

附录：实验六十六 数字示波器的原理与应用（讲义）

示波器是一种应用极其广泛的电子学测量仪器，主要用于电学量的时域测量。示波器的种类繁多，常见的有模拟示波器、数字示波器、取样示波器、存储示波器、高压示波器和行波示波器等。模拟示波器是最早发展起来的示波器，技术非常成熟，其优点主要是带宽宽、成本低。随着数字技术的进步，迅速发展起来的数字示波器拥有了许多模拟示波器不具备的优点：不仅具有可存储波形、体积小、功耗低，使用方便等优点，而且还具有强大的信号实时处理分析功能、输入输出功能、与计算机或其他外设相连实现更复杂的数据运算或信号高级分析功能。随着电子技术的进一步发展，数字示波器的应用将更加普及广泛，学习数字示波器的原理和应用具有重要的实际意义。

实验目的

1. 了解数字示波器的工作原理，掌握数字示波器的调节步骤及使用方法。
2. 学会用数字示波器观察、测量电信号的相关参量。
3. 了解李萨如图形成的原理，学会用李萨如图测量未知信号的频率。

实验原理

1. 数字示波器的硬件结构

数字示波器主要由采集信号单元、处理和存储的单元、触发单元、存储及控制单元和显示单元组成。典型的数字示波器结构如图 1 所示：

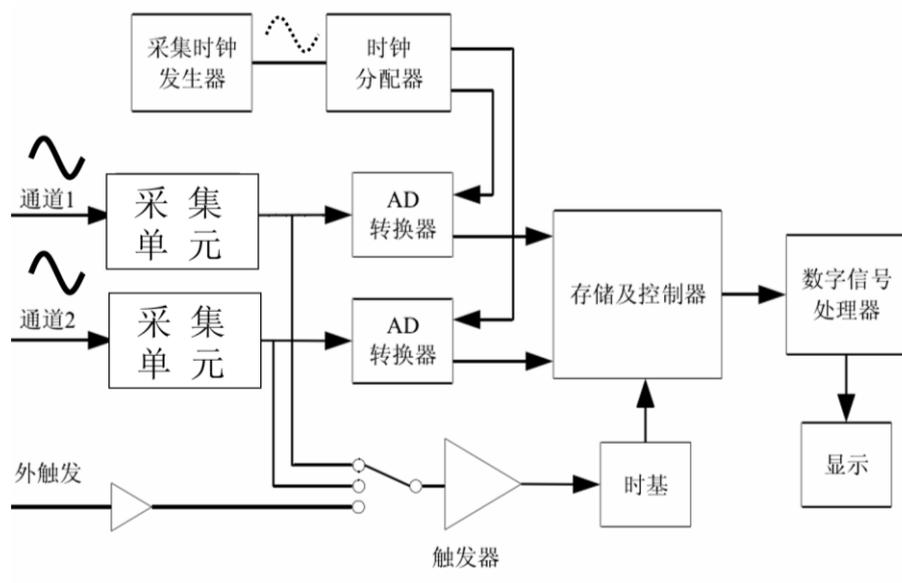


图 1 数字示波器内部结构框图

采集单元主要由输入探头、衰减器和放大器组成。信号处理和存储单元主要由模数转换器 Analog to Digital Converter(简称 ADC)、内存控制器和存储器组成。触发单元主要由触发电路及其控制开关组成。显示单元是由数据总线控制的液晶屏幕组成。

待测模拟信号通过探头接入示波器后，首先要进行适当的衰减然后再进行放大。当衰减器的衰减比较大值时，可以测试较大幅度信号，当衰减比较小或 0dB 时，通过放大器的调节，可以测试小幅度信号。实际操作中，调节示波器的垂直灵敏度，就是调节衰减器的衰减比。有的示波器衰减器和放大器是联动的，可以更好达到调节效果。经过调节的信号进入 ADC 进行模数转换数字化处理。数字化包括“取样”和“量化”两个过程，取样是获得模拟输入信号的离散值，而量化则是使每个取样的离散值经 A/D 转换成二进制数字，最后，数字化的信号在逻辑控制电路的控制下依次写入到 RAM 存储器中。通过接口总线系统程控数字存储示波器的工作状态，并使内部存储器和外部存储器交换数据成为可能。处理器 CPU 从存储器中依次把数字信号读出并在显示屏上显示相应的信号波形。

2. 数字示波器显示波形的原理

数字示波器首先采用数字电路，通过高速 ADC 模数转换器将模拟信号前端快速采样，转换成数字信息并将其存入存储器中，再利用数字信号处理技术对所存储的数据进行 D/A 数字/模拟转换，实时快速处理成模拟波形并标定其参数，显示在示波器的屏幕上。数字示波器不但测量精度高、速度快，还可以存储和调用显示特定时刻信号。

1) 模数转换原理

模拟信号输入，数字信号输出的流程如图 2 所示：

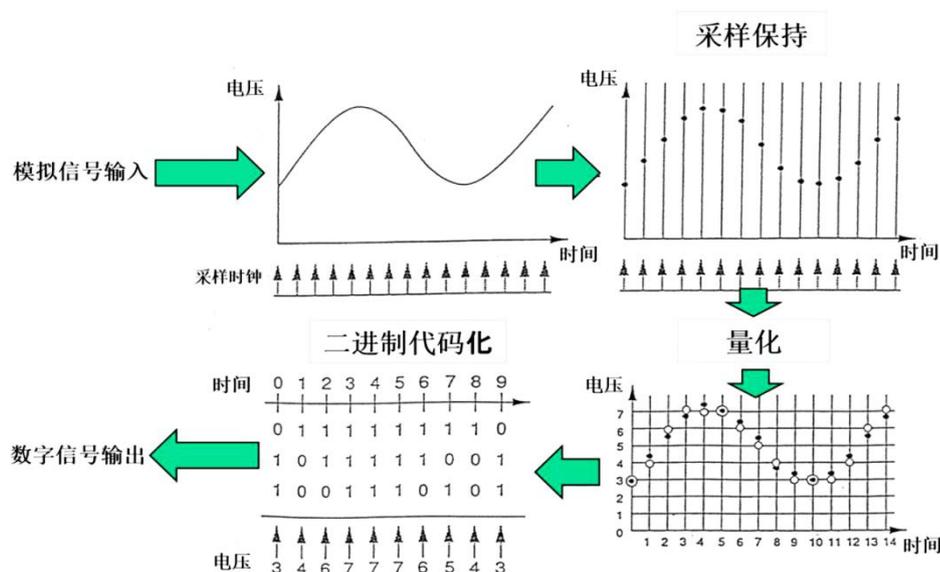


图 2 ADC 转换器处理信号流程图

这个过程由模数转换器即 ADC 转换器来完成。ADC 通常是指一个将模拟信号转变为数字信号电子元件。数字示波器中 A/D 转换的作用是将时间连续、幅值也连续的模拟电压量转换为时间离散、幅值也离散的数字信号。A/D 转换一般要经过采样、保持、量化及编码 4 个过程。由于数字信号本身仅仅表示一个相对大小，不具有实际意义，因此需要一个参考模拟量作为转换的标准，一般把可转换的最大信号当做参考标准，而输出的数字量则表示输入信号相对于参考信号的大小。

模数转换分辨率的高低是以输出二进制或十进制数字的位数多少作为衡量标准，位数越多，量化单位越小，对输入信号转换的分辨能力就越高。完成一次模数转换所需要的时间称为转换时间。一般定义转换时间的倒数为转换速度。ADC 的转换速度主要取决于转换电路的类型。

ADC 转换器工作方式主要有三种类型：逐次逼近法、双积分法、电压频率转换法。逐次逼近式 ADC 是比较常见的一种转换电路，转换的时间为微秒级。采用逐次逼近法的 A/D 转换器是由一个比较器、D/A 转换器、缓冲寄存器及控制逻辑电路组成，其结构如图 3 所示。

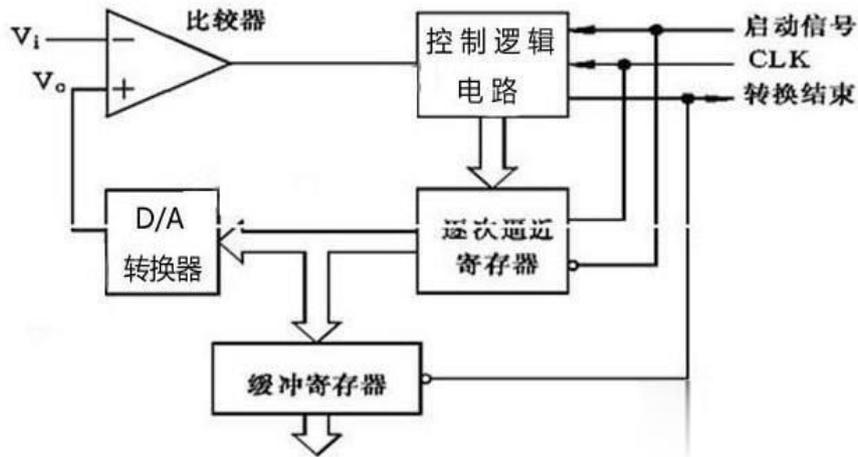


图 3 逐次逼近法 ADC 结构图

逐次逼近法 A/D 转换首先在初始化时将逐次逼近寄存器各位清零，转换开始时，先将逐次逼近寄存器最高位置 1，送入 D/A 转换器，经 D/A 转换后生成的模拟量送入比较器，称为 V_o ，与送入比较器的待转换的模拟量 V_i 进行比较，若 $V_i > V_o$ ，该位 1 被保留，否则被清除。然后再置逐次逼近寄存器次高位为 1，将寄存器中新的数字量送入 D/A 转换器，输出的 V_o 再与 V_i 比较，若 $V_i > V_o$ ，该位 1 被保留，否则被清除。重复此过程，直至逼近寄存器最低位。转换结束后，将逐次逼近寄存器中的数字量送入缓冲寄存器，得到数字量的输出。逐次逼近的操作过程是在一个控制电路的控制下进行的。

双积分法的 A/D 转换器一般由电子开关、积分器、比较器和控制逻辑等部件组成。基本原理是将输入电压变换成与其平均值成正比的时间间隔，再把此时间间隔转换成数字量，属于间接转换。

电压频率转换法的 A/D 转换器是由计数器、控制门及一个具有恒定时间的时钟门控制信号组成，它的工作原理是 V/F 转换电路把输入的模拟电压转换成与模拟电压成正比的脉冲信号。

ADC 转换器的种类繁多，按电路工作原理的不同，可分成间接 ADC 和直接 ADC 两种。间接 ADC 是先将输入模拟电压转换成时间或频率，然后再把这些中间量转换成数字量，常用的有中间量是时间的双积分型 ADC。直接 ADC 则直接转换成数字量，常用的有并联比较型 ADC 和逐次逼近型 ADC。

2) 采样原理

输入示波器的信号在水平方向时间轴和垂直方向电压轴上都是连续变化的，这样的模拟信号无法用数字的方法进行描述和处理，数字化的过程就是用高速 ADC 模数转换器对信号进行采样和量化的过程。采样有实时采样和等效采样两种模式。采样是等间隔进行的。对模拟正弦电压信号采样如图 4 所示：

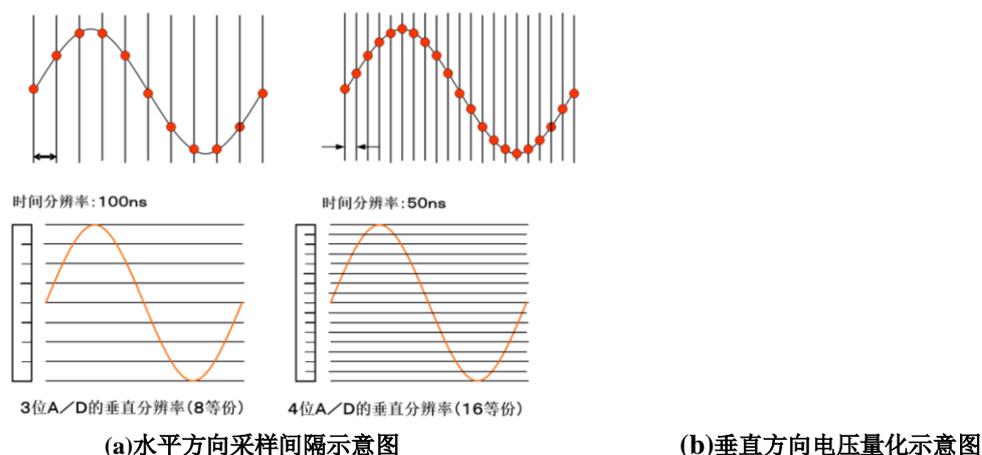


图 4 正弦信号采样示意图

经过模数转换采样后，在时间和电压上连续变化的波形就变成一个个有间隔的数字化的样点，在采样和量化过程中，能否真实地重建波形，取决于时间轴上采样点是否足够密集、垂直方向的电压的量化级数是否足够大。水平方向的采样点间隔取决于示波器的 ADC 模数转换器的采样率。如果采样率为 20MS/s，则采样点间隔，即时间分辨率为 50ns。垂直方向的电压量化级数取决于模数转换器的位数。N 位的 ADC 转换器可以把模拟量转换成 2^N 个二进制数。

数字示波器屏幕显示的波形由一系列密集的点构成，当被观察的信号在一个周期内采样点数不够多时，显示的波形是难以辨认的。一般标准认为采样频率要高于被测信号频率的 2.5 倍，此时波形可以很清晰完整的被显示出来。为了保证采样速率足够高，同时又不降低带宽指标，数字滤波器往往采用插值法处理数据，即在波形上两个测试点数据间进行估值。其估值方式主要采用矢量插值法和正弦插值法。矢量插值法是用斜率不同的直线段来连接相邻的点，正弦插值法是以正弦规律用曲线连接各数据点的显示方式。当被测信号频率为采样频率的 1/10 以下时，采用矢量插值可以得到满意的效果；正弦插值法能显示频率为采样频率的 1/2.5 以下的被测波形。

3) 触发原理

为了实时稳定地显示信号波形，示波器必须重复地从存储器中读取数据并显示。为使每次显示的曲线和前一次重合，必须采用触发技术。信号的触发也叫整部或同步，一般的触发方式为：输入信号经衰减放大后分送至 A/D 转换器的同时也分送至触发电路，触发电路根据一定的触发条件（如信号电压达到某值并处于上升沿）产生触发信号，控制电路一旦接收到来自触发电路的触发信号，就启动一次数据采集与 RAM 写入循环。

触发决定了示波器何时开始采集数据和显示波形，一旦触发被正确设定，它可以把不稳定的显示或黑屏转换成有意义的波形。示波器在开始收集数据时，先收集足够的数据用来在触发点的左方画出波形。示波器在等待触发条件发生的同时连续地采集数据。当检测

到触发后，示波器连续地采集足够的数​​据以在触发点的右方画出波形。

触发是示波器非常重要的特征之一，通过触发调节可以捕获目标信号波形，确定时间参考零点，稳定显示波形。

边沿触发是目前最常用的触发方式，包括上升沿触发、下降沿触发两种形式。边沿触发的工作原理如图 5 所示：

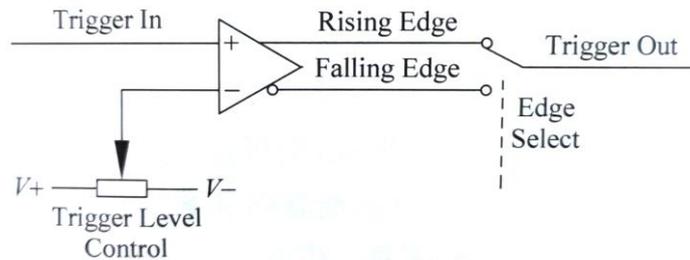


图 5 边沿触发工作原理图

首先根据待测信号电平范围，预设触发电平值，触发信号与触发电平比较，当触发信号穿越触发电平后，电压比较器将产生一个触发脉冲去驱动下一级硬件，完成边沿触发过程。

触发源可以从多种信源得到，如输入通道、市电、外部触发等。常见的触发模式有自动触发、正常触发和单次触发。常见的触发类型有边沿触发、边沿转换时间触发、毛刺触发、码型和状态触发、脉冲宽度触发、矮电平触发、建立时间和保持时间触发、超时触发、窗口触发、视频触发等多种。

4) 信息存储、波形重建和显示

信息存储：数字示波器的采样率很高，以现有的技术，示波器内部处理器的工作速度仍然无法实时处理采样点数据，因此数字示波器在 ADC 后面又有高速缓存，用来临时存储采样数据，这些缓存称为示波器的内存。缓存的大小定义为内存深度，是衡量示波器性能的一个重要指标，其单位是 Sample，即样点数，它决定了示波器一次连续采集所能采到的最大样点数。数字示波器的内存是非常高速的缓存，或者是通过高速解复用芯片控制的高速存储器，单位存储空间的成本很高。目前商用的数字示波器内存深度可以做到每通道 2G 样点。

波形重建：数字示波器把采集的一段数据存入到高速缓存后即停止采集，后面的处理器将缓存中的数据取出进行内插、分析、测量、显示。数字示波器中采用的处理器种类繁多。一般便携式示波器采用的是低成本的嵌入式微型处理器，有 Windows 平台的示波器则会使用 X86 平台通用的 CPU。这两种类型处理器无法满足实时示波器快速处理高采样率大量数据的需求，所以有些高端示波器则采用 DSP、FPGA 甚至专门研发的 ASIC 芯片来辅助进行数据处理，以加快波形重建和显示的速度。

波形显示：数字示波器的显示屏幕有 CRT 显示屏、液晶显示屏和容性触摸屏三种。

数字示波器必须把存储器中的波形显示出来以便观察、处理和测量。存储器中每个单元存储了一个抽样点的信息，在显示屏上显示为一个点，该点 Y 方向的坐标值决定于数字信号值的大小、示波器 Y 方向电压灵敏度设定值、Y 方向整体偏移量，X 方向的坐标值决定于数字信号值在存储器中的位置（即地址）、示波器 X 方向电压灵敏度的设定值、X 方向的整体偏移量。

为了适应对不同波形的观测、智能化的数字存储器有多种灵活的显示方式：存储显示、双踪显示、插值显示、流动显示等。存储显示是示波器最基本的显示方式。它显示的波形是由一次触发捕捉到的信号片断，稳定地显示在屏幕上。存储显示还有：连续捕捉显示和单次捕捉显示之分，在连续捕捉显示方式下，每满足一次触发条件，屏幕上原来的波形就被新存储的波形更新，而单次捕捉显示只保存并显示一次触发形成的波形。如果需要显示两个电压波形并保持两个波形在时间上的原有对应关系，可采用交替存储技术以达到双踪显示。这种交替存储技术利用存储器写地址的最低位 A_0 来控制通道开关，轮流对两通道输入信号进行取样和 A/D 转换，两个电压波形便可在屏幕上交替显示。

5) 数字示波器的主要指标

示波器的带宽：示波器的带宽标于示波器面板显示屏上端。带宽是示波器最重要的一个指标，它决定了示波器测量高频信号的能力。一般放大器，其增益不可能在任何频率下都能保持一致。示波器中采用的放大器也是如此。示波器中前端放大器工作频点从直流开始，其增益随着输入信号频率增高而下降。把放大器增益下降至-3dB 对应的频率点称为放大器的带宽。需要注意的是-3dB 的是按信号功率计算的，相当于信号功率增益下降了二分之一。示波器实际测量的是信号的电压，功率与电压的平方成正比，所以-3dB 增益相当于电压信号随着频率的增加下降到原来的 $\sqrt{2}/2$ 倍。

示波器的采样率：对模拟信号的采样和数字化是通过高速的 A/D 转换器完成的，示波器的采样率是指对输入信号进行 A/D 转换时采样时钟的频率。现在常用的数字示波器最大采样率均可达到每秒几个 GS/s 到几十个 GS/s。

示波器的死区时间 Deadtime：数字示波器的采样率很高，而现有的电子技术又无法对这么大的数据量进行实时处理，所以模数转换器采集完一段波形后必须停下来等待数据处理是显示。在这段处理和显示的时间段内，示波器既不响应触发也不进行波形捕获，因此定义这段时间为示波器的死区时间 Dead Time。如果死区时间过长，即两次波形采集间隔时间过长，示波器单位时间内能够捕捉和显示的波形数就会变少。所以通常会用波形捕获率的指标衡量示波器单位时间内能够捕获和处理波形的数量。一般数字示波器波形的捕获率为每秒几百次至几千次。

6) 示波器探头

市面上的示波器，输入接口一般是 BNC 或者 SMA、3.5mm 接头、2.92mm 接头、1.85mm 接头等同轴接口。如果被测信号输出端使用的是类似的同轴接口连接器，可以通过电缆直接连接到示波器的输入接口。如果被测信号的输出不是同轴连接器，就需要用探头把被测信号引入示波器接口。示波器一般自带 2 个探头。示波器探头种类繁多。一般分为有源探头和无源探头两大类，探头详细分类见图 6 所示：

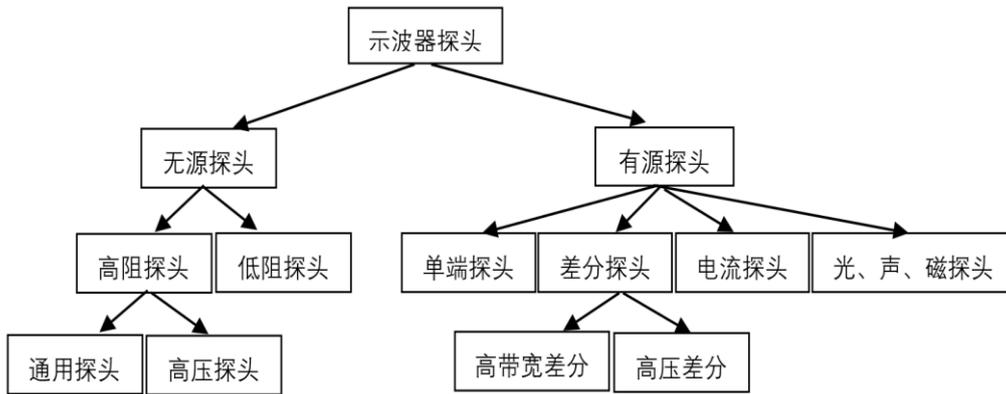


图 6 示波器探头分类

理想的探头应该对被测电路没有任何影响同时不会给信号带来失真。实际应用中很难二者兼顾。无源探头是指探头内部没有需要供电的有源器件，根据输入阻抗的大小又分为高阻无源探头和低阻无源探头两种。高阻无源探头是应用最为广泛的探头，高阻无源探头与示波器相连接时，要求示波器的输入阻抗达到 1M 欧姆。图 7 是高阻无源探头的原理图：

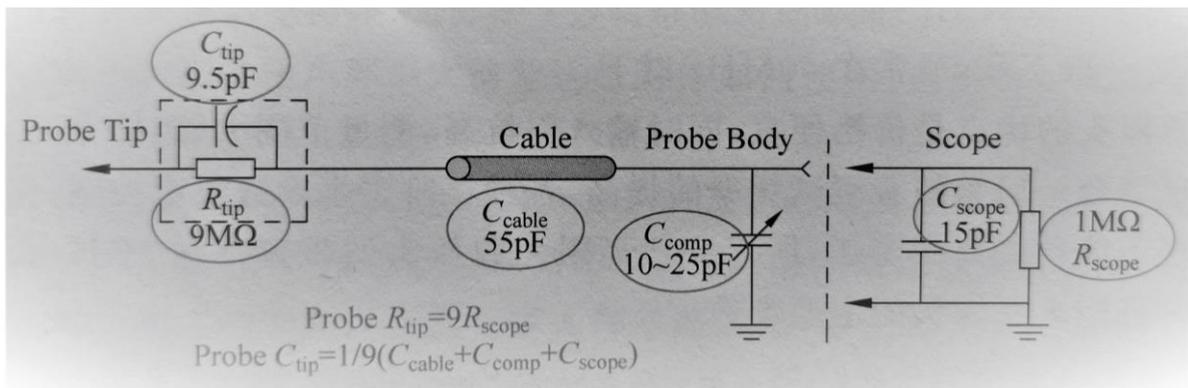


图 7 高阻无源探头原理图

为改善探头的高频响应特性，探头前端会设置相应的匹配电路，最典型的匹配电路由 R_{tip} 和 C_{tip} 组成的并联结构。高阻无源探头又分为高压探头和普通探头两种，高压探头有 100:1、1000:1 两种比例。普通探头即 1:1 输入比例。高阻无源探头价格便宜、输入阻抗高、测量范围大、连接方便，广泛应用于通用测试场合。

7) 波形参数测量及李萨如图：

① 波形参数测量

波形参数的测量可以直接读取屏幕显示的数据，也可以通过读取波形在水平、垂直两个方向占的格数，再乘以相应的灵敏度数值算出。

电压值测量：信号的峰峰值、最大值、最小值、顶端值、底端值、过冲、预冲、幅值等电压参量，各参量定义如图 8 所示。

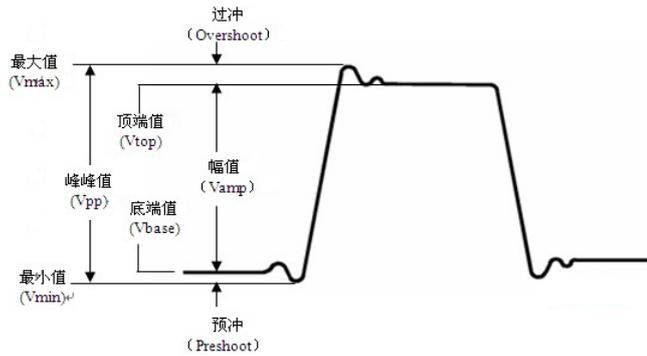


图 8 信号电压参量定义

时域信息测量，主要测量跟时间有关的量，如周期、相位延迟、相位差等参量，可间接计算出信号的频率。

②李萨如图形成原理

观察测量电压信号时，示波器 Y 轴输入待测电压信号，X 轴输入的是由时基电路控制的扫描信号。当 X 轴、Y 轴分别输入频率为 f_x 、 f_y 的正弦波时，屏幕上显示的是两个随时间变化的正弦波垂直合成的李萨如图形。李萨如图形在水平方向与 X 轴的切点数为 n_x ，垂直方向与 Y 轴切点数为 n_y ，切点数比值和频率比成反比关系：

$$\frac{f_y}{f_x} = \frac{n_x}{n_y}$$

信号频率已知，则可通过李萨如图形切点数比值，求出另一通道信号的频率。当 Y 轴输入的正弦波信号频率为 X 轴信号频率的 2 倍，即 $f_y/f_x = n_x/n_y = 2/1$ ，相位差为零时，李萨如图形成过程如图 9 所示。图 10 给出了几组简单整数比、不同相位时刻的李萨如图。

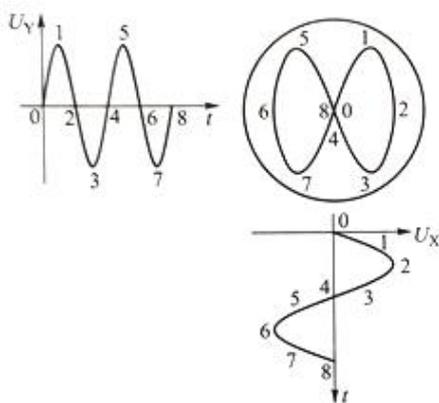


图 9 李萨如图原理示意图

$f_y/f_x \backslash \varphi$	0°	45°	90°	135°	180°
1	斜线	椭圆	圆	椭圆	斜线
$\frac{2}{1}$	8字形	8字形	8字形	8字形	8字形
$\frac{3}{1}$	3瓣形	3瓣形	3瓣形	3瓣形	3瓣形
$\frac{3}{2}$	3瓣形	3瓣形	3瓣形	3瓣形	3瓣形

图 10 简单整数比不同相位李萨如图

李萨如图常用来测量信号的频率和两个信号间的相位差。在实际的调节过程中，两个通道的信号往往是不同源的，即使频率满足简单的整数比，但实际上也存在微小的随机频率差，即相位差不是恒定的。此时李萨如图形会随时间发生变化不能保持稳定状态。如果两个信号源频率足够稳定，且可调信号源的频率可调节的分辨率足够小，李萨如图是可以调到相对稳定的状态的。

8) 示波器的面板设置

根据示波器硬件结构和相应部分的功能，示波器面板主要由 Vertical、Horizontal、Trigger、Measure、显示区域、标准信号输出端、通道 1 和通道 2 输入端、EXT In 输入端等几个部分组成。近年开发的新型示波器，自带信号源 Gen out 输出。

实验仪器：

数字存储示波器，电学黑匣子、信号发生器、电容、电阻、导线、信号线若干。

实验任务

1. 熟悉数字示波器、任意函数发生器的面板布局，掌握旋钮按键的名称、功能及调节方法；
2. 用数字示波器观察、测量信号发生器输出的正弦波、方波、三角波及示波器校准信号，熟悉示波器的调节步骤及测量电学参数的方法。要求：①调出稳定波形；②估测各波形的峰峰值；③估测各波形的周期，将估测结果与信号源显示及示波器面板标值对照，纠正操作错误；④利用光标测量频率为 50 Hz 的正弦波的周期和峰峰值。
3. 用示波器观测黑匣子输出的五个波形：①记录示波器自动显示参数的周期、峰峰值数据，②分别测量记录 X 轴、Y 轴光标数据，用以计算波形的周期、峰峰值。在坐标纸上分别画出五个信号一个周期的波形。
4. 用李萨如图形测量黑匣子正弦波的频率

待测信号：黑匣子输出的正弦波，频率未知；

已知信号：信号发生器输出的正弦波信号，频率已知，

分别调出三种不同频率比值的李萨如图形，记录某一时刻李萨如图的示意图、X 方向和

Y 方向的切点数及已知信号发生器输出信号频率，求出黑匣子未知正弦波信号的频率。

讨论题

1. 何为触发？如何调节触发使波形稳定？
2. 采样时间间隔即时间分辨率 10ns，采样率等于多少？8 位的 ADC 转换器，电压量化二进制数的个数等于多少？

参考文献

1. 李凯 现代示波器高级应用-测试及使用技巧 清华大学出版社 2017 北京
2. 孙灯亮 数字示波器的原理和应用 上海交通大学出版社 2012 上海
3. 林占江 电子测量技术 电子工业出版社 2006 北京