

# 通用型高增益集成运算放大器\*

半导体厂 半导体专业工农兵学员毕业实践小组  
(南开大学) (南开大学物理系)

根据工农业生产的发展和国防建设的需要, 我校半导体厂在 1974 年接受了研制 NG04 型集成运算放大器的任务。我们物理系半导体专业工农兵学员结合这一具体战斗任务进行了毕业实践。由于工人师傅和工农兵学员的共同努力, 经过四个月的时间, 试制成功了通用型高增益的 NG04 集成运算放大器。现在这一产品已在我校半导体厂正式投产, 有力地支援了我园电子工业的发展。

集成运算放大器是近十几年才出现的一种新产品, 由于性能逐步提高, 它的应用范围越来越普遍, 最近几年国内外发展都很快。运算放大器的用途很广泛, 它不但可以进行各种数学运算, 如作加法器、积分器、微分器、比例放大器、对数放大器等, 也可以作为一般的交直流放大器或者做检波器、振荡器、有源滤波器等。在许多电子仪器中, 像模拟计算机、自动化控制设备、通讯设备及各种自动化仪器仪表中都要使用运算放大器。集成化的运算放大器是这些电子仪器产品换代所必需的。随着国民经济的发展, 集成运算放大器的用途将越来越多。

NG04 型集成运算放大器是一种性能较高的通用型集成运算放大器, 生产的工艺条件要求也较严格。许多生产电子仪器整机的单位都迫切需要这种器件。工农兵学员在毛主席革命教育路线的指引下, 实行开门办学, 与工厂的工人师傅一起战斗, 运用所学到的理论知识来解决生产实际中遇到的问题。在试制的过程中吸取了一些国内外先进技术, 破除迷信, 敢想敢干, 胜利地完成了研制任务。

## 一、电路的特点

NG04 集成运放是单片半导体集成电路, 采用 TO-5 型的金属圆壳封装。共有 12 个引线, 其管腿分配如图 1 所示。图中①—⑫表示管腿, ①是反相输入端, ②是同相输入端, ⑩是正电源, ⑥是负电源, ⑧是输出端, ③和

⑪之间外接 30PF 的补偿电容, ④和⑤是调零端(一般接 1—5K 的电位器即可), ⑦、⑨和⑫三个腿为空腿。

NG04 集成运算放大器由 24 个晶体管和 9 个电阻构成, 其中有 7 个横向 pnp 晶体管, 电阻都是硼扩散电阻。此电路在设计上有如下一些主要特点:

1. 采用有源器件做为负载, 所以放大器的单级增益高, 整个电路只有两级放大, 增益即可达 10 万倍 (100dB) 以上。

2. 输入级是采用恒流源电路做为负载的互补差分电路。这样一种输入级的优点是: (1) 扩大了差动输入电压范围。因为  $T_3$ 、 $T_4$  是横向 pnp 型的管子, 它们的基-射结击穿电压  $BV_{EBO}$  与 npn 型管子的基-集结击穿电压  $BV_{CBO}$  是一样的, 而一般的  $BV_{CBO}$  都在 30V 以上, 故此输入级的差动输入电压范围可达 40—60V。 (2) 输入基极偏流  $I_b$  较小, 输入阻抗  $R_i$  与  $I_b$  的关系为  $R_i \approx 160/I_b$ , 这就比在小电流工作时一般的差分输入级的输入阻抗提高了一倍。 (3) 能自动实现电平移动, 不需再加入电平移动电路即可实现零电平输入时得到零电平输出。 (4) 这样的输入级本身就完成了双端输入、单端输出的转换。

3. 输入级的直流偏置是由  $T_5$ 、 $T_{10}$  和  $T_7$ 、 $T_8$  两个恒流源电路提供的。这个偏置电路形成一个闭环稳定

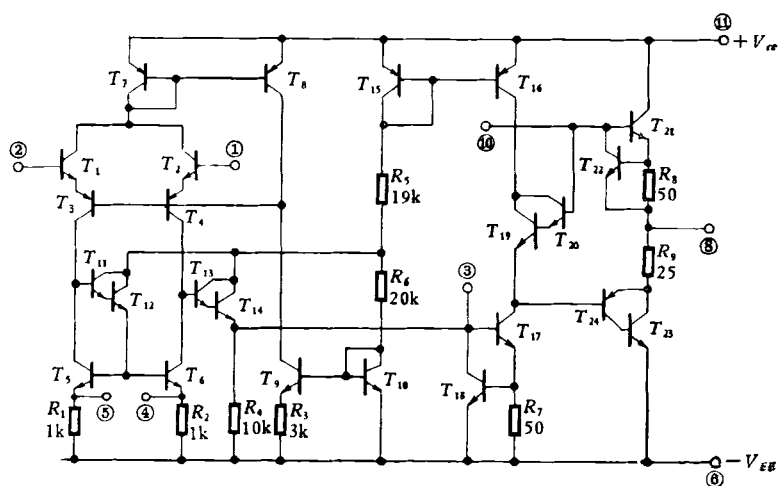


图 1 NG04 集成运算放大器电路及管腿的分配

\* 1976 年 3 月 11 日收到。

系统,可以保持输入级的工作电流不随温度变化,自动维持稳定。并且由于 $T_9$ 管的电流 $I_{c9}$ 与偏置链( $T_{15}$ 、 $R_5$ 、 $R_6$ 、 $T_{10}$ )上的电流 $I_{R5}$ 有对数关系,使输入级的工作电流对电源电压有较大的适应性,因此也就提高了整个电路的电源电压抑制比。

4.为了提高整个放大器的增益,在输入级与驱动级之间加入一个由复合管 $T_{13}$ 、 $T_{14}$ 构成的缓冲级。并且为降低对 $T_{14}$ 管耐压的要求, $T_{13}$ 、 $T_{14}$ 两管的集电极连接到电阻 $R_5$ 、 $R_6$ 中间的近于零电位的位置上。

5.因为只有两级放大,所以运算放大器的频率补偿大大的简化了。利用密勒效应,输入级的输出端与驱动级的输出端之间连接一个30pF的小电容,即可做到完全的频率补偿。

6.输出级电路采用npn管和pnp管的互补推挽Z类输出,因此可降低功耗和增大输出电压范围。为了与介质隔离工艺相适应,输出级中的pnp管用横向pnp管与一般npn管的复合管来代替。

## 二、工作原理

整个电路可分为五部分:偏置电路、输入级、缓冲级、驱动级和输出级。

偏置电路是由恒流源电路 $T_9$ 、 $T_{10}$ 和恒流源电路 $T_{15}$ 、 $T_{16}$ 以及电阻 $R_5$ 、 $R_6$ 构成。 $T_9$ 管的电流 $I_{c9}$ 提供了输入级的工作电流。 $T_{16}$ 管的电流 $I_{c16}$ 提供了驱动级的工作电流。各电流与电源电压有如下关系:

$$I_{R5} = \frac{V_{cc} - (-V_{ee}) - 2V_{BE}}{R_5 + R_6} = 740\mu\text{A};$$

$$I_{c9} = \frac{KT}{qR_3} \cdot \ln \frac{I_{R5}}{I_{c9}} \approx 28\mu\text{A};$$

$$I_{c16} = \frac{I_{R5}}{1 + \frac{2}{\beta_{15}}} = 530\mu\text{A}.$$

在上面各式中, $+V_{cc}$ 、 $-V_{ee}$ 为正负电源,分别为+15V和-15V, $V_{BE}$ 为晶体管的基-射结压降, $V_{BE}=0.7\text{V}$ 。 $\beta_{15}$ 为横向pnp管 $T_{15}$ 的电流放大系数, $\beta_{15}=5$ 。

在输入级电路中, $T_1/T_3$ 和 $T_2/T_4$ 构成互补差分电路,信号由 $T_1$ 、 $T_2$ 的基极输入, $T_1$ 、 $T_2$ 做为射随器,经它们的发射极输出到共基极组态的 $T_3$ 、 $T_4$ 的发射极上,从 $T_3$ 、 $T_4$ 的集电极输出。 $T_5$ 、 $T_6$ 和复合管 $T_7$ 、 $T_8$ 构成一个工作电流与参考电流能很好跟随的恒流源电路,它们做为差分电路的负载,以提高此级的电压增益,并实现双端输入到单端输出的转换。此级的工作电流为

$$I_{c3} = I_{c4} = \frac{1}{2} I_{c9} \approx 14\mu\text{A}.$$

缓冲级就是由 $T_{13}$ 、 $T_{14}$ 复合管构成的射极输出器。

利用它的高输入阻抗和低输出阻抗这个特点,使之有利于增大输入级和驱动级的增益。

驱动级是由 $T_{17}$ 管来完成的,横向pnp管 $T_{16}$ 做为它的有源负载。当 $T_{16}$ 和 $T_{17}$ 的电流放大系数 $\beta=5$ 时, $T_{17}$ 管的静态工作电流为530 $\mu\text{A}$ ;当它们的电流放大系数 $\beta=3$ 时, $T_{17}$ 管的静态工作电流为450 $\mu\text{A}$ 。

在互补推挽输出级电路中,横向pnp的 $T_{24}$ 管和npn管 $T_{23}$ 构成一个复合管,它等效一个 $\beta$ 相乘的pnp型管子。如果在工艺上控制 $\beta_{24}=1$ ,那么互补推挽输出的两个管子( $T_{21}$ 和 $T_{23}/T_{24}$ )就是互相对称的了。就可以获得正负半周对称的输出波形。 $T_{16}$ 和 $T_{20}$ 是为推挽输出提供一个约1.1V的起始偏压,以克服交越失真。

$T_{22}$ 管、电阻 $R_8$ 和 $T_{18}$ 管、电阻 $R_7$ 分别提供了正、负半周的过载保护。

电路的各级电压增益及总的电压增益可通过计算得出:

输入级的电压增益

$$A_{01} = 200 \text{ 倍};$$

驱动级的电压增益

$$A_{02} = 1000 \text{ 倍};$$

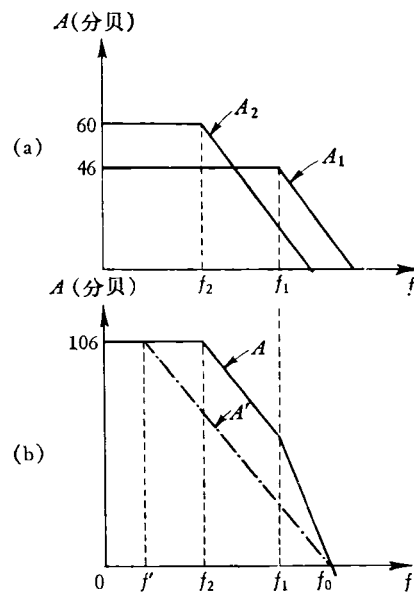


图2 NG04型集成运算放大器的幅频特性

总的电压增益

$$A_0 = 20 \text{ 万倍}.$$

NG04集成运算放大器的频率特性如下:

图2示出了NG04电路的幅频特性。在图2(a)中, $A_1$ 、 $A_2$ 分别为输入级和驱动级的幅频特性。在图2(b)中, $A$ 是整个电路在未加补偿之前的幅频特性, $A'$ 是加了补偿以后的幅频特性。

NG04 的频率补偿方法是在  $T_4$  的基极与  $T_{17}$  的集电极之间连接一个 30PF—100PF 的电容, 此时可画出如图 3 所示的等效电路。图中,  $A_{02}$  是驱动级的开环增益,  $R_{01}$  和  $R'_1$  分别是输入级的输出阻抗和缓冲级的输入阻抗, 它们的数值很大, 都在几 M $\Omega$  以上。  $C_{分}$  是分布电容, 约为几 PF。  $C_{补}$  为补偿电容,  $(C_{补} + C_{分})$  在驱动级输入端的等效电容为  $(1 + A_{02})(C_{补} + C_{分})$ , 由此得到补偿后的 -3dB 带宽  $f'$  为:

$$f' = \frac{1}{2\pi(1 + A_{02})(C_{补} + C_{分})(R_{01} \parallel R'_1)} \cong 5\text{HZ.}$$

NG04 电路的零分贝带宽  $f_0$  约为 1MC。

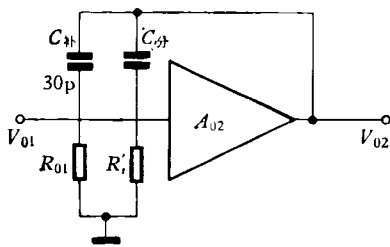


图 3 加补偿后的等效电路

### 三、应用举例

NG04 型集成运算放大器属于通用型高增益的集成运算放大器, 用分立的晶体管组成的运算放大器达到这样的技术指标是比较困难。因此, 在集成运算放大器出现之前, 运算放大器的广泛应用受到限制, 集成化的运算放大器不但技术指标较高, 体积小, 而且使用起来非常方便, 免除了大量的电路调试工作。整个集成运算放大器作为一个器件来使用, 是整机产品的更新换代所必不可少的。例如对于自动化仪器仪表、自动控制、无线电通讯等国民经济的许多领域都有广泛的

应用。NG04 型集成运算放大器典型的技术指标如下:

直流开环增益 $A_0$	106dB
输入失调电压 $V_{0s}$	$\leq 1\text{mV}$
输入失调电流 $I_{0r}$	$\leq 50\text{mA}$
输入基极电流 $I_{ib}$	$\leq 0.1\mu\text{A}$
共模抑制比 $CMRR$	$\geq 90\text{dB}$
输入共模电压范围 $CMV_i$	$\pm 13\text{V}$
输出电压幅度 $V_{P-P}$	$\pm 14\text{V}$
功耗 $P_W$	$< 60\text{mW}$
电源电压 $\pm V$	$\pm 6 - \pm 18\text{V}$ (典型 $\pm 15\text{V}$ )

现将其具体应用举例说明如下:

#### 1. 用作加法器

当输入讯号不是一个, 而是几个时 (例如三个), 如图 4, 此时输出电压与输入电压的关系为

$$V_0 = -(V_1 + V_2 + V_3).$$

即输出电压是输入电压之和, 只是相位相反, 若在其后再接一个倒相器就构成一个完整的加法器了。

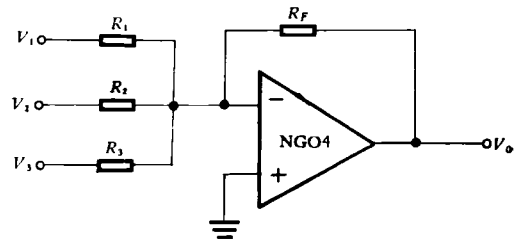


图 4 NG04 型集成运算放大器用作加法器

#### 2. 用作直流稳压电源

用集成运算放大器作为直流稳压电源的电压比较放大器时, 可以大大提高稳压电源的性能。