

初级读本

探头入门



安全摘要

在对电子系统或电路进行测量时，人身的安全是最重要的。需要确实了解你所使用的测量设备的性能和使用规定。另外，在进行测量前，需要完全掌握你将要测量的电子电路或系统，参看被测系统的所有文件和图表，特别注意电路中电压的高低及位置，注意任何所有的警告注释。此外，保证参阅如下安全警告，以防止人身受伤，及防止对测量设备或其所连接的系统遭致损坏。

进一步对下列警告的解释请参看附录 A：安全预防措施的解释说明。

- 遵守所有终端设备的额定值。
- 使用适当的接地处理。
- 适当联接与断开探头
- 避免裸露的电路。
- 当操作探头时避免射频灼伤。
- 不要在屏蔽保护的情况下操作探头。
- 不要在湿、潮的条件下操作。
- 不要在易爆的空气中操作。
- 不要在怀疑有故障的情况下操作。
- 保持探头表面干净且干燥。
- 不要将探头浸入液体。

目 录

第 1 章: 探头 - 测量质量的关键环节.....	1
什么是探头.....	1
理想的探头.....	2
现实的探头.....	4
选择正确的探头.....	8
一些探头的使用技巧.....	8
小结.....	10
第 2 章: 对于不同的应用需要使用不同的探头.....	11
为何有如此多种的探头?.....	11
不同的探头类型及他们的好处.....	13
浮动测量法.....	18
探头附件.....	20
第 3 章: 探头如何影响你的测量结果.....	23
源极阻抗的影响.....	23
电容负载效应.....	23
带宽考虑.....	25
如何面对探头效应.....	29
第 4 章: 理解探头的详细说明.....	31
畸变(通用).....	31
安培秒乘积(电流探头).....	31
衰减因数(通用的).....	31
精确度(通用).....	31
带宽(通用).....	32
电容(通用).....	32
共模抑制比(CMRR)(差动探头).....	32
CW 电流测量能力的频率衰变(电流探头).....	33
衰减时间常数(电流探头).....	33
直流电流(电流探头).....	33
插入阻抗(电流探头).....	33
输入电容(通用).....	33
输入电阻(通用).....	33
最大额定输入电流(电流探头).....	33
最大峰值脉冲电流(电流探头).....	33
最大额定电压(通用).....	33
传输延迟(通用).....	33
上升时间(通用).....	34
正切噪声(电流探头).....	34
温度范围(通用).....	34
第 5 章: 探头选择指南.....	35
了解信号源.....	35
示波器问题.....	37
选择正确的探头.....	38
第 6 章: 高级探测技术.....	39
地线问题.....	39
差动测量法.....	42
小信号测量.....	45

附录 A: 安全警告的解释.....	47
遵守所有终端设备的额定值.....	47
使用适当的接地处理.....	47
适当联接与断开探头.....	48
避免裸露的电路.....	48
当操作探头时避免射频灼伤.....	48
不要在没有屏蔽保护的情况下操作探头.....	48
不要在湿、潮的条件下操作.....	48
不要在易爆的空气中操作.....	48
不要在怀疑有故障的情况下操作.....	48
保持探头表面干净且干燥.....	48
不要将探头浸入液体.....	48
附录 B: 词汇表.....	49

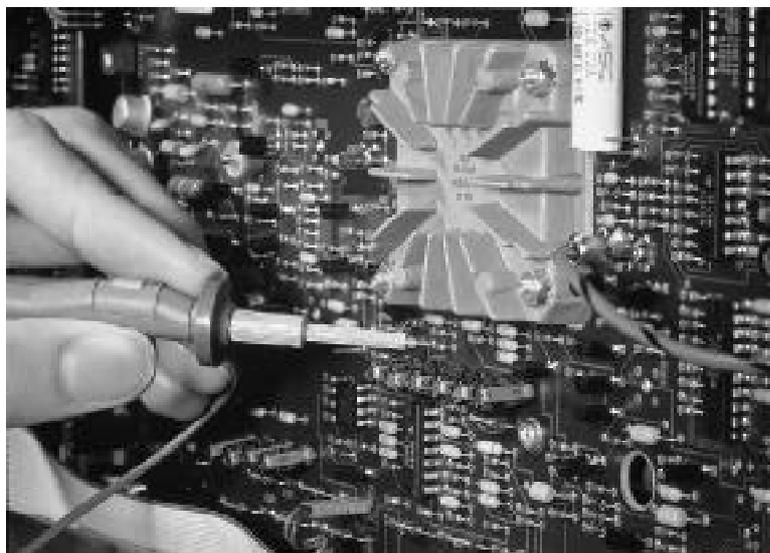
第一章：探头 - 测量质量的关键环节

探头对于示波器测量是非常关键的，为了理解其重要性，把探头从示波器断开，并且尝试测量，我们知道这是不可能的，必须使用一种探头作为电路连接，这些探头连接于被测信号与示波器输入通道之间。

探头对于示波器测量是非常重要的，另外探头对于测量质量也是非常关键的。把一个探头连接到一个电路可能影响电路的运行，并且，归根结底，示波器也只是能够显示和测量探头传送回来的输入信号。

因此，探头对于被测回路，必须有最小的影响，同时对想要测量的信号应保证足够的保真度。如果探头不能保持信号的保真度，如果它以任何方式改变信号或改变一个电路的动作，示波器将显示实际信号的一个畸变的型式。其结果会导致出错的或者误导的测量。

实质上，探头是示波器测量链的第一个链环。并且这个测量链环的强度同依赖示波器一样依赖于探头。应用一个不适当的或者不良的探头会削弱这第一个链环，并最终影响整个测量链路的质量。在这一章和后面的一章，你将学习各种探



头的优势和劣势，并且学习正确使用探头的重要提示和技巧。

探头是什么？

第一步，让我们确定示波器探头是什么。从本质上讲，探头是在一个测试点或信号源和一台示波器之间做的物理及电路的连接。依据你的测量需求，这个连接能象一段电线一样简单或者会非常的精密复杂，例如一根有源差分探头。从这一点，我们可以充分地讲，示波器探头

是把信号源连接到示波器的输入通道的一种设备或电路网络。

在图 1-1 中加以说明，探头在此测量图中作为一个未定义的方框而被指明。探头事实上无论它是什么，它必须在信号源和示波器输入之间提供足够便利的和高质量的连接(图 1-2)。适当的连接有 3 个关键性的定义问题-物理连接，对电路运行的影响，及信号的传送。

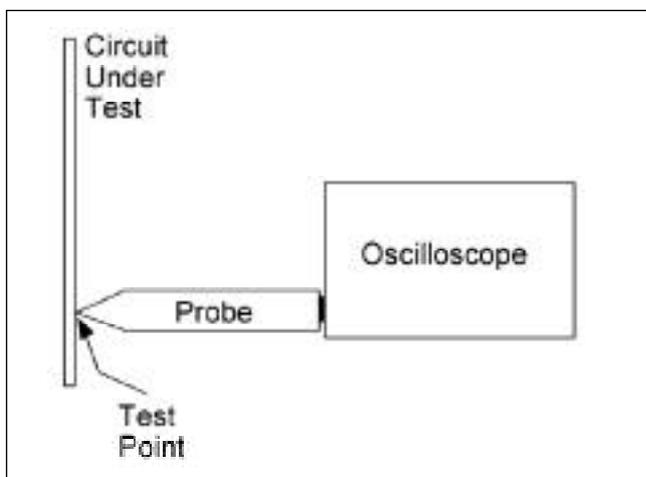


图 1-1. 探头是在示波器和测试点之间进行物理和电路连接的设备。

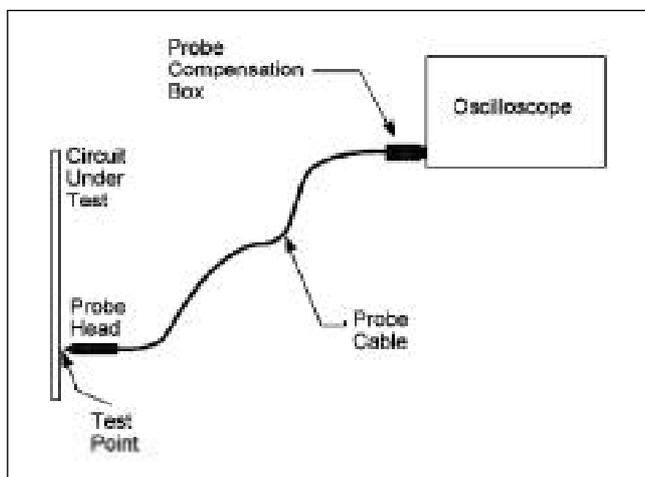


图 1-2. 大多数探头由一个探头尖，一根探头电缆线，及一个补偿盒或其它类型的信号调节网络组成。

新术语

带宽 - 一个连续的频带段，即电路或网路传送信号时，信号中频功率处至信号功率衰减小于3dB处(参考图 1-5)。

负载作用 - 加于源的负载从源分流电流的过程。



a. 探测 SMT 设备。



b. 高压探头。



c. 通用探头上的夹具。

图 1-3 多种多样的探头可应用于不同的技术应用及测量需求之中。

使用一台示波器进行测量时，你应首先在物理上将探头置于测试点。若要使这成为可能，绝大多数探头须有至少一、两米的与他们连接的电缆线，如图 1-2 所示。在进行电路测量时，这段电缆线的存在使示波器可以放置于手推车的固定位置或者工作台上，而探头可以在各个测试点之间移动。然而对这种便利是有所折衷的，探头电缆线减小了探头的带宽。电缆线越长，减小的越大。

除了电缆线的长度，大多数探头也有一个探头头，或者说手柄，其上有一个探头尖。探头头使你能够手持探头从而操纵探头尖与测试点接触，通常，这个探头尖以弹簧钩的形式把探头连接附着于测试点上。

在物理上把探头附着于测试点也在探头尖和示波器输入端之间建立了一个电路连接。

为了得到可用的测量结果，把探头附着于一个电路必须让它对电路动作具有最小的影响，并且通过探头尖传送的信号必须有足够的信号保真度，信号通过探头及线缆到达示波器的输入端。

这三个问题 -- 物理的附着，对电路动作的最小影响，足够的信号保真度 - 共同成为选择合适的探头的主要因素。

由于探头的影响并且由于信号保真度是一个更加复杂的论题，因此这份教材的大部分内容将讨论这些问题。然而，物理的连接问题也不应该被忽略。在把一个探头连接到一个测试点的难点在于它会经常引起探头减小信号保真度的探测操作。

理想的探头

在理想世界中，理想的探头将提供下列关键的属性：

- 连接简单和便利
- 绝对信号保真度
- 零信号源极负载
- 完全的噪音抗扰性

连接简易和便利。一个连接到测试点的物理连接已经作为探测的关键要求之一被论及。使用理想的探头，你应该能够使物理连接简单及便利。

对于小型化电路，如高密度的表面装配技术(SMT)电路，微型探头及多种类型的为 SMT 设备设计的探头尖适配器，能够使连接简易及便利。图 1-3a 所示，为这样的一个探头系统。

然而，这些探头，对于具有高电压和普通标准导线的工业功率电路而言，是太小了。

对于功率应用，需要应用更大尺寸的具有更多边缘保护的探头。

图 1-3b 和表 1-3c 是此类探头的例子。

图 1-3b 是一根高压探头，

图 1-3c 是一个通用探头上的夹具。

从这几个物理连接的例子可以看出，对于所有的应用来说，没有唯一的理想的探头尺寸及外形结构，因此，我们设计了各种各样尺寸外形及结构的探头，从而满足各种各样的应用和物理连接的要求。

绝对信号保真度。理想的探头应该忠实地将信号从探头尖传送到示波器输入端。换句话说，探头尖处的原有信号应当被忠实地复制到示波器输入端。

新术语

衰减 - 一个信号的振幅被减小的处理过程。

相位 - 相对于基准点或某一波形,表达波形或波形分量的时间相关位置的一种方式。例如,由定义,一个余弦波具有零相位,一个正弦波是一个余弦波的90度相位变换。

线性相位 - 一个网络的特性,对于测量正弦波,随着正弦波频率的增加,相位被线性变换,具有线性相位的网络,将能够保持非正弦波形中谐波的相对相位关系,因此,波形的相位关系没有畸变。

负载 - 跨在信号源上的阻抗,一个开环电路是“空载”状态。

阻抗 - 阻碍或限制AC信号流动的过程。阻抗以欧姆表示,并且,由一个有阻抗力的部件(R)和能起反作用的部件(X)组成,它可以是容性阻抗(X_C)或感性阻抗(X_L)。阻抗(Z)以复数的形式表示为:

$$Z = \sqrt{R + jX}$$

或以幅值和相位表示,幅值(M)为:

$$M = \sqrt{R^2 + X^2}$$

相位 为:

$$= \arctan(X/R)$$

屏蔽 - 把接地良好的薄片导体物质,放置于电路和外部噪声源之间,这样,屏蔽材料拦截噪声信号,并且将它们同电路隔离开。

对于绝对保真度,探头电路从尖端到示波器输入,必须具有零衰减,无限带宽、跨越所有频率的线性相位。这些理想的需求事实上不可能完成,他们也是不切实际的。例如,当你处理音频信号时,并不需要无限带宽的探头,也不需要那样的示波器。500MHz就能覆盖大多数的数字信号、TV、和其他的一些典型的示波器应用。这时理想示波器也是不需要的,在给定的操作带宽之内,绝对的信号保真度是最终理想的状态。

零信号源负载。电路被测试之后,测试点可认为或模拟为一个信号源。任何外部的设备,例如一个探头,被接入测试点,都可看作在测试点之后信号源上附加的负载。外部的设备从电路(信号源)提取信号的同时,外部设备也充当负载。

这个载入过程,或者说信号的提取,在测试点后改变了电路的动作,并且因此改变了在测试点处被看到的信号。一根理想的探头导致了零信号负载。换句话说,它不从信号源分流任何信号电流。这就是说,对于零电流分流,探头必须具

有无限的阻抗,实质上它是一个开环电路接入测试点。在实际情况下,具有负载零信号源的探头是没有的。因为一个探头必须分流信号电流的微小数量以便在示波器输入端显示信号电压。因此,当使用一个探头时,对负载的信号源有要求。目标应当是通过选择适当的探头来减小载摄入量。

完全噪音抗扰性。荧光灯和电扇电机只是两种在我们环境中的噪音源。这些源能感应到附近电路及电缆线之上,导致噪音被加入到信号。因为噪音的易感应性,简单的一条电线不应是示波器探头的理想选择。理想的示波器探头对所有的噪音源具有完全的抗扰性。因此,送到示波器的信号与在测试点处相比,信号中没有更多的干扰。然而噪音(干扰)却在小信号测量时依然是个问题。特别的是,在应用不同的测量方法时,共模干扰问题常常出现,这将在以后的文章中论述。

新术语

分布元素(L, R, C) - 阻抗及电抗超过导线的示波器；分布特性值相比总的器件值是非常的小的。

源 - 信号电压或电流的起源点或单元；甚至可以是FET (常效应晶体管)的一个极。

上升时间 - 脉冲的上升沿转换时间,上升时间是脉冲从10% 振幅上升到90% 振幅的时间。

理想的探头

前面在对理想探头的讨论中,提及了几个阻止实际探头达到理想状态的原因。为了理解探头如何影响示波器的测量,我们需要进一步研究探头的实际问题。首先我们应当认识到,一个探头,就算它只是简单的一条电线,它也可能是一个很复杂的电路。对于DC信号(0 Hz 频率),探头作为一对导线与一系列电阻,他们就向一个终端电阻一样。(图 1-4a)。

然而,对于AC信号,随着频率的增加,特性曲线戏剧性地产生变化(图 1-4b)。

AC信号的特性变化是因为:电线具有分布电感(L),电线具有分布电容(C)。分布电感反作用于AC信号,在信号频率增加时,阻止AC信号通过。分布电容反作用于AC信号,在信号频率增加时,减小AC信号电流通过的阻抗。这些反作用元件(L和C)的交互作用,与电阻元件(R)一起,成为随信号频率不同而变化的探头阻抗。

通过对探头的良好设计,控制探头的R、L、C元件,就能控制获得想要得到的信号保真度,并使衰减及源负载超过指定的频率示波器。

即使是良好的设计,探头也时由他们的电路的本质所限制。当选择并且使用探头时,知道这些限制和他们的影响,是非常重要的。

带宽和上升时间限制。带宽是一台示波器或探头设计的频率的范围。例如,一根100 MHz探头或示波器被设计为在高达100 MHz 的频率范围内进行测量。在信号频率高于指定带宽时进行测量会导致不可预知的测量结果。(图 1-5)

在一般情况下,为了获得正确的振幅测量,示波器的带宽应该比被测量的波形的频率大5倍。“这条5倍规则”为非正弦波高频成分保证了足够的带宽,例如方波。同样,为了测量波形,示波器必须有足够的上升时间。

示波器或探头的上升时间定义为:当测量一个理想的、瞬时的上升脉冲时,所测量的上升时间。为了合理精确地测量脉冲上升或下降时间,探头和示波器的上升时间之和应该是3~5倍快于被测脉冲。(图 1-6)。

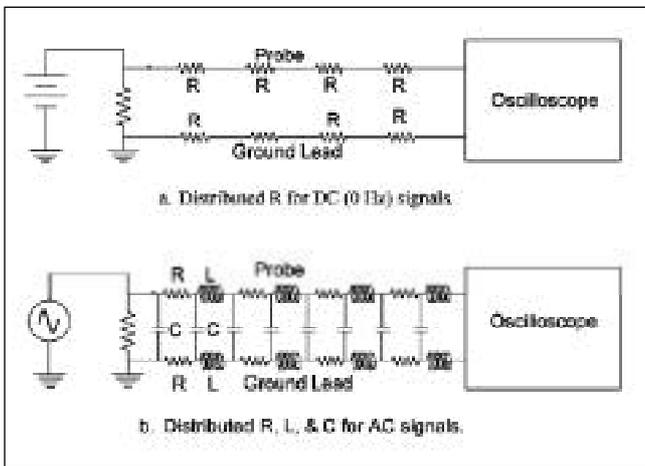


图 1-4. 探头是由分布式的阻抗、感抗、电容组成。(R, L, C)。

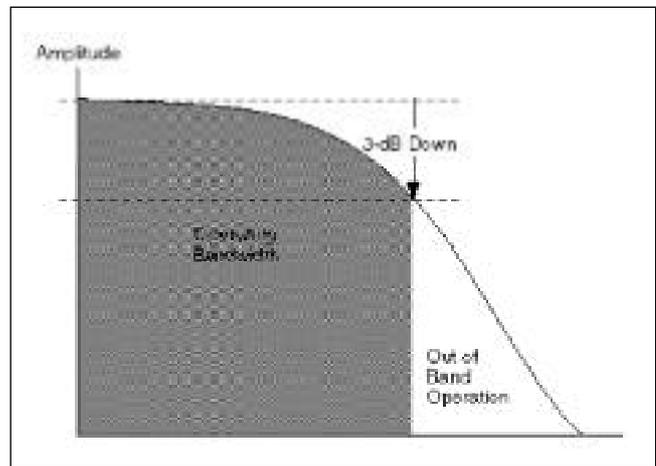


图 1-5. 探头和示波器设计为在规定的带宽范围上进行测量。超越了3 dB点的频率,信号振幅极度削弱,测量结果是无法预知的。

新术语

有源探头 - 包含晶体管或其他有源设备作为部分信号调节网络的探头。

无源探头 - 网络仅由阻抗(R),感抗(L),容抗(C)元件组成,不包括有源元件的探头。

在上升时间没被指定的情况时,你可以从带宽(BW)的指标导出上升时间(T_r),他们具有如下的关系说明:

$$T_r = 0.35/BW$$

每台示波器都定义了带宽和上升时间限制。同样,每根探头也有它的带宽及自己的上升时间限。并且,当一个探头接

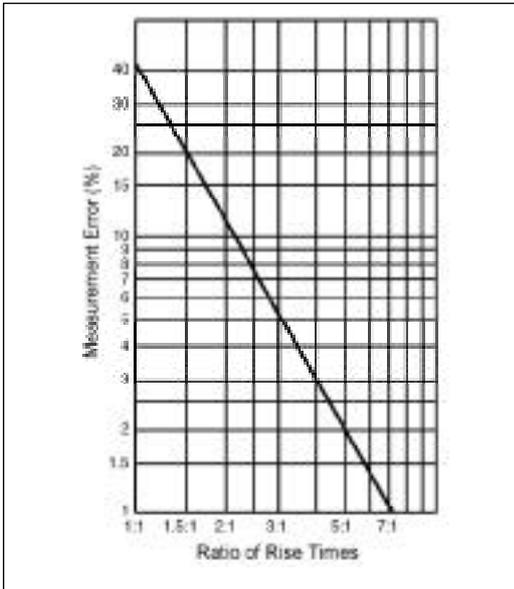


图 1-6. 上升时间测量误差可以从上面的图表进行估计。示波器/探头的共同的上升时间比被测量信号快3倍时,预期测量误差在 5% 以内。快五倍时将导致仅仅 2% 的误差。

入一台示波器时,你将得到一套新的带宽和上升时间限。不幸的是,系统带宽和单个示波器和探头带宽之间的关系不是简单的一种关系。对于上升时间也一样。

为了处理这个问题,当示波器用于特殊模式时,先进的示波器制造商指定的上升时间当使用原配的探头时,是探头尖的上升时间。这是非常重要的,因为示波器和探头一起形成一个测量系统,系统的带宽和上升时间决定它的测量能力。如果你使用没有在示波器推荐表上的探头,你将冒无法预知测量结果的风险。

动态范围限制。所有的探头应该有不应该超过的高电压安全限制。对于无源探头来说,这个限制能从几百伏特延伸到几千伏特。

然而,对于有源探头,最大的安全电压限制经常是几十伏特。为了避免个人安全上的危险及潜在的损坏探头的危险,知道被测量的电压范围及需要使用的探头的电压限制,是明智的选择。

除了安全方面的考虑,也有实际的测量的动态范围方面的考虑。示波器有特定的灵敏度范围。例如,1 mV 到 10V 每格

是一个典型的示波器灵敏度范围。在8格显示时,这意味着你能从4 mV峰峰值到40V峰峰值信号范围内作相当的精确测量。假定至少信号要显示4格幅度,才能获得合理的测量分辨率。

一根 1X 探头(1倍增益探头),它的动态测量范围同示波器一样。

对于上面的例子,这将是4mV到40V范围内的信号测量。但是,如果你需要测量一个超过40V的信号时该怎么办?

你可以通过使用一个衰减探头,从而扩展示波器的动态范围至更高的高电压。例如一根 10X 探头,将扩展动态测量范围至 40 mV 到 400V。

它衰减输入信号10倍,有效地在增大了示波器的测量范围。

对于大多数的通用用途,首选使用10X探头,因为他们具有最高的电压范围及较少的信号源负载。然而,如果你计划测量一个宽电压范围的电压值时,你可以考虑采用可切换的1X/10X探头。它会给你一个4 mV至400V的动态范围,然而,在1X模式下,必须更多的注意信号源负载。

新 术 语

电抗 - 一个随信号频率变化, 阻止电流通过的反作用于AC信号的阻抗单元。电容器(C)代表一个AC信号的容性的电抗, 以欧姆表示, 具有如下关系:

$$X_c = \frac{1}{2\pi fc}$$

其中:

X_c = 容性电抗, 单位: 欧姆
= 3.14159

f = 频率, 单位: 赫兹

C = 电容, 单位: 法拉

电感(L), 代表AC信号的感应电抗, 以欧姆表示, 具有如下关系:

$$X_L = 2\pi fL$$

其中:

X_L = 感应电抗, 单位欧姆
= 3.14159

f = 频率, 单位: Hz

L = 电感, 单位: 亨利

源负载 - 以前曾提及, 一个探头必须分流一些信号电流以便在示波器输入端获得输入信号的电压。这一在测试点的负载, 能够改变电路信号或信号源传送到测试点的信号。源负载影响的最简单的例子是考虑测量一个电池驱动的电网络。如图 1-7 所示。

图 1-7a, 在一个探头被连接之前, 电池的 DC 电压通过电池的内部的电阻(R_i)、负载电阻(R_l)分压, 及电池驱动。图示给出数值, 由此导出输出电压:

$$\begin{aligned} E_o &= E_b * R_l / (R_i + R_l) \\ &= 100 \text{ V} * 100,000 / \\ &\quad (100 + 100,000) \\ &= 10,000,000 \text{ V} / 100,100 \\ &= 99.9 \text{ V} \end{aligned}$$

图 1-7b, 探头连接于电路, 置探头电阻(R_p)与 R_l 并联。如果 R_p 是 100 k, 有效负载电阻是一半 50 k。对 E_o 的负载影响是:

$$\begin{aligned} E_o &= 100 \text{ V} * 50,000 / \\ &\quad (100 + 50,000) \\ &= 5,000,000 \text{ V} / 50,100 \\ &= 99.8 \text{ V} \end{aligned}$$

这个负载的影响是 99.8V 对 99.9V, 仅仅是 0.1% 的影响, 这在大多数情况下是可以忽略的。

然而, 如果 R_p 变小, 例如 10k, 其影响将是不可以忽略的。为了使阻抗负载减到最小, 1X 探头通常内阻有 1M, 10X 探头典型内阻有 10M。

对于大多数测试, 这些阻值使得阻抗负载为零。然而, 当测量高阻抗信号源时, 就必须加以考虑了。

通常, 负载最多涉及到探头尖引起的电容(见图 1-8)。对于低频信号, 这个电容具有非常高的电阻, 其影响不大, 但当信号频率增加时, 电容电抗减小, 结果导致高频率时负载的增加。

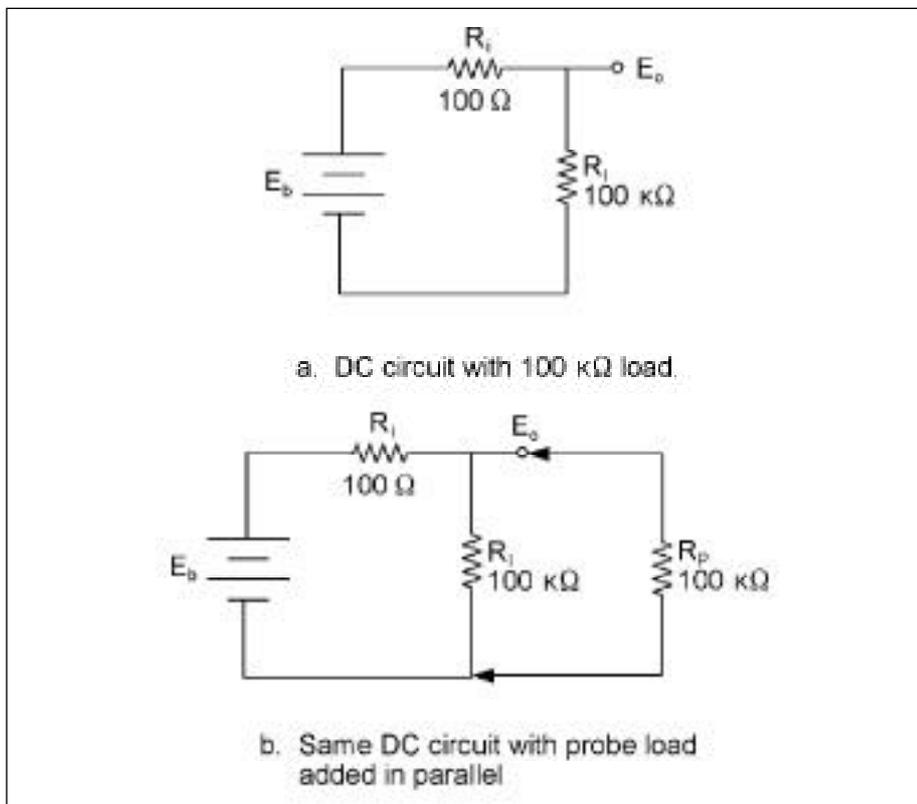


图 1-7. 电阻负载的一个例子。

新术语

振荡 - 当一个电路共振时引起的电压摆动，典型地，脉冲的衰减正弦曲线称为振荡。

接地 - 因为探头必须为进行测量而从信号源分流，必然存在电流回路，这条回路，由一个探头的地导线连接电路或公共地的接地导线提供。

这一容性负载使得测量系统的带宽降低，上升时间变慢。可以通过选择低探头尖端电容的探头，而减小容性负载。

下面表格提供了各种探头电容的典型值。

Probe	Attenuation	R	C
P6101B	1X	1M	100 pF
P6106A	10X	10M	11 pF
P6139A	10X	10M	8 pF
P6243	10X	1M	1 pF

既然接地导线是一条电线，它就一定数量的分布电感(见图 1-9)。这些电感与探头电容相互作用，引起在某一频率的振荡，振荡的频率由 L 和 C 的值决定。振荡是不可避免的，并且可以看到，它是加于脉冲上的，衰减的正弦波振荡。

良好设计的探头接地，可以减小振荡的

影响，由此，振荡频率出现的位置将超过探头/示波器系统的带宽限制。为了避免接地出现问题，通常使用具有最短接地导线长度的探头。替换其他的接地方式，就可能导致在周期性的脉冲上出现振荡。

探头是传感器。在处理示波器探头的具体情况时，记住探头是传感器，这一点是非常重要的。大多数示波器探头是电压传感器。这就是说，他们探查或传感一个电压信号并且传送电压输入示波器。

然而，探头也允许你检测到除电压以外的信号。例如，电流探头被设计为检测通过一根电线的电流。探头变换检测到的电流成为相应的电压信号，然后再将电压信号传送到示波器的输入端。

同样，光电探头检测光功率，并将它们变换为示波器测量的电压信号。

另外，示波器电压探头能够当作传感器和变换器，用于测量不同的现象。例如，一个振动变换器，允许你在示波器屏幕上看到机械振动信号。其可能性非常多样，就象市场上可用的传感器一样。

通常，传感器、探头、示波器是联接在一起的，因此他们应当被视为一个测量系统。

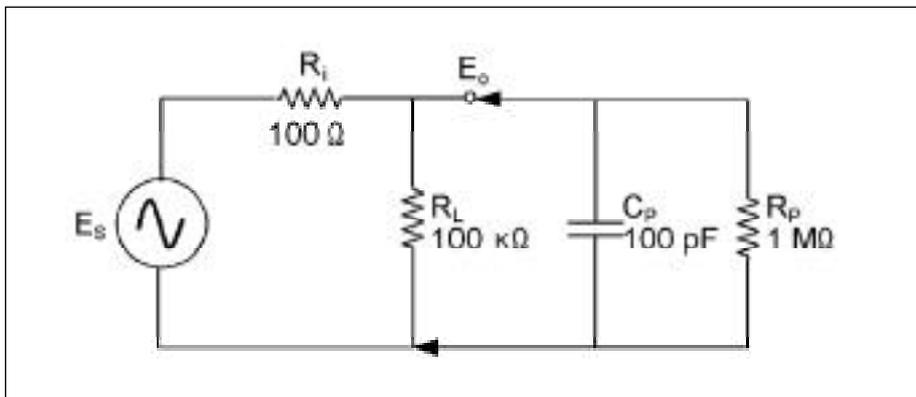


图 1-8. 对于 AC 信号源，探头尖端电容(C_p)是其涉及的最大负载。当信号频率增加，容性的电抗(X_c)减少，引起更多的信号流过电容。

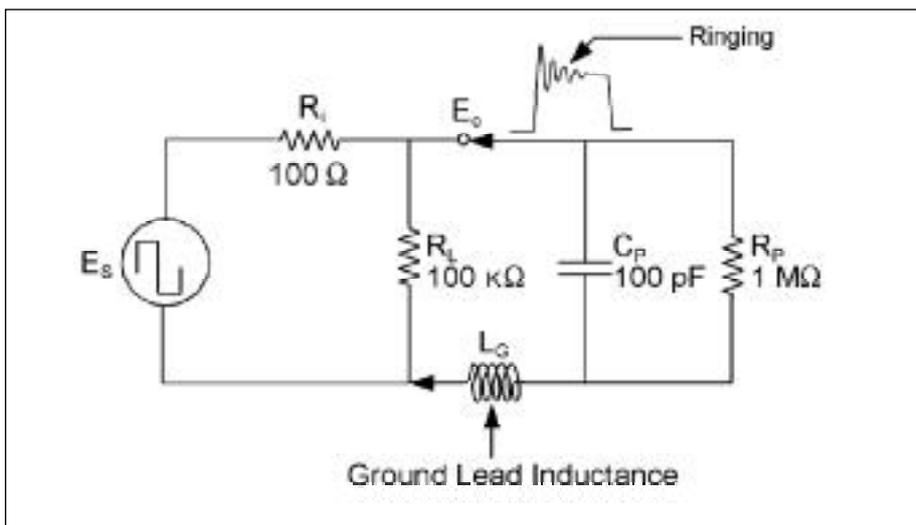


图 1-9. 探头的接地线把自感加入电路。接地线越长，自感越大，快速脉冲产生阻尼振荡的可能性也就更大。

新术语

谐波 - 方波, 锯齿波, 或其它周期性的非正弦波, 包含由基本的频率组成的频率(1/周期)成分, 并且是基频的整数倍(1x, 2x, 3x, ...)的频率, 并称之为谐波频率。二次谐波的频率是基频的二倍, 三次谐波的频率是基频的三倍。其余同理。

此外, 实际上以上讨论的探头扩展到传感器。传感器也有带宽限制并且能引起负载效应。

选择适当的探头

由于示波器测量应用及需求的广泛性, 在市场上示波器探头的选择也很多, 可能导致大家在选择探头时不知如何是好。为了正确地选择探头, 应当遵循示波器制造商对探头选择的建议。这是非常重要的, 因为不同的示波器设计, 有不同

的带宽、上升时间、灵敏度、及输入阻抗上的考虑。

充分利用示波器的测量能力要求有一个匹配示波器的探头。另外, 探头选择过程中, 也应该考虑你测量时的需要。你需要测量什么? 电压? 电流? 一个光信号? 通过选择适合于信号的一个探头, 你能更快得到直接的测量结果。

另外, 考虑你正在测量的信号的振幅。他们在你的示波器的动态范围以内吗? 如果不是, 你需要选择能调整动态范围的探头。通常, 通过有一个10X或更高的衰减的探头, 在探头尖超过你计划测量的信号的频率或上升时间时, 可以确保带宽或上升时间。应当记住非正弦信号有重要的频率成分或者说除了信号的基频, 还有很多的谐波频率。例如, 完全包括5次谐波的100 MHz方波, 你需要一个在探头尖具有500 MHz带宽的一个测量系统。

同样, 你所使用的示波器系统的上升时间应该比你计划测量的信号的上升时间快3~5倍。并且应当计入可能的由探头带来的信号负载。尽量使用高阻抗, 低电容探头。对于大多数应用来说, 一个10 M Ω 的20 pF或小于20 pF电容量的探头, 其源负载是不必考虑的。然而, 对于一些高速数字电路, 你应当使用有源探头, 它们具有更小的探头尖电容。最后, 记住, 在你能够做测量之前, 你一定要能把探头接入电路。这可能需要考虑如下的特殊的选择问题, 探头头部的尺寸, 探头尖适配器, 以便与电路作简易便利的连接。

一些探测要点

选择匹配示波器的并且满足应用需求的探头, 可以获得必要的测量的能力。实际上使测量获得有效的结果也取决于你怎么使用工具。下面的探头要点将帮助你避免一些普遍的测量问题:

补偿你的探头。大多数探头被设计为匹配特定的示波器的输入电路。然而，不同的示波器之间有细微的变化，甚至在同一示波器的不同的输入通道之间也有。为了处理这一问题，许多探头，特别是

衰减探头(10X和100X探头)，有内建的补偿网络。

如果你的探头有一个补偿网络，你应该调整这个网络，为你正在使用的示波器通道做探头补偿。

探头补偿，遵循下列过程：

1. 把探头接入示波器。
2. 把探头尖接入示波器前面板上的探头补偿测试点(见图 1-10)。
3. 使用探头自带的调整工具或其他无感调节工具，来调节补偿网络，从而获得一个标准波形，这一波形应当具有平直的顶部，不能有冲及圆弧。(见图 1-11)。
4. 如果示波器有内嵌的校准程序，运行这个程序，从而提高精确度。

一根未补偿的探头能导致各种各样的测量错误，特别是测量脉冲上升或下降时间。为避免这样的错误，通常在把探头连接到示波器及检查补偿以后补偿探头。另外，无论何时你改变探头尖适配器后，再检查探头补偿，是非常明智的。

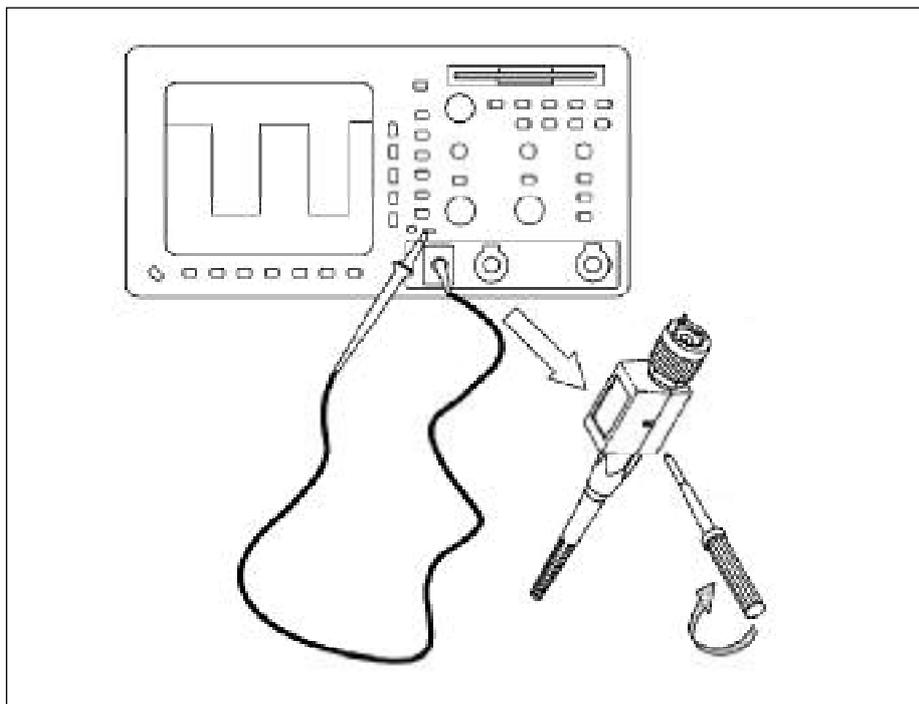


图 1-10. 探头补偿的调节，或者在探头尖端或者在接入示波器输入的补偿盒。

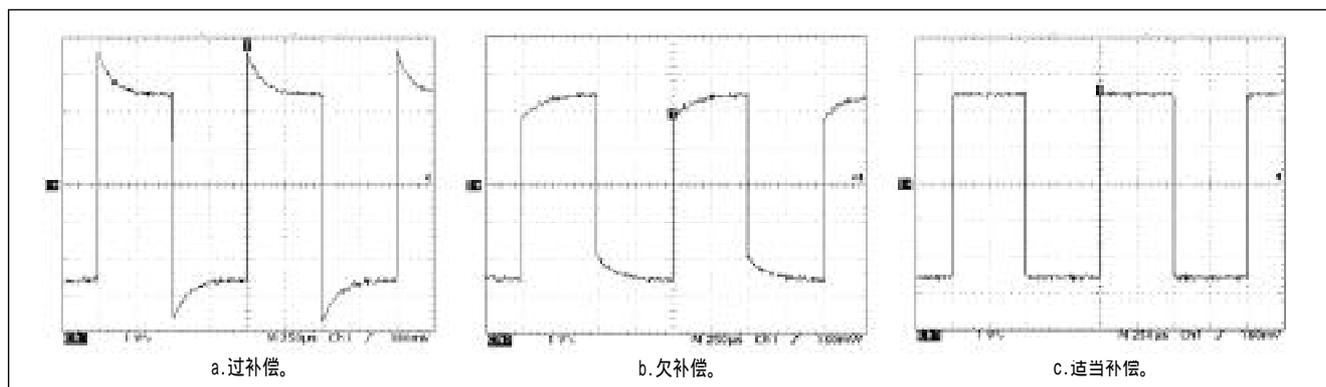


图 1-11. 一个探头补偿效果的例子：对方波的影响。

只要可能，使用适当的探头尖适配器。对被测量的电路进行测量时，一个适当的探头尖适配器能使探头连接快速，方便，并且稳定可靠。不幸的是，用一截普通地短电线直接焊接于电路点上充当探头尖适配器是非常常见的。问题在于，即是一至两个英寸的电线都能在高频率通过时，产生重大的阻抗变化。这个影响由图 1-12 显示，一个电路由探头尖直接的接触进行测量，对比通过一根连接于探头尖及电路之间的短电线进行测量。

使接地线尽可能的短和直接。当做性能检查或修理大的电路板或系统时，经常想延长探头的接地线。加长的接地线使得你接地后，在你探看各各测试点时，就能够自由地在系统附近移动探头，而不需要再次连接地线。然而，延伸的接地线所增加的电感能在快速变换的波形上引起阻尼振荡。如图 1-13 所示，当使用标准的探头和加长的接地线探头时波形的测量情况。

概要

在第一章里，我们努力提供了适当选择探头及适当使用探头的所有的必要的基本的信息。

在下列章节，我们将详细阐述这个问题，同时，也将阐述关于探头及探测技术的更高级知识。

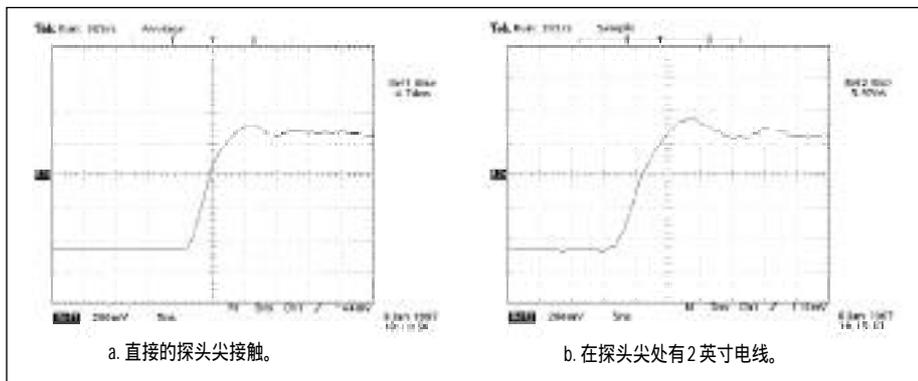


图 1-12. 将短电线接入测试点，能引起信号的保真度问题。在这种情况下，上升时间从 4.74 ns (a) 被改变到 5.67 的 ns (b)。

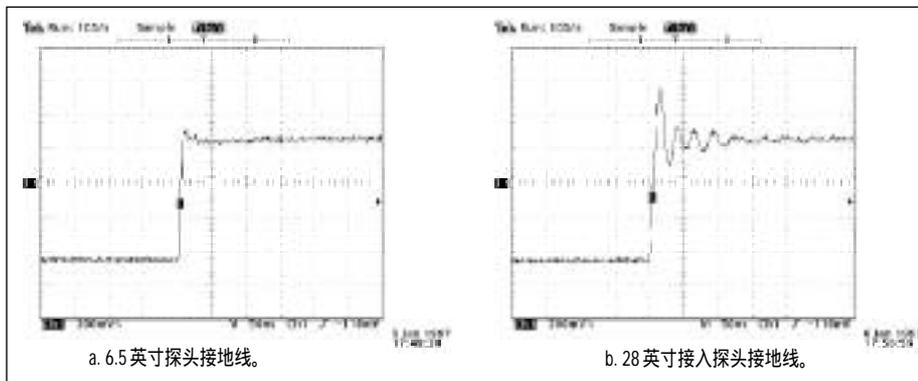


图 1-13. 延伸探头接地线能引起阻尼振荡在脉冲上出现。

第二章 对于不同的应用需要使用不同的探头

在市场上可以获得成百上千的不同种类的示波器探头。Tektronix 的测量产品目录列出超过 70 种不同的探头型号。如此

广泛的探头选择确实是必要的吗？答案是：是的！并且在这章你将发现原因是什么。

通过理解这些原因，你将更好地准备探头选择，从而匹配你正在使用示波器和匹配你需要做的测量的类型。

其好处是：合适的探头选择导致测量性能及结果的提高。

为什么有如此多种类的探头？

示波器型号和性能的多样性是有如此多探头的一个基本原因。不同的示波器要求不同的探头。一个 400 MHz 示波器要求支持 400 MHz 的带宽的探头。然而，这些同样的探头对于 100MHz 示波器来说，不论从性能上还是从价格上都是不必要的。

因此，需要为 100 MHz 带宽设计一种不同的探头。通常，探头应该选择为任何

时候都匹配示波器的带宽。如果不是这样，应选择超过示波器的带宽的探头。带宽是首要的考虑。示波器也有不同的输入接头类型和不同的输入阻抗。例如，大多数示波器使用一简单的 BNC（同轴电缆连接器）类型输入接头。也有使用 SMA（表面贴装）接头的。另外，如图 2-1 所示，特殊设计的探头接口将支持读出器，踪迹 ID，探头供电，或其它高级特性。这样，探头选择也必须与特定示波器兼容。

这可以是直接的接头兼容性，或通过一个适当的适配器的连接。读出器支持是探头 / 示波器接头兼容性的一个特别重要的方面。

当 1X 和 10X 探头在一个示波器上被互换时，示波器的垂直刻度读出器应该反映 1X 到 10X 的变化。

例如，如果示波器的垂直刻度读出是 1 伏特/格，使用 1X 探头，当改变为一根 10X 探头，垂直的读出应该被乘以 10 为 10V/格。如果示波器不能随着 1X 到 10X 的改变而改变刻度，用 10X 探头作振幅测量时，得到的结果将比实际值小十倍。

很多市面上销售的普通探头不能为所有的示波器支持读出功能。所以，当代替制造商特别推荐的探头而使用通用的探头时，额外的小心是非常必要的。

除了带宽和接头的差别，各种各样的示波器也有不同的输入阻抗和输入电容。典型地，示波器输入电阻是 50 或 1 M。

新术语

读出 - 在一台示波器屏幕上显示的字符及数字的信息，它提供波形缩放比例信息，测量结果，或其它的信息。

踪迹识别 - 当多重的波形踪迹在一台示波器上被显示时，踪迹 ID 特征允许识别一个从特定探头或示波器通道来的特殊波形。瞬时按下探头上的踪迹 ID 钮，能够使示波器跟踪相应的波形，并即刻以跟踪识别的方式改变示波器工作模式。

探头供电 - 供给探头电力的有：示波器，探头放大器，或被测电路等。探头需要供电的这一特征，使其具有有源电子学的特性，因此归类定义为有源探头。

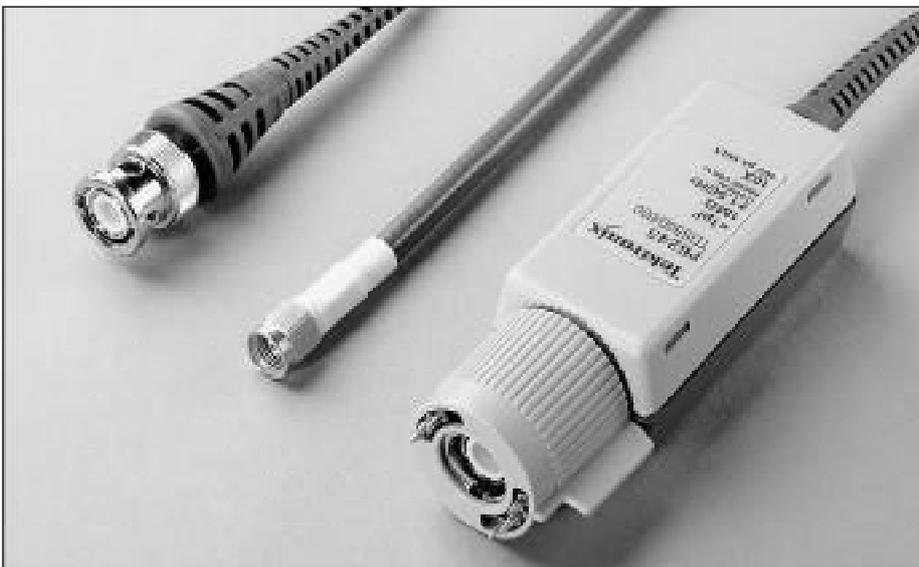


图 2-1. 需要各种各样接头类型的探头匹配不同的示波器输入通道连接器。

新术语

衰减探头 - 通过衰减信号, 有效地增加示波器的刻度因数范围的探头。

例如, 10X 探头通过衰减 10 倍有效地增加了示波器的显示范围。

这些探头通过衰减施加于探头尖的信号完成倍增; 这样, 一个峰峰值 100 伏特信号被一根 10X 探头衰减到 10 伏特峰峰值信号, 并且再作为峰峰值信号通过示波器的刻度因子 10X 倍增, 在示波器上显示为 100 伏特的信号。

然而, 根据示波器的带宽技术规格和其他设计因素, 输入电容可以有很大的变化。为了合适的信号转换和保真度, 探头的 R 和 C 匹配示波器的 R 和 C, 这一点是非常重要的。例如, 50 示波器输入电阻应当使用 50 探头。同样, 1M 输入电阻示波器上使用 1M 探头。但一

个例外有别于阻抗一一匹配, 当使用衰减探头时, 例如, 一根 50 输入阻抗的 10X 探头 具有 500 的输入电阻; 1M 的 10X 探头具有 10M 的输入阻抗。

(衰减探头, 例如一根 10X 探头, 也被归类于分压器探头与乘法器探头。这些探头倍增示波器的测量范围, 并且通过衰减或分压输入示波器的信号而完成这一工作。)除了阻抗匹配, 探头的电容也应该匹配示波器的额定的输入电容。

通常, 这个电容的匹配能通过探头的补偿网络的调整来做。但是只有当示波器的额定输入电容在探头的补偿范围内时才可以做到。因此需要不同补偿范围的探头来满足不同的示波器的输入范围的需要。

匹配一个探头到一台示波器这一问题极大地被示波器制造商简化了。示波器制造商小心地将其视为一个完整的系统而

设计探头和示波器。其结果是, 使用制造商所指定的标准探头, 才能获得探头与示波器的最佳匹配。使用除制造商所指定的以外的任何其它探头, 均可导致逊于最佳性能的测试。

探头与示波器的匹配要求是市场上具有大量商品探头的第一个理由。不同测量需求要求不同的探头使得这一数目大大增加。

探头最基本的差别在于被测量的电压的范围。毫伏特, 伏特, 及千伏特测量时, 要求探头有不同的探头衰减因子 (1X, 10X, 100X)。

另外, 在许多情况下信号电压是差分的。也就是说, 信号通过 2 点或 2 根电线而存在, 这两点都不是接地点或公共电位 (见图 2-2)。

如此的差分信号在电话语音电路、计算机磁盘读通道、及多相电源电路上是常见的。测量这些信号还需要另外一种探头, 称为差分探头。

有许多例子, 特别是在功率应用时, 此时电流比电压还要重要。这种应用最适合于另一类探头, 它们敏感电流而非电压。电流探头和差分探头仅仅是许多不同的类型的可用探头中的两个特别的种类。

本章的余下部分包含更多的常见类型的探头及他们的特殊用处。

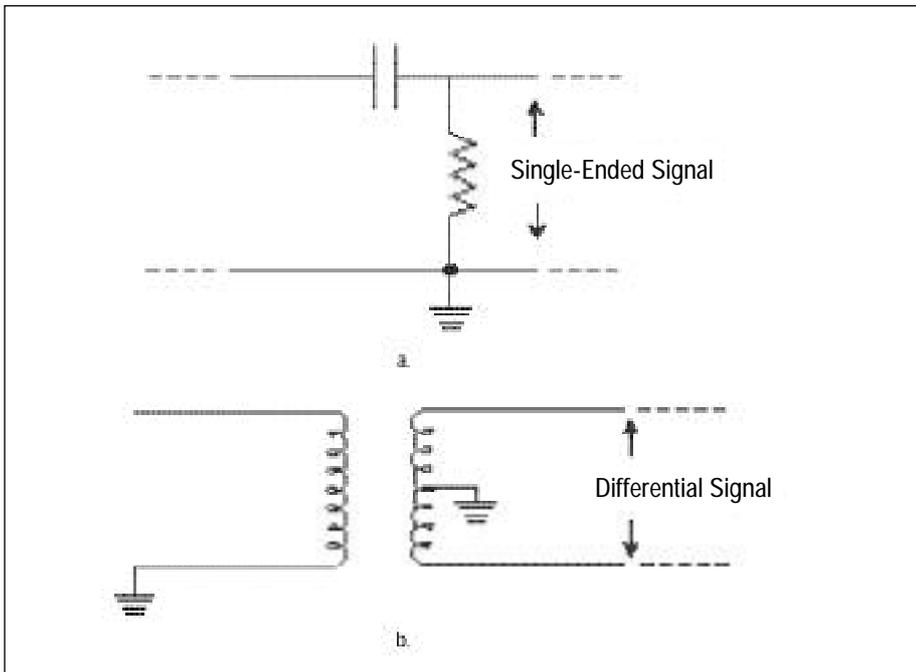


图2-2. 单端信号将地(a)作为参考点, 差分信号是两个信号线之间的差或两个测试点之间的差(b)。

新术语

时域反射计(TDR) - 一种测量技术,将一个快速脉冲加于信号传输路径,测量脉冲的反射,以分析测定传输路径的故障或失谐的位置和类型。

不同探头的好处

作为一篇前言而讨论各种各样的常用探头的类型,认识到探头类型常有重叠,是非常重要的。当然一根电压探头只敏感电压,但是一根电压探头可以是一根无源探头或一根有源探头。同样,差分探头是电压探头的一种特殊类型,并且差分探头也可以是有源或无源探头。其中,将适当指出这些探头之间重叠的关系。

无源电压探头。无源探头由电线和接头组成,并且,当需要补偿或衰减时,还有电阻器与电容器。探头没有有源的部件-晶体管或放大器,并且不需电源给探头。因为他们相对简单,无源探头趋于是最粗劣且最经济的探头。他们易于使用并且也是探头中最广泛地被使用的类型。

然而,不要被使用的简单或构造的简单所蒙骗,高质量的无源探头很少有简单的设计!

无源电压探头可用于各种各样的衰减因子可用-1X,10X,100X,他们为了不同的电压范围而设计。

因此,无源电压探头最通常是使用10X探头,并且作为示波器的一个代表性的标准附件。对于信号振幅是1伏特或小于1伏特的峰峰值的应用,一个1X探头是更适当或者所说更必要的。

信号中有低振幅信号及中等振幅信号几十伏特或几十毫伏)的混合,则一根1X/10X可切换探头是非常便利的。

然而,应该记住,一根可变换的1X/10X探头本质上是在一起的2根不同的探头。不仅是他们有不同的衰减因子,他们的带宽、上升时间及阻抗(R与C)特征也是不同的。

其结果是,这些探头将不确切地匹配示波器的输入,并且将不能提供标准的10X探头的最适宜的性能。大多数的无源探头设计为普通的示波器的应用。因此,他们的带宽典型范围从不到100兆赫延伸到500兆赫以上。有一种提供更高带宽的无源探头,被称为50 Ω 探头,或者分压器探头。这些探头设计为在50 Ω 环境下使用,它典型的应用是高速设备,微波通信,及时域反射计(TDR)。一个用于如此应用的典型的50 Ω 探头有数千兆赫的带宽且有几个100皮秒或更快的上升时间。

有源电压探头。有源探头通常包含有源器件,例如晶体管。通常,有源设备是一只场效应晶体管(FET)。场效应管输入的优点是它提供一个很低的输入电容,典型值小于1pF。有一些特定的场合需要

极低的电容。首先,回想一下,低值电容,C,转换为高值的容抗, X_c 。这可以从 X_c 的公式看出,它是:

$$X_c = \frac{1}{2\pi fc}$$

既然容性电抗是一个探头的主要的输入阻抗元件,一个低值的C意味着高输入阻抗。有源的场效应管探头一般具有从500兆赫至高达4GHz的带宽。

除了更高的带宽,有源场效应管探头的高输入阻抗,允许在测量点进行未知阻抗的测量,它具有更小的对负载的影响。

另外,既然低电容减小了地线的影响,就可以使用更长的地线。然而,最重要的方面是,场效应晶体管探头提供很低的负载,使他们能够用于使用无源探头将带来严重负载的高阻抗电路。

既然具备如此高的性能,比如直流到4GHz宽的带宽,你可能会说:那为什么还要无源探头?回答是有源探头没有无源探头那样的电压动态范围。有源探头的线性动态范围通常是从 $\pm 0.6V$ 到 $\pm 10V$ 。同样,他们能承受的最大电压小于 $\pm 40V$ (直流+交流峰值)。换句话说你不能象使用一根无源探头一样,测量从毫伏到数十伏特的信号,并且有源探头可能在无意中测试高电压时损坏。他们甚至可能被静电损坏。然而,场效应晶体管探头的高带宽是其主要的优点,其线性电压范围已经包含典型的半导体系列电压值。有源的场效应晶体管探头,常用于低电压信号的测量,包括射极耦合逻辑、GaAs、及其它的快速逻辑系列。

差分探头。差分信号是相互作为参考,而不是以地为参考。图 2-3 是差分信号的几个例子。包括集电极负载电阻器两端电压信号,磁盘驱动器读通道信号,多相电源系统,及许多其它本质上“浮”于地上状态的信号。

差分信号以探头测量有两个基本的方法。两种方法在图 2-4 中说明。

一个常用方法是使用 2 根探头做 2 个单端信号测量,如图 2-4a 所示。

它也通常是做差分测量时,人们最先想到的测量方法。因为双通道示波器有 2 根探头是可用的,此方法经常被使用。将所有的信号与地(单端)进行测量,使用示波器的数学功能,信号从一个通道减去另一个通道(通道 A 减通道 B 的信号),看起来非常完美的完成了对差分信号的测量。对于低频信号,并且差信号幅度足够大,不会淹没于噪声的情况也许适用。但是这种测量方法将会有一些可能

的问题。一个问题是,有 2 个长并且分离的信号路径通过探头及每个示波器通道。这些路径之间的任何延迟差别将导致 2 个信号时间上的扭曲。在高速信号时,这一扭曲能导致确定差分信号时产生重大的的振幅及定时错误。为了使这种影响减到最小,应该使用匹配的探头。

单端测量的另外的问题是,他们不能提供足够的共模噪声抑制。许多小电压信号,例如磁盘读通道信号,被差分地传送以便于共模噪声的抑制及处理。共模噪声是由于附近的时钟线或外部噪声源例如荧光灯引起的加于两个信号上的噪音。在一个差分系统中,这个共模噪声应当从差分信号中减去。成功的做法就要涉及共模抑制比(CMRR)。

因为通道的差别,单端测量时的共模抑制比(CMRR)性能随着频率的增加,快速下降至非常低的水平。如果源的共模抑制特性不变,测量到的信号噪音比其

实际大。而差分探头是使用差分放大器使 2 个信号相减,由示波器的一个通道测量出差分信号(如图 2-4b)。这就提供了在更宽的频率范围上的共模抑制比(CMRR)性能的充分提高。由于电路技术的进步,差分放大器已经可以做到实际的探头上。

在最新的差分探头中,例如 Tektronix P6247,达到 1-GHz 的带宽,共模抑制比(CMRR)性能达到 1 MHz 时 60 dB (1000:1), 1 GHz 时 30 dB (32:1)。这种带宽/共模抑制比(CMRR)性能在磁盘驱动器读/写率达到或超过 100 兆赫时,正变得越来越重要。

高压探头。术语“高压”是相对的。半导线行业中的高压对于电力行业中的高压而言,是非常小的。然而,从探头的角度,我们可以定义高压为:任一超过典型通用的 10X 无源探头安全使用的电压。

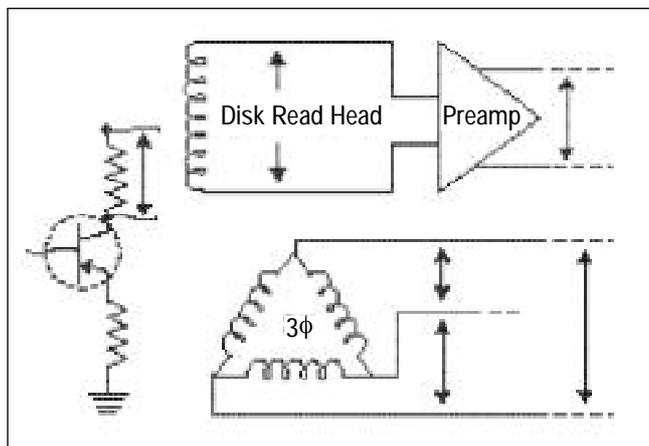


图 2-3. 差分信号源的一些例子。

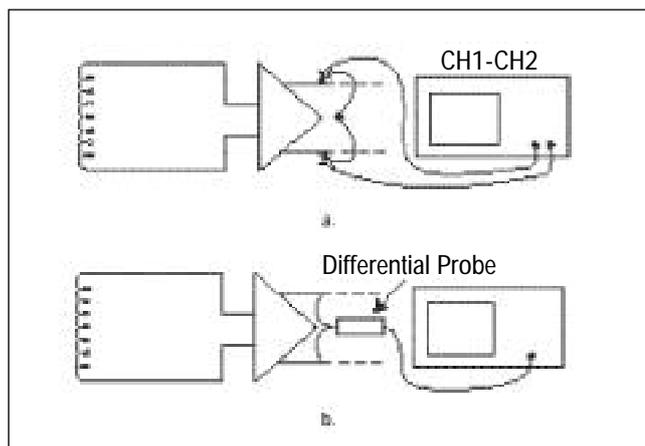


图 2-4. 差分信号能用一双通道示波器的转换来计算(a),或更使用差分探头获得更好测量结果(b)。

Differential Signal

常用无源探头的最大测量的电压大约在 400 ~ 500 伏特附近(直流 + 交流峰值)。另一方面, 高压探头能测量的电压最大高达 20, 000 伏特。有这样的探头的例子, 如图 2-5 所示。安全是高压探头和测量的一个特别重要的方面。

为满足这一要求, 许多高压探头有比正常探头长的电缆线。典型的电缆线长度是 3 米。这通常满足于将示波器置于安全柜或安全屏蔽之外时的使用。选择 8 米电缆线可用于示波器操作需要更加远离高压源的情况。

电流探头。电流通过导线引起导线周围电磁场的形成。电流探头感应这一场的强度, 并且转换为电压信号由示波器测量。这允许你用示波器观察并分析电流波形。与一台示波器组合进行电压测量时, 电流探头也允许你用于各种的功率测量。取决于示波器的波形数学处理能

力, 这些测量可能包括瞬时功率, 有效功率, 视在功率, 及相位。基本的示波器的电流探头有两种类型。交流电流探头, 它通常是无源探头, 及 AC/DC 电流探头, 它通常是有源探头。两种类型都应用变压器原理, 传感导线中的交流电。

对于变压器效应, 首先必须是交流电流通过导线。这一交流电引起与电流流动的振幅和方向相关的磁场。当线圈置于磁场时, 如图 2-6 所示, 变化的磁场通过简单的变压器效应感应电压。

这种变压器效应是电流探头的基础。交流探头的头也确实就是一个线圈, 它精密地缠绕在磁铁芯上。当以特定的方向持有探头并接近通过交流电的导线时, 探头输出一个与导线中电流已知比例的线性电压, 这一相关电压能在一台示波器上作为电流波形被显示出来。电流探头的带宽取决于探头线圈的设计和其他

的因素。带宽最大可以达到 1 GHz, 但大多数带宽低于 100 兆赫。

通常, 对于交流探头也有一低频截止带宽。这包括直流, 既然直流不引起磁场的变化, 这样就不能引起变压器的感应。同样在频率很接近直流时 如 0.01 赫兹, 磁场没有足够快的变化而使变压器感知不到。这样, 只要低频到达变压器的作用域, 就会在探头的带宽内产生可测量的输出。

此外, 还取决于探头的线圈的设计, 带宽的低频截止可能是低至 0.5 Hz 或高达 1.2kHz。

对于带宽起始于接近直流的探头, 霍尔效应器件可以被加于探头, 来检测直流电。AC/DC 探头带宽始于直流, 并且延伸至带宽 3 dB 点处。这类探头要求有电源作为霍尔效应器件的偏流, 用于直流检测。



图 2-5. P6015A 能测量高达 20 Kv 的直流电及 40 kv 脉冲, 具有 75 兆赫的带宽。

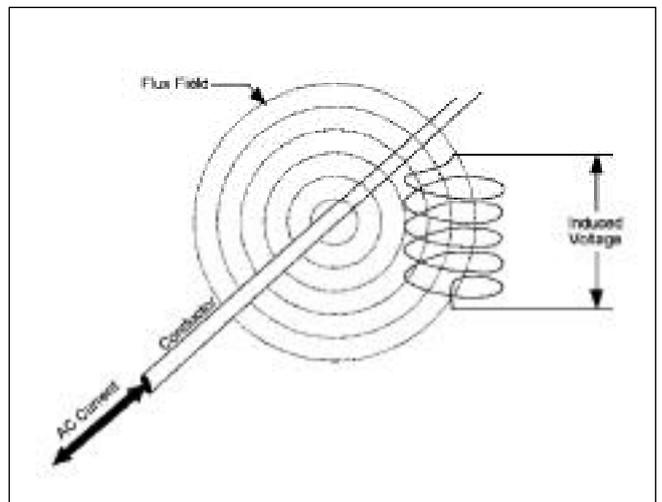


图 2-6. 线圈置于通过交流电的导线周围, 并由磁场感应到电压。

根据电流探头的设计，经常需要电流探头放大器处理交流和直流信号的组合，为示波器观察提供单一的输出波形。

电流探头本质上是一对紧密耦合的变压器，这是非常重要的。这个概念如图 2-7 中说明，它适用于基本的变压器方程。对于标准的操作，可以将待测的电流导线看作有一圈绕组 (N_1)。电流从单一

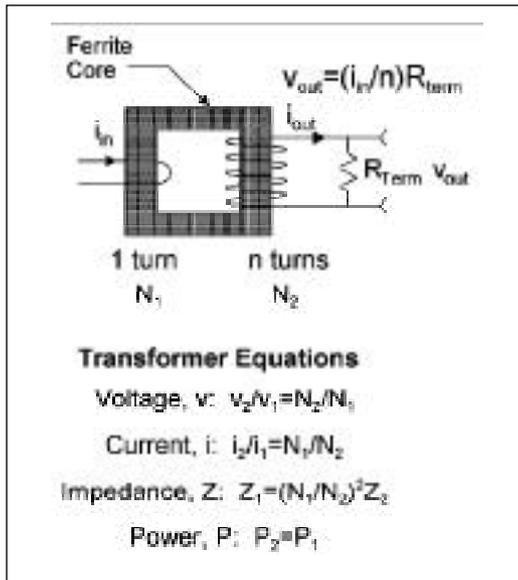


图 2-7. 通过交流变压器作用，电流通过导线 (N_1) 在交流探头的线圈 (N_2) 感应电流，导致一个与电流成比例的电压通过探头端子 (R_{term})。

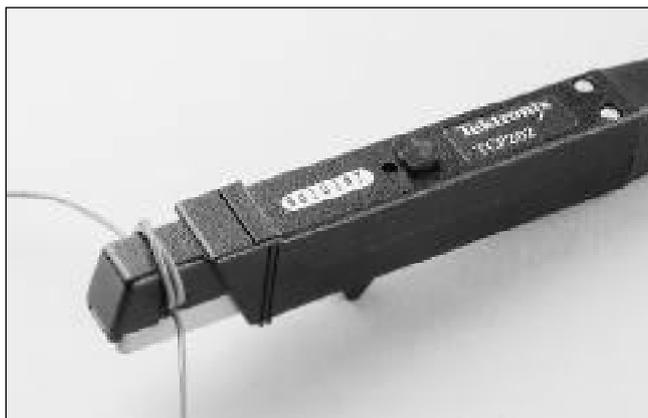


图 2-8. 分离磁芯交流电流探头的例子。通过探头环绕的导线有 n 圈，则增加敏感度 n 倍。

绕组变换为多圈 (N_2)，探头输出相对于圈数比例 (N_2/N_1) 相称的电压。同时，探头的阻抗作为串连插入阻抗，被变换到导线阻抗。插入阻抗取决于具体的探头，在 1-MHz 时典型值大约是 30 ~ 500m Ω 。大多数情况下，电流探头的插入阻抗可以忽略其负载影响。

我们可以利用变压器基本原理，通过缠绕探头多圈导线的方法增加探头敏感度，如图 2-8 所示。2 圈绕组加倍其敏感度，3 圈绕组 3 倍其敏感度。然而，这也会由于增加的圈数增加其插入阻抗达到圈数的平方倍。

图 2-8 举例说明了一个特别种类的分磁芯的探头。这类探头的绕组在一个“U”型的磁芯上，并由一块滑动的铁氧体将磁芯“U”开口的顶部闭合。这类探头的优点是铁氧体滑动触头能被缩回，从而允许探头方便夹住导线而测量电流。当测量完成时，滑动触头能缩回并且探头能被移动到另外的导线。也有实心的电流变压器。这些变压器完全环绕正在

被测量的导线。测量时，必须断开导线，将导线穿过变压器，然后重新连接被测电路的导线。

实心探头的主要优点是，他们尺寸小，测量快速低振幅电流脉冲及交流信号时具有好的高频响应。分裂铁芯探头是迄今为止是最常用的类型。它们可用于 AC 和 AC/DC 的形式，依靠安培秒乘积，它们有各种各样的电流显示范围。

安培秒乘积为某些电流探头的线性操作限定了最大值。这个乘积定义为电流振幅乘以脉冲宽度。当超过安培秒乘积时，探头线圈的磁芯材料进入饱和状态。饱和状态的磁芯不能再感应当前电流的变化，输入电流和输出电压之间的比例不再是常数。结果是波形峰值在安培秒乘积被超过的区域中被切去。磁芯饱和状态可能由通过导体的高压直流所引起。

为减轻磁芯饱和状态与有效地扩大电流测量范围，一些有源探头提供偏置电流。感应导体中的电流，然后设置偏流使之与此电流大小相等，方向相反。通过反相电流的副作用，反馈电流能调整并阻止磁芯进入饱和状态。

新术语

畸变 - 与理想或标准的任何背离；通常与波形或脉冲的平顶和基底有关系。信号的畸变可能由信号源的电路条件引起，也可能是由被测系统引起。对于有畸变的信号，最重要的是决定其来源，是待测信号本身的问题，还是源自测量过程。通常，畸变以背离正确响应的百分比来说明。

由于从毫安到千安培的电流测量的广泛需求，从兆赫到直流，电流探头有各种型号。为一个特别的应用选择电流探头，同考虑选择电压探头在许多方面是类似的。电流的处理能力、敏感范围、插入阻抗、连接、上升时间及带宽限制是一些关键的选择条件。另外，电流测量能力将随频率降低，而且不能超过指定的安培秒乘积。

逻辑探头。数字系统错误的发生可能有许多原因。逻辑分析仪是确认及隔离错误的主要工具，但是实际上引起逻辑错误的确切原因经常是由于数字波形的模拟属性。脉冲宽度抖动，脉冲振幅错误，及通常的模拟噪声和串扰，是许多可能导致数字电路错误的模拟原因之中的几个。

分析数字波形的模拟属性要求使用示波器。然而，为了隔离确切的原因，数字设计者经常需要注意在特殊的逻辑条件期间发生的数据脉冲。

这需要一个逻辑触发能力，这也就是逻辑分析仪与示波器不同的典型特征。

这一逻辑触发功能，可以通过使用一个字触发识别探头加于大多数示波器上来实现的。如图 2-9 所示。

如图 2-9 所示的特别的探头为 TTL 和 TTL 兼容逻辑而设计。

它能提供多达 17 个数据通道探头(16 个数据位)，同步及异步兼容操作。

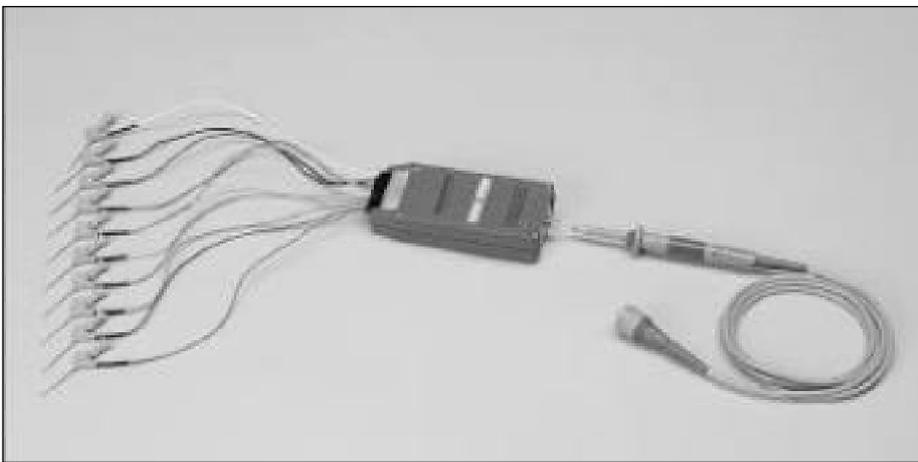


图 2-9. 字识别探头。此探头允许示波器被用来在专用的逻辑条件区间分析具体的数据波形。

手工设置微型开关，将要识别的触发字编程入探头。当一个匹配的字被认出时，探头输出一高(一个)触发脉冲，用来触发示波器获得事件的相关数据波形。

光电探头。随着以光纤为基础的通信的到来和发展，观察及分析光电波形的需求快速增加。许多专业化的光学系统仪器，填补了对通信系统故障检修及分析

的需要。然而，在对光学部件的开发和检验上，对于一般用途的光学波形测量的仪器也同样有越来越多的需求。光电探头就是一个光电转换器。在光学一侧，探头的选择必须匹配专用的光学连接器和被测量设备的光纤类型或光学模式。在电学一侧，遵循标准的探头与示波器匹配标准。

其他探头类型。除了上述所列的“标准的”探头类型，也有许多特别的探头及探头系统。包括：

- 抗恶劣环境探头，它被设计为可以超过一个很宽的温度范围内操作。
- 温度探头，它被设计为用来测量器件和热量产生单元的温度。
- 用于探测微距设备如多片模块、混合电路、集成电路等所用的探测站和有探头伸缩臂(图 2-10)。

浮动测量

浮动测量指对于都不是地电位的两点之间的测量。如果听起来浮动测量好像在前面谈到差分探头时听过，你是正确的。浮动测量就是差分测量，并且，事实上，浮动测量可以通过差分探头来实现。

一般术语“浮动测量”用于谈及对电源系统的测量。例如开关电源、电机驱动器、镇流器、及不间断电源，测量的两个点均不是地(地电位)，“公共”的信号可以被提高(浮动)到对地几百伏。通常，为了计算加于其上的低电压信号，这些测量需要滤掉高的共模信号。外部的地电流也能把交流干扰加到显示器，从而引起更多的测量困难。一种典型的浮动测量情况如图 2-11 所示。在这台电机驱动器系统中，交流总线的三相电被整流到浮地 600v，以地为参考的控制电路通过独立于桥晶体管的驱动线路产生脉冲调制门驱动信号，使得每一输出以脉冲调制频率在总线电压上下摆动。对集电极-射极电压的准确测量需要滤去总线跃迁。

另外，紧凑设计的电机驱动电路，快速的电流跃变，及邻近的旋转电机一起形成恶劣的电磁干扰环境。示波器探头的地线连接到电机驱动器电路的任何部分将引起一个短路。



图 2-10. 用来探测小尺寸设备如混合电路或集成电路的探测台，探头架。

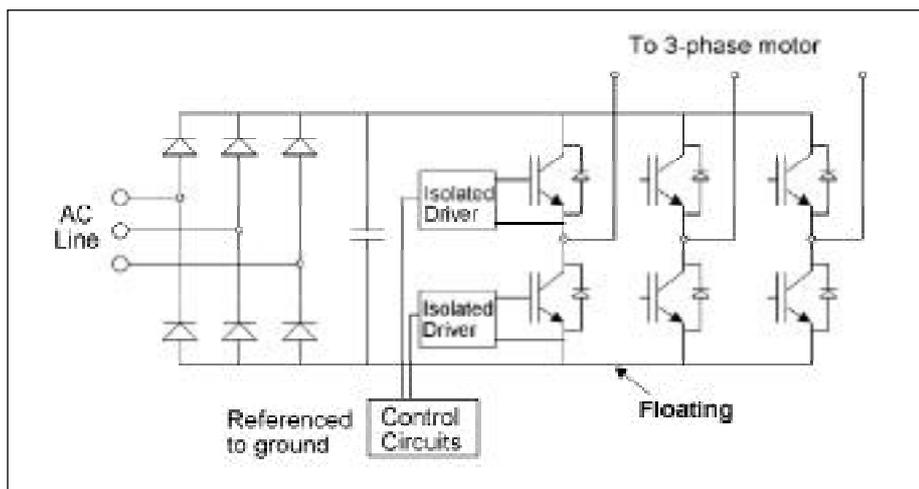


图 2-11. 在这三相电机驱动中，所有点的电位高于地，做浮动测量是必要的。

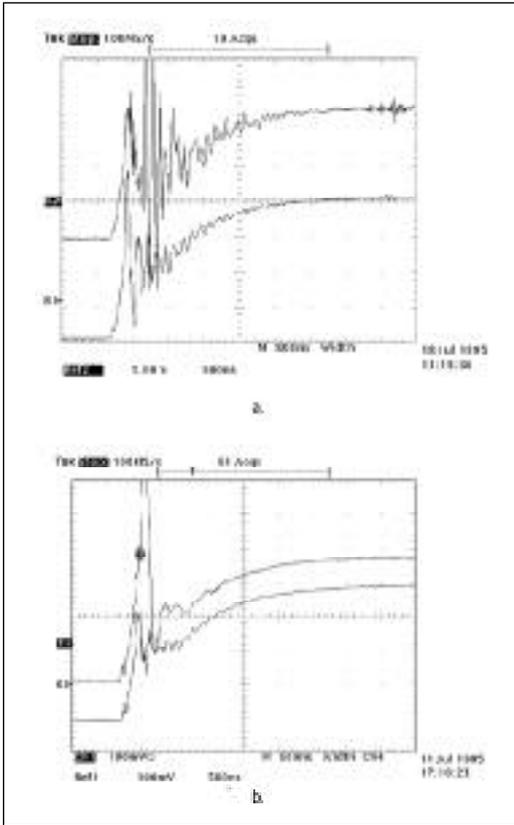


图 2-12. 不但潜在危险，浮动示波器测量(a)与使用探头隔离器(b)的安全方法相比，能导致明显的阻尼振荡。

危险

为了避免这样的短路，一些示波器用户使用了不安全的剪断示波器地线的方法。示波器的地线对电机驱动电路浮地，可以进行差分测量。但是，这种方法也将示波器机壳浮地，示波器使用者可能遭受危险的甚至致命的电击。

“浮动”示波器不仅只是不安全，而且测量结果经常由于噪声和其它的影响而不准确。如图 2-12a 所示，浮地示波器测量电机驱动单元上一个相的基极 - 发射极电压。如图 2-12a 的下部的踪迹是低端的基极 - 发射极电压上面的踪迹是高

端电压。注意在这两个踪迹上都有的明显的阻尼振荡。这个阻尼振荡由地与示波器机壳的大寄生电容所引起。

图 2-12b 所示同样的测量，但是这次作了适当的示波器接地，并且测量通过了探头隔离。不仅测量中阻尼振荡被消除了，而且示波器不再是浮地，测量更为安全。

探头隔离器不浮动示波器，而是仅仅浮起探头。这种对探头的隔离可由变压器或光学耦合装置来实现 如图 2-13 所示。示波器接地，而差分信号加于隔离器探头二端。差分信号通过隔离器后，产生一个以地为参考的与差分信号成比例的信号。所以探头隔离器兼容几乎任何仪器。

为了满足不同的需要，隔离器有各种各样的类型。这包括提供有独立参考端的两个或更多通道的多通道隔离器。以光纤为基础的隔离器可用于隔离器与仪器的距离很长的情况（例如 100 米或者以上）。与差分探头一样，隔离器选择的关键条件是带宽和共模抑制比（CMRR）。

另外，最高工作电压对隔离系统是最关键的指标。一般为 600V 均方根值（有效值）或 850 V（直流 + 交流峰值）。

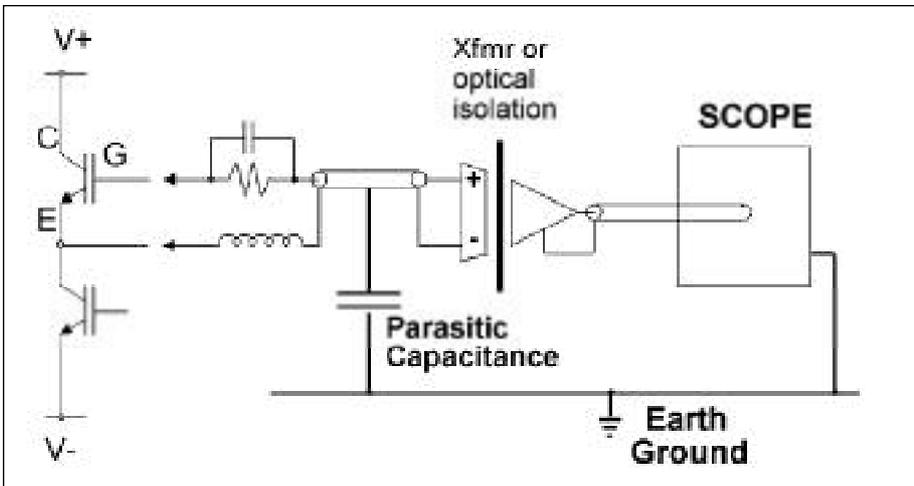


图 2-13. 使用隔离器进行浮动测量的例子。



图 2-14 典型的通用电压探头及其标准附件。

探头附件

大多数探头有标配的附件包。这些附件常包括地线夹钳, 探头补偿调整工具, 及一个或多个帮助将探头接入各种各样的测试点的探头尖附件。图 2-14 所示例子为一根典型的通用电压探头及其标准附件。

为专门的应用领域而设计的探头, 例如探测表面贴封器件的探头在标准附件包中包含附加的探头尖适配器。另外, 作为可选项, 探头可选择各种特殊用途的附件。图 2-15 举例说明了几种类型的为小尺寸探头而设计的探头尖适配器。

大多数探头附件, 特别是探头尖适配器, 一般都只能与特定的探头一起工作。在不同的探头型号或者不同的探头制造商之间变换搭配使用适配器会导致与测试点的不良连接或者导致探头及探头适配器的损坏。

选购探头时, 必须考虑将要探测的电路类型及能够使测试迅速简便的探头适配器和附件。在许多情况下, 价格便宜的通用探头不提供额外的适配器。示波器制造商将会提供更多种类的适合各种应用的探头。例如图 2-16 所示, 探头有各种的附件和可选项。当然, 不同的探头其附件和可选项也不同。

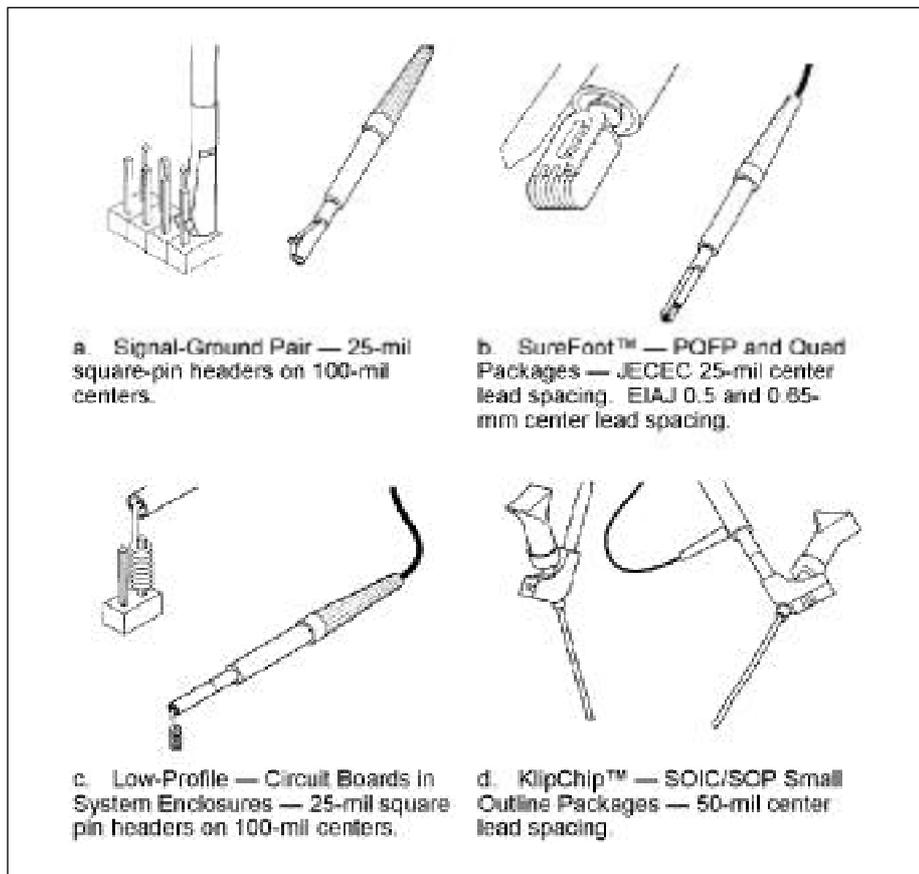


图 2-15. 小尺寸探头的探头尖适配器的一些例子。这些适配器使测量微型电路非常简单, 也通过提供高度集成化的测试点连接从而使得测量更准确。

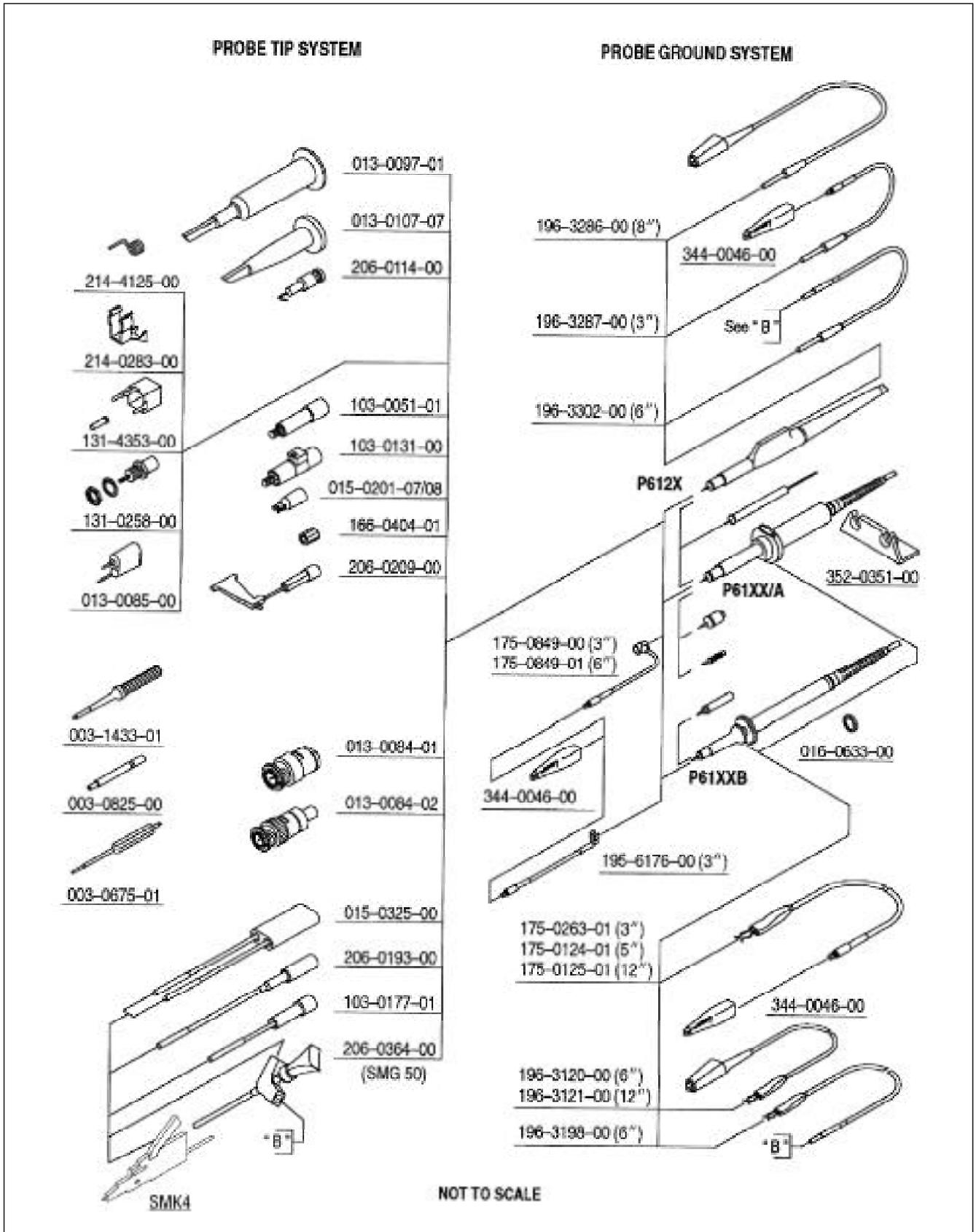


图 2-16. 5-mm 探头系统可用的附件的例子，其他的探头系列根据探头的特定应用将有其不同的附件。

第三章 探头如何影响测量

为了在示波器上显示信号，信号的一部分必须被转到示波器输入电路。如图 3-1 所示，电路在测试点 (TP) 之后，由信号源 (E_s) 代表，且相应的电路电阻由 Z_{S1} 及 Z_{S2} 代表，是在 E_s 上的正常的负载。当一台示波器被接入测试点时，探头阻抗， Z_p ，及示波器输入阻抗， Z_i ，成为信号源负载的一部分。依赖探头及示波器的相关的阻抗值，可引起各种负载影响。这一章将详细探讨负载作用，以及其它的进行探测所带来的影响。

源阻抗作用

源阻抗的值能显著地影响任何探头负载的网络作用。例如，对于低的源阻抗，一根典型的高阻抗 10X 探头的负载作用几乎没有影响。这是高阻抗与低阻抗产品并联，对总阻抗没有影响。然而，随着阻抗越来越高，情况将产生很大变化，如图 3-1。图 3-2 所示，源阻抗等于探头及示波器的总阻抗，对于相等的阻值 Z ，没有接入探头和示波器时，源负载是 $2Z$ (见图 3-2a)，在测试点引起一个 $0.5E_s$ 的信号振幅。在探头及示波器接入时，源

负载的和是 $1.5Z$ ，信号振幅在测试点缩减至原值的三分之二。

有两个方法可以减小测试的负载阻抗作用。一种方法是使用一根更高阻抗的探头，另一种方法是测量其他低输入阻抗的信号点。例如，阴极、发射极、源极通常具有比阳极、集电极、漏极更低的阻抗。

容性负载

随着信号频率及转换速率的提高，容性阻抗器件成为主要因素。因而，容性负载成为越来越需要考虑的一件事。

新术语

源阻抗 - 从负载看源时的阻抗。

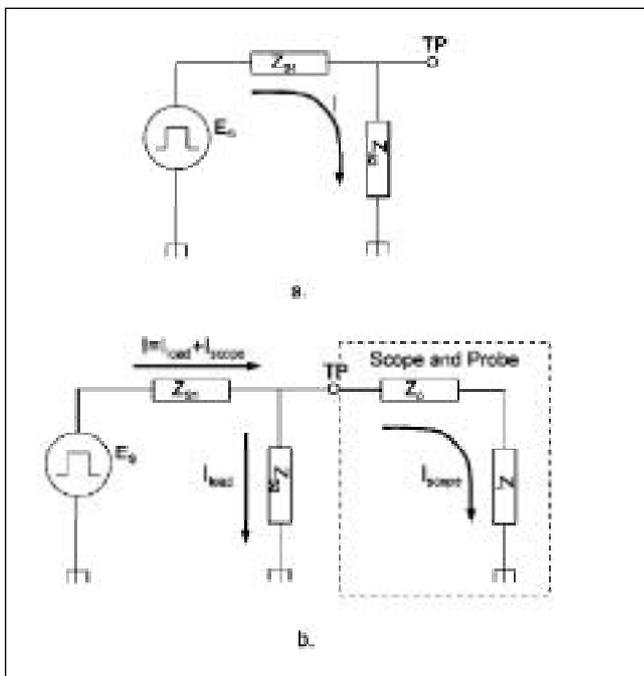


图 3-1. 在测试点被测试的信号，可以由一个信号源及阻抗来代替(a)。探测测试点时将探头及示波器阻抗加于源负载，导致被测量系统分流电流(b)。

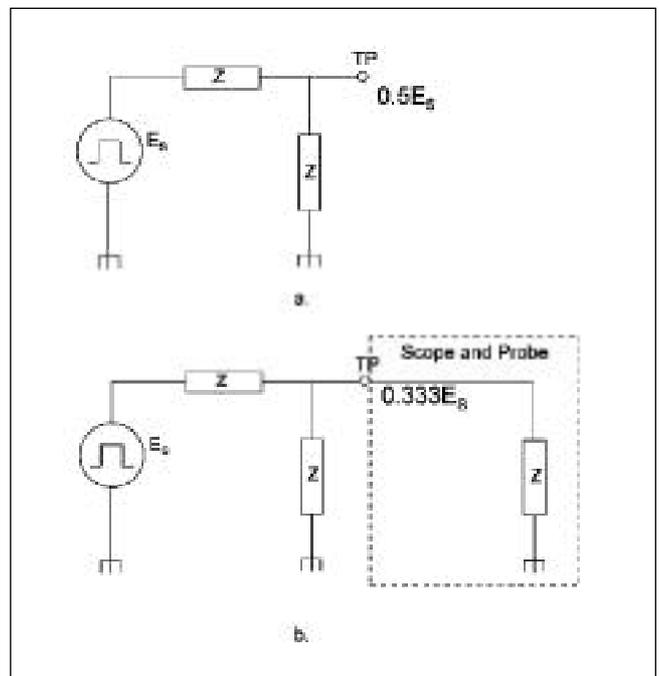


图 3-2. 源阻抗越大，测试引起的负载效应就越大。本例中，阻抗相等，探头在测试点导致信号振幅 30% 的衰减。

容性负载尤其将影响快速波形的上升和下降时间，及波形的高频成分的振幅。

对上升时间的影响。为了说明容性负载，让我们考虑一个具有很快的上升时间的脉冲发生器。如图 3-3 所示，理想脉冲发生器产生的脉冲上升时间为零 ($t_r = 0$)。

零上升时间被源负载的相关阻抗和电容的积分而改变。RC 网络通常产生的上升时间为 $2.2RC$ 的 10-90%。这可以从一个电容器通用的时间常数曲线导出。值 2.2 是 RC 时间常数，是通过 R 向 C 充电，从脉冲的 10% 振幅值到 90% 振幅值所用的时间。在图 3-3 中源阻抗的 50Ω 和 20 pF 导致 2.2 纳秒上升时间的一个脉冲。这个 $2.2RC$ 值，是脉冲可能具有的最快的上升时间。

当脉冲生成器的输出被施加到探头时，探头的输入电容与阻抗加于脉冲生成器。如图 3-4 所示，一根典型的 $10 \text{ M}\Omega$ 11 pF 探头。因为探头的 $10 \text{ M}\Omega$ 阻抗比脉冲发生器的 50Ω 电阻大许多，探头的电阻可以被忽略。然而，探头的电容与负载电容并联，使总负载电容数增加为 31 pF 。它增加了 $2.2RC$ 的值，导致测量的上升时间的增加，从以前测量的 2.2 纳秒增加为 3.4 纳秒。

你可以通过探头的电容与已知的或估计的源电容之间的比率，来估计探头尖电容对上升时间的影响。使用图 3-4 中的值，从而有如下的对上升时间的百分比变化的估计：

$$\begin{aligned} & \frac{C_{\text{probe tip}}}{C_1} \times 100\% \\ &= \frac{11 \text{ pF}}{20 \text{ pF}} \times 100\% \\ &= 55\% \end{aligned}$$

从以上可以看出，探头的选择，要特别关注探头电容，它能影响你的上升时间的测量。对于无源探头，衰减越大，总的尖电容越低。这在表 3-1 中有简要说明。这里举例列出了不同的无源探头的探头电容。当需要更小尖电容时，应当使用有源的场效应晶体管输入探头。

表 3-1. 探头尖电容

探头	衰减	探头尖电容
Tektronix P6101B	1X	54 pF
Tektronix P5100	100X	2.75 pF
Tektronix P6105A	10X	11.2 pF

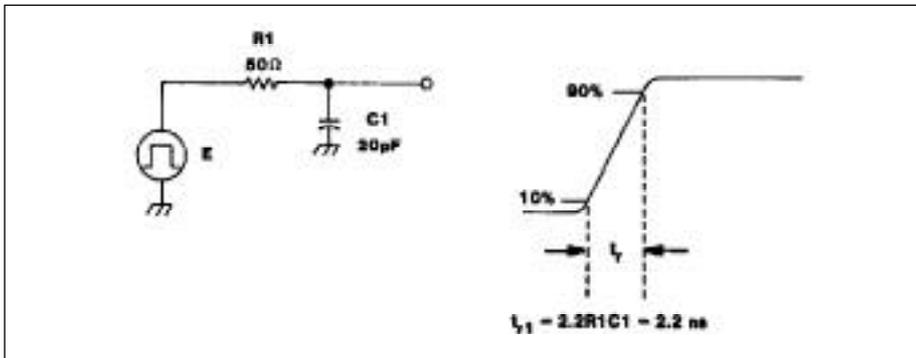


图 3-3. 脉冲产生器的上升时间由它的 RC 负载决定。

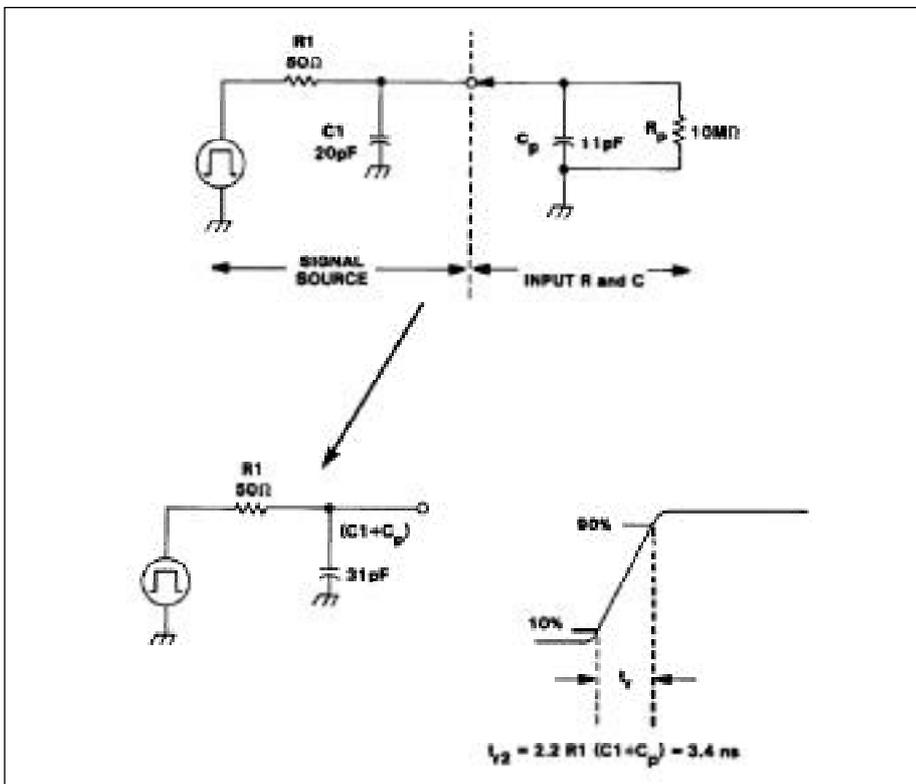


图 3-4. 由于接入探头增加了电容，因此增加了 RC 值也增加了所测量到的上升时间。

根据型号不同,有源探头可以得到1pF或更小的尖电容。

对振幅和相位的影响。除了影响上升时间,容性负载也影响波形中高频器件的振幅和相位。

为了考虑这一问题,记住所有的波形都是由正弦成份组成的。50兆赫方波具有超过100兆赫的谐波成份。因此,既考虑基频波的负载影响,也要考虑数倍于基频的负载影响。

负载由探头尖的总阻抗决定。它被设计为 Z_p , Z_p 由阻抗成分 R_p 及反作用成分 X_p 组成。反作用成份主要是容性。尽管可以使用感性元件偏移容性负载并置于探头中。但是 Z_p 随着频率的增加而减少。大多数探头说明手册有对于探头的 R_p 和 Z_p 相对于频率的曲线图。图3-5是Tektronix P6205有源探头的这一曲线的例子。

注意到1M 阻抗在100kHz附近大小恒定。这是由于仔细设计了相关阻抗、电容、感应元件而得来。

图3-6。探头曲线的另外的例子。

在这个例子中,所示为典型的10M 无源探头 R_p 和 X_p 随频率变化图。虚线(X_p)显示容性电抗随频率的变化。

注意到 X_p 在直流时开始减少,但是 R_p 并不开始显著地降低直到100kHz。另外,总的负载已由于仔细设计相关的R、C、L元件而抵消。如果你不能使用一个探头的阻抗曲线,你可以使用下列公式对负载作最坏的估计:

$$X_p = \frac{1}{2\pi fc}$$

其中

X_p = 容性电抗

f = 频率

C = 探头尖电容

例如,一个标准的10M 11pF电容的无源探头,在50MHz大约有容性电抗(X_p)290。源阻抗不同,负载对信号振幅(通过简单的分压)有很大的影响,甚至影响被测的电路。

对带宽的影响

带宽是包含探头和示波器带宽的整个测量系统的问题。示波器的带宽应该超过你想要测量的信号的频率,且探头的带宽应该等于或超过示波器的带宽。从测量系统来看,实际关心的是探头尖的带宽。通常,制造商将为示波器/探头组合详细说明探头尖的带宽。但并不是所有厂家都标出。因此,你应该意识到示波器及探头的带宽问题,不论它们自身或是它们的组合。

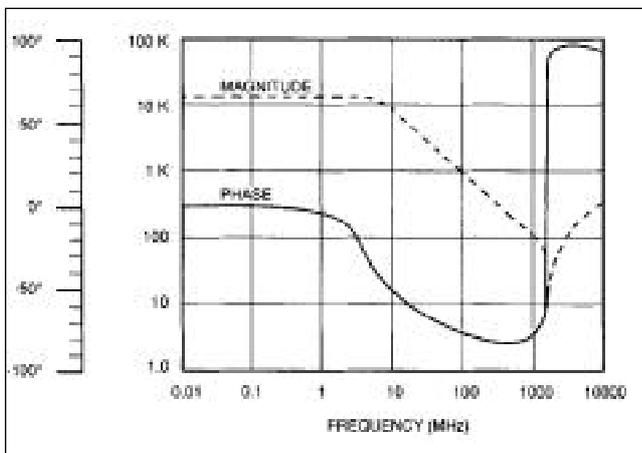


图3-5.为 Tektronix P6205 有源探头典型的频率 - 输入阻抗图。

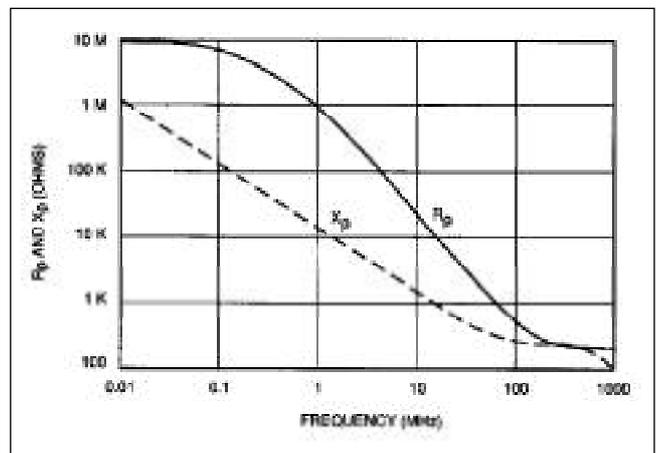


图3-6.为典型的10M 无源探头的频率 - X_p - R_p 图。

新术语

额定值降低 - 根据一个或多个操作变量而减小元件或系统的额定值；例如，振幅测量的精确度可以根据被测信号的频率而降低。

示波器带宽和上升时间。带宽定义为幅度与频率曲线上，测量系统比参考值低 3 dB 的一个点。如图 3-7 举例说明，图中显示了一个响应曲线，并指出了 3 dB 点。要着重注意一点，测量系统比额定带宽在振幅上低 3 dB。这就是说，在对与系统带宽同频率的信号进行幅度测量时，将会有 30% 的误差。通常你可以用示波器测量与其带宽相等的信号。然而，如果振幅的精确度极为重要，你应该提高示波器带宽。例如图 3-8 所示，考虑带宽滚降的放大图。

图的水平刻度为必要的获得高于 30% 精确度的额定降低因数。如果不存在这一因素 (1.0 的降低因数), 100 兆赫示波器

将在 100 MHz 有高达 30% 的振幅误差。如果你想要振幅测量误差在 3% 以内, 示波器必须工作于 30 MHz 的信号。任何超过 30 MHz 的测量, 将使振幅误差超过 3%。以上的例子指出了示波器选择的一般规则。对于在 3% 以内误差的振幅测量, 应当选择比你测量的最高波形频率大 3~5 倍的带宽的示波器。

当上升时间或下降时间是首要的测量项目时, 你可以变换示波器的带宽 (BW) 规格到下列公式说明的上升时间:

$$Tr = \frac{0.35}{BW}$$

或, 简化为:

$$Tr \text{ (nanoseconds)} = \frac{350}{BW \text{ (MHz)}}$$

至于带宽, 你应当这样选择示波器, 其上升时间比所要测量的系统的上升时间快 3~5 倍。(注意, 以上带宽与上升时间的转换中, 假设示波器的响应为高斯

(Gaussian) 滚降。大多数示波器被设计为有一个高斯滚降。

探头带宽。所有的探头, 象其他的电子电路一样, 也有带宽限制。并且, 象示波器一样, 探头也由它们的带宽而分类。具有 100 兆赫带宽的一个探头, 同样将在 100 兆赫有低于实际值 3 dB 的幅度响应。同样, 探头带宽也可以使用与示波器同样的公式, 以上升时间这一术语来表示。(Tr = 0.35/BW)。另外, 对于有源探头, 示波器和探头的上升时间可由以下公式相加, 从而获得近似的探头/示波器系统的上升时间:

$$Tr_{\text{system}}^2 = Tr_{\text{probe}}^2 + Tr_{\text{scope}}^2$$

对于无源探头, 关系更复杂, 并且不能使用上面的公式。通常, 探头带宽应该总是等于或超过它将要使用的示波器的带宽。

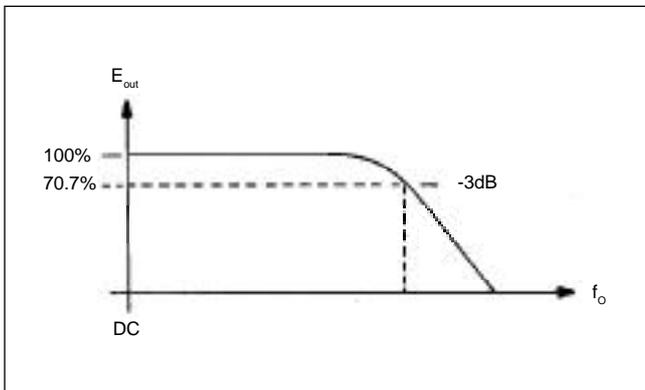


图 3-7. 带宽定义为在幅度频率响应曲线上, 振幅减小 3 dB 处的频率。

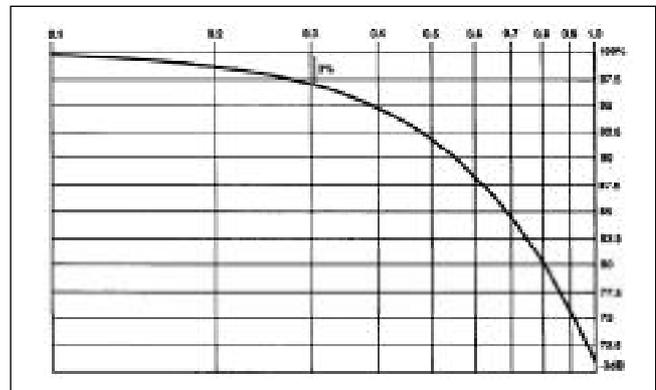


图 3-8. 带宽的降低曲线

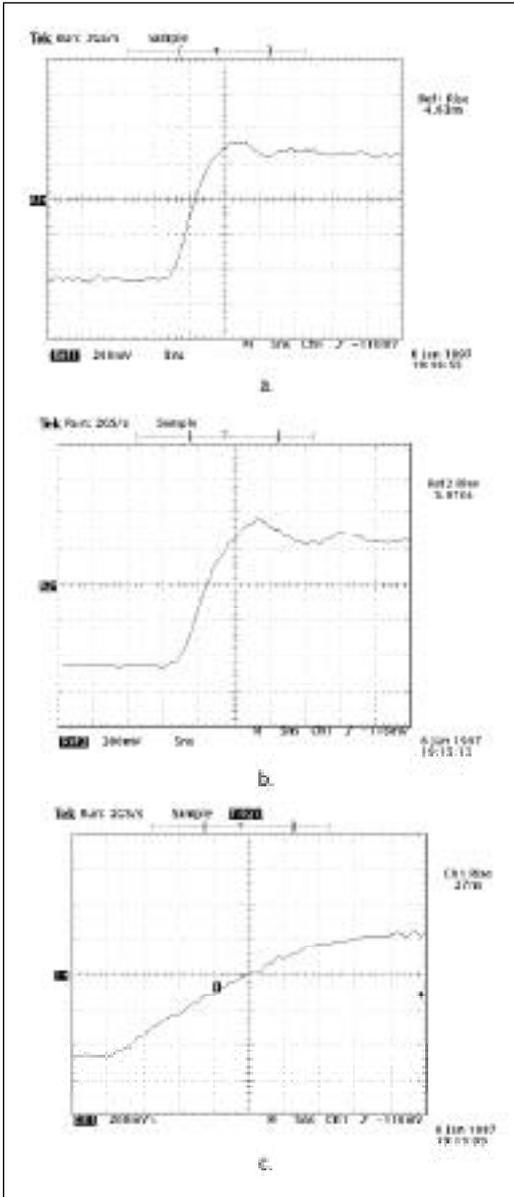


图 3-9. 使用 3 根不同的探头对上升时间的影响 (a) 400 兆赫, 10X 探头 (b) 100 兆赫, 10X 探头 (c) 10 兆赫, 1X 探头。所有的测量使用同样的 400 兆赫示波器。

使用较小带宽的探头将限制示波器发挥它的全部测量能力。进一步如图 3-9 所示, 它显示测量同一脉冲跃变时, 使用了 3 种不同带宽探头进行测量。

第一个测量, 如图 3-9a 所示, 使用了 400 兆赫的匹配的示波器和探头的组合。使用的探头是一根 10 阻抗 14.1 pF 电容的 10X 探头。注意, 测得的脉冲上升时间为 4.63 纳秒。这对于上升时间为 875 ps 以内, 400 兆赫示波器 / 探头组合时是恰当的。现在看一看, 当使用一根 10X100 MHz 探头及同样的示波器来测量同一脉冲时, 会发生什么? 如图 3-9b 所示, 此时测量的上升时间为 5.97 纳秒。相比以前测量的 4.63 纳秒大了 30%!

正如所预期的那样, 使用低带宽的探头所观测到的上升时间增加了。一个极端的例子如图 3-9c 所示, 在此使用一个 1X 10 MHz 探头测量同样的脉冲。在这里上升时间从最初的 4.63 纳秒变为 27 纳秒。图 3-9 的关键点在于:

不能随便使用探头!

要使示波器获得最大限度的性能 - 你所期望的性能 - 就要确定使用制造商所推荐使用的探头。

探头尖的带宽。通常, 探头带宽问题和探头 / 示波器系统带宽问题应当根据制造商的详细说明及推荐来解决。例如, Tektronix 详细说明了一个探头在超出其限定带宽时的性能表现。这些限定包括总体畸变、上升时间、带宽。另外, 当使用一台兼容的示波器时, 一根 Tektronix 探头使示波器的带宽扩展到探头尖。

例如, 当使用匹配的 100 MHz 示波器时, Tektronix 100 MHz 探头在探头尖提供 100 MHz 性能(-3 dB)。

业界公认的检验探头尖带宽的试验, 由图 3-10 的电路图解说明。测试信号源为阻抗 50 并进行端接, 等价为 25 的源阻抗。另外, 应该使用尖至同轴电缆接插件 (probe-tip-to-BNC) 适配器连接到源。保证最短的可能的接地路径。

使用以上描述的测试设置, 一个 100 兆赫示波器 / 探头组合应该导致观察到的上升时间为小于等于 3.5 纳秒。这个 3.5 纳秒上升时间根据以前讨论的带宽 / 上升时间关系对应于 100 兆赫带宽 ($T_r = 0.35/BW$)。

大多数制造商的通用示波器都包含他们承诺的标准附件探头及他们广告中所说明的在探头尖处的示波器带宽。

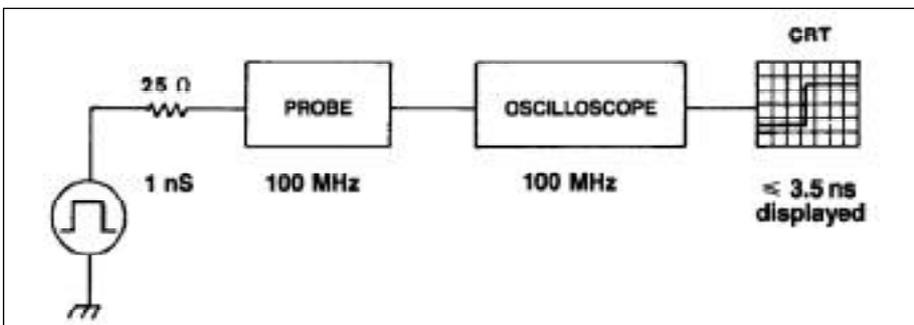


图 3-10. 测试到探头尖带宽的等效电路。对于一个 100 兆赫系统, 显示的上升时间应该是 3.5 纳秒或更快。

记住探头尖的带宽由图3-10的测试方法所决定，是非常重要的。既然真实世界的信号很少来自25 源，事实上，尤其当测量高阻抗电路时，应当预期响应及带宽比理想要差。

接地线效应。当以大地为参考做测量时，需要连接所测试的电路或设备的二个点。一个点是经由探头探测到电压或被测量的信号。另外的必要连接是通过示波器回到测试电路的接地回路。这一接地回路完成测量的电流通路。

在被测电路及示波器接在同一交流电源上时，电源公共点提供接地回路。这个信号回路经过电源地，通常都会经过较长的通路。因而不能认为它为干净，低感应的接地回路。

作为一条规则，当使任何一种示波器测量时，你应该使用最短的可能接地路径。最理想的接地系统，是在ECB（蚀刻电路板）上的探头尖适配器电路。如图3-11所示。ECB适配器允许你直接将探头尖插入电路测试点，并且适配器的外部圆柱套管成为探头尖直接、最短的接地环路。

对于严格的定时及振幅测量，推荐电路板上应为建立测试点而设计有ECB/探头尖适配器。不仅清楚地指明测试点位置，也保证与待测点最佳的连接从而导致最精确的示波器测量。

但是ECB/探头尖适配器对于许多一般的测试情形并不实用。一般都是使用一条短的接地线夹于被测试电路的地点。这对于快速地在被测电路上移动探头测试点更加方便。而且大多数探头制造商供应的探头所带的短接地线，对于大多数测量情形已经提供了足够好的地回路。

然而，大家应该清醒地了解不当接地会产生问题。设想一下，如图3-12所示，有一电感(L)接于地线。这一地线随着导线长度的增加，其电感也增加。

另外，注意接地线的L和 C_{in} 形成一个串联震荡电路，其中仅有 R_{in} 为衰减电阻。当这一串联震荡撞上脉冲时，将产生阻尼振荡。而且附加的地线L将限制电路给C充电，这样，将限制脉冲的上升时间。

不用计算就可以知道当使用6英寸接地线的11 pF无源探头测量快速脉冲时，将导致140 MHz的阻尼振荡。使用一个100兆赫的示波器时，这个阻尼振荡正好在示波器的带宽以上，根本不能被看到。但是，使用一个更快的示波器，比如说200兆赫，接地线感应了阻尼振荡，并在示波器的带宽以内，它将在脉冲显示的波形上明显地被看到。

如果你看见在脉冲上显示有阻尼振荡，就应试着使接地线的长度变短。

较短的地线具有更小的电感和更高频率的阻尼振荡。如果你看到脉冲显示上所看到的阻尼振荡的频率改变了，你应该知道是相关的接地变化了。

进一步使地线变短，可以进一步使阻尼振荡频率移动至示波器的带宽以外，从而，在测量中使它的影响减到最小。如果当你改变接地长度时，阻尼振荡不变化，那么阻尼振荡可能是由被测电路产生的。

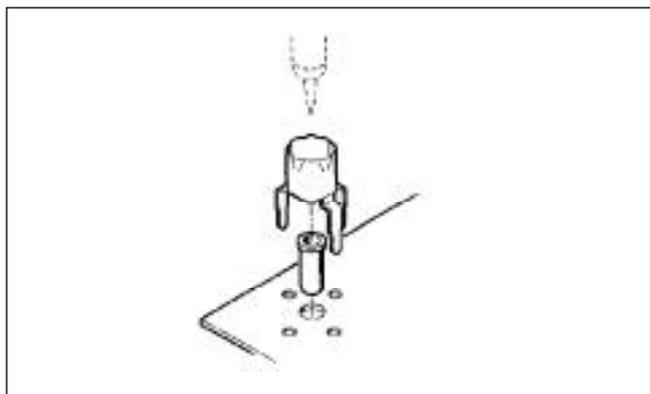


图 3-11. 一个 ECB 探头尖适配器。

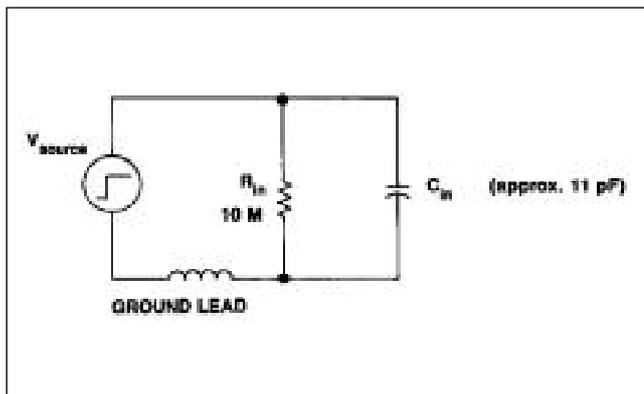


图 3-12. 一根典型的无源探头连接到信号源的等效电路。

图 3-13 进一步说明地线感应产生阻尼振荡。在图 3-13a 中，使用匹配的示波器/探头组合来获得快速的转换。地线使用了探头标准配置的 6.5 英寸接地夹钳导线，并且它被接入较近的一个公共测试点。

图 3-13b，获得同样的脉冲跃迁。然而，这次，探头的接地线为标准的 28 英寸夹钳导线。

有时候地线可能被延长，例如，在进行大系统测量时，为避免每次移动接地夹钳到不同点，可能使用另外的加长的引线。延长的地回路能引起严重的阻尼振荡，如图 3-13b 所示。

图 3-13c 所示，地回路变长的另外一个例子。在这个例子中，探头的地线根本没有连结。取代它的是一个分离的 28 英尺夹钳导线，连接电路的公共点和示波器机壳。这样，建立了一个差分的、显然更长的接地回路，导致更低频率的阻尼振荡。如图 3-13c 所示。

从图 3-13 的例子，可以看出，实际接地队测量质量有极大的影响。具体地说，探头接地线应当是越短越好。

对测量有什么影响

从前面的例子和讨论，我们看到信号源阻抗，探头，及示波器形成一个相互作用的系统。为了获得最佳的测量结果，你需要做到减小示波器/探头对信号源的影响。下列通用的规则将会对你有所帮助：

- 要根据示波器制造商的推荐匹配你的示波器和探头。
- 确定你的示波器/探头具有足够的带宽或上升时间，从而有能力对所测量的信号进行测试。典型地，你应该选择这样一个示波器/探头组合：其上升时间比你所要测量的最快的上升时间快 3~5 倍。
- 要尽量使探头接地线尽可能的短和直接。额外的地回路会导致脉冲上的阻尼振荡。
- 在测量性能及机械连接上选择那些最匹配你的应用需要的探头。

最后，应知道在被测电路上探头可能有负载作用。通常，负载可以通过选择探头而被控制或使之减到最小。

以下总结了一些需要注意的探头负载补偿：

无源探头。1X 无源探头，典型地，比 10X 无源探头有更低的电阻值和更高的电容值。其结果是，1X 探头更容易引起负载作用，并且只要可能，一般测量使用 10X 探头。

电压分压器(Z_o)探头。这些探头有很低的尖电容，但是在损坏的情况下具有相对高的阻抗负载。他们为需要匹配阻抗在 50 的环境中预定使用。然而，因为他们具有很高的带宽/上升时间能力，分压器探头经常用于进行高速上升时间测量环境中。对于振幅测量，探头的低输入 R 作用应该被考虑。

偏置探头。偏置补偿探头是一种特殊类型的电压分压器探头，具有在探头尖提供可变的偏移电压的能力。这种探头用于测量高速 ECL 逻辑电路，阻抗负载能改变电路的工作点。

有源探头。有源探头能在各方面提供最好的低阻抗负载及低的尖电容。需要折衷的是有源探头一般具有低的动态范围。然而，如果你的测量适合有源探头的动态范围，在大多数情况下，有源探头就是最好的选择。

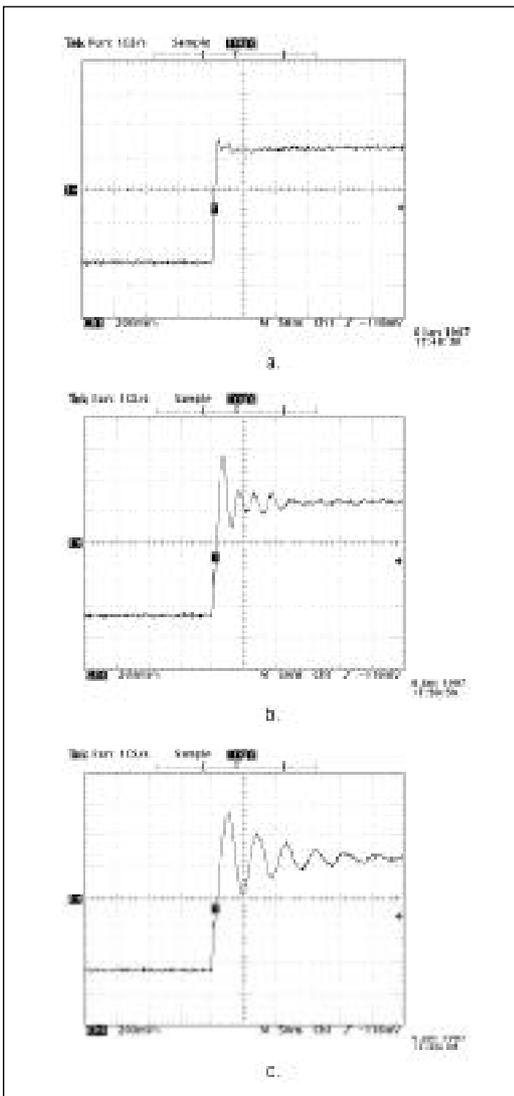


图 3-13. 地线长度和定位将极大地影响测量。

第四章 理解探头规格说明书

在以前的各章节中已经讨论了大多数关键的探头的技术术语，不论从探头类型的术语或是探头影响测量的术语。这一章，为更容易的作参考，收集这些探头的特有的参数和术语，放在一起。以下列表的指标说明以字母顺序排列，但并不是所有的技术指标适用于给定的探头。例如，插入阻抗是仅仅适用于电流探头的一个规格说明。另外的说明，例如带宽，是通用的，它适用于所有的探头。

畸变(通用)

畸变是对期望或理想的输入信号的响应信号的任何振幅的偏差。

在实际中，畸变通常是在快速波形转换后及有时涉及“阻尼振荡”时出现。

畸变对于最终的脉冲响应电压以 \pm 背离百分比来测定或说明。(见图 4-1)。规格说明可能也为畸变设定一个时间窗口。

例如：畸变应该在第一个 30 纳秒内不超过峰峰值的 $\pm 3\%$ 或 5%

当在脉冲测量中看见过度的畸变时，在考虑所有的可能原因之后，才能假定探头有故障。例如，畸变实际上是信号源的一部分？或是由探头接地技术导致的结果？观测到畸变的非常普遍的原因是，忽略了检查及适当调整电压探头补偿。一个严重的过补偿探头将导致明显的峰值瞬时脉冲超界。(见图 4-2)。

安培秒乘积(电流探头)

对于电流探头，安培秒乘积指定了电流变压器磁芯的能量处理能力。

如果平均电流和脉冲宽度的乘积超过额定的安培秒值，磁芯将处于饱和状态。磁芯饱和状态导致剪切或抑制了波形发生在磁芯饱和状态的部分。

如果安培秒乘积没被超过，电压探头输出的信号将是线性的并且测量精确。

衰减因数(通用)

所有的探头有衰减因数，并且一些探头具有可选的衰减因数。典型的衰减因数是 1X, 10X, 及 100X。衰减因数是探头衰减信号振幅的量。

一根 1X 探头不减小信号，或者说不衰减信号，一根 10X 探头减小信号为它的探头尖振幅的 1/10。衰减因子可以扩展示波器的测量范围。例如，一根 100X 探头可以测量比其大 100 倍振幅的信号。1X, 10X, 100X 这些称号来自过去示波器还不能自动地识别探头衰减，因此需要调整比例因子的年代。例如 10X 标记，提醒你所有的振幅测量需要被 10 乘。现在示波器的读出系统能自动地探测探头的衰减因子并且因此调整比例因数读出器。

电压探头衰减因子一般使用有阻抗的电压分压器技术而获得。因此，具有高衰减因子的探头一般具有高输入阻抗。

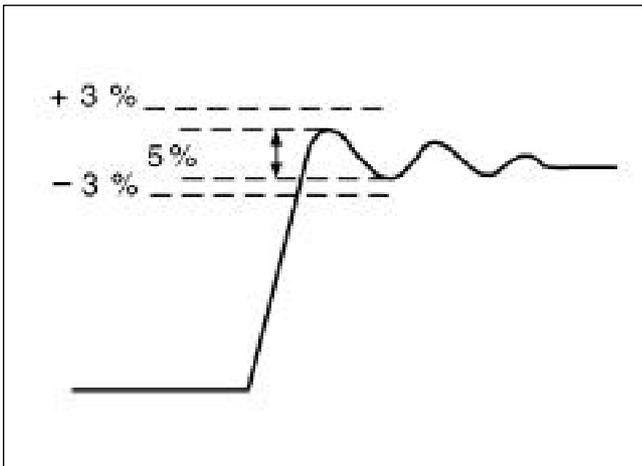


图 4-1. 测量畸变的一个例子。相对比为脉冲高度的百分数。

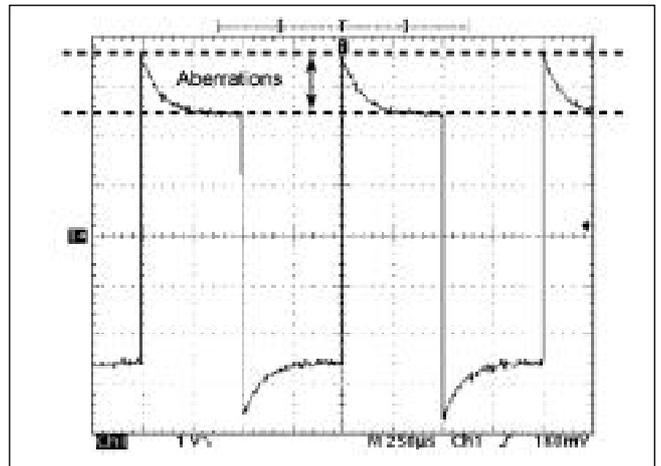


图 4-2. 畸变超过探头补偿的一个例子。

另外对于高的衰减因子,由于分压器效应,探头的电容在探头尖看也有效减小。

精度(通用)

对于电压探头,其精确度通常参考于探头对直流信号的衰减。计算和测量探头精确度通常应该包括示波器的输入电阻。这样,探头精确度的规格说明,仅在探头用于具有假定的输入电阻的示波器的情况下,是正确和适用的。一个对精确度说明的例子是:

10X,小于3%(对于示波器输入 $1\Omega \pm 2\%$)。

对于电流探头,精度指标是指电流-电压转换的精度。这取决于电流变压器绕组比和终接电阻值及其精确度。带专用放大器的电流探头具有直接以安培/每格做过校准的输出,衰减精确度以电流/每格的百分比给出。

带宽(通用)

所有的探头都有带宽。10兆探头具有10兆赫带宽,100兆探头具有100兆赫带宽。探头的带宽是指探头的响应引起输出振幅降至70.7%的频率(-3dB),如图4-3显示。

也应该注意到,一些探头也有低频带宽

限制。例如,交流探头。因为他们设计上的原因,电流探头不能通过直流或低频率信号。因此,他们的带宽必须用两个值详细说明,一个是低端截止频率,另一个是高端截止频率。对于示波器测量,实际关心的是示波器和探头组合的总的带宽。这一系统性能最终决定测量的性能。

探头接入示波器将导致系统带宽性能的降低。例如,使用一台100兆赫示波器及100兆赫探头,将导致测量系统的性能低于100兆赫。为了避免总的系统带宽性能的降低,当使用指定的探头型号时,泰克的示波器规定测量系统带宽在无源电压探头的尖端提供。

在选择示波器和示波器探头时,认识到带宽对于测量精确度有若干意义是重要的。对于振幅测量,当正弦波频率接近带宽限时,正弦波的振幅逐渐地衰减。在带宽极限,正弦波的振幅将被测量为它的实际振幅的70.7%。

这样,为了提高振幅测量的精确度,选择比你计划测量的最高的频率波形带宽高若干倍带宽的示波器和探头,是必要的。同样,为保持正确的测量波形的上升及降落时间。波形跃迁,例如脉冲和

方波的边缘,由高频率成份组成。这些由高频限制的高频成分的衰减,导致跃迁看起来比实际慢。

对于精确的上升--与下降时间的测量,使用一个具有足够带宽的测量系统,保持高频波形的上升及下降时间,是必要的。这常在上升时间这一术语中被说明。它应该典型地比你正在测量的上升时间快4~5倍。

电容(通用)

通常,探头电容规格是指在探头尖的电容。这是探头加上被测电路或设备的电容。探头尖电容非常重要,因为它影响脉冲的测量。一个较低的探头尖电容可以使上升时间畸变减到最小。另外,如果一个脉冲的持续时间,比探头的RC时间常数低5倍,脉冲的振幅将受到影响。

探头也加一个电容到示波器的输入端,并且这个探头电容应该匹配示波器。对于10X和100X探头,这个电容涉及到补偿范围,它与探头尖电容不同。对于探头匹配,示波器的输入电容应该是在探头的补偿范围以内。

共模抑制比(CMRR、差分探头)

共模抑制比(CMRR)是差分测量中,差分探头抑制共模信号的能力。

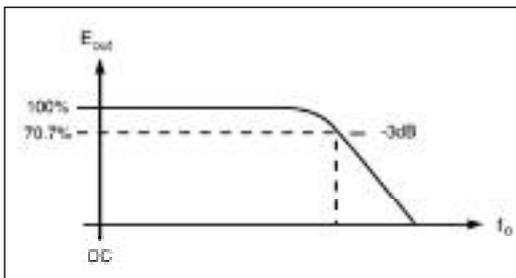


图4-3. 带宽是响应曲线上正弦波的振幅衰减70.7%处的频率(-3dB)。

共模抑制比是差分探头和放大器具有优点的一个关键参数，并且它被定义为：共模抑制比

$$CMRR = |A_d / A_c|$$

其中 A_d = 差分信号电压增益。

A_c = 共模信号电压增益。

理想状态时， A_d 应该大， A_c 应该为零，导致一无限大的共模抑制比(CMRR)。在实际中，10,000:1 的共模抑制比(CMRR)已被认为是相当好了。这意味着，共模输入 5 伏特信号时，在抑制后，输出为 0.5 毫伏。这样的抑制对于在噪音中测量差分信号是很重要的。

共模抑制比(CMRR)随着频率的增加而减小，频率在共模抑制比(CMRR)的规格说明中，同共模抑制比(CMRR)本身一样重要。高共模抑制比(CMRR)的高频差分探头比同样共模抑制比(CMRR)的低频差分探头性能好。

随频率变化的最大测量电流降低(电流探头)

电流探头规格说明应包含振幅对频率衰减的曲线，随频率的增加，磁芯饱和状态加剧。这种随着频率的增加磁芯饱和状态加剧的作用是：具有平均电流为零安培的波形，当波形频率或振幅增加时，振幅峰值将被剪切。

衰变时间常数(电流探头)

衰变时间常数是指电流探头的脉冲维持能力。这一时间常数是次级的感应系数(探头线圈)除以端接电阻。衰变时间常数有时被称为探头 L/R 比。在更大的 L/R 比时，更长的电流脉冲，代表振幅没有有效的衰减。在更小的 L/R 比时，在脉冲结束之前，当衰变为零，可以看到长持续时间的脉冲。

直流成分(电流探头)

直流减少电流探头线圈磁芯的磁导率。减少的磁导率导致线圈感应和 L/R 时间常数的减小。结果是减小低频耦合性能，遗失低频电流感应性能。一些交流电流探头提供电流补偿选项，以使直流的作用为零。

插入阻抗(电流探头)

插入阻抗是从电流探头的线圈(次级的)转变入电流传送导线(初级的)而被测量的阻抗。典型地，一根电流探头的反阻抗值在毫欧的范围，对于 25 或更高电阻的电路的影响是微不足道的。

输入电容(通用)

在探头尖处测量的探头电容。

输入电阻(通用)

探头的输入电阻是探头在零赫兹(直流)时加在测试点上的阻抗。

最大输入电流额定值(电流探头)

最大输入电流额定值是探头认可的，确定能够测量的总电流(交流峰值+直流)。

最大脉冲电流额定峰值

不能超过这一额定值。他考虑了磁芯饱和度和次级电压的影响。最大脉冲电流额定峰值通常以安培秒乘积说明。

最大额定电压(通用)

应避免接近最大额定电压。最大额定电压由探头本身和测量点的探头组合的额定击穿电压决定。

传输延迟(通用)

每根探头随着信号频率的变化，会产生一些小的时间延迟及相位移位。这是探头组合的作用，时间为信号从探头尖经过探头组合到达示波器连接头的时间。通常，大多数信号变化由探头电缆线引起。例如，42 英寸的特别电缆线有 5 纳秒信号延迟。对于 1 兆赫信号，5 纳秒延迟导致 2 度信号相位变化。一根更长的电缆线将导致相应地更长的信号延迟。

传播延迟通常仅仅涉及两个或者更多的波形的比较测量。例如，当测量 2 个波形之间的时间差别时，波形应该使用匹配的探头以便使每个信号通过探头时经历同样的传播延迟。

另外的例子是在使用电压探头和电流探头的组合进行电源测量时。既然电压和电流探头具有明显不同的结构，他们将有不同的传播延迟。这些延迟是否将对电源测量有影响，取决于被测波形的频率。

对于赫兹和kHz信号,延迟通常是不足道的。然而,对于兆赫信号延迟差别可以有显著的影响。

上升时间(通用)

探头对于阶跃函数的10~90%响应指出了探头最快的从探头尖到示波器输入端的过渡时间。为了精确上升和下降时间的测量,测量系统(示波器和探头的组合)的上升时间应该比被测量的最快的转换时间安快3~5倍。

余切噪声(有源探头)

余切噪声是有源探头产生探头噪声的一个方法的一个说明。切线噪声大约是两倍的RMS(均方值)噪声。

温度范围(通用)

电流探头有最大的操作温度指标,是由于引入绕组的磁通产生的热效应。温度增加,总损耗增加。因此,电流探头有最大振幅对频率的衰减曲线。

衰减器电压探头(例如10X,100X,等等)

可能由于温度的改变而产生精确度的变化。

第五章 探头选择指导

前面的章节就示波器探头的各个方面进行了讨论，我们谈到探头的作用、探头的种类、探头对测量的影响等。我们着重强调了将探头接入测试点时，将会发生什么。

在这一章，我们将着重讨论待测信号的属性以及如何根据这些属性选择合适的探头。目的当然是选择合适的探头，保证高度保真地将待测信号传递到示波器。不仅如此，在探头选择过程中，也要考虑示波器的要求。这一章研究各种各样的选择要求，首先理解信号源的要求。

理解信号源

选择探头应考虑四个基本的信号源问题。他们是信号类型，信号频率成分，源阻抗，及测试点的物理属性。这些问题的将在下面讨论。

信号类型。探头选择的第一步是确定被测量的信号类型。为此，信号能被分类为：

- 电压信号
- 电流信号
- 逻辑信号
- 其他信号

电压信号是电子测量中最常见的信号类型。电压敏感探头是最普遍的示波器探头类型。另外，应该注意，示波器要求输入一个电压信号，其他类型的示波器探头实质上是变换其它现象为相应的电压信号。一个常见的的例子是电流探头，它变换电流信号为电压信号并在示波器显示。逻辑信号实际上是一种特别种类的电压信号。

逻辑信号能用标准的电压探头来观察，也常用于观察一个专门的逻辑事件。可以通过设置逻辑探头在某一特殊的逻辑组合发生时，提供一个触发信号给示波器。这就允许在示波器上观测特殊的逻辑事件。除了电压，电流及逻辑信号，可以有许多感兴趣的其他类型的信号。可以包括光学的、机械的、热的、声学的、及其他的信号。能用各种各样的变换器来变换此信号为示波器可以显示的相应的电压。

此时，变换器成为信号源，其目的是选择一个探头向示波器传送变换的信号。

图 5-1 以待测信号类型为基础的各种探头种类。注意到在每个类别中，有各种探头的子类，他们进一步由信号的其他属性决定，就象对示波器的需求一样。

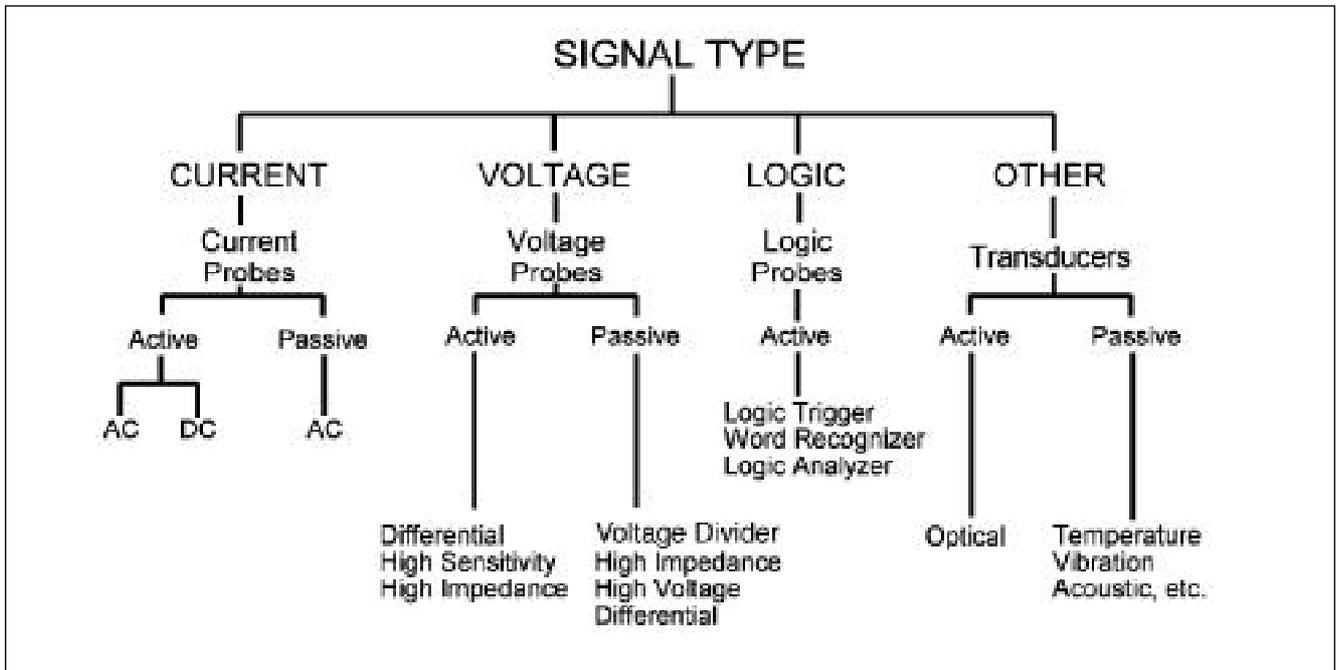


图 5-1 以待测信号类型为基础的各种探头种类。

信号频率成分。所有的信号，不论什么类型，都有频率成分。直流信号有0赫兹的频率，且纯正弦信号具有以周期的倒数为频率的单一频率。另外其他的信号都具有依据于信号波形的多重频率成分。例如，一个对称方波具有基频(f_0)，其大小是方波周期的倒数，另外谐波频率是基频的奇数倍($3f_0, 5f_0, 7f_0, \dots$)。基频是波形的基础，谐波频率与基频结合形成波形详细的结构，如波形的跃迁和转角。

对于探头向示波器传送信号，为保持足够的信号保真度，探头必须有足够的带宽和最小的干扰以传递信号的主要频率成份。在方波和其他的周期信号的例子

中，这通常意味着探头带宽需要比信号的基频率高3~5倍。

这就是允许基频和前几个谐波频率能够通过，而不衰减他们的振幅。

更高的谐波频率将也能通过，因为更高频率的谐波超过探头的-3dB带宽，其衰减越来越大。然而，既然更高的谐波频率仍然至少在某种程度上出现，他们仍然能对波形的结构有所贡献。

带宽主要影响是减小了信号的振幅。越靠近信号的基频就越靠近探头的-3dB带宽，在探头输出所看到的总的信号振幅就越低。

在-3dB点，振幅降低了30%。另外，那

些超越探头带宽的信号谐波频率及其他的频率成份，由于带宽滚降，将经受更程度的衰减。结果就是，更大的在高频成分上的衰减，这可以由变圆的锐利拐角和变慢的快速波形跃迁而看出来。(见图5-2)。也应该注意，探头尖电容也限制信号转换的上升时间。这也与源阻抗和信号源负载有关系，是要讨论的下一个话题。

信号源阻抗。在第2章详细讨论了信号源阻抗及它与探头阻抗的相互作用。在第2章中对源阻抗的讨论可以提炼出下列关键点：

- 1 探头阻抗与信号源阻抗结合为一个新的信号负载，其对信号振幅和信号上升时间有影响。
- 2 当探头阻抗比信号源阻抗充分大时，探头对信号振幅的影响是可以忽略的。
- 3 探头尖电容，也归及输入电容，其有拉长信号的上升时间的作用。这是由于要有时间给探头输入电容进行从10%到90%电平的充电。

$$tr = 2.2 \times R_{source} \times C_{probe}$$

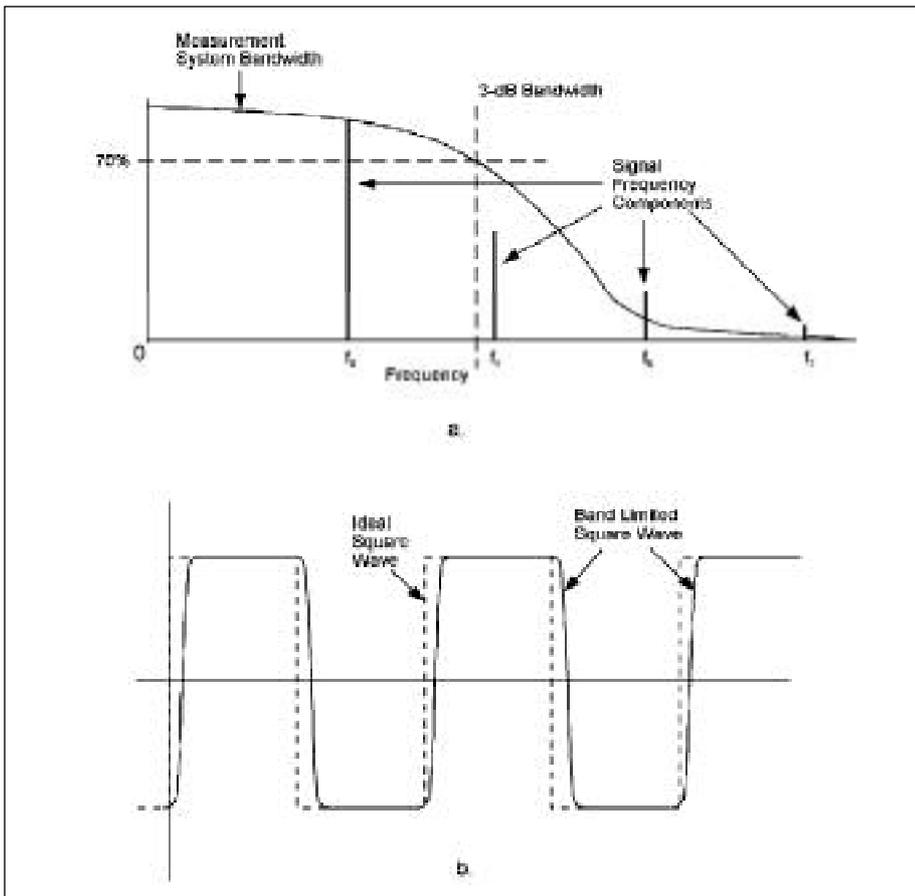


图5-2 当一个信号的主要频率成份超过测量系统的带宽(a)时，他们将经历更程度的衰减。其结果是通过圆角的钝化的波形和延长的转换时间(b)而使波形细节丢失。

从以上各点,我们可以看出,高阻抗、低电容探头是使探头信号源负载减到最小的最好的选择。另外,探头负载作用也可以通过尽可能选择低阻抗信号测试点的方法来进行减小。

物理连接的考虑。信号测试点的位置和几何尺寸,也是探头选择时要重点考虑的问题。

仅仅是将探头接触测试点,并观察示波器的信号波形就已足够,还是有必要将探头接入测试点,并在做各种各样的电路调整时监视信号?前一种状况,一个针状的探头尖是适当的,后一种状况要求使用一些种可收回的钩尖。

测试点的尺寸也影响探头的选择。标准的测量探头和附件能够很好的连接测试针、电阻器线、及后面板。然而,对于探测表面贴装电路,推荐使用具有专为表面贴装电路设计附件的更小的探头。

目标是选择探头尺寸、几何结构、及最适合你的应用的附件。他们允许探头与测试点进行快的、简便的、且稳固的连接,从而进行可靠的测量。

示波器问题

示波器问题同信号源问题一样对于探头选择具有很大关系。如果探头不匹配示波器,信号保真度将在探头的示波器端被削弱。

带宽和上升时间。认识到探头和示波器一起成为测量系统,是非常重要的。这样,使用的示波器应该具有等于或超过所使用探头的,并且足够检验被测信号的带宽和上升时间。总的来说,探头和示波器之间的带宽和上升时间的相互作用是很复杂的。因为这一复杂性,大多数示波器制造商会给出特定示波器以及为之专门设计的特定探头组合中,探头尖点的带宽和上升时间。

为了确保对于待测试的信号有足够的示波器系统带宽和上升时间,最好遵从示波器制造商对探头的推荐。

输入阻抗和电容。所有的示波器都有输入阻抗和输入电容。为保证对于信号的最好传送,示波器的输入R和C必须匹配如下的探头R及C:

$$R_{scope} C_{scope} = R_{probe} C_{probe} \\ = \text{Optimum Signal Transfer}$$

更具体地说,50 的示波器输入要求50 的示波器探头,1M 的示波器输入要求1M 的探头。当使用适当的50 适配器时,1M 示波器也能使用50 探头。探头与示波器电容也必须匹配。通过选择特定示波器型号的专用示波器探头而实现。另外,许多探头有补偿调节,允许通过较小的电容变化补偿,从而精确的进行匹配。

无论何时探头被接入示波器,应该做的第一件事情就是调整探头的补偿(第1章谈到补偿)。必须将探头与示波器进行合适的匹配,包括恰当的探头选择和适当

的补偿调节,否则都将导致明显的测量误差。

灵敏度。示波器的垂直灵敏度范围决定了可以测量的信号幅度的范围。例如,有垂直10格显示范围的一台示波器,且灵敏度范围从1mV/格到10V/格,有一个从大约0.1mV到100V的实际的垂直的动态范围。

如果你打算测量的信号的振幅从0.05V到150V,这一示波器的基本的动态范围,在高端和低端都不够。然而,这个问题能通过对将要处理的各种信号作适当的探头选择而补救。对于高振幅信号,示波器的动态范围能通过使用衰减探头而向上扩展。例如,一个10x探头将有效地10倍示波器的灵敏度范围。对于上例中的示波器,将是10mV/格到100V/格。这样,不仅为150伏特信号提供足够的范围,它也能使示波器显示高达1000V的范围。当然在把任何探头连结到一个信号之前,要保证信号不超过探头的最大的电压接受能力。

警告

要观察探头的最大的额定电压承受能力。将探头连接至超过探头容量的电压可能会导致仪器的损坏及个人人身伤害。

对于低振幅信号,通过使用探头放大器系统来扩展示波器的低电压灵敏度。这是一种典型的差分放大器的例子,它可以提供10 μ V/格的灵敏度。

这样的探头放大器系统是高度专业化的探头，并且被设计为匹配专用的示波器类型。所以在做示波器选择时，也要非常注意检查制造厂商所推荐的可用的差分探头的附件清单，从而满足你对小信号测量应用的需求。

警告

差分探头系统常包含可能被过电压损坏的灵敏度元件，也包括静电放电。为避免探头系统的损坏，应当遵循制造厂商的建议，并遵守其预防措施。

读出能力。最新式的示波器在显示屏上都提供垂直及水平灵敏度设置(电压/格及秒/格)的读出器。通常，这些示波器也提供探头灵敏度及读出处理能力，这样，读出器能够适当地跟踪被使用的探头类型。例如，如果使用一根10X探头，示波器应该由一个10X因子调整垂直的读出器。或者，如果你正在使用一根电流探头，垂直的读出器改变伏特/格及安

培/格从而反映测量的合适的单位。为了利用此读出器的作用，使用与示波器的读出器系统兼容的探头很重要。另外，这也意味着，关于特定示波器的探头的使用，要遵从制造厂商的推荐。对于新型号的示波器，有一点非常重要，就是他们具有先进的读出器特征，这一特征不能完全被普通的探头所支持。

正确的选择探头

从前面的关于信号源和示波器的讨论，可以看出如果没有帮助及指导，选择探头的过程将是一个复杂的过程。事实上，既然一些关键的选择标准，如探头上升时间、示波器输入电容，不是总被说明，选择过程在一些情况下简化为推测。

为避免推测，最好选择一台推荐附件表中包括大量探头选择的示波器。另外，当你遇见新的测量需求时，应该与示波器制造厂商确认，是否具有新的探头，以扩展示波器的测量能力。最后应牢记，对于某一个应用，从来没有所谓“正确”的

测量选择，只有正确的“探头/示波器”组合的选择，并且，他们依赖于在下列术语中对你的测量需求的最初定义：

- 信号类型(电压，电流，光学，等等)

- 信号频率成分(带宽问题)

- 信号上升时间

- 阻抗(R与C)

- 信号振幅(最大，最小)

- 测试点几何形状(引线的元件，表面贴装，等等)

通过考虑上面的问题，在空白上填上你应用的特定信息，你将能够确定适合你的应用的示波器和各种匹配的探头。

第六章 高级探测技术

前面的章节涵盖了应知道的关于示波器探头及其应用的基本信息。对于大多数测量情形，只要你记住下列各条基本论点，随示波器一起提供的探头就已足够满足测量的要求了，它们是：

- 带宽 / 上升时间限制
- 潜在的信号源负载
- 探头补偿调整
- 正确的探头接地

然而即使这样，你将遇到一些超出基本情况探测问题。

这一章研究一些你最可能遇到的一些高级的探测问题，从我们的老朋友接地导线开始。

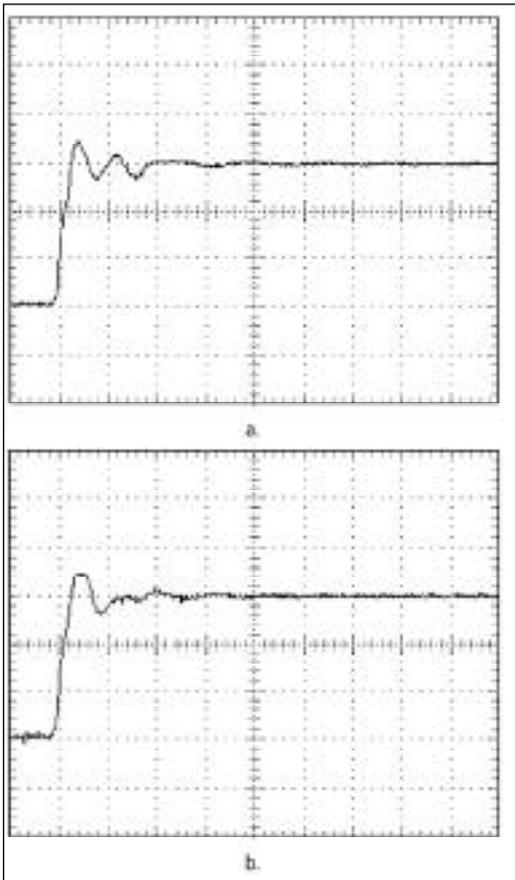


图 6-1. 快速变换的阶跃波形(T_r 为 1 纳秒)畸变是由于使用 6 英寸探头接地线(a)而产生的。这些畸变能由移动探头电缆线或把一只手放在电缆线(b)上而改变。

接地线问题

接地线问题持续困扰示波器测量，这是因为在测量中，建立一个真正的地参考点是很困难的。这个困难来自于接地线，不论在探头上或在电路中，随着信号频率的增加，都产生电感，这一电感成为电路本身的一部分。

这一影响在第 1 章已被讨论及说明，长的地线在脉冲上引起阻尼振荡。除了阻尼振荡、波形畸变，地线能也为噪声充当一条天线。怀疑是对地线问题的第一个防卫武器。在示波器显示信号时观察到噪声或畸变要首先持怀疑的态度。噪声或畸变可能是信号的一部分，也可能是测量过程的结果。如果畸变是测量的一部分，下列讨论将提供确定的方法指南，及如果是这样，如何解决问题。

地线长度。任何探头地线都有一些电感，并且更长的地线具有更大的电感。当探头尖电容、信号源电容和接地线电感结合时，形成共振电路，并引起了在某个频率上的阻尼振荡。为了看到由接地不良引起的阻尼振荡及其它畸变，有 2 个条件必然存在：

- 1、示波器系统带宽一定高于探头尖所处理信号的高频含量。
- 2、探头尖的输入信号必然包含足够的高频信息(快的上升时间)，从而在不良的接地存在时，引起阻尼振荡或畸变。

当以上两条满足时，图 6-1 中显示了一个阻尼振荡和畸变的例子。图 6-1 所示的波形是一台 350 兆赫示波器使用 6 英寸地线捕获到的。实际波形是上升时间为 1 纳秒的阶跃波形。1 纳秒上升时间等价于示波器的带宽 ($BW = 0.35/Tr$)，并且在探头的地回路中，具有足够高的频率成分引起阻尼振荡。这个阻尼振荡信号与阶跃波形一起注入，它被视为加在阶跃波形头部的畸变，如图 6-1a 和图 6-1b 所示。

图 6-1 中显示的波形是使用同一示波器、同一探头捕捉波形跳变获得的。然而，注意，图 6-1b 的畸变与图 6-1a 相比有些细微的不同。图 6-1b 中看到的差别是由于重新定位探头电缆及将手远离电缆所得到的。重新定位电缆线及手靠近电缆线都会导致探头接地回路电容及高频终端特性的改变，从而改变畸变的形状。需要认识到的重要的一点就是，事实上，探头接地线随着波形的快速变化，能在波形上引起畸变。

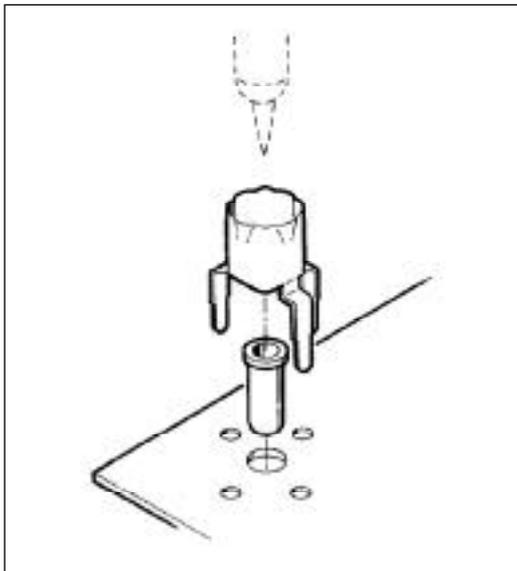


图 6-2. 典型的 ECB- 探头尖适配器。

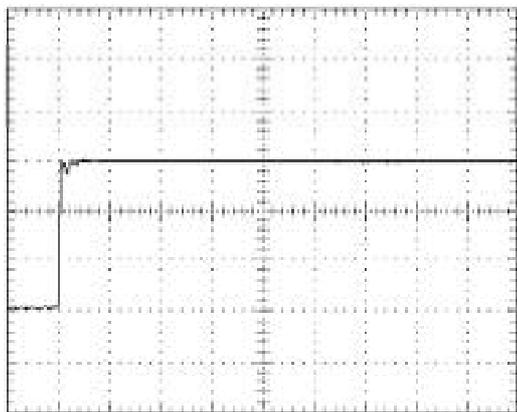


图 6-3. 通过一个 ECB-探头尖适配器获得了阶跃波形的 1 纳秒上升时间。

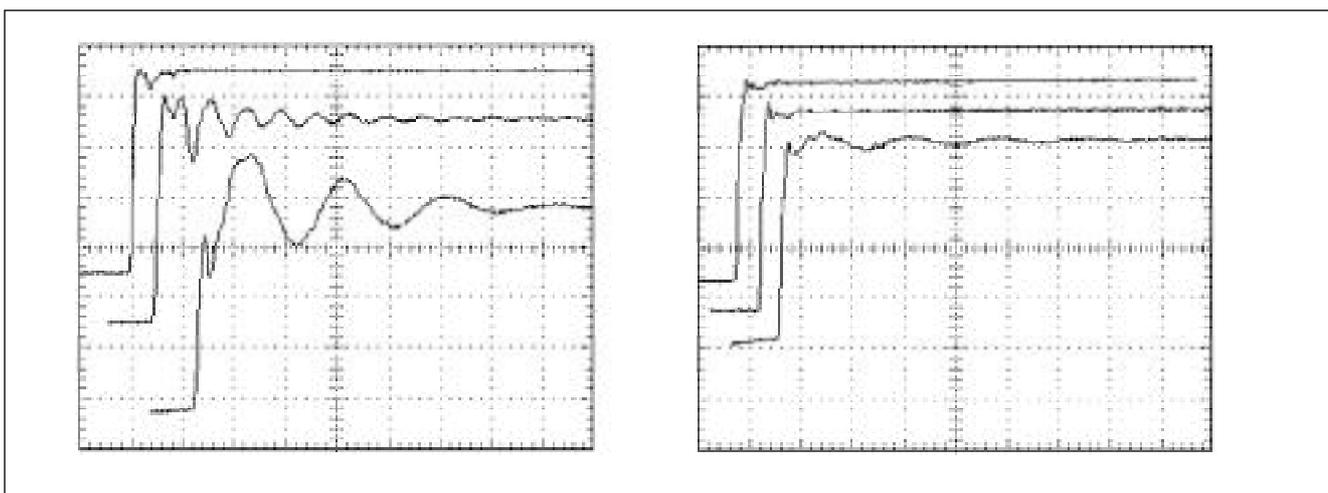


图 6-4. 对于有源探头及无源探头，地线作用的例子。三个踪迹，左边图为使用 1/2 英寸，6 英寸，及 12 英寸的无源探头接地线对波形的影响。右边图为使用场效应晶体管有源探头接地线对波形的影响，他们显示的是同一波形。

另外需要注意的重要一点是，波形上看见的那个畸变可能只是波形的一部分，而并不是探头接地导致的结果。为了在这两种状况之间进行区分，移动探头电缆线。如果把你的手放在探头上或移动电缆线引起畸变的更改，畸变就是由接地系统引起的。正确的接地(终端)探头将完全不受到电缆线的位置及手触摸的影响。进一步说明上面这一点，使用同样的示波器和探头获得同样的波形。这一次，6英寸探头接地线被移动，并且单步信号通过一个 ECB-探头尖适配器装置而获得(见图 6-2)。

没有畸变的阶跃波形显示如图 6-3 所示。由探头地线及 ECB-探头尖适配器装置上的探头直接端接，实际上消除了所有的畸变。现在显示的测试波形是测试点的精确波形。从上面的例子可以得到 2 个主要的结论。

第一是，当探测快速信号时，探头接地线应该尽可能地短。

第二是，产品设计者应该注意产品可测试性设计，保证产品维护与调试的更高的有效性。包括使用上述的 ECB- 探头尖适配器，在安装及维护时，有必要更好的控制测试环境及避免对产品电路的错误调节。

当你测量一个快速波形，而 ECB- 探头尖适配器没有安装时，要记住使探头有尽可能短的接地线。许多情况中，可以使用具有整体接地尖的专用探头尖适配器来完成。另一个选择是，使用一根有源的场效应晶体管探头。场效应晶体管探头，因为他们的高输入阻抗和极低的尖电容(经常不到 1 pF)，能消除许多无源探头的接地线问题。进一步说明如图 6-4 所示。

地线噪声问题。噪声是可能在示波器上出现的另外一种类型的信号畸变。就象阻尼振荡与畸变，噪声可能实际上是在探头尖上的信号的一部分，或者它可能由于非法的接地技术而导致。

不同在于噪声通常来自于外部的源，它的波形不是被测信号频率的函数。换句话说，不良的接地能导致在任何频率的任何信号上出现噪声。

有两种主要的机制，使得噪声作为测量的结果而加于信号上。其一是，噪声通过接地回路进入。另一个是通过探头电缆及接地线感应而获得。两机制分别地在下面讨论。

地回路噪声注入。噪声注入进接地系统可能是由于在地回路系统中，在示波器公共点及测试电路电源地线及探头电缆线、地线之间，存在不必要的电流流动。通常，这些点应当是零伏特电位，并且没有地电流流动。然而，如果示波器和

测试电路建立在不同建筑物的地系统之上，就可能有的电压差，或者说在其中的一个建筑物地系统上有噪声。(见图6-5)。结果形成电压降，电流将通过探头的外部屏蔽流动。这一噪声电压将在探头尖与信号一起串联注入示波器。结果是，你将看到信号上有噪声，或者信号可能由于噪声产生阻尼振荡。随着地回路噪声的注入，噪声经常是交流电频率噪声(50赫兹)。

通常，噪声可以是尖形或突变脉冲，它源于建筑物上的设备，例如空调，开关的通断。有各种各样的方式可以避免或使地回路噪声减到最小。

第一个方法是，示波器及被测电路使用同一电源地，从而使地回路最小化。另外一个方法是，探头和电缆线应该坚决放置在离开潜在的串扰源的地方。尤其不能允许探头电缆线越过或并排于电源电缆线。

如果地回路噪声问题还存在，你需要以下列方法之一打开地回路：

1. 使用地隔离监视器。
2. 在测试电路或示波器使用一个电源线隔离变压器。
3. 使用隔离放大器，将示波器探头与示波器隔离。
4. 使用差分探头做测量(抑制共模噪声)。

无论如何都不应该通过破坏示波器三线的接地供电系统而隔离示波器或测试电路。如果需要浮动测量，使用被认可的隔离变压器，或使用为示波器而设计的地隔离监视器。

警告

为避免触电，在将探头接入测试点之前，必须先将探头接入示波器或探头隔离器。

感应噪声。噪声可以通过感应进入探头电缆线而进入共地系统。特别地是当使用具有长电缆线的探头时。接近电源线或其他电流导线都能在探头的外部的屏蔽上感应出电流。电路通过建筑系统的共同地而成为闭合回路。

为了使这个潜在的噪声源减到最小，尽可能使用短的接地线，还要使探头电缆线远离可能的串扰源。

噪声也可能直接地被感应进入探头地线。这是由于，一般的探头接地线看起来是一个单圈的天线。

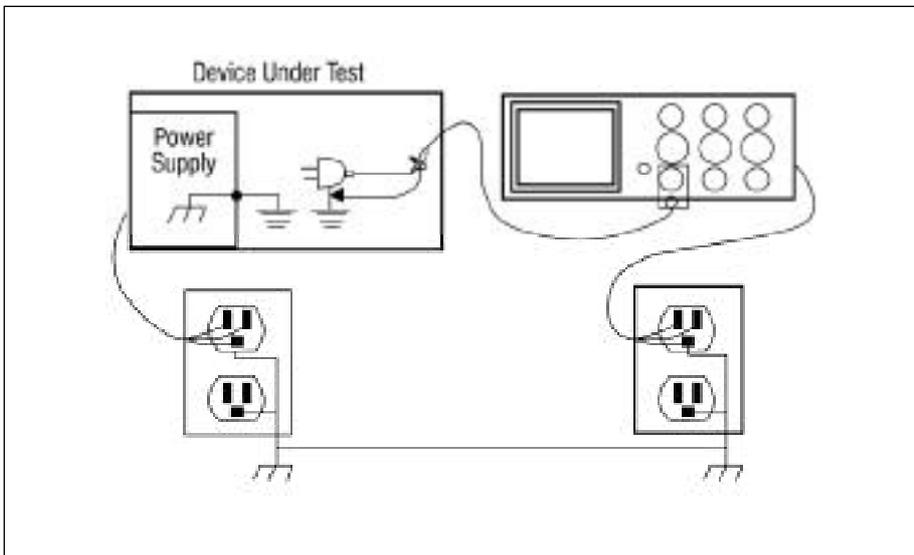


图 6-5. 两个不同的电源插座上的，对于示波器，探头，及测试电路的全部的地电路或地回路。

这条地线天线对于逻辑电路或快速变换信号，相当容易受到电磁干扰。

如果探头地线放置于靠近被测试的电路板的某个区域，例如时钟线，地线可能感应到信号，并将在探头尖与待测信号混合。当你在示波器上观看信号的噪声时，问题是：噪声是在探头尖信号的一部分，还是被探头的接地线感应到的？

为回答这个问题，四下移动探头接地线。如果噪声信号电平变化了，噪声就是被感应进地线。另外一个辨认噪声源的有效方法是，从电路断开探头并且将探头地线夹钳夹到探头尖。然后来回在电路上移动这个探头尖/地线回路天线。这条

回路天线将在电路上感应强辐射噪声的区域。

图 6-6 的例子中探头地线与探头尖短接，对逻辑电路产生的感应信号。为了使感应进探头地的噪声最小化，应当使地线远离所被测试板上的噪声源。另外，更短的地线将减少噪声感应的量。

差分测量

严格地说话，所有的测量都是差分测量。在一个标准的信号测量中，探头接入信号点，探头地线接入电路的地，这实际上是在测试点及地之间的差分测量。在这种情况下，有两个信号线。地信号线

及测试信号线。实际的差分测量涉及两个信号线，每一个都高于地电压。

这就要求使用一种差分放大器，以便使两个信号线（双端信号源）能被数学的相加成为相对于地（单端信号）的单一信号线，再输入示波器，如图 6-7 所示。

差分放大器可以是特殊的放大器，它是探测系统的一部分，或者如果示波器允许波形进行数学相加，每个信号就能在单独的通道中测量到，两个通道就可以数学相加。

在任何一个情形中，对共模信号的抑制是差分测量质量的关键问题。

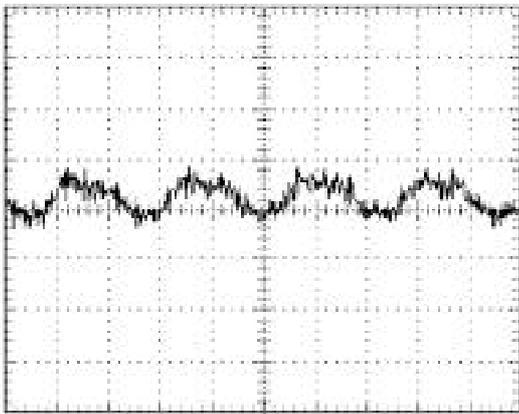


图 6-6. 探头接地线环路（探头尖短接地线夹钳）感应电路板信号而产生噪声的例子。

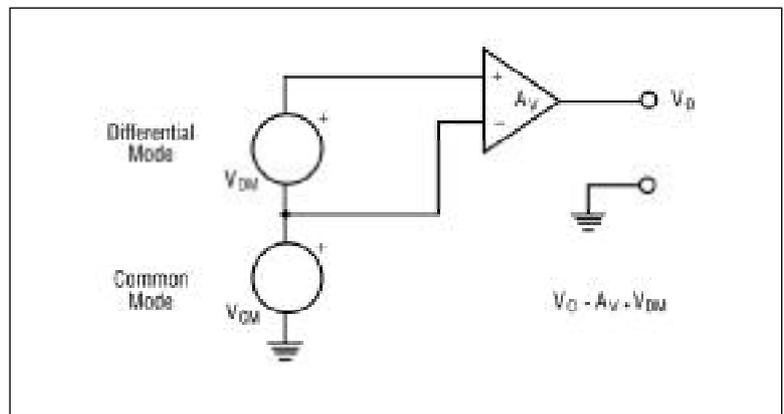


图 6-7. 差分放大器具有两个信号线，它们差分输入以地为参考的单端信号。

理解差模和共模信号

理想的差分放大器放大差分的信号, V_{DM} , 在它的两个输入之间完全抑制对两输入的公共电压, V_{CM} 。结果输出电压为:

$$V_o = A_v (V_{+in} - V_{-in})$$

其中:

A_v = 放大器增益。

V_o = 以地为参考的输出信号

差分信号被归于差分电压或差分模式信号, 表示为:

$$V_{DM}$$

其中:

$$V_{DM} = \text{上面等式的 } V_{+in} - V_{-in} \text{ 项。}$$

请注意共模电压 V_{CM} 并不是上面等式的一部分。这是因为理想的差分放大器抑制所有的共模成分, 而不考虑它的振幅或频率。

图 6-8, 使用差分放大器测量逆变器中的 MOSFET 的门驱动的例子。当 MOSFET 通断切换时, 源极电压从正到负来回摆动。通过变压器使门信号对源信号参考。当, 差分放大器抑制几百伏特的源到地的跃迁, 允许示波器在足够的分辨率下测量 VGS 信号(几伏特的摆动), 例如 2 V/格。

在真实世界中, 差分放大器不能抑制所有的共模信号。在输出将有小共模电压信号成为误差信号。共模误差信号与想要得到的差分信号是难以区分的。

差分放大器抑制不希望共模信号的能力, 称为共模抑制比, 简记为 CMRR。共模抑制比 (CMRR) 的真正定义是“输入的差模增益除以共模增益”:

$$CMRR = A_{DM} / A_{CM}$$

对于估值, 共模抑制比 (CMRR) 的性能可以由 0 输入信号估值。

这时, 输出结果 V_{DM} 显然由共模输入确定。共模抑制比可以有两种表达方式 10,000 : 1 或以 dB 表示:

$$dB = 20 \log (A_{DM} / A_{CM})$$

例如, 10,000 : 1 的共模抑制比 (CMRR) 等价于 80 db。为了理解其重要性, 如图 6-9 假定你需要测量一个电压, 即在所示的音频功率放大器的限流电阻器上的输出电压。

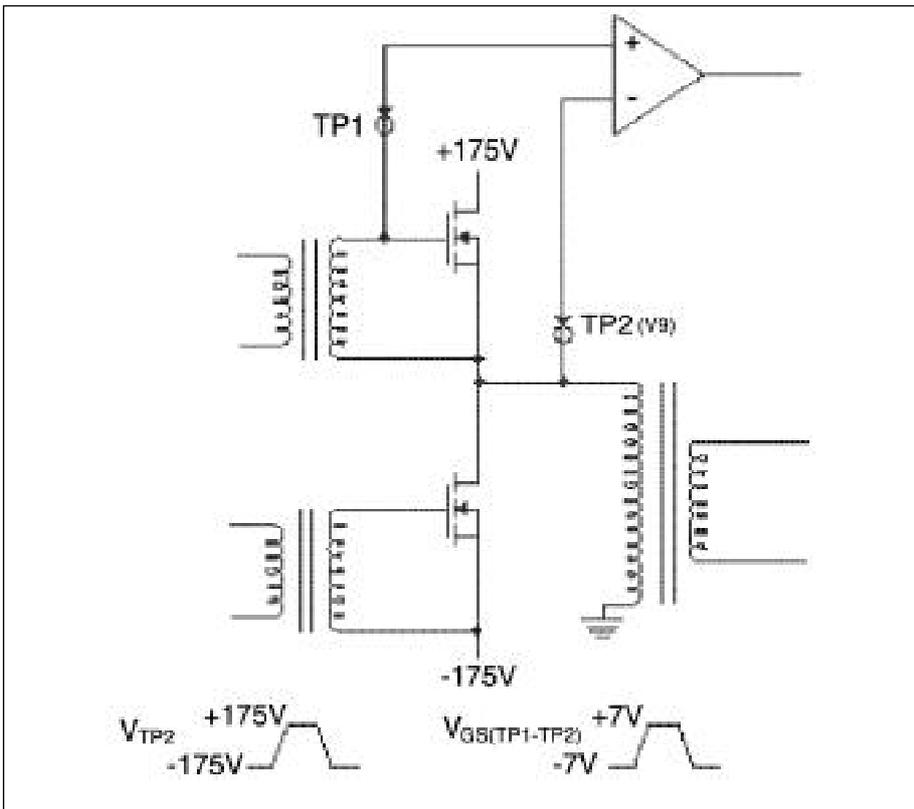


图 6-8. 差分放大器用来测量上面逆变器推挽电路中晶体管的控制极 (栅极) 到源极的电压。注意源极在测量过程中有 350v 的改变。

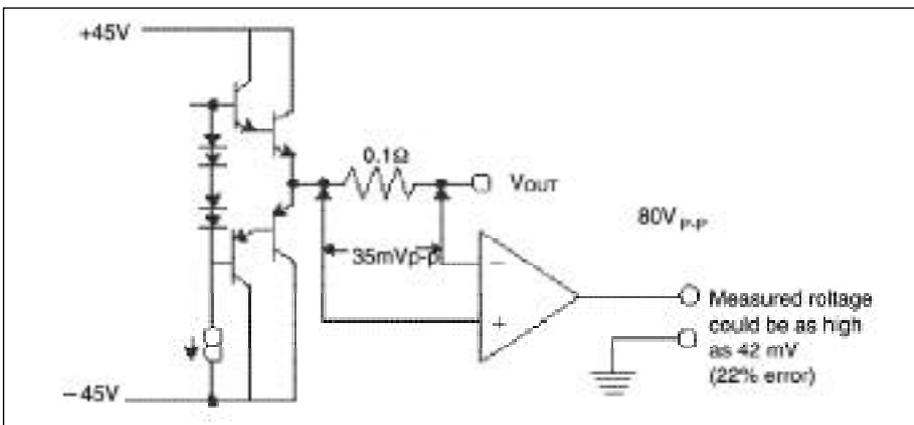


图 6-9. 来自于具有 10,000: 1 CMRR 差分放大器的共模误差。

在全负载时，通过阻尼电阻的电压(V_{DM})应该 35 mV，输出电压(V_{CM}) 达到 80Vp-p。使用的差分放大器在 1kHz 有 10,000:1 的共模抑制比指标。

当 1 kHz 正弦波使放大器达到完全功率时，万分之一的共模信号将错误地作为 V_{DM} 出现，它的大小将是 80 V/10,000 或 8 mV。8 mV 残余共模信号意味着 35 mV 信号上的 22% 的误差！

注意，对共模抑制比 (CMRR) 的说明是绝对值，这一点很重要。它不指定误差的极性或相位的转变。因此，你不能简单地从显示的波形中减去误差。另外 共模抑制比 (CMRR) 通常在直流是最高的(最好)，随着 V_{CM} 频率的增加逐渐衰减。

一些差分放大器用频率的函数曲线对共模抑制比 (CMRR) 进行说明；其它的是

简单地在一些关键的频率点提供共模抑制比(CMRR)参数说明。在任何一个情况中，在比较差分放大器或探头时，确定你对共模抑制比 (CMRR) 的比较在同样的频率点，是很重要的。

共模抑制比 (CMRR) 的指标说明中假设共模成分是正弦曲线。现实中，一般不是这种情况。例如，图 6-8 的逆变器的共模信号是一个 30 kHz 的方波。既然方波的能量包含在远远高于 30KHZ 的频率上，共模抑制比 (CMRR) 将在 30KHZ 点比指定的要差。

无论何时 如果共模成分不是正弦曲线，实验测试是决定共模抑制比 (CMRR) 误差范围的最快的方法(见图 6-10)。联结所有输入导线到源。示波器现在仅显示共模误差。你现在可以确定误差信号的

大小。需要注意的是， V_{CM} 与 V_{DM} 之间的相位没有被说明。因此从差分测量中减去显示的共模误差将不精确地消除错误项。

图 6-10 中的实验对于在实际测量中确定共模成分非常简便。但是还有一个影响，这个测试会捕捉不到。当所有输入接入同一点，由放大器看，激励阻抗没有什么差别。这种状况产生最好的共模抑制比(CMRR)性能。但是值得注意地，当差分放大器的两个输入端有不同的源阻抗时，共模抑制比(CMRR)将降低。

使差分测量误差减到最小。把差分放大器或探头连接到信号源通常是误差的最大来源。为了维持输入匹配，两条路径应该尽可能相同。任何一根电缆线都应该为了输入具有同样的长度。

如果每个信号线使用一个探头，他们应该具有同样的型号及电缆线长度。当测量一个具有高共模电压的低频率信号时，避免使用衰减探头。在高增益时，也完全不能用，是因为他们不可能精确地平衡他们的衰减。

当高电压或高频率中需要应用衰减时，应当使用特殊的专为差分测量而设计的专用的无源探头。这些探头用于精确微调直流衰减和交流补偿。

为了获得最好的性能，放大器应该使用一套专用的探头，并与放大器一起按照探头的校准方法进行校准。

展开并行的输入电缆相当于一个变压器绕组的作用。任何交流磁通通过线圈会感应电压，并成为差分信号，输入放大器，然后被完全地加至输出。

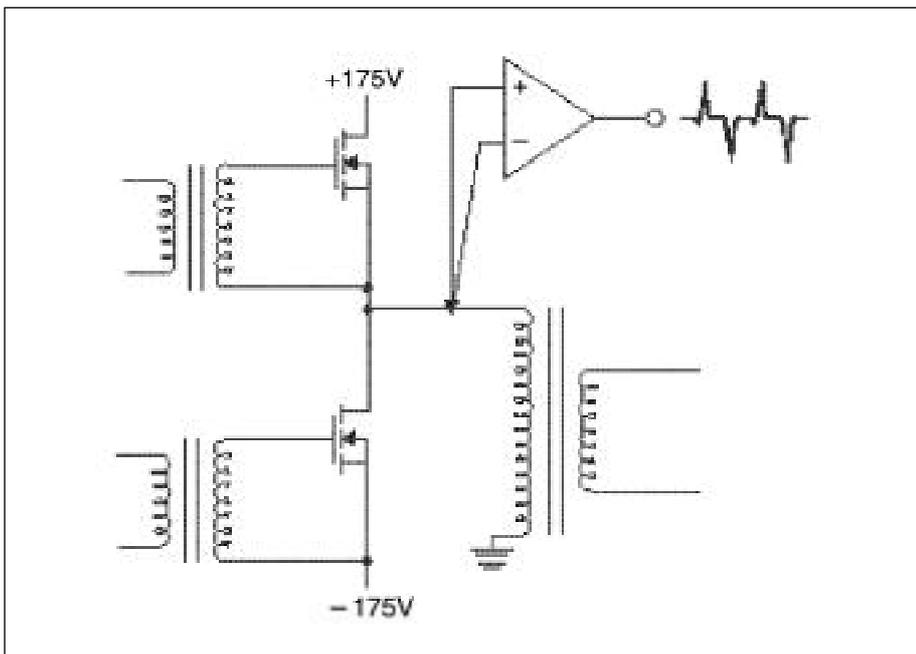


图 6-10. 对适当的共模抑制的试验测量。两个输入由同一点驱动。剩余的共模信号在输出出现。这个测试不能捕捉差分的源阻抗作用。

为使差分测量误差减到最小，通常将探头的+、-输入线捻在一起，成为双绞线。这样减小了交流供电及其他的噪声感应。随着输入线捻在了一起，如图6-11所示，任何感应的电压趋于在VCM路径上，被差分放大器所抑制。

高频测量受过大的共模影响，可以通过将输入导线都缠绕铁氧体而加以改进。这样将衰减对两个输入端是公共信号的高频成分。因为差分信号在两个方向通过磁芯，所以他们未受影响。

大多数差分放大器的输入连接器，是具屏蔽接地的BNC接头。当使用探头或同轴输入连接时，总是有与地的关系这一问题。因为测量应用的变化，所以并没有严格的规则。

在低频率测量小电压信号时，通常最好只在放大器的端部连接地，而输入端不连接。这为被感应进入屏蔽的电流提供一条回路，但是并不创造可以扰乱测量及被测设备的一个接地回路环。

在进行更高的频率测量时，探头的输入电容，与线电感一起，形成串联共振电路，可能引起振荡。在单端测量时，这一影响可以使用最可能短的地线使之减到最小。这一感应系数的降低，有效地将共振频率向高处移动，希望能超过放大器的带宽。差分测量是在两个探头尖之间来进行的，将没有地的概念。但是，如果阻尼振荡产生于共模分量的快速上升，使用一根短的接地线减小引起共模的电路的感应系数，也可以减小阻尼振荡。在某些状况，快速差分信号的阻尼

振荡，也可以通过连接地线而减小。一般是共模的源具有很高频率和很低的对地阻抗，也就是通过电容器旁路。除非这种情况，连接地线可以使测量变得更坏！如果这种情况发生，要使探头的地线在一起接地，通过屏蔽降低电感的影响。

当然，将探头地连接到电路会产生一个地回路。当测量高频率信号时，这通常不会引起问题。最好的建议是，当测量高频率信号时，试着在连接地线与不接地线的两种情况下进行测量；然后使用具有最好的结果的设置。

将探头接地线接入电路时，记住要使其接地！使用差分放大器时，既然它们可以探测电路的任何部位，而不存在损坏的风险，也就很容易忘记接地的位置。

小信号测量

测量低振幅信号，存在一些独特的问题。首先的问题是，噪声和足够的测量灵敏度。

降低噪声。当测量一些几百毫伏的信号时，周围环境的噪声通常就不能忽略了，尤其是测量一些数十毫伏或更小的信号时，周围环境的噪声非常明显。

因而，对于减小测量系统的噪声，减小接地回路及保持接地导线尽量短是很必要的。

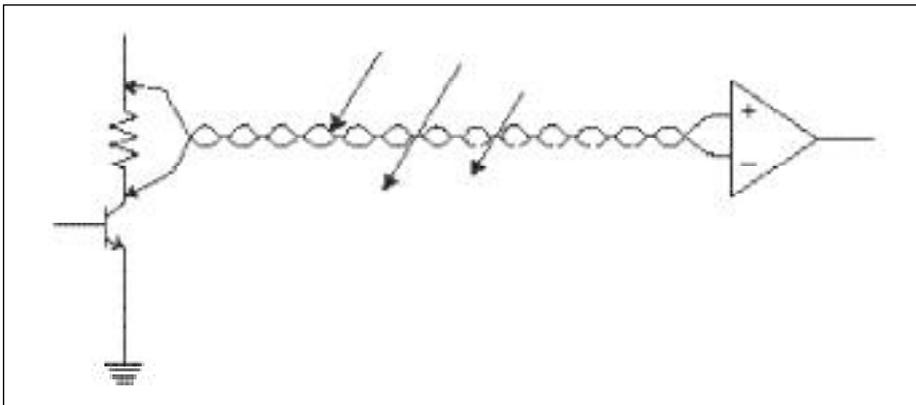


图 6-11. 随着输入导线双绞到一起，回路的区域变得很小，因此有更少的磁通通过它。任何感应的电压都趋于被差分放大器抑制到 V_{CM} 路径中。

新术语

SNR (信噪比) - 信号振幅与噪声振幅的比; 通常以 dB 表示:

$$\text{SNR} = 20 \log (V_{\text{signal}} / V_{\text{noise}})$$

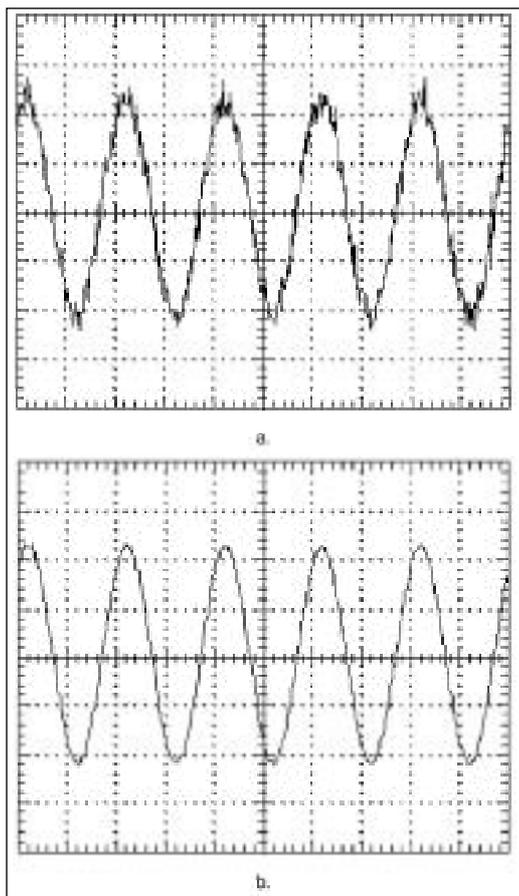


图 6-12. 信号平均(b)可以净化具有噪音的信号(a).

极端情况下, 对于很低振幅信号的无噪声干扰测量可能需要电源线滤波器和屏蔽室。

不过考虑极端情况之前, 应该考虑使用信号平均, 这是一种简单经济可行的解决信号噪声问题的方法。如果你正在测量的信号具有重复性, 你正在试图消除的噪声是随机的, 信号平均能对已获得信号在 SNR 上提供极大的改进。

这个例子如图 6-12 所示。信号平均是大多数数字存储示波器(DSOs)的一个标准功能。

它的操作为, 对反复的信号波形进行多次采集进行求和, 并由多次采集计算平均波形。既然随机噪声具有长期平均值为零的特点, 对反复信号求平均值的操作减小了随机噪声。改进的数量以术语 SNR 来表示。理想状态, 信号平均对于 SNR 的改进, 平均次数每增加 2 的一次幂, 改进 3dB。

这样, 平均 2 次 (2^1) 提供最高 3dB 的 SNR 改进, 平均 4 次采集 (2^2) 提供最高 6 dB 的改进, 平均 8 次 (2^3) 提供 9 dB 的改进, 等等。

增加测量灵敏度。示波器的测量灵敏度是它的输入放大电路的函数。输入电路为了使振幅信号定标显示于示波器上, 或者是放大或者是衰减输入信号。显示信号所需的放大或者衰减的量, 要通过示波器的垂直灵敏度设置而选择, 它按照电压/显示格(V/格)调整。

为了显示小信号, 示波器输入必须具有足够的增益或灵敏度, 从而提供至少几个格的信号高度。例如, 为了给 20 mV 峰峰值信号提供至少 2 格高的显示, 示波器要求为垂直 10mV/格设置。同样对于 10mV 信号的 2 格显示, 示波器要求灵敏度设置为 5mV/格。较小的电压/格设置相当于高灵敏度, 反之亦然。

除了测量小信号要有足够的示波器灵敏度这一要求以外, 你也需要有适当的探头。一般这样的探头对大多数示波器都不是标准配置。

标准的探头通常是 10X 探头, 它由因子 10 减小示波器灵敏度。换句话说, 当示波器使用一根 10X 探头时, 示波器的 5 mV/格设置成为 50 mV/格。因而, 为达到示波器的最高的信号测量灵敏度, 你将需要使用一根非衰减 1X 探头。在前一章讨论了, 1X 无源探头有更低的带宽, 更低的输入阻抗, 即通常更高的尖电容。

这就意味着, 你需要额外注意测量的小信号的带宽限制及可能的由探头带来的信号源负载。如果这些看起来会是问题, 解决的一条好的方法就是使用更高带宽及更低负载的 1X 有源探头。

小信号的振幅在示波器的敏感范围以下的情况时, 预放大是很必要的。因为小的信号容易感应噪声, 通常使用差分的预放大。差分的预放大通过共模抑制, 提供噪声抗扰性及放大小信号的优点, 由此小信号将在示波器敏感范围内。

随着示波器差分前置放大器的设计与使用, 可以获得 10 μ V/格的灵敏度。这些特殊设计的前置放大器, 具有对象 5 μ V 一样小的信号进行测量的特点, 甚至在高噪声环境下也可应用!

为了充分利用差分的前置放大器要求匹配使用高质量的无源探头。不使用匹配探头将导致差分前置放大器的共模噪声抑制能力降低。

另外, 在你需要做单端而非差分测量的情况下, 负的信号探头可以接入测试电路的地。实质上, 是在大地和信号地之间的差分测量。在这样做时, 由于没有到信号线和公共地的共模噪声, 你会失去共模噪声抑制能力。

最后要注意的是, 要遵从示波器制造商推荐的程序, 来连接及使用所有的探头及探头放大器。另外, 对于有源探头, 要特别注意: 高电压可能损坏电压探头的元件。

附录 A：安全防范说明

回顾以下安全防范措施，以避免人身受到损害及防止损坏测试设备或其连接的任何产品。避免潜在的冒险，按照制造商指定的测试设备使用方法使用仪器。记住所有的电压和电流都是潜在危险的，或者是人身的冒险或者是设备损坏，或者二者都有。

遵守所有的终端额定值

- 避免着火或突然的震动，观察产品上所有的额定值和标记。在将产品接入测试之前，参考产品手册，以得到更多的标称值信息。
- 不能使用任何超过额定值的电压。
- 连结到地的探头地线仅仅接地。

注意

对于那些特别设计及指定用于浮动场合应用的示波器（例如 Tektronix THS700 系列电池供电数字存储器示波器），第二导线是公共线而不是地线。这时，遵从制造商指定的能够连接的最大电压值。

- 仔细阅读产品手册，了解额定值的降低情况。例如，最大输入电压的额定值可能随着频率的增加而减小。

正确的接地

- 探头通过示波器电源接地导线间接接地。为避免触电，接地导线必须被连接到大地。在将产品的输入或输出终端接入之前，保证产品被适当接地。
- 不要尝试将任何测试设备的电源接地线消除
- 连结到地的探头地线仅仅接地。
- 使用非指定的装置将地线与示波器隔离，或将地线接至非地的连结上，将导致危险电压出现在连接器、控制端、其他示波器或探头的表面。

注意

对于大多数示波器是这样的，也有一些示波器专门设计及应用于浮动测量。一个例子是 Tektronix THS700 系列电池动力数字存储器示波器。

适当连接及分离探头

- 首先把探头连接到示波器。然后把探头适当接地，再接入测试点。
- 探头地线仅应该连结大地。
- 当从测试电路分离探头时，首先把探头尖从电路移开，然后断开地线。
- 除了探头尖及探头连接器的中心导线，所有探头上可受影响的金属（包括接地夹钳），都连接至连接器的屏蔽。

避免接触暴露的电路

- 避免用你身体的手或任何其他部位触摸暴露的电路或元件。
- 确保探头尖及接地导线夹钳的接触，而不会有意外的互相触碰，或接触被测电路的其他部分。

当手持探头时避免射频灼伤

- 为避免射频(无线电频率)灼伤,当导线被连接到超过特定的射频灼伤危险电压和频率限制时,不要手持探头导线。(见例如图 A-1 曲线)。
- 通常,使用没有接地的探头及导线测量高于 300 伏特 1 兆赫的信号时,总是会有射频灼伤的危险。
- 你需要使用有射频灼伤危险的探头时,在连接及分离探头线之前关掉电源。当电路启动后,不要手触摸输入导线。

不要在没有屏蔽的情况下操作

- 示波器及探头不能没有任何屏蔽或保护的情况下操作。除去防护、探头屏蔽或连接器盒,将使导线及元件暴露于潜在危险的电压之下!

不要在湿/潮湿条件下操作

- 为避免遭到电击及设备的损坏,不要在湿或潮湿的条件操作测量设备。

不要在易爆炸气体中操作

- 在易爆的气体中操作电或电子设备,能导致爆炸。具有潜在爆炸危险的气体可以是汽油、溶剂、醚、丙烷、及

其它挥发性物质,它们四处存在,或被使用,或被存储。另外,一些细的尘粒或粉末在空气悬浮也可以导致空气爆炸。

如果怀疑示波器有故障,请不要操作它

- 如果你怀疑示波器或探头有故障,在继续使用它之前要由合格的服务人员检查故障。

保持探头表面干净且干燥

- 潮湿、污垢、及其它的污染物,在探头表面,能够提供传导路径。为了安全并且精确的测量,将探头表面保持干净且干燥。

- 清洗探头应仅使用在探头文件中说明的方法及程序。

不要将探头浸入液体

- 将探头浸入液体能在内部的元件之间提供一条传导通路,或导致内部元件及外部屏蔽的损坏或腐蚀。
- 清洗探头应仅使用在探头文件中说明的方法及程序。

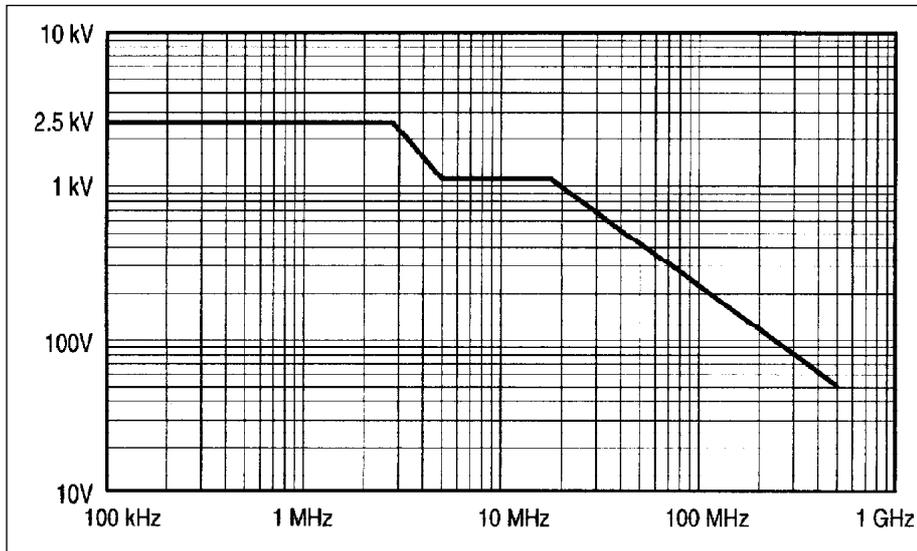
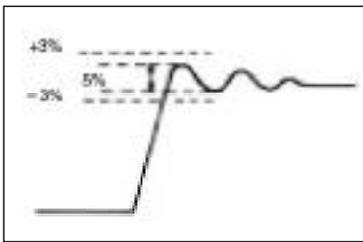


图 A-1. 减载运行曲线的例子。实际的值和范围将随特定的产品而变化。

附录 B：术语表

畸变 - 与理想或标准的任何背离；通常与波形或脉冲的平的顶及底相联系。信号可以具有由信号源电路或电路环境所引起的畸变，并且畸变可以通过测量系统而影响信号。在进行任何涉及畸变的测量时，决定畸变是否是信号的一部分，还是测量过程的结果很重要。通常，畸变以平顶响应的百分比背离来指定。



有源探头 - 一种探头，包含晶体管或其他有源设备作为探头信号的调整网络。

衰减 - 信号振幅被减小的过程。

衰减器探头 - 有效地增加示波器的刻度因子范围而削弱信号的一种探头。例如，10X 探头通过因子10 有效地增加了示波器显示范围。这些探头是通过衰减加于探头尖的信号而完成这一增加的。这样，100V 峰峰值信号通过 10X 探头将衰减到 10 伏特峰峰值，并且然后作为 100V 峰峰值信号通过示波器的比例因子 10X 的倍乘而显示在示波器上。

带宽 - 连续的频段，网络或电路从中频带至功率减小不超过3-dB处。(参考图 1-5)。

额定值降低 - 根据一个或几个操作变量，减小元件或系统的额定值。例如，振幅的测量精度可以基于被测信号的频率而被降低。

分布参数(L, R, C) - 在一个导线上展开的电阻与电抗；分布元素值与元器件值相比是非常小的。

谐波频率 - 方波，锯齿波，及其它周期的非正弦波包含许多频率成份，可以使波形的基频(1/ 时期)及频率为基频的整数倍(1x, 2x, 3x, ...)的频率；二次谐波频率是基频的二倍，3次谐波频率是基频的3倍，等等。

阻抗 - 阻碍或限制交流信号流动的过程。

阻抗以欧姆表示且由一阻抗成分(R)和反作用成分(X)组成。(X)可以是容性的(X_C)也可以是感性的(X_L)。

阻抗(Z)以复数表示为：

$$Z = R + jX$$

或以振幅和相位表示，其中振幅(M)：

$$M = \sqrt{R^2 + X^2}$$

相位 为：

$$= \arctan(X/R)$$

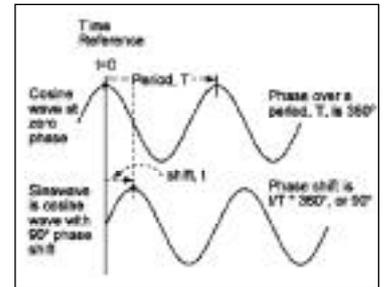
线性相位 - 网络的特征，所应用的正弦波的相位随着频率的增加线性地变化，具有线性相位变化的网络保持谐波及非正弦波相对的相位关系，这样就没有相位相关的失真。

负载 - 通过信号源的的阻抗；一个开环电路将是“无负载”的。

加载 - 使用负载从源分流电流的过程。

无源探头 - 一种探头，其网络等价物仅仅由阻抗(R)，感抗(L)，容抗(C)元件组成；不包含有源部件的一种探头。

相位 - 一种表示波形或波形相关成份，相对于波形或参考点的时间相对位置的表示方法。例如，由定义，余弦波具有零相位，正弦波是具有90度变化的余弦波。



探头供电 - 从一些源，例如示波器，探头放大器，或被测电路提供给探头的电源。典型地，要求电源的探头有有源电子学的一些形式，这样，归类为有源探头。

电抗 - 阻抗的一个成份,它根据流过的信号频率反作用限制信号通过。一个电容器(C)代表对交流信号的容性电抗,以欧姆表示,其关系如下:

$$X_c = \frac{1}{2\pi fC}$$

其中:

X_c = 以欧姆为单位的容性电抗
= 3.14159

f = 以赫兹为单位的频率

C = 以法拉为单位的电容

电感代表对交流信号的感应电抗,以欧姆表示,其关系如下:

$$X_L = 2\pi fL$$

其中:

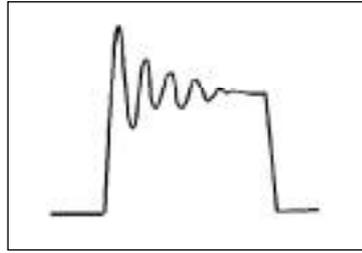
X_L = 以欧姆为单位的电抗
= 3.14159

f = 频率,单位:赫兹。

L = 电感。单位:亨利。

读出器 - 在示波器屏幕上显示的字符信息,它提供波形刻度信息、测量结果、或其他的信息。

阻尼振荡 - 当一个电路共振时,导致震荡;典型地,在脉冲上看见的阻尼正弦曲线就是阻尼振荡。



上升时间 - 在一个脉冲的上升跃变时,上升时间是脉冲从10%振幅升到90%振幅的时间。

屏蔽 - 将一张良好接地的传导薄片放置于外部噪音及源之间,这样屏蔽阻碍噪声传入电路。

SNR (信噪比) - 信号振幅与噪声振幅的比;通常以dB表示:

$$SNR = 20 \log (V_{\text{signal}} / V_{\text{noise}})$$

源 - 信号电压或电流的起点或组成单元;同样可以包括在FET(场效果晶体管)中的一个极。

源极阻抗 - 往回看入源的阻抗。

时域反射计 (TDR) - 一种测量技术,使用一个快速脉冲加于传送通路,分析反射信号,从而判定传送路径中断点(故障或者失谐)的位置及类型。

跟踪标识 - 当多重的波形踪迹在一台示波器上显示时,踪迹标识特征允许识别来自特定探头或示波器通道的特定波形。瞬时按下探头上的跟踪标识按钮,能够引起示波器某种方式的瞬时变化,并以即刻以一种识别踪迹的方式来进行相应的波形跟踪。

泰克电子(中国)有限公司
北京市海淀区花园路4号
通恒大厦1楼101室
邮编: 100088
电话: (86 10) 6235 1210/1230
(86 10) 6235 1186
传真: (86 10) 6235 1236

泰克上海办事处
上海市静安区延安中路841号
东方海外大厦18楼
邮编: 200040
电话: (86 21) 6289 6908
传真: (86 21) 6289 7267

泰克广州办事处
广东省广州市环市东路403号
广州国际电子大厦2107室
邮编: 510095
电话: (86 20) 8732 2008
传真: (86 20) 8732 2108

泰克深圳办事处
深圳市深南东路5002号
信兴广场地王商业中心43楼02室
邮编: 518008
电话: (07 55) 8246 3087
传真: (07 55) 8246 1539

泰克成都办事处
成都市人民南路一段86室
城市之心23层D-F座
邮编: 610016
电话: (86 28) 8620 3028
传真: (86 28) 8620 3038

泰克西安办事处
西安市东大街西安凯悦(阿房宫)
饭店322室
邮编: 710001
电话: (86 29) 723 1234 - 8345
(86 29) 723 1794
传真: (86 29) 721 8549

泰克武汉办事处
武汉市武昌区民主路788号
白玫瑰大酒店924室
邮编: 430071
电话: (86 27) 8781 2831
(86 27) 8789 3366-1924
(86 27) 8731 8969
传真: (86 27) 8730 5230

泰克香港办事处
香港铜锣湾希慎道33号
利园花园3501室
电话: (852) 2585 6688
传真: (852) 2598 6260



© 美国泰克公司(Tektronix, Inc.)2002年版权所有。 版权所有。泰克公司的产品受正在申请或已批准的美国和外国专利保护。 本手册之内容取代以前所有出版物的内容。 本公司保留随时更改技术规格和产品价格的权利。 TEKTRONIX 和 TEK 是公司的注册商标, 本文提及之所有其它商业名称分别为其各自公司的服务标志、 商标或注册商标。 7/98 KC/XBS 60W-6053-7

Tektronix
Enabling Innovation