

实用电子技术丛书

OP放大器电路及应用

杨家树 关 静 编



科学出版社
www.sciencep.com

实用电子技术丛书

OP 放大器电路及应用

杨家树 关 静 编

科学出版社

北 京

TN722.7
X206

内 容 简 介

本书系“实用电子技术丛书”之一。本书主要对 OP 放大器在实际应用中的一些具体问题以及相关实用电路进行了分析、讲解。用一章的篇幅介绍集成运放的相关概念、主要参数和应用常识,以及一些普遍性问题的解决方法。其他七章分别讨论 OP 放大器在反相应用、同相应用、差动应用、微积分电路、非线性函数、电压比较、振荡电路中的各种应用电路。以基本电路、工作原理、存在问题、实用电路和扩展应用的思路逐步深入。

本书适合具有一定设计或应用 OP 放大电路基础的电子技术人员或电子爱好者使用,也能作为高等院校电子及其相关专业师生的参考读物。本书对在校学生参与电子竞赛等创新活动有重要参考价值。

图书在版编目(CIP)数据

OP 放大器电路及应用/杨家树,关静编. —北京:科学出版社,2010
(实用电子技术丛书)

ISBN 978-7-03-026239-4

I. O… II. ①杨…②关… III. 运算放大器-电路 IV. TN722.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 232437 号

责任编辑:赵方青 杨 凯 / 责任制作:董立颖 魏 谨

责任印制:赵德静 / 封面设计:李 力

北京东方科龙图文有限公司 制作

<http://www.okbook.com.cn>

科 学 出 版 社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京天时彩色印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2010 年 1 月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2010 年 1 月第一次印刷 印张:13 1/2

印数:1—5 000 字数:262 000

定 价:30.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

在现代电子技术领域,OP 放大器作为高性能、多用途、小信号的电压放大器得到了广泛应用,其相关知识已成为电子领域从业人员必备的专业基础。从学校教科书到学者论文专著,均具有广泛而深入的论述。然而,对于工作在设计与生产第一线的技术人员,在工作实践中还是会遇到种种问题,这些问题难以用理想运放的概念解释处理,看似简单的 OP 放大器其实并不是容易操控的小玩具。究其原因,无非是运放内部的复杂性和使用环境的复杂性所致。这种客观存在的复杂性与教科书中论述的运放的理想特性差距甚大,而且在很多应用场合不容忽视。不能否定的是,对 OP 放大器非理想特性的分析在理论上是相当复杂的问题。本书试图在有限的理论分析的基础上将 OP 放大器的几种典型应用领域中的实际问题作一些剖析,提出解决实际运放应用中的一些具体问题的基本思路和方法,并提供了大量实用电路,希望能对读者有所裨益。

考虑到运放基本概念的重要性,本书第 1 章首先介绍了 OP 放大器的一般概念、特性和参数。这些知识对使用者而言,无论如何都是必不可少的,也是非常具有实用价值的。在此基础上,讨论了非理想运放的等效模型、输入失调以及温漂的处理方法、噪声的抑制和防止运放工作中产生自激的措施等实用知识。在后续的章节中,按 OP 放大器的几种典型应用分别介绍了反相应用、同相应用、差动应用、非线性函数、振荡与波形发生、电压比较等领域的应用问题。各章内容基本上都是按典型电路、基本特性、存在问题、实用电路和工程实际问题的处理方法这样的思路层层展开,对所述电路以尽量简明的理论分析作必要的说明,重点还是在实用中可能遇到的问题以及解决问题的思路与方法。多数电路经过实践验证。电子技术是一门实验科学,也是工程技术,所有的理论都能经受实践的考核。而理论结合实践,一面学习、一面实践也是学习电子技术的最佳方法,读者不妨对书中所述电路进行实验,在实验中发现问题的,学习提高,应该能够有所收获。

随着微电子技术的飞速发展,许多原本是 OP 放大器担任的工作正在被专用集成电路取代,从知识延伸、拓展视野的角度,本书介绍了一些专用集成电路如仪用放大器、函数发生器、比较放大器等电路的相关知识,具有一定的实用价值。

本书内容偏重于 OP 放大器的实际应用,涉及的也是最基本的几类常规应用电路,对各种运放应用中的理论分析按“必需”、“适度”的原则进行讲解。本书通俗易懂,解决实际问题。深度广度或许未能满足读者所需,敬请见谅。书中若有谬误不当之处,恳请读者赐教斧正。

目 录

第1章 集成运放应用基础	1
1.1 集成运放的组成	1
1.1.1 集成运放的基本构成	1
1.1.2 集成运放的表示符号与引脚功能	4
1.2 集成运放的主要参数	6
1.2.1 直流参数	6
1.2.2 交流参数	8
1.2.3 集成运放的分类	11
1.3 集成运放的等效模型	14
1.3.1 理想运放	14
1.3.2 实际运放模型	16
1.4 实际运放	16
1.4.1 运算误差	16
1.4.2 调 零	18
1.4.3 噪 声	23
1.5 集成运放的自激与补偿	28
1.5.1 集成运放的自激	28
1.5.2 集成运放的相位补偿	32
1.5.3 造成运放工作不稳定的其他因素	39
第2章 反相放大电路的原理与应用	41
2.1 基本反相输入应用电路	41
2.1.1 基本反相放大电路	41
2.1.2 高精度反相放大电路	43
2.1.3 高输入阻抗反相放大电路	45
2.1.4 反相放大器的实际特性	47
2.2 加法运算电路	49
2.2.1 反相输入加法运算电路	49
2.2.2 实际应用中的瞬态响应问题	49
2.2.3 使用高速运放	50

2.2.4 进行超前补偿	50
2.3 电流-电压转换	51
2.3.1 I/V 转换电路	51
2.3.2 微电流转换技术	53
2.3.3 V/I 转换电路	55
第3章 同相放大电路的原理与应用	59
3.1 基本同相输入放大电路	59
3.1.1 同相放大器的基本特点	59
3.1.2 基本电路	59
3.1.3 同相放大器的实际特性	60
3.1.4 同相放大器的实际问题	61
3.2 同相放大电路中的自举技术	63
3.2.1 阻容耦合的电压跟随器	63
3.2.2 阻容耦合同相交流放大器	65
3.3 同相输入加法器	66
3.3.1 同相输入加法器	66
3.4 同相放大电路的系统技术	67
3.4.1 同轴电缆的分布电容处理	67
3.4.2 脉冲放大器的增益微调	68
3.4.3 高压输出电压跟随器	68
3.4.4 输入端微电流保护	69
第4章 差动放大电路的原理与应用	73
4.1 基本差动放大电路	73
4.1.1 差动放大电路的基本特点	73
4.1.2 基本差动放大电路	73
4.2 实用差动放大电路	77
4.2.1 不受信号源阻抗影响的差动放大电路	77
4.2.2 高输入阻抗型差动放大电路	77
4.2.3 增益可变的高输入阻抗型差动放大器	78
4.2.4 反相输入型差动放大器	78
4.2.5 三运放仪用放大器	79
4.3 集成仪用放大器 INA114	80
4.3.1 引脚与封装	80
4.3.2 主要电气参数	81
4.3.3 基本接法与增益	81
4.3.4 噪声特性	82

4.3.5	失调/偏移的修正	82
4.3.6	输入共模范围	83
4.3.7	输入保护	84
4.3.8	输出检测(仅适用于 SOL 16 封装)	84
4.3.9	应用举例	85
4.4	差动放大电路应用中的几个问题	86
4.4.1	消除噪声	86
4.4.2	偏置电路	88
4.4.3	动态范围	88
4.4.4	输入电缆	91
第 5 章	集成运放在微分、积分电路中的应用	93
5.1	基本积分电路以及理想特性	93
5.1.1	反相积分器	93
5.1.2	同相积分器	95
5.1.3	差动积分器	97
5.1.4	其他类型的积分电路	99
5.2	积分运算电路的误差	101
5.2.1	输入失调电压与电流的影响	101
5.2.2	增益与带宽的影响	101
5.2.3	电容特性的影响	103
5.2.4	输出动态范围的影响	103
5.2.5	输入端漏电流的影响	103
5.3	微分运算电路	104
5.3.1	基本微分器和理想微分特性	104
5.3.2	改进型微分电路	105
5.3.3	比例微分电路	107
5.3.4	差动微分电路	108
5.4	积分微分电路的应用	109
5.4.1	电感模拟器	109
5.4.2	电容倍增电路	111
5.4.3	V/F 变换器和 F/V 变换器	113
第 6 章	集成运放基于非线性元件的应用	121
6.1	对数与反对数运算	121
6.1.1	对数运算电路	121
6.1.2	反对数运算电路	124
6.2	限幅电路	125

6.2.1	稳压二极管构成的限幅器	126
6.2.2	二极管限幅电路	128
6.2.3	输入回路的二极管限幅电路	130
6.3	二极管绝对值与线性检波电路	132
6.3.1	二极管检波器	133
6.4	峰值检测与保持电路	137
6.4.1	峰值检测器的工作原理	138
6.4.2	实用峰值检测器	138
6.4.3	低漂移峰值保持电路	139
第7章	集成运放在电压比较器中的应用	143
7.1	比较器的主要特性与运放的选择	143
7.2	单门限电位比较器	146
7.3	滞回比较器	149
7.4	窗孔比较器	153
7.4.1	用集成运放构成的窗孔比较器	153
7.4.2	用集成比较器构成的窗孔比较器	154
7.5	电压比较器的应用	155
7.5.1	提高电压比较器的可靠性	155
7.5.2	电压比较器的应用电路	157
第8章	集成运放在振荡电路中的应用	163
8.1	振荡电路的种类与应用	163
8.2	正弦波振荡电路	163
8.2.1	正弦波振荡电路的原理	164
8.2.2	RC 振荡器	166
8.3	多谐振荡器	176
8.3.1	多谐振荡器的概念	176
8.3.2	使用滞回比较器构成方波振荡器	177
8.3.3	占空比可调的方波振荡器	181
8.3.4	其他波形发生器	182
8.4	定时电路	187
8.4.1	单稳态多谐振荡器	187
8.4.2	长时间延时器	188
8.4.3	数字电路中的接口	190
8.4.4	单电源振荡器与定时电路	190
8.5	专用函数发生器	195

第1章

集成运放应用基础

1.1 集成运放的组成

1.1.1 集成运放的基本构成

集成运放是一种集成化高性能直接耦合放大电路。具有双端输入单端对地输出的特点。内部电路包括输入级、中间级、输出级和偏置电路四个组成部分。而一些高精度、高阻抗、低功耗等类型的集成运放,内部还要根据性能特点配置相应的单元电路,如温度补偿、温度控制、相位补偿、限流限压、过流过热保护等电路;而功率型的集成运放内部还包含了大功率互补对称输出级电路。如图 1.1 所示即为通用型集成运放内部电路结构框图。

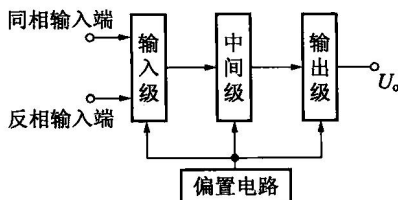


图 1.1 通用型集成运放内部电路结构框图

由于集成制造工艺的原因,集成运放内部电路与分立元件电路有很大的区别。在集成电路内部制造一个三极管比制作一个电阻要更容易,所以大量采用三极管代替电阻、二极管等元件。用 PN 结的结电容替代电路所需的小电容,一些无法替代的大电阻、大电容采用外接的方法予以解决。而电感类元件在集成运放内部无法制作,则采用外接或等效模拟的方法实现电感的作用。

在集成电路内部精确地控制元件的参数比较困难,但由于在相同的材料上用相同的工艺、相同的环境条件下制造多个三极管,所以三极管的参数一致性较好。因此,在集成运放电路中大量采用具有结构和参数均对称的差动放大电路,较好地解决了直接耦合放大电路的零点漂移问题。

一个典型的通用型运算放大器 F741 的内部电路如图 1.2 所示。其各部分简介如下。

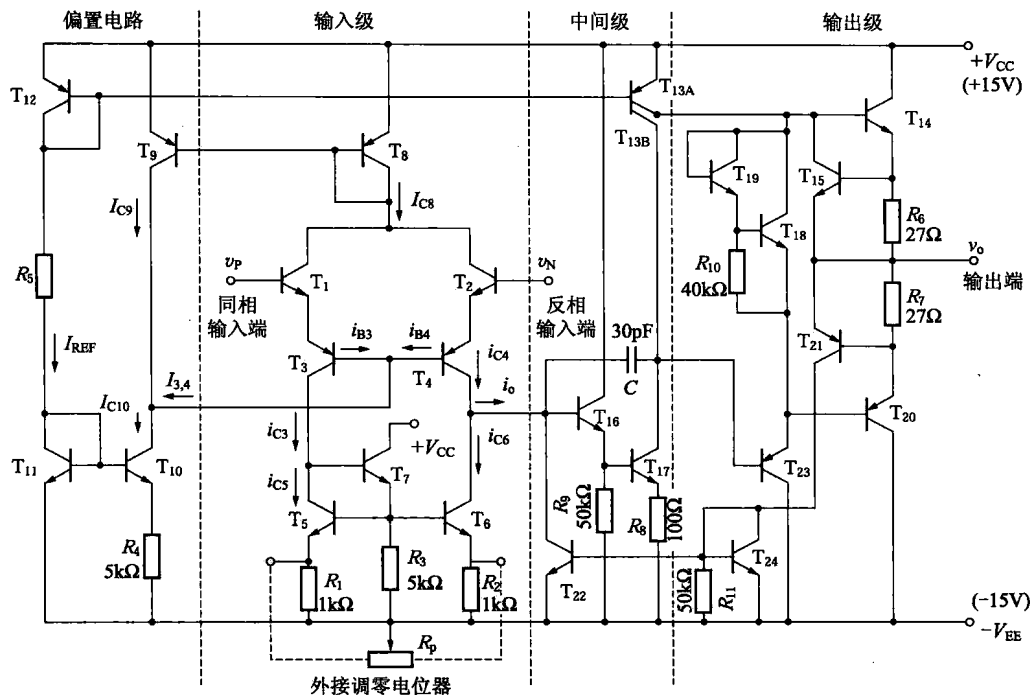


图 1.2 F741 集成运算放大器内部电路图

1. 输入级

输入级的设计主要考虑提高集成运放的输入电阻，减小失调电压、偏置电流，提高差模和共模输入电压范围等性能参数。在电路设计上普遍采用差动放大电路，并且采用超 b 管、达林顿复合管、串联互补复合管、场效应管等措施进一步减小输入偏置电流，提高输入电阻。在输入级的差动放大电路中，经常采用有源负载或恒流源负载进一步提高电路的性能，而考虑到输入级的对称性对失调电压以及漂移等问题的重大影响，通常在输入级设置调零电路。为防护过高输入电压造成集成运放损毁，输入端一般都设计了保护电路。

在图 1.2 中，F741 的输入级由 $T_1 \sim T_8, R_1 \sim R_3$ 构成。 T_1, T_2 (NPN 型) 和 T_3, T_4 (PNP 型) 组成互补差分输入放大级。 T_1, T_2 管为共集电极组态，其 β 值很大，具有很小的基极偏置电流和高的差模输入电阻。 T_3, T_4 管为横向 PNP 管，采用共基极组态，以改善输入频响特性。由于 T_3 和 T_4 管基射结可耐受较大的反压，则可承受较大的差模输入电压。 T_5, T_7 管和 R_1, R_3 电阻构成了电流镜恒流源，它们是 T_3, T_4 管集电极有源负载，并完成从双端输出到单端输出的转换，同时提高输入级的增益。在 T_5, T_6 组成电流镜恒流源，再配合 T_{10} 恒流源，完成输入级共模

电流负反馈,以稳定输入级工作电流,提高输入级共模抑制比和共模输入电阻。在共模输入电压作用或由于温升而使 IC_3 、 IC_4 增大时,电流负反馈的作用则是:通过 IC_3 、 IC_4 增大, IC_8 必然同时减少,达到稳定工作点,提高共模特性。

2. 中间级

集成运放的中间级主要实现高倍电压放大,同时为了将输入级的双端平衡输出信号变成输出级的对地单端输出,需要进行电平移动。在电路上多采用恒流源负载、横向 PNP 管、电流负反馈、并联电压负载等措施,特别是采用各种形式的恒流源负载,由于其等效阻抗极大,大大提高了中间级的电压增益,所以采用 2 级、3 级共射放大电路,即可获得数万倍或更大的电压放大倍数。

图 1.2 所示 F741 的内部电路中, T_{16} 、 T_{17} 管和它的有源负载 T_{13B} 组成中间放大级,同时完成电平移动。这一级具有较高的增益。为了运放闭环工作的稳定性,在 T_{16} 管集电极和基极间接入 30pF 积分校正电容。 T_{11} 、 T_{12} 两个二极管和电阻 R_5 为 T_{10} 、 T_{13A} 、 T_{13B} 管的电流镜恒流源的偏置电路。

3. 输出级

集成运放的输出级必须具有很小的输出电阻、较高的输出电压和较大的输出电流,输出级通常采用双电源供电的互补对称输出放大电路,并使用复合三极管或共射共基电路。一般集成运放的输出级电路中设有保护电路,以保护在负载短路或过流的情况下不致损坏。

图 1.2 的输出级输出级由 T_{14} 、 T_{20} 和 T_{21} 管及偏置电路、输出保护电路构成。 T_{14} 、 T_{20} 管组成互补输出级, T_{21} 管为激励级。 T_{18} 、 T_{19} 两个二极管为 T_{14} 、 T_{20} 提供初始偏置电压,以减小交越失真。 T_{13A} 为 T_{21} 射极有源负载。为了避免输出级接地过载引起的损坏,由 T_{15} 管和电阻 R_9 构成正向电路过载保护电路。当 T_{14} 管输出电流增大到使 R_9 上的电压大于 0.6V 时, T_{15} 管导通,降分流 T_{14} 管部分基极电流使正向输出短路电流限制在 $0.6\text{V} \div 27\Omega = 22\text{mA}$,负向输出电流保护电路由 T_{22} 、 T_{23} 管和电阻 R_{10} 构成。当电阻 R_{10} 上电压超过 0.6V 时, T_{24} 、 T_{23} 和 T_{22} 管相继导通,分去 T_{16} 管的基极电流,限制了输出级 T_{20} 管输出电流,使负向输出短路电流限制在 $0.6\text{V} \div 22\Omega = 27\text{mA}$ 。

4. 偏置电路

集成运放的偏置电路的作用是为电路的各部分提供所需的电源电压和静态工作电流。由于集成运放大量采用恒流源负载和复合三极管、高 β 三极管,故各级的静态电流都非常小,但要求非常稳定,所以集成运放的偏置电路多数采用微电流源、镜像电流源、多路输出恒流源等电路类型,这些电路也发挥电平移动的作用。

在图 1.2 所示 F741 集成运算放大器内部电路中,偏置电路由 T_8 、 T_9 、 T_{10} 、 T_{11} 、 T_{12} 、 T_{13} 及电阻 R_4 、 R_5 等组成。其中, T_8 、 T_9 是镜像电流源,为 T_1 、 T_2 提供工作电流 I_{C8} 、 I_{C9} 与微电流源 T_{10} 、 T_{11} 的 I_{C10} 配合,为 T_3 、 T_4 提供偏置电流,以电流负反

馈的方式达到抑制温度漂移的目的; T_{12} 、 T_{13} 为镜像电流源, T_{13} 是一个双集电极三极管,其功效可视为两个三极管并联使用,其输出电流 I_{13A} 为输出级提供偏置电流,另一路输出电流 I_{13B} 则作为中间级 T_{16} 、 T_{17} 的有源负载,一方面为中间级提供稳定的偏置电流,另一方面则为中间级建立高阻抗的等效负载,大大提高了中间级的放大倍数。

1.1.2 集成运放的表示符号与引脚功能

1. 集成运放的表示符号

集成运放的电路符号如图1.3(a)为国标符号,如图1.3(b)所示为惯用符号,都是两个输入端、一个输出端。两个输入中一个标“+”的是同相输入,表示集成运放输出信号的相位与该输入端信号相位相同;一个标“-”为反相输入,表示集成运放输出信号的相位与该输入端引入的信号相位相反。这样的符号简洁明了地表达了集成运放的主要特性,但实际的运放还有正负电源端和调零、相位补偿等辅助功能端,在电路原理图中根据需要标出。

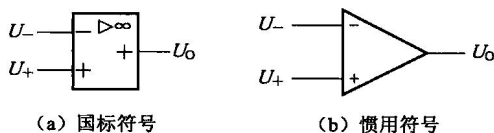
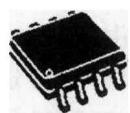


图 1.3 集成运放的表示符号

2. 集成运放的封装

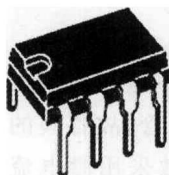
集成运放的封装与普通集成电路的封装形式相同,有适合自动化高密度安装的贴片式封装(SMD)、适合实验和低密度安装的双列直插式封装(DIP)和金属圆



(a) 表面贴装型



(c) 金属圆帽型



(b) 双列直插型

图 1.4 集成运放外形

帽封装,如图1.4所示。贴片式封装和双列直插式安装的区别主要在体积和引脚形式上,其引脚的排列一般都是相同的。双列直插式封装的集成运放多为8脚和14脚标准封装,引脚间距是100mil(0.1in,2.54mm),引脚跨度(两排引脚的间距)为300mil(7.62mm),引脚宽为0.46mm;贴片式封装的引脚间距为50mil(1.27mm),引脚跨度为225mil(5.71mm)。金属圆帽式封装具有电磁屏蔽作用,散热性能好的特性,但由于不便于自动化安装,金属圆帽封装已经逐步被主流市场淘汰。

集成运放有一个集成块中只有一个运放单元的单运放、一个集成块中包含两个运放单元的双运放和包含四个运放单元的

四运放。不同型号的集成运放其各自的引脚排列有相同的规律,图 1.5 集成运放引脚排列即表示这三种运放的引脚排列规律,可供参考,具体运放的引脚定义,请查阅有关器件手册。

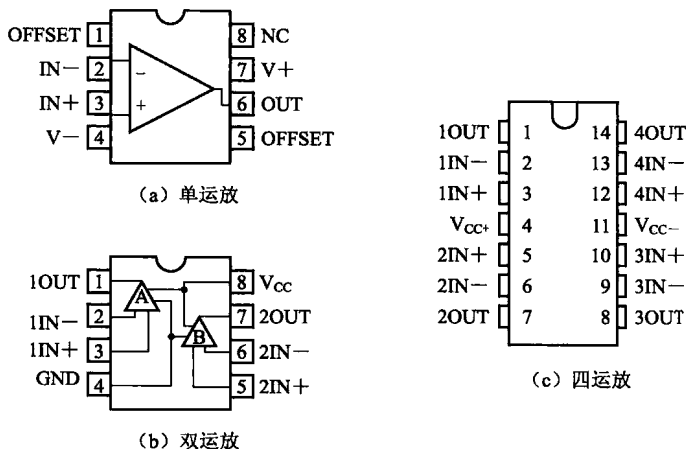


图 1.5 集成运放引脚排列

3. 集成运放的引脚功能

集成运放的引出端按功能可分为五类。

① 输入端:即信号输入端,它有两个,通常用“+”表示同相端,用“-”表示反相端。

② 输出端:即放大信号的输出端,只有一个,通常为对地输出电压。

③ 电源端:集成运放为有源器件,工作时必须外接电源。一般有两个电源端,对双电源的运放,其中一个为正电源端,另一个为负电源端;对单电源的运放,一端接正电源,另一端接地。

④ 调零端:一般有两个引出端。将其接地电位器的两个外端,而电位器的中心调节端接正电源或负电源端。有些集成运放不设调零端,欲调零时需外设调零电路。

⑤ 相位补偿(或校正)端:其引出端数目因型号而各异。一般为两个引出端,多者有 3~4 个。有些型号的集成运放采用内部相位补偿的方法,所以不设外部相位补偿端。

集成运放的输入端、输出端、电源端在电路符号上标示的位置是固定的,不可随意处理,如图 1.3 所示,而调零端、相位补偿端则不同,可在国标符号的短边或惯用符号的两斜边的任意位置标出。

为使电路图简洁明了,画原理图时,经常只标出两个输入和一个输出端,而将电源端、调零端、相位补偿端略去。必要时可标出所需说明的引出端,如调零端等。

在用于施工的集成运放电路图中,必须将全部引出端和所连元件、连接方式具

体地表示出来,并在相应的引出端标出器件管脚的编号,在其电路符号内标出集成运放的型号和编号。外接的元件也应标出其参数值(或型号)和编号。图 1.6 所示为一个集成运放纳安电流表的实际接线电路图。其中 7 和 4 是正负电源,1 和 5 是调零端,8 是补偿端。

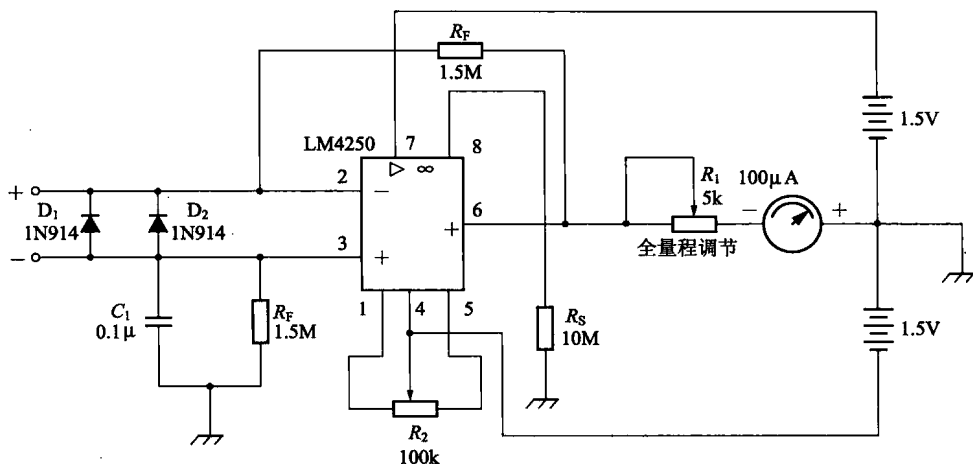


图 1.6 考虑电源、调零、补偿端子实际接法的集成运放应用电路

1.2 集成运放的主要参数

在设计运放电路时,必须熟悉实际集成运放的特性参数。正确理解和运用其特性参数,是正确评价和选择集成运放以及设计、计算、实验调试运放电路所必需的。集成运放的参数名目很多,各生产单位所给出的参数种类也可能有所不同,但其中都包括了一些最基本的参数。下面仅就这些基本参数作一介绍,其中包括直流特性参数与交流特性参数。

1.2.1 直流参数

1. 输入失调电压 U_{OS}

由于集成运放内部构造不可能理想对称,当输入电压为零时,输出电压并不能保证严格等于零。为了使集成运放在零输入时达到零输出,需在其输入端加一个直流补偿电压,这直流补偿电压的大小即为输入失调电压。输入失调电压一般是毫伏数量级。采用双极型三极管作为输入级的运放,其 U_{OS} 为 $1\sim 10\text{mV}$;采用场效应管作为输入级的集成运放,其 U_{OS} 大得多;而对于高精度、低漂移型的集成运放,其 U_{OS} 的值一般很小。

2. 输入失调电压的温度系数 $\Delta U_{OS}/\Delta T$

在一确定的温度变化范围内,失调电压的变化与温度变化的比值定义为输入

失调电压的温度系数。一般集成运放输入失调电压的温度系数为 $10 \sim 20 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$ ；而高精度、低漂移集成运放的温度系数在 $1 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$ 以下。

3. 输入偏置电流 I_{IB}

当集成运放的输入电压为零，输出电压也为零时，其两个输入端偏置电流的平均值定义为输入偏置电流。两个输入端的偏置电流分别记为 $I_{\text{IB}+}$ 、 $I_{\text{IB}-}$ ，而 I_{IB} 表示为：

$$I_{\text{IB}} = \frac{I_{\text{IB}+} + I_{\text{IB}-}}{2} \quad (1.1)$$

双极型三极管为输入级的集成运放，其 I_{IB} 为 $10\text{nA} \sim 1\mu\text{A}$ ；场效应管输入的集成运放，其 I_{IB} 一般小于 1nA 。

4. 输入失调电流 I_{os}

当集成运放的输入电压为零，输出电压也为零时，两个输入偏置电流的差值，称为输入失调电流，即

$$I_{\text{os}} = |I_{\text{IB}+} - I_{\text{IB}-}| \quad (1.2)$$

一般来说，集成运放的偏置电流越大，其输入失调电流也越大。

输入偏置电流和输入失调的温度系数，分别用 $\Delta I_{\text{IB}}/\Delta T$ 和 $\Delta I_{\text{os}}/\Delta T$ 来表示。

由于输入失调电压、输入失调电流以及输入偏置电流均为温度的函数，所以产品手册中均应注明这些参数的测试温度。此外，需要指出的是，上述各参数均与电源电压以及集成运放输入端所加的共模电压值有关。手册中的参数一般是指在标准电源电压值以及零共模输入电压下的测试值。

5. 差模开环电压增益 A_{ud}

集成运放工作于线性区时，差模电压输入后，其输出电压变化 U_o 与差模输入电压变化 U_{id} 的比值，称为差模开环电压增益，即

$$A_{\text{ud}} = \frac{\Delta U_o}{\Delta U_{\text{id}}} \quad (1.3)$$

差模开环电压增益一般用分贝为单位，则可用下式表示：

$$A_{\text{ud}}(\text{dB}) = 20 \lg \left(\frac{\Delta U_o}{\Delta U_{\text{id}}} \right) (\text{dB}) \quad (1.4)$$

实际集成运放的差模开环电压增益是频率的函数，所以手册中的差模电压增益均指直流（或低频）开环电压增益。大多数集成运放的差模开环电压增益均大于 10^4 倍（80dB）。

6. 共模抑制比 CMRR

集成运放工作于线性区时，其差模电压增益 A_{ud} 与共模电压增益 A_{uc} 之比称为共模抑制比，即

$$\text{CMRR} = \frac{A_{\text{ud}}}{A_{\text{uc}}} \quad (1.5)$$

此处的共模电压增益 A_{uc} 是指当共模信号输入时,集成运放输出电压的变化量 ΔU_o 与输入电压变化量 ΔU_i 的比值。

若以分贝为单位时,CMRR 由下式表示:

$$CMRR = 20 \lg \left(\frac{A_{ud}}{A_{uc}} \right) (\text{dB}) \quad (1.6)$$

与差模开环电压增益类似,CMRR 也是频率的函数。集成运放手册中给出的参数值均指直流(或低频)时的 CMRR。多数集成运放的 CMRR 的值在 80dB 以上。

7. 电源电压抑制比 PSRR

集成运放工作于线性区时,输入失调电压随电源电压改变的变化率称为电源电压抑制比,表示为:

$$PSRR = \left| \frac{\Delta U_{os}}{\Delta U_s} \right| (\mu\text{V/V}) \quad (1.7)$$

式中, ΔU_s 为电源电压的波动 ΔU_{CC} 或 ΔU_{EE} 。

电源电压抑制比若以分贝为单位,则可用下式表示:

$$PSRR = 20 \lg \left(\frac{\Delta U_{os}}{\Delta U_s} \right) (\text{dB}) \quad (1.8)$$

若 PSRR 为 100dB,相当于 $10\mu\text{V/V}$ 。一般低漂移集成运放的 PSRR 为 90~100dB,相当于 $2\sim 20\mu\text{V/V}$ 。需说明的是,对于有些集成运放,其正负电源电压抑制比并不相同,使用时应注意。

8. 输出峰-峰电压 U_{opp}

输出峰-峰电压是指在特定的负载和电源电压条件下,集成运放能输出的最大电压幅度,正、负向的电压摆幅往往并不相同。目前大多数集成运放的正、负电压摆幅均大于 10V。

9. 最大共模输入电压 U_{icm}

当集成运放的共模抑制特性显著变坏时的共模输入电压即为最大共模输入电压。有时将共模抑制比(在规定的共模输入电压时)下降 6dB 时所加的共模输入电压值,作为最大共模输入电压。

10. 最大差模输入电压 U_{idm}

最大差模输入电压是集成运放两输入端所允许加的最大电压差。当差模输入电压超过此电压值时,集成运放输入级的三极管将被反向击穿,甚至损坏。

1.2.2 交流参数

1. 开环带宽 BW

集成运放的开环电压增益下降 3dB(或直流增益下降到的 0.707 倍)时所对应

的信号频率称为开环带宽。

2. 单位增益带宽 GW

单位增益带宽是指集成运放在闭环增益 1 倍状态下,当用正弦小信号驱动时,其闭环增益下降至 0.707 倍时的频率。当集成运放的频率特性具有单极点响应时,其单位增益带宽可表示为:

$$GW = A_{ud} f \quad (1.9)$$

式中, A_{ud} 是当信号频率为 f 时集成运放的实际差模开环电压增益值。

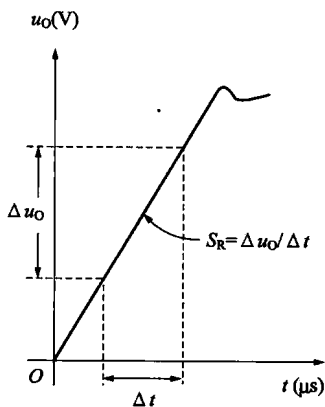
当集成运放具有多极点的频率响应时,其单位增益带宽与开环带宽没有直接关系,此时,采用增益带宽乘积参数表示。集成运放闭环工作时的频率响应主要取决于单位增益带宽。

还应注意的是,这两个频率参数均指集成运放小信号工作时的频率特性。此时的信号输出范围为 100~200mV。当集成运放处在大信号工作时,其输入级工作于非线性区,这时集成运放的频率特性将会发生明显变化。下面三个参数均用来描述集成运放大信号工作的频率特性。

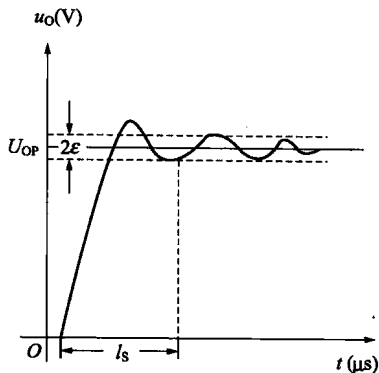
3. 转换速率(或电压摆率)SR

在额定的负载条件下,当输入阶跃大信号时,集成运放输出电压的最大变化率称为转换速率。图 1.7(a)是转换速度的定义。

通常集成运放手册中所给出的转换速率均指闭环增益为 1 倍时的值。实际上,在转换期内,集成运放的输入级时处于开关工作状态,所以集成运放的反馈回路不起作用,即集成运放的转换速率与其闭环增益无关。一般在集成运放反相和同相应用时,转换速率是不一样的,其输出波形的前沿和后沿的转换速率也不相同。普通集成运放的转换速率约为 $1V/\mu s$ 以下,而高速集成运放的转换速率应大于 $10V/\mu s$ 。



(a) 转换速率



(b) 建立时间

图 1.7 转换速率与建立时间