

数字示波器的原理及应用

【实验综述】

示波器是一种用途广泛的电子测量仪器，可以用来测量电学信号随时间变化。示波器不仅能观测电信号的波形，还能直接测量电信号的幅度、周期、频率和相位等参量。使用双踪示波器还可以测量两路信号之间的时间差。除此之外，示波器还可以配合各类传感器去观测一系列可以转化为电压的物理量，例如温度、位移、压力、光强、磁场等。因此示波器在电子、通讯、计算机、医疗、汽车、航天等行业具有广泛的应用。

根据实现原理不同，示波器可以分为模拟示波器和数字示波器两大类。历史上第一台示波器是由德国物理学家卡尔·费迪南德·布劳恩在 1897 年发明的。他在发明阴极射线管（Cathode Ray Tube，简称 CRT）后，在此基础上发明了 CRT 示波器。CRT 示波器是一种模拟示波器，具有实时性好、荧光显示真实、结构简单、价格便宜等优点。

美国物理学家与工程师 Walter LeCroy 在 1971 年借助模拟-数字转化技术发明了第一台数字存储示波器。进入 20 世纪 80 年代后，随着芯片与数字处理技术的发展，数字示波器获得了高速发展，迅速在触发、存储、带宽等方面超越了传统的模拟示波器。除了全面提升性能外，一些数字示波器还融合了软件分析功能，可以借助软件对硬件特性进行修正并实现数据处理，并通过开放的计算机接口为功能扩展提供了良好的硬件和软件基础。

【实验目的】

1. 了解数字示波器的主要结构和基本工作原理；
2. 熟悉数字示波器和信号发生器的基本调节和使用方法；
3. 掌握使用数字示波器测量输入信号的幅度、频率、周期和相位差等参量的方法；
4. 学习数字示波器在电学量及非电学量测量中的应用。

【实验原理】

数字示波器工作原理

随着半导体技术的发展，现代数字示波器的功能日益复杂，已发展为一个高度集成化的信号采集与处理显示系统，但其内部结构一般由以下几个部分组成，如图 1 所示：

1. 垂直信号模块：衰减器与放大器。
2. 触发模块：触发电路。
3. 水平时基模块：采样时钟。
4. 数据采集与存储模块：模数转换器（Analog to Digital Converter, 简称 ADC）、存储器等。
5. 波形重建与显示模块：数据处理器、显示系统等。

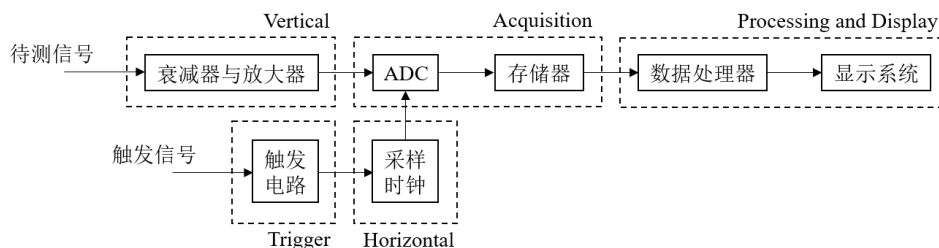


图 1 数字示波器工作原理框图

当待测信号通过示波器探头或者测试线缆进入示波器后，首先经过衰减器与放大器。衰减器通过电阻电路对信号进行减弱，放大器通过晶体管电路对信号进行放大。一般用**衰减（Loss）**和**增益（Gain）**来度量衰减器和放大器的作用，单位用 dB 表示。信号经过缩放后再进入 ADC。一般待测信号的电压范围较宽，峰峰值可从 1 mV 到 100 V 不等，而数字示波器常用的 ADC 具有固定的输入电压范围，例如峰峰值 1 V。因此，经过衰减器和放大器可调节输入信号至尽可能多的占据 ADC 的输入电压范围，充分利用 ADC 的测量精度。在垂直信号模块中，信号是由一系列不同衰减比的衰减器进行级联衰减后进入放大器的。在调节示波器时，改变衰减器的级联情况和放大器参数，可使信号的衰减和增益发生改变，从而调节示波器显示器上波形的垂直幅度。

待测信号通常是周期性变化的，具有特定的频率。这引出了数字示波器最重要的指标——**带宽（Bandwidth）**，单位为 Hz。这个参量决定了示波器测量高频信号的能力，既测量**频率上限**。它主要受衰减器和放大器的带宽影响。对于放大器，随着信号频率增加，其增益会随之下降。这导致它对信号幅度增益的偏差加剧，使信号波形失真。一般把放大器增益后输出正弦波的幅度不低于其理论输出幅度的 70.7%（称为-3 dB 点）的最高频率称为放大器的带宽。由于衰减器的电路主要由阻抗元件构成，在较大频率范围保持稳定的衰减比，带宽可达 10 GHz 以上。而放大器中用到晶体管和容抗等元件，因其频率响应特性，带宽相对较小，常见的在 100 MHz。因此，放大器是决定示波器带宽的主要电学元件。数字示波器的带宽也由放大器带宽标示。为了保证信号保真度，根据傅里叶级数展开原理，待测信号的频率一般不能超过数字示波器带宽的三分之一。

由于待测信号一般为电压模拟信号，在其调至合理的幅度后，需要由 ADC 进行数字化以供处理器进行后续数据处理。ADC 把输入的连续变化的电压信号转换为离散的数字采样点，然后存储在存储器中。ADC 对待测信号进行模数转换的最高速率被称为**采样率（Sampling rate）**，单位为 Sample/s，简称 Sa/s，即一秒钟采样点的数量。这个参量是数字示波器除带宽外另一项重要指标，一般可达每秒十亿次（1 GSa/s），一些先进的数字示波器的采样率可达每秒几百亿次。由于当前的数据处理器不能实时处理如此大的数据量，所以在 ADC 后配备存储器用来临时存储采样点，存满后再把数据传输给数据处理器。存储器的大小被称为**存储深度**，是数字示波器第三项重要的参量。存储深度的大小决定了数字示波器一次连续采样的最长时间，也被称为时间长度。可以使用以下公式计算：时间长度=存储深度/采样率。数字示波器必须在采集完一段数据后进行数

据处理与显示,这段时间采样停止,被称为数字示波器的死区时间,一般长于采集时间。由于死区时间的存在不可避免,数字示波器对一些偶发信号有测量不到的可能,使用时应该加以注意。一般来说,采样率越高,数字示波器的测量精度越高,如果存储深度有限,那么一次连续采样的时间长度会减小,导致死区时间占比增加,使得单位时间内测量的波形变少。因此如果需要高精度地采集较长时间,还需要扩充示波器的存储深度。

触发是示波器最关键的功能。在测量时,示波器需要满足特定条件才能显示稳定的波形。这是由触发模块帮助实现的。触发信号一般为频率固定的信号,既可来自于待测信号,也可由外部信号输入。触发电路通常采用施密特方式触发,它通过滞后比较电路有效降低噪声干扰,将触发信号转换成同频率的方波信号。这一方波信号经水平时基模块转换成水平时钟信号,用以确定存储器中记录采样点的时间起点和终点,最终将记录的数据反复刷新地以波形显示在显示器上。若正确触发,时钟信号便与待测信号的保持一定的时间关系,达到同步状态,每次刷新的波形基本保持一致,图像得以稳定,类似于模拟示波器的扫描同步过程。若未触发,存储器会以某个预设的时间起止点进行采样。由于预设水平周期和信号周期存在随机性的关系,不能保证同步,这些数据被显示时,无法形成稳定的波形。在调节时,一般通过改变记录数据的时钟信号调节示波器显示器上波形的水平延展情况。**触发斜率(slope)**决定了触发点是在信号的上升沿还是下降沿。斜率为正对应上升沿,斜率为负对应下降沿。**触发电平(trigger level)**决定了在起始边缘的触发点电压值,即显示器最左侧起点的电压水平。当触发电平处于触发信号范围内时,示波器才能正确触发。与模拟示波器不同,数字示波器因其采样特性还能采集存储触发前的数据,有助于了解待测信号在触发条件发生前后的变化。

为了正确触发,一般要保证三个方面的条件:第一,选择正确的触发信号源,第二,选择合适的耦合方式,例如对触发信号进行低通滤波消除噪声等,第三,调节触发电平至相对触发信号的合适大小。最终,实现触发,使示波器显示稳定的波形信号。

当采样点存入存储器后,数据处理器将数据取出进行内插、测量等数据处理,有的数字示波器可以对数据进行快速傅里叶分析、求导、积分等数学运算。数据经过处理器处理后,一般使用液晶屏进行显示。液晶屏点阵中的像素点的明暗状态可以用来显示文字、数字与波形。液晶屏的像素数决定了使用光标读数的精度。

信号发生器工作原理

信号发生器在电子设备测试与研发中具有重要作用。通过集成振荡器、放大电路、波形调节电路、控制电路等模块,信号发生器可以模拟不同的信号源,例如正弦波、方波、三角波与脉冲波,并且根据需求调节幅度、频率、相位与直流偏置大小。信号发生器通过 LC 振荡电路或者晶振等元件构成的振荡电路,产生周期信号,并可以调节频率。振荡器产生的信号可以通过调节放大电路的增益进行放大,从而得到需要的输出功率。再通过基于非线性元件的波形调节电路获得所需要的不同波形。最后,使用控制电路实现对输出信号的频率、幅度、相位等参数的调节。

【实验装置】

本实验以 RIGOL DS1102 型数字示波器和 RIGOL SG1020A 信号发生器为例分别对数字示波器和信号发生器进行实验装置介绍。不同型号数字示波器之间的操作面板有所区别，但主要功能相同，这里不再展开。

数字示波器

1. 测量菜单操作键。
2. 液晶显示屏。
3. 功能菜单操作键。
4. 多功能旋钮，可用于调节波形亮度，并在菜单操作时选择子菜单。
5. 功能菜单：
 - Measure: 可打开波形参数测量菜单。
 - Acquire: 可设置示波器的获取方式与存储深度。
 - Storage: 可设置数据储存的类型与调用。
 - Cursor: 用于进行光标测量。
 - Display: 用于设置波形显示的各项参数。
 - Utility: 用于设置系统功能。
6. 清除键。
7. 波形自动显示: 示波器将根据输入信号调整垂直档位、水平时基以及触发方式，使波形达到最佳状态。
8. 运行/停止控制键。
9. 单次触发。
10. 打印键。
11. 电源。
12. USB 接口。
13. 通道 1 与通道 2 输入。
14. 垂直控制区：
 - CH1 与 CH2: 通道设置键。
 - MATH: 可以对通道 1 与通道 2 的信号进行数学与逻辑运算。
 - REF: 可将实测波形与参考波形比较。
 - POSITION 旋钮: 调节当前通道的垂直位移。
 - SCALE 旋钮: 调节当前通道的垂直档位或偏转因数选择 (VOLTS/DIV)，按下旋钮可以使调节方式为粗调或细调。
15. 水平控制区：
 - POSITION 旋钮: 调节水平位移。
 - MENU: 可打开或关闭扫描功能，切换不同的时基模式。
 - SCALE 旋钮: 调节水平时基 TIME/DIV。
16. 外部触发输入。
17. 触发控制区:

MODE: 切换触发方式为 Auto、Normal 或 Single。

LEVEL: 调节触发电平。

MENU: 设置触发类型。

FORCE: 强制产生触发信号。

18. 探头补偿信号输出端/接地端。

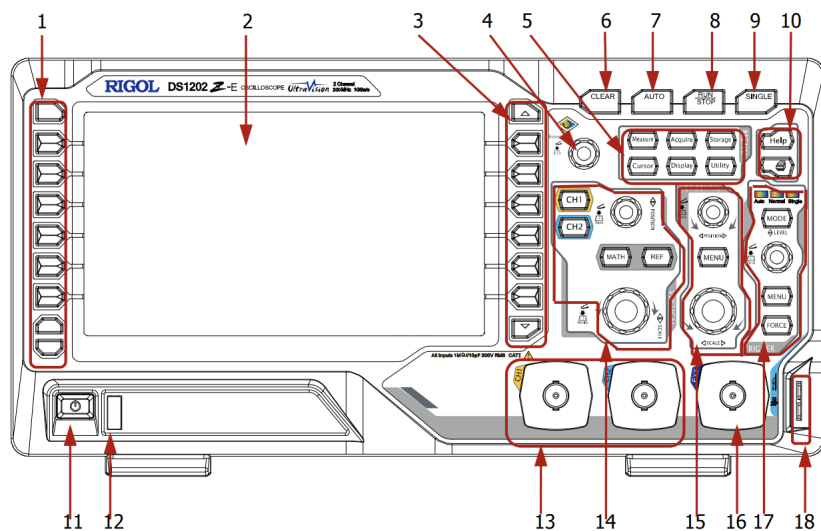


图 2 数字示波器前面板

数字示波器基本调节方法：

1. 将数字示波器初始化至默认设置状态。
2. 连入待测信号，开启相应通道。
3. 根据待测信号的幅度大小合理选择输入端的衰减比。
4. 选择合适的触发源。选择外部触发时，连入外部触发信号。
5. 合理调节波形在示波器屏幕上的水平位置和垂直位置，并调节垂直挡位和水平挡位，使屏幕上显示合适的波形。
6. 调节触发电平，稳定波形。
7. 使用示波器测量与数据分析选项，读取相关参数。

信号发生器

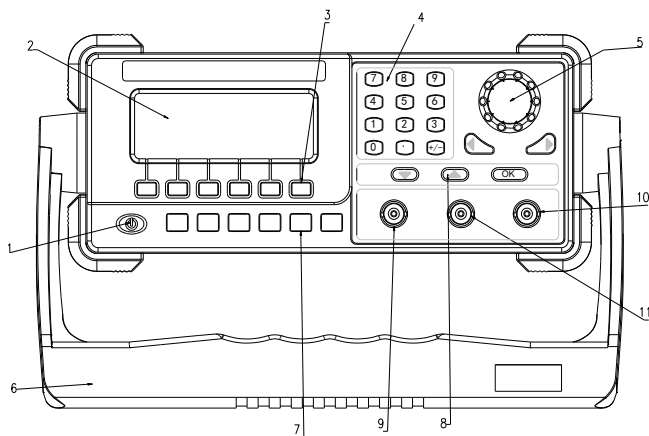


图 3 信号发生器前面板

1. 电源开关
2. 显示器
3. 软键
4. 数字键
5. 调节旋钮
6. 提手/支架
7. 主功能键
8. 方向/确认键
9. 外调幅输入
10. 电压（波形）输出
11. TTL 输出

信号发生器基本使用方法：

1. 将信号发生器初始化至默认状态，进入索引菜单。
2. 按实验要求，选定输出函数形式、频率、幅度和直流偏置大小。

【实验内容】

A.基础内容

1. 测量不同类型电压信号的幅值与频率

调节信号发生器分别产生频率不同、幅度不同的正弦波、方波与三角波信号，并接入数字示波器并调节，获得稳定的波形后，测量其峰峰值与频率。

（1）直读法

即直接从示波器荧光屏上量出被测电压波形的垂直刻度，然后转换成电压值，公式如下：

$$V_{p-p} = D \cdot h_{p-p}, \quad (1)$$

式中 V_{p-p} 是被测电压的峰峰值， D 为偏转因数（如 2 mV/DIV），可以通过示波器垂直控制区的 SCALE 旋钮调节，并从示波器屏幕上读取， h_{p-p} 为被测电压波形的峰峰垂直刻度间隔（单位：DIV）。

操作步骤如下，旋转 CH1 或 CH2 的 SCALE 旋钮，选择合适的偏转因数并调节 POSITION 旋钮，调节波形位置，使波形尽可能占满屏幕，但不能超出屏幕。读取被测电压峰峰值所占垂直刻度 h_{p-p} ，并代入公式计算 V_{p-p} 。

示波器通常通过测量周期 T_x ，然后由公式 $f = 1/T_x$ 来求出被测信号的频率。其测量公式为：

$$T_x = Q \cdot x, \quad (2)$$

式中 Q 表示时基因数（如 0.5 ms/DIV ），可以通过调整水平控制区的 **SCALE** 旋钮来确定，它的刻度范围表示示波器的频带宽度，可从示波器屏幕上读取。 x 表示被测波形周期对应的水平刻度间隔（单位：**DIV**）。

操作步骤如下，旋转水平控制区的 **SCALE** 旋钮，选择适当的时基因数并调节 **POSITION** 旋钮，调节波形位置，使波形尽可能以较少的周期占满屏幕。测量被测信号一个周期占有的格数 x ，进而求得周期和频率。

（2）光标法

在功能菜单区选择按键 **Cursor**，进入光标测量。选择“手动”模式，在该模式下将出现一对光标。在该模式下可选择在垂直方向（电压）和水平方向（时间）选择一条或一对光标，并通过多功能调旋钮整其位置，在屏幕上读取两条光标间的间隔或直接读取对应结果。通过调整光标的位置，分别测量信号的峰峰值与周期。

除了直读法与光标法之外，对于稳定的周期性信号，数字示波器可以直接读取峰峰值、周期、频率等被测信号参量。在功能菜单区，选择 **Measure** 按键，即可显示。

（3）校准与探头补偿

为了标定示波器的测量准确性，许多示波器都携带一个幅度与频率都十分准确的标准校准信号（正弦或方波信号，取决于示波器型号），标定时可将该信号接入示波器的输入端，按电压与频率的测量方法检查示波器测量结果是否与标准信号符合。若不符合，通过校准旋钮进行重新标定和校准。标准信号参数可通过查阅说明书获得。

为了对测量探头作补偿调整，提高测量保真度，有的示波器专门提供了补偿信号输出。该补偿信号输出仅用于探头补偿，不能用于示波器的标定和校准。

B.提升内容

2. 通过李萨如图形测量未知正弦波信号的频率

如果在示波器的 **X** 轴和 **Y** 轴都输入正弦变化的电压信号，两信号的频率 f_x 和 f_y 相同或成简单的整数比，则显示的波形将是两个互相垂直的正弦信号的合成，这种合成图形称为李萨如图形。当这两个信号的相位差 $\phi_y - \phi_x$ 不同时，同一频率比的李萨如图形的形状也有所不同。图 4 为三个典型的 $f_y : f_x$ 为不同频率比值时的李萨如图形。

参量		$\phi_y - \phi_x$				
$f_y:f_x$	1:2	0	$\pi/4$	$\pi/2$	$3\pi/4$	π
	1:3	0	$\pi/4$	$\pi/2$	$3\pi/4$	π
	2:3	0	$\pi/8$	$\pi/4$	$3\pi/8$	$\pi/2$

图 4 不同频率比和相位差的李萨如图形

理论推导表明李萨如图形满足以下关系：

$$f_y:f_x = N_x:N_y, \quad (3)$$

其中， N_x 和 N_y 分别是 X 方向与 Y 方向的一条直线与李萨如图形相交的最多交点格数，或相切的最少切点格数。可以利用这个关系用于未知信号的频率测量，例如当观察到图 4 第一行第二幅李萨如图形，如果已知 $f_x=100$ Hz，由图中虚线可知 $N_x = 2$ ， $N_y = 4$ ，根据公式可求得 $f_y=50$ Hz。

当 f_x 与 f_y 不满足简单整数比时，李萨如图形会不断翻转。随着 f_x 与 f_y 之比越偏离整数比关系，李萨如图翻转速度越快，越不稳定，反之，则李萨如图翻转速度越慢，越稳定。当 f_x 与 f_y 回到简单整数比时，李萨如图形又停止翻转，保持不变。

实验操作步骤如下：

- (1) 按动水平控制区的 MENU 键，在“时基”选项下选择 X-Y 模式。
- (2) 在垂直控制区，在 CH1 和 CH2 通道下，分别调整 POSITION 旋钮，使光点落在屏幕中央。
- (3) 将待测正弦波信号和信号发生器产生的正弦波信号分别接入示波器的 CH1 与 CH2。调节示波器垂直控制区相应通道 SCALE 旋钮，使波形尽可能占满屏幕。
- (4) 调整信号发生器输出信号的频率，使李萨如图形尽量稳定，选择多个不同频率比对李萨如图形进行观察，记录图形和相应数据，并计算待测正弦波频率。

3. 测量二极管正向导通电压和伏安特性

晶体二极管具有单向导通的作用，因此在交流电路中有整流作用。实验操作电路图如图 5 所示。将信号发生器输出端和示波器 CH1 接到电路的输入端（图 5 电路左侧两端），示波器 CH2 接到电路的输出端（图 5 电路右侧两端），观察输入、输出两端波形并理解整流的物理涵义。操作步骤如下：

- (1) 调整示波器至默认状态。
- (2) 调节信号发生器的输出信号(如频率为 2 kHz, 电压为 5 V 的正弦波信号)，

测量 CH1 信号的峰峰值 V_{1p-p} 。

- (3) 测量 CH2 信号的峰值 V_{2p} ，通过公式(4)计算二极管导通电压 $V_{\text{导}}$ ，

$$V_{\text{导}} = \frac{V_{1p-p}}{2} - V_{2p} \tag{4}$$

- (4) 逐步增大信号发生器的输出信号的幅值，测量 $V_{\text{导}}$ 随 V_{1p-p} 的变化关系。测量电阻 R ，分析二极管正向伏安特性。

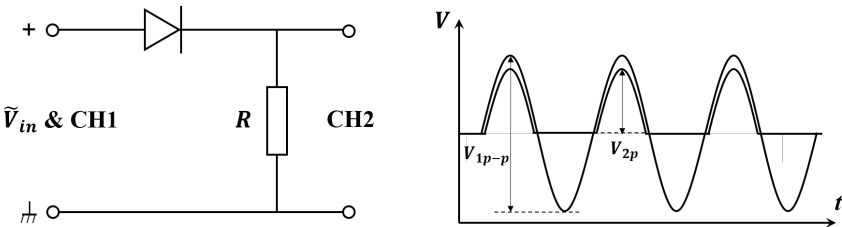


图 5 二极管测量电路和信号波形示意图

表 1 导通电压与输入电压关系表

编号	V_{1p-p}/V	$V_{\text{导}}/\text{mV}$
1		
2		
3		
4		
5		
6		
7		
8		
.....		

C.进阶内容

4. 使用驻波法测量超声波声速

超声波是一种纵波，在不同的介质中传播速度不同。在实验中，可以利用超声波的波动性使用驻波法测量声速。实验装置如图 6 所示，压电换能器可以实现电能与声能之间的可逆转化。将两个压电换能器作为超声波的发射端 S_1 与接收端 S_2 ，其中发射端固定，接收端可在有游标的标尺上移动。发射端与接收端都接在示波器上以观察波形，发射端与信号发生器相连作为超声波信号输入。

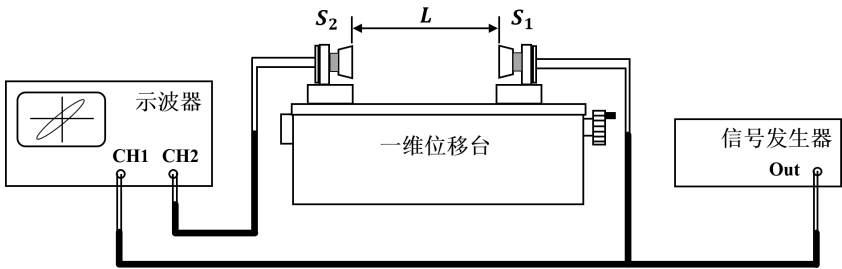


图 6 声速测量示意图

由于入射声波与反射声波相干叠加，两个换能器之间可形成如图 7 所示的的共

驻波现象。由纵波的性质可以证明，当接收器端面位于声压波节时，接收到的压力作用最大，经接收器转换成的电信号也最强。

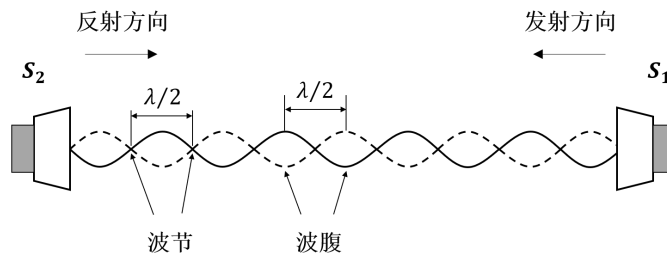


图 7 声驻波示意图

驻波共振的条件是发射端到接收端的距离 L 恰好等于半波长的整数倍，即

$$L_n = n \frac{\lambda}{2} \quad (n = 1, 2, \dots) \quad (5)$$

此时，将接收端信号输入示波器可以看到最大振幅，接收端每移动距离 ΔL 使示波器上再次观察到最大振幅，易得：

$$\Delta L = L_{n+1} - L_n = \frac{\lambda}{2} \quad (6)$$

再代入声速 v 、频率 f 和波长 λ 的关系公式：

$$v = \lambda f, \quad (7)$$

即可计算超声波声速。

操作步骤如下：

- (1) 调整示波器至默认状态，按实验要求连接实验装置。
- (2) 调节信号发生器输出幅度与频率，由接收端换能器测量，使发射端换能器输出声波产生的信号达到最大振幅。
- (3) 移动接收端换能器，观察干涉现象。
- (4) 在示波器上逐次观察到极大振幅波形，在极大时记录接收端换能器位置。
- (5) 记录信号发生器频率，计算声速。
- (6) 设计其他方案测量声速，并结合示波器和刻度尺精度分析声速测量精度。

5. 通过共振频率测量铜棒杨氏模量

对于杨氏模量大的材料，因其形变量太小，一般采用动态法测量。一根长度 L 远大于直径 d 的细铜棒，作微小弯曲振动时满足动力学方程（横振动方程）为：

$$\frac{\partial^4 y}{\partial x^4} + \frac{\rho S}{EJ} \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = 0, \quad (8)$$

其中， E 为杨氏模量，单位为 Pa 或 N/m²， ρ 为材料铜的密度， S 为截面积， J 为截面惯性矩， y 为垂直于棒的振动方向的位移。圆棒的截面惯性矩为，

$$J = \frac{\pi d^4}{64}, \quad (9)$$

其中 d 为铜棒截面直径。在棒两端为自由边界条件下求解方程得到棒的简谐振动频率满足，

$$\omega = \left(\frac{K_n^4 EJ}{\rho S} \right)^2 (K_n L = 0, 4.730, 7.853, 10.996, \dots) \quad (10)$$

因此，可得铜棒杨氏模量满足，

$$E = 1.6067 \frac{L^3 m}{d^4} f_1 \quad (11)$$

其中， L 为铜棒长度， m 为铜棒质量， f_1 为基频共振频率， d 为铜棒直径。

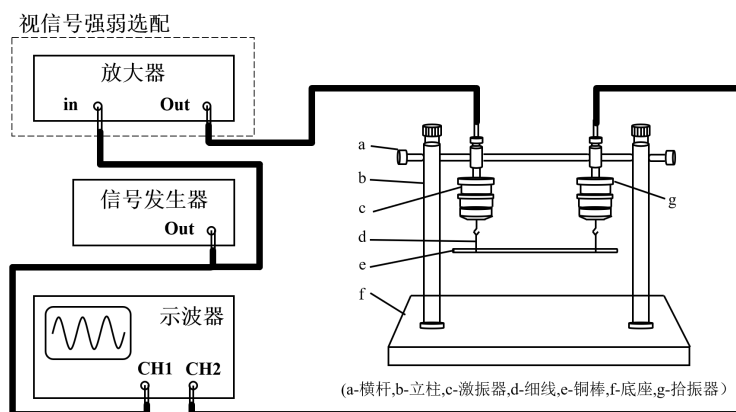


图 8 杨氏模量测量示意图

实验操作步骤如下，

- (1) 连接实验装置，将细丝分别悬挂铜棒的 $0.1L$ 与 $0.9L$ 处。
- (2) 查找铜棒杨氏模量标准值，先由(11)式估算出铜棒共振基频 f_1 ，以便寻找共振点。
- (3) 缓慢调节信号发生器频率，使其在基频附近扫描，观察示波器上信号的变化。当示波器显示的拾振信号峰峰值在某一频率达到极大，则认为信号发生器的激振频率与被测铜棒共振，记下该频率 f 。
- (4) 将两细丝以等间隔向里靠拢（间隔自行设计），分别记下频率。
- (5) 通过多项式拟合法由频率极小值获得铜棒的基频 f_1 。
- (6) 测量铜棒长度、质量和直径，代入公式(11)，计算铜棒的杨氏模量。

D.高阶内容

6. 测量 RC 电路相位差和时间常数

利用双通道数字示波器可以测量两信号之间的相位差，实验操作电路图如图所示。将信号发生器输出端接入电路的输入端（图 9 电路左侧两端），示波器的 CH1 接电路输入端，CH2 接电路的输出端（图 9 电路右侧两端），测量电容引起的滞后相位差 $\Delta\phi$ 。操作步骤如下：

- (1) 调整示波器至默认状态。
- (2) 调节信号发生器的输出信号（如频率为 2kHz, 电压为 5V），测量正弦波一个周期所占的间隔 x 值（单位：ms 或 μ s 等）。
- (3) 测量间隔 x_1 值（与 x 同单位）。

(4) 计算公式如下：

$$\Delta\phi = \frac{X \text{ 方向两个波形同相点间隔 } x_1}{X \text{ 方向一个周期所占的间隔 } x} \times 360^\circ. \quad (12)$$

(5) 设计实验测量 RC 电路的时间常数，研究 RC 电路的滤波特性。

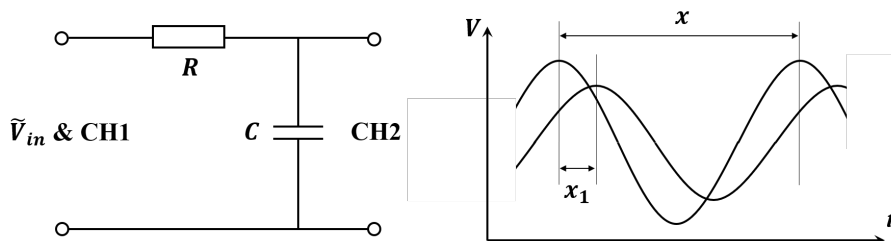


图 9 RC 测量电路和信号波形示意图

根据交流电路阻抗分压的规律，相位差满足关系

$$\Delta\phi = \arctan 2\pi fRC, \quad (13)$$

CH1 和 CH2 所得两个正弦波信号幅度不相等，如图 8 所示。相位差可以通过测量 X 方向上两个波峰间隔作为 x_1 值，也可以通过两个波谷及其他同相位点的间隔来获得。

7. 测量振荡信号频谱特征

利用数字示波器的傅里叶分析功能，可以直接获得测量振荡信号的频谱特征曲线，这可以很便利的应用于多种共振现象的研究。例如，RLC 串联谐振电路的驱动信号频率响应特征，共振峰半高宽与阻抗的关系等。另一方面，数字示波器存储的实时信号也可用于自行傅里叶分析，与示波器直接获得频谱结果进行对比。

- (1) 设计实验测量 RLC 串联电路的频率响应特性。
- (2) 设计实验通过拾音器测量铜线受迫振动的频谱特征。
- (3) 设计实验通过麦克风测量迷你扬声器和低音炮的频率响应特性。

【注意事项】

1. 使用数字示波器时，测量电路与示波器都需要良好接地。
2. 针对待测信号的幅度，需要正确选择合理的测量挡位。
3. 使用示波器前应先仔细阅读使用说明书，保证使用安全。

【思考题】

1. 预习思考题

- (1) 数字示波器能测量什么形式的信号，测量其何种参数？
- (2) 数字示波器为什么能显示被测信号的波形？
- (3) 数字示波器与模拟示波器有何区别，一般如何选择？
- (4) 数字示波器的触发与同步是如何实现的？
- (5) 数字示波器的输入阻抗是多少，如何影响测量结果？

2. 实验过程思考题

- (1) 当显示器上没有波形时，有可能是哪些原因引起的？
- (2) 当波形左移或右移时，应如何调整触发使波形平稳？
- (3) 在观察李萨如图形时，波形为什么会来回翻转，翻转的速度受什么因素影响？
- (4) 在测量二极管正向导通电压时，分压电阻上的电压随时间满足什么规律？
- (5) 如何调节激励信号频率以最快的找到共振信号？

3. 实验报告思考题

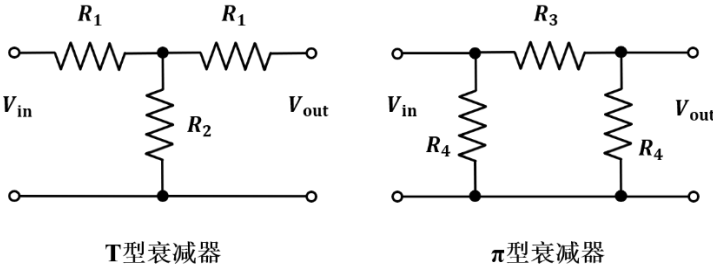
- (1) 示波器的电压和时间测量精度如何影响测量结果的精度？
- (2) 讨论李萨如图形测量未知信号频率的优点与不足。
- (3) RC 电路常用作电路的低通滤波器，请结合实验进行讨论。
- (4) 示波器频谱的精度和测量范围受什么因素影响，又如何影响测量？

【参考文献】

- [1] 李海洋等，大学物理实验 I. 高等教育出版社，2013
- [2] 孙灯亮，数字示波器原理和应用. 上海交通大学出版社，2012
- [3] 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
- [4] RIGOL: DS1000E-Z 系列数字示波器用户手册
- [5] RIGOL: SG1020A 系列数字合成信号发生器使用说明书
- [6] Tetronix: Sweep generator circuits, 1969

附录一、衰减器

一般情况下，衰减器在电路中是隔离信号源和负载并与它们串联的。它还需要与信号源和负载的阻抗相匹配，然后才能在设定的衰减（或衰减比下）正常工作。附录仅介绍信号源与负载阻抗相等且匹配的简单情况。



附图 1. T 型和 π 型衰减器

最常见的是上图所示的 T 型和 π 型衰减器。当需要获得更弱的信号时，可以串联的方式级联多个衰减器加以实现。衰减是度量衰减器性能的指标，单位为 dB，即分贝。分贝的定义式为，

$$\text{dB} = 10\log_{10}(P_{\text{in}}/P_{\text{out}}) \text{ 或 } \text{dB} = 20\log_{10}(V_{\text{in}}/V_{\text{out}}), \quad (\text{S1.1})$$

其中， P_{in} (V_{in}) 代表输入衰减器的信号功率（电压）， P_{out} (V_{out}) 代表衰减器输出的功率（电压），以电压定义分贝的关系式仅在信号源与负载阻抗相等时成立。因为电压关系更直观，我们后面讨论的衰减比通常指电压比。由(S1)式不难看出，当衰减分别为 6dB 和 10dB 的两个衰减器级联作用时，它们的总衰减为两者之和，即 16dB。

对于 T 型衰减器，假设其信号源和负载阻抗 $Z_{\text{in}} = Z_{\text{out}} = Z$ 恒定为电阻性 50Ω。那么相关参数如下，

$$K_T = \frac{V_{\text{in}}}{V_{\text{out}}} = 10^{\text{dB}/2}, \quad R_1 = Z \left(\frac{K_T - 1}{K_T + 1} \right), \quad R_2 = Z \left(\frac{2K_T}{K_T^2 - 1} \right), \quad (\text{S1.2})$$

其中， K_T 为 T 型衰减器的衰减比， R_1 和 R_2 代表衰减器的电阻。相关参数可以列出下表：

T 型衰减器电阻参数			
输入输出阻抗： $Z_{\text{in}} = Z_{\text{out}} = Z = 50 \, \Omega$			
衰减/dB	衰减比/ K_T	R_1/Ω	R_2/Ω
1.0	1.12	2.88	433.34
2.0	1.26	5.73	215.24
3.0	1.41	8.55	141.93
4.0	1.58	11.31	104.83
6.0	2.00	16.61	66.93
10.0	3.16	25.97	35.14
20.0	10.00	40.91	10.10

对于 π 型衰减器，同样假设其信号源和负载阻抗 $Z_{\text{in}} = Z_{\text{out}} = Z$ 恒定为电阻性 50Ω。那

么相关参数如下，

$$K_{\pi} = \frac{V_{in}}{V_{out}} = 10^{\text{dB}/2}, \quad R_3 = Z \left(\frac{K_{\pi}^2 - 1}{2K_{\pi}} \right), \quad R_4 = Z \left(\frac{K_{\pi} + 1}{K_{\pi} - 1} \right),$$

(S1.3)

其中， K_{π} 为 π 型衰减器的衰减比， R_3 和 R_4 代表衰减器的电阻。相关参数可以列出下表：

π 型衰减器电阻参数			
输入输出阻抗: $Z_{in} = Z_{out} = Z = 50 \Omega$			
衰减/dB	衰减比/ K_{π}	R_3/Ω	R_4/Ω
1.0	1.12	5.77	869.55
2.0	1.26	11.61	436.21
3.0	1.41	17.61	292.40
4.0	1.58	23.85	220.97
6.0	2.00	37.35	150.48
10.0	3.16	71.15	96.25
20.0	10.00	247.50	61.11

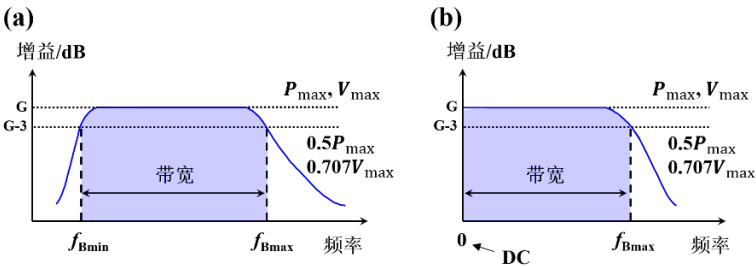
附录二、放大器

自 1906 年真空三极管问世以来，放大器经历了不断的升级换代，如 1947 年贝尔实验室的点接触晶体管，1948 年的双极结型晶体管（BJT），再到 1958 年贝尔实验室的金属氧化物半导体场效应晶体管（MOSFET），放大器的尺寸越来越小，极大地推动了电子测量技术的发展。增益是度量放大器性能的指标，单位也为 dB，即分贝。其定义式为，

$$G(\text{dB}) = 10\log_{10}(P_{out}/P_{in}),$$

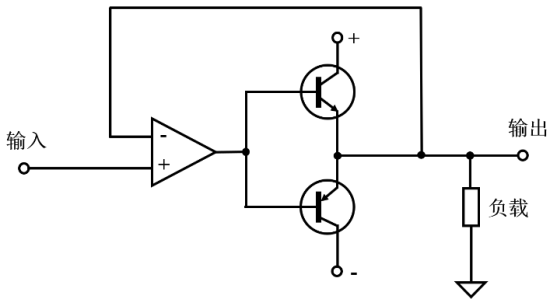
(S2.1)

其中， P_{in} 代表输入衰减器的信号功率， P_{out} 代表衰减器输出的功率。放大器的带宽是指放大器提供“可靠性能”的频率范围。对于不同的应用，“可靠的性能”的定义可能不同。一个常用且被广泛接受的度量方法是输出信号频谱曲线的半功率点（即功率下降到其峰值一半的频率，或电压降到其峰值的 0.707 倍的频率）法。带宽一般定义为上半功率点和下半功率点之间的频率差，如附图 2.1。当峰值功率放大器的增益为 G dB 时，半功率点的增益则为 $G-3$ dB。因此，它也被称为-3 dB 带宽。常用示波器的带宽为 DC-100 MHz，指的就是下半功率点为 0 Hz，上半功率点为 100 MHz。



附图 2.1 放大器增益频谱曲线与带宽

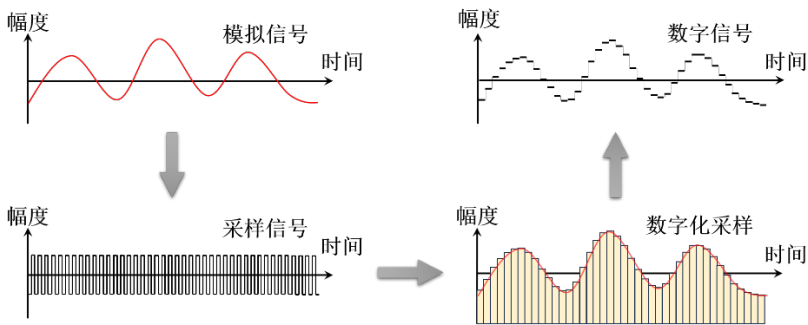
下图举例展示了推挽放大器（Push-pull amplifier）的电路示意图。推挽放大器是基于一对互补的晶体管，并使用有源器件的电子电路。这些有源器件交替地向连接的负载提供电流，其中一个晶体管从负载接收电流导入电源负端或地端，另一个晶体管从电源正端向负载输出电流。推挽放大器的电路结构经常应用于 TTL 和 CMOS 数字逻辑电路中，相比单端的“A类”放大器更有效率，但却更容易因输入波形的两半被不相等地放大引起交叉失真。



附图 2.2 推挽放大器电路示意图

附录三、模数转换器 ADC

模数转换器（ADC 或 A/D）是一种将模拟信号（如麦克风拾取的声音或数码相机摄取的光）转换为数字信号的系统；数模转换器（DAC 或 D/A）则是它的逆系统，可将数字信号转换成模拟信号。模拟信号在时间上是连续的，经 ADC 获得的数字信号在时间上则表现出离散性，存在一个信号保持不变的时间间隔。这一间隔由 ADC 的采样率决定，是采样率的倒数。数字信号能通过重构滤波器再现原始信号。根据奈奎斯特-香农采样定理，只有当 ADC 采样率高于信号最高频率的两倍时，才有可能忠实地再现原始信号。以示波器为例，一般其采样率为 1 GSa/s，对应奈奎斯特-香农频率极限为 0.5 GHz。这意味着频率在 0.5 GHz 以下的信号才能被正确地采集和测量。而一般示波器使用的放大器带宽小于奈奎斯特-香农频率极限。因此，由采样率带来对信号频率的限制一般可以不予考虑。



附图 3.1 ADC 模数转换示意图

除采样率以外，ADC 的另一项重要指标是**分辨率**。它表示在 ADC 允许的模拟输入值范围内可以产生的不同值，即离散值的数量，一般用 bit 表示其单位。例如，一个 8 bits 的 ADC，可以产生 $2^8 = 256$ 个不同的数字信号。假设其输入电压范围为 0-1 V，则其对模拟信号的电压分辨率为 $1/255$ V，约 3.92 mV。概括来说，ADC 的分辨率满足下面关系，

$$R = \frac{V_r}{2^M - 1}, \quad (\text{S3.1})$$

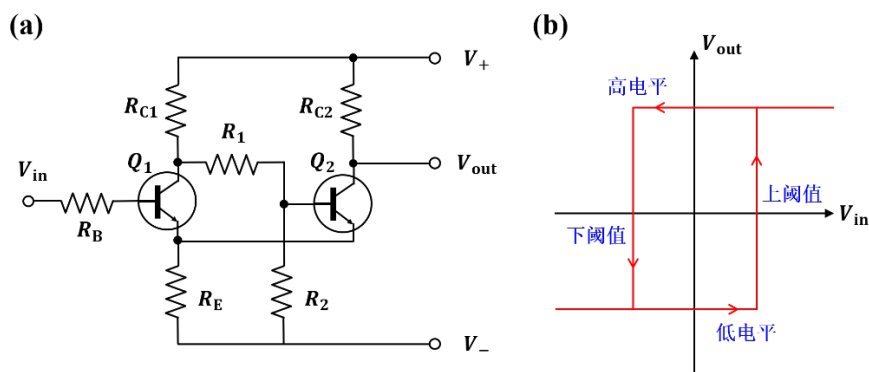
其中, R 为 ADC 的电压分辨率, V_r 为 ADC 输入电压的上下限的最大范围, M 为 ADC 的分辨率。在实际应用中, 可以通过电路前端的衰减器和放大器提升 ADC 对待测信号的有效电压分辨率。目前通用数字示波器的 ADC 分辨率为 8 bits。

附录四、施密特触发

电路的触发, 有很多不同的实现方案, 如采用比较器、单稳多谐振荡器和双稳多谐振荡器等。施密特触发 (Schmitt trigger) 是目前示波器较为普遍采用的一种方式, 它是通过向比较器或差分放大器施加正反馈来实现的带有滞后的比较器电路, 如附图 4.1(a) 所示。施密特电路的输出端一般会保持其输出值, 直到输入发生足够的变化以触发变化。当输入高于所选阈值时, 输出为高电平。当输入低于另一 (较低的) 所选阈值时, 输出为低电平, 当输入在两个电平之间时, 输出就保持其值。这种双阈值作用被称为滞后, 相应的传递函数曲线如附图 4.1(b) 所示。根据电路基本原理, 可以得到阈值电压的近似表达式为,

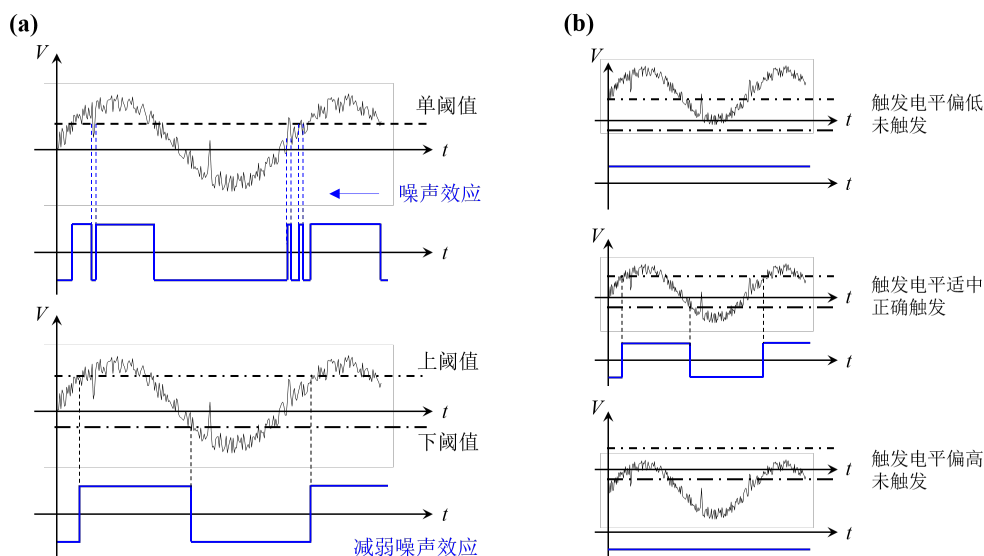
$$V_{HT} = \frac{R_E}{R_E + R_{C2}} V_+ \text{ 与 } V_{LT} = \frac{R_E}{R_E + R_{C1}} V_+, \quad (\text{S4.1})$$

其中, V_{HT} 为上阈值电压, V_{LT} 为下阈值电压。实际电路中可反转施密特触发电路的极性, 从而改变触发斜率, 使触发过程从上升沿触发转变为下降沿触发。



附图 4.1 施密特触发, (a) 电路示意图, (b) 传递函数曲线

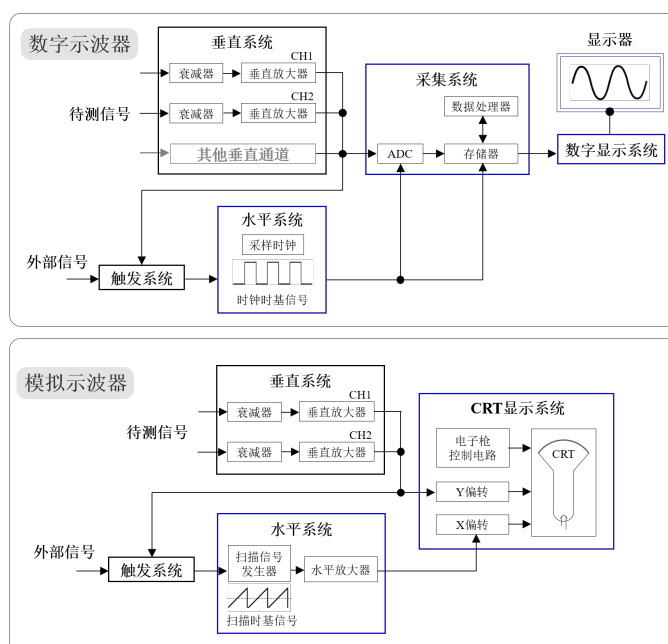
施密特触发因其双阈值的滞后特性, 可以减弱触发信号中的噪声影响, 如附图 4.2(a) 所示。应用中, 还可以通过调节触发电路中的电阻等参数, 以调节上下阈值电压, 从而实现对触发电平的调节, 以匹配输入的触发信号, 实现正确触发, 见附图 4.2(b)。



附图 4.2 (a)触发电路信号对比, (b)正确触发的实现

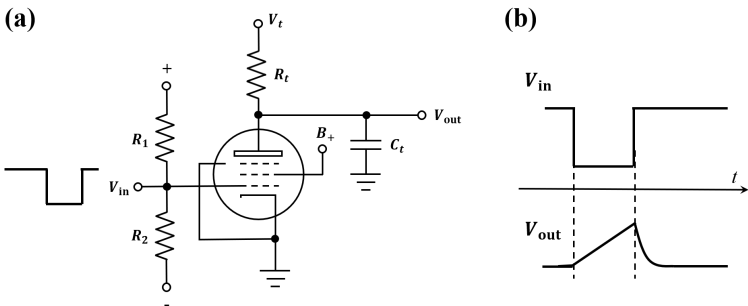
附录五、数字示波器与模拟示波器

数字示波器是在半导体集成电路和芯片技术的基础上从模拟示波器发展而来,它的基本功能在很大程度上和模拟示波器保持一致,调节方法也基本相同。附图 5.1 展示了它们的工作原理图的对比。由于配有存储器和处理器等组件,数字示波器在数据的采集、处理以及分析方面相较模拟示波器已经有了质的提升。而模拟示波器则因采用 CRT 显示器,在显示数据波形图像方面具有更好的连续性和即时性。随着 ADC 分辨率、采样率等参数的优化和存储器和处理器的升级,目前高性能的数字示波器在波形显示方面已经和模拟示波器没有明显区别。



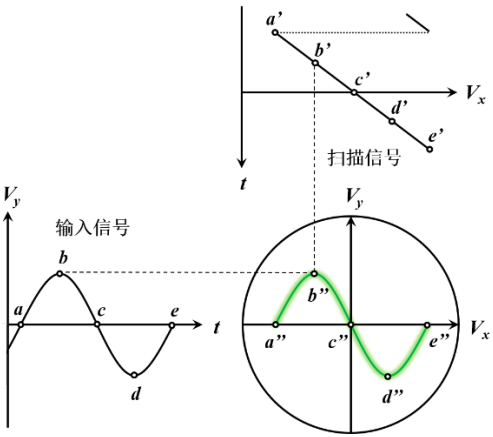
附图 5.1 数字与模拟示波器原理框图对比

模拟示波器与数字示波器还有一个关键区别在于水平系统的调控。在通过触发电路获得方波信号后，数字示波器通过方波时钟信号实现同步显示波形，而模拟示波器则采用扫描发生器（Sweep generator）将方波信号转换成同频率的锯齿波信号再放大。放大后，锯齿波信号进入 CRT 的 X 偏转极板，对 CRT 中电子束的运动在水平方向上进行随时间增长地线性偏转，最终实现模拟示波器的同步扫描。附图 5.2(a)展示了一种基于真空管的扫描发生器（Gated-clamp-tube generator）电路，它通过周期性的对 RC 电路充放电实现近线性的锯齿形扫描信号，对应的输入输出信号如附图 5.2(b)所示。这里所采用的恒定电压 V_t 较大且 RC 电路拥有较长的时间常数，以确保短时间的充电过程具有较高的线性度，符合锯齿波的特征。



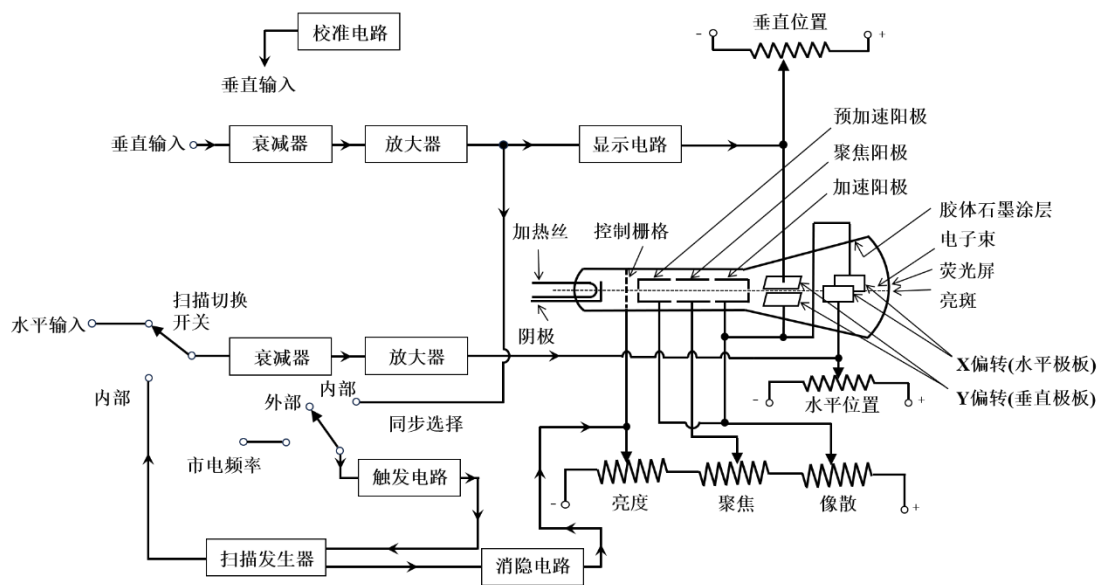
附图 5.2 (a) 扫描发生器电路示意图和(b) 输入输出信号关系图

附图 5.3 和 5.4 分别展示了模拟示波器的同步扫描和 CRT 工作原理示意图。其中，控制 CRT 的部分还包含消隐电路。它主要是在电子束回扫的短暂过程中在控制栅格施加负电压，用来阻隔电子束，消除电子束的回扫亮斑。

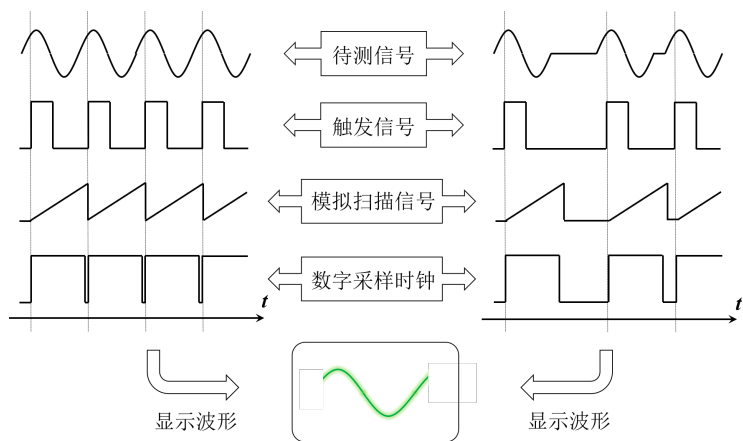


附图 5.3 同频率同步扫描示意图

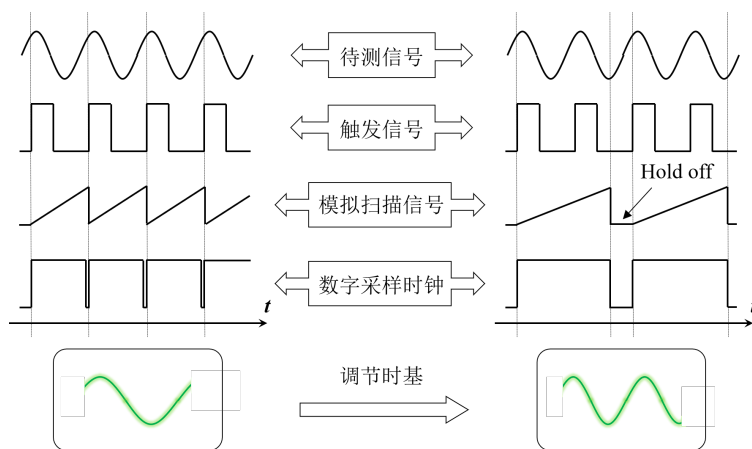
最后附图 5.5 和 5.6 展示了数字与模拟示波器触发同步过程的举例以及调节时基旋钮的效果，以帮助建立清晰的认识。



附图 5.4 CRT 工作原理示意图



附图 5.5 示波器触发同步举例示意图



附图 5.6 示波器调节时基示意图