

# “示波器的艺术” 基础篇系列之四

2014-09-15

## 示波器探头基础入门指南(上)

作者：聂文伟 Oscilloscope.China@rohde-schwarz.com, “ScopeArt 先生” 团队成员

示波器探头是示波器使用过程中不可或缺的一部分，它主要是作为承载信号传输的链路，将待测信号完整可靠的传输至示波器，以进一步进行测量分析。很多工程师很看重示波器的选择，却容易忽略对示波器探头的甄别。试想如果信号经过前端探头就已经失真，那再完美的示波器所测得的数据也会有误。所以正确了解探头性能，有效规避探头使用误区对我们日常使用示波器来说至关重要！

在绝大多数示波器测量环境下，我们都需要使用探头。示波器探头有很多种，内部原理构造迥异，使用方法也各不相同。本文主要给大家介绍示波器探头的种类及工作原理，探头使用过程中注意事项以及如何选择示波器探头。

### 1 示波器探头种类及工作原理

对于 DC 直流或一般低频信号而言，示波器探头只是一个由特定阻抗  $R$  所形成的一段传输线缆。而随着待测信号频率的增加和不规则性，示波器探头在测量过程中会引入寄生电容  $C$  以及电感  $L$ ，寄生电容会衰减信号的高频成分，使信号的上升沿变缓。寄生电感则会与寄生电容一起构成谐振回路，使信号产生谐振现象。所有这些都会对我们测量信号的准确性带来挑战。

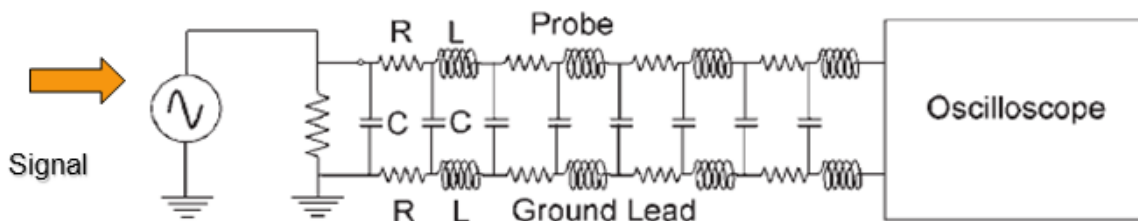


图1 探头电气特性示意图

示波器探头按供电方式分可分为无源探头和有源探头。无源探头又分为无源低压、无源高压及低阻传输线探头等，有源探头又分为有源单端、有源差分、高压差分探头等。此外，在一些特殊应用下，还会使用到电流探头（AC、DC）、近场探头、逻辑探头以及各类传感器（光、温度、振动）探头等。

无源探头是最常用的一类电压探头，也是我们在购买示波器时标配赠送的探头。如图 2 所示。



图2 无源探头示意图

无源探头一般使用通用型 BNC 接口与示波器相连，所以大多数厂家的无源探头可以在不同品牌的示波器上通用（某些厂家特殊接口标准的探头除外），但由于示波器一般无法自动识别其他品牌的探头类型，所以此时需要手动在示波器上设置探头衰减比，以保证示波器在测量时正确补偿探头带来的信号衰减。

图 3 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（一般 1 至 1.5 米左右）、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。

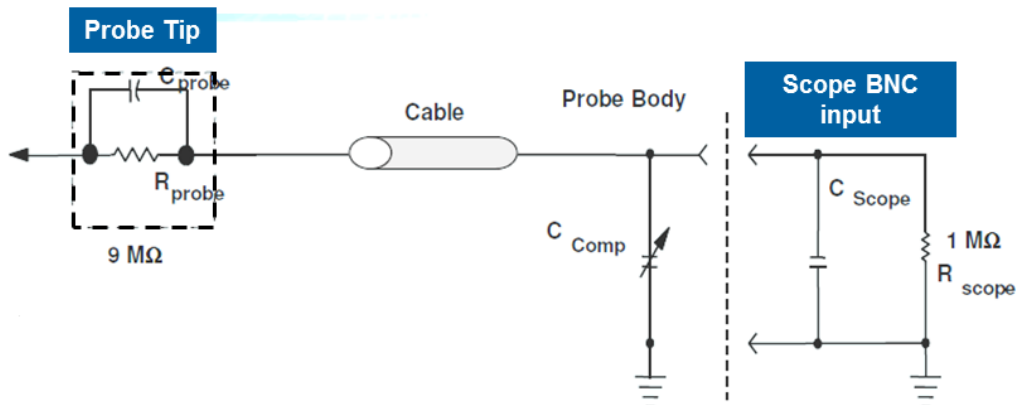


图3无源探头原理图

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：

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

由关系式可知，示波器得到的电压是探头探测到电压的十分之一，这也是无源探头 10: 1 衰减因子的由来。无源探头具备高阻抗  $10M\Omega$ ，因此它对待测电路的负载效应（将在第二部分详述）很小，能覆盖一般低频频段（500MHz 以内），耐压能力强（300V-400Vrms），价格便宜，通用性好，所以得到广泛使用。

当无源探头的衰减因子为 100: 1、1000: 1 甚至更高时，此类探头一般归类为无源高压探头。由于其衰减比很大，因此能测量高压、超高压电信号。



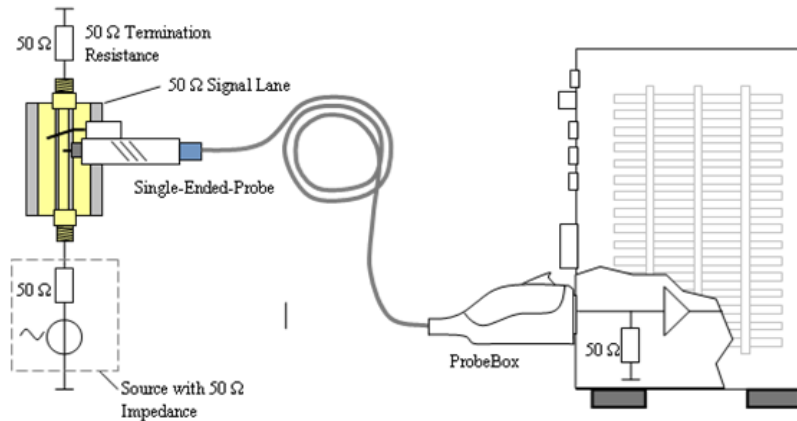


图7 传输线探头的典型应用

需要注意的是，由于传输线探头的低阻抗，它的负载效应会比较明显。因此，此类探头仅适用于与低输出阻抗（几十至 100 欧姆）的电路测试。对于更高输出阻抗的电路，我们可以选择使用高阻有源探头的方案，将在后续详述。



图8 R&amp;S RT-ZZ80 8.0GHz 无源传输线探头

介绍完无源探头，我们接下来看看有源探头。顾名思义，有源探头区别于无源探头最大的特点是“有源”，即它需要提供电源才能工作。如今大多数有源探头都配备有特殊接口，通过与示波器连接从示波器获得电源，而不需要额外提供外置电源（某些型号除外）。下图所示为有源单端探头原理图：

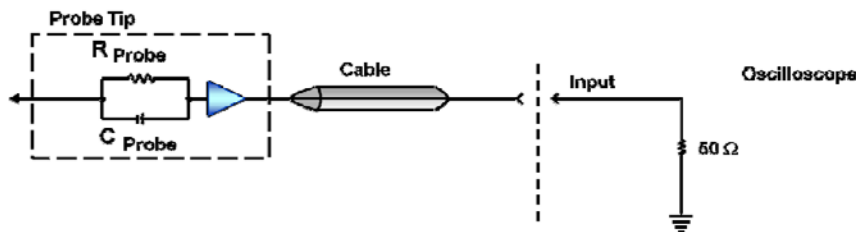


图9 有源单端探头原理图

有源单端探头一般具备高阻抗（1MΩ 上下），低寄生电容。其前端有一个高带宽的放大器，有源探头的供电主要用于此放大器。放大器驱动信号经过 50Ω 传输线到达示波器，示波器的输入阻抗需选择为 50Ω 作匹配。由于其较低的寄生电容和 50 欧姆传输，有源单端探头可以提供比无源探头更高的带宽，因此主要应用在高频率信号的测量领域。

优点和缺点往往是并存的，有源单端探头亦是如此。能够测量更高带宽的信号是其优点，但由于需要集成有源放大器，因而其成本相对于无源探头来说更高，一个几 GHz 带宽的有源单端探头价格可达数

万人民币。除此之外，由于高带宽放大器的信号输入范围十分有限，因而其动态范围有限，一般有源单端探头的动态范围仅在几伏范围之内，探头所能承受的最大电压也只有几十伏。

相对于前面所说的无源传输线探头，有源单端探头同样可以应用在低阻抗高频率信号的测量环境，且由于其输入阻抗相对于无源传输线探头更高，因此它的负载效应更小。不仅如此，R&S 有源单端探头还可以与 RT-ZA9 (N 型转换接头，USB 供电) 附件连接，进而用在射频信号源和频谱分析仪上，用来测试特殊环境下的信号，如传统 50 欧姆同轴电缆无法连接的探测点处，或者需要使用高阻探头探测待测点信号频谱时。



图10 R&S RT-ZS 系列单端有源探头与 RT-ZA9 N 型转换头相连

除了有源单端探头之外，有源差分探头是另外一类重要的有源探头。我们可以从字面上来理解这两种探头的区别，有源单端的前端有两处连接点：信号点和地。有源差分顾名思义主要用来测试差分信号，探头前端有三处连接点：信号正、信号负、地。



图11 有源单端探头前端（左）与有源差分探头前端（右）

有源差分探头的原理图如下：

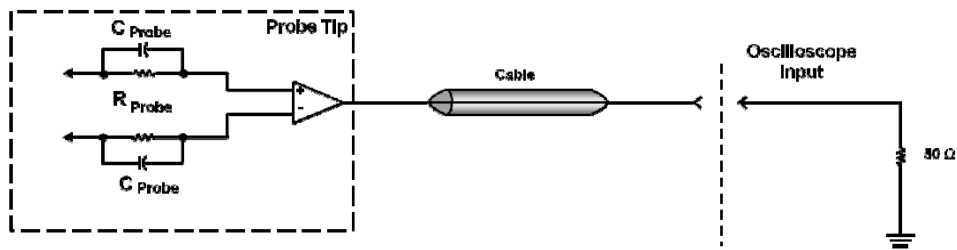


图12有源差分探头原理图

与有源单端探头相比，其最大不同在于使用了差分放大器。有源差分探头同样具备低寄生电容和高带宽特性，所不同的是，有源差分探头具有高共模抑制比（CMRR），对共模噪声的抑制能力比较强。有源差分探头主要用来测试差分信号，即测试两路信号（一般为相位相差 180 度的正反信号）的相对电压差，与地无关。

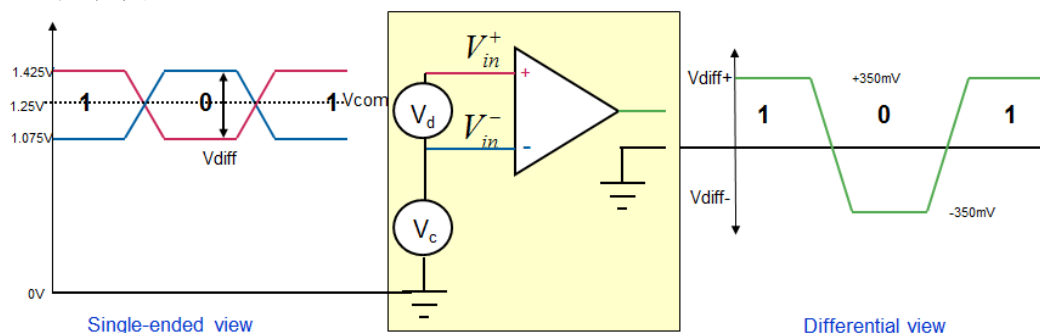


图13 差分信号测试原理示意图

上图显示了用有源差分探头测试差分信号的原理，图中红色波形显示的为差分信号  $V_{in+}$ ，蓝色波形显示为差分信号  $V_{in-}$ ，二者幅度相同，相位相差 180 度。 $V_{in+}$  和  $V_{in-}$  经由差分探头正、负探测点探测后经过差分放大器放大，然后传输至示波器，最后得到如图绿色差分波形。

这里要介绍几个概念，以便大家能够更好的理解共模抑制比 CMRR。

**共模（Common Mode）：**差分信号两端具有相同幅度和相位的信号成分，用表达式表示为  $V_{cm} = (V_{in+} + V_{in-}) / 2$ 。

由于理想的  $V_{in+}$ 、 $V_{in-}$  幅度相同，相位相反，所以二者相加应该为零。但在实际工作环境下， $V_{in+}$ 、 $V_{in-}$  上会叠加上噪声干扰  $V_{noise}$ 。由于  $V_{in+}$ 、 $V_{in-}$  所处环境相同，因而在二者上叠加的噪声也往往相同，所以由 CM 表达式可知： $CM = V_{noise}$ 。

**差模（Differential Mode）：**差分信号两端不同的信号成分，用表达式表示为  $V_{dm} = V_{in+} - V_{in-}$ 。

**共模抑制（Common Mode Rejection）：**差分放大器对共模信号的抑制能力，即差分放大器的一项主要能力是对  $V_{noise}$  进行抑制消除。如果共模电压  $V_{cm}$  经过差分放大器的增益为  $A_{cm}$ ，差模电压  $V_{dm}$  经过差分放大器的增益为  $A_{dm}$ ，则我们可以用共模抑制比（Common Mode Rejection Ratio）即 CMRR 来表示共模抑制能力，其表达式为：

$$CMRR = A_{dm} / A_{cm}$$

举例如下图：差模信号  $V_{dm}$  幅度为 1V，经过差分放大器后幅度仍然为 1V，即  $A_{dm} = 1$ 。共模信号  $V_{cm}$  幅度为 4.5V，经过差分放大器后幅度抑制为 0.45V，即  $A_{cm}=0.1$ 。因此， $CMRR = 1 / 0.1 = 10:1 = 20\text{dB}$ 。

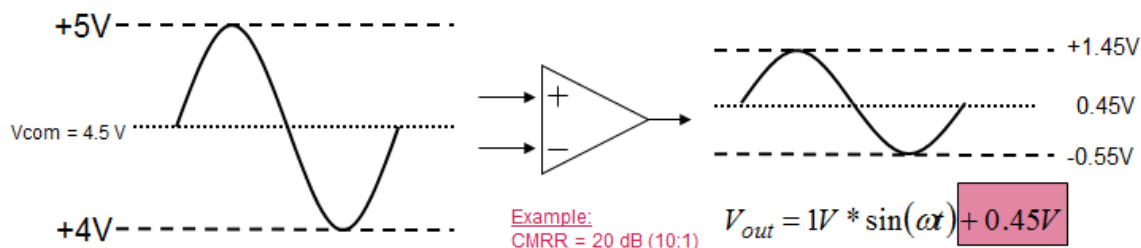


图14 差分信号测试举例



对于理想的差分放大器而言，我们希望其完全抑制共模信号，从而消除噪声  $V_{noise}$  对差分信号测量的影响。对于一般的差分信号测量而言，20dB 的 CMRR 已经足够，而 R&S RT-ZD40 的 CMRR 可达 50dB，性能非常优异。



图15 R&S RT-ZD40有源差分探头

值得一提的是，R&S 的有源单端探头和有源差分探头上都配备了 MicroButton 多功能按钮和 ProbeMeter 探头计功能。其中，MicroButton 是位于有源探头前段的一个微型按钮，用户可以在测试时很方便的按动按钮，从而执行对示波器的特定控制（可自定义），如：自动设置、默认设置、单次运行、连续运行等。

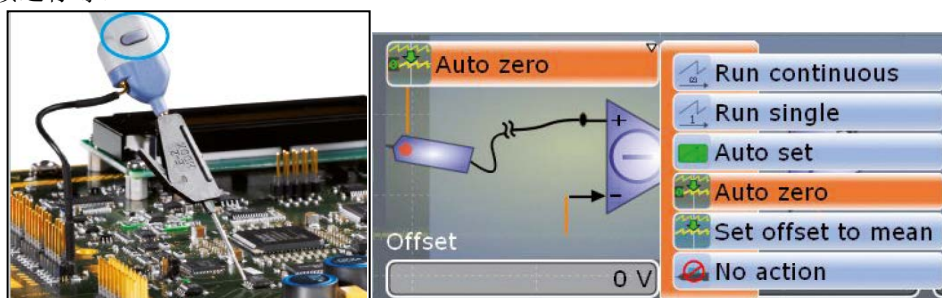


图16 MicroButton 多功能按钮

ProbeMeter 则是集成在有源探头前端的 16 位 DC 电压计，可用来直接在探头点处测试直流电压，这与其他厂家使用探头捕获波形然后输送到示波器，进而对波形进行测量得到 DC 数值的方案完全不同。很显然，ProbeMeter 摒除了探头传输的失真影响，从而具备了 0.1% 的高精度度。在使用差分探头时，可以借助此功能方便快捷查看单端、共模、差模电压数值。

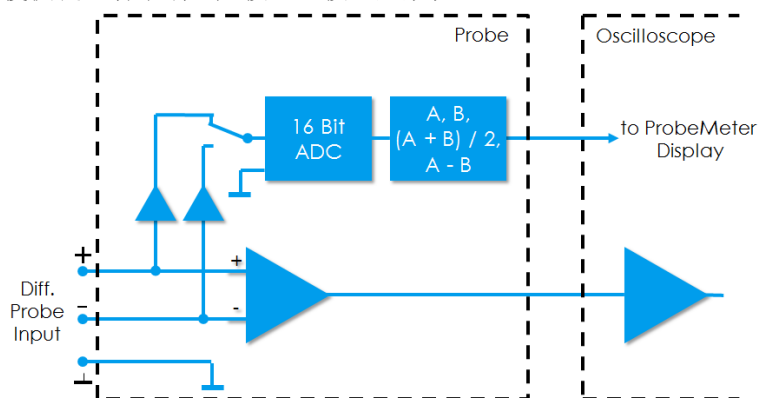


图17 ProbeMeter 探头电压计

有源差分探头可用于绝大多数较小幅度差分信号的测量，但对于幅度达上百甚至上千幅的高压差分信号而言，有源差分探头就显得力不从心了。此时我们只能借助于高压差分探头的帮忙，相对于一般差分探头而言，高压差分探头具有更高的动态范围，能够承受更高的电压。



图18 R&S RT-ZD01  $\pm 1400V$  高压差分探头

高压差分探头相对于无源高压探头而言价格昂贵，因此有用户在测试高压差分信号时会选择将示波器的电源接地线剪断，使示波器“浮起来”进行测试，这是非常危险的，一定要杜绝此类行为。我们将在第二部分详细说明。

电流探头严格意义上说也属于有源探头的一种，几乎所有的电流探头在使用过程中都需要供电。电流探头主要分为三类：AC（仅能测试交流电）、DC（仅能测试直流电）、AC+DC。而目前大多数电流探头都具备了AC+DC的测量功能。

电流探头的原理如下，主要是利用电磁效应（AC测量）和霍尔效应（DC测量）。

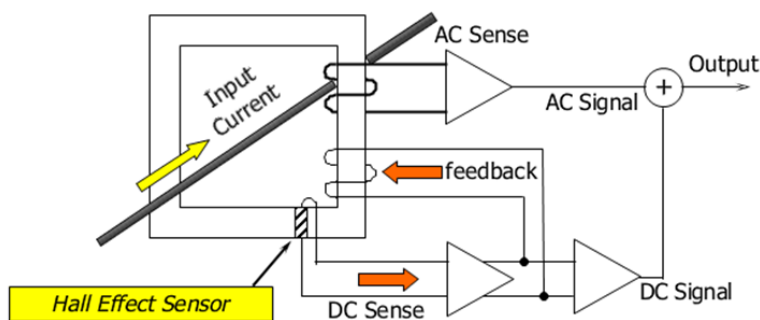


图19 AC+DC 电流探头原理图

当有 AC 电流经过导线穿过电流探头的前段闭合钳口时，会有相应磁场产生，通过磁场的强弱直接感应到电流探头的线圈。探头就象一个电流变压器，系统直接测量的是感应电流。

如果是 DC 或者低频电流，当电流钳闭合后，电流导线附近会出现一个磁场。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压。系统根据这个电压产生一个反相（补偿）电流至电流探头的线圈，使电流钳中的磁场为零，防止磁饱和。系统根据反相电流测得实际得电流值。

电流探头的选择主要依据其测量带宽、量程以及钳口直径等。

MSO 数字逻辑探头在数字逻辑测试中会经常使用，与一般 8bit 模拟探头相比，数字逻辑探头根据示波器所设置的判决门线电平，将捕获的电压按照 0、1 跳变（1bit）的数字信号在屏幕上显示出来。用户可以根据多路数字信号的逻辑电平及关系来判断逻辑电路的性能。





图20 R&S RTO-B1数字逻辑探头

EMI 近场探头是另一类特殊的探头类型，它实际使用了天线接收原理，用来捕获电路板上空间辐射的电磁场干扰，特别是在系统集成中做 EMI 电磁干扰的诊断。

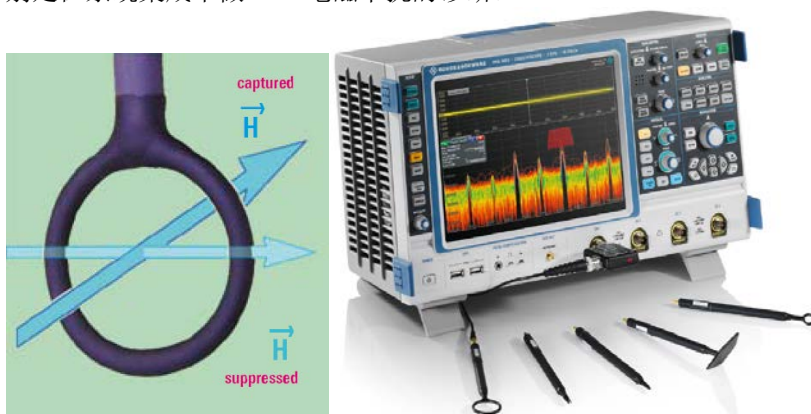


图21 EMI 近场探头示意图

除了以上给大家介绍的各种探头之外，还有光探头、温度传感探头及其他各类传感探头等。原则上来说，任何一款能够将各物理量转换成电压信号并具备与示波器互连能力的传感器都可以作为示波器探头，用户可以根据具体使用环境和需求选择适合的探头类型。

-----未完待续-----

作者介绍:

聂文伟先生于 2008 年毕业于北京交通大学电信学院，电磁场与微波技术专业，获工学硕士学位。毕业后供职于 ZTE 中兴通讯股份有限公司，先后从事无线产品测试与海外营销方面的工作。2012 年加入罗德与施瓦茨公司，现任罗德与施瓦茨公司西安示波器业务发展工程师，主要负责西北地区的示波器产品市场推广工作。