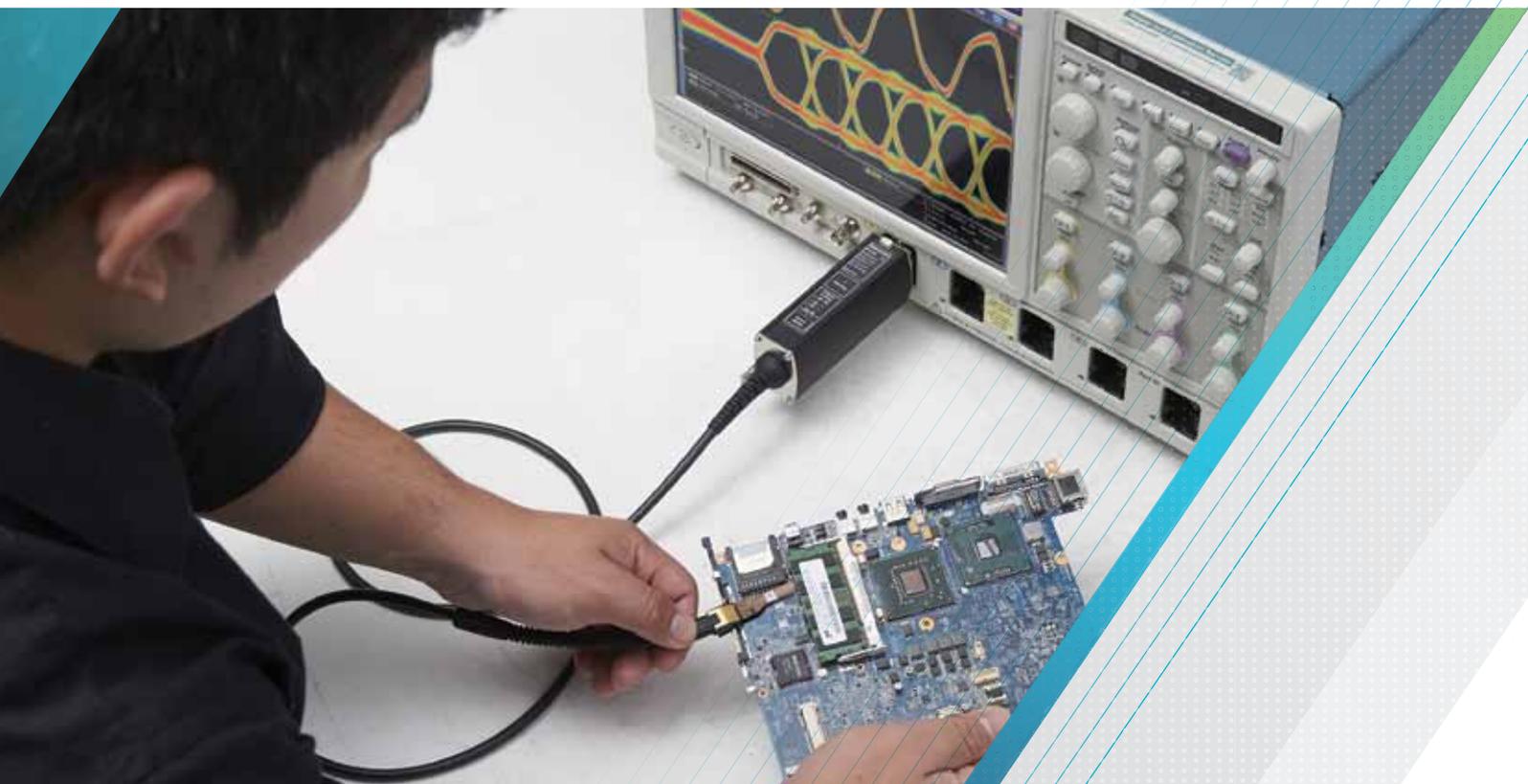


# 高性能设计和测量探测小贴士

应用指南



**Tektronix**<sup>®</sup>

## 目录

探头负载基础知识 .....	3	仿真探头负载 .....	9
高频（HF）电路探头设计考虑因素 .....	4	把探头连接到器件时的挑战 .....	12
P7700 探头尖端芯片技术.....	6	捕获单端信号和差分信号 .....	14
高性能探头设计折衷因素及其影响 .....	6	接地还是不接地？ .....	14
探测实例 1：高速串行 .....	7	单端 – 应该使用什么输入？ .....	14
探测实例 2：低功率串行总线及源阻抗开关 .....	8	总结 .....	15

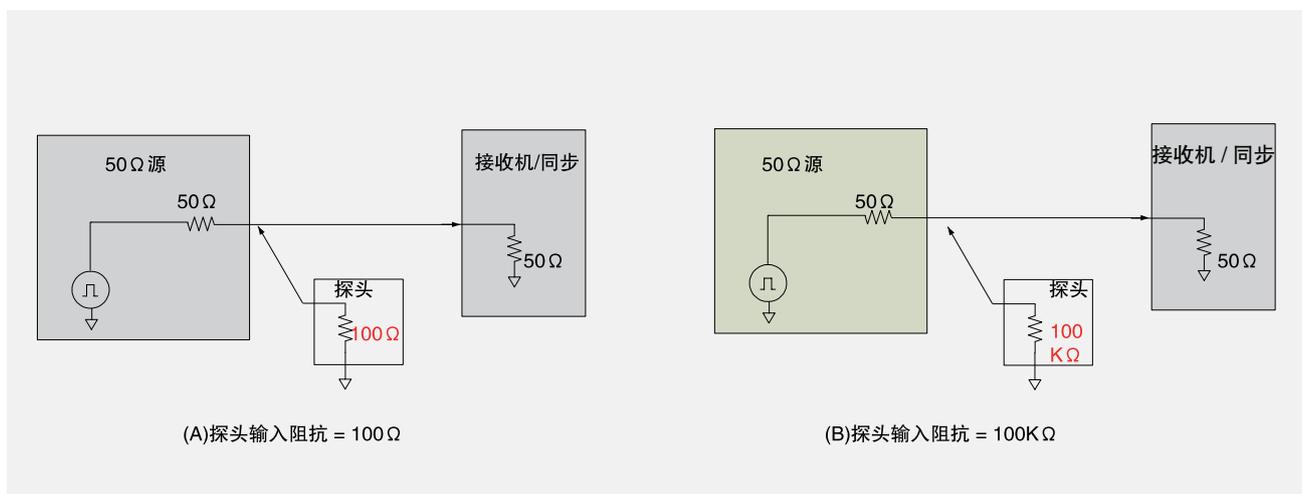


图 1. 探头负载取决于探头的输入阻抗及电路对这种阻抗的灵敏度。

在需要检验高性能系统或元器件时，它通常要求连接示波器。对高速电路来说，连接探头的影响通常是不能忽略的。

本应用指南介绍了多个主题和挑战，如电路负载、仿真探头效应、长线连接的影响、使用 TriMode™ 探头进行单端测量和差分测量。这些内容与当今复杂的高性能电路有关，可以帮助高性能探头用户最大限度地提高测量的信号保真度。

### 探头负载基础知识

在探头连接到电路上时，必需了解探头对电路行为的影响。探头负载程度取决于两个因素：探头的输入阻抗和电路对这种阻抗的灵敏度。图 1 显示了连接两只探头的实例，一只拥有低输入阻抗，另一只到电路产生高输入阻抗，电路的源阻抗为 50 Ω，以 50 Ω 端接在系统接收机 (RX) 部分。

这个系统的特性阻抗是两个并联的  $50\Omega$  阻抗或  $25\Omega$ 。把一只  $100\Omega$  阻抗探头连接到电路上会形成一个电压分路器。这个电压分路器导致了接收机 (RX) 上的电压低于预期。下面的公式显示了连上探头时接收机上的电压。

$$V_{rx} = \frac{100}{100 + 25} * V_{source}$$

$$V_{rx} = 80\% * V_{source}$$

在第一个实例中, 由于探头负载丢失了 20% 的源信号。

如果探头输入阻抗提高到  $100k\Omega$ , 探头负载会下降, 接收机上的电压会更接近电路的实际电压。

$$V_{rx} = \frac{100000}{100000 + 25} * V_{source}$$

$$V_{rx} = 99.98\% * V_{source}$$

在  $100k\Omega$  探头实例中, 电路上的负载为 0.02%。

这两只探头的冲击负载明显不同, 但两只探头之差是否影响电路取决于连接信号源的接收机的灵敏度。某些电路设计成容忍接收机上的电压下降 50% 时仍能继续操作。但是, 信号下降 20% 就可能产生问题, 因为电路的其他部分本身的电压可能会大幅度下降。从  $100k\Omega$  探头中可以看出, 电路似乎更能容忍  $<1\%$  的影响。通过使用这种简单的电压分路器方法, 包括探头的 DC 电阻和被测电路的源阻抗, 我们可以很好地了解探头负载。

## 高频 (HF) 电路探头设计考虑因素

在低频率 (DC-100Hz) 上, 典型探头的阻抗类似于大的电阻器。探头在低频率上的阻抗在  $40k\Omega \sim 1M\Omega$  之间。要求使用高性能探头, 来测量频率远远高于 100Hz 的信号。当今市场上有许多探头的带宽在几 GHz 直到 33 GHz。由于高性能探头覆盖很宽的频宽, 因此必需了解在输入信号的频率提高时, 高性能探头的输入阻抗怎样变化。图 2 显示了高性能探头在低频率时的输入阻抗高, 然后输入阻抗怎样随着输入信号的频率提高而下降。

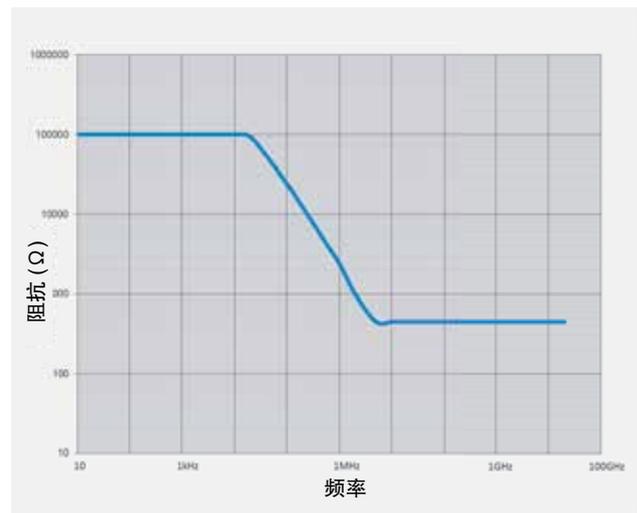


图 2. 高性能探头输入阻抗相对于频率的关系。

为什么呢？这是因为在输入信号的频率提高时，探头及形成探头衰减电路的探头尖端的物理结构会改变阻抗。衰减电路扩展了探头的输入放大器（图 3）的动态范围。这条衰减电路由一组电阻器构成，电阻器的衰减比为 5:1 或 10:1。衰减器电路在输入信号的路径中还有一定量的寄生电容（ $C_{par}$ ）。寄生电容可能是由多个不同的项目引起的。线对、IC 焊盘、ESD 保护电路和输入晶体管底座都可能会引起寄生电容。

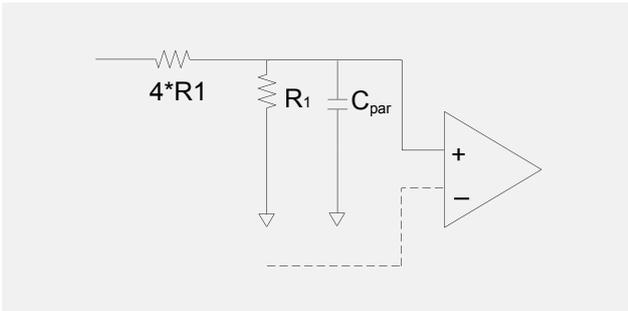


图 3. 探头输入衰减电路 (5:1 比率)。<sup>1</sup>

衰减器电路中的电阻和电容相结合，可能会产生低通滤波器，限制探头的可用带宽。为了扩展带宽，在输入中一般会增加一套更大的电容器和电阻器。通过正确匹配分量值，可以把探头的带宽扩展到非常高的频率（图 4）。

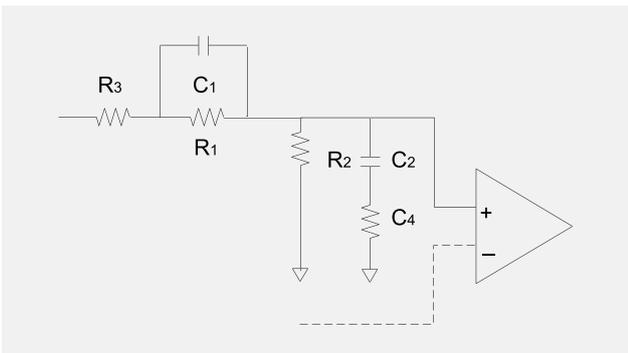


图 4. 高频性能的探头输入衰减。

如果正确设计输入衰减网络，探头的带宽将非常高。但是，输入的阻抗会表现出输入阻抗下降的特点，如图 2 所示。再看一下这条阻抗相对于频率的关系曲线，可以明显看出低频率时输入阻抗以电阻器 ( $R_1$  和  $4 \cdot R_1$ ) 为主。对有高频成分的信号，则以电容器为主，导致阻抗随着频率提高而下降（图 5）。

如果电路是纯容性，阻抗最终会达到  $0 \Omega$ 。为了确定探头的最低阻抗值，设计人员一般会在衰减电路中包含另一套电阻器。这些电阻器  $R_3$  和  $R_4$  确立了探头最低的阻抗水平，有时称为  $Z_{min}$ 。

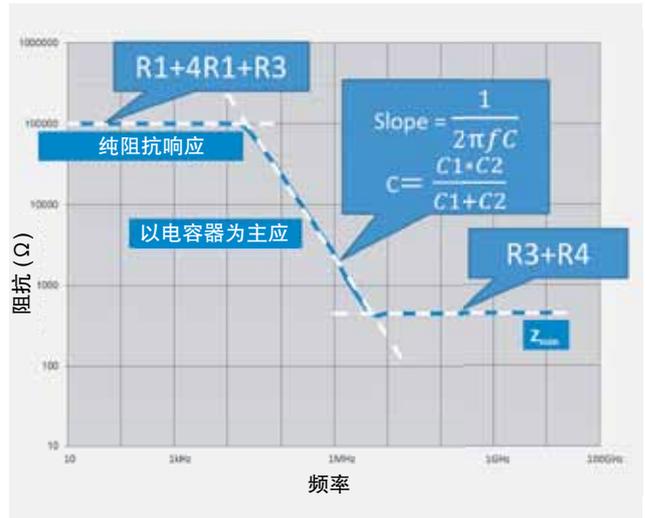
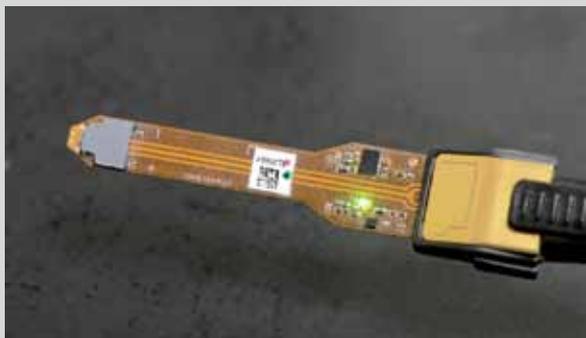


图 5. 探头输入阻抗相对于频率变化的关系。

<sup>1</sup> 高频测量中最常用的探头是差分探头。但为简单起见，图中只显示了一半的探头输入电路。在大多数高性能探头中，差分输入包含两个一模一样的衰减网络。



### P7700 探头尖端芯片技术

过去，探头设计人员必须在三个主要因素之间进行折衷平衡，即带宽性能、输入阻抗及方便地连接被测器件。P7700 系列在高性能探头中创下了业内第一。这些探头采用“尖端芯片”结构，把探头的有源输入缓冲器放在尖端的末端。现代硅锗工艺使这一创新成为可能，在非常小的封装内提供了一套高阻抗输入放大器。小的探头放大器封装放在焊接尖端，距 DUT 连接不到 4mm，使信号损耗达到最小，并实现了低电容、低附加噪声和 20 GHz 带宽。此外，这些有源尖端非常薄、非常软，适合探测非常紧张的空间。通过尖端芯片技术，用户不必再在带宽、低负载和简便连接之间进行取舍。

### 高性能探头设计折衷因素及其影响

探头前端的高频设计折衷因素影响其输入阻抗。我们看一下使用不同设计的两种高性能探头对器件的实际影响。图 6 显示了两种探头的输入阻抗。很明显，探头设计人员在探头设计中做出了不同选择。一个选择的是较高的电容输入，其阻抗在相对较低的频率上下跌到  $Z_{min}$  (探头 1)。另一个则创建了一个较低的电容设计，其阻抗保持到高频率，然后才跌回  $Z_{min}$  (探头 2)。

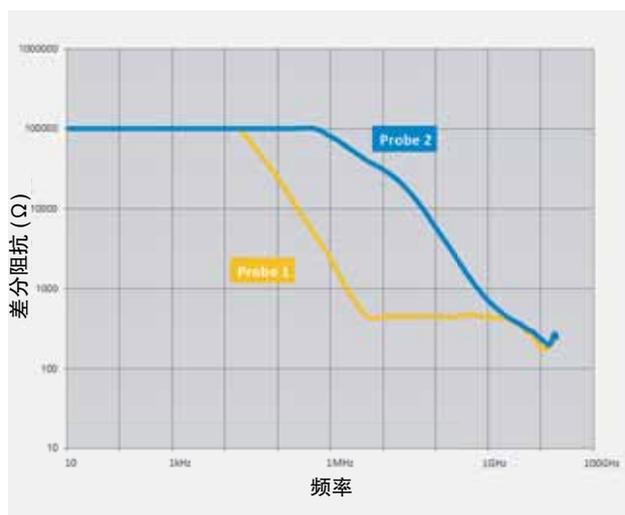


图 6. 两种探头设计的输入阻抗曲线。

过去，设计类似探头 2 的高阻抗输入一般意味着探头的带宽受限，类似探头 1 的设计则以降低输入阻抗为代价来实现高带宽。现在，形势已经变化，因为现在有一种输入阻抗为探头 2 的 20 GHz 带宽探头。详情请参见侧栏“P7700 尖端芯片技术”。

### 探测实例 1：高速串行

我们看一下这两种探头的差输入阻抗对实际信号的影响。我们从 8 Gb/s 高速串行 (HSS) 链路的眼图入手，连接每个探头，研究由于探头负载导致的信号变化。这个 HSS 信号的标称幅度为  $\pm 500\text{mV}$ 。图 7 表示没有负载状态下的信号。这幅图表示进行探测前发射机输出上的信号。

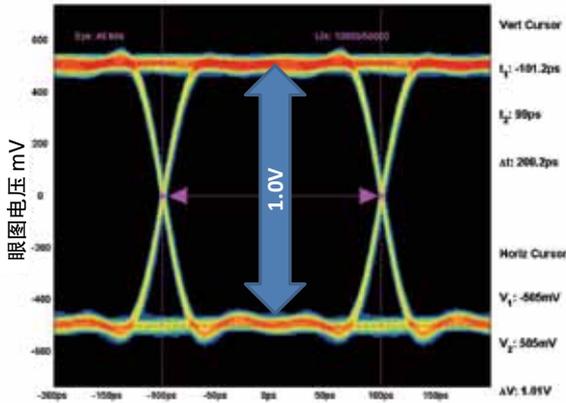


图 7. 没有负载的高速串行总线(基准)。

在探头连接到这条电路上时，探头移除了一部分信号电流。图 8 显示了拥有一个高电容输入的探头 1 的结果。由于探头 1 在低频率和高频率时都表现出低阻抗，高速串行信号上的负载很显著，而在信号的各种频率成分中则很相似。这种负载意味着接收机看到的信号已经从  $\pm 500\text{mV}$  下降到  $\pm 450\text{mV}$ ，或下降了 10%。

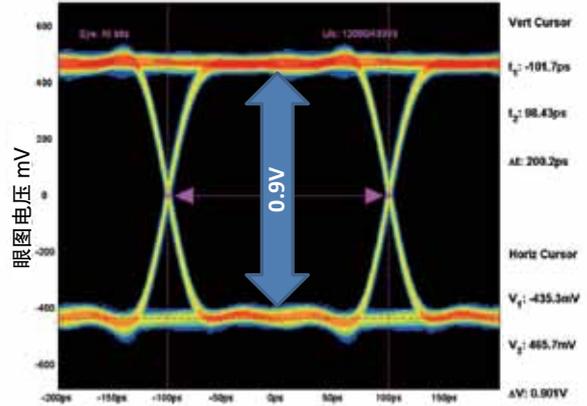


图 8. 连接探头时的高速串行总线。

探头 2 在中低频率时表现出高阻抗特点，图 9 显示了探头 2 在中低频率时对电路的负载非常小。与基准眼图相比，眼图顶线和基线的峰值幅度非常类似。眼图中的明显变化发生在较高的频率上，信号会随着非常快速的上升沿或下降沿改变电平。

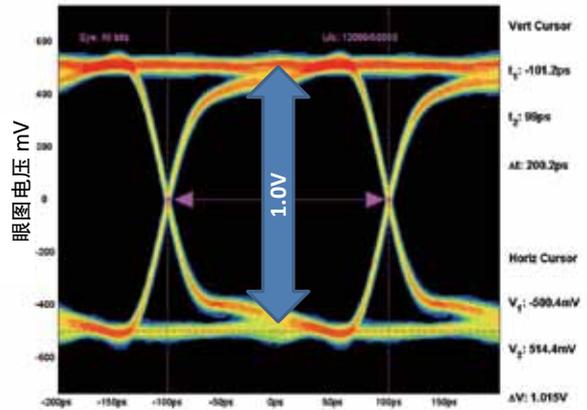


图 9. 连接探头 2 时的高速串行信号。

这种探头在高频率时的负载产生了外观非对称的眼图，接收机看到的信号的上升时间和下降时间较慢。尽管这两种探头以不同方式加载 HSS 信号，但串行链路可能仍能继续可靠地运行，因为眼图仍然很宽。

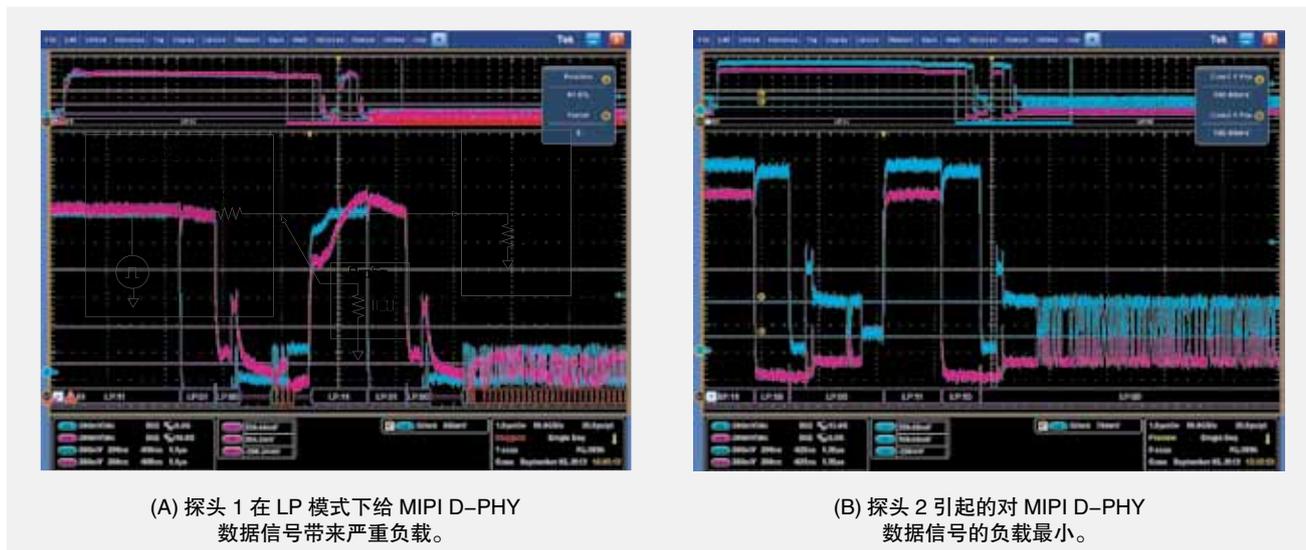


图 10.1 Gb/s MIPI® D-PHY 总线信号在未端的低功率模式下运行时，探头 1 的探头负载的影响非常严重。

### 探测实例 2：低功率串行总线及源阻抗开关

在 HSS 实例中，系统接收机能够容忍较低的信号电平及边沿变慢。现在我们看一个实例，其中器件的源阻抗会根据总线状态切换电平。这可以使用 1 Gb/s MIPI® D-PHY 总线信号显示。在低功率 (LP) 模式下，D-PHY 总线在高阻抗状态下运行，在高速模式下，发射机和接收机作为一条 100 Ω 差分阻抗的差分链路运行。

在类似探头 1 的高电容探头连接到数据线，同时处于低功率模式时，数据信号会严重负载。之所以发生这种负载，是因为总线在低功率模式下运行时，它处于高阻抗状态，其信令的频率范围只有几 MHz。在 1-10 MHz 频率范围中，探头的阻抗朝着  $Z_{min}$  下降。看一下

图 10a 中的数据信号，注意波形有一个圆顶，而不是边沿急剧上升、然后在顶部变方。

我们使用拥有较高阻抗和较低电容特点的探头 2，可以在低功率模式下降低负载，改善 D-PHY 总线操作 (图 10b)。这种探头较高的输入阻抗和较低的电容会降低 D-PHY 总线在 LP 模式下看到的负载。它还精确地表示高速模式信号，因为总线在这个时候作为端接的差分链路运行。探头 2 的  $Z_{min}$  高于 100 Ω 差分阻抗，探头负载不明显。

对 D-PHY 总线，要求使用输入阻抗特点类似于探头 2 的探头。

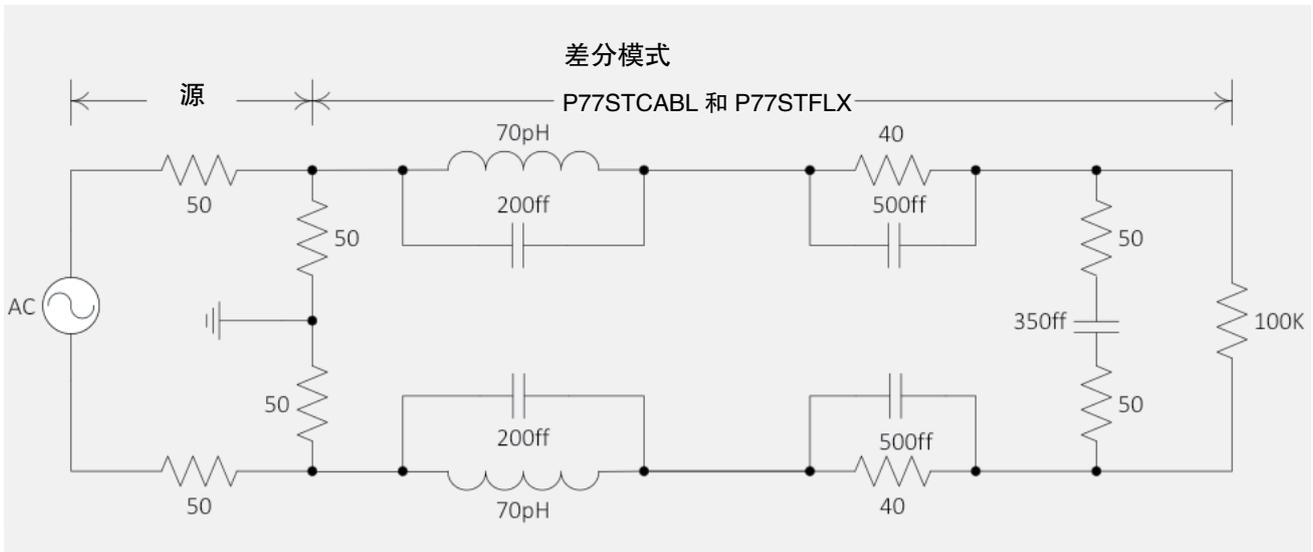


图 11. P7720 探头和焊接尖端的等效电路模型。

## 仿真探头负载

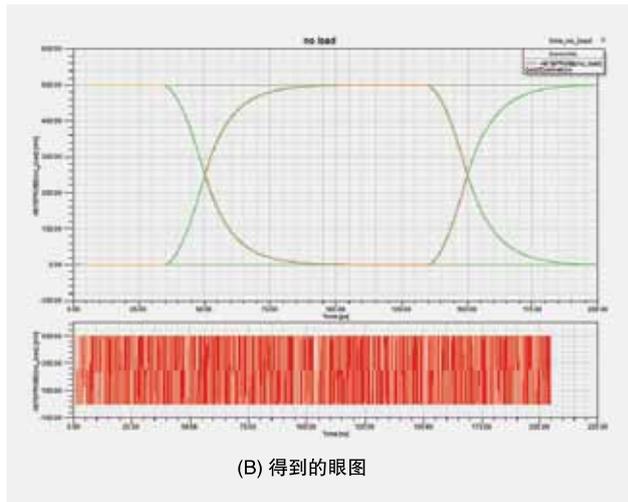
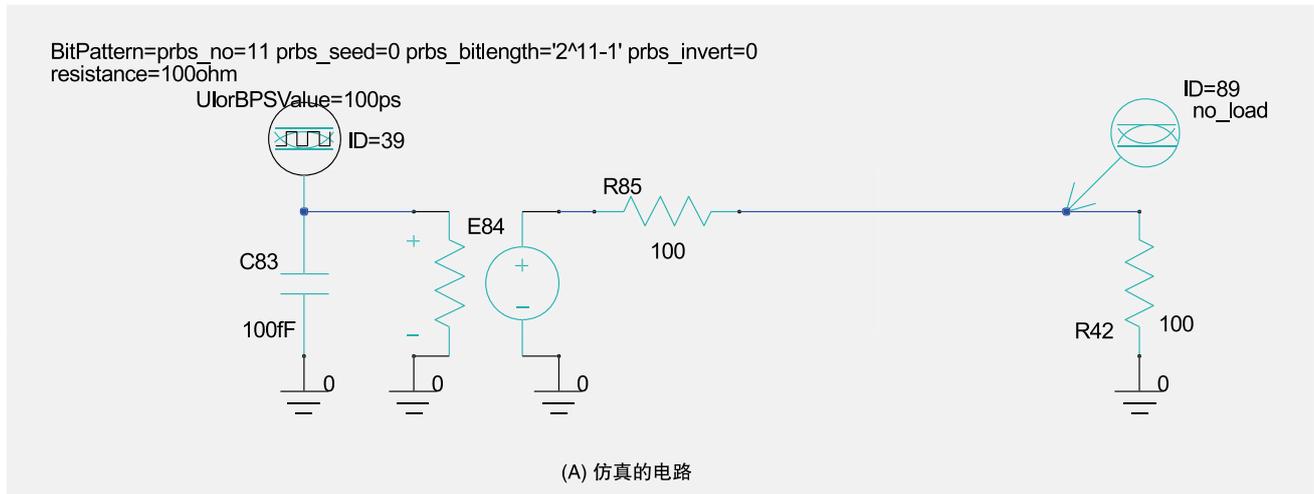
尽管改进电路板布线工具的功能有助于降低高性能数字电路板由于信号完整性问题发生故障的风险，但仿真工具的效果取决于其自身模型。

当前高性能探头一般包括探头频响及其阻抗随频率变化模型。通过使用这些信息，可以仿真探头负载对电路的影响。<sup>2</sup> 例如，这里使用的探头是泰克 P7720 TriMode™ 探头。P7720 探头及其附件尖端使用矢量

网络分析仪 (VNA) 校准，得到的响应的 S 参数描述存储在机载内存中。

P7720 TriMode 探头中设计的 S 参数模型提供了探头负载和响应信息。探头负载模型信息从自定义测试夹具上的 VNA 测量中提取。通过使用这些信息，可以为探头建立等效 AC 电路，仿真其给电路带来的负载 (图 11)。

<sup>2</sup> 通过使用与示波器中进行的反嵌操作有关的进一步信息，还可以仿真示波器上看到的测量。



泰克探头模型可以用于以 SPICE 或 Touchstone 格式文件作为输入的仿真工具。我们看一下 10Gb/s,  $2^{11}-1$  PRBS 信号的激励源。在仿真器中，我们使用 100fF 电容器和 VCVS 来平滑输入眼图，使其更现实。图 12 显示了使用泰克 iConnect 软件进行的实例电路仿真和得到的信号。

图 12. 10Gb/s,  $2^{11}-1$  PRBS 信号的实例电路模型。

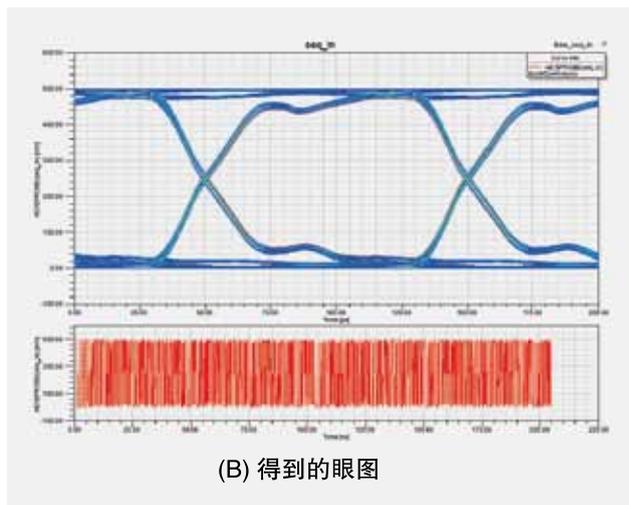
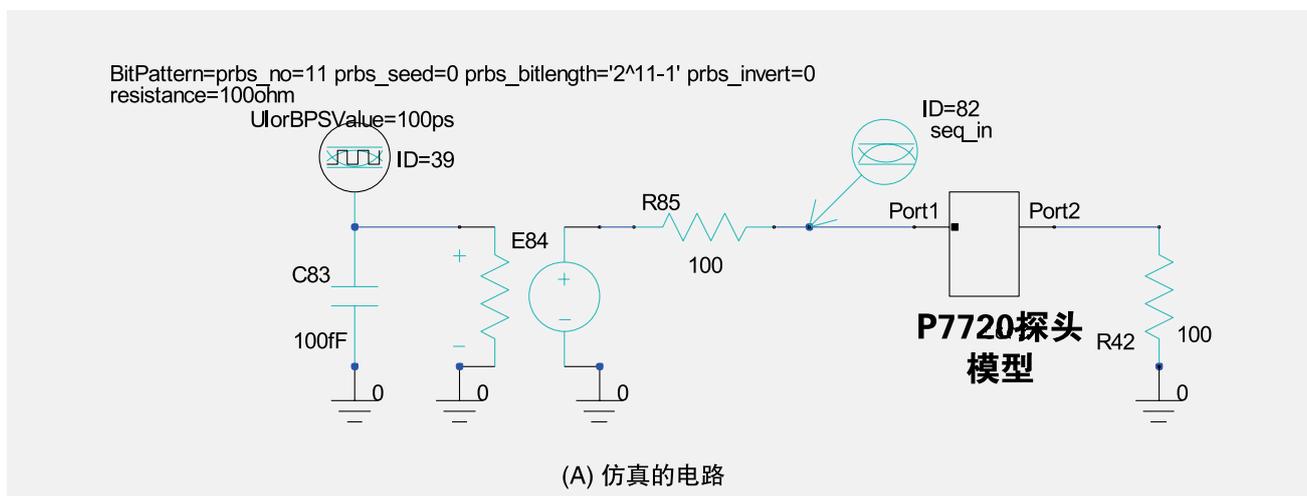


图 13. 把探头模型增加到 10Gb/s,  $2^{11}-1$  PRBS 信号的实例电路模型中。

图 13 显示了把图 11 所示的 P7720 和焊接尖端电路模型插入实例电路模型中。注意这个眼图与图 9 中测得的眼图的相似之处。这个眼图显示了系统接收机处加载的信号。

泰克示波器根据探头的参数数据执行自动探头反嵌。通过使用探头的附件尖端的 S 参数，示波器软件消除了大部分探头负载效应，把信号紧密还原成“未加载”状态。

## 把探头连接到器件时的挑战

连接器件通常要求使用导线和焊接。可用的测试点长度通常要求连接使用直径非常小的导线。随着现代元器件和 PCB 特性的大小不断缩小，连接使用的导线直径最小可达 4 mil (0.1mm) (图 14)。

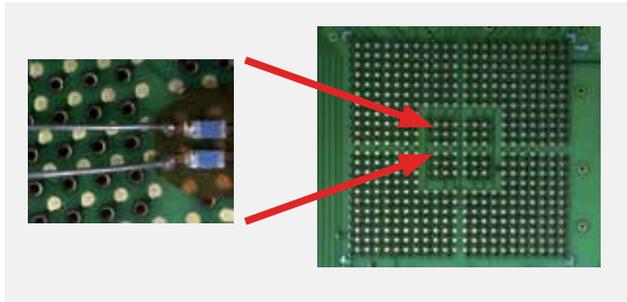


图 14. 探头尖端和导线位于 BGA 封装背面的小测试点旁边。

在需要在很小的面积内进行多个连接时，通常要求探头尖端以不同的角度隔开，使用的导线必需距探头尖端的末端很远。某些探头尖端上带有可以用于这一目的的引线，但这些自带的引线可能会很短，特别是在需要在很小的面积中连接 3-4 只探头尖端时 (图 15)。



图 15. 连接间隔很近的通路要求较长的导线。

为最大限度地提高探头性能和信号保真度，泰克建议信号和接地连接的导线长度要尽可能短，这是因为在探头尖端增加导线，会以电容和电感形式增加不想要的寄生信号。但是，某些连接要求使用更长的线，把探头尖端连接到 DUT。那么到底增加了多少寄生成分，到底导线多长时才会严重降低探头的带宽呢？

尽管有太多的变量不能确切了解某种导线长度具体会降低多少探头带宽，但泰克使用各种长度的导线收集了焊接尖端的许多探头类型的的数据。我们在探头手册中发布了这些试验数据，说明探头在导线长度逐渐增加时的响应。

图 16 显示了在导线引线剪短到各种长度时，带有 P77STFLXA 焊接尖端的 P7720 TriMode 探头的响应。作为这些截图的信号源的步长发生器拥有 23ps 10-90% 上升时间。每个图下面的图示中包含着上升时间测量 (10%-90%) 和等效带宽数据。可以把这些截图作为大体指引，测量导线长度的影响，但实际结果可能会视其他因素变化，如被测器件特点 (如上升时间和源阻抗) 和焊接连接的精度。

在导线长度超过 0.12 英寸时，P7720 探头的带宽低于 20 GHz 指标。连接很难接触的测试点可能要求使用更长的导线。如果测量要求的带宽低于 20 GHz，那么用降低带宽的方式来换取更简便地连接是可以接受的。如需进一步的上升时间和导线长度信息，请查看具体探头手册。



导线长度 = 0.01”，上升时间 (10–90%) = 30.5 ps, 20 GHz 带宽



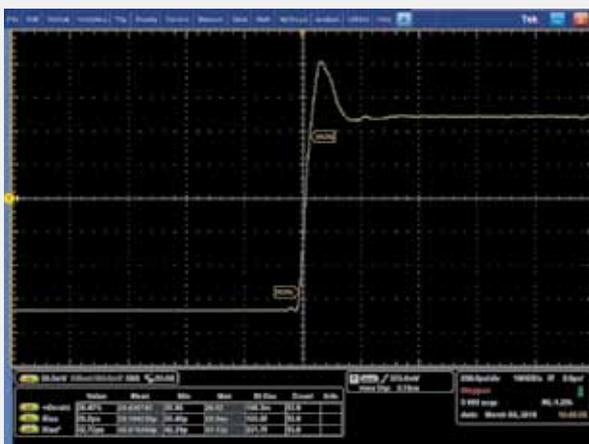
导线长度 = 0.075”，上升时间 (10–90%) = 27.9 ps, 20 GHz 带宽



导线长度 = 0.120”，上升时间 (10–90%) = 30.1 ps, 20 GHz 带宽



导线长度 = 0.2”，上升时间 (10–90%) = 34 ps, 17 GHz 带宽



导线长度 = 0.3”，上升时间 (10–90%) = 42.8 ps, 14 GHz 带宽

图 16. 在各种导线长度下测量带宽和上升时间。

## 捕获单端信号和差分信号

现代高性能探头可以灵活地连接电路，以差分方式测量信号，以单端参考地电平方式测量信号，以测量电路共模电压的方式测量信号。泰克 P7500、P7600 和 P7700 探头系列提供了这种 TriMode 功能 (图 17)。

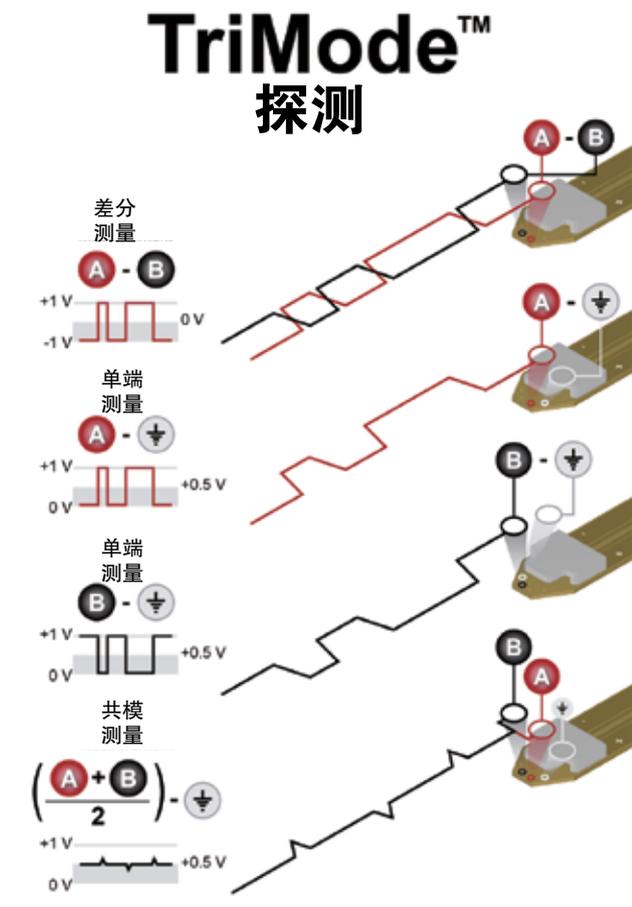


图 17. 通过一条连接，泰克 TriMode 探头可以灵活地测量差分信号、单端信号和共模信号。

## 接地还是不接地？

TriMode 探头可以只把探头的 A 输入和 B 输入连接到 DUT 上，来采集差分信号。在这种情况下，为什么需要接地连接，或接地连接有什么用呢？由于探头尖端附近的空间限制，只连接探头的差分输入可能最方便，通常会提供优秀的电气性能。但是，如果有空间可以放另一条连接及探头尖端附近的探头，那么推荐接上探头连接，因为这有助于避免 DUT 接地上大的电位导致测试信号漂移到探头输入放大器的线性范围之外。在理想情况下，最好既连接差分输入，又连接接地，以便避免探头放大器中信号削波。

## 单端 - 应该使用什么输入？

在采集单端参考地电平的信号，用户有两种选择。第一，探头的 A 输入或 B 输入可以连接到信号上，其中一条探头接地连接可以连到接地上。这种连接方式的优势是可以同时把探头连接到两个单端信号上。通过一次把两个单端信号连接到探头上，只需使用 TriMode 探头中内置的开关矩阵，就可以在查看 A 输入上的信号与查看 B 输入上的信号之间简便切换。

如果只有一个单端信号连接到探头上，用户可以选择把 A 输入连接到信号上，把 B 输入连接到接地上；或把 A 输入连接到信号上，把探头的接地输入连接到 DUT 的接地上。在这种情况下，泰克推荐使用 A-B 模式，把 B 输入连接到接地上。之所以推荐这种方式，是因为如果不连接 B 输入，那么可能会有干扰信号耦合到探头的输入中，使 A 侧采集的测得信号失真。

使用 A-B 模式而不是 A 接地的第二个原因，是把探头的差分输入连接到器件上，减短导线长度通常要更方便。探头的接地连接从尖端设置回来，在连接间隔很短的测试点的 DUT 时可能不太方便。

### 总结

本应用指南讨论了在探测高性能电路时遇到的多种挑战，其中详细讨论和介绍了探头负载，从而可以避免影响 DUT 操作的负载。本文还介绍了探测的其他方面，如使用细线接入信号及怎样最好地利用 TriMode 探头。通过注意探测方法，通常可以避免信号保真度问题及对 DUT 的影响。



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：[cn.tek.com](http://cn.tek.com)**

**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座7楼/9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

[cn.tek.com](http://cn.tek.com)

**有关信息**

泰克维护着完善的、且不断扩大的资料库，其中包括各种应用指南、技术简介和其它资源，帮助工程师开发尖端技术。详情请访问：[cn.tek.com](http://cn.tek.com)

© 泰克公司 2016 年版权所有，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。

