

集成电路应用丛书



集成运算放大器 应用精粹

肖景和 编著

- 信号放大电路
- 信号比较电路
- 有源滤波电路
- 波形产生及变换电路
- 测试电路
- 集成运放的综合应用

 人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS

图书在版编目 (CIP) 数据

集成运算放大器应用精粹/肖景和编著. —北京: 人民邮电出版社, 2006. 5

(集成电路应用丛书)

ISBN 7-115-14355-2

I. 集... II. 肖... III. 集成电路—运算放大器—基本知识 IV. TN722.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 024980 号

内 容 提 要

本书介绍了集成运算放大器的内部组成、工作原理等基础知识, 并精选了集成运算放大器应用于各个领域的近 150 个实例, 对这些电路的组成、工作原理、元器件的选用和电路的调试进行了分析。本书较为全面地介绍了集成运算放大器的应用知识, 涉及的电路包括信号放大电路、信号比较电路、有源滤波器、测试电路等。

本书可供电子爱好者、从事电子产品开发设计的技术人员以及高等院校相关专业师生阅读参考。

集成电路应用丛书

集成运算放大器应用精粹

-
- ◆ 编 著 肖景和
责任编辑 付方明
 - ◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市崇文区夕照寺街 14 号
邮编 100061 电子函件 315@ptpress.com.cn
网址 <http://www.ptpress.com.cn>
北京艺辉印刷有限公司印刷
新华书店总店北京发行所经销
 - ◆ 开本: 787×1092 1/16
印张: 14.25
字数: 347 千字
印数: 1-5000 册

2006 年 5 月第 1 版

2006 年 5 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-115-14355-2/TN · 2678

定价: 20.00 元

读者服务热线: (010) 67129264 印装质量热线: (010) 67129223

前 言

运算放大器的产生，最初是由于模拟计算机的需要，由晶体管电路“搭”成的，主要用在模拟电子计算机的运算电路中，实现数值的加法、乘法、微分、积分等数学运算，因此被称为“运算放大器”。

集成电路出现后不久，人们为了缩小运算放大器的体积，便开始运用集成技术制造这种电路。为了与数字集成电路相区别，这种电路又称为模拟集成电路，于是模拟集成运算放大器诞生了。

集成运算放大器出现后，经历了第一代、第二代、第三代和第四代，如今已使原来十分复杂的电路部件缩小到与晶体管一样大小。这种集成运算放大器不仅体积小、功耗低，而且性能优异、稳定可靠、通用性强、使用方便，因此它的应用范围很快便超出了模拟计算机的范围，并被广泛地应用于自动控制 and 测量技术等诸多领域。目前集成运算放大器已经成为电子技术领域中的一种基本的放大元器件，过去一些电路的设计人员需要花费很大精力设计、安装和调试的放大器电路，现在只需合理地选择和使用集成运算放大器即可。

本书精选了集成运算放大器应用于各个领域内的近 150 个应用实例，对其电路组成及工作原理进行分析介绍，为读者学习和应用集成运算放大器提供尽可能详尽的参考。

全书共分 8 章，其中第 1 章作为集成运算放大器基本知识的介绍，介绍了集成运算放大器内部的基本组成以及运算放大器的主要参数和品种分类，使读者对运算放大器有一个基本概念；第 2 章~第 7 章分别介绍了运算放大器在信号放大、信号比较、有源滤波、波形产生与变换、测试电路等诸方面的应用电路；第 8 章介绍了运算放大器组成的单元电路，这一部分电路的特点是仅由一只运算放大器（或一只双运放）组成，作为一个功能完整的电路的一部分，完成电路中的某一功能，同时，这些电路也可以单独使用。

由于作者水平有限，书中难免有不足之处，敬请广大读者批评指正。

编著者

目 录

第 1 章 集成运算放大器的基本知识	1
1.1 集成运算放大器的基本组成与工作原理	1
1.2 集成运算放大器的技术参数	6
1.3 CMOS 集成运算放大器的特点	12
1.4 集成运算放大器的分类.....	13
1.5 集成运算放大器的应用基础.....	15
1.6 集成运算放大器的应用.....	17
第 2 章 运算放大器用于信号放大电路	35
2.1 电流—电压转换电路.....	35
2.2 由 AD590 组成的测温电路	36
2.3 电子听诊器.....	37
2.4 心率测试仪.....	38
2.5 环境噪声监测器.....	39
2.6 集成运放组成的毫伏表.....	40
2.7 高精度区间式电压表.....	42
2.8 线性式热敏电阻温度计.....	44
2.9 高精度数字式温度测控仪.....	45
2.10 空气湿度指示仪	47
2.11 数字式湿度控制仪	48
2.12 土壤湿度测定仪	51
2.13 温度传感器及应用电路	53
2.14 压力传感器应用电路	56
2.15 恒温控制电路	59
2.16 高精度温度控制器	60
2.17 热释电红外报警器	61
2.18 热释电红外控制自动灯 (一)	63
2.19 热释电红外控制自动灯 (二)	64
2.20 抽油烟机自动控制电路	65
2.21 双向传输电路	66
第 3 章 运算放大器用于信号比较电路	68
3.1 电机正反转超速控制电路.....	68
3.2 收录机自动断电控制电路.....	69

3.3	蓄电池电压指示电路	70
3.4	家用热水器水温报警器	72
3.5	双向超温报警器	73
3.6	电源超、欠电压声光报警器	74
3.7	可变门限的过压过流保护器	75
3.8	高精度恒温控制电路	76
3.9	简易型温度控制器	77
3.10	由集成温度传感器组成的温控电路	79
3.11	方便灵敏的测温电路	81
3.12	双限温控器	82
3.13	精密的双限温度报警器	83
3.14	电风扇温控电路	85
3.15	电风扇温控开关	86
3.16	电风扇自动控制装置	88
3.17	可燃气体定量显示报警器	91
3.18	太阳能电池充放电控制器	93
3.19	三相电机缺相保护电路	94
3.20	电机工作电流超限报警器	96
3.21	音乐酒吧闪烁电路	97
3.22	家用抽油烟机自动监控电路	98
3.23	音像设备电源自动开关电路	101
3.24	纸张厚度检测仪	102
3.25	家用电器安全保护器	103
3.26	小型有线电视系统自动开/关机装置	105
3.27	全自动交流调压器	106
第4章 用运算放大器组成有源滤波器		108
4.1	基本有源电子分频器电路	108
4.2	一例容易调整的带通滤波器	110
4.3	多功能状态可变滤波器	110
4.4	单级带通滤波器	111
4.5	四通道带通滤波放大器	111
4.6	由双T电桥网络组成的选频放大器	112
4.7	四阶带通超重低音功放电路	113
4.8	超声波检漏仪	114
4.9	实时频谱显示电路	115
4.10	集成运放组成的音调控制电路	117
第5章 运算放大器用于波形产生及变换电路		119
5.1	简单实用的波形发生器	119

5.2	多种波形发生器	120
5.3	多波段波形信号发生器	120
5.4	输出多波形的压控振荡器	121
5.5	打击乐合成器	122
5.6	海浪声模拟电路	123
5.7	脉宽调制控制器	124
5.8	正弦波、方波信号发生器	126
5.9	电压—频率变换器	127
5.10	调容式 RC 振荡器	128
5.11	压控占空比方波发生器	129
5.12	将方波变换为三角波	130
5.13	无稳态多谐振荡器	131
5.14	单稳态多谐振荡器	132
5.15	文氏电桥振荡电路	134
5.16	T 型桥式振荡电路	136
5.17	RC 相移振荡电路	137
5.18	二相振荡电路	138
5.19	方波、三角波产生电路	140
5.20	锯齿波实用电路	141
第 6 章	运算放大器用于测试电路	143
6.1	电路连通性测试仪	143
6.2	电子式静电验电器	144
6.3	三态逻辑测试仪	144
6.4	多功能逻辑测试仪	145
6.5	数显式逻辑笔	147
6.6	维修电脑用的音响式逻辑笔	147
6.7	通用模拟信号工作范围指示电路	148
6.8	平均值与峰值检测电路	150
6.9	精确的全波整流电路	150
6.10	单结晶体管分压比测试器	152
6.11	电子元件噪声测试仪	153
6.12	线性刻度多量程欧姆表	153
6.13	用集成运放改造旧式万用表	155
6.14	防静电手环测试仪	156
6.15	镍镉电池自动充电器	158
6.16	峰值检测保持电路	160
6.17	误差范围可调的电阻快速筛选器	160
6.18	比较式电阻值检测器	161
6.19	空调制冷剂泄漏检测仪	162

6.20	简易交流电压表	163
6.21	线性刻度的欧姆表	164
第7章 运算放大器的综合应用		165
7.1	湿度自动报警器	165
7.2	家庭影院电源联控插座	166
7.3	具有优先识别功能的呼叫器	167
7.4	直流稳压电源	169
7.5	高性能稳压电源	169
7.6	一种实用的大功率开关电源	171
7.7	高保真音响功放电路对称式稳压电源	172
7.8	改进串联型线性稳压电源	175
7.9	通用型交流电源稳压器	177
7.10	2kV 高压稳压电源	179
7.11	30V/5A 低功耗可调稳压电源	180
7.12	高灵敏度接近防盗报警器	182
7.13	多级循环开关定时器	183
7.14	人体感应多功能自动控制器	184
7.15	热释电红外控制无线电报警装置	186
7.16	热释电红外自动洗手控制电路	187
7.17	多功能路灯自动开关	188
7.18	雷达式节能灯自动开关	190
7.19	超声波式行车安全警示器	191
7.20	红外光控开关	193
7.21	遮断反射式红外控制电路	194
7.22	性能优良的调光电路	195
7.23	电力载波通信电路	196
7.24	触摸式音量控制器	197
7.25	音频放大器自动增益控制电路	198
第8章 集成运算放大器组成的单元电路		199
8.1	用一只二极管组成全波整流电路	199
8.2	精密检波器	199
8.3	电压保持器	200
8.4	双向限幅器	201
8.5	单稳态触发器	201
8.6	可调直流恒压源	202
8.7	可变恒流源	202
8.8	可控双向恒流源	202
8.9	取绝对值电路	203

8.10	可变电容倍增器	204
8.11	由运放组成二倍频电路	204
8.12	用外接元件扩展频带	205
8.13	用外接元件提高输出幅度 (一)	206
8.14	用外接元件提高输出幅度 (二)	206
8.15	用外接元件增大输出电流	207
8.16	精密基准电压电路	207
8.17	电压极性转换电路	208
8.18	将单电源转换为双电源的电路	208
8.19	集成运放组成的电子开关	209
8.20	用集成运算放大器组成逻辑门电路	209
8.21	集成运放组成模拟电感电路	210
附录 A	常用集成运算放大器参数表	212
附录 B	高输入阻抗集成运算放大器	213
附录 C	低噪声集成运算放大器	213
附录 D	宽频带集成运算放大器	214
附录 E	低漂移集成运算放大器	214
附录 F	单电源运算放大器	215
附录 G	集成电压比较器	215
附录 H	F007、741 内部等效电路图	216
附录 I	LM324 内部等效电路	216

第 1 章 集成运算放大器的基本知识

1.1 集成运算放大器的基本组成与工作原理

图 1-1 是集成运算放大器 F006 的电路原理图，它相当于国外最著名的集成运放电路 $\mu A741$ 。该电路看起来很复杂，但若将其分解开来，便可得知它其实是由一些基本的单元电路组成的。

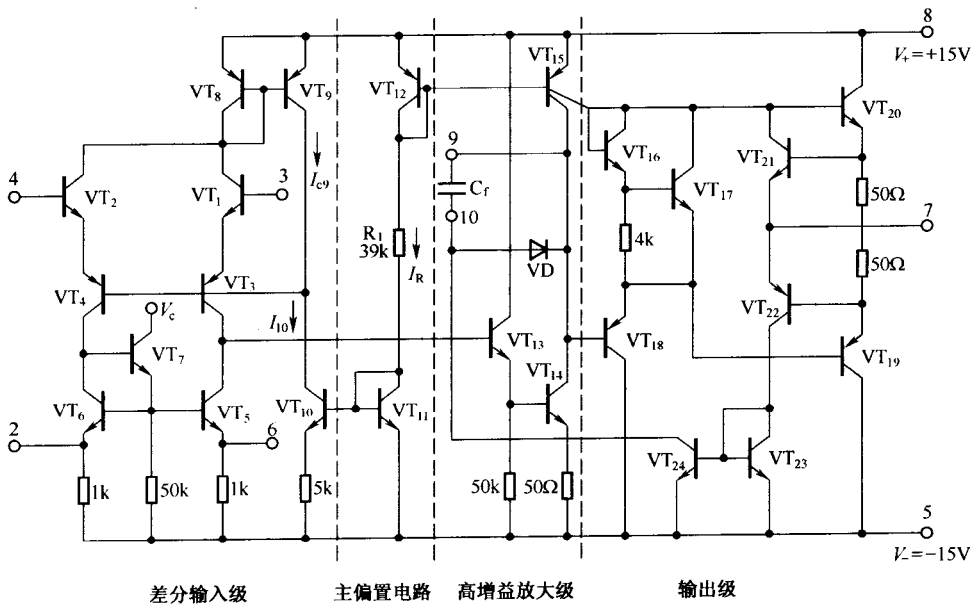


图 1-1 F006 内部电路原理图

任何一种集成运算放大器，不管其内部电路如何复杂，总是由这样一些最基本的单元电路组成的。这些单元电路包括：差分输入级、主偏置电路及恒流源、高增益中间放大级、输出级、输出短路保护电路等，下面分别进行介绍。

1. 主偏置电路及恒流源

主偏置电路的作用是给电路中的几个恒流源提供稳定的偏置电压。它是由电阻 R_1 和作二极管使用的晶体管 VT_{11} 、 VT_{12} 串联组成的，其等效电路如图 1-2 (a) 所示。电阻 $R_1 = 39k\Omega$ ， R_1 上的电流 $I_R = (V_+ - V_- - 2V_{be}) / R_1 = (15V + 15V - 2 \times 0.7V) / 39k\Omega \approx 0.7mA$ 。该电流流过 VT_{11} 、 VT_{12} 时，会使它们产生一定的结压降（由于流过二极管的电流是固定的，因此在二极管上产生的压降也是固定的）。 VT_{11} 上的结压降加到 VT_{10} 的基极与负电源

V_- 之间, 使 VT_{10} 的基极电流和集电极电流固定不变, 成为一个恒流源, 见图 1-2 (b)。 VT_{12} 上的结电压加到 VT_{15} 的基极与发射极之间。不过 VT_{15} 有两个集电极: c_a 和 c_b 。这是集成运放中常用的所谓“多集电极横向 PNP 管”, 它的两个集电极之间互相独立。因此 VT_{15} 可以被看作是 eb 结并联的两个晶体管, 如图 1-3 所示。每个集电极电流在发射极电流 I_e 中所占的比例取决于各集电极面积的大小, 因此 VT_{15} 的两个集电极实际上组成两个独立的恒流源。由于 VT_{15} 的发射极面积与 VT_{12} 相同, 故 I_{e15} 也近似地为 0.7mA , 而 VT_{15} 的集电极 c_a 与 c_b 的面积比为 $2:1$, 因此恒流源电流 I_{c15a} 约为 $450\mu\text{A}$, 它作为高增益放大管 VT_{14} 的有源负载; 恒流源 I_{c15b} 约为 $200\mu\text{A}$, 它作为供给前置缓冲级 VT_{18} 的偏置电流。

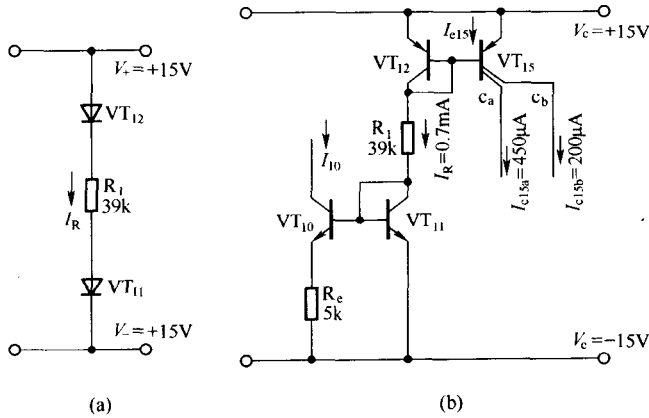


图 1-2 主偏置电路及恒流源

恒流源在集成运放中是应用最多的电路之一, 它除了在差动输入级中代替发射极电阻 R_e 外, 还常用作有源集电极负载为放大级提供稳定的偏置电流, 以及用在双端信号变单端输出的电路中。恒流源的应用, 大大提高了集成运算放大器的温度稳定性。集成运算放大器中使用的恒流源主要有镜像恒流源、多路镜像恒流源、威尔逊恒流源及微电流源, 如图 1-4 所示。在 F006 中以使用镜像恒流源为主, 如图 1-1 中的 VT_8 与 VT_9 、 VT_{12} 与 VT_{15} 、 VT_5 与 VT_6 、 VT_{10} 与 VT_{11} 、 VT_{23} 与 VT_{24} 都是镜像恒流源。

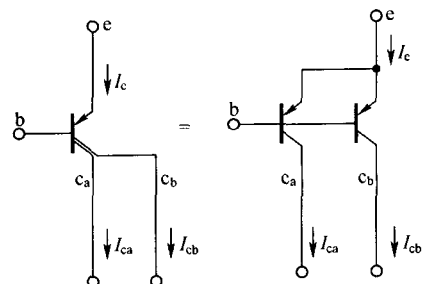


图 1-3 多集电极横向 PNP 管

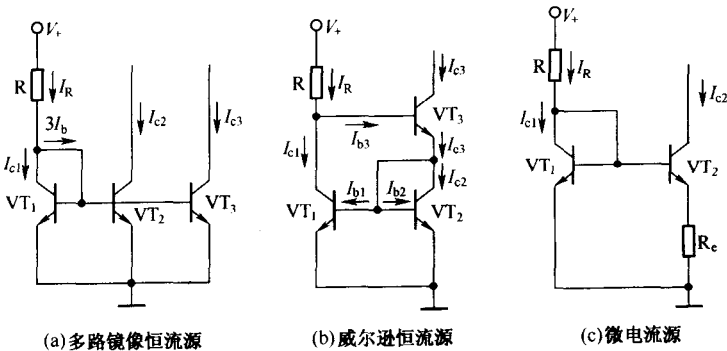


图 1-4 镜像恒流源电路

2. 差分输入级

集成运算放大器几乎无一例外地选用差分输入电路。这是因为采用集成工艺可以在一块衬底上制作出温度特性一致的差分对管，而且差分对管的电特性也很一致，这对提高电路的温度稳定性、抑制共模干扰很有好处。

差分输入级的作用有两个：一是放大输入信号；二是把双端输入信号变为单端输出。如图 1-5 所示，它由下列单元电路组成：VT₁~VT₄组成 NPN-PNP 复合差分对放大管；VT₅~VT₇组成镜像恒流源电路，作为差分对管的负载；VT₈、VT₉也组成一个镜像恒流源，作为复合差分对管 VT₁~VT₄的偏置电路。输入信号由 3、4 两端输入（差模输入），输出信号由 VT₃集电极单端输出。下面分析它的工作原理。

为了分析方便，首先假定 VT₉开路，因为 VT₈接成二极管，压降仅 0.7V，暂将其忽略。这样便可将 VT₁、VT₂看作与电源正极直接连接，从而画出如图 1-5 所示的输入级电路。图中，VT₁、VT₂为两个射极跟随器，输入信号 V₁、V₂经 VT₁、VT₂输入 VT₃、VT₄的发射极。VT₃、VT₄的基极是连在一起的，它们的基极电流 I_{b3}、I_{b4}流向恒流源，流入恒流源的电流是 I₁₀。当 V₁ = V₂ 时，I_{e1} = I_{e2}，I_{b3} = I_{b4}，I_{c3} = I_{c4}。

复合差分对管本身是双端输入双端输出，其输出信号电流为 I_{c3} - I_{c4}，因为这时 I_{c3} - I_{c4} = 0，所以没有信号电流输出。当 V₁ ≠ V₂ 时，又分两种情况：一是 V₁ > V₂，这时，I_{e1} > I_{e2}，I_{b3} > I_{b4}（I_{b3} 增大，I_{b4} 减小，但 I_{b3} 与 I_{b4} 的总和不变），I_{c3} > I_{c4}，即 I_{c3} - I_{c4} > 0；二是 V₁ < V₂，这时，I_{e1} < I_{e2}，I_{b3} < I_{b4}，I_{c3} < I_{c4}，即 I_{c3} - I_{c4} < 0。

由此可见，差分输入电路的输出电流是随差模输入信号而变化的，这就是 VT₁~VT₄ 复合差分对管放大差模输入信号的过程。它和普通差分对放大管类似，但是它具有 NPN 和 PNP 管两者的特点：输入端是 NPN 管的基极，所以电流放大系数和 NPN 管的 β 值一样高；而 VT₃、VT₄ 是“横向 PNP 管”，它们的 β 值虽然低，但 eb 结反向击穿电压很高，因此能承受较大的反向电压，提高了差模输入电压范围。

VT₅~VT₇ 组成一个镜像恒流源电路。它能把差分对管输出的双端输出电流 (I_{c3} - I_{c4}) 变成单端输出电流 (ΔI_o)。采用单端输出方法的目的是为了和后边的中间放大级连接方便，而采用恒流源作差分输出级的有源负载，不仅能将双端输出变为单端输出，而且电路增益不受损失。下面介绍其工作原理。

在图 1-5 中，VT₅ 和 VT₆ 的基极连在一起，它们的发射极又都通过 1kΩ 电阻接到负电源 V₋，加之两管又是用同一工艺制作在一起的，特性相同，所以它们的基极电流和集电极电流在任何时候都相等，即 I_{b5} = I_{b6}，I_{c5} = I_{c6}。

由图 1-5 又知，I_{c4} = I_{c6} + I_{b7}，而 I_{b7} 相对于 I_{c6} 来说很小，可忽略不计，所以可以认为 I_{c4} = I_{c6}。既然 I_{c5} 与 I_{c4} 都等于 I_{c6}，当然也就有 I_{c4} ≈ I_{c5}。前面谈到，I_{c3} - I_{c4} 就是复合差分对放大管的输出电流，所以 I_{c3} - I_{c5} (= ΔI_o) 也就成了复合差分对放大管的输出电流。然而这

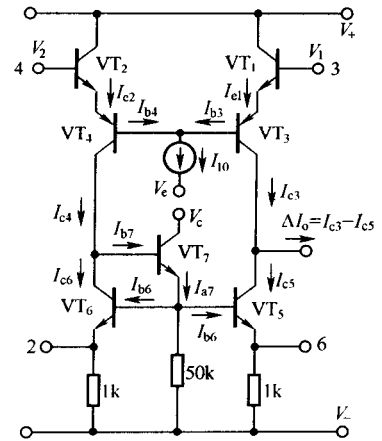


图 1-5 差分输入电路

在高频信号输入时，信号电流 ΔI_o 一部分输入 VT_{13} 的基极 (I_b)，得到放大；另一部分被 C_f (还有极间寄生电容 C_M ，但 C_M 远小于 C_f) 旁路掉。频率愈高， I_f 愈大， I_b 愈小，增益就愈低，以致在总附加相移还未达到 180° 时，放大器增益已小于 1，这样便使放大器保持工作稳定，不会产生自激。

一般来说， C_f 愈大，工作愈稳定，但这会使频带变窄，不能满足工作要求。通常 C_f 在几十皮法到几百皮法之间选用。

4. 输出级与输出短路保护电路

(1) 输出级电路

输出级与输出短路保护电路如图 1-7 所示。NPN 管 VT_{20} 与 PNP 管 VT_{19} 组成互补射极输出级电路。 $VT_{21} \sim VT_{24}$ 是输出级短路保护电路。 VT_{18} 是射极跟随器，其偏置电流由 I_{15b} 提供。 VT_{16} 与 VT_{17} 的 eb 结串联，相当于两个二极管，用来建立 VT_{20} 与 VT_{19} 的起始偏压，以克服交越失真。

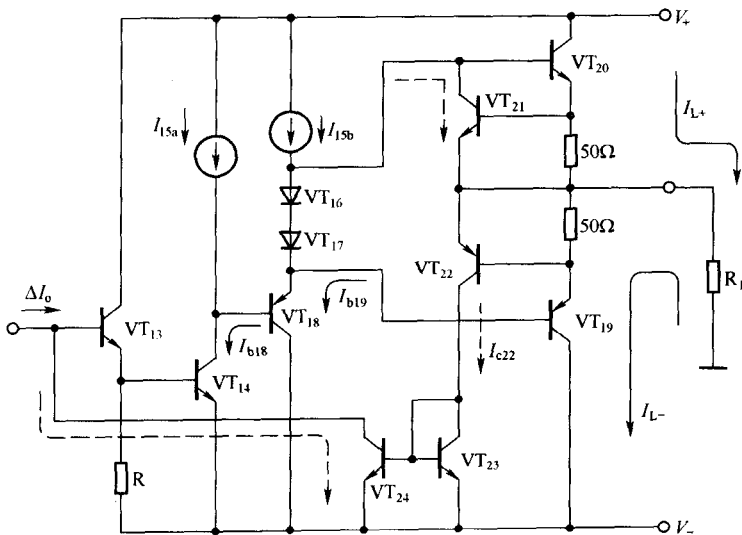


图 1-7 输出级与输出短路保护电路

电路的输出部分和输出电压特性曲线如图 1-8 (c)、(d) 所示， VD_1 、 VD_2 为 VT_1 与 VT_2 的极间偏压二极管，称为消死区二极管。如果两输出管的基极间无偏压二极管，如图 1-8 (a) 所示，当输入信号小于 $\pm 0.7V$ 时 (晶体管 eb 结压降)， VT_1 、 VT_2 都不导通，输出 $V_o = 0$ 。它的输出曲线如图 1-8 (b) 所示，显然在 $|V_i|$ 小于 $0.7V$ 时，曲线出现一段平坦部分，称为“死区”。

由于死区造成输出电压 V_o 在跨越零点时出现的失真称为“交越失真”。为了克服交越失真，在电路中加入两个二极管 VD_1 、 VD_2 。这样 VT_3 的集电极电流 I_{c3} 在 VD_1 、 VD_2 上各产生 $0.7V$ 左右的压降，它为 VT_1 、 VT_2 的基极建立起一个 $0.7V$ 的偏置电压，即使输入信号 $V_i = 0$ 时， VT_1 、 VT_2 仍导通，从而消除了输出电压 V_o 的死区。

高增益放大级输出的信号直接送到 VT_{18} 的基极，当这个信号电压为正时，由 VT_{20} 输出正向电流 I_{L+} ，通路为：正电源 $V_{c+} \rightarrow VT_{20}$ (c) $\rightarrow VT_{20}$ (e) $\rightarrow 50\Omega$ 电阻 $\rightarrow R_L \rightarrow$ 地。 VT_{20} 的基极驱动电流通路为：正电源 $V_c \rightarrow$ 恒流源 $I_{15b} \rightarrow VT_{20}$ (b) $\rightarrow VT_{20}$ (e) $\rightarrow 50\Omega$ 电阻 $\rightarrow R_L \rightarrow$ 地。

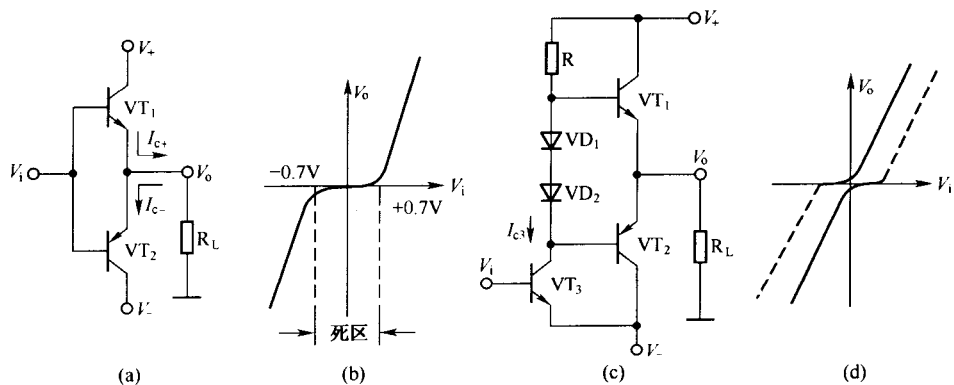


图 1-8 消死区电路

当 VT_{18} 基极信号电压为负时，则由 VT_{19} 输出负向电流 I_{L-} ，其通路为：地 $\rightarrow R_L \rightarrow 50\Omega$ 电阻 $\rightarrow VT_{19}$ (e) $\rightarrow VT_{19}$ (c) \rightarrow 负电源 V_e 。 VT_{19} 基极驱动电流的通路为：地 $\rightarrow R_L \rightarrow 50\Omega$ 电阻 $\rightarrow VT_{19}$ (e) $\rightarrow VT_{19}$ (b) $\rightarrow VT_{18}$ (e) $\rightarrow VT_{18}$ (c) \rightarrow 负电源 V_e 。从正负向输出电流的通路来看，如果省去射极输出器 VT_{18} 和恒流源 I_{15b} ，而将 VT_{14} 的集电极直接接到 VT_{19} 的基极，也是可以工作的。但 VT_{19} 是 PNP 管，这种管子的 β 值要比 NPN 管 VT_{20} 的 β 值小，增加射随器 VT_{18} ，正是为了增加放大器在负向输出时的电流输出能力。

(2) 输出保护电路及其工作原理

输出保护电路由 $VT_{21} \sim VT_{24}$ 组成，其中由 VT_{21} 构成正向输出短路保护。当负载电阻 R_L 较大、输出电流 I_{L+} 较小时， I_{L+} 在 50Ω 电阻上产生的压降小于 VT_{21} 的 eb 结导通电压， VT_{21} 截止，不影响电路的工作。若放大器输出端不慎对地短路或负载电阻 R_L 过小时， I_{L+} 增大，当 50Ω 电阻上的压降达到 $0.7V$ 时， VT_{21} 导通，恒流源 I_{15b} 提供的驱动电流大部分被 VT_{21} 旁路，因此注入到 VT_{20} 基极的电流不再增加，使 VT_{20} 的输出电流 I_{L+} 受到限制，保护了 VT_{20} 。这种保护方式称为限流保护。显然，放大器的最大输出电流即为 $0.7V/50 = 14mA$ 。

负向输出短路保护由 $VT_{22} \sim VT_{24}$ 三只晶体管完成。本来也可以像正向保护一样，只用一只晶体管，即把 VT_{22} 的集电极直接与负向输出管 VT_{19} 的基极连接就行了。但是，因为 VT_{19} 前面还有一级射随器 VT_{18} ，它也应受到保护，而 VT_{18} 的驱动电流 I_{b18} 又由 VT_{14} 提供。

要实现对 VT_{18} 和 VT_{19} 的保护，最好的办法就是切断 VT_{14} ，此时负向保护的反馈节点移到了 VT_{13} 的基极。当 I_{L-} 较大时， VT_{22} 导通， I_{c22} 流过 VT_{23} 。由于 VT_{23} 与 VT_{24} 也组成一个简单的镜像恒流源电路，所以这时 VT_{24} 也导通，使 ΔI_o 通过 VT_{24} 旁路， VT_{14} 通路被切断，从而保护了 VT_{18} 和 VT_{19} 。

1.2 集成运算放大器的技术参数

当准备设计一套电路时，需要合理选用元器件，即在保证电路技术指标的前提下，使用便宜而性能相同或相近的元器件以降低成本；在制作电路时，需要充分利用自己手头已有的元器件来提高电路的性能或解决元器件的代用。这样，了解集成运放的技术指标的意义就显得非常重要了。

1. 开环电压增益 A_{vd}

集成运放在不加负反馈时的差模直流电压增益简称开环电压增益。它是放大器开环时的输出电压 V_o 与输入差动电压 $V_p - V_n$ 之比, 如图 1-9 (a) 所示。

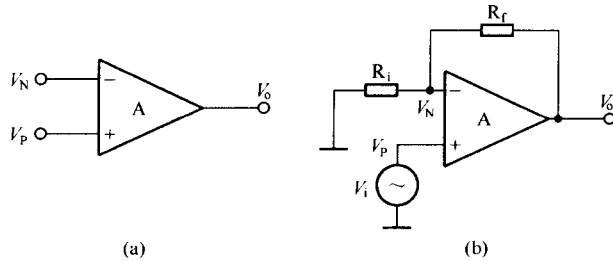


图 1-9 开环放大与闭环放大

在实际应用中集成运放总是接成闭环状态 (即电压负反馈的形式) 工作的, 如图 1-9 (b) 所示。闭环放大器的闭环增益或称闭环放大倍数, 用 A_{vf} 来表示, $A_{vf} = V_o/V_i = A_{vd}/(1 + A_{vd} \cdot F)$ 。式中, F 表示输出信号反馈到输入端的百分比, 称为反馈系数, $F = R_f/(R_i + R_f)$ 。

当运算放大器的开环增益 A_{vd} 足够大时, $A_{vd} \cdot F \gg 1$ 。这时, 闭环增益 $A_{vf} \approx A_{vd}/(A_{vd} \cdot F) = 1/F = (R_i + R_f)/R_f$ 。这就说明, 当 A_{vd} 足够大时, 闭环放大器的闭环增益 A_{vf} 就只与反馈系数有关, 而与 A_{vd} 无关了。这样, 我们就可以运用高增益的运算放大器通过一定深度的负反馈组装成各种放大器。

在设计电路时选用高增益运放通过对负反馈深度的调节, 可以使电路的设计调试变得简单, 在大批量生产时不必一件件挑选运放元器件, 并能解决互换性问题。用高增益运放组装的电路还具有较高的温度稳定性。

但是, 并不是选用的运放增益越高越好。在满足 $A_{vd} \cdot F \gg 1$ 的条件下, 应尽量选用增益较低的运放, 以降低成本。

高增益运放的频带较窄, 例如高增益运放 F007, 其 $A_{vd} \geq 2 \times 10^5$, 而开环带宽只有 5Hz 左右; 中增益运放 F003, 其 $A_{vd} \geq 4 \times 10^4$, 开环带宽为 1kHz; 低增益运放 F001, 其开环增益 $A_{vd} \geq 3 \times 10^3$, 它的开环带宽达到 500kHz。

注: 一般运算放大器的开环增益 A_{vd} 在 10^3 量级的称为低增益运放, 如通用 I 型运放 F001、F002、BG301、8FC1、FC1、7XC1 等。 A_{vd} 在 10^4 量级的称为中增益运放, 如通用 II 型运放 F003、F005、FC3、BG303、8FC2、5G23、FC41 等。 A_{vd} 在 10^5 量级的称为高增益运放, 如通用 III 型运放 F006、F007、BG308、8FC4、5G24、FC4、4E322、NG04 等 (多为仿 $\mu A741$ 产品)。

2. 输入偏置电流 I_{IB}

输入偏置电流是指在标称电源电压及室温 25°C 下, 使运算放大器静态输出电压为零时流入 (或流出) 两输入端电流的平均值, 即 $I_{IB} = (I_{IB+} + I_{IB-})/2$ 。

对于 I_{IB} 这个指标, 我们总希望它小一些。因为只有当运放具有极高的输入电阻和极小的输入偏置电流时, 才能近似地认为它的输入端不吸收电流。即如图 1-10 所示, 有

$I_p \approx 0$, $I_N \approx 0$, 才能近似地把 N 点看成虚地, 认为其输入电流 I_i 等于反馈电流 I_f , 也才能导出 $V_o = -I_f \cdot R_f = -I_i \cdot R_f = -(R_f/R_i) \cdot V_i$ 。由此可见, 只有 I_{IB} 小的管子其实际运算结果才比较接近理论值。

另一方面, 偏置电流 I_{IB+} 、 I_{IB-} 越小, 这两个电流的差值, 即后面要讲到的失调电流 I_{IO} 及其温漂自然要小些, 这就保证电路具有较高的精度与较小的温漂。

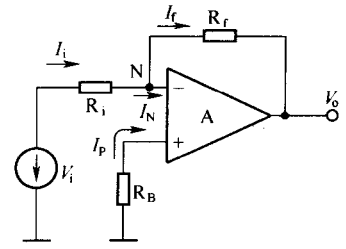


图 1-10 输入偏置电路

为保证运算精度, 希望 $I_i = I_f$, 即希望 I_{IB} 相对 I_i 尽可能小。因此对 I_{IB} 较大的器件, 在设计电路时, 应在保证电路足够的输入电阻 R_i 的前提下, 适当减小 R_i 、 R_f 的阻值, 以便能得到较大的 I_i 、 I_f , 即可削弱不为零的 I_{IB} 对运算精度的影响。

为消除不为零的 I_{IB} 在运放输入端电阻上造成的附加失调误差, 在设计电路时应保证两输入端对地的等效电阻对称, 即使 $R_B = R_i // R_f$ [若信号源内阻较大, 则应有 $R_B = (R_i + R_s) // R_f$]。这样, 只要参数选配合理, 用 I_{IB} 较大的器件也能组装成性能较好的电路。

3. 输入失调电流 I_{IO}

输入失调电流是指在标称电源电压及室温 25°C 下, 输入信号为零时运算放大器两输入端偏置电流的差值, 即 $I_{IO} = |I_{IB+} - I_{IB-}|$ 。它主要反映了集成运放输入对管的不对称度, 当然越小越好。

在设计或使用集成运放时应注意以下几点。

① 任何一种集成运放都存在着一一定的失调电流 I_{IO} , 故在设计时使两输入端对地的等效电阻严格相等已无实际意义。只需选择 R_B 、 R_i 与 R_f 的标称值使 R_B 近似等于 $R_i // R_f$ 即可。

② 为了减小因输入失调电流 I_{IO} 不为零所造成的附加失调误差, 根据 $V_{IO} = R_B \cdot I_{IO}$, 设计电路时应选取尽可能小的 R_B 值和 R_i 、 R_f 值。但因 R_f 过小会增加输出负担, 造成较大的负载效应, 因此应全面考虑, 适当减小。

③ 造成集成运放输出失调的因素除 I_{IO} 外, 尚有输入失调电压及温漂等, 因此在要求较高的场合, 宜采用失调电压 V_{IO} 相近而失调电流 I_{IO} 较小的器件。

除上述方法外, 采用外调零电位器的方法也可使集成运放在输入为零时, 输出电压 V_o 也为零。

4. 输入失调电压 V_{IO}

输入失调电压是指在标称电源电压及室温 25°C 下, 当输入电压为零时, 集成运放的输出电压 V_{OO} 折合到输入端的数值, 即 $V_{IO} = V_{OO}/A_{vd}$ (A_{vd} 是开环电压放大倍数)。这就意味着, 必须在输入端加上一个与 V_{IO} 大小相等的差动输入电压, 才能补偿运放本身不对称因素造成的输出电压不为零。

当集成运放输入端外接电阻较小时, 因输入失调电流 I_{IO} 所引起的附加失调误差较小, 失调电压及其温漂往往成为引起误差的主要原因。因此 V_{IO} 的大小成为集成运放分档的一个重要指标。

为了使集成运放在电路中有趋于零的输出电位, 大多数运放均有调零引出脚, 通过外接调零电位器进行调零。

并非一切运放电路都需调零，在非线性应用中以及对闭环增益较低且精度要求不高的线性电路中也不一定要求调零。

5. 输入失调电压温漂 dV_{IO}

输入失调电压温漂是指在规定的温度范围内，器件的输入失调电压 V_{IO} 相对温度 T ($^{\circ}\text{C}$) 的关系曲线的平均斜率。它说明失调电压温漂值随温度的不同而不同，参数表内所给值是指其绝对值。

集成运放的失调及温漂不仅降低放大器的精度，而且降低其分辨率。虽然放大器的失调可通过调零装置予以补偿，但任何调零装置都无法跟踪并补偿运算放大器的温度漂移。因此器件的失调电压温漂成为评价“高精度”运算放大器（或称“低漂移”运放）的一项重要指标。

在设计应用电路时，对于要求较高的直流放大或运算电路，应采用低漂移器件以保证精度。对于其他一般电路，则可不必要求用低漂移器件，只需一般器件即可。

6. 差模输入电压范围 V_{IDR} 、共模抑制比 K_{CMR} 及共模输入电压范围 V_{ICR}

(1) 差模输入电压范围 V_{IDR}

所谓“差模输入电压”，是指在差分放大电路的两个输入端上所加的两个对地的输入信号电压之差，即 $(V_{i+} - V_{i-})$ 。这类放大器的输出电压 V_o 仅与其差模输入信号，即 $(V_{i+} - V_{i-})$ 成比例，而与这两个信号本身的大小无关。因此对于由差分电路组成输入级的运算放大器，差模输入电压 $(V_{i+} - V_{i-})$ 就是它的有效输入信号，其输出电压 V_o 与差模信号之间的比例系数即集成运放的开环电压增益 A_{vd} ，即 $V_o = (V_{i+} - V_{i-})A_{vd}$ ，如图 1-11 所示。

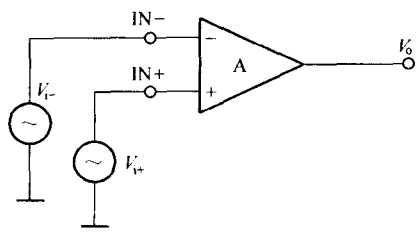


图 1-11 差模输入

“差模输入电压范围”则被定义为运算放大器两个输入端之间所能承受的最大电压。超过这个允许值，集成运放输入级的某一侧晶体管即出现击穿，从而使运放的输入特性恶化，甚至发生永久性损坏。因此 V_{IDR} 这个指标是用来描述当两个输入端出现过大的差模信号时，不致使输入级晶体管的发射结反向击穿的输入信号电压范围的极限指标。

采用不同差分输入形式的运放，具有不同的 V_{IDR} 。采用单级差分对管输入的通用 I 型运放，如 F001、F002 等，其 V_{IDR} 值为 $\pm 7\text{V}$ 。采用复合管差分电路作输入级的高增益运放电路，如 BG305、8FC2I、FC3、FC52 等，其 V_{IDR} 可增大到 $\pm 14\text{V}$ 。而对于采用包括横向 PNP 管在内的复合组态输入级的运算放大器，如通用 III 型运放 CF741、8FC7 以及输入级与其相似的 CF747、CF253、F010 等，其 V_{IDR} 可达 $\pm 30\text{V}$ 。

(2) 共模抑制比 K_{CMR}

当两个大小相等、极性相反的直流信号，例如 $V_{i+} = 10\text{mV}$ ， $V_{i-} = -10\text{mV}$ ，或是一对幅值相等、相位相反的交流信号，如 $V_{i+} = 10\text{mV}\sin\omega t$ ， $V_{i-} = 10\text{mV}\sin(\omega t + \pi)$ ，被加到运算放大器的两个输入端时，我们就把这种成对出现，但对差分电路两边晶体管作用相反（使一边晶体管注入电流 I_b 增大，而另一边 I_b 减小）的信号称为差模输入信号。差模输入信号是需要加以放大的有用信号。而在运算放大器的两输入端上出现的不仅大小相等，而且极性