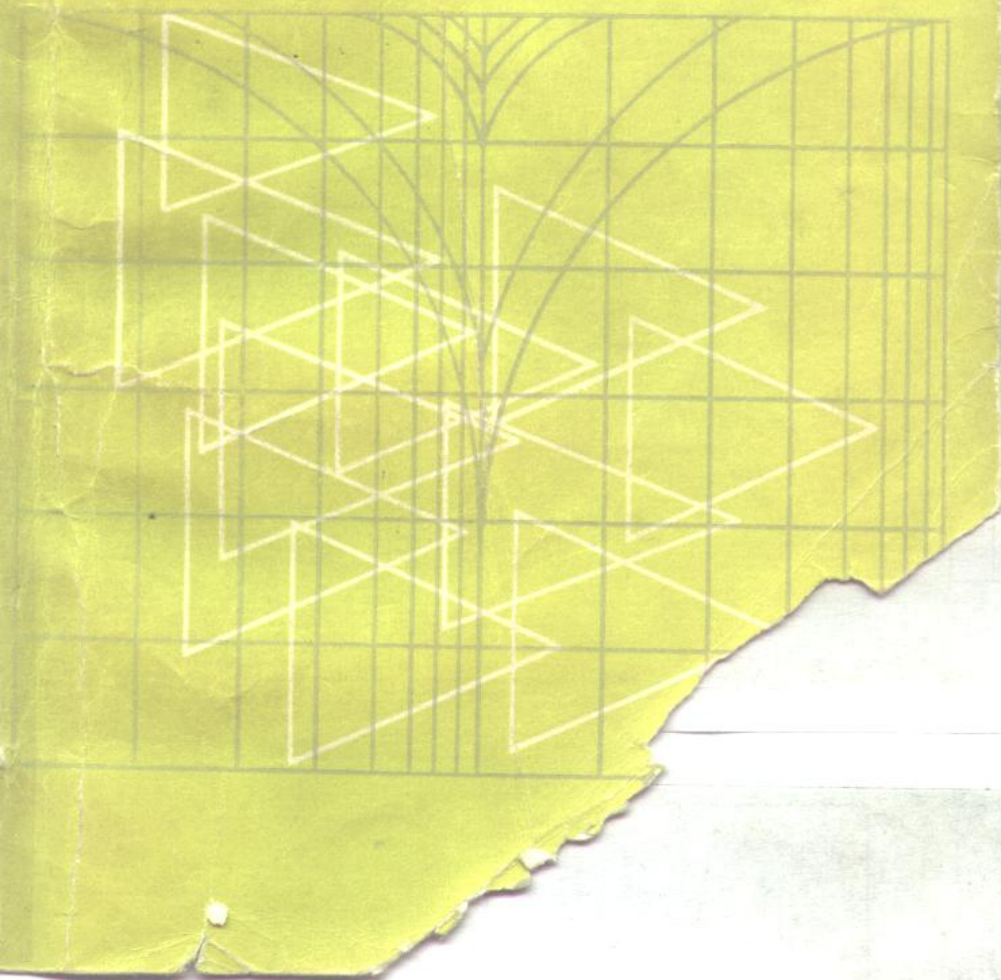


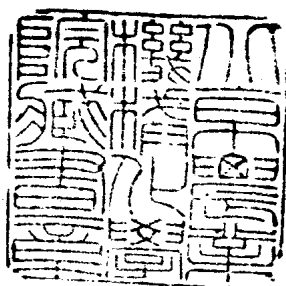
集成运算放大器 应用原理

JI CHENG YUN SUAN FANG DA QI YING YONG YUAN LI



集成运算放大器应用原理

秦世才 王朝英 编著



天津科学技术出版社

集成运算放大器应用原理

秦世才 王朝英 编著

天津科学技术出版社出版

天津市赤峰道124号

天津新华印刷一厂印刷

天津市新华书店发行

开本 787 × 1092毫米 1/32 印张 12.375 字数 261,000

一九八三年十月新一版

一九八三年十月第一次印刷

印数: 1 - 8,800

书号: 15212·107 定价: 1.00元

前 言

运算放大器的历史可以追溯到四十年代，但是直到单片集成运算放大器在一九六四年问世之后才得到了广泛应用。单片集成运算放大器中的晶体管、电阻和电容等被做在一个小小的硅片上，这不仅省去了大量的组装和调整工作，而且也大大提高了放大器的性能和可靠性。现在，集成运算放大器除用作积分、微分、加、减、乘、除等模拟运算之外，还广泛用于精密测量、自动控制、电源、通讯、信息处理等电子设备中，成为产量和用量最大的一种模拟集成电路。

本书的重点是阐述集成运算放大器的应用原理，而不是讲内部电路设计。全书共分七章，其中前面五章介绍了集成运算放大器的基本知识，这是了解和使用集成运算放大器的基础。为了加深对基础知识的理解，第六章列举了集成运算放大器的一些典型应用实例。最后一章介绍国内集成运算放大器的主要产品，以供读者在使用时参考。

在编写时，力求做到简明扼要，重点突出，结论明确。由于我们的水平有限，经验不足，缺点、错误在所难免，恳望读者批评指正。

钱其璈同志对全书进行了审阅，在此深表谢意。

秦世才

目 录

第一章 运算放大器的基本概念

- § 1. 什么是运算放大器 (1)
- § 2. 集成运算放大器的基本电路结构 (4)
- § 3. 集成运算放大器的主要参数 (28)
- § 4. 理想运算放大器 (42)

第二章 运算放大器的闭环特性

- § 1. 反相输入放大器 (45)
- § 2. 同相输入放大器 (50)
- § 3. 对两种工作方式的讨论 (56)
- § 4. 差动输入放大器 (62)
- § 5. 直流参数引进的误差 (63)

第三章 集成运算放大器的频率响应

- § 1. 单极点放大器的开环频率响应 (76)
- § 2. 多极点放大器的开环频率响应 (81)
- § 3. 运算放大器的闭环频率响应 (86)

第四章 集成运算放大器的自激振荡与相位补偿

- § 1. 反馈运算放大器的自激振荡 (95)
- § 2. 集成运算放大器的相位补偿 (102)
- § 3. 运算放大器的瞬态响应 (131)

第五章 集成运算放大器的测试

- § 1. 通用型集成运算放大器主要参数的测量 (140)
- § 2. 其他参数的测试 (146)
- § 3. 使用辅助放大器的测试方法 (146)

第六章 集成运算放大器的应用

§ 1. 直流比例放大器	(180)
§ 2. 直流差动放大器	(194)
§ 3. 积分器	(209)
§ 4. 微分器	(223)
§ 5. PID放大器	(227)
§ 6. 对数放大器	(231)
§ 7. 比较器	(241)
§ 8. 电流-电压变换器和微电流放大器	(249)
§ 9. 电压-电流变换器和恒流源	(254)
§ 10. 直流稳压电源	(259)
§ 11. 波形发生器	(266)
§ 12. 检波电路	(290)
§ 13. 有源滤波器	(298)
§ 14. 晶体管测量电路	(326)
§ 15. 改善集成运算放大器性能的方法	(331)

第七章 国产集成运算放大器介绍

§ 1. F 001、F 002集成运算放大器简介	(340)
§ 2. F 003、F 005集成运算放大器简介	(347)
§ 3. F 004集成运算放大器简介	(351)
§ 4. BG305集成运算放大器简介	(355)
§ 5. 8FC2集成运算放大器简介	(358)
§ 6. FC52集成运算放大器简介	(360)
§ 7. F 007、F 006集成运算放大器简介	(361)
§ 8. NG04集成运算放大器简介	(369)
§ 9. F 010集成运算放大器简介	(370)
§ 10. F 031集成运算放大器简介	(371)
§ 11. F 050高速集成运算放大器简介	(375)
§ 12. F 072集成运算放大器简介	(376)

附录 I	部分国内外集成运算放大器型号对照表	(379)
附录 II	国产集成运算放大器参数分类表	(380)
附录 III	部分国产集成运算放大器参数表	(382)
参考资料		(385)

第一章 运算放大器的 基本概念

运算放大器，顾名思义，就是作运算用的放大器。运算放大器是模拟计算机的核心部件，用以对讯号进行加法、减法、积分、微分等数学运算。但是运算放大器的用途并不限于此，由于它本身是一种高性能的直接耦合放大器，所以在自动控制、测量技术、仪器仪表等领域中均有十分广泛的用途。

本章的主要内容是介绍有关运算放大器的一些基本概念。随着集成电路技术的发展，电子管运算放大器早已被淘汰，分立的晶体管运算放大器也很少使用，而集成运算放大器的发展却十分迅猛。本书是针对集成运算放大器写的，但是书中所讲的基本概念对分立元件的运算放大器也同样适用。

§1. 什么是运算放大器

运算放大器实质上是一种高性能的直接耦合放大器。运算放大器的符号如图 1·1 所示。它有两个输入端，即同

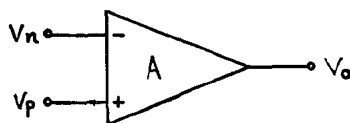


图 1·1 运算放大器的符号

相输入端和反相输入端，分别以符号“+”和“-”表示。讯号从同相端输入时，输出讯号与输入讯号相位相同；讯号从反相端输入时，输出讯号与输入讯号相位相反。输出与输入满足下面的关系：

$$V_o = A_o (V_p - V_n) \quad (1.1)$$

其中 A_o 是放大器的电压增益。

当 $A_o \rightarrow \infty$ 时，由于输出电压 V_o 不能任意大，所以

$$(V_p - V_n) \rightarrow 0 \quad (1.2)$$

或者

$$V_p \doteq V_n$$

当输入阻抗 $R_i \rightarrow \infty$ 时，放大器的输入电流

$$I_B = \frac{V_n - V_p}{R_i} \rightarrow 0 \quad (1.3)$$

对这样的高性能直接耦合放大器加接不同的外接元件，其输出与输入可具有不同的运算关系。例如：

一、加法器

对于图 1.2 所示的电路，如果放大器的 A_o 和 R_i 均为无穷大，则由 (1.2) 式知

$$V_n \doteq V_p = 0 \quad (1.4)$$

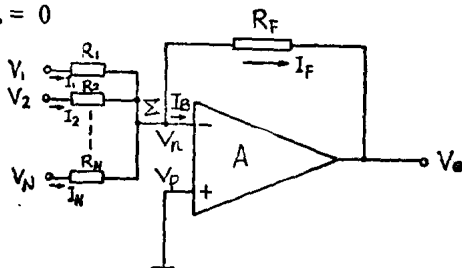


图 1.2 加法器

即 Σ 点的电位近于地而不能接地（如果接地，则输入讯号被短路），称为“虚地”。所以

$$I_1 = \frac{V_1 - V_n}{R_1} = \frac{V_1}{R_1}, \quad I_2 = \frac{V_2 - V_n}{R_2} = \frac{V_2}{R_2}, \quad \dots$$

$$I_F = -\frac{V_0 - V_n}{R_F} = -\frac{V_0}{R_F}$$

又因 $I_B \rightarrow 0$, $I_1 + I_2 + \dots + I_N = I_F$

所以
$$\frac{V_1}{R_1} + \frac{V_2}{R_2} + \dots + \frac{V_N}{R_N} = -\frac{V_0}{R_F}$$

若取 $R_1 = R_2 = \dots = R_N = R_F$, 使得

$$V_0 = -(V_1 + V_2 + \dots + V_N)$$

即输出电压等于各输入电压之和，实现了加法运算。

二、积分器

对于图1.3的电路，

由(1.3)和(1.4)式知

$$V_0 = -V_C, \quad I_R = I_C$$

V_C 是电容上的电压。所以

$$V_0 = -V_C = -\frac{1}{C} \int I_C dt = -\frac{1}{RC} \int V_i dt$$

(1.5)

从而实现了输入讯号的积分运算。

三、微分器

对图1.4的电路，在(1.3)式和(1.4)式成立时，有

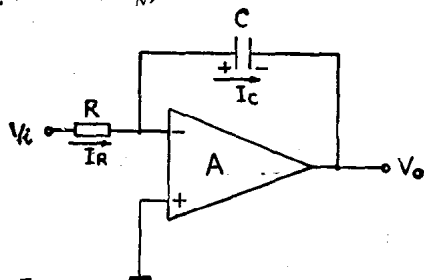


图1.3 积分器

$$V_o = -RI_R = -RI_C = -RC \frac{dV_i}{dt} \quad (1.6)$$

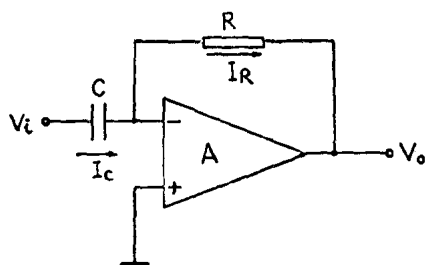


图 1.4 微分器

即输出讯号与输入讯号的微分成比例，实现了微分运算。

从上面的几个例子看出，运算电路是由高性能的直接耦合放大器和反馈网络两部分组成的。但是由于放大器是

核心部分，所以人们又把能组成运算电路的高性能直接耦合放大器叫做运算放大器。在以下的论述中，所说的运算放大器都是指直接耦合放大器本身，而不包括反馈网络。

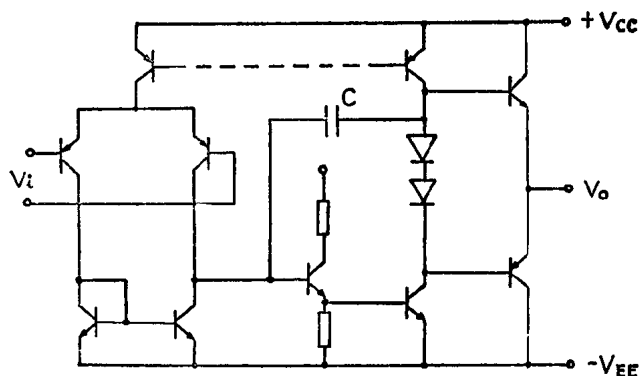
§2. 集成运算放大器的基本电路结构

集成运算放大器一般由差动输入级、中间放大级、输出级、偏置电路、电平移动电路及附加电路（如短路保护电路等）几部分组成。图 1.5 是现在应用很广的一种集成运算放大器的简化电路，偏置电路、电平移动电路等部分在图中没有画出。下面，简要介绍组成集成运算放大器的一些基本单元电路及其特点。

一、差动电路

1. 最基本的差动电路：最基本的差动电路如图 1.6 所

T_1 、 T_2 是性能相同的两个晶体管， R_c 是它们的集电极负载电阻， R_E 是公用发射极电阻。为了使输入端能接零电位，



←差动输入级→←中间放大级→←输出级→

图 1.5 集成运算放大器结构简图

采用正、负电源供电。

差动放大器的输入端和输出端各有两个不接地的端点，因此有多种工作方式：

(1) 当两个输入端接入大小相同、相位相反的讯号时，即 $V_1 = -V_2$ ，称为差模输入。此时，在二输出端之间能得到相位相反的输出，称二输出端之间的相对输出叫差模输出。

(2) 当二输入端接入大小相等、相位相同的讯号时，即 $V_1 = V_2$ ，称为共模输入。此时二输出端对地输出的讯号电

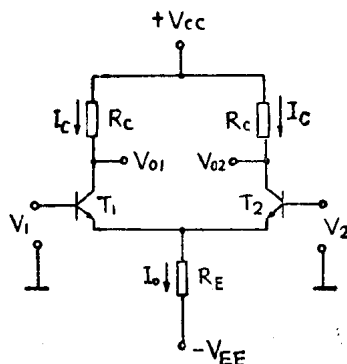


图 1.6 差动放大级

压的平均值叫共模输出。

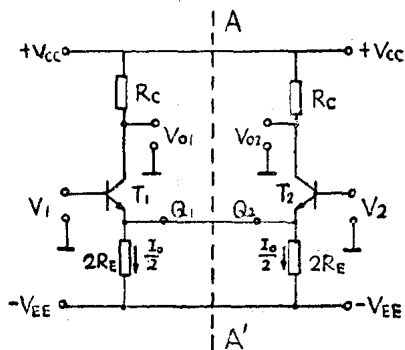


图 1.7 差分放大级的等效电路

电路的左、右两半相对 AA' 轴是对称的。每个管子的发射极电阻为 $2R_E$ ，发射极电流为 $\frac{I_0}{2}$ 。

当加入差模讯号时，即 $V_1 = -V_2 = V_d$ ，若 V_1 使 T_1 的基极电位上升，则 V_2 使 T_2 的基极电位下降，两者变化的幅度相同。此时 T_1 的集电极电位下降， T_2 的集电极电位上升，如果电路是对称的， V_{01} 与 V_{02} 的电位变化方向相反、幅度相同。与此同时 I_{c1} 增大， I_{c2} 减少，流过发射极电阻上的总电流不变，即连接

(3) 当讯号从二输入端中的任一端输入，另一端接地时，称为单端输入。而二输出端任一端对地的输出都叫单端输出。

因为差动放大器的结构是对称的，因此可以把图 1.6 的电路重新画成图 1.7 的形式，电

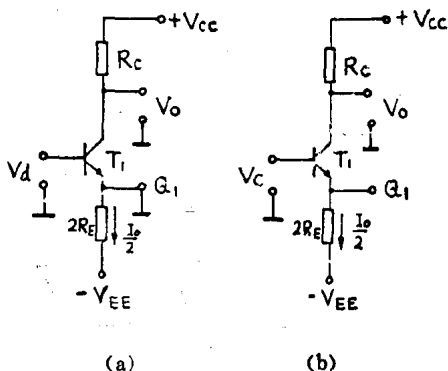


图 1.8 差分放大级的等效电路

两个发射极的节点($Q_1 - Q_2$)电位保持不变, 因此对差模输入讯号来说, 可以用图 1·8 (a) 所示的等效电路来分析。由图可知, 此时电路的电压增益就是一般的共发射极放大器的增益:

$$A_{DM} = \frac{V_o}{V_i} = -R_c g_m \quad (1.7)$$

其中 R_c 是集电极负载电阻, g_m 是 T_1 管的跨导。

$$g_m = \frac{qI_o}{2KT} \quad (1.8)$$

其中 q 是电子电荷量 $= 1.6 \times 10^{-19}$ 库仑

K 是波尔兹曼常数 $= 1.38 \times 10^{-23}$ 焦耳/ $^{\circ}K$

T 是用 $^{\circ}K$ 表示的绝对温度。

当输入共模讯号时, 即 $V_1 = V_2 = V_c$ 时, 差动电路左右两半部的电压和电流以相同的方式变化, T_1 和 T_2 的两个发射极电位相对没有变化。因此, 对共模输入来说可用图 1·8 (b) 的等效电路进行分析。由于发射极上串有电阻 $2R_E$, 因此电压增益很低。由图可写出共模输入时的电压增益为

$$A_{CM} = \frac{V_o}{V_c} = - \frac{R_c}{\frac{1}{g_m} + 2R_E} \quad (1.9)$$

发射极电阻 R_E 的数值一般都取的较大, 因此共模增益是很低的。

上面所讲的差模讯号 ($V_1 = -V_2$) 及共模讯号 ($V_1 = V_2$) 是两个完全反对称和完全对称的讯号, 这只是特殊情况。如果差动放大器的两个输入讯号是任意的, 则差模讯号与共模讯号的定义为

$$V_d = \frac{1}{2}(V_1 - V_2) \quad (1.10)$$

$$V_c = \frac{1}{2} (V_1 + V_2) \quad (1.11)$$

这表明，对于既不是对称又不是反对称的两个任意输入讯号，它不但引进一定的差模讯号，而且引进一定的共模讯号。

在许多情况下，差动电路用于单端输入，例如输入讯号 $V_2 = 0$ ，则由(1.10)知，此时对应的差模输入讯号为 $V_d = \frac{1}{2} V_1$ ，因此得到单端输入时差动电路的增益为

$$A = \frac{V_0}{V_1} = -\frac{g_m R_c}{2} \quad (1.12)$$

可见单端输入的增益比双端输入的增益降低一半。

由(1.7)和(1.9)式可知，增大发射极电阻 R_E 的阻值可以

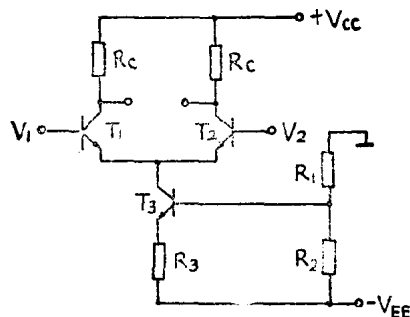


图 1.9 用晶体管代替发射极电阻的差动放大器

减小共模增益而不会影响差模增益。但是提高 R_E 受电源电压和静态功耗等因素的限制。用晶体管的高的集电极动态输出阻抗来代替 R_E 可以克服这一矛盾，如图 1.9 所示。晶体管 T_3 在这里起着恒流源的作用，它为差动电路提供了所需

的直流偏置，也用它的动态输出阻抗代替了 R_E 。

这种基本差动电路的输入阻抗为两个输入晶体管 T_1 、 T_2 的输入阻抗之和，即

$$\begin{aligned}
 R_i &= 2h_{ie} \\
 &= 2[r_b + (1 + \beta)r_e] \\
 &\doteq 2\beta r_e
 \end{aligned}
 \tag{1.13}$$

式中 r_b 为基极电阻， r_e 是发射极动态电阻。

2. 差动电路的几种变型：为了减少输入晶体管的基极电流，可以采用电流放大系数 β 大的晶体管做为差动对管，也可用复合管组成差动电路，如图1.10所示。 T_1/T'_1 和 T_2/T'_2 是两个复合管，如果 T_1 、 T_2 的电流放大系数为 β ， T'_1 、 T'_2 的电流放大系数

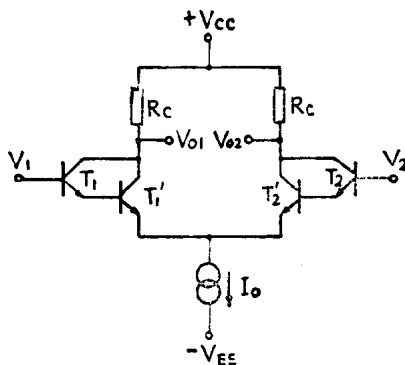


图 1.10 复合差动放大级

为 β' ，那么复合管 T_1/T'_1 、 T_2/T'_2 的电流放大系数为 $\beta\beta'$ 。如果复合管的集电极电流与图 1.9 差动电路的电流相同，这种复合差动电路的基极电流将降低很多。

复合差动电路在差模输出时的跨导为

$$g_m = \frac{qI_0}{4KT} \tag{1.14}$$

与(1.8)式相比可知，这种差动电路的跨导比前述的单管差动电路的跨导要小一半。

复合差动放大级的输入阻抗为

$$R_i \doteq 2\beta\beta'r_e \tag{1.15}$$

在相同的集电极电流下，复合差动放大级的输入阻抗要比单

管差动放大器高。

另一种改进的差动电路是用npn晶体管和pnp晶体管组成的互补差动电路，如图1·11所示。 T_1 、 T_2 为npn晶体管，

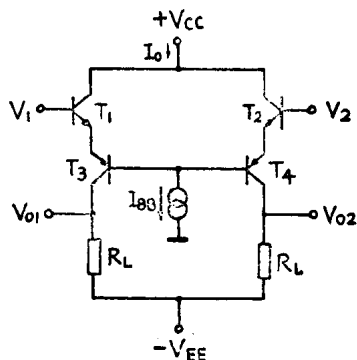


图 1·11 互补差动放大级

T_3 、 T_4 为pnp晶体管，讯号由 T_1 、 T_2 的基极输入，由它们的发射极输出到共基极组态的 T_3 、 T_4 管的发射极上，经放大后由 T_3 、 T_4 的集电极输出。晶体管 T_3 、 T_4 是横向pnp晶体管，它们的电流放大系数 β 较小（只有几倍或十几倍），但它的基—射结

反向击穿电压 BV_{EBO} 与基—集结的反向击穿电压 BV_{CBO} 是一样大的，一般总可达到40V以上，因此这种电路的差模输入电压范围很大，约40V以上。

此外，这种差动电路是从pnp管的集电极输出的，因此可以采用npn型晶体管作为它的有源负载。这可大大提高电压增益，并便于进行电平移动。

互补差动电路差模输出时的跨导为

$$g_m = \frac{\alpha_3 q I_0}{4 K T} \quad (1 \cdot 16)$$

其中 $\alpha_3 = \alpha_4$ 是pnp管 T_3 、 T_4 的共基极电流放大系数。

这种差动电路的输入阻抗为

$$R_i = 2(1 + \beta_1)(r_{e1} + r_{e3}) \approx 4\beta r_e \quad (1 \cdot 17)$$