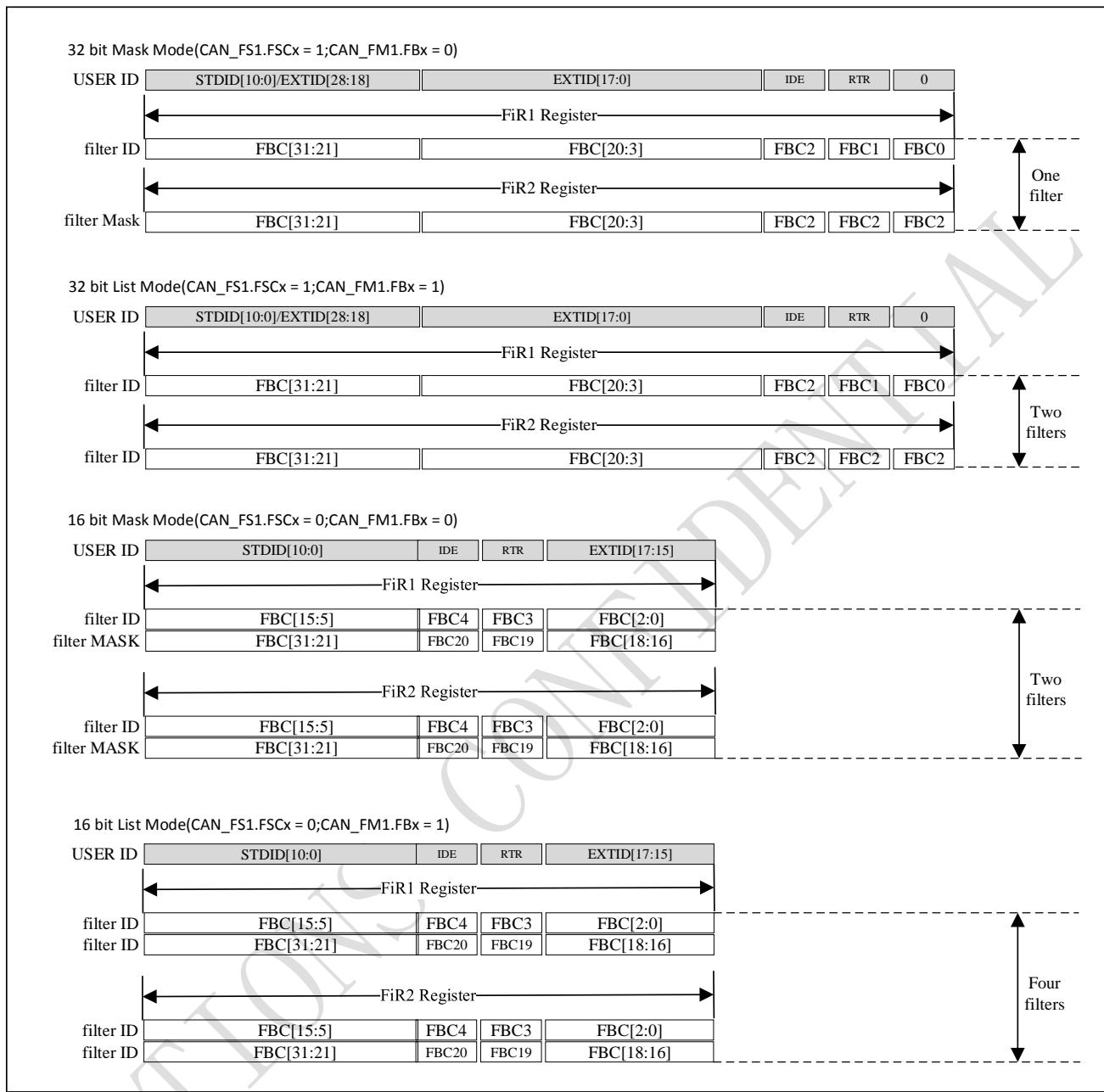
19.4.5.1 过滤器位宽和模式的设置

根据过滤器组的模式和位宽设置，对过滤器组中的每个过滤器进行编号（过滤器编号，从 0 到一个确定的最大值）。过滤器配置见下图。过滤器组可以通过对应的 CAN_FMC 寄存器进行配置。应用程序未使用的过滤器组应保持禁用状态。在配置过滤器组之前，必须通过清除 CAN_FA1.FAC 位将其设置为禁用状态。

通过设置相应的 CAN_FS1.FSCx 位，您可以配置过滤器组的位宽，参见图 19-9。

通过 CAN_FM1.FBx 位，可以将对应的掩码/标识符寄存器配置为标识符列表或标识符掩码模式。过滤器组设置为工作在掩码模式，可过滤出一组标识符。过滤器组设置为在标识符列表模式下工作，可过滤掉一个标识符。

图 19-9 过滤器位宽设置-寄存器组织



19.4.5.2 可变位宽

每个滤波器组的位宽可以独立配置。每个滤波器组可配置为一个 32 位滤波器：包括 STDID[10:0]、EXTID[17:0]、IDE 和 RTRQ 位；或两个 16 位过滤器，包括 STDID[10:0]、IDE、RTRQ 和 EXTID[17:15]位，见图 19-9。此外，过滤器可以配置为两种不同的模式，即掩码模式和标识符列表模式。

掩码模式

过滤器 ID 用于存储标识符格式，过滤器掩码用于指示哪些位必须检查，哪些位可以忽略。

标识符列表模式

过滤器 ID 用于存储标识符格式。此时没有掩码进行比较，可以使用掩码位多存储一个过滤器 ID。但此时消息的标识需要与过滤器 ID 格式完全一致，否则无法通过过滤器。

19.4.5.3 过滤匹配序列号

CAN 内核收到有效消息后，会将消息 ID 与过滤器一一匹配，直到有一个过滤器通过或所有过滤器都失败。如果此消息未能通过任何启用的过滤器，则它将被丢弃。否则当 CAN 内核找到 ID 可以通过的第一个过滤器时，它会将过滤器索引与 CAN 报文打包并根据过滤器设置存储在 SRAM 中的接收 FIFO 中 (CAN_FFA1 决定存储在哪个 FIFO 中)。用户可以在 CAN_RMDTx 寄存器的 FMI[7:0]位中找到滤波器索引。此过滤器匹配索引可以帮助识别它在此接收 FIFO 中的消息类型。

过滤器匹配序列号有两种使用方式。第一个是将过滤器匹配序列号与一系列预期值进行比较。另一种是使用过滤器匹配的序列号作为索引来访问目标地址。在对过滤器进行编号时，不考虑过滤器组是否处于活动状态。此外，每个 FIFO 为其关联的过滤器编号。请参考以下示例。

对于掩码模式的过滤器，软件只需要比较需要的掩码位（必须匹配的位）。对于标识符列表模式的过滤器（非筛选过滤器），软件无需直接与标识符进行比较。

表 19-1 过滤器编号示例

| 指向 FIFOx | 过滤器组 | 过滤器模式 | FIFO0 过滤器编号 |
|----------|------|----------|-------------|
| FIFO | 0 | 32 位掩码模式 | 0 |
| | 2 | 16 位掩码模式 | 1/2 |
| | 5 | 32 位列表模式 | 3/4 |
| | 7 | 16 位列表模式 | 5/6/7/8 |
| | 9 | 32 位列表模式 | 9/10 |
| | 11 | 16 位列表模式 | 11/12/13/14 |
| | 13 | 32 位掩码模式 | 15 |
| 指向 FIFOx | 过滤器组 | 过滤器模式 | FIFO1 过滤器编号 |
| FIFO1 | 1 | 32 位列表模式 | 0/1 |
| | 3 | 16 位列表模式 | 2/3/4/5 |
| | 4 | 32 位掩码模式 | 6 |
| | 6 | 16 位掩码模式 | 7/8 |
| | 8 | 32 位掩码模式 | 9 |
| | 10 | 16 位掩码模式 | 10/11 |
| | 12 | 32 位列表模式 | 12/13 |

19.4.5.4 过滤器优先规则

根据过滤器的不同配置，一个消息标识符可以被多个过滤器过滤是可能的；在这种情况下，首先根据位宽确定接收邮箱中存储的过滤器匹配序列号，32位宽的过滤器比16位宽的过滤器具有更高的优先级。对于具有相同位宽的过滤器，标识符列表模式优先于掩码模式。如果过滤器具有相同的位宽和模式，则优先级由过滤器组编号确定，编号较小的过滤器组优先级较高。在过滤器组内，过滤器编号越小，优先级越高。

图 19-10 过滤机制示例

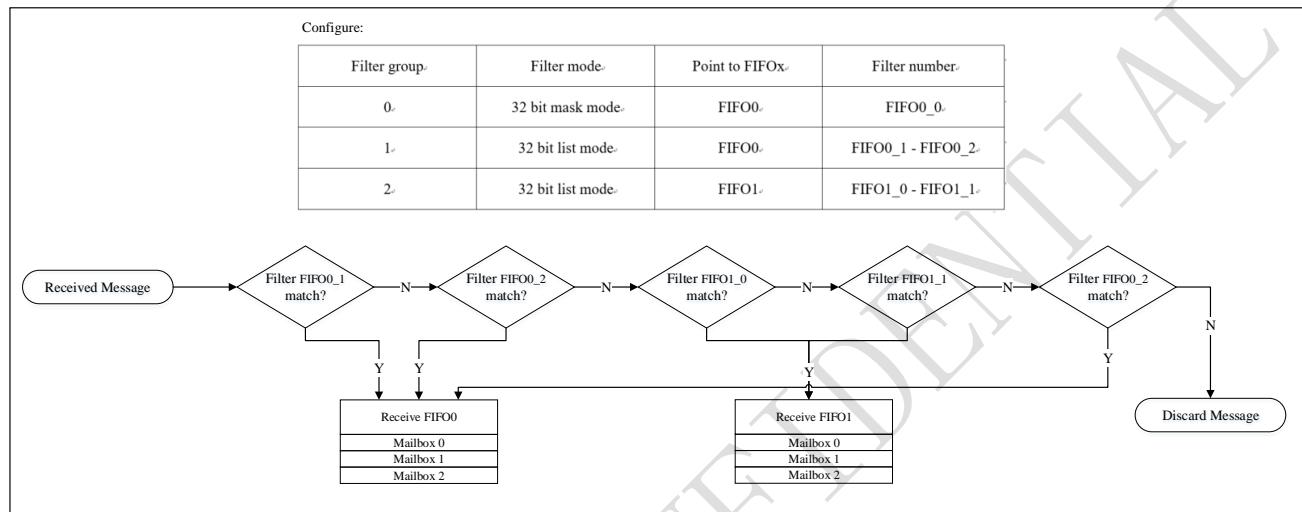


图 19-10 说明了 CAN 的过滤规则。收到消息时，首先将其标识符与标识符列表模式中配置的过滤器进行比较。如果匹配，则将消息存储在关联的 FIFO 中，并将匹配过滤器的序列号存储在过滤器匹配序列号中。如果不匹配，则将消息标识符与掩码模式中配置的过滤器进行比较。如果消息标识符与过滤器中的任何标识符不匹配，硬件将自动丢弃该消息而无需软件干预。

19.4.6 消息存储

邮箱包含与消息相关的所有信息：标识符、数据、控制、状态和时间戳信息。邮箱是软件和硬件之间传递消息的接口。

19.4.6.1 发送邮箱

在启用发送请求之前，应通过软件将消息写入一个空的发送邮箱。您可以通过 CAN_TSTS 寄存器查询发送状态。

表 19-2 发送邮箱寄存器列表

| 相对发送邮箱的地址偏移 | 寄存器名称 |
|-------------|-----------|
| 0 | CAN_TMX |
| 4 | CAN_TMDTx |
| 8 | CAN_TMDLx |
| 12 | CAN_TMDHx |

19.4.6.2 接收邮箱(FIFO)

CAN_RMDTx.FMI[7:0]字段可以存储过滤器匹配序列号，CAN_RMDTx.MTIM[15:0]字段可以存储 16 位时

间截。软件可以访问接收 FIFO 的输出邮箱读取接收到的报文.一旦软件对报文进行了处理,比如读出,软件应该设置 CAN_RFFx.RFFOM 位来释放相应的接收 FIFO,为以后的报文预留存储空间.

表 19-3 接收邮箱寄存器列表

| 相对接收邮箱的基地址偏移 | 寄存器名称 |
|--------------|-----------|
| 0 | CAN_RMIx |
| 4 | CAN_RMDTx |
| 8 | CAN_RMDLx |
| 12 | CAN_RMDHx |

19.4.7 位时序

位时间特性逻辑通过采样监控串行 CAN 总线,通过与帧起始位的边沿同步并与下一个边沿重新同步来调整其采样点。为避免软件编程错误,设置位时间特性寄存器 (CAN_BTIM) 只能在 CAN 初始化时进行。

其操作可以简单理解为将每个位时间分为三段:同步段 (SYNC_SEG)、时间段 1 (BS1) 和时间段 2 (BS2)。

通常,位变化将发生在 SYNC_SEG 中。其值固定为 1 个时间单位($1 \times t_{CAN}$)。

BS1 定义了采样点的位置。它包括 CAN 标准中的 PROP_SEG 和 PHASE_SEG1。其值可编成 1~16 个时间单位,但为了补偿网络中不同节点频率差异引起的相位正向漂移,也可自动扩展。

在 BS2 中,它定义了发送点的位置。它代表 CAN 标准中的 PHASE_SEG2。它的值可以编程为 1 到 8 个时间单位,但也可以自动缩短以补偿相位的负向漂移。

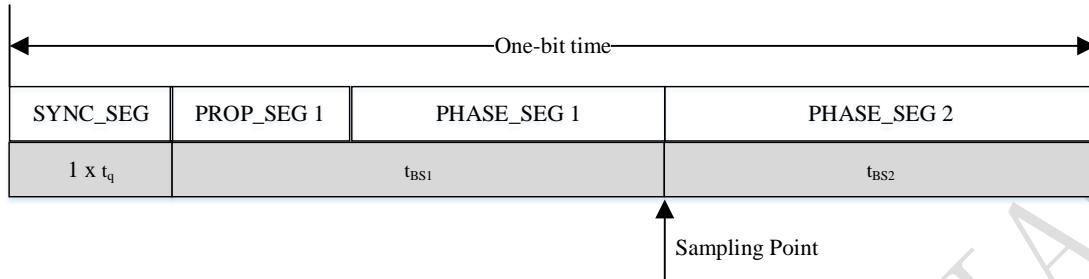
如果在 BS1 中检测到有效转换但在 SYNC_SEG 中没有检测到,则 BS1 的时间最多延长 RSJW 以延迟采样点。反之,如果在 BS2 中检测到有效转换但在 SYNC_SEG 中没有检测到,则 BS2 的时间最多缩短 RSJW 以提前采样点。

在上面的描述中,RSJW (重新同步跳转宽度) 定义了每个比特可以延长或缩短多少时间单元的上限。它的值可以编程为 1 到 4 个时间单位。有效转换定义为 CAN 本身不发送隐性位时从显性位到隐性位的第一次转换。

注: 1. CAN 位的时间特性和重同步机制详见 ISO11898 标准。

2. 为了提高 CAN 位时间精度,不推荐使用 HSI 作为时钟源。

图 19-11 位时序



Notes :

$$t_{PCLK} = \text{time period of the APB1 clock},$$

$$t_q = (CAN_BTIM.BRTP[9:0] + 1) \times t_{PCLK},$$

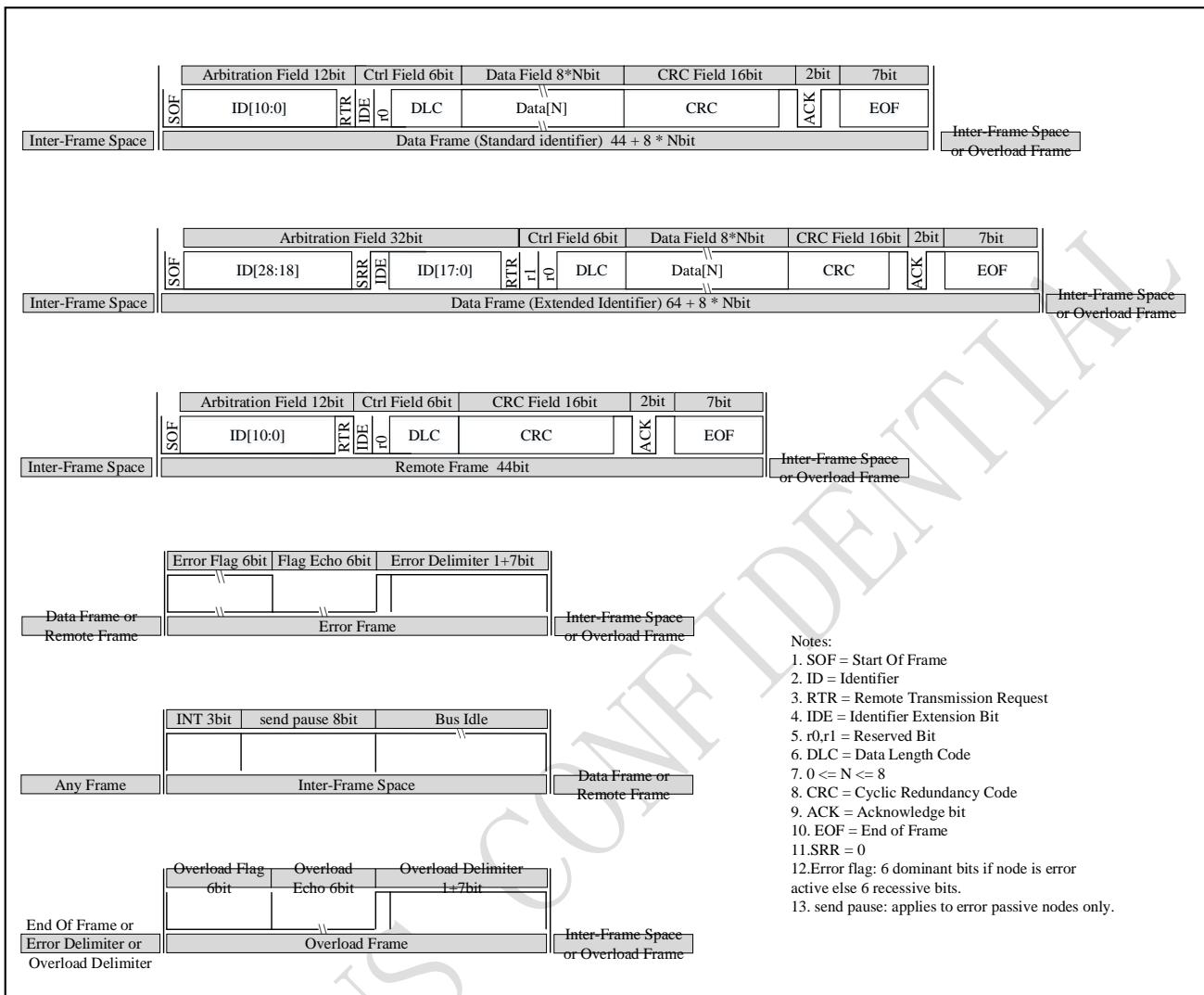
$$t_{BS1} = t_q \times (CAN_BTIM.TBS1[3:0] + 1),$$

$$t_{BS2} = t_q \times (CAN_BTIM.TBS2[2:0] + 1),$$

$$\text{One-bit time} = 1 \times t_q + t_{BS1} + t_{BS2}$$

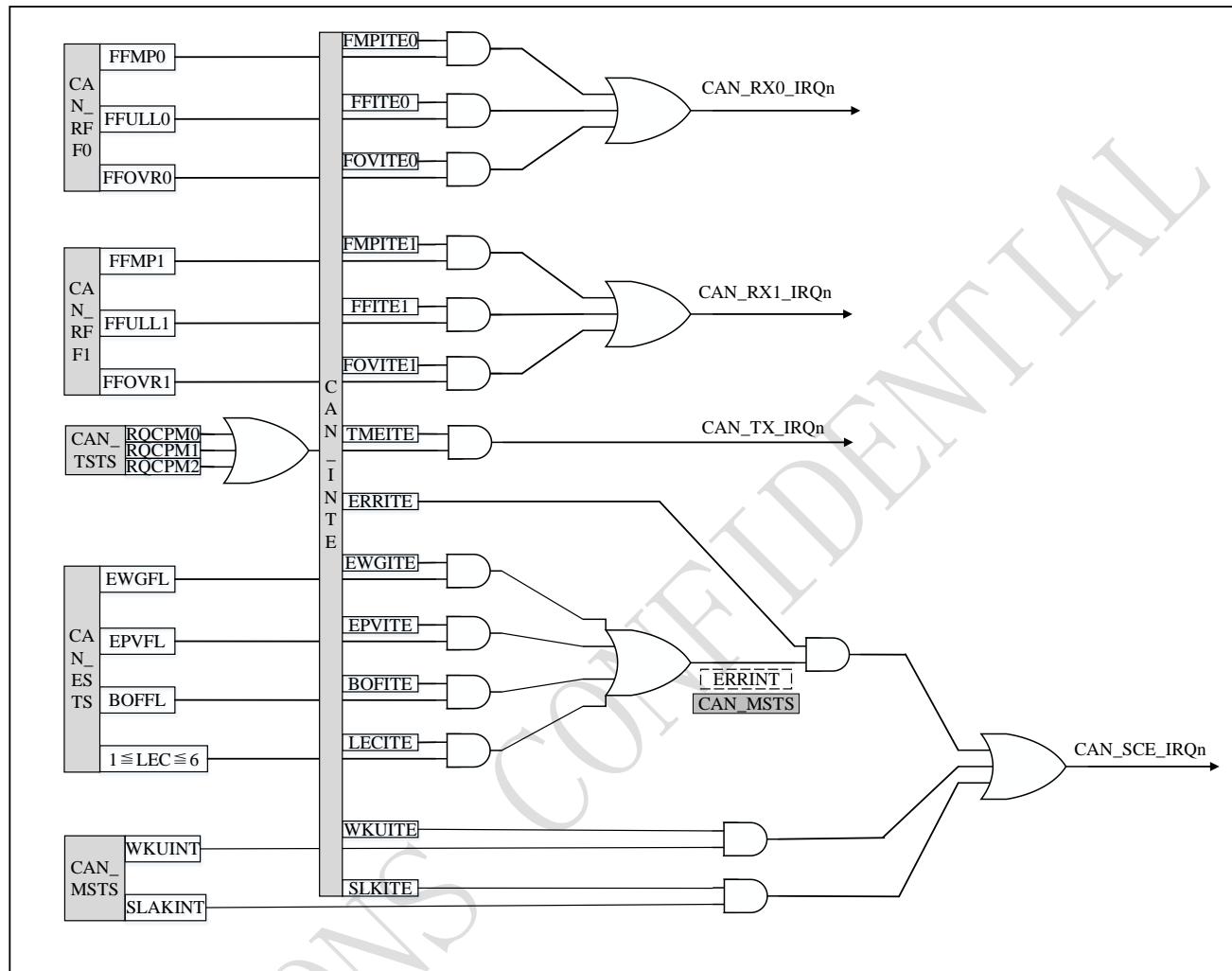
$$\text{BaudRate} = \frac{1}{\text{One-bit time}}$$

图 19-12 各类帧格式



19.5 CAN 中断

图 19-13 事件标志和中断产生



CAN 有四个中断向量。通过设置 CAN 中断启用寄存器 (CAN_INTE)，您可以单独启用或禁用每个中断源。以下是可以产生每个中断的事件。

■ FIFO0 中断(CAN_RX0_IRQn):

- FIFO0 收到一条新消息，并且 CAN_RFF0.FFMP0 位不是'00';
- 当 FIFO0 变满时，并且 CAN_RFF0.FFULL0 位被置位；
- 当 FIFO0 溢出，并且 CAN_RFF0.FFOVR0 位被置位。

■ FIFO1 中断(CAN_RX1_IRQn):

- FIFO1 接收到一条新消息，并且 CAN_RFF1.FFMP1 位不是“00”。
- 当 FIFO1 变满时，并且 CAN_RFF1.FFULL1 位被置位。
- 当 FIFO1 溢出，并且 CAN_RFF1.FFOVR1 位被置位。

■ 发送中断(CAN_TX_IRQn):

发送邮箱 x 变空，对应的 CAN_TSTS.RQCPMx 位被置位(x=1/2/3)。

■ 错误和状态转变中断(CAN_SCE_IRQn):

CAN 进入睡眠模式；

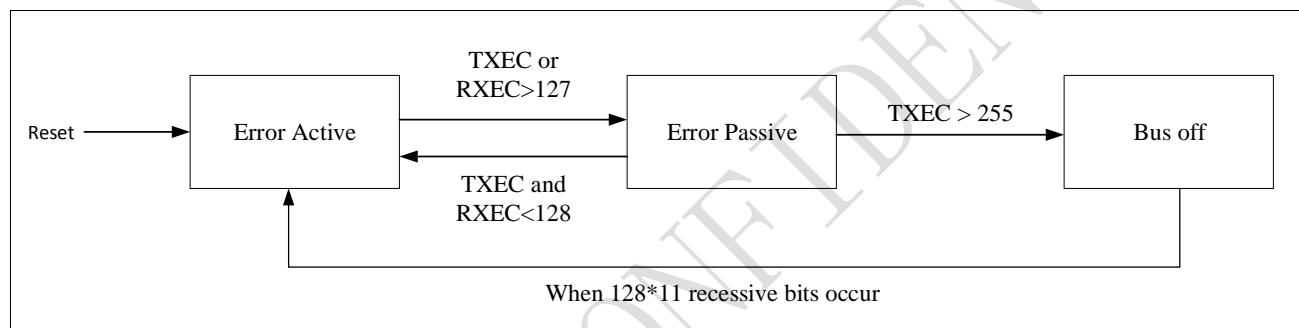
唤醒条件，在 CAN 接收引脚上进行监视帧起始位(SOF)。

错误情况，请参考 CAN 错误状态寄存器(CAN_ESTS)了解错误详情。

19.5.1 错误管理

如 CAN 协议所述，错误管理完全由硬件通过发送错误计数器 (CAN_ESTS.TXEC 字段) 和接收错误计数器 (CAN_ESTS.RXEC 字段) 来实现。计数器值会根据错误情况增加或减少。如果您想了解有关 CAN_ESTS.TXEC 和 CAN_ESTS.RXEC 管理的更多详细信息，请参阅 CAN 标准。

图 19-14 CAN 错误状态框图



软件可以读取发送/接收错误计数器的值来判断 CAN 网络的稳定性，读取 CAN_ESTS.LEC[2:0]位可以得到当前错误状态的详细信息。更重要的是，通过设置 CAN_INTE 寄存器 (如 CAN_INTE.LECITE 位)，软件可以灵活控制检测到错误时中断的产生。

19.5.2 总线关闭恢复

当 TXEC 大于 255 时，CAN_ESTS.BOFFL 位置位，表示 CAN 总线关闭。此时，CAN 无法接收和发送消息。

在正常模式下，根据 CAN_MCTRL.ABOM 位，CAN 可以自动或根据软件的要求，从总线关闭状态恢复，并切换到主动错误状态。如果设置了 CAN_MCTRL.ABOM 位，恢复过程将在进入总线关闭状态后自动启动。否则，软件必须请求 CAN 进入然后退出初始化模式后，才会开始恢复过程。在这两种情况下，CAN 都必须等待 CAN 标准中描述的恢复过程，即在 CANRX 引脚上检测到 128*11 个连续的隐性位。

在初始化模式下，CAN 不会监控 CANRX 引脚的状态，因此无法完成恢复过程。

19.6 CAN 配置流程

本章将介绍 CAN 的常用配置过程，其他详细信息如各模式的功能和寄存器位将在本手册的其他部分进行介绍。CAN 配置流程可以分为多个阶段。只要满足先前的要求 (例如，过滤器值)，就可以随时更改某些配置。

■ 准备阶段：

1. 配置 RCC 使能 CAN 时钟
2. 配置 RCC 使能 AFIO 和 GPIO 时钟

3. 写入 GPIO 寄存器以将 CAN TX 和 CAN RX 信号映射到所需的 GPIO 引脚。

■ **基础配置阶段:**

1. 复位后 CAN 设备以睡眠模式启动。
2. 通过清除 CAN_MCTRL.SLPRQ 位退出睡眠模式。
3. 通过设置 CAN_MCTRL.INIRQ 位进入初始化模式。
4. 等待 CAN_MSTS.INIAK 位变为 1 (进入初始化模式)。
5. 通过将值写入 CAN_BTIM.BSJW、CAN_BTIM.TBS2、CAN_BTIM.TBS1 和 CAN_BTIM.BRTP 位来配置 CAN 的位时序。CAN 总线的波特率由以下公式定义:

$$\text{波特率} = \frac{1}{(1 + (TBS1 + 1) + (TBS2 + 1)) * (BRTP * t_{pclk})}$$

6. 通过写入寄存器中的 CAN_BTIM.SLM (静默) 或 CAN_BTIM.LBM 来配置 CAN 的工作模式选项。
7. 通过 CAN_MCTRL 配置 CAN 行为 (TTCM、ABOM、AWKUM、NART、RFLM、TXFP)。该寄存器中的大部分配置都可以即时更改, 但建议不要这样做。否则在几个周期内, CAN 行为将变得不可预测。
8. 通过清除 CAN_MCTRL.INIRQ 位退出初始化模式。
9. 等待 CAN_MSTS.INIAK 位变为 0 (退出初始化模式)。
10. 用户可以使用过滤器来过滤他们想要接收的消息。要配置过滤器, 用户需要将“1”写入 CAN_FMC.FINITM 位以请求过滤器进入初始化模式。当过滤器处于初始化模式时, CAN 停止接收。
11. 为每个过滤器配置工作模式 (CAN_FM1)、过滤器比例 (CAN_FS1) 和过滤器分配 (CAN_FFA1)。用户还可以在此期间更改过滤器值(CAN_FiRx)。完成过滤器配置后, 清除 CAN_FMC.FINITM 位以退出过滤器初始化。

■ **发送:**

1. 使能必要的发送相关中断 CAN_INTE.TMEITE 位。
2. 检查 CAN_TSTS 中每个邮箱的状态位。如果任何一个 TMEMx(x=0~2)为‘1’的邮箱, 用户可以将等待发送的消息写入对应的邮箱地址。CAN_TMIx.TXRQ(x=0~2)位必须在该邮箱被编程后写入“1”。
3. 一段时间后或等待发送中断后, 返回检查 CAN_TSTS 中的发送状态。重复步骤 2~3 进行新消息传输。

■ **接收:**

1. 当相应的过滤器被禁用时, 用户也可以更改过滤器值 (CAN_FiRx)。要禁用某个过滤器, 用户需要将“0”写入 CAN_FA1 寄存器中的相应位。
2. 在 CAN_INTE 寄存器中配置接收相关的中断。
3. 一旦 CAN 接收到报文并将其存储在接收 FIFO 中, 用户需要按时读取相应的 FIFO 并通过向寄存器 CAN_RFFx(x=0,1)中的 RFFOMx 写入“1”释放接收邮箱。

19.7 CAN 寄存器

这些外设寄存器必须以字 (32 位) 的方式操作。

19.7.1 寄存器描述

19.7.1.1 寄存器访问保护

当 CAN 节点正常工作时, 不正确的访问/修改某些配置寄存器可能会导致节点出现硬件错误, 暂时干扰整个 CAN 网络。因此, 只有在 CAN 内核处于初始化模式时才允许修改 CAN_BTIM 寄存器。

只有当发送邮箱状态位 CAN_TSTS.TMEM=1 时用户才能修改发送邮箱的数据.

19.7.1.2 控制和状态寄存器

通过配置这些寄存器，用户可以：配置 CAN 参数，例如工作模式和波特率；开始消息发送；处理消息接收；中断设置；读取诊断信息。

19.7.1.3 邮箱寄存器描述

发送邮箱和接收邮箱基本相同，只是接收邮箱是只读的，包含 CAN_RMDTx.FMI 字段。发送邮箱为空时可写。

注意：设置了对应的 CAN_TSTS.TMEM 位，表示发送邮箱为空。

有 3 个发送邮箱和 2 个接收 FIFO。每个接收 FIFO 有 3 个邮箱，只能访问 FIFO 中第一个接收到的报文。

每个邮箱包含 4 个寄存器：

FIFO0 包含 CAN_RMI0、CAN_RMDT0、CAN_RMDL0、CAN_RMDH0；

FIFO1 包含 CAN_RMI1、CAN_RMDT1、CAN_RMDL1、CAN_RMDH1；

发送邮箱 (x) 包含 CAN_TMIx, CAN_TMDTx, CAN_TMDLx, CAN_TMDHx; x=0,1,2。

19.7.1.4 过滤寄存器描述

只有在关闭相应的过滤器组或设置了 CAN_FMC.FINITM 位时才能修改过滤器的值。另外，只有当整个滤波器设置为初始化模式（即 CAN_FMC.FINITM=1）时，才能修改滤波器的设置，即可以修改 CAN_FM1、CAN_FS1 和 CAN_FFA1 寄存器。

19.7.2 CAN 寄存器总览

表 19-4 CAN 寄存器总览

| Offset | Register | 31 | 30 | 29 | 28 | 27 | 26 | 25 | 24 | 23 | 22 | 21 | 20 | 19 | 18 | 17 | 16 | 15 | 14 | 13 | 12 | 11 | 10 | 9 | 8 | 7 | 6 | 5 | | | |
|--------|-------------|----------|----|-----------|----|-------------|----|-------------|----|-------------|----|-------------|----|-------------|----|-------------|----|-------------|----|-------------|----|-------------|----|-------------|---|-------------|---|----------|--|----------|--|
| 000h | CAN_MCTRL | Reserved | | | | | | | | | | | | | | Reserved | | Reserved | | Reserved | | Reserved | |
| 004h | Reset Value | CAN_MSTS | | CAN_TSTS | | Reset Value | | Reset Value | | | | | |
| 008h | Reset Value | 0 | 0 | LOWM[2:0] | | TMEM[2:0] | | TERRM2 | | ALSTM2 | | TXOKM2 | | RQCPM2 | | ABRQMI | | TERRM1 | | RXS | | Reserved | | Reserved | | Reserved | | Reserved | | | |
| | | 0 | 0 | LOWM[2:0] | | TMEM[2:0] | | TERRM2 | | ALSTM2 | | TXOKM2 | | RQCPM2 | | ABRQMI | | TERRM1 | | RXS | | Reserved | | Reserved | | Reserved | | Reserved | | | |

| Offset | Register | 31 | 30 | 29 | 28 | 27 | 26 | 25 | 24 | 23 | 22 | 21 | 20 | 19 | 18 | 17 | 16 | 15 | 14 | 13 | 12 | 11 | 10 | 9 | 8 | 7 | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | 0 |
|-------------|-------------|-----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 00Ch | CAN_RFF0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Reset Value | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 010h | CAN_RFF1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Reset Value | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 014h | CAN_INTE | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Reset Value | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 018h | CAN_ESTS | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Reset Value | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | | |
| 01Ch | CAN_BTIM | SLM | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | | |
| | Reset Value | 0 | 0 | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 020h - 17Fh | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 180h | CAN_TMI0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Reset Value | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | 0 | | | |
| 184h | CAN_TMDT0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Reset Value | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | | | | |
| 188h | CAN_TMDL0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Reset Value | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | |
| 18Ch | CAN_TMDH0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Reset Value | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | |
| 190h | CAN_TMI1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Reset Value | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | 0 | | | |
| 194h | CAN_TMDT1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Reset Value | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | | |
| 198h | CAN_TMDL1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Reset Value | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | |
| 19Ch | CAN_TMDH1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Reset Value | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | |
| 1A0h | CAN_TMI2 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Reset Value | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | 0 | |

| Offset | Register | 31 | 30 | 29 | 28 | 27 | 26 | 25 | 24 | 23 | 22 | 21 | 20 | 19 | 18 | 17 | 16 | 15 | 14 | 13 | 12 | 11 | 10 | 9 | 8 | 7 | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | 0 | | |
|-------------|-------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----------|----------|----|----|----|----|----|----|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|--|--|
| 210h | | | | | | | | | | | | | | | | Reserved | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 214h | CAN_FFA1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Reset Value | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 218h | | | | | | | | | | | | | | | | | Reserved | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 21Ch | CAN_FA1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Reset Value | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 220h | | | | | | | | | | | | | | | | | Reserved | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 224h - 23Fh | | | | | | | | | | | | | | | | | Reserved | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 240h | CAN_F0B1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Reset Value | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | | | |
| 244h | CAN_F0B2 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Reset Value | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | | | |
| 248h | CAN_F1B1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Reset Value | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | | | |
| 24Ch | CAN_F1B2 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Reset Value | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | | | |
| . | . | | | | | | | | | | | | | | | | Reserved | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 2A8h | CAN_F13B1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Reset Value | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | | | |
| 2ACh | CAN_F13B2 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Reset Value | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | | | |

19.7.3 CAN 控制和状态寄存器

寄存器描述中使用的缩写，请参考 1.1 部分。

19.7.3.1 CAN 主控制寄存器(CAN_MCTRL)

偏移地址:0x00

复位值:0x0001 0002

| | | | | | | | | | | | | |
|------|----------|----------|----|----|----|----|----|----|----|----|------|---------|
| 31 | Reserved | | | | | | | | | | 17 | 16 |
| | | | | | | | | | | | DBGF | |
| 15 | 14 | Reserved | 8 | 7 | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | | rw 0 |
| MRST | | | rw | rw |

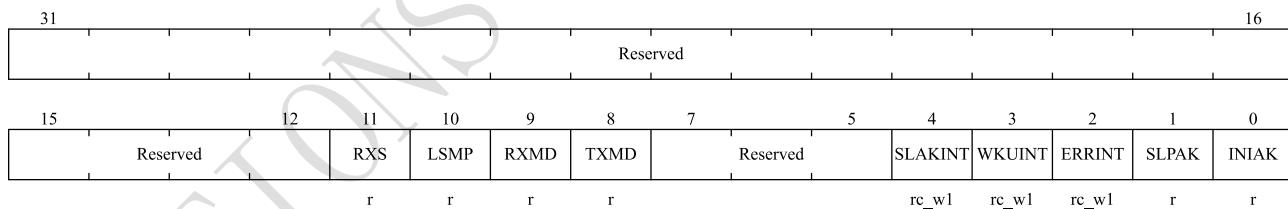
| 位域 | 名称 | 描述 |
|-------|----------|--|
| 31:17 | Reserved | 保留, 必须保持复位值 |
| 16 | DBGF | <p>调试冻结 (Debug freeze)</p> <p>0: 在调试时, CAN 照常工作</p> <p>1: 在调试时, 冻结 CAN 的接收/发送。仍然可以正常地读写和控制接收 FIFO。</p> <p>注: CAN 冻结时必须设置 DBG_CTRL.CAN_STOP 位, 请参考 19.3.7: 调试模式。</p> |
| 15 | MRST | <p>CAN 软件复位 (bxCAN software master reset)</p> <p>0: 该外设正常工作;</p> <p>1: 强制复位 CAN, 之后 CAN 进入睡眠模式, CAN_RFFx.FFMP 位和 CAN_MCTRL 寄存器被初始化为其复位值。之后, 硬件自动清除该位。</p> |
| 14:8 | Reserved | 保留, 必须保持复位值 |
| 7 | TTCM | <p>时间触发通信模式 (Time triggered communication mode)</p> <p>0: 禁用时间触发通信模式;</p> <p>1: 使能时间触发通信模式。</p> <p>注: 关于时间触发通信方式的更多信息, 请参考 19.4.2: 时间触发通信方式。</p> |
| 6 | ABOM | <p>自动离线 (Bus-Off) 管理 (Automatic bus-off management)</p> <p>该位确定 CAN 硬件可以退出总线关闭状态的条件。</p> <p>0: 退出总线关闭状态的过程是软件设置 CAN_MCTRL.INIRQ 位然后清零后, 一旦硬件检测到 128 个连续的 11 位隐性位, 就退出总线关闭状态;</p> <p>1: 一旦硬件检测到 128 个连续的 11 位隐性位, 将自动退出总线关闭状态。</p> <p>注: 有关总线关闭状态的更多信息, 请参阅 19.5.1: 错误管理。</p> |
| 5 | AWKUM | <p>自动唤醒模式 (Automatic wakeup mode)</p> <p>该位决定 CAN 在睡眠模式下是被硬件唤醒还是软件唤醒。</p> <p>0: 软件通过清除 CAN_MCTRL.SLPRQ 位唤醒睡眠模式;</p> <p>1: 睡眠模式由硬件通过检测 CAN 报文自动唤醒。</p> <p>在唤醒的同时, 硬件自动清除 CAN_MSTS.SLPRQ 和 CAN_MSTS.SLPAK 位。</p> |
| 4 | NART | <p>禁止报文自动重传 (No automatic retransmission)</p> <p>0: 根据 CAN 标准, 当 CAN 硬件发送报文失败时, 会自动重传, 直到发送成功;</p> <p>1: CAN 报文只发送一次, 与发送结果无关 (成功、错误或仲裁失败)。</p> |
| 3 | RFLM | <p>接收 FIFO 锁定模式 (Receive FIFO locked mode)</p> <p>0: 接收溢出时 FIFO 不锁定, 当接收 FIFO 的报文没有被读出时, 下一个接收到的报文会覆盖上一条报文;</p> |

| 位域 | 名称 | 描述 |
|----|-------|---|
| | | 1: 接收溢出时锁定 FIFO。当接收 FIFO 的报文没有被读出时, 下一个接收到的报文将被丢弃。 |
| 2 | TXFP | 发送 FIFO 优先级 (Transmit FIFO priority) 当有多个消息同时等待发送时, 该位决定这些消息的发送顺序。 0: 优先级由消息的标识符决定; 1: 优先级由发送请求的顺序决定。 |
| 1 | SLPRQ | 睡眠模式请求 (Sleep mode request) 软件可以通过设置该位请求 CAN 进入睡眠模式, 一旦当前 CAN 活动 (发送或接收报文) 结束, CAN 将进入睡眠模式。 软件清零使 CAN 退出睡眠模式。 当 CAN_MCTRL.AWKUM 位置位并且在 CAN Rx 信号中检测到 SOF 位时, 硬件会清除该位。 该位在复位后置位, 即 CAN 在复位后处于睡眠模式。 |
| 0 | INIRQ | 初始化请求 (Initialization request) 软件清除该位可以使 CAN 退出初始化模式: 当 CAN 离开初始化模式进入正常模式时, 需要在接收引脚上检测到 11 个连续的隐性位, CAN 将同步并准备好接收和发送数据, 此时硬件相应地清除 CAN_MSTS.INIAK 位。 通过软件设置该位使 CAN 从正常操作模式进入初始化模式: 一旦当前 CAN 活动 (发送或接收) 结束, 此时硬件设置 CAN_MSTS.INIAK 位, CAN 进入初始化模式。 |

19.7.3.2 CAN 主状态寄存器 (CAN_MSTS)

偏移地址: 0x04

复位值: 0x00000c02



| 位域 | 名称 | 描述 |
|-------|----------|---|
| 31:12 | Reserved | 保留, 必须保持复位值 |
| 11 | RXS | CAN 接收电平 (CAN Rx signal) 该位反映 CAN 接收引脚 (CAN_RX) 的实际电平。 |
| 10 | LSMP | 上次采样值 (Last sample point) CAN 接收引脚的上次采样值 (对应于当前接收位的值)。 |
| 9 | RXMD | 接收模式 (Receive mode) 该位为'1'表示 CAN 当前为接收器。 |
| 8 | TXMD | 发送模式 (Transmit mode) 该位为'1'表示 CAN 当前为发送器。 |
| 7:5 | Reserved | 保留, 必须保持复位值 |

| 位域 | 名称 | 描述 |
|----|---------|---|
| 4 | SLAKINT | <p>睡眠确认中断 (Sleep acknowledge interrupt)</p> <p>当 CAN_INTE.SLKITE=1 时, 一旦 CAN 进入睡眠模式, 硬件会设置该位, 然后触发相应的中断。当该位置位时, 如果 CAN_INTE.SLKITE 位置位, 将产生状态改变中断。</p> <p>软件可以清零该位, 当 CAN_MSTS.SLPAK 位清零时, 硬件也会清零该位。</p> <p>注: 当 CAN_INTE.SLKITE=0 时, 不应查询该位, 但应查询 CAN_MSTS.SLPAK 位以了解睡眠状态。</p> |
| 3 | WKUINT | <p>唤醒中断 (Wakeup interrupt)</p> <p>当 CAN 处于睡眠状态时, 一旦检测到帧起始位 (SOF), 硬件将设置该位; 如果设置了 CAN_INTE.WKUISTE 位, 则会生成状态改变中断。</p> <p>该位由软件清零。</p> |
| 2 | ERRINT | <p>错误中断 (Error interrupt)</p> <p>当检测到错误时, 会设置 CAN_ESTS 寄存器的某个位, 如果 CAN_INTE 寄存器的相应中断使能位也被设置, 则硬件会设置该位; 如果设置了 CAN_INTE.ERRITE 位, 则会生成状态更改中断。该位由软件清零。</p> |
| 1 | SLPAK | <p>睡眠模式确认 (Sleep acknowledge)</p> <p>该位由硬件置位, 表示软件 CAN 模块处于睡眠模式。该位用于确认软件请求进入睡眠模式 (设置 CAN_MCTRL.SLPRQ 位)。</p> <p>当 CAN 退出睡眠模式 (CAN 离开睡眠模式并进入正常模式, 需要与 CAN 总线同步) 时, 硬件清零该位。这里与 CAN 总线同步意味着硬件需要检测 CAN 的 RX 引脚上的 11 个连续的隐性位。</p> <p>注: 通过软件或硬件清除 CAN_MCTRL.SLPRQ 位将启动退出睡眠模式的过程。有关清除 CAN_MCTRL.SLPRQ 位的详细信息, 请参见 CAN_MCTRL.AWKUM 位的说明。</p> |
| 0 | INIAK | <p>初始化确认 (Initialization acknowledge)</p> <p>该位由硬件置位, 表示软件 CAN 模块处于初始化模式。该位是软件请求进入初始化模式的确认 (CAN_MCTRL.INIRQ 位被设置)。</p> <p>当 CAN 退出初始化模式 (CAN 离开初始化模式并进入正常模式, 需要与 CAN 总线同步) 时, 硬件清零该位。这里与 CAN 总线同步意味着硬件需要检测 CAN 的 RX 引脚上的 11 个连续的隐性位。</p> |

19.7.3.3 CAN 发送状态寄存器 (CAN_TSTS)

偏移地址: 0x08

复位值: 0x1C00 0000

| | | | | | | | | | | | | | | |
|---------|----------|---------|---------|---------|---------|--------|--------|----------|----------|--------|------------|------------|------------|------------|
| 31 | 30 | 29 | 28 | 27 | 26 | 25 | 24 | 23 | 22 | 20 | 19 | 18 | 17 | 16 |
| LOWM2 | LOWM1 | LOWM0 | TMEM2 | TMEM1 | TMEM0 | CODE | ABRQM2 | Reserved | Reserved | TERRM2 | ALSTM2 | TXOKM2 | RQCPM2 | |
| r 15 | r 14 | r 13 | r 12 | r 11 | r 10 | r 9 | r 8 | rs 7 | 6 | 4 | rc_w1 3 | rc_w1 2 | rc_w1 1 | rc_w1 0 |
| ABRQM1 | Reserved | | TERRM1 | ALSTM1 | TXOKM1 | RQCPM1 | ABRQM0 | Reserved | Reserved | TERRM0 | ALSTM0 | TXOKM0 | RQCPM0 | |
| rs | | | rc_w1 | rc_w1 | rc_w1 | rc_w1 | rs | | | rc_w1 | rc_w1 | rc_w1 | rc_w1 | |

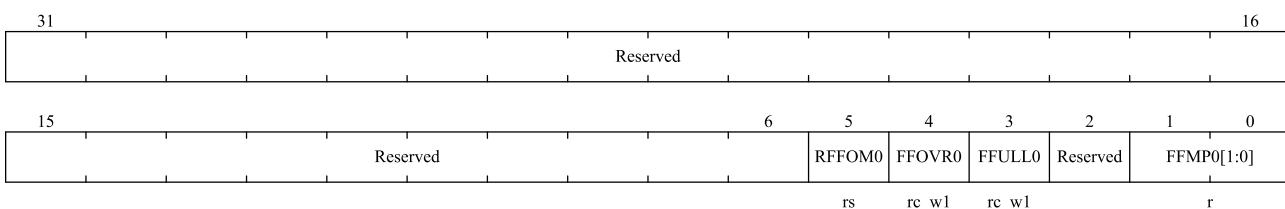
| 位域 | 名称 | 描述 |
|-------|-----------|---|
| 31 | LOWM2 | 邮箱 2 最低优先级标志 (Lowest priority flag for mailbox 2) 当多个邮箱在等待发送报文, 且邮箱 2 的优先级最低时, 硬件对该位置'1'。 |
| 30 | LOWM1 | 邮箱 1 最低优先级标志 (Lowest priority flag for mailbox 1) 当多个邮箱在等待发送报文, 且邮箱 1 的优先级最低时, 硬件对该位置'1'。 |
| 29 | LOWM0 | 邮箱 0 最低优先级标志 (Lowest priority flag for mailbox 0) 当多个邮箱在等待发送报文, 且邮箱 0 的优先级最低时, 硬件对该位置'1'。 注: 如果只有 1 个邮箱在等待, 则 CAN_TSTS.LOWM[2:0] 被清'0'。 |
| 28 | TMEM2 | 发送邮箱 2 空 (Transmit mailbox 2 empty) 当邮箱 2 中没有等待发送的报文时, 硬件对该位置'1'。 |
| 27 | TMEM1 | 发送邮箱 1 空 (Transmit mailbox 1 empty) 当邮箱 1 中没有等待发送的报文时, 硬件对该位置'1'。 |
| 26 | TMEM0 | 发送邮箱 0 空 (Transmit mailbox 0 empty) 当邮箱 0 中没有等待发送的报文时, 硬件对该位置'1'。 |
| 25:24 | CODE[1:0] | 邮箱号 (Mailbox code) 当有至少 1 个发送邮箱为空时, 这 2 位表示下一个空的发送邮箱号。 当所有的发送邮箱都为空时, 这 2 位表示优先级最低的那个发送邮箱号。 |
| 23 | ABRQM2 | 邮箱 2 中止发送 (Abort request for mailbox 2) 设置该位, 软件可以停止邮箱 2 的发送请求, 当邮箱 2 的发送消息空闲时, 硬件清零该位。如果邮箱 2 中没有等待发送的消息, 则设置该位无效。 |
| 22:20 | Reserved | 保留, 必须保持复位值 |
| 19 | TERRM2 | 邮箱 2 发送失败 (Transmission error of mailbox 2) 当邮箱 2 因为出错而导致发送失败时, 对该位置'1'。 |
| 18 | ALSTM2 | 邮箱 2 仲裁丢失 (Arbitration lost for mailbox 2) 当邮箱 2 因为仲裁丢失而导致发送失败时, 对该位置'1'。 |
| 17 | TXOKM2 | 邮箱 2 发送成功 (Transmission OK of mailbox 2) 每次在邮箱 2 进行发送尝试后, 硬件对该位进行更新: 0: 上次发送尝试尚未成功; 1: 上次发送尝试成功。 当邮箱 2 的发送请求被成功完成后, 硬件对该位置'1'。请参见图 19-7。 |
| 16 | RQCPM2 | 邮箱 2 请求完成 (Request completed mailbox 2) 当邮箱 2 的上请求 (发送或中止) 完成时, 硬件将设置该位。 软件向该位写'1'可以清零; 当硬件接收到发送请求时, 也可以清零该位 (CAN_TMI2.TXRQ 位被置位)。 当该位清零时, 邮箱 2 的其他发送状态位 (CAN_TSTS.TXOKM2、CAN_TSTS.ALSTM2 和 CAN_TSTS.TERRM2 位) 也被清零。 |
| 15 | ABRQM1 | 邮箱 1 中止发送 (Abort request for mailbox 1) 设置该位, 软件可以停止邮箱 1 的发送请求, 当邮箱 1 的发送报文空闲时, 硬件清零该位。如果邮箱 1 中没有等待发送的消息, 则设置该位无效。 |
| 14:12 | Reserved | 保留, 必须保持复位值 |
| 11 | TERRM1 | 邮箱 1 发送失败 (Transmission error of mailbox 1) 当邮箱 1 因为出错而导致发送失败时, 对该位置'1'。 |
| 10 | ALSTM1 | 邮箱 1 仲裁丢失 (Arbitration lost for mailbox 1) |

| 位域 | 名称 | 描述 |
|-----|----------|---|
| | | 当邮箱 1 因为仲裁丢失而导致发送失败时, 对该位置'1'。 |
| 9 | TXOKM1 | 邮箱 1 发送成功 (Transmission OK of mailbox 1) 每次在邮箱 1 进行发送尝试后, 硬件对该位进行更新: 0: 上次发送尝试尚未成功; 1: 上次发送尝试成功。 当邮箱 1 的发送请求被成功完成后, 硬件对该位置'1'。请参见图 19-7。 |
| 8 | RQCPM1 | 邮箱 1 请求完成 (Request completed mailbox 1) 当邮箱 1 的上次请求 (发送或中止) 完成时, 硬件设置该位。 软件向该位写'1'可以清零; 当硬件接收到发送请求时, 也可以清除该位 (CAN_TMI1.TXRQ 位被置位)。 当该位清零时, 邮箱 1 的其他发送状态位 (CAN_TSTS.TXOKM1、CAN_TSTS.ALSTM1 和 CAN_TSTS.TERRM1 位) 也被清零。 |
| 7 | ABRQM0 | 邮箱 0 中止发送 (Abort request for mailbox 0) 软件可以通过设置该位来停止邮箱 0 的发送请求, 当邮箱 0 的发送消息空闲时硬件清零该位。如果邮箱 0 中没有等待发送的消息, 则设置该位无效。 |
| 6:4 | Reserved | 保留, 必须保持复位值 |
| 3 | TERRM0 | 邮箱 0 发送失败 (Transmission error of mailbox 0) 当邮箱 0 因为出错而导致发送失败时, 对该位置'1'。 |
| 2 | ALSTM0 | 邮箱 0 仲裁丢失 (Arbitration lost for mailbox 0) 当邮箱 0 因为仲裁丢失而导致发送失败时, 对该位置'1'。 |
| 1 | TXOKM0 | 邮箱 0 发送成功 (Transmission OK of mailbox 0) 每次尝试发送邮箱 0 后, 硬件都会更新此位: 0: 上次发送尝试尚未成功; 1: 上次发送尝试成功。 当邮箱 0 的发送请求成功完成时, 硬件设置该位。参见图 19-7。 |
| 0 | RQCPM0 | 邮箱 0 请求完成 (Request completed mailbox 0) 当邮箱 0 的上次请求 (发送或中止) 完成时, 硬件设置该位。 软件向该位写'1'可以清零; 当硬件接收到发送请求时, 也可以清除该位 (CAN_TMI0.TXRQ 位被置位)。 当该位清零时, 邮箱 0 的其他发送状态位 (CAN_TSTS.TXOKM0、CAN_TSTS.ALSTM0 和 CAN_TSTS.TERRM0 位) 也被清零。 |

19.7.3.4 CAN 接收 FIFO0 寄存器 (CAN_RFF0)

偏移地址: 0x0c

复位值: 0x0000 0000

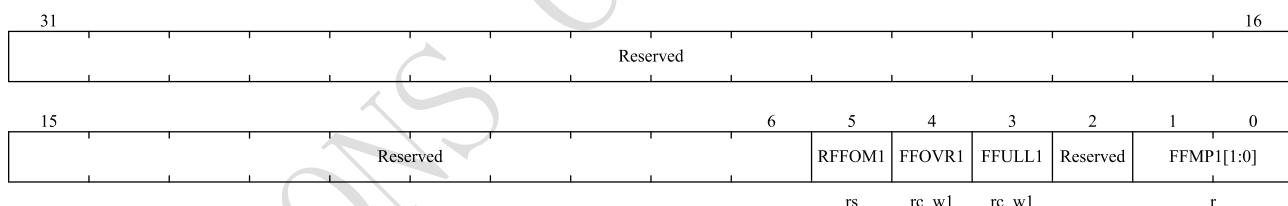


| 位域 | 名称 | 描述 |
|------|------------|---|
| 31:6 | Reserved | 保留, 必须保持复位值 |
| 5 | RFFOM0 | <p>释放接收 FIFO 0 输出邮箱 (Release FIFO 0 output mailbox)</p> <p>软件通过设置该位来释放接收 FIFO 的输出邮箱。如果接收 FIFO 为空, 则设置该位没有影响, 即只有在 FIFO 中有报文时, 设置该位才有意义。如果 FIFO 中有两条以上的消息, 由于 FIFO 的特性, 软件需要释放输出邮箱才能访问第二条消息。</p> <p>当输出邮箱被释放时, 硬件清除该位。</p> |
| 4 | FFOVR0 | <p>FIFO 0 溢出 (FIFO 0 overrun)</p> <p>当 FIFO0 已满, 又收到新的报文且报文符合过滤条件, 硬件对该位置'1'。该位由软件清'0'。</p> |
| 3 | FFULL0 | <p>FIFO 0 满 (FIFO 0 full)</p> <p>当 FIFO 0 中有 3 个报文时, 硬件对该位置'1'。该位由软件清'0'。</p> |
| 2 | Reserved | 保留, 必须保持复位值 |
| 1:0 | FFMP0[1:0] | <p>FIFO 0 报文数目 (FIFO 0 message pending)</p> <p>FIFO 0 报文数目这两位反映了当前存储在接收 FIFO0 中的报文数量。每在接收 FIFO0 中存储一条新报文, 硬件将 CAN_RFF0.FFMP0 加 1。</p> <p>每次软件向 CAN_RFF0.RFFOM0 位写入"1"以释放输出邮箱时, CAN_RFF0.FFMP0 减 1, 直到为 0。</p> |

19.7.3.5 CAN 接收 FIFO 1 寄存器 (CAN_RFF1)

偏移地址: 0x10

复位值: 0x0000 0000



| 位域 | 名称 | 描述 |
|------|----------|--|
| 31:6 | Reserved | 保留, 必须保持复位值 |
| 5 | RFFOM1 | <p>释放接收 FIFO 1 输出邮箱 (Release FIFO 1 output mailbox)</p> <p>软件通过对该位置'1'来释放接收 FIFO 的输出邮箱。如果接收 FIFO 为空, 那么对该位置'1'没有任何效果, 即只有当 FIFO 中有报文时对该位置'1'才有意义。如果 FIFO 中有 2 个以上的报文, 由于 FIFO 的特点, 软件需要释放输出邮箱才能访问第 2 个报文。</p> <p>当输出邮箱被释放时, 硬件对该位清'0'。</p> |
| 4 | FFOVR1 | <p>FIFO 1 溢出 (FIFO 1 overrun)</p> <p>当 FIFO 1 已满, 又收到新的报文且报文符合过滤条件, 硬件对该位置'1'。该位由软件清'0'。</p> |
| 3 | FFULL1 | <p>FIFO 1 满 (FIFO 1 full)</p> <p>当 FIFO 1 中有 3 个报文时, 硬件对该位置'1'。该位由软件清'0'。</p> |

| 位域 | 名称 | 描述 |
|-----|------------|--|
| 2 | Reserved | 保留, 必须保持复位值 |
| 1:0 | FFMP1[1:0] | FIFO 1 报文数目 (FIFO 1 message pending) FIFO 1 中的报文数 这两位反映了当前接收 FIFO 1 中存储的报文数量。接收 FIFO 1 中每存储一条新报文, 硬件将 CAN_RFF1.FFMP1 加 1。 每次软件通过向 CAN_RFF1.RFFOM1 位写入“1”来释放输出邮箱时, CAN_RFF1.FFMP1 减 1, 直到为 0。 |

19.7.3.6 CAN 中断使能寄存器(CAN_INTE)

偏移地址: 0x14

复位值: 0x0000 0000

| | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--------|----------|----------|--------|--------|--------|--------|----------|---------|--------|---------|---------|--------|---------|--------|----|----|----|
| 31 | Reserved | | | | | | | | | | | | | | 18 | 17 | 16 |
| 15 | 14 | 12 | 11 | 10 | 9 | 8 | 7 | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | rw | 1 | rw | 0 | |
| ERRITE | | Reserved | LECITE | BOFITE | EPVITE | EWGITE | Reserved | FOVITE1 | FFITE1 | FMPITE1 | FOVITE0 | FFITE0 | FMPITE0 | TMEITE | | | |
| rw | | rw | rw | rw | rw | rw | rw | rw | rw | rw | rw | rw | rw | rw | | | |

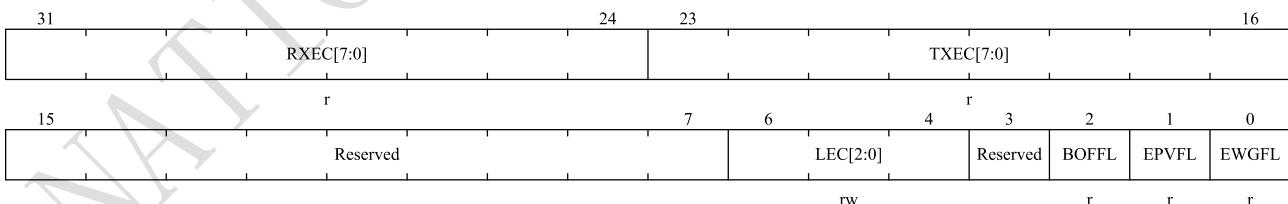
| 位域 | 名称 | 描述 |
|-------|----------|--|
| 31:18 | Reserved | 保留, 必须保持复位值 |
| 17 | SLKITE | 睡眠中断使能 (Sleep interrupt enable) 0: 当 CAN_MSTS.SLAKINT 位置位时, 不产生中断; 1: 当 CAN_MSTS.SLAKINT 位置位时, 产生中断。 |
| 16 | WKUITE | 唤醒中断使能 (Wakeup interrupt enable) 0: 当 CAN_MSTS.WKUINT 位置位时, 不产生中断; 1: 当 CAN_MSTS.WKUINT 位置位时, 产生中断。 |
| 15 | ERRITE | 错误中断使能 (Error interrupt enable) 0: 当 CAN_ESTS 寄存器有错误发生时, 不产生中断; 1: 当 CAN_ESTS 寄存器有错误发生时, 产生中断。 |
| 14:12 | Reserved | 保留, 必须保持复位值 |
| 11 | LECITE | 上次错误号中断使能 (Last error code interrupt enable) 0: 检测到错误时, 当硬件置位 CAN_ESTS.LEC[2:0]时, CAN_MSTS.ERRINT 位不置位; 1: 检测到错误时, 当硬件设置 CAN_ESTS.LEC[2:0]时, 设置 CAN_MSTS.ERRINT 位。 |
| 10 | BOFITE | 离线中断使能 (Bus-off interrupt enable) 0: 当设置 CAN_ESTS.BOFFL 位时, 不设置 CAN_MSTS.ERRINT 位; 1: 设置 CAN_ESTS.BOFFL 位时, 设置 CAN_MSTS.ERRINT 位。 |
| 9 | EPVITE | 错误被动中断使能 (Error Passive Interrupt Enable) 0: 当设置 CAN_ESTS.EPVFL 位时, 不设置 CAN_MSTS.ERRINT 位; 1: 当设置 CAN_ESTS.EPVFL 位时, 设置 CAN_MSTS.ERRINT 位。 |
| 8 | EWGITE | 错误警告中断使能 (Error warning interrupt enable) 0: 当设置 CAN_ESTS.EWGFL 位时, 不设置 CAN_MSTS.ERRINT 位; |

| 位域 | 名称 | 描述 |
|----|----------|---|
| | | 1: 当设置 CAN_ESTS.EWGFL 位时, 设置 CAN_MSTS.ERRINT 位。 |
| 7 | Reserved | 保留, 必须保持复位值 |
| 6 | FOVITE1 | FIFO 1 溢出中断使能 (FIFO overrun interrupt enable) 0: 当 CAN_RFF1.FOR 位置位时, 不产生中断; 1: 当 CAN_RFF1.FO 位置位时, 产生中断。 |
| 5 | FFITE1 | FIFO 1 满中断使能 (FIFO full interrupt enable) 0: 当 CAN_RFF1.FULL 位置位时, 不产生中断; 1: 当 CAN_RFF1.FULL 位置位时, 产生中断。 |
| 4 | FMPITE1 | FIFO 1 消息挂号中断使能 (FIFO message pending interrupt enable) 0: 当 CAN_RFF1.FFMP[1:0]位为非 0 时, 不产生中断; 1: 当 CAN_RFF1.FFMP[1:0]位不为 0 时, 产生中断。 |
| 3 | FOVITE0 | FIFO 0 溢出中断使能 (FIFO overrun interrupt enable) 0: 当 CAN_RFF0.FFOVR 位置位时, 不产生中断; 1: 当 CAN_RFF0.FFOVR 位置位时, 产生中断。 |
| 2 | FFITE0 | FIFO 0 满中断使能 (FIFO full interrupt enable) 0: 当 CAN_RFF0.FFULL 位置位时, 不产生中断; 1: 当 CAN_RFF0.FFULL 位置位时, 产生中断。 |
| 1 | FMPITE0 | FIFO 0 消息挂号中断使能 (FIFO message pending interrupt enable) 0: 当 CAN_RFF0.FFMP[1:0]位为非 0 时, 不产生中断; 1: 当 CAN_RFF0.FFMP[1:0]位不为 0 时, 产生中断。 |
| 0 | TMEITE | 发送邮箱空中断使能 (Transmit mailbox empty interrupt enable) 0: 当 CAN_TSTS.RPMx 位置位时, 不产生中断; 1: 当 CAN_TSTS.RPMx 位置位时, 产生中断。 注: 请参考 19.5 节 CAN 中断。 |

19.7.3.7 CAN 错误状态寄存器(CAN_ESTS)

偏移地址: 0x18

复位值: 0x0000 0000



| 位域 | 名称 | 描述 |
|-------|-----------|--|
| 31:24 | RXEC[7:0] | 接收错误计数器 (Receive error counter) 这个计数器按照 CAN 协议的故障界定机制的接收部分实现。按照 CAN 的标准, 当接收到错时, 根据出错的条件, 该计数器加 1 或加 8; 而在每次接收成功后, 该计数器减 1, 或当该计数器的值大于 127 时, 设置它的值为 120。当该计数器的值超过 127 时, CAN 进入错误被动状态。 |
| 23:16 | TXEC[7:0] | 9 位发送错误计数器的低 8 位 (Least significant byte of the 9-bit transmit error |

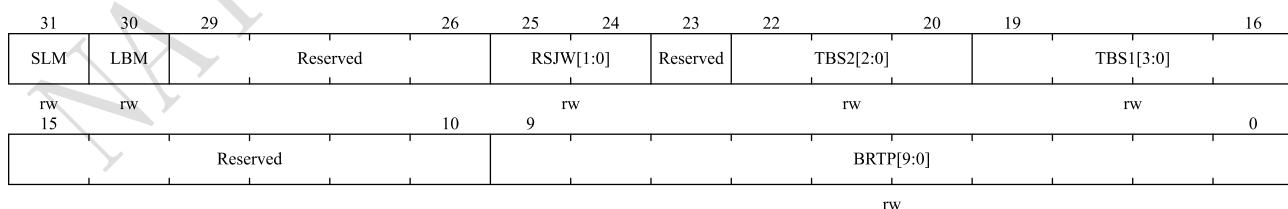
| 位域 | 名称 | 描述 |
|------|----------|---|
| | | counter) 与上面相似, 这个计数器按照 CAN 协议的故障界定机制的发送部分实现。 |
| 15:7 | Reserved | 保留, 必须保持复位值 |
| 6:4 | LEC[2:0] | 上次错误代码 (Last error code) 当 CAN 总线上检测到错误时, 根据错误情况设置硬件。当正确发送或接收消息时, 硬件将其值清除为“0”。 硬件不使用错误代码 7, 软件可以设置此值, 以便检测到代码更新。 000: 没有错误; 001: 位填充错误; 010: 错误的格式 (Form); 011: 确认 (ACK) 错误; 100: 隐性错位 (CAN 传输隐性但在总线上检测显性); 101: 显性错位 (CAN 传输显性但在总线上检测到隐性); 110: CRC 错误; 111: 软件设置。 |
| 3 | Reserved | 保留, 必须保持复位值 |
| 2 | BOFFL | 离线标志 (Bus-off flag) 当总线关闭时, 硬件设置该位。当传输错误计数器 CAN_TSTS.TXEC 溢出, 即大于 255 时, CAN 总线关闭。请参阅 19.5.1 部分。 |
| 1 | EPVFL | 错误被动标志 (Error passive flag) 当出错次数达到错误被动的阈值时, 硬件对该位置'1'。 (接收错误计数器或发送错误计数器的值>127)。 |
| 0 | EWGFL | 错误警告标志 (Error warning flag) 当出错次数达到警告的阈值时, 硬件对该位置'1'。 (接收错误计数器或发送错误计数器的值≥96)。 |

19.7.3.8 CAN 位时序寄存器 (CAN_BTIM)

偏移地址: 0x1C

复位值: 0x0123 0000

注: 当 CAN 处于初始化模式时, 该寄存器只能由软件访问。



| 位域 | 名称 | 描述 |
|----|-----|---|
| 31 | SLM | 静默模式 (用于调试) (Silent mode (debug)) 0: 正常状态; 1: 静默模式。 |
| 30 | LBM | 回环模式 (用于调试) (Loop back mode (debug)) |

| 位域 | 名称 | 描述 |
|-------|-----------|--|
| | | 0: 禁止回环模式; 1: 允许回环模式。 |
| 29:26 | Reserved | 保留, 必须保持复位值 |
| 25:24 | RSJW[1:0] | 重新同步跳跃宽度 (Resynchronization jump width) 为了重新同步, 该位域定义了 CAN 硬件在每位中可以延长或缩短多少个时间单元的上限。 $t_{RJW} = t_{CAN} \times (RSJW[1:0] + 1)$. |
| 23 | Reserved | 保留, 必须保持复位值 |
| 22:20 | TBS2[2:0] | 时间段 2 (Time segment 2) 该位域定义了时间段 2 占用了多少个时间单元 $t_{BS2} = t_{CAN} \times (TBS2[2:0] + 1)$. |
| 19:16 | TBS1[3:0] | 时间段 1 (Time segment 1) 该位域定义了时间段 1 占用了多少个时间单元 $t_{BS1} = t_{CAN} \times (TBS1[3:0] + 1)$ 有关位时间特性的详细信息, 请参阅第 19.4.7 节: 位时序。 |
| 15:10 | Reserved | 保留, 必须保持复位值 |
| 9:0 | BRTP[9:0] | 波特率分频器 (Baud rate prescaler) 该位域定义了时间单元 (t_q) 的时间长度 $t_q = (BRTP[9:0] + 1) \times t_{PCLK}$ |

19.7.4 CAN 邮箱寄存器

本节介绍发送和接收邮箱寄存器。有关寄存器映射的更多信息, 请参阅 19.4.6 部分: 消息存储。

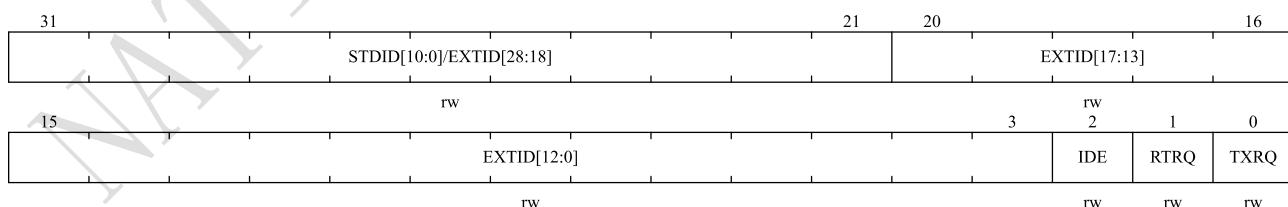
19.7.4.1 发送邮箱标识寄存器(CAN_TMIx)(x=0..2)

偏移地址: 0x180, 0x190, 0x1A0

复位值: 0xXXXX XXXX, X=未定义位 (除了第 0 位, 复位时 TXRQ=0)

注: 1 当其所属的邮箱处在等待发送的状态时, 该寄存器是写保护的;

2 该寄存器实现了发送请求控制功能 (第 0 位) — 复位值为 0。



| 位域 | 名称 | 描述 |
|-------|--------------------------|--|
| 31:21 | STDID[10:0]/EXTID[28:18] | 标准标识符或扩展标识符 (Standard identifier or extended identifier) 依据 IDE 位的内容, 这些位或是标准标识符, 或是扩展身份标识的高字节。 |
| 20:3 | EXTID[17:0] | 扩展标识符 (Extended identifier) |

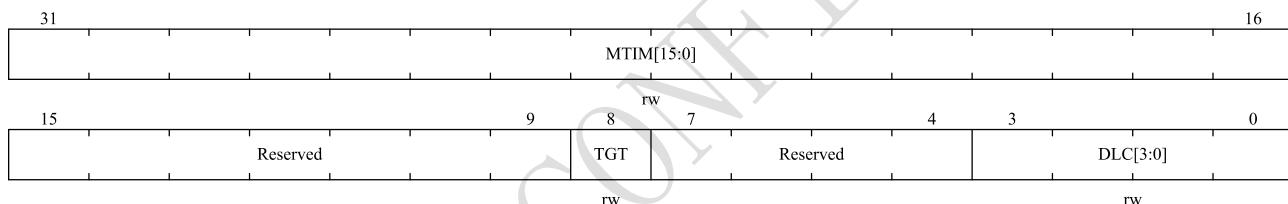
| 位域 | 名称 | 描述 |
|----|------|--|
| | | 扩展身份标识的低字节。 |
| 2 | IDE | 标识符选择 (Identifier extension) 该位决定发送邮箱中报文使用的标识符类型 0: 使用标准标识符; 1: 使用扩展标识符。 |
| 1 | RTRQ | 远程发送请求 (Remote transmission request) 0: 数据帧; 1: 远程帧。 |
| 0 | TXRQ | 发送数据请求 (Transmit mailbox request) 由软件对其置'1', 来请求发送邮箱的数据。当数据发送完成, 邮箱为空时, 硬件对其清'0'。 |

19.7.4.2 发送邮箱数据长度和时间戳寄存器 (CAN_TMDT_x)(x=0..2)

当邮箱不在空置状态时，该寄存器的所有位为写保护。

偏移地址: 0x184, 0x194, 0x1A4

复位值: 未定义



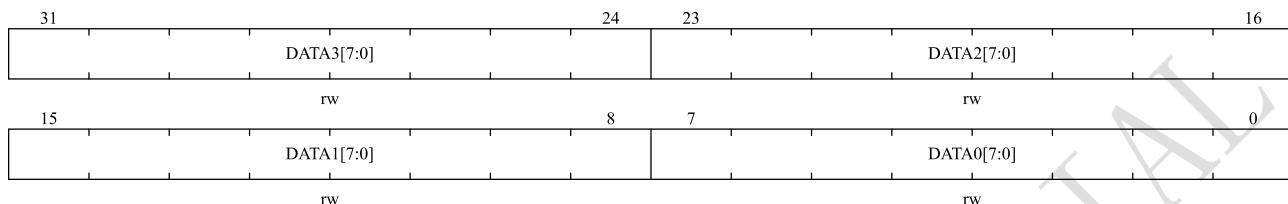
| 位域 | 名称 | 描述 |
|-------|------------|---|
| 31:16 | MTIM[15:0] | 报文时间戳 (Message time stamp) 该域包含了，在发送该报文 SOF 的时刻，16 位定时器的值。 |
| 15:9 | Reserved | 保留，必须保持复位值 |
| 8 | TGT | 发送时间戳 (Transmit global time) 该位仅在 CAN 处于时间触发通信模式时有效，即 CAN_MCTRL.TTCM 位置位。 0: 不发送时间戳 CAN_TMDTx.MTIM[15:0]; 1: 发送时间戳 CAN_TMDTx.MTIM[15:0]。在长度为 8 的消息中，时间戳 CAN_TMDTx.MTIM[15:0] 是发送的最后两个字节： CAN_TMDTx.MTIM[7:0] 是第七个字节，CAN_TMDTx.MTIM[15:8] 是第八个字节。它们替换了写入 CAN_TMDHx[31:16] 的数据 (CAN_TMDLx.DATA6[7:0] 和 CAN_TMDLx.DATA7[7:0])。为了发送时间戳的 2 个字节，DLC 必须编程为 8。 |
| 7:4 | Reserved | 保留，必须保持复位值 |
| 3:0 | DLC[3:0] | 发送数据长度 (Data length code) 该域指定了数据报文的数据长度或者远程帧请求的数据长度。1 个报文包含 0 到 8 个字节数据，而这由 DLC 决定。 |

19.7.4.3 发送邮箱低字节数据寄存器(CAN_TMDLx) (x=0..2)

当邮箱不在空置状态时，该寄存器的所有位为写保护。

偏移地址: 0x188, 0x198, 0x1A8

复位值: 未定义



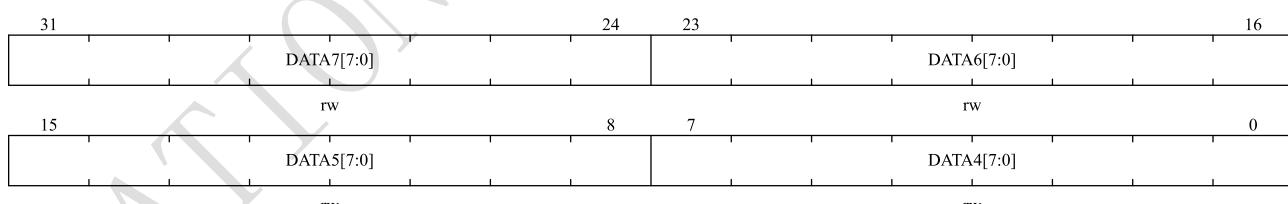
| 位域 | 名称 | 描述 |
|-------|------------|---|
| 31:24 | DATA3[7:0] | 数据字节 3 (Data byte 3) 报文的数据字节 3。 |
| 23:16 | DATA2[7:0] | 数据字节 2 (Data byte 2) 报文的数据字节 2。 |
| 15:8 | DATA1[7:0] | 数据字节 1 (Data byte 1) 报文的数据字节 1。 |
| 7:0 | DATA0[7:0] | 数据字节 0 (Data byte 0) 报文的数据字节 0。 注: 报文包含 0 到 8 个字节数据, 且从字节 0 开始。 |

19.7.4.4 发送邮箱高字节数据寄存器(CAN_TMDHx) (x=0..2)

当邮箱不在空置状态时，该寄存器的所有位为写保护。

偏移地址: 0x18c, 0x19c, 0x1ac

复位值: 未定义



| 位域 | 名称 | 描述 |
|-------|------------|--|
| 31:24 | DATA7[7:0] | 数据字节 7 (Data byte 7) 报文的数据字节 7。 注意: 如果 CAN_MCTRL.TTCM 位为“1”且此邮箱的 CAN_TMDTx.TGT 位也为“1”，则 DATA7 和 DATA6 将被时间戳替换。 |
| 23:16 | DATA6[7:0] | 数据字节 6 (Data byte 6) 报文的数据字节 6。 |
| 15:8 | DATA5[7:0] | 数据字节 5 (Data byte 5) 报文的数据字节 5。 |

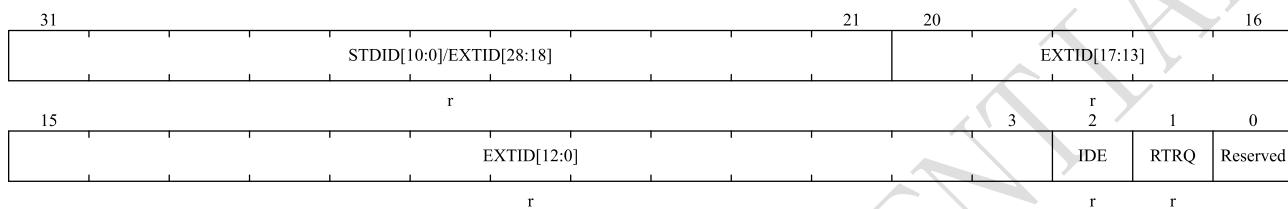
| 位域 | 名称 | 描述 |
|-----|------------|------------------------------------|
| 7:0 | DATA4[7:0] | 数据字节 4 (Data byte 4) 报文的数据字节 4。 |

19.7.4.5 接收 FIFO 邮箱标识符寄存器(CAN_RMIx) (x=0..1)

偏移地址: 0x1B0, 0x1C0

复位值: 未定义

注: 所有接收邮箱寄存器都是只读的。



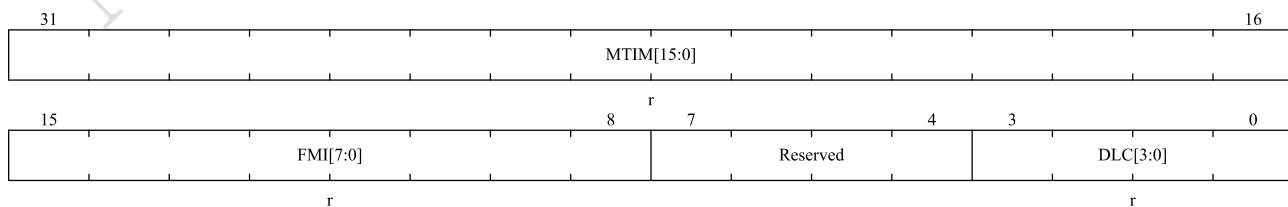
| 位域 | 名称 | 描述 |
|-------|--------------------------|---|
| 31:21 | STDID[10:0]/EXTID[28:18] | 标准标识符或扩展标识符 (Standard identifier or extended identifier) 根据 CAN_RMIx.IDE 位的内容, 这些位要么是标准标识符, 要么是扩展标识的高字节。 |
| 20:3 | EXTID[17:0] | 扩展标识符 (Extended identifier) 扩展身份标识的低字节。 |
| 2 | IDE | 标识符选择 (Identifier extension) 该位决定发送邮箱中报文使用的标识符类型 0: 使用标准标识符; 1: 使用扩展标识符。 |
| 1 | RTRQ | 远程发送请求 (Remote transmission request) 0: 数据帧; 1: 远程帧。 |
| 0 | Reserved | 保留, 必需保持复位值。 |

19.7.4.6 接收 FIFO 邮箱数据长度和时间戳寄存器(CAN_RMDTx) (x=0..1)

偏移地址: 0x1B4, 0x1C4

复位值: 未定义

注: 所有接收邮箱寄存器都是只读的。



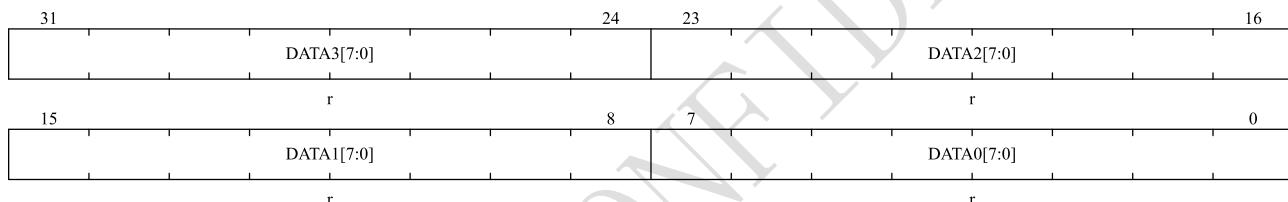
| 位域 | 名称 | 描述 |
|-------|------------|---|
| 31:16 | MTIM[15:0] | 报文时间戳 (Message time stamp) 该域包含了，在发送该报文 SOF 的时刻，16 位定时器的值。 |
| 15:8 | FMI[7:0] | 过滤器匹配序号 (Filter match index) 这是存储在邮箱中的信息传输的过滤器序列号。有关标识符过滤的详细信息，请参阅19.4.5 部分：标识符过滤。 |
| 7:4 | Reserved | 保留，必须保持复位值 |
| 3:0 | DLC[3:0] | 接收数据长度 (Data length code) 该域表明接收数据帧的数据长度 (0~8)。对于远程帧请求，数据长度 DLC 恒为 0。 |

19.7.4.7 接收 FIFO 邮箱低字节数据寄存器(CAN_RMDLx)(x=0..1)

偏移地址: 0x1B8, 0x1C8

复位值: 未定义

注: 所有接收邮箱寄存器都是只读的。



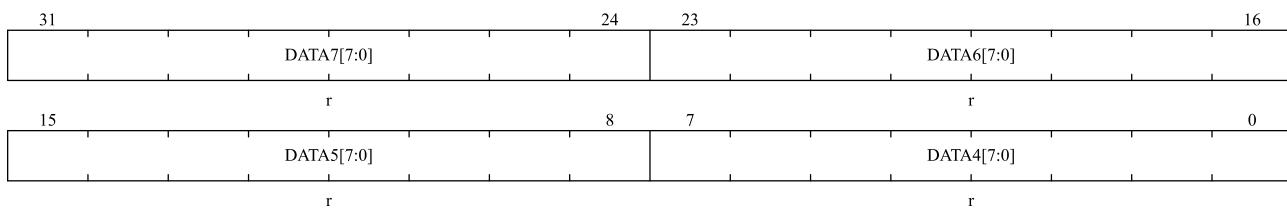
| 位域 | 名称 | 描述 |
|-------|------------|---|
| 31:24 | DATA3[7:0] | 数据字节 3 (Data byte 3) 报文的数据字节 3。 |
| 23:16 | DATA2[7:0] | 数据字节 2 (Data byte 2) 报文的数据字节 2。 |
| 15:8 | DATA1[7:0] | 数据字节 1 (Data byte 1) 报文的数据字节 1。 |
| 7:0 | DATA0[7:0] | 数据字节 0 (Data byte 0) 报文的数据字节 0。 注: 报文包含 0 到 8 个字节数据, 且从字节 0 开始。 |

19.7.4.8 接收 FIFO 邮箱低高字节数据寄存器(CAN_RMDHx) (x=0..1)

偏移地址: 0x1BC, 0x1CC

复位值: 未定义

注: 所有接收邮箱寄存器都是只读的。



| 位域 | 名称 | 描述 |
|-------|------------|------------------------------------|
| 31:24 | DATA7[7:0] | 数据字节 7 (Data byte 7) 报文的数据字节 7。 |
| 23:16 | DATA6[7:0] | 数据字节 6 (Data byte 6) 报文的数据字节 6。 |
| 15:8 | DATA5[7:0] | 数据字节 5 (Data byte 5) 报文的数据字节 5。 |
| 7:0 | DATA4[7:0] | 数据字节 4 (Data byte 4) 报文的数据字节 4。 |

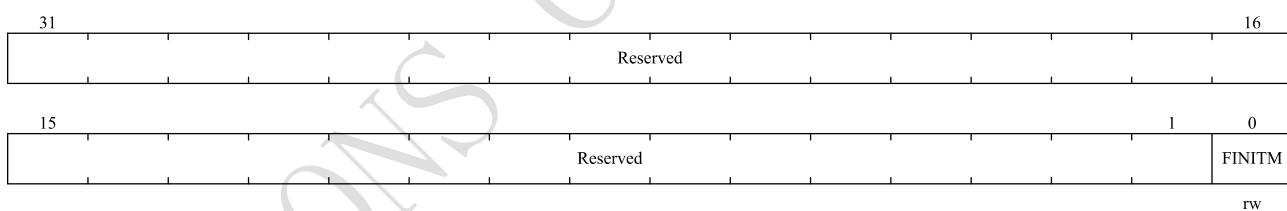
19.7.5 CAN 过滤器寄存器

19.7.5.1 CAN 过滤器主控制寄存器(CAN_FMC)

偏移地址: 0x200

复位值: 0x2A1C 0E01

注: 该寄存器的非保留位完全由软件控制。



| 位域 | 名称 | 描述 |
|------|----------|---|
| 31:1 | Reserved | 保留, 必须保持复位值 |
| 0 | FINITM | 过滤器初始化模式 (Filter init mode) 针对所有过滤器组的初始化模式设置。 0: 过滤器组工作在正常模式; 1: 过滤器组工作在初始化模式。 |

19.7.5.2 CAN 过滤器模式寄存器(CAN_FM1)

偏移地址: 0x204

复位值: 0x0000 0000

注: 当设置 CAN_FMC.FINITM 位将滤波器置于初始化模式时, 才能写入该寄存器。

| Reserved | | | | | | | | | | | | | | | |
|----------|------|------|------|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|----|
| 15 | 14 | 13 | 12 | 11 | 10 | 9 | 8 | 7 | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | 0 |
| Reserved | FB13 | FB12 | FB11 | FB10 | FB9 | FB8 | FB7 | FB6 | FB5 | FB4 | FB3 | FB2 | FB1 | FB0 | |
| | rw | rw | rw | rw | rw | rw | rw | rw | rw | rw | rw | rw | rw | rw | rw |

| 位域 | 名称 | 描述 |
|-------|----------|--|
| 31:28 | Reserved | 保留, 必须保持复位值 |
| 13:0 | FBx | 过滤器模式 (Filter mode) 过滤器组 x 的工作模式。 0: CAN_FiRx 的两个 32 位寄存器工作在标识符屏蔽模式; 1: CAN_FiRx 的两个 32 位寄存器工作在标识符列表模式。 |

19.7.5.3 CAN 过滤器位宽寄存器(CAN_FSI1)

偏移地址: 0x20C

复位值: 0x0000 0000

注: 当设置 CAN_FMC.FINITM 位将滤波器置于初始化模式时, 才能写入该寄存器。

| Reserved | | | | | | | | | | | | | | | |
|----------|-------|-------|-------|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|----|
| 15 | 14 | 13 | 12 | 11 | 10 | 9 | 8 | 7 | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | 0 |
| Reserved | FSC13 | FSC12 | FSC11 | FSC10 | FSC9 | FSC8 | FSC7 | FSC6 | FSC5 | FSC4 | FSC3 | FSC2 | FSC1 | FSC0 | |
| | rw | rw | rw | rw | rw | rw | rw | rw | rw | rw | rw | rw | rw | rw | rw |

| 位域 | 名称 | 描述 |
|-------|----------|--|
| 31:28 | Reserved | 保留, 必须保持复位值 |
| 13:0 | FSCx | 过滤器位宽设置 (Filter scale configuration) 过滤器组 x (13~0) 的位宽。 0: 过滤器位宽为 2 个 16 位; 1: 过滤器位宽为单个 32 位。 |

19.7.5.4 CAN 过滤器 FIFO 关联寄存器 (CAN_FFA1)

偏移地址: 0x214

复位值: 0x0000 0000

注: 当设置 CAN_FMC.FINITM 位将滤波器置于初始化模式时, 才能写入该寄存器。

| Reserved | | | | | | | | | | | | | | | |
|----------|-------|-------|-------|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|----|
| 15 | 14 | 13 | 12 | 11 | 10 | 9 | 8 | 7 | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | 0 |
| Reserved | FAF13 | FAF12 | FAF11 | FAF10 | FAF9 | FAF8 | FAF7 | FAF6 | FAF5 | FAF4 | FAF3 | FAF2 | FAF1 | FAF0 | |
| | rw | rw | rw | rw | rw | rw | rw | rw | rw | rw | rw | rw | rw | rw | rw |

| 位域 | 名称 | 描述 |
|-------|----------|---|
| 31:28 | Reserved | 保留, 必须保持复位值 |
| 13:0 | FAFx | 过滤器 x 的过滤器 FIFO 分配 (Filter FIFO assignment for filter x) 报文在通过了某过滤器的过滤后, 将被存放到其关联的 FIFO 中。 0: 过滤器被关联到 FIFO0; 1: 过滤器被关联到 FIFO1。 |

19.7.5.5 CAN 过滤器激活寄存器(CAN_FA1)

偏移地址: 0x21C

复位值: 0x0000 0000

| | | | | | | | | | | | | | | | |
|----------|-------|-------|-------|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|----|
| 31 | | | | | | | | | | | | | | | 16 |
| Reserved | | | | | | | | | | | | | | | |
| 15 | 14 | 13 | 12 | 11 | 10 | 9 | 8 | 7 | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | 0 |
| Reserved | FAC13 | FAC12 | FAC11 | FAC10 | FAC9 | FAC8 | FAC7 | FAC6 | FAC5 | FAC4 | FAC3 | FAC2 | FAC1 | FAC0 | |

rw rw

| 位域 | 名称 | 描述 |
|-------|----------|--|
| 31:28 | Reserved | 保留, 必须保持复位值 |
| 13:0 | FACx | 过滤器激活 (Filter active) 软件为某位设置“1”以激活相应的过滤器。只有在清除 CAN_FA1.FACx 位或设置 CAN_FMC.FINITM 位后, 才能修改相应的滤波器寄存器 i(CAN_FiR[2:1])。 0: 过滤器被禁用; 1: 过滤器被激活。 |

19.7.5.6 CAN 过滤器 i 寄存器 x (CAN_FiRx) (i=0..13;x=1..2)

偏移地址: 0x240h, 0x31C

复位值: 未定义

注: 14 组滤波器: $i = 0 \dots 13$ 。每组滤波器由两个 32 位寄存器 CAN_FiR[2:1] 组成。

只有当相应的 CAN_FA1.FACx 位被清零或 CAN_FMC.FINIT 位被置位时, 才能修改相应的过滤寄存器。

| | | | | | | | | | | | | | | | |
|----------|----------|----------|----------|----------|----------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 31 | 30 | 29 | 28 | 27 | 26 | 25 | 24 | 23 | 22 | 21 | 20 | 19 | 18 | 17 | 16 |
| FBC31 | FBC30 | FBC29 | FBC28 | FBC27 | FBC26 | FBC25 | FBC24 | FBC23 | FBC22 | FBC21 | FBC20 | FBC19 | FBC18 | FBC17 | FBC16 |
| rw 15 | rw 14 | rw 13 | rw 12 | rw 11 | rw 10 | rw 9 | rw 8 | rw 7 | rw 6 | rw 5 | rw 4 | rw 3 | rw 2 | rw 1 | rw 0 |
| FBC15 | FBC14 | FBC13 | FBC12 | FBC11 | FBC10 | FBC9 | FBC8 | FBC7 | FBC6 | FBC5 | FBC4 | FBC3 | FBC2 | FBC1 | FBC0 |

rw rw

| 位域 | 名称 | 描述 |
|------|-----------|---|
| 31:0 | FBC[31:0] | 过滤器位 (Filter bits) 标识符模式 寄存器的每位对应于所期望的标识符的相应位的电平。 |

| 位域 | 名称 | 描述 |
|----|----|---|
| | | <p>0: 期望相应位为显性位; 1: 期望相应位为隐性位。</p> <p>屏蔽位模式</p> <p>寄存器的每位指示是否对应的标识符寄存器位一定要与期望的标识符的相应位一致。</p> <p>0: 不关心, 该位不用于比较; 1: 必须匹配, 到来的标识符位必须与滤波器对应的标识符寄存器位相一致。</p> |

注: 根据滤波器位宽和模式的不同设置, 滤波器组中的两个寄存器的功能是不同的。关于过滤器的映射、功能描述和屏蔽寄存器的关联, 请参见 19.4.5 章节: 标识符过滤。

掩码模式中的掩码/标识符寄存器与**标识符列表模式**中的寄存器位定义相同。

滤波器组寄存器地址见表 19-4。

20 串行外设接口/内置音频总线（SPI/I2S）

20.1 SPI/I2S 简介

本模块是 SPI/I2S， 默认工作在 SPI 模式， 通过寄存器设置， 可以选择工作在 I2S 模式。

SPI 可以工作在主模式或从模式， 支持全双工和单工高速通讯模式， 并且具有硬件 CRC 计算能力且可配置多主模式。

I2S 可以工作在单工的主模式或从模式， 支持 4 种音频标准： 飞利浦 I2S 标准、 MSB 对齐标准、 LSB 对齐标准和 PCM 标准。

这两种都是同步串行接口通讯协议。

20.2 SPI 和 I²S 主要特性

20.2.1 SPI 主要特性

- 全双工和单工同步模式
- 支持主模式、 从模式和多主模式
- 支持 8bit 或 16bit 数据帧格式
- 数据位顺序可编程
- 硬件或软件片选管理
- 时钟极性和时钟相位可配置
- 发送和接收支持硬件 CRC 计算及校验
- 支持 DMA 传输功能

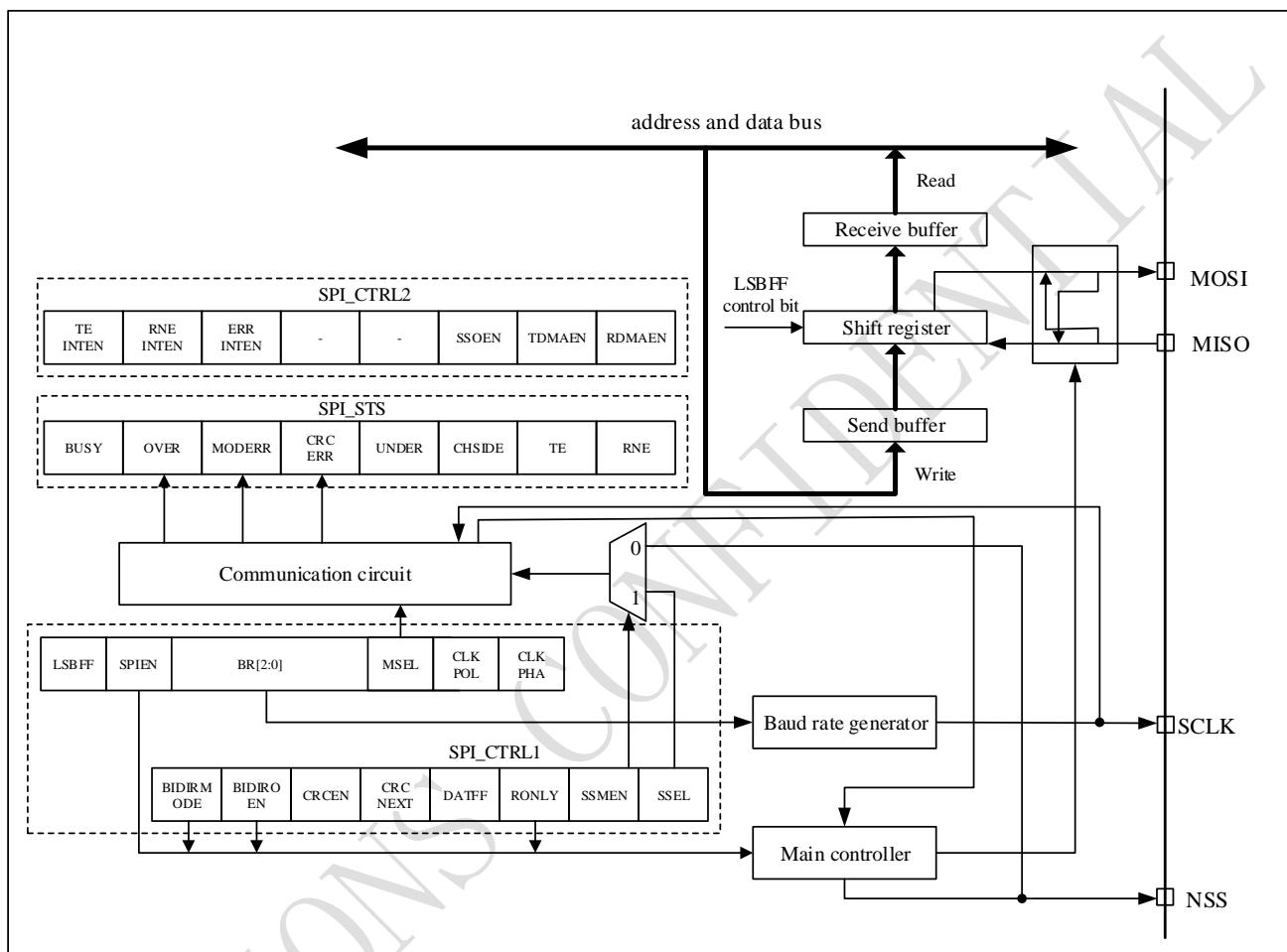
20.2.2 I²S 主要特性

- 单工同步模式
- 支持主模式和从模式操作
- 4 种音频标准可以支持： 飞利浦 I2S 标准、 MSB 对齐标准、 LSB 对齐标准和 PCM 标准
- 音频采样频率可配置， 范围从 8KHz 到 96KHz
- 稳态时钟极性可配置
- 数据方向 MSB
- 支持 DMA 传输功能

20.3 SPI 功能描述

20.3.1 通用描述

图 20-1 SPI 框图



为了连接外部设备，SPI 接口有 4 个引脚与外设器件连接，具体如下：

- **SCLK:** 串行时钟引脚，该信号从主设备 SCLK 引脚输出，由从设备 SCLK 引脚输入
- **MISO:** 主输入/从输出引脚，数据从主设备的 MISO 引脚输入，由从设备的 MISO 引脚输出
- **MOSI:** 主输出/从输入引脚，数据从主设备的 MOSI 引脚输出，由从设备的 MOSI 引脚输入
- **NSS:** 片选引脚，有两种 NSS 引脚类型，外部引脚和内部引脚。如果内部引脚检测到高电平，SPI 工作在主模式，相反，SPI 工作在从模式。用户可以使用主设备的一个标准 I/O 引脚控制从设备的 NSS 引脚

软件 NSS 模式

当 SPI_CTRL1.SSMEN=1 (图 20-2)，软件从设备管理被使能。

NSS 引脚不用于软件 NSS 模式。在这种模式下，内部 NSS 信号电平通过写入 SPI_CTRL1.SSEL 位来驱动 (主机模式 SPI_CTRL1.SSEL = 1，从机模式 SPI_CTRL1.SSEL = 0)。

硬件 NSS 模式

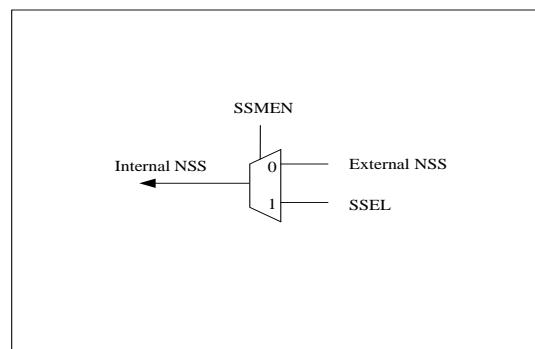
当 SPI_CTRL1.SSMEN = 0 (图 20-2), 软件从设备管理被禁能。

NSS 输入模式: 主设备的 NSS 输出被禁止 (SPI_CTRL1.MSEL = 1, SPI_CTRL2.SSOEN = 0), 允许操作在多主模式下。在整个数据帧传输期间主机应该连接 NSS 到高电平, 从机应该连接 NSS 到低电平。

NSS 输出模式: 主设备的 NSS 输出被使能 (SPI_CTRL1.MSEL = 1, SPI_CTRL2.SSOEN = 1), 主设备必须驱动 NSS 到低电平, 所有与主设备连接并且设置为硬件 NSS 模式的设备将会检测到低电平, 并自动进入从模式。当主设备的 NSS 没有被驱动到低电平, 设备进入从模式, 并产生主模式失效错误。

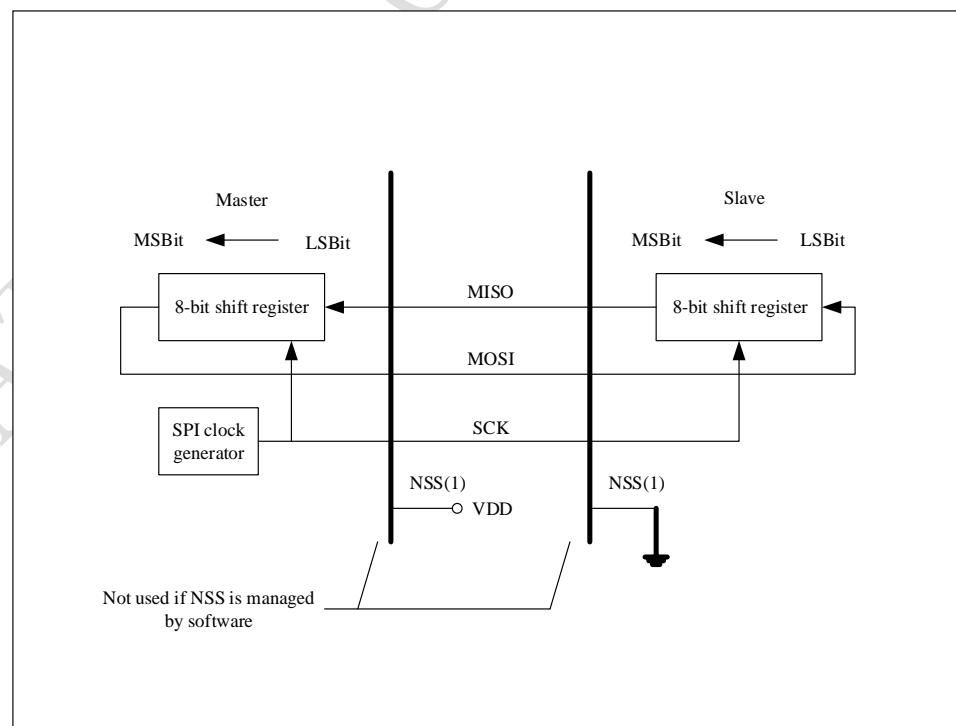
注: 软件模式或硬件模式的选择, 取决于通讯协议中是否需要 NSS 控制。如果不需要, 可以选择软件模式, 释放一个 GPIO 管脚另作他用。

图 20-2 硬件/软件的从选择管理



下图是单个主设备和单个从设备互联的例子。

图 20-3 单主和单从应用



注意: NSS 引脚被设置为输入。

SPI 是一个环形总线结构。主设备通过 SCK 管脚输出同步时钟信号，主设备的 MOSI 引脚连接到从设备的 MOSI 引脚，并且主设备的 MISO 引脚连接到从设备的 MISO 引脚，以便数据可以在设备之间传输。主设备和从设备之间的连续数据传输，通过 MOSI 引脚发送数据到从设备，而从设备通过 MISO 引脚发送数据到主设备。

SPI 时序模式

通过设置 SPI_CTRL1.CLKPOL 位和 SPI_CTRL1.CLKPHA 位，用户可以选择数据捕获的时钟沿。

当 CLKPOL = 0, CLKPHA = 0，空闲时 SCLK 引脚将保持低电平，数据将在第一个时钟沿被采样，即上升沿。

当 CLKPOL = 0, CLKPHA = 1，空闲时 SCLK 引脚将保持低电平，数据将在第二个时钟沿被采样，即下降沿。

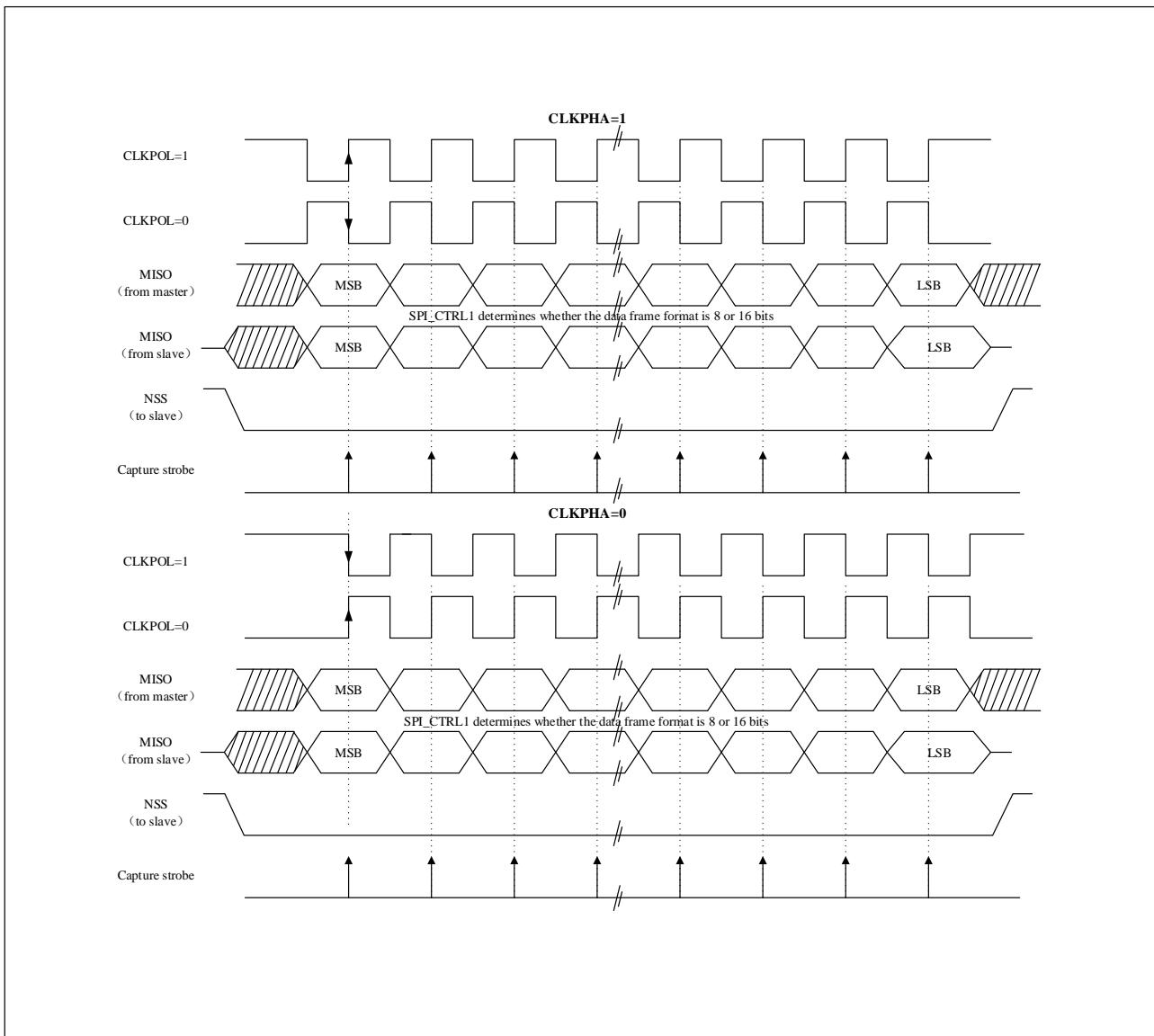
当 CLKPOL = 1, CLKPHA = 0，空闲时 SCLK 引脚将保持高电平，数据将在第一个时钟沿被采样，即下降沿。

当 CLKPOL = 1, CLKPHA = 1，空闲时 SCLK 引脚将保持高电平，数据将在第二个时钟沿被采样，即上升沿。

不管选择哪种时序模式，主设备和从设备的时序模式配置必须相同。

图 20-4 是当 SPI_CTRL1.LSBFF = 0 时，SPI 传输的 4 种 CLKPHA 和 CLKPOL 位组合时序。

图 20-4 数据时钟时序图



数据格式

通过设置 SPI_CTRL1.LSBFF 位，用户可以选择数据的位顺序，当 SPI_CTRL1.LSBFF = 0，SPI 将先发送数据的高位（MSB），当 SPI_CTRL1.LSBFF = 1，SPI 将先发送数据的低位（LSB）。

通过设置 SPI_CTRL1.DATFF 位，用户可以选择数据帧格式。

20.3.2 SPI 工作模式

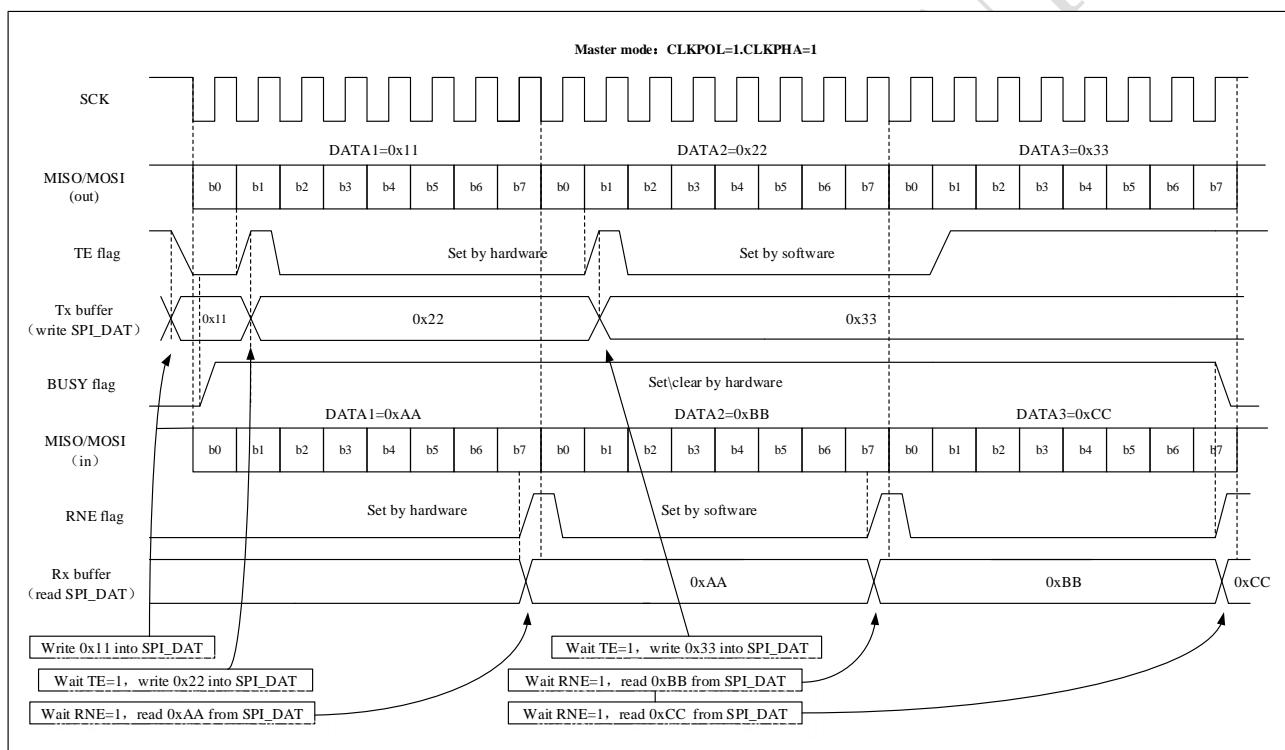
■ 主机全双工模式 (SPI_CTRL1.MSEL = 1, SPI_CTRL1.BIDIRMODE = 0, SPI_CTRL1.RONLY = 0)

第一个数据被写到 SPI_DAT 寄存器后，将会开始传输，数据第一个位被发送时，数据字节并行从数据寄存器装载进入移位寄存器，然后数据位按照 SPI_CTRL1.LSBFF 位的配置，数据位按照 MSB 或 LSB 顺序被串行移位进入 MOSI 引脚。与此同时，在 MISO 引脚上接收到的数据，按照同样顺序被串行地移位进入移位寄存器，然后并行装载入 SPI_DAT 寄存器。

1. 设置SPI_CTRL1.SPIEN位为1, 使能SPI模块;
2. 写待发送的第一个数据到SPI_DAT (这个写操作会清除SPI_STS.TE标志位) ;
3. 等待SPI_STS.TE标志位置1后, 再写入第二个待发送的数据到SPI_DAT寄存器, 等待SPI_STS.RNE标志位置1后, 读取SPI_DAT寄存器获得第一个接收的数据, 读取SPI_DAT寄存器, SPI_STS.RNE标志位会清0。重复上述操作, 发送后续的数据, 同时接收第n-1个数据;
4. 等待SPI_STS.RNE置1后, 读取最后一个数据;
5. 等待SPI_STS.TE标志位置1, 等待SPI_STS.BUSY标志位清除后再关闭SPI模块。

数据的发送和接收处理可以在 SPI_STS.RNE 标志位或 SPI_STS.TE 标志位的上升沿产生的中断处理程序中实现。

图 20-5 主机全双工模式下连续传输时, SPI_STS.TE/RNE/BUSY 的变化示意图



■ 主机双线单向仅发送模式 (SPI_CTRL1.MSEL = 1, SPI_CTRL1.BIDIRMODE = 0, SPI_CTRL1.RONLY = 0)

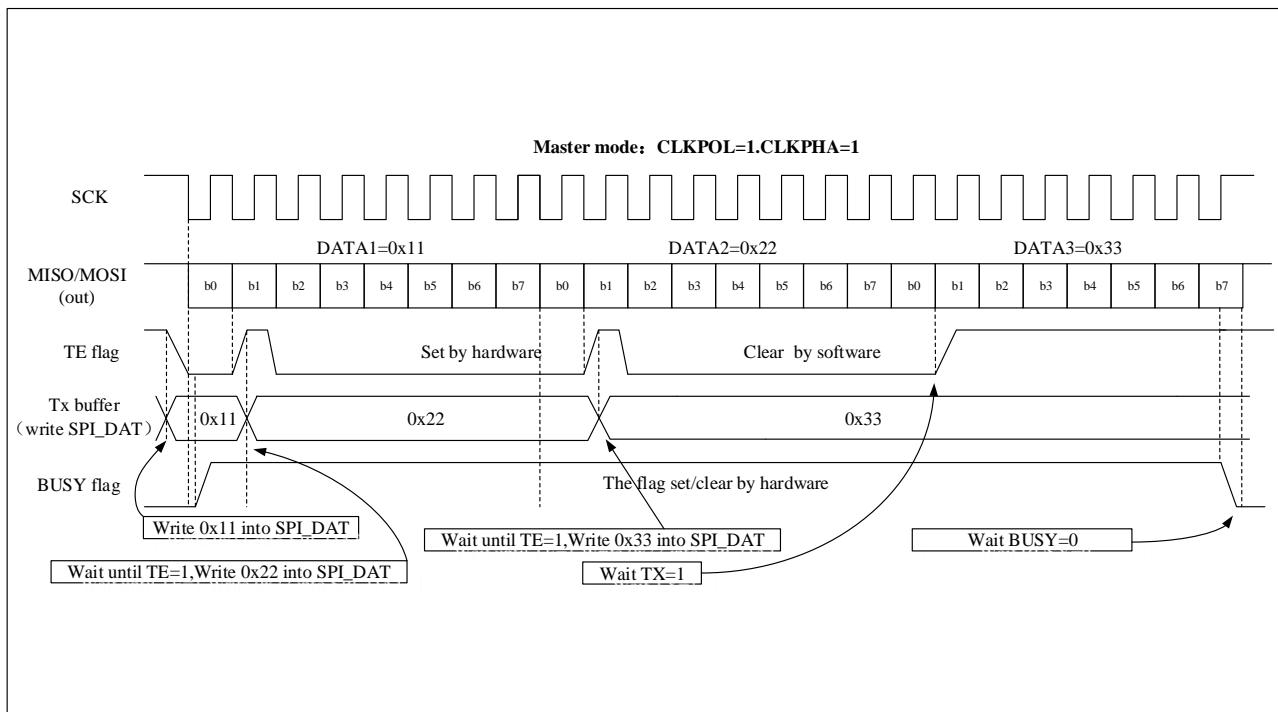
双线单向仅发送模式和全双工模式相似, 但是在双线单向仅发送模式, 接收的数据将不会被读取, 因此 SPI_STS.OVER 标志位将会置位, 软件应该忽略这个位。软件操作流程如下(图 20-6):

1. 设置SPI_CTRL1.SPIEN位为1, 使能SPI模块;
2. 写待发送的第一个数据到 SPI_DAT 寄存器 (该操作会清除 SPI_STS.TE 标志位);
3. 等待 SPI_STS.TE 标志位置 1, 写待发送的第二个数据到 SPI_DAT 寄存器, 重复这个操作发送后续的数据;
4. 写最后一个数据到 SPI_DAT 寄存器, 等待 SPI_STS.TE 标志位置 1, 然后等待 SPI_STS.BUSY 位清除,

完成所有数据的发送。

数据发送可以在 SPI_STS.TE 标志位上升沿产生的中断处理程序里实现。

图 20-6 主机单向只发送模式下连续传输时, SPI_STS.TE/BUSY 变化示意图



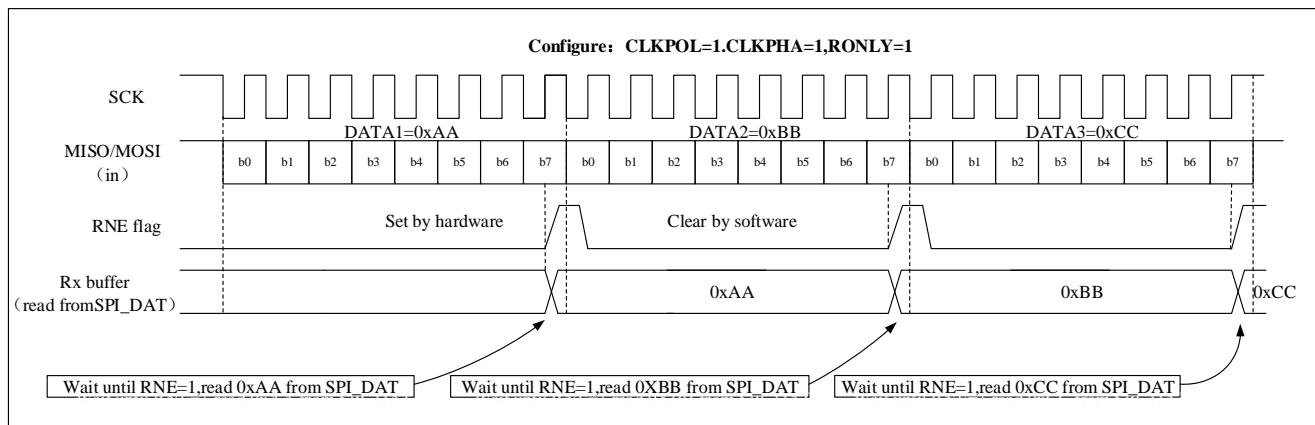
■ 主机双线单向仅接收模式 (SPI_CTRL1.MSEL = 1, SPI_CTRL1.IDIRMODE = 0, SPI_CTRL1.RONLY = 1)

当 SPI_CTRL1.SPIEN = 1, 开始接收过程。来自 MISO 引脚的数据位依次连续移位进入移位寄存器, 然后并行传送数据到 SPI_DAT 寄存器。软件操作流程如下 (图 20-7):

1. 设置 SPI_CTRL1.RONLY = 1, 使能仅接收模式;
2. 主机模式下, 设置 SPI_CTRL1.SPIEN 位为 1, 使能 SPI 模块, SCLK 信号会立即产生, 在 SPI 关闭前 (SPI_CTRL1.SPIEN = 0), 数据连续被接收。从机模式下, 当主设备驱动 NSS 信号低电平并且产生 SCLK, 数据持续被接收;
3. 等待 SPI_STS.RNE 位置 1, 读取 SPI_DAT 寄存器获得接收的数据, 当读取 SPI_DAT 寄存器, SPI_STS.RNE 位将会清除。重复这个操作接收所有数据。

数据处理可以在 SPI_STS.RNE 标志位产生的中断处理程序里实现。

图 20-7 只接收模式 (BIDIRMODE = 0 且 RONLY = 1) 下连续传输时, RNE 变化示意图



- 主机单线双向发送模式 (SPI_CTRL1.MSEL = 1, SPI_CTRL1.BIDIRMODE = 1, SPI_CTRL1.BIDIROEN = 1, SPI_CTRL1.RONLY = 0)

数据写进 SPI_DAT 寄存器后, 传输过程开始。这个模式不接收数据。发送第一个数据位的同时, 被发送的数据并行装载进移位寄存器, 然后根据 LSBFF 位的配置, SPI 按照 MSB 或 LSB 顺序将数据位串行移位到 MOSI 引脚。

主机单线双向发送的软件操作流程和仅发送模式的流程相同。

- 主机单线双向接收模式 (SPI_CTRL1.MSEL = 1, SPI_CTRL1.BIDIRMODE = 1, SPI_CTRL1.BIDIROEN = 0, SPI_CTRL1.RONLY = 0)

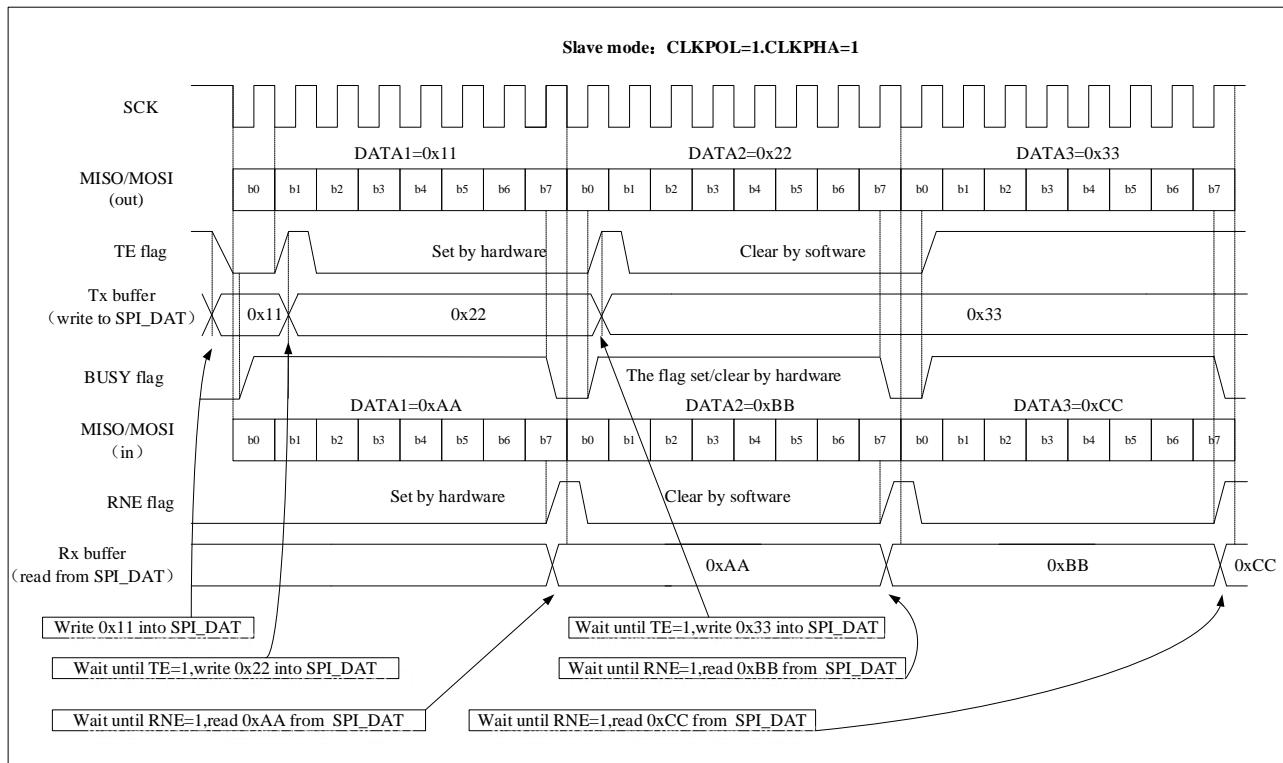
该模式下, 当 SPI 使能 (SPI_CTRL1.SPIEN = 1), 接收过程开始。该模式下, 没有数据输出, 接收到的数据位顺序且连续移位进入移位寄存器, 并行的传输进 SPI_DAT 寄存器 (接收缓存)。

主机单线双向接收模式的软件操作流程和仅接收模式一样。

- 从机全双工模式 (SPI_CTRL1.MSEL = 0, SPI_CTRL1.BIDIRMODE = 0, SPI_CTRL1.RONLY = 0)

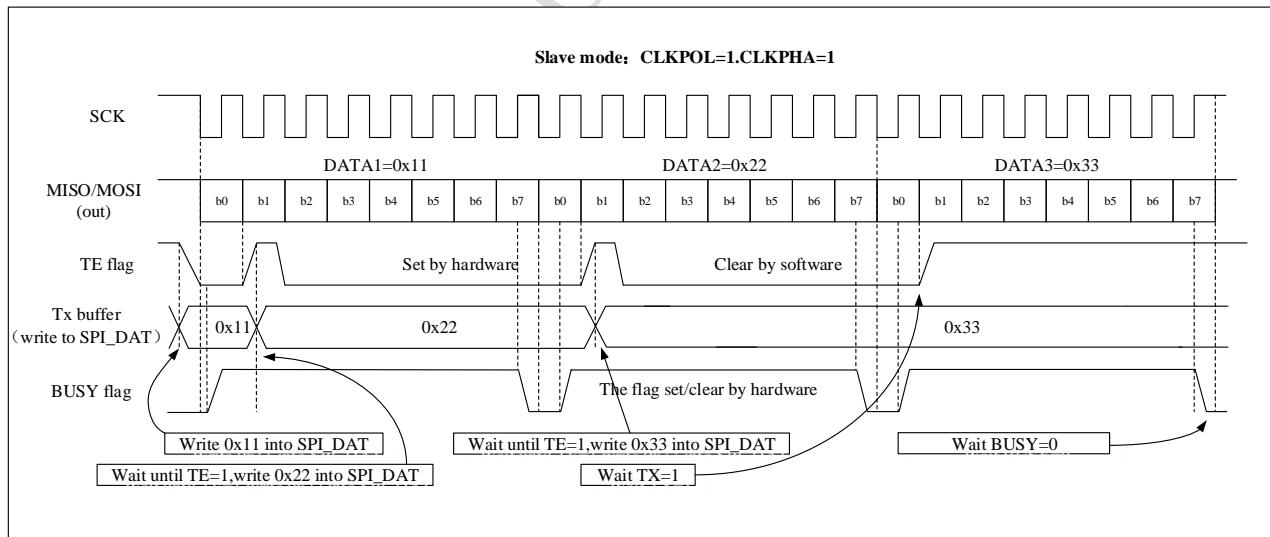
当从设备接收到第一个时钟沿, 数据传输过程开始。主设备开始数据传输之前, 软件必须确保待发送的数据写入 SPI_DAT 寄存器。

图 20-8 从机全双工模式下连续传输时, SPI_STS.TE/RNE/BUSY 的变化示意图



- 从机双线单向仅发送模式 (SPI_CTRL1.MSEL = 0, SPI_CTRL1.BIDIRMODE = 0, SPI_CTRL1.RONLY = 0)

图 20-9 从机单向只发送模式下连续传输时, SPI_STS.TE/BUSY 变化示意图



- 从机双线单向仅接收模式 (SPI_CTRL1.MSEL = 0, SPI_CTRL1.BIDIRMODE = 0, SPI_CTRL1.RONLY = 1)

当从设备接收到时钟信号和来自 MOSI 引脚的第一个数据位, 数据接收过程开始。接收到的数据位顺序且连续地串行移位到移位寄存器, 然后并行地装载到 SPI_DAT 寄存器 (接收缓存)。

- 从机单线双向发送模式 (SPI_CTRL1.MSEL = 0, SPI_CTRL1.BIDIRMODE = 1,

SPI_CTRL1.BIDIROEN = 1)

当从设备接收到第一个时钟沿，数据发送过程开始。该模式没有数据接收，SPI 主机开始数据传输前，软件必须确保待发送数据已经被写进 SPI_DAT 寄存器。

■ 从机单线双向接收模式 (SPI_CTRL1.MSEL = 0, SPI_CTRL1.BIDIRMODE = 1, SPI_CTRL1.BIDIROEN = 0)

当从设备接收到第一个时钟沿和来自 MOSI 引脚的数据位时，数据接收开始。该模式没有数据输出，接收到的数据位顺序且连续地串行移位到移位寄存器，然后并行地装载到 SPI_DAT 寄存器（接收缓存）。

注意：从机的软件操作流程参考主机的。

SPI 初始化流程

1. 通过设置 SPI_CTRL1.BR[2:0]位配置数据传输的波特率；
2. 选择时钟极性 (SPI_CTRL1.CLKPOL) 和时钟相位 (SPI_CTRL1.CLKPHA)，定义数据传输和时钟的相位关系；
3. 设置 SPI_CTRL1.DATFF 位定义帧格式为 8bit 还是 16bit；
4. 配置 SPI_CTRL1.LSBFF 定义数据位发送的顺序是 LSB 还是 MSB；
5. 配置 NSS 模式；
6. 配置 SPI_CTRL1.MSEL、SPI_CTRL1.BIDIRMODE、SPI_CTRL1.BIDIROEN 和 SPI_CTRL1.RONLY 位；
7. 设置 SPI_CTRL1.SPIEN 位使能 SPI 模块。

SPI 协议基本的发送和接收处理

当 SPI 发送 1 个数据帧，首先，数据帧从数据缓存装载进移位寄存器，然后装载的数据被发送。当来自发送缓存的数据传输进移位寄存器，发送缓存器为空，SPI_STS.TE 标志位置 1，然后下一个数据可装载进入发送缓存。如果 SPI_CTRL2.TEINTEN 位置 1，中断将会产生。写 SPI_DAT 寄存器可以对 SPI_STS.TE 标志位清 0。

采样时钟的最后一个边沿，当数据从移位寄存器传输进接收缓存，SPI_STS.RNE 标志位置 1，数据准备就绪，可以从 SPI_DAT 寄存器读取。如果 SPI_CTRL2.RNEINTEN 标志位置 1，中断将会产生。读 SPI_DAT 寄存器可以对 SPI_STS.RNE 标志位清 0。

主模式下，当数据写进发送缓存，发送过程开始。当前数据帧发送完成前，如果下个数据写进 SPI_DAT 寄存器，连续发送可以实现。

从机模式下，NSS 引脚为低，当第一个时钟沿到来，发送过程开始。为了避免意外的数据传输，数据发送前（主机发送时钟前，建议先使能 SPI 模块）软件必须写数据到发送缓存。

在有些配置里，当发送最后数据时，SPI_STS.BUSY 标志位可以用于等待数据发送结束。

连续和非连续传输

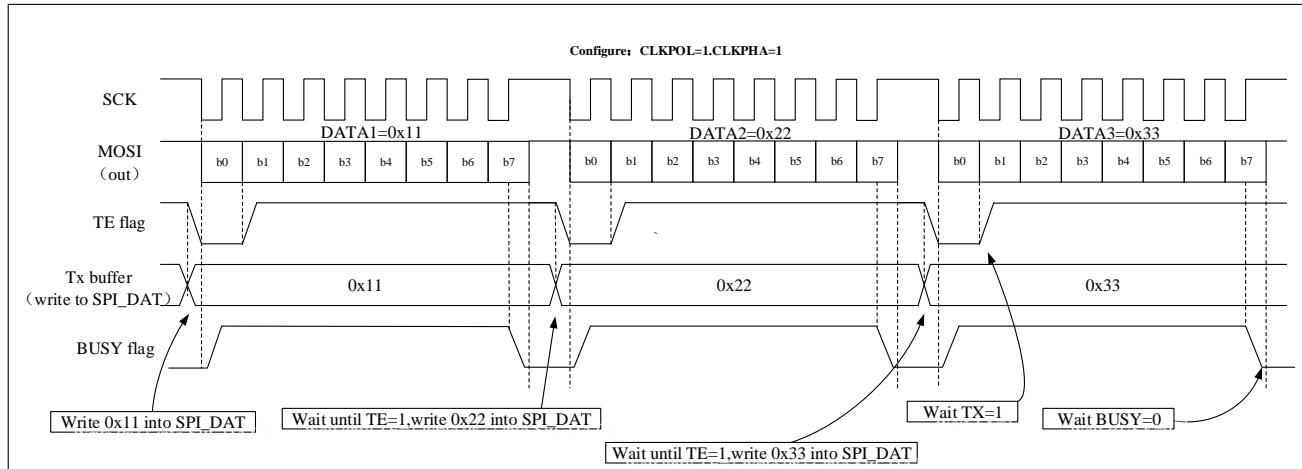
当主模式下发送数据，如果软件足够快，检测到每个 TE 上升沿（或 TE 中断），且正进行的传输结束前，立即将数据写入 SPI_DAT 寄存器，此时，每个数据项之间的 SPI 时钟保持连续，SPI_STS.BUSY 标志位将不会被清除，连续通讯可以实现。

如果软件不够快，将导致不连续的通讯，此时，每个数据传输之间 SPI_STS.BUSY 标志位会被清除（图 20-10）。

主机仅接收模式下 (SPI_CTRL1.RONLY = 1)，通讯总是连续的，并且 BUSY 标志位总是为高。

从模式下，通讯的连续性由主设备决定，任何情况下，即使通讯是连续的，每个数据项之间，BUSY 标志位将至少有 1 个 SPI 时钟周期为低（图 20-9）

图 20-10 BIDIRMODE = 0, RONLY = 0 非连续传输发送时, SPI_STS.TE/BUSY 变化示意图



20.3.3 状态标志

SPI_STS 寄存器有 3 个标志位监控 SPI 的状态。

发送缓存空标志位 (TE)

当发送缓存空，TE 标志位置 1，意味着可以将新数据写进 SPI_DAT 寄存器。当发送缓存非空，该标志位将被硬件清 0。

接收缓存非空标志位 (RNE)

当接收缓存非空，RNE 标志位置 1，因此用户知道接收缓存有数据。读取 SPI_DAT 寄存器后，该标志位将被硬件清 0。

忙标志位 (BUSY)

当传输开始，BUSY 标志位置 1，传输结束后 BUSY 标志位被硬件清 0。

仅当设备在主机单线双向接收模式，当通讯进行中，BUSY 标志位将会设置为 0。

下面情况，BUSY 标志位将会清 0：

- 传输结束（主机模式下连续通讯除外）
- 关闭 SPI 模块 (SPI_CTRL1.SPIEN = 0)
- 主机模式错误发生 (SPI_STS.MODERR = 1)

当通讯是不连续的：每个数据项传输之间，BUSY 标志位清 0。

当通讯是连续的：在主机模式，整个传输过程，BUSY 标志位保持为高。在从机模式，每个数据项传输之间 BUSY 标志位会有 1 个 SPI 时钟周期为低。因此不要使用 BUSY 标志位处理每个数据项的发送和接收。

20.3.4 关闭 SPI

为了关闭 SPI 模块，不同的操作模式需要采用不同的操作步骤：

在主机或从机全双工模式

1. 等待 SPI_STS.RNE 标志位置 1，并且接收到最后一个字节；
2. 等待 SPI_STS.TE 标志位置 1；
3. 等待 SPI_STS.BUSY 标志位清 0；
4. 关闭 SPI 模块 (SPI_CTRL1.SPIEN = 0)。

在主机或从机单向发送模式或双向只发送模式

1. 向 SPI_DAT 寄存器写完最后一个字节后，等待 SPI_STS.TE 标志位置 1；
2. 等待 SPI_STS.BUSY 标志位清 0；
3. 关闭 SPI 模块 (SPI_CTRL1.SPIEN = 0)。

在主机单向只接收模式或主机双向只接收模式

1. 等待倒数第二个 SPI_STS.RNE 置 1；
2. 关闭 SPI 模块前 (SPI_CTRL1.SPIEN=0)，等待 1 个 SPI 时钟周期 (使用软件延时)；
3. 进入关机模式前 (或关闭 SPI 模块时钟)，等待最后一个 SPI_STS.RNE 置 1。

从机单向只接收模式或双向接收模式

1. 可以在任意时间关闭 SPI 模块 (SPI_CTRL1.SPIEN = 0)，并且当前传输结束后，SPI 模块将被关闭；
2. 如果想进入关机模式，进入关机模式之前 (或关闭 SPI 模块时钟)，必须等待 SPI_STS.BUSY 标志位为 0。

20.3.5 使用 DMA 进行 SPI 通讯

用户可以选择 DMA 进行 SPI 数据传输，应用程序可以得到释放，系统效率可以大大提升。

当发送缓存 DMA 使能 (SPI_CTRL2.TDMAEN 位置 1)，每次 SPI_STS.TE 标志位置 1，会产生 DMA 请求，DMA 自动将数据写入 SPI_DAT 寄存器，这将会清除 TE 标志位。当接收缓存 DMA 使能 (SPI_CTRL2.RDMAEN 位置 1)，每次 SPI_STS.RNE 标志位置 1，会产生 DMA 请求，DMA 自动读取 SPI_DAT 寄存器，这将会清除 SPI_STS.RNE 标志位。

当 SPI 仅用于数据发送，仅需要使能 SPI 的发送 DMA 通道 (SPI_CTRL2.TDMAEN 位置 1)。

当 SPI 仅用于数据接收，仅需要使能 SPI 的接收 DMA 通道 (SPI_CTRL2.RDMAEN 位置 1)。

在发送模式，DMA 已经发送完所有待发送的数据后 (DMA_INTSTS.TXCF 标志位变为 1)，SPI_STS.BUSY 标志位可以被监视确认 SPI 通讯结束，这样可以避免当 SPI 关闭或进入停机模式，破坏最后数据的发送。因此，软件需要等待 SPI_STS.TE 标志位置 1，并且等待 SPI_STS.BUSY 标志位为 0。

图 20-11 使用 DMA 发送

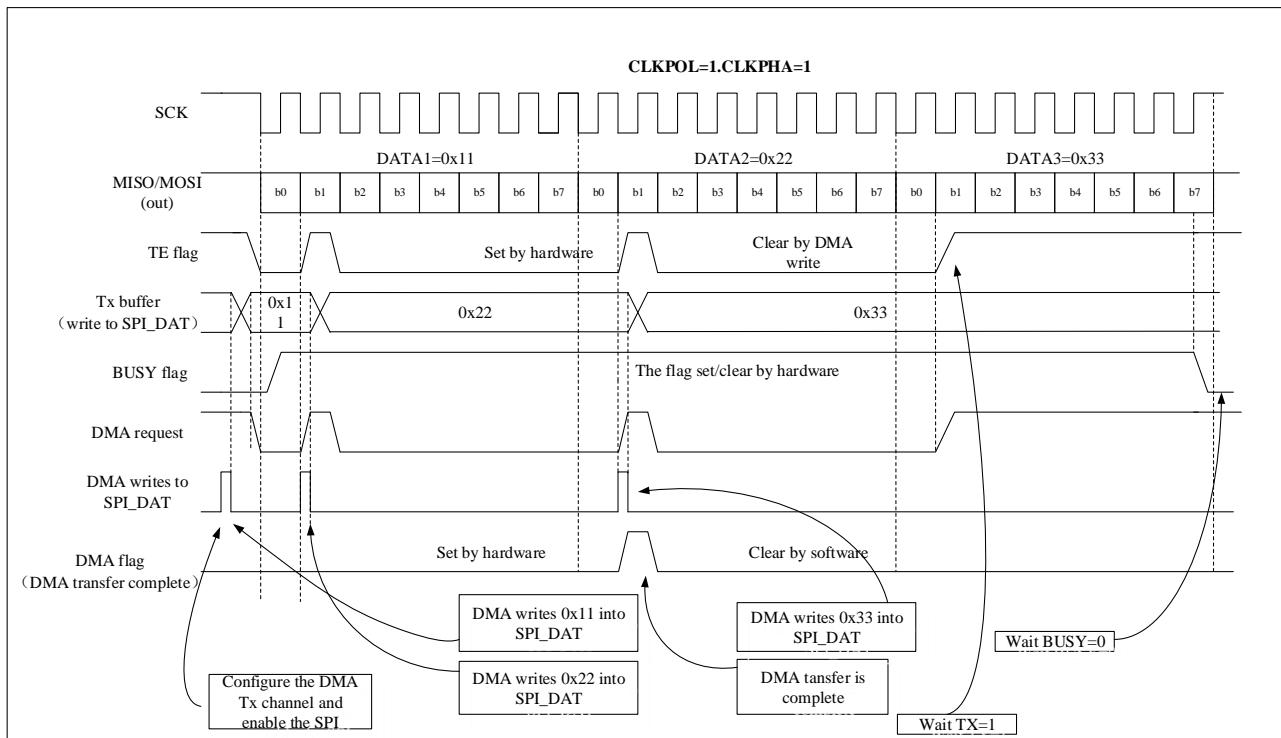
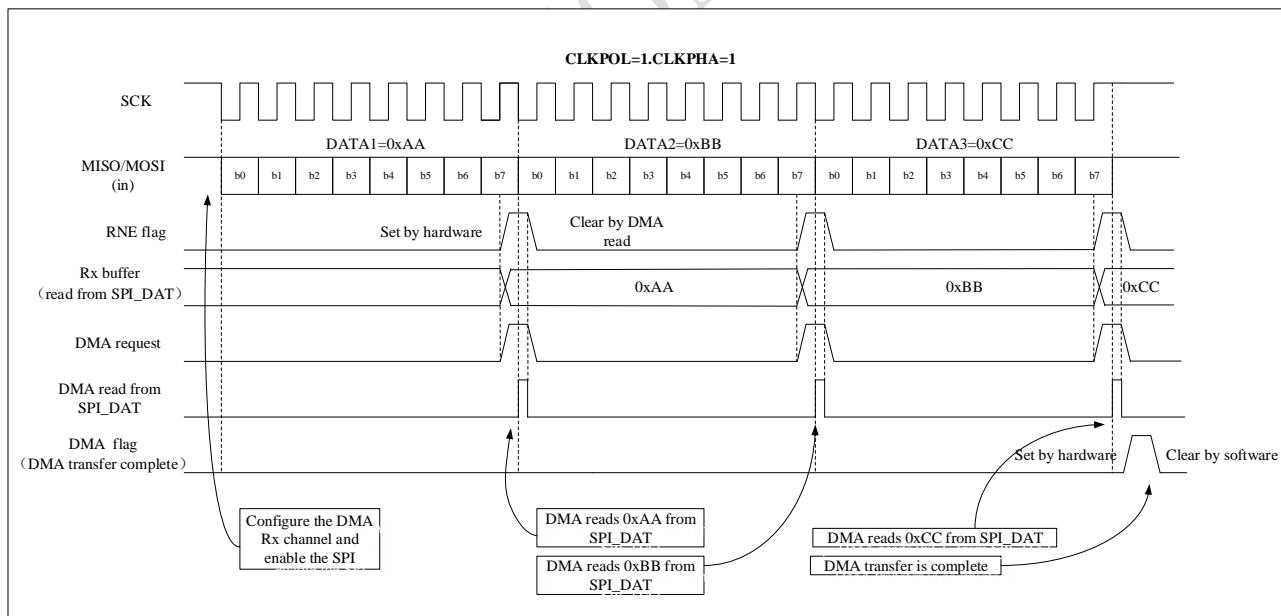


图 20-12 使用 DMA 接收



20.3.6 CRC 计算

SPI 包含两个独立的 CRC 计算器，用于数据发送和数据接收，以确保数据传输的正确性。根据发送和接收数据帧格式，CRC 采用不同的计算方法，8 位数据帧格式采用 CRC8，16 位数据帧格式采用 CRC16。SPI CRC 计算使用的多项式由 SPI_CRCPOLY 寄存器设置，用户设置 SPI_CTRL1.CRCEN 位使能 CRC 计算。

在发送模式，最后的数据写进发送缓存后，设置 SPI_CTRL1.CRCNEXT 位为 1，这指示发送完数据后硬件将开始发送 CRC 值 (SPI_CRCRDAT 值)。发送 CRC 时，CRC 计算将停止。

在接收模式，倒数第二个数据帧接收到后，设置 SPI_CTRL1.CRCNEXT 位为 1。接收到的 CRC 和 SPI_CRCRDAT 值进行比较，如果他们不同，SPI_STS.CRCERR 位置 1，当 SPI_CTRL2.ERRINTEN 位置 1，中断产生。

为了保持主设备-从设备下次的 CRC 计算结果的同步，用户应清除主设备-从设备的 CRC 值。SPI_CTRL1.CRCEN 位置 1 会复位 SPI_CRCRDAT 寄存器和 SPI_CRCRDAT 寄存器。按顺序采用下面步骤：SPI_CTRL1.SPIEN = 0; SPI_CTRL1.CRCEN = 0; SPI_CTRL1.CRCEN = 1; SPI_CTRL1.SPIEN = 1。

最重要的是，当 SPI 配置为从模式且 CRC 使能，只要 SCLK 引脚有时钟脉冲，即使 NSS 引脚为高，CRC 计算将仍然被执行。这种情况常见于当主设备和多个从设备交替通讯时，因此这需要避免 CRC 误操作。

当 SPI 硬件 CRC 检查使能 (SPI_CTRL1.CRCEN = 1) 且 DMA 使能，通讯结束时硬件自动完成 CRC 字节发送和接收。

20.3.7 错误标志位

主模式失效位 (MODERR)

以下两种情况将会导致主机失效错误：

- NSS 引脚硬件管理模式，主设备 NSS 引脚被驱动低电平；
- NSS 引脚软件管理模式，SSEL 位被设置为 0。

当主模式失效错误发生，SPI_STS.MODERR 标志位置 1。如果用户允许相应的中断，则产生中断。SPI_CTRL1.SPIEN 位和 SPI_CTRL1.MSEL 将写保护，且硬件清除。SPI 关闭且强制进入从模式。

软件执行 SPI_STS 寄存器读或写操作，然后写 SPI_CTRL1 寄存器可以清除 SPI_STS.MODERR 位（在多主配置下，主机的 NSS 引脚必须先拉高）。

通常，从机的 SPI_STS.MODERR 位不能设置为 1。然而，在多主配置下，从设备的 SPI_STS.MODERR 位可能置位。这种情况下，SPI_STS.MODERR 位指示存在多主冲突。中断程序可以执行复位或返回默认状态从错误状态恢复。

上溢错误 (OVER)

当 SPI_STS.RNE 位置 1，但是仍然有数据发送进入接收缓存，上溢错误将发生，此时，上溢标志 SPI_STS.OVER 置 1。如果用户使能相应的中断，则产生中断。所有接收到的数据丢失，且 SPI_DAT 寄存器仅保留之前未读的数据。

依次读 SPI_DAT 寄存器和 SPI_STS 寄存器可以清除 SPI_STS.OVER 位。

CRC 错误 (CRCERR)

CRC 错误标志用于检查接收数据的有效性。当接收到的 CRC 值和 SPI_CRCRDAT 值不匹配，CRC 错误发生。

20.3.8 SPI 中断

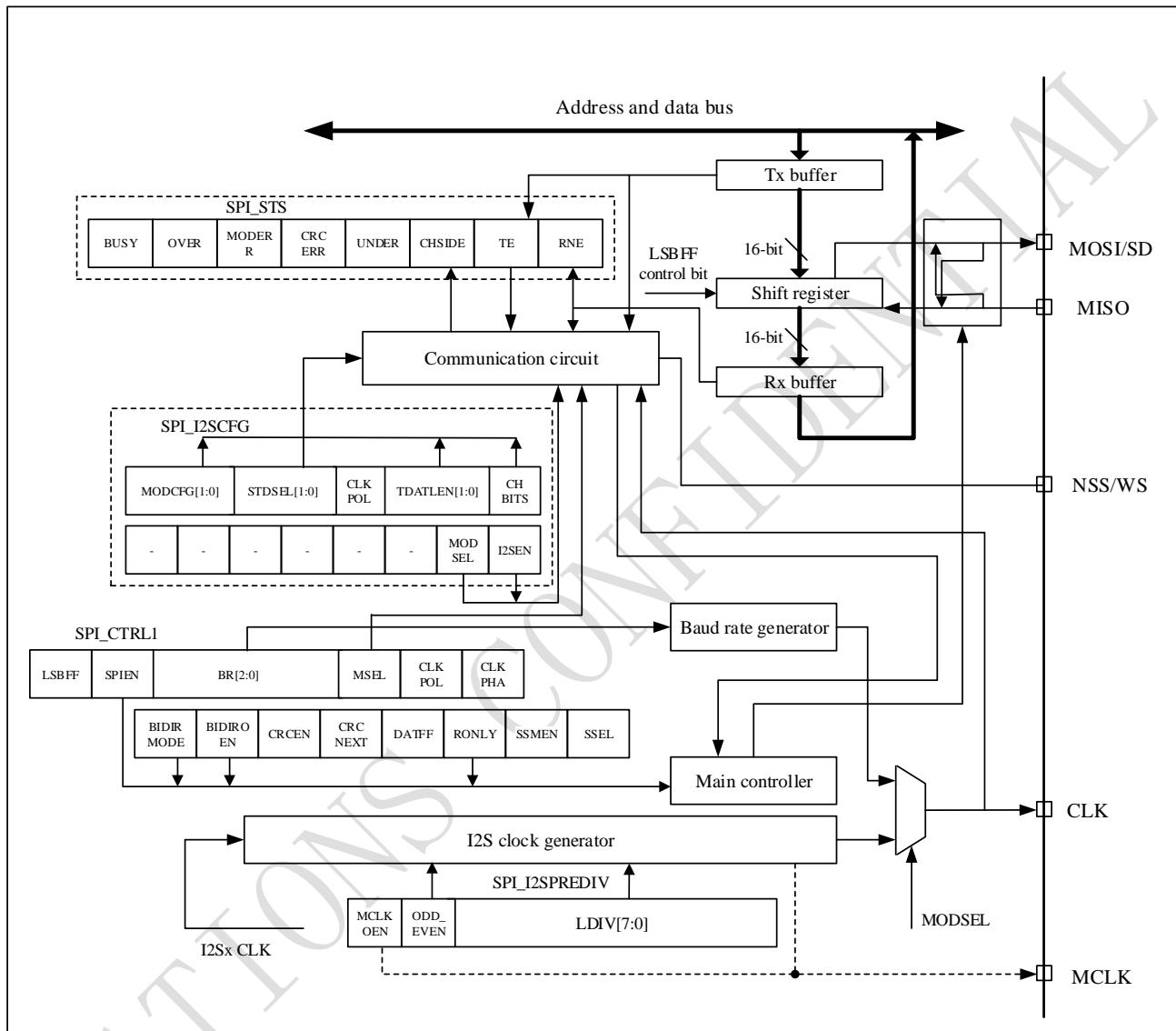
表 20-1 SPI 中断请求

| 中断事件 | 事件标志位 | 使能控制位 |
|----------|--------|----------|
| 发送缓存空标志 | TE | TEINTEN |
| 接收缓存非空标志 | RNE | RNEINTEN |
| 主模式失效事件 | MODERR | ERRINTEN |
| 上溢错误 | OVER | |
| CRC 错误标志 | CRCERR | |

20.4 I²S 功能描述

I²S 的框图如下图显示：

图 20-13 I²S 框图



I²S 接口使用和 SPI 接口相同的引脚、标志和中断。SPI_I2SCFG.MODSEL 位置 1 选择 I²S 音频接口。

I²S 总共有 4 个引脚，其中 3 个引脚与 SPI 共享：

- **CLK:** 串行时钟（和 SCLK 引脚共享），每次 1 位音频数据发送，CLK 产生一个脉冲。
- **SD:** 串行数据（和 MOSI 引脚共享），用于数据发送和接收；
- **WS:** 通道选择（和 NSS 引脚共享），主模式下用作数据控制信号输出，从模式下用作输入；
- **MCLK:** 主机时钟（独立映射，可选），输出 $256 \times F_s$ 时钟信号，保证系统间更好的同步。

注意： F_s 是音频信号的采样频率

在主模式下, I²S 使用自己的时钟发生器产生时钟信号用于通讯, 这个时钟发生器也是主时钟输出的时钟源 (SPI_I2SPREDIV.MCLKOEN 位置 1, 主时钟输出使能)。

20.4.1 支持的音频协议

通过设置 SPI_I2SCFG.STDSEL[1:0]位, 可以选择 4 种音频标准

- I²S 飞利浦标准
- MSB 对齐标准
- LSB 对齐标准
- PCM 标准

左声道和右声道的音频数据通常是时分复用的, 左声道总是先于右声道发送数据。通过检查 SPI_STS.CHSIDE 位, 用户可以区分接收到的数据属于哪个声道。然而, PCM 音频标准里, SPI_STS.CHSIDE 位是没有意义的。

通过设置 SPI_I2SCFG.TDATLEN 位, 用户可以设置待传输的数据长度, 通过设置 SPI_I2SCFG.CHBITS 位, 设置通道的数据位宽。下面有 4 种数据格式发送数据:

- 16 位数据打包成 16 位的数据帧
- 16 位数据打包成 32 位的数据帧 (前面的 16 位是有意义的数据, 后面的 16 位数据被硬件设置为 0)
- 24 位数据打包成 32 位数据帧 (前面的 24 位数据是有意义的数据, 后面 8 位数据被硬件设置为 0)
- 32 位的数据打包成 32 位数据帧

I²S 使用和 SPI 相同的 SPI_DAT 寄存器发送和接收 16 位宽的数据。如果 I²S 需要发送或接收 24 位或 32 位宽数据, CPU 需读或写 SPI_DAT 寄存器 2 次。另一方面, 当 I²S 发送或接收 16 位宽数据, CPU 仅需读或写 SPI_DAT 寄存器一次。

不管采用哪个数据格式和通讯标准, I²S 总是先发送数据高位 (MSB)。

I²S 飞利浦标准

采用 I²S 飞利浦标准, 发送数据的设备在时钟下降沿改变数据, 接收数据的设备在时钟上升沿采样数据。WS 信号在第一个数据位 (MSB) 发送前一个时钟应有效, 时钟信号下降沿将变化。

图 20-14 I²S 飞利浦协议波形 (16/32 位全精度, CLKPOL = 0)

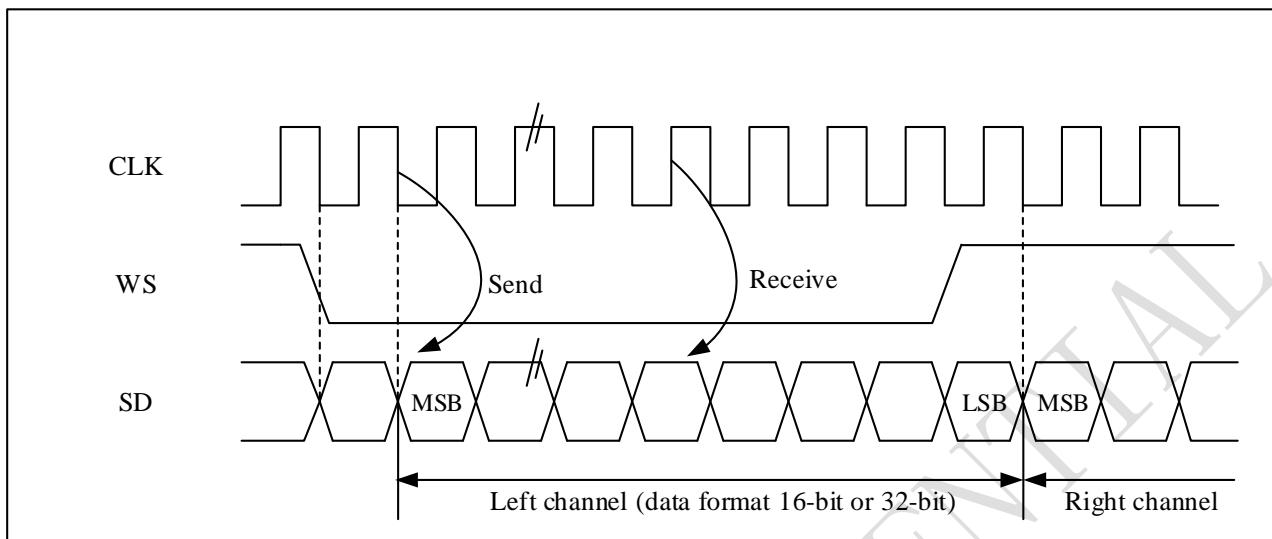
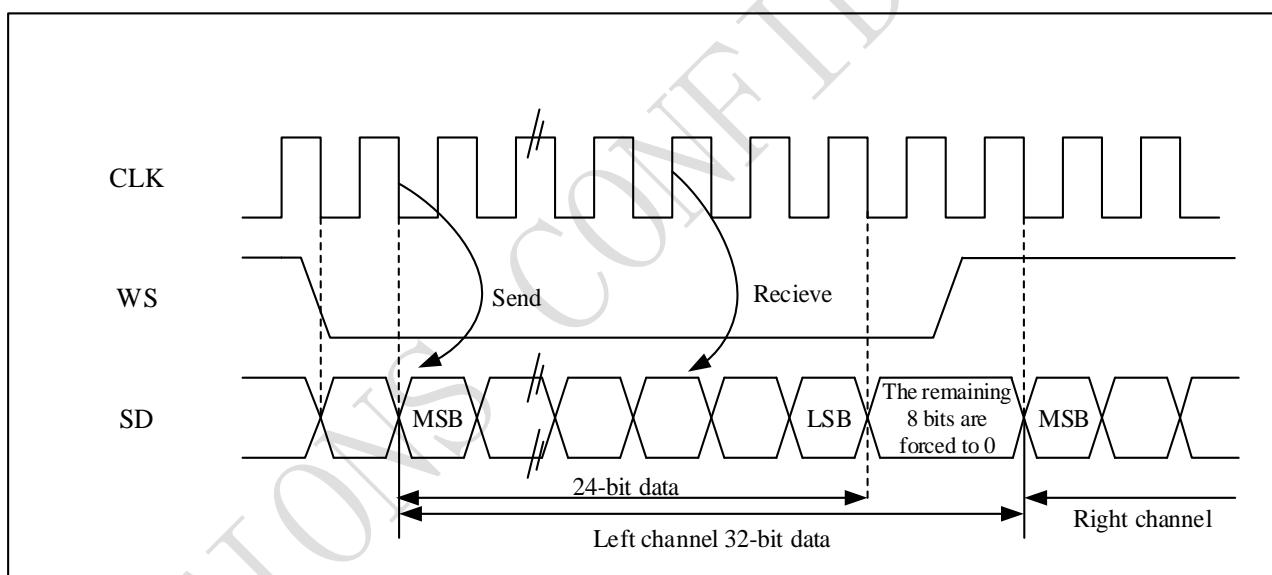
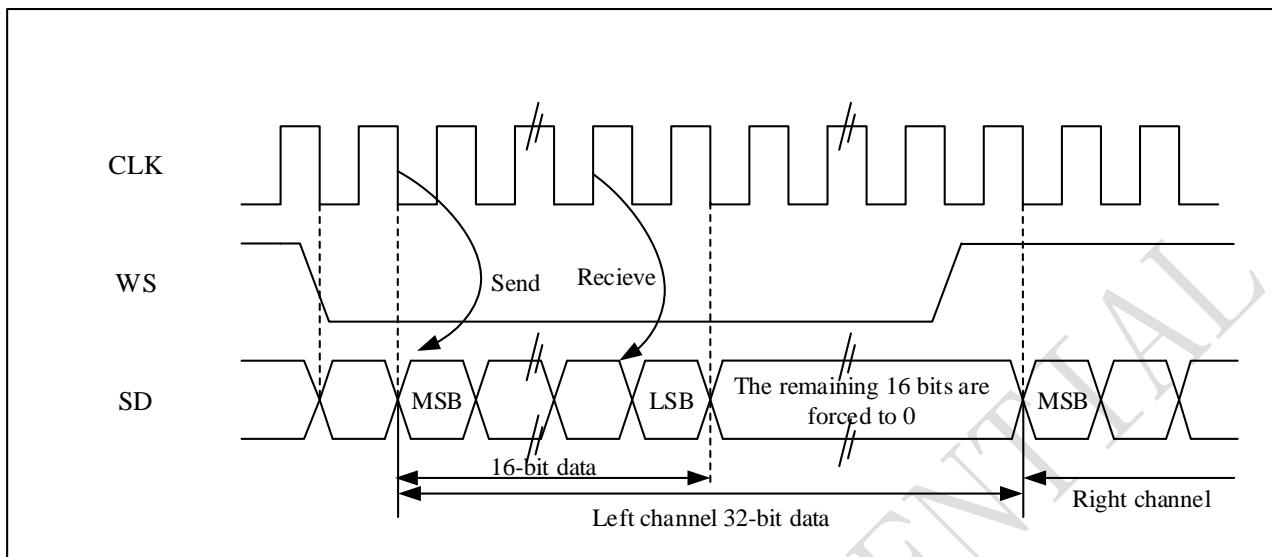


图 20-15 I²S 飞利浦协议标准波形 (24 位帧, CLKPOL = 0)



如果 24 位数据需要打包成 32 位数据帧格式, 每帧数据传输时, CPU 需要读或写 SPI_DAT 寄存器 2 次。例如, 如果用户发送 24 位数据 0x95AA66, CPU 将首先写 0x95AA 进 SPI_DAT 寄存器, 然后再写 0x66XX 进 SPI_DAT 寄存器 (仅高 8 位数据有效, 低 8 位数据是无意义的, 可以是任何值); 如果用户接收 24 位数据 0x95AA66, CPU 将首先读 SPI_DAT 寄存器得到 0x95AA, 然后再读 SPI_DAT 寄存器得到 0x6600 (仅高 8 位数据有效, 低 8 位数据总是 0)。

图 20-16 I²S 飞利浦协议标准波形（16 位扩展至 32 位包帧，CLKPOL = 0）



如果 16 位数据需要打包进 32 位数据帧格式，每帧数据传输时，CPU 仅需要读或写 SPI_DAT 寄存器一次。用于扩展到 32 位的低 16 位数据总是设置为 0x0000。例如，如果用户发送或接收 16 位的数据 0x89C1（扩展到 32 位数据是 0x89C10000）。数据发送过程中，高 16 位半字（0x89C1）需要写进 SPI_DAT 寄存器；直到 SPI_STS.TE 位置 1，用户可以写入新的数据。如果用户使能相应的中断，则中断产生。发送由硬件执行，即使最后 16 位（0x0000）没有发送，硬件将设置 SPI_STS.TE 位为 1，且产生相应的中断。接收数据过程，每次设备收到高 16 位半字（0x89C1）后，SPI_STS.RNE 标志位将置 1。如果用户使能相应的中断，则中断产生。这样，在 2 次读和写之间 CPU 有更多时间，且可以防止上溢或下溢的情况发生。

MSB 对齐标准

在 MSB 对齐标准里，发送数据的设备将在时钟下降沿改变数据，接收数据的设备在时钟上升沿采样数据。WS 信号和第一个数据位（MSB）同时产生。

这个标准里，数据发送和接收处理和 I²S 飞利浦标准一样。

图 20-17 MSB 对齐 16 位或 32 位全精度，CLKPOL = 0

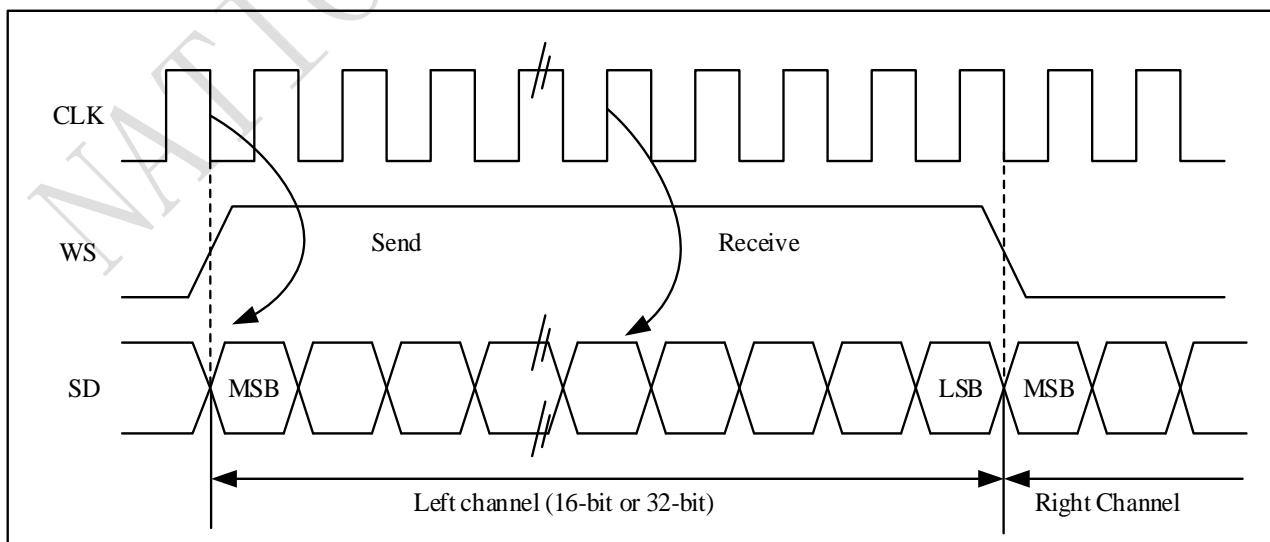


图 20-18 MSB 对齐 24 位数据, CLKPOL = 0

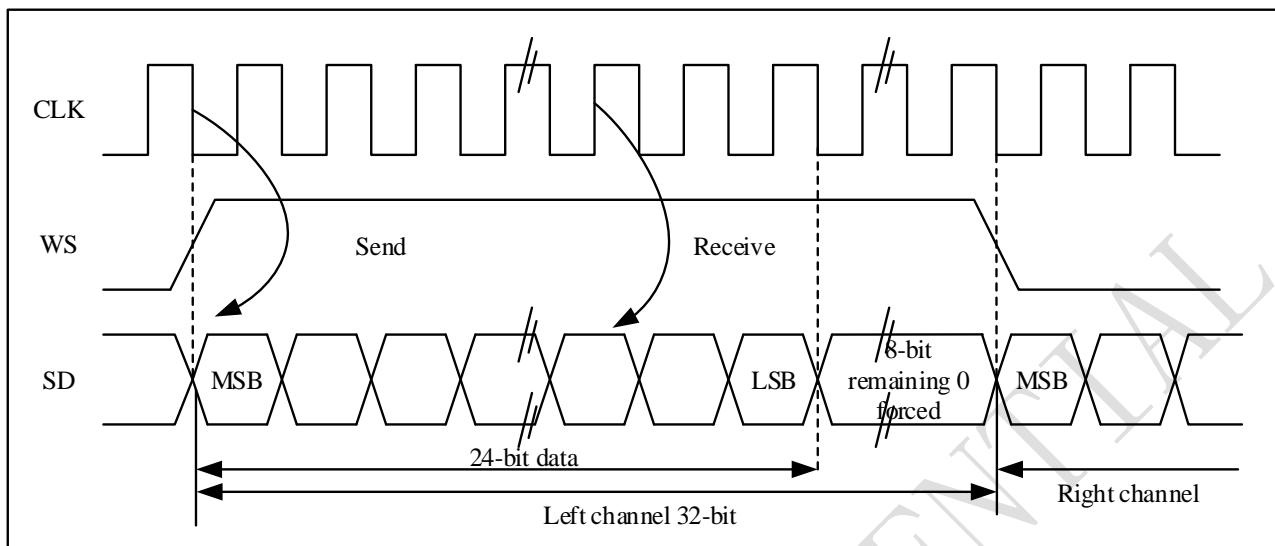
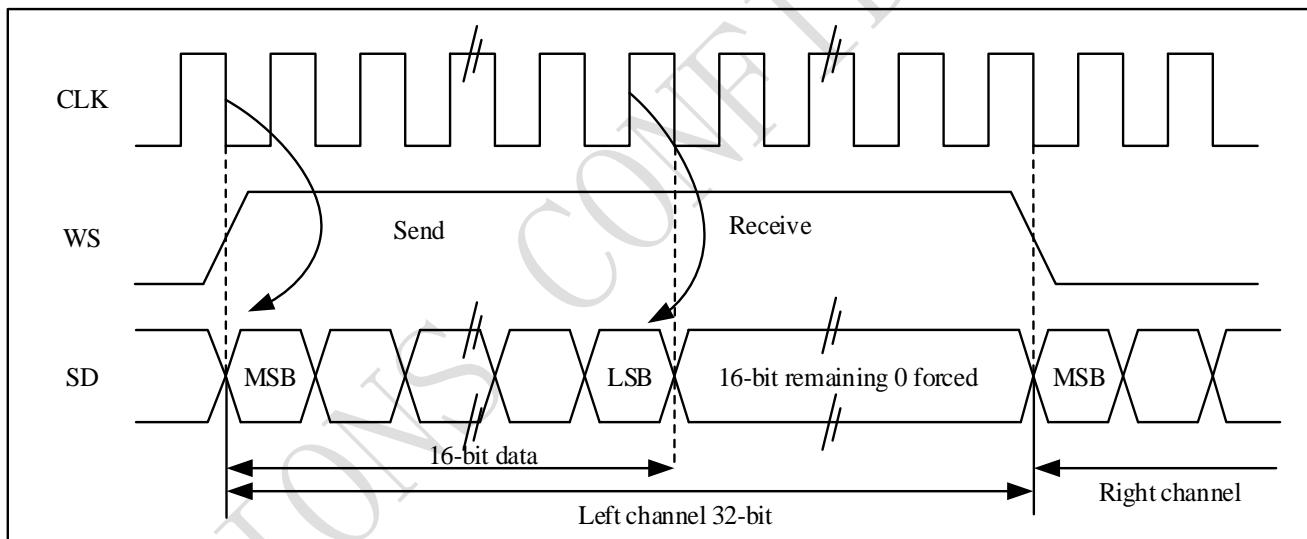


图 20-19 MSB 对齐 16 位数据扩展到 32 位包帧, CLKPOL = 0



LSB 对齐标准

16 位或 32 位全精度帧格式, LSB 对齐标准和 MSB 对齐标准是一样的。

图 20-20 LSB 对齐 16 位或 32 位全精度, CLKPOL = 0

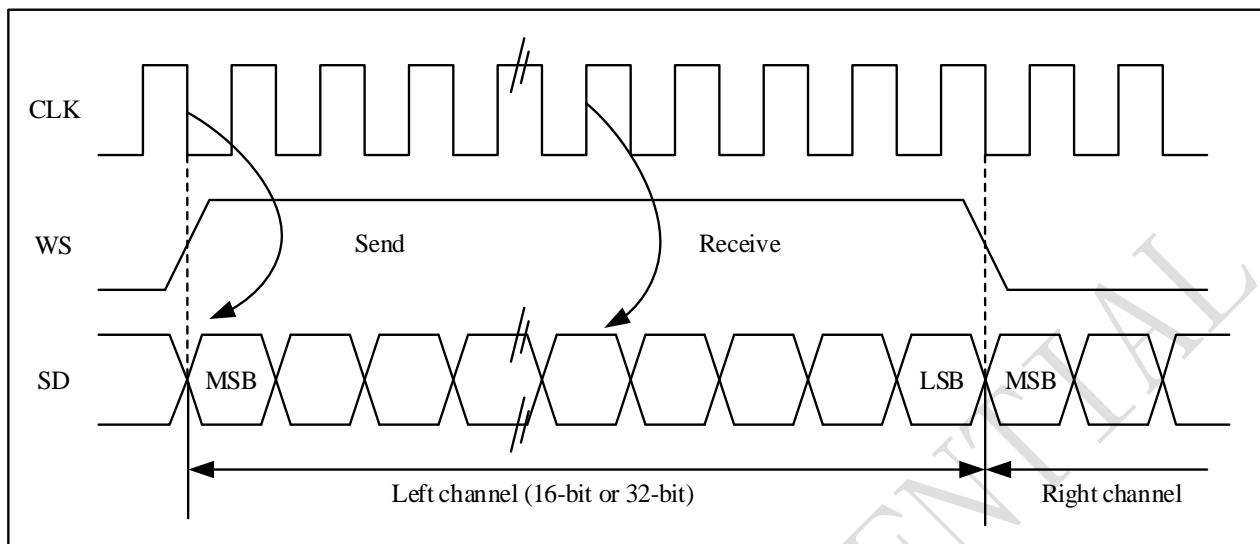
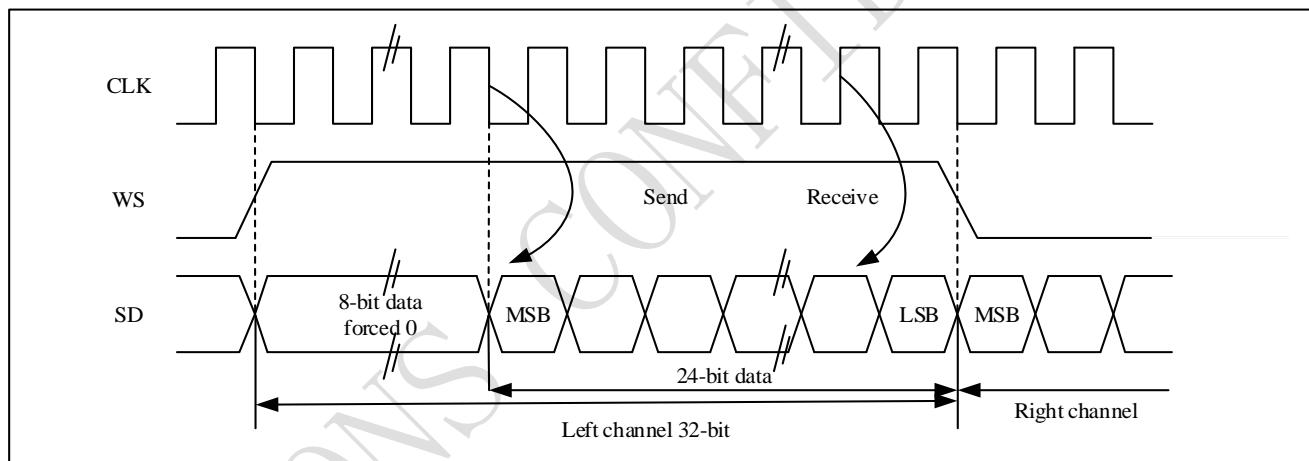
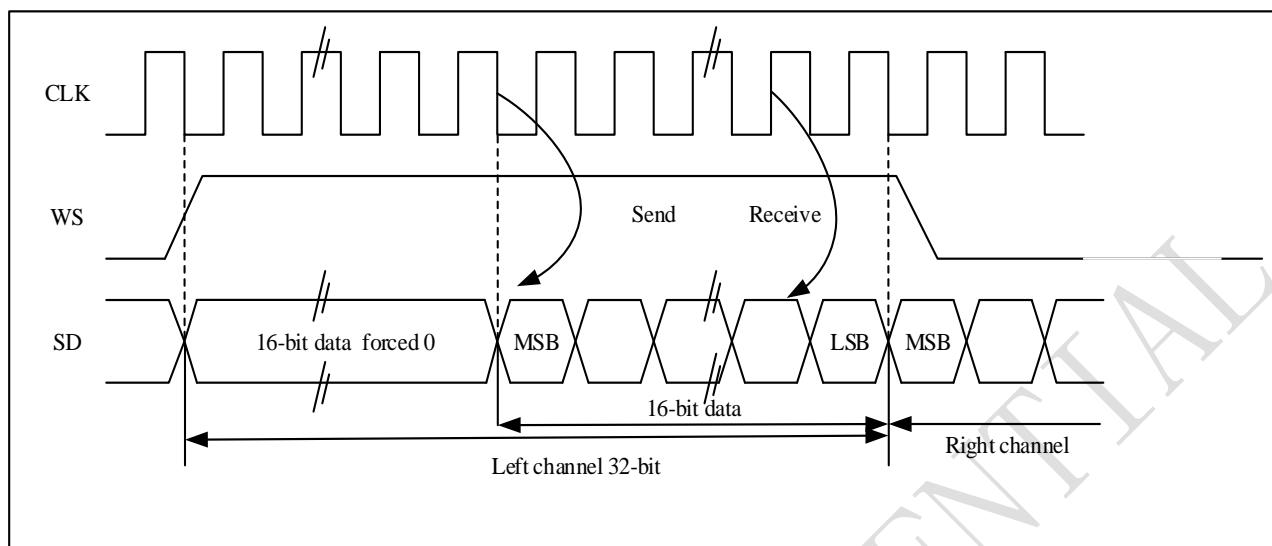


图 20-21 LSB 对齐 24 位数据, CLKPOL = 0



如果 24 位数据需要打包成 32 位数据帧格式, 每帧数据传输时, CPU 需要读或写 SPI_DAT 寄存器 2 次。例如, 用户发送 24 位数据 0x95AA66, CPU 将先写 0xXX95 (仅低 8 位数据有效, 高 8 位数据没有意义, 可以是任何值) 进 SPI_DAT 寄存器, 然后再写 0xAA66 进 SPI_DAT 寄存器。如果用户接收 24 位数据 0x95AA66, CPU 将先读 SPI_DAT 寄存器得到 0x0095 (仅低 8 位数据有效, 高 8 位总是为 0), 然后再读 SPI_DAT 寄存器得到 0xAA66。

图 20-22 LSB 对齐 16 位数据扩展到 32 位包帧, CLKPOL = 0



如果 16 位数据需要打包进 32 位数据帧格式, 每帧数据传输时, CPU 仅需要读或写 SPI_DAT 寄存器一次。扩展到 32 位数据的高 16 位被硬件设置为 0x0000, 如果用户发送或接收 16 位数据 0x89C1 (扩展到 32 位数是 0x000089C1)。发送过程中, 高 16 位半字 (0x0000) 需要先写到 SPI_DAT 寄存器; 一旦有效数据开始发送, 下一个 TE 事件将产生。接收数据过程中, 一旦设备接收到有效数据, RNE 事件将发生。这样, 在 2 次读和写之间 CPU 将有更多时间, 可以防止上溢或下溢的情况发生。

PCM 标准

在 PCM 标准里, 有短帧和长帧两种帧结构。用户可以设置 SPI_I2SCFG.PCMFSYNC 位选择帧结构。WS 信号指示帧同步信息。

用于同步长帧的 WS 信号是 13 位有效的; 用于同步短帧的 WS 信号长度是 1 位。

数据接收和发送的处理标准和 I²S 飞利浦标准是一样的。

图 20-23 PCM 标准波形 (16 位)

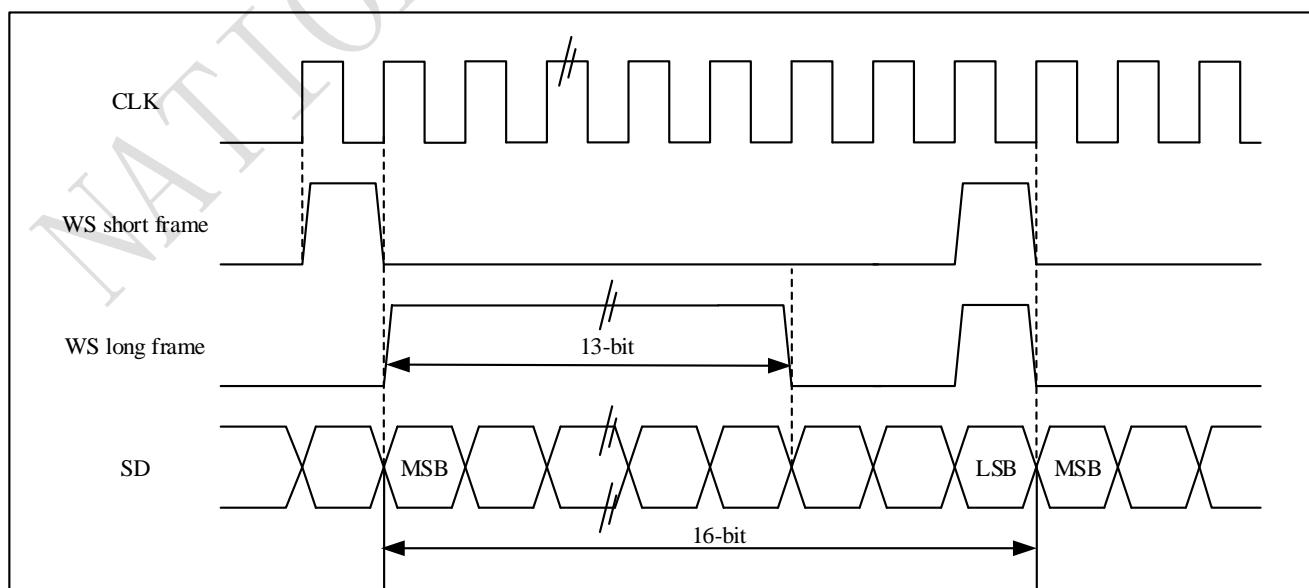
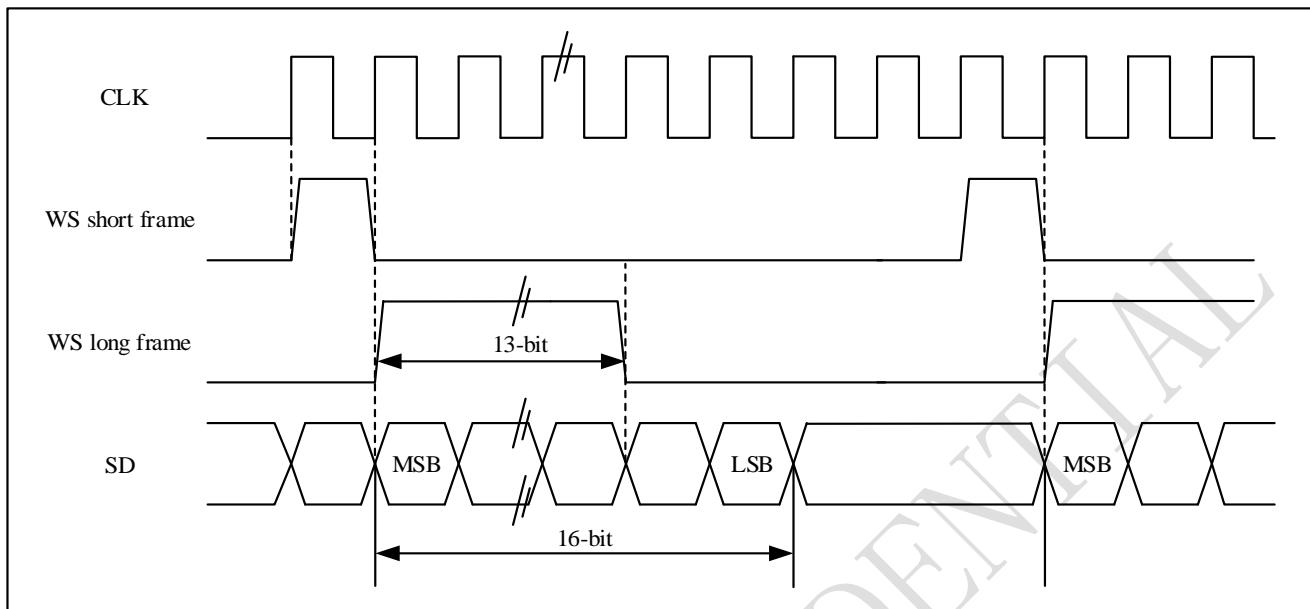


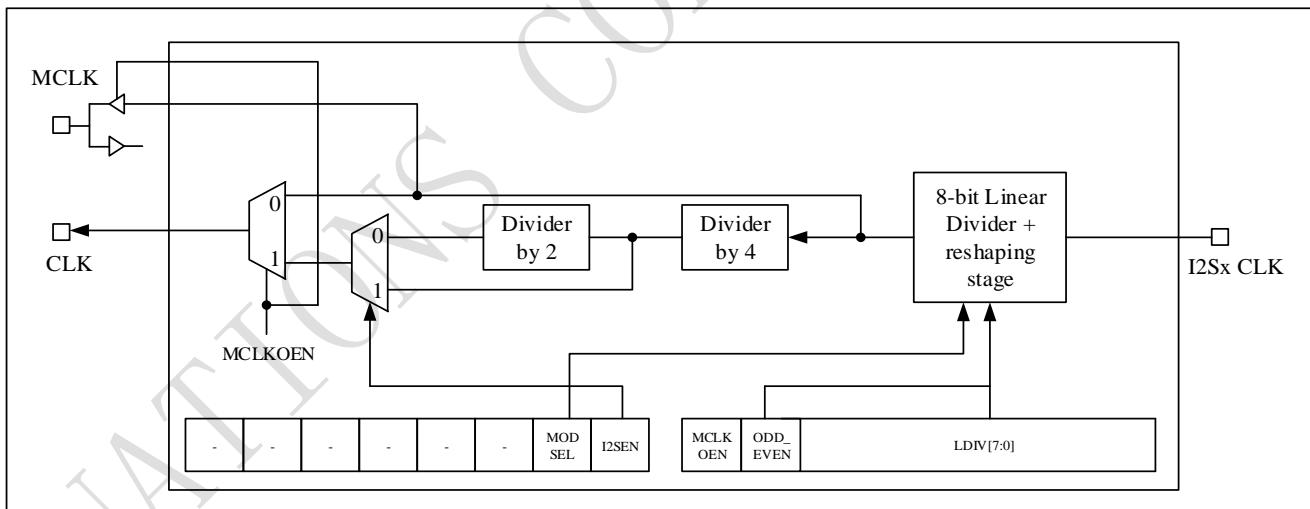
图 20-24 PCM 标准波形 (16 位扩展到 32 位包帧)



20.4.2 时钟发生器

对于主设备，为了获得需要的音频频率，需要正确地对线性分频器进行设置

图 20-25 I²S 时钟发生器结构



注：I²SxCLK 的时钟源是驱动 AHB 时钟的 HSI、HSE 或 PLL 系统时钟。

I²S 的比特率决定了在 I²S 数据线上的数据流和 I²S 的时钟信号频率。

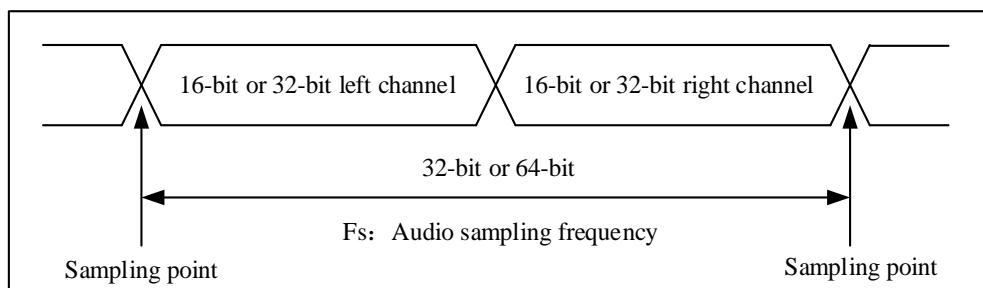
I²S 比特率 = 每个声道的比特数 × 声道数目 × 音频采样频率

对于一个具有左右声道和 16 位音频的信号，I²S 比特率计算如下：

I²S 比特率 = $16 \times 2 \times F_s$

如果包长为 32 位，则有：I²S 比特率 = $32 \times 2 \times F_s$

图 20-26 音频采样频率定义



通过设置 SPI_I2SPREDIV.ODD_EVEN 位和 SPI_I2SPREDIV.LDIV 位，可以设置音频的采样信号频率。音频的采样频率可以是 96kHz、48kHz、44.1kHz、32kHz、22.05kHz、16kHz、11.025kHz 或者 8kHz（或任何此范围内的数值）。参照以下公式设置线性分频器：

$$MCLKOEN = 1, \text{CHBITS} = 0 \text{ 时, } F_s = I^2SxCLK / [(16 \times 2) \times ((2 \times LDIV) + ODD_EVEN) \times 8]$$

$$MCLKOEN = 1, \text{CHBITS} = 1 \text{ 时, } F_s = I^2SxCLK / [(32 \times 2) \times ((2 \times LDIV) + ODD_EVEN) \times 4]$$

$$MCLKOEN = 0, \text{CHBITS} = 0 \text{ 时, } F_s = I^2SxCLK / [(16 \times 2) \times ((2 \times LDIV) + ODD_EVEN)]$$

$$MCLKOEN = 0, \text{CHBITS} = 1 \text{ 时, } F_s = I^2SxCLK / [(32 \times 2) \times ((2 \times LDIV) + ODD_EVEN)]$$

可参照下表的时钟配置得到精确的音频频率。

表 20-2 使用标准的 8MHz HSE 时钟得到精确的音频频率

| SYSCLK (MHz) | I ² S_LDIV | | I ² S_ODD_EVEN | | MCLK | 期望值 Fs(Hz) | 实际的 F _s (Hz) | | 误差 | |
|-----------------|-----------------------|---------|---------------------------|---------|---------|---------------|-------------------------|----------|---------|---------|
| | 16 bits | 32 bits | 16 bits | 32 bits | | | 16 bits | 32 bits | 16 bits | 32 bits |
| 72 | 11 | 6 | 1 | 0 | without | 96000 | 97826.09 | 93750 | 1.90% | 2.34% |
| 72 | 23 | 11 | 1 | 1 | without | 48000 | 47872.34 | 48913.04 | 0.27% | 1.90% |
| 72 | 25 | 13 | 1 | 0 | without | 44100 | 44117.65 | 43269.23 | 0.04% | 1.88% |
| 72 | 35 | 17 | 0 | 1 | without | 32000 | 32142.86 | 32142.86 | 0.44% | 0.44% |
| 72 | 51 | 25 | 0 | 1 | without | 22050 | 22058.82 | 22058.82 | 0.04% | 0.04% |
| 72 | 70 | 35 | 1 | 0 | without | 16000 | 15675.75 | 16071.43 | 0.27% | 0.45% |
| 72 | 102 | 51 | 0 | 0 | without | 11025 | 11029.41 | 11029.41 | 0.04% | 0.04% |
| 72 | 140 | 70 | 1 | 1 | without | 8000 | 8007.11 | 7978.72 | 0.09% | 0.27% |
| 72 | 2 | 2 | 0 | 0 | yes | 96000 | 70312.15 | 70312.15 | 26.76% | 26.76% |
| 72 | 3 | 3 | 0 | 0 | yes | 48000 | 46875 | 46875 | 2.34% | 2.34% |
| 72 | 3 | 3 | 0 | 0 | yes | 44100 | 46875 | 46875 | 6.29% | 6.29% |
| 72 | 4 | 4 | 1 | 1 | yes | 32000 | 31250 | 31250 | 2.34% | 2.34% |
| 72 | 6 | 6 | 1 | 1 | yes | 22050 | 21634.61 | 21634.61 | 1.88% | 1.88% |
| 72 | 9 | 9 | 0 | 0 | yes | 16000 | 15625 | 15625 | 2.34% | 2.34% |
| 72 | 13 | 13 | 0 | 0 | yes | 11025 | 10817.3 | 10817.3 | 1.88% | 1.88% |
| 72 | 17 | 17 | 1 | 1 | yes | 8000 | 8035.71 | 8035.71 | 0.45% | 0.45% |

20.4.3 I²S 发送和接收流程

I²S 初始化流程

1. 用户可以设置 SPI_I2SPREDIV.LDIV[7:0]和 SPI_I2SPREDIV.ODD_EVEN 位配置相关的预分频和串行时钟波特率；
2. 如果用户需要主设备提供主时钟 MCLK 给外部的 DAC/ADC 音频设备，设置 SPI_I2SPREDIV.MCLKOEN 位为 1。（根据不同的时钟输出，计算 LDIV 和 ODD_EVEN，见 19.4.2 章节）
3. 用户可以设置 SPI_I2SCFG 寄存器的 CLKPOL 位定义空闲时通讯时钟极性；用户可以设置 SPI_I2SCFG.MODSEL 位为 1 配置设备为 I²S 模式，且设置 SPI_I2SCFG.MODCFG[1:0]选择 I²S 的主从模式和传输方向（发送或接收）；设置 SPI_I2SCFG.STDSEL[1:0]选择相应的 I²S 标准（PCM 标准下，设置 PCMF SYNC 位选择同步模式）；设置 SPI_I2SCFG.TDATLEN[1:0]选择数据位数，通过 SPI_I2SCFG.CHBITS 位选择每个通道的数据位数。
4. 当用户需要使能中断或 DMA，配置操作和 SPI 一样。
5. 最后，设置 SPI_I2SCFG.I2SEN 位为 1 开始 I²S 通讯。

发送流程

主模式

当 I²S 工作在主模式下，CLK 引脚输出串行时钟，WS 引脚产生声道选择信号，设置 SPI_I2SPREDIV.MCLKOEN 位选择是否输出主时钟（MCLK）。

当数据写进发送缓存，发送过程开始。当前声道的数据并行从发送缓存传输到移位寄存器，SPI_STS.TE 标志位置 1。此时，另外一个声道的数据应该被写进 SPI_DAT 寄存器。通过 SPI_STS.CHSIDE 标志位，可以检查当前数据相应的声道。SPI_STS.CHSIDE 值当 SPI_STS.TE 标志位置 1 时更新。完整的数据帧包括左声道和右声道，并且设备不可以仅传输部分数据帧。当 SPI_STS.TE 标志位置 1，如果 SPI_CTRL2.TEINTEN 位置 1，则产生中断。写入数据的操作取决于选择的 I²S 标准。详见 19.4.1 章节

当用户要关闭 I²S 功能时，等待 SPI_STS.TE 标志位置 1 且 SPI_STS.BUSY 标志位为 0，然后清除 SPI_I2SCFG.I2SEN 位为 0。

从模式

从模式的发送过程和主模式相似。不同处如下：

当 I²S 工作在从模式，不需要配置时钟，并且 CLK 引脚和 WS 引脚和主设备的相应引脚连接。当外部的主设备发送时钟信号，并且当 WS 信号要求数据传输时，发送过程开始。仅当从设备使能且数据已经写入 I²S 数据寄存器，外部的主设备才可以开始通讯。

当代表下个数据传输的第一个时钟沿到达前，新数据还没有写进 SPI_DAT 寄存器，下溢产生，且 SPI_STS.UNDER 标志位置 1。如果 SPI_CTRL2.ERRINTEN 位置 1，中断产生，指示错误已经发生。

SPI_STS.CHSIDE 标志指示当前被发送的数据对应哪个声道，和主模式发送过程相比，在从模式，SPI_STS.CHSIDE 取决于外部主 I²S 设备的 WS 信号（WS 信号为 1 意味着左声道）

接收流程

主模式

音频数据总是以 16 位包格式接收，根据配置的数据和声道长度，接收到的音频数据需要一次或两次传输到接收缓存。

当数据从移位寄存器传输到接收缓存，SPI_STS.RNE 标志位置 1，数据准备就绪可以从 SPI_DAT 寄存器读取，如果 SPI_CTRL2 寄存器的 RNEINTEN 位置 1，中断产生。读 SPI_DAT 寄存器清除 RNE 标志位。如果

之前的接收的数据没有读取，新的数据再次接收进来，上溢发生，OVER 标志位置 1，如果 SPI_CTRL2 寄存器的 ERRINTEN 位置 1，中断产生，指示错误已经发生。

通过 SPI_STS.CHSIDE 位，当前已经传输的数据对应的声道可以得到确认，当 SPI_STS.RNE 标志位置 1，SPI_STS.CHSIDE 值更新。

读数据的操作取决于选择的 I²S 标准，详见 19.4.1 章节。

当用户关闭 I²S 功能，不同的音频标准、数据长度、声道长度采用不同的步骤：

- 如果数据长度是 16 位，声道长度是 32 位 (SPI_I2SCFG.TDATLEN = 00, SPI_I2SCFG.CHBITS = 1), LSB 对齐标准 (SPI_I2SCFG.STDSEL = 10)。
 1. 等待倒数第二个 SPI_STS.RNE 标志位置 1;
 2. 软件延时，等待 17 个 I²S 时钟;
 3. 关闭 I²S (SPI_I2SCFG.I2SEN = 0)。
- 如果数据长度是 16 位，声道长度是 32 位 (SPI_I2SCFG.TDATLEN = 00, SPI_I2SCFG.CHBITS = 1), MSB 对齐标准 (SPI_I2SCFG.STDSEL = 01), I²S 飞利浦标准 (SPI_I2SCFG.STDSEL = 00) 或 PCM 标准 (SPI_I2SCFG.STDSEL = 11)
 1. 等待最后一个 SPI_STS.RNE 标志位置 1;
 2. 软件延时，等待 1 个 I²S 时钟;
 3. 关闭 I²S (SPI_I2SCFG.I2SEN = 0)。
- 其他的 SPI_I2SCFG.TDATLEN 和 SPI_I2SCFG.CHBITS 组合和 SPI_I2SCFG.STDSEL 选择的任意音频模式
 1. 等待倒数第二个 SPI_STS.RNE 标志位置 1;
 2. 软件延时，等待 1 个 I²S 时钟;
 3. 关闭 I²S (SPI_I2SCFG.I2SEN = 0)。

从模式

从模式的接收过程和主模式的相似，不同处如下：

SPI_STS.CHSIDE 标志指示当前发送数据对应的哪个声道。和主模式接收流程相比，在从模式下，SPI_STS.CHSIDE 取决于外部主设备的 WS 信号。关闭 I²S 功能时，当 SPI_STS.RNE 标志位为 1 时清除 SPI_I2SCFG.I2SEN 位为 0。

20.4.4 状态标识

在 SPI_STS 寄存器有下面 4 个标志位，用于监视 I²S 总线状态

发送缓存空标志位 (TE)

当发送缓存空，该标志位置 1，指示新数据可以写进 SPI_DAT 寄存器。当发送缓存非空，该标志位清 0。

接收缓存非空标志 (RNE)

当接收缓存非空，该标志位置 1，指示有效数据已经接收到接收缓存。当读取 SPI_DAT 寄存器，该标志位

清 0。

忙标志 (BUSY)

当传输开始, BUSY 标志位置 1, 当传输结束后, BUSY 标志位硬件清 0 (软件操作是无效的)。

主设备模式 (SPI_I2SCFG.MODCFG = 11) 下, 在接收期间 BUSY 标志位被置 0。

当 I²S 模块关闭或传输完成, 该标志位清 0。

在从机连续通讯模式, 每个数据项传输之间, BUSY 标志位变低 1 个 I²S 时钟。因此, 不要使用 BUSY 标志位处理每一个数据项的发送和接收

声道标志 (CHSIDE)

CHSIDE 位用来指示当前收发的数据所在的通道, 在 PCM 标准下, 这个标志位没有意义。

在发送模式下, 该标志位当 TE 标志位置 1 时更新; 在接收模式下, 该标志位当 RNE 标志位置 1 时更新。

在收发过程中, 如果发生上溢 (OVER) 或下溢 (UNDER) 错误, 该标志位无意义, 需要将 I²S 关闭再打开。

20.4.5 错误标志位

SPI_STS 寄存器有 2 个错误标志位。

上溢标志位 (OVER)

当 RNE 标志位置 1, 但是仍有数据发送到接收缓存, 上溢错误将会发生, 这时, OVER 标志置 1。如果用户使能相应的中断, 中断将会产生。从这以后所有收到的数据将会丢失, SPI_DAT 寄存器仅保留之前未读的数据。依次读 SPI_DAT 寄存器和 SPI_STS 寄存器, 可以清除 OVER 标志位。

下溢标志位 (UNDER)

在从发送模式下, 当发送数据的第一个时钟沿到达, 如果发送缓存仍然是空的, UNDER 标志位置 1。如果用户使能相应的中断, 中断将会产生。读 SPI_STS 寄存器清除 UNDER 位。

20.4.6 I²S 中断

所有 I²S 中断如下表所列。

表 20-3 I²S 中断请求

| 中断事件 | 事件标志位 | 使能控制位 |
|----------|-------|----------|
| 发送缓存空标志 | TE | TEINTEN |
| 接收缓存非空标志 | RNE | RNEINTEN |
| 下溢标志 | UNDER | ERRINTEN |
| 上溢标志 | OVER | |

20.4.7 DMA 功能

工作在 I²S 模式, 不需要数据传输保护功能, 因此不需要支持 CRC, 其他的 DMA 的功能与 SPI 模式是一样的。

20.5 SPI 和 I²S 寄存器

20.5.1 SPI 寄存器总览

表 20-4 SPI 寄存器总览

| Offset | Register | 31 | 30 | 29 | 28 | 27 | 26 | 25 | 24 | 23 | 22 | 21 | 20 | 19 | 18 | 17 | 16 | 15 | 14 | 13 | 12 | 11 | 10 | 9 | 8 | 7 | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | 0 | | | | |
|--------|---------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|--|--|--|--|
| 000h | SPI_CTRL1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Reset Value | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 004h | SPI_CTRL2 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Reset Value | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 008h | SPI_STS | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Reset Value | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 00Ch | SPI_DAT | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Reset Value | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 010h | SPI_CRCPOLY | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Reset Value | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 014h | SPI_CRCRDAT | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Reset Value | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 018h | SPI_CRCTDAT | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Reset Value | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 01Ch | SPI_I2SCFG | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Reset Value | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 020h | SPI_I2SPREDIV | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Reset Value | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

20.5.2 SPI 控制寄存器 1 (SPI_CTRL1) (不能用于 I²S 模式)

地址偏移: 0x00

复位值: 0x0000

| 15 | 14 | 13 | 12 | 11 | 10 | 9 | 8 | 7 | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | 0 |
|------------|-----------|-------|----------|-------|-------|-------|------|-------|-------|---------|------|--------|--------|---|---|
| BIDIR MODE | BIDIR OEN | CRCEN | CRC NEXT | DATFF | RONLY | SSMEN | SSEL | LSBFF | SPHEN | BR[2:0] | MSEL | CLKPOL | CLKPHA | | |

| 位域 | 名称 | 描述 |
|----|-----------|--|
| 15 | BIDIRMODE | 双向数据模式使能 0: 选择“双线单向”模式; 1: 选择“单线双向”模式。 |

| 位域 | 名称 | 描述 |
|----|----------|--|
| | | 注意: 不能用在I ² S 模式。 |
| 14 | BIDIROEN | <p>双向模式下输出使能</p> <p>0: 输出禁止 (仅接收模式)。</p> <p>1: 输出使能 (仅发送模式)。</p> <p>在主机模式下, “单线”数据线是 MOSI 引脚, 在从机模式下, “单线”数据线是 MISO 引脚。</p> <p>注意: 不能用在I²S 模式。</p> |
| 13 | CRCEN | <p>硬件 CRC 计算使能</p> <p>0: CRC 计算禁能。</p> <p>1: CRC 计算使能。</p> <p>该位只能用于全双工模式。</p> <p>注意: 该位仅在 SPI 禁能时可写 (SPI_CTRL1.SPIEN = 0), 否则会产生错误。</p> <p>注意: 不能用在I²S 模式。</p> |
| 12 | CRCNEXT | <p>下个发送 CRC</p> <p>0: 下个发送的数据来自发送缓存。</p> <p>1: 下个发送的数据来自 CRC 寄存器。</p> <p>注意: 最后数据写进 SPI_DAT 寄存器后, 该位应该立即写入。</p> <p>注意: 不能用在I²S 模式。</p> |
| 11 | DATFF | <p>数据帧格式</p> <p>0: 8 位数据帧格式用于发送/接收。</p> <p>1: 16 位数据帧格式用于发送/接收</p> <p>注意: 该位仅 SPI 禁能时可以写入 (SPI_CTRL1.SPIEN = 0), 否则会产生错误。</p> <p>注意: 不能用在I²S 模式。</p> |
| 10 | RONLY | <p>仅接收模式</p> <p>该位和 BIDIRMODE 位一起决定双线单向模式的传输方向。在多个从设备的应用场景, 该位仅被访问的从设备置 1, 仅被访问的从设备可以输出, 从而避免数据线冲突。</p> <p>0: 全双工 (发送和接收模式)。</p> <p>1: 输出禁能 (仅接收模式)。</p> <p>注意: 不能用在I²S 模式。</p> |
| 9 | SSMEN | <p>软件从设备管理</p> <p>当 SSMEN 位置 1, NSS 引脚电平由 SSEL 位的值决定。</p> <p>0: 软件从设备管理被禁止。</p> <p>1: 使能软件从设备管理。</p> <p>注意: 不能用在I²S 模式。</p> |
| 8 | SSEL | <p>内部从设备选择</p> <p>该位仅在 SSMEN 位置 1 时有意义。它决定了 NSS 电平, 且 NSS 引脚的 I/O 操作无效。</p> <p>注意: 不能用在I²S 模式。</p> |
| 7 | LSBFF | <p>帧格式</p> <p>0: 先发送 MSB。</p> <p>1: 先发送 LSB。</p> <p>注意: 通讯过程中该位不能被改变。</p> <p>注意: 不能用在I²S 模式。</p> |

| 位域 | 名称 | 描述 |
|-----|---------|---|
| 6 | SPIEN | <p>SPI 使能</p> <p>0: 禁能 SPI 模块。</p> <p>1: 使能 SPI 模块。</p> <p>注意: 不能用在 I²S 模式。</p> <p>注意: 当关闭 SPI 模块, 请遵循 20.3.4 的流程操作。</p> |
| 5:3 | BR[2:0] | <p>波特率控制</p> <p>000: fPCLK/2</p> <p>001: fPCLK/4</p> <p>010: fPCLK/8</p> <p>011: fPCLK/16</p> <p>100: fPCLK/32</p> <p>101: fPCLK/64</p> <p>110: fPCLK/128</p> <p>111: fPCLK/256</p> <p>注意: 当通讯过程中, 这些位不能被修改。</p> <p>注意: 不能用在 I²S 模式。</p> |
| 2 | MSEL | <p>主设备选择</p> <p>0: 配置为从设备。</p> <p>1: 配置为主设备。</p> <p>注意: 通讯过程中该位不能被修改。</p> <p>注意: 不能用在 I²S 模式。</p> |
| 1 | CLKPOL | <p>时钟极性</p> <p>0: 空闲状态下, SCLK 保持为低电平。</p> <p>1: 空闲状态下, SCLK 保持为高电平。</p> <p>注意: 通讯过程中该位不能被修改。</p> <p>注意: 不能用在 I²S 模式。</p> |
| 0 | CLKPHA | <p>时钟相位</p> <p>0: 第一个时钟沿采样数据</p> <p>1: 第二个时钟沿采样数据。</p> <p>注意: 通讯过程中该位不能被修改。</p> <p>注意: 不能用在 I²S 模式。</p> |

20.5.3 SPI 控制寄存器 2 (SPI_CTRL2)

地址偏移: 0x04

复位值: 0x0000

| | | | | | | | | | | |
|----|----------|---|----|----|----|---|----|----|----|---|
| 15 | Reserved | 8 | 7 | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | 0 |
| | | | rw | rw | rw | | rw | rw | rw | |

| 位域 | 名称 | 描述 |
|------|----------|-------------|
| 15:8 | Reserved | 保留, 必须保持复位值 |

| 位域 | 名称 | 描述 |
|-----|----------|--|
| 7 | TEINTEN | 发送缓存空中断使能 0: 禁能 TE 中断 1: 允许 TE 中断, 当 SPI_STS.TE 标志位置 1 时产生中断请求。 |
| 6 | RNEINTEN | 接收缓存非空中断使能 0: 禁能 RNE 中断; 1: 允许 RNE 中断, 当 SPI_STS.RNE 标志位置 1 时产生中断请求。 |
| 5 | ERRINTEN | 错误中断使能 当错误 (CRCERR, OVER, MODERR) 发生时, 该位控制是否产生中断 0: 禁能错误中断; 1: 允许错误中断。 |
| 4:3 | Reserved | 保留, 必须保持复位值。 |
| 2 | SSOEN | NSS 输出使能 0: 在主模式下禁止输出 NSS, 该设备可以工作在多主设备模式; 1: 设备开启时, 打开主模式下 NSS 输出, 该设备不能工作在多主设备模式。 注意: 不能用于 PS 模式。 |
| 1 | TDMAEN | 发送缓存 DMA 使能 当该位被设置时, TE 标志位一旦被置位就发出 DMA 请求 0: 禁止发送缓存 DMA; 1: 使能发送缓存 DMA。 |
| 0 | RDMAEN | 接收缓存 DMA 使能 当该位被设置时, RNE 标志位一旦被置位就发出 DMA 请求 0: 禁止接收缓存 DMA; 1: 使能接收缓存 DMA。 |

20.5.4 SPI 状态寄存器 (SPI_STS)

地址偏移: 0x08

复位值: 0x0002

| | | | | | | | | | | | | | | | | |
|----|----------|---|------|---|------|---|--------|---|--------|---|-------|---|--------|---|---|---|
| 15 | Reserved | 8 | BUSY | 7 | OVER | 6 | MODERR | 5 | CRCERR | 4 | UNDER | 3 | CHSIDE | 2 | 1 | 0 |
| | | | r | r | r | r | rc_w0 | r | r | r | r | r | r | r | r | r |

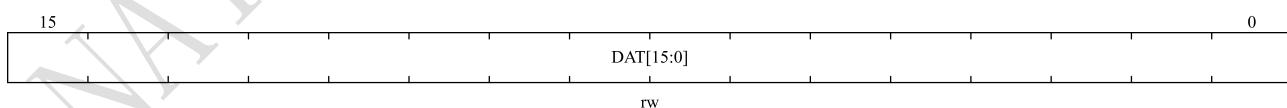
| 位域 | 名称 | 描述 |
|------|----------|--|
| 15:8 | Reserved | 保留, 必须保持复位值。 |
| 7 | BUSY | 忙标志 0: SPI 不忙; 1: SPI 忙于通讯或发送缓存非空。 该位硬件清 0 或置 1 注意: 使用该标志需要特别注意, 详见20.3.3 章节和 20.3.4 章节。 |
| 6 | OVER | 上溢标志 0: 没有上溢错误; 1: 发生上溢错误。 |

| 位域 | 名称 | 描述 |
|----|--------|---|
| | | 该位硬件置位，根据软件操作序列清除，更详细的信息详见20.3.7 章节。 |
| 5 | MODERR | 模式错误 0: 没有模式错误; 1: 模式错误发生。 该位硬件置位，根据软件操作序列清除，更详细的信息详见20.3.7 章节。 注意：不能用于I²S 模式。 |
| 4 | CRCERR | CRC 错误标志 0: 接收到的 CRC 值和 SPI_CRCRDAT 寄存器值匹配; 1: 接收到的 CRC 值和 SPI_CRCRDAT 寄存器值不匹配。 该位硬件置位，软件写 0 清除。 注意：不能用于I²S 模式。 |
| 3 | UNDER | 下溢标志 0: 没有下溢产生; 1: 有下溢产生。 该位硬件置 1，通过软序列清 0，详见 20.4.5 章节。 注意：不能用于SPI 模式。 |
| 2 | CHSIDE | 声道 0: 需要发送或接收左声道; 1: 需要发送或接收右声道。 注意：不能用于SPI 模式。PCM 模式是没有意义的。 |
| 1 | TE | 发送缓存空 0: 发送缓存非空; 1: 发送缓存空。 |
| 0 | RNE | 接收缓存非空 0: 接收缓存空; 1: 接收缓存非空。 |

20.5.5 SPI 数据寄存器 (SPI_DAT)

地址偏移: 0x0C

复位值: 0x0000



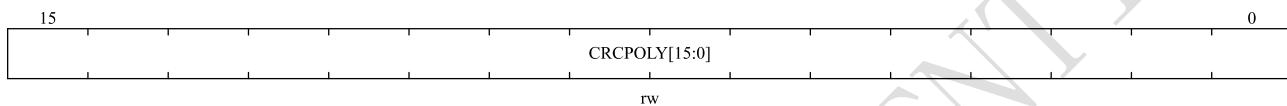
| 位域 | 名称 | 描述 |
|------|-----------|--|
| 15:0 | DAT[15:0] | 数据寄存器 待发送或者已经收到的数据 数据寄存器对应两个缓存：一个用于写（发送缓存）；另外一个用于读（接收缓存）。写操作将数据写到发送缓存；读操作将返回接收缓存里的数据。 对 SPI 模式的注释：根据 SPI_CTRL1.DATFF 位对数据帧格式的选择，数据的发送和接收可以是 8 位或者 16 位的。为保证正确的操作，需要在启用 SPI 之前就确定好数据帧格 |

| 位域 | 名称 | 描述 |
|----|----|---|
| | | <p>式。</p> <p>对于 8 位的数据，缓冲器是 8 位的，发送和接收时只会用到 SPI_DAT[7:0]。在接收时，SPI_DAT[15:8]被强制为 0。</p> <p>对于 16 位的数据，缓冲器是 16 位的，发送和接收时会用到整个数据寄存器，即 SPI_DAT[15:0]。</p> |

20.5.6 SPI CRC 多项式寄存器 (SPI_CRCPOLY) (不能用于 I²S 模式)

地址偏移: 0x10

复位值: 0x0007

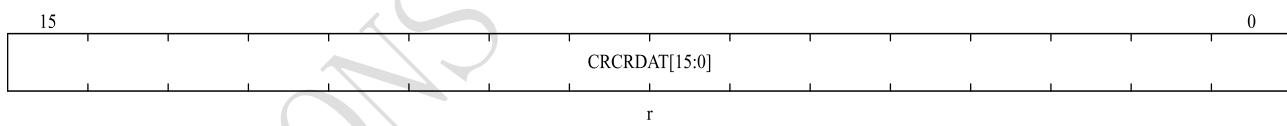


| 位域 | 名称 | 描述 |
|------|----------------|--|
| 15:0 | CRCPOLY [15:0] | <p>CRC 多项式寄存器</p> <p>这个寄存器包含了用于 CRC 计算的多项式</p> <p>复位值是 0x0007，根据应用可以设置其他值</p> <p>注意: 不能用于 I²S 模式。</p> |

20.5.7 SPI 接收 CRC 寄存器 (SPI_CRCRDAT) (不能用于 I²S 模式)

地址偏移: 0x14

复位值: 0x0000

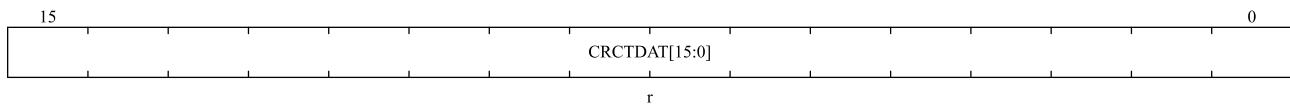


| 位域 | 名称 | 描述 |
|------|---------|---|
| 15:0 | CRCRDAT | <p>接收 CRC 寄存器</p> <p>当 CRC 计算使能时，CRCRDAT[15:0]中包含了后续收到的字节计算的 CRC 数值。当向 SPI_CTRL1.CRCEN 位写入 ‘1’ 时，该寄存器被复位。CRC 计算使用 SPI_CRCPOLY 中的多项式。</p> <p>当数据帧格式被设置为 8 位时，仅低 8 位参与计算，并且按照 CRC8 的方法进行；当数据帧格式为 16 位时，寄存器中的所有 16 位都参与计算，并且按照 CRC16 的标准</p> <p>注意: 当 BUSY 标志为 ‘1’ 时读该寄存器，将可能读到不正确的数值。</p> <p>注意: 不能用于在 I²S 模式。</p> |

20.5.8 SPI 发送 CRC 寄存器 (SPI_CRCTDAT)

地址偏移: 0x18

复位值: 0x0000

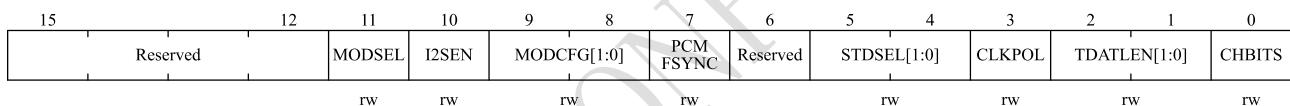


| 位域 | 名称 | 描述 |
|------|---------|---|
| 15:0 | CRCTDAT | <p>发送 CRC 寄存器</p> <p>当 CRC 计算使能时, CRCTDAT[15:0]中包含了后续发送的字节计算的 CRC 数值。当向 SPI_CTRL1.CRCEN 位写入 ‘1’ 时, 该寄存器被复位。CRC 计算使用 SPI_CRCPOLY 中的多项式。</p> <p>当数据帧格式被设置为 8 位时, 仅低 8 位参与计算, 并且按照 CRC8 的方法进行; 当数据帧格式为 16 位时, 寄存器中的所有 16 个位都参与计算, 并且按照 CRC16 的标准。</p> <p>注意: 当 BUSY 标志为 ‘1’ 时读该寄存器, 将可能读到不正确的数值。</p> <p>注意: 不能用于在 I²S 模式。</p> |

20.5.9 SPI_I²S 配置寄存器 (SPI_I2SCFG)

地址偏移: 0x1c

复位值: 0x0000



| 位域 | 名称 | 描述 |
|-------|--------------------|---|
| 15:12 | Reserved | 保留, 必须保持复位值。 |
| 11 | MODSEL | <p>I²S 模式选择</p> <p>0: 选择 SPI 模式</p> <p>1: 选择 I²S 模式</p> <p>注意: 该位仅当 SPI 或 I²S 关闭时可设置。</p> |
| 10 | I ² SEN | <p>I²S 使能</p> <p>0: 关闭 I²S;</p> <p>1: 使能 I²S。</p> <p>注意: 不能用于 SPI 模式。</p> |
| 9:8 | MODCFG | <p>I²S 模式设置</p> <p>00: 从设备发送;</p> <p>01: 从设备接收;</p> <p>10: 主设备发送;</p> <p>11: 主设备接收。</p> <p>注意: 该位仅当 I²S 关闭时可设置。</p> <p>注意: 不能用于 SPI 模式。</p> |
| 7 | PCMFSYNC | <p>PCM 帧同步</p> <p>0: 短帧同步;</p> <p>1: 长帧同步。</p> |

| 位域 | 名称 | 描述 |
|-----|----------|--|
| | | <p>注意: 该位仅当 $SPI_I2SCFG.STDSEL = 11$ (PCM 标准使用) 有意义。</p> <p>注意: 不能用于 SPI 模式。</p> |
| 6 | Reserved | 保留, 必须保持复位值。 |
| 5:4 | STDSEL | <p>I²S 标准选择</p> <p>00: I²S 飞利浦标准;</p> <p>01: 高字节对齐标准 (左对齐);</p> <p>10: 低字节对齐标准 (右对齐);</p> <p>11: PCM 标准。</p> <p>详见 20.4.1 章节</p> <p>注意: 为正确操作, 该位仅在 I²S 关闭时设置</p> <p>注意: 不能用于 SPI 模式。</p> |
| 3 | CLKPOL | <p>静止时钟极性</p> <p>0: I²S 时钟静止态为低电平;</p> <p>1: I²S 时钟静止态为高电平。</p> <p>注意: 为正确操作, 该位仅在 I²S 关闭时设置</p> <p>注意: 不能用于 SPI 模式。</p> |
| 2:1 | TDATLEN | <p>待传输数据长度</p> <p>00: 16 位数据长度;</p> <p>01: 24 位数据长度;</p> <p>10: 32 位数据长度;</p> <p>11: 不允许。</p> <p>注意: 为正确操作, 该位仅在 I²S 关闭时设置</p> <p>注意: 不能用于 SPI 模式。</p> |
| 0 | CHBITS | <p>声道长度 (每个音频声道的数据位数)</p> <p>0: 16 位宽;</p> <p>1: 32 位宽。</p> <p>仅当 TDATLEN = 00 时, 该位的写操作才有意义, 否则, 声道长度都由硬件固定为 32 位。</p> <p>注意: 为正确操作, 该位仅在 I²S 关闭时设置</p> <p>注意: 不能用于 SPI 模式。</p> |

20.5.10 SPI_I²S 预分频寄存器 (SPI_I2SPREDIV)

地址偏移: 0x20

复位值: 0x0002

| | | | | | | | |
|----|----------|----|---|----|----|-----------|---|
| 15 | Reserved | 10 | 9 | 8 | 7 | LDIV[7:0] | 0 |
| | | | | rw | rw | | |

| 位域 | 名称 | 描述 |
|-------|----------|--------------|
| 15:10 | Reserved | 保留, 必须保持复位值。 |
| 9 | MCLKOPEN | 主时钟输出使能 |

| 位域 | 名称 | 描述 |
|-----|----------|---|
| | | <p>0: 关闭主设备主时钟输出; 1: 主时钟输出使能。 注意: 为正确操作, 该位仅在I²S关闭时设置, 该位仅用于I²S主模式, 不能用于SPI模式。</p> |
| 8 | ODD_EVEN | <p>奇系数预分频 0: 实际频率分频系数 = LDIV × 2; 1: 实际频率分频系数 = (LDIV × 2) + 1。 详见 20.4.2 章节 注意: 为正确操作, 该位仅在I²S关闭时设置, 该位仅用于I²S主模式, 不能用于SPI模式。</p> |
| 7:0 | LDIV | <p>I²S 线性预分频 禁止设置 LDIV [7:0] = 0 或 LDIV [7:0] = 1 详见 20.4.2 章节 注意: 为正确操作, 该位仅在I²S关闭时设置, 该位仅用于I²S主模式, 不能用于SPI模式。</p> |

21 I²C 接口

21.1 简介

I²C(inter-integrated circuit)总线是一种广泛应用的总线结构，它只有两根双向线，即数据总线 SDA 和时钟总线 SCL，通过这两根线，所有与 I²C 总线兼容的设备都可以通过 I²C 总线彼此直接通信。

I²C 接口连接微控制器和串行 I²C 总线，可用于 MCU 和外部 I²C 设备的通讯。I²C 接口模块实现了 I²C 协议的标速模式和快速模式，具备 CRC 计算和校验功能、支持 SMBus(系统管理总线)和 PMBus(电源管理总线)，此外它提供多主机功能，控制所有 I²C 总线特定的时序、协议、仲裁。I²C 接口模块也支持 DMA 模式，可有效减轻 CPU 的负担。

21.2 主要特性

- 同一接口既可实现主机功能又可实现从机功能
- 是并行总线到 I²C 总线协议的转换器
- 支持 7 位和 10 位的地址模式和广播寻址
- 作为 I²C 主设备可以产生时钟、起始信号和停止信号
- 作为 I²C 从设备具有可编程的 I²C 地址检测、停止位检测的功能
- 支持标速(最高 100kHz)、快速(最高 400kHz)模式和快速+(最高 1MHz)模式
- 支持中断向量，字节成功传输中断和错误事件中断
- 可选的时钟延展功能
- 支持 DMA 模式
- 可选择的 PEC (报文错误检测) 生成和校验
- 兼容 SMBus 2.0 和 PMBus

21.3 功能描述

I²C 接口通过数据引脚 (SDA) 和时钟引脚 (SCL) 连接到 I²C 总线与外部设备进行通信，可以连接到标准 (高达 100kHz) 或快速 (400kHz) 的 I²C 总线。I²C 模块接收时将数据从串行转换成并行，发送时将数据从并行转换成串行。支持中断模式，用户可以根据需要开启或禁止中断。

21.3.1 SDA/SCL 控制

I²C 模块有两条接口线：串行数据线 (SDA) 和串行时钟线 (SCL)。连接到总线上的设备通过这两根线互相传递信息。SDA 和 SCL 都是双向线，通过一个电流源或者上拉电阻接到电源正极。当总线空闲时，两条线都是高电平。连接到总线的设备输出极必须带开漏或者开集，以提供线与功能。I²C 总线上的数据在标准模式下可以达到 100 kbit/s，在快速模式下可以达到 400kbit/s。由于 I²C 总线上可能会连接不同工艺的设备，逻辑‘0’和逻辑‘1’的电平并不是固定的，取决于 VDD 的实际电平。

如果允许时钟延长，即 SCL 线拉低，就可以避免在接收时发生过载错误以及在发送时发生欠载错误。

比如，在发送模式时，如果发送数据寄存器为空且字节发送结束位置起（I2C_STS1.TXDATE = 1, I2C_STS1.BSF = 1），I²C 接口在传输前保持时钟线为低，以等待软件读取 STS1 后把数据写进数据寄存器（缓冲器和移位寄存器都是空的）；在接收模式时，如果数据寄存器非空且字节发送结束位置起（I2C_STS1.RXDATNE = 1, I2C_STS1.BSF = 1），I²C 接口在接收到数据字节后保持时钟线为低，以等待软件读 STS1，然后读数据寄存器 DAT（缓冲器和移位寄存器都是满的）。

如果从模式中禁止时钟延长，在接收模式时，如果接收数据寄存器非空（I2C_STS1.RXDATNE = 1），在接收到下个字节前数据还没有被读出，则发生过载错误，最后一字节也将被丢弃。在发送模式时，如果发送数据寄存器空（I2C_STS1.TXDATE = 1），在必须发送下个字节之前还没有新数据写进数据寄存器，则发生欠载错误。相同的字节将被重复发出。这种情况下不控制重复写冲突。

21.3.2 软件通讯流程

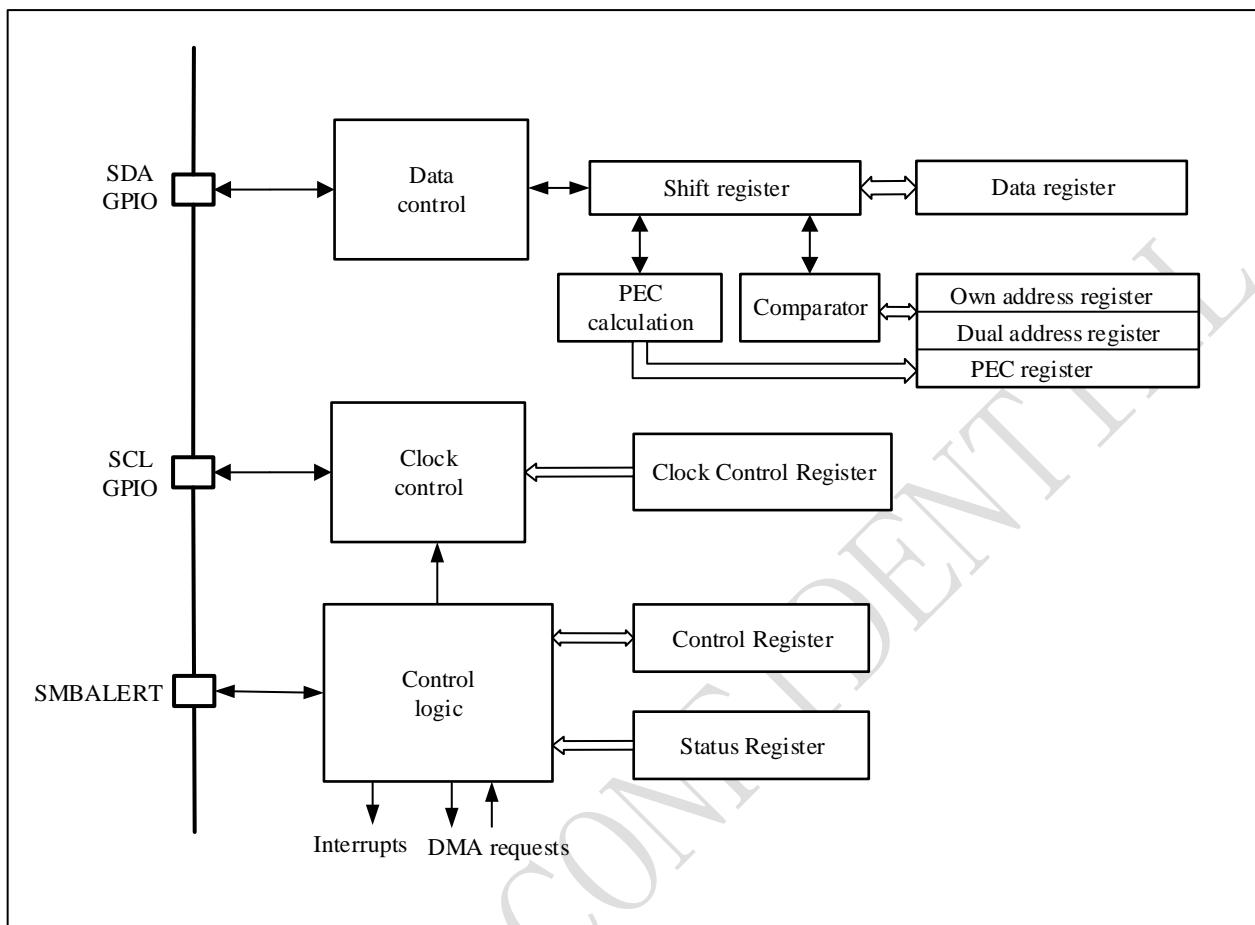
I²C 设备的数据传输分为主机和从机。主机是指负责初始化总线上数据的传输并产生时钟信号的设备，此时任何被寻址的设备都是从机。不管 I²C 设备是主机还是从机，都可以发送或接收数据。I²C 接口支持 4 种运行模式：

- 从机发送器模式
- 从机接收器模式
- 主机发送器模式
- 主机接收器模式

系统复位后，I²C 默认工作在从机模式下。通过软件配置 I²C 接口在总线上发送一个起始位，随后接口自动地从从模式切换到主模式；当仲裁丢失或产生停止信号时，则从主模式切换到从模式。

I²C 接口的功能框图如下：

图 21-1 I²C 功能框图

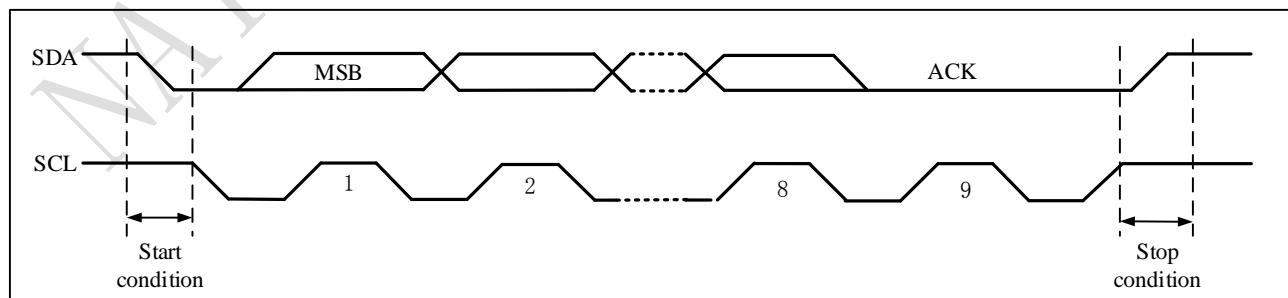


注：在 SMBus 模式下，SMBALERT 是可选信号。如果禁止了 SMBus，则不能使用该信号。

21.3.2.1 开始和停止条件

所有的数据传输总是以起始位开始并以停止位结束。起始条件和停止条件都是在主模式下由软件控制产生。起始位（START）是指：在 SCL 为高时，SDA 线上出现一个从高到低的电平转换。停止位（STOP）是指在 SCL 为高时，SDA 线上出现一个从低到高的电平转换。如下图所示：

图 21-2 I²C 总线协议



21.3.2.2 时钟同步与仲裁

I²C 接口支持多主机仲裁，即两个主机可以同时在空闲总线上开始传送数据，因此就必须通过一些机制来决

定哪个主机获取总线的控制权，这一般是通过时钟同步和仲裁来完成的。

I²C 电路具有两个关键特点：

- SDA 和 SCL 为漏极开路结构，通过外部的上拉电阻实现了信号的“线与”逻辑；
- SDA 和 SCL 引脚在输出信号的同时还将引脚上的电平进行检测，检测是否与刚才输出一致。这为“时钟同步”和“总线仲裁”提供硬件基础。

I²C 设备对总线的操作是通过“把线路接地”来输出逻辑 0。基于 I²C 总线的特点，如果一设备发送逻辑 0，其他发送逻辑 1，那么线路看到的只有逻辑 0，所以线路上不可能出现电平冲突的现象。

总线的物理接法允许主设备往总线写数据的同时读取数据。这样两主设备争总线的时候发送逻辑 0 的并不知道竞争的发生，只有发送逻辑 1 的才会发现冲突（当写一个逻辑 1，却读到了 0）从而退出竞争。

时钟同步

SCL 线的高到低切换会使器件开始数它们的低电平周期，而且一旦器件的时钟变低电平，它会使 SCL 线保持这种状态直到到达时钟的高电平。但是，如果另一个时钟仍处于低电平周期，这个时钟的低到高切换不会改变 SCL 线的状态，因此，SCL 线被有最长低电平周期的器件保持低电平，此时，低电平周期短的器件会进入高电平的等待状态。

当所有有关的器件数完了它们的低电平周期后，时钟线被释放并且变成高电平，之后器件时钟和 SCL 线的状态没有差别，而且所有器件会开始数它们的高电平周期，首先完成高电平周期的器件会再次将 SCL 线拉低。

这样，产生的同步 SCL 时钟的低电平周期由低电平时钟周期最长的器件决定，而高电平周期由高电平时钟周期最短的器件决定。

仲裁

仲裁和同步一样，都是为了解决多主机情况下的总线控制冲突。仲裁的过程与从机无关。当两个主机在总线空闲的时候都产生了一个有效的起始位，这种情况就需要决定由哪个主机来完成数据传输，这就是仲裁的过程。

各个主控制器没有对总线实施控制的优先级别，都是由仲裁决定的。总线控制随即而定且逐位进行，他们遵循“低电平优先”的原则，即谁先发送低电平谁就会掌握对总线的控制权。在每一位的仲裁期间，当 SCL 为高时，每个主机都检查自己的 SDA 电平是否和自己发送的相同。理论上讲，如果两个主机所传输的内容完全相同，那么他们能够成功传输而不出现错误。如果一个主机发送高电平但检测到 SDA 电平为低，则认为自己仲裁失败并关闭自己的 SDA 输出驱动，而另一个主机则继续完成自己的传输。

21.3.2.3 I²C 数据通信流程

每个 I²C 设备都通过唯一的地址进行识别，根据设备功能，他们既可以是发送器也可作为接收器。

I²C 主机负责产生起始位和结束位来开始和结束一次传输，并且负责产生 SCL 时钟。

I²C 模块支持 7 位和 10 位的地址，用户可以通过软件配置 I²C 从机的地址。I²C 从机检测到 I²C 总线上的起始位之后，就开始从总线上接收地址，并把接收到的地址和自身的地址进行比较，一旦两个地址相同，I²C 从机将发送一个确认应答(ACK)，并响应总线的后续命令：发送或接受所要求的数据。此外，如果软件开启了广播呼叫，则 I²C 从机始终对一个广播地址(0x00)发送确认应答。

数据和地址按 8 位字节进行传输，高位在前。跟在起始条件后的 1 或 2 个字节是地址（7 位模式为 1 个字节，10 位模式为 2 个字节）。地址只在主模式发送。在一个字节传输的 8 个时钟后的第 9 个时钟期间，接

收器必须回送一个应答位 (ACK) 给发送器。如图 21-2 I²C 总线协议所示。

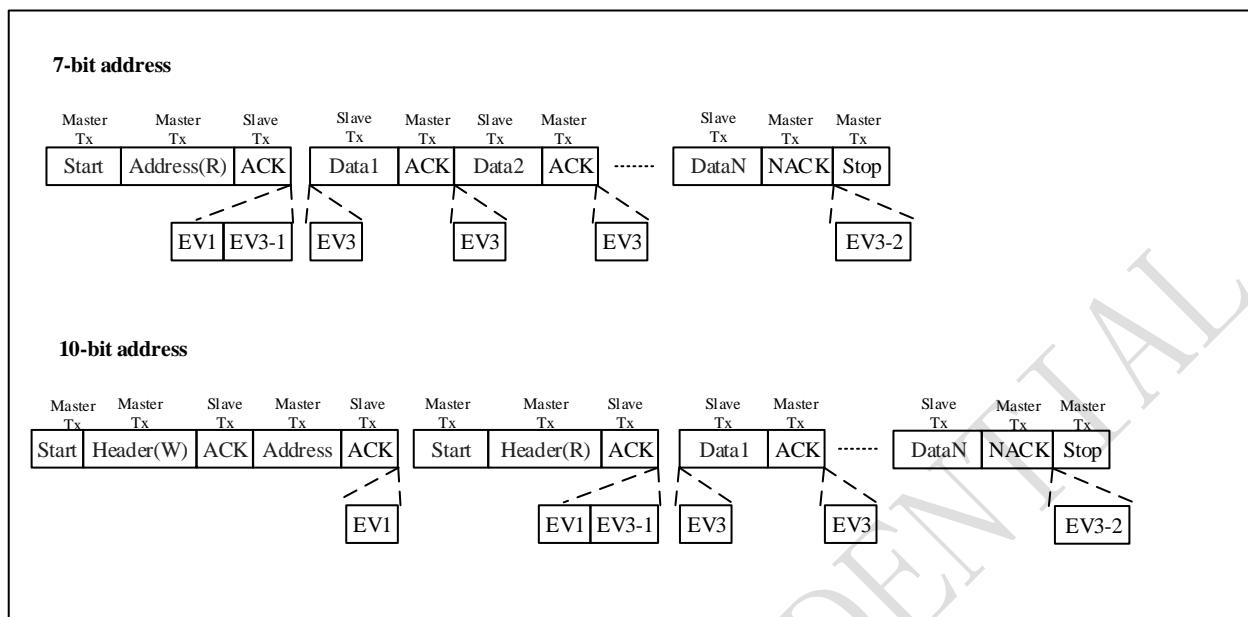
软件可以开启或禁能应答 (ACK)，并可以设置 I²C 接口的地址 (7 位、10 位地址或广播呼叫地址)。

21.3.2.4 I²C 从机发送模式

在从机模式下发送接收标记位 (I2C_STS2.TRF) 指示当前是处于接收器模式还是发送器模式。当在发送器模式下要发送数据到 I²C 总线，软件应该按照下面的步骤操作：

1. 首先，使能 I²C 外设时钟，配置 I2C_CTRL1 中时钟相关寄存器，确保输出正确的 I²C 时序。当这两步都完成以后，I²C 运行在从机模式下，等待接收起始位和地址。
2. I²C 从机先收到一个起始位，随后收到匹配的 7 位或 10 地址，I²C 硬件将 I2C_STS1.ADDRF 位（接收到了地址并且和自身的地址匹配）置 1，软件应该定期查询此位或者中断监视此位，发现置位后，软件读 I2C_STS1 寄存器然后读 I2C_STS2 寄存器来清除 I2C_STS1.ADDRF 位。如果地址是 10 位格式，I²C 主机应该接着再产生一个 START 并发送一个地址头到 I²C 总线。从机在检测到 START 和紧接着的地址头之后会继续将 I2C_STS1.ADDRF 位置 1。软件继续通过读 I2C_STS1 寄存器和接着读 I2C_STS2 寄存器来第二次清除 I2C_STS1.ADDRF 位。
3. I²C 进入数据发送状态，现在移位寄存器和数据寄存器 I2C_DAT 都是空，所以硬件将 I2C_STS1.TXDATE (发送数据空)位置 1。此时软件可以写入第一个字节数据到 I2C_DAT 寄存器，但是，因为写入 I2C_DAT 寄存器的字节被立即移入内部移位寄存器了，所以 I2C_STS1.TXDATE 位并没有被清 0。当移位寄存器非空的时候，I²C 开始发送数据到 I²C 总线。
4. 第一个字节的发送期间，软件写第二个字节到 I2C_DAT，此时 I2C_DAT 寄存器和移位寄存器都不是空。I2C_STS1.TXDATE 位被清 0。
5. 第一个字节发送完成之后，I2C_STS1.TXDATE 再次被置起，软件写第三个字节到 I2C_DAT，同时 I2C_STS1.TXDATE 位被清 0。在此之后，只要依然有数据待等待被发送且 I2C_STS1.TXDATE 被置 1，软件都可以写入一个字节到 I2C_DAT 寄存器。
6. 倒数第二个字节发送期间，软件写最后一个数据到 I2C_DAT 寄存器来清除 I2C_STS1.TXDATE 标志位，之后就再不用关心 I2C_STS1.TXDATE 的状态。I2C_STS1.TXDATE 位会在倒数第二个字节发送完成后置起，直到检测到 STOP 结束位时被清 0。
7. 根据 I²C 协议，I²C 主机不会对接收到的最后一个字节发送应答，所以在最后一个字节发送结束后，I²C 从机的 ACKFAIL 位（应答出错）会置起以通知软件发送结束。软件写 0 到 I2C_STS1.ACKFAIL 位可以清除此位。

图 21-3 从发送器传送序列



说明：

1. EV1: I2C_STS1.ADDRF = 1, 读 STS1 然后读 STS2 将清除该事件。
2. EV3-1: I2C_STS1.TXDATE=1, 移位寄存器空, 数据寄存器空, 写 DAT。
3. EV3: I2C_STS1.TXDATE=1, 移位寄存器非空, 数据寄存器空, 写 DAT 将清除该事件。
4. EV3-2: I2C_STS1.ACFAIL=1, 在 STS1 的 ACFAIL 位写“0”可清除该事件。

注：

- a) EV1 和 EV3-1 事件拉长 SCL 低的时间, 直到对应的软件序列结束。
- b) EV3 的软件序列必须在当前字节传输结束之前完成。

21.3.2.5 I²C 从机接收模式

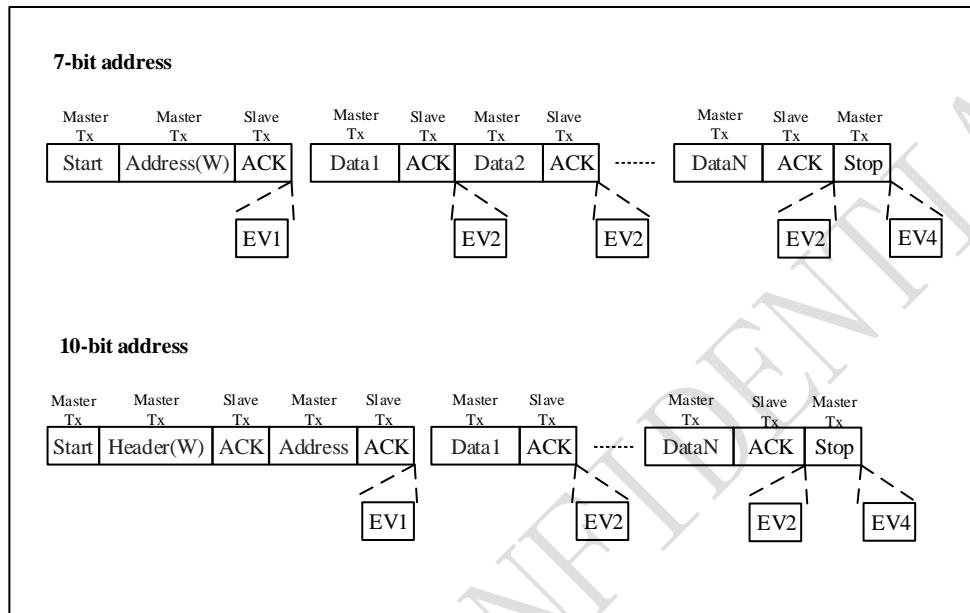
在从机模式下接收数据时, 软件应该按如下步骤操作：

1. 首先, 使能 I²C 外设时钟, 配置 I2C_CTRL1 中时钟相关寄存器, 确保输出正确的 I²C 时序。当这两步都完成以后, I²C 运行在从机模式下, 等待接收起始位和地址。
2. 在接收到 START 起始条件和匹配的 7 位或 10 地址之后, I²C 硬件将 I2C_STS1.ADDRF 位 (接收到地址并且和自身的地址匹配) 置 1, 此位应该通过软件轮询或者中断来检测, 发现置起后, 软件通过先读 I2C_STS1 寄存器然后再读 I2C_STS2 寄存器来清除 I2C_STS1.ADDRF 位。一旦 I2C_STS1.ADDRF 位被清 0, I²C 从机就开始接收来自 I²C 总线的数据。
3. 当接收到第一个字节后, I2C_STS1.RXDATNE 位 (接收数据非空) 被硬件置 1, 如果设置了 I2C_CTRL2.EVTINTEN 和 I2C_CTRL2.BUFINTEN 位, 则产生一个中断。软件应该通过轮询或者中断来检测该位, 一旦发现置起后, 软件可以读取 I2C_DAT 寄存器的第一个字节, 此时 I2C_STS1.RXDATNE 位被清 0。注意, 如果设置了 I2C_CTRL1.ACKEN 位, 则在接收到一个字节后, 从机应该产生一个应答脉冲。
4. 任何时候, 只要 I2C_STS1.RXDATNE 位被置 1, 软件均可以从 I2C_DAT 寄存器读取一个字节。当接收

到最后一个字节后, I2C_STS1.RXDATNE 被置 1, 软件读取最后一个字节

- 当从机检测到 I²C 总线上的停止位 (STOP) 后, 将 I2C_STS1.STOPF 位置 1, 如果设置了 I2C_CTRL2.EVTINTEN 位, 则产生一个中断。软件通过先读 I2C_STS1 寄存器再写 I2C_CTRL1 寄存器来清除 I2C_STS1.STOPF 位 ((见下图的 EV4))。

图 21-4 从机接收器传送序列



说明:

- EV1: I2C_STS1.ADDRF = 1, 读 STS1 然后读 STS2 将清除该事件。.
- EV2: I2C_STS1.RXDATNE =1, 读 DAT 将清除该事件。
- EV4: I2C_STS1.STOPF=1, 读 STS1 然后写 CTRL1 寄存器将清除该事件。

注: a) EV1 事件拉长 SCL 低的时间, 直到对应的软件序列结束。

b) EV2 的软件序列必须在当前字节传输结束之前完成。

21.3.2.6 I²C 主机发送模式

在主模式时, I²C 接口启动数据传输并产生时钟信号。串行数据传输总是以起始条件开始并以停止条件结束。当通过 START 位在总线上产生了起始条件, 设备就进入了主模式。

在主机模式下发送数据到 I²C 总线时, 软件应该按如下步骤操作:

- 首先, 使能 I²C 外设时钟, 配置 I2C_CTRL1 中时钟相关寄存器, 确保输出正确的 I²C 时序。当这两步都完成以后, I²C 默认运行在从机模式下, 等待接收起始位和地址。
- 当 BUSY=0 时, 设置 I2C_CTRL1.STARTGEN 位为 1, I²C 接口将产生一个开始条件并切换至主模式 (I2C_STS2.MSMODE 位置位)。
- 一旦发出开始条件, I²C 硬件将 I2C_STS1.STARTBF 位 (起始位标志) 置 1 然后进入主机模式, 如果设置了 I2C_CTRL2.EVTINTEN 位, 则会产生一个中断。接着软件读 I2C_STS1 寄存器然后写一个 7 位地址位或带有地址头的 10 位地址位到 I2C_DAT 寄存器来清除 I2C_STS1.STARTBF 位。I2C_STS1.STARTBF 位被清 0 后 I²C 就开始发送地址或者地址头到 I²C 总线。

在 10 位地址模式时，发送一个头序列会产生以下事件：

- I2C_STS1.ADDR10F 位被硬件置位，如果设置了 I2C_CTRL2.EVTINTEN 位，则产生一个中断。然后主设备读 STS1 寄存器，再将第二个地址字节写入 DAT 寄存器。
- I2C_STS1.ADDRF 位被硬件置位，如果设置了 I2C_CTRL2.EVTINTEN 位，则产生一个中断。随后主设备读 STS1 寄存器，跟着读 STS2 寄存器

注：在发送器模式，主设备先发送头字节 (1110xx0)，然后发送从地址的低 8 位。(这里 xx 代表 10 位地址中的最高 2 位)。

在 7 位地址模式时，只需送出一个地址字节，一旦该地址字节被送出：

- ADDRF 位被硬件置位，如果设置了 EVTINTEN 位，则产生一个中断。随后主设备等待一次读 STS1 寄存器，跟着读 STS2 寄存器。

注：在发送器模式，主设备发送从地址时置最低位为‘0’。

4. 7 位或 10 位的地址位发送完成后，I²C 硬件将 I2C_STS1.ADDRF 位（地址已被发送）置 1，如果设置了 I2C_CTRL2.EVTINTEN 位，则产生一个中断，软件通过读 I2C_STS1 寄存器然后读 I2C_STS2 寄存器来清除 I2C_STS1.ADDRF

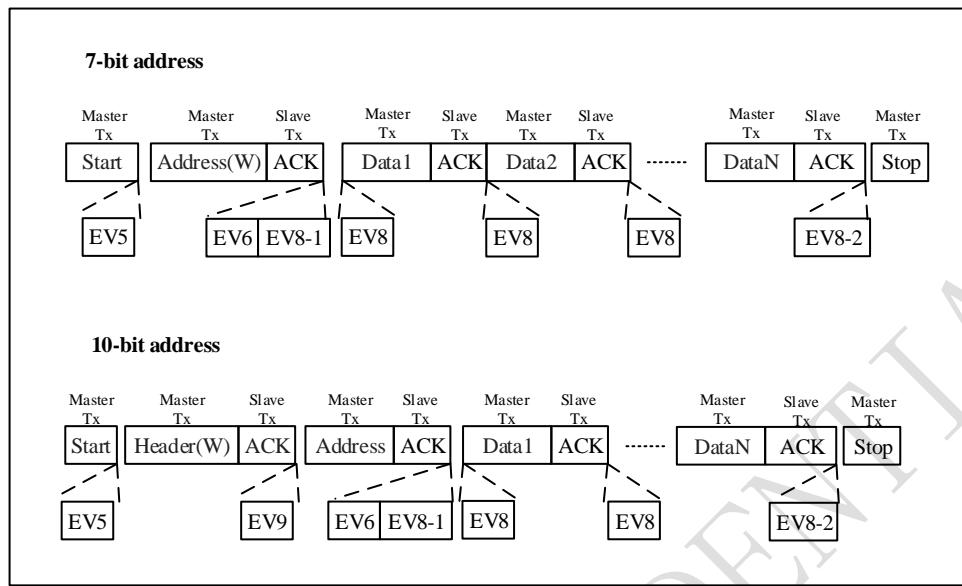
5. I²C 进入数据发送状态，因为移位寄存器和数据寄存器 (I2C_DAT) 都是空的，所以硬件将 I2C_STS1.TXDATE 位（发送数据空）置 1，接着软件写第一个字节数据到 I2C_DAT 寄存器，但是，因为写入 I2C_DAT 寄存器的字节被立即移入内部移位寄存器，所以 I2C_STS1.TXDATE 位此时不会被清零。一旦移位寄存器非空，I²C 就开始发送数据到总线。

6. 在第一个字节的发送过程中，软件写第二个字节到 I2C_DAT，此时 I2C_STS1.TXDATE 被清零。任何时候，只要还有数据等待被发送，且 I2C_STS1.TXDATE 位被置 1，软件都可以向 I2C_DAT 寄存器写入一个字节。

7. 在倒数第二个字节发送过程中，软件写入最后一个字节数据到 I2C_DAT 来清除 I2C_STS1.TXDATE 标志位，此后就不用关心 I2C_STS1.TXDATE 位的状态。I2C_STS1.TXDATE 位会在倒数第二个字节发送完成后被置起，直到发送停止位 (STOP) 时被清零。

8. 最后一个字节发送结束后，因为移位寄存器和 I2C_DAT 寄存器此时都为空，I²C 主机将 I2C_STS1.BSF 位（字节发送结束）置位，在清除 I2C_STS1.BSF 位之前 I²C 接口将保持 SCL 为低电平；读出 I2C_STS1 之后再写入 I2C_DAT 寄存器将清除 I2C_STS1.BSF 位。软件此时设置 I2C_CTRL1.STOPGEN 位产生一个停止条件，然后 I²C 接口将自动回到从模式 (I2C_STS2.MSMODE 位清除)。

图 21-5 主发送器传送序列



说明：

1. EV5: I2C_STS1.STARTBF = 1, 读 STS1 然后将地址写入 DAT 寄存器将清除该事件。
2. EV6: I2C_STS1.ADDRF = 1, 读 STS1 然后读 STS2 将清除该事件。
3. EV8_1: I2C_STS1.TXDATE = 1, 移位寄存器空, 数据寄存器空, 写 DAT 寄存器。
4. EV8: I2C_STS1.TXDATE = 1, 移位寄存器非空, 数据寄存器空, 写 DAT 寄存器将清除该事件。
5. EV8_2: I2C_STS1.TXDATE = 1, I2C_STS1.BSF = 1, 请求设置停止位。这两个事件由硬件在产生停止条件时清除。
6. EV9: I2C_STS1.ADDR10F = 1, 读 STS1 然后写入 DAT 寄存器将清除该事件。

注: a) EV5、EV6、EV9、EV8_1 和 EV8_2 事件拉长 SCL 低的时间, 直到对应的软件序列结束。

b) EV8 的软件序列必须在当前字节传输结束之前完成。

c) 当 TXDATE 或 BSF 位置位时, 停止条件应安排在出现 EV8_2 事件时。

21.3.2.7 I²C 主机接收模式

在主机模式下从 I²C 总线接收数据软件应该按如下步骤操作：

1. 首先, 使能 I²C 外设时钟, 配置 I2C_CTRL1 中时钟相关寄存器, 确保输出正确的 I²C 时序。使能和配置以后, I²C 默认运行在从机模式下, 等待接收起始位和地址。
2. 当 BUSY=0 时, 设置 I2C_CTRL1.STARTGEN 位为 1, I²C 接口将产生一个开始条件并切换至主模式 (I2C_STS2.MSMODE 位置位),
3. 一旦发出开始条件, I²C 硬件将 I2C_STS1.STARTBF 位 (起始位标志) 置 1 然后进入主机模式, 如果设置了 I2C_CTRL2.EVTINTEN 位, 则会产生一个中断。接着软件读 I2C_STS1 寄存器然后写一个 7 位地址位或带有地址头的 10 位地址位到 I2C_DAT 寄存器来清除 I2C_STS1.STARTBF 位。I2C_STS1.STARTBF 位被清 0 后 I²C 就开始发送地址或者地址头到 I²C 总线。

在 10 位地址模式时，发送一个头序列会产生以下事件：

- I2C_STS1.ADDR10F 位被硬件置位，如果设置了 I2C_CTRL2.EVTINTEN 位，则产生一个中断。然后主设备读 STS1 寄存器，再将第二个地址字节写入 DAT 寄存器。
- I2C_STS1.ADDRF 位被硬件置位，如果设置了 I2C_CTRL2.EVTINTEN 位，则产生一个中断。随后主设备读 STS1 寄存器，跟着读 STS2 寄存器。

注：在接收器模式，主设备先发送头字节 (11110xx0)，然后发送从地址的低 8 位，然后再重新发送一个开始条件，后面跟着头字节 (11110xx1) (这里 xx 代表 10 位地址中的最高 2 位)。

在 7 位地址模式时，只需送出一个地址字节，一旦该地址字节被送出：

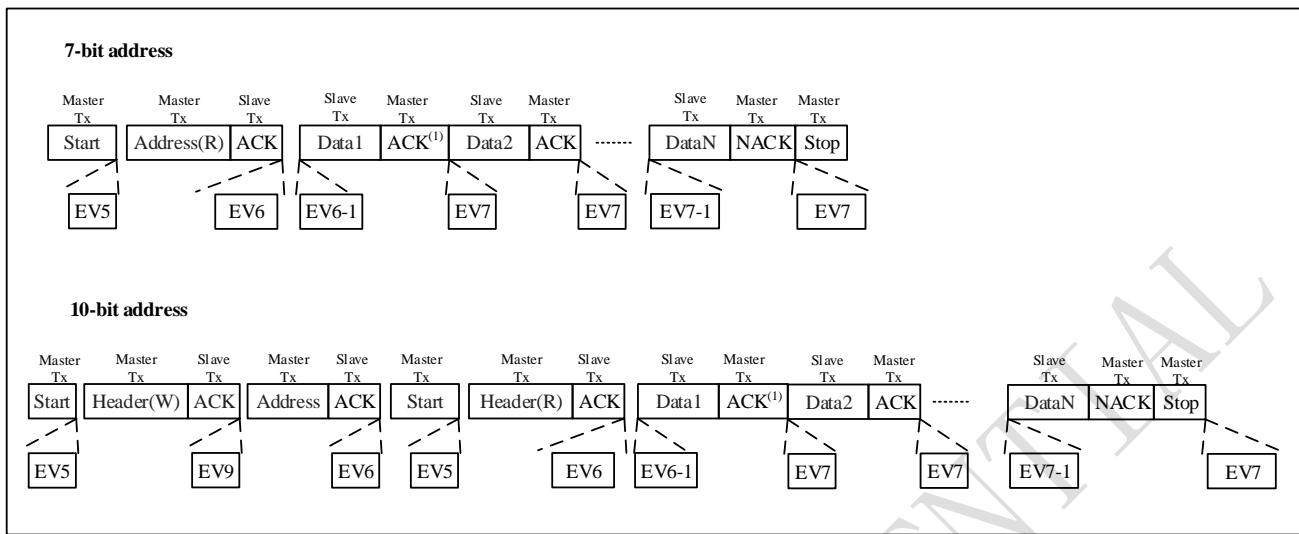
- I2C_STS1.ADDRF 位被硬件置位，如果设置了 I2C_CTRL2.EVTINTEN 位，则产生一个中断。随后主设备等待一次读 STS1 寄存器，跟着读 STS2 寄存器。

注：在接收器模式，主设备发送从地址时置最低位为‘1’。

4. 7 位或 10 位的地址位发送完成后，I²C 硬件将 I2C_STS1.ADDRF 位（地址已被发送）置 1，如果设置了 I2C_CTRL2.EVTINTEN 位，则产生一个中断，软件通过读 I2C_STS1 寄存器然后读 I2C_STS2 寄存器来清除 I2C_STS1.ADDRF，在发送地址和清除 I2C_STS1.ADDRF 之后，如果地址是 10 位格式，软件应该再次将 STARTGEN 置位 1 来重新产生一个 START (Sr)。在 START 产生后，I2C_STS1.STARTBF 位会被置 1。软件应该通过先读 I2C_STS1 然后写地址头到 I2C_DAT 来清除 I2C_STS1.STARTBF 位，然后地址头被发到 I²C 总线，ADDRF 再次被置 1。软件应该再次通过先读 I2C_STS1 然后读 I2C_STS2 来清除 I2C_STS1.ADDRF 位。
5. 在发送完地址和清除 I2C_STS1.ADDRF 之后，I²C 接口进入主机接收器模式。在此模式下，I²C 接口从 SDA 线接收数据字节，并通过内部移位寄存器送至 DAT 寄存器。一旦接收到第一个字节，硬件会将 I2C_STS1.RXDATNE 位（接收数据非空标志位）置 1，如果 ACKEN 位被置位，发出一个应答脉冲。此时软件可以从 I2C_DAT 寄存器读取第一个字节，之后 I2C_STS1.RXDATNE 位被清 0。此后，只要 I2C_STS1.RXDATNE 被置 1，软件就可以从 I2C_DAT 寄存器读取一个字节。
6. 主设备在从从设备接收到最后一个字节后发送一个 NACK。接收到 NACK 后，从设备释放对 SCL 和 SDA 线的控制；主设备就可以发送一个停止/重新起始条件。为了在收到最后一个字节后产生一个 NACK 脉冲，接收完倒数第二个字节(N-1)数据之后，软件应该立即清除 ACKEN 位。为了产生一个停止/重新起始条件，软件必须在读倒数第二个数据字节之后将 I2C_CTRL1.STOPGEN 位或者 I2C_CTRL1.STARTGEN 置 1，这一过程需要在最后一个字节接收完毕之前完成，以确保 NACK 发送给最后一个字节。
7. 最后一个字节接收完毕后，I2C_STS1.RXDATNE 位被置 1，软件可以读取最后一个字节。由于 I2C_CTRL1.ACKEN 已经在前一步骤中被清 0，I²C 不再为最后一个字节发送 ACK，并在最后一个字节发送完毕后产生一个 STOP 停止位。

注意：以上步骤要求字节数目 N>1，如果 N=1，步骤 6 应该在步骤 4 之后就执行，且需要在字节接收完成之前完成。

图 21-6 主接收器传送序列图



说明:

1. EV5: I2C_STS1.STARTBF=1, 读 STS1 然后将地址写入 DAT 寄存器清除该事件。
2. EV6: I2C_STS1.ADDRF=1, 读 STS1 然后读 STS2 将清除该事件。在 10 位主接收模式下, 该事件后应设置 CTRL1 的 STARTGEN=1。
3. EV6_1: 没有对应的事件标志, 至适于接收 1 个字节的情况。恰好在 EV6 之后 (即清除了 ADDRF 之后), 要清除响应和停止条件的产生位。
4. EV7: I2C_STS1.RXDATNE=1, 读 DAT 寄存器消除该事件。
5. EV7_1: I2C_STS1.RXDATNE =1, 读 DAT 寄存器清除该事件。设置 I2C_CTRL1.ACKEN=0 和 I2C_CTRL1.STOPGEN=1。
6. EV9: I2C_STS1.ADDR10F=1, 读 STS1 然后写入 DAT 寄存器将清除该事件。

注:

- a) 如果收到一个单独的字节, 则是NA。
- b) EV5、EV6 和 EV9 事件拉长SCL 低电平, 直到对应的软件序列结束。
- c) EV7 的软件序列必须在当前字节传输结束前完成。
- d) EV6_1 或 EV7_1 的软件序列必须在当前传输字节的ACK 脉冲之前完成。

21.3.3 错误条件

I²C 的错误主要有总线错误、应答错误、仲裁丢失、过载/欠载错误。这些错误都可能造成通讯的失败。

21.3.3.1 应答错误 (ACKFAIL)

当接口检测到应答位与期望不符时, 将产生应答错误。此时 I2C_STS1.ACKFAIL 被置位, 如果设置了 I2C_CTRL2.ERRINTEN 位, 则产生一个中断。当发送器接收到一个 NACK 时, 必须复位通讯: 如果时处于从模式, 硬件会释放总线。如果是处于主模式, 软件必须生产一个停止条件。

21.3.3.2 总线错误 (BUSERR)

在一个地址或数据字节传输期间,当 I²C 接口检测到一个外部的停止或起始条件则产生总线错误, I2C_STS1.BUSERR 被置位。如果设置了 I2C_CTRL2.ERRINTEN 位为“1”, 则产生一个中断。

在主模式情况下,硬件不释放总线,同时不影响当前的传输状态。此时由软件决定是否要中止当前的传输。

在从模式情况下,数据被丢弃,硬件释放总线。此时有两种情况:如果检测到错误的开始条件,从设备认为是一个重启,并等待地址或停止条件。如果检测到错误的停止条件,从设备按正常的停止条件操作,同时硬件释放总线。

21.3.3.3 仲裁丢失 (ARLOST)

当 I²C 接口检测到仲裁丢失时产生仲裁丢失错误,硬件释放总线, I2C_STS1.ARLOST 位被置位。如果设置了 I2C_CTRL2.ERRINTEN 位为“1”, 则产生一个中断。

I²C 接口自动回到从模式 (I2C_STS2.MSMODE 位被清除)。当 I²C 接口丢失了仲裁,则它无法在同一个传输中响应它的从地址,但它可以在赢得总线的主设备重新发送起始条件之后响应。

21.3.3.4 过载/欠载错误 (OVERRUN)

在从机接收模式下,如果禁止时钟延长,容易发生过载/欠载错误。

当它已经接收到一个字节 (I2C_STS1.RXDATNE=1),但在 DAT 寄存器中前一个字节数据还没有被读出,则发生过载错误,数据寄存器最后接收的数据被丢弃;同时软件应清除 I2C_STS1.RXDATNE 位,发送器重新发送最后一次发送的字节。

在从机发送模式下,如果禁止时钟延长,在当前字节已经发送完成,而 DAT 仍然为空(I2C_STS1.TXDATE=1),则发生欠载错误。此时,在 DAT 寄存器中的前一个字节将被重复发出;用户应该确定在发生欠载错时,接收端应丢弃重复接收到的数据。发送端应按 I²C 总线标准在规定的时间更新 I2C_DAT 寄存器。

在发送第一个字节时,必须在清除 I2C_STS1.ADDRF 之后并且第一个 SCL 上升沿之前写入 I2C_DAT 寄存器;如果不能做到这点,则接收方应该丢弃第一个数据。

21.3.4 DMA 应用

在传输时,当数据寄存器为空或满时,能够生成 DMA 请求。DMA 能够写数据到 I²C 数据寄存器,或从 I²C 数据寄存器读出数据以减少 CPU 的开销。

DMA 请求必须在当前字节传输结束之前被响应。当相应 DMA 通道设置的数据传输已经完成时, DMA 控制器发送传输结束信号 EOT 到 I²C 接口,并且在中断使能时产生一个中断。

在主机发送模式,在 EOT 中断服务程序中,需禁止 DMA 请求,然后在等到 I2C_STS1.BSF 事件后设置停止条件。

在主机接收模式,当要接收的数据数目大于或等于 2 时, DMA 控制器发送一个硬件信号 EOT_1,它对应 DMA 传输(字节数-1)。如果设置了 I2C_CTRL2.DMALAST 位,硬件在发送完 EOT_1 后的下一个字节,将自动发送 NACK。在中断允许的情况下,用户可以在 DMA 传输完成的中断服务程序中产生一个停止条件。

注: I²C 与其他外设在使用同一个 DMA 控制器时,不能同时开启。

21.3.4.1 发送流程

DMA 模式通过设置 I2C_CTRL2.DMAEN 位使能。只要 I2C_STS1.TXDATE 位被置位，数据将由 DMA 从预置的存储区装载进 I2C_DAT 寄存器。设置 DMA 通道进行 I²C 发送，须执行以下步骤（x 是通道号）：

1. 在 DMA_PADDRx 寄存器中设置 I2C_DAT 寄存器地址。数据将在每个 I2C_STS1.TXDATE 事件后从存储器传送至这个地址。
2. 在 DMA_MADDRx 寄存器中设置存储器地址。数据在每个 I2C_STS1.TXDATE 事件后从这个存储区传送至 I2C_DAT。
3. 在 DMA_TXNUMx 寄存器中设置所需传输的字节数。在每个 I2C_STS1.TXDATE 事件后，此值递减，直到 0。
4. 利用 DMA_CHCFGx 寄存器中的 PRIOLVL[1:0]位配置通道优先级。
5. 设置 DMA_CHCFGx 寄存器中的 DIR 位，并根据应用要求可以配置在整个传输完成一半或全部完成时发出中断请求。
6. 通过设置 DMA_CHCFGx 寄存器上的 CHEN 位激活通道。
7. 当 DMA 控制器中设置的数据传输数目已经完成时，DMA 控制器给 I²C 接口发送一个传输结束的 EOT/EOT_1 信号。在中断允许的情况下，将产生一个 DMA 中断。

注：如果使用 DMA 进行发送时，不要设置 I2C_CTRL2 寄存器的 BUFINTEN 位。

21.3.4.2 接收流程

DMA 模式通过设置 I2C_CTRL2.DMAEN 位使能。每次接收到数据字节时，将由 DMA 把 I2C_DAT 寄存器的数据传送到设置的存储区。设置 DMA 通道进行 I²C 接收，须执行以下步骤（x 是通道号）

1. 在 DMA_PADDRx 寄存器中设置 I2C_DAT 寄存器的地址。数据将在每次 I2C_STS1.RXDATNE 事件后从此地址传送到存储区。
2. 在 DMA_MADDRx 寄存器中设置存储区地址。数据将在每次 I2C_STS1.RXDATNE 事件后从 I2C_DAT 寄存器传送到此存储区。
3. 在 DMA_TXNUMx 寄存器中设置所需的传输字节数。在每个 I2C_STS1.RXDATNE 事件后，此值递减，直到 0。
4. 用 DMA_CHCFGx 寄存器中的 PRIOLVL[1:0]配置通道优先级。
5. 清除 DMA_CHCFGx 寄存器中的 DIR 位，根据应用要求可以设置在数据传输完成一半或全部完成时发出中断请求。
6. 设置 DMA_CHCFGx 寄存器中的 CHEN 位激活该通道。
7. 当 DMA 控制器中设置的数据传输数目已经完成时，DMA 控制器给 I²C 接口发送一个传输结束的 EOT/EOT_1 信号。在中断允许的情况下，将产生一个 DMA 中断。

注：如果使用 DMA 进行接收时，不要设置 I2C_CTRL2 寄存器的 BUFINTEN 位。

21.3.5 包错误校验 (PEC)

将 I2C_CTRL1.PECEN 位置 1 就可以使能 PEC 功能，PEC 使用 CRC-8 算法对包括地址和读/写位在内所有

信息字节进行计算，从而提高通信的可靠性。包错误校验（PEC）计算器使用的 CRC-8 多项式为 $C(x) = x^8 + x^2 + x + 1$ 。

在发送模式时，软件可以在最后一个 I2C_STS1.TXDATE 事件时设置 I2C_CTRL1.PEC 传输位，PEC 将在最后一个字节后被发送。在接收模式时，软件在最后一个 I2C_STS1.RXDATNE 事件之后设置 I2C_CTRL1.PEC 位，然后接收 PEC 字节，并将接收到的 PEC 字节与内部计算的 PEC 值进行比较。如果不等于内部计算的 PEC，接收器发送一个 NACK。如果是主机接收器模式，不管校对的结果如何，PEC 后都将发送 NACK。需要注意，I2C_CTRL1.PEC 位必须在接收当前字节的 ACK 脉冲之前设置。

如果 DMA 和 PEC 计算器都被激活，I²C 将自动发送或者检查 PEC 值。

在发送模式时，当 I²C 接口从 DMA 控制器处接收到 EOT 信号时，它在最后一个字节后自动发送 PEC。在接收模式时，当 I²C 接口从 DMA 处接收到一个 EOT_1 信号时，它将自动把下一个字节作为 PEC，并且和内部计算的 PEC 进行比较。在接收到 PEC 后产生一个 DMA 请求。

为了允许中间 PEC 传输，I2C_CTRL2.DMALAST 位用于判别是否真是最后一个 DMA 传输。如果确实是最后一个主接收器的 DMA 请求，在接收到最后一个字节后自动发送 NACK。

当仲裁丢失的时候，PEC 计算失效。

21.3.6 SMBus

21.3.6.1 介绍

系统管理总线（System Management Bus，简写为 SMBus 或 SMB）是一种结构简单的单端双线制总线。通过它，各设备之间以及设备与系统的其他部分之间可以互相通信。SMBus 是 I²C 的一种衍生总线形式，为系统和电源管理相关的任务提供一条控制总线。SMBus 基于 I²C 通信标准，是一个与系统管理和电源管理相关的控制总线。想要了解更多信息，请参考 SMBus 规范 V2.0(<http://smbus.org/specs/>)。

SMBus 有三类设备标准：

- 主设备：发送命令、产生时钟和终止发送设备；
- 从设备：接收或响应命令设备；
- 主机：一个系统仅有一个主机，它提供与系统 CPU 的主接口。主机具有主-从机功能并必须支持 SMBus 提醒协议。

SMBus 与 I²C 的相似点：

- 总线协议都是两条线（一个时钟线 SCL 和一个数据线 SDA），再加一条可选的 SMBus 提醒线；
- 数据格式相似，SMBus 数据格式类似于 I²C 的 7 位地址格式（见图 21-2）；
- 都是主-从通信模式，且主设备提供时钟；
- 都支持多主机功能；

SMBus 和 I²C 的不同点：

表 21-1 SMBus 与 I²C 的比较

| SMBus | I ² C |
|---------------|------------------|
| 最大传输速度 100KHz | 最大传输速度 1MHz |
| 最小传输速度 10KHz | 无最小传输速度 |

| SMBus | I ² C |
|----------------------|--------------------|
| 35ms 时钟低超时 | 无时钟超时 |
| 固定逻辑电平 | 逻辑电平由 VDD 决定 |
| 不同的地址类型 (保留的, 动态的等) | 7 位、10 位和广播呼叫从地址类型 |
| 不同的总线协议(快递命令, 处理呼叫等) | 无总线协议 |

21.3.6.2 SMBus 用途

SMBus 利用系统管理总线, 可实现轻量级的通信需求。一般来说, SMBus 最常见于计算机主板, 主要用于电源传输 ON/OFF 指令的通信, 为系统和电源管理相关的任务提供控制总线。

21.3.6.3 设备标识

在 SMBus 中, 任意一个设备作为从设备时都有一个地址, 叫从地址。

为了给每一个设备分配地址, 必须有一个唯一的设备标识 (UDID) 分配给设备。

21.3.6.4 总线协议

SMBus 技术规范包括 8 个总线协议。想要了解关于 SMBus 的详细信息和地址类型请参考 SMBus 技术规范 V2.0(<http://smbus.org/specs/>)。用户可以决定使用哪些协议。

SMBus 上每个报文交互都遵从 SMBus 协议中预定义的格式。SMBus 是 I²C 规范中数据传输格式的子集。只要 I²C 设备可通过 SMBus 协议之一进行访问, 便视为兼容 SMBus 规范。

注: SMBus 不支持 *Quick command* 协议。

21.3.6.5 地址解析协议 (ARP)

通过 SMBus 协议动态分配新的唯一地址给每个从设备来解决地址冲突, 这是地址解析协议 (ARP)。地址解析协议具有一下特性:

任何一个 SMBus 主设备都可以遍历总线;

使用 SMBus 物理层仲裁机制分配地址。当设备维持供电期间, 分配的地址保持不变, 协议也允许再断电后保留其地址。

地址分配之后, 没有额外的 SMBus 打包开销 (访问分配地址的设备与访问固定地址的设备所用的时间是一样的)。

21.3.6.6 超时错误

SMBus 有一种超时特性: 假如某个通信耗时太久, 便会自动复位设备。这就是为什么 SMBus 有最小传输速率的要求——为了防止超时后长时间锁死总线。I²C 在本质上可以视为一个“直流”总线, 也就是说当主机正在访问从机的时候, 假如从机正在执行一些子程序无法及时响应, 从机可以拉住主机的时钟。这样便可以提醒主机: 从机正忙, 但并不想放弃当前的通信。从机的当前任务结束之后, 将可以继续 I²C 会话。I²C 总线协议中并没有限制这个延时的上限, 但在 SMBus 系统中, 这个时间被限定为 35ms。按照 SMBus 协议的假定, 如果某个会话耗时太久, 就意味着总线出了问题, 此时所有设备都应当复位以消除这种 (问题) 状态。这样就不允许从设备将时钟拉低太长时间。I²C_STS1.TIMOUT 位表明了这个特性的状态。

21.3.6.7 SMBus 提醒模式

SMBus 提供了一个可选的中断信号 SMBALERT (与 SCL 和 SDA 一样, 是一种有线与信号), 设备使用该信号来扩展其控制能力, 但需要牺牲一个引脚。SMBALERT 通常和 SMBus 广播呼叫地址结合使用。关于

SMBus 的消息有 2 个字节。

仅具有从机功能的设备可以设置 I2C_CTRL1.SMBALERT 位以指示它要与主机通信。主机处理该中断并通过提醒响应地址 ARA (Alert Response Address, 地址值为 0001100x) 访问所有 SMBALERT 设备。只有那些将 SMBALERT 拉低的设备能应答 ARA。此状态是由 I2C_STS1.SMBALERT 来标识的。从发送设备提供的 7 位设备地址被放在字节的 7 个最高位上, 第八个位可以是 ‘0’ 或 ‘1’。

当多个设备的 SMBALERT 为低时, 在地址传输过程中, 最高优先级 (地址越小优先级越高) 可以通过标准仲裁赢得总线通信。如果确认从机地址, 则设备的 SMBALERT 不再为低。如果报文传输完毕, 设备的 SMBALERT 仍为低, 表示主机将再次读取 ARA。没有采用 SMBALERT 信号时主机可以定期访问 ARA。

21.3.6.8 SMBus 通信流程

SMBus 的通讯流程和标准 I²C 的流程相似。如果要使用 SMBus 模式, 还需要在程序中配置 SMBus 特定寄存器、并响应 SMBus 特定标志位、实现在 SMBus 手册中介绍的上层协议。

- 首先, 设置 I2C_CTRL1.SMBMODE 位; 并按照应用要求配置 I2C_CTRL1.SMBTYPE 和 I2C_CTRL1.AR PEN 位。如果 I2C_CTRL1.AR PEN=1 且 I2C_CTRL1.SMBTYPE=0, 使用 SMB 设备默认地址; 如果 I2C_CTRL1.AR PEN=1 且 I2C_CTRL1.SMBTYPE=1, 使用 SMB 主设备头字段。
- 为了支持 ARP 协议 (I2C_CTRL1.AR PEN=1), 在 SMBus 主机模式下 (I2C_CTRL1.SMBTYPE=1), 软件需要响应标志位 I2C_STS2.SMBHADDR (在 SMBus 从机模式下, 响应 I2C_STS2.SMBDADDR 标志位), 并实现 ARP 协议中的功能。
- 为了支持 SMBus 警告模式, 软件应该响应 I2C_STS1.SMBALERT 标志位, 并实现相应的功能。

21.4 调试模式

当微控制器进入调试模式 (Cortex-M4 核心处于停止状态) 时, 根据 DBG 模块中的 DBG_CTRL.I2Cx_SMBUS_TIMEOUT 配置位, SMBUS 超时控制或者继续正常工作或者可以停止。详见 26.4.3。

21.5 中断请求

下表列出了所有的 I²C 中断请求:

表 21-2 I²C 中断请求

| 中断功能 | 中断事件 | 事件标志 | 设置控制位 |
|----------|---------------------|---------|-----------------------|
| I2C 事件中断 | 起始位已发送 (主) | STARTBF | EVTINTEN |
| | 地址已发送 (主) 或地址匹配 (从) | ADDRF | |
| | 10 位头段地址已发送 (主) | ADDR10F | |
| | 收到停止位 (从) | STOPF | |
| | 数据字节传输完成 | BSF | |
| | 接收缓冲区非空 | RXDATNE | EVTINTEN and BUFINTEN |
| | 发送缓冲区为空 | TXDATE | |
| I2C 错误中断 | 总线错误 | BUSERR | ERRINTEN |
| | 仲裁丢失 (主) | ARLOST | |
| | 应答失败 | ACKFAIL | |

| 中断功能 | 中断事件 | 事件标志 | 设置控制位 |
|------|------------|----------|-------|
| | 过载/欠载 | OVERRUN | |
| | PEC 错误 | PECERR | |
| | 超时/Tlow 错误 | TIMOUT | |
| | SMBus 提醒 | SMBALERT | |

注: 1. STARTBF, ADDR, ADDR10F, STOPF, BSF, RXDATNE 和 TXDATE 通过逻辑或汇到同一个中断通道中。

2. BUSERR、ARLOST、ACKFAIL、OVERRUN、PECERR、TIMOUT 和 SMBALERT 通过逻辑或汇到同一个中断通道中。

21.6 I²C 寄存器

可以用半字 (16 位) 或字 (32 位) 的方式操作这些外设寄存器。

21.6.1 I²C 寄存器总览

表 21-3 I²C 寄存器总览

| Offset | Register | 31 | 30 | 29 | 28 | 27 | 26 | 25 | 24 | 23 | 22 | 21 | 20 | 19 | 18 | 17 | 16 | 15 | 14 | 13 | 12 | 11 | 10 | 9 | 8 | 7 | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | 0 | 31 | 30 | 29 | 28 | 27 | 26 | 25 | 24 | 23 | 22 | 21 | 20 | 19 | 18 | 17 | 16 | 15 | 14 | 13 | 12 | 11 | 10 | 9 | 8 | 7 | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | 0 | 31 | 30 | 29 | 28 | 27 | 26 | 25 | 24 | 23 | 22 | 21 | 20 | 19 | 18 | 17 | 16 | 15 | 14 | 13 | 12 | 11 | 10 | 9 | 8 | 7 | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | 0 | 31 | 30 | 29 | 28 | 27 | 26 | 25 | 24 | 23 | 22 | 21 | 20 | 19 | 18 | 17 | 16 | 15 | 14 | 13 | 12 | 11 | 10 | 9 | 8 | 7 | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | 0 | 31 | 30 | 29 | 28 | 27 | 26 | 25 | 24 | 23 | 22 | 21 | 20 | 19 | 18 | 17 | 16 | 15 | 14 | 13 | 12 | 11 | 10 | 9 | 8 | 7 | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | 0 | 31 | 30 | 29 | 28 | 27 | 26 | 25 | 24 | 23 | 22 | 21 | 20 | 19 | 18 | 17 | 16 | 15 | 14 | 13 | 12 | 11 | 10 | 9 | 8 | 7 | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | 0 | 31 | 30 | 29 | 28 | 27 | 26 | 25 | 24 | 23 | 22 | 21 | 20 | 19 | 18 | 17 | 16 | 15 | 14 | 13 | 12 | 11 | 10 | 9 | 8 | 7 | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | 0 | 31 | 30 | 29 | 28 | 27 | 26 | 25 | 24 | 23 | 22 | 21 | 20 | 19 | 18 | 17 | 16 | 15 | 14 | 13 | 12 | 11 | 10 | 9 | 8 | 7 | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | 0 | 31 | 30 | 29 | 28 | 27 | 26 | 25 | 24 | 23 | 22 | 21 | 20 | 19 | 18 | 17 | 16 | 15 | 14 | 13 | 12 | 11 | 10 | 9 | 8 | 7 | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | 0 | 31 | 30 | 29 | 28 | 27 | 26 | 25 | 24 | 23 | 22 | 21 | 20 | 19 | 18 | 17 | 16 | 15 | 14 | 13 | 12 | 11 | 10 | 9 | 8 | 7 | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | 0 | 31 | 30 | 29 | 28 | 27 | 26 | 25 | 24 | 23 | 22 | 21 | 20 | 19 | 18 | 17 | 16 | 15 | 14 | 13 | 12 | 11 | 10 | 9 | 8 | 7 | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | 0 | 31 | 30 | 29 | 28 | 27 | 26 | 25 | 24 | 23 | 22 | 21 | 20 | 19 | 18 | 17 | 16 | 15 | 14 | 13 | 12 | 11 | 10 | 9 | 8 | 7 | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | 0 | 31 | 30 | 29 | 28 | 27 | 26 | 25 | 24 | 23 | 22 | 21 | 20 | 19 | 18 | 17 | 16 | 15 | 14 | 13 | 12 | 11 | 10 | 9 | 8 | 7 | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | 0 | 31 | 30 | 29 | 28 | 27 | 26 | 25 | 24 | 23 | 22 | 21 | 20 | 19 | 18 | 17 | 16 | 15 | 14 | 13 | 12 | 11 | 10 | 9 | 8 | 7 | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | 0 | 31 | 30 | 29 | 28 | 27 | 26 | 25 | 24 | 23 | 22 | 21 | 20 | 19 | 18 | 17 | 16 | 15 | 14 | 13 | 12 | 11 | 10 | 9 | 8 | 7 | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | 0 | 31 | 30 | 29 | 28 | 27 | 26 | 25 | 24 | 23 | 22 | 21 | 20 | 19 | 18 | 17 | 16 | 15 | 14 | 13 | 12 | 11 | 10 | 9 | 8 | 7 | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | 0 | 31 | 30 | 29 | 28 | 27 | 26 | 25 | 24 | 23 | 22 | 21 | 20 | 19 | 18 | 17 | 16 | 15 | 14 | 13 | 12 | 11 | 10 | 9 | 8 | 7 | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | 0 | 31 | 30 | 29 | 28 | 27 | 26 | 25 | 24 | 23 | 22 | 21 | 20 | 19 | 18 | 17 | 16 | 15 | 14 | 13 | 12 | 11 | 10 | 9 | 8 | 7 | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | 0 | 31 | 30 | 29 | 28 | 27 | 26 | 25 | 24 | 23 | 22 | 21 | 20 | 19 | 18 | 17 | 16 | 15 | 14 | 13 | 12 | 11 | 10 | 9 | 8 | 7 | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | 0 | 31 | 30 | 29 | 28 | 27 | 26 | 25 | 24 | 23 | 22 | 21 | 20 | 19 | 18 | 17 | 16 | 15 | 14 | 13 | 12 | 11 | 10 | 9 | 8 | 7 | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | 0 | 31 | 30 | 29 | 28 | 27 | 26 | 25 | 24 | 23 | 22 | 21 | 20 | 19 | 18 | 17 | 16 | 15 | 14 | 13 | 12 | 11 | 10 | 9 | 8 | 7 | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | 0 | 31 | 30 | 29 | 28 | 27 | 26 | 25 | 24 | 23 | 22 | 21 | 20 | 19 | 18 | 17 | 16 | 15 | 14 | 13 | 12 | 11 | 10 | 9 | 8 | 7 | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | 0 | 31 | 30 | 29 | 28 | 27 | 26 | 25 | 24 | 23 | 22 | 21 | 20 | 19 | 18 | 17 | 16 | 15 | 14 | 13 | 12 | 11 | 10 | 9 | 8 | 7 | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | 0 | 31 | 30 | 29 | 28 | 27 | 26 | 25 | 24 | 23 | 22 | 21 | 20 | 19 | 18 | 17 | 16 | 15 | 14 | 13 | 12 | 11 | 10 | 9 | 8 | 7 | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | 0 | 31 | 30 | 29 | 28 | 27 | 26 | 25 | 24 | 23 | 22 | 21 | 20 | 19 | 18 | 17 | 16 | 15 | 14 | 13 | 12 | 11 | 10 | 9 | 8 | 7 | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | 0 | 31 | 30 | 29 | 28 | 27 | 26 | 25 | 24 | 23 | 22 | 21 | 20 | 19 | 18 | 17 | 16 | 15 | 14 | 13 | 12 | 11 | 10 | 9 | 8 | 7 | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | 0 | 31 | 30 | 29 | 28 | 27 | 26 | 25 | 24 | 23 | 22 | 21 | 20 | 19 | 18 | 17 | 16 | 15 | 14 | 13 | 12 | 11 | 10 | 9 | 8 | 7 | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | 0 | 31 | 30 | 29 | 28 | 27 | 26 | 25 | 24 | 23 | 22 | 21 | 20 | 19 | 18 | 17 | 16 | 15 | 14 | 13 | 12 | 11 | 10 | 9 | 8 | 7 | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | 0 | 31 | 30 | 29 | 28 | 27 | 26 | 25 | 24 | 23 | 22 | 21 | 20 | 19 | 18 | 17 | 16 | 15 | 14 | 13 | 12 | 11 | 10 | 9 | 8 | 7 | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | 0 | 31 | 30 | 29 | 28 | 27 | 26 | 25 | 24 | 23 | 22 | 21 | 20 | 19 | 18 | 17 | 16 | 15 | 14 | 13 | 12 | 11 | 10 | 9 | 8 | 7 | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | 0 | 31 | 30 | 29 | 28 | 27 | 26 | 25 | 24 | 23 | 22 | 21 | 20 | 19 | 18 | 17 | 16 | 15 | 14 | 13 | 12 | 11 | 10 | 9 | 8 | 7 | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | 0 | 31 | 30 | 29 | 28 | 27 | 26 | 25 | 24 | 23 | 22 | 21 | 20 | 19 | 18 | 17 | 16 | 15 | 14 | 13 | 12 | 11 | 10 | 9 | 8 | 7 | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | 0 | 31 | 30 | 29 | 28 | 27 | 26 | 25 | 24 | 23 | 22 | 21 | 20 | 19 | 18 | 17 | 16 | 15 | 14 | 13 | 12 | 11 | 10 | 9 | 8 | 7 | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | 0 | 31 | 30 | 29 | 28 | 27 | 26 | 25 | 24 | 23 | 22 | 21 | 20 | 19 | 18 | 17 | 16 | 15 | 14 | 13 | 12 | 11 | 10 | 9 | 8 | 7 | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | 0 | 31 | 30 | 29 | 28 | 27 | 26 | 25 | 24 | 23 | 22 | 21 | 20 | 19 | 18 | 17 | 16 | 15 | 14 | 13 | 12 | 11 | 10 | 9 | 8 | 7 | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | 0 | 31 | 30 | 29 | 28 | 27 | 26 | 25 | 24 | 23 | 22 | 21 | 20 | 19 | 18 | 17 | 16 | 15 | 14 | 13 | 12 | 11 | 10 | 9 | 8 | 7 | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | 0 | 31 | 30 | 29 | 28 | 27 | 26 | 25 | 24 | 23 | 22 | 21 | 20 | 19 | 18 | 17 | 16 | 15 | 14 | 13 | 12 | 11 | 10 | 9 | 8 | 7 | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | 0 | 31 | 30 | 29 | 28 | 27 | 26 | 25 | 24 | 23 | 22 | 21 | 20 | 19 | 18 | 17 | 16 | 15 | 14 | 13 | 12 | 11 | 10 | 9 | 8 | 7 | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | 0 | 31 | 30 | 29 | 28 | 27 | 26 | 25 | 24 | 23 | 22 | 21 | 20 | 19 | 18 | 17 | 16 | 15 | 14 | 13 | 12 | 11 | 10 | 9 | 8 | 7 | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | 0 | 31 | 30 | 29 | 28 | 27 | 26 | 25 | 24 | 23 | 22 | 21 | 20 | 19 | 18 | 17 | 16 | 15 | 14 | 13 | 12 | 11 | 10 | 9 | 8 | 7 | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | 0 | 31 | 30 | 29 | 28 | 27 | 26 | 25 | 24 | 23 | 22 | 21 | 20 | 19 | 18 | 17 | 16 | 15 | 14 | 13 | 12 | 11 | 10 | 9 | 8 | 7 | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | 0 | 31 | 30 | 29 | 28 | 27 | 26 | 25 | 24 | 23 | 22 | 21 | 20 | 19 | 18 | 17 | 16 | 15 | 14 | 13 | 12 | 11 | 10 | 9 | 8 | 7 | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | 0 | 31 | 30 | 29 | 28 | 27 | 26 | 25 | 24 | 23 | 22 | 21 | 20 | 19 | 18 | 17 | 16 | 15 | 14 | 13 | 12 | 11 | 10 | 9 | 8 | 7 | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | 0 | 31 | 30 | 29 | 28 | 27 | 26 | 25 | 24 | 23 | 22 | 21 | 20 | 19 | 18 | 17 | 16 | 15 | 14 | 13 | 12 | 11 | 10 | 9 | 8 | 7 | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | 0 | 31 | 30 | 29 | 28 | 27 | 26 | 25 | 24 | 23 | 22 | 21 | 20 | 19 | 18 | 17 | 16 | 15 | 14 | 13 | 12 | 11 | 10 | 9 | 8 | 7 | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | 0 | 31 | 30 | 29 | 28 | 27 | 26 | 25 | 24 | 23 | 22 | 21 | 20 | 19 | 18 | 17 | 16 | 15 | 14 | 13 | 12 | 11 | 10 | 9 | 8 | 7 | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | 0 | 31 | 30 | 29 | 28 | 27 | 26 | 25 | 24 | 23 | 22 | 21 | 20 | 19 | 18 | 17 | 16 | 15 | 14 | 13 | 12 | 11 | 10 | 9 | 8 | 7 | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | 0 | 31 | 30 | 29 | 28 | 27 | 26 | 25 | 24 | 23 | 22 | 21 | 20 | 19 | 18 | 17 | 16 | 15 | 14 | 13 | 12 | 11 | 10 | 9 | 8 | 7</th |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |

21.6.2 I2C 控制寄存器 1 (I2C_CTRL1)

地址偏移: 0x00

复位值: 0x0000

| | | | | | | | | | | | | | | | |
|----------|----------|-----------|-----|---------|-------|----------|-----------|-----------|------|-------|-------|----------|----------|----------|----|
| 15 | 14 | 13 | 12 | 11 | 10 | 9 | 8 | 7 | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | 0 |
| SW RESET | Reserved | SMB ALERT | PEC | ACK POS | ACKEN | STOP GEN | START GEN | NO EXTEND | GCEN | PECEN | ARPEN | SMB TYPE | Reserved | SMB MODE | EN |

| 位域 | 名称 | 描述 |
|----|----------|---|
| 15 | SWRESET | <p>软件复位 (Software reset) 在复位该位前确认 I²C 的引脚被释放, 总线是空的。 0: I²C 模块不处于复位状态; 1: I²C 模块处于复位状态。 注: 该位可以用于 I2C_STS2.BUSY 位为'1', 在总线上又没有检测到停止条件时。</p> |
| 14 | Reserved | 保留, 必须保持复位值 |
| 13 | SMBALERT | <p>SMBus提醒 (SMBus alert) 软件可以设置或清除该位; 当I2C_CTRL1.EN=0时, 由硬件清除。 0: 释放SMBAlert引脚使其变高。提醒响应地址头紧跟在NACK信号后面; 1: 驱动 SMBAlert 引脚使其变低。提醒响应地址头紧跟在 ACK 信号后面。</p> |
| 12 | PEC | <p>数据包出错检测 (Packet error checking) 软件可以设置或清除该位; 当传送完PEC后或检测到起始或停止条件时或当I2C_CTRL1.EN=0时, 硬件均会将其清除。 0: 无 PEC 传输 1: PEC传输 注: 仲裁丢失时, PEC 的计算失效。</p> |
| 11 | ACKPOS | <p>应答/PEC位置 (用于数据接收) (Acknowledge/PEC Position (for data reception)) 软件可以设置或清除该位, 或当I2C_CTRL1.EN=0时, 由硬件清除。 0: I2C_CTRL1.ACKEN位决定是否向当前正在接收的字节发送ACK; I2C_CTRL1.PEC 位表示当前移位寄存器中的字节为 PEC。 1: I2C_CTRL1.ACKEN位决定是否向下一个接收到的字节发送ACK; I2C_CTRL1.PEC 位指示移位寄存器中接收到的下一个字节是PEC。 注: ACKPOS位只能用在2字节的接收配置中, 必须在接收数据之前配置。 为了NACK第2个字节, I2C_CTRL1.ACKEN位必须在I2C_STS1.ADDRF位清零后清零。 为了检测第 2 个字节的 PEC, 必须在配置 ACKPOS 位之后, 扩展 ADDR 事件时设置 I2C_CTRL1.PEC 位。</p> |
| 10 | ACKEN | <p>应答使能 (Acknowledge enable) 软件可以设置或清除该位, 或当I2C_CTRL1.EN=0时, 由硬件清除。 0: 无应答返回; 1: 在接收到一个字节后返回一个应答 (匹配的地址或数据)。</p> |
| 9 | STOPGEN | <p>停止条件产生 (Stop generation) 软件可以设置或清除该位; 或当检测到停止条件时, 由硬件清除; 当检测到SMBus超时错误时, 硬件将其置位。 在主模式下:</p> |

| 位域 | 名称 | 描述 |
|----|----------|---|
| | | <p>0: 无停止条件产生; 1: 在当前字节传输或在当前起始条件发出后产生停止条件。 在从模式下: 0: 无停止条件产生; 1: 在当前字节传输或释放SCL和SDA线。 注: 当设置了STOPGEN、STARTGEN 或 PEC 位, 在硬件清除这个位之前, 软件不要执行任何对I2C_CTRL1 的写操作; 否则有可能会第2 次设置STOPGEN、STARTGEN 或 PEC 位。</p> |
| 8 | STARTGEN | 起始条件产生 (Start generation) 软件可以设置或清除该位, 当起始条件发出后或I2C_CTRL1.EN=0时, 由硬件清除。 0: 无起始条件产生; 1: 产生起始条件。 |
| 7 | NOEXTEND | 禁止时钟延长 (从模式) (Clock stretching disable (Slave mode)) 该位决定在从机模式下数据未就绪 (I2C_STS1.ADDRF或I2C_STS1.BSF标志置位) 时是否拉低SCL。通过软件复位清零。 0: 允许时钟延长; 1: 禁止时钟延长。 |
| 6 | GCEN | 广播呼叫使能 (General call enable) 0: 禁止广播呼叫。不应答(NACK)地址 00h; 1: 允许广播呼叫。以应答(ACK)地址 00h。 |
| 5 | PECEN | PEC使能 (PEC enable) 0: 禁止PEC模式; 1: 开启 PEC 模式。 |
| 4 | ARPEN | ARP使能 (ARP enable) 0: 禁止ARP; 1: 使能ARP。 如果I2C_CTRL1.SMBTYPE=0, 使用SMBus设备的默认地址。 如果 I2C_CTRL1.SMBTYPE=1, 使用 SMBus 的主地址。 |
| 3 | SMBTYPE | SMBus类型 (SMBus type) 0: SMBus设备; 1: SMBus 主机。 |
| 2 | Reserved | 保留, 必须保持复位值 |
| 1 | SMBMODE | SMBus模式 (SMBus mode) 0: I2C模式; 1: SMBus 模式。 |
| 0 | EN | I ² C模块使能 (Peripheral enable) 0: 禁用I ² C模块; 1: 启用I ² C模块。 注: 如果清除该位时通讯正在进行, 在当前通讯结束后, I²C模块被禁用并返回空闲状态。由于在通讯结束后发生EN=0, 所有的位被清除。 在主模式下, 通讯结束之前, 绝不能清除该位。 |

21.6.3 I2C 控制寄存器 2 (I2C_CTRL2)

地址偏移: 0x04

复位值: 0x0000

| | | | | | | | | | | | |
|----|----------|----|----------|--------|-----------|-----------|-----------|---|---|---|----|
| 15 | Reserved | 13 | DMA LAST | DMA EN | BUFINT EN | EVTINT EN | ERRINT EN | 7 | 6 | 5 | 0 |
| | | | rw | rw | rw | rw | rw | | | | rw |

| 位域 | 名称 | 描述 |
|-------|----------|--|
| 15:13 | Reserved | 保留, 必须保持复位值 |
| 12 | DMALAST | <p>DMA最后一次传输 (DMA last transfer)</p> <p>0: 下一次DMA的EOT不是最后的传输;</p> <p>1: 下一次DMA的EOT是最后的传输。</p> <p>注: 该位在主接收模式使用, 使得在最后一次接收数据时可以产生一个NACK。</p> |
| 11 | DMAEN | <p>DMA请求使能 (DMA requests enable)</p> <p>0: 禁止DMA请求;</p> <p>1: 使能 DMA 请求。</p> |
| 10 | BUFINTEN | <p>缓冲器中断使能 (Buffer interrupt enable)</p> <p>0: 当 I2C_STS1.TXDATE=1 或 I2C_STS1.RXDATNE=1 时, 不产生任何中断;</p> <p>1: 当 I2C_STS1.TXDATE=1 或 I2C_STS1.RXDATNE=1 时 (I2C_CTRL2.EVTINTEN=1), 产生事件中断 (不管 DMAEN 是何种状态)。</p> |
| 9 | EVTINTEN | <p>事件中断使能 (Event interrupt enable)</p> <p>0: 禁止事件中断</p> <p>1: 允许事件中断</p> <p>在下列条件下, 将产生该中断:</p> <p>I2C_STS1.STARTBF = 1 (主模式)</p> <p>I2C_STS1.ADDRF = 1 (主/从模式)</p> <p>I2C_STS1.ADD10F = 1 (主模式)</p> <p>I2C_STS1.STOPF = 1 (从模式)</p> <p>I2C_STS1.BSF = 1, 但是没有I2C_STS1.TXDATE或I2C_STS1.RXDATNE事件</p> <p>如果I2C_STS1.BUFINTEN = 1, I2C_STS1.TXDATE标志为1</p> <p>如果 I2C_STS1.BUFINTEN = 1, I2C_STS1.RXDATNE 标志为 1</p> |
| 8 | ERRINTEN | <p>出错中断使能 (Error interrupt enable)</p> <p>0: 禁止出错中断;</p> <p>1: 允许出错中断。</p> <p>在下列条件下, 将产生该中断:</p> <p>I2C_STS1.BUSERR = 1</p> <p>I2C_STS1.ARLOST = 1</p> <p>I2C_STS1.ACKFAIL = 1</p> <p>I2C_STS1.OVERRUN = 1</p> <p>I2C_STS1.PECERR = 1</p> <p>I2C_STS1.TIMOUT = 1</p> <p>I2C_STS1.SMBALERT = 1</p> |

| 位域 | 名称 | 描述 |
|-----|--------------|--|
| 7:6 | Reserved | 保留, 必须保持复位值 |
| 5:0 | CLKFREQ[5:0] | I ² C模块时钟频率 (Peripheral clock frequency) CLKFREQ[5:0]应该为APB时钟频率以产生正确的时序： 000000: 禁用 000001: 禁用 000010: 2MHz 000011: 3MHz ... 100100: 36MHz 100101~111111: 禁用。 |

21.6.4 I²C 自身地址寄存器 1 (I²C_OADDR1)

地址偏移: 0x08

复位值: 0x0000

| 15 | 14 | 13 | 10 | 9 | 8 | 7 | 1 | 0 |
|-----------|----------|----------|----|-----------|---|-----------|---|-------|
| ADDR MODE | Reserved | Reserved | | ADDR[9:8] | | ADDR[7:1] | | ADDR0 |
| rw | | | rw | | | rw | | rw |

| 位域 | 名称 | 描述 |
|-------|-----------|---|
| 15 | ADDRMODE | 寻址模式 (从模式) (Addressing mode (slave mode)) 0: 7位从地址 (不响应10位地址)； 1: 10位从地址 (不响应7位地址)。 |
| 14 | Reserved | 必须始终由软件保持为‘1’。 |
| 13:10 | Reserved | 保留, 必须保持复位值 |
| 9:8 | ADDR[9:8] | 接口地址 (Interface address) 地址的9~8位。 注: 7位地址模式时不用关心 |
| 7:1 | ADDR[7:1] | 接口地址 (Interface address) 地址的7~1位。 |
| 0 | ADDR0 | 接口地址 (Interface address) 地址第0位。 注: 7位地址模式时不用关心 |

21.6.5 I²C 自身地址寄存器 2 (I²C_OADDR2)

地址偏移: 0x0C

复位值: 0x0000

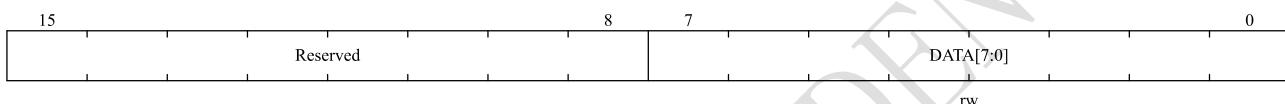
| 15 | 8 | 7 | 1 | 0 |
|----------|---|------------|---|--------|
| Reserved | | ADDR2[7:1] | | DUALEN |
| rw | | rw | | rw |

| 位域 | 名称 | 描述 |
|------|------------|---|
| 15:8 | Reserved | 保留, 必须保持复位值 |
| 7:1 | ADDR2[7:1] | 接口地址 (Interface address) 在双地址模式下地址的 7~1 位。 |
| 0 | DUALEN | 双地址模式使能位 (Dual addressing mode enable) 0: 不使能双地址模式, 只有OADDR1被识别; 1: 使能双地址模式, OADDR1和OADDR2都被识别。 注: 仅 7 位地址模式有效 |

21.6.6 I2C 数据寄存器 (I2C_DAT)

地址偏移: 0x10

复位值: 0x0000

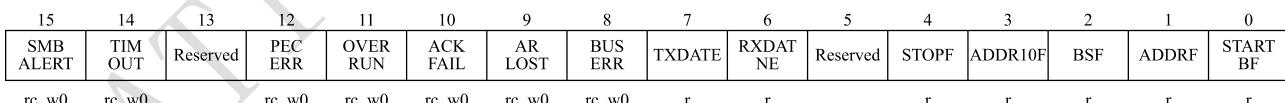


| 位域 | 名称 | 描述 |
|------|-----------|---|
| 15:8 | Reserved | 保留, 必须保持复位值 |
| 7:0 | DATA[7:0] | 8位数据寄存器 (8-bit data register) 发送或接收数据 注意: 从模式下。地址不会被拷贝到数据寄存器 注意: 如果 I2C_STS1.TXDATE =0, 数据仍然会被写入数据寄存器 注意: 如果在处理ACK 时, 发生了ARLOST 事件, 接收到的字节不会被拷贝到数据寄存器, 因此不能读到它。 |

21.6.7 I2C 状态寄存器 1 (I2C_STS1)

地址偏移: 0x14

复位值: 0x0000



| 位域 | 名称 | 描述 |
|----|----------|---|
| 15 | SMBALERT | SMBus提醒 (SMBus alert) 该位由软件写‘0’清除, 或在I2C_CTRL1.EN = 0时由硬件清除。 0: 无SMBus提醒 (主模式) 或没有SMBAlert响应地址头序列 (从模式) ; 1: 在引脚上产生 SMBAlert 提醒事件 (主模式) 或收到 SMBAlert 响应地址 (从模式); |
| 14 | TIMOUT | 超时或Tlow错误 (Timeout or Tlow error) 该位由软件写‘0’清除, 或在I2C_CTRL1.EN=0=0时由硬件清除。 0: 无超时错误; 1: 超时错误发生; |

| 位域 | 名称 | 描述 |
|----|----------|--|
| | | <p>错误情形：</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ SCL 处于低电平已达到 25ms (Timeout); ■ 主机的低电平累积时钟扩展时间超过 10ms (Tlow:mext); ■ 从设备的低电平累积时钟扩展时间超过 25ms (Tlow:sext); <p>从模式超时：从设备复位通讯，硬件释放总线。</p> <p>主模式超时：硬件发出停止条件。</p> |
| 13 | Reserved | 保留，必须保持复位值 |
| 12 | PECERR | <p>在接收时发生PEC错误 (PEC Error in reception)</p> <p>该位由软件写‘0’清除，或在I2C_CTRL1.EN =0时由硬件清除。</p> <p>0: 无 PEC 错误: 接收到 PEC 后接收器返回 ACK (如果 I2C_CTRL1.ACKEN=1) 1: PEC 错误: 接收到 PEC 后接收器返回 NACK (不管 I2C_CTRL1.ACKEN 是否置位)</p> |
| 11 | OVERRUN | <p>过载/欠载 (Overrun/Underrun)</p> <p>该位由软件写‘0’清除，或在I2C_CTRL1.EN=0时由硬件清除。</p> <p>0: 无过载/欠载; 1: 出现过载/欠载。</p> <p>当I2C_CTRL1.NOEXTEND=1时，在从模式下该位被硬件置位。同时：</p> <p>在接收模式中当接收到一个新的字节时，如果数据寄存器里的内容还未被读出，则发生过载错误，新接收的字节将会丢失。</p> <p>在发送模式中要发送一个新的字节时，却没有新的数据写入数据寄存器，将发生欠载错误，同样的数据将会被发送两次。</p> |
| 10 | ACKFAIL | <p>应答失败 (Acknowledge failure)</p> <p>该位由软件写‘0’清除，或在I2C_CTRL1.EN=0时由硬件清除。</p> <p>0: 没有应答失败; 1: 应答失败。</p> |
| 9 | ARLOST | <p>仲裁丢失 (主模式)</p> <p>该位由软件写‘0’清除，或在I2C_CTRL1.EN=0时由硬件清除。</p> <p>0: 没有仲裁丢失; 1: 仲裁丢失。</p> <p>当接口失去对总线的控制时，硬件将置该位为‘1’。在ARLOST事件之后，I²C接口自动切换回从模式(I2C_STS2.MSMODE=0)。</p> <p>注：在 SMBUS 模式下，在从模式下对数据的仲裁仅仅发生在数据阶段，或应答传输区间（不包括地址的应答）。</p> |
| 8 | BUSERR | <p>总线错误 (Bus error)</p> <p>该位由软件写‘0’清除，或在I2C_CTRL1.EN=0时由硬件清除。</p> <p>0: 无起始或停止条件出错; 1: 起始或停止条件出错。</p> |
| 7 | TXDATE | <p>数据寄存器为空 (发送时)</p> <p>软件写数据到DAT寄存器可清除该位；或在发生一个起始或停止条件后，或当I2C_CTRL1.EN=0时由硬件自动清除。</p> <p>0: 数据寄存器非空; 1: 数据寄存器空。</p> <p>在发送数据时，数据寄存器为空时该位被置‘1’，在发送地址阶段不设置该位。</p> |

| 位域 | 名称 | 描述 |
|----|----------|--|
| | | <p>如果收到一个NACK，或下一个要发送的字节是PEC (I2C_CTRL1.PEC=1)，该位不被置位。</p> <p>注：在写入第1个要发送的数据后，或设置了BSF时写入数据，都不能清除TXDATE位，这是因为数据寄存器仍然为空。</p> |
| 6 | RXDATNE | <p>数据寄存器非空（接收时）</p> <p>软件对数据寄存器的读写操作清除该位，或当I2C_CTRL1.EN=0时由硬件清除。</p> <p>0：数据寄存器为空； 1：数据寄存器非空。</p> <p>在接收时，当数据寄存器不为空，该位被置‘1’。在接收地址阶段，该位不被置位。</p> <p>在发生ARLOST事件时，RXDATNE不被置位。</p> <p>注：当设置了BSF时，读取数据不能清除RXDATNE位，因为数据寄存器仍然为满。</p> |
| 5 | Reserved | 保留，必须保持复位值 |
| 4 | STOPF | <p>停止条件检测位（从模式）</p> <p>软件读取STS1寄存器后，对I2C_CTRL1寄存器的写操作将清除该位，或当I2C_CTRL1.EN=0时，硬件清除该位。</p> <p>0：没有检测到停止条件； 1：检测到停止条件。</p> <p>在一个应答之后，当从设备在总线上检测到停止条件时，硬件将该位置‘1’。</p> <p>注：在收到NACK后，I2C_STS1.STOPF位不被置位。</p> |
| 3 | ADDR10F | <p>10位头序列已发送（主模式）</p> <p>软件读取STS1寄存器后，对CTRL1寄存器的写操作将清除该位，或当I2C_CTRL1.EN=0时，硬件清除该位。</p> <p>0：没有ADDR10F事件发生； 1：主设备已经将第一个地址字节发送出去。</p> <p>在10位地址模式下，当主设备已经将第一个地址字节发送出去时，硬件将该位置‘1’。</p> <p>注：收到一个NACK后，I2C_STS1.ADDR10F位不被置位。</p> |
| 2 | BSF | <p>字节传输结束（Byte transfer finished）</p> <p>在软件读取STS1寄存器后，对数据寄存器的读或写操作将清除该位；或在传输中发送一个起始或停止条件后，或当I2C_CTRL1.EN=0时，由硬件清除该位。</p> <p>0：字节传输未完成； 1：字节传输结束。</p> <p>当I2C_CTRL1.NOEXTEND=0时，在下列情况下硬件将该位置‘1’：</p> <p>在接收时，当收到一个新字节（包括ACK脉冲）且数据寄存器还未被读取 (I2C_STS1.RXDATNE=1)。</p> <p>在发送时，当一个新数据将被发送且数据寄存器还未被写入新的数据 (I2C_STS1.TXDATE=1)。</p> <p>注：在收到一个NACK后，BSF位不会被置位。</p> <p>如果下一个要传输的字节是PEC (I2C_STS2.TRF为‘1’，同时I2C_CTRL1.PEC为‘1’)，BSF位不会被置位。</p> |
| 1 | ADDRF | <p>地址已被发送（主模式）/地址匹配（从模式）</p> <p>在软件读取STS1寄存器后，对STS2寄存器的读操作将清除该位，或当I2C_CTRL1.EN=0时，由硬件清除该位。</p> |

| 位域 | 名称 | 描述 |
|----|---------|---|
| | | <p>0: 地址不匹配或没有收到地址（从模式），地址发送未完成（主模式）； 1: 收到的地址匹配（从模式），地址发送完成（主模式）。</p> <p>在主模式下： 7位地址模式时，当收到地址的ACK后该位被置‘1’，10位地址模式时，当收到地址的第二个字节的ACK后该位被置‘1’。</p> <p>在从模式下： 当收到的从地址与OADDR寄存器中的内容相匹配，或广播呼叫或SMBus设备默认地址或SMBus主机或SMBus提醒被识别时，硬件就将该位置‘1’（当对应的设置被使能时）。 注：在收到NACK后，I2C_STS1.ADDRF位不会被置位。</p> |
| 0 | STARTBF | <p>起始位（主模式） 软件读取I2C_STS1寄存器后，写数据寄存器的操作将清除该位，或当I2C_CTRL1.EN=0时，硬件清除该位。 0: 未发送起始条件； 1: 起始条件已发送。 当发送出起始条件时该位被置‘1’。</p> |

21.6.8 I2C 状态寄存器 2 (I2C_STS2)

地址偏移: 0x18

复位值: 0x0000

| 15 | PECVAL[7:0] | 8 | 7 | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | 0 |
|----|-------------|---|---|---|---|---|----------|-----|---|---|
| | | r | r | r | r | r | Reserved | TRF | r | r |

| 位域 | 名称 | 描述 |
|------|-------------|--|
| 15:8 | PECVAL[7:0] | <p>数据包出错检测 (Packet error checking register) 当 I2C_CTRL1.PECEN=1 时，PECVAL[7:0]存放内部的 PEC 值。</p> |
| 7 | DUALFLAG | <p>双标志（从模式） 在产生一个停止条件或一个重复的起始条件时，或I2C_CTRL1.EN =0时，硬件将该位清除。 0: 接收到的地址与OADDR1内的内容相匹配； 1: 接收到的地址与 OADDR2 内的内容相匹配。</p> |
| 6 | SMBHADDR | <p>SMBus主机头地址（从模式） 在产生一个停止条件或一个重复的起始条件时，或I2C_CTRL1.EN =0时，硬件将该位清除。 0: 未收到SMBus主机的地址； 1: 当 I2C_CTRL1.SMBTYPE=1 且 I2C_CTRL1.AR PEN=1 时，收到 SMBus 主机地址。</p> |
| 5 | SMBDADDR | <p>SMBus 设备默认地址（从模式） 在产生一个停止条件或一个重复的起始条件时，或I2C_CTRL1.EN =0时，硬件将该位清除。 0: 未收到SMBus设备的默认地址； 1: 当 I2C_CTRL1.AR PEN=1 时，收到 SMBus 设备的默认地址。</p> |

| 位域 | 名称 | 描述 |
|----|-----------|---|
| 4 | GCALLADDR | <p>广播呼叫地址（从模式）</p> <p>在产生一个停止条件或一个重复的起始条件时，或I2C_CTRL1.EN=0时，硬件将该位清除。</p> <p>0: 未收到广播呼叫地址；</p> <p>1: 当 I2C_CTRL1.GCEN =1 时，收到广播呼叫的地址。</p> |
| 3 | Reserved | 保留，必须保持复位值 |
| 2 | TRF | <p>发送/接收（Transmitter/receiver）</p> <p>在检测到停止条件（I2C_STS1.STOPF =1）、重复的起始条件或总线仲裁丢失（I2C_STS1.ARLOST =1）后，或当I2C_CTRL1.EN=0时，硬件将其清除。</p> <p>0: 数据接收模式；</p> <p>1: 数据发送模式；</p> <p>在整个地址传输阶段的结尾，该位根据地址字节的 R/W 位来设定。</p> |
| 1 | BUSY | <p>总线忙（Bus busy）</p> <p>当检测到一个停止条件时，硬件将该位清除。</p> <p>0: 在总线上无数据通讯；</p> <p>1: 在总线上正在进行数据通讯。</p> <p>在检测到SDA或SCL为低电平时，硬件将该位置‘1’；</p> <p>注：该位指示当前正在进行的总线通讯，当接口被禁用（I2C_CTRL1.EN =0）时该信息仍然被更新。</p> |
| 0 | MSMODE | <p>主从模式（Master/slave）</p> <p>当总线上检测到一个停止条件、仲裁丢失（I2C_STS1.ARLOST =1）时、或当I2C_CTRL1.EN =0时，硬件清除该位。</p> <p>0: 从模式；</p> <p>1: 主模式。</p> <p>当接口处于主模式（I2C_CTRL1.STARTBF=1）时，硬件将该位置位；</p> |

21.6.9 I2C 时钟控制寄存器 (I2C_CLKCTRL)

地址偏移: 0x1C

复位值: 0x0000

注: 1. 要求 F_{PCLK1} 应当是 10 MHz 的整数倍, 这样可以正确地产生 400KHz 的快速时钟。

2. CLKCTRL 寄存器只有在关闭 I²C 时 (*I2C_CTRL1.EN* = 0) 才能设置。

| 位域 | 名称 | 描述 |
|----|--------|--|
| 15 | FSMODE | I2C 主模式选择 0: I2C 标准模式(占空比默认 1/1); 1: I2C 快速模式(占空比可配置). |
| 14 | DUTY | 快速模式占空比 (Duty cycle in fast mode) |

| 位域 | 名称 | 描述 |
|-------|---------------|--|
| | | 0: Tlow/Thigh= 2; 1: Tlow/Thigh= 16/9 |
| 13:12 | Reserved | 保留, 必须保持复位值 |
| 11:0 | CLKCTRL[11:0] | <p>快速/标准模式下的时钟控制分频系数 (主模式) 该分频系数用于设置主模式下的 SCL 时钟。</p> <ul style="list-style-type: none"> 如果 duty cycle = Tlow/Thigh = 1/1: $CLKCTRL = f_{PCLK1}(\text{Hz})/100000/2$ $T_{low} = CLKCTRL \times T_{PCLK1}$ $T_{high} = CLKCTRL \times T_{PCLK1}$ 如果 duty cycle = Tlow/Thigh = 2/1: $CLKCTRL = f_{PCLK1}(\text{Hz})/100000/3$ $T_{low} = 2 \times CLKCTRL \times T_{PCLK1}$ $T_{high} = CLKCTRL \times T_{PCLK1}$ 如果 duty cycle = Tlow/Thigh = 16/9: $CLKCTRL = f_{PCLK1}(\text{Hz})/100000/25$ $T_{low} = 16 \times CLKCTRL \times T_{PCLK1}$ $T_{high} = 9 \times CLKCTRL \times T_{PCLK1}$ <p>例如, 如果 $f_{PCLK1}(\text{Hz}) = 8\text{MHz}$, duty cycle = 1/1, $CLKCTRL = 8000000/100000/2 = 0x28$。 注意: 1. 允许设定的最小值为 0x04, 在快速 DUTY 模式下允许的最小值为 0x01。 2. $T_{high} = T_{f(SCL)} + T_{w(SCLH)}$, 详见数据手册中对这些参数的定义。 3. $T_{low} = T_{f(SCL)} + T_{w(SCLL)}$, 详见数据手册中对这些参数的定义。 4. 这些延时没有过滤器;</p> |

21.6.10 I2C 上升时间寄存器 (I2C_TMRISE)

地址偏移: 0x20

复位值: 0x0002

注意: I2C_TMRISE 寄存器仅在主模式下有效, 当 I2C 禁用 (I2C_CTRL1.EN=0) 时才能配置。

| 15 | Reserved | 6 | 5 | 0 |
|----|----------|---|---|-------------|
| | | | | TMRISE[5:0] |

rw

| 位域 | 名称 | 描述 |
|------|-------------|--|
| 15:6 | Reserved | 保留, 必须保持复位值 |
| 5:0 | TMRISE[5:0] | <p>在快速/标准模式下的最大上升时间 (主模式) 这些位必须设置为 I²C 总线规范里给出的最大的 SCL 上升时间, 增长步幅为 1。 例如, 标准模式中最大允许 SCL 上升时间为 1000ns。如果 I2C_CTRL2.CLKFREQ[5:0] 中的值等于 0x08 且 TPCLK1=125ns, 故 TMRISE[5:0] 中必须写入 09h (1000ns/125 ns + 1)。 如果结果不是一个整数, 则将整数部分写入 TMRISE[5:0] 以确保 tHIGH 参数。</p> |

22 通用同步异步收发器(USART)

22.1 简介

通用同步异步收发器（USART）是一种全双工串行数据交换接口，支持同步或异步通信。可灵活配置，以便于与多种外部设备进行全双工数据交换。

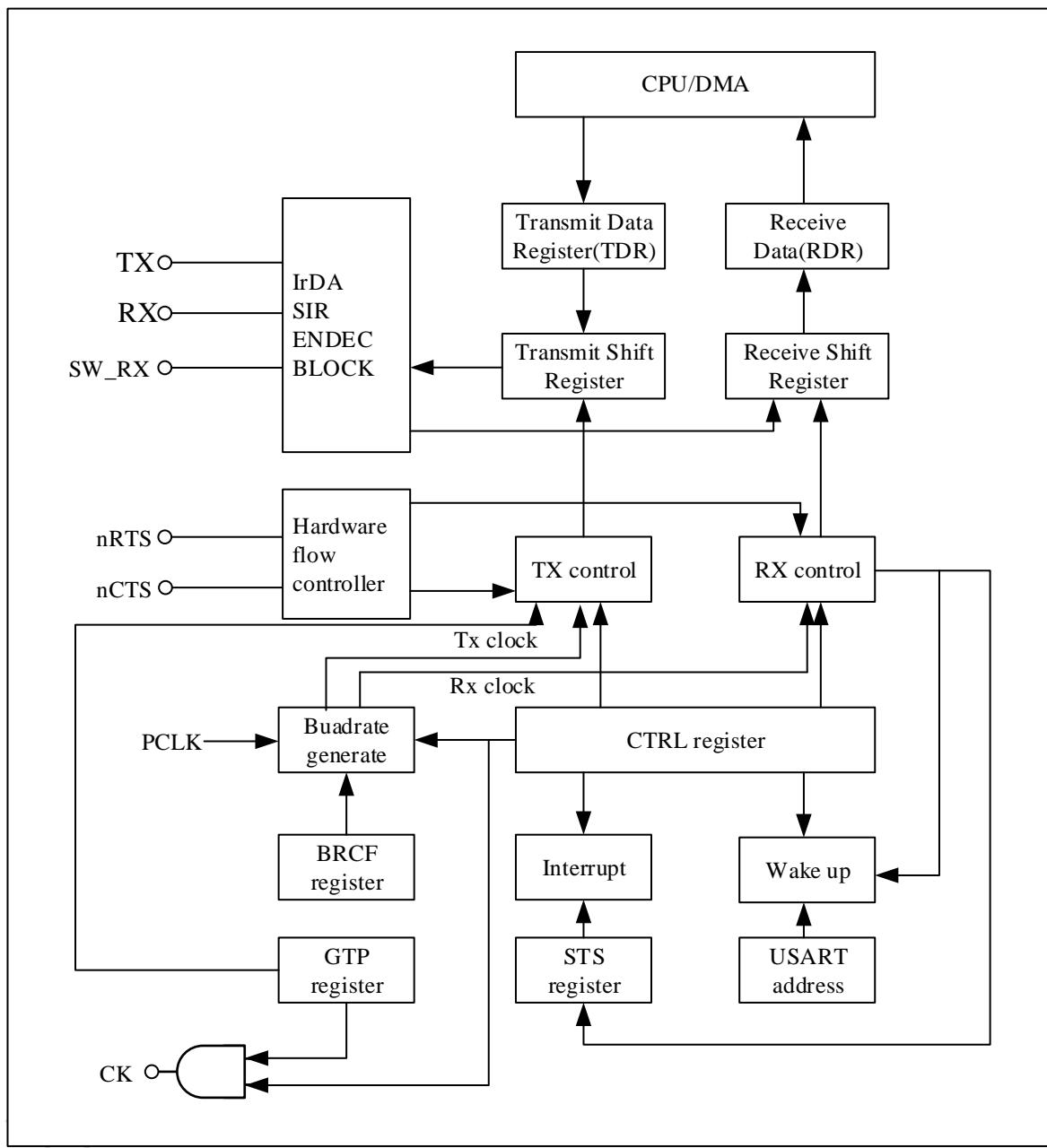
USART 接口发送与接收波特率可配置，也支持通过 DMA 进行连续通信。USART 还支持多处理器通信、LIN 模式、同步模式、单线半双工通信、智能卡异步协议、IrDA SIR ENDEC 功能、以及硬件流控制功能。

22.2 主要特性

- 支持全双工通信
- 支持单线半双工通信
- 波特率可配置，最高波特率可达 4.5Mbit/s
- 支持 8bit 或 9bit 数据帧
- 支持 1bit 或 2bit 停止位
- 支持硬件生成校验位及校验位检查
- 支持硬件流控: RTS、CTS
- 支持 DMA 收发
- 支持多处理器通信：如果地址不匹配，则进入静默模式，可通过空闲总线检测或地址标识唤醒
- 支持同步模式，允许用户在主模式下控制双向同步串行通信
- 支持智能卡异步协议，符合 ISO7816-3 标准
- 支持串行红外协议（IrDA SIR）编码与解码，提供正常与低功耗两种运行模式
- 支持 LIN 模式
- 支持多钟错误检测：数据溢出错误、帧错误、噪声错误、检验错误
- 支持多个中断请求：发送数据寄存器为空、CTS 标志、发送完成、数据已接收、数据溢出、总线空闲、检验错误、LIN 模式断开帧检测、以及多缓冲区通信中的噪声标志/溢出错误/帧错误

22.3 功能框图

图 22-1 USART 框图



22.4 功能描述

如图 22-1 所示, USART 的双向通信都需要使用 RX 和 TX 引脚与外部器件连接。其中 TX 为数据发送引脚 (输出), 当发送功能使能但没有发送数据时, TX 引脚输出高电平, 当发送功能被禁用时, TX 引脚为普通 IO 端口, 状态由应 IO 配置决定。RX 为数据接收引脚 (输入), 接收数据时采用了过采样技术。

当设备作为发送端时, 通过 TX 引脚发送数据, 作为接收端时则通过 RX 引脚接收数据。当没有数据收发时, 总线处于空闲状态。数据帧格式为: 1 个起始位+8 或 9 位数据 (最低有效位在前)+1 个检验位 (可选)+0.5,1,1.5 或 2 个停止位。

使用分数波特率发生器来配置发送与接收波特率。

从功能框图上可以看出，使用硬件流控功能时，需要 nRTS 输出引脚和 nCTS 输入引脚。当 USART 作为接收端时，如果已准备好接收数据，nRTS 输出低电平。当 USART 作为发送端时，nCTS 有效（低电平）才发送下一个数据，nCTS 无效（高电平）则不发送数据。

当使用同步模式时需要用到 CK 引脚，用于同步传输时钟输出，时钟极性与相位可软件配置。但在发送起始位与停止位时，CK 引脚不输出同步时钟。在智能卡模式下也需要 CK 引脚提供时钟。

22.4.1 USART 帧格式

起始位：1位，低电平有效

数据位：可通过 USART_CTRL1.WL 配置为 8 或 9 位，最低有效位在前。

停止位：高电平有效。

空闲帧：全部由'1'组成的一个完整的数据帧，包括起始位。后跟包含数据的数据帧的起始位。

断开帧：全部由'0'组成的一个完整的数据帧，包括停止位。在断开帧结束后，发送端再插入 1 或 2 个停止位来应答起始位。

图 22-2 字长=8 设置

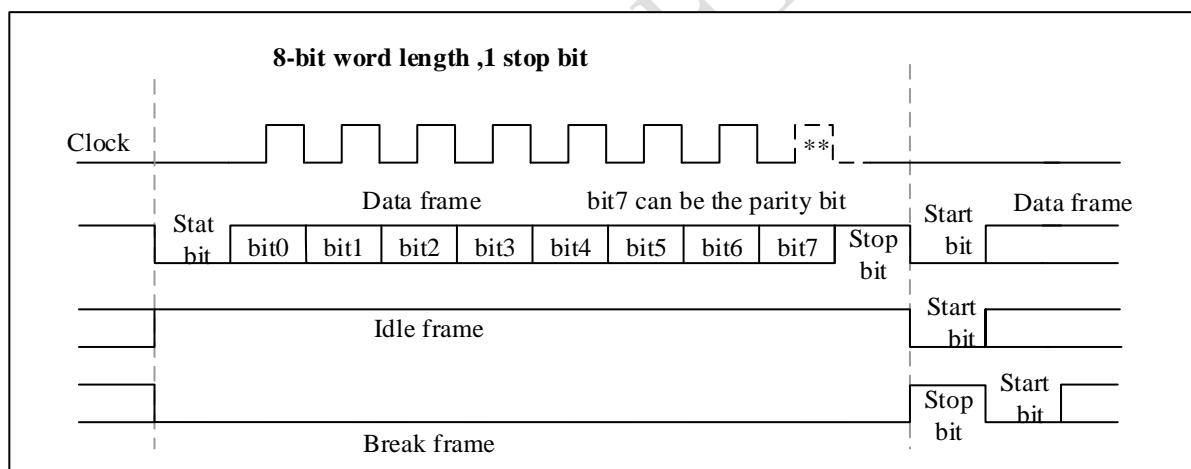
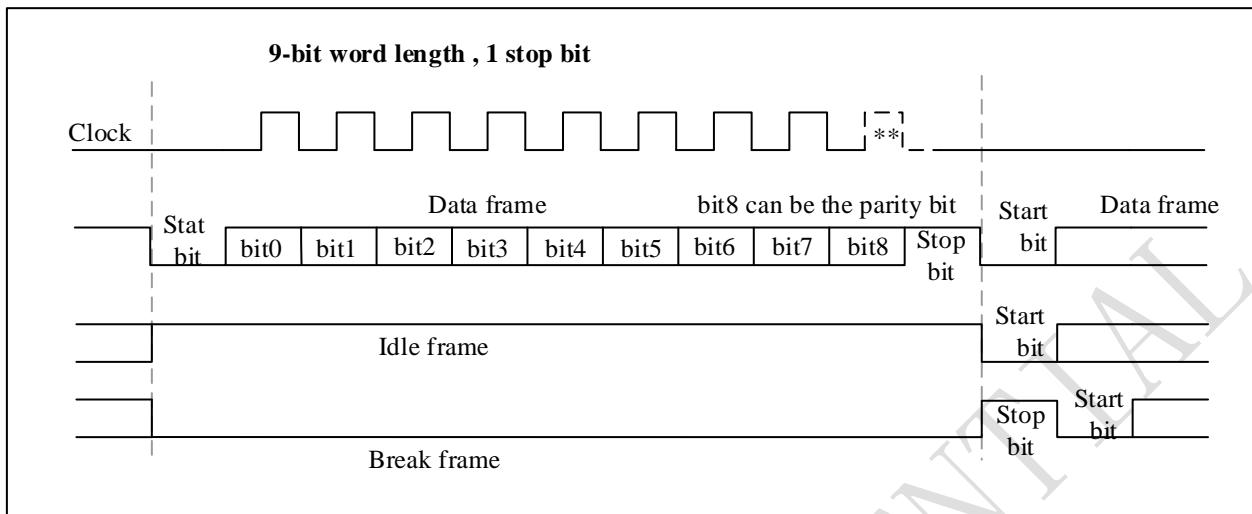


图 22-3 字长=9 设置



22.4.2 发送器

当发送功能使能后，进入移位寄存器中的数据通过 TX 引脚输出。

22.4.2.1 空闲帧

USART_CTRL1.TXEN 置 1 后，USART 会在发送数据之前发送一个空闲帧。

22.4.2.2 字符发送

在空闲帧结束后，字符可正常发送。在每个字符发送前，先发送一个起始位（低电平）。发送器根据数据长度配置发送 8 位或 9 位数据，其中最低有效位先发送。如果在数据传输时 USART_CTRL1.TXEN 被清零，将导致波特率计数器停止计数，从而破坏正在传输的数据。

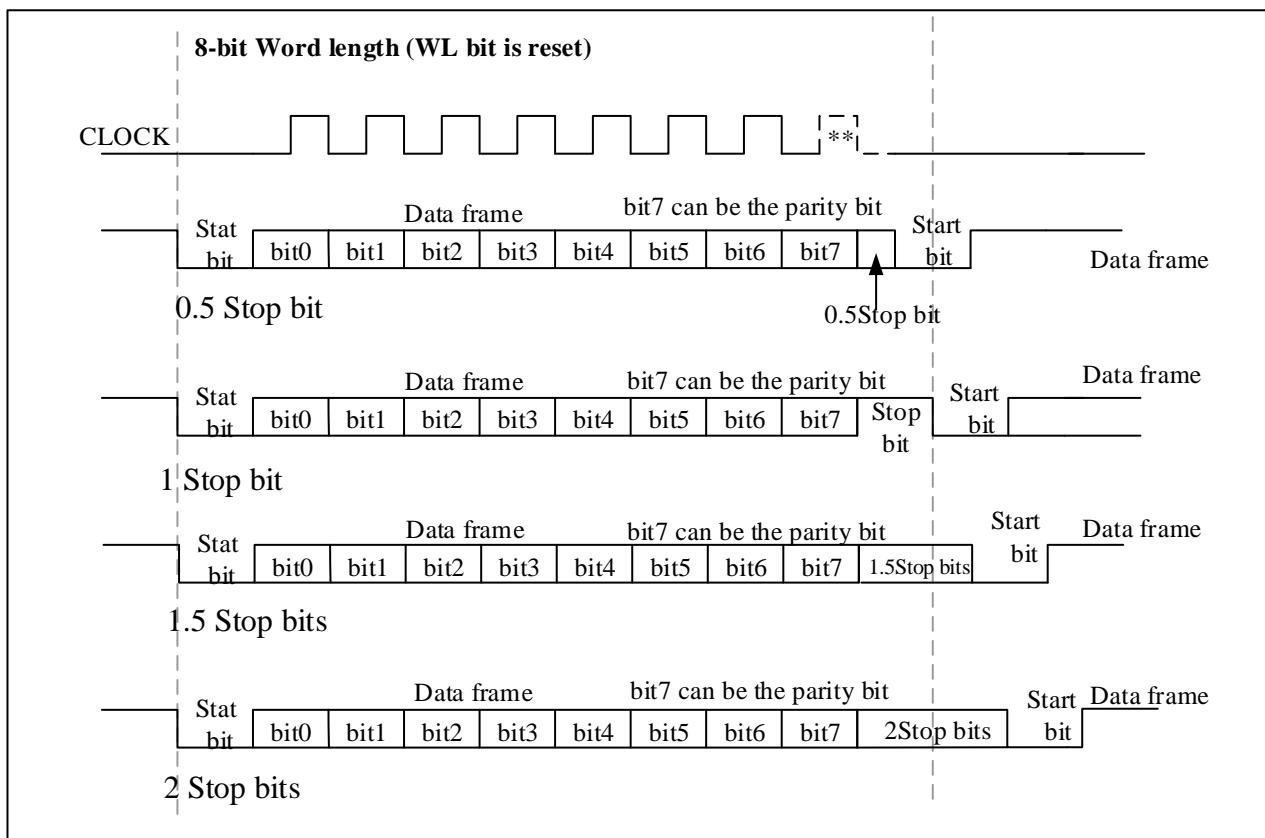
22.4.2.3 停止位

字符发送完成后，发送器自动发送停止位。停止位位数可通过 USART_CTRL2.STPB[1:0]配置。

表 22-1 停止位配置

| USART_CTRL2.STPB[1:0] | 停止位长度 (位) | 功能描述 |
|-----------------------|-----------|------------------------------|
| 00 | 1 | 默认 |
| 01 | 0.5 | 用于智能卡模式下数据接收 |
| 10 | 2 | 用于常规 USART 模式、单线模式以及调制解调器模式. |
| 11 | 1.5 | 用于智能卡模式下数据发送和接收 |

图 22-4 停止位配置



22.4.2.4 断开帧

可通过置位 USART_CTRL1.SDBRK 来发送 1 个断开帧。当数据长度为 8 位时，断开帧由 10 位低电平组成，当数据长度为 9 位时，断开帧由 11 位低电平组成。断开帧结束后将插入一位停止位（高电平）。

断开帧发送完成后，USART_CTRL1.SDBRK 被硬件清零，同时自动发送停止位。因此，如果要连续发送断开帧，必须在前一个断开帧与停止位发送完成后再次置位 USART_CTRL1.SDBRK。

如果在断开帧开始发送前软件清零 USART_CTRL1.SDBRK，当前断开帧不会发送。

22.4.2.5 发送流程

1. 置位 USART_CTRL1.UEN 来使能 USART；
2. 配置波特率、数据长度、校验位、停止位长度、以及根据需要配置相关 DMA；
3. 使能发送功能 (USART_CTRL1.TXEN)；
4. 通过 CPU 或 DMA 将要发送的数据依次写入数据寄存器 USART_DAT，当数据写入数据寄存器时将清零 USART_STS.TXDE；
5. 当所有数据已写入到数据寄存器 USART_DAT 后，等待发送完成标志位 USART_STS.TXC 置 1，数据发送完成。

22.4.2.6 单字节通信

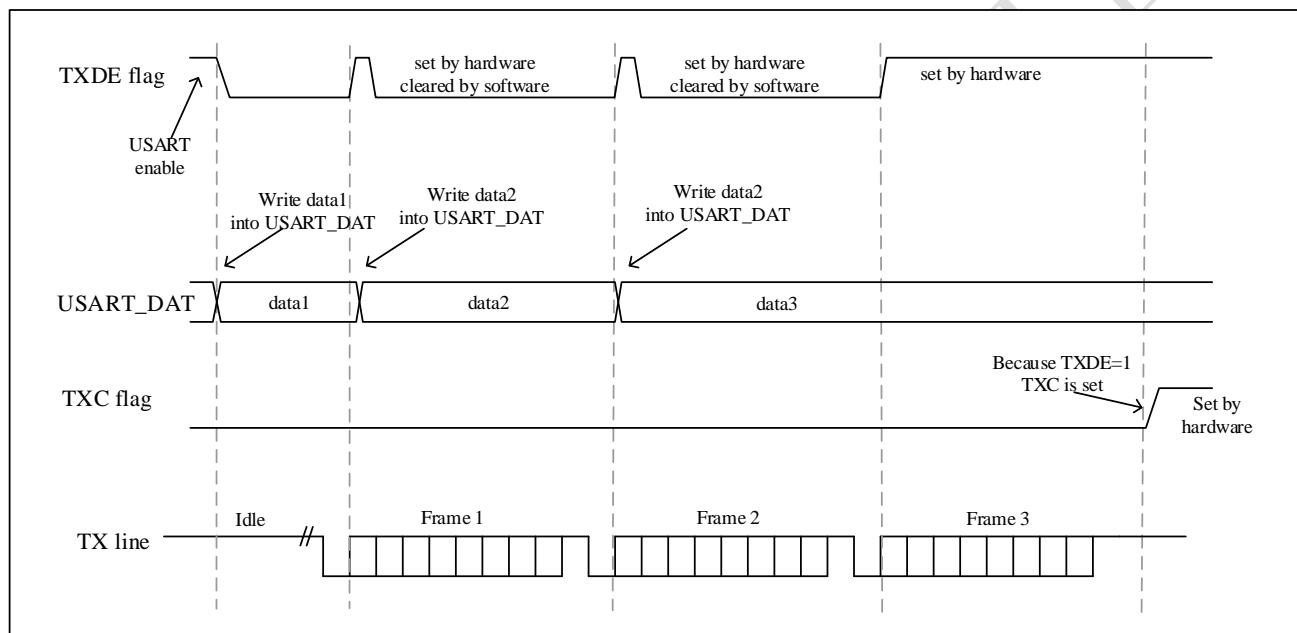
对数据寄存器 USART_DAT 的写操作将清零标志位 USART_STS.TXDE。

当数据已从发送数据寄存器送到移位寄存器时, USART_STS.TXDE 位由硬件置 1, 表示数据开始发送。如果 USART_CTRL1.TXDEIEN 已置 1, 将产生一个中断。此时, 可将下一个数据写入数据寄存器 USART_DAT。

对数据寄存器 USART_DAT 进行写操作时:

- 如果移位寄存器空闲, 数据将直接送到移位寄存器, 同时 USART_STS.TXDE 硬件置 1
 - 如果移位寄存器正在发送数据, 数据保存在数据寄存器, 待上一个数据发送完成后, 再送到移位寄存器
- 当一帧数据发送完成后并且 USART_STS.TXDE 置 1, USART_STS.TXC 被硬件置 1。如果 USART_CTRL1.TXCIEN 已置 1, 将产生一个中断。USART_STS.TXC 通过以下软件操作清零: 先读一次 USART_STS 寄存器, 再写一次 USART_DAT 寄存器。

图 22-5 发送时 TXC/TXDE 的变化情况



22.4.3 接收器

22.4.3.1 起始位检测

在 USART 中, 如果识别到一个特殊的采样序列 1 1 1 0 X 0 X 0 X 0 0 0 0, 就认为检测到一个起始位。

在第 3、5、7 位的采样, 以及在第 8、9、10 位的采样都为'0' (也即 6 个'0'), 则确认收到起始位, 并将 USART_STS.RXDNE 置 1, 但不会置位 NEF 噪声标志。如果 USART_CTRL1.RXDNEIEN 已置 1, 则产生一个中断。

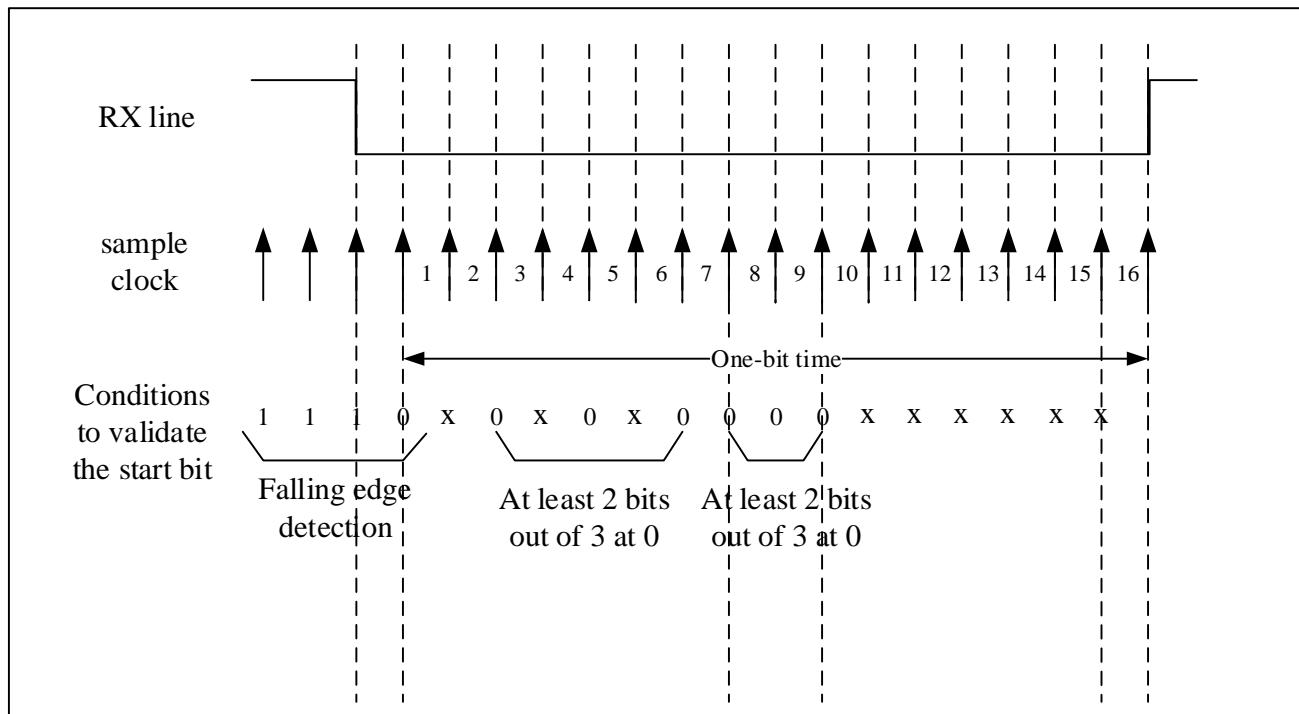
第 3、5、7 位的采样有两个'0', 与此同时, 第 8、9、10 位的采样有两个'0'点, 也确认收到起始位, 但是会置位 NEF 噪声标志位。

第 3、5、7 位的采样有三个'0', 与此同时, 第 8、9、10 位的采样有两个'0'点, 也确认收到起始位, 并置位 NEF 噪声标志位。

第 3、5、7 位的采样有两个'0', 与此同时, 第 8、9、10 位的采样有三个'0'点, 也确认收到起始位, 并置位 NEF 噪声标志位。

如果在第 3、5、7、8、9、10 位的采样值满足不了上面四种要求，USART 接收器认为没有接受到正确的起始位，将退出起始位侦测并回到空闲状态等待下降沿。

图 22-6 起始位检测



22.4.3.2 停止位

停止位长度可通过 USART_CTRL2.STPB[1:0]配置。常规模式下，可配置为 1 位或 2 位。智能卡模式下，可配置为 0.5 位或 1.5 位。

1. 0.5 位停止位（智能卡模式中的数据接收）：不对停止位进行采样。因此，此时不能检测帧错误和断开帧。
2. 1 个停止位：默认情况下通过三个点对 1 个停止位的采样，选择第 8，第 9 和第 10 采样位上进行。
3. 1.5 个停止位（智能卡模式）：智能卡模式下发送数据时，器件必须检查数据是否被正确的发送出去。所以接收器功能块必须被激活（USART_CTRL2.RXEN=1），并且在停止位的发送期间采样数据线上的信号。如果出现校验错误智能卡会在发送方采样 NACK 信号时拉低数据线，表示出现了帧错误。USART_STS.FEF 与 USART_STS.RXDNE 在停止位结束后被置 1。对 1.5 个停止位的采样是在第 16，第 17 和第 18 采样点进行的，可分成两个部分：0.5 个数据位周期，接收器不做任何处理；然后是 1 个数据位周期，接收器对其进行采样。参照图 22.4.14 智能卡模式。
4. 2 个停止位：对 2 个停止位的采样是在第一停止位的第 8，第 9 和第 10 个采样点完成的。如果第一个停止位期间检测到一个帧错误，帧错误标志将被置起。在第一个停止位结束时 USART_STS.RXDNE 标志将被设置。第二个停止位将不会检测帧错误。

22.4.3.3 接收流程

1. 将 USART_CTRL1.UEN 置 1 来使能 USART；
2. 配置波特率、数据长度、校验位、停止位长度、以及根据需要配置相关 DMA；

3. 使能接收器 (USART_CTRL1.RXEN) , 开始起始位检测;
 4. 接收 8 位或 9 位数据, 通过 RX 引脚送往接收移位寄存器, 最低有效位在前;
 5. 当数据由接收移位寄存器送到 RDR 寄存器, USART_STS.RXDNE 被置 1, 表示数据可以被读出。如果 USART_CTRL2.RXNEIEN 已置 1, 将产生一个中断;
 6. 当接收过程中检测到帧错误、噪音或溢出错误, 这样错误标志将被置 1。如果在数据传输过程中 USART_CTRL1.RXEN 被清零, 当前接收数据丢失;
 7. USART_STS.RXDNE 通过对 USART_DAT 寄存器进行读操作清零;
- 在多缓冲器通信模式, USART_STS.RXDNE 通过 DMA 对数据寄存器的读操作清零。
 - 在单缓冲器通信模式, USART_STS.RXDNE 通过软件对数据寄存器的读操作清零。

22.4.3.4 空闲帧检测

当一空闲帧被检测到时, USART_STS.IDLEF 置 1。此时如果 USART_CTRL1.IDLEIEN 已置 1, 将产生一个中断。USART_STS.IDLEF 可通过以下软件操作清零: 先读 USART_STS 寄存器, 再读 USART_DAT 寄存器。

22.4.3.5 断开帧检测

当一断开帧被检测到时, 帧错误标志 USART_STS.FEF 被硬件置 1, 可通过以下软件操作清零: 先读 USART_STS 寄存器, 再读 USART_DAT 寄存器。

22.4.3.6 帧错误

如果在预期的时间内没有接收和识别到停止位, 产生一个帧错误, 标志位 USART_STS.FEF 置 1, 同时无效数据将从移位寄存器送到 USART_DAT 寄存器。在单字节通信时, 没有帧错误中断产生, 因为此时 USART_STS.RXDNE 位同时置 1, 后者将产生中断。在多缓冲器通信情况下, 如果 USART_CTRL3.ERRIEN 已置 1, 将产生一个中断。

22.4.3.7 溢出错误

如果 USART_STS.RXDNE 已被置 1, 而接收移位寄存器又有数据需要送入数据寄存器, 则发生溢出错误, 同时标志位 USART_STS.OREF 硬件置 1。此时数据寄存器中的数据不会丢失, 但移位寄存器中的数据将被覆盖。USART_STS.OREF 可通过以下软件操作清零: 先读 USART_STS 寄存器, 再读 USART_DAT 寄存器。

当产生溢出错误时, 因 USART_STS.RXDNE 已置 1, 将产生一个接收中断。多缓冲器通信模式下, 如果 USART_CTRL3.ERRIEN 已置 1, 将产生一个错误中断。

22.4.3.8 噪声错误

当接收器检测到噪声错误时, USART_STS.NEF 被置 1, 可通过以下软件操作清零: 先读 USART_STS 寄存器, 再读 USART_DAT 寄存器。在单字节通信模式下不会产生噪声中断, 因为此时 USART_STS.RXDNE 也被置 1 并产生接收中断。在多缓冲器通信模式, 如果 USART_CTRL3.ERRIEN 已置 1, 将产生一个错误中断。

表 22-2 噪声检测的数据采样

| 采样值 | NE 状态 | 接收的位 | 数据有效性 |
|-----|-------|------|-------|
|-----|-------|------|-------|

| | | | |
|-----|---|---|----|
| 000 | 0 | 0 | 有效 |
| 001 | 1 | 0 | 无效 |
| 010 | 1 | 0 | 无效 |
| 011 | 1 | 1 | 无效 |
| 100 | 1 | 0 | 无效 |
| 101 | 1 | 1 | 无效 |
| 110 | 1 | 1 | 无效 |
| 111 | 0 | 1 | 有效 |

22.4.4 分数波特率计算

波特率通过 USART_BRCF 寄存器配置，分频系数由整数部分和小数部分组成，同时适用于发送器与接收器。在写入 USART_BRCF 之后，波特率计数器会被波特率寄存器的新值替换。因此，不要在通信过程中改变波特率寄存器的数值。

$$\text{TX / RX 波特率} = f_{\text{PCLK}} / (16 * \text{USARTDIV})$$

其中 f_{PCLK} 为 USART 外设时钟：

- PCLK1 用于 USART2、USART3、UART4、UART5，最高 36MHz
- PCLK2 用于 USART1、UART6、UART7，最高 72MHz.

USARTDIV 为无符号分频系数

22.4.4.1 分频系数 USARTDIV 与 USART_BRCF 寄存器配置

示例 1：

如果 USARTDIV = 27.75，则：

$$\text{DIV_Decimal} = 16 * 0.75 = 12 = 0x0C$$

$$\text{DIV_Integer} = 27 = 0x1B$$

$$\text{因此 USART_BRCF} = 0x1BC$$

示例 2：

如果 USARTDIV = 20.98，则：

$$\text{DIV_Decimal} = 16 * 0.98 = 15.68$$

取最接近的整数 DIV_Decimal = 16 = 0x10，超出可配置范围，因此需要向整数位进位

$$\text{从而 DIV_Integer} = 20 + 1 = 21 = 0x15$$

$$\text{DIV_Decimal} = 0x0$$

$$\text{因此 USART_BRCF} = 0x150$$

示例 3：

如果 USART_BRCF = 0x19B:

DIV_Integer = 0x19 = 25

DIV_Decimal = 0x0B = 11

USARTDIV = $25 + 11/16 = 25.6875$

表 22-3 设置波特率时的误差计算

| 波特率 | | f _{PCLK} =36MHz | | | f _{PCLK} =72MHz | | |
|-----|-------|--------------------------|----------|-------|--------------------------|---------|-------|
| 序号 | Kbps | 实际 | 寄存器设置值 | 误差% | 实际 | 寄存器设置值 | 误差% |
| 1 | 2.4 | 2.4 | 937.5 | 0% | 2.4 | 1875 | 0% |
| 2 | 9.6 | 9.6 | 234.375 | 0% | 9.6 | 468.75 | 0% |
| 3 | 19.2 | 19.2 | 117.1875 | 0% | 19.2 | 234.375 | 0% |
| 4 | 57.6 | 57.6 | 39.0625 | 0% | 57.6 | 78.125 | 0% |
| 5 | 115.2 | 115.384 | 19.5 | 0.15% | 115.2 | 39.0625 | 0% |
| 6 | 230.4 | 230.769 | 9.75 | 0.16% | 230.769 | 19.5 | 0.16% |
| 7 | 460.8 | 461.538 | 4.875 | 0.16% | 461.538 | 9.75 | 0.16% |
| 8 | 921.6 | 923.076 | 2.4375 | 0.16% | 923.076 | 4.875 | 0.16% |
| 9 | 2250 | 2250 | 1 | 0% | 2250 | 2 | 0% |
| 10 | 4500 | 不可能 | 不可能 | 不可能 | 4500 | 1 | 0% |

注意: CPU 的时钟频率越低, 则某一特定波特率的误差也越低。.

22.4.5 USART 接收器容忍时钟的变化

应用中可能会出现发送误差(包括发射端时钟的变化)、接收端波特率误差及振荡器变化、传输线变化(通常由数据上升沿和下降沿时序不一致引起)。这些因素都会影响整个时钟系统的变化。只有当上述四个变化之和小于 USART 接收机的容差时, USART 异步接收机才能正常工作。

正常接收数据时, USART 接收器的容忍度为最大能容忍的变化, 取决于数据位长度的选择, 以及是否使用分数波特率分频系数。

表 22-4 当 DIV_Decimal =0 时, USART 接收器的容忍度

| WL 位 | 认为 NF 是错误 | 不认为 NF 是错误 |
|------|-----------|------------|
| 0 | 3.75% | 4.375% |

| | | |
|---|-------|-------|
| 1 | 3.41% | 3.97% |
|---|-------|-------|

表 22-5 当 DIV_Decimal !=0 时, USART 接收器的容忍度

| WL 位 | 认为 NF 是错误 | 不认为 NF 是错误 |
|------|-----------|------------|
| 0 | 3.33% | 3.88% |
| 1 | 3.03% | 3.53% |

22.4.6 校验控制

通过设置 USART_CTRL1.PCEN 来使能奇偶校验功能。

使能后, 在发送数据时自动生成并发送校验位, 接收数据时对校验位进行检查。

表 22-6 帧格式

| WL 位 | PCEN 位 | USART 帧 |
|------|--------|---------------------------|
| 0 | 0 | 起始位 8 位数据 停止位 |
| 0 | 1 | 起始位 7 位数据 奇偶校验位 停止位 |
| 1 | 0 | 起始位 9 位数据 停止位 |
| 1 | 1 | 起始位 8 位数据 奇偶校验位 停止位 |

偶校验

USART_CTRL1.PSEL 设置为 0, 使能偶校验

偶校验表示一帧数据 (包括校验位) 中'1'的个数为偶数。例如: 数据=11000101, 有 4 个'1', 则发送端偶校验位为'0' (总共 4 个'1')。接收端对数据中'1'个数进行确认: 如果是偶数, 校验通过; 如果是奇数, 表示产生了校验错误, USART_STS.PEF 标志位置 1, 此时如果 USART_CTRL1.PEIVEN 已置 1, 产生一个中断。

奇校验

USART_CTRL1.PSEL 设置为 1, 使能奇校验

奇校验表示一帧数据 (包括校验位) 中'1'的个数为奇数。例如: 数据=11000101, 有 4 个'1', 则发送端奇校验位为'1' (总共 5 个'1')。接收端对数据中'1'个数进行确认: 如果是奇数, 校验通过; 如果是偶数, 表示产生了校验错误, USART_STS.PEF 标志位置 1, 此时如果 USART_CTRL1.PEIVEN 已置 1, 产生一个中断。

22.4.7 DMA 通信

USART 支持 DMA 通信, 此时采用多缓冲模式可达到较高的通信效率。

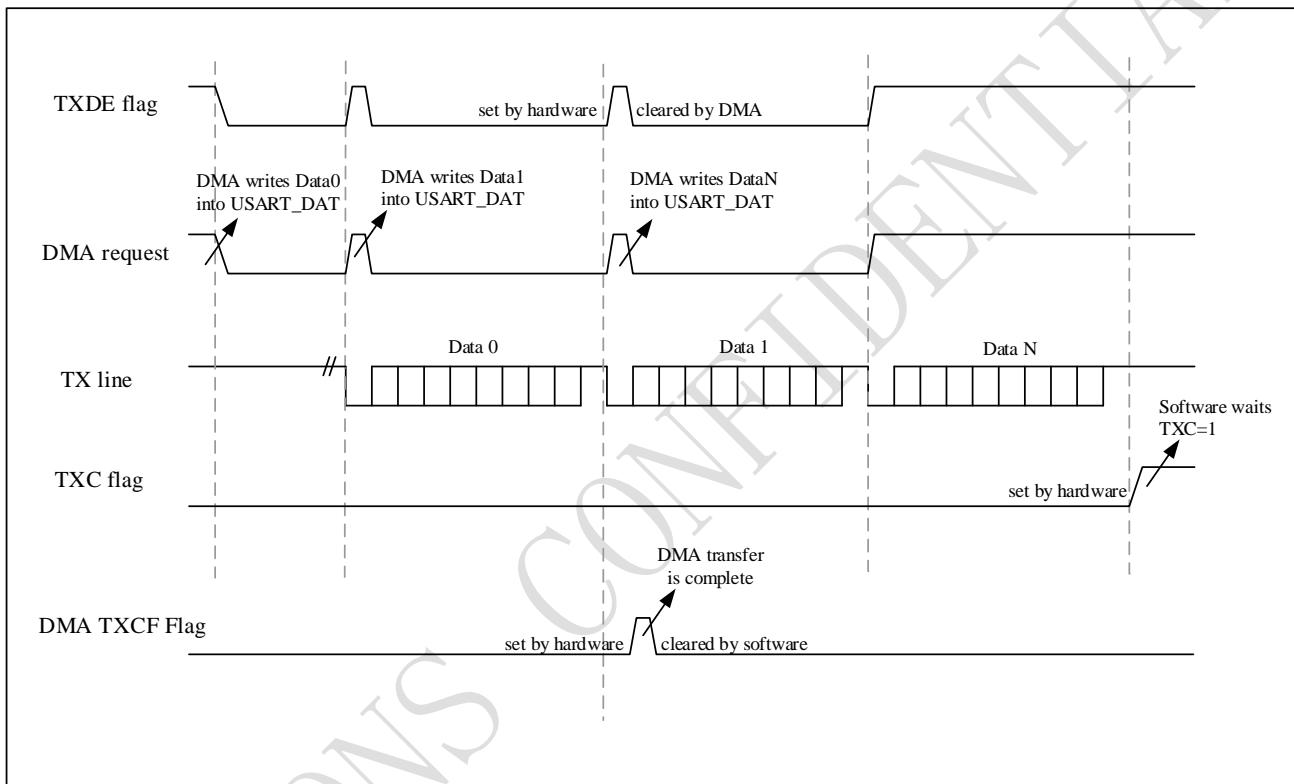
22.4.7.1 DMA 发送

发送器通过将 USART_CTRL3.DMATXEN 置 1 来使能 DMA 发送。当发送移位寄存器为空时 (USART_STS.TXDE=1),, DMA 将数据由 SRAM 送到数据寄存器 USART_DAT。

使用 DMA 发送功能时, 按照以下流程对 DMA 进行配置:

1. 设置 DMA 传输的源地址, DMA 传输时从此地址读取要发送的数据
2. 设置 DMA 传输的目地地址为 USART_DAT 寄存器地址
3. 设置要传输的总的字节数.
4. 设置 DMA 通道优先级、循环模式、地址增加模式、传输数据宽度、中断(传输完成一半还是全部完成时)
5. 激活当前 DMA 通道
6. 传输完成后, 标志位 DMA_INTSTS.TXCFx 被置 1

图 22-7 DMA 发送



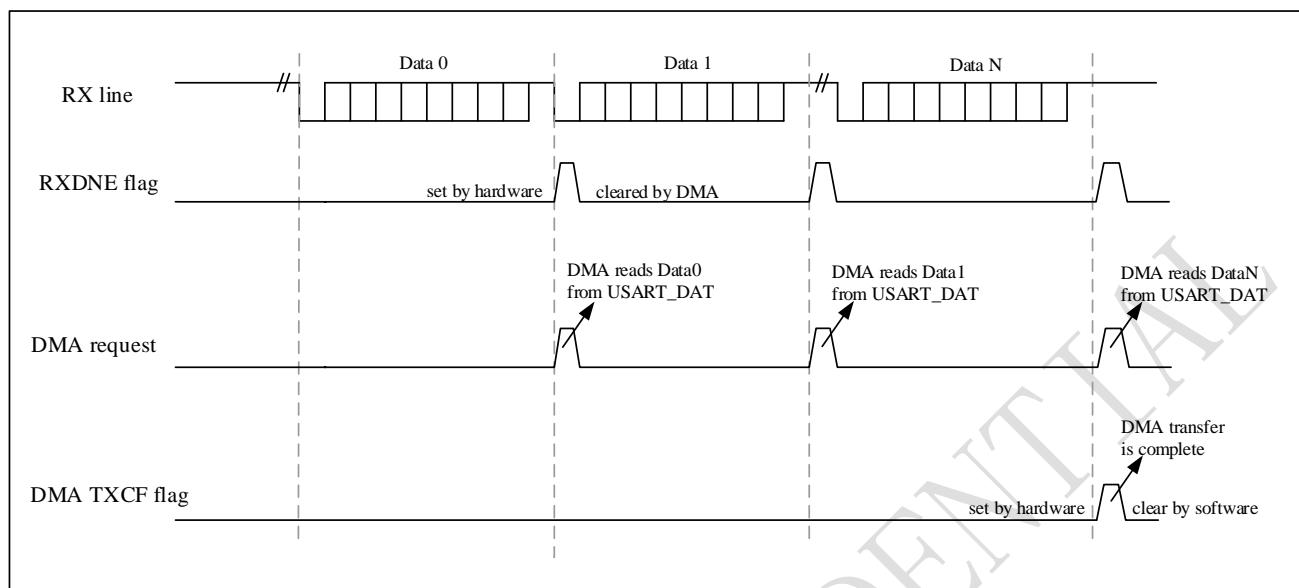
22.4.7.2 DMA 接收

接收器通过将 USART_CTRL3.DMATXEN 置 1 来使能 DMA 接收。当收到 1 字节数据时 (USART_STS.RXDNE=1), DMA 将数据从数据寄存器 USART_DAT 读出数据, 送到 SRAM。

使用 DMA 接收功能时, 按照以下流程对 DMA 进行配置:

1. 设置 DMA 传输的源地址为 USART_DAT 寄存器地址, DMA 传输时从此地址读取要发送的数据
2. 设置 DMA 传输的目地地址, DMA 传输时将数据送到此地址。
3. 设置要传输的总的字节数.
4. 设置 DMA 通道优先级、循环模式、地址增加模式、传输数据宽度、中断(传输完成一半还是全部完成时)
5. 激活当前 DMA 通道

图 22-8 DMA 接收

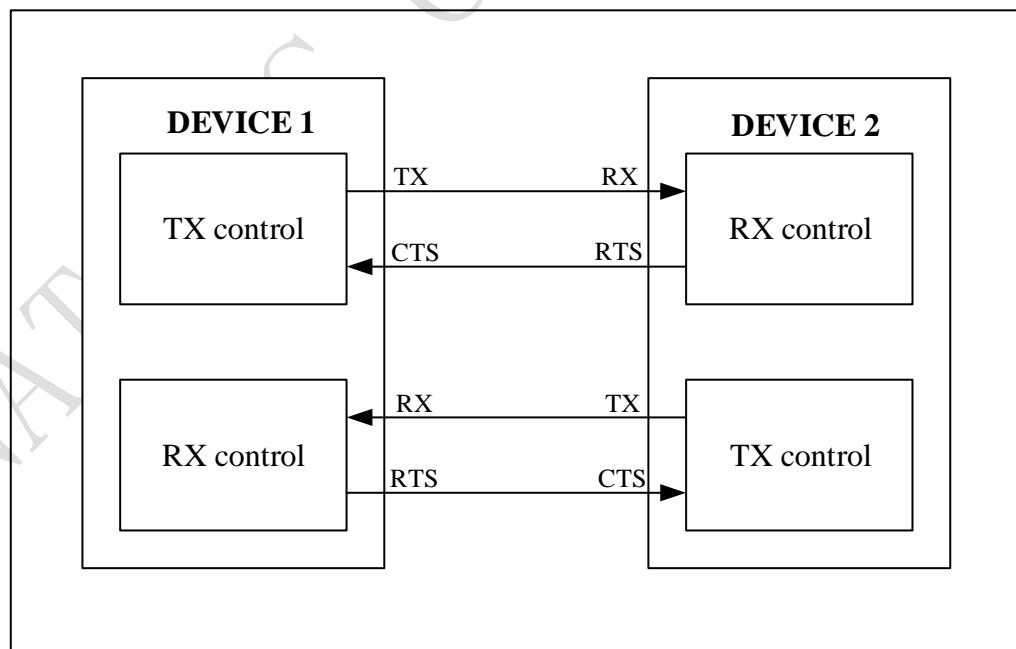


在多缓冲器通信模式，当检测到帧错误、溢出错误、噪声错误时，相应标志位置 1。如果此时 USART_CTRL3.ERRIEN 已置 1，产生一个错误中断。

22.4.8 硬件流控

USART 支持硬件流控，用于协调发送端与接收端时序，避免数据丢失。连接方式见下图。

图 22-9 两个 USART 间的硬件流控制

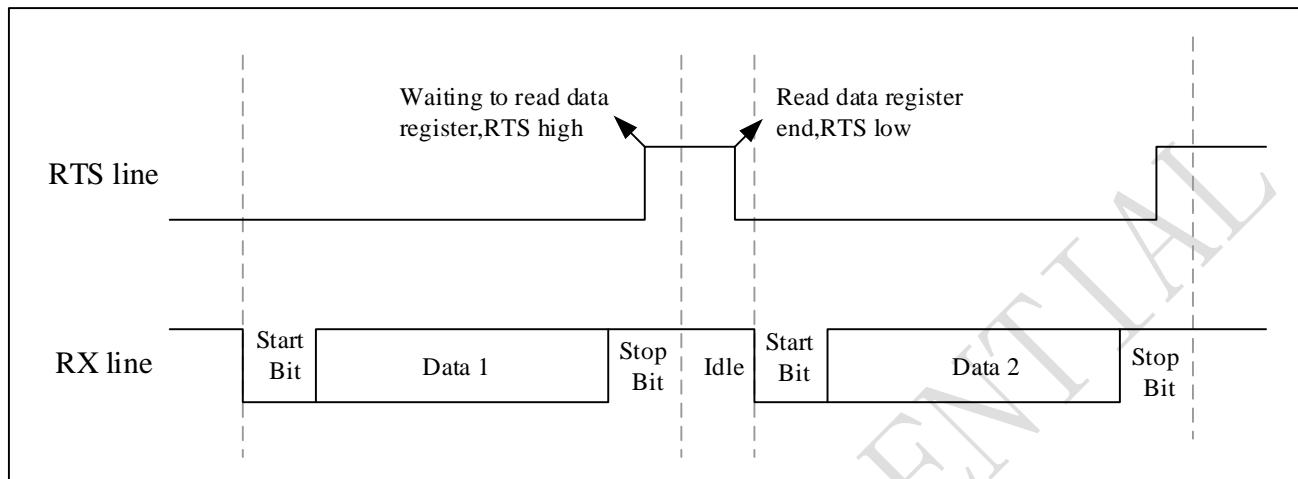


22.4.8.1 RTS 流控制

将 USART_CTRL3.RTSEN 置 1，RTS 流控制使能。通过 nRTS 引脚输出低电平表示当前 USART 的接收器

已准备好接收数据。当接收器收到数据后, nRTS 输出高电平, 提示发送端暂停发送下一帧数据。如果接收器准备后接收下一帧数据, 再次通过 nRTS 输出低电平。

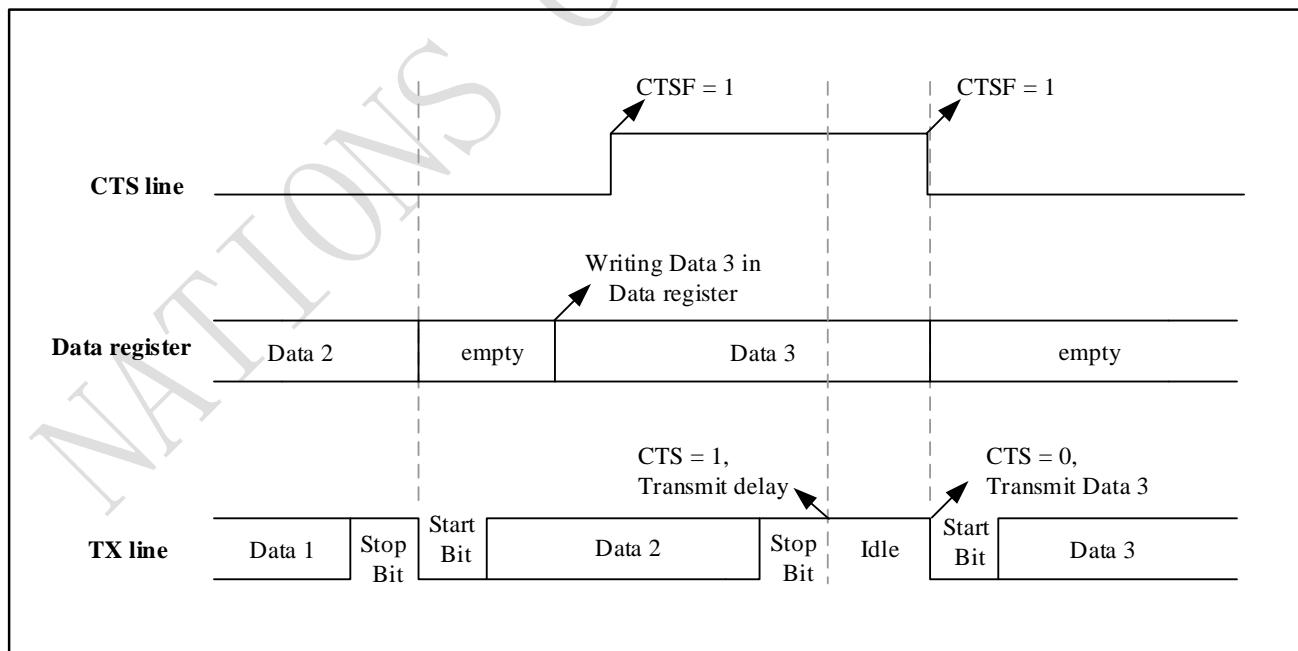
图 22-10 RTS 流控制



22.4.8.2 CTS 流控制

将 USART_CTRL3.CTSEN 置 1, CTS 流控制使能。nCTS 为输入引脚, 用于判断是否能发送数据给其他设备。nCTS 检测到低电平时, 表示可以发送数据给其他设备。如果在数据传输完成后停止发送。如果在 nCTS 无效时写数据到数据寄存器, 数据保持, 直到 nCTS 有效后开始发送。当 nCTS 输入信号状态发生变化时, USART_STS.CTSF 置 1。此时如果 USART_CTRL3.CTSIEN 已置 1, 将产生一个中断。

图 22-11 CTS 流控制



22.4.9 多处理器通信

USART 支持多处理器通信：多个设备同时连接到 USART 进行通信，因此必须判定哪一个设备作为主设备，其他设备自动做为从设备。主机的 TX 引脚直接连接到其他从设备的 RX 引脚，所有从设备的 TX 引脚通过逻辑与的方式合并，再连接到主设备的 RX 引脚。

在多处理器通信模式下，从设备处于静默模式，主设备在需要时通过通过指定方式唤醒某一个从设备，从而从设备可以和主设备进行正常通信。

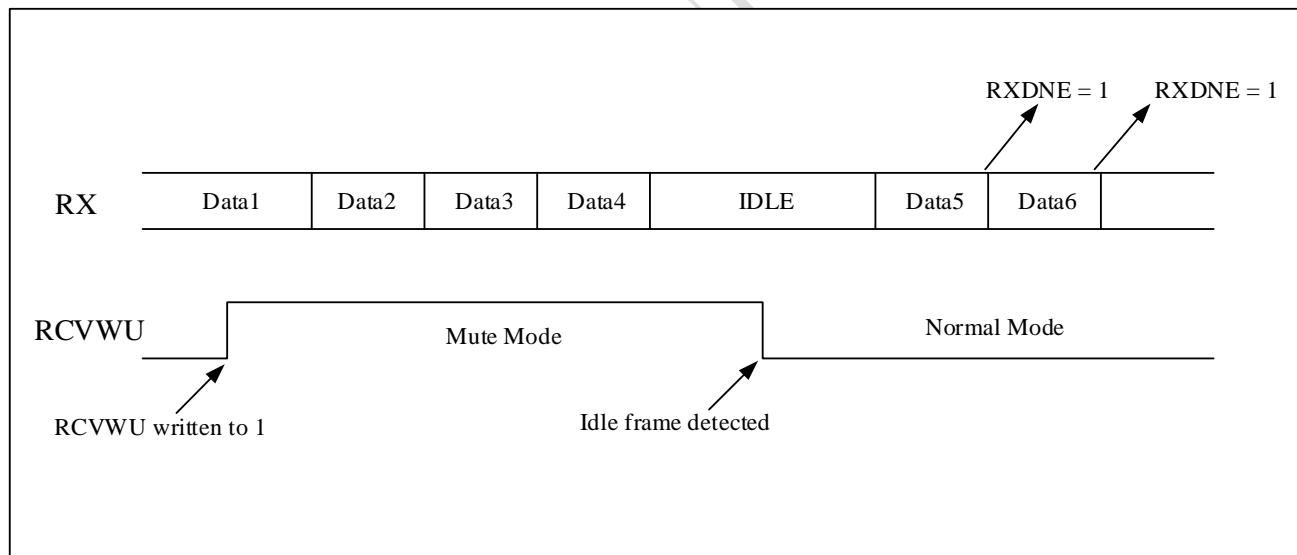
USART 可通过空闲总线检测或地址标识检测的方式从静默模式唤醒。

22.4.9.1 空闲总线检测

空闲总线检测流程如下：

1. 清零 USART_CTRL1.WUM 位，USART 启用空闲总线检测功能。
2. 当 USART_CTRL1.RCVWU 已置 1(可通过硬件自动控制或由在特定条件下由软件配置)，USART 进入静默模式，此时接收状态标志位不会置位，同时接收中断被禁用。
3. 如图 22-12 所示，当检测到空闲帧时，USART 被唤醒，同时 USART_CTRL1.RCVWU 被硬件清零，此时 USART_STS.IDLEF 标志位不会被置 1。

图 22-12 静默模式下的空闲总线检测



22.4.9.2 地址标识检测

当 USART_CTRL1.WUM 置 1 时，USART 启用地址标识检测功能。标识地址通过 USART_CTRL2.ADDR[3:0] 来配置。如果接收的数据最高有效位 (MSB) 为 1，当前数据为地址，低 4 位有效；如果 MSB =0，则当前数据为普通数据。

此模式下，USART 可通过以下方式进入静默模式：

- 当接收器没有数据处理时，可通过软件将 USART_CTRL1.RCVWU 置 1，使 USART 进入静默模式。

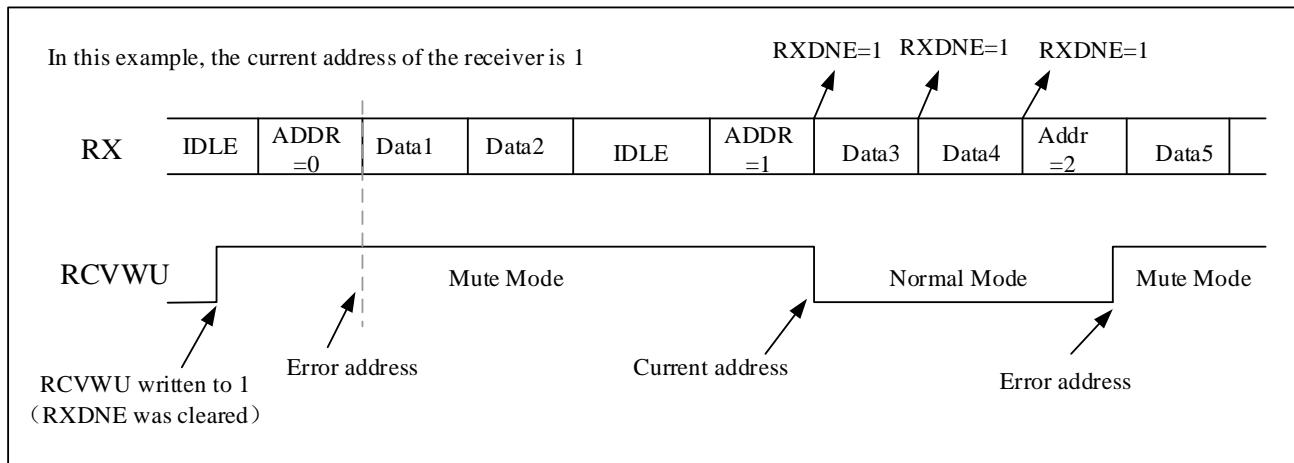
注意：当接收数据寄存器为空时，(USART_SR.RXNE=0)，USART_CTRL1.RCVWU 位可通过软件写 0 或写 1。否则，对 USART_CTRL1.RCVWU 的写操作被忽略。

- 当接收器收到的地址与预设的地址标识不匹配时，USART_CTRL1.RCVWU 由硬件置 1。

静默模式下，所有接收状态标志位不会置位，同时所有接收中断被禁用。

当接收器收到的地址与预设的地址标识相同时，USART 从静默模式唤醒，USART_CTRL1.RCVWU 被硬件清零，同时 USART_STS.RXDNE 位置 1，此时可进行正常的数据传输。

图 22-13 静默模式下的地址标识检测



22.4.10 同步模式

USART 支持同步串行通信模式。同步模式下，USART 只能做为主设备，无法通过外部输入的时钟进行数据收发。通过将 USART_CTRL2.CLKEN 位置 1 来启用同步模式。

注意：要启用同步模式，必须将以下控制位全部清零：USART_CTRL2.LINMEN、USART_CTRL3.SCMEN、USART_CTRL3.HDMEN、USART_CTRL3.IRDAMEN。

22.4.10.1 同步时钟

CK 引脚为同步时钟输出引脚。在总线空闲时、实际数据发送之前、以及发送断开标识时，同步时钟不输出。

同步时钟相位与极性可软件配置，且只能在发送器与接收器都被禁用时配置。

当时钟极性配置为 0 (USART_CTRL2.CLKPOL=0) 时，空闲时 CK 引脚输出低电平；当时钟极性配置为 1 (USART_CTRL2.CLKPOL=1) 时，空闲时 CK 引脚输出高电平。

当相位配置为 0 (USART_CTRL2.CLKPHA=0) 时，数据在第一个时钟沿采样；当相位配置为 1 (USART_CTRL2.CLKPHA=1) 时，数据在第二个时钟沿采样。

在发送起始位或停止位时，CK 引脚保持空闲状态，无时钟不输出。

未发送数据时无法接收同步数据。因为时钟仅在发送器被激活且数据写入 USART_DAT 寄存器时可用。

USART_CTRL2.LBCLK 位控制数据字节的最高有效位 (MSB) 是否有时钟脉冲。此位只能在发送器与接收器都被禁用时配置。当 USART_CTRL2.LBCLK = 1 时，则最后一位数据的时钟脉冲将从 CK 输出；当 USART_CTRL2.LBCLK = 0 时，则最后一位数据的时钟脉冲不从 CK 输出。

22.4.10.2 同步发送

同步模式下的数据发送与异步模式相同，数据从 TX 引脚输出，同时从 CK 引脚输出对应的时钟脉冲。

22.4.10.3 同步接收

同步模式下的数据接收与异步模式不同。数据在 CK 引脚输出的有效时钟沿采样，而不使用过采样。但必须考虑数据建立时间与保持时间 (1/16 数据位周期，具体时间依赖于波特率)。

图 22-14 USART 同步传输示例

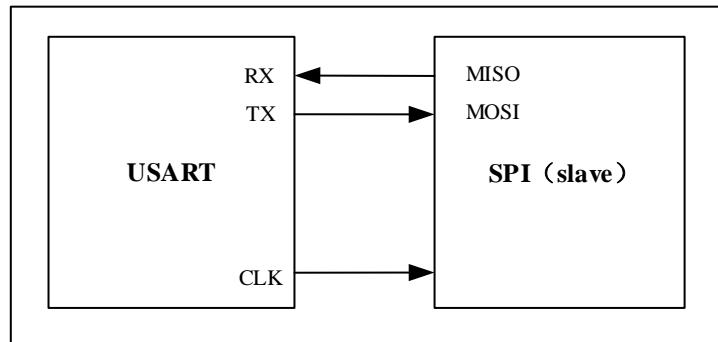


图 22-15 USART 数据时钟时序示例 (WL=0)

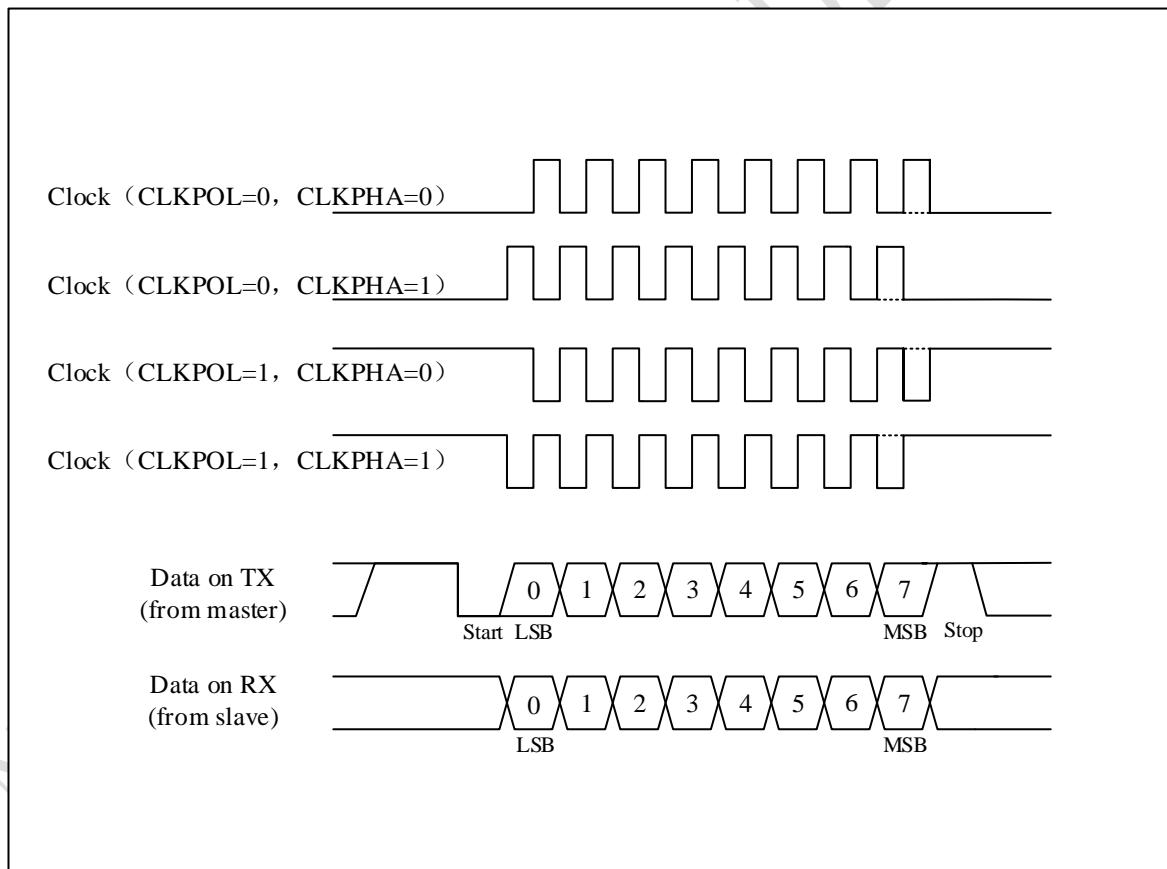


图 22-16 USART 数据时钟时序示例 (WL=1)

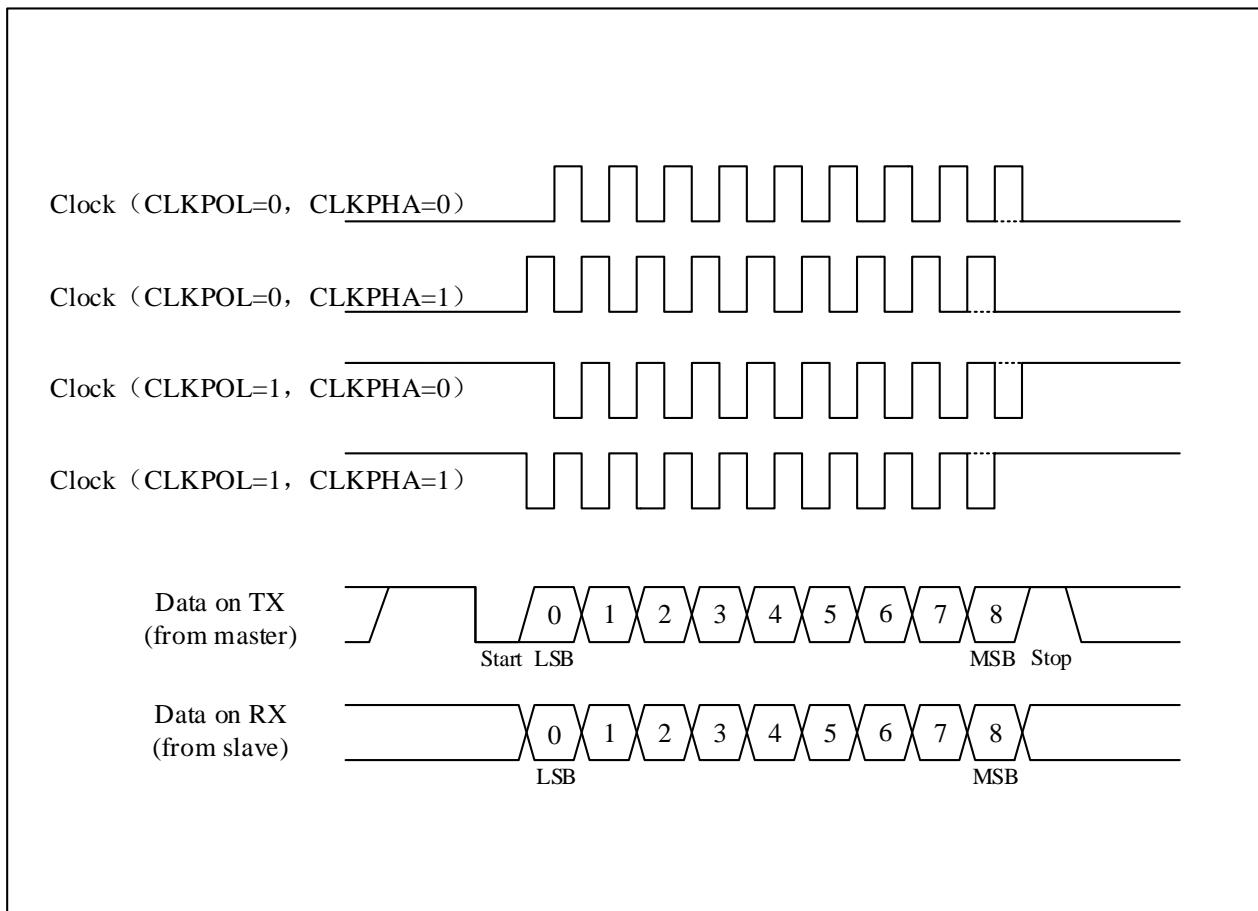
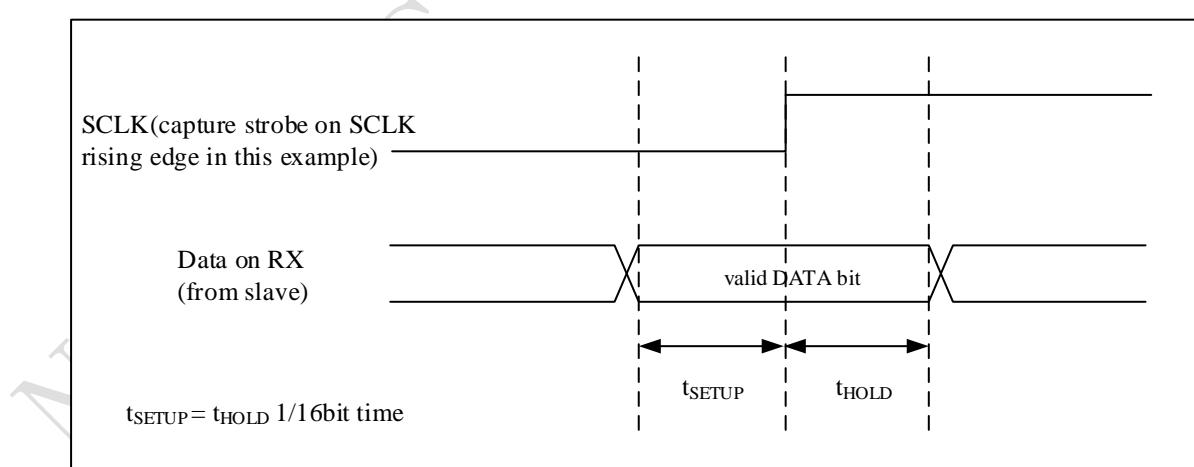


图 22-17 RX 数据采样/保持时间



注意：在智能卡模式下，CK 引脚功能与同步模式不同，有关细节请参考智能卡模式部分。

22.4.11 单线半双工模式

USART 支持单线半双工通信模式，允许数据双方向收发，但同一时间只能单向接收数据或发送数据，数据通信的冲突由软件控制。

通过设置 USART_CTRL3.HDMEN 位来选择单线半双工模式，此时以下控制位必须全部清零： USART_CTRL2. CLKEN 、 USART_CTRL2. LINMEN 、 USART_CTRL3. SCMEN 、 USART_CTRL3.IRDAMEN 。

启用单线半双工通信模式后，TX 引脚与 RX 引脚在芯片内部相连，外部 RX 引脚不再使用。当没有数据发送时，TX 引脚被释放。因此，TX 引脚未被 USART 使用时，必须配置为浮空输入或开漏输出高电平。

22.4.12 串行 IrDA 红外编解码模式

USART 支持 IrDA (Infrared Data Association) SIR ENDEC 规范。

通过设置 USART_CTRL3.IRDAMEN 位来选择是否使用 IrDA 模式。当启用 IrDA 模式时，以下配置位必须全部清零： USART_CTRL2.CLKEN 、 USART_CTRL2.STPB[1:0] 、 USART_CTRL2.LINMEN 、 USART_CTRL3.HDMEN 、 USART_CTRL3.SCMEN 。

通过设置 USART_CTRL3.IRDALP 位，可选择 IrDA 的正常工作模式或低功耗模式。

22.4.12.1 IrDA 正常模式

当 USART_CTRL3.IRDALP=0，IrDA 工作在正常模式。

IrDA 是一个半双工通信接口，因此在发送和接收之间最小要有 10ms 的延时。数据采用反相归零(RZI)调制，即采用红外光源脉冲表示逻辑 0。脉冲宽度规定为一个位周期的 3/16，如图 22-19 所示。最大波特率为 115200bps。

USART 将数据送到 SIR 编码器进行调制后输出。调制后的数据流输出给外部红外发送器进行发送。接收时，先通过外部红外接收器接收数据并解调后，发送到 SIR 解码器，解码后再将数据送给 USART。

发送编码器与解码器输入极性相反。空闲时，编码器输出为低电平，而解码器输入为高电平。编码器输出高脉冲表示逻辑 0，输出低电平作为逻辑 1。解码器输入则与之相反。

当 USART 正在发送数据给 IrDA 编码器时，解码器将忽略数据线上的所有数据。当 USART 正在从解码器接收数据时，发送到编码器的数据也被忽略，不进行编码操作。

脉冲宽度可软件配置。IrDA 规范要求脉冲宽度大于 1.41us。如果脉冲宽度小于 2 个周期，数据被过滤而丢失。PSCV 是在 USART_GTP 寄存器配置的预分频值。

22.4.12.2 IrDA 低功耗模式

当 USART_CTRL3.IRDALP=1，IrDA 工作在低功耗模式。

在低功耗模式下发送数据时，脉冲宽度为 3 倍 PSCV 周期。经 PSCV 分频后的时钟频率最小值为 1.42MHz，典型值为 1.8432MHz，(1.42 MHz < 时钟频率 < 2.12 MHz)。

接收数据时，有效低电平信号宽度必须大于 2 个 PSCV 周期。

图 22-18 IrDA SIR ENDEC-框图

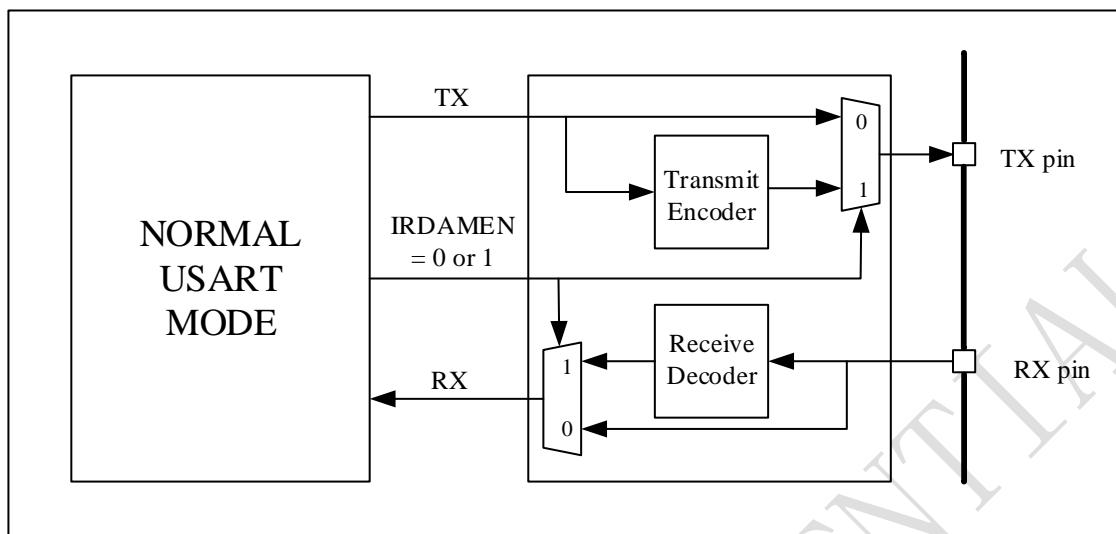
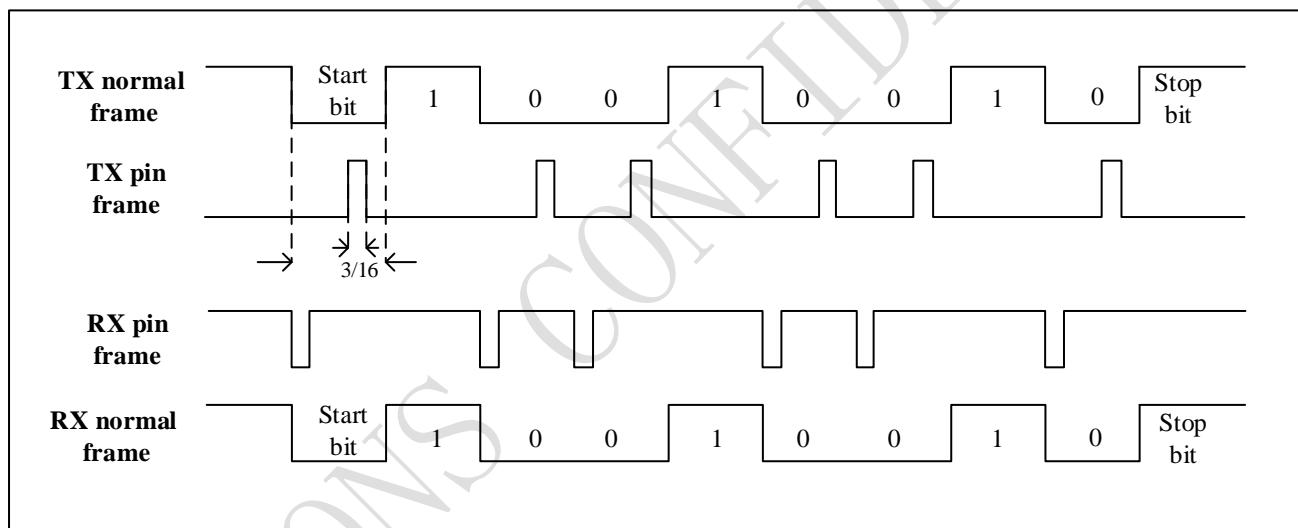


图 22-19 IrDA 数据调制 (3/16)-正常模式



22.4.13 LIN 模式

USART 支持 LIN (Local interconnection Network)模式，支持作为主机时发送同步断开帧，也支持作为从机检测断开帧。通过设置 USART_CTRL2.LINMEN 位来使能 LIN 模式。.

注意 当使用 LIN 模式时，以下配置位必须全部被清零：USART_CTRL2.STPB[1:0]、USART_CTRL2.CLKEN、USART_CTRL3.SCMEN、USART_CTRL3.HDMEN、USART_CTRL3.IRDAMEN。

22.4.13.1 LIN 发送

在 LIN 模式下发送数据时，数据长度只能配置为 8 位。将 USART_CTRL1.SDBRK 置 1 将发送一个 13 位“0”断开帧，并插入一个停止位。

22.4.13.2 LIN 接收

当总线空闲或数据传输过程中均可检测断开帧。断开帧检测机制独立于 USART 接收器。

通过配置 USART_CTRL2.LINBDL 位，断开帧检测有效低电平位可选择 10 位或 11 位。

当接收器检测到一个起始位，采样电路在每个位的第 8, 9, 10 个过采样时钟点进行过采样。如果 10 个或 11 个位都是'0'，并且又跟着一个定界符，表示检测到一个断开帧，USART_STS.LINBDF 位置 1。在确认为断开帧前，必须检测定界符，意味着 RX 线已经回归空闲状态(高电平)。此时如果 USART_CTRL2.LINBDIEN 已置 1，将产生一个中断。

如果在 10 个或 11 个位前收到了'1'，当前断开帧检测被取消，并重新寻找起始位。

图 22-20 LIN 模式下的断开检测（11 位断开帧长度-设置了 LINBDL 位）

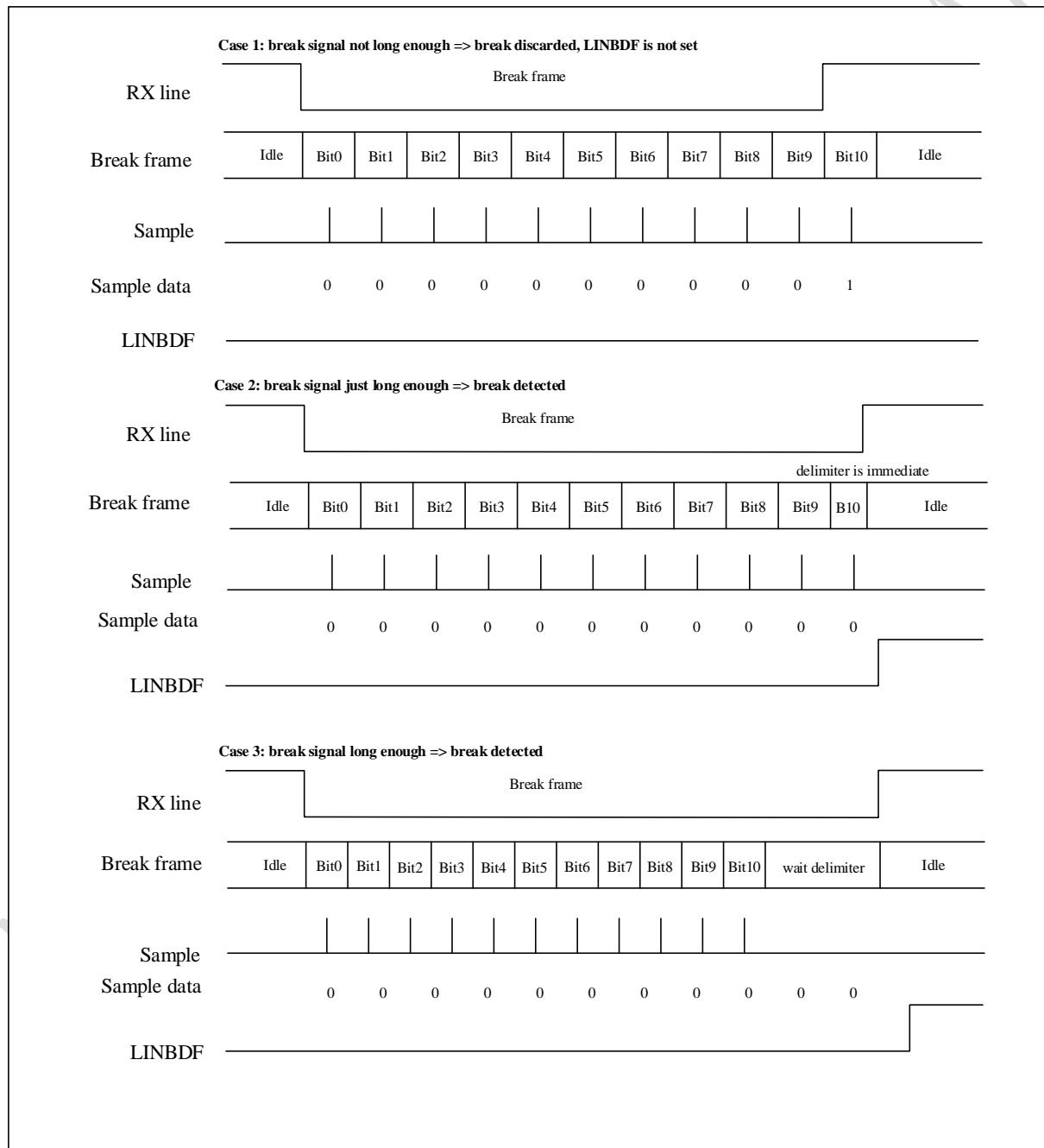
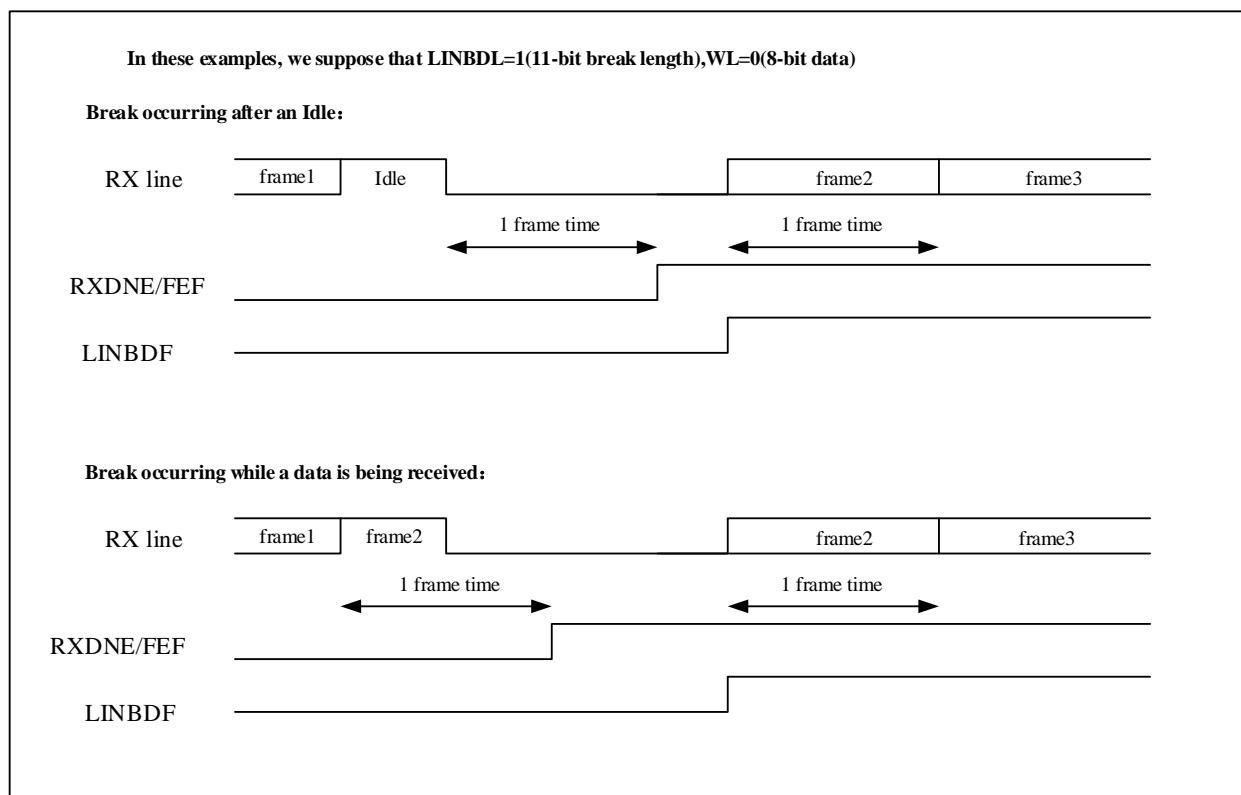


图 22-21 LIN 模式下的断开检测与帧错误的检测



22.4.14 智能卡模式 (ISO7816)

USART 支持智能卡规范，支持 ISO7816-3 标准中定义的智能卡协议。

通过配置 USART_CTRL3.SCMEN 位来选择是否启用智能卡模式。使用智能卡模式时，以下配置位必须全部清零：USART_CTRL2.LINMEN、USART_CTRL3.HDMEN、USART_CTRL3.IRDAMEN。

智能卡模式中，USART 通过 CK 引脚提供时钟，时钟频率通过预分频寄存器配置，配置范围为 $fCK/2$ 至 $fCK/62$ ，其中 fCK 为当前 USART 输入外设时钟。

智能卡模式下，接收数据时可采用 0.5 位或 1.5 位停止位，但发送数据时停止位长度只能配置为 1.5 位。因此建议在发送和接收时均使用 1.5 个停止位，以避免在 2 种停止位长度配置间频繁切换。

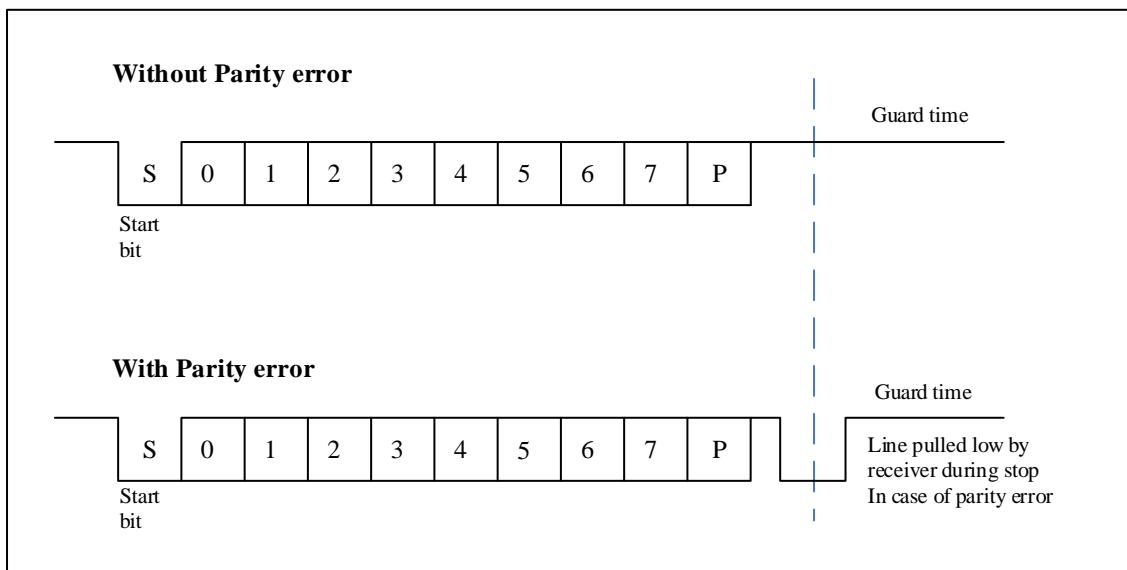
智能卡模式下，数据长度必须配置为 8 位，且校验位需要配置。

当接收器检测到一个校验错误时，在停止位后将数据发送线拉低一个波特时钟作为 NACK 信号 (USART_CTRL3.SCNAK 位置 1 时)，同时在发送端产生一个帧错误 (发送端停止位为 1.5 位)。

当发送器接收到来自接收器的 NACK 信号 (帧错误) 时，它不会将 NACK 作为起始位 (根据 ISO 协议，接收到的 NACK 的持续时间可以是 1 或 2 个波特时钟周期)。

下图为有无校验错误时的两种时序示例。

图 22-22 ISO7816-3 异步协议



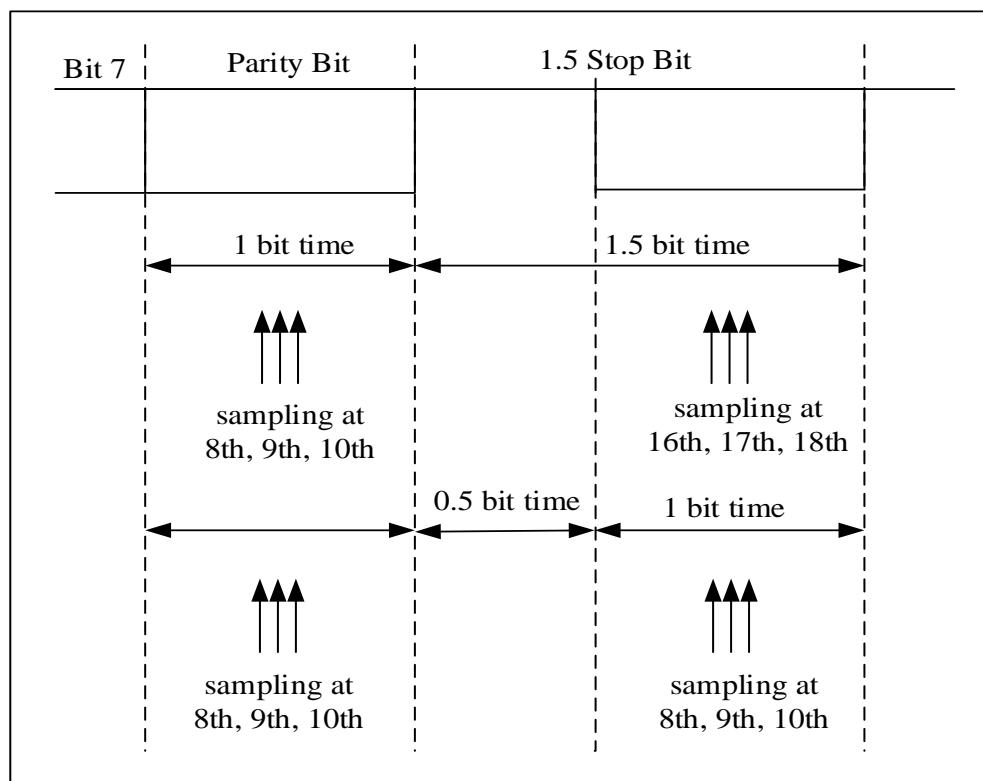
在智能卡模式下，不支持断开帧。如果接收到断开帧，视为一个带帧错误的 00h 数据帧处理。

在普通模式下，数据在下一个波特时钟从发送移位寄存器移出，而在智能卡模式下，数据发送比起普通模式至少延迟 1/2 个波特时钟。

普通模式下，当数据帧发送完并且 USART_STS.TXDE=1 时 USART_STS.TXC 置 1。在智能卡模式下，数据发送完且保护时间达到预设值（USART_GTP.GTV[7:0]）时，USART_STS.TXC 位才被置 1，且 USART_STS.TXC 标志的清零不受智能卡模式影响。

下图为 USART 采样 NACK 信号示意图。

图 22-23 使用 1.5 停止位检测奇偶检验错误



22.5 中断请求

USART 的各种中断事件是逻辑或的关系。如果某个事件对应的中断使能位已置 1, 将产生一个相应的中断。但同一个时间只产生一个中断请求。

表 22-7 USART 中断请求

| 中断函数 | 中断事件 | 事件标志 | 使能 |
|------------|--------------------------------------|--------------|-----------------------|
| USART 全局中断 | 发送数据寄存器空 | TXDE | TXDEIEN |
| | CTS 标志 | CTSF | CTSIEN |
| | 发送完成 | TXC | TXCIEN |
| | 接收数据就绪可读 | RXDNE | RXDNEIEN |
| | 检测到数据溢出 | ORERR | |
| | 检测到空闲线路 | IDLEF | IDLEIEN |
| | 奇偶检验错 | PEF | PEIEN |
| | 断开标志 | LINBDF | LINBDIEN |
| | 噪声标志, 多缓冲通信中的溢出错误和帧错误 ⁽¹⁾ | NEF/OREF/FEF | ERRIEN ⁽¹⁾ |

(1) 仅当使用 DMA 接收数据(USART_CTRL3.DMARXEN=1)时，才使用这个标志位。

22.6 模式配置

表 22-8 USART 模式设置⁽¹⁾

| 通信模式 | USART1 | USART2 | USART3 | UART4 | UART5 | UART6 | UART7 |
|-----------|--------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|
| 异步模式 | Y | Y | Y | Y | Y | Y | Y |
| 多处理器 | Y | Y | Y | Y | Y | Y | Y |
| LIN | Y | Y | Y | Y | Y | Y | Y |
| 同步模式 | Y | Y | Y | N | N | N | N |
| 单线模式(半双工) | Y | Y | Y | Y | Y | Y | Y |
| 智能卡模式 | Y | Y | Y | N | N | N | N |
| IrDA 红外模式 | Y | Y | Y | Y | Y | Y | Y |
| DMA 通讯模式 | Y | Y | Y | Y | Y | Y | Y |
| 硬件流控模式 | Y | Y | Y | N | N | N | N |

(1) Y = 支持该模式, N = 不支持该模式

22.7 USART 寄存器

22.7.1 USART 寄存器总览

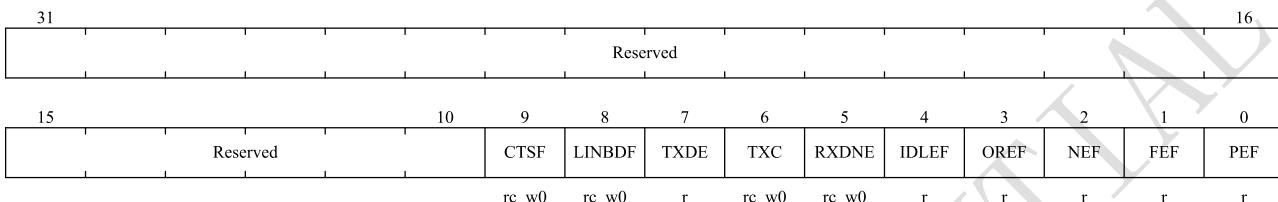
表 22-9 USART 寄存器总览

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--------|-------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Offset | Register | 31 | 30 | 29 | 28 | 27 | 26 | 25 | 24 | 23 | 22 | 21 | 20 | 19 | 18 | 17 | 16 | 15 | 14 | 13 | 12 | 11 | 10 | 9 | 8 | 7 | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | 0 | |
| | Reset Value | | | | | | | | | | | | | | | | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

22.7.2 USART 状态寄存器 (USART_STS)

偏移地址: 0x00

复位值: 0x0000 00C0



| 位域 | 名称 | 描述 |
|-------|----------|---|
| 31:10 | Reserved | 保留, 必需保持复位值。 |
| 9 | CTSF | CTS 标志 (CTS flag)。 如果设置了 USART_CTRL3.CTSEN 位, 当 nCTS 输入变化时, 该位由硬件置位。如果设置了 USART_CTRL3.CTSIEN 位, 将产生中断。 该位由软件清 0。 0: nCTS 状态线没有变化。 1: nCTS 状态线发生变化。 注意: 该位对 UART4/5/6/7 无效。 |
| 8 | LINBDF | LIN 断开检测标志 (LIN break detection flag)。 如果设置了 USART_CTRL2.LINMEN 位, 当检测到 LIN 断开, 该位由硬件置位。如果 USART_CTRL2.LINBDIEN 被置位时, 将产生中断。 该位由软件清 0。 0: 没有检测到 LIN 断开字符。 1: 检测到 LIN 断开字符。 |
| 7 | TXDE | 发送数据缓冲区空 (Transmit data register empty)。 上电复位或待发送数据已发送至移位寄存器后, 该位置 1。 USART_CTRL1.TXDEIEN 被置位将产生中断。 该位在软件将待发送数据写入 USART_DAT 时被清 0。 0: 发送数据缓冲区不为空。 1: 发送数据缓冲区空。 |
| 6 | TXC | 发送完成 (Transmission complete)。 上电复位后, 该位被置 1。如果 USART_STS.TXDE 置位, 在当前数据发送完成时该位置 1。 USART_CTRL1.TXCIEN 被置位将产生中断。 该位由软件清 0。 0: 发送没有完成。 1: 发送完成。 |
| 5 | RXDNE | 读数据缓冲区非空 (Read data register not empty)。 当读数据缓冲区接收到来自移位寄存器的数据时, 该位置 1。当寄存器 |

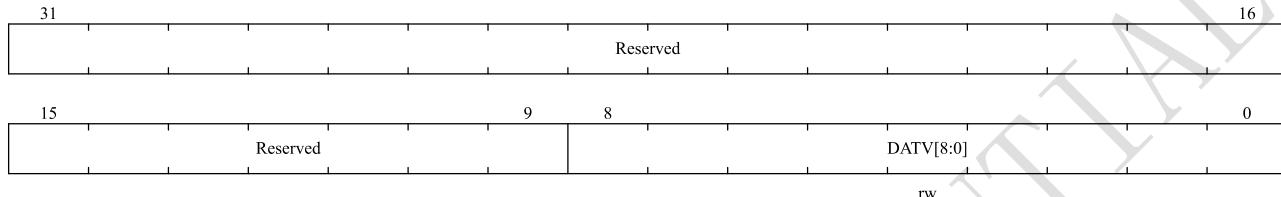
| 位域 | 名称 | 描述 |
|----|-------|--|
| | | <p>USART_CTRL1.RXDNEIEN 位被置位, 将会有中断产生。 软件可以通过对该位写 0 或读 USART_DAT 寄存器来将该位清 0。 0: 读数据缓冲区为空。 1: 读数据缓冲区不为空。</p> |
| 4 | IDLEF | <p>空闲线检测标志 (IDLE line detected)。 在一个帧时间内, 在 RX 引脚检测到空闲状态, 该位置 1。当寄存器 USART_CTRL1.IDLEIEN 位被置位, 将会有中断产生。 软件先读 USART_STS, 再读 USART_DAT 可清除该位。 0: 未检测到空闲帧。 1: 检测到空闲帧。 注意: IDLEF 位不会再次被置高直到 RXDNE 位被置起 (即又检测到一次空闲总线)。</p> |
| 3 | OREF | <p>溢出错误 (Overrun error)。 在 RXDNE 置位的情况下, 如果 USART_DAT 寄存器接收到来自移位寄存器的数据, 该位置 1。当寄存器 USART_CTRL3.ERRIEN 位被置位, 将会有中断产生。 软件先读 USART_STS, 再读 USART_DAT 可清除该位。 0: 没有检测到溢出错误。 1: 检测到溢出错误。</p> |
| 2 | NEF | <p>噪声错误标志 (Noise error flag)。 在接收到的帧检测到噪音时, 由硬件对该位置位。由软件序列对其清零 (先读 USART_STS, 再读 USART_DAT)。 0: 没检测到噪音错误。 1: 检测到噪音错误。 注意: 该位不会产生中断, 因为它和 USART_STS.RXDNE 一起出现, 硬件会在设置 USART_STS.RXDNE 标志时产生中断。在多缓冲区通信模式下, 如果设置了 USART_CTRL3.ERRIEN 位, 则设置 NEF 标志时会产生中断。</p> |
| 1 | FEF | <p>帧错误 (Framing error)。 当检测到同步错位, 过多的噪音或者检测到断开符, 该位被硬件置位。由软件序列将其清零 (先读 USART_STS, 再读 USART_DAT)。 0: 未检测到帧错误。 1: 检测到帧错误或者断开帧 (break frame)。 注意: 该位不会产生中断, 因为它和 USART_STS.RXDNE 一起出现, 硬件会在设置 USART_STS.RXDNE 标志时产生中断。如果当前传输的数据既产生了帧错误, 又产生了过载错误, 硬件还是会继续该数据的传输, 并且只设置 OREF 标志位。 在多缓冲区通信模式下, 如果设置了 USART_CTRL3.ERRIEN 位, 则设置 FEF 标志时会产生中断。</p> |
| 0 | PEF | <p>校验错误 (Parity error)。 当接收到的数据帧校验位与预期校验值不同时, 该位置位。 软件先读 USART_STS, 再读 USART_DAT 可清除该位。 0: 没检测到校验错误。</p> |

| 位域 | 名称 | 描述 |
|----|----|-------------|
| | | 1: 检测到校验错误。 |

22.7.3 USART 数据寄存器(USART_DAT)

偏移地址: 0x04

复位值: 未定义 (不确定值)



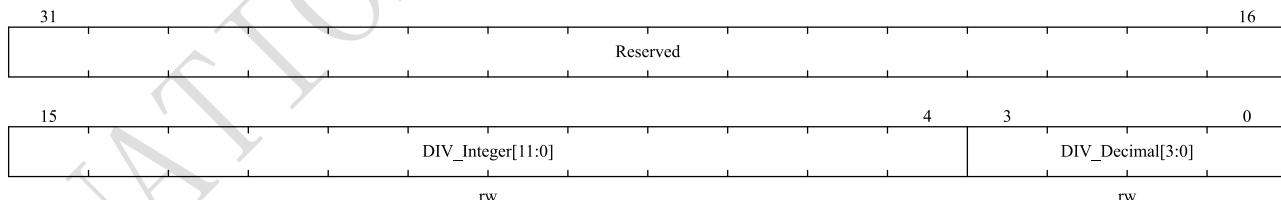
| 位域 | 名称 | 描述 |
|------|-----------|---|
| 31:9 | Reserved | 保留, 必需保持复位值。 |
| 8:0 | DATV[8:0] | <p>数据值 (Data value)</p> <p>包含了发送或接收的数据; 软件可以通过写这些位来改变发送数据, 或读这些位的值来获取接收数据。</p> <p>如果使能了奇偶校验, 当发送数据被写入寄存器, 数据的最高位 (第 7 位或第 8 位取决于 USART_CTRL1.WL 位) 将被校验位取代。</p> |

22.7.4 USART 波特率配置寄存器 (USART_BRCF)

偏移地址: 0x08

复位值: 0x0000 0000

注意: USART_CTRL1.UEN=1 时, 不能写该寄存器; 如果 USART_CTRL1.TXNE 或 USART_CTRL1.RXNE 被分别禁止, 波特计数器停止计数。



| 位域 | 名称 | 描述 |
|-------|--------------------|--------------|
| 31:16 | Reserved | 保留, 必需保持复位值。 |
| 15:4 | DIV_Integer [11:0] | 波特率分频器的整数部分。 |
| 3:0 | DIV_Decimal[3:0] | 波特率分频器的小数部分。 |

22.7.5 USART 控制寄存器 1(USART_CTRL1)

偏移地址: 0x0C

复位值: 0x0000 0000

| | | | | | | | | | | | | | | | | |
|----------|----------|----|-----|------|------|-------|----------|---------|-----------|----------|------|------|-------|-------|----|----|
| 31 | Reserved | | | | | | | | | | | | | | | 16 |
| 15 | 14 | 13 | 12 | 11 | 10 | 9 | 8 | 7 | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | 0 | |
| Reserved | UEN | WL | WUM | PCEN | PSEL | PEIEN | TXDE IEN | TXC IEN | RXDNE IEN | IDLE IEN | TXEN | RXEN | RCVWU | SDBRK | | |
| | rw | rw | rw | rw | rw | rw | rw | rw | rw | rw | rw | rw | rw | rw | rw | |

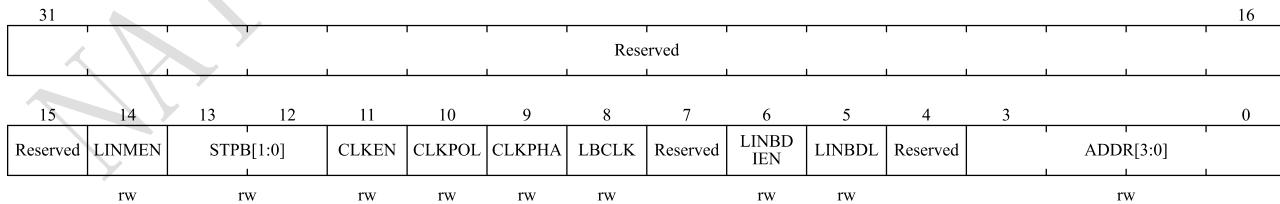
| 位域 | 名称 | 描述 |
|-------|----------|---|
| 31:14 | Reserved | 保留, 必需保持复位值。 |
| 13 | UEN | <p>USART 使能 (USART enable)。</p> <p>当该位被清零, 在当前字节传输完成后 USART 的分频器和输出停止工作, 以减少功耗。该位由软件设置和清零。</p> <p>0: USART 禁用。</p> <p>1: USART 使能。</p> |
| 12 | WL | <p>字长 (Word length)。</p> <p>0: 8 数据位。</p> <p>1: 9 数据位。</p> <p>注意: 在数据传输过程中 (发送或者接收时), 不能修改这个位。</p> |
| 11 | WUM | <p>从静默模式唤醒方法 (Wake up mode)。</p> <p>0: 空闲帧唤醒。</p> <p>1: 地址标识唤醒。</p> |
| 10 | PCEN | <p>校验控制使能 (Parity control enable)。</p> <p>0: 校验控制禁用。</p> <p>1: 校验控制被使能。</p> |
| 9 | PSEL | <p>校验模式 (Parity selection)。</p> <p>0: 偶校验。</p> <p>1: 奇校验。</p> |
| 8 | PEIEN | <p>校验错误中断使能 (PE interrupt enable)。</p> <p>如果该位置 1, USART_STS.PEF 被置位时产生中断。</p> <p>0: 校验错误中断禁用。</p> <p>1: 校验错误中断使能。</p> |
| 7 | TXDEIEN | <p>发送缓冲区空中断使能 (TXDE interrupt enable)。</p> <p>如果该位置 1, USART_STS.TXDE 被置位时产生中断。</p> <p>0: 发送缓冲区空中断禁止。</p> <p>1: 发送缓冲区空中断使能。</p> |
| 6 | TXCIEN | <p>发送完成中断使能 (Transmission complete interrupt enable)。</p> <p>如果该位置 1, USART_STS.TXC 被置位时产生中断。</p> <p>0: 发送完成中断禁用。</p> <p>1: 发送完成中断使能。</p> |
| 5 | RXDNEIEN | <p>读数据缓冲区非空中断和过载错误中断使能 (RXDNE interrupt enable)。</p> <p>如果该位置 1, USART_STS.RXDNE 或 USART_STS.OREF 被置位时产生中断。</p> |

| 位域 | 名称 | 描述 |
|----|---------|---|
| | | 0: 读数据缓冲区非空中断和过载错误中断禁用。 1: 读数据缓冲区非空中断和过载错误中断使能。 |
| 4 | IDLEIEN | IDLE 线检测中断使能 (IDLE interrupt enable)。 如果该位置 1, USART_STS.IDLEF 被置位时产生中断。 0: IDLE 线检测中断禁用。 1: IDLE 线检测中断禁用使能。 |
| 3 | TXEN | 发送器使能 (Transmitter enable)。 0: 发送器禁用。 1: 发送器使能。 |
| 2 | RXEN | 接收器使能 (Receiver enable)。 0: 接收器禁用。 1: 接收器使能。 |
| 1 | RCVWU | 接收器从静默模式中唤醒 (Receiver wakeup) 软件可以通过将该位置 1 使得 USART 进入静默模式, 将该位清 0 唤醒 USART。 空闲帧唤醒模式下 (USART_CTRL1.WUM=0), 当检测到空闲帧时, 该位由硬件清 0。地址标识唤醒模式下 (USART_CTRL1.WUM=1), 当接收到一个地址匹配帧时, 该位由硬件清 0; 或接收到一个地址非匹配帧时, 由硬件置 1。 0: 接收器处于普通工作模式。 1: 接收器处于静默模式。 |
| 0 | SDBRK | 发送断开帧 (Send break)。 软件通过将该位置 1 发送断开帧。 断开帧传输结束由硬件清 0 该位。 0: 没有发送断开帧。 1: 发送断开帧。 |

22.7.6 USART 控制寄存器 2(USART_CTRL2)

偏移地址: 0x10

复位值: 0x0000 0000



| 位域 | 名称 | 描述 |
|-------|----------|--|
| 31:15 | Reserved | 保留, 必需保持复位值。 |
| 14 | LINMEN | LIN 模式使能 (LIN mode enable) 0: LIN 模式禁用 1: LIN 模式使能 |

| 位域 | 名称 | 描述 |
|-------|-----------|---|
| 13:12 | STPB[1:0] | <p>停止位长 (STOP bits)。</p> <p>00: 1 停止位。</p> <p>01: 0.5 停止位。</p> <p>10: 2 停止位。</p> <p>11: 1.5 停止位。</p> <p>注意: 对于 UART4/5/6/7, 只有1位停止位和2位停止位是有效的。</p> |
| 11 | CLKEN | <p>时钟使能 (Clock enable)</p> <p>0: CK 引脚禁用</p> <p>1: CK 引脚使能</p> <p>注意: 该位对 UART4/5/6/7 无效。</p> |
| 10 | CLKPOL | <p>时钟极性 (Clock polarity)。</p> <p>该位用来设定在同步模式下 CK 引脚的极性。</p> <p>0: CK 引脚不对外发送时保持为低电平。</p> <p>1: CK 引脚不对外发送时保持为高电平。</p> <p>注意: 该位对 UART4/5/6/7 无效。</p> |
| 9 | CLKPHA | <p>时钟相位 (Clock phase)。</p> <p>该位用来设定在同步模式下 CK 引脚的相位。</p> <p>0: 在首个时钟边沿采样第一个数据。</p> <p>1: 在第二个时钟边沿采样第一个数据。</p> <p>注意: 该位对 UART4/5/6/7 无效。</p> |
| 8 | LBCLK | <p>最后一位时钟脉冲 (Last bit clock pulse)。</p> <p>该位用来设定在同步模式下是否在 CK 引脚上输出最后发送的那个数据字节 (MSB) 对应的时钟脉冲。</p> <p>0: 最后一位数据的时钟脉冲不从 CK 输出。</p> <p>1: 最后一位数据的时钟脉冲会从 CK 输出。</p> <p>注意: 该位对 UART4/5/6/7 无效。</p> |
| 7 | Reserved | 保留, 必需保持复位值。 |
| 6 | LINBDIEN | <p>LIN 断开帧检测中断使能 (LIN break detection interrupt enable)。</p> <p>如果该位置 1, 当 USART_STS.LINBDF 被置位时将产生中断。</p> <p>0: 断开信号检测中断禁用</p> <p>1: 断开信号检测中断使能</p> |
| 5 | LINBDL | <p>LIN 断开帧检测长度 (LIN break detection length)。</p> <p>该位用来设定在断开帧长度。</p> <p>0: 10 位</p> <p>1: 11 位</p> <p>注意: LINBDL 可用于 LIN 模式及其他模式下的断开帧的检测长度控制, 且检测长度和 LIN 模式相同。</p> |
| 4 | Reserved | 保留, 必需保持复位值。 |
| 3:0 | ADDR[3:0] | <p>USART 地址。</p> <p>在多处理器通信下的静默模式中使用的, 使用地址标识来唤醒某个 USART 设备。</p> <p>地址标识唤醒模式下 (USART_CTRL1.WUM=1), 如果接收到的数据帧低四位与</p> |

| 位域 | 名称 | 描述 |
|----|----|---|
| | | ADDR[3:0]值不相等, USART 就会进入静默模式; 如果接收到的数据帧低四位与 ADDR[3:0]值相等, USART 就会被唤醒。 |

22.7.7 USART 控制寄存器 3(USART_CTRL3)

偏移地址: 0x14

复位值: 0x0000 0000

| | | | | | | | | | | | | | | | |
|----|----------|----|---------|-------|-------|----------|----------|--------|---------|--------|---------|----------|---------|---|----|
| 31 | Reserved | | | | | | | | | | | | | | 16 |
| 15 | Reserved | 11 | CTS IEN | CTSEN | RTSEN | DMA TXEN | DMA RXEN | SC MEN | SC NACK | HDM EN | IRDA LP | IRDA MEN | ERR IEN | 1 | 0 |

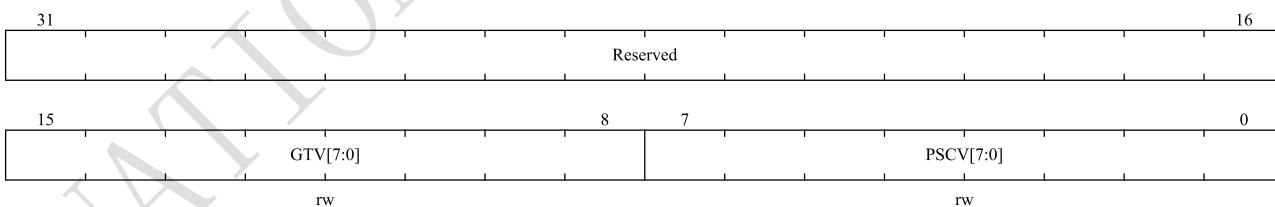
| 位域 | 名称 | 描述 |
|-------|----------|---|
| 31:11 | Reserved | 保留, 必需保持复位值。 |
| 10 | CTSIEN | CTS 中断使能 (CTS interrupt enable)。 如果该位置 1, 当 USART_STS.CTSF 被置位时将产生中断。 0: CTS 中断禁用。 1: CTS 中断使能。 注意: 该位对 UART4/5/6/7 无效。 |
| 9 | CTSEN | CTS 使能 (CTS enable)。 该位用于使能 CTS 硬件流控制功能。 0: CTS 硬件流控制禁用。 1: CTS 硬件流控制使能。 注意: 该位对 UART4/5/6/7 无效。 |
| 8 | RTSEN | RTS 使能 (RTS enable)。 该位用于使能 RTS 硬件流控制功能。 0: RTS 硬件流控制禁用。 1: RTS 硬件流控制使能。 注意: 该位对 UART4/5/6/7 无效。 |
| 7 | DMATXEN | DMA 发送使能 (DMA transmitter enable)。 0: DMA 发送模式禁用。 1: DMA 发送模式使能。 |
| 6 | DMARXEN | DMA 接收使能 (DMA receiver enable)。 0: DMA 接收模式禁用。 1: DMA 接收模式使能。 |
| 5 | SCMEN | 智能卡模式使能 (Smart card mode enable)。 该位用于使能智能卡模式。 0: 智能卡模式禁用。 1: 智能卡模式使能。 注意: 该位对 UART4/5/6/7 无效。 |

| 位域 | 名称 | 描述 |
|----|---------|--|
| 4 | SCNACK | 在智能卡模式 NACK 使能 (Smart card NACK enable)。 该位用于智能卡模式在奇偶校验错误发生时使能发送 NACK。 0: 当出现校验错误时不发送 NACK。 1: 当出现校验错误时发送 NACK。 注意: 该位对 UART4/5/6/7 无效。 |
| 3 | HDMEN | 半双工模式使能 (Half-duplex mode enable)。 该位用于使能半双工模式。 0: 半双工模式禁用。 1: 半双工模式使能。 |
| 2 | IRDALP | IrDA 低功耗模式 (IrDA low-power)。 该位用于为 IrDA 模式选择低功耗模式。 0: 正常模式。 1: 低功耗模式。 |
| 1 | IRDAMEN | IrDA 模式使能 (IrDA mode enable)。 0: IrDA 禁用。 1: IrDA 使能。 |
| 0 | ERRIEN | 错误中断使能 (Error interrupt enable)。 当 DMA 接收模式 (USART_CTRL3.DMARXEN=1) 使能时, 如果该位被置 1, USART_STS.FEF、USART_STS.OREF、USART_STS.NEF 被置位将产生中断。 0: 错误中断禁用。 1: 错误中断使能。 |

22.7.8 USART 保护时间和预分频寄存器(USART_GTP)

偏移地址: 0x18

复位值: 0x0000 0000



| 位域 | 名称 | 描述 |
|-------|-----------|--|
| 31:16 | Reserved | 保留, 必需保持复位值。 |
| 15:8 | GTV[7:0] | 智能卡模式下的保护时间值 (Guard time value)。 该位域规定了以波特时钟为单位的保护时间。在智能卡模式下, 需要这个功能。USART_STS.TXC 标志置位时间延时 GTV[7:0]个波特时钟周期。 注意: 该位对 UART4/5/6/7 无效。 |
| 7:0 | PSCV[7:0] | 预分频器值 (Prescaler value)。 在 IrDA 低功耗模式下: |

| 位域 | 名称 | 描述 |
|----|----|--|
| | | <p>这些位用来设定将外设时钟（PCLK1/PCLK2）分频产生低功耗频率的分频系数。</p> <p>00000000: 保留 – 不要写入该值</p> <p>00000001: 对源时钟 1 分频</p> <p>...</p> <p>11111111: 对源时钟 255 分频</p> <p>在 IrDA 正常模式下:</p> <p>PSCV 只能设置成 00000001。</p> <p>在智能卡模式下:</p> <p>PSCV[7:5]保留, PSCV[4:0]用于设定外设时钟（APB1/APB2）生成智能卡时钟的分频系数。实际的分频系数为 PSCV[4:0]设定值的两倍。</p> <p>0000: 保留 – 不要写入该值</p> <p>00001: 对源时钟 2 分频</p> <p>00010: 对源时钟 4 分频</p> <p>...</p> <p>11111: 对源时钟 62 分频</p> <p><i>注意: 该位对 UART4/5/6/7 无效。</i></p> |

23 四线串行外设接口 (QSPI)

23.1 QSPI 简介

QSPI 是用于单/双/四线 SPI 外设通信的接口。可以在间接和内存映射 2 种模式下工作。

间接模式：使用 QSPI 寄存器执行所有操作。

内存映射模式：外部闪存映射至微控制器地址空间，系统将其视为内部存储空间。

23.2 QSPI 主要特性

QSPI 控制器的主要特性如下：

- 支持 1 路 QSPI，可以配置成 Single SPI/Dual SPI/Quad SPI 模式。在 Single 模式下，支持标准的 SPI 操作，可以工作在半双工、全双工模式下；
- 支持间接模式和内存映射模式；
- 支持 8-bit、16-bit、32-bit 的数据访问方式；
- 支持深度为 32，宽度为 32bit 的独立 RX FIFO 和 TX FIFO；
- 支持 DMA 操作；
- 支持 FIFO 中断、操作完成中断、数据访问错误中断；
- 最大速度支持 $4 \times 36\text{Mbps}$ ；
- 在间接模式或内存映射模式下，操作分为 Instruction 阶段、Address 阶段、Mode bits 阶段、wait cycles 阶段、Data 阶段。这几个阶段可以配置为略过，但至少保留一个阶段。

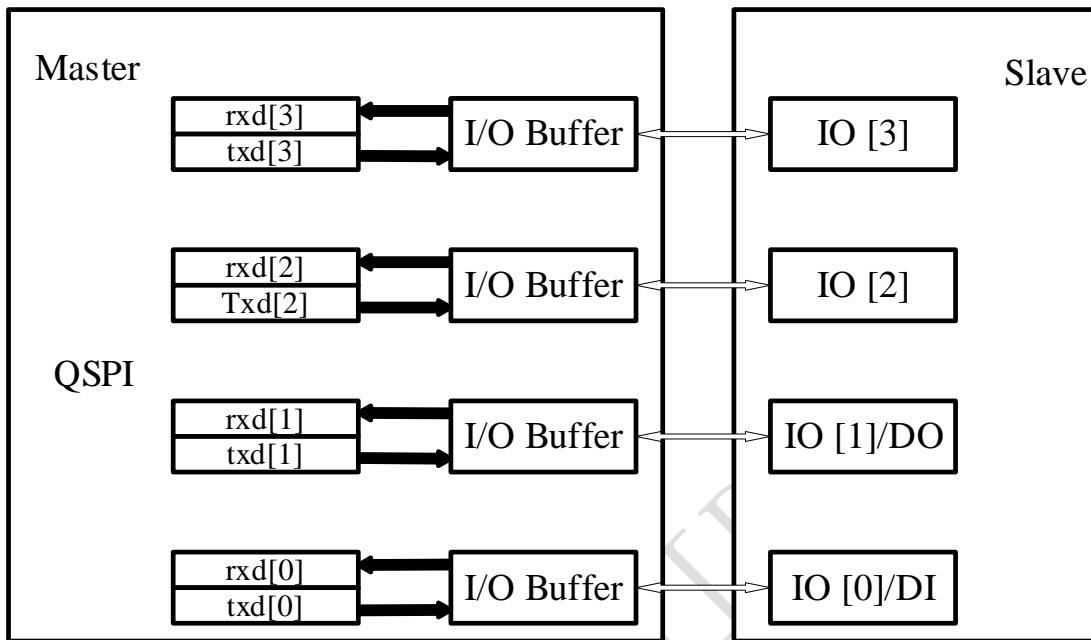
注意：Mode bits 阶段只在 XIP 模式使用。

注意：XIP 模式下仅支持对外部存储器进行读操作，不支持写操作。

注意：XIP 模式下读取外部存储器数据时仅支持大端模式。

23.3 功能描述

图 23-1 QSPI 功能框图

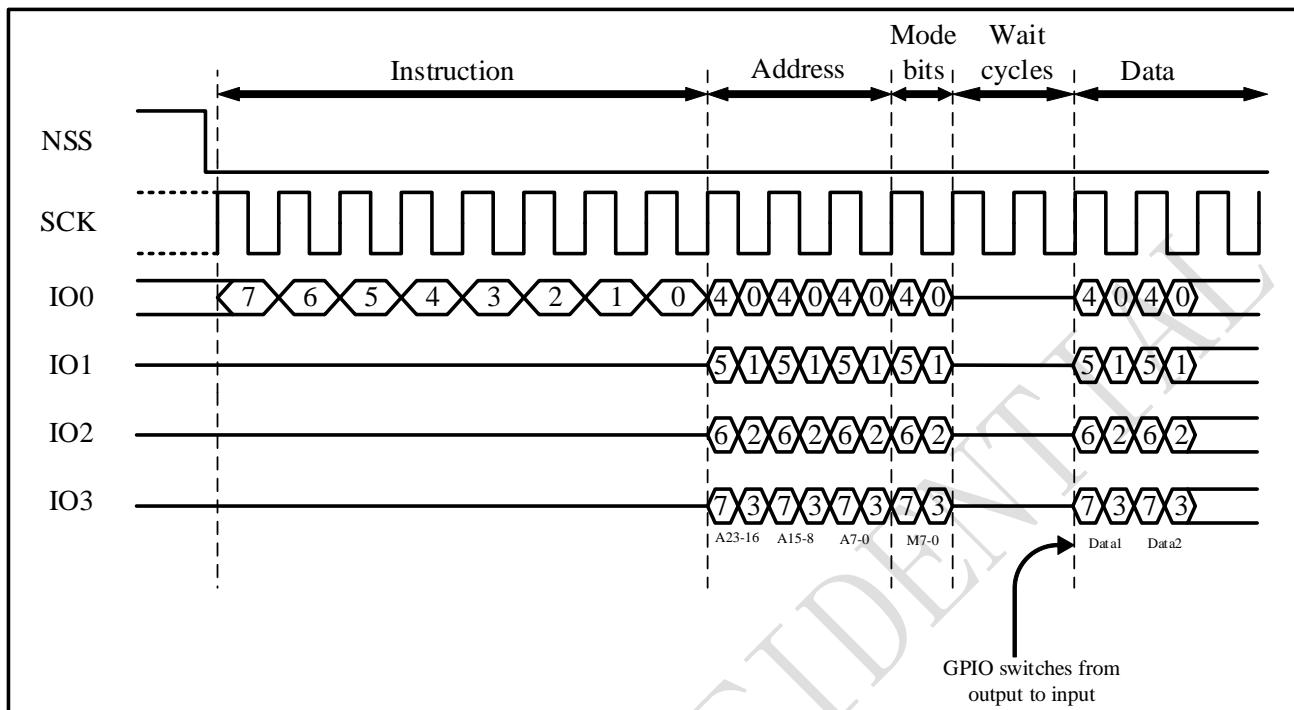


23.4 QSPI 命令序列

QSPI 通过命令与外设通信，每条命令包括 Instruction 阶段、Address 阶段、Mode bits 阶段、Wait cycles 阶段和 Data 阶段五个阶段，任一阶段均可跳过，但至少要保留 Instruction 阶段、Address 阶段、Mode bits 阶段或 Data 阶段其中一个阶段。

注意：Mode bits 阶段只用在 XIP 模式

图 23-2 QSPI 命令序列



23.5 操作流程

23.5.1 QSPI 间接模式

在间接模式下，通过写入 QSPI 寄存器来启动命令，并通过读写数据寄存器来传输数据，其方式与其它通信外设相同。

当 `QSPI_CTRL0.TMOD[1:0]=00` 时，处于发送与接收模式，发送/接收数据均有效。传输数据持续进行，直到发送 FIFO 为空为止。从外部设备接收的数据存储在接收 FIFO 存储器中，主机处理器可以访问该数据。

注意：只有在标准 SPI 模式下 (`QSPI_CTRL0.SPI_FRF[1:0] = 00`) 才可以使用 *Tx and Rx* 模式

当 `QSPI_CTRL0.TMOD[1:0]=01` 时，QSPI 处于间接发送模式，其待发送字节在数据发送阶段送到闪存，通过写入 `QSPI_DATx` 寄存器来提供数据。

当 `QSPI_CTRL0.TMOD[1:0]=10` 时，QSPI 处于间接接收模式，其待接收数据在数据接收阶段从闪存接收，通过读取 `QSPI_DATx` 寄存器来获取数据。

当 `QSPI_CTRL0.TMOD[1:0]=11` 时，EEPROM 读取模式，发送数据用于将操作码/地址发送到 EEPROM 设备。

注意：只有在标准 SPI 模式下 (`QSPI_CTRL0.SPI_FRF[1:0] = 00`) 才可以使用 *EEPROM read* 模式

要读取的字节数在 `QSPI_CTRL1.NDF[15:0]` 中指定。

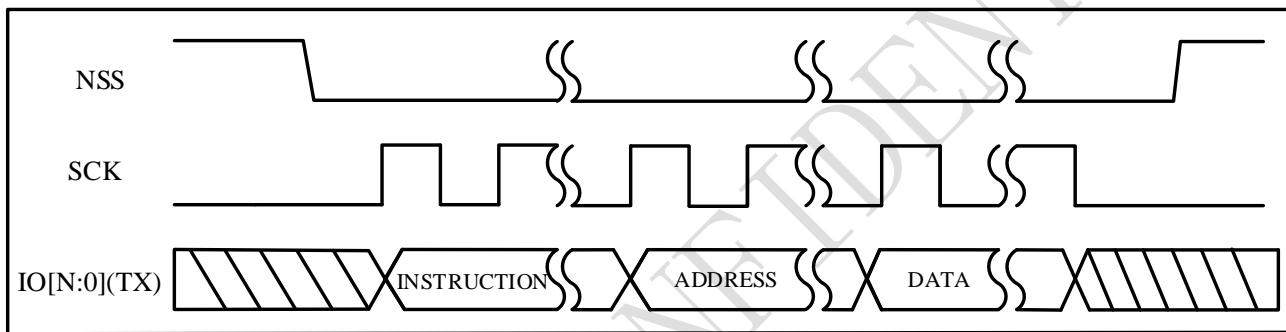
23.5.2 QSPI 间接发送操作

- 1 QSPI_CTRL0.SPI_FRF[1:0]指定帧发送格式（标准/双线/四线模式）
- 2 QSPI_CTRL0.DFS[4:0]指定数据长度(4~32bit)
- 3 QSPI_ENH_CTRL0.ADDR_LEN[3:0]指定地址长度(4bit~60bit, 可配置跳过 Address 阶段)
- 4 QSPI_ENH_CTRL0.INST_L[1:0]指定指令长度(4bit、8bit、16bit, 可配置跳过 Instruction 阶段)

注意: 1 条指令占用 1 个 FIFO 地址, 地址可以占用多个 FIFO 位置。指令和地址都必须在 QSPI_DATx 寄存器中编程。

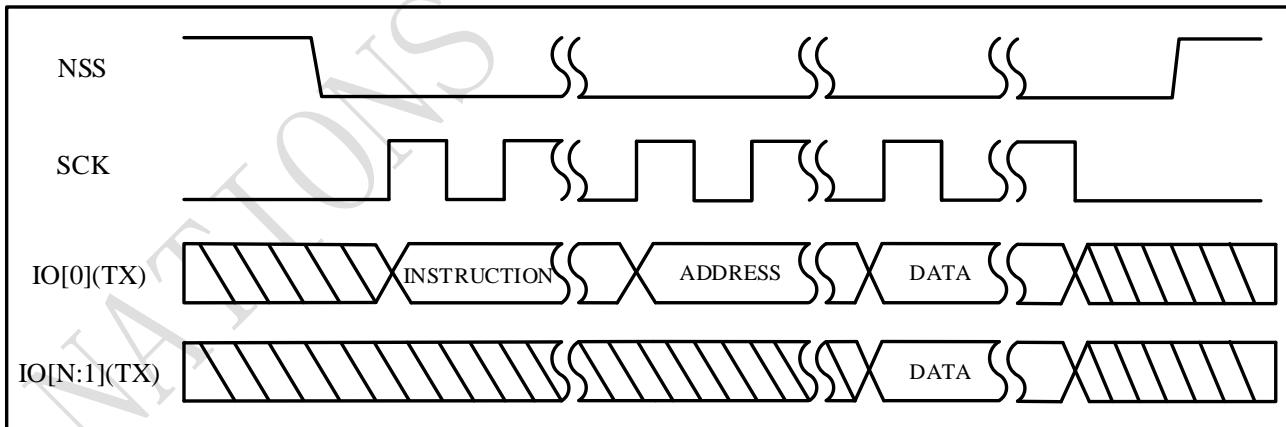
写操作可以分为 3 个阶段: Instruction 阶段、Address 阶段、Data 阶段。

- 典型写操作时序



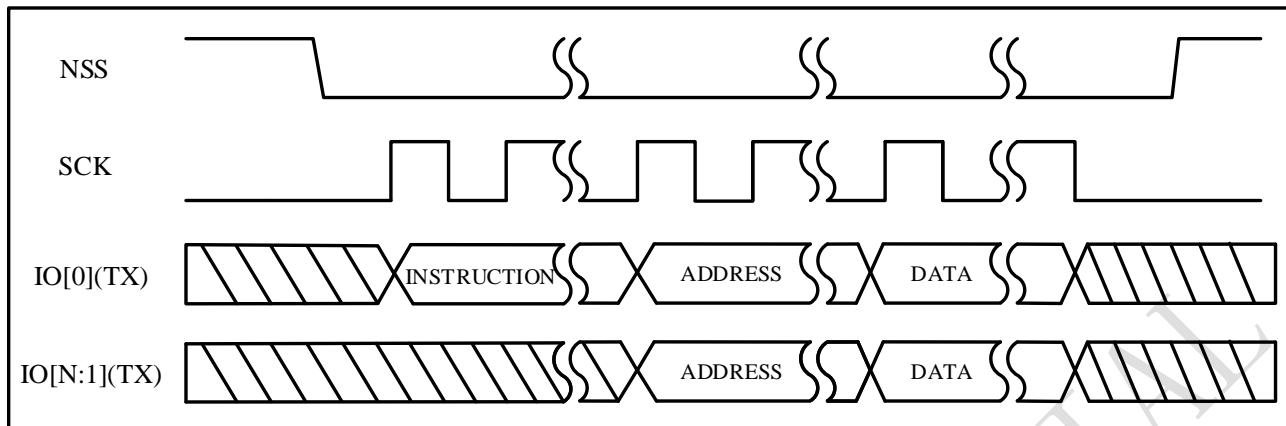
四线模式下 N=3, 对于 1 次写操作, 指令和地址仅发送 1 次, 然后是 QSPI_DATx 寄存器中存储的数据帧, 直到发送 FIFO 为空。

- 指令和地址都以标准 SPI 格式发送时



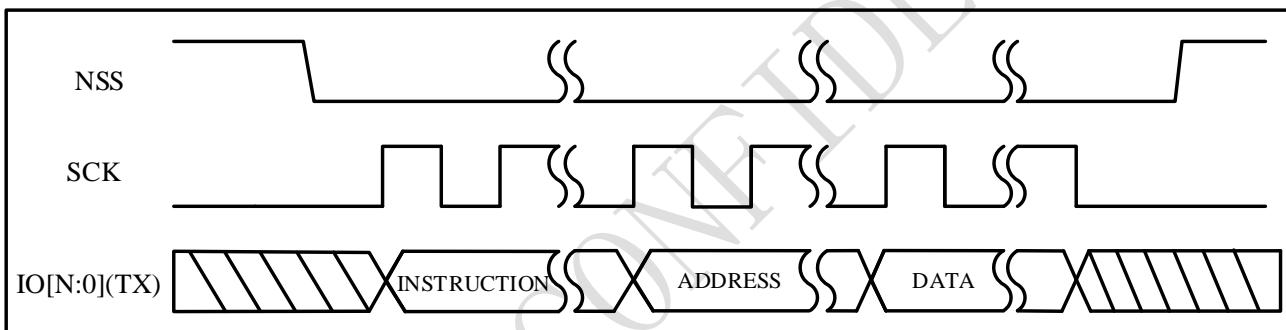
QSPI_ENH_CTRL0.TRANS_TYPE[1:0]须配置为 0。QSPI_CTRL0.SPI_FRF[1:0]配置为 0x02 (四线模式) 时, N=3; QSPI_CTRL0.SPI_FRF[1:0]配置为 0x01 (双线模式) 时, N=1。

- 指令以标准 SPI 模式发送, 地址以 CTRL0.SPI_FRF 制定模式发送时序



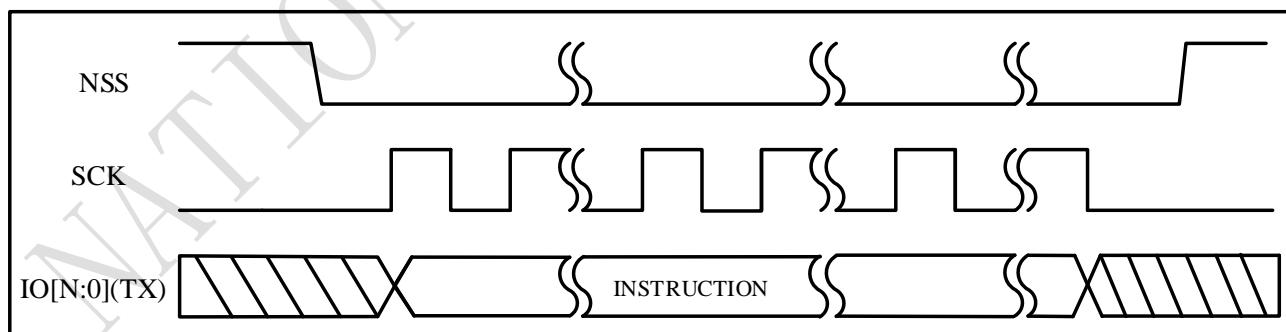
QSPI_ENH_CTRL0.TRANS_TYPE[1:0]须配置为 0x01。QSPI_CTRL0.SPI_FRF[1:0]配置为 0x02（四线模式）时，N=3；QSPI_CTRL0.SPI_FRF[1:0]配置为 0x01（双线模式）时，N=1。

- 指令和地址以 QSPI_CTRL0.SPI_FRF 制定模式发送时序



QSPI_ENH_CTRL0.TRANS_TYPE[1:0]须配置为 0x02。QSPI_CTRL0.SPI_FRF[1:0]配置为 0x02（四线模式）时，N=3；QSPI_CTRL0.SPI_FRF[1:0]配置为 0x01（双线模式）时，N=1。

- 只有指令阶段的发送时序



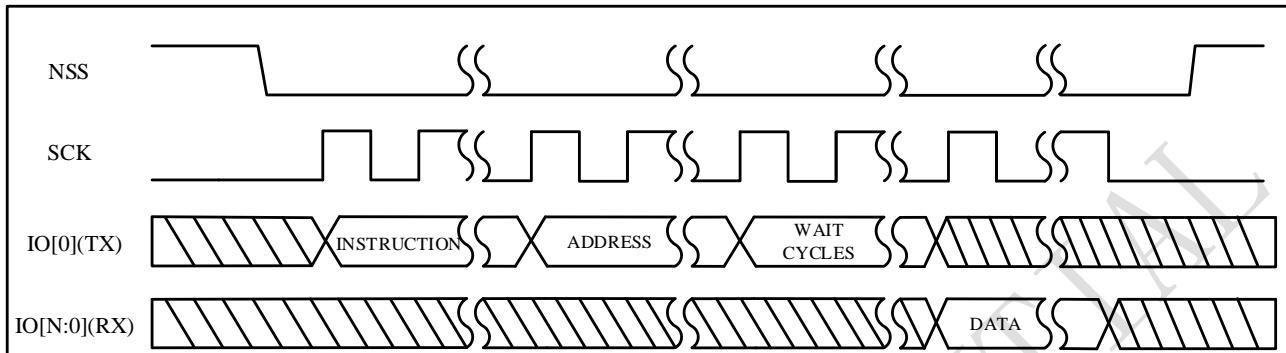
和 QSPI_ENH_CTRL0.TRANS_TYPE[1:0]配置无关。QSPI_CTRL0.SPI_FRF[1:0]配置为 0x02（四线模式）时，N=3；QSPI_CTRL0.SPI_FRF[1:0]配置为 0x01（双线模式）时，N=1。

23.5.3 QSPI 间接接收操作

对于读操作，QSPI 发送 1 次指令和控制数据，直到收到数量等于 NDF (QSPI_CTRL1[15:0]) 数量的数据，

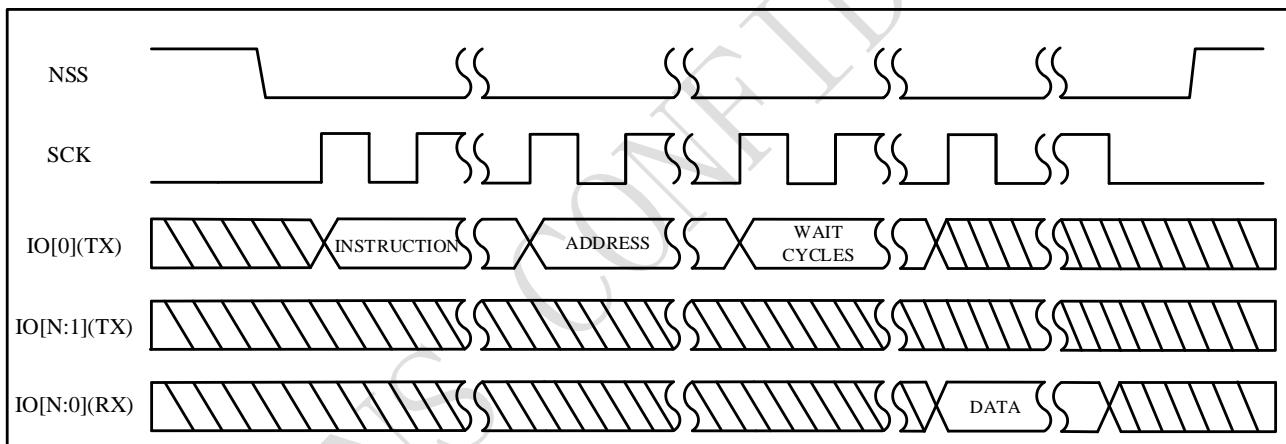
然后取消从机选择信号。读操作可以分为 4 个阶段：Instruction 阶段、Address 阶段、Wait cycles 阶段和 Data 阶段。

■ 典型读操作时序



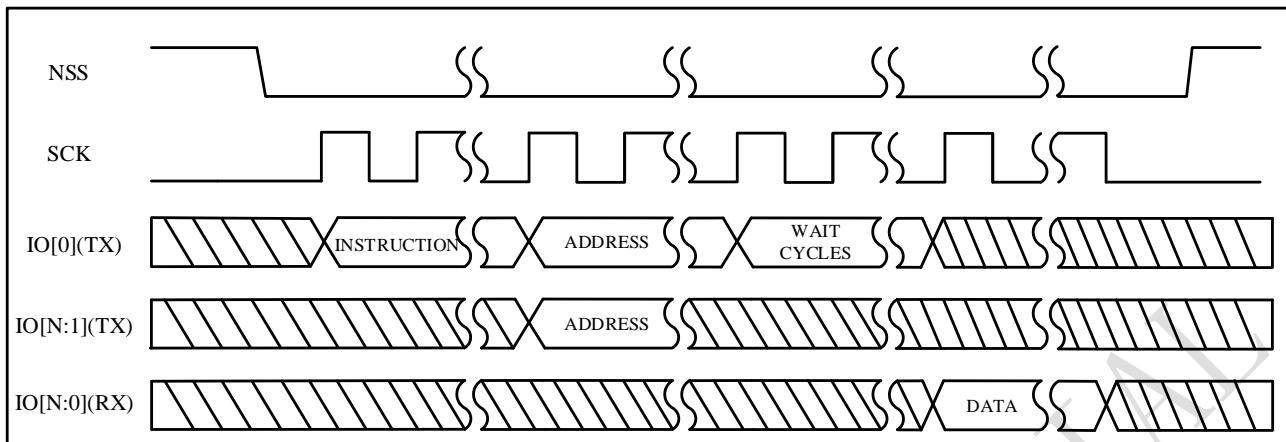
四线模式下 $N=3$ ，每个读取命令数据将以 `QSPI_CTRL0.SPI_FRF[1:0]` 配置的格式传输。配置为 `0x2` 为四线模式。

■ 地址和指令都以标准 SPI 格式接收时序



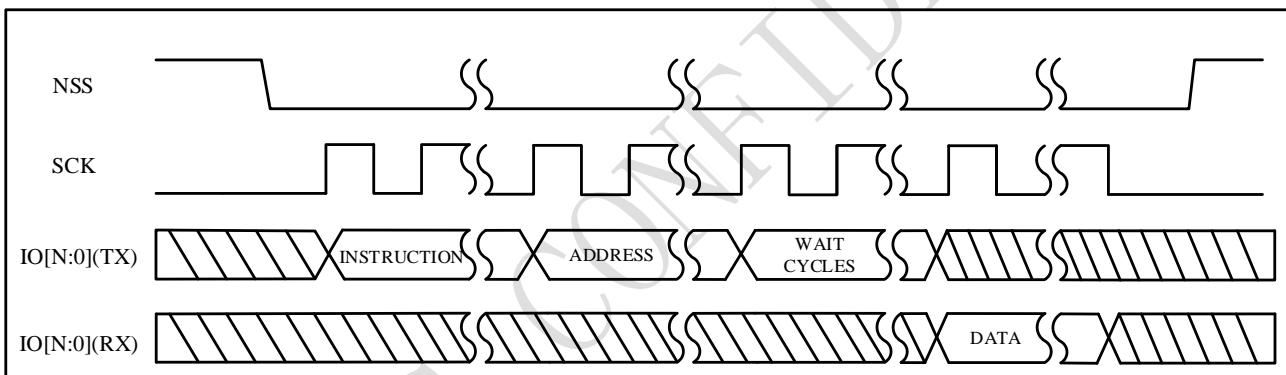
`QSPI_ENH_CTRL0.TRANS_TYPE[1:0]` 应配置为 `0x0`，`QSPI_ENH_CTRL0.WAIT_CYCLES[4:0]` 配置 `WAIT` 的周期。`QSPI_CTRL0.SPI_FRF[1:0]` 配置为 `0x02`（四线模式）时， $N=3$ ；`QSPI_CTRL0.SPI_FRF[1:0]` 配置为 `0x01`（双线模式）时， $N=1$ 。

■ 指令以标准 SPI 模式发送，地址以 `QSPI_CTRL0.SPI_FRF` 制定模式接收时序



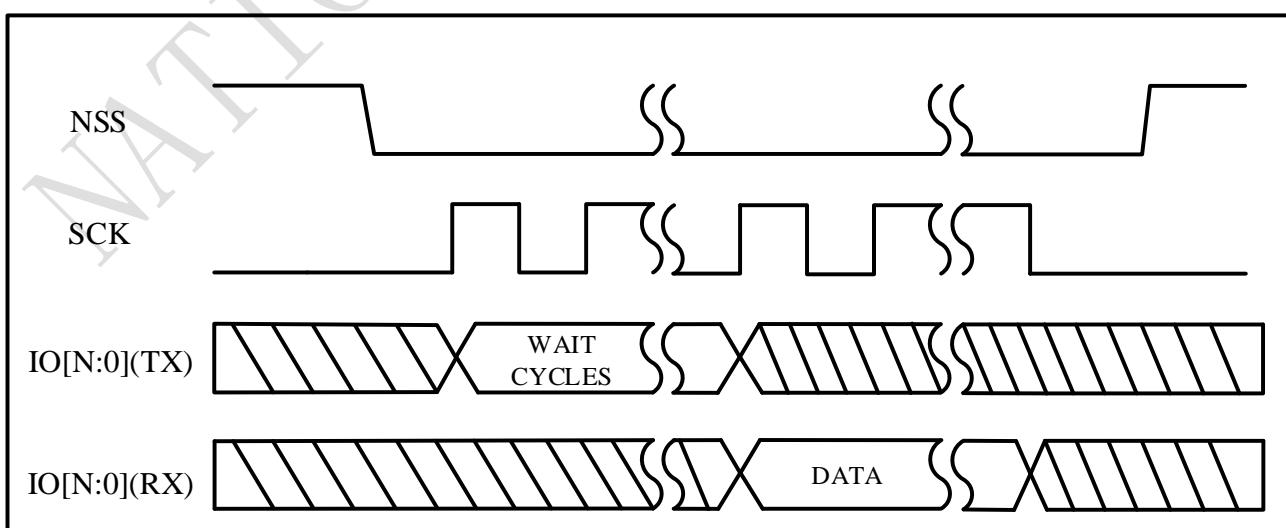
QSPI_ENH_CTRL0.TRANS_TYPE[1:0]应配置为0x1, QSPI_ENH_CTRL0.WAIT_CYCLES[4:0]配置WAIT的周期。QSPI_CTRL0.SPI_FRF[1:0]配置为0x02（四线模式）时，N=3; QSPI_CTRL0.SPI_FRF[1:0]配置为0x01（双线模式）时，N=1。

- 指令和地址以QSPI_CTRL0.SPI_FRF制定模式接收时序



QSPI_ENH_CTRL0.TRANS_TYPE[1:0]配置应为0x2。QSPI_CTRL0.SPI_FRF[1:0]配置为0x02（四线模式）时，N=3; QSPI_CTRL0.SPI_FRF[1:0]配置为0x01（双线模式）时，N=1。

- 只有Wait cycles阶段的接收时序



QSPI_ENH_CTRL0.ADDR_LEN[3:0] 配置为 0 , QSPI_ENH_CTRL0.INST_L[1:0] 配置为 0 , QSPI_ENH_CTRL0.WAIT_CYCLES[4:0]配置 wait cycles。QSPI_CTRL0.SPI_FRF[1:0]配置为 0x02 (四线模式) 时, N=3; QSPI_CTRL0.SPI_FRF[1:0]配置为 0x01 (双线模式) 时, N=1。

23.6 QSPI 寄存器

23.6.1 QSPI 寄存器总览

表 23-1 QSPI 寄存器总览

| Offset | Register | 31 | 30 | 29 | 28 | 27 | 26 | 25 | 24 | 23 | 22 | 21 | 20 | 19 | 18 | 17 | 16 | 15 | 14 | 13 | 12 | 11 | 10 | 9 | 8 | 7 | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | 0 | | | |
|--------|---------------|----------|----|----|----|----|--------------|----|----|----|----|---------------|----|----|----|----|------|----|----|----|----|----------|----|---|---|---|-----------|---|---|--------|---|---|---|--|-----------|--|
| 000h | QSPI_CTRL0 | Reserved | | | | | CFS[3:0] | | | | | Reserved | | | | | SSTE | | | | | Reserved | | | | | TMOD[1:0] | | | | | | | | | |
| | Reset Value | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | | | | | |
| 004h | QSPI_CTRL1 | Reserved | | | | | | | | | | NDF[15:0] | | | | | | | | | | | | | | | | | | QEN | | | | | | |
| | Reset Value | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | | | | | |
| 008h | QSPI_EN | Reserved | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Reset Value | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | | | | |
| 00Ch | QSPI_MW_CTRL | Reserved | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Reset Value | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | | | | | |
| 010h | QSPI_SLAVE_EN | Reserved | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Reset Value | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | | | | | |
| 014h | QSPI_BAUD | Reserved | | | | | | | | | | CLK_DIV[15:0] | | | | | | | | | | | | | | | | | | MHS_EN | | | | | | |
| | Reset Value | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | | | | | |
| 018h | QSPI_TXFT | Reserved | | | | | TXFT_ST[4:0] | | | | | Reserved | | | | | | | | | | | | | | | | | | MC_DIR | | | | | | |
| | Reset Value | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | | | | | |
| 01Ch | QSPI_RXFT | Reserved | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | MWMOD | |
| | Reset Value | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | | | | |
| 020h | QSPI_TXFN | Reserved | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | SEN | |
| | Reset Value | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | | | | |
| 024h | QSPI_RXFN | Reserved | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | RXFN[5:0] | |

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---------------------|---------------|------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|-------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|---|
| Offset | Register | 31 | 30 | 29 | 28 | 27 | 26 | 25 | 24 | 23 | 22 | 21 | 20 | 19 | 18 | 17 | 16 | 15 | 14 | 13 | 12 | 11 | 10 | 9 | 8 | 7 | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | 0 | | | | | |
| | Reset Value | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 028h | QSPL_STS | Reserved | | | | | | | | | | | | | | | | | | DC_ERR | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| | Reset Value | | | | | | | | | | | | | | | | | | | MMCIM | MMCIS | |
| 02Ch | QSPI_IMASK | Reserved | | | | | | | | | | | | | | | | | | RXFF | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| | Reset Value | | | | | | | | | | | | | | | | | | | RXFOIM | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | |
| 030h | QSPI_ISTS | Reserved | | | | | | | | | | | | | | | | | | RXFNE | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| | Reset Value | | | | | | | | | | | | | | | | | | | RXFUIF | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | |
| 034h | QSPI_RISTS | Reserved | | | | | | | | | | | | | | | | | | RXFUIF | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| | Reset Value | | | | | | | | | | | | | | | | | | | RXFUIF | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| 038h | QSPI_TXFOI_CL | Reserved | | | | | | | | | | | | | | | | | | RXFUIF | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| | R | | | | | | | | | | | | | | | | | | | RXFUIF | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| 03Ch | QSPI_RXFOI_CL | Reserved | | | | | | | | | | | | | | | | | | RXFUIF | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| | R | | | | | | | | | | | | | | | | | | | RXFUIF | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| 040h | QSPI_RXFUI_CL | Reserved | | | | | | | | | | | | | | | | | | RXFUIF | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| | R | | | | | | | | | | | | | | | | | | | RXFUIF | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| 044h | QSPI_MMC_CLR | Reserved | | | | | | | | | | | | | | | | | | RXFUIF | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| | Reset Value | | | | | | | | | | | | | | | | | | | RXFUIF | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| 048h | QSPI_ICLR | Reserved | | | | | | | | | | | | | | | | | | RXFUIF | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| | Reset Value | | | | | | | | | | | | | | | | | | | RXFUIF | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| 04Ch | QSPI_DMA_CTR | Reserved | | | | | | | | | | | | | | | | | | RXFUIF | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| | L | | | | | | | | | | | | | | | | | | | RXFUIF | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| 050h | QSPI_DMATDL | Reserved | | | | | | | | | | | | | | | | | | DMATDL[5:0] | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| | CTRL | | | | | | | | | | | | | | | | | | | DMATDL[5:0] | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| 054h | QSPI_DMARDL | Reserved | | | | | | | | | | | | | | | | | | DMARDL[5:0] | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| | CTRL | | | | | | | | | | | | | | | | | | | DMARDL[5:0] | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| 060h+004h*x(x=0~31) | QSPI_DATx | DATx[31:0] | | | | | | | | | | | | | | | | | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| | Reset Value | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | | | | |
| 0F0h | QSPI_RS_DELA | Reserved | | | | | | | | | | | | | | | | | | SDCN[7:0] | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | Y | | | | | | | | | | | | | | | | | | | SDCN[7:0] | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | Reset Value | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | |

| Offset | Register | 31 | 30 | 29 | 28 | 27 | 26 | 25 | 24 | 23 | 22 | 21 | 20 | 19 | 18 | 17 | 16 | 15 | 14 | 13 | 12 | 11 | 10 | 9 | 8 | 7 | 6 | 5 | 4 | 31 |
|--------|------------------------------|----------|----|----------------|--------------|----|----|----|----|----|-----------|----|-------------|----|-------------|----|--------|----|--------|----|----|----|----|---|---|---|---|---|---|----|
| 0F4h | QSPI_ENH_CTR L0 | Reserved | 31 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | 0 | CLK_STRETCH_EN | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Reset Value | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0F8h | QSPI_DDR_TXD E | Reserved | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Reset Value | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0FCh | QSPI_XIP_MODE Reset Value | Reserved | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | QSPI_XIP_INCR_ TOC | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 100h | QSPI_XIP_WRAP _TOC | Reserved | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Reset Value | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 104h | QSPI_XIP_WRAP _TOC | Reserved | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Reset Value | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 108h | QSPI_XIP_CTRL Reset Value | Reserved | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | 1 | 0 | XIP_MBL[1:0] | | | | | | XIP_CT_EN | | XIP_INST_EN | | INST_DDR_EN | | DDR_EN | | DFS_HC | | | | | | | | | | | |
| | Reset Value | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 10Ch | QSPI_XIP_SLAV E_EN | Reserved | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Reset Value | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 110h | QSPI_XIP_RXFO L_CLR | Reserved | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Reset Value | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 114h | QSPI_XIP_TOUT Reset Value | Reserved | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

23.6.2 QSPI 控制寄存器 0 (QSPI_CTRL0)

QSPI_CTRL0 寄存器控制串行数据传输。

注意: 当 QSPI_EN.QEN = 1 时, 该寄存器不能被写入。

偏移地址: 0x00

复位值: 0x0080 4407

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|----------|----------|-----|----------|-----------|-------|------|----------|----------|----|--------------|----|----------|---|----------|---|----|---|----|
| 31 | Reserved | | | | | | | | 24 | SPI_FRF[1:0] | | Reserved | | CFS[3:0] | | | | 16 |
| 15 | 14 | 13 | 12 | 11 | 10 | 9 | 8 | 7 | rw | 6 | rw | 5 | 4 | rw | 0 | rw | 0 | |
| Reserved | SSTE | SRL | Reserved | TMOD[1:0] | SCPOL | SCPH | FRF[1:0] | Reserved | | DFS[4:0] | | | | | | | | |

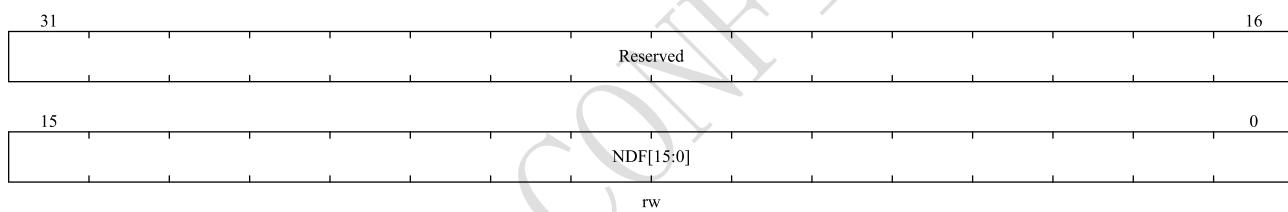
| 位域 | 名称 | 描述 |
|-------|--------------|---|
| 31:24 | Reserved | 保留, 必须保持复位值 |
| 23:22 | SPI_FRF[1:0] | SPI 帧格式 00: 标准 SPI; 01: 双线 SPI; 10: 四线 SPI; 11: 保留。 |
| 21:20 | Reserved | 保留, 必须保持复位值 |
| 19:16 | CFS[3:0] | 选择 Microwire 帧格式的控制字长度 0000: 1bit 控制字; 0001: 2bit 控制字; 0010: 3bit 控制字; 0011: 4bit 控制字; 1110: 15bit 控制字; 1111: 16bit 控制字。 |
| 15 | Reserved | 保留, 必须保持复位值 |
| 14 | SSTE | 片选切换使能 在时钟相位(SCPH)设置为 0 的 SPI 模式下运行时, 该位控制数据帧之间 NSS 的行为。 0: 串行时钟 sclk 在整个传送期间片选连续为低; 1: 串行时钟 sclk 在每一帧数据传输时片选为低。 |
| 13 | SRL | 移位寄存器循环 用于测试, 有效时将发送移位寄存器输出连接到接收移位寄存器输入 0: 禁能; 1: 使能。 |
| 12 | Reserved | 保留, 必须保持复位值 |
| 11:10 | TMOD[1:0] | 传输模式 00: Tx and Rx; 01: Tx only; 10: Rx only; 11: EEPROM read。 |
| 9 | SCPOL | 非活动串行时钟极性 0: 低; 1: 高。 |
| 8 | SCPH | 串行时钟相位 0: 在串行时钟的第一个边沿捕获数据; 1: 在从选择线激活后开始切换一个周期, 并在串行时钟的第二个边沿捕获数据。 |
| 7:6 | FRF[1:0] | 帧格式 00: Motorola SPI 帧格式; 01: TI SSP 帧格式; 10: National Semiconductors Microwire 帧格式; |

| 位域 | 名称 | 描述 |
|-----|----------|---|
| | | 11: 保留。 |
| 5 | Reserved | 保留, 必须保持复位值 |
| 4:0 | DFS[4:0] | 数据帧长度 当数据帧小于 32bit 时自动右对齐 0x0/0x01/0x02: 保留 0x03: 4bit 0x04: 5bit 0x05: 6bit 0x1D: 30bit 0x1E: 31bit 0x1F: 32bit |

23.6.3 QSPI 控制寄存器 1 (QSPI_CTRL1)

偏移地址: 0x04

复位值: 0x0000 0000

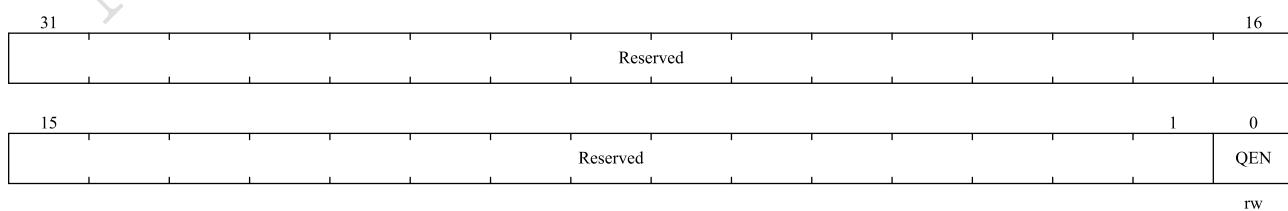


| 位域 | 名称 | 描述 |
|-------|-----------|---|
| 31:16 | Reserved | 保留, 必须保持复位值 |
| 15:0 | NDF[15:0] | 数据帧数量 当 QSPI_CTRL0.TMOD[1:0] = 10 或 11 时, 该寄存器配置连续接收的数据帧数量 |

23.6.4 QSPI 使能寄存器 (QSPI_EN)

偏移地址: 0x08

复位值: 0x0000 0000



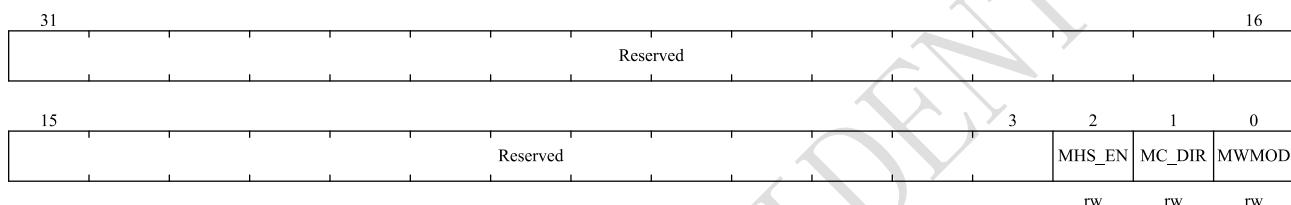
| 位域 | 名称 | 描述 |
|------|----------|--|
| 31:1 | Reserved | 保留, 必须保持复位值 |
| 0 | QEN | 使能 QSPI 0: 禁能, 当禁能 QSPI 时, 所有串行传输立即停止; 1: 使能 QSPI。 |

23.6.5 QSPI MW 控制寄存器 (QSPI_MW_CTRL)

注意: 当 *QSPI_EN.QEN = 1* 时, 该寄存器不能被写入。

偏移地址: 0x0C

复位值: 0x0000 0000



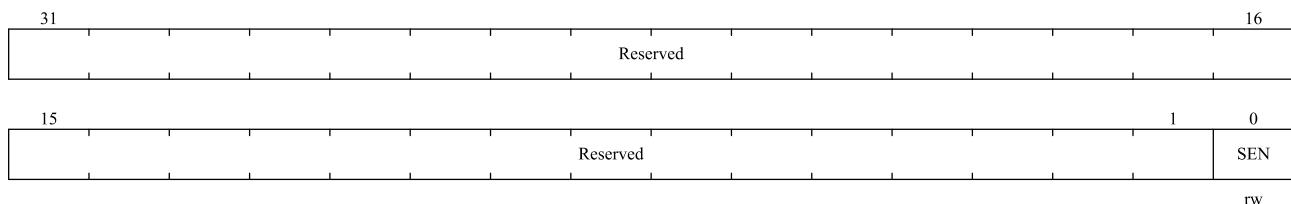
| 位域 | 名称 | 描述 |
|------|----------|--|
| 31:3 | Reserved | 保留, 必须保持复位值 |
| 2 | MHS_EN | Microwire 握手使能 0: 握手禁能; 1: 握手使能, 传输最后 1 个数据或控制位后, 在清除 QSPI_STS.BUSY 状态之前, 从目标器件检查就绪状态。 |
| 1 | MC_DIR | Microwire 数据方向控制 0: Rx 1: Tx |
| 0 | MWMOD | Microwire 传输模式 0: 非顺序传输, 必须为每个发送或接收数据字块指定控制字; 1: 顺序传输, 仅需一个控制字来发送或接收数据字节。 |

23.6.6 QSPI 从设备使能寄存器 (QSPI_SLAVE_EN)

注意: 使能 *QSPI_EN* 寄存器, *QSPI_SLAVE_EN* 寄存器才会被启用, 用于外部从设备选择使能片选。

偏移地址: 0x10

复位值: 0x0000 0000

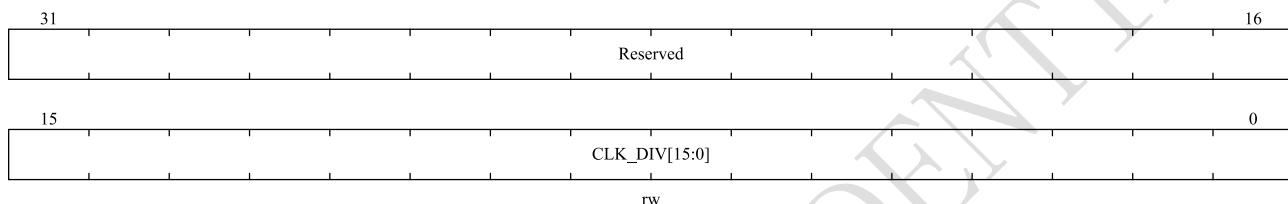


| 位域 | 名称 | 描述 |
|------|----------|-----------------------------|
| 31:1 | Reserved | 保留, 必须保持复位值 |
| 0 | SEN | 外部从设备片选使能 0: 禁能 1: 使能 |

23.6.7 QSPI 波特率选择寄存器 (QSPI_BAUD)

偏移地址: 0x14

复位值: 0x0000 0000

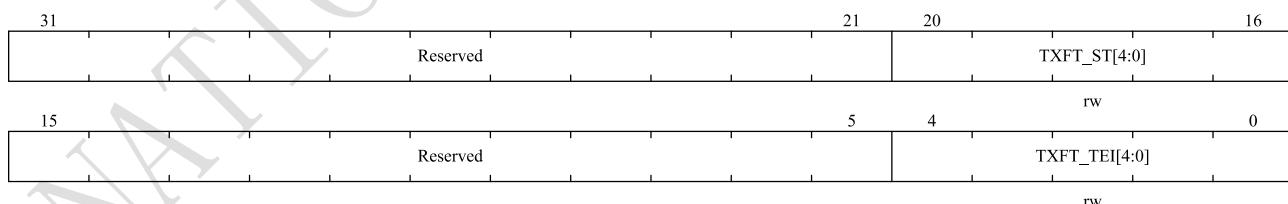


| 位域 | 名称 | 描述 |
|-------|---------------|---|
| 31:16 | Reserved | 保留, 必须保持复位值 |
| 15:0 | CLK_DIV[15:0] | 时钟分频 该寄存器 bit 0 始终配置为 0, 不受写操作影响, 这样可以确保在该寄存器中保留偶数值。如果 CLK_DIV[15:0]=0x0000, 则禁能串行输出时钟。串行输出时钟频率 = AHB/CLK_DIV[15:0], CLK_DIV[15:0]取值范围为 2~65534 之间的偶数。 |

23.6.8 QSPI 发送缓存阈值寄存器 (QSPI_TXFT)

偏移地址: 0x18

复位值: 0x0000 0000

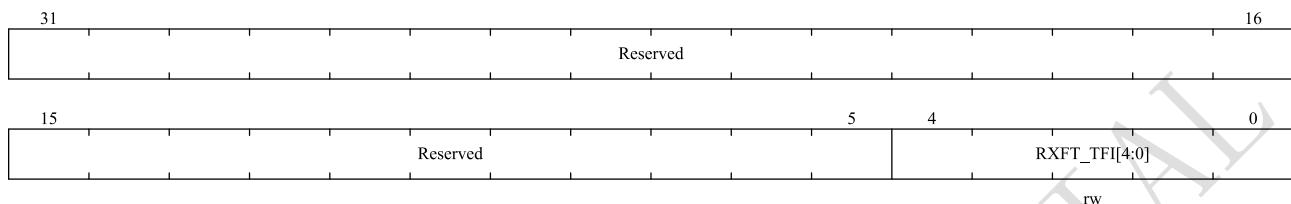


| 位域 | 名称 | 描述 |
|-------|---------------|---------------------------------|
| 31:21 | 保留 | 必须保持复位值。 |
| 20:16 | TXFT_ST[4:0] | Tx 传输阈值, 达到该值后, 开始 Tx 传输 |
| 15:5 | Reserved | 保留, 必须保持复位值 |
| 4:0 | TXFT_TEI[4:0] | Tx 传输阈值, 当发送 FIFO 数量小于该值, 触发空中断 |

23.6.9 QSPI 接收缓存阈值寄存器 (QSPI_RXFT)

偏移地址: 0x1C

复位值: 0x0000 0000

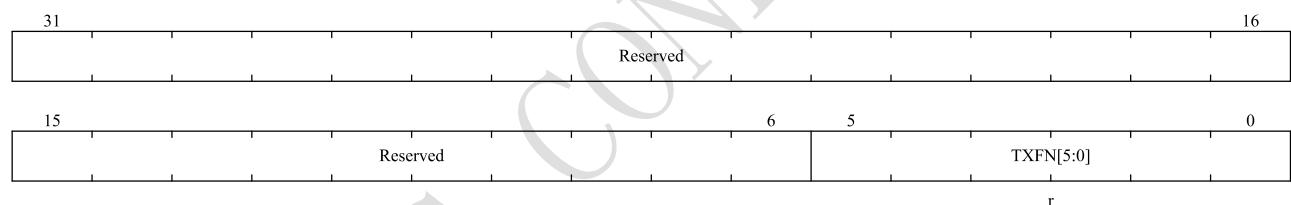


| 位域 | 名称 | 描述 |
|------|---------------|--------------------------------------|
| 31:5 | Reserved | 保留, 必须保持复位值 |
| 4:0 | RXFT_TFI[4:0] | Rx 传输阈值, 当接收 FIFO 数量大于该值加 1 时, 触发满中断 |

23.6.10 QSPI 发送缓存数据量寄存器 (QSPI_TXFN)

偏移地址: 0x20

复位值: 0x0000 0000

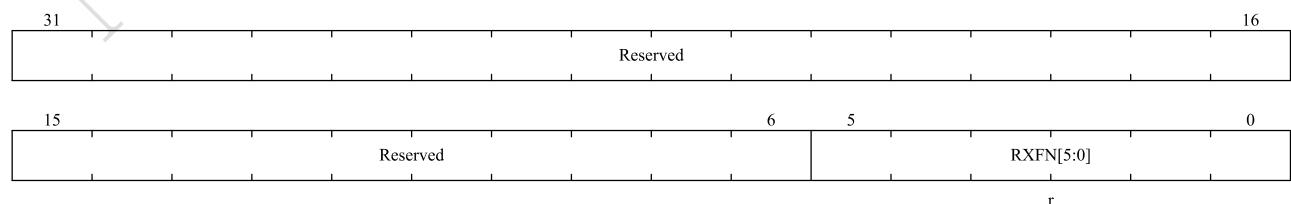


| 位域 | 名称 | 描述 |
|------|-----------|-------------|
| 31:6 | Reserved | 保留, 必须保持复位值 |
| 5:0 | TXFN[5:0] | Tx FIFO 数据量 |

23.6.11 QSPI 接收缓存数据量寄存器 (QSPI_RXFN)

偏移地址: 0x24

复位值: 0x0000 0000



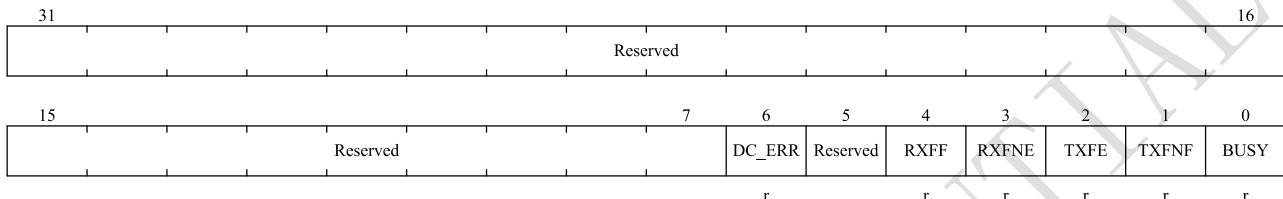
| 位域 | 名称 | 描述 |
|------|----------|-------------|
| 31:6 | Reserved | 保留, 必须保持复位值 |

| 位域 | 名称 | 描述 |
|-----|-----------|-------------|
| 5:0 | RXFN[5:0] | Rx FIFO 数据量 |

23.6.12 QSPI 状态寄存器 (QSPI_STS)

偏移地址: 0x28

复位值: 0x0000 0006

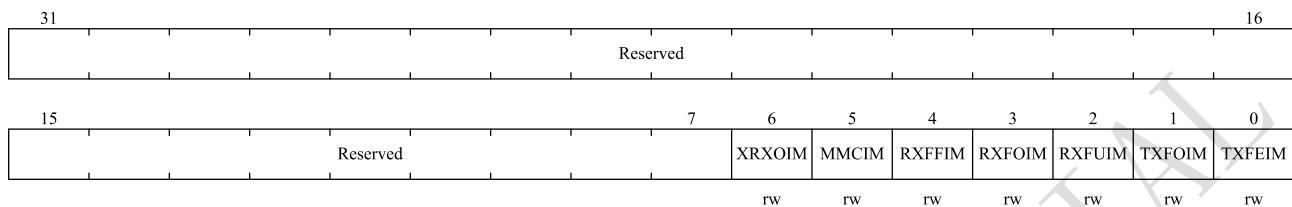


| 位域 | 名称 | 描述 |
|------|----------|---|
| 31:7 | Reserved | 保留, 必须保持复位值 |
| 6 | DC_ERR | 数据冲突错误状态 0: 无错误冲突 1: 发送冲突错误 |
| 5 | Reserved | 保留, 必须保持复位值 |
| 4 | RXFF | Rx Fifo 满 0: 无 Rx FIFO 满 1: 发生 Rx FIFO 满 当 Rx FIFO 完全满时, 该位被置位。当 Rx FIFO 包含一个或多个空单元时, 该位被清除。 |
| 3 | RXFNE | Rx FIFO 非空状态 0: Rx FIFO 空状态 1: 发生 Rx FIFO 非空状态 当 Rx FIFO 非空时置位, 当 Rx FIFO 为空时清零。 |
| 2 | TXFE | Tx FIFO 空状态 0: Tx FIFO 有数据状态 1: 发生 Tx FIFO 空状态 当 Tx FIFO 全为空时, 该位置位。当 Tx FIFO 包含一个或多个有效空间时, 该位被清除。 |
| 1 | TXFNF | Tx FIFO 非满状态 0: Tx FIFO 满状态 1: 发生 Tx FIFO 非满状态 当 Tx FIFO 包含一个或多个空单元时置位, 当 Tx FIFO 满时清零。 |
| 0 | BUSY | 传输忙标志 0: 空闲或禁能 1: 正在进行传输 |

23.6.13 QSPI 中断屏蔽寄存器 (QSPI_IMASK)

偏移地址: 0x2C

复位值: 0x0000 007F



| 位域 | 名称 | 描述 |
|------|----------|---------------------------------------|
| 31:7 | Reserved | 保留, 必须保持复位值 |
| 6 | XRXOIM | XIP Rx FIFO 上溢中断屏蔽 0: 屏蔽 1: 不屏蔽 |
| 5 | MMCIM | 多主冲突中断屏蔽 0: 屏蔽 1: 不屏蔽 |
| 4 | RXFFIM | Rx FIFO 满中断屏蔽 0: 屏蔽 1: 不屏蔽 |
| 3 | RXFOIM | Rx FIFO 上溢中断屏蔽 0: 屏蔽 1: 不屏蔽 |
| 2 | RXFUIM | Rx FIFO 下溢中断屏蔽 0: 屏蔽 1: 不屏蔽 |
| 1 | TXFOIM | Tx FIFO 上溢中断屏蔽 0: 屏蔽 1: 不屏蔽 |
| 0 | TXFEIM | Tx FIFO 空中断屏蔽 0: 屏蔽 1: 不屏蔽 |

23.6.14 QSPI 中断状态寄存器 (QSPI_ISTS)

偏移地址: 0x30

复位值: 0x0000 0000

| | | | | | | | | | | |
|----|----------|---|---|--------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 31 | Reserved | | | | | | | | 16 | |
| 15 | Reserved | 7 | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | 0 | |
| | | | | XRXOIS | MMCIS | RXFFIS | RXFOIS | RXFUIS | TXFOIS | TXFEIS |
| | | r | r | r | r | r | r | r | r | |

| 位域 | 名称 | 描述 |
|------|----------|--|
| 31:7 | Reserved | 保留, 必须保持复位值 |
| 6 | XRXOIS | XIP Rx FIFO 上溢状态 (中断屏蔽后) 0: 失效 1: 有效 |
| 5 | MMCIS | 多主冲突状态 (中断屏蔽后) 0: 失效 1: 有效 |
| 4 | RXFFIS | Rx FIFO 满状态 (中断屏蔽后) 0: 失效 1: 有效 |
| 3 | RXFOIS | Rx FIFO 上溢状态 (中断屏蔽后) 0: 失效 1: 有效 |
| 2 | RXFUIS | Rx FIFO 下溢状态 (中断屏蔽后) 0: 失效 1: 有效 |
| 1 | TXFOIS | Tx FIFO 上溢状态 (中断屏蔽后) 0: 失效 1: 有效 |
| 0 | TXFEIS | Tx FIFO 空状态 (中断屏蔽后) 0: 失效 1: 有效 |

23.6.15 QSPI 原始中断状态寄存器 (QSPI_RISTS)

偏移地址: 0x34

复位值: 0x0000 0000

| | | | | | | | | | |
|----|----------|---------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|----|
| 31 | Reserved | | | | | | | | 16 |
| 15 | Reserved | 7 | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | 0 |
| | | XRXORIS | MMCRIS | RXFFRIS | RXFORIS | RXFURIS | TXFORIS | TXFERIS | |
| | | r | r | r | r | r | r | r | r |

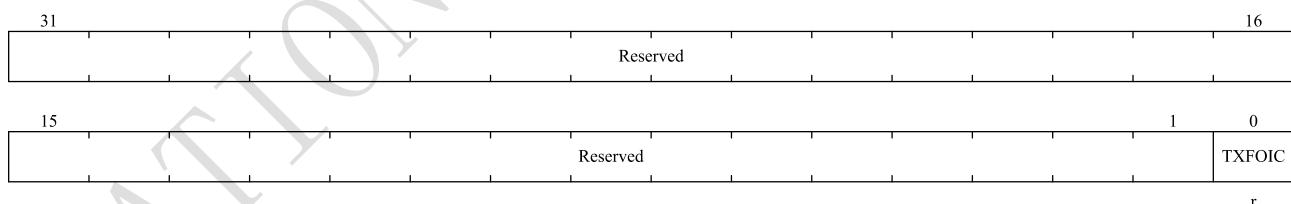
| 位域 | 名称 | 描述 |
|------|----------|-------------|
| 31:7 | Reserved | 保留, 必须保持复位值 |

| 位域 | 名称 | 描述 |
|----|---------|--|
| 6 | XRXORIS | XIP Rx FIFO 上溢状态 (在中断屏蔽前的状态) 0: 失效 1: 有效 |
| 5 | MMCRIS | 多主冲突状态 (在中断屏蔽前的状态) 0: 失效 1: 有效 |
| 4 | RXFFRIS | Rx FIFO 满状态 (在中断屏蔽前的状态) 0: 失效 1: 有效 |
| 3 | RXFORIS | Rx FIFO 上溢状态 (在中断屏蔽前的状态) 0: 失效 1: 有效 |
| 2 | RXFURIS | Rx FIFO 下溢状态 (在中断屏蔽前的状态) 0: 失效 1: 有效 |
| 1 | TXFORIS | Tx FIFO 上溢状态 (在中断屏蔽前的状态) 0: 失效 1: 有效 |
| 0 | TXFERIS | Tx FIFO 空状态 (在中断屏蔽前的状态) 0: 失效 1: 有效 |

23.6.16 QSPI 发送缓存上溢中断清除寄存器 (QSPI_TXFOI_CLR)

偏移地址: 0x38

复位值: 0x0000 0000

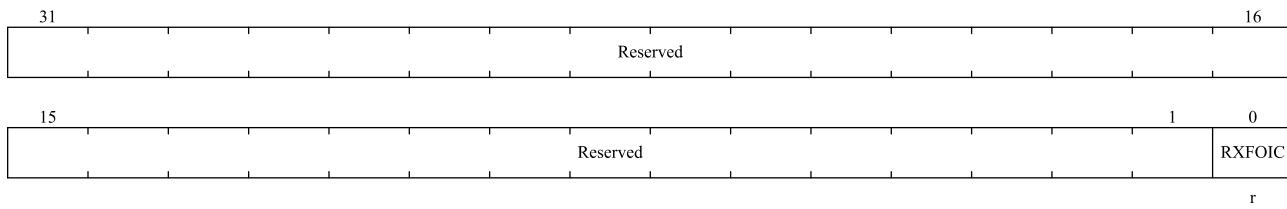


| 位域 | 名称 | 描述 |
|------|----------|---------------------------|
| 31:1 | Reserved | 保留, 必须保持复位值 |
| 0 | TXFOIC | 读该寄存器后, 清除 Tx FIFO 上溢中断状态 |

23.6.17 QSPI 接收缓存上溢中断清除寄存器 (QSPI_RXFOI_CLR)

偏移地址: 0x3C

复位值: 0x0000 0000

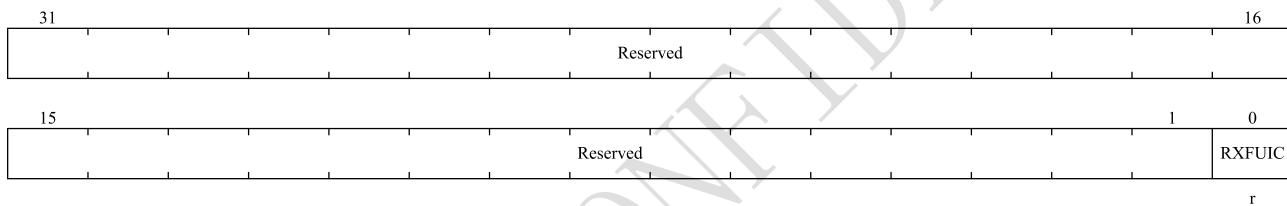


| 位域 | 名称 | 描述 |
|------|----------|---|
| 31:1 | Reserved | 保留, 必须保持复位值 |
| 0 | RXFOIC | Clear Receive FIFO Overflow Interrupt. 读该寄存器后, 清除 Rx FIFO 上溢中断状态 |

23.6.18 QSPI 接收缓存下溢中断清除寄存器 (QSPI_RXFUI_CLR)

偏移地址: 0x40

复位值: 0x0000 0000

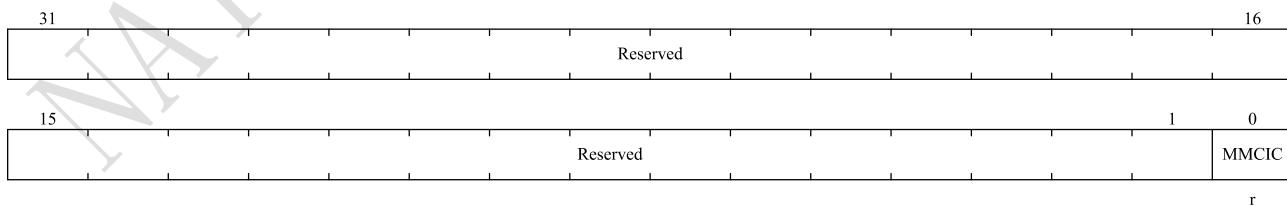


| 位域 | 名称 | 描述 |
|------|----------|--|
| 31:1 | Reserved | 保留, 必须保持复位值 |
| 0 | RXFUIC | Clear Receive FIFO Underflow Interrupt. 读该寄存器后, 清除 Rx FIFO 下溢中断状态 |

23.6.19 QSPI 多主冲突中断清除寄存器 (QSPI_MMCI_CLR)

偏移地址: 0x44

复位值: 0x0000 0000

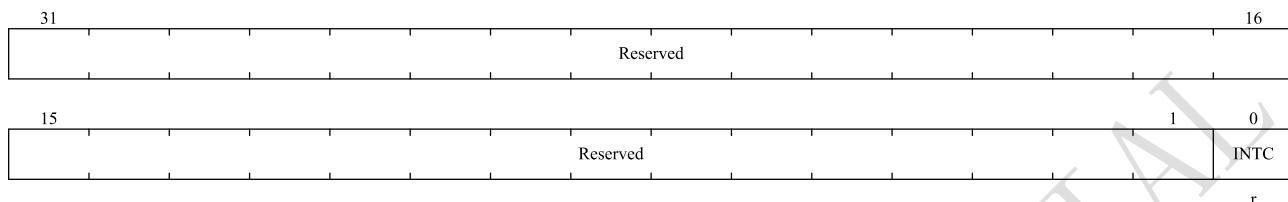


| 位域 | 名称 | 描述 |
|------|----------|--|
| 31:1 | Reserved | 保留, 必须保持复位值 |
| 0 | MMCIC | Clear Multi-Master Contention Interrupt. 读该寄存器后, 清除多主冲突中断状态 |

23.6.20 QSPI 中断清除寄存器 (QSPI_ICLR)

偏移地址: 0x48

复位值: 0x0000 0000

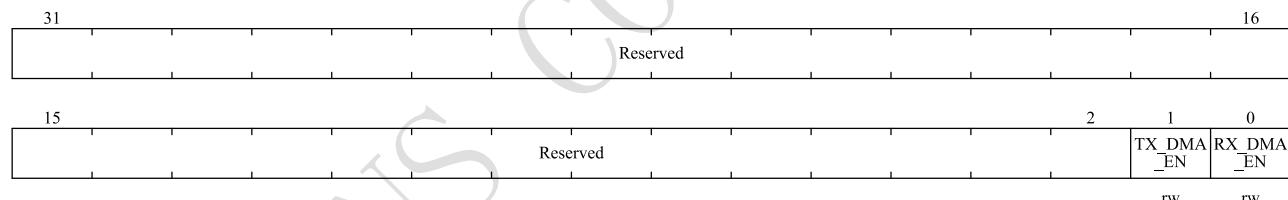


| 位域 | 名称 | 描述 |
|------|----------|---|
| 31:1 | Reserved | 保留, 必须保持复位值 |
| 0 | INTC | Clear Interrupts. 读该寄存器后, 清除发送缓存上溢中断、接收缓存上溢中断、接收缓存下溢中断、多主冲突中断状态。 |

23.6.21 QSPI DMA 控制寄存器 (QSPI_DMA_CTRL)

偏移地址: 0x4C

复位值: 0x0000 0000

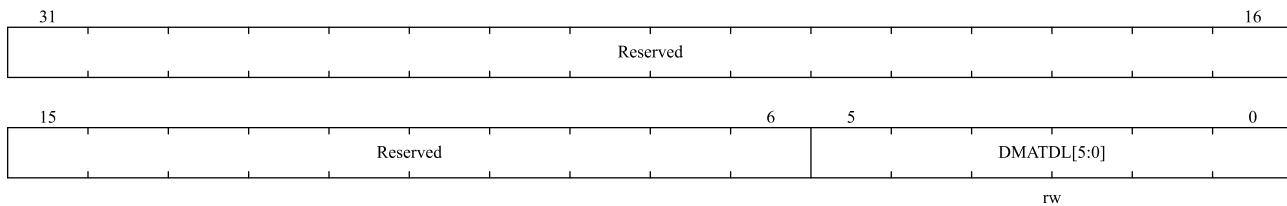


| 位域 | 名称 | 描述 |
|------|-----------|-------------------------------|
| 31:2 | Reserved | 保留, 必须保持复位值 |
| 1 | TX_DMA_EN | Tx DMA 功能使能 0: 禁能 1: 使能 |
| 0 | RX_DMA_EN | Rx DMA 功能使能 0: 禁能 1: 使能 |

23.6.22 QSPI DMA 发送水位控制寄存器 (QSPI_DMATDL_CTRL)

偏移地址: 0x50

复位值: 0x0000 0000

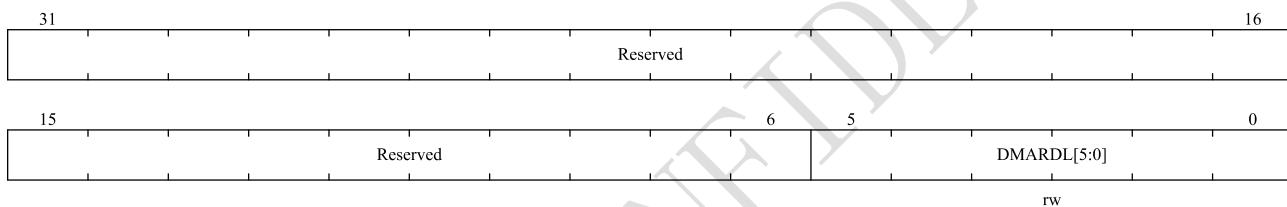


| 位域 | 名称 | 描述 |
|------|-------------|------------------|
| 31:6 | Reserved | 保留, 必须保持复位值 |
| 5:0 | DMATDL[5:0] | 发出 DMA 发送请求的水位控制 |

23.6.23 QSPI DMA 接收水位控制寄存器 (QSPI_DMARDL_CTRL)

偏移地址: 0x54

复位值: 0x0000 0000

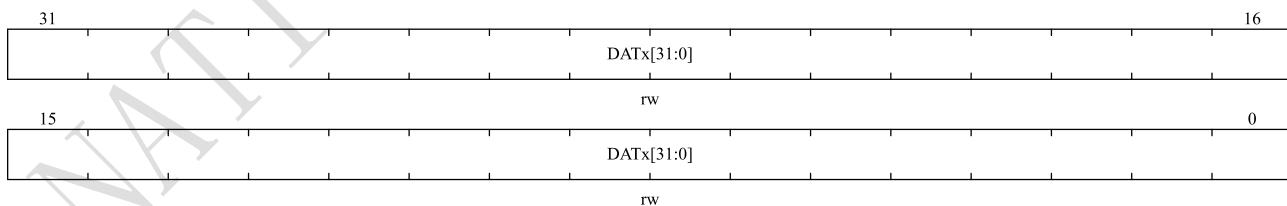


| 位域 | 名称 | 描述 |
|------|-------------|------------------|
| 31:6 | Reserved | 保留, 必须保持复位值 |
| 5:0 | DMARDL[5:0] | 发出 DMA 接收请求的水位控制 |

23.6.24 QSPI 数据寄存器 (QSPI_DATx)

偏移地址: 0x60+0x04 × x (x=0~31)

复位值: 0x0000 0000



| 位域 | 名称 | 描述 |
|------|------------|---|
| 31:0 | DATx[31:0] | Data Register 数据寄存器 Rx 状态下为接收缓冲区, 读取数据自动右对齐; Tx 状态下为发送缓冲区, 写数据必须对数据进行右对齐。 注意: 共 32 个寄存器地址为 0x60+(0:31) × 0x04 |

23.6.25 QSPI 接收采样延迟寄存器 (QSPI_RS_DELAY)

偏移地址: 0xF0

复位值: 0x0000 0000

| | | | | | | | | | | | | |
|----|-----------|--|--|--|--|--|--|--|--|--|----|----|
| 31 | Reserved | | | | | | | | | | 17 | 16 |
| 15 | Reserved | | | | | | | | | | rw | 0 |
| 8 | SDCN[7:0] | | | | | | | | | | rw | |

| 位域 | 名称 | 描述 |
|-------|-----------|--|
| 31:17 | Reserved | 保留, 必须保持复位值 |
| 16 | SES | 采样沿选择位 0: 上升沿采样 1: 下降沿采样 注意: 采样沿选择位配置的是 QSPI 在内核时钟 AHB 的上升沿或下降沿采样 |
| 15:8 | Reserved | 保留, 必须保持复位值 |
| 7:0 | SDCN[7:0] | 延迟采样周期位 这位配置的是延迟采样的 AHB 周期数量。 注意: 当超过 0x6 时, 将采用 0 延迟采样。 |

23.6.26 QSPI 增强型 SPI 模式控制寄存器 (QSPI_ENH_CTRL0)

此寄存器用于增强型 SPI 操作模式下控制串行数据传输。只有当 QSPI_CTRL0.SPI_FRF ≠ 00 时, 配置此寄存器才有效。在 QSPI_EN 寄存器使能后, 无法写入此寄存器。

偏移地址: 0xF4

复位值: 0x0000 0200

| | | | | | | | | | | | | | | | |
|----------|------------------|----|----------|-------------|---|----------|---|----------|---------------|--|----|----|-------------|------------|----|
| 31 | 30 | 29 | Reserved | | | | | | | | | | 18 | 17 | 16 |
| Reserved | CLK_STRETCH_EN | | | | | | | | | | | | INST_DDR_EN | SPI_DDR_EN | |
| rw | | | 11 | 10 | 9 | 8 | 7 | 6 | 5 | | 2 | rw | 1 | rw | 0 |
| | WAIT_CYCLES[4:0] | | Reserved | INST_L[1:0] | | Reserved | | Reserved | ADDR_LEN[3:0] | | rw | | rw | rw | |

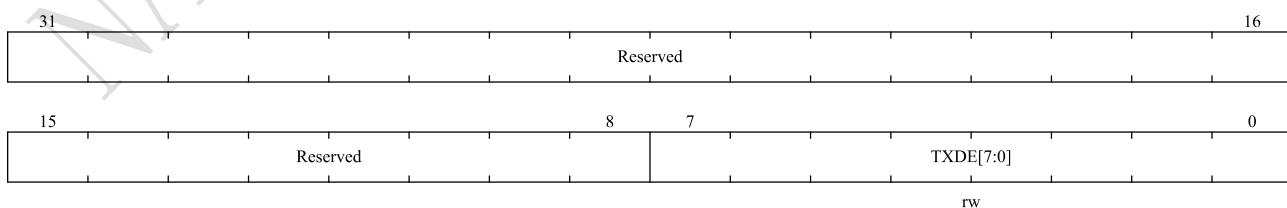
| 位域 | 名称 | 描述 |
|----|----------------|--|
| 31 | Reserved | 保留, 必须保持复位值 |
| 30 | CLK_STRETCH_EN | 时钟拉伸 在写入的情况下, 如果 FIFO 为空, 则 QSPI 将拉伸时钟, 直到 FIFO 有足够的数据。 在读取的情况下, 如果 FIFO 为满, 则 QSPI 将停止时钟, 直到 FIFO 有足够的空间。 |

| 位域 | 名称 | 描述 |
|-------|------------------|---|
| 29:18 | Reserved | 保留, 必须保持复位值 |
| 17 | INST_DDR_EN | 指令双速率传输使能 |
| 16 | SPI_DDR_EN | DDR 模式使能 将启用 SPI 的 2/4 线模式下所有的双速率传输。 |
| 15:11 | WAIT_CYCLES[4:0] | 等待周期 在控制帧发送和数据接收之间的等待周期, 以 SCK 时钟为周期。 |
| 10 | Reserved | 保留, 必须保持复位值 |
| 9:8 | INST_L[1:0] | 2/4 线模式指令长度 00: 无指令 01: 4bit 10: 8 bit 11: 16 bit |
| 7:6 | Reserved | 保留, 必须保持复位值 |
| 5:2 | ADDR_LEN[3:0] | 要传输的地址长度 0x0: 无地址 0x1: 4bit 0x2: 8bit 0x3: 12bit 0xE: 56bit 0xF: 60bit |
| 1:0 | TRANS_TYPE[1:0] | 地址和指令传输格式 00: 标准 SPI 模式 01: 指令以标准 SPI 模式发送, 地址以 QSPI_CTRL0.SPI_FRF 制定模式发送 10: 指令和地址以 QSPI_CTRL0.SPI_FRF 制定模式发送 11: 保留 |

23.6.27 QSPI 发送驱动边沿寄存器 (QSPI_DDR_TXDE)

偏移地址: 0xF8

复位值: 0x0000 0000



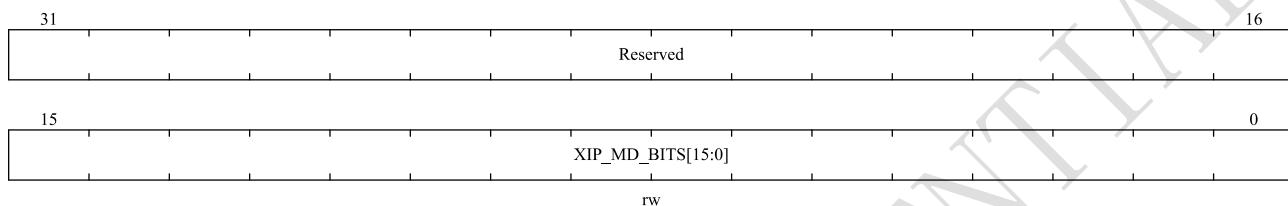
| 位域 | 名称 | 描述 |
|------|-----------|-------------|
| 31:8 | Reserved | 保留, 必须保持复位值 |
| 7:0 | TXDE[7:0] | 发送驱动边沿 |

| 位域 | 名称 | 描述 |
|----|----|--|
| | | 决定 DDR 模式下内核时钟发送数据的驱动边沿, 该寄存器的最大值=QSPI_BAUD/2 - 1。 |

23.6.28 QSPI XIP MODE BITS 寄存器 (QSPI_XIP_MODE)

偏移地址: 0xFC

复位值: 0x0000 0000

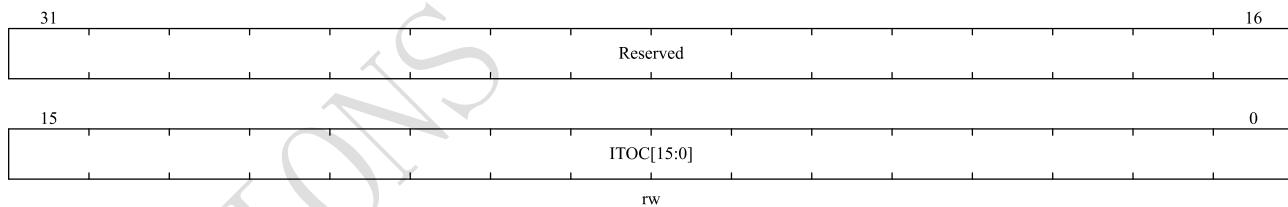


| 位域 | 名称 | 描述 |
|-------|--------------------|--|
| 31:16 | Reserved | 保留, 必须保持复位值 |
| 15:0 | XIP_MD_BITS [15:0] | XIP Mode bits 在 XIP 传输的 Address 阶段后发送的 Mode bits。 |

23.6.29 QSPI XIP INCR 传输操作码寄存器 (QSPI_XIP_INCR_TOC)

偏移地址: 0x100

复位值: 0x0000 0000



| 位域 | 名称 | 描述 |
|-------|------------|--|
| 31:16 | Reserved | 保留, 必须保持复位值 |
| 15:0 | ITOC[15:0] | XIP_INCR 传输操作码 当 QSPI_XIP_CTRL.XIP_INST_EN=1, QSPI 发送 XIP INCR 类型传输指令码。指令阶段要发送的位数由 QSPI_XIP_CTRL.INST_L 字段确定。 |

23.6.30 QSPI XIP WRAP 传输操作码寄存器 (QSPI_XIP_WRAP_TOC)

偏移地址: 0x104

复位值: 0x0000 0000

| | | |
|----|------------|----|
| 31 | Reserved | 16 |
| 15 | WTOC[15:0] | 0 |

rw

| 位域 | 名称 | 描述 |
|-------|------------|--|
| 31:16 | Reserved | 保留, 必须保持复位值 |
| 15:0 | WTOC[15:0] | XIP_WRAP 传输操作码 当 QSPI_XIP_CTRL.XIP_INST_EN=1, QSPI 发送 XIP_WRAP 类型传输指令码。指令阶段要发送的位数由 QSPI_XIP_CTRL.INST_L 字段确定。 |

23.6.31 QSPI XIP 控制寄存器 (QSPI_XIP_CTRL)

偏移地址: 0x108

复位值: 0x28C0 0402

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|------------------|-------------|----------|--------------|----------|----------|----|-----------|----|-------------|----|----------|----|-------------|----|--------|----|--------|----|------------------|----|----|----|----|--|
| 31 | Reserved | 28 | XIP_MBL[1:0] | 27 | Reserved | 26 | XIP_CT_EN | 25 | XIP_INST_EN | 24 | Reserved | 23 | INST_DDR_EN | 22 | DDR_EN | 21 | DFS_HC | 20 | WAIT_CYCLES[4:0] | 19 | 18 | 17 | 16 | |
| 15 | | 13 | | 12 | rw | 11 | rw | 10 | rw | 9 | rw | 8 | rw | 7 | rw | 4 | rw | 3 | rw | 2 | 1 | rw | 0 | |
| WAIT_CYCLES[4:0] | MD_BI_TS_EN | Reserved | INST_L[1:0] | Reserved | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

rw rw

| 位域 | 名称 | 描述 |
|-------|------------------|---|
| 31:28 | Reserved | 保留, 必须保持复位值 |
| 27:26 | XIP_MBL[1:0] | XIP 模式下 Mode bits 位宽 00: 2 01: 4 10: 8 11: 16 |
| 25:24 | Reserved | 保留, 必须保持复位值 |
| 23 | XIP_CT_EN | XIP 模式下启用连续传输。 |
| 22 | XIP_INST_EN | XIP 指令使能。 使能后, XIP 传输也将具有指令阶段。将根据 AHB 传输类型从 XIP_INCR_TOC 或 XIP_WRAP_TOC 寄存器中选择指令操作码 |
| 21 | Reserved | 保留, 必须保持复位值 |
| 20 | INST_DDR_EN | 指令双速率传输使能 |
| 19 | DDR_EN | SPI DDR 模式使能 将启用 SPI 的 2/4 线模式下所有的双速率传输。 |
| 18 | DFS_HC | Fix DFS for XIP transfers. 0: 数据帧 SIZE 和数量取决于 AHB 总线的 HSIZE 和 HBURST 信号 1: XIP 数据帧长度固定为 QSPI_CTRL0.DFS 的配置值 |
| 17:13 | WAIT_CYCLES[4:0] | Wait Cycles |

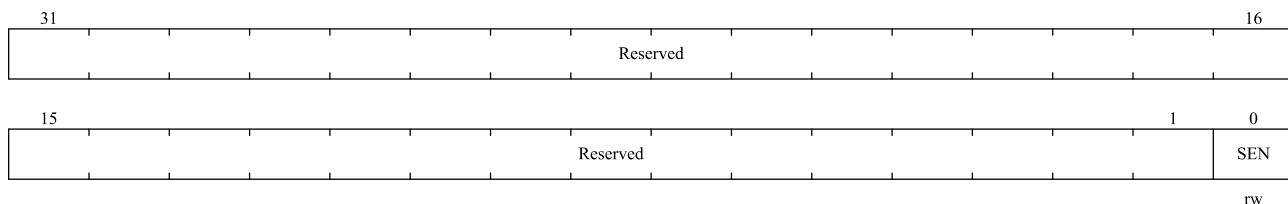
| 位域 | 名称 | 描述 |
|------|-----------------|--|
| | | 在控制帧发送和数据接收之间的等待周期，以 SCK 时钟为周期。 |
| 12 | MD_BITS_EN | XIP Mode bits 使能 使能后在 XIP 模式中将在 Address 阶段后插入 Mode bits。这些位在 XIP_MODE 寄存器中设置。Mode bits 长度通常为 8 bit。 |
| 11 | Reserved | 保留，必须保持复位值 |
| 10:9 | INST_L[1:0] | 2/4 线模式指令长度 00: 无指令 01: 4bit 10: 8 bit 11: 16 bit |
| 8 | Reserved | 保留，必须保持复位值 |
| 7:4 | ADDR_LEN[3:0] | 要传输的地址长度 0x0: 无地址 0x1: 4bit 0x2: 8bit 0x3: 12bit 0xE: 56bit 0xF: 60bit |
| 3:2 | TRANS_TYPE[1:0] | 地址和指令传输格式 00: 标准 SPI 模式 01: 指令以标准 SPI 模式发送，地址以 QSPI_XIP_CTRL.FRF[1:0]制定模式发送 10: 指令和地址以 QSPI_XIP_CTRL.FRF[1:0]制定模式发送 11: 保留 |
| 1:0 | FRF[1:0] | 帧格式选择 00: 保留 01: 2 线 10: 4 线 11: 保留 |

23.6.32 QSPI XIP 从设备使能寄存器 (QSPI_XIP_SLAVE_EN)

使能 QSPI_EN 寄存器，QSPI_XIP_SLAVE_EN 寄存器才会被启用，用于外部从设备选择使能片选。

偏移地址: 0x10C

复位值: 0x0000 0000

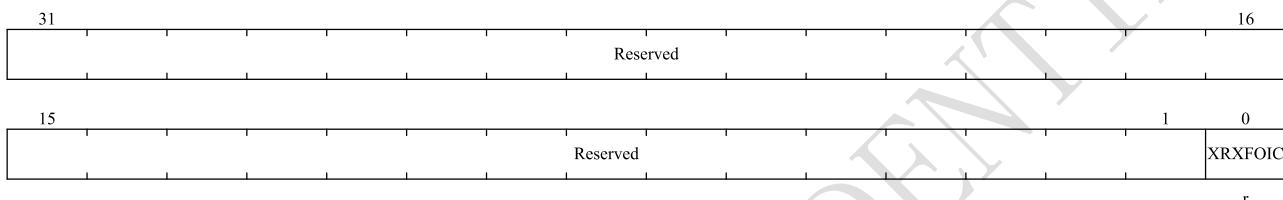


| 位域 | 名称 | 描述 |
|-------|----------|-----------------------------|
| 31:31 | Reserved | 保留, 必须保持复位值 |
| 0 | SEN | 外部从设备片选使能 0: 禁能 1: 使能 |

23.6.33 QSPI XIP 接收缓存上溢中断清除寄存器 (QSPI_XIP_RXFOI_CLR)

偏移地址: 0x110

复位值: 0x0000 0000

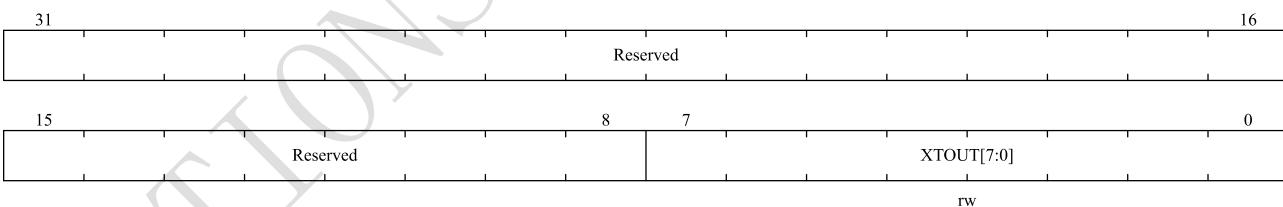


| 位域 | 名称 | 描述 |
|------|----------|---|
| 31:1 | Reserved | 保留, 必须保持复位值 |
| 0 | XRXFOIC | Clear XIP Receive FIFO Overflow Interrupt. 读该寄存器后, 清除 Rx FIFO 上溢中断状态 |

23.6.34 QSPI XIP 连续传输超时寄存器 (QSPI_XIP_TOUT)

偏移地址: 0x114

复位值: 0x0000 0000



| 位域 | 名称 | 描述 |
|------|------------|--|
| 31:8 | Reserved | 保留, 必须保持复位值 |
| 7:0 | XTOUT[7:0] | XIP 连续传输超时时间配置 以 AHB 为单位的 XIP 超时时间。一旦在连续 XIP 模式中选择了从机, 如果没有请求的时间超出了该计数器指定时间, 将取消从机选择。 |

24 比较器 (COMP)

COMP 模块用于比较两个输入模拟电压的大小，并根据比较结果输出高/低电平。当“INP”输入端电压高于“INM”输入端电压时，比较器输出为高电平，当“INP”输入端电压低于“INM”输入端电压时，比较器输出为低电平。

24.1 COMP 系统连接框图

COMP 模块最多支持 7 个独立比较器，统一挂接在 APB1 总线上。

图 24-1 比较器 1 和比较器 2 系统连接图

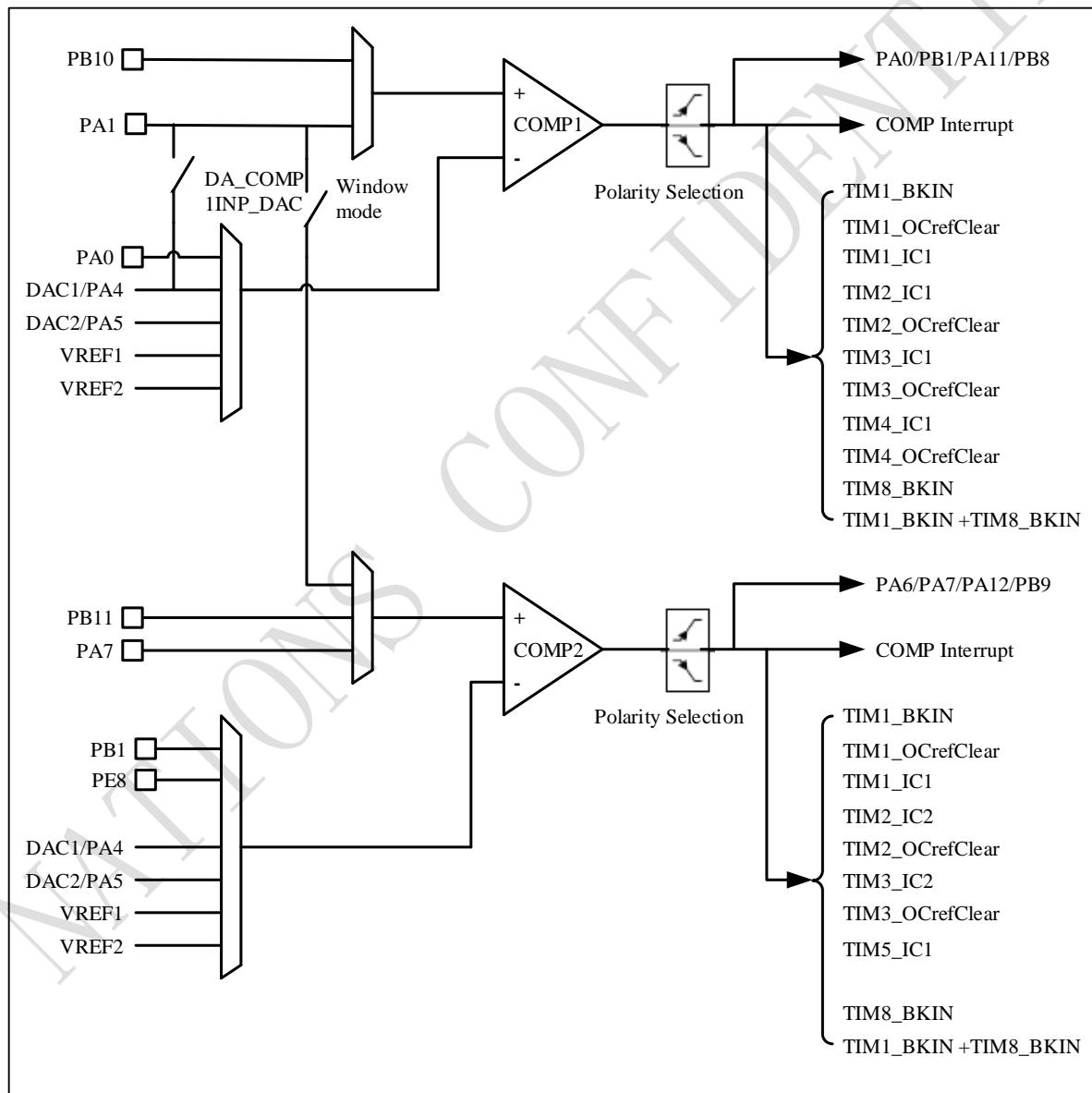


图 24-2 比较器 3 和比较器 4 系统连接图

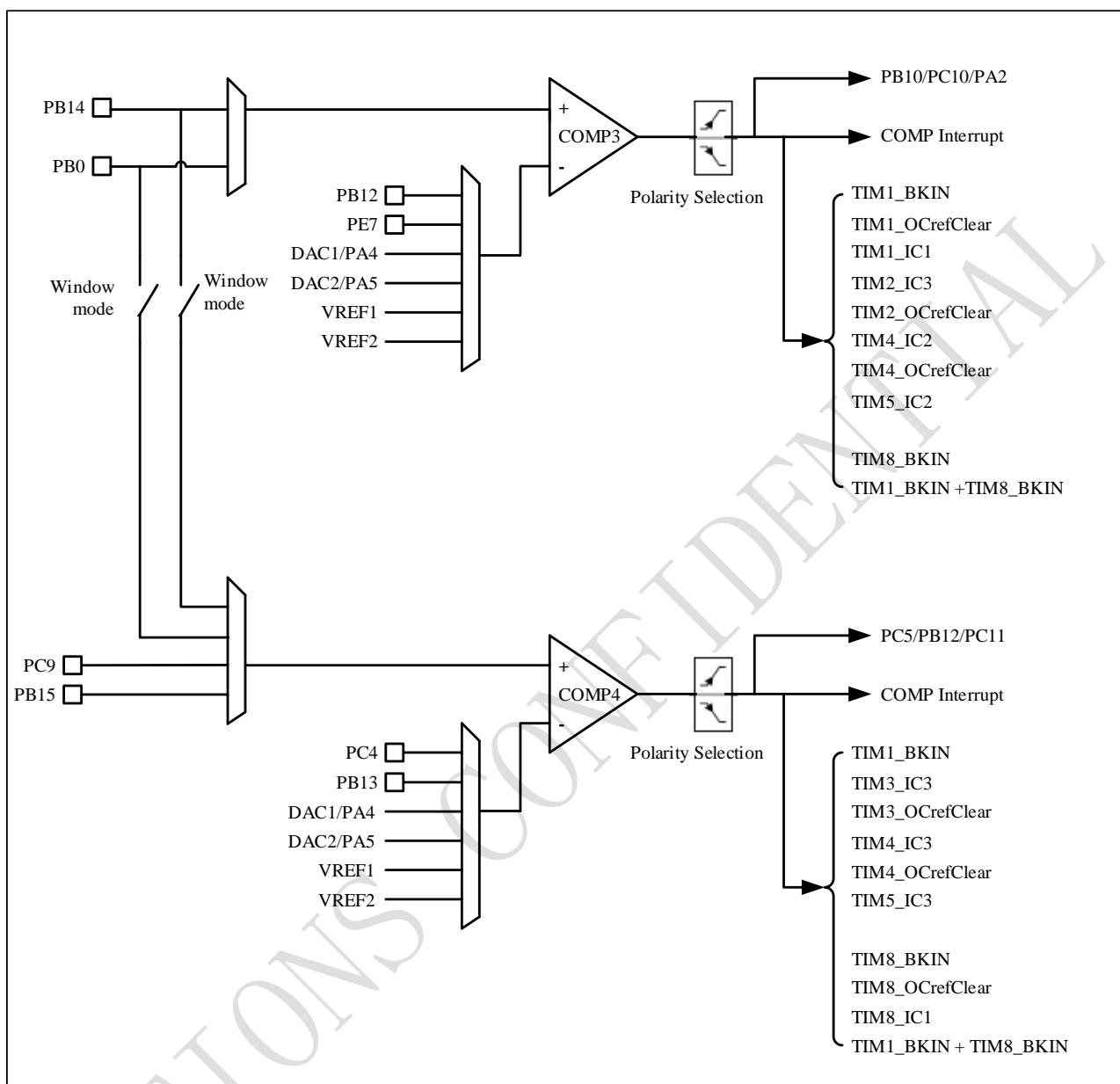
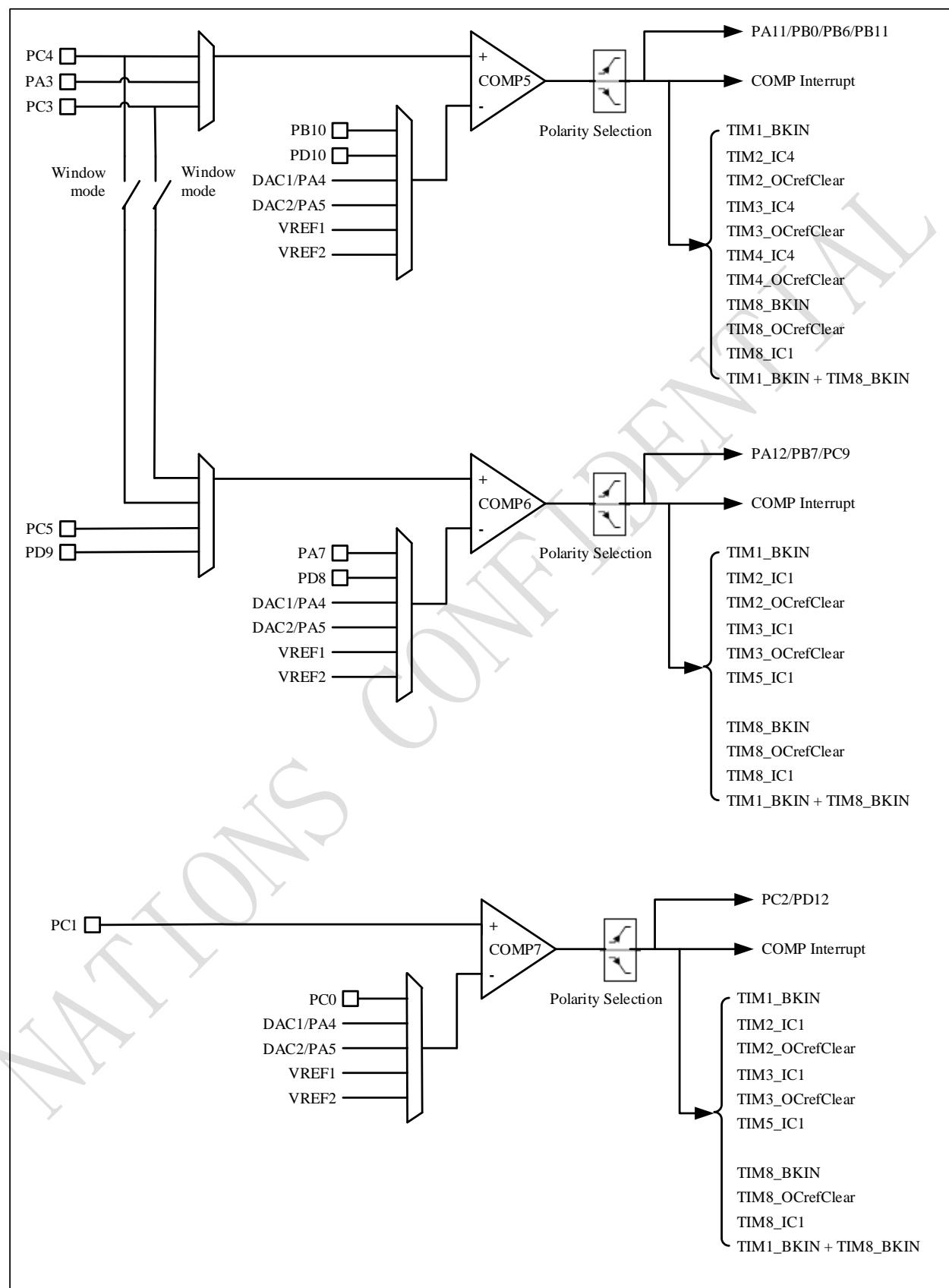


图 24-3 比较器 5, 比较器 6, 比较器 7 系统连接图



24.2 COMP 特性

- 最多 7 个独立的比较器
- 内置两个 64 级可编程的比较电压参考源 VREF1, VREF2
- 支持滤波时钟, 滤波复位
- 输出极性可配置高、低
- 迟滞配置可配置无、低、中、高
- 比较结果可输出到 I/O 端口或触发定时器, 用于捕获事件、OCREF_CLR 事件、刹车事件、产生中断
- 输入通道可复选 I/O 端口、DAC 的通道输出、VREF1、VREF2
- 可配只读或读写, 在锁定的情况下需要复位才能解锁
- 支持消隐 (Blanking), 可配置产生 Blanking 的消隐源
- COMP1/COMP2、COMP3/COMP4、COMP5/COMP6 可以组成窗口比较器
- 可通过产生中断的方式将系统从 Sleep 模式唤醒
- 可配置滤波窗口大小
- 可配置滤波阈值大小
- 可配置用于滤波的采样频率

24.3 COMP 配置流程

完整的配置项包括如下所示, 某些项目如果采用系统默认配置, 跳过相应的配置项。

- 可配置的迟滞等级 COMPx_CTRL.HYST[1:0]。
- 配置输出极性 COMPx_CTRL.POL。
- 配置输入选择, 比较器正极 COMPx_CTRL.INPSEL[3:0], 负极 COMPx_CTRL.INMSEL [2:0]。
- 配置输出选择 COMPx_CTRL.OUTSEL[3:0]。
- 配置消隐源 COMPx_CTRL.BLKING[2:0]。
- 配置比较器窗口模式 COMP_WINMODE.CMP12MD。
- 配置滤波器采样窗口 COMPx_FILC.SAMPW[4:0]。
- 配置阈值 COMPx_FILC.THRESH[4:0] (阈值应当大于 COMPx_FILC.SAMPW[4:0]/2)。
- 配置滤波器采样频率 (对于计时器应用, 采样频率应当大于 5MHz。)
- 打开滤波器使能 COMPx_FILC.FILEN。
- 打开比较器使能 COMPx_CTRL.EN。

注意:对于以上步骤, 需先打开滤波器使能, 再打开比较器使能, 比较器使能需要在滤波 (若启用) 配置、使能完成后启用, 此外在比较器控制寄存器锁定的情况下, 只有通过复位才能取消锁定。

24.4 COMP 工作模式

24.4.1 窗口模式

比较器可以组合成 3 个窗口比较器，如下：

- 比较器 1 和比较器 2 共享 PA1 形成窗口比较器
- 比较器 3 和比较器 4 共享 PB14 或 PB0 形成窗口比较器
- 比较器 5 和比较器 6 共享 PC3 或 PC4 形成窗口比较器

24.4.2 独立比较器

7 个比较器可独立配置，完成比较器功能。比较器的输出可以输出到 IO 端口，每一个比较器都有不同的重映射端口，通过配置 COMPx_CTRL.OUTTRG[3:0]可以选择比较器的输出，连接到相应的端口。

比较器输出，支持触发事件，比如可以配置成定时器 1，定时器 8 的刹车功能。

注：具体配置参考比较器互联关系

24.5 比较器互联关系

比较器输出端口的互联，可以参考 AFIO 寄存器章节，定义了比较器 OUT 重映射的值，具体配置如下表所示。

| OUT | COMP1[1:0] | COMP2[3:2] | COMP3[5:4] | COMP[7:6] | COMP5[9:8] | COMP6[11:10] | COMP7[12] |
|-----|------------|------------|------------|-----------|------------|--------------|-----------|
| 00 | PA0 | PA6 | PB10 | PC5 | PB0 | PC9 | PC2 |
| 01 | PB1 | PA7 | PC10 | PB12 | PB11 | PA12 | PD12 |
| 10 | PA11 | PA12 | Not Used | Not Used | PB6 | Not Used | -- |
| 11 | PB8 | PB9 | PA2 | PC11 | PA11 | PB7 | -- |

注意：

1. COMP7 只有 1 位控制输出重映射
2. COMP1、COMP2、COMP5、COMP7 使能后，COMP1_OUT、COMP2_OUT、COMP5_OUT、COMP7_OUT 对应的 IO 端口，不能配置成其他外设的输出模式，可以是其他外设的输入模式、GPIO 的输入、GPIO 的输出。

比较器 INP 引脚有如下配置

| INPSEL | COMP1 | COMP2 | COMP3 | COMP4 | COMP5 | COMP6 | COMP7 |
|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 000 | PA1 | PA1 | PB14 | PB14 | PC4 | PC4 | PC1 |
| 001 | PB10 | PB11 | PB0 | PB0 | PC3 | PC3 | -- |
| 010 | -- | PA7 | -- | PC9 | PA3 | PC5 | -- |
| 011 | -- | -- | -- | PB15 | -- | PD9 | -- |
| 100 | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- |
| Other | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- |

比较器 INM 引脚有如下配置

| INMSEL | COMP1 | COMP2 | COMP3 | COMP4 | COMP5 | COMP6 | COMP7 |
|--------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 000 | PA0 | PB1 | PB12 | PC4 | PB10 | PA7 | PC0 |
| 001 | DAC1/PA4 | PE8 | PE7 | PB13 | PD10 | PD8 | DAC1/PA4 |
| 010 | DAC2/PA5 | DAC1/PA4 | DAC1/PA4 | DAC1/PA4 | DAC1/PA4 | DAC1/PA4 | DAC2/PA5 |
| 011 | VREF1 | DAC2/PA5 | DAC2/PA5 | DAC2/PA5 | DAC2/PA5 | DAC2/PA5 | VREF1 |
| 100 | VREF2 | VREF1 | VREF1 | VREF1 | VREF1 | VREF1 | VREF2 |
| 101 | -- | VREF2 | VREF2 | VREF2 | VREF2 | VREF2 | -- |
| Other | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- |

比较器输出 TRIG 的信号有如下互联关系

| TRIG | COMP1 | COMP2 | COMP3 | COMP4 | COMP5 | COMP6 | COMP7 |
|-------|-----------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|-----------------------------|
| 0000 | NC | NC | NC | NC | NC | NC | NC |
| 0001 | TIM1_BKIN | TIM1_BKIN | TIM1_BKIN | TIM1_BKIN | TIM1_BKIN | TIM1_BKIN | TIM1_BKIN |
| 0010 | TIM1_IC1 | TIM1_IC1 | TIM1_IC1 | TIM3_IC3 | TIM2_IC4 | TIM2_IC1 | TIM2_IC1 |
| 0011 | TIM1_OCre fclear | TIM1_OCrefcl ear | TIM1_OCrefcl ear | TIM3_OCrefcl ear | TIM2_OCrefcl ear | TIM2_OCrefcl ear | TIM2_OCrefc lear |
| 0100 | TIM2_IC1 | TIM2_IC2 | TIM2_IC3 | TIM4_IC3 | TIM3_IC4 | TIM3_IC1 | TIM3_IC1 |
| 0101 | TIM2_OCre fclear | TIM2_OCrefcl ear | TIM2_OCrefcl ear | TIM4_OCrefcl ear | TIM3_OCrefcl ear | TIM3_OCrefcl ear | TIM3_OCrefc lear |
| 0110 | TIM3_IC1 | TIM3_IC2 | TIM4_IC2 | TIM5_IC3 | TIM4_IC4 | TIM5_IC1 | TIM5_IC1 |
| 0111 | TIM3_OCre fclear | TIM3_OCrefcl ear | TIM4_OCrefcl ear | -- | TIM4_OCrefcl ear | -- | -- |
| 1000 | TIM4_IC1 | TIM5_IC1 | TIM5_IC2 | TIM8_IC1 | TIM8_IC1 | TIM8_IC1 | TIM8_IC1 |
| 1001 | TIM4_OCre fclear | -- | -- | TIM8_OCrefcl ear | TIM8_OCrefcl ear | TIM8_OCrefcl ear | TIM8_OCrefc lear |
| 1010 | TIM8_BKIN | TIM8_BKIN | TIM8_BKIN | TIM8_BKIN | TIM8_BKIN | TIM8_BKIN | TIM8_BKIN |
| 1011 | TIM1_BKIN + TIM8_BKIN | TIM1_BKIN + TIM8_BKIN | TIM1_BKIN + TIM8_BKIN |
| Other | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- |

24.6 中断

COMP 支持中断响应，COMP1, COMP2, COMP3 共享 1 个中断入口，COMP4, COMP5, COMP6 共享 1 个中断入口，COMP7 独占 1 个中断入口。中断产生有如下 2 种情况。

- COMP_x_CTRL.POL 极性不反转，中断使能，当 INPSEL > INMSEL 时，COMP_x_CTRL.OUT 由硬件置为 1 时即产生比较器中断。
- COMP_x_CTRL.POL 极性反转，中断使能，当 INPSEL < INMSEL 时，COMP_x_CTRL.OUT 由硬件置为 1 时即产生比较器中断。

24.7 COMP 寄存器

24.7.1 COMP 寄存器总览

表 24-1 COMP 寄存器总览

| Offset | Register | 31 | 30 | 29 | 28 | 27 | 26 | 25 | 24 | 23 | 22 | 21 | 20 | 19 | 18 | 17 | 16 | 15 | 14 | 13 | 12 | 11 | 10 | 9 | 8 | 7 | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | 0 | | | | | | | | | |
|--------|--------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|--|--|--|--|--|--|--|--|--|
| 044h | COMP4_FILC | | | | | | | | | | | Reserved | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Reset Value | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 048h | COMP4_FILP | | | | | | | | | | | Reserved | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Reset Value | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 04Ch | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 050h | COMP5_CTRL | | | | | | | | | | | Reserved | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Reset Value | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 054h | COMP5_FILC | | | | | | | | | | | Reserved | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Reset Value | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 058h | COMP5_FILP | | | | | | | | | | | Reserved | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Reset Value | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 05Ch | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 060h | COMP6_CTRL | | | | | | | | | | | Reserved | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Reset Value | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 064h | COMP6_FILC | | | | | | | | | | | Reserved | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Reset Value | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 068h | COMP6_FILP | | | | | | | | | | | Reserved | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Reset Value | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 06Ch | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 070h | COMP7_CTRL | | | | | | | | | | | Reserved | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Reset Value | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 074h | COMP7_FILC | | | | | | | | | | | Reserved | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Reset Value | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 078h | COMP7_FILP | | | | | | | | | | | Reserved | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Reset Value | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 07Ch | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 080h | COMP_WINMODE | | | | | | | | | | | Reserved | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Reset Value | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

| Offset | Register | 31 | 30 | 29 | 28 | 27 | 26 | 25 | 24 | 23 | 22 | 21 | 20 | 19 | 18 | 17 | 16 | 15 | 14 | 13 | 12 | 11 | 10 | 9 | 8 | 7 | 6 | CMP6LK | CMP5LK | CMP4LK | CMP3LK | CMP2LK | CMP1LK | CMP0LK |
|--------|--------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|---|---|---|---|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 084h | COMP_LOCK | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Reset Value | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 088h | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 08Ch | COMP_INTEN | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Reset Value | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 090h | COMP_INTSTS | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Reset Value | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 094h | COMP_VREFSCL | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Reset Value | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

24.7.2 COMP 控制状态寄存器 (COMPx_CTRL)

比较器 1 的 INPDAC 有效, 比较器 2 到比较器 7, INPDAC 位无效。

偏移地址:0x10, 0x20, 0x30, 0x40, 0x50, 0x60, 0x70

复位值:0x0000 0000

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|-------------|-----------|-----|----|----|-------------|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--------|-----|--------------|--|
| 31 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | INPDAC | OUT | BLKING [2:0] | |
| 15 | 14 | 13 | 12 | 11 | 10 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | rw | r | rw | |
| BLKING[2:0] | HYST[1:0] | POL | | | OUTTRG[3:0] | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

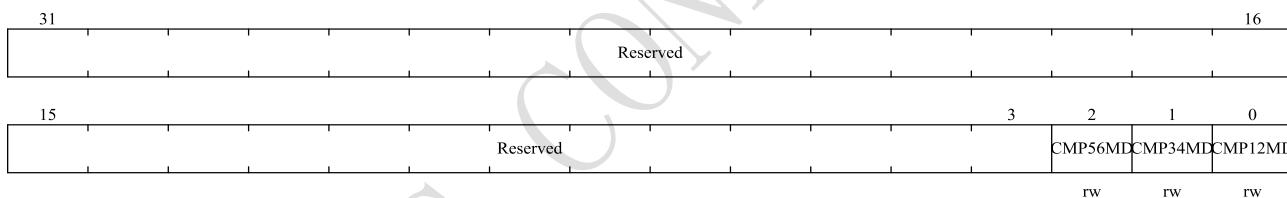
| 位域 | 名称 | 描述 |
|-------|-------------|---|
| 31:19 | Reserved | 保留, 必需保持复位值。 |
| 18 | INPDAC | 比较器 1 非反向输入端的 PA1 和 DAC 输出的连接选择 0: 连接 PA1; 1: 连接 DAC 输出。 注意: 仅 COMP1 支持此位。 |
| 17 | OUT | 这个只读位是比较器输出状态 0: 输出低(非反向输入低于反向输入输入); 1: 输出高(非反向输入高于反向输入输入)。 |
| 16:14 | BLKING[2:0] | 这些位选择哪个定时器输出控制比较器输出消隐。 000: 不消隐; 001: 选择 Tim1 OC5 作为消隐源; 010: 选择 Tim8 OC5 作为消隐源; 其他配置:保留。 |
| 13:12 | HYST[1:0] | 这些位选择比较器的迟滞等级 00: 无迟滞; 01: 低迟滞; |

| 位域 | 名称 | 描述 |
|------|-------------|---|
| | | 10: 中等迟滞; 11: 高迟滞。 |
| 11 | POL | 该位用于反转比较器 1 的输出 0: 输出未反转; 1: 输出反转。 |
| 10:7 | OUTTRG[3:0] | 比较器输出连接选择 注意: 具体枚举值对应关系参考 24.5 章节 “比较器互联关系”。 |
| 6:4 | INPSEL[2:0] | 比较器非反向输入端选择 注意: 具体枚举值对应关系参考 24.5 章节 “比较器互联关系”。 |
| 3:1 | INMSEL[2:0] | 比较器反向输入端选择 注意: 具体枚举值对应关系参考 24.5 章节 “比较器互联关系”。 |
| 0 | EN | 该位打开/关闭比较器 0: 比较器已禁用; 1: 比较器已启用。 |

24.7.3 COMP 窗口比较寄存器 (COMP_WINMODE)

偏移地址:0x80

复位值:0x0000 0000



| 位域 | 名称 | 描述 |
|------|----------|--|
| 31:3 | Reserved | 保留, 必需保持复位值。 |
| 2 | CMP56MD | 该位选择窗口模式: 比较器的两个非反向输入端共享 PC3 或 PC4 输入 0: 比较器 5 和 6 不在窗口模式; 1: 比较器 5 和 6 用于窗口模式。 |
| 1 | CMP34MD | 该位选择窗口模式: 比较器的两个非反向输入端共享 PB14 或 PB0 输入 0: 比较器 3 和 4 不在窗口模式; 1: 比较器 3 和 4 用于窗口模式。 |
| 0 | CMP12MD | 该位选择窗口模式: 比较器的两个非反向输入端共享 PA1 输入 0: 比较器 1 和 2 不在窗口模式; 1: 比较器 1 和 2 用于窗口模式。 |

24.7.4 COMP 锁寄存器 (COMP_LOCK)

偏移地址:0x84

复位值:0x0000 0000

| 31 | Reserved | 16 |
|------|----------|---|
| 15 | Reserved | 7 6 5 4 3 2 1 0 |
| | | <small>rw rw rw rw rw rw rw rw</small> |
| 位域 | 名称 | 描述 |
| 31:7 | Reserved | 保留, 必需保持复位值。 |
| 6 | CMP7LK | 仅写一次, 是由软件控制的, 只能通过系统重置来清除 设置此位可以将 COMP7_CTRL 设置为只读 0: COMP7_CTRL 是可读写的; 1: COMP7_CTRL 是只读的。 |
| 5 | CMP6LK | 同 CMP7LK 的功能。 |
| 4 | CMP5LK | 同 CMP7LK 的功能。 |
| 3 | CMP4LK | 同 CMP7LK 的功能。 |
| 2 | CMP3LK | 同 CMP7LK 的功能。 |
| 1 | CMP2LK | 同 CMP7LK 的功能。 |
| 0 | CMP1LK | 同 CMP7LK 的功能。 |

24.7.5 COMP 中断使能寄存器 (COMP_INTEN)

偏移地址:0x8C

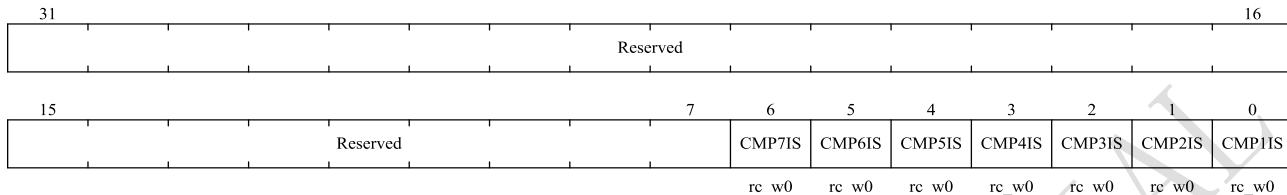
复位值:0x0000 0000

| 31 | Reserved | 16 |
|------|----------|---|
| 15 | Reserved | 7 6 5 4 3 2 1 0 |
| | | <small>rw rw rw rw rw rw rw rw</small> |
| 位域 | 名称 | 描述 |
| 31:7 | Reserved | 保留, 必需保持复位值。 |
| 6 | CMP7IEN | 该位控制 COMP7 的中断启用 0: 禁用; 1: 启用。 注意: COMPx_CTRL.OUT 高电平触发中断。 |
| 5 | CMP6IEN | 同 CMP7IEN 的功能。 |
| 4 | CMP5IEN | 同 CMP7IEN 的功能。 |
| 3 | CMP4IEN | 同 CMP7IEN 的功能。 |
| 2 | CMP3IEN | 同 CMP7IEN 的功能。 |
| 1 | CMP2IEN | 同 CMP7IEN 的功能。 |
| 0 | CMP1IEN | 同 CMP7IEN 的功能。 |

24.7.6 COMP 中断状态寄存器 (COMP_INTSTS)

偏移地址:0x90

复位值:0x0000 0000

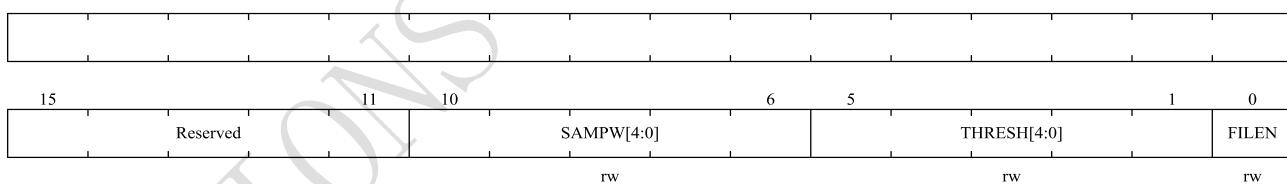


| 位域 | 名称 | 描述 |
|------|----------|----------------------|
| 31:7 | Reserved | 保留, 必需保持复位值。 |
| 6 | CMP7IS | COMP7 中断状态位, 写 0 清除。 |
| 5 | CMP6IS | 同 CMP7IS 的功能。 |
| 4 | CMP5IS | 同 CMP7IS 的功能。 |
| 3 | CMP4IS | 同 CMP7IS 的功能。 |
| 2 | CMP3IS | 同 CMP7IS 的功能。 |
| 1 | CMP2IS | 同 CMP7IS 的功能。 |
| 0 | CMP1IS | 同 CMP7IS 的功能。 |

24.7.7 COMP 滤波寄存器 (COMPx_FILC)

偏移地址:0x14, 0x24, 0x34, 0x44, 0x54, 0x64, 0x74

复位值:0x0000 0000



| 位域 | 名称 | 描述 |
|-------|-------------|---|
| 31:11 | Reserved | 保留, 必需保持复位值。 |
| 31:11 | Reserved | 保留, 必需保持复位值。 |
| 10:6 | SAMPW[4:0] | 滤波器采样窗口大小, 采样窗口= SAMPW + 1。 |
| 5:1 | THRESH[4:0] | 滤波器门限置, 样本窗口中至少出现相反状态的采样阈值, 才能改变输出状态, 此值要求大于 SAMPW / 2。 |
| 0 | FILEN | 过滤器启用 0: 禁用; 1: 启用。 |

24.7.8 COMP 滤波分频寄存器 (COMPx_FILP)

偏移地址:0x18, 0x28, 0x38, 0x48, 0x58, 0x68, 0x78

复位值:0x0000 0000

31 16

Reserved

15 0

CLKPSC[15:0]

rw

| 位域 | 名称 | 描述 |
|-------|--------------|--|
| 31:16 | Reserved | 保留，必需保持复位值。 |
| 15:0 | CLKPSC[15:0] | 低通滤波采样时钟预分频，系统时钟分频数 = CLKPSC + 1 0: 每 1 个时钟； 1: 每 2 个时钟； 2: 每 3 个时钟； ... |

24.7.9 COMP 电压参考寄存器 (COMP_VREFSCL)

偏移地址:0x94

复位值:0x0000 0000

| | | | | | | | | | | | |
|----|----------|----|--|---|---|---|--|--|---|---|----|
| 31 | Reserved | | | | | | | | | | 16 |
| 15 | 14 | 13 | | 8 | 7 | 6 | | | 1 | 0 | |

| 位域 | 名称 | 描述 |
|-------|---------------|----------------------------------|
| 31:14 | Reserved | 保留，必需保持复位值。 |
| 13:8 | VREF2SET[5:0] | VREF2 电压定标器微调值。 |
| 7 | VREF2EN | VREF2 电压定标器： 0: 禁用； 1: 启用。 |
| 6:1 | VREF1SET[5:0] | VREF1 电压定标器微调值。 |
| 0 | VREF1EN | VREF1 电压定标器： 0: 禁用； 1: 启用。 |

25 运算放大器 (OPAMP)

OPAMP 模块可以灵活配置，适用于独立运算放大器、可编程增益放大器(PGA)，和跟随器等模式应用。内部的运算放大器可以配置为具有不同增益的组合放大器，也可以使用外部电阻进行级联。OPAMP 的输入范围是 0V 到 VDDA，输出范围是 0.1V 到 VDDA-0.1V。

25.1 OPAMP 特性

- 4 个独立配置运放
- 支持轨到轨输入，输入范围是 0V 到 VDDA，输出范围是 0.1V 到 VDDA-0.1V 可编程增益
- OPAMP 通过外部电阻连接可配置为仪表放大器
- 多种工作模式可配置：
 - ◆ 独立运放模式
 - ◆ 跟随模式
 - ◆ 可编程增益放大模式
 - ◆ 两个运放的差分运放
- 可编程增益设置为 2X、4X、8X、16X、32X
- 增益带宽：4MHz
- 支持 TIM1_CC6 对 OPAMP1 和 OPAMP2 输入 PIN 的自动切换，TIM8_CC6 对 OPAMP3 和 OPAMP4 的输入 PIN 自动切换
- 支持独立写保护

25.1.1 OPAMP 功能描述

四个 OPAMP 通过寄存器选择可以配置为各种不同的 PGA 模式，也可以配置为用户使用外部元件的 OPAMP 功能。OPAMP 的输出可以作为 ADC 的通道输入，四个 OPAMP 输出连接到 ADC 的模拟通道如下。

OPAMP1 的输出连接到 ADC1 的模拟输入通道 3

OPAMP2 的输出连接到 ADC2 的模拟输入通道 3

OPAMP3 的输出连接到 ADC3 的模拟输入通道 1

OPAMP4 的输出连接到 ADC4 的模拟输入通道 3

图 25-1 OPAMP1 和 OPAMP2 连接图框图

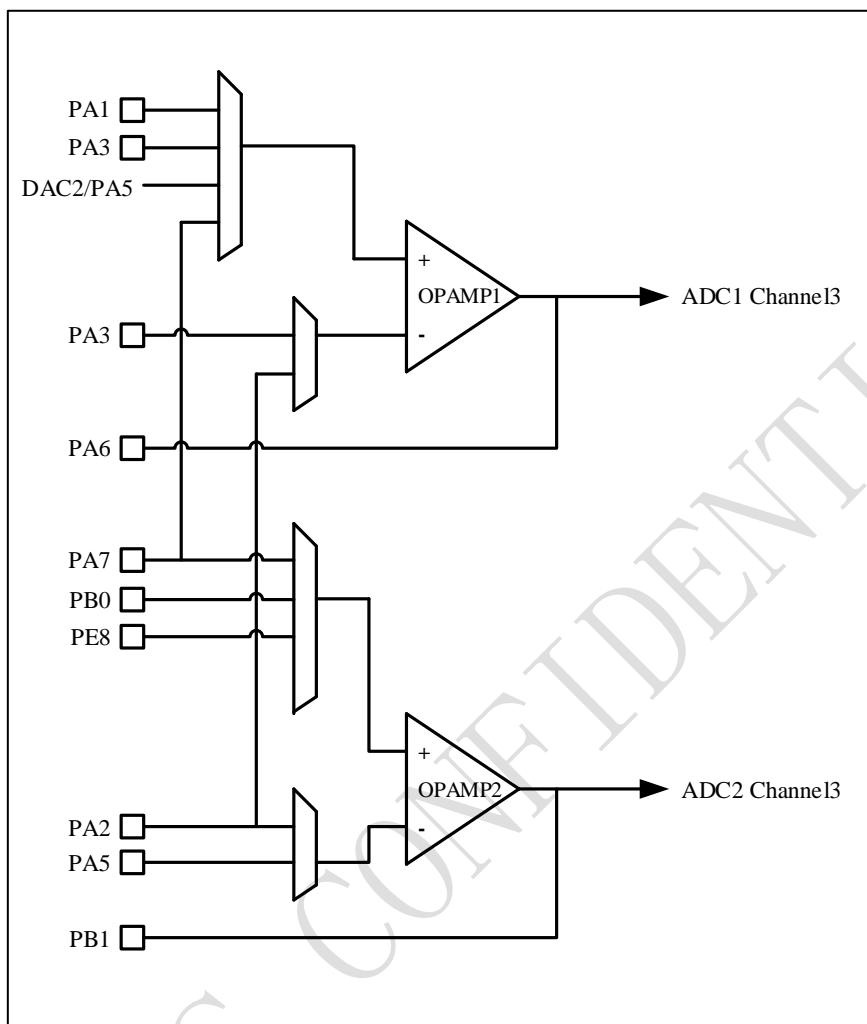
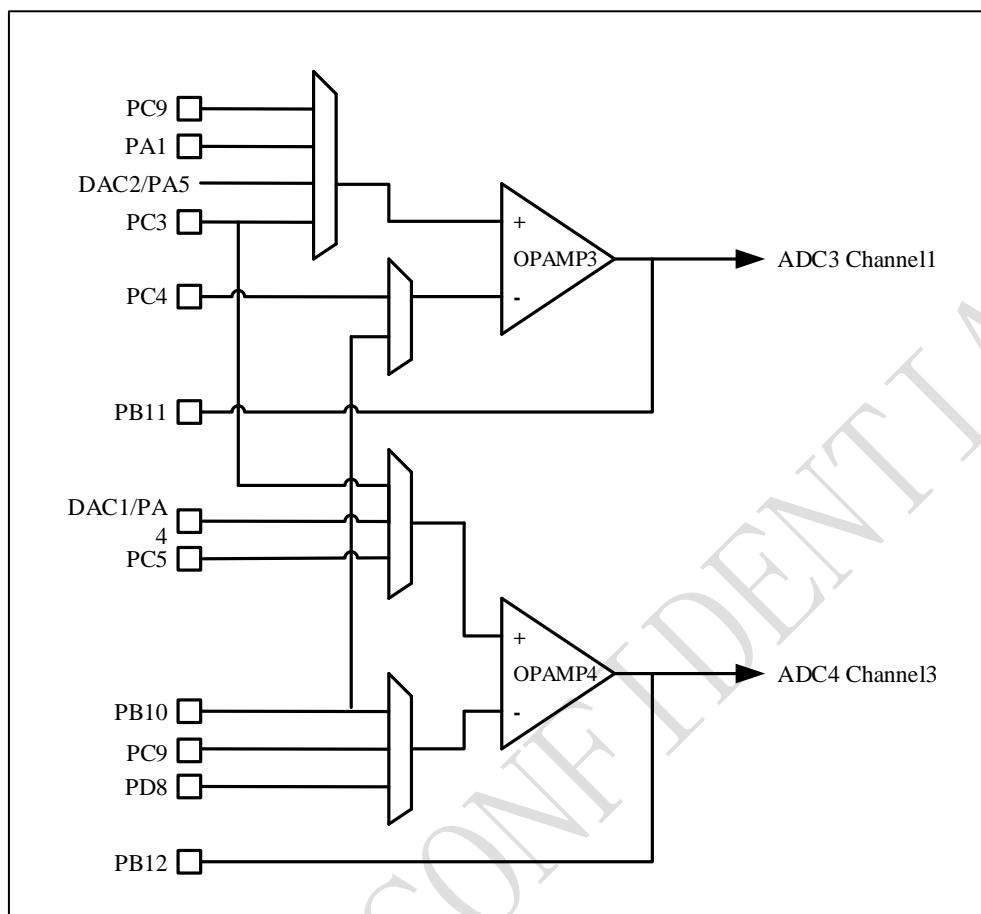


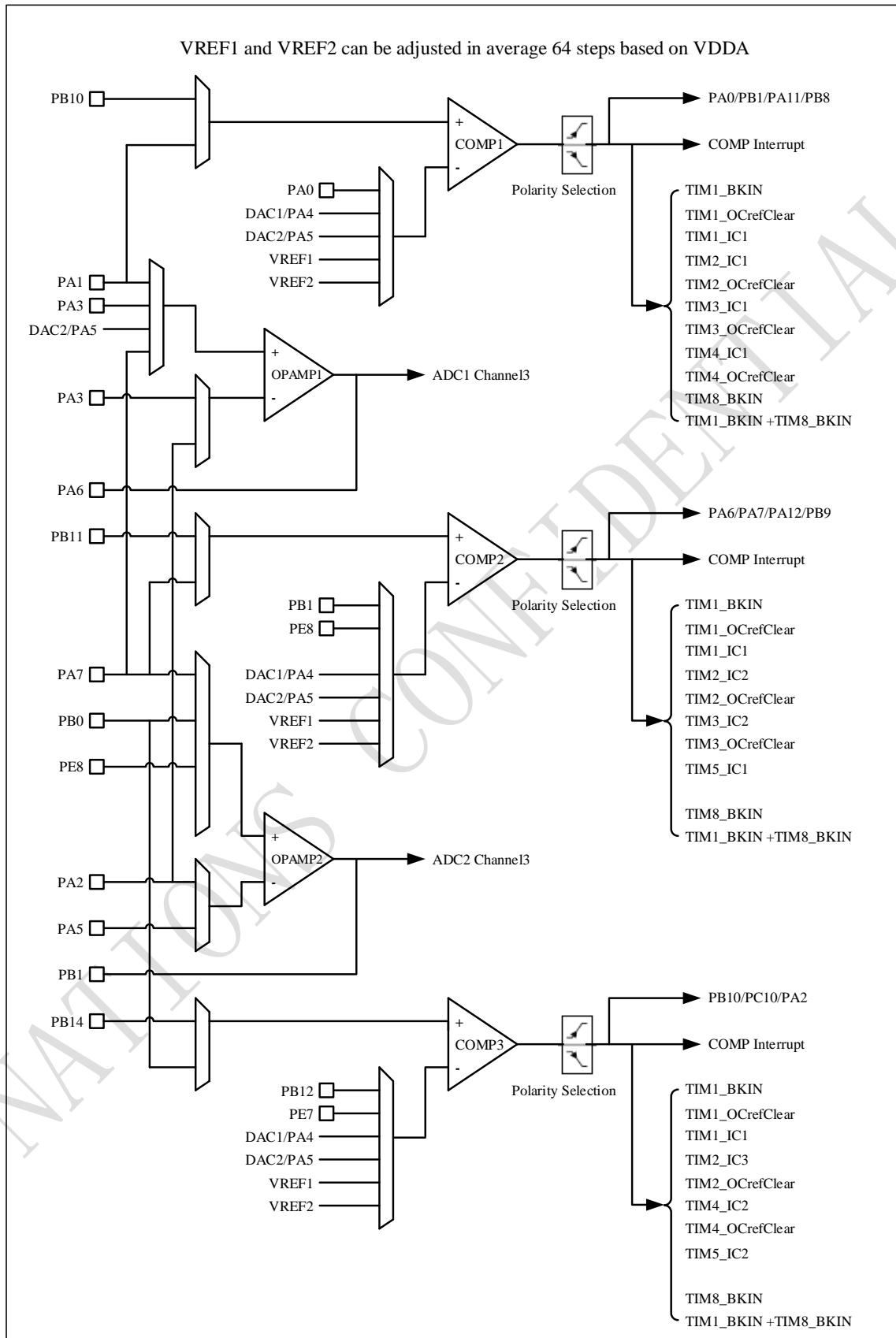
图 25-2 OPAMP3 和 OPAMP4 连接图框图



25.1.2 OPAMP 与 COMP 的内部的连接

OPAMP1、OPAMP2、COMP1、COMP2、COMP3、ADC1 和 ADC2 构成一组模拟联动应用，其拓扑关系如下：

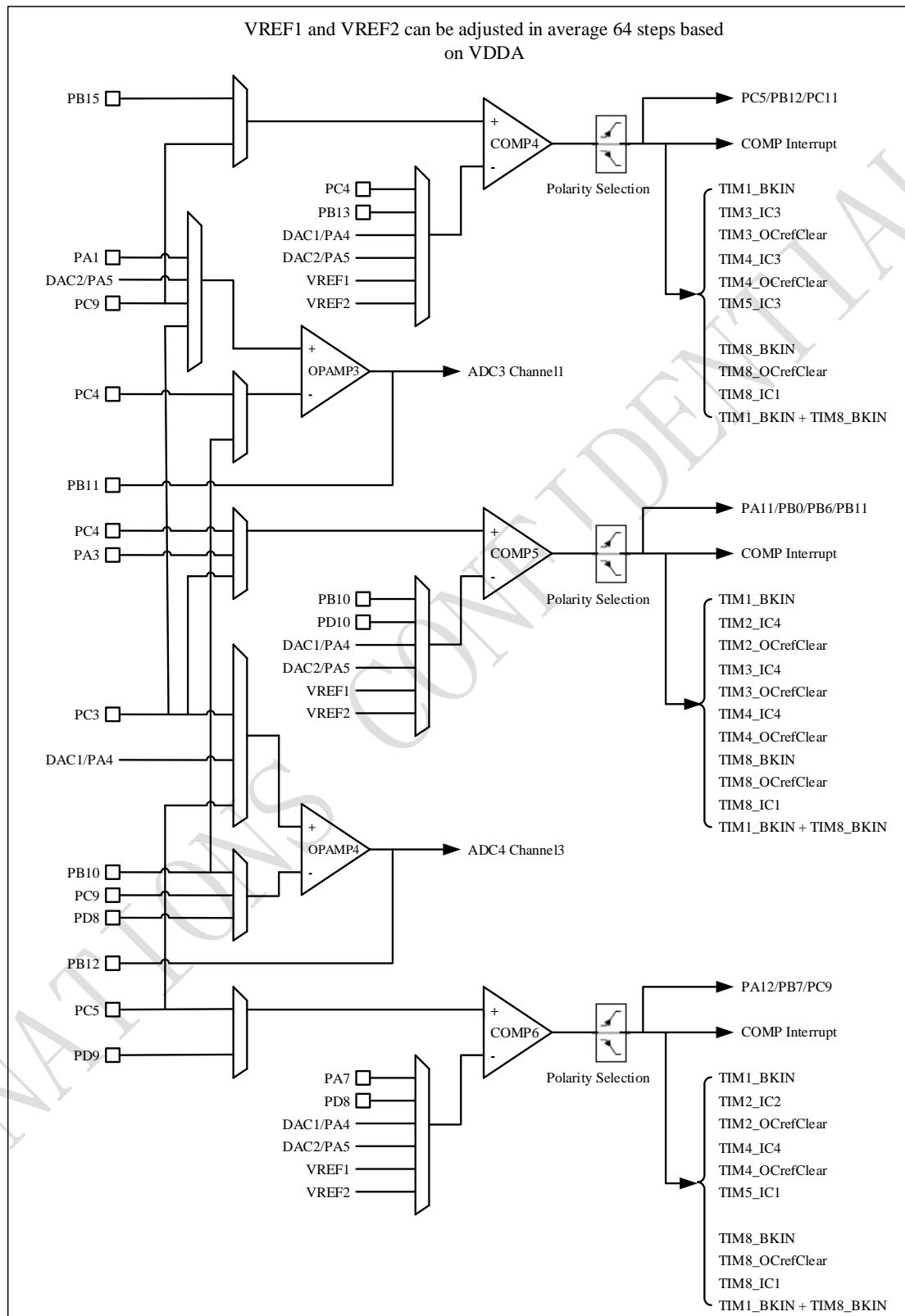
图 25-3 模拟模块联动关系 1



OPAMP3、OPAMP4、COMP4、COMP5、COMP6、ADC3 和 ADC4 构成一组模拟联动应用，其拓扑关系如

下：

图 25-4 模拟模块联动关系 2



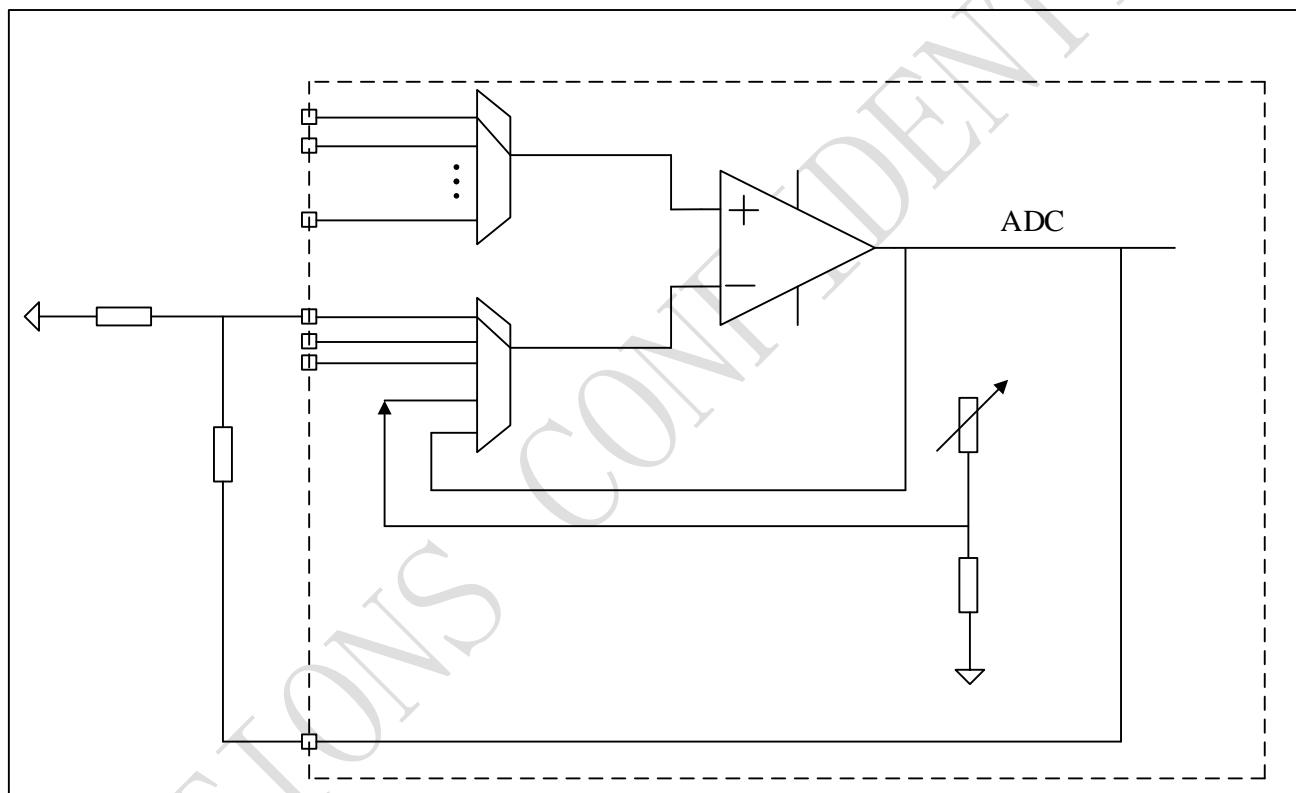
25.2 OPAMP 工作模式

25.2.1 OPAMP 独立运算放大器模式

外部放大模式即放大倍数由连接的电阻电容决定。OPAMPx_CS.MOD 设置为 2'b00 或 2'b01 时为运放功能，OPAMPx_CS.VPSSEL 或 OPAMPx_CS.VPSEL 选择正端输入，OPAMPx_CS.VMSSEL 或 OPAMPx_CS.VMSEL 选择负端输入。使用外部电阻组成闭环放大系统。

四个完全独立 OPAMP，此时增益大小由外部电阻网络决定，也可以按需要进行级联，组成所需要的放大增益，如下图所示，OPAMP 正端、负端、输出端均连接至外部端口，放大系数由外部阻容网络决定。

图 25-5 OPAMP 独立运算放大器模式



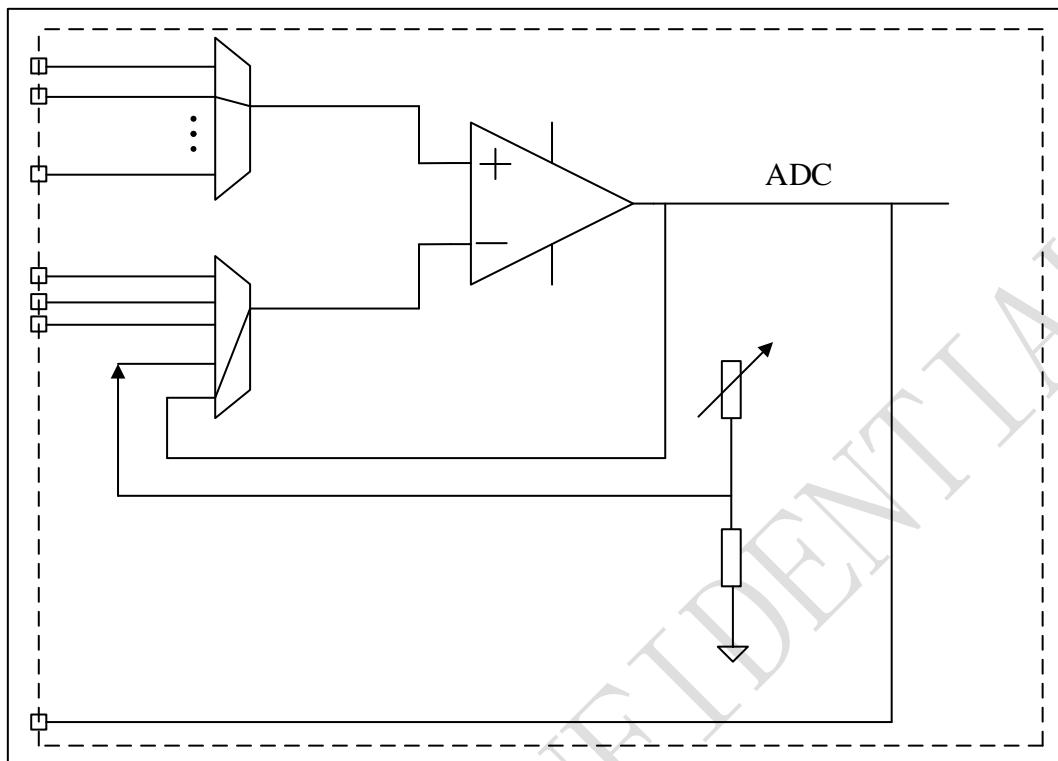
25.2.2 OPAMP 跟随模式

跟随模式，电压是直接跟随，VMSEL 端必须配置为和 OPAMP 输出端口直连。

OPAMPx_CS.MOD 设置为 2'b11 为内部跟随功能，OPAMPx_CS.VPSSEL 或 OPAMPx_CS.VPSEL 选择正端输入，OPAMPx_CS.VMSSEL 或 OPAMPx_CS.VMSEL 由芯片内部连接到输出端口。

没有占用的 VM 引脚可以作为其他 GPIO 使用。

图 25-6 OPAMP 跟随模式



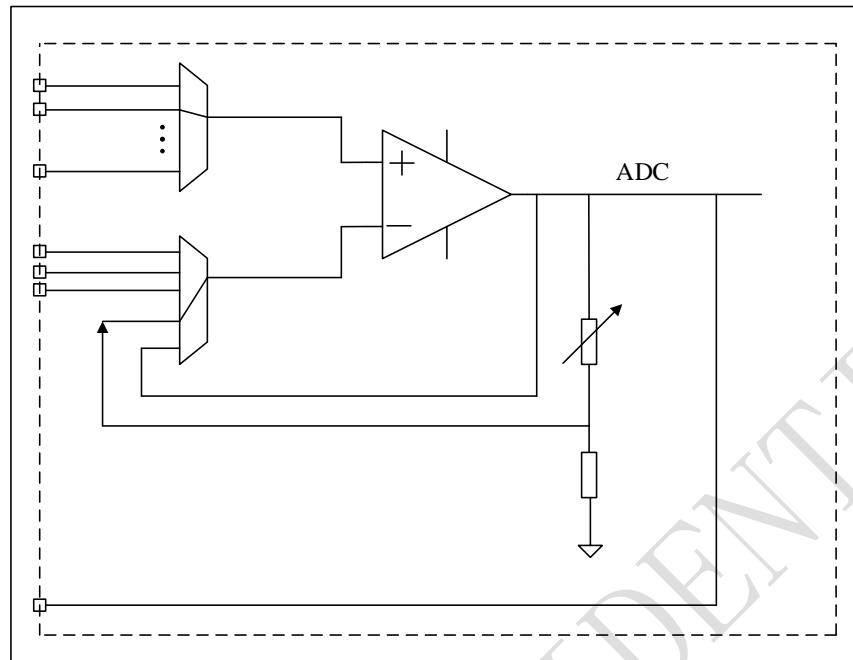
25.2.3 OPAMP 内部可编程增益（PGA）模式

内部放大模式，即 PGA 模式，通过内置的电阻反馈网络对输入电压进行放大。

OPAMPx_CS.MOD 设置为 2'b10 为 PGA 功能，支持 2/4/8/16/32 放大倍数，OPAMPx_CS.VMSSEL 或 OPAMPx_CS.VMSEL 引脚必须设置为浮空。OPAMPx_CS.VPSSEL 或 OPAMPx_CS.VPSEL 选择正端输入。正端输入可以连接到外部引脚，该外部引脚可以是其他 OPAMP 的输出端口或者电阻网络。设置 OPAMPx_CS.PGAGAN，进行增益选择。OPAMP 的输出可以是其他 OPAMP 的输入或者电阻网络。

OPAMP 的 VM 输入引脚可以作为普通 GPIO 使用。

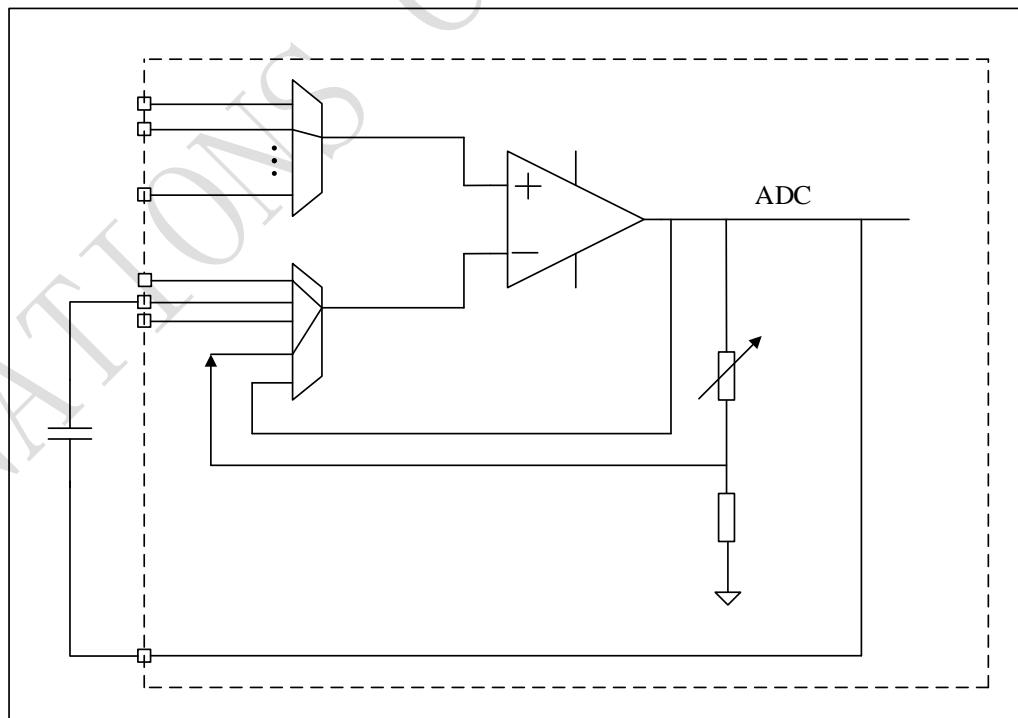
图 25-7 内部可编程增益模式



25.2.4 OPAMP 带滤波内部增益模式

带滤波内部放大模式，即在内部 PGA 模式下，放大电压可调，支持 2/4/8/16/32，同时 OPAMPx_CS.VPSSEL 或 OPAMAPx_CS.VPSEL 引脚设置为和外部引脚相连，在 OPAMP 负端可以连接电容等元件。

图 25-8 带滤波内部增益模式



25.2.5 OPAMP 校正

芯片出产已进行校正，用户可以根据实际环境，再次进行校正。

注意：具体校正方法联系国民技术，获取相关资料。

25.2.6 OPAMP 独立写保护

通过配置 OPAMP_LOCK 寄存器，可以对 4 个 OPAMP 的写保护进行独立设置。当设置了写保护后，软件将不能对相应 OPAMP 寄存器进行写操作，只有在芯片复位后，才能取消写保护功能。

25.2.7 OPAMP TIMER 控制切换模式

在一些应用中，可以通过 TIMx_CC6 对运放进行输入切换。TIM1_CC6 控制 OPAMP1 和 OPAMP2 的输入切换，TIM8_CC6 控制 OPAMP3 和 OPAMP4 的输入切换。

当 TIM1_CC6 为 1 时 OPAMP1 和 OPAMP2 选择 VPSSEL/VMSSEL 所配置端口作为输入，否则使用 VPSEL/VMSEL。当 TIM8_CC6 为 1 时 OPAMP3 和 OPAMP4 选择 VPSSEL/VMSSEL 所配置端口作为输入，否则使用 VPSEL/VMSEL。

OPAMPx_CS.TCMEN 置 1，开启自动切换输入功能，配置自动切换的流程如下所示。

- 开启自动切换功能 OPAMPx_CS.TCMEN (四个 OPAMP 独立控制)
- 配置好两次转换的 MUX 配置 (VPSEL,VMSEL,VPSSEL,VMSSEL)
- 启动 OPAMP 与 TIM

25.3 OPAMP 寄存器

25.3.1 OPAMP 寄存器总览

表 25-1 OPAMP 寄存器总览

| Offset | Register | 31 | 30 | 29 | 28 | 27 | 26 | 25 | 24 | 23 | 22 | 21 | 20 | 19 | 18 | 17 | 16 | 15 | 14 | 13 | 12 | 11 | 10 | 9 | 8 | 7 | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | 0 |
|--------|-----------|----------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|-------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|-------------|----|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 000h | OPAMP_CS1 | Reserved | | | | | | | | | | VPSSEL[2:0] | | | | | | | | | | VMSSEL[1:0] | | | | | | | | | | | |
| | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | | |
| 010h | OPAMP_CS2 | Reserved | | | | | | | | | | VPSEL[2:0] | | | | | | | | | | VMSSEL[1:0] | | | | | | | | | | | |
| | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | | |
| 020h | OPAMP_CS3 | Reserved | | | | | | | | | | VPSSEL[2:0] | | | | | | | | | | VMSSEL[1:0] | | | | | | | | | | | |
| | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | | |
| 030h | OPAMP_CS4 | Reserved | | | | | | | | | | VPSEL[2:0] | | | | | | | | | | VMSSEL[1:0] | | | | | | | | | | | |
| | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | | |

| Offset | Register | 31 | 30 | 29 | 28 | 27 | 26 | 25 | 24 | 23 | 22 | 21 | 20 | 19 | 18 | 17 | 16 | 15 | 14 | 13 | 12 | 11 | 10 | 9 | 8 | 7 | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | 0 |
|--------|-------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 040h | OPAMP_LOCK | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Reset Value | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

25.3.2 OPAMP 控制状态寄存器 (OPAMPx_CS)

偏移地址: 0x00, 0x10, 0x20, 0x30

复位值: 0x0000 0000

| | | | | | | | | | | | | | | | | |
|-------|----------|--------|----------|-------|-------|-------|--------|-----|----|---|----|----|----|----|----|----|
| 31 | Reserved | | | | | | | | | | 22 | 21 | 19 | 18 | 17 | 16 |
| | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 15 | 14 | 13 | 12 | 11 | 10 | 8 | 7 | 6 | 5 | 4 | rw | 3 | 2 | 1 | rw | 0 |
| RANGE | CALOUT | TSTREF | Reserved | CALON | VPSEL | VMSEL | PGAGAN | MOD | EN | | | | | | | |
| rw | r | rw | | rw | rw | rw | rw | rw | rw | | rw | rw | rw | rw | rw | rw |

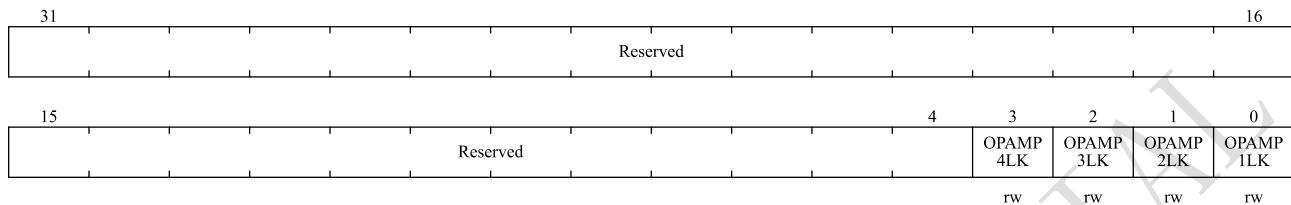
| 位域 | 名称 | 描述 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|-------|-------------|--|----------|----------|--------|--------|--------|-----|-----|-----|-----|------|-----|-----|-----|------|----------|-----|----------|-----|----------|-----|-----|-----|----|-----|----|-----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| 31:22 | Reserved | 保留, 必需保持复位值。 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 21:19 | VPSSEL[2:0] | OPAMP 正向输入端从选择 (Non inverted input secondary selection) <table border="1" data-bbox="584 1006 1426 1304"> <tr> <td>枚举值</td> <td>OPAMP1</td> <td>OPAMP2</td> <td>OPAMP3</td> <td>OPAMP4</td> </tr> <tr> <td>000</td> <td>PA1</td> <td>PA7</td> <td>PC9</td> <td>PC3</td> </tr> <tr> <td>001</td> <td>PA3</td> <td>PB0</td> <td>PA1</td> <td>DAC1/PA4</td> </tr> <tr> <td>010</td> <td>DAC2/PA5</td> <td>PE8</td> <td>DAC2/PA5</td> <td>PC5</td> </tr> <tr> <td>011</td> <td>PA7</td> <td>保留</td> <td>PC3</td> <td>保留</td> </tr> <tr> <td>100</td> <td>保留</td> <td>保留</td> <td>保留</td> <td>保留</td> </tr> <tr> <td>其他</td> <td>保留</td> <td>保留</td> <td>保留</td> <td>保留</td> </tr> </table> 注意: DAC2 直接连到 PA5 | 枚举值 | OPAMP1 | OPAMP2 | OPAMP3 | OPAMP4 | 000 | PA1 | PA7 | PC9 | PC3 | 001 | PA3 | PB0 | PA1 | DAC1/PA4 | 010 | DAC2/PA5 | PE8 | DAC2/PA5 | PC5 | 011 | PA7 | 保留 | PC3 | 保留 | 100 | 保留 | 保留 | 保留 | 保留 | 其他 | 保留 | 保留 | 保留 | 保留 |
| 枚举值 | OPAMP1 | OPAMP2 | OPAMP3 | OPAMP4 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 000 | PA1 | PA7 | PC9 | PC3 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 001 | PA3 | PB0 | PA1 | DAC1/PA4 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 010 | DAC2/PA5 | PE8 | DAC2/PA5 | PC5 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 011 | PA7 | 保留 | PC3 | 保留 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 100 | 保留 | 保留 | 保留 | 保留 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 其他 | 保留 | 保留 | 保留 | 保留 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 18:17 | VMSSEL[1:0] | OPAMP 反向输入端从选择 (Inverted input secondary selection) <table border="1" data-bbox="584 1410 1426 1612"> <tr> <td>枚举值</td> <td>OPAMP1</td> <td>OPAMP2</td> <td>OPAMP3</td> <td>OPAMP4</td> </tr> <tr> <td>00</td> <td>PA3</td> <td>PA2</td> <td>PC4</td> <td>PB10</td> </tr> <tr> <td>01</td> <td>PA2</td> <td>PA5</td> <td>PB10</td> <td>PC9</td> </tr> <tr> <td>10</td> <td>保留</td> <td>保留</td> <td>保留</td> <td>PD8</td> </tr> <tr> <td>11</td> <td>浮空</td> <td>浮空</td> <td>浮空</td> <td>浮空</td> </tr> </table> 注意: VM 浮空 (用于内部 PGA (No Filter) 模式, 跟随模式) | 枚举值 | OPAMP1 | OPAMP2 | OPAMP3 | OPAMP4 | 00 | PA3 | PA2 | PC4 | PB10 | 01 | PA2 | PA5 | PB10 | PC9 | 10 | 保留 | 保留 | 保留 | PD8 | 11 | 浮空 | 浮空 | 浮空 | 浮空 | | | | | | | | | | |
| 枚举值 | OPAMP1 | OPAMP2 | OPAMP3 | OPAMP4 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 00 | PA3 | PA2 | PC4 | PB10 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 01 | PA2 | PA5 | PB10 | PC9 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 10 | 保留 | 保留 | 保留 | PD8 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 11 | 浮空 | 浮空 | 浮空 | 浮空 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 16 | TCMEN | 定时器控制自动切换模式使能 (Timer controlled Mux mode enable)。 此位由软件设置或清除, 用于控制自动切换主次输入 (VPSEL, VMSEL 和 VPSSEL, VMSSEL)。 TIM1_CC6 对 OPAMP1 和 OPAMP2 自动切换, TIM8_CC6 对 OPAMP3 和 OPAMP4 自动切换。 0: 关闭自动切换; 1: 允许自动切换。 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 15 | RANGE | OPAMP 电压区间 (OPAMP Operational amplifier power supply range)。 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

| 位域 | 名称 | 描述 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|------|-------------|--|----------|----------|--|--|-----|--------|--------|--------|--------|-----|-----|-----|-----|------|-----|-----|-----|------|----------|-----|----------|-----|----------|-----|-----|-----|----|-----|----|-----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| | | 0: 低电压区间 (VDDA < 2.4V); 1: 高电压区间。 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 14 | CALOUT | OPAMP 校准输出 (Operation amplifier calibration output) 当此信号切换时, 校准模式期间的偏移量被校准。 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 13 | TSTREF | 保留, 必需保持复位值。 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 12 | Reserved | 保留, 必需保持复位值。 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 11 | CALON | 校准模式使能 (Calibration mode enabled) 0: 正常模式; 1: 校准模式。 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 10:8 | VPSEL[2:0] | OPAMP 正向输入端选择 (Non Inverted input selection) <table border="1" data-bbox="584 653 1421 961"> <tr><th>枚举值</th><th>OPAMP1</th><th>OPAMP2</th><th>OPAMP3</th><th>OPAMP4</th></tr> <tr><td>000</td><td>PA1</td><td>PA7</td><td>PC9</td><td>PC3</td></tr> <tr><td>001</td><td>PA3</td><td>PB0</td><td>PA1</td><td>DAC1/PA4</td></tr> <tr><td>010</td><td>DAC2/PA5</td><td>PE8</td><td>DAC2/PA5</td><td>PC5</td></tr> <tr><td>011</td><td>PA7</td><td>保留</td><td>PC3</td><td>保留</td></tr> <tr><td>100</td><td>保留</td><td>保留</td><td>保留</td><td>保留</td></tr> <tr><td>其他</td><td>保留</td><td>保留</td><td>保留</td><td>保留</td></tr> </table> | | | | | 枚举值 | OPAMP1 | OPAMP2 | OPAMP3 | OPAMP4 | 000 | PA1 | PA7 | PC9 | PC3 | 001 | PA3 | PB0 | PA1 | DAC1/PA4 | 010 | DAC2/PA5 | PE8 | DAC2/PA5 | PC5 | 011 | PA7 | 保留 | PC3 | 保留 | 100 | 保留 | 保留 | 保留 | 保留 | 其他 | 保留 | 保留 | 保留 | 保留 |
| 枚举值 | OPAMP1 | OPAMP2 | OPAMP3 | OPAMP4 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 000 | PA1 | PA7 | PC9 | PC3 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 001 | PA3 | PB0 | PA1 | DAC1/PA4 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 010 | DAC2/PA5 | PE8 | DAC2/PA5 | PC5 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 011 | PA7 | 保留 | PC3 | 保留 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 100 | 保留 | 保留 | 保留 | 保留 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 其他 | 保留 | 保留 | 保留 | 保留 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | 注: DAC2 直接连到 PA5 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 7:6 | VMSEL[1:0] | OPAMP 反向输入端选择 (Inverted input selection) <table border="1" data-bbox="584 1051 1421 1260"> <tr><th>枚举值</th><th>OPAMP1</th><th>OPAMP2</th><th>OPAMP3</th><th>OPAMP4</th></tr> <tr><td>00</td><td>PA3</td><td>PA2</td><td>PC4</td><td>PB10</td></tr> <tr><td>01</td><td>PA2</td><td>PA5</td><td>PB10</td><td>PC9</td></tr> <tr><td>10</td><td>保留</td><td>保留</td><td>保留</td><td>PD8</td></tr> <tr><td>11</td><td>浮空</td><td>浮空</td><td>浮空</td><td>浮空</td></tr> </table> | | | | | 枚举值 | OPAMP1 | OPAMP2 | OPAMP3 | OPAMP4 | 00 | PA3 | PA2 | PC4 | PB10 | 01 | PA2 | PA5 | PB10 | PC9 | 10 | 保留 | 保留 | 保留 | PD8 | 11 | 浮空 | 浮空 | 浮空 | 浮空 | | | | | | | | | | |
| 枚举值 | OPAMP1 | OPAMP2 | OPAMP3 | OPAMP4 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 00 | PA3 | PA2 | PC4 | PB10 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 01 | PA2 | PA5 | PB10 | PC9 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 10 | 保留 | 保留 | 保留 | PD8 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 11 | 浮空 | 浮空 | 浮空 | 浮空 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | 注: 浮空 (用于内部PGA (No Filter) 模式, follow 模式) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 5:3 | PGAGAN[2:0] | OPAMP 增益设置 (Operational amplifier Programmable amplifier gain value) 000: 内部 PGA 增益 2; 001: 内部 PGA 增益 4; 010: 内部 PGA 增益 8; 011: 内部 PGA 增益 16; 100: 内部 PGA 增益 32; 其他: 内部 PGA 增益 2。 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 2:1 | MOD[1:0] | OPAMP 模式选择 (Operational amplifier PGA mode) 0x: 外部放大模式; 10: 内部 PGA 使能; 11: 内部跟随模式。 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0 | EN | OPAMP 使能 (Operational amplifier Enable) 0: 禁能; 1: 使能。 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

25.3.3 OPAMP 锁寄存器 (OPAMP_LOCK)

偏移地址: 0x40

复位值: 0x0000 0000



| 位域 | 名称 | 描述 |
|------|----------|--|
| 31:4 | Reserved | 保留, 必需保持复位值。 |
| 3 | OPAMP4LK | OPAMP4 锁 (OPAMP4 lock bit) 在复位后, 此位仅能写一次 0: OPAMP 寄存器可读写; 1: OPAMP 寄存器只读。 |
| 2 | OPAMP3LK | 同 OPAMP 4LK。 |
| 1 | OPAMP2LK | 同 OPAMP 4LK。 |
| 0 | OPAMP1LK | 同 OPAMP 4LK。 |

26 调试支持 (DBG)

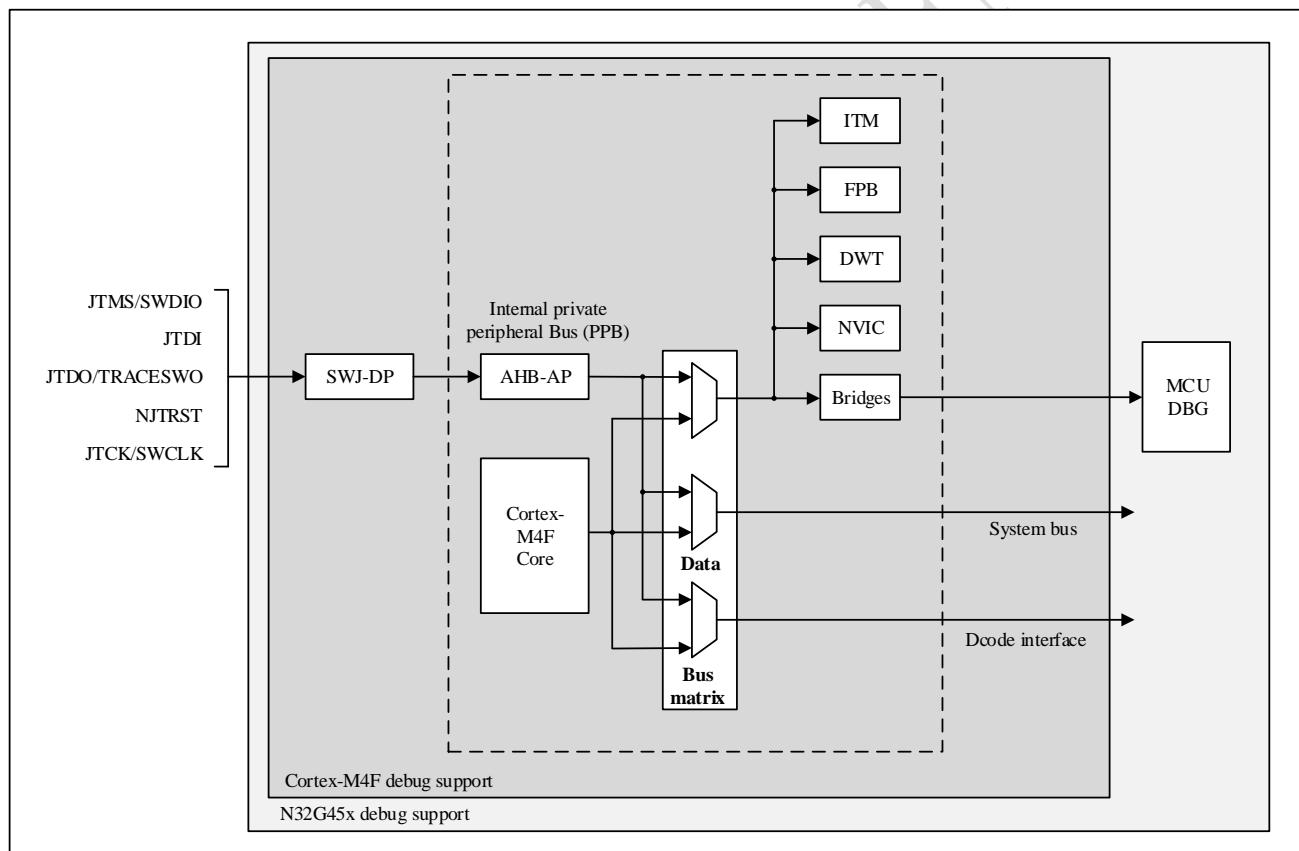
26.1 简介

N32A455 使用集成硬件调试模块的 CortexTM-M4F 内核。支持指令断点（指令取值时停止）和数据断点（数据访问时停止）。当内核停止时，用户可以查看内核的内部状态和系统的外部状态。用户查询操作完成后，可以恢复内核和外设，继续执行相应的程序。N32A455 内核的硬件调试模块在连接到调试器时即可使用（在未被禁用的情况下）。

N32A455 支持以下调试接口：

- 串行接口
- JTAG 调试接口

图 26-1 N32A455 级别和 CortexTM-M4F 级别的调试框图



ARM CortexTM-M4F 内核硬件调试模块可提供如下调试功能：

- SWJ-DP：串行/JTAG 调试端口
- AHB-AP：AHB 访问端口
- ITM：执行跟踪单元
- FPB：闪存指令断点

- DWT: 数据触发

可参考:

- Cortex™-M4 技术参考手册 (TRM)
- ARM 调试接口 V5 结构规范
- ARM CoreSight 开发工具集 (r1p0 版) 技术参考手册

调试系统支持低功耗模式调试和对部分外设的调试。支持调试的外设包括:CAN、I2C 接口和 TIMER、WWDG、IWDG 模块。用户进行低功耗调试或者外设调试时, 需要将调试控制寄存器 (DBG_CTRL) 的相应位置 1。

26.2 JTAG/SWD 功能

调试工具可以通过上述的 SWD 调试接口或者 JTAG 调试接口来调用调试功能。

26.2.1 切换 JTAG/SWD 接口

芯片默认使用 JTAG 调试接口, 如需切换调试接口, 可以通过以下操作进行 SWD 接口和 JTAG 接口的相互切换:

JTAG 调试接口切换到 SWD 调试接口:

1. 发送 50 个以上 JTCK 周期的 JTMS = 1 信号;
2. 发送 16 位 JTMS = 1110011110011110 (0xE79E LSB) 信号;
3. 发送 50 个以上 JTCK 周期的 JTMS = 1 信号。

SWD 调试接口切换到 JTAG 调试接口:

1. 发送 50 个以上 JTCK 周期的 JTMS = 1 信号;
2. 发送 16 位 JTMS = 1110011100111100 (0xE73C LSB) 信号;
3. 发送 50 个以上 JTCK 周期的 JTMS = 1 信号。

26.2.2 引脚分配

JTAG 调试接口包含 5 个管脚: JTCK (JTAG 时钟管脚), JTMS (JTAG 模式选择引脚), JTDI (JTAG 数据输入管脚), JTDO (JTAG 数据输出管脚), NJTRST (JTAG 数据复位管脚, 低电平复位)。

SWD (串行调试) 接口包含 2 个管脚: SWCLK (时钟管脚) 和 SWDIO (数据输入输出管脚) 提供两个引脚的接口: 数据输入输出引脚 (SWDIO) 和时钟引脚 (SWCLK)。

JTAG 调试接口和 SWD 调试接口管脚分配见下表 (SWDIO 同 JTMS 复用, SWCLK 同 JTCK 复用):

表 26-1 调试端口引脚

| 调试端口 | 引脚分配 |
|------------|------|
| JTMS/SWDIO | PA13 |
| JTCK/SWCLK | PA14 |
| JTDI | PA15 |

| | |
|--------|-----|
| JTDO | PB3 |
| NJTRST | PB4 |

- JTAG 调试接口和 SWD 调试接口都使能的情况下，复位后默认使用 5 线 JTAG 调试接口。
- 使用 JTAG 接口时，用户可以不使用 NJTRST 管脚，此时可将 NJTRST 管脚（PB4，内部硬件上拉）用作通用 GPIO。
- 使用 SWD 接口时，JTDI (PA15)、JTDO (PB3)、NJTRST (PB4) 三个管脚可作为通用 GPIO 使用。
- 不使用调试功能时，上述 5 个管脚都可作为通用 GPIO 使用。

26.3 MCU 调试功能

26.3.1 低功耗模式支持

N32A455 可以提供多种低功耗模式（详细参考电源控制（PWR））。在进行调试时，要保证内核的 FCLK 和 HCLK 是开启状态，为内核调试提供必要的时钟。用户可以根据特定的操作（保证低功耗模式下 FCLK 或 HCLK 的输出），在低功耗模式下进行 MCU 调试。

用户想要在进行低功耗模式下调试 MCU，则首先需要调试器配置低功耗模式相关的寄存器：

- DBG_SLEEP 模式：
需要配置 DBG_CTRL.SLEEP 位，为 HCLK 提供与提供给 FCLK 相同的时钟（即：原始配置的系统时钟）。
- DBG_STOP 模式：
需要配置 DBG_CTRL.STOP 位，启动内部 RC 振荡器，为 HCLK 和 FCLK 提供时钟。
- DBG_STANDBY 模式：
需要配置 DBG_CTRL.STDBY 位，启动内部 RC 振荡器，为 HCLK 和 FCLK 提供时钟。

26.3.2 外设调试支持

当 DBG_CTRL 寄存器中外设控制位的相应位置 1 时，当内核停止后相应的外设进入调试状态：

- Timer 外设：定时器的计数器停止并进入调试状态；
- I2C 外设：I2C 的 SMBUS 保持状态并进入调试状态；
- WWDG/TWDG 外设：WWDG/TWDG 计数器停止并进入调试状态；
- CAN 外设：CAN 接口接收寄存器停止并进入调试状态。

26.4 寄存器

26.4.1 DBG 寄存器总览

必须以字（32 位）的方式操作这些外设寄存器。寄存器的地址为 0xE004 2000。

表 26-2 DBG 寄存器总览

| Offset | Register | 31 | 30 | 29 | 28 | 27 | 26 | 25 | 24 | 23 | 22 | 21 | 20 | 19 | 18 | 17 | 16 | 15 | 14 | 13 | 12 | 11 | 10 | 9 | 8 | 7 | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | 0 | | |
|--------|----------|----------|----|-----------|----|----|----|----------|----|----------------|----|----|----|------------|-----------|-----------|-----------|----------------|-----------|-------------------|-------------------|----------------|-----------|-----------|-----------|----------------|-----------|-----------|------|----------------|-------|---|---|--|--|
| 000h | DBG_ID | | | SRAM[3:0] | | | | Reserved | | DEV_NUM_L[3:0] | | | | FLASH[3:0] | | | | REV_NUM_L[3:0] | | | | REV_NUM_H[3:0] | | | | REV_NUM_M[3:0] | | | | REV_NUM_H[3:0] | | | | | |
| | | x | x | x | x | x | x | | | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | | |
| 004h | DBG_CTRL | Reserved | | | | | | | | | | | | | CAN2_STOP | TIM7_STOP | TIM6_STOP | TIM5_STOP | TIM8_STOP | I2C2SMBUS_TIMEOUT | I2C1SMBUS_TIMEOUT | CAN1_STOP | TIM4_STOP | TIM3_STOP | TIM2_STOP | TIM1_STOP | WWDG_STOP | IWDG_STOP | STBY | STOP | SLEEP | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | | |

26.4.2 ID 寄存器 (DBG_ID)

地址偏移: 0x00

只支持 32 位访问, 固定值不可修改。

| 31 | 28 | 27 | 24 | 23 | 20 | 19 | 16 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|----|----------------|----|----|----------------|----|----|----------------|---|------------|----------------|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|
| | SRAM[3:0] | | | Reserved | | | DEV_NUM_L[3:0] | | FLASH[3:0] | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 15 | r | 12 | 11 | 8 | r | 4 | r | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | DEV_NUM_H[3:0] | | | DEV_NUM_M[3:0] | | | REV_NUM_H[3:0] | | | REV_NUM_L[3:0] | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | r | | r | | r | | r | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

| 位域 | 名称 | 描述 |
|-------|----------------|--|
| 31:28 | SRAM[3:0] | SRAM 容量指示位。 芯片 SRAM 容量为 (SRAM[3:0] + 1) * 16KB |
| 27:24 | Reserved | 保留, 必须保持复位值。 |
| 23:20 | DEV_NUM_L[3:0] | 设备型号的低 4 位。 设备型号由高、中、低共 12 位组成, 代表芯片的型号。取值如下: ■ 0x455: 增加型 N32A455 |
| 19:16 | FLASH[3:0] | FLASH 容量指示位。 芯片 FLASH 容量为 FLASH[3:0] * 64KB |
| 15:12 | DEV_NUM_H[3:0] | 设备型号的高 4 位。 见 DEV_NUM_L[3:0]的说明。 |
| 11:8 | DEV_NUM_M[3:0] | 设备型号的中 4 位。 见 DEV_NUM_L[3:0]的说明。 |
| 7:4 | REV_NUM_H[3:0] | 芯片版本号高 4 位。 |
| 3:0 | REV_NUM_L[3:0] | 芯片版本号低 4 位。 |

26.4.3 调试控制寄存器 (DBG_CTRL)

地址偏移: 0x04

POR 复位值: 0x0000 0000 (系统复位不会重置)

| | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|---|--|----------|----|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|--------------------|
| 31 | Reserved | | | | | | | | | | 22 | CAN2_STOP | TIM7_STOP | TIM6_STOP | TIM5_STOP | TIM8_STOP | I2C2_SMBUS_TIMEOUT |
| 15 | 14 | 13 | 12 | 11 | 10 | 9 | 8 | 7 | | | rw | rw | rw | rw | rw | rw | rw |
| I2C1_SMBUS_TIMEOUT | CAN1_STOP | TIM4_STOP | TIM3_STOP | TIM2_STOP | TIM1_STOP | WWDG_STOP | IWDG_STOP | | | Reserved | 3 | 2 | 1 | 0 | STDBY | STOP | SLEEP |
| rw | rw | rw | rw | rw | rw | rw | rw | | | | | | | | rw | rw | rw |

| 位域 | 名称 | 描述 |
|-------|-------------------|---|
| 31:22 | Reserved | 保留, 必须保持复位值。 |
| 21 | CAN2_STOP | 当内核进入调试状态时, CAN2 停止运行。 由软件置 1 或清零。 0: CAN2 仍然正常运行; 1: CAN2 的接收寄存器不继续接收数据。 |
| 20:17 | TIMx_STOP | 当内核停止时停止定时器计数器 (x=7,6,5,8)。 由软件置 1 或清零。 0: 内核停止时, 时钟仍提供给相关定时器的计数器, 定时器输出正常工作; 1: 当内核停止时, 关闭相关定时器的计数器的时钟, 同时关闭定时器的输出。 |
| 16:15 | I2CxSMBUS_TIMEOUT | 当内核停止时停止 SMBUS 超时模式 (x=2,1)。 由软件置 1 或清零。 0: 与正常模式操作相同; 1: 冻结 SMBUS 的超时控制。 |
| 14 | CAN1_STOP | 当内核进入调试状态时, CAN1 停止运行。 由软件置 1 或清零。 0: CAN1 仍然正常运行; 1: CAN1 的接收寄存器不继续接收数据。 |
| 13:10 | TIMx_STOP | 当内核进入调试状态时计数器停止工作 (x=4,3,2,1)。 由软件置 1 或清零。 0: 所选定时器的计数器仍正常工作; ; 1: 所选定时器的计数器停止工作。 |
| 9 | WWDG_STOP | 当内核进入调试状态时, 调试窗口看门狗停止工作。 由软件置 1 或清零。 0: 窗口看门狗计数器仍正常工作; 1: 窗口看门狗计数器停止工作。 |
| 8 | IWDG_STOP | 当内核进入调试状态时, 看门狗停止工作。 由软件置 1 或清零。 0: 门狗计数器仍然正常工作; 1: 看门狗计数器停止工作。 |
| 7:3 | Reserved | 保留, 必须保持复位值。 |
| 2 | STDBY | 调试待机模式。 由软件置 1 或清零。 0: (FCLK 关、HCLK 关) 整个数字电路部分都断电。从软件的角度来看, 退 |

| 位域 | 名称 | 描述 |
|----|-------|--|
| | | <p>出 STANDBY 模式与复位相同（除了一些状态位指示微控制器刚从 STANDBY 状态退出）。</p> <p>1:(FCLK 开、HCLK 开) 数字电路部分不掉电, FCLK 和 HCLK 时钟由内部 RLD 振荡器提供时钟。另外, 微控制器通过产生系统复位来退出 STANDBY 模式和复位是一样的。</p> |
| 1 | STOP | <p>调试停止模式。</p> <p>由软件置 1 或清零。</p> <p>0: (FCLK 关、HCLK 关) 在停止模式下, 时钟控制器禁用所有时钟 (包括 HCLK 和 FCLK)。退出 STOP 模式时, 时钟的配置与复位后的配置相同 (微控制器由 8MHz 内部 RC 振荡器 (HSI) 提供时钟)。因此, 软件必须重新配置时钟控制系统来启动 PLL、晶振等。</p> <p>1:(FCLK 开、HCLK 开) 在停止模式下, FCLK 和 HCLK 时钟由内部 RC 振荡器提供。退出停止模式时, 软件必须重新配置时钟系统以启动 PLL、晶振等 (与配置该位为 0 时的操作相同)。</p> |
| 0 | SLEEP | <p>调试睡眠模式。</p> <p>由软件置 1 或清零。</p> <p>0:(FCLK 开, HCLK 关) 在睡眠模式下, FCLK 由先前已配置好的系统时钟提供, 而 HCLK 则关闭。由于睡眠模式不会重置已配置好的时钟系统, 因此在退出睡眠模式时, 无需重新配置时钟系统。</p> <p>1:(FCLK 开, HCLK 开) 在睡眠模式下, FCLK 和 HCLK 时钟均由先前配置好的系统时钟提供。</p> |

27 唯一设备序列号 (UID)

27.1 简介

MCU 系列产品内置两个不同长度的唯一设备序列号，分别为 96 位的 UID(Unique device ID)和 128 位的 UCID(Unique Customer ID)，这两个设备序列号存放在闪存存储器的系统配置块中，它们所包含的信息在出厂时编写，并保证对任意一个 MCU 微控制器在任何情况下都是唯一的，用户应用程序或外部设备可以通过 CPU 或 JTAG/SWD 接口读取，不可被修改。

UID 为 96 位，通常用来做为序列号或作为密码，在编写闪存时，将此唯一标识与软件加解密算法相结合，进一步提高代码在闪存存储器内的安全性，也可用于激活带安全功能的自举程序(Secure Bootloader)。

UCID 为 128 位，遵守国民技术芯片序列号定义，它包含芯片生产及版本相关信息。

27.2 UID 寄存器

起始地址：0x1FFF_F7F0 长度 96 位。

27.3 UCID 寄存器

起始地址：0x1FFF_F7C0 长度 128 位。

28 版本历史

| 日期 | 版本 | 修改记录 |
|----------|------|------|
| 2022.8.6 | V0.9 | 初始版本 |

NATIONS CONFIDENTIAL

29 声明

国民技术股份有限公司（下称“国民技术”）对此文档拥有专属产权。依据中华人民共和国的法律、条约以及世界其他法域相适用的管辖，此文档及其中描述的国民技术产品（下称“产品”）为公司所有。

国民技术在此并未授予专利权、著作权、商标权或其他任何知识产权许可。所提到或引用的第三方名称或品牌（如有）仅用作区别之目的。

国民技术保留随时变更、订正、增强、修改和改良此文档的权利，恕不另行通知。请使用人在下单购买前联系国民技术获取此文档的最新版本。

国民技术竭力提供准确可信的资讯，但即便如此，并不推定国民技术对此文档准确性和可靠性承担责任。

使用此文档信息以及生成产品时，使用者应当进行合理的设计、编程并测试其功能性和安全性，国民技术不对任何因使用此文档或本产品而产生的任何直接、间接、意外、特殊、惩罚性或衍生性损害结果承担责任。

国民技术对于产品在系统或设备中的应用效果没有任何故意或保证，如有任何应用在其发生操作不当或故障情况下，有可能致使人员伤亡、人身伤害或严重财产损失，则此类应用被视为“不安全使用”。

不安全使用包括但不限于：外科手术设备、原子能控制仪器、飞机或宇宙飞船仪器、所有类型的安全装置以及其他旨在支持或维持生命的应用。

所有不安全使用的风险应由使用人承担，同时使用人应使国民技术免于因为这类不安全使用而导致被诉、支付费用、发生损害或承担责任时的赔偿。

对于此文档和产品的任何明示、默示之保证，包括但不限于适销性、特定用途适用性和不侵权的保证责任，国民技术可在法律允许范围内进行免责。

未经明确许可，任何人不得以任何理由对此文档的全部或部分进行使用、复制、修改、抄录和传播。