

第一章 示波器

示波器(oscilloscope)被广泛地用来测量电路上的一些特性,例如:信号大小、波形、频率、相位关系等,要懂得如何使用,应先了解它的基本结构与原理。

1.1 基本结构

示波器的主要基本结构包括:

- (1) 阴极射线管(cathode-ray tube, CRT)
- (2) 垂直放大器(vertical amplifier)
- (3) 水平放大器(horizontal amplifier)
- (4) 触发脉冲发生器(trigger pulse generator)
- (5) 扫描发生器(sweep generator)

在以上这些基本结构中,阴极射线管是主要部分。阴极射线管的结构如图 1.1 所示,在一密闭真空的漏斗形玻璃管顶部,有一个由灯丝、阴极(cathode)、栅极(grid)、聚焦阳极(focus anode)、加速阳极(accelerating anode)组成的电子枪(electron gun)能发射出已聚焦的电子束,电子束经过垂直偏向板(vertical deflection plate)和水平偏向板(horizontal deflection plate)后,撞击在涂有磷化物的荧光屏上而发光。

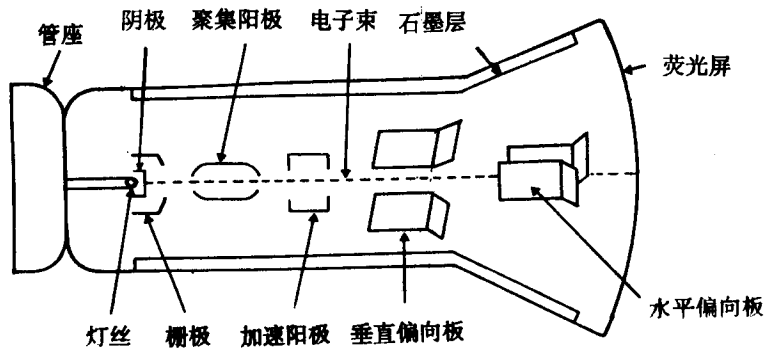


图 1.1 阴极射线管(CRT)

改变垂直偏向板和水平偏向板的电压会影响电子束的路径,即改变电子束撞击荧光屏的位置,由于眼睛视觉停留现象,当电子束在荧光屏上快速移动时,看起来就像是个完整的图形。

阴极射线管各部分的主要功能如下:

- (1) 灯丝
加热阴极。
- (2) 阴极

受灯丝加热后能发射电子。

(3) 栅极

控制栅极对阴极的电压,可调节电子束的大小,而电子束的大小可改变荧光屏上的明暗程度。

(4) 聚焦阳极

借助控制聚焦阳极对阴极的电压,使电子束聚焦,荧光屏上的光点更加清晰。

(5) 加速阳极

加速电子束前进,避免在撞击荧光屏之前,因电子间相互排斥而扩散。

(6) 垂直偏向板

位于电子束路径上、下两侧,控制电子束垂直方向的偏移。如果下方偏向板的电压比上方偏向板的电压高,电子束就往下偏移;反之,电子束则往上偏移。

(7) 水平偏向板

位于电子束路径左、右两侧,可控制电子束水平方向的偏移。如果左侧偏向板的电压比右侧偏向板的电压高,电子束就向左偏移;反之,电子束则向右偏移。

(8) 荧光屏

在玻璃内涂有磷化物,受到电子束撞击时产生光点,光点的颜色及停留时间的长短由磷化物的类型决定。

(9) 石墨层

石墨层具有导电性,接上正电压可以吸收荧光屏受电子束撞击后产生的电子。

1.2 波形显示原理

当水平偏向板和垂直偏向板都无外加电压时,电子束撞击在荧光屏的正中央,即光点位置位于荧光屏的中心点,如果一侧偏向板电压高于另一侧,电子束受正电压电场的吸引往电压较高的方向偏移,其偏移大小由电压的高低决定。如果在水平偏向板上加上锯齿波,荧光屏上的光点将如图 1.2 所示,由左往右移动,然后迅速回到左边,再往右边移动,这样依次循环,由于眼睛视觉停留的关系,在荧光屏上可看到一条水平线。

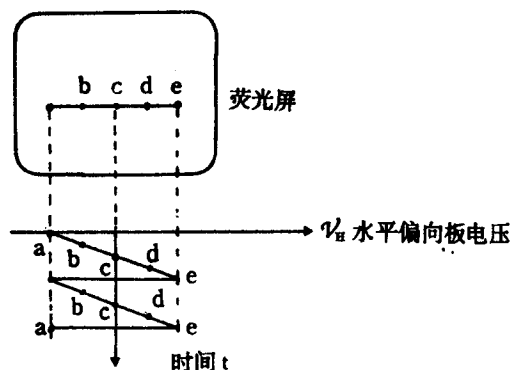


图 1.2 水平偏向板加上锯齿波后,荧光屏上产生一条水平线

在水平偏向板上加上锯齿波后,使电子束在荧光屏上由左向右移动,显示一条水平线。如果同时在垂直偏向板上加上想要测量的信号,那么此时电子束同时受到两组偏向板的作用,可以扫描出相应的波形,如图 1.3 所示,在垂直偏向板上加上一正弦波后,荧光屏上显示出一相应的正弦波。

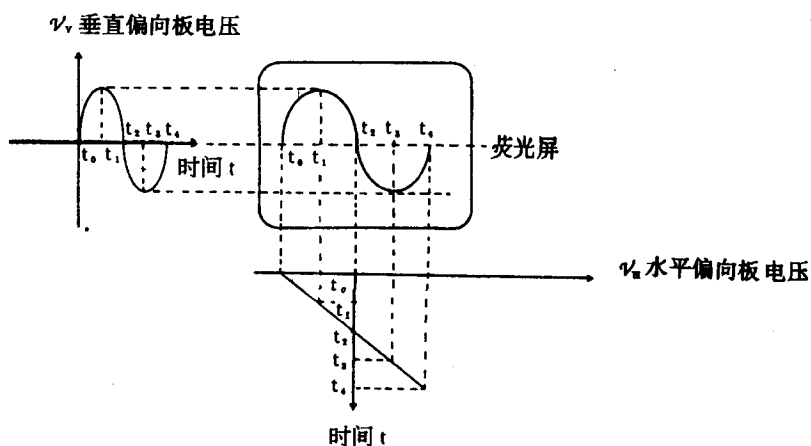


图 1.3 在垂直偏向板上加上待测信号电压

当垂直偏向板的待测信号频率等于水平偏向板的锯齿波频率时,荧光屏上显示一个周期性波形,如果垂直偏向板待测信号频率等于水平锯齿波频率的 n (n 为整数) 倍时,荧光屏上将显示 n 个周期的波形。垂直偏向板信号需与水平偏向板上的锯齿波同步,即两者频率为 n 倍关系。当两者不是同步时,荧光屏上的波形将左右移动,呈现出波形不稳定的现象。

1.3 双轨迹示波器

双轨迹 (Dual Trace) 示波器又称双轨示波器或双迹示波器,能同时在荧光屏上显示两个信号的波形,以方便比较两者的不同和相应关系。

为了同时显示两个波形,双轨迹示波器有两种形式:

- (1) 双枪式:使用两个电子枪,但共用一个荧光屏,因成本高而较少使用。
- (2) 单枪式:使用一个电子枪对两个输入信号自动切换扫描。

单枪式双轨迹示波器按动作方式可分为:

- (1) 交替扫描 (Alternate, ALT)

如果将水平偏向板上加的第奇数个锯齿波用来扫描 CH1 的波形,利用自动开关将第偶数个锯齿波用来扫描 CH2 的波形,那么 CH1 与 CH2 两个待测信号交替显示,由于视觉停留,当交替频率较高时,就好像两个波形同时显示在荧光屏上。但当频率较低时,必须使用分段扫描,否则将无法显示完整的波形。

- (2) 分段扫描 (Chop)

将水平偏向板上所加的每一锯齿波切割成许多片段,如果将第奇数个片段的锯齿波用来扫描 CH1 的波形,第偶数个片段的锯齿波用来扫描 CH2 的波形。这种方法使两个低频待测信

号以高速交替显示,就像是两个波形切割成许多小点一样,在低频时,荧光屏上的波形看起来与原波形一致,在频率较高时使用分段扫描,波形中微小的变化将无法清楚显示。

双轨示波器除了可选择内部触发或外部触发以便同时显示 CH1 和 CH2 两个信号波形外,也可利用 X-Y MODE 将 CH1 和 CH2 分别作为水平轴(X 轴)和垂直轴(Y 轴)的输入信号,在荧光屏上显示两个信号的对应关系。

1.4 示波器的基本原理

图 1.4 所示为示波器的基本电路框图,待测信号由 CH1 INPUT(或 CH2 INPUT)信号输入端输入后,如果输入信号接连方式选择开关放在 AC,输入信号经电容器隔离直流信号,保留交流信号,经 CH1/CH2 切换开关电路到垂直放大器;如果输入信号接连方式选择开关放在 DC,输入信号直接经过 CH1/CH2 切换开关电路进入垂直放大器,可将微小的信号放大,以控制 CRT 垂直偏向板的电压;如果输入信号接连方式选择开关放在 GND,CRT 的垂直偏向板电压为零,可以校正直流电压。倘若要同时观察两个信号,那么两个信号分别由 CH1 INPUT 和 CH2 INPUT 信号输入端输入,经输入信号接连方式选择开关到 CH1/CH2 切换开关电路,使用交替(ALT)或分段(CHOP)切换 CH1 和 CH2 的输入信号,再由垂直放大器控制 CRT 垂直偏向板的电压。

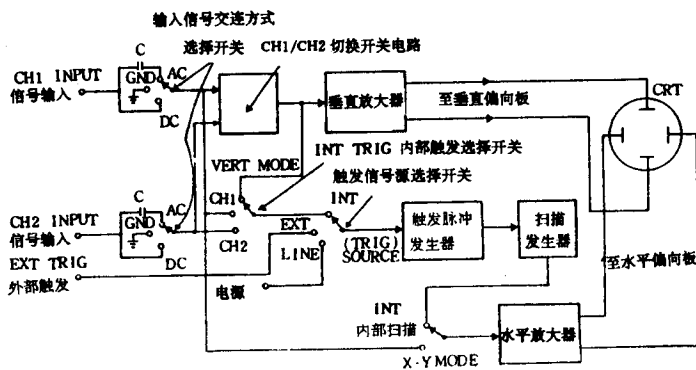


图 1.4 示波器的基本电路图

当内部触发选择开关 INT TRIG 放在 CH1(或 CH2),触发信号源选择开关(TRIG)SOURCE 在 INT 位置时,CH1(或 CH2)信号经触发脉冲发生器、扫描发生器后产生一锯齿波,由水平放大器放大后,加在 CRT 的水平偏向板。这样,就可在 CRT 上显示出待测信号的波形。如果 INT TRIG 内部触发选择开关放在 VERT MODE,CH1 和 CH2 信号交替作为信号触发源,可用来同时观察 CH1 和 CH2 两个输入信号波形。

如果触发信号源选择开关(TRIG)SOURCE 放在 EXT,就把从外部触发 EXT TRIG 端输入信号作为触发源;如果(TRIG)SOURCE 开关放在 LINE,直接以电源作为触发源。

当示波器开关放在 X-Y MODE 时,只有 CH2 INPUT 的输入信号经垂直放大器放大后,连接到 CRT 的垂直偏向板;CH1 INPUT 的输入信号由水平放大器放大后,加在 CRT 的水平

偏向板上。这样,在 CRT 上显示的图形表示 CH1(X 轴)和 CH2(Y 轴)信号的对应关系。

1.5 示波器开关的控制与调节

各种示波器上的开关、旋钮的标志可能稍有不同,但其基本原理与调节方法是一样的。

(1) POWER(电源开关)

示波器的电源开关,通常旁边有一指示灯指示开关是否接通。

(2) INTENSITY(亮度控制)

用来调节荧光屏上光点的亮度,顺时针方向移动亮度增加。但亮度太强会减少荧光屏的寿命。

(3) FOCUS(聚焦控制)

INTENSITY 旋钮用来调节荧光屏上光点的亮度,FOCUS 旋钮是用来调节光点的清晰度。

(4) TRACE ROTATION(光点倾斜调节)

当电子束受到周围磁场的影响使荧光屏上的光迹倾斜时,可调节 TRACE ROTATION 旋钮直到水平位置。

(5) CH1 INPUT(信号输入端)

使用 BNC 连接器作为一个输入端,当示波器在 X-Y MODE 时,这个输入信号变为水平轴(X 轴)的输入端。

(6) CH2 INPUT(信号输入端)

示波器当作双轨迹使用时,CH2 INPUT 作为第二个输入端口。示波器在 X-Y MODE 这个输入信号端变为垂直轴(Y 轴)的输入端。

(7) AC-GND-DC(输入信号接连方式选择开关)

用来选择输入信号与垂直放大器的接连方式,如果放在 AC,输入端口串联一电容器以隔绝直流部分,只显示交流信号;如果放在 GND,垂直输入信号接地,可用来校正直流电压;如果放在 DC,输入信号直接进入垂直放大器,可同时显示直流与交流信号。

(8) VOLTS/DIV

可以选择输入待测信号适当的衰减,以方便荧光屏上波形的观察。VOLTS/DIV 表示荧光屏上每一格高度的伏特数。如果使用 10:1 的探针(又称测试棒)测试时,VOLTS/DIV 值需乘以 10 倍表示每格高度的伏特数。VOLTS/DIV 旋钮通常用 1,2 或 5 的倍数切换。观察电压值时,上面的微调旋钮 VAR 需放在 CAL 位置,VOLTS/DIV 的值才有意义。

(9) VAR

PULL×5GAIN

如果 VOLTS/DIV 不以倍数调节,VAR 的调节是连续的,所以使用 VAR 调节时,VOLTS/DIV 的读数并不代表荧光屏上每一格高度的伏特数,只是在观察波形时可调节 VAR 使波形易于观察。如果将 VAR 拉出,其垂直感度可放大 5 倍,用来观察微小的波形变化。

(10) V POSITION(垂直位置调节旋钮开关)

用来移动 CH1 信号光迹在荧光屏上的垂直(即上、下)位置。

(11) V POSITION

PULL INVERT

用来移动 CH2 信号光迹在荧光屏上的垂直位置,当旋钮拉出时,CH2 输入信号特性刚好相反,这样有助于比较两个反相的波形。

(12) MODE(垂直轴显示方式选择开关)

CH1:只有 CH1 信号能在荧光屏上显示。

CH2:只有 CH2 信号能在荧光屏上显示。

ALT:CH1 和 CH2 待测信号交替扫描显示。

CHOP:分段扫描显示。

ADD:显示 CH1 和 CH2 信号和。如果要显示 CH1 与 CH2 的信号差,可配合拉出上述的 PULL INVERT 开关使用。

(13) TIME/DIV(扫描时间开关)

当示波器设定成 X-Y MODE 时,TIME/DIV 开关应转至 X-Y 位置。在 SWP VAR 旋钮转至 CAL 位置时,TIME/DIV 设定值表示荧光屏水平方向每格的时间。如果要检测波形的周期或频率,TIME/DIV 应转到 CAL 位置,波形每周期所占水平格数乘以 TIME/DIV 设定值,即为波形的周期。

(14) SWP VAR(扫描时间微调旋钮)

在观察波形时扫描时间微调,可配合微调使波形在最合适的观察位置。

(15) H POSITION(水平位置调节旋钮)

PULL×10 MAG

当开关按入时,可用来调节荧光屏上光迹的水平(即左、右)位置,将此旋钮拉出时,扫描时间为 TIME/DIV 值的 10 倍,波形在水平方向放大 10 倍。换句话说,荧光屏水平每格的时间为 TIME/DIV 值的 1/10。

(16) (TRIG) SOURCE(INT-LINE-EXT)(触发信号源选择开关)

当开关放在 INT 时,表示触发源来自示波器内部的 CH1 或 CH2 信号。如果放在 LINE,由电源频率来使信号同步,这在观察与电源直接有关的波形时较为方便。当观察某些特殊波形或经其它电路的合成波形时,要从外部输入信号作为触发源,这时开关应放在 EXT。

(17) INT TRIG(内部触发选择开关)

内部触发选择开关可以选择 CH1,CH2 或 VERT MODE。

CH1:用 CH1 的输入信号触发。

CH2:用 CH2 的输入信号触发。

VERT MODE:用 CH1 和 CH2 交替作为信号触发源,用来同时观察两个波形。

(18) EXT TRIG(外部触发连接端)

当 SOURCE(触发信号源选择开关)放在 EXT 时,用接到 EXT TRIG 连接器的信号作为外触发源。

(19) LEVEL(触发准位调节和触发特性选择旋钮)

PULL (-) SLOPE

用来决定输入波形开始扫描位置,如果按入旋钮,扫描起始点在波形的上升部分;如果拉出旋钮,扫描起始点位置在波形的下降部分。当触发方式选择旋钮(TRIG) MODE 放在 NORM,荧光屏上的波形不稳定时,可调节 LEVEL 或 SLOPE 旋钮。

(20) TRIG MODE(触发方式选择开关)

用来选择扫描电路的动作方式,通常有 AUTO,NORM,TV(V)及 TV(H)四种。

AUTO:水平电路自动扫描,不必外加信号触发,如果没有信号输入,荧光屏上显示一条水平线。

NORM:水平电路只有在有信号输入且产生适当触发脉冲波时才扫描。不适当的触发脉冲,即使有输入信号,也不一定有扫描光迹,此时应调节触发 LEVEL 和 SLOPE 或提高垂直灵敏度 VOLTS/DIV。

TV(V)(视频垂直同步脉冲触发):用来观测视频信号的垂直波形。

TV(H)(视频水平同步脉冲触发):用来观察视频信号的扫描波形。

(21) CAL 0.5V(校准电压输入端)

校准电压输出端的输出电压通常为峰对峰值 0.5V,1KHz 的方形波,可用来校准探针。

(22) GND(接地端)

接地端与 CH1 和 CH2 探针上的接地夹均是同电压。

(23) 探针

探针又称为测试棒,作为待测信号的输入端,其旁边附有接地夹。探针一般有 $\times 1$ 和 $\times 10$ 两种可供选择,当输入信号振幅较大时,可以使用 $\times 10$ 的探针,待测信号经过探针内的电阻,使信号强度衰减为 $1/10$,即经示波器所测得的信号振幅为实际信号振幅的 $1/10$,也就是实际上信号的振幅应为示波器所测得的值乘以 10 。

1.6 示波器的基本使用方法

测试前的准备

测试前应让示波器上电源电压设置与电源电压相符合,并将下列开关放在适当位置。

- (1) POWER 电源开关:OFF
- (2) INTENSITY 亮度控制:大约在中间位置
- (3) FOCUS 聚焦控制:在中间位置
- (4) AC—GND—DC:GND
- (5) H POSITION,V POSITION 水平及垂直位置调节:中间位置
- (6) MODE :CH1
- (7) (TRIG)MODE:AUTO
- (8) (TRIG)SOURCE:INT
- (9) INT TRIG:CH1

电源开关放在 ON 约 10 秒后,荧光屏上会显示出一条水平线,调节 INTENSITY 到适当的亮度及 FOCUS 到光迹最清晰的位置。然后将 CH1 探针钩住 CAL 0.5V 检验电压输入端,适当调节 VOLTS/DIV 和 TIME/DIV 按钮,检查荧光屏上所显示的波形是否为峰值 0.5V、频率 1KHz 的方形波。CH2 探针也可使用相同的方法检查,如果方形波波形不佳,可调节探针上的校准可调电容。

一般的测量

若观察单一波形时,可使用 CH1 或 CH2。如果使用 CH1,通常

- (1) 垂直轴显示方式选择开关 MODE 放在 CH1;
- (2) 触发方式选择开关 (TRIG)MODE 放在 AUTO;
- (3) 触发源选择开关 (TRIG)SOURCE 放在 INT;
- (4) INT TRIG 放在 CH1 的位置。

如果使用 CH2,其方法与上述步骤相同,只是将 CH1 改为 CH2。

若同时观察两个波形,应将垂直轴显示方式选择开关放在 ALT 或 CHOP 的位置。高频时使用 ALT,低频时使用 CHOP。

交流电压的测量

- (1) AC-GND-DC 开关放在 AC。
- (2) 将 VOLTS/DIV 上的 VAR 旋钮转到 CAL 的位置。
- (3) 调节 VOLTS/DIV,使波形的振幅易于观察。
- (4) 如果使用 $\times 1$ 探针,峰对峰值(V_{p-p})=VOLTS/DIV \times 垂直格数。
如果使用 $\times 10$ 探针,峰对峰值(V_{p-p})=VOLTS/DIV $\times 10 \times$ 垂直格数。
需注意峰对峰值与有效值 V_{rms} 间的关系,以正弦波为例,

$$V_{rms} = \frac{V_{p-p}}{2 \times \sqrt{2}} \quad (1)$$

- (5) 如果只观察波形,可调节 VOLTS/DIV 上的 VAR 旋钮直到易于观察为止。

直流电压的测量

- (1) 将 AC-GND-DC 开关放在 GND 位置,荧光屏上应显示 0V 的水平线。
- (2) 将 VOLTS/DIV 上的 VAR 旋钮转到 CAL 位置。
- (3) AC-GND-DC 开关改放到 DC 的位置,观察原水平线的垂直位移,往上为正,往下为负。
- (4) 调节 VOLTS/DIV,使水平线的垂直位移易于观察。
- (5) 如果使用 $\times 1$ 探针

$$\text{电压(V)} = \text{VOLTS/DIV} \times \text{垂直位移格数}$$

如果使用 $\times 10$ 探针

$$\text{电压(V)} = \text{VOLTS/DIV} \times 10 \times \text{垂直位移格数}$$

周期与频率的测量

测量周期时,可调节 TIME/DIV 到易于观察波形在水平方向所占的格数,需注意 TIME/DIV 旋钮上的 VAR 应放在 CAL。

$$\text{周期 } T = \text{TIME/DIV} \times \text{每周期的水平格数}$$

若将 PULL $\times 10$ MAG 旋钮拉出,

$$\text{周期 } T = (\text{TIME/DIV} / 10) \times \text{一周期的水平格数}$$

频率 f 与周期 T 互为倒数关系,测得周期,频率即可算出:

$$f = 1/T \quad (2)$$

电流的测量

在示波器测量电流时,可在电路中串联一已知电阻 R ,通过测量电阻端的电压降 V ,即可算出电流 $I=V/R$,需注意串联的电阻规律,电阻值不应过大,以减少电路因增加电阻引起的误差。

相位差的测量

测量两个波形间的相位差时,可以将垂直轴显示方式选择开关 MODE 放在 ALT 或 CHOP,以同时显示两个波形,如图 1.5 所示,测量波形的周期 T 与两波形达到正的最大值的时间差 Δt ,即可求出相位差:

$$\theta = \frac{\Delta t}{T} \times 360^\circ \quad (3)$$

上式中的 Δt 表示两波形达到负(或正)的最大值的时间差。

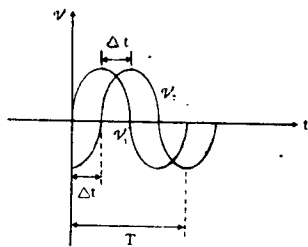


图 1.5 V_1 超前 V_2 的相位角 $\theta = \frac{\Delta t}{T} \times 360^\circ$

如果两个波形都是正弦波,可利用李沙育图形(Lissajous Pattern)测出相位差。测量时将两个正弦波电压分别加在 CH1 和 CH2,示波器设定为 X-Y MODE,按其在荧光屏上显示的图形为一直线、圆或椭圆可以判断出两者的相位差。利用 POSITION 旋钮将图形移至荧光屏正中央,如图 1.6 所示相位差:

$$\theta = \sin^{-1} \frac{B}{A} \quad (4)$$

如果直线向左下方倾斜, $\theta=0^\circ$;如果直线向右下方倾斜, $\theta=180^\circ$ 。

C:\MSDOS\SYSTEM\

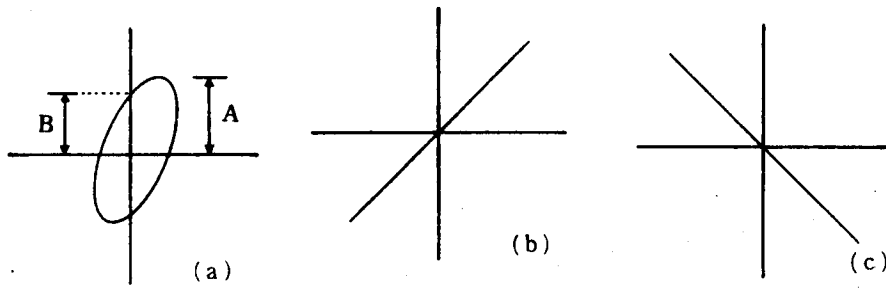


图 1.6 李沙育图形

(a) 相位差 $\theta = \sin^{-1} \frac{B}{A}$, (b) 相位差 0° , (c) 相位差 180°

频率比的测量

测量两个波形的频率,可分别或同时将两个波形显示出来,测出其周期,即可算出频率。如果两个波形均为正弦波,也可利用李沙育图形来测量,测量时示波器设定为 X-Y MODE,两个信号分别加在 CH1 和 CH2。如果加在水平轴信号的频率为 f_H (即为 CH1 信号的频率 f_1),垂直轴的频率为 f_V (即为 CH2 信号的频率 f_2),那么

$$\frac{f_2}{f_1} = \frac{f_V}{f_H} = \frac{\text{水平方向的切点数}}{\text{垂直方向的切点数}} \quad (5)$$

假设 f_H 的频率为 f_V 频率的两倍,所测得的李沙育图形如图 1.7 所示,垂直方向的切点数与水平方向切点数比为 2 : 1。如果图形因重叠产生的端点只能算 1/2 点(如图 1.8)。

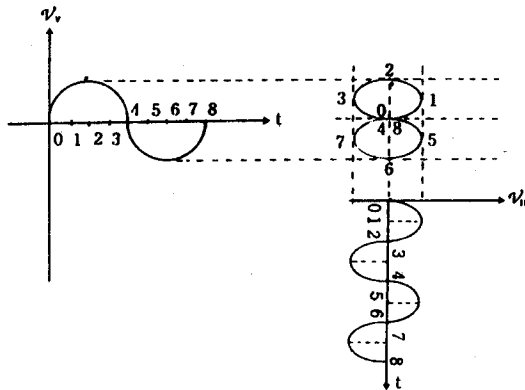


图 1.7 以李沙育图形判别两正弦波频率比的原理

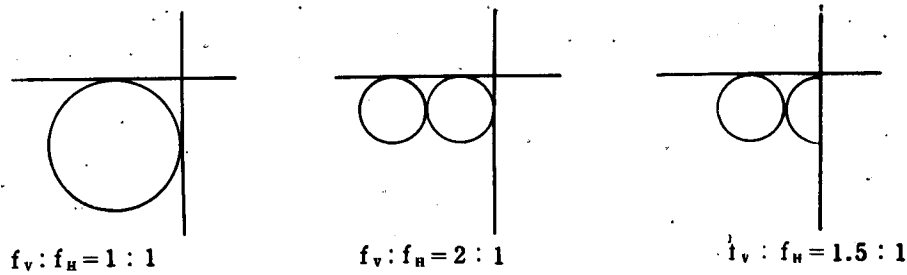


图 1.8 以李沙育图形判别两正弦波的频率比

转换特性(Transfer Characteristic)曲线的测量

电路的输入端与输出端的关系可用转换特性曲线来表示,如图 1.9 所示的电路,输入端电压 u_i ,输出端口电压 u_o ,如果要测量 u_i 和 u_o 的对应关系,利用示波器的 X-Y MODE,将 TIME/DIV 开关转到 X-Y 位置,以 u_i 作为 CH1(X 轴)的信号源, u_o 作为 CH2(Y 轴)的信号源,这样在荧光屏上显示出的电路转换特性曲线,其中 X 轴表示 V_i ,Y 轴表示 V_o ,测试时需注意示波器上两个探针旁的接地夹电位相同。

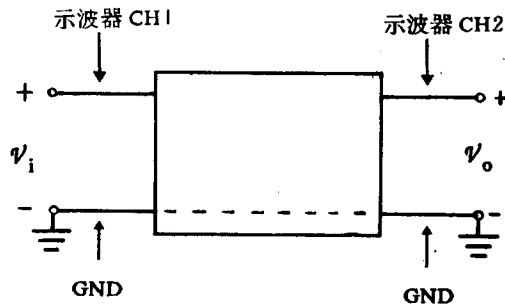


图 1.9 用示波器的 X-Y MODE 测量电路的转换特性曲线

使用外触发源测量波形

使用外触发源测量电压、电流和周期等的方法,除了:

- (1) 接示波器外部触发连接端 EXT TRIG 到外部信号源。
- (2) 将触发信号源选择开关(TRIG)SOURCE 改放到 EXT。其它步骤与上述示波器的基本使用方法一样。

实验 1.1 示波器的使用

一、目的

1. 了解示波器的基本结构与原理。
2. 学习示波器的使用与测量方法。

二、说明

参考 1.1 至 1.6 节。

三、实验器材

- | | |
|----------|-----------------|
| 1. 示波器 | ×1 |
| 2. 信号发生器 | ×1 |
| 3. 电阻 | 10k Ω ×1 |
| 4. 电容 | 0.1 μ F×1 |

四、实验步骤

(一) 熟悉示波器的使用

1. 按照本实验说明——测试前的准备一项中的要领,使光迹正确而清晰的显示在示波器荧光屏上。

2. 打开信号发生器开关,调节输出为 1KHz、振幅 50m V_{p-p} 的正弦波。调节直流电源开关 DC OFFSET,使得直流输出电压约为 20mV,并从 MAIN OUTPUT 输出端连接至示波器 CH1(即以 CH1 作为信号输入端)。

3. 按照第一章说明方法,分别测量信号发生器输出信号的直流电压、交流电压、频率和波形等。

4. 调节信号发生器输出其它波形(如方形波、三角形波),再重复步骤 3。

5. 调节信号发生器 DC OFFSET 到不同位置,观察示波器所显示的波形直流电压大小的变化。

6. 改变信号发生器的输出频率,调节示波器并观察波形频率的改变。

7. 重复以上步骤,配合调节信号发生器的不同输出,直到熟悉示波器的操作为止。

(二) 相位差的测量

1. 按照图 1.10 接线。

2. 调节信号发生器输出为 10V_{p-p},100Hz 的正弦波作为 V_i 信号源。

3. 示波器探针及接地夹放在如图 1.10 所示的位置,并按照本实验说明——测试前的准备要领,使光迹正确而清晰地显示在荧光屏上。

4. 示波器垂直轴显示方式选择开关 MODE 放在 ALT 或 CHOP,观察并记录 V_i 和 V_o 的

波形,由测得的波形求两者的相位差。

5. 信号发生器频率分别调节为 500Hz, 1KHz, 10KHz, 并重复步骤 4。

6. 示波器垂直显示方式选择开关 MODE 改放在 X-Y, V_i 频率分别调节为 100Hz, 500Hz, 1KHz 和 10KHz, 观察并记录荧光屏上所显示的图形, 求 v_i 与 v_o 的相位差并与步骤 4 和 5 的结果相比较。

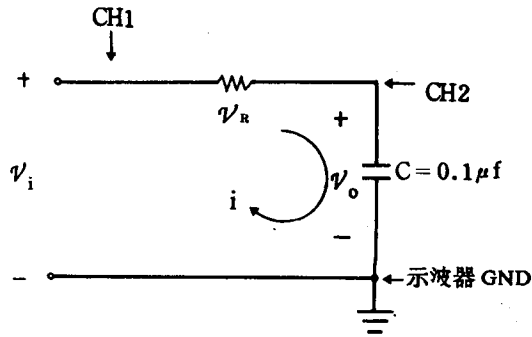


图 1.10 测量 V_i 和 V_o 的波形与相位差

(三)使用外同步触发方式测量波形

1. 如图 1.11 接好线路, 并调节信号发生器输出为 $2V_p-p$, 100Hz 的正弦波作为 V_i 信号源。
2. 连接示波器外部触发连接端 EXT TRIG 及将探针放在如图 1.11 所示的位置。
3. 将触发信号源选择开关 (TRIG) SOURCE 置于 EXT。
4. 调节示波器观察 v_i 和 v_o 的波形。

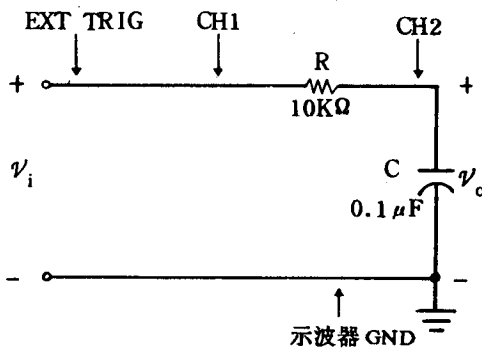


图 1.11 使用外同步触发方式测量波形

五 问题与讨论

1. 比较步骤(二)中的理论值与实际测得的结果。
2. 在图 1.10 电路中, 如何用示波器同时测量 i 和 V_o 的波形与其相位的关系?
3. 有一信号 v_s 包括直流电压 V_s 和交流电压 v_s , 如何用示波器测得该信号直流和交流部分的电压。

第二章 二极管

在电子电路中,有许多基本元件如二极管、晶体管系统都由半导体制成,因此,本章将介绍半导体的物理现象并讨论二极管的构造、电压-电流特性以及温度特性等。

由于二极管的电压-电流特性是非线性关系,为方便分析二极管电路,可根据二极管的特性使用适当的模型,即以等效电路简化电路的分析。

二极管的种类很多,如整流二极管、稳压管、发光二极管、光二极管、萧特基二极管与变容二极管等,本章将分别讨论其用途和应用电路。

2.1 半导体

物质按单位体积中所存在的自由电子的多少决定其导电性能的好坏。良好的导体每立方厘米约 10^{26} 个自由电子,绝缘体约有 10 个自由电子,半导体是介于两者之间,例如常温下纯硅(Si)每立方厘米约有 1.92×10^{15} 个电子。

电子电路中所使用的电子元件,大部分是由硅或锗(Ge)半导体所制成的。纯硅或锗均为四价元素,其原子结构中带负电的电子围绕着原子核旋转,原子核则由带正电的质子和中性不带电的中子所组成(如图 2.1)。在电子的最外层轨道有四个电子称为价电子(valence electrons)。移开外层轨道上的电子所需的能量比移开内层轨道上电子的能量少;换句话说,原子接受足够的能量后,其最外层轨道上的电子较容易离开轨道而成为自由电子。

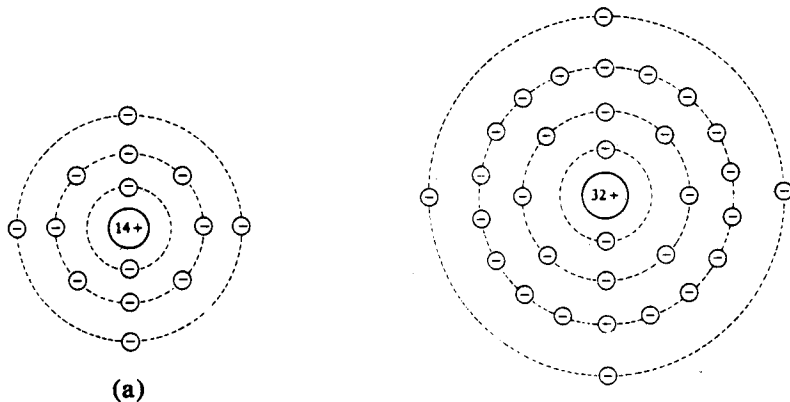


图 2.1 (a) 硅原子的结构, (b) 锗原子结构

硅或锗晶体是由一些原子所组成,这些原子最外层轨道的四个价电子与其四个相邻原子的价电子形成四个共价键(covalent bonds)(如图 2.2(a))。当部分价电子接受能量(例如热能)后,破坏共价键,价电子不再被束缚而形成自由电子(free electrons),在断裂的共价键中,缺少电子的地方即形成空穴(holes)(如图 2.2(b)所示)。

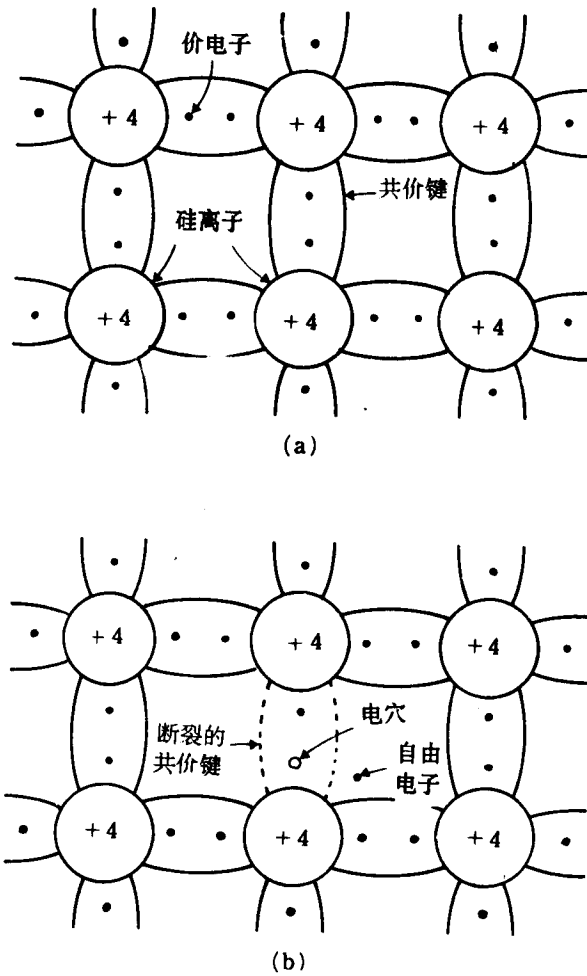


图 2.2 (a) 硅晶体的结构, (b) 硅晶体中断裂的共价键、空穴和自由电子

2.2 n 型半导体和 p 型半导体

在四价的纯硅或锗半导体中, 如果加入性质相近的五价杂质, 即其原子最外层有五个价电子, 如磷、砷、锑等, 使得半导体原子与杂质原子的价电子相结合, 形成共价键, 杂质多余的价电子变成自由电子(如图 2.3 所示)。这种在四价的纯半导体中加入五价杂质的半导体, 称为 n 型半导体。

如果在纯硅或锗中加入三价的杂质, 如硼、镓、铟等, 使得纯半导体与杂质原子相结合的共价键中, 因缺少一个价电子而成为断裂的共价键, 缺少价电子的地方即形成空穴, 这种半导体称为 P 型半导体(如图 2.4 所示)。

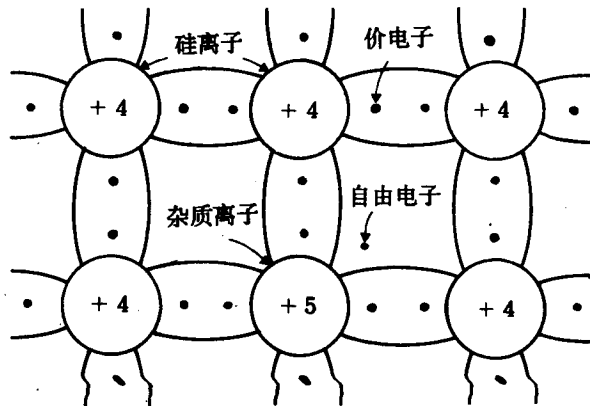


图 2.3 在四价的硅半导体中,加入五价的杂质,杂质多余的价电子变成自由电子,这种半导体称为 n 型半导体

在纯半导体(intrinsic semiconductor)中加入杂质的方法称为掺杂(doping),杂质越多,半导体内的电子或空穴也越多,因而其导电性也愈佳;这种加入杂质的半导体,如 n 型、p 型半导体称为杂质半导体(extrinsic semiconductor)。

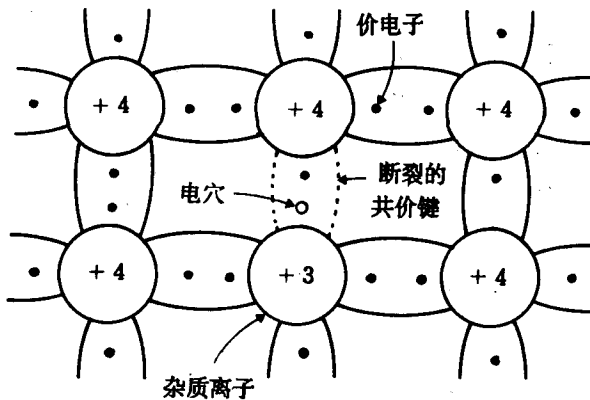


图 2.4 在四价的硅半导体加入三价的杂质,在杂质与相邻硅原子结合的共价键中,有一共价键因缺少一个价电子而成为断裂的共价键,缺少价电子的地方称为空穴,这种半导体称为 p 型半导体

2.3 二极管

二极管即在硅或锗晶体中,一边杂质为 p 型半导体,另一边为 n 型半导体,p 型端引线称为阳极(anode, A),n 型端引线则称为阴极(cathode, K)。

图 2.5(a)所示为二极管的结构,在 p 型半导体端加入的杂质原子接受电子变成负离子,这一端主要载体为空穴;在 n 型端加入的杂质原子提供多余的价电子成为正离子,这一端主要

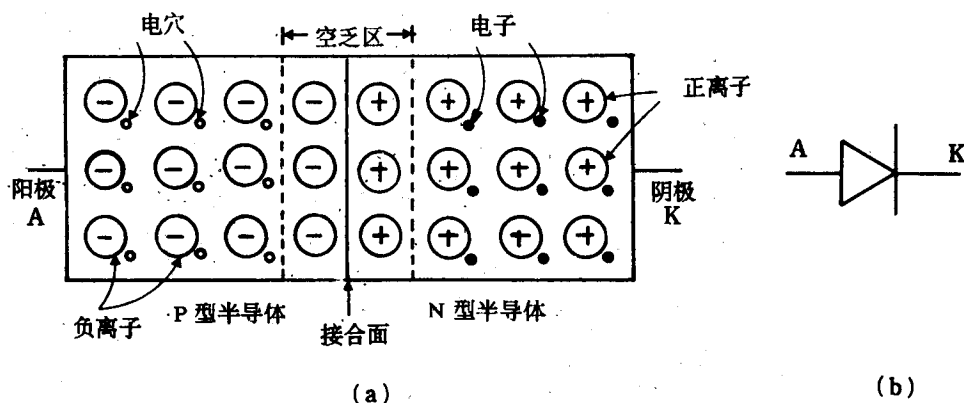


图 2.5 二极管(a)结构与(b)符号

的载体为电子。在二极管 p 与 n 两端刚接合时, n 型半导体端靠近接合面的自由电子越过接合面, 扩散至 p 型端, 填入接合面附近的空穴, 这种扩散作用并不会一直持续下去; 在 p 型端靠近接合面处的空穴被电子填满后, 负离子将排斥可能来自 n 型端带负电的电子; 同理, n 型端靠近接合面的正离子将排斥来自 p 型端的空穴; 这样, 停止电子与空穴的继续结合, 达到平衡状态。这时候, 在 p-n 接合面附近因缺少自由电子与空穴称为空乏区(depletion region)。在空乏区离子阻止电子与空穴越过接合面的力量称为障碍电压(potential barrier), 换句话说, 接合面平衡后, 要使电子或空穴继续通过空乏区, 可在 p、n 两端加上一电压以克服障碍电压。障碍电压的大小与半导体的种类及掺杂程度有关; 通常, 硅二极管约为 0.6 至 0.7V, 锗二极管较低, 约为 0.2 至 0.3V。

2.4 正向电压和反向电压

在二极管 p 端加上正电压, n 端加上负电压, 这种偏置方式称为正向电压(forward bias)(如图 2.6 所示)。p 端主要载体—空穴受到 V_D 正电压的排斥, 通过接合面, 进入 n 端后, 受到 V_D 负电压的吸引, 经外电路回到 p 端。n 端主要载体—电子因 V_D 负电压的排斥, 越过接合面, 进入 p 端后, 再受到 V_D 正电压的吸引, 经外电路回到 n 端。因此, 电子与空穴源源不断以反方向越过接合面, 产生正向电流 I_D 。

要使 p 端的空穴与 n 端的电子跨越接合面的空乏区分别进入 n 端与 p 端, 加的正向电压 V_D 必须使得电子与空穴获得足够能量以克服障碍电压, 才会有正向电流 I_D 流通; 所以, 在硅二极管两端加入正向电压约大于 0.6V 时开始有少许电流通过, 这时的电压称为开启电压(cut-in voltage), 又称为开启电压。锗二极管的切入电压较低, 约为 0.2V。

如果在二极管 p 端接负电压, n 端接正电压, 这种偏置方式称为反向电压(reverse bias)(如图 2.7 所示)。二极管加上反向电压后, p 端的空穴受到 V_D 负电压的吸引远离接合面, n 端的电子受到 V_D 正电压的吸引也远离接合面, 所以在接合面处, 缺少电子与空穴, 扩大空乏区。如果反向电压不很大, 在接合面处, 由于周围温度关系获得能量所产生的少量电子空穴穿越接合面, 形成一微小的电流。如果增加反向电压, 在一定范围内电流并不随着增加, 这时的电流称为