

使用示波器调试 USB 2.0 问题

应用指南



引言

基于 USB 的系统已经深入我们的生活，包括嵌入式系统（USB 作为产品内部不同元器件之间的互连技术）及电脑和外设之间流行的外部互连总线。USB 接口还有一个额外的好处，那就是它支持从主机把功率传送到外设。

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。

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。

USB 2.0 是一种成熟的标准，许多构件都非常强健。但是，这些总线受到噪声、电路板布线、端接和其他因素的影响。在总线通信故障中，示波器是必备工具，它在前期提供定时和幅度信息，而在配备解码功能时，还会提供协议级诊断信息。

即使 USB 总线正常运行时，其他系统也会在具体条件下发生问题。在这些情况下，触发特定的 USB 总线值可以提供关键时间基准，帮助设计人员调试系统级漏洞。

本应用指南

- 简要介绍了 USB 2.0 总线的物理层和分组结构，以期为帮助调试问题提供足够的细节
- 介绍了怎样在配备 USB 2.0 解码功能的示波器上设置解码
- 介绍了怎样在配备 USB 2.0 解码功能的示波器上理解串行总线数据
- 介绍了在配备 USB 2.0 串行解码功能的示波器上有哪些触发和搜索选项

通过选配串行触发和分析功能，泰克示波器为开发 USB 2.0 总线的嵌入式系统设计人员提供了强大的工具。在本应用指南中，我们使用 5 系列 MSO 在这些总线上演示解码和触发。

其他泰克示波器也支持 USB 2.0 触发和分析。如需完整的示波器列表，请参阅 [“使用示波器和选配软件提供串行支持”](#)。

USB 2.0

背景

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。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。

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。

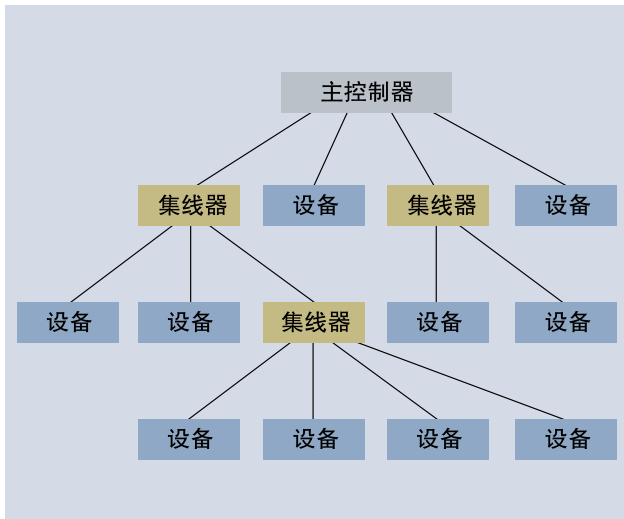
工作方式

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

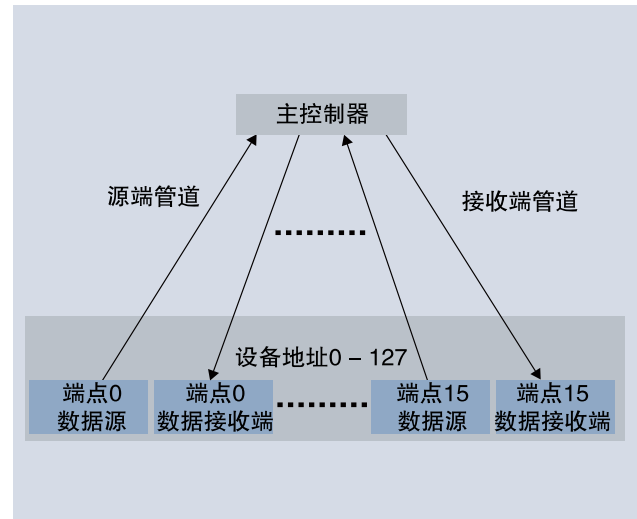
USB 速度分为四种。高速设备先以全速开始操作，然后转换到高速。USB 2.0 总线的速度受到与主控制器相连的速度最低的设备限制。

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。

部分泰克示波器上提供 USB 串行触发和分析支持。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。



USB 网络包括一个主控制器及 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。



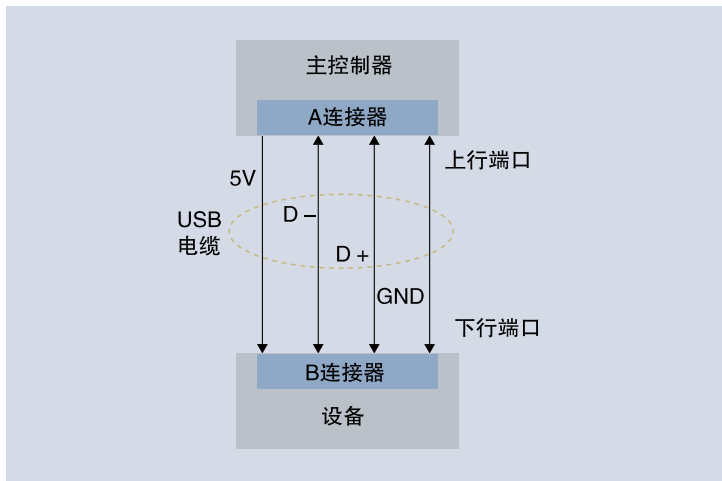
每台设备最多可以有 16 个数据端点(图 15)。端点 0 是必须的，主机使用它与设备通信。管道是主机中的应用程序与设备端点之间的逻辑连接。

USB 网络中的连接在枚举过程中动态进行配置，枚举是开机或设备热插拔时发生，具体顺序如下：

1. 主机检测到 USB 总线上存在设备。
2. 主机借助 SETUP 令牌轮询设备，令牌使用地址 0 和端点 0。
3. 主机为设备分配一个唯一的地址，范围为 1 - 127。
4. 主机还识别设备速度和数据传送类型。
5. 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。

电接口

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。



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。在示波器上，可以使用无源或有源模拟探头及数字逻辑探头捕获各个信号。

信令

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%
SuperSpeed USB 3.0	5 Gb/s	200 ps

低速设备和全速设备的电压标称值相等，但高速设备的电压标称值明显要低得多。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，极性表明了设备的初始速度。

数据状态	差分电压
J状态	低速设备：拉高D-，得到负差分电压。
	全速设备：拉高D+，得到正差分电压
K状态	低速设备：拉高D+，得到负差分电压。
	全速设备：拉高D-，得到正差分电压

数据传输采用非归零颠倒 (NRZI) 编码，两种数据状态称为 J 和 K。代表 J 和 K 状态的不同电压对低速设备和全速设备的极性相反。为保证跳变数量最小，标准要求位填充。有效性最低的位先传送，有效位最高的位后传输。

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。

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。PID 4 位值识别 17 种数据包。数据包类型分为令牌包、数据包、握手包和特殊包。

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。

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

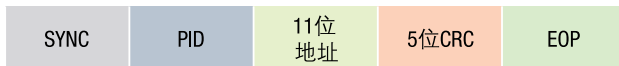
PID类型	PID名称	PID
令牌	OUT	0001
	IN	1001
	SOF	0101
	SETUP	1101
数据	DATA0	0011
	DATA1	1011
	DATA2	0111
	MDATA	1111
握手	ACK	0010
	NAK	1010
	STALL	1110
	NYET	0110
特殊	PRE	1100
	ERR	1100
	SPLIT	1000
	PING	0100
	Reserved	0000

握手包



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)。

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。

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。

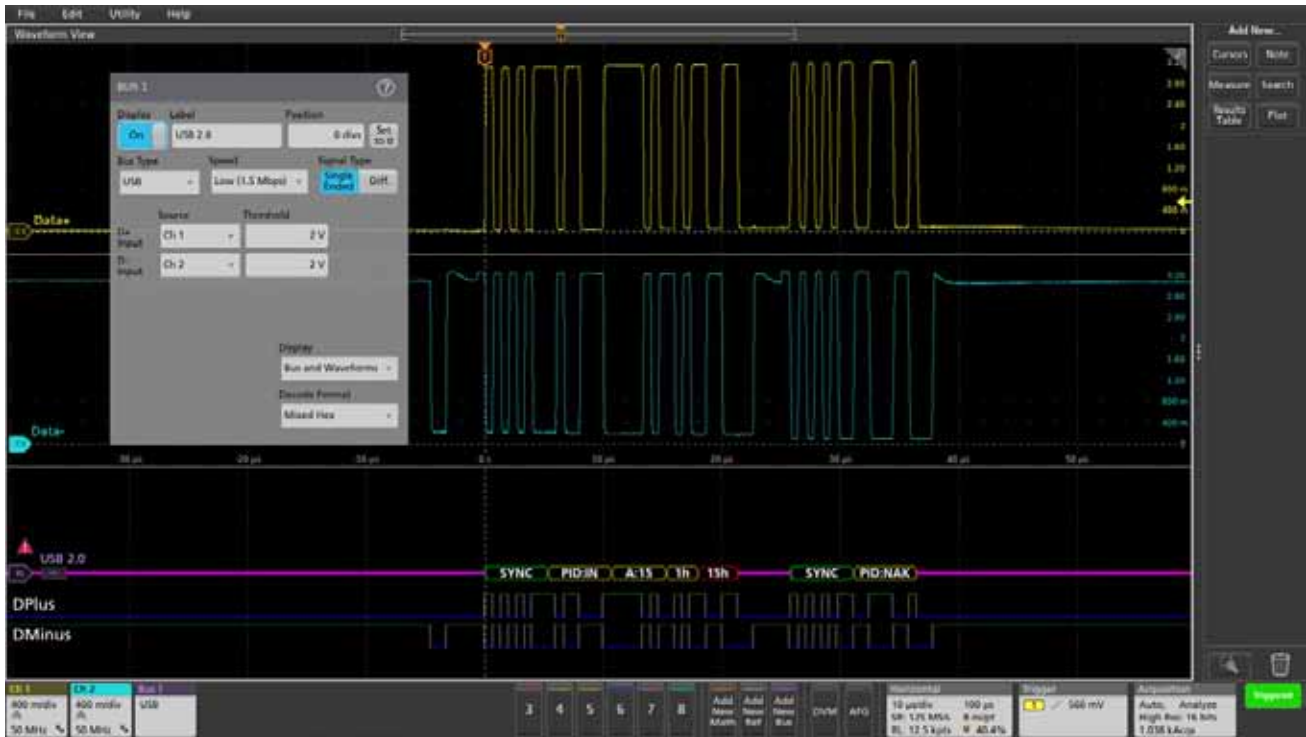
无差错数据事务是指在主机向设备发送一个 DATA0 数据包时，设备会发送一个握手 ACK 包，然后主机发送一个 DATA1 包。

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



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。



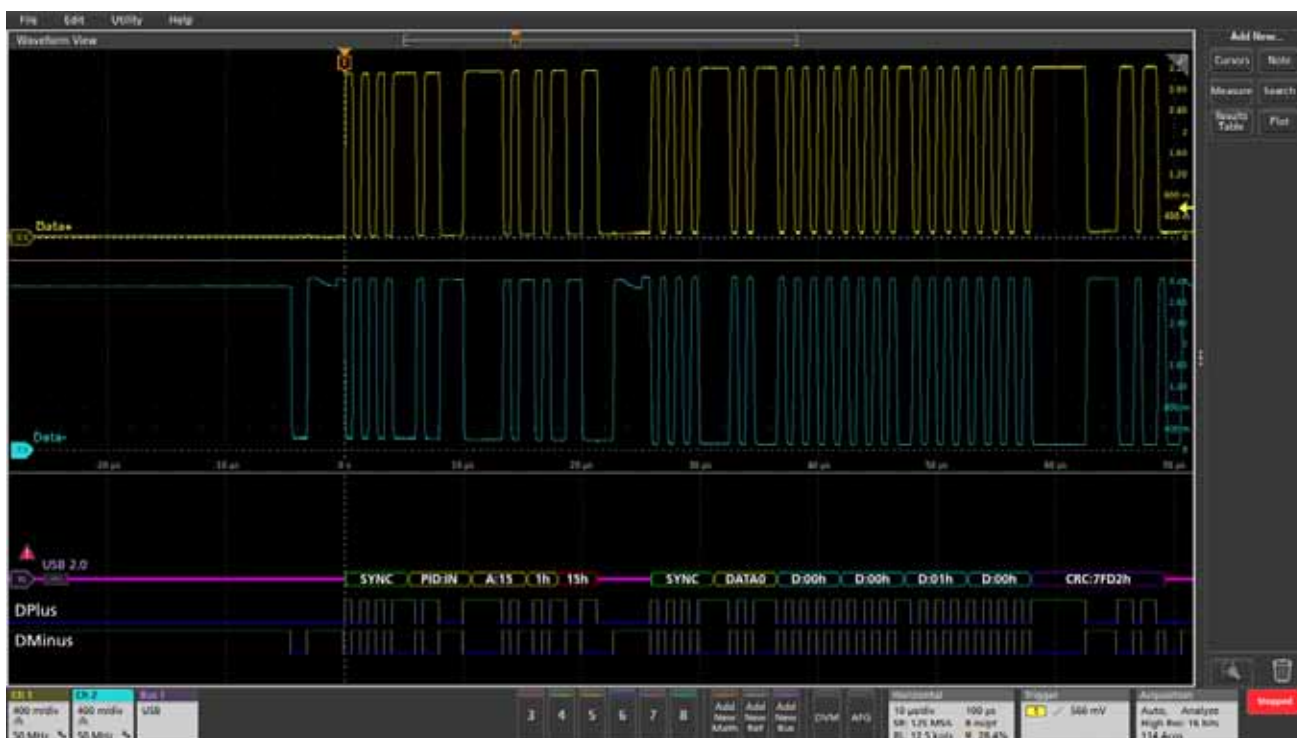
设置 USB 2.0 解码

单击 Add New Bus 按钮或按前面板上的 Bus 按钮，然后输入总线的基本参数，我们可以定义一条 USB 总线，包括信号速度、输入通道、信号类型和电压阈值。

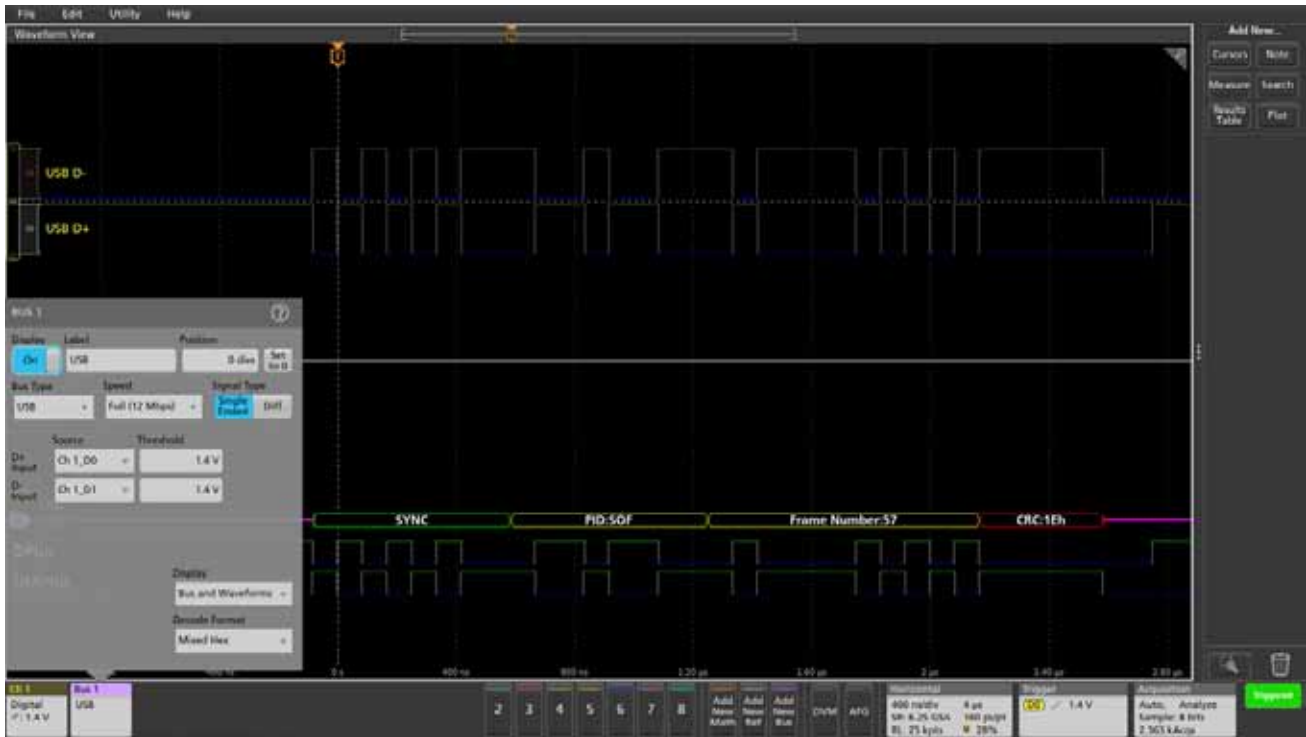
USB 2.0 信号作为差分对传送。可以使用无源或有源模拟探头及数字逻辑探头捕获各个信号。如左面的配置菜单所示，我们设置两个单端模拟输入，捕获 PC 与鼠标之间的低速 USB 2.0 业务。

理解 USB 2.0 总线

示波器显示了主机与低速 USB 鼠标之间的通信，包括设置。USB 主机发送一个 IN 令牌，请求数据；鼠标应答一个 NAK，因为鼠标没有移动。

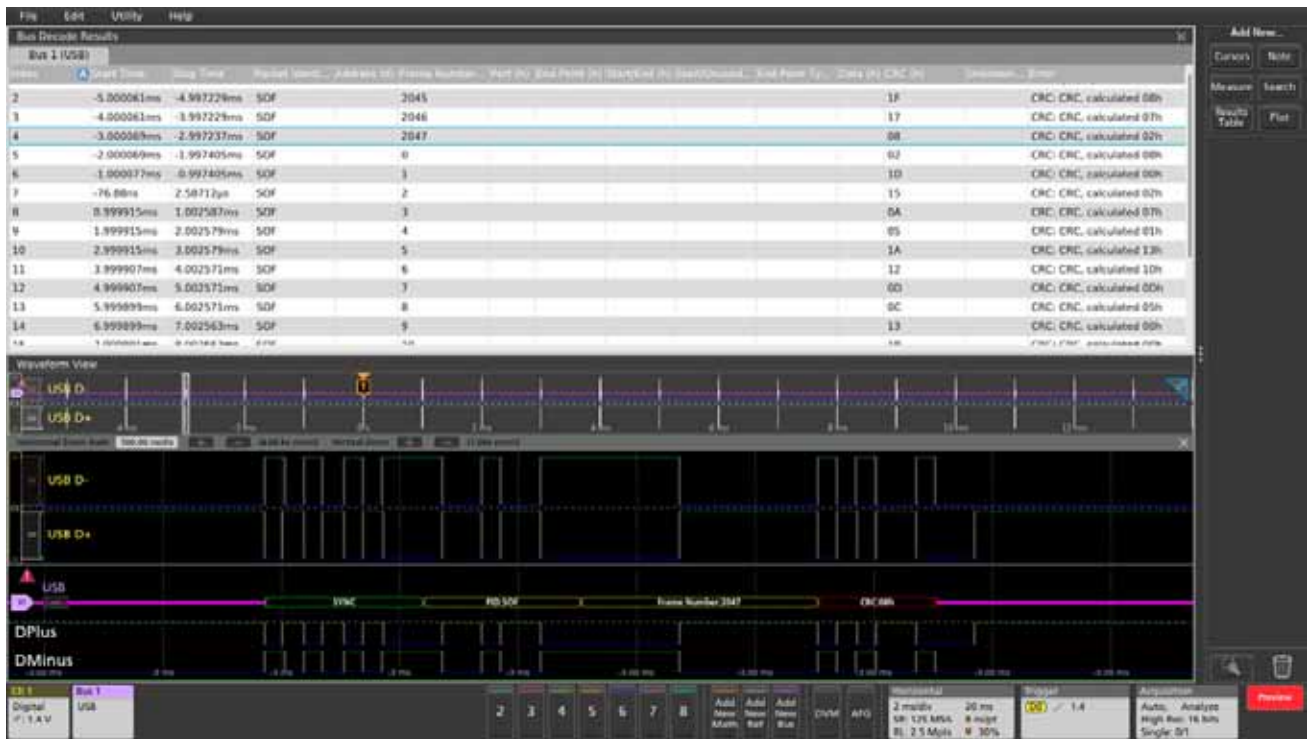


在鼠标移动时，鼠标会向主机请求应答一串数据字节，表明位置变化。



这种情况表明了 PC 与 USB 驱动器之间的全速 USB 2.0 业务。我们使用连接到一个 FlexChannel® 输入上的逻辑探头捕获信号。尽管示波器可以使用单端探头采集和解码速度较低的 USB 总线，但使用差分探头可以改善信号保真度及抗噪声能力，这对高速 USB 信号必不可少。

USB 2.0总线单元	表示方式
帧头	
同步字段	
包标识符指明包类型	
地址	
可以用十六进制或二进制显示数据值	
CRC用紫色框显示。 CRC错误用红色框显示	
帧尾	



对固件工程师，结构表格式可能更实用。工程师可以简便地对比这种带时间标记的总线活动画面与软件列表，简便地计算执行速度。

结果表还可以向回链接到波形画面，轻触表格画面的一条线，示波器会自动放大对应的总线信号和得到的解码后的总线波形，并显示在屏幕的下方。



触发 USB 2.0 总线

在调试或验证设计时，我们还要设置示波器，隔离、捕获和显示关心的特定总线事件。

在本例中，我们使用一只差分探头，探测 PC 与高速 USB 内存设备之间的 USB 扩展电缆。示波器触发开头为 16 位十六进制 12 01 的数据包。

示波器可以触发下述 USB 总线单元：

触发	说明
同步	同步字段
握手包	指定任意以下类型：Any, ACK, NAK, STALL, NYET
特殊包	指定任意以下类型：Any, ERR, SPLIT, PING, RESERVED
错误	指定任意以下类型：PID校验位, 令牌CRC5, 数据CRC16, 或位填充
令牌(地址)包	指定任意以下类型：Any, SOF, OUT, IN, SETUP
数据包	指定任意以下类型：Any, DATA0, DATA1, DATA2, MDATA, 最多16字节数据码型
复位	
暂停	
恢复	
包尾(EOP)	



搜索 USB 2.0 总线

在泰克示波器上，可以配置 Wave Inspector，自动搜索和标记触发中指定的相同事件。例如，Wave Inspector 可以搜索整个采集，查找地址为十六进制 00 的 SETUP 令牌包的每个时点。在本例中，Wave Inspector 找到两次指定的总线事件。通过使用 Wave Inspector 前面板上的 Navigate 按钮在事件之间跳转，我们可以简便地查看每个标记的事件。



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

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

北京市海淀区花园路4号
通恒大厦3楼301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

如需更多资源，敬请访问 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。

06/18 EA 55C-61092-1

