

现代电子电路原理与设计

张卫平 张英儒 编著



0.02

原子能出版社

现代电子电路原理与设计

张卫平 张英儒 编著

原子能出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

现代电子电路原理与设计/张卫平, 张英儒编著。—北京: 原子能出版社, 1997. 2
ISBN 7-5022-1470-4

I. 现… II. ①张… ②张… III. 电子电路原理与设计 IV. TN710.02

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (96) 第 01948 号

内 容 简 介

本书较系统地论述了现代电子电路的原理与设计方法。内容包括: 各种放大器的设计、调试、干扰抑制与制作工艺; 有源滤波器的实用设计; 开关电源设计及印制板设计。为读者提供了许多典型的器件和电路; 大量的设计方法、设计表格、设计公式; 若干实用的调试方法和经验。作者力图做到: 内容新颖而系统; 方法简便而实用。

本书可作为高等工科院校高年级学生和研究生教材及参考书, 也可供从事电子产品开发、仪器仪表设计、测量与控制系统设计等方面工作人员使用。

现代电子电路原理与设计

张卫平 张英儒 编著

© 原子能出版社, 1996

原子能出版社出版发行

责任编辑: 刘其润

社址: 北京市海淀区阜成路 43 号 邮政编码: 100037

北方工业大学印刷厂印刷 新华书店经销

开本 787×1092 mm 1/16 印张 15 字数 370 千字

1997 年 2 月北京第 1 版 1997 年 2 月北京第 1 次印刷

印数: 1—3000

定价: 19.80 元

前 言

现代电子电路是以集成电路为核心器件的电子电路。其工作原理和设计方法等与以晶体管为核心器件的传统电子电路都有很大的差异。随着集成技术的迅速发展和集成电路的广泛应用,在实际应用中,现代电子电路已基本取代了传统电子电路,但目前,系统论述这方面内容的书籍尚不多见。为适应各方面的需要,我们编写了《现代电子电路原理与设计》一书,作为一次尝试,并为北方工业大学应用电子技术、自动化和仪表等专业开设了这门课。

编写本书的指导思想是:在分析、设计和调试方面,在简述原理的基础上,从设计的角度进行推理论述,并适当介绍一些调试方法;在理论推导和实用性方面,突出其实用性;在单元电路和系统方面,以单元电路的设计为主;在传统内容和先进内容方面,以集成电路的应用性设计为主,并力图反映当前具有典型代表的新器件、新理论和新技术。本书是以已学完电工学的高年级学生、研究生以及具有同等水平的工程技术人员为对象,较系统地介绍现代电子电路原理与设计方法、调试方法和制作工艺,为提高设计能力开辟一条新路。

全书分为如下六章:第一章,放大器的实用设计,较详尽地对各种小信号放大器进行了研究,给出了设计原则、步骤、实例、误差分析及装配工艺措施;第二章,精密放大器,全面介绍了能代表当前水平的各种精密测量放大器,包括仪用放大器,可编程增益放大器,隔离放大器以及毫伏变送器等;第三章,电磁干扰及其抑制技术,以“场”和“路”的观点,对干扰源、干扰传播方式和抑制技术进行了系统的论述;第四章,有源滤波器的实用设计,主要介绍利用设计表设计RC有源滤波器的快速设计方法,并对开关电容滤波器及其典型产品作了介绍;第五章,开关电源实用设计,系统介绍了开关电源的原理及设计方法,结合作者的实践经验给出了设计实例,调试技巧,测量方法,适当地介绍了近年来出现的集成PWM芯片和专用高压驱动电路;第六章,印制板设计,系统、全面地叙述了在设计印制板时应具备的基础知识,应采取的主要步骤以及抑制干扰的布线技巧。应特别说明,由于系统介绍现代电子电路的参考书尚不多见,而有关资料却浩如烟海,因此,本书难免挂一漏万;由于作者的水平有限,加之时间仓促又缺乏经验,书中难免有很多不妥、甚至谬误之处,恳请前辈、同仁们及广大读者批评赐教。

参加本书审阅的专家有:北京理工大学龚绍文教授,北方工业大学田风桐、栗嘉铭、张东彦副教授等。他们对书稿逐字逐句非常认真负责的审查,提供了详尽的修改意见,给作者以很大的启迪和帮助。上海交通大学何绍雄教授,东北大学田芝芬教授对本书的修改提出了许多宝贵意见。原子能出版社刘其润编审审阅了全书,并给予了多方面的支持和帮助。在成书过程中,原子能出版社、北方工业大学等单位给了热情帮助,在此谨向他们致以衷心的感谢。

编著者

1996年元月于北京

主要符号说明

一、几条原则

1. 电流和电压(以基极电流为例)

I_B 大写字母、大写下标,表示直流量

I_b 大写字母、小写下标,表示交流有效值

\dot{I}_b 代表电流的相量

i_B 小写字母、大写下标,表示包含直流的瞬时总值

i_b 小写字母、小写下标,表示交流瞬时值

$I_{B(AV)}$ 表示平均值

2. 电阻

R 大写字母表示电路的电阻或等效电阻

r 小写字母表示器件内部的等效电阻

二、基本符号

1. 电流和电压

I, i 电流的通用符号

U, u 电压的通用符号

I_f, U_f 反馈电流、电压

I_i, U_i 交流输入电流、电压的有效值

I_o, U_o 交流输出电流、电压的有效值

I_Q, U_Q 静态工作点电流、电压

I_R, U_R 参考电流、电压

I_+, U_+ 集成运放同相输入端电流、电压

I_-, U_- 集成运放反相输入端电流、电压

I_{om}, U_{om} 最大输出电流、电压有效值

E_n, I_n 噪声电压源、噪声电流源

E_{ni} 所有噪声在信号源处的等效值

U_{ic} 共模输入电压

U_{id} 差模输入电压

U_S 信号源电压

V_{CC}, E 集电极回路电源对地电压

V_+, V_- 集成运放正、负电源电压或正负电源端

2. 功率

P 功率通用符号

p 瞬时功率

P_o 输出功率

P_T 晶体管耗散的功率

3. 频率

f 频率通用符号
 ω 角频率通用符号
 f_{bw} 通频带、带宽、频带
 f_c 单位增益带宽,截止频率
 f_H 上限(-3 dB)频率
 f_L 下限(-3 dB)频率
 f_0 振荡频率、中心频率

4. 电阻、电导、电容、电感

R_i 电路的输入电阻
 R_{if} 反馈电路的输入电阻
 R_L 负载电阻
 R'_L 交流负载电阻
 R_o 电路的输出电阻
 R_{of} 反馈电路的输出电阻
 R_S 信号源内阻
 R_{opt} 最佳源电阻
 R_P 运放输入端的平衡电阻
 R_W, W 电位器
 C 电容通用符号
 L 电感通用符号

5. 增益或放大倍数

A, G 增益或放大倍数通用符号
 A_c 共模电压放大倍数
 A_d 差模电压放大倍数
 A_u, A_v 电压放大倍数的通用符号
 A_{um} 中频电压放大倍数,最大电压放大倍数
 A_{uu} 第一个下标表示输出量、第二个下标表示输入量,电压放大倍数,其余类推
 A_{uuf} 反馈电路的电压放大倍数,其余类推
 F 反馈系数的通用符号
 F_{uu} 第一个下标为反馈网络的输出量,第二个下标表示反馈的输入量,反馈系数,其余类推

三、器件及其参数符号

b 基极
 c 集电极
 e 发射极
 f_β 共射极接法下晶体管电流放大系数的上限频率
 g_m 跨导
 $r_{bb'}$ 基区体电阻

r_{be} 发射结的微变等效电阻
 r_{bc} 共射极接法下基射极之间的微变等效电阻
 A_{od} 运放的开环增益
 D 二极管,场效应管的漏极
 Dz 稳压管
 G 场效管的栅极
 I_{CBO} 发射极开路时 c - b 极间的反向电流
 I_{CEO} 基极开路时 c - e 极间的穿透电流
 I_{CM} 集电极最大允许电流
 I_D 二极管电流,漏极电流
 $I_{D(AV)}$ 整流管整流电流平均值
 I_F 二极管正向电流
 I_{IB} 集成运放输入偏置电流
 I_{IO} 集成运放输入失调电流
 P_{CM} 集电极最大允许耗散功率
 S 场效应管的源极,开关
 S_R 集成运放的转换速率
 $U_{(BR)}$ 二极管反向击穿电压
 $U_{(BR)CEO}$ 基极开路时 c - e 极间的击穿电压
 $U_{GS(off)}$ 耗尽型场效应管的夹断电压
 $U_{GS(th)}$ 增强型场效管的开启电压
 U_{IO} 集成运放的输入失调电压
 U_T 温度的电压当量
 β 共射极接法下交、直流电流放大倍数

四、其它符号

NF 噪声系数
 Q 静态工作点
 T 周期、温度
 $BG(T)$ 晶体管,场效应管
 η 效率
 τ 时间常数
 φ 相位角

目 录

前 言

第一章 放大器的实用设计	(1)
1.1 集成运放应用的基础知识	(2)
1.1.1 运放的基本特性和主要参数	(2)
1.1.2 集成运放的相位补偿技术	(4)
1.1.3 集成运放的调零技术	(8)
1.1.4 集成运放的保护措施	(9)
1.1.5 选择集成运放的原则	(11)
1.1.6 集成运放的正确使用	(13)
1.2 用集成运放设计放大器的方法	(14)
1.2.1 基本反相放大器的设计方法	(14)
1.2.2 基本同相放大器的设计方法	(22)
1.2.3 多级交流放大器的设计	(26)
1.3 低漂移直流放大器设计	(29)
1.3.1 常用低漂移线性集成运放及实用设计方法	(30)
1.3.2 线性集成自稳零运放及其使用方法	(31)
1.3.3 各种低漂移运放的比较及选型	(35)
1.3.4 低漂移直流放大器制作工艺	(36)
1.4 高输入阻抗放大器设计	(38)
1.4.1 直流高输入阻抗放大器	(39)
1.4.2 交流高输入阻抗放大器	(40)
1.4.3 高输入阻抗差动放大器	(43)
1.4.4 高输入阻抗放大器的信息保护技术	(45)
1.4.5 制作及装配高输入阻抗放大器的注意事项	(45)
参考文献	(48)
第二章 精密测量放大器	(49)
2.1 仪用放大器的基础知识	(49)
2.1.1 三运放的差动放大器	(49)
2.1.2 集仪用放大器	(50)
2.1.3 仪用放大器的主要特性参数	(52)
2.2 典型仪用放大器的使用方法	(52)
2.2.1 AD 521 的使用方法	(52)
2.2.2 AD 522 的使用方法	(54)
2.2.3 MPINA 101 的使用方法	(55)
2.2.4 INA 102 的使用方法	(56)
2.3 可编程增益放大器	(58)
2.3.1 可编程增益放大器的工作原理	(58)
2.3.2 LH0084 的使用方法	(59)

2.3.3	PGA 100 多路输入可编程增益放大器的使用方法	(62)
2.4	集成隔离放大器	(63)
2.4.1	概述	(63)
2.4.2	光电耦合的隔离放大器	(64)
2.4.3	变压器耦合的隔离放大器	(66)
2.5	其它典型产品简介	(67)
2.5.1	小信号双线变送器 XTR 101	(67)
2.5.2	EK 系列直流毫伏变送器电路简介	(68)
2.5.3	ERICSSON(爱立信)模块式 DC-DC 变换器	(69)
	参考文献	(70)
第三章 电磁干扰及其抑制技术		(71)
3.1	干扰源简介	(71)
3.1.1	外部干扰	(71)
3.1.2	内部干扰	(71)
3.1.3	新的干扰源	(71)
3.2	干扰的传输方式	(72)
3.2.1	电容性耦合(电场干扰)	(72)
3.2.2	互感性耦合(磁场干扰)	(74)
3.2.3	漏电流耦合	(74)
3.2.4	共阻抗耦合	(75)
3.3	干扰抑制技术的基础知识	(77)
3.3.1	概述	(78)
3.3.2	屏蔽技术	(78)
3.3.3	接地技术	(82)
3.3.4	退耦电路	(84)
3.4	由输入端串入的干扰及其抑制技术	(85)
3.4.1	差模干扰及其抑制技术	(85)
3.4.2	共模干扰及其抑制技术	(88)
3.5	由工频电源变压器串入的干扰	(91)
3.5.1	工频变压器的静电屏蔽技术	(92)
3.5.2	交流噪声滤波器	(93)
3.6	干扰抑制技术在测量系统中的实际应用	(94)
3.6.1	测量系统中实用屏蔽规则	(94)
3.6.2	测量系统的放大器与现场信号源的连接方式	(96)
3.6.3	测量仪表内部元件的安排和走线及装配工艺的设计准则	(97)
	参考文献	(99)
第四章 有源滤波器的实用设计		(100)
4.1	概述	(100)
4.2	低通滤波器的基本理论	(100)
4.2.1	巴特沃斯低通滤波器	(101)
4.2.2	切比雪夫低通滤波器	(101)
4.3	有源低通滤波器(LPF)典型电路及快速设计	(102)

4.3.1	有源 LPF 典型电路	(102)
4.3.2	二阶有源 LPF 快速实用设计基础	(105)
4.3.3	有源 LPF 的设计步骤及举例	(106)
4.4	有源高通滤波器(HPF)典型电路及快速设计	(107)
4.4.1	HPF 的基本理论	(107)
4.4.2	有源 HPF 典型电路	(109)
4.4.3	设计举例.....	(110)
4.5	有源带通滤波器(BPF)典型电路及快速设计	(110)
4.5.1	BPF 基本理论	(110)
4.5.2	BPF 的级联	(112)
4.5.3	有源 BPF 典型电路及设计举例	(113)
4.6	有源带阻滤波器(BEF)典型电路及快速设计	(116)
4.7	开关电容滤波器(SCF)	(118)
4.7.1	SCF 的基本单元电路	(118)
4.7.2	一阶 LPF 开关电容滤波器	(121)
4.7.3	集成 SCF 产品	(122)
	参考文献	(124)
	设计表.....	(125)
第五章	开关电源实用设计	(150)
5.1	串联式开关稳压电源	(151)
5.1.1	工作原理和电路分析.....	(151)
5.1.2	滤波电感和电容计算,工作频率的选择	(153)
5.1.3	开关功率晶体管和续流二极管功耗计算.....	(154)
5.2	单端反激式开关电源原理与设计	(158)
5.2.1	电路的结构及工作原理.....	(158)
5.2.2	计算公式.....	(159)
5.2.3	电路设计.....	(160)
5.3	单端正激式开关电源原理与设计	(163)
5.3.1	电路的结构及工作原理.....	(163)
5.3.2	电路设计.....	(166)
5.4	双端开关电源原理与设计	(167)
5.4.1	推换式开关电源.....	(167)
5.4.2	半桥式开关电源.....	(168)
5.4.3	全桥式开关电源.....	(169)
5.4.4	三种双端开关电源的比较.....	(170)
5.4.5	电路设计.....	(170)
5.5	典型集成脉冲宽度调制器(PWM)	(173)
5.5.1	PWM 的基本工作原理	(173)
5.5.2	双端输出式 PWM 的集成芯片	(174)
5.5.3	单端输出式 PWM 的集成芯片	(176)
5.6	开关电源的设计举例及调试	(179)
5.6.1	输入部分设计.....	(179)

5.6.2	起动电阻 R_2 和电容 C_2 的设计	(179)
5.6.3	高频变压器的设计	(180)
5.6.4	选择开关管和整流二极管	(181)
5.6.5	缓冲电路设计	(181)
5.6.6	电流感应电阻 R_{10} 以及 R_8, R_7 的作用	(181)
5.6.7	开关管驱动电路 R_7 和 R_{13} 的设计	(181)
5.6.8	开关电源的组装	(183)
5.6.9	单端反激式开关电源的调试	(183)
5.7	典型单片功率开关稳压器的使用方法	(184)
5.7.1	CW 4962(CW 4960)的工作原理	(185)
5.7.2	CW 4962(CW 4960)的应用电路	(188)
5.7.3	典型电路的实测结果	(188)
	参考文献	(189)
第六章 印制板设计		(191)
6.1	消除地线共阻抗干扰的方法	(191)
6.1.1	“地线”阻抗的计算	(191)
6.1.2	一点接地准则的应用	(191)
6.1.3	板内地线设计	(192)
6.1.4	整机地线布局	(195)
6.2	电磁干扰的抑制方法	(196)
6.2.1	平行导线的寄生耦合及抑制方法	(196)
6.2.2	输入输出寄生耦合与抑制方法	(198)
6.2.3	板内屏蔽导线的布设	(199)
6.3	印制电路板排版设计基础知识	(200)
6.3.1	敷铜板的电气特性	(201)
6.3.2	元件的排列与安装	(203)
6.3.3	接点、导线和孔的形式及要求	(204)
6.3.4	元件引出端尺寸及识别	(208)
6.3.5	印制板的板外连线及插头座	(211)
6.4	印制板排版过程与方法	(213)
6.4.1	整体布局及印制板结构	(214)
6.4.2	单线不交叉图的绘制	(217)
6.4.3	排版草图的绘制	(221)
6.5	计算机绘图	(224)
6.5.1	SMARTWORK 软件简介	(224)
6.5.2	TANGO 软件简介	(225)
	参考文献	(225)

第一章 放大器的实用设计

放大器是电子设备的重要组成部分，其主要任务是对有用的输入信号不失真的放大。在自动检测仪器中，由传感器送来的信号一般是比较微弱的，而且含有一些与测量无关的信号——干扰，因此不能把这种信号直接送到计算机的数据采集系统（或二次仪表）。必须把与被测量有关的有用信号放大，且最大限度地抑制干扰——这就是信号的放大与处理。对于一个自动测量仪器，放大器性能的优劣直接影响仪器的精度、可靠性及其它技术指标。在给定性能指标条件下，设计放大器的主要内容有：放大电路的选形，元件参数的计算和元器件的选型，性能核对，制造试验电路并调试等。

放大器的种类繁多，有音频放大器、视频放大器、测量放大器等。本章主要介绍常用小信号交流放大器的设计方法和调试技术，并介绍了一些特殊放大器（如低漂移、高阻抗）的设计。目的是让读者通过本章学习，在放大器设计方面有扎实的基础理论并获得一定实用设计技巧及调试方法。为便于自学，本章给出了许多设计实例，而且许多设计理论和方法渗透在实例中。

根据经验，设计放大器的程序是：（1）仔细研究放大器的工作环境，对放大器提出符合实际的技术指标；研究放大器的工作环境包括：传感器的特性，工作频率，增益，输入电阻的阻值，工作温度变化范围，输出电压的幅值，输出电阻的阻值，传感器到放大器以及放大器到负载的传输距离等。对于经验不足的设计者来说，且不要过分地增加某个指标的余量，因为某个技术指标的提高总是以降低另一些指标为代价。例如，增加放大器的带宽会使其输出噪声明显增加；又如提高输入电阻，会使放大器的抗干扰能力下降等等。（2）查阅资料，寻找性能相似或相近的实用电路，并将其消化，以便使国内外已有的实用电路为己所用。对于一个电路设计者来说，应备用一些必要的技术资料，如元器件手册，实用电路集等资料。应说明，有些资料介绍的实用电路并不实用，而且有些电路也不易被理解。设计者应把查到的有关电路进行计算机辅助分析（例如用 SPICE 程序）或在实验板上实际调试。作者建议应试着干，不要坐着等。（3）初步设计包括电路的选形，元器件的参数计算和选型。这一步要求设计者综合已掌握的电子技术方面的基础知识。建议设计者应多看资料，多做实验，勤向有经验的设计工程师请教。（4）核对已设计电路的技术指标。目前计算机辅助分析（简称为 CAA）的程序很多，使用也很方便。CAA 具有快速、简便、准确的优点。当然，对于较简单的电路也可以用人工近似估算和分析。（5）实验板上调试并实测其性能。建议在组装电路前，应用仪器逐个测试所使用元器件，这样往往事半功倍。（6）用计算机绘印制电路板。目前较为流行的绘图软件有 SMARTWORK 和 TANGO，这些软件使用简便也很容易掌握。（7）制作放大器的样品。（8）设计外壳。根据放大器的工作环境设计合理的外壳，例如在精密仪器中要求放大器处在恒温且要除湿（像丹麦 B/K 公司的前置放大器，日本某公司的前置放大器）。外壳另一个作用就是对电路屏蔽。总之，外壳不仅能保护电路，而且有许多特殊功能，希望引起设计者的重视。

上述的设计、制作程序并非一成不变的公式，设计者可根据实际情况选择若干步骤。上

述设计程序也适用于其它电子电路的制作和设计。

1.1 集成运放应用的基础知识

集成运算放大器（简称运放）是一种非常好用的线性集成组件，因其性能优良，使用方便等受到用户的普遍欢迎，它已成为设计现代电子电路的主流组件。但是，由于运放种类繁多，应用电路和方法差异甚大，对于初学者来说，在实际应用时，经常出现选型不当，外围电路设计不合理，整体电路达不到预定技术要求等问题。作者认为出现上述问题的原因有两个：其一，对运放应用的基础知识了解不足；其二是真正了解的运放太少。为解决第一个问题，本节将介绍一些使用者必须掌握的基础知识，其主要内容有：集成运放的基本特性和主要参数；相位补偿；调零技术；选型原则以及正确使用运放的方法。针对第二个问题，本节简介了各种类型的运放。

1.1.1 运放的基本特性和主要参数

(1) 集成运放的外形和符号

集成运放是一种常用的线性集成电路组件，其集成芯片的封装形式通常有两种：即金属圆壳式和双列直插式，如图 1.1.1 (a)，(b) 所示。由图可知，无论采用何种封装，从器件顶部正视时，其引脚均是按逆时针方向排列。对于金属圆壳式封装的组件，标记点左边的第一个引脚为 1；对于双列直插式封装的组件，标记缺口左下脚的第一个引脚为 1。

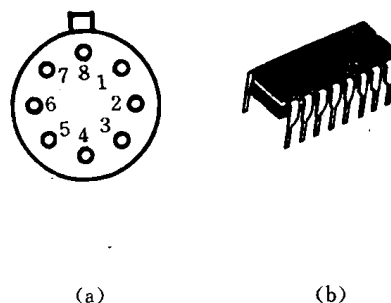


图 1.1.1 集成运放两种封装
(a) ——金属圆壳式封装；(b) ——双列直插式封装

集成运放的电路符号如图 1.1.2 (a)，(b)，(c) 所示。图 (a) 是我国的

国标符号，运放的两个输入端（反相输入端 $U_{i(-)}$ 和同相输入端 $U_{i(+)}$ ）和一个输出端 (U_o) 分别

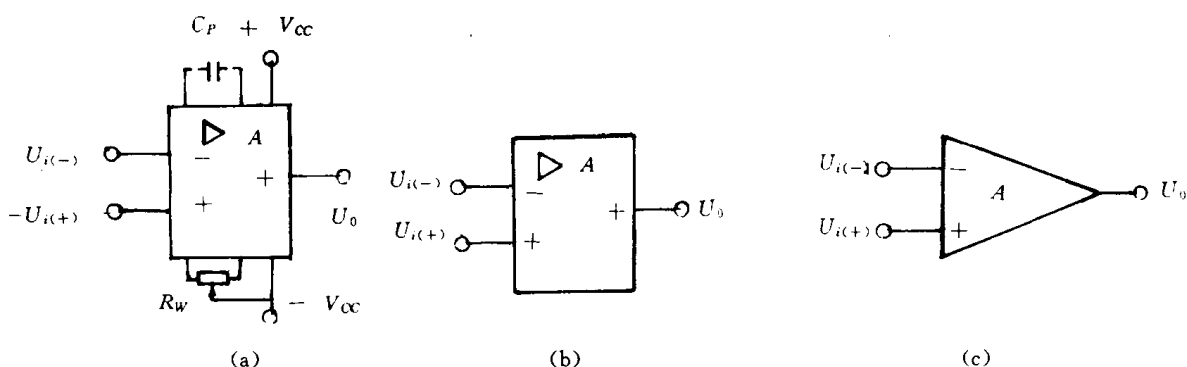


图 1.1.2 集成运放的电路符号

(a) ——国标符号；(b) ——简化符号；(c) ——习惯画法

画在方框的左右两侧，其它功能端，如电源端 ($\pm V_{CC}$)，调零端（外接电阻）和频率补偿端（外接电容 C_P ）等均画在方框图的上下侧；框中符号“ \triangleright ”表示信号的传送方向， A 表示放大器件。

图 (b) 为运放的简化符号。图 (c) 所给出的运放符号是一种被广为应用的符号, 所以本书仍采用图 (c) 所示的符号。

(2) 集成运放的电压传输特性及三项基本参数

集成运放的电压传输特性如图 1.1.3 所示, 它表征了在低频条件下, 输入电压和输出电压之间的关系。在图中 $U_{id} [= U_{i(+)} - U_{i(-)}]$ 是差模输入电压。由传输特性可知, 当 U_{id} 在 $-U_{Im} \sim +U_{Im}$ 范围内变化时, 输入与输出呈线性关系, 其斜率为: $\Delta U_o / \Delta U_{id}$, 该斜率是运放的差模电压放大倍数 A_{od} 。我们定义 $U_{id} = -U_{Im} \sim +U_{Im}$ 为线性区, 其余部分为非线性区域。在理想条件下, 电压传输特性曲线是通过原点的, 即当 $U_{id} = 0, U_o = 0$ 。当使用运放放大信号时, 运放工作在线性区。

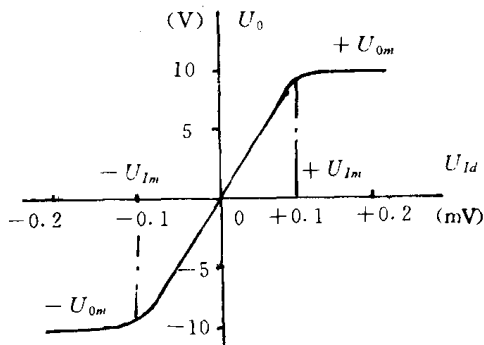


图 1.1.3 运放的电压传输特性

运放在线性区工作有三个重要性能指标:

① 差模电压放大倍数 A_{od} (亦称之为开环差模放大倍数)

$$A_{od} = \Delta U_o / \Delta U_{id} = U_o / (U_{i(+)} - U_{i(-)})$$

一般情况下, $A_{od} = 10^4 \sim 10^6$ (即 $80 \sim 120$ dB), 性能较好的运放可达到 140 dB 以上。

② 差模输入电阻 r_{id} 差模输入电阻 r_{id} 是指输入差模信号时运放的输入电阻。在实际运放中, r_{id} 也是较高, 如: CF 741 的 $r_{id} = 1 \text{ M}\Omega$, 高阻型运放 5 G28 的 $r_{id} = 10^4 \text{ M}\Omega$ 。

③ 输出电阻 r_o 集成运放的输出级一般采用互补对称式共集电路, 因而有较小的输出阻抗, 通常 $r_o = 100 \Omega \sim 1 \text{ k}\Omega$, 如 CF741, $r_o \approx 200 \Omega$ 。

(3) 集成运放的失调参数

在实际运放电路中, 当 $U_{id} = 0, U_o \neq 0$, 即运放的传输特性曲线不通过坐标原点, 这相当于运放的静态工作点发生了偏移 (称为输出失调)。为补偿输出失调, 在运放电路的输入级中设置了调零端。

① 输入失调电压 U_{I0}

$$U_{I0} = \frac{U_o}{A_{od}} \Big|_{U_I = 0}$$

式中 U_{I0} 称为输入失调电压。 U_{I0} 的含义是, 在 $U_I = 0$ 时, 欲使输出电压 $U_o = 0$, 所需外加的补偿电压。造成失调电压的原因是运放输入级差分对管的特性不会完全一致。

② 输入失调电压温漂 dU_{I0}/dT

由于运放电路输入级差分对管的温度特性不一致, 当温度变化时, 输入失调电压亦随之变化。可以用外接调零电路抵消 U_{I0} 的影响, 但不能消除 dU_{I0}/dT 的影响。因此, 对于用户来说, dU_{I0}/dT 是一个更为重要的参数。

③ 输入失调电流 I_{I0}

$$I_{I0} = |I_{B1} - I_{B2}|$$

式中, I_{B1} 和 I_{B2} 是同相端与反相端的输入电流。这个参数表征了差分对管输入电流不对称的程度。

④ 输入失调电流的温漂 dI_{I0}/dT 其意义与 dU_{I0}/dT 类似, 它也是运放一个重要参数。

在上面四个参数中, dU_{I0}/dT 和 dI_{I0}/dT 愈小, 运放的温漂亦愈小, 这对于设计低漂移的放大器来说是至关重要的参数。

(4) 集成运放的共模参数

① 共模抑制比 K_{CMR}

$$K_{CMR} = \left| \frac{A_{od}}{A_{oc}} \right|$$

式中, A_{oc} 是共模放大倍数, 称 K_{CMR} 为共模抑制比, 也常用分贝表示, 即为 $20\lg K_{CMR}$ 。通常运放的 $20\lg K_{CMR} = 60 \sim 100\text{dB}$ 。高共模抑制比组件的 $20\lg K_{CMR}$ 可达 $120 \sim 140\text{dB}$, 例如 AD521, AD522。

② 最大共模输入电压 U_{ICMAX} 如果共模信号的幅值超过一定限度, 运放就不能正常工作。称这个极限值为 U_{ICMAX} 。

在工业现场使用的放大器, 因由传感器经传输线传来的信号含有很强的共模信号, 要特别注意共模参数。在强干扰的工业现场使用的放大器, 第一级最好采用 U_{ICMAX} 、 K_{CMR} 都高的仪用放大器。

(5) 集成运放的时域和频域参数

① -3dB 带宽 f_H 它是集成运放的上限截止频率。例如 F007(CF741) 的 $f_H = 100\text{Hz}$ 。

② 单位增益带宽 f_C 它是 $A_{od} = 1$ 时所对应的频率, 也就是运放的增益带宽积。

③ 转换速率 S_R

$$S_R = \left| \frac{du_0}{dT} \right|_{\max}$$

S_R 反映了运放对高速变化的输入信号的响应情况, 只有当输入信号变化斜率的绝对值小于 S_R 时, 输出才能按线性规律变化的, 否则输出信号将产生频率失真。

若 $u_0 = U_{om} \sin \omega t$, 则

$$S_R = \left| \frac{du_0}{dT} \right|_{\max} = |U_{om} \cdot \omega \cdot \cos \omega t|_{\max} = U_{om} \cdot \omega$$

上式说明, 当 S_R 给定, U_{om} 愈大, 运放的最高工作频率愈低。

上述三个参数主要用于交流放大器的设计。

从集成运放应用的角度出发, 提出所谓“理想运放”的概念, 它具有下面技术指标:

$$A_{od} = \infty, K_{CMR} = \infty, r_{id} = \infty, f_H = \infty, S_R \rightarrow \infty$$

$$U_{I0} = 0, \frac{dU_{I0}}{dT} = 0, I_{I0} = 0, \frac{dI_{I0}}{dT} = 0, I_{I(+)} = I_{I(-)} = 0, r_o = 0$$

理想运放的两个基本特性:

i 运放两输入端之间为虚短路, 即 $U_{Id} = 0, U_{I(+)} \approx U_{I(-)}$

ii 运放两输入端之间为虚断路, 即 $I_{I(+)} = I_{I(-)} = 0$

上述两个基本特性是分析集成运放线性应用电路的关键, 亦是近似设计的基础, 应该牢固掌握并灵活使用。

1.1.2 集成运放的相位补偿技术

集成运放实质上是一个高增益的多级直接耦合放大电路, 由于各级晶体管极间电容的影响, 使其开环增益 A 成为频率的函数。当集成运放工作在其传输特性曲线的线性区时, 为使

集成运放能正常工作，通常引入深度负反馈。因此，在其传输特性曲线线性区工作的集成运放，实际就是一个带有深度负反馈的多级放大器。根据电子学的基本理论^[4]，深度负反馈容易引起放大器的自激，所以工作在其线性区的集成运放也同样存在自激及其消除问题。

(1) 集成运放的自激条件

①集成运放的闭环增益和自激条件 若考虑到开环增益 A 是频率的函数以及反馈网络也存在着相移，闭环增益 A_f 的表达式为：

$$A_f = \frac{A}{1 + AF} \quad (1.1.1)$$

式中， A 是集成运放的开环增益， F 是反馈网络的反馈系数， A_f 是闭环增益， AF 为回路增益。

由集成运放开环增益的频率特性可知， A 的幅值随频率升高而下降，而且产生一个附加的相移 φ_A 。若在某个高频下，反馈系数的相移 φ_F 与 φ_A 之和——即回路增益的附加相移达到 $\pm 180^\circ$ ，负反馈就变为正反馈。只要回路增益的幅值足够大，就会产生自激。

由上式可知，自激的条件是：

$$AF = -1 \quad (1.1.2)$$

其物理意义是：在 $AF = -1$ 时， $|A_f| = \infty$ ，即在不加任何激励时，也有输出（即自激振荡）。

改写上式为模和角的关系式，即得到自激振荡的相位条件和幅值条件。

$$\text{自激的相位条件: } \Delta\varphi = \varphi_A + \varphi_F = \pm 180^\circ \quad (1.1.3)$$

$$\text{自激的幅值条件: } AF = 1 \quad (1.1.4)$$

由上式可得到如下结论：i 当 A 给定， F 愈大愈容易自激，即反馈愈强，愈容易自激。对于由电阻组成的反馈回路而言， F 的最大值是 1。如果一个放大电路在 $F = 1$ 时，不能产生自激，那么由电阻组成的任何反馈网络将不会产生自激；ii 在深度负反馈情况下， $|A_f| = \left| \frac{1}{F} \right|$ 。由结论 i 可知， F 愈大，愈容易自激。因此，在深度负反馈情况下， $|A_f|$ 愈小愈容易自激。

通常用分贝表示自激的幅值条件：

$$20\lg AF = 0 \quad (1.1.5)$$

②负反馈的稳定裕度 从工程实际的观点看，仅仅保证放大器不发生自激还是不够的，因为使用条件略有变化，放大器还有可能再次自激，所以一般应用时都应留有一定的裕度。稳定裕度如图 1.1.4 所示。

幅度裕度 G_m 的定义：若 $\Delta\varphi = \pm 180^\circ$ 所对应的频率为 f_0 ，则

$$G_m = 20\lg(AF) \Big|_{f=f_0} \leq -10\text{dB} \quad (1.1.6)$$

相位裕度 φ_m 的定义，若 $20\lg AF = 0$ 时所对应的频率为 f_c ，则

$$\varphi_m = 180^\circ - |\Delta\varphi|_{f=f_c} \geq 45^\circ \quad (1.1.7)$$

(2) 集成运放的相位补偿

由上述分析可知，负反馈愈强（即 F 值愈大），愈容易发生自激；但减少 F 值，又不利于性能的改善。如果既想保持必要的 F 值又不发生自激振荡，通常采用相位补偿。相位补偿的基本思想是给放大器增加 RC 补偿网络来改变集成运放的频率特性，达到破坏自激条件的目的。

工程上通常采用的相位补偿方法大体上可分滞后补偿、超前补偿和滞后——超前补偿。若根据补偿回路的接入点来分类，相位补偿的方法又可分成内、外两类补偿方法。内部补偿是指把补偿网络接入集成运放的内部，通过改变开环增益的频率特性来满足稳定条件的方法。外

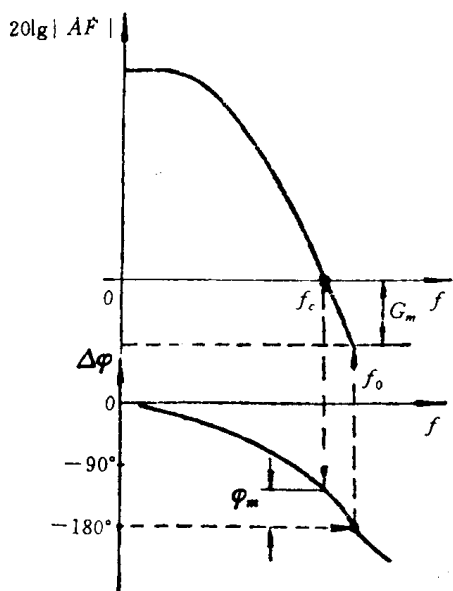


图 1.1.4 稳定裕度示意图

部补偿是在集成运放外部的输入回路或反馈回路接入补偿网络，通过改变开环增益或反馈系数的特性来满足稳定条件的方法。内部补偿是工程上常用的相位补偿方法，外部补偿方法通常为内部补偿方法的一种补充，但是当某些集成运放具有固定的频率特性（即用户无法改变其频率特性），外部补偿方法就变为唯一可取的相位补偿手段。本书主要介绍外部补偿的原理及方法。

①内部补偿举例 有些集成运放需要外接补偿网络，以保证稳定工作。一般情况是：集成运放给用户已引出了补偿端，生产厂家在其用户手册中也提供了补偿电路的类型及元件参数的选择范围，用户只要按手册中给出电路进行补偿即可。例如 CF725（或 $\mu A725$ ）高精度型集成运放的补偿网络如图 1.1.5 所示，补偿网络的数值见表 1.1.1。

②输入端滞后补偿 滞后补偿是指补偿网络所产生的附加相位使得回路增益的相位增加，达到破坏自激条件的方法。滞后补偿方法主要靠降低中频段回路增益来达到稳定，因而这种补偿会导致反馈放大器的通频带变窄。由此可见，滞后补偿通常适用于对频带要求不高的低频放大器中。图 1.1.6 给出输入端滞后补偿的电路，这是一种外部补偿方法。在图 1.1.6 中， R_B, C_B 组成了滞后补偿网络。 R_B, C_B 的计算方法，请参阅文献 [9]。

表 1.1.1 CF725 补偿网络的数值表

A_f	$R_1(\Omega)$	$C_1(\mu F)$	$R_2(\Omega)$	$C_2(\mu F)$
10000	10k	50 pF		
1000	470	0.001		
100	47	0.01		
10	27	0.05	270	0.0015
1	10	0.05	39	0.02

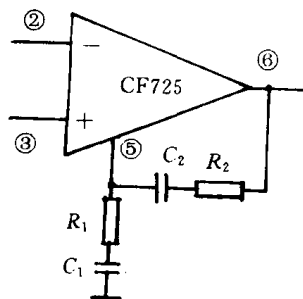


图 1.1.5 CF725 补偿网络

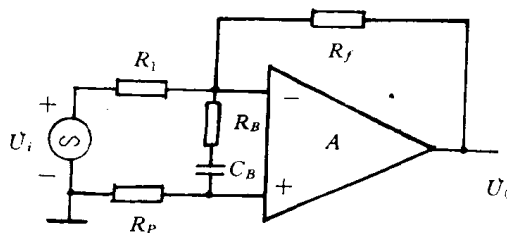


图 1.1.6 输入端滞后补偿