

## 第 6 章 实用基本集成器件及其应用

电子技术发展的一个重要方向和趋势就是实现集成化，因此集成运算放大电路的应用是模拟电路的重点内容之一。本章先介绍集成运算放大电路的基本知识，包括集成放大电路的特点、基本组成部分以及理想运放的概念和特点。然后重点介绍集成运放的实际应用电路和分析方法。最后介绍直流稳压电源和集成稳压电路的应用。

### 6.1 集成运算放大电路的特点和基本组成

#### 6.1.1 集成运算放大电路的特点

集成电路简称 IC(Integrated Circuit), 是 20 世纪 60 年代初期发展起来的一种半导体器件, 它是在半导体制造工艺的基础上将各种元器件和连线等集成在一片硅片上面制成的, 因此密度高、引线短、外部接线大为减少, 从而提高了电子设备的可靠性和灵活性, 同时降低了成本, 为电子技术的应用开辟了一个新的时代。

集成电路按其功能的不同, 可以分为数字集成电路(输入量和输出量为高、低两种电平且具有一定逻辑关系的电路)和模拟集成电路(数字集成电路以外的集成电路统称为模拟集成电路); 按模拟集成电路的类型来分, 则又有集成运算放大器、集成功率放大器、集成高频放大器、集成中频放大器、集成比较器、集成乘法器、集成稳压器、集成数/模和模/数转换器以及集成锁相环等; 按构成有源器件的类型来分, 则有双极型和单极型(场效应管)等。

制造集成电路时, 要在硅片上经过氧化、光刻、扩散、外延、蒸发等工艺过程, 把晶体管、电阻等电路元器件和它们之间的连线全部集成在同一块半导体基片上, 最后再进行封装, 做成一个完整的电路。集成电路的外形通常有 3 种: 双列直插式、圆壳式和扁平式, 如图 6-1 所示。

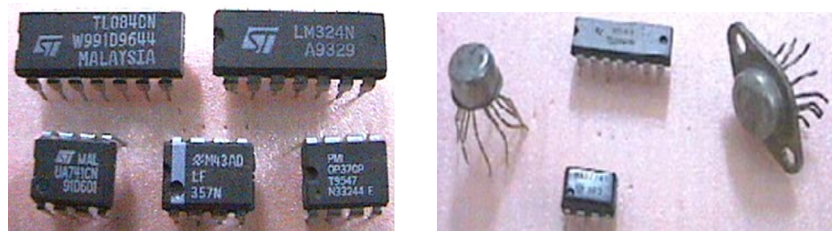


图 6-1 各种集成运算放大器

与分立元件组成的放大电路相比, 它具有以下几方面的特点:

(1) 由集成电路工艺制造出来的元器件, 虽然其参数的精度不是很高, 受温度的影响也比较大, 但由于各有关元器件都同处在一个硅片上, 距离又非常接近, 因此对称性较好, 适用

于构成差分放大电路。

(2) 由集成电路工艺制造出来的电阻，其阻值范围有一定的局限性，一般在几十欧到几十千欧之间，因此在需要很高阻值的电阻时，就要在电路上另想办法。

(3) 在集成电路中，制造三极管，特别是 NPN 型三极管往往比制造电阻、电容等无源器件更加方便，占用更少的芯片面积，因而成本更低廉。所以在集成放大电路中，常常用三极管代替电阻，尤其是大电阻。

(4) 集成电路工艺不适于制造几十皮法以上的电容器，至于电感器就更困难。因此放大级之间通常都采用直接耦合方式，而不采用阻容耦合方式。

(5) 直接耦合放大电路中，经常遇到既有 NPN 又有 PNP 管的情况，但在单片集成电路中，一般情况下 PNP 管只能做成横向的，此时它的  $\beta$  值比较小 ( $\leq 10$ )，而不能像分立器件那样，使 NPN 和 PNP 管的特性匹配得比较接近。在分析时，横向 PNP 管的  $\beta + 1$  和  $\beta$  值差别比较大。

总的来说，集成运放和分立器件的直接耦合放大电路虽然在工作原理上基本相同，但由于上述原因，在电路的结构形式上二者将有较大的差别。

### 6.1.2 集成运放的基本组成部分

从原理上说，集成运算放大电路实质上是一个具有高放大倍数的多级直接耦合放大电路。它的内部通常包含 4 个基本组成部分，即输入级、中间级、输出级和偏置电路，其框图如图 6-2 所示。

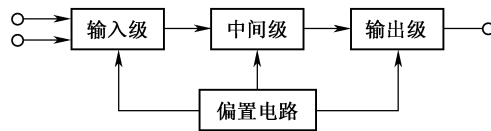


图 6-2 集成运算放大器原理框图

下面就其内电路分别进行介绍。

#### 1. 偏置电路

偏置电路的作用是向各放大级提供合适的偏置电流，确定各级静态工作点。各个放大级对偏置电流的要求各不相同。对于输入级，通常要求提供一个比较小（一般为微安级）的偏置电流，而且应该非常稳定，以便提高集成运放的输入电阻，降低输入偏置电流、输入失调电流及其温漂等。

#### 2. 差分放大输入级

集成运放的输入级对于它的许多指标，如输入电阻、共模输入电压、差模输入电压和共模抑制比等，起着决定性的作用，因此是提高集成运放质量的关键。

为了发挥集成电路内部元件参数匹配较好、易于补偿的优点，输入级大都采用差分放大电路的形式。差分放大电路常见的形式有 3 种：基本形式、电阻长尾式和恒流源式。

#### 3. 中间级

中间级的主要任务是提供足够大的电压放大倍数。从这个目标出发，不仅要求中间级本身具有较高的电压增益，同时为了减少对前级的影响，还应具有较高的输入电阻。尤其当输入

级采用有源负载时，输入电阻问题更为重要，否则将使输入级的电压增益大为下降，失去了有源负载的优点。另外，中间级还应向输出级提供较大的推动电流，并能根据需要实现单端输入至差分输出或差分输入至单端输出的转换。

为了提高电压放大倍数，集成运放的中间级经常利用三极管作为有源负载。另外，中间级的放大管有时采用复合管的结构形式。

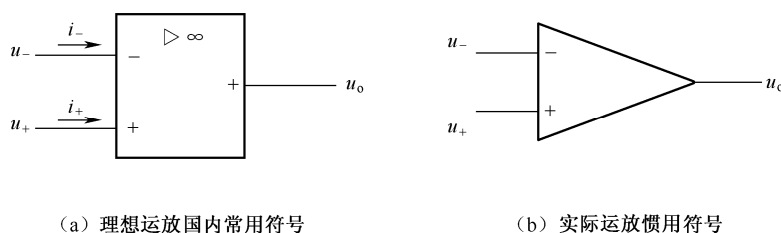
#### 4. 输出级

集成运放输出级的主要作用是提供足够的输出功率以满足负载的需要，同时还应具有较低的输出电阻以便增强带负载能力，也应有较高的输入电阻，以免影响前级的电压放大倍数。一般不要求输出级提供很高的电压放大倍数。由于输出级工作在大信号状态，应设法尽可能减小输出波形的失真。此外，输出级应有过载保护措施，以防输出端意外或负载电流过大而烧毁功率管。集成运放的输出级基本上都采用互补对称电路。

## 6.2 理想运算放大器

集成运放的输入级通常由差分放大电路组成，它具有两个输入端和一个输出端，还有用于连接电源等的引出端。两个输入端中，一个与输出端为反相关系，称为反相输入端；另一个与输出端为同相关系，称为同相输入端。

图 6-3 所示是运算放大器的电路符号。



(a) 理想运放国内常用符号

(b) 实际运放惯用符号

图 6-3 集成运放电路符号

### 6.2.1 集成运放的主要技术指标

为了描述集成运放的性能，提出了许多项技术指标，下面介绍常用的几项。

#### 1. 开环差模电压增益 $A_{od}$

$A_{od}$  是指运放在无外加反馈情况下的差模电压增益，一般用以 10 为底的对数表示，单位为分贝。它的定义是

$$A_{od} = 20 \lg \left| \frac{\Delta U_o}{\Delta U_- - \Delta U_+} \right|$$

$A_{od}$  是决定运放精度的重要因素，理想情况下希望  $A_{od}$  为无穷大。实际集成运放一般  $A_{od}$  在 100dB 以上，高质量的集成运放  $A_{od}$  可达 160dB 以上。

#### 2. 差模输入电阻 $r_{id}$

它的定义是差模输入电压  $U_{id}$  与相应的输入电流  $I_{id}$  的变化量之比，即

$$r_{id} = \frac{\Delta U_{id}}{\Delta I_{id}}$$

用以衡量集成运放向信号源索取电流的大小。一般集成运放的差模输入电阻为几兆欧，以场效应管作为输入级的集成运放，国产的高输入阻抗的集成运放  $r_{id}$  可达  $10^6 \text{M}\Omega$ 。

### 3. 共模抑制比 $K_{CMR}$

共模抑制比的定义是开环差模电压增益与开环共模电压增益之比，一般也用对数表示，即

$$K_{CMR} = 20 \lg \left| \frac{A_{od}}{A_{oc}} \right|$$

这个指标用以衡量集成运放抑制温漂的能力。多数集成运放的共模抑制比在 80dB 以上，高质量的可达 160dB。

### 4. 输出电阻 $r_o$

是指集成运放在开环状态下的动态输出电阻。它表征集成运放的带负载能力， $r_o$  越小，带负载能力越强。它的数值一般在几十欧至几百欧（CF741 的  $r_o=75\Omega$ ）。

## 6.2.2 理想运算放大器及特点

### 1. 理想运放的技术指标

在分析集成运放的各种应用电路时，常常将其中的集成运放看成是一个理想运算放大器。所谓理想运放就是将集成运放的各项技术指标理想化，即认为集成运放常用的各项指标为：

- (1) 开环差模电压增益  $A_{od} = \infty$ 。
- (2) 差模输入电阻  $r_{id} = \infty$ 。
- (3) 输出电阻  $r_o = 0$ 。
- (4) 共模抑制比  $K_{CMR} = \infty$ 。

实际的集成运算放大器当然不可能达到上述理想化的技术指标。但是，由于集成运放工艺水平的不断改进，集成运放产品的各项性能指标越来越好。因此，一般情况下，在分析估算集成运放的应用电路时，将实际运放视为理想运放所造成的误差在工程上是允许的。

在分析运放应用电路的工作原理时，运用理想运放的概念有利于抓住事物的本质，忽略次要因素，从而简化分析的过程。

### 2. 理想运放工作在线性区时的特点

在各种应用电路中，集成运放的工作范围有两种情况：工作在线性区和工作在非线性区。当工作在线性区时，集成运放的输出电压与其两个输入端的电压之间存在着线性放大关系，即

$$u_o = A_{od}(u_+ - u_-) \quad (6-1)$$

式中  $u_o$  是集成运放的输出端电压， $u_+$  和  $u_-$  分别是其同相输入端和反相输入端电压， $A_{od}$  是其开环差模电压增益。

理想运放工作在线性区时有两个重要结论：

- (1) 理想运放的差模输入电压等于 0。

由于运放工作在线性区，故输出、输入之间符合式 (6-1) 所示的关系式。而且，因理想

运放的  $A_{od} = \infty$ ，所以由式 (6-1) 可得

$$u_+ - u_- = \frac{u_o}{A_{od}} = 0$$

$$\text{即} \quad u_+ = u_- \quad (6-2)$$

上式表示运放同相输入端与反相输入端两点的电压相等，如同将该两点短路一样。但是该两点实际上并未真正被短路，只是表面上似乎短路，因而是虚假的短路，所以将这种现象称为“虚短”。

实际的集成运放  $A_{od} \neq \infty$ ，因此  $u_+$  和  $u_-$  不可能完全相等。但是当  $A_{od}$  足够大时，集成运放的差模输入电压 ( $u_+ - u_-$ ) 的值很小，与电路中其他电压相比，可以忽略不计。

(2) 理想运放的输入电流等于 0。

由于理想运放的差模输入电阻  $r_{id} = \infty$ ，因此在其两个输入端均没有电流，即在图 6-3 (a) 中有

$$i_+ = i_- = 0 \quad (6-3)$$

此时，运放的同相输入端和反相输入端的电流都等于 0，如同该两点被断开一样，这种现象称为“虚断”。

“虚短”和“虚断”是理想运放工作在线性区时的两点重要结论。这两点重要结论常常作为今后分析许多运放应用电路的出发点，因此必须牢牢掌握。

### 3. 理想运放工作在线性区时的特点

如果运放的工作信号超出了线性放大的范围，则输出电压不再随着输入电压线性增长，而将达到饱和，集成运放的传输特性如图 6-4 所示。

理想运放工作在线性区时，也有两个重要的特点：

(1) 理想运放的输出电压  $u_o$  的值只有两种可能：或等于运放的正向最大输出电压  $+U_{OM}$ ，或等于其负向最大输出电压  $-U_{OM}$ ，如图 6-4 中的实线所示。

当  $u_+ > u_-$  时， $u_o = +U_{OM}$ 。

当  $u_+ < u_-$  时， $u_o = -U_{OM}$ 。

在非线性区内，运放的差模输入电压 ( $u_+ - u_-$ ) 可能很大，即  $u_+ \neq u_-$ 。也就是说，此时“虚短”现象不复存在。

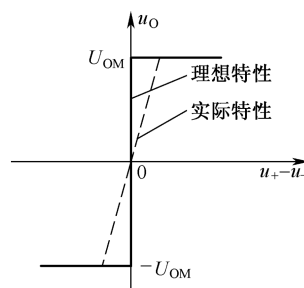


图 6-4 集成运放的传输特性

(2) 理想运放的输入电流等于 0。

在非线性区，虽然运放两个输入端的电压不等，即  $u_+ \neq u_-$ ，但因为理想运放的  $r_{id} = \infty$ ，故仍认为此时的输入电流等于 0，即  $i_+ = i_- = 0$ 。

理想运放工作在线性区或非线性区时，各有不同的特点，因此在分析各种应用电路时，首先必须判断集成运放究竟工作在哪个区域。当集成运放工作在线性区时，一般在电路中引入深度负反馈，以保证放大电路稳定工作。

### 6.2.3 运放应用电路的分析步骤

上面全面介绍了理想运放工作在线性区和非线性区的不同特点，对于实际运放应用电路的分析和计算，可以归纳为以下 3 步：

(1) 将实际运放作为理想运放看待，这就抓住了主要矛盾，实际运放就具有了理想运放的特点。

(2) 判断集成运放是工作在线性放大区还是非线性放大区。线性放大电路中往往加负反馈以保证稳定工作，而非线性放大电路中往往加正反馈以加速输出状态的转换。

(3) 对工作在线性放大区的集成运放电路，可运用其两个重要结论进行分析，列电路方程求解；对工作在非线性区的集成运放电路，也可运用非线性的两个特点进行分析和计算。

### 6.3 集成运放在线性区的应用

集成放大器最早应用于模拟信号的运算，故称为集成运算放大器，它是集成运算的一个极其重要的应用领域。在各种运算电路中，要求输出和输入的模拟信号之间实现一定的数学运算关系，因此运算电路中的集成运放必须工作在线性区。

下面介绍几种应用最多的线性区集成运算放大电路。

#### 6.3.1 反相比例运算电路

电路如图 6-5 所示。

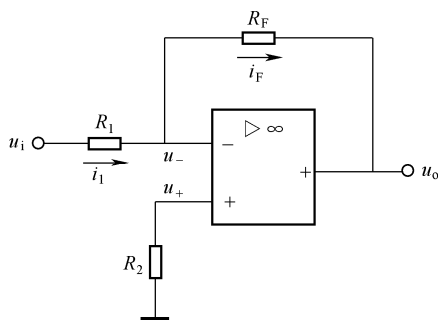


图 6-5 反相比例运算电路

输入电压  $u_i$  经  $R_1$  加到集成运放的反相输入端，其同相输入端经电阻  $R_2$  接地。输出电压  $u_o$  经  $R_F$  接回到反相输入端。集成运放的反相输入端和同相输入端实际上是运放内部输入级两个差分对管的基极。

为使差动放大电路的参数保持对称，应使两个差分对管基极对地的电阻尽量一致，以免静态基流流过这两个电阻时，在运放输入端产生附加的偏差电压。因此，通常选择  $R_2$  的阻值为  $R_2 = R_1 // R_F$ （常称  $R_2$  为平衡电阻）。

经过分析， $R_F$  为反馈支路，反相比例运算电路中反馈的组态是电压并联负反馈。由于集成运放的开环差模增益很高，很容易满足深度负反馈的条件，故认为集成运放工作在线性区。因此，可以利用理想运放工作在线性区时“虚短”和“虚断”的特点来分析反相比例运算电路的电压放大倍数。

在图 6-5 中，由于“虚断”，故  $i_+ = 0$ ，即  $R_2$  上没有压降，可得

$$u_- = u_+ = 0$$

上式说明在反相比例运算电路中，集成运放的反相输入端与同相输入端两点的电位不仅

相等，而且均等于 0，如同该两点接地一样，这种现象称为“虚地”。“虚地”是反相比例运算电路的一个重要特点。

由于  $i_- = 0$ ，则由图 6-5 可见

$$\text{即} \quad \frac{u_i - u_-}{R_1} = \frac{u_- - u_o}{R_F}$$

上式中  $u_- = 0$ ，由此可以求得反相比例运算电路的电压放大倍数为

$$A_{\text{uf}} = \frac{u_o}{u_i} = -\frac{R_F}{R_1} \quad (6-4)$$

下面分析反相比例运算电路的输入电阻。因为反相输入端“虚地”，显而易见，电路的输入电阻  $R_{\text{iF}} = R_1$ 。

综合以上分析，对反相比例运算电路可归纳得出以下几点结论：

(1) 反相比例运算电路实际上是一个深度的电压并联负反馈电路，在理想情况下，反相输入端的电位等于 0，称为“虚地”。因此加在集成运放输入端的共模输入端电压很小。

(2) 电压放大倍数  $A_{\text{uF}} = -\frac{R_F}{R_1}$ ，即输出电压与输入电压的幅值成正比，但相位相反。也就是说，电路实现了反相比例运算。比值  $|A_{\text{uF}}|$  决定于电阻  $R_F$  和  $R_1$  之比，而与集成运放内部各项参数无关。只要  $R_F$  和  $R_1$  的阻值比较准确而稳定，就可以得到准确的比例运算关系。

(3) 由于引入了深度电压并联负反馈，因此电路的输入电阻不高，输出电阻很低。

### 6.3.2 同相比例运算电路

在图 6-6 中，输入电压  $u_i$  接至同相输入端，但是为保证引入的是负反馈，输出电压  $u_o$  通过电阻  $R_F$  仍接到反相输入端，同时，反相输入端通过电阻  $R_1$  接地。为了使集成运放反相输入端和同相输入端对地的电阻一致， $R_2$  的阻值仍为：

$$R_2 = R_1 // R_F$$

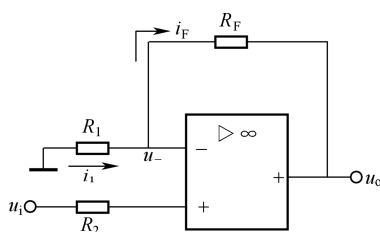


图 6-6 同相比例运算电路

同相比例运算电路中反馈的组态为电压串联负反馈，同样可以利用理想运放工作在线性区时的两个特点来分析其电压放大倍数。在图 6-6 中，根据“虚短”和“虚断”的特点可知：

$$\text{故} \quad \begin{aligned} i_- = i_+ &= 0 \\ u_- &= \frac{R_1}{R_1 + R_F} u_o \end{aligned}$$

而且

$$u_- = u_+ = u_i$$

由以上二式可得

$$\frac{R_1}{R_1 + R_F} u_o = u_i$$

则同相比例运算电路的电压放大倍数为

$$A_{uF} = \frac{u_o}{u_i} = 1 + \frac{R_F}{R_1} \quad (6-5)$$

由于引入了电压串联负反馈，因此能够提高输入电阻，而且提高的程度与负反馈深度有关。在理想运放条件下，即认为  $A_{od} \rightarrow \infty$ ， $R_{id} \rightarrow \infty$ ，则同相比例运算电路的输入电阻  $R_{iF} \rightarrow \infty$ 。

由式(6-5)可知，同相比例运算电路的电压放大倍数总是大于或等于1。

当  $R_F = 0$  或  $R_1 = \infty$  时， $A_{uF} = 1$ ，此时电路如图6-7所示，由图可得

$$u_+ = u_i, \quad u_- = u_o$$

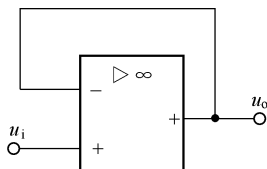


图6-7 电压跟随器

由于“虚短”，即  $u_- = u_+$ ，故  $u_o = u_i$ ，则电压放大倍数为

$$A_{uF} = \frac{u_o}{u_i} = 1 \quad (6-6)$$

由于这种电路的输出电压与输入电压不仅幅值相等，而且相位也相同，二者之间是一种“跟随”关系，所以又称为电压跟随器。

综上所述，对同相比例运算电路可以得到以下几点结论：

(1) 同相比例运算放大电路是一个深度电压串联负反馈电路。因为  $u_- = u_+ = u_i$ （同相端口没有接地），所以不存在“虚地”现象，在选用集成运放时要考虑到其输入端可能具有较高的共模输入电压。

(2) 电压放大倍数  $A_{uF} = 1 + \frac{R_F}{R_1}$ ，即输出电压与输入电压的幅值成正比，且相位相同，也就是说，电路实现了同相比例运算。 $A_{uF}$  也只取决于电阻  $R_F$  和  $R_1$  之比，而与集成运放的内部参数无关，所以比例运算的精度和稳定性主要取决于电阻  $R_F$  和  $R_1$  的精确度和稳定度。一般情况下， $A_{uF}$  值恒大于1。当  $R_F = 0$  和  $R_1 = \infty$  时， $A_{uF} = 1$ ，这种电路称为电压跟随器。

(3) 由于引入了深度电压串联负反馈，因此电路的输入电阻很高，输出电阻很低。

### 6.3.3 差分比例运算电路（减法运算电路）

在图6-8中，输入电压  $u_i$  和  $u_i'$  分别加在集成运放的反相输入端和同相输入端，从输出端通过反馈电阻  $R_F$  接回到反相输入端。为了保证运放两个输入端对地的电阻平衡，同时为了避免降低共模抑制比，通常要求  $R_1 = R_1'$ ， $R_F = R_F'$ ，在理想条件下，由于“虚断”， $i_+ = i_- = 0$ ，



利用式（6-4）、（6-5）和叠加定理可以求得输出信号电压的电位为

$$u_o = \left(1 + \frac{R_F}{R_1}\right) u_+ - \frac{R_F}{R_1} u_{i1} \quad (6-7)$$

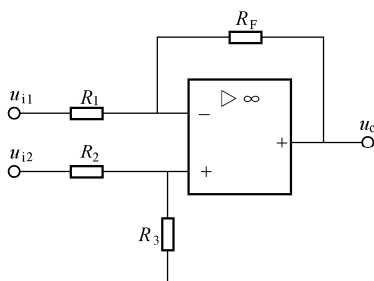


图 6-8 差分比例运算电路

由于同相输入端的电位（净输入信号）为

$$u_+ = \frac{R_3}{R_2 + R_3} u_{i2}$$

代入式（6-7），即得电路输出为

$$u_o = \left(1 + \frac{R_F}{R_1}\right) \left(\frac{R_3}{R_2 + R_3}\right) u_{i2} - \frac{R_F}{R_1} u_{i1}$$

当满足条件  $R_1 = R_2$ ,  $R_F = R_3$  时，整理上式，可以求得差分比例运算电路的输出电压和电压放大倍数为

$$u_o = \frac{R_F}{R_1} (u_{i2} - u_{i1}) \quad (6-8)$$

$$A_{uF} = \frac{u_o}{u_{i1} - u_{i2}} = -\frac{R_F}{R_1} \quad (6-9)$$

在电路元件参数对称的条件下，差分比例运算电路的差模输入电阻为  $R_{iF} = 2R_1$ 。

由式（6-8）可知，电路的输出电压与两个输入电压之差成正比，实现了差分比例运算（减法运算），其比值  $|A_{uF}|$  同样决定于电阻  $R_F$  和  $R_1$  之比，而与集成运放内部参数无关。由以上分析还可以知道，差分比例运算电路中集成运放的反相输入端和同相输入端可能加有较高的共模输入电压，电路中不存在“虚地”现象。

差分比例运算电路除了可以进行减法运算以外，还经常被作为测量放大器。

### 6.3.4 反相输入求和电路

求和电路的输出量反映多个模拟输入量相加的结果。用运放实现求和运算时，用得最多的电路是反相输入求和电路，下面介绍这种电路，电路图如图 6-9 所示。

为了保证集成运放两个输入端对地的电阻平衡，同相输入端电阻  $R'$  的阻值应为：

$$R' = R_1 // R_2 // R_F$$

由于“虚断”， $i_- = 0$ ，因此

$$i_1 + i_2 = i_F$$

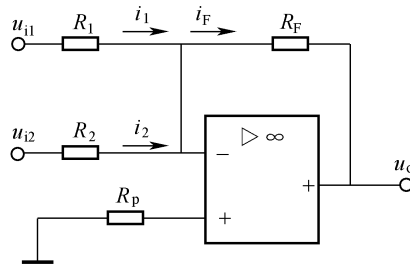


图 6-9 反相输入求和电路

又因集成运放的反相输入端“虚地”，故上式可写为

$$\frac{u_{i1}}{R_1} + \frac{u_{i2}}{R_2} = -\frac{u_o}{R_F}$$

则输出电压为

$$u_o = -\left(\frac{R_F}{R_1}u_{i1} + \frac{R_F}{R_2}u_{i2}\right) \quad (6-10)$$

可见，电路的输出电压  $u_o$  反映了输入电压  $u_{i1}$ 、 $u_{i2}$  相加所得的结果，即电路能够实现求和运算。如果电路中电阻的阻值满足关系  $R_1 = R_2 = R$ ，则上式成为

$$u_o = -\frac{R_F}{R}(u_{i1} + u_{i2}) \quad (6-11)$$

当然，按照同样的原则，可以将求和电路的输入端扩充到 3 个以上，电路的分析方法是相同的。

通过上面的分析可以看出，反相输入求和电路的实质是利用“虚地”和“虚断”的特点，通过各路输入电流相加的方法来实现输入电压的相加。这种反相输入电路的优点是，当改变某一输入回路的电阻时，仅仅改变输出电压与该路输入电压之间的比例关系，对其他各路没有影响，因此调节比较灵活方便。另外，由于“虚地”，因此，加在集成运放输入端的共模电压很小。

**【例 6-1】**假设图 6-10 所示电路中的集成运放均为理想运放，试求输出电压  $u_{o1}$ 、 $u_{o2}$  和  $u_o$ 。

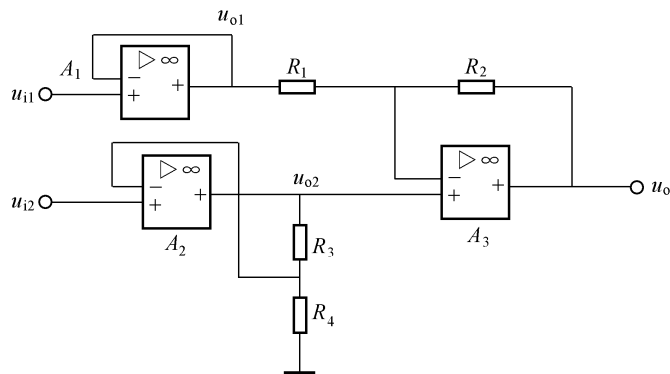


图 6-10 例 6-1 电路图

**【方法点拨】** 电路中共有 3 个集成运放，解答本题的关键有两点：①分清 3 个集成运放的电路组态；②分析好  $A_2$  的电路结构。

(1) 分析 3 个集成运放的电路组态。

$A_1$  为电压跟随器， $A_2$  为典型的同相输入比例电路，它的电路画法和原理图不同，图 6-10 中的  $R_3$  相当于  $R_F$ ， $R_4$  相当于标准接法的  $R_1$ ，看清楚电路的这种结构至关重要， $A_3$  为差分输入比例电路（减法运算电路）。

(2) 运用前面介绍过的集成运放基本公式，列方程求解。

解：因为  $u_{o1} = u_{i1}$  ( $A_1$  是电压跟随器)

对  $A_2$  有  $u_{o2} = \left(1 + \frac{R_3}{R_4}\right) u_{i2}$  (同相输入比例电路)

$A_3$  同相输入端的电压  $u_+ = u_{o2}$

集成运放  $A_3$  是减法电路，应用叠加原理，可看成是“同相电路”和“反相电路”的叠加，即

$$u_o = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) u_{o2} - \frac{R_2}{R_1} u_{o1}$$

将  $u_{o1}$  和  $u_{o2}$  的结果代入上式，可得：

$$u_o = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \left(1 + \frac{R_3}{R_4}\right) u_{i2} - \frac{R_2}{R_1} u_{i1}$$

解毕！

**【例 6-2】** 设图 6-11 所示电路中的集成运放  $A_1$ 、 $A_2$  和  $A_3$  均为理想运放。

(1) 分析  $A_1$ 、 $A_2$  和  $A_3$  分别组成何种运算电路。

(2) 写出输出电压  $u_o$  的表达式。

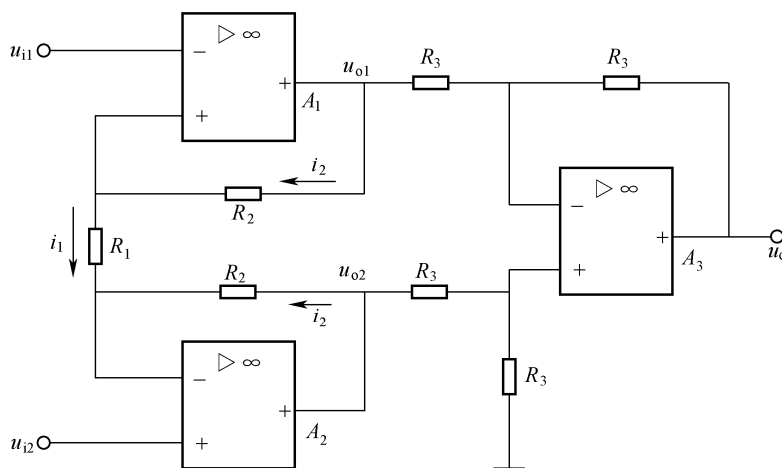


图 6-11 例 6-2 电路图

**解：** 本题电路所示为三运放构成的测量放大器原理图。测量放大器，又称精密放大器或仪用放大器，用于对传感器输出的微弱信号在共模环境下精确地放大，因而要求放大电路具

有高增益、高输入电阻和高共模抑制比；测量放大器的应用非常广泛，目前已有单片集成芯片产品。

图中  $A_1$ 、 $A_2$  为对称性很好的集成运放，由于采用同相输入，构成了串联负反馈，因而输入电阻极高。 $A_3$  接成减法运算电路，采用差动输入，变双端输入为单端输出，可以抑制共模信号。 $A_1$ 、 $A_2$  构成第一级，根据集成运放线性应用的特点可知，电阻  $R_1$  中由差动信号产生的电流为

$$i_1 = \frac{u_{i1} - u_{i2}}{R_1}$$

$R_1$  两端电位因“虚短”各为  $u_{i1}$ 、 $u_{i2}$ ，故流经  $R_2$  的电流因“虚断”也为  $i_1$ ，故有

$$u_{o1} - u_{o2} = i_1(R_1 + R_2 + R_2) = \frac{R_1 + 2R_2}{R_1}(u_{i1} - u_{i2})$$

$A_3$  为第二级，其输入分别为  $u_{o1}$ 、 $u_{o2}$ ，由减法运算公式可得  $A_3$  的输出  $u_o$  为

$$u_o = u_{o2} - u_{o1} = -\frac{R_1 + 2R_2}{R_1}(u_{i1} - u_{i2})$$

## 6.4 直流稳压电源的组成及工作原理

电子设备中所用的直流电源通常是将电网提供的 50Hz 交流电经过整流、滤波和稳压以后得到的。对于直流电源主要要求是：输出电压的幅值稳定，即当电网电压或负载电流波动时能保持输出电压不变；直流输出电压平滑，脉动成分小；交流电变换成直流电时的转换效率要高。

### 6.4.1 直流稳压电源的组成

小功率直流稳压电源通常由电源变压器、整流电路、滤波电路和稳压电路 4 部分组成，其原理方框图如图 6-12 所示。

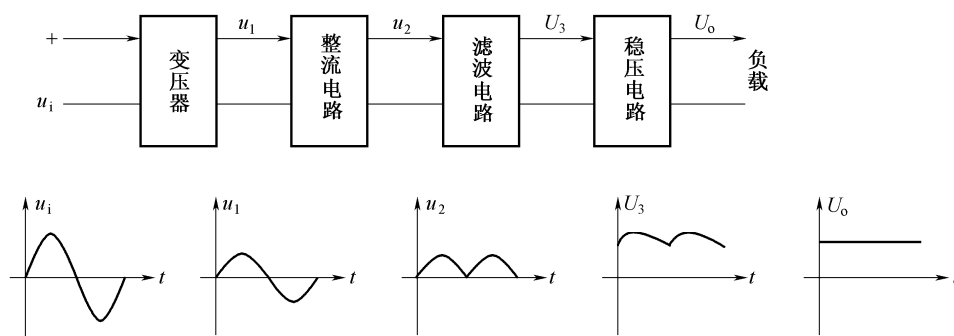


图 6-12 直流稳压电路组成方框图

各部分的作用是：

- (1) 变压器：将电网 220V 交流电变换成合适的副边交流电压  $u_2$ 。
- (2) 整流电路：利用二极管的单向导电性将交流电变换成脉动直流电。在直流电源中，

常采用单相桥式整流电路，第4章已经介绍了其工作原理。

(3) 滤波电路：利用电容或电感等元件的作用，将脉动直流电整形为较平滑的直流电压或电流。

(4) 由于交流电网一般允许有 $\pm 10\%$ 的波动，或者当负载变化时输出电压也将随之变化，所以还需要稳压电路。稳压电路的作用是能自动维持直流输出电压的稳定。

### 6.4.2 滤波电路

整流电路的输出电压都含有较大的脉动成分。除了在一些特殊的场合可以直接用作放大器的电源外，通常都要采取一定的措施，一方面尽量降低输出电压中的脉动成分，另一方面又要尽量保留其中的直流成分，使输出电压接近于理想的直流电压。这样的措施就是滤波。

电容和电感都是基本的滤波元件，利用它们在二极管导电时储存一部分能量，然后再逐渐释放出来，从而得到比较平滑的波形。由于电容滤波电路结构简单、成本低、体积小、重量轻，因而得到广泛应用。

为了便于说明工作原理，我们来分析图6-13所示的桥式整流、电容滤波电路。

在负载电阻 $R_L$ 上并联一个电容为什么能起滤波作用呢？没有接电容时，整流二极管 $VD_1$ 、 $VD_3$ 在 $u_2$ 的正半周导电，负半周时 $VD_2$ 、 $VD_4$ 导电，输出电压 $u_o$ 的波形如图6-13(b)中的上图所示。并联电容以后，在 $u_2$ 的正半周，当二极管 $VD_1$ 、 $VD_3$ 导电时，由图6-13(a)可见，二极管导电时，除了有一个电流 $i_o$ 流向负载外，同时还有一个电流 $i_C$ 向电容充电，电容电压 $u_C$ 的极性为上正下负。如果忽略二极管的内阻，则在二极管导通时， $u_C$ （即输出电压 $u_o$ ）等于变压器副边电压 $u_2$ 。当 $u_2$ 达到最大值以后开始下降，此时电容上的电压 $u_C$ 也将由于放电而逐渐下降。当 $u_2 < u_C$ 时，二极管 $VD_1$ 、 $VD_3$ 被反相偏置，因而不导电，于是 $u_C$ 以一定的时间常数按指数规律下降，直到下一个半周，当 $|u_2| > u_C$ 时，二极管 $VD_2$ 、 $VD_4$ 导通。输出电压 $u_o$ 的波形如图6-13(b)所示。

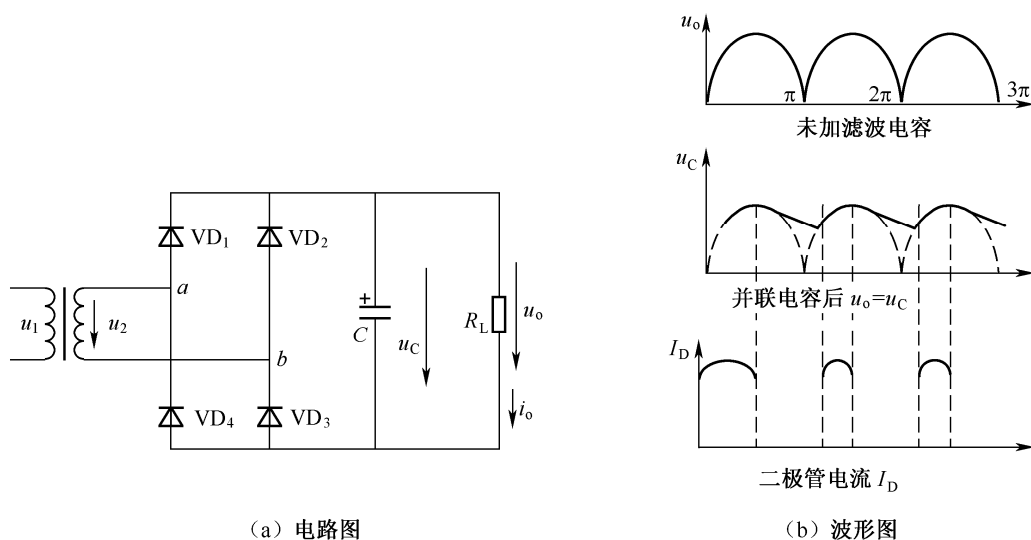


图 6-13 桥式整流、电容滤波电路

根据以上分析,对于电容滤波可以得到以下几个结论:

(1) 加了电容滤波以后,输出电压的直流成分提高了。如在桥式整流电路中,当不接电容时,输出电压成为半个正弦波的形状,如图 6-13 (b) 中的虚线所示。在  $R_L$  上并联电容以后,当二极管截止时,由于电容通过  $R_L$  放电,输出电压仍较高,因此输出电压的平均提高了。从图 6-13 (b) 看出,加上电容滤波以后,  $u_o$  波形包围的面积显然比原来虚线部分包围的面积增大了。

(2) 加了电容滤波以后,输出电压中的脉动成分降低了。这是由于电容的储能作用造成的。当二极管导电时,电容被充电,将能量储存起来,然后再逐渐放电,把能量传送给负载,因此输出波形比较平滑。由图 6-13 (b) 也可以看出,  $u_o$  的波形比虚线部分的输出波形脉动成分减少了,达到了滤波的目的。

(3) 电容放电的时间常数  $\tau = R_L C$  越大,放电过程越慢,则输出电压越高,同时脉动成分也越少,即滤波效果越好。由图 6-14 可见,当  $R_L C = \infty$  (可以认为负载开路) 时,输出电压的平均值  $U_{o(AV)} = \sqrt{2}U_2$ , 脉动系数  $S = 0$ 。为此,应选择大容量的电容作为滤波电容,而且要求  $R_L$  也大,因此,电容滤波适用于负载电流比较小的场合。

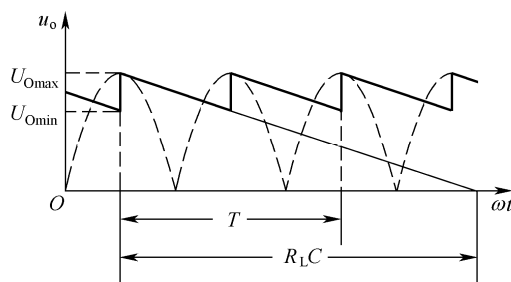


图 6-14  $R_L C$  变化对电容滤波  $u_o$  的影响

(4) 由图 6-15 可以看出,电容滤波电路的输出直流电压  $U_{o(AV)}$  将随着输出直流电流  $I_{o(AV)}$  而变化。当负载开路,即  $I_{o(AV)} = 0$  ( $R_L = \infty$ )

时,电容充电到  $U_2$  的最大值以后不再放电,则输出的直流电压  $U_{o(AV)} = \sqrt{2}U_2$ 。当  $I_{o(AV)}$  增大(即  $R_L$  减小)时,由于电容放电过程加快而使  $U_{o(AV)}$  下降。如果忽略整流电路的内阻,桥式整流加电容滤波电路后,其  $U_{o(AV)}$  值的变化范围为  $\sqrt{2}U_2 \sim 0.9U_2$ 。若考虑电流在二极管和变压器等效内阻上的降落,则  $U_{o(AV)}$  值更低。输出电压  $U_{o(AV)}$  与输出电流  $I_{o(AV)}$  之间的关系曲线称为电路的外特性。电容滤波电路的输出电压下降很快,即它的外特性比较软,所以电容滤波适用于负载电流变化不大的场合。

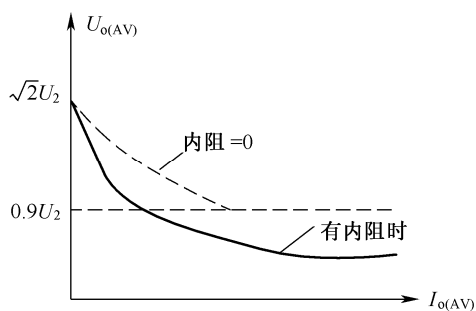


图 6-15 电容滤波电路外特性

电容滤波电路的输出电压下降很快,即它的外特性比较软,所以电容滤波适用于负载电流变化不大的场合。

(5) 接入电容以后,整流二极管的导电时间缩短了。二极管的导电角小于  $180^\circ$ , 而且电

容放电时间常数越大，则导电角越小。由于加了电容滤波以后，平均输出电流比原来提高了，而导电角却减小了，因此，整流管在短暂的导电时间内流过一个很大的冲击电流，对管子的寿命不利，所以必须选择较大容量的整流二极管。

为了得到比较好的滤波效果，在实际工作中经常根据式（6-12）来选择滤波电容的容量：

$$R_L C \geq (3 \sim 5) \frac{T}{2} \quad (6-12)$$

其中  $T$  为电网交流电压的周期。由于电容值比较大，约几十至几千微法，一般选用电解电容器。接入电路时，注意电容的极性不要接反。电容器的耐压值应该大于  $\sqrt{2}U_2$ 。

当滤波电容的容值满足式（6-12）时，可以认为输出直流电压近似为

$$U_{o(AV)} \approx 1.2U_2 \quad (6-13)$$

**【例 6-3】**单相整流电容滤波电路如图 6-13（a）所示，已知电网电压为 220V，交流电压频率为 50Hz，要求直流电压  $U_o$  为 30V，负载电流为 100mA。试求：（1）变压器次级电压有效值  $U_2$ ；（2）整流二极管的主要参数；（3）选择滤波电容器。

**解：**本题的分析涉及整流电路的知识和滤波电路的知识，在实际电路设计中有重要意义。

（1）变压器次级电压有效值  $U_2$  的求解。

由于  $U_o \approx 1.2U_2$ ，得：

$$U_2 = \frac{U_o}{1.2} = \frac{30}{1.2} = 25 \text{ (V)}$$

（2）二极管的主要参数。在滤波电路中，为了整流管的安全，一般选择二极管的最大整流电流：

$$I_F \geq (2 \sim 3)I_D = (2 \sim 3) \times \frac{1}{2}I_o = (2 \sim 3) \times \frac{1}{2} \times \frac{U_o}{R_L} = (2 \sim 3) \times \frac{1}{2} \times 100 = (2 \sim 3) \times 50 \text{ (mA)}$$

二极管的最大反向电压  $U_{RM} \geq \sqrt{2}U_2 = \sqrt{2} \times 25 \approx 35 \text{ (V)}$ 。

（3）滤波电容器的选择。

$$\text{确定负载电阻： } R_L = \frac{U_o}{I_o} = \frac{30(\text{V})}{100(\text{mA})} = 300 \text{ (}\Omega\text{)}$$

由于  $R_L C \geq (3 \sim 5) \frac{T}{2}$ ，而  $T = \frac{1}{f} = \frac{1}{50} = 0.02 \text{ (s)}$ ，若取  $R_L C = 4 \cdot \frac{T}{2}$ ，于是可求得：

$$C = 4 \times \frac{0.02}{2 \times 300} \approx 133 \text{ (}\mu\text{F)}$$

在实际使用中，若考虑电网电压  $\pm 10\%$  的波动，则电容器的耐压值为：

$$U_{CM} \geq \sqrt{2}U_2 \times 1.1 = 1.4 \times 25 \times 1.1 = 38.5 \text{ (V)}$$

于是可选标称值为 200 $\mu$ F/50V 的电解电容器。

### 6.4.3 串联型稳压电路

交流电压经过整流滤波后所获得的直流电压是不稳定的，当电网电压波动，负载和温度变化时，其直流电压的大小也将随着发生变化。这种变化会引起负载工作不稳定，甚至不能正常工作。因此，为使输出的直流电压基本保持恒定，应在整流滤波电路之后增加稳压电路。稳压电路的种类很多，常用的有稳压管稳压电路、三端集成稳压电路、串联型稳压电路以及开关

型稳压电路。由于稳压管稳压电路在第4章中已经介绍，这里不再赘述。下面介绍串联型稳压电路。

### 1. 串联型稳压电路的组成及工作原理

这种电路的设计思想可以用图6-16来说明，由于 $R_W$ 和 $R_L$ 是串联的，所以有 $U_i = U_o + U_{R_W}$ ，即 $U_o = U_i - U_{R_W}$ ，而 $U_{R_W}$ 和 $R_W$ 成正比，调节 $R_W$ 即可改变 $U_o$ 的数值。

图6-16在实用中不方便，于是想到用三极管的c、e极间电阻来替代 $R_W$ ， $R_{CE}$ 是可变电阻，它的阻值可通过控制基极电位来改变，于是将图6-16修改为图6-17，这个电路具有自动控制性能。

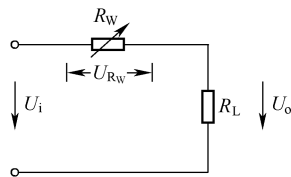


图 6-16 串联稳压原理 1

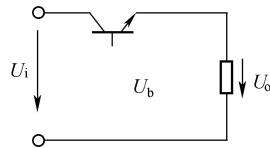


图 6-17 串联稳压原理 2

图6-18所示是串联型直流稳压电路。它由基准电压源、比较放大电路、调整电路和采样电路4部分组成。其中三极管VT接成射极输出器形式，称为调整管。因为调整管的c、e极之间可等效为电阻 $R_{CE}$ ，所以c、e极间的电压变化实质是等效电阻 $R_{CE}$ 的变化，由于 $R_{CE}$ 与负载 $R_L$ 相串联，用于调节输出电压 $U_o$ ，所以这种电路称为串联型直流稳压电路。

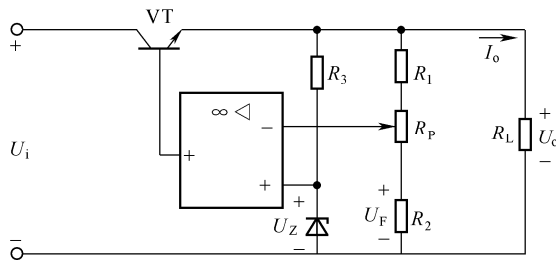


图 6-18 串联型直流稳压电路

电路包括4个组成部分：

#### (1) 采样电阻。

由电阻 $R_1$ 、 $R_2$ 、 $R_P$ 组成。当输出电压发生变化时，采样电阻取其变化量的一部分送到运算放大器的反相输入端。

#### (2) 比较放大电路。

运算放大器的作用是将稳压电路输出电压的变化量进行放大，然后再送到调整管的基极。如果运放的放大倍数比较大，则只要输出电压产生一点微小的变化，即能引起调整管的基极电压发生较大的变化，提高了稳压效果，因此放大倍数越大，则输出电压的稳定性越高。

#### (3) 基准电压。

基准电压由稳压二极管 $VD_Z$ 提供，接到运算放大器的同相输入端。采样电压与基准电压通过运放进行比较后，再将二者的差值进行放大。限流电阻 $R_3$ 的作用是保证 $VD_Z$ 有一个合适的工作电流。

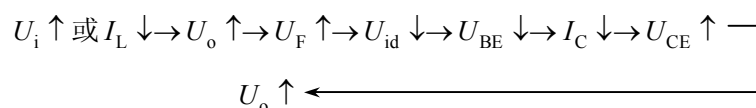


#### (4) 电压调整管。

调整管 VT 接在输入直流电压  $U_i$  和输出端的负载电阻  $R_L$  之间, 若输出电压  $U_o$  由于电网电压或负载电流波动而发生波动时, 其变化量经采样、比较、放大后送到调整管的基极, 使调整管的集-射电压  $U_{CE}$  也发生相应的变化, 最终调整输出电压使之基本保持稳定。

#### 2. 串联型直流稳压电路的稳压原理

假设由于  $U_i$  增大或  $I_L$  减小而导致输出电压  $U_o$  增大, 则通过采样以后反馈到运放的反相输入端的电压  $U_F$  也按比例地增大, 但其同相输入端的电压 (即基准电压  $U_Z$ ) 保持不变, 故放大电路的差模输入电压  $U_{id} = U_Z - U_F$  将减小, 于是运放的输出电压减小, 使调整管的基极输入电压  $U_{BE}$  减小, 则调整管的集电极电流  $I_C$  随之减小, 同时集电极电压  $U_{CE}$  增大, 结果使输出电压  $U_o$  保持基本不变。以上稳压过程可以用字符流程图表示如下:



由此看出, 串联型直流稳压的过程实质上是通过电压负反馈使输出电压保持基本稳定的过程。

#### 3. 输出电压的调节范围

串联型电路的一个优点是允许输出电压在一定范围内进行调节。这种调节可以通过改变采样电阻中电位器  $R_p$  的滑动端向上移动时, 反馈电压  $U_F$  增大, 放大电路的差模输入电压减小, 使调整管的  $U_{BE}$  减小, 则  $U_{CE}$  增大, 于是输出电压  $U_o$  减小。反之, 若  $R_p$  滑动端向下移动, 则  $U_o$  增大。输出电压总的调节范围与采样电阻  $R_1$ 、 $R_2$ 、 $R_p$  三者之间的比例关系及稳压管的稳压值  $U_Z$  有关。

在图 6-18 中, 假设运算放大电路 A 是理想运放, 且工作在线性区, 则可以认为其两个输入端“虚短”, 即  $U_+ = U_-$ , 在本电路中  $U_+ = U_Z$ ,  $U_- = U_F$ , 故  $U_Z = U_F$ , 而且两个输入端不取电流, 则由图 6-18 可得

$$U_Z = U_F = \frac{R_p'' + R_2}{R_1 + R_p + R_2} U_o$$

当  $R_p$  的滑动端调至最上端时,  $R_p' = 0$ ,  $R_p'' = R_p$ ,  $U_o$  达到最小值, 此时

$$U_{o\min} = \frac{R_1 + R_2 + R_p}{R_p'' + R_2} U_Z$$

而当  $R_p$  的滑动端调至最下端时,  $R_p' = R_p$ ,  $R_p'' = 0$ ,  $U_o$  达到最大值, 可得  $U_{o\max} = \frac{R_1 + R_2 + R_p}{R_2} U_Z$ 。

**【例 6-4】** 如图 6-18 所示, 已知基准电压  $U_Z = 6V$ , 三极管 VT 的饱和压降  $U_{CE(sat)} = 2V$ ,  $R_1 = R_2 = 300\Omega$ ,  $R_p = 200\Omega$ , 试确定:

(1) 稳压电路输出电压的调节范围。

(2) 变压器二次电压  $u_2$ 。

解:

(1) 根据串联型稳压电路的输出电压调节范围可求得:

$$U_{\text{omax}} \approx \frac{R_1 + R_2 + R_p}{R_2} U_Z = \frac{300 + 300 + 200}{300} \times 6 = 16 \text{ (V)}$$

$$U_{\text{omin}} \approx \frac{R_1 + R_2 + R_p}{R_2 + R_p} U_Z = \frac{300 + 300 + 200}{300 + 200} \times 6 = 9.6 \text{ (V)}$$

所以，输出电压的调节范围是 9.6~16V。

(2) 若忽略整流二极管的压降，则变压器二次电压  $u_2$  就是稳压电路的输入电压，即  $U_C$ ，又因为三极管的饱和压降  $U_{\text{CE(sat)}} = 2\text{V}$ ，要求稳压电路的输入电压至少为：

$$U_C = U_{\text{CE1}} + U_{\text{omax}} = U_{\text{CE(sat)}} + U_{\text{omax}} = 2 + 16 = 18 \text{ (V)}$$

又因电容滤波电路有  $U_o \approx 1.2U_2$ ，而  $U_o$  其实就是  $U_C$ ，故  $U_2 = \frac{U_C}{1.2} = \frac{U_o}{1.2} = 15 \text{ (V)}$

本例题对正确选用变压器具有一定的意义。

## 6.5 集成稳压电路

集成稳压电路体积小，使用调整方便，性能稳定，而且成本低，因此应用日益广泛。它的工作原理与分立元件的稳压电路是相同的。它的内部结构同样包括基准电压源、比较放大器、调整电路、采样电路和保护电路等部分。它是通过各种工艺将元器件集中做在一块小硅片上，封装后把整个稳压电路变成了一个部件，即集成电路。它以一个单体的形式参与电路工作，因此使用变得十分简单。

集成稳压电路的类型很多。按其外部特性可分为三端固定式、三端可调式、多端固定式、多端可调式、正电压输出式、负电压输出式；按其型号分类又有 CW78 系列、CW79 系列等。

本节主要讨论三端固定式、三端可调式两类集成稳压器。

### 6.5.1 固定式三端集成稳压器

#### 1. 固定式三端集成稳压器的型号系列

如图 6-19 所示为固定式三端集成稳压器 W78×× 系列和 W79×× 系列的外形及符号，它有 3 个接线端，即输入端、输出端、接地端。其中 W78×× 系列为正电压输出，W79×× 系列为负电压输出。两种系列的后两位均为稳压数值。例如 W7805 为恒定的 +5V 输出，W7812 为恒定的 +12V 输出；W7905 为 -5V 输出，W7912 为 -12V 输出，依此类推。两种系列均可输出固定电压 5V、6V、9V、10V、12V、15V、18V、24V 等电压等级。输出最大电流等级为 1.5A。

#### 2. 固定式三端集成稳压器的实用电路

图 6-20 (a)、(b) 分别是 CW78×× 系列和 CW79×× 系列三端稳压器正、负固定输出电压的应用电路。根据输出电压要求的数值和极性选择相应型号、规格的稳压器。整流滤波后的输出电压，也就是稳压器的输入电压  $U_1$  必须小于稳压器所允许的最大输入电压，但也要比稳压器的输出电压大 2~3V，稳压器才能正常工作。 $C_1$  能抵消输入端的电感效应，防止产生自激振荡。 $C_2$  是为了改善稳压电路的负载瞬态效应，即瞬时增减负载电流时不致引起输出电压有较大的波动。为减小分布参数的影响和高频噪声， $C_1$  和  $C_2$  两电容器应直接与稳压器的公共端相连接。图 6-20 (c) 为正、负电压输出的稳压电路。

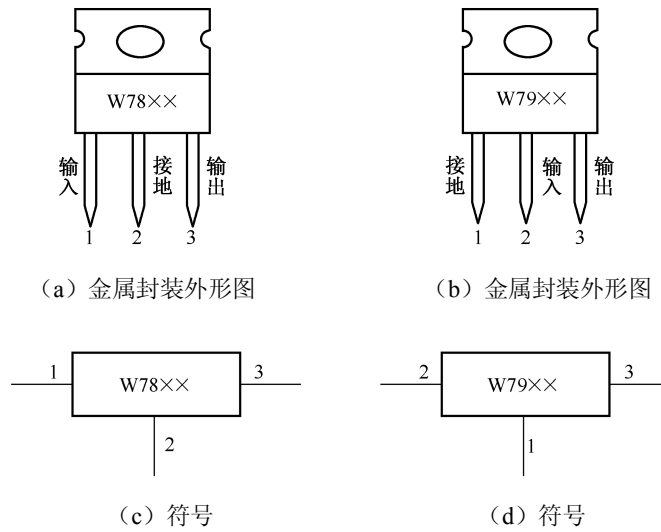


图 6-19 固定式三端稳压电路外形图及符号

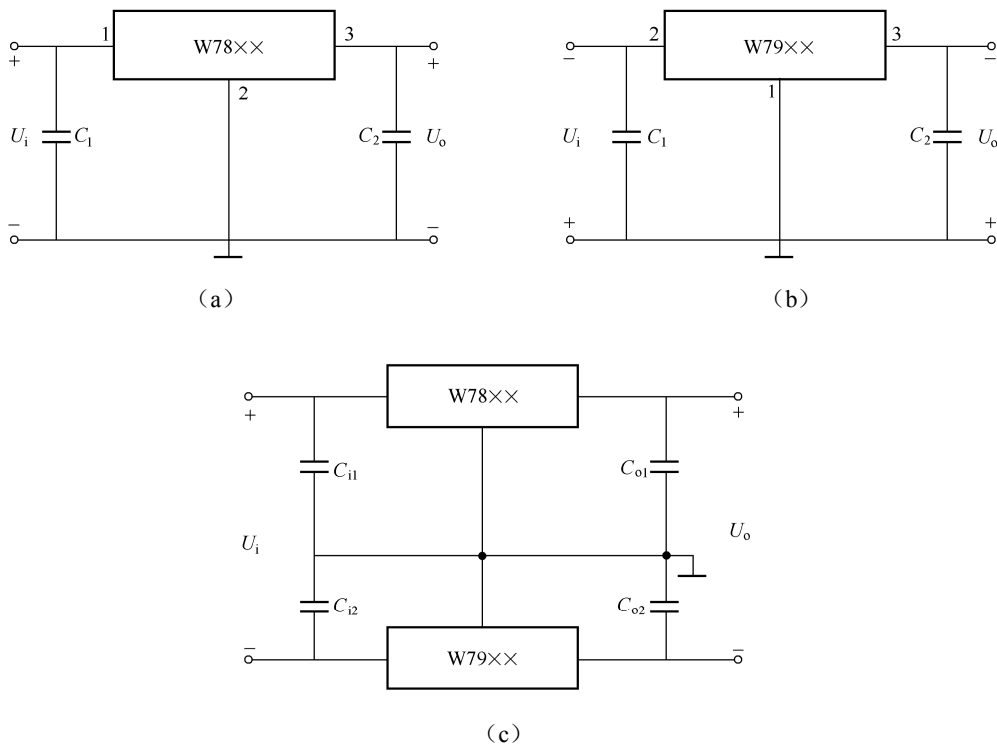


图 6-20 固定式三端集成稳压器的应用

## 6.5.2 可调式三端集成稳压器

### 1. 可调式三端集成稳压器的型号系列

可调式三端集成稳压器广泛使用的产品有输出正电压的 W317 (W117) 系列和输出负电压的 W337 (W137) 系列, 其外形和管脚排列如图 6-21 所示 (塑料封装)。该系列的输出电压

在 1.25~37V 范围内连续可调，输出电流达 1.5A。

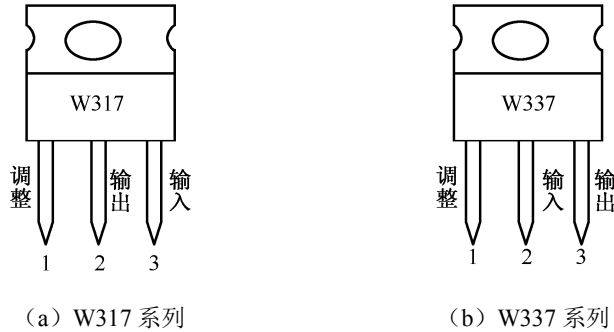


图 6-21 可调式三端稳压器外形图

## 2. 实用电路举例

如图 6-22 所示为典型的可调式三端稳压电路。 $R_p$  为可调电阻，通过调节  $R_p$  可以达到调节输出电压的目的。电路中  $R_1$  与  $R_p$  构成输出分压式电路， $C_{o1}$  用于消除高频噪声， $C_{o2}$  完成对输出电压的滤波。输出电压可以按照如下公式计算得出：

$$|U_o| = 1.25 \left( 1 + \frac{R_p}{R_1} \right) U_i$$

该公式也适合 W337 电路的求解。根据所选电阻参数的不同，可以实现 1.25~37V 的可调电压输出的设计。

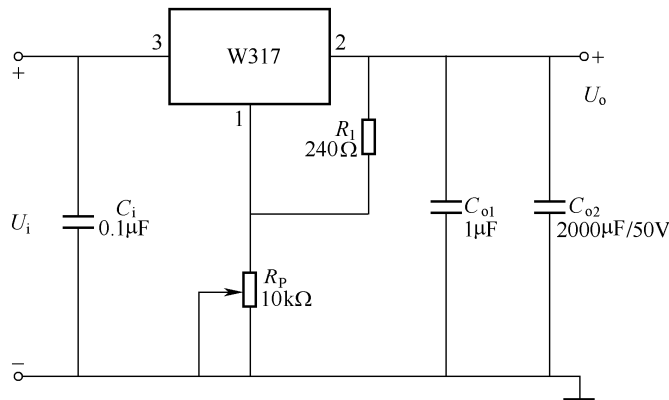


图 6-22 W317 典型应用电路

## 6.6 实训一：习题分析技术

本章的实用性比较强。例 6-5 是一道综合性较强的运算放大器的分析题，通过示范，使大家对比较复杂的电路能够理清思路，掌握化繁为简的解题技巧。例 6-6 选择了可以直接应用于业余无线电制作的实用电源电路设计题，大家在学习其电路设计思想的同时，又能领悟到学习基础知识的重要性。

【例 6-5】电路如图 6-23 所示，各电路参数均标在图中， $A_1$ 、 $A_2$  和  $A_3$  均为理想运放，求  $u_{o1}$ 、 $u_{o2}$  和  $u_o$ 。

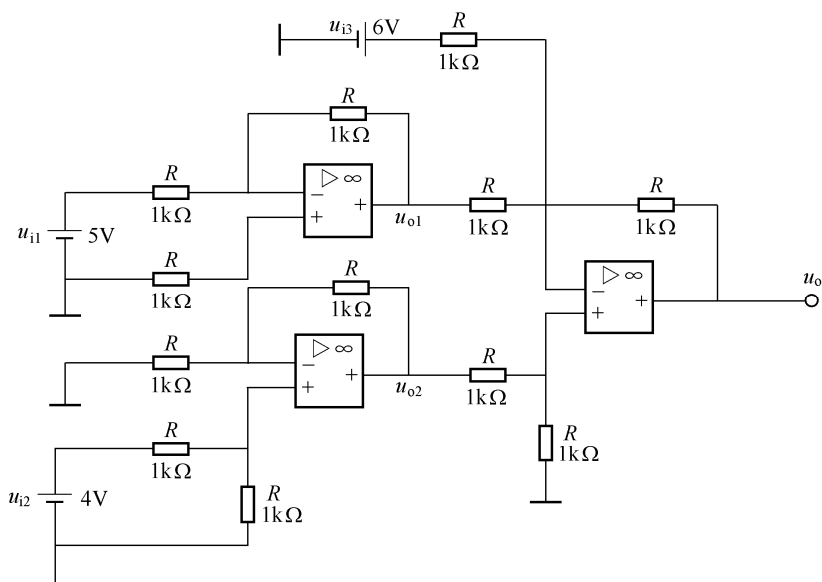


图 6-23 例 6-5 电路图

解：

【方法点拨】本题是一个复杂的三运放电路，我们在解题时，可以采用层层化解的方法，分解为 3 个独立的电路来解决。运放  $A_1$  构成典型的反相输入比例运放电路；运放  $A_2$  构成典型的同相输入比例运放电路；先按线性运放的特点，分别求出它们的输出  $u_{o1}$  和  $u_{o2}$ ；运放  $A_3$  构成综合型的比例运放电路，其中和  $u_{i3}$  组成反相输入求和电路，然后与  $u_{o2}$  构成差分比例运放电路。我们把  $A_1$  和  $A_2$  的输出求出后，可以把它们从电路中分离出去，这样就只要单独处理  $A_3$  了。对  $A_3$  而言，有二路输入即  $A_1$  和  $A_2$  的输出。解题过程分述如下：

(1) 由于理想运放输出电阻  $\rightarrow 0$ ，故  $u_{o1}$ 、 $u_{o2}$  可分别单独计算，其他运放不会对其产生影响。

$A_1$  为反相输入 ( $u_{i1} = 5\text{V}$ ) 比例运放电路，其闭环电压放大倍数

$$A_{uF1} = -\frac{R_F}{R_1} = -\frac{R}{R} = -1$$

$$u_{o1} = u_{i1} \cdot A_{uF1} = (5)(-1) = -5 \text{ (V)}$$

$A_2$  为同相输入比例运放电路，其

$$u_{2+} = u_{i2} \frac{R}{R+R} = 2 \text{ (V)}$$

$$A_{uF2} = 1 + \frac{R_F}{R_1} = 1 + \frac{R}{R} = 2$$

$$u_{o2} = u_{2+} \cdot A_{uF2} = 2 \times 2 = 4 \text{ (V)}$$

(2) 运放  $A_3$  的电路可简化为如图 6-24 所示。

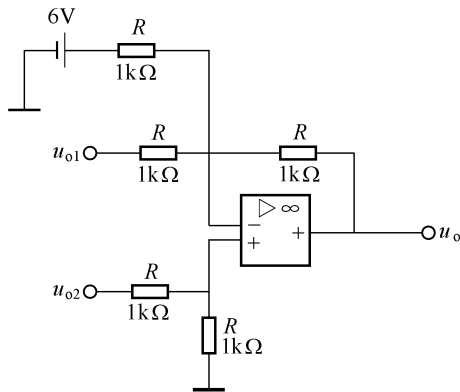


图 6-24 例 6-5 简化图

计算  $u_o$  采用叠加定理，当  $u_{i3}$  (+6V) 单独作用时， $u_{o1}$  和  $u_{o2}$  均置 0，电路如图 6-25 (a) 所示。

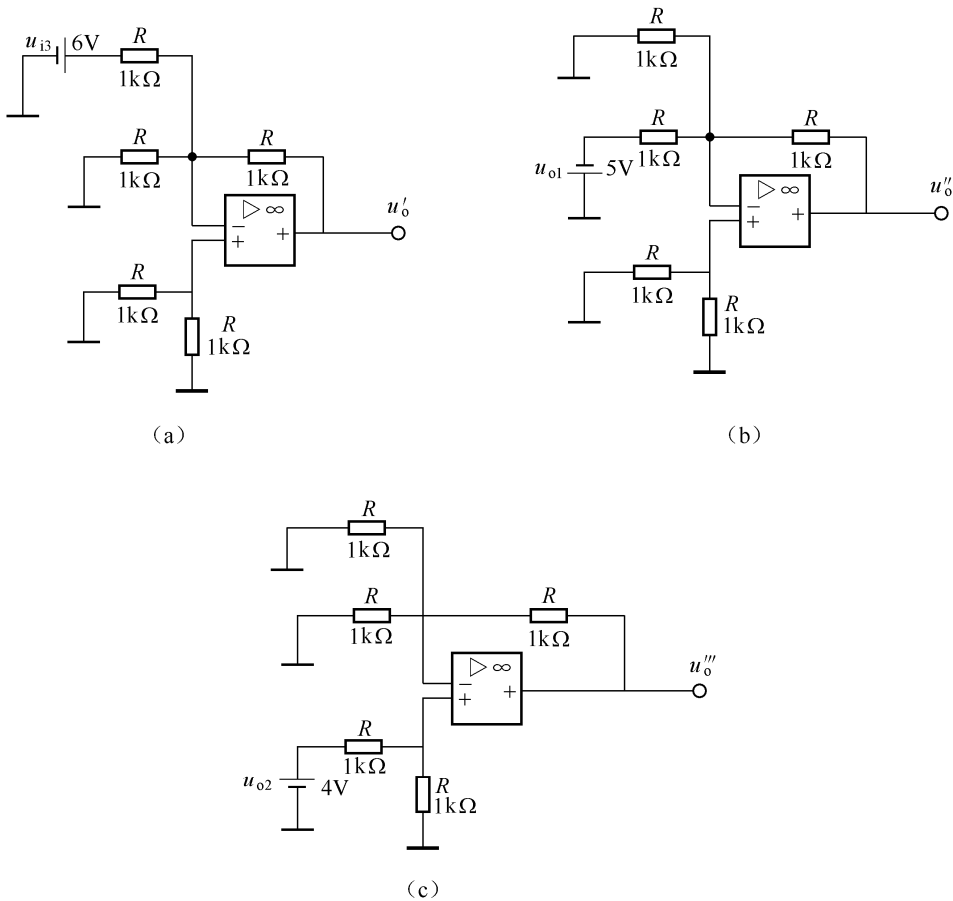


图 6-25 例 6-5 叠加定理等效电路图

等效电路图 6-25 (a) 是一个反相输入比例运放电路，其输出为：

$$u'_o = -\frac{R}{R}u_{i3} = -6 \text{ (V)}$$

当  $u_{o1}$  (-5V) 单独作用时,  $u_{i3}$  和  $u_{o2}$  均置 0, 电路如图 6-25 (b) 所示。

$$u_{3+} = u_{3-} = 0$$

所以

$$i_2 = i_F$$

$$u''_o = -\frac{R}{R}u_{o1} = (-1) \times (-5) = 5 \text{ (V)}$$

当  $u_{o2}$  (4V) 单独作用时,  $u_{i3}$  和  $u_{o1}$  均置 0, 电路如图 6-25 (c) 所示。

$A_3$  同相端的净输入电压为

$$u_{3+} = \left( \frac{R}{R+R} \right) u_{o2} = \frac{1}{2} u_{o2} = 2 \text{ (V)}$$

$A_3$  是同相输入比例运放电路, 其输出是

$$u'''_o = A'''_{uF3} \cdot u_{3+} = \left( 1 + \frac{R}{0.5R} \right) u_{3+} = 3 \times 2 = 6 \text{ (V)}$$

将三者叠加得

$$u_o = u'_o + u''_o + u'''_o = (-6) + 5 + 6 = 5 \text{ (V)}$$

总结: 由于本题中 3 个运放电路都工作在线性区, 所以在求解电路输出信号电压时可以使用“叠加定理”。

**【例 6-6】** 试设计一个方案将固定式三端稳压器扩展为输出可调式稳压电路。

**【方法点拨】** 由于固定式三端稳压器输出电压不能调节, 这就使得它的使用受到了限制, 为了使电路有一定的适用范围, 可对其进行扩展。本电路的设计思想是在稳压器输出端加分压电路的方法来扩展输出电压可调。

根据设计思想, 可以画出电路图如图 6-26 所示。

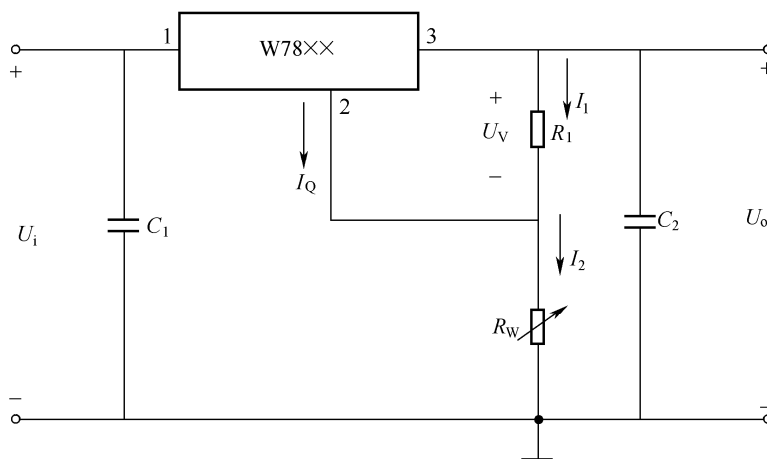


图 6-26 输出电压可调的固定式三端稳压器

调压原理: 因为根据分压公式有:  $U_V = \frac{R_1}{R_1 + R_W} U_o$

$$\text{所以有: } U_o = \frac{R_1 + R_w}{R_1} U_V = \left(1 + \frac{R_w}{R_1}\right) U_V$$

因此, 改变  $R_w$  即可调节输出电压的大小, 式中  $U_V$  为稳压器的输出稳定电压。

## 6.7 实训二: 实用培训技术

### 实验一 小功率可调直流稳压电源的应用

#### 一、实验目的

- (1) 了解直流稳压电源组成。
- (2) 熟悉三端集成稳压器的使用方法。
- (3) 了解集成稳压器的性能和特点。

#### 二、实验原理

图 6-27 中,  $T_r$  为工频变压器, 采用桥式整流电路,  $C_1$  为滤波电容,  $C_2$ 、 $C_3$  可进一步提高输出电压的稳定性,  $R_L$  为负载电阻; 二极管  $VD_1$ 、 $VD_2$  给电容  $C_2$ 、 $C_3$  提供放电通路, 以防输入端瞬时掉电时 W317 输出端受反向冲击电压作用造成损坏。

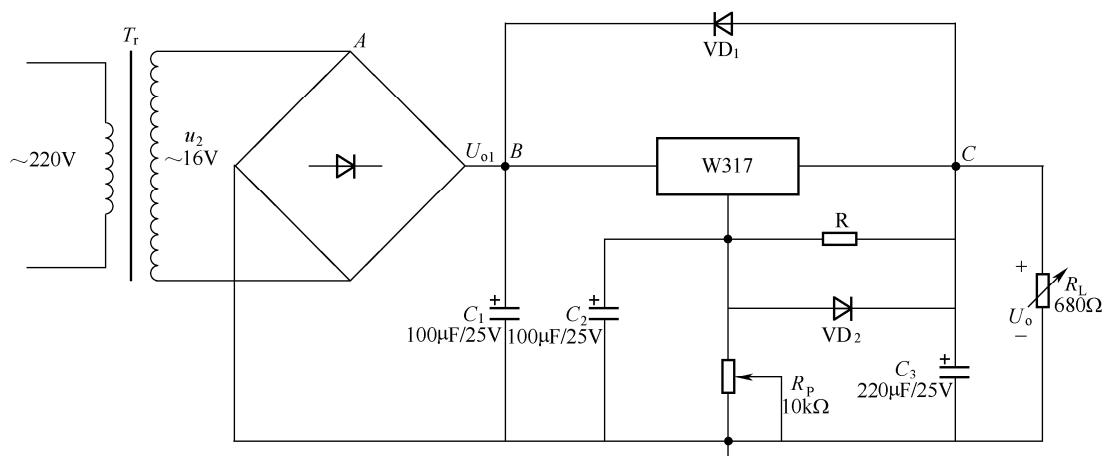


图 6-27 正电压输出可调三端集成稳压器应用电路图

W317 是一种正电压可调三端集成稳压器, 输出电压为:

$$U_o \approx 1.25 \left(1 + \frac{R_p}{R}\right)$$

#### 三、实验内容

- (1) 检查实验线路连接是否正确, 输出电压  $U_o$  是否正常。
- (2) 测量稳压电源输出电压范围。
  - 1) 用万用表分别测量  $T_r$  次级电压  $U_2$ 、整流滤波输出电压  $U_{o1}$ , 并记入表 6-1 中。
  - 2) 调节  $R_p$ , 测量输出电压  $U_o$  的变化范围, 记入表 6-1 中。
- (3) 用示波器观察  $A$ 、 $B$ 、 $C$  各点电压波形, 画在表 6-2 中。
- (4) 观察过流保护, 保持输入交流电压 220V 不变, 将  $R_L$  缓慢调节至 0, 用万用表观察



输出电流  $I_L$  的变化情况，同时用示波器观察输出电压的变化。

表 6-1 测量数据 1

$U_1$	$U_2$	$U_{o1}$	$U_{omax}$	$U_{omin}$
220V				

表 6-2 测量数据 2

	A 点	B 点	C 点
电压波形			

#### 四、实验报告要求

- (1) 若输出电压  $U_o$  纹波较大，可能是电路中的哪个元件出现故障？
- (2) 若无输出电压或输出电压不可调，试说明其原因及解决的办法。
- (3) 说明实验中遇到的问题及解决方法。

### 实验二 集成运算放大器的应用

#### 一、实验目的

- (1) 学习集成运算放大器参数的测试方法。
- (2) 通过实验熟悉用集成运算放大器构成基本运算放大电路的方法。
- (3) 掌握示波器和信号发生器的使用。
- (4) 了解电路关键测试点的测量方法。

#### 二、实验仪器

- (1) 数字万用表。
- (2) 双踪示波器。
- (3) 信号发生器。

#### 三、实验原理

集成运算放大电路实质上是一个具有高放大倍数的多级直接耦合放大器，它具有很高的开环电压增益、高输入电阻、低输出电阻，并具有较宽的通频带，是一种通用性强、可靠性高的电子元件。

#### 四、实验内容

##### 1. 调零（消振）

由于输入失调电压和失调电流的影响，当运放的输入为 0 时，输出不是 0，所以必须调零。

(1) 按图 6-28 所示连接电路。

(2) 用数字万用表或示波器监测输出端，如有自激振荡现象，则调整  $R_p$  消振，使输出端电压为 0。

##### 2. 传输特性测试

(1) 按图 6-29 所示连接电路。

(2) 信号发生器设置为 1V、100Hz 的正弦波。

(3) 接通电源，用数字万用表或者示波器测量或观察输入信号、输出信号波形的幅度和相位。

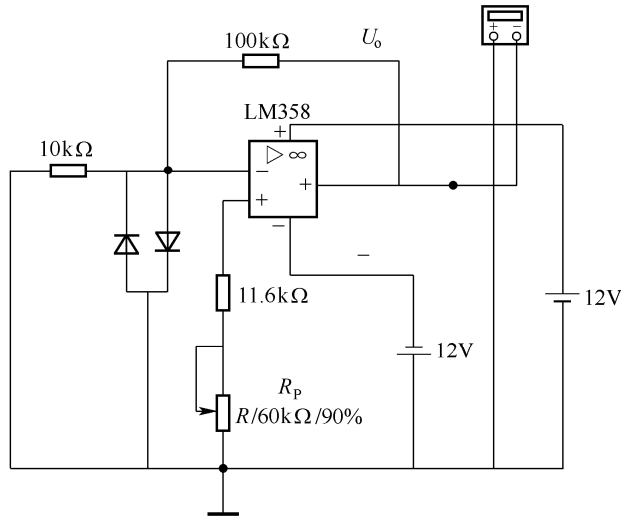


图 6-28 实验二调零电路图

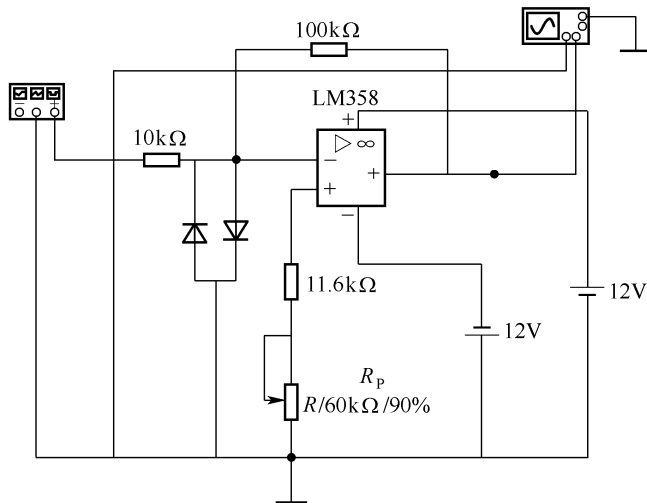


图 6-29 传输特性测试电路图

(4) 按表 6-3 中的要求调整输入信号的幅度，用数字万用表或者示波器测量、观察输出信号波形，看是否按同一比例变化。

表 6-3 传输特性测试记录表

输入信号幅度 ( $u_i$ )	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
输出信号幅度 ( $u_o$ )					
比例 (%)					

### 3. 反相加法运算放大器

图 6-30 所示是反相加法运算电路图，其输出电压为

$$u_o = -\left(\frac{R_F}{R_1}u_{i1} + \frac{R_F}{R_2}u_{i2}\right)$$

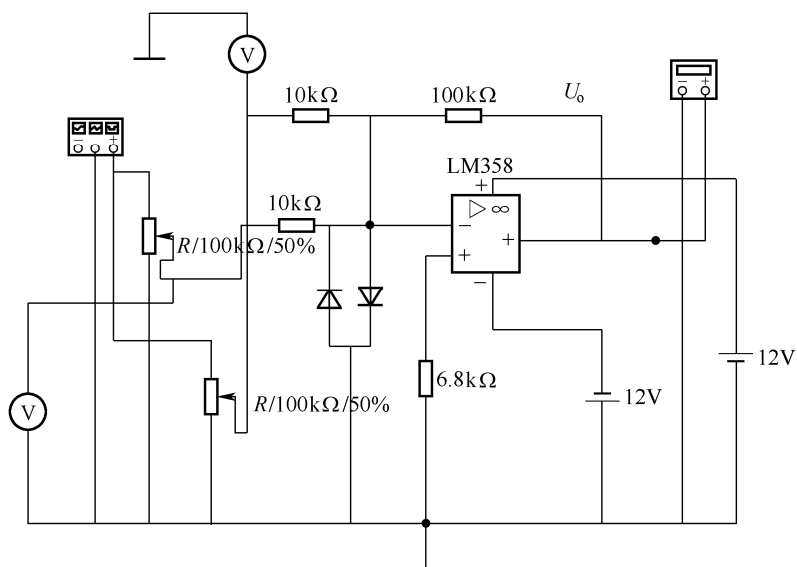


图 6-30 反相加法运算放大器实验电路

实验步骤：

- (1) 将电压表、数字万用表置为交流挡。
- (2) 将电路通电，调整  $R_{P1}$ 、 $R_{P2}$  的大小，使  $u_{i1}$  和  $u_{i2}$  满足表 6-4 所示数据的要求。同时将测试到的输出电压数据填入表 6-4 中，并与计算值相比较。

表 6-4 实验数据记录表

$u_{i1}$ (V)	0.1	0.2
$u_{i2}$ (V)	0.1	0.4
测量值 $u_o$ (V)		
计算值 $u_o$ (V)		

## 本章小结

本章主要介绍由集成运放组成的各种模拟信号运算电路以及稳压电源电路。模拟信号的运算集成是运算放大器典型的应用领域。

(1) 由于运算电路的输入、输出信号均为模拟量，因此要求运算电路中的集成运放工作在线性区。从电路结构看，运算电路通常都引入了深度的负反馈。在分析运算电路的输入、输出关系时，总是从理想运放工作在线性区时的两个特点，即“虚短”和“虚断”出发。

(2) 比例运算电路是最基本的信号运算电路，在此基础上可以扩展、演变成为其他运算电路。比例运算电路有 3 种输入方式：反相输入、同相输入和差分输入。当输入方式不同时，电路的性能和特点各有不同。

(3) 在求和电路中,着重介绍应用比较广泛的反相输入求和电路,这种电路实际上是利用“虚短”和“虚断”的特点,通过将各输入回路的电流求和的方法实现各路输入电压求和的。

(4) 在电子产品中,很多系统需要直流电,这时就需要将交流电网电压转换为稳定的直流电,为此要用整流、滤波和稳压等环节构成直流稳压电路来实现。直流稳压电路一般由变压、整流、滤波和稳压4部分组成。本章主要介绍了电容滤波电路和各种稳压电路的结构及工作原理,以及电路元器件的选择等内容。

(5) 电容滤波电路是利用电容两端电压不能突变(或利用电感中电流不能突变)的特性将整流后输出电压中的交流成分滤除,使之变成平滑的直流电压。电容滤波适用于负载电流小且变化不大的场合。电容两端的输出电压  $U_o \approx 1.2U_2$ , 滤波电容的选择  $C \geq (3 \sim 5) \frac{T}{2R_L}$ 。

(6) 稳压电路的功能是使直流电压在受到电网波动和负载变化的影响时保持稳定不变。稳压电路的种类和形式很多。利用稳压管和限流电阻构成的稳压管稳压电路最为简单,但是其输出电压不能作任意调节,输出电流也不能太大,而且稳压性能较差。

串联型稳压电路是最常用的稳压电路。它一般由采样电路、比较放大电路、基准电源电路和调整管电路4部分组成。这种稳压电路,调整管串联在输入电压与负载之间,利用稳压管提供基准电压,再引入电压负反馈和放大环节,使输出电压保持稳定。其稳压性能较好,输出电压调节方便。

集成稳压电路目前已得到了广泛的应用,其中CW78系列(稳定输出正电压)、CW79系列(稳定输出负电压)、输出正电压可调的W317(W117系列)和输出负电压可调的W337(W137)系列等是最常用的三端集成稳压器。它们的组成和工作原理与串联型稳压电路基本相同。一般小功率的稳压电源采用集成稳压电路。

## 习题六

- 6-1 直流电压是怎样由交流电压转换来的?各转换环节的作用是什么?
- 6-2 画出桥式整流电容滤波的电路图和波形图,说明电容和负载的变化对  $U_o$  的影响。
- 6-3 串联型稳压电路由哪几部分组成?它实质上是利用什么原理进行稳压的?
- 6-4 现有 220V 交流电源,试用变压器、桥式整流、电容滤波和三端集成块稳压器设计出 +24V 直流稳压电路。
- 6-5 电路如图 6-31 所示,已知  $U_1 = 24V$ ,  $U_2 = 6V$ ,  $R_1 = 240\Omega$ ,  $R_2 = 1.2k\Omega$ ,  $R_p = 470\Omega$ , 试分析  $R_p$  减小时的输出电压调节原理,并计算输出电压的调节范围。
- 6-6 在图 6-32 所示的放大电路中,电路参数均标在图中。
- (1) 列出  $u_{o1}$ 、 $u_{o2}$  和  $u_o$  的表达式。
- (2) 若  $u_{i1} = 0.3V$ ,  $u_{i2} = 0.1V$ , 则  $u_o = ?$
- 6-7 在图 6-33 所示的电路中,  $\frac{U_o}{U_i} = ?$
- 6-8 集成稳压电路如图 6-34 所示,已知  $R_1 = R_2 = 1k\Omega$ ,  $C_1 = 0.3\mu F$ ,  $C_2 = 1\mu F$ , 试求:(1) 说明 W7805 的直流输出电压的大小和极性;(2) 在忽略  $I_Q$  的情况下,求直流输出电压  $U_o$ 。

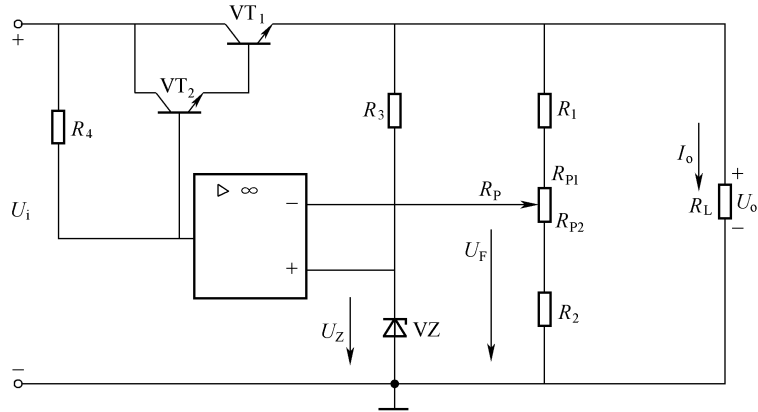


图 6-31 习题 6-5 图

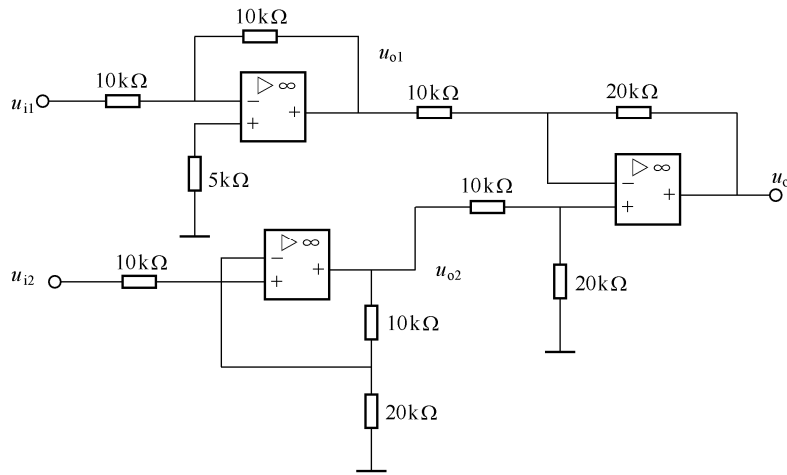


图 6-32 习题 6-6 电路图

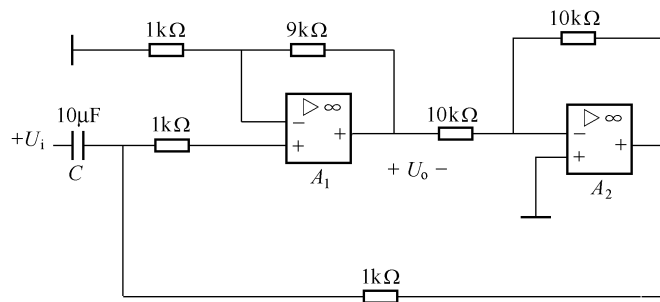


图 6-33 习题 6-7 电路图

6-9 试证明图 6-35 所示的电路中，输出电压  $u_o = \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right)(u_{i1} + u_{i2})$ 。

6-10 写出图 6-36 (a) 和 (b) 所示运算电路的输入输出关系。

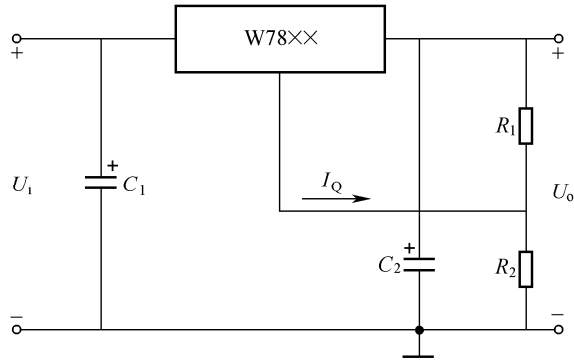


图 6-34 习题 6-8 图

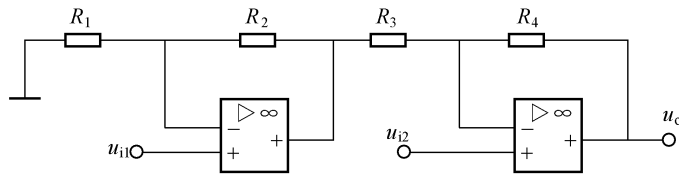
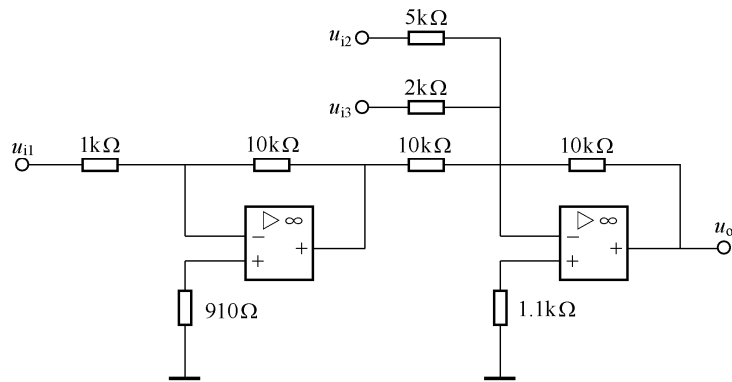
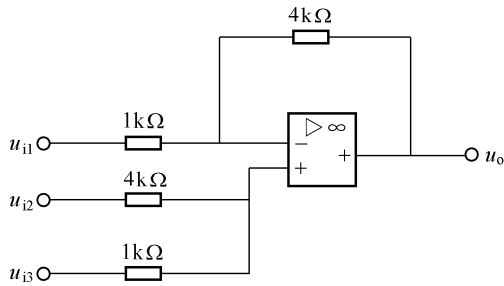


图 6-35 习题 6-9 电路图



(a)



(b)

图 6-36 习题 6-10 电路图

6-11 在图 6-37 所示的电路中，设  $A_1$ 、 $A_2$  和  $A_3$  均为理想运放：

- (1)  $A_1$ 、 $A_2$  和  $A_3$  各组成何种基本运算电路？
- (2) 列出  $u_{o1}$ 、 $u_{o2}$  和  $u_{o3}$  与输入电压  $u_{i1}$ 、 $u_{i2}$  和  $u_{i3}$  之间的关系式。

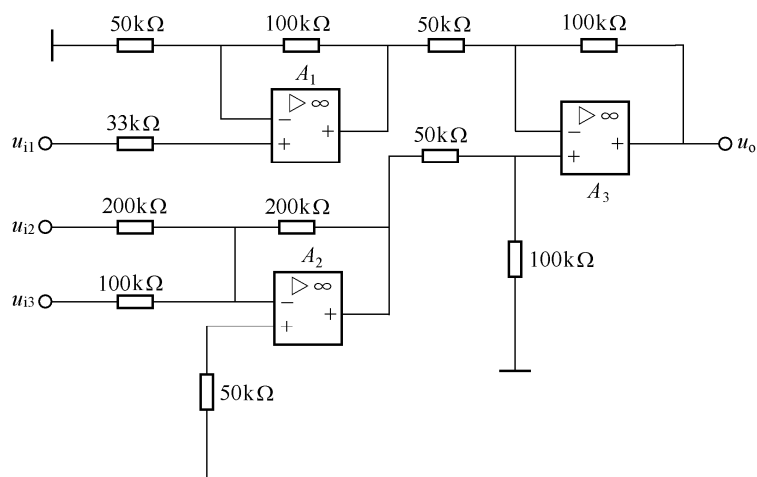


图 6-37 习题 6-11 电路图