

➤ 实验原理(请用自己的语言简明扼要地叙述,注意原理图需要画出、主要公式需要写明)

示波器的原理

示波器有各种不同的型号,但所有示波器都由阴极示波管CRT(Cathode Ray Tube)、Y 轴电压放大器和衰减器、X 轴电压放大器和衰减器、触发同步电路、扫描信号发生器等部分组成,其中阴极射线示波管是其核心部件,如图一所示。

阴极射线示波管

阴极射线示波管是个电真空器件,如图二所示,玻璃壳内有荧光屏、电子枪和偏转系统几个部分,核心部件是电子枪。

荧光屏

示波管前方内部涂有荧光材料,当高速电子流打上时,荧光物质会发光。发光的强弱(波形亮度),取决于电子流的强度。

电子枪

电子枪由灯丝 F 、阴极 K 、栅极 G 、第一阳极 A_1 和第二阳极 A_2 构成。电子枪主要的功能是产生一束强度可以调节的高速电子流,并且使电子束可以聚焦在荧光屏上。灯丝加热后,阴极发射出大量电子,这些电子在两个阳极的加速下,将以可达 10^7 m/s 的高速射向荧光屏。栅极处于第一阳极和阴极之间,电位比阴极低。控制栅极的电位(通过示波器面板上的“亮度”旋钮调节),就可以控制电子束的强度,从而改变荧光屏上光点和波形的亮度。控制第一阳极 A_1 和第二阳极 A_2 之间的电势差(通过示波器面板上的“聚焦”旋钮调节),可以使电子束恰好聚焦到荧光屏上。

偏转系统

X、Y 是一对互相垂直放置的偏转电极板。当在水平或垂直偏转板间加电压时,通过其间的电子束就会在偏转板间电场的作用下,在水平或垂直方向上发生偏转,亦即使荧光屏上的光点发生水平或垂直移动。其移动量的大小,取决于电压的高低,二者成正比关系。在偏转板上加一个直流电压(通过示波器面板上的“水平位置”和“垂直位置”旋钮调节),可改变光点的基础位置。加变化电压时,光点移动的距离也跟着变化,而且光点位置变化的规律与所加电压变化的规律是一致的。如果同时在两个偏转板上加电压,光点的位置则取决于两个偏转作用的合成结果。

扫描机构

当我们通过“Y 轴输入”将交变信号接到垂直偏转板上时,可以看到光点沿垂直方向振动。由于荧光屏上的光点有一定的余辉,会将连续移动的光点看成亮线。但这时只能看到一条直线,而不可能看到信号随时间变化的波形。要想看到波形,必须将光点的振动沿水平方向展开。这就需要在水平偏转板上加上随时间线性变化的信号,而且当光点移动到屏幕的一侧时,需使电压突然变为零,以使光点回到屏幕的另一侧,然后重新开始移动。这实际上是在水平偏转板,上加上一个锯齿波电压,如图三所示。

例如,在 Y 轴方向上加上一正弦波信号电压 $U_y = U_0 \sin \omega t$,在 X 轴方向加上一周期相同的锯齿波电压,在每个周期内, $U_x = Kt$, K 为常数。光点沿 Y 轴方向的移动代表变化着的信号电压 U_y ,而光点沿 x 轴的移动代表时间 t ,二者的合成结果如图四所示。

如果某一瞬间 U_y 为 1 点,而在同一时刻 U_x 在 1' 点,则屏上相应的光点位置在 1'' 点。下一瞬间, U_y 为 2 点时, U_x 在 2' 点,屏上相应的光点位置在 2'' 点。依此类推,当 U_y 变化一个完整的周期时,荧光屏上的光点将正好描绘出与 U_y 随时间的变化规律完全相同的波形。我们把在水平偏转板上加上这种电压所起的作用称作“扫描”。扫描用的锯齿波电压信号是由示波器内的扫描信号(锯齿波)发生器提供的。

上面是 U_x 、 U_y 周期相同的情况,荧光屏上出现的是一个完整的正弦波形。若频率 $f_x = \frac{f_y}{n}$ ($n = 1, 2, 3, \dots$),则荧光屏上将出现一个、两个、三个……完整的正弦波形。只有当 f_x 是 f_y 的整数倍时,波形才能稳定。

图五是 $f_x = \frac{f_y}{2}$ (扫描周期二倍于待测信号周期)的情形。图六的扫描周期略长于待测信号的周期,可看出屏幕上的波形逐渐向左移动。

整步和触发扫描

f_x 是待测信号的频率,而 f_x 是由示波器内的锯齿波发生器产生的,二者相互无关,那么如何才能始终保持二者之比成整数,从而使波形保持稳定呢?不同型号的示波器,用不同的方法解决这个问题。

多数示波器采用“触发扫描”的办法使波形稳定。它是使用被测信号来控制扫描电压的产生时刻。调节触发电平的高低,使被测信号达到一定相位时(通过“触发电平”旋钮调节),扫描电路才开始工作,产生一个锯齿波,将被测信号显示出来,所以每次扫描显示的波形相同,这样,在荧光屏上看到的波形就稳定了。有关原理如图七所示。

有些示波器采用“整步”的办法使波形稳定,由从 Y 轴输入的待测信号,或由机外另行输入的某一频率稳定的信号作为“整步信号”,强迫 f_x 跟着变化,以保证满足 $f_x = \frac{f_y}{n}$ 条件。不过,整步信号需要达到一定的幅值才能起作用。通常示波器上都有相应的旋钮,如“整步增幅”“整步水平”等,主要是为了进行这项调节设置的。

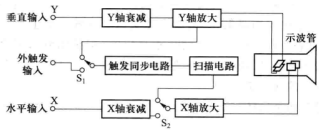
衰减器和放大器

由于示波器本身和 X 轴及 Y 轴偏转板的灵敏度不高 ($0.1 \sim 1$ mm/V)当加在偏转板上的信号电压较小时,电子束不能发生足够的偏转,以致屏上光点位移过小,不便观测,这就需要预先把小的信号电压加以放大再加到偏转板上。为此,设置 X 轴和 Y 轴电压放大器。

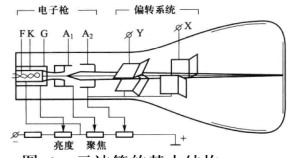
衰减器的作用是使过大的输入电压变小,以适应“Y 轴放大器”和“X 轴放大器”的要求,否则放大器不能正常工作,甚至受损。

上面提到的正弦波形观察中,都是把信号加在 Y 轴,X 轴加的是扫描信号。如果 X 轴上加的不是锯齿波,而是另一个正弦信号,即两个方向上加的都是正弦波信号,这时屏上光点的位移是 X、Y 两个方向的振动合成的结果。由于两个信号间无固定的相位关系,因而合成运动轨迹是不稳定的。如果 f_x 、 f_y 成简单整数比,则光点运动轨迹将是某种形状的封闭曲线,这些曲线称为“李萨如图形”。

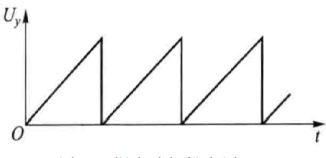
注:实验原理课前预习时填写,要画原理图(电路或光路图)上课前教师检查。



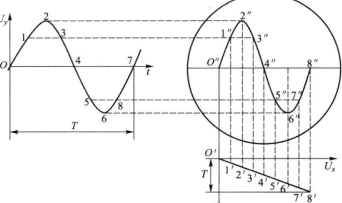
图一：示波器的基本结构



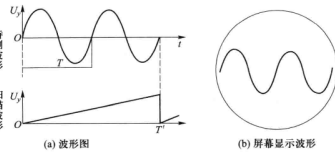
图二：示波管的基本结构



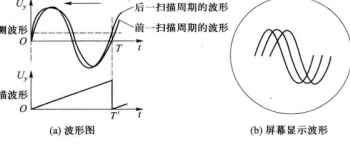
图三：锯齿波扫描电压



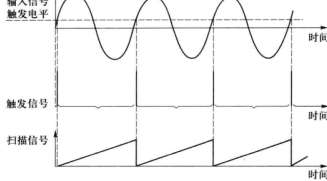
图四：示波器显示正弦波形原理图



图五：扫描周期二倍于待测信号周期



图六：扫描周期略长于待测信号周期



图七：触发扫描原理

实验内容与步骤

波形观察

信号源频率调整为 $f = 100\text{ Hz}$, 调整示波器 Y 灵敏度开关及扫描开关, 使屏上观察到一个或两个周期正弦波, 并记录此波形。保持示波器状态不变, 将信号波频率调整为 $f = 10\text{ kHz}$, 观察此时正弦波周期变化, 并记录此时波形。

幅值测量

选信号 $f = 1\text{ kHz}$, 用 Y 灵敏度开关测信号的 V_{pp} (峰值), 记录 V/div ; 记录信号垂直方向格数 L ; $V_{pp} = L * V/\text{div}$ (单次测量)。

信号周期测量

选信号 $f = 1\text{ kHz}$, 用扫描开关测量其周期记录 T/div ; 记录信号水平方向周期占格数 L_T , $T = L_T * T/\text{div}$ 。

李萨如图法测频率

调整扫描开关, 使示波器处在 $X - Y$, 观察李萨如图状态, 改变信号源频率 f_x , 屏上分别出现 $f_x : f_y$ 为 $1 : 1, 1 : 2, 1 : 3$ 的图形, 当图形转动最慢时, 记录对应的 f_x , 计算被测频率 f_y 及 \bar{f}_y 。

观察整流波形

观察半波整流波形, 记录波形(整流前, 整流后);
观察全波整流波形, 记录波形(整流前, 整流后);
观察桥式(全波)整流波形, 记录波形(整流前, 整流后)。

注: 实验内容与实验步骤课后填写。

● 实验记录

幅值测量

格数	/div	4.4
灵敏度	/V · div ⁻¹	2

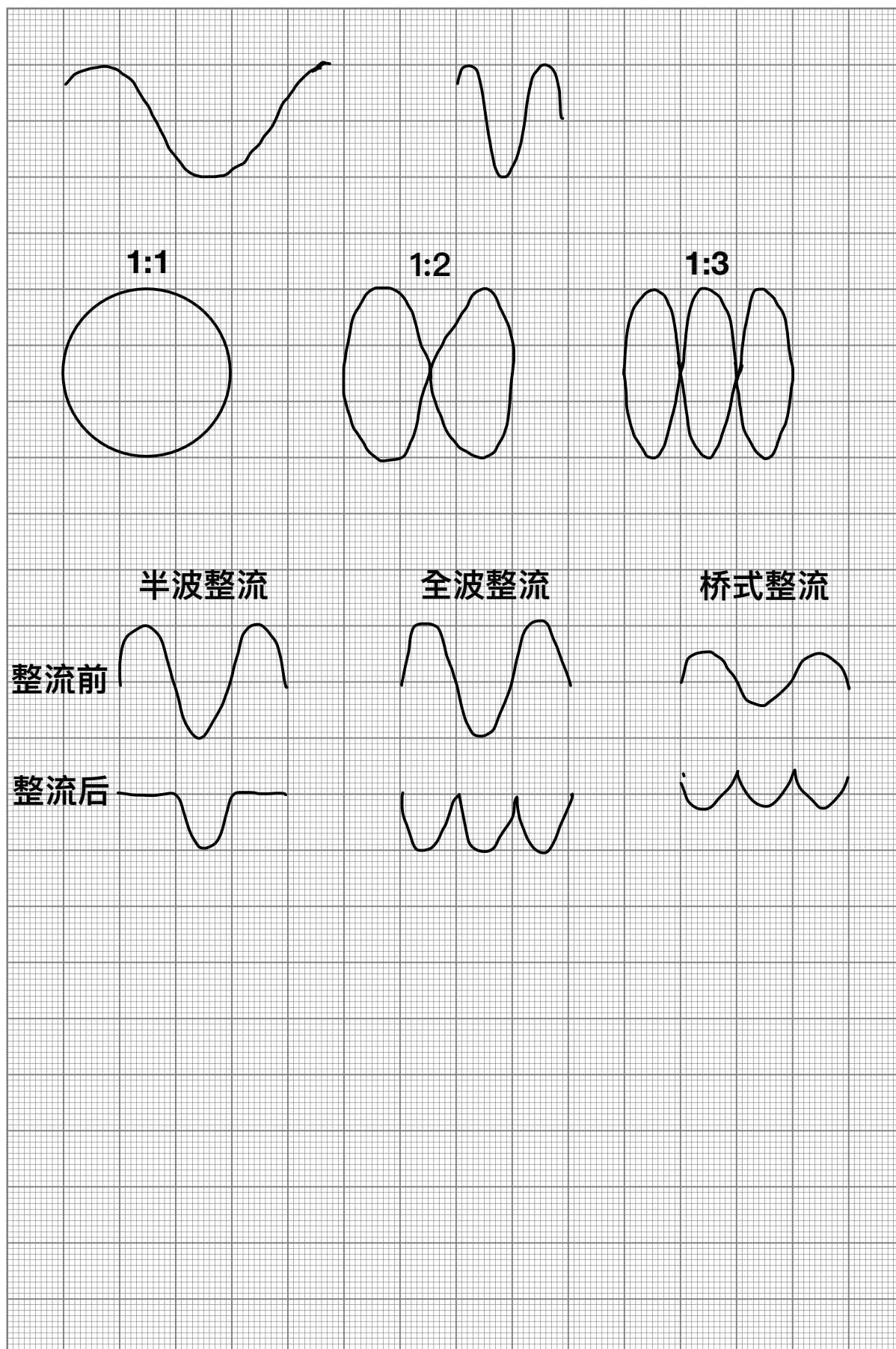
信号周期测量

格数	/div	5.0
灵敏度	/ms · div ⁻¹	0.2

李萨如方法测频率

$f_x : f_y$	1 : 1	1 : 2	1 : 3
f_x/Hz	49.99	24.93	16.56

注：自行设计规范的数据表格，表格中填写原始数据，注意单位和有效数字。



数据处理及误差分析

$$\begin{aligned}
 V_{pp} &= L * V / \text{div} \\
 &= 4.4 * 2 \\
 &= 8.8 \text{ V}, \\
 T &= L_T * T / \text{div} \\
 &= 5.0 * 0.2 \\
 &= 1.0 \text{ ms}.
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 f_{y1} &= f_{x1} \cdot \frac{f_{y1}}{f_{x1}} \\
 &= 49.99 * 1 \\
 &= 49.99 \text{ Hz},
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 f_{y2} &= f_{x2} \cdot \frac{f_{y2}}{f_{x2}} \\
 &= 24.93 * 2 \\
 &= 49.86 \text{ Hz},
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 f_{y3} &= f_{x3} \cdot \frac{f_{y3}}{f_{x3}} \\
 &= 16.56 * 3 \\
 &= 49.68 \text{ Hz}.
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \overline{f_y} &= \frac{1}{3} \sum f_y \\
 &= \frac{1}{3} (49.99 + 49.86 + 49.68) \\
 &= 49.84 \text{ Hz}.
 \end{aligned}$$

注:数据处理要写出公式及详细计算过程。

➤ 思考题及实验小结

如果示波器是良好的，但由于各旋钮位置没有调好，示波器屏上看不到亮线，问哪几个旋钮位置不合适就可能造成这种情况？

首先调整 $v/div, s/div$ 旋钮，当屏幕上显示信号后，再调整水平垂直位置旋钮，这样才能更容易调出信号。因此 $v/div, s/div$ 旋钮以及水平垂直位置旋钮位置不合适都有可能导致示波器上看不到亮线。

当观察到稳定波形时，加快或减慢扫描速度对观察波形产生什么影响？

加快扫描速度，波形缩短，反应出来的现象能看到更加长的波形范围，但可能不太清晰；减慢扫描速度，波型拉长，整个屏幕可能看不到个完整的波形。

实验小结

了解了示波器的结构与工作原理，熟悉示波器和信号发生器面板控制件的作用与使用方法。

掌握了用示波器观察波形、测量电压和频率的方法。

掌握了用示波器观察李萨如图形的方法，并能测量未知信号频率。用示波器观测了整流电路中电压信号的波形。

注：请在完成实验后一周内交实验报告。