

示波器基础知识

1.1 说明和功能

我们可以把示波器简单地看成是具有图形显示的电压表。

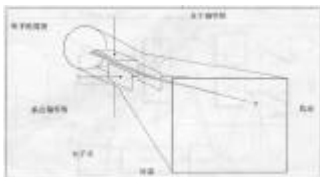
普通的电压表是在其度盘上移动的指针或者数字显示来给出信号电压的测量读数。而示波器则与它不同。示波器具有屏幕，它能在屏幕上以图形的方式显示信号电压随时间的变化，即波形。

示波器和电压表之间的主要区别是：

1. 电压表可以给出被测信号的数值，这通常是有效值即 RMS 值。但是电压表不能给出有关信号形状的信息。有的电压表也能测量信号的峰值电压和频率。然而，示波器则能以图形的方式显示信号随时间变化的历史情况。

2. 电压表通常只能对一个信号进行测量，而示波器则能同时显示两个或多个信号。

显示系统



示波器的显示器件是阴极射线管，缩写为 CRT，见图 1。阴极射线管的基础是一个能产生电子的系统，称为电子枪。电子枪向屏幕发射电子。电子枪发射的电子经聚焦形成电子束，并打在屏幕中心的一点上。屏幕的内表面涂有荧光物质，这样电子束打中的点就发出光来。

图 1 阴极射线管图

电子在从电子枪到屏幕的途中要经过偏转系统。在偏转系统上施加电压就可以使光点在屏幕上移动。偏转系统由水平 (X) 偏转板和垂直 (Y) 偏转板组成。这种偏转方式称为静电偏转。

在屏幕的内表面用刻划或腐蚀的方法作出许多水平和垂直的直线形成网络，称为标尺。标尺通常在垂直方向有 8 个，水平方向有 10 个，每个格为 1cm。有的标尺线又进一步分成小格，并且还有标明 0% 和 100% 的特别线。这些特别的线和标明 10% 和 90% 的标尺配合使用以进行上升时间的测量。我们后面会讨论这个问题。

如上所述，受到电子轰击后，CRT 上的荧光物质就会发光。当电子束移开后，荧光物质在一个短的时间内还会继续发光。这个时间称为余辉时间。余辉时间的长短随荧光物质的不同而变化。最常用的荧光物质是 P_{31} ，其余辉时间小于一毫秒 (ms)。而荧光物质 P_7 的余辉时间则较长，约为 300ms，这对于观察较慢的信号非常有用。 P_{31} 材料发射绿光，而 P_7 材料发光的颜色为黄绿色。

将输入信号加到 Y 轴偏转板上，而示波器自己使电子束沿 X 轴方向扫描。这样就使得光点在屏幕上描绘出输入信号的波形。这样扫出的信号波形称为波形轨迹。

影响屏幕的控制机构有：

—辉度

辉度控制用来调切波形显示的亮度。本书中用作示例的示波器所采用的电路能够根据不同的扫描速度自动调切辉度。当电子束移动得比较快时，荧光物质受到激励的时间就变短，因此必须增加辉度才能看清轨迹。相反，当电子束移动缓慢时，屏幕上的光点变得很亮，因此必须减小辉度以免荧光物质被烧坏。从而延长示波管的寿命。

对于屏幕上的文字部分，另有单独的辉度控制机构。

—聚焦

聚焦控制机构用来控制屏幕上光点的大小，以便获得清晰的波形轨迹。有些示波器，例如本书用作示例的示波器上，聚焦也是由示波器自己进行最佳控制的，从而能在不同的辉度和不同的扫描下保持清晰的波形轨迹。另外也提供手动调节的聚焦控制。

—扫描旋转

这个控制机构使 X 轴扫描线和水平标尺线对齐。由于地球的磁场在各个地方是不同的，这将会影响示波管显示的扫描线。扫描旋转功能就用来对此进行补偿。扫描旋转功能是预先调好的，通常只需在示波器搬动后再行调节。

—标尺照明

标尺亮度可以单独控制。这对于屏幕摄影或在弱光线条件下工作时非常有用。

—Z 调制

扫描的辉度可以用电气的方法通过一个外加的信号来改变。这对于由外部信号来产生水平偏转以及使用 X - Y 显示方式来寻找频率关系的应用中是十分有用的。

此信号输入端通常是示波器后面板上的一个 BNC 插座。

1.2 模拟示波器方框图

CRT 是所有示波器的基础。现在我们已经对它有所了解。下面我们就看一看示波管是怎样作为示波器的核心来起作用的。

我们已经看到，示波器有两个垂直偏转板，两个水平偏转板和一个电子枪。从电子枪发射出的电子束的强度可以用电气的办法来加以控制。

在上术基础上，再增添下面叙述的电路就可以构成一个完整的示波器（见图 2）

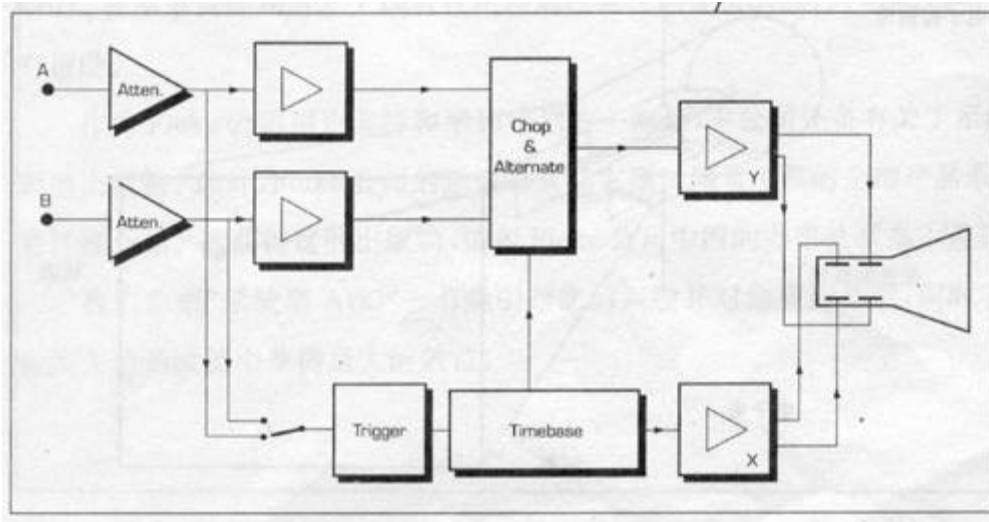


图2 模拟示波器方框图

示波管的垂直偏转系统包括：

—输入衰减器（每通道一个）

—前置放大器（每通道一个）

—用来选择使用哪一个输入通道的电子开关

—偏转放大器

示波器的水平偏转系统包括：时基、触发电路和水平偏转放大器

辉度控制电路用电子学的方法在恰当的时刻点亮和熄灭扫迹。

为使所有这些电路工作，示波器需要有一个电源。此电源从交流市电或者从机内或外部的电池获取能量，使示波器工作。任何示波器的基本性能都是由它的垂直偏转系统的特性来决定的，所以我们首先来详细地考察这一部分。

1.3 垂直偏转

灵敏度

垂直偏转系统对输入信号进行比例变换，使之能在屏幕上表现出来。示波器可以显示峰峰值电压为几毫伏到几十伏的信号。因此必须把不同幅度的信号进行变换以适应屏幕的显示范围，这样就可以按照标尺刻度对波形进行测量。为此就要求对大信号进行衰减、对小信号进行放大。示波器的灵敏度或衰减器控制就是为此而设置的。

灵敏度是以每格的伏特数来衡量的看一下图3可以知道其灵敏度设置为1V/格。因此，峰峰值为6V的信号使得扫迹在垂直方向的6个格内偏转变化。知道了示波器的灵敏度设置值和电子束在垂直方向扫描的格数，我们就可以测量出信号的峰峰电压值。

在多数示波器上，灵敏度控制都是按1-2-5的序列步进变化的。即灵敏度。设置颠倒为10mV/格、20mV/格、50mV/格、100mV/格等等。灵敏度通常是用幅度上升/下降钮来进行控制的，而在有些示波器则是用转动垂直灵敏度旋钮来进行。

如果使用这些灵敏度步进不能调节信号使之能够准确的按照要求在屏幕上显示，那么就可以使用可变（VAR）控制。在第6章我们将会看到，使用标尺刻度来进行信号上升时间的测量就是一个很好的例子。可变控制能够在1-2-5的步进值之间对灵敏度进行连续调节。通常当使用可变控制时，准确的灵敏度值是不知道的。我们只知道这时示波器的灵敏度是在1-2-5序列的两个步进值之间的某个值。这时我们称该通道的Y偏转是未校准的或表示为“uncal”。这种未校准的状态通常在示波器的前面板或屏幕上指示出来。

在更现代化的示波器，例如我们用作示例的示波器，由于采用了现代先进的技术进行控制和校准。因此示波器的灵敏度可以在最小值和最大值之间连续变化，而始终保持处于校准状态。

在老式的示波器上，通道灵敏度的设置值是从灵敏度控制旋钮周围的刻度上读出的。而在新型的示波器上，通道灵敏度设置值清晰地显示在屏幕上，如图3所示，或者用一个单独的CD显示器显示出来。

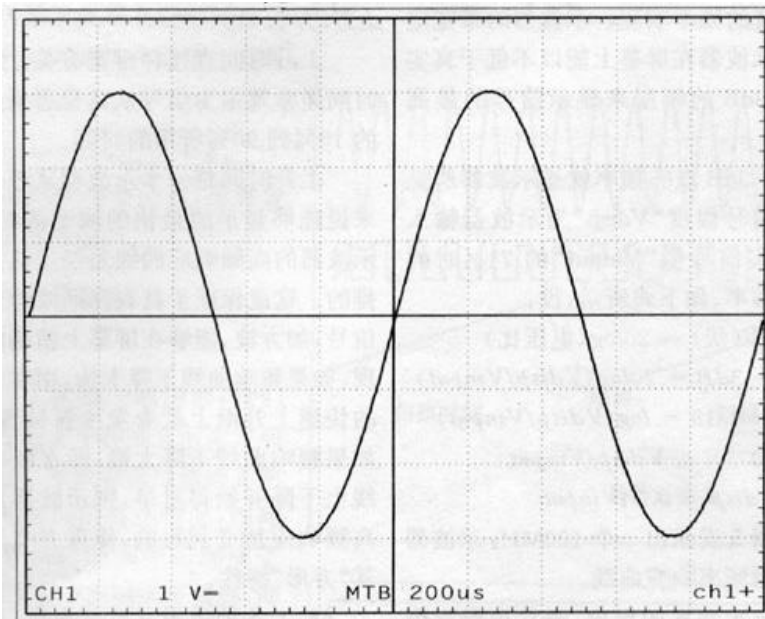


图3 在灵敏度为1v/格的情况下，峰峰值为6v的信号使电子束在垂直方向偏转6格

耦合

耦合控制机构决定输入信号从示波器前面板上的 BNC 输入端通到该通道垂直偏转系统其它部分的方式。耦合控制可以有两种设置方式，即 DC 耦合和 AC 耦合。

DC 耦合方式为信号提供直接的连接通路。因此信号提供直接的连接通路。因此信号的所有分量（AC 和 DC）都会影响示波器的波形显示。

AC 耦合方式则在 BNC 端和衰减器之间串联一个电容。这样，信号的 DC 分量就被阻断，而信号的低频 AC 分量也将受阻或大为衰减。示波器的低频截止频率就是示波器显示的信号幅度仅为其实幅度为 71% 时的信号频率。示波器的低频截止频率主要决定于其输入耦合电容的数值。示波器的低频截止频率典型值为 10Hz，见图 4。

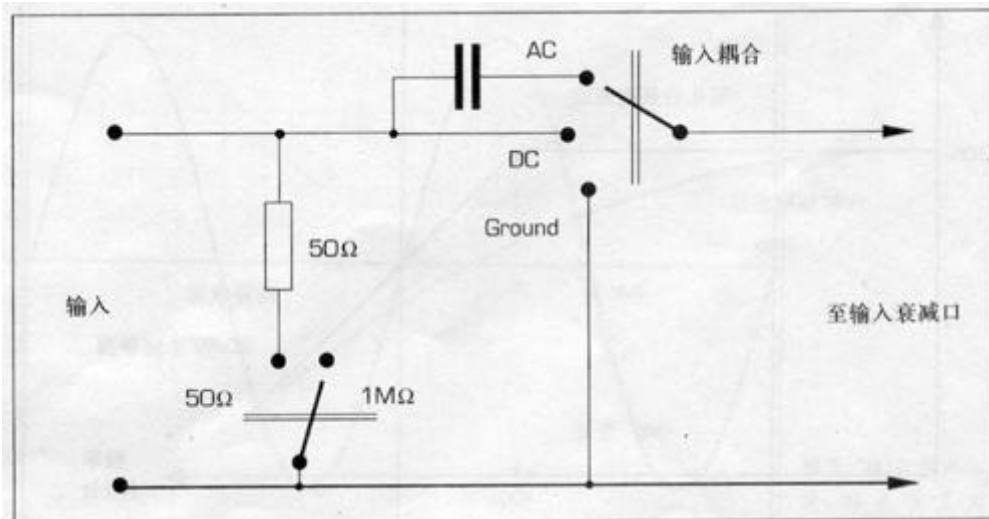


图4 说明 AC 及 DC 耦合、输入接地以及 50 输入阻抗功能选择的简化输入电路

和耦合控制机构有关的另一个功能是输入接地功能。这时，输入信号和衰减器断开并将衰减器输入端连至示波器的地电平。当选择接地时，在屏幕上将会看到一条位于 0V 电平的直线。这时可以使用位置控制机构来调节这个参考电平或扫描基线的位置。

输入阻抗

多数示波器的输入阻抗为 1M 和大约 25pF 相关联。这足以满足多数应用场合的要求，因为它对多数电路的负载效应极小。

有些信号来自 50 输出阻抗的源。为了准确的测量这些信号并避免发生失真，必须对这些信号进行正确的传送和端接。这时应当使用 50 特性阻抗的电缆并用 50 的负载进行端接。某些示波器，如 PM3094 和 PM3394A，内部装有一个 50 的负载，提供一种用户可选择的功能。为避免误操作，选择此功能时需经再次确认。由于同样的理由，50 输入阻抗功能不能和某些探头配合使用。

位置

垂直位置控制或 POS 控制机构控制扫迹在屏幕 Y 轴的位置。在输入耦合控制中选择接地,这时就将输入信号断开,这样就可以找到地电平的位置。在更先进的示波器上设有单独的地电平指示器,它可以让用户能连续地获得波形的参考电平。

动态范围

动态范围就是示波器能够不失真地显示信号的最大幅度,在此信号幅度下只要调节示波器的垂直位置仍能观察到波形的全部。对于 Fluke 公司的示波器来说,动态范围的典型值为 24 路(3 个屏幕)

相加和反向

简单的把两个信号相加起来似乎没有什么实际意义。然百,把两个有关信号之一反向,再将二者相加,实际上就实现了两个信号的相减。这对于消除共模干扰(即交流声),或者进行差分测量都是非常有用的。

从一个系统的输出信号中减去输入信号,再进行适当的比例变换,就可以测出被测系统引起的失真。

由于很多电子系统本身就具有反向的特性,这样只要把示波器的两个输入信号相加就能实现我们所期望的信号相减。

交替和断续

示波器 CRT 本身一次只能显示一条扫迹。然而,在很多示波器应用中,常常要进行信号的比较,例如,研究输入/输出信号间的关系,或者一个系统对信号的延迟等。这就要求示波器实际上能同时显示不只一个信号。

为了达到这一目的,可以用两种办法来控制电子束:

1. 可以交替地画完一条扫迹,再画另一条扫迹。这种方法称为交替模式,或简称为 ALT 模式。
2. 可以在两条扫迹之间迅速的进行开关或斩波切换,从而分段的画出两条扫迹。这称为断续模式或 CHOP 模式。其结果是在一次扫描的时间里一段接一段的画出两条扫迹。

断续模式适合于在低时基速率下显示低频率信号,因为这时斩波器开关能快速进行切换。

交替模式适合于需要使用较快时基设置的高频率信号的显示。本书中我们用作示例的示波器在不同的扫描速度下能自动地 ALT 或 CHOP 模式以给出最好的显示效果。用户也可以手动选择 ALT 或 CHOP 模式以适合特殊信号的需求。

带宽

示波器最生根的技术指标就是带宽。示波器的带宽表明了该示波器垂直系统的频率响应。示波器的带宽定义为示波器在屏幕上能以不低于真实信号 3dB 的幅度来显示信号的最高频率。

—3dB 点的频率就是示波器所显示的信号幅度“Vdisp”为示波器输入端真实信号值“Vinput”的 71%时的信号频率,如下式所示:设:

$$\begin{aligned} \text{dB(伏)} &= 20 \log(\text{电压比}) \\ -3\text{dB} &= 20 \log(\text{Vdisp}/\text{Vinput}) \\ -0.15 &= \log(\text{Vdisp}/\text{Vinput}) \\ 10^{-0.15} &= \text{Vdisp}/\text{Vinput} \\ \text{Vdisp} &= 0.7\text{Vinput} \end{aligned}$$

图 5 表示出一个 100MHz 示波器的典型频率响应曲线。

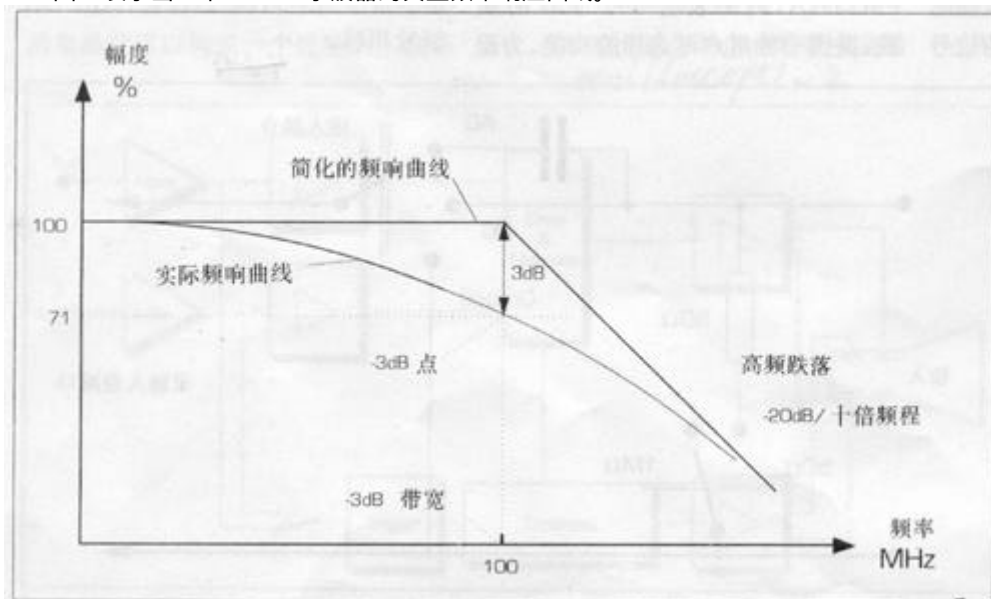


图 5 一台典型为 100MHz 示波器的频率响应曲线(简化的曲线和实际的曲线)

出于现实的理由，通常把带宽想象成为幅频曲线一直平坦延伸至其截止频率，然后从该频率以 -20dB/+倍频程的斜率下降。当然，这是一种简化的考虑。实际上，放大器的灵敏度从较低的频率就开始下降，百在其截止频率达到 -3dB。图 5 中同时给出了简化的频率响应曲线和实际的频率响应曲线。

带宽限制器

使用带宽限制器可以把通常带宽在 100MHz 以上的宽带示波器的频带减小到 20MHz 的典型值。这样就降低了噪声电平 and 干扰，这对于进行高灵敏度的测量是非常有用的。

上升时间

上升时间直接和带宽有关。上升时间通常规定为信号从其稳态最大值的 10% 到 90% 所用的时间。

上升时间是一个示波器从理论上来说能够显示的最快的瞬变的时间。示波器的高频响应曲线是经过认真安排的。这就保证了具有高谐波含量的信号，如方波，能够在屏幕上精确的再现。如果频响曲线下降太快，则在信号的快速上升沿上就会发生振铃现象。如果频响曲线下降太慢，即在频响曲线上下降开始得过早，则示波器总的高频响应就受到影响，使得方波失去“方形”特性。

对于各种通用示波器来说，其高频响应曲线是类似的。从该曲线我们可以得到一个示波器带宽和上升时间的简单关系公式。此公式为：

$$t_r(s) = 0.35 / BW(\text{Hz})$$

对于高频示波器来说，这个公式可以表示为：

$$t_r(\text{ns}) = 350 / BW(\text{MHz})$$

对于一个 100MHz 的示波器来说，上升时间为 3.5 (ns=纳秒 10⁻⁹ 秒)

在示波器的标尺上刻有标明 0% 和 100% 的专门的线，用来进行上升时间的测量。测量时我们先用 VAR 灵敏度控制机构将被测信号的顶部和底部分别和标有 0% 和 100% 的线对齐。

然后找出信号和标尺上标有 10% 和 90% 的两条线的交点。这样，上升时间就可以从这两个交点沿 X 轴方向的时间间隔读出来。

要想测量一台示波器的上升时间，我们使用与上述相同的方法，只是要求测试信号的上升时间应当比该示波器的上升时间短得多。为获得 2% 的测量误差，测试信号的上升时间至少应小于示波器上升时间的五分之一。示波器上显示的上升时间应当是示波器上升时间和信号上升时间和组合函数。其关系为

$$t_{r\text{displayed}} = \sqrt{t_{r\text{signal}}^2 + t_{r\text{Scope}}^2}$$

请记住这个公式，你将发现它是很有用的。

1.4 水平偏转

时基

为了描绘一幅图形，我们必须要有水平和垂直两个方向的信息。示波器描绘轨迹表明信号随时间的变化情况，因此其水平偏转必须和时间成正比。示波器中控制水平偏转，即 X 轴的系统称为时基。

在示波器里有一个精确的扫描发生器。它使得电子束以精确的、用户可选择的速度在屏幕上扫描。时基发生器的输出示于图 6。

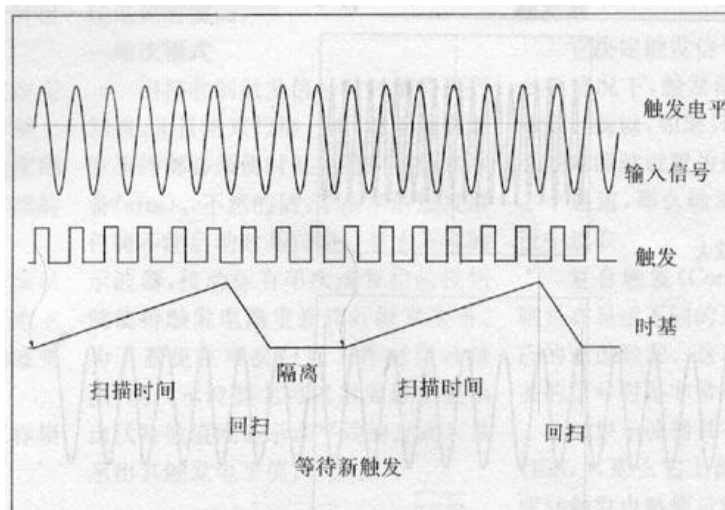


图 6 时基发生器的输出波形。图中示出扫描时间、回扫时间和隔离停止 (Hold-off) 时间

扫描速度以每格的秒数 (s/格) 来度量。一台典型示波器的扫描速度范围可以从 20ns/格到 0.5s/格。扫描速度也和灵敏度控制一样按 1 - 2 - 5 的序列变化。只要我们知道了每个标尺格所代表的时间值, 就可以测量出屏幕扫迹上任何两点之间的时间

例如, 图 7 和图 8 显示的都是 1kHz 的正弦波 (其周期为 1ms), 而扫描速率分别为 1ms/格和 200ms/格。(us=微秒 10^{-6})。

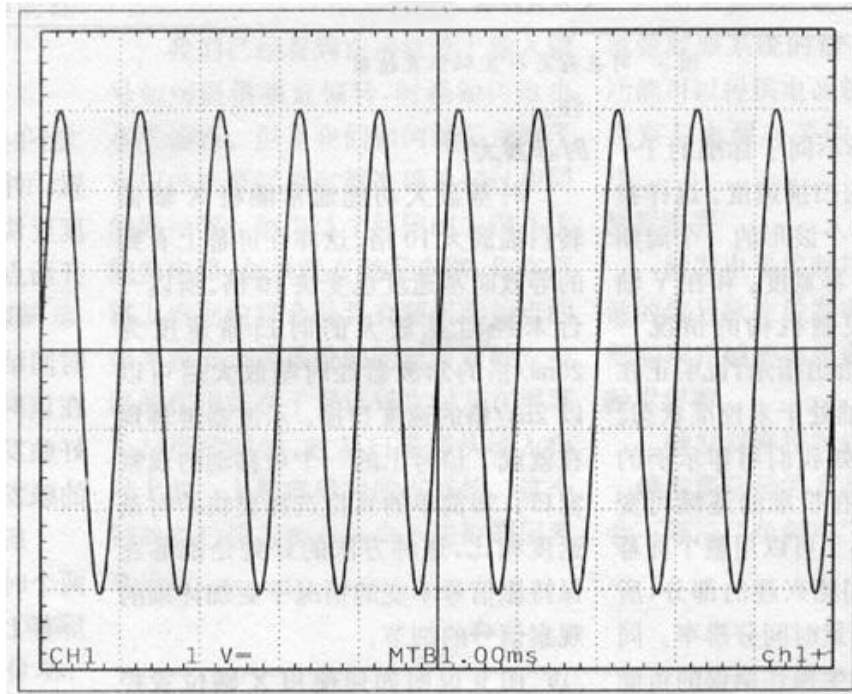


图 7 1kHz 的正弦波, 时基设置为 1ms/格

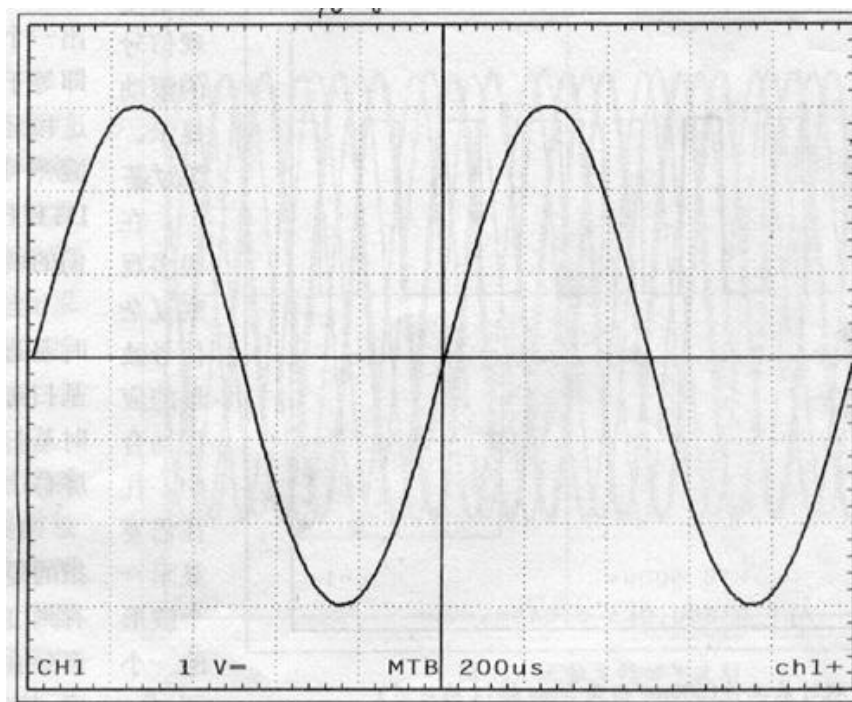


图 8 1kHz 的正弦波, 时基设置为 200 µs/格

水平位置控制

水平或 X 轴位置控制机构 X - POS 可以在屏幕上沿水平方向移动扫迹。这样我们就可以把扫迹上的某一点和某一条垂直标尺线对齐，以便为时间测量规定一个起始点。

可变时基

我们可以选择不同于标准的 1 - 2 - 5 序列设置值的扫描速度。这样我们就能够把任意一个波形的一个周期调整成模跨整个屏幕宽度。和在 Y 轴方向使用 VAR 控制机构的情况一样多数示波器会给出指示，说明正在使用可变时基，X 轴处于未校准状态。更先进的示波器，如我们用作示例的示波器，可以工作在校准的连续可变时基模式。这时由于可以用整个屏幕来显示信号中我们感兴趣的部分，所以能获得更好的测量时间分辨率。同时也能大大减少发生操作错误的可能性。

时基放大

时基放大功能通常能将 X 轴偏转扫描放大 10 倍。这样在屏幕上看到的等效时基速度也变快 10 倍。所以一台未经时基放大的时扫描速度为 20ns/格的示波器经时基放大后可以以 2ns/格的速度扫描。示波器屏幕现在就成了信号上的一个可移动的观察窗口。和简单的直接选择更快的时基速度相比，这种方法的好处是能够在保持原信号不变的情况下更加详细的观察信号的细节。

图 9 说明如何使用 X 轴位置控制来实现信号的滚动显示。

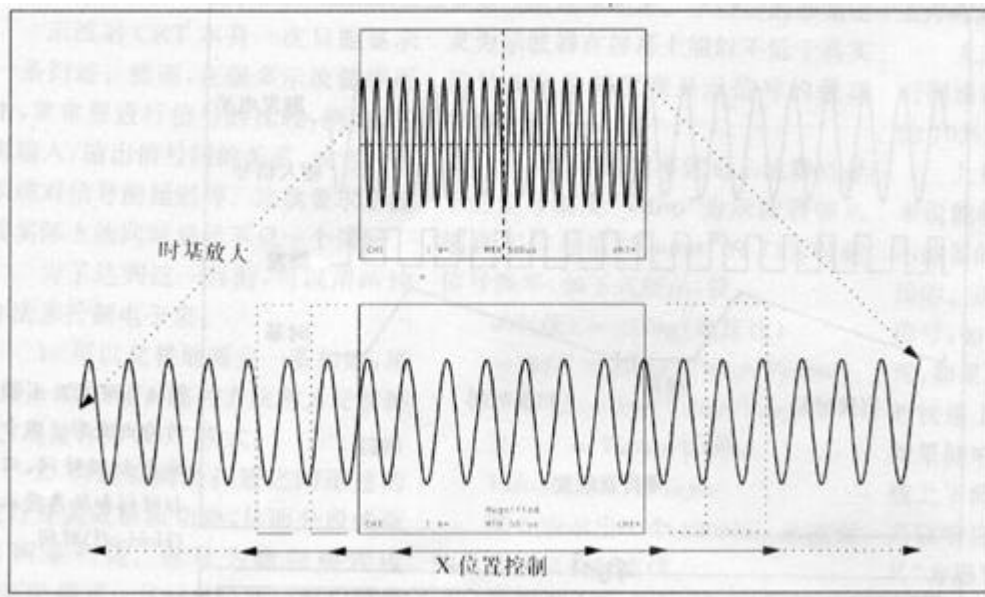


图 9 时基放大和 X 轴位置控制

双时基

在很多观察复杂信号波形的应用场合中，往往需要显示一个波形的一小部分，并使它占踞整个屏幕。这种情况的一个典型的例子是观察研究全部电视信号中某一选定的行的波形。在这类情况中，使用标准时基通过正常触发的方法是无能为力的。

这就是在现代示波器上采用双时基工作的原因。

在这个例子中，示波器的主时基 (MTB) 可由波形中的主触发事件，即全电视信号中的垂直同步信号来触发。MTB 扫迹的一部分显示得更亮一些，这称为加亮部分。在此加亮部分的起始点时刻，第二个时基，称为延迟时基或 DTB 开始扫描。这第二个时基可按自己的扫描速度来设置。并且扫描速度比主时基的扫描速度要快。主时基的起始点和加亮部分开始点之间的延迟时间是可调的。

我们甚至可以作到在选定的延迟时间结束时不启动 DTB 扫描，而只是在该时刻为 DTB 时基的触发电路作好触发准备。如果过一会儿再发生新的触发事件，DTB 扫描即将开始。

所以，使用双时基时，电子束将以两个时基的两种不同的速度交替的在屏幕上扫描。

让我们来看图 10。首先主时基以 500 μ s/格的速度运行，在屏幕上描绘出一个波形。在此扫描期间，

过了 2ms 即等于 4 格的时间以后，扫迹被加亮。这段延迟时间由延迟 1 控制来设定。波形上加亮部分的时间长度则由 DTB 扫描时间控制机构来高定，在我们的例子中现在为 $50\ \mu\text{s}$ /格当经过 2ms 的延迟时间后延迟时基进行扫描时，它只显示原来主时基扫迹的十分之一。但是这段原来主进基扫迹十分之一的波形段则在整个屏幕上显示出来。

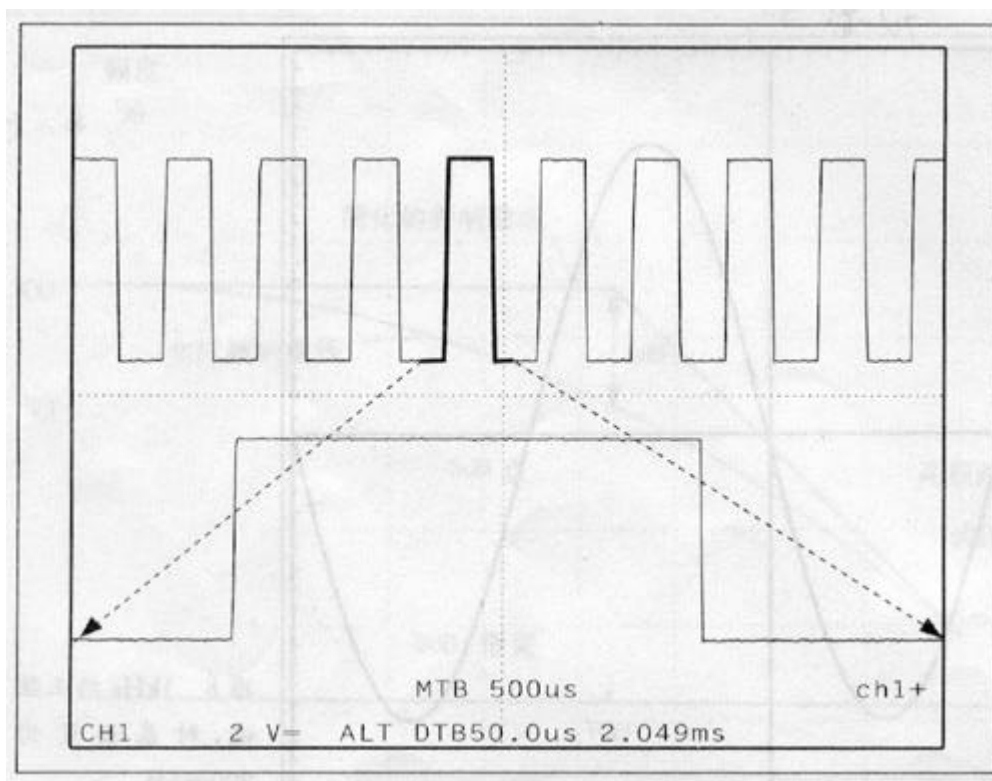


图 10 双时基工作 ($500\ \mu\text{s}$ /格及 $50\ \mu\text{s}$ 格, 4 格延迟)

1) 在老式的示波器上，延迟控制指的是延迟时间倍增器。边是一个带有刻度的多圈电位器。当扫迹的加亮部分在 MTB 上根据需要确定位置以后，其延迟即可由 DTB 时基速度和该电位器示出的刻度读数相乘而计算出来。由此延迟控制一词得名。

当我们改变延迟时间时，就改变了延迟时基扫描的起始点在主时基上的位置。而改变延迟时基扫描速度则改变在主时基上显示出来的波形段的长度。

当延迟时基已经设置好，并显示出欲观察的信号段时，我们可以把主时基关闭。这样可以使得延迟扫迹变得更亮。

典型双时基示波器的时基工作模式有：

—MTBI = 只用主时基

只用 MTB 工作时，示波器的性能和单时基示波器相同。

—MTB ± = 主时基加亮

这时示波器只显示主时基。但是扫迹上的一部分被加亮，以表示出 DTB 的起始位置及其扫描速度。

—MTB 加亮和 DTB

和 MTBI 相同，但也同时显示 DTB 扫描。

—DTB = 延迟时基。

只显示 DTB 扫描。

在本书的触发部分还会进一步讨论双时基的问题。

时基模式

时基电路有几种工作。对普通模拟示波器来说，工作模式有自动、正常或触发以及单次或单次捕捉等模式。

—正常模式

时基必须受到触发才能产生扫描。其规律非常简单，即“没有信号就没有扫描轨迹”。示波器在选定的触发源通道上必须有输入信号，并且该信号必须大到足以触发时基电路。如果没有输入信号，屏幕上就不会有扫描轨迹。

—自动模式

如果能在没有输入信号时也能看到扫描。这将会是很有用的。在没有输入信号以进行触发时，自动模式将使时基以低频率自由运行，从而在屏幕上产生扫描。这使得用户可以设置扫描的垂直位置，即如果信号仅为一直流电位的情况。

—单次模式

当接收到触发信号时进基将进行扫描，并且将只扫描一次。对于每次触发事件都必须使时基电路作好触发准备（arm）。不然的话，下面来的触发事件将不能启动时基扫描。对于不同的示波器，按动标有单次或复位的按钮就使得触发电路重新作好触发准备。为了避免在单次扫描工作时盲目猜测，现代示波器上可以用屏幕上显示出伏特数值或显示水平线的方式来显示出其触发电平值。

1.5 触发

我们已经看到在示波管上输入信号如何提供垂直偏转，时基如何给出水平偏转。但是我们如何保证在电子束扫过屏幕时每次都准确地扫过相同的路径呢？解决这个问题的关键在于触发电路。如果没有触发电路，你在屏幕上看到的将会是具有随机起始点的很多波形杂乱重叠的图象。而触发电路的作用就在于保证每次时基在屏幕的扫描的时候，时基扫描都从输入信号上的一上精确确定的点开始。这个精确的扫描起始点则由下述控制因素来决定。

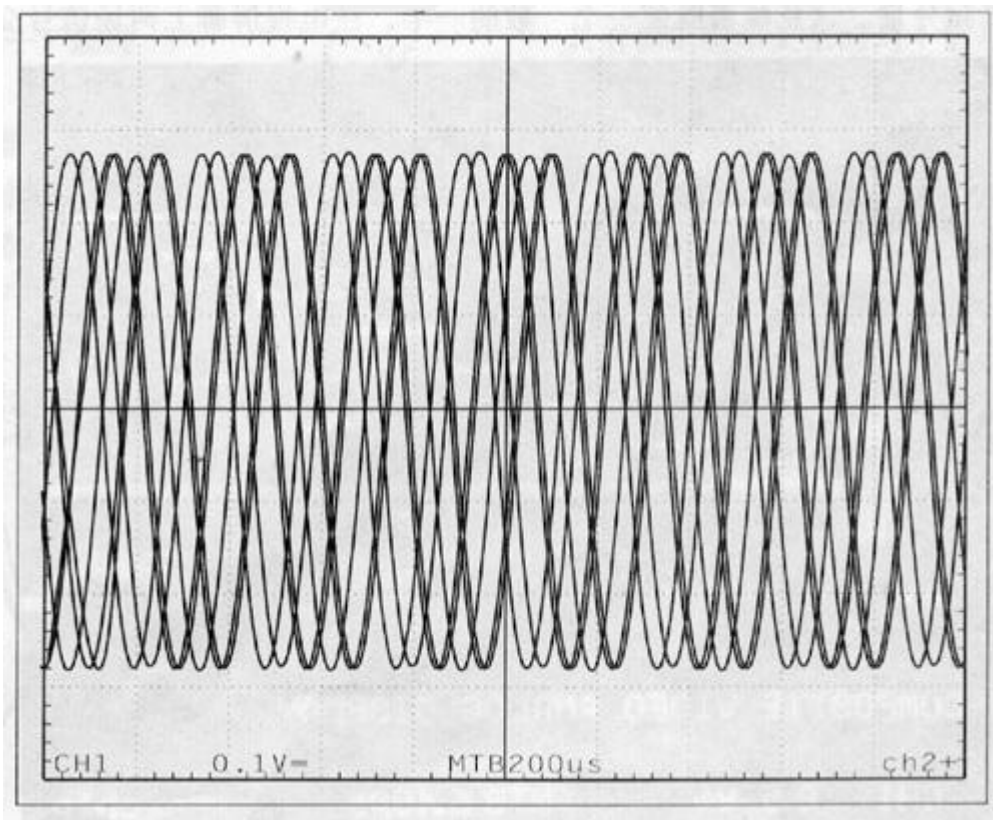


图 11 无触发的信号波形

触发源

它决定触发信号从哪里获得。在多数情况下，触发信号来自输入信号本身。所以如果只使用一个通道，那么触发源就设置为该通道。如果使用多个通道，那么触发源可以从这些通道中选取。

复合触发（Composite triggering）则是在显示不同的通道时轮流使用相应的通道触发。这对于显示

频率不相关的信号时是非常有用的。

如果示波器具有外部触发输入端 (Ext)，那么它上面连接的信号则可驱动触发电路使示波器触发。

如果要观测在电源频率或者源于电源频率系统的信号，那么电源触发功能可以提供电源触发的能力。这是观察与电源有关的干扰信号的好方法。

触发电平

触发电平控制机构设置选定触发源的信号欲使触发电路启动时基扫描所必须跨越的电压电平值。

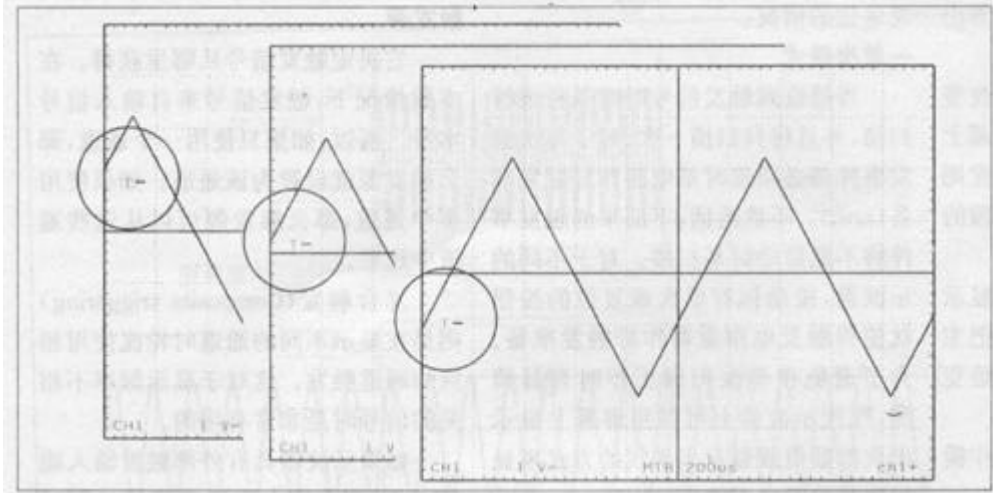


图 12 触发电平设置对显示波形的影响。

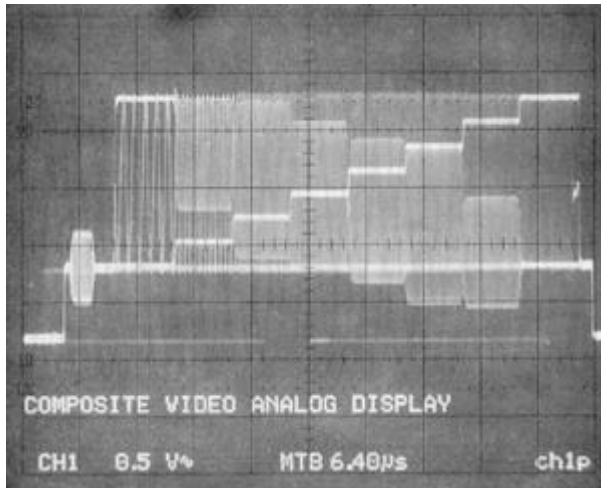


图 13 视频行信号

触发斜率

触发斜率控制机构决定触发发生于触发源信号的上升沿 ("正斜率") 或者下降沿 ("负斜率")

触发耦合

用以决定选定的触发源信号送往触发电路的耦合方式

—DC 耦合

触发源直接连到触发电路。

—AC 耦合

触发源通过一个串联的电容连到触发电路。

—峰 (-) 峰值电平 - (Level p (-) p)

将触发电平控制机构的控制范围设置成略小于触发源信号的峰 (-) 峰值。在这种模式下不可能将触发电平设置为超出输入信号的值，所以只要有信号示波器总能触发。

—HF 抑制

使触发源信号通过低通滤波器以抑制其高频分量。这意味着即使一个低频信号中包含很多高频噪音，我们仍能使其按低频信号触发。

—LF 抑制

使触发源信号通过一个高通滤波器以抑制其低频成分。这对于显示包含很多电源交流声的信号等情况是很有用的。

—TV 触发

在这种模式下触发电平控制不起作用。这时示波器使用视频信号中的同步脉冲作为触发信号。TV 触发有两种模式：帧触发 TVF 和行触发 TVL

—TVF

每一帧电视图象由两场组成。每一场则包含构成一个完整的帧所需行数的一半。在电视屏幕上两场信号交错显示以构成一帧的画面。采用这种技术减少了传送一个频道所需要的带宽并减小了画面的闪烁。在每一个场开始的时候都有一个特别的脉冲序列，称为帧同步脉冲。在 TVF 同步模式下，示波器就由帧同步脉冲来触发。现代示波器的触发控制可以区分第一场和第二场。

—TVL

每一场包括若干行。每一行都由一个行同步脉冲即行同步信号开始。示波器可以由每一个行同步脉冲来触发，这样描绘出的各个行的波形将会重叠在一起。使用帧触发和双时基我们可以观察某一特定行的波形。我们还可以使用如象 Fluke 公司的示波器所具有的称为视频行选择器的特殊的附件 PM8917 来观察某一特定的行。使用本书中用作示例的组合示波器时，我们可以使用示波器中内装的视频行计数器直接选定所需的行号（仅限于 PM3394A 系列示波器）。

触发隔离(Trigger Hold-off)

有些信号具有多个可能的触发点。这种情况的一个很好的例子是图 14 中的数字信号。该信号虽然在较长的时间周期内是重复的，但是在短时间内情况则不然。为了更详细的观察少数个别脉冲，必须使用快速的扫描时基。但是这样一来每次扫描时显示出来的信号波形段就是变化不一的。为了解决这个问题，我们采用了触发隔离功能，即在每次扫描之间加入延迟时间，使得扫描的每次触发总是从相同的信号沿开始。

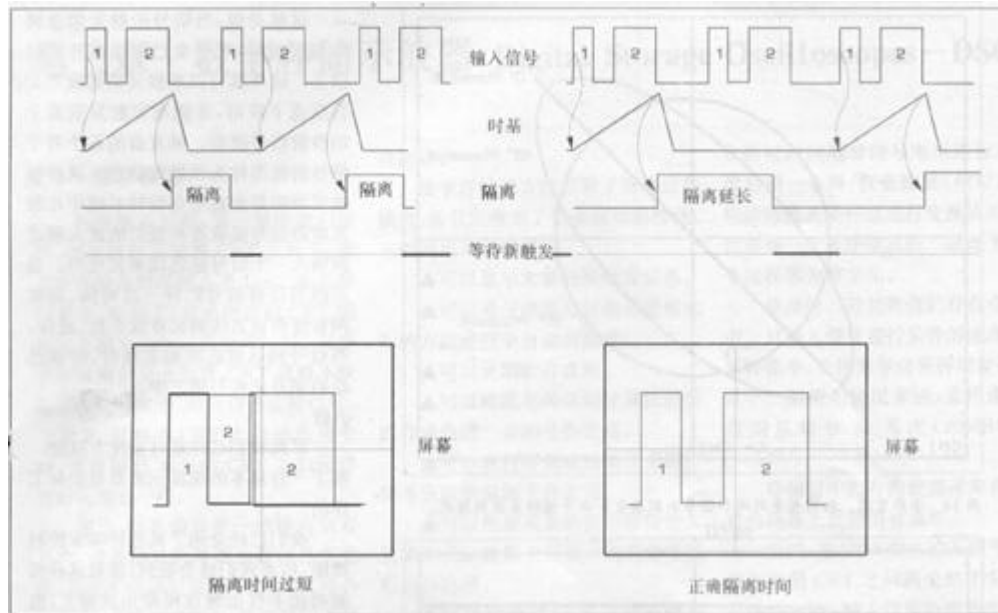


图 14 复杂脉冲的触发隔离应用

延迟时基触发

从本书前面的时基部分我们已经知道，在 MTB 扫描时基开始后经过一段延迟，DTB 开始扫描，即受到触发。此延迟时间从 MTB 触发点开始计算。经过这段时间延迟后，DTB 实际上是由延迟系统启动的。这种模式称为 DTB 启动。

和 MTB 类似，DTB 也可以按触发模式工作，示波器上设有相应的控制机构以设置 DTB 触发源、触发电平、触发率及耦合方式。这些控制机构与 MTBN 无关，自己独立工作。选择了这种设置方式后，当上述的延迟时间结束以后，DTB 就作好触发准备。而当输入信号上探测到新的触发事件时 DTB 才被触发开始扫描。

1.6 附加功能

X-Y 偏转

X-Y 偏转或 X-Y 模式是示波器的另一种显示方法。这种示波器将时基关闭，而用另一个与产生垂直偏转的信号不同的信号来使电子束在水平方向偏转。这就是说用两个信号在 X、Y 方向同时作用于电子束而描绘出波形，以便观察这两个信号的关系。

这种方法最常见的用处是观察两信号间的相位关系。图 15 的图形称为李萨育图。这些图形是当使用互相成谐波频率关系的两个信号分别作 X 和 Y 偏转信号时产生的。如果所使用的两个信号没有相关的频率关系，则不会获得稳定的图形显示。对于使用具有固定频率关系的两个信号的情况来说，从显示的图形中还可以得两个信号间的相位关系。作为一个例子，图 16 给出了由具有相同频率而相位差分别为 0° 、 45° 、 90° 的两个信号所形成的图形。

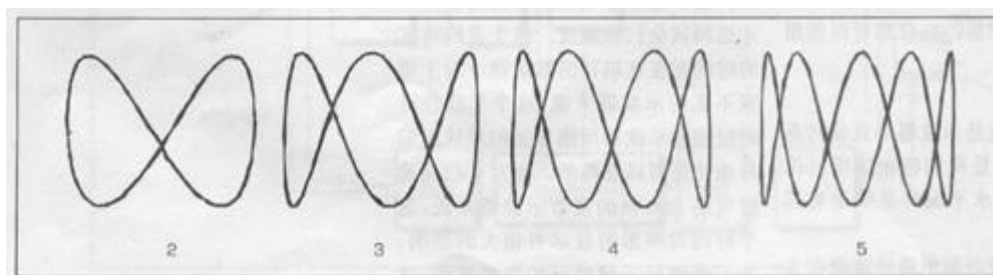


图 15 李萨育图，垂直偏转信号的频率为水平偏转信号频率的整倍数

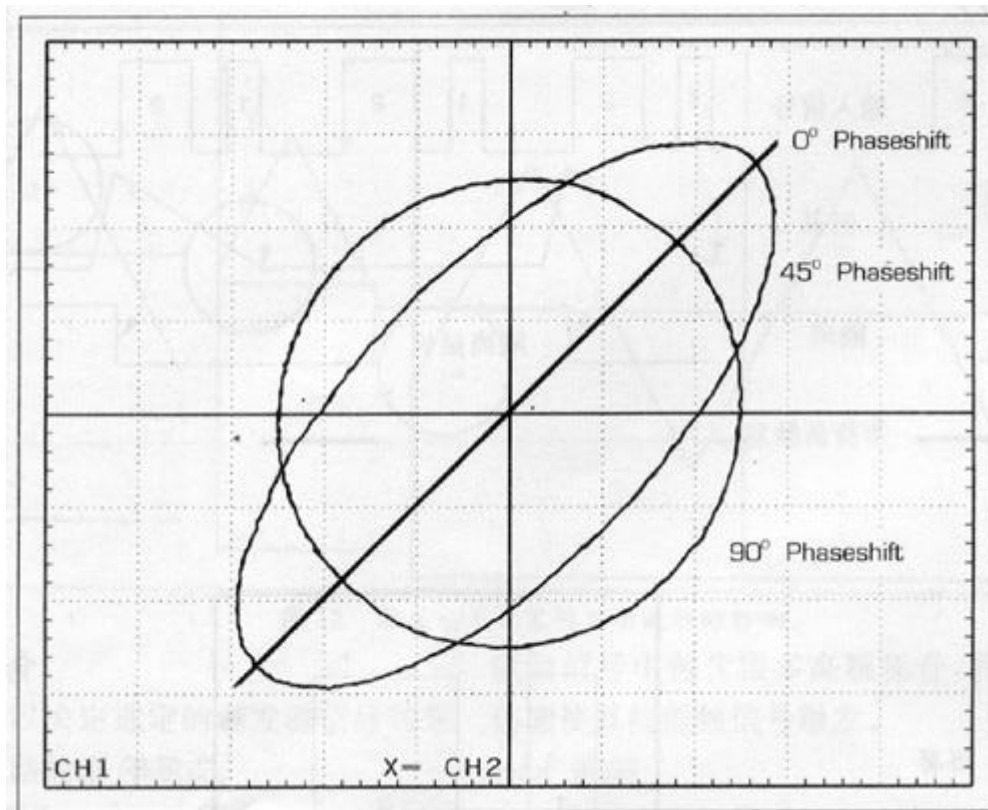


图 16 李萨育图。相同频率的两个信号加到垂直和水平偏转系统的情况。

X-Y 用适当的传感器把物理量变换成示波器能显示的信号，就可显示两个物理量，例如位移和压力之

间的关系。X - Y 显示模式还可以在电子学实验室用来进行元件测试工作，例如描绘二极管的特性曲线等。事实上，在任何涉及两个相互关联的物理量的场合都可以使用 X - Y 显示模式。

延迟线

虽然延迟线是示波器垂直偏转系统的一部分，但是我们将在这里讨论它，因为触发和水平偏转系统是对其有影响的因素。

无论触发和时基电路的速度有多快，要对一个有效的触发条件作出响应都需要一定时间。同时，时基电路在其扫描起始点也有一个小的非线性区。过了这个非线性区以后时基扫描才达到其全扫描速度。这个非线性区的时间宽度在纳秒的数量级。对于带宽不宽的示波器来说，这个非线性区的时间和示波器所能显示的最快的信号相比是可以忽略的。而对于扫描速度可达 2ns/格的宽带示波器来说，这个时间对波形的显示有很大的影响。为了能够显示纳秒级的波形事件，就必须在信号波形中的触发事件到达屏幕之前触发时基开始扫描。

这就是说，当信号的触发信息到达偏转板时，电子束已经提前开始扫描了。这样就可以观察完整的波形上升沿或下降沿，并能观察触发前若干纳秒的信号波形。触发前的这个若干纳秒的波形称为预触发信息。这种预触发功能是由在垂直偏转系统中在触发电路信号提取点和最后的放大器之间插入一个信号延迟线来实现的。延迟线可以将信号贮存一段时间，其时间长度和延迟线的长度成正比。这样，当信号到达延迟线的末端时，时基已经启动并正在扫描之中。

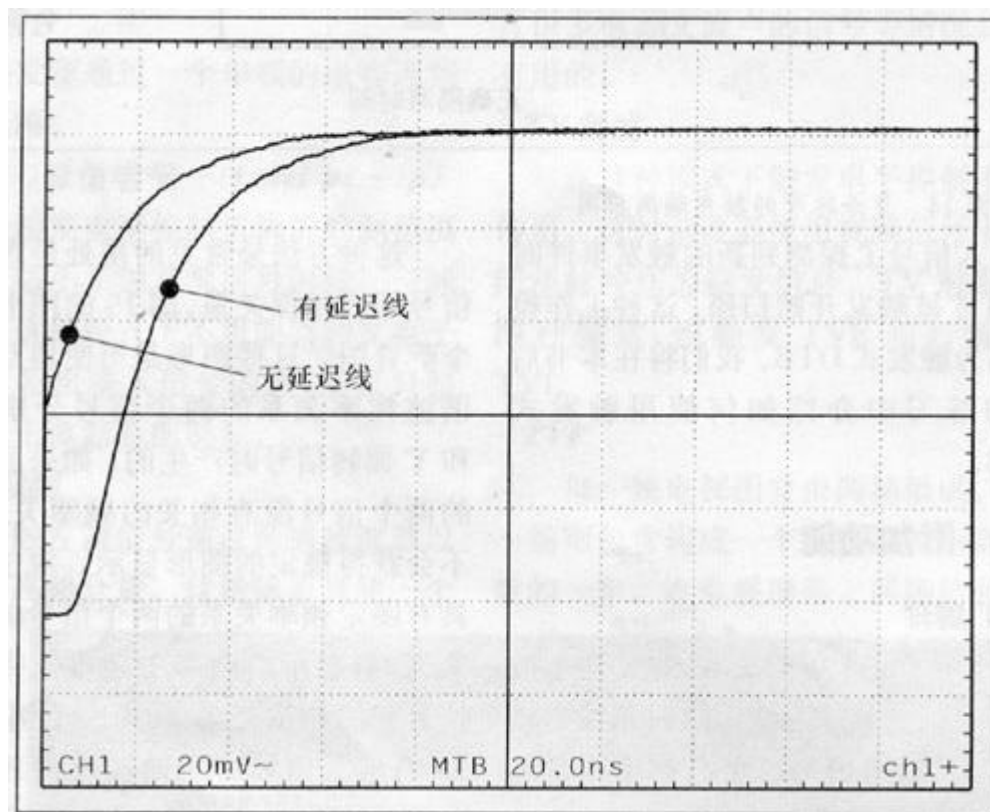


图 17 延迟线对显示快速上升的影响

小结

至此我们已经通过系统方框图说明了一台基本的模拟示波器是如何工作的。

我们已经介绍了其各种基本控制功能。后面我们将会看到，多数这些控制功能不仅出现在模拟示波器上，也出现在数字存储示波器上。

数字存储示波器之一

第二章 数字存储示波器 (Digital Storage oscilloscopes-DSO)

2.1 数字存储

你可能还记得，第一章中我们谈到，普通模拟示波器 CRT 上的 P31 荧光物质的余辉时间小于 1ms。在有些情况下，使用 P7 荧光物质的 CRT 能给出大约 300ms 的余辉时间。只要有信号照射荧光 CRT 就将不断显示信号波形。而当信号去掉以后使用 P31 材料的 CRT 上扫迹迅速变暗，而使用 P7 材料的 CRT 上扫迹停留时间稍长一些。

那么，如果信号在一秒钟内只有几次，或者信号的周期为数秒至分钟，甚至于信号只发生一次，那又将会怎么样呢？在这种情况下，使用我们上面介绍过的模拟示波器则几乎乃至完全不能观察这些信号。

因此我们需要找到在荧光物质上保持信号轨迹的方法。为达到这一目的而采用的一种老式方法是使用一种称为存储示波管的特殊 CRT。这种示波管的荧光物质后面装有栅网，通过在栅网上充积电荷的方法存贮电子束的路径。这种示波管价格很昂贵又比较脆弱，并且只能耐有限的时间内保持轨迹。

数字存储的方法克服了所有这些缺点，并且还带来了很多附加的特色，下面列出部分特点：

- 可以显示大量的预触发信息。
- 可通过使用光标和不使用光标的方法进行全自动的测量。
- 可以长期贮存波形。
- 可以在打印机或绘图仪上制作硬拷贝以供编制文件之用。
- 可以重新采集的波形和操作人员手工或示波器全自动采集的参考波形进行比较。
- 可以按通过/不通过的原则进行判断。
- 波形信息可用数学进行处理。

何谓数字存储

从字意上不难看出，所谓数字存储就是在示波器中以数字编码的形式来贮存信号。

当信号进入数字存储示波器，或称 DSO 以后，在信号到达 CRT 的偏转电路之前（图 18），示波器将按一定的时间间隔对信号电压进行采样。然后用一个模/数变换器（ADC）对这些瞬时值或采样值进行变换从而生成代表每一个采样电压的二进制字。这个过程称为数字化。

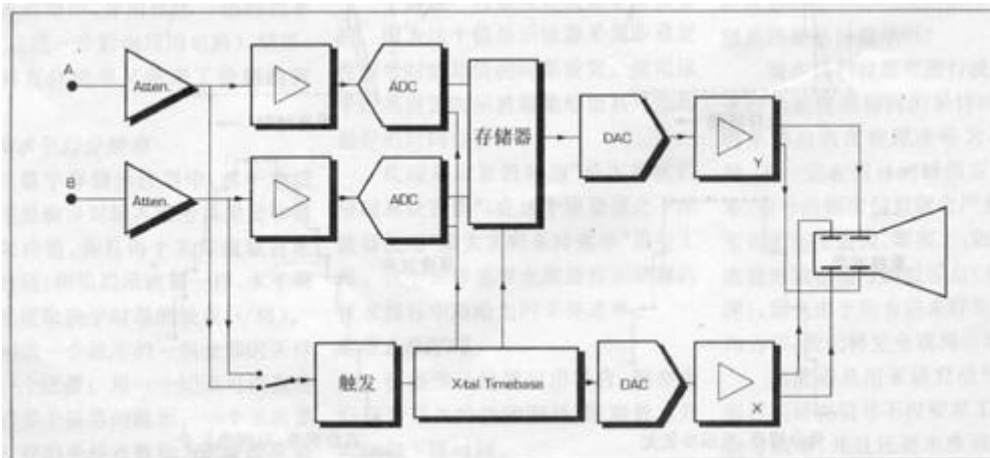


图 18 数字存储示波器的方框图

获得的二进制数值贮存在存储器中。对输入信号进行采样的速度称为采样速率。采样速率由采样时钟控制。对于一般使用情况来说，采样速率的范围从每秒 20 兆次（20MS/s）到 200MS/s。

存储器中贮存的数据用来在示波器的屏幕上重建信号波形。

所以，在 DSO 中的输入信号接头和示波器 CRT 之间的电路不只是仅有模拟电路。输入信号的波形在 CRT 上获得显示之前先要存贮到存储器中去我们在示波器屏幕上看到的波形总是由所采集到数据重建的波形，而不是输入连接端上所加信号的立即的、连接的波形显示。

采样和数字化

数字存储分两步来实现。第一步，获取输入电压的采样值。这是通过采样及保持电路来完成的，见图 19。

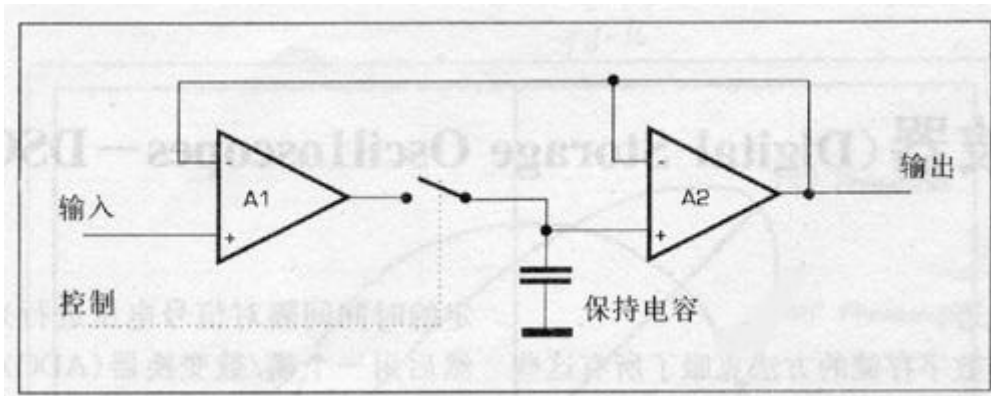


图 19 基本的采样保持电路

当开关 S 闭合时，输入放大器 A₁，通过开关 S 对保持电容进行充放电，而当开关 S 断开时保持电容上的电压就不再变化，缓冲放大器 A₂ 将此采样值送往模/数转换器 (ADC)，ADC 则测量此采样电压值，并用数字的“字”的形式表示出来。

模/数转换器围绕一组比较器而构成，见图 20，每一个比较器都检查输入采样电压是高于或低于其参考电压。如果高于其参考电压则该比较器的输出为有效；反之则输出为无效。

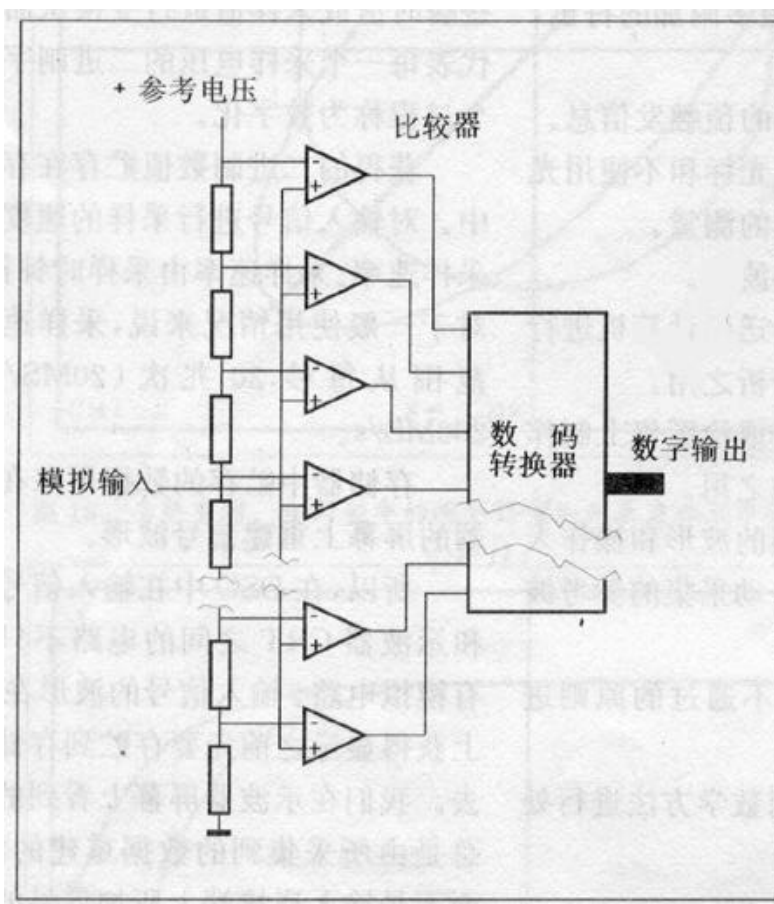


图 20 模数转换器基本电路

各个比较器的参考电压彼此略有不同，这此参考电压都是用一个电阻链从一个基准电压源而得到的。对于某一采样电压值来说，若干个比较器输出为有效，而其余的比较器输出为无效，接着 ADC 中的编码变换器就把该采样电压值变为一个“数字”，并将其送往数字存储器。

这种类型的 ADC 称为闪其速式 (flash) 模/数字变换器。因为它能在“一闪”间把一个模拟输入电压变换为一个“数字”。除此之外，还可以使用其它类型的模/数变换器。其模/数变换是由几步动作来完成的，但是其缺点是完成一个采样压的变

换所需时间较长。

模/数变换器和垂直分辨率

ADC 通过把采样电压和许多参考电压进行比较来确定采样电压的幅度。构成 ADC 所用的比较器越多，其电阻链越长，ADC 可以识别的电压层次也越多。这个特性称为垂直分辨率，垂直分辨率越高，则示波器上的波形中可以看到信号细节越小 (见图 21)。

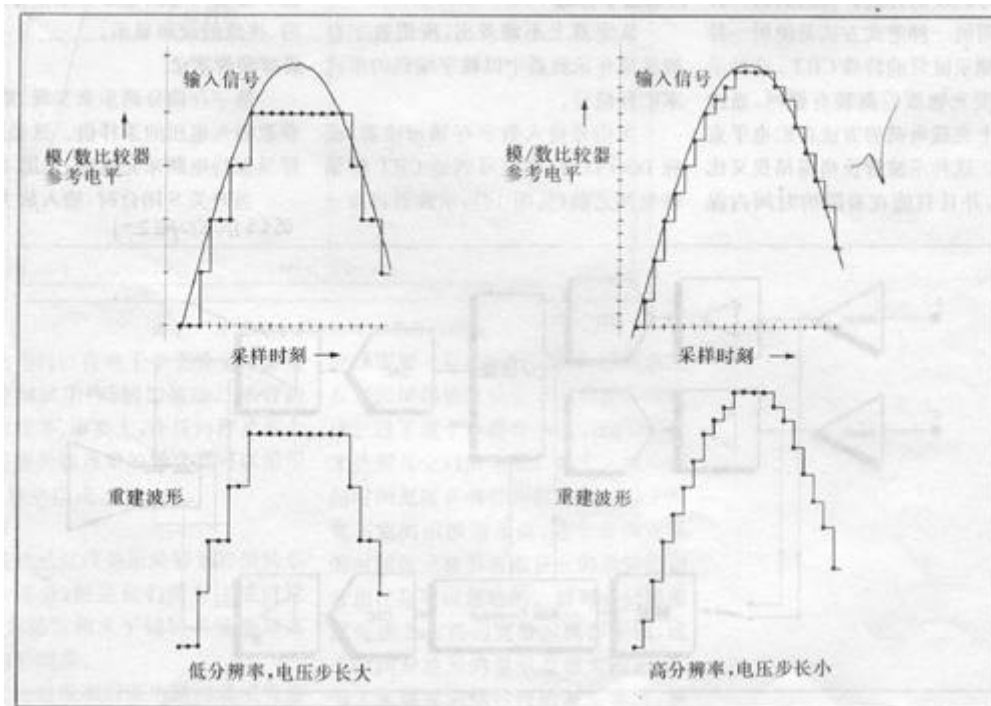


图 21 垂直分辨对显示波形的影响

垂直分辨率用比特来表示，垂直分辨率就是构成输出的字的总比特数（即数字输出字的长度大小）。

这样 ADC 可以识别并进行编码的电压层数可以用下式来计算：

$$\text{层数} = 2^{\text{比特数}}$$

多数示波器使用比特的模/数变换器，所以能够按 $2^8=256$ 个不同的电压层次来表示信号电平，这样就能够提供足够的细节以便研究信号和进行测量，在这种垂直分辨率下，可以显示的最小分辨率号步进值大约和 CRT 屏幕上光点的直径大小相同，代表采样电压值的一个 ADC 输出字包含 8 个比特，并称为一个字节。

在现实当中，增加垂直分辨率的限制因素之一是成本问题，在制造 ADC 时，输出字每多增加一个比特，就需要将所用的比较器数增加一倍并使用更大的编码变换器，这样一来就使得 ADC 电路在电路板上占据大一倍的芯片空间，并消耗多一倍的功率（这又将进一步影响周围电路）结果，增加垂直分辨率又带了价格的提高。

时基和水平的分辨率

在数字存储示波器中，水平系统的作用是确保对输入信号采集足够数量的采样值，并且每个采样值取自正确的时刻，和模拟示波器一样，水平偏转的速度取决于时基的设置（s/格）。

构成一个波形的组全部的采样叫作一个记录，用一个记录可以重建一个或多个屏莫的波形，一个示波器可以贮存的采样点数称为记录长度或采集长度，记录长度用字节或千字节来表示，1 千字节（1KB）等于 1024 个采样点。

通常，示波器沿着水平轴显示 512 采样点，为了便于使用，这些采样点以每格 50 个采样点的水平分辨率来进行显示，这就是说水平轴的长为 $512/50=10.24$ 格。

据此，两个采样之间的时间间隔可按下式计算：

$$\text{采样间隔} = \text{时基设置 (s/格)} / \text{采样点数}$$

若时基设置为 1ms/格 ，且生格有 50 个采样，则可以计算出采样间隔为： $\text{采样间隔} = 1\text{ms}/50 = 20\mu\text{s}$

采样速率是采样间隔的倒数： $\text{采样速率} = 1 / \text{采样间隔}$

通常示波器可以显示的采样点数是固定的，时基设置的改变是通过改变采样速率来实现的，因此一台特定的示波器所给出的采样速率只有在某一特定的时时设置之下才是有效的。在较低的时基设置之下，示波器使用的采样速率也比较低。

设有一台示波器，其最大采样速率为 100MS/s 那么示波器实际使用这一采样的速率的时基设置值应为

$$\begin{aligned} \text{时基设置值} &= 50 \text{ 样点} \times \text{采样间隔} \\ &= 50 / \text{采样速率} \\ &= 50 / (100 \times 10^6) \\ &= 500\text{ns/格} \end{aligned}$$

了解这一时基设置值是非常重要的，因为这个值是示波器采集非重复性信号时的最快的时基

设置，使用这个时基设置时示波器能给出其可能的最好的时间分辨率。

此时基设置值称为“最大单次扫描时基设置值”，在这个设置值之下示波器使用“最大实进采样速率”进行工作。这个采样速率也就是在示波器的技术指标中所给出的采样速率。

实用上升时间

在很多示波器应用场合，都要进行信号开关的测量，即测量上升时间和下降时间。

从第一章我们已经知道，示波器的上升时间决定了该示波器能够精密进行测量的最快瞬变我对于模拟示波器来说，上升时间特性。对于模拟示波器来说，上升时间特性完全取决于示波器的模拟电路。

如果 DSO，则示波器可以采集到的最快的瞬变特性不仅取决于其模拟电路，也取决于其时间分辨率。为了正确的进行上升时间的测量，必须在我们关心的信号边缘上采集到足够的细节信息，这就是说，在瞬变期间必须采集很多采样点。这个上升时间称为 DSO 的有用上升时间。并且其时间值是时基设置值的函数。

我们将在本书的练习部分（第六章）更详细的讨论上升时间测量的问题。

最大捕捉频率及香农(Shannon)采样准则

当人们最初探索将信号进行数字化的时候研究工作就已揭示，为了很好的恢复原来的信号，在进行信号数字化的时候就要求采样时钟的频率至少应为信号本身所包含的最高频率的两倍，这个要求通常称为香农采样定理。

然而，这项研究工作是针对通信应用领域而并非针对示波器为进行的，现在来看图 22。从图中看出。当使用两倍于信号频率的采样时钟时。信号频率确实可以恢复。使用恰当的波形重建装置我们就可得到和原始的波形十分相象的波形。但是问题真的是这样简单吗？

现在我们设想在进行波形的数字化时仍然使用相同的采样时钟，但是将采样点选在和原来略为不同的时刻，不定在信号的峰值点，这样一来，信号的幅度信息就会严重失误，甚至可能完全丢失，事实上。如果采样点准确地取在信号地过零零碎碎点（见图 22 下图）那么由于所有的采样取到的采值均为零零碎碎，我们将完全观测不到信号。

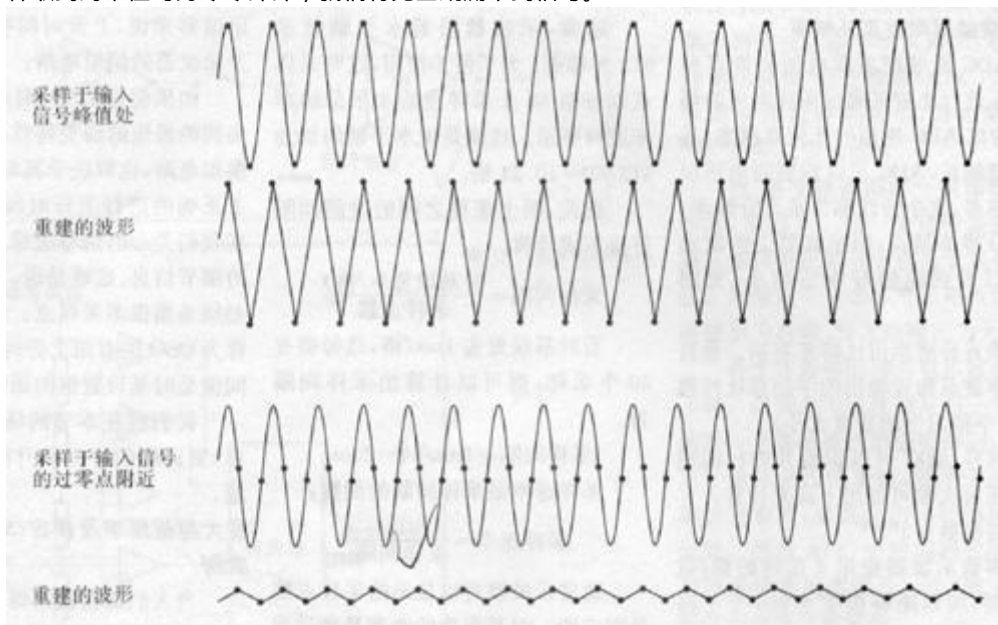


图 22 用两倍于信号频率的采样速率对正弦波进行采样。

分别示出采样点位于信号峰值点和采样点接近信号过零零碎碎点两种情况

示波器是用来研究信号的，为了更好的研究主事情不仅要求正确的表示信号频率并且还要求准确地表示信号波形的幅度。从图 23 可以看出，如果每个周期用三个采样点对信号进行采样。则再现的波形也会发生很大的失真。

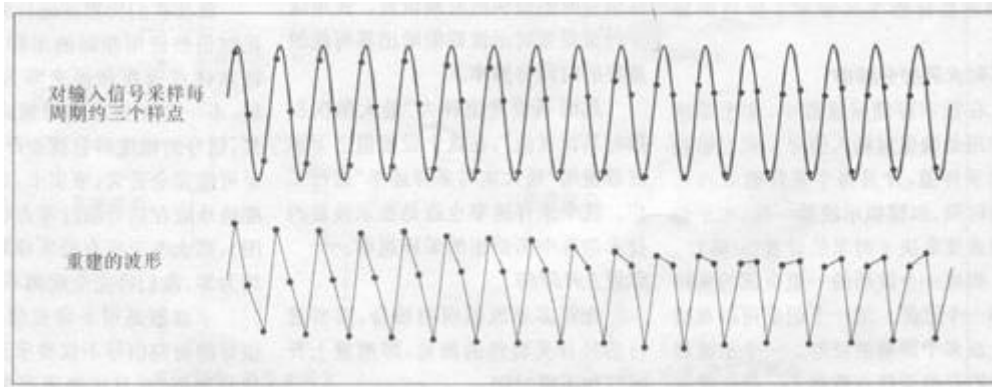


图 23 以每周期约三个采样点进行采样的信号波形

根据经验通常认为每周期最小要了十个采样点才能给出足够的信号细节。在有些情况下，对信号怕细节要求低一些，这时每周期取五个样点可能就足以给出有关信号的特性（见图 24）。这样，对于一个最大样率为 200Ms/s 的示波器来说，能够准确采集的最大信号频率即为 20 于 40MHz。在这种情况下，还可以使用特殊的显示系统来提高显示波开有的保真度。其方法是通过各个采样点画出最佳拟合的正弦曲线。这种方法称为正弦内插。

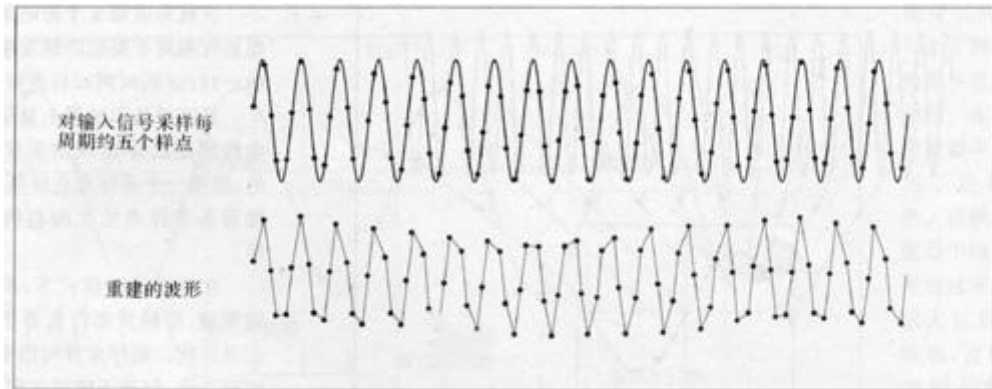


图 24 以每周期五个采样点进行采样的信号波形

假象 (Aliasing) 现象

我们已经知道，为了重建一个波形，至少需要一定数量的采样点，而且在任何情况下采样时钟的频率都必须比信号频率高五至十倍。

如果采样时钟频率比信号频率代，那么我们将会得到不可预料的结果。

让我来看一下图 25 所示的情况。如图所示，我们从信号波形的不同周期连续获到采样点，然而，每一个新的采样点的采集都发生在相对信号过零点的时间间隔略为长一点的时刻。如果我们现在来显示这些采样点并用它来重建信号波形，则显示出的仍然是一个正弦波。但是这个正弦波的频率和原来输入信号的频率完全不同。这种现象称为假象信号或者不正确频率的幻影信号。然而，它却可能表示出正确的波形形状，而且往往还具有正确的波度幅度。

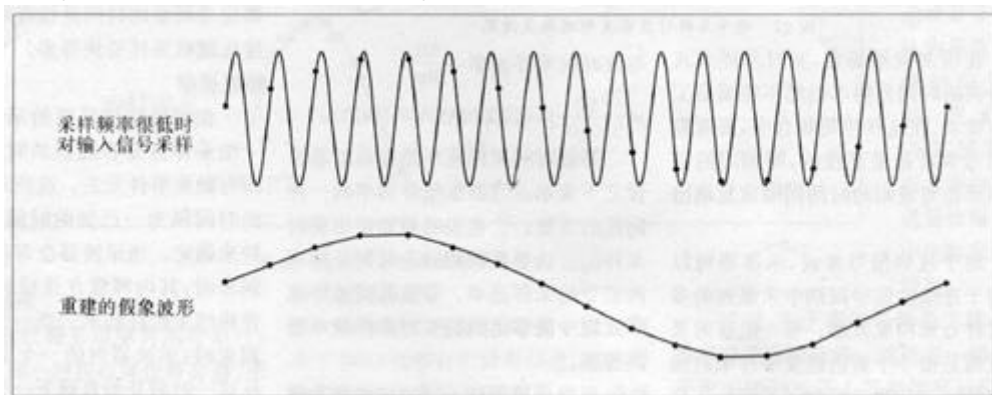


图 25 假象信号正弦波

多数现代示波器都调用有所谓自动设置功能，一旦输入信号连好以后，示波器就能自动地造反适当的偏转系数和时基设置值。这种自动设置功能也能帮助避免假象现象。

在有些情况下，信号的频率变化得非常快，以致于在某一时刻选定的时基设置是正确的，而在另一时刻（或者对于信号的另一部分而言）示波器又显示出假象信事情，这时可以用峰值检测

功能（见 2.2 节）来发现任何时刻信号的真实幅值。

为了获得这种复杂信号的起初波形，建议使用组合示波器的模拟方式来观察信号，归根结底，模拟方式是不可能发生假象现象的。

实理采样和等效时间采样

到现在为止我们所介绍的波形数字化方法称为实时采样。这时所有的采样点都是按照一个固定的次序来采集的。这个波形采样的次序和采样点在示波器屏幕上出现的次序是相同的。只要一个触发事件就可以启动全部的采集动作。

在很多多应有和场合，实时采样方式所提供的时间分辨率仍然不能满足工作的要求，在这些应用场合中，要观察的信号常常是重复性的，即相同的信号图形按有规则的时间间隔重复地出现。

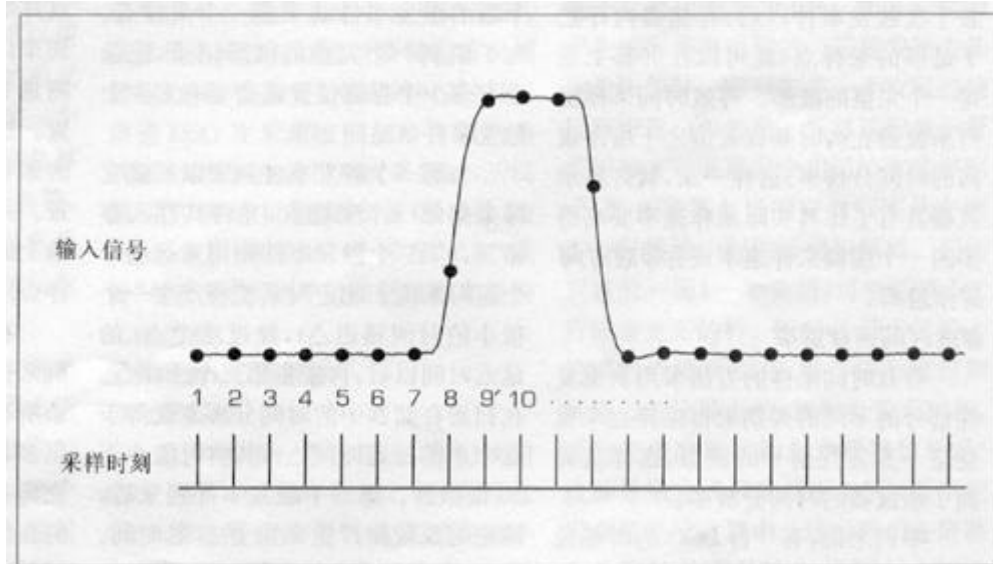


图 26 实时采样

对于这些信号来说，示波器可以从若干连续的信号周期中采集到的多组采样点来构成波形，第一组新的采样点都是由一个新的触发事件来启动采集的。这称为等效时间采样，在这种模式下，一个触发事件到来以后，示波器就采集信号波形的一部分，例如采集五个采样点并将它们存入存储器。另一个触发事件则用来采集另外的五个采样点，并将其存储在同一存储器的不同位置，如此进行下去经过若干次触发事件以后，存储器内存贮的足够的采样点，就可以在屏幕上重建一个完整的波形，等效时间采样使得示波器在高时基设置值之下给出很高的时间分辨率，这样一来，就好象示波器具有了比共实际要样速率要高得多的一个虚拟采样速率或称等效时间采样速率。

等效时间采样速率

等效时间采样的方法采用从重复性信号的不同周期取得采样点来重建这个重复性信号的波形，这样就提高了示波器的时间分辨率。

举例来说，有一台 DSO 的时基设置值为 5ns/格，每格显示 50 个采样点，则可以求出等效时间采样速率为：等效时间采样速率=50/5ns=50/5*10⁻⁹=10000MS/s

等效时间采样速率是在高进基设置之下表示示波器不平分辨率的一种间接的方法。它也表明假如使用实时采样的方法要获得相同的时间分辨率所需要的采样速率，等效时间采样速率比现今能够达到的实时采样速率要高得多。

可以采用两种不同的技术来实现等效时间采样，即顺序采样和随机采样。

顺序采样

采用顺序采样时，采样点的采集是按一个固定的次序进行的，即在屏幕以上左向右的进行采集。每到来一个新的触发事件就采集一个采样点。为了填满一个完整的波形记录，记录中有多少个存储位置就需要用多少个触发事件，（见图 27）。

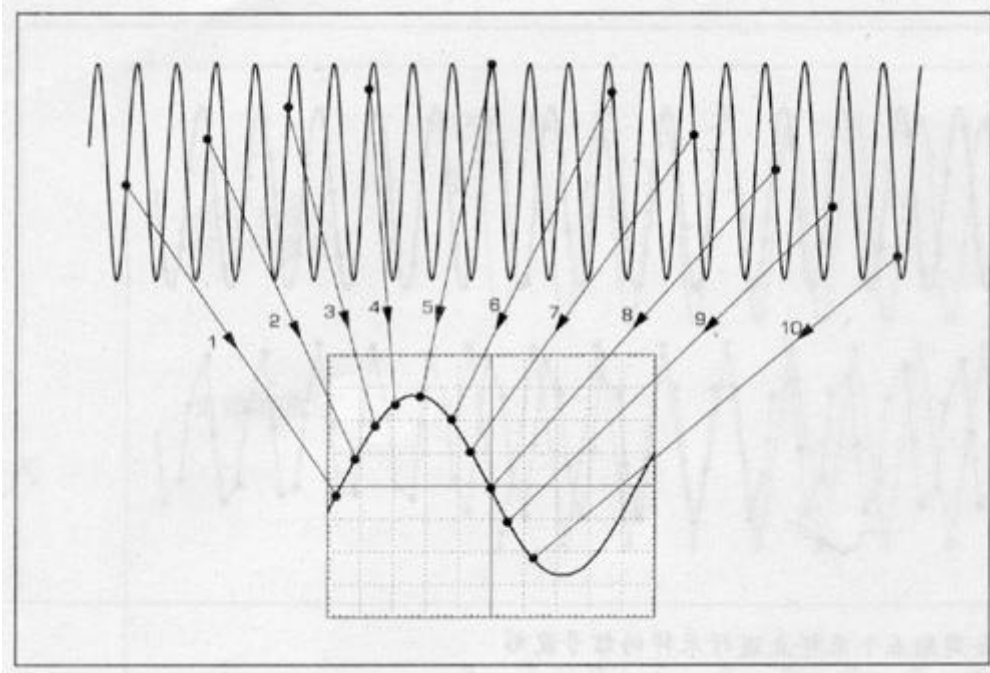


图 27 顺序采样时显示波形的构成情况

当第一个触发事件到来以后就立即采集第一个采样点,并将其存入存储器.第二个触发事件则用来超动一个定时系统.此定时系统将产生一个很小的时间延迟 t ,经过这个 t 的延迟时间以后,再采集第二个采样点,在扫迹存储器中的时间分辨率就等于这个小的延迟时间 t ,其值可能小于 50 微微秒.第三个触发事件到来后,该定时系统则产生 $2t$ 的延迟时间.此延迟时间后再采集第三个采样,并这样进行下去.

这就是说第 n 个新的采样点的采集是在相对于类似的触发事件延迟了 $(n-1)t$ 的时间以后进行的。

其结果是示波器上显示的波形是由按固定次序出现的采样点而构成的。即第一个采样点在屏幕的最左边,接着各采样点集资向右构成显示波形。

在顺序采样模式下,采集波形的周期数,即触发事件数等于存储器的记录长度。顺序采样可以实现后触发延迟功能,但是不能提供预触发信息。在快速时基设置之下,填满一个存储器记录所需的时间是很有限的。其速度比随机采产要快得多。

随机采样

在使用随机采样的示波器中,第一组采样点是在随机的时刻采集的,而与触发事件无关,这些采样点之间的时间隔为一已知的时间,由采样时钟来确定,当示波器在在等待触发事件到来时,其内部就在连续的进行采样并将结果贮存起来.当一个触发事件到来时示波器内的一个定时系统就从这一时刻开始直到下一个采点时刻进行时间测量.由于采样间隔是固定的,因此示波器就能够从此测量的时间计算出所有采集的采样点在存储器中的位置(见图 28)。当第一次采集的所有采样点存贮完毕以后,就开始采集一组新的采样点并等待新的触发事件,新触发事件到来以后,计时系统双进行新的时间测量并计算出这些新的采产点位置.这些新的采样点落在一次采集的采产点填充位置之间的未填充位置,用这种方法,波形扫迹就由在 X 轴上的随机位置上出现的一组采样点所构成。

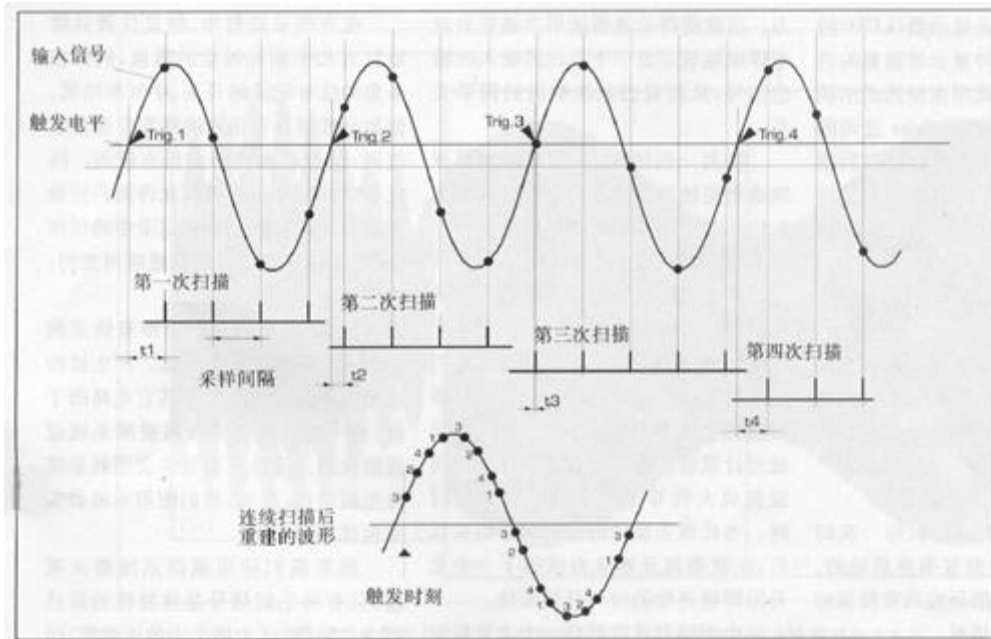


图 28 随机采样时扫迹的构成情况

在最快的时基设置之下,使用随机采样的方法填满一个完整的波形记录所花的时间要比顺序采样的方法多很多,因为这时是用统计的方法来填充所有的存储器位置。随机采样技术的优点在于可以提供预触发信息以及触发后信息。

电荷耦合器件

有些波器采用电荷耦合器件,或称 CCD 即一种模拟移位寄存器,来作模拟存储介质。电荷耦合器件可以看成是一个由很多小单元组成的阵列,每个单元都可以贮存一定的电荷,此电荷就代表队号的采样值,在时钟信号的命令控制下,这些单元可以按一个固定方向一个接一个的传递电荷,就象救火队员传递水桶一样。

在高速时钟控制下,CCD 可以用来移位存入模拟信息,当所有的单元都填满时,快速时钟停止,然后用一个较慢的时钟将 CCD 中的电荷信息移位取出送入一个标准的模/数变换器。这样模/数变抽象器就可以以低得多的速度工作。而波形采集的速度仅仅取决于 CCD 输入时钟的速度。

如果让采样时钟连续运行,而当触发事件到来时让时钟停止,那么所有 CCD 的单元中存贮的都是触发时刻这前采集的信息,也就是说,整个 CCD 中填充的都是预触发信息。这对于研究系统过程的起因是非常宝贵的。

单次捕捉应用

模拟示波器和 DSO 的主要区别在于 DSO 能够存贮波形信息。这使得 DSO 在研究低重复速率的现象或者研究完全不重复的现象即所谓单冲信号的工作中具有特别宝贵的价值。这种应用情况的例子包括诸如测量一个电系统的冲击电流、破坏性试验中只能进行一次测量,事实上,非重复性信号或单位信号在很多系统中都可以见到。虽然很多模拟示波器也常常有单次测量能力,即可以产生单次的进基扫描。但是 DSO 在采集波形细节方面则是首屈一指的。在进行单次采集时,示波器首先进行触发准备(armed for triggering)。通常用一个标有“单次”或者“单次复位”的传门控制机构来提供此项功能。

显示类型,光栅扫描与向量扫描

在本书第一章的开头,我们谈到 CRT 是示波器的核心。还谈到在 CRT 中电子束的偏听偏信转是通过在两个偏转板之间施加电压来实现的。这种偏转方法称为静电偏转。这时偏听偏信转系统可以从 DC 开始直到很宽的频率范围内使用。在模拟示波器中就采用了这种方法,在模拟示波器中输入信号经过衰减或放大以后,连续地、直接地加到偏转系统。因此,模拟示波器常常被认为是最可信赖的信号仪器;我们在 CRT 屏幕上所看到的波形就是被套测系统中实际发生的情况。

这时,电子束的偏转是由输入信号和时基来决定的。这两者一起把电子束偏转到屏幕上需要加亮的位置。这种类型的显示称为向量扫描显示。

在 DSO 中,在显示信号波形之前首先要采集波形并存入存储器。在基本些 DSO 中使用了另一种类型的 CRT,即和 PC 监视器及电视机所使用的相类侯 CRT。在这些 CRT 中电子束得由安装在 CRT 外面的线圈产生的磁场来偏转的。这种偏转方法称为磁偏转,它只能在一个有限的偏转频率范围内使用,所以为种显示管采用和 TV 屏幕完全相同的方法来驱动:即在屏幕上以固定的频率从左到右一行紧挨一行的车出扫描线。扫守完整的一屏(一个全场)可能需要 500 行或者更多的行。DSO 计算出屏幕上的哪些点需要加亮,当扫描系统扫到屏幕上的这种点时,就使电子束加亮。这种显示方式只能用于 DSO,而不能用在模拟示波器中。这时我们在屏幕上看到的并不是输

入信号本身的波形，而是使用早些时刻采集的表示输入信号的数据在屏幕上重建的波形。

近年来使用液晶显示 (LCD) 的 DSO 已经问世，这种显示器需要的功率比 CRT 要小，因此用在便携式示波器上极为理想。下面在 Fluke 公司的示波表 (ScopeMeter) 中我们会看到很好的应用实例。由于 LCD 显示器功耗很低，所以一组小型的电池就可以供仪器工作几个小时。

2.2 DSO 的功能和控制机构

DSO 有许多新的特性，这就使得 DSO 有许多模拟示波器没有的控制机构，下面我们将介绍若干最常见的控制机构。

预触发和后触发

在第一章中我们谈到，每次时基扫描都是由一个触发事件启动的。这样一来我们就只通用性研究观察触发时刻以后的信号变化情况。

在很多应用场合，我们感兴趣的波形部分并不紧跟在引起稳定触发的信号部位的后面，而是在触发以后一段时间，或者甚至可能在触发这前。

例如，当一个半导体器件被打开时，其输出信号的幅度可能很大，我们可以用它来触发示波器，但是，如果我们要研究该半导体器件开始导通的很小的输入信号时，我们就会发现。这个信号太小因而不能准确的触发示波器。这就要求示波器具有所谓的预触发观察能力：即由一个信号（这里指那个大的输出信号）来触发示波器，而示波器显示触发时刻之前的信号的能力，这就使得示波器能用多通道的波形详细地显示出一个系统的输入和输出信号，从而看出系统响应的因果关系。

在另一些情况下，你可能想要详细地研究触发事件之后一段时间发生的信号有关部分。例如在研究一个方波的抖动的大小，就可以使用一台具有后触发延迟或后触发观察能力的示波器。这时可以使用方波的一个沿来触发示波器，而把时基设置成很高的速度以显示抖动，其做法是：在示波器探测到触发事件时，启动一个后触发延迟计数器。将此计数器的计数时间设置成大约等于一个信号周期的时间。当此预先设计的定时时间结束以后，示波器就开始从方波的下一个上升沿好将开始的时刻开始采集。

由于延迟计数器是一个非常稳定的石英晶体控制的数字时钟，它与被测信号无关、独立工作，所以被没方波信号的抖动就会表现为示波器上采集到的上升沿位置的不稳定性。也就是说在各次采集过程中，方波的上升沿将会在相对于触发事件卡拉奇不同时刻（即屏幕上的不同位置）出现。

触发位置

具有预触发或后触发延迟能力的示波器必须具有某种方法来控制延迟时间的大小，这可以用触发位置控制机构来完成。这个控制机构可以舍不得触发位置在屏幕上或者在采集记录中移动。

在有些示波器中，触发位置只能设置为几个预先规定的数值，例如在采集的信号记录的开关、中间和结尾。但如示波器具有很宽的触发位置控制范围，使用起来将会是很方便的。因此 PM3394A 示波器就允许用户将触发时刻设置在整个采集记录中的任何位置，并且触发位置还是连续可变的。

毛刺捕捉

图 29 所示的是一个带有快速的毛刺或尖峰的失真正弦波。产生这种波形的原因可能是由于其它电路的干扰，也可能是由于连线离被测系统过近的缘故。这些毛刺常常会引起系统发生误动作。那么，我们能利用示波器来发现这些毛刺吗？

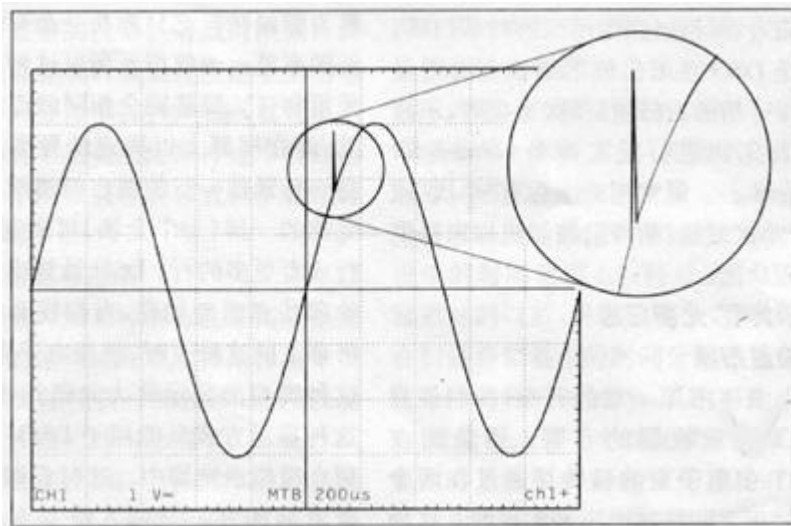


图 29 叠加了毛刺的正弦波

如果我们使用模拟示波器来观察，只有当毛刺信号是重复性的并且和主信号（即这个例子中的正弦波）同步时，我们才能看到毛刺信号。或者，如果我们的运气好，出现了很多的毛刺的朦胧形象。

由于毛刺源于其它的电路系统，所以这些毛刺通常只是偶尔发生，并且和主信号不同步。

那么，如果 DSO，我们能发能这些毛刺吗？未必，首先我们必须确保示波器已准备好去捕捉这些快速毛刺。

我们知道，DSO 在特定时刻对输入信号进行采样，如本章开头所述，采样点之间的时间间隔取决于时基设置。如果毛刺的宽度比示波器的时间分辨率还要小，那么能否捕捉到毛刺就看运气如何了。为了能够捕捉到毛，我们的办法就是峰值检测或毛刺捕捉。

彩峰值检测的方法时，示波器将对信号波形的幅度连续地进行监测，并由正负峰值检测器将信号的峰值幅度暂地存贮起来。当示波器要显示采样点的时候，示波器就将正或负峰值检测器保存的峰值进行数字化，并将该峰值检测器清零。这样在示波器上用检测到的信号的正，负峰值代替了原来的采样点数值。因此，峰值检测的方法能够帮助我们发现由于使用的采样速率过低而丢失的信号或者由于假象而引起失真的信号。峰值检测的方法对于捕捉调制信号，例如图 30 所示的 AM 波形，也是非常有用的。为了显示这类信号，必须将示波器的时基设置得和调制信号在频率相配合，而在这种信号中，调制信号的频率通常在音频范围但载波频率通常为 455KHz 或者更高。在这种情况下，不使用行刺捕捉功能，就不能正确地采集信号，而使用了毛刺捕捉功能就可以看到类似模拟示波器所显示的波形。

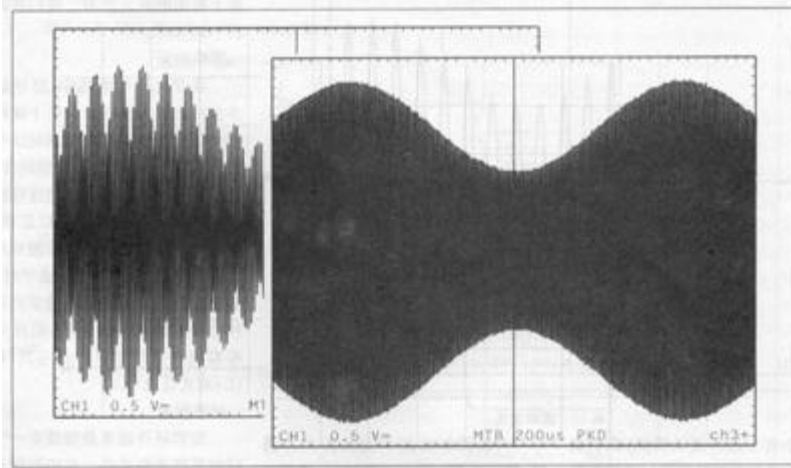


图 30 使用和不使用峰值检测模式两种情况下捕捉到 AM 调制信号波形

示波器上的峰值检测功能是通过硬件（模拟）峰值检测器的方法或者快速采样的方法来实现的，模拟峰值检测器是一个专门的硬件电路，它以电容上电压的形式存贮信号的峰值，这种缺点是速度比较慢，它通常只能存贮宽度大于几个微秒且具有相当幅度的毛刺。

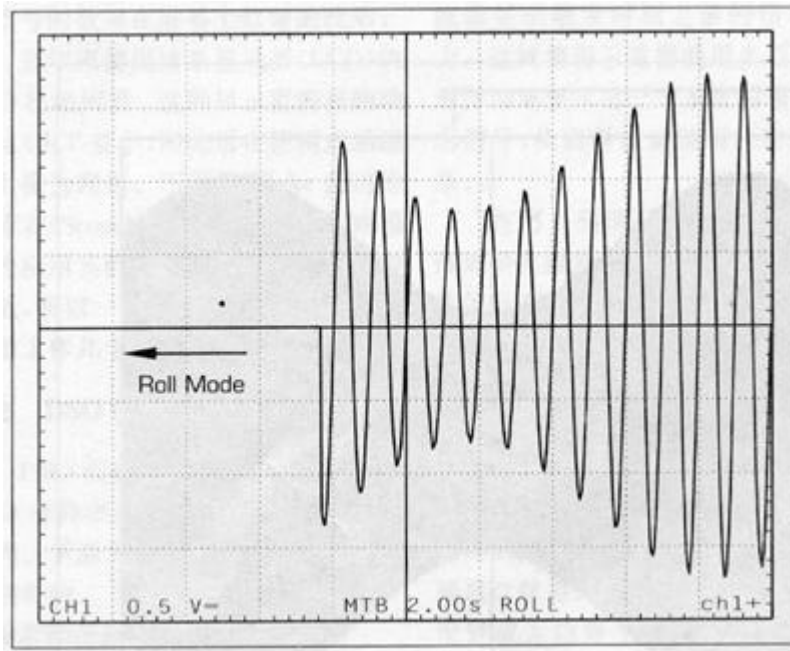
数字式峰值检测器围绕 ADC 而构成，这时 ADC 将以可能的最高采样速率连续对信号进行采样，然后将峰值存贮在一个专用的存储器中，当要显示采样点的值时，贮存的峰值就作为该时刻的采样值来使用。数字式峰值检测器的优点是其速度和数字化过程的速度一样快，本书中用作示例的示波器 PM3394A 就能够在很低的时基速率设置下，如 1 秒/格，以正确的幅度采集到窄至 5ns 的毛刺。

滚动模式

至此，我们已经知道 DSO 能用和模拟示波器类似的方式显示波形，从触发事件开始，标波器采集信号的采样点，并将其存于采集在存储器中的连续位置中。一旦新的数据已将存储器的最后一个单元填满以后，采集过程既告结束，示波器就将采集存储器中的波形数据复制到显示存储器中去在此时期示波器不再采集新的数据，就像模拟示波器在时基复位期间不能显示波形扫迹一样。

对于低频应用的场合，信号的变化周期可达分钟量级而远不只是微秒的量级，这时 DSO 可以应用于一种全连续的显示方式：滚动模式。而这种背后的极样点显示于屏幕的右面，屏幕上已有的波形则向左滚动（见图 31）。老的采样点一旦移动到屏幕的左面即行消失。这样一来示波器屏幕上显示的波形总是反映出最新信号对时间变化的情况。

图 31 滚动模式



由于有了这种滚动模式，我们就可以用示波器来代替图表记录仪来显示慢变化的现象，诸如化学过程、电池的充放电周期或温度对系统性能的影响等。

显示放大

在模拟示波器中，可以将进基放大 10 倍，以便详细观察信号的事情的细节。在 DSO 中显示的波形可以按大小不同的步进值放大，通常进基放大按 2 的幂次倍数放大，即按 x2, x4, x8, x16, 等倍数放大。

一旦波形已经采集并存入存储器，例如单次波形采集的情况，使用垂直放大功能代替提高垂直灵敏度来放大波形也是很方便的。

特殊的触发方式

DSO 的存贮功能使它成为捕捉十分罕见、甚至于只发生一次的信号，例如单次事件或者系统闭锁等情况的极为有用的工具。为捕捉这些信号就要求示波器具有各种各样的触发方式去探测这些特殊的条件，以便启动波形采集。这其实这一目的，只有边缘触发方式往往是不够的，为此又开发了若干附加的触发能力。我们在此讨论其中的几种。

—图形触发

在逻辑硬件电路各，信号是由许多并行的线来传送的，整个硬件的瞬时状态则是由在给定时刻时这些线上的状态来表示的。为了识别硬件状态，就需要有一种仪器来检测这些线的状态。使用图形触发功能可以监视多条，例如 4 条线的状态，当探测到用户规定的图形（例如 HHLH）或字时，示波器就被触发。由于图形触发的设计是和数字逻辑配合使用的，因此，可以用来监视各条线的状态是为高（H）、低（L）、或者任意（X）。

—状态触发

逻辑硬件通常是围绕着一个中央时钟系统来构成的。其中的所有硬件都在时钟系统的指令之下来存贮其输入信号，因此我们的测试仪器也应依据同样的原则工作。当使用状态触发时。输入信号怕自理方法和图形触发时一样，只不过一在要把其中的一个输入信号当作时钟信号。如果示波器在时钟上升沿或下降沿时存贮的其余三条线的输入字和用户规定的触发定一致，则示波器新触发。

—毛刺触发

使用毛刺触发时，能引起系统误动作的窄脉冲，如毛刺、类峰等可以引起示波器触发。

如果一个系统是设计在 DC 到某一频率信号下工作的，那么由于线路走线可能会使系统引入比此范围更高的频率信号，例如来自其它线路的干扰或吸收大功率的瞬变信号等，可以把示波器设置为当被测脉冲的宽度小于允许的最高频率信号之周期的一半时触发。如果我们认为，在正常工作的情况下，这样窄的脉冲是不会发生的。

毛刺触发的另一个应用场合是逻辑硬件，这时硬件电路的逻辑状态都是和系统时钟同步变化的。结果，这种硬件电路中的脉冲宽度都应为系统时钟周期的整倍数。在这种系统中，故障的发生常常和脉冲宽度异常有关，为了探测故障，我们现在可以把示波器的角发条件设置为在脉冲宽小于一个时钟周期时触发。

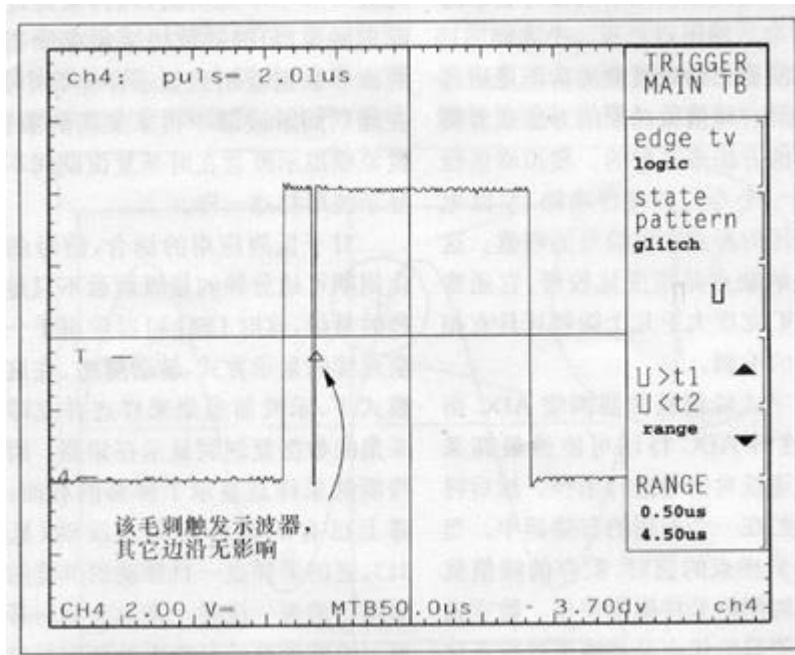


图 32 毛刺触发

—时间限定触发

这种触发方式使得示波器在满足一定的时间长度要求的条件下，可以按上述任何一种方式触发。这种时间长度要求可以是要注意某一最小时间长度（如果时间长于某值则为有效），要求某一最大时间长度或者要求某一个从最小值到最大值的时间范围。时间限定触发对于按照系统不能满足正常工作条件来触发以对系统进行检测时非常形

的。还可有用这种触发方式来探测连续工作信号发生的中断现象。

—事件延迟

这种触发方式使示波器多个信号的情况来触发，而其中的一个入号，用来延迟采集的超始点。触发周期是由一个主信号，通常为多个信号通道之一启动的。接收到主触发信号以后，示波器就开始检查第二个信号（这也可能还是那个主触发信号，但取不同的电平），并对这个信号上的触发事件进行计数，当达到预先规定的触发事件数时，示波器就开始采集波形，见图 33。

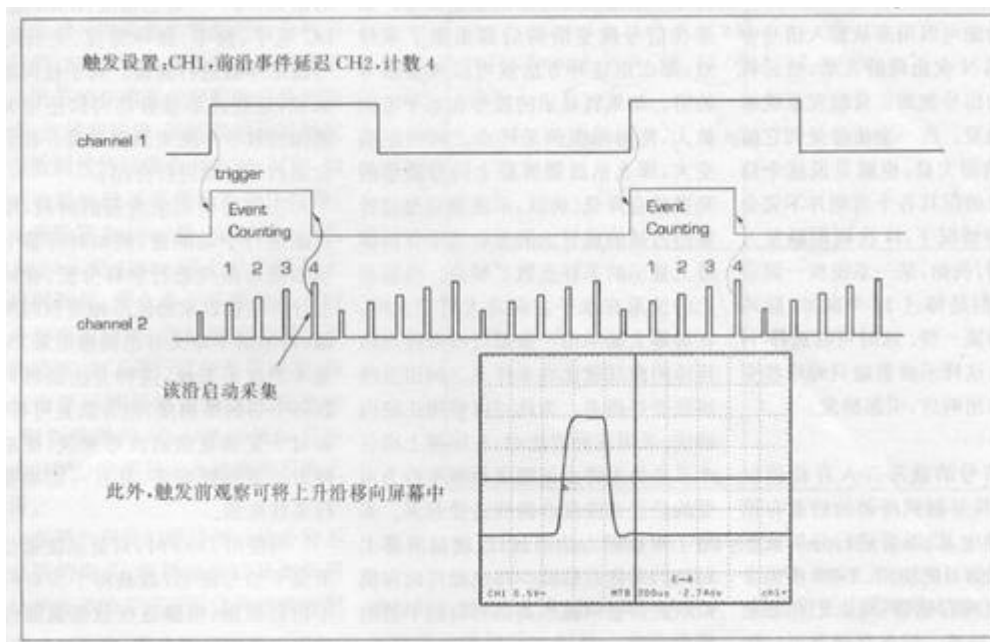
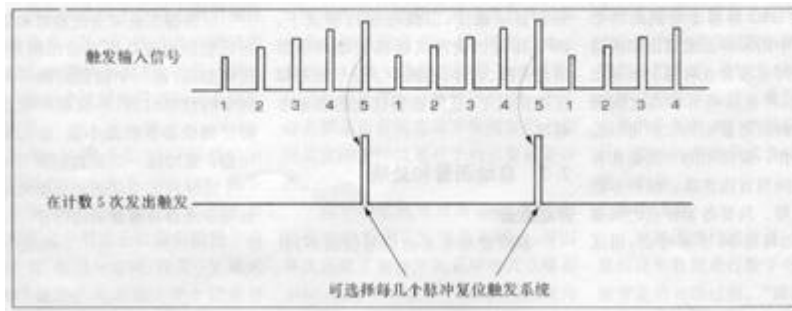


图 33 事件延迟

典型应用实例为串行数据线、控制系统及机械环境等。

—N 次周期

这种功能可以用来从输入信号中选出每个第 N 次出现的波形，然后将这种选出的信号加到正常触发系统来使示波器触发。当一个信号受到它的谐波的影响而失真，也就是说这个信号是周期性的但其各个周期并不完全相同，这种情况下，N 次周期触发方式特别有用。例如，其一系统按一固定频率运行，但是每过



12 个脉冲, 脉冲宽度就变得宽一些。这时可以选择“N=周期=12”, 这样示波器就只对这些变宽的脉冲作出响应, 引起触发。

图 34 N 次周期触发
波形存贮

被测信号的波形存入存储器以后, 可以将其复制到所谓的后备存储器或寄存器中, 供以后进行分析或作参考及比较的目的使用, DSO 中通常装有多组这种存储器可以按扫迹存储器的方式设置, 这时示波器多通道采集的每一条扫迹将分别存贮, 也可将后备存储器设置为记录存储器, 这时示波器将多通道采集所有数据同时存贮了所有有关的时间信息。

示波器配备大量的后备存储器对于在现场工作的工程师是很方便的。这时工程师可以把现场测量期间所有有关的波形都存贮下来, 以便以后生成硬拷贝, 或将这些波形传往计算机再作进一步的分析。

显示算法, 内插和点连接

我们在 DSO 屏幕上看到的波形是由存储器中的采样点重建出来的信号波形。这时示波器在屏幕上显示出这些采样点, 并在这些采样点之间画出连线, 这种波形显示的工作可以按几种方法来作, 最简单的方法是在各个采样点之间用直线连接, 这种称为线性内插, 只要各采样点之间间隔得很近, 例如每格 50 个采样点, 用这种方法就能获得足够的重建波形, 如果在信号跳变沿前后都采集了采样点, 那么用这种方法就可以观察信号的沿, 如果将显示的波形在水平方向放大, 使得采集的采样点之间的距离变大, 那么示波器屏幕上信号波形的亮度就会降低, 所以, 示波器是通过计算出内插的或显示的采样值来保持屏幕上显示的采样点数足够高, 当屏幕上的波形在水平方向放大得很大时, 在屏幕上显示出一条通过各采样点的连续的曲线就比在采样点之间用直线连接要好得多, 为此可用使用正弦内插法。采用这种方法时, 在屏幕上将各个采集的采样点用幅度和频率均为可变的最佳正弦拟合曲线连接起来。采用了内插的方法以后, 即使当屏幕上每格的采样点数较少时也能得到和模拟示波器显示波形类似的自然平滑的重建波形。

为了察看真正的采样点, 示波器通常设有点显示方式, 在此方式之下, 不使用任何内插方法。选择这种方式以后, 我们在屏幕上只能看到用离散亮点表示采样点, 而在这些点之间没有任何连线。

窗口模式

当我们进行信号比较时, 例如将一新采集的波形和以前存贮的信号波形比较时, 把这两个波形扫迹显示在示波器屏幕的不同区域会很有用处的。为此, 示波器又设有窗口模式, 这个模式将示波器屏幕分成两个或多个区域以显示不同的扫迹, 由于减小了显示波形幅度的情况下, 还能获得优化的测量准确度,

2.3 自动测量和处理

自动测量

示波器用来显示信号的波形, 并对诸如: 峰 — 峰值幅度, RMS 幅度、DC 电平、频率、脉冲宽度、上升时间等波形参数进行测量。对于任何波形来说, 这些波表参数都可以使用大家熟知的数学方法来测量计算, 我们将在第六章对此进行介绍。

在使用模拟示波器的时候, 用户只能进行手动测量, 例如对屏幕上显示的波形曲线进行解释分析、在屏幕上计算格数以求出波形幅度和时间间隔, 殖民地用数学定义算出测量结果, 对于复杂的波形来说, 这种方法虽然只能获得中等的准确度, 但方法是可行的。而对于更加复杂的波形来说, 使用这方法要困难得多, 并且可能需要进行某些推测。

当使用 DSO 时, 只要示波器已经采集了信号波形, 就获得了所有的波形信息数据, 根据这些数据就能自动计算出要测量的参数, 得到更加准确, 可靠的结果, 整个过程极为迅速, 简便。

多数 DSO 都能对一个或多个通道上的输入信号同时进行两个或几个参数的测量, 因此可以用来进行信号间的比较, 例如比较一个放大器或衰减器的输入和输出信号。

另外，如果示波器对存贮的波形和新采集的波形都能进行参数测量，那将会是非常方便的。这就使我们能对实际信号的性能和标准信号的性能进行比较，也使我们能够观察时间对信号的响应变化或者对系统修改后的变化影响。

示波器上最完全的参数测量功能还应包括用统计形式给出测量结果，这就是说，在一个较长的波形采集期间中的任何时刻，示波器应给出某一特定测量参数的最小值，最大值和平均值，使用这一功能我们就可以发现一个系统性能变化的趋势而无需连续监视示波器屏幕显示的内容。

应当记住，任何示波器的参数测量都是通过对采集的数据进行分析来进行的，所以，参数测量的结果都源于在示波器中存贮的采集到的波形，这就意味着，示波器的设置情况对参数测量和结果会有影响，例如，如果示波器的时基速度设置得比较慢，比如说设置为 1ms/格，而要对一个估计为 50ns 至 100ns 的上升沿进行上升时间测量，那么由于采集过程中时间分辨率的限制，我们就无法测出正确的结果，为了进行这项参数测量，我们应当把示波器的时基设置得足够快，例如设置为 50ns/格以便以足够细的时间分辨率显示出被测波形的上升沿。

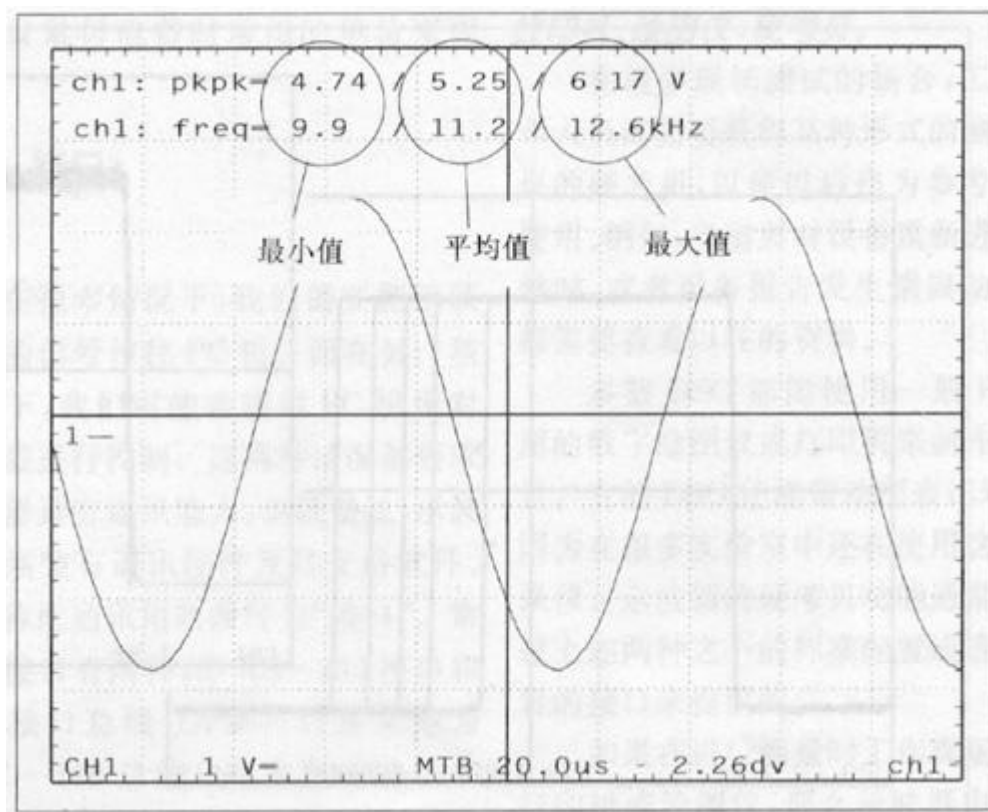


图 35 用统计的格式给出峰 - 峰值电压和频率测量值的屏幕显示情况。

其中给出了这两个参数的最小值，平均值和最大值随时间的变化

在第六章我们将详细讨论各种不同参数的定义、测量方法以及如何用手动和自动的方式进行这些参数的测量。

数字处理

示波器所采集的波形数据中包含了非常丰富的信息，用来显示这些数据的一种非常有用的形式就是波形显示，即用垂直坐标轴表示电压、用水平坐标轴表示时间。这就是 Y-t 显示方式。

另一种显示波形数据的方法是用两上通道的波形数据来画图。这时对显示的每个数据点来说，其水平位置代表一个通道的数据值，而其垂直位置则表示另一个通道的数据值，这种显示模式称为 X 对 Y 模式，或简称为 X-Y 模式，用这种模式，用户可以观察频率相关联的两个信号之间的相位或时间关系，X-Y 模式对于测试相移器和滤波器极为有用，还可以和运动传感器配合使用来检查运动系统的振动情况。

在 X-Y 模式下，DSO 比模拟示波器优越地地方在于这时 DSO 的带宽为示波器的全部采集带宽，而在 X-Y

模式下 DSO 显示的是在某一单个记录中所包含的采样点数据。这些数据只能表示在一个有限的时间期间(该记录的时间长度)的波形,而在 X-Y 模式下模拟示波器给出的是一个连续的,活的显示图形。

此外还有很多其它的方法用来从波形数据中提取宝贵的信息,或者对数据进行运算以使用更加有用的格式来表示数据中所包含的信息,这种运算通常称为波形的数学处理,这咱处理往往是由计算机来完成的,这就是说把采集到的波形传送给计算机,然后再作进一步的处理。

更新颖的 DSO 已经把这种数学处理能力装在了示波器内部,这可以靠示波器的主处理器或者另一个附加的数字信号处理器(DSP)来实现的。

—采用平均的方法来提分辨率

平均的方法是把连续的各次波形采集的结果组合在一起,采用平均的方法可以减少叠加在信号上的噪音,经过平均处理以后的波形的第一个采样点都是由各次连续采集的波形上相同位置的采样值通过平均运算而获得的。

由于噪音的本质所决定,噪音对每次新的采集来说都是不同的,所以各次连续采集波形的采样值就会略有不同,通过平均减少了这种差别,获得了更加平滑的波形,但是并不影响带宽,然而,当使用平均的方法时,示波器要用更长的时间才能响应信息的变化。多数 DSO 的垂直分辨率为 8 比特。这就是说,采集的波形完全由 256 个不同的电压电平来表示,通过对各次连续采集的波形进行平均可以提高分辨率,进行平均计算时所用的连续采集波形数越多,垂直分辨率就越高。每当所用的连续采集波形数增加一倍时,垂直分辨率就增加一个比特。

—包络模式

当被测信号随着时间变化时,例如要观察信事情的幅度变化或者抖动现象时,观测在多次采集过程中波形记录中每个采样点位置的最小值和最大值都存贮下来,并以此构成波形显示,这样获得的显示波形表现了信号长期变化的积累效果,使得我们可以进行长时间的抖动测量或者长时间的幅度变化测量。

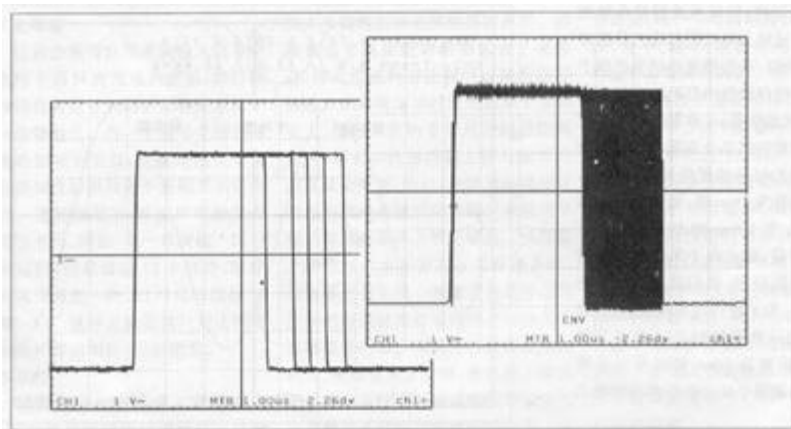


图 36 使用和不使用包络模式两种情况下的抖动脉冲

—数字滤波

对波形进行滤波是一种通过对采集的波形数据进行数学处理以减小波形带宽的得理过程。“滤波”一词说明这种处理功能和在示波器的输入端加入低

通滤波器具有相同的效果。

数字滤波是通过把波形记录中的每个采样点和同一波表记录中与该点相邻的若干采样点进行平均来实现的。这样作的结果减小了信号的噪音,但同时也减少了带宽的目的是为了减小噪音。数字滤波也可用于单次信号的情况,而平均的方法却要求对重复性信号进行多次波形采集。

—波形比较,样板测试

示波器中存贮的波形可以和新采集的波形同时进行显示,例如,我们可以把一个已知好的设备的波形特性和有故障的设备的波形特性进行比较,在很多情况下,进行这种信号比较的目的在于检查该系统的性能是否符合其技术指标。在设备生产测试过程中,我们常常会遇到这种情况,使用具有“通过/不通过”测试能力的示波器我们可以非常容易地,全自动地进行这种信号比较工作。首先,我们把标准信号及其允许的极限范围存贮在示波器的寄存器中,这些存贮的信息称为样板,接着示波器就从被测系统采集信号,并将每个新采集的信号和该样板进行比较,如果采集的信号在样板的范围之内,则示波器指示“通过”,反之,则示波大就会报出“不通过”。

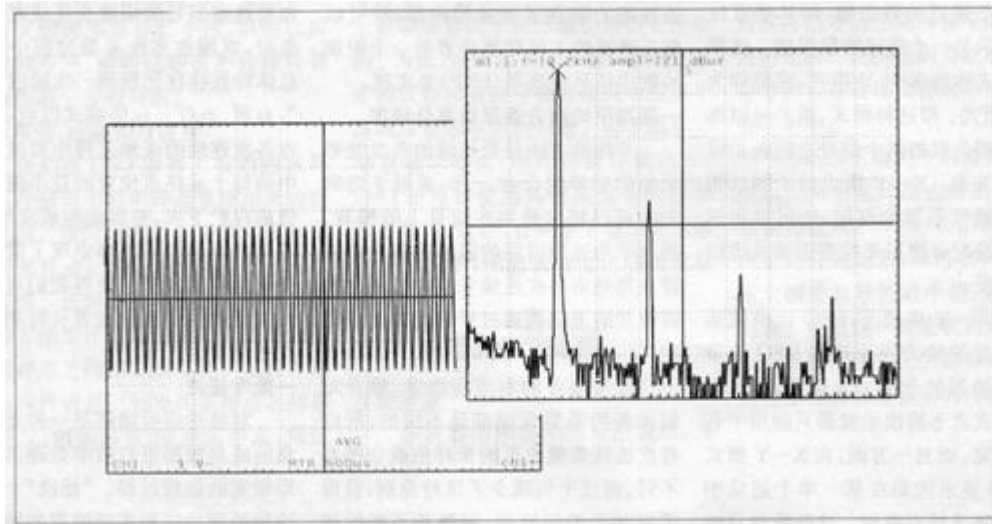


图 37 信号的波形及其频率变换

—快速付里叶变换 (FFT)

快速付里叶变换是一种数学运算方法。它从被测信号中提取信号所包含的各个频率分量，并将各个频率分量的幅度显示出来。

FFT 对于发现信号失真的大小，确认复杂波形中包含的频率万分或者寻找系统间的相互干扰等工作都是非常有用的。

—波表相乘

此功能最重要的应用是测量电功率，因为电功率的定义就是电流和电压的数学乘积，为了进行功率的测量，示波器就要同时采集电压和电流的小波形，并将二者相乘，相乘后获得的波形则表示随时间变化的瞬时功率值。这种功率测量工作对于测试电源，功率放大器以及稳压器等都是非常重要的，因为在这些场合电流都比较大，而这些部件承受的功率大小都是很关键的指标。

—积分

积分可以给出一条曲线下的面积，使我们能够观察信号随着时间积累的总效果，例如，连续充电过程对于电容器上的电荷量的总效果，或者一个元件耗散功率的总效果。

在测量机械系统时，如使用输出电压和系统加速度成正比的传感器，则此信号的积分映出的就是速度。

—微分

微分表示的是信号变化的速率，例如，一个电信号的摆动率 (Slew rate) 就是信号随时间变化曲线的微分。

—功率及损耗的测量

下面叙述的功率耗损测量是示波器处理能力的一个实际例子。

一个元件可以承受一定的功率，此功率的定义为跨过元件两端的电压和流过元件的电流的乘积。在元件的设计中通常要对元件随功率的能力规定一个极限值，此极限值是由该功率在一定的时间里引起的元件温升来确定的。元件耗散的热量 (即能量) 是由其瞬时功率和时间来决定的。

元件产生的热量可以通过测量其电压和电流值并将二者相乘来决定，两者相乘后获得的是以瓦特为单位的任一时刻的瞬时功率值，接着可以使用第二个数学处理功能进行积分，这样就可以得到以瓦秒为单位的总的功率耗损值，而 3600000 瓦秒等于 1kwh 这样通过换算我们就可以把元件的功耗值换算成我们日常交电费时常用的单位来表示。

2.4 接口

接口

在很多情况下，我们需要把示波器中的信号传往 PC 机，而在另一些情况下，我们可能希望用 PC 机来对示波器进行控制，这两种情况都要求示波器具有通讯能力。也就是说，示波器必须装有通讯硬件及其支

持软件。我们称此通信用软硬件为“接口”。常用的接口有两种，好 RS-232 接口和通用接口总线 (GPIB)，后者又称为 IEEE-488 总线，对多数示波器来说，这些通讯接口都是选件。

RS-232 接口是一种串行接口，这种接口在 PC 机上一般用来通过调制解调器进行通讯，还用来连接鼠标器，打印机等设备。连接到 PC 机上的每个设备都需要单独占用 PC 机上的一个 RS-232 接口，也就是说在一台 PC 机上只能连接有限个设备，常常只能连接一个。

很多软件包都使用串行通讯方式，因为这种通讯方式要求对 PC 机的改动最小，并且可以使用比较简单的电缆，所以在示波器上配备这种软件比较容易。我们只要使用一台 PC 机就可以存贮示波器采集的波形以作后备之用。GPIB 总线是一种为在仪器系统中使用而设计的并行总线，这种总线允许多台仪器同时连至同一总线。这种总线还允许各仪器在测试协议之下随时（例如，当某台仪器在测量发生错误时）请求控制器给予注意，按 GPIB 总线的计算机可以是专用的 GPIB 控制器，但当今最常用的还是配有 GPIB 插卡的标准 PC 机，由于 GPIB 插卡不是 PC 机的标准配置，所以必须另外加配。

供 GPIB 使用的软件通常都在计算机上生成一个完整的测试环境，将我台仪器集成为一个单独的测试系统。

打印机、绘图仪，硬拷贝

在很多现场测试的场合，工程技术人员都需要获得某种形式的测量结果的硬拷贝，以便以后作为参考资料使用，或者设备报告发生错误动作时都需要查看以往的资料。

多数 DSO 都能使用一般 PC 机用的数字绘图仪或打印机来制作硬拷贝。有的 DSO 还能带动图表记录仪，因为在很多实验室中还在使用这种记录仪。示波器的硬拷贝功能通常是通过上述两种之一的标准配置或选件配置的接口来提供的。

如果在进行测量时工作现场没有打印机或绘图仪，那么示波器中最好配备比较多的存储器，以便把所有需要的信息都存贮下来留待以后再制作硬拷贝。

第三章 模拟示波器、数字示波器，还是二者兼备？

3.1 介绍

当考虑购买新的示波器时，用户往往会提出许多问题。比如，应当选择哪种示波器？需要多宽的带宽？模拟示波器能够满足工作需要吗？还是需要一台 DSO？

另一个人经常问的问题是：“DSO 能够满足我的工作需要吗？”换句话说，DSO 能完成我原来用模拟示波器所作的所有测量工作吗？

遗憾的是对所有这些问题并没有一个简洁的答案。问题的答案完全取决于要进行的测量工作和要测量的信号。在有些情况下模拟示波器比现有的 DSO 都要好，现在让我们来考察若干主要的思考原则。

3.2 简单重复性信号

使用模拟示波器和 DSO 通常都能很好地观察简单重复性信号。但是两者都有其优点和局限性。对于模拟示波器来说，由于 CRT 的余辉时间很短，因而难于显示频率很低的信号。由于示波管上的扫迹亮度和扫描速度成反比，所以具有快速上升、下降时间的低重复速率信号就很难看到。而 DSO 的扫迹亮度和扫描速度与信号重复速率无关。随着被测信号情况的不同，这个特点可能是优点也可能是缺点。

对于显示具有足够高重复速率的重复性信号的快速沿来说，DSO 和模拟示波器的性能几乎没有什么区别。用两种示波器都能很好的观察信号波形。

当要进行信号参量的测量时，DSO 的优点在于具有自动测量的能力。而使用模拟示波器时，用户必须自己设置光标、分析理解显示的波形才能得到测量的结果。

如果要进行调整工作，那么一般最好使用模拟示波器。这是因为模拟示波器的实时显示能力使它在每时刻都能显示出输入的电压。其波形更新速率（每秒钟在屏幕上描画扫迹的次数）很高，在高扫描速度时可以远超过 100000 次扫描/秒。所以信号的任何变化都会立即显示出来。而且有些细小的变化会在显示屏幕上以波形亮度变化的形式表现出来。

与模拟示波器相反，DSO 所显示的是用采集的波形数据重建的波形。每秒钟采集波形的闪数远低于 100

次。在有些示波器上，每秒钟采集波形的次数超过 5 次。结果在信号发生变化和变化了的信号在屏幕上显示出来之间就有了明显的时间延迟。当对系统进行调整工作时，这是使用 DSO 的重大缺点。

3.3 比较复杂的重复性信号

上述的简单重复性信号可以在很多电子学领域中见到，但是这些信号常常用来作为信息的载体。为此目的可以有多种形式，例如正弦波、脉冲、斜波或阶梯波等，而且多种调制信号和多种调制方式常常可能同时使用。

一个常见的复杂模拟信号的实例就是全电视信号。此信号由多种不同频率，不同幅度的分量构成，既包括脉冲，也包括正弦波，于加上为表示彩色信息而进行了相移的另外的正弦波。对于这样的情况，模拟示波器的 DSO 都有其自己特别的优点，各自都能对信号的不同部分进行最佳节观察。

例如，模拟示波器具有有限的分辨率和每秒钟很高的扫描次数，它能显示出波形在时间止的逐波形扫描上的这度变化正比于信号在某一特定持续的时间，这就很好的显示出彩色调制的情况。由于示波器具有很高的波形更新速率（第秒钟的扫描次数很高），所以它能立即显示出对系统进行调整的效果。

使用 DSO 时，由于其采样点数有限以及没有亮度的变化，使得很多波形细节信息无法显示出来，虽然有些 DSO 可能具有两上或多个亮度层次，但这只是相对意义上的区别，再加上示波器有限的显示分辨率，使它仍然不能重现模拟显示的效果。

图 38 给出了使用模拟示波器显示全电视信号的情况。请注意其中丰富的波形细节和亮度变化的情况。图 39 给出的是在 DSO 的典型光栅扫描 CRT 上显示相同信号的情况。

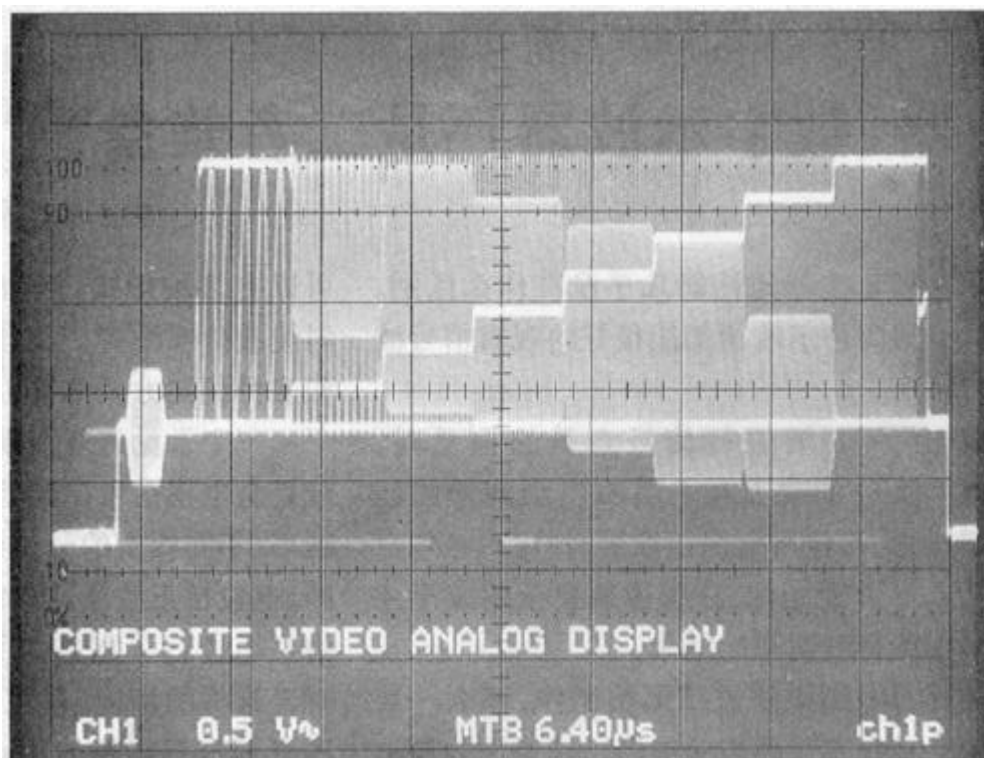


图 38 在模拟示波器上看到的视频信号

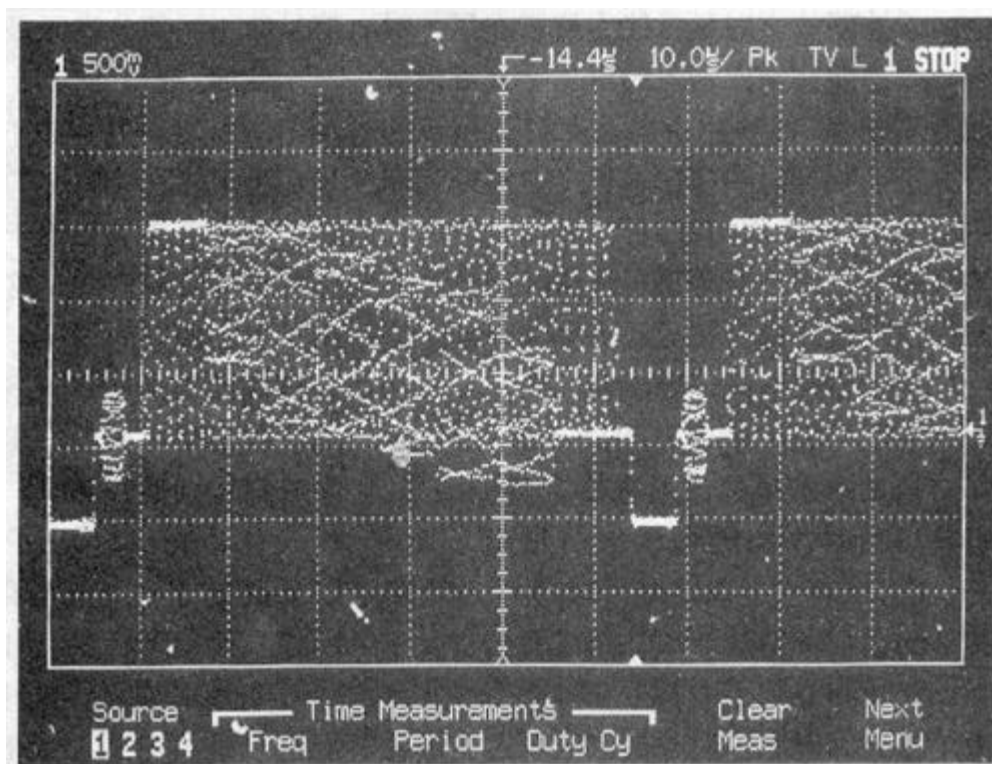


图 39 在数字存储示波器上看到的同一个视频信号

如果只要显示一行视频信号的小部分，例如某一特定行中的 TV 发送测试信号、图文电视数据或者某一特定行上的采色脉冲群，那么最好用 DSO。如果使用模拟示波器，则由于相对比较低的信号重复速率，再加上要观察的信号部分本身时间很短，很容易导致显示的画面太暗而难以看见。而 DSO 则不论信号的重复速率高低具有一致的亮度，因而能以很高的亮度显示此信号。

如果重复性的浅薄形中还包含着宽度很窄的尖峰或毛刺，那么使用模拟示波器观察整个波形是不可能看到这些类峰或毛刺的。而当 DSO 时，使用峰值检测就可以将这些尖峰显示出来（见图 40）。

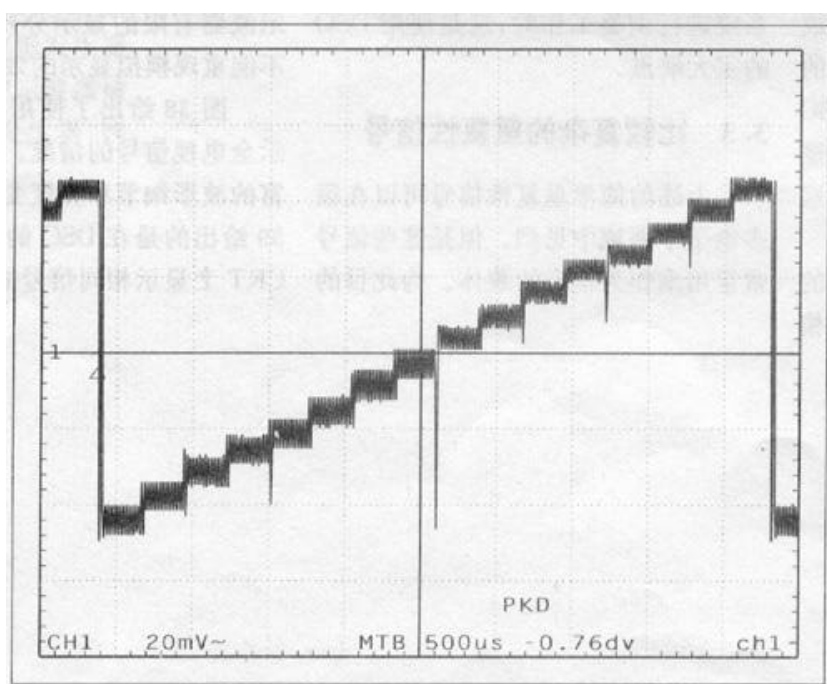


图 40 这类尖峰信号通常只是偶尔发生，因此只能用 DSO 捕捉

3.4 非重复性信号和瞬变

以前，由于观察极为困难而且代价过高，所以很多观察非重复性信号和瞬变的工作都不得不许诺了，因为在那个时候，观察这类的信号需要使用昂贵的模拟存储示波器、照相机和长余辉示波管等。

如果某一个事件只发生一次，那么模拟示波器通常是不能应付的。而这正是 DSO 展示其强大能力的时机，DSO 能够捕捉这种罕见的一次性事件，并且按照你的希望长时间地将它显示出来。

这种罕见的事件甚至可能是干扰的结果，通过用干扰本身来触发，DSO 具有显示预触发信息的能力，包括显示干扰的原因。

图 41 显示的是当电缆一端的开路接在桌面上弹起时电缆的微音效应波形，图中触发时刻用 T 符号来表示，这个符号左边的波形信息就是预触发信息。

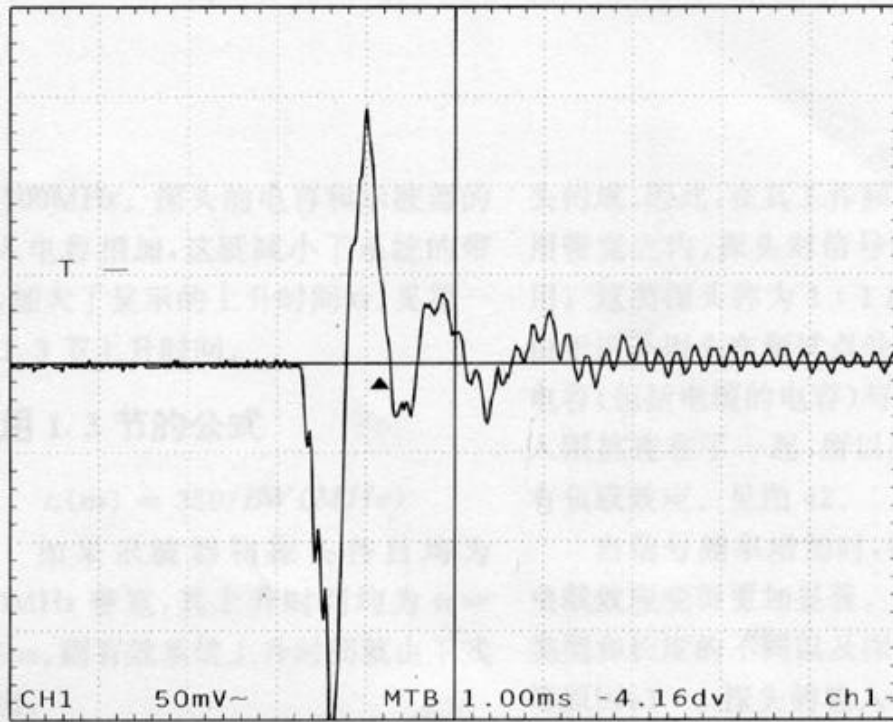


图 41 当电缆一端的接头在桌面上弹起时电缆的微音效应。

只有使用 DSO 才能捕捉到这种突起的信号

3.5 模拟示波器、数字示波器，还是二者兼备

我们已经看到，在日常工作中技术人员同时需要模拟示波器和数字存储示波器，以便对他们工作中遇到的信号

进行最好的观察，在某些应用场合模拟示波器比较合适，而在另一些场合 DSO 则是更好的选择。

市场上见到的一些 DSO 号称具有“模拟示波器的外观和感觉”。但这些都是纯粹的 DSO，尽管其中有一些示波器的控制机构排列得和许多模拟示波器完全相同，而另一些又具有很高扫描更新率以模仿真正的模拟示波器的能力。或者，他们可能具有很高的采样速率而采集波形的记录长度都有限，从而不具备观察比较复杂的信号，避免出现假象信号所需要的时间分辨率，当然，这些示波器不仅具有 DSO 的优点，也具有 DSO 的全部缺点。

值得庆幸的是，现在有一种示波器能够真正的把模拟示波器和 DSO 两者的能力和优点结合于一台仪器。这就是组合示波器，组合示波器把一台高性能模拟示波器组合在一起，并且能很容易的从一种工作模式转换到另一种工作模式。

技术人员选用了组合示波器就意味着，只要有这台示波器就足够耻，不管他的工作需求如何，他的手边总有合适的工具。当这台仪器设置成 DSO 时，用户可以用它来进行自动参数，测量，存贮采集的波形进而制作硬拷贝；而同时，当需要地时候还能具有模拟示波器的无限分辨率以及熟悉而可信的波形显示，并且使用组合示波器时，不管信号重复速率的高低，都可获得最亮的显示，换句话说，组合示波器使用得模拟示波器和 DSO 两者的精华兼备于一身。

我们在后面的练习中使用的 PM3394A 就是这种组合示波器之一。

第四章 附件和软件

4.1 探头是怎样工作的

示波器探头不仅仅是把测试信号判定以示波器输入端的一段导线，而且是测量系统的重要组成部分。探头有很多种类型号各有其没的特性，以适应各种不同的专门工作的击破要，其中一类称为有源探头，探头内包含有源电子元件可以提供放大能力，不含有源元件的探头称为无源探头，其中只包含无源元件如电阻和电容。这种探头通常对输入信号进行衰减。

我们将首先集中讨论通用无源探头，说明共主要技术指标以及探头对被测电路和被测信号的影响，接着简单介绍几种专用探头及其附近。

屏蔽

探头的的一个重要任务是确保只有希望观测的信号才在示波器上出现，如果我们仅仅使用一面导线来代替探头，那到它的作用就好像是一根天线，可以从无线电台、荧光灯，电机、50 或 60Hz 的电源的交流声甚至当地业余无线电爱好者那里接收到很多不希望的干扰信号，其些这类噪声甚至还能抽向注入到被测电路中去所以我们首先需要的是屏蔽的电缆，示波器探头的屏蔽电缆通过们于探头尖端的接地线和被测电路连接，从而保证了很好的屏蔽。

探头带宽

和示波器一们，探头也具有其允许的有限带宽。如果我们使用一台 100MHz 的示波器和一个 100MHz 的探头，那么它们组合起来的响应就小于 100MHz，探头的电容和示波器的输入电容相加，这就减小了系统的带宽，加大了显示的上升时间 t_r 见第一章 1.3 节上升时间。

使用 1.3 节的公式

$$t_r(\text{ns})=350/\text{BW}(\text{MHz})$$

如果示波器和探头各自均为 100MHz 带宽，其上升时间均为 $t_r=3.5\text{ns}$ 。则有效系统上升时间就由下式给出：

$$\begin{aligned}t_{r\text{system}} &= \text{sqr}(t_{r\text{scope}}+t_{r\text{probe}}) \\ &= \text{sqr}(3.52+3.52)\text{ns} \\ &= \text{sqr}(24.5)2\text{ns} \\ &= 4.95\text{ns}\end{aligned}$$

根据 4.95ns 的系统上升时间求得，系统带宽为 $350/4.95\text{MHz}=70.7\text{MHz}$ 。

Fluke 公司给所有示波器配备的探头都能使示波器保证在探头尖端获得规定的示波器带宽，从上述的计算可以看出，视觉要求探头本射的带宽要比示波器的带宽宽得多。

负载效应

当我们进行测量时，我们常常以为测得的电压和电路中未连入示波器时是完全一样的。

实际上，每个探头都有其输入阻抗，输入阻抗包含了电阻、电容和电感分量。由于探头引入的额外负载，所以连入探头后就会影响被测电路我以当我们分析测量结果时必须考虑探头的特性以及测试电路的阻抗。

有些探头里没有串联的电阻，这类探头主要就由一段电缆和一个测试头构成，因此，在其工作频率范围或有用带宽之内，探头对信号没有衰减作用。这类探头称为 1:1 或 X1 探头。由于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，所以这种探头具有负载效应。见图 42。

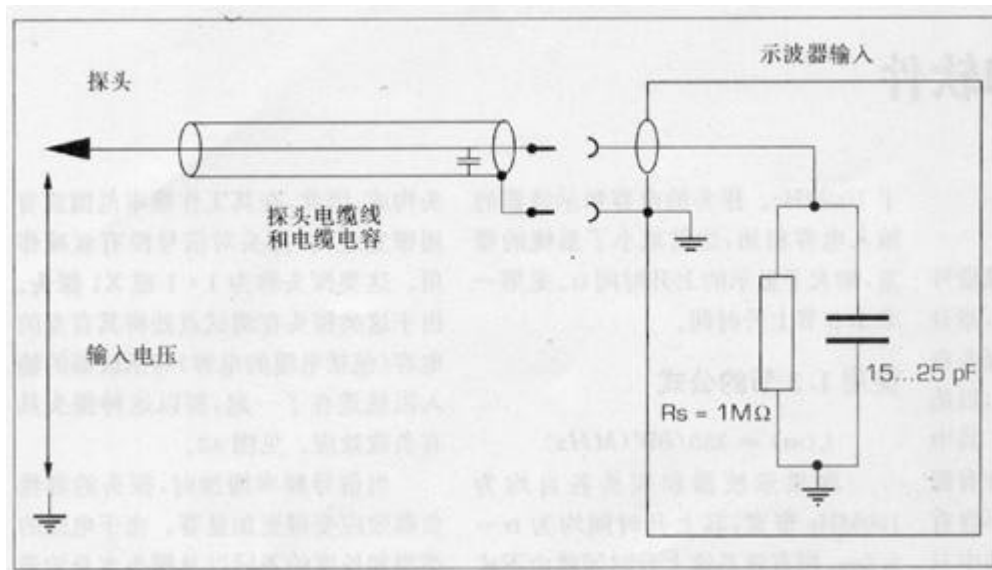


图 42 探头的等效电路

当信号频率高时，探头的容性负载效应显得更加显著。由于电缆的类型和长度的不同以及探头本身构造等原因，1 : 1 探头的输入电容通常可以从大约 35pF 到 100pF 以上，这等于给被测电路施加了一个低阻抗负载，具有 47pF 输入电容 1 : 1 探头在 20MHz 之下的电抗仅为 169W，这就使得这个探头在此频率无法使用。

衰减式探头减小了负载效应

我们可以在探头中增加一个和示波器输入阻抗相串联的阻抗，用这种办法就可以减小探头的负载效应。然而，这就意味着输入电压不能完全加到示波器的输入端，因为我们现在已经引入了一个分压器。

图 43 给出了一处简化的探头等效电路， R_p 和 R_s 构成了一个 10 : 1 的分压器， R_s 为示波器的输入阻抗。调节补偿电容 C 补偿使得探头和示波器相匹配，视觉保证了在探头的尖端获得正确的频率响应曲线，这样一来就使得这种探头的频率响应比 1 : 1 探头频率响应要宽得多。

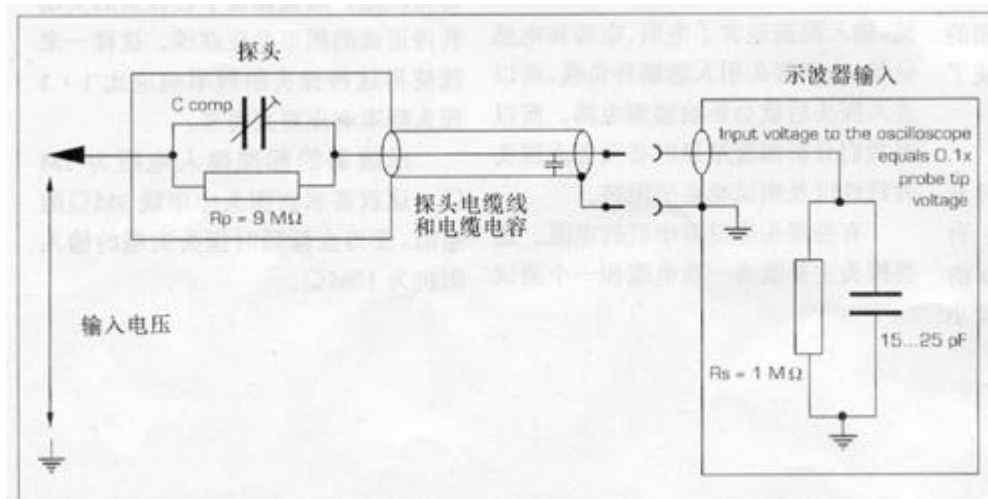


图 43 10 : 1 探头电路图

示波器的标准输入电阻为 $1\text{M}\Omega$ 。这就要求在探头中串联 $9\text{M}\Omega$ 的电阻，使得在低频时探头尖端的输入阻抗为 $10\text{M}\Omega$ 。

探头补偿

一个实际的 10 : 1 探头具有几个可调的电容和电阻以便在很宽的频率范围内获得正确的频率响应，这些可调元件的大多数都是在制造探头时由工厂调好的。只有一个微调电容留给用户去调节。这个电容称为

低频补偿电容，应当通过调节这个电容使得探头和与相配用的示波器匹配，使用示波器前面板上的信号输出可以很容易地进行这项调节工作，示波器的这个输出端标有"探头调节"、"校准器" "CAL" 或者"探头校准"等标志，并能送出一个方波输出电压。方波中包含很多频率分量。当所有这些分量都以正确的幅度送至示波器时，就能在示波器屏幕上再现方波信号。图 44 示出探头欠补偿，正确补偿和过补偿的影响。

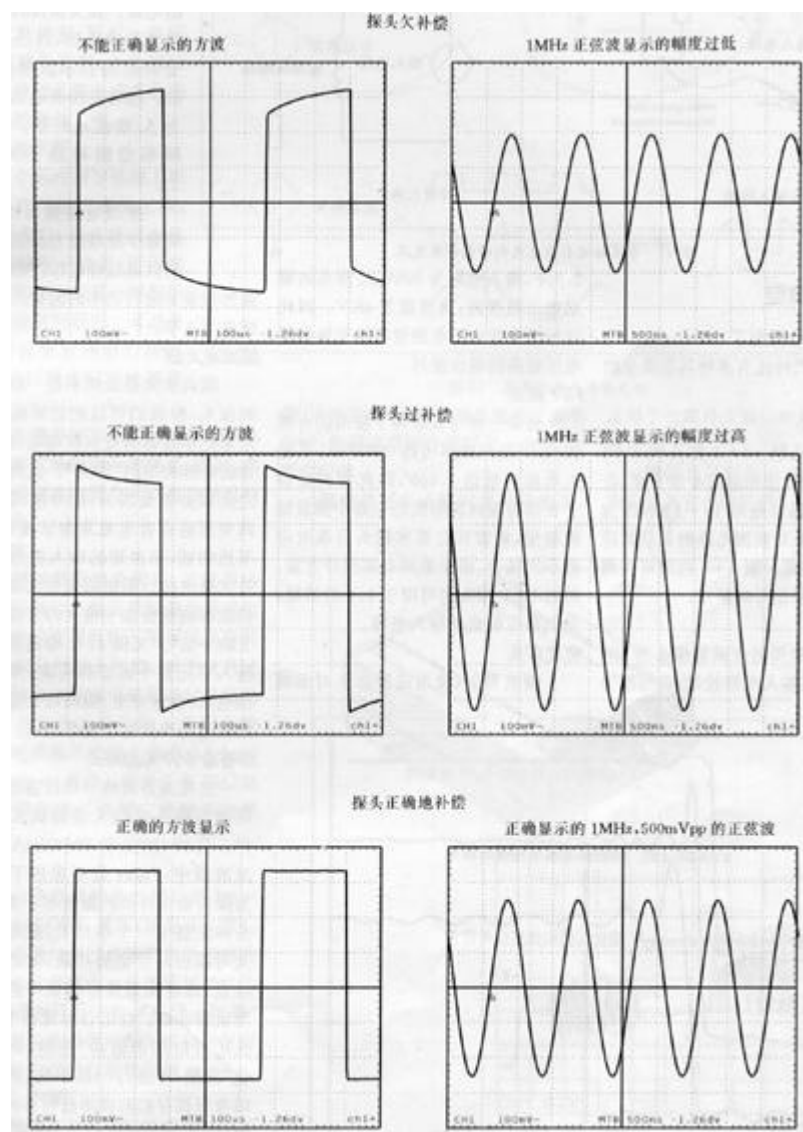


图 44 在 2kHz 方波和 1MHz 正弦波之下观察不同探头补偿情况的影响。

可以看出，在较高的频率下探头过补偿和欠补偿和欠被偿情况下 1MHz 正弦波的幅度是很不准确的。

所以在使用的衰减探头之前一定不要忘记检查探头的补偿情况。由于一台示波器的不同输入通道的输入电容可能有小的差异，所以您应当按照示波器上要使用的通道来进行探头补偿调整工作。

最大输入电压

多数通用 10 : 1 探头的构造使这些探头适合于最大输入电压为峰值 400V 或 500V 的情况下使用，所以这些探头可以用于信号电平高达数百伏的广泛的应用场合，对于需要测量更高电压的场面合，我们推荐使用电压额定值更高的 100 : 1 探头。

探头读出

现代示波器探头都装有编码系统，使得示波器能够识别与它相连年的探头类型。从而使示波器能够高速垂直偏转指示值及所有幅度测量结果以避免发生混淆。而如果使用不带这种识别系统的探头，则用户就不得不自己为所有波形显示和测量结果重新定档以便反映出探头的衰减量。

接地引线电感

图 45 说明探头的接地引线电感如何与探头及示波器的输入电容形成串联谐振电路。而探头的输入电阻则在谐振电路中引入阻尼。

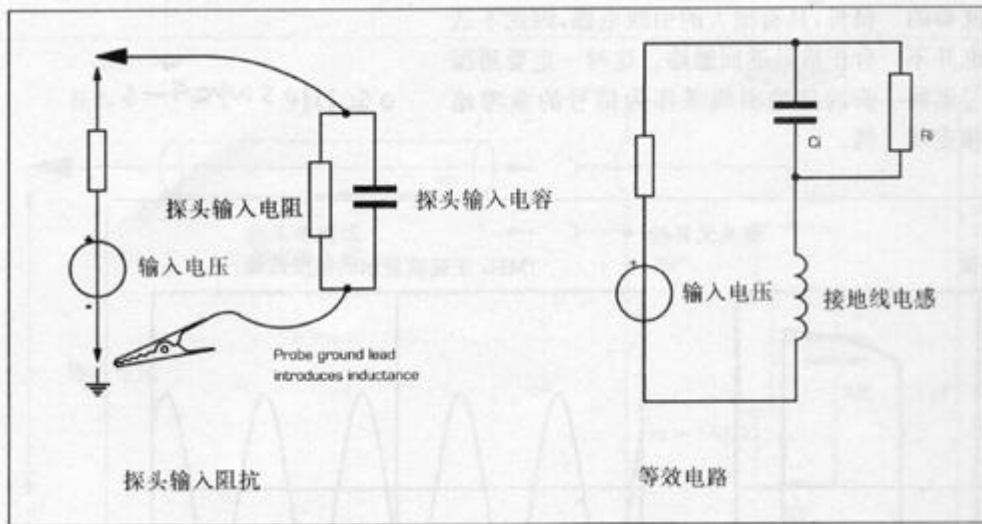


图 45 带有接地引线电感的探头等效电路

像其它谐振电路一样，如果在探头上加入阶跃电压则此谐振电路也会发生振铃现象，过大的接地引线电感还会使示波器显示的上升时间变差，图 46 显示出使用不同长度的接地引线时，连至示波器的快速上升沿脉冲的显示波形。

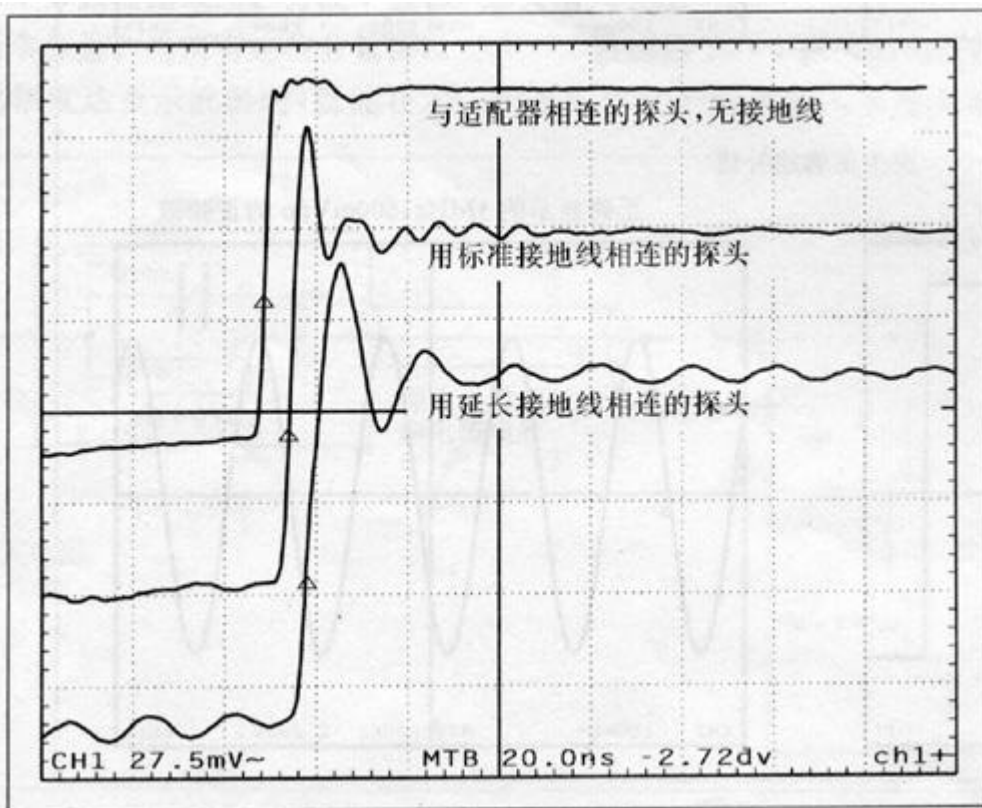


图 46 接地引线对脉冲响应的影响

从图中我们可以清楚的看到接地引线电感对测量结果的影响，所以一定要使探头的接地引线尽可能的短，特别是在测高频和快速上升沿的信号时尤应注意。

安全接地

为保证电气上的安全，多数示波器都通过电源线与安全地线相连。被测信号有可能和地线具有相同的参考电位，但并非必然如此，因此在连接探头的地线时，一定要注意不要因此而把被测系统的某一部分短路。另一方面，即使被测系统和示波器的地线具有相同的参考电位，这也并不意味着可以用安全地线来作

信号返回通路，这是由于安全地线连接走线很长，具有很大的引线电感，因此不合作信号返回通路。这时一定要用探头的接地引线来作为信号的参考地线。

4.2 探头类型

我们已经研究了 10 : 1 和 1 : 1 两种探头，此外还有多种其它类型的通用探头。

可切换式探头

这种探头将 10 : 1 探头和 1 : 1 探头容为一体，使用起来非常方便，在一般情况下最好使用 10 : 1 档，因为在这一档探头对被测电路的负载效应小，而且频带宽。而 1 : 1 档则可在测量低频电平信号时使用。

衰减器探头

另一种常用的衰减器探头为 100 : 1 探头，其输入电容较低，典型值为 2.5pF，输入电阻为 20MW，探头的额定电压值很高，典型值为 4KV。因此这种探头适合于在测量高压变换器等电压很高的场合使用。

FET 探头

这是一种可在高频下使用的有源探头，其使用频率可达 650MHz。其输入电容可低达 1.4pF，因此特别适合于在具有很高源阻抗的电路中测量快速瞬变，或者其它要求探头负载效应最小的场合。由于采用有源设计方案，所以 FET 探头也可用于 1 : 1 的情况，仍具有极低的输入电容。

电流探头

顾名思义，使用这种探头时示波器上显示的是导体中的电流而不是其上的电压。在这种探头的头上装有一个电流感应变压器，使用时只要把探头卡到电缆导线上而无需切断电路，探头获得的信号首先变换成电压，再经过比例变换后送到示波器的端，这时示波器显示的单位为 A/格或 mA/格。探头的频率范围可达 70MHz 以上。

使用电流探头以后，具有数学处理能力的示波器就可以通过将电压波形和电流波形相乘来进行功率的测量，详细情况见 2.3 节。

隔离放大器

隔离放大器虽然不是一般意义下的探头，但我们可以把它看成是一种用来把示波器测量点和地电位隔离开来的特殊类“探头”。这种“探头”之所以必要是因为，除非使用电源隔离变压器或者电池来为示波器供电，不然的话，示波器的输入参考地线总是在地电位，采用隔离放大器还使我们能够测量叠加于很大的共模电压之上的小信号（见图 47）。隔离放大器的输入单元整个由塑料构成。并由电池供电，以保证安全。隔离放大器大都应用在电力和控制系统等领域。

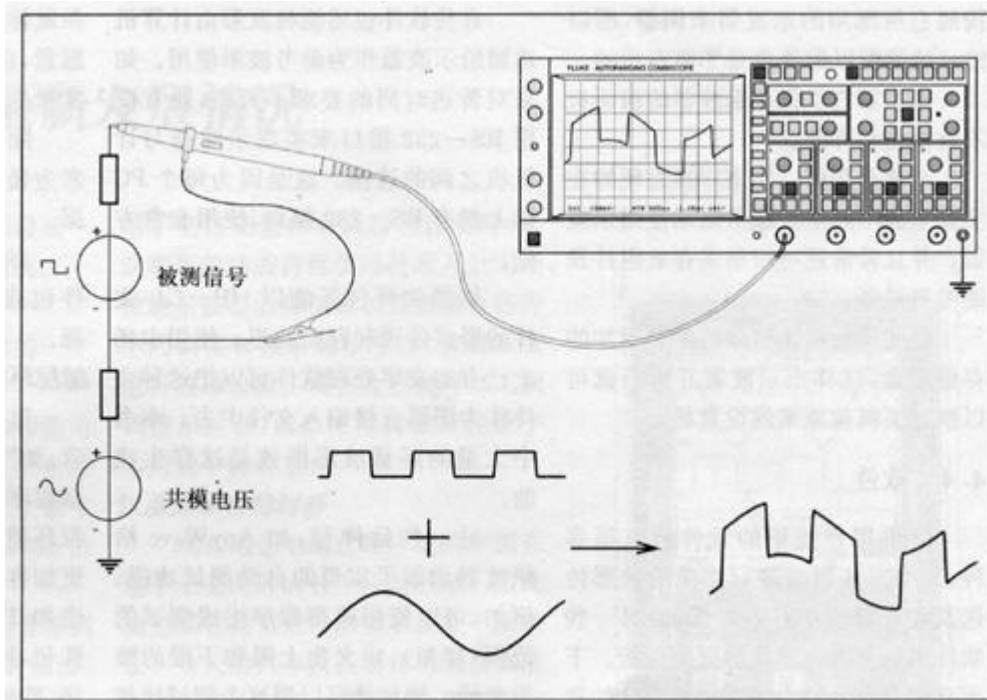


图 47 具有共模电压的电路

带有命令开关的探头

在探头方面的一项最新改进是针对使用探头进行大量测试工作的用户。在 PM3094 和 PM3394A 系列的示波器中,Fluke 公司采用了一项称为探头命令开关的新技术,为此在探头体上装了一个小开关,使用空虚开关可以启动预选的功能,如启动自动设置,或者从设置存储器中选择另一组设置参数,在组合示波器中命令开送还可以用来启动"接触、保持和测量"功能,即进行一次采集,将波形冻结并根据存贮的波形进行多咱参数的测量。

4.3 其它附件

示波器还可配备多种附件,其中有些附件是为了使示波器适合于在某种测量环境下使用,例如:接口,上架机件及软件包,而另一些附件则有助于方便、有条有理的携带示波器及探头或者有助于专门的测量工作。

视频行选择器

这个附近件对于视频工程师的工作是极理想的工具。它能生成行、场及帧同步脉冲用以触发示波器,使得视频工程师可以对某一视频行的各部分进行研究。通过开关可以观察行的另码,当该行到来时示波器就触发。

某些型号的示波器,如 PM3394A 具有内置式的视频行选择器。这时,此功能的控制机构则为示波器控制机构的一部分。

终端负载

当测量低阻抗系统时,示波器必须配以正确的终端负载以避免信号失真。某些示波器的输入端可以由开关切换成 50 的输入阻抗。对于没有这种功能的示波器则可使用这种终端负载附件来和示波器的输入端配合使用,终端负载的衰减系数有 1:1、10:1 及 100:1 多咱。此外还有 75 规格的终端负载可供其它视频系统使用。

接口

在示波器最常见的接口是 RS-232 接口和 GPIB 接口(详见 2.4 节),使用这些接口可以将数据传给示波器或者从示波器取出,虽然通过接口传送波形可能只限于数字存储示波器,但是模拟示波器也可配备接口以便对示波器的设置进行远程控制。

电池和逆变器

这些附件使台式示波器可以在没有市电的场合,如车辆或收音机中使用,还能使示波器能进行对地浮置的测量。这也意味着,当被测系统处于地电位时,使用这类附件可以避免地回路。

其它配件

携带箱可在运输时保护示波器,这对于经常外出施行的用户非常有价值。

附件盒可以和示波器配套,保存探头及其它小的附件。由于探头应当按照它所配用的示波器来调整,所以给示波器配以附件盒是非常有用的。

保护罩可以保护示波器的前面板不致损伤和弄脏。

示波器可以使用户很方便的在实验室的不同地点经常流动使用示波器,并且常常还要以有来存放附件及硬考设备。有些示波器还可以再配备附加的存储器盒,晕样当示波器开机后就可以恢复关机关原来的设置状态。

4.4 软件

可供用户使用的软件包有很多种,其中有些用来进行简单的波形传送及在计算机中存贮波形;而另一些软件则有来进行复杂的数据分析。下面介绍若干专门为测度仪器设计的软件包的实例。

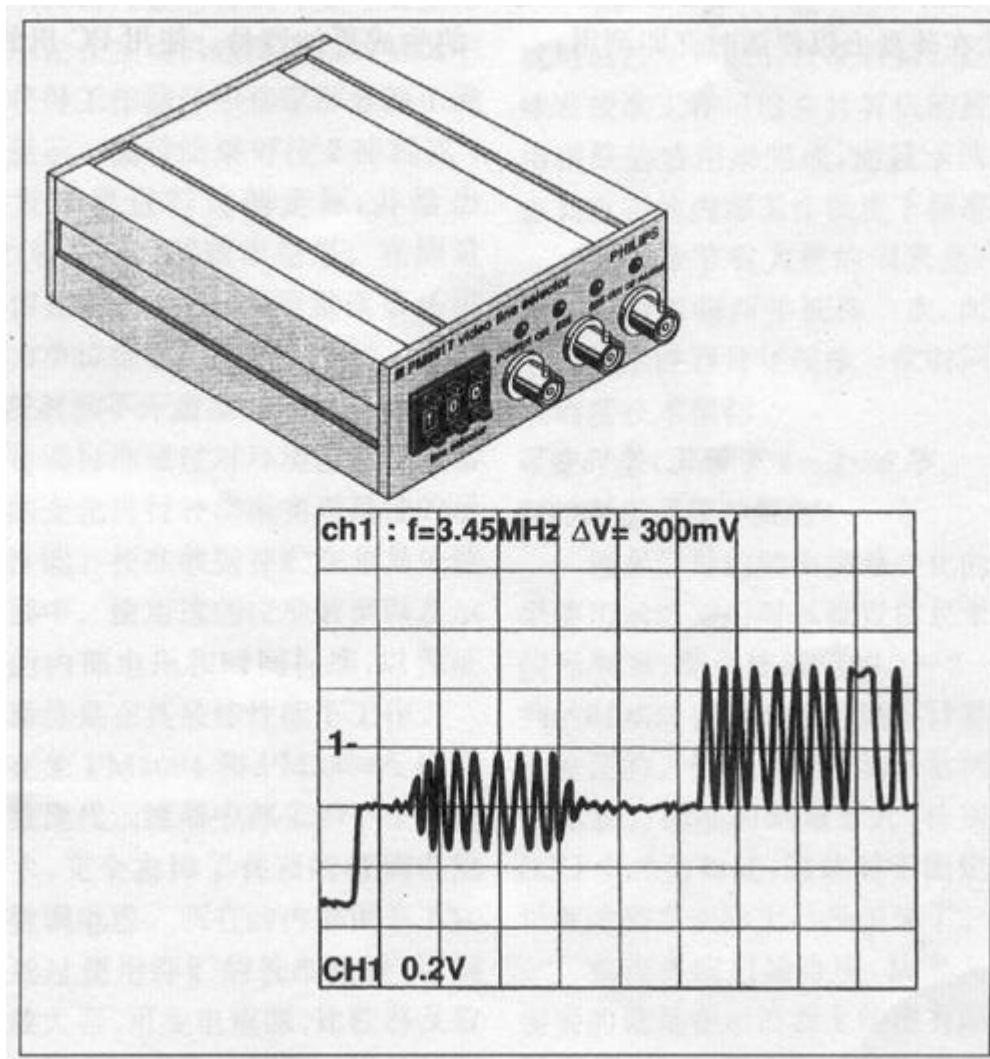


图 48 视频行选择器和选择的视频行信号

通讯软件

有多种软件包可以实现将波形从示波器传送到 PC 机，并将其存贮在 PC 机的硬盘上。示波器捕获的波形可以和示波器的设置一起在 PC 机的屏幕上显示出来，而且还能将这些信息存贮在硬盘上便随时调用。

有些软件包还能将波形由计算机送回给示波器作为参考波形使用。如果对传送时间的要求不苛刻，通常使用 RS-232 接口来实现示波器与计算机之间的连接。这是因为每个 PC 机上都有 RS-232 接口，使用非常方便。某些软件包还能以 HP-GL 文件的形式传送和存贮波形。使用市场上已有的文字处理软件可以把这种文件作为图形直接编入文件中去，本书中大量的屏幕波形图就是这样生成的。

另一些软件包，如 Any Wave 给示波器增添了宝贵的自动测试功能。例如，可以使用这类程序生成测试的范围（样板），定义出上限和下限的波形曲线，然后就可以用这个测试样板作为参考标准进行立即的、自动的通过/不通过测试。测量的波形可以通过 RS-232 或者 IEEE 通讯接口传送给 PC 机，并将不通过的波形自动存贮下来。

对于装有样板测试功能的示波器来说 Any Wave 软件也使得测试包络的生成更加容易，使用 PC 机的键盘和鼠标就可以对包络进行编辑。如果愿意，也可以从一个采集到的波形出发来生成包络。

除此之外，Any Wave 软件还可用来为任意波形发生器生成波形描述数据。

存贮的波形还可以用统计图表软件包或者专门的分析软件来进行处理。

编程环境软件

这些软件包能为使用标准编程语言，如"Quick-Basic"或"C"等编写测试程序提供一种编程环境。在这

种编程环境下,应用程序的开发工作变得更加容易、更加有效、更加迅速。使用诸如 TestTeam 和 Lab Windows 等软件包,则可以提供各种仪器的驱动程序,使编程工作进一步简化,这些软件包不仅能支持示波器的应用,而且有助于在使用诸如多表表、信号发生器、程控电源、频率计和信号并关等多种仪器时编写测试程序。晕样编写的程序可以在 TestTeam 的环境下执行,也可以转换成独立的可执行文件来控制测试系统。



“电子爱好者”网站是一个面向广大电子爱好者、大专院校学生、中小型企业工程技术人员的电子技术应用、推广专业网站。主要内容有：电子技术应用交流，器件资料、电子设计软件下载，电子技术支持服务，电子产品发布、转让和引进等信息。

本资料由“电子爱好者”网站收集整理，版权属原作者

在使用本资料或软件时，有什么问题，欢迎到“电子爱好者”网站内的 BBS “技术论坛”中发表，我站的热心网友会帮助你的。

技术论坛：<http://www.etuni.com/bbs>

需要更多的电子技术相关资料或软件，欢迎到“电子爱好者”网站下载。

“电子爱好者”网站：<http://www.etuni.com>