## SD卡物理层协议

### SD卡系统

#### 1.1 SD卡读写属性

**SD卡分类：**

* 读写(RW)卡(一次性可编程OTP，多次可编程MTP)：这些卡通常作为空白(空)媒体出售，用于大量数据存储，最终用户视频、音频或数字图像记录。这些卡片是用固定的数据内容制造的。它们通常被用作软件、音频、视频等的分发媒介；
* 只读存储器(ROM)卡：这些卡片是固定的数据内容；通常被用作软件、音频、视频等的分发媒介；

工作电源电压方面：

* 高压SD存储卡，可以在2.7-3.6 V电压范围内工作；
* 支持工作电压范围为2.7 ~ 3.6V或1.70 ~ 1.95V的UHS-II SD存储卡；
* 支持工作电压范围为2.7 ~ 3.6V或1.70 ~ 1.95V的LVS卡，支持工作电压范围为的LVS卡；

#### 1.2 卡的容量

SD存储卡有两个可访问的独立区域：用户区和受保护区域。用户区域是主存区域，保护区域可以通过第三部分安全规范定义的身份验证访问。卡容量指用户区域容量和保护区域容量之和。

卡容量：

* 标准容量SD存储卡(SDSC)支持的容量不超过2GB；
* 高容量SD存储卡(SDHC)支持容量大于2GB，最大32GB；
* 扩展容量SD存储卡(SDXC)支持32GB，最大2TB；

SD卡速度等级：

* 第0类卡不指定性能；包括物理层规范版本2.00之前的所有传统卡，无论其性能如何；
* 第2类大于或等于2MB/秒的性能(默认速度模式)；
* 第4类大于等于4mb /秒 (默认速度模式)；
* 第6类大于等于6MB/秒(默认速度模式)；
* 第10类大于等于10MB /秒(高速模式)；

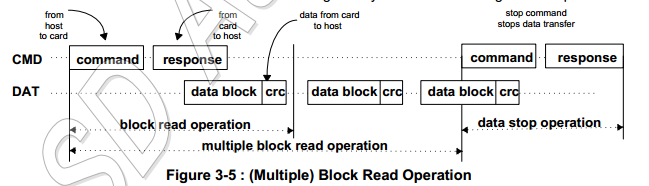
#### 1.3 总线协议

SD总线上的通信基于命令和数据比特流，这些比特流由起始位发起，由停止位终止。

* 命令：命令是启动一个操作的令牌。命令从主机发送到单个卡(寻址命令)或发送到所有连接的卡(广播命令)。命令在CMD行上串行传输；
* 响应：响应是一个令牌，从一个地址卡发送，或者(同步地)从所有连接的卡发送给主机，作为对先前收到的命令的回答。响应在CMD行上串行传输；
* 数据：数据可以从卡传输到主机，反之亦然。数据通过数据线传输；

卡寻址是使用会话地址实现的，会话地址在初始化阶段分配给卡。SD总线上的基本事务是命令响应事务。这种类型的总线事务直接在命令或响应结构中传输信息。此外，一些操作具有数据令牌。

数据传输到或从SD存储卡是在块完成。数据块总是由CRC位校验。定义了单个和多个块操作。注意，多块操作模式更适合于更快的写操作。当CMD行上跟随一个停止命令时，多块传输被终止。数据传输可以由主机配置为使用单个或多个数据线。



每个命令令牌前有一个起始位(0)，后有一个结束位(1)，总长度为48位。每个令牌都由CRC位保护，这样可以检测到传输错误，并可以重复操作。

响应令牌有四种编码方案之一，具体取决于内容。令牌长度为48位或136位。块数据的CRC保护算法是一个16位的CCITT多项式。

在CMD行中，首先传输最高有效位(MSB)，最后传输最低有效位(LSB)。

当使用宽总线选项时，数据每次传输4位。开始和结束位以及CRC位，在每一条DAT线路传输。每个数据行单独计算和检查CRC位。CRC状态响应和忙指示将由卡发送到主机上的DAT0 (DAT1-DAT3在此期间被忽略)。

#### 1.4 SD引脚

* CD(DAT3)：SD卡模式主要作为片选和数据线；SPI模式作为片选线；
* CMD：SD卡模式作为命令和响应；而SPI模式作为数据输入；
* VSS：地面电源电压；
* VDD：电源电压；
* CLK：时钟信号线；
* VSS2：地面电源电压；
* DAT0：SD卡模式作为数据线；SPI模式作为数据输出；
* DAT1：SD卡模式作为数据线；SPI模式保留；
* DAT2：SD卡模式作为数据线；SPI模式保留；

主机可以通过关闭和重新打开电源来复位卡。每个卡都有自己的上电检测电路，使卡在上电后进入规定的状态。不需要显式的复位信号。卡也可以通过发送GO\_IDLE (CMD0)命令来重置。

### 2 SD卡功能

#### 2.1 概述

主机和卡之间的所有通信都由主机控制。主机发送两种类型的命令：广播和寻址(点对点)命令。

* 广播命令：广播命令适用于所有卡。其中一些命令需要响应；
* 寻址(点对点)命令：寻址命令被发送到寻址卡，并引起该卡的响应；

两种操作模式(主机和卡)：

* 卡识别模式：主机在复位后和在总线上寻找新卡时将处于卡识别模式。在收到SEND\_RCA命令(CMD3)之前，复位后卡将处于此模式；
* 数据传输模式：在RCA首次发布后，卡将进入数据传输模式。主机识别出总线上的所有卡后，进入数据传输模式；

#### 2.2 卡识别模式

在卡识别模式下，主机重置所有处于卡识别模式的卡，验证操作电压范围，识别卡并要求发布相对卡地址(RCA)。该操作在每个卡各自的CMD行上分别完成。卡识别模式下的所有数据通信仅使用命令行(CMD)。

在卡识别过程中，卡必须在识别时钟频率fOD的SD时钟频率下工作。

##### 2.2.1 卡重启

在SD模式下，GO\_IDLE\_STATE(CMD0)命令是软件复位命令，无论当前卡的状态如何，都将每个卡设置为空闲状态。处于非活动状态的卡不受此命令的影响。

主机上电后，所有卡的状态为空闲，包括之前为非活跃状态的卡。上电或CMD0后，所有卡的CMD都处于输入模式，等待下一个命令的起始位。这些卡初始化为默认的相对卡地址(RCA=0x0000)，并具有400KHz时钟频率的默认驱动程序强度。在3.3V信号的情况下，如果支持并选择最高驱动电流能力，则默认驱动强度由驱动级寄存器(DSR)指定。

##### 2.2.2 运行情况检测

在主机和卡开始通信时，主机可能不知道卡支持的电压，卡也可能不知道自己是否支持当前供电的电压。主机发出一个带有指定电压的重置命令(CMD0)，同时假定卡可能支持。

SEND\_IF\_COND (CMD8)用于校验SD卡接口的工作状态。卡通过分析CMD8的参数来检查运行状态的有效性，主机通过分析CMD8的响应来检查有效性。供电电压由参数中的VHS字段表示。卡假定VHS中规定的电压为当前供电电压。在任何给定时间，VHS中只有1位被设置为1。主机使用CRC和校验模式来检查主机和卡之间通信的有效性。

如果卡可以在提供的电压上操作，则响应回显在命令参数中设置的提供电压和检查模式。如果卡不能在提供的电压下工作，不返回响应并保持在空闲状态。在初始化SDHC或SDXC卡时，必须在第一个ACMD41之前发布CMD8。

SD\_SEND\_OP\_COND (ACMD41)旨在为SD存储卡主机提供一种机制，以识别和拒绝与主机所需的VDD范围不匹配的卡。这是通过主机发送所需的VDD电压窗口作为该命令的操作数来完成的。

不能在规定范围内进行数据传输的卡应从进一步的总线操作中丢弃自己，并进入非活动状态。OCR寄存器中的电平应相应地定义。注意，ACMD41是特定于应用程序的命令；因此APP\_CMD (CMD55)总是在ACMD41之前。空闲状态中CMD55使用的RCA应该是卡的默认RCA。

主机发出复位命令(CMD0)复位卡后，主机应在ACMD41之前发出CMD8重新初始化SD存储卡。

通过在ACMD41参数中设置OCR为零，主机可以查询每个卡，并确定公共电压范围，然后将超出范围的卡发送到非活跃状态。如果主机能够选择一个公共电压范围，或者如果需要通知堆栈中不可用的卡的应用程序，则应使用此查询。如果ACMD41作为查询发出，则卡不会开始初始化并忽略参数中的HCS。之后，主机可以选择一个电压进行操作，并在此条件下重新发布ACMD41，使不兼容的卡进入非活跃状态。

在初始化过程中，不允许主机改变工作电压范围。

#### 2.3 数据传输模式

在卡识别模式结束之前，主机应保持在fOD频率，因为在卡识别模式中，某些卡可能有工作频率限制。在数据传输模式下，主机可以在fPP频率范围内操作卡。主机发出SEND\_CSD (CMD9)来获取卡片特定数据(CSD寄存器)，例如块长度，卡片存储容量等。

广播命令SET\_DSR(CMD4)配置所有标识卡的驱动阶段。根据应用总线布局(长度)和总线上卡的数量以及数据传输频率对DSR寄存器进行编程。时钟速率也从fOD切换到fPP。SET\_DSR命令是卡和主机的选项。

CMD7用于选择一张卡并将其置于传输状态。在给定的时间内，只能有一张卡处于转移状态。如果先前选择的卡处于转移状态，则与主机的连接将被释放，并且将移回备用状态。当CMD7被授予保留的相对卡地址0时，所有卡都回到待机状态。

这可以在识别新卡之前使用，而无需重置其他已注册的卡。在这种状态下，已经有RCA的卡不会响应识别命令。CMD48、CMD49、CMD58和CMD59也可在UHS-II模式下使用。

* 所有的数据读取命令都可以在任何时候通过停止命令(CMD12)终止。数据传输将终止，卡将返回到传输状态。读命令有块读(CMD17)、多块读(CMD18)、发送写保护(CMD30)、发送SCR (ACMD51)和读模式通用命令(CMD56)；
* 所有的数据写命令都可以通过停止命令(CMD12)随时终止。在CMD7取消选择卡之前，应该停止写命令。写命令包括块写命令(CMD24和CMD25)、程序写命令(CMD27)、锁/解锁命令(CMD42)和写模式通用命令(CMD56)；
* 数据传输完成后，卡将退出数据写入状态，并进入编程状态(传输成功)或传输状态(传输失败)；
* 如果停止写块操作，并且最后一块的块长度和CRC有效，则将对数据进行编程；
* 该卡可以为块写入提供缓冲。这意味着下一个数据块可以在前一个数据块被编程时被发送到卡片上。如果所有写缓冲区都满了，并且只要卡处于编程状态，DAT0线将保持低(BUSY)；
* 写CSD、写保护和擦除没有缓冲选项。这意味着，当卡忙于服务这些命令中的任何一个时，将不接受其他数据传输命令。DAT0线将保持低，只要卡是忙的，并在编程状态。实际上，如果卡的CMD和DAT0线保持分开，主机保持忙DAT0线与其他DAT0线断开连接(其他卡的)，主机可以在卡忙时访问其他卡；
* 当卡正在编程时，不允许参数设置命令；参数设置命令有：设置块长度(CMD16)、擦除块开始(CMD32)和擦除块结束(CMD33)；
* 当卡正在编程时，不允许读取命令；
* 将另一张卡从待机状态移动到传输状态(使用CMD7)不会终止擦除和编程操作。卡将切换到断开状态，并将释放DAT线；
* 在断开状态下，可以使用CMD7重新选择卡。在这种情况下，卡将移动到编程状态并重新激活忙指示；
* 复位卡(使用CMD0或CMD15)将终止任何未决或正在进行的编程操作。这可能会破坏卡上的数据内容。主人有责任防止这种情况发生；
* CMD34-37、CMD50、CMD57预留用于SD指挥系统扩展。这些命令的状态转换在每个命令系统规范中定义；

##### 2.3.1 总线位宽选择

宽总线(4位总线宽度)操作模式可以使用ACMD6选择/取消选择。上电或GO\_IDLE (CMD0)后的默认总线宽度为1位总线宽度。为了改变总线宽度，需要卡处于传输状态并且卡未被锁定，被锁定的卡将响应ACMD6为非法命令。

要制作2G卡，最大块长度(READ\_BL\_LEN=WRITE\_BL\_LEN)应该设置为1024字节。然而，CMD16设置的块长度应不超过512字节，以保持与512字节最大块长度卡的一致性。

##### 2.3.2 数据读取

当没有数据传输时，通过上拉使数据总线电平高。传输的数据块由起始位(低1位或低4位)和连续数据流组成。数据流包含有效载荷数据(如果使用离卡ECC，则包含纠错位)。数据流以结束位(1或4位高电平)结束。数据传输与时钟信号同步。面向块的数据传输的有效载荷由1位或4位CRC校验和保护。

关闭电源可能会中断SD存储卡的读取操作。SD存储卡确保在主机发出的除写或擦除操作外的所有情况下，即使在突然关闭或移除的情况下，数据也不会被破坏。

如果发生BLOCK\_LEN\_ERROR或ADDRESS\_ERROR，并且没有进行数据传输，则拒绝读取命令。

块读取是面向块的数据传输。数据传输的基本单位是一个块，其最大大小始终为512字节。较小的块，其起始和结束地址完全包含在512字节边界内，可以传输。CMD16设置的块长度可以设置为512字节，与READ\_BL\_LEN无关。

CRC被附加到每个块的末尾，以确保数据传输的完整性。CMD17 (READ\_SINGLE\_BLOCK)发起一个块读取，完成传输后，卡返回到传输状态。CMD18 (READ\_MULTIPLE\_BLOCK)开始传输几个连续的块。

块将持续传输，直到发出STOP\_TRANSMISSION命令(CMD12)。由于串行命令传输，停止命令有一个执行延迟。数据传输在停止命令结束位之后停止。当使用CMD18读取用户区的最后一块时，即使顺序正确，主机也应该忽略可能发生的OUT\_OF\_RANGE错误。

如果主机使用的部分块的累积长度不是块对齐的，并且不允许块错位，卡将在第一个错位块的开始处检测到块错位，在状态寄存器中设置ADDRESS\_ERROR错误位，中止传输，并在数据状态中等待停止命令。

##### 2.3.3 数据写入

数据传输格式与数据读取格式类似。对于面向块的写数据传输，CRC校验位被添加到每个数据块中。在写操作之前，卡对每个接收到的数据块执行1或4位CRC奇偶校验。通过这种机制，可以防止写入错误传输的数据。

如果发生BLOCK\_LEN\_ERROR或ADDRESS\_ERROR，并且没有进行数据传输，则拒绝写命令。

在块写入(CMD24)期间，一个或多个数据块从主机传输到卡，主机在每个块的末尾附加1或4位CRC。无论WRITE\_BL\_LEN设置为1k还是2k字节，支持块写的卡都要求CMD16设置的块长度为512字节。

如果WRITE\_BL\_PARTIAL是允许的，那么更小的块，最多一个字节的分辨率，也可以使用。如果CRC失败，卡应在DAT线上指示失败；传输的数据将被丢弃而不被写入，所有后续传输的块(多块写入模式)将被丢弃。为了提高写操作的速度，建议使用多个块写命令，而不是连续的单个写命令。

如果主机使用的部分块的累计长度没有块对齐，并且不允许块错位(CSD参数WRITE\_BLK\_MISALIGN未设置)，则卡应在第一个错位块开始之前检测到块错位错误并中止传输。卡应该在状态寄存器中设置ADDRESS\_ERROR错误位，同时忽略所有进一步的数据传输，在接收数据状态中等待停止命令。

注意，第一个数据块对于写命令是不对齐的(即在写命令的实际响应中报告ADDRESS\_ERROR)，卡保持在传说状态，没有数据被编程。如果主机试图在写保护区域上写，写操作也会被终止。然而，在这种情况下，卡应该设置WP\_VIOLATION位。

CSD寄存器的编程不需要先前的块长度设置。传输的数据也受CRC保护。如果CSD寄存器的一部分存储在ROM中，那么这个不可改变的部分应与接收缓冲区的相应部分相匹配。如果匹配失败，那么卡将报告一个错误，并且不会更改任何寄存器内容。

有些卡可能需要很长且不可预测的时间来写入数据块。在接收到数据块并完成CRC检查后，如果写缓冲区已满并且无法接受来自新WRITE\_BLOCK命令的新数据，则卡将开始写入并保持DAT0低电平。主机可以在任何时候用SEND\_STATUS命令(CMD13)轮询卡片的状态，卡片将用状态进行响应。状态位READY\_FOR\_DATA表示卡是否可以接受新数据，或者写过程是否仍在进行中。主机可以通过发出CMD7(选择不同的卡)来取消卡的选择，这将使卡进入断开状态并释放数据线而不中断写操作。当重新选择卡时，如果编程仍在进行中并且写缓冲区不可用，将通过将DAT拉到低来重新激活忙指示。实际上，主机可以同时对多张卡进行写操作，并有互留过程。交错过程可以通过在其他卡忙时单独访问每个卡来完成。这个过程可以通过适当的CMD和DAT0-3线操作(断开忙卡)来完成。

设置预擦除的写块数量(ACMD23)将使后续的多块写操作比不使用ACMD23的相同操作更快。主机将使用这个命令来定义在下一次写操作中要发送多少个写块。如果主机将在所有数据块发送到卡之前终止写操作(使用停止传输)，则剩余写块的内容是未定义的(可以被擦除或仍然有旧数据)。

如果主机发送的写块数量超过ACMD23中定义的数量，卡将逐个擦除块(当接收到新数据时)。多块写操作完成后，该数值将复位为默认值。

建议在CMD25之前使用此命令，有些卡对于多写块操作会更快。注意，如果主机想要使用预擦除特性，则应该在WRITE命令之前发送ACMD23。否则，在执行其他命令时，可能会自动清除预擦去。

使用管道机制进行数据缓冲区管理的系统，在某些情况下，如果在多块写入操作中发生错误，则无法确定哪个块是最后一个被写入闪存的。卡将用写入良好的块的数量响应ACMD22。

##### 2.3.4 擦除和填充

为了提高数据吞吐量，需要同时擦除多个写块。这些写块的识别是通过ERASE\_WR\_BLK\_START (CMD32)、ERASE\_WR\_BLK\_END (CMD33)命令完成的。

如果在CMD38参数中设置了0x1h或0x2h，则如果卡支持丢弃或填充，则可能不会执行擦除。如果收到顺序错误的擦除(CMD38)或地址设置(CMD32, 33)命令，卡将在状态寄存器中设置ERASE\_SEQ\_ERROR位，并重置整个序列。

如果收到乱序命令(SEND\_STATUS除外)，卡将在状态寄存器中设置ERASE\_RESET状态位，重置擦除顺序，执行最后一条命令。如果擦除范围包括写保护扇区，则保留写保护扇区，只擦除非保护扇区。应该设置状态寄存器中的WP\_ERASE\_SKIP状态位。

地址设置命令中的地址字段是以字节为单位的写块地址。卡将忽略WRITE\_BL\_LEN(参见CSD)大小以下的所有LSB。

丢弃操作类似于缺省的擦除操作。卡可以部分或全部取消分配丢弃的块。已应用丢弃函数的区域的内容将被主机视为忽略。在丢弃操作之后，先前写入的数据可以由主机部分或全部读取，这取决于卡的实现。为了提高数据吞吐量，需要同时丢弃多个写块。

这些写块的识别是通过ERASE\_WR\_BLK\_START (CMD32)、ERASE\_WR\_BLK\_END (CMD33)命令完成的。支持丢弃的主机应该检查SD\_STATUS寄存器中的DISCARD\_SUPPORT位(b313)。如果卡不支持丢弃，主机不应该发出丢弃命令。如果卡不支持丢弃，卡将执行ERASE。

如果收到的丢弃 (CMD38)或地址设置(CMD32, 33)命令顺序错了，卡将在状态寄存器中设置ERASE\_SEQ\_ERROR位，并复位整个序列。

如果收到乱序命令(SEND\_STATUS除外)，卡将在状态寄存器中设置ERASE\_RESET状态位，复位DISCARD顺序，执行最后一条命令。

如果主机提供超出范围的地址作为CMD32或CMD33的参数，卡将在R1 (ERX)中指示CMD38或下一条命令的R1中的OUT\_OF\_RANGE错误，并重置整个丢弃序列。在执行DISCARD命令后，主机将检查是否有错误。

FULE操作类似于默认的擦除操作，除了卡必须在逻辑上完全擦除整个用户区域。需要在逻辑上擦除整个用户区。完整用户区域的识别是通过参数等于0的ERASE\_WR\_BLK\_START (CMD32)和参数等于用户区域结束的ERASE\_WR\_BLK\_END (CMD33)命令完成的。

支持填充的主机应检查SD\_STATUS寄存器中是否有FULE\_SUPPORT位。如果卡不支持FULE，主机将不会发出FULE命令。如果卡不支持填充，卡将执行ERASE。

如果收到的填充(CMD38)或地址 (CMD32, 33)命令顺序错了，卡将在状态寄存器中设置ERASE\_SEQ\_ERROR位，并复位整个序列。如果收到乱序命令(SEND\_STATUS除外)，卡将在状态寄存器中设置ERASE\_RESET状态位，复位填充序列，执行最后一条命令。

##### 2.3.5 卡写保护管理

SD存储卡支持三种写保护方式：机械写保护开关(仅主机负责)；卡内部写保护(卡负责)；密码保护卡锁操作。

用户将使用卡侧面的机械滑动板来指示给定卡是否受写保护。如果滑动平板被放置在这样一种方式，窗口是打开的，这意味着卡片是写保护。如果窗口关闭，则卡不受写保护。插座侧的一个合适的、匹配的开关将向主机指示卡是否为写保护。主机有责任保护卡的安全。卡的内部电路不知道写保护开关的位置。

##### 2.3.6 卡锁和解锁操作

密码保护功能使主机能够在提供密码的同时锁定卡片，稍后将用于解锁卡片。密码及其大小分别保存在128位PWD和8位PWD\_LEN寄存器中。可选地，强制擦除密码可以存储在额外的128位FEP中，如果卡支持卡所有权保护(COP)，则应存在8位FEP\_LEN寄存器。这些寄存器是非易失性的，因此电源周期不会擦除它们。

锁定卡响应并执行命令类(0类)、ACMD41、CMD16和锁定卡命令类中的所有命令。因此，允许主机进行复位、初始化、选择、查询状态等操作，但不允许访问卡上的数据。如果之前设置过密码(PWD\_LEN的值不为0)，上电后卡会自动锁定。

与现有的CSD寄存器写命令类似，锁命令只能在传输状态下使用。这意味着不包括地址参数，卡必须在使用前进行选择。

锁命令具有普通单块写命令的结构和总线事务类型。传输的数据块包括命令所需的所有信息(密码设置模式、PWD本身、卡锁/解锁等)。内容保护由PWD管理。物理卡所有权是用COP特性管理的。

#### 2.4 时钟控制

主机可以使用SD卡总线时钟信号将卡切换到节能模式或控制总线上的数据流。允许主机降低时钟频率或关闭主机。因此，为了保持数据的连续传输，从卡的角度来看，到卡的时钟应该在第一个512字节之后停止。然后，主机将用另一个512字节填充其内部缓冲区。在主机中写块的后半部分准备好后，将通过重新启动时钟供应继续向卡传输数据。这样，卡就不能识别数据传输中的任何中断。

主机需要考虑以下几点限制：

* 总线频率可以随时更改(在最大数据传输频率和规范文件定义的识别频率的限制下)；

#### 2.5 CRC校验码

CRC旨在保护SD存储卡命令、响应和数据传输免受SD存储卡总线上传输错误的影响。为每个命令生成一个CRC，并检查CMD行上的每个响应。对于数据块，每个传输的块生成一个CRC。

#### 2.6 错误条件

所有命令都由CRC(循环冗余校验)位保护。如果地址卡的CRC检查失败，则该卡不响应，命令不执行。卡不改变状态，状态寄存器设置COM\_CRC\_ERROR位。同样，如果接收到非法命令，卡将不改变其状态，不响应，并在状态寄存器中设置ILLEGAL\_COMMAND错误位。