

负载效应是如何影响被测信号的？

薛定谔的猫，比喻一件事如果你不去做，它就可能有两个结果，而一旦你去做，最后结果就只有一个，你的参与也直接干预了结果。

使用示波器测试电信号，就像观察薛定谔的猫：一旦被测电路接入探头和示波器进行观测，会对信号本身产生一定程度的影响。想要将测试设备对信号的影响降到最低，就需要深入理解探头的负载效应。

何为探头的负载效应？

简单来说，探头的负载效应就是在用示波器接探头测电路中的其中两点的波形时，在两个测试点中接入了一个负载，而这个负载的大小，会直接影响电路的状态，造成测量结果的不正确性。

示波器本身是有输入阻抗的，用示波器测量的同时，也不得不将这部分阻抗并联到电路中。而为了防止信号发生反射而震荡，探头与示波器电路需要进行阻抗匹配。每个示波器探头也有其输入阻抗，这个阻抗是特性阻抗，不仅仅是电阻，还包含了电容和电感等。由于探头引入的额外负载，所以探头接入被测电路后，也会从信号中汲取能量，实际上就会影响被测电路。因此我们在进行分析测量时必须考虑到探头的负载特性及测试电路的阻抗匹配。

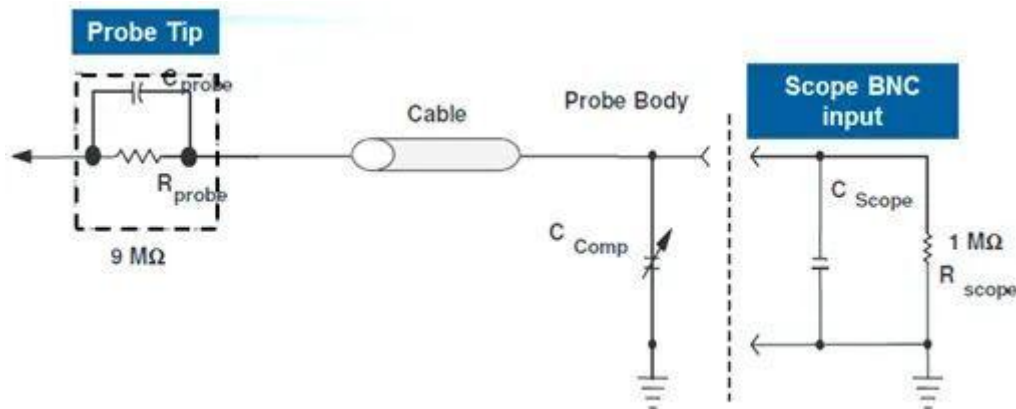


图 1 10:1 探头连接到示波器输入阻抗的简化模型

如图 1 所示为日常最为常见的一类无源探头原理示意图，它由输入阻抗 R_{probe} 、寄生电容 C_{probe} 、传输导线、可调补偿电容 C_{comp} 组成。此类无源探头一般输入阻抗为 $10M\Omega$ ，衰减比因子为 10: 1。

在使用此类探头时，示波器的输入阻抗会自动设置为高阻 $1M\Omega$ 。此时示波器 BNC 通道输入点的电压 V_{scope} 与探头前端所探测的电压值 V_{probe} 的关系满足以下对应关系：

$$V_{probe}/V_{scope} = (9M\Omega + 1M\Omega) / 1M\Omega = 10 : 1$$

示波器的 50Ω 和 $1M\Omega$

在 DC 和较低频时，示波器 $1M\Omega$ 起到主导地位。而当频率超过 $10MHz$ 以后，电容会成为主要的负载即容性负载效应会更高。

探头在 $\times 1$ 档位时，信号直接进入示波器，这类探头在测试点处将其自身的电容（包括电缆的电容）与示波器的输入阻抗连在了一起，这就是探头的负载效应。

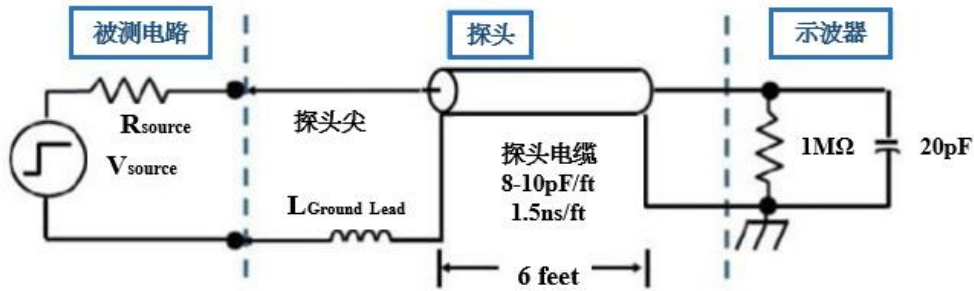


图2 x1档结构模型

x1 档位输入电容通常为 $55 \pm 10 \text{ pF}$ ，此时等同于在被测电路上加了一个低阻抗负载，在输入电容为 50 pF 时，若测试 10 MHz 的信号，根据容抗计算公式： $X_c(C_p) = 1 / (2 \times \pi \times f \times C)$ ，此时容抗约为 318Ω ，且 x1 档时带宽较低，测试出的结果是不准确的。

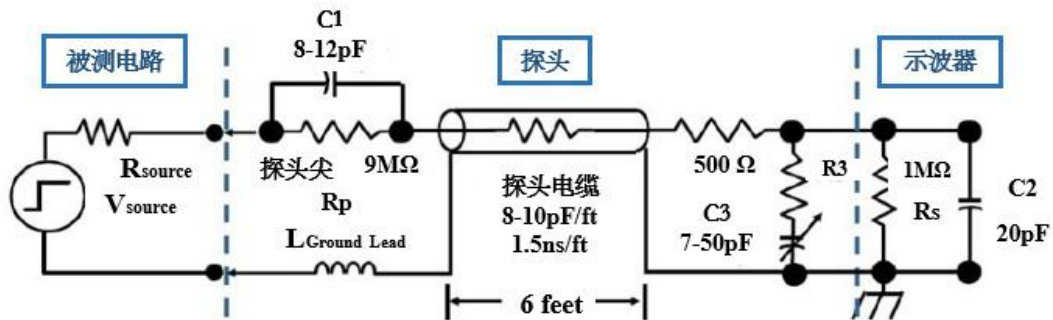


图3 x10档结构模型

探头在 x10 档时，输入阻抗为 $10 \text{ M}\Omega$ ，输入电容 10 pF ，输入信号的频率为 100 MHz ，此时，探头输入容抗为 $X_c(C_p) = 1 / (2 \times \pi \times f \times C) = 159 \Omega$ ，此时容抗远远小于探头阻抗，信号电流更多的会通过输入电容提供的低阻回路，而高阻回路等效为旁路。所以如果测量高频信号，建议使用 10:1 无源探头进行测量，因为其寄生电容要比示波器低。

从以上我们可以知道，从电压测量的角度来说，为了减小对被测电路的影响（即减小负载效应），示波器应采用 $1 \text{ M}\Omega$ 的高输入阻抗，但是由于高阻抗电路的带宽很容易受到寄生电容的影响。所以 $1 \text{ M}\Omega$ 的输入阻抗广泛应用于 500 M 带宽以下的测量。

而对于更高频率的测量，通常采用传输线，传输线探头具备更低的寄生电容，且具有低输入阻抗的特性，传输线的阻抗为 50Ω ，故示波器 50Ω 匹配主要用于高频测量。

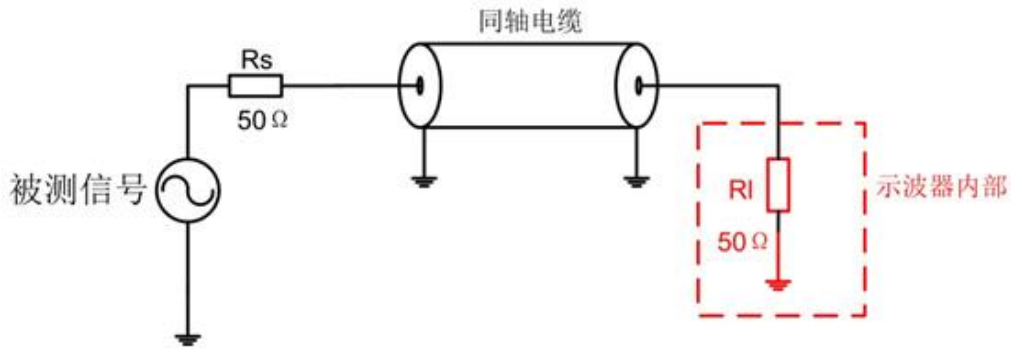


图4 50Ω传输线缆图

特性阻抗大小会影响信号传输功率、传输损耗、串扰等电气性能，而其板材和几何结构又影响制造成本，这种情况只能找一个折中值。而50Ω正是同轴线的传输功率、传输损耗以及制造成本的一个最佳平衡点。所以大多数高速信号都会采用50Ω特性阻抗系统，形成标准并沿用至今，成为使用最广泛的一种阻抗标准，这也是50Ω的由来。

1MΩ阻抗和50Ω阻抗档位的设计出发点不同，1MΩ档位的出发点是为了让示波器拥有较小的负载效应，而50Ω档位则是为了消除传输线上的信号反射，将传输线影响降到最低。

如何选择阻抗匹配及探头档位

- 1、当被测信号是一个无负载信号（如信号发生器），且采用50Ω特性阻抗同轴电缆与示波器相连接时，则需要使用50Ω阻抗档位。
- 2、当被测信号是一个板载信号，有自己完整的终端接收系统时，则需要使用1MΩ阻抗档位直接测量或者使用探头测量。

1MΩ阻抗时档位选择：

- 1、通常X1探头的带宽较低。想要更高频率，需要选用带衰减的无源探头。
- 2、对于比如VCO的VTUNE引脚，最好使用X10档，因为信号比较敏感。衰减后对信号干扰较少。
- 3、测量晶振等内阻较大，输出阻抗大的线路时，使用X10档，可以获得比较精确的幅度值。起到提高输入阻抗的作用。

ZDS5000/4000系列示波器的通道输入阻抗1MΩ或者50Ω可调，如图5所示，可用于多种设备的接入测量。这些输入阻抗可在被测设备上使示波器的负载效应最小化，使用户能够进行最精确的测量，适用于许多无源探头。

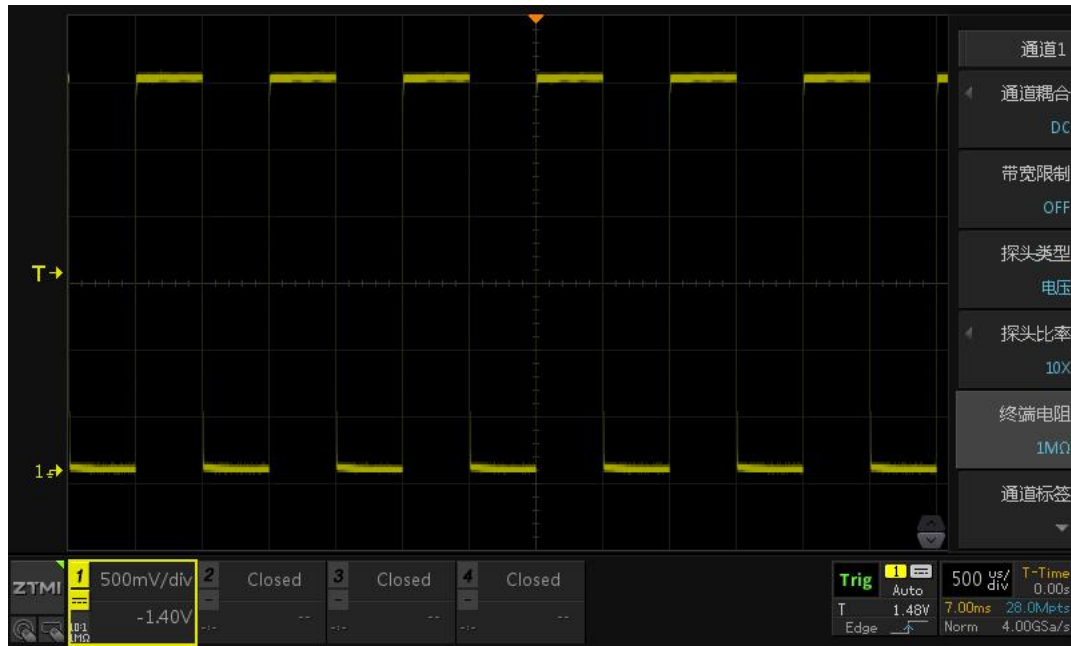


图 5 ZDS5000 通道阻抗选择