

一何为读、写分离？

读、写分离是指在对双向传输的信号线进行电气参数测试时，通过手段识别读信号和写信号，从而针对性的测试读、写两个条件下的电气参数。

二

为何读、写分离？

2.1 芯片之间的通讯，可以划分为：发送端、链路、接收端。电气参数测试应在接收端抓取信号，从而判断其电平以及时序参数是否满足接收端芯片的要求。例如：芯片 A、B 之间通讯，从芯片 A 的视角出发，信号流向 A->B 即写信号，应是在靠近 B 端测试，而信号流向 A<-B 即读信号，应在靠近 A 端测试。所以读信号和写信号的测试点选择是不同的。尤其对于高带宽的通讯总线，对于测试点的要求非常严格。

当然，有些时候在难以确定链路情况时，也会选择在发送端测试电气参数。例如：USB、HDMI 输出接口等。当设备包含这类输出端口时，因为实际使用场景未知，所以只能以发送端的电气参数来要求设备输出的信号质量。因此对于一条通讯总线（尤其是高速串行接口），其完整的电气参数要求通常包括：发送端信号质量、链路 S 参数、接收端信号质量，以此来约束每个环节。

2.2 对读、写操作的电气参数要求不同。从信号电平参数看，信号在经过走线或线缆后必然会产生衰减，当然为了改善这一问题，发送端和接收端的预加重和去加重是一个广泛使用的办法，但从信号本身来看发送端的电平幅值必然会更高，所以各个接口协议在对发送端和接收端的电平要求是不同的。

三

如何读、写分离？

既然读、写分离是针对双向传输信号线测试的先决条件，那么下面举几个常见通讯信号电气参数测试中的例子，大家可以体会一些基本的思路。

3.1 对于 DDR 系列

◆ DDR2

1、DQ 和 DQS 信号的对齐方式不同，读数据时两者边沿对齐，写数据时两者中央对齐。如下图，Read data 部分 DQ 和 DQS 波形在时间轴上几乎重合的，而 Write data 部分可以明显观察到两者波形存在时延，因为在写数据时是在 DQS 的上下边沿过零点采样，所以如果数据要有充分的建立/保持时间，就需要采取这种中间对齐的方式。

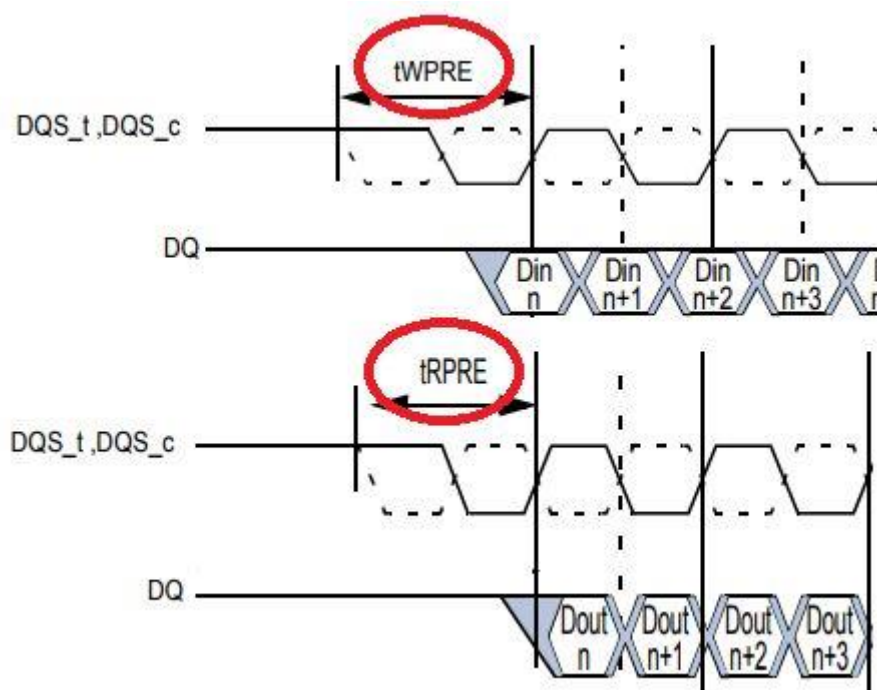
2、DQ 和 DQS 的信号幅度不同，假定读、写发送端的信号幅度相同，那么在靠近内存颗粒端，写操作的信号幅度要小于读操作的信号幅度，而在靠近内存控制器端，前者大于后者，这是因为信号经过走线后必然产生衰减，如上图就是在内存颗粒端测试到的读、写信号波形，可以看出在幅值上有明显差异。

3、DQS 信号的前导负脉冲宽度不同，读操作的第一个负脉冲宽度参数 t_{RPRE} 约为 T_{ck} ，写操作的第一个负脉冲参数 t_{WPRE} 宽度大于 $0.35T_{ck}$ ，但通常从实测波形中观察 t_{RPRE} 是明显大于 t_{WPRE} 的，因此也可以作为一个辅助判据。

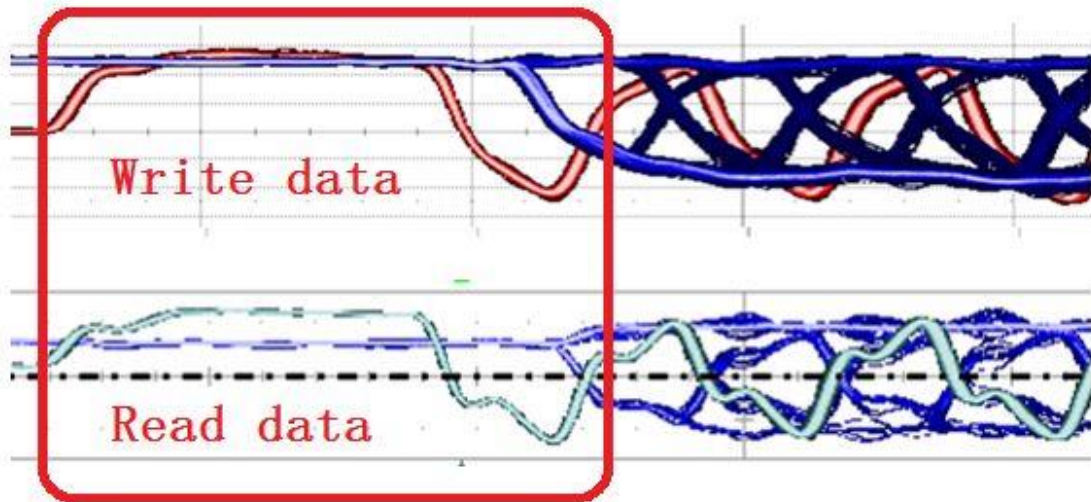
◆DDR3

对于 DDR3，对齐方式和信号幅度的规律和 DDR2 相同，但是 DQS 前导波形有变化，如下图，对于写操作，前导是正脉冲和负脉冲的组合，对于读操作，前导是单一负脉冲。因此从 DQS 前导波形来对 DDR3 进行读、写分离是很简单明了的。

实测读、写操作时的 DQS 前导波形如下，其中通道 M3 是 DQ，M4 是 DQS：



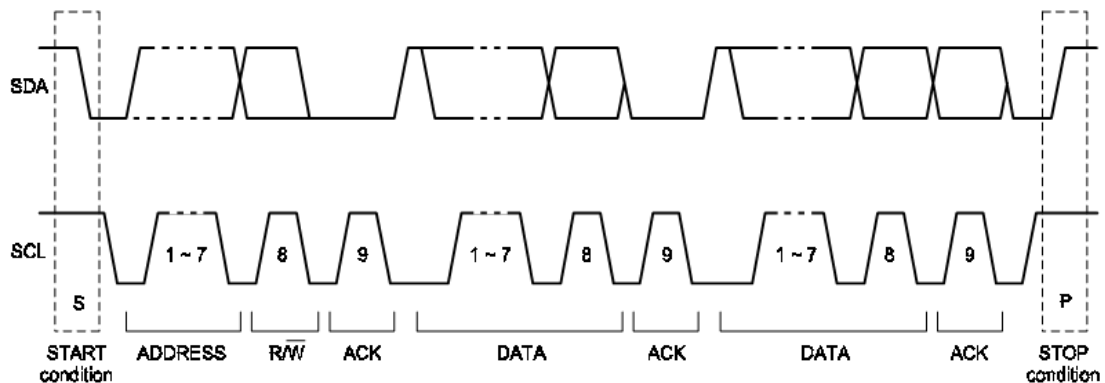
实测读、写操作时的 DQS 前导波形如下：



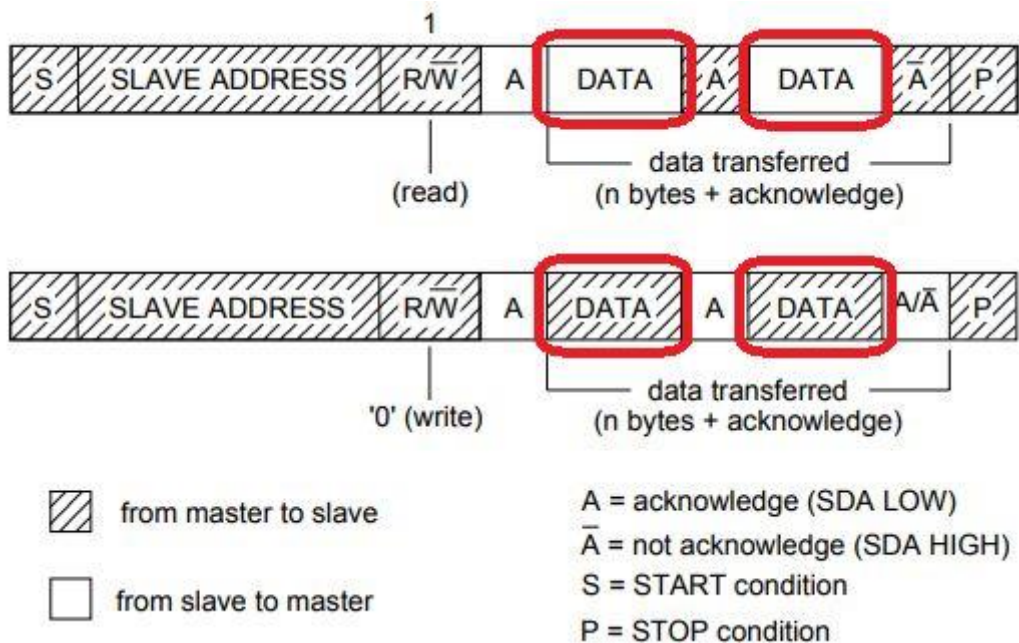
综上所述，在使用示波器测量各版本 DDR 的读、写参数时，首先要根据读、写时 DQS 的不同波形特征来设置触发条件，从而过滤出读或者写波形，再进行参数测试。

3.2 对于 I2C

I2C 总线是由 Philips 公司开发的一种简单、双向二线制同步串行总线，只需要两条信号线即可在连接于总线上的器件之间传送信息，使用非常广泛。I2C 数据的传输格式如下：



在起始条件“S”后发送从机地址，该地址共有 7 位，紧接着的第 8 位是读写位“R/W”，该位为 0 表示写操作，为 1 表示读操作；ACK 是应答信号，为 0 表示写未应答，为 1 表示应答；之后跟着若干位 DATA 信号；末尾处由主机产生的停止位“P”。当然针对 I2C 有一系列的电气参数要求，但针对主机和从机是完全不同的，例如：测试主、从两端的数据建立时间 $t_{su:dat}$ 和保持时间 $t_{hd:dat}$ 参数时，需要分别在读、写操作中抓取对应的 DATA 信号波形，如下以红色边框标注。



如果 I2C 总线上挂了多个从设备，需要根据各设备的地址来区分当前的通讯是从设备中的哪一个，目前很多智能示波器配备了“I2C 触发”方式，以此进行读、写信号分离，再进行参数测试。如下图是 SDS3000X 操作，很便捷：

进入 Setup 界面后，设置 SDA 和 SCL 对应的通道，设置触发类型为 Addr，设置地址信号格式：二进制或者十六进制，选择设置触发的地址是否包含“读/写”位，若在“Include R/W Bit”勾选框打“√”则不需要在下面的“Direction”下拉框里选择 Write 或 Read，反之，需要设置。选择地址信号 bit 位数和触发地址，若在“Include R/W Bit”勾选框打“√”此处填写的 Address 地址应为 8Bits，包含“读/写”位，反之，仅需设置 7bits，设置信号格式是否包含 Ack。

如下图是一段实测的 I2C 波形，从示波器中显示的解码信息可以明确得知，当前通讯的从设备地址以及读、写的数据具体是什么，一目了然。

3.3 对于 SD-card

SD-card 因为体积小、数据传输速度快、可热插拔等特性，广泛应用于各种便携式设备作为数据存储介质，例如：数码相机、多媒体播放器、智能手机等。SD-card 的各引脚定义如下：

从引脚定义也可以看出，SD-card 可以工作在两种模式：SD 模式或者 SPI 模式，因为工作在 SPI 模式时数据线为单向传输，并不需要读、写分离，下面主要讲述 SD 模式时的分离方法。

数据传输格式如下图，分别是读、写操作时 CMD 和 DATA 信号线的状态，大体说是 host 向 SD-card 发送 command 命令字，然后 SD-card 发出 response 响应字，之后进行 data block 数据传输，数据传输完成后再进行一次 command 和 response 操作。

SD-card 的读、写分离与 I2C 的操作有所不同，主要有两点：

- i. 目前市面上的示波器很多配备了“I2C 触发”模式，但没有 SD 触发模式，因此针对 SD-card 的电气参数测试无法通过示波器现有的触发模式进行。
- ii. I2C 是通过“R/W”标志位来区分读写，而 SD-card 需要通过 command 命令字来区分，更加复杂。基于以上两点，在此特别将 SD 模式下的操作方法做以描述。

因为读、写分离需要使用 command 命令字，所以先了解该字段的格式和内容。该字段共 48bits，读、写分离主要用到 command index 中的内容，该段内容对应不同的操作命令。

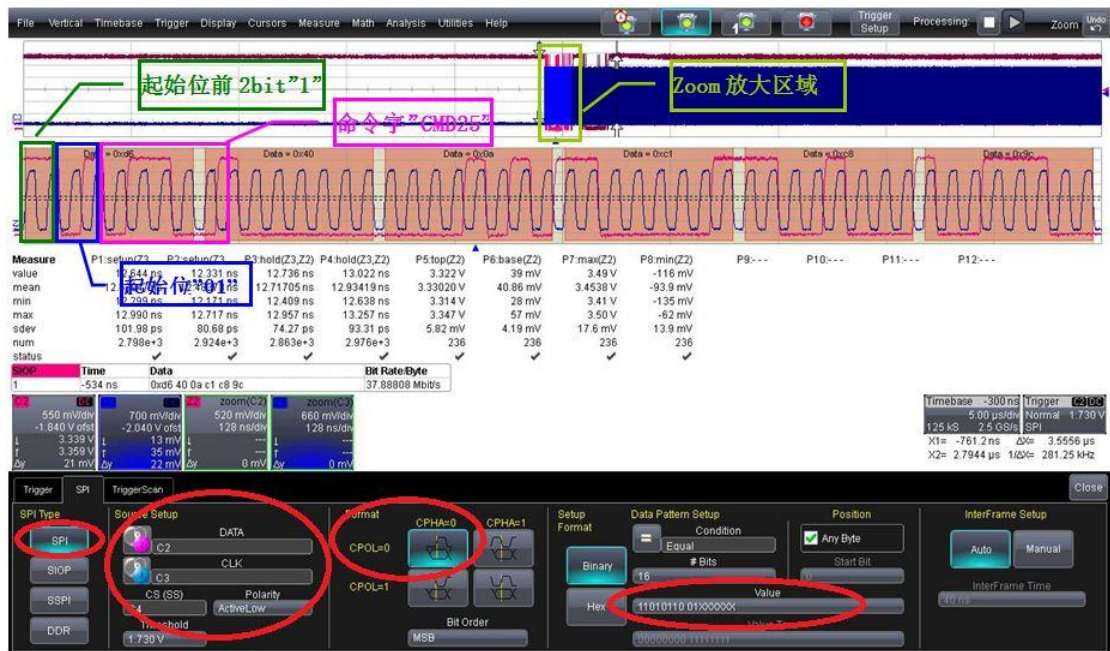
如下是和读、写相关的 4 个命令，其中 CMD17、CMD18 是读操作，而 CMD24、CMD25 是写操作，在进行读、写分离操作时，就是根据该字段的不同来设置用于触发的二进制序列。

CMD INDEX	type	argument	resp	abbreviation	command description
CMD17	adtc	[31:0] data address ²	R1	READ_SINGLE_BLOCK	In the case of a Standard Capacity SD Memory Card, this command, this command reads a block of the size selected by the SET_BLOCKLEN command. ¹ In the case of a High Capacity Card, block length is fixed 512 Bytes regardless of the SET_BLOCKLEN command.
CMD18	adtc	[31:0] data address ²	R1	READ_MULTIPLE_BLOCK	Continuously transfers data blocks from card to host until interrupted by a STOP_TRANSMISSION command. Block length is specified the same as READ_SINGLE_BLOCK command.
CMD24	adtc	[31:0] data address ²	R1	WRITE_BLOCK	In the case of a Standard Capacity SD Memory Card, this command writes a block of the size selected by the SET_BLOCKLEN command. ¹ In the case of a High Capacity Card, block length is fixed 512 Bytes regardless of the SET_BLOCKLEN command.
CMD25	adtc	[31:0] data address ²	R1	WRITE_MULTIPLE_BLOCK	Continuously writes blocks of data until a STOP_TRANSMISSION follows. Block length is specified the same as WRITE_BLOCK command.

触发二进制序列以起始位“01”和 command index 组成，如下：

命令			触发序列
读	Block Read	CMD17	01010001
	Multiple Block Read	CMD18	01010010
写	Block Write	CMD24	01011000
	Multiple Block Write	CMD25	01011001

前面也已经说到示波器并没有 SD 触发模式，此处可以使用具有“SPI 触发”模式的示波器，只需要进行相应的配置。如下图，选择“SPI”触发，C1 通道为待测 DATA 信号，C2 通道为 CMD 信号，C3 为 CLK 信号，因为 SPI 信号中有个 CS 信号，但 SD-card 并没有该信号，所以将设置中的 CS 设置为低电平有效，通道为 C4，实际上示波器的 C4 通道是悬空的，因此恒为低电平，也等效于设置为 CS 持续有效。CPHA=0，CPOL=0，之后在触发序列中输入相应的二进制。在此有一个需要注意的情况，虽然 SD-card 协议中说明 command 是以“01”起始，但实际上在“01”之前可能存在若干个高电平，因此在测试时还是需要观察实际波形，判断高电平的位数，并增加在触发序列中。如下图是以 CMD25 触发写操作，放大波形后发现前面有 2bit “1”，因此将触发序列修改为“1101011001”，从而完成对于写操作的触发设置。之后即可开始对波形进行电气参数测试，如：数据信号的建立/保持时间。使用不同的触发序列抓取不同命令的读、写波形即可完整测试读、写两端的参数测试。



以上针对 I2C 和 SD-card 的测试需要用到示波器的 “I2C 触发” 和 “SPI 触发” 方式，所以选择一款具备该功能的示波器是必要的，鼎阳科技的 SDS3000X 系列示波器配置了丰富的触发和解码功能，在相关测试中得心应手。

型号	SDS3054X	SDS3104X
带宽	500MHz	1GHz
最高实时采样率	4GSa/s	
通道数	4 模拟通道 +16 数字通道	
最大存储深度	20Mpts/CH	
最高波形捕获率	1,000,000 帧 / 秒 (Sequence 模式下)	
触发类型	边沿, 脉宽, 判定合格, 逻辑图, TV, 窗口, 间隔, 漏失, 欠幅, 斜率, I ² C, I ² S, SPI, UART/RS232, LIN, CAN, CAN-FD, FlexRay, MIL 1553, USB 2.0	
解码类型 (选件)	I ² C, I ² S, SPI, UART/RS232, LIN, CAN, CAN-FD, FlexRay, MIL 1553, USB 2.0	

四

结语

针对某一通讯接口的读、写分离，往往是开始电气参数测试时的第一个环节，因此掌握其方法尤为重要，可以这样说：“如果没有准确的进行读、写分离，测试结果本身是无效的。” 本文主要讲述了 DDR、I2C、SD-card 电气参数测试中的读、写分离过程，选这几个接口是因为它们都很常用而且有一定的代表性，希望通过本文可以使大家认识到该环节的重要性以及进行读、写分离的大体思路。