

第 1 章 二极管及其应用实例

1.1 普通二极管

1.1.1 二极管的种类和检测

1. 二极管的种类

二极管一般由一个 PN 结和两条引出线组成，将其封装在一个密封的壳体中。P 区引出线为二极管正极，N 区引出线为二极管负极。二极管组成与电路符号如图 1-1 所示，图中箭头方向为二极管单向导电时的电流方向。

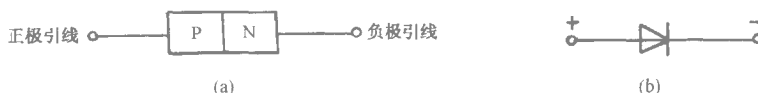


图 1-1 二极管的组成和电路符号

(a) 组成；(b) 电路符号

二极管的种类很多，按半导体材料分为硅管和锗管两种。硅管的优点是反向电流小、允许工作温度高、击穿电压高及热稳定性好，缺点是小信号检波的灵敏度低、线性差，一般用于整流和逻辑应用等。而锗管的优、缺点正好与硅管相反，多用于检波、高频等电路中。

二极管按结构形式分为点接触型和面接触型两种。点接触型是由一根金属丝和半导体晶片接触构成 PN 结，因此，PN 结面积小，不能通过大电流，但结间电容小，工作频率高，适用于小功率整流、高频检波等电路。而面接触型的 PN 结面积大，故结电阻小，允许通过的电流大，但结间电容大，工作频率低，适用于低频大功率整流电路。

二极管按用途可分为整流二极管、信号二极管和特殊用途二极管等。

2. 二极管的检测

二极管的检测一般使用万用表的电阻挡进行测量，万用表的电阻挡实际上就是串联了一只电阻的直流电源，如图 1-2(a) 所示。黑表笔（表的负极）相当于电源的正极，红表笔（表的正极）相当于电源的负极。被检测的二极管接在红、黑表笔之间就相当于一只电阻，若二极管的电阻大，回路中的电流就小，表针摆动就小。反之，电阻小，回路中的电流就大，表针摆动大，这就是用万用表测量二极管的原理。用万用表可识别普通二极管的极性，即将万用表拨到 $R \times 100 \Omega$ 或 $R \times 1 k\Omega$ 挡，两个表笔分别接在二极管的两端，即测量二极管两个引出脚，如图 1-2(b) 和图 1-2(c) 所示。正、反向各测一次，当出现一次小阻值（几百欧姆左右）时，以这次测量为准，黑表笔接的是二极管的正极，红表笔接的是二极管的负极。

用万用表可测量二极管正、反向电阻，从而判断二极管性能的好坏。用万用表电阻 $R \times 100 \Omega$ 或 $R \times 1 k\Omega$ 挡进行测量，正常情况下锗材料二极管的正向电阻为 $1 k\Omega$ 左右，反向电阻为 $500 k\Omega$ 以上；而硅材料二极管的正向电阻值为 $1 \sim 5 k\Omega$ 之间，反向电阻值为无限大。若测得二极管的正、反向电阻值均为 0Ω ，则说明二极管被击穿造成短路；若正、反向电阻值均为无

限大, 则说明二极管开路; 若正、反向电阻差值小, 即正向电阻值偏大, 反向电阻值偏小, 则说明二极管性能不良。不论锗材料还是硅材料的二极管, 都是其正向电阻值越小越好, 正向电阻值过大, 会使二极管单向导电性变坏。反之, 反向电阻值越大越好, 反向电阻值过小, 说明二极管失去了单向导电作用。在实际应用中, 被认为是理想二极管的正向电阻值为 $0\ \Omega$, 反向电阻值为无限大。

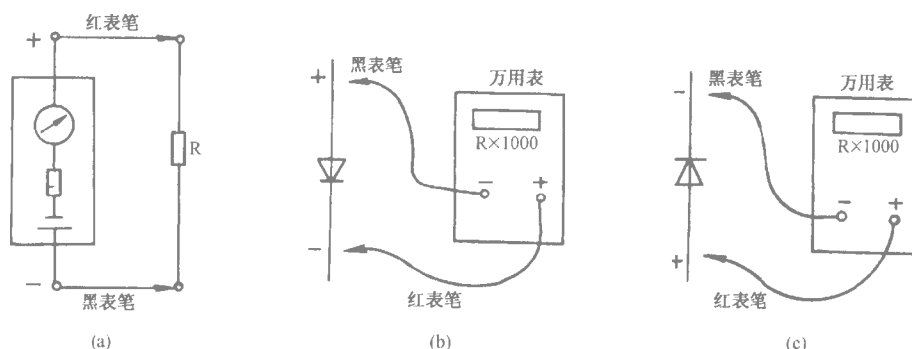


图 1-2 二极管测量示意图

1.1.2 二极管的特性和参数

1. 二极管的特性

二极管的伏安特性曲线表示通过二极管中电流与其两端外加电压之间的关系, 如图 1-3 所示。二极管的型号虽很多, 参数不尽相同, 但它们的伏安特性曲线的形状大致相似。正向伏安特性如图 1-3 中的右侧部分所示, 从原点至 A 点的区域称为正向死区, A 点电压称为死区电压, 在常温下硅管的死区电压约为 0.5 V , 锗管的死区电压约为 0.2 V 。当二极管两端的电压超过 A 点电压后, 管子开始导通, 正向电流随端电压的增高而迅速增大, 二极管呈低阻状态。由图 1-3 的特性可看出, 这时二极管的正向电流在相当大的范围内变化, 而二极管两端电压的变化却不大 (近似为恒定特性) 小功率硅管约为 0.7 V 锗管约为 0.3 V 。

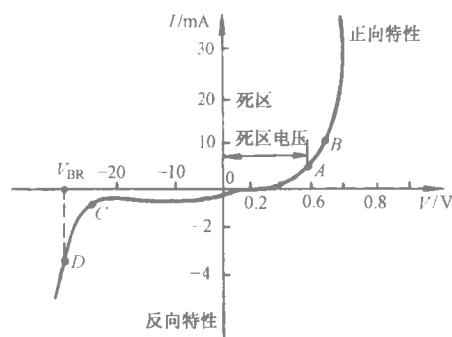


图 1-3 二极管的典型伏安特性

在二极管两端加反向电压时, 由于 PN 结的反向电阻很高, 所以反向电压在一定范围内变化, 反向电流非常小, 基本上不随反向电压而变化, 如图 1-3 中从原点至 C 点的曲线所示, 这时的电流称为反向饱和电流, 此时二极管处于截止状态。

反向电流是二极管的一个重要参数, 反向电流越大, 说明二极管的单向导电性能越差。一般来说, 硅管的反向电流约为 $1\ \mu\text{A}$ 到几十微安, 锗管约为几十微安至几百微安。另外, 反向电流随温度的上升而急剧增大, 通常温度每增加 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$, 其反向电流值约增加 1 倍。

在图 1-3 中 当过 C 点继续增大反向电压时, 反向电流在 D 点处突然上升, 这种现象称为反向击穿, 这时所对应的电压称为反向击穿电压 V_{BR} , 不同类型和不同材料二极管的反向击穿电压是不同的, 通常为几十伏到几百伏, 甚至高达数千伏。

当外加反向电压超过反向击穿电压时 PN 结被击穿，反向电流突然剧增。二极管失去了单向导电性能。如果被电压击穿的二极管又因电流过大而引起了热击穿，二极管将被烧毁造成永久性损坏。在实际应用中要特别注意，不能让二极管承受过高的反向电压。

2. 二极管主要参数

额定整流电流 (I_F)：额定整流电流是指二极管长时间工作时允许流过二极管的最大正向平均电流。在使用时工作电流一般不得超过 I_F 值，否则将会引起 PN 结过热而损坏二极管。

额定反向电压 (V_R)：额定反向电压是指二极管使用时所允许加的最大反向电压，一般手册上给出的 V_R 是反向击穿电压的一半。

反向电流 (I_R)：反向电流是指二极管在一定温度下加反向电压时的反向电流值。 I_R 越大，表明二极管单向导电性能越差。

此外，还有二极管的最高工作频率、正向管压降、极间电容和散热器规格等参数。必须说明，上述各参数都与温度有关，因此只有在规定的散热条件下，才能保证二极管在长期工作中各参数稳定。选择二极管时要考虑实际应用中温度的影响。

1.1.3 肖特基整流二极管

在开关电源中，所需的整流二极管必须具有正向压降低、快速恢复的特点，还应具有足够大的输出功率，这时可以使用肖特基整流二极管。这种整流二极管即使在大的正向电流作用下其正向压降也很低，仅为 0.4 V 左右。因此，肖特基整流二极管特别适用于 5V 左右的低电压输出开关电源电路中。在一般情况下，低电压输出所驱动的负载电流都较大，而且随着结温的增加，其正向压降更低。肖特基整流二极管的反向恢复时间是可以忽略不计的，因为此管是多数载流子半导体器件，在肖特基整流二极管的开关过程中，没有清除少数载流子存储电荷的问题。

肖特基整流二极管有两大缺点：其一，反向截止电压的承受能力较低，目前的产品大约为 100 V；其二，反向漏电流较大，使得该器件比其他类型的整流器件更容易受热击穿。当然，这些缺点可以通过增加瞬时过电压保护电路及适当控制结温来克服。

1.2 稳压二极管

1.2.1 硅稳压二极管

1. 稳压二极管的伏安特性

稳压二极管又称齐纳二极管，常用硅材料制成，所以又称硅稳压二极管，它是利用齐纳击穿或雪崩击穿的性质而工作的。其图形符号与伏安特性如图 1-4 所示，稳压管工作在反向伏安特性上，电流限定于一定的区段，当电流小于最大允许数值时，就能安全地工作。

硅稳压管的 PN 结具有硬的反向特性，当反向电压低于击穿电压时，反向漏电流很小（微安数量级），相当于具有很大的反向电阻（兆欧数量级）。当反向电压超过击穿电压后，反向电流很快增大，特性曲线出现明显拐弯点，如图 1-4(b) 中 A 点所示。随着电流的增大，电压增大得较慢，电流在一定范围内变动时，输出电压变化很小，利用这个特性可用来稳压。产品在规定的测试电流 I_z 下测定稳定电压 V_z ，并按 V_z 的大小划分型号，各种型号稳压管的稳定电压一般在 1~220 V 之间。

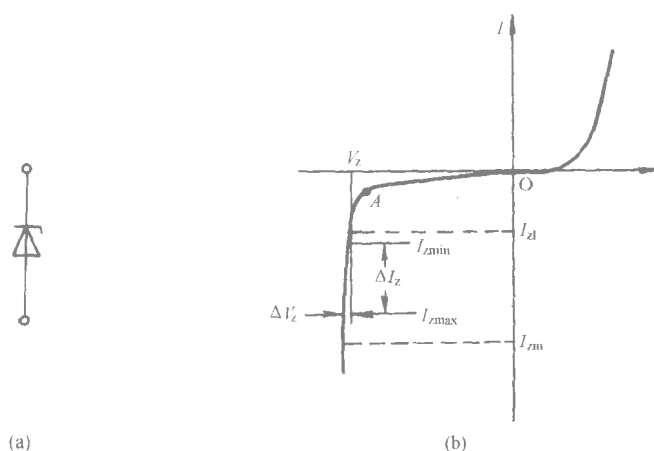


图 1-4 稳压二极管的图形符号与伏安特性

(a) 稳压二极管的图形符号；(b) 伏安特性

2. 稳压二极管的主要参数

稳定电压 (V_z): 稳定电压 (V_z) 是稳压管的反向击穿电压, 即为稳压管正常工作时其两端所具有的电压值。不同型号的稳压管的 V_z 值不同, 即使同一型号的稳压管该值也具有一定的离散性。例如一个 2CW21A 稳压管的 V_z 值是 4~4.5 V 之间的某一确定值, 2CW7 稳压管的 V_z 值是 6~7.5 V 之间的某一确定值。在使用和更换稳压管时一定要对具体的稳压管进行测试, 看其稳压值是否合乎要求。

稳定电流 (I_z): I_z 是稳压管正常工作时电流的参考值, 它是稳压管两端保持正常稳定电压 V_z 值时制造厂的出厂测试电流。这个参数只是作为应用时的参考依据, 在实际电路中, 稳压管中的工作电流的选用还要根据具体情况来考虑。

最大稳定电流 (I_{zmax}): I_{zmax} 又称最大工作电流, 即稳压管允许通过的最大反向电流, 它是稳压管的重要指标。稳压管在工作时的电流应小于该值, 否则稳压管将因电流过大而发热损坏。

最小稳定电流 (I_{zmin}): I_{zmin} 是稳压管进入正常稳压状态所必需的起始电流, 实际电流小于此值时, 稳压管因未进入击穿状态而不能起到稳压作用。

最大耗散功率 (P_{zmax}): P_{zmax} 是稳压管在反向击穿工作时 PN 结所能承受的最大功率值。它与最大稳定电流的关系是 $P_{zmax} = V_z I_{zmax}$ 。稳压管实际消耗的功率等于稳定电压 V_z 与稳定电流 I_z 的乘积 即 $P_z = V_z I_z$ 。 P_z 只能小于 P_{zmax} , 否则将造成稳压管的损坏。

动态电阻 (R_z): 当流过稳压管的电流发生变化时, 它两端的电压变化量 ΔV_z 与电流变化量 ΔI_z 之比称为稳压管的动态电阻或内阻, 即 $R_z = \Delta V_z / \Delta I_z$ 。稳压管的内阻越小, 说明电流变化时其两端电压变化也小, 即稳压性能好, 选择稳压管时宜选择内阻值小的稳压管。

电压温度系数 (X_z): 当环境温度变化时, 稳压管的击穿电压将产生微小的变化。一般常用电压温度系数来表示稳压管的温度稳定性。其定义式为

$$X_z = \frac{\Delta V_z}{V_z \Delta T} 100\% (1/^\circ\text{C}) \quad (1-1)$$

式中 ΔT 表示温度的变化量。 X_z 反映温度每变化 1 时稳压管稳定电压的相对变化量, 该值越小其稳压性能受温度影响越小, 即温度特性越好。一般 V_z 为 5~6 V 的稳压管其 X_z 值约等于零, V_z 值大于 6 V 的稳压管其 X_z 值为正, 而 V_z 值小于 5 V 的稳压管其 X_z 值为负。因此, 选用 5~6 V 的稳压管能得到较好的温度稳定性。

3. 稳压二极管稳压电路

稳压二极管稳压电路如图 1-5 所示, 稳压管 VD_z 工作于反向偏置, R_s 是限流电阻并起着电压调整作用。这种电路是利用硅稳压管的反向击穿特性, 使稳压管在工作电流范围内保持两端电压基本不变。

电路中, 限流电阻 R_s 的确定应考虑以下两种极端情况。第一, 当输入电压为最大 V_{imax} 而负载开路 $I_o=0$ 时, 流过稳压管 VD_z 的电流最大, 为了不超过稳压管 VD_z 的最大允许电流 I_{zmax} 限流电阻 R_s 应足够大。

$$R_{smin} > \frac{V_{imax} - V_o}{I_{zmax} + 0} \quad (1-2)$$

第二, 当输入电压为最小 V_{imin} , 而负载电流最大 I_{omax} 时, 流过稳压管 VD_z 的电流最小, 为了保证稳压管 VD_z 电流不小于选定的最小稳定电流 I_{zmin} 限流电阻 R_s 不应过大。

$$R_{smax} < \frac{V_{imin} - V_o}{I_{zmin} + I_{omax}} \quad (1-3)$$

所以限流电阻 R_s 应当满足式 (1-2) 和式 (1-3) 所给的范围, 即

$$R_{smin} < R_s < R_{smax} \quad (1-4)$$

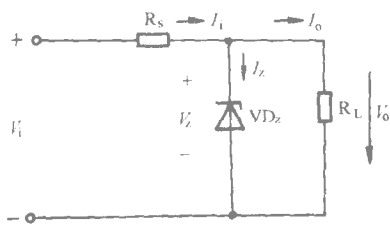


图 1-5 稳压管稳压电路

4. 稳压二极管的检测方法

(1) 稳压二极管的极性判别

稳压二极管极性判别方法与普通二极管类似, 用万用表电阻 $R \times 1 \text{ k}\Omega$ 挡测量稳压二极管两引脚阻值, 如果万用表指针在几百欧 (或几千欧) 位置, 则说明黑表笔接的是稳压二极管的正极, 如果万用表指针在几百千欧以上, 则说明红表笔接的是二极管的正极。在判别稳压二极管的极性时, 不能使用 $R \times 10 \text{ k}\Omega$ 挡, 因为 $R \times 10 \text{ k}\Omega$ 挡内为高压电池, 测反向电阻时会使稳压二极管击穿, 这时万用表上读出的数值很小, 往往会误认为稳压二极管被击穿了。

(2) 稳压二极管的好坏判断

用万用表电阻 $R \times 1 \text{ k}\Omega$ 挡测量稳压二极管正、反向电阻时, 正常情况下稳压二极管的正向电阻值约为 $10 \text{ k}\Omega$, 反向电阻值为无限大。若与之不符合, 则稳压二极管损坏。

稳压二极管和普通二极管的区别: 首先用万用表电阻 $R \times 1 \text{ k}\Omega$ 挡找出被测二极管正、负极, 然后用 $R \times 10 \text{ k}\Omega$ 挡测二极管反向电阻, 若阻值为无限大, 该二极管为普通二极管, 若反向电阻值较小, 则说明该二极管为稳压二极管。值得注意的是, 当稳压二极管稳压值大于 9 V 时, 用该方法无法判断。

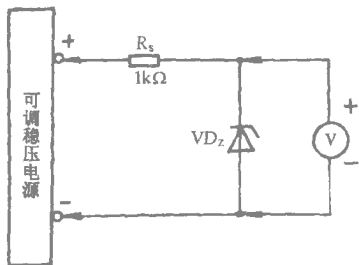


图 1-6 稳压二极管的简易测试电路

(3) 稳压二极管的简易测试

图 1-6 是稳压二极管的简易测试电路, 可用于测量稳压二极管的稳定电压 V_z 。测试过程如下: 将被测稳压管 VD_z 接在电路中, 用万用表的直流电压挡监视 VD_z 两端电压, 稳压电源的输出从 0 V 开始调大, 电压表指示的电压随之增大, 输出电压调到某值时电压表指示的电压不再增大, 则此时电压表指示的电压即为被测稳压管的稳定电压 V_z , 反复调多次可得到准确的稳定电压值。

1.2.2 TL431

TL431 是精密可电基准电源，它有如下特点：稳压值

从 2.5~36 V 连续可调；参考电压源误差为 $\pm 1.0\%$ 低动态输出电阻 典型值为 $0.22\ \Omega$ 输出电流为 1.0~100 mA；全温度范围内温度特性平坦，典型值为 5×10^{-7} ；低输出噪声电压；TL431C、TL431I 和 TL431M 仅是工作温度不同，其中 TL431C 为 $-20 \sim 85\ ^\circ\text{C}$ ，TL431I 为 $-40 \sim 85\ ^\circ\text{C}$ ，TL431M 为 $-55 \sim 125\ ^\circ\text{C}$ 。TL431 的引脚、图形符号及内部等效电路如图 1-7 所示。

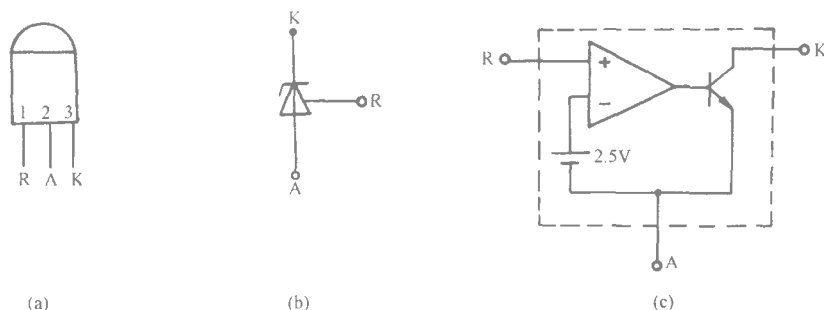


图 1-7 TL431 引脚、图形符号及内部等效电路

(a) 引脚；(b) 图形符号；(c) 内部等效电路

TL431 有 3 种基本应用：其一，作为稳压管使用，如图 1-8 所示，R 端接到阴极 K 上时，就成为 2.5 V 的稳压二极管，与一般稳压管同样使用。

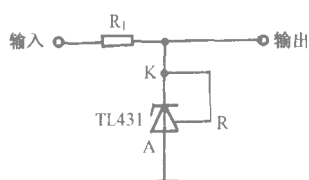


图 1-8 作为稳压管使用

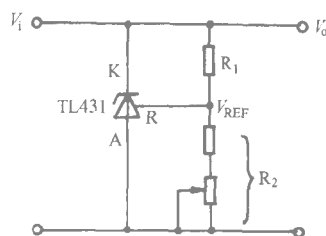


图 1-9 组成可变电源的电路

其二，作为可变电源使用，如图 1-9 所示，工作时，电路自行调节阴极 K 端子电压，以使 R 端的电压保持在 2.5 V。而输出电压 V_o 保持为

$$V_o = V_{KA} = V_{REF}(1 + R_1/R_2) - I_{REF}R_1 \quad (1-5)$$

I_{REF} 通常只有几微安，可忽略不计，则式 1-5 可简化为

$$V_o = V_{REF}(1 + R_1/R_2) \quad (1-6)$$

由于 V_{REF} 稳定在 2.5 V 若改变 R_1 和 R_2 的比值，就可任意地改变输出电压 V_o 。

其三，作为恒压元件使用，它被广泛用作开关稳压器的恒压元件，如图 1-10 所示。

在交流输入方式的开关稳压器中，开关电路和交流电源线之间没有绝缘。但是，为了避免在直流输出端触电的危险，采用变压器隔离方法。另一方面，输出电压的变化也必须以隔离方式传送给开关电路，因此，常采用光电耦合器来实现。

在图 1-10 所示的电路中，将光电耦合器 PC 和 TL431 接在要稳定的直流输出端。若输出电压 V_o 升高，TL431 的 K 极电流 I_K 就增大，流过光电耦合器 PC 中发光二极管的电流也同时

单晶体管的等效电路如图 1-11(b) 所示。 B_2 和 B_1 之间的 N 型区域等效为一个纯电阻 R_{BB} ，称为基区电阻。

$$R_{BB} = R_{B1} + R_{B2} \quad (1-7)$$

式中 R_{B2} 为第二基极与发射极之间硅片的电阻； R_{B1} 为第一基极与发射极之间硅片的电阻， R_{B1} 的阻值随发射极电流 I_E 而变化。当无 I_E 时， R_{BB} 通常为 $2 \sim 12 \text{ k}\Omega$ 。发射极处的 PN 结构成一只二极管 VD。

单结管的特性曲线如图 1-12 所示，主要特点是具有负阻效应，现结合等效电路来说明。

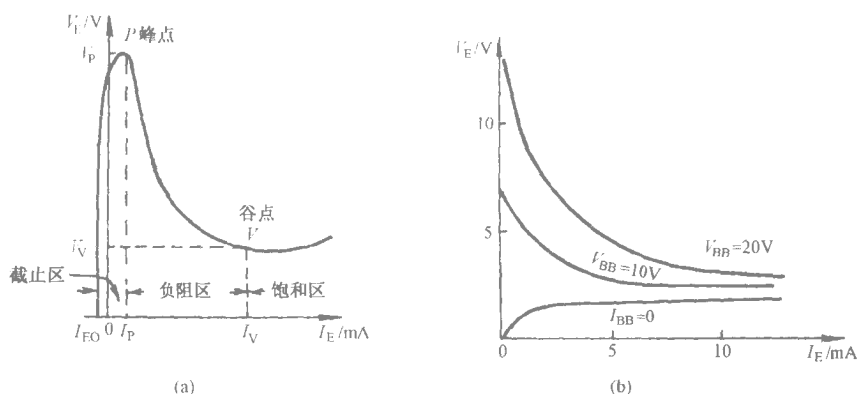


图 1-12 单结管的特性曲线
(a) 某固定 V_{BB} 时；(b) 不同 V_{BB} 时

1 分压比

在 B_2 、 B_1 间加以电压 V_{BB} 时，有一不大的电流 I_{BB} 从 B_2 流向 B_1 在 A 与 B_1 间分压得一电位差

$$V_A = \frac{R_{B1}}{R_{B1} + R_{B2}} V_{BB} = \frac{R_{B1}}{R_{BB}} V_{BB} = \eta V_{BB} \quad (1-8)$$

式中 η 称为分压比，它是单结管的重要参数之一，其值主要取决于发射极的几何位置，一个单结管的分压比几乎是固定不变的，大量产品的分压比处在 $0.3 \sim 0.9$ 之间。

2. 截止区

等效二极管 VD 为一个具有整流二极管正、反向特性的 PN 结。当发射极电压 $V_E < \eta V_{BB}$ 时，二极管 VD 处于负偏状态，只有很小（小于 $1 \sim 2 \mu\text{A}$ ）的反向电流 I_{EO} 流过 PN 结，参看图 1-12(a) 曲线中截止区内纵坐标左侧的特性。当 $V_E = \eta V_{BB}$ 时，PN 结为零偏，电流 $I_E = 0$ ，见图 1-12(a) 中曲线与纵坐标的交点。当 $\eta V_{BB} < V_E < \eta V_{BB} + V_D$ 时，二极管正偏，但由于硅二极管的正向导通电压 V_D 在 25 时一般为 0.7 V 左右，若发射结的偏压小于此值时， I_E 仍很小，VD 仍处于截止状态。见图 1-12(a) 中截止区内纵坐标右侧的特性曲线。

3. 负阻区

当 V_E 增大到等于 $\eta V_{BB} + V_D$ 时，由于克服了 PN 结的截止电压，因此，VD 转为导通。这一点的 V_E 称为峰点电压 V_P 故

$$V_P = \eta V_{BB} + V_D \quad (1-9)$$

式中 V_D 为 PN 结正向压降。相应于 V_P 的电流为峰点电流 I_P ，见图 1-12(a) 中的 P 点。当二极管 VD 导通后，发射极 P 区的空穴就会源源不断注入 N 区，空穴被电位为负的基极 B_1 吸引

过去, 与外电路流进的电子复合, 形成发射极电流 I_E 。由于空穴的注入, 使发射极 E 与基极 B_1 之间的 N 型区域内载流子的密度显著增加, 导电性能大大加强, V_A 减小, 这相当于电阻 R_{B1} 减小。由于 V_A 减小, 使加在 PN 结上的正向偏压增大, 空穴的注入进一步提高, 即 I_E 进一步增大。这又导致 V_A 及 R_{B1} 进一步减小, V_A 的减小又使 I_E 增加, 这一正反馈式的连锁反应, 使 V_E 随 I_E 的增加而减小。这就是单结晶体管的负阻特性。

4. 饱和区

负阻区不是没有止境的, 当空穴的注入量增大到一定程度时, 就会有一部分空穴来不及与基区的电子复合, 出现了空穴的多余存储, E 与 B_1 之间的基区将由中性变为正电性, 使空穴的注入遇到新的阻力, 这时 V_E 将随 I_E 的增大而缓慢增加, 这一现象称为饱和。由负阻区转化到饱和区的转折点 V 称为谷点。这一点的发射极电压叫谷点电压 V_V , 相应的发射极电流叫谷点电流 I_V 。图 1-12(a) 中特性曲线上 $I_E > I_V$ 的区域为饱和区。当 I_E 达到最大发射极额定电流 I_{EM} 时, 发射极与基极 B_1 间的压降称为发射极饱和压降 V_{ES} , 一般小于 4~5 V。

1.3.2 单结管弛张振荡电路

利用单结管负阻特性和电容的充放电特性, 可组成产生锯齿波及窄脉冲的弛张振荡电路。

1. 原理

单结管弛张振荡电路如图 1-13(a) 所示, 当 S 闭合后, 电源电压 E_B 一方面通过 R_2 及 R_1 加在单结管的 B_2 及 B_1 上。若 $R_2 \ll R_{BB}$ 及 $R_1 \ll R_{BB}$, 则 $V_{BB} \approx E_B$ 。在 N 型硅片上发射极端分压得 $V_A = \eta V_{BB} \approx \eta E_B$ 。另一方面 E_B 经 R 向电容 C 充电, 发射极电压 V_E 随 V_C 按指数规律上升, 其充电时间常数 $\tau_c = RC$ 。当 $V_E < V_C < V_P$ 时, 单结管处于截止状态。当 V_E 达到峰点电压 $V_P = \eta V_{BB} + V_D$ 时, 单结管呈现负阻而导通, 并输出脉冲电压 $V_o = V_C - V_{EB1}$, V_{EB1} 为单结管导通时 E 和 B_1 之间的压降。脉冲电压峰值为

$$V_{om} \approx V_P - V_{ES} \approx \eta V_{BB} - V_{ES} \quad (1-10)$$

随着电容电荷经发射极 E、第一基极 B_1 向 R_1 及外接等效负载电阻 R'_g 放电, 电容电压 V_C 按指数曲线下降, 其放电时间常数为

$$\tau_d = R_{EB1} + \frac{R_1 R'_g}{R_1 + R'_g} C \quad (1-11)$$

式中 R_g 为门极支路等效电阻, 等于门极等效电阻 R_g 与防干扰二极管 VD_1 的正向等效电阻 R_{r1} 之和。由于放电时间常数远小于充电时间常数, 故输出电压是尖顶的窄脉冲。当 V_C 减小到低于谷点电压 V_V 时, 单结管截止, 第一个脉冲结束。接着电容再次被充电, 待充电电压达到 V_P 时, 单结管再导通, 并输出脉冲, 如此周期地振荡不止。

2. 振荡周期与频率

计算振荡周期时, 因放电时间很短, 可以忽略, 故只计算充电时间。经数学推导得振荡周期为

$$T \approx RC \ln \frac{1}{1 - \eta} \quad (1-12)$$

可见, 当 C 值一定时, 调节 R 之值就能改变振荡周期。

3. R 的临界范围

R 的调节范围必须满足单结管的振荡条件, 即使单结管工作在负阻区, 若 R 值过大或过小都会使单结管停振。

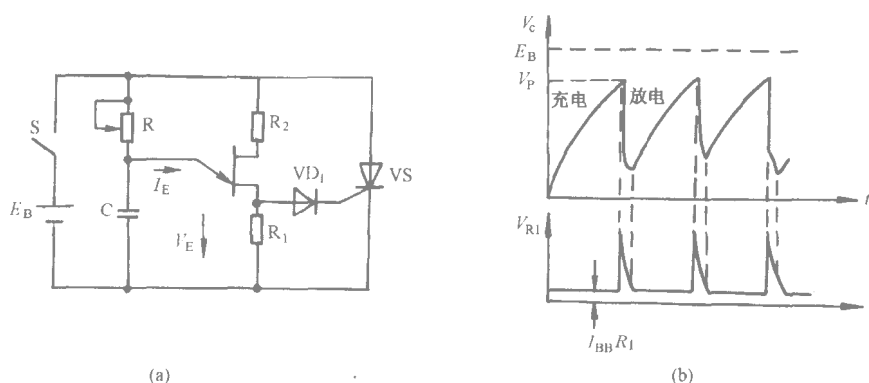


图 1-13 单结管弛张振荡电路

(a) 电路; (b) 波形

(1) 最大临界值 $R_{\max}$

若 R 值过大, 使单结管发射极电流始终小于 I_P , 不能进入负阻区, 则单结管的工作点稳定在截止区而不能振荡。故要保证振荡必须使

$$R < R_{\max} = \frac{E_B - V_P}{I_P} \quad (1-13)$$

(2) 最小临界值 $R_{\min}$

若 R 值过小, 使单结管第一周期放电后, 流过 R 及发射极的电流 I_E 始终大于谷点电流 I_V , 则单结管工作点稳定在饱和区而不再振荡。要使单结管工作点再次经过负阻区, 必须使

$$R > R_{\min} = \frac{E_B - V_V}{I_V} \quad (1-14)$$

4. 放电电阻 R_1

R_1 与晶闸管门极支路等效电阻 R'_g 并联, R_1 的作用是使单结管漏电流 I_{BB} 在 R_1 上只产生较小的压降 $I_{BB}R_1$ 如图 1-13(b)所示, 防止晶闸管的误触发。设 I_{BB} 全部流过 R_1 其压降应小于防干扰二极管 VD_1 的正向压降 V_{D1} ,

$$I_{BB}R_1 \approx (E_B/R_{BB})R_1 < V_{D1} = 0.7 \text{ V} \quad (1-15)$$

这样, 晶闸管门极干扰电压极小, 避免了误触发, 故 R_1 应满足下式关系

$$R_1 < \frac{0.7R_{BB}}{E_B} \quad (1-16)$$

由于 R_1 的阻值较小, 通常仅为 $50 \sim 200 \Omega$, 对输出脉冲的分流作用是很明显的, 通常 R_1 中消耗了大部分脉冲电流, 而门极电流峰值 I_{gm} 只是单结管发射极最大电流的小部分。这种单结管电路通常只能输出 20 mA 左右的脉冲电流, 用以触发一个电流不大的晶闸管。

5. 温度补偿电阻 R_2

由于单结管的结温上升时 V_D 有所减小, 故峰点电压 V_P 也相应减小, 此缺点可利用 R_{BB} 随结温升高而增大的特点来补偿。结温升高时漏电流 I_{BB} 减小, R_2 上的电压降 $I_{BB}R_2$ 也减小, 因而分配到 B_2, B_1 的电压 V_{BB} 增大, 使 ηV_{BB} 也增大用以补偿 V_D 及 $I_{BB}R_1$ 的减小。

R_2 一般为 $200 \sim 400 \Omega$, 要求温度补偿得较好时, 也可用试验的方法调整之。

1.3.3 单晶体管的检测

在发射极开路的条件下,用万用表 $R \times 100 \Omega$ 或 $R \times 1 k\Omega$ 挡测量 B_1 和 B_2 间的阻值应在 $2 \sim 10 k\Omega$ 之间,阻值过大或过小均不宜使用。

分压比 η 是单晶体管的重要参数,其测试方法如图 1-14 所示,其中图 1-14(a) 中 VD 为硅二极管,万用表用直流电压挡,电源电压 V_{BB} 为 $10 V$ 左右,电压表的读数为 V 则分压比 $\eta = V_{BB}/V$ 。图 1-14(b) 中,当加 V_{BB} 电压后,被测单晶管 VT 与电阻 R_2 、电容 C_2 组成振荡电路,在 VT 的发射极得到锯齿波电压。二极管 VD、电容 C_1 以及电阻 RP 与电流表组成锯齿波峰值检测电路。在接通电源后, V_e 锯齿波电压即经 VD 对电容 C_1 充电,由于充电快放电慢,所以经过几个振荡周期后, V_A 即充为锯齿波峰值电压,这样 VT 峰点电压 V_P 与二极管 VD 正向电压之差 $V_A = V_P - V_{VD} = V_A$ 式中, V_A 为 VT 内 A 点电位。测量时,只需先将按钮 SB 按上,调节 RP 使微安表读数为整数,例如 $100 \mu A = V_{BB}/(RP + R_{表})$, $R_{表}$ 为微安表内阻,然后松开 SB 微安表读数为 $I = V_A/(RP + R_{表})$, 则 $I/100 \mu A = V_A/V_{BB} = \eta$ 。

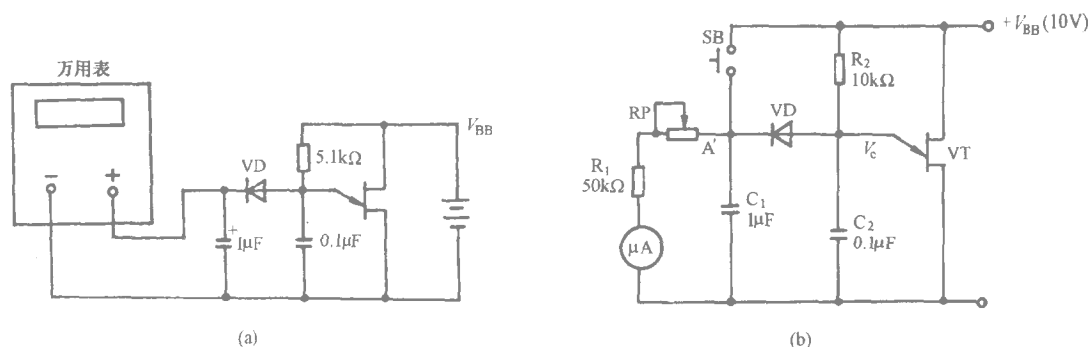


图 1-14 单晶体管分压比的测试

(a) 测试方法之一; (b) 测试方法之二

1.4 光电耦合器

1.4.1 光电耦合器基本特性

光电耦合器在电路中主要作用是把高压电路和控制电路进行电气隔离。典型的光电耦合器内部等效电路如图 1-15(a) 所示,图 1-15(b) 为光电耦合器的基本电路,由内部等效电路可知,光电耦合器主要由光源(即发光二极管)和光敏器件(即光电池、光敏晶体管、光敏晶闸管等)组成。最通用的光电耦合器是把一个发光二极管 LED 和一个光敏晶体管 VT 封装在一个完全与外界光线隔离的外壳中。光电耦合器的工作过程简述如下:当有电流流过 LED 时,便产生一个光源,光的强度取决于激励电流的大小,此光照射到封装在一起的光敏晶体管 VT 上后,控制 VT 产生一个与 LED 正向电流成比例的集电极电流。

光电耦合器的基本特性如下。

1. 共模抑制比

在光电耦合器内部,由于发光管和光敏管之间的耦合电容很小($2 pF$ 以内)所以共模输入电压通过级间耦合电容对输出电流的影响很小,因而,共模抑制比很高。

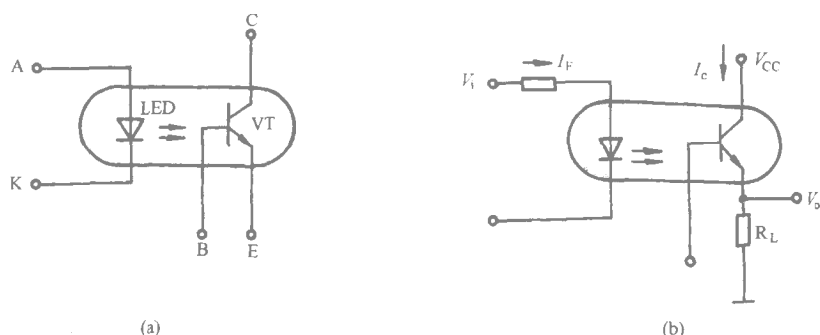


图 1-15 光电耦合器电路
(a) 内部等效电路；(b) 基本电路

2. 输出特性

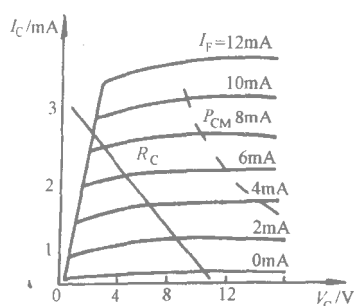


图 1-16 二极管-晶体管光电耦合器的输出特性曲线

光电耦合器的输出特性是指在一定的发光电流 I_F 下，光敏管所置偏压 V_C 与输出电流 I_C 之间的关系。二极管-晶体管光电耦合器的输出特性如图 1-16 所示。图中， I_C 为集电极电流， V_C 为光敏晶体管集-射极电压。当 $I_F = 0$ 时，发光二极管不发光，此时对应的光敏晶体管集电极输出电流称为暗电流，这种暗电流一般很小，可忽略。当 $I_F > 0$ 时，发光二极管开始发光，在一定的 I_F 作用下所对应的 I_C 基本上与 V_C 无关， I_F 和 I_C 之间的变化成线性关系。当在集电极或发射极串接一个负载电阻 R_L 后，即可获得输出电压。 R_L 的选择应使负载在允许功耗 P_{CM} 曲线之内。

3. 电流传输比

光电耦合器光敏管的集电极电流 I_C 与发光二极管的注入电流 I_F 之比称为电流传输比 CTR。对于微小变量输出电流 ΔI_C 与注入电流 ΔI_F 之比称为微变电流传输比。对于线性度比较好的光电耦合器，以上两者近似相等。CTR 的大小与光电耦合器的类型有关，例如，二极管输出光电耦合器的 CTR 较小，在 3% 以内；晶体管输出光电耦合器的 CTR 可达 150%；而光电开关的 CTR 最大可达 500%。

4. 隔离性能

光电耦合器的发光二极管和晶体管之间的隔离电阻为 $10^{10} \sim 10^{11} \Omega$ ，隔离电压为 500 ~ 1 000 V 有的可达 10 kV，隔离电容小于 2 pF。

光电耦合器可线性工作，也可工作于开关状态。在电源的驱动电路中，光电耦合器一般用来传递脉冲信号，所以光电耦合器工作于开关状态。在高频工作时应考虑光电耦合器的响应时间，包括延迟时间 t_d 、上升时间 t_r 和下降时间 t_f 如图 1-17 所示。发光二极管-硅光敏晶体管型光电耦合器的响应时间 (t_r 或 t_f) 一般为 5 ~ 10 μs ，而发光二极管-硅光敏二极管型光电耦合器的响应时间小于 2 μs 。为得到快速响应，常选用高速光电耦合器，它的 t_r 和 t_f 均小于 1.5 μs 。图 1-18(a) 表示了高速光电耦合器的电路。在光电耦合器的电路中，负载电阻 R_L 的大小影响光电耦合器的响应时间， R_L 越小，光电耦合器的响应时间越短，所以在实际应用中，在光电耦合器允许的集电极电流范围内应尽量减小负载电阻以提高光电耦合器的响应速度。在图 1-18(a) 中， R_b 是提供光电耦合器存储电荷的释放电路，以减小关断时间，但同时会减小

光电耦合器传输比 故 R_b 一般为几十千欧。

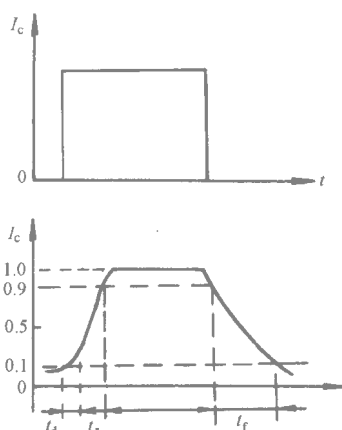


图1-17 光电耦合器的输入输出波形

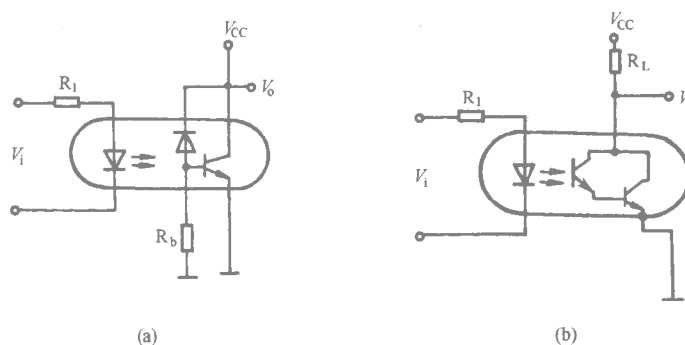


图 1-18 光电耦合器电路

(a) 高速光电耦合器电路；(b) 高电流传输比的光电耦合器电路

为了提高光电耦合器的传输比，输出可采用达林顿接法，但这会使响应时间加长，图 1-18(b)表示了高电流传输比的光电耦合器电路。

在设计电路时，选用光电耦合器必须遵守如下原则：所选用的光电耦合器必须符合国内或国际的有关隔离击穿电压的标准；若用放大电路去驱动光电耦合器，必须精心设计，保证它能够补偿耦合器的温度不稳定性和漂移；所选用的光电耦合器必须有较高的传输比。

1.4.2 常用光电耦合器等效电路

图 1-19 给出了常用 28 种光电耦合器的内部等效电路、管脚配置及其功能，供读者选用。

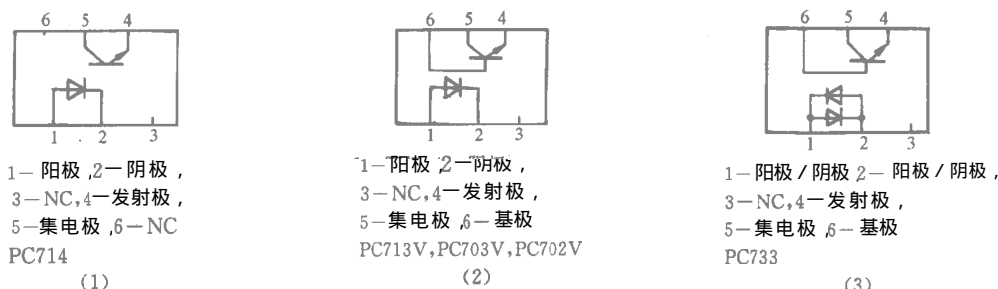
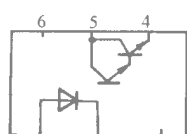
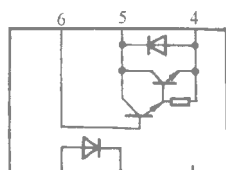


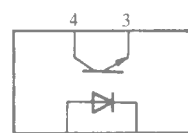
图 1-19 常用光电耦合器等效电路 (1)~(3)



1—阳极, 2—阴极,
3—NC, 4—发射极,
5—集电极, 6—NC
PC715V, PC716V



1—阳极, 2—阴极,
3—NC, 4—发射极,
5—集电极, 6—基极
PC725V

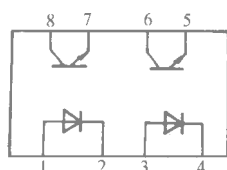


1—阳极, 2—阴极,
3—发射极, 4—集电极
PC817, PC818
PC356T, PC357T

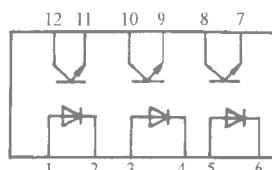
(4)

(5)

(6)



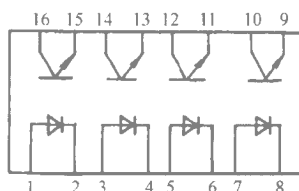
1, 3—阳极, 2, 4—阴极,
5, 7—发射极, 6, 8—集电极
PC827



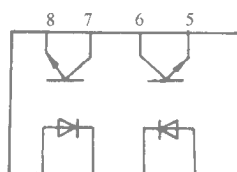
1, 3, 5—阳极, 2, 4, 6—阴极,
7, 9, 11—发射极, 8, 10, 12—集电极
PC837

(7)

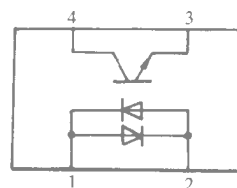
(8)



1, 3, 5, 7—阳极,
2, 4, 6, 8—阴极,
9, 11, 13, 15—发射极,
10, 12, 14, 16—集电极,
PC847



1, 4—阳极, 2, 3—阴极,
5, 8—发射极,
6, 7—集电极
PC829

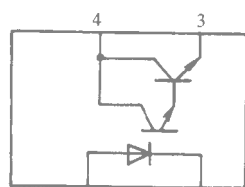


1—阳极/阴极, 2—阳极/阴极,
3—发射极,
4—集电极
PC814, PC354T

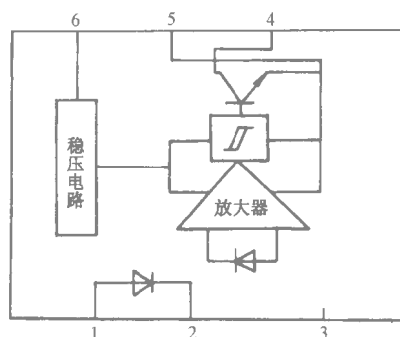
(9)

(10)

(11)



1—阳极, 2—阴极,
3—发射极,
4—集电极,
PC815, PC355T



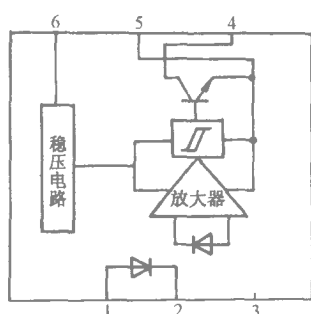
1—阳极, 2—阴极, 3—NC,
4—输出, 5—地, 6— V_{CC}
PC900V

(12)

(13)

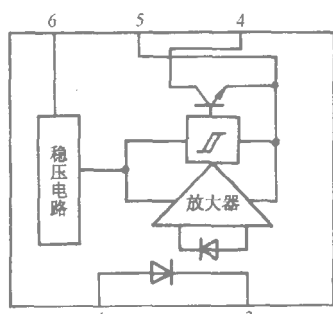
(12)

图 1-19 常用光电耦合器等效电路 (4)~(13)



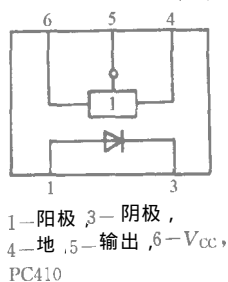
1—阳极, 2—阴极, 3—NC,
4—输出, 5—地, 6— V_{CC}
PC901V

(14)

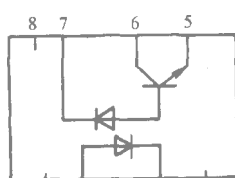


1—阳极, 3—阴极,
4—输出, 5—地, 6— V_{CC}
PC400

(16)

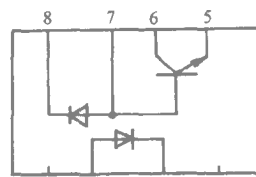


1—阳极, 3—阴极,
4—地, 5—输出, 6— V_{CC} ,
PC410



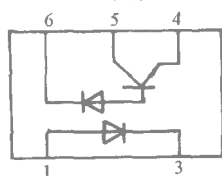
1—NC, 2—阳极, 3—阴极,
4—NC, 5—地, 6—输出
7—NC, 8— V_{CC}
PC917

(17)



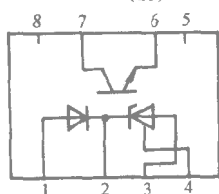
1—NC, 2—阳极, 3—阴极, 4—NC,
5—地, 6—输出, 7— V_S , 8— V_{CC}
PC918

(18)



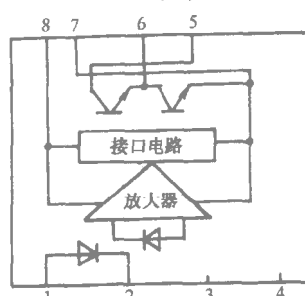
1—阳极, 3—阴极,
4—地, 5— V_O , 6— V_{CC}
PC417

(19)



1—阳极, 2—阴极, 3—地,
4—参考, 5—NC, 6—发射极,
7—集电极, 8—NC
PC904, PC905

(20)



1—阳极, 2—阴极, 3—NC, 4—NC,
5— O_1 , 6— O_2 , 7—地, 8— V_{CC}
PC922

(22)

(23)

(21)

图 1-19 常用光电耦合器等效电路 (14)~(23)

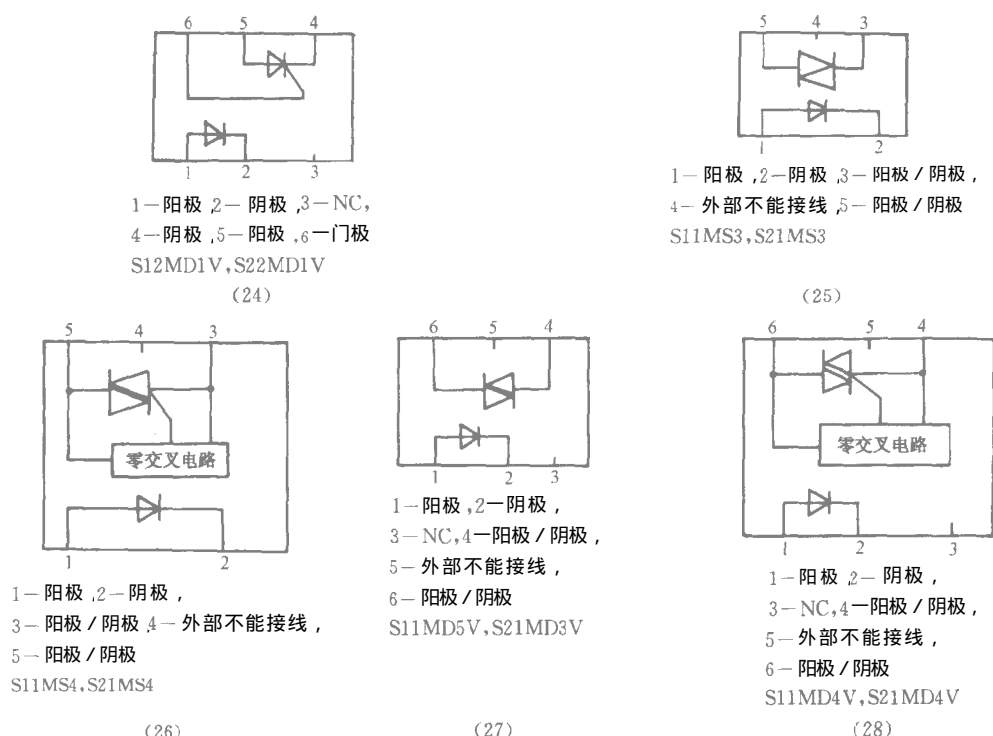


图 1-19 常用光电耦合器等效电路 (24)~(28)

1.4.3 光电耦合器的基本测试

可用万用表判断光电耦合器的好坏。例如, 对于图 1-20 结构的光电耦合器, 1、2 脚之间的发光二极管具有单向导电性, 用万用表的电阻 $R \times 10 \Omega$ 挡, 测量正向电阻值约为几百欧。当 1、2 脚之间的发光二极管无电流流通时, 3、4 脚之间阻值应为无限大; 当 1、2 脚之间的发光二极管电阻值变小时, 流过发光二极管的电流增大, 3、4 脚之间的阻值变小。1、2 脚之间与 3、4 脚之间的正常阻值应为无限大。

光电耦合器 1、2 脚、6、5 脚、6、4 脚之间均为 PN 结, 都具有单向导电性, 而 5、4 脚之间是不通的, 当给 1、2 脚通电时, 5、4 脚导通, 其阻值变小, 如图 1-20(b) 所示。

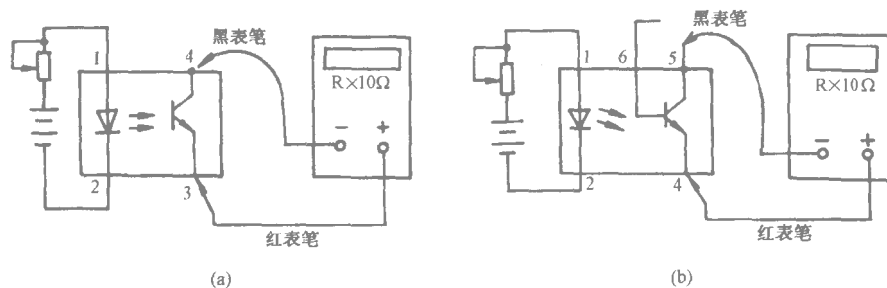


图 1-20 光电耦合器测量示意图

(a) 测试方法之一; (b) 测试方法之二

图 1-21 是光电耦合器简易测试电路, 当接通电源后, LED 不发光, 按下 SB, LED 会发光。调节 RP, LED 的发光强度会发生变化, 说明被测光电耦合器是好的。

1.4.4 光电耦合器的基本应用

1. 光电耦合器构成的整形电路

图 1-22 是光电耦合器构成的整形电路, 其中, 图 1-22(a) 是一种施密特整形电路, 因为不管输入的是失真方波、正弦波还是锯齿波, 在输出端均得到方波; 图 1-22(b) 是光电耦合器接入与非门进行整形; 图 1-22(c) 是光电耦合器后接两级与非门构成的反相整形电路; 图 1-22(d) 是光电耦合器输出端后接两只晶体管, 构成的同相整形电路。

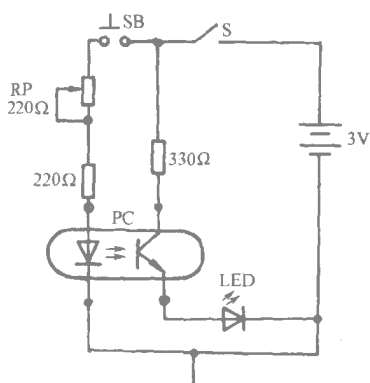


图 1-21 光电耦合器简易测试电路

2. 光电耦合器构成的斩波电路

图 1-23 是光电耦合器构成的斩波电路, 其中, 图 1-23(a) 图 1-21 光电耦合器构成的斩波电路与普通用变压器隔离的调制器相比精度较高, 而

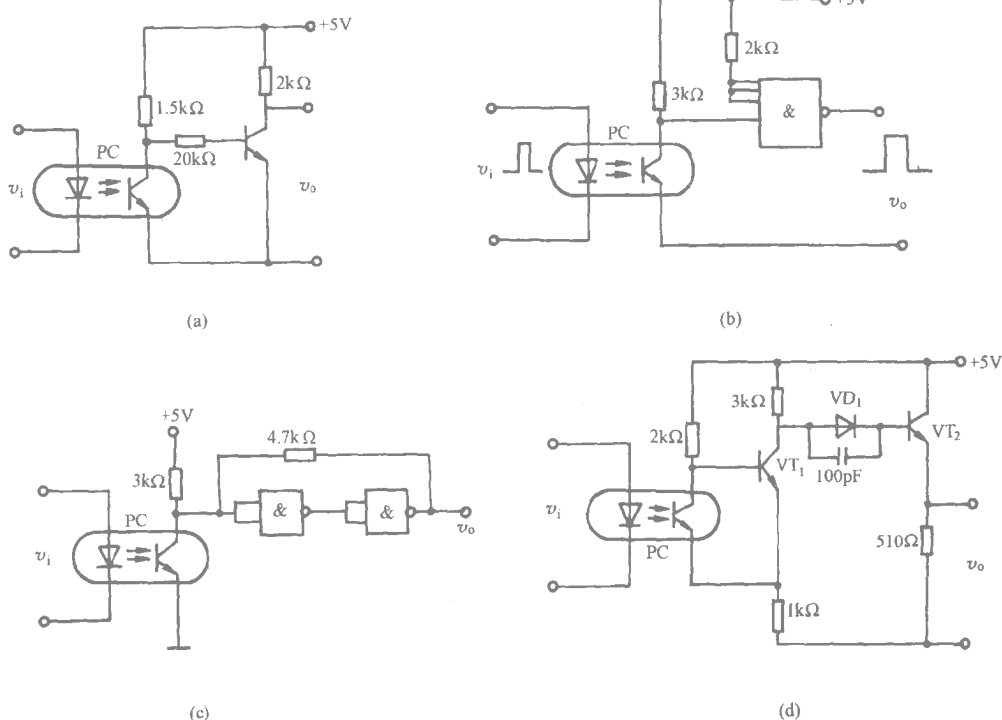


图 1-22 光电耦合器构成的整形电路

变压器因电压太大, 故引出脉冲波顶不平。当斩波脉冲输入时, VT 导通, 则 PC 也导通, 输入边 v_i 传至输出边, 而 v_o 正比于 v_i , 但相位相反。反之, 当斩波脉冲为零时, PC 截止, v_o 为高电平。图 1-23(b) 是用两个光电耦合器 PC_1 和 PC_2 构成的斩波电路, 其中 PC_1 作为开关, 当斩波脉冲输入时, PC_1 导通, v_i 反相传至 PC_2 的输出边, 使 v_o 与输入 v_i 及斩波脉冲进行隔离。

3. 光电耦合器构成的逻辑电路

由于光电耦合器的抗干扰性能比晶体管好, 因此用光电耦合器组成逻辑电路要比晶体管可靠得多。