

TURING

图灵电子与电气工程丛书



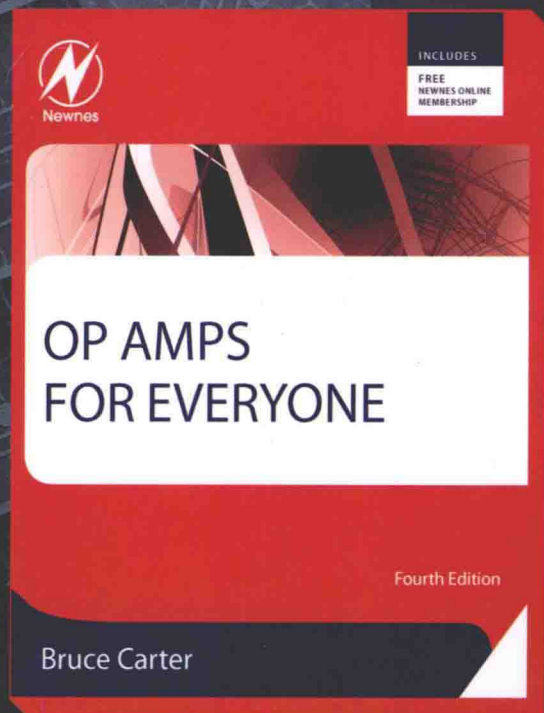
来自全球领导厂商
德州仪器公司的经验总结

运算放大器权威指南

Op Amps for Everyone, 4E

(第4版)

[美] Bruce Carter 著
孙宗晓 译



人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS

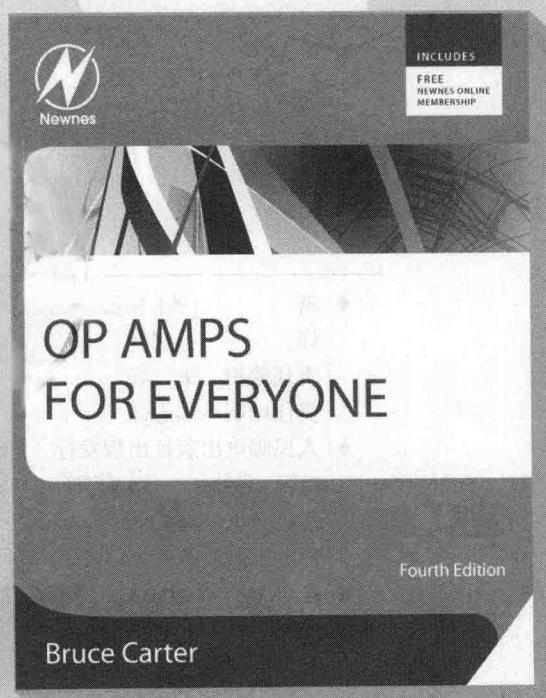
TURING

图灵电子与电气工程丛书

运算放大器权威指南

Op Amps for Everyone, 4E (第4版)

[美] Bruce Carter 著
孙宗晓 译



人民邮电出版社
北京

图书在版编目 (C I P) 数据

运算放大器权威指南：第4版 / (美) 卡特
(Carter, B.) 著；孙宗晓译. — 北京：人民邮电出版社，2014.6

(图灵电子与电气工程丛书)
ISBN 978-7-115-35404-4

I. ①运… II. ①卡… ②孙… III. ①运算放大器—
指南 IV. ①TN722.7-62

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第080325号

内 容 提 要

本书出自全球领先的半导体公司TI技术专家之手，系统全面介绍了运算放大器电路设计和信号链设计方法，首版至今，已成为运算放大器电路设计方面的经典参考教材。最新第4版，增加了关于极端环境下应用、稳压器设计及在线和离线的设计辅助工具等方面的内容，更具有系统性。

本书适合从事电路设计的工程技术人员，也可供高校相关专业师生参考。

-
- ◆ 著 [美] Bruce Carter
 - 译 孙宗晓
 - 责任编辑 朱 巍
 - 责任印制 焦志炜
 - ◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市丰台区成寿寺路11号
 - 邮编 100164 电子邮件 315@ptpress.com.cn
 - 网址 <http://www.ptpress.com.cn>
 - 三河市海波印务有限公司印刷
 - ◆ 开本：787×1092 1/16
 - 印张：14.75
 - 字数：524千字 2014年6月第1版
 - 印数：1-4 000册 2014年6月河北第1次印刷
 - 著作权合同登记号 图字：01-2013-4948号



定价：59.00元

读者服务热线：(010)51095186转600 印装质量热线：(010)81055316

反盗版热线：(010)81055315

广告经营许可证：京崇工商广字第 0021 号

译者序

本书是运放电路设计方面的一部重要著作，最早以德州仪器（TI）公司的设计参考文档（Design Reference）SLOD006B 的形式出现在 TI 公司的网站上，后来出版了单行本，并经多次修订，目前已出到第 4 版。与前几版相比，第 4 版进行了相当大的修订，主要变化有：删除了一些理论性较强的内容以及关于正弦波振荡器的内容，对前几版中分散在不同章节中的一些主题类似的内容进行了整合，增加了关于极端环境下应用、稳压器设计及在线和离线的设计辅助工具等方面的内容。这些修订，可能与本书编著者、第 3 版主编 Bruce Carter 于 2009 年从 TI 公司离职有关。这里我们不去追究背后发生的故事。

经过修订，本书的篇幅有较大的缩减，只有第 3 版的一半左右，但其价值并未因此降低。相比之下，前几版似乎更适合作为百科全书式的设计参考，而本版更适合系统性阅读。

近年来，信号链设计的概念被越来越多地提到。相比传统的模拟电路设计的提法，信号链设计更加侧重于从系统的角度看问题，将传感器、信号调理电路、模数转换器和电源（有时还有数模转换器和执行器）作为一个整体讨论。这样，系统设计指标的分配能够更加合理，传统上容易遇到的系统各部分在接口和指标上不匹配的问题，也能够通过对系统的彻底分析来避免。方案阶段的讨论越彻底，项目的实施就越顺利。

以运放电路设计为核心的信号调理电路设计，是信号链设计的主要内容：对于大多数应用领域，传感器和数据转换器属于定型产品，除了选型之外，能够做的具体工作并不多。这样，最终获取的信号质量，极大程度上取决于信号调理电路的设计。精心设计的信号调理电路能够提高信号质量，大大减轻后续的数据处理工作的难度；而对低质量的信号使用高级的数据处理方法，只能算是事后的补救措施，当作“最后一招”使用。因此，运放电路设计作为从源头上解决问题的方法，对系统指标的保证与提高，能起到事半功倍的效果。本书介绍的运放电路设计和信号链设计的方法，具有十分重要的参考价值。

从某种意义上说，模拟电路设计工作，就是不停地遇到和解决意料之外问题的过程。在遇到意料之外的问题时，有两种解决方法：一是做加法，二是做减法。例如，在系统遇到干扰时，可以利用做加法的方式，在系统中增加抑制干扰的器件；也可以利用做减法的方式，分析拾取干扰的回路，并将其断开。对于具体的问题，采用哪种方式，需要具体分析与权衡。然而一般来说，如果能够采取做减法的方式解决问题，那么对问题的解决，会比做加法的方式更加彻底，效果也会更好。本书中的很多例子，也体现了这一思想。

看完本书之后，读者应当对使用运放进行电路设计的基本原理和方法有了一定的了解。

在本书的翻译过程中，很多人从各种不同方面为译者及译者的翻译工作提供了帮助。他们包括但不限于：

翻译本书第 3 版中文版的北京微电子技术研究所姚剑清研究员。流畅准确的第 3 版译文，是本书翻译工作的标杆和重要参考。

人民邮电出版社图灵公司朱巍编辑、隋春宁编辑。朱巍是本书的责任编辑，为本书的翻译、审校、出版工作付出了大量的工作；隋春宁对本书译稿提出了许多切中肯綮的修改意见。正是她们的辛勤劳动，使本书的出版成为可能。

译者所在工作单位的领导和同事们。单位良好的学术氛围，是译者完成本书翻译工作的重要保证。

经常与译者在 BBS 北大未名站电子制作版 (elecdiy.bdwm.net) 和 BBS 水木社区站广播与无线电版 (www.newsmth.net/nForum/#!board/Radio) 讨论技术问题的王希光、张浩、马晟厚、孙忆南、郭溢譞、魏超、倪效熹等朋友。与他们的讨论，使译者获益良多。

由于译者的专业水平和英文水平有限，译文中难免存在文字上、技术上以及其他方面的问题，恳请读者不吝指正。

孙宗晓

2013 年 12 月 24 日
于北京航天城

目 录

第 1 章 运算放大器在世界上的地位	1	4.3 电流反馈运放	37
1.1 难以控制的增益	1	4.4 全差分运放	37
1.2 解决问题的方法	1	4.4.1 全差分意味着什么	38
1.3 作为基本元件的运算放大器的诞生	2	4.4.2 第二个输出端如何使用	38
1.3.1 电子管时代	2	4.4.3 差分放大级	39
1.3.2 晶体管时代	2	4.4.4 单端到差分的转换	39
1.3.3 集成电路时代	3	4.4.5 一项新功能	40
参考文献	4	4.5 仪表放大器	41
第 2 章 运放基础回顾	5	4.6 差动放大器	43
2.1 引言	5	4.7 缓冲放大器	45
2.2 基本概念	5	4.8 其他种类的运放	47
2.2.1 欧姆定律	5	第 5 章 传感器与模数转换器的接口	
2.2.2 分压器规则	6	电路	49
2.2.3 叠加定理	6	5.1 引言	49
2.3 基本的运放电路	7	5.2 系统的信息	50
2.3.1 同相放大电路	8	5.3 电源的信息	51
2.3.2 反相放大电路	9	5.4 输入信号的特性	52
2.3.3 加法器	9	5.5 模数转换器的特性	52
2.3.4 差分放大器	10	5.6 接口的特性	53
2.4 没那么快	11	5.7 结构的确定	54
第 3 章 分离和管理交流与直流增益	15	5.8 小结	56
3.1 稍稍复杂化一下	15	第 6 章 有源滤波器设计技巧	57
3.2 单电源与双电源	15	6.1 引言	57
3.3 联立方程组	17	6.2 传递函数法	57
3.3.1 情形1: $V_{\text{OUT}}=+mV_{\text{IN}}+b$	19	6.3 快速实用滤波器设计	60
3.3.2 情形2: $V_{\text{OUT}}=+mV_{\text{IN}}-b$	22	6.3.1 选择响应曲线	60
3.3.3 情形3: $V_{\text{OUT}}=-mV_{\text{IN}}+b$	24	6.3.2 低通滤波器	62
3.3.4 情形4: $V_{\text{OUT}}=-mV_{\text{IN}}-b$	25	6.3.3 高通滤波器	62
3.4 所有情形的列表	27	6.3.4 窄(单频响应)带通滤波器	63
3.5 设计步骤与设计辅助工具	29	6.3.5 宽带通滤波器	64
3.6 小结	32	6.3.6 陷波(单频抑制)滤波器	65
第 4 章 不同类型的运放	33	6.4 高速滤波器设计	67
4.1 电压反馈运放	33	6.4.1 高速低通滤波器	67
4.2 无补偿和欠补偿的电压反馈运放	34	6.4.2 高速高通滤波器	67

6.4.3 高速带通滤波器	67	第9章 极端环境下的应用	101
6.4.4 高速陷波滤波器	69	9.1 引言	101
6.5 最有效地使用运放构造滤波器	69	9.2 温度	101
6.5.1 三极点低通滤波器	70	9.2.1 噪声	102
6.5.2 三极点高通滤波器	70	9.2.2 速度	102
6.5.3 参差调谐和多峰响应带通滤波器	71	9.2.3 输出驱动能力和输出级	102
6.5.4 单运放陷波滤波器和多频点陷波滤波器	74	9.2.4 高温下什么指标会劣化	102
6.5.5 结合使用带通滤波器和陷波滤波器	75	9.2.5 极端环境下运放参数的最终注记	103
6.6 双二阶滤波器	76	9.3 封装	103
6.7 设计辅助工具	77	9.3.1 集成电路本身	103
6.7.1 低通、高通及带通滤波器设计辅助工具	77	9.3.2 集成电路的封装	104
6.7.2 陷波滤波器设计辅助工具	79	9.3.3 集成电路的互联	104
6.7.3 双T滤波器设计辅助工具	80	9.4 当失效不可接受时	105
6.7.4 关于滤波器设计辅助工具的最终注记	81	9.5 当产品寿命要求很长时	107
6.8 小结	81	9.6 小结	108
第7章 运放在射频设计中的应用	83	第10章 稳压器	109
7.1 引言	83	10.1 引言	109
7.2 电压反馈还是电流反馈	83	10.2 稳压器的情况	109
7.3 射频放大器的电路结构	83	10.2.1 虚地: $b=0$	109
7.4 用于射频设计的运放参数	85	10.2.2 正电压和负电压稳压器: $b>0, b<0$	109
7.4.1 单级增益	85	10.3 自制还是购买	110
7.4.2 相位线性度	86	10.4 线性稳压器	110
7.4.3 频响峰值的调节	86	10.5 开关电源	112
7.4.4 -1dB 压缩点	87	10.6 过压保护电路	113
7.4.5 噪声系数	87	10.7 有源负载电路	114
7.5 无线系统	89	10.8 设计辅助工具	116
7.5.1 宽带放大器	89	10.9 小结	117
7.5.2 中频放大器	91	第11章 其他应用	119
7.6 高速模拟输入驱动电路	92	11.1 引言	119
7.7 小结	93	11.2 数模转换器与负载的接口电路	119
第8章 低压运放电路的设计	95	11.3 运放振荡器	121
8.1 引言	95	11.4 混合放大器和提高输出功率的方法	123
8.2 关键的指标	95	11.5 小结	126
8.2.1 输出电压摆幅	95	第12章 生产厂家提供的设计辅助工具	127
8.2.2 动态范围	96	12.1 引言	127
8.2.3 输入共模范围	97	12.2 德州仪器公司的Tina-TI	127
8.2.4 信噪比	99	12.3 德州仪器公司的FilterPro	129
8.3 小结	100		

12.4 国家半导体/德州仪器公司的 Webench.....	133	13.6 电流反馈运放的应用错误	146
12.5 NI Multisim的ADI版本.....	136	13.6.1 短路的反馈电阻	147
12.6 ADI公司的OpAmp Error Budget.....	137	13.6.2 反馈环中的电容	148
12.7 Linear Technology公司的LT Spice	138	13.7 全差分运放的应用错误	148
12.8 印制电路板布图工具.....	140	13.7.1 错误的直流工作点	149
12.9 小结	140	13.7.2 错误的共模范围	150
第 13 章 常见的应用错误	141	13.7.3 错误的单端端接	151
13.1 引言	141	13.8 不恰当的退耦	152
13.2 运放工作在小于单位增益 (或规定增益) 以下	141	13.9 小结	153
13.3 运放用作比较器	142	附录 A 理解运放的参数	155
13.3.1 比较器	143	附录 B 运放的噪声理论	181
13.3.2 运放	144	附录 C 印制电路板布图技术	189
13.4 未用运放的不恰当端接.....	144	附录 D 运放电路集锦.....	209
13.5 直流增益	146	索引	219

第 1 章

运算放大器在世界上的地位

1.1 难以控制的增益

1934 年，Harry Black^[1] 家住纽约城，在新泽西州的贝尔实验室上班，乘坐铁路和轮渡通勤。坐轮渡让他感到身心放松，可以进行一些概念性思考。他有一个棘手的问题需要解决：电话线很长的时候需要使用放大器，但是不稳定的放大器限制了电话服务的范围。放大器增益的初始误差过大，不过稍做调整即可解决。不幸的是，出厂调测合格的放大器在现场使用时，增益漂移往往还是过大，要么使音量过低，要么让话音失真。

为了制造出稳定的放大器，人们采取了种种尝试，但是温度变化和电话线上供电电压的极限值导致了无法控制的增益漂移。无源元件的漂移特性要比有源元件好很多，因此，如果能设法让放大器的增益取决于无源元件，这一问题就能得到解决。有一次坐轮渡时，Harry 灵光一现，想到了解决这一问题的新方法，当场把它记录了下来。

1.2 解决问题的方法

这一新方法是：首先制作一个增益和带宽都比实际需求高很多的放大器，然后将放大器输出信号的一部分反馈到输入，以使整个电路（包括放大器和反馈元件）的增益取决于反馈电路而不是放大器本身。这样，电路的增益就由无源反馈网络而不是有源放大器决定了，而无源反馈网络的稳定性比放大器好很多。这种技术称为负反馈，是所有现代运算放大器的基本工作原理。Harry 在轮渡上记录了第一个有意设计的负反馈电路。我相信，有人早就无意中设计出了负反馈电路，只是没注意到负反馈的效果而已！

我仿佛能听到贝尔实验室的经理们和放大器设计师们在苦不堪言地叫喊着。我猜他们会这样说：“设计 30 kHz 增益带宽积（GBW）的放大器已经够难了，现在那个傻瓜却让我设计一个 3 MHz 增益带宽积的放大器，但是他最终想要的就是个音频放大器。”尽管如此，他们还是完成了任务，解决了问题，大家也了解了负反馈的好处。运算放大器诞生了——尽管很多年之后，人们才认为这是一个基本的元件，并将其称作运算放大器。

有一个小问题 Harry 没有详细讨论：放大器自激振荡的问题。有时，开环增益很大的放大器在闭环工作时会发生振荡。很多人研究过这一不稳定性问题，到 20 世纪 40 年代已经对其有了充分的了解，但是解决过程需要冗长复杂的数学计算。又过去了几年，仍然没有人能够让这个问题的解法变得简单易懂。

1945年，H.W.Bode给出了一套分析反馈系统稳定性的图解方法。在那以前，反馈系统的分析要使用乘法，因此传递函数的计算是一项费时费力的辛苦活。Bode提出了一套对数方法，将原本计算反馈系统稳定性需要的复杂数学推导，转化成了简单直观的图解法。自此，反馈系统的设计不再是一门被少数精通数学的电气工程师独占的“绝学”。任何一名电气工程师都可以用Bode的方法分析反馈电路的稳定性，反馈电路的实际应用从此增多，运算放大器也变得易懂。然而，直到计算机和传感器的时代降临，运算放大器的实际需求才开始大量出现。

1.3 作为基本元件的运算放大器的诞生

最早的计算机是模拟计算机，其中有许多对电压信号进行数学计算的模拟电路单元，将这些单元和无源元件连接起来就可以编程。模拟计算机的核心正是Harry的发明——一种称作运算放大器的器件。通过改变连接方式，运算放大器可以对输入信号进行加减乘除、微分和积分等数学运算。运算放大器正是因此得名，而它的简称就是我们耳熟能详的运放。

那段时间，通用模拟计算机成为了大学和大公司实验室里研究工作的关键工具。尽管早期的运放是针对模拟计算机设计的，但人们很快发现，这些运放还有他用，成为物理实验室中趁手的器件。当时，实验技术还对传感器的信号调理提出了需求，这成为了运放的另一应用领域。信号调理这一应用领域逐渐扩展，对运放的需求也超过了模拟计算机对运放的需求。

硬连接的局限导致模拟计算机的应用逐渐减少。后来，模拟计算机逐渐被数字计算机取代，运放由于在通用模拟领域的重要性而没有随之消亡。最终，模拟计算机彻底让位于数字计算机（对实时测量来说很可惜），但由于测量应用有增无减，运放的需求也随之增长。

1.3.1 电子管时代

在晶体管广泛使用之前，最早的信号调理用运放是用电子管制造的，因此又大又笨重。20世纪50年代出现了工作电压较低的小型电子管，运放的体积随之缩小，能达到和建房用的砖头一样大小。因此当时的运放模块有个俗名叫“砖块”。随着电子管和其他元件的微型化，运放渐渐缩小到了标准八脚电子管的大小。

最早供应市场的运放之一是George A. Philbrick Research公司出品的K2-W型。这种运放包含两个电子管，供电电压是 $\pm 300\text{V}$ ！若这么高的电压都没有让你心生敬畏，那么它的全差分特性一定会令你大吃一惊。与更常见的单端输出运放不同，全差分运放有两个输出：一个同相输出和一个反相输出。这就需要闭合两条反馈环路，而不是像单端输出运放中那样只有一条。先别害怕，这两条反馈环路需要的元件的值完全相同，因而并不需要全新的设计方法。如今，全差分运放又得新生，因为它是驱动全差分模数转换器（ADC）的理想元件。全差分运放还可以用来驱动差分信号，如数字用户线路（DSL）和 600Ω 平衡音频电路。可以说，运放已经历一次轮回。

1.3.2 晶体管时代

20世纪60年代，晶体管的大量上市使运放的体积缩小到了几个立方英寸，但是“砖块”的俗名仍然沿用。如今，任何灌胶封装或采用其他非集成电路封装方式的电路模块都可以称作

“砖块”。大多数早期的运放针对特定的应用领域制造，因此未必通用。当时，运放都是专用产品，不同厂家生产的运放规格和封装都不一样，因此大都是独家供应的。

1.3.3 集成电路时代

20世纪50年代末到60年代早期，人们开始研发集成电路（IC），不过直到60年代中期，仙童公司才推出 $\mu\text{A}709$ 。它由Robert J. Widler设计，是第一种在商业上获得成功的集成运放。 $\mu\text{A}709$ 有一些问题，但是能干的工程师可以克服这些问题并把它应用到不同的模拟电路中。 $\mu\text{A}709$ 最主要的弱点是稳定性：它需要进行外部补偿。另外， $\mu\text{A}709$ 对外部环境相当敏感，任何不利的条件都可能使其自毁。 $\mu\text{A}709$ 不稳定性的影响一直持续到现在：由于存在错误使用的问题，如今市场上已经很少有未补偿的运放。如今，稳定性仍然是人们对运放电路设计中理解最少的问题之一，也是运放最容易被误用的方面之一。即使是有多年模拟设计经验的工程师，对这一问题也没有统一的意见。然而，明智的工程师会仔细阅读运放的数据手册，使运放的闭环增益不低于规范中指定的值。这可能是反直觉的，然而，运放在规定的最低增益下最不稳定。后面的章节将深入讨论这一现象。

$\mu\text{A}741$ 在 $\mu\text{A}709$ 之后推出。它是一种内部补偿运放，只要在数据手册要求的条件下使用，就不需要外部补偿电路。另外，它也比 $\mu\text{A}709$ 更能容忍外部条件的变化。相比 $\mu\text{A}709$ 来说， $\mu\text{A}741$ 留下了更多的正面遗产：事实上741这个元件型号像2N2222三极管或1N4148二极管一样深入人心，工程师提起运放时，一般总是首先想到它。只要不出现严重错误， $\mu\text{A}741$ 总会工作，这与 $\mu\text{A}709$ 不同，也是它深受几代工程师喜爱并长盛不衰的原因之一。 $\mu\text{A}741$ 的供电电压是 $\pm 15\text{V}$ ，这导致了数百种提供 $\pm 15\text{V}$ 电压的电源器件的出现。这一情况正如晶体管-晶体管逻辑电路（TTL）之于 $+5\text{V}$ 电压或RS232串行接口之于 $\pm 12\text{V}$ 电压一样。此后多年，每种新推出的运放都采用和 $\mu\text{A}741$ 一样的 $\pm 15\text{V}$ 供电电压。甚至到今天，在要求宽动态范围和高耐用性时， $\mu\text{A}741$ 依旧是很好的选择。

自 $\mu\text{A}741$ 之后，每年都有数不尽的新型集成运放推出，它们的性能和可靠性也日新月异。现在，任何能够读懂数据手册的人都可以用运放来设计模拟电路。如今，集成运放已经发展为蔚为大观：从增益带宽积5kHz的极低功耗低频运放到超过3GHz的高频运放，从0.9V供电就可以保证正常工作的低压运放到能承受1000V供电电压不致损坏的高压运放，都有产品供应。运放的输入电流和输入失调电压已经小到客户在进货复验时难以测量的程度。运放真正成为了“万能”的模拟集成电路，可以用于各种模拟应用领域，用作线路驱动器、放大器、电平转换器、振荡器、滤波器、信号调理电路、执行器驱动、电流源、电压源，等等。

需要注意的是，任何一种运放都不可能适合所有的应用。可以理想地用作传感器接口的运放可能在射频（RF）应用中完全无法工作。类似地，有着优良的射频性能的运放的直流指标可能糟糕到可怕。厂家供应的成百上千种型号的运放以略微不同的方式进行优化，设计师的任务就是从大量型号中找出适合具体应用的种类。本书讨论完成这一任务的方法，至少可以应用于信号链中运放的选择。

本书讨论使用运放进行的电路设计，而不是运放内部的电路。本书不涉及过于繁复的计算。在进行例行设计时，工程师不应该干数学家的活。数学发挥作用的地方是较为深入的应用，而

不是在例行设计中一遍又一遍地简单重复。读者可以从适合自己水平的部分开始阅读本书，很快进入较为深入的论题。

运放在电路中是非常基本的元件，它也将继续成为模拟电路设计中的关键部分。随着电子设备的更新换代，越来越多的功能将集成在硅片上，越来越多的模拟电路也集成了进去。不要担心模拟电路的前景，随着数字电路应用的增加，模拟电路的应用也会同样增长。因为数据主要来源于现实世界，接口也发生在电路和现实世界之间，而现实世界是一个“模拟”的世界。因此，新一代的电子设备会对模拟电路提出新的要求。为了满足新的要求，人们也会研发新型的运放。直到遥远的未来，模拟电路设计和运放电路设计都会是电路设计的基本技能。

参考文献

1. H. S. Black, *Stabilized Feedback Amplifiers*, Bell System Technical Journal 13 (January) (1934).

第 2 章

运放基础回顾

2.1 引言

虽然本书尽量少使用数学，但是理解模拟电路毕竟离不开代数运算。下面介绍一些数学知识，并讲解它们在本书中的实际用法。电路由无源和有源元件组成。元件以特定方式连接，以便完成所需功能。元件连接而成的这种结构称为电路（circuit），有时也称作电路组态（circuit configuration，也称“电路结构”）。

当设计进行到电路层面时，必须列出电路方程，以预测和分析电路的性能。这里的回顾无意取代教科书中严格的电路建模方法，只准备讨论几个应当记住的常用公式。

有多少位电子工程师，就有多少种电路分析的方法。如果方程列得正确，每种方法都能得到一样的结果。不过，有些电路分析方法比较简单，不必进行所有的计算，这些方法也将在下面讲解。

2.2 基本概念

2.2.1 欧姆定律

欧姆定律 [式 (2-1)] 是电子学最基本的定律。欧姆定律可以用于单个元件、任意一组元件的组合或一个完整的电路。当流过电路任意部分的电流已知时，电路这一部分上的电压降等于电流和电路这一部分电阻的乘积：

$$V = IR \quad (2-1)$$

图 2-1 中，电流 I 流过总电阻 R 时，电阻 R 上的电压降为 V 。

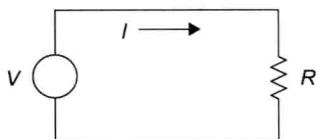


图 2-1 欧姆定律

2.2.2 分压器规则

当电路没有输出负载时，分压器规则可以用来计算电路的输出电压。如图 2-2 所示，假设流过电路中所有元件的电流相同，使用欧姆定律得 $V=I(R_1+R_2)$ ，变换得式 (2-2)。在输出电阻 R_2 上使用欧姆定律，可得式 (2-3)。

$$I = \frac{V}{R_1 + R_2} \quad (2-2)$$

$$V_{\text{OUT}} = IR_2 \quad (2-3)$$

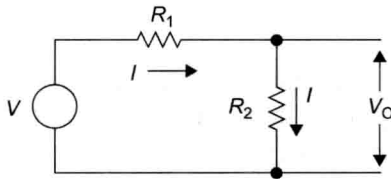


图 2-2 分压器规则

将式 (2-2) 代入式 (2-3)，可得分压器规则 [式 (2-4)]。

$$V_{\text{OUT}} = V \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad (2-4)$$

分压器规则很好记：输出电阻除以电路总电阻，再将这一比例乘以输入电压，即得输出电压。应当记住，分压器规则总是假定输出电阻上没有负载。如果输出电阻上并联了另外的元件，这一公式就不成立了。幸好，连在分压器电路后面的大部分电路都是输入电路，而输入电路多是高阻抗的。当有一个固定负载与输出电阻并联时，负载电阻和输出电阻的并联等效值可直接用于分压器计算，不会带来误差。当负载电阻是输出电阻的 10 倍时，很多人会忽略负载电阻，但这会带来 10% 的误差。

2.2.3 叠加定理

叠加定理对任何线性电路都适用。实质上，当存在独立的多个电压源或电流源时，可以分别计算每个源产生的电压或电流，然后计算出这些结果的代数和。因此不必写出一连串的回路或结点方程，从而简化了计算。图 2-3 给出了一个例子。

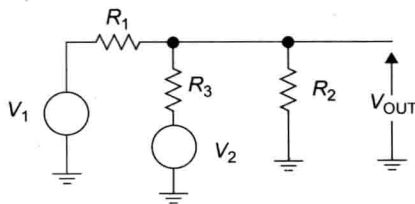


图 2-3 叠加定理示例

当 V_1 接地时, V_2 、 R_1 和 R_2 的并联电阻、 R_3 三者组成一个分压器。使用分压器规则 [式 (2-4)] 可以计算出这一电路的输出电压 V_{OUT2} 。该电路如图 2-4 所示。使用分压器规则得

$$V_{OUT2} = V_2 \frac{R_1 \parallel R_2}{R_3 + R_1 \parallel R_2} \quad (2-5)$$

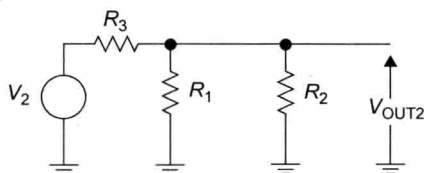


图 2-4 V_1 接地时的情况

同样, 当 V_2 接地时, 如图 2-5 所示, V_1 、 R_3 和 R_2 的并联电阻、 R_1 三者组成一个分压器。使用分压器规则可计算出 V_{OUT1} [式 (2-6)]。

$$V_{OUT1} = V_1 \frac{R_2 \parallel R_3}{R_1 + R_2 \parallel R_3} \quad (2-6)$$

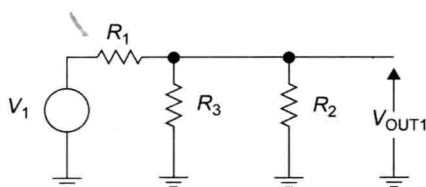


图 2-5 V_2 接地时的情况

对两个电压源完成计算后, 将计算结果相加, 可得最终解 [式 (2-7)]:

$$V_{OUT} = V_1 \frac{R_2 \parallel R_3}{R_1 + R_2 \parallel R_3} + V_2 \frac{R_1 \parallel R_2}{R_3 + R_1 \parallel R_2} \quad (2-7)$$

使用叠加定理得出的解形式简单, 便于理解。观察式 (2-7), 容易看出, 当两个电压源电压相等、极性相反, 并且 $R_1=R_3$ 时, 输出电压为零。

2.3 基本的运放电路

下面讨论最常使用的运放电路。这些电路中假设运放是理想的, 因此使用实际的运放元件时, 电路的性能会降低 (见 2.4 节)。尽管如此, 理想运放假设为运放电路设计提供了一个切入点, 也足够应付要求不太严格的应用领域。

我们简单定义一些术语如下。

- 增益: 包含运放的一级电路的输出电压与输入电压之比。
- 开环增益: 没有反馈时运放的增益。

- 反馈：运放输出的一部分按照与输入信号反相的方式反馈到输入^①。
- R_f ：反馈电阻，即连接运放的输出端与反相输入端的电阻。
- R_g ：增益电阻，即连接运放的反相输入端和地的电阻。

2.3.1 同相放大电路

同相放大电路的输入信号与同相输入端连接（图 2-6）。因此，对输入信号源来说，同相放大电路输入端呈现高阻抗。在理想运放条件下输入失调电压 $V_{OS}=V_E=0$ ，因此反相输入端必须处于与同相输入端相同的电位上。运放的输出端向 R_f 提供电流，直到反相输入端的电压为 V_{IN} ，从而使 R_g 上的电压也等于 V_{IN} 。

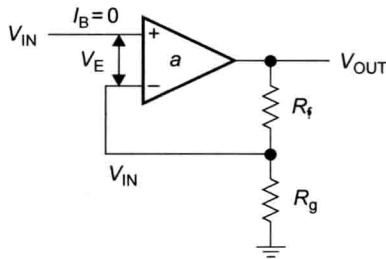


图 2-6 同相放大电路

使用分压器规则可以计算出 V_{IN} ： V_{OUT} 是分压器的输入，而 V_{IN} 是分压器的输出。由于运放的两个输入端均没有电流流入，我们可以使用分压器规则：首先写出式（2-8），经过变换的增益由式（2-9）给出。

$$V_{IN} = V_{OUT} \frac{R_g}{R_g + R_f} \quad (2-8)$$

$$\frac{V_{OUT}}{V_{IN}} = \frac{R_g + R_f}{R_g} = 1 + \frac{R_f}{R_g} \quad (2-9)$$

当 R_g 远远大于 R_f 时， (R_f/R_g) 趋近于 0，式（2-9）简化为式（2-10）：

$$V_{OUT}/V_{IN} = 1 \quad (2-10)$$

在这些条件下， $V_{OUT}/V_{IN}=1$ ，电路变为单位增益缓冲器，增益为 1。在单位增益缓冲器中， R_g 一般不连接（开路），不会改变效果； R_g 开路时， R_f 的值与增益无关，因此一般可以短路。但是有的运放在 R_f 短路时会自毁，因此很多缓冲器的设计中依然保留 R_f 。此时，缓冲器电路中的 R_f 则起到过压防护的作用，在过电压时限制流入反相输入端静电放电（ESD）结构的电流（一般小于 1mA），从而保护反相输入端免受过高电压伤害。此时电阻 R_f 可取任意值（经常使用 20kΩ）。在电流反馈运放电路中， R_f 绝对不能省去，因为它决定了电流反馈放大器的稳定性。

^① 本书中不加修饰的“反馈”（feedback）一词，一般指负反馈。——译者注

2.3.2 反相放大电路

在反相放大电路中，运放的同相输入端接地，如图 2-7 所示。我们前面假设，输入误差电压 $V_E=0$ ，因此反馈会使运放的反相输入端一直处于地电位（一般称作虚地，因为这一端并未实际接地，只是表现与实际的地类似）。假设流入运放输入端的电流为零，这样，流经 R_f 和 R_g 的电流相等。使用基尔霍夫定律，可以写出式 (2-11)。式中之所以加入负号，是因为这里是反相输入端。变换得式 (2-12)。

$$I_1 = \frac{V_{IN}}{R_g} = -I_2 = -\frac{V_{OUT}}{R_f} \quad (2-11)$$

$$\frac{V_{OUT}}{V_{IN}} = -\frac{R_f}{R_g} \quad (2-12)$$

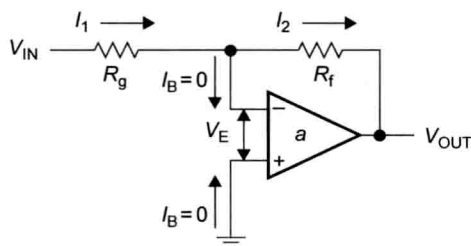


图 2-7 反相放大电路

注意到增益仅与反馈电阻和增益电阻有关，所以反馈实现了它的功能：使增益和运放本身的参数无关。实际的电阻取值取决于需要的输入阻抗大小。根据式 (2-12)，如果 $R_f=10\text{k}\Omega$ ， $R_g=10\text{k}\Omega$ ，那么增益为-1； $R_f=100\text{k}\Omega$ 和 $R_g=100\text{k}\Omega$ 时，增益仍然为-1。输入阻抗是 $10\text{k}\Omega$ 或 $100\text{k}\Omega$ ，决定了吸收电流的大小、杂散电容的效应和其他一些问题，但是并不影响增益，因为增益是由 R_f/R_g 的比例决定的。

最后要说明一点：输出信号是输入信号经过放大和反相之后的结果。电路的输入阻抗为 R_g ，因为反相输入端保持在地电位。

2.3.3 加法器

对反相放大电路增加更多的输入，可以构成加法器（如图 2-8 所示）。反馈使电阻与运放反相输入端相连的一端保持虚地，因此，增加新的输入并不影响已有的输入。

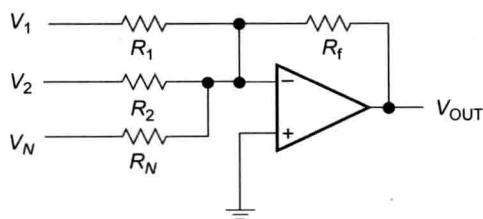


图 2-8 加法器电路