

## TDR 阻抗测量： 信号完整性的基础



### ► 简介

随着数字系统设计人员在计算机、通信系统、视频系统和网络系统中开发的时钟频率和数据速率越来越高，信号完整性正变得愈发重要。在当前的高工作频率下，影响信号上升时间、脉宽、定时、抖动或噪声内容的任何事物都会影响整个系统的可靠性。为保证信号完整性，必需了解和控制信号经过的传输环境的阻抗。阻抗不匹配和偏差可能会导致反射，在整体上降低信号质量。

阻抗容限是当前许多数字系统元器件电子规范的一部分，包括Rambus(、USB 2.0 (通用串行总线)、Firewire (IEEE 1394 标准) 等规范。业内普遍使用建模工具设计高速电路。建模加快了设计周期，最大限度地减少了错误数量。但是，在建立了模型之后，必须对硬件进行测量来检验建模设

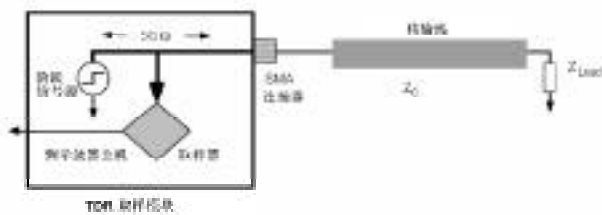
计，包括阻抗测量。在阻抗测量中，首选的方法是时域反射计(TDR)，它采用高性能仪器，如配有 80E04 TDR 取样模块的TDS8000示波器来实现。TDR允许在时域中分析信号传输环境，就象在时域中分析数据信号的信号完整性一样。

## 使用 TDR 帮助解决信号完整性问题

### ► 应用文章

#### 什么是时域反射计？

时域反射计(TDR)用来测量信号在通过某类传输环境传导时引起的反射，如电路板轨迹、电缆、连接器等等。TDR 仪器通过介质发送一个脉冲，把来自“未知”传输环境的反射与标准阻抗生成的反射进行比较。图 1 是简化的 TDR 测量方块图。



► 图 1. TDR 电路结构图

TDR 显示了在沿着一条传输线传播快速阶跃信号时返回的电压波形。波形结果是入射阶跃和阶跃遇到阻抗偏差时产生的反射的组合。

#### 反射系数：数学计算

TDR 测量的数学基础很简单，但十分重要。从本质上看，TDR 测量基于一系列阻抗比率。大多数 TDR 测量将在内部执行必要的比率计算，显示一个数字结果。TDR 测量以反射系数(ρ)表示。系数(ρ)是反射的脉冲幅度与入射脉冲幅度之比：

$$\rho = \frac{V_{\text{reflected}}}{V_{\text{incident}}}$$

对固定终端 $Z_L$ ，还可以用传输线特性阻抗 $Z_0$ 和负载阻抗 $Z_L$ 表示：

$$\rho = \frac{V_{\text{reflected}}}{V_{\text{incident}}} = \frac{(Z_L - Z_0)}{(Z_L + Z_0)}$$

在有了这些公式以后，如果我们插入表示阻抗匹配负载、短路和开路负载的数值，那么我们可以看到(的取值范围位于 +1 和 -1 之间，其中 0 表示阻抗匹配负载。在 $Z_L$ 等于 $Z_0$ 时，负载匹配。反射波 $V_{\text{reflected}}$ 等于 0 时，也等于 0，这时没有反射。

$$\rho = \frac{V_{\text{reflected}}}{V_{\text{incident}}} = \frac{0}{V} = 0$$

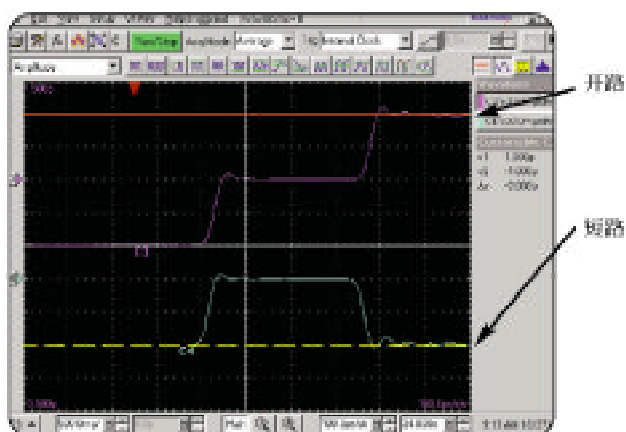
$Z_L$  为零(0)表示发生短路。反射波等于入射波，但极性相反。如下面的公式所示，反射波取消了部分入射波，(值为 -1。

$$\rho = \frac{V_{\text{reflected}}}{V_{\text{incident}}} = \frac{-V}{V} = -1$$

在 $Z_L$ 无穷大时，表示发生开路。反射波等于入射波，极性相同。如下面的公式所示，反射波加强了部分入射波，(值为 +1。

$$\rho = \frac{V_{\text{reflected}}}{V_{\text{incident}}} = \frac{V}{V} = 1$$

图 2 是 TDS8000 示波器的实际 TDR 波形显示。轨迹中明确显示了上述数学概念。



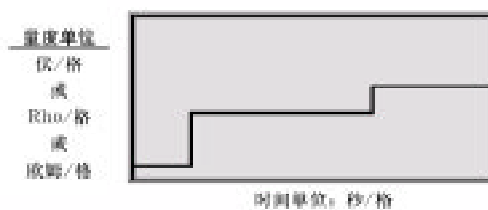
► 图 2：时域测量显示了一个开路和短路的阶跃。短路测量结果为 -1 (rho)，开路(无穷大欧姆)测量结果为  $\rho = +1$ 。

计算传输线和负载的阻抗

可以使用(值计算特性阻抗  $Z_0$  或负载阻抗  $Z_L$ ：

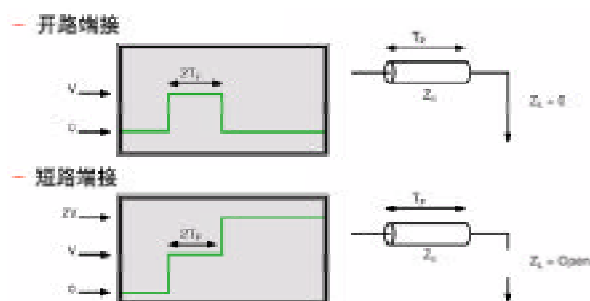
$$Z_0 = Z_L * \frac{(1 + \rho)}{(1 - \rho)}$$

在当前大多数支持 TDR 功能的仪器中，如 TDS8000 取样示波器中，可以在垂直量度标尺上，以伏特、欧姆或 (rho) 为单位显示 TDR 测量结果。水平轴则表示时间单位，如图 3 所示。

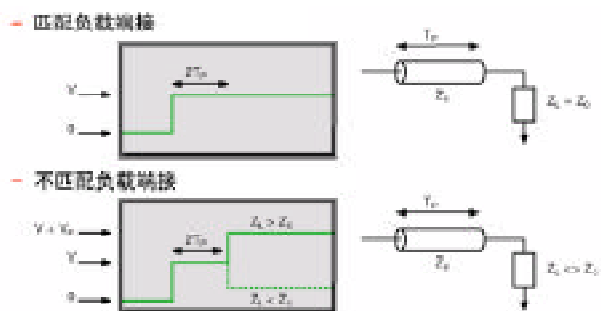


► 图 3: TDR 波形简图

通过 TDR 技术，可以观察和描绘其它汇总效果和分布效果。图 4 到图 8 说明了通过各种阻抗和端接获得的理想的 TDR 结果。



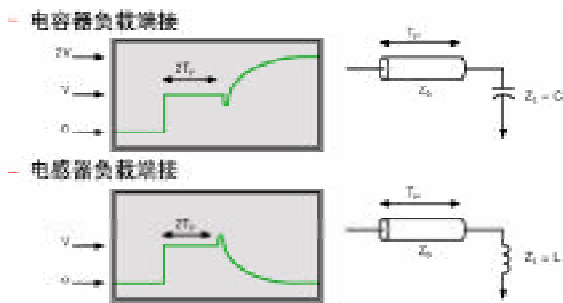
► 图 4: 短路和开路端接



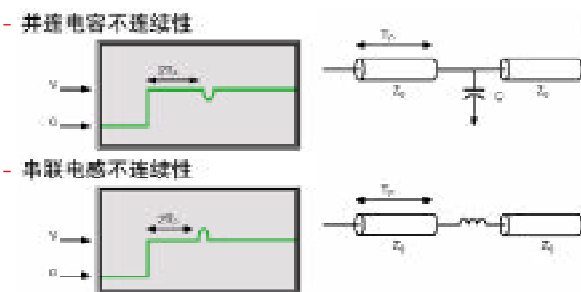
► 图 5: 匹配的和 mismatch 的负载端接

## 使用 TDR 帮助解决信号完整性问题

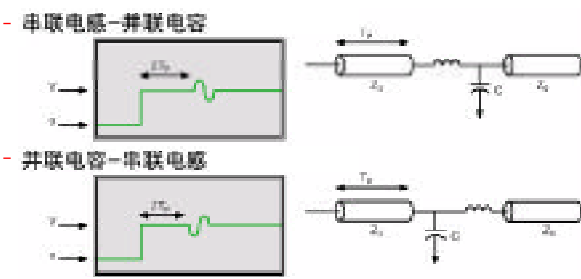
### ► 应用文章



► 图 6: 电容和电感负载端接



► 图 7: 电容和电感不连续



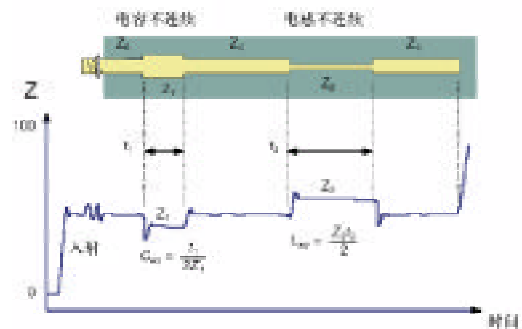
► 图 8: 混合电容和电感负载

### 考察实际的电路特点

一般来说，蚀刻电路板带有控制阻抗的微带和带状传输线。在这些传输线的跨距中，元器件、通路、连接器和其它“中断”会生成阻抗不连续点。这些不连续点可以作为电感器、电容器和传输线建模。

如图9所示，TDR波形显示了所有阻抗不连续点产生的所有反射效应。波形就象是轨迹中阻抗偏差的一张道路图。现在，可以评估波形，确定阻抗与额定值的偏差程度。某些支持TDR功能的仪器，如TDS8000示波器和80E04 TDR取样模块，提供了扩展的数学功能，可以计算实际的元器件值及沿着传输线距相关点的物理距离。

在图9中，波形是理想脉冲沿着传输介质传导的结果。TDR取样模块如80E04可以生成非常精确的控制脉冲，且具有快速上升时间和最小畸变。想象一下，沿着相同的传输路径发送一个典型的数据波形！数据脉冲自身的畸变将以不可预测的方式与不连续点相互影响。这种情况本身会导致不稳定的间歇性问题。通过TDR测量确定环境特点(然后校正不连续点)，可以明显改善信号完整性。



► 图 9: TDR 波形揭露了轨迹不连续点

## TDR 分辨率因素

我们已经知道，TDR 测量可以有效地考察电路阻抗和信号完整性。但是，并不能以“一刀切”的方式创建 TDR 解决方案。许多因素影响着 TDR 系统可以分辨的最小的不连续点的距离间隔的能力。

如果 TDR 系统的分辨率不足，那么间隔很小或间隔紧密的不连续点可能会平滑地转化成波形中的一个畸变。这种效应不仅可能会隐藏某些不连续点，而且可能会导致阻抗读数不精确。上升时间、建立时间和脉冲畸变可能会明显影响 TDR 系统的分辨率。

### 上升时间

阻抗不连续点的表现之一是上升时间等于或更可能长于（慢于）入射阶跃。电路中任意两个不连续点之间的物理间隔决定了在 TDR 波形上彼此之间相对反射位置的接近程度。如果它们的之间的距离不到系统上升时间的一半，那么测量仪器可能区分不出两个相邻的不连续点。下面的公式说明了这一概念。

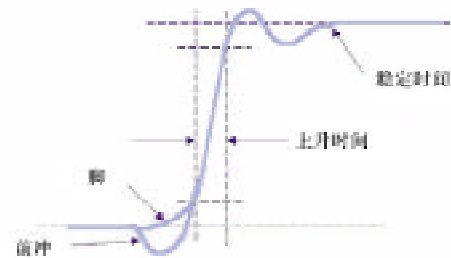
$$T_{(\text{resolution})} = 1/2 T_{R(\text{system})}$$

### 提前畸变

这是在主要入射阶跃之前发生的畸变，提前畸变特别讨厌，因为它们到达不连续点，在主要阶跃到达之前开始产生反射。这些早期反射隐藏了间隔紧密的不连续点，降低了分辨率。

### 建立畸变

稳定畸变是指在入射阶跃之后发生的畸变，如瞬变（图 10），这将导致反射中发生相应的畸变。这些畸变很难与测试的设备 (DUT) 不连续性导致的反射区分开来。注意，TDR 仪器阶跃发生器中的畸变和取样器阶跃响应中的畸变产生的影响几乎完全相同。



## TDR 精度因素

许多因素影响着 TDR 测量的精度，包括 TDR 系统的阶跃响应、互连反射和 DUT 损耗、阶跃幅度精度、基线校正和测量中使用的参考阻抗的精度 ( $Z_0$ )。

### 参考阻抗

所有 TDR 测量都是相对的，它们通过比较反射的幅度与入射幅度得出。现代 TDR 仪器执行所有计算，比较入射幅度和反射幅度，以  $\rho$  或  $\text{ohm}$  直接表示结果。但是，这一过程仍取决于参考阻抗的精度 ( $Z_0$ )。对 TDR 应用，TDS8000 示波器采用高精度 3.5 mm 空气线连接器作为稳定的阻抗参考基准，来计算  $\rho$  和  $\text{ohm}$ 。在模块校准过程中，将针对外部可跟踪的高精度空气线测量连接器的阻抗。

## 使用 TDR 帮助解决信号完整性问题

### ► 应用文章

#### 阶跃幅度和基线校正

一般来说，现代 TDR 仪器测量和 / 或校准入射阶跃幅度，根据已知的阶跃幅度和基线电平，计算毫  $\rho$  和  $\Omega$ 。通过在取样模块中置入一条已知空气线，TDS8000 示波器向前推进了一步。之后它会定期监视基线和入射阶跃幅度。这样，可以自动补偿系统，允许即使在阶跃幅度偏置漂移的情况下实现可重复性非常强的测量。

#### 入射阶跃畸变

入射阶跃畸变导致的最明显问题是，如果在相对于测量的线路很短的时间内脉冲没有稳定，那么则不能精确地测量反射阶跃幅度。这类错误只对阻抗明显不同于 50 欧姆的 DUT 阻抗特别重要。在这种情况下，精度在很大程度上取决于反射阶跃幅度精度。阻抗越靠近 50 欧姆，精度越取决于反射阻抗，因为反射很小。

可能导致问题的第二类畸变是阶跃之前的“脚”或前冲。如果 DUT 在末端存在开路，那么阶跃的这一部分将在看到阶跃明显上升边沿之前反映开路。这将在接近测量线路的末端导致错误。

低频阶跃畸变会引起更加错综复杂的效应。这些畸变可以在轨迹中显示为一个斜坡，甚至使用一个完美的 50 欧姆端接代替 DUT。如果没有在测量参考阻抗的同一时间内测量 DUT，那么这会导致 50 欧姆电平偏置。

#### 噪声

在测量小的阻抗偏差时，随机噪声会成为一个重大的误差源。幸运的是，现代仪器可以执行信号加权平均，降低随机噪声的影响。许多仪器的缺点是加权平均可能会明显放慢处理速度，特别是在显示自动测量结果时。TDS8000 示波器内置多部处理器，可以分担处理工作负载，解决了这个问题。

#### 互连精度和反射

如果使用的探头电缆很长，在测量相对于电缆末端的 DUT 阻抗时要非常谨慎，以降低电缆损耗的影响。但是，在这种情况下，电缆阻抗直接影响着测量精度。参考电平将移动电缆的  $\rho$  ( $\rho_{\text{cable}}$ )，DUT 上的入射阶跃幅度将为  $(1 - |\rho_{\text{cable}}|)$ 。为实现最大精度，可以测量这些参数，计算其阻抗。

互联元件和探头到 DUT 接口反射也会导致问题。探头接口可能会产生大的电感反射，在进行精确测量前必须稳定电感反射。尽量缩短探头触点和地线的长度非常重要，以使这些问题达到最小。

#### 电缆损耗

测试设置中的电缆损耗可能会导致多个问题。尽管可能会同时发生导线损耗和绝缘体损耗，但导线损耗通常占大多数。导线损耗是由电缆中金属导线的有限阻抗导致的，由于集肤效应，导线损耗会随着频率一起提高。在进一步考察电缆时，这一递增串联阻抗结果的阻抗值会明显提高。因此，在使用长的测试电缆时，DUT 阻抗看上去要高于实际值。

第二个问题是入射脉冲到达电缆末端的时间会使其上升时间和稳定时间降级。这影响着分辨率和精度，因为入射阶跃的有效幅度不同于预期幅度。在 DUT 阻抗接近 50 欧姆时，这种阻抗不精确不会引起大的误差，但是对较大或较小的阻抗，误差可能会很大。



通过使用延长电缆,使取样头更靠近DUT,可以使导线损耗达到最小。如果不可能使用这种方法,那么则可以采用比较反射技术之类的方法,帮助解决问题。该技术的实例如下:

- 用已知标准阻抗的空气线代替DUT。测量在使用这条空气线时的实际阻抗读数。这种测量提供了一个可以用于下一步骤中的偏置值。这个偏置值量化了在DUT之前互连单元的影响。
- 在DUT本身的所有后续测量中加上或减去偏置值。
- TDS8000示波器等支持TDR功能的仪器具有杰出的线性能力,保证了在使用标准空气线或DUT时,阶跃信号经历完全相同的信号源、互连和取样器不完整性。

比较反射方法大大改善了 和阻抗测量的绝对精度。

#### 控制上升时间

尽管在许多情况下,用户希望最快的上升时间,但在某些情况下,极快的上升时间在TDR测量中会给出误导性结果。例如,在使用上升时间为35 ps的系统测试电路板上微带的阻抗时,会提供完美的分辨率。但是,即使当前使用的最高速的逻辑家族也不能一开始就与35 ps的TDR阶跃上升时间相匹配。典型的高速逻辑家族如ECL,输出上升时间在200 ps到2 ns之间。小的不连续性,如微带中的短线或锐角转角,会变得非常明显,在35 ps上升时间时可能会产生大的反射。上升时间为1 ns的ECL栅在实际运行中驱动的不同传输线可能会产生非常小的可以忽略不计的反射。

测量和现实之间的这种差异可能会引发信号完整性问题。在试图校正误导性阻抗读数时,用户可能会损害实际操作信号所需的环境。用户通常会首选查看传输线对类似于实际电路操作的上升时间的TDR反应。

某些TDR仪器为提高入射阶跃的明显上升时间提供了一种手段。TDS8000取样示波器采用双矩形波串平均技术实现过滤,它相当于在波形外面缠上一个三角形脉冲。它使用活动波形数学执行过滤,以接近实时的方式显示过滤的响应。这种技术提供了过滤的全“活动”波形,应变迅速,不要求任何额外的校准步骤。过滤的波形结果与使用外部发生器发生同等脉冲所作的类似测量非常一致。

#### 差分TDR测量

许多高速设计是通过差分传输线实现的。这种方法提供了许多优点,但必需进行TDR测量,以支持信号完整性。

上面讨论的所有单端TDR测量概念也适用于差分传输线。但是,必须扩展这些概念,以有效地测量差分阻抗。

差分传输线具有两种独特的传播方式,每种方式都具有自己的特性阻抗和传播速度。大多数资料把这两种方式称为奇模阻抗和偶模阻抗。

- 奇模阻抗被定义为通过监测一条线路,而另一条线路通过补充信号驱动而测量的阻抗。
- 差分阻抗是指在差分驱动线对时在两条线路中测量的阻抗。差分阻抗是奇模阻抗的两倍。
- 偶模阻抗被定义为通过监测一条线路,而另一条线路先通过同等信号驱动而测量的阻抗。
- 共模阻抗是指并连在一起的线路的阻抗,是偶模阻抗的二分之一。

## 使用 TDR 帮助解决信号完整性问题

### ► 应用文章

把一条差分线路中的两条导线捆在一起，然后使用传统的单端TDR系统驱动导线，可以有效地测量共模阻抗。但是，共模阻抗的重要程度通常要低于差分阻抗。

为提供真正的差分阻抗测量功能，80E04 TDR取样模块为两条通道中的每条通道提供了一个极性可选的TDR阶跃。通过这种方法，可以在实际操作中差分驱动差分系统，就象 DUT 在预期的应用中运行一样。模块单独捕获差分线路每一侧的响应，并作为一个差分量进行评估。

这两条取样器通道都必须具有匹配的阶跃响应。两个阶跃还必须匹配而且互补，必须在 DUT 上对阶跃作时间调整。TDS8000 示波器在一个包含公共时钟源的取样模块中，提供两条采集和极性可选的 TDR 通道，满足了这些要求。两个阶跃发生器的相对定时可以进行抗扭曲处理，以在 DUT 上精确地调整两个阶跃，去掉因布线导致的任何不匹配。

通过使用互补入射阶跃设置 TDR 系统，并使用欧姆单位将两条通道相加，可以产生差分阻抗。单独的轨迹提供了奇模阻抗。如果线路不平衡，那么两条轨迹不会完全匹配。

#### 阶跃发生器抗扭曲处理

真正的差分 TDR 测量要求激励系统和采集系统在定时和阶跃响应方面很好地匹配。系统设计中可以固定步时响应。但是，两条通道的相对定时通常是可以调节的。采集定时和TDR阶跃定时必须匹配，以产生有效的TDR测量结果。但是要注意，匹配要求取决于DUT，而不是仪器的前面板。即使在仪器的前面板上进行调节，但电缆或互连设备与 DUT 匹配程度差，仍会使 TDR 阶跃到达 DUT 时发生时间扭曲，进而导致明显的测量误差。

消除或减少这种问题的最有效方式是最大限度地减少互连长度，并使用认真匹配的电缆。在TDS8000示波器中，取样头距大型机的距离可以延长到2米，而不会造成任何性能损害。这有助于最大限度地降低电缆长度及相关的不匹配、损耗、离散和其它误差。

采集路径的抗扭曲处理也非常重要，在TDS8000示波器中，在使用TDR Setup菜单中的抗扭曲控制功能时，阶跃发生器的定时也可能发生相对扭曲。通过查看两个通道的TDR响应，来设置阶跃发生器的定时可能会很难；正确的设置并不是一直都很明显。但是，不平衡轨迹实时显示了这种定时不匹配的影响。通过观察不平衡轨迹，可以简便地调节定时，因为它实时显示了不匹配的影响。

这种抗扭曲方法对涉及的采集也很重要。在TDS8000示波器中，一个取样模块中的两条通道本身匹配得很好，因为它们是从同一个公共时钟源驱动的。



## 静电注意事项

高带宽取样头对静电非常敏感。为了在阻抗和信号完整性应用中保证连续的性能，它们要求在设备的上方提供保护设备，来为传统示波器提供保护。在使用任何高带宽取样模块时，应遵守下述基本指导原则。

- 在不用时盖好取样输入。
- 在接触模块时，应使用小于 10 Mohm 的接地腕带。
- 为防止可能会探测已充电的设备 应在探测设备或把设备连接到模块之前，一直对设备放电。把探头地线或手指（假设您已经使用腕带）接触希望进行 TDR 测试的点，可以完成放电。SIU800 静电隔离单元采用微波继电器执行这种功能。通过这种单元，DUT 电缆连接到接地上，直到踏下脚踏开关和继电器开关，把 DUT 连接到 TDR 输入上。

## 探头和接口备选方案

从同轴电缆 50 欧姆电缆环境到电路板微带的电子接口可能会在到达被测试设备理想的 50 欧姆路径中产生局部干扰。用户希望使这种干扰达到最小，但同时还必须考虑成本和方便性。下面是常用的备选方案。

### P6150 探头和触点装置

许多制造商使用 P6150 探头，因为它使用方便，而且是市面上流行的产品。可以把这种探头指定为测试站标准的可重复部分。50 欧姆探头电缆由异常柔软的材料制成。

## SMA 板激励装置

- 同轴电缆厂商提供。
- 必须设计和安装在电路板上。
- 提供了质量和重复能力最好的接口。
- 最适合于高频测试。

## 可重复性问题

测量精度的重要组成部分是可重复性问题。在不同时间对同一部分进行的测量应产生相同的结果。尽管这种可重复性并不能保证测量精度，但是如果缺少它，精度会成为一句空话。多种因素影响着可重复性：

- 探头和夹具技术和稳定性。
- 电缆和连接的情况 / 质量。
- 测量程序。
- 仪器情况和校准。

### 应用实例：在 USB 2.0 设备上耦合 TDR 测量

#### 背景

随着 USB 2.0 速度的提高，信号完整性要求已经进一步扩大。因此，人们日益关注阻抗测量及 USB 电缆和设备内部的阻抗偏差所产生的影响。配有 80E04 取样模块的 TDS8000 取样示波器为支持信号完整性、进行阻抗测量提供了一个通用解决方案。

通过一条屏蔽双绞线（差分）电缆，完成高速 USB 2.0 连接，电缆的特性阻抗为：

$$\begin{aligned} Z_{\text{odd}} &= 45 \quad (Z_{\text{diff}} = 90) \pm 15\% \\ Z_{\text{even}} &= 60 \quad (Z_{\text{cm}} = 30) \pm 30\% \end{aligned}$$

最大单向延迟为 26 ns (TFSCBL)。在收发器和相关连接器之间运行的 D+ 和 D- 电路板轨迹的额定差分阻抗也应该是 90 欧姆。

## 使用 TDR 帮助解决信号完整性问题

### ► 应用文章

#### TDR 负载规范

处于高速空闲状态的收发器的交流负载规范使用差分 TDR 测量指定。

这些测量控制着端口连接器允许的最大传输线不连续性、从连接器到收发器的交连引线、收发器包装和收发器 IC 本身。在带有捕获电缆的高速设备的特殊情况下，测量中还包括电缆组装件的传输线不连续性。

在差分 TDR 仪的入射上升时间设为 400 ps 时，必须满足下述规范。必需指出的是，所有时间都是 TDR 上“显示”的时间，因此是“往返时间”。

在连接器参考时间之后，将在特定的测量时间使用 TDR 测量端接阻抗 (ZHSTERM)。通过把 TDR 连接从端口连接器上断开，然后注意开路阶跃的时间，可以确定连接器参考时间。对“A”连接器，测量时间是连接器参考位置后 8 ns。

对“B”连接器，测量时间是连接器参考位置后 4 ns。差分端接阻抗必须是：

$$80 \leq Z_{HSTERM} \leq 100$$

通过阻抗 (ZHSTHRU) 是从连接器参考位置之前 500 ps 到端接阻抗规范决定的时间所测量的阻抗。

$$70 \leq Z_{HSTHRU} \leq 110$$

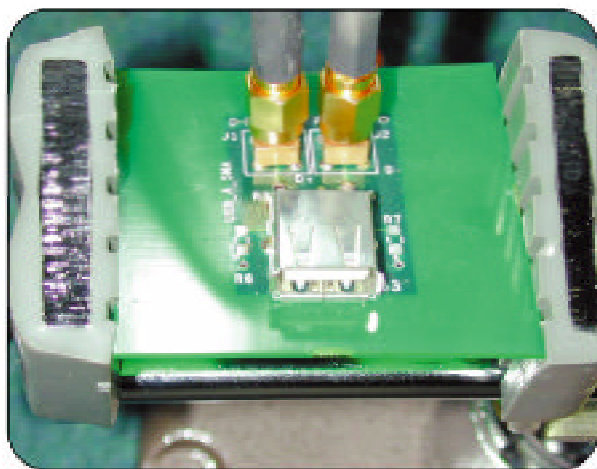
在异常窗口 (通过阻抗时间窗口内部的一个滑动的 1.4 ns 窗口) 中，差分阻抗可能会超过通过限制。但是，任何一个偏移超过通过限制的时间均不得超过 TDR 阶跃上升时间 (400 ps) 的两倍。

在带有捕获电缆的高速设备的特殊情况下，必须满足相同的规范，但必须通过捕获电缆装配件完成 TDR 测量。在这种情况下，确定连接器参考时间可能比较困难，因为可能并不能随时从测试的端口中移出电缆。这要求具体设备的测试仪通过任何方式来确定连接器参考位置。

如需与这些 TDR 要求和测量条件有关的更多细节，请参阅通用串行总线规范标准第 2.0 修订版 1。

带有 80E04 取样模块的 TDS8000 示波器可以显示一条差分线路的单独正负 TDR 波形。通过这一解决方案，用户可以查看反射特点，直接测量每条导线的阻抗或差分线路的共模阻抗。这种测试系统还可以显示这两条线路的真正差分测量结果，并以欧姆显示这些结果，为用户检验任何 USB 设备提供了所需的测量功能。

注 1: 通用串行总线 2.0 规范 ([www.usb.org/developers/usb20](http://www.usb.org/developers/usb20))



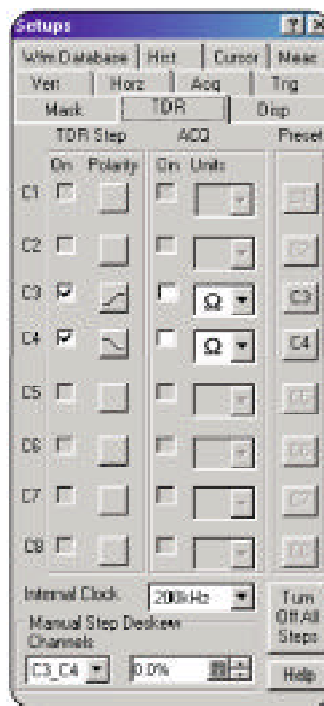
► 图 11：在符合 USB 2.0 规范的元器件上进行 TDR 测量使用的 SMA 固定装置

## USB 2.0 阻抗测量程序

### 连接 DUT

可以通过可断裂板完成这一连接，可断裂板在一端提供了 SMA 连接，在另一端提供了一个 USB 连接器。可断裂板应为差分线路的每条线路提供一个 SMA 连接器，如图 11 所示。

把 SMA 电缆的另一端连接到 TDS8000 示波器上安装的 80E04 20-GHz TDR 取样模块上。在使用任何快速取样模块时，一定要遵循严格的防静电程序。



► 图 12: TDR SETUP 菜单

启动 TDR 波形，生成差分阶跃脉冲

在 TDS8000 示波器的 TDR Setup 菜单中：

- 预先设置关联的通道，在本例中是 Ch 3 和 Ch 4，如图 12 所示。
- 选择欧姆( $\Omega$ )作为显示单位。
- 改变其中一条通道的极性，生成一个差分阶跃。

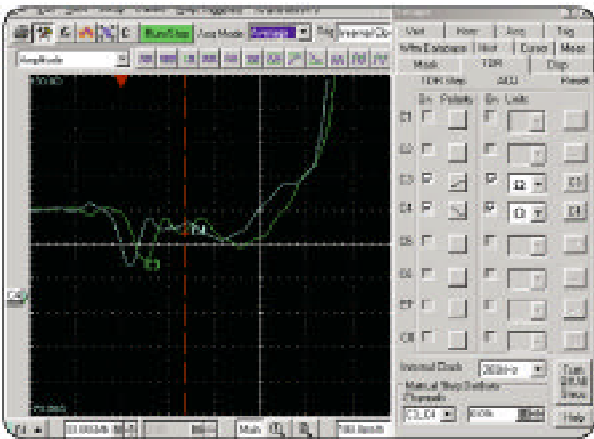
用户可能还希望在 Display 菜单中启动 Vectors，然后从 Oscilloscope 工具条上启动 Averaging。

注意在 TDR 菜单中选择负极时，阶跃发生器会生成一个负向阶跃，这时没有倒置取样通道。还要注意，在选择单位是伏特时，用户会看到阶跃趋向于负，而在以  $\rho$  和欧姆为单位时，阶跃显示为正。

为理解这一概念，记住  $\rho$  的定义：它是反射的电压除以入射电压，因此与入射阶跃的正负号无关。这在物理上也说明了一个道理，即反射系数的正负号表明了阻抗是大于还是小于参考阻抗，而不是“负阻抗”。

## 使用 TDR 帮助解决信号完整性问题

### ► 应用文章



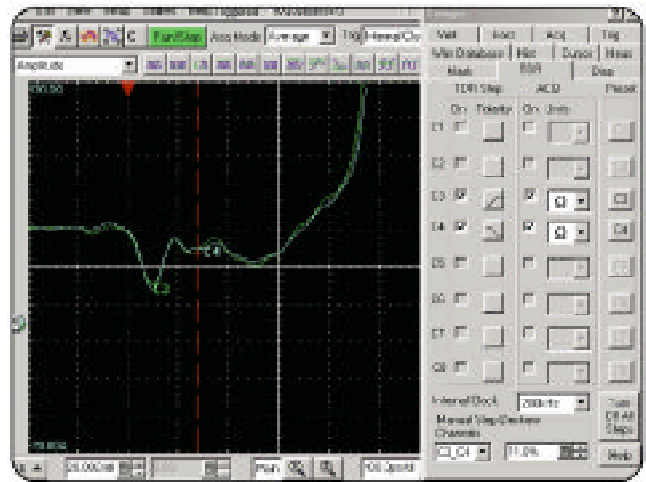
► 图 13: 抗扭曲调整前的差分 TDR 轨迹

#### 定位相关区域

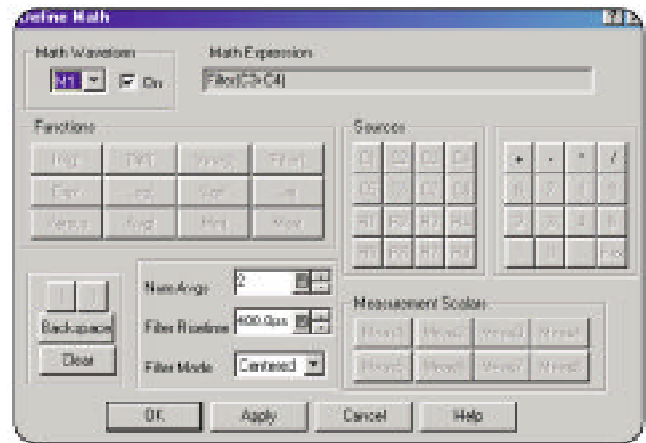
使用 Horizontal 控件和 Vertical 控件，显示要求的分辨率。这里，我们已经调整了显示结果，因此它以打开的 USB 连接器为中心（图 13）。

#### 调节扭曲

在 TDR Setup 菜单中使用 Deskew 调节，对两条通道进行抗扭曲处理，这样在连接 DUT 的 USB 连接器处，可以对准这两条通道。结果如图 14 所示。



► 图 14: 进行抗扭曲调节后的差分 TDR



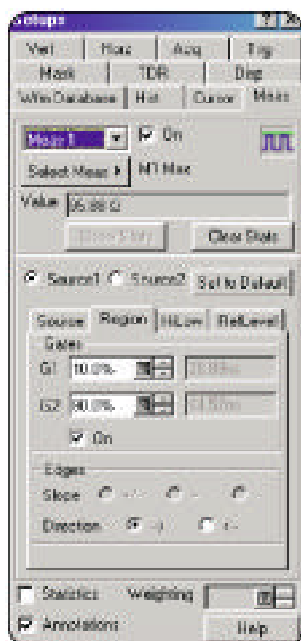
► 图 15: Define Math 菜单

#### 生成差分过滤波形

- 在 Math 菜单中(Windows(工具条中的 Edit 下或示波器工具条中的 math 图标)，选择 Filter，在 Filter Risettime 菜单中输入测试希望的上升时间(图 15)。USB 设备一般使用 400 ps。
- 在控制面板窗口上，使用 “+” 在数学上增加两条通道。为生成图 14 中显示的差分波形，启动 Math Waveform，选择 Apply。

## 使用 TDR 帮助解决信号完整性问题

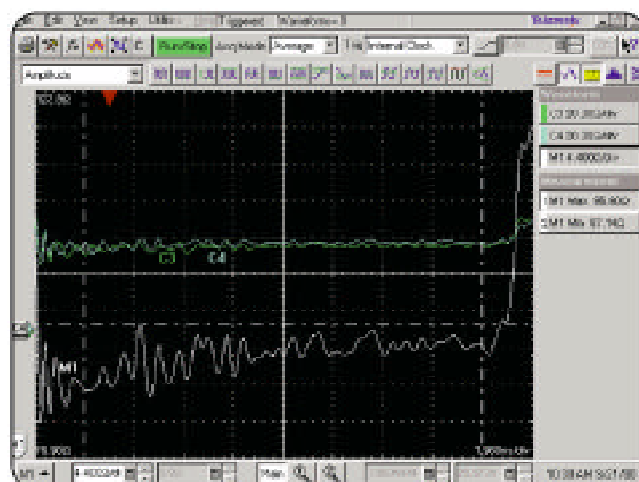
► 应用文章



► 图 16: Measurement 菜单

### 使用自动测量功能检验容限水平

- 从 Amplitude Measurement 工具条中选择 Max 和 Min 图标，启动这些测量功能。(一定要保证 M1 是选择的波形)
- 显示 Measurement Setup 菜单(图 16)，使用 Gates 为每项测量创建一个 Region。在本例中，对测量的区域将使用 10% 和 90% 的水平显示。用户还可能希望启动 Annotations，查看进行测量的确切位置。



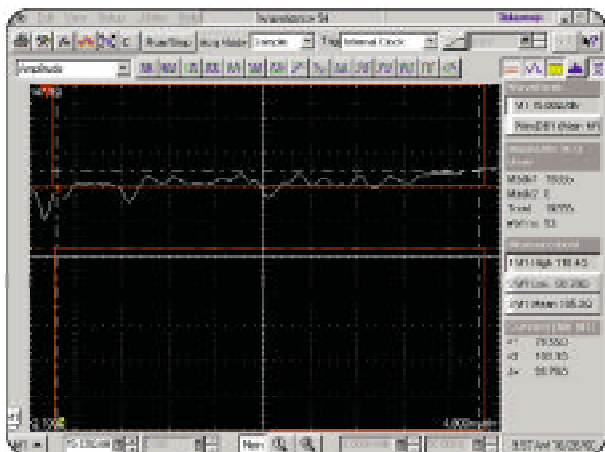
► 图 17: USB 2.0 阻抗测量，位于规范之内

### 检验是否符合 USB 2.0 规范

图 17 说明了一个 TDR 结果，其中测量的 Min 和 Max 位于 USB 差分规范（即 90( ( 15% ) 规定的容限之内。

## 使用 TDR 帮助解决信号完整性问题

### ► 应用文章



► 图 18: USB 2.0 阻抗测量，位于规范之外 (显示了模板)

现在看一下图 18，这是一个 TDR 结果，其中最大阻抗超过了 USB 规范。这个 TDS8000 示波器屏幕快照还包括一个用户模板集合，列明了 USB 规范的限制。通过使用模板，可以简便地确定可能会影响信号完整性的异常事件。

### 结论

随着系统时钟和数据速率的不断提高，信号完整性正成为越来越重要的问题。信号完整性的一个主要指标是信号传导时必须经过的环境的阻抗，如电缆、连接器、包装引线 and 电路板轨迹。结果，阻抗测量几乎已经成为每个高速设计项目的一部分。

时域反射计为描绘单端和差分传输线和网络的阻抗提供了一个方便强大的工具。TDR 仪器采用的原理是，传输线或网络中的任何变化都会引起反射，而反射则是不连续性量度的一个函数。具有 TDR 功能的现代仪器，如 TDS8000 示波器，可以自动比较入射幅度和反射幅度，提供阻抗、反射系数及共模阻抗和差分阻抗的直接读数。此外，仪器中内置的波形数学函数可以针对用户选择的上升时间自动显示 TDR 结果，从而可以查看 DUT 对其在终端应用中遇到的信号所作出的响应。通过采用一致的程序、防静电和良好的测量作法，用户可以获得精确稳定的 TDR 结果。



## 关于 TDS8000 取样示波器和 80E04 TDR 取样模块

### 高带宽、高精度，支持高速设备测量

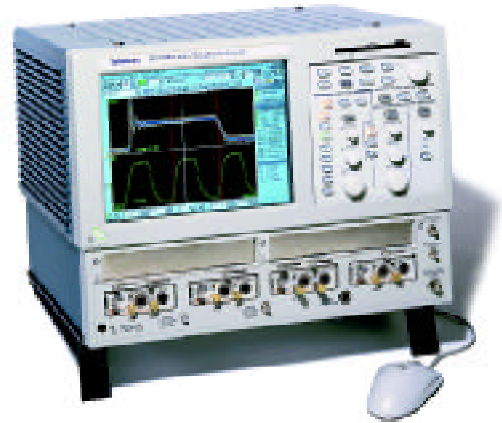
TDS8000 数字取样示波器的电子带宽达 50 GHz，为工程师精确地测量快速设计提供了所需的带宽。同样重要的是，TDR 的 80E04 电子取样模块提供了业内唯一真正的差分 TDR 测量功能。在这个取样模块中提供了两条完善的通道，这两条通道由同一个公共时钟源驱动，允许工程师完成阻抗测量，其精度要远远高于从单端 TDR 采集中获得的测量结果。

单端 TDR 系统依赖数学方法，而不是精确的测量，它们要求对测量设置作出限制。配以 14 位垂直分辨率（在取样器的动态范围中）和联机校正基线和阶跃幅度偏差的 rho 和 ohm，TDS8000 示波器可以精确地、可重复地测量 TDR 阻抗，确定印刷电路板、电缆、包装和互连的性能。

### 完整的连接能力

TDS8000 取样示波器可以开放地访问 Windows(操作系统)。尽管该仪器仍是一台专用示波器，但它能够访问 Windows 桌面，创造出—个强大的新型工具。写字板、画笔和网络浏览器等内置应用程序允许用户在运行仪器的同时保持实验室记录。这不仅节约了时间，还消除了与传输图像，以备日后编制报表和交流测量结果有关的容易出错的步骤。在仪器中还可以安装 TDA Systems Iconnect™ 等应用软件，实现 TDR 建模和采集。通过安装网络软件，则可以上网浏览信息、收发电子邮件、打印文档和共享文件。

此外，可以采用外部监视器扩展 TDS8000 示波器。在这种配置下，仪器保持实时的示波器显示，而出版、分析或浏览工具等应用程序则出现在外部显示器上。用户可以简便地把图像和波形数据从 TDS8000 示波器传送到本地运行的应用程序上，或者在使用示波器完成设计工作的同时查看网上参考信息。



► TDS8000 取样示波器



► 电子取样模块

### 标准接口

TDS8000 示波器为控制功能和外设扩展提供了标准接口。GPIB 命令集在很大程度上与其它 TDS 类仪器相同，但它提高了硬件和软件性能。TDS8000 示波器包括 USB 接口和 PS-2 接口，用于鼠标、键盘和其它外设的扩展。USB 具有热插拔的优点，可以在不关断电源的情况下插拔设备。TDS8000 示波器还为联网提供了一个局域网接口。

## 使用 TDR 帮助解决信号完整性问题

### ► 应用文章

#### 综合工具套件提供了卓越的测量和分析能力



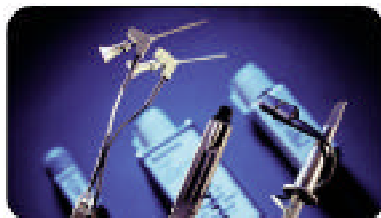
##### 示波器

不管是处理半导体、计算机、通信还是其它应用,泰克针对每种开发、测试或调试需求都提供了理想的示波器。



##### 逻辑分析仪

对需要调试和检验其设计的设计团队,泰克 TLA600 和 TLA700 系列逻辑分析仪提供了突破性的功能,可以捕获、分析和显示数字系统的实时行为。



##### 探头

泰克提供广泛的先进探头和互连设备,允许访问测试的设备,同时保持最大的信号逼真度。



##### 信号源

通过使用泰克先进的全系列任意波形发生器和逻辑源,您可以实现优异的控制能力、灵活性、重复能力和精度,把设计推向性能和可靠性极限。

#### 泰克科技(中国)有限公司

##### 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) 6235 1210/1230  
传真: (86 10) 6235 1236

##### 泰克上海办事处

上海市静安区延安中路841号  
东方海外大厦18楼  
邮编: 200040  
电话: (86 21) 6289 6908  
传真: (86 21) 6289 7267

##### 泰克广州办事处

广州市环市东路403号  
广州国际电子大厦2807A室  
邮编: 510095  
电话: (86 20) 8732 2008  
传真: (86 20) 8732 2108

##### 泰克深圳办事处

深圳市罗湖区深南东路5002号  
信兴广场地王商业大厦G1-02室  
邮编: 518008  
电话: (86 755) 8246 0909  
传真: (86 755) 8246 1539

##### 泰克成都办事处

成都市人民南路一段86号  
城市之心23层D-F座  
邮编: 610016  
电话: (86 28) 8620 3028  
传真: (86 28) 8620 3038

##### 泰克西安办事处

西安市东大街  
西安凯悦(阿房宫)饭店322室  
邮编: 710001  
电话: (86 29) 8723 1794  
传真: (86 29) 8721 8549

##### 泰克香港办事处

香港铜锣湾希慎道33号  
利园3501室  
电话: (852) 2585 6688  
传真: (852) 2598 6260

#### 如需进一步信息

泰克一直在全方位地、持之以恒地收集应用注释、技术简介和其它资源,以帮助工程师开发尖端技术。

请访问 [www.tektronix.com](http://www.tektronix.com) 网站上的“Resources For You”。