

运算放大器应用基础

段尚枢 编

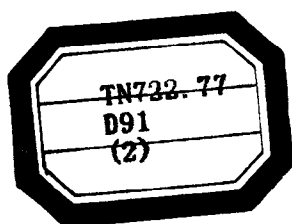
哈尔滨工业大学出版社

22.77

434167

运算放大器应用基础

段尚枢 编



00434167

哈尔滨工业大学出版社

哈尔滨

内 容 简 介

本书系按机械电子工业部的工科机、电类专业教材的出版规划,根据“电磁测量技术及仪表”专业教材编审委员会制定的教学计划和教学大纲编写出版的。

本书对运算放大器及其应用着重于从基础方面作了比较全面和深入地分析与介绍。全书共八章,内容包括运算放大器的基础知识,信号放大电路,模拟运算器,线性变换器,非线性波形变换器,RC有源滤波器,模拟电压比较器和信号发生器。

本书为高等工程院校电磁测量及仪表专业本科生教材,也可供从事自动检测、电子测量仪器、自动控制、计算机技术等有关专业师生、工程技术和科研工作者在学习和应用运算放大器电路时参考。

运算放大器应用基础

Yunsuan Fangdaqì Yingyong Jichu

段尚枢 编

*

哈尔滨工业大学出版社出版发行

哈尔滨理工大学东区印刷厂印刷

*

开本 787×1092 1/16 印张 12.625 字数 281 千字

1998 年 10 月第 2 版 1998 年 10 月第 2 次印刷

印数 3 001—6 000

ISBN 7-5603-0391-9 /TN·26 定价 13.00 元

前 言

随着科学技术的发展,模拟与数字集成电路已广泛应用于电子计算技术、测量技术和自动控制等各个领域,并成为各类电子设备和系统中必不可少的电子器件。

运算放大器最早在模拟计算技术中得到应用。它经历了电子管、晶体管分立元件及集成电路等不同的发展阶段。至今,集成运算放大器无论在品种数量上,还是在性能质量上都有相当大的发展,已成为集成电路中比较重要的,也是当前应用比较广泛的最基本的电子器件。

随着电子计算机技术在测量技术中的推广应用,测量仪器和检测系统对信号处理的能力和品质都有了相当大的提高。然而,由于测试仪器和系统必须首先通过传感器从被测对象上获得信息,再对其模拟信号进行模拟量的预处理(如放大、变换和滤波等等),模拟通道(也包括传感器)的测量误差,将限制整台测量仪器和设备的测量精度。因此,模拟通道的设计与试验已成为重要的一环。随着集成运算放大器的应用和推广,几乎所有新型测量仪器的模拟通道都是采用集成运算放大器来实现,作为从事测量技术及仪器设计的工程技术人员必须具有能完成模拟电路设计和试验的良好素质。

本教材是在模拟电子技术的基础上,为进一步强化学生的集成运算放大器电路知识而编写的。其内容不是以介绍更多的器件和应用电路为主要目的,而是着眼于在有限的篇幅内完成对学生基本技能的培养,着重于讲授集成运算放大器的基础知识,剖析典型应用电路,使学生掌握基本分析方法和误差计算。

本教材是编者在多年教学经验总结的基础上编写的。全书共分八章,内容包括运算放大器的基础知识,信号放大电路,模拟运算器,线性变换器,非线性波形变换器,RC有源滤波器,模拟电压比较器和信号发生器。由于受篇幅和教学时数的限制,以及考虑到在其它课程中有所体现,在本书编写时,有关集成运算放大器在模拟与数字转换技术、采样与保持器、调制与解调器,以及噪声分析、屏蔽防护、特殊集成运算放大器等方面的内容均未编入。本教材课堂讲授约为55学时,各校在具体讲授时,可根据需要增减内容。在教学中要求学生重点掌握集成运算放大器的技术特性及其参数的测试方法,熟悉各种典型电路的构成,学会分析电路工作原理和理想传输特性的推导方法,根据具体条件,运用等效电路分析和计算各种因素所引起的测量误差。这是一门实践性很强的课程,在学习和消化课程内容的同时,安排一定的习题和实验,对提高学生的动手能力也将是十分必要的。

本书在编写过程中得到了哈尔滨工业大学电磁测量技术及仪器教研室赵新民教授、**赫继显**讲师、张荣祥副教授、郭振芹副教授及教研室各位老师的指导和支持,并由重庆大学周德超副教授对全书作了认真审阅,在此特向他们表示谢意。

由于编者水平所限,书中可能存在一些缺点和错误,殷切希望广大读者批评指正。

编 者

目 录

第一章 集成运算放大器的基础知识	(1)
§ 1-1 集成运算放大器的基本构成和表示符号	(1)
§ 1-2 理想运算放大器及其等效模型	(4)
§ 1-3 集成运算放大器的特性参数及分类	(6)
§ 1-4 集成运算放大器的实际等效模型	(15)
§ 1-5 集成运算放大器特性参数的测试方法	(16)
§ 1-6 集成运算放大器负反馈电路的稳定性	(25)
第二章 信号放大电路	(38)
§ 2-1 集成运算放大器的基本放大电路	(38)
§ 2-2 基本放大电路的误差分析	(46)
§ 2-3 仪器放大器	(50)
§ 2-4 动态校零型斩波放大器	(53)
第三章 基本模拟运算器	(60)
§ 3-1 模拟加法器和减法器	(60)
§ 3-2 模拟积分器	(63)
§ 3-3 模拟微分器	(71)
§ 3-4 模拟对数运算器	(76)
§ 3-5 模拟指数运算器	(79)
§ 3-6 模拟乘法器	(81)
第四章 线性变换器	(89)
§ 4-1 电压-电流变换器	(89)
§ 4-2 电流-电压变换器	(93)
§ 4-3 电桥放大器	(95)
§ 4-4 电荷放大器	(99)
§ 4-5 阻抗模拟变换器	(101)
第五章 非线性波形变换器	(107)
§ 5-1 线性检波电路	(107)

§ 5-2	绝对值变换器	(109)
§ 5-3	限幅器	(113)
§ 5-4	二极管函数变换器	(118)
第六章	RC 有源滤波器	(124)
§ 6-1	概述	(124)
§ 6-2	传递函数的幅度近似问题	(126)
§ 6-3	滤波器传递函数的设计	(134)
§ 6-4	电压控制电压源单端正反馈型基本节电路	(140)
§ 6-5	电压控制电压源双重正反馈型基本节电路	(146)
§ 6-6	双二阶电路	(151)
§ 6-7	灵敏度	(153)
第七章	模拟电压比较器	(161)
§ 7-1	模拟电压比较器及其特性	(161)
§ 7-2	过零电压比较器	(162)
§ 7-3	电平检测器	(168)
§ 7-4	回差电压比较器	(170)
§ 7-5	窗口电压比较器	(174)
§ 7-6	动态校零型电压比较器	(177)
第八章	信号波形发生器	(180)
§ 8-1	正弦波发生器	(180)
§ 8-2	方波和三角波发生器	(186)
§ 8-3	压控振荡器	(188)
§ 8-4	脉冲波和锯齿波发生器	(190)
§ 8-5	阶梯波发生器	(191)
参考文献		(195)

第一章 集成运算放大器的基础知识

在各类电子仪器和设备所采用的电子线路中,集成运算放大器(以下简称集成运放)是应用最普遍的模拟电子器件。集成运放配上不同的反馈网络和采用不同的反馈方式,就可以构成功能和特性完全不同的各种集成运放电子电路,简称运放电路,如放大器、积分器、滤波器、振荡器等等。这些运放电路是各种电子电路中最基本的组成环节。为了更好地熟悉和掌握各类运放电路的设计和计算方法,首先必须对集成运放有一个比较全面的和较深入的了解。只有在充分熟悉集成运放器件性能和特点的基础上,才能很好地学习和掌握各种运放电路的构成和分析方法,才能根据任务要求,灵活地掌握电路设计和元件参数的计算,合理选择元器件,并在理论指导下进行电路调试。

全面了解集成运放需要涉及半导体材料、微电子电路设计和集成电路制造工艺等许多方面的知识。集成运放的电路设计和制造是一个专业性很强的技术领域,作为从事集成运放应用的工作者来讲,更多的不是关心它们的内部电路是如何设计、采用什么材料和哪种工艺制造的,而是将它们作为电路的一个基本器件,从它的外部特性去了解、掌握和应用它。学习集成运放的基础知识,是进一步熟悉和掌握运放电路分析、设计和计算的基础,这是十分必要的。

§ 1-1 集成运算放大器的基本构成和表示符号

一、集成运放的基本构成

集成运放是以双端为输入,单端对地为输出的直接耦合型高增益放大器。它是将相当数目的晶体管、电阻以及连接线,采用半导体集成工艺制做在一块面积很小(约 0.5mm^2)的硅片上。

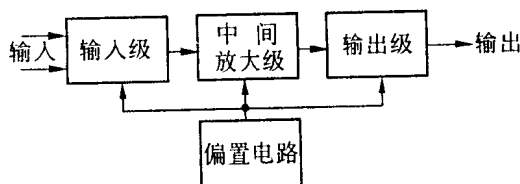


图 1-1 集成运放内部电路构成方框图

集成运放内部电路包括四个基本组成环节:输入级、中间放大(兼电平移动)级、输出级和各级的偏置电路,如图 1-1 所示。由于晶体管容易制造,且它在硅片上占的面积小,集成运放内部电路大量采用晶体管来代替其它元器件,如采用三极管构成二极管、用有源负载代替电阻负载等。由于晶体管是在相同的

工艺条件下同时制造的,同一硅片上的对管特性比较相近,易获得良好的对称特性,且在同一温度场,易获得良好的温度补偿,具有很好的温度稳定性。内部电路中的部分电阻采用半导体工艺制造,如扩散电阻、夹层电阻、体电阻、离子注入电阻、薄膜电阻等。内部电容

采用 PN 结电容、薄膜电容等,电容量较小,在几十 pF 之内。一般大电阻、大电容在硅片上占用面积大,集成电路内部很少采用,需要时采用外接方法,特别是大的相位校正电容,多采用外接方式。为了提高集成运放输入电阻、减小失调电压和偏置电流、提高差模和共模输入电压范围等性能,集成运放的输入差分放大级可采用超 β 管、达林顿复合管、串联互补复合管、场效应管等等。从集成运放差动输入级经中间放大级转为单端输出,差模输入电压为零时,其输出对地电压不为零,因此在输入与输出级之间需采用电平移动电路,将其电平移动到地电平。电平移动电路多采用恒流源、横向 PNP 管、稳压管、正向二极管链和电阻降压电路等。从双端输出到单端输出的变换,常采用并联电阻负反馈、有源负载、电流负反馈、PNP 管等方法。为了提高共模抑制能力,提高差模增益和提供稳定的内部电路工作电流,实际电路中广泛采用各种恒流源电路,如稳压管恒流源、镜电流恒流源,比例恒流源、多集电极恒流源、场效应管恒流源等。为了获得比较大的输出电压动态范围、大的输出电流和低的输出电阻,集成运放输出级多采用互补推挽输出级、跟随器推挽输出级、多级互补推挽输出级等。

为提高集成运放的稳定性和耐受过载能力,某些集成运放又在内部电路中采用一些辅助电路,如内电源稳压电路、控温电路、温度补偿电路、输入电压保护、输出过流、过热保护电路等。

二、741 型集成运放电路简介

以图 1-2 所示的 741 型(如 $\mu A741$, AD741)集成运放电路为例,简述其构成原理。

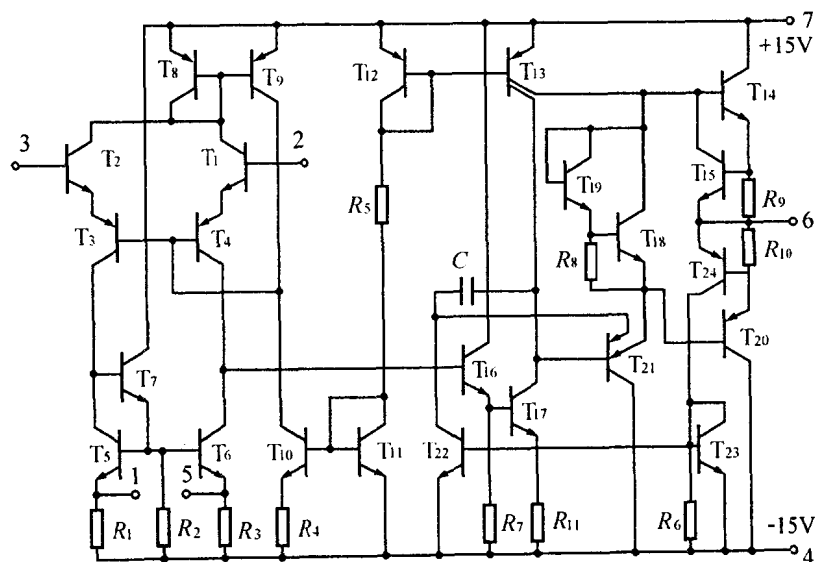


图 1-2 $\mu A741$ 型集成运放内部电路图

图中 $T_1 \sim T_{10}$ 管和 $R_1 \sim R_4$ 电阻组成了输入级。 T_1 、 T_2 (NPN 管) 和 T_3 、 T_4 (PNP 管) 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。 $T_5 \sim T_7$ 管和

$R_1 \sim R_3$ 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。在输入级偏置电路中,由 T_5 、 T_6 组成电流镜电流源,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 I_{c3} 、 I_{c4} 增大时,共模电流负反馈的作用则是,通过 I_{c3} 、 I_{c4} 增大,使 I_{c8} 增大,根据电流镜的关系, I_{c9} 也增大,而 T_{10} 为恒流源,则 T_3 、 T_4 的基极电流 I_{b3} 、 I_{b4} 必然同时减小,从而使 I_{c3} 、 I_{c4} 减小,达到稳定工作点,提高共模特性的目的。

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。为了保证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。

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 构成正向电流过载保护电路。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,将分流 T_{14} 管部分基极电流,使正向输出短路电流限制在 $0.6\text{V}/27\Omega = 22\text{mA}$ 。负向输出电流保护电路由 T_{22} 、 T_{23} 、 T_{24} 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 $0.6\text{V}/22\Omega = 27\text{mA}$ 。

三、集成运放的引出端及表示符号

集成运放器件的封装形式主要有两类:金属圆帽封装和双列直插封装,如图 1-3(a)

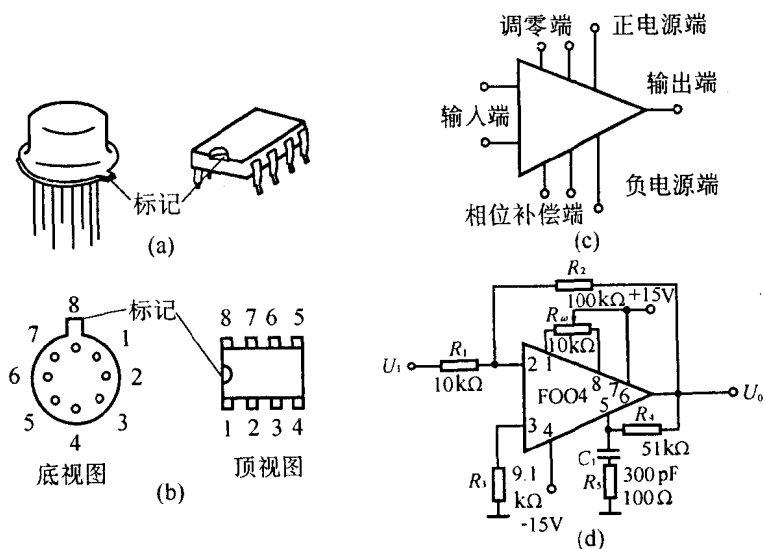


图 1-3 集成运放外形、管脚排列标记和表示符号

所示。按封装材料分,双列直插封装有塑封、陶瓷封装、金属-陶瓷封装,它们适用于不同的

环境条件。集成运放管脚排列方法如图 1-3(b)所示。圆帽封装多数为 8 脚,也有 10 脚、12 脚的。双列直插单运放多数为 8 脚,双运放和四运放多数为 14 脚。圆帽封装的管脚号排列顺序是以圆帽边沿上的凸作为定位标志,一般以对准定位标志的管脚定为最大的管脚号。在早期产品中有的对准管脚 1 或管脚 1 与最大管脚间空位。管脚排列以底视图顺时针方向顺序编号。双列直插器件的定位标志一般是在器件正表面上的一端设凹坑或标志点,管脚排列顺序是以顶视图,并按逆时针方向,从定位标志开始的第一管脚顺序排列。管脚编号排列顺序应注意定位标志、视图方法和时针方向。

集成运放通常采用图 1-3(c)所示的三角形符号和相应的引出端来表示。集成运放共有五类引出端:

(1)输入端。即信号电压输入端,它有两个。通常用符号“+”来表示同相输入端,用“-”来表示反相输入端。

(2)输出端。即放大信号输出端,只有一个,通常为对地电压输出。

(3)电源端。集成运放为有源器件,工作时必须外接电源。一般有两个引出端。对于双电源运放,其中一个为正电源 $+U_{cc}$ 端,而另一个为负电源 $-U_{cc}$ 端;对于单电源运放,一端接正电源,另一端接地。

(4)调零端。一般有两个引出端。将其外接到电位器的两个外端,而电位器中心调节端接正电源或负电源端。有些运放则不设调零端,欲调零则需外设调零电路。

(5)相位补偿(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 3~4 个,少者不设相位补偿端。

集成运放的输入端、输出端、电源端在三角形符号上标示的位置比较固定,如图 1-3(c)所示。而调零端、相位补偿端则不同,可在两斜边任一位置上标出。

为简化电路图,经常只标出两个输入端和一个输出端,而将电源端、调零端和相位补偿端略去。必要时也可标出所需说明的引出端,如调零端等。由于输入输出共三个引出端,因此称其为三端器件。

在用于施工的运放电路图中,必须将全部引出端和所连元件、连接方式完整地表示出来,并在相应的引出端标出器件管脚编号,在相应的三角形表示符号内或附近标出器件型号和器件编号。外接的元件也相应标出参数值和编号,如图 1-3(d)所示。

§ 1-2 理想运算放大器及其等效模型

集成运放与不同的外部电路连接,采用不同结构的反馈网络、不同的反馈元件和反馈方式,可以构成功能和特性各异的多种应用电路。在分析众多的应用电路时,首先应该分析这些应用电路欲实现的理想输出-输入特性,即理想的传输特性或理想的变换特性。对于可以用传递(传输)函数来描述其传输(或变换)特性的运放电路,则应分析它的理想传递函数。这些理想的传输特性或理想的传递函数,是把集成运放看作理想运放、把反馈元件看作理想元件时所获得的。集成运放应用电路的分析和设计,也应该是先从理想的传输特性设计入手。把运放看作一个环节,从它在系统中所处的地位和作用,来确定它所应该完成的最基本的功能。然后根据实际元器件的实际特性和参数,分析和计算实际电路的传

输特性和误差。并根据设计指标要求,选择合适的元器件及其参数,然后进行电路装配、实验调整和性能测试,最终完成满足技术要求的应用电路。

一、理想运放的基本条件

运算放大器是以它的高增益和很小的引入误差来获得接近于理想的传输和阻抗变换等特性。运放的增益越高、引入误差越小,运放电路的特性越接近于理想特性。可见理想运放应具备的基本条件是:

- (1)差模电压增益为无限大;
- (2)具有无限宽的频带;
- (3)共模电压增益为零;
- (4)输入失调电压、偏置电流、输入噪声电压和电流均为零;
- (5)输入阻抗为无限大;
- (6)输出阻抗为零。

二、理想运放等效模型

从反馈角度看,运算放大器有两类基本工作状态:一类是以负反馈为主的,负反馈工作状态;另一类是正反馈工作状态。运算放大器负反馈工作状态是大多数运放电路所采用的基本工作状态。根据理想运放条件,处于负反馈工作状态的运放,可以采用图 1-4(a)所示的理想运放等效模型来代替。

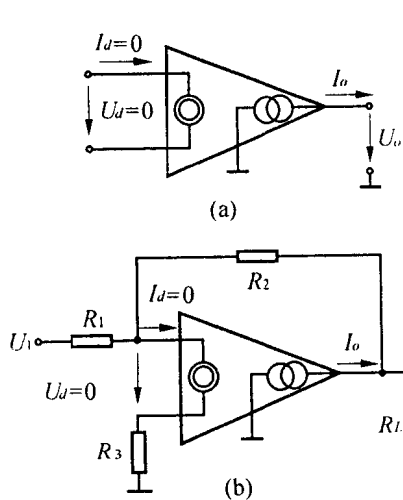


图 1-4 理想运放等效模型

理想运放等效模型的输入端采用“零子”符号来表示。“零子”系指两个输入端的差模电压 U_d 为零,流入输入端的电流 I_d 亦为零。由于理想运放的增益为无限大,其输出电压等效到输入端的差模电压看作为零。输入阻抗为无限大,这意味着输入差模电流为零。也就是理想运放在负反馈电路中,其同相端和反相端电位相等,若同相端接地,则反相端也为地电位,但并不是直接接地,称之为“虚地”。若同相端为某一电位,则反相端将与同相端等电位,反相端不能与同相端短接,称之为“虚短”。理想运放输入差模电压为零,然而输出电压 U_o 和输出电流 I_o 为任意值。等效模型的输出端用“任意子”符号来表示。所谓“任意子”系指理想运放提供给外部电路的对地输出电压和电流均为任意值。任意值的含

意就在于它有能力提供任意输出电压和输出电流。然而任意者并非随意,理想运放的输出电压和输出电流将由外部网络的条件所决定,其值与外部连接的网络结构、元件特性和参数值、输入信号大小、输出端负载等密切相关。外部网络条件确定后,理想运放的输出电压和输出电流将为确定值。

将集成运放看作理想运放,并用等效模型来代替,可以很快地导出运放电路的理想传

输特性。

§ 1-3 集成运算放大器的特性参数及分类

一、集成运放的特性参数

实际上,集成运放并非为理想运放。因此,由集成运放构成的各种运放电路,在实际的电路与欲实现的理想电路的特性之间存在一定的差别,由此带来误差。在设计运放电路和参数计算时,必须充分熟悉和掌握实际运放的特性及表述其性能的各项技术参数或指标。正确理解和运用其特性参数,是正确评价和选择集成运放、设计、计算和实验调试运放电路所必须的。

集成运放的特性参数分工作特性参数和极限参数两大类。而工作特性参数可按输入特性参数、传输特性参数、输出特性参数、电源特性参数分类。下面分别介绍这些特性参数。

首先应该说明的是,集成运放的各项参数都是与运放的工作环境和外部条件有关的,因此,许多参数都规定了一定的条件,如供电电源电压额定值或一定的电压范围、环境温度、输入信号幅度、信号频率和波形、运放的负载条件等等。这些条件在具体的技术规范中有详细规定,这也是器件特性参数的测试条件。为了简化叙述,在下面介绍各项特性参数时,一般将不再详细列举每项参数所规定的条件。

1. 输入特性参数

这一类特性参数与集成运放输入端有关,因此说,它主要是与输入级有关的输入端等效特性参数。

(1) 输入失调电压 U_{os}

当集成运放差模输入端外加电压为零时,由于输入差分级不对称,以及后续电路不完善,则表现出输入差模电压为零,而输出电压并不为零的失调现象。其中,对输出电压贡献最大的是差分输入级不对称,特别是差分对管特性不一致。此输出电压可以看作是输入端有一个很小的等效差模输入电压,经放大后所产生的输出电压,即输出电压等于此差模电压乘以差模放大倍数,此差模电压即为输入失调电压,或者,当差模输入端外加一个直流补偿电压,使运放输出电压为零,此时的补偿电压与失调电压大小相等,而输入极性相反,此补偿电压值为失调电压值。对实际集成运放,只给出输入失调电压典型值、最大值,而对其极性不作任何规定。

一般集成运放输入失调电压在 $20\mu\text{V}\sim 20\text{mV}$ 范围内。双极型集成运放比场效应管型集成运放的输入失调电压小。

(2) 输入失调电压温度系数 $\Delta U_{os}/\Delta T$

在规定的温度范围内,集成运放的输入失调电压将随温度变化而变化,失调电压对温度的变化率,即为输入失调电压温度系数。

失调电压致使运放电路零位输出电压不为零,这可以通过调零方法,使其输出电压调整为零。但由于温度变化,失调电压也随之变化,结果引起运放电路输出电压的零点漂移。

输入失调电压温度系数可用来估计和评价集成运放对运放电路输出电压零值的温度稳定性。这也是一项重要的特性参数。一般低漂移集成运放的失调电压温度系数约为 $0.2 \sim 50 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$ 。

(3) 输入偏置电流 I_B

集成运放的失调电压被补偿后,使其输出电压为零时,集成运放两个差模输入端所需偏流的平均值,规定为输入偏置电流,即

$$I_B = \frac{1}{2}(I_{B+} + I_{B-}) \quad (1-1)$$

为了保证双极型集成运放正常工作,在两个输入端必须提供一定的偏流。而以场效应管为输入级的集成运放,在其输入端也必须通过一定的途径将栅极接地,或是通过电阻直接接地,或是通过电阻和输出端接地,总之需通过外部电路给栅极提供一定的直流电平。尽管场效应管输入电阻很高,但栅极输入端总是存在一定的漏电流。此栅极漏电流对运放电路带来的影响与双极型偏流的影响相同,也按偏流处理。由于差分对管不对称,集成运放的两个输入端的偏流不完全相等,取其平均值定义为输入偏置电流。为了与偏置电流相区别,每个输入端的偏置工作电流称其为偏流,分别为 I_{B+} 、 I_{B-} 。

输入偏置电流的大小与输入级管子类型、电路和参数、以及工艺有关。双极型运放一般为 $0.025 \sim 1 \mu\text{A}$,结型场效应管型运放大约为 $1 \sim 50 \text{pA}$,绝缘栅型场效应管型运放可小于 0.1pA 。

(4) 输入失调电流 I_{os}

集成运放在失调电压被补偿后,两个输入端偏流之差的绝对值,定义为失调电流,即

$$I_{os} = |I_{B+} - I_{B-}| \quad (1-2)$$

由于工艺上的一些原因,制造出来的集成运放,其输入级管子特性及电路不可能完全对称,两个输入端的偏流也不等。为衡量输入级偏流的对称性,并计算由此产生的误差,所以定义两个偏流之差的绝对值为输入失调电流。

绝对值的意思是只确定失调电流值,不确定它的符号。为分析时更明确,一般假定 $I_{os} = I_{B+} - I_{B-}$ 为正。

集成运放两个输入端的偏流将在各自输入端之外的等效直流电阻 R_{B+} 、 R_{B-} 上产生直流电压降: $U_{B+} = I_{B+}R_{B+}$ 和 $U_{B-} = I_{B-}R_{B-}$,二者的差值将带来集成运放的差模输入电压,如同输入失调电压一样将带来零位输出电压。当 $R_{B+} = R_{B-}$ 时,偏置电流 I_B 引起的零值输出电压为零,这时只有失调电流 I_{os} 将引起零位输出电压。通过调零方法可以将失调电流引起的零位输出电压补偿掉。

一般集成运放的输入失调电流比偏置电流小几倍到几十倍。

(5) 输入失调电流的温度系数 $\Delta I_{os}/\Delta T$

在规定的温度范围内,输入失调电压被补偿后,集成运放输入失调电流随温度变化而变化,失调电流对温度的变化率,即为输入失调电流温度系数。

由于失调电流随温度变化,也将导致输出电压零位的漂移。为衡量集成运放的温度稳定性,计算温度漂移,采用输入失调电流温度系数这个指标可作为衡量和选择集成运放的

重要依据。

一般低漂移集成运放输入失调电流温度系数为每度失调电流的 $10^{-2} \sim 10^{-3}$ 量级。

(6) 差模输入电阻 R_d

集成运放的两个输入端之间,在其差模电压为零(接近于零)时的等效输入电阻,即为差模输入电阻,它是差模输入电压变化量与由此引起的差模输入电流变化量之比。

差模输入电阻与输入级晶体管类型、工作状态以及环境温度有关。双极型运放差模输入电阻不如场效应管型运放的高,一般为几百 $k\Omega$ 到几十 $M\Omega$,而场效应管型运放的输入电阻一般为 $10^{12} \sim 10^{14} \Omega$,甚至更高。一般偏置电流小的集成运放,其差模输入电阻高。

与差模输入电阻并联的差模输入电容 C_d 一般在 $0.2 \sim 4pF$ 左右。二者并联称为差模输入阻抗。

(7) 共模输入电阻 R_{CM}

集成运放两个输入端相对地之间的输入电阻为共模输入电阻。

共模输入电阻与共模电压和温度有关。共模输入电阻由共模电压从零到最大时的平均值来确定。对于双极型运放,共模输入电阻远大于差模输入电阻,而场效应管型运放二者相当。

与共模输入电阻并联的共模输入电容 C_{CM} 一般也在 $0.2 \sim 4pF$ 左右。二者并联称为共模输入阻抗。

2. 传输特性参数

这是在信号电压从输入端到输出端传输过程中所表现出来的,与输入和输出电压同时有关的一些特性参数。

(1) 开环差模电压增益

由差模输入电压引起的对地输出电压与此差模输入电压之比,即为开环差模电压增益,简称开环增益。

开环增益可用放大倍数来表示,如 10^5 倍,或用 $10^2 V/mV$ 来表示,也可用分贝数来表示,如 $20 \lg A_d = 100dB$ 。

1) 直流开环增益

一般,开环增益指的是直流开环增益,这是在输入直流电压信号下或在很低频率下近似测得的增益。

集成运放的开环增益一般为 $100 \sim 140dB$ 。

2) 交流开环增益 $A_d(\omega)$

当差模输入电压信号为交流时,其开环增益为交流开环增益。交流开环增益随频率上升而下降,其开环增益与频率的关系曲线称之为开环增益的频响特性曲线,简称增益频响特性,一般用伯德图来描述,如图1-5所示。增益频响特性与相位补偿条件有关,图1-5(a)示出了 CF709集成运放在不同的补偿参数下的频响特性。 $\mu A741$ 采用内部相位补偿,其频响特性曲线如图1-5(b)所示。随着信号频率增高,集成运放输出电压不失真的输出幅值也随之下降,因此其增益频响特性在高频端实际上是小信号的增益频响特性。

(2) $-3dB$ 带宽 BW,增益带宽积 GBW

开环增益频响特性在从直流开环增益下降 $-3dB$ 时所对应的频率范围,称之为 $-3dB$

带宽,又称之为开环带宽。

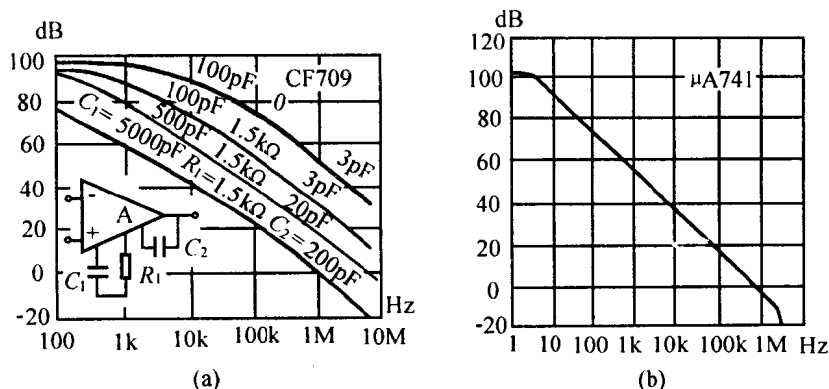


图1-5 CF709型和 $\mu A741$ 型集成运放开环增益频响特性

交流开环增益与其相应的增益带宽(频率)的乘积被称之为增益带宽积。一般规定在指定频率下或指定增益下进行测试。

在作交流信号放大时,希望集成运放在较宽的频率范围内保持较高的交流开环增益。开环带宽是衡量开环频响特性的一个指标,是由第一个极点所决定的转折频率。开环带宽仅仅表明增益频响特性相对于频率的相对变化范围,不表示增益绝对量值。若采用增益带宽积来衡量集成运放的频响特性,则将同时考虑了增益和频带这两个方面的因素,将是比较全面的。

(3) 单位增益带宽 f_T

当交流增益下降到0dB,即交流开环放大倍数为一倍时所对应的信号频率,称单位增益带宽。

这是小信号特性参数。若集成运放被看作单极点时,运放的增益函数可表示为

$$A_d(s) = \frac{A_d}{1 + T_o s} \quad (1-3)$$

其增益频响特性为

$$A_{df} = \frac{A_d}{\sqrt{1 + (f/f_o)^2}} \quad (1-4)$$

式中 $f_o = BW = 1/2\pi T_o$

由式(1-4)可得出,单位增益带宽近似等于增益带宽积

$$f_T = A_d \cdot BW = GBW$$

实际上,由于与 f_T 频率接近的第二个极点频率的影响,单位增益带宽 f_T 略低于增益带宽积 GBW。

(4) 全功率带宽 f_P

在保证正弦波输出电压失真系数不大于规定值(一般为1%)和最大输出电压幅度 $\pm U_{om}$ (或 U_{OP-P}) 的条件下,所达到的最高正弦信号频率,即为全功率带宽,又称满功率带宽。这是大信号的工作带宽。

(5) 输出电压摆率 SR

集成运放在输入信号为阶跃脉冲条件下,输出电压对时间的最大变化率,即输出电压转换速率,简称摆率。

摆率是由集成运放内部电路中的电容和晶体管电流驱动能力所限定的,它也与相位补偿网络的特性和负载电容有关,这是输出电压对快速变化的输入信号所能达到的最快响应速率,如图1-6所示。输入为大信号方波,而输出方波的上升沿和下降沿的电压变化率即为摆率

$$SR = \Delta u_o / \Delta t$$

若输入为正弦信号 $u_i(t) = U_m \sin \omega t$, 在理想条件下, 图 1-6(a) 所示电路的输出电压 $u_o(t) = -U_m \sin \omega t$ 。此正弦波输出电压的最大电压变化率发生在输出电压过零时, 其值为

$$\left. \frac{du_o(t)}{dt} \right|_{\max} = U_m \omega$$

当输出信号幅值达到 $\pm U_{om}$, 同时最大变化率又不大于摆率, 即 $U_{om} \omega \leq SR$, 则输出正弦电压将不会失真。随信号频率增高, 达到某频率时, 输出信号开始失真, 如图 1-6(c)。在保证输出幅度为 $\pm U_{om}$, 且不失真, 可由 $U_{om} \omega = SR$ 条件, 确定全功率带宽 f_p 与摆率的关系式

$$f_p = \frac{SR}{2\pi U_{om}} \quad (1-5)$$

(6) 建立时间 t_s

集成运放接成闭环放大器, 经调零后, 输入大信号阶跃脉冲, 从脉冲沿达到 50% 时计时, 到放大器输出达到稳定值, 并在规定的精度之内所需时间, 即为建立时间 t_s 。

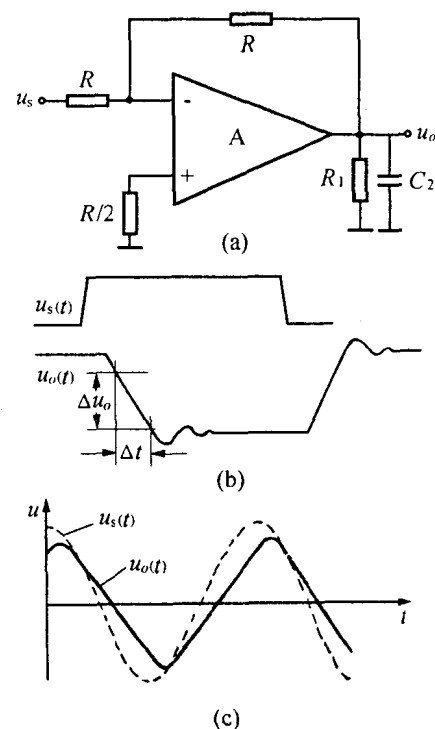


图1-6 摆率测试电路和输出波形图

集成运放可接成增益为-1的倒相放大器, 如图1-6(a)所示。也可接成增益为+1的同相跟随器。一般输入端加10V 阶跃脉冲信号, 规定输出电压达到稳定值的精度为 $\pm 0.1\%$, 即误差为 $\pm \epsilon = \pm 10\text{mV}$ 。建立时间可分为上升沿建立时间 t_{sr} , 下降沿建立时间 t_{sf} 。建立时间包括信号传输中的延迟时间 t_d , 上升(或下降)时间 $t_r(t_f)$, 以及恢复时间 t_{rs} , 如图 1-7 所示。

(7) 共模电压增益 A_{CM} 与共模抑制比 CMRR

集成运放在两个输入端上所加的共同的对地电压为共模输入电压 U_{CM} 。由共模输入电压引起的输出电压与此共模输入电压之比, 定义为共模电压增益

$$A_{CM} = U_{oCM} / U_{CM} \quad (1-6)$$

理想运放的共模电压增益为零, 而实际的集成运放尽管内部电路采用共模负反馈, 但总有一定的共模增益。一个集成运放, 希望它的共模增益越小越好, 而差模增益越大越好。为了便于比较, 则采用共模抑制比 CMRR。它被定义为差模电压增益 A_d 与共模电压增益

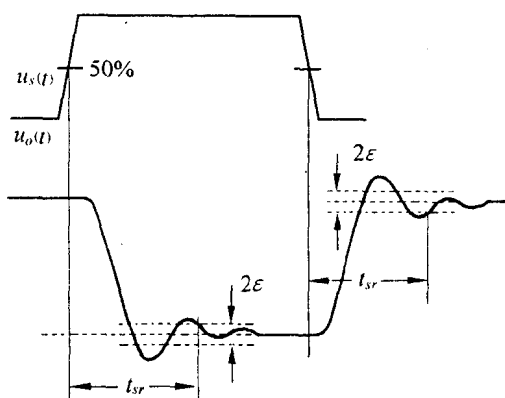


图1-7 测试建立时间的输出响应波形图

或 $CMRR = 20\lg(U_{CM}/U_{dCM})$

一般,集成运放的共模抑制比 CMRR 为 80 ~ 100dB。

3. 输出特性参数

(1) 最大输出电压幅度 $\pm U_{oM}$

集成运放在额定电源电压和规定的负载(或输出电流)下,保证运放输出电压不出现限幅或非线性失真,运放至少能达到的最大的输出电压,即为最大输出电压幅度或称峰-峰值电压 U_{opp} 。

最大输出电压幅度与电源电压、负载和信号频率有关。一般低于电源电压1~2V。图1-8(a)和(b)分别为 AD301和 AD741集成运放最大输出电压与输出电流或负载电阻的关系特性曲线。从曲线中可以看出,负载电阻越小,输出电流越大,最大输出不失真电压幅度也越小。通常特性参数所给出的最大输出电压幅度都标出电源电压和负载等条件。

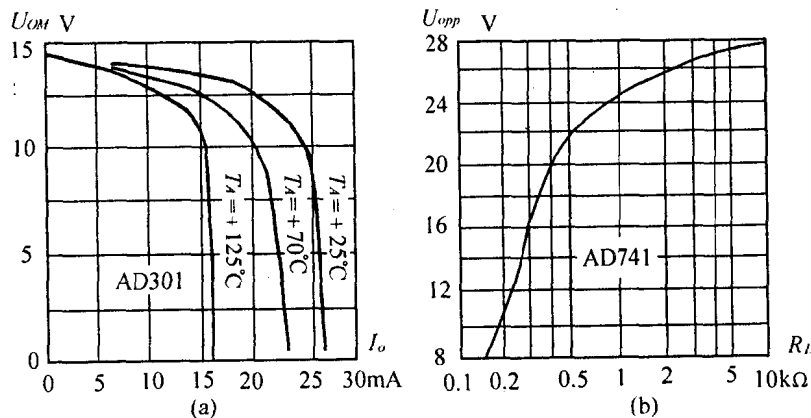


图1-8 AD301型和 AD741型集成运放输出电压幅度(峰-峰值)与输出电流(或负载电阻)的关系曲线

A_{CM} 之比,可表示为

$$CMRR = A_d/A_{CM}$$

或 $CMRR = 20\lg(A_d/A_{CM})$ (dB)

(1-7)

由共模输入电压 U_{CM} 引起的输出电压 U_{dCM} 也可以被看作是在输入端有一个等效的差模电压 U_{dCM} 引起的输出。可见此等效差模电压为

$$U_{dCM} = U_{dCM}/A_d = U_{CM}/CMRR$$

(1-8)

由此很容易导出共模抑制比

$$CMRR = U_{CM}/U_{dCM}$$