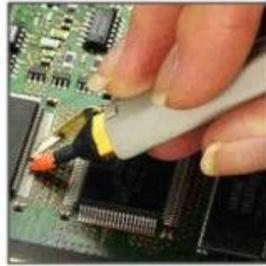


一文了解示波器探头

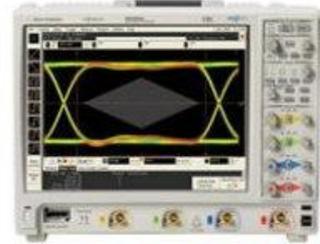
示波器因为有探头的存在而扩展了示波器的应用范围，使得示波器可以在线测试和分析被测电子电路，如下图：



被测电路



探头



示波器

探头的选择和使用需要考虑如下两个方面：

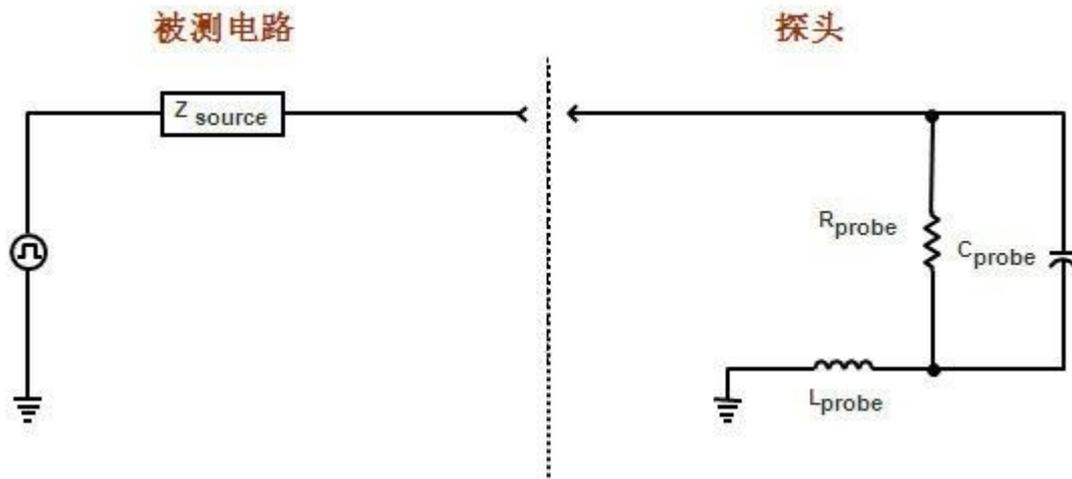
其一：因为探头有负载效应，探头会直接影响被测信号和被测电路；

其二：探头是整个示波器测量系统的一部分，会直接影响仪器的信号保真度和测试结果

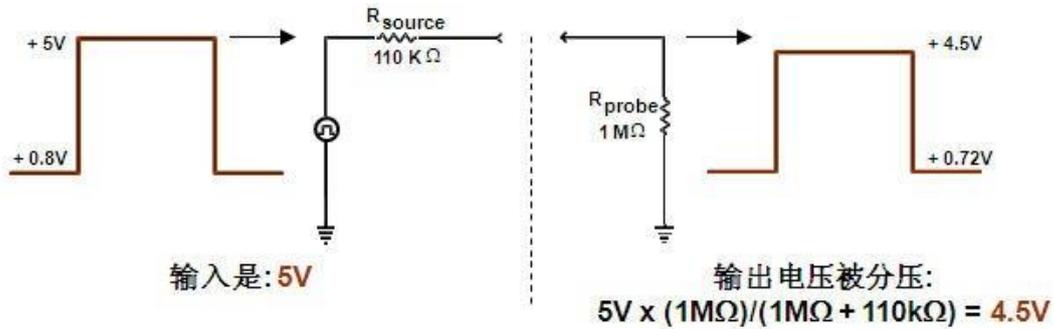
一、探头的负载效应

当探头探测到被测电路后，探头成为了被测电路的一部分。探头的负载效应包括下面 3 部分：

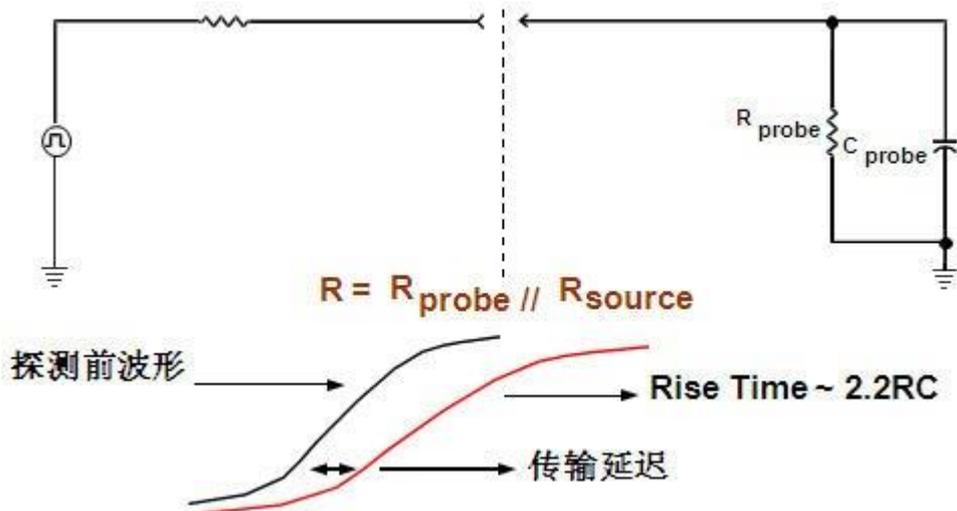
1. 阻性负载效应；
2. 容性负载效应；
3. 感性负载效应。



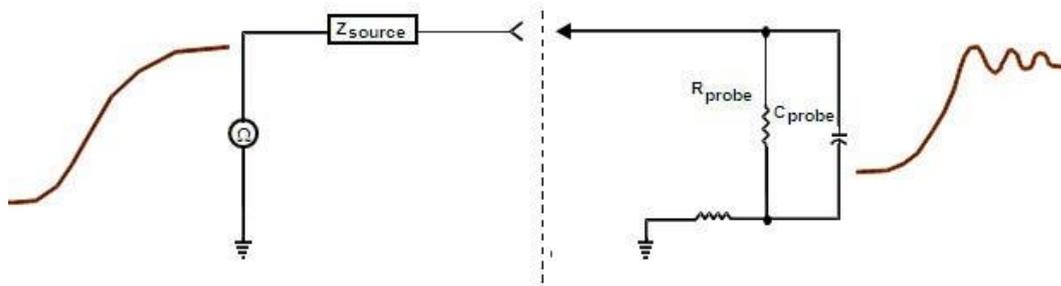
阻性负载相当于在被测电路上并联了一个电阻，对被测信号有分压的作用，影响被测信号的幅度和直流偏置。有时，加上探头时，有故障的电路可能变得正常了。一般推荐探头的电阻 $R > 10$ 倍被测源电阻，以维持小于 10% 的幅度误差。



容性负载相当于在被测电路上并联了一个电容，对被测信号有滤波的作用，影响被测信号的上升下降时间，影响传输延迟，影响传输互连通道的带宽。有时，加上探头时，有故障的电路变得正常了，这个电容效应起到了关键的作用。一般推荐使用电容负载尽量小的探头，以减小对被测信号边沿的影响。



感性负载来源于探头地线的电感效应，这地线电感会与容性负载和阻性负载形成谐振，从而使显示的信号上出现振铃。如果显示的信号上出现明显的振铃，需要检查确认是被测信号的真实特征还是由于接地线引起的振铃，检查确认的方法是使用尽量短的接地线。一般推荐使用尽量短的地线，一般地线电感=1nH/mm。



二、探头的类型

示波器探头大的方面可以分为：无源探头和有源探头两大类。无源有源顾名思义就是需不需要给探头供电。

无源探头细分如下：

1. 低阻电阻分压探头；
2. 带补偿的高阻无源探头（最常用的无源探头）；
3. 高压探头

有源探头细分如下：

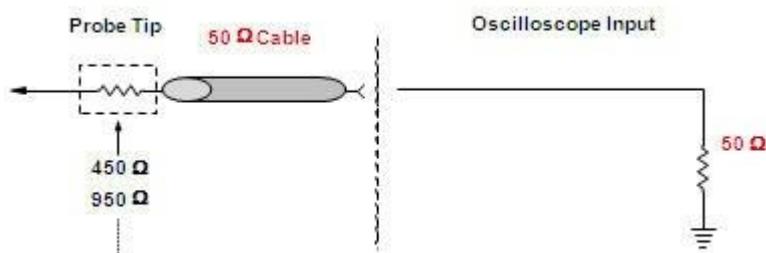
1. 单端有源探头；
2. 差分探头；
3. 电流探头

最常用的高阻无源探头和有源探头简单对比如下：

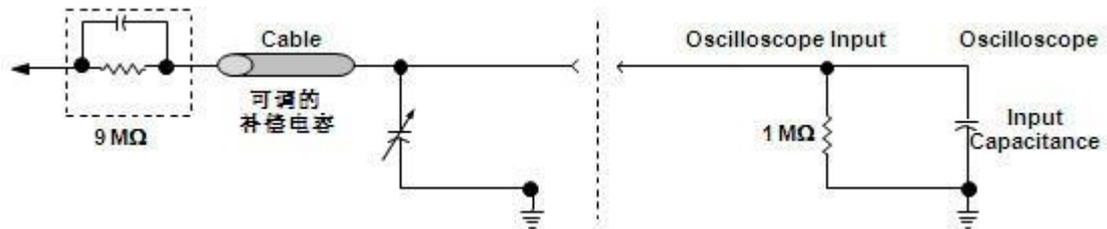
有源探头和高阻无源探头对比

| | 有源探头 | 高阻无源探头 |
|--------|---------------------|---------------------|
| 负载 | 阻性负载和容性负载的最佳组合 | 高容性负载，低阻性负载 |
| 带宽 | 高带宽 | 低带宽 |
| 最大输入电压 | ~ +40V (dc+peak ac) | ~ 300V (dc+peak ac) |
| 探头尖 | 大或小 | 小和轻 |
| 价格 | 高 | 低 |

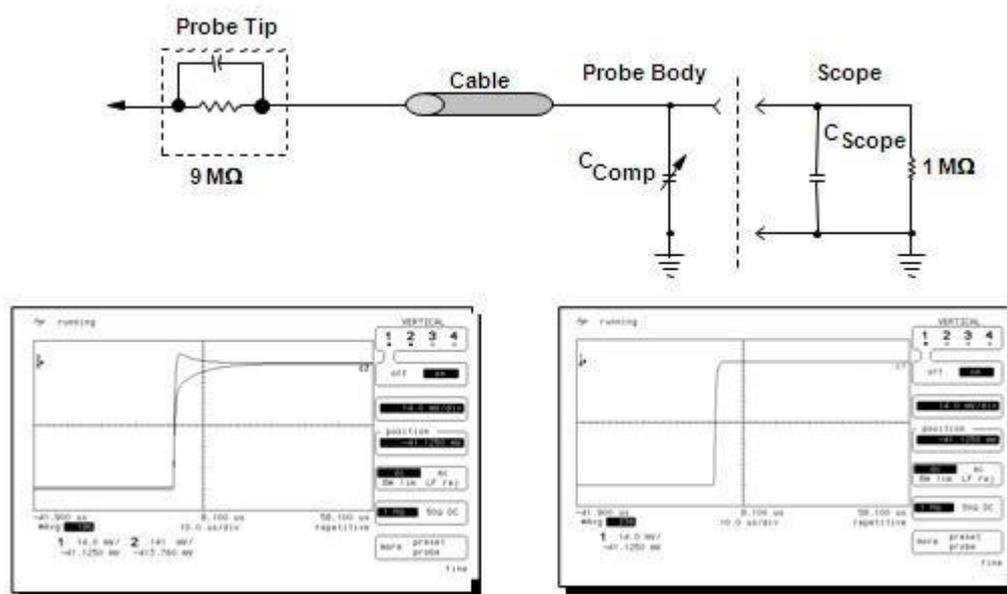
低阻电阻分压探头具备较低的电容负载 (<1pf)，较高的带宽 (>1.5GHz)，较低的价格，但是电阻负载非常大，一般只有 500ohm 或 1Kohm，所以只适合测试低源阻抗的电路，或只关注时间参数测试的电路。



带补偿的高阻无源探头是最常用的无源探头，一般示波器标配的探头都是此类探头。带补偿的高阻无源探头具备较高的输入电阻（一般 $1\text{M}\Omega$ 以上），可调的补偿电容，以匹配示波器的输入，具备较高的动态范围，可以测试较大幅度的信号（几十幅以上），价格也较低。但是不知之处是输入电容过大（一般 10pF 以上），带宽较低（一般 500MHz 以内）。

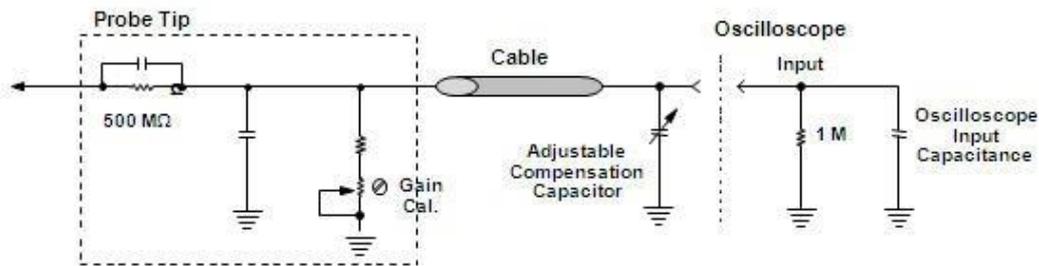


带补偿的高阻无源探头有一个补偿电容，当接上示波器时，一般需要调整电容值（需要使用探头自带的小螺丝刀来调整，调整时把探头连接到示波器补偿输出测试位置），以与示波器输入电容匹配，以消除低频或高频增益。下图的左边是存在高频或低频增益，调整后的补偿信号显示波形如下图的右边所示。



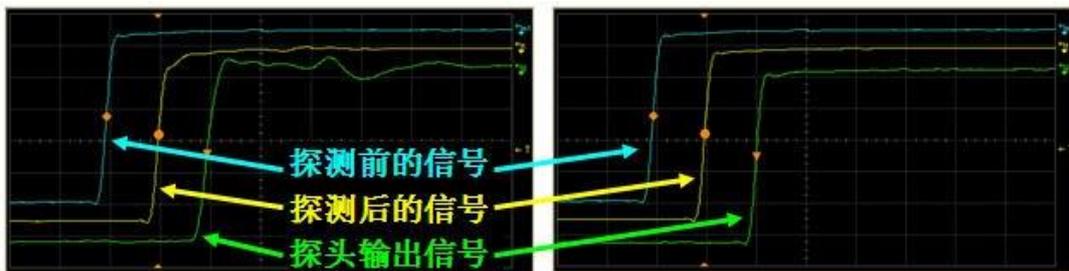
(匹配低频增益和 高频增益)

高压探头是带补偿的无源探头的基础上，增大输入电阻，使得衰减加大(如: $100:1$ 或 $1000:1$ 等)。因为需要使用耐高压的元器件，所以高压探头一般物理尺寸较大。



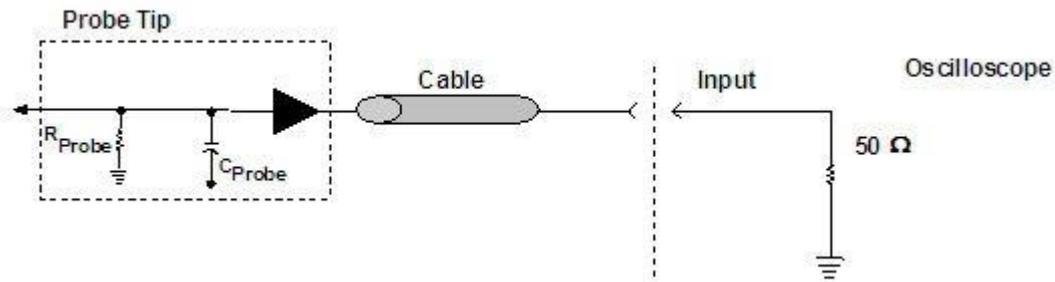
三、有源探头

我们先来观察一下用 600MHz 无源探头和 1.5GHz 有源探头测试 1ns 上升时间阶跃信号的影响。使用脉冲发生器产生一个 1ns 的阶跃信号，通过测试夹具后，使用 SMA 电缆直接连接到一个 1.5GHz 带宽的示波器上，这样示波器上会显示一个波形（如下图中的蓝色信号），把这个波形存为参考波形。然后使用探头点测测试夹具去探测被测信号，通过 SMA 直连的波形因为受探头负载的影响而变成黄色的波形，探头通道显示的是绿色的波形。然后分别测试上升时间，可以看出无源探头和有源探头对高速信号的影响。



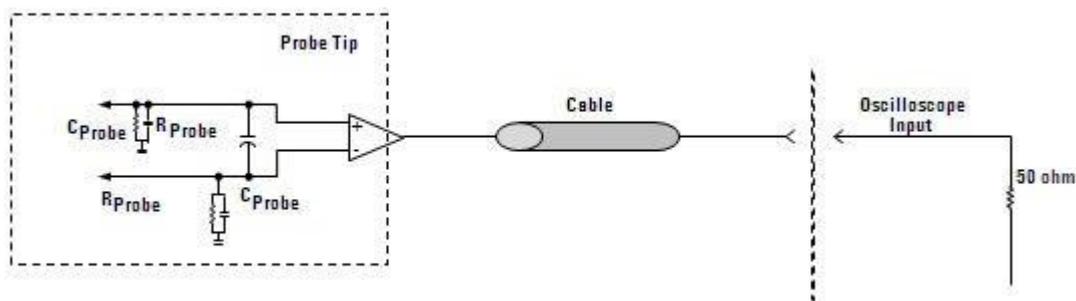
具体测试结果如下：

使用 1165A 600MHz 无源探头，使用鳄鱼嘴接地线：受探头负载的影响，上升时间变为：1.9ns；探头通道显示的波形存在振铃，上升时间为：1.85ns；
 使用 1156A 1.5GHz 有源探头，使用 5cm 接地线：受探头负载的影响较小，上升时间仍为：1ns；探头通道显示的波形与原始信号一致，上升时间仍为：1ns。
 单端有源探头结构图如下，使用放大器实现阻抗变换的目的。单端有源探头的输入阻抗较高（一般达 100Kohm 以上），而输入电容较小（一般小于 1pf），通过探头放大器后连接到示波器，示波器必须使用 50ohm 输入阻抗。有源探头带宽宽（现在可达 30GHz），而负载小，但是价格相对较高（一般每根探头达到同样带宽示波器价格的 10%左右），动态范围较小（这个需要注意，因为超过探头动态范围的信号，不能正确测试。一般动态范围 5V 左右），比较脆弱，使用需小心。



差分探头结构图如下，使用差分放大器实现阻抗变换的目的。差分探头的输入阻抗较高（一般达 50Kohm 以上），而输入电容较小（一般小于 1pf），通过差分探头放大器后连接到示波器，示波器必须使用 50ohm 输入阻抗。差分探头带宽非常宽（现在可达 30GHz），负载非常小，具有较高共模抑制比，但是价格相对较高（一般每根探头达到同样带宽示波器价格的 10% 左右），动态范围也较小（这个需要注意，因为超过探头动态范围的信号，不能正确测试。一般动态范围 3V 左右），比较脆弱，使用需小心。

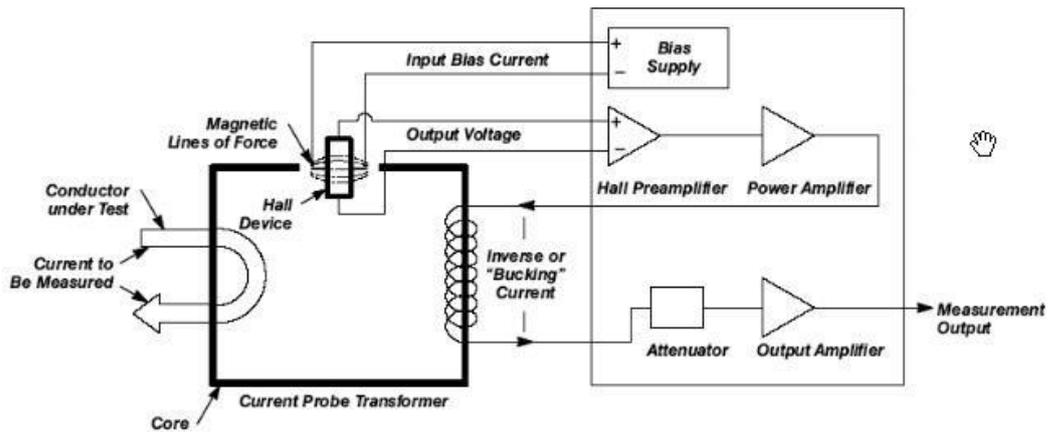
差分探头适合测试高速差分信号（测试时不用接地），适合放大器测试，电源测试，适合虚地测试等应用。



电流探头也是有源探头，利用霍尔传感器和感应线圈实现直流和交流电流的测量。电流探头把电流信号转换成电压信号，示波器采集电压信号，再显示成电流信号。电流探头可以测试几十毫安到几百安培的电流，使用时需要引出电流线（电流探头是把导线夹在中间进行测试的，不会影响被测电路）。

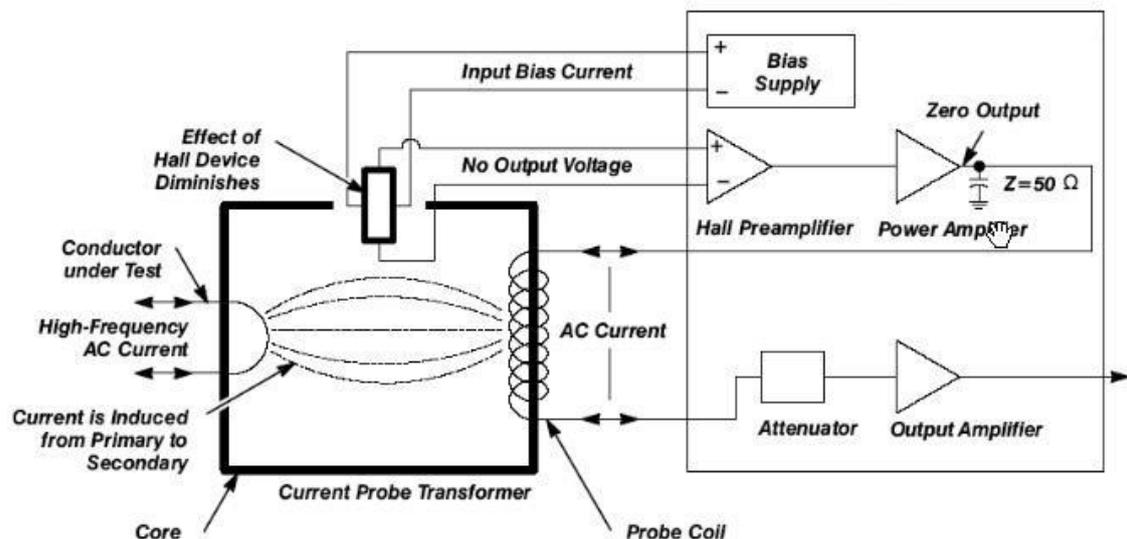
电流探头在测试直流和低频交流时的工作原理：

当电流钳闭合，把一通有电流的导体围在中心时，响应地会出现一个磁场。这些磁场使霍尔传感器内的电子发生偏转，在霍尔传感器的输出产生一个电动势。电流探头根据这个电动势产生一个反向（补偿）电流送至电流探头的线圈，使电流钳中的磁场为零，以防止饱和。电流探头根据反向电流测得实际的电流值。用这个方法，能够非常线性的测量大电流，包括交直流混合的电流。



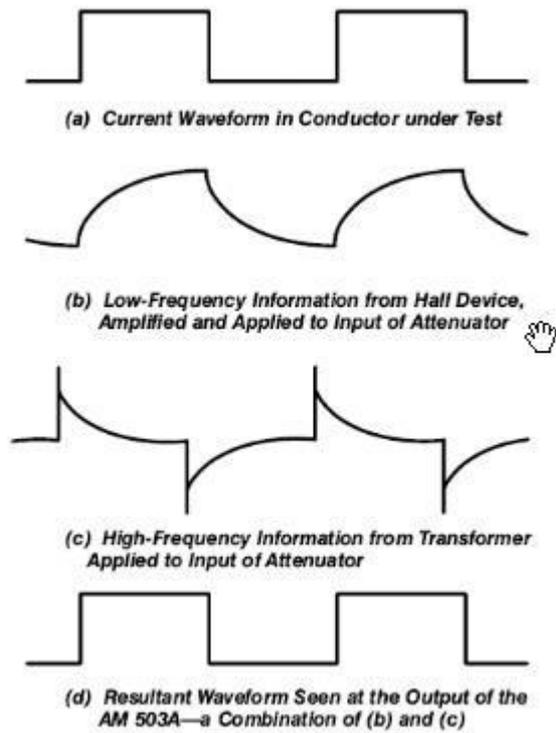
电流探头在测试高频时的工作原理：

随着被测电流频率的增加，霍尔效应逐渐减弱，当测量一个不含直流成分的高频交流电流时，大部分是通过磁场的强弱直接感应到电流探头的线圈。此时，探头就像一个电流变压器，电流探头直接测量的是感应电流，而不是补偿电流，功放的输出为线圈提供一个低阻抗的接地回路。



电流探头在交叉区域时的工作原理：

当电流探头工作在 20KHz 的高低频交叉区域时，部分测量是通过霍尔传感器实现的，另一部分是通过线圈实现的。



四、有源探头附件

现代的高带宽有源探头都采用分离式的设计方法，即：探头放大器与探头附件部分分开。这样设计的好处是：

- 1、支持更多的探头附件，使得探测更加的灵活；
- 2、保护投资，最贵的是探头放大器（一个探头放大器可以支持多种探测方式，以前需要几个探头来实现）；同时探头附件保护探头放大器（探头附件即使损坏，价格也相对便宜）；
- 3、这种设计方式容易实现高带宽。

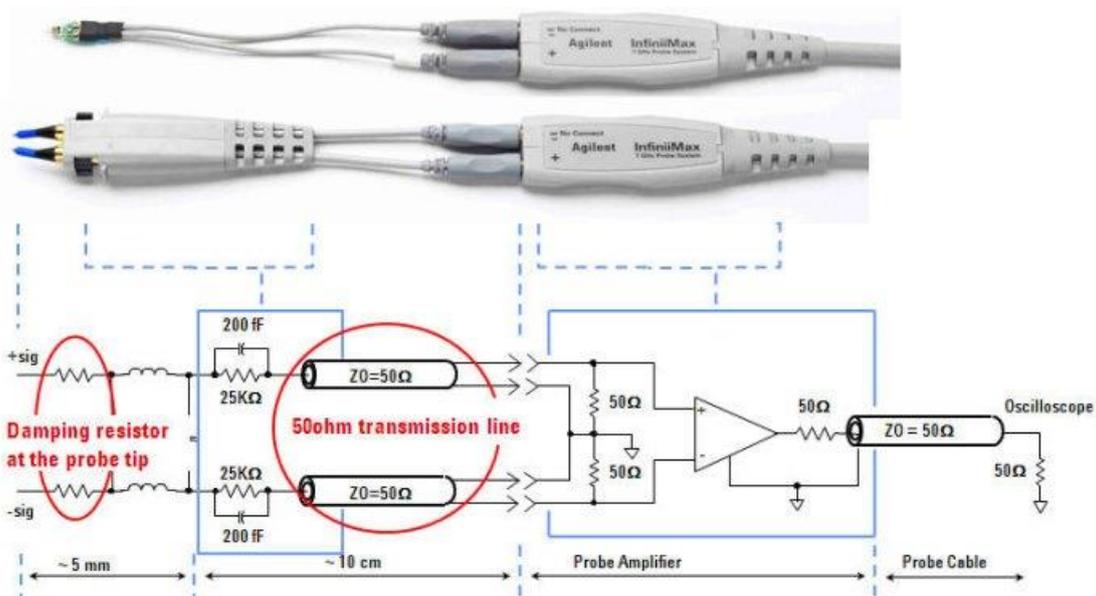


这些探头附件，主要包括以下几种：

- 1、点测探头附件（包括：单端点测和差分点测）；
- 2、焊接探头附件（包括：单端焊接和差分焊接，分离式的 ZIF 焊接）；
- 3、插孔探头附件；
- 4、差分 SMA 探头附件（示波器一般直接支持 SMA 连接，但是如果被测信号需要上拉如 HDMI，则必须使用 SMA 探头附件）。

探头附件的电路结构如下图所示：

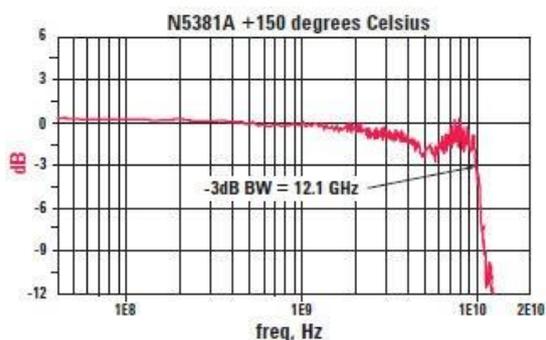
- 1、在探头附件尖端部分会有一对阻尼电阻（一般 82ohm），这对阻尼电阻的作用是消除探头附件尖端部分的电感的谐振影响；
- 2、探头尖端部分的后面是 25Kohm 的电阻，这个电阻决定了探头的输入阻抗（直流输入阻抗即电阻：单端 25Kohm，差分 50Kohm），这个电阻使得被测信号传输到探头放大器部分的功率是非常小的，不至于对被测信号有较大影响。
- 3、25Kohm 的电阻后面是同轴传输线部分，这个传输线负责把小信号传输到放大器。这个传输线的长度可以很长，也可以很短，中间可以加衰减器，也可以加耦合电容。
- 4、同轴传输线连接到放大器，放大器是 50ohm 匹配的（差分 100ohm 匹配）。



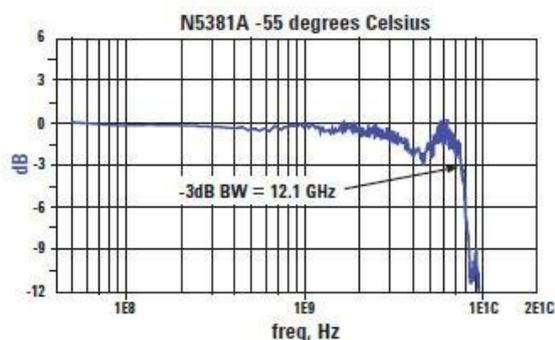
有源探头为了保持探头的精确度，需要工作在恒温状态，所以探头放大器不能放置到高低温箱里进行高低温环境下被测电路板的测试。从探头附件结构中可见中间的 50ohm 传输线的长短不影响探测，所以可以用很长的同轴电缆或扩展同轴电缆，让这个同轴电缆伸进高低温箱里进行高低温环境下被测电路板的测试。如下图所示是 N5450A 扩展电缆，使用 N5381A 焊接探头附件，可以工作在 -55° 到 150° 温度范围。



使用N5450A扩展电缆和N5381A探头附件,使用1169A 12GHz探头放大器,在-55°和150°环境下的频响曲线如下图所示,可见能够满足高速信号测试的要求。



**Response plot for N5381A + N5450A
at 150 °C**



**Response plot for N5381A + N5450A
at -55 °C**

五、探头及附件准确度验证

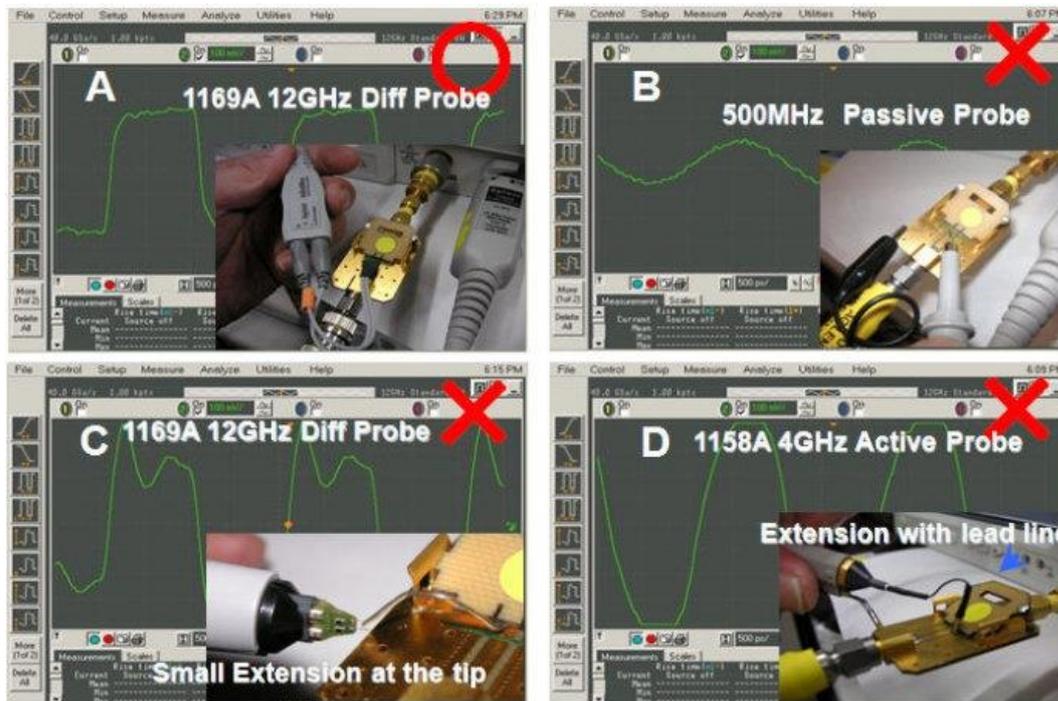
下图是一个例子:被测信号是一个频率456MHz,边沿时间约65ps的时钟信号,分别使用不同类型的探头和探头附件的测试结果。

A图是使用12GHz的1169A差分探头和N5381A 12GHz焊接探头附件的测试结果,几乎完全复现被测信号;

B图是使用500MHz的无源探头的测试结果,显示的信号完全失真;

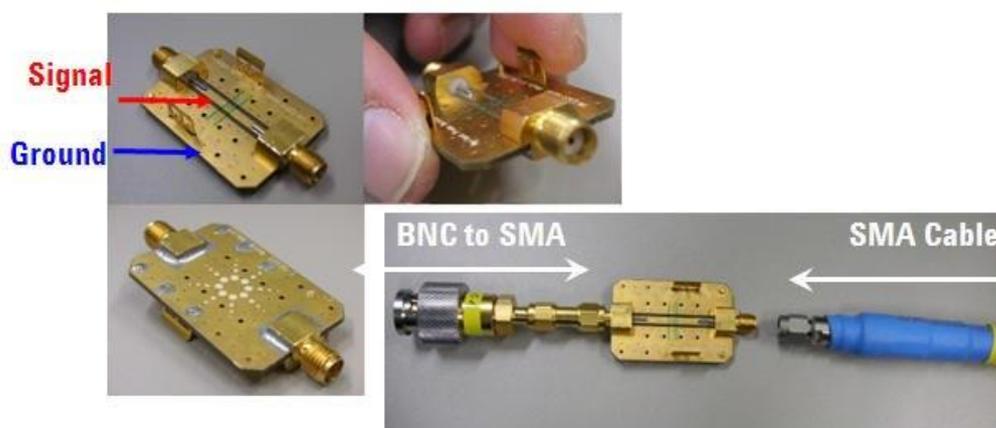
C图是使用12GHz的1169A差分探头和较长的测试引线的测试结果,显示的信号出现很大的过冲;

D图是使用4GHz的1158A单端探头和较长的测试引线的测试结果,显示的信号几乎是正弦波,失真较大。



从图中可见探头和探头附件对测试精确度的影响是非常大的，是我们测试高速信号应该重点注意的内容之一。那我们应该如何验证探头和探头附件呢？

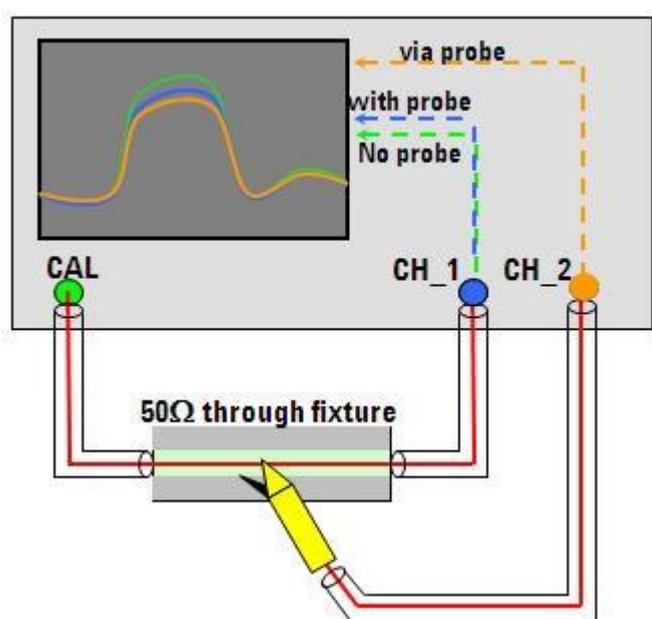
验证探头和探头附件需要使用一台脉冲码型发生器（如：81134A，3.35GHz 速率，60ps 边沿的脉冲码型发生器），如果示波器自带高速信号输出功能，也可以使用示波器的这个辅助输出口代替脉冲码型发生器（如：Infiniium 示波器的 AUX OUT 端口可以发一个高速时钟：456MHz 频率，约 65ps 边沿）。另外，需要同轴电缆和测试夹具（Infiniium 示波器配置的探头校准夹具可以作为探头和探头附件验证测试夹具）。测试夹具的外表是地 (Ground)，里面走线是信号 (Signal)，如下图所示。使用时，通过同轴电缆把一端接到脉冲码型发生器或示波器的辅助输出 AUX OUT 端口，另外一端通过适配器连接到示波器的通道 1 上。



然后把被验证的探头连接到通道 2 上，探头通过探头附件可以接触到测试夹具的信号和地（如果是差分探头，那么把+端连接到测试夹具的信号线，把-端连接到

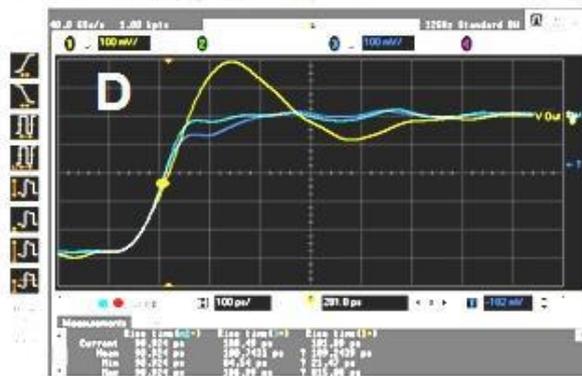
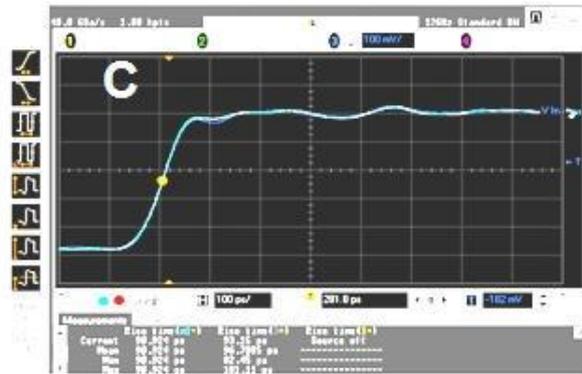
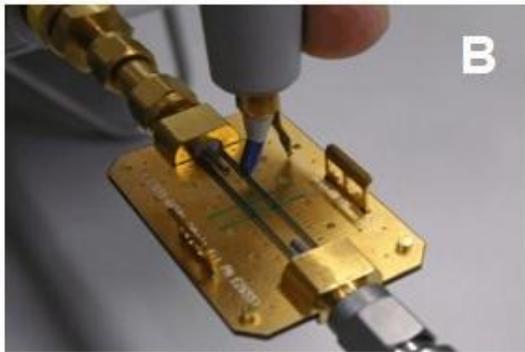
测试夹具的地上)。

- 1、如果探头不接触信号线，则屏幕上会出现一个原始波形，存为参考波形；
- 2、当用探头探测信号线时，通道 1 的波形会发生变化，这个变化后的波形就是被探头和探头附件影响后的被测信号；
- 3、这时，连接探头的通道 2 会出现一个波形，这个波形是探头测试到的波形；
- 4、通过对比参考波形，通道 1 的波形，和连接探头的通道 2 的波形，就可以直观的看出或通过测试参数读出三者的差别，可以验证探头和探头附件的影响。



下图是实际验证的一个例子，图 A 把示波器的 AUX OUT 通过同轴电缆连接到测试夹具，测试夹具的另一端通过 SMA-PBNC 适配器连接到示波器的一个通道上（此例连接到通道 3），把探头连接到通道 1 上，此时调整屏幕上的波形，使得出现一个边沿阶跃波形，如图 C 所示，并把此波形存为参考波形。如图 B 把被验证探头和附件点测到测试夹具上，如图 D 所示，屏幕上出现 3 个波形，兰色的是参考波形，绿色的是受探头影响后的被测波形，黄色的是探头显示的波形，通过测试

上升时间参数，过冲参数等，可确认探头和探头附件的性能。



文章来源：安捷伦公司