

调试嵌入式系统设计中的串行总线 应用指南

您将学习哪些内容：

怎样使用泰克示波器强大的触发、解码和搜索功能，高效解决嵌入式系统设计问题。

引言

今天，嵌入式系统几乎遍布在人类社会的每个角落。嵌入式系统可以简单定义为属于大型系统或机器一部分的一种专用计算机系统，其目的是为该系统或机器提供监测和控制服务。典型的嵌入式系统在开机时会开始运行某些专用应用，直到关闭时才会停止。当前设计和生产的几乎每个电子设备都是嵌入式系统。嵌入式系统实例包括：

- 电子闹表
- 自动柜员机
- 移动电话
- 计算机打印机
- 防抱死刹车控制器
- 微波炉
- 导弹使用的惯性引导系统
- DVD 播放机
- 个人数字助理 (PDA)
- 工业自动化和监测使用的可编程逻辑控制器 (PLC)
- 便携式音乐播放机
- 可能还包括烤面包机…

嵌入式系统可能包含许多不同类型的设备，包括微处理器、微控制器、DSP、RAM、EPROM、FPGA、模数转换器、数模转换器和 I/O。这些设备在传统上一直使用宽并行总线相互通信及与外部世界通信。然而今天，嵌入式系统设计中使用的越来越多的构件将用串行总线代替宽并行总线，原因如下：

- 减少了要布线的信号数量，降低了要求的电路板空间
- 降低了成本
- 降低了功率要求
- 减少了封装上的针脚数量
- 嵌入式时钟
- 差分信令，改善抗噪声能力
- 采用标准串行接口的器件大量供应

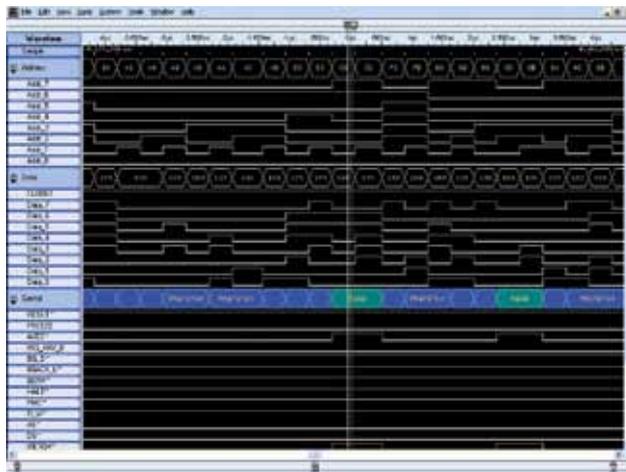


图 1. 逻辑分析仪采集的微控制器的时钟、地址总线、数据总线和控制线。

尽管串行总线提供了大量的优势，但它们也给嵌入式系统设计人员带来了某些重大挑战，因为它以串行方式传送信息，而不是以并行方式传送信息。本应用指南讨论了嵌入式系统设计人员的常用挑战，及怎样使用下述系列示波器中的功能迎接这些挑战：MSO/DPO70000、DPO7000、MSO/DPO5000、MDO/DPO4000、MDO3000 和 MSO/DPO2000 系列。

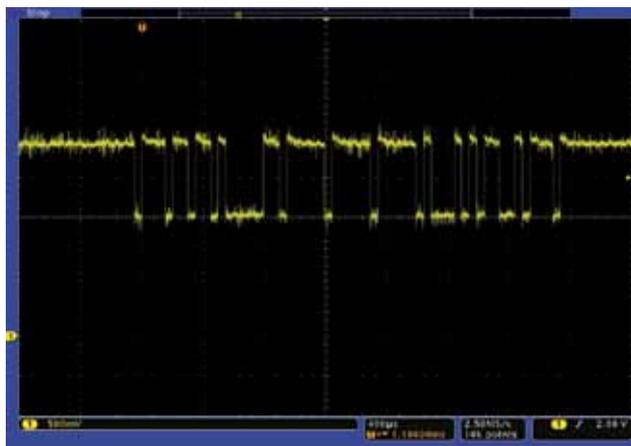


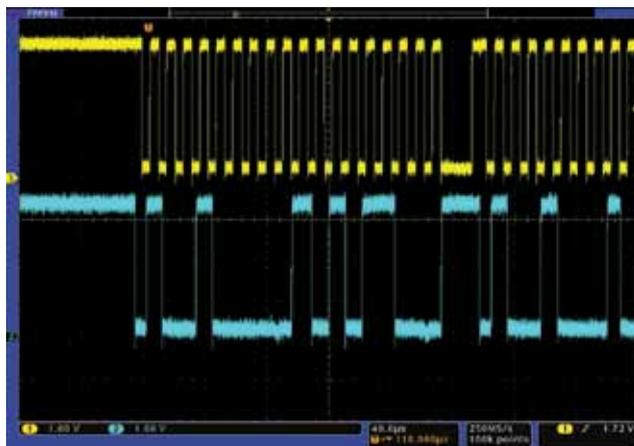
图 2. 从 CAN 总线中采集的一条消息。

并行结构与串行结构比较

在并行结构中，总线的每个组件都有自己的信号路径。可能有 16 条地址线、16 条数据线、一条时钟线和各种其它控制信号。通过总线发送的地址或数据值会通过所有并行线路同时传送。因此，使用大多数示波器和逻辑分析仪中的状态触发或码型触发功能触发关心的事件相对简便。同时，可以简便地一目了然地了解在示波器或逻辑分析仪显示屏上捕获的数据。例如，在图 1 中，我们使用逻辑分析仪从微控制器中采集时钟线、地址线、数据线和控制线。通过使用状态触发，我们隔离了我们查找的总线。为“解码”总线上发生的情况，我们需要查看每条地址线、数据线和控制线的逻辑状态。在串行总线中，所有这些信息都必须以串行方式在相同的少数导线（有时是一条）上发送。这意味着一个信号可能包括地址信息、控制信息、数据信息和时钟信息。例如，看一下图 2 中所示的控制器局域网 (CAN) 串行信号。

这条消息包含帧头、标识符（地址）、数据长度代码、数据、CRC 和帧尾及少量其它控制位。时钟嵌入在数据中，使用填充位保证接收设备拥有数量充足的边沿锁定时钟，这使情况变得进一步复杂化。即使是经过训练的眼睛，也很难迅速了解这一消息的内容。现在想象一下这是一条有问题的消息，一天只发生一次，您需要触发采集这条消息。传统示波器和逻辑分析仪不能有效处理这类信号。

注 1: 支持的串行总线标准视示波器型号变化。如需了解不同泰克示波器支持的总线，请参阅附录 A 或访问 cn.tektronix.com。

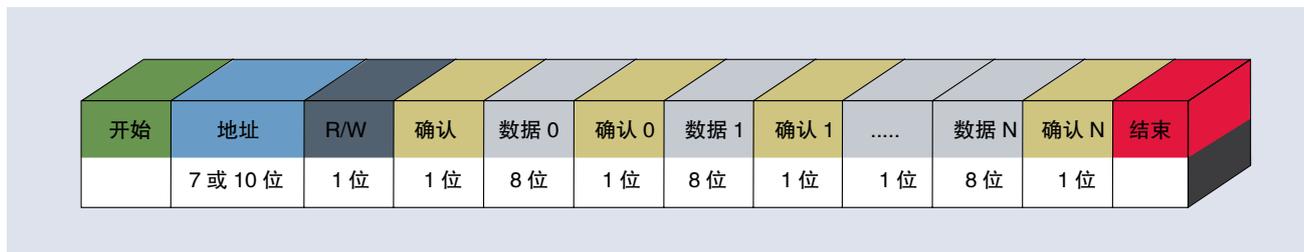
图 3. 从 I²C 总线中采集的一条消息。

即使是比较简单的串行标准，如 I²C，与并行协议相比，观察总线上传输的内容仍要明显困难得多。

I²C 采用分开的时钟线和数据线，因此至少在本例中，您可以使用时钟作为参考点。但是，您仍需要找到消息开头（数据变低，时钟为高），手动检查和记下每个时钟上升沿上的数据值，然后把各个位整理成消息结构。

在长采集中解码一条消息就会需要几分钟时间，而您不知道这是不是实际要找的消息。如果不是，您需要在下一条消息上重新开始这一麻烦的、容易出错的过程。最好只触发查找的消息内容，但多年来示波器的逻辑分析仪上使用的状态触发和码型触发并不能发挥作用。它们是为了考察多条通道中同时发生的问题设计的。为处理串行总线，其触发引擎深度必需有几千种状态（每个 bit 位一个状态）。即使存在这种触发功能，但为所有这些 bit 位逐个状态编程也不是件好玩的事。必须找到一种更好的方式！

现在有一种更好的方式。下面几节重点介绍了怎样使用泰克示波器 1，测试嵌入式系统设计中使用的最常用的低速串行标准。

图 4. I²C 消息结构。

I²C

背景知识

I²C 或 “I squared C” 是指集成电路间总线。它最初是飞利浦公司在 20 世纪 80 年代研制的，为把控制器连接到电视机上的外设芯片提供了一种低成本方式，但之后其已经发展成为嵌入式系统设备之间通信的一项全球标准。它采用简单的两线设计，广泛用于领先芯片制造商生产的各种芯片中，如 I/O、模数转换器、数模转换器、温度传感器、微控制器和微处理器，芯片制造商则包括：Analog Devices, Atmel, Infineon, Cypress, 英特尔, Maxim, 飞利浦, Silicon Laboratories, ST Microelectronics, 德州仪器, Xicor 等等。

工作方式

I²C 的物理两线接口由双向串行时钟 (SCL) 和数据 (SDA) 线组成。I²C 支持总线上多个主从设备，但一次只能激活一个主设备。任何 I²C 设备可以连接到总线上，允许任何主设备与从设备交换信息。每台设备都使用唯一的地址识别，它可以作为发射机或接收机操作，具体取决于设备功能。在开始时，I²C 只使用 7 位地址，但随着时间推移，它演变成也支持 10 位地址。它支持三种位速率：100 kb/s (标准模式)、400 kb/s

(快速模式) 和 3.4 Mb/s (高速模式)。最大设备数量取决于 400 pf 的最大容量，或大约支持 20–30 台设备。I²C 标准规定了下述格式，如图 4 所示：

- Start – 表明设备控制总线，一条消息将开始传送
- Address – 7 位或 10 位数字，表示将要读取或写入的设备地址
- R/W Bit – 1 位，表明是否将从设备中读取数据或向设备写入数据
- Ack – 1 位，来自从设备，确认主设备的操作。通常每个地址和数据字节有一个确认位，但不总是有确认位
- Data – 从设备中读取或写入设备的字节的整数
- Stop – 表明消息结束，主设备已经释放总线

有两种方式对 I²C 分组、以进行解码：7 位 + 读或写 (R/W) 位方案，8 位 (1 字节)、其中作为地址的一部分包括 R/W 位。7 位地址方案是固件和软件设计工程师遵守的指定方案。但是，许多其它工程师使用 8 位地址方案。泰克示波器可以在任一方案中解码数据。

处理 I²C

通过选配串行触发和分析功能，泰克示波器为处理 I²C 总线的嵌入式系统设计人员提供了强大的工具。前面板有多个 Bus 按钮，允许用户把到示波器的输入定义为一条总线。I²C 总线的设置菜单如图 5 所示。

通过简单地定义时钟和数据位于哪条通道上及用来确定逻辑 1 和 0 的门限，示波器可以理解通过总线传输的协议。有了这些知识，示波器可以触发任何指定的消息级信息，然后把得到的采集数据解码成有意义的、容易理解的结果。边沿触发已经过了好多天了，希望您已经采集到关心的事件，然后逐条消息手动解码消息，同时查找问题。

例如，考虑一下图 6 中的嵌入式系统。I²C 总线连接到多台设备上，包括 CPU、EEPROM、风扇速度控制器、数模转换器和大量的温度传感器。

这部仪器被退回工程部分析故障，该产品持续过热，自动关机。要检查的第一件事是风扇控制器和风扇本身，但似乎一切正常。然后要检查温度传感器是否有问题。风扇速度控制器定期轮询两个温度传感器（位于仪器中不同的区域），调节风扇速度，稳定内部温度。我们怀疑其中一个或两个温度传感器读数不正确。为查看传感器与风扇速度控制器之间的交互。我们只需连接到 I²C 时钟和数据线，设置总线。我们知道，两个传感器在 I²C 总线上的地址分别是 18 和 19，因此我们决定设置触发事件，查找地址 18 上的写入操作

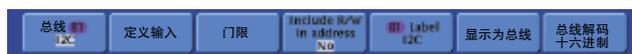


图 5. I²C 总线设置菜单。

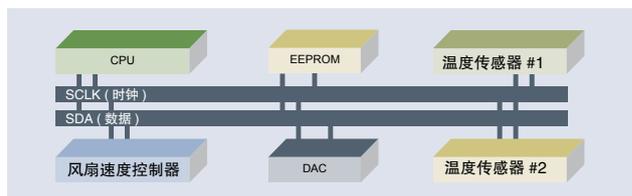


图 6. I²C 总线实例。

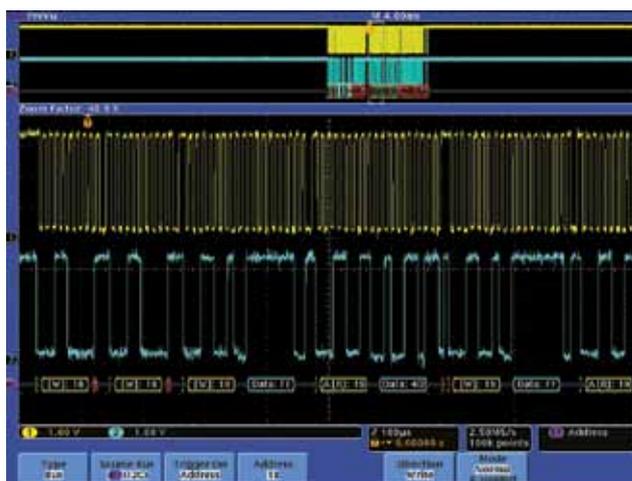


图 7. I²C 地址和数据总线波形解码。

(风扇速度控制器轮询传感器的当前温度)。触发的采集结果如图 7 中的屏幕图所示。

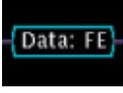
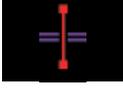
总线条件	指示:
Starts 用垂直绿条表示。在显示另一个开始、而没有上一个 Stop 时, 会发生重复开始。	
地址用黄框显示, [W] 表示写入, [R] 表示读取。地址值可以用十六进制显示, 也可以用二进制显示。	
数据用青框显示。数据值可以用十六进制显示, 也可以用二进制显示。	
Missing Acks 用红框内的感叹号表示。	
Stops 用红色竖条表示。	

表 1. 总线条件。

在这种情况下, 通道 1 (黄色) 连接到 SCLK, 通道 2 (青色) 连接到 SDA。紫色波形是我们向示波器中输入一些简单的参数定义的 I²C 总线。显示器的上方部分显示了整个采集。在这种情况下, 我们已经捕获了大量的总线空闲时间, 中间是我们放大的突发活动。显示屏下方的较大部分是缩放窗口。您可以看出, 示波器已经解码了经过总线的每条消息的内容。总线使用表 1 中的颜色和标记, 表明消息中的重要部分。看一下采集的波形, 我们可以看到, 示波器触发地址 18 上的写入操作 (如显示屏左下方所示)。事实上, 风扇速度控制器试图写入地址 18 两次, 但在这两种情况下,

在试图写入温度传感器时它没有收到确认。然后它检查地址 19 上的温度传感器, 收回希望的信息。因此, 为什么第一个温度传感器没有对风扇控制器做出响应呢? 看一下电路板上的实际部件, 我们发现其中一条地址线焊接不当。温度传感器不能在总线上通信, 结果导致设备过热。由于示波器的 I²C 触发和总线解码功能, 我们只需几分钟时钟, 就成功地隔离了这个潜在的难检问题。

在图 7 所示的实例中, 我们触发了写入操作, 但示波器强大的 I²C 触发还包括许多其它功能。

- Start – 在 SDA 变低、SCL 为高时触发。
- Repeated Start – 在没有上一个停止条件下发生开始条件时触发。这通常是主设备发送多条消息、而没有释放总线时发生的情况。
- Stop – SDA 为高、SCL 为高时触发。
- Missing Ack – 从设备通常配置成在每个地址和数据字节后发送确认。在从设备没有生成确认位的情况下示波器可以触发采集。
- Address – 触发用户指定的地址或任何预先编程的专用地址, 包括全呼、开始字节、HS 模式、EEPROM 或 CBUS。地址可以是 7 位或 10 位地址, 以二进制或十六进制输入。
- 数据 – 触发二进制或十六进制输入的最多 12 字节的用户指定数据值
- 地址和数据 – 可以输入地址数据值及读写, 捕获确切关心的事件

这些触发可以隔离您关心的特定总线业务, 解码功能则可以即时查看采集中总线上传输的每条消息的内容。

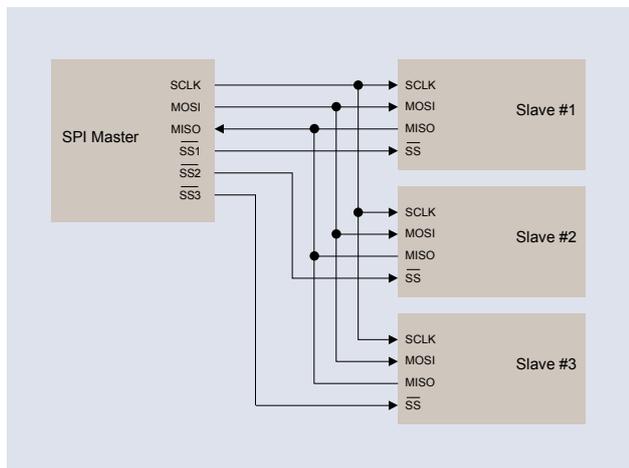


图 8. 常用的 SPI 配置。

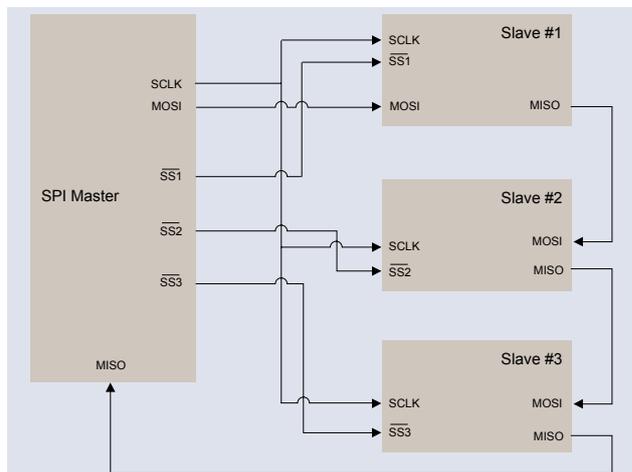


图 9. 串联 SPI 配置。

SPI

背景知识

串行外设接口总线 (SPI) 最初是摩托罗拉在 20 世纪 80 年代末为其 68000 系列微控制器研制的。由于该总线简单、流行，许多其它制造商也已经采用这一标准。它现在用于嵌入式系统设计常用的各种器件中。SPI 主要用于微控制器和直接外设之间。它通常用于移动电话、PDA 和其它移动设备中，在 CPU、键盘、显示器和内存芯片之间通信。

工作方式

SPI 总线是一种主 / 从结构的 4 线串行通信总线。4 个信号是时钟 (SCLK), 主输出 / 从输入 (MOSI), 主输入 / 从输出 (MISO) 和从选择 (SS)。在两台设备通信时，一台设备称为“主设备”，另一台设备称为“从设备”。主设备驱动串行时钟。它同时收发数据，因此是一种全双工协议。SPI 使用 SS 线路指明与哪台设备传送数据，而不是总线上的每台设备都有一个唯一的地址。这样，总线上的每台唯一的设备都需要从主设备提供自己的 SS 信号。如果有 3 台从设备，那么主设备有 3 条 SS 引线，每条引线都连接到每台从设备上，如图 8 所示。

在图 8 中，每台从设备只与主设备通话。但是，SPI 可以串联多台从设备，每台从设备依次进行操作，然后把结果发回主设备，如图 9 所示。

因此您可以看到，SPI 实现方案没有“标准”。在某些情况下，在不要求从设备向回到主设备通信时，MISO 信号可以完全省略。在其它情况下，只有一台主设备和一台从设备，SS 信号捆到接地上，这通常称为 2 线 SPI。

在 SPI 数据传送发生时，8 位数据字移出 MOSI，不同的 8 位数据字移入 MISO。这可以视为 16 位循环位移寄存器。在传送发生时，这个 16 位位移寄存器位移 8 个位置，从而在主设备和从设备之间交换 8 位数据。一对寄存器 - 时钟极性 (CPOL) 和时钟相位 (CPHA) 决定着驱动数据的时钟边沿。每个寄存器有两种可能的状态，支持四种可能的组合，所有这些组合互不兼容。因此，主 / 从设备对必须使用相同的参数值进行通信。如果使用多个固定在不同配置的从设备，那么每次需要与不同的从设备通信时，主设备必须重新进行配置。

处理 SPI

我们可以使用前面板的 Bus 按钮，简单地输入总线基本参数，包括 SCLK, SS, MOSI 和 MISO 位于哪条通道上、门限和极性，来定义一条 SPI 总线（参见图 10）。

例如，考虑一下图 11 中的嵌入式系统。

一条 SPI 总线连接到一个合成器、一个 DAC 及某个 I/O 上。合成器连接到 VCO 上，VCO 为其余系统提供一个 2.5 GHz 时钟。在启动时，CPU 应该对合成器编程。但是不知道哪里出了问题，VCO 在产生 3 GHz 的信号。调试这个问题的第一步是考察 CPU 和合成器之间的信号，确定存在信号，没有物理连接问题，但我们找不到发生了什么问题。然后，我们决定看一下 SPI 总线上传送的合成器编程使用的实际信息。为捕获这些信息，我们把示波器设成在合成器 Slave Select 信号激活时触发采集，并对 DUT 通电，捕获启动编程命令。采集结果如图 12 所示。

通道 1（黄色）是 SCLK，通道 2（青色）是 MOSI，通道 3（洋红色）是 SS。为确定我们是否对设备正确编程，我们看一下合成器的产品资料。总线上的前三个消息假设是初始化合成器、加载分路器比率、锁存数据。根据技术数据，前三个传送中最后半个字节（一个十六进制字符）应该分别是 3, 0 和 1，但我们看到的是 0, 0 和 0。

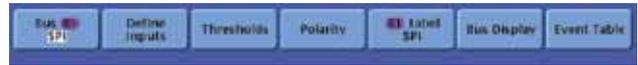


图 10. SPI 总线设置菜单。

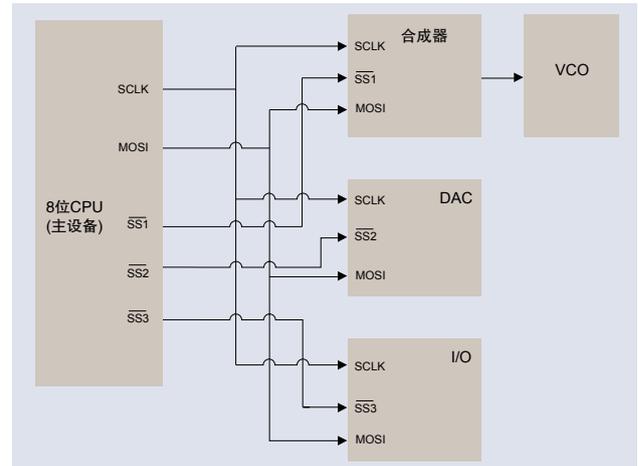


图 11. 通过 SPI 控制的合成器。



图 12. 采集 SPI 总线之外的合成器配置消息。



图 13. 正确的合成器配置消息。

在消息末尾全是 0 时，我们认识到，我们在 SPI 中犯了一个最常见的错误，即在软件中以相反的顺序在每个 24 位字中对各个位编程。在迅速改变软件配置后，得到下面的采集，VCO 正确锁定在 2.5 GHz，如图 13 所示。

在上面的实例中，我们使用简单的 SS Active 触发。泰克示波器完整的 SPI 触发功能包括下述类型：

- SS Active – 在从设备选择行对从设备变真时触发。
- Start of Frame – 在使用时钟空闲时间定义帧时序时触发帧头。
- MOSI – 在从主设备到从设备用户指定最多 16 个字节时触发。
- MISO – 在从设备到主设备用户指定最多 16 个字节时触发。
- MOSI/MISO – 在主设备到从设备及从设备到主设备用户指定最多 16 个字节时触发 (只在 4000/3000/2000 系列型号上提供)。

这些触发也可以隔离关心的特定总线业务，解码功能则可以立即查看采集中总线传送的每条消息的内容。

USB 速度	位速率	位周期
低速 USB 2.0	1.5 Mbps	667 ns
全速 USB 2.0	12 Mbps	83.3 ns
高速 USB 2.0	480 Mbps	2.8 ns
SuperSpeed USB 3.0	5 Gbps	200 ps

表 2. USB 速度。

USB

背景

通用串行总线 (USB) 已经成为当前个人电脑上的主要接口，代替了以前使用的许多外部串行总线和并行总线。自其 1995 年问世以来，USB 的用途已经不再局限于最初的个人电脑，而是成为许多电子设备中广泛使用的接口。

2000 年发布的 USB 2.0 规范涵盖了目前使用的大多数 USB 设备。USB 2.0 代替了 USB 1.1 规范，在 USB 1.1 规范的低速接口和全速接口中增加了一个高速接口 (参见表 2)。

USB 已经不再局限于系统间通信。例如，芯片间 USB (IC_USB) 和高速芯片间 (HSIC) USB 已经用于芯片到芯片通信。IC_USB、HSIC 和其它增强技术完善了 USB 2.0 规范。

2008 年，USB 3.0 规范发布。USB 3.0 称为 SuperSpeed USB，其速度比高速 USB 2.0 快了 10 倍。SuperSpeed USB 可以向下兼容 USB 2.0 设备。USB 3.0 是一种附加规范，与 USB 2.0 规范一起使用，而不是代替 USB 2.0。SuperSpeed USB 设备必须实现 USB 2.0 设备框架命令和描述符。

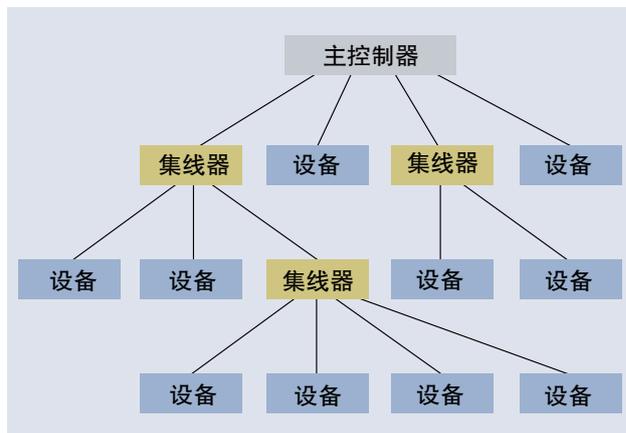


图 14. USB 分层星形拓扑采用集线器，扩展了总线。

USB 实现者论坛 (USB-IF) 负责管理和推广 USB 标准和 USB 技术。USB 规范可以参阅 USB-IF 网站：www.usb.org。

工作方式

USB 配置采用一个主控制器带 1 - 127 台设备。USB 采用分级星形拓扑，选配多个集线器，扩展了总线 (图 14)。主机是唯一的主设备，控制着所有总线业务。主机发起到各个设备的所有通信，各个设备不能中断主机。

表 2 显示了 4 种 USB 速度。高速设备先以全速开始操作，然后转换到高速。USB 2.0 总线的速度受到与主控制器相连的速度最低的设备限制。

SuperSpeed USB 使用两个主控制器：一个用于 SuperSpeed USB 设备，一个用于 USB 2.0 设备。与 USB 2.0 系统一样，包括 USB 2.0 设备的总线速度受到最低速度的限制。

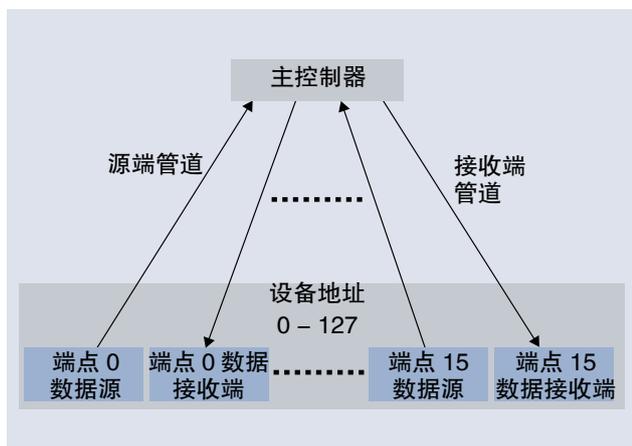


图 15. USB 端点是设备的数据源和数据接收端，拥有到应用软件的逻辑管道。

设备端点

设备端点是设备中的数据源和接收端。每台设备最多可以有 16 个数据端点 (图 15)。端点 0 是必须的，主机使用它与设备通信。管道是主机中的应用软件与设备端点之间的逻辑连接。

枚举

枚举是开机或设备热插拔时发生的配置过程。主机检测到 USB 总线上存在设备，然后主机借助 SETUP 令牌轮询设备，令牌使用地址 0 和端点 0。然后，主机为设备分配一个唯一的地址，范围为 1-127。此外，主机还识别设备速度和数据传送类型。在枚举过程中，会确定设备的种类。设备种类定义设备的功能，如打印机、海量存储器、视频、音频、人机接口、等等。

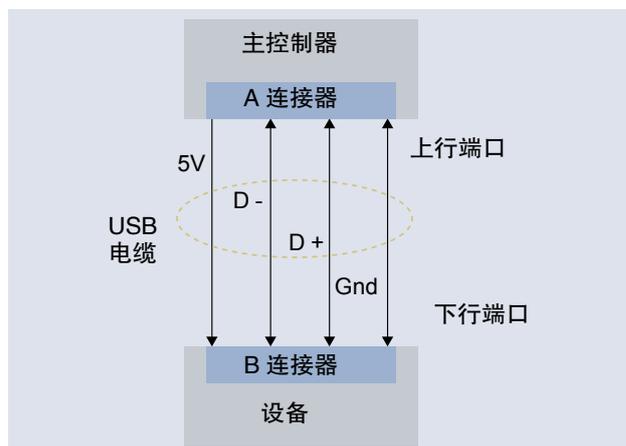


图 16. USB 4 线电缆在上行端口采用“A”连接器，在下行端口采用“B”连接器。

电气配置

主机使用上行“A”连接器，设备使用下行“B”连接器。每个连接器有三个版本：标准型，迷你型，微型。

USB 2.0 电缆有四条线，如图 16 所示。两条线用来从主机供电：5 V 电源 (红线) 和接地 (黑线)。这些连接器的设计是先连接电源引脚和接地引脚，然后再连接数据数据引脚。主机提供 100 mA - 500 mA 的电流，并拥有智能电源管理功能。例如，可以由主机或集线器监测为设备提供的电源，在发生过流情况时关闭电源。

USB 速度	状态低	状态高
低速	<0.3V	>2.8V
全速	<0.3V	>2.8V
高速	0 V ± 10%	400 mV ± 10%

表 3. 电信号特点。

PID 类型	PID 名称	PID
令牌	OUT	0001
	IN	1001
	SOF	0101
	SETUP	1101
数据	DATA0	0011
	DATA1	1011
	DATA2	0111
	MDATA	1111
握手	ACK	0010
	NAK	1010
	STALL	1110
	NYET	0110
特殊	PRE	1100
	ERR	1100
	SPLIT	1000
	PING	0100
	Reserved	0000

表 4. USB 数据包类型。

差分双绞线 Data+ (D+ 绿线) 和 Data-(D- 白线) 用于使用主机控制的半双工差分信令实现双向通信。表 3 列出了信号电平。总线采用 DC 耦合。

在没有连接设备时, 主机会同时拉低 D+ 和 D-, 这称为单端零(SE0) 状态。在设备连接到 USB 总线上时, USB 总线电压会拉到正或拉到负, 极性表明了设备速度。

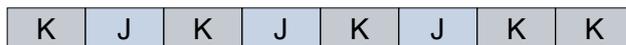


图 17. 低速和高速 SYNC 字段。

在 J 空闲状态下, 低速设备会拉高 D-, 得到负差分电压。全速设备会拉高 D+, 得到正差分电压。K 状态与 J 状态相反。

数据使用非归零反向 (NRZI) 编码和位填充技术, 保证跳变数达到最小。最低有效位先传送, 最高有效位后传送。

数据包

数据包是 USB 通信的基本要素。数据包开头是一个同步字段, 后面是数据包标识符。数据包标识符后面没有字段或者有其它字段, 具体视数据包类型而定。包尾字段结束数据包。

从 J 空闲状态开始, 对低速和全速 USB, 数据包开头是一个 8 位同步 (SYNC) 字段。SYNC 是 3 KJ 对, 后面跟着两个 Ks (图 17)。

高速 USB 的 SYNC 字段是 15 KJ 对后面跟着两个 K, 允许使用集线器把重复的 SYNC 字段减少到 5KJ 对, 后面跟着两个 K。

数据包标识符 (PID) 是第二个数据包字节, 其中包括一个 4 位 PID 及其 4 位 PID 补数, 用来校验错误。在第一个 PID 4 位与最后 PID 4 位补数不匹配时, 会发生 PID 编码错误。这些位先发送到总线最低有效位上, 最后发送到最高有效位上。

PID 4 位值识别 17 种数据包, 如表 4 所示。注意, 数据包 PRE 和 ERR 的 PID 代码相同。数据包类型分为令牌包、数据包、握手包和特殊包。

包尾 (EOP) 长 3 位。EOP 开头是两位的 SE0, 结尾是一位 J 状态。

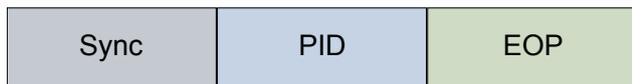


图 18. 握手包的组织结构。



图 19. OUT、IN 和 SETUP 令牌包的组织结构。



图 20. 数据包，带有 DATA0 或 DATA1 的 PID。



图 21. 包头。

握手包

如图 18 所示，握手包由 Sync 字节、PID 字节和 EOP 组成，如确认的数据包 (ACK) 和否认的数据包 (NAK)。

令牌包

主机发送的令牌包由 SYNC 和 PID 组成，后面是两个字节，其中包括一个 11 位地址和 5 位循环冗余校验 (CRC) (图 19)。

OUT、IN 和 SETUP 令牌 11 位地址分成一个 7 位设备地址和一个 4 位端点标识符。

地址零是专用的，用于在枚举过程开始时没有指配地址的设备。在之后的枚举过程中，主机会为设备指配一个非零地址。

所有设备都有一个端点零。端点零用于设备控制和状态。其它设备端点用于数据源和 / 或接收端。

主机向设备发送一个 OUT 令牌，然后是一个数据包。主机向设备发送一个 IN 令牌，预计会从设备收到一个数据包或握手包，如 NAK。

数据包

数据包包含一个 PID 字节、多个数据字节和 16 位 CRC，如图 20 所示。

DATA0 和 DATA1 数据包有一个 1 位序列号，用来停止和等待自动重复请求握手。DATA0 和 DATA1 数据包在无差错传输中交替。在发生传输错误时，会使用相同序列号重发数据包。

无差错数据事务是指在主机向设备发送一个 DATA0 数据包时，设备会发送一个握手 ACK 包，然后主机发送一个 DATA1 包。

如果主机没有收到握手 ACK 包或从设备收到 NAK，那么它会重发 DATA0 数据包。如果设备发送一个 ACK 包，收到拥有相同序列号的数据包，那么设备会确认数据包，但会作为重复数据而忽略数据。

帧头

如图 21 所示，帧头 (SOF) 包用来同步异步数据和被轮询的数据流。在每个连续 SOF 中，11 位帧号会递增 1。

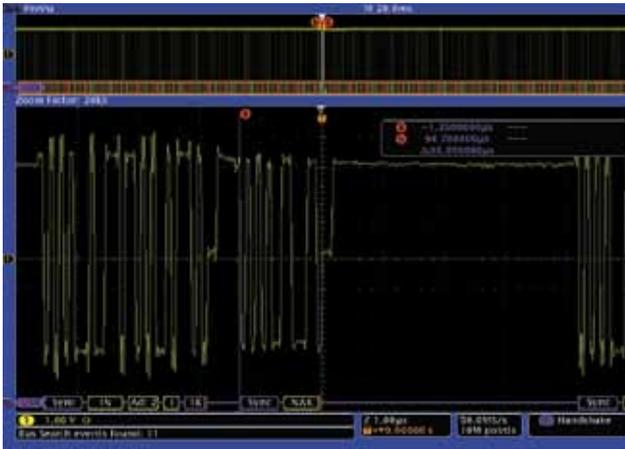


图 22. 全速存储器设备对光标 A 处主机第一个 IN 令牌请求应答 NAK。

处理 USB 2.0

部分泰克示波器上提供 USB 串行触发和分析支持 (参见附录 A)。对低速和全速 USB, 所有示波器型号都提供了触发、解码和搜索支持。对高速 USB, 要求 ≥ 1 GHz 型号示波器。

例如, 通过查看存储器设备是否对来自存储器设备的数据 IN 令牌请求应答 NAK, 可以检查全速存储器设备的数据时延性能。

TDP1000 差分探头用来探测计算机与 USB 存储器设备之间的 USB 延伸电缆。在把探头连接到电缆上时, 我们使用探头上的 TDP1000 菜单按钮, AutoZero (自动清零) 探头的 4.25 V 范围。

为定义 USB 总线, 我们进入总线菜单, 从支持的标准列表中选择 USB。然后, 我们从左到右使用设置按钮, 定义总线的各个参数: 速度、源通道、探头类型和门限。本例中使用全速预置 1.4 V 和 -1.4 V 门限。

首先, 我可以触发 SETUP 令牌, 检查枚举过程。在枚举后, 我们可以触发帧头 (SOF) 包, 检查 J 空闲状态是否为正或测量 SOF SYNC 字段的位宽度, 检验速度, 检查帧头 (SOF) 包。

然后, 我们可以配置示波器, 触发 NAK 令牌, 然后把示波器置入 Single 采集模式。然后, 我们可以从存储器设备发出计算机请求数据。如果存储器设备准备传送数据, 示波器将不会触发。但是, 如果存储器设备没有准备传送数据, 那么它将发送一个 NAK, 应答计算机主机 IN 令牌, 示波器将触发 NAK。图 22 说明了 NAK 采集。



图 23. 使用配有选项 SR-USB 的 MSO5024 上的串行触发功能捕获的解码后的高速 USB 2.0 波形。

我们还可以复制示波器触发设置，作为 Wave Inspector 的搜索指标。Wave Inspector 将搜索整个采集，查找 NAK 的每个例程。在本例中，Wave Inspector 找到 11 个 NAK。第一个 NAK 在触发位置，其它 10 个 NAK 在触发后。所有 NAK 都是对重发 IN 令牌的计算机主机作出的应答。通过使用 Wave Inspector next 和 previous 前面板按钮，跳到每个标明的 NAK，可以简便地查看每个 NAK。

提供的 USB 触发功能包括：

- 同步
- 复位
- 暂停
- 恢复
- 包尾 (EOP)
- 令牌 (地址) 包
 - SETUP, IN, OUT 和 SOF
- 数据包
 - 任意数据值, DATA0, DATA1, DATA2 或 MDATA
 - 数据匹配, 支持最多 16 个数据字节的码型
- 握手包
 - 任意握手值, 或 ACK, NAK, STALL, 或 NYET
- 专用包
 - Reserved, PRE, 或 PRE, ERR, SPLIT, 或 PING
- 错误类型包括 PID 校验位, 令牌 CRC5, 数据 CRC16 和位填充

Wave Inspector 还可以搜索触发使用的所有相同指标。

通过泰克示波器，您可以简便地捕获和分析 USB 2.0 信号、协议和数据，然后把它们与其它模拟信号和数字信号关联起来，使您能够全面了解设计特点。

类型	前置码	帧头分界符	目的地址	源地址	长度 / 类型	数据 + 填充位	帧校验顺序
字节	7	1	6	6	2	46-1500	4

图 24. IEEE 802.3 标准以太网帧格式。

以太网

背景

以太网是局域网 (LAN) 使用的一系列基于帧的计算机网络技术，最初是施乐 PARC 于 20 世纪 70 年代开发的。电气和电子工程师学会 (IEEE) 在 1980 年出版了第一个草议标准。IEEE 802.3 CSMA/CD 于 1982 年获批，国际 ISO/IEEE 802.3 标准于 1984 年获批。

工作方式

两种最常用的以太网版本是大多数个人电脑上使用的 10BASE-T 和 100BASE-TX。前面的数字表示以 Mb/s 为单位的数据速率。BASE 表示信号是基带信号，因此没有 RF 信号调制。T 表示网络节点之间使用的局域网电缆中的双绞线。

10BASE-T 和 100BASE-TX 的流行及硬件实现成本不断下降，使得越来越多的嵌入式系统设计采用以太网技术。

以太网提供了基于分组的对等通信，实现直接点到点通信。在物理层，10BASE-T 和 100BASE-TX 信号传送地址信息、控制信息、数据信息和时钟信息。数据按数据字节顺序传送，称为数据包。以太网数据包可以在内部承载其它更高级的协议数据包。例如，以太网数据包可以包含互联网协议 (IP) 数据包，IP 数据包又可以包含传送控制协议 (TCP) 数据包。这种复杂的信号使得分析 10BASE-T 和 100BASE-TX 波形时很难隔离关心的事件。

IEEE 802.3 标准规定了以太网数据帧格式，其中包含多个字段，如图 24 所示。前置码长 7 个字节，由同步使用的 1 和 0 交替的码型组成。

起始帧分界符长一个字节，包括交替的 1 和 0，但末尾是两个 1。

目的和源介质访问控制 (MAC) 地址都长 6 个字节，从最有效位到最无效位顺序传送。每个以太网节点被分配一个唯一的 MAC 地址，用来指定每个数据包的目的地址和源地址。这样，它构成了大多数链路层 (OSI 第二层 2) 网络的基础，上层协议依赖链路层，生成复杂的运行网络。

长度 / 类型字段是一个长两字节的值。如果长度 / 类型的十进制值 ≤ 1500 ，那么它表示数据字段中的数据字节数。如果长度 / 类型值 > 1536 (0x0600)，那么它是一个 EtherType 值，指明了以太网帧净荷中封装的协议。(例如，IPv4 的 EtherType 设置成 0x0800)

数据包包含 46 - 1500 个字节。如果数据长度小于 46 个字节，那么数据字段将填充到长 46 个字节。

帧校验顺序是 32 位循环冗余校验 (CRC)，在目的地址、源地址、长度 / 类型和数据字段中提供了错误校验功能。

最后，在发送每个帧后，发射机必须发送最低 12 个字节的空闲字符，然后才能传送下一个帧，或者发射机必须通过反确认发送启用信号，保持空闲状态同等数量的时间。



图 25. 10BASE-T 解码显示画面。

处理以太网

以太网正广泛用于当前嵌入式设计中。通过在物理层和协议层分析以太网业务，可以了解嵌入式设计其它子系统的运行情况。但是，一个差分以太网信号中包含着地址信息、控制信息、数据信息和时钟信息，很难隔离关心的事件。以太网串行触发和分析选项把部分泰克示波器转换成强大的工具，支持自动触发、解码和搜索，可以调试基于 10BASE-T 和 100BASE-TX 的系统。

示波器可以触发以太网数据包内容，如起始帧分界符、MAC 地址、MAC 长度 / 类型、MAC 客户端数据、Q 标记控制信息、IP 包头、TCP 包头、TCP/IPV4 客户端数据、包尾、空闲 (仅适用于 100BASE-TX 和 DPO4ENET) 和 FCS (CRC) 错误。

解码后的显示画面为构成 10BASE-T 和 100BASE-TX 的各个信号提供了更高级的综合视图，可以简便地识别数据包开始位置和结束位置，识别子数据包成分，如前置码、SFD、MAC 地址、数据、FCS、错误、等等。总线上每个数据包都被解码，取值可以在总线波形中用十六进制、二进制或 ASCII 显示。

除查看总线波形本身上解码后的数据包数据外，您可以以表格方式查看捕获的所有数据包，这在很大程度上与软件列表的查看方式类似。数据包带有时间标记，连续列出每个成分栏 (时间、目的地址、源地址、长度、数据、FCS/CRC、错误)。

串行触发特别适合隔离关心的事件，但在捕获事件后，需要分析周围数据时，您该怎么办呢？Wave Inspector 自动搜索采集的数据，查找用户自定义标准，如串行数据包内容。每个发生时点都用搜索标记突出显示。您只需按示波器前面板上的 **Previous (←)** 和 **Next (→)** 按钮，就可以在不同标记之间快速移动。

RS-232

背景知识

RS-232 是近距离的两台设备之间进行串行通信广泛使用的标准，它主要用于 PC 串行端口，另外也用于嵌入式系统，作为调试端口使用或连接两台设备。RS-232-C 标准于 1969 年问世，之后标准修订了两次，但变化很小，其信号能够与 RS-232-C 互通。业内还有几个相关标准，如 RS-422 和 RS-485，这些标准类似，但使用差分信令在远距离内通信。

工作方式

两台设备称为 DTE (数据终端设备) 和 DCE (数据电路端接设备)。在某些应用中，DTE 设备控制着 DCE 设备；在其它应用中，这两台设备是对等的，DTE 和 DCE 之间的区别可以是任意的。

RS-232 标准规定了各种各样的信号，许多信号并不常用。两个最重要的信号是发送的数据 (Tx) 和接收的数据 (Rx)。Tx 把数据从 DTE 传送到 DCE。DTE 设备的 Tx 线路是 DCE 设备的 Rx 线路。类似的，Rx 把数据从 DCE 传送到 DTE。

RS-232 标准没有规定使用哪些连接器。最常用的连接器是 25 针连接器和 9 针连接器。也可以使用 10 针、8 针或 6 针连接器。还可以在不使用标准连接器的情况下，把同一块电路板上的两台 RS-232 设备连接起来。

信号	缩写	针脚
Carrier Detect (载波检测)	DCD	1
Received Data (接收的数据)	Rx	2
Transmitted Data (发送的数据)	Tx	3
Data Terminal Ready (数据端子就绪)	DTR	4
Common Ground (公共接地)	G	5
Data Set Ready (数据集就绪)	DSR	6
Request to Send (请求发送)	RTS	7
Clear to Send (清除发送)	CTS	8
Ring Indicator (振铃指示符)	RI	9

表 5. 常用的 RS-232 连接器引脚输出。

在连接两台 RS-232 设备时，通常要求零讯号调制器。这种设备交换多条线路，包括 Tx 和 Rx 线路。通过这种方式，每台设备可以在 Tx 线路上发送数据，在 Rx 线路上接收数据。

表 5 显示了 RS-232 信号常用的 9 针连接器使用的引脚输出。记住，如果信号已经传过零讯号调制解调器，那么许多信号将被交换。最重要的是，将交换 Tx 和 Rx。

在探测 RS-232 信号时，通常要使用接续盒。这种设备允许简便地探测 RS-232 电缆内部的信号。接续盒成本低，可以从电子器件经销商处购买。



图 26. RS-232 字节结构。

RS-232 标准没有规定通过总线传送的内容。ASCII 文本是最常见的内容，但也使用二进制数据。数据通常会划分成数据包。在 ASCII 文本中，数据包最后通常带有换行符或回车符。在二进制数据中，通常使用其它值，如 00 或 FF 十六进制。

设备通常使用通用异步接收机 / 发射机 (UART) 实现 RS-232。UART 在市面上流行的部件中广泛使用。UART 采用位移寄存器，把一个数据字节转换成串行流，反之亦然。在嵌入式设计中，UART 还直接通信，而不需使用 RS-232 收发机。

图 26 显示了 RS-232 数据的一个字节。这个字节由下述位组成：

- 开始位 – 字节的开头是一个开始位。
- 数据位 – 后面跟着多个数据位。最常见的是 8 个数据位，某些应用使用 7 个数据位。即使在只传送 7 个位时，数据通常也会非正式地称为一个字节。在 UART 到 UART 通信中，有时会使用 9 位数据字。
- 奇偶性 – 一个可选的奇偶性位。
- 结束位 – 1 个、1.5 个或 2 个结束位。

RS-232 总线没有时钟线路。每台设备使用自己的时钟，确定什么时候对数据线路采样。在许多设计中，UART 使用 Tx 和 Rx 信号的上升沿，把自己的时钟与其它设备的时钟同步起来。

处理 RS-232

大多数泰克示波器上提供了 RS-232 串行触发和分析功能 (参见附录 A)。您可以在示波器上方便地查看 RS-232、RS-422、RS-485 或 UART 数据,而不需连接 PC 或专用解码器。

通过使用前面板总线按钮,我们可以输入基本参数,如使用的通道、位速率和奇偶性,定义 RS-232 总线 (参见图 27)。

在本例中,我们选择了 ASCII 解码;示波器还以二进制或十六进制方式显示 RS-232 数据。

想象一下您有一台设备轮询传感器,请求通过 RS-232 总线传送数据。传感器没有对数据请求作出应答。您想确定传感器是不是没有收到请求,或者是不是收到请求、但忽略了请求。

首先,探测 Tx 和 Rx 线路,在示波器上设置一条总线。然后把示波器设置成在通过 Tx 线路发送数据请求时触发采集。触发后的采集如图 28 所示。

在这里,我们可以看到数字通道 1 上的 Tx 线路及数字通道 0 上的 Rx 线路。但是,我们更关心解码的数据,其显示在原始波形上方。我们放大查看传感器的响应。概况显示了 Tx 线路上的请求及 Rx 线路上的响应。光标显示在请求结束后大约 37ms 时发出回复。提高控制器的超时可以解决这个问题,因为它为传感器回复提供了足够的时间。



图 27. RS-232 总线设置菜单。

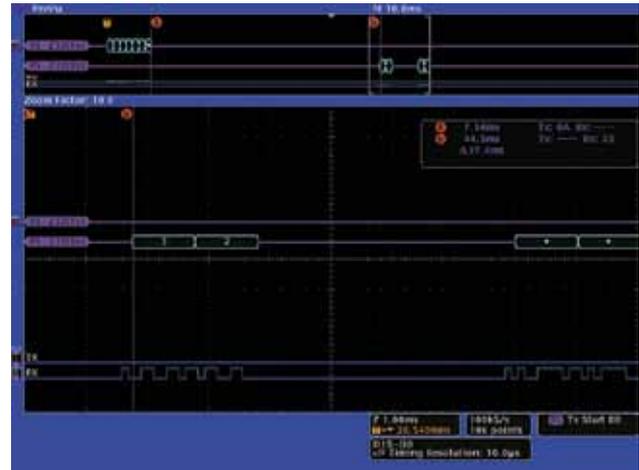


图 28. 测量两条 RS-232 总线上的消息时延。

示波器的 RS-232 触发包括下述功能:

- Tx 开始位 – 在表明字节开始的位上触发。
- Tx 数据包尾 – 在数据包最后一个字节上触发。数据包可以以某个字节结尾: 零 (00 十六进制), 换行 (0A 十六进制), 回车 (0D 十六进制), 空格 (20 十六进制) 或 FF 十六进制。
- Tx 数据 – 触发最多 10 个字节的用户指定数据值。
- Rx 开始位、Rx 数据包尾和 Rx 数据 – 这些与 Tx 触发类似,但发生在 Rx 线路上。

通过泰克示波器,可以简便地查看 RS-232 信号,分析信号,把这些信号与设备中的其它活动关联起来。

CAN

背景知识

CAN (控制器局域网) 总线是博世公司在 20 世纪 80 年代专门研制的一种分层串行数据通信协议，以在电气噪声环境中作为设备之间的通信总线。1992 年，梅塞德兹 – 奔驰率先在其汽车系统中采用 CAN。今天，每个汽车制造商都在使用 CAN 控制器和网络，控制汽车中的各种设备。业内研制了一种更新的、成本更低的总线，称为 LIN(后面将对此讨论)，以满足不需要 CAN 总线那么高的成本、通用性和速度的应用需求。LIN 在许多应用中已经取代了 CAN，但 CAN 仍是引擎定时控制、防抱死刹车系统和传动系控制等使用的主要总线。由于能够容忍电气噪声、减少连线、校验错误及高速传送速率，CAN 正迅速扩展到其它应用中，如工业控制、舰队、医疗、航空等领域。

工作方式

CAN 总线是一种平衡的 (差分) 2 线接口，在屏蔽双绞线 (STP)、非屏蔽双绞线 (UTP) 或带状电缆上运行。每个节点使用公头 9 针连接器。非归零 (NRZ) 位编码与位填充一起使用，保证紧凑的消息及最小的转换数量和高抗噪声能力。CAN 总线接口采用异步传输方案，在总线空闲时每个节点可以开始传送信息。消息广播到网络上的所有节点。在多个节点同时发起消息时，位仲裁用来确定哪条消息的优先级较高。消息可以是四种类型中的一种：数据帧、远程传输请求 (RTR) 帧、错帧或过载帧。总线上检测到错误的任何节点会传输一个错帧，导致总线上所有节点能够看到当前消息不完整，传输节点会重新发送消息。接收设备发起过载帧，表明还没有准备好接收数据。数据帧用来传输数

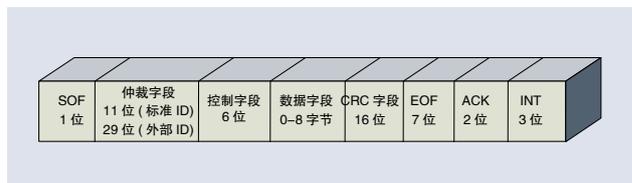


图 29. CAN 数据 / 远程帧。

据，远程帧由用来请求数据。数据帧和远程帧由每个帧开头和结束的起始位和停止位控制，包括下述字段：仲裁字段、控制字段、数据字段、CRC 字段和 ACK 字段，如图 29 所示。

- SOF – 帧以帧头 (SOF) 位开始
- 仲裁 – 仲裁字段包括标识符 (地址) 和远程传输请求 (RTR) 位，用来区分数据帧和数据请求帧，其也称为远程帧。标识符可以采取标准格式 (11 位 – 2.0A 版) 或扩展格式 (29 位 – 2.0B 版)。
- 控制 – 控制字段由 6 个位组成，包括标识符扩展 (IDE) 位，它区分 CAN 2.0A (11 位标识符) 标准帧和 CAN 2.0B (29 位标识符) 扩展帧。控制字段还包括数据长度代码 (DLC)。DLC 长 4 位，表明数据帧中数据字段的字节数或远程帧请求的字节数。
- 数据 – 数据字段由 0-8 个数据字节组成。
- CRC – 15 位循环冗余校验代码和隐性分隔符位。
- ACK – 确认字段长两位。第一个位是时隙位，作为隐性位传输，但之后被成功地收到传输消息的任何节点传送的显性位覆盖。第二个位是隐性分隔符位。
- EOF – 七个隐性位，表明帧尾 (EOF)。

应用指南

三个隐性位的间断 (INT) 字段表明总线空闲。总线空闲时间可以是任意长度，包括零。

它定义了大量的不同数据速率，最高数据速率为 1Mb/s，最低数据速率为 5kb/s。所有模块必须支持至少 20kb/s 的速率。电缆长度取决于使用的数据速率。正常情况下，系统中所有设备都以统一的固定速率传送信息。最大线路长度在低速时可以达到几千米；典型情况是 1Mb/s 时 40 米。在电缆每端使用端接电阻器。

处理 CAN

多个选项可以在多个泰克示波器家族上实现 CAN 串行触发和分析 (参见附录 A)。我们可以使用前面板 Bus 按钮，简单地输入总线的基本参数，包括探测的 CAN 信号类型及位于哪条通道上、位速率、门限和样点 (位时间的百分比)，来定义 CAN 总线，参见图 30。

想象一下您需要进行相关定时测量，确定从司机在司机车门仪表板上按下摇车窗开关开始到车窗实际开始移动之间的时延。通过指定司机车门中 CAN 模块的 ID 及与“摇下车窗”命令有关的数据，您可以触发采集正在查找的数据帧。通过同时探测司机车门的下摇车窗开关及车门的马达驱动，可以非常简便地完成这一定时测量，如图 31 所示。



图 30. CAN 总线设置菜单。



图 31. 触发 CAN 总线上的特定标识符和数据，解码采集中的所有消息。

图中的白三角形是我们放在波形上作为参考点的标记。通过简单地按示波器前面板上 Set/Clear Mark (设置/清除标记) 按钮，可以在屏幕中增加或从屏幕中删除标记。按前面板上的 Previous 和 Next 按钮，缩放窗口从一个标记跳到另一个标记，从而可以简便地在采集中关心的事件之间导航。

现在想象一下，如果没有这些功能会怎样执行这一任务。如果没有 CAN 触发功能，您将不得不触发开关本身，捕获时间窗口足够长的活动，然后在 CAN 总线上逐帧手动解码，直到最终找到适当的帧。以前需要几十分钟或几个小时完成的工作，现在只需要一会儿就可以完成。

示波器强大的 CAN 触发功能包括下述类型：

- 帧头 – 触发 SOF 字段。
- 帧类型 – 选项有数据帧，远程帧，错帧和过载帧
- 标识符 – 使用读 / 写判定触发特定的 11 位或 29 位标识符
- 数据 – 触发 1-8 字节用户指定的数据
- Missing Ack – 在接收设备没有提供确认时触发
- 帧尾 – 触发 EOF 字段

这些触发类型可以轻松隔离 CAN 总线上查找的几乎任何项目。但触发只是开始。调试通常要求检查触发前和触发后的消息内容。可以通过事件表简单地查看一次采集中的多个消息的内容，如图 32 所示。



图 32. CAN 事件表。

事件表以带时戳的表格形式显示了采集中的每条消息解码的消息内容。它不仅可以在简便地查看总线上的所有业务，还可以在消息之间进行定时测量。事件表还可以用于示波器支持的所有总线类型。

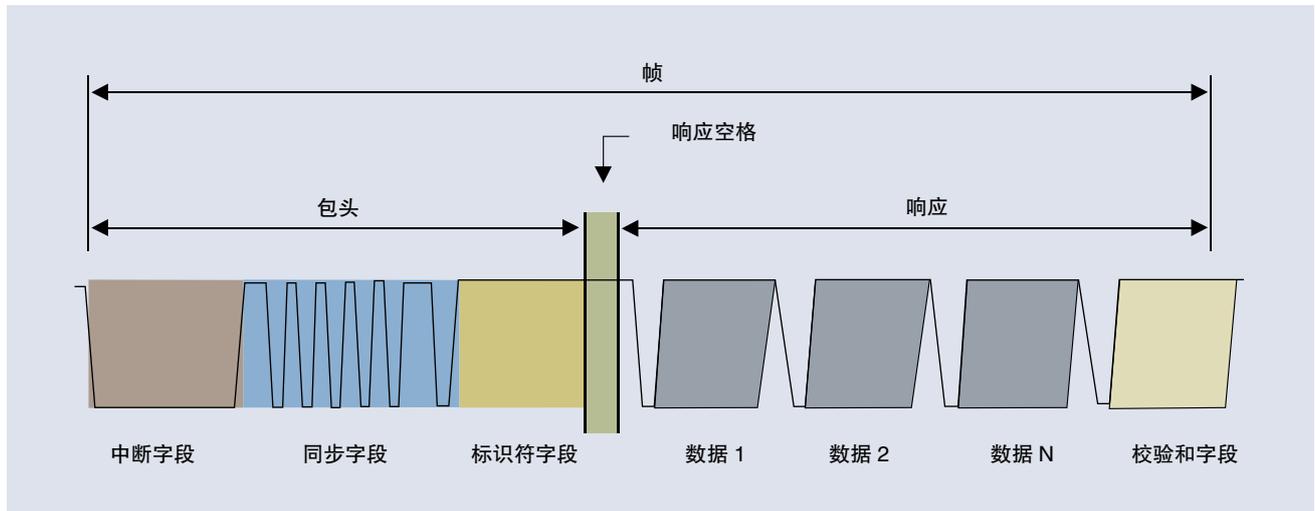


图 33. LIN 帧的结构。

LIN

背景知识

本地互连网络 (LIN) 总线是 LIN 联盟在 1999 年开发的，在不需 CAN 总线那么高的成本、通用性和速度的应用中，作为 CAN 总线的低成本替代方案。这些应用一般包括智能传感器和制动器之间的通信，如车窗控制、门锁、雨水传感器、雨刷控制、气候控制等等。

但是，由于能够容忍电气噪声、错误检测功能及高速数据传送，CAN 目前仍用于引擎定时控制、防抱死刹车系统、传动系控制等应用中。

工作方式

LIN 总线是一种基于增强 ISO9141 标准的低成本单线实现方案。LIN 网络有一个主设备，有一个或多个从设备。所有消息都由主设备发起，每条消息只有一个从设备作出响应，因此不象 CAN 那样需要碰撞检测和仲裁功能。通信基于 UART/SCI，数据在 8 位字节中与开始位、结束位和非奇偶性位一起传送。数据速率在 1kb/s - 20kb/s 之间，尽管听起来很慢，但它适合许多预计的应用，使 EMI 达到最小。LIN 总线总是处于两种状态中的一种状态：活动状态或睡眠状态。在活动状态下，总线上所有节点是醒着的，收听相关的总线命令。通过使用主设备签发 Sleep Frame (睡眠帧)，或总线不活动时间长于预先确定的时间，可以使总线上的节点进入睡眠状态。然后在任何节点请求唤醒或主设备签发中断字段时，总线会被唤醒。

LIN 帧由两个主要部分组成：包头和响应。包头由主设备发出，响应则由从设备发出。包头和响应都有自己的构成，如图 33 所示。

包头构成：

- 中断字段 – 中断字段用来表明新帧的开头。它激活和命令所有从设备接听包头的其余部分。
- 同步字段 – 从设备使用同步字段确定主节点使用的波特率，相应地进行同步。
- 标识符字段 – 标识符指明哪台从设备采取行动。

响应构成：

- 数据 – 指定的从设备应答 1-8 个字节的的数据。
- 校验和 – 计算得出的字段，用来检测数据传输中的错误。LIN 标准已经演进了多个版本，使用两种不同形式的校验和。典型的校验和只在数据字节上计算，用于 1.x 版 LIN 系统中。增强校验和在数据字节和标识符上计算，用于 2.x 版 LIN 系统中。

处理 LIN

泰克示波器还通过多个不同的串行触发和分析选项提供 LIN 支持 (参见附录 A)。使用前面板 Bus 按钮，我们可以简单地输入总线的基本参数，如使用的 LIN 版

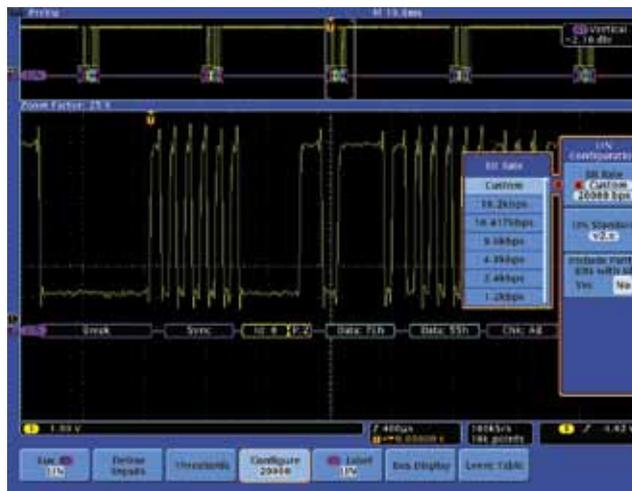


图 34. LIN 总线设置菜单和解码后的帧。

本、位速率、极性、门限及在哪里对数据采样 (位时间的百分比)，定义一条 LIN 总线。LIN 设置菜单及解码后的 LN 帧如图 34 所示。

应用指南

泰克示波器拥有一种强大的功能，能够同时定义和解码最多 16 条串行总线。回到前面的 CAN 总线实例，现在想象一下 LIN 总线运行车窗控制装置。在司机按下 Passenger Window Down(摇下乘客车窗) 控制装置时，司机窗户中的 LIN 总线上会发起一条消息，这条消息传过中央 CAN 网关，然后发送到司机车门的另一个 LIN 网络中。在这种情况下，我们可以触发其中一条总线上的相关消息，同时捕获和解码全部三条总线，在业务通过系统从一条总线传送到另一条总线时，可以非常简便地查看业务。如图 35 所示，我们触发了第一条 LIN 消息，捕获了全部三条总线。

示波器 LIN 触发功能包括下述类型：

- 同步 – 触发同步字段。
- 标识符 – 触发特定的标识符。
- 数据 – 触发 1-8 个字节的特定数据值或数据值范围。
- 标识符和数据 – 触发标识符和数据组合。
- 唤醒帧 – 触发唤醒帧。
- 睡眠帧 – 触发睡眠帧。
- 错误 – 触发同步错误、ID 奇偶性错误或校验和错误。

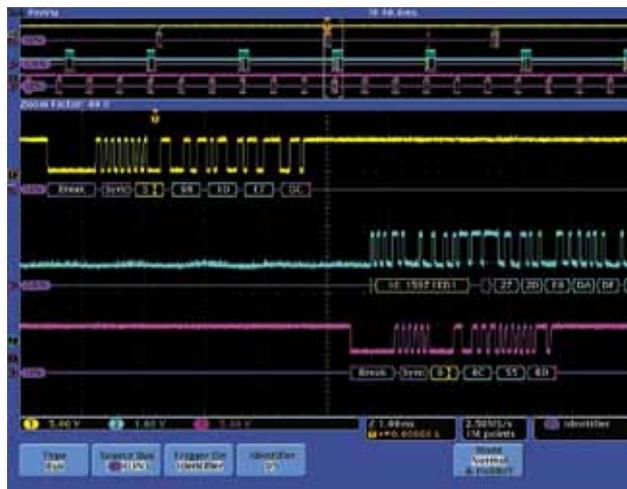


图 35. 触发帧号和循环数，搜索采集的数据，找到启动帧。

这些触发类型允许比以前更快地隔离 LIN 总线上查找的一切特性。通过泰克示波器中的其它高级串行功能，如事件表及搜索和标记功能，调试基于 LIN 的汽车设计变得前所未有的简便。

命令字	同步	终端地址	T/R	子地址模式	字数 / 模式代码	奇偶性
位数	3	5	1	5	5	1

图 36. MIL-STD-1553 命令字格式

数据字	同步	数据 (D15- D0)	奇偶性
位数	3	16	1

图 37. MIL-STD-1553 数据字格式。

MIL-STD-1553

背景

与计算机行业的 LAN 类似，MIL-STD-1553 是一种军用标准，规定了串行总线的电气和协议特点，而这种总线最初是为航空电子应用中的数据通信设计的。

MIL-STD-1553 源于汽车工程师协会 (SAE) 在 1970 年开发的 A2-K 草议标准。在政府和军队复核修订之后，它于 1973 年作为 MIL-STD-1553 (USAF) 发布。MIL-STD-1553A 于 1975 年发布，支持军用标准的所有分支，之后 SAE 发布并冻结了 MIL-STD-1553B 标准，以使元器件制造商能够设计标准产品。最新变化称为 Notice 2，于 1986 年发布，提供了一套常用的运行特点。现在该标准作为商用文件 AS15531 由 SAE 负责监管。

尽管这一标准广泛用于美国军事应用中，但它还以商用方式用于大众运输、宇宙飞船和制造应用中，已经被 NATO 及许多其它政府认可和实现。

工作方式

MIL-STD-1553 以异步方式通过屏蔽双绞线和双轴同轴电缆，以高达 10 Mb/s 的位速率传送由最多 32 个 16 位数据字组成的消息。1553 网络采用时分复用半双工通信技术，通过一条电缆传送数据。对安全至关重要的应用，通常采用双冗余总线，提供更可靠的通信。它采用 Manchester II 双相编码，实现直接耦合或变压器耦合。Manchester 编码自行提供时钟，独立于位顺序，实现 DC 均衡。由于 Manchester 编码信号实际包含在零交点的极性和定时中，1553 总线能够容忍很大的信号电平变化。

MIL-STD-1553 规定了三种不同的字类型：命令字、数据字和状态字。所有字都采用 20 位结构，带有一个 3 位同步字段、一个 16 位信息字段、最后是一个简单检测错误的奇数位。同步字段是无效的 Manchester 信号，第二个位时间中间有一个跳变。命令 / 状态同步在中间有一个负跳变，数据同步有一个正跳变。

有源总线控制器发出的命令字指明远程终端要执行的功能。16 位信息字段包含一个 5 位终端地址，它唯一地识别终端，字段中还包含一个发送 / 接收位、5 个子地址或模式位、以及 5 个字数位或模式代码。

总线控制器或远程终端传送数据字，以最有效位优先的原则发送。

状态字	同步	终端地址	ME	IB	SR	预留位	BCR	忙	SF	DBA	TF	奇偶性
位数	3	5	1	1	1	3	1	1	1	1	1	1

图 38. MIL-STD-1553 状态字格式。



图 39. MIL-STD-1553 总线解码后的显示画面。

处理 MIL-STD-1553

多个泰克示波器家族上提供了 MIL-STD-1553 串行触发和分析选项 (参见附录 A)。

可以使用任意模拟通道上的无源探头, 简便地连接 1553 总线, 按前面板上的总线按钮和屏幕菜单, 设置总线参数。如果想隔离 MIL-STD-1553 总线上的特定事件, 示波器可以触发同步、字类型、数据字值和奇偶性错误。

通过选配的串行触发和分析选项, 可以简便地查看 MIL-STD-1553 串行信号, 分析信号, 把它们与设计中的其它事件关联起来。

远程终端返回状态字, 应答控制器发出的有效消息, 确认收到消息或传递远程终端状态。16 位信息字段中的前 5 位是终端地址。其余位表示特定的状态信息, 包括消息错误、仪器位、服务请求、收到广播命令、忙、子系统标记、动态总线接纳和终端标记。

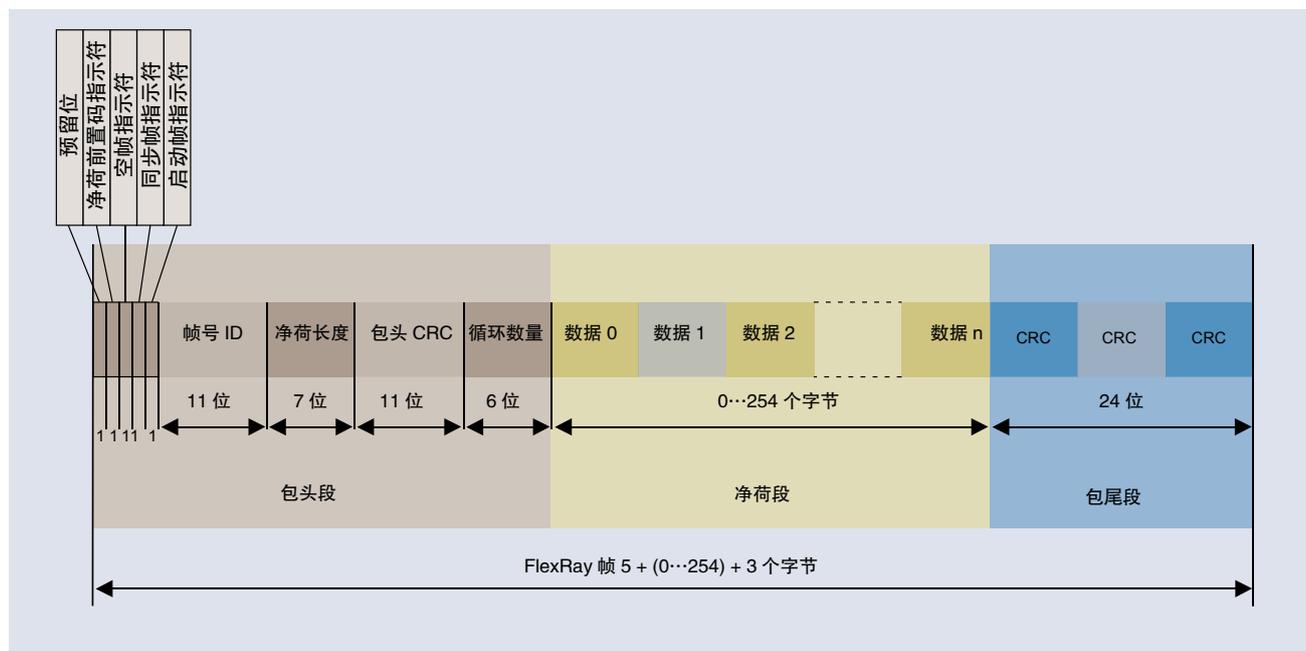


图 40. FlexRay 帧结构。

FlexRay

背景知识

FlexRay 是一种相对较新的汽车总线。随着汽车智能化程度不断提高及电子器件进入越来越多的汽车应用，制造商发现现有的汽车串行标准（如 CAN 和 LIN）没有满足 X-by-wire 应用要求的速度、可靠性或冗余性，如线路制动或线路转向应用。今天，这些功能主要采用机械系统和水压系统。将来，它们将被代之以由传感器和高度可靠的电子组成的网络，这不仅可以降低汽车的成本，还可以明显提高乘客的安全性，因为它提供了许多基于智能电子的功能，如提前制动、避免碰撞、自适应巡航控制、等等。

工作方式

FlexRay 是在屏蔽双绞线 (STP) 或非屏蔽双绞线 (UTP) 上运行的一种速率高达 10 Mb/s 的差分总线，其速度明显高于 LIN 的 20 kb/s 或 CAN 的 1 Mb/s 速率。FlexRay 采用双通道结构，有两大优势。第一，可以配置两条通道，在关键安全应用中提供冗余通信，如 x-by-wire 应用，保证消息通过。第二，可以配置两条通道，在每条通道上以 10 Mb/s 速率发送唯一的信息，在安全重要程度较低的应用中实现 20 Mb/s 的整体总线传送速率。

FlexRay 采用时间触发协议，通过同时包含静态帧和动态帧的通信周期，实现了以前的同步协议和异步协议的优势。静态帧是为总线上每台设备分配的时隙或预定长度，以在每个周期期间通信。总线上的每台设备也有机会通过动态帧在每个周期中通信，动态帧的长度（和时间）可能会变化。FlexRay 帧由三个主要段组成：包头段、净荷段和包尾段。每个段都有自己的构成，如图 40 所示。

包头段的构成：

- 指示符位 – 前 5 个位称为指示符位，表明传送的帧的类型。选项包括正常帧、净荷帧、空帧、同步帧和启动帧。
- 帧号 – 帧号定义了应该在哪个时隙中传送帧。帧号在 1–2047 之间，在通信周期中每条通道内任何单独帧号使用的次数不多于一次。
- 净荷长度 – 净荷长度字段用来指明净荷字段中有多少个数据字。
- 包头 CRC – 使用同步帧指示符、启动帧指示符、帧号和净荷长度计算得出的循环冗余校验 (CRC) 代码。
- 循环数量 – 当前通信周期的值，范围为 0–63。

净荷段的构成：

- 数据 – 数据字段包含最多 254 字节的数据。对在静态段中传送的帧，净荷段的前 0–12 个字节可以选择作为网络管理矢量使用。帧包头中的净荷前置码指示符指明净荷段是否包含网络管理矢量。对在动态段中传送的帧，净荷段的前两个字节可以选择作为消息 ID 字段使用，允许接收节点根据这个字段的内容过滤或掌控数据。帧包头中的净荷前置码指示符指明净荷段是否包含消息 ID。



图 41. FlexRay 总线设置菜单。

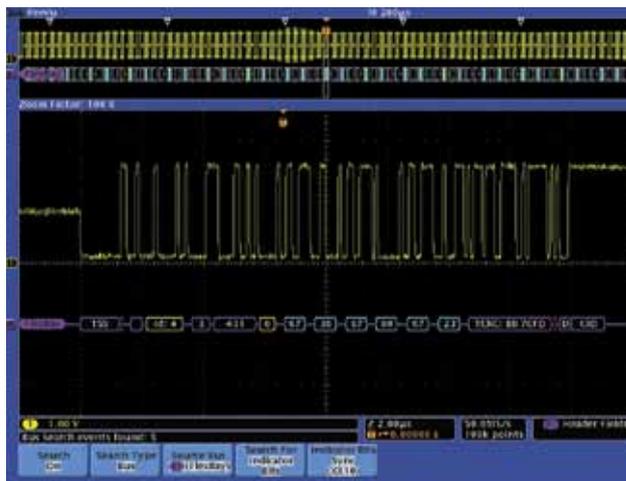


图 42. 触发帧号和循环数，搜索采集的数据，找到启动帧。

包尾段构成：

- CRC – 使用帧的包头段和净荷估计算得出的循环冗余校验 (CRC) 代码。

动态帧有一个额外的成分，位于包尾 CRC 后面，称为动态尾部序列 (DTS)，防止总线接收机过早地检测通道空闲状态。

处理 FlexRay

多个泰克示波器家族上提供了 FlexRay 串行触发和分析功能（参见附录 A）。为定义 FlexRay 总线，我们进入总线菜单，从支持的标准列表中选择 FlexRay。FlexRay 设置菜单如图 41 所示。

然后，我们使用 Define Inputs 菜单，告诉示波器我们是在查看 FlexRay 通道 A 还是通道 B、我们正在探测哪类信号（差分、半差分对或控制器和总线驱动器之间的逻辑信号），然后设置门限和位速率。FlexRay 在查看非 Tx/Rx 信号时要求设置两个门限，因为它是一种三电平总线。这样，示波器可以识别 Data High 和 Data Low 及两个信号电压相同的空闲状态。

泰克示波器强大的 FlexRay 功能集如图 42 所示，其中我们触发了 Frame ID = 4 和 Cycle Count = 0 组合，捕获了大约 80 个 FlexRay 帧，解码了整个采集，然后让示波器搜索采集数据，找到和标记发生的所有同步帧。所有这一切只需使用 100,000 点的记录长度完成。通过部分泰克示波器上提供的高达 250M 点的记录长度，可以捕获和分析超长串行活动时间窗口。

泰克示波器 FlexRay 触发功能包括下述类型：

- 帧头 – 触发帧头序列 (FSS) 的后沿。
- 指示符位 – 触发正常帧、净荷帧、空帧、同步帧或启动帧。
- 标识符 – 触发特定帧号或一个帧号范围。
- 循环数量 – 触发特定的循环数量值或一个循环数量值范围。
- 包头字段 – 触发任意包头字段或所有包头字段中用户指定值的组合，包括指示符位、帧号、净荷长度、包头 CRC 和循环数量。
- 数据 – 触发最多 16 个字节的数据。数据窗口可以偏移帧中用户指定字节数及非常长的数据净荷。可以作为特定值或取值范围指定所需的数据。

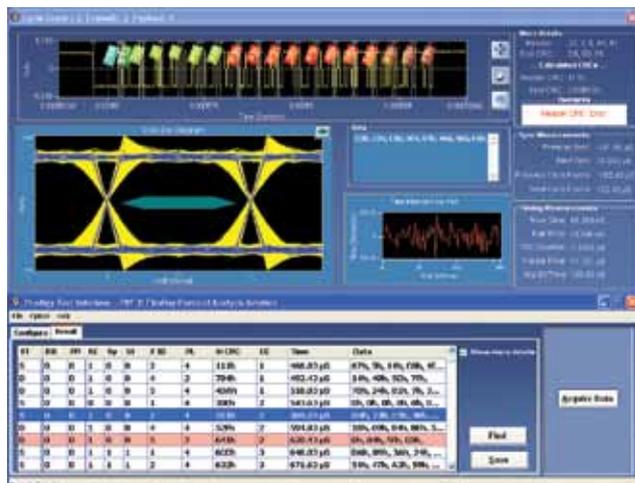


图 43. FlexRay 信号的眼图分析。

- 标识符和数据 – 触发帧号和数据组合。
- 帧尾 – 触发静态帧、动态帧或所有帧。
- 错误 – 触发大量的不同错误类型，包括包头 CRC 错误、包尾 CRC 错误、空帧错误、同步帧错误和启动帧错误。

除上面介绍的触发和解码功能外，DPO4AUTOMAX 还提供了 FlexRay 眼图分析功能，帮助诊断物理层问题。用户只需把软件包装到 PC 上，通过 LAN 或 USB 把 PC 连接到示波器，点击 Acquire Data 按钮，就可以获得信息丰富的显示画面，如图 43 所示。分析功能包括：

- 眼图 – 使用采集中的所有信息构建眼图，当前选择的帧用蓝色突出显示。与 TP1 或 TP4 模板简便地进行对比，违规的地方用红色突出显示。
- 解码 – 在模拟波形上解码当前选择的帧，整个采集在下面的表格中解码。

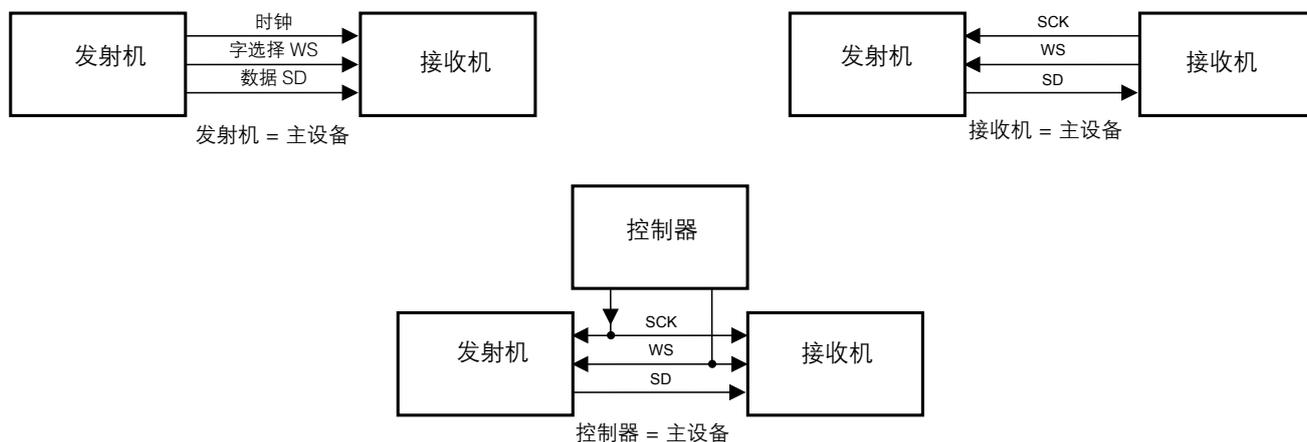
应用指南

- 时间间隔误差 (TIE) 图 – 简便地目测帧内的抖动。
- 错误校验 – 错误用红色突出显示。计算包头和包尾 CRC，并与传送的帧进行对比。
- 定时测量 – 上升时间、下降时间、TSS 时长、帧时间、平均位时间、前一个同步、下一个同步、前一个周期帧、下一个周期帧。
- 查找 – 根据分组内容隔离关心的特定帧。
- 保存 – 把解码后的采集保存到 .csv 文件中，以进一步离线分析。

由于这套完善的 FlexRay 触发功能及上述 CAN 和 LIN 功能，泰克示波器提供了最优秀的汽车设计调试工具。



图 44. 在 CAN 总线采集中搜索指定标识符和数据。

图 45. 不同的 I²S 总线配置。

音频总线

背景知识

I²S 或 “I squared S” 是 IC 间声音的缩写。它最初是由飞利浦公司在 20 世纪 80 年代中期开发的，为消费电子设备中的数字音频信号提供标准化通信路径，如唱片机和数字电视。在过去 20 年中，消费电子市场持续演变，I²S 应用应运而生。今天，它已成为手机、MP3 播放机、机顶盒、专业音频设备和游戏系统中常见的总线。

工作方式

I²S 总线是一种主从 3 线串行通信总线，三个信号是时钟 (SCK)、字选择 (WS) 和数据 (SD)。一般来说，发射机是主设备，接收机是从设备。但在某些情况下，通过生成时钟和字选择信号，接收机可以作为主设备。在需要时，可以由另一台设备控制发射机和接收机。图 38 说明了这些配置方案。

串行数据以 2 的补数传送，最高有效位 (MSB) 先传送。之所以先传送 MSB，是因为发射机和接收机可能有不同的字长度。发射机没必要知道接收机可以处理多少个位，接收机也没必要知道传送多少位。在系统字长度大于发射机字长度时，字会被截短 (最低有效数据位设为 ‘0’)，以进行数据传送。如果接收机发送的位数超出了字长度，那么最低有效位 (LSB) 后面的位会被忽略。另一方面，如果接收机收到的位数低于字长度，那么漏掉的位会在内部设置为零。这样，MSB 有固定的位置，而 LSB 的位置则视字长度而定。发射机一直在 WS 变化后一个时钟周期时发送下一个字的 MSB。

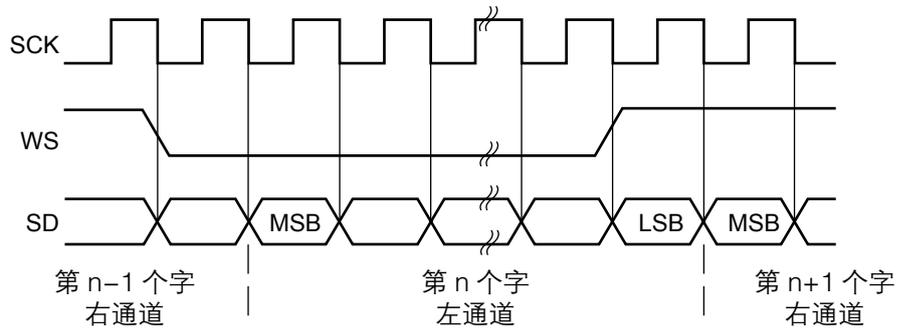


图 46 第一部分 . I²S 格式。

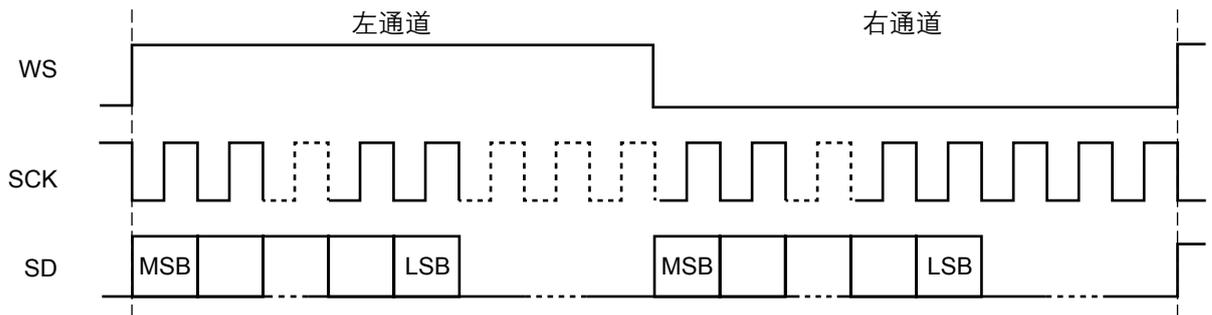


图 46 第二部分 . LJ 格式。

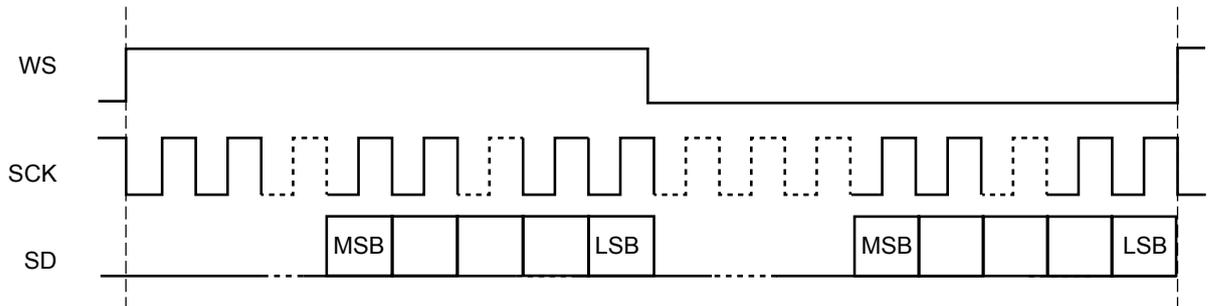


图 46 第三部分 . RJ 格式。

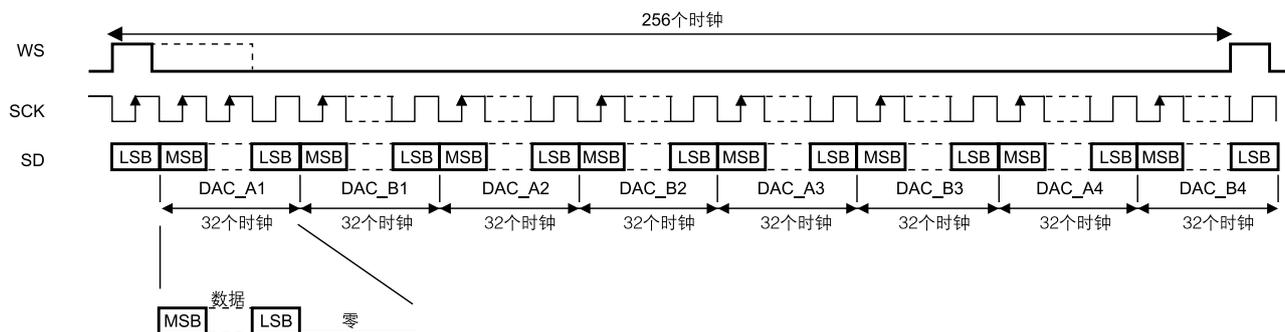


图 47. TDM 格式

I²S 总线有多种常用的变通方案，称为左对齐 (LJ)、右对齐 (RJ) 和时分复用 (TDM)。I²S、LJ 和 RJ 之间的主要区别在于数据相对于 Word Select 信号的时间位置。在 I²S 中，MSB 在 WS 后延迟一个时钟。在 LJ，数据位与 WS 对齐。在 RJ 中，数据位与 WS 右对齐，如图 46 所示 (NXP Online)*。TDM 与 I²S、LJ 和 RJ 类似，但支持两条以上的音频通道。图 40 所示实例拥有 8 条音频通道，每条通道有 32 个数据位。

所有这些数字音频总线都采用非常简单的结构。我们在本应用指南中考察的许多其它总线都有地址字段、CRC 字段、奇偶位、开始/结束位和各种其它指示符位，但数字音频总线对每条通道只有数据值。

处理音频总线

多个泰克示波器产品家族上提供了数字音频总线支持 (参见附录 A)。通过使用前面板上的 Bus 按钮, 我们可以简单地输入基本总线参数, 如字长度、信号极性、位顺序和门限, 定义一条音频总线。TDM 定义还要求提供每条通道数据位数、每条通道时钟位数、位延迟和每个帧通道数。

在设置总线后, 可以迅速触发总线上的特定数据内容, 解码整个采集, 搜索采集数据, 找到要查找的特定数据。在下面的实例中, 我们将考察模数转换器 (ADC) 驱动的一条 I²S 总线。通道 1 (黄色) 是时钟信号, 通道 2 (蓝色) 是字选择信号, 通道 3 (粉红色) 是数据信号。我们把触发设置成查找指定范围外的数据值, 看我们采样的信号是否落在 ADC 的限制内。如图 48 所示, 我们使用这种 Outside Range 触发捕获了一个极端值 (-128)。

泰克示波器强大的音频触发功能包括下述触发类型:

- Word Select – 触发 I²S、LJ 和 RJ 总线中帧开始的 Word Select 的边沿。
- Frame Sync – 触发 TDM 中帧开始的 Frame Sync 信号。
- TDM Data – 触发 I²S、LJ 和 RJ 中 Left Word、Right Word 或 Either Word 中的用户指定数据。在 TDM 中, 可以指定通道编号, 查找其中的数据值。数据判定符包括 =、≠、≤、<、>、≥、范围内和范围外。

与泰克示波器支持的所有其它串行总线类型一样, 这些触发指标也作为搜索指标提供, 以考察长采集数据, 然后可以以事件表方式, 表示解码后的音频数据。

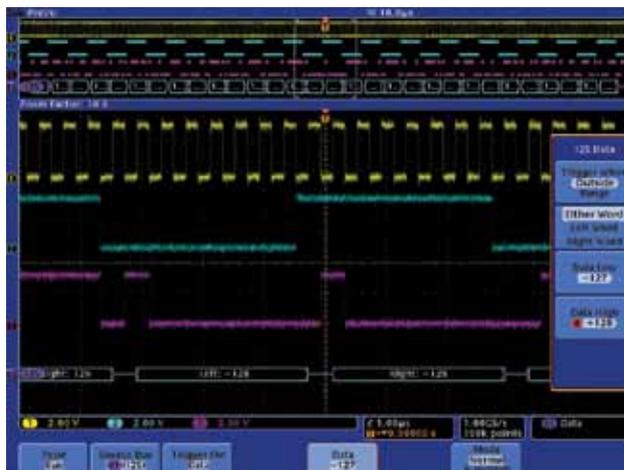


图 48. 在 I²S 总线上落在取值范围时触发采集。

MIPI DSI-1 / CSI-2 总线

背景

与本文中其它标准已经上市数十年不同, 移动行业处理器接口 (MIPI) 标准相对较新, 在某些情况下仍在发展。MIPI 联盟 (www.mipi.org) 指出:

“这些规范确立了硬件和软件接口标准, 推动着新技术发展, 可以在移动生态系统中更快地部署新功能和 new 服务。” “移动行业深受接口太多之苦, 这些接口不能相互兼容, 一般没有什么特色。这会导致产品之间不兼容, 工程投资冗余、以保持多种接口技术, 最终会导致更高的成本 (但最可能的情况是并非更高的利润率 / 价值)。通过开发极具吸引力的融合方案, MIPI 预计将消除这种分隔状态, 这些方案将较专有方案提供大量的技术优势和知识产权优势。”

MIPI 联盟已经完成了多项规范, 许多移动产品正在采用这些规范, 其中两项规范: DSI-1 和 CSI-2 是协议级规范, 规定了怎样在主处理器和显示芯片之间 (DSI-1) 及在主处理器和摄像机芯片之间 (CSI-2) 传送信息。这两种协议都采用 MIP 联盟开发的相同的底层物理层接口: D-PHY 和 M-PHY。

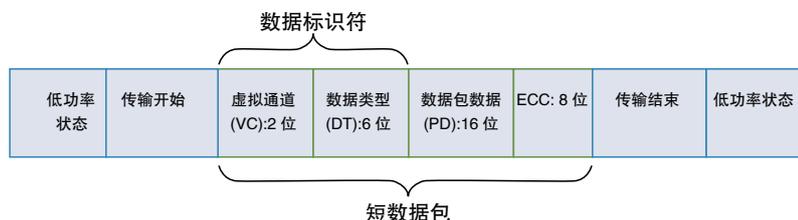


图 49. 短 MIPI 数据包。



图 50. 长 MIPI 数据包。

工作方式

D-PHY 物理层规定了主处理器与另一台设备 (如显示器或摄像机) 之间的高速串行链路。最低总线配置是一条时钟通路和一条数据通路, 但可以使用最多 4 条数据通路, 提高总线带宽。

总线有两种工作模式: 低功率模式和高速模式。低功率模式采用单端信令, 把时钟嵌入数据中。它一般用于命令和控制目的, 最大数据传送速率为 10 Mb/s。高速模式采用差分信令, 一般用于快速数据传送。例如, 可以在低功率模式下传送手机显示屏的垂直和水平同步信息, 因为需要传送的信息相对较少, 低传送速率足够了。但是, 手机上显示的实际视频内容则要求大的高速数据传送, 以支持当前高清显示, 因此要采用高速模式。尽管高速模式下实际最大传送速率视不同实现方案不同, 但整个总线的工作范围一般为每路 80 Mb/s - 1 Gb/s。

DSI-1 和 CSI-2 协议规定使用短数据包和长数据包组合, 通过 D-PHY 物理层传送信息。

短数据包一般用于命令控制型信息, 如同步和配置; 长数据包一般用于视频内容。短数据包的结构如下:

- Data Identifier(数据标识符) - 长 8 位, 其中包括下面介绍的 Virtual Channel(虚拟通道) 字段和 Data Type(数据类型) 字段。

- Virtual Channel(虚拟通道) - 虚拟通道字段指明在总线上启动一台以上的摄像机或显示设备时, 数据包预计传送到总线上的哪台设备。这个字段长两位, 最多 4 台设备可以共享一条总线。
- Data Type(数据类型) - 这个字段长 6 位, 指明发送哪类命令或操作, 以及 Packet Data(数据包数据) 字段中的数据代表什么以及其结构。
- ECC - 这是一个纠错字段, 可以纠正单位错误, 可以检测短数据包中的 2 位错误。

长数据包有更多的字段。长数据包的结构如下:

虚拟通道、数据类型和 ECC 与短数据包相同, 其与短数据包的区别有:

- Word Count(字数) - 长数据包用字数代替了数据包数据。这个 16 位值指明了净荷数据中包括的字节数。
- Payload(净荷) - 这个字段一般用来通过大量不同的视频格式发送大量的视频数据。每种格式都有自己的 Data Type(数据类型)。净荷字段可以长 0 - 65,535 (216 - 1) 字节。
- Checksum(校验和) - 这个字段校验净荷中的错误。



图 51. MIPI DSI-1 总线设置。



图 53. MSO70000C 模拟通道解码后的封装像素流显示画面，显示了校验和错误。

处理 DSI-1 和 CSI-2

SR-DPHY 应用软件可以解码 DSI-1 和 CSI-2 总线。在设置总线时，您只需进入 Bus Setup Menu 菜单，选择 Serial，然后选择 MIPI DSI-1 或 MIPI CSI-2。在下面的截图中，我们选择了 DSI-1。

在配置总线时，我们需要指定通道类型（模拟通道或数字通道）及探测总线使用的探头。在使用模拟通道时，应使用差分探头探测时钟，使用两只单端探头探测数据通路。P6780 差分探头使得 MSO70000C 系列能够使用数字通道探测一条或多条通路。一条通道用来探测时钟，一条通道探测差分信号 D+/D-，一条通道探测单端信号 D+/GND，一条通道探测单端信号 D-/GND。因此要求三条模拟通道或四条数字通道，才能探测单路 DSI-1 或 CSI-2 实现方案。

在配置和显示之后，总线表单显示短数据包和长数据包解码后的所有成分，以及其它通信类型，如总线往返周期 (BTA) 及逃脱模式命令。



图 52. MSO70000C 数字通道解码后的封装像素流、24 位 RGB 8-8-8 格式长数据包显示画面。

在默认情况下，虚拟通道和字数字段用十进制显示。数据类型字段指明数据包的类型。ECC 和校验和都用十六进制显示。最后，对规定的数据类型，净荷字段解码传送到相关显示型信息中的数据。在上面的实例中，净荷中发送的第一个像素值的 Red 值是 255、Green 值是 216、Blue 值是 0。

除解码 DSI-1 / CSI-2 采集外，您还可以搜索长采集数据，找到下述类型的数据包内容发生的所有时点：

- 短数据包 (指明 VC, DT, 方向和数据包数据值)
- 长数据包 (指明 VC, DT, 方向, WC 和数据净荷, 包括像素值)
- 停止
- 传输开始 (SoT)
- 传输结束 (EoT)
- 总线往返周期 (仅适用于 DSI-1)
- 逃脱模式
- ECC 警告
- ECC 错误
- 校验和错误

通过 SR-DPHY 应用软件和相应的泰克示波器 (参见附录 A)，您可以简便地解码和查看 DSI-1 和 CSI-2 串行总线数据包，分析数据包，然后把它们与器件中其它活动关联起来。

触发与搜索

正如我们在本应用指南中讨论的那样，必需拥有强大的触发系统，隔离串行总线上关心的事件。但是，一旦已经采集了数据（示波器被停止），而且想分析数据，那么触发就没有什么用了。如果示波器具有类似触发的资源、分析停止的波形数据不是更好吗？

泰克示波器提供了 Wave Inspector® 和高级搜索和标记功能，以及强大的搜索能力。本文中讨论的所有总线触发功能还作为已采集数据的搜索标准使用。

例如，在图 44 中，示波器已经在长采集记录中搜索了具有特定地址和数据内容的每条 CAN 消息，并在显示屏顶部在每条消息上标明空心的白三角形。为在发生的消息之间导航，用户只需按前面板上的 Previous 和 Next 按钮即可。

当然，搜索也可以用于比较传统的触发类型。搜索类型包括边沿、脉宽、欠幅脉冲、建立时间和保持时间、逻辑和上升时间 / 下降时间。

总结

尽管嵌入式系统设计从并行总线转向串行总线带来了许多好处，但它也给设计工程师带来了许多挑战。通过传统测试测量工具，触发查找的事件要困难得多，这些工具仅仅查看模拟信号，几乎不可能告诉用户其提供了哪些信息，而且手动解码长时间的总线活动、诊断问题是非常耗时、非常容易出错的过程。泰克示波器系列改变了这一切。由于其强大的触发、解码和搜索功能，当前的设计工程师可以以极高的效率解决嵌入式系统设计问题。

附录 A：泰克提供多种示波器，可以满足您的需求和预算。

	MSO/DPO70000 系列	DPO7000 系列	MSO/DPO5000 系列	MDO/MSO/DPO4000 系列	MDO3000 系列	MSO/DPO2000 系列
带宽	33 GHz, 25 GHz, 23 GHz, 20 GHz, 16 GHz, 12.5 GHz, 8 GHz, 6 GHz, 4 GHz	3.5 GHz, 2.5 GHz, 1 GHz, 500 MHz	2 GHz, 1 GHz, 500 MHz, 350 MHz	1 GHz, 500 MHz, 350 MHz, 100 MHz	1 GHz, 500 MHz, 350 MHz, 200 MHz, 100 MHz	200 MHz, 100 MHz, 70 MHz
模拟通道	4	4	4	2 或 4	2 或 4	2 或 4
数字通道	16 (MSO)	-	16 (MSO)	16 (MDO)	16 (选配)	16 (MSO)
频谱分析仪通道	-	-	-	1 (MDO)	1	-
记录长度 (所有通道)	高达 62.5 M (标配) 高达 250 M (选配)	25 M (标配) 高达 125 M (选配)	25 M (标配) 高达 125 M (选配)	高达 20 M	10 M	1 M
采样率 (模拟)	高达 100 GS/s	高达 40 GS/s	高达 10 GS/s	高达 5 GS/s	高达 5 GS/s	1 GS/s
彩色显示器	12.1 英寸 XGA	12.1 英寸 XGA	10.4 英寸 XGA	10.4 英寸 XGA	9 英寸 WVGA	7 英寸 WQVGA
串行总线触发和分析应用	SR-EMBD: I ² C, SPI SR-COMP: RS-232/422/485 UART SR-USB: USB 2.0 SR-DPHY: MIPI 解码 SR-AERO: MIL-STD-1553 SR-AUTO: CAN, LIN, FlexRay SR-810B: 8b/10b 解码 SR-PCIe: PCI Express SR-ENET: 10/100BASE-T 以太网解码	SR-EMBD: I ² C, SPI SR-COMP: RS-232/422/485 UART SR-USB: USB 2.0 SR-DPHY: MIPI 解码 LSA: CAN, LIN 解码 SR-AERO: MIL-STD-1553 SR-AUTO: CAN, LIN, FlexRay SR-810B: 8b/10b 解码 SR-PCIe: PCI Express 解码 SR-ENET: 10/100BASE-T 以太网解码	SR-EMBD: I ² C, SPI SR-COMP: RS-232/422/485 UART SR-USB: USB 2.0 SR-DPHY: MIPI 解码 VNM: CAN, LIN 解码 SR-AERO: MIL-STD-1553 SR-AUTO: CAN, LIN, FlexRay SR-810B: 8b/10b 解码 SR-PCIe: PCI Express 解码 SR-ENET: 10/100BASE-T 以太网	DPO4EMBD: I ² C, SPI DPO4USB: USB 2.0 DPO4COMP: RS-232/422/485/UART DPO4AUTO: CAN, LIN DPO4AUTOMAX: CAN, LIN, FlexRay DPO4AUDIO: I ² S/LJ/RJ/TDM DPO4ENET: 10/100BASE-T 以太网 DPO4AERO: MIL-STD-1553	MDO3EMBD: I ² C, SPI MDO3USB: USB 2.0 MDO3COMP: RS-232/422/485/UART MDO3AUTO: CAN, LIN MDO3FLEX: FlexRay MDO3AUDIO: I ² S/LJ/RJ/TDM MDO3AERO: MIL-STD-1553	DPO2EMBD: I ² C, SPI DPO2COMP: RS-232/422/485/UART DPO2AUTO: CAN, LIN
同时显示的串行总线数量	16	16	16	4	2	2

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
北京市海淀区花园路4号
通恒大厦1楼101室
邮编: 100088
电话: (86 10) 5795 0700
传真: (86 10) 6235 1236

泰克上海办事处
上海市徐汇区宜山路900号
科技大楼C楼7楼
邮编: 200233
电话: (86 21) 3397 0800
传真: (86 21) 6289 7267

泰克深圳办事处
深圳市福田区南园路68号
上步大厦21层G/H/I/J室
邮编: 518031
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C座
邮编: 710065
电话: (86 29) 8723 1794
传真: (86 29) 8721 8549

泰克武汉办事处
武汉市解放大道686号
世贸广场1806室
邮编: 430022
电话: (86 27) 8781 2760/2831

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

有关信息

泰克公司备有内容丰富的各种应用文章、技术简介和其他资料, 并不断予以充实, 可为从事前沿技术研究的工程师提供帮助。请访问泰克公司网站 cn.tektronix.com



版权 ©2014 年, 泰克有限公司。版权所有。Tektronix 产品, 不论已获得专利和正在申请专利者, 均受美国和外国专利法的保护。本文提供的信息取代所有以前出版的资料。本公司保留变更技术规格和售价的权利。TEKTRONIX 和 TEK 是 Tektronix, Inc. 的注册商标。本文提及的所有其它商号分别为其各自所有公司的服务标志、商标或注册商标。

01/14 EAWWWW

48C-19040-16

Tektronix®