

# 11.2 运放在单电源下工作

## 11.2.1 运放单电源工作时需要解决的问题

由图 2.1.1c 和 6.3 节运放内部电路所示，运算放大器有两个工作电源输入端，为运放内部电路提供对“地”来说一正一负的工作电压，以使输入电压为 0V 时输出电压也为 0V。输入输出电压即便是相对于地而言的，但运算放大器并没有接地端。

迄今为止，我们在使用运放时都为它提供的是正负对称的工作电压（如±15V），如图 11.2.1a 所示。一般运算放大器的输出电压摆幅要小于工作电压 1~2V。因为运算放大器没有接地端，所以当将两个工作电压加在一起，如图 11.2.1b 所示时，运放本身并不会感知这个变化，也就是说，它可以在非对称的单电源下工作。当然，此时输入电压和输出电压的基准线不再是 0V，而是向正电压方向移动了 15V。因此静态时，输出电压应设定在 15V 上。

运放在单电源下工作的放大电路要比对称的双电源工作方式的电路复杂些，但它更便于与数字电路联合使用。

由图 11.2.1b 可知，运放单电源工作时，关键是将输出端的静态电压设置为电源电压的一半。而且在接入信号后，也不能影响输出的静态电压。这样，输入信号的正、负半周使输出电压在 15V 的基础上上、下波动，其波动范围（摆幅）是 2V~28V

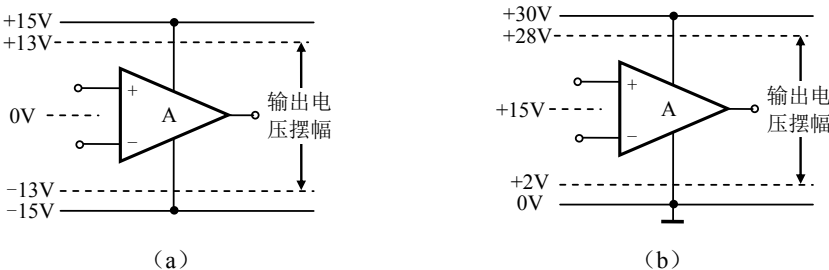


图 11.2.1 工作电压对输出电压摆幅的影响

(a) 对称的双电源工作

(b) 非对称的单电源工作

## 11.2.2 单电源阻容耦合放大电路

### 1. 反相放大电路

单电源工作运放的最简单偏置方式如图 11.2.2 所示。运放构成电压跟随器，由于  $V_P = V_{CC}/2$ ，所以静态输出电压  $V_{OQ} = V_P = V_{CC}/2$ ，满足单电源工作要求。

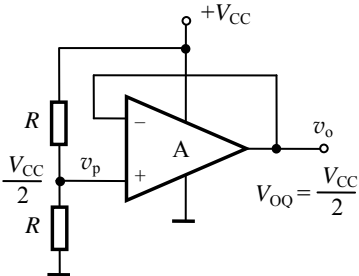


图 11.2.2 设置输出静态电压

接下来要解决信号输入输出问题，以及设计一定的放大倍数。图 11.2.3a 所示为阻容耦合单电源反相放大电路。 $C_1$  和  $C_2$  为隔直电容，避免信号源和负载接入影响单电源工作运放的静态工作点。显然，电路只能放大交流信号。设  $C_1$  和  $C_2$  的容量足够大，在交流情况下， $C_1$  和

$C_2$  看作短路, 直流电压源短路 (接地), 得到其交流通路如图 b 所示。可见, 它是典型的反相放大电路, 其电压增益为  $A_v = v_o/v_i = -R_f/R_1$ 。两个  $R$  并联的阻值应尽量接近  $R_f$  的阻值 (见 11.3.2 节)。

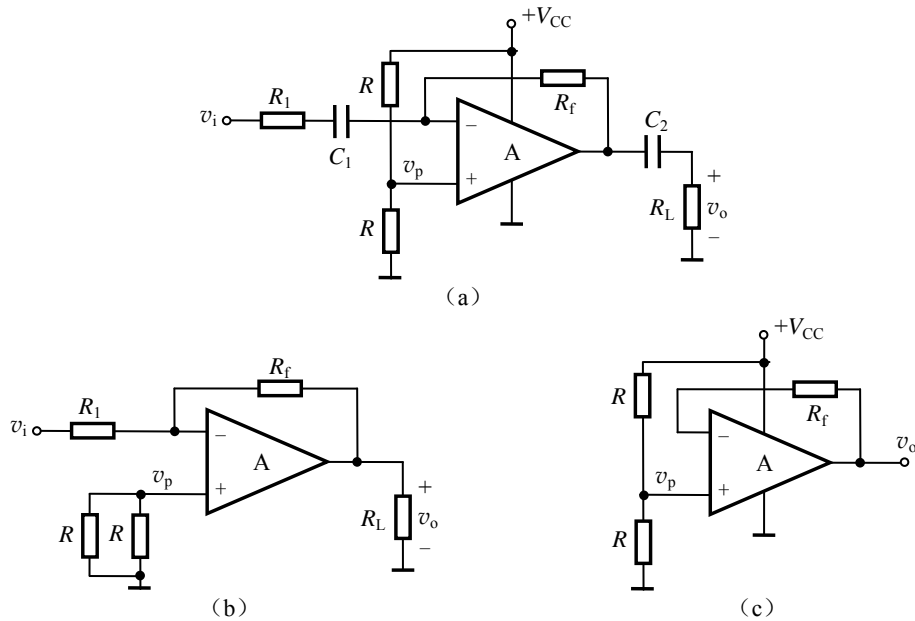


图 11.2.3 单电源阻容耦合反相放大电路  
(a) 原理电路 (b) 交流通路 (c) 直流通路

当  $C_1$  和  $C_2$  开路时便得到直流通路, 如图 c 所示。与图 11.2.2 相比, 图 11.2.3c 直流通路仅多了一个反馈电阻  $R_f$ , 根据虚断概念,  $R_f$  中没有电流, 所以此放大电路对  $v_p$  来说仍是电压跟随器, 输出静态电压的设置与图 11.2.2 电路完全相同。

## 2. 同相放大电路

如果将图 11.2.3a 所示电路的输入信号通过隔直电容  $C_3$  接到同相输入端, 并将  $R_1$  左侧接地, 则得到单电源阻容耦合同相放大电路如图 11.2.4a 所示。该电路的直流通路与图 11.2.3c 完全相同, 交流通路如图 11.2.4b 所示。显然, 它是典型的同相放大电路, 其电压增益为  $A_v = v_o/v_i = 1 + R_f/R_1$ 。需要注意, 由于电阻  $R$  的存在, 原本同相放大电路输入电阻无穷大的特点已完全丧失。

实际上可以采用与图 11.1.4b 所示电路类似的自举方式, 提高电路的输入电阻。改进后的电路如图 11.2.5a 所示, 图 b 是它的交流通路 (电容短路, 电源接地)。根据虚短和虚断, 可得交流电压增益为

$$A = 1 + \frac{R_f}{R_1/2} \quad (11.2.1)$$

当电容开路时便得到图 11.2.5c 的直流通路。由虚断可知,  $R_2$  中无电流流过, 所以 a 点电压是两个  $R_1$  电阻对  $+V_{CC}$  的分压, 且有  $V_{OQ} = V_p = V_a = V_{CC}/2$ 。

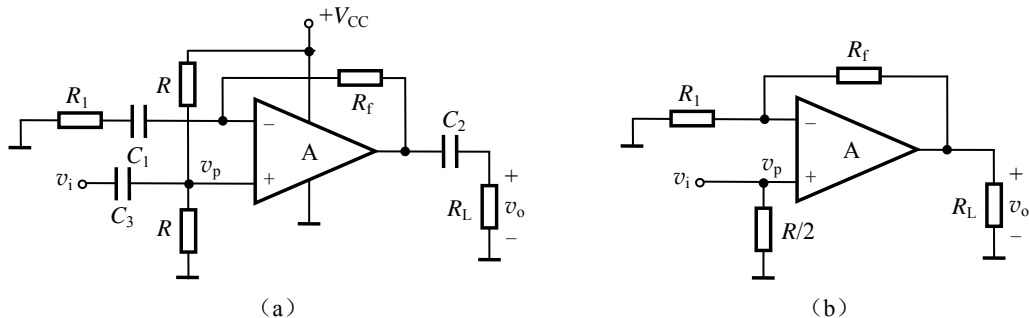


图 11.2.4 单电源阻容耦合同相放大电路

(a) 原理电路 (b) 交流通路

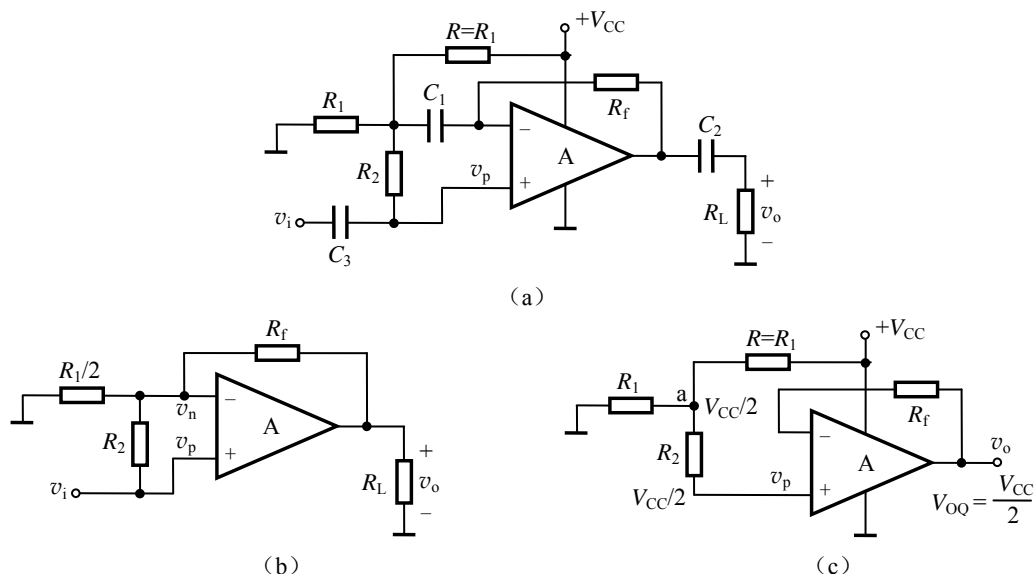


图 11.2.5 高输入阻抗单电源阻容耦合同相放大电路

(a) 原理电路 (b) 交流通路 (b) 直流通路

另外需要注意，在图 11.2.4a 和图 11.2.5a 的同相放大电路中， $C_3$  必不可少，否则  $v_i$  的接入将影响  $v_p$  的直流电压，从而影响输出的静态电压。

### 11.2.3 单电源直接耦合放大电路

直接耦合是运算放大器的突出优点，在上一节中，为了避免信号源和负载对单电源工作的运放静态输出电压造成影响，都在输入端和输出端都加入了隔直电容。同时，为了使直流和交流有不同的增益，在运放反相输入端到地的支路上也串入了隔直电容。所以上述电路无法放大频率很低的、甚至直流的信号。

#### 1. 反相放大电路

实际上，单电源工作的运算放大器也可以构成直接耦合放大电路，如图 11.2.6 所示。该电路为反相放大电路。由于不像双电源工作那样  $v_p = 0V$ ，而是有一个直流偏置电压，所以利用叠加原理，可求出输出电压为

$$v_o = (1 + \frac{R_f}{R_1})v_p - \frac{R_f}{R_1}v_i \quad (11.2.2)$$

当  $v_i = 0V$  时，需要使  $v_o = V_{CC}/2$ ，所以

$$\frac{V_{CC}}{2} = (1 + \frac{R_f}{R_1})v_p \quad (11.2.3)$$

而  $R_2$  和  $R_3$  分压有

$$v_p = \frac{R_2}{R_2 + R_3} \cdot V_{CC} \quad (11.2.4)$$

由式 (11.2.3) 和式 (11.2.4) 可得电阻应满足如下关系：

$$\frac{R_2}{R_2 + R_3} = \frac{1}{2} \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_f} \quad (11.2.5)$$

将式 (11.2.5) 和式 (11.2.4) 代入式 (11.2.2) 得

$$v_o = (1 + \frac{R_f}{R_1})(\frac{1}{2} \frac{R_f}{R_1 + R_f} V_{CC}) - \frac{R_f}{R_1} v_1 = \frac{1}{2} V_{CC} - \frac{R_f}{R_1} v_1 \quad (11.2.6)$$

当  $v_1$  为正弦波时,  $v_o$  以  $V_{CC}/2$  为基准上下波动。由式 (11.2.6) 可得对输入电压  $v_1$  的动态增益为

$$A_v = \frac{v_o}{v_1} = -\frac{R_f}{R_1} \quad (11.2.7)$$

由于放大电路的输出电阻很小, 所以接负载时不会影响静态输出电压, 但负载中将含有直流分量。

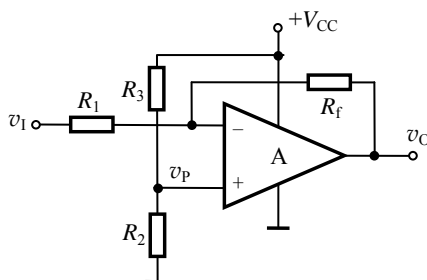


图 11.2.6 单电源直接耦合反相放大电路

如果  $v_1$  不是正负对称的电压波形, 它仅在正电源范围变化, 且设  $V_1$  是  $v_1$  变化范围的中点电压, 那么, 电路输入输出电压的对应关系应满足: 当  $v_1 = V_1$  时, 有  $v_o = V_{CC}/2$ 。将它们代入式 (11.2.2) 得

$$\frac{V_{CC}}{2} = (1 + \frac{R_f}{R_1})v_p - \frac{R_f}{R_1} V_1 \quad (11.2.8)$$

将式 (11.2.4) 代入式 (11.2.8) 可得电阻应满足如下关系:

$$\left( \frac{1}{2} - \frac{R_1 + R_f}{R_1} \frac{R_2}{R_2 + R_3} \right) V_{CC} = -\frac{R_f}{R_1} V_1 \quad (11.2.9)$$

## 2. 同相放大电路

一种单电源直接耦合同相放大电路如图 11.2.7 所示。由于输入信号采用直接耦合方式接入运放的同相输入端, 如果仍然采用图 11.2.6 的方式提供静态输出电压, 则电阻的关系将比较复杂, 也不方便调整增益, 而图 11.2.7 的电路则是一种较好形式。

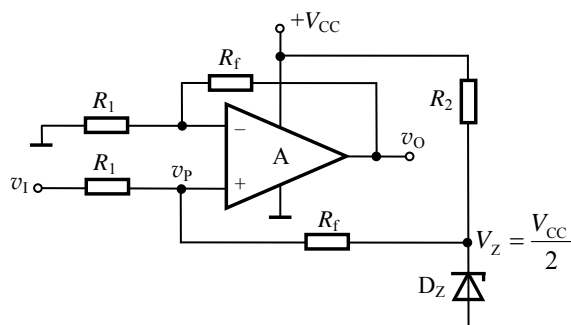


图 11.2.7 单电源直接耦合同相放大电路

该电路使用了一个齐纳二极管, 提供一个稳定的直流电压  $V_Z = V_{CC}/2$ 。根据虚短、虚断和叠加原理, 有

$$v_p = \frac{R_f}{R_1 + R_f} v_1 + \frac{R_1}{R_1 + R_f} V_Z \quad (11.2.10)$$

而

$$v_o = (1 + \frac{R_f}{R_1})v_p \quad (11.2.11)$$

所以

$$v_o = (1 + \frac{R_f}{R_1})(\frac{R_f}{R_1 + R_f}v_1 + \frac{R_1}{R_1 + R_f}V_Z) = \frac{R_f}{R_1}v_1 + V_Z = \frac{R_f}{R_1}v_1 + \frac{V_{CC}}{2} \quad (11.2.12)$$

显然，当  $v_1 = 0V$  时， $v_o = V_{CC}/2$ ，满足单电源工作时静态输出电压为二分之一电源电压的要求。由式（11.2.12）可得对输入电压  $v_1$  的动态增益为

$$A_v = \frac{v_o}{v_1} = \frac{R_f}{R_1} \quad (11.2.13)$$

由此看出，比一般同相放大电路少了加 1，增益关系很简单。当然，该同相放大电路的输入电阻不大，等于  $R_1$  和  $R_f$  的串联。

如果  $v_1$  不是正负对称的电压波形，它仅在正电源范围变化，且设  $V_1$  是  $v_1$  变化范围的中点电压，那么，电路输入输出电压的对应关系应满足：当  $v_1 = V_1$  时，有  $v_o = V_{CC}/2$ 。将它们代入式（11.2.12）可得  $V_Z$  电压：

$$V_Z = \frac{V_{CC}}{2} - \frac{R_f}{R_1}V_1 \quad (11.2.14)$$

还有一种情况，就是  $v_1$  在正电源范围内变化，且要求  $v_1 = 0V$  时，有  $v_o \approx 0V$ 。此时只能用同相放大电路实现，并且要求运放的输出端与负电源端之间的饱和压降几乎为零。满足这种要求的有专为单电源工作设计的运算放大器，如 LM324、TLC084、TLC274 等。也可以采用 11.3.3 节介绍的具有轨到轨输入/输出特性的运算放大器。

**例 11.2.1** 单电源工作的电压跟随器如图 11.2.8 所示。问（1） $v_1$  在正电压还是负电压时  $v_o$  才能正常跟随？（2）输出电压的最大跟随范围受什么因素影响？（3）如果要求  $v_1 = 0V$  时  $v_o$  也能跟随，对运放的什么指标有怎样的要求？

**解：**（1）因为是正电压单电源工作方式，所以  $v_1$  在正电压时  $v_o$  才能正常跟随。

（2）输出电压的最大跟随范围受运放最大输入电压范围和输出饱和压降的限制。

（3）要求运放输入电压范围的下限值能达到  $0V$ ，同时输出饱和压降也接近  $0V$ 。

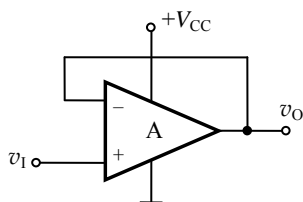


图 11.2.8 例 11.2.1 的电路