



ING916XX 系列芯片外设开发者手册

Ingchips Technology Co., Ltd.

目录

第一章 版本历史	1
第二章 概览	3
2.1 缩略语及术语	3
2.2 参考文档	4
第三章 DMA 简介	5
3.1 功能描述	5
3.1.1 特点	5
3.1.2 搬运方式	5
3.1.3 搬运类型	6
3.1.4 中断类型	6
3.1.5 数据地址类型	6
3.1.6 数据方式	6
3.1.7 数据位宽	7
3.2 使用方法	7
3.2.1 方法概述	7
3.2.1.1 单次搬运	7
3.2.1.2 成串搬运	7
3.2.2 注意点	8
3.3 编程指南	8

3.3.1	驱动接口	8
3.3.2	代码示例	9
3.3.2.1	单次搬运	9
3.3.2.2	成串搬运	9
3.3.2.3	DMA 乒乓搬运	11
第四章	eFuses(electronic fuses)	13
4.1	功能概述	13
4.2	使用说明	13
4.2.1	模块初始化	13
4.2.2	按 bit 编程	13
4.2.3	按 word 编程	14
第五章	通用输入输出 (GPIO)	17
5.1	功能概述	17
5.2	使用说明	18
5.2.1	设置 IO 方向	18
5.2.2	读取输入	18
5.2.3	设置输出	19
5.2.4	配置中断请求	19
5.2.5	处理中断状态	20
5.2.6	输入去抖	21
第六章	I2C 功能概述	23
6.1	I2C 使用说明	23
6.2	场景 1: Master 读 Slave, 不使用 DMA	23
6.2.1	I2C Master 配置	23
6.2.1.1	配置 Pin	24
6.2.1.2	初始化 I2C 模块	25

6.2.1.3	I2C 中断实现	25
6.2.1.4	I2C master 触发传输	26
6.2.1.5	使用流程	26
6.2.2	I2C Slave 配置	27
6.2.2.1	配置 Pin	27
6.2.2.2	初始化 I2C 模块	28
6.2.2.3	I2C 中断实现以及发送数据	28
6.2.2.4	使用流程	30
6.3	场景 2: Master 写 Slave, 不使用 DMA	30
6.3.1	I2C Master 配置	30
6.3.1.1	配置 Pin	31
6.3.1.2	初始化 I2C 模块	32
6.3.1.3	I2C 中断实现	32
6.3.1.4	I2C master 触发传输	33
6.3.1.5	使用流程	34
6.3.2	I2C Slave 配置	34
6.3.2.1	配置 Pin	34
6.3.2.2	初始化 I2C 模块	35
6.3.2.3	I2C 中断实现以及发送数据	35
6.3.2.4	使用流程	37
6.4	场景 3: Master 读 Slave, 使用 DMA	37
6.4.1	I2C Master 配置	38
6.4.1.1	配置 Pin	38
6.4.1.2	初始化 I2C 模块	39
6.4.1.3	初始化 DMA 模块	39
6.4.1.4	I2C 中断实现	40
6.4.1.5	I2C master DMA 设置	40

6.4.1.6	I2C master 触发传输	41
6.4.1.7	使用流程	41
6.4.2	I2C Slave 配置	41
6.4.2.1	配置 Pin	42
6.4.2.2	初始化 I2C 模块	43
6.4.2.3	初始化 DMA 模块	43
6.4.2.4	I2C 中断实现以及发送数据	43
6.4.2.5	I2C Slave 发送数据 DMA 设置	44
6.4.2.6	使用流程	45
6.5	场景 4: Master 写 Slave, 使用 DMA	45
6.5.1	I2C Master 配置	46
6.5.1.1	配置 Pin	46
6.5.1.2	初始化 I2C 模块	47
6.5.1.3	初始化 DMA 模块	47
6.5.1.4	I2C 中断实现	48
6.5.1.5	I2C master DMA 设置	48
6.5.1.6	I2C master 触发传输	49
6.5.1.7	使用流程	49
6.5.2	I2C Slave 配置	49
6.5.2.1	配置 Pin	50
6.5.2.2	初始化 I2C 模块	51
6.5.2.3	初始化 DMA 模块	51
6.5.2.4	I2C 中断实现以及发送数据	51
6.5.2.5	I2C Slave 发送数据 DMA 设置	52
6.5.2.6	使用流程	53

第七章 I2s 简介	55
7.1 功能描述	55
7.1.1 特点	55
7.1.2 I2s 角色	56
7.1.3 I2s 工作模式	56
7.1.4 串行数据	56
7.1.5 时钟分频	56
7.1.5.1 时钟分频计算	56
7.1.6 i2s 存储器	57
7.2 使用方法	57
7.2.1 方法概述	57
7.2.2 注意点	59
7.3 编程指南	59
7.3.1 驱动接口	59
7.3.2 代码示例	59
7.3.2.1 I2s 配置	60
7.3.2.2 I2s 使能	60
7.3.2.3 I2s 中断	62
7.3.2.4 I2s & 乒乓 DMA	63
第八章 IR 红外	67
8.1 功能概述	67
8.2 使用说明	67
8.2.1 参数 (不同编码的时间参数)	67
8.2.2 红外发射接收	69
8.2.2.1 配置 pin	69
8.2.2.2 配置模块	70
8.2.2.3 IR 中断	71

第九章 PDM 简介	73
9.1 功能描述	73
9.1.1 特点	73
9.1.2 PDM & PCM	73
9.2 使用方法	74
9.2.1 方法概述	74
9.2.2 注意点	74
9.3 编程指南	75
9.3.1 驱动接口	75
9.3.2 代码示例	75
9.3.2.1 PDM 结合 I2s:	75
9.3.2.2 PDM 数据 DMA 搬运	77
第十章 管脚管理 (PINCTRL)	79
10.1 功能概述	79
10.2 使用说明	83
10.2.1 为外设配置 IO 管脚	83
10.2.2 配置下拉、下拉	84
10.2.3 配置驱动能力	84
第十一章 PTE 简介	87
11.1 功能描述	87
11.1.1 特点	87
11.1.2 PTE 原理图	87
11.1.3 功能	87
11.2 使用方法	88
11.2.1 方法概述	88
11.2.2 注意点	88

11.3 编程指南	89
11.3.1 src&dst 外设	89
11.3.2 驱动接口	91
11.3.3 代码示例	91
第十二章 增强型脉宽调制发生器 (PWM)	93
12.1 PWM 工作模式	93
12.1.1 最简单的模式: UP_WITHOUT_DIED_ZONE	94
12.1.2 UP_WITH_DIED_ZONE	94
12.1.3 UPDOWN_WITHOUT_DIED_ZONE	94
12.1.4 UPDOWN_WITH_DIED_ZONE	95
12.1.5 SINGLE_WITHOUT_DIED_ZONE	95
12.1.6 DMA 模式	96
12.1.7 输出控制	96
12.2 PCAP	96
12.3 PWM 使用说明	97
12.3.1 启动与停止	97
12.3.2 配置工作模式	98
12.3.3 配置门限	98
12.3.4 输出控制	99
12.3.5 综合示例	100
12.3.6 使用 DMA 实时更新配置	100
12.4 PCAP 使用说明	101
12.4.1 配置 PCAP 模式	101
12.4.2 读取计数器	103

第十三章 实时时钟 (RTC)	105
13.1 功能描述	105
13.2 使用说明	105
13.2.1 RTC 使能	105
13.2.2 获取当前日期	105
13.2.3 修改日期	106
13.2.4 配置闹钟	106
13.2.5 配置中断请求	106
13.2.6 获取当前中断状态	108
13.2.7 清除中断	108
13.2.8 处理中断状态	108
第十四章 SPI 功能概述	109
14.1 SPI 使用说明	109
14.2 场景 1: 只读只写不带 DMA	109
14.2.1 SPI 主配置	110
14.2.1.1 接口配置	110
14.2.1.2 SPI 模块初始化	110
14.2.1.3 SPI 中断	111
14.2.1.4 SPI 发送数据	112
14.2.1.5 使用流程	112
14.2.2 SPI 从配置	113
14.2.2.1 接口配置	113
14.2.2.2 SPI 模块初始化	113
14.2.2.3 SPI 接收数据	114
14.2.2.4 使用流程	115
14.3 场景 2: 只读只写并且使用 DMA	115
14.3.1 SPI 主配置	116

14.3.1.1	接口配置	116
14.3.1.2	SPI 模块初始化	116
14.3.1.3	SPI DMA 初始化	117
14.3.1.4	SPI DMA 设置	118
14.3.1.5	SPI 中断	118
14.3.1.6	SPI 发送数据	118
14.3.1.7	使用流程	119
14.3.2	SPI 从配置	120
14.3.2.1	接口配置	120
14.3.2.2	SPI 模块初始化	120
14.3.2.3	SPI DMA 初始化	121
14.3.2.4	SPI DMA 设置	122
14.3.2.5	SPI 接收数据	122
14.3.2.6	SPI 中断	122
14.3.2.7	使用流程	123
14.4	场景 3: 同时读写不带 DMA	123
14.4.1	SPI 主配置	124
14.4.1.1	接口配置	124
14.4.1.2	SPI 模块初始化	124
14.4.1.3	SPI 中断	125
14.4.1.4	SPI 发送数据	126
14.4.1.5	使用流程	126
14.4.2	SPI 从配置	127
14.4.2.1	接口配置	127
14.4.2.2	SPI 模块初始化	127
14.4.2.3	SPI 接收数据	128
14.4.2.4	使用流程	129

14.5 场景 4：同时读写并且使用 DMA	130
14.5.1 SPI 主配置	130
14.5.1.1 接口配置	130
14.5.1.2 SPI 模块初始化	131
14.5.1.3 SPI DMA 初始化	132
14.5.1.4 SPI DMA 设置	132
14.5.1.5 SPI 中断	133
14.5.1.6 SPI 接收数据	133
14.5.1.7 SPI 发送数据	134
14.5.1.8 使用流程	135
14.5.2 SPI 从配置	135
14.5.2.1 接口配置	135
14.5.2.2 SPI 模块初始化	136
14.5.2.3 SPI DMA 初始化	137
14.5.2.4 SPI DMA 设置	137
14.5.2.5 SPI 接收数据	138
14.5.2.6 SPI 发送数据	138
14.5.2.7 SPI 中断	139
14.5.2.8 使用流程	139
第十五章 系统控制 (SYSCTRL)	141
15.1 功能概述	141
15.1.1 外设标识	141
15.1.2 时钟树	142
15.1.3 DMA 规划	144
15.2 使用说明	144
15.2.1 外设复位	144
15.2.2 时钟门控	145

15.2.3 时钟配置	145
15.2.4 DMA 规划	147
第十六章 定时器 (TIMER)	149
16.1 功能概述	149
16.2 使用说明	149
16.2.1 设置工作模式	149
16.2.2 时钟频率	150
16.2.3 重载值	150
16.2.4 使能	151
16.2.5 比较	151
16.2.6 配置中断请求	152
16.2.7 中断清除	152
16.2.8 获取中断	152
第十七章 通用异步收发传输器 (UART)	155
17.1 功能概述	155
17.2 使用说明	155
17.2.1 设置波特率	155
17.2.2 获取波特率	156
17.2.3 接收错误查询	156
17.2.4 FIFO 轮询模式	156
17.2.5 发送数据	157
17.2.6 接收数据	157
17.2.7 配置中断请求	158
17.2.8 处理中断状态	159
17.2.9 UART 初始化	159
17.2.10 发送数据	161

17.2.11 接收数据	161
17.2.12 清空 FIFO	161
17.2.13 使能 FIFO	161
17.2.14 处理中断状态	162
17.2.15 DMA 传输模式使能	162
第十八章 看门狗 (WATCHDOG)	163
18.1 功能概述	163
18.2 使用说明	163
18.2.1 配置看门狗	163
18.2.2 重启看门狗	164
18.2.3 清除中断	164
18.2.4 禁用看门狗	164
第十九章 内置 Flash (EFlash)	165
19.1 功能概述	165
19.2 使用说明	165
19.2.1 擦除并写入新数据	165
19.2.2 不擦除直接写入数据	166
19.2.3 单独擦除	166
19.2.4 Flash 数据升级	166

表格

2.1 缩略语	3
10.1 支持与常用 IO 全映射的常用功能管脚	79
10.2 其它外设功能管脚的映射关系	80
10.3 其它外设功能管脚的映射关系	84
15.1 各硬件外设的时钟源	143

插图

7.1 I2S 控制器操作流程图	58
11.1 PTE 原理图	88

第一章 版本历史

版本	信息	日期
0.1	初始版本	2022-xx-xx

第二章 概览

欢迎使用 *INGCHIPS* 918xx/916xx 软件开发工具包（SDK）。

ING916XX 系列芯片支持蓝牙 5.3 规范，内置高性能 32bit RISC MCU（支持 DSP 和 FPU）、Flash、低功耗 PMU，以及丰富的外设、高性能低功耗 BLE RF 收发机。BLE 发射功率。

本文介绍 SoC 外设及其开发方法。每个章节介绍一种外设，各种外设与芯片数据手册之外设一一对应，基于 API 的兼容性、避免误解等因素，存在以下例外：

- PINCTRL 对应于数据手册之 IOMUX
- PCAP 对应于数据手册之 PCM
- SYSCTRL 是一个“虚拟”外设，负责管理各种 SoC 功能，组合了几种相关的硬件模块

SDK 外设驱动的源代码开放，其中包含很多常数，而且几乎没有注释——这是有意为之，开发者只需要关注头文件，而不要尝试修改源代码。

2.1 缩略语及术语

表 2.1: 缩略语

缩略语	说明
ADC	模数转换器（Analog-to-Digital Converter）
DMA	直接存储器访问（Direct Memory Access）
EFUSE	电编程熔丝（Electronic Fuses）
FIFO	先进先出队列（First In First Out）
FOTA	固件空中升级（Firmware Over-The-Air）
GPIO	通用输入输出（General-Purpose Input/Output）
I2C	集成电路间总线（Inter-Integrated Circuit）

缩略语	说明
I2S	集成电路音频总线（Inter-IC Sound）
IR	红外线（Infrared）
PCAP	脉冲捕捉（Pulse CAPture）
PDM	脉冲密度调制（Pulse Density Modulation）
PTE	外设触发引擎（Peripheral Trigger Engine）
PWM	脉宽调制信号（Pulse Width Modulation）
QDEC	正交解码器（Quadrature Decoder）
RTC	实时时钟（Real-time Clock）
SPI	串行外设接口（Serial Peripheral Interface）
UART	通用异步收发器（Universal Asynchronous Receiver/Transmitter）
USB	通用串行总线（Universal Serial Bus）

2.2 参考文档

1. Bluetooth SIG¹
2. ING916XX 系列芯片数据手册

¹<https://www.bluetooth.com/>

第三章 DMA 简介

DMA 全称 direct memory access，即直接存储器访问。

其主要作用是不占用 CPU 大量资源，在 AMBA AHB 总线上的设备之间以硬件方式高速有效地传输数据。

3.1 功能描述

3.1.1 特点

- 符合 AMBA、AHB 和 APB4 标准
- 最多 8 个 DMA 通道
- 最多 16 个硬件握手请求/确认配对
- 支持 8/16/32/64 位宽的数据传输
- 支持 24-64 位地址宽度
- 支持成链传输数据

3.1.2 搬运方式

- 单次数据块搬运：DMA 使用单个通道，一次使能将数据从 SRC 到 DST 位置搬运一次
- 成串多数据块搬运：DMA 使用单个通道，一次使能按照 DMA 链表信息依次将数据从 SRC 到 DST 位置搬运多次或循环搬运。

其根本区别是有无注册有效的 DMA 链表。

3.1.3 搬运类型

- memory 到 memory 搬运
- memory 到 peripheral 搬运
- peripheral 到 memory 搬运
- peripheral 到 peripheral 搬运

3.1.4 中断类型

- IntErr: 错误中断表示 DMA 传输发生了错误而触发中断，主要包括总线错误、地址没对齐和传输数据宽度没对齐等。
- IntAbt: 终止传输中断会在终止 DMA 通道传输时产生。
- IntTC: TC 中断会在没有产生 IntErr 和 IntAbt 的情况下完成一次传输时产生。

3.1.5 数据地址类型

- Increment address
- Decrement address
- Fixed address

如果 Increment 则 DMA 从地址由小到大搬运数据，相反的 Decrement 则由大到小搬运。fixed 地址适用于外设 FIFO 的寄存器搬运数据。

3.1.6 数据方式

- normal mode
- handshake mode

一般外设寄存器选择用握手方式。

选择握手方式要和外设协商好 SrcBurstSize，当前支持 2^n ($n = 0-7$) 大小的 SrcBurstSize。

3.1.7 数据位宽

DMA 传输要求传输两端的数据类型一致，支持数据类型有：

- Byte transfer
- Half-word transfer
- Word transfer
- Double word transfer

覆盖所有常见数据类型。

3.2 使用方法

3.2.1 方法概述

首先确认数据搬运需求是单次搬运还是成串搬运，搬运类型 memory 和 peripheral 的关系。

3.2.1.1 单次搬运

1. 注册 DMA 中断
2. 定义一个 DMA_Descriptor 变量用来配置 DMA 通道寄存器
3. 根据数据搬运类型选择 DMA 寄存器配置接口，正确调用驱动接口配置 DMA 寄存器
4. 使能 DMA 通道开始搬运

3.2.1.2 成串搬运

1. 注册一个或多个 DMA 中断
2. 定义多个 DMA_Descriptor 变量用来配置 DMA 通道寄存器
3. 根据数据搬运类型选择 DMA 寄存器配置接口，正确调用驱动接口配置 DMA 寄存器
4. 将多个 DMA_Descriptor 变量首尾相连成串，类似链表
5. 使能 DMA 通道开始搬运

3.2.2 注意点

- 定义 DMA_Descriptor 变量需要 8 字节对齐，否则 DMA 搬运不成功
- 成串搬运如果配置多个 DMA 中断则需要每个中断里使能 DMA，直到最后一次搬运完成
- 对于从外设搬运需要确认外设是否支持 DMA
- 建议从外设搬运选择握手方式，并与外设正确协商 burstSize
- burstSize 尽量取较大值，有利于减少 DMA 中断次数提高单次中断处理效率。但 burstSize 太大可能最后一次不能搬运丢弃较多数据
- 建议设置从外设搬运总数据量为 burstSize 的整数倍或采用乒乓搬运的方式
- 在 DMA 从外设搬运的情况下，正确的操作顺序是先配置并使能好 DMA，再使能外设开始产生数据

3.3 编程指南

3.3.1 驱动接口

- DMA_PrepareMem2Mem: memory 到 memory 搬运标准 DMA 寄存器配置接口
- DMA_PreparePeripheral2Mem: Peripheral 到 memory 搬运标准 DMA 寄存器配置接口
- DMA_PrepareMem2Peripheral: memory 到 Peripheral 搬运标准 DMA 寄存器配置接口
- DMA_PreparePeripheral2Peripheral: Peripheral 到 Peripheral 搬运标准 DMA 寄存器配置接口
- DMA_Reset: DMA 复位接口
- DMA_GetChannelIntState: DMA 通道中断状态获取接口
- DMA_ClearChannelIntState: DMA 通道清中断接口
- DMA_EnableChannel: DMA 通道使能接口
- DMA_AbortChannel: DMA 通道终止接口

3.3.2 代码示例

3.3.2.1 单次搬运

下面以 memory 到 memory 单次搬运展示 DMA 的基本用法：

```
#define CHANNEL_ID 0
char src[] = "hello world!";
char dst[20];
DMA_Descriptor test __attribute__((aligned (8)));
static uint32_t DMA_cb_isr(void *user_data)
{
    uint32_t state = DMA_GetChannelIntState(CHANNEL_ID);
    DMA_ClearChannelIntState(CHANNEL_ID, state);

    printf("dst = %s\n", dst);
    return 0;
}

void DMA_Test(void)
{
    DMA_Reset();
    platform_set_irq_callback(PLATFORM_CB_IRQ_DMA, DMA_cb_isr, 0);
    DMA_PrepareMem2Mem(&test[0],
                      dst,
                      src, strlen(src),
                      DMA_ADDRESS_INC, DMA_ADDRESS_INC, 0);
    DMA_EnableChannel(CHANNEL_ID, &test);
}
```

最终会在 DMA 中断程序里面将搬运到 dst 中的“hello world!”字符串打印出来。

3.3.2.2 成串搬运

下面以 memory 到 memory 两块数据搬运拼接字符串展示 DMA 成串搬运的基本用法：

```
#define CHANNEL_ID 0
char src[] = "hello world!";
char src1[] = "I am a chinese.";
char dst[100];
DMA_Descriptor test[2] __attribute__((aligned (8)));
static uint32_t DMA_cb_isr(void *user_data)
{
    uint32_t state = DMA_GetChannelIntState(CHANNEL_ID);
    DMA_ClearChannelIntState(CHANNEL_ID, state);

    printf("dst = %s\n", dst);
    return 0;
}

void DMA_Test(void)
{
    DMA_Reset();
    platform_set_irq_callback(PLATFORM_CB_IRQ_DMA, DMA_cb_isr, 0);
    test[0].Next = &test[1];    // make a DMA link chain
    test[1].Next = NULL;
    DMA_PrepareMem2Mem(&test[0],
                      dst,
                      src, strlen(src),
                      DMA_ADDRESS_INC, DMA_ADDRESS_INC, 0);
    DMA_PrepareMem2Mem(&test[1],
                      dst + strlen(src),
                      src1, sizeof(src1),
                      DMA_ADDRESS_INC, DMA_ADDRESS_INC, 0);
    DMA_EnableChannel(CHANNEL_ID, &test[0]);
}
```

最终将会打印出“hello world!I am a chinese.”字符串。

3.3.2.3 DMA 乒乓搬运

DMA 乒乓搬运是一种 DMA 搬运的特殊用法，其主要应用场景是将外设 FIFO 中数据循环搬运到 memory 中并处理。

可实现“搬运”和“数据处理”分离，从而大大提高程序处理数据的效率。

下面将以最常见的 DMA 乒乓搬运 I2s 数据为例展示 DMA 乒乓搬运的用法。

I2s 的相关配置不在本文的介绍范围内，默认 I2s 已经配置好，DMA 和 I2s 协商 burstSize=8。

```
#define CHANNEL_ID 0
uint32_t pingpang_buff[2][80];
DMA_Descriptor test[2] __attribute__((aligned (8)));
uint8_t pingpang = 0;
static uint32_t DMA_cb_isr(void *user_data)
{
    uint32_t state = DMA_GetChannelIntState(CHANNEL_ID);
    DMA_ClearChannelIntState(CHANNEL_ID, state);

    pingpang ^= 1;
    DMA_EnableChannel(CHANNEL_ID, &test[pingpang]);
    uint32_t *data = (pingpang) ? (pingpang_buff[0]) : (pingpang_buff[1]);

    // do something to handle the data in 'data' buffer

    return 0;
}

void DMA_Test(void)
{
    DMA_Reset();
    platform_set_irq_callback(PLATFORM_CB_IRQ_DMA, DMA_cb_isr, 0);
    test[0].Next = &test[1];
    test[1].Next = &test[0];    // make a DMA link cycle
    DMA_PreparePeripheral2RAM(&test[0],
                              pingpang_buff[0],
```

```
        SYSCTRL_DMA_I2S_RX,  
        80,  
        DMA_ADDRESS_INC,  
        0 | 8 << 24 | 1 << 28);  
DMA_PreparePeripheral2RAM(&test[1],  
        pingpang_buff[1],  
        SYSCTRL_DMA_I2S_RX,  
        80,  
        DMA_ADDRESS_INC,  
        0 | 8 << 24 | 1 << 28);  
DMA_EnableChannel(CHANNEL_ID, &test[pingpang]);  
I2S_ClearRxFIFO(APB_I2S);  
I2S_DMAEnable(APB_I2S, 1, 1);  
I2S_Enable(APB_I2S, 0, 1);    // Enable I2s finally  
}
```

第四章 eFuses(electronic fuses)

4.1 功能概述

Efuse 是一种片内一次性可编程存储器，可以在断电后保持数据，并且编程后无法被再次修改。ING916 系列提供 128bit EFUSE，支持按 bit 编程或者按 Word 编程，bit 的默认值是 0，通过编程可以写成 1

4.2 使用说明

4.2.1 模块初始化

```
void setup_peripherals_efuse_module(void)
{
    // 打开 clock, 并且 reset 模块
    SYSCTRL_ClearClkGateMulti( (1 << SYSCTRL_ITEM_APB_EFUSE));
    SYSCTRL_ResetBlock(SYSCTRL_ITEM_APB_EFUSE);
    SYSCTRL_ReleaseBlock(SYSCTRL_ITEM_APB_EFUSE);
}
```

4.2.2 按 bit 编程

```

void peripherals_efuse_write_bit(void)
{
    // 提供需要编程的 bit 位置,0 到 127 之间
    EFUSE_UnLock(APB_EFUSE, EFUSE_UNLOCK_FLAG);
    EFUSE_WriteEfuseDataBitToOne(APB_EFUSE, pos);//pos is bit position from 0 to 127

    //写操作完成
    //如果要读取, 需要 reset 模块
    SYSCTRL_ResetBlock(SYSCTRL_ITEM_APB_EFUSE);
    SYSCTRL_ReleaseBlock(SYSCTRL_ITEM_APB_EFUSE);

    //设置读取 flag
    EFUSE_SetRdFlag(APB_EFUSE);
    //等待数据读取标志
    while(!EFUSE_GetDataValidFlag(APB_EFUSE));
    //读取数据
    platform_printf("word 0: 0x%x \n",EFUSE_GetEfuseData(APB_EFUSE, 0));//bit 0 - 31
    platform_printf("word 1: 0x%x \n",EFUSE_GetEfuseData(APB_EFUSE, 1));//bit 32 - 63
    platform_printf("word 2: 0x%x \n",EFUSE_GetEfuseData(APB_EFUSE, 2));//bit 64 - 95
    platform_printf("word 3: 0x%x \n",EFUSE_GetEfuseData(APB_EFUSE, 3));//bit 96 - 127
}

```

4.2.3 按 word 编程

```

void peripherals_efuse_write_word(void)
{
    // 提供需要编程的 word 位置,0 到 3 之间, 每个 word 32bit, 一共 128bit
    // EFUSE_PROGRAMWORDCNT_0 代表 word 0
    // data 是要写入的 32bit 数据
    EFUSE_WriteEfuseDataWord(APB_EFUSE, EFUSE_PROGRAMWORDCNT_0, data);

    //写操作完成

```



```
//如果要读取, 需要 reset 模块
SYSCTRL_ResetBlock(SYSCTRL_ITEM_APB_EFUSE);
SYSCTRL_ReleaseBlock(SYSCTRL_ITEM_APB_EFUSE);

//设置读取 flag
EFUSE_SetRdFlag(APB_EFUSE);
//等待数据读取标志
while(!EFUSE_GetDataValidFlag(APB_EFUSE));
//读取数据
platform_printf("word 0: 0x%x \n", EFUSE_GetEfuseData(APB_EFUSE, 0)); //bit 0 - 31
platform_printf("word 1: 0x%x \n", EFUSE_GetEfuseData(APB_EFUSE, 1)); //bit 32 - 63
platform_printf("word 2: 0x%x \n", EFUSE_GetEfuseData(APB_EFUSE, 2)); //bit 64 - 95
platform_printf("word 3: 0x%x \n", EFUSE_GetEfuseData(APB_EFUSE, 3)); //bit 96 - 127
}
```


第五章 通用输入输出（GPIO）

5.1 功能概述

GPIO 模块常用于驱动 LED 或者其它指示器，控制片外设备，感知数字信号输入，检测信号边沿，或者从低功耗状态唤醒系统。ING916XX 系列芯片内部支持最多 42 个 GPIO，通过 PINCTRL 可将 GPIO n 引出到芯片 IO 管脚 n 。

特性：

- 每个 GPIO 都可单独配置为输入或输出
- 每个 GPIO 都可作为中断请求，中断触发方式支持边沿触发（上升、下降单沿触发，或者双沿触发）和电平触发（高电平或低电平）
- 硬件去抖

在硬件上存在 两个 GPIO 模块，每个模块包含 21 个 GPIO，相应地定义了两个 SYSCTRL_Item：

```
typedef enum
{
    SYSCTRL_ITEM_APB_GPIO0    ,
    SYSCTRL_ITEM_APB_GPIO1    ,
    // ...
} SYSCTRL_Item;
```



注意按照所使用的 GPIO 管脚打开对应的 GPIO 模块。

5.2 使用说明

5.2.1 设置 IO 方向

在使用 GPIO 之前先按需要配置 IO 方向：

- 需要用于输出信号时：配置为输出
- 需要用于读取信号时：配置为输入
- 需要用于生产中断请求时：配置为输入
- 需要高阻态时：配置为高阻态

使用 `GIO_SetDirection` 配置 GPIO 的方向。GPIO 支持四种方向：

```
typedef enum
{
    GIO_DIR_INPUT,    // 输入
    GIO_DIR_OUTPUT,   // 输出
    GIO_DIR_BOTH,     // 同时支持输入、输出
    GIO_DIR_NONE      // 高阻态
} GIO_Direction_t;
```



如无必要，不要使用 `GIO_DIR_BOTH`。

5.2.2 读取输入

使用 `GIO_ReadValue` 读取某个 GPIO 当前输入的电平信号，例如读取 GPIO 0 的输入：

```
uint8_t value = GIO_ReadValue(GIO_GPIO_0);
```

使用 `GIO_ReadAll` 可以同时读取所有 GPIO 当前输入的电平信号。其返回值的第 n 比特（第 0 比特为最低比特）对应 GPIO n 的输入；如果 GPIO n 当前不支持输入，那么第 n 比特为 0：

```
uint64_t GIO_ReadAll(void);
```

5.2.3 设置输出

使用 `GIO_WriteValue` 设置某个 GPIO 输出的电平信号，例如使 GPIO 0 输出高电平（1）：

```
GIO_WriteValue(GIO_GPIO_0, 1);
```

5.2.4 配置中断请求

使用 `GIO_ConfigIntSource` 配置 GPIO 生成中断请求。

```
void GIO_ConfigIntSource(  
    const GIO_Index_t io_index,      // GPIO 编号  
    const uint8_t enable,           // 使能的边沿或者电平类型组合  
    const GIO_IntTriggerType_t type // 触发类型  
);
```

其中的 `enable` 为以下两个值的组合（0 表示禁止产生中断请求）：

```
typedef enum  
{  
    ...LOGIC_LOW_OR_FALLING_EDGE = ..., // 低电平或者下降沿  
    ...LOGIC_HIGH_OR_RISING_EDGE = ...  // 高电平或者上升沿  
} GIO_IntTriggerEnable_t;
```

触发类型有两种：

```
typedef enum
{
    GPIO_INT_EDGE,    // 边沿触发
    GPIO_INT_LOGIC    // 电平触发
} GPIO_IntTriggerType_t;
```

- 例如将 GPIO 0 配置为上升沿触发中断

```
GPIO_ConfigIntSource(GPIO_GPIO_0,
    ...LOGIC_HIGH_OR_RISING_EDGE,
    GPIO_INT_EDGE);
```

- 例如将 GPIO 0 配置为双沿触发中断

```
GPIO_ConfigIntSource(GPIO_GPIO_0,
    ...LOGIC_HIGH_OR_RISING_EDGE | ..._HIGH_OR_RISING_EDGE,
    GPIO_INT_EDGE);
```

- 例如将 GPIO 0 配置为高电平触发

```
GPIO_ConfigIntSource(GPIO_GPIO_0,
    ...LOGIC_HIGH_OR_RISING_EDGE,
    GPIO_INT_LOGIC);
```

5.2.5 处理中断状态

用 `GPIO_GetIntStatus` 获取某个 GPIO 上的中断触发状态，返回非 0 值表示该 GPIO 上产生了中断请求；用 `GPIO_GetAllIntStatus` 一次性获取所有 GPIO 的中断触发状态，第 n 比特（第 0 比特为最低比特）对应 GPIO n 上的中断触发状态。

GPIO 产生中断后，需要消除中断状态方可再次触发。用 `GPIO_ClearIntStatus` 消除某个 GPIO 上中断状态，用 `GPIO_ClearAllIntStatus` 一次性清除所有 GPIO 上可能存在的中断触发状态。

5.2.6 输入去抖

使用 `GPIO_DebounceCtrl` 配置输入去抖参数，每个 `GPIO` 硬件模块使用单独的参数：

```
void GPIO_DebounceCtrl(
    uint8_t group_mask,    // 比特 0 为 1 时配置模块 0
                          // 比特 1 为 1 时配置模块 1
    uint8_t clk_pre_scale,
    GPIO_DbClk_t clk       // 防抖时钟选择
);
```

所谓去抖就是过滤掉长度小于 $(\text{clk_pre_scale} + 1)$ 个防抖时钟周期的“毛刺”。

防抖时钟共有 2 种：

```
typedef enum
{
    GPIO_DB_CLK_32K,    // 使用 32k 时钟
    GPIO_DB_CLK_PCLK,   // 使用快速 PCLK
} GPIO_DbClk_t;
```

快速 `PCLK` 的具体频率参考 `SYSCTRL`。

通过 `GPIO_DebounceEn` 为单个 `GPIO` 使能去抖。例如要在 `GPIO 0` 上启用硬件去抖，忽略宽度小于 $5/32768 \approx 0.15(\text{ms})$ 的“毛刺”：

```
GPIO_DebounceCtrl(1, 4, GPIO_DB_CLK_32K);
GPIO_DebounceEn(GPIO_GPIO_0, 1);
```


第六章 I2C 功能概述

- 两个 I2C 模块
- 支持 Master/Slave 模式
- 支持 7bit/10bit 地址
- 支持速率调整
- 支持 DMA

6.1 I2C 使用说明

以下场景中均以 I2C0 为例，如果需要 I2C1 则可以根据情况修改

6.2 场景 1: Master 读 Slave，不使用 DMA

其中 I2C 配置为 Master 读操作，Slave 收到地址后，将数据返回给 Master，CPU 操作读写，没有使用 DMA。配置之前需要决定使用的 GPIO，请参考 datasheet 了解可以使用的 GPIO

```
#define I2C_SCL      GPIO_GPIO_10
#define I2C_SDA      GPIO_GPIO_11
```

6.2.1 I2C Master 配置

// 测试数据，每次传输 10 个字节（fifo 深度是 8 字节），每个传输单元必须是 1 字节

6.2 场景 1: MASTER 读 SLAVE, 不使用 DMA

```
#define DATA_CNT (10)
uint8_t read_data[DATA_CNT] = {0,};
uint8_t read_data_cnt = 0;
```

6.2.1.1 配置 Pin

将 GPIO 映射成 I2C 引脚

```
void setup_peripherals_i2c_pin(void)
{
    // 打开 clock, 注意此处使用的是 I2C0
    // GPIO 的 clock 请根据需要打开 GPIO0 或者 GPIO1
    SYSCTRL_ClearClkGateMulti(    (1 << SYSCTRL_ITEM_APB_I2C0)
                                   | (1 << SYSCTRL_ITEM_APB_SysCtrl)
                                   | (1 << SYSCTRL_ITEM_APB_PinCtrl)
                                   | (1 << SYSCTRL_ITEM_APB_GPIO1)
                                   | (1 << SYSCTRL_ITEM_APB_GPIO0));

    // 使用默认内部上拉, 实际使用中建议使用外部上拉 - 响应速度更快, 可以支持更高的时钟
    // 如果使用外部上拉, 则不需要 pull
    PINCTRL_Pull(IO_SOURCE_I2C0_SCL_OUT, PINCTRL_PULL_UP);
    PINCTRL_Pull(IO_SOURCE_I2C0_SDA_OUT, PINCTRL_PULL_UP);
    PINCTRL_Pull(IO_SOURCE_I2C0_SCL_IN, PINCTRL_PULL_UP);
    PINCTRL_Pull(IO_SOURCE_I2C0_SDA_IN, PINCTRL_PULL_UP);

    // 将 GPIO 映射成 I2C 引脚
    PINCTRL_SelI2cIn(I2C_PORT_0, I2C_SCL, I2C_SDA);

    // 打开 I2C 中断
    platform_set_irq_callback(PLATFORM_CB_IRQ_I2C0, peripherals_i2c_isr, NULL);
}
```

6.2.1.2 初始化 I2C 模块

```
#define ADDRESS (0x71)
void setup_peripherals_i2c_module(void)
{
    // 配置为 Master, 7bit 地址
    I2C_Config(APB_I2C0, I2C_ROLE_MASTER, I2C_ADDRESSING_MODE_07BIT, ADDRESS);
    // 配置时钟, 可选
    I2C_ConfigClkFrequency(APB_I2C0, I2C_CLOCKFREQUENCY_STANDARD);

    I2C_Enable(APB_I2C0, 1);
    // 打开传输结束中断和 fifo 满中断
    I2C_IntEnable(APB_I2C0, (1<<I2C_INT_CMPL)|(1 << I2C_INT_FIFO_FULL));
}
```

6.2.1.3 I2C 中断实现

```
static uint32_t peripherals_i2c_isr(void *user_data)
{
    uint8_t i;
    uint32_t status = I2C_GetIntState(APB_I2C0);

    // FIFO 满之后, 触发中断, 此时需要将所有数据都读出来
    if(status & (1 << I2C_STATUS_FIFO_FULL))
    {
        for(; read_data_cnt < DATA_CNT; read_data_cnt++)
        {
            if(I2C_FifoEmpty(APB_I2C0)){break;}
            read_data[read_data_cnt] = I2C_DataRead(APB_I2C0);
        }
    }
}
```

6.2 场景 1: MASTER 读 SLAVE, 不使用 DMA

```
//传输结束后, 触发中断, 读取完剩下的数据
if(status & (1 << I2C_STATUS_CMPL))
{
    for(; read_data_cnt < DATA_CNT; read_data_cnt++)
    {
        read_data[read_data_cnt] = I2C_DataRead(APB_I2C0);
    }

    I2C_ClearIntState(APB_I2C0, (1 << I2C_STATUS_CMPL));

}

return 0;
}
```

6.2.1.4 I2C master 触发传输

```
void peripheral_i2c_send_data(void)
{
    // 设置方向, Master 读取
    I2C_CtrlUpdateDirection(APB_I2C0, I2C_TRANSACTION_SLAVE2MASTER);
    // 设置每次传输的大小
    I2C_CtrlUpdateDataCnt(APB_I2C0, DATA_CNT);
    // 触发传输
    I2C_CommandWrite(APB_I2C0, I2C_COMMAND_ISSUE_DATA_TRANSACTION);

}
```

6.2.1.5 使用流程

- 设置 GPIO, setup_peripherals_i2c_pin()
- 初始化 I2C, setup_peripherals_i2c_module()

- 在需要时候触发 I2C 读取, peripheral_i2c_send_data()
- 检查中断状态

6.2.2 I2C Slave 配置

// 测试数据, 每次传输 10 个字节 (fifo 深度是 8 字节), 每个传输单元必须是 1 字节

```
#define DATA_CNT (10)
uint8_t write_data[DATA_CNT] = {0,};
uint8_t write_data_cnt = 0;
```

6.2.2.1 配置 Pin

将 GPIO 映射成 I2C 引脚

```
void setup_peripherals_i2c_pin(void)
{
    // 打开 clock, 注意此处使用的是 I2C0
    // GPIO 的 clock 请根据需要打开 GPIO0 或者 GPIO1
    SYSCTRL_ClearClkGateMulti(    (1 << SYSCTRL_ITEM_APB_I2C0)
                                   | (1 << SYSCTRL_ITEM_APB_SysCtrl)
                                   | (1 << SYSCTRL_ITEM_APB_PinCtrl)
                                   | (1 << SYSCTRL_ITEM_APB_GPIO1)
                                   | (1 << SYSCTRL_ITEM_APB_GPIO0));

    // 使用默认内部上拉, 实际使用中建议使用外部上拉 - 响应速度更快, 可以支持更高的时钟
    // 如果使用外部上拉, 则不需要 pull
    PINCTRL_Pull(IO_SOURCE_I2C0_SCL_OUT, PINCTRL_PULL_UP);
    PINCTRL_Pull(IO_SOURCE_I2C0_SDA_OUT, PINCTRL_PULL_UP);
    PINCTRL_Pull(IO_SOURCE_I2C0_SCL_IN, PINCTRL_PULL_UP);
    PINCTRL_Pull(IO_SOURCE_I2C0_SDA_IN, PINCTRL_PULL_UP);

    // 将 GPIO 映射成 I2C 引脚
    PINCTRL_SelI2cIn(I2C_PORT_0, I2C_SCL, I2C_SDA);
```

6.2 场景 1: MASTER 读 SLAVE, 不使用 DMA

```
// 打开 I2C 中断
platform_set_irq_callback(PLATFORM_CB_IRQ_I2C0, peripherals_i2c_isr, NULL);

}
```

6.2.2.2 初始化 I2C 模块

```
#define ADDRESS (0x71)
void setup_peripherals_i2c_module(void)
{
    // 配置为 Slave, 7bit 地址
    I2C_Config(APB_I2C0, I2C_ROLE_SLAVE, I2C_ADDRESSING_MODE_07BIT, ADDRESS);

    I2C_Enable(APB_I2C0, 1);
    // 打开传输结束中断和地址触发中断
    I2C_IntEnable(APB_I2C0, (1<<I2C_INT_ADDR_HIT)|(1<<I2C_INT_CMPL));
}
```

6.2.2.3 I2C 中断实现以及发送数据

```
static uint32_t peripherals_i2c_isr(void *user_data)
{
    uint8_t i;
    static uint8_t dir = 2;
    uint32_t status = I2C_GetIntState(APB_I2C0);

    // Slave 收到匹配的地址, 触发中断
    if(status & (1 << I2C_STATUS_ADDR_HIT))
    {
```

```
// 判断是读操作还是写操作
dir = I2C_GetTransactionDir(APB_I2C0);
if(dir == I2C_TRANSACTION_MASTER2SLAVE)
{
    I2C_IntEnable(APB_I2C0, (1 << I2C_INT_FIFO_FULL));
}
else if(dir == I2C_TRANSACTION_SLAVE2MASTER)
{
    I2C_IntEnable(APB_I2C0, (1 << I2C_INT_FIFO_EMPTY));
}

I2C_ClearIntState(APB_I2C0, (1 << I2C_STATUS_ADDRHIT));
}

// 如果是读操作, 则会触发 empty 中断, 此时需要填写需要发送的数据, 直到 FIFO 满
if(status & (1 << I2C_STATUS_FIFO_EMPTY))
{
    // push data until fifo is full
    for(; write_data_cnt < DATA_CNT; write_data_cnt++)
    {
        if(I2C_FifoFull(APB_I2C0)){break;}
        I2C_DataWrite(APB_I2C0, write_data[write_data_cnt]);
    }
}

// 传输结束, 清理打开的中断
if(status & (1 << I2C_STATUS_CMPL))
{
    I2C_ClearIntState(APB_I2C0, (1 << I2C_STATUS_CMPL));

    // prepare for next
    if(dir == I2C_TRANSACTION_MASTER2SLAVE)
```

```

{
    I2C_IntDisable(APB_I2C0, (1 << I2C_INT_FIFO_FULL));
}
else if(dir == I2C_TRANSACTION_SLAVE2MASTER)
{
    I2C_IntDisable(APB_I2C0, (1 << I2C_INT_FIFO_EMPTY));
}

}

return 0;
}

```

6.2.2.4 使用流程

- 设置 GPIO, setup_peripherals_i2c_pin()
- 初始化 I2C, setup_peripherals_i2c_module()
- 检查中断状态, 在中断中发送数据, I2C_STATUS_CMPL 中断代表传输结束

6.3 场景 2: Master 写 Slave, 不使用 DMA

其中 I2C 配置为 Master 写操作, Slave 收到地址后, 将从 Master 读取数据, CPU 操作读写, 没有使用 DMA。配置之前需要决定使用的 GPIO, 请参考 datasheet 了解可以使用的 GPIO

```

#define I2C_SCL          GPIO_GPIO_10
#define I2C_SDA          GPIO_GPIO_11

```

6.3.1 I2C Master 配置

// 测试数据, 每次传输 10 个字节 (fifo 深度是 8 字节), 每个传输单元必须是 1 字节


```
#define DATA_CNT (10)
uint8_t write_data[DATA_CNT] = {0,};
uint8_t write_data_cnt = 0;
```

6.3.1.1 配置 Pin

将 GPIO 映射成 I2C 引脚

```
void setup_peripherals_i2c_pin(void)
{
    // 打开 clock, 注意此处使用的是 I2C0
    // GPIO 的 clock 请根据需要打开 GPIO0 或者 GPIO1
    SYSCTRL_ClearClkGateMulti(    (1 << SYSCTRL_ITEM_APB_I2C0)
                                   | (1 << SYSCTRL_ITEM_APB_SysCtrl)
                                   | (1 << SYSCTRL_ITEM_APB_PinCtrl)
                                   | (1 << SYSCTRL_ITEM_APB_GPIO1)
                                   | (1 << SYSCTRL_ITEM_APB_GPIO0));

    // 使用默认内部上拉, 实际使用中建议使用外部上拉 - 响应速度更快, 可以支持更高的时钟
    // 如果使用外部上拉, 则不需要 pull
    PINCTRL_Pull(IO_SOURCE_I2C0_SCL_OUT, PINCTRL_PULL_UP);
    PINCTRL_Pull(IO_SOURCE_I2C0_SDA_OUT, PINCTRL_PULL_UP);
    PINCTRL_Pull(IO_SOURCE_I2C0_SCL_IN, PINCTRL_PULL_UP);
    PINCTRL_Pull(IO_SOURCE_I2C0_SDA_IN, PINCTRL_PULL_UP);

    // 将 GPIO 映射成 I2C 引脚
    PINCTRL_SelI2cIn(I2C_PORT_0, I2C_SCL, I2C_SDA);

    // 打开 I2C 中断
    platform_set_irq_callback(PLATFORM_CB_IRQ_I2C0, peripherals_i2c_isr, NULL);
}
```

6.3.1.2 初始化 I2C 模块

```
#define ADDRESS (0x71)
void setup_peripherals_i2c_module(void)
{
    // 配置为 Master, 7bit 地址
    I2C_Config(APB_I2C0, I2C_ROLE_MASTER, I2C_ADDRESSING_MODE_07BIT, ADDRESS);
    // 配置时钟, 可选
    I2C_ConfigClkFrequency(APB_I2C0, I2C_CLOCKFREQUENCY_STANDARD);

    I2C_Enable(APB_I2C0, 1);
    // 打开传输结束中断和 fifo 空中断
    I2C_IntEnable(APB_I2C0, (1 << I2C_INT_CMPL) | (1 << I2C_INT_FIFO_EMPTY));
}
```

6.3.1.3 I2C 中断实现

```
static uint32_t peripherals_i2c_isr(void *user_data)
{
    uint8_t i;
    uint32_t status = I2C_GetIntState(APB_I2C0);

    // 传输结束, 触发中断
    if(status & (1 << I2C_STATUS_CMPL))
    {
        I2C_ClearIntState(APB_I2C0, (1 << I2C_STATUS_CMPL));
    }

    // empty FIFO 中断, 填写需要发送的数据, 数据全部发送之后, 关掉 I2C_INT_FIFO_EMPTY
    if(status & (1 << I2C_STATUS_FIFO_EMPTY))
    {

```

```
// push data until fifo is full
for(; write_data_cnt < DATA_CNT; write_data_cnt++)
{
    if(I2C_FifoFull(APB_I2C0)){break;}
    I2C_DataWrite(APB_I2C0,write_data[write_data_cnt]);
}

// if its the last, disable empty int
if(write_data_cnt == DATA_CNT)
{
    I2C_IntDisable(APB_I2C0,(1 << I2C_INT_FIFO_EMPTY));
}

}

return 0;
}
```

6.3.1.4 I2C master 触发传输

```
void peripheral_i2c_send_data(void)
{
    // 设置方向, Master 写
    I2C_CtrlUpdateDirection(APB_I2C0,I2C_TRANSACTION_MASTER2SLAVE);
    // 设置每次传输的大小
    I2C_CtrlUpdateDataCnt(APB_I2C0, DATA_CNT);
    // 触发传输
    I2C_CommandWrite(APB_I2C0, I2C_COMMAND_ISSUE_DATA_TRANSACTION);
}
```

6.3.1.5 使用流程

- 设置 GPIO, setup_peripherals_i2c_pin()
- 初始化 I2C, setup_peripherals_i2c_module()
- 在需要时候发送 I2C 数据, peripheral_i2c_send_data()
- 检查中断状态

6.3.2 I2C Slave 配置

// 测试数据, 每次传输 10 个字节 (fifo 深度是 8 字节), 每个传输单元必须是 1 字节

```
#define DATA_CNT (10)
uint8_t read_data[DATA_CNT] = {0,};
uint8_t read_data_cnt = 0;
```

6.3.2.1 配置 Pin

将 GPIO 映射成 I2C 引脚

```
void setup_peripherals_i2c_pin(void)
{
    // 打开 clock, 注意此处使用的是 I2C0
    // GPIO 的 clock 请根据需要打开 GPIO0 或者 GPIO1
    SYSCTRL_ClearClkGateMulti(    (1 << SYSCTRL_ITEM_APB_I2C0)
                                   | (1 << SYSCTRL_ITEM_APB_SysCtrl)
                                   | (1 << SYSCTRL_ITEM_APB_PinCtrl)
                                   | (1 << SYSCTRL_ITEM_APB_GPIO1)
                                   | (1 << SYSCTRL_ITEM_APB_GPIO0));
    // 使用默认内部上拉, 实际使用中建议使用外部上拉 - 响应速度更快, 可以支持更高的时钟
    // 如果使用外部上拉, 则不需要 pull
    PINCTRL_Pull(IO_SOURCE_I2C0_SCL_OUT, PINCTRL_PULL_UP);
    PINCTRL_Pull(IO_SOURCE_I2C0_SDA_OUT, PINCTRL_PULL_UP);
    PINCTRL_Pull(IO_SOURCE_I2C0_SCL_IN, PINCTRL_PULL_UP);
```

```
PINCTRL_Pull(IO_SOURCE_I2C0_SDA_IN,PINCTRL_PULL_UP);

// 将 GPIO 映射成 I2C 引脚
PINCTRL_SelI2cIn(I2C_PORT_0,I2C_SCL,I2C_SDA);

// 打开 I2C 中断
platform_set_irq_callback(PLATFORM_CB_IRQ_I2C0, peripherals_i2c_isr, NULL);

}
```

6.3.2.2 初始化 I2C 模块

```
#define ADDRESS (0x71)
void setup_peripherals_i2c_module(void)
{
    // 配置为 Slave, 7bit 地址
    I2C_Config(APB_I2C0,I2C_ROLE_SLAVE,I2C_ADDRESSING_MODE_07BIT,ADDRESS);

    I2C_Enable(APB_I2C0,1);
    // 打开传输结束中断和地址触发中断
    I2C_IntEnable(APB_I2C0,(1<<I2C_INT_ADDR_HIT)|(1<<I2C_INT_CMPL));
}
```

6.3.2.3 I2C 中断实现以及发送数据

```
static uint32_t peripherals_i2c_isr(void *user_data)
{
    uint8_t i;
    static uint8_t dir = 2;
```

```
uint32_t status = I2C_GetIntState(APB_I2C0);

// Slave 收到匹配的地址, 触发中断
if(status & (1 << I2C_STATUS_ADDRHIT))
{
    // 判断是读操作还是写操作
    dir = I2C_GetTransactionDir(APB_I2C0);
    if(dir == I2C_TRANSACTION_MASTER2SLAVE)
    {
        I2C_IntEnable(APB_I2C0, (1 << I2C_INT_FIFO_FULL));
    }
    else if(dir == I2C_TRANSACTION_SLAVE2MASTER)
    {
        I2C_IntEnable(APB_I2C0, (1 << I2C_INT_FIFO_EMPTY));
    }

    I2C_ClearIntState(APB_I2C0, (1 << I2C_STATUS_ADDRHIT));
}

// 等待 FIFO FULL, 读取 FIFO 直到 FIFO 变空
if(status & (1 << I2C_STATUS_FIFO_FULL))
{
    for(; read_data_cnt < DATA_CNT; read_data_cnt++)
    {
        if(I2C_FifoEmpty(APB_I2C0)){break;}
        read_data[read_data_cnt] = I2C_DataRead(APB_I2C0);
    }
}

// 传输结束, 读取 FIFO 中剩余的数据, 清除相关中断
if(status & (1 << I2C_STATUS_CMPL))
{
    for(; read_data_cnt < DATA_CNT; read_data_cnt++)
```

```
{
    read_data[read_data_cnt] = I2C_DataRead(APB_I2C0);
}

I2C_ClearIntState(APB_I2C0, (1 << I2C_STATUS_CMPL));

// prepare for next
if(dir == I2C_TRANSACTION_MASTER2SLAVE)
{
    I2C_IntDisable(APB_I2C0, (1 << I2C_INT_FIFO_FULL));
}
else if(dir == I2C_TRANSACTION_SLAVE2MASTER)
{
    I2C_IntDisable(APB_I2C0, (1 << I2C_INT_FIFO_EMPTY));
}

}

return 0;
}
```

6.3.2.4 使用流程

- 设置 GPIO, setup_peripherals_i2c_pin()
- 初始化 I2C, setup_peripherals_i2c_module()
- 检查中断状态, I2C_STATUS_CMPL 中断代表传输结束

6.4 场景 3: Master 读 Slave, 使用 DMA

其中 I2C 配置为 Master 读操作, Slave 收到地址后, 将数据返回给 Master, DMA 操作读写。配置之前需要决定使用的 GPIO, 请参考 datasheet 了解可以使用的 GPIO

```
#define I2C_SCL          GPIO_GPIO_10
#define I2C_SDA          GPIO_GPIO_11
```

6.4.1 I2C Master 配置

// 测试数据, 每次传输 23 个字节 (fifo 深度是 8 字节), 每个传输单元必须是 1 字节

```
#define DATA_CNT (23)
uint8_t read_data[DATA_CNT] = {0,};
uint8_t read_data_cnt = 0;
```

6.4.1.1 配置 Pin

将 GPIO 映射成 I2C 引脚

```
void setup_peripherals_i2c_pin(void)
{
    // 打开 clock, 注意此处使用的是 I2C0
    // GPIO 的 clock 请根据需要打开 GPIO0 或者 GPIO1
    SYSCTRL_ClearClkGateMulti(    (1 << SYSCTRL_ITEM_APB_I2C0)
                                   | (1 << SYSCTRL_ITEM_APB_SysCtrl)
                                   | (1 << SYSCTRL_ITEM_APB_PinCtrl)
                                   | (1 << SYSCTRL_ITEM_APB_GPIO1)
                                   | (1 << SYSCTRL_ITEM_APB_GPIO0));

    // 使用默认内部上拉, 实际使用中建议使用外部上拉 - 响应速度更快, 可以支持更高的时钟
    // 如果使用外部上拉, 则不需要 pull
    PINCTRL_Pull(IO_SOURCE_I2C0_SCL_OUT, PINCTRL_PULL_UP);
    PINCTRL_Pull(IO_SOURCE_I2C0_SDA_OUT, PINCTRL_PULL_UP);
    PINCTRL_Pull(IO_SOURCE_I2C0_SCL_IN, PINCTRL_PULL_UP);
    PINCTRL_Pull(IO_SOURCE_I2C0_SDA_IN, PINCTRL_PULL_UP);

    // 将 GPIO 映射成 I2C 引脚
```



```
PINCTRL_SelI2cIn(I2C_PORT_0, I2C_SCL, I2C_SDA);

// 打开 I2C 中断
platform_set_irq_callback(PLATFORM_CB_IRQ_I2C0, peripherals_i2c_isr, NULL);

}
```

6.4.1.2 初始化 I2C 模块

```
#define ADDRESS (0x71)
void setup_peripherals_i2c_module(void)
{
    // 配置为 Master, 7bit 地址
    I2C_Config(APB_I2C0, I2C_ROLE_MASTER, I2C_ADDRESSING_MODE_07BIT, ADDRESS);
    // 配置时钟, 可选
    I2C_ConfigClkFrequency(APB_I2C0, I2C_CLOCKFREQUENCY_STANDARD);

    I2C_Enable(APB_I2C0, 1);
    // 打开传输结束中断
    I2C_IntEnable(APB_I2C0, (1 << I2C_INT_CMPL));
}
```

6.4.1.3 初始化 DMA 模块

```
static void setup_peripherals_dma_module(void)
{
    SYSCtrl_ClearClkGateMulti(1 << SYSCtrl_ClkGate_APB_DMA);
    DMA_Reset(1);
    DMA_Reset(0);
}
```

6.4.1.4 I2C 中断实现

```
static uint32_t peripherals_i2c_isr(void *user_data)
{
    uint8_t i;
    uint32_t status = I2C_GetIntState(APB_I2C0);

    if(status & (1 << I2C_STATUS_CMPL))
    {
        I2C_ClearIntState(APB_I2C0, (1 << I2C_STATUS_CMPL));
    }

    return 0;
}
```

6.4.1.5 I2C master DMA 设置

```
// 注意此处是 I2C0
void peripherals_i2c_rxfifo_to_dma(int channel_id, void *dst, int size)
{
    DMA_Descriptor descriptor __attribute__((aligned (8)));

    descriptor.Next = (DMA_Descriptor *)0;
    DMA_PreparePeripheral2Mem(&descriptor, dst, SYSCTRL_DMA_I2C0, size, DMA_ADDRESS_INC, 0);

    DMA_EnableChannel(channel_id, &descriptor);
}
```

6.4.1.6 I2C master 触发传输

```
void peripheral_i2c_send_data(void)
{
    // I2C DMA 功能打开
    I2C_DmaEnable(APB_I2C0, 1);
    // 设置传输方向, Master 读
    I2C_CtrlUpdateDirection(APB_I2C0, I2C_TRANSACTION_SLAVE2MASTER);
    // 设置需要传输的数据大小
    I2C_CtrlUpdateDataCnt(APB_I2C0, DATA_CNT);

    // 配置 DMA
    #define I2C_DMA_RX_CHANNEL    (0)//DMA channel 0
    peripherals_i2c_rxfifo_to_dma(I2C_DMA_RX_CHANNEL, read_data, sizeof(read_data));

    // 触发传输
    I2C_CommandWrite(APB_I2C0, I2C_COMMAND_ISSUE_DATA_TRANSACTION);
}
```

6.4.1.7 使用流程

- 设置 GPIO, setup_peripherals_i2c_pin()
- 初始化 I2C, setup_peripherals_i2c_module()
- 初始化 DMA, setup_peripherals_dma_module()
- 在需要时候触发 I2C 读取, peripheral_i2c_send_data()
- 检查中断状态

6.4.2 I2C Slave 配置

// 测试数据, 每次传输 23 个字节 (fifo 深度是 8 字节), 每个传输单元必须是 1 字节

```
#define DATA_CNT (23)
uint8_t write_data[DATA_CNT] = {0,};
uint8_t write_data_cnt = 0;
```

6.4.2.1 配置 Pin

将 GPIO 映射成 I2C 引脚

```
void setup_peripherals_i2c_pin(void)
{
    // 打开 clock, 注意此处使用的是 I2C0
    // GPIO 的 clock 请根据需要打开 GPIO0 或者 GPIO1
    SYSCTRL_ClearClkGateMulti(    (1 << SYSCTRL_ITEM_APB_I2C0)
                                   | (1 << SYSCTRL_ITEM_APB_SysCtrl)
                                   | (1 << SYSCTRL_ITEM_APB_PinCtrl)
                                   | (1 << SYSCTRL_ITEM_APB_GPIO1)
                                   | (1 << SYSCTRL_ITEM_APB_GPIO0));

    // 使用默认内部上拉, 实际使用中建议使用外部上拉 - 响应速度更快, 可以支持更高的时钟
    // 如果使用外部上拉, 则不需要 pull
    PINCTRL_Pull(IO_SOURCE_I2C0_SCL_OUT, PINCTRL_PULL_UP);
    PINCTRL_Pull(IO_SOURCE_I2C0_SDA_OUT, PINCTRL_PULL_UP);
    PINCTRL_Pull(IO_SOURCE_I2C0_SCL_IN, PINCTRL_PULL_UP);
    PINCTRL_Pull(IO_SOURCE_I2C0_SDA_IN, PINCTRL_PULL_UP);

    // 将 GPIO 映射成 I2C 引脚
    PINCTRL_SelI2cIn(I2C_PORT_0, I2C_SCL, I2C_SDA);

    // 打开 I2C 中断
    platform_set_irq_callback(PLATFORM_CB_IRQ_I2C0, peripherals_i2c_isr, NULL);
}
```

6.4.2.2 初始化 I2C 模块

```
#define ADDRESS (0x71)
void setup_peripherals_i2c_module(void)
{
    // 配置为 Slave, 7bit 地址
    I2C_Config(APB_I2C0, I2C_ROLE_SLAVE, I2C_ADDRESSING_MODE_07BIT, ADDRESS);

    I2C_Enable(APB_I2C0, 1);
    // 打开传输结束中断和地址触发中断
    I2C_IntEnable(APB_I2C0, (1<<I2C_INT_ADDR_HIT) | (1<<I2C_INT_CMPL));
}
```

6.4.2.3 初始化 DMA 模块

```
static void setup_peripherals_dma_module(void)
{
    SYSCTRL_ClearClkGateMulti(1 << SYSCTRL_ClkGate_APB_DMA);
    DMA_Reset(1);
    DMA_Reset(0);
}
```

6.4.2.4 I2C 中断实现以及发送数据

```
static uint32_t peripherals_i2c_isr(void *user_data)
{
    uint8_t i;
    static uint8_t dir = 2;
    uint32_t status = I2C_GetIntState(APB_I2C0);
```

```
// Slave 收到了匹配的地址, 触发中断, 判断方向
if(status & (1 << I2C_STATUS_ADDRHIT))
{
    dir = I2C_GetTransactionDir(APB_I2C0);
    if(dir == I2C_TRANSACTION_MASTER2SLAVE)
    {

    }
    else if(dir == I2C_TRANSACTION_SLAVE2MASTER)
    {
        // 设置 DMA, 发送数据
        peripherals_i2c_write_data_dma_setup();
    }
    I2C_ClearIntState(APB_I2C0, (1 << I2C_STATUS_ADDRHIT));
}

// 传输结束, 关闭 DMA
if(status & (1 << I2C_STATUS_CMPL))
{
    I2C_DmaEnable(APB_I2C0, 0);
    I2C_ClearIntState(APB_I2C0, (1 << I2C_STATUS_CMPL));
}

return 0;
}
```

6.4.2.5 I2C Slave 发送数据 DMA 设置

```
// 此处配置的是 I2C0
void peripherals_i2c_dma_to_txfifo(int channel_id, void *src, int size)
{
    DMA_Descriptor descriptor __attribute__((aligned (8)));
```

```

descriptor.Next = (DMA_Descriptor *)0;
DMA_PrepareMem2Peripheral(&descriptor, SYSCTRL_DMA_I2C0, src, size, DMA_ADDRESS_INC, 0);

DMA_EnableChannel(channel_id, &descriptor);
}

void peripherals_i2c_write_data_dma_setup(void)
{
    // 设置 DMA
    #define I2C_DMA_TX_CHANNEL    (0)//DMA channel 0
    peripherals_i2c_dma_to_txfifo(I2C_DMA_TX_CHANNEL, write_data, sizeof(write_data));
    // 更新需要传输的数据
    I2C_CtrlUpdateDataCnt(APB_I2C0, DATA_CNT);
    // 打开 I2C DMA
    I2C_DmaEnable(APB_I2C0, 1);
}

```

6.4.2.6 使用流程

- 设置 GPIO, setup_peripherals_i2c_pin()
- 初始化 I2C, setup_peripherals_i2c_module()
- 初始化 DMA, setup_peripherals_dma_module()
- 检查中断状态, 在中断中设置 DMA 发送数据, I2C_STATUS_CMPL 中断代表传输结束

6.5 场景 4: Master 写 Slave, 使用 DMA

其中 I2C 配置为 Master 写操作, Slave 收到地址后, 读取 Master 发送的数据, DMA 操作读写。配置之前需要决定使用的 GPIO, 请参考 datasheet 了解可以使用的 GPIO

```

#define I2C_SCL        GPIO_GPIO_10
#define I2C_SDA        GPIO_GPIO_11

```

6.5.1 I2C Master 配置

// 测试数据, 每次传输 23 个字节 (fifo 深度是 8 字节), 每个传输单元必须是 1 字节

```
#define DATA_CNT (23)
uint8_t write_data[DATA_CNT] = {0,};
uint8_t write_data_cnt = 0;
```

6.5.1.1 配置 Pin

将 GPIO 映射成 I2C 引脚

```
void setup_peripherals_i2c_pin(void)
{
    // 打开 clock, 注意此处使用的是 I2C0
    // GPIO 的 clock 请根据需要打开 GPIO0 或者 GPIO1
    SYSCTRL_ClearClkGateMulti(    (1 << SYSCTRL_ITEM_APB_I2C0)
                                   | (1 << SYSCTRL_ITEM_APB_SysCtrl)
                                   | (1 << SYSCTRL_ITEM_APB_PinCtrl)
                                   | (1 << SYSCTRL_ITEM_APB_GPIO1)
                                   | (1 << SYSCTRL_ITEM_APB_GPIO0));
    // 使用默认内部上拉, 实际使用中建议使用外部上拉 - 响应速度更快, 可以支持更高的时钟
    // 如果使用外部上拉, 则不需要 pull
    PINCTRL_Pull(IO_SOURCE_I2C0_SCL_OUT, PINCTRL_PULL_UP);
    PINCTRL_Pull(IO_SOURCE_I2C0_SDA_OUT, PINCTRL_PULL_UP);
    PINCTRL_Pull(IO_SOURCE_I2C0_SCL_IN, PINCTRL_PULL_UP);
    PINCTRL_Pull(IO_SOURCE_I2C0_SDA_IN, PINCTRL_PULL_UP);

    // 将 GPIO 映射成 I2C 引脚
    PINCTRL_SelI2cIn(I2C_PORT_0, I2C_SCL, I2C_SDA);

    // 打开 I2C 中断
    platform_set_irq_callback(PLATFORM_CB_IRQ_I2C0, peripherals_i2c_isr, NULL);
```



```
}
```

6.5.1.2 初始化 I2C 模块

```
#define ADDRESS (0x71)
void setup_peripherals_i2c_module(void)
{
    // 配置为 Master, 7bit 地址
    I2C_Config(APB_I2C0, I2C_ROLE_MASTER, I2C_ADDRESSING_MODE_07BIT, ADDRESS);
    // 配置时钟, 可选
    I2C_ConfigClkFrequency(APB_I2C0, I2C_CLOCKFREQUENCY_STANDARD);

    I2C_Enable(APB_I2C0, 1);
    // 打开传输结束中断
    I2C_IntEnable(APB_I2C0, (1<<I2C_INT_CMPL));
}
```

6.5.1.3 初始化 DMA 模块

```
static void setup_peripherals_dma_module(void)
{
    SYSCTRL_ClearClkGateMulti(1 << SYSCTRL_ClkGate_APB_DMA);
    DMA_Reset(1);
    DMA_Reset(0);
}
```

6.5.1.4 I2C 中断实现

```
static uint32_t peripherals_i2c_isr(void *user_data)
{
    uint8_t i;
    uint32_t status = I2C_GetIntState(APB_I2C0);

    if(status & (1 << I2C_STATUS_CMPL))
    {
        I2C_ClearIntState(APB_I2C0, (1 << I2C_STATUS_CMPL));
    }

    return 0;
}
```

6.5.1.5 I2C master DMA 设置

```
// 注意此处是 I2C0
void peripherals_i2c_dma_to_txfifo(int channel_id, void *src, int size)
{
    DMA_Descriptor descriptor __attribute__((aligned (8)));

    descriptor.Next = (DMA_Descriptor *)0;
    DMA_PrepareMem2Peripheral(&descriptor, SYSCTRL_DMA_I2C0, src, size, DMA_ADDRESS_INC, 0);

    DMA_EnableChannel(channel_id, &descriptor);
}
```

6.5.1.6 I2C master 触发传输

```
void peripheral_i2c_send_data(void)
{
    // I2C DMA 功能打开
    I2C_DmaEnable(APB_I2C0, 1);
    // 设置传输方向, Master 读
    I2C_CtrlUpdateDirection(APB_I2C0, I2C_TRANSACTION_MASTER2SLAVE);
    // 设置需要传输的数据大小
    I2C_CtrlUpdateDataCnt(APB_I2C0, DATA_CNT);

    // 配置 DMA
    #define I2C_DMA_TX_CHANNEL    (0)//DMA channel 0
    peripherals_i2c_dma_to_txfifo(I2C_DMA_TX_CHANNEL, write_data, sizeof(write_data));

    // 触发传输
    I2C_CommandWrite(APB_I2C0, I2C_COMMAND_ISSUE_DATA_TRANSACTION);
}
```

6.5.1.7 使用流程

- 设置 GPIO, setup_peripherals_i2c_pin()
- 初始化 I2C, setup_peripherals_i2c_module()
- 初始化 DMA, setup_peripherals_dma_module()
- 在需要时候触发 I2C 读取, peripheral_i2c_send_data()
- 检查中断状态

6.5.2 I2C Slave 配置

// 测试数据, 每次传输 23 个字节 (fifo 深度是 8 字节), 每个传输单元必须是 1 字节

```
#define DATA_CNT (23)
uint8_t read_data[DATA_CNT] = {0,};
uint8_t read_data_cnt = 0;
```

6.5.2.1 配置 Pin

将 GPIO 映射成 I2C 引脚

```
void setup_peripherals_i2c_pin(void)
{
    // 打开 clock, 注意此处使用的是 I2C0
    // GPIO 的 clock 请根据需要打开 GPIO0 或者 GPIO1
    SYSCTRL_ClearClkGateMulti(    (1 << SYSCTRL_ITEM_APB_I2C0)
                                   | (1 << SYSCTRL_ITEM_APB_SysCtrl)
                                   | (1 << SYSCTRL_ITEM_APB_PinCtrl)
                                   | (1 << SYSCTRL_ITEM_APB_GPIO1)
                                   | (1 << SYSCTRL_ITEM_APB_GPIO0));

    // 使用默认内部上拉, 实际使用中建议使用外部上拉 - 响应速度更快, 可以支持更高的时钟
    // 如果使用外部上拉, 则不需要 pull
    PINCTRL_Pull(IO_SOURCE_I2C0_SCL_OUT, PINCTRL_PULL_UP);
    PINCTRL_Pull(IO_SOURCE_I2C0_SDA_OUT, PINCTRL_PULL_UP);
    PINCTRL_Pull(IO_SOURCE_I2C0_SCL_IN, PINCTRL_PULL_UP);
    PINCTRL_Pull(IO_SOURCE_I2C0_SDA_IN, PINCTRL_PULL_UP);

    // 将 GPIO 映射成 I2C 引脚
    PINCTRL_SelI2cIn(I2C_PORT_0, I2C_SCL, I2C_SDA);

    // 打开 I2C 中断
    platform_set_irq_callback(PLATFORM_CB_IRQ_I2C0, peripherals_i2c_isr, NULL);
}
```

6.5.2.2 初始化 I2C 模块

```
#define ADDRESS (0x71)
void setup_peripherals_i2c_module(void)
{
    // 配置为 Slave, 7bit 地址
    I2C_Config(APB_I2C0, I2C_ROLE_SLAVE, I2C_ADDRESSING_MODE_07BIT, ADDRESS);

    I2C_Enable(APB_I2C0, 1);
    // 打开传输结束中断和地址触发中断
    I2C_IntEnable(APB_I2C0, (1<<I2C_INT_ADDR_HIT) | (1<<I2C_INT_CMPL));
}
```

6.5.2.3 初始化 DMA 模块

```
static void setup_peripherals_dma_module(void)
{
    SYSCTRL_ClearClkGateMulti(1 << SYSCTRL_ClkGate_APB_DMA);
    DMA_Reset(1);
    DMA_Reset(0);
}
```

6.5.2.4 I2C 中断实现以及发送数据

```
static uint32_t peripherals_i2c_isr(void *user_data)
{
    uint8_t i;
    static uint8_t dir = 2;
    uint32_t status = I2C_GetIntState(APB_I2C0);
```

```
// Slave 收到了匹配的地址, 检查传输方向
if(status & (1 << I2C_STATUS_ADDRHIT))
{
    dir = I2C_GetTransactionDir(APB_I2C0);
    if(dir == I2C_TRANSACTION_MASTER2SLAVE)
    {
        // 设置 DMA 读取数据
        peripherals_i2c_read_data_dma_setup();
    }
    else if(dir == I2C_TRANSACTION_SLAVE2MASTER)
    {
    }
    I2C_ClearIntState(APB_I2C0, (1 << I2C_STATUS_ADDRHIT));
}

// 传输结束, 关闭 DMA
if(status & (1 << I2C_STATUS_CMPL))
{
    I2C_DmaEnable(APB_I2C0, 0);
    I2C_ClearIntState(APB_I2C0, (1 << I2C_STATUS_CMPL));
}

return 0;
}
```

6.5.2.5 I2C Slave 发送数据 DMA 设置

```
// 此处配置的是 I2C0
void peripherals_i2c_rxfifo_to_dma(int channel_id, void *dst, int size)
{
    DMA_Descriptor descriptor __attribute__((aligned (8)));
```

```

    descriptor.Next = (DMA_Descriptor *)0;
    DMA_PreparePeripheral2Mem(&descriptor,dst,SYSCTRL_DMA_I2C0,size,DMA_ADDRESS_INC,0);

    DMA_EnableChannel(channel_id, &descriptor);
}

void peripherals_i2c_read_data_dma_setup(void)
{
    // 设置 DMA
    #define I2C_DMA_RX_CHANNEL    (0)//DMA channel 0
    peripherals_i2c_rxfifo_to_dma(I2C_DMA_RX_CHANNEL, read_data, sizeof(read_data));
    // 更新需要传输的数据
    I2C_CtrlUpdateDataCnt(APB_I2C0, DATA_CNT);
    // 打开 I2C DMA
    I2C_DmaEnable(APB_I2C0,1);
}

```

6.5.2.6 使用流程

- 设置 GPIO, setup_peripherals_i2c_pin()
- 初始化 I2C, setup_peripherals_i2c_module()
- 初始化 DMA, setup_peripherals_dma_module()
- 检查中断状态, 在中断中设置 DMA 读取数据, I2C_STATUS_CMPL 中断代表传输结束

第七章 I2s 简介

I2S (inter-IC sound) 总线是数字音频专用总线。它有四个引脚，两个数据引脚 (DOUT 和 DIN)，一个位率时钟引脚 (BCLK) 和一个左右通道选择引脚 (LRCLK)。

另外，通过 ING91682A 的 MCLK 输出，它可用于给外部 DAC/ADC 芯片提供时钟（可选）。

7.1 功能描述

7.1.1 特点

- 遵从 I2S 协议标准，支持 I2S 标准模式和左对齐模式
- 支持 PCM(脉冲编码调制) 时序
- 可编程的主从模式
- 可配置的 LRCLK 和 BCLK 极性
- 可配置数据位宽
- 独立发送和接收 FIFO
- TX 和 RX 的 FIFO 深度分别为 16*32bit
- 支持立体声和单声道模式
- 可配置的采样频率
- TX 和 RX 分别支持 DMA 搬运

7.1.2 I2s 角色

在 I2S 总线上，提供时钟和通道选择信号的器件是 MASTER，另一方则为 SLAVER。

MASTER 和 SLAVE 都可以进行数据收发。

7.1.3 I2s 工作模式

I2S 有两种工作模式：一种是立体声音频模式，另外一种为语音模式。

7.1.4 串行数据

串行数据是以高位（MSB）在前，低位（LSB）在后的方式进行传送的。

如果音频 codec 发送的位数多于 I2S 控制器的接收位数，I2S 控制器会将低位多余的位数忽略掉；

如果音频 codec 发送的位数小于 I2S 控制器接收位数，I2S 控制器将后面的位补零。

7.1.5 时钟分频

916 芯片可选用系统 24MHz 时钟或者 PLL 作为 I2s 时钟源。

位率时钟（BCLK）可以通过对功能时钟进行分频得到；

通道选择时钟（LRCLK）即音频数据的采样频率可以通过对 BCLK 进行分频得到。

音频 Codec 中对采样频率 LRCLK 要求精度比较高，我们在计算分频时应该首先根据不同的采样频率计算得到对应的 MCLK 和 BCLK。

7.1.5.1 时钟分频计算

计算示例：

假设当前 codec 采用 16K 采样频率，mic 要求一帧 64 位（参考具体的 mic 使用手册）。

有以下关系：

- $f_{bclk} = clk / (2 * b_div)$
- $f_{lrclk} = f_{bclk} / (2 * lr_div)$

其中 clk 为 codec 时钟, f_bclk、f_lrclk 分别为 BCLK 和 LRCLK, b_div、lr_div 分别为 BCLK 和 LRCLK 的分频系数。

BCLK 和 LRCLK 之间的关系是可变的, 但是 BCLK 必须大于等于 LRCLK 的 48 倍。即 $lr_div \geq 24$ 。

支持 $lr_div = 32$, DATA_LEN = 32 位的配置, 其他情况下 $lr_div - DATA_LEN > 3$ 。

通过 $f_lrclk = 16000$, $lr_div = 32$ 计算出 $f_bclk = 1.024\text{MHz}$ 。也就是 $clk = 2.048 * b_div$ 。

clk 通过时钟源分频得到必定是整数, b_div 也同样是整数, 通过计算得知在 384MHz 内只有当 $b_div = 125$ 时 $clk = 256\text{MHz}$ 为整数。

故需要将 PLL 时钟配置为 256MHz, $b_div = 125$ 可以得到 16K 采样率。

7.1.6 i2s 存储器

采用两个深度为 16, 宽度为 32bit 的 FIFO 分别存储接收、发送的音频数据。

有如下规则:

- 音频数据位宽为 16bit 时, 每 32bit 存储两个音频数据, 高 16bit 存储左声道数据, 低 16bit 存储右声道数据。
- 音频数据位宽大于 16bit 时, 每 32bit 存储一个音频数据, 低地址存储左声道数据, 高地址存储右声道数据。

7.2 使用方法

7.2.1 方法概述

I2s 使用方法总结为: 时钟配置, I2s 配置 (包括采样率) 和数据处理。

数据发送:

1. I2s 引脚 GPIO 配置
2. 配置外部 codec 芯片, 使其处于工作模式
3. 写相应配置寄存器
4. 将数据写入 TX_MEM

5. 使能 I2s
6. 等待中断产生
7. 读取状态寄存器，将数据写入 TX_MEM
8. 传输完毕，关闭 I2S

数据接收：

1. I2s 引脚 GPIO 配置
2. 配置外部 codec 芯片，使其处于工作模式
3. 写相应配置寄存器
4. 使能 I2s
5. 等待中断产生
6. 读取状态寄存器，读取 RX_MEM 中数据
7. 传输完毕，关闭 I2S

I2S 控制器操作流程如下：

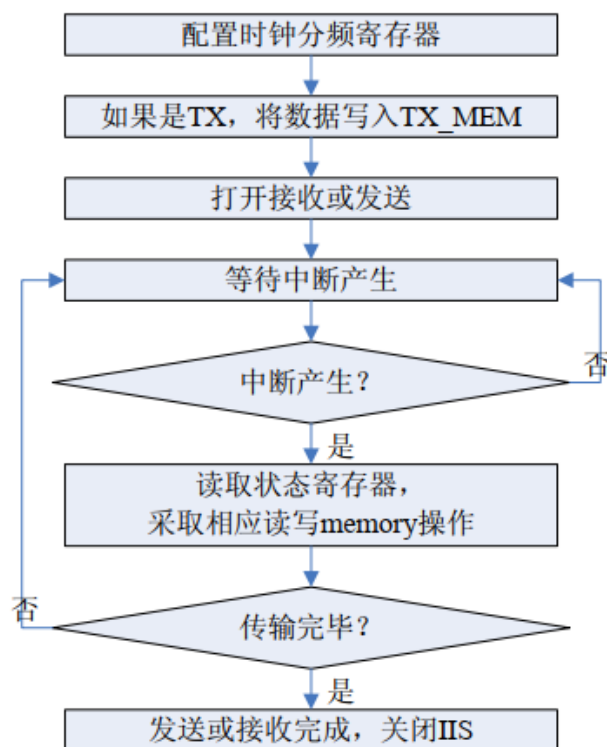


图 7.1: I2S 控制器操作流程

如果需要用到 DMA 搬运则需要在使用 I2s 之前配置 DMA 并使能。

7.2.2 注意点

- I2s 时钟源可以选择晶振 24M 时钟和 PLL 时钟，要注意是选择哪一个时钟源
- I2s 数据可能会进行采样，需要注意具体的数据结构以及对应的数据处理，如是否需要数据移位等
- 当前 I2s 支持的发送/接收数据位宽为 16-32bit，需要查阅 mic 文档或其他使用手册来确定数据位宽，否则不能正常工作
- 配置 DMA 要在使能 I2s 之前完成，使能 I2s 一定是最后一步
- 建议采用 DMA 乒乓搬运的方式来传输 I2s 数据

7.3 编程指南

7.3.1 驱动接口

- I2S_ConfigClk: I2s 时钟配置接口
- I2S_Config: I2s 配置接口
- I2S_ConfigIRQ: I2s 中断配置接口
- I2S_DMAEnable: I2s DMA 使能接口
- I2S_Enable: I2s 使能接口
- I2S_PopRxFIFO、I2S_PushTxFIFO: I2s FIFO 读写接口
- I2S_ClearRxFIFO、I2S_ClearTxFIFO: I2s 清 FIFO 接口
- I2S_GetIntState、I2S_ClearIntState: I2s 获取中断、清中断接口
- I2S_GetRxFIFOCOUNT、I2S_GetTxFIFOCOUNT: I2s 获取 FIFO 数据数量接口
- I2S_DataFromPDM: I2s 获取 PDM 数据接口

7.3.2 代码示例

下面将通过实际代码展示 I2s 的基本配置及使用代码。

7.3.2.1 I2s 配置

```

#define I2S_PIN_BCLK      28
#define I2S_PIN_IN        29
#define I2S_PIN_LRCLK     30
void I2sSetup(void)
{
    // pinctrl & GPIO mux
    PINCTRL_SetPadMux(I2S_PIN_BCLK, IO_SOURCE_I2S_BCLK_OUT);
    PINCTRL_SetPadMux(I2S_PIN_IN, IO_SOURCE_I2S_DATA_IN);
    PINCTRL_SelI2sIn(IO_NOT_A_PIN, IO_NOT_A_PIN, I2S_PIN_IN);
    PINCTRL_SetPadMux(I2S_PIN_LRCLK, IO_SOURCE_I2S_LRCLK_OUT);
    PINCTRL_Pull(IO_SOURCE_I2S_DATA_IN, PINCTRL_PULL_DOWN);

    // CLK & Register
    SYSCTRL_ConfigPLLClk(6, 128, 2); // source clk PLL = 256MHz
    SYSCTRL_SelectI2sClk(SYSCTRL_CLK_PLL_DIV_1 + 4); // I2s_Clk = 51.2MHz
    I2S_ConfigClk(APB_I2S, 25, 32); // F_bclk = 1.024MHz, F_lrclk = 16K
    I2S_ConfigIRQ(APB_I2S, 0, 1, 0, 10);
    I2S_DMAEnable(APB_I2S, 0, 0);
    I2S_Config(APB_I2S, I2S_ROLE_MASTER, I2S_MODE_STANDARD, 0, 0, 0, 1, 24);

    // I2s interrupt
    platform_set_irq_callback(PLATFORM_CB_IRQ_I2S, cb_isr, 0);
}

```

7.3.2.2 I2s 使能

I2s 使能分 3 种情况：I2s 发送、I2s 接收、使用 DMA 搬运

接收：

```
void I2sStart(void)
{
    I2S_ClearRxFIFO(APB_I2S);
    I2S_Enable(APB_I2S, 0, 1);
}
```

发送:

```
uint8_t  sendSize = 10;
uint32_t sendData[10];
void I2sStart(void)
{
    int i;
    I2S_ClearTxFIFO(APB_I2S);
    // push data into TX_FIFO first
    for (i = 0; i < sendSize; i++) {
        I2S_PushTxFIFO(APB_I2S, sendData[i]);
    }
    I2S_Enable(APB_I2S, 0, 1);
}
```

使用 DMA (接收):

```
#define CHANNEL_ID 0
DMA_Descriptor test __attribute__((aligned (8)));
void I2sStart(uint32_t data)
{
    DMA_EnableChannel(CHANNEL_ID, &test);
    I2S_ClearRxFIFO(APB_I2S);
    I2S_DMAEnable(APB_I2S, 1, 1);
    I2S_Enable(APB_I2S, 0, 1);
}
```

无论哪种情况都必须最后一步使能 I2s, 否则 I2s 工作异常。

7.3.2.3 I2s 中断

接收:

```
uint32_t cb_isr(void *user_data)
{
    uint32_t state = I2S_GetIntState(APB_I2S);
    I2S_ClearIntState(APB_I2S, state);

    int i = I2S_GetRxFIFOCount(APB_I2S);

    while (i) {
        uint32_t data = I2S_PopRxFIFO(APB_I2S);
        i--;
        // do something with data
    }

    return 0;
}
```

发送:

```
uint8_t  sendSize = 10;
uint32_t sendData[10];
uint32_t cb_isr(void *user_data)
{
    uint32_t state = I2S_GetIntState(APB_I2S);
    I2S_ClearIntState(APB_I2S, state);

    int i;
    for (i = 0; i < sendSize; i++) {
        I2S_PushTxFIFO(APB_I2S, sendData[i]);
    }
    return 0;
}
```


7.3.2.4 I2s & 乒乓 DMA

下面以经典的 DMA 乒乓搬运 I2s 接收数据为例展示 I2s 实际使用方法。

这里我们采用 16K 采样率，单个数据帧固定 64 位，和 DMA 协商握手、burstSize=8、一次搬运 80 个数据。

```
#define I2S_PIN_BCLK      28
#define I2S_PIN_IN       29
#define I2S_PIN_LRCLK    30
#define CHANNEL_ID 0
uint32_t pingpang_buff[2][80];
DMA_Descriptor test[2] __attribute__((aligned (8)));
uint8_t pingpang = 0;
static uint32_t DMA_cb_isr(void *user_data)
{
    uint32_t state = DMA_GetChannelIntState(CHANNEL_ID);
    DMA_ClearChannelIntState(CHANNEL_ID, state);

    pingpang ^= 1;
    DMA_EnableChannel(CHANNEL_ID, &test[pingpang]);
    uint32_t *data = (pingpang) ? (pingpang_buff[0]) : (pingpang_buff[1]);

    // do something with data-buffer's data

    return 0;
}

void DMA_SetUpPingPang(void)
{
    DMA_Reset();
    platform_set_irq_callback(PLATFORM_CB_IRQ_DMA, DMA_cb_isr, 0);
}
```

```

test[0].Next = &test[1];
test[1].Next = &test[0];    // make a DMA link cycle
DMA_PreparePeripheral2RAM(&test[0],
                          pingpang_buff[0],
                          SYCTRL_DMA_I2S_RX,
                          80,
                          DMA_ADDRESS_INC,
                          0 | 8 << 24 | 1 << 28);
DMA_PreparePeripheral2RAM(&test[1],
                          pingpang_buff[1],
                          SYCTRL_DMA_I2S_RX,
                          80,
                          DMA_ADDRESS_INC,
                          0 | 8 << 24 | 1 << 28);
DMA_EnableChannel(CHANNEL_ID, &test[pingpang]);
}
void I2sSetup(void)
{
    // pinctrl & GPIO mux
    PINCTRL_SetPadMux(I2S_PIN_BCLK, IO_SOURCE_I2S_BCLK_OUT);
    PINCTRL_SetPadMux(I2S_PIN_IN, IO_SOURCE_I2S_DATA_IN);
    PINCTRL_SelI2sIn(IO_NOT_A_PIN, IO_NOT_A_PIN, I2S_PIN_IN);
    PINCTRL_SetPadMux(I2S_PIN_LRCLK, IO_SOURCE_I2S_LRCLK_OUT);
    PINCTRL_Pull(IO_SOURCE_I2S_DATA_IN, PINCTRL_PULL_DOWN);

    // CLK & Register
    SYCTRL_ConfigPLLClk(6, 128, 2); // sorce clk PLL = 256MHz
    SYCTRL_SelectI2sClk(SYCTRL_CLK_PLL_DIV_1 + 4); // I2s_Clk = 51.2MHz
    I2S_ConfigClk(APB_I2S, 25, 32); // F_bclk = 1.024MHz, F_lrclk = 16K
    I2S_ConfigIRQ(APB_I2S, 0, 1, 0, 8);
    I2S_DMAEnable(APB_I2S, 0, 0);
    I2S_Config(APB_I2S, I2S_ROLE_MASTER, I2S_MODE_STANDARD, 0, 0, 0, 1, 24);

    // setup pingpang DMA

```

```
DMA_SetUpPingPang();  
  
// start working  
I2S_ClearRxFIFO(APB_I2S);  
I2S_DMAEnable(APB_I2S, 1, 1);  
I2S_Enable(APB_I2S, 0, 1);  
}
```

DMA 的具体用法请参见本手册 DMA 一节。

更加系统化的 I2s 代码请参考 SDK 中 voice_remote_ctrl 例程。

第八章 IR 红外

8.1 功能概述

- 支持红外发射 & 接收
- 时序可调整，支持多种编码

8.2 使用说明

8.2.1 参数 (不同编码的时间参数)

```
//32KHz 调制时钟
#define FCLK          32000

//NEC 载波频率 38KHz
#define NEC_WAVE_FREQ  38000

// RC5 载波频率 36KHz
#define RC5_WAVE_FREQ  36000

// 计算载波频率发生器数据，由此产生如 38KHz NEC 的载波，NEC 与 TC9012 通用 38KHz 载波
#define IR_WAVE_NEC_TC9012_FREQ (OSC_CLK_FREQ/NEC_WAVE_FREQ)
#define IR_WAVE_RC5_FREQ (OSC_CLK_FREQ/RC5_WAVE_FREQ)

//通过 FCLK 产生各种协议每 bit 位调制周期最小单位，如 NEC 协议中，560us 为最小调制周期
#define NEC_UINT      (FCLK*560/1000000+1)
```

```

#define TC9012_UINT (FCLK*260/1000000+1)
#define RC5_UINT    (FCLK*889/1000000+1)

//不必要的参数
#define INESSENTIAL    0

typedef struct
{
    uint16_t timer1;//发送模式下，表示引导码低电平时间：如 NEC 为 16*UNIT = 9ms，接收模式
    uint16_t timer2;//发送模式下，表示重复码低电平时间：如 NEC 为 4*UNIT = 2.25ms，接收模
    uint16_t timer3;//发送模式下，表示引导码高电平时间：如 NEC 为 8*UNIT = 4.5ms，接收模式
    uint16_t timer4;//发送模式下，表示重复码高电平时间：如 NEC 为 UNIT = 560us，接收模式
    uint16_t timer5;//接收时接收超时定时器，发射不必关注
    uint16_t btimer1;//逻辑 0 的 bit 时长：如 NEC = 2*UNIT = 1.12ms.
    uint16_t btimer2;//逻辑 1 的 bit 时长：如 NEC = 4*UNIT = 2.25ms.
    uint16_t bit_cycle;//发射模式下：bit 调制周期最小单位，如 NEC 为 560us，接收模式下为
    uint16_t carry_low;//载波低电平时长，与 carry_high 组合形成占空比可调的载波波形，如 N
    uint16_t carry_high;//载波高电平时长，与 carry_low 组合形成占空比可调的载波波形，如 N
}Ir_mode_param_t;

//由于发送和接收初始化不同参数 定义结构体表示接收发送初始化参数。
typedef struct{
    Ir_mode_param_t param_tx;
    Ir_mode_param_t param_rx;
}Ir_type_param_t;

//定义初始化数据，初始化函数体根据不同协议自动从此表适配参数
const static Ir_type_param_t t_ir_type_param_table[] =
{
    { //NEC param
        { //TX
            16*NEC_UINT-1, 4*NEC_UINT-1, 8*NEC_UINT-1, 1*NEC_UINT-1, INESSENTIAL,
            2*NEC_UINT-1, 4*NEC_UINT-1, 1*NEC_UINT-1, IR_WAVE_NEC_TC9012_FREQ*2/3, IR_WAVE_N
        } //RX
    }
}

```

```

        14*NEC_UINT-1, 18*NEC_UINT-1, 22*NEC_UINT-1, 26*NEC_UINT-1, 0xffff,
        INESSENTIAL, 2*NEC_UINT-1, 0x7f, INESSENTIAL, INESSENTIAL},
    },
    {//TC9012 param
        { //TX
            16*TC9012_UINT-1, 8*TC9012_UINT-1, 16*TC9012_UINT-1, 2*TC9012_UINT-1, INESSEN
            4*TC9012_UINT-1, 6*TC9012_UINT-1, 2*TC9012_UINT-1, IR_WAVE_NEC_TC9012_FREQ*2
        { //RX
            28*TC9012_UINT-1, 36*TC9012_UINT-1, 44*TC9012_UINT-1, 32*TC9012_UINT-1, 0xffff
            4*TC9012_UINT-1, 0x7f, INESSENTIAL, INESSENTIAL},
        },
    {//RC5 param
        { //TX
            2*RC5_UINT-1, 2*RC5_UINT-1, INESSENTIAL, INESSENTIAL, INESSENTIAL, 2*RC5_UINT-
            INESSENTIAL, 1*RC5_UINT, IR_WAVE_RC5_FREQ*2/3, IR_WAVE_RC5_FREQ*1/3},

        { //RX
            1*RC5_UINT-2, 1*RC5_UINT, 3*RC5_UINT-1, 5*RC5_UINT-1, INESSENTIAL, 1*RC5_UINT-
            1*RC5_UINT-1, 2*RC5_UINT-1, INESSENTIAL, INESSENTIAL},
        }
    }
};

```

8.2.2 红外发射接收

8.2.2.1 配置 pin

```

#define IR_PIN GPIO_GPIO_17
void setup_peripherals_ir_module(void)
{
    // 打开时钟
    // 大于等于 GPIO 18 则使用 SYSCTRL_ClkGate_APB_GPIO1, 否则是 SYSCTRL_ClkGate_APB
    SYSCTRL_ClearClkGateMulti( (1 << SYSCTRL_ClkGate_APB_GPIO0)

```

```

        | (1 << SYSCTRL_ClkGate_APB_GPIO1)
        | (1 << SYSCTRL_ITEM_APB_IR)
        | (1 << SYSCTRL_ClkGate_APB_PinCtrl));

PINCTRL_SetPadMux(IR_PIN, IO_SOURCE_IR_DATA_OUT);
platform_set_irq_callback(PLATFORM_CB_IRQ_IR_INT, IRQHandler_IR_INT, NULL);
}

```

8.2.2.2 配置模块

```

static void user_ir_device_init(IR_IrMode_e mode, IR_TxRxMode_e tx_rx_mode, GPIO_Index_t irpin)
{
    IR_CtrlSetIrMode(APB_IR, mode);
    IR_CtrlSetTxRxMode(APB_IR, tx_rx_mode);
    IR_CtrlSetIrIntEn(APB_IR);

    if (IR_TXRX_MODE_TX_MODE == tx_rx_mode)
    {
        IR_TxConfigIrTxPol(APB_IR);
        IR_TxConfigCarrierCntClr(APB_IR);
        IR_TxConfigIrIntEn(APB_IR);
        IR_CarryConfigSetIrCarryLow(APB_IR, t_ir_type_param_table[mode].param_tx.carry_low);
        IR_CarryConfigSetIrCarryHigh(APB_IR, t_ir_type_param_table[mode].param_tx.carry_high);
        IR_TimeSetIrTime1(APB_IR, t_ir_type_param_table[mode].param_tx.timer1);
        IR_TimeSetIrTime2(APB_IR, t_ir_type_param_table[mode].param_tx.timer2);
        IR_TimeSetIrTime3(APB_IR, t_ir_type_param_table[mode].param_tx.timer3 );
        IR_TimeSetIrTime4(APB_IR, t_ir_type_param_table[mode].param_tx.timer4);
        IR_CtrlIrSetBitTime1(APB_IR, t_ir_type_param_table[mode].param_tx.btimer1);
        IR_CtrlIrSetBitTime2(APB_IR, t_ir_type_param_table[mode].param_tx.btimer2);
        IR_CtrlIrSetIrBitCycle(APB_IR, t_ir_type_param_table[mode].param_tx.bit_cycle);
        PINCTRL_SetPadMux(irpin, IO_SOURCE_IR_DATA_OUT);
    }
}

```



```

else{
    IR_CtrlSetIrEndDetectEn(APB_IR);//end code detect en
    IR_CtrlSetIrIntVerifyEn(APB_IR);
    IR_CtrlIrUserCodeVerify(APB_IR);
    IR_CtrlIrDatacodeVerify(APB_IR);
    IR_TimeSetIrTime1(APB_IR,t_ir_type_param_table[mode].param_rx.timer1);
    IR_TimeSetIrTime2(APB_IR,t_ir_type_param_table[mode].param_rx.timer2);
    IR_TimeSetIrTime3(APB_IR,t_ir_type_param_table[mode].param_rx.timer3);
    IR_TimeSetIrTime4(APB_IR,t_ir_type_param_table[mode].param_rx.timer4);
    IR_TimeSetIrTime5(APB_IR,t_ir_type_param_table[mode].param_rx.timer5);
    IR_CtrlIrSetBitTime1(APB_IR,t_ir_type_param_table[mode].param_rx.btimer1);
    IR_CtrlIrSetBitTime2(APB_IR,t_ir_type_param_table[mode].param_rx.btimer2);
    IR_CtrlIrSetIrBitCycle(APB_IR,t_ir_type_param_table[mode].param_rx.bit_cycle);
    PINCTRL_SetPadMux(irpin,IO_SOURCE_IR_DATA_IN);
}
IR_CtrlEnable(APB_IR);
}

```

8.2.2.3 IR 中断

```

static uint32_t IRQHandler_IR_INT(void *user_data)
{
    if(IR_FsmGetIrTransmitOk(APB_IR))
        ;//platform_printf("int ir send ok\n");
    if(IR_FsmGetIrTxRepeat(APB_IR))
        ;//platform_printf("int ir repeat ok\n");
    return 0;
}

```


第九章 PDM 简介

PDM 全称 pulse density modulation，即脉冲密度调制。

PDM 模块处理来自外部音频前端 (如数字麦克风) 的脉冲密度调制信号的输入。该模块生成 PDM 时钟，支持双通道数据输入。

9.1 功能描述

9.1.1 特点

- 支持双通道，数据输入相同
- 16kHz 输出采样率，24 位采样
- HW 抽取过滤器
- 时钟和输出采样率之间的可选比为 64 或 80
- 支持 DMA 和 I2S 的样本缓冲

9.1.2 PDM & PCM

PDM 和 PCM 同为用数字信号表示模拟信号的音频数据调制方法，其主要区别是：

- PDM 不像 PCM 等间隔采样
- PDM 只有 1 位非 0 即 1 的输出，而 PCM 采样结果可以是 Nbit
- PDM 使用远高于 PCM 采样率的时钟频率进行采样
- PDM 逻辑相对 PCM 复杂
- PDM 只需要 2 根信号线，即时钟线 and 数据线；PCM 需要 4 根线

9.2 使用方法

9.2.1 方法概述

PDM 使用方法分为 PDM 结合 I2s 使用和 PDM 数据直接 DMA 搬运两种。

PDM 结合 I2s:

1. PDM 引脚 GPIO 配置（时钟、数据）
2. 外部时钟配置，使其处于工作模式
3. 写相应配置寄存器
4. 配置 I2s 数据源为 PDM，配置 I2s 时钟、寄存器、中断
5. 使能 PDM，使能 I2s
6. 等待 I2s 中断产生
7. 读取状态寄存器，读取 RX_MEM 中数据
8. 传输完毕，关闭 PDM 和 I2S

PDM 数据 DMA 搬运:

1. PDM 引脚 GPIO 配置（时钟、数据）
2. 外部时钟配置，使其处于工作模式
3. 写相应配置寄存器
4. 配置 DMA 寄存器、中断
5. 使能 DMA，使能 PDM
6. 等待 DMA 中断产生
7. 传输完毕，关闭 PDM 和 DMA

其中 I2s 和 DMA 相关配置不在本节介绍内容范围内，可参考本手册对应章节。

9.2.2 注意点

- I2s 时钟源可以选择晶振 24M 时钟和 PLL 时钟，要注意是选择哪一个时钟源
- 建议选择晶振 24M 作为时钟源，这样可以获得较好的准确度和防抖动效果
- 需要查阅数字麦克风数据手册了解其时钟要求，并正确配置 PDM 时钟频率

- 结合 I2s 使用时要先使能 PDM 最后开启 I2s
- 结合 DMA 使用时要先使能 DMA 最后开启 PDM
- 建议采用 DMA 乒乓搬运的方式

9.3 编程指南

9.3.1 驱动接口

- PDM_Config: PDM 配置接口
- PDM_Start: PDM 使能接口
- PDM_DmaEnable: PDM 使能 DMA 接口

9.3.2 代码示例

下面以 PDM 结合 I2s 使用和 PDM 数据直接 DMA 搬运两种方式来展示 PDM 的具体使用方法。
已知现有 mic 使用的时钟频率为 3M，I2s 采样率 16K。

9.3.2.1 PDM 结合 I2s:

```
#define PDM_PIN_MCLK      28
#define PDM_PIN_IN        29
static uint32_t I2s_isr(void *user_data)
{
    uint32_t state = I2S_GetIntState(APB_I2S);
    I2S_ClearIntState(APB_I2S, state);

    int i = I2S_GetRxFIFOCount(APB_I2S);
    while (i) {
        // do something with these data
        i--;
    }
}
```

```
    }  
}  
  
void audio_input_setup(void)  
{  
    // GPIO & Pin Ctrl  
    PINCTRL_SetPadMux(PDM_PIN_MCLK, IO_SOURCE_PDM_DMIC_MCLK);  
    PINCTRL_SetPadMux(PDM_PIN_IN, IO_SOURCE_PDM_DMIC_IN);  
    PINCTRL_SelPdmIn(PDM_PIN_IN);  
  
    // PDM clock configuration, 3M  
    SYSCTRL_SetPdmClkDiv(8, 1);  
    SYSCTRL_SelectTypeAClk(SYSCTRL_ITEM_APB_PDM, SYSCTRL_CLK_ADC_DIV);  
  
    // PDM register configuration  
    PDM_Config(APB_PDM, 0, 1, 1, 1, 0);  
  
    // I2s configuration, bclk=2.4M, samplerate=16K, data from PDM  
    I2S_DataFromPDM(1);  
    I2S_ConfigClk(APB_I2S, 5, 75);  
    I2S_ConfigIRQ(APB_I2S, 0, 1, 0, 10);  
    I2S_DMAEnable(APB_I2S, 0, 0);  
    I2S_Config(APB_I2S, I2S_ROLE_MASTER, I2S_MODE_STANDARD, 0, 1, 0, 1, 24);  
  
    // I2s interruption  
    platform_set_irq_callback(PLATFORM_CB_IRQ_I2S, I2s_isr, 0);  
  
    // enable I2s and PDM  
    I2S_ClearRxFIFO(APB_I2S);  
    PDM_Start(APB_PDM, 1);  
    I2S_Enable(APB_I2S, 0, 1);  
}
```

上面示例涉及到的关于 I2s 配置参考手册的 I2s 章节：

9.3.2.2 PDM 数据 DMA 搬运

```
#define PDM_PIN_MCLK      28
#define PDM_PIN_IN        29
#define CHANNEL_ID  0
uint32_t buff[80];
DMA_Descriptor test __attribute__((aligned (8)));
static uint32_t DMA_cb_isr(void *user_data)
{
    uint32_t state = DMA_GetChannelIntState(CHANNEL_ID);
    DMA_ClearChannelIntState(CHANNEL_ID, state);

    DMA_EnableChannel(CHANNEL_ID, &test);

    // do something with data in buff
}

void DMA_SetUp(void)
{
    DMA_Reset();
    platform_set_irq_callback(PLATFORM_CB_IRQ_DMA, DMA_cb_isr, 0);
    test.Next = NULL;
    DMA_PreparePeripheral2RAM(&test,
                             buff,
                             SYSCTRL_DMA_PDM,
                             80,
                             DMA_ADDRESS_INC,
                             0 | 1 << 24);
    DMA_EnableChannel(CHANNEL_ID, &test);
}

void audio_input_setup(void)
{
    //GPIO & Pin Ctrl
    PINCTRL_SetPadMux(PDM_PIN_MCLK, IO_SOURCE_PDM_DMIC_MCLK);
```

```
PINCTRL_SetPadMux(PDM_PIN_IN, IO_SOURCE_PDM_DMIC_IN);
PINCTRL_SelPdmIn(PDM_PIN_IN);

// PDM clock configuration, 3M
SYSCTRL_SetAdcClkDiv(8, 1);
SYSCTRL_SelectTypeAClk(SYSCTRL_ITEM_APB_PDM, SYSCTRL_CLK_ADC_DIV);

// PDM register configuration
PDM_Config(APB_PDM, 0, 1, 1, 0, 0);
PDM_DmaEnable(APB_PDM, 1, 0);

// DMA setup
DMA_SetUp();

// enable DMA and PDM
PDM_DmaEnable(APB_PDM, 1, 1);
PDM_Start(APB_PDM, 1);
}
```

建议采用 DMA 乒乓搬运的方法进行数据搬运，具体讲解参考手册 DMA 章节。

第十章 管脚管理（PINCTRL）

10.1 功能概述

PINCTRL 模块管理芯片所有 IO 管脚的功能，包括外设 IO 的映射，上拉、下拉选择，输入模式控制，输出驱动能力设置等。

每个 IO 管脚都可以配置为数字或模拟模式，当配置为数字模式时，特性如下：

- 每个 IO 管脚可以映射多种不同功能的外设
- 每个 IO 管脚都支持上拉或下拉
- 每个 IO 管脚都支持施密特触发输入方式
- 每个 IO 管脚支持四种输出驱动能力

鉴于片内外设丰富、IO 管脚多，进行管脚全映射并不现实，为此，PINCTRL 尽量保证灵活性的前提下做了一定取舍、优化。部分常用外设的输入、输出功能管脚可与 {0..17, 21, 22, 31, 34, 35} 这 23 个常用 IO 之间任意连接（全映射），这部分常用外设功能管脚总结于表 10.1。表 10.2 列出了其它外设功能管脚支持映射到哪些 IO 管脚上。除此以外，所有 IO 管脚都可以配置为 GPIO 或者 DEBUG 模式。GPIO 模式的输入、输出方向由 `GPIO_SetDirection` 控制。

表 10.1: 支持与常用 IO 全映射的常用功能管脚

外设	功能管脚
I2C	I2C0_SCL_I, I2C0_SCL_O, I2C0_SDA_I, I2C0_SDA_O, I2C1_SCL_I, I2C1_SCL_O, I2C1_SDA_I, I2C1_SDA_O
I2S	I2S_BCLK_I, I2S_BCLK_O, I2S_DIN, I2S_DOUT, I2S_LRCLK_I, I2S_LRCLK_O
IR	IR_DATIN, IR_DATOUT, IR_WAKEUP
PCAP	PCAP0_IN, PCAP1_IN, PCAP2_IN, PCAP3_IN, PCAP4_IN, PCAP5_IN

外设	功能管脚
PDM	PDM_DMIC_IN, PDM_DMIC_MCLK
QDEC	QDEC_INDEX, QDEC_PHASEA, QDEC_PHASEB
SPI0	SPI0_CLK_IN, SPI0_CLK_OUT, SPI0_CSN_IN, SPI0_CSN_OUT, SPI0_HOLD_IN, SPI0_HOLD_OUT, SPI0_MISO_IN, SPI0_MISO_OUT, SPI0_MOSI_IN, SPI0_MOSI_OUT, SPI0_WP_IN, SPI0_WP_OUT
SPI	SPI1_CLK_IN, SPI1_CLK_OUT, SPI1_CSN_IN, SPI1_CSN_OUT, SPI1_HOLD_IN, SPI1_HOLD_OUT, SPI1_MISO_IN, SPI1_MISO_OUT, SPI1_MOSI_IN, SPI1_MOSI_OUT, SPI1_WP_IN, SPI1_WP_OUT
SWD	SWDO, SW_TCK, SW_TMS
UART0	UART0_CTS, UART0_RTS, UART0_RXD, UART0_TXD
UART1	UART1_CTS, UART1_RTS, UART1_RXD, UART1_TXD

表 10.2: 其它外设功能管脚的映射关系

外设功能管脚	可连接到的 IO 管脚
KEY_IN_COL_0	0, 23
KEY_IN_COL_1	1, 24
KEY_IN_COL_2	2, 25
KEY_IN_COL_3	3, 29
KEY_IN_COL_4	4, 30
KEY_IN_COL_5	5, 31
KEY_IN_COL_6	6, 32
KEY_IN_COL_7	7, 33
KEY_IN_COL_8	8, 34
KEY_IN_COL_9	9, 35
KEY_IN_COL_10	10
KEY_IN_COL_11	11
KEY_IN_COL_12	12
KEY_IN_COL_13	13
KEY_IN_COL_14	14
KEY_IN_COL_15	15
KEY_IN_COL_16	16
KEY_IN_COL_17	17

外设功能管脚	可连接到的 IO 管脚
KEY_IN_COL_18	21
KEY_IN_COL_19	22
KEY_OUT_ROW_0	0, 23
KEY_OUT_ROW_1	1, 24
KEY_OUT_ROW_2	2, 25
KEY_OUT_ROW_3	3, 29
KEY_OUT_ROW_4	4, 30
KEY_OUT_ROW_5	5, 31
KEY_OUT_ROW_6	6, 32
KEY_OUT_ROW_7	7, 33
KEY_OUT_ROW_8	8, 34
KEY_OUT_ROW_9	9, 35
KEY_OUT_ROW_10	10
KEY_OUT_ROW_11	11
KEY_OUT_ROW_12	12
KEY_OUT_ROW_13	13
KEY_OUT_ROW_14	14
KEY_OUT_ROW_15	15
KEY_OUT_ROW_16	16
KEY_OUT_ROW_17	17
KEY_OUT_ROW_18	21
KEY_OUT_ROW_19	22
ANT_SW0	0, 3, 6, 9, 12, 15, 21, 34
ANT_SW1	1, 4, 7, 10, 13, 16, 22, 35
ANT_SW2	2, 5, 8, 11, 14, 17, 31
ANT_SW3	0, 3, 6, 9, 12, 15, 21, 34
ANT_SW4	1, 4, 7, 10, 13, 16, 22, 35
ANT_SW5	2, 5, 8, 11, 14, 17, 31
ANT_SW6	0, 3, 6, 9, 12, 15, 21, 34
ANT_SW7	1, 4, 7, 10, 13, 16, 22, 35
PA_RXEN	11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 34, 35
PA_TXEN	4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 34, 35
TIMER0_PWM_0A	0, 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 21, 31, 35
TIMER0_PWM_0B	1, 3, 5, 7, 9, 11, 13, 15, 17, 22, 34

外设功能管脚	可连接到的 IO 管脚
TIMER0_PWM_1A	0, 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 21, 31, 35
TIMER0_PWM_1B	1, 3, 5, 7, 9, 11, 13, 15, 17, 22, 34
TIMER1_PWM_0A	0, 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 21, 31, 35
TIMER1_PWM_0B	1, 3, 5, 7, 9, 11, 13, 15, 17, 22, 34
TIMER1_PWM_1A	0, 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 21, 31, 35
TIMER1_PWM_1B	1, 3, 5, 7, 9, 11, 13, 15, 17, 22, 34
TIMER2_PWM_0A	0, 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 21, 31, 35
TIMER2_PWM_0B	1, 3, 5, 7, 9, 11, 13, 15, 17, 22, 34
TIMER2_PWM_1A	0, 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 21, 31, 35
TIMER2_PWM_1B	1, 3, 5, 7, 9, 11, 13, 15, 17, 22, 34
PWM_0A	0, 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 21, 31, 35
PWM_0B	1, 3, 5, 7, 9, 11, 13, 15, 17, 22, 34
PWM_1A	0, 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 21, 31, 35
PWM_1B	1, 3, 5, 7, 9, 11, 13, 15, 17, 22, 34
PWM_2A	0, 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 21, 31, 35
PWM_2B	1, 3, 5, 7, 9, 11, 13, 15, 17, 22, 34
QDEC_EXT_IN_CLK	3, 9
QDEC_TIMER_EXT_IN1_A	1, 7
QDEC_TIMER_EXT_IN2_A	2, 8
QDEC_TIMER_EXT_IN2_B	5, 11
QDEC_TIMER_EXT_OUT0_A	0, 6
QDEC_TIMER_EXT_OUT1_A	1, 7
QDEC_TIMER_EXT_OUT2_A	2, 8
QDEC_TIMER_EXT_OUT0_B	3, 9
QDEC_TIMER_EXT_OUT1_B	4, 10
QDEC_TIMER_EXT_OUT2_B	5, 11
SPI0_CLK_IN	19
SPI0_CLK_OUT	19
SPI0_CSN_IN	18
SPI0_CSN_OUT	18
SPI0_HOLD_IN	20
SPI0_HOLD_OUT	20
SPI0_MISO_IN	27
SPI0_MISO_OUT	27

外设功能管脚	可连接到的 IO 管脚
SPI0_MOSI_IN	28
SPI0_MOSI_OUT	28
SPI0_WP_IN	26
SPI0_WP_OUT	26
SPI2AHB_CS	16
SPI2AHB_DI	17
SPI2AHB_DO	17
SPI2AHB_SCLK	15

10.2 使用说明

10.2.1 为外设配置 IO 管脚

1. 将外设输出连接到 IO 管脚

通过 `PINCTRL_SetPadMux` 将外设输出连接到 IO 管脚。注意按照表 10.1 和表 10.2 确认硬件是否支持。对于不支持的配置，显然无法生效，函数将返回非 0 值。

```
int PINCTRL_SetPadMux(
    const uint8_t io_pin_index, // IO 序号 (0 .. IO_PIN_NUMBER - 1)
    const io_source_t source     // IO 源
);
```

例如将 IO 管脚 10 配置为 GPIO 模式：

```
PINCTRL_SetPadMux(10, IO_SOURCE_GPIO);
```

2. 将 IO 管脚连接到外设的输入

对于有些外设的输入同样通过 `PINCTRL_SetPadMux` 配置。对于另一些输入，`PINCTRL` 为不同的外设分别提供了 API 用以配置输入。比如 UART 的数据输入 RXD 和用于硬件流控的 CTS，需要通过 `PINCTRL_SelUartIn` 配置：

```
int PINCTRL_SelUartIn(
    uart_port_t port,      // UART 序号
    uint8_t io_pin_rxd,    // 连接到 RXD 输入的 IO 管脚
    uint8_t io_pin_cts);   // 连接到 CTS 输入的 IO 管脚
```

对于不需要配置的输入，可在对应的参数上填入值 `IO_NOT_A_PIN`。

表 10.3 罗列了为各外设提供的输入配置函数。

表 10.3: 其它外设功能管脚的映射关系

外设功能管脚	可连接到的 IO 管脚
KeyScan	<code>PINCTRL_SelKeyScanColIn</code>
I2C	<code>PINCTRL_SelI2cIn</code>
I2S	<code>PINCTRL_SelI2sIn</code>
IR	<code>PINCTRL_SelIrIn</code>
PDM	<code>PINCTRL_SelPdmIn</code>
PCAP	<code>PINCTRL_SelPCAPIn</code>
QDEC	<code>PINCTRL_SelQDECIn</code>
SWD	<code>PINCTRL_SelSwIn</code>
SPI	<code>PINCTRL_SelSpiIn</code>
UART	<code>PINCTRL_SelUartIn</code>

10.2.2 配置下拉、下拉

IO 管脚的上拉、下拉模式通过 `PINCTRL_Pull` 配置：

```
void PINCTRL_Pull(
    const uint8_t io_pin_index,    // IO 管脚序号
    const pinctrl_pull_mode_t mode // 模式
);
```

10.2.3 配置驱动能力

通过 `PINCTRL_SetDriveStrength` 配置 IO 管脚的驱动能力：

```
void PINCTRL_SetDriveStrength(  
    const uint8_t io_pin_index,  
    const pinctrl_drive_strength_t strength);
```


第十一章 PTE 简介

PTE 全称 Peripheral trigger engine，即外设触发引擎。

其主要作用是使外围设备可以通过其他外围设备或事件独立于 CPU 进行自主交互。PTE 允许外围设备之间可以精确触发。

11.1 功能描述

11.1.1 特点

- 支持 APB 总线触发
- 支持 4 通道 PTE
- 支持复用触发源或复用触发地址
- 支持产生 CPU 中断

11.1.2 PTE 原理图

11.1.3 功能

PTE 具有不同外设之间的可编程内部通道，可以从 src 外设触发 dst 外设。PTE 可以不依赖 CPU 而通过硬件的方式触发任务，因此任务可以在同步 DFF 所占用的周期内启动。

src 外设通过 pte_in_mask 配置，dst 外设通过 pte_out_mask 配置。在 SOC 中集成了 4 个 PTE 通道，每个通道可以通过通道使能信号来启用/禁用。

当 DFF 为高时 PTE 中断将挂起。在清除 PTE 中断之前，src 外设中断必须被清除，否则另一个启动脉冲将发送到 dst 外设，这可能会产生未知的错误。

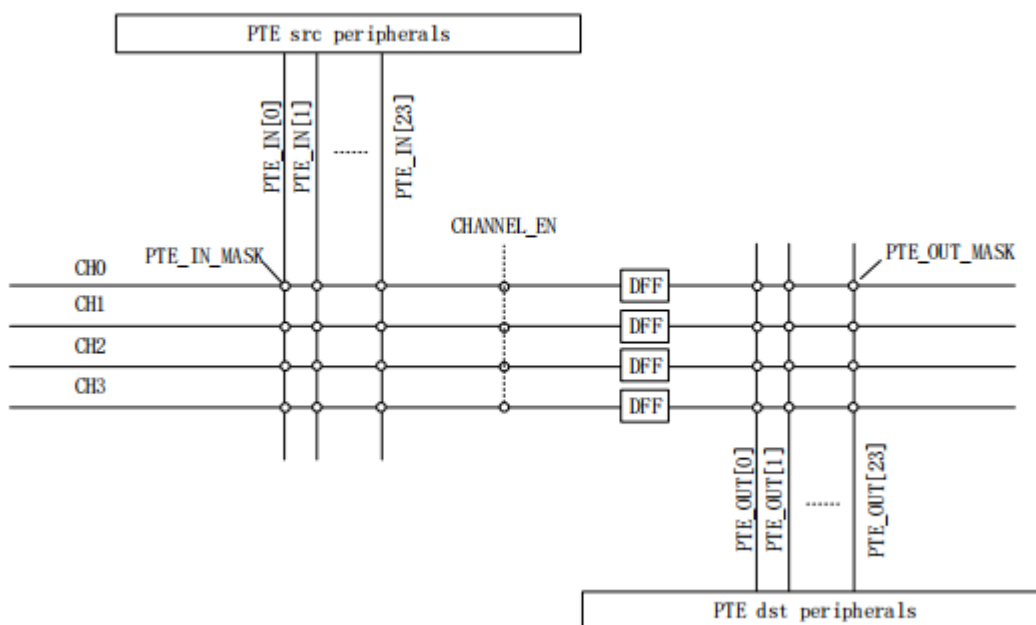


图 11.1: PTE 原理图

11.2 使用方法

11.2.1 方法概述

PTE 使用方法总结为：建议不使用 PTE 中断，在 dst 外设中断里清 PTE 中断（或关闭 PTE 通道）。

1. 配置触发外设和被触发外设以及相应中断（被触发外设中断一定要有）
2. 配置要使用的 PTE 通道寄存器以及中断（建议不使用 PTE 中断）
3. 使能触发外设，等待 PTE 中断（如定义）和被触发外设来中断
4. 在 PTE 中断中清 PTE mask（如定义）
5. 在被触发外设中断中清 PTE 中断（如定义），如果只触发一次则直接关闭 PTE 通道

11.2.2 注意点

- 不清 src 中断会循环通过 PTE 触发 dst 外设，使程序陷入死循环
- 不清 PTE 中断会循环触发 dst 外设，使程序陷入死循环

- PTE 中断优先级低容易被打断，在极端情况下如果 dst 外设来中断非常快会出问题（一般不会）
- 使用 PTE 中断会更多占用 CPU 资源并增加触发过程操作复杂度、增加出错风险，中断处理程序完全可以在 src 和 dst 中断中完成，所以强烈建议不要使用 PTE 中断

11.3 编程指南

11.3.1 src&dst 外设

当前 PTE 支持的 src 外设定义在 SYSCTRL_PTE_SRC_INT 中：

```
typedef enum
{
    SYSCTRL_PTE_I2C0_INT      = 0,
    SYSCTRL_PTE_I2C1_INT      = 1,
    SYSCTRL_PTE_SARADC_INT     = 2,
    SYSCTRL_PTE_I2S_INT        = 3,
    SYSCTRL_PTE_DMA_INT        = 4,
    SYSCTRL_PTE_IR_INT         = 5,
    SYSCTRL_PTE_KEYSCANNER_INT = 6,
    SYSCTRL_PTE_PWMC0_INT      = 7,
    SYSCTRL_PTE_PWMC1_INT      = 8,
    SYSCTRL_PTE_PWMC2_INT      = 9,
    SYSCTRL_PTE_TIMER0_INT     = 10,
    SYSCTRL_PTE_TIMER1_INT     = 11,
    SYSCTRL_PTE_TIMER2_INT     = 12,
    SYSCTRL_PTE_GPI00_INT      = 13,
    SYSCTRL_PTE_GPI01_INT      = 14,
    SYSCTRL_PTE_UART0_INT      = 15,
    SYSCTRL_PTE_UART1_INT      = 16,
    SYSCTRL_PTE_SPI0_INT       = 17,
    SYSCTRL_PTE_SPI1_INT       = 18,
    SYSCTRL_PTE_SPIFLASH       = 19,
```

```

SYSCTRL_PTE_RCT_CNT      = 20,
SYSCTRL_PTE_IR_WAKEUP    = 21,
SYSCTRL_PTE_USB_INT      = 22,
SYSCTRL_PTE_QDEC_INT     = 23,

SYSCTRL_PTE_SRC_INT_MAX  = 24,
} SYSCTRL_PTE_SRC_INT;

```

dst 外设定义在 SYSCTRL_PTE_DST_EN 中:

```

typedef enum
{
    SYSCTRL_PTE_I2C0_EN      = 0,
    SYSCTRL_PTE_I2C1_EN      = 1,
    SYSCTRL_PTE_SARADC_EN    = 2,
    SYSCTRL_PTE_I2S_TX_EN    = 3,
    SYSCTRL_PTE_I2S_RX_EN    = 4,
    SYSCTRL_PTE_IR_EN        = 5,
    SYSCTRL_PTE_KEYSCANNER_EN = 6,
    SYSCTRL_PTE_PWMC0_EN     = 7,
    SYSCTRL_PTE_PWMC1_EN     = 8,
    SYSCTRL_PTE_PWMC2_EN     = 9,
    SYSCTRL_PTE_TIMER0_CH0_EN = 10,
    SYSCTRL_PTE_TIMER0_CH1_EN = 11,
    SYSCTRL_PTE_TIMER1_CH0_EN = 12,
    SYSCTRL_PTE_TIMER1_CH1_EN = 13,
    SYSCTRL_PTE_TIMER2_CH0_EN = 14,
    SYSCTRL_PTE_TIMER2_CH1_EN = 15,

    SYSCTRL_PTE_DST_EN_MAX   = 16,
} SYSCTRL_PTE_DST_EN;

```

通过 PTE 连接的 src 外设和 dst 外设需要在已注册枚举中选取。

11.3.2 驱动接口

- PTE_ConnectPeripheral: PTE 外设连接接口
- PTE_EnableChennel: PTE 通道使能接口
- PTE_ChennelClose: PTE 通道关闭接口
- PTE_IrqProcess: PTE 标准中断程序接口
- PTE_OutPeripheralContinueProcess: dst 外设中断标准 PTE 中继触发接口
- PTE_OutPeripheralEndProcess: dst 外设中断标准 PTE 结束接口

11.3.3 代码示例

下面以 Timer0 通过 PTE 通道 0 触发 Timer1 为例展示 PTE 的具体使用方法。

src 外设和 dst 外设配置方法不在本文档介绍范围内，我们默认 Timer0 和 Timer1 已经配置好并注册好中断。

```
uint32_t Timer0Isr(void *user_data)
{
    TMR_IntClr(APB_TMR0);
    return 0;
}

uint32_t Timer1Isr(void *user_data)
{
    TMR_IntClr(APB_TMR1);
    PTE_OutPeripheralContinueProcess(0);
    return 0;
}

// 仅供参考，不建议注册 PTE 中断
uint32_t PTE0Isr(void *user_data)
{
```

```
PTE_IrqProcess(0);  
return 0;  
}  
  
void PTE_Test(void)  
{  
    PTE_ConnectPeripheral(SYSCTRL_PTE_CHENNEL_0,  
                          SYSCTRL_PTE_TIMER0_INT,  
                          SYSCTRL_PTE_TIMER1_CH0_EN);  
    TMR_Enable(APB_TMR0);  
}
```

上面示例会保留 PTE 通道 0 并等待下一次触发。如果想要触发之后直接关闭通道代码如下：

```
uint32_t Timer1Isr(void *user_data)  
{  
    TMR_IntClr(APB_TMR1);  
    PTE_OutPeripheralEndProcess(0);  
    return 0;  
}
```

关闭通道会断开 Timer0 和 Timer1 的连接，再次触发需要重新建立连接。

第十二章 增强型脉宽调制发生器（PWM）

增强型脉宽调制发生器具有两大功能：生成脉宽调制信号（PWM），捕捉外部脉冲输入（PCAP）。增强型脉宽调制发生器具备 3 个通道，每个通道都可以单独配置为 PWM 或者 PCAP 模式。每个通道拥有独立的 FIFO。FIFO 里的每个存储单元为 2 个 20bit 数据。FIFO 深度为 4，即最多存储 4 个单元，共 $8 \times 20\text{bit}$ 数据。这里的 20bit 位宽是因为本硬件模块内部 PWM 使用的各计数器都是 20 比特。可根据 FIFO 内的数据量触发中断或者 DMA 传输。

说明：TIMER 也支持生成脉宽调制信号，但是可配置的参数较简单，不支持死区等。

PWM 特性：

- 最多支持 3 个 PWM 通道，每一个通道包含 A、B 两个输出
- 每个通道参数独立
- 支持死区
- 支持通过 DMA 更新 PWM 配置

PCAP 特性：

- 支持 3 个 PCAP 通道，每一个通道包含两个输入
- 支持捕捉上升沿、下降沿
- 支持通过 DMA 读取数据

12.1 PWM 工作模式

PWM 使用的时钟频率可配置，请参考SYSCTRL。

每个 PWM 通道支持以下多种工作模式：

```
typedef enum
{
    ..._UP_WITHOUT_DIED_ZONE      = ...,
    ..._UP_WITH_DIED_ZONE         = ...,
    ..._UPDOWN_WITHOUT_DIED_ZONE  = ...,
    ..._UPDOWN_WITH_DIED_ZONE     = ...,
    ..._SINGLE_WITHOUT_DIED_ZONE   = ...,
    ..._DMA                       = ...,
} PWM_WorkMode_t;
```

12.1.1 最简单的模式：UP_WITHOUT_DIED_ZONE

此模式需要配置两个门限：计数器回零门限 PERA_TH、高门限 HIGH_TH，HIGH_TH 必须小于 HIGH_TH。以伪代码描述 A、B 输出如下：

```
cnt = 0;
on_clock_rising_edge()
{
    cnt = cnt < PERA_TH ? cnt + 1 : 0;
    A = HIGH_TH <= cnt;
    B = !A;
}
```

12.1.2 UP_WITH_DIED_ZONE

与 UP_WITHOUT_DIED_ZONE 相比，此模式需要一个新的死区门限 DZONE_TH，DZONE_TH 必须小于 HIGH_TH。以伪代码描述 A、B 输出如下：

```
cnt = 0; on_clock_rising_edge() { cnt = cnt < PERA_TH ? cnt + 1 : 0; A = HIGH_TH + DZONE_TH
<= cnt; B = DZONE_TH <= cnt < HIGH_TH); }
```

12.1.3 UPDOWN_WITHOUT_DIED_ZONE

此模式需要的门限参数与 UP_WITHOUT_DIED_ZONE 相同。以伪代码描述 A、B 输出如下：


```

cnt = 0;
on_clock_rising_edge()
{
    cnt = cnt < 2 * PERA_TH ? cnt + 1 : 0;
    A = PERA_TH - HIGH_TH <= cnt <= PERA_TH + HIGH_TH;
    B = !A;
}

```

12.1.4 UPDOWN_WITH_DIED_ZONE

与 UP_WITHOUT_DIED_ZONE 相比，此模式需要一个新的死区门限 DZONE_TH。以伪代码描述 A、B 输出如下：

```

cnt = 0;
on_clock_rising_edge()
{
    cnt = cnt < 2 * PERA_TH ? cnt + 1 : 0;
    A = PERA_TH - HIGH_TH + DZONE_TH <= cnt <= PERA_TH + HIGH_TH;
    B = (cnt < PERA_TH - HIGH_TH) || (cnt > PERA_TH + HIGH_TH + DZONE_TH);
}

```

12.1.5 SINGLE_WITHOUT_DIED_ZONE

此模式需要配置两个门限：计数器回零门限 PERA_TH、高门限 HIGH_TH，HIGH_TH 必须小于 PERA_TH。此模式只产生一个脉冲，以伪代码描述 A、B 输出如下：

```

cnt = 0;
on_clock_rising_edge()
{
    cnt++;
    A = HIGH_TH <= cnt < PERA_TH;
}

```

```
B = !A;
}
```



以上伪代码仅用于辅助描述硬件行为，与实际行为可以存在微小差异。

12.1.6 DMA 模式

此模式支持通过 DMA 实时更新门限。

12.1.7 输出控制

对于每个通道的每一路输出，另有 3 个参数控制最终的两路输出：掩膜、停机输出值、反相。最终的输出以伪代码描述如下：

```
output_control(v)
{
    if (掩膜 == 1) return A 路输出 0、B 路输出 1;
    if (本通道已停机) return 停机输出值;
    if (反相) v = !v;
    return v;
}
```

12.2 PCAP

PCAP 每个通道包含两路输入。PCAP 内部有一个单独的 32 比特计数器¹，当检测到输入信号变化（包含上升沿和下降沿）时，PCAP 将计数器的值及边沿变化信息作为一个存储单元压入 FIFO：

¹所有 6 路输入共有此计数器。

```
struct data0
{
    uint32_t cnt_high:12;
    uint32_t p_cap_0_p:1; // A 路出现上升沿
    uint32_t p_cap_0_n:1; // A 路出现下降沿
    uint32_t p_cap_1_p:1; // B 路出现上升沿
    uint32_t p_cap_1_n:1; // B 路出现下降沿
    uint32_t tag:4;
    uint32_t padding:12;
};

struct data1
{
    uint32_t cnt_low:20;
    uint32_t padding:12;
};
```

通过复位整个模块可以清零 PCAP 计数器。

12.3 PWM 使用说明

12.3.1 启动与停止

共有两个开关与 PWM 的启动和停止有关：使能（Enable）、停机控制（HaltCtrl）。只有当 Enable 为 1，HaltCtrl 为 0 时，PWM 才真正开始工作。

相关的 API 为：

```
// 使能 PWM 通道
void PWM_Enable(
    const uint8_t channel_index, // 通道号
    const uint8_t enable        // 使能或禁用
);
```

```
// PWM 通道停机控制
void PWM_HaltCtrlEnable(
    const uint8_t channel_index,    // 通道号
    const uint8_t enable            // 停机 (1) 或运转 (0)
);
```

12.3.2 配置工作模式

```
void PWM_SetMode(
    const uint8_t channel_index,    // 通道号
    const PWM_WorkMode_t mode       // 模式
);
```

12.3.3 配置门限

```
// 配置 PERA_TH
void PWM_SetPeraThreshold(
    const uint8_t channel_index,
    const uint32_t threshold);
```

```
// 配置 DZONE_TH
void PWM_SetDiedZoneThreshold(
    const uint8_t channel_index,
    const uint32_t threshold);
```

```
// 配置 HIGH_TH
void PWM_SetHighThreshold(
    const uint8_t channel_index,
    const uint8_t multi_duty_index, // 对于 ING916XX, 此参数无效
    const uint32_t threshold);
```

各门限值最大支持 0xFFFFF，共 20 个比特。

12.3.4 输出控制

```
// 掩膜控制
void PWM_SetMask(
    const uint8_t channel_index, // 通道号
    const uint8_t mask_a,       // A 路掩膜
    const uint8_t mask_b       // B 路掩膜
);
```

```
// 配置停机输出值
void PWM_HaltCtrlCfg(
    const uint8_t channel_index, // 通道号
    const uint8_t out_a,         // A 路停机输出值
    const uint8_t out_b         // B 路停机输出值
);
```

```
// 反相
void PWM_SetInvertOutput(
    const uint8_t channel_index, // 通道号
    const uint8_t inv_a,         // A 路是否反相
    const uint8_t inv_b         // B 路是否反相
);
```

12.3.5 综合示例

下面的例子将 `channel_index` 通道配置成输出频率为 `frequency`、占空比为 `(on_duty)%` 的方波，涉及 3 个关键参数：

- 生成这种最简单的 PWM 信号需要的模式为 `UP_WITHOUT_DIED_ZONE`;
- `PERA_TH` 控制输出信号的频率，设置为 `PWM_CLOCK_FREQ / frequency`;
- `HIGH_TH` 控制信号的占空比，设置为 `PERA_TH * (100 - on_duty) %`

```
void PWM_SetupSimple(  
    const uint8_t channel_index,  
    const uint32_t frequency,  
    const uint16_t on_duty)  
{  
    uint32_t pera = PWM_CLOCK_FREQ / frequency;  
    uint32_t high = pera > 1000 ?  
        pera / 100 * (100 - on_duty)  
        : pera * (100 - on_duty) / 100;  
    PWM_HaltCtrlEnable(channel_index, 1);  
    PWM_Enable(channel_index, 0);  
    PWM_SetPeraThreshold(channel_index, pera);  
    PWM_SetHighThreshold(channel_index, 0, high);  
    PWM_SetMode(channel_index, PWM_WORK_MODE_UP_WITHOUT_DIED_ZONE);  
    PWM_SetMask(channel_index, 0, 0);  
    PWM_Enable(channel_index, 1);  
    PWM_HaltCtrlEnable(channel_index, 0);  
}
```

12.3.6 使用 DMA 实时更新配置

使用 DMA 能够实时更新配置（相当于工作在 `UP_WITHOUT_DIED_ZONE`，但是每个循环使用不同的参数）：每当 PWM 计数器计完一圈回零时，自动使用来自 DMA 的数据更新配置。这些数据以 2 个 `uint32_t` 为一组，依次表示 `HIGH_TH` 和 `PERA_TH`。

```
void PWM_DmaEnable(  
    const uint8_t channel_index, // 通道号  
    uint8_t trig_cfg,           // DMA 请求触发门限  
    uint8_t enable              // 使能  
);
```

当 PWM 内部 FIFO 数据少于 trig_cfg, PWM 请求 DMA 传输数据。PWM FIFO 深度为 4 (指可以存储 4 组 PWM 配置), 所以 trig_cfg 的取值范围为 1..4。

12.4 PCAP 使用说明

12.4.1 配置 PCAP 模式

要启用 PCAP 模式, 需要 5 个步骤:

1. 关闭整个模块的时钟 (参考SYSCTRL)
2. 使用 PCAP_Enable 使能 PCAP 模式

```
void PCAP_Enable(  
    const uint8_t channel_index // 通道号  
);
```

3. 使用 PCAP_EnableEvents 选择要检测的事件

```
void PCAP_EnableEvents(  
    const uint8_t channel_index,  
    uint8_t events_on_0,  
    uint8_t events_on_1);
```

events 为下面两个事件的组合:

```
enum PCAP_PULSE_EVENT
{
    PCAP_PULSE_RISING_EDGE    = 0x1,
    PCAP_PULSE_FALLING_EDGE   = 0x2,
};
```

比如在通道 1 的 A 路输入上同时检测、上报上升沿和下降沿：

```
PCAP_EnableEvents(1,
    PCAP_PULSE_RISING_EDGE
    | PCAP_PULSE_FALLING_EDGE,
    ...);
```

4. 打开整个模块的时钟（参考SYSCTRL）

5. 配置 DMA 传输

当 PCAP 通道 FIFO 内存储的数据多于 trig_cfg，请求 DMA 传输数据。trig_cfg 的取值范围为 0..4。

```
void PCAP_DmaEnable(
    const uint8_t channel_index, // 通道号
    uint8_t trig_cfg,           // DMA 请求触发门限
    uint8_t enable              // 使能
);
```

6. 使能计数器

```
void PCAP_CounterEnable(
    uint8_t enable // 使能 (1)/禁用 (0)
);
```


12.4.2 读取计数器

```
uint32_t PCAP_ReadCounter(void);
```


第十三章 实时时钟（RTC）

13.1 功能描述

实时时钟是一个独立的定时器。RTC 模块拥有一组连续计数的计数器，在相应的软件配置下，可提供时钟日历的功能。修改计数器的值可以重新设置系统当前的时间和日期。

13.2 使用说明

13.2.1 RTC 使能

使用 `RTC_Enable` 使能 RTC。

```
void RTC_Enable(uint8_t enable);
```

13.2.2 获取当前日期

使用 `RTC_GetTime` 获取当前时间（包括时分秒）。

```
uint16_t RTC_GetTime(  
    uint8_t *hour,  
    uint8_t *minute,  
    uint8_t *second  
);
```

13.2.3 修改日期

使用 RTC_ModifyTime 修改当前时间。

```
void RTC_ModifyTime(  
    uint16_t day,  
    uint8_t hour,  
    uint8_t minute,  
    uint8_t second  
);
```

13.2.4 配置闹钟

使用 RTC_ConfigAlarm

```
void RTC_ConfigAlarm(  
    uint8_t hour,  
    uint8_t minute,  
    uint8_t second  
);
```

13.2.5 配置中断请求

使用 RTC_EnableIRQ 配置并使能 RTC 中断请求。

```
void RTC_EnableIRQ(uint32_t mask);
```

其中的 mask 为 RTC 中断类型，一共有六种：

```
typedef enum
{
    RTC_IRQ_ALARM = 0x04,
    RTC_IRQ_DAY = 0x08,
    RTC_IRQ_HOUR = 0x10,
    RTC_IRQ_MINUTE = 0x20,
    RTC_IRQ_SECOND = 0x40,
    RTC_IRQ_HALF_SECOND = 0x80,
} rtc_irq_t;
```

- 例如将 RTC 设置为 alarm 中断

```
RTC_EnableIRQ(RTC_IRQ_ALARM);
```

- 例如将 RTC 设置为 day 中断

```
RTC_EnableIRQ(RTC_IRQ_DAY);
```

- 例如将 RTC 设置为 hour 中断

```
RTC_EnableIRQ(RTC_IRQ_HOUR);
```

- 例如将 RTC 设置为 minute 中断

```
RTC_EnableIRQ(RTC_IRQ_MINUTE);
```

- 例如将 RTC 设置为 second 中断

```
RTC_EnableIRQ(RTC_IRQ_SECOND);
```

- 例如将 RTC 设置为 half-second 中断

```
RTC_EnableIRQ(RTC_IRQ_HALF_SECOND);
```

13.2.6 获取当前中断状态

使用 `RTC_GetIntState` 获取当前 RTC 的中断状态。

```
uint32_t RTC_GetIntState(void);
```

13.2.7 清除中断

使用 `RTC_ClearIntState` 清除当前 RTC 的中断状态。

```
void RTC_ClearIntState(uint32_t state);
```

13.2.8 处理中断状态

用 `RTC_GetIntState` 获取 RTC 上的中断触发，返回非 0 值表示 RTC 上产生了中断请求；RTC 产生中断后，需要消除中断状态方可再次触发。利用 `RTC_ClearIntState` 可清除 RTC 的中断触发状态。

第十四章 SPI 功能概述

- 两个 SPI 模块
- 支持 SPI 主 & 从模式
- 支持 Quad SPI，可以执行代码
- 独立的 RX&TX FIFO，深度为 8 个 word
- 支持 DMA

14.1 SPI 使用说明

以下场景中均以 SPI1 为例，如果需要 SPI0 则可以根据情况修改

14.2 场景 1：只读只写不带 DMA

其中 SPI 主配置为只写模式，SPI 从配置为只读模式，CPU 操作读写，没有使用 DMA 配置之前需要决定使用的 GPIO，如果是普通模式，则不需要 SPI_MIC_WP 和 SPI_MIC_HOLD

```
#define SPI_MIC_CLK      GPIO_GPIO_10
#define SPI_MIC_MOSI     GPIO_GPIO_11
#define SPI_MIC_MISO     GPIO_GPIO_12
#define SPI_MIC_CS       GPIO_GPIO_13
#define SPI_MIC_WP       GPIO_GPIO_14
#define SPI_MIC_HOLD     GPIO_GPIO_15
```

14.2.1 SPI 主配置

14.2.1.1 接口配置

```
static void setup_peripherals_spi_pin(void)
{
    // 打开 SPI 模块时钟
    // 此处是以 SPI1 为例，如果是 SPI0 则需要更改
    // 根据使用的 GPIO，选择打开 GPIO0 或者 GPIO1 的时钟
    SYSCTRL_ClearClkGateMulti(    (1 << SYSCTRL_ITEM_APB_SPI1)
                                   | (1 << SYSCTRL_ITEM_APB_SysCtrl)
                                   | (1 << SYSCTRL_ITEM_APB_PinCtrl)
                                   | (1 << SYSCTRL_ITEM_APB_GPIO1)
                                   | (1 << SYSCTRL_ITEM_APB_GPIO0));

    // 设置 IO MUX，将 GPIO 映射成 SPI 功能，不需要的 pin 可以使用 IO_NOT_A_PIN 替代
    PINCTRL_SelSpiIn(SPI_PORT_1, SPI_MIC_CLK, SPI_MIC_CS, SPI_MIC_HOLD, SPI_MIC_WP, SPI_M
    PINCTRL_SetPadMux(SPI_MIC_CLK, IO_SOURCE_SPI1_CLK_OUT);
    PINCTRL_SetPadMux(SPI_MIC_CS, IO_SOURCE_SPI1_CSN_OUT);
    PINCTRL_SetPadMux(SPI_MIC_MOSI, IO_SOURCE_SPI1_MOSI_OUT);

    // 设置 SPI 的中断
    platform_set_irq_callback(PLATFORM_CB_IRQ_APBSPi, peripherals_spi_isr, NULL);
}
```

14.2.1.2 SPI 模块初始化

常用设置项用注释标出，详细定义请参考“peripheral_ssp.h”

```
// 示例，每次传输大小是 8 个 word
#define DATA_LEN (SPI_FIFO_DEPTH)
static void setup_peripherals_spi_module(void)
{
    apSSP_sDeviceControlBlock pParam;
```



```

pParam.eSclkDiv = SPI_INTERFACETIMINGSCLKDIV_DEFAULT_2M;// SPI 时钟设置
pParam.eSCLKPolarity = SPI_CPOL_SCLK_LOW_IN_IDLE_STATES;// SPI 模式设置
pParam.eSCLKPhase = SPI_CPHA_ODD_SCLK_EDGES;// SPI 模式设置
pParam.eLsbMsbOrder = SPI_LSB_MOST_SIGNIFICANT_BIT_FIRST;
pParam.eDataSize = SPI_DATALEN_32_BITS;// SPI 每个传输单位的大小
pParam.eMasterSlaveMode = SPI_SLVMODE_MASTER_MODE;// SPI 主模式
pParam.eReadWriteMode = SPI_TRANSMODE_WRITE_ONLY;// SPI 只写
pParam.eQuadMode = SPI_DUALQUAD_REGULAR_MODE;
pParam.eWriteTransCnt = DATA_LEN;// SPI 每次传输多少个单位（每个单位的大小是 pParam.eDataSize）
pParam.eReadTransCnt = DATA_LEN;// SPI 每次接收多少个单位（每个单位的大小是 pParam.eDataSize）
pParam.eAddrEn = SPI_ADDREN_DISABLE;
pParam.eCmdEn = SPI_CMDEN_DISABLE;
pParam.RxThres = DATA_LEN/2;
pParam.TxThres = DATA_LEN/2;
pParam.SlaveDataOnly = SPI_SLVDATAONLY_ENABLE;
pParam.eAddrLen = SPI_ADDRLEN_1_BYTE;
pParam.eInterruptMask = (1 << bsSPI_INTREN_ENDINTEN);// 打开 SPI 中断（传输结束后）

apSSP_DeviceParametersSet(APB_SSP1, &pParam);
}

```

14.2.1.3 SPI 中断

```

// SPI ENDINT 中断触发标志传输结束，清除中断状态
static uint32_t peripherals_spi_isr(void *user_data)
{
    uint32_t stat = apSSP_GetIntRawStatus(APB_SSP1);

    if(stat & (1 << bsSPI_INTREN_ENDINTEN))
    {
        apSSP_ClearIntStatus(APB_SSP1, 1 << bsSPI_INTREN_ENDINTEN);
    }
}

```

```
}
```

14.2.1.4 SPI 发送数据

```
uint32_t write_data[DATA_LEN];//数据大小等于 pParam.eDataSize, 数组大小等于 pParam.eWrite
void peripherals_spi_send_data(void)
{
    // 写入命令, 触发 SPI 传输
    apSSP_WriteCmd(APB_SSP1, 0x00, 0x00);//trigger transfer

    // 填写数据到 TX FIFO, 这个例子中 DATA_LEN 等于 FIFO 的深度 (8), 如果大于 8, 可以分为多
    for(i = 0; i < DATA_LEN; i++)
    {
        apSSP_WriteFIFO(APB_SSP1, write_data[i]);
    }

    // 等待发送结束
    while(apSSP_GetSPIActiveStatus(APB_SSP1));
}
```

14.2.1.5 使用流程

- 设置 GPIO, setup_peripherals_spi_pin()
- 初始化 SPI, setup_peripherals_spi_module()
- 在需要时候发送 SPI 数据, peripherals_spi_send_data()
- 检查中断状态

14.2.2 SPI 从配置

14.2.2.1 接口配置

```
static void setup_peripherals_spi_pin(void)
{
    // 打开 SPI 模块时钟
    // 此处是以 SPI1 为例，如果是 SPI0 则需要更改
    // 根据使用的 GPIO，选择打开 GPIO0 或者 GPIO1 的时钟
    SYSCTRL_ClearClkGateMulti(    (1 << SYSCTRL_ITEM_APB_SPI1)
                                   | (1 << SYSCTRL_ITEM_APB_SysCtrl)
                                   | (1 << SYSCTRL_ITEM_APB_PinCtrl)
                                   | (1 << SYSCTRL_ITEM_APB_GPIO1)
                                   | (1 << SYSCTRL_ITEM_APB_GPIO0));

    // 设置 IO MUX，将 GPIO 映射成 SPI 功能，不需要的 pin 可以使用 IO_NOT_A_PIN 替代
    PINCTRL_Pull(IO_SOURCE_SPI1_CLK_IN, PINCTRL_PULL_DOWN);
    PINCTRL_Pull(IO_SOURCE_SPI1_CSN_IN, PINCTRL_PULL_UP); // CS 需要默认上拉
    PINCTRL_SelSpiIn(SPI_PORT_1, SPI_MIC_CLK, SPI_MIC_CS, SPI_MIC_HOLD, SPI_MIC_WP, S
    PINCTRL_SetPadMux(SPI_MIC_CLK, IO_SOURCE_SPI1_CLK_OUT);
    PINCTRL_SetPadMux(SPI_MIC_MISO, IO_SOURCE_SPI1_MISO_OUT);

    // 设置 SPI 的中断
    platform_set_irq_callback(PLATFORM_CB_IRQ_APBSPi, peripherals_spi_isr, NULL);
}
```

14.2.2.2 SPI 模块初始化

常用设置项用注释标出，详细定义请参考“peripheral_ssp.h”

```
// 示例，每次传输大小是 8 个 word
#define DATA_LEN (SPI_FIFO_DEPTH)
static void setup_peripherals_spi_module(void)
{
}
```

```

apSSP_sDeviceControlBlock pParam;
pParam.eSclkDiv = SPI_INTERFACETIMINGSCLKDIV_DEFAULT_2M; // SPI 时钟设置
pParam.eSCLKPolarity = SPI_CPOL_SCLK_LOW_IN_IDLE_STATES; // SPI 模式设置
pParam.eSCLKPhase = SPI_CPHA_ODD_SCLK_EDGES; // SPI 模式设置
pParam.eLsbMsbOrder = SPI_LSB_MOST_SIGNIFICANT_BIT_FIRST;
pParam.eDataSize = SPI_DATALEN_32_BITS; // SPI 每个传输单位的大小
pParam.eMasterSlaveMode = SPI_SLVMODE_SLAVE_MODE; // SPI 从模式
pParam.eReadWriteMode = SPI_TRANSMODE_READ_ONLY; // SPI 只读
pParam.eQuadMode = SPI_DUALQUAD_REGULAR_MODE;
pParam.eWriteTransCnt = DATA_LEN; // SPI 每次传输多少个单位（每个单位的大小是 pParam.eDataSize）
pParam.eReadTransCnt = DATA_LEN; // SPI 每次接收多少个单位（每个单位的大小是 pParam.eDataSize）
pParam.eAddrEn = SPI_ADDREN_DISABLE;
pParam.eCmdEn = SPI_CMDEN_DISABLE;
pParam.RxThres = DATA_LEN/2;
pParam.TxThres = DATA_LEN/2;
pParam.SlaveDataOnly = SPI_SLVDATAONLY_ENABLE;
pParam.eAddrLen = SPI_ADDRLen_1_BYTE;
pParam.eInterruptMask = (1 << bsSPI_INTREN_ENDINTEN); // 打开 SPI 中断（传输结束后触发）

apSSP_DeviceParametersSet(APB_SSP1, &pParam);
}

```

14.2.2.3 SPI 接收数据

```

uint32_t read_data[DATA_LEN]; // 数据大小等于 pParam.eDataSize，数组大小等于 pParam.eReadTransCnt
static uint32_t peripherals_spi_isr(void *user_data)
{
    uint32_t stat = apSSP_GetIntRawStatus(APB_SSP1), i;
    if(stat & (1 << bsSPI_INTREN_ENDINTEN))
    {
        /* check if rx fifo still have some left data */
        // 检查当前 RX FIFO 中有效值的个数，根据个数读取 RX FIFO
    }
}

```

```
uint32_t num = apSSP_GetDataNumInRxFifo(APB_SSP1);
for(i = 0; i < num; i++)
{
    apSSP_ReadFIFO(APB_SSP1, &read_data[i]);
}

apSSP_ClearIntStatus(APB_SSP1, 1 << bsSPI_INTREN_ENDINTEN);

}
}
```

14.2.2.4 使用流程

- 设置 GPIO, setup_peripherals_spi_pin()
- 初始化 SPI, setup_peripherals_spi_module()
- 观察 SPI 中断, 中断触发代表当前传输结束

14.3 场景 2：只读只写并且使用 DMA

其中 SPI 主配置为只写模式, SPI 从配置为只读模式, 同时使用 DMA 进行读写配置之前需要决定使用的 GPIO, 如果是普通模式, 则不需要 SPI_MIC_WP 和 SPI_MIC_HOLD

```
#define SPI_MIC_CLK      GIO_GPIO_10
#define SPI_MIC_MOSI     GIO_GPIO_11
#define SPI_MIC_MISO     GIO_GPIO_12
#define SPI_MIC_CS       GIO_GPIO_13
#define SPI_MIC_WP       GIO_GPIO_14
#define SPI_MIC_HOLD     GIO_GPIO_15
```

14.3.1 SPI 主配置

14.3.1.1 接口配置

```
static void setup_peripherals_spi_pin(void)
{
    // 打开 SPI 模块时钟
    // 此处是以 SPI1 为例，如果是 SPI0 则需要更改
    // 根据使用的 GPIO，选择打开 GPIO0 或者 GPIO1 的时钟
    SYSCTRL_ClearClkGateMulti(    (1 << SYSCTRL_ITEM_APB_SPI1)
                                   | (1 << SYSCTRL_ITEM_APB_SysCtrl)
                                   | (1 << SYSCTRL_ITEM_APB_PinCtrl)
                                   | (1 << SYSCTRL_ITEM_APB_GPIO1)
                                   | (1 << SYSCTRL_ITEM_APB_GPIO0));

    // 设置 IO MUX，将 GPIO 映射成 SPI 功能，不需要的 pin 可以使用 IO_NOT_A_PIN 替代
    PINCTRL_SelSpiIn(SPI_PORT_1, SPI_MIC_CLK, SPI_MIC_CS, SPI_MIC_HOLD, SPI_MIC_WP, SPI_M
    PINCTRL_SetPadMux(SPI_MIC_CLK, IO_SOURCE_SPI1_CLK_OUT);
    PINCTRL_SetPadMux(SPI_MIC_CS, IO_SOURCE_SPI1_CSN_OUT);
    PINCTRL_SetPadMux(SPI_MIC_MOSI, IO_SOURCE_SPI1_MOSI_OUT);

    // 设置 SPI 的中断
    platform_set_irq_callback(PLATFORM_CB_IRQ_APBSPi, peripherals_spi_isr, NULL);
}
```

14.3.1.2 SPI 模块初始化

常用设置项用注释标出，详细定义请参考“peripheral_ssp.h”

```
// 示例，每次传输大小是 8 个 word
#define DATA_LEN (SPI_FIFO_DEPTH)
static void setup_peripherals_spi_module(void)
{
    apSSP_sDeviceControlBlock pParam;
```

```

    pParam.eSclkDiv = SPI_INTERFACETIMINGSCLKDIV_DEFAULT_2M;// SPI 时钟设置
    pParam.eSCLKPolarity = SPI_CPOL_SCLK_LOW_IN_IDLE_STATES;// SPI 模式设置
    pParam.eSCLKPhase = SPI_CPHA_ODD_SCLK_EDGES;// SPI 模式设置
    pParam.eLsbMsbOrder = SPI_LSB_MOST_SIGNIFICANT_BIT_FIRST;
    pParam.eDataSize = SPI_DATALEN_32_BITS;// SPI 每个传输单位的大小
    pParam.eMasterSlaveMode = SPI_SLVMODE_MASTER_MODE;// SPI 主模式
    pParam.eReadWriteMode = SPI_TRANSMODE_WRITE_ONLY;// SPI 只写
    pParam.eQuadMode = SPI_DUALQUAD_REGULAR_MODE;
    pParam.eWriteTransCnt = DATA_LEN;// SPI 每次传输多少个单位（每个单位的大小是 pParam.eDataSize）
    pParam.eReadTransCnt = DATA_LEN;// SPI 每次接收多少个单位（每个单位的大小是 pParam.eDataSize）
    pParam.eAddrEn = SPI_ADDREN_DISABLE;
    pParam.eCmdEn = SPI_CMDEN_DISABLE;
    pParam.RxThres = DATA_LEN/2;
    pParam.TxThres = DATA_LEN/2;
    pParam.SlaveDataOnly = SPI_SLVDATAONLY_ENABLE;
    pParam.eAddrLen = SPI_ADDRLEN_1_BYTE;
    pParam.eInterruptMask = (1 << bsSPI_INTREN_ENDINTEN);// 打开 SPI 中断（传输结束后）

    apSSP_DeviceParametersSet(APB_SSP1, &pParam);
}

```

14.3.1.3 SPI DMA 初始化

// 初始化 DMA 模块

```

static void setup_peripherals_dma_module(void)
{
    SYSCTRL_ClearClkGateMulti(1 << SYSCTRL_ClkGate_APB_DMA);
    DMA_Reset(1);
    DMA_Reset(0);
}

```

14.3 场景 2：只读只写并且使用 DMA

14.3.1.4 SPI DMA 设置

// 此处是以 SPI1 为例

```
void peripherals_spi_dma_to_txfifo(int channel_id, void *src, int size)
{
    DMA_Descriptor descriptor __attribute__((aligned (8)));

    descriptor.Next = (DMA_Descriptor *)0;
    DMA_PrepareMem2Peripheral(&descriptor, SYSCTRL_DMA_SPI1_TX, src, size, DMA_ADDRESS_INC, 0)

    DMA_EnableChannel(channel_id, &descriptor);
}
```

14.3.1.5 SPI 中断

```
// SPI ENDINT 中断触发标志传输结束，清除中断状态
static uint32_t peripherals_spi_isr(void *user_data)
{
    uint32_t stat = apSSP_GetIntRawStatus(APB_SSP1);

    if(stat & (1 << bsSPI_INTREN_ENDINTEN))
    {
        apSSP_ClearIntStatus(APB_SSP1, 1 << bsSPI_INTREN_ENDINTEN);
    }
}
```

14.3.1.6 SPI 发送数据


```
uint32_t write_data[DATA_LEN]; // 数据大小等于 pParam.eDataSize, 数组大小等于 pParam.eWriteTransCnt

void peripherals_spi_send_data(void)
{
    // 首先需要打开 SPI 模块中的 DMA 功能
    apSSP_SetTxDmaEn(APB_SSP1, 1);
    // 初始化中已经设置了 pParam.eWriteTransCnt, 如果需要调整则可以调用这个 API
    apSSP_SetTransferControlWrTranCnt(APB_SSP1, DATA_LEN);

    // DMA 共有 8 个 channel
    #define SPI_DMA_TX_CHANNEL (0) // DMA channel 0
    // 配置 DMA, 指向需要发送的数据
    peripherals_spi_dma_to_txfifo(SPI_DMA_TX_CHANNEL, write_data, sizeof(write_data));

    // 写入命令, 触发 SPI 传输
    apSSP_WriteCmd(APB_SSP1, 0x00, 0x00); // trigger transfer

    // 等待发送结束
    while(apSSP_GetSPIActiveStatus(APB_SSP1));

    // 关闭 SPI 模块中的 DMA 功能
    apSSP_SetTxDmaEn(APB_SSP1, 0);
}
```

14.3.1.7 使用流程

- 设置 GPIO, setup_peripherals_spi_pin()
- 初始化 SPI, setup_peripherals_spi_module()
- 初始化 DMA, setup_peripherals_dma_module()
- 在需要时候发送 SPI 数据, peripherals_spi_send_data()
- 检查中断状态

14.3.2 SPI 从配置

14.3.2.1 接口配置

```
static void setup_peripherals_spi_pin(void)
{
    // 打开 SPI 模块时钟
    // 此处是以 SPI1 为例，如果是 SPI0 则需要更改
    // 根据使用的 GPIO，选择打开 GPIO0 或者 GPIO1 的时钟
    SYSCTRL_ClearClkGateMulti(    (1 << SYSCTRL_ITEM_APB_SPI1)
                                   | (1 << SYSCTRL_ITEM_APB_SysCtrl)
                                   | (1 << SYSCTRL_ITEM_APB_PinCtrl)
                                   | (1 << SYSCTRL_ITEM_APB_GPIO1)
                                   | (1 << SYSCTRL_ITEM_APB_GPIO0));

    // 设置 IO MUX，将 GPIO 映射成 SPI 功能，不需要的 pin 可以使用 IO_NOT_A_PIN 替代
    PINCTRL_Pull(IO_SOURCE_SPI1_CLK_IN, PINCTRL_PULL_DOWN);
    PINCTRL_Pull(IO_SOURCE_SPI1_CSN_IN, PINCTRL_PULL_UP); // CS 需要默认上拉
    PINCTRL_SelSpiIn(SPI_PORT_1, SPI_MIC_CLK, SPI_MIC_CS, SPI_MIC_HOLD, SPI_MIC_WP, SPI_M
    PINCTRL_SetPadMux(SPI_MIC_CLK, IO_SOURCE_SPI1_CLK_OUT);
    PINCTRL_SetPadMux(SPI_MIC_MISO, IO_SOURCE_SPI1_MISO_OUT);

    // 设置 SPI 的中断
    platform_set_irq_callback(PLATFORM_CB_IRQ_APBSPi, peripherals_spi_isr, NULL);
}
```

14.3.2.2 SPI 模块初始化

常用设置项用注释标出，详细定义请参考“peripheral_ssp.h”

```
// 示例，每次传输大小是 8 个 word
#define DATA_LEN (SPI_FIFO_DEPTH)
static void setup_peripherals_spi_module(void)
{
}
```

```

apSSP_sDeviceControlBlock pParam;
pParam.eSclkDiv = SPI_INTERFACETIMINGSCLKDIV_DEFAULT_2M; // SPI 时钟设置
pParam.eSCLKPolarity = SPI_CPOL_SCLK_LOW_IN_IDLE_STATES; // SPI 模式设置
pParam.eSCLKPhase = SPI_CPHA_ODD_SCLK_EDGES; // SPI 模式设置
pParam.eLsbMsbOrder = SPI_LSB_MOST_SIGNIFICANT_BIT_FIRST;
pParam.eDataSize = SPI_DATALEN_32_BITS; // SPI 每个传输单位的大小
pParam.eMasterSlaveMode = SPI_SLVMODE_SLAVE_MODE; // SPI 从模式
pParam.eReadWriteMode = SPI_TRANSMODE_READ_ONLY; // SPI 只读
pParam.eQuadMode = SPI_DUALQUAD_REGULAR_MODE;
pParam.eWriteTransCnt = DATA_LEN; // SPI 每次传输多少个单位（每个单位的大小是 pParam.eDataSize）
pParam.eReadTransCnt = DATA_LEN; // SPI 每次接收多少个单位（每个单位的大小是 pParam.eDataSize）
pParam.eAddrEn = SPI_ADDREN_DISABLE;
pParam.eCmdEn = SPI_CMDEN_DISABLE;
pParam.RxThres = 0;
pParam.TxThres = 0;
pParam.SlaveDataOnly = SPI_SLVDATAONLY_ENABLE;
pParam.eAddrLen = SPI_ADDRLEN_1_BYTE;
pParam.eInterruptMask = (1 << bsSPI_INTREN_ENDINTEN); // 打开 SPI 中断（传输结束后）

apSSP_DeviceParametersSet(APB_SSP1, &pParam);
}

```

14.3.2.3 SPI DMA 初始化

// 初始化 DMA 模块

```

static void setup_peripherals_dma_module(void)
{
    SYSCTRL_ClearClkGateMulti(1 << SYSCTRL_ClkGate_APB_DMA);
    DMA_Reset(1);
    DMA_Reset(0);
}

```

14.3 场景 2：只读只写并且使用 DMA

14.3.2.4 SPI DMA 设置

// 此处是以 SPI1 为例

```
void peripherals_spi_rxfifo_to_dma(int channel_id, void *dst, int size)
{
    DMA_Descriptor descriptor __attribute__((aligned (8)));

    descriptor.Next = (DMA_Descriptor *)0;
    DMA_PreparePeripheral2Mem(&descriptor, dst, SYSCTRL_DMA_SPI1_RX, size, DMA_ADDRESS_INC, 0);

    DMA_EnableChannel(channel_id, &descriptor);
}
```

14.3.2.5 SPI 接收数据

```
uint32_t read_data[DATA_LEN]; // 数据大小等于 pParam.eDataSize, 数组大小等于 pParam.eReadTransCnt
void peripherals_spi_read_data(void)
{
    // 打开 SPI DMA 功能
    apSSP_SetRxDmaEn(APB_SSP1, 1);
    // 功能等同于重新设置 pParam.eReadTransCnt, 代表一次传输的单位个数
    apSSP_SetTransferControlRdTranCnt(APB_SSP1, DATA_LEN);

    #define SPI_DMA_RX_CHANNEL    (0) // DMA channel 0
    peripherals_spi_rxfifo_to_dma(SPI_DMA_RX_CHANNEL, read_data, sizeof(read_data));
}
```

14.3.2.6 SPI 中断

```
// SPI ENDINT 中断触发标志传输结束，清除中断状态
static uint32_t peripherals_spi_isr(void *user_data)
{
    uint32_t stat = apSSP_GetIntRawStatus(APB_SSP1);

    if(stat & (1 << bsSPI_INTREN_ENDINTEN))
    {
        peripherals_spi_read_data();
        apSSP_ClearIntStatus(APB_SSP1, 1 << bsSPI_INTREN_ENDINTEN);
    }
}
```

14.3.2.7 使用流程

- 设置 GPIO，setup_peripherals_spi_pin()
- 初始化 SPI，setup_peripherals_spi_module()
- 初始化 DMA，setup_peripherals_dma_module()
- 设置接收 DMA，peripherals_spi_read_data()
- 观察 SPI 中断，中断触发代表当前接收结束

14.4 场景 3：同时读写不带 DMA

其中 SPI 主从都配置为同时读写模式，CPU 操作读写，没有使用 DMA 配置之前需要决定使用的 GPIO，如果是普通模式，则不需要 SPI_MIC_WP 和 SPI_MIC_HOLD

```
#define SPI_MIC_CLK      GIO_GPIO_10
#define SPI_MIC_MOSI     GIO_GPIO_11
#define SPI_MIC_MISO     GIO_GPIO_12
#define SPI_MIC_CS       GIO_GPIO_13
#define SPI_MIC_WP       GIO_GPIO_14
#define SPI_MIC_HOLD     GIO_GPIO_15
```

14.4.1 SPI 主配置

14.4.1.1 接口配置

```
static void setup_peripherals_spi_pin(void)
{
    // 打开 SPI 模块时钟
    // 此处是以 SPI1 为例，如果是 SPI0 则需要更改
    // 根据使用的 GPIO，选择打开 GPIO0 或者 GPIO1 的时钟
    SYSCTRL_ClearClkGateMulti(    (1 << SYSCTRL_ITEM_APB_SPI1)
                                   | (1 << SYSCTRL_ITEM_APB_SysCtrl)
                                   | (1 << SYSCTRL_ITEM_APB_PinCtrl)
                                   | (1 << SYSCTRL_ITEM_APB_GPIO1)
                                   | (1 << SYSCTRL_ITEM_APB_GPIO0));

    // 设置 IO MUX，将 GPIO 映射成 SPI 功能，不需要的 pin 可以使用 IO_NOT_A_PIN 替代
    PINCTRL_SelSpiIn(SPI_PORT_1, SPI_MIC_CLK, SPI_MIC_CS, SPI_MIC_HOLD, SPI_MIC_WP, SPI_M
    PINCTRL_SetPadMux(SPI_MIC_CLK, IO_SOURCE_SPI1_CLK_OUT);
    PINCTRL_SetPadMux(SPI_MIC_CS, IO_SOURCE_SPI1_CSN_OUT);
    PINCTRL_SetPadMux(SPI_MIC_MOSI, IO_SOURCE_SPI1_MOSI_OUT);

    // 设置 SPI 的中断
    platform_set_irq_callback(PLATFORM_CB_IRQ_APBSPi, peripherals_spi_isr, NULL);
}
```

14.4.1.2 SPI 模块初始化

常用设置项用注释标出，详细定义请参考“peripheral_ssp.h”

```
// 示例，每次传输大小是 8 个 word
#define DATA_LEN (SPI_FIFO_DEPTH)
static void setup_peripherals_spi_module(void)
{
    apSSP_sDeviceControlBlock pParam;
```

```

pParam.eSclkDiv = SPI_INTERFACETIMINGSCLKDIV_DEFAULT_2M;// SPI 时钟设置
pParam.eSCLKPolarity = SPI_CPOL_SCLK_LOW_IN_IDLE_STATES;// SPI 模式设置
pParam.eSCLKPhase = SPI_CPHA_ODD_SCLK_EDGES;// SPI 模式设置
pParam.eLsbMsbOrder = SPI_LSB_MOST_SIGNIFICANT_BIT_FIRST;
pParam.eDataSize = SPI_DATALEN_32_BITS;// SPI 每个传输单位的大小
pParam.eMasterSlaveMode = SPI_SLVMODE_MASTER_MODE;// SPI 主模式
pParam.eReadWriteMode = SPI_TRANSMODE_WRITE_READ_SAME_TIME;// SPI 同时读写
pParam.eQuadMode = SPI_DUALQUAD_REGULAR_MODE;
pParam.eWriteTransCnt = DATA_LEN;// SPI 每次传输多少个单位（每个单位的大小是 pParam.eDataSize）
pParam.eReadTransCnt = DATA_LEN;// SPI 每次接收多少个单位（每个单位的大小是 pParam.eDataSize）
pParam.eAddrEn = SPI_ADDREN_DISABLE;
pParam.eCmdEn = SPI_CMDEN_DISABLE;
pParam.RxThres = DATA_LEN/2;
pParam.TxThres = DATA_LEN/2;
pParam.SlaveDataOnly = SPI_SLVDATAONLY_ENABLE;
pParam.eAddrLen = SPI_ADDRLEN_1_BYTE;
pParam.eInterruptMask = (1 << bsSPI_INTREN_ENDINTEN);// 打开 SPI 中断（传输结束后）

apSSP_DeviceParametersSet(APB_SSP1, &pParam);
}

```

14.4.1.3 SPI 中断

```

// SPI ENDINT 中断触发标志传输结束，清除中断状态
static uint32_t peripherals_spi_isr(void *user_data)
{
    uint32_t stat = apSSP_GetIntRawStatus(APB_SSP1);

    if(stat & (1 << bsSPI_INTREN_ENDINTEN))
    {
        apSSP_ClearIntStatus(APB_SSP1, 1 << bsSPI_INTREN_ENDINTEN);
    }
}

```

```
}

```

14.4.1.4 SPI 发送数据

```
uint32_t write_data[DATA_LEN]; // 数据大小等于 pParam.eDataSize, 数组大小等于 pParam.eWriteSize
void peripherals_spi_send_data(void)
{
    // 写入命令, 触发 SPI 传输
    apSSP_WriteCmd(APB_SSP1, 0x00, 0x00); // trigger transfer

    // 填写数据到 TX FIFO, 这个例子中 DATA_LEN 等于 FIFO 的深度 (8), 如果大于 8, 可以分为多次发送
    // 每次发送完 8 个单位, 需要读取 RX FIFO 中的数据
    for(i = 0; i < DATA_LEN; i++)
    {
        apSSP_WriteFIFO(APB_SSP1, write_data[i]);
    }

    // 等待发送结束
    while(apSSP_GetSPIActiveStatus(APB_SSP1));

    // 读取当前 RX FIFO 中有效值的个数, 然后从 RX FIFO 中读取返回值
    uint32_t num = apSSP_GetDataNumInRxFifo(APB_SSP1);
    for(i = 0; i < num; i++)
    {
        apSSP_ReadFIFO(APB_SSP1, &read_data[i]);
    }
}
```

14.4.1.5 使用流程

- 设置 GPIO, setup_peripherals_spi_pin()
- 初始化 SPI, setup_peripherals_spi_module()

- 在需要时候发送 SPI 数据, peripherals_spi_send_data()
- 检查中断状态

14.4.2 SPI 从配置

14.4.2.1 接口配置

```
static void setup_peripherals_spi_pin(void)
{
    // 打开 SPI 模块时钟
    // 此处是以 SPI1 为例, 如果是 SPI0 则需要更改
    // 根据使用的 GPIO, 选择打开 GPIO0 或者 GPIO1 的时钟
    SYSCTRL_ClearClkGateMulti(    (1 << SYSCTRL_ITEM_APB_SPI1)
                                   | (1 << SYSCTRL_ITEM_APB_SysCtrl)
                                   | (1 << SYSCTRL_ITEM_APB_PinCtrl)
                                   | (1 << SYSCTRL_ITEM_APB_GPIO1)
                                   | (1 << SYSCTRL_ITEM_APB_GPIO0));

    // 设置 IO MUX, 将 GPIO 映射成 SPI 功能, 不需要的 pin 可以使用 IO_NOT_A_PIN 替代
    PINCTRL_Pull(IO_SOURCE_SPI1_CLK_IN, PINCTRL_PULL_DOWN);
    PINCTRL_Pull(IO_SOURCE_SPI1_CSN_IN, PINCTRL_PULL_UP); // CS 需要默认上拉
    PINCTRL_SelSpiIn(SPI_PORT_1, SPI_MIC_CLK, SPI_MIC_CS, SPI_MIC_HOLD, SPI_MIC_WP, S
    PINCTRL_SetPadMux(SPI_MIC_CLK, IO_SOURCE_SPI1_CLK_OUT);
    PINCTRL_SetPadMux(SPI_MIC_MISO, IO_SOURCE_SPI1_MISO_OUT);

    // 设置 SPI 的中断
    platform_set_irq_callback(PLATFORM_CB_IRQ_APBSPi, peripherals_spi_isr, NULL);
}
```

14.4.2.2 SPI 模块初始化

常用设置项用注释标出, 详细定义请参考“peripheral_ssp.h”

```
// 示例，每次传输大小是 8 个 word
#define DATA_LEN (SPI_FIFO_DEPTH)
static void setup_peripherals_spi_module(void)
{
    apSSP_sDeviceControlBlock pParam;
    pParam.eSclkDiv = SPI_INTERFACETIMINGSCLKDIV_DEFAULT_2M; // SPI 时钟设置
    pParam.eSCLKPolarity = SPI_CPOL_SCLK_LOW_IN_IDLE_STATES; // SPI 模式设置
    pParam.eSCLKPhase = SPI_CPHA_ODD_SCLK_EDGES; // SPI 模式设置
    pParam.eLsbMsbOrder = SPI_LSB_MOST_SIGNIFICANT_BIT_FIRST;
    pParam.eDataSize = SPI_DATALEN_32_BITS; // SPI 每个传输单位的大小
    pParam.eMasterSlaveMode = SPI_SLVMODE_SLAVE_MODE; // SPI 从模式
    pParam.eReadWriteMode = SPI_TRANSMODE_WRITE_READ_SAME_TIME; // SPI 同时读写
    pParam.eQuadMode = SPI_DUALQUAD_REGULAR_MODE;
    pParam.eWriteTransCnt = DATA_LEN; // SPI 每次传输多少个单位（每个单位的大小是 pParam.eDataSize）
    pParam.eReadTransCnt = DATA_LEN; // SPI 每次接收多少个单位（每个单位的大小是 pParam.eDataSize）
    pParam.eAddrEn = SPI_ADDREN_DISABLE;
    pParam.eCmdEn = SPI_CMDEN_DISABLE;
    pParam.RxThres = DATA_LEN/2;
    pParam.TxThres = DATA_LEN/2;
    pParam.SlaveDataOnly = SPI_SLVDATAONLY_ENABLE;
    pParam.eAddrLen = SPI_ADDRLen_1_BYTE;
    pParam.eInterruptMask = (1 << bsSPI_INTREN_ENDINTEN); // 打开 SPI 中断（传输结束后触发）

    apSSP_DeviceParametersSet(APB_SSP1, &pParam);
}
```

14.4.2.3 SPI 接收数据

```
void peripherals_spi_push_data(void)
{
    for(i = 0; i < DATA_LEN; i++)
    {
```

```

        apSSP_WriteFIFO(APB_SSP1, write_data[i]);
    }
}

uint32_t read_data[DATA_LEN];//数据大小等于 pParam.eDataSize, 数组大小等于 pParam.eRe
static uint32_t peripherals_spi_isr(void *user_data)
{
    uint32_t stat = apSSP_GetIntRawStatus(APB_SSP1), i;
    if(stat & (1 << bsSPI_INTREN_ENDINTEN))
    {
        /* check if rx fifo still have some left data */
        // 检查当前 RX FIFO 中有效值的个数, 根据个数读取 RX FIFO
        uint32_t num = apSSP_GetDataNumInRxFifo(APB_SSP1);
        for(i = 0; i < num; i++)
        {
            apSSP_ReadFIFO(APB_SSP1, &read_data[i]);
        }

        // 根据需要填充下一次发送的 SPI 数据
        peripherals_spi_push_data();

        apSSP_ClearIntStatus(APB_SSP1, 1 << bsSPI_INTREN_ENDINTEN);
    }
}

```

14.4.2.4 使用流程

- 设置 GPIO, setup_peripherals_spi_pin()
- 初始化 SPI, setup_peripherals_spi_module()
- 根据需要填充 TX FIFO, peripherals_spi_push_data()
- 观察 SPI 中断, 中断触发代表当前传输结束

14.5 场景 4：同时读写并且使用 DMA

其中 SPI 主从配置为同时读写模式，同时使用 DMA 进行读写配置之前需要决定使用的 GPIO，如果是普通模式，则不需要 SPI_MIC_WP 和 SPI_MIC_HOLD

```
#define SPI_MIC_CLK          GPIO_GPIO_10
#define SPI_MIC_MOSI        GPIO_GPIO_11
#define SPI_MIC_MISO        GPIO_GPIO_12
#define SPI_MIC_CS          GPIO_GPIO_13
#define SPI_MIC_WP          GPIO_GPIO_14
#define SPI_MIC_HOLD        GPIO_GPIO_15

// RX FIFO 和 TX FIFO 使用两个 DMA channel
#define SPI_DMA_TX_CHANNEL   (0)//DMA channel 0
#define SPI_DMA_RX_CHANNEL   (1)//DMA channel 1
```

14.5.1 SPI 主配置

14.5.1.1 接口配置

```
static void setup_peripherals_spi_pin(void)
{
    // 打开 SPI 模块时钟
    // 此处是以 SPI1 为例，如果是 SPI0 则需要更改
    // 根据使用的 GPIO，选择打开 GPIO0 或者 GPIO1 的时钟
    SYSCTRL_ClearClkGateMulti(    (1 << SYSCTRL_ITEM_APB_SPI1)
                                   | (1 << SYSCTRL_ITEM_APB_SysCtrl)
                                   | (1 << SYSCTRL_ITEM_APB_PinCtrl)
                                   | (1 << SYSCTRL_ITEM_APB_GPIO1)
                                   | (1 << SYSCTRL_ITEM_APB_GPIO0));

    // 设置 IO MUX，将 GPIO 映射成 SPI 功能，不需要的 pin 可以使用 IO_NOT_A_PIN 替代
```

```
PINCTRL_SelSpiIn(SPI_PORT_1, SPI_MIC_CLK, SPI_MIC_CS, SPI_MIC_HOLD, SPI_MIC_WP, S
PINCTRL_SetPadMux(SPI_MIC_CLK, IO_SOURCE_SPI1_CLK_OUT);
PINCTRL_SetPadMux(SPI_MIC_CS, IO_SOURCE_SPI1_CSN_OUT);
PINCTRL_SetPadMux(SPI_MIC_MOSI, IO_SOURCE_SPI1_MOSI_OUT);

// 设置 SPI 的中断
platform_set_irq_callback(PLATFORM_CB_IRQ_APBSPi, peripherals_spi_isr, NULL);
```

14.5.1.2 SPI 模块初始化

常用设置项用注释标出，详细定义请参考“peripheral_ssp.h”

```
// 示例，每次传输大小是 8 个 word
#define DATA_LEN (SPI_FIFO_DEPTH)
static void setup_peripherals_spi_module(void)
{
    apSSP_sDeviceControlBlock pParam;
    pParam.eSclkDiv = SPI_INTERFACETIMINGSCLKDIV_DEFAULT_2M;// SPI 时钟设置
    pParam.eSCLKPolarity = SPI_CPOL_SCLK_LOW_IN_IDLE_STATES;// SPI 模式设置
    pParam.eSCLKPhase = SPI_CPHA_ODD_SCLK_EDGES;// SPI 模式设置
    pParam.eLsbMsbOrder = SPI_LSB_MOST_SIGNIFICANT_BIT_FIRST;
    pParam.eDataSize = SPI_DATALEN_32_BITS;// SPI 每个传输单位的大小
    pParam.eMasterSlaveMode = SPI_SLVMODE_MASTER_MODE;// SPI 主模式
    pParam.eReadWriteMode = SPI_TRANSMODE_WRITE_READ_SAME_TIME;// SPI 同时读写
    pParam.eQuadMode = SPI_DUALQUAD_REGULAR_MODE;
    pParam.eWriteTransCnt = DATA_LEN;// SPI 每次传输多少个单位（每个单位的大小是 pPar
    pParam.eReadTransCnt = DATA_LEN;// SPI 每次接收多少个单位（每个单位的大小是 pPara
    pParam.eAddrEn = SPI_ADDREN_DISABLE;
    pParam.eCmdEn = SPI_CMDEN_DISABLE;
    pParam.RxThres = DATA_LEN/2;
    pParam.TxThres = DATA_LEN/2;
    pParam.SlaveDataOnly = SPI_SLVDATAONLY_ENABLE;
    pParam.eAddrLen = SPI_ADDRLEN_1_BYTE;
```

14.5 场景 4：同时读写并且使用 DMA

```
pParam.eInterruptMask = (1 << bsSPI_INTREN_ENDINTEN); // 打开 SPI 中断（传输结束后触发）

apSSP_DeviceParametersSet(APB_SSP1, &pParam);

}
```

14.5.1.3 SPI DMA 初始化

// 初始化 DMA 模块

```
static void setup_peripherals_dma_module(void)
{
    SYSCTRL_ClearClkGateMulti(1 << SYSCTRL_ClkGate_APB_DMA);
    DMA_Reset(1);
    DMA_Reset(0);
}
```

14.5.1.4 SPI DMA 设置

// 此处是以 SPI1 为例

```
// 分别设置 RX FIFO 和 TX FIFO 的 DMA
void peripherals_spi_dma_to_txfifo(int channel_id, void *src, int size)
{
    DMA_Descriptor descriptor __attribute__((aligned (8)));

    descriptor.Next = (DMA_Descriptor *)0;
    DMA_PrepareMem2Peripheral(&descriptor, SYSCTRL_DMA_SPI1_TX, src, size, DMA_ADDRESS_INC, 0);

    DMA_EnableChannel(channel_id, &descriptor);
}
```

```
void peripherals_spi_rxfifo_to_dma(int channel_id, void *dst, int size)
{
    DMA_Descriptor descriptor __attribute__((aligned (8)));

    descriptor.Next = (DMA_Descriptor *)0;
    DMA_PreparePeripheral2Mem(&descriptor, dst, SYSCTRL_DMA_SPI1_RX, size, DMA_ADDRESS_IM

    DMA_EnableChannel(channel_id, &descriptor);
}
```

14.5.1.5 SPI 中断

```
// SPI ENDINT 中断触发标志传输结束，清除中断状态
static uint32_t peripherals_spi_isr(void *user_data)
{
    uint32_t stat = apSSP_GetIntRawStatus(APB_SSP1);

    if(stat & (1 << bsSPI_INTREN_ENDINTEN))
    {
        apSSP_ClearIntStatus(APB_SSP1, 1 << bsSPI_INTREN_ENDINTEN);
    }
}
```

14.5.1.6 SPI 接收数据

```
uint32_t read_data[DATA_LEN] = {0,}; //数据大小等于 pParam.eDataSize，数组大小等于 pPa

void peripherals_spi_read_data(void)
{
    // 首先需要打开 SPI 模块中的 DMA 功能
```

```
apSSP_SetRxDmaEn(APB_SSP1,1);
apSSP_SetTransferControlRdTranCnt(APB_SSP1,DATA_LEN);
// 配置 DMA，指向存储接收数据的地址
peripherals_spi_rxfifo_to_dma(SPI_DMA_RX_CHANNEL, read_data, sizeof(read_data));
}
```

14.5.1.7 SPI 发送数据

```
uint32_t write_data[DATA_LEN]; //数据大小等于 pParam.eDataSize，数组大小等于 pParam.eWriteSize

void peripherals_spi_push_data(void)
{
    // 首先需要打开 SPI 模块中的 DMA 功能
    apSSP_SetTxDmaEn(APB_SSP1,1);
    apSSP_SetTransferControlWrTranCnt(APB_SSP1,DATA_LEN);
    // 配置 DMA，指向需要发送的数据
    peripherals_spi_dma_to_txfifo(SPI_DMA_TX_CHANNEL, write_data, sizeof(write_data));
}

void peripherals_spi_send_data(void)
{
    // 分别设置接收和发射的 DMA
    peripherals_spi_read_data();
    peripherals_spi_push_data();

    // 写入命令，触发 SPI 传输
    apSSP_WriteCmd(APB_SSP1, 0x00, 0x00); //trigger transfer

    // 等待发送结束
    while(apSSP_GetSPIActiveStatus(APB_SSP1));
}
```



```
// 关闭 SPI 模块中的 DMA 功能
apSSP_SetTxDmaEn(APB_SSP1, 0);
}
```

14.5.1.8 使用流程

- 设置 GPIO，setup_peripherals_spi_pin()
- 初始化 SPI，setup_peripherals_spi_module()
- 初始化 DMA，setup_peripherals_dma_module()
- 在需要时候发送 SPI 数据，peripherals_spi_send_data()
- 检查中断状态

14.5.2 SPI 从配置

14.5.2.1 接口配置

```
static void setup_peripherals_spi_pin(void)
{
    // 打开 SPI 模块时钟
    // 此处是以 SPI1 为例，如果是 SPI0 则需要更改
    // 根据使用的 GPIO，选择打开 GPIO0 或者 GPIO1 的时钟
    SYSCTRL_ClearClkGateMulti(    (1 << SYSCTRL_ITEM_APB_SPI1)
                                   | (1 << SYSCTRL_ITEM_APB_SysCtrl)
                                   | (1 << SYSCTRL_ITEM_APB_PinCtrl)
                                   | (1 << SYSCTRL_ITEM_APB_GPIO1)
                                   | (1 << SYSCTRL_ITEM_APB_GPIO0));

    // 设置 IO MUX，将 GPIO 映射成 SPI 功能，不需要的 pin 可以使用 IO_NOT_A_PIN 替代
    PINCTRL_Pull(IO_SOURCE_SPI1_CLK_IN, PINCTRL_PULL_DOWN);
    PINCTRL_Pull(IO_SOURCE_SPI1_CSN_IN, PINCTRL_PULL_UP); // CS 需要默认上拉
    PINCTRL_SelSpiIn(SPI_PORT_1, SPI_MIC_CLK, SPI_MIC_CS, SPI_MIC_HOLD, SPI_MIC_WP, S
    PINCTRL_SetPadMux(SPI_MIC_CLK, IO_SOURCE_SPI1_CLK_OUT);
```

```
PINCTRL_SetPadMux(SPI_MIC_MISO, IO_SOURCE_SPI1_MISO_OUT);

// 设置 SPI 的中断
platform_set_irq_callback(PLATFORM_CB_IRQ_APBSPi, peripherals_spi_isr, NULL);
```

14.5.2.2 SPI 模块初始化

常用设置项用注释标出，详细定义请参考“peripheral_ssp.h”

```
// 示例，每次传输大小是 8 个 word
#define DATA_LEN (SPI_FIFO_DEPTH)
static void setup_peripherals_spi_module(void)
{
    apSSP_sDeviceControlBlock pParam;
    pParam.eSclkDiv = SPI_INTERFACETIMINGSCLKDIV_DEFAULT_2M; // SPI 时钟设置
    pParam.eSCLKPolarity = SPI_CPOL_SCLK_LOW_IN_IDLE_STATES; // SPI 模式设置
    pParam.eSCLKPhase = SPI_CPHA_ODD_SCLK_EDGES; // SPI 模式设置
    pParam.eLsbMsbOrder = SPI_LSB_MOST_SIGNIFICANT_BIT_FIRST;
    pParam.eDataSize = SPI_DATALEN_32_BITS; // SPI 每个传输单位的大小
    pParam.eMasterSlaveMode = SPI_SLVMODE_SLAVE_MODE; // SPI 从模式
    pParam.eReadWriteMode = SPI_TRANSMODE_WRITE_READ_SAME_TIME; // SPI 同时读写
    pParam.eQuadMode = SPI_DUALQUAD_REGULAR_MODE;
    pParam.eWriteTransCnt = DATA_LEN; // SPI 每次传输多少个单位（每个单位的大小是 pParam.eDataSize）
    pParam.eReadTransCnt = DATA_LEN; // SPI 每次接收多少个单位（每个单位的大小是 pParam.eDataSize）
    pParam.eAddrEn = SPI_ADDREN_DISABLE;
    pParam.eCmdEn = SPI_CMDEN_DISABLE;
    pParam.RxThres = 0;
    pParam.TxThres = 0;
    pParam.SlaveDataOnly = SPI_SLVDATAONLY_ENABLE;
    pParam.eAddrLen = SPI_ADDRLen_1_BYTE;
    pParam.eInterruptMask = (1 << bsSPI_INTREN_ENDINTEN); // 打开 SPI 中断（传输结束后触发）

    apSSP_DeviceParametersSet(APB_SSP1, &pParam);
```

```
}
```

14.5.2.3 SPI DMA 初始化

// 初始化 DMA 模块

```
static void setup_peripherals_dma_module(void)
{
    SYSCTRL_ClearClkGateMulti(1 << SYSCTRL_ClkGate_APB_DMA);
    DMA_Reset(1);
    DMA_Reset(0);
}
```

14.5.2.4 SPI DMA 设置

// 此处是以 SPI1 为例

```
// 分别设置 RX FIFO 和 TX FIFO 的 DMA
void peripherals_spi_dma_to_txfifo(int channel_id, void *src, int size)
{
    DMA_Descriptor descriptor __attribute__((aligned (8)));

    descriptor.Next = (DMA_Descriptor *)0;
    DMA_PrepareMem2Peripheral(&descriptor, SYSCTRL_DMA_SPI1_TX, src, size, DMA_ADDRESS_INCREMENT_INCREMENT);

    DMA_EnableChannel(channel_id, &descriptor);
}

void peripherals_spi_rxfifo_to_dma(int channel_id, void *dst, int size)
{
    DMA_Descriptor descriptor __attribute__((aligned (8)));
```

14.5 场景 4：同时读写并且使用 DMA

```
descriptor.Next = (DMA_Descriptor *)0;
DMA_PreparePeripheral2Mem(&descriptor,dst,SYSCTRL_DMA_SPI1_RX,size,DMA_ADDRESS_INC,0)

DMA_EnableChannel(channel_id, &descriptor);
}
```

14.5.2.5 SPI 接收数据

```
uint32_t read_data[DATA_LEN] = {0,};//数据大小等于 pParam.eDataSize, 数组大小等于 pParam.

void peripherals_spi_read_data(void)
{
    // 首先需要打开 SPI 模块中的 DMA 功能
    apSSP_SetRxDmaEn(APB_SSP1,1);
    apSSP_SetTransferControlRdTranCnt(APB_SSP1,DATA_LEN);
    // 配置 DMA, 指向存储接收数据的地址
    peripherals_spi_rxfifo_to_dma(SPI_DMA_RX_CHANNEL, read_data, sizeof(read_data));
}
```

14.5.2.6 SPI 发送数据

```
uint32_t write_data[DATA_LEN];//数据大小等于 pParam.eDataSize, 数组大小等于 pParam.eWrite

void peripherals_spi_push_data(void)
{
    // 首先需要打开 SPI 模块中的 DMA 功能
    apSSP_SetTxDmaEn(APB_SSP1,1);
    apSSP_SetTransferControlWrTranCnt(APB_SSP1,DATA_LEN);
    // 配置 DMA, 指向需要发送的数据
    peripherals_spi_dma_to_txfifo(SPI_DMA_TX_CHANNEL, write_data, sizeof(write_data));
}
```

}

14.5.2.7 SPI 中断

```
// SPI ENDINT 中断触发标志传输结束，清除中断状态
static uint32_t peripherals_spi_isr(void *user_data)
{
    uint32_t stat = apSSP_GetIntRawStatus(APB_SSP1);

    if(stat & (1 << bsSPI_INTREN_ENDINTEN))
    {
        // 根据情况决定是否需要准备下一次的接收和发射
        peripherals_spi_read_data();
        peripherals_spi_push_data();
        apSSP_ClearIntStatus(APB_SSP1, 1 << bsSPI_INTREN_ENDINTEN);
    }
}
```

14.5.2.8 使用流程

- 设置 GPIO, setup_peripherals_spi_pin()
- 初始化 SPI, setup_peripherals_spi_module()
- 初始化 DMA, setup_peripherals_dma_module()
- 设置接收 DMA, peripherals_spi_read_data();
- 设置发射 DMA, peripherals_spi_push_data();
- 观察 SPI 中断，中断触发代表当前接收结束

第十五章 系统控制（SYSCTRL）

15.1 功能概述

SYSCTRL 负责管理、控制各种片上外设，主要功能有：

- 外设的复位
- 外设的时钟管理，包括时钟源、频率设置、门控等
- DMA 规划
- 其它功能

15.1.1 外设标识

SYSCTRL 为外设定义了几种不同的标识。最常见的一种标识为：

```
typedef enum
{
    SYSCTRL_ITEM_APB_GPI00    ,
    SYSCTRL_ITEM_APB_GPI01    ,
    // ...
    SYSCTRL_ITEM_NUMBER,
} SYSCTRL_Item;
```

这种标识用于外设的复位、时钟门控等。SYSCTRL_ResetItem 和 SYSCTRL_ClkGateItem 是 SYSCTRL_Item 的两个别名。

下面这种标识用于 DMA 规划：

```
typedef enum
{
    SYSCTRL_DMA_UART0_RX = 0,
    SYSCTRL_DMA_UART1_RX = 1,
    //...
} SYSCTRL_DMA;
```

15.1.2 时钟树

1. 32KiHz 时钟 (*clk_32k*)

32k 时钟有两个来源：内部 RC 电路，外部 32768Hz 晶体。

2. PLL 输入的 24MHz 时钟 (*clk_pll_in*)

24MHz 时钟有两个来源：内部 RC 电路，外部 24MHz 晶体。

3. PLL 输出 (*clk_pll*)

clk_pll 的频率 f_{pll} 可配置，受 *loop*、 div_{pre} 和 div_{output} 等 3 个参数控制：

$$f_{vco} = \frac{f_{osc} \times loop}{div_{pre}}$$

$$f_{pll} = \frac{f_{vco}}{div_{output}}$$

这里， f_{osc} 即 *clk_pll_in* 的频率。要求 $f_{vco} \in [60, 600]MHz$ ， $f_{osc}/div_{pre} \in [2, 24]MHz$ 。

4. *sclk_fast* 与 *sclk_slow*

clk_pll 经过门控后的时钟称为 *sclk_fast*，24MHz 时钟 *clk_pll_in* 经过门控后称为 *sclk_slow*。

5. *hclk*

sclk_fast 经过分频后得到 *hclk*。下列外设（包括 MCU）固定使用这个时钟¹：

- DMA
- 片内 Flash

¹每个外设可单独对 *hclk* 门控。

- QSPI
- USB²
- 其它内部模块如 AES、Cache 等

hclk 经过分频后得到 *pclk*。*pclk* 主要用于硬件内部接口。

6. *sclk_slow* 的进一步分频

sclk_slow 经过若干独立的分频器得到以下多种时钟：

- *sclk_slow_pwm_div*: 专供 PWM 选择使用
- *sclk_slow_timer_div*: 供 TIMER0、TIMER1、TIMER2 选择使用
- *sclk_slow_ks_div*: 专供 KeyScan 选择使用
- *sclk_slow_adc_div*: 供 EFUSE、ADC、IR 选择使用
- *sclk_slow_pdm_div*: 专供 PDM 选择使用

7. *sclk_fast* 的进一步分频：

sclk_fast 经过若干独立的分频器得到以下多种时钟：

- *sclk_fast_i2s_div*: 专供 I2S 选择使用
- *sclk_fast_qspi_div*: 专供 QSPI 选择使用
- *sclk_fast_flash_div*: 专供片内 Flash 选择使用
- *sclk_fast_usb_div*: 专供 USB 选择使用

各硬件外设可配置的时钟源汇总如表 15.1。

表 15.1: 各硬件外设的时钟源

外设	时钟源
GPIO0、GPIO1	选择 <i>sclk_slow</i> 或者 <i>clk_32k</i>
TMR0、TMR1、TMR2	独立配置 <i>sclk_slow_timer_div</i> 或者 <i>clk_32k</i>
WDT	<i>clk_32k</i>
PWM	<i>sclk_slow_pwm_div</i> 或者 <i>clk_32k</i>
PDM	<i>sclk_slow_pdm_div</i>
QDEC	对 <i>hclk</i> 或者 <i>sclk_slow</i> 分频
KeyScan	<i>sclk_slow_ks_div</i> 或者 <i>clk_32k</i>

²仅高速时钟。

外设	时钟源
IR、ADC、EFUSE	独立配置 <i>sclk_slow_adc_div</i> 或者 <i>sclk_slow</i>
DMA	<i>hclk</i>
SPI0	<i>sclk_fast_qspi_div</i> 或者 <i>sclk_slow</i>
I2S	<i>sclk_fast_i2s_div</i> 或者 <i>sclk_slow</i>
UART0、UART1、SPI1	独立配置 <i>hclk</i> 或者 <i>sclk_slow</i>
I2C0、I2C1	<i>sclk_slow</i>

15.1.3 DMA 规划

由于DMA 支持的硬件握手信号只有 16 种，无法同时支持所有外设。因此需要事先确定将要的外设握手信号，并通过 `SYSCTRL_SelectUsedDmaItems` 接口声明。

一个外设可能具备一个以上的握手信号，需要注意区分。比如 UART0 有两个握手信号 UART0_RX 和 UART0_TX，分别用于触发 DMA 发送请求（通过 DMA 传输接收到的数据）和读取请求（向 DMA 请求新的待发送数据）。外设握手信号定义在 `SYSCTRL_DMA` 内：

```
typedef enum
{
    SYSCTRL_DMA_UART0_RX = 0,
    SYSCTRL_DMA_UART1_RX = 1,
    // ...
} SYSCTRL_DMA;
```

15.2 使用说明

15.2.1 外设复位

通过 `SYSCTRL_ResetBlock` 复位外设，通过 `SYSCTRL_ReleaseBlock` 释放复位。

```
void SYSCTRL_ResetBlock(SYSCTRL_ResetItem item);
void SYSCTRL_ReleaseBlock(SYSCTRL_ResetItem item);
```

15.2.2 时钟门控

通过 `SYSCTRL_SetClkGate` 设置门控（即关闭时钟），通过 `SYSCTRL_ClearClkGate` 消除门控（即恢复时钟）。

```
void SYSCTRL_SetClkGate(SYSCTRL_ClkGateItem item);  
void SYSCTRL_ClearClkGate(SYSCTRL_ClkGateItem item);
```

`SYSCTRL_SetClkGateMulti` 和 `SYSCTRL_ClearClkGateMulti` 可以同时控制多个外设的门控。
`items` 参数里的各个比特与 `SYSCTRL_ClkGateItem` 里的各个外设一一对应。

```
void SYSCTRL_SetClkGateMulti(uint32_t items);  
void SYSCTRL_ClearClkGateMulti(uint32_t items);
```

15.2.3 时钟配置

举例如下。

1. *clk_pll* 与 *hclk*

使用 `SYSCTRL_ConfigPLLClk` 配置 *clk_pll*：

```
int SYSCTRL_ConfigPLLClk(  
    uint32_t div_pre,  
    uint32_t loop,  
    uint32_t div_output);
```

例如，将 *hclk* 配置为 220MHz 并读取到变量：

```
SYSCTRL_ConfigPLLClk(6, 110, 1);  
SYSCTRL_SelectHClk(SYSCTRL_CLK_PLL_DIV_1 + 1);  
uint32_t SystemCoreClock = SYSCTRL_GetHClk();
```

2. 为硬件 I2S 配置时钟

使用 `SYSCTRL_SelectI2sClk` 为 I2S 配置时钟：

```
void SYSCTRL_SelectI2sClk(SYSCTRL_ClkMode mode);
```

`SYSCTRL_ClkMode` 的定为为：

```
typedef enum
{
    SYSCTRL_CLK_OSC,           // 使用 sclk_slow
    SYSCTRL_CLK_HCLK,         // 使用 hclk
    SYSCTRL_CLK_ADC_DIV = ..., // 使用 sclk_slow_adc_div
    SYSCTRL_CLK_PLL_DIV_1 = ..., // 对 sclk_fast 分频
} SYSCTRL_ClkMode;
```

根据表 15.1 可知，I2S 可使用 `_sclk_slow`：

```
SYSCTRL_SelectI2sClk(SYSCTRL_CLK_OSC);
```

或者独占一个分频器，对 *sclk_fast* 分频得到 *sclk_fast_i2s_div*，比如使用 *sclk_fast* 的 5^3 分频：

```
SYSCTRL_SelectI2sClk(SYSCTRL_CLK_PLL_DIV_1 + 4);
```

3. 读取时钟频率

使用 `SYSCTRL_GetClk` 可获得指定外设的时钟频率：

```
uint32_t SYSCTRL_GetClk(SYSCTRL_Item item);
```

比如，

³ $5 = 1 + 4$

```
// I2S 使用 PLL 的 5 分频
SYSCTRL_SelectI2sClk(SYSCTRL_CLK_PLL_DIV_1 + 4);
// freq = sclk_fast 的频率 / 5
uint32_t freq = SYSCTRL_GetClk(SYSCTRL_ITEM_APB_I2S);
```

15.2.4 DMA 规划

使用 SYSCTRL_SelectUsedDmaItems 配置要使用的 DMA 握手信号：

```
int SYSCTRL_SelectUsedDmaItems(
    uint32_t items // 各比特与 SYSCTRL_DMA 一一对应
);
```

使用 SYSCTRL_GetDmaId 可获取为某外设握手信号的 DMA 信号 ID，如果返回 -1，说明没有规划该外设握手信号⁴：

```
int SYSCTRL_GetDmaId(SYSCTRL_DMA item);
```

⁴SYSCTRL_SelectUsedDmaItems 的 items 参数里对应的比特为 0

第十六章 定时器（TIMER）

16.1 功能概述

定时器（TIMER）是由两个寄存器组成的，其中一个寄存器用来确定计数器的工作形式和功能，另外一个计时器是用来控制单片机的启动和停止的，同时也设置了一个

16.2 使用说明

16.2.1 设置工作模式

在使用 TIMER 之前，需要使用 TMR_SetOpMode 按需设置 TIMER 的工作模式。

```
void TMR_SetOpMode(  
    TMR_TypeDef *pTMR,  
    uint8_t ch_id,  
    uint8_t op_mode,  
    uint8_t clk_mode,  
    uint8_t pwm_park_value  
);
```

TIMER 的工作模式有以下 6 种，分别三类：定时器、PWM、复用。* 定时器功能包括：32bit 单定时器、16bit 双定时器、8bit 四定时器 ““c #define TMR_CTL_OP_MODE_32BIT_TIMER_x1 1 // one 32bit timer #define TMR_CTL_OP_MODE_16BIT_TIMER_x2 2 // dual 16bit timers #define TMR_CTL_OP_MODE_8BIT_TIMER_x4 3 // four 8bit timers

* PWM功能：16bit双计数器

```
```c
```

```
#define TMR_CTL_OP_MODE_16BIT_PWM 4 // PWM with two 16bit counters
```

- 定时器 +PWM 复用功能：8bit 双计数器 +16bit 单定时器、8bit 双计数器 +8bit 双定时器

```
#define TMR_CTL_OP_MODE_8BIT_PWM_16BIT_TIMER_x1 6 // MIXED: PWM with t
#define TMR_CTL_OP_MODE_8BIT_PWM_8BIT_TIMER_x2 7 // MIXED: PWM with t
```

- 例如将 TIMER1 的通道 0 设置为 TMR\_CTL\_OP\_MODE\_32BIT\_TIMER\_x1 模式：

```
TMR_SetOpMode(APB_TMR1, 0, TMR_CTL_OP_MODE_32BIT_TIMER_x1, TMR_CLK_MODE_APB, 0);
TMR_SetReload(APB_TMR1, 0, TMR_GetClk(APB_TMR1, 0) / 10);
TMR_Enable(APB_TMR1, 0, 0xf);
TMR_IntEnable(APB_TMR1, 0, 0xf);
```

## 16.2.2 时钟频率

使用 TMR\_GetClk 获取 TIMER 某个通道的时钟频率。

```
uint32_t TMR_GetClk(
 TMR_TypeDef *pTMR,
 uint8_t ch_id
);
```

## 16.2.3 重载值

使用 TMR\_SetReload 设置 TIMER 某个通道的重载值。



```
void TMR_SetReload(
 TMR_TypeDef *pTMR,
 uint8_t ch_id,
 uint32_t value
);
```

在不同的 TIMER 模式中，value 的值分配如下表。Table:

TIMER 模式	bits[0:7]	bits[8:15]	bits[16:31]
TMR_CTL_OP_MODE_32BIT_TIMER_x1	Timer 0	Timer 0	Timer 0
TMR_CTL_OP_MODE_16BIT_TIMER_x2	Timer 0	Timer 0	Timer 0
TMR_CTL_OP_MODE_8BIT_TIMER_x4	Timer 0	Timer 1	Timer 2
TMR_CTL_OP_MODE_16BIT_PWM	PWM low period	PWM low period	PWM high period
TMR_CTL_OP_MODE_8BIT_PWM_16BIT_TIMER_x1	Timer 0	Timer 0	PWM low period
TMR_CTL_OP_MODE_8BIT_PWM_8BIT_TIMER_x2	Timer 0	Timer 1	PWM low period

### 16.2.4 使能

使用 TMR\_Enable TIMER 的某个通道。

```
void TMR_Enable(
 TMR_TypeDef *pTMR,
 uint8_t ch_id,
 uint8_t mask
);
```

### 16.2.5 比较

使用 TMR\_GetCMP。

```
uint32_t TMR_GetCMP(
 TMR_TypeDef *pTMR,
 uint8_t ch_id
);
```

### 16.2.6 配置中断请求

使用 TMR\_IntEnable 配置并使能 TIMER 中断。

```
void TMR_IntEnable(
 TMR_TypeDef *pTMR,
 uint8_t ch_id,
 uint8_t mask
);
```

### 16.2.7 中断清除

使用 TMR\_IntClr 清除某个 TIMER 的中断状态。

```
void TMR_IntClr(
 TMR_TypeDef *pTMR,
 uint8_t ch_id,
 uint8_t mask
);
```

### 16.2.8 获取中断

使用 TMR\_IntHappened 获取某个 TIMER 的中断状态。

```
uint8_t TMR_IntHappened(
 TMR_TypeDef *pTMR,
 uint8_t ch_id
);
```



# 第十七章 通用异步收发传输器（UART）

## 17.1 功能概述

UART 负责处理数据总线和串行口之间的串/并、并/串转换，并规定了相应的帧格式，通信双方只要采用相同的帧格式和波特率，就能在未共享时钟信号的情况下，仅用两根信号线（RX 和 TX）完成通信过程。

特性：

- 异步串行通信，可为全双工、半双工、单发送（TX）或单接收（RX）模式；
- 支持 5~8 位数据位的配置，波特率几百 bps 至几百 Kbps；
- 可配置奇校验、偶校验或无校验位；可配置 1、1.5 或 2 位停止位；
- 将并行数据写入内存缓冲区，再通过 FIFO 逐位发送，接收时同理；
- 输出传输时，从低位到高位传输。

## 17.2 使用说明

### 17.2.1 设置波特率

使用 apUART\_BaudRateSet 设置对应 UART 设备的波特率。

```
void apUART_BaudRateSet(
 UART_TypeDef* pBase,
 uint32_t ClockFrequency,
 uint32_t BaudRate
);
```

### 17.2.2 获取波特率

使用 apUART\_BaudRateGet 获取对应 UART 设备的波特率。

```
uint32_t apUART_BaudRateGet (
 UART_TypeDef* pBase,
 uint32_t ClockFrequency
);
```

### 17.2.3 接收错误查询

使用 apUART\_Check\_Rece\_ERROR 查询接收产生的错误。

```
uint8_t apUART_Check_Rece_ERROR(
 UART_TypeDef* pBase
);
```

### 17.2.4 FIFO 轮询模式

在轮询模式下，CPU 通过检查线路状态寄存器中的位来检测事件：

- 使用 apUART\_Check\_Rece\_ERROR 查询接收产生的错误字。

```
uint8_t apUART_Check_Rece_ERROR(
 UART_TypeDef* pBase
);
```

- 用 apUART\_Check\_RXFIFO\_EMPTY 查询 RXFIFO 是否为空。

```
uint8_t apUART_Check_RXFIFO_EMPTY(
 UART_TypeDef* pBase
);
```

- 使用 apUART\_Check\_RXFIFO\_FULL 查询 RXFIFO 是否已满。

```
uint8_t apUART_Check_RXFIFO_FULL(
 UART_TypeDef* pBase
);
```

- 使用 apUART\_Check\_TXFIFO\_EMPTY 查询 TXFIFO 是否为空。

```
uint8_t apUART_Check_TXFIFO_EMPTY(
 UART_TypeDef* pBase
);
```

- 使用 apUART\_Check\_TXFIFO\_FULL 查询 TXFIFO 是否已满。

```
uint8_t apUART_Check_TXFIFO_FULL(
 UART_TypeDef* pBase
);
```

### 17.2.5 发送数据

使用 UART\_SendData 发送 8bits 数据。

```
void UART_SendData(
 UART_TypeDef* pBase,
 uint8_t Data
);
```

### 17.2.6 接收数据

使用 UART\_ReceData 接收 8bits 数据。

```
uint8_t UART_ReceData(
 UART_TypeDef* pBase
);
```

### 17.2.7 配置中断请求

使用 apUART\_Enable\_TRANSMIT\_INT 使能发送中断状态。

```
void apUART_Enable_TRANSMIT_INT(
 UART_TypeDef* pBase
);
```

使用 apUART\_Disable\_TRANSMIT\_INT 禁用发送中断状态。

```
void apUART_Disable_TRANSMIT_INT(
 UART_TypeDef* pBase
);
```

使用 apUART\_Enable\_RECEIVE\_INT 使能接收中断状态。

```
void apUART_Enable_RECEIVE_INT(
 UART_TypeDef* pBase
);
```

使用 apUART\_Disable\_RECEIVE\_INT 禁用接收中断状态。

```
void apUART_Disable_RECEIVE_INT(
 UART_TypeDef* pBase
);
```



### 17.2.8 处理中断状态

```
uint8_t apUART_Get_ITStatus(UART_TypeDef* pBase,uint8_t UART_IT); uint32_t apUART_Get_all_raw_i
pBase);
```

```
void apUART_Clr_RECEIVE_INT(UART_TypeDef* pBase); void apUART_Clr_TX_INT(UART_TypeDef*
pBase); void apUART_Clr_NonRx_INT(UART_TypeDef* pBase);
```

### 17.2.9 UART 初始化

两个设备使用 UART 通讯时，必须先约定好传输速率和一些数据位。

```
typedef struct UART_xStateStruct
{
 // Line Control Register, UARTLCR_H
 UART_eWLEN word_length; // WLEN
 UART_ePARITY parity; // PEN, EPS, SPS
 uint8_t fifo_enable; // FEN
 uint8_t two_stop_bits; // STP2
 // Control Register, UARTCR
 uint8_t receive_en; // RXE
 uint8_t transmit_en; // TXE
 uint8_t UART_en; // UARTEN
 uint8_t cts_en; //CTSEN
 uint8_t rts_en; //RTSEN
 // Interrupt FIFO Level Select Register, UARTIFLS
 uint8_t rxfifo_waterlevel; // RXIFLSEL
 uint8_t txfifo_waterlevel; // TXIFLSEL
 //UART_eFIFO_WATERLEVEL rxfifo_waterlevel; // RXIFLSEL
 //UART_eFIFO_WATERLEVEL txfifo_watchlevel; // TXIFLSEL

 // UART Clock Frequency
 uint32_t ClockFrequency;
 uint32_t BaudRate;
```

```
} UART_sStateStruct;
```

定义函数 `config_uart`,

```
void config_uart(
 uint32_t freq,
 uint32_t baud
);
```

在函数中, 对 `UART_sStateStruct` 的各项参数初始化, 并调用 `apUART_Initialize` 对 UART 进行初始化。

```
void config_uart(uint32_t freq, uint32_t baud)
{
 UART_sStateStruct config;

 config.word_length = UART_WLEN_8_BITS;
 config.parity = UART_PARITY_NOT_CHECK;
 config.fifo_enable = 1;
 config.two_stop_bits = 0;
 config.receive_en = 1;
 config.transmit_en = 1;
 config.UART_en = 1;
 config.cts_en = 0;
 config.rts_en = 0;
 config.rxfifo_waterlevel = 1;
 config.txfifo_waterlevel = 1;
 config.ClockFrequency = freq;
 config.BaudRate = baud;

 apUART_Initialize(PRINT_PORT, &config, 0);
}
```

### 17.2.10 发送数据

使用 UART\_SendData 发送数据。

```
void UART_SendData(
 UART_TypeDef* pBase,
 uint8_t Data
);
```

### 17.2.11 接收数据

使用 UART\_ReceData 接收数据。

```
uint8_t UART_ReceData(
 UART_TypeDef* pBase
);
```

### 17.2.12 清空 FIFO

使用 uart\_empty\_fifo 清空 UART 的 FIFO。

```
static void uart_empty_fifo(
 UART_TypeDef* pBase
);
```

### 17.2.13 使能 FIFO

使用 uart\_enable\_fifo 使能 UART 的 FIFO。

```
static void uart_enable_fifo(
 UART_TypeDef* pBase
);
```

### 17.2.14 处理中断状态

用 `apUART_Get_ITStatus` 获取某个 UART 上的中断触发状态，返回非 0 值表示该 UART 上产生了中断请求；用 `apUART_Get_all_raw_int_stat` 一次性获取所有 UART 的中断触发状态，第  $n$  比特（第 0 比特为最低比特）对应 UART  $n$  上的中断触发状态。

UART 产生中断后，需要消除中断状态方可再次触发。用 `apUART_Clr_RECEIVE_INT` 消除某个 UART 上接收中断的状态，用 `apUART_Clr_TX_INT` 消除某个 UART 上发送中断的状态。用 `apUART_Clr_NonRx_INT` 消除某个 UART 上除接收以外的中断状态。

### 17.2.15 DMA 传输模式使能

DMA 向 CPU 发出总线请求，CPU 将总线交给 DMA 之后，由 DMA 控制数据的收发工作。

使用 `UART_DmaEnable` 使能 DMA 工作模式。

```
void UART_DmaEnable(
 UART_TypeDef *pBase,
 uint8_t tx_enable,
 uint8_t rx_enable,
 uint8_t dma_on_err
);
```

# 第十八章 看门狗（WATCHDOG）

## 18.1 功能概述

看门狗就是定期的查看芯片内部情况，一旦发生错误就向芯片内部发出重启信号。看门狗指令在程序的中断中拥有最高的优先级。防止程序跑飞，同时也能防止程序在线运行时出现死循环

## 18.2 使用说明

### 18.2.1 配置看门狗

使用 TMR\_WatchDogEnable3 配置并启用看门狗。

```
void TMR_WatchDogEnable3(
 uint32_t int_timeout_ms,
 uint32_t reset_timeout_ms,
 uint8_t enable_int
);
```

为了 ING916xx 和 ING918xx 统一接口,定义宏 TMR\_WatchDogEnable 代替 TMR\_WatchDogEnable3。

```
#define TMR_WatchDogEnable(timeout) do {
 uint32_t TMR_CLK_FREQ = OSC_CLK_FREQ;
 uint32_t cnt = ((uint64_t)(timeout) * 1000 / OSC_CLK_FREQ);
 TMR_WatchDogEnable3(cnt, cnt, 0);
} while (0)
```

例如：

### 18.2.2 重启看门狗

使用 TMR\_WatchDogRestart 重启看门狗。

```
void TMR_WatchDogRestart(void);
```

### 18.2.3 清除中断

使用 TMR\_WatchDogClearInt 清除看门狗的中断。

```
void TMR_WatchDogClearInt(void);
```

### 18.2.4 禁用看门狗

在使用 TMR\_WatchDogEnable 启用或 TMR\_WatchDogRestart 重启看门狗之后，需要使用 TMR\_WatchDogDisable 对其禁用。

```
void TMR_WatchDogDisable(void);
```

# 第十九章 内置 Flash (EFlash)

## 19.1 功能概述

芯片内置一定容量的 Flash，可编程擦写。擦除时以扇区（sector）为单位进行，写入时以 32bit 为单位。

## 19.2 使用说明

### 19.2.1 擦除并写入新数据

通过 `program_flash` 擦除并写入一段数据。

```
int program_flash(
 // 待写入的地址
 const uint32_t dest_addr,
 // 数据源的地址
 const uint8_t *buffer,
 // 数据长度（以字节为单位，必须是 4 的倍数）
 uint32_t size);
```

`dest_addr` 为统一编址后的地址，而非 Flash 内部从 0 开始的地址。`dest_addr` 必须对应于某个扇区的起始地址。数据源不可位于 Flash 内。

`program_flash` 将根据 `size` 自动擦除一个或多个扇区并写入数据。

本函数如果成功，则返回 0，否则返回非 0。

### 19.2.2 不擦除直接写入数据

通过 `write_flash` 不擦除直接写入数据。

```
int write_flash(
 // 待写入的地址
 const uint32_t dest_addr,
 // 数据源的地址
 const uint8_t *buffer,
 // 数据长度（以字节为单位，必须是 4 的倍数）
 uint32_t size);
```

`dest_addr` 为统一编址后的地址，必须 32bit 对齐。`write_data` 不擦除 Flash，而是直接写入。数据源不可位于 Flash 内。如果对应的 Flash 空间未被擦除，将无法写入。

本函数如果成功，则返回 0，否则返回非 0。

### 19.2.3 单独擦除

通过 `erase_flash_sector` 擦除一个指定的扇区。

```
int erase_flash_sector(
 // 待擦除的地址
 const uint32_t addr);
```

`addr` 必须对应于某个扇区的起始地址。本函数如果成功，则返回 0，否则返回非 0。

### 19.2.4 Flash 数据升级

通过 `flash_do_update` 可以升级 Flash 里的数据。这个函数可用于 FOTA 升级。



```
int flash_do_update(
 // 数据块数目
 const int block_num,
 // 每个数据块的信息
 const fota_update_block_t *blocks,
 // 用于缓存一个扇区的内存
 uint8_t *ram_buffer);
```

每个数据块的定为为：

```
typedef struct fota_update_block
{
 uint32_t src;
 uint32_t dest;
 uint32_t size;
} fota_update_block_t;
```

这个函数的行为大致如下：

```
flash_do_update() {
 for (block in blocks) {
 flash_copy(block.dest,
 block.src,
 block.size);
 }
}
```

如前所述，program\_flash 的数据源不能位于 Flash，所以 flash\_copy 需要把各扇区逐个读入 ram\_buffer，然后使用 program\_flash 擦除、写入。

这个函数如果成功，将自动重启系统，否则返回非 0。

