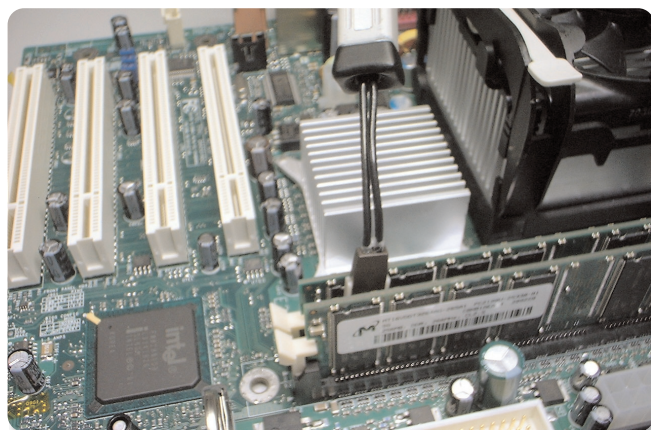
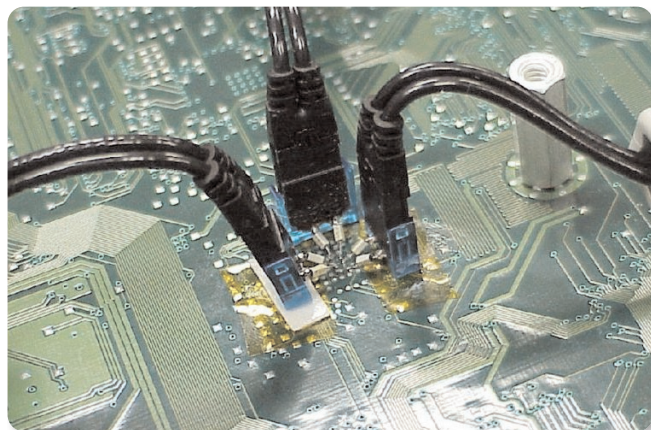
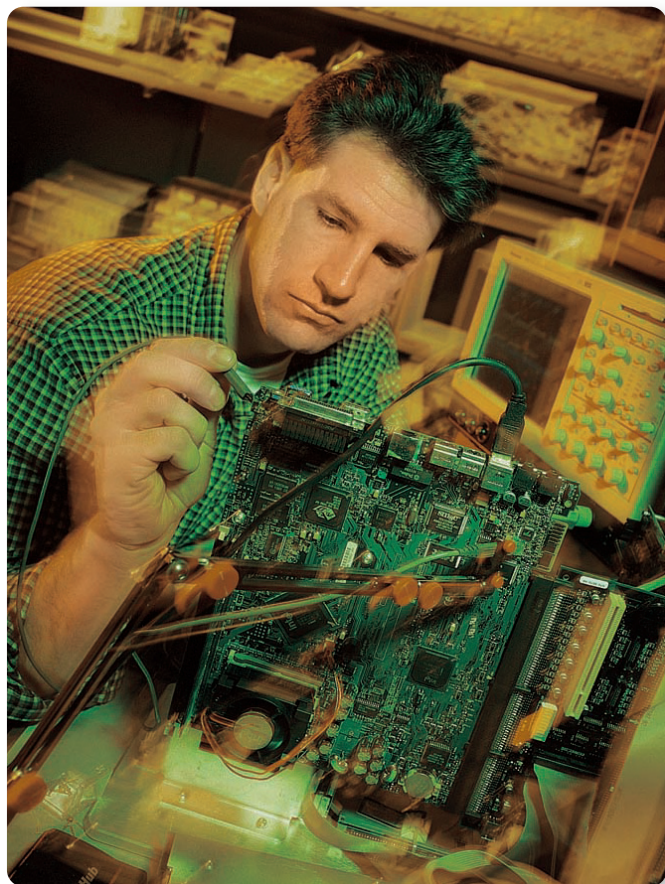


探头带宽计算

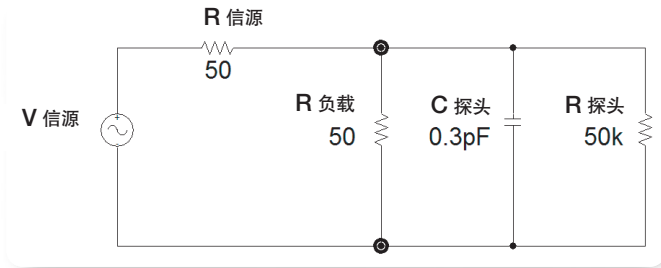


探头是示波器测量系统中的关键部件。示波器探头向受测试的电路提供物理连接和电连接。它还对示波器通道输入的信号进行缓冲和调节。理想的示波器探头测出的信号具有完美的保真度，信号可以在连接的示波器上精确地显示。在进行这种测量时，探头也能最大程度地不以任何方式干扰探测的信号。因为理想的探头只存在于理想世界中，现实世界中探头测量保真度受到探头电性能和探头负载的限制。

每个工程师都有过探头导致电路停止工作的经历。甚至还曾经历过探头导致电路开始工作的事情。实际原因是探头与被测设备 (DUT) 相互作用，这种相互作用改变了信号波形的形状。探头设计的一个主要目标是将探头负载降到最低点，此时相互作用对于被测设备来讲可以忽略。不幸的是，随着信号速度提高，将探头负载降低到可以忽略的程度变得越来越难。

探头带宽计算

► 技术简介

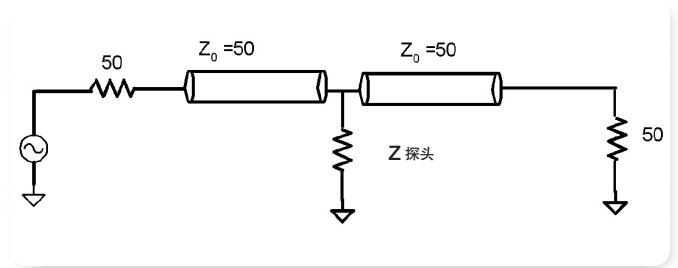


► 图 1. 探头负载的离散模型。

数字通信中不断提高的信号速度对探头电子性能和负载提出了新的要求。高速信号探测需要示波器探头在传输线环境中测量信号。传输线环境中的探头负载影响需要的处理方法比以前普遍使用的简单的离散探头负载模型更复杂。分布式电路环境中的探头负载影响，也使探头供应商在探头测量和探头技术规格方面引入了新方法。因为这种新方法给探头市场带来了一些迷惑，所以本文将研究这一新方法并将其与较传统的公认方法做比较。

探头负载

以前，描述示波器探头时使用的是离散模型。典型的离散模型（如图 1 所示）将探头负载描述为直流阻抗和输入电容。如果信号速度较低，这是个有效的方法。



► 图 2. 探头负载的分布式模型。

电信号沿传输线传播，传播速度取决于传输线周围材料的物理属性。对于 FR-4 电路板材料上的微带传输线，传播速率约为 150 ps/英寸，约为光速的一半。对于上升时间为 500 ps 的信号，可以观察到信号上升时间变化的传输线长度约为三英寸（电长度 = 信号上升时间/传播速率）一种保守的方法是，对于长于信号变化传播长度（比如微带传输线 0.5 英寸）的 1/6 的互连，可以期望互连显示传输线效应^{*1}。只要电路的物理特性小于传播长度的 1/6，就可以使用离散模型。但是，随着电互连越来越快，问题将不止于此。100 ps 上升时间的信号在 FR-4 中的传播长度为 0.66 英寸。大于 0.11 英寸的部分将开始显示传输线效应。

示波器探头现在以分布式模型描述（如图 2 所示）。这些模型有助于考虑传输线效应。

^{*1} “TekConnect™ 探头：信号保真度问题和建模”， Tektronix, Inc.

可以通过探头频率范围上的输入阻抗更精确地描述探头负载的特征。图 3 显示了一种高性能差分探头输入阻抗随频率发生的变化。使用输入阻抗是一种随频率建立电阻、电容和电感之间复杂相互作用模型的简单直接的方法。这种描述特征的方法允许用户测量在特定频率探头负载的影响。

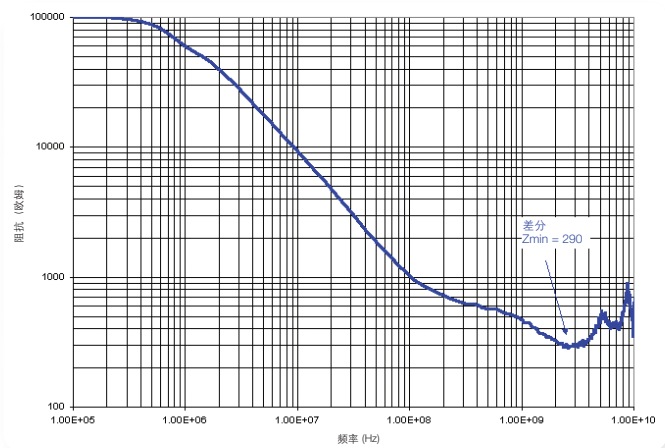
示波器探测基本原理

与示波器相比，示波器探头具有截然不同的使用模型。现今的高带宽示波器每个通道都有 50Ω 的终端。示波器可用作终端接收机，用来查看来自 50Ω 信源的信号。示波器探头用来连接到被测设备，设备可能已经终接好了信源和接收机。这些探头通常设计成具有高输入阻抗，以使探头尽可能不影响被测设备。

关于示波器探头在示波器上实际应该显示什么问题，有两种观点。Tektronix 赞成探头应测量空载信号或原始信号的观点。Agilent 赞成另一种观点，主张探头应测量有负载的信号。这究竟是什么意思呢？首先，必须了解探头带宽特征的描述方式。

探头的直通响应（或传递函数）的特征描述为 V_{OUT} / V_{IN} ，其中 V_{IN} 为到探头的输入， V_{OUT} 为探头的输出。该比率描述了探头放大器的增益，可以记为 $V_{OUT}(f)/V_{IN}(f)$ ，因为该增益随频率变化。探头的带宽定义为探头的传递函数值下降到其低频点 0.707 (3dB) 时的频率。这是带宽的行业标准定义。

Tektronix 和 Agilent 在实现方法上的差别与基准信号 V_{IN}



► 图 3. 带有短花线小电阻器花线 Tip-Clip™ 部件的 Tektronix P7380 的差分输入阻抗。

的定义有关。将探头引入控制良好的环境可能引起环境的变化。Tektronix 和 Agilent 以不同方式表示该变化。

一直以来， 50Ω 环境都是高速信号产生和传输的标准。因此，示波器探头通常使用终接的 50Ω 信号发生器描述特征。测试信号发生器校准时应使兴趣频率范围内的响应尽可能平坦。Tektronix 描述该平坦信源 (V_{SOURCE}) 的特征并将其称为 V_{IN} 。于是，探头响应被设计为在此纯粹的 50Ω 环境中，在其整个频率范围内尽可能平坦。这一描述探头特征的方法具有补偿探头负载的固有效应。该类探头在示波器上显示原始的空载信号。这是被测设备在连接探头之前的信号。

探头带宽计算

► 技术简介

Agilent 认为探头的负载对被测信号存在影响，以至于 $V_{SOURCE} \neq V_{IN}$ 。他们主张必须测量探头的频率相关负载并且计入校准中，以精确地得到探头的带宽。以这种方法表征的探头给出的带宽和探头响应包括探头在 50Ω 环境中的负载。该探头不尝试补偿负载，但实际上包括负载。Agilent 探头在示波器屏幕上将原始信号显示为经探头加载后的信号。

如果存在没有负载的探头，这两种观点将达成一致，两种探头之间没有差别。因为探头负载确实存在，测量方法上的差别对经探头显示的波形和探头带宽的指标都有影响。要更好地解释基本原理上的差异，下面举一个简化的示例。假设有一完美的 1VDC 信号需要测量。使用探头测量该信号时，您期望探头测出 1VDC。如果探头负载导致信号电平下降到 0.95V，您希望探头显示的是 1VDC 还是 0.95VDC？Tektronix 的观点是您希望看到 1V 的信号。Agilent 的观点是您希望看到 0.95V 的信号。

可以进一步考虑这个例子。假设您希望测量一完美的交流正弦 1Vpp 信号。该信号频率可能从几赫兹到几吉赫兹连续变化，并且仍然具有完美的 1Vpp 信号电平。信号源在其频率范围内连续变化时，探头输出是应该因其变化的负载曲线而随频率变化，还是应该在其整个频率范围主体上显示 1Vpp？这是一个简化的例子，但它清楚地说明了探测基本原理上的差别。

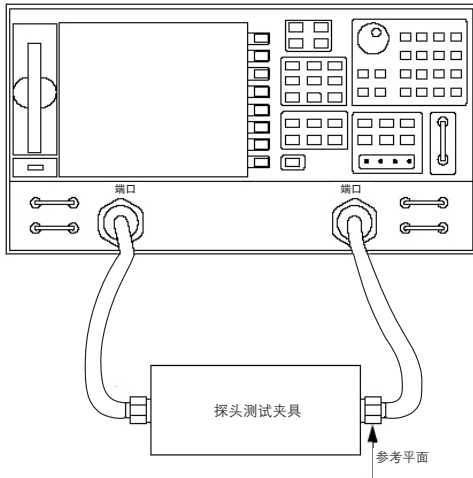
Tektronix 相信，对于探头用户来讲，知道未连接探头时电路内发生了什么更为有用。本文的其余部分将更详细地考查 Agilent 探测基本原理的效果，以及为什么 Tektronix 支持传统的带宽测量技术。

如何测量探头带宽

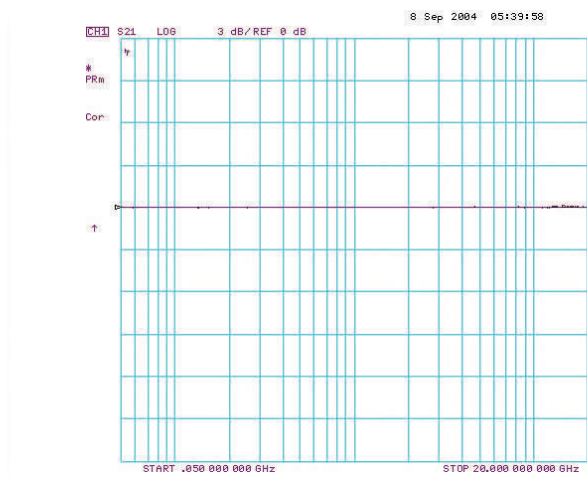
Tektronix 将探头响应设计为在整个频率范围内尽可能平坦。平坦程度由网络分析器测试，网络分析器连同探头测试夹具一起已被校准为 20 GHz 输出的平坦信源，如图 4 和图 5 所示。网络分析器通常带有特殊的高频同轴连接器，所以要使用特殊的探头校准测试夹具将探头连接到网络分析器上。然后校准网络分析器，去除电缆和测试夹具的任何频率影响。该方法可以确保测量的可重复性，因为不同测试台间电缆和夹具可能有微小的差别。Tektronix 将该平坦系统定义为 V_{SOURCE} 或 V_{IN} 。

然后将探头连接到测试夹具，如图 6 所示，随后测量探头的响应，如图 7 所示。

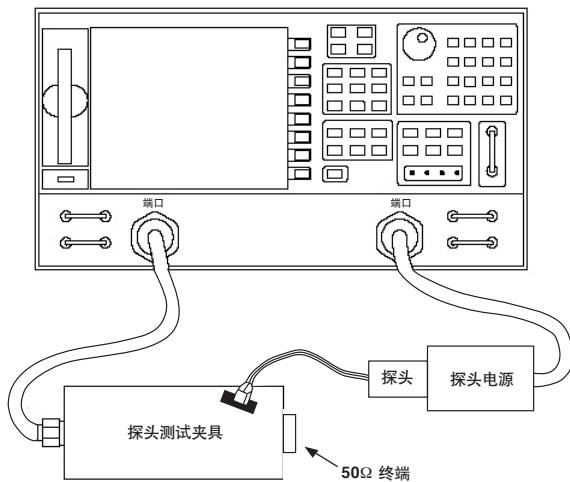
探头具有可以调整其频率响应的组件。可以对这些组件进行积极调整，使其成为实时校准探头，并使整个频率范围内的响应尽可能平坦。该方法的一个优点是，探头的频率相关负载可在过程中自动得到补偿。



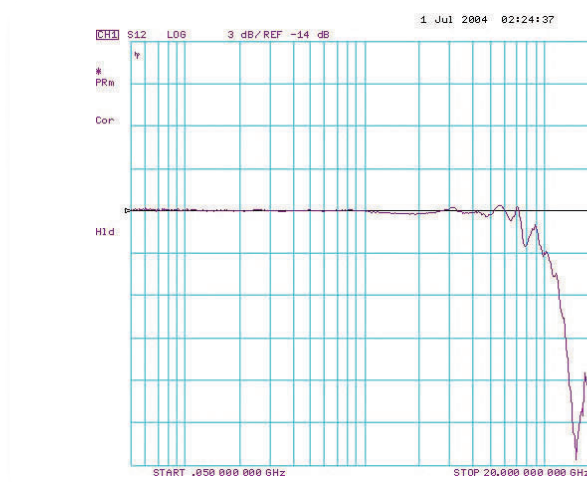
► 图 4. 用于测试系统校准的网络分析器和测试夹具装置。



► 图 5. 校准后，网络分析器显示平坦的 V_{source} 。



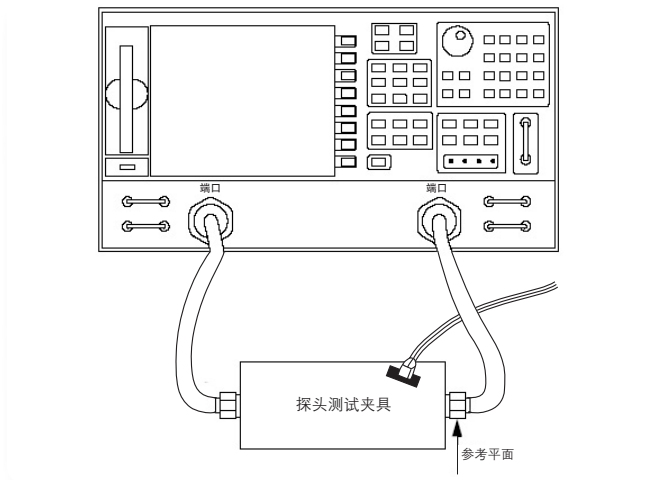
► 图 6. 在网络分析器上测量探头响应的装置。



► 图 7. Tektronix P7380 探头响应。

探头带宽计算

► 技术简介

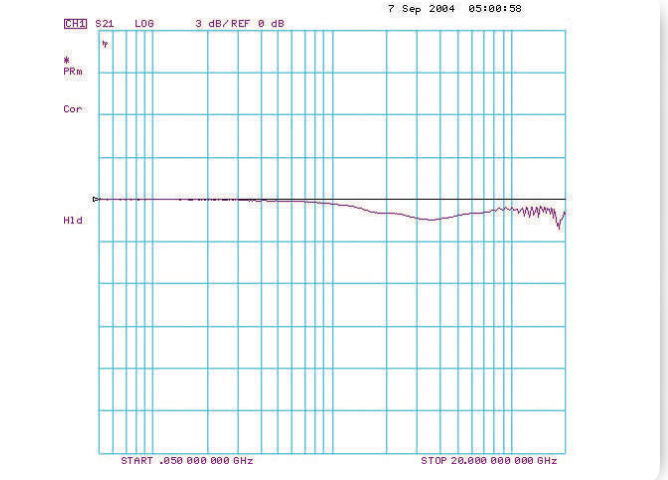


► 图 8. 用于测量探头负载的校准装置。

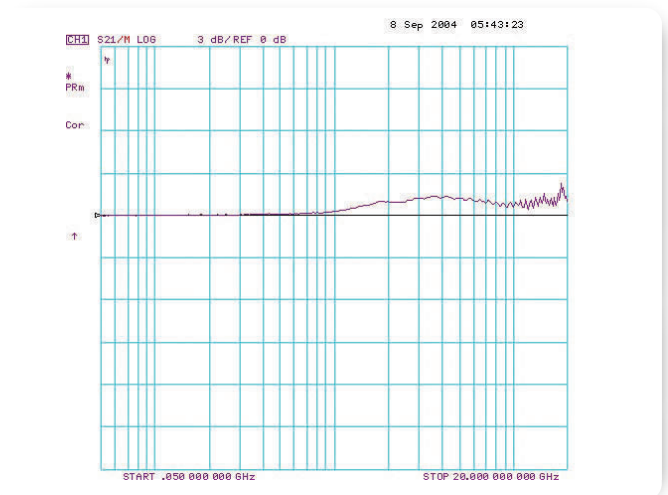
Agilent 遵循有些相似的方法，但使用一些其他步骤来校准探头来显示加载响应。使用测试夹具将网络分析器校准为平坦信号源之后，测量频率上的探头负载，并存入存储器。这一步通过使用连接到测试夹具的探头测量测试夹具的直通响应完成，如图 8 所示。探头负载在测试夹具直通响应上的结果如图 9 所示。

然后，使用数学方法从平坦参考中将探头负载分离，以考虑负载的影响。这个结果就是 Agilent 计算带宽时使用的 V_{IN} 。

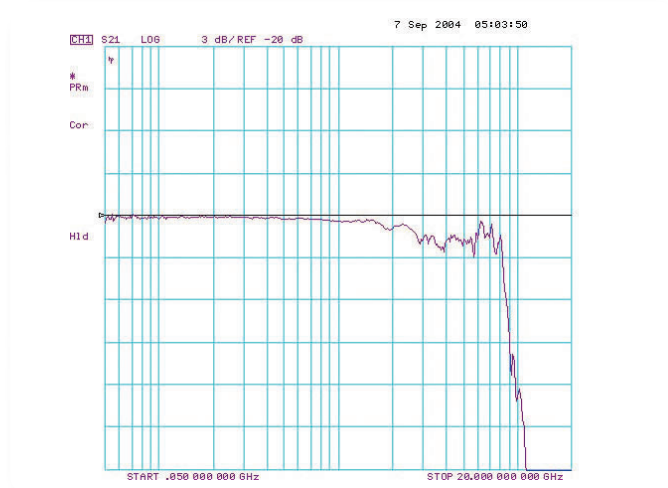
然后，将探头置入系统中并测量其频率响应。图 11 显示了使用 Tektronix 的传统带宽测量方法的 Agilent 探头响应。图 12 显示了使用新的 Agilent 带宽测量方法的 Agilent 探头响应。比较这两幅图可以发现，相比于传统方法，新的 Agilent 带宽方法趋向于加大带宽。



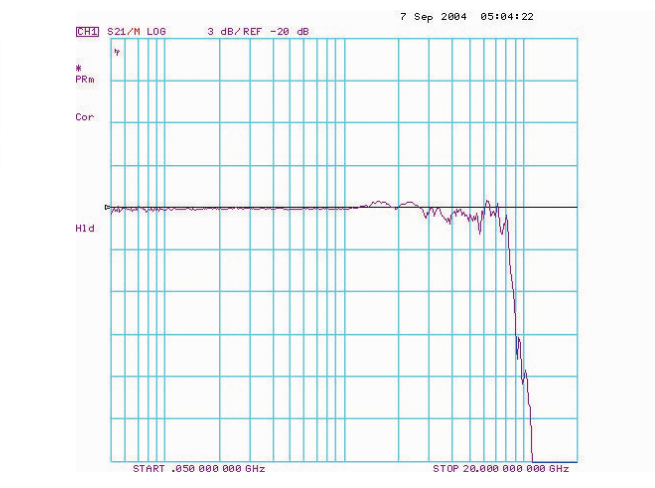
► 图 9. 带有差分焊接探头端部的 Agilent 1134A 的负载。



► 图 10. 经数学计算考虑了探头负载的 V_{IN} 。



► 图 11. 不使用数学方法分离负载的 1134A 差分焊接探头端部响应 (Tektronix 方法)。



► 图 12. 使用数学方法分离负载的 1134A 差分焊接探头端部响应 (Agilent 方法)。

如果使用 Tektronix 方法测量探头，则探头响应在 2 GHz 附近出现约 2dB 的滚降。一旦负载从探头响应中分离，探头在整个频率范围内看起来相当平坦。Agilent 探头设计用于给出尽可能平坦的数学频率响应，或者说加载响应。于是，探头的带宽定义为这样一个点，在该点的此数学响应比探头的直流响应低 3dB。本质上讲，新的 Agilent 带宽规范方法假设信源阻抗为零欧姆，信源不受探头负载影响。以 Agilent 的方法描述特征的探头的有效带宽将比其计算带宽低，因为现实环境中使用的探头的阻抗不会为零。比较起来，Tektronix 带宽测量方法针对有效的 25Ω 信源阻抗（50Ω 信源与 50Ω 终端并联）进行了优化，这与在终接的 50Ω 环境中测量高速信号的现实条件更为接近。

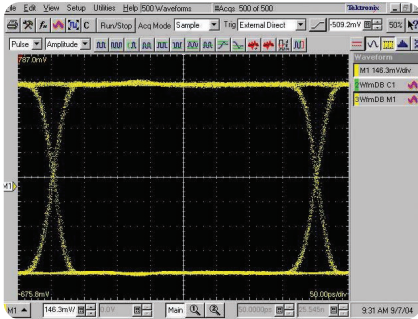
规定探头带宽的新的 Agilent 方法的局限性的一个表现是，要考虑探头具有高带宽和大探头负载的情况。使用 Agilent 带宽测量方法，该探头将看似具有非常高的带宽，但在现实环境中的效用却有限。

时域响应 — 使用加载响应探头的结果

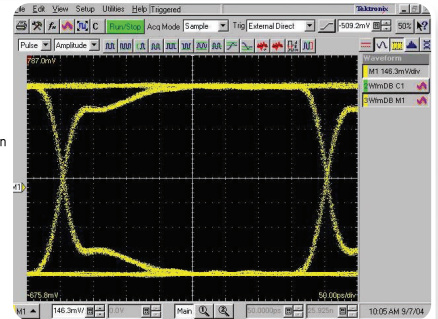
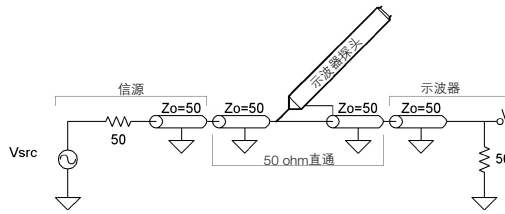
虽然带宽（频率响应的度量）是示波器的一个主要技术规格，但示波器首先是时域仪器。示波器上显示的数据是随时间变化的幅度曲线图。在频率域上看起来很小的差别，可能在时域上产生很大影响。

探头带宽计算

► 技术简介



信源的空载眼孔图样*



有负载的眼孔图样

► 图 13. CSA/TDS8000 采样示波器上显示的探头负载的时域效果。*2.5 Gb/s PRBS7 数据码型, 40 ps 10/90% 上升时间。

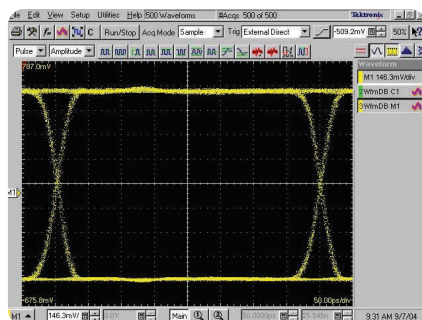
方波比在示波器显示屏上看到的要复杂得多。根据傅立叶数学，完美的方波可以分解为正弦谐波的无穷级数。但是，因为现在的探头和示波器不具有无限带宽，方波信号看起来不会是完美的。因为方波信号不能立即由低态变为高态，所以使用上升时间和下降时间的数字描述变化速度。较多的高频含量等同于较快的上升和下降时间。方波信号边缘的尖锐度受有用高频含量的影响。探头负载是频率相关的，通常是频率越高变得越糟。因此，探头负载对任何阶跃函数或方波的角有直接影响。图 13 说明了探头负载对眼图的影响。

显示空载响应 (Tektronix) 和显示负载响应 (Agilent) 的基本原理之间的差别，在时域中变得明显的多。

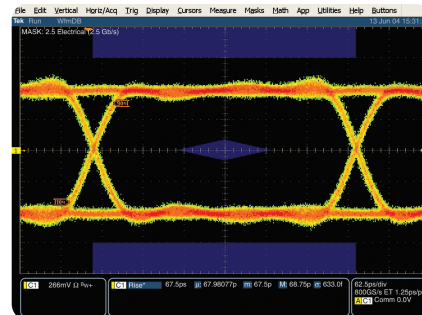
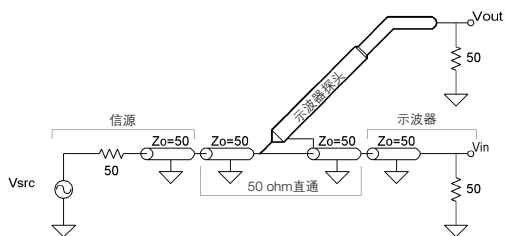
理论如何化为实践

如图 14 和图 15 所示，两种测量方法都产生各自想要的结果。Tektronix 探头设计用于显示被测设备在连接探头前输出的原始信号。即使对于上升时间如此快的信号，示波器显示屏上显示的响应看起来都与信源生成的眼图非常相似。Agilent 探头设计用于显示有负载的原始信号，即，连接探头后被测设备中的信号。Agilent 示波器显示屏上的响应确实与有负载的眼图具有相似的特征。

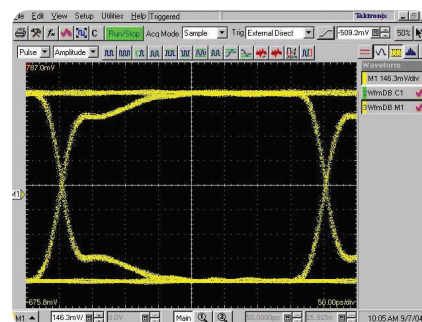
两种校准探头的方法都是正确的，这取决于要观察和测量的目的。Tektronix 认为，多数探头用户希望了解未连接探头时电路内部发生的情况。因此如此设计探头以满足需要。如果您希望了解电路内部发生的情况，那么您应该选择 Tektronix 探头。该类型探头是一种无需多费力即可进行测量的通用的好工具。



信源的空载眼孔图样*

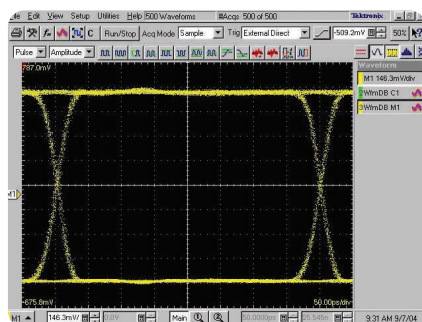


TDS6804B 示波器上的
Tektronix P7380 探头响应

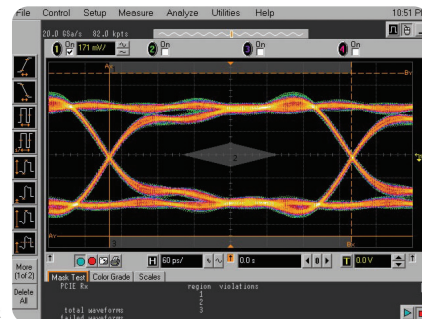
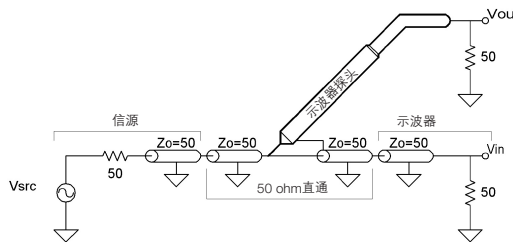


有负载的眼孔图样

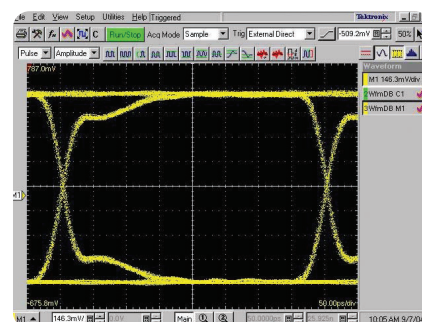
► 图 14. 时域中空载响应类型探头的示例。*2.5 Gbps PRBS7 数据码型，40 ps 10/90% 上升时间。



信源的空载眼孔图样*



54855A 示波器上的 Agilent
1134A 差分探头端部响应



有负载的眼孔图样

► 图 15. 时域中加载响应类型探头的示例。*2.5 Gbps PRBS7 数据码型，40 ps 10/90% 上升时间。

探头带宽计算

► 技术简介

如果您希望看到探头如何影响电路，您应该考虑选择 Agilent 探头。例如，在电路用来建模和仿真时，Agilent 探头很有用。可以向模型中添加探头负载，可以使用探头和示波器的输出检查仿真的输出。Tektronix 探头可以用于该类型测量，但需要被测设备终接到一个示波器通道，通常是通过同轴电缆连接。电路板并不总是提供该类型连接。

Agilent 探头在一些特定的应用中性能很好，但不能很好地作为一种通用工具。由于数据中始终包含探头的负载，因此，如果不做大量辅助计算，不花额外的时间，这种探头不能给出期望的数据。该类型的探头不是一种好的通用工具，因为它增加了一层复杂度。

测量电路时，工程师知道期望看到什么，他们使用探头验证是否每个部件都按设计运行。Agilent 将只显示系统性能，因为它受探头负载影响。于是工程师必须判断所看到的是系统造成的，还是仅仅来自探头负载的影响。采用测得的数据并反向计算出原始信号是可能的，但这一过程很难，而且很耗时。Agilent 没有执行这一步骤的自动示波器程序。每个单独的被测波形都必须做此项计算。如果省略该步骤，那么记录的数据将是可疑的。如果工程师希望使用示波器提供的大量应用程序中的一种，那么该现象可能就不是那么简单的问题了。所有这些应用程序都使用示波器数据来执行分析。由于出现了原始信号中所没有的探头

额外影响，因此如果使用原始探头数据，应用程序可能给出错误的传递或导致应用程序失败。

Agilent 有一篇应用文章对各种方法进行更详细的描述，使用这些方法可以采用探头输出，并反向计算以显示原始信号。Agilent 采样示波器具有正态化功能，可以在进行时域反射计 (TDR) 测量时用于校准测试夹具特征。可以使用同样的正态化功能来考虑探头负载，帮助探头显示原始信号。该方法的缺点是，在正态化之前，需要使用相应的探头负载恰当地描述信源的特征。在许多情况下，探头用户的最终目标是描述自己信号的特征。为什么要经受这么多麻烦来完全描述信号，然后才能回过头来用探头测量这个信号呢？Agilent 的实时示波器没有正态化功能。他们对这一问题的解决方案是使用离散元件为探头增加补偿电路。虽然这确实产生所需的效果，但这个解决方案对于测试自己的电路的工程师是不实用的。为什么要经受这么多麻烦从 Agilent 探头反向得出原始信号、Tektronix 探头就可以直接得到。

Agilent 探头的另外一个缺点是不能可靠地用于模板测试。如图中所示，探头负载可能对高速数字信号的前端角产生显著影响。由于响应中包含了探头负载，这可能使信号因人为因素导致模板测试失败或通过模板测试。

模板测试是高速串行数据测试的一种重要工具。大多数串行数据标准指定了可用于验证数据流的模板，以确保其符合标准。模板通常与线端接收机一起使用，如终接的 50Ω 示波器通道或 SMA-input 探头（如 P7380SMA）。线端接收机不必处理探头负载的问题。到达接收机的信号质量主要取决于传输线和 50Ω 终端的质量。模板定义了串行数据流目标环境中的串行数据流限制，串行数据流不包括外部因素，如探头负载。有时，不可能访问串行数据流以将其直接传送到示波器中。这种情况的一个示例是，同一电路板上有两个芯片，两者之间存在高速串行连接。访问数据流的惟一方法是使用示波器探头。

Tektronix 探头可以用于模板测试，因为该探头可以重现原始环境中的信号。而 Agilent 探头显示的信号包含探头负载，可能不符合进行有效模板测试的标准。使用 Agilent 探头进行模板测试的电路，在探头不连接到系统时可能会遇到问题，因为该电路是在无效环境中通过测试的。如果使用专门修改的模板，则可以使用 Agilent 探头进行兼容性测试，但无法使用标准模板（如标准委员会指定的模板）。

Agilent 探头的上升时间测量方法也可能无效，因为探头的负载会影响任何阶跃响应的前端角。示波器屏幕上显示的

探头响应包含负载。示波器测量算法通常查找 10-90% 点进行测量。前端角的失真可能足以改变波的形状，使 90% 点明显不同，使测量发生错误。20-80% 上升时间测量方法受到前端角失真的影响较少些，因为测量离该角较远。

结论

示波器探头是工程师用来进行快速测量并帮助将产品推向市场的工具。信号速度在过去几年的巨幅增长使探测变得更为复杂，探头用户需要了解并考虑这一增长。过去，所有的示波器探头设计者遵循同样的基本原理。Agilent 的加载响应类型探头的引入为探头用户提供了另外一种工具，但也引起迷惑。

不论使用哪种探头，都必须注意了解探头如何与 DUT 相互作用。Agilent 探头对于一小部分应用可能是很好的工具，但对于通用探测任务（如 DUT 鉴定、验证以及模板测试）来说不是非常适合，因为这些任务需要额外的计算来提取探头负载。相反，Tektronix 探头是进行通用探测任务的不错的工具，因为 Tektronix 探头尽可能直接显示原始的空载信号。

资料来源:

"Z-Active™: A New High Performance Probe Architecture", Tektronix, Inc.

"ABC's of Probes", Tektronix, Inc.

"Side-by-Side Comparison of Agilent and Tektronix Probing Measurements on High-Speed Signals", Agilent App Note 1491 Agilent Technologies, Inc.

"Time-Domain Response of Agilent InfiniiMax Probes and 54850 Series Infiniium Oscilloscopes", Agilent App Note 1461 Agilent Technologies, Inc.

User Manual: 1134A 7 GHz InfiniiMax Differential and Single-ended Probes (Publication Number 01134-97007), Agilent Technologies, Inc.

与 Tektronix 联系:

奥地利 +41 52 675 3777
巴尔干半岛、以色列、南非及其它 ISE 国家/地区 +41 52 675 3777
巴西和南美 55 (11) 3741-8360
比利时 07 81 60166
波兰 +41 52 675 3777
丹麦 80 88 1401
德国 +49 (221) 94 77 400
东南亚国家联盟/澳大拉西亚/巴基斯坦 (65) 6356 3900
俄罗斯、独联体和波罗的海诸国 7 095 775 1064
法国和北非 +33 (0) 1 69 81 81
芬兰 +41 52 675 3777
韩国 82 (2) 528-5299
荷兰 090 02 021797
加拿大 1 (800) 661-5625
卢森堡 +44 (0) 1344 392400
美国 1 (800) 426-2200
美国 1 (出口销售) 1 (503) 627-1916
墨西哥、中美洲和加勒比海 52 (55) 56666-333
南非 +27 11 254 8360
挪威 800 16098
欧洲中东地区、乌克兰和波罗地海 +41 52 675 3777
葡萄牙 80 08 12370
日本 81 (3) 6714-3010
瑞典 020 08 80371
瑞士 +41 52 675 3777
台湾 886 (2) 2722-9622
西班牙 (+34) 901 988 054
香港 (852) 2585-6688
意大利 +39 (02) 25086 1
印度 (91) 80-22275577
英国和爱尔兰 +44 (0) 1344 392400
中东、亚洲和北非 +41 52 675 3777
中华人民共和国 86 (10) 6235 1230
中欧和希腊 +41 52 675 3777
其他地区请联系 Tektronix 公司 1 (503) 627-7111
最后更新日期: 2004 年 11 月 3 日

了解更多信息

Tektronix 维护一个全面的和不断扩展的应用文章、技术简介和其他资源的集锦, 可帮助工程师使用最新的技术。请访问 www.tektronix.com



版权所有 © 2004, Tektronix, Inc. 保留所有权利。Tektronix 产品受美国 and 外国专利权 (包括已取得的和正在申请的专利权) 的保护。本文中的信息将取代所有以前出版的资料中的信息。保留更改产品规格和价格的权利。TEKTRONIX 和 TEK 是 Tektronix, Inc. 的注册商标。引用的其他所有商标名称均为他们各自公司的服务标志、商标或注册商标。
11/04 FLG/WOW 60C-18324-0

Tektronix
Enabling Innovation