

中等专业学校系列教材

非电专业通用

集成运算放大器 及其应用

张慎旃 编

高等教育出版社

2.7

内 容 提 要

本书是在国家教育委员会职业技术教育司指导下，根据“全国中等专业学校电工学与工业电子学课程组”和高等教育出版社共同制订的1986~1990年教材规划，通过评选择优出版的。可以作为中等专业学校非电类专业师生学习“工业电子学”课程的补充教材，也可供电专业师生和有关工程技术人员参考。

本书比较系统地剖析了集成运算放大器的内部电路结构工作原理、典型产品、主要参数及理想特性，着重讨论了它在信号运算、信号处理、信号发生、信号变换、信号测量与信号放大等方面的典型电路、基本原理和应用举例，最后介绍了它的使用常识。

中等专业学校系列教材

非电专业通用

集成运算放大器及其应用

张慎旃 编

高等教育出版社出版

新华书店上海发行所发行

商务印书馆上海印刷厂印装

*

开本 787×1092 1/32 印张 9.125 字数 188,000

1990年9月第1版 1990年9月第1次印刷

印数 0,001—3,590

ISBN 7-04-003026-8/TM·154

定价 1.35 元

前 言

本书是在国家教育委员会职业技术教育司指导下, 根据全国中等专业学校电工学与工业电子学课程组和高等教育出版社共同制订的 1986~1990 年教材规划而编写的系列教材之一。本书的主要任务是帮助中等专业学校学生在学习了《电工学》与《工业电子学》等课程的基础上开阔视野、学习新技术, 激励青年学生及有志于自学的读者不断进取、勇攀高峰的学习后劲, 培养他们的自学能力, 为掌握高一级的电子技术打下一定的基础; 并为相关教师提供教学参考资料。

集成运算放大器, 作为一个通用性很强的功能部件, 由专业工厂成批生产, 直接提供人们选用, 它与传统的分立元件放大器相比, 大大减少了使用者从电路设计、元件选配到组装调整等方面的繁重劳动, 同时还具有体积小、重量轻、功耗低、工作可靠、维修简便、成本低廉、性能优良、灵活性大等优点。因此, 该器件得到了迅速发展和广泛应用。本书通过介绍若干具有代表性的典型产品和基本电路, 试图让读者对集成运算放大器能获得初步的了解, 从而掌握一些使用该器件的基本方法, 并使集成运算放大器得到更进一步的普及和推广。

本书以定性分析为主、定量分析为辅的原则进行编写, 力求做到深入浅出、通俗易懂、条理清楚、便于自学。书中对初次出现的新名词、新概念、新电路、新原理, 均予以尽可能详细的介绍; 对一些难度较大的电路和数学推导, 由于篇幅所限,

则只能摘引原著结论,并注明参考书的出处,以备读者查阅。

本书由贵州省邮电学校张慎旃编写,广西南宁化工学校周静益审阅,并经湖南大学黄义源老师复审。本书在编写过程中,曾得到全国中专电工学与工业电子学课程组、高等教育出版社电工编辑室、贵州省邮电学校领导及不少老前辈和有关同志的指导、帮助、支持和关心,编者在此一并表示深切谢意。

由于本人水平有限,书中难免有不妥之处,恳切希望广大师生和读者批评指正。

编 者

1989年8月于贵阳

目 录

绪论	1
第一章 集成运算放大器的基础知识	3
第一节 集成运算放大器的单元电路	3
一、输入级	4
二、恒流源及其偏置电路	13
三、中间级	18
四、输出级	26
第二节 通用型集成运算放大器的典型电路	31
一、通用 I 型集成运算放大器	31
二、通用 II 型集成运算放大器	34
三、通用 III 型集成运算放大器	37
第三节 特殊型集成运算放大器简介	43
一、高输入阻抗集成运算放大器	43
二、高精度集成运算放大器	44
三、其它特殊型集成运算放大器	45
第四节 集成运算放大器的主要参数	45
一、静态参数	46
二、动态参数	48
第五节 集成运算放大器的理想化	52
一、集成运放的图形符号	52
二、集成运放的理想条件	53
三、两条重要结论	54
第六节 集成运算放大器的三种基本接法(组态)	55
一、反相输入放大器	56
二、同相输入放大器	59
三、差动输入放大器	62
四、误差及改善措施	63

五、交流放大器简介	64
第二章 集成运算放大器在信号运算方面的应用	67
第一节 加法和减法运算放大器	67
一、加法运算放大器	67
二、减法运算放大器	71
三、加减综合运算放大器	73
第二节 对数和反对数运算放大器	73
一、对数运算放大器	73
二、反对数运算放大器	75
第三节 乘法和除法运算放大器	76
一、乘法运算放大器	76
二、除法运算放大器	78
三、乘法器的应用举例	79
第四节 积分和微分运算放大器	83
一、积分运算放大器	84
二、微分运算放大器	87
三、利用运算放大器求解微分方程举例	89
第三章 集成运算放大器在信号处理方面的应用	90
第一节 RC 有源滤波器	90
一、低通滤波器	91
二、高通滤波器	94
三、带通滤波器	97
四、带阻滤波器	99
五、应用举例	100
第二节 反馈限幅器	102
一、硅稳压管反馈限幅器	102
二、稳压管桥式反馈限幅器	104
三、电阻分压式反馈限幅器	106
第三节 非线性函数产生器	107
一、限幅型函数产生器	108
二、扩展型函数产生器	111
三、倒数型函数产生器	113

四、应用举例	115
第四节 精密二极管电路	117
一、二极管精密检波器	118
二、幅度选择电路	120
三、精密全波整流器	121
第五节 采样-保持电路	123
一、缓冲式采样-保持电路	123
二、峰值采样-保持电路	125
第六节 电压比较器	127
一、单限比较器	127
二、回差比较器	131
三、窗孔比较器	135
四、应用举例	136
第四章 集成运算放大器在信号发生方面的应用	140
第一节 正弦波发生器	140
一、自激振荡原理	140
二、文氏电桥正弦波发生器	143
三、移相式正弦波发生器	145
第二节 方波和三角波发生器	146
一、方波发生器	146
二、方波和三角波发生器	148
第三节 矩形波和锯齿波发生器	150
一、矩形波发生器	150
二、矩形波和锯齿波发生器	152
三、锯齿波应用举例	154
第四节 阶梯波发生器	157
一、阶梯波发生器	157
二、阶梯波应用举例	160
第五章 集成运算放大器在信号变换方面的应用	162
第一节 电压-频率变换电路(VFC)	162
一、压控振荡器(VCO)	162
二、压控振荡器的应用	165

三、压-频变换器(VFC)	165
四、压-频变换器的应用举例	169
第二节 频率-电压变换电路(FVC)	170
一、单稳态触发器	170
二、频-压变换原理	174
第三节 模拟-数字(A/D)变换电路	176
一、单斜坡式模-数变换器	177
二、并行模-数变换器	179
第四节 数字-模拟(D/A)变换电路	182
一、数-模变换的基本概念	182
二、数字位电子开关	183
三、权电阻数-模变换器	184
第六章 集成运算放大器在信号测量方面的应用	187
第一节 模拟电表电路	187
一、直流电压表电路	188
二、直流电流表电路	190
三、交流电压表电路	191
四、交流电流表电路	192
五、电阻表电路	193
六、电桥电路	194
七、隔离测量技术	196
第二节 数字仪表	198
一、数字表头	198
二、交流电压-直流电压变换器	200
三、电流-电压变换器	202
四、电阻-电压变换器	203
第七章 集成运算放大器在信号放大等方面的应用	204
第一节 能量转换器	204
一、压电转换器	204
二、热电转换器	205
三、光电转换器	207
四、声电转换器	209

第二节	自动调节器	211
一、	比例-积分(PI)调节器	211
二、	比例-微分(PD)调节器	213
三、	比例-积分-微分(PID)调节器	215
四、	应用举例	216
第三节	稳定电源	217
一、	基准电压源	218
二、	稳压电源	219
三、	稳流电源	223
四、	可控双向恒流源	224
第四节	放大电路拾零	226
一、	倒相输出功率放大电路	226
二、	心电图测试仪前置放大器	227
三、	三段有源音调调节电路	228
四、	调谐放大器	229
第五节	其它应用电路简介	231
一、	脉宽调制(PWM)	231
二、	有源模拟电感	234
三、	逻辑电路	237
第八章	集成运算放大器的使用常识	238
第一节	集成电路的外形和引线脚	238
一、	圆筒型	238
二、	扁平型	240
三、	直插型	240
第二节	集成运算放大器的测试	240
一、	集成运放的粗测	241
二、	主要参数的简易测量方法	243
三、	辅助放大器测试法	247
第三节	集成运算放大器的相位补偿技术	248
一、	简单电容补偿	249
二、	密勒电容补偿	250
三、	RC串联补偿	251

第四节	集成运算放大器的选择和互换	251
一、	集成运放的选择	252
二、	集成运放的互换	253
三、	互换时的注意事项	253
第五节	通用型集成运算放大器的性能扩展	253
一、	减小失调电压和漂移	255
二、	提高输入电阻	255
三、	增大输出功率	256
第六节	集成运算放大器在使用中可能出现的问题	257
一、	不能调零	257
二、	阻塞现象	258
三、	自激振荡	260
四、	突然损坏	261
第七节	集成运算放大器的保护措施	261
一、	电源极性保护	261
二、	输入保护	262
三、	输出保护	264
结束语	267
附录一	国产集成运算放大器的分类及主要电参数	269
附录二	集成运算放大器型号对照表	270
附录三	国产集成运算放大器引线脚排列图(顶部俯视)	274
参考文献	279

绪 论

科学研究和生产实践的客观需要促进了电子器件和应用电路的不断改进，而电子器件的每一次重大变革又推动着电子技术的飞跃发展。随着电子管、晶体管、集成电路和大规模集成电路先后四代电子器件的相继出现，已把电子技术的应用推向了更广阔的天地。当前，电子技术正在日新月异地飞速发展。

集成电路是 60 年代初期发展起来的一种新型电子器件，它是采用掩模光刻、扩散、外延和蒸铝等半导体生产工艺，把晶体管、电阻、电容及连接导线按其电路要求集中制造在一块半导体基片上，封装在一个管壳内，构成一个不可分割的、具有一定电路功能的固体组件。集成电路分模拟和数字两大类，在模拟集成电路中应用最广的则是集成运算放大器，简称“集成运放”。

集成运放是一个开环增益很高的多级直流放大器。当它外接不同性质的反馈网络时，就能具有一系列的数学运算功能，这就是“集成运放”这一名称的由来。

集成运放的特点是：输入阻抗高、零点漂移小、抗干扰能力强，能用来处理微弱的电信号；开环电压增益高达几万到几百万倍，在应用时可加上深度负反馈，因而具有增益稳定、非线性失真小等优点；而且它作为一种独立的电子器件产品供人们直接选用，使用尤为方便，同时还具有集成电路所特有的

许多优点;更重要的是,能用它组成各式各样的电路,因此,它除了可以进行信号运算外,还能在信号处理、信号发生、信号变换、信号测量及信号放大等方面发挥更广泛的作用,可以毫不夸张地说:凡是晶体管分立元件能组成的电子电路都可以用集成运放来组成,而且还能用集成运放组成晶体管分立元件难以做到的、性能非常独特的电子电路。所以,集成运放不仅用于电子模拟计算机中,还遍及自动控制、自动测量、航天技术、通信工程、医疗设备和家用电器等各种技术领域中。

集成运放的发展经历了以下几个阶段:1964年问世的 $\mu A702$ (我国的F001),是集成运放的雏型,它的特点是全部为NPN型管,便于制造,其高频特性也较好。第一代集成运放以1965年问世的 $\mu A709$ (我国的F004)为代表,它采用少量横向PNP型管等特殊元件,技术指标达到了中等运算精度的要求。第二代集成运放于1966年问世,它的特点是采用有源负载,提高了电路增益,典型代表是 $\mu A741$ (我国的F007)。第三代集成运放以1972年问世的AD508.(我国的F030)为代表,特点是采用了超 β 晶体管,获得了优良的直流参数。第四代集成运放以1973年问世的HA2900和SN62088为代表,特点是采用斩波自稳零技术,使失调和漂移进一步减小,性能接近理想化,并已进入了大规模集成电路的体制。目前,集成运放正在向高速、高压、低功耗、低漂移、低噪声、大功率等方面继续发展中。

第一章 集成运算放大器的基础知识

本章首先详细剖析集成运放的内部电路结构和各单元电路的工作原理,进而介绍集成运放的典型产品和主要参数,最后讨论理想集成运放和三种基本接法,为学习集成运放的应用电路打好基础。

第一节 集成运算放大器的单元电路

要正确使用集成运算放大器,就应该熟悉它的性能参数;要熟悉它的性能参数,还必须对它的内部电路结构和工作原理有所了解。

集成运放是一个高增益的多级直流放大器,它一般采用双端输入、单端输出的结构形式,由输入级、中间级、输出级和偏置电路四大部分组成,中间级又包括了双端-单端转换电路、中间增益级和电位位移电路,其方框图如图 1-1 所示。

集成运放的图形符号如图 1-2 所示,图中“-”为反相输

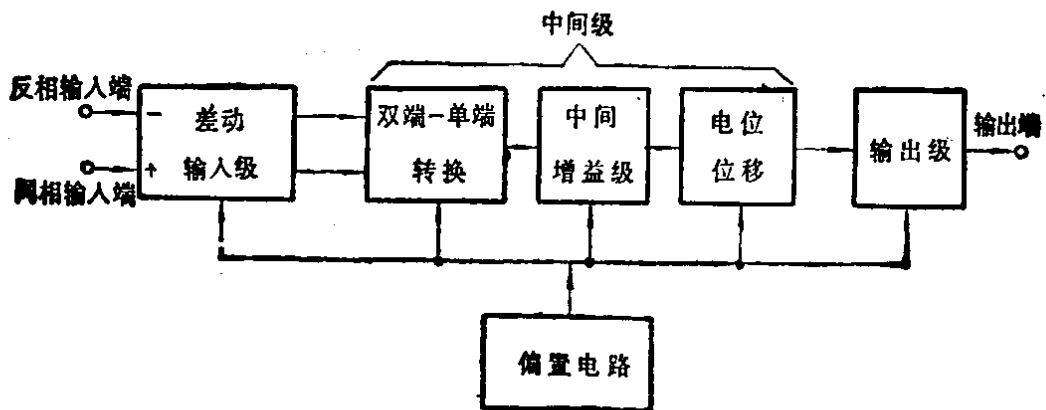


图 1-1 集成运放方框图

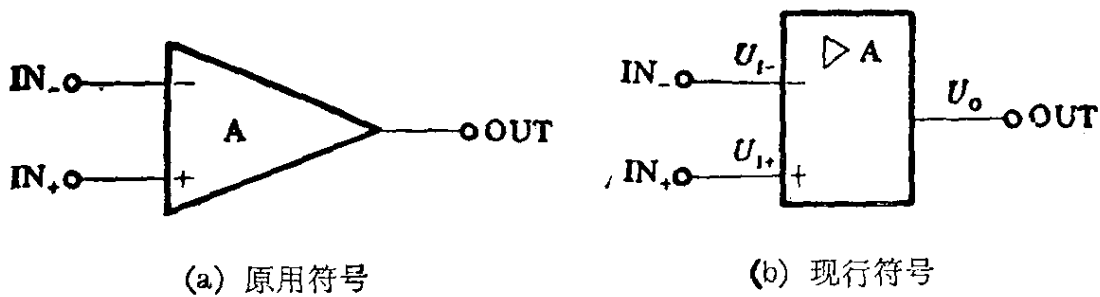


图 1-2 集成运放的图形符号

入端 IN_- , 表示集成运放输出端 OUT 的信号 U_o 与该输入端的信号 U_{I-} 相位相反; “+”为同相输入端 IN_+ , 表示输出信号 U_o 与该输入端信号 U_{I+} 相位相同。

下面就集成运放各单元电路分别加以讨论。

一、输入级

由于集成工艺制作大电容和电感困难, 所以在集成运放中只能采用直接耦合放大电路。但在直接耦合放大电路中, 由于温度、电源电压的变化和外界因素的干扰, 将会引起各级静态工作点发生变动, 而这些变动(特别是温度变化所引起的变动)又会被逐级放大, 使放大器输出电压偏离了起始值, 这种现象就称为零点漂移。零点漂移将会在放大器输出端出现不规则的低频噪声, 同时使放大器的动态工作范围变窄, 非线性失真加剧, 干扰了放大器的正常工作; 严重时还会把有用信号完全淹没掉, 以致在输出端分辨不出真实情况, 使放大器根本无法工作。

为了克服零点漂移和增加使用的灵活性, 几乎所有的集成运放都采用性能优良的差动放大器作为输入级。下面就来分析差动放大器的典型电路和工作原理。

1. 典型差动放大电路

典型差动放大电路如图1-3所示。图中 T_1 、 T_2 是一对特性相同的差分对管, R_{C1} 、 R_{C2} 是阻值相等的集电极负载电阻, I_0 是两管发射极公用恒流源, $+E_C$ 是集电极正电源, $-E_E$ 是发射极负电源, 1、2 端为信号输入端, 3、4 端为信号输出端。

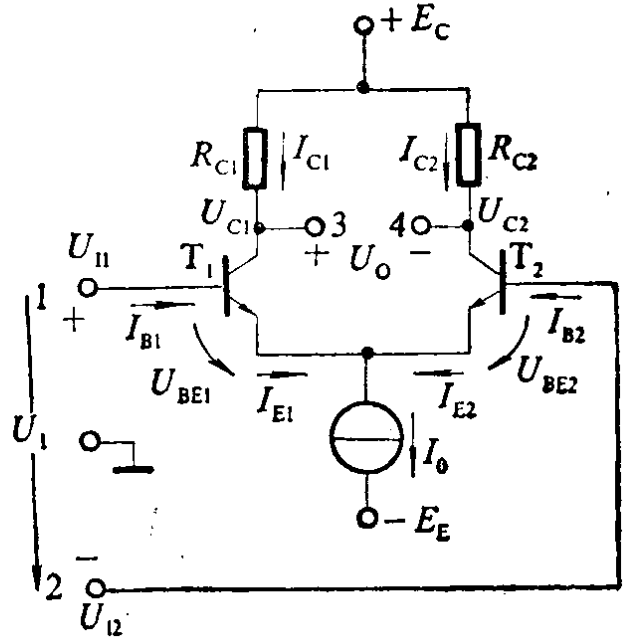


图 1-3 差动放大电路

静态时, 输入信号 $U_{I1} = 0$, 即两管基极电位 $U_{I1} = U_{I2} = 0$, 在 $-E_E$ 的作用

下产生静态基流, 由于两管特性相同、电路元件对称, 即 $\beta_1 = \beta_2$ 、 $U_{BE1} = U_{BE2}$ 、 $R_{C1} = R_{C2}$, 则

$$I_{BQ1} = I_{BQ2}$$

$$I_{CQ1} = I_{CQ2}$$

$$I_{EQ1} = I_{EQ2} = \frac{I_0}{2}$$

$$U_{CQ1} = U_{CQ2}$$

此时差动放大电路的输出电压 U_o 为

$$U_o = U_{CQ1} - U_{CQ2} = 0$$

可见, 差动放大电路在静态时处在零输入-零输出状态。

(1) 差模放大原理

当两个输入端之间加一个输入信号 U_{ID} 时, 由于两管特性对称一致, 使两管基极获得一对大小相等、对地极性相反的

信号 ΔU_{I1} 和 ΔU_{I2} , 即

$$\begin{cases} \Delta U_{I1} = \frac{U_{ID}}{2} \\ \Delta U_{I2} = -\frac{U_{ID}}{2} \end{cases}$$

通常把这对大小相等、对地极性相反的信号叫做差模信号, 称

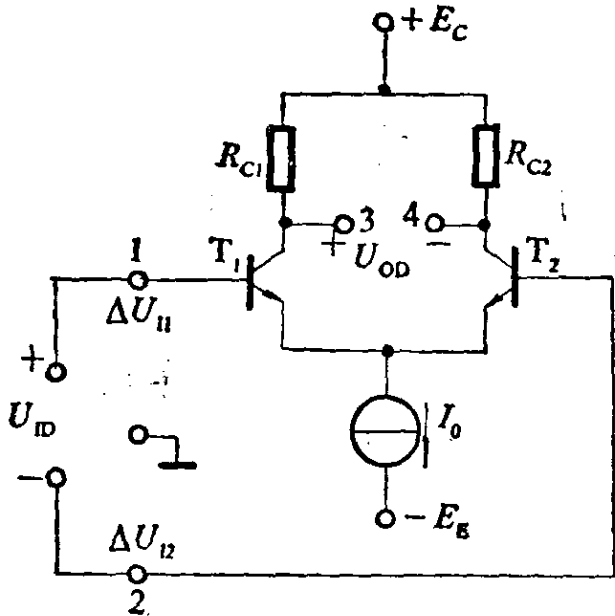


图 1-4 差模输入

这种信号输入方式为差模输入, 输入信号电压 U_{ID} 叫差模输入电压, 如图 1-4 所示。

差模输入时, T_1 管基极电位升高 ΔU_{I1} , 使基流增大 ΔI_{B1} 、集电极电流增大 ΔI_{C1} 、发射极电流增大 ΔI_{E1} 、集电极电位下降 ΔU_{C1} ; 同时, T_2 管基极电位下降

ΔU_{I2} , 使基流减小 ΔI_{B2} 、集电极电流减小 ΔI_{C2} 、发射极电流减小 ΔI_{E2} 、集电极电位升高 ΔU_{C2} 。且

$$\Delta I_{B1} = |-\Delta I_{B2}|$$

$$\Delta I_{C1} = |-\Delta I_{C2}|$$

$$\Delta I_{E1} = |-\Delta I_{E2}|$$

$$|-\Delta U_{C1}| = \Delta U_{C2}$$

注意, 此处“负”号表示减小。则差模输出电压

$$U_{OD} = (-\Delta U_{C1}) - \Delta U_{C2} = -2\Delta U_{C1}$$

又由于 T_1 管电流增大量等于 T_2 管电流减小量，因而两管发射极总电流

$$\begin{aligned} I_E &= I_{E1} + I_{E2} = (I_{EQ1} + \Delta I_{E1}) + (I_{EQ2} - \Delta I_{E2}) \\ &= I_{EQ1} + I_{EQ2} = I_0 \end{aligned}$$

仍维持不变，恒流源 I_0 对差模信号无负反馈作用。

该电路的差模电压增益（也可称为电压放大倍数） A_{UD} 应为

$$\begin{aligned} A_{UD} &= \frac{U_{OD}}{U_{ID}} = \frac{-2\Delta U_{C1}}{2\Delta U_{I1}} = A_{U1} = \frac{-\beta_1 \Delta I_{B1} R_{C1}}{\Delta I_{B1} r_{be1}} \\ &= -\beta_1 \frac{R_{C1}}{r_{be1}} \end{aligned} \quad (1-1)$$

可见，差动放大电路的差模电压增益 A_{UD} 和单管无负反馈共射放大电路的电压增益 A_U 相同。式中“ $-$ ”则表示输出电压 U_{OD} 与输入电压 U_{ID} 反相 180° 。

不难证明，差动放大电路在双端输入、单端输出的情况下，差模电压增益 A_{UD} 将只有单管共射放大电路 A_U 的一半。

差动放大电路的差模输入电阻 R_{ID} 是晶体管输入电阻 r_{be} 的两倍，即

$$R_{ID} = 2r_{be} \quad (1-2)$$

(2) 共模抑制原理

当两个输入端同时加一对大小相等、对地极性相同的共模信号 U_{IC} 时，这种输入方式称为共模输入，如图 1-5 所示。实际上，温度、电源及外因所带来的零点漂移折合到放大电路的输入端，就是一对共模信号 U_{IC} 。

该电路对共模信号有无放大能力呢？下面就来看看吧。共