



**APB-SDIO**

2024.09.08

一 修订

版本	日期	编辑人	内容
1.00	陈家耀	2024.09.08	创建了第一个正式版本

## 二 简介和特性

APB-SDIO 基于 SD 卡控制器搭建，是一个带有 APB 从接口的 SDIO 控制器，可直接挂载在 APB 总线上充当 SDIO 主机外设。本 IP 简单易用、功能丰富，具有以下特性：

- 支持一线/四线模式
- 可动态配置 SDIO 时钟分频数，支持 1~1024 分频
- 支持常用的初始化命令（CMD0/8/2/3/7/16，CMD55，ACMD41/6），功能查询与切换命令（CMD6），单块读写命令（CMD17/24），多块读写（CMD18/25），停止传输（CMD12），可方便地进行命令拓展
- 可启用的响应和读数据 CRC
- 可配置的响应超时周期数、响应后 busy 超时周期数、读超时周期数
- 支持 SD 卡初始化硬核
- 支持 FAT32 文件系统

APB-SDIO 的组成如图 2-1 所示，它由读/写数据 fifo、命令缓存、APB 寄存器接口、SDIO 控制器、SDIO 中断发生器五部分组成。SDIO 控制器接收命令流，访问读写数据 fifo，返回响应和状态信息，内部的 IO 时钟发生器产生 SDIO 时钟，控制逻辑驱动 SDIO 命令线和数据线。SDIO 中断发生器可产生 SDIO 读/写数据中断和常规命令处理完成中断。命令缓存相当于深度为 1 的命令 fifo。

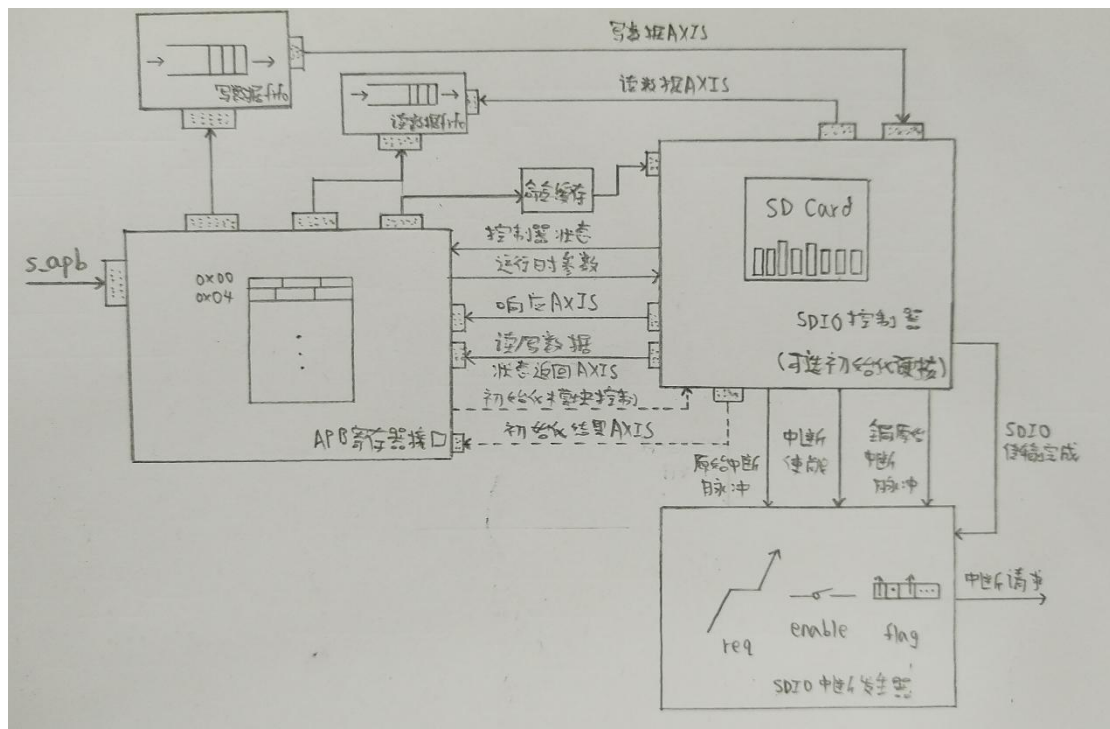


图 2-1 APB-SDIO 组成框图

### 三 IP 功能

APB-SDIO 是通用的 SDIO 主机外设，能够驱动 SDIO 接口实现命令发送、响应获取和数据读写，可启用命令处理完成中断。其功能描述如下：

1、**发送 SDIO 命令**。通过 APB 接口发送 SDIO 命令以完成 SD 卡初始化，或者进行数据读写。目前支持常用的初始化命令（CMD0/8/2/3/7/16，CMD55，ACMD41/6），功能查询与切换命令（CMD6），单块读写命令（CMD17/24），多块读写（CMD18/25），停止传输（CMD12）。

2、**获取 SDIO 响应**。在 SDIO 命令处理完成后，通过 APB 接口可获取这条命令的响应。目前支持常规 48bit 响应和 136bit 长响应。

3、**可启用命令处理完成中断**。目前支持读写数据命令处理完成中断和常规命令处理完成中断。

4、**将待写数据送入缓冲区**。通过 APB 接口可向写数据 fifo 填充数据，应在发送写数据命令前将待写数据全部送入写数据 fifo。

5、**从缓冲区获取读数据**。当读命令完成后，通过 APB 接口可从读数据 fifo 获取这条读命令对应的数据。

6、**可启用的 SD 卡初始化硬核**。SD 卡初始化可由硬件来完成，硬核将 SD 卡初始化为高速模式，用户需向硬核发送开始信号然后等待初始化模块空闲，此时可以获取初始化结果。

7、**配置 SDIO 时钟分频数**。SDIO 时钟分频数可以在运行时配置，支持 1~1024 分频。

8、**配置 SDIO 总线位宽**。SDIO 总线位宽可以在运行时配置，可选 1bit 或 4bit，配置的总线位宽应当与 SD 卡初始化时提供的总线位宽一致。

9、**开关 SDIO 时钟**。SDIO 时钟可以在运行时开关。

10、**可启用的命令和数据 CRC**。命令和数据 CRC 结果可在响应中查询。

11、**支持命令超时判定**。普通命令、带 busy 阶段的命令和读数据命令均设有接收超时周期数。

## 四 IO 描述

表 4-1 APB-SDIO IO 表

端口名	方向	位宽	含义
时钟和复位			
clk	input	1	时钟
resetn	input	1	复位，低有效
APB 从接口			
paddr	input	32	APB 从机地址
psel	input	1	APB 从机片选
penable	input	1	APB 从机传输使能
pwrite	input	1	APB 从机读写类型
pwrdata	input	32	APB 从机写数据
pready_out	output	1	APB 从机传输完成，固定为 1
prdata_out	output	32	APB 从机读数据
pslverr_out	output	1	APB 从机传输错误，固定为 0
SDIO 接口			
sdio_clk	output	1	SDIO 时钟线
sdio_cmd_t	output	1	SDIO 命令线方向，0 表示输出，1 表示输入
sdio_cmd_o	output	1	SDIO 命令线输出
sdio_cmd_i	input	1	SDIO 命令线输入
sdio_data_t	output	4	SDIO 数据线方向，0 表示输出，1 表示输入
sdio_data_o	output	4	SDIO 数据线输出
sdio_data_i	input	4	SDIO 数据线输入
中断信号			
itr	output	1	SDIO 主机外设中断请求

## 五 可配置参数描述

表 5-1 APB-SDIO 可配置参数表

配置参数名	含义	可取值
en_hw_init	是否使能 SD 卡初始化硬核	"true"   "false"
init_acmd41_try_n	初始化时发送 ACMD41 命令的尝试次数, 仅使能硬件初始化时有效	[1, 32]
resp_timeout	响应超时周期数	32 位正整数
resp_with_busy_timeout	响应后 busy 超时周期数	32 位正整数
read_timeout	读超时周期数, 设为-1 时表示不设超时	32 位正整数或-1
en_resp_rd_crc	是否使能响应和读数据 CRC	"true"   "false"
en_sdio_clken	是否使用 sdio 时钟使能	"true"   "false"
simulation_delay	仿真延时, 可用于仿真时模拟 D 到 Q 延迟	0.1f~100.0f

## 六 应用指南

### 6.1 RTL 设计指南

APB-SDIO 是标准的 SDIO 主机外设，请将 APB-SDIO 挂载在 APB 总线上使用，典型情况是挂载在 AXI-APB 桥或 AHB-APB 桥上作为一个 APB 从机，如图 6-1-1 所示。关于 AXI-APB 桥或 AHB-APB 桥，请参见 UG200。

需要注意的是，本 IP 在 `sdio_sck_generator.v` 中（第 72 行）使用了 `oddr`，`oddr` 可能与器件类型有关，必要时请根据设计要求进行替换。另外，本 IP 所提供的同步 FIFO 的顶层 RTL 文件为 `ram_fifo_wrapper.v`，由于 `fifo` 使用到的 RAM 可能与器件类型有关，必要时请根据设计要求进行替换。

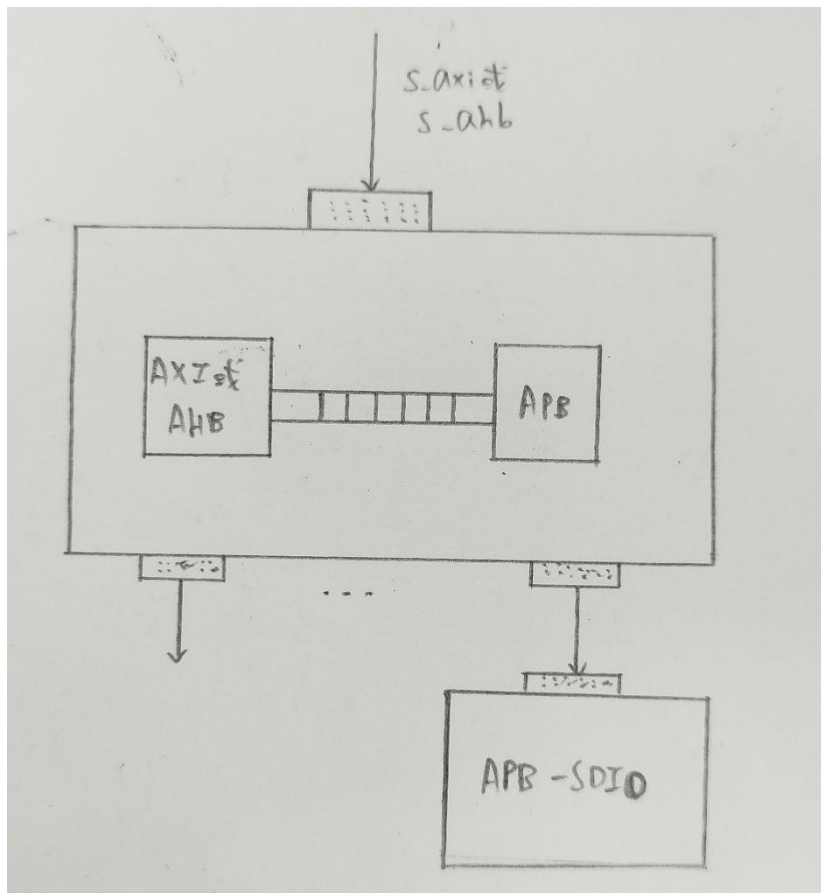


图 6-1-1 APB-SDIO 应用图

### 6.2 软件编程指南

#### 6.2.1 软件驱动 API

`apb_sdio.c` 和 `apb_sdio.h` 是 APB-SDIO 外设的底层驱动，`sd_card.c` 和 `sd_card.h` 是 SD 卡控制器的驱动，一般用户只需要关心后者。下面介绍的 API 都是 SD 卡控制器的驱动。本 IP 目前不支持写 SD 卡时 SDIO 时钟为 1 分频，因此在写 SD 卡时请将分频数设置为  $\geq 1$ ，读 SD 卡则没有这个限制。

## 1、类型定义

- SDCardInitRes 结构体（SD 卡初始化结果结构体）
  - uint8\_t sd2\_supported:** 是否支持 SD2.0
  - uint8\_t large\_volume:** 是否大容量卡
  - uint16\_t rca:** 卡推荐地址(RCA)

## 2、宏定义

- SD 卡初始化状态
  - SD\_CARD\_INIT\_CMD8\_ERR** CMD8 错误
  - SD\_CARD\_INIT\_ACMD41\_ERR** ACMD41 错误
  - SD\_CARD\_INIT\_POWER\_UP\_FAILED** 上电失败
  - SD\_CARD\_INIT\_CMD2\_ERR** CMD2 错误
  - SD\_CARD\_INIT\_CMD3\_ERR** CMD3 错误
  - SD\_CARD\_INIT\_CMD7\_ERR** CMD7 错误
  - SD\_CARD\_INIT\_CMD16\_ERR** CMD16 错误
  - SD\_CARD\_INIT\_NOT\_TRANSFER** 未进入 Transfer 状态
  - SD\_CARD\_INIT\_ACMD6\_ERR** ACMD6 错误
  - SD\_CARD\_INIT\_CMD6\_ERR** CMD6 错误
  - SD\_CARD\_INIT\_SUCCESS** 成功

## 3、函数

- **int sd\_card\_init**(ApbSDIO\* sdio, uint8\_t en\_wide\_sdio, SDCardInitRes\* init\_res, uint32\_t baseaddr);
  - 简介：初始化 SD 卡
  - 参数：**sdio** APB-SDIO（结构体指针）
    - en\_wide\_sdio** 是否使用 4 位 SDIO 总线
    - init\_res** SD 卡初始化结果（结构体指针）
    - baseaddr** APB-SDIO 外设基地址
  - 返回值：SD 卡初始化状态
- **int sd\_card\_send\_read\_single\_block\_cmd**(ApbSDIO\* sdio, uint32\_t addr);
  - 简介：发送单块读命令
  - 参数：**sdio** APB-SDIO（结构体指针）
    - addr** 块地址
  - 返回值：是否成功
- **int sd\_card\_send\_read\_mul\_block\_cmd**(ApbSDIO\* sdio, uint32\_t addr, uint8\_t read\_n);
  - 简介：发送多块读命令
  - 参数：**sdio** APB-SDIO（结构体指针）
    - addr** 块地址
    - read\_n** 读取块数
  - 返回值：是否成功



- `uint32_t sd_card_read_data_block(ApbSDIO* sdio, uint32_t* rdata);`  
 简介：从缓冲区读取数据  
 参数：**sdio** APB-SDIO（结构体指针）  
       **rdata** 读数据缓冲区基地址  
 返回值：读取到的双字数
- `int sd_card_send_write_single_block_cmd(ApbSDIO* sdio, uint32_t addr);`  
 简介：发送单块写命令  
 参数：**sdio** APB-SDIO（结构体指针）  
       **addr** 块地址  
 返回值：是否成功
- `int sd_card_send_write_mul_block_cmd(ApbSDIO* sdio, uint32_t addr, uint8_t write_n);`  
 简介：发送多块写命令  
 参数：**sdio** APB-SDIO（结构体指针）  
       **addr** 块地址  
       **write\_n** 写入块数  
 返回值：是否成功
- `void sd_card_write_data_block(ApbSDIO* sdio, uint32_t* wdata, uint32_t len);`  
 简介：向缓冲区写入数据  
 参数：**sdio** APB-SDIO（结构体指针）  
       **wdata** 写数据基地址  
       **len** 待写数据的双字数  
 返回值：无
- `int sd_card_stop_trans(ApbSDIO* sdio);`  
 简介：发送停止传输命令  
 参数：**sdio** APB-SDIO（结构体指针）  
 注意：本函数应在每个多块读/写命令后调用  
 返回值：是否成功

### 6.2.2 软件编程示例

基于 **FATFS** 的 **SD 卡读写例程**请参见 `firmware/examples`，该例程从 SD 卡读取 `test.bin` 并验证数据，然后创建并写文件 `out.txt` 并读取，测试文件 `test.bin` 也在 `firmware/examples` 里。与例程对应的硬件采用默认参数（除 `simulation_delay` 外）进行综合，即：

```
en_hw_init = "false"
init_acmd41_try_n = 20
resp_timeout = 64
resp_with_busy_timeout = 64
read_timeout = -1
```

```
en_resp_rd_crc = "false"  
en_sdio_clken = "true"  
simulation_delay = 0
```