

# 示波器在测量中的应用

## 一、示波器的分类：

示波器是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的仪器。

示波器分为模拟示波器和数字示波器两大类。

从示波器的发展来看，模拟实时示波器(ART)属于第一代示波器，数字存储示波器(DSO——Digital Storage Oscilloscopes)属于第二代示波器，数字荧光示波器(DPO——Digital Phosphor Oscilloscopes)属于第三代示波器。

模拟示波器可为工程技术人员提供眼见为实的波形，在规定的带宽内可非常放心进行测试。人类五官中眼睛视觉十分灵敏，屏幕波形瞬间反映至大脑作出判断，微细变化都可感知。因此，模拟示波器深受使用者的欢迎。

同时模拟示波器的某些特点，是数字示波器所不具备的：

- 1、操作简单——全部操作都在面板上，波形反应及时，数字示波器往往要较长处理时间。
- 2、垂直分辨率高——连续而且无限级，数字示波器分辨率一般只有 8 位至 10 位。
- 3、数据更新快——每秒捕捉上百万个波形，数字存储示波器每秒只能捕捉几十个波形至上千个波形。数字荧光示波器有了质的飞跃，已经与模拟示波器相近，但还没有达到模拟示波器相同的水平。
- 4、实时带宽和实时显示——连续波形与单次波形的带宽相同，数字示波器的带宽与采样率密切相关，采样率不高时需借助内插计算，容易出现波形混叠。

廿世纪九十年代，数字示波器的带宽提高到 1GHz 以上，它的全面性能已经超越模拟示波器。首先在采样率上提高，从最初采样率等于两倍带宽，提高至五倍甚至十倍，相对应正弦波采样引入的失真也从 100%降低至 3%甚至 1%。带宽 1GHz 的采样率就是 5GHz，甚至 10GHz。

其次，数字荧光示波器提高了波形捕获率，接近模拟示波器相同的水平，最高可达每秒 40 万个波形，对观察偶发信号和捕捉毛刺方便多了。

再次，采用多处理器加快信号处理能力，从多重菜单的烦琐测量参数调节，改进为简单的旋钮调节，甚至全自动测量，使用上与模拟示波器同样方便。

同时，数字荧光示波器与模拟示波器一样具有屏幕的余辉方式显示，赋予波形的三维状态，即显示出信号的幅值、时间以及幅值在时间上的分布。

廿世纪，模拟示波器已经从前台退到后台，数字示波器独领风骚。

## 二、示波器的实际应用

在进行测量时，了解示波器的能力是很重要的，如标在示波器面板上的带宽和采样率以及示波器的存储单元的长度、上升时间等参数，它们将决定你的示波器能测量什么样的波形。

我们知道，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。

对于上升时间的测量来说，情况也是这样。如果您使用一台上升时间比被测信号的上升时间快 10 倍的示波器来进行测量，那么示波器本身的上升时间对测量的影响将几乎可以忽略。然而如果示波器的被测信号的上升时间相同，那么引起的测量误差可高达 41%。

下面，通过例子来说明示波器性能与被测信号之间的关系。

### 1、上升沿与采样率的关系：

假设被测信号为一个 25MHz 的方波，上升沿为 5ns，要精确测量此信号，则示波器在信号的上升沿最少应能采样 10 个点，那么采样点间隔最少为 500ps，示波器的采样率最少为 2GS/s。若要完整显示信号的一个周期，既在 50ns 时间轴上（时基调整到 5ns/div）分布的 500 个点都是采样获得，而非插值，则采样间隔最少为 100ps，这就要求示波器采样率为 10GS/s，这样高的采样率只能通过等效采样获得，而且要求被测波形是稳定的周期信号。

### 2、带宽与被测信号的关系

同样，要测量上述方波，对示波器带宽也有严格的要求。

从理论上说，方波是由其基波和基波的奇次谐波分量组成，示波器的带宽所能通过的奇次谐波分量越多，重现的方波越准确。因此，在测量中选择示波器的带宽越大越好，至少应大于方波基频分量的 10 倍。

在实际测量中，被测方波往往还包含偶次谐波分量，并叠加有频率更高的过冲及毛刺等，若要对这些特性进行测量，则要求示波器的带宽至少能通过这些信号，而且采样率足够高，带宽具体大到什么程度要根据对被测信号的要求而定，因为带宽越大，示波器成本越高。

### 3、示波器的上升时间与被测信号的关系

在模拟示波器中，上升时间是示波器的一项极其重要的指标。而在有些数字示波器中，上升时间甚至都不作为指标明确给出。当示波器的上升时间比信号的上升时间快 5 倍时，被测信号的异常幅度衰减可达到 2%，表 1 给出了示波器上升时间与被测信号上升时间的关系。从表中可以看出，示波器的上升时间越快，测得的信号越准确。

表 1:

示波器的上升时间	上升时间慢引起的异常幅度衰减
等于信号的上升时间	41%
比信号的上升时间快 2 倍	12%
比信号的上升时间快 3 倍	5%
比信号的上升时间快 5 倍	2%

另外，信号上升时间的测量还与示波器的时基选择有关，虽然信号的上升时间是一个定值，而用数字示波器测量出来的结果却因为时基选择的不同而相差甚远。得到最大采样率的时基越小测得的上升时间最小；时基越大测得的信号上升时间越大。

而时基与采样率的关系为：

$$\text{时基 (t/div)} = \frac{50(\text{每格点数})}{\text{采样率}}$$

时基越小，要求采样率越大。在实际测量中，采样率还受到存储深度的影响。

#### 4、采样率和采样存储深度

实际上采样率是一个与时基及存储深度有关的变化量，并不总等于厂家所给的最高采样率。例如某示波器，存储深度为 1KS/ch，当时基足够快(小)时，采样率为 1GS/s，到时基增大至 100ns/div，一帧波形(10div)的采样时间为 100ns/div×10div=1 μs，所采点数恰为 1 μs×1GS/s=1KS，已经把存储器存满。再增加时基，若按 1GS/s 速度采样就存不下了，只能降低实际采样率。例如时基增加 10 倍，采样率就下降 10 倍。

存储和显示密度(SDD)的概念，定义为在某时基下，示波器 t 轴方向每格能用于存储和显示的点数。当 SDD 不大于显示分辨率时（一般为每格 50 个点），SDD 即为显示密度；当 SDD 大于显示分辨率时，表示实际存储的点数高于直接显示的需要。可供把波形拉宽观测细节。引入 SDD 的概念还能直观地判断荧屏上真实的采样点数是否够用。

$$\text{存储和显示密度 (S/div)} = \text{采样率 (S/s)} \times \text{时基 (t/div)}$$

在实际测量中，非常讲究在一次捕获数据后，既能看到信号的全景，又能观察其中非常细小的部分。例如，既要看清几十位数字信号的脉冲列是否正常，又想仔细观察其中某个脉冲的前沿是否够陡，该边沿部分是否叠加了毛刺或寄生振荡。

现在我们用两个示波器：

A: 带宽 400MHz, 上升时间 1ns, 采样率 100MS/s, 等效采样率 10GS/s, 存储长度 1MS 的示波器。

B: 带宽 200MHz, 上升时间 2ns, 实时采样率 1GS/s, 没有等效采样, 存储长度 1KS 的示波器。

(1) 同时来测量一个周期为 25MHz 方波信号。

选择时基为 5 ns/div 时, 要求示波器有 10GS/s 的采样率,

示波器 A:

$$SDDa = 10GS/s \times 5ns/div = 50S/div$$

全屏有 500 个采样点, 记录存储长度为 100 μ s。

示波器 B:

$$SDDb = 1GS/s \times 5ns/div = 5S/div$$

全屏只有 50 个采样点, 记录存储长度为 10 μ s, 其余显示的点均是插值拟合的, 可见示波器 B 在观察一个周期信号时, 精度远不如 A。

根据示波器上升时间对被测信号的影响, 以及被测信号对采样率的要求, 当用这两个示波器精确测量稳定周期信号的上升沿时, A 示波器可用来测量上升时间大于 5ns 的信号, B 示波器只能用来测量上升时间大于 10ns 的信号。当测量非稳定周期信号的上升沿时, A 示波器只能测量上升时间大于 100ns 的信号, 而 B 示波器同样能测量上升时间大于 10ns 的信号。

(2) 选择时基为 1 μ s/div, 测量一个周期为 100KHz 方波信号。

示波器 A: 采样率为 10GS/s 时, 显示一帧波形所须的存储深度为:

$$10GS/s \times 10\mu s = 100KS$$

示波器 A 的存储深度为 1MS, 可以进行 10GS/s 的采样;

示波器 B: 示波器 B 的存储深度只有 1KS, 因此只能进行 100MS/s 的采样。此时两示波器的存储显示密度 SDD 分别为:

$$SDDa = 10GS/s \times 1\mu s/div = 10KS/div$$

$$SDDb = 100MS/s \times 1\mu s/div = 100S/div$$

可见, A 比 B 大 100 倍。在观测某部分细节时, A 示波器即使将波形放大 200 倍, 仍有 500 个点供显示局部的细节, 使显示部分真实可靠; 而 B 示波器统共才采集存储了 1k 个样点, 将局部放大 2 倍后, 再放大多少倍, 显示点数就少多少倍。

当然对 B 示波器用两种不同时基，亦可分别观测波形的全景和局部细节，但是它是两次采样分别得到的两个波形，而不少偶发故障不见得在两次采样中表现相同。所以既要观测全景又要观测细节用 A 示波器更好。正如照像时提供这样一种底片，不但几百人的合影清楚，而且把其中一个人放大成个人特写，头发睫毛都很清楚。而 B 示波器要想取得类似效果不但需要照两次像，并且个人照的表情未必和集体照中完全相同。若要几百人细节都清楚，得照几百张像了。

从以上分析可见，用示波器测量一个信号时，首先应考虑示波器的带宽能否满足被测信号的要求，然后再综合考虑被测信号对采样率和存储深度的要求，如果示波器的上升时间已知，还要考虑示波器的上升时间对被测信号的影响。

### 5、探头对被测信号的影响

探头往往是测量时被忽略的一个因素，而它对测量结果的影响几乎同示波器一样重要。每台示波器都配有自己专用的探头，带宽和上升时间都与示波器相匹配。虽然多数探头或者型号相同，或者性能参数相同，但还是不提倡混用。

$$t_{rise} = \sqrt{t_{osc}^2 + t_{sig}^2 + t_{probe}^2}$$

类型	带宽	上升时	输入电	输入阻
1X Passive Probe	15 MHz	23 ns	100 pF	1 MΩ
10X Passive Probe	100 MHz - 500 MHz	3.5 ns - 700 ps	13 pF - 8 pF	10 MΩ
Z0 Passive Probe	3 GHz - 9 GHz	120 ps - 40 ps	1 pF - 0.15 pF	500 Ω
Active Probe	500 MHz - 4 GHz	700 ps - 100 ps	2 pF - 0.4 pF	10 MΩ - 100 kΩ

探头的带宽和上升时间的选择与示波器相同，在实际测量中，实测得到的  $t_{rise}$  不仅与信号的上升沿有关，还与示波器的上升时间及使用探头的上升时间有关：

式中： $t_{rise}$ ——实际测量得到的上升时间；

$t_{osc}$ ——示波器的上升时间；

$t_{sig}$ ——信号的实际上升时间；

$t_{probe}$ ——探头的上升时间；

因此，在测量中，性能不同的探头所测得的波形会有差别，在补偿一致的情况下，带宽大，上升时间快的探头测量值更准确。

另外，探头的输入阻抗也影响测量的准确度，下表列出了不同种类探头的技术参数。

## 6、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，因此不适合作信号返回通路。这时一定要用探头的接地引线来作为信号的参考地线。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。

在电子测量中，接地是抑制干扰的主要方法之一，将设备的地线或接地面与大地实行低阻抗连接，接地的目的是：

- ① 给出设备的零电位基准；
- ② 防止在设备外壳或屏蔽层上由于电荷积聚、电压上升而造成人身不安全，或引起火花放电；
- ③ 将设备机壳或屏蔽层等接地，给高频干扰电压形成一个低阻抗通路，以防止它对电子设备的干扰。

另外，操作者也应佩带接地手镯，防止静电损坏被测电路中昂贵的 IC。

### 浮置

浮置是指电子测量装置的公共线（信号地线）不接大地。浮置与屏蔽接地相反，屏蔽接地的目的是将干扰电流从信号电路引开，即不让干扰电流流经信号线，而是让干扰电流流经机壳或屏蔽层到大地。浮置是阻断干扰电流的通路，测量系统被浮置后，加大了测试系统公共线与大地之间的阻抗，大大减少了共模干扰电流，可以提高共模干扰抑制能力，但是，浮置不是绝对的，测试系统公共线与大地之间的阻抗虽然很大（绝缘电阻级），可大大地减少电阻性漏电流干扰，但它们之间仍存在寄生电容，即容性漏电流仍存在。

许多示波器都可以象万用表一样浮置使用，它们的外壳经过特殊处理，不会积累电荷对人体构成威胁。如便携式示波器，信号参考点的选择非常灵活，给测试带来方便。

示波器用起来虽然非常方便，但只有在了解其性能的基础上使用，才能使测试准确可靠。另外，从被测试电路和示波器的安全来讲，也应对示波器的关键参数和使用注意事项作到心中有数。