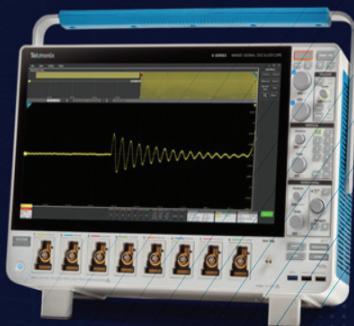


# 用混合信号示波器探索总线的秘密

应用指南

更低噪声、更多通道  
更高带宽



MSO6B混合信号示波器

Tektronix®

**摘要：**混合信号示波器具有数模混合测量功能。本文以 MSO6B 系列示波器为主要测量仪器，从 UART 协议入手，介绍了总线解码的基本概念和示波器具体操作方法。文中还介绍了 I<sup>2</sup>C 和 SPI 协议，并对比手动解析和示波器自动解码的过程和结果，充分展现了现代化混合信号示波器的混合测量能力。对于信号失真的场景，从数字和模拟信号 2 个角度，进一步阐述了混合调试的思想。

**关键词：**混合信号；示波器；总线解码；逻辑分析

## 目录

<b>1 使用示波器测量混合信号 .....</b>	<b>3</b>
<b>2 总线解码快速上手 .....</b>	<b>4</b>
2.1 UART 协议解析 .....	4
2.2 示波器设置 .....	4
2.3 示波器解码结果 .....	5
<b>3 常见协议的解码 .....</b>	<b>6</b>
3.1 I <sup>2</sup> C 协议 .....	6
3.2 SPI 协议 .....	7
<b>4 混合调试 .....</b>	<b>8</b>
<b>5 总结 .....</b>	<b>9</b>
<b>参考文献 .....</b>	<b>9</b>

## 1 使用示波器测量混合信号

泰克的 MSO 系列示波器，是混合信号示波器，顾名思义，除了具有良好的模拟信号捕捉还原能力外，还是具有数字信号采集和分析能力。因此 MSO 系列示波器，不仅可以作为一台专业的高速逻辑分析仪，还能同步处理模拟和数字信号，实现数模混合测量功能。

以 MSO68B 示波器为例，它具有 8 个通道的输入。对于每个通道而言，它不仅仅是可以输入 1 路模拟信号的传统模拟通道，而是名为 FlexChannel 的数模混合通道。对于每一个 FlexChannel，可以配置为 1 个模拟输入，或者 8 个数字输入。因此 8 个 FlexChannel，可以最多配置为 8 乘以 8 共 64 个数字通道。进一步的，得益于泰克自研的 ASIC 芯片，这些逻辑通道的采样率最高可以达到模拟采样相同的速率，例如 25Gs，完全可以胜任高速逻辑信号的分析。

以观察一个数字模拟转换器（DAC）的输入和输出为例。我们的目标是同时看到 8 个数字输入和 1 个模拟输出信号，这对于软硬件设计、调试和验证都是非常有用的。为了将数字信号输入示波器，我们需要使用 TLP058 逻辑探头，每个逻辑探头占用一个 FlexChannel，提供 8 个数字输入。出于演示的目的，我们在通道 1 和 2 上各插入一个 TLP058 逻辑探头，示波器上显示了 16 路数字输入，其中 C1 通道的 8 路数字输入连接到 DAC 的数字输入。剩余 6 个 FlexChannel 依然作为模拟信号的输入，我们在通道 3 上插入一个标配无源探头（TPP1000），连接到 DAC 的模拟输出。硬件连接全貌如图 1 所示。

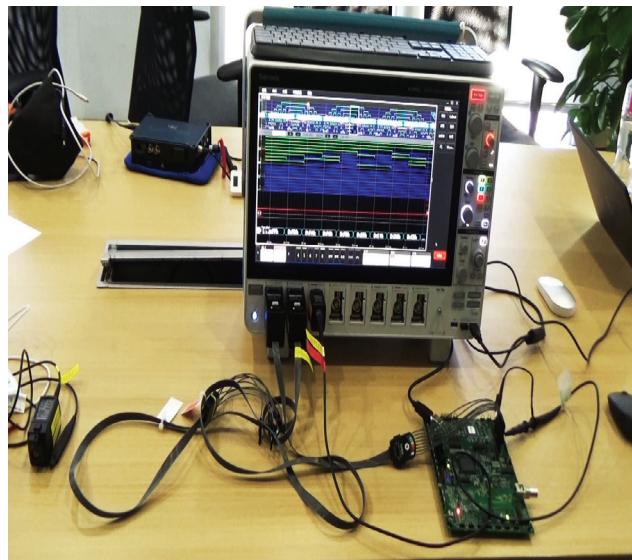


图 1：示波器测量混合信号的硬件连接

简单设置水平、垂直通道参数和触发后，就可以在屏幕上观察到数字和模拟信号了，如图 2 所示，示波器屏幕的波形显示分成了多个部分，数字波形、模拟波形都可以同屏展示。这里的模拟信号是一个正弦波，因此简单使用模拟信号的上升沿进行触发，实际上触发也可以在全部通道上进行按需灵活设置。



图 2：混合信号测量结果

细心的朋友还可以看到图 2 中添加了一条总线，把 8 个数字通道作为一个并行输入，从而解码出具体数值。为了观察总线的细节，可以使用示波器的缩放功能，如图 3 所示。这里数字和模拟信号会同步放大，总线上的数据也可以看清了，充分发挥了大屏幕的优势。

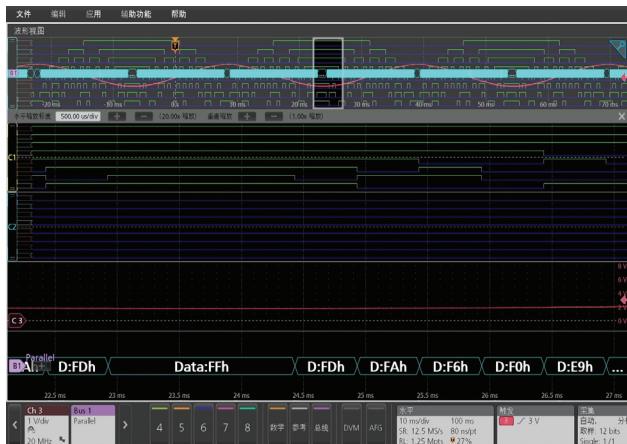


图 3：使用缩放功能查看混合信号的细节

本节展示了一个典型的混合信号的测量和分析过程。下文将重点讲解数字信号的分析方法，特别是总线解码相关的知识和操作方法。

## 2 总线解码快速上手

这里以常见的串口（UART）信号为例，介绍使用混合信号示波器进行总线解码的基本流程。

### 2.1 UART 协议解析

通用异步收发传输器（UART）也就是大家常见的串口，大部分带微控制器的嵌入式设备都可以支持。一个完整的 UART 一般至少需要 3 根线，除了地线（GND）外，一根线用来接收（RX）、一根线用来发送（TX），实现数据双向传输。UART 的数据帧如图 4 所示，包含起始位，数据位和停止位。

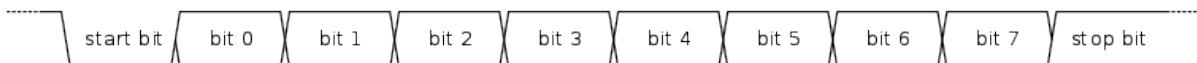


图 4：UART 数据帧 [1]

一个 UART 波形的示例如图 5 所示。图中 UART 信号线空闲为高电平，起始位通过拉低电平实现。之后通过高低电平变化来传输 8 个 bits 的数据。由于 UART 协议非常简单，我们手动就可以把数据解码出来。图中左边的数据直译为 10100010（LSB 在左），通常记录时会习惯先写 MSB，因此逆序为 01000101（MSB 在左），转换为常用的 16 进制就是 0x45。同理，右边的数据解码的结果是 0x6E。



图 5：UART 波形和手动解析示例

### 2.2 示波器设置

本节描述如何用示波器捕捉 UART 波形，并使用示波器自带的总线解码功能完成自动解码。以 Raspberry Pi Pico 的 UART 作为例子，在控制器里烧录一个往 UART0 发送数据的程序，通过示波器捕捉并解码。

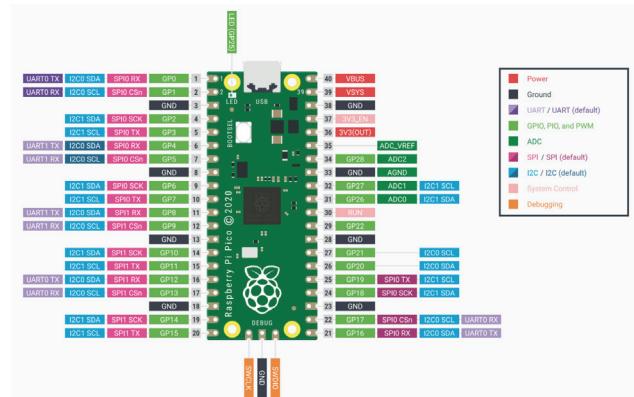


图 6：Raspberry Pi Pico 的 UART [2]

如图 6 所示, Raspberry Pi Pico 的 UART0 的 TX 线与 GPO 复用, 在 1 号引脚上。因此 1 号引脚的信号需要输入示波器。示波器的垂直系统可以在某个通道连上逻辑探头, 当然这是一个普通的共模信号, 使用无源探头直接捕捉也是可以的。如果使用逻辑探头, 需要注意门限电压的设置, Raspberry Pi Pico 的低电平为 0V, 高电平为 3.3V, 门限电压设为 1.6V 左右。水平系统方面, 已知波特率是 115200 bps, 每个 bit 的传输时间约为 8.7 us, 可先设为 100us /div, 甚至 1ms /div, 等观察到信号后再做微调。

触发系统的设置和模拟信号有所不同, 我们可以设置为专用的总线触发。以演示信号为例, 首先添加总线, 设置如图 7 所示。UART 的一个常见物理层接口是 RS-232, 因此示波器里的总线类型选择“RS-232”。位速率即波特率, 常用的有 9600、115200bps 等, 根据实际情况设置。数据位数常用的是 8 位, “极性”用来设置数字“1”用高电平或低电平表示, 此例中是高电平表示 1。解码格式不影响解码结果, 只是显示的格式, 这里选“十六进制”。其它选项根据实际情况设置, 或者默认即可。总线设置完成后, 就可以用总线触发了, 我们选择“开始”, 即总线开始数据传输的位置, 这样只要总线上有数据传输, 就会被触发。



图 7: UART 总线设置

### 2.3 示波器解码结果

如果设置准确, 波形视图的总线上就会出现实时的解码结果, 如图 8 所示。其中 0x45 和 0x6E 的解码结果, 和前文手动解析的结果是一致的。



图 8: UART 总线解码结果

接下来更换为逻辑探头, 来查看 Raspberry Pi Pico 的 UART 输出, 如图 9 所示。这里做了 2 个小的改动: 一是打开了总线解码结果的表格 (点击界面右边的“结果表”), 二是把解码结果用字符串形式显示。我们可以从结果表或者波形视图中发现, Raspberry Pi Pico 输出的是一个字符串“Hello2021”。并且结果表和波形视图是联动的, 点击某个数据, 就会跳转到波形的对应位置, 可以快捷查找数据, 并放大对应的波形, 操作十分方便。

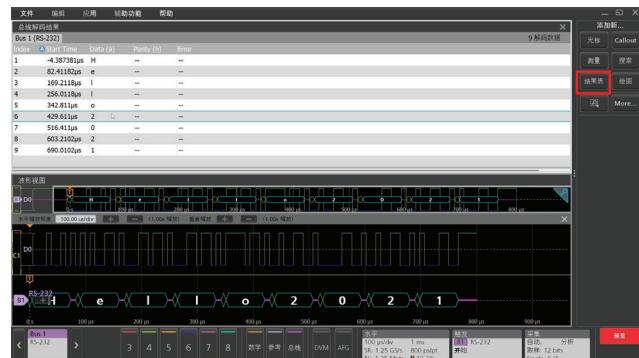


图 9: UART 解码结果的进阶展示

此外, 总线触发也有多种选择, 例如可以选择通过特定的数据去触发, 这样就实现了示波器自动找数据的功能。

### 3 常见协议的解码

#### 3.1 I<sup>2</sup>C 协议

I<sup>2</sup>C 是一种集成电路总线，硬件连接主要有 2 根线，一根是时钟 (SCLK)，一根是数据 (SDA)。协议标准上规定了在时钟高电平采样，因此解码比较固定，但数据格式需要区分地址、读写标志和数据，在一个字节内还要留意起始条件 (S)、应答 (ACK) 和停止条件 (P)，如图 10 所示。根据电平可以解析出二进制数据流为“10100001 00011000”。根据标准，前 7 位是地址，转换为 16 进制是 0x50，读写标志是 1，表示“读”，记为“R”，之后是数据，转换为 16 进制是 0x18。

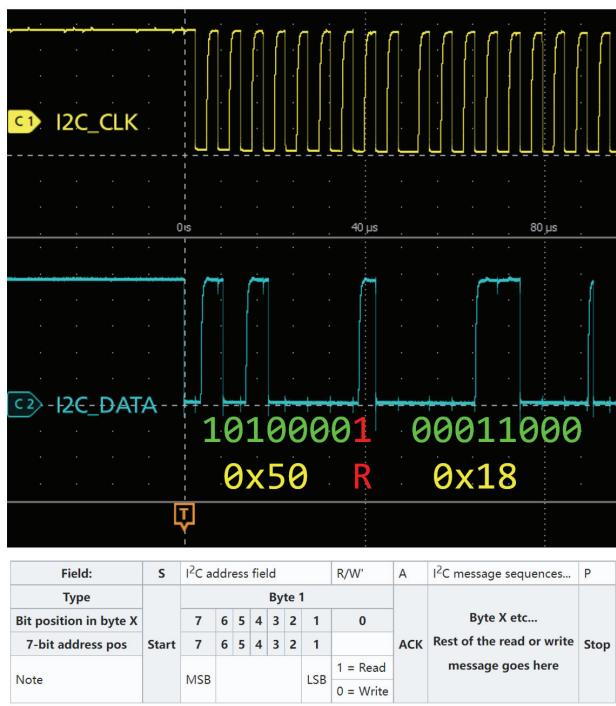


图 10：I<sup>2</sup>C 波形和手动解析示例（协议格式来自 [3]）

使用示波器总线解码的设置也比较固定，如图 11 所示。只要指定好时钟和数据的来源和门限电压就可以了。



图 11：I<sup>2</sup>C 总线设置

解码结果如图 12 所示，可以验证前 2 个字节与手动解析的结果是相同的。



图 12：I<sup>2</sup>C 总线解码结果

### 3.2 SPI 协议

SPI 是串行外设接口的缩写，也是一种常见的芯片之间通信的接口协议。标准的 SPI 会用到 4 根线：1 根时钟 (SCLK)，2 根数据收发，分别是主出从入 (MOSI) 和主入从出 (MISO)，1 根片选 (SS)。与 I<sup>2</sup>C 不同的是，SPI 是一种事实标准，因此配置比较灵活，每一根线上的信号都有多种可能的配置选项。例如时钟信号可能是上升沿或下降沿有效；数据信号 (MOSI 和 MISO) 可能是低电平或高电平有效；片选信号可能是低电平或高电平有效。在数据解析方面，也有多种配置：数据字长 4–32 位都可能，位顺序可能是 MSB 在前或 LSB 在前。

因此实际解析时，需要查阅相关文档或者编写测试程序来确认用到的 SPI 具体配置如何，否则解析可能不准确。如图 13 所示的一个波形，是时钟 SCLK 上升沿有效，MOSI 数据是高电平有效 (MISO 同理，略去)，片选信号 SS 是低电平有效。数据方面，字长是 8 位，位顺序是 MSB 在前。综合上述配置，不难找出图中波形代表的信号是 1 个字节，二进制表示为 10010011，转换到 16 进制表示为 0x93。

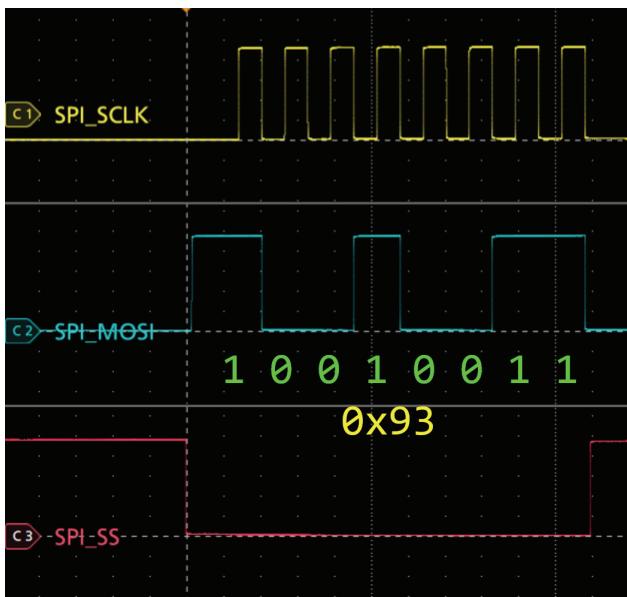


图 13: SPI 波形和手动解析示例

示波器总线解码的设置也提供了丰富的选项，需要我们仔细选择正确，如图 14 所示。SCLK 设置为上升沿，SS 输入设置为“低态有效”，数据输入设置为“高态有效”，字大小设为“8 bits”，位顺序设为“MS 居前”。



图 14: I<sup>2</sup>C 总线设置

解码结果如图 15 所示，可以验证这个字节与手动解析的结果是相同的。注意 SPI 没有额外的校验机制，因为总线配置错误也能够解码，但是结果是错的，在实际操作时一定要注意确认配置。



图 15: SPI 总线解码结果

## 4 混合调试

上述 UART、I<sup>2</sup>C、SPI 协议的解析，我们默认一个前提是信号是准确无误的。因此无论用模拟探头或者逻辑探头，只要配置准确，解码的结果一定是正确的。实际应用时，数字信号和模拟信号一样会存在失真的问题。当数字信号失真到超过阈值时，逻辑探头是无法正确解析的，此时会出现数据错误。

如图 16 就是一个失真的信号举例。除了红框内的片段，其它位置的电压在 0V 和 3.3V 之间跳变，按协议解码是 16 进制的 0xE9。但是红框内有一个脉冲幅度较低，解码就出错了。

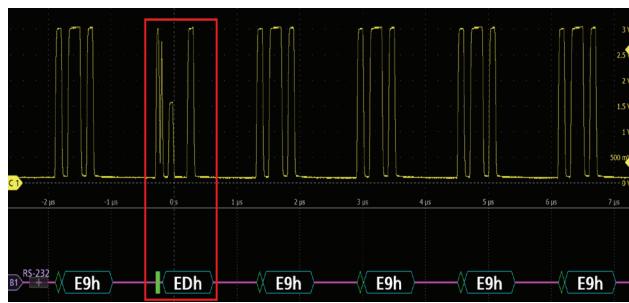


图 16：信号失真举例

为了找到这样的失真信号，可以从 2 个角度利用混合信号示波器的相关功能。

(1) 数字角度。由于数据出错，可以使用总线触发，搜索错误的值，就能找到这个失真的信号了。

(2) 模拟角度。这是一个欠幅信号，可是使用示波器的欠幅触发功能。如图 17 所示，示波器的欠幅触发作用于任意模拟信号，当该信号越过下限两次但未越过上限时触发。我们把上限和下限分别设为 2.8V 和 0.2V，就能找到介于二者之间的失真脉冲了。图 17 中，触发位置正是失真脉冲的下降沿。

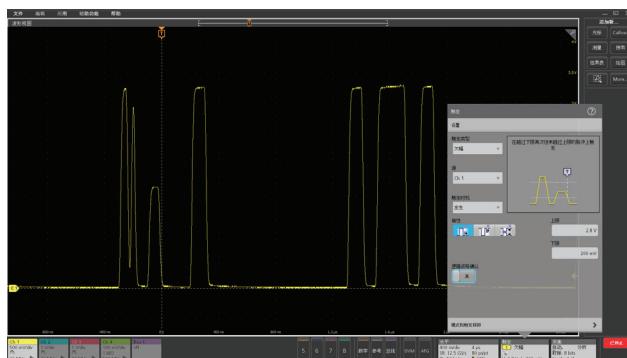


图 17：欠幅触发的设置

从这个例子中，我们可以发现：混合信号示波器同时可以解析模拟和数字信号，因此我们也可以根据需要灵活选择触发方法，查找信号问题，实现板级实时的混合调试。

## 5 总结

使用混合信号示波器，可以同步处理模拟和数字信号，实现数模混合测量功能。本文从常见的 UART 协议出发，辅以多种总线协议的解析，介绍了总线解码的基本概念和具体操作方法，并对比手动解析和示波器自动解码的过程和结果，充分展现了现代化混合信号示波器的混合测量能力。对于信号失真的场景，从数字和模拟信号 2 个角度，进一步阐述了混合调试的思想。全文全部数据和波形都由实测和实拍得到，贴近应用实际，具有工程参考价值。

## 参考文献

- [1] [https://en.wikipedia.org/wiki/Universal\\_asynchronous\\_receiver-transmitter](https://en.wikipedia.org/wiki/Universal_asynchronous_receiver-transmitter)
- [2] <https://datasheets.raspberrypi.org/pico/pico-datasheet.pdf>
- [3] <https://en.wikipedia.org/wiki/I%C2%B2C>



泰克官方微信

如需所有最新配套资料，请立即与泰克本地代表联系！

或登录泰克公司中文网站：[www.tek.com.cn](http://www.tek.com.cn)

泰克中国客户服务中心全国热线：400-820-5835

**泰克科技(中国)有限公司**  
上海市浦东新区川桥路1227号  
邮编：201206  
电话：(86 21) 5031 2000  
传真：(86 21) 5899 3156

**泰克北京办事处**  
北京市朝阳区酒仙桥路6号院  
电子城·国际电子总部二期  
七号楼2层203单元  
邮编：100015  
电话：(86 10) 5795 0700  
传真：(86 10) 6235 1236

**泰克上海办事处**  
上海市长宁区福泉北路518号  
9座5楼  
邮编：200335  
电话：(86 21) 3397 0800  
传真：(86 21) 6289 7267

**泰克深圳办事处**  
深圳市深南东路5002号  
信兴广场地王商业大厦3001-3002室  
邮编：518008  
电话：(86 755) 8246 0909  
传真：(86 755) 8246 1539

**泰克成都办事处**  
成都市锦江区三色路38号  
博瑞创意成都B座1604  
邮编：610063  
电话：(86 28) 6530 4900  
传真：(86 28) 8527 0053

**泰克西安办事处**  
西安市二环南路西段88号  
老三届世纪星大厦26层L座  
邮编：710065  
电话：(86 29) 8723 1794  
传真：(86 29) 8721 8549

**泰克武汉办事处**  
武汉市洪山区珞喻路726号  
华美达大酒店702室  
邮编：430074  
电话：(86 27) 8781 2760

**泰克香港办事处**  
香港九龙尖沙咀弥敦道132号  
美丽华大厦808-809室  
电话：(852) 2585 6688  
传真：(852) 2598 6260

更多宝贵资源，敬请登录：[WWW.TEK.COM.CN](http://WWW.TEK.COM.CN)

© 泰克公司版权所有，侵权必究。泰克产品受到已经签发及正在申请的美国专利和外国专利保护。本文中的信息代替所有以前出版的材料中的信息。本文中的技术数据和价格如有变更，恕不另行通告。TEKTRONIX 和 TEK 是泰克公司的注册商标。本文中提到的所有其它商号均为各自公司的服务标志、商标或注册商标。

11/2021

