



前面主要针对放大电路及其特性进行了讨论,以介绍集成运放这个典型的放大电路为例,通过引入不同组态的负反馈,构成各种功能电路,并对这些电路进行分析和设计,由此理解集成运放的各种应用电路,等等,所有这些都是基于放大电路的外部特性而进行的。一个电子电路(包括放大电路)是由各种不同的电子元器件组成的,了解这些元器件的特性及其应用,将有助于电子电路的分析与设计。本章及第 6、7 章将对几种典型的电子元器件,如半导体二极管、双极型晶体管和场效应管进行讨论,从元器件的外部特性出发,分析其基本电路的原理和构成以及应用电路的分析和设计。

5.1 半导体二极管的外部特性



利用半导体的掺杂工艺,根据掺入杂质元素的不同,可以得到两种掺杂半导体,即主要靠自由电子导电的 N 型半导体和主要靠空穴导电的 P 型半导体。当 N 型半导体和 P 型半导体结合后,在它们的交界面附近便形成了所谓的“PN 结”(可参见第 13 章)。将 PN 结用外壳封装起来,并分别从 P 区和 N 区引出电极引线,就构成了半导体二极管(简称二极管)。几种常见的二极管封装如图 5.1 所示。PN 结示意图和二极管的电路符号如图 5.2 所示。图中,阳极(正极)对应于 P 区的引线,阴极(负极)对应于 N 区的引线。通过下面的讨论可知,电路符号中“三角形箭头”的方向表示二极管正向导通时的电流方向。



图 5.1 几种常见的二极管

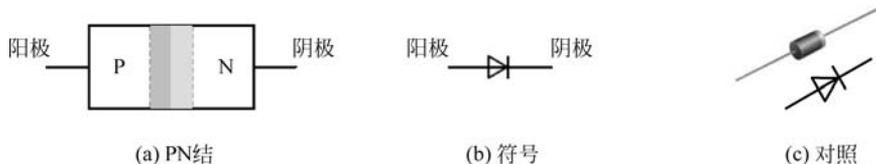


图 5.2 PN 结示意图、二极管的电路符号及其与实物的对照

可以通过实验的方法得到二极管的外部特性,即伏安特性,测试电路如图 5.3 所示。图 5.3(a)为二极管正向特性测试电路,此时加在二极管上的电压为正向电压(简称正偏),即 P 区的电位高于 N 区的电位。图 5.3(b)所示为二极管反向特性测试电路,此时加在二极管上的电压为反向电压(简称反偏),即 N 区的电位高于 P 区的电位。由此可以得到二极管的伏安特性,也可以使用晶体管特性图示仪直接测试得到该特性曲线。图 5.4 给出了利用 Multisim 仿真软件得到的二极管伏安特性曲线。图中, $v > 0$ 的部分为其正向特性,当正向电压超过零点几伏(工程上,一般取硅管约为 0.7V ,锗管约为 0.2V)时,才会有明显的正向电流,这个电压称为二极管的导通电压 V_{on} 。从整个正向特性来看,当电流较小时,呈现出指数规律变化;当电流较大时,近似于直线。 $v < 0$ 的部分为其反向特性,当反向电压未达到击穿电压 $V_{(\text{BR})}$ 时,反向电流很小(硅管小于 $0.1\mu\text{A}$,锗管小于几十微安)。当反向电压达到击穿电压 $V_{(\text{BR})}$ 时,二极管处于反向击穿状态,反向电流将会急剧增大。

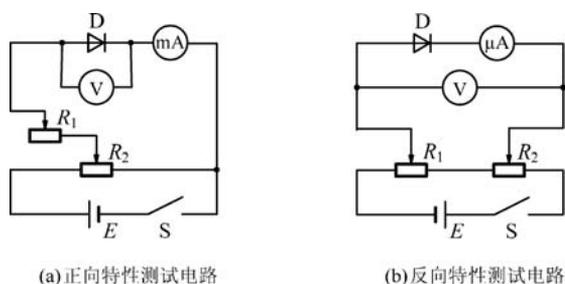


图 5.3 二极管伏安特性测试电路

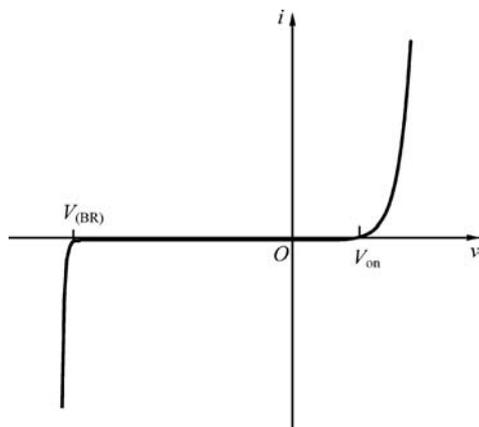


图 5.4 二极管的伏安特性

一般来说,电路中的二极管工作在特性曲线的不同区域,将具有不同的电路功能:

(1) 当工作在正向特性的线性部分时,若加入一幅值较小的正弦电压信号,即小信号,则流过二极管的交流电流分量也为正弦的,以实现信号的线性传输。可用于放大电路。

(2) 当工作在正向特性的非线性部分时,若加入一定幅值的正弦电压信号,则流过二极管的交流电流分量为非正弦的,即出现了高次谐波。可用于高频电路。

(3) 当工作在正向特性(导通状态)和反向特性(未击穿)时,二极管呈现单向导电性。后面介绍的应用实例中,大多数属于这种工作状态。

(4) 当工作在反向特性的击穿状态时,若使流过二极管的反向电流在一定范围内变化,则其端电压基本不变,据此可用于稳压电路。注意,这里所说的反向击穿属于齐纳击穿,而不是雪崩击穿(可参考第 13 章的有关内容)。

由理论分析可知,二极管的伏安特性可用式(5.1)描述,即

$$i = I_S (e^{v/V_T} - 1) \quad (5.1)$$

式中, I_S 为反向饱和电流, $V_T = \frac{kT}{q}$, 被称为热电压,其中 q 为电子电量, k 为玻耳兹曼常数, T 为热力学温度。当 $T = 300\text{K}$ 时, $V_T \approx 26\text{mV}$ 。

尽管各种二极管特性曲线的形状是类似的,但人们根据不同的用途,对曲线的不同区域和数值有了特定的要求,于是出现了各种用途的二极管。例如普通二极管一般是应用它的单向导电性,故它的反向电阻很大,正向导通电阻很小,且反向击穿电压较高;齐纳二极管一般是应用它的反向击穿特性,故它的反向击穿区曲线非常陡峭,以保证它有很好的稳压特性,等等。因此,在使用不同用途的二极管时,就应根据其特性,通过设置工作点,以确保它工作在曲线的相应位置。关于这个问题,将在后面二极管的应用中,针对具体问题再作讨论。

以上仅从二极管的伏安特性曲线进行了分析,可知二极管具有单向导电性、稳压特性等。事实上,若考虑PN结的温度特性,则可作为热敏元件;若考虑PN结的光特性,则可作为光敏元件;若考虑PN结在外加反向电压作用下,是一个主要由势垒电容构成的电容,且其电容值随外加反向电压变化而变化,则可作为压控电容,例如变容二极管,等等。

5.2 半导体二极管模型

由图 5.4 可知,二极管是一个非线性电子器件,对于含有二极管的非线性电路,可以采用图解分析法来求解电路中的电压和电流。例如,求解如图 5.5 所示电路中流过二极管的电流和二极管的端电压。

先将电路以 ab 为分界线分为两部分,ab 的右边为非线性部分,其端电压 v_D 和电流 i_D 应符合二极管的特性曲线;ab 的左边为线性部分,其端电压 v_D 和电流 i_D 应满足线性方程

$$i_D = -\frac{1}{R}v_D + \frac{E}{R} \quad (5.2)$$

在事先得到的二极管特性曲线上作图,连接纵轴截距点 $(0, \frac{E}{R})$ 和横轴截距点 $(E, 0)$,即可得到式 (5.2) 所确定的直线,该直线称为负载线,二极管特性曲线与负载线的交点 $Q(V_{DQ}, I_{DQ})$ 即为所求,如图 5.6 所示。显然,图解法在实际应用中有时就不大适宜。对此,人们根据器件的工作状态和工程计算精度要求,提出了不同的简化电路模型,以满足定性分析和简单计算的需要。

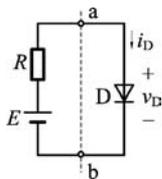


图 5.5 含有二极管的非线性电路

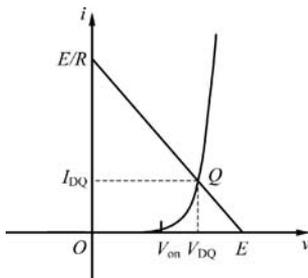


图 5.6 图解分析法

1. 理想二极管模型

若作用于二极管上的信号为大信号,即信号电压(或电流)可使二极管导通或截止,此时二极管的非线性主要表现为单向导电性,导通电压相对较小且可忽略,那么二极管的伏安特

性曲线由图 5.4 变为图 5.7。因此采用理想二极管模型可作定性分析和要求计算精度不高的工程计算。

2. 恒压降二极管模型

若考虑到导通电压不可忽略,并视为一常数(例如硅管为 0.7V,锗管为 0.3V),那么二极管的伏安特性曲线由图 5.7 变为图 5.8 所示。因此采用恒压降二极管模型也可作定性分析和要求计算精度不高的工程计算,但比理想二极管模型的精度高一些。

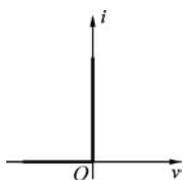


图 5.7 理想二极管的伏安特性曲线

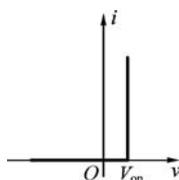


图 5.8 恒压降二极管的伏安特性曲线

3. 分段线性二极管模型

分段线性模型的伏安特性曲线如图 5.9 所示。可以看出,该曲线较前两种更接近实际的特性曲线,因此,采用分段线性模型可以得到较高精度的计算结果。

4. 二极管的微变等效电路

在二极管的实际应用中,有时需要先通过加入直流电压,给二极管设置一个静态工作点即 Q 点, Q 点的位置为正向特性曲线上的某一点,然后再加入一交流小信号。显然, Q 点的位置不同,交流小信号在其附近变化时,二极管表现出的动态电阻 ($r_d = \frac{\Delta v_D}{\Delta i_D}$) 也不同,如图 5.10 所示。因此以上三种模型就不适用了,于是有必要讨论在 Q 点附近二极管的交流小信号特性——微变等效电路。

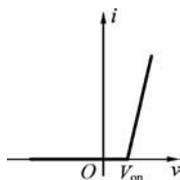


图 5.9 分段线性二极管的伏安特性曲线

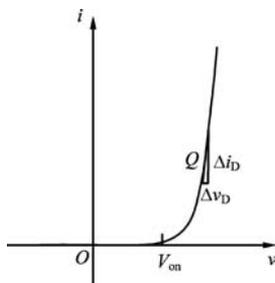


图 5.10 二极管的动态电阻

欲讨论二极管的微变等效电路,必须先确定 Q 点,并计算出静态参数,然后再计算动态参数,即所谓的“先静态后动态”。

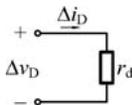
假设已经求得静态参数 I_D (可利用上述模型计算),然后再求出动态电阻。

根据二极管电流-电压方程,即式(5.1),得

$$\frac{1}{r_d} = \frac{\Delta i_D}{\Delta v_D} \approx \frac{di_D}{dv_D} = \frac{d[I_S(e^{v_D/V_T} - 1)]}{dv_D} \approx \frac{I_S}{V_T} e^{v_D/V_T} \approx \frac{I_D}{V_T} \quad (5.3)$$

即

$$r_d \approx \frac{V_T}{I_D} \quad (5.4)$$



式中, I_D 为 Q 点的电流。二极管的微变等效电路如图 5.11 所示。由式(5.4)可以看出, Q 点不同, 即 I_D 值不同, 动态电阻 r_d 的值也不同。

图 5.11 二极管的微变等效电路

5.3 应用电路分析与设计

根据前面对二极管伏安特性的分析可知, 利用二极管可以构成各种功能电路。下面选择几种常见的应用电路, 并采用二极管的不同模型进行分析。同时根据实际问题对电路的要求, 进行电路设计。



视频 27

5.3.1 整流电路

1. 半波整流电路

将交流电变为直流电的过程称为整流。仅由一个二极管构成的最简单的整流电路如图 5.12(a)所示, 图中二极管 D 起整流作用, R_L 为负载。

在整流电路中, 输入交流电压的幅值远大于二极管的导通电压, 利用交流电的正半周和负半周, 使二极管导通和截止, 故无须给二极管加偏置电压, 即零偏置。因此整流电路是利用二极管的单向导电性的一种功能电路。对此, 可采用理想二极管模型对电路进行分析。若输入交流电压 $v_i = \sqrt{2}V_1 \sin \omega t$, 当 v_i 为正半周时, D 导通, 输出电压 $v_o = v_i$; 当 v_i 为负半周时, D 截止, $v_o = 0$, 其输入、输出波形如图 5.12(b)所示。由于电路输出的电压只有半周, 故这种电路称为半波整流电路。

在 Multisim 中, 对图 5.12(a)进行仿真, 通过 DC 扫描, 得到该电路的 DC 传输特性, 如图 5.12(c)所示。可以看出, v_i 大于零点几伏时, v_o 正比于 v_i ; v_i 小于该值时, $v_o = 0$ 。可见, 二极管的导通电压 V_{on} 对整流输出电压 v_o 有一定影响。所以只有当输入电压幅值远大于 V_{on} 时, 才可将二极管的管压降忽略不计。

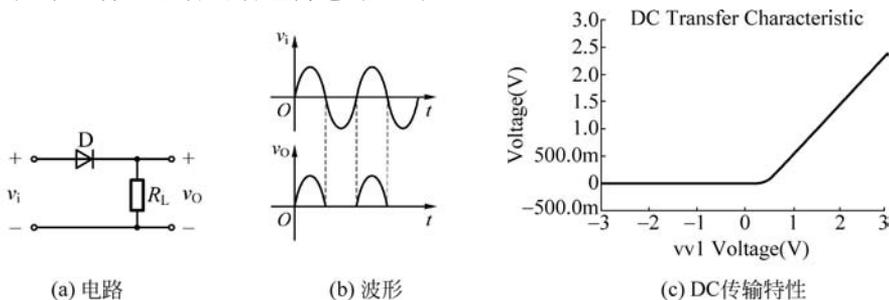


图 5.12 半波整流电路、输入和输出波形及其 DC 传输特性

半波整流电路输出电压的平均值就是负载上电压的平均值 $V_{O(AV)}$, 可表示为

$$V_{O(AV)} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} \sqrt{2} V_1 \sin \omega t d(\omega t) \quad (5.5)$$

式中, V_1 为输入电压的有效值。解式(5.5)得

$$V_{O(AV)} = \frac{\sqrt{2} V_1}{\pi} \approx 0.45 V_1 \quad (5.6)$$

负载电流的平均值

$$I_{L(AV)} = \frac{V_{O(AV)}}{R_L} \approx \frac{0.45 V_1}{R_L} \quad (5.7)$$

2. 全波整流电路

全波整流电路及其输入、输出波形如图 5.13(a)、图 5.13(b)所示。可以看出,全波整流电路是由 D_1 、 D_2 两个半波整流电路组成的,它们的输入电压大小相等,相位相反,这可以利用具有中心抽头的变压器来实现。 D_1 、 D_2 在交流电的正半周和负半周内轮流导通,且流过负载的电流保持同一方向,从而使正、负半周在负载上均有输出电压。其输出电压的平均值和负载电流的平均值可分别表示为

$$V_{O(AV)} = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} \sqrt{2} V_1 \sin \omega t d(\omega t) = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} V_1 \approx 0.9 V_1 \quad (5.8a)$$

$$I_{L(AV)} = \frac{V_{O(AV)}}{R_L} \approx \frac{0.9 V_1}{R_L} \quad (5.8b)$$

在 Multisim 中,对如图 5.13(a)所示电路进行仿真。在进行 DC 扫描时,用一个可调电阻分压,来模拟具有中心抽头的变压器,以便得到大小相等,相位相反的输入电压,仿真电路和该电路的 DC 传输特性分别如图 5.13(c)、图 5.13(d)所示。可以看出, $|v_i|$ 大于零点几伏时, v_o 正比于 $|v_i|$,所以,全波整流电路又称为绝对值电路。同样地,二极管的导通电压 V_{on} 对整流输出电压 v_o 也有一定影响。

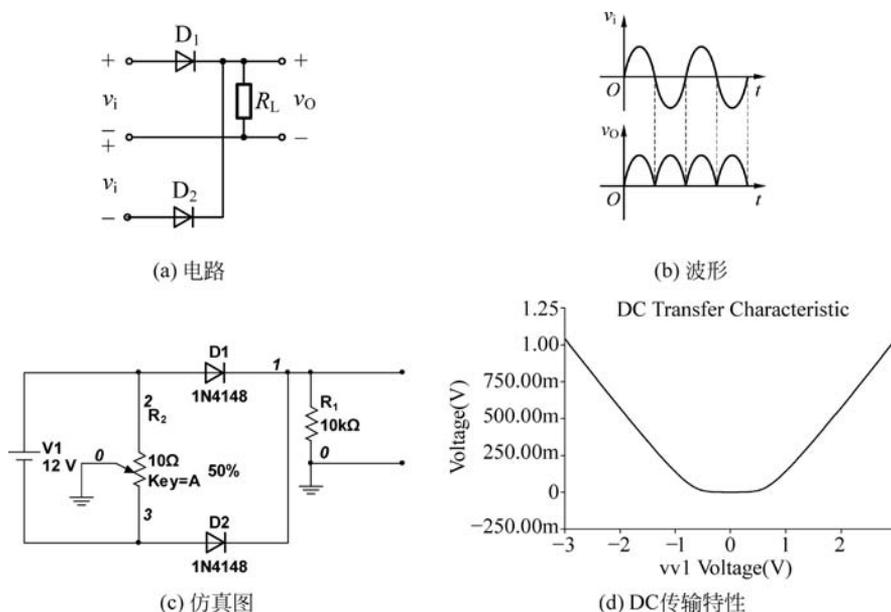


图 5.13 全波整流电路、输入和输出波形及其 DC 传输特性



3. 桥式整流电路

桥式整流电路及其输入、输出波形如图 5.14 所示。可以看出,桥式整流电路由四个二极管 D_1 、 D_2 、 D_3 和 D_4 组成,它们接成电桥的形式。在交流电的正半周内 D_2 、 D_4 导通、 D_1 、 D_3 截止;在交流电的负半周内 D_1 、 D_3 导通、 D_2 、 D_4 截止,且流过负载的电流保持同一方向,从而使正、负半周在负载上均有输出电压,其输出电压的平均值与式(5.8a)相同。桥式整流电路的 DC 传输特性与图 5.13(d)相似。桥式整流电路也是一种绝对值电路。

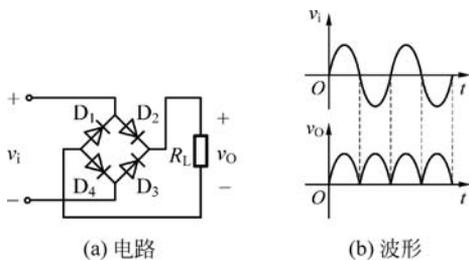


图 5.14 桥式整流电路及其输入、输出波形

在设计整流电路时,需先根据负载电阻的电压要求,确定输入电压的有效值和负载电流值,再确定二极管的参数,这里是根据流过二极管电流在一个周期内的平均值和它所承受的最大反向电压来选择二极管的型号的。

在半波整流电路中,流过二极管的平均电流为 $\frac{0.45V_1}{R_L}$,二极管承受的最大反压为 $\sqrt{2}V_1$ 。

在全波整流电路中,流过二极管的平均电流为 $\frac{0.45V_1}{R_L}$,二极管承受的最大反压为 $2\sqrt{2}V_1$ 。

在桥式整流电路中,流过二极管的平均电流为 $\frac{0.45V_1}{R_L}$,二极管承受的最大反压为 $\sqrt{2}V_1$ 。

【例 5.1】 已知一负载的工作电压为 12V,负载电阻值为 100Ω ,试问:

- (1) 若选用半波整流电路供电,则输入电压为多少? 二极管的参数如何?
- (2) 若选用桥式整流电路供电,则输入电压又为多少? 二极管的参数如何?

解 (1) 由式(5.6),可得整流电路的输入电压为

$$V_1 = \frac{V_{O(AV)}}{0.45} = \frac{12}{0.45} \text{V} \approx 26.7 \text{V}$$

由已知条件,可得负载电流为

$$I_L = \frac{V_{O(AV)}}{R_L} = \frac{12}{100} \text{A} = 0.12 \text{A} = 120 \text{mA}$$

二极管的参数为

$$I_D > I_L = 120 \text{mA}$$

$$V_{RM} > \sqrt{2}V_1 = \sqrt{2} \times 26.7 \text{V} = 37.8 \text{V}$$

(2) 由式(5.8a),可得整流电路的输入电压为

$$V_1 = \frac{V_{O(AV)}}{0.9} = \frac{12}{0.9} \text{V} \approx 13.3 \text{V}$$

由已知条件,可得负载电流为

$$I_L = \frac{V_{O(AV)}}{R_L} = \frac{12}{100} \text{A} = 0.12 \text{A} = 120 \text{mA}$$

二极管的参数为

$$I_D > \frac{1}{2} I_L = 60 \text{mA}$$

$$V_{RM} > \sqrt{2} V_1 = \sqrt{2} \times 13.3 = 18.8 \text{V}$$

4. 精密整流电路

以上介绍的是简单整流电路,它们的 DC 传输特性(见图 5.12(c)和图 5.13(d))表明,二极管的导通电压 V_{on} 对整流输出电压 v_O 是有一定影响的。以图 5.12(a)所示的半波整流电路为例,若输入电压 v_i 为正弦波,考虑到二极管 D 存在导通电压 V_{on} ,故 v_O 只是 v_i 大于 V_{on} 的那部分电压,而当 v_i 小于 V_{on} 时,则 v_O 几乎为 0, v_i 和 v_O 的波形如图 5.15 所示。因此在实际应用中,简单整流电路须使 v_i 远大于 V_{on} ,这样,才可以忽略 V_{on} 对 v_O 的影响,即简单整流电路常应用于输入电压远大于二极管导通电压的场合下,而不能对微弱交流信号进行整流。下面将介绍一种精密整流电路,它由集成运放和二极管等元器件组成,利用运放的放大作用,可将微弱的交流电转换为直流电。

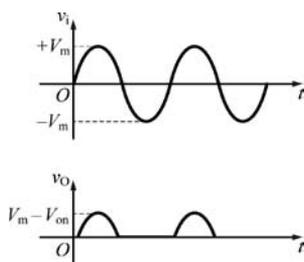


图 5.15 简单整流电路波形图

1) 半波精密整流电路

由二极管和集成运放构成的半波精密整流电路如图 5.16(a)所示。若 v_i 为正弦波,当 $v_i > 0$ (正半周)时,则 $v'_O < 0$, 导致 D_1 截止, D_2 导通,此时电路等效为反相器,输出电压 $v_O = -v_i$; 当 $v_i < 0$ (负半周)时,则 $v'_O > 0$, 导致 D_1 导通, D_2 截止,输出电压 $v_O = 0$, v_i 和 v_O 的波形如图 5.16(b)所示。

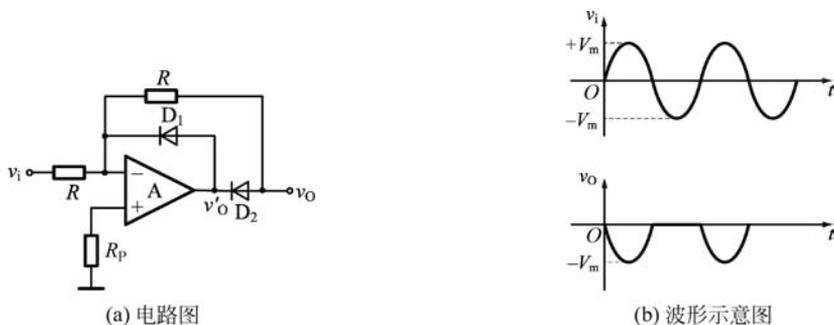


图 5.16 半波精密整流电路

下面对这种电路的“精密”程度作一估计。设二极管的导通电压 $V_{on} = 0.7 \text{V}$, 集成运放的开环差模电压增益 $A_{vd} = 10^5$ 。为使二极管导通,集成运放的净输入电压为 $0.7/10^5 = 7 \mu\text{V}$ 。

由此可知,集成运放只需微伏数量级的净输入电压,二极管 D_1 或 D_2 就可以处于导通状态,以实现精密整流。

利用 Multisim 仿真,半波精密整流电路的仿真图如图 5.17(a)所示。通过 DC 扫描,得到的电压传输特性如图 5.17(b)所示。从图中也可以看出该整流电路确实是很“精

密”的,因为在输入电压幅度很小时,依然有 $v_O = -v_i$, 而没有观察到二极管导通电压的影响。

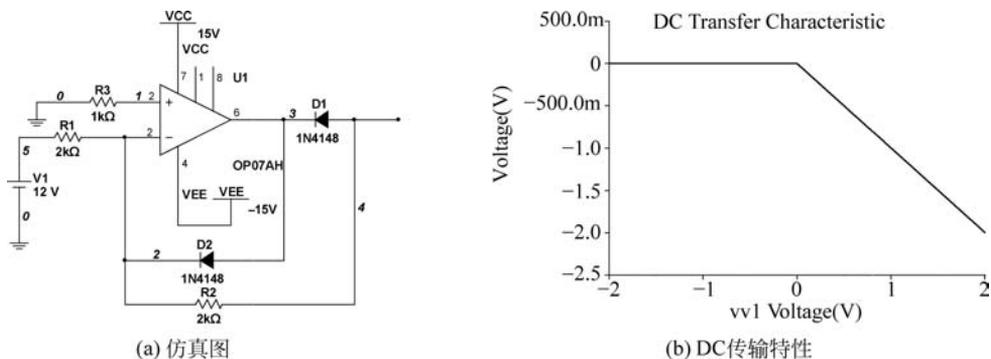


图 5.17 半波精密整流电路的 DC 电压传输特性仿真

2) 全波精密整流电路

全波精密整流电路是在上述半波精密整流电路的基础上,利用一个二输入反相加法器,使交流信号的正半周和负半周在负载上均有相同的输出电压,从而降低了输出波形的脉动成分,其电路如图 5.18(a)所示。其中, A_1 、 D_1 和 D_2 等组成半波精密整流电路,其输出为

$$v'_O = \begin{cases} -2v_i & v_i > 0 \\ 0 & v_i < 0 \end{cases}$$

A_2 组成反相加法器,其输出为

$$v_O = -(v'_O + v_i)$$

综合上述二式,可得

$$v_O = \begin{cases} v_i & v_i > 0 \\ -v_i & v_i < 0 \end{cases}$$

或

$$v_O = |v_i|$$

表明输入电压不论是正半周还是负半周,电路的输出电压均为正值,因此该电路又称绝对值电路。 v_i 和 v_O 的波形图如图 5.18(b)所示。

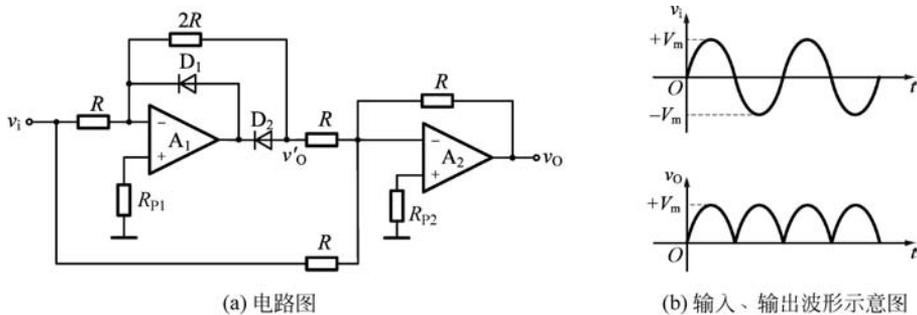


图 5.18 全波精密整流电路



实验视频 6

利用 Multisim 仿真,全波精密整流电路的仿真图如图 5.19(a)所示。通过 DC 扫描,得到的电压传输特性如图 5.19(b)所示,从图中也可看出它所具有的“绝对值”电路特性。

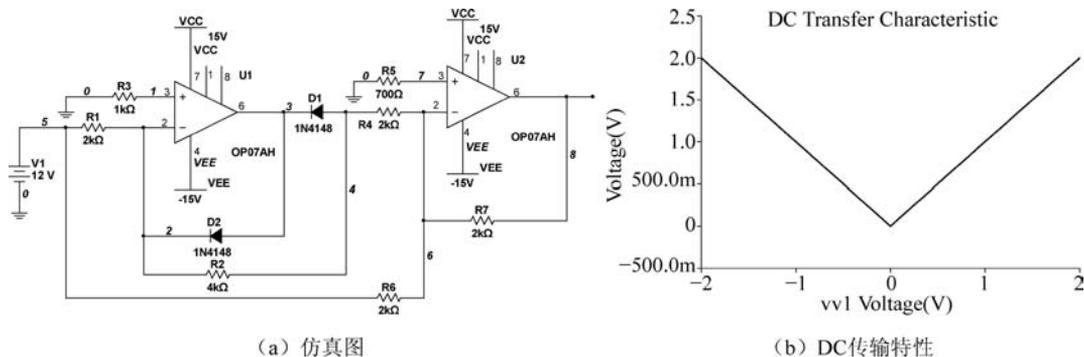


图 5.19 全波精密整流电路的 DC 电压传输特性仿真

综上所述,精密整流电路的 DC 传输特性明显优于普通整流电路,两种电路相比,前者电路较复杂,成本较高,常用于小信号的整流,但电路的输入输出电压和电流受集成运放参数的限制;后者电路简单,成本低,适用于输入电压远大于二极管的导通电压的场合下,二极管的工作电流取决于电路中的负载电流,常用于大信号的整流,如电源电路等。

5.3.2 二极管逻辑电路

图 5.20(a)给出了数字电路中常见的二极管“与”逻辑电路,它是利用二极管的单向导电性,使电路接通或者断开,二极管在其中相当于一个“开关”。从两个输入信号波形来看,低电平为 0.3V 对应逻辑 0,高电平为 3.6V 对应逻辑 1。在分析电路时,需考虑二极管的导通电压对输出电平的影响,特别在逻辑电路级联时,二极管的导通电压有可能影响到整个电路的逻辑,对此,采用恒压降模型分析输出高低电平比较适宜。首先分析输入输出高低电平的各种可能,以便画出输出波形图。

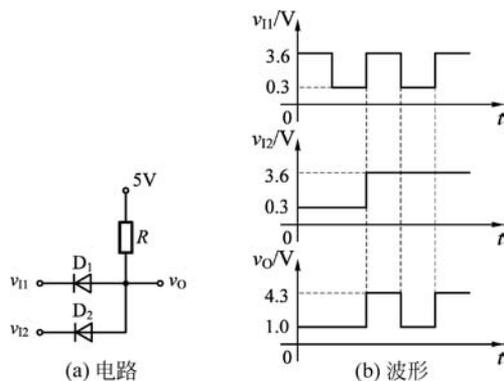


图 5.20 二极管“与”逻辑电路及其波形

当 v_{11} 、 v_{12} 均为 0.3V 时, D_1 、 D_2 均导通,故此时输出为 1V(认为二极管的导通电压为 0.7V);当 v_{11} 为 0.3V、 v_{12} 为 3.6V 时, D_1 导通、 D_2 截止,故此时输出也为 1V;当 v_{11} 为 3.6V、 v_{12} 为 0.3V 时, D_1 截止、 D_2 导通,故此时输出仍为 1V;当 v_{11} 、 v_{12} 均为 3.6V 时, D_1 、

D_2 均导通,故此时输出为 4.3V。据此画出的输出波形如图 5.20(b)所示。

5.3.3 钳位电路

钳位电路又称直流分量恢复电路,其作用是使整个信号电压进行直流平移。钳位电路的一个重要特征是无须知道确切的信号波形,而能调整其直流分量。

图 5.21 所示为一种简单的二极管钳位电路。若输入电压 $v_i = V_m \sin \omega t$,将二极管视为理想二极管,则在时间为 $\frac{T}{4}$ 时,信号电压达到其幅值 V_m ,同时电容上的电压也被充到幅值 V_m ,而后,信号电压下降,二极管截止,电容上的电压将保持 V_m 。当电路稳定后,输出电压应为

$$v_o = -V_m + V_m \sin \omega t$$

可见输出波形相对输入波形有了 $-V_m$ 的直流平移。

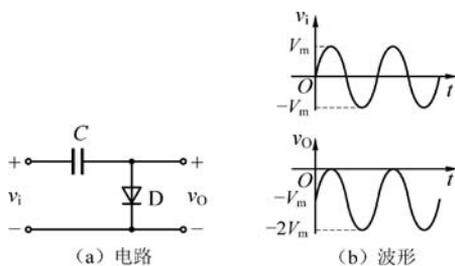


图 5.21 二极管钳位电路及其波形

5.3.4 稳压电路

1. 基本稳压电路

齐纳二极管又称稳压二极管,简称稳压管。从特性曲线上来看,反向击穿区曲线非常陡峭,当稳压管工作在反向击穿状态时,它表现出很好的稳压作用,即在反向击穿电压 V_Z 附近,电流增量 ΔI_Z 很大,而电压变化量 ΔV_Z 却很小。因此在使用稳压管时,首先应将其设置在反向击穿区,但是流过稳压管的反向电流必须加以限制,若小于最小工作电流 I_{Zmin} ,则稳压管还没有被可靠“击穿”,起不到稳压作用;若大于允许的最大工作电流 I_{Zmax} ,则稳压管将过热而损坏。在给出的图 5.22 所示的简易稳压电路中,输入电压的极性和稳压管的接入应使稳压管反偏,输入电压的值应大于稳压管的稳压值即反向击穿电压 V_Z ,通过设置电阻 R 的值,来保证稳压管有一个合适的工作电流,即给稳压管设置一个合适的工作点。

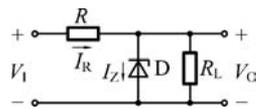


图 5.22 稳压管稳压电路

设稳压管的最小工作电流为 I_{Zmin} ,允许的最大工作电流为 I_{Zmax} ;输入电压的最大值为 V_{Imax} ,最小值为 V_{Imin} ;负载电流的最小值为 I_{Lmin} ,最大值为 I_{Lmax} 。欲使稳压管能正常工作,则有

$$\frac{V_{Imax} - V_Z}{R} - I_{Lmin} < I_{Zmax}$$

和

$$\frac{V_{Imin} - V_Z}{R} - I_{Lmax} > I_{Zmin}$$

即

$$R > \frac{V_{I_{\max}} - V_Z}{I_{Z_{\max}} + I_{L_{\min}}} \quad (5.9)$$

和

$$R < \frac{V_{I_{\min}} - V_Z}{I_{Z_{\min}} + I_{L_{\max}}} \quad (5.10)$$

因此同时满足式(5.9)和式(5.10)的电阻 R 即为所求。

图 5.22 所示的稳压过程可表示为

$$V_O \uparrow \rightarrow I_Z \uparrow \rightarrow I_R \uparrow \rightarrow V_R \uparrow \\ V_O \downarrow \leftarrow$$

可见电阻 R 是至关重要的,它具有双重作用,一是限流作用,即通过设计合适的 R 值,将稳压管设置在反向击穿区,并保证其电流在最小工作电流 $I_{Z_{\min}}$ 与允许的最大工作电流 $I_{Z_{\max}}$ 之间;二是调整作用,即通过电阻 R 上压降 V_R 的变化,对输出电压进行调整。

根据上述对稳压管的分析可知,由于稳压管的反向击穿特性非常陡峭,所以它具有很好的稳压特性,事实上,有些二极管的正向特性也比较陡峭,只不过它的导通电压较低。在实际应用中,可以利用普通二极管的正向特性,实现低电压稳压电路,例如两只普通硅二极管正向串联,可得到约为 1.4V 的稳定电压;还可以利用发光二极管的正向特性(正向导通电压约为 2V),实现约为 2V 的稳定电压。

【例 5.2】 现用蓄电池为一台 9V 收音机供电,收音机的最大消耗功率为 0.5W,蓄电池的电压波动为 12~13.6V。设计一个简易稳压电路,如图 5.22 所示。试确定电阻 R 和稳压管的参数。

解 当收音机关闭时,负载电流最小, $I_{L_{\min}} = 0$; 当收音机音量最大时,负载电流最大, $I_{L_{\max}} = \frac{0.5}{9} \approx 56\text{mA}$ 。输入电压的最小值为 12V,最大值为 13.6V。

由已知条件可知,稳压管的稳定电压为 9V。设 $I_{Z_{\min}} = 0.05I_{Z_{\max}}$,根据式(5.9)和式(5.10)可得

$$R > \frac{13.6 - 9}{I_{Z_{\max}}} = \frac{4.6}{I_{Z_{\max}}}, \quad R < \frac{12 - 9}{0.05I_{Z_{\max}} + 56} = \frac{3}{0.05I_{Z_{\max}} + 56}$$

令二式相等,可求得 $I_{Z_{\max}}$ 的最小值

$$I_{Z_{\max}} = 93\text{mA}$$

稳压管消耗的功率为 $9 \times 93 = 837\text{mW}$,这个计算结果是稳压管应满足的最低限度值。对应的限流电阻 $R = 4.6/93 = 49.5\Omega$ 。

选择参数时,要根据实际情况,对上述值进行适当的调整。例如取电阻 R 为 47Ω (标称值),则稳压管的 $I_{Z_{\max}}$ 应大于 $(13.6 - 9)\text{V}/47\Omega = 0.098\text{A} = 98\text{mA}$,此时稳压管消耗的功率为 $9 \times 98\text{mW} = 882\text{mW}$,并可求得电阻 R 上消耗的最大功率为 $(13.6 - 9) \times 0.098\text{W} = 0.451\text{W}$ 。为了确保电路工作的安全、可靠,参数选择需留有一定的余量。因此 R 选用 47Ω 、1W 的电阻;稳压管选用 1N4739A,其参数为:稳定电压为 9.1V,耗散功率为 1W。

2. 基准电压源

图 5.22 是稳压管的基本电路,它可以提供一个固定电压或基准电压。但该电路有两点



不足：一是它所提供的基准电压不能超过稳压管的稳压值；二是电路的带负载能力较差。根据第4章介绍的集成运放，结合稳压管的基本电路，就可以设计灵活方便的基准电压源电路。

由稳压管和集成运放构成的基准电压源电路如图 5.23 所示。图中电阻 R 和稳压管 D_Z 组成基本稳压电路，其中，电压源 V 通过 R 将 D_Z 偏置于反向击穿区，使稳压管提供稳定电压 V_Z ；为了减小负载的影响，在基本稳压电路与负载之间，接入由集成运放构成的同相放大电路，对电压 V_Z 进行放大。根据图中参数，电路的输出电压为

$$V_O = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) V_Z$$

由此可见，图 5.23 所示电路具有以下特点，一是通过适当调整电阻比 R_2/R_1 ，可以满足所需的基准电压；二是负载电流由集成运放提供，这样，负载电流的变化不会影响流过稳压管的电流，使稳压管提供的电压 V_Z 更为稳定，即集成运放在这里起到了“放大”和“隔离”的作用；三是根据负反馈理论可知，图中的同相放大电路属于电压串联负反馈电路，具有高输入电阻和低输出电阻的特点，而高输入电阻对稳压管基本电路的影响会更小，低输出电阻使得该电路具有很强的带负载能力。

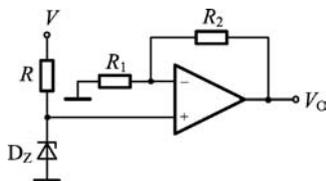


图 5.23 简单的集成运放基准电压源电路

5.3.5 限幅电路

限幅电路的作用是消除信号中大于或小于某一特定值的部分，它可分为上限幅电路、下限幅电路和双向限幅电路，它们的传输特性如图 5.24 所示。其中，图 5.24(a)表明当输入电压 v_1 小于上门限电压 V_{IH} 时，输出电压 v_O 与 v_1 呈线性关系，而当 $v_1 > V_{IH}$ 时， v_O 等于最大输出电压 V_{Omax} ，即可实现上限幅；图 5.24(b)表明当 v_1 大于下门限电压 V_{IL} 时， v_O 与 v_1 呈线性关系，而当 $v_1 < V_{IL}$ 时， v_O 等于最小输出电压 V_{Omin} ，即可实现下限幅；图 5.24(c)表明当 $V_{IL} < v_1 < V_{IH}$ 时， v_O 与 v_1 呈线性关系，而当 $v_1 > V_{IH}$ 或 $v_1 < V_{IL}$ 时， v_O 等于 V_{Omax} 或 V_{Omin} ，即可实现双向限幅。比较图 5.12(c)与图 5.24(b)可知，半波整流电路可视为门限电压约为零的限幅电路。

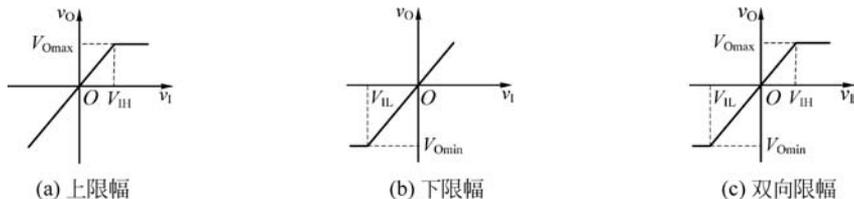


图 5.24 限幅电路的传输特性

根据前面对二极管伏安特性的分析可知，二极管的正向导通特性和反向击穿特性均具有限制电压的作用，所以，利用普通二极管或稳压管可构成多种形式的限幅电路。

【例 5.3】 利用二极管的正向导通特性构成的双向限幅电路如图 5.25(a)所示。试分析它的传输特性，以及输入输出波形。

解 考虑到二极管正向导通电压的影响，采用恒压降模型进行分析。

从图中可以看出，当 D_1 、 E 支路的端电压等于 $E + V_{on}$ 时， D_1 处于导通与截止之间的临界

状态,而当 $v_1 > E + V_{on}$ 时, D_1 导通, $v_O = E + V_{on}$; 当 $v_1 < E + V_{on}$ 时, D_1 截止, 该支路等效为开路, $v_O = v_1$, 即电路实现了上限幅。当 D_2 、 E 支路的端电压等于 $-(E + V_{on})$ 时, D_2 处于导通与截止之间的临界状态, 而当 $v_1 < -(E + V_{on})$ 时, D_2 导通, $v_O = -(E + V_{on})$; 当 $v_1 > -(E + V_{on})$ 时, D_2 截止, 该支路等效为开路, $v_O = v_1$, 即电路实现了下限幅。因此电路的下门限、上门限分别为

$$V_{IL} = -(E + V_{on}), \quad V_{IH} = E + V_{on}$$

电路的传输特性如图 5.25(b) 所示。



图 5.25 二极管双向限幅电路

Multisim 仿真: 取 $E = 3\text{V}$, $R = 1\text{k}\Omega$ 。输入信号为正弦波电压, 其幅值为 6V , 频率为 1kHz 。二极管双向限幅电路的仿真图如图 5.26(a) 所示。通过 DC 扫描, 得到电路的传输特性, 如图 5.26(b) 所示, 测试结果表明, 电路的下门限、上门限电压分别为 -3.634V 和 $+3.634\text{V}$, 与理论分析结果基本一致; 通过瞬态分析, 得到的输入输出波形如图 5.26(c) 所示, 比较二波形可以看出, 电路将输入电压超出 $\pm 3.634\text{V}$ 的部分削去后作为输出电压。考虑到实际二极管的特性, 仿真与理论结果是有差异的, 比较图 5.25(b) 与图 5.26(b) 所示即可看出。

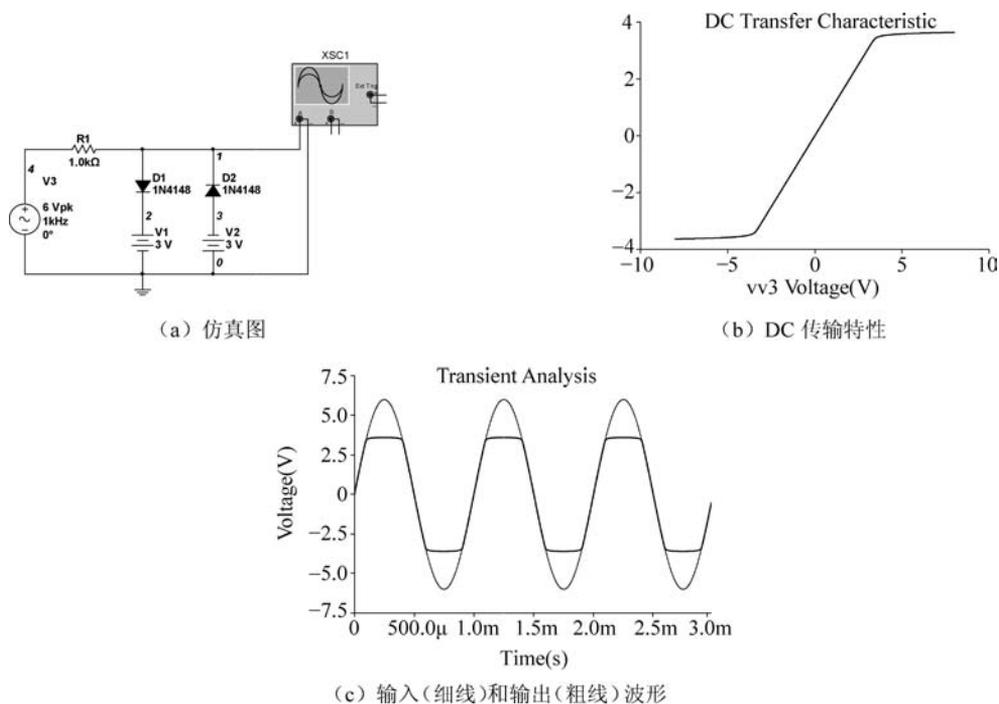


图 5.26 二极管双向限幅电路仿真

在实际应用中,可以将限幅电路设置于电路的不同地方,以起到不同的作用。如图 5.27 所示,将限幅电路设置于集成运放的输入端,起到保护输入端的作用。图 5.27(a)中所示的 D_1 和 D_2 将输入电压限制在二极管的正向导通电压以内,以防止输入差模电压过大。图 5.27(b)中所示的 D_1 和 D_2 将输入电压限制在 $-(V+V_{on}) \sim (V+V_{on})$ 以内,以防止输入共模电压过大。

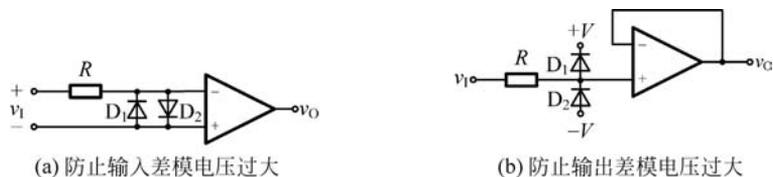


图 5.27 集成运放输入端保护电路

图 5.28 显示了利用稳压管的反向击穿特性和正向导通特性构成的双向限幅电路。将限流电阻和两个背靠背的稳压管设置于集成运放的输出端,使输出电压限制在 $-(V_Z+V_{on}) \sim (V_Z+V_{on})$ 以内,以满足后续电路的需要。同时该电路对输出端也有一定的保护作用。

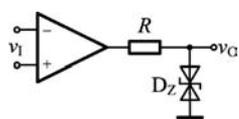


图 5.28 稳压管双向限幅电路

5.3.6 显示电路

发光二极管(Light-Emitting Diode, LED)是由电能转换为光能的一种半导体器件,因其发光颜色种类多、驱动电压低、功耗小、寿命长、可靠性高及价格低等优点,在各种显示电路中得到了广泛的应用。

发光二极管的发光颜色取决于所用材料,常见的有红、绿、黄、橙和蓝等颜色,其外形有圆柱形和长方体形等,如图 5.29(b)所示。其电路符号如图 5.29(a)所示。

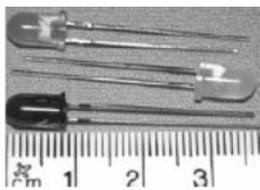
发光二极管的伏安特性与普通二极管的相似,其正向导通电压 V_{on} 一般为 $1.8 \sim 2.5\text{V}$,蓝色发光二极管的在 $3 \sim 4\text{V}$ 。

发光二极管的发光强度与工作电流有关,工作电流大,亮度大。在一般使用中,发光二极管的正向工作电流 I_F 为 $5 \sim 10\text{mA}$ 。典型应用电路如图 5.30 所示。通过设置限流电阻 R ,使发光二极管工作在正向导通状态, R 的取值可由式(5.11)求出。

$$R = \frac{V - V_{on}}{I_F} \quad (5.11)$$



(a) 电路符号



(b) 实物图

图 5.29 发光二极管电路符号及其实物

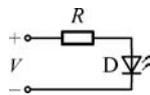


图 5.30 发光二极管的典型应用电路

当有 n 个发光二极管串联时,其限流电阻 R 为

$$R = \frac{V - V_{\text{on}} \cdot n}{I_{\text{F}}} \quad (5.12)$$

当有 n 个发光二极管并联时,其每一支路上的 R 由式(5.11)决定,如图 5.31 所示。

由于发光二极管的反向耐压较低,为几伏,当电路中有可能出现较大的反向电压时,应在发光二极管的两端反向并联一个二极管,起到保护作用,如图 5.32 所示。

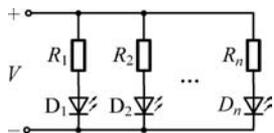


图 5.31 发光二极管的并联

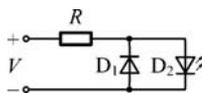


图 5.32 发光二极管的保护

5.3.7 光控电路

光电二极管是由光能转换为电能的一种半导体器件,广泛应用于遥控、报警、自动控制及光电传感等领域。光电二极管的电路符号如图 5.33 所示。



图 5.33 光电二极管的电路符号

光电二极管的伏安特性如图 5.34 所示。在无光照时,其伏安特性与普通二极管类似,其反向电流(称为暗电流)很小,通常小于 $0.2\mu\text{A}$ 。

在一般使用中,光电二极管工作在反向导通状态下,从图 5.34 中可以看出,在反向电压作用下,受到光照而产生的光电流随入射光照度的增大而增大,人们利用这一特点,可实现光信号的接收放大或光控。光电二极管在电路中的一种典型接法如图 5.35 所示。当无光照时,输出电压几乎为零;当有光照时,输出端为高电平。

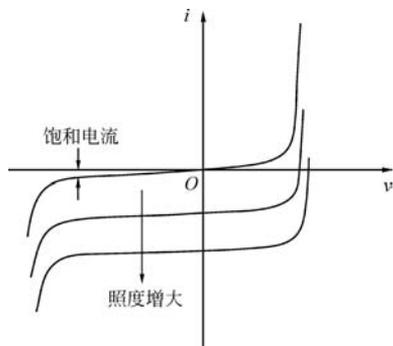


图 5.34 光电二极管的伏安特性

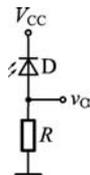


图 5.35 光电二极管的一种接法

5.4 计算机仿真分析与设计

利用 Multisim 计算机仿真软件,对二极管的特性及其应用电路进行仿真分析与设计,将有助于更好地理解二极管电路,为进一步应用二极管电路打下基础。

5.4.1 二极管的伏安特性

二极管伏安特性的仿真图如图 5.36 所示。通过对 V1 进行 DC 扫描,观察流过二极管电流的变化情况,即得到二极管的伏安特性曲线,如图 5.37 所示。为了在一定电压范围内能同时观察到二极管的正向和反向特性,可将二极管的反向击穿电压值适当改小一些。

特别注意,图 5.36 仅仅是一个二极管的仿真图,在实际电路中是不允许这样连接的。一般需要在电路中串入限流电阻,以免二极管因电流过大而烧毁。

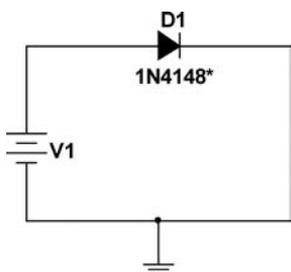


图 5.36 二极管伏安特性的仿真图

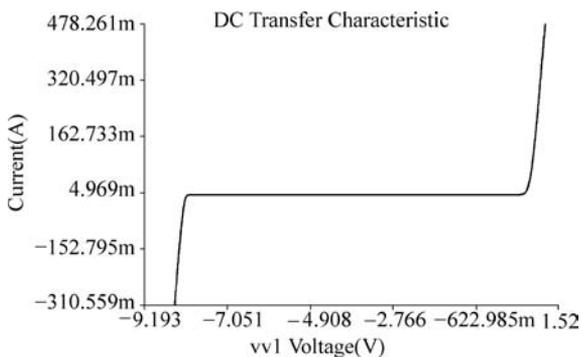


图 5.37 二极管的伏安特性曲线

5.4.2 二极管的动态特性

利用图 5.38 所示的仿真电路,讨论二极管静态工作点对输出电压的影响。

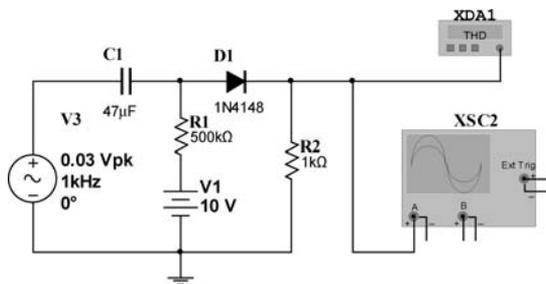
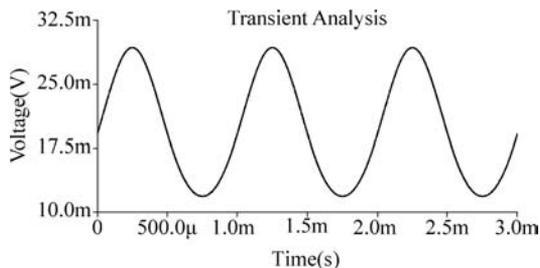


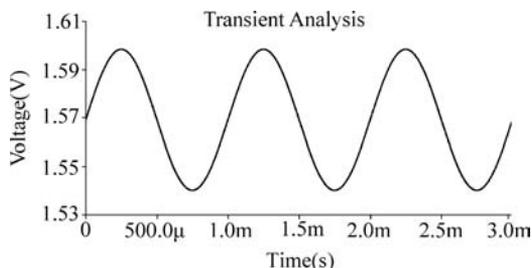
图 5.38 二极管动态特性的仿真图

图中 V_1 、 R_1 和 R_2 为二极管设置静态工作点,交流信号通过电容 C_1 作用于二极管支路上,用示波器通过观察 R_2 上的电压波形,了解二极管静态工作点对输出电压的影响。

当 $R_1=500\text{k}\Omega$ 时, R_2 上的电压波形如图 5.39 所示,其失真度为 8.065%,输出波形失真较大。此时二极管静态电流的理论值为 0.019mA,工作点偏低,二极管工作在特性曲线的非线性区。

图 5.39 $R_1=500\text{k}\Omega$ 时, R_2 上的电压波形

当 $R_1=5\text{k}\Omega$ 时, R_2 上的电压波形如图 5.40 所示, 其失真度为 0.014%, 输出波形失真较小。此时二极管静态电流的理论值为 1.55mA, 工作点较高, 二极管工作在特性曲线的线性区。

图 5.40 $R_1=5\text{k}\Omega$ 时, R_2 上的电压波形

可见, 对于给定的输入波形来说, 可根据不同的需要, 选择不同的静态工作点。

通过进一步分析和仿真可知, 当 $R_1=0$ 时, 直流源将交流信号短路, 故输出电压中不含交流成分, 由此可以看出电阻 R_1 的“隔离”作用。而电容 C_1 的作用则是既要保证交流信号通过, 又要保证二极管上的直流电压不被交流源短路, 即所谓“通交隔直”作用。

5.4.3 对数和指数放大电路

1. 对数放大电路

第 4 章介绍了由集成运放构成的反相输入放大电路, 现将其中的反馈电阻用二极管 D 取代, 即为对数放大电路, 如图 5.41(a) 所示。由于二极管需正向偏置, 故要求输入电压大于零。当二极管的正向压降较大时, 二极管的伏安特性方程, 即式(5.1)可近似为

$$i_D \approx I_S e^{v_D/V_T}$$

根据“虚断”和“虚短”, 输入电流即流过电阻 R 的电流为

$$i_1 = \frac{v_1}{R}$$

且 $i_1 = i_D$ 和 $v_D = -v_O$, 故有

$$I_S e^{-v_O/V_T} = \frac{v_1}{R}$$

两边取自然对数, 并整理可得

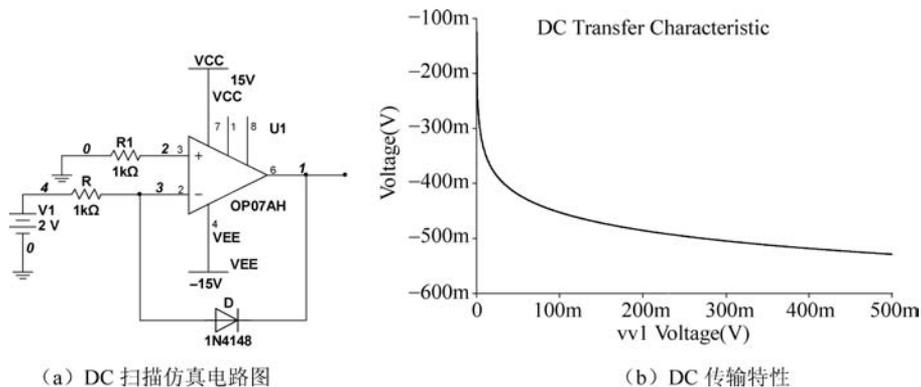


图 5.41 对数放大电路仿真

$$v_O = -V_T \ln\left(\frac{v_I}{I_S R}\right) \quad (5.13)$$

表明该电路的输出电压与输入电压的对数成正比。利用 Multisim 仿真,通过 DC 扫描,得到该电路的 DC 传输特性如图 5.41(b)所示。

2. 指数放大电路

将对数放大电路中的电阻 R 和二极管 D 对换,即得到指数放大电路,如图 5.42(a)所示。根据“虚断”和“虚短”,在输入电压 $v_I > 0$ 的条件下有

$$i_D \approx I_S e^{v_I/V_T}$$

和

$$v_O = -i_R R = -i_D R$$

即

$$v_O = -I_S R e^{v_I/V_T} \quad (5.14)$$

表明该电路的输出电压是输入电压的指数函数。利用 Multisim 仿真,通过 DC 扫描,得到该电路的 DC 传输特性如图 5.42(b)所示。

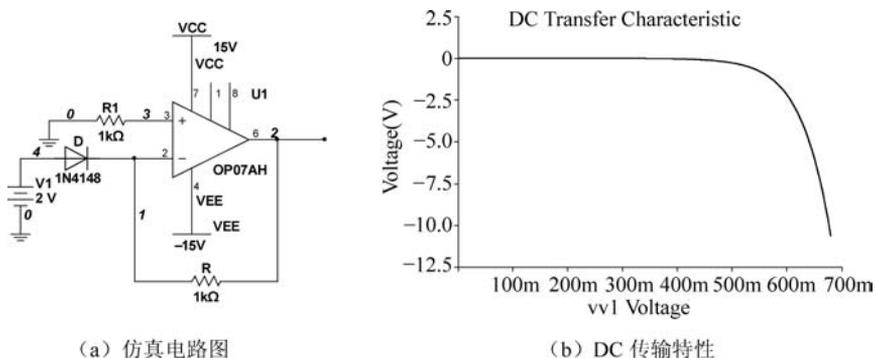
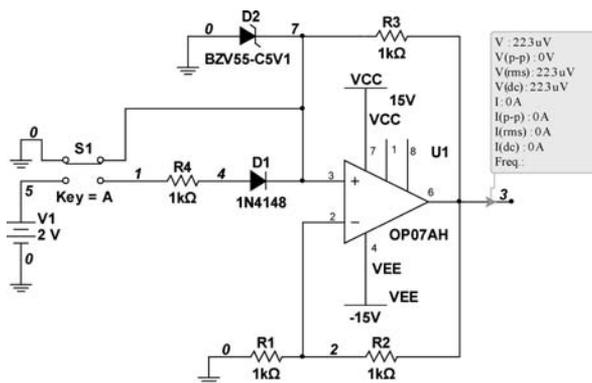


图 5.42 指数放大电路仿真

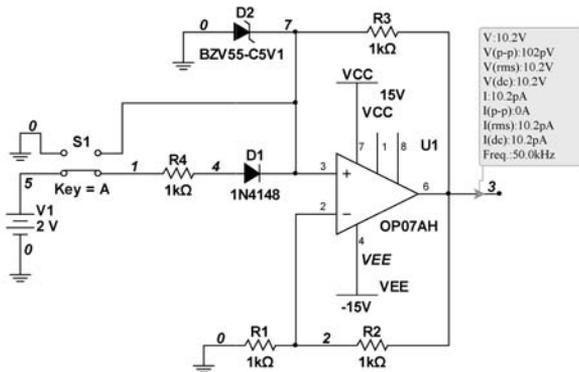
另外,式(5.13)和式(5.14)表明输出电压 v_O 与反向饱和电流 I_S 有关,而 I_S 与温度有很大关系,且不同二极管的 I_S 也不同,所以,电路的运算精度受温度和器件的影响。用晶体管取代二极管构成的对数和指数电路,可以消除 I_S 的影响,这将在第 6 章中介绍。

5.4.4 基准电压源设计

5.3.4 节介绍了简单的基准电压源电路,并分析了它的特点。进一步分析,不难发现它存在的不足。稳压管的动态电阻是不等于零的,故稳压管的稳定电压 V_Z 与其流过的电流有关,这样电压 V 的变化势必影响 V_Z 的值,从而导致输出电压 V_O 的变化。如图 5.43 所示,给出了基准电压源的另一电路结构,它试图减小甚至消除供电电压对 V_O 的影响。图中电阻 R_1 和 R_2 构成负反馈网络;电阻 R_3 和稳压管 D2 构成基准电压电路,兼正反馈网络;电阻 R_4 、二极管 D1、单刀双掷开关 S1 和电源 V1 组成启动电路。



(a) 启动开关 S1 断开, 输出电压为 0V



(b) 启动开关 S1 闭合, 输出电压为 10.2V

图 5.43 带启动电路的基准电压源仿真

当启动开关 S1 掷上方时,如图 5.43(a)所示,由于运放的同相端被 S1 短接到地,即同相端的电位为零,故此时输出电压 V_O 也为零。

当启动开关 S1 掷下方时,如图 5.43(b)所示,电压 V1 通过 S1、 R_4 和 D1 作用于运放的同相端,使运放有一定的输出电压,而该电压值还不足以使稳压管 D2 反向击穿。由于 R_3 的正反馈且此时为输出电压的全部正反馈,大于 R_1 和 R_2 的负反馈作用,导致输出电压 V_O 迅速增大,直到使稳压管 D2 反向击穿,这样运放的同相端将被固定在稳压值 V_Z 上,同时运放的输出电压 V_O 也被固定,即

$$V_O = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) V_Z \quad (5.15)$$

流过稳压管的电流为

$$I_{D2} = \frac{V_O - V_Z}{R_3} = \frac{R_2}{R_1 R_3} V_Z \quad (5.16)$$

与此同时,由于 D1 的负端电位高于其正端电位,故 D1 截止,启动电路不再起作用,电源 V1 也就对电路不再产生影响,也就是说,电源 V1 仅仅用于电路的启动。这里利用了 D1 的单向导电性,当 D1 正向导通时,保证了 V1 对电压源电路的启动;当 D1 反向截止时,阻断 V1 对电压源电路的影响。注意,这里要求 $V_Z > V_1$ 。

根据反馈理论,可以分析输出电压 V_O 的稳定过程。假设由于某种原因导致输出电压 V_O 升高,电路将通过正、负反馈过程,使输出电压 V_O 稳定在一定值上。这一过程可概括为:对于正反馈过程来说, V_O 升高 $\rightarrow I_{D2}$ 增大 $\rightarrow V_Z$ 略有升高,即运放的同相端电位略有升高;对于负反馈过程来说, V_O 升高 \rightarrow 负反馈电压即 R_1 上的压降增大 \rightarrow 运放的反相端电位升高;由于运放反相端电位比同相端电位升高的相对较高,故运放的输出电压 V_O 将下降,即 V_O 保持稳定。同理也可以进行相反过程的分析。

根据上述分析,设计一个带启动电路的基准电压源,使其输出电压为 10.2V。所用稳压管的稳压值为 5.1V,其工作电流在 5mA 左右。

首先确定电阻 R_1 和 R_2 。由式(5.15),可知

$$\frac{V_O}{V_Z} = 1 + \frac{R_2}{R_1} = \frac{10.2}{5.1} = 2$$

故有

$$\frac{R_2}{R_1} = 1$$

若取 $R_1 = 1\text{k}\Omega$, 则 $R_2 = 1\text{k}\Omega$ 。又由于

$$I_{D2} = I_{R3} = \frac{V_O - V_Z}{R_3} = 5\text{mA}$$

代入数据,可得 $R_3 = 1\text{k}\Omega$ 。

据此设计数据,在 Multisim 中的仿真图如图 5.43 所示。仿真时按动开关 S1,即 A 键,可以看到,随着 A 键的按动,探针的测试结果也随之变化。从图 5.43 所示结果可知,该电路符合设计要求。

5.4.5 限幅放大器

在第 1 章中曾经以功能模块的形式,介绍了放大和限幅电路。本节利用集成运放和稳压管,设计一个具有放大与限幅双重功能的电路,即限幅放大器。

要求:限幅放大器的放大倍数为 20,输出电压限制在 $-3.5 \sim +3.5\text{V}$ 。

根据第 4 章中介绍的集成运放放大电路,先设计一个 20 倍电压放大器,例如采用反相比例放大器,然后利用背靠背的稳压管,对输出电压加以限制,以实现双向限幅,仿真图如

图 5.44(a)所示。图中若 R_1 取 $1\text{k}\Omega$, 则 R_2 取 $20\text{k}\Omega$, R_3 取 $1/20 \approx 1\text{k}\Omega$ 。考虑到稳压管的正向压降, 稳压管的稳压值取 3.3V 。

电路的输出电压为电阻 R_2 右端对地的电压, 而反相放大电路的反相输入端为“虚地”, 故输出电压 v_o 即 R_2 的端电压(右→左)。将背靠背的稳压管 D1 和 D2 并联于 R_2 两端, 即可实现对输出电压的双向限幅。根据设计要求, 当 $|v_o| < 3.5\text{V}$, 即输入电压 $|v_i| < 3.5/20 = 0.175\text{V}$ 时, D1 和 D2 均处于截止状态, 此时电路等效为 -20 倍的电压放大器, 即 $v_o = -20v_i$; 当 $|v_i| > 0.175\text{V}$ 时, D1 和 D2 一个正向导通, 一个反向击穿, 此时电路的反馈电流主要流过稳压管, 使 $|v_o|$ 稳定在 3.5V 。

通过 DC 扫描, 得到电路的 DC 传输特性, 如图 5.44(b)所示。测试结果: 输出电压摆幅为 $\pm 3.5382\text{V}$, 输入电压范围为 $-0.175 \sim +0.175\text{V}$, 基本符合要求。

通过瞬态分析, 可以观测输出电压波形的情况。当输入正弦电压幅值较小(例如 0.1V)时, 输出电压小于 3.5V , 波形未被限幅, 仍为正弦波, 如图 5.44(c)所示。当输入正弦电压幅值较大(例如 0.3V)时, 输出电压大于 3.5V 而被限幅于 3.5V , 如图 5.44(d)所示。

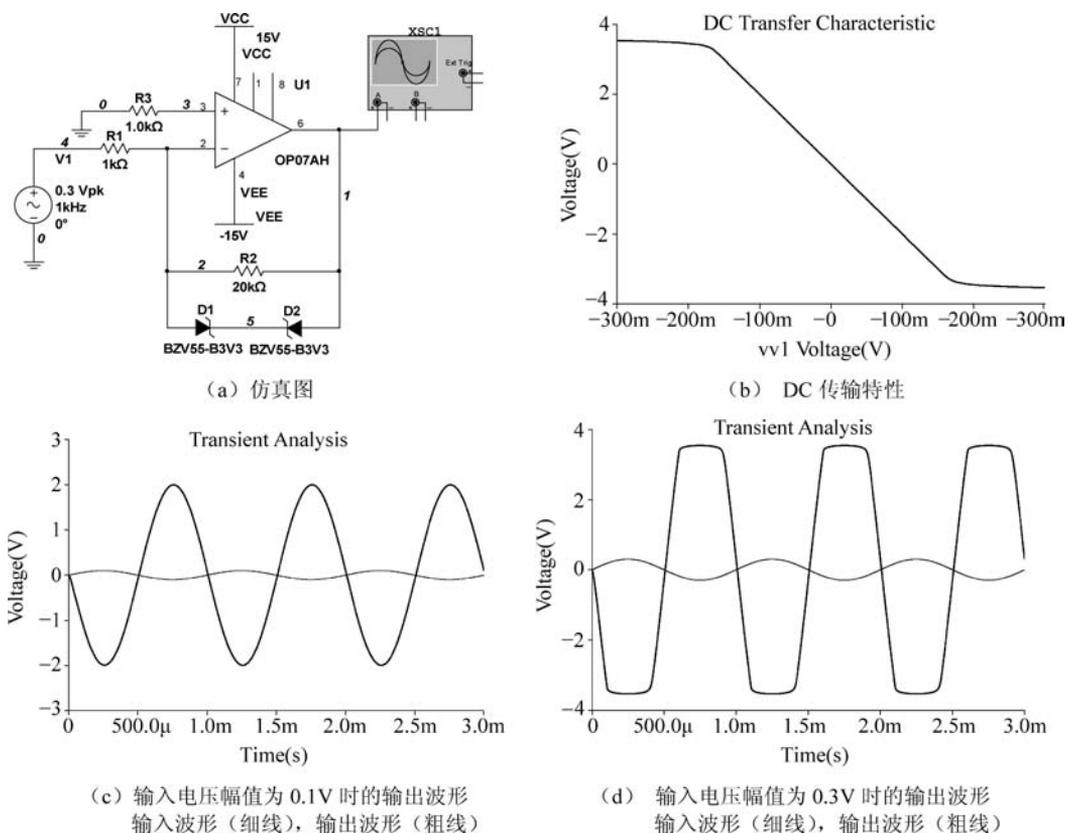
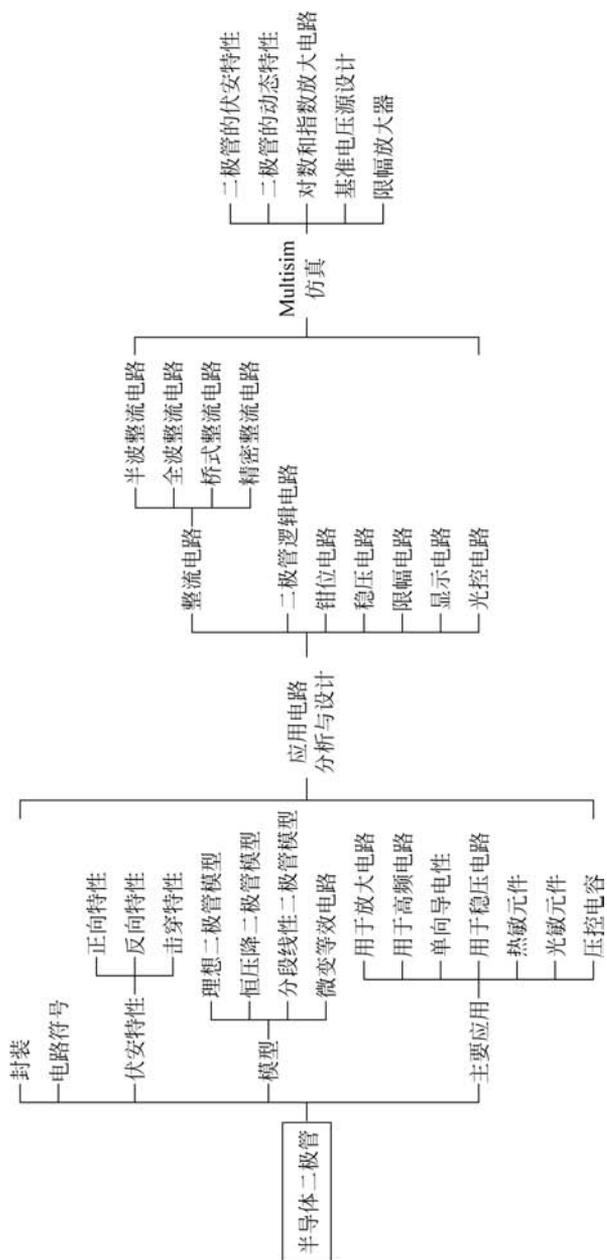


图 5.44 限幅放大器仿真

本章知识结构图和小结

知识结构图



小结

1. 将PN结用外壳封装起来,并分别从P区和N区引出电极引线,就构成了半导体二极管(简称二极管)。

2. 由伏安特性可知,二极管工作在特性曲线的不同区域,可具有不同的电路功能。

在使用不同用途的二极管时,应根据其特性,通过设置工作点,以确保它工作在曲线的相应位置。

3. 二极管除具有单向导电性和稳压特性外,根据其温度特性,则可作为热敏元件;根据其光特性,则可作为光敏元件;根据其在外加反向电压作用下,是一个主要由势垒电容构成的电容,且其电容值随外加反向电压变化而变化,则可作为压控电容,例如变容二极管,等等。

4. 二极管是一个非线性电子器件,可以采用图解分析法,来求解电路中的电压和电流。

5. 根据器件的工作状态和工程计算精度要求,满足定性分析和简单计算的需要,二极管有不同的简化电路模型:

理想二极管模型

恒压降二极管模型

分段线性二极管模型

二极管的微变等效电路

6. 通过对二极管伏安特性的分析可知,利用二极管可以构成各种功能电路。几种常见的应用电路,例如整流电路、二极管逻辑电路、钳位电路、稳压电路、限幅电路、显示电路和光控电路等,可采用二极管的不同模型进行分析。

7. 利用计算机仿真软件,对二极管的特性及其应用电路进行仿真分析与设计,将有助于更好地理解二极管电路,为进一步应用二极管电路打下基础。

习题

分析题

5.1 电路如图 5.45 所示,设二极管导通电压 $V_D=0.7\text{V}$,试确定各电路的输出电压值。

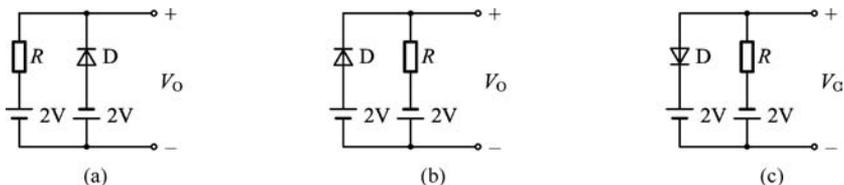


图 5.45 题 5.1 的图

5.2 电路如图 5.46 所示,已知 $v_i=5\sin\omega t$ (V),二极管导通电压 $V_D=0.7\text{V}$ 。试画出 v_i 与 v_o 的波形,并标出幅值。

5.3 仿真分析半波整流电路。

5.4 仿真分析全波整流电路。

5.5 对图 5.21(a)钳位电路进行仿真分析。

5.6 电路如图 5.47 所示,二极管导通电压 $V_D=0.7\text{V}$,常温下 $V_T\approx 26\text{mV}$,电容 C 对

交流信号可视为短路； v_i 为正弦波，有效值为 10mV 。试问二极管中流过的交流电流有效值为多少？

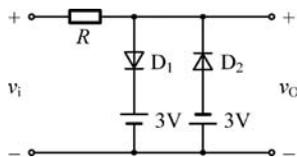


图 5.46 题 5.2 的图

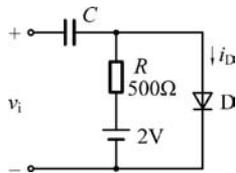


图 5.47 题 5.6 的图

5.7 已知电源电压为 5V ，发光二极管导通电压 $V_D = 1.8\text{V}$ ，正向电流在 $5\sim 15\text{mA}$ 时才能正常工作。试确定限流电阻 R 的取值范围。

5.8 现有两只稳压管，它们的稳定电压分别为 6V 和 8V ，正向导通电压均为 0.7V 。试回答：

- (1) 若将它们串联相接，可得到哪几种稳压值？
- (2) 若将它们并联相接，又可得到哪几种稳压值？

5.9 已知一负载的工作电压为 15V ，负载电阻值为 100Ω ，若选用桥式整流电路供电，试确定输入电压以及二极管的参数。

5.10 电路如图 5.48 所示。确定电路输出电压与输入电压的关系，并通过仿真分析电路的电压传输特性加以验证，电路的功能如何？

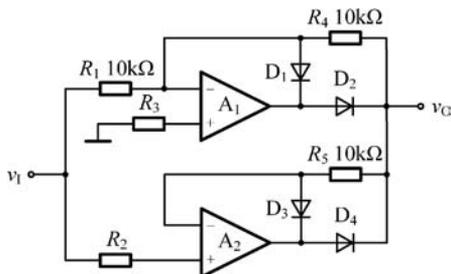


图 5.48 题 5.10 的图

设计题

5.1 已知运放的供电电压为 $\pm 15\text{V}$ ，稳压管的稳压值为 5.1V ，工作电流为 5mA 。设计一个 9V 的基准电压源，并进行仿真实验验证。

5.2 若收音机的最大消耗功率为 0.3W ，重新设计例 5.2，并仿真实验验证设计结果。

5.3 设计一个简易 3V 稳压电源。已知输入电压为 $8\sim 10\text{V}$ 的直流电压，要求输出电压为 3V ，输出电流最大为 20mA ，最小为 0mA 。现有稳压管一个，稳压值为 5.1V ，最大工作电流为 50mA ，最小工作电流为 5mA ；正向导通电压为 0.7V 的二极管若干。试画出电原理图，确定电路其他元件参数，并仿真实验验证之。

5.4 使用 $1\text{k}\Omega$ 电阻、理想二极管和其他元件，设计一个电路，使之满足图 5.49 所示的电压传输特性，并进行仿真实验验证。

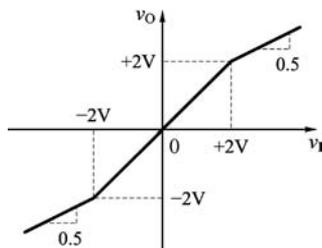


图 5.49 设计题 5.4 的图