



第3章

分立元件基本应用电路及其分析

引言 前面所介绍的二极管、三极管和场效应管等,因其相对独立性而被称为分立元件。它们都是电子线路的重要组成元件。本章将从实际应用的角度,介绍有关电路的组成特点、分析方法和性能指标。

3.1 二极管基本应用电路

3.1.1 普通二极管基本电路的分析方法

1. 图解法

由二极管的伏安特性可见,二极管是一个非线性器件。因此,二极管电路是一个非线性电路,对于它的分析就比较麻烦。图解法是非线性电路通用的一种分析方法,以下举例介绍。

例 3.1.1 电路如图 3.1(a) 所示,已知二极管的伏安特性如图 3.1(b) 所示。求二极管和负载上的电压和电流。

解 由图 3.1(a) 可知 $U_D = E - I_D(R_1 + R_L)$, 与二极管特性曲线相交于 Q 点,如图 3.2 所示, Q 点所对应的横坐标和纵坐标即为二极管电压 U_{DQ} 和电流 I_{DQ} 。所以,负载上的电流为 I_{DQ} , 电压 $U_O = I_{DQ}R_L$ 。

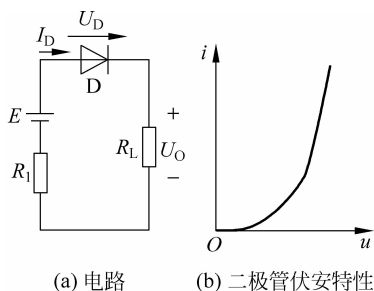


图 3.1 例 3.1.1 电路图

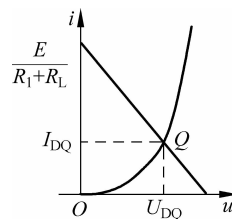


图 3.2 例 3.1.1 电路的图解法

2. 等效电路法

可以看到,图解法直观但不方便。考虑到半导体器件的参数存在着较大的离散性,通常采用一种近似的等效电路来分析。其基本思想是将非线性问题线性化处理,这当然会带来方法上的误差。为了兼顾分析的精度和方法的简洁,根据二极管的工作条件,一般可选择以下等效电路模型中的一种进行分析。

(1) 理想模型

图 3.3(a₁)中的实线表示理想二极管的伏安特性,虚线表示实际二极管的伏安特性。用实线近似代替虚线所建立的模型即理想模型,图 3.3(b₁)所示为它的代表符号。

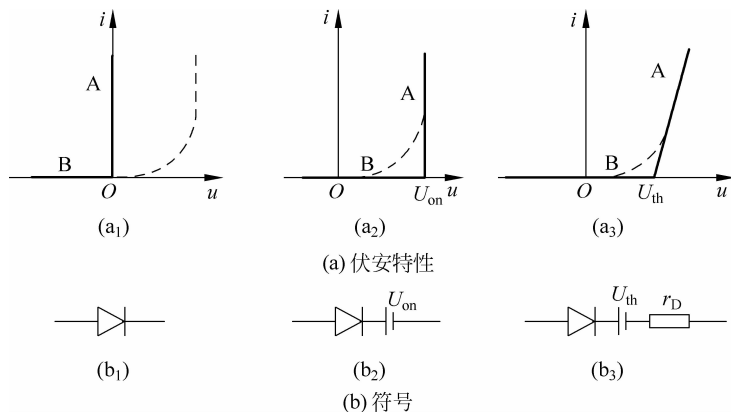


图 3.3 二极管理想模型、恒压降模型和折线模型

用理想模型分析电路的步骤如下:

首先,判断二极管的工作状态。一般可假设二极管截止(工作于 B 段),求出二极管两端的正向电压。若小于 0,则假设成立,否则导通(工作于 A 段)。

然后,利用等效模型分析电路。即二极管截止,等效于开路;二极管导通,等效于短路。

注意,此法适宜于电源电压远比二极管正向管压降大的电路。

(2) 恒压降模型

将实际二极管的伏安特性用图 3.3(a₂)所示的实线来近似,所得到的模型即恒压降模型。图 3.3(b₂)所示为它的代表符号。

用恒压降模型分析电路的步骤如下:

首先,判断二极管的工作状态。一般可假设二极管截止(工作于 B 段),求出二极管两端的正向电压。若小于导通电压 U_{on} (典型值为 0.7V),则假设成立,否则导通(工作于 A 段)。

然后,利用等效模型分析电路。即二极管截止,等效于开路;二极管导通,等效于一个大小为 U_{on} 的恒压源。

注意,此法适宜于二极管正向导通电流较大(一般不低于 1mA)的电路。

(3) 折线模型

将实际二极管的伏安特性用图 3.3(a₃)所示的实线来近似,所得到的模型即折线模

型。图 3.3(b₃)所示为它的代表符号。

用折线模型分析电路的步骤如下:

首先,判断二极管的工作状态。一般可假设二极管截止(工作于 B 段),求出二极管两端的正向电压。若小于门坎电压 U_{th} (典型值为 0.5V),则假设成立,否则导通(工作于 A 段)。

然后,利用等效模型分析电路。即二极管截止,等效于开路;二极管导通,等效于一个大小为 U_{th} 的恒压源串联一个电阻 r_D (典型值为 200Ω), r_D 的大小决定了折线 A 段的斜率。

注意,此法适宜于二极管正向导通电流较小的电路。

(4) 低频小信号模型

二极管在直流电源和低频小信号共同作用下,如图 3.4 所示,可以先考虑直流电源的作用,确定二极管的静态工作点 Q ,然后考虑低频小信号的作用。前者可以按照前面介绍的方法分析,后者可以近似等效为一个动态电阻 r_d ,即利用低频小信号模型分析。动态电阻 r_d 的倒数实际上就是二极管特性曲线以 Q 点为切点的切线的斜率,即

$$\begin{aligned} \frac{1}{r_d} &= \frac{di_D}{du_D} = \frac{d}{du_D} [I_S (e^{u_D/U_T} - 1)] \\ &= \frac{I_S}{U_T} e^{u_D/U_T} \approx \frac{i_D}{U_T} = \frac{I_D}{U_T} \quad (\text{在 } Q \text{ 点上}) \end{aligned}$$

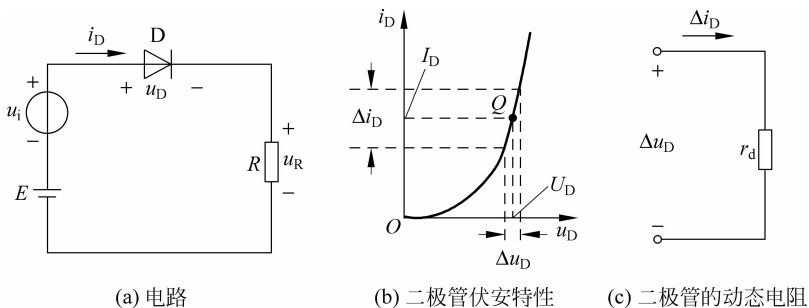


图 3.4 二极管在低频小信号作用下的等效电阻

由此可得

$$r_d = \frac{U_T}{I_D} \quad (T = 300\text{K 时}, U_T = 26\text{mV}) \quad (3.1)$$

例 3.1.2 电路如图 3.5 所示,试分别用理想模型、恒压降模型和折线模型求输出电压 U_O 。

解 (1) 理想模型

假设 D 截止,则 D 两端的电压为

$$U_D = E_1 - \frac{R_L}{R_2 + R_L} E_2$$

当 $U_D < 0$ 时,假设成立, D 等效于开路。此时,输出电压为

$$U_O = \frac{R_L}{R_2 + R_L} E_2$$

当 $U_D \geq 0$ 时,假设不成立, D 等效于短路。此时,输出电压为

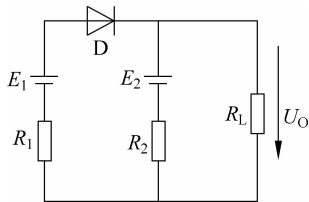


图 3.5 例 3.1.2 电路

$$U_O = \frac{R_2 // R_L}{R_1 + R_2 // R_L} E_1 + \frac{R_1 // R_L}{R_2 + R_1 // R_L} E_2$$

(2) 恒压降模型

假设 D 截止, 则 D 两端的电压为

$$U_D = E_1 - \frac{R_L}{R_2 + R_L} E_2$$

当 $U_D < U_{on}$ 时, 假设成立, D 等效于开路。此时, 输出电压为

$$U_O = \frac{R_L}{R_2 + R_L} E_2$$

当 $U_D \geq U_{on}$ 时, 假设不成立, D 等效于一个大小为 U_{on} 的恒压源。此时, 输出电压为

$$U_O = \frac{R_2 // R_L}{R_1 + R_2 // R_L} (E_1 - U_{on}) + \frac{R_1 // R_L}{R_2 + R_1 // R_L} E_2$$

(3) 折线模型

假设 D 截止, 则 D 两端的电压为

$$U_D = E_1 - \frac{R_L}{R_2 + R_L} E_2$$

当 $U_D < U_{th}$ 时, 假设成立, D 等效于开路。此时, 输出电压为

$$U_O = \frac{R_L}{R_2 + R_L} E_2$$

当 $U_D \geq U_{th}$ 时, 假设不成立, D 等效于一个大小为 U_{th} 的恒压源串联一个电阻 r_D 。此时, 输出电压为

$$U_O = \frac{R_2 // R_L}{R_1 + r_D + R_2 // R_L} (E_1 - U_{th}) + \frac{(R_1 + r_D) // R_L}{R_2 + (R_1 + r_D) // R_L} E_2$$

例 3.1.3 电路如图 3.6 所示, 已知二极管导通电压 $U_{on} = 0.6V$, $U_T = 26mV$ 。若 u_i 是有效值为 $20mV$, 频率为 $1kHz$ 的正弦信号, 电容在正弦信号作用下的容抗忽略不计, 则输入的交流电流有效值 I_i 为多少?

解 (1) 首先求出二极管的动态电阻。在交流信号为零时, 二极管的直流电流为

$$I_D = \frac{E - U_{on}}{R} = \frac{2 - 0.6}{500} = 0.0028A = 2.8mA$$

所以, 由式(3.1)可知二极管的动态电阻为

$$r_d \approx \frac{U_T}{I_D} = \frac{26}{2.8} \approx 9.3\Omega$$

(2) 输入的交流电流等于电阻和二极管电流之和, 计算时应将 $2V$ 电源看成短路, 即

$$I_i = \frac{U_i}{R} + \frac{U_i}{r_d} \approx \frac{20}{500} + \frac{20}{9.3} \approx 2.2mA$$

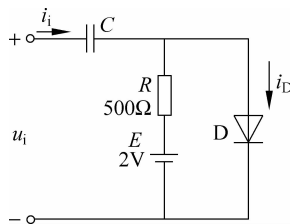


图 3.6 例 3.1.3 电路

3.1.2 普通二极管基本应用电路

1. 整流电路

将交流电压转换成直流电压, 称为整流。利用二极管的单向导电性实现整流目的的

电路称为整流电路。通常,在分析整流电路时采用理想模型。

图 3.7(a)所示为半波整流电路,设输入电压 $u_i = U_m \sin \omega t$ 。当 $u_i > 0$ 时, D 导通, $u_o = U_m \sin \omega t$; 当 $u_i < 0$ 时, D 截止, $u_o = 0$ 。因此,输入、输出电压波形如图 3.7(b)所示,输出为脉动的直流电压。

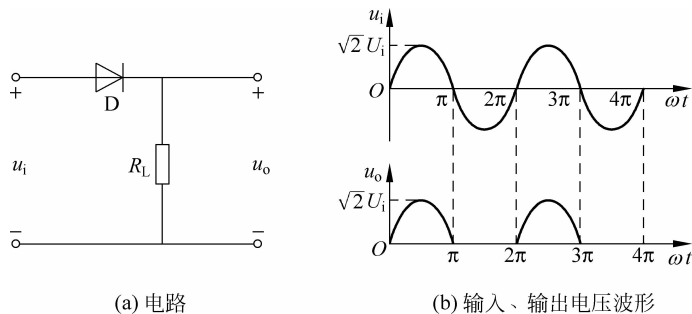


图 3.7 半波整流电路

图 3.8(a)所示为全波整流电路,输入电压为 220V/50Hz 交流电,经变压器得到两个合适的交流电压 u_2 。当 $u_2 > 0$,即 A 为“+”、C 为“-”时, D_1 导通, D_2 截止,电流从 A 点经 D_1 、 R_L 至 B 点, u_o 等于上面的 u_2 ; 当 $u_1 < 0$,即 A 为“-”、C 为“+”时, D_1 截止, D_2 导通,电流从 C 点经 D_2 、 R_L 至 B 点, u_o 等于下面的 u_2 。因此,输入、输出电压波形如图 3.8(b)所示, R_L 中的电流方向不变,输出为脉动的直流电压。

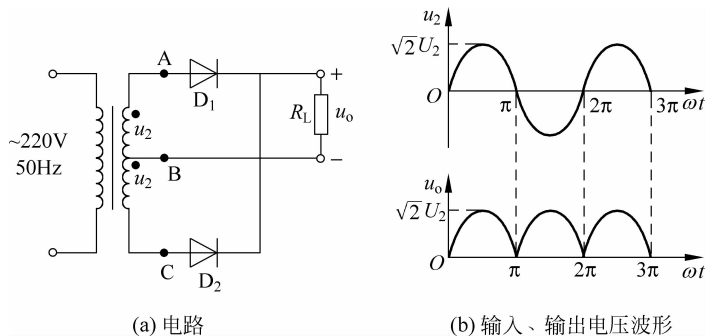


图 3.8 全波整流电路

2. 开关电路

图 3.9(a)所示为开关电路中的与门,其输出与输入的逻辑关系是:只有输入均为高电平时,输出才为高电平,其余情况下输出均为低电平。分析这类电路时,通常用恒压降模型(一般取二极管导通电压 0.7V)。

设图 3.9(a)所示电路中的输入高电平 $U_{IH} = 3V$,输入低电平 $U_{IL} = 0.3V$ 。当输入电压波形如图 3.9(b)中的 u_{i1} 和 u_{i2} 所示时,输出电压波形如图 3.9(b)中的 u_o 所示。两个输入经组合共有 4 种情况,输出与输入的对应关系及二极管的工作状态如表 3.1 所示。

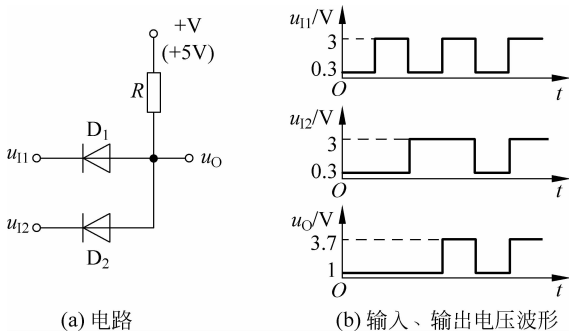


图 3.9 与门

表 3.1 与门输入与输出的关系

u_{11}/V	u_{12}/V	u_O/V	D_1	D_2
0.3	0.3	1	导通	导通
0.3	3	1	导通	截止
3	0.3	1	截止	导通
3	3	3.7	导通	导通

在二极管应用电路中,当二极管一端的电位确定时,另一端的电位也基本确定,称之为二极管的箝位作用。

3. 低电压稳压电路

稳压电源是电子电路中常见的电源,通常由稳压电路实现。稳压电路的作用就是使得输出电压在输入电压和负载一定的变化范围内基本保持不变。图 3.10(a)所示为低电压稳压电路,它是利用二极管的正向特性得到的。

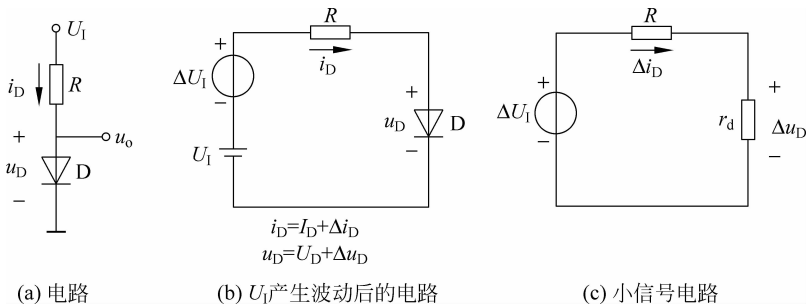


图 3.10 低电压稳压电路

由于某种原因(如电网电压的波动),直流电源电压 U_1 产生波动,即 U_1 变成了 $U_1 + \Delta U_1$ 。可见, ΔU_1 相当于一个随机变化的小电源,与 U_1 串联共同作用于电路。因此,图 3.10(a)所示的低电压稳压电路的分析可用小信号模型。

例 3.1.4 图 3.10(a)所示电路中,直流电源电压 U_1 的正常值为 10V, $R=10\text{k}\Omega$,若 U_1 变化 $\pm 1\text{V}$,问相应的硅二极管电压(输出电压)的变动如何?

解 (1) 当 U_1 的正常值为 10V 时, 利用二极管恒压降模型, 可得二极管 Q 点上的电流为

$$I_D = \frac{U_1 - U_D}{R} = \frac{10 - 0.7}{10} = 0.93 \text{mA}$$

有如此大的导通电流, 用恒压降模型分析二极管的静态工作点是合适的。

(2) 设 U_T 为 26mV, 则二极管在此 Q 点上的微变电阻为

$$r_d = \frac{U_T}{I_D} = \frac{26}{0.93} \approx 28 \Omega$$

(3) 按题意, U_1 有 $\pm 1\text{V}$ 的波动, 相应地, 二极管上的波动电压, 即输出电压的变动为

$$\Delta u_D = \pm 1 \times \frac{r_d}{r_d + R} = \pm 1 \times \frac{28}{28 + 10 \times 10^3} = \pm 2.79 \text{mV}$$

例 3.1.4 表明, 电源的相对变化为 $\pm \frac{1}{10} \times 100\%$ 时, 输出电压的相对变化只有 $\pm \frac{2.79 \times 10^{-3}}{0.7} \times 100\%$ 。可见, 利用二极管正向压降基本恒定的特点, 可以构成低电压稳压电路。若将 3 只二极管串联起来, 可等效于 1 只约 2V 的稳压管。由于低电压稳压管的稳压性能不够理想, 所以在 3~4V 以下, 采用多只二极管串联可以获得较好的稳压特性。

另外, 在实际电路中, 二极管还常常用于保护、限幅、电位偏移和温度补偿等, 对此后面章节将有描述。

3.1.3 特殊二极管在电路中的应用

1. 稳压管稳压电路

图 3.11 所示为稳压管稳压电路, 由限流电阻 R 和稳压管 D_Z 组成, 其输入为变化的直流电压 U_1 , 输出为稳压管的稳定电压 U_Z 。

例 3.1.5 图 3.11 所示电路中, 已知输入电压 $U_1 = 10 \sim 12\text{V}$, 稳压管的稳定电压 $U_Z = 6\text{V}$, 低限稳定电流 $I_{ZL} = 5\text{mA}$, 高限稳定电流 $I_{ZH} = 25\text{mA}$, 负载电阻 $R_L = 600 \Omega$ 。求限流电阻 R 的取值范围。

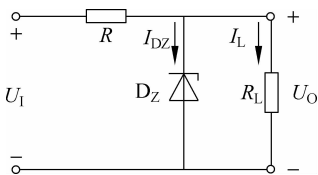


图 3.11 稳压管稳压电路

解 由图 3.11 所示电路可知, $I_Z = I_R - I_L$ 。其中, $I_L = U_Z / R_L = (6/600)\text{A} = 10\text{mA}$ 。由于 $U_1 = 10 \sim 12\text{V}$, $U_Z = 6\text{V}$, 所以 $U_R = 4 \sim 6\text{V}$, I_R 也将随之变化。当 $U_1 = U_{1\min} = 10\text{V}$ 时, U_R 最小, I_R 最小, I_Z 也最小, 这时 R 的取值应保证 $I_{Z\min} > I_{ZL}$, 即 $I_{Z\min} = I_{R\min} - I_L > I_{ZL}$, 故

$$\frac{U_{1\min} - U_Z}{R} - I_L > I_{ZL} \quad (3.2)$$

代入数据后得

$$\frac{10 - 6}{R} - 10 > 5$$

可得 $R < 267 \Omega$ 。

同理,当 $U_1 = U_{\text{Imax}} = 12\text{V}$ 时, U_R 最大, I_R 最大, I_Z 也最大,这时 R 的取值应保证 $I_{Z\text{max}} < I_{Z\text{H}}$, 即 $I_{Z\text{max}} = I_{R\text{max}} - I_L < I_{Z\text{H}}$, 故

$$\frac{U_{\text{Imax}} - U_Z}{R} - I_L < I_{Z\text{H}} \quad (3.3)$$

代入数据后得

$$\frac{12 - 6}{R} - 10 < 25$$

可得 $R > 171\Omega$ 。

由以上分析可知,限流电阻的取值范围为 $171 \sim 267\Omega$ 。

2. 稳压管限幅电路

在电压比较器中,为了满足不同负载对电压幅值的要求,常利用稳压管组成限幅电路。图 3.12 所示为几种常见的设有稳压管限幅电路的电压比较器及其传输特性。图中各稳压管的稳定电压均小于集成运放输出电压的最大幅值 U_{OM} , R 为稳压管的限流电阻。

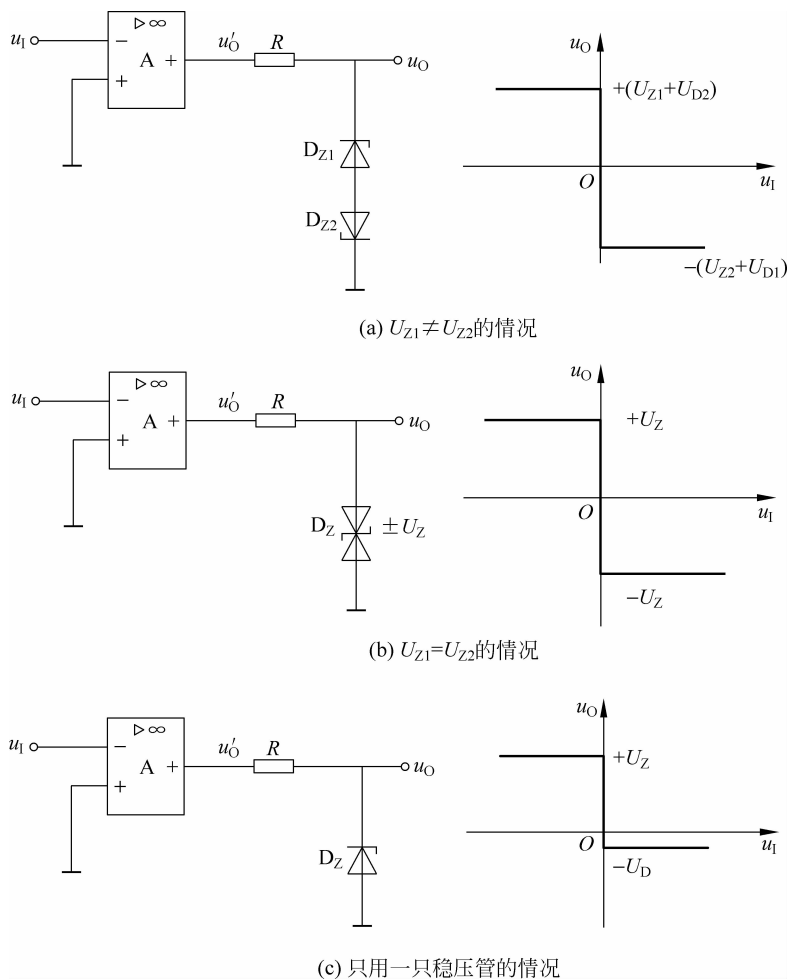


图 3.12 具有稳压管限幅的电压比较器及其传输特性

在图 3.12(a) 所示电路中,稳压管 D_{Z1} 的稳定电压为 U_{Z1} ,正向导通电压为 U_{D1} ;稳压管 D_{Z2} 的稳定电压为 U_{Z2} ,正向导通电压为 U_{D2} 。若 $u_1 < 0$,则集成运放的输出电压为 $+U_{OM}$,使 D_{Z1} 工作在稳压状态,且 D_{Z2} 正向导通,因而输出电压 $u_O = +(U_{Z1} + U_{D2})$;若 $u_1 > 0$,则集成运放的输出电压为 $-U_{OM}$,使 D_{Z1} 正向导通,且 D_{Z2} 工作在稳压状态,因而输出电压 $u_O = -(U_{D1} + U_{Z2})$ 。

在图 3.12(b) 所示电路中采用了双向稳压管,其稳定电压为 $\pm U_Z$,电路等同于图 3.16(a) 所示电路中 $U_{Z1} = U_{Z2}$ 的情况。

在图 3.12(c) 所示电路中,稳压管 D_Z 的稳定电压为 U_Z ,正向导通电压为 U_D 。若 $u_1 < 0$,则集成运放的输出电压为 $+U_{OM}$,使 D_Z 工作在稳压状态,因而输出电压 $u_O = +U_Z$;若 $u_1 > 0$,则集成运放的输出电压为 $-U_{OM}$,使 D_Z 正向导通,因而输出电压 $u_O = -U_D$ 。

例 3.1.6 图 3.13(a) 所示为窗口比较器电路。它由两个集成运放 A_1 和 A_2 组成,输入电压分别接到 A_1 的同相输入端和 A_2 的反向输入端。两个参考电压 U_{RH} 和 U_{RL} 分别接到 A_1 的反相输入端和 A_2 的同相输入端,其中 $U_{RH} > U_{RL}$ 。设稳压管 D_Z 的稳压电压为 U_Z ,试分析电路的传输特性。

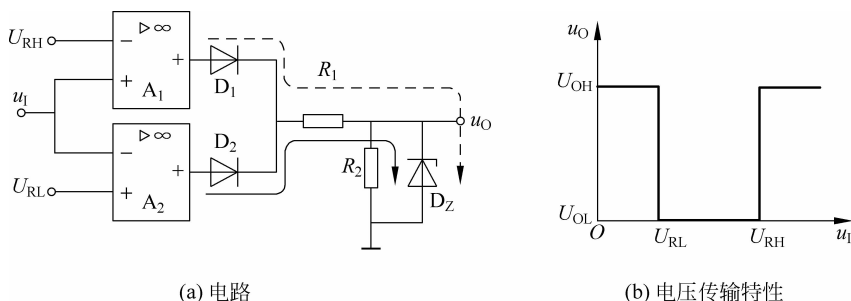


图 3.13 窗口比较器

解 当 u_1 低于 U_{RL} 时,必然更低于 U_{RH} ,因而 A_1 输出低电平, D_1 截止; A_2 输出高电平, D_2 导通,电流如图 3.13(a) 中实线所示, $u_O = +U_Z$ 。

当 u_1 高于 U_{RH} 时,必然高于 U_{RL} ,因而 A_2 输出低电平, D_2 截止; A_1 输出高电平, D_1 导通,电流如图 3.13(a) 中虚线所示, $u_O = -U_Z$ 。

当 u_1 高于 U_{RL} 且低于 U_{RH} 时, A_1 、 A_2 均输出低电平, D_1 、 D_2 均截止,因而 $u_O = 0$ 。

由此可得到电压传输特性如图 3.13(b) 所示,其形状如窗口。

3. 发光二极管基本应用电路

发光二极管包括可见光、不可见光、激光等不同类型,这里只对可见光二极管作一简单介绍。发光二极管的发光颜色决定于所用材料,目前有红、绿、黄、橙等色,可以制成各种形状,如长方形、圆形等。

发光二极管也具有单向导电性。只有当外加的正向电压使得正向电流足够大时,发光二极管才发光,它的开启电压比普通二极管的大,红色的在 $1.6 \sim 1.8V$ 之间,绿色的约 $2V$ 。正向电流越大,发光越强。使用发光二极管时,应特别注意不要超过最大功耗、最大正向电流和反向击穿电压等极限参数。发光二极管因其驱动电压低、功耗小、寿命长和可

靠性高等优点广泛用于显示电路中。

例 3.1.7 电路如图 3.14 所示,已知发光二极管的导通电压 $U_D = 1.6\text{V}$,正向电流大于 5mA 才能发光,小于 20mA 才不至于损坏。试问:

(1) 开关处于何种位置时,发光二极管可能发光?

(2) 为使发光二极管正常发光,电路中 R 的取值范围为多少?

解 (1) 当开关断开时,发光二极管可能发光。因为开关断开时,发光二极管两端可能有合适的电压;而开关闭合时,发光二极管两端的电压为零。

(2) 因为 $I_{D\min} = 5\text{mA}$, $I_{D\max} = 20\text{mA}$, 所以

$$R_{\max} = \frac{E - U_D}{I_{D\min}} = \frac{6 - 1.6}{5} = 0.88\text{k}\Omega$$

$$R_{\min} = \frac{E - U_D}{I_{D\max}} = \frac{6 - 1.6}{20} = 0.22\text{k}\Omega$$

R 的取值范围为 $220 \sim 880\Omega$ 。

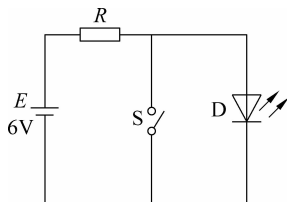


图 3.14 发光二极管基本应用电路

3.2 基本电压放大电路

电压放大电路的用途是极其广泛的。在电子系统中,往往传感器得到的电信号都是很微弱的,要驱动负载,首先必须进行电压放大。

3.2.1 三极管电压放大电路及其分析

三极管放大电路都是利用三极管的电流控制作用来实现信号放大的。因此,三极管电压放大电路的组成原则,首先是三极管必须具有电流控制作用,或者说必须有合适的工作状态,其次要考虑电压放大能力、与信号源和负载的连接、温度稳定性、失真和频率特性等问题。

1. 共发射极电路

固定偏流电路是一种最简单的共发射极电路,如图 3.15 所示, C_1 和 C_2 分别将信号源与放大电路、放大电路与负载连接起来,称之为耦合电容。耦合电容的容量足够大时,对一定频率的交流信号而言,其容抗可忽略,即可视为短路,信号就可以几乎无损失地进行传递。耦合电容对于直流来讲相当于开路,可以隔离信号源与放大电路、放大电路与负载之间的直流量。所以,可将 C_1 和 C_2 的作用概括为“隔直通交”。至于电路中其他元件的作用,可以在以下对电路的分析后自然得出。这种电路的特点是信号源将信号从三极管基极送入、负载将信号从三极管集电极取走,发射极为输入和输出的公共端,所以称其为共发射极电路。与二极管一样,对该电路的分析主要有两种方法,即图解法和等效电路法,以下分别介绍。

(1) 图解法

① 静态分析

静态分析的目的是为了确定三极管在电路中的工作状态,判断其能否在电路中起电流控制作用。

静态分析的步骤如下:

第一步,画出直流通路。即将信号源除去,电容看作开路,如图 3.16 所示。

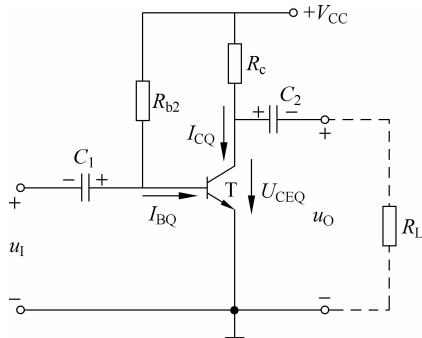


图 3.15 固定偏流电路

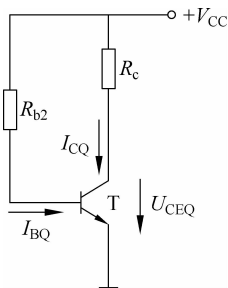


图 3.16 固定偏流电路直流通路

第二步,如图 3.17(a)所示,在三极管输入特性坐标系中画出电路输入回路方程

$$i_B = \frac{V_{CC} - u_{BE}}{R_b} \quad (3.4)$$

所对应的直线。该直线与三极管输入特性曲线的交点就是静态工作点 $Q(U_{BEQ}, I_{BQ})$ 。

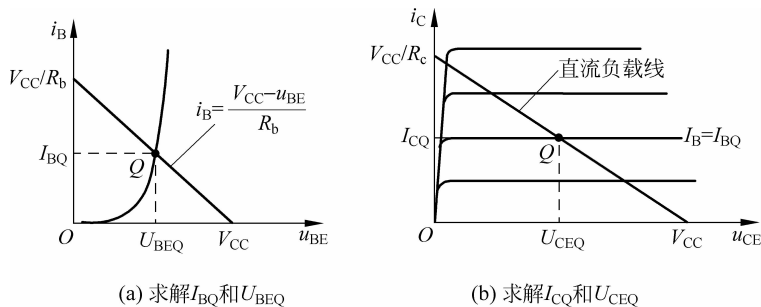


图 3.17 固定偏流电路的静态分析

第三步,如图 3.17(b)所示,在三极管输出特性坐标系中画出电路输出回路方程

$$u_{CE} = V_{CC} - i_C R_c \quad (3.5)$$

所对应的直线(又称直流负载线)。直流负载线与三极管输入特性曲线中 I_B 等于 I_{BQ} 的交点就是静态工作点 $Q(U_{CEQ}, I_{CQ})$ 。

② 动态分析

动态分析的目的是为了确定电路的放大能力和工作范围等动态指标。

如图 3.18 所示,电压放大倍数的求解步骤如下:

第一步,由给定输入电压 u_i (即基极与发射极间的动态电压 u_{be}),在输入特性上求得基极动态电流 i_b 。