

# Electronic system design

## 电子系统设计

朱金刚 王效灵 余长宏 编著



浙江工商大学出版社  
ZHEJIANG GONGSHANG UNIVERSITY PRESS

# 电子系统设计

朱金刚 王效灵 余长宏 编著

## 图书在版编目(CIP)数据

电子系统设计 / 朱金刚, 王效灵, 余长宏编著. —  
杭州: 浙江工商大学出版社, 2011. 6

ISBN 978-7-81140-330-5

I. ①电… II. ①朱… ②王… ③余… III. ①电子系  
统一系统设计—高等学校—教材 IV. ①TN02

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 118620 号

## 电子系统设计

朱金刚 王效灵 余长宏 编著

责任编辑 任晓燕 孙一凡

责任校对 周敏燕

封面设计 刘 韵

责任印制 汪 俊

出版发行 浙江工商大学出版社

(杭州市教工路 198 号 邮政编码 310012)

(E-mail: zjgsupress@163.com)

(网址: <http://www.zjgsupress.com>)

电话: 0571-88904980, 88831806(传真)

排 版 杭州朝曦图文设计有限公司

印 刷 杭州杭新印务有限公司

开 本 787mm×1092mm 1/16

印 张 14.75

字 数 376 千字

版 印 次 2011 年 6 月第 1 版 2011 年 6 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-81140-330-5

定 价 38.00 元

版权所有 翻印必究 印装差错 负责调换

浙江工商大学出版社营销部邮购电话 0571-88804227

# 前 言

电子科学技术发展的速度日新月异,尤其是集成电路的设计与应用,其更新速度更是快到让人无法正视的程度。同时社会对于工科学生的专业修养提出了更高的要求,电子设计与电子系统集成成为电子工程师必备的专业技能。

可编程器件的广泛应用,改变了常规意义上人们对于电子系统设计的理解模式,一片 CPLD/FPGA 器件就可能实现一个完整的电子系统功能;软件仿真代替了传统方式下的电路调试,同时软件仿真为产品的更快上市争取了宝贵的时间;智能器件的发展改变了测量系统的结构模式,SoPC、SoC、PSoC 器件更多、更快地被人们所接受,越来越多的应用于人们的测量系统中,产品的性价比更高,性能更加稳定。

因此,编写本书时,突出了工程实践技能的培养要求,重视电子系统构成的完整性,兼顾模拟与数字、高频与低频以及单片机系统的应用设计,总结了浙江工商大学在电子技术教学过程中近十年的教学实践经验,具体内容安排如下。

第一章 模拟电路设计。综合描述了集成运算放大器应用过程中必须注意的深层次问题,有源滤波器、开关电容滤波器,强化了运算放大器的应用范围;线性稳压电路及开关型稳压电路等内容则兼顾了性能与效率之间的选择要求。

第二章 基于 PLD/FPGA 的电子系统设计。介绍了 PLD/FPGA 的发展历程、供应商及其产品的内部电路结构;通过一个具体的开发实例,让读者了解 PLD/FPGA 的设计过程。

第三章 高频通信电路设计。介绍了无线电收、发信机的电路结构以及高稳定高频信号源的设计,同时介绍了射频信号的放大与功率合成、天线的特性及调试等内容。

第四章 单片机高级语言编程基础。描述了单片机高级语言编程的环境及 C51 程序设计基础知识,本章的最后一节还介绍了高级语言与汇编语言的混合编程方法。

第五章 51 单片机应用系统设计。集中展示了 51 系列单片机的各种应用系统的设计内容,包括单片机内部资源的使用、最小应用系统(显示+键盘)、I<sup>2</sup>C 总线、信号产生与测量以及温度测量等方面的实用技术,每个环节均有详细的电路原理和应用程序供读者参考。

第六章 设计实例。介绍了基于锁相技术的可编程倍频电路、稳压电源性能测试仪、光伏蓄能及逆变并网控制器 3 个具体的电子应用系统的设计资料。

参加本书编写工作的有朱金刚、王效灵、余长宏等。第一章、第六章由王效灵编写,第二章由余长宏编写,其余各章由朱金刚编写。朱金刚负责全书的整体编排、统稿与定稿工

作。

在本书编写的过程中,参考了互联网上许多优秀的电子技术设计文献;浙江工商大学信息与电子工程学院副院长陈小余教授于百忙之中耐心、细致地审阅了全部书稿,提出了许多宝贵的修改意见,在此谨致以衷心的感谢。

本书的出版还得益于浙江工商大学电子信息工程省级重点专业建设经费的资助。

另外还要感谢鲁思行、陈楚、唐起源、盛权等同学在本书的电路图绘制、源程序调试等方面所付出的辛勤劳动。

本书的编写是对多年教学经验的总结和凝练,虽然我们尽了最大的努力,但由于编者水平有限,本书难免有错误和不完善之处,殷切希望各位读者提出宝贵意见或批评指正。

朱金刚

2011年3月

## 目 录

第一章 模拟电路设计	1
§ 1.1 运算放大器	1
§ 1.2 有源滤波器设计	15
§ 1.3 电源电路设计	21
第二章 基于 PLD/FPGA 的电子系统设计	34
§ 2.1 PLD/FPGA 简介	34
§ 2.2 PLD/FPGA 的开发环境	40
§ 2.3 EDA 开发实例:数字闹钟的设计	53
第三章 高频通信电路设计	69
§ 3.1 无线接收机电路结构	69
§ 3.2 无线发射机电路结构	78
§ 3.3 石英晶体振荡器	80
§ 3.4 鞭状天线	89
§ 3.5 小功率调频发射机芯片 MC2833P	91
§ 3.6 高频功率放大电路	94
§ 3.7 功率合成技术	98
第四章 单片机高级语言编程基础	104
§ 4.1 使用高级语言编程的好处	104
§ 4.2 编译环境	105
§ 4.3 C51 程序设计基础	110
第五章 51 单片机应用系统设计	150
§ 5.1 51 系列单片机内部资源的使用	150
§ 5.2 显示电路设计	159
§ 5.3 键盘管理技术	164
§ 5.4 I <sup>2</sup> C 总线及其应用	168
§ 5.5 信号产生与测量电路设计	174

§ 5.6 温度测量 .....	197
<b>第 6 章 设计实例</b> .....	204
§ 6.1 基于锁相技术的可编程倍频电路设计 .....	204
§ 6.2 稳压电源性能测试仪的设计 .....	214
§ 6.3 光伏蓄能及逆变并网控制器的设计 .....	221
<b>参考文献</b> .....	229

# 第一章 模拟电路设计

## § 1.1 运算放大器

集成运算放大器是最早被提出和研制的线性集成电路,1969年美国仙童公司生产出了第一种集成运放,其型号为 $\mu A702$ 。早期的运放主要是模拟计算机的基本运算部件,用于模拟计算机的各种运算电路(如比例、加、减、乘、除、积分、微分等),所以称为运算放大器。30多年来,集成运放的型号与日俱增,设计调试简单,性价比高,使用灵活。在模拟电路领域中,除了超高频、大功率等特殊场合外,已普遍取代了分立元件电路,其应用范围不断扩大,被称为“万能器件”。

### 1.1.1 集成运放应用基础

“集成运放”是采用半导体集成工艺制造的一种高增益( $10^5$ )、高输入阻抗、高共模抑制比的多级直接耦合放大器。它通常至少具有十万倍以上的放大倍数,兆欧级以上的输入电阻,大多是一个三级的直接耦合放大器,能用于直流和交流信号的放大。集成运放通常均采用对称的正负电源供电。

集成运放采用如图 1.1.1 所示的(a)、(b)两种表示符号,其中(a)为习惯表示法,(b)为最新的国家标准表示法。图中标以“+”的输入端为“同相输入端”;标以“-”的输入端为“反相输入端”。这种表示方法是为了说明输出信号与输入信号的极性对应关系。若自同相端加入相对反相端为正的信号,则输出信号一定为正值,反之则为负值。

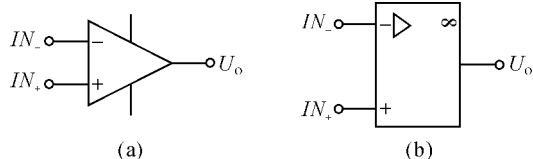


图 1.1.1 集成运放的符号

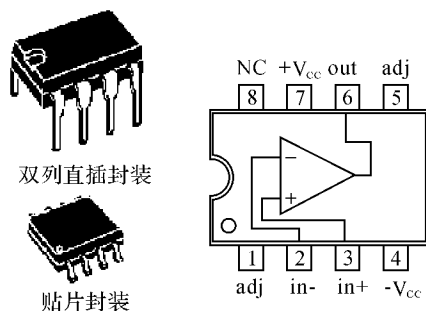


图 1.1.2 集成运放( $\mu A741$ )的两种外形及引脚排列图

集成运放的常规封装形式有双列直插式塑封或陶瓷封装、金属圆壳封装两种,还有供薄膜、厚膜集成或模块电路表面贴装用的微型封装(如图 1.1.2 所示)。按其工作温度又可分为民品( $0\sim 70\text{ }^{\circ}\text{C}$ )、工业品( $-25\sim 85\text{ }^{\circ}\text{C}$ )、军品( $-55\sim 125\text{ }^{\circ}\text{C}$ )三个档次。

集成运放组成的放大器按引入负反馈的方式可分为反相输入和同相输入两种,如图 1.1.3 (a)、(b)所示。其中图 1.1.3(a)反相输入引入的是电压并联负反馈;图 1.1.3(b)同相输入引入



的是电压串联负反馈。

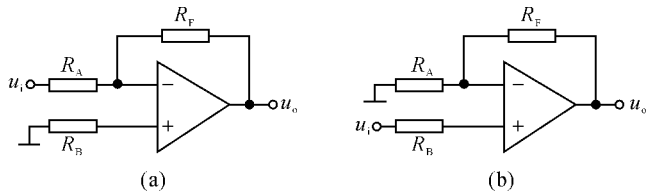


图 1.1.3 反相输入放大和同相输入放大

分析、计算集成运放电路的基本原则有两个：一是“虚短”；二是“虚断”。所谓“虚短”，是指当集成运放工作在线性状态（即输出、输入成比例，放大器任一级都工作在放大区而未进入饱和或截止状态）时，运放两输入端电位必定接近“相等”，好像这两个输入端已被内部一根导线“短路”一样（但若真的用一根导线把两输入端短路的话，则放大器就会因输入信号被短路为零而不工作了）。应该说明的是，运放两输入端电位并不是完全相等，只不过非常接近，以至于一般的电压表量不出其之间的差别罢了。

我们用图 1.1.4 来说明这一点，目的是计算为使运放的输出电压达到最大但尚未饱和时，究竟需要在运放的两个输入端施加多大的输入电压  $u_i$ 。因为电源电压为  $\pm 15\text{ V}$ ，抛去放大器输出级互补管的饱和压降，输出电压最多只能达到  $\pm 13 \sim \pm 14\text{ V}$ 。因为集成运放的放大倍数至少也是十万倍（ $10^5$ ）以上，故此时的  $u_i$  最多只有  $(\pm 13 \sim \pm 14\text{ V})/10^5 = \pm 130 \sim \pm 140\text{ }\mu\text{V}$ ，难怪一般的电压表量不出两输入端之间的电压差来。我们称这种现象为“虚短”，即虚假的短路。今后我们在分析运放电路时，只要放大器正常工作（未进入饱和或截止状态），就可认为运放两输入端是等电位的。

所谓“虚断”，是运放两输入端之间具有极高的输入电阻和极低的静态偏置电流。因此运放在正常工作时如果在其输入端串入电流表（如图 1.1.5 所示），因为实际上流入或流出运放输入端的偏置电流和信号电流已经小到无法测量，因而电流表的指示均为零，好像从输入端到运放内部已经“断路”一样（当然如果在串入电流表的地方将引线剪断，运放当然也不能工作了）。故称之为“虚断”，即虚假的断路。今后我们分析运放电路时均可认为两输入电流为零（实际上有极微弱的电流），而不会给分析带来多大的误差。

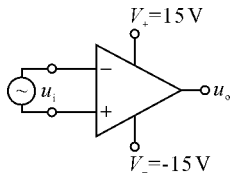


图 1.1.4 虚短

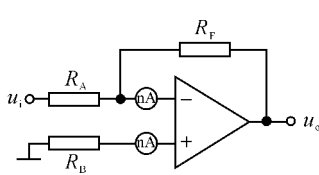


图 1.1.5 虚断

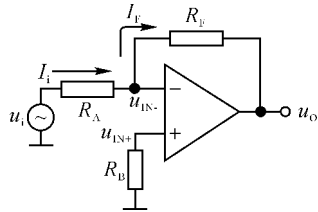


图 1.1.6

有了“虚短”和“虚断”的概念，再回过头来分析由运放组成的放大器就非常容易了。如图 1.1.6 所示的反相输入放大器，引入反馈后的闭环增益  $A_V = u_o/u_i$  可计算如下。

因同相输入端“虚断”，电流为零，故电阻  $R_B$  两端等电位，有  $u_{iN+} = 0$ 。

因“虚短”，有两输入端等电位，即  $u_{iN+} = u_{iN-} = 0$ 。

因反相输入端“虚断”，有  $I_i = (u_i - u_{iN-})/R_A = u_i/R_A = I_F = (u_{iN-} - u_o)/R_F = -u_o/R_F$ 。

解上式可得： $A_V = u_o/u_i = -R_F/R_A$ 。

式中负号说明  $u_o$  与  $u_i$  极性相反,放大倍数为反馈电阻  $R_F$  与输入电阻  $R_A$  之比.

反相放大器的输入电阻  $r_i = R_A$ .

由此可见,设计一个放大倍数为  $A_V$ 、输入电阻为  $r_i$  的高性能放大器的任务变成仅选择两个合适的电阻这么简单的问题了.

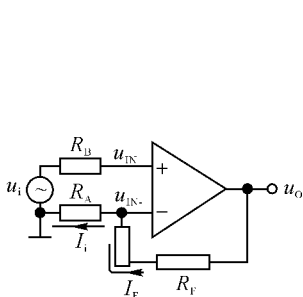


图 1.1.7

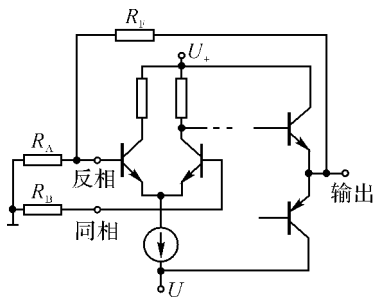


图 1.1.8

对图 1.1.7 所示的同相放大电路,因同相端“虚断”,有  $u_{IN+} = u_i$ .

因“虚短”有  $u_{IN+} = u_{IN-}$ ,  $I_i = u_{IN-} / R_A = u_i / R_A$ .

因反相端“虚断”,有  $I_F = (u_o - u_{IN-}) / R_F = (u_o - u_i) / R_F = I_i = u_i / R_A$ .

由上式得:  $A_V = u_o / u_i = (1 + R_F / R_A)$ .

同相输入放大器的输入电阻因同相输入端“虚断”,有  $r_i = \infty$ .

由此可见,同相放大器的特点是输入阻抗极高,因而适用于要求高输入阻抗的场合,且其输出与输入同极性(对交流则为同相位),因而电路设计是极其简单的.

最后的问题是对图 1.1.6、图 1.1.7 电路中的偏置电阻  $R_B$  应有什么要求. 如果对比比例放大器的精度和漂移指标都要求不高,即工作时允许其放大倍数有微小变化的话,  $R_B$  甚至可以省去不用,以使电路更加简单. 如果需要设计非常精密的放大器、要求有极高的精度和极小漂移的话,则应取  $R_B = R_A \parallel R_F$  ( $R_A$  与  $R_F$  的并联值). 这是因为集成运放的输入级都是左右两边要求对称的差分放大电路,如图 1.1.8 所示. 在静态时(输入信号为零),差分电路两输入端对地的偏置电阻也应该是对称的. 其同相端通过  $R_B$  接地,反相端一方面通过  $R_A$  接地(或  $R_A$  通过电阻为 0 的信号源接地),另一方面通过  $R_F$  接到输出端. 当输入信号为 0 时,其输出信号也为 0,相当于  $R_F$  通过输出端也接到地. 即反相端是通过  $R_A \parallel R_F$  接地的. 若两输入端的输入电阻不对称,则在输入信号为 0 时相同的偏置电流  $I_{R_B}$  将在  $R_B$  和  $R_A \parallel R_F$  两支路形成不同的压降,即相当于在运放两输入端加入一个人为的干扰信号. 当环境变化致使  $I_{R_B}$  变化时,这个干扰信号也将随温度而漂移并导致放大器产生温漂或零漂. 因此对于高精度、低漂移的放大器,保证  $R_B = R_A \parallel R_F$  是非常重要的.

### 1.1.2 运放电路设计技巧

**例 1-1-1** 假设需设计一交流放大器,要求放大倍数  $A_V = 500$ ,输入电阻  $r_i \geq 100 \text{ k}\Omega$ . 电路设计的第一步是方案选择,可以采用反相输入,也可以采用同相输入,那么用哪种更好呢?

如采用反相输入形式,电路可如图 1.1.9 所示,为保证输入电阻  $r_i \geq 100 \text{ k}\Omega$ ,则  $R_1$  至少取  $100 \text{ k}\Omega$ ,为保证  $A_V = 500$ ,则有  $R_F = 500R_1 = 50 \text{ M}\Omega$ . 且有  $R_B = R_1 \parallel R_F = 100 \text{ k}\Omega \parallel 50 \text{ M}\Omega \approx 100 \text{ k}\Omega$ .

如采用同相输入的形式,电路可如图 1.1.10 所示,由于同相输入阻抗近似无穷大,因此选多大的  $R_1$  和  $R_B$  都可以. 例如取  $R_1 = 1 \text{ k}\Omega$ ,则  $R_F = 499 \text{ k}\Omega$  即可满足  $A_V = 500$ ,  $R_B$  也近似取  $1 \text{ k}\Omega$  即可.

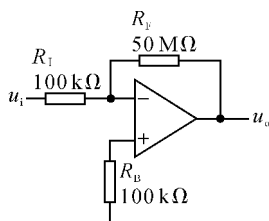


图 1.1.9

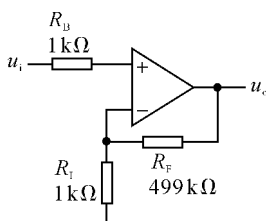


图 1.1.10

以上这两种方案有什么优缺点,各适用于什么场合呢?

采用反相输入形式的优点是:运放不管有无输入信号,其两输入端电位始终近似为零.两输入端之间只有  $\mu\text{V}$  级的差动信号(或称差分信号、差模信号).而在同相输入形式中,因  $u_{\text{IN}+} = u_{\text{IN}-} = u_i$ ,在不为零时运放两输入端间除有极小的差模信号(例如  $u_{\text{IN}+} - u_{\text{IN}-} = 5.00001\text{ V} - 4.99999\text{ V} = 20\text{ }\mu\text{V}$ )外,还存在较大的共模电压  $(u_{\text{IN}+} + u_{\text{IN}-})/2 = (5.00001\text{ V} + 4.99999\text{ V})/2 = 5\text{ V}$ .集成运放虽有较高的共模抑制能力,但其共模放大倍数总是大于零的,因此多少总会带来一些误差,这是同相输入的缺点.但本例要求放大器有较高的输入电阻和较大的放大倍数,若采用反相输入形式,则  $R_i$  和  $R_F$  至少要取到  $100\text{ k}\Omega$  和  $50\text{ M}\Omega$ .而在运放电路中,通常不希望使用这么大的电阻,因为哪怕是很微小的干扰电流(如随温度而漂移的失调电流)流经大的电阻,也会形成较大的干扰电压,并影响整个电路的工作精度.因此本例还是以取同相输入形式为好.

第二个常引起初学者困惑的问题是:取  $R_i = 1\text{ k}\Omega$ 、 $R_F = 499\text{ k}\Omega$ ,或是  $R_i = 1\text{ }\Omega$ 、 $R_F = 499\text{ }\Omega$ ,或是  $R_i = 100\text{ k}\Omega$ 、 $R_F = 49.9\text{ M}\Omega$ ,都能保证放大倍数  $A_v = 500$ ,那么  $R_i$ 、 $R_F$  取大一些还是小一些好呢?前面我们已经分析了  $R_i$ 、 $R_F$  过大可能会带来较大的电流漂移干扰,那么  $R_i$ 、 $R_F$  是不是越小越好呢?答案也是否定的.从减小偏置电流、失调电流及其漂移所造成的误差来看, $R_i$ 、 $R_F$  取小一些好.但在电路中  $R_i$ 、 $R_F$  同时也是放大器的负载,当输出电压不为零时,运放除向负载提供电流外,也同时向  $R_F$  支路提供电流.例如若取  $R_i + R_F = 500\text{ }\Omega$ ,则当输出电压  $u_o$  为  $10\text{ V}$  时,就将有  $20\text{ mA}$  的电流自运放输出端流入  $R_F$ 、 $R_i$ ,而集成运放的最大输出电流通常只有  $\pm 10\text{ mA}$  左右.过重的负载不仅会使运放提前进入饱和、输出动态范围缩小,还可能使管耗增加、发热严重,从而造成器件的损坏.因此  $R_i$ 、 $R_F$  的阻值既不宜过大,也不宜过小.在适当的阻值范围内, $R_i$ 、 $R_F$  取大一些、小一些无所谓,只要其比例关系符合要求,例如  $R_i$ 、 $R_F$  分别取  $100\text{ }\Omega$ 、 $49.9\text{ k}\Omega$ ;或  $1\text{ k}\Omega$ 、 $499\text{ k}\Omega$  等均可.

**例 1-1-2** 假设需要一个增益为 500、输入电阻  $\geq 100\text{ k}\Omega$  的直流放大器,且要求输入、输出反相.这里当然应该取反相输入的方式.那么如何解决反馈电阻高达  $50\text{ M}\Omega$  的问题呢?

大家不妨看看图 1.1.11 所示电路,它巧妙地解决了这个问题.

此例中如需输出、输入同相,可采用同相输入方式,如图 1.1.12 所示.

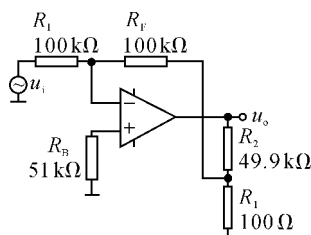


图 1.1.11

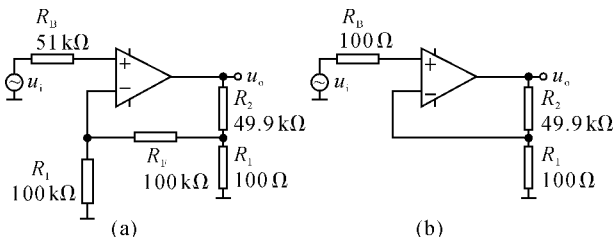


图 1.1.12

前面所举例子中,输入信号都是单纯对地的信号.而实际应用中常常会碰到来自电桥的差动信号,如各种压阻式压力传感器、各种热敏电阻组成的热敏电桥等,如图1.1.13(a)所示.这种信号源的特点是:它有两个都不接地的输出端,当电桥平衡,即无信号时,有 $U_A = U_B \neq 0$ ;而当压力或温度变化时,电桥不平衡,使 $U_A \neq U_B$ .这里真正有用的信号是 $U_A$ 和 $U_B$ 之间的微小差值,即 $u_i = U_A - U_B$ ,称为差模信号.我们又常把 $U_A$ 和 $U_B$ 的平均值、即 $(U_A + U_B)/2$ 称为共模信号.例如大量使用的压阻式压力传感器的共模电压一般为 $3 \sim 5 \text{ V}$ ,而差模信号只有 $30 \sim 50 \text{ mV}$ .我们希望放大器既放大有用的微弱差模信号、又能抑制很大的无用共模信号.图1.1.9、图1.1.10、图1.1.11所示的电路对此无能为力,而图1.1.13(b)的电路就巧妙地解决了这个问题.

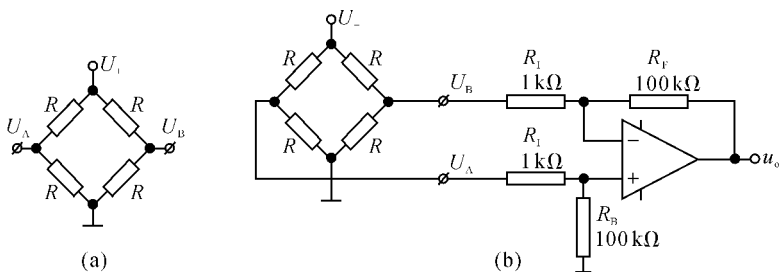


图 1.1.13 差动信号及其放大电路

### 1.1.3 集成运放使用时要考虑的问题

当我们设计好放大器的电路结构之后,自然就要考虑该选购什么型号的运算放大器、用多少伏的电源、实验步骤,以及实验中必然碰到的诸如消除自激振荡、调零等一系列使用问题.

#### 1. 选择合适的运放型号

目前集成运放的种类和型号很多,在性能、价格、工作温度范围、封装形式、封装材料上各不相同,致使初次使用者往往感到无所适从.

##### (1) 通用型运算放大器.

通用型运放的电特性一般,但价格低廉,典型代表有 LM741( $\mu\text{A}741$ )、LM124/224/324.

##### (2) 低失调、低漂移运算放大器.

此类运放的电性能比通用型的要高,特别是失调电压要小得多,此类运放常用在要求较高的电路.其代表有 OP07、OP27、OP37,它们都是单运放封装.

##### (3) 低输入偏置电流运算放大器.

此类运放芯片内部输入为 MOS 管,故输入偏置电流很小,输入电阻很高,此类运放常用于高输入阻抗电路.其代表有 TL081/082/084、CA3140、AD549 等.其中 AD549 由于超低的输入偏置电流,常用于微弱电流测量.

##### (4) 斩波稳零型运算放大器 ICL7650.

ICL7650 采用大规模集成工艺,输入级使用了 MOSFET,输入电阻达  $10^{12} \Omega$ .电路采用斩波自动稳零及调制与解调(200 Hz)等措施,使输入失调电压小至  $1 \mu\text{V}$ ,温度漂移也很小,应用时无需失调调整,十分方便.特别适用于微弱信号放大.

##### (5) 宽带运算放大器.

这一类运放以 AD8011、CF357 等为代表,其  $\text{BW} > 100 \text{ MHz}$ .更高频率的应用可选择 TI

公司的 OPA656U、OPA657U、THS4631D 等。

(6)增益可控制运算放大器。

图 1.1.14(a)为数字控制增益的运放 PGA103。通过  $A_1$ 、 $A_0$  两引脚的逻辑电平可使运放的增益分别为 1、10、100，在增益 = 10 时增益误差为  $\pm 0.05\%$ ，失调电压的温度系数为  $2\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ 。压控类的增益放大器可选择 AD603、VCA810、VCA820、VCA830 等器件。

VCA810 的应用电路非常简单，除去电源、地和直接接地的反相输入端，它只需考虑三个引脚的布局布线。同相输入、输出和电压控制端都可以采取短而直的线直连，无需任何附加电路，图 1.1.14(b)中，可以通过是否选用  $R_3$  或  $R_4$  来选择是反相输入还是同相输入，通过  $R_1$ 、 $R_2$ 、 $R_5$ 、 $R_6$  可以实现阻抗匹配。

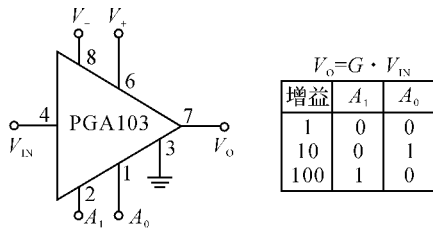


图 1.1.14(a) 可编程增益运放 PGA103

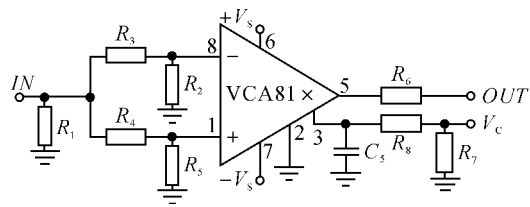


图 1.1.14(b) VCA810 应用原理图

图 1.1.14

VCA810 的控制电压  $V_c$  端也拥有 25MHz 的带宽，因此可以将 VCA810 用作模拟乘法器、自动增益控制器、压控滤波器等。 $V_c$  端的控制电压范围为  $-2\sim 0\text{ V}$  时，增益的变化范围为  $+40\sim -40\text{ dB}$ ，由此可见，mV 级的纹波就可能使 VCA810 的电压增益起伏不定，因此对  $V_c$  端的滤波是非常必要的。除此之外，应小心避免 VCA810 的输出饱和，在  $\pm 5\text{ V}$  供电下，VCA810 的典型输出幅度为  $\pm 1.8\text{ V}_{\text{pp}}$ 。如果需要处理更宽带宽的信号，VCA820 和 VCA822 将是一个不错的选择。VCA820 和 VCA822 是一对 150 MHz 带宽的压控增益放大器。它们在增益等于 10 时的小信号带宽为 150 MHz。当增益等于 10 时， $5\text{ V}_{\text{pp}}$  全功率输出时，仍然有 137 MHz 带宽的输出能力，性能非常突出。

2. 供电电源的选择

运放型号选定后，下一步就要考虑用什么样的电源工作。集成运放的供电电源的典型值是  $\pm 15\text{ V}$ ，故在各种教科书、器件手册、电路大全中所见到的电路大多都是在  $\pm 15\text{ V}$  下工作的。但实际应用中没有必要都用  $\pm 15\text{ V}$ ，而应按自己电路的需要灵活选择。目前使用的绝大多数运放都能在很宽的电源电压范围  $\pm 3\sim \pm 18\text{ V}$  内正常工作，这是因为许多集成运放采用镜像微电流源来为输入级建立工作点，使输入差分级工作点电流仅与电源电压的对数成比例，即使电源电压在很大范围内波动，其输入级工作点仍变化不大，故不影响其正常工作。我们到底选用多少伏电源，要根据应用电路的具体需要和设备中已配置的电源来决定。如放大电路的输出电压范围在  $\pm 3\text{ V}$  以内，那么选用  $\pm 5\text{ V}$  的电源就可以了。但如果设备中已有现成的  $\pm 15\text{ V}$  电源，则也不必去另配一套  $\pm 5\text{ V}$  电源。总之电路设计应以所用电源种类最少、电压较低为好。

3. 运放的自激振荡

集成运放是一个高增益三级直接耦合放大器。用它组成的线性电路大多采用负反馈，故工作应是稳定的，但在实际使用中有时确实会出现放大器自激的现象。

在调试运放电路之前，必须检查是否存在自激现象。若没有接入输入信号，在输出端有信号输出，即表明电路产生了自激。使用万用表的交流电压档测量输出端，若无指示说明没有自

激;若有指示,则说明存在自激现象.指示值越大,说明自激振荡的幅度越大.也可以用示波器测试电路的输出端,若有自激,在无输入信号的情况下,在屏幕上可以清楚地看见波形或者一条小粗带,在输入信号的情况下,小粗带会叠加在输出信号波形上,带越宽,自激越严重.

负反馈放大器为什么会和正反馈电路一样产生自激呢?这是因为集成运放输入级和中间级的增益相当高,分别可达  $10^2$  和  $10^3$  量级.因此,集成晶体管哪怕很小的 PN 结电容在高频时也会形成较大的附加相移.如果在某一高频集成运放各级所形成的附加相移累计达到  $180^\circ$  度,则在直流或低频下接成的负反馈,在那个高频下就接成了正反馈.原来的负反馈越深,这时的正反馈也就越强.只要有一点干扰谐波,在那个频率上正反馈被加强,就会出现自激振荡.

消除自激的方法一般是在电路的共射中间级上加一个很小的补偿电容  $C$ ,如图 1.1.15 所示.不难看出,这实际上是以附加高频负反馈来降低集成运放在高频段的增益,以使附加相移虽达  $180^\circ$  度而变成正反馈时,其回路增益被降至小于 1.这样即使放大器在谐波干扰下出现正反馈振荡,因回路增益过小,振荡无法维持,电路也就稳定了.

目前在集成运放中,大多数电路内部已用集成工艺加进了补偿电容,可保证在最坏情况下运放都能稳定工作.这种运放叫做内补偿或全补偿运放.使用这种器件时可不必考虑补偿,也不会出现自激.也有些运放内部没有加补偿电容,而是从应该接补偿电容的地方引出两个引脚供用户外接补偿电容用,习惯称之为外补偿运放.

#### 4. 运放的调零

所谓调零,就是希望外加的调零电路能在输入为零时将输出调到零.通常外加的调零端均从运放的输入差分级集电极负载处引出,如图 1.1.16 所示.通过引脚接入的电位器串,并在  $R_C$  上,以改变差分电路两边的集电极负载电阻,通过将两边的集电极负载电阻调成某种程度的不对称,以抵消原电路中两边  $R_C$ 、两只晶体管以及偏置电路等所有的不对称因素的影响,恰好使输出为零.

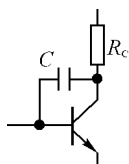


图 1.1.15

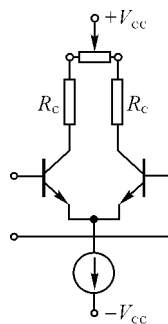


图 1.1.16

(1)集成运放在开环状态是无法调零的,这是因为在开环状态下运放有几十万倍的增益,只要输入端稍有失调,其输出早已被放大至正或负的饱和值,因而调零几乎是不可能的.因此调零是指引入负反馈后的运放电路的调零.

(2)并不是所有的应用电路都需要调零.在非线性应用电路中,如运放作为比较器或接成振荡器,这时运放的输出要么是正的饱和值,要么是负的饱和值,这种电路不需要调零;另一种情况就是当运放组成反相器、跟随器或增益很低的比例放大电路,而用户对电路的精度及零电位要求又不太高时(零电位一般只差几个毫伏),也可以省去调零电路以降低成本和简化电路.

(3)对于由若干级放大器组成的放大电路是否需要对每级放大器都调零?答案是否定的.

在高增益电路中,每级运放的放大倍数可能都很高,而所谓调零并不是真能把运放的输出调到零,而是  $u_o$  已小到电压表的量程分辨率之外,看不出  $u_o$  不等于零罢了. 将这些输出并不真正是零的放大器串在一起,前级的极微小电位输出被后几级放大后,仍能表现出相当大的非零位输出. 因此,即使每个运放级都调好零,各级串在一起后仍然还要调零. 既然如此,我们就没有必要每级运放都调零,而只在调零最灵敏的第一级加上调零电路,并在电路串成闭合回路后一起进行调零. 这时第一级运放的输出并不一定是零,但它可以补偿第二级及后续电路所有的零位偏移,并保证系统总的输出为零.

(4) 电路调零并不是一劳永逸的. 因为集成运放的失调电压、失调电流虽然可以通过调零加以补偿使运放输出为零,但运放的失调电压和失调电流具有一定的温度系数,会随环境温度的变化而变化. 今天调好零,到明天温度变了,输出又不是零了. 因此对某些要求高的应用电路,在每次使用前应预热一段时间后重新调零.

### 5. 抑制失调和漂移

实际电路中使用的运放都存在失调电压、失调电流和温度漂移. 我们设计电路时,往往按照理想条件设计,实际应用时就会出现偏差. 有些电路对精确度和稳定性要求很高,这时失调现象和温度漂移就不能忽视,必须采取一些措施来解决这些问题. 如果两个运算放大器的失调电压和失调电流的温度特性相同,按照图 1.1.17 所示的电路连接,就可以实现零漂移的信号放大. 假定图 1.1.17 中两个集成运放的失调特性一致,  $A_1$  作同相运算,  $A_2$  作反相运算,把失调特性和温度漂移均抵消了. 电路中  $R_1$ 、 $R_2$ 、 $R_3$  用来减小放大器偏置电流对总失调电压及漂移的影响. 电路的增益由  $R_i$  和  $R_f$  决定,即:  $A_v = -\frac{R_f}{R_i} = 10$ .

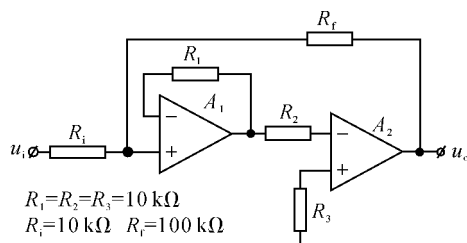


图 1.1.17 零漂移运算放大器

特性一致,  $A_1$  作同相运算,  $A_2$  作反相运算,把失调特性和温度漂移均抵消了. 电路中  $R_1$ 、 $R_2$ 、 $R_3$  用来减小放大器偏置电流对总失调电压及漂移的影响. 电路的增益由  $R_i$  和  $R_f$  决定,即:  $A_v$

$$= -\frac{R_f}{R_i} = 10.$$

### 6. 输出功率扩展

集成运放受自身功耗的限制,其输出功率是有限制的. 一般情况下 ( $\pm 15\text{ V}$  供电) 其输出电压摆幅为  $\pm 12\sim 13\text{ V}$ , 输出电流幅值为  $\pm 10\text{ mA}$ , 输出功率仅百毫瓦级, 而许多应用场合要求放大器能输出更大的输出功率, 甚至驱动如低速力矩马达这样的负载.

最简单的扩展输出功率的办法是在运放的输出端串接一级互补推挽电路, 如图 1.1.18 所示. 电路中二极管  $D_1$ 、 $D_2$  和电阻  $R$  为互补功放级提供偏置, 使其工作在甲乙类以消除交越失真, 这时的工作电流可以提高到几百毫安. 如果要求更大的输出功率, 可采用复合管组成互补或准互补电路, 如图 1.1.19 所示, 这时的输出电流可以达到安培级.

引入功率扩展时, 一般的设计均使互补电路工作在甲乙类以克服交越失真, 偏置电路所用的器件较多, 且一般很难准确计算其工作点, 往往需经调试才能最终确定偏置电阻的阻值. 实际上由于运算放大器极少有开环工作的, 大多数情况下均引入负反馈. 特别是深反馈下工作时, 只要自互补功放级的输出端向运放输入端引入负反馈, 如图 1.1.20 所示, 互补功放级完全可以省去偏置电路而工作在乙类状态, 且不会因为晶体管输入特性的死区造成输出波形失真. 这是因为运算放大器有几十万倍以上的高增益, 一般情况下引入负反馈后均能构成深负反馈, 利用深负反馈能将包围电路内部的非线性影响减少到  $1+AF$  倍 ( $A$  为运放的开环增益,  $F$  为电路的反馈系数, 一般有  $AF \gg 1$ ) 的特点使功放级工作在乙类, 这时电路设计和调试大大简

化,也不会产生令人担心的乙类交越失真(例如当  $A=10^5$ 、 $F=0.03$  时,互补管  $0.5\text{ V}$  的死区在输出端所能造成的影响小于  $0.15\text{ mV}$ )。

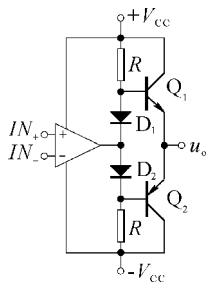


图 1.1.18 输出功率扩展

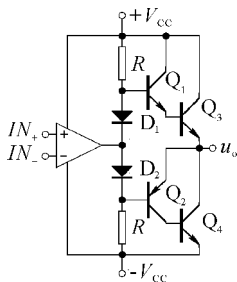


图 1.1.19

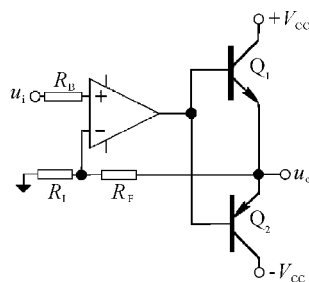


图 1.1.20

引入功率扩展级后,功放管的选择要考虑管耗,必要时应加散热片.晶体管与散热片之间除采取必要的绝缘措施外,建议采用导热硅脂涂覆的办法减小热阻,以利散热.

### 7. 输出电压扩展

由于常规运算放大器的电源电压最大为  $\pm 15\text{ V}$ ,故其输出电压摆幅一般不超过  $\pm 12\sim\pm 13\text{ V}$ ,对于某些场合需要较大的电压输出时,可以采用常规的运算放大器使用图 1.1.21 所示的电路扩展输出电压范围.

要扩大运放的输出电压范围必然要提高电源电压,而常规运放受内部集成晶体管击穿电压的限制,电源电压一般不允许超过  $\pm 16\sim\pm 18\text{ V}$ ,图 1.1.21 所示的电路采用  $\pm 30\text{ V}$  供电,但真正加到运放上的电源电压为晶体管  $Q_1$ 、 $Q_2$  发射极间的电压.由于  $R_1=R_2=R_3=R_4$ ,静态时, $Q_1$ 、 $Q_2$  基极端的电压为  $\pm 15\text{ V}$ ,因而  $Q_1$ 、 $Q_2$  发射极端的电压大约为  $\pm 13.6\text{ V}$ ,也就是说运放的供电电压为  $\pm 13.6\text{ V}$ .

这个电路的特点是当输出电压随输入电压变化时,运算放大器的供电电压是浮动的.当  $u_o=+24\text{ V}$  时,有  $U_{b1}=+27\text{ V}$ 、 $U_{e1}=+26.3\text{ V}$ ;  $U_{b2}=-3\text{ V}$ 、 $U_{e2}=-2.3\text{ V}$ .反之当  $u_o=-24\text{ V}$  时,有  $U_{b1}=+3\text{ V}$ 、 $U_{e1}=+2.3\text{ V}$ ;  $U_{b2}=-27\text{ V}$ 、 $U_{e2}=-26.3\text{ V}$ .也就是说,当输出电压变化时,运算放大器正负电源间的电位差恒等于  $28.6\text{ V}$  左右,但输出电压的摆幅可以扩展到  $\pm 24\text{ V}$  以上.

值得注意的是运算放大器电源电压浮动时,输入端的电位是相对静止的.这就相当于电源电压不变,输入端引入了同样变化幅度的共模输入电压.因此运算放大器电源电压浮动的范围必须小于它所允许的共模输入电压范围,否则运算放大器输入级的晶体管便会进入饱和或截止状态,放大器便工作不正常了.对于图 1.1.21 所示电路,运算放大器电源电压的浮动范围为  $\pm 12\text{ V}$ ,故  $\mu\text{A}741$ 、 $\text{LM}324$ 、 $\text{LM}358$  等第二代集成运放均可胜任.

图 1.1.22 是增大输出电压摆幅的另外一种方案.它实际上是在运算放大器的输出端再外接一级由晶体管  $Q_1$  组成的共发射极放大,并驱动  $Q_2$ 、 $Q_3$  组成的互补推挽功放电路.附加级的电源电压高于运算放大器的电源电压.这个方案不仅增大了输出电压的摆幅,而且也增大了正负向的输出电流.



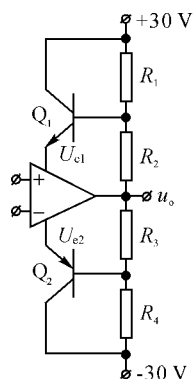


图 1. 1. 21

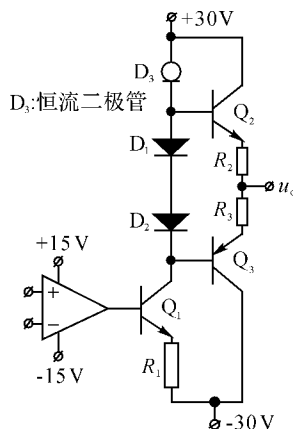


图 1. 1. 22

### 1. 1. 4 集成运放的单电源应用

集成运放一般都是在对称的正负电源下工作的,典型值为 $\pm 15\text{ V}$ .在只有单电源的场合,运放能不能工作呢?答案是:在一定的条件下是可以的.

如图 1. 1. 23(a)所示的交流放大电路采用 $\pm 15\text{ V}$ 供电, $u_i$ 为正弦输入信号,放大倍数为 $-10$ .图 1. 1. 23(b)为单电源 $+30\text{ V}$ 供电,处理的办法是利用两个相等的电阻将本应接地的同相输入端接到 $+30\text{ V}$ 的中点电位上,即 $+15\text{ V}$ ,而在放大器的输入和输出端各用一个容量足够大的电容将信号源、负载与运放直流隔离.这样在(a)、(b)电路中运放的输入端与电源高、低端之间的电位关系都是处在总电源的中点电位上.耦合电容起到隔直流、通交流的作用,解决了单电源交流放大问题.这种电路的输出动态范围与采用 $\pm 15\text{ V}$ 电源时相似,约为 $\pm 12\sim 13\text{ V}$ .

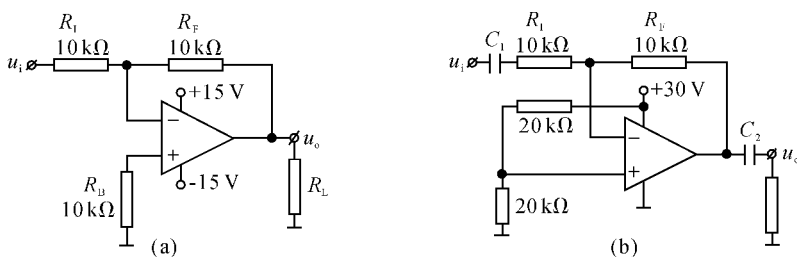


图 1. 1. 23

另外,集成运放的互补推挽输出级总会有约 $1\sim 2\text{ V}$ 、甚至更大的饱和压降(与输出电流大小有关),因而输出电压总要比电源电压低.

在只有单电源或便携式仪表需用电池单电源供电,而电路的输入信号又可能等于零或运放的输出电压也能趋于零时,常规运放由于共模电压输入范围和最大输出电压范围的限制也就无能为力了.为此生产厂家专门设计了在单电源工作时其共模输入电压能降低到零、其输出电压也能趋于零(其大小与负载阻抗有关,最低仅几个毫伏)的“单电源运放”,如美国国家半导体公司的 LM358、LM324、LM3900, RCA 公司的 CA3140、CA3130, LT 公司的 LT1013、LT1014 等等.

图 1. 1. 24 提供了一种确保单电源工作时输出电压为零的方法,二极管 D 的存在使输出