

## 6.2.1 交流电及整流滤波电路

(本文内容选自高等教育出版社《大学物理实验》)

在现代工农业生产和日常生活中,广泛地使用着交流电。主要原因是与直流电相比,交流电在生产、输送和使用方面具有明显的优点和重大的经济意义。例如在远距离输电时,采用较高的电压可以减少线路上的损失。对于用户来说,采用较低的电压既安全又可降低电气设备的绝缘要求。这种电压的升高和降低,在交流供电系统中可以很方便而又经济地由变压器来实现。此外,异步电动机比起直流电动机来,具有构造简单、价格便宜,运行可靠等优点。在一些非用直流电不可的场合,如工业上的电解和电镀等,也可利用整流设备,将交流电转化为直流电。

交流电的电压(或电流)随时间作周期性变化。实际上,所谓交流电包括各种各样的波形,如正弦波、方波、锯齿波等。本实验中,我们主要讨论正弦交流电。其原因在于,正弦交流电在工业中得到广泛的应用,它在生产、输送和应用上比起直流电来有不少优点,而且正弦交流电变化平滑且不易产生高次谐波,这有利于保护电气设备的绝缘性能和减少电气设备运行中的能量损耗。另外各种非正弦交流电都可由不同频率的正弦交流电叠加而成(用傅立叶分析法),因此可用正弦交流电的分析方法来分析非正弦交流电。

本实验的目的是掌握交流电路的基本特性及交流电各参数的测量方法。了解整流滤波电路的基本工作原理。

### 实验原理

#### 1. 交流电路

正弦交流电的表达式如下,其曲线如图 6.2.1-1 所示。

$$\begin{aligned} i(t) &= I_p \sin(\omega t + \varphi_1) \\ u(t) &= U_p \sin(\omega t + \varphi_2) \end{aligned} \quad (1)$$

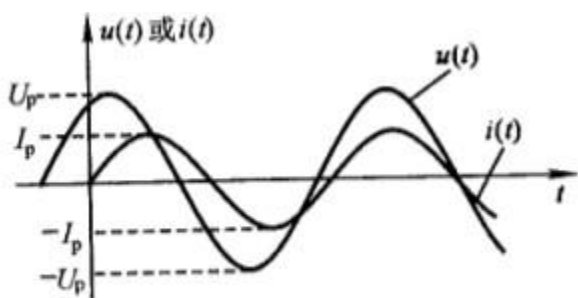


图 6.2.1-1 正弦交流电电压和电流曲线

由此可见,正弦交流电的特性表现在正弦交流电的大小、变化快慢及初始值方面。而它们分别由幅值(或有效值)、频率(或周期)和初相位来确定。所以幅值、频率和初相位被称为正弦交流电的三要素。

#### (1) 幅值、频率值和有效值

##### 1) 幅值

峰值或最大值,记为  $U_p$  或  $I_p$ ,峰点电位之差称为“峰-峰值”,记为  $U_{p-p}$  和  $I_{p-p}$ 。显然  $U_{p-p} = 2U_p$ ,  $I_{p-p} = 2I_p$ 。

## 2) 平均值

令  $i(t)$ 、 $u(t)$  分别表示时间变化的交流电流和交流电压，则它们的平均值分别为

$$\bar{i} = \frac{1}{T} \int_0^T i(t) dt \quad \bar{u} = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) dt \quad (2)$$

这里  $T$  是周期，平均值实际上就是交流信号中直流分量的大小，所以图 6.2.1-1 所示的正弦交流电的平均值为 0。

## 3) 有效值

在实际应用中，交流电路中的电流或电压往往是用有效值而不是用幅值来表示。许多交流电流或电压测量设备的读数均为有效值。有效值采用如下定义：

$$I = \left[ \frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) dt \right]^{\frac{1}{2}} \quad U = \left[ \frac{1}{T} \int_0^T u^2(t) dt \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

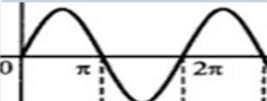


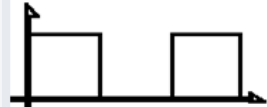
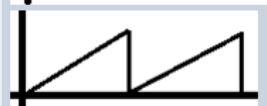
表 6.2.1—1 常见交流电的有效值、峰值和平均值的换算关系

对于具有 (2) 式性质的纯正弦交流电来说，上述计算结果

为：  $I = \frac{I_p}{\sqrt{2}} \quad U = \frac{U_p}{\sqrt{2}}$ 。

通常我国使用的市电电压为 220V，意指其有效值  $U=220V$ ，因此它的峰值

$U_p = \sqrt{2}U \approx 311V$ ，表 6.2.1—1 表示常见交流电的有效值、峰值和平均值的换算关系。

名称	波形	峰值	平均值	总有效值
正弦波		$U_p$	0	$U_p/\sqrt{2}$
半波正弦		$U_p$	$U_p/\pi$	$U_p/2$
全波正弦		$U_p$	$2U_p/\pi$	$U_p/\sqrt{2}$
方波		$U_p$	$U_p/2$	$U_p/\sqrt{2}$
锯齿波		$U_p$	$U_p/2$	$U_p/\sqrt{3}$

总有效值 (交流+直流成分)

## (2) 周期与频率

正弦交流电通常用周期 ( $T$ ) 或频率 ( $f$ ) 来表示交变的快慢，也常常用角频率 ( $\omega$ ) 来表示，这三者之间的关系是

$$f = \frac{1}{T} \quad \omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f \quad (4)$$

需要指出的是：同频率正弦交流电的和或差均为同一频率的正弦交流电。此外，正弦交流电对于时间的导数 ( $\frac{di(t)}{dt}$ ) 或积分 ( $\int i(t) dt$ ) 也仍为同一频率的正弦交流电。这在技术上具有十分重要的意义。

### (3) 初相位

交流电  $t=0$  时的相位 ( $\varphi$ ) 称为交流电的初相位。它反映了正弦交流电的初始值。它反映了正弦交流电的初始值。在实际电路中由于电流、电压之间的位相不同, 电器的平均功率  $P=U I \cos \varphi$  ( $\cos \varphi$  称为功率因数),  $\cos \varphi$  越大, 电路能量的利用率越高, 损耗越小。功率因数是电力工业中需要考虑的一个重要问题。

## 2. 整流和滤波

整流电路的作用是把交流电转换成直流电, 严格地讲是单方向大脉动直流电, 而滤波电路的作用是把大脉动直流电处理成平滑的脉动小的直流电。

### (1) 整流原理

利用二极管的单向导电性可实现整流。

#### 1) 半波整流

图 6.2.1-2 中  $D$  是二极管,  $R_L$  是负载电阻。若输入交流电为

$$u_i(t) = U_p \sin \omega t \quad (5)$$

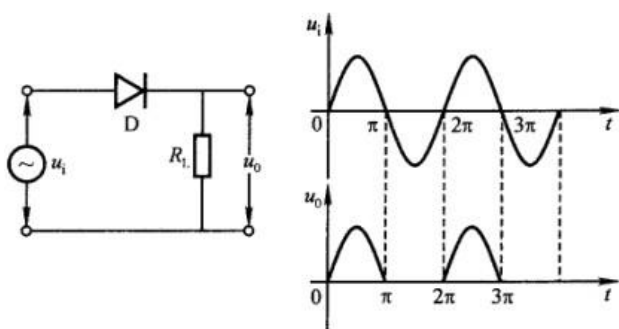


图 6.2.1-2 半波整流电路及其波形图

则经整流后输出电压  $u_o(t)$  为 (一个周期内):

$$\begin{aligned} u_o(t) &= U_p \sin \omega t & 0 \leq \omega t \leq \pi \\ u_o(t) &= 0 & \pi \leq \omega t \leq 2\pi \end{aligned} \quad (6)$$

其相应的平均值 (即直流平均值, 又称直流

$$\text{分量}) \bar{u}_0 = \frac{1}{T} \int_0^T u_o(t) dt = \frac{1}{\pi} U_p \approx 0.318 U_p \quad (7)$$

#### 2) 全波桥式整流

前述半波整流只利用了交流电半个周期的正弦信号。为了提高整流效率, 使交流电的正负半周

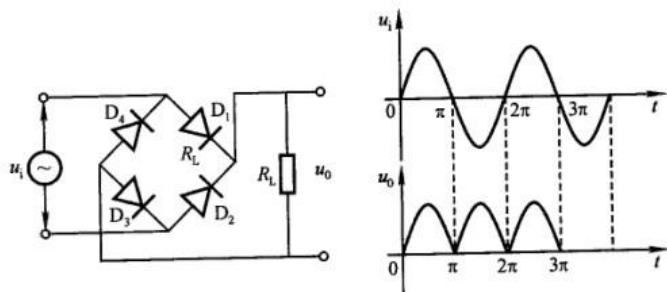


图 6.2.1-3 桥式整流电路和波形图

信号都被利用, 则应采用全波整流, 现以全波桥式整流为例, 其电路和相应的波形如图 6.2.1-3 所示。

若输入交流电仍为

$$u_i(t) = U_p \sin \omega t \quad (8)$$

则经桥式整流后的输出电压  $u_o(t)$  为 (一个周期)

$$\begin{aligned} u_o &= U_p \sin \omega t & 0 \leq \omega t \leq \pi \\ u_o &= -U_p \sin \omega t & \pi \leq \omega t \leq 2\pi \end{aligned} \quad (9)$$

$$\text{其相应直流平均值为 } \overline{u_0} = \frac{1}{T} \int_0^T u_0(t) dt = \frac{2}{\pi} U_P \approx 0.637 U_P \quad (10)$$

由此可见，桥式整流后的直流电压脉动大大减少，平均电压比半波整流提高了一倍（忽略整流内阻时）。

## (2) 滤波电路

经过整流后的电压（电流）仍然是有“脉动”的直流电，为了减少被波动，通常要加滤波器，常用的滤波电路有电容、电感滤波等。现介绍最简单的滤波电路。

### 1) 电容滤波电路

电容滤波器是利用电容充电和放电来使脉动的直流电变成平稳的直流电。我们已经知道电容器的充、放电原理。图 6.2.1-4 所示为电容滤波器在带负载电阻后的工作情况。设在  $t_0$  时刻接通电源，整流元件的正向导阻很小，可略去不计，在  $t=t_1$  时， $U_C$  达到峰值为  $\sqrt{2}U_i$ 。此后  $U_i$  以正弦规律下降直到  $t_2$  时刻，二极管  $D$  不再导电，电容开始放电， $U_C$  缓慢下降，一直到下一个周期。电压  $U_i$  上升到和  $U_C$  相等时，即  $t_3$  以后，二极管  $D$  又开始导通，电容充电，直到  $t_4$ 。在这以后，二极管  $D$  又截止， $U_C$  又按上述规律下降，如此周而复始，形成了周期性的电容器充电放电过程。在这个过程中，二极管  $D$  并不是在整个半周内都导通的，从图上可以看到二极管  $D$  只在  $t_3$  到  $t_4$  段内导通并向电容器充电。由于电容器的电压不能突变，故在这一小段时间内，它可以被看成是一个反电动势（类似蓄电池）。

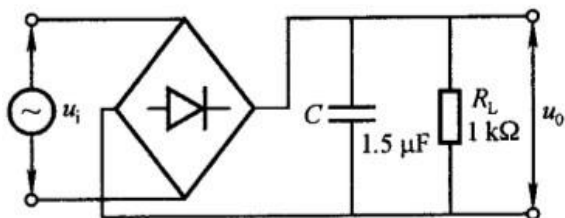


图 6.2.1-4 全波整流电容滤波器

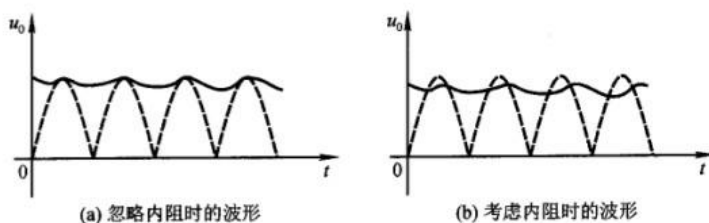


图 6.2.1-5 全波整流电容滤波电路的输出波形

由电容两端的电压不能突变的特点，达到输出波形趋于平滑的目的。经滤波后的输出波形如图 6.2.1-5 所示。

### 2) $\pi$ 型 RC 滤波

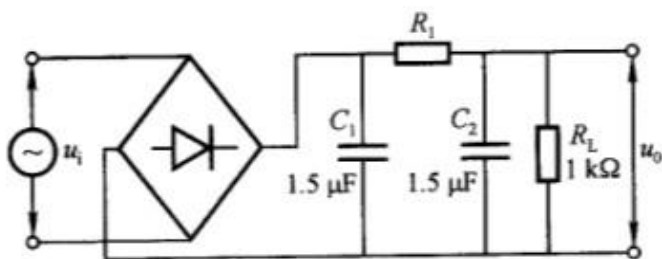


图 6.2.1-6  $\pi$  型 RC 滤波电路

前述电容滤波的输出波形脉动系统仍较大，尤其是负载电阻  $R_L$  较小时。除非将电容容量增加（实际应用时难于实现）。在这种情况下，要想减少脉动可利用多级滤波方法，此时再加一级 RC 低通滤波电路，如图 6.2.1-6

所示，这种电路也称  $\pi$  型 RC 滤波电路。

由图可见， $\pi$  型 RC 滤波是在电容滤波之后又加了一级 RC 滤波，使得输出电压更平滑（但输出电压平均值要减少）。

## 实验内容

### 1. 测量交流电压（或电流）

选择信号发生器（XD-8）的频率为 500Hz，测出信号发生器 15V 挡从 1V~15V 的输出电压。

（1）用数字多用表测量电压的有效值，计算峰-峰值。

（2）用示波器观察及测量其电压峰-峰值，计算有效值，画出波形图。

在坐标纸上画出上面两组数据曲线（示波器读数作 x 轴坐标，数字多用表读数作 y 轴坐标），计算相对误差。

### 2. 整流波形的电压测量，实验电路如图 6.2.1-7 所示

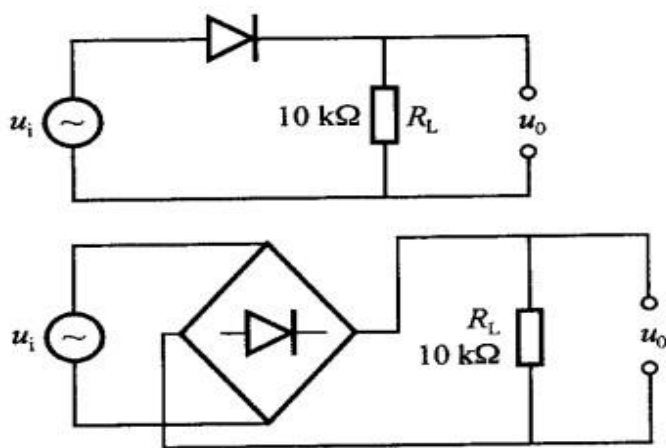


图 6.2.1-7 半波和全波整流电路

（1）用示波器观测信号源输出纯正弦函数波形（无直流偏置），并把此正弦波峰峰值固定在 10 V，分别接入半波、全波整流电路的输入端接线柱上（预备工作）；

（2）用示波器分别观察半波、或全波整流的输出端信号  $u_o$ ，分别画出  $u_o$  的图形(示意图)；

（3）用示波器分别测量半波、或全波整流的输出端信号的峰值（即：交流成分），即： $V_{op}$ ；

（4）用示波器分别测量半波、或全波整流的

输出端信号，电压的直流成分大小。

（5）用万用表分别测量

半波整流输出端信号的直流成分的电压（DCV）、交流成分电压的有效值（ACV）

全波整流输出端信号的直流成分的电压（DCV）、交流成分电压的有效值（ACV）

（6）在全波整流电路中，输出端（按图 6.2.1—4 接线）接入电容进行滤波。

A. 用示波器观测输出端交流信号电压的

直流成分大小，交流成分的变化幅度大小。

B. 用万用表测量输出端交流信号电压的

电压的直流成分大小（DCV），电压的交流成分的有效值（ACV）

(7) 对半波、全波整流以及滤波后的输出端的交流成分、直流成分的电压测量值，各自的变化规律，进行总结。

(选做 $\pi$ 型滤波)

(8) 实验按图 6.2.1-6 电路接线。调节信号发生器输出电压，使  $U_{ipp}=10V$ 。

用示波器观察两个滤波电路的输入、输出波形，画出波形图。

用万用表分别测量，输入、输出端的（直流、交流成分的）电压。

用示波器分别测量，输入、输出端的交流成分的电压（波动幅度），

输入、输出端的直流成分的电压。

### 3. 测交流电路的频率响应和相位（选做）

让图 6.2.1-8 所示的两电路分别通过 1kHz、10kHz、100kHz 的交流信号，观察其输出信号的幅度随频率变化的情况，以及输出信号相位变化的情况。

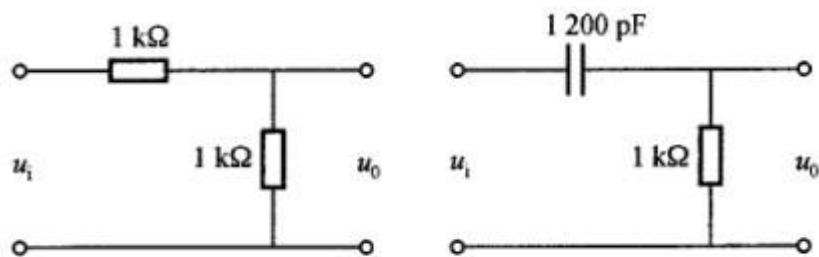


图 6.2.1-8 交流电测试电路

### 4. 整流器特性（选做）

如果整流器具有前面所描述的理想特性，那么无论在什么电压下，整流平均电压都应同交流电压的幅度成正比。也就是说，直流电压表上的直流刻度和交流电压表上的交流刻度将只相差一个常数转换因子。但实际上，常常只是在电压足够高时直流电压才与交流电压近似成正比，而在小电压下，则更接近于与交流电压的平方成正比。

### 思考题

1. 峰-峰值为 1V 的正弦波，它的有效值是多少？
2. 整流、滤波的主要目的是什么？
3. 要将 220V50Hz 的电网电压变成脉动较小的 6V 直流电压，需要什么元件？

附注:

**1.有关模拟示波器的结构、以及波形显示原理**

请阅读《实验 3.2.2 用示波器测量时间》“实验原理”中的部分内容。

**2.有关示波器测量（交流变化的）电压、以及测量经过整流（滤波）后的直流成分（电压）**

请阅读《实验 6.2.2 用示波器测量电压》“实验原理”中的部分内容。

本实验涉及到示波器的结构知识、使用原理，以及用示波器测量电压的原理和方法，在此作一个附注、参考。

1. 示波器的基本结构

示波器的结构如图 3.2.2-1 所示，由示波管（又称阴极射线管）、放大系统、衰减系统、扫描和同步系统及电源等部分组成。

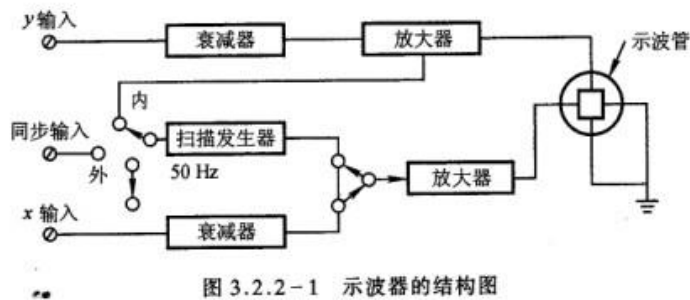


图 3.2.2-1 示波器的结构图

为了适用于多种量程，对于不同大小的信号，经衰减器分压后，得到大小相同的信号，经放大器放大后产生最大约 20V 左右的电压送至示波管的偏转板。

示波管是示波器的基本构件，它由电子枪、偏转板和荧光屏三部分组成，被封装在高真空的玻璃管内，其结构如图 3.2.2-2 所示。电子枪是示波管的核心部分，它由阴极、栅极和阳极构成。

- (1) 阴极——阴极的射线源：由灯丝（F）和阴极（K）构成，阴极表面涂有脱出功较低的钨、钽氧化物，灯丝通电后，阴极被加热，大量的电子从阴极表面逸出，在真空中自由运动从而实现电子发射。
- (2) 栅极——辉度控制：由第一栅极  $G_1$ （又称控制级）和第二栅极  $G_2$ （又称前加速级）构成，栅极是一个顶部有小孔的金属圆筒，它的电位低于阴极，具有反推电子的作用，只有少量电子能通过栅极，调节栅极电压可控制通过栅极的电子束的强弱，从而实现辉度调节。在  $G_1$  的控制下，只有少量电子通过栅极， $G_2$  与  $A_2$  相连，所加电位比  $A_1$  高， $G_2$  的正电位对阴极发射的电子奔向荧光屏起加速作用。
- (3) 第一阳极——聚焦：第一阳极（ $A_1$ ）呈圆柱形（或圆形），有好几个间壁，第一阳极上加有几百伏的电压，形成一个聚焦的电场，当电子束通过此聚焦电场时，在电场力的作用下，电子汇合于一点，结果在荧光屏上得到一个又小又亮的光点，调节加在  $A_1$  上的电压可以达到聚焦的目的。

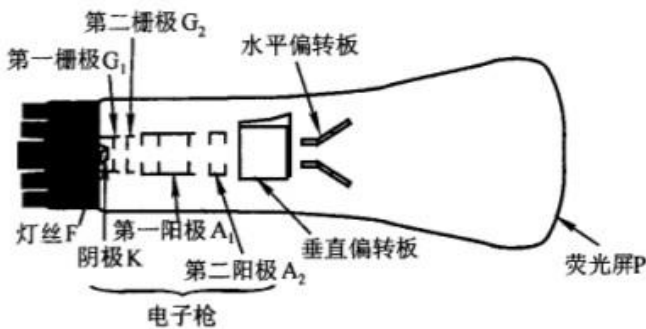


图 3.2.2-2 示波管结构

第二阳极——电子的加速：第二阳极（ $A_2$ ）上加有 1000V 以上的电压。聚焦后的电子经过这个高压电场的加速获得足够的动能，使其成为一束高速的电子流。这些能量很大的电子打在荧光屏上可引起荧光物质发光。能量越大就越亮，但也不能太大，太大会使发光强度过大，以致烧坏荧光屏。一般来说， $A_2$  上的电压在 1500V 左右就可以了。

(4) 偏转板：由两对相互垂直的金属板构成，在两对金属板上分别加以直流电压，以控制电子束的位置，适当调节这个电压值可以把光点或波形移到荧光屏的

中间部位。偏转板除了直流电压外，还有待测物理量的信号电压，在信号电压的作用下，光点将随信号电压的变化而变化，形成一个反映信号电压的波形。

- (5) 荧光屏：荧光屏（P）上面涂有硅酸锌、钨酸镉、钨酸钙等磷光物质，能在高能电子的轰击下发光。辉光的强度取决于电子的能量和数量。在电子射线停止作用之后，磷光要经过一段时间才熄灭，这个时间称为余辉时间。余辉使我们能在屏上观察到光点的连续轨迹。

自阴极发射的电子束，经过第一栅极（ $G_1$ ）、第二栅极（ $G_2$ ）、第一阳极（ $A_1$ ）、第二阳极（ $A_2$ ）的加速和聚焦后，形成一个细电子束。垂直偏转板（常称  $y$  轴）及水平偏转板（常称  $x$  轴）所形成的二维电场，使电子束发生位移，位移的大小，与  $y$  偏转板及  $x$  偏转板上所加的电压有关：

$$y = S_y V_y = \frac{V_y}{D_y} \quad x = S_x V_x = \frac{V_x}{D_x} \quad (1)$$

式（1）中的  $S_y$  和  $D_y$  为  $y$  轴偏转板的偏转灵敏度和偏转因数， $S_x$  和  $D_x$  为  $x$  轴偏转板的偏转灵敏度和偏转因数。它们均与偏转板的参数有关，是示波器的主要技术指标之一。

## 2. 示波器显示波形的原理

由式（1）， $y$  轴或  $x$  轴的位移与所加电压有关。如图 3.2.2-3，在  $x$  轴偏转板上加一个随时间  $t$  按一定比例增加的电压  $V_x$ ，光点从  $A$  点向  $B$  点移动。如果光点到达  $B$  点后， $V_x$  降到零（图中坐标轴上的  $T_x$  点），那么光点就返回到  $A$  点。若此后  $V_x$  再按上述相同规律变化（ $V_x$  及  $T_x$  相同），光点会重新由  $A$  移动到  $B$ 。这样  $V_x$  周期性变化（此种变化称为锯齿波），并且由于发光物质的特殊性使光迹有一定保留时间（由荧光屏的发光物质而定），于是就得到一条“扫描线”，称为时间基线[图 3.2.2-3（a）]。

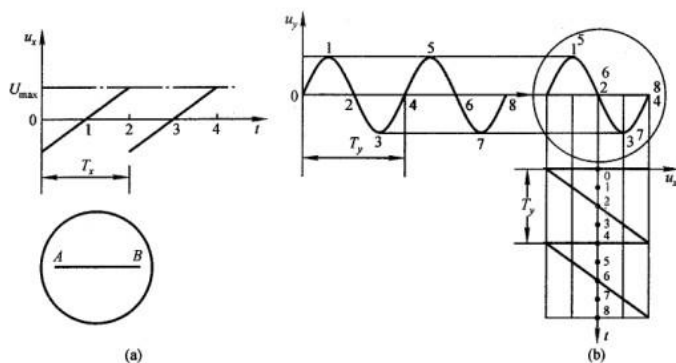


图 3.2.2-3 波形显示原理

如果在  $x$  轴上加有锯齿形扫描电压的同时，在  $y$  轴上加一正弦变化的电压[图 3.2.2-3(b)]，则电子束受到水平电场和垂直电场的共同作用而呈现二维图形。为了得到可观测的图形，必须使电子束的偏转多次重复出现，即重复扫描。

很显然，为了得到清晰稳定的波形，上述扫描电压的周期  $T_x$ （或频率  $f_x$ ）与被测信号的周期  $T_y$ （或  $f_y$ ）必须满足

$$T_y = \frac{T_x}{n}, \quad f_x = n f_y, \quad n=1,2,\dots \quad (2)$$

以保证  $T_x$  轴的起点始终与  $y$  轴周期信号固定一点相对应（称“同步”），波形才稳定。否则，波形就不稳定而无法观测。

由于扫描电压发生器的扫描频率  $f_x$  不会很稳定。因此，要保证式（2）始终成立，示波器需设置扫描电压同步电路，即触发电路，如图 3.2.2-1 所示，利用它提供一种触发信号来使扫描电压频率与外加信号同步，从而获得稳定的信号图形。图 3.2.2-1 中设置了三种同步触发方式：外信号触发、被测信号触发（内触发）、50Hz 市电触发。

实际使用的示波器，由于用途不同，它的示波管及放大电路等也不尽相同。因此，示波器有一系列技术特性指标，如输入阻抗、频带宽度、余辉时间、扫描电压线性度、 $y$  轴和  $x$  轴的范围等。

## 3. 用 $x$ 轴时基测时间参数

在实验中或工程技术上都经常用示波器来测量信号的时间参数，如信号的周期或频率，信号波形的宽度、上升时间或下降时间，信号的占空比（宽度/周期）等。如雷达通过测量发射脉冲信号与反射（接收）脉冲信号的时间差来实现测距离，其他无线电测距、声纳测潜艇位置等，都属于这一原理。

从式（2）出发，设待测信号接  $y$  轴输入端，则  $T_y$  是待测信号的周期， $T_x$  是  $x$  轴扫描信号的周期， $N$  是一个扫描周期内所显示的待测信号的波形周期个数。如荧光屏上显示 2 个信号波形，扫描信号的周期为 10ms，则待测信号的周期为 5ms。

$x$  轴扫描信号的周期，实际上是以时基单位（时间/cm 或时间/度）来标示的，一般的示波管荧光屏直径以 10cm 的居多，则式（2）的  $T_x$ ，由时基（时间/cm）乘上 10cm，如时基为 0.1ms/cm，则扫描信号的周期为 1ms。为此，在实际测量中，将式（2）改成式（3）的形式

$$T_x = \text{时基单位} \times \text{波长厘米数} \quad (3)$$



式中的波形厘米数，可以是信号一个周期的读数（可测待测信号的周期）、正脉冲（或负脉冲）的信号宽度的读数或待测信号波形的其他参数。

#### 4. 用示波器测量电压

##### a) 用示波器测交流电峰—峰值

将开关置于“AC”位置，调节 Y 轴衰减器的旋钮，使信号在屏幕上的幅度适中，读出信号波形在屏幕上标尺的峰—峰距离  $D\text{cm}$ （图 6.2.2—3）。若“V/cm”旋钮指在  $0.1\text{V/cm}$  档，则被测信号的峰—峰电压值为： $V_{p-p} = 0.1\text{V/cm} \times D\text{cm} = 0.1D$ （Volts）

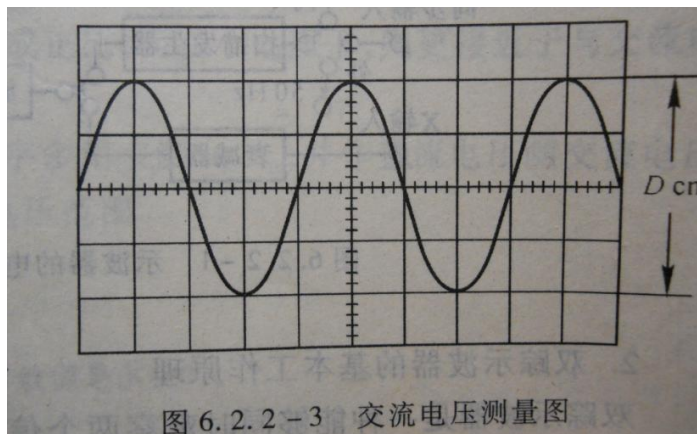


图 6.2.2—3 交流电压测量图

##### b) 测定经整流（全波或半波）后的直流分量

任何一个周期为  $T$  的分段单调函数  $f(t)$  都可以展开成傅里叶级数，即

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos(n\Omega t) + \sum_{n=1}^{\infty} b_n \sin(n\Omega t) \quad (1)$$

$$\text{式中 } a_0 = \frac{2}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} f(t) dt \quad a_n = \frac{2}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} f(t) \cos n\omega t dt \quad b_n = \frac{2}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} f(t) \sin n\omega t dt$$

式（1）的第一项称为直流分量，其余各项为不同谐波  $n\omega$  的交流分量。

当  $f(t)$  为正弦波、三角波等时，经整流（全波或半波）后，其直流分量是不同的，可以用示波器测量它们。

为了确定被测信号的直流成分，首先确定一个相对的基准电位，将开关置于“⊥”（指接地），将扫描基准线调至屏幕刻度中心为基准电位所在位置。然后将开关置于“DC”，这时可看到待测信号的整流波形（包括直流成分和交流成分）。再将开关置于“AC”，这时由于去掉信号的直流成分，波形位置下降（或上升），下降（或上升）的距离则是直流成分的大小。

----- 完 -----