ING20XX 系列芯片外设开发者手册

桃芯科技（苏州）有限公司

官网：www.ingchips.com

www.ingchips.cn

邮箱：service@ingchips.com

电话：010-85160285

地址：北京市海淀区知春路 49 号紫金数 3 号楼 8 层 803

深圳市南山区科技园曙光大厦 1009

目录

插图

表格

版本历史

版本	信息	日期
0.0	初始版本	2025-07-8

第一章　概览

欢迎使用 *INGCHIPS* 918xx/916xx/20XX 软件开发工具包（SDK）.

ING20XX 系列芯片支持蓝牙 5.4 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。

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。

1.1　缩略语及术语

表 1.1: 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）
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）
I2S	集成电路音频总线（Inter-IC Sound）

缩略语	说明
IR	红外线（Infrared）
PCAP	脉冲捕捉（Pulse CAPture）
PDM	脉冲密度调制（Pulse Density Modulation）
PLL	锁相环（Phase Locked Loop）
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）

1.2 参考文档

1. Bluetooth SIG[1]

[1] https://www.bluetooth.com/

第二章　ADC 简介

ADC 全称 Analog-to-Digital Converter，即模数转换器。

其主要作用是通过 PIN 测量电压，并将采集到的电压模拟信号转换成数字信号。

2.1　功能描述

2.1.1　特点

- 最多 12 个单端输入通道
- 12 位分辨率
- 电压输入范围（0~VBAT）
- 支持 APB 总线
- 采样频率可编程
- 支持单一转换模式和连续转换模式

2.1.2　ADC 模式

- 校准模式（calibration）：用于校准精度。
- 转换模式（conversion）：用于正常工作状态下的模数转换。

根据 ADC 输入模式完成对应的模式校准，之后在转换模式下进行正常模数转换。

2.1.3 ADC 输入模式

- 单端输入（single-ended）：使用单个输入引脚，采样 ADC 内部的参考电压；

2.1.4 ADC 转换模式

- 单次转换（single）：ADC 完成单次转换后，ADC 将停止，数据将被拉入 FIFO；
- 连续转换（continuous）：ADC 经过 loop-delay 时间后循环进行转换，直到手动关闭。

2.1.5 ADC 通道

ADC 共 12 个 channel，即 ch0-ch11。

其中 ch0-ch9 为通用通道。

具体通道的输入连接引脚如下：

表 2.1: ADC 输入连接引脚

通道	连接引脚
ch0	GPIO7
ch1	GPIO8
ch2	GPIO9
ch3	GPIO10
ch4	GPIO30
ch5	GPIO31
ch6	GPIO34
ch7	GPIO35
ch8	GPIO15
ch9	GPIO20

通道输入模式配置规则：

1. 通用通道 ch0-ch9

以下是关于 ADC 通道对于开发者的几点使用建议：

1. 在使能通道前请先配置 ADC 输入模式；

2. 如需切换 ADC 输入模式，建议调用 ADC_DisableAllChannels 关闭之前模式下所有已使能通道，重新使能新的通道；

2.1.6 采样率

采样率和时钟、loop-delay 大小以及使能通道个数有关，其计算关系如下：

当 loop-delay=0 时：

$$SAMPLERATE = \frac{ADC\_CLK}{16 \times CH\_NUM}$$

当 loop-delay>0 时：

$$SAMPLERATE = \frac{ADC\_CLK}{loop\_delay + 16 \times CH\_NUM + 5}$$

2.2 使用方法

2.2.1 时钟配置

当前 ADC 所用时钟源为 `clock slow` 经过分频得到的 ADC 工作时钟。

当前 ADC 工作时钟可以配置范围为 500K-8M。

2.2.2 ADC 参数配置

ADC 参数配置接口的函数声明如下：

```
void ADC_ConvCfg(SADC_adcCtrlMode ctrlMode,
                 SADC_channelId ch,
                 uint8_t enNum,
                 uint8_t dmaEnNum,
                 uint32_t loopDelay);
```

涉及参数有：ADC 转换模式、采样通道、data 触发中断数、data 触发 DMA 搬运数、ADC 输入模式和 `loop-delay`。

具体的参数取值范围请参考 ADC 头文件里对应的枚举定义或参数说明。

data 触发中断数和 data 触发 DMA 搬运数决定了搬运 ADC 数据的方式。前者用触发中断的方式，后者用触发 DMA 搬运的方式。

注意： data 触发中断数和 data 触发 DMA 搬运数应该一个为 0，一个非 0,。如果两值都非 0 则默认选择触发中断的方式，DMA 配置不生效；

关于搬运方式的建议：

- 一般在小数据量情况下，如定时采集温度、电池电压，建议采用触发中断并 CPU 读数的方式。
- 一般大数据量连续采样，如模拟麦克风采样，建议采用 DMA 搬运方式（乒乓搬运），可以大大提高数据搬运处理效率。

注意：多次调用 ADC_ConvCfg 则以最后一次调用为准（除通道使能，不会自动关闭之前已使能的通道），如只需使能（关闭）ADC 通道可以通过 ADC_EnableChannel 接口完成。

2.2.3 ADC 数据处理

ADC 数据处理的推荐步骤为：

1. 调用 ADC_PopFifoData（或 DMA 搬运 buff）读取 FIFO 中的 ADC 原始数据；

2. 调用 ADC_GetDataChannel 得到原始数据中的数据所属通道（如需要）；

3. 调用 ADC_GetData 得到原始数据中的 ADC 数据；

4. 调用 ADC_GetVol 通过 ADC 数据计算得到其对应的电压值（如需要）。

也可以通过调用 ADC_ReadChannelData 接口直接得到指定通道的 ADC 数据，但这样会丢弃其他通道数据，请谨慎使用。其可以作为辅助接口使用，非主要方式。

对于单个数据的读取我们建议采用取若干数据求其平均值的方式，可以明显提高数据稳定性。

我们提供了方便开发者移植的**求平均值程序**，如有需求请参考 SDK 例程 peripheral_battery。

2.3 编程指南

2.3.1 驱动接口

ADC 控制：

- ADC_Reset：ADC 复位
- ADC_Start：ADC 使能
- ADC_AdcClose：ADC 关闭

ADC 配置：

- ADC_ConvCfg：ADC 转换参数配置
- ADC_EnableChannel：通道使能
- ADC_DisableAllChannels：关闭所有通道

数据处理相关：

- ADC_GetFifoEmpty：读取 FIFO 是否为空
- ADC_PopFifoData：读取 FIFO 原始数据
- ADC_GetDataChannel：读取原始数据中通道号
- ADC_GetData：读取原始数据中 ADC 数据
- ADC_ReadChannelData：读取特定通道 ADC 数据（注意：该接口会丢弃其他通道数据）
- ADC_GetVol：读取 ADC 数据对应电压值
- ADC_ClrFifo：清空 FIFO

以上是 ADC 常用接口，还有部分接口不推荐直接使用，在此不进行罗列，详见头文件声明。

2.3.2 代码示例

下面展示 ADC 的基本用法：

（注：以下 ADC 参数设置仅供参考，具体参数请结合实际需要进行配置）

// TODO ：ADC 模板未量产前校准参数不可用，仅限于获取原始 adc 数据测试使用

2.3.2.1 单次中断搬运

```c
#define ADC_CHANNEL    ADC_CH_0
#define ADC_CLK_MHZ    6

static uint32_t ADC_cb_isr(void *user_data)
{
    uint32_t data = ADC_PopFifoData();
    SADC_channelId channel = ADC_GetDataChannel(data);
    if (channel == ADC_CHANNEL) {
        uint16_t sample = ADC_GetData(data);
        // do something with 'sample'
    }
    return 0;
}

void test(void)
{
    SYSCTRL_ClearClkGate(SYSCTRL_ITEM_APB_ADC);
    SYSCTRL_SetAdcClkDiv(24 / ADC_CLK_MHZ);
    SYSCTRL_ReleaseBlock(SYSCTRL_ITEM_APB_ADC);
    ADC_Reset();
    ADC_ConvCfg(SINGLE_MODE, ADC_CHANNEL, 0, 0, 0);
    platform_set_irq_callback(PLATFORM_CB_IRQ_SADC, ADC_cb_isr, 0);
    ADC_Start(1);
}
```

第三章　ASDM 简介

ASDM 全称，Sigma-Delta-Analog-to-Digital Converter，即 Sigma-Delta 模拟数字转换器。

集成一个 Sigma-Delta ADC 模块，通过 PIN 测量电压，并将采集到的电压模拟信号转换成数字信号。相较于普通 ADC 模块，转换精度更高，抗干扰能力更强，功耗更低。

专为数字音频采样设计，内置数字处理单元，包含 AGC 和 HPF 等数字信号处理功能，支持硬件滤波，集成音量控制，音量淡入淡出。支持 DMIC 输出 PDM 信号采样处理。

3.1　功能描述

3.1.1　特点

- 单端输入或全差分输入
- 支持 1MIC 通道，模拟电压- 20dB ~ 40dB，增益 0 / 16 / 12 / 20dB
- 16 位分辨率
- 电压输入范围（0~VBAT）
- 支持 APB 总线
- 采样频率可编程
- 可产生 2.2 V 到 2.7 V 的麦克风偏置电压，最高输出电流 2MA，电流过载保护
- DMIC 支持 PDM 信号采样处理，支持 128 和 64bit 两种采样类型
- 支持带淡入和淡出的独立音量控制
- 可编程时钟，支持六种典型采样频率：8/12/16/24/32/48kHz
- 支持 DC 阻塞的高通滤波器

3.1.2 性能

- 温度：- 40 ~ 125℃
- 电源电压 (Analog)：从 2.7 V 到 3.6 V
- SNR: > 92dB （需要使用内部偏置电压，内置参考电压需单独外接滤波电容）
- THD: <-84dB
- 最高输出电流 2MA: <2mA

3.1.3 引脚定义

ASDM 模块包含一对差分输入引脚 ASDM_P 和 ASDM_N，以及一个偏置电压输出引脚 MicBias，一个内置参考电压输出 ASDM_Vref.

其中 MicBias 引脚用于输出麦克风偏置电压，用于驱动麦克风，偏置电压可以根据需求进行调整，ASDM_Vref 引脚用于输出内置参考电压，如果需要获得更好的采样效果，内置参考电压需要从引脚输出并单独外接滤波电容，ASDM_P 和 ASDM_N 引脚用于输入麦克风信号。

引脚的映射关系如表 3.2所示。

注意：如果不考虑增加电容对内置参考电压滤波，请不要打开内置参考电压输出，否则会影响系统采样，电路错误甚至会损坏芯片

表 3.1： ASDM 引脚定义

引脚名称	连接引脚	连接引脚
ASDM_Vref	11	参考电压输出
MicBias	12	麦克风偏置电压输出
ASDM_P	13	差分输入 P(单端输入)
ASDM_N	14	差分输入 N
DMIC_CLK	查看 PINCTRL 章节	DMIC 时钟输入
DMIC_DATA	查看 PINCTRL 章节	DMIC 数据输入

3.1.4 采样率

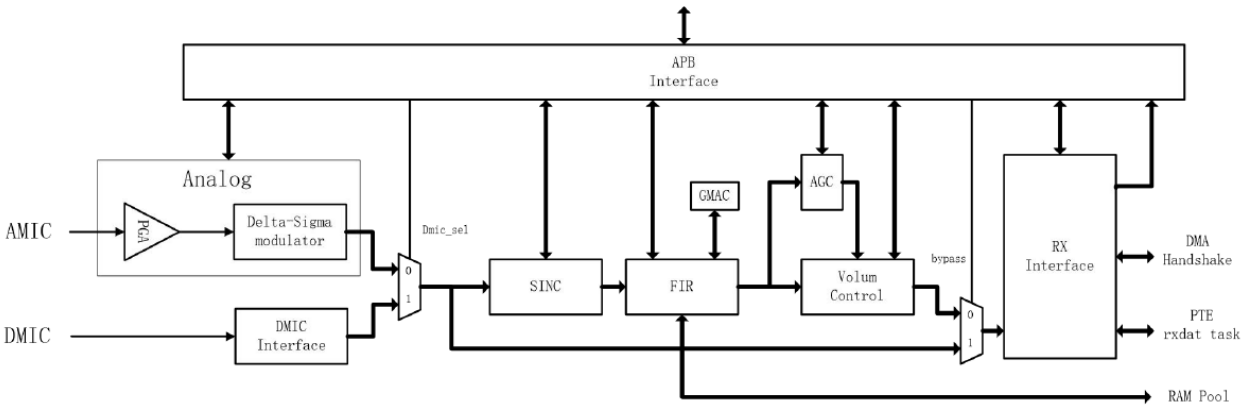
模块的采样率和模块使用的输入时钟频率和内部时钟分频相关，支持的音频采样频率如表 3.2所示

表 3.2: ASDM 支持的采样率

采样率 (kHz)	外设输入时钟频率 (MHz)	模拟 AMIC 时钟采样频率/数字 DMIC 时钟采样频率（128*fs）	数字 DMIC 时钟采样频率（64*fs）
48	12.288	6.144	3.072
32	12.288	3.072	1.536
24	12.288	2.448	1.224
16	12.288	1.536	0.768
8	12.288	0.768	0.384

外设的输入时钟频率由 fast_clk 分频而来，因此实现标准的声音采样需要调整对应的 pll 输出和 ASDM 的 DIV 实现，推荐使用 cube 工具生成对应的时钟分频参数。

3.1.5 模块功能简述



上图为 ASDM 的整体功能框图，包含数字和模拟两个信号输入，后端集成数字信号处理。

- 模拟采样部分由 PGA 模块和 Sigma-Delta ADC 模块组成，PGA 模块用于放大输入信号，Sigma-Delta ADC 模块用于将模拟信号转换为数字信号。采样更加精确，采样结果可选经过硬件数字滤波输出或直接输出采样结果。
- DMIC 输入接口可以采样 dmic 输入的 pdm 信号，可以直接输出获取 dmic 的数字输出或经硬件数字处理后输出滤波后的音频结果。
- 内置 SINC 和 HPF 硬件数字滤波器，可以对输入数字信号进行滤波。

- AGC（自动增益控制）位于信号处理链的中间环节，可选是否开启，解决输入音频信号电平不均衡的问题。AGC 通过自动动态地调整增益，使输出电平保持稳定，从而维持后续处理模块输入信号的级别。
- 音量控制模块 VolCtrl 位于信号处理链的末端，用于调节输出信号的音量，通过调节增益值来控制输出信号的音量大小，可实现音量的淡入淡出控制。
- 输出的结果可以直接通过 fifo 输出，同时支持 DMA 数据搬运和 PTE 任务触发。

3.2 使用方法

3.2.1 时钟配置

当前 ASDM 的时钟源来自于 FAST_CLK，通过 PLL 进行分频后输出到 ASDM_CLK，推荐使用 CUBE 工具生成分频系数，这里提供一组可选的 CLK 配置参数，PLL 时钟源来自于 RF24M 时钟，PRE 分频设置为 5，LOOP 倍频设置为 64，OUT 分频设置为 1，ASDM 分频设置为 25，可获得 12.288M 的输出时钟。PLL 输出为 307.2M。由于需要调整 PLL 时钟源，开发者需要注意对应的时钟规划，防止外设出现时钟冲突的问题。

例如：

```
SYSCTRL_SelectSlowClk(SYSCTRL_SLOW_CLK_24M_RF);
SYSCTRL_SelectHClk(SYSCTRL_CLK_SLOW);
SYSCTRL_SelectFlashClk(SYSCTRL_CLK_SLOW);
SYSCTRL_ConfigPLLClk(5,64,1);
SYSCTRL_EnablePLL(1);
SYSCTRL_SelectHClk(SYSCTRL_CLK_PLL_DIV_1);
SYSCTRL_SelectFlashClk(SYSCTRL_CLK_PLL_DIV_2);
SYSCTRL_UpdateAsdmClk(25);
```

3.2.2 设置电压偏置和 Vref 输出滤波

ASDM 模块可以输出单独的偏置电压用来驱动 mic 输出，对应接口存在于 `peripheral_sysctrl.c`，接口如下：

```
void SYSCTRL_SetAdcVrefSel(uint8_t vref);
```

为了获得更好的收音效果，通常推荐打开内部 verf 输出，外接单独的硬件滤波。**不外接硬件滤波一定不要使能参考电压输出，否则可能导致底噪变大**。打开 Vref 输出的接口如下：

```
void SYSCTRL_EnableAsdmVrefOutput(uint8_t enable);
```

使用 ASDM 模块，需要使用内置的参考电压对外部信号进行采样，因此**一定要打开内部电压参考**否则可能会工作不正常。接口如下：

```
void SYSCTRL_EnableInternalVref(uint8_t enable);
```

注意：使能引脚偏置电压输出或参考电压输出，一定要将引脚设置为模拟输入输出模式，详细实现参考 PINCTRL

3.2.3 初始化配置

对于 AMIC 和 DMIC 的数据采样应用，由于 ASDM 内部集成了数字信号处理逻辑，可以极大的简化数字信号处理.

通过配置对应的 AGC、HPF、SINC、VOL 等参数，可以快速实现数字信号处理。对比使用 CPU 进行数字信号滤波，降低了处理难度，加快了处理速度.

对于想要快速使用 ING20 系列芯片进行语音采集应用测试和加快开发速度，调整 AGC 参数整定选择高通滤波器参数，电压偏置调整较为复杂，不方便初学者入手.

因此在综合考虑芯片的易用性和灵活性下，初始化接口根据 voice 和 music 场景封装了典型的滤波参数和 agc 增益参数，用户可以使用初始化接口快速初始化外设，或根据自身需求调用指定接口整定对应滤波器和其他数字信号处理单元参数。

ASDM 初始化接口配置如下：

```
int ASDM_Config(ASDM_TypeDef *base, ASDM_ConfigTypeDef* pParam);
```

用户需要传入 ASDM 模块宏 APB_ASDM，和需要用户配置的结构体参数内容 pParam。

结构体如下：

```
typedef struct
{
    uint32_t volume;
    uint8_t Asdm_Mode;
    ASDM_SampleRate Sample_rate;
    ASDM_AgcMode Agc_mode;
    ASDM_AgcConfigTypeDef *Agc_config;
    uint8_t Fifo_Enable;
    uint8_t Fifo_DmaTrigNum;
    uint8_t FifoIntMask;
} ASDM_ConfigTypeDef;
```

涉及参数：

volume：控制系统音量 **注意：volume 设置为 0 时，系统会静音输出数值为 0**

Asdm_Mode：选择 ASDM 模块输入模式，0 选择 amic，1 选择 dmic。

Sample_rate：可选对应采样率。

Agc_mode：封装了常用的 agc 模式配置，可以通过模式选择载入不同的 agc 默认参数配置或关闭 agc。

Agc_config：用户选择 `ASDM_AgcOff` 时 agc 参数无效。当用户选择 `ASDM_AgcVoice` 或 `ASDM_AgcMusic` 模式时，用户可以通过该结构体获取默认的 agc 参数信息（传入 NULL 指针无效），当用户选择 `ASDM_AgcCustom` 模式时，用户可以通过该结构体传入自定义的 agc 参数信息.

具体参数如下：

```
typedef struct
{
    uint8_t Agc_MaxLevel; //最大增益
    uint8_t Agc_NoiseThreshold; //噪声阈值
    uint8_t Agc_NoiseEn; //噪声检测使能
    uint8_t Agc_NoiseHold; //噪声检测保持时间
```

```
    uint16_t Agc_NoiseFramTime; //噪声检测帧时间
    uint16_t Agc_PgaGate; //PGA 门限
} ASDM_AgcConfigTypeDef;
```

Fifo_Enable：使能 FIFO 功能，0 关闭，1 打开。Fifo_DmaTrigNum：FIFO 触发 DMA 传输的阈值，当 FIFO 内数据量大于该值时，DMA 会自动传输数据。（仅用于 dma 传输）FifoIntMask：FIFO 中断使能，打开对应的中断，可使用的中断类型参考 `ASDM_FifoMask` **注意，当 fifo 关闭时仅可开启 ASDM_RX_FLG_EN 中断**

3.3 编程指南

3.3.1 驱动接口

ASDM 模块控制：

- ASDM_Config ： 配置 ASDM 模块工作参数。
- ASDM_Enable ： 使能 ASDM 模块。

内部参数调整：

- ASDM_SetEdgeSample ： 设置 pdm 模块采样的边沿。
- ASDM_InvertInput ： 设置 pdm 模块输入信号是否反向。
- ASDM_SelMic ： 选择输入类型，模拟输入 pdm 输入。
- ASDM_SelDownSample ： PDM 模块降采样（设置 128 64 采样率）
- ASDM_SetSampleRate ： 根据采样类型设置采样频率和高通滤波器参数
- ASDM_SetHpfCoef ： 单独设置高通滤波器参数
- ASDM_SetAgcMode ： 设置 agc 模式，和 agc 参数
- ASDM_Reset ： 重置 ASDM 模块
- ASDM_MuteEn ： 设置静音使能

- ASDM_SetPgaGain：设置 pga 增益
- ADSM_VolZeroState：获取系统静音状态
- ASDM_SetVol：设置系统输出音量步进
- ASDM_GetAGCMute：获取 agc 静音状态

数据处理：

- ASDM_GetOutData：获取 ASDM 模块输出数据

ASDM 模块输出数据格式说明：

模块通过 32 位宽 FIFO 输出采样数据，每次输出包含两个 16 位采样值：

高 16 位（bit[31:16]）：当前最新采样数据（时间上较新）低 16 位（bit[15:0]）：上一拍历史采样数据（时间上较旧）即：每次从 FIFO 读取的 32 位数据 = {当前采样, 历史采样}，按时间顺序从新到旧排列。

- ASDM_ClrOverflowError：清除 FIFO 溢出错误标志位
- ASDM_ClrFifo：清除 FIFO
- ASDM_FifoEn：使能 FIFO
- ASDM_GetFifoCount：获取 FIFO 内数据量
- ASDM_IntMask：使能 ASDM 中断
- ASDM_GetIntStatus：获取 ASDM 中断状态
- ASDM_SetDMATrig：设置 DMA 触发条件

以上是 ASDM 模块的驱动接口，详细描述可以参考头文件声明。

3.3.2 代码示例

下面展示 ASDM 模块的基本用法，实际使用需要根据情况调整，对于大数据采样推荐使用 dma 进行数据搬运减小中断频率。

注意输入时钟的 PLL 和 DIV 配置不在此表述可参考 `sysctrl` 接口,`SYSCTRL_UpdateAsdmClk` 用来设置 ASDM 模块基于 fast_clk 的输入分频，以下代码示例中假设调整 PLL 和调用 `SYSCTRL_UpdateAsdmClk` 设置分频后时钟为 12.288Mhz。

3.3.2.1 Dmic 中断获取 mic 数据输出

```
static uint32_t ASDM_cb_isr(void *user_data)
{
    while (ASDM_GetFifoCount(APB_ASDM))
        {
            uint32_t DataGet = ASDM_GetOutData(APB_ASDM);
            uint16_t next_data = (DataGet)>>16;
            uint16_t data = (DataGet)&0xffff;
        }
}

ASDM_ConfigTypeDef AsdmConfig = {
    .Agc_config = 0,
    .Asdm_Mode = 1,
    .Agc_mode = ASDM_AgcVoice,
    .Sample_rate = ASDM_SR_16k,
    .Fifo_Enable = 1,
    .volume = 0x3fff,
    .FifoIntMask = ASDM_FIFO_FULL_EN,
};

void ASDM_InitPre(void)
{
    int ret;
    SYSCTRL_ClearClkGate(SYSCTRL_ClkGate_APB_GPIO0);
    SYSCTRL_ClearClkGate(SYSCTRL_ClkGate_APB_PinCtrl);
    SYSCTRL_ClearClkGate(SYSCTRL_ITEM_APB_ASDM);
    PINCTRL_SelAsdm(GIO_GPIO_13,GIO_GPIO_14);

    ret = ASDM_Config(APB_ASDM, &AsdmConfig);
    if (ret)
        printf("ASDM_Config error %d\n", ret);
    platform_set_irq_callback(PLATFORM_CB_IRQ_ASDM, ASDM_cb_isr, 0);
```

```
    ASDM_Enable(APB_ASDM,1);
}
```

3.3.2.2 Amic 中断获取 mic 数据输出

```
static uint32_t ASDM_cb_isr(void *user_data)
{
    while (ASDM_GetFifoCount(APB_ASDM))
        {
            uint32_t DataGet = ASDM_GetOutData(APB_ASDM);
            uint16_t next_data = (DataGet)>>16;
            uint16_t data = (DataGet)&0xffff;
        }
}

ASDM_ConfigTypeDef AsdmConfig = {
    .Agc_config = 0,
    .Asdm_Mode = 0,
    .Agc_mode = ASDM_AgcVoice,
    .Sample_rate = ASDM_SR_16k,
    .Fifo_Enable = 1,
    .volume = 0x3fff,
    .FifoIntMask = ASDM_FIFO_FULL_EN,
};

void ASDM_InitPre(void)
{
    int ret;
    SYSCTRL_ClearClkGate(SYSCTRL_ITEM_APB_ASDM);
    SYSCTRL_ClearClkGate(SYSCTRL_ClkGate_APB_GPIO0);//gpio0
    SYSCTRL_ClearClkGate(SYSCTRL_ClkGate_APB_PinCtrl);
```

```
    PINCTRL_EnableAnalog(GIO_GPIO_11); // vref pad
    PINCTRL_EnableAnalog(GIO_GPIO_12); // mic bias pad
    PINCTRL_EnableAnalog(GIO_GPIO_13); // mic in p
    PINCTRL_EnableAnalog(GIO_GPIO_14); // mic in n

    SYSCTRL_SetAdcVrefSel(0x1);
    SYSCTRL_EnableAsdmVrefOutput(1);
    SYSCTRL_EnableInternalVref(1);

    ret = ASDM_Config(APB_ASDM, &AsdmConfig);
    if (ret)
        printf("ASDM_Config error %d\n", ret);
    platform_set_irq_callback(PLATFORM_CB_IRQ_ASDM, ASDM_cb_isr, 0);

    ASDM_Enable(APB_ASDM,1);
}
```

3.3.2.3 Amic DMA 配置

```
#include "pingpong.h"

#define DMA_CHANNEL             0
static DMA_PingPong_t PingPong;

ASDM_ConfigTypeDef AsdmConfig = {
    .Agc_config = 0,
    .Asdm_Mode = 0,
    .Agc_mode = ASDM_AgcVoice,
    .Sample_rate = ASDM_SR_16k,
    .Fifo_Enable = 1,
    .volume = 0x3fff,
    .FifoIntMask = 0,
```

```
    .Fifo_DmaTrigNum = 4,
};

static uint32_t DMA_cb_isr(void *user_data)
{
    uint32_t state = DMA_GetChannelIntState(DMA_CHANNEL);
    DMA_ClearChannelIntState(DMA_CHANNEL, state);

    uint32_t *buff = DMA_PingPongIntProc(&PingPong, DMA_CHANNEL);
    uint32_t tranSize = DMA_PingPongGetTransSize(&PingPong);

    return 0;
}
void test(void)
{
    int ret;
    SYSCTRL_ClearClkGate(SYSCTRL_ITEM_APB_ASDM);
    SYSCTRL_ClearClkGate(SYSCTRL_ClkGate_APB_GPIO0);//gpio0
    SYSCTRL_ClearClkGate(SYSCTRL_ClkGate_APB_PinCtrl);

    PINCTRL_EnableAnalog(GIO_GPIO_11); // vref pad
    PINCTRL_EnableAnalog(GIO_GPIO_12); // mic bias pad
    PINCTRL_EnableAnalog(GIO_GPIO_13); // mic in p
    PINCTRL_EnableAnalog(GIO_GPIO_14); // mic in n

    SYSCTRL_SetAdcVrefSel(0x1);
    SYSCTRL_EnableAsdmVrefOutput(1);
    SYSCTRL_EnableInternalVref(1);

    ret = ASDM_Config(APB_ASDM, &AsdmConfig);
    if (ret)
        printf("ASDM_Config error %d\n", ret);

    SYSCTRL_ClearClkGateMulti((1 << SYSCTRL_ITEM_APB_DMA));
```

```
    SYSCTRL_SelectUsedDmaItems(1 << SYSCTRL_DMA_ASDM_RX);
    DMA_PingPongSetup(&PingPong, SYSCTRL_DMA_ASDM_RX, 80, 8);
    platform_set_irq_callback(PLATFORM_CB_IRQ_DMA, DMA_cb_isr, 0);
    DMA_PingPongEnable(&PingPong, DMA_CHANNEL);

    ASDM_Enable(APB_ASDM,1);
}
```

第四章　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。

4.1　功能描述

4.1.1　特点

- 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

4.1.2　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。

4.1.3 搬运类型

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

4.1.4 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。

  注意：当 DMA 传输链表有效时，TC 中断只会在传输完成时产生，不会在传输过程中产生。

- IntEachDesc：链转换结束中断。当 DMA 传输链表有效时，每当一个描述符传输完成时产生。

  注意：中断触发时会停止 DMA 传输，需要在中断重新使能通道才会继续进行链式 DMA 传输。

4.1.5 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。

4.1.6 数据方式

- normal mode
- handshake mode

DMA 搬运前需要对数据源和数据目的地址的数据方式进行配置。

数据方式的选择有如下建议：

1. 从内存搬运数据选择 normal mode；

2. 从外设 FIFO 搬运数据选择 handshake mode，同时要和外设协商好 BurstSize，支持 2^n(n = 0-7) 大小的 BurstSize。

4.1.7 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。

4.1.8 总线仲裁

DMA 支持总线仲裁，即多个 DMA 通道共享总线，互不干扰。当使能多个 DMA 通道时，DMA 会自动进行总线仲裁，使得总线上同时只有一个 DMA 通道在工作。为了防止总线单通道阻塞，DMA 会根据每个传输的 burstSize 大小，自动切换通道数据传输，即通道每传输一个 burstSize 的数据，切换到下一个通道继续传输。

4.2 使用方法

4.2.1 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，以及搬运类型，即 memory 和 peripheral 的关系。

4.2.1.1 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

4.2.1.2 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

4.2.2 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 中断则需要在每个中断里使能 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

4.2.3 握手请求

- 握手请求：DMA 请求握手信号，请求对方传输数据。当进行外设到内存数据传输，内存到外设数据传输以及外设到外设数据传输时，都需要进行握手请求。
- 握手请求的触发条件：

  DMA 用作到外设到 FIFO 搬运数据时，当 FIFO 内数据计数增加 waterlevel 时，外设会发出数据请求，DMA 开始将数据从外设 FIFO 搬运到内存。

  DMA 用作 FIFO 到外设数据传输时，当 FIFO 内数据计数减小到 waterlevel 时，DMA 会发出数据请求，DMA 开始将数据从内存搬运到外设 FIFO。

  例如：

  1. 使用 DMA 将 RX 接收数据搬运到内存：UART 设置 RX FIFO waterlevel 为 4，当接收到 4 个字节数据时，UART 会发出数据请求，DMA 开始将数据从外设 FIFO 搬运到内存。
  2. 使用 DMA 将内存搬运到外设触发 TX 发送：UART 设置 TX FIFO waterlevel 为 4，当 fifo 内的数据计数到达 4 时，UART 会发出数据请求，DMA 开始将数据从内存搬运到外设 FIFO。

- 握手请求的配置：通常情况无需关心，使用默认配置。

  当需要使能的 DMA 搬运配置为 pdm,adc,pwm_channel0,pwm_channel2,qdec_req2 外设时，需要手动重新配置握手请求表，再使用对应接口初始化 DMA. **详情请参照 SYSCTRL DMA 规划章节。**

4.3 编程指南

4.3.1 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
- DMA_ConfigSrcBurstSize：DMA 配置通道 burstSize 接口

4.3.2 代码示例

4.3.2.1 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。

4.3.2.2 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 ING20.";
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 ING20.” 字符串。

4.3.2.3 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。

对于大量且连续的数据搬运，如音频，我们推荐选用 DMA 乒乓搬运的方式。

4.3.2.3.1 DMA 乒乓搬运接口 在最新 SDK 中我们已将 DMA 乒乓搬运封装成标准接口，方便开发者调用，提高开发效率。

使用时请添加 `pingpong.c` 文件，并包含 `pingpong.h` 文件。

- DMA_PingPongSetup：DMA 乒乓搬运建立接口
- DMA_PingPongIntProc：DMA 乒乓搬运标准中断处理接口
- DMA_PingPongGetTransSize：获取 DMA 乒乓搬运数据量接口
- DMA_PingPongEnable：DMA 乒乓搬运使能接口

- DMA_PingPongDisable：DMA 乒乓搬运去使能接口

更多程序开发者可以参考 voice_remote_ctrl 例程。

4.3.2.3.2 DMA 乒乓搬运示例

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。

```
#include "pingpong.h"
#define CHANNEL_ID  0
DMA_PingPong_t PingPong;

static uint32_t DMA_cb_isr(void *user_data)
{
    uint32_t state = DMA_GetChannelIntState(CHANNEL_ID);
    DMA_ClearChannelIntState(CHANNEL_ID, state);

    // call 'DMA_PingPongIntProc' to get the pointer of data-buff.
    uint32_t *rr = DMA_PingPongIntProc(&PingPong, CHANNEL_ID);
    uint32_t i = 0;
    // call 'DMA_PingPongGetTransSize' to kwon how much data in data-buff.
    uint32_t transSize = DMA_PingPongGetTransSize(&PingPong);
    while (i < transSize) {
        // do something with data 'rr[i]'
        i++;
    }

    return 0;
}

void DMA_Test(void)
{
    // call 'DMA_PingPongSetup' to setup ping-pong DMA.
    DMA_PingPongSetup(&PingPong, SYSCTRL_DMA_I2S_RX, 100, 8);
```

```
    platform_set_irq_callback(PLATFORM_CB_IRQ_DMA, DMA_cb_isr, 0);

    // call 'DMA_PingPongEnable' to start ping-pong DMA transmission.
    DMA_PingPongEnable(&PingPong, CHANNEL_ID);
    I2S_ClearRxFIFO(APB_I2S);
    I2S_DMAEnable(APB_I2S, 1, 1);
    I2S_Enable(APB_I2S, 0, 1);   // Enable I2s finally
}
```

停止 DMA 乒乓搬运可以调用以下接口：

```
void Stop(void)
{
    // call 'DMA_PingPongEnable' to disable ping-pong DMA transmission.
    DMA_PingPongDisable(&PingPong, CHANNEL_ID);
    I2S_Enable(APB_I2S, 0, 0);
    I2S_DMAEnable(APB_I2S, 0, 0);
}
```

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。ING20XX 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，分为 GPIO0 {IO0-IO20} 和 GPIO1 {IO21-IO41}。

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

- 设置单个输出

  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);
  ```

- 同时设置所有输出

  通过 GIO_WriteAll 可同时设置所有 GPIO 输出的电平信号：

  ```
  void GIO_WriteAll(const uint64_t value);
  ```

- 将若干输出置为高电平

  通过 GIO_SetBits 可同时将若干 GPIO 输出置为高电平：

  ```
  void GIO_SetBits(const uint64_t index_mask);
  ```

  比如要将 GPIO 0、5 置为高电平，那么 index_mask 为 (1 << 0) | (1 << 5)。

- 将若干输出置为低电平

  通过 GIO_ClearBits 可同时将若干 GPIO 输出置为低电平：

```
void GIO_ClearBits(const uint64_t index_mask);
```

index_mask 的使用与 GIO_SetBits 相同。

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
{
    GIO_INT_EDGE,   // 边沿触发
    GIO_INT_LOGIC   // 电平触发
} GIO_IntTriggerType_t;
```

- 例如将 GPIO 0 配置为上升沿触发中断

```
GIO_ConfigIntSource(GIO_GPIO_0,
  ...LOGIC_HIGH_OR_RISING_EDGE,
  GIO_INT_EDGE);
```

- 例如将 GPIO 0 配置为双沿触发中断

```
GIO_ConfigIntSource(GIO_GPIO_0,
  ...LOGIC_HIGH_OR_RISING_EDGE | ..._HIGH_OR_RISING_EDGE,
  GIO_INT_EDGE);
```

- 例如将 GPIO 0 配置为高电平触发

```
GIO_ConfigIntSource(GIO_GPIO_0,
  ...LOGIC_HIGH_OR_RISING_EDGE,
  GIO_INT_LOGIC);
```

5.2.5 处理中断状态

用 `GIO_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 `GIO_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 `GIO_ClearIntStatus` 消除某个 GPIO 上中断状态，用 `GIO_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 `GIO_DebounceCtrl` 配置输入去抖参数，每个 GPIO 硬件模块使用单独的参数：

```
void GIO_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,
  GIO_DbClk_t clk         // 防抖时钟选择
  );
```

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

防抖时钟共有 2 种：

```
typedef enum
{
    GIO_DB_CLK_32K,     // 使用 32k 时钟
    GIO_DB_CLK_PCLK,    // 使用快速 PCLK
} GIO_DbClk_t;
```

快速 PCLK 的具体频率参考SYSCTRL。

通过 GIO_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 $5/32768 \approx 0.15(ms)$ 的“毛刺”：

```
GIO_DebounceCtrl(1, 4, GIO_DB_CLK_32K);
GIO_DebounceEn(GIO_GPIO_0, 1);
```

5.2.7 低功耗保持状态

所有 GPIO 可以在芯片进入低功耗状态后保持状态。根据功能的不同，存在两种类型的 GPIO，总结于表 5.1。

表 5.1: GPIO 的保持与唤醒功能

序号	分类	低功耗保持	DEEP 唤醒源	DEEPER 唤醒源
0	A	Y	Y	Y

序号	分类	低功耗保持	DEEP 唤醒源	DEEPER 唤醒源
1	B	Y	Y	
2	B	Y	Y	
3	B	Y	Y	
4	B	Y	Y	
5	A	Y	Y	Y
6	A	Y	Y	Y
7	B	Y	Y	
8	B	Y	Y	
9	B	Y	Y	
10	B	Y	Y	
11	B	Y	Y	
12	B	Y	Y	
13	B	Y	Y	
14	B	Y	Y	
15	B	Y	Y	
16	B	Y	Y	
17	B	Y	Y	
18	B	Y	Y	
19	B	Y	Y	
20	B	Y	Y	
21	A	Y	Y	Y
22	A	Y	Y	Y
23	A	Y	Y	Y
24	B	Y	Y	
25	B	Y	Y	
26	B	Y	Y	
27	B	Y	Y	
28	B	Y	Y	
29	B	Y	Y	
30	B	Y	Y	
31	B	Y	Y	
32	A	Y	Y	Y
33	A	Y	Y	Y
34	B	Y	Y	

序号	分类	低功耗保持	DEEP 唤醒源	DEEPER 唤醒源
35	B	Y	Y	
36	C	Y		
37	C	Y		
38	C	Y		
39	C	Y		
40	C	Y		
41	C	Y		

- 对于 A 型 GPIO

  使用 `GIO_EnableRetentionGroupA` 使能或禁用 A 型 GPIO 的低功耗状态保持功能。使能状态保持功能时，IOMUX 与之相关的所有配置都被锁存，即使处于各种低功耗状态下。使能后，对这些 GPIO 的配置再做修改无法生效。只有禁用保持功能后，才会生效。使能后，低功耗状态下这些 GPIO 不掉电。

```
void GIO_EnableRetentionGroupA(uint8_t enable);
```

- 对于 B 型 GPIO

  使用 `GIO_EnableRetentionGroupB` 使能或禁用 B 型 GPIO 的低功耗状态保持功能。使能状态保持功能时，与之相关的配置（输出值 —— 对于 IO 方向为输出的 GPIO、上下拉）都被锁存，即使处于各种低功耗状态下。使能后，对这些 GPIO 的配置再做修改无法生效。只有禁用保持功能后，才会生效。

  说明：对于 IO 方向为输入的 GPIO，使能低功耗状态保持功能并进入低功耗状态后，确实可以保持其 IO 输入功能，但是并不能产生实际效果（产生中断或者唤醒系统）。

```
void GIO_EnableRetentionGroupB(uint8_t enable);
```

使用 `GIO_EnableHighZGroupB` 使能或禁用 B 型 GPIO 的低功耗高阻功能。使能该功能后，IO 方向为输出的 B 型 GPIO 处于高阻状态，对这些 GPIO 的配置再做修改无法生效。只有禁用保持功能后，才会生效。

```
void GIO_EnableHighZGroupB(uint8_t enable);
```

这两个功能是互斥的，比如先后调用这个两个函数，先使能保持再使能高阻，则只有高阻功能生效。

- 对于 C 型 GPIO

  不支持低功耗保持。

这些功能只支持对所有 GPIO 同时使能或禁用，不能对单个 GPIO 分别控制。

5.2.8 睡眠唤醒源

一部分 GPIO 支持作为低功耗状态的唤醒源：出现指定的电平信号时，将系统从低功耗状态下唤醒。对于深度睡眠（DEEP Sleep），这些 GPIO （{0...35}）可作为唤醒源，包括所有的 A 型 GPIO 和部分 B 型 GPIO；对于更深度的睡眠（DEEPER Sleep），所有的 A 型 GPIO 可作为唤醒源，参见表 5.1。

- 深度睡眠唤醒源

  使用 `GIO_EnableDeepSleepWakeupSource` 使能（或停用）某个 GPIO 的唤醒功能。其中，`io_index` 应该为支持该功能的 GPIO 的编号；`mode` 为唤醒方式；对于 A 型 GPIO，忽略 `pull` 参数，其上下拉由 `PINCTRL_Pull` 控制。共支持以下 5 种唤醒方式：

  - `GIO_WAKEUP_MODE_LOW_LEVEL`：通过低电平唤醒；
  - `GIO_WAKEUP_MODE_HIGH_LEVEL`：通过高电平唤醒；
  - `GIO_WAKEUP_MODE_RISING_EDGE`：通过上升沿唤醒；
  - `GIO_WAKEUP_MODE_FALLING_EDGE`：通过下降沿唤醒；
  - `GIO_WAKEUP_MODE_ANY_EDGE`：通过任意边沿唤醒，即上升沿或下降沿皆可。

  当使用电平唤醒时，电平与上下拉应该相互配合：高电平唤醒时，使用下拉；低电平唤醒时，使用上拉。当使用边沿唤醒时，注意脉冲需要维持至少 100 μs。

  对于 B 型 GPIO，唤醒源与低功耗保持为两套独立的电路，因此：1）上下拉独立于`PINCTRL_Pull` ，而且一直生效 —— 无论是否处于低功耗状态，所以，不要用 `PINCTRL_Pull` 配置相反的上下拉；2）使能或禁用 B 型 GPIO 的低功耗保持或者高阻功

能不影响这里的唤醒源设置；3）不要将某 IO 同时设为输出和唤醒源，比如将某 IO 同时设为输出高电平、高电平唤醒，使能保持功能并进入低功耗时，这个 IO 上保持电路所输出的高电平将传输到唤醒源电路并触发唤醒。

```
int GIO_EnableDeepSleepWakeupSource(
  GIO_Index_t io_index,      // GPIO 编号
  uint8_t enable,            // 使能 (1)/禁用 (0)
  uint8_t mode ,             // 触发方式
  pinctrl_pull_mode_t pull   // 上下拉配置
);
```

任意一个唤醒源检测到唤醒电平就会将系统从低功耗状态唤醒。

- 更深度睡眠唤醒源

使用 `GIO_EnableDeeperSleepWakeupSourceGroupA` 使能（或停用）A 型 GPIO 的更深度睡眠唤醒功能。其中，`level` 为触发电平，1 为高电平唤醒，0 为低电平唤醒。使能后，所有 IO 方向为输入的 A 型 GPIO 都将作为唤醒源。任意一个唤醒源检测到唤醒电平就会将系统从低功耗状态唤醒。

```
void GIO_EnableDeeperSleepWakeupSourceGroupA(
  uint8_t enable,            // 使能 (1)/禁用 (0)
  uint8_t level              // 触发唤醒的电平
);
```

第六章　I2C 总线

I2C(Inter － Integrated Circuit) 是一种通用的总线协议。它是一种只需要两个 IO 并且支持多主多从的双向两线制总线协议标准。

6.1　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

6.2　使用说明

I2C Master 有两种使用方式可以选择：

- 方法 1：以blocking的方式操作 I2C（读写操作完成后 API 才会返回），针对 I2C Master 读取外设的单一场景。
- 方法 2：使用I2C 中断操作 I2C，需要在中断中操作读写的数据。

I2C Slave 则需要使用方法 2，以中断方式操作。

6.2.1　方法 1（blocking）

6.2.1.1　IO 配置

1. IO 选择，并非所有 IO 都可以映射成 I2C，请查看对应 datasheet 获取可用 IO。

2. 操作模块之前需要打开对应模块的时钟。使用 `SYSCTRL_ClearClkGateMulti()` 打开时钟。请查看下述代码示例，需要注意的是：

   - `SYSCTRL_ITEM_APB_I2C0` 对应 I2C0，如果使用 I2C1 需要对应修改。

3. I2C IO 需要配置为默认上拉，芯片内置上拉可以通过 `PINCTRL_Pull()` 实现（已经包含在 `PINCTRL_SelI2cIn()` 中）。实际应用中建议在外部实现上拉（可以获得更快的响应速度和时钟）。

4. 将选定 IO 映射到 I2C 模块，两个 IO 均需要配置为双向（输入 + 输出）。请参考下述代码实现（`PINCTRL_SelI2cIn()` 中包含了输入 + 输出的配置）。

以下示例可以将指定 IO 映射成 I2C 引脚：

```
#define I2C_SCL         GIO_GPIO_10
#define I2C_SDA         GIO_GPIO_11

void setup_peripherals_i2c_pin(void)
{
  SYSCTRL_ClearClkGateMulti( (1 << SYSCTRL_ITEM_APB_I2C0)
                           | (1 << SYSCTRL_ITEM_APB_PinCtrl));
  PINCTRL_SelI2cIn(I2C_PORT_0,I2C_SCL,I2C_SDA);
}
```

6.2.1.2 模块配置

- 参考：`\ING_SDK\sdk\src\BSP\iic.c`
- 包含 API：

```
/**
 * @brief Init an I2C peripheral
 *
 * @param[in] port              I2C peripheral ID
 */
```

```
void i2c_init(const i2c_port_t port);

/**
 * @brief Write data to an I2C slave
 *
 * @param[in] port              I2C peripheral ID
 * @param[in] addr              address of the slave
 * @param[in] byte_data         data to be written
 * @param[in] length            data length
 * @return                      0 if success else non-0 (e.g. time out)
 */
int i2c_write(const i2c_port_t port, uint8_t addr, const uint8_t *byte_data,
int16_t length);

/**
 * @brief Read data from an I2C slave
 *
 * @param[in] port              I2C peripheral ID
 * @param[in] addr              address of the slave
 * @param[in] write_data        data to be written before reading
 * @param[in] write_len         data length to be written before reading
 * @param[in] byte_data         data to be read
 * @param[in] length            data length to be read
 * @return                      0 if success else non-0 (e.g. time out)
 */
int i2c_read(const i2c_port_t port, uint8_t addr, const uint8_t *write_data,
int16_t write_len, uint8_t *byte_data, int16_t length);
```

- 使用方法：
  - 配置 IO。
  - 初始化 I2C 模块：

```
i2c_init(I2C_PORT_0);
```

– 写数据：

```
i2c_write(I2C_PORT_0, ADDRESS, write_data, DATA_CNT);
```

当读操作完成后 API 才会返回，为了避免长时间等待 ACK 等意外情况，使用 I2C_HW_TIME_OUT 来控制 blocking 的时间。

– 读数据：

```
i2c_read(I2C_PORT_0, ADDRESS, write_data, DATA_CNT, read_data, DATA_CNT);
```

如果 write_data 不为空，则会首先执行写操作，然后再执行读操作。

6.2.2 方法 2（Interrupt）

I2C Slave 以及 I2C Master 方法 2 需要使用 Interrupt 方式。

6.2.2.1 IO 配置

1. IO 选择，并非所有 IO 都可以映射成 I2C，请查看对应 datasheet 获取可用 IO。
2. 操作模块之前需要打开对应模块的时钟。使用 `SYSCTRL_ClearClkGateMulti()` 打开时钟。请查看下述代码示例，需要注意的是：
   - `SYSCTRL_ITEM_APB_I2C0` 对应 I2C0，如果使用 I2C1 需要对应修改。
3. I2C IO 需要配置为默认上拉，芯片内置上拉，可以通过 `PINCTRL_Pull()` 实现（已经包含在 `PINCTRL_SelI2cIn()` 中）。实际应用中建议在外部实现上拉（可以获得更快的响应速度和时钟）。
4. 将选定 IO 映射到 I2C 模块，两个 IO 均需要配置为双向（输入 + 输出）。请参考下述代码实现（`PINCTRL_SelI2cIn()` 中包含了输入 + 输出的配置）。

5. 如果需要使用中断，使用 `platform_set_irq_callback()` 配置应用中断。

以下示例可以将指定 IO 映射成 I2C 引脚，并配置了中断回调函数：

```
#define I2C_SCL         GIO_GPIO_10
#define I2C_SDA         GIO_GPIO_11

void setup_peripherals_i2c_pin(void)
{
  SYSCTRL_ClearClkGateMulti( (1 << SYSCTRL_ITEM_APB_I2C0)
                           | (1 << SYSCTRL_ITEM_APB_PinCtrl));

  PINCTRL_SelI2cIn(I2C_PORT_0,I2C_SCL,I2C_SDA);

  platform_set_irq_callback(PLATFORM_CB_IRQ_I2C0, peripherals_i2c_isr, NULL);

}
```

6.2.2.2 模块初始化

I2C 模块初始化需要通过以下 API 来实现：

1. 通过 `I2C_Config()` 选择 Master/Slave 角色，以及 I2C 地址。
2. 使用 `I2C_ConfigClkFrequency()` 更改时钟配置。
3. 根据使用场景打开相应的中断 `I2C_IntEnable()`：
   - I2C_INT_CMPL：该中断的触发代表传输结束。
   - I2C_INT_FIFO_FULL：代表 RX FIFO 中有数据。
   - I2C_INT_FIFO_EMPTY：TX FIFO 空，需要填充发送数据。
   - I2C_INT_ADDR_HIT: 总线上检测到了匹配的地址。
4. 使能 I2C 模块 `I2C_Enable()`。

6.2.2.3 触发传输

1. 调用 `I2C_CtrlUpdateDirection()` 设置传输方向。

   - I2C_TRANSACTION_SLAVE2MASTER：Slave 发送数据，Master 读取数据。
   - I2C_TRANSACTION_MASTER2SLAVE：Master 发送数据，Slave 读取数据。

2. 通过 `I2C_CtrlUpdateDataCnt()` 设置该次传输的数据大小，最大 8 个 bit（256 字节），以字节为单位。

3. 使用 `I2C_CommandWrite()` 触发 I2C 传输：

   - I2C_COMMAND_ISSUE_DATA_TRANSACTION：Master 有效，触发数据传输。
   - I2C_COMMAND_RESPOND_ACK：在接收到的字节后发送一个 ACK。
   - I2C_COMMAND_RESPOND_NACK：在接收到的字节后发送一个 NACK。
   - I2C_COMMAND_CLEAR_FIFO：清空 FIFO。
   - I2C_COMMAND_RESET：reset I2C 模块。

6.2.2.4 中断配置

数据的读写需要在中断中进行。

1. 在中断触发后，通过 `I2C_GetIntState()` 来读取中断状态。不同状态需要参考 `I2C_STATUS_xxx` 定义。

   - I2C_STATUS_FIFO_FULL：读取数据，并通过 `I2C_FifoEmpty()` 判断 FIFO 状态。
   - I2C_STATUS_FIFO_EMPTY：填充数据，并通过 `I2C_FifoFull()` 判断 FIFO 状态。
   - I2C_STATUS_CMPL：一次传输数据结束，判断 FIFO 中是否有剩余数据并读取。
   - I2C_STATUS_ADDRHIT：地址匹配，在该中断中通过 `I2C_GetTransactionDir()` 判断传输的方向。
     - I2C_TRANSACTION_MASTER2SLAVE：代表 Master 发送，Slave 则需要读取数据。
     - I2C_TRANSACTION_SLAVE2MASTER：代表 Slave 需要发送，Master 读取数据。

2. FIFO 相关中断不需要清除标志，其余中断需要通过 `I2C_ClearIntState()` 来清除标志，避免中断重复触发。

6.2.2.5 编程指南

6.2.2.5.1 场景 1：Master 只读，Slave 只写，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 IO，请参考IO 配置。

6.2.2.5.1.1 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 read_data[DATA_CNT] = {0,};
uint8_t read_data_cnt = 0;
```

- 初始化 I2C 模块

  此处配置为 Master, 7bit 地址，并打开了传输结束中断和 FIFO FULL 中断。

```
#define ADDRESS (0x71)
void setup_peripherals_i2c_module(void)
{
  I2C_Config(APB_I2C0,I2C_ROLE_MASTER,I2C_ADDRESSING_MODE_07BIT,ADDRESS);
  I2C_ConfigClkFrequency(APB_I2C0,I2C_CLOCKFREQUENY_STANDARD);
  I2C_Enable(APB_I2C0,1);
  I2C_IntEnable(APB_I2C0,(1<<I2C_INT_CMPL)|(1 << I2C_INT_FIFO_FULL));
}
```

- Master 中断实现

  中断中通过 I2C_STATUS_FIFO_FULL 来读取接收到的数据。当 I2C_STATUS_CMPL 触发时，当前传输结束，需要判断 FIFO 中有没有剩余数据。

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

```
  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);
    }
  }

  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;
}
```

- Master 触发传输

  首先需要设置传输方向，此处是 I2C_TRANSACTION_SLAVE2MASTER，即代表 Slave 发送数据，Master 读取数据。

```
void peripheral_i2c_send_data(void)
{
  I2C_CtrlUpdateDirection(APB_I2C0,I2C_TRANSACTION_SLAVE2MASTER);
  I2C_CtrlUpdateDataCnt(APB_I2C0, DATA_CNT);
  I2C_CommandWrite(APB_I2C0, I2C_COMMAND_ISSUE_DATA_TRANSACTION);
}
```

- 使用流程

- 设置 IO，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。

6.2.2.5.1.2 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;
```

- 初始化 I2C 模块

  对于 Slave，需要打开 I2C_INT_ADDR_HIT，此中断的触发代表收到了匹配的地址。

```
#define ADDRESS (0x71)
void setup_peripherals_i2c_module(void)
{
  I2C_Config(APB_I2C0,I2C_ROLE_SLAVE,I2C_ADDRESSING_MODE_07BIT,ADDRESS);
  I2C_Enable(APB_I2C0,1);
  I2C_IntEnable(APB_I2C0,(1<<I2C_INT_ADDR_HIT)|(1<<I2C_INT_CMPL));
}
```

- Slave 中断实现以及发送数据

  1. 首先需要等待 I2C_STATUS_ADDRHIT 中断,在该中断中通过 `I2C_GetTransactionDir()` 判断传输的方向。
     - I2C_TRANSACTION_MASTER2SLAVE：代表 Slave 需要读取数据，打开 I2C_INT_FIFO_FULL 中断。
     - I2C_TRANSACTION_SLAVE2MASTER：代表 Slave 需要发送，打开 I2C_INT_FIFO_EMPTY。
  2. 如果是 Slave 写操作，则会触发 I2C_STATUS_FIFO_EMPTY 中断，此时填写需要发送的数据，直到 FIFO 满。

3. 等待 I2C_STATUS_CMPL 中断，该中断的触发代表传输结束，在中断中关闭打开的 FIFO 中断。

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

  if(status & (1 << I2C_STATUS_ADDRHIT))
  {
    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));
  }

  if(status & (1 << I2C_STATUS_FIFO_EMPTY))
  {
    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(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;
}
```

- 使用流程：
  - 设置 IO，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。

6.2.2.5.2 场景 2：Master 只写，Slave 只读，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 IO，请参考IO 配置。

6.2.2.5.2.1 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;
```

- 初始化 I2C 模块

  此处配置为 Master, 7bit 地址，并打开了传输结束中断和 FIFO EMPTY 中断。I2C_INT_FIFO_EMPTY 中断用来发送数据。

```
#define ADDRESS (0x71)
void setup_peripherals_i2c_module(void)
{
  I2C_Config(APB_I2C0,I2C_ROLE_MASTER,I2C_ADDRESSING_MODE_07BIT,ADDRESS);
  I2C_ConfigClkFrequency(APB_I2C0,I2C_CLOCKFREQUENY_STANDARD);
  I2C_Enable(APB_I2C0,1);
  I2C_IntEnable(APB_I2C0,(1<<I2C_INT_CMPL)|(1 << I2C_INT_FIFO_EMPTY));
}
```

- Master 中断实现

  1. 中断中通过 I2C_STATUS_FIFO_EMPTY 来发送数据。每次填充 FIFO 直到 FIFO 为满，当填充完最后一个数据后，需要关掉 I2C_INT_FIFO_EMPTY，否则中断会继续触发。
  2. 当 I2C_STATUS_CMPL 触发时，当前传输结束。

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

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

  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;
}
```

- Master 触发传输

  首先需要设置传输方向，I2C_TRANSACTION_MASTER2SLAVE，即代表 Master 发送数据，Slave 读取数据。注意！！！中断发送数据完成后关闭了 I2C_INT_FIFO_EMPTY（FIFO 空）中断，如果需要开始新一次传输需要打开中断。打开 I2C_INT_FIFO_EMPTY：I2C_IntEnable(APB_I2C0,(1 « I2C_INT_FIFO_EMPTY));

```
void peripheral_i2c_send_data(void)
{
  I2C_CtrlUpdateDirection(APB_I2C0,I2C_TRANSACTION_MASTER2SLAVE);
  I2C_CtrlUpdateDataCnt(APB_I2C0, DATA_CNT);
  I2C_CommandWrite(APB_I2C0, I2C_COMMAND_ISSUE_DATA_TRANSACTION);
}
```

- 使用流程
  - 设置 IO，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。

6.2.2.5.2.2 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;
```

- 初始化 I2C 模块

  对于 Slave，需要打开 I2C_INT_ADDR_HIT，此中断的触发代表收到了匹配的地址。

```
#define ADDRESS (0x71)
void setup_peripherals_i2c_module(void)
{
  I2C_Config(APB_I2C0,I2C_ROLE_SLAVE,I2C_ADDRESSING_MODE_07BIT,ADDRESS);
  I2C_Enable(APB_I2C0,1);
  I2C_IntEnable(APB_I2C0,(1<<I2C_INT_ADDR_HIT)|(1<<I2C_INT_CMPL));
}
```

- Slave 中断实现以及接收数据

  1. 首先需要等待 I2C_STATUS_ADDRHIT 中断,在该中断中通过 `I2C_GetTransactionDir()` 判断传输的方向。
     - I2C_TRANSACTION_MASTER2SLAVE：代表 Slave 需要读取数据，打开 I2C_INT_FIFO_FULL 中断。
     - I2C_TRANSACTION_SLAVE2MASTER：代表 Slave 需要发送，打开 I2C_INT_FIFO_EMPTY。
  2. I2C_STATUS_FIFO_FULL 的触发，代表 FIFO 中有接收到的数据，读取数据，直到 FIFO 变空。
  3. I2C_STATUS_CMPL 代表传输结束，检查 FIFO 中有没有剩余数据，并且关掉 FIFO 中断避免再次触发。

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

  if(status & (1 << I2C_STATUS_ADDRHIT))
  {
    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));
  }

  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);
    }
  }

  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;
}
```

- 使用流程
  - 设置 IO，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。

6.2.2.5.3 场景 3：Master 只读，Slave 只写，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 IO，请参考IO 配置。

6.2.2.5.3.1 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,};
```

- 初始化 I2C 模块

  此处配置为 Master, 7bit 地址，并打开了传输结束中断，由于使用 DMA 传输，因此不需要打开 FIFO 相关中断。其余配置和场景 1 相同。

```
#define ADDRESS (0x71)
void setup_peripherals_i2c_module(void)
{
  I2C_Config(APB_I2C0,I2C_ROLE_MASTER,I2C_ADDRESSING_MODE_07BIT,ADDRESS);
  I2C_ConfigClkFrequency(APB_I2C0,I2C_CLOCKFREQUENY_STANDARD);
  I2C_Enable(APB_I2C0,1);
  I2C_IntEnable(APB_I2C0,(1<<I2C_INT_CMPL));
}
```

- 初始化 DMA 模块

  使用前需要配置 DMA 模块。

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

- Master 中断实现

  等待 I2C_STATUS_CMPL 中断的触发，该中断代表传输结束。

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

  if(status & (1 << I2C_STATUS_CMPL))
  {
```

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

  return 0;
}
```

- Master DMA 设置

  该 API 实现了 I2C0 RXFIFO 到 DMA 的配置，细节请参考 DMA 文档。

```
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);
}
```

- Master 触发传输

  1. 打开 I2C 模块的 DMA 功能。
  2. 设置传输方向 I2C_TRANSACTION_SLAVE2MASTER，与场景 1 相同。
  3. 设置需要传输的数据大小。
  4. 配置 DMA，并使用 I2C_COMMAND_ISSUE_DATA_TRANSACTION 触发 I2C 传输。

```
void peripheral_i2c_send_data(void)
{
  I2C_DmaEnable(APB_I2C0,1);
  I2C_CtrlUpdateDirection(APB_I2C0,I2C_TRANSACTION_SLAVE2MASTER);
  I2C_CtrlUpdateDataCnt(APB_I2C0, DATA_CNT);
```

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

  I2C_CommandWrite(APB_I2C0, I2C_COMMAND_ISSUE_DATA_TRANSACTION);
}
```

- 使用流程
  - 设置 IO，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。

6.2.2.5.3.2 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,};
```

- 初始化 I2C 模块

  对于 Slave，需要打开 I2C_INT_ADDR_HIT，此中断的触发代表收到了匹配的地址。

```
#define ADDRESS (0x71)
void setup_peripherals_i2c_module(void)
{
  I2C_Config(APB_I2C0,I2C_ROLE_SLAVE,I2C_ADDRESSING_MODE_07BIT,ADDRESS);
  I2C_Enable(APB_I2C0,1);
  I2C_IntEnable(APB_I2C0,(1<<I2C_INT_ADDR_HIT)|(1<<I2C_INT_CMPL));
}
```

- 初始化 DMA 模块

  使用前需要配置 DMA 模块。

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

- Slave 中断实现以及发送数据

  1. 首先需要等待 I2C_STATUS_ADDRHIT 中断,在该中断中通过 `I2C_GetTransactionDir()` 判断传输的方向。
     - I2C_TRANSACTION_SLAVE2MASTER：代表 Slave 需要发送，设置 DMA 发送数据。
  2. I2C_STATUS_CMPL 代表传输结束，关闭 I2C DMA 功能。

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

  if(status & (1 << I2C_STATUS_ADDRHIT))
  {
    dir = I2C_GetTransactionDir(APB_I2C0);
    if(dir == I2C_TRANSACTION_SLAVE2MASTER)
    {
      peripherals_i2c_write_data_dma_setup();
    }
    I2C_ClearIntState(APB_I2C0, (1 << I2C_STATUS_ADDRHIT));
  }
```

```
  if(status & (1 << I2C_STATUS_CMPL))
  {
    I2C_DmaEnable(APB_I2C0,0);
    I2C_ClearIntState(APB_I2C0, (1 << I2C_STATUS_CMPL));
  }

  return 0;
}
```

- Slave 发送数据以及 DMA 设置

  该 API 实现了 DMA 传输数据到 I2C0 FIFO 的配置，细节请参考 DMA 文档。

```
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);
}
```

  设置 DMA 并打开 I2C DMA 功能。

```
void peripherals_i2c_write_data_dma_setup(void)
{
  #define I2C_DMA_TX_CHANNEL   (0)//DMA channel 0
  peripherals_i2c_dma_to_txfifo(I2C_DMA_TX_CHANNEL, write_data,
                                sizeof(write_data));

  I2C_CtrlUpdateDataCnt(APB_I2C0, DATA_CNT);
```

```
  I2C_DmaEnable(APB_I2C0,1);
}
```

- 使用流程
  - 设置 IO，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。

6.2.2.5.4 场景 4：Master 只写，Slave 只读，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 IO，请参考IO 配置。

6.2.2.5.4.1 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,};
```

- 初始化 I2C 模块

  请参考场景 3 中 Master 配置的初始化 `I2C` 模块。

- 初始化 DMA 模块

  请参考场景 3 中 Master 配置的初始化 `DMA` 模块。

- I2C 中断实现

  请参考场景 3 中 Master 配置的 `Master` 中断实现。

- I2C Master DMA 设置

  该 API 实现了 DMA 传输数据到 I2C0 FIFO 的配置，细节请参考 DMA 文档。

```
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);
}
```

- I2C Master 触发传输

  1. 打开 I2C DMA 功能。
  2. 设置传输方向为 I2C_TRANSACTION_MASTER2SLAVE，和场景 2 相同。
  3. 配置 DMA，并使用 I2C_COMMAND_ISSUE_DATA_TRANSACTION 触发 I2C 传输。

```
void peripheral_i2c_send_data(void)
{
  I2C_DmaEnable(APB_I2C0,1);
  I2C_CtrlUpdateDirection(APB_I2C0,I2C_TRANSACTION_MASTER2SLAVE);
  I2C_CtrlUpdateDataCnt(APB_I2C0, DATA_CNT);

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

  I2C_CommandWrite(APB_I2C0, I2C_COMMAND_ISSUE_DATA_TRANSACTION);

}
```

- 使用流程

- 设置 IO，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。

6.2.2.5.4.2 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,};
```

- 初始化 I2C 模块

  请参考场景 3 中 Slave 配置的初始化 `I2C` 模块。

- 初始化 DMA 模块

  请参考场景 3 中 Slave 配置的初始化 `DMA` 模块。

- Slave 中断实现以及接收数据

  1. 首先需要等待 I2C_STATUS_ADDRHIT 中断,在该中断中通过 `I2C_GetTransactionDir()` 判断传输的方向。
     - I2C_TRANSACTION_MASTER2SLAVE：代表 Slave 需要接收，设置 DMA 接收数据。
  2. I2C_STATUS_CMPL 代表传输结束，关闭 I2C DMA 功能。

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

  if(status & (1 << I2C_STATUS_ADDRHIT))
  {
```

```
    dir = I2C_GetTransactionDir(APB_I2C0);
    if(dir == I2C_TRANSACTION_MASTER2SLAVE)
    {
      peripherals_i2c_read_data_dma_setup();
    }

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

  if(status & (1 << I2C_STATUS_CMPL))
  {
    I2C_DmaEnable(APB_I2C0,0);
    I2C_ClearIntState(APB_I2C0, (1 << I2C_STATUS_CMPL));
  }

  return 0;
}
```

- Slave 发送数据以及 DMA 设置

  该 API 实现了 I2C0 RXFIFO 到 DMA 的配置，细节请参考 DMA 文档。

```
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);
}
```

  设置 DMA 并打开 I2C DMA 功能。

```
void peripherals_i2c_read_data_dma_setup(void)
{
  #define I2C_DMA_RX_CHANNEL   (0)//DMA channel 0
  peripherals_i2c_rxfifo_to_dma(I2C_DMA_RX_CHANNEL, read_data,
                                sizeof(read_data));

  I2C_CtrlUpdateDataCnt(APB_I2C0, DATA_CNT);
  I2C_DmaEnable(APB_I2C0,1);
}
```

- 使用流程
  - 设置 IO，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。

6.2.2.5.5 场景 5：Master/Slave 同时读写 其中 I2C 操作为，首先执行写操作然后再执行读操作，CPU 操作读写，没有使用 DMA。配置之前需要决定使用的 IO，请参考IO 配置。

6.2.2.5.5.1 Master 配置 测试数据，每次传输 8 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 (8)
uint8_t write_data[DATA_CNT] = {0,};
uint8_t write_data_cnt = 0;
uint8_t read_data[DATA_CNT] = {0,};
uint8_t read_data_cnt = 0;
```

- 初始化 I2C 模块

1. 配置为 Master, 7bit 地址。

2. 打开传输结束中断和 ADDR_HIT 中断。对于 Master 来说，如果有 Slave 响应了该地址，则会有 I2C_INT_ADDR_HIT 中断。

```
#define ADDRESS (0x71)
void setup_peripherals_i2c_module(void)
{
  I2C_Config(APB_I2C0,I2C_ROLE_MASTER,I2C_ADDRESSING_MODE_07BIT,ADDRESS);
  I2C_ConfigClkFrequency(APB_I2C0,I2C_CLOCKFREQUENY_STANDARD);
  I2C_Enable(APB_I2C0,1);
  I2C_IntEnable(APB_I2C0,(1<<I2C_INT_CMPL)|(1<<I2C_INT_ADDR_HIT));

}
```

- Master 中断实现

1. I2C_STATUS_ADDRHIT，代表 Slave 响应了 Master 发送的地址:
   - 如果 Master 执行写操作，需要打开 I2C_INT_FIFO_EMPTY，用来发送数据。
   - 如果 Master 执行读操作，需要打开 I2C_INT_FIFO_FULL，用来接收数据。
2. 如果 Master 执行写操作，I2C_STATUS_FIFO_EMPTY 中断会出现，此时需要填充待发送的数据。如果数据发送完成，需要关闭 I2C_STATUS_FIFO_EMPTY 中断，避免重复触发。
3. 如果 Master 执行读操作，I2C_STATUS_FIFO_FULL 中断会出现，此时需要读取数据。
4. I2C_STATUS_CMPL，代表传输结束：
   - 如果 Master 执行写操作，代表写成功。
   - 如果 Master 执行读操作，需要读取 FIFO 中的剩余数据。

```
uint8_t master_write_flag = 0;
static uint32_t peripherals_i2c_isr(void *user_data)
{
  uint32_t status = I2C_GetIntState(APB_I2C0);

  if(status & (1 << I2C_STATUS_ADDRHIT))
```

```
{
  if(master_write_flag)
  {
    I2C_IntDisable(APB_I2C0,(1 << I2C_INT_FIFO_FULL));
    I2C_IntEnable(APB_I2C0,(1<<I2C_INT_CMPL)|(1 << I2C_INT_FIFO_EMPTY));
  }
  else
  {
    I2C_IntDisable(APB_I2C0,(1 << I2C_INT_FIFO_EMPTY));
    I2C_IntEnable(APB_I2C0,(1<<I2C_INT_CMPL)|(1 << I2C_INT_FIFO_FULL));
  }
  I2C_ClearIntState(APB_I2C0, (1 << I2C_STATUS_ADDRHIT));
}

if(status & (1 << I2C_STATUS_FIFO_EMPTY))
{
  if(master_write_flag)
  {
    // 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));
    }

  }
}
```

```
  if(status & (1 << I2C_STATUS_FIFO_FULL))
  {
    if(!master_write_flag)
    {
      for(; read_data_cnt < DATA_CNT; read_data_cnt++)
      {
        if(I2C_FifoEmpty(APB_I2C0)){ break; }
        read_data[read_data_cnt] = I2C_DataRead(APB_I2C0);
      }
    }
  }

  // 传输结束中断，代表 DATA_CNT 个字节接收或者发射完成
  if(status & (1 << I2C_STATUS_CMPL))
  {
    if(master_write_flag)
    {
      I2C_ClearIntState(APB_I2C0, (1 << I2C_STATUS_CMPL));
    }
    else
    {
      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
    }
  }

  return 0;
}
```

- Master 写传输

  首先需要设置传输方向，I2C_TRANSACTION_MASTER2SLAVE，即代表 Master 发送数据，Slave 读取数据。

```
void peripheral_i2c_write_data(void)
{
  master_write_flag = 1;

  //write data use fifo empty Interrupt,so disable I2C_INT_FIFO_FULL,enable I2C_INT_FIFO_EMP
  I2C_IntDisable(APB_I2C0,(1 << I2C_INT_FIFO_FULL));
  I2C_IntEnable(APB_I2C0,(1 << I2C_INT_FIFO_EMPTY));
  I2C_CtrlUpdateDirection(APB_I2C0,I2C_TRANSACTION_MASTER2SLAVE);
  I2C_CtrlUpdateDataCnt(APB_I2C0, DATA_CNT);
  I2C_CommandWrite(APB_I2C0, I2C_COMMAND_ISSUE_DATA_TRANSACTION);
}
```

- Master 读传输

  首先需要设置传输方向，此处是 I2C_TRANSACTION_SLAVE2MASTER，即代表 Slave 发送数据，Master 读取数据。

```
void peripheral_i2c_read_data(void)
{
  master_write_flag = 0;

  //read data use fifo full Interrupt,so disable I2C_INT_FIFO_EMPTY,enable I2C_INT_FIFO_FULL
  I2C_IntDisable(APB_I2C0,(1 << I2C_INT_FIFO_EMPTY));
  I2C_IntEnable(APB_I2C0,(1 << I2C_INT_FIFO_FULL));
  I2C_CtrlUpdateDirection(APB_I2C0,I2C_TRANSACTION_SLAVE2MASTER);
  I2C_CtrlUpdateDataCnt(APB_I2C0, DATA_CNT);
  I2C_CommandWrite(APB_I2C0, I2C_COMMAND_ISSUE_DATA_TRANSACTION);
}
```

- 使用流程

- 设置 IO，setup_peripherals_i2c_pin()。
- 初始化 I2C，setup_peripherals_i2c_module()。
- 在需要时候触发 I2C 写数据，peripheral_i2c_write_data()。
- 当写结束后，可以触发 I2C 读取，peripheral_i2c_read_data()。
- 检查中断状态。

6.2.2.5.5.2 Slave 配置

- 初始化 I2C 模块

1. 配置为 Slave, 7bit 地址。
2. 打开传输结束中断和 ADDR_HIT 中断。对于 Slave 来说，如果有匹配的地址，则会有 I2C_INT_ADDR_HIT 中断。

```
#define ADDRESS (0x71)
void setup_peripherals_i2c_module(void)
{
  I2C_Config(APB_I2C0,I2C_ROLE_SLAVE,I2C_ADDRESSING_MODE_07BIT,ADDRESS);
  I2C_Enable(APB_I2C0,1);
  I2C_IntEnable(APB_I2C0,(1<<I2C_INT_ADDR_HIT)|(1<<I2C_INT_CMPL));
}
```

- Slave 中断实现

1. I2C_STATUS_ADDRHIT，在该中断中通过 `I2C_GetTransactionDir()` 判断传输的方向:
   - I2C_TRANSACTION_MASTER2SLAVE：代表 Slave 需要读取数据，打开 I2C_INT_FIFO_FULL 中断。
   - I2C_TRANSACTION_SLAVE2MASTER：代表 Slave 需要发送，打开 I2C_INT_FIFO_EMPTY。
2. 如果 Slave 需要发送，I2C_STATUS_FIFO_EMPTY 中断会出现，此时需要填充待发送的数据。
3. 如果 Slave 需要读取数据，I2C_STATUS_FIFO_FULL 中断会出现，此时需要读取数据。
4. I2C_STATUS_CMPL，代表传输结束：

- 如果 Slave 执行写操作，代表写成功，关闭 I2C_STATUS_FIFO_EMPTY 中断。
- 如果 Slave 执行读操作，需要读取 FIFO 中的剩余数据，关闭 I2C_STATUS_FIFO_FULL 中断。

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

  if(status & (1 << I2C_STATUS_ADDRHIT))
  {
    dir = I2C_GetTransactionDir(APB_I2C0);
    if(dir == I2C_TRANSACTION_MASTER2SLAVE)
    {
        master_write_flag = 1;
        I2C_IntEnable(APB_I2C0,(1 << I2C_INT_FIFO_FULL));
    }
    else if(dir == I2C_TRANSACTION_SLAVE2MASTER)
    {
        master_write_flag = 0;
        I2C_IntEnable(APB_I2C0,(1 << I2C_INT_FIFO_EMPTY));
    }

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

  }

  if(status & (1 << I2C_STATUS_FIFO_EMPTY))
  {
    // master read
    if(!master_write_flag)
    {
      // 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(status & (1 << I2C_STATUS_FIFO_FULL))
{
  // master write
  if(master_write_flag)
  {
    for(; read_data_cnt < DATA_CNT; read_data_cnt++)
    {
      if(I2C_FifoEmpty(APB_I2C0)){break;}
      read_data[read_data_cnt] = I2C_DataRead(APB_I2C0);
    }
  }
}

if(status & (1 << I2C_STATUS_CMPL))
{
  if(master_write_flag)
  {
    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));
  }
  else
  {
```

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

    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;
}
```

- 使用流程
  - 设置 IO，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。
  - 如果是读操作，slave 应该在 master_write_flag=0 之后准备好数据写到 FIFO。

6.2.3 时钟配置

I2C 时钟配置使用 API：

```
/**
 * @brief Set clk frequency for controller.
 * @param[in] I2C_BASE              base address
 * @param[in] option                see I2C_ClockFrequenyOptions
 */
void I2C_ConfigClkFrequency(I2C_TypeDef *I2C_BASE, I2C_ClockFrequenyOptions option);
```

其中 option 中定义了几个可选项（I2C 时钟和系统时钟有关系，以下枚举可能需要根据实际时钟调整）：

```
typedef enum
{
    I2C_CLOCKFREQUENY_NULL,
    I2C_CLOCKFREQUENY_STANDARD,//up to 100kbit/s
    I2C_CLOCKFREQUENY_FASTMODE,//up to 400kbit/s
    I2C_CLOCKFREQUENY_FASTMODE_PLUS,//up to 1Mbit/s
    I2C_CLOCKFREQUENY_MANUAL
} I2C_ClockFrequenyOptions;
```

如果选择 MANUAL, 需要手动配置相关寄存器来生成需要的时钟:

- `I2C_BASE->TPM`：乘数因子, 位宽 5bit, 所有 `I2C_BASE->Setup` 中的时间参数都会被乘以（TPM+1）。
- `I2C_BASE->Setup`: 使用 `I2C_ConfigSCLTiming()` 配置该寄存器，参数如下：
  - `scl_hi`：高电平持续时间，位宽 9bit，默认 0x10。
  - `scl_ratio`: 低电平持续时间因子，位宽 1bit，默认 1。
  - `hddat`：SCL 拉低后 SDA 的保持时间，位宽 5bit，默认 5。
  - `sp`: 可以被过滤的脉冲毛刺宽度，位宽 3bit，默认 1。
  - `sudat`: 释放 SCL 之前的数据建立时间，位宽 5bit，默认 5。

  每个参数和时钟的计算关系如下：
  - 高电平持续时间计算：
    $SCLhighperiod = (2 \times pclk) + (2 + sp + sclhi) \times pclk \times (TPM + 1)$
    其中 $pclk$ 为 I2C 模块的系统时钟，默认为 24M，实际时钟可以从 `SYSCTRL_GetClk()` 获取。
    如果 $sp = 1, pclk = 42ns, TPM = 3, sclhi = 150$，则：
    $SCLhighperiod = (2 \times 42) + (2 + 1 + 150) \times 42 \times (3 + 1) = 25788ns$
  - 低电平持续时间计算：
    $SCLlowperiod = (2 \times pclk) + (2 + sp + sclhi \times (sclratio + 1)) \times pclk \times (TPM + 1)$
    如果 $sp = 1, pclk = 42ns, TPM = 3, sclhi = 150, sclratio = 0$，则：
    $SCLlowperiod = (2 \times 42) + (2 + 1 + 150 \times 1) \times 42 \times (3 + 1) = 25788ns$

- 毛刺抑制宽度：$spikesuppressionwidth = sp \times pclk \times (TPM + 1)$

  如果 $sp = 1, pclk = 42ns, TPM = 3$，则：

  $spikesuppressionwidth = 1 \times 42 \times (3 + 1) = 168ns$

- SCL 之前的数据建立时间：

  $setuptime = (2 \times pclk) + (2 + sp + sudat) \times pclk \times (TPM + 1)$

  如果 $sp = 1, pclk = 42ns, TPM = 3, sudat = 5$，则：

  $setuptime = (2 \times 42) + (2 + 1 + 5) \times 42 \times (3 + 1) = 1428ns$

  协议对 SCL 之前的数据建立时间要求为：

  - standard mode: 最小250ns。
  - fast mode: 最小100ns。
  - fast mode plus: 最小50ns。

- SCL 拉低后 SDA 的保持时间：

  $holdtime = (2 \times pclk) + (2 + sp + hddat) \times pclk \times (TPM + 1)$

  如果 $sp = 1, pclk = 42ns, TPM = 3, hddat = 5$，则:

  $holdtime = (2 \times 42) + (2 + 1 + 5) \times 42 \times (3 + 1) = 1428ns$

  协议对 SCL 拉低后 SDA 的保持时间要求为：

  - standard mode: 最小300ns。
  - fast mode: 最小300ns。
  - fast mode plus: 最小0ns。

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 ING20 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 12S 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 8*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，另外一种是话音模式。

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

20 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>=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 = 1.024MHz。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 = 256MHz 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 8，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 控制器操作流程图如下：

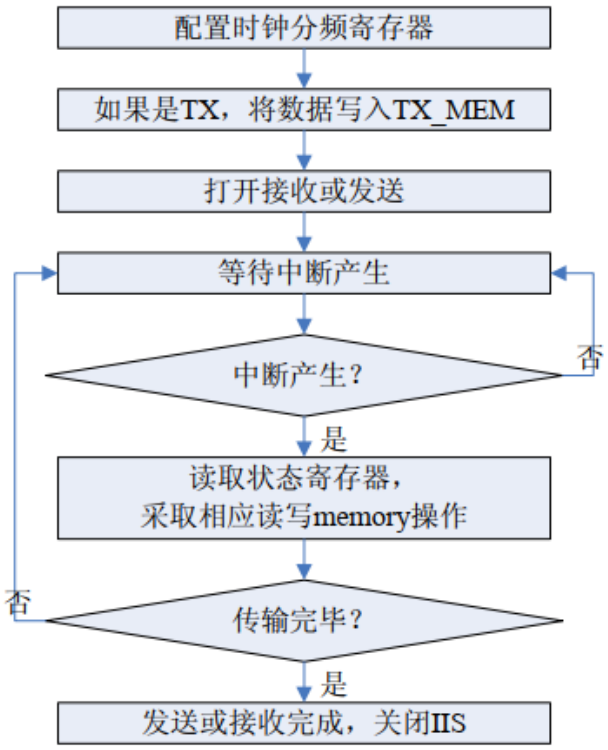


图 7.1: I2S 控制器操作流程图

如果需要用到 DMA 搬运则需要在使能 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        21
#define I2S_PIN_IN          22
#define I2S_PIN_LRCLK       35
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(I2S_PIN_IN, PINCTRL_PULL_DOWN);

    // CLK & Register
    SYSCTRL_ConfigPLLClk(6, 128, 2); // sorce 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 & DMA 乒乓搬运

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。

```
#include "pingpong.h"
#define I2S_PIN_BCLK        21
#define I2S_PIN_IN          22
#define I2S_PIN_LRCLK       35
#define CHANNEL_ID  0
DMA_PingPong_t PingPong;

static uint32_t DMA_cb_isr(void *user_data)
{
    uint32_t state = DMA_GetChannelIntState(CHANNEL_ID);
    DMA_ClearChannelIntState(CHANNEL_ID, state);

    uint32_t *rr = DMA_PingPongIntProc(&PingPong, CHANNEL_ID);
    uint32_t i = 0;
    uint32_t transSize = DMA_PingPongGetTransSize(&PingPong);
    while (i < transSize) {
        // do something with data 'rr[i]'
        i++;
    }

    return 0;
}
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(I2S_PIN_IN, PINCTRL_PULL_DOWN);

    // CLK & Register
    SYSCTRL_ConfigPLLClk(6, 128, 2); // sorce 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, 8);
    I2S_DMAEnable(APB_I2S, 0, 0);
    I2S_Config(APB_I2S, I2S_ROLE_MASTER, I2S_MODE_STANDARD, 0, 0, 0, 1, 24);

    // setup DMA
    DMA_PingPongSetup(&PingPong, SYSCTRL_DMA_I2S_RX, 100, 8);
    platform_set_irq_callback(PLATFORM_CB_IRQ_DMA, DMA_cb_isr, 0);

    // start working
    DMA_PingPongEnable(&PingPong, CHANNEL_ID);
    I2S_ClearRxFIFO(APB_I2S);
    I2S_DMAEnable(APB_I2S, 1, 1);
    I2S_Enable(APB_I2S, 0, 1);
}
```

DMA（乒乓搬运）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　硬件键盘扫描控制器（KEYSCAN）

8.1　功能概述

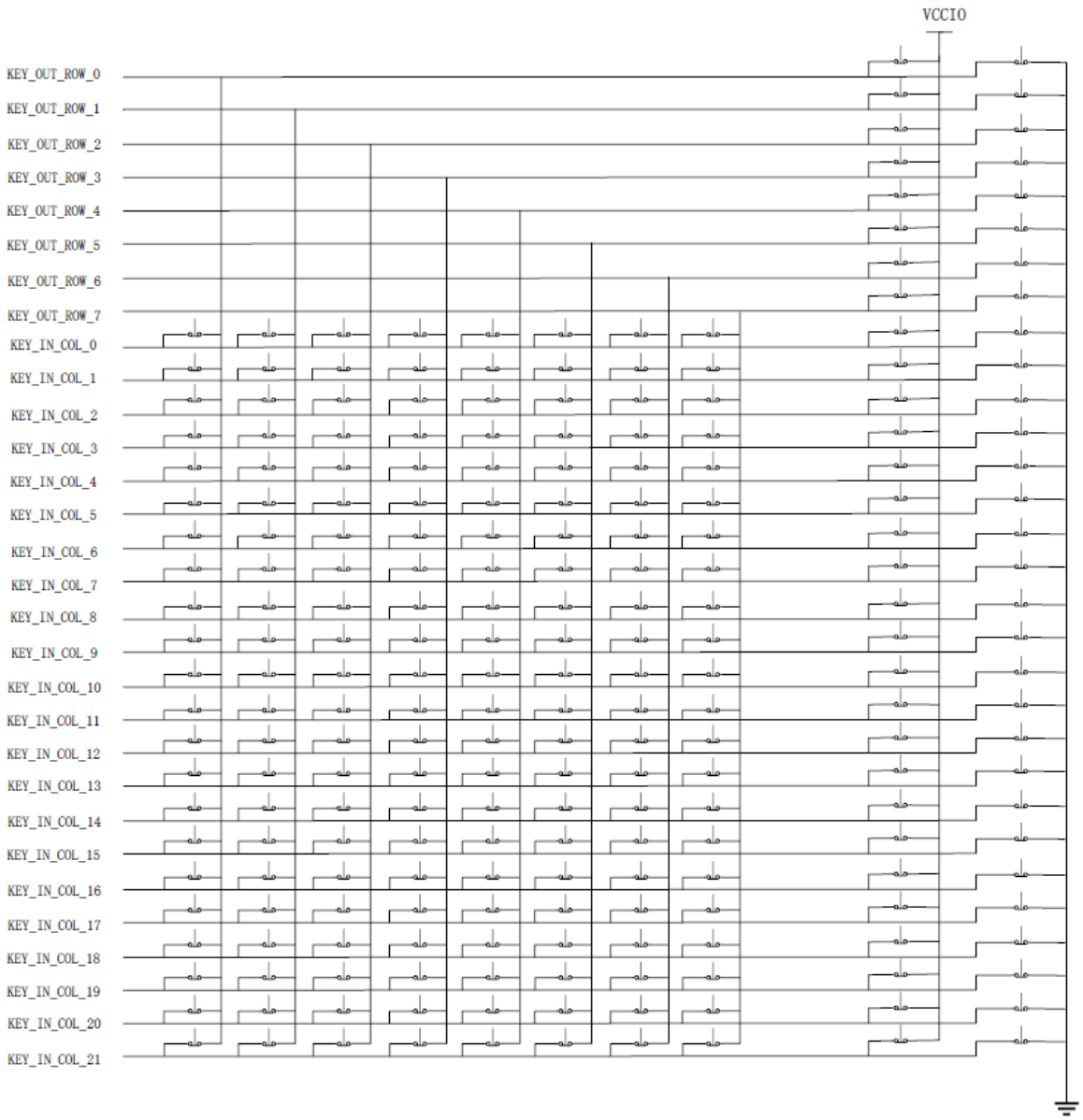
8.1.1　特性：

- 标准模式可配置矩阵，最大支持 8 行 *22 列的键盘矩阵。
- 每个 io 支持额外的两个独立按键扫描。
- LPkey 模式可配置三角阵列，最大支持 16 个 COL 连接共 y*(y-1)/2+2(x+y) 按键
- 标准模式支持 table（按键变化才产生中断）模式
- 每个单独的行或者列可以设置启用或者禁用。
- 可配置时钟。
- 支持输入硬件去抖动，去抖时间可配置。
- 支持配置扫描间隔和释放时间，支持多按键同时按下。
- 支持中断和 DMA。

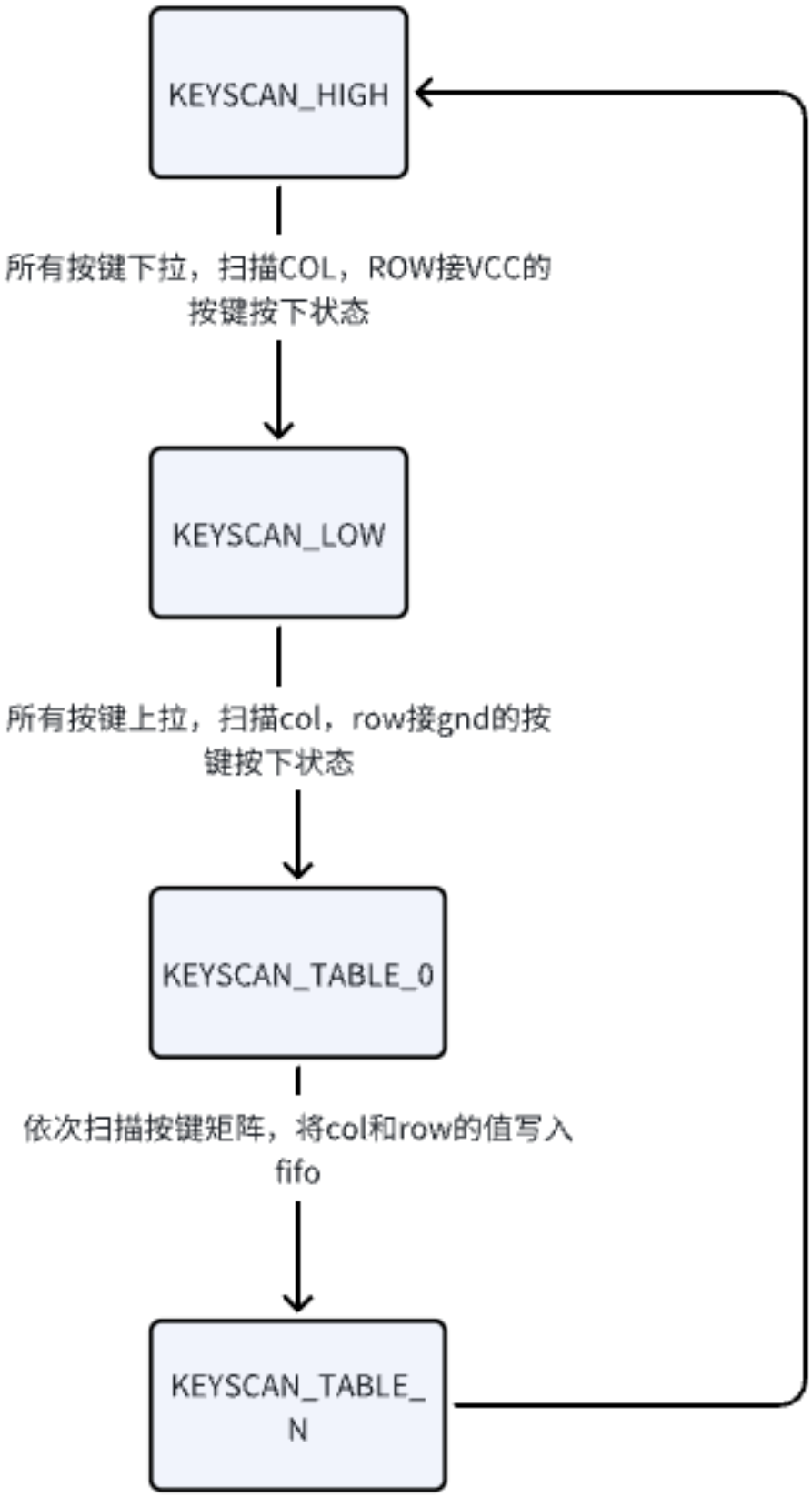
8.1.2　功能简述

keyscan 模块支持 DMA，fifo 最大深度 32，按键扫描支持标准和 lpkey 两种工作模式，其中标准模式支持 table（按键按下上报变化）模式，Keyscan 还提供了去抖功能，为输入过滤掉毛刺。该功能可以针对每个通道单独启用。过滤时间可单独配置。#### 标准模式

keyscan 标准模式支持 x*y+2(x+y) 个按键布局（x：列扫描，最高支持 8 列。y：行扫描，最高支持 22 行）。支持的键盘扫描排列如下图所示：



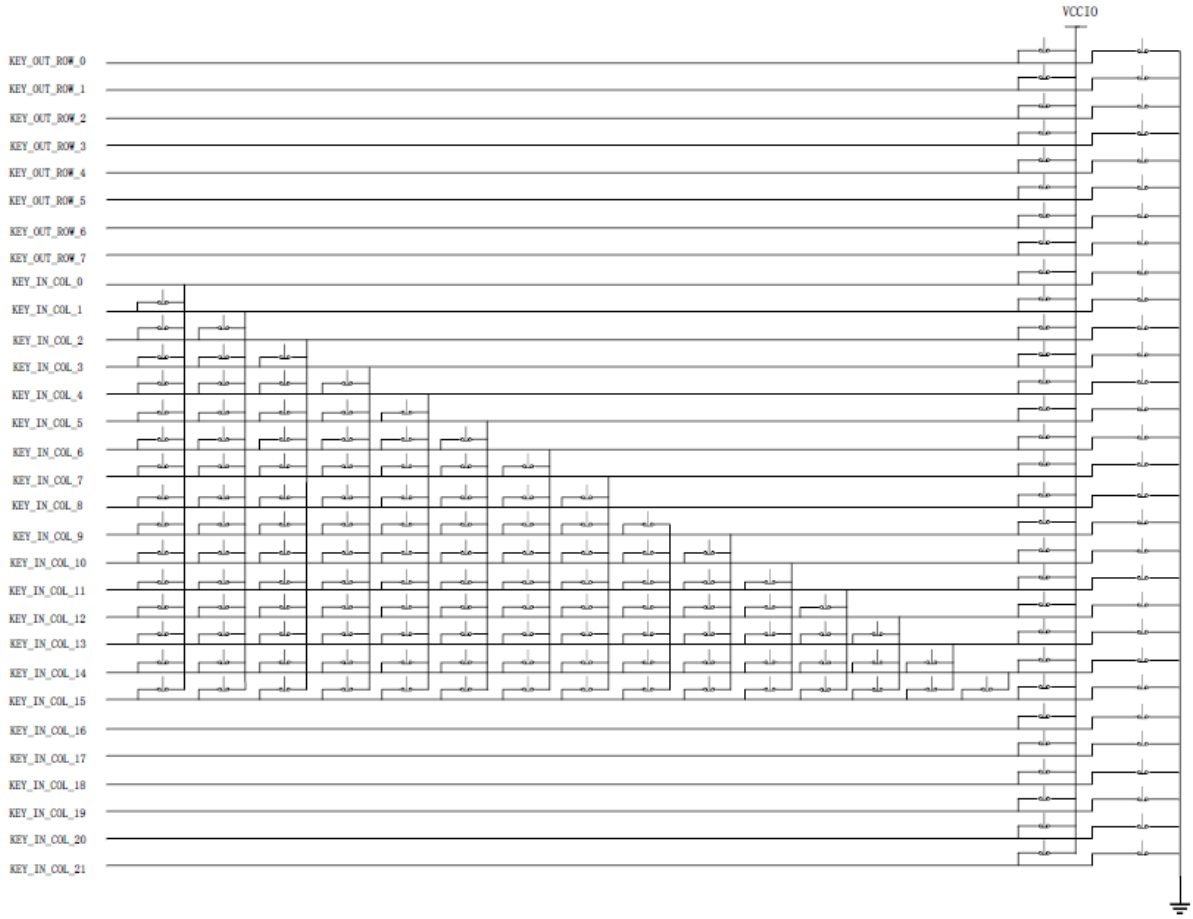
在标准模式下，keyscan 模块会根据设定的扫描周期 loop 值（扫描周期和 loop 配置以及模块输入时钟相关）周期触发 keyscan 的按键扫描任务并将扫描到的键值压入 FIFO，在 keyscan 的运行过程中，扫描流程如下。


KEYSCAN_HIGH
所有按键下拉，扫描COL，ROW接VCC的按键按下状态
KEYSCAN_LOW
所有按键上拉，扫描col，row接gnd的按键按下状态
KEYSCAN_TABLE_0
依次扫描按键矩阵，将col和row的值写入fifo
KEYSCAN_TABLE_N

标准扫描模式支持使能 table 模式，不需要手动获取 fifo 的数值并进行软件比对，硬件可以自动和上一次的采样结果进行比对，触发中断给出变化的键值。

8.1.3 LPkey 模式

Lpkey 模式支持 y*(y-1)/2+2(x+y) 个按键布局（x：列扫描，最高支持 8 列。y：行扫描，最高支持 22 行）。支持的键盘扫描排列如下图所示：

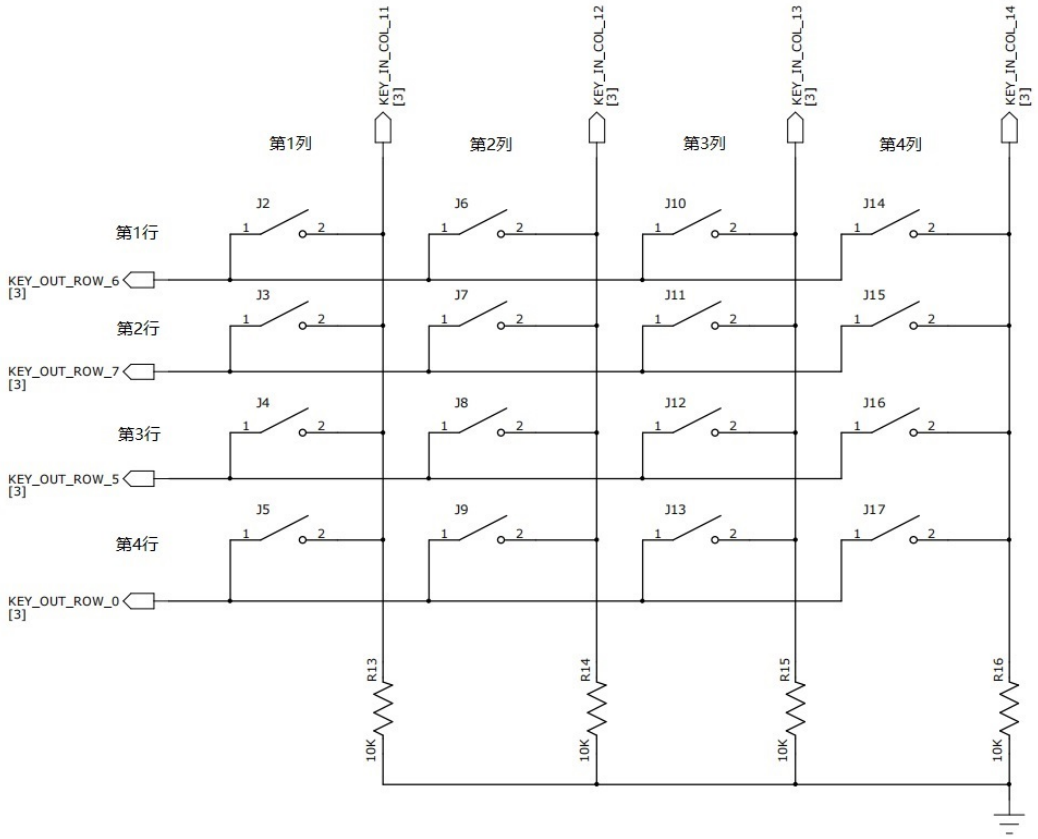


LPkey 模式提供了以更少的 io 数量扩展更多扫描矩阵的一种方式，相比普通模式，相同的 io 数量可扫描的按键数量更多，适用于小封装或 io 数量受限的应用场景。

Lpkey 模式不支持键值比较的（table）模式，扫描流程和标准模式相同。通过 DMA 或直接读取 fifo 的方式获取周期扫描按键值。判断按键是否触发。

8.2 使用说明

以 4 行 *4 列的键盘矩阵为例：



8.2.1 键盘矩阵的软件描述

```
typedef struct {
    KEYSCAN_InColIndex_t in_col;
    GIO_Index_t gpio;
} KEYSCAN_InColList;

typedef struct {
    KEYSCAN_OutRowIndex_t out_row;
    GIO_Index_t gpio;
} KEYSCAN_OutRowList;
```

```
KEYSCAN_OutRowList key_out_row[] = {
    {KEY_OUT_ROW_6, GIO_GPIO_30}, // 第 1 行
    {KEY_OUT_ROW_7, GIO_GPIO_31}, // 第 2 行
    {KEY_OUT_ROW_5, GIO_GPIO_29}, // 第 3 行
    {KEY_OUT_ROW_0, GIO_GPIO_32}, // 第 4 行
};
#define key_out_row_num (sizeof(key_out_row) / sizeof(key_out_row[0]))

KEYSCAN_InColList key_in_col[] = {
    {KEY_IN_COL_11, GIO_GPIO_11}, // 第 1 列
    {KEY_IN_COL_12, GIO_GPIO_12}, // 第 2 列
    {KEY_IN_COL_13, GIO_GPIO_13}, // 第 3 列
    {KEY_IN_COL_14, GIO_GPIO_14}, // 第 4 列
};
#define key_in_col_num (sizeof(key_in_col) / sizeof(key_in_col[0]))
```

第 1 行按键接到了 GPIO30，映射到 KEYSCAN 模块的 ROW6。第 1 列按键接到了 GPIO11，映射到 KEYSCAN 模块的 COL11。以此类推 4 行 4 列的键盘阵列。

注意：KEYSCAN 的 ROW 和 COL 不是随意映射到 GPIO，映射关系参考管脚管理（PINCTRL）说明文档。

8.2.2 KEYSCAN 模块初始化

```
typedef struct {
    KEYSCAN_InColList *col;
    int col_num;

    KEYSCAN_OutRowList *row;
    int row_num;

    uint8_t fifo_num_trig_int;
```

```
    uint8_t dma_num_trig_int;
    uint8_t loop_num_trig_int;
    uint8_t dma_en;
    uint8_t int_trig_en;
    uint8_t int_loop_en;
    uint16_t release_time;
    uint16_t scan_interval;
    uint8_t debounce_counter;
#if (INGCHIPS_FAMILY == INGCHIPS_FAMILY_20)
    uint8_t table_mode_en;
    uint8_t lpkey_mode_en;
#endif
} KEYSCAN_SetStateStruct;
```

```
/**
 * @brief Initialize keyscan module
 *
 * @param[in] keyscan_set       Initial parameter struct
 * @return                      0 if success else non-0
 */
int KEYSCAN_Initialize(const KEYSCAN_SetStateStruct* keyscan_set);

/**
 * @brief Initialize mapping table of keyboard array row and col
 *
 * @param[in]  keyscan_set       Initial parameter struct
 * @param[out] ctx               keyboard array mapping table
 */
void KEYSCAN_InitKeyScanToIdx(const KEYSCAN_SetStateStruct* keyscan_set,
                              KEYSCAN_Ctx *ctx);
```

8.2.3 获取扫描到的按键

KEYSCAN 模块使能扫描后会按照行和列的配置开始扫描。模块有 FIFO 缓存扫描数据。每次扫描循环结束，FIFO 中压入 1 个 0x400 标志完成一次扫描。

可以配置 FIFO 中数据个数触发中断或者 DMA 触发中断：

```
void KEYSCAN_SetFifoNumTrigInt(uint32_t trig_num);
void KEYSCAN_SetDmaNumTrigInt(uint32_t trig_num);
```

获取 FIFO 是否为空的状态和数据：

```
/**
 * @brief Check keyscan FIFO empty or not
 *
 * @return 0: FIFO have data; 1: empty
 */
uint8_t KEYSCAN_GetIntStateFifoEmptyRaw(void);

/**
 * @brief GET keyscan FIFO data
 *
 * @return 0~4 bits: col; 5~9 bits: row; 10 bit: scan cycle end flag
 */
uint16_t KEYSCAN_GetKeyData(void);
```

按键 FIFO 原始数据的 0~4 位是按下按键所在的 KEYSCAN 模块中的 col，5~9 位是 row，注意这个值并不是键盘矩阵中的行和列，可以用下面接口将原始数据解析为键盘矩阵中的行和列：

```
/**
 * @brief Transfer keyscan FIFO raw data to keyboard array row and col
 *
 * To use this helper function, `ctx` must be initialized with `KEYSCAN_InitKeyScanToIdx`.
 *
```

```
 * @param[in]  ctx              keyboard array mapping table
 * @param[in]  key_data         keyscan FIFO raw data
 * @param[out] row              pressed key's 0-based row index in keyboard array
 * @param[out] col              pressed key's 0-based col index in keyboard array
 * @return                      0: scan cycle end data;
 *                              1: find key pressed, *row and *col are key positions in keyb
 */
uint8_t KEYSCAN_KeyDataToRowColIdx(const KEYSCAN_Ctx *ctx, uint32_t key_data,
                                   uint8_t *row, uint8_t *col);
```

8.3 应用举例

8.3.1 初始化 KEYSCAN 模块

```
KEYSCAN_OutRowList key_out_row[] = {
    {KEY_OUT_ROW_6, GIO_GPIO_32}, // 第 1 行
    {KEY_OUT_ROW_7, GIO_GPIO_33}, // 第 2 行
    {KEY_OUT_ROW_5, GIO_GPIO_31}, // 第 3 行
    {KEY_OUT_ROW_0, GIO_GPIO_23}, // 第 4 行
};
#define key_out_row_num (sizeof(key_out_row) / sizeof(key_out_row[0]))

KEYSCAN_InColList key_in_col[] = {
    {KEY_IN_COL_11, GIO_GPIO_11}, // 第 1 列
    {KEY_IN_COL_12, GIO_GPIO_12}, // 第 2 列
    {KEY_IN_COL_13, GIO_GPIO_13}, // 第 3 列
    {KEY_IN_COL_14, GIO_GPIO_14}, // 第 4 列
};
#define key_in_col_num (sizeof(key_in_col) / sizeof(key_in_col[0]))

static KEYSCAN_Ctx key_ctx = {0};
```

```
static KEYSCAN_SetStateStruct keyscan_set = {
        .col                = key_in_col,
        .col_num            = key_in_col_num,
        .row                = key_out_row,
        .row_num            = key_out_row_num,
        .loop_num_trig_int = 1,
        .int_loop_en        = 0,
        .table_mode_en      = 0, // 使用 table 模式时，使能该结构体变量
        .fifo_num_trig_int = 1,
        .release_time       = 0x1ff,
        .scan_interval      = 0xfff,
        .debounce_counter   = 0xff,
        .dma_num_trig_int   = 0x10,
        .dma_en             = 0,
        .int_trig_en        = 1,
        .lpkey_mode_en      = 0,
};

static uint32_t keyscan_cb_isr(void *user_data);
static void setup_peripherals_keyscan(void)
{
    SYSCTRL_ClearClkGateMulti(1 << SYSCTRL_ITEM_APB_KeyScan);
    SYSCTRL_ClearClkGateMulti(1 << SYSCTRL_ITEM_APB_PinCtrl);

    KEYSCAN_Initialize(&keyscan_set);
    KEYSCAN_InitKeyScanToIdx(&keyscan_set, &key_ctx);

    platform_set_irq_callback(PLATFORM_CB_IRQ_KEYSCAN, keyscan_cb_isr, 0);

    return;
}
```

8.3.2 中断数据处理

8.3.2.1 标准模式

```
static uint8_t key_state_buf[2][key_out_row_num][key_in_col_num] = {0};
static uint8_t key_state_last_index = 0;
static uint8_t key_state_now_index = 1;
static void printf_key_state(void)
{
    int row, col;
    for (row = 0; row < key_out_row_num; row++) {
        for (col = 0; col < key_in_col_num; col++) {
            if (key_state_buf[key_state_now_index][row][col] !=
                key_state_buf[key_state_last_index][row][col]) {
                printf("row%u col%u %s\r\n",
                row + 1, col + 1,
                key_state_buf[key_state_now_index][row][col] == 0 ?
                "release" : "press");
            }
        }
    }

    if (key_state_now_index == 0) {
        key_state_now_index = 1;
        key_state_last_index = 0;
    } else {
        key_state_now_index = 0;
        key_state_last_index = 1;
    }

    for (row = 0; row < key_out_row_num; row++) {
        for (col = 0; col < key_in_col_num; col++) {
            key_state_buf[key_state_now_index][row][col] = 0;
        }
```

```
    }

    return;
}
static void key_state_clear(void)
{
    int row, col;
    for (row = 0; row < key_out_row_num; row++) {
        for (col = 0; col < key_in_col_num; col++) {
            key_state_buf[0][row][col] = 0;
            key_state_buf[1][row][col] = 0;
        }
    }
}
static uint32_t keyscan_cb_isr(void *user_data)
{
    uint32_t key_data;
    uint8_t key_scan_row;
    uint8_t key_scan_col;
    uint8_t row = 0;
    uint8_t col = 0;
    static uint8_t have_key_pressed = 0;
    static uint8_t no_key_pressed_cnt = 0;

    while (KEYSCAN_GetIntStateFifoEmptyRaw() == 0) {
        key_data = KEYSCAN_GetKeyData();
        if (KEYSCAN_KeyDataToRowColIdx(&key_ctx, key_data, &row, &col)) {
            // 扫描到有按键按下 按键位置为 row col
            key_state_buf[key_state_now_index][row][col] = 1;
            have_key_pressed = 1;
        } else {
            // 完成一次扫描 根据 have_key_pressed 判断该轮扫描中是否有按键按下
            if (have_key_pressed == 1) {
                have_key_pressed = 0;
```

```
                no_key_pressed_cnt = 0;
            } else {
            }
            switch (no_key_pressed_cnt) {
            case 0: // 该轮扫描中有按键按下
                no_key_pressed_cnt++;
                printf_key_state();
                break;
            case 1: // 该轮扫描中没有按键按下 上一轮扫描中有按键按下 说明按键释放
                no_key_pressed_cnt++;
                printf_key_state();
                key_state_clear();
                break;
            case 2: // 连续两轮或以上都没有按键按下
                break;
            default:
                break;
            }
        }
    }
    return 0;
}
```

8.3.2.2 Table 模式

```
static uint32_t keyscan_cb_isr(void *user_data)
{
    uint32_t key_data;
    KEYSCAN_ScanMode_t scan_mode;
    uint8_t key_scan_row;
    uint8_t key_scan_col;
    uint8_t row = 0;
```

```
    uint8_t col = 0;
    while (KEYSCAN_GetIntStateFifoEmptyRaw() == 0) {
            key_data = KEYSCAN_GetKeyData();
            if(KEYSCAN_GetScanMode(1,&scan_mode,key_data)) {
                  KEYSCAN_KeyDataToRowColIdx(&key_ctx, key_data, &row, &col);
                  print("row = %d, col = %d\n", row, col);
              }
    }
}
```

第九章　管脚管理（PINCTRL）

9.1　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..22} 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 9.1。表 9.2 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 `GIO_SetDirection` 控制。DEBUG 模式为保留功能，具体功能暂不开放。

表 9.1: 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
PCAP	PCAP0_IN, PCAP1_IN, PCAP2_IN, PCAP3_IN, PCAP4_IN, PCAP5_IN
SDM	DMIC_CLK, DMIC_DATA

外设	功能管脚
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 9.2: 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, 12, 24
KEY_IN_COL_1	1, 13, 25
KEY_IN_COL_2	2, 14, 26
KEY_IN_COL_3	3, 15, 27
KEY_IN_COL_4	4, 16, 28
KEY_IN_COL_5	5, 17, 29
KEY_IN_COL_6	6, 18, 30
KEY_IN_COL_7	7, 19, 31
KEY_IN_COL_8	8, 20, 32
KEY_IN_COL_9	9, 21, 33
KEY_IN_COL_10	10, 22, 34
KEY_IN_COL_11	11, 23, 35
KEY_IN_COL_12	12, 24, 0
KEY_IN_COL_13	13, 25, 1
KEY_IN_COL_14	14, 26, 2
KEY_IN_COL_15	15, 27, 3
KEY_IN_COL_16	16, 28, 4
KEY_IN_COL_17	17, 29, 5
KEY_IN_COL_18	18, 30, 6

外设功能管脚	可连接到的 IO 管脚
KEY_IN_COL_19	19, 31, 7
KEY_IN_COL_20	20, 32, 8
KEY_IN_COL_21	21, 33, 9
KEY_OUT_ROW_0	0, 8, 16, 24, 32
KEY_OUT_ROW_1	1, 9, 17, 25, 33
KEY_OUT_ROW_2	2, 10, 18, 26, 34
KEY_OUT_ROW_3	3, 11, 19, 27, 35
KEY_OUT_ROW_4	4, 12, 20, 28
KEY_OUT_ROW_5	5, 13, 21, 29
KEY_OUT_ROW_6	6, 14, 22, 30
KEY_OUT_ROW_7	7, 15, 23, 31
ANT_SW0	0, 3, 6, 9, 12, 15, 18, 21, 24, 27, 32
ANT_SW1	1, 4, 7, 10, 13, 16, 19, 22, 25, 30
ANT_SW2	2, 5, 8, 11, 14, 17, 20, 23, 26, 31
ANT_SW3	0, 3, 6, 9, 12, 15, 18, 21, 24, 27, 32
ANT_SW4	1, 4, 7, 10, 13, 16, 19, 22, 24, 27, 32
ANT_SW5	2, 5, 8, 11, 14, 17, 20, 25, 30
ANT_SW6	0, 3, 6, 9, 12, 15, 18, 21，23，26，31
ANT_SW7	1, 4, 7, 10, 13, 16, 22, 24，27，32
PA_RXEN	5, 12, 13, 14, 15, 16, 20, 21, 22，23
PA_TXEN	4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 21, 22，23，30
TIMER0_PWM_0A	0, 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 19, 21, 23, 25 27, 29, 31, 33, 35
TIMER0_PWM_0B	1, 3, 5, 7, 9, 11, 13, 15, 17, 18, 20, 22, 24, 26, 28, 30, 32, 34
TIMER0_PWM_1A	0, 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 19, 21, 23, 25 27, 29, 31, 33, 35
TIMER0_PWM_1B	1, 3, 5, 7, 9, 11, 13, 15, 17, 18, 20, 22, 24, 26, 28, 30, 32, 34
TIMER1_PWM_0A	0, 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 19, 21, 23, 25 27, 29, 31, 33, 35
TIMER1_PWM_0B	1, 3, 5, 7, 9, 11, 13, 15, 17, 18, 20, 22, 24, 26, 28, 30, 32, 34
TIMER1_PWM_1A	0, 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 19, 21, 23, 25 27, 29, 31, 33, 35
TIMER1_PWM_1B	1, 3, 5, 7, 9, 11, 13, 15, 17, 18, 20, 22, 24, 26, 28, 30, 32, 34
PWM_0A	0, 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 19, 21, 23, 25 27, 29, 31, 33, 35
PWM_0B	1, 3, 5, 7, 9, 11, 13, 15, 17, 18, 20, 22, 24, 26, 28, 30, 32, 34
PWM_1A	0, 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 21, 23, 25 27, 29, 31, 33, 35
PWM_1B	1, 3, 5, 7, 9, 11, 13, 15, 17, 20, 22, 24, 26, 28, 30, 32, 34
PWM_2A	0, 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 21, 23, 25 27, 29, 31, 33, 35

外设功能管脚	可连接到的 IO 管脚
PWM_2B	1, 3, 5, 7, 9, 11, 13, 15, 17, 20, 22, 24, 26, 28, 30, 32, 34
QDEC_EXT_IN_CLK	3, 9
QDEC_TIMER_EXT_IN1_A	7, 13, 19
QDEC_TIMER_EXT_IN2_A	8, 14, 20
QDEC_TIMER_EXT_IN2_B	11, 17, 23
QDEC_TIMER_EXT_OUT0_A	12, 18
QDEC_TIMER_EXT_OUT1_A	13, 19
QDEC_TIMER_EXT_OUT2_A	14, 20
QDEC_TIMER_EXT_OUT3_B	15, 21
QDEC_TIMER_EXT_OUT4_B	16, 22
QDEC_TIMER_EXT_OUT5_B	17, 23
SPI0_CLK_IN	23, 37
SPI0_CLK_OUT	23, 37
SPI0_CSN_IN	24, 36
SPI0_CSN_OUT	24, 36
SPI0_HOLD_IN	25, 38
SPI0_HOLD_OUT	25, 38
SPI0_MISO_IN	27, 40
SPI0_MISO_OUT	27, 40
SPI0_MOSI_IN	30, 41
SPI0_MOSI_OUT	30, 41
SPI0_WP_IN	26, 39
SPI0_WP_OUT	26, 39
SPI1_CLK_IN	31
SPI1_CLK_OUT	31
SPI1_CS_IN	32
SPI1_CS_OUT	32
SPI1_MISO_IN	23
SPI1_MISO_OUT	23
SPI1_MOSI_IN	24
SPI1_MOSI_OUT	24
SPI1_HOLD_IN	25
SPI1_HOLD_OUT	25
SPI1_WP_IN	26

外设功能管脚	可连接到的 IO 管脚
SPI1_WP_OUT	26
PCAP_IN0	24, 26, 30, 32
PCAP_IN1	23, 25, 27, 31
PCAP_IN2	24, 26, 30, 32
PCAP_IN3	23, 25, 27, 31
PCAP_IN4	24, 26, 30, 32
PCAP_IN5	23, 25, 27, 31
UART0_TX	23, 24 25 , 26, 27, 30, 31, 32
UART0_RTS	23, 24 25 , 26, 27, 30, 31, 32
UART1_TX	23, 24 25 , 26, 27, 30, 31, 32
UART1_RTS	23, 24 25 , 26, 27, 30, 31, 32
DMIC_DATA	24, 30
DMIC_CLK	25, 32

9.2 使用说明

9.2.1 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 9.1 和表 9.2 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 9.3 罗列了为各外设提供的输入配置函数。

表 9.3: 各外设的输入配置函数

外设	配置函数
KeyScan	PINCTRL_SelKeyScanColIn
I2C	PINCTRL_SelI2cIn
I2S	PINCTRL_SelI2sIn
IR	PINCTRL_SelIrIn
PDM	PINCTRL_SelPdmIn
PCAP	PINCTRL_SelPCAPIn
QDEC	PINCTRL_SelQDECIn
SWD	PINCTRL_SelSwIn
SPI	PINCTRL_SelSpiIn
UART	PINCTRL_SelUartIn
USB	PINCTRL_SelUSB

9.2.2 配置上拉、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
  );
```

表 9.4 列出了各管脚默认的上下拉配置。

表 9.4: 管脚上下拉默认配置

管脚	默认配置
1	上拉
2	上拉
3	上拉
4	上拉
15	下拉
16	下拉
17	下拉
其它	禁用上下拉

9.2.3 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);
```

默认驱动能力共分 4 档，分别为 $2mA$、$4mA$、$8mA$、$12mA$。除了 IO1 驱动能力默认为 $12mA$ 之外，其它管脚驱动能力默认 $8mA$。

9.2.4 配置天线切换控制管脚

支持最多 8 个管脚用于天线切换控制，相应地，天线切换模板（switching pattern）内每个数字包含 8 个比特，取值范围为 0..255。这 8 个比特可依次通过 `IO_SOURCE_ANT_SW0`、……、`IO_SOURCE_ANT_SW7` 选择。例如，查表 9.2 可知管脚 0 能够映射为 ANT_SW0，即比特 0。通过下面这行代码就可将管脚 0 映射为 ANT_SW0：

```
PINCTRL_SetPadMux(0, IO_SOURCE_ANT_SW0);
```

通过函数 PINCTRL_EnableAntSelPins 可批量配置用于天线切换控制的管脚：

```
int PINCTRL_EnableAntSelPins(
  int count,                // 数目
  const uint8_t *io_pins);  // 管脚数组
```

管脚数组 io_pins 里的第 n 个元素代表第 n 个比特所要映射的管脚。如果不需要为某个比特配置管脚，则在 io_pins 的对应位置填入 IO_NOT_A_PIN。比如，只选用第 0、第 2 等两个比特用作控制，分别映射到管脚 0 和 5：

```
const uint8_t io_pins[] = {0, IO_NOT_A_PIN, 5};
PINCTRL_EnableAntSelPins(sizeof(io_pins), io_pins);
```

9.2.5 配置模拟模式

通过以下 3 步可将一个管脚配置为模拟模式：

1. 配置为 GPIO 模式；
2. 禁用上下拉；
3. 将 GPIO 配置为高阻态。

函数 PINCTRL_EnableAnalog 封装了以上步骤：

```
void PINCTRL_EnableAnalog(const uint8_t io_index);
```

模拟模式适用于以下几种外设。

- USB

  函数 PINCTRL_SelUSB() 内部封装了 PINCTRL_EnableAnalog，开发者不需要再为 USB 管脚调用该函数配置模拟模式。

- ADC

  开发者需要调用该函数使能某管脚的 ADC 输入功能。支持 ADC 输入功能的管脚如表 9.5 所示。

表 9.5: 支持 ADC 输入的管脚

管脚	模拟输入
7	AIN 0
8	AIN 1
9	AIN 2
10	AIN 3
30	AIN 4
31	AIN 5
34	AIN 6
35	AIN 7
15	AIN 8
20	AIN 9

- ASDM

  开发者需要调用该函数使能管脚的 ASDM 输入采样功能，Amic 内部驱动电压输出（MicBias）功能，以及内部 Vref 参考电压输出（ASDM_Vref）功能。

  Vref 参考电压可从 IO（ASDM Vref Pad）输出，外接滤波电容，可提升采样信号质量。

表 9.6: 支持 ASDM 输入输入的管脚

管脚	模拟输入输出
11	ASDM_Vref
12	MicBias
13	ASDM_P
14	ASDM_N

第十章　增强型脉宽调制发生器（PWM）

增强型脉宽调制发生器具有：生成脉宽调制信号（PWM），捕捉外部脉冲输入（PCAP），带载波生成 IR 发送信号，捕获计算 IR 信号。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 $8 \times 20bit$ 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
- 支持 WS2812 位带灯控制

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

IR 特性：* 支持 IR 捕获模式。* 支持 IR 发送，可配置不同载波频率。

10.1　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
{
    PWM_WORK_MODE_UP_WITHOUT_DIED_ZONE          = 0x0,
    PWM_WORK_MODE_UP_WITH_DIED_ZONE             = 0x1,
    PWM_WORK_MODE_UPDOWN_WITHOUT_DIED_ZONE      = 0x2,
    PWM_WORK_MODE_UPDOWN_WITH_DIED_ZONE         = 0x3,
    PWM_WORK_MODE_SINGLE_WITHOUT_DIED_ZONE      = 0x4,
    PWM_WORK_MODE_DMA                           = 0x5,
    PWM_WORK_MODE_PCAP                          = 0x6,
    PWM_WORK_MODE_IR                            = 0x7
} PWM_WorkMode_t;
```

10.1.1 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;
}
```

10.1.2 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);
}
```

10.1.3 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;
}
```

10.1.4 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);
}
```

10.1.5 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 HIGH_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。

10.1.6 DMA 模式

此模式支持通过 DMA 实时更新门限。

10.1.7 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;
}
```

10.2 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：

```
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。

10.2.1 IR 模式

IR 可以使能一路 IR 信号输出，载波频率可配，通过配置 pwm 输出步进可生成灵活的 IR 信号，推荐预定义 IR 数据流，使用 DMA 的方式快速完成 IR 控制信号输出。

IR 抓取模式以 PCAP 模式为基础，通过 PCAP 抓取 IR 信号，通内部配置 IR 信号解码参数，可完成 IR 信号的解码，解码结果输出到对应 FIFO。在此模式下，需要将步进配置为预测的 IR 的 3 6 次频率通过寄存器 pera_th，建议使用 200kHz，IR 给出将抓取以下时间节点：

- 1，第一个上升的边缘，跌落边缘，第二次上升边缘，跌落边缘，以便确定载波频率。
- 2，载波停止的时间点以及它开始的时间点。

[1]所有 6 路输入共有此计数器。

10.3 PWM 使用说明

10.3.1 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)
    );
```

10.3.2 配置工作模式

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

10.3.3 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 ING20XX，此参数无效
    const uint32_t threshold);
```

各门限值最大支持 0xFFFFF，共 20 个比特。

10.3.4 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
    );
```

10.3.5 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);
}
```

10.3.6 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 8，可以存储 8 个 32 比特数据（只有低 20 比特有效，其余比特忽略），相当于 4 组 PWM 配置，所以 `trig_cfg` 的取值范围为 0..7。

10.4 PCAP 使用说明

10.4.1 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
);
```

1. 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,
    ...);
```

1. 打开整个模块的时钟（参考SYSCTRL）

2. 配置 DMA 传输

当 PCAP 通道 FIFO 内存储的数据多于或等于 trig_cfg 时，请求 DMA 传输数据。trig_cfg 的取值范围为 0..7。

```
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
    );
```

1. 使能计数器

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

10.4.2 读取计数器

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

10.5 IR 模式示例

10.5.1 IR 发送模式

该模式演示了 NEC 发送一段 NEC 数据序列的代码，需要根据 NEC 的序列要求，计算要填入 fifo 的数值，之后通过写 fifo 或 DMA 的形式发送 NEC 序列。

```
//IR Step Mode constant
#define IR_REG_SW   (1<<15)
#define NEC_START_P_NUM 342
#define NEC_START_I_NUM 172
#define NEC_LOGIC_NUM 22
#define NEC_STOP_NUM  22

void PWM_Init(void)
{
    SYSCTRL_ClearClkGateMulti((1 << SYSCTRL_ITEM_APB2_PWM) | (1 << SYSCTRL_ITEM_APB1_PinCtrl) | (
    PINCTRL_SetPadMux(GIO_GPIO_8,IO_SOURCE_PWM4_A);
    PINCTRL_SetPadMux(GIO_GPIO_7,IO_SOURCE_PWM4_B);
}
void IR_Step_Mode_init(const uint8_t channel_index)
{
    PWM_Init();

    PWM_Enable(channel_index, 0);

    SYSCTRL_EnablePcapMode(channel_index,0);
    PWM_SetMask(channel_index,0,0);//设置通道输出极性
    SYSCTRL_ReleaseBlock(SYSCTRL_ITEM_APB2_PWM);
    SYSCTRL_ClearClkGate(SYSCTRL_ITEM_APB2_PWM);
    PWM_SetMode(channel_index, PWM_WORK_MODE_IR);
    PWM_StepEnabled(channel_index,0);//close step enabled
    IR_CycleCarrierSetup(channel_index,0,38000,70);
    IR_CycleCarrierSetup(channel_index,1,38000,0);

    PWM_Enable(channel_index, 1);
}

void NEC_START(const uint8_t channel_index)
{
    IR_WriteCarrierData(channel_index,NEC_START_P_NUM);
```

```
    while (IR_BusyState(channel_index));
    IR_WriteCarrierData(channel_index,NEC_START_I_NUM | IR_REG_SW);
    while (IR_BusyState(channel_index));
}

void NEC_LOGIC(const uint8_t channel_index,uint8_t x)
{
    uint8_t pulse;
    IR_WriteCarrierData(channel_index,NEC_LOGIC_NUM);
    while (IR_BusyState(channel_index));
    pulse = NEC_LOGIC_NUM*(x * 2 + 1);
    IR_WriteCarrierData(channel_index,pulse | IR_REG_SW);
    while (IR_BusyState(channel_index));
}
void NEC_STOP(const uint8_t channel_index)
{
    IR_WriteCarrierData(channel_index,NEC_STOP_NUM);
    while(IR_BusyState(channel_index));
}

void IR_Write_data(const uint8_t channel_index,uint8_t  data)
{
    uint8_t  i;
    for(i = 0; i<8; i++)
    {
        NEC_LOGIC(channel_index,((data>>i) & 0x01));
    }
}

void IR_NECSend_Command(const uint8_t channel_index,uint8_t address, uint8_t cmd)
{
    NEC_START(channel_index);
    IR_Write_data(channel_index,address);
    IR_Write_data(channel_index,~address);
```

```
    IR_Write_data(channel_index,cmd);
    IR_Write_data(channel_index,~cmd);
    NEC_STOP(channel_index);
}

void PWM_IR_Reset(uint8_t channel)
{
    PWM_Enable(channel, 0);
    PWM_Enable(channel, 1);
}

void IR_test_cycle(const uint8_t channel_index,uint8_t address, uint8_t cmd)
{
    PWM_IR_Reset(channel_index);
    IR_NECSend_Command(channel_index,address, cmd);
    delay_ms(200);
}

void main(void)
{
    IR_Step_Mode_init(0);
    IR_test_cycle(0,0xFF,0x00);
    IR_test_cycle(0,0xFF,0x00);
    while(1);
}
```

10.5.2 IR 接收模式

该模式通过抓取载波频率和具体的信号步进的方式解析对应的红外信号，以下是代码示例(部分函数实现可参考发送部分配置)：

```
//IR Grabbing test function
void IR_Grabbing_TX(void)
```

```
{
    SYSCTRL_ClearClkGateMulti((1 << SYSCTRL_ITEM_APB2_PWM) | (1 << SYSCTRL_ITEM_APB1_PinCtrl
    PINCTRL_SetPadMux(GIO_GPIO_8,IO_SOURCE_PWM5_A);

    PWM_Enable(1, 0);

    SYSCTRL_EnablePcapMode(1,0);
    PWM_SetMask(1,0,0);
    SYSCTRL_ReleaseBlock(SYSCTRL_ITEM_APB2_PWM);
    SYSCTRL_ClearClkGate(SYSCTRL_ITEM_APB2_PWM);
    PWM_SetMode(1, PWM_WORK_MODE_IR);
    PWM_StepEnabled(1,0);//close step enabled
    IR_CycleCarrierSetup(1,0,38000,70);
    IR_CycleCarrierSetup(1,1,38000,0);

    PWM_Enable(1, 1);
}

void IR_Grabbing_init(void)
{
    SYSCTRL_ClearClkGateMulti((1 << SYSCTRL_ITEM_APB1_PinCtrl) | (1 << SYSCTRL_ITEM_APB1_GPI
    PINCTRL_SelPCAPIn(0, GIO_GPIO_7);
    SYSCTRL_EnablePcapMode(0,1);
    SYSCTRL_ReleaseBlock(SYSCTRL_ITEM_APB2_PWM);
    SYSCTRL_ClearClkGate(SYSCTRL_ITEM_APB2_PWM);
    PCAP_Enable(0);
    PWM_StepEnabled(0,1);
    PCAP_EnableEvents(0,
                        PCAP_PULSE_RISING_EDGE | PCAP_PULSE_FALLING_EDGE,
                        PCAP_PULSE_RISING_EDGE | PCAP_PULSE_FALLING_EDGE);
    APB2_PWM->Channels[0].Ctrl0 &= ~(0x7 << 12);
    APB2_PWM->Channels[0].Ctrl0 |=  (0x1 << 12);
    uint32_t pera = PWM_CLOCK_FREQ / 200000;
    APB2_PWM->Channels[0].PeraTh = pera;
```

```
    NVIC_Configuration();
    PWM_FifoIntEnable(0,1,PWM_FIFO_TRIGGER_EN);
    PCAP_CounterEnable(1);
    PWM_Enable(0, 1);
}

void IR_Grabbing_test(void)
{
    IR_Grabbing_init();
    IR_Grabbing_TX();

    IR_test_cycle(1,0xFF,0x00);
}
```

第十一章　QDEC 简介

QDEC 全称 Quadrature Decoder，即正交解码器。

其作用是用来解码来自旋转编码器的脉冲序列，以提供外部设备运动的步长和方向。

11.1　功能描述

11.1.1　特点

- 可配置时钟
- 支持过滤器
- 支持 APB 总线
- 支持 DMA

11.1.2　正转和反转

QDEC 是通过采集到 phase_a、phase_b 相邻两次的数值变化来判断外设的运动方向。

顺时针采集数据如图所示：

逆时针采集数据如图所示：

在 QDEC 数据上，如果引脚配置和连接正确，顺时针转动则采集到的数据逐渐增大，逆时针则数据逐渐减小。

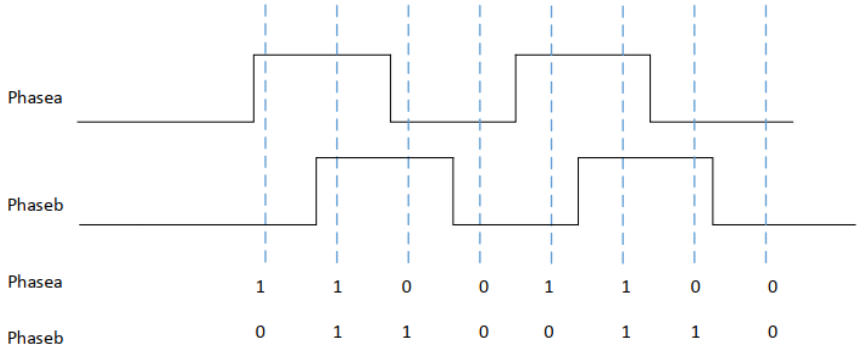


图 11.1: QDEC 顺时针采集数据

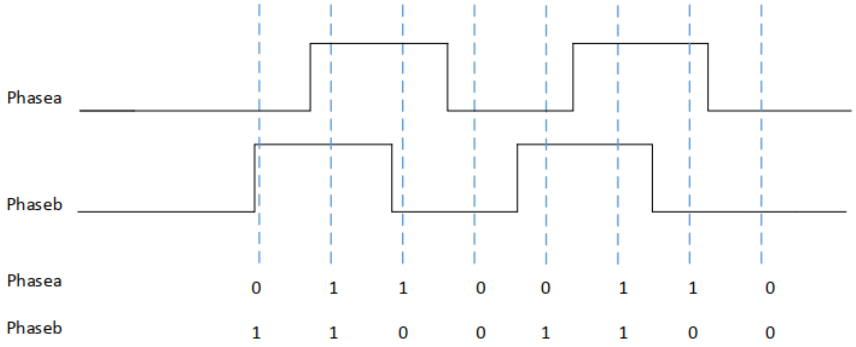


图 11.2: QDEC 逆时针采集数据

11.2 使用方法

11.2.1 方法概述

方法概述为：GPIO 选配，时钟配置，QDEC 参数配置以及数据处理。

11.2.1.1 GPIO 选择

驱动接口：PINCTRL_SelQDECIn

QDEC 的 GPIO 选择，请参考PINCTRL

对 phase_a、phase_b 选定要配置的 GPIO 口，并调用 PINCTRL_SelQDECIn 接口进行配置。

11.2.1.2 时钟配置

驱动接口：SYSCTRL_SelectQDECClk

当前 QDEC 可以选择使用的时钟源为 HCLK 时钟或者 sclk_slow 时钟

出于实际效果和硬件资源等因素考虑，**我们推荐开发者选择 sclk_slow 作为时钟源**

对所选用的时钟源还需要进行一次分频，分频系数范围为 1-1023，默认值为 2

这里需要特别注意的是：如果使用 sclk_slow 时钟，**请务必配置 pclk 时钟频率不大于 qdec 时钟源频率**

注意：如果配置 pclk 频率大于 qdec 时钟源频率，会出现 qdec 参数配置失败从而不能正常工作的现象。

为了方便开发者使用，可以直接调用下面提供的接口来配置 pclk 时钟符合上述要求：

```
static void QDEC_PclkCfg(void)
{
    if ((APB_SYSCTRL->QdecCfg >> 15) & 1)
        return;
    uint32_t hclk = SYSCTRL_GetHClk();
    uint32_t slowClk = SYSCTRL_GetSlowClk();
    uint8_t div = hclk / slowClk;
    if (hclk % slowClk)
        div++;
    if (!(div >> 4))
        SYSCTRL_SetPClkDiv(div);
}
```

开发者可以将以上代码拷贝到程序里，在配置 qdec 之前调用即可。

在配置完 qdec 之后可以选择将 pclk 恢复到原来频率，实例可参考 SDK 中 HID mouse 例程。

11.2.1.3 QDEC 参数配置

驱动接口：QDEC_EnableQdecDiv、QDEC_QdecCfg

共有 3 个参数需要配置：qdec_clk_div、filter 和 miss

其含义分别如下：

- **qdec_clk_div**：用于控制 qdec 结果上报频率。即多少个时钟周期上报一次采样结果

- **filter**：用于过滤 **filter× 时钟周期**时长以内的毛刺
- **miss**：用于控制 qdec 可以自动补偿的最大 miss 结果数。例如由于滚轮转动过快，导致两次采样中变换了不止一个结果，则此时会自动补偿最多 miss 个结果。

对于 miss 值配置此处建议先加入较小的 miss 值（如 miss=1）测试效果，如果效果良好则可以尝试继续加大 miss 值。在保证性能的基础上，理论上 miss 值越大越好。

注意：对于 miss 值的配置需要格外注意，miss 值的设置主要考虑到可能由于转动速度过快导致有数据丢失的情况，但此补偿机制容易受设备信号质量影响。对于信号质量很差的设备，如信号很多毛刺，如果加入 miss 则可能出现 **“采样数据跳变”** 和 **“换向迟钝”** 的问题。对于此类设备，建议进行以下几方面尝试：

1. 如选用 sclk_slow 作为时钟源，检查是否有配置 pclk 频率小于 qdec 工作频率

2. 改用较小工作时钟

3. 采用较小的 miss 值（如 miss=1）和较大的 filter 值

4. 采用较大工作时钟（如 HCLK 时钟），不加 miss 进行采样

如果偶尔有较小的数据跳变，如 5 以内，则需判断其可能属于正常情况。

11.2.2 注意点

- phase_a、phase_b 引脚配置注意区分正反，交换引脚则得到相反的转向
- 配置 pclk 时钟可能会影响其他外设，建议配好 qdec 之后将 pclk 及时恢复
- qdec 采样快慢和时钟正相关，和 qdec_clk_div 大小无关，qdec_clk_div 只控制对结果的上报频率
- qdec 上报结果会同时触发 qdec 中断或者 DMA_REQ，qdec_clk_div 设置过低会占用较多 CPU 资源
- filter 建议选择较大值，受毛刺影响较小，稳定性较好

11.3 编程指南

11.3.1 驱动接口

- QDEC_QdecCfg：qdec 标准配置接口

- QDEC_EnableQdecDiv：qdec_clk_div 设置使能接口
- QDEC_ChannelEnable：qdec 通道使能接口
- QDEC_GetData：qdec 获取数据接口
- QDEC_GetDirection：qdec 获取转向接口
- QDEC_Reset：qdec 复位接口

11.3.2 代码示例

下面一段代码展示了 qdec 全部配置并循环读数：

```
static void QDEC_PclkCfg(void)
{
    if ((APB_SYSCTRL->QdecCfg >> 15) & 1)
        return;
    uint32_t hclk = SYSCTRL_GetHClk();
    uint32_t slowClk = SYSCTRL_GetSlowClk();
    uint8_t div = hclk / slowClk;
    if (hclk % slowClk)
        div++;
    if (!(div >> 4))
        SYSCTRL_SetPClkDiv(div);
}
void test(void)
{
    // setup qdec
    SYSCTRL_ClearClkGateMulti((1 << SYSCTRL_ITEM_APB_PinCtrl) |
                              (1 << SYSCTRL_ITEM_APB_QDEC));
    SYSCTRL_ReleaseBlock(SYSCTRL_ITEM_APB_QDEC);
    PINCTRL_SelQDECIn(16, 17);    // set GPIO16=phase_a, GPIO17=phase_b

    SYSCTRL_SelectQDECClk(SYSCTRL_CLK_SLOW, 100);
    QDEC_PclkCfg();    // set pclk not bigger than sclk_slow
```

```
    QDEC_EnableQdecDiv(QDEC_DIV_1024);
    QDEC_QdecCfg(50, 1);
    QDEC_ChannelEnable(1);

    // print qdec data and direction when rotate the mouse wheel manually
    uint16_t preData = 0;
    uint16_t data = 0;
    uint8_t dir;
    while(1) {
        data = QDEC_GetData();
        dir = QDEC_GetDirection();
        if (data != preData) {
            if (dir) {
                printf("data: %d, %s\n", data, "anticlockwise");
            } else {
                printf("data: %d, %s\n", data, "clockwise");
            }
        }
        preData = data;
    }
}
```

当手动转动鼠标滚轮时，会打印出收到的 qdec 数据和转向。

推荐开发者采用 timer 定时轮询的方式读取 qdec 数据，并进行数据处理和上报。具体的 qdec 详细使用实例请参考 SDK 中 HID mouse 例程。

第十二章　串行外围设备接口（SPI）

SPI 全称为 Serial Peripheral interface 即串行外围设备接口。SPI 是一种高速同步的通信总线。一般使用四个 IO：SDI（数据输入），SDO（数据输出），SCK（时钟），CS（片选）。针对 Flash 的 QSPI 则还需要使用额外的两个 IO：WP（写保护），HOLD（保持）。

12.1　功能概述

- 两个 SPI 模块
- 支持 SPI 主 (Master)& 从 (Slave) 模式
- 支持 Quad SPI，可以从外挂 Flash 执行代码
- 独立的 RX&TX FIFO，深度为 8 个 word
- 支持 DMA
- 支持 XIP(SPI0)

12.2　使用说明

12.2.1　时钟以及 IO 配置

使用模块之前，需要打开相应的时钟，并且配置 IO（查看对应 datasheet 获取可用的 IO）：

1. 通过 `SYSCTRL_ClearClkGateMulti` 打开 SPI 时钟,例如 SPI1 则需要打开 `SYSCTRL_ITEM_APB_SPI1`。
2. 配置 IO 的输入功能 `PINCTRL_SelSpiIn`，没有使用到的 IO 可以使用 IO_NOT_A_PIN 替代。
3. 使用 `PINCTRL_SetPadMux` 配置 IO 的输出功能。
4. 对于 Slave 的输入，例如 CLK 需要保持默认低电平，则使用 `PINCTRL_Pull` 配置 IO 的上拉功能。

5. 打开 SPI 中断 `platform_set_irq_callback`。
6. 对于时钟大于 20M 的使用场景，IO 的选择有特殊要求，请参考高速时钟和 `IO` 映射。

以 SPI1 为例，高速 IO 可以为：

```
#define SPI_MIC_CLK         GIO_GPIO_7
#define SPI_MIC_MOSI        GIO_GPIO_8
#define SPI_MIC_MISO        GIO_GPIO_9
#define SPI_MIC_CS          GIO_GPIO_10
#define SPI_MIC_WP          GIO_GPIO_11
#define SPI_MIC_HOLD        GIO_GPIO_12
```

下述示例可以将指定 IO 映射到 SPI1 的 Master 模式：

```
static void setup_peripherals_spi_pin(void)
{
    SYSCTRL_ClearClkGateMulti(    (1 << SYSCTRL_ITEM_APB_SPI1)
                                | (1 << SYSCTRL_ITEM_APB_PinCtrl));

    PINCTRL_SelSpiIn(SPI_PORT_1, SPI_MIC_CLK, SPI_MIC_CS, SPI_MIC_HOLD,
                     SPI_MIC_WP, SPI_MIC_MISO, SPI_MIC_MOSI);
    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);

    platform_set_irq_callback(PLATFORM_CB_IRQ_APBSPI, peripherals_spi_isr, NULL);
}
```

如果是 Slave 模式，则需要额外配置默认上拉，并且输入输出 IO 有区别：

```
static void setup_peripherals_spi_pin(void)
{
    SYSCTRL_ClearClkGateMulti(    (1 << SYSCTRL_ITEM_APB_SPI1)
```

```
                                | (1 << SYSCTRL_ITEM_APB_PinCtrl)));

    PINCTRL_Pull(SPI_MIC_CLK,PINCTRL_PULL_DOWN);
    PINCTRL_Pull(SPI_MIC_CS,PINCTRL_PULL_UP);
    PINCTRL_SelSpiIn(SPI_PORT_1, SPI_MIC_CLK, SPI_MIC_CS, SPI_MIC_HOLD,
                     SPI_MIC_WP, SPI_MIC_MISO, SPI_MIC_MOSI);
    PINCTRL_SetPadMux(SPI_MIC_CLK, IO_SOURCE_SPI1_CLK_OUT);
    PINCTRL_SetPadMux(SPI_MIC_MISO, IO_SOURCE_SPI1_MISO_OUT);

    platform_set_irq_callback(PLATFORM_CB_IRQ_APBSPI, peripherals_spi_isr, NULL);
}
```

12.2.2 模块初始化

模块的初始化通过 apSSP_DeviceParametersSet 和结构体 apSSP_sDeviceControlBlock 实现，结构体各个参数为：

- eSclkDiv:时钟分频因子,决定了 SPI 的时钟速率。该参数和 SPI 模块时钟有关,在默认配置下,SPI 模块时钟为 24M,eSclkDiv 可以直接使用 SPI_INTERFACETIMINGSCLKDIV_DEFAULT_xx 宏定义。对于更高的时钟，需要首先提高 SPI 模块时钟，然后再计算 eSclkDiv，计算公式和配置方式请参考章节其他配置-> 时钟配置。
- eSCLKPhase：上升沿还是下降沿采样，参考 SPI_TransFmt_CPHA_e。
- eSCLKPolarity：时钟默认是低电平还是高电平，参考 SPI_TransFmt_CPOL_e。
- eLsbMsbOrder：bit 传输顺序是 LSB 还是 MSB，默认是 MSB，参考 SPI_TransFmt_LSB_e。
- eDataSize：每个传输单位的 bit 个数，8/16/32bit，参考 SPI_TransFmt_DataLen_e。
- eMasterSlaveMode：选择是 Master 还是 Slave 模式，参考 SPI_TransFmt_SlvMode_e。
- eReadWriteMode:选择传输模式:只读/只写/同时读写,参考 SPI_TransCtrl_TransMode_e。
- eQuadMode：选择是普通 SPI 还是 QSPI，参考 SPI_TransCtrl_DualQuad_e。
- eWriteTransCnt:每次发送的单位个数，每个单位 eDataSize 个 bit，达到单位个数后，CS 将会拉高，代表一次传输结束。
- eReadTransCnt：每次接收的单位个数，每个单位 eDataSize 个 bit，达到单位个数后，CS 将会拉高，代表一次传输结束。
- eAddrEn：是否需要在数据之前发送地址，只适用 Master，参考 SPI_TransCtrl_AddrEn_e。
- eCmdEn：是否需要在数据之前发送命令，只适用 Master，参考 SPI_TransCtrl_CmdEn_e。

- eInterruptMask：需要打开的 SPI 中断类型，比如 SPI 传输结束中断和 FIFO 中断，参考 bsSPI_INTREN_xx。
- TxThres：触发 TX FIFO 中断的门限值，比如可以为 eWriteTransCnt/2，参考 apSSP_SetTxThres。
- RxThres：触发 RX FIFO 中断的门限值，比如可以为 eReadTransCnt/2，参考 apSSP_SetRxThres。
- SlaveDataOnly:Slave 模式下生效,如果只有数据,需要设置为打开,如果包含地址 eAddrEn 或者命令 eCmdEn，需要设置改参数为 DISABLE，参考 SPI_TransCtrl_SlvDataOnly_e。
- eAddrLen：如果打开了 eAddrEn，需要选择地址长度，参考 SPI_TransFmt_AddrLen_e。

具体使用请参考编程指南。

12.2.3 中断配置

通过 eInterruptMask 打开需要的中断:

- bsSPI_INTREN_ENDINTEN：传输结束（CS 拉高）之后会触发该中断。
- bsSPI_INTREN_TXFIFOINTEN：到达 TxThres 门限值之后，触发 FIFO 中断。
- bsSPI_INTREN_RXFIFOINTEN：到达 RxThres 门限值之后，触发 FIFO 中断。
  - 通过 apSSP_GetDataNumInRxFifo 来判断当前 FIFO 中有效数据的个数。使用 apSSP_ReadFIFO 来读取 FIFO 中的数据，直到 FIFO 为空。

12.2.4 编程指南

以下提供不同场景下的代码实现供参考。

12.2.4.1 场景 1：同时读写，不使用 DMA

其中 SPI 主（Master）和 SPI 从（Slave）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 IO，如果是普通模式，则不需要 SPI_MIC_WP 和 SPI_MIC_HOLD。

12.2.4.1.1 Master 配置

- 配置 IO，参考时钟以及 IO 配置。

- 模块初始化：

  假设每个传输单元是 32bit，则 mode 0 下的 Master 模式初始化配置为：

```
#define SPI_MASTER_PARAM(DataLen) { SPI_INTERFACETIMINGSCLKDIV_DEFAULT_2M, \
SPI_CPHA_ODD_SCLK_EDGES, SPI_CPOL_SCLK_LOW_IN_IDLE_STATES, \
SPI_LSB_MOST_SIGNIFICANT_BIT_FIRST, SPI_DATALEN_32_BITS, \
SPI_SLVMODE_MASTER_MODE, SPI_TRANSMODE_WRITE_READ_SAME_TIME, \
SPI_DUALQUAD_REGULAR_MODE, DataLen, DataLen, \
SPI_ADDREN_DISABLE, SPI_CMDEN_DISABLE, (1 << bsSPI_INTREN_ENDINTEN), \
0, 0, SPI_SLVDATAONLY_ENABLE, SPI_ADDRLEN_1_BYTE }
```

  使用 API`apSSP_DeviceParametersSet` 来初始化 SPI 模块：

```
#define DATA_LEN (SPI_FIFO_DEPTH)
static void setup_peripherals_spi_module(void)
{
    apSSP_sDeviceControlBlock pParam = SPI_MASTER_PARAM(DATA_LEN);
    apSSP_DeviceParametersSet(APB_SSP1, &pParam);
}
```

- 中断实现

  该示例中只打开了 SPI ENDINT 中断，该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);
  }
}
```

- 发送数据

  发送数据需要填充数据到 TX FIFO 并且触发传输：

  - 使用 apSSP_WriteFIFO 写入需要传输的数据，通过 apSSP_TxFifoFull 来判断 TX FIFO 状态，写入数据直到 FIFO 变满。FIFO 的深度为 8，超过 8 个数据可以分为多次发送。
  - apSSP_WriteCmd 来触发传输，此场景中 eAddrEn 或者 eCmdEn 都是关闭的，但是仍然需要填充一个任意数据（比如 0x00）来触发传输。
  - 使用 apSSP_GetSPIActiveStatus 等待发送结束，或者查看对应中断。
  - 发送的数据格式和长度需要和 eDataSize 等参数对应。

```
uint32_t write_data[DATA_LEN];
void peripherals_spi_send_data(void)
{
  apSSP_WriteCmd(APB_SSP1, 0x00, 0x00);//trigger transfer
  for(i = 0; i < DATA_LEN; i++)
  {
    if(apSSP_TxFifoFull(APB_SSP1)){ break; }
    apSSP_WriteFIFO(APB_SSP1, write_data[i]);
  }
  while(apSSP_GetSPIActiveStatus(APB_SSP1));
}
```

- 接收数据

  在 SPI 发送结束后，通过 apSSP_GetDataNumInRxFifo 查看并读取 RX FIFO 中的数据。

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

- 使用流程

- 设置 IO，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。

12.2.4.1.2 Slave 配置

- 配置 IO，参考时钟以及 IO 配置。
- 模块初始化：

  Slave 的初始化和 Master 相同，只需要将 mode 切换为 SPI_SLVMODE_SLAVE_MODE：

```
#define SPI_SLAVE_PARAM(DataLen) { SPI_INTERFACETIMINGSCLKDIV_DEFAULT_2M, \
SPI_CPHA_ODD_SCLK_EDGES, SPI_CPOL_SCLK_LOW_IN_IDLE_STATES, \
SPI_LSB_MOST_SIGNIFICANT_BIT_FIRST, SPI_DATALEN_32_BITS, \
SPI_SLVMODE_SLAVE_MODE, SPI_TRANSMODE_WRITE_READ_SAME_TIME, \
SPI_DUALQUAD_REGULAR_MODE, DataLen, DataLen, \
SPI_ADDREN_DISABLE, SPI_CMDEN_DISABLE, (1 << bsSPI_INTREN_ENDINTEN), \
0, 0, SPI_SLVDATAONLY_ENABLE, SPI_ADDRLEN_1_BYTE }
```

  调用 apSSP_DeviceParametersSet 来初始化 SPI 模块：

```
static void setup_peripherals_spi_module(void)
{
    apSSP_sDeviceControlBlock pParam = SPI_SLAVE_PARAM(DATA_LEN);
    apSSP_DeviceParametersSet(APB_SSP1, &pParam);
}
```

- 发送数据

  Slave 的待发送数据需要提前放到 TX FIFO 中。比如在初始化之后，就可以往 FIFO 中填充发送数据，同时需要判断 apSSP_TxFifoFull：

```
for(i = 0; i < DATA_LEN; i++)
{
  if(apSSP_TxFifoFull(APB_SSP1)){ break; }
  apSSP_WriteFIFO(APB_SSP1, write_data[i]);
}
```

- 接收数据

  Slave 的数据接收需要在中断中进行，bsSPI_INTREN_ENDINTEN 中断代表传输结束，此时可以读取 RX FIFO 中的内容，如果数据长度大于 FIFO 深度，则需要打开 RxThres，在 FIFO 中断中读取接收数据，或者使用 DMA 方式，否则数据会丢失。

```
static uint32_t peripherals_spi_isr(void *user_data)
{
  uint32_t stat = apSSP_GetIntRawStatus(APB_SSP1), i;
  if(stat & (1 << bsSPI_INTREN_ENDINTEN))
  {
    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);

  }
}
```

- 使用流程

  – 设置 IO，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。

12.2.4.2 场景 2：同时读写，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 IO，如果是普通模式，则不需要 SPI_MIC_WP 和 SPI_MIC_HOLD。

12.2.4.2.1 Master 配置

- 配置 IO，参考时钟以及 IO 配置。
- 模块初始化，参考场景 1Master 配置。
- DMA 初始化

  使用之前需要初始化 DMA 模块：

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

- DMA 设置

  1. 设置 DMA 将指定地址的数据搬运到 SPI1 TX FIFO，并打开 DMA。SPI1 启动后，搬运自动开始：

```
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);
}
```

2. 设置 DMA 将 SPI1 RX FIFO 的数据搬运到指定地址：

```
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);
}
```

- 中断实现

  该示例中只打开了 SPI ENDINT 中断，该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);
  }
}
```

- 接收数据配置

1. 首先需要打开 SPI 模块中的 DMA 功能 `apSSP_SetRxDmaEn`。
2. 设置每次传输时接收和发射的个数，改参数已经在模块初始化中设置过了，此处为可选项，如果需要更新，可以通过 `apSSP_SetTransferControlRdTranCnt` 和 `apSSP_SetTransferControlWrTranCnt` 来更新。注意：该场景下，发射和接收的个数需要相同。
3. 配置 DMA。

```
#define SPI_DMA_RX_CHANNEL   (1)//DMA channel 1
uint32_t read_data[DATA_LEN];

void peripherals_spi_read_data(void)
{
  apSSP_SetRxDmaEn(APB_SSP1,1);
  apSSP_SetTransferControlRdTranCnt(APB_SSP1,DATA_LEN);
  peripherals_spi_rxfifo_to_dma(SPI_DMA_RX_CHANNEL, read_data,
                                sizeof(read_data));
}
```

- 发送数据配置

  类似于接收，发射需要打开 SPI 的 DMA 功能，并且配置 DMA。

```
#define SPI_DMA_TX_CHANNEL   (0)//DMA channel 0
uint32_t write_data[DATA_LEN];

void peripherals_spi_push_data(void)
{
  apSSP_SetTxDmaEn(APB_SSP1,1);
  apSSP_SetTransferControlWrTranCnt(APB_SSP1,DATA_LEN);
  peripherals_spi_dma_to_txfifo(SPI_DMA_TX_CHANNEL, write_data,
                                sizeof(write_data));
}
```

- 发送数据

  1. 在需要发送数据时，通过 DMA 填充待发射数据到 TX FIFO。
  2. 配置接收数据的 DMA，同时读写模式下，发射和接收同步进行。
  3. 配置命令触发传输。
  4. 等待发射结束 `apSSP_GetSPIActiveStatus`，关闭 DMA 功能。

```
void peripherals_spi_send_data(void)
{
  peripherals_spi_read_data();
  peripherals_spi_push_data();
  apSSP_WriteCmd(APB_SSP1, 0x00, 0x00);//trigger transfer
  while(apSSP_GetSPIActiveStatus(APB_SSP1));
  apSSP_SetTxDmaEn(APB_SSP1,0);
}
```

- 使用流程
  - 设置 IO，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。

12.2.4.2.2 Slave 配置

- 配置 IO，参考时钟以及 IO 配置。
- 模块初始化，参考场景 1Slave 配置。
- DMA 初始化，与 Master 的 DMA 初始化相同，参考 setup_peripherals_dma_module。
- DMA 设置，与 Master 的 DMA 设置相同，参考 peripherals_spi_dma_to_txfifo 和 peripherals_spi_rxfifo_to_dma。
- 接收数据配置，与 Master 相同，参考 peripherals_spi_read_data。
- 发送数据配置，与 Master 相同，参考 peripherals_spi_push_data。
- 传输前准备

1. 对于 Slave，如果需要在第一次传输时发送数据，则需要提前将需要发送的数据配置到 DMA，配置 peripherals_spi_push_data。
2. 使用 peripherals_spi_read_data 配置接收 DMA，等待 Master 传输。

```
peripherals_spi_read_data();
peripherals_spi_push_data();
```

- 中断实现

1. bsSPI_INTREN_ENDINTEN 的触发代表当前传输结束。
2. 检查接收数据。
3. 如果需要准备下一次传输，使用 peripherals_spi_read_data 建立接收 DMA。
4. 如果需要准备下一次传输，准备发送数据，使用 peripherals_spi_push_data 建立发射 DMA。
5. 清除中断标志。

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

- 使用流程

  – 设置 IO，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。

12.2.5 其他配置

12.2.5.1 时钟配置（pParam.eSclkDiv）

12.2.5.1.1 默认配置 对于默认配置，SPI 时钟的配置通过 pParam.eSclkDiv 来实现，计算公式为：$(spi \quad interface \quad clock)/(2\times(eSclkDiv+1))$，其中默认配置下，spi interface clock 为 24M，因此可以得到不同时钟下的 eSclkDiv：

```
#define SPI_INTERFACETIMINGSCLKDIV_DEFAULT_6M    (1)
#define SPI_INTERFACETIMINGSCLKDIV_DEFAULT_4M    (2)
#define SPI_INTERFACETIMINGSCLKDIV_DEFAULT_3M    (3)
#define SPI_INTERFACETIMINGSCLKDIV_DEFAULT_2M4   (4)
#define SPI_INTERFACETIMINGSCLKDIV_DEFAULT_2M    (5)
```

12.2.5.1.2 高速时钟配置 SPI0 和 SPI1 的高速时钟配置有一些不同，**注意：高速时钟需要使用特定的 IO，请查看 SPI 高速时钟和 pin 的映射**。

12.2.5.1.2.1 SPI0 对于更高的时钟，需要在配置 pParam.eSclkDiv 之前打开额外配置，打开方式如下

- 首先通过 SYSCTRL_GetPLLClk() 获取 PLL 时钟，此处假设为 336M。
- 切换 SPI0 到高速时钟 SYSCTRL_SelectSpiClk(SPI_PORT_0,SYSCTRL_CLK_HCLK+1)，此处的入参代表分频比 2，即最终的 spi interface clock 为 $336/2=168.0M$。
- 通过计算公式 $(spi \quad interface \quad clock)/(2 \times (eSclkDiv + 1))$ 得到不同时钟下的 eSclkDiv。
- 通过 SYSCTRL_GetClk(SYSCTRL_ITEM_AHB_SPI0) 来确认 interface clock 是否生效。

在以上举例中，可以使用以下宏定义来配置 pParam.eSclkDiv

```
#define SPI_INTERFACETIMINGSCLKDIV_SPI0_21M    (1)
#define SPI_INTERFACETIMINGSCLKDIV_SPI0_14M    (2)
```

以下的 API 可以实现相同的功能，假设 PLL 时钟为 336M，入参为 21000000(21M), 则该 API 可以完成 SPI0 时钟配置，并且返回 `eSclkDiv`。**入参需要和 PLL 成倍数关系**。

```
uint8_t setup_peripherals_spi_0_high_speed_interface_clk(uint32_t spiClk)
{
    //for spi0 only
    uint8_t eSclkDiv = 0;
    uint32_t spiIntfClk;
    uint32_t pllClk = SYSCTRL_GetPLLClk();

    SYSCTRL_SelectSpiClk(SPI_PORT_0,SYSCTRL_CLK_PLL_DIV_1+1);

    spiIntfClk = SYSCTRL_GetClk(SYSCTRL_ITEM_AHB_SPI0);
    eSclkDiv = ((spiIntfClk/spiClk)/2)-1;

    return eSclkDiv;
}
```

调用方式为：

```
pParam.eSclkDiv = setup_peripherals_spi_0_high_speed_interface_clk(21000000);
```

12.2.5.1.2.2 SPI1 对于更高的时钟，需要在配置 `pParam.eSclkDiv` 之前打开 HCLK 配置，打开方式如下：

- 首先查看 HCLK 频率:`SYSCTRL_GetHClk()`。
  - 如果有需要可以使用 `SYSCTRL_SelectHClk(SYSCTRL_CLK_PLL_DIV_1+3);` 来修改 HCLK 时钟。修改方法为，首先使用 `SYSCTRL_GetPLLClk()` 获取 PLL 时钟，入参为分频比，假如 PLL 时钟为 336M，则 `SYSCTRL_CLK_PLL_DIV_1+6` 为 7 分频，最终 HClk 为 336/7=48M。
- 将 SPI1 时钟切换到 HCLK:`SYSCTRL_SelectSpiClk(SPI_PORT_1,SYSCTRL_CLK_HCLK)`。

- 通过计算公式 $(spi \quad interface \quad clock)/(2 \times (eSclkDiv + 1))$ 得到不同时钟下的 eSclkDiv。
- 通过 SYSCTRL_GetClk(SYSCTRL_ITEM_APB_SPI1) 来确认 interface clock 是否生效。

假设 HCLK 为 112M（即 spi interface clock），通过计算公式可以得到不同时钟下的 eSclkDiv 为：

```
#define SPI_INTERFACETIMINGSCLKDIV_SPI1_19M    (2)
#define SPI_INTERFACETIMINGSCLKDIV_SPI1_14M    (3)
```

以下的 API 可以实现相同的功能，假设 HCLK 时钟为 112M，入参为 14000000(14M), 则该 API 可以完成 SPI1 时钟配置，并且返回 eSclkDiv。**入参需要和 HCLK 成倍数关系**

```
uint8_t setup_peripherals_spi_1_high_speed_interface_clk(uint32_t spiClk)
{
    uint8_t eSclkDiv = 0;
    uint32_t spiIntfClk;
    uint32_t hClk = SYSCTRL_GetHClk();

    SYSCTRL_SelectSpiClk(SPI_PORT_1,SYSCTRL_CLK_HCLK);

    spiIntfClk = SYSCTRL_GetClk(SYSCTRL_ITEM_APB_SPI1);
    eSclkDiv = ((spiIntfClk/spiClk)/2)-1;

    return eSclkDiv;
}
```

调用方式为：

```
pParam.eSclkDiv = setup_peripherals_spi_1_high_speed_interface_clk(14000000);
```

12.2.5.2 QSPI 使用

QSPI 的 bit 顺序以及 MOSI/MISO 的含义和普通 SPI 不同，但大部分读写的配置是共享的。使用 QSPI 需要在普通 SPI 的配置的基础上，做一些额外修改：

12.2.5.2.1 IO 配置 QSPI 用到了 CLK,CS,MOSI,MISO,HOLD,WP, 主从都需要配置为输入输出：

```
PINCTRL_SelSpiIn(SPI_PORT_1, SPI_MIC_CLK, SPI_MIC_CS, SPI_MIC_HOLD,
                 SPI_MIC_WP, SPI_MIC_MISO, SPI_MIC_MOSI);
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);
PINCTRL_SetPadMux(SPI_MIC_MISO, IO_SOURCE_SPI1_MISO_OUT);
PINCTRL_SetPadMux(SPI_MIC_WP, IO_SOURCE_SPI1_WP_OUT);
PINCTRL_SetPadMux(SPI_MIC_HOLD, IO_SOURCE_SPI1_HOLD_OUT);
```

对于 Slave，则还需要额外配置 CS 的内部上拉：

```
PINCTRL_Pull(SPI_MIC_CLK,PINCTRL_PULL_DOWN);
PINCTRL_Pull(SPI_MIC_CS,PINCTRL_PULL_UP);
```

12.2.5.2.2 QSPI Master

12.2.5.2.2.1 pParam 配置 QSPI 的部分 `pParam` 参数需要修改为如下，同时 `Addr` 和 `Cmd` 需要打开：

```
pParam.eQuadMode = SPI_DUALQUAD_QUAD_IO_MODE;
pParam.SlaveDataOnly = SPI_SLVDATAONLY_DISABLE;
pParam.eAddrEn = SPI_ADDREN_ENABLE;
pParam.eCmdEn = SPI_CMDEN_ENABLE;
```

此外，Master 还需要配置 `pParam.eReadWriteMode`, 例如：

- `SPI_TRANSMODE_WRITE_READ`：读和写顺序执行，比如首先利用四线完成写操作，然后再读。
- `SPI_TRANSMODE_WRITE_DUMMY_READ`：先写后读，在 Write 和 Read 之间添加 dummy（默认为 8 个 clk cycle）。

对于 Slave，则读写顺序相反：

- `SPI_TRANSMODE_READ_WRITE`：先读后写。
- `SPI_TRANSMODE_READ_DUMMY_WRITE`：先读后写，在 Read 和 Write 之间添加 dummy（默认为 8 个 clk cycle）。

`SPI_TransCtrl_TransMode_e` 定义了可以使用的 `pParam.eReadWriteMode`。

配置参数举例：

```
#define SPI_MASTER_PARAM(DataLen) { SPI_INTERFACETIMINGSCLKDIV_DEFAULT_2M, \
SPI_CPHA_ODD_SCLK_EDGES, SPI_CPOL_SCLK_LOW_IN_IDLE_STATES, \
SPI_LSB_MOST_SIGNIFICANT_BIT_FIRST, SPI_DATALEN_32_BITS, SPI_SLVMODE_MASTER_MODE, \
SPI_TRANSMODE_WRITE_DUMMY_READ, SPI_DUALQUAD_QUAD_IO_MODE, DataLen, DataLen, \
SPI_ADDREN_ENABLE, SPI_CMDEN_ENABLE, (1 << bsSPI_INTREN_ENDINTEN), \
0, 0, SPI_SLVDATAONLY_DISABLE, SPI_ADDRLEN_1_BYTE }

#define SPI_SLAVE_PARAM(DataLen) { SPI_INTERFACETIMINGSCLKDIV_DEFAULT_2M, \
SPI_CPHA_ODD_SCLK_EDGES, SPI_CPOL_SCLK_LOW_IN_IDLE_STATES, \
SPI_LSB_MOST_SIGNIFICANT_BIT_FIRST, SPI_DATALEN_32_BITS, SPI_SLVMODE_SLAVE_MODE, \
SPI_TRANSMODE_READ_DUMMY_WRITE, SPI_DUALQUAD_QUAD_IO_MODE, DataLen, DataLen, \
SPI_ADDREN_ENABLE, SPI_CMDEN_ENABLE, (1 << bsSPI_INTREN_ENDINTEN), \
0, 0, SPI_SLVDATAONLY_DISABLE, SPI_ADDRLEN_1_BYTE }
```

12.2.5.5.2.2.2 Dummy cnt 配置 `pParam.eReadWriteMode` 中指定了 dummy 的位置，通过 `apSSP_SetTransferControlDummyCnt` 配置 dummy 个数。

API 的入参为 dummy cnt，通过以下关系转换成 API CLK 的 dummy cycles。

$$cycles = (dummy \quad cnt + 1) \times ((pParam.eDataSize)/(spi \quad io \quad width))$$

dummy cnt + 1	pParam.eDataSize	spi io width	cycles
1	8	1(single)	8
1	32	4(quad-qspi)	8

以上述的参数配置为例，则下述 API 可以将 dummy cycle 配置为 16：

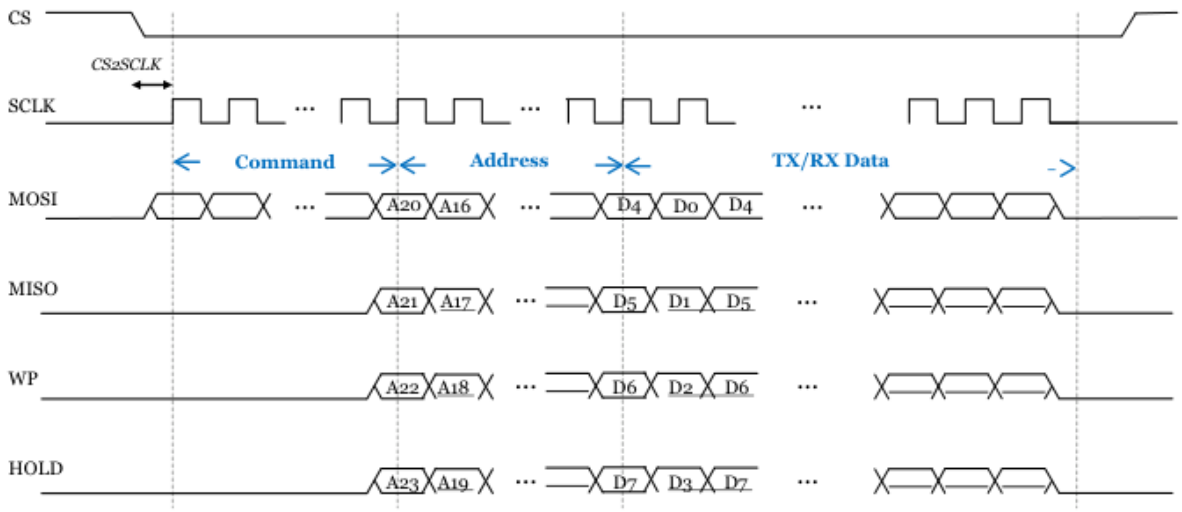
```
apSSP_SetTransferControlDummyCnt(APB_SSP1, 1);//dummy cnt = 1;
```

注意，额外的配置需要在 apSSP_DeviceParametersSet 之后以避免参数覆盖。

12.2.5.2.2.3 Addr 格式 QSPI 的 Command 和 Addr 通过 apSSP_WriteCmd 配置，首先发送 Command，Command 固定占用 MOSI 的 8 个 cycle，然后发送 Addr，Addr 的长度通过 pParam.eAddrLen 配置，发送格式通过 apSSP_SetTransferControlAddrFmt 配置。

- SPI_ADDRFMT_SINGLE_MODE: 默认配置，Addr 只占用 MOSI
- SPI_ADDRFMT_QUAD_MODE:Addr 以 QSPI 的模式发送，占用 MOSI,MISO,WP,HOLD

该 API 只适用于 SPI Master。假如 Addr 配置为 3 字节以及 QUAD MODE，则传输格式为：



12.2.5.2.2.4 QSPI 读取和 XIP 当通过 SPI 外接 FLASH 模块的时候，可以通过芯片内置功能直接读取 FLASH 内容而不需要操作 SPI。该功能只支持 SPI0。

操作步骤为，

- 首先打开时钟并且配置 SPI IO，参考时钟以及 IO 配置。对于 QSPI，请参考 QSPI 的 IO 配置。

  IO 必须使用高速时钟和 IO 映射中 SPI0 的指定 IO。

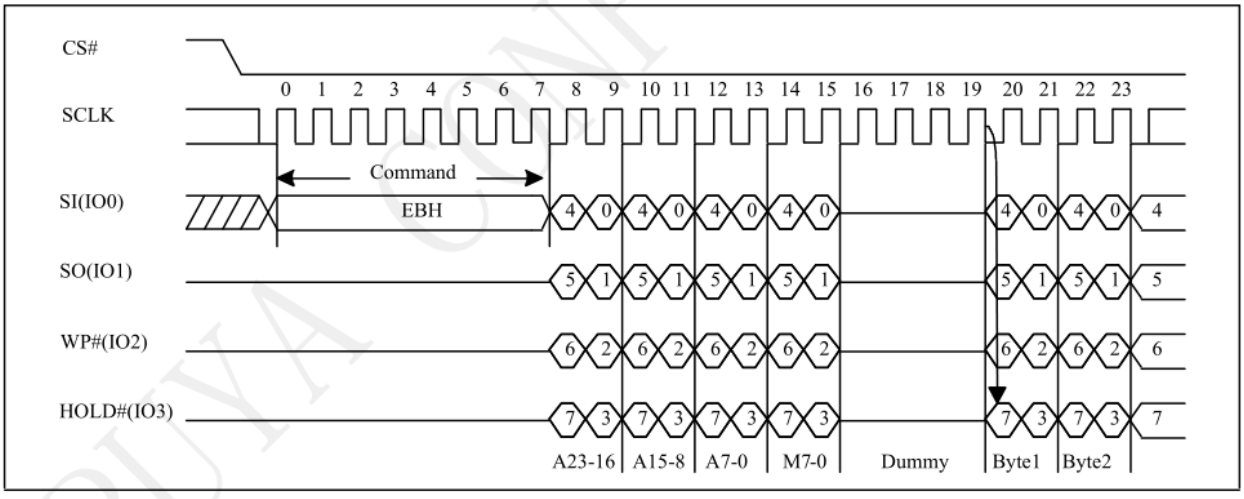
- 然后需要额外打开 SPI 的直接读取功能（不需要其他的 SPI 模块配置）

```
void apSSP_SetMemAccessCmd(SSP_TypeDef *SPI_BASE, apSSP_sDeviceMemRdCmd cmd);
```

cmd 用来选择 FLASH 的读取命令，该命令需要查看对应的 FLASH 手册来获取。apSSP_sDeviceMemRdCmd 中列出了所有支持的读取命令以及该命令的格式：

```
typedef enum
{
  SPI_MEMRD_CMD_03 = 0 ,//read command 0x03 + 3bytes address(regular mode) + data (regular mode)
  SPI_MEMRD_CMD_0B = 1 ,//read command 0x0B + 3bytes address(regular mode) + 1byte dummy + data (
  SPI_MEMRD_CMD_3B = 2 ,//read command 0x3B + 3bytes address(regular mode) + 1byte dummy + data (
  SPI_MEMRD_CMD_6B = 3 ,//read command 0x6B + 3bytes address(regular mode) + 1byte dummy + data (
  SPI_MEMRD_CMD_BB = 4 ,//read command 0xBB + 3bytes + 1byte 0 address(dual mode) + data (dual mo
  SPI_MEMRD_CMD_EB = 5 ,//read command 0xEB + 3bytes + 1byte 0 address(quad mode) + 2bytes dummy
  SPI_MEMRD_CMD_13 = 8 ,//read command 0x13 + 4bytes address(regular mode) + data (regular mode)
  SPI_MEMRD_CMD_0C = 9 ,//read command 0x0C + 4bytes address(regular mode) + 1byte dummy + data (
  SPI_MEMRD_CMD_3C = 10,//read command 0x3C + 4bytes address(regular mode) + 1byte dummy + data (
  SPI_MEMRD_CMD_6C = 11,//read command 0x6C + 4bytes address(regular mode) + 1byte dummy + data (
  SPI_MEMRD_CMD_BC = 12,//read command 0xBC + 4bytes + 1byte 0 address(dual mode) + data (dual mo
  SPI_MEMRD_CMD_EC = 13,//read command 0xEC + 4bytes + 1byte 0 address(quad mode) + 2bytes dummy
}apSSP_sDeviceMemRdCmd;
```

以 SPI_MEMRD_CMD_EB 为例，该命令的格式为:command(0xEB)+address(4bytes)+dummy(2bytes)+data(q



mode)

- 直接读取外置 FLASH 的内容

外置 FLASH 的内容映射在 AHB_QSPI_MEM_BASE 开始的连续空间（32MB）。

- 使用举例：

```
setup_peripherals_spi_pin();
apSSP_SetMemAccessCmd(AHB_SSP0, SPI_MEMRD_CMD_EB);
// read by *((uint8_t*)AHB_QSPI_MEM_BASE + i), i=[0,32MB)
```

- XIP

通过 SPI 模块下载程序到外置 FLASH 模块，然后跳转到外置 FLASH 地址来执行代码。

12.2.5.2.3 QSPI Slave Addr 只适用于 Master，当作为 Slave 的时候，只支持 Command 命令。Slave 在 QSPI 下集成了两个 Command:

- QSPI read only: 0x0E

  格式固定为：Command(单线，8bit) + Dummy(单线，8bit) + read Data(四线)

- QSPI write only: 0x54

  格式固定为：Command(单线，8bit) + Dummy(单线，8bit) + write Data(四线)

当使用这两个 Command 的时候，Master 需要按照上述格式配置。

12.2.5.3 高速时钟和 IO 映射

只有 SPI0 支持 XIP，最大时钟速率和 VBAT 有关：

Function	SPI0	SPI1
XIP	最大速率：96M（取决于 VBAT）	不支持

SPI0 和 SPI1 最大可以支持的时钟在不同场景下有区别：

Function	SPI0	SPI1
Master	传输中只有读或者写：96M	24M
Master	传输中既有读也有写：48M	24M
Slave	24M	24M

高速时钟对 IO 能力有要求，因此对于时钟大于 20M 的情况，需要使用以下固定的 IO，其中 SPI0 的 IO 映射固定。对于 SPI1，SCLK 必须使用 IO7，其他 IO8/9/10/11/12 可以任意配置。

SPI0	SPI1
GPIO36:CS	GPIO7: SCLK
GPIO37:SCLK	GPIO8: CS/HOLD/WP/MISO/MOSI
GPIO38:HOLD	GPIO9: CS/HOLD/WP/MISO/MOSI
GPIO39:WP	GPIO10:CS/HOLD/WP/MISO/MOSI
GPIO40:MISO	GPIO11:CS/HOLD/WP/MISO/MOSI
GPIO41:MOSI	GPIO12:CS/HOLD/WP/MISO/MOSI

第十三章　系统控制（SYSCTRL）

13.1　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

13.1.1　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_GPIO0     ,
    SYSCTRL_ITEM_APB_GPIO1     ,
    // ...
    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;
```

13.1.2 时钟树

从源头看，共有 4 个时钟源：

1. 内部 32KiHz RC 时钟；
2. 外部 32768Hz 晶体；
3. 内部高速 RC 时钟（8M/16M/24M/32M/48M 可调）；
4. 外部 24MHz 晶体。

从 4 个时钟源出发，得到两组时钟：

1. 32KiHz 时钟（*clk_32k*）

   32k 时钟有两个来源：内部 32KiHz RC 电路，外部 32768Hz 晶体。

2. 慢时钟

   慢时钟有两个来源：内部高速 RC 时钟，外部 24MHz 晶体。

   BLE 子系统中射频相关的部分固定使用外部 24MHz 晶体提供的时钟。

之后，

1. PLL 输出（*clk_pll*）

   clk_pll 的频率 f_{pll} 可配置，受 div_{pre}（前置分频）、$loop$（环路分频）和 div_{output}（输出分频）等 3 个参数控制：

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

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

这里，f_{in} 即慢时钟。要求 $f_{vco} \in [60, 600]MHz$，$f_{in}/div_{pre} \in [2, 24]MHz$。

2. *sclk_fast* 与 *sclk_slow*

   clk_pll 经过门控后的时钟称为 *sclk_fast*，慢时钟经过门控后称为 *sclk_slow*。

3. *hclk*

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

   - DMA
   - 片内 Flash
   - QSPI
   - USB[2]
   - 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。

4. *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

5. *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 SPI0 选择使用
   - *sclk_fast_flash_div*：专供片内 Flash 选择使用
   - *sclk_fast_usb_div*：专供 USB 使用

各硬件外设可配置的时钟源汇总如表 13.1。

[1]每个外设可单独对 *hclk* 门控。

[2]仅高速时钟。

表 13.1: 各硬件外设的时钟源

外设	时钟源
GPIO0、GPIO1	选择 *sclk_slow* 或者 *clk_32k*
TMR0、TMR1、TMR2	独立配置 *sclk_slow_timer_div* 或者 *clk_32k*
WDT	*clk_32k*
PWM	*sclk_slow_pwm_div* 或者 *clk_32k*
PDM	*sclk_slow_pdm_div*
QDEC	对 *hclk* 或者 *sclk_slow*
KeyScan	*sclk_slow_ks_div* 或者 *clk_32k*
IR、ADC、EFUSE	独立配置 *sclk_slow_adc_div* 或者 *sclk_slow*
DMA	*hclk*
SPI0	*sclk_fast_qspi_div* 或者 *sclk_slow*
I2S	*sclk_fast_i2s_div* 或者 *sclk_slow*
UART0、UART1、SPI1	独立配置 *hclk* 或者 *sclk_slow*
I2C0、I2C1	*pclk*

13.1.3 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。

规划 DMA 通道需要同时将需要支持的 16 个 DMA 通道的握手信号传入 `SYSCTRL_SelectUsedDmaItems` 接口。

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;
```

13.2 使用说明

13.2.1 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);
```

13.2.2 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);
```

13.2.3 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,   // 前置分频
    uint32_t loop,      // 环路倍频
    uint32_t div_output // 输出分频
);
```

例如，假设慢时钟配置为 24MHz，下面的代码将 *hclk* 配置为 112MHz 并读取到变量：

```
SYSCTRL_ConfigPLLClk(5, 70, 1);
SYSCTRL_SelectHClk(SYSCTRL_CLK_PLL_DIV_3);
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` 的定义为：

```
typedef enum
{
    SYSCTRL_CLK_SLOW,             // 使用 sclk_slow
    SYSCTRL_CLK_32k = ...,        // 使用 32KiHz 时钟
    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_CLK_SLOW_DIV_1 = ..., // 对 sclk_slow 分配
} SYSCTRL_ClkMode;
```

根据表 13.1 可知，I2S 可使用 *slk_slow*：

```
SYSCTRL_SelectI2sClk(SYSCTRL_CLK_SLOW);
```

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 分频：

```
SYSCTRL_SelectI2sClk(SYSCTRL_CLK_PLL_DIV_5);
```

3. 读取时钟频率

   使用 `SYSCTRL_GetClk` 读取指定外设的时钟频率：

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

   比如，

```
// I2S 使用 PLL 的 5 分频
SYSCTRL_SelectI2sClk(SYSCTRL_CLK_PLL_DIV_5);
// freq = sclk_fast 的频率 / 5
uint32_t freq = SYSCTRL_GetClk(SYSCTRL_ITEM_APB_I2S);
```

4. 降低频率以节省功耗

   降低系统各时钟的频率可以显著降低动态功耗。相关函数有：

   - `SYSCTRL_SelectHClk`：选择 *hclk*
   - `SYSCTRL_SelectFlashClk`：选择内部 Flash 时钟
   - `SYSCTRL_SelectSlowClk`：选择慢时钟
   - `SYSCTRL_EnablePLL`：开关 PLL

5. 配置用于慢时钟的高速 RC 时钟

   通过 `SYSCTRL_EnableSlowRC` 可以使能并配置内部高速 RC 时钟的频率模式：

```
void SYSCTRL_EnableSlowRC(
    uint8_t enable,              // 使能或禁用
    SYSCTRL_SlowRCClkMode mode   // 频率模式
);
```

频率模式为：

```
typedef enum
{
    SYSCTRL_SLOW_RC_8M = ...,
    SYSCTRL_SLOW_RC_16M = ...,
    SYSCTRL_SLOW_RC_24M = ...,
    SYSCTRL_SLOW_RC_32M = ...,
    SYSCTRL_SLOW_RC_48M = ...,
} SYSCTRL_SlowRCClkMode;
```

由于内部（芯片之间）、外部环境（温度）存在微小差异或变化，所以这个 RC 时钟的频率或存在一定误差，需要进行调谐以尽量接近标称值。通过 SYSCTRL_AutoTuneSlowRC 可自动完成调谐[3]：

```
uint32_t SYSCTRL_AutoTuneSlowRC(SYSCTRL_SlowRCClkMode value);
```

这个函数返回的数据为调谐参数。如果认为有必要[4]，可以把此参数储存起来，如果系统重启，可通过 SYSCTRL_TuneSlowRC 直接写入参数调谐频率。

温馨提示：

- 关闭 PLL 时，务必先将 CPU、Flash 时钟切换至慢时钟；
- 修改慢时钟配置时，需要保证 PLL 的输出、CPU 时钟等在支持的频率内；
- 推荐使用 SDK 提供的工具生成时钟配置代码，规避错误配置。

[3] 以 24MHz 晶体为参考。

[4] 比如认为 SYSCTRL_AutoTuneSlowRC 耗时过长。

13.2.4 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[5]：

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

13.2.5 唤醒后的时钟配置

ROM 内的启动程序包含一个时钟配置程序，当系统初始上电或者从低功耗状态唤醒时，这个程序就按照预定参数配置几个关键时钟及看门狗。

默认情况下，这个时钟配置程序是打开的，所使用的预定参数如下：

- PLL：打开，div_pre、loop、div_output 分别为 5、70、1；
- *hclk*：*clk_pll* 3 分频；
- 片内 Flash 时钟：*clk_pll* 2 分频；
- 看门狗：不使能。

由于初始上电或者唤醒后，慢时钟来自外部 24MHz 晶体，可计算出上述几个时钟的频率如表 13.2。

表 13.2: 默认参数对应的时钟频率

时钟	频率（MHz）
PLL	336
hclk	112

[5] SYSCTRL_SelectUsedDmaItems 的 items 参数里对应的比特为 0

时钟	频率（MHz）
片内 Flash	168

通过以下两个函数向这个程序传递参数：

1. 使能这个程序并设置参数

```
void SYSCTRL_EnableConfigClocksAfterWakeup(
    uint8_t enable_pll,         // 是否使能 PLL
    uint8_t pll_loop,           // PLL loop
    SYSCTRL_ClkMode hclk,       // hclk
    SYSCTRL_ClkMode flash_clk,  // 片内 Flash 时钟
    uint8_t enable_watchdog);   // 是否使能看门狗
```

如果使能看门狗，系统唤醒后，时钟配置程序将其配置为 4.5s 后触发超时、复位系统。

2. 禁用这个程序

```
void SYSCTRL_DisableConfigClocksAfterWakeup(void);
```

如果禁用这个程序，系统唤醒后几个时钟的频率见表 13.3。

表 13.3： 禁用时钟配置程序时重新唤醒后几个关键时钟的频率

时钟	频率（MHz）
PLL	384
hclk	24
片内 Flash	24

13.2.6 RAM 相关

SoC 内部包含多个内存块，根据用途可分为：仅供 CPU 使用的 SYS RAM，CPU 和蓝牙 Modem 皆可使用的 SHARE RAM 以及高速缓存（Cache）。部分内存块既可以作为 SYS RAM 也可以作为 SHARE RAM（见表 13.4），在不同的软件包内将被配置为不同用途。

表 13.4: 可作为 SYS/SHARE RAM 的内存块

名称	大小 (KiB)	配置为 SYS RAM 时的地址范围	配置为 SHARE RAM 时的地址范围	备注
SYS_MEM_BLOCK_0	16	0x20000000~0x20003FFF	不支持	不可关闭
SYS_MEM_BLOCK_1	16	0x20004000~0x20007FFF	0x40128000~0x4012BFFF	
REMAPPABLE_BLOCK_0	16	0x20008000~0x2000BFFF	0x40124000~0x40127FFF	
REMAPPABLE_BLOCK_1	8	0x2000C000~0x2000DFFF	0x40122000~0x40123FFF	
SHARE_MEM_BLOCK_0	8	不支持	0x40120000~0x40121FFF	

在 *noos_mini*, *mini* 软件包共配置 56 KiB SYS RAM，8 KiB SHARE RAM；在其它软件包里，SYS、SHARE RAM 各 32 KiB。详见表 13.5。注意，虽然 SYS_MEM_BLOCK_1 也可用作 SHARE RAM，但是在所有的软件包里它总是被用作 SYS RAM。

表 13.5: 各软件包里的 SYS/SHARE RAM 配置

名称	SYS RAM		SHARE RAM	
	地址范围	包含的内存块	地址范围	包含的内存块
mini, *noos_mini*	0x20000000 ~ 0x2000DFFF	SYS_MEM_BLOCK_0 SYS_MEM_BLOCK_1 REMAPPABLE_BLOCK_0 REMAPPABLE_BLOCK_1	0x40120000 ~ 0x40121FFF	SHARE_MEM_BLOCK_0
其它	0x20000000 ~ 0x20007FFF	SYS_MEM_BLOCK_0 SYS_MEM_BLOCK_1	0x40120000 ~ 0x40127FFF	SHARE_MEM_BLOCK_0 REMAPPABLE_BLOCK_0 REMAPPABLE_BLOCK_1

表 13.4 中的内存块支持低功耗数据保持。所有这些内存块默认都是开启的，部分内存块可关闭以节省功耗。如果程序中实际用到的 SYS RAM 较少，可通过 `SYSCTRL_SelectMemoryBlocks` 选择所要使用的内存块，并关闭不使用的内存块：

```
void SYSCTRL_SelectMemoryBlocks(
    uint32_t block_map);
```

例如在一个使用 *mini* 软件包的程序里，如果确认只需要 32 KiB 的 SYS RAM，那么为了降低功耗，可关闭 REMAPPABLE_BLOCK_0 和 REMAPPABLE_BLOCK_1，保留其它内存块：

```
SYSCTRL_SelectMemoryBlocks(
    SYSCTRL_SYS_MEM_BLOCK_0 | SYSCTRL_SYS_MEM_BLOCK_1 |
    SYSCTRL_SHARE_MEM_BLOCK_0);
```

另有 2 个内存块可配置为 SYS RAM 或者高速缓存，其配置可通过 `SYSCTRL_CacheControl` 动态修改。将其映射为 SYS RAM 后，可按照表 13.6 中的地址访问。

表 13.6: 可用作高速缓存的内存块

名称	大小 (KiB)	配置为 SYS RAM 时的地址范围
D-Cache-M	8	0x2000E000~0x2000FFFF
I-Cache-M	8	0x20010000~0x20011FFF

这两个内存块都默认处于 Cache 模式。当需要更多的 RAM 时，通过 `SYSCTRL_CacheControl` 可将这两块内存映射为普通 RAM：

```
void SYSCTRL_CacheControl(
    SYSCTRL_CacheMemCtrl i_cache,
    SYSCTRL_CacheMemCtrl d_cache
);
```

`SYSCTRL_CacheMemCtrl` 包含两个值，对应 Cache 模式和 SYS MEM 模式：

```
typedef enum
{
    SYSCTRL_MEM_BLOCK_AS_CACHE = 0,
    SYSCTRL_MEM_BLOCK_AS_SYS_MEM = 1,
} SYSCTRL_CacheMemCtrl;
```

务必注意：

1. 从低功耗状态唤醒时，这两个内存块都将恢复默认值 AS_CACHE；
2. 低功耗状态时，这两个内存块里的数据（无论处于哪种模式）都会丢失；
3. 映射为普通 RAM 后，系统缺少高速缓存，性能有可能明显下降。

第十四章　定时器（TIMER）

14.1　功能概述

ING20XX 系列具有功能完全相同的 3 个计时器，每个计时器包含两个通道，每个通道支持 1 个 32 位计时器，所以系统中一共有 6 个 32 位计时器。既可以用作脉冲宽度调制器 (PWM)，也可以用作简单的定时器。

特性：

- 支持 AMBA2.0 支持 APB 总线
- 最多 4 个多功能定时器
- 提供 6 种使用场景（定时器和 PWM 的组合）
- 计时器时钟源可选
- 计时器可以暂停

14.2　使用说明

14.2.1　设置 TIMER 工作模式

使用 `TMR_SetOpMode` 设置 TIMER 的工作模式。

```
void TMR_SetOpMode(
  TMR_TypeDef *pTMR,      //定时器外设地址
  uint8_t ch_id,          //通道 ID
  uint8_t op_mode,        //工作模式
  uint8_t clk_mode,       //时钟模式
```

```
    uint8_t pwm_park_value
);
```

关于 TMR_SetOpMode 中的参数 pwm_park_value 的值将影响 PWM 的输出：

- 若为 0：通道被禁用时，PWM 输出为低电平；通道启用时，较低周期的 PWM 计数器先计数；
- 若为 1：通道被禁用时，PWM 输出为高电平；通道启用时，较高周期的 PWM 计数器先计数；

TIMER 具有 6 种不同的工作模式，可以大致分为三类：定时器功能、PWM 功能、（定时器+PWM）组合功能。

- 定时器功能

  32 位定时器可以分别作为 1 个 32 位定时器、2 个 16 位定时器、4 个 8 位定时器，定义如下所示。

```
#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
```

- 脉冲宽度调制器功能

  定时器的本质其实是计数器，所以可以拆分为 2 个 16 位的计数器来产生 PWM 信号。

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

- 组合功能

  定时器与 PWM 的功能可以组合使用，对应的组合方式有两种：1）一个 8bitPWM 和一个 16 位计时器；2）一个 8 位 PWM 和两个 8 位计时器。

```
#define TMR_CTL_OP_MODE_8BIT_PWM_16BIT_TIMER_x1   6   // MIXED: PWM with two 8bit cou
#define TMR_CTL_OP_MODE_8BIT_PWM_8BIT_TIMER_x2    7   // MIXED: PWM with two 8bit cou
```

注意: 要更改当前工作的定时器通道模式，必须先禁用该通道, 然后将通道设置为新模式并启用它。

TIMER 的时钟源有两种，分别是内部时钟和外部时钟，定义如下所示。

```
#define TMR_CLK_MODE_EXTERNAL                    0   //external clock
#define TMR_CLK_MODE_APB                         1   //internal clock
```

14.2.2 获取时钟频率

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
  );
```

14.2.3 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,      //通道 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[16:23]	bits[24:31]
TMR_CTL_OP_MODE_32BIT_TIMER_x1				
TMR_CTL_OP_MODE_16BIT_TIMER_x2				
TMR_CTL_OP_MODE_8BIT_TIMER_x4	Timer0	Timer1	Timer2	
TMR_CTL_OP_MODE_16BIT_PWM				
TMR_CTL_OP_MODE_8BIT_PWM_16BIT_TIMER_x1	PWM low period		PWM high period	
TMR_CTL_OP_MODE_8BIT_PWM_8BIT_TIMER_x2	Timer0 PWM low period	Timer1 PWM high period	PWM low period	PWM high period

关于上述格中分配的重载值有两点说明：* 定时器模式下，某个 Timer 在其（重载值 + 1）个计数周期产生一次中断；* PWM 模式下，高周期和低周期的频率值分别是对应重载值 + 1。

14.2.4 使能 TIMER

使用 TMR_Enable 使能对应通道上的一个或多个 timer。

```
void TMR_Enable(
  TMR_TypeDef *pTMR,
  uint8_t ch_id,
  uint8_t mask  //比特 0 为 1 配置 TIMER0
                //比特 1 为 1 配置 TIMER1
                //比特 2 为 1 配置 TIMER2
                //比特 3 为 1 配置 TIMER3
  );
```

注意，如果相应的通道 **不存在**或在通道模式中它 **不是一个有效的设备**，则定时器或 PWM 不能被启用。例如，当 0 号通道设置为 32 位定时器模式时，0 号通道的 Timer 1 不能使能。

14.2.5 获取 TIMER 的比较值

使用 TMR_GetCMP 获取定时器的比较输出。

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

14.2.6 获取 TIMER 的计数器值

使用 TMR_GetCNT 获取定时器的计数值。

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

14.2.7 计时器暂停

使用 TMR_PauseEnable 可以将计时器暂停，计时器的 counter 将保持当前的计数值，取消暂停之后将恢复计数。

```
void TMR_PauseEnable(
  TMR_TypeDef *pTMR,
  uint8_t enable
  );
```

14.2.8 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
  );
```

14.2.9 处理中断状态

使用 TMR_IntHappened 一次性获取某个通道上所有 Timer （最多 4 个 Timer ）的中断触发状态，返回非 0 值表示该 Timer 上产生了中断请求。第 n 比特（第 0 比特为最低比特）对应 Timer n 上的中断触发状态。

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

使用 TMR_IntClr 可以一次性清除某个通道上所有定时器的中断状态。

```
void TMR_IntClr(
  TMR_TypeDef *pTMR,
  uint8_t ch_id,
  uint8_t mask  //比特 0 为 1 清除对应通道上的 Timer0
                //比特 1 为 1 清除对应通道上的 Timer1
                //比特 2 为 1 清除对应通道上的 Timer2
                //比特 3 为 1 清除对应通道上的 Timer3
  );
```

14.3 使用示例

14.3.1 使用计时器功能及暂停功能

将 TIMER1 的通道 0 设置为 TMR_CTL_OP_MODE_32BIT_TIMER_x1 模式，并设定每 1 秒产生一次中断：

```
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));  //4999
TMR_Enable(APB_TMR1, 0, 0xf);
TMR_IntEnable(APB_TMR1, 0, 0xf);
```

14.3.2 使用 TIMER 的 PWM 功能

将 TIMER1 的通道 0 的工作模式设置为 TMR_CTL_OP_MODE_16BIT_PWM，并使用 13 号引脚输出 10HzPWM 信号。

```
#define PIN_TMR_PWM 13

static void setup_peripheral_timer(void)
{
  SYSCTRL_ClearClkGateMulti( (1 << SYSCTRL_ITEM_APB_SysCtrl)
                            |(1 << SYSCTRL_ITEM_APB_PinCtrl)
                            |(1 << SYSCTRL_ITEM_APB_TMR1));

  SYSCTRL_SelectTimerClk(TMR_PORT_1, SYSCTRL_CLK_32k);
  TMR_SetOpMode(APB_TMR1, TMR_CTL_OP_MODE_16BIT_PWM, TMR_CLK_MODE_EXTERNAL, 0);
  TMR_SetReload(APB_TMR1, 0, 0x00090009); // 9 9
  TMR_Enable(APB_TMR1, 0, 0xf);

  PINCTRL_SetPadMux(PIN_TMR_PWM, IO_SOURCE_TIMER1_PWM0_B);
}
```

14.3.3 通道 0 产生 2 个周期性中断

使用 TIMER1 通道 0 生成 2 个中断: 一个用于每 1000 个 APB 时钟周期，另一个用于每 3000 个 APB 周期。

```
static void setup_peripheral_timer(void)
{
  SYSCTRL_ClearClkGateMulti( (1 << SYSCTRL_ITEM_APB_SysCtrl)
                            |(1 << SYSCTRL_ITEM_APB_PinCtrl)
                            |(1 << SYSCTRL_ITEM_APB_TMR1));

  SYSCTRL_SelectTimerClk(TMR_PORT_1, SYSCTRL_CLK_32k);
  TMR_SetOpMode(APB_TMR1, 0, TMR_CTL_OP_MODE_16BIT_TIMER_x2, TMR_CLK_MODE_APB, 0);
  TMR_SetReload(APB_TMR1, 0, 0x0BB703E7);  // 2999  999

  TMR_IntEnable(APB_TMR1, 0, 0x3);  //Ch0Int0 Ch0Int1
  TMR_Enable(APB_TMR1, 0, 0x3);     //Ch0TMR0En Ch0TMR1En
}
```

14.3.4 产生 2 路对齐的 PWM 信号

使用 TIMER1 的通道 0 和通道 1 分别生成两路 PWM 信号 PWM0 和 PWM1，对应参数设置如下所示：PWM0: 周期 = 30 个外部时钟周期，占空比 = 1/3 PWM1: 周期 = 60 个外部时钟周期，占空比 = 1/3 将两路 PWM 对齐，并分别由引脚 13、14 输出。

```
#define PIN_TMR_PWM0 13
#define PIN_TMR_PWM1 14

static void setup_peripheral_timer(void)
{
  SYSCTRL_ClearClkGateMulti( (1 << SYSCTRL_ITEM_APB_SysCtrl)
                            |(1 << SYSCTRL_ITEM_APB_PinCtrl)
                            |(1 << SYSCTRL_ITEM_APB_TMR1));
```

```
    SYSCTRL_SelectTimerClk(TMR_PORT_1, SYSCTRL_CLK_32k);

    TMR_SetOpMode(APB_TMR1, 0, TMR_CTL_OP_MODE_16BIT_PWM, TMR_CLK_MODE_EXTERNAL, 1);
    TMR_SetOpMode(APB_TMR1, 1, TMR_CTL_OP_MODE_16BIT_PWM, TMR_CLK_MODE_EXTERNAL, 1);
    TMR_SetReload(APB_TMR1, 0, 0x00090013);   //9   19
    TMR_SetReload(APB_TMR1, 1, 0x00130027);   //19  39
    TMR_Enable(APB_TMR1, 0, 0xf);
    TMR_Enable(APB_TMR1, 1, 0xf);

    PINCTRL_SetPadMux(PIN_TMR_PWM0, IO_SOURCE_TIMER1_PWM0_B);
    PINCTRL_SetPadMux(PIN_TMR_PWM1, IO_SOURCE_TIMER1_PWM1_A);
}
```

第十五章　通用异步收发传输器（UART）

15.1　功能概述

UART 全称 Universal Asynchronous Receiver/Transmitter，即通用异步收发传输器件。UART 对接收的数据执行串并转换，对发送的数据执行并串转换。

特性：

- 支持硬件流控
- 可编程波特率发生器，最高波特率可达 7000000bps
- 独立的发送和接收 FIFO
- 单个组合中断，包括接收（包括超时）、传输、调制解调器状态和错误状态中断，每个中断可屏蔽
- 支持 DMA 方式

15.2　使用说明

15.2.1　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,      //UART 参数结构体 & 设备地址
  uint32_t ClockFrequency,  //时钟信号的频率
  uint32_t BaudRate         //波特率
  );
```

15.2.2 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
  );
```

15.2.3 UART 初始化

在使用 UART 之前，需要先通过 apUART_Initialize 对 UART 进行初始化。

```
void apUART_Initialize(
  UART_TypeDef* pBase,
  UART_sStateStruct* UARTx,  //uart 状态结构体
  uint32_t IntMask    //中断掩码
  );
```

初始化 UART 之前需要初始化如下所示的 UART 状态结构体：

```
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;
```

常用的中断掩码如下所示，IntMask 是它们的组合。

```
#define UART_INTBIT_RECEIVE            0x10  //receive interrupt
#define UART_INTBIT_TRANSMIT           0x20  //transmit interrupt
```

例如，配置并初始化串口，开启接收中断和发送中断，设置串口波特率为 115200：

- 首先，创建 UART 配置函数 config_uart ，在函数内初始化 UART 状态结构体，并配置必要的状态参数，然后调用 apUART_Initialize 初始化串口。

```
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, UART_INTBIT_RECEIVE | UART_INTBIT_TRANSMIT);
}
```

使用时只需要如下所示调用 config_uart 函数即可。

```
config_uart(OSC_CLK_FREQ, 115200);
```

15.2.4 UART 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 Rx FIFO 是否为空。

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

- 使用 apUART_Check_RXFIFO_FULL 查询 Rx FIFO 是否已满。

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

- 使用 apUART_Check_TXFIFO_EMPTY 查询 Tx FIFO 是否为空。

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

- 使用 apUART_Check_TXFIFO_FULL 查询 Tx FIFO 是否已满。

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

15.2.5 UART 中断使能/禁用

用 apUART_Enable_TRANSMIT_INT 使能发送中断，用 apUART_Disable_TRANSMIT_INT 禁用发送中断；用 apUART_Enable_RECEIVE_INT 使能接收中断，用 apUART_Disable_RECEIVE_INT 禁用接收中断。

中断默认是禁用的,使能中断既能用上述 apUART_Enable_TRANSMIT_INT 和 apUART_Enable_RECEIVE_INT 的方式，也可以通过 apUART_Initialize 初始化串口是设置参数 IntMask 的值使能相应的中断，详情请参考UART 初始化

15.2.6 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。

15.2.7 UART FIFO 中断触发逻辑

RX 中断：

- 当接收 FIFO 水位标记被触发时，产生 RX 中断。

RX Timeout 中断：

- 当接收 FIFO 超时中断被触发时，产生 RX Timeout 中断。

TX 中断：

- 当发送 FIFO 水位标记被触发时，产生 TX 中断。
- 当使能 TX fifo 中断时，不会直接产生中断，需向 fifo 写入数据后，才会产生中断。例如：txfifo_waterlevel = 1，则当 fifo 中有 1 个字节数据时，产生中断；当 fifo 中有 2 个字节数据时，不会产生中断，需写入第 2 个字节后，才会产生中断。

  注意：当使能 TX 时，TX fifo 写入的第一个字节会直接发送，因此当 txfifo_waterlevel = 0 时，写入一个字节不会产生 fifo 中断。推荐每次发送数据时，使用 apUART_Check_TXFIFO_FULL() 接口，写入数据直到 TX fifo 满，减少中断次数的同时保证中断正常产生。

15.2.8 发送数据

使用 UART_SendData 发送数据。

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

15.2.9 接收数据

使用 UART_ReceData 接收数据。

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

15.2.10 DMA 传输模式使能

使用 UART_DmaEnable 使能 UART 的 DMA 工作模式，可以使用 DMA 完成对串口数据的收发，从而不占用 CPU 的资源。

```
void UART_DmaEnable(
  UART_TypeDef *pBase,
  uint8_t tx_enable,   //发送使能 (1)/禁用 (0)
  uint8_t rx_enable,   //接收使能 (1)/禁用 (0)
  uint8_t dma_on_err
  );
```

15.3 示例代码

15.3.1 UART 接收变长字节数据

1. **UART+FIFO 方式**

```
#define RX_FIFO_WATER_LEVEL     0x10
char dst[256];

void config_uart(uint32_t freq, uint32_t BaudRate)
{
```

```
    //config uarts parameter
    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 = RX_FIFO_WATER_LEVEL;
    config.txfifo_waterlevel = 1;
    config.ClockFrequency    = freq;
    config.BaudRate          = BaudRate;

    apUART_Initialize(APB_UART0, &config, UART_INTBIT_TIMEOUT | UART_INTBIT_RECEIVE);
}

uint32_t uart_isr(void *user_data)
{
    uint32_t status;
    static int index = 0;
    uint8_t cnt = 0;
    while(1)
    {
        status = apUART_Get_all_raw_int_stat(APB_UART0);

        if (status == 0)
            break;

        APB_UART0->IntClear = status;
```

```
        // rx int
        if (status & (1 << bsUART_RECEIVE_INTENAB))
        {
            while (apUART_Check_RXFIFO_EMPTY(APB_UART0) != 1)
            {
                char c = APB_UART0->DataRead;
                dst[index++] = c;
                cnt++;
                /* To avoid the situation where the RX FIFO data length is the same as that
                   of the RX_FIFO_WATER_LEVEL, the rx timeout interrupt cannot be generated.
                if(cnt >= RX_FIFO_WATER_LEVEL - 1)
                {
                    break;
                }
            }
        }

        // rx timeout_int
        if (status & (1 << bsUART_TIMEOUT_INTENAB))
        {
            while (apUART_Check_RXFIFO_EMPTY(APB_UART0) != 1)
            {
                char c = APB_UART0->DataRead;
                dst[index++] = c;
            }
            dst[index] = 0;
            // 一包数据接收完毕，可在此进行数据处理
            index = 0;
        }
    }
    return 0;
}

void uart_peripherals_read_data()
```

```
{
    //注册 uart0 中断
    platform_set_irq_callback(PLATFORM_CB_IRQ_UART0, uart_isr, NULL);
    config_uart(OSC_CLK_FREQ, 115200);
}
```

2. **UART+FIFO+DMA 方式**

```
char dst[256];
char src[] = "Finished to receive a frame!\n";

#define DMA_RX_CHANNEL_ID  1
#define DMA_TX_CHANNEL_ID  0

void config_uart(uint32_t freq, uint32_t BaudRate)
{
    //config uarts parameter
    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 = 7;
    config.txfifo_waterlevel = 1;
    config.ClockFrequency    = freq;
    config.BaudRate          = BaudRate;
```

```
    apUART_Initialize(APB_UART0, &config, UART_INTBIT_TIMEOUT);
    UART_DmaEnable(APB_UART0, 1, 1, 0);
}

static void setup_peripheral_dma(void)
{
    DMA_Descriptor descriptor __attribute__((aligned (8))) = {0};
    DMA_PreparePeripheral2Mem(  &descriptor,
                                dst, SYSCTRL_DMA_UART0_RX,
                                sizeof(dst), DMA_ADDRESS_INC, 0);
    DMA_EnableChannel(DMA_RX_CHANNEL_ID, &descriptor);
}

//添加 UART 通过 DMA 发送的配置
void UART_trigger_DmaSend(void)
{
    DMA_Descriptor descriptor __attribute__((aligned (8))) = {0};
    DMA_PrepareMem2Peripheral(  &descriptor,
                                SYSCTRL_DMA_UART0_TX,
                                src, strlen(src),
                                DMA_ADDRESS_INC, 0);
    DMA_EnableChannel(DMA_TX_CHANNEL_ID, &descriptor);
}

uint32_t uart_isr(void *user_data)
{
    uint32_t status;
    int index = 0;
    while(1)
    {
        status = apUART_Get_all_raw_int_stat(APB_UART0);

        if (status == 0)
            break;
```

```
        APB_UART0->IntClear = status;

        // rx timeout_int
        if (status & (1 << bsUART_TIMEOUT_INTENAB))
        {
            index = APB_DMA->Channels[DMA_RX_CHANNEL_ID].Descriptor.DstAddr - (uint32_t)rx_buffer
            while (apUART_Check_RXFIFO_EMPTY(APB_UART0) != 1)
            {
                char c = APB_UART0->DataRead;
                dst[index++] = c;
            }
            dst[index] = 0;
            // 一包数据接收完毕，可在此进行数据处理
            UART_trigger_DmaSend();
            setup_peripheral_dma();
        }
    }
    return 0;
}

void uart_peripherals_read_data()
{
    //注册 uart0 中断
    platform_set_irq_callback(PLATFORM_CB_IRQ_UART0, uart_isr, NULL);
    config_uart(OSC_CLK_FREQ, 115200);
    setup_peripheral_dma();
}
```

第十六章　通用串行总线 (USB)

16.1　功能概述

- 支持 full-speed (12 Mbps) 模式
- 集成 PHY Transceiver，内置上拉，软件可控
- Endpoints:
  - Endpoints 0: control endpoint
  - Endpoints 1-5: 可以配置为 in/out，以及 control/isochronous/bulk/interrupt
- 支持 USB suspend, resume, remote-wakeup
- 内置 DMA 方便数据传输

16.2　使用说明

16.2.1　USB 软件结构

- driver layer，USB 的底层处理，不建议用户修改。
  - 处理了大部分和应用场景无关的流程，提供了 USB_IrqHandler，调用 event handler。
  - 位置：`\ING\_SDK\sdk\src\FWlib\peripheral\_usb.c`
- bsp layer，处理场景相关的流程，需要用户提供 event handler，并实现 control 和 transfer 相关处理。
  - 位置：`\ING\_SDK\sdk\src\BSP\bsp\_usb_xxx.c`

16.2.2 USB Device 状态

- USB 的使用首先需要配置 USB CLK，USB IO 以及 PHY，并且初始化 USB 模块，此时 USB 为”NONE” 状态，等待 USB 的 reset 中断（USB_IrqHandler）。
- reset 中断的触发代表 USB cable 已经连接，而且 host 已经检测到了 device，在 reset 中断中，USB 模块完成相关的 USB 初始化。并继续等待中断。
- enumeration 中断的触发代表 device 可以开始接收 SOF 以及 control 传输，device 需要配置并打开 endpoint 0，进入”DEFAULT” 状态。
- out 中断的触发代表收到了 host 的 get descriptor，用户需要准备好相应的 descriptor，并配置相关的 in endpoint。
- out 中断中的 set address request 会将 device 的状态切换为”ADDRESS”。
- out 中断中的 set configuration 会将 device 的状态切换为”CONFIGURED”。此时 device 可以开始在配置的 endpoint 上传输数据。
- bus 上的 idle 会自动触发 suspend 中断（用户需要在初始化中使能 suspend 中断），此时切换为”SUSPEND” 状态。
- idle 之后任何 bus 上的活动将会触发 resume 中断（用户需要在初始化中使能 resume 中断）, 用户也可以选择使用 remote wakeup 主动唤醒。
- 唤醒之后的 usb 将重新进入”CONFIGURED” 状态，每 1ms（full-speed）将会收到 1 个 SOF 中断（用户需要在初始化中使能 SOF 中断）。

```
typedef enum
{
  USB_DEVICE_NONE,
  /* A USB device may be attached or detached from the USB */
  USB_DEVICE_ATTACHED,
  /*USB devices may obtain power from an external source  */
  USB_DEVICE_POWERED,
  /*  After the device has been powered, and reset is done */
  USB_DEVICE_DEFAULT,
  /*  All USB devices use the default address when initially powered
  or after the device has been reset. Each USB device is assigned
  a unique address by the host after attachment or after reset. */
  USB_DEVICE_ADDRESS,
  /* Before a USB device function may be used, the device must be configured. */
```

```
  USB_DEVICE_CONFIGURED,
  /* In order to conserve power, USB devices automatically enter the
  Suspended state when the device has observed no bus traffic for
  a specified period */
  USB_DEVICE_SUSPENDED,
  USB_DEVICE_TEST_RESET_DONE
}USB_DEVICE_STATE_E;
```

16.2.3 设置 IO

USB 的 DP/DM 固定在 GPIO16/17,IO 初始化细节请参考 `ING_SDK\sdk\src\BSP\bsp\_usb.c` 中的 `bsp_usb_init()`

```
// ATTENTION ! FIXED IO FOR USB on 20 series
#define USB_PIN_DP GIO_GPIO_16
#define USB_PIN_DM GIO_GPIO_17
```

16.2.4 设置 PHY

使用 `SYSCTRL_USBPhyConfig()` 初始化 PHY, 细节请参考 `ING_SDK\sdk\src\BSP\bsp\_usb.c` 中的 `bsp_usb_init()`。

```
/**
 * @brief Config USB PHY functionality
 *
 * @param[in] enable            Enable(1)/Disable(0) usb phy module
 * @param[in] pull_sel          DP pull up(0x1)/DM pull up(0x2)/DP&DM pull down(0x3)
 */
void SYSCTRL_USBPhyConfig(uint8_t enable, uint8_t pull_sel);
```

16.2.5 USB 模块初始化

细节请参考 `ING_SDK\sdk\src\BSP\bsp\_usb.c` 中的 `bsp_usb_init()`。

- USB 模块首选需要打开 USB 中断并配置相应接口，其中 `USB_IrqHandler` 由 driver 提供不需要用户修改。

```
platform_set_irq_callback(PLATFORM_CB_IRQ_USB, USB_IrqHandler, NULL);
```

- 其次需要初始化 USB 模块以及相关状态信息，入参结构体中用户需要提供 event handler，其余为可选项

```
/**
 * @brief interface API. initilize usb module and related variables,
 must be called before any usb usage
 *
 * @param[in] device callback function with structure USB_INIT_CONFIG_T.
 *            When this function has been called your device is ready
               to be enumerated by the USB host.
 * @param[out] null.
 */
extern USB_ERROR_TYPE_E USB_InitConfig(USB_INIT_CONFIG_T *config);
```

16.2.6 event handler

USB 的用户层调用通过 event handler 来实现,细节请参考 `ING_SDK\sdk\src\BSP\bsp\_usb.c` 中的 `bsp_usb_event_handler()`。

event handler 需要包含对以下 event 事件的处理：

- USB_EVENT_EP0_SETUP
  - 该 event 包含 EP0(control endpoint) 上的所有 request，包括读取/设置 descriptor，设置 address，set/clear feature 等 request，按照 USB 协议，device 需要支持所有协议中的标准 request。
  - descriptor 需要按照协议格式准备，并且放置在 4bytes 对齐的全局地址，并通过 `USB_SendData()` 发送给 host，在整个过程中，该全局地址和数据需要保持。(4bytes 对齐是内部 DMA 搬运的要求，否则可能出现错误)。

  - 对于没有 data stage 的 request，event handler 中不需要使用 `USB_SendData()` 以及 `USB_RecvData()`。
  - 对于不支持的 request，需要设置 status 为：

```
status = USB_ERROR_REQUEST_NOT_SUPPORT;
```

  - 根据返回的 status，driver 判断当前 request 是否支持，否则按照协议发送 stall 给 host。
  - 对于包含 data stage 的 out 传输，driver 将继续接收数据，数据将在 `USB_EVENT_EP_DATA_TRANSFER` 的 EP0 通知用户。
  - setup/data/status stage 的切换将在 driver 内进行。

- USB_EVENT_EP_DATA_TRANSFER

  数据相关的处理，接收和发射数据。

  参数包含 ep number

```
uint8_t  ep;
```

  以及数据处理类型，分别代表发送和接收 transfer 的结束。

```
typedef enum
{
    /// Event send when a receive transfert is finish
    USB_CALLBACK_TYPE_RECEIVE_END,
    /// Event send when a transmit transfert is finish
    USB_CALLBACK_TYPE_TRANSMIT_END
} USB_CALLBACK_EP_TYPE_T;
```

- USB_EVENT_DEVICE_RESET

  USB reset 中断的 event，代表枚举的开始。

- USB_EVENT_DEVICE_SOF

  SOF 中断，每 1m（full-speed）将会收到 1 个 SOF 中断（用户需要在初始化中使能 SOF 中断）。

- USB_EVENT_DEVICE_SUSPEND

  bus 进入 idle 状态后触发 suspend，此时总线上没有 USB 活动。driver 会关闭 phy clock。

- USB_EVENT_DEVICE_RESUME

  bus 上的任何 USB 活动将会触发 wakeup 中断。resume 后 driver 打开 phy clock，USB 恢复到正常状态。

16.2.6.1 USB_EVENT_EP0_SETUP 的实现

control 以及枚举相关的流程实现需要通过 USB_EVENT_EP0_SETUP event 来进行。

- 默认的 control endpoint 是 EP0, 所有 request 都会触发该 event。
- 如果场景不支持某个 request，则需要设置 status == USB_ERROR_REQUEST_NOT_SUPPORT。driver 会据此发送 stall。
- 如果场景需要处理某个 request，则需要将 status 设置为非 USB_ERROR_REQUEST_NOT_SUPPORT 状态。
- 用户需要将所有 descriptor 保存在 4bytes 对齐的全局地址。以 device descriptor 为例

```
case USB_REQUEST_DEVICE_DESCRIPTOR_DEVICE:
{
  size = sizeof(USB_DEVICE_DESCRIPTOR_REAL_T);
  size = (setup->wLength < size) ? (setup->wLength) : size;

  status |= USB_SendData(0, (void*)&DeviceDescriptor, size, 0);
}
break;
```

首先判断 size，确保数据没有超出 request 要求，然后使用 USB_SendData 发送 in transfer 数据。其中 DeviceDescriptor 为 device descriptor 地址。

- set address request 需要配置 device 地址，因此在 driver layer 实现。

16.2.6.2 SUSPEND 的处理

SUSPEND 状态下可以根据需求进行 power saving，默认配置只关闭了 phy clock，其余的 USB power/clock 处理需要根据场景在应用层中的 low power mode 中来实现。

16.2.6.3 remote wakeup

进入 suspend 的 device 可以选择主动唤醒，唤醒通过 bsp_usb_device_remote_wakeup() 连续发送 10ms 的 resume signal 来实现。

```
void bsp_usb_device_remote_wakeup(void)
{
  USB_DeviceSetRemoteWakeupBit(U_TRUE);
  // setup timer for 10ms, then disable resume signal
  platform_set_timer(internal_bsp_usb_device_remote_wakeup_stop,16);
}
```

16.2.7 常用 driver API

16.2.7.1 send usb data

使用该 API 发送 USB 数据（包括 setup data 和应用数据），但需要在 set config（打开 endpoint）之后使用。

- ep: 数据发送对应的 Endpoint，需要使用 USB_EP_DIRECTION_IN。
- buffer：buffer 地址需要是四字节对齐 `c __attribute__ ((aligned (4)))`。
- size: 需要小于 512*MPS，例如对于 EP0，如果 MPS 为 64bytes，则 size 需要小于 512×64。
- flag：NULL。
- 如果成功则返回 U_TRUE，否则返回 U_FALSE。

```
extern USB_ERROR_TYPE_E USB_SendData(uint8_t ep, void* buffer,
                                     uint16_t size, uint32_t flag);
```

16.2.7.2 receive usb data

使用该 API 接收 USB 数据（包括 setup data 和应用数据），但需要在 set config（打开 endpoint）之后使用。

- ep: 数据发送对应的 Endpoint，需要使用 USB_EP_DIRECTION_OUT。
- buffer：buffer 地址需要是四字节对齐 `c __attribute__ ((aligned (4)))`。
- size: 需要是 MPS 的整数倍，如果期望接收的数据小于 MPS，参考 flag 设置。
- flag：
  - `1<<USB_TRANSFERT_FLAG_FLEXIBLE_RECV_LEN`: 当接收数据小于 MPS 时需要设置。
- 如果成功则返回 U_TRUE，否则返回 U_FALSE。

```
extern USB_ERROR_TYPE_E USB_RecvData(uint8_t ep, void* buffer,
                                     uint16_t size, uint32_t flag);
```

16.2.7.3 enable/disable ep

正常处理中不需要使用该 API，特殊情况下可以根据需求打开关闭某个特定的 endpoint。

```
/**
 * @brief interface APIs. use this pair for enable/disable certain ep.
 *
 * @param[in] ep number with USB_EP_DIRECTION_IN/OUT.
 * @param[out] null
 */
extern void USB_EnableEp(uint8_t ep, USB_EP_TYPE_T type);
extern void USB_DisableEp(uint8_t ep);
```

16.2.7.4 usb close

USB 的 disable 请使用 bsp layer 中的 `bsp_usb_disable()`。

```
/**
 * @brief interface API. shutdown usb module and reset all status data.
 *
 * @param[in] null.
 * @param[out] null.
 */
extern void bsp_usb_disable(void);
```

16.2.7.5 usb stall

```
/**
 * @brief interface API. set ep stall pid for current transfer
 *
 * @param[in] ep num with direction.
 * @param[in] U_TRUE: stall, U_FALSE: set back to normal
 * @param[out] null.
 */
extern void USB_SetStallEp(uint8_t ep, uint8_t stall);
```

16.2.7.6 usb in endpoint nak

```
/**
 * @brief interface API. use this api to set NAK on a specific IN ep
 *
 * @param[in] U_TRUE: enable NAK on required IN ep. U_FALSE: stop NAK
 * @param[in] ep: ep number with USB_EP_DIRECTION_IN/OUT.
 * @param[out] null.
 */
extern void USB_SetInEndpointNak(uint8_t ep, uint8_t enable);
```

16.2.8 使用场景

16.2.8.1 example 0: WINUSB

WinUSB 是适用于 USB 设备的通用驱动程序，随附在 Windows 系统中。对于某些通用串行总线 (USB) 设备（例如只有单个应用程序访问的设备），可以直接使用 WINUSB 而不需要实现驱动程序。如果已将设备定义为 WinUSB 设备，Windows 会自动加载 Winusb.sys。

- 参考：`\ING\_SDK\sdk\src\BSP\bsp_usb.c`

  首先调用 `bsp_usb_init()` 初始化 USB 模块, 之后的 USB 活动则全部在 `bsp_usb_event_handler()` 中处理。

```
#define FEATURE_WCID_SUPPORT
```

- device 需要在 enumeration 阶段提供 WCID 标识和相关 descriptor。示例中的 descriptor 实现如下：

```
#define USB_WCID_DESCRIPTOR_INDEX_4 \
{ \

#define USB_WCID_DESCRIPTOR_INDEX_5 \
{ \
```

- 通过修改 `USB_STRING_PRODUCT` 来改变产品名称 iproduct

```
#define USB_STRING_PRODUCT {16,0x3,'w',0,'i',0,'n',0,'-',0,'d',0,'e',0,'v',0}
```

  第一个值是整个数组的长度，第二个值不变，之后是 16bit unicode 字符串（每个符号占用两个字节），该示例中 iproduct 为’win-dev’。

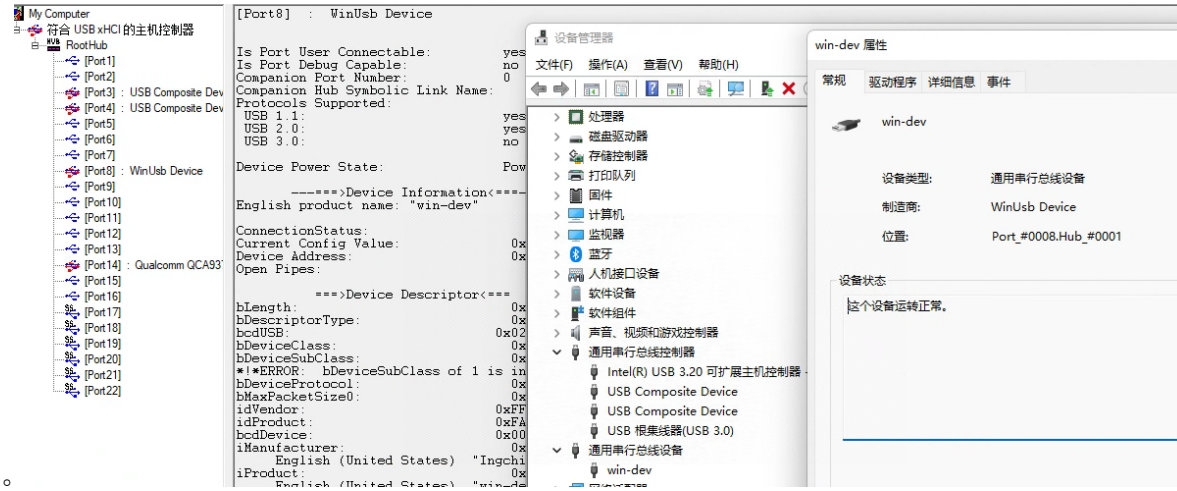
- 该示例中打开了两个 bulk endpoint，endpoint 1 为 input，endpoint 2 为 output, 最大包长为 64：

```
#define USB_EP_1_DESCRIPTOR \
{ \
  .size = sizeof(USB_EP_DESCRIPTOR_REAL_T), \
  .type = 5, \
  .ep = USB_EP_DIRECTION_IN(EP_IN), \
  .attributes = USB_EP_TYPE_BULK, \
  .mps = EP_X_MPS_BYTES, \
  .interval = 0 \
}

#define USB_EP_2_DESCRIPTOR \
{ \
  .size = sizeof(USB_EP_DESCRIPTOR_REAL_T), \
  .type = 5, \
  .ep = USB_EP_DIRECTION_OUT(EP_OUT), \
  .attributes = USB_EP_TYPE_BULK, \
  .mps = EP_X_MPS_BYTES, \
  .interval = 0 \
}
```

- 在 set configuration(USB_REQUEST_DEVICE_SET_CONFIGURATION) 之后，In/out endpoint 可以使用，通过 `USB_RecvData()` 配置 out endpoint 接收 host 发送的数据。在收到 host 的数据后 `USB_CALLBACK_TYPE_RECEIVE_END`，通过 `USB_SendData()` 将数据发送给 host（通过 in endpoint）。

- 在 WIN10 及以上的系统上，该设备会自动加载 winusb.sys 并枚举成 WinUsb Device, 设备



名称为”win-dev”。

- 通过 ing_usb.exe 可以对该设备进行一些简单数据测试:

```
ing_usb.exe VID:PID -w 2 xxxx xxxx
```

  - VID:PID 的数值请查看 `USB_DEVICE_DESCRIPTOR`。
  - -w：代表写命令。
  - 2：传输类型，2 为 bulk transfer。
  - xxxx: 需要传输的数据（32bit），默认包长度为 endpoint 的 mps。

数据会通过 out endpoint 发送给 USB Device 并通过 in endpoint 回环并打印出来):

```
C:\Dropbox>ing_usb.exe FFF1:FA2F -w 2 0x1234 0x2345
Using libusb v1.0.25.11692

Opening device FFF1:FA2F...
       endpoint[0].address: 81
           max packet size: 0040
          polling interval: 00
       endpoint[1].address: 02
           max packet size: 0040
          polling interval: 00

Kernel driver attached for interface 0: -12

Claiming interface 0...

start transfer ...

  00000000  34 12 00 00 45 23 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00  4...E#..........
  00000010  00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00  ................
  00000020  00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00  ................
  00000030  00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00  ................
type 2 send sucess,length: 64 bytes
 (0)  received 64 bytes

  00000000  34 12 00 00 45 23 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00  4...E#..........
  00000010  00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00  ................
  00000020  00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00  ................
  00000030  00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00  ................

transfer end

Releasing interface 0...
Closing device...
```

- 使用 ing_usb.exe 可以读取 in endpoint 的数据，但是 bsp layer 中需要做相应的修改（使用 in endpoint 发送数据给 host）:

```
ing_usb.exe VID:PID -r 2
```

- VID:PID 的数值请查看 `USB_DEVICE_DESCRIPTOR`。
- -r：代表读命令。
- 2：传输类型，2 为 bulk transfer。

16.2.8.2 example 1: HID composite

该示例实现了一个 mouse + keyboard 的复合设备，使用了两个独立的 interface，每个 interface 包含一个 In Endpoint。

- 参考：`\ING_SDK\sdk\src\BSP\bsp_usb_hid.c`

首先调用 `bsp_usb_init()` 初始化 USB 模块, 之后的 USB 活动则全部在 `bsp_usb_event_handler()` 中处理，report 的发送参考 `report data 发送`。

16.2.8.2.1 标准描述符 其标准描述符结构如下，configuration descriptor 之后分别是 interface descriptor, hid descriptor, endpoint descriptor。

```
typedef struct __attribute__((packed))
{
  USB_CONFIG_DESCRIPTOR_REAL_T config;
  USB_INTERFACE_DESCRIPTOR_REAL_T interface_kb;
  BSP_USB_HID_DESCRIPTOR_T hid_kb;
  USB_EP_DESCRIPTOR_REAL_T ep_kb[bNUM_EP_KB];
  USB_INTERFACE_DESCRIPTOR_REAL_T interface_mo;
  BSP_USB_HID_DESCRIPTOR_T hid_mo;
  USB_EP_DESCRIPTOR_REAL_T ep_mo[bNUM_EP_MO];
}BSP_USB_DESC_STRUCTURE_T;
```

上述描述符的示例在路径`\ING_SDK\sdk\src\BSP\bsp_usb_hid.h`，以 keyboard interface 为例：

```
#define USB_INTERFACE_DESCRIPTOR_KB \
{ \
  .size = sizeof(USB_INTERFACE_DESCRIPTOR_REAL_T), \
  .type = 4, \
  .interfaceIndex = 0x00, \
  .alternateSetting = 0x00, \
  .nbEp = bNUM_EP_KB,  \
  .usbClass = 0x03, \
  /* 0: no subclass, 1: boot interface */ \
  .usbSubClass = 0x00, \
  /* 0: none, 1: keyboard, 2: mouse */ \
  .usbProto = 0x00, \
  .iDescription = 0x00 \
}
```

其中可能需要根据场景修改的变量使用宏定义，其他则使用常量。请注意：该实现中没有打开 boot function。

16.2.8.2.2 报告描述符 报告描述符的示例在路径`\ING_SDK\sdk\src\BSP\bsp_usb_hid.h`

- keyboard 的 report 描述符为：

```
#define USB_HID_KB_REPORT_DESCRIPTOR {  \
    0x05, 0x01, /* USAGE_PAGE (Generic Desktop)                    */  \
    0x09, 0x06, /* USAGE (Keyboard)                                */  \
    0xa1, 0x01, /* COLLECTION (Application)                         */  \
    0x05, 0x07, /*   USAGE_PAGE (Keyboard)                         */  \
    ...\ING_SDK\sdk\src\BSP\bsp_usb_hid.h
```

keyboard report descriptor 包含 8bit modifier input，8bit reserve, 5bit led output, 3bit reserve, 6bytes key usage id 。report 本地结构为：

```
#define KEY_TABLE_LEN (6)
typedef struct __attribute__((packed))
{
  uint8_t modifier;
  uint8_t reserved;
  uint8_t key_table[KEY_TABLE_LEN];
}BSP_KEYB_REPORT_s;
```

report 中的 usage id data 的实现分别在以下 enum 中：

```
BSP_KEYB_KEYB_USAGE_ID_e
BSP_KEYB_KEYB_MODIFIER_e
BSP_KEYB_KEYB_LED_e
```

- mouse 的 report 描述符为：

```
#define USB_HID_MOUSE_REPORT_DESCRIPTOR_SIZE (50)
#define USB_HID_MOUSE_REPORT_DESCRIPTOR { \
    0x05, 0x01, /* USAGE_PAGE (Generic Desktop)       */   \
    0x09, 0x02, /* USAGE (Mouse)                      */   \
    0xa1, 0x01, /* COLLECTION (Application)           */   \
    ...\ING_SDK\sdk\src\BSP\bsp_usb_hid.h
```

report 包含一个 3bit button(button 1 ~ button 3), 5bit reserve, 8bit x value, 8bit y value 结构为：

```
typedef struct __attribute__((packed))
{
  uint8_t button;/* 1 ~ 3 */
  int8_t pos_x;/* -127 ~ 127 */
  int8_t pos_y;/* -127 ~ 127 */
}BSP_MOUSE_REPORT_s;
```

16.2.8.2.3 standard/class request EP0 的 request 处理在 event：USB_EVENT_EP0_SETUP。HID Class 相关的处理在 interface destination 下：USB_REQUEST_DESTINATION_INTERFACE。

以其中 keyboard report 描述符的获取为例：

- setup->wIndex 代表了 interface num，其中 0 为 keyboard interface（参考 BSP_USB_DESC_STRUCTURE_T）
- 使用 USB_SendData 发送 report 数据

```
case USB_REQUEST_DEVICE_GET_DESCRIPTOR:
{
  switch(((setup->wValue)>>8)&0xFF)
  {
    case USB_REQUEST_HID_CLASS_DESCRIPTOR_REPORT:
    {
      switch(setup->wIndex)
      {
        case 0:
        {
          size = sizeof(ReportKeybDescriptor);
          size = (setup->wLength < size) ? (setup->wLength) : size;

          status |= USB_SendData(0, &ReportKeybDescriptor, size, 0);
          KeybReport.pending = U_FALSE;
        }break;
        ...\ING_SDK\sdk\src\BSP\bsp_usb_hid.c
```

16.2.8.2.4 report data 发送

- keyboard key 的发送, 入参为一个键值以及其是否处于按下的状态，如果该键按下，则将其添加到 report 中并发送出去。

```
/**
 * @brief interface API. send keyboard key report
 *
 * @param[in] key: value comes from BSP_KEYB_KEYB_USAGE_ID_e
 * @param[in] press: 1: pressed, 0: released
 * @param[out] null.
 */
extern void bsp_usb_handle_hid_keyb_key_report(uint8_t key, uint8_t press);
```

- keyboard modifier 的发送，与 key 类似，区别是 modifier 是 bitmap data。

```
extern void bsp_usb_handle_hid_keyb_key_report(uint8_t key, uint8_t press);
/**
 * @brief interface API. send keyboard modifier report
 *
 * @param[in] modifier: value comes from BSP_KEYB_KEYB_MODIFIER_e
 * @param[in] press: 1: pressed, 0: released
 * @param[out] null.
 */
extern void bsp_usb_handle_hid_keyb_modifier_report(BSP_KEYB_KEYB_MODIFIER_e modifier, uint8
```

- keyboard led 的获取，该示例中没有 out endpoint，因此 led report 可能是用 EP0 的 set report 得到，参考：USB_REQUEST_HID_CLASS_REQUEST_SET_REPORT。
- mouse report 的发送, 入参分别为 x,y 的相对值和 button 的组合（按下为 1，释放为 0）。

```
/**
 * @brief interface API. send mouse report
 *
 * @param[in] x: 8bit int x axis value, relative,
 * @param[in] y: 8bit int y axis value, relative,
 * @param[in] btn: 8bit value, button 1 to 3,
```

```
 * @param[out] null.
 */
extern void bsp_usb_handle_hid_mouse_report(int8_t x, int8_t y, uint8_t btn);
```

16.2.8.3 example 3: USB MSC

该示例提供了以下功能，通过 `BSP_USB_MSC_FUNC` 来选择：

- BSP_USB_MSC_FLASH_DISK：在指定的 FLASH 空间内初始化一个 FAT16 文件系统。在成功枚举后，可以在 host 端（电脑侧）以操作磁盘的形式直接读取/写入文件。
- BSP_USB_MSC_FLASH_DISK_NO_VFS：类似 `BSP_USB_MSC_FLASH_DISK` 但是没有提供文件系统，适用于用户自定义的存储设备，当成功枚举后，host 端（电脑侧）会提示需要格式化磁盘，选择相应的参数，完成格式化后，即可以按照正常磁盘使用。
- BSP_USB_MSC_FLASH_DISK_DOWNLOADER：拖拽下载功能。打开磁盘后，放入 bin 文件，则可以完成下载并重启。
- 参考：`\ING_SDK\sdk\src\BSP\bsp_usb_msc.c`

应用层需要调用 `bsp_usb_init()` 初始化 USB 模块，插入电脑，完成枚举，则可以使用对应功能。

第十七章　看门狗（WATCHDOG）

17.1　功能概述

看门狗的本质就是一个定时器，其功能主要是防止程序跑飞，同时也能防止程序在线运行时出现死循环，一旦发生错误就向芯片内部发出重启信号。

特性：

- 支持 AMBA 2.0 APB 总线
- 当看门狗超时时，提供中断和重启的组合
- 为控制/重启寄存器提供写保护机制
- 可编程定时器时钟源
- 可配置的用于寄存器写保护和定时器重启的魔数
- 看门狗定时器可外部暂停

ING20XX 的看门狗定时器提供了一个两级机制，如下图所示（图 17.1）。：

- 1）第一阶段 中断阶段：若 watchdog 中断启用，则在中断计时结束时会产生中断信号 wdt_int；
- 2）第二阶段 复位阶段：若 watchdog 复位启用，并且在复位超时时间结束前 watchdog 未重启，则会产生复位信号 wdt_rst 使得系统复位。

17.2　使用说明

17.2.1　配置看门狗

使用 `TMR_WatchDogEnable3` 配置并启用看门狗。

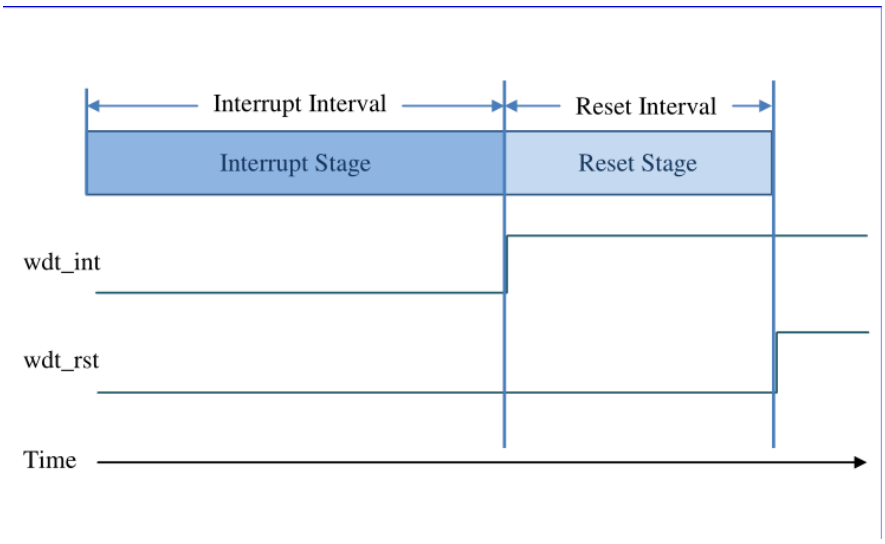


图 17.1: WDT 阶段图

```
void TMR_WatchDogEnable3(
  wdt_inttime_interval_t int_timeout, ,  //中断阶段时间
  wdt_rsttime_interval_t rst_timeout,  //复位阶段时间
  uint8_t enable_int          //中断使能 (1)/禁用 (0)
  );
```

其中中断阶段时间和复位阶段的时间设置分别支持 16 种和 8 种，分别如下述的枚举变量 `wdt_inttime_interval_t` 和 `wdt_rsttime_interval_t` 所示。默认使用的 PCLK=32.768MHz，所以对应 `int_timeout == WDT_INTTIME_INTERVAL_1S` 时，对应的中断阶段时间为 1s，其余时间以及复位阶段的超时时间以此类推。

```
typedef enum
{
    WDT_INTTIME_INTERVAL_2MS          = 0,    //0.001953125s
    WDT_INTTIME_INTERVAL_8MS          = 1,    //0.0078125s
    WDT_INTTIME_INTERVAL_31MS         = 2,    //0.03125s
    WDT_INTTIME_INTERVAL_62MS         = 3,    //0.0625s
    WDT_INTTIME_INTERVAL_125MS        = 4,
    WDT_INTTIME_INTERVAL_250MS        = 5,
    WDT_INTTIME_INTERVAL_500MS        = 6,
```

```
    WDT_INTTIME_INTERVAL_1S           = 7,
    WDT_INTTIME_INTERVAL_4S           = 8,
    WDT_INTTIME_INTERVAL_16S          = 9,
    WDT_INTTIME_INTERVAL_1M_4S        = 10,   //64s
    WDT_INTTIME_INTERVAL_4M_16S       = 11,   //256s
    WDT_INTTIME_INTERVAL_17M_4S       = 12,   //1024s
    WDT_INTTIME_INTERVAL_1H_8M_16S    = 13,   //4096s
    WDT_INTTIME_INTERVAL_4H_33M_6S    = 14,   //16384s
    WDT_INTTIME_INTERVAL_18H_12M_16S  = 15    //65536s
}wdt_inttime_interval_t;

typedef enum
{
    WDT_RSTTIME_INTERVAL_4MS          = 0,    //3.90625ms
    WDT_RSTTIME_INTERVAL_8MS          = 1,    //7.8125ms
    WDT_RSTTIME_INTERVAL_15MS         = 2,    //15.625ms
    WDT_RSTTIME_INTERVAL_31MS         = 3,    //31.25ms
    WDT_RSTTIME_INTERVAL_62MS         = 4,    //62.5ms
    WDT_RSTTIME_INTERVAL_125MS        = 5,
    WDT_RSTTIME_INTERVAL_250MS        = 6,
    WDT_RSTTIME_INTERVAL_500MS        = 7
}wdt_rsttime_interval_t;
```

为了方便使用，通过宏定义将 ING20xx 和 ING916xx 和 ING918xx 接口统一为 TMR_WatchDogEnable 。

```
#define TMR_WatchDogEnable(timeout) do { uint64_t TMR_CLK_FREQ = OSC_CLK_FREQ;uint32_t cnt =
                                         for (uint8_t i = 1; i < 10; i++,mode++) { if (cn
                                         TMR_WatchDogEnable3(mode, WDT_RSTTIME_INTERVAL_5
```

代码中会将设置的时间映射到结构体 wdt_inttime_interval_t 中，但是由于 *ING916XX* 的 WDT 能设置的时间是离散的，所以为了方便使用，我们只选取从 WDT_INTTIME_INTERVAL_1S 到 WDT_INTTIME_INTERVAL_18H_12M_16S 。

由于 *ING916XX* 和 *ING918XX* 的看门狗在机制上有差别，所以使用 *ING916XX* 时推荐使用 `TMR_WatchDogEnable3` 。若要在 *ING916XX* 中使用 `TMR_WatchDogEnable` 需注意：*ING918XX* 的看门狗没有中断机制，实际的复位超时时间为设定时间的两倍；而在 *ING916XX* 中的中断阶段和复位阶段的超时时间都是可以设置的，复位时间我们默认 **0.5s**。所以若用 `TMR_WatchDogEnable(OSC_CLK_FREQ * 1)` 设置的时间在 **918** 和 **916** 上分别是 **2s** 和 **1.5s**。

17.2.2 重启看门狗

使用 `TMR_WatchDogRestart` 重启看门狗，也就是我们俗称的 喂狗。

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

17.2.3 清除中断

使用 `TMR_WatchDogClearInt` 清除看门狗的中断。

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

17.2.4 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` 才能将其禁用。

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

17.2.5 暂停看门狗

使用 `TMR_WatchDogPauseEnable()` 可以暂停看门狗。

```
void TMR_WatchDogPauseEnable(
  uint8_t enable
  );
```

17.2.6 处理中断状态

当调用 TMR_WatchDogEnable 或者在 TMR_WatchDogEnable3 的参数中使能中断，就会在 WDT 上产生中断，此时需要调用 TMR_WatchDogClearInt 清除看门狗中断之后才能再次触发中断。

第十八章　内置 Flash（EFlash）

18.1　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，每个扇区大小为 `EFLASH_SECTOR_SIZE` 字节；写入时以 32bit 为单位。

表中的 Flash 时钟频率可通过 `SYSCTRL_GetFlashClk()` 读取。Flash 内部会对这个时钟 2 分频，实际工作频率是这个时钟频率的一半。

18.2　使用说明

18.2.1　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。

18.2.2 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。

18.2.3 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。

18.2.4 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。

第十九章　RTIMER 简介（Reduce Timer）

RTIME 是 Reduce Timer（递减定时器）的缩写，ING20XX 系列芯片提供了两个简单的递减计数器模块。该模块结构简单，仅支持向下计数，仅支持定时计数。可应用于简单的定时计数场景。

注意：FWLib 中为方便表述将所有代码归类到 peripheral_timer.c 文件中。为了表述一致，将 RTIMER0 和 RTIMER1 分别表述为为 TIMER2 和 TIMER3。

例如：RTIMER 的 platform 注册回调命名和寄存器基地址如下表述.

```
typedef enum
{
...
    PLATFORM_CB_IRQ_TIMER2,
    PLATFORM_CB_IRQ_TIMER3,
...
} platform_irq_callback_type_t;


...
#define APB_TMR2            ((RTMR_TypeDef *)APB_TMR2_BASE)
#define APB_TMR3            ((RTMR_TypeDef *)APB_TMR3_BASE)
...
```

19.1　功能描述

19.1.1　特性

- 32 位增量计数器和 32 位比较寄存器

- 支持三种工作模式：连续回绕、自由运行、单次模式
- 中断支持

19.1.2 工作模式

具有三种工作模式：

- 连续回绕（Continuous Wrapping Mode）

  定时器开始运行，并将计数器的值（Counter）和比较值（Compare）进行对比，当定时器值小于比较值时，触发中断和数值重载。

- 自由运行

  与自动回绕模式的区别主要是在计数到比较直的时候不会自动重载数值，而是继续递减计数到 0 再溢出重新计数，可通过获取 cnt 支持，标定固定周期的定时器时间戳。

- 单次模式

  定时器开始运行，并将计数器的值（Counter）和比较值（Compare）进行对比，当定时器值小于比较值时，触发中断，并停止计数，即定时器只运行一次就停止。

19.2 使用方法

19.2.1 API 参考

初始化 RTMR 工作模式，RTMR 支持 WRAPPING、ONESHOT、FREERUN 三种工作模式，用户可根据需求选择合适的工作模式。

```
// timer work mode
#define TMR_CTL_OP_MODE_WRAPPING            0           // 0 - continuous wrapping mode
#define TMR_CTL_OP_MODE_ONESHOT             1           // 1 - one-stop mode
#define TMR_CTL_OP_MODE_FREERUN             2           // 2 - continuous free-run mode
void RTMR_SetOpMode(RTMR_TypeDef *pTMR, uint8_t mode);
```

设置 RTMR 比较值，比较值是定时器的停止条件参考，除 freerun 模式，用户要根据自己的定时器工作频率和需要的计时时间计算对应的比较早。

注意递减计数器值从 0 递减，需要设定的定时时间值（cnt）为（0xffff - cnt）

```
void RTMR_SetCompare(RTMR_TypeDef *pTMR, uint32_t cnt);
```

获取当前计数值，用户在定时器运行过程中可以通过获取当前 cnt 计数值,，来获取当前时间戳。

```
uint32_t RTMR_GetCNT(RTMR_TypeDef *pTMR);
```

复位当前定时器计数值，手动停止计数器或计数器初始化时推荐调用，防止定时器初值不为 0 造成定时时间偏差。

```
void RTMR_Reload(RTMR_TypeDef *pTMR);
```

定时器使能停止。可通过接口控制定时器的启动和停止。

```
void RTMR_Enable(RTMR_TypeDef *pTMR);
void RTMR_Disable(RTMR_TypeDef *pTMR);
```

定时器中断控制，可通过接口打开和关闭对应中断。

```
void RTMR_IntEnable(RTMR_TypeDef *pTMR);
void RTMR_IntDisable(RTMR_TypeDef *pTMR);
```

19.2.2 使用示例

使用自动回绕模式周期触发定时器。

```
static uint32_t rtimer_callback(void *user_data)
{
    if(RTMR_IntHappened(APB_TMR2))
    {
        printf("rtimer int\r\n");
        RTMR_IntClr(APB_TMR2);
    }

}

void rtimer_init(void)
{
    SYSCTRL_ClearClkGateMulti(1 << SYSCTRL_ClkGate_APB_RTMR2);
    RTMR_SetCMP(APB_TMR2, 0xffffffff - getpll_clk() / 1000);
    RTMR_SetOpMode(APB_TMR2, TMR_CTL_OP_MODE_WRAPPING);
    RTMR_Reload(APB_TMR2);
    platform_set_irq_callback(PLATFORM_CB_IRQ_TIMER2, rtimer_callback, 0);
    RTMR_IntEnable(APB_TMR2);
}
```

使用单次模式计数一次并触发中断

```
static uint32_t rtimer_callback(void *user_data)
{
    if(RTMR_IntHappened(APB_TMR2))
    {
        printf("rtimer int\r\n");
        RTMR_IntClr(APB_TMR2);
    }

}

void rtimer_init(void)
{
```

```
    SYSCTRL_ClearClkGateMulti(1 << SYSCTRL_ClkGate_APB_RTMR2);
    RTMR_SetCMP(APB_TMR2, 0xffffffff - getpll_clk() / 1000);
    RTMR_SetOpMode(APB_TMR2, TMR_CTL_OP_MODE_ONESHOT);
    RTMR_Reload(APB_TMR2);
    platform_set_irq_callback(PLATFORM_CB_IRQ_TIMER2, rtimer_callback, 0);
    RTMR_IntEnable(APB_TMR2);
}
```