

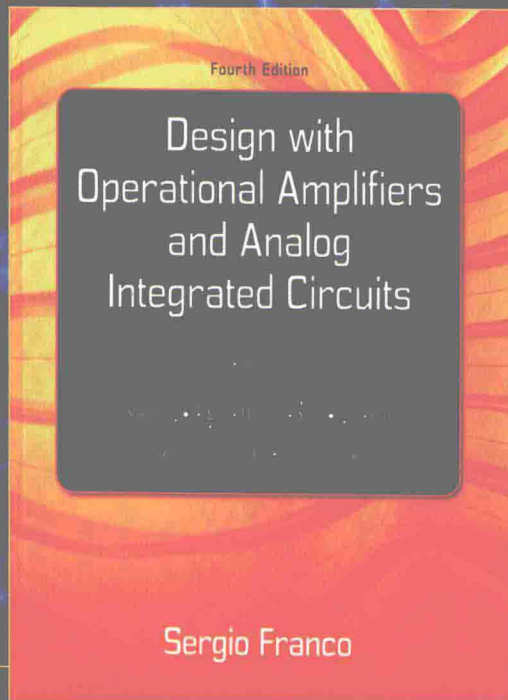
基于运算放大器和模拟 集成电路的电路设计

(原书第4版·精编版)

[美] 赛尔吉欧·弗朗哥 (Sergio Franco) 著

何乐年 奚剑雄 等译

*Design with Operational
Amplifiers and Analog
Integrated Circuits
Fourth Edition*

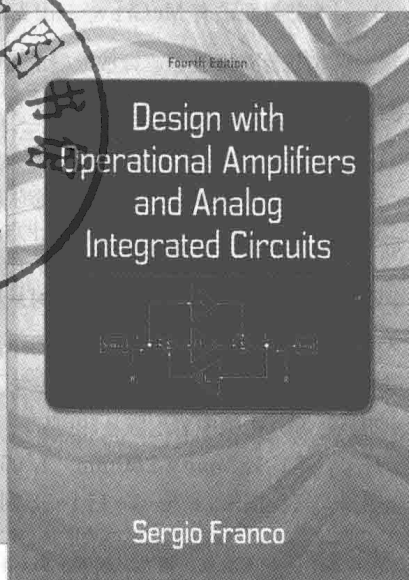


基于运算放大器和模拟 集成电路的电路设计

(原书第4版·精编版)

[美] 赛尔吉欧·弗朗哥 (Sergio Franco) 著
何乐年 奚剑雄 等译

*Design with Operational
Amplifiers and Analog
Integrated Circuits
Fourth Edition*



图书在版编目 (CIP) 数据

基于运算放大器和模拟集成电路的电路设计 (原书第 4 版·精编版) / (美) 赛尔吉欧·弗朗哥 (Sergio Franco) 著; 何乐年等译. —北京: 机械工业出版社, 2017.10
(国外电子与电气工程技术丛书)

书名原文: Design with Operational Amplifiers and Analog Integrated Circuits, Fourth Edition

ISBN 978-7-111-58149-9

I. 基… II. ①赛… ②何… III. ①运算放大器—电路设计—英文 ②模拟集成电路—电路设计—英文 IV. ① TN722.702 ② TN431.102

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 243369 号

本书版权登记号: 图字 01-2014-7264

Sergio Franco: Design with Operational Amplifiers and Analog Integrated Circuits, Fourth Edition (978-0-07-802816-8)

Copyright © 2015 by McGraw-Hill Education.

All Rights reserved. No part of this publication may be reproduced or transmitted in any form or by any means, electronic or mechanical, including without limitation photocopying, recording, taping, or any database, information or retrieval system, without the prior written permission of the publisher.

This authorized Chinese adaptation is jointly published by McGraw-Hill Education and China Machine Press. This edition is authorized for sale in the People's Republic of China only, excluding Hong Kong, Macao SAR and Taiwan.

Copyright © 2018 by McGraw-Hill Education and China Machine Press.

版权所有。未经出版人事先书面许可, 对本出版物的任何部分不得以任何方式或途径复制或传播, 包括但不限于复印、录制、录音, 或通过任何数据库、信息或可检索的系统。

本授权中文简体字改编版由麦格劳-希尔(亚洲)教育出版公司和机械工业出版社合作出版。此版本经授权仅限在中华人民共和国境内(不包括香港特别行政区、澳门特别行政区和台湾)销售。

版权 © 2018 由麦格劳-希尔(亚洲)教育出版公司与机械工业出版社所有。

本书封面贴有 McGraw-Hill Education 公司防伪标签, 无标签者不得销售。

本书全面论述了运算放大器的原理与特性参数, 以及以其为核心构建的各种模拟集成电路原理、设计方法和应用。在电路设计方面, 以业界通用的器件为背景, 对应用中的许多问题进行了详细的分析。本中文精编版书共分 9 章, 包括三个部分。第一部分为第 1~2 章, 以运算放大器为理想器件介绍它的基本原理和应用, 包括运算放大器基础和电阻反馈电路。第二部分为第 3~6 章, 主要介绍运算放大器的诸多实际问题, 如静态和动态限制、噪声以及稳定性问题。第三部分为 7~9 章, 主要介绍了基于运算放大器的各种应用电路的设计方法, 包括非线性电路、信号发生器、电压基准与稳压电源等。

本书可以作为电子信息工程、电子科学与技术、微电子科学与工程等本科专业高年级以及相关研究生学生的教科书或参考书, 对从事模拟集成电路设计与应用的工程师们也有参考价值。

出版发行: 机械工业出版社 (北京市西城区百万庄大街 22 号 邮政编码: 100037)

责任编辑: 张梦玲

责任校对: 殷虹

印刷: 中国电影出版社印刷厂

版次: 2018 年 1 月第 1 版第 1 次印刷

开本: 185mm × 260mm 1/16

印张: 22

书号: ISBN 978-7-111-58149-9

定价: 89.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

客服热线: (010) 88378991 88361066

投稿热线: (010) 88379604

购书热线: (010) 68326294 88379649 68995259

读者信箱: hzjsj@hzbook.com

版权所有·侵权必究

封底无防伪标均为盗版

本书法律顾问: 北京大成律师事务所 韩光/邹晓东

出版者的话

文艺复兴以来，源远流长的科学精神和逐步形成的学术规范，使西方国家在自然科学的各个领域取得了垄断性的优势；也正是这样的传统，使美国在信息技术发展的六十多年间名家辈出、独领风骚。在商业化的进程中，美国的产业界与教育界越来越紧密地结合，信息学科中的许多泰山北斗同时身处科研和教学的最前线，由此而产生的经典科学著作，不仅擘划了研究的范畴，还揭示了学术的源变，既遵循学术规范，又自有学者个性，其价值并不会因年月的流逝而减退。

近年，在全球信息化大潮的推动下，我国的信息产业发展迅猛，对专业人才的需求日益迫切。这对我国教育界和出版界都既是机遇，也是挑战；而专业教材的建设在教育战略上显得举足轻重。在我国信息技术发展时间较短的现状下，美国等发达国家在其信息科学发展的几十年间积淀和发展的经典教材仍有许多值得借鉴之处。因此，引进一批国外优秀教材将对我国教育事业的发展起到积极的推动作用，也是与世界接轨、建设真正的世界一流大学的必由之路。

机械工业出版社华章公司较早意识到“出版要为教育服务”。自1998年开始，我们就将工作重点放在了遴选、移译国外优秀教材上。经过多年的不懈努力，我们与 Pearson、McGraw-Hill、Elsevier、John Wiley & Sons、CRC、Springer 等世界著名出版公司建立了良好的合作关系，从他们现有的数百种教材中甄选出 Alan V. Oppenheim、Thomas L. Floyd、Charles K. Alexander、Behzad Razavi、John G. Proakis、Stephen Brown、Allan R. Hambley、Albert Malvino、Peter Wilson、H. Vincent Poor、Hassan K. Khalil、Gene F. Franklin、Rex Miller 等大师名家的经典教材，以“国外电子与电气技术丛书”和“国外工业控制与智能制造丛书”为系列出版，供读者学习、研究及珍藏。这些书籍在读者中树立了良好的口碑，并被许多高校采用为正式教材和参考书籍。其影印版“经典原版书库”作为姊妹篇也越来越多被实施双语教学的学校所采用。

权威的作者、经典的教材、一流的译者、严格的审校、精细的编辑，这些因素使我们的图书有了质量的保证。随着电气与电子信息学科、自动化、人工智能等建设的不断完善和教材改革的逐渐深化，教育界对国外电气与电子信息类、控制类、智能制造类等相关教材的需求和应用都将步入一个新的阶段，我们的目标是尽善尽美，而反馈的意见正是我们达到这一终极目标的重要帮助。华章公司欢迎老师和读者对我们的工作提出建议或给予指正，我们的联系方式如下：

华章网站：www.hzbook.com

电子邮件：hzsj@hzbook.com

联系电话：(010)88379604

联系地址：北京市西城区百万庄南街1号

邮政编码：100037



华章科技图书出版中心

译者序

本书是一本关于模拟集成电路的核心器件——运算放大器及其应用电路，从基础概念知识到工程设计紧密结合的教科书。译者曾于2008年，在浙江大学电气工程学院采用此教材，同时参与了电子信息工程本科“模拟信号及系统设计”的课程建设，深感此书的精深。

本书作者 Sergio Franco 教授在模拟集成电路设计方向的研究与教学方面具有丰富的经验，所编著的本书在产业界和教育界都具有相当大的影响。运算放大器是应用最为广泛的一类模拟器件，以它为核心组成的各类模拟集成电路在工业控制、仪器仪表、电力电子等领域是不可或缺的，它也是系统芯片(SOC)不可缺少的组成部分。本书全面系统地分析了运算放大器的原理与特性，以及以其为核心的各类模拟集成电路的原理和实现方法，并给出了相关实际问题及其解决方法，特别是给出了不少具有实际参考价值的经验设计，是国内同类型参考书中不常见的，尤其是对于从事模拟集成电路设计的学生和技术人员来说，可以由此学习从更高的电路层次上研究和设计模拟集成电路。

本书第4版增加或扩展了运算放大器的负反馈、动态和频率特性概念、开关调节器等内容，并重新设计了例题和25%的习题。

由于考虑到系统性，本中文版省去了原书中有源滤波器、D-A和A-D转换器、非线性放大器和锁相环的相应章节，即原书的第3章、第4章、第12章、第13章。

本书由何乐年教授和奚剑雄研究员翻译并统稿，参加本书翻译和校对工作的还有刘侃、冷亚辉、吴旭烽、陈琛、蒋一帆、陈敬远、李浙鲁、高红波等。本书在翻译过程中还参考了西安交通大学刘树棠教授等翻译的第3版。在此，对所有为本书出版提供帮助的人们表示诚挚的谢意！

由于译者水平有限，而本书所涵盖的专业领域相当广，译文中难免有误或不妥之处，敬请读者批评指正。

译者

2017年8月

于浙江大学微电子学院

在近十多年中，由于数字电子技术的飞速发展，有很多关于几乎不再需要模拟电路的预言。在远没有证实这种预言是否正确之前，这一论点已经挑起了相反的辩驳，可以概括为：“倘若你无法用数字的方法来实现设计的话，就可以用模拟的方式来完成。”更为甚者，一般都有这样一种误解，比起数字设计这种系统化的技术而言，似乎模拟设计是一种更为玄乎和捉摸不定的艺术。对于受困惑的学生来说如何来理解这一争论？继续选修某些模拟电子学方面的课程是否值得？抑或最好还是仅仅将精力集中在数字电路方面？

毋庸置疑，传统上隶属于模拟电子学领域的许多功能，今天都用数字形式实现了。其中最为常见的例子就是数字音响。在这个应用中，由拾音器和其他的声音传感器产生的模拟信号被一些放大器和滤波器进行适当的调整，然后转换为数字形式做进一步处理，如混合、编辑和产生某些特殊效果，以及更多的是为了进行传输、存储和提取等琐碎却同样重要的工作。最后，数字信号被转换回模拟信号并经由扬声器播放出来。之所以想用数字方法实现尽可能多的功能的主要理由之一是数字电路的高可靠性和高灵活性。然而，物理世界本来就是模拟的。这表明，总是需要模拟电路去适应这些物理信号，像与传感器相连的电路，以及把模拟信息转换为数字信息，再从数字转换到模拟以供物理世界进一步处理的模拟电路。再者，考虑到速度和功率的因素，采用模拟前端电路更具优势。新的应用领域不断出现，无线通信就是一个很好的例子。

的确如此，当今的许多应用是由混合模式的集成电路(混合模式 IC)和系统组成的，它们依赖模拟电路来与物理世界对接，而数字电路则用作处理和控制。即便这个模拟电路或许仅占这块芯片面积的一小部分，但它往往却是设计中极具挑战性的部分，并且在整个系统的性能上起着关键作用。在这一方面，通常所谓的模拟设计师就要用明确的数字工艺为实现模拟功能的任务构思出独创性的解决方案；滤波中的开关电容技术和数据转换中的 Σ -D 技术就是大家所熟知的例子。出于以上原因，企业对有能力的模拟设计师的需求仍然很强盛。即使是纯数字电路，当将它们推向运算极限时，它们还是要呈现模拟的行为特性。因此，对模拟电路设计原理和技术的牢固掌握在任何 IC(无论是数字或是纯模拟的 IC)设计中都是一笔宝贵的财富。

关于本书

本书的目的是利用实际的元器件和应用说明一般的模拟原理和设计方法学。本书旨在作为本科生和研究生模拟集成电路(模拟 IC)设计和应用方面的教科书，以及为工程师们提供实际参考。读者在电子学方面应具有初步基础，熟悉频域分析方法，并会使用 PSpice。尽管本书包括的内容足够作为两个学期的课程，但是经适当挑选之后也能作为一个学期的基础课程。由于本书及其每一章一般都是按从简到繁、先易后难的顺序编写的，所以挑选过程是极易完成的。

在旧金山州立大学(San Francisco State University)，这本书可作为两个一学期课程的系列课对待：一个是本科高年级，另一个是在研究生层次上。在本科高年级的课程中，可选第 1~3 章、第 5 章和第 6 章，以及第 9 章和第 10 章的大部分；在研究生的课程中，可选择全部。作为本科高年级的课程，它是与模拟 IC 制造和设计课程并行的。为了更有效地使用模拟 IC，用户略知一点它们内部的工作原理(即便至少是定性的)是很重要的。为了满足这种需要，本书在一种设计决策上给出了工艺和电路因素的直观说明。

第 4 版新增内容

新版的主要特点是：①介绍了一个全新版本的负反馈，②增加了运算放大器动态和频率概念的介绍，③扩展了开关调节器相关内容的覆盖范围，④对三极管和 CMOS 技术进行更平衡的介绍，⑤增加了使用 PSpice 的内容，以及⑥重新设计了例题和 25% 的章末习题，体现了版本更新。

此前版本对负反馈的阐述是从运算放大器使用者的特殊视角出发，而第 4 版提供了更为宽广的视角，这在其他诸如开关调节器和锁相环的领域上是有用的。新版本提供了双端口分析(two-port analysis)和反馈比分析(return-ratio analysis)，在强调相似性的同时也强调区别，尝试消除这两者之间的混淆(为了保证区分，环路增益和反馈系数在双端口分析中使用 L 和 b ，而在反馈比分析中使用 T 和 β)。

当然，新版本负反馈包含对运算放大器动态和频率补偿的扩展重写。在这里，第 4 版采用了由 R. D. Middlebrook 为环路测量提出的电压/电流注入技术。

考虑到当今模拟电子技术中便携设备电源管理的重要性，第 4 版扩展了对开关调节器的覆盖。对电流控制和斜坡补偿，以及诸如右半平面零点和误差放大器设计等稳定性问题也给予了更多的关注。

本书采用了大量的 SPICE 仿真(使用电路图代替了早先版本中的网表)，以便验证对手工计算来说计算和研究太过复杂的高阶效应。SPICE 当今有多种可用的版本，所以，相对于指定某一特定的版本，对于本版选定的示例，学生能够在选定的 SPICE 版本上快速重绘。

在之前的版本中，正文的内容通过仔细设置例题和章尾的习题得到强化，通过这些来强调工程师在日常工作中所需的直觉、物理洞察力和解决问题的方法学。

为了用一种超脱于最新工艺趋势的方式来写一般性和最基本的原理，第 4 版精选了已确立并广泛形成文件的元器件和工艺作为载体来阐明这样的原理。然而，只要有必要，还是要让读者了解一些更为现代的替代方案，鼓励读者自行上网查找这些方案。

本书内容[⊖]

尽管没有明确指出，本书实际上是由三个部分组成的。第一部分(第 1~4 章)基于将运算放大器作为一种理想器件来介绍其基本概念和应用。我们觉得在学生着手处理并评价实际器件限制以前，需要对理想(或接近理想)运算放大器的学习树立足够的自信。各种运算放大器的限制是第二部分(第 5~8 章)的主要内容，在这一版中，这方面的内容要比此前的版本更为系统和详细。最后，第三部分(第 9~13 章)基于前两部分介绍的基础，致力于讲解面向设计的各种应用。下面是各章内容的简要描述。

第 1 章复习基本放大器概念，包括负反馈概念。重点内容放在环路增益作为电路性能的一种度量标准上。环路增益的概念通过双端口分析和反馈比分析来进行阐述，本章还讲解了这两种方法之间的相似和不同，向学生介绍简化的 PSpice 模型，这一模型将随着本书的进程逐渐复杂和精确。如果教师发现本书对环路增益的介绍过早，可以跳过这一章，而在稍后某个更为合适的时机再重新回到这一论题上来。由于各节和各章都尽量独立编排，所以这类内容易于重新组织。另外，章末的习题也是按节组成的。

第 2 章介绍各种仪器仪表和传感放大器，以及 I - V 、 V - I 和 I - I 转换器。这一章将重点放在各种反馈拓扑结构和环路增益 T 的作用上。

第 3 章包含一阶滤波器、音频滤波器和常用的二阶滤波器，像 KRC、多重反馈、状

⊖ 此处介绍的是英文版原书的内容安排，本中文精编版的内容安排与此有不同，具体编排见正文内容。
——编辑注

态变量和双二阶拓扑结构等二阶滤波器。本章重点是复平面系统的概念，并以滤波器灵敏度的讨论结束。(本中文版未收录)

想深入了解滤波器的读者会发现第4章(本中文版未收录)是有用的。这一章包括用级联和直接的方法讨论高阶滤波器的综合。另外，这些方法既是针对有源RC滤波器，又是针对开关电容(SC)滤波器的情况提出的。

第5章聚焦于由输入端引起的运算放大器误差，诸如 V_{OS} 、 I_B 、 I_{OS} 、CMRR、PSRR和漂移，并与它们的极限情况一起讨论。本章也向学生介绍技术指标和性能参数的说明、PSpice的宏模型，以及不同的工艺和拓扑。(本中文版第3章)

第6章着重讨论频域和时域中的动态极限，并研究它们对电阻性电路和基于理想运算放大器模型的滤波器的影响。详细地对电压反馈和电流反馈进行比较，并广泛应用PSpice对有代表性的电路在频率响应和暂态响应上做可视化展示。在已经掌握了理想或接近理想运算放大器的前4章内容之后，学生就可更加好地理解和评价由实际器件的限制造成的结果。(本中文版第4章)

将第5、6章介绍的原理结合起来，自然而然地就引入了第7章(本中文版第5章)有关交流噪声的内容。噪声计算和估计代表着另一个领域，其中PSpice是一种非常有用的工具。

第二部分以第8章(本中文版第6章)的稳定性专题结束。通过负反馈来增强收敛性需要考虑额外频率补偿，也包含对运算放大器内部和外部的考虑。第4版采用了由R. D. Middlebrook为测量环路而提出的电压/电流注入技术。同样，PSpice用来观察已给出的不同频率补偿技术的效果。

从第9章开始的第三部分涉及非线性应用。这里，非线性特性要么源自没有反馈(电压比较器)，要么是存在反馈但属于正反馈类型(施密特触发器)，或有负反馈但是应用了像二极管和开关(精密整流器、峰值检波器、跟踪保持放大器)这样一类非线性元件。(本中文版第7章)

第10章包含各种信号发生器，其中有文氏桥和正交振荡器、多谐振荡器、定时器、函数发生器，以及V-F和F-V转换器。(本中文版第8章)

第11章专注于调节器。由电压基准开始，从线性电压调节器介绍到开关调节器。本章重点关注的问题包括电流控制和斜坡补偿，以及误差放大器设计的稳定性问题和boost变换器中右半平面零点的影响问题。(本中文版第9章)

第12章处理数据转换。用系统的方式处理数据转换器的技术要求，并给出多种DAC的应用。本章以过采样转换原理和转换器作为结束。关于这一专题也有大量相关专著，所以这一章仅是让学生了解最基本的知识。(本中文版未收录)

第13章用各种非线性电路作为结束，其中有对数/反对数放大器、模拟乘法器，以及用一种简要接触gm-C滤波器的方式构成的运算跨导放大器。这一章最后介绍锁相环。另外，这一章还将前面各章所涉及的重要内容组合在一起介绍。(本中文版未收录)

网站

本书的配套网站是<http://www.mhhe.com/franco>，其上有各种供教师和学生使用的资源。教师资源包含习题解答、一组PowerPoint课件和指向勘误表的链接。

www.CourseSmart.com有本书的电子书。用此电子书，你不仅可以节省纸质课本的费用，减少对环境的影响，同时，还能利用强大的网络工具来学习。CourseSmart电子书能够在线阅读或下载到电脑上。电子书允许读者进行全文搜索，添加高亮标记和笔记，以及同他人分享笔记。CourseSmart拥有可在任何位置访问的最大的电子书库。访问www.CourseSmart.com可了解更多内容并试读示例章节。

致谢

第4版的变化是对工业界和学术界中许多读者的反馈意见的一种回应，我对那些花费宝贵时间给我发电子邮件的所有人表示诚挚的谢意。另外，下面提到的评阅人曾对以前的版本给过详细的评阅并对当前的修订版本提出过宝贵的建议。所提建议都经过仔细斟酌过，仅有一部分被兑现的原因，绝不是麻木不仁或熟视无睹，而是由于出版的限制，或者是个人观点不同。对所有的评阅者致以深深的感谢：Aydin Karsilayan, Texas A&M University; Paul T. Kolen, San Diego State University; Jih-Sheng (Jason) Lai, Virginia Tech; Andrew Rusek, Oakland University; Ashok Srivastava, Louisiana State University; S. Yuvarajan, North Dakota State University。

我仍然要对早先版本的评阅者表示感谢，他们是：Stanley G. Burns, Iowa State University; Michael M. Cirovic, California Polytechnic State University-San Luis Obispo; J. Alvin Connelly, Georgia Institute of Technology; William J. Eccles, Rose-Hulman Institute of Technology; Amir Farhat, Northeastern University; Ward J. Helms, University of Washington; Frank H. Hielscher, Lehigh University; Richard C. Jaeger, Auburn University; Franco Maddaleno, Politecnico di Torino, Italy; Dragan Maksimovic, University of Colorado-Boulder; Philip C. Munro, Youngstown State University; Thomas G. Owen, University of North Carolina-Charlotte; Dr. Guillermo Rico, New Mexico State University; Mahmoud F. Wagdy, California State University-Long Beach; Arthur B. Williams, Coherent Communications Systems Corporation; and Subbaraya Yuvarajan, North Dakota State University。最后，对我的妻子 Diana May 表示感谢，谢谢她的鼓励和坚定不移的支持。

Sergio Franco

旧金山，加利福尼亚州，2014

出版者的话
译者序
前言

第 1 章 运算放大器基础	1
1.1 放大器基础	2
1.2 运算放大器	4
1.3 基本运算放大器结构	5
1.4 理想运算放大器电路分析	10
1.5 负反馈	15
1.6 运算放大器电路中的反馈	20
1.7 环路增益和布莱克曼公式	25
1.8 运算放大器的供电	31
习题	35
参考文献	42
附录	42
第 2 章 电阻反馈电路	44
2.1 电流-电压转换器	44
2.2 电压-电流转换器	46
2.3 电流放大器	51
2.4 差分放大器	52
2.5 仪表放大器	56
2.6 仪表应用	61
2.7 传感器桥式放大器	64
习题	69
参考文献	73
第 3 章 静态运算放大器的限制	74
3.1 简化运算放大器电路图	75
3.2 输入偏置电流和输出失调电流	79
3.3 低输入偏置电流运放	82
3.4 输入失调电压	85
3.5 低输入失调电压	89
3.6 输入失调误差和补偿技术	92
3.7 输入电压范围和输出电压摆动	95
3.8 最大额定值	100
习题	101

参考文献	104
附录	105
第 4 章 动态运算放大器的限制	113
4.1 开环响应	113
4.2 闭环响应	117
4.3 输入和输出阻抗	122
4.4 瞬态响应	125
4.5 有限增益带宽积对积分电路的影响	130
4.6 有限 GBP 对滤波器的影响	135
4.7 电流反馈放大器	139
习题	146
参考文献	150
第 5 章 噪声	151
5.1 噪声特性	152
5.2 噪声的动态分析	155
5.3 噪声源	158
5.4 运算放大器中的噪声	162
5.5 光敏二极管放大器中的噪声	167
5.6 低噪声运算放大器	170
习题	172
参考文献	175
第 6 章 稳定性	176
6.1 稳定性问题	176
6.2 相位裕度和增益裕度的测量	183
6.3 运算放大器的频率补偿	188
6.4 有反馈极点的运算放大器电路	197
6.5 输入时延补偿和超前反馈补偿	203
6.6 电流反馈放大器电路的稳定性	207
6.7 复合放大器	209
习题	213
参考文献	218
第 7 章 非线性电路	219
7.1 电压比较器	219

7.2 比较器应用	224	习题	284
7.3 施密特触发器	230	参考文献	287
7.4 精密整流器	234	第9章 电压基准与稳压电源	288
7.5 模拟开关	238	9.1 性能要求	289
7.6 峰值检测器	242	9.2 电压基准	293
7.7 采样-保持放大器	245	9.3 电压基准应用	297
习题	249	9.4 线性稳压电源	300
参考文献	252	9.5 线性稳压电源应用	304
第8章 信号发生器	253	9.6 开关稳压电源	310
8.1 正弦波发生器	254	9.7 误差放大器	317
8.2 多谐振荡器	258	9.8 电压模式控制	318
8.3 单片定时器	264	9.9 峰值电流模式控制(PCMC)	322
8.4 三角波发生器	268	9.10 boost 型变换器的 PCMC	330
8.5 锯齿波发生器	272	习题	335
8.6 单片波形发生器	273	参考文献	338
8.7 V-F 转换器和 F-V 转换器	279		

运算放大器 (operational amplifier), 简称运放 (Op Amp), 是在 1947 年由 John R. Ragazzini 命名的, 用于代表一种特殊类型的放大器。通过对其外部元件的适当选取, 可以构成各种运算, 如放大、加、减、微分和积分等。运算放大器的首次应用是在模拟计算机中, 实现的数学运算是通过高增益和负反馈结合起来完成的。

早期的运算放大器是用真空管实现的, 因而体积大、耗电大, 并且价格昂贵。第一次显著小型化运算放大器是由于双极性结型晶体管 (BJT) 的出现, 利用分立 BJT 实现了新一代运算放大器。然而, 真正的突破出现在集成电路 (IC) 运算放大器的研发上, 元件以单片集成的形式制造在只有针尖大小的硅芯片上。第一个这样的器件是在 20 世纪 60 年代初, 由仙童半导体公司 (Fairchild Semiconductor Corporation) 的 Robert J. Widlar 研制。1968 年, 仙童公司推出了运算放大器, 其后成为工业标准, 这就是普遍流行的 $\mu A741$ 运算放大器 (简称为 741 运算放大器)。从此, 运算放大器的各种系列和制造商大量涌现。不管怎样, 741 运算放大器无疑是应用最广泛的运算放大器。它的应用普及经久不衰, 且目前仍有许多文献拿它作参考, 所以无论是从历史观点还是教学角度, 741 运算放大器都值得我们学习。

事实上, 运算放大器已经不断地渗透到模拟和模拟-数字混合电子学的各个领域^[1]。应用如此广泛得益于价格的急剧下降。今天, 批量采购一块运算放大器的价格可与大多传统的非高档元件 (如微调电容器、质量好的电容器和精密电阻器) 的价格相当。事实上, 一般把运算放大器看作另一种元件, 这对当今研究和设计模拟电路具有深远影响。

第 3 章末的附录中, 图 2 所示为 741 运算放大器的内部电路框图。这张电路图或许使你畏惧, 特别是, 如果你对 BJT 理解还不够深的话。然而, 不详细了解运算放大器的内部工作机理就设计出大量运算放大器应用电路是可能的。确实如此, 无论运算放大器内部多么复杂, 它的输入、输出关系却很简单, 可以用黑匣子表示。可以看到, 这种简化的框图对于大多数情况已经够用了。当不是这种情况时, 可以借助于数据手册, 并由给定的技术参数来预测电路性能, 这同样不需要详细考虑内部电路的工作。

为了提升它们的产品, 运算放大器制造商们一直将应用部门与确认产品在应用领域的效果维系在一起, 并且在商业期刊上利用应用笔记或技术文章将它们公布出来。当今可以从网上获得许多信息, 利用空闲时间, 你可以熟悉模拟产品数据手册和应用笔记, 甚至可以通过注册参加在线研讨会或网络会议。

运算放大器原理的这种学习方式可以被实际试验所证实。你可以在实验室里的一块面包板上组装、调试你的电路, 也可以采用现在的各种 CAD/CAE 软件包 (如 SPICE), 用电脑对它们进行仿真, 最好是两者都做。

本章重点

简单复习基本运算放大器概念后, 这一章介绍运算放大器, 以及各种基本运算放大器电路, 如反相/同相放大器、缓冲放大器、加法/差分放大器、微分/积分器和负阻转换器。

这些电路的工作核心是负反馈, 本章介绍双端口网络法和返回比 (return-ratio) 分析法。尤其是要向读者引入环路增益, 这是负反馈电路最为重要的特性 (在双端口网络法中, 环路增益和反馈系数分别表示为 L 与 b ; 在返回比分析法中, 则分别表示为 T 与 β)。负反馈的优点已由大量实例与 SPICE 仿真实证。

本章最后考虑某些实际应用情况, 如运算放大器的供电问题、内部功耗, 以及输出饱

和(更多的细节在第3章和第4章介绍)。本章大量使用 SPICE 作为手算验证工具,同时也用作教学工具来传达更直接的概念和原则。

1.1 放大器基础

在着手研究运算放大器之前,先复习一下有关放大和加载的基本概念。运算放大器是一种双端口器件,它接收一个外加输入信号,并由此产生一个输出信号,且输出=增益×输入,这里增益是一个合适的比例常数。满足于这种定义的器件称为线性放大器,以区别于具有非线性输入-输出关系的器件(如二次和对数或者反对数放大器)。除非特别说明,此处术语“放大器”指的就是线性放大器。

一个运算放大器接收某个信号源的输入,并将它的输出向下输送到某个负载。根据输入、输出信号的属性,可划分不同类型的放大器。最普遍的是电压放大器,它的输入 v_1 和输出 v_0 都是电压。这个放大器的端口可用戴维南等效定理建模,由一个电压源和一个串联电阻组成。输入端口通常起一个纯无源的作用,所以只用一个电阻 R_i 来建模,称为该放大器的输入电阻。输出端口用一个表明与 v_1 有关的电压控制电压源(VCVS)和一个称为输出电阻 R_o 的串联电阻来建模。这种情况如图 1.1 所示,图中 A_{oc} 为电压增益因子,单位用 V/V 表示。值得注意的是,输入源也是用戴维南等效给予建模的,它由电压源 v_s 和串联电阻 R_s 构成;输出负载,用电阻 R_L 建模。

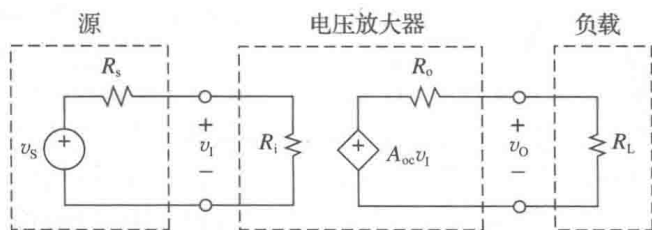


图 1.1 电压放大器

现在导出一个利用 v_s 的 v_0 表达式。在输出端口应用电压分压公式得出:

$$v_0 = \frac{R_L}{R_o + R_L} A_{oc} v_1 \quad (1.1)$$

请注意当不存在负载($R_L = \infty$)时, $v_0 = A_{oc} v_1$, 所以 A_{oc} 称为无载或开路电压增益。在输入端口应用电压分压公式可得出:

$$v_1 = \frac{R_i}{R_s + R_i} v_s \quad (1.2)$$

消去 v_1 并整理得到源电压-负载增益为:

$$\frac{v_0}{v_s} = \frac{R_i}{R_s + R_i} A_{oc} \frac{R_L}{R_o + R_L} \quad (1.3)$$

当信号从源向负载传递时,首先信号在输入端口有某些衰减,然后在放大器内部放大 A_{oc} 倍,最后在输出端口又有额外的衰减。这些衰减统称为加载效应。显然,由于加载效应,

式(1.3)给出的 $\left| \frac{v_0}{v_s} \right| \leq |A_{oc}|$ 。

例 1.1 (1) 一个放大器的 $R_i = 100\text{k}\Omega$, $A_{oc} = 100\text{V/V}$ 和 $R_o = 1\Omega$, 被一个 $R_s = 25\text{k}\Omega$ 的源驱动, 负载 $R_L = 3\Omega$ 。计算总电压增益, 以及输入和输出的加载量。(2) 在源的 $R_s = 50\text{k}\Omega$ 和负载 $R_L = 4\Omega$ 下重做(1)问。

解:

(1) 根据式(1.3), 总增益是 $\frac{v_0}{v_s} = \left[\frac{100}{(25+100)} \right] \times 100 \times \frac{3}{(1+3)} \text{V/V} = 0.80 \times 100 \times 0.75 \text{V/V} = 60 \text{V/V}$, 加载的缘故, 它小于 100V/V 。输入加载后, 引起源电压降低到无载

时的80%；输出加载引入附加的衰减，下降到75%。

(2) 利用同一算式， $\frac{v_o}{v_s} = 0.67 \times 100 \times 0.80 \text{V/V} = 53.3 \text{V/V}$ 。现在的情况是在输入端口加载加重，而在输出端口加载减轻，但总的增益还是由60V/V变化到53.3V/V。

加载效应一般来说是不希望的，因为它使得总增益依赖特定的输入源和输出负载，而且增益下降。加载的根源是明显的：当放大器与输入源相连时， R_i 上流过电流并引起 R_s 上电压降低。准确地说，一旦从 v_s 上减去这一压降就导致一个减小的电压 v_i 。同样，在输出端口由于 R_o 上的压降而使 v_o 的幅度小于可控源电压 $A_{oc}v_i$ 。

如果可以消除加载效应，无论输入源和输出负载，都会有 $v_o/v_s = A_{oc}$ 。为了达到这一状况，无论 R_s 和 R_L 为何值， R_s 和 R_o 上的压降都必须是零。这仅仅在电压放大器满足 $R_i = \infty$ 和 $R_o = 0$ 的条件下才成立。显然，可将这样的一个放大器称为理想放大器。尽管这些条件在实际中不能满足，但是，运算放大器的设计者总是力求通过调整有可能与该放大器连接的所有输入源和输出负载，确保 $R_i \gg R_s$ 和 $R_o \ll R_L$ 或尽可能接近这一点。

另一常见的放大器是电流放大器。由于处理的是电流，所以要用诺顿等效给输入源和放大器建模，如图1.2所示。这个电流控制电流源(CCCS)的参数 A_{sc} 称为无载电流或短路电流增益。两次使用电流分流公式可得源-负载增益为：

$$\frac{i_o}{i_s} = \frac{R_s}{R_s + R_i} A_{sc} \frac{R_o}{R_o + R_L} \quad (1.4)$$

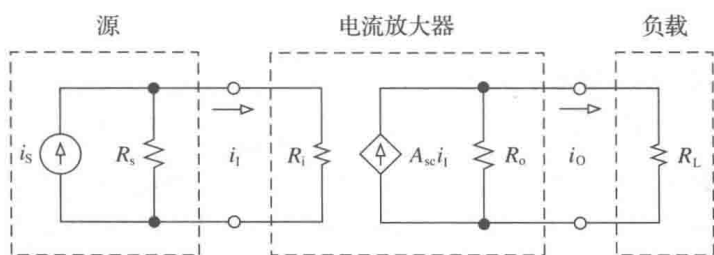


图 1.2 电流放大器

可以再次看到两个端口的加载效应。在输入端口由于 i_s 的一部分损失在 R_s 内，使得 $i_i < i_s$ ；在输出端口由于 $A_{sc}i_i$ 的一部分经由 R_o 而损失掉，结果总是有 $\left| \frac{i_o}{i_s} \right| \leq |A_{sc}|$ 。为了消除加载效应，一个理想的电流放大器应有 $R_i = 0$ 和 $R_o = \infty$ ，这正好与理想电压放大器相反。

输入是电压 v_i ，输出是电流 i_o 的放大器称为跨导放大器，因为它的增益单位是A/V(安/伏)，量纲是导纳。这种情况的输入端口与图1.1所示的电压放大器是相同的；而输出端口则与图1.2所示的电流放大器相类似，只是现在的可控源是一个值为 $A_g v_i$ 的电压控制电流源(VCCS)，其中 A_g 量纲为A/V。为了避免加载效应，理想的跨导放大器应有 $R_i = \infty$ 和 $R_o = \infty$ 。

最后，输入是电流 i_i ，而输出是电压 v_o 的放大器称为跨阻放大器，它的增益是以单位V/A(伏/安)计的。这时输入端口与图1.2所示的一样，而输出端口类似于图1.1所示的端口，只是现在是一个值为 $A_r i_i$ 的电流控制电压源(CCVS)， A_r 量纲为V/A(伏/安)。理想情况下这个放大器应有 $R_i = 0$ 和 $R_o = 0$ ，这正好和理想跨导放大器相反。

这四种基本放大器类型及其理想输入和输出电阻一起总结于表1.1中。

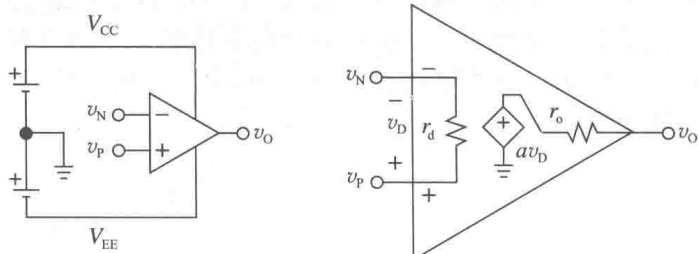
表 1.1 基本放大器及其理想端口电阻

输入	输出	放大器类型	增益	R_i	R_o
v_i	v_o	电压	V/V	∞	0
i_i	i_o	电流	A/A	0	∞
v_i	i_o	跨导	A/V	∞	∞
i_i	v_o	跨阻	V/A	0	0

1.2 运算放大器

运算放大器是一种具有极高增益的电压放大器。例如，常用的 741 运算放大器典型的增益有 $200\,000\text{V/V}$ ，也表示为 200V/mV 。增益也可用分贝 (dB) 表示为 $20\lg 200\,000\text{dB} = 106\text{dB}$ 。更新的 OP77 运算放大器的增益为 $12 \times 10^6\text{V/V}$ ，或 $12\text{V}/\mu\text{V}$ ，或 $20\lg(12 \times 10^6)\text{dB} = 141.6\text{dB}$ 。实际上，运算放大器有别于其他所有电压放大器的就是它的增益大小。下一节将会阐述，增益是越高越好；或者说，理想运算放大器应有一个无限大的增益。为什么总希望增益极大(不用说是无限大)，这一点从开始分析第一个运算放大器电路时就会变得越来越清楚。

图 1.3a 所示的是运算放大器的图形符号和能使它工作的电源连接。标识为“—”和“+”符号的输入代表反相和同相输入端。它们对地电压分别用 v_N 和 v_P 表示，输出是 v_O 。箭头代表信号从输入向输出流动。



a) 运算放大器图形符号和电源连接 b) 上电后的运算放大器等效电路

图 1.3 741 运算放大器的典型值 $r_d = 2\text{M}\Omega$ ， $a = 200\text{V/mV}$ ， $r_o = 75\Omega$

运算放大器没有一个 0V 的接地端子。参考“地”是由电源公共端从外部建立起来的。在双极型器件中，电源电压用 V_{CC} 和 V_{EE} 表示，而在 CMOS 器件中，电源电压用 V_{DD} 和 V_{SS} 表示。741 运算放大器的电源电压的典型值是 $\pm 15\text{V}$ ，在十多年时间内逐渐降低，现在，其典型值为 $\pm 1.25\text{V}$ 、 $+1.25\text{V}$ 和 0V 也并不罕见。随着发展，我们将使用许多电源电压值。但要记住，我们所学习的大多数原理和应用，绝不是仅依赖于特定的电源使用的。为了避免电路图杂乱，习惯上是不画出电源连线的。然而，当在实验室调试运算放大器时，必须记住要给它供电，使它工作。

图 1.3b 所示的是一个正确供电的运算放大器的等效电路。虽然运算放大器本身并没有一个接地端子(引脚)，但在它的等效电路内部的接地符号却是作为图 1.3a 所示的电源公共接地端建模的。这个等效电路包括差分输入电阻 r_d ，电压增益 a 和输出电阻 r_o 。下一节将说明把 r_d 、 a 和 r_o 称为开环参数的道理，并将它们用小写字母符号表示。电压差

$$v_D = v_P - v_N \quad (1.5)$$

称为差分输入电压，增益 a 也称为无载增益，因为在输出不加载时有：

$$v_O = av_D = a(v_P - v_N) \quad (1.6)$$

因为两个输入端对地都允许有独立的电位，所以把这种输入端口称为双端型。与此对照的是输出端口，它属于单端型。式(1.6)表明，运算放大器仅对它的输入电压之间的差做出响应，而不对它们单个的值响应，因此运算放大器也称为差分放大器。

由式(1.6)可得：

$$v_D = \frac{v_O}{a} \quad (1.7)$$

这就可以求出为产生某一给定的 v_O 所需要的 v_D 。再次看到，这个式子仅得到差值 v_D ，而不是 v_N 和 v_P 的值本身。由于分母中的增益 a 很大， v_D 就被界定到非常小。譬如，要维持 $v_O = 6\text{V}$ ，一个无载 741 运算放大器需要 $v_D = (6/200\,000)\text{V} = 30\mu\text{V}$ ，是非常小的电压。一

个无载 OP77 运算放大器只需 $v_D = 6 / (12 \times 10^6) \text{V} = 0.5 \mu\text{V}$ ，一个更小的值！

理想运算放大器

我们知道，为了使加载效应最小，一个精心设计的电压放大器必须能从输入源中流出可以忽略的电流（理想情况为零），并且对输出负载来说必须呈现出可以忽略的电阻（理想为零）。运算放大器也不例外，所以定义理想运算放大器作为一个具有无限大开环增益的理想电压放大器：

$$a \rightarrow \infty \quad (1.8a)$$

它的理想端口条件是：

$$r_d = \infty \quad (1.8b)$$

$$r_o = 0 \quad (1.8c)$$

$$i_P = i_N = 0 \quad (1.8d)$$

式中： i_P 和 i_N 是被正向和反向输入吸入的电流。理想运算放大器的模型如图 1.4 所示。

可以看到，在 $a \rightarrow \infty$ 的极限情况下， $v_D \rightarrow v_O / \infty \rightarrow 0$ ！这一结果往往是导致困惑的根源，因为它使得人们感到奇怪，一个零输入的放大器为何还能维持一个非零的输出？按照式(1.6)，这个输出不应该也是零吗？答案的关键在于：随着增益 a 趋于无限大， v_D 确实向零趋近，但是却以这样的一种方式保持住乘积 av_D 为非零，而等于 v_O 。

现实中的运算放大器与理想的运算放大器稍微有些差异，所以图 1.4 所示的模型仅是一种概念化的模型。

但是在我们进入运算放大器电路的领域时，将用这个模型，因为它使我们从顾及加载效应的后果中解脱出来，而将注意力集中在运算放大器本身的作用上。一旦我们获得足够的理解和自信，将重新考虑并应用图 1.3b 所示这个更为现实的模型，以评价结果的真实性和一致性。我们会发现，利用理想模型所得结果与用实际模型得到的结果相比，比想象的更为接近一致。这就证实了：尽管理想模型是概念上的，但绝不是纯理论和脱离实际的。

SPICE 仿真

在电路分析和设计中，计算机电路仿真已经成为一种强有力的和不可或缺的方法。本书将应用 SPICE 软件来验证我们的计算并研究高阶的影响，这些内容手算起来很复杂。读者可以通过先前的课程熟悉 SPICE 软件的基本应用。通过不断的修订，SPICE 软件已有各式各样的版本。但本书的电路实例是使用 Cadence PSpice 的学生版本创建的，便于读者重画和重新运行它们。

现在由图 1.5 所示的基本模型入手，它反映的是 741 运算放大器的参数。这个电路使用一个电压控制电压源作为电压增益模型，一对电阻作为终端电阻模型（在 PSpice 中，“+”输入在上，“-”输入在下，与运算放大器相反）。

如果希望有一个准理想模型，可让 r_d 开路， r_o 短路，并将源值从 200kV/V 增加到某个很大的值（譬如 1GV/V ，不过，读者应小心，太大的值可能会引起收敛问题）。

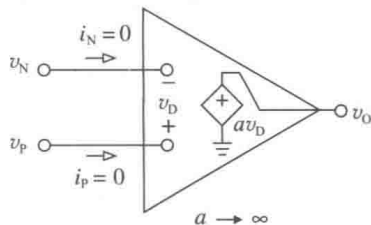


图 1.4 理想运算放大器模型

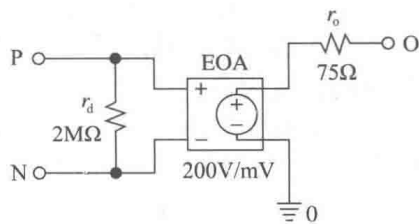


图 1.5 741 运算放大器的基本 SPICE 模型

1.3 基本运算放大器结构

环绕一个运算放大器连接上外部元件，就得到一个今后称为运算放大器电路的电路。关键是要明白一个运算放大器电路和一个单纯的运算放大器之间的不同，后者只是当作前者的一个部分，就如同是外部元件一样。最基本的运算放大器电路是反相、非反相（同相）和缓冲放大器。

同相放大器

图 1.6a 所示的电路是由一个运算放大器和两个外部电阻所组成的, 为了弄清楚它的功能, 需要求出 v_o 和 v_i 之间的关系。为此, 将它重画为图 1.6b 所示的电路, 这里运算放大器已用它的等效模型代替, 而将电阻重新安排, 以突出它在电路中的作用。通过式(1.6)可以求出 v_o ; 然而必须首先导出 v_p 和 v_n 的表达式。很明显,

$$v_p = v_i \quad (1.9)$$

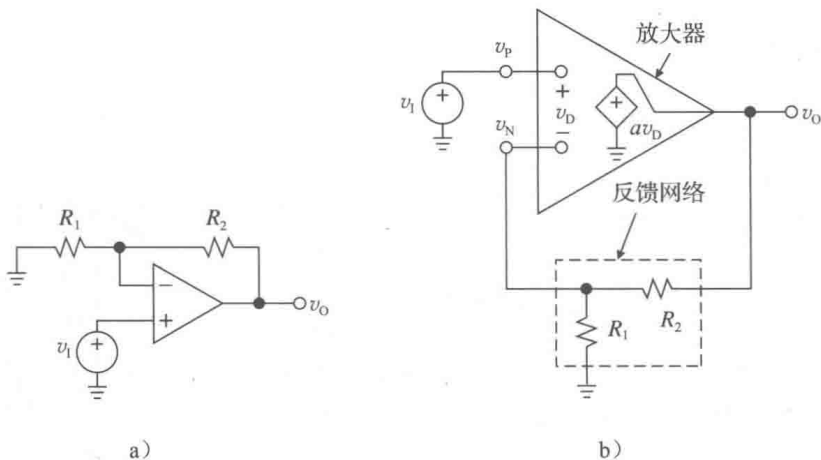


图 1.6 同相放大器与电路分析模型

利用分压公式得出:

$$v_n = [R_1 / (R_1 + R_2)] v_o$$

或者

$$v_n = \frac{1}{1 + R_2/R_1} v_o \quad (1.10)$$

电压 v_n 代表了 v_o 的一部分, 它被反馈到反相输入端。这样, 电阻网络的作用就是为了环绕这个运算放大器创建负反馈。令 $v_o = a(v_p - v_n)$, 得到:

$$v_o = a \left(v_i - \frac{1}{1 + R_2/R_1} v_o \right) \quad (1.11)$$

将相关项进行组合并对比值 v_o/v_i (记作 A) 求解:

$$A = \frac{v_o}{v_i} = \left(\frac{1 + R_2}{R_1} \right) \frac{1}{1 + (1 + R_2/R_1)/a} \quad (1.12)$$

这个结果指出, 由一个运算放大器加上一对电阻组成的图 1.6a 所示的电路本身就是一个放大器, 它的增益是 A 。因为 A 为正, 所以 v_o 的极性与 v_i 的极性是一样的, 故而命名为同相放大器。

运算放大器电路的增益 A 和基本运算放大器的增益 a 是很不相同的。这点并不奇怪, 因为这两个放大器虽然共有相同的输出 v_o , 但却有不同的输入, 即 v_i 是前者的输入, v_D 是后者的输入。为了强调这一差别, a 称为开环增益, 而 A 称为闭环增益, 后者的叫法是源自运算放大器电路包含一个环路的缘故。事实上, 在图 1.6b 所示电路中从反相输入端出发, 沿顺时针方向经由运算放大器, 然后再通过电阻网络又重新回到了出发点。

例 1.2 在图 1.6a 所示电路中, 设 $v_i = 1\text{V}$, $R_1 = 2\text{k}\Omega$ 和 $R_2 = 18\text{k}\Omega$, 若 (1) $a = 10^2 \text{V/V}$, (2) $a = 10^4 \text{V/V}$, (3) $a = 10^6 \text{V/V}$, 求 v_o 。

解:

由式(1.12)给出 $v_o/1 = (1 + 18/2)/(a + 10/a)$, 或 $v_o = 10/(1 + 10/a)$, 所以有:

(1) $v_o = (10/(1 + 10/10^2))\text{V} = 9.091\text{V}$

(2) $v_o = 9.990\text{V}$