

示波器探头

摘要: 本文的核心是示波器探头, 主要介绍其结构、分类、主要技术指标以及在实际测试中对测量结果的影响, 另外介绍了如何选用合适的示波器探头, 以及使用示波器探头的注意事项。

关键词: 负载、带宽、阻抗匹配、示波器探头

1 概述

示波器探头对测量结果的准确性以及正确性至关重要, 它是连接被测电路与示波器输入端的电子部件。最简单的探头是连接被测电路与电子示波器输入端的一根导线, 复杂的探头由阻容元件和有源器件组成。简单的探头没有采取屏蔽措施很容易受到外界电磁场的干扰, 而且本身等效电容较大, 造成被测电路的负载增加, 使被测信号失真。

1.1 示波器探头的定义

本质上, 示波器探头是在测试点或信号源和示波器之间建立了一条物理和电子连接; 实际上, 示波器探头是把信号源连接到示波器输入上的某类设备或网络, 它必须在信号源和示波器输入之间提供足够方便优质的连接。连接的充分程度有三个关键的问题: 物理连接、对电路操作的影响和信号传输。

1.2 示波器探头的发展过程

在过去 50 年中, 各种示波器探头接口设计一直在不断演进, 以满足提高的仪器带宽速度和测量性能要求。在最早的年代, 通常使用香蕉式插头和 UHF 型连接器。在 20 世纪 60 年代, 普通 BNC 型连接器成为常用的探头接口类型, 因为 BNC 体积更小、频率更高。目前, BNC 探头接口仍用于测试和测量仪器设计, 当前更高质量的 BNC 型连接器提供了接近 4GHz 的最大可用带宽功能。

之后, 某些厂家提出了普通 BNC 型探头接口设计变通方案, 在使用 BNC 连接器的同时, 额外提供了一个模拟编码的标度系数检测针脚, 作为机械和电子接口设计的一部分, 使得兼容的示波器能够自动检测和改变示波器显示的垂直衰减范围。

1.3 示波器探头的结构形式

大多数探头由探头头部、探头电缆、补偿设备或其他信号调节网络和探头连接头组成。如图 1 所示。

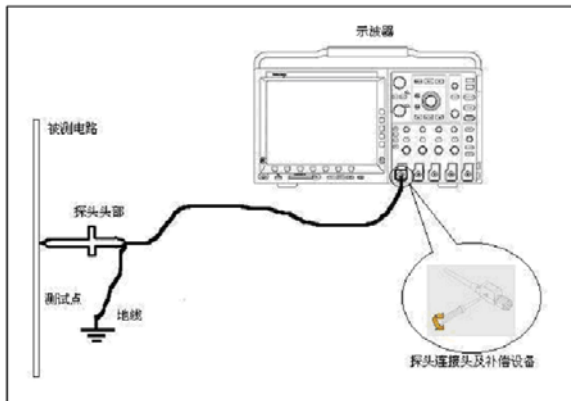


图 1 探头的结构形式

为进行示波器测量，必须先能够在物理上把探头连接到测试点。为实现这一点，大多数探头至少有一两米长的相关电缆，如图 1 所示。但是探头电缆降低了探头带宽：电缆越长，下降的幅度越大。除了一两米长的电缆外，大多数探头还有一个探头头部或带探针的把手，探头头部可以固定探头，用户则可以移动探针，与测试点接触。通常这一探针采用弹簧支撑的挂钩形式，可以把探头实际连接到测试点上。

为了获得可用的测量结果，探针上的信号必须通过探头头部和电缆，以足够的保真度传送到示波器的输入。

2 示波器探头的主要分类和各类探头的特点

市场上提供了数百种、甚至上千种不同的示波器探头。示波器探头的技术指标是频率特性，按频率划分探头的种类有其方便之处，但是示波器探头的频率覆盖范围有限很难按无线电频率的 LF、HF、VHF、UHF、RF 等波段来划分。示波器探头是所有探头中的一种，最常使用的探头是电压电流探头，而探头通常是按测量对象进行分类的，具体分类如图 2 所示：



图 2: 探头的分类

2.1 无源电压探头

2.1.1 无源探头

无源探头由导线和连接器制成, 在需要补偿或衰减时, 还包括电阻器和电容器。探头中没有有源器件 (晶体管或放大器), 因此不需为探头供电。无源探头一般是最坚固、最经济的探头, 它们不仅使用简便, 而且使用广泛。

2.1.2 高阻无源电压探头

从实际需要出发, 使用最多的是电压探头, 其中高阻无源电压探头占最大部分。无源电压探头为不同电压范围提供了各种衰减系数 $1\times$, $10\times$ 和 $100\times$ 。在这些无源探头中, $10\times$ 无源电压探头是最常用的探头。对信号幅度是 1V 峰峰值或更低的应用, $1\times$ 探头可能比较适合, 甚至是必不可少的。在低幅度和中等幅度信号混合 (几十毫伏到几十伏) 的应用中, 可切换 $1\times/10\times$ 探头要方便得多。但是, 可切换 $1\times/10\times$ 探头在本质上是一个产品中的两个不同探头, 不仅其衰减系数不同, 而且其带宽、上升时间和阻抗 (R 和 C) 特点也不同。因此, 这些探头不能与示波器的输入完全匹配, 不能提供标准 $10\times$ 探头实现的最优性能。

2.1.3 低阻无源电压探头

大多数高阻无源探头的带宽范围在小于 100MHz 到 500MHz 或更高的带宽之间。而低阻无源电压探头 (又称为 50 欧姆探头、 Z_0 探头、分压器探头) 的频率特性很好, 采用匹配同轴电缆的探头, 带宽可达 10GHz 和 100 皮秒或更快的上升时间。这种探头是为用于 50 欧姆环境中设计的, 这些环境一般是高速设备检定、微波通信和时域反射计 (TDR)。

2.1.4 无源高压探头

“高压”是相对的概念。从探头角度看, 我们可以把高压定义为超过典型的通用 $10\times$ 无源探头可以安全处理的电压的任何电压。高压探头要求具有良好的绝缘强度, 保证使用者和示波器的安全。

2.2 有源电压探头

2.2.1 有源探头

有源探头包含或依赖有源器件, 如晶体管。最常见的情况下, 有源设备是一种场效应晶体管 (FET), 它提供了非常低的输入电容, 低电容会在更宽的频段上导致高输入阻抗。可以从下面的 X_c 公式中看出:

$$X_c = \frac{1}{2\pi fC} \quad (1)$$

2.2.2 有源 FET 探头

有源 FET 探头的规定带宽一般在 500MHz ~4GHz 之间。除带宽更高外, 有源 FET 探头的高输入阻抗允许在阻抗未知的测试点上进行测量, 而产生负荷效应的风险要低得多。另外, 由于低电容降低了地线影响, 可以使用更长的地线。

有源 FET 探头没有无源探头的电压范围。有源探头的线性动态范围一般在 $\pm 0.6V$ 到 $\pm 10V$ 之间。

2.2.3 有源差分探头

差分信号是互相参考, 而不是参考接地的信号。差分探头可测量浮置器件的信号, 实质上它是两个对称的电压探头组成, 分别对地段有良好绝缘和较高阻抗。差分探头可以在更宽的频率范围内提供很高的共模抑制比 (CMRR)。

2.3 电流探头

从原理上来看, 用电压探头测得电压值, 除以被测阻抗值, 很容易就可以获得电流值。然而, 实际上这种测量引入的误差很大, 所以一般不采用电压换算电流的方法。电流探头可以精确测得电流波形, 方法是采用电流互感器输入, 信号电流磁通经互感变压器变换成电压, 再由探头内的放大器放大后送到示波器。

2.3.1 交流电流探头

交流电流在互感器中, 随着电流方向的变化, 产生电场的变化, 并感应出电压。交流电流探头属于无源设备, 无需外接供电。

2.3.2 直流电流探头

传统电流探头只能测量交流交流信号, 因为稳定的直流电流不能在互感器中感应电流。然而, 利用霍尔效应, 电流偏流的半导体设备将产生与直流电场对应的电压。所以, 直流电流探头是一种有源设备, 需要外接供电。

所以电流探头基本上分成两类: 即 AC 电流探头和 AC/DC 电流探头, AC 电流探头通常是无源探头, AC/DC 电流探头通常是有源探头。

2.4 逻辑探头

使用示波器观察分析数字波形的模拟特点时, 需要用到逻辑探头, 为隔离确切地成因, 数字设计人员通常需要查看在具体逻辑条件下发生的特定数据脉冲, 这要求逻辑触发功能。如图 3 为逻辑探头示意图, 可以在大多数示波器中增加这种逻辑出发功能。

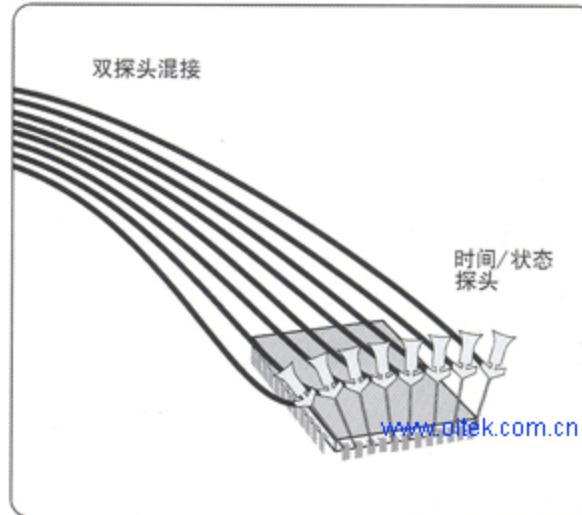


图 3 逻辑探头示意图

2.5 其他探头

由于示波器的应用范围十分广泛，所以除了上述的探头类型外还有各种专用探头，这些专业探头根据其前端传感器的不同而有不同的功用，下面我们介绍其中的两种，仅供读者了解。

光电探头在原理上是普通电压探头与光电转换器件的组合，可直接测量光器件和光纤传输的光信号。

温度探头是普通电压探头与温度传感器的组合，可直接测量物体的温度。温度探头属传感器探头的一种，各种传感器探头与示波器配合可测量多种物理量。

3 示波器探头对测量的影响

3.1 负载效应

所谓负载效应就是在被测电路上接入示波器时，有时示波器的输入电阻会对被测电路产生影响，致使被测电路的信号发生变化。若负载效应的影响很大，就不能准确地进行波形测量。若要减小负载效应，就需要将示波器一端的输入电阻增大。输入电阻越大，输入电容越小，负载效应就越小。

在示波器测量中，另外一种负载效应指的是探头对被测电路的负载效应，为保证测量的准确性，需要减轻探头对被测电路的负载效应，不至影响到被测信号，因此应选择高输入阻抗的探头。探头的输入阻抗可以等效为电阻与电容的并联。低频时(1MHz 以下)探头的负载主要是阻抗作用；高频时(10MHz 以上)探头的负载主要是容抗作用。为了减轻探头对被测电路的负载作用，应选择高阻抗、低容抗的探头，例如带宽 100MHz 用的无源探头，它的输入电阻是 $1 \sim 10 \Omega$ ，输入电容是 $1 \sim 10 \text{pF}$ 。有源探头的负

载作用优于无源探头, 频率特性更好。

3.2 阻抗匹配

阻抗是电压和电流之比, 在理想情况下, 对被测仪器进行测试时不应影响它的正常工作, 测量值也应和未接测试仪器时相同。当连接仪器进行测量时, 要考虑阻抗对测量准确性的影响, 为了保证仪器之间能够传送最大的功率, 阻抗应该匹配。如果阻抗为纯电阻, 应使输入阻抗与输出阻抗的值相等。如果阻抗包含电抗成分应使负载的输入阻抗与源的输出阻抗共轭匹配, 这时能够传送最大功率。

阻抗匹配的阻抗值通常和使用的传输线的特性阻抗值一致。对于射频系统, 一般采用 $50\ \Omega$ 阻抗。对于高阻抗仪器, 由于等效并联电容的存在, 随着频率升高, 并联组合阻抗逐渐变小, 将对被测电路形式负载。如 $1\text{M}\ \Omega$ 输入阻抗, 在频率达到 100MHz 时, 等效阻抗只有 $100\ \Omega$ 左右。因此, 高带宽的示波器一般都采用 $50\ \Omega$ 输入阻抗, 这样可以保证示波器与源端的匹配。但是使用 $50\ \Omega$ 输入阻抗时, 必须考虑到 $50\ \Omega$ 输入阻抗的负载效应比较明显, 此时最好使用低电容的有源探头。

3.3 电容负荷

随着信号频率或转换速率提高, 阻抗的电容成分变成主要因素。结果, 电容负荷成为主要问题, 特别是电容负荷会影响快速转换波形的上升时间和下降时间及波形中高频成分幅度。

4 示波器探头的主要技术指标

4.1 带宽和上升时间

探头的带宽是指导致探头响应输出幅度下降到 70.7% (-3dB) 的频率。上升时间是指探头对步进函数 $10\sim 90\%$ 的响应, 表明了探头可以从头部到示波器输入传送的快速测量转换。大多数探头, 带宽与上升时间乘积接近 0.35 。在很多情况下, 带宽由脉冲上升时间验证来保证最小失真。

4.2 电容

探头头部电容指标是指探头探针上的电容, 是探头等效在被测电路测试点或被测设备上的电容。探头对示波器一端也等效成一个电容, 这个电容值应该与示波器电容相匹配。对 $10\times$ 和 $100\times$ 探头, 这一电容称为补偿电容, 它不同于探头头部电容。下面将继续介绍补偿电容。

4.3 畸变(Aberration)

畸变是输入信号预计响应或理想响应的任何幅度偏差。在实践中，在快速波形转换之间通常会立即发生畸变，其表现为所谓的“减幅振荡”。没有规定极限畸变的高频探头可以提供使人完全误解的测量。存在畸变可以说明严重失真的带宽和滚降(roll-off)特性。

4.4 衰减系数

当正确接上终端时，探头应该有恒定的衰减系数。衰减系数是输出信号对输入信号的比值。某些探头的可能会有可以选择的衰减系数，典型的衰减系数是 1×、10× 和 100×。1×档和 10×档电路如图 4 所示，这两部分电路均由电阻电容组成。

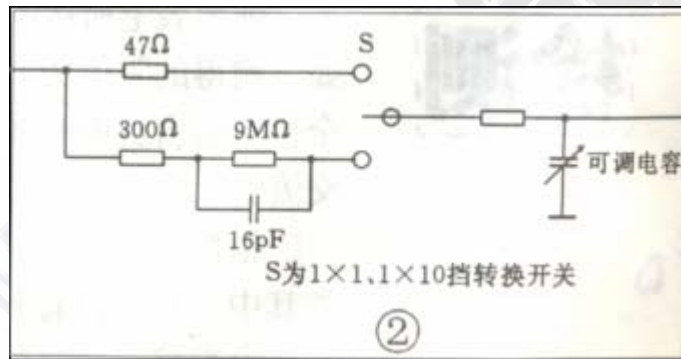


图 4 1×档和 10×档电路图

4.5 探头衰减补偿

所谓探头衰减补偿是指当示波器和探头配合使用时，调整探头中的可变电容，以使频率达到相对稳定。探头补偿意味着在探头末端和示波器的输入端之间频率补偿。探头末端与示波器的输入端的关系如图 5 所示，调节 C2 可得如下关系：

$$R_1 \times C_1 = R_2 \times (C_1 + C_2)$$

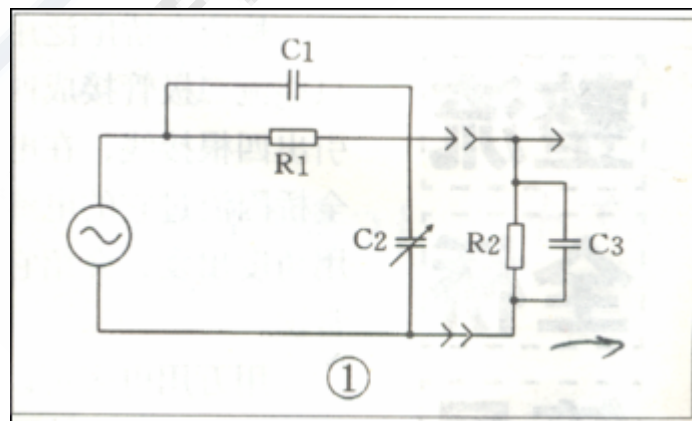


图 5 电容探头补偿电路

示波器的输入电阻虽然只有 $1\text{M}\Omega$ ，但是与其并联的输入电容却根据机种的不同而有差异。即使是同一机种，每个通道上的输入电容也不相同，所以，改变了示波器和探头的组合，相应的也要改变探头的相位补偿。

探头校准的方法如下：将探头与探头校准的方波信号输出端子相连，探头的特性为最佳状态时，如图 6 中(a)所示，若出现(b)，(c)所示的情况，请用改锥调整探头上的频率补偿微调电容器进行校准。

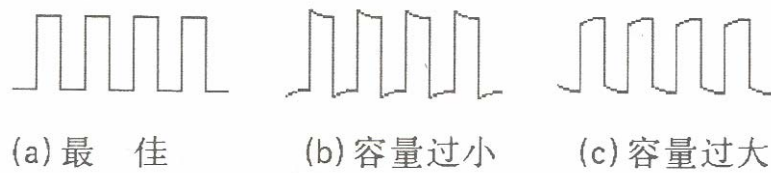


图 6 探头校准示意图

4.6 额定最大电压

额定最大电压由 DC + peak AC 决定，即输出电压的直流值和交流峰值的总和不能超过示波器的额定电压最大值，如果超过这个额定最大电压，会损坏探头。

4.7 电压额定值随频率的下降

电压探头在低频时的最大输入电压有明确的规定，随着频率的增加输入电压会相应降低。对于高频探头必须注意输入电压随频率的变化，在频率高于 1MHz 时允许的输入电压随频率的增加而急剧下降。

5 最佳示波器探头的选择

探头的特性和特点中最重要的参数就是带宽和输入阻抗，它们既要与示波器的带宽和输入阻抗匹配，又要将对被测电路的影响减到最小。因此选择探头时要综合考虑。

5.1 带宽和上升时间

探头的带宽或上升时间要等于或优于示波器的带宽。如果观察纯正弦信号，探头带宽等于被测信号频率的最高值即可；如观察非正弦信号，探头带宽应能容纳被测信号的基波和最重要谐波分量。为精确地测量脉冲的上升时间和下降时间，系统的上升时间（示波器和探头之和）应该比要测量的最快的上升时间快 3-5 倍。

5.2 阻抗匹配

探头的输入阻抗要与所用示波器的输入阻抗匹配，另外对被测电路的负载作用最少。对于低输入阻抗的示波器，应选择有源探头或 50Ω 输入阻抗的探头；对于高输入

阻抗的示波器，应选择 $\times 10$ 的探头。例如示波器的输入阻抗是 $1\text{M}\Omega/10\text{pF}$ ，探头输入阻抗最好是 $10\text{M}\Omega/1\text{pF}$ ，这样的探头既有 10 倍的信号衰减，对被测信号的负载很轻，又能与示波器输入阻抗匹配。

5.3 负载作用

减轻探头对被测电路的负载作用。除了选择输入阻抗高的探头外，还有记住探头输入阻抗随频率成反比例下降。

5.4 时间延迟的影响

每种探头对被测信号的延迟时间存在差异，在进行差分测量以及时间（或相位）一致性测量时，最好使用 2 个型号相同和电缆长度相等的探头。

5.5 良好的接地

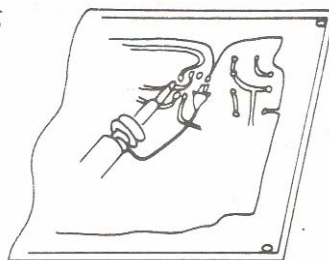
探头的额定频率特性是在同轴系统内测得的结果。在实际电路应用时，往往探头处于非同轴匹配的系统内，因此探头的接地引线要尽量减短，把串联电感减到最小。如发现高阻探头接地不良，就要考虑使用低阻同轴探头或者与探头匹配的适配器、连接器和夹具。

6 示波器探头使用注意事项

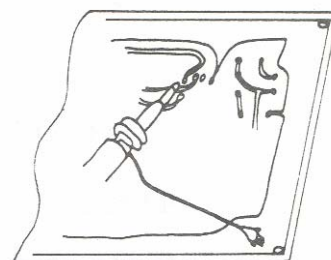
将待测信号正确接入示波器是测试工作的第一步，这里我们主要介绍探头与被测电路连接时的注意事项。

1. 探头与被测电路连接时，探头的接地端务必与被测电路的地线相联。否则在悬浮状态下，示波器与其他设备或大地间的电位差可能导致触电或损坏示波器、探头或其他设备。
2. 测量建立时间短的脉冲信号和高频信号时，请尽量将探头的接地导线与被测点的位置邻近。接地导线过长，可能会引起振铃或过冲等波形失真。如图 7 所示。

接地方法



正确



不正确

图 7 探头接地方法示意图

3. 为避免接地导线影响对高频信号的测试, 建议使用探头的专用接地附件。如图 8 所示为典型通用电压探头所带有的标准测试附件。



图 8 带有标准配件的典型通用电压探头 (图片来源于泰克《探头 ABC》)

4. 为避免测量误差, 请务必在测量前对探头进行检验和校准, 探头衰减补偿的校准原理和方法我们在前面已经介绍过, 这里不再赘述。
5. 对于高压测试, 要使用专用高压探头, 分清楚正负极后, 确认连接无误才能通电开始测量。
6. 对于两个测试点都不处于接地电位时, 要进行“浮动”测量, 也称差分测量, 要使用专业的差分探头。

7 总结

探头对示波器测量至关重要, 所以要求探头对探测的电路影响必须达到最小, 并希望测量值保持足够的信号保真度。如果探头以任何方式改变信号或改变电路运行方式, 示波器会看到实际信号的失真结果, 进而可能导致错误的测量结果, 或者误导性的测量结果。通过以上介绍可知, 探头的选购和正确使用有许多值得注意的地方, 只有与示波器和被测电路都匹配良好的探头才是您该选择和使用的探头。

参考文献

- 【1】 《交流和直流电流测量》, 作者: 周家明, 北京海洋仪器。
【2】 《阻抗对测量的影响》, 作者: 魏乾、韩洁, 【M】 国外电子测量技术。
【3】 《如何用好示波器探头》, 【M】 无线电。
【4】 《电子示波器探头》, 【M】 电子仪器信息。
【5】 日立示波器使用说明。
【6】 《探头 ABC》, 泰克公司出版。