



国外电子信息经典教材

THOMSON

Power Electronics:  
Principles & Applications

# 功率电子学

## ——原理与应用

(美) J. Michael Jacob 著  
蒋晓颖 译



清华大学出版社

国外电子信息经典教材

# 功率电子学

—— 原理与应用

(美) J. Michael Jacob 著

蒋晓颖 译

清华大学出版社

北 京

J. Michael Jacob

Power Electronics: Principles & Applications

EISBN: 0-7668-2332-6

Copyright © 2002 by Delmar, a division of Thomson Learning.

Original language published by Thomson Learning (a division of Thomson Learning Asia Pte Ltd). All Rights reserved.

本书原版由汤姆森学习出版集团出版。版权所有，盗印必究。

Tsinghua University Press is authorized by Thomson Learning to publish and distribute exclusively this Simplified Chinese edition. This edition is authorized for sale in the People's Republic of China only (excluding Hong Kong, Macao SAR and Taiwan). Unauthorized export of this edition is a violation of the Copyright Act. No part of this publication may be reproduced or distributed by any means, or stored in a database or retrieval system, without the prior written permission of the publisher.

本中文简体字翻译版由汤姆森学习出版集团授权清华大学出版社独家出版发行。此版本仅限在中华人民共和国境内(不包括中国香港、澳门特别行政区及中国台湾地区)销售。未经授权的本书出口将被视为违反版权法的行为。未经出版者预先书面许可，不得以任何方式复制或发行本书的任何部分。

981-265-373-2

北京市版权局著作权合同登记号 图字：01-2003-2241

版权所有，翻印必究。举报电话：010-62782989 13501256678 13801310933

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签，无标签者不得销售。

本书防伪标签采用清华大学核研院专有核径迹膜防伪技术，用户可通过在图案表面涂抹清水，图案消失，水干后图案复现；或将表面膜揭下，放在白纸上用彩笔涂抹，图案在白纸上再现的方法识别真伪。

#### 图书在版编目(CIP)数据

功率电子学——原理与应用/(美)雅各布(Jacob, J.M.)著；蒋晓颖译. —北京：清华大学出版社，2005.3

书名原文：Power Electronics: Principles & Applications

(国外电子信息经典教材)

ISBN 7-302-08933-7

I. 功… II. ①雅…②蒋… III. 电力电子学 IV. TM1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 065679 号

出版者：清华大学出版社

<http://www.tup.com.cn>

社总机：010-62770175

组稿编辑：曹康

封面设计：康博

印装者：北京鑫海金澳胶印有限公司

发行者：新华书店总店北京发行所

开本：185×260 印张：25 字数：640千字

版次：2005年3月第1版 2005年3月第1次印刷

书号：ISBN 7-302-08933-7/TN·194

印数：1~4000

定价：48.00元

地址：北京清华大学学研大厦

邮编：100084

客户服务：010-62776969

文稿编辑：李阳

版式设计：康博

# 出版说明

电子信息产业是一项新兴的高科技产业，有“朝阳产业”之称，有着巨大的潜力和广阔的发展前景。近年来，我国电子信息产业的飞速发展，大大推动了对电子信息类人才的需求，迫切需要我国的高等院校能够培养出大批符合企业要求的电子信息类人才。

教育与教材的关系始终是密不可分的，教材的合适与否会直接影响到培养人才的质量好坏。虽然目前我国高校中现行的电子信息类教材曾经对我国电子信息类人才的培养做出了非常重要的贡献，但是确实普遍存在着一些问题，如“课程系统老化”、“内容落伍”、“惯性大，更新速度慢”、“针对性差”、“缺乏原创精品”等等，教学内容和课程体系的改革已经成为目前教学改革过程中的当务之急。

基于这种背景，我们决定在国内引进并推出一套“国外电子信息经典教材”，通过系统地研究和借鉴国外一流大学的相关教材，为我国高校的课程改革和国际化教学进程提供参考和推动作用。

为了组织该套教材的出版，我们在国内聘请了一批资深的专家和教授，共同成立了教材编审委员会。由编委会结合目前国内高校电子信息类专业的课程体系和教学内容，从 McGraw-Hill Education、Thomson Learning、John Wiley & Sons 和 Springer 等一批国际著名的教育出版集团，精选出一套“国外电子信息经典教材”。列选的每本教材都经过了国内相应领域的资深专家推荐和审读，对于一些基础类的专业课程，我们列选了多种不同体系、不同风格和不同层次的教材，以供不同要求和不同学时的同类课程使用。为了确保该套教材的质量，我们聘请了高校相应专业的资深教师和相应领域的专家担纲译者，加强了该套教材各个出版环节的编审力量和质量控制。另外，为了丰富国内的教学资源，我们在引进教材的同时也积极引进了教材配套的教学资源。

该套教材的读者对象为电子信息与电气工程类专业的本科生，同时兼顾相关工程学科各专业的本科生或研究生。该套教材既可作为相应课程的教材或教学参考书，也适于相应技术领域的工程师和技术人员参考或自学。

尽管我们作了种种努力，但该套教材书目选择的恰当性，内容的合理性，都还有待于通过教学实践来检验。首先感谢选用该套教材的广大教师对我们的支持，同时期待广大读者积极为该套教材提出意见或建议。

清华大学出版社

# 前 言

## Herrick & Jacob 系列的介绍

对于大学一年级的新生来说,给他们讲授电子工程技术原理这门课程的传统方法是:首先,开设直流电路原理和分析的课程。在直流电路课程中,讲解这门学科的基本规律,介绍许多工具,并在非常简单的电阻性电路中来应用这些知识。然后,通常会开设交流电路原理和分析课程。在直流课程中,所有研究的课题、规则和工具都被复习一遍,但这次使用的是三角和复数(有实部和虚部)数学。同样,应用仅限于无源(简单)的电阻、电容和电感电路。直到第二个学期,一般不会到第三个学期,通过一门或者两门独立的课程,学生们才最终被引入到电子世界中。在此时,他们才会学到他们一直想学习的内容:放大器,电源,波形特性,使得一切正常运转的反馈,功率放大器以及通信实例中的无线电频率。这种授课方法已经存在了数十年,并且是全国通用的模式。

那么这种方法存在的问题在哪里呢?很明显,这项工作必须由很多人参与。当前,在直流和交流课程中,学生们被告知不要考虑为什么要学这些东西,只要知道他们必须记住这些内容并且以后去应用它们即可。这两门课程(直流和交流)已经变成了工具课程。一大堆技巧一个接着一个地讲授,期望最终当(或者如果)它们要被用到时,学生们能记起来。甚至对最有才华的老师和最专注的学生来说,这两门课已经变成了可以被“淘汰”的课了,其中的信息看起来是“如果您有足够的毅力、潜力和忠诚的话,我们最后(以后)将向您介绍电子学课程。”反过来,电子学课程被独立于电路分析课程来讲授。在需要学生去理解放大器如何工作或者稳压器如何设计的时候,总是期望学生能够很快回忆起所需的电路分析工具(这些内容在几个学期前的直流和交流课程中学过)。这导致了带有负面影响的结果。首先,学生不明白直流和交流电路原理与电子学之间的联系。每一门课程都被作为独立的知识体系来记忆。如果学生们能长期坚持学习,最终他们就能接触到电子学课程,明白电路的作用;其次,老师们感到灰心,因为学生对前面的课程生厌而毫无兴趣,而在这些课程中他们本应该学会他们所需要全部基本原理。但是当学生们在后面的电子学课程中需要这些知识的时候,他们又记不起来了。这种结果已经困扰了我们数十年。这就是一个新系列(Herrick & Jacob 系列)的概念发展起来的前提。

Herrick & Jacob 系列提供了一种不同的学习方法。它把电路原理工具和电子学结合起来,根据需要主题交叉组织。电路分析工具在即学即用的基础上讲授,以配合电子电路的学习。将电子学作为基本电路分析技巧的应用来讲授,而不是作为有其自己的规则和专用语的、独特的且让人不可思议的课程来讲授。各主题会以螺旋状的方式反复提及,贯穿整个系列,最初的讲解停留在简单的层面上。而后,随着学生们拥有了更多的知识和更牢固的数学基础,就研究这些相同的电子电路的复杂的交流响应和非正弦响应。接下来,在他们两年的学习结束时,学生们就会对一些主要的电子模块探究得更为深入,在知道了许多寄生效应存在的情况下,观察

它们的非理想特性、非线性、温度响应、高功率以及无线电频率下的性能。最后，在高等模拟信号处理的书籍中，拉普拉斯变换被应用到放大器、多极滤波器和其他闭环过程中。同时也会研究它们的固定状态和瞬态响应以及稳定性。

我们所持的态度是“让我们从一开始就做有趣且有用的事。在需要时，我们将发展和使用电路原理。电子学并不是魔法；它只是要求严格地使用一些基本规律。当您(学生)学习的知识越多，且当您已准备就绪时，我们将突破这些电子电路性能的极限。”学习再学习，讲授再讲授，我们将不断前进。

## 本书简介

本书是综合系列课本“Herrick & Jacob 系列”中的第一本。它把电路理论和电子学基本原理应用到将功率发送到用户和工业负载的广义的电子学上。从传统意义上来讲，“功率电子学”这个术语是指工业的功率电子学；研究用于给制造业的负载发送成千上万瓦特的设备和电路。其重点为功率半导体特性、直流电源和交流电源之间的转换、电力线路和电动机控制的接口。这是一个非常特殊且复杂的领域。与现代工业制造设备所需要的电子设计、选择、安装、运行和维护有关的人员必须知道所有这些内容。

只有很小比例的技术毕业生跟这样的工业强度的负载打交道。但是，实际上每一个电子电路都必须管理电源。例如，助听器和寻呼机必须把电池放电引起的大范围变化的电压有效地转换成一个稳定的电平。手机、膝上型电脑和汽车都必须能够清晰地把音频功率发送到它的扬声器。微处理器无处不在：车库门开启工具、微波炉、冰箱、传真机、打印机、复印机，还有许多玩具内都有它的身影。功率电子器件必须执行微处理器的操作命令，把范围从几百毫安到几十安的电流发送到我们使用的电动机、电子管、加热器和电灯。事实上，每一个电子技术人员的工作都要求理解这些电路。

然而，核心电子学教科书不会涉及音频放大器的细节，而这些细节却是成功地设计、搭建和保护一个 100W 的放大器所必需的；音频原理(就是音响强度以及放大器的增益、输出电平和功率之间的关系意味着什么)从来没有被提及。线性电源在基础电子学课本中有讲解，但是没有开关电源的介绍。现在的大多数电源都是开关电源，所以，基础课本没有向它的读者提供理解、设计或操作绝大多数电源的能力。模拟电路课本不会涉及电源开关(那是数字电路的事情)。但是，逻辑电路课本和有关微处理器的书本都是关于 0、1 和代码的；脉冲宽度、空载时间、开关频率、H 电桥以及传动器都讲得很少，栅电容、均方根和功率更是不曾提及，这些是模拟电路的课题。

因此，其结果就造成学生知识体系中存在很大的漏洞，而这些知识对于所有电子技术的毕业生来说都是很常用的。现有的基础电子课本没有为搭建把几十瓦特到几千瓦特的功率发送到日常生活中常用的各种负载的电路提供足够的细节信息。现有的工业功率电子书籍是为那些少量的、从事制造业的毕业生准备的。本书就是要尝试填补这个缺口。

## 本书结构

第 1 章——高等运算放大器原理。本章巩固和复习读者应该已经学过的基本原理。

第 2 章——功率电子电路布局。本章说明如何搭建一个功率电路与部件的选择一样重要。

说明试验电路板和印制电路板的布局原理。

第3章——功率参数计算。平均值、均方根和功率并不像基础电路课程中描述的那样简单。需要应用一些积分知识来理解电子器件是如何响应各种标准波形的。本章解开了一些奥秘，消除了空洞的东西，没有陷入“一般情况”，这些“一般情况”往往使技术专业的学生无法接受大多数工程方面的课程。

第4章——线性功率放大器集成电路。现在，计算机、电话、电视、随身听、PDA和汽车都可以发出声音。我们的电子器件被期望能与我们对话。我们可以听见它们，因为在所有这些产品内都包含了音频功率集成电路。

第5章——分立的线性功率放大器。集成电路当前只可以向扬声器发送大约20W的功率。要使扬声器更响一些，需要一个分立的MOSFET放大器。本章讲述了发送一个纯净的、低失真的、受保护的且大于100W的信号所需要的细节。传统的课本中对这里详细解释的技术只进行了简单的概述。

第6章——电源开关。电子器件形成了机器世界的智能，但是如果没有使显示器发光，使磁盘头移动，使继电器关闭，使笔写出字，或使阀门开启等的实际能力，它们事实上根本没有用什么。电源开关为数字电路、微处理器和计算机提供“肌肉”，从而对它们操作的数据进行处理。

第7章——转换电源。构成我们现代生活结构的所有电子小配件都需要电源。PDA、寻呼机、手机、计算机、汽车、照相机、各种娱乐装置、GPS和其他一些系统及器件都需要电压高效地从一种形式转换成另一种形式。转换电源是管理这些电压的主要方法。但是，绝大多数传统的电子课本都没有涉及到转换电源。

第8章——半导体开关元件。用户市场变得日益“非插拔”，正如上面所提到的那样。但是，自动工业制造，甚至家庭“机器”都需要来自商业电力网的功率的控制。半导体开关、触发器、吸收和比例控制都是需要的。尽管大多数常用的课本对这些器件也给出了少量的讲解，但它们都没有提供实际设计、搭建和安全地测试实际电路，从而通过商业线路向负载发送功率所需要的详细内容。

第9章——电源转换和电动机驱动的应用。这些电路构成大多数“工业强度的功率电子学”课程的核心。但是，有了前面各章提供的基础和技巧，这些工业的专业电源控制电路就可以作为关键概念的延伸来阐述，而不是独一无二的、棘手的、专门的系统。

## 本书特色

### 教学法

每一章都从基于实现的学习目标开始。这一目标在整个章节中都严格遵循。

一共提供了100多个示例，每个示例都提供了完整的计算和前面信息的定量解释说明。每个示例后面都有一道练习题，要求读者用一组不同的数字对刚刚阐明的技巧进行扩展应用，或者使用稍微不同的方法来求解。并给出定量的答案供学生检查他们自己的计算结果正确与否。

查找规格说明、零件和出售商的能力是电子技术人员的一项重要技能。由于这个原因，没有在附录中提供完整的数据表。读者应该浏览半导体制造商和销售商的网址，形成一套自己需要

的独一无二的书签。然而，这些数据表的解释是本书介绍的一个关键部分。所以，本书中在讨论它们时都包含了来自实际数据表的摘录，并突出了相关点。

所有的电路都以实际部件显示，所有的功率管脚都进行了连接并正确地去耦，其他的辅助元件也都各就其位。只有很少的地方为了清楚起见有必要简化电路。特别是对技术学生而言，所讨论的系统能够如显示的那样实际工作是很重要的。在功率电子学中，辅助元件常常允许大电流和高电压通过导线和接线器发送到真实的负载上。工业目的的理想部件和简化示意图经常会忽略实际执行的实现性细节。所以在搭建时电路是无法工作的，其原因并不是因为这个学生没有理解它的操作或是错误地进行了设计，而是因为真实的辅助元件要么被省略(“课本中没有它们!”)，要么放置的位置不正确。

### 计算机仿真

Electronics Workbench 的 Multisim 和 OrCAD 的 PSpice 用来说明这些应用和功率电子器件仿真的缺点。这两个仿真包存在着相当大的差别，它们有各自的优点和缺点，只介绍其中一种仿真包会误导读者。试图不使用仿真包来讲授功率电子器件会严重妨碍读者。其他电子电路中的故障或设计错误通常可以在试验电路板上估计到并发现。在功率电子学中，故障是很惊人的，发生得十分快且只留下熔化成一团的东西，设计者几乎不能从这些故障中学到什么东西。正确的仿真是很必要的。

本书自始至终都使用仿真来阐明需要讲述的知识点。它们不只是作为附件被包含在各章结束部分，它们好像是后添加的内容。大约有三分之一的示例使用 Multisim，三分之一使用 OrCAD，大约三分之一通过手工完成。

各章后面的习题大多数都是可解的，或者通过手工计算，并用一种仿真软件包进行验证。解答手册提供与示例相同的内容：大约三分之一手工解答，三分之一用 Multisim，三分之一用 OrCAD。如果教师采用本书，这些文件也可以获得。

本书使用的是 Multisim 6.1 的教学版本和 OrCAD 的 PSpice 9.1 评估版本。尽管在写作本书期间它们各自的后续版本已经发行，但这些版本都不会改变示例的教学结果。

Multisim 是 Electronics Workbench 的产品。可以从下列网站获得信息：

<http://www.electronicsworbench.com>

OrCAD 是 Cadence 的产品。可以从下列网站获得信息：

<http://www.orcad.com>

### 习题

章后习题是以小节的形式组织的，这些小节与该章中的小节相对应。习题是成对设置的。编号为奇数的习题答案已在课本的最后给出。读者必须在没有目标答案的情况下解答编号为偶数的习题。

### 实验

绝大多数章节的最后都安排有实验。它们的几个修订版本都已经被 1000 多个学生和许多老师使用过，都能够运行，并且能清晰地说明课本中所提出的原理。在这些实现中要使用  $\pm 56\text{V}$ ，3A 的电源和一些独特的印制电路板，但不需要什么特殊的仪器。在各实验中使用的零件和特别



的设备在课本的最后以真值表的形式给出。

## 本书合作站点

本书中创建示例和图形时所用的一些 Multisim 文件和 OrCAD 文件, 读者可以通过本书合作站点 <http://www.tupwk.com.cn> 下载。

另外, 为方便读者学习, 合作站点 <http://www.electronictech.com> 也为本书提供了一些相关的在线信息, 如示例和习题解答的 Multisim 和 OrCAD 文件、30 多个可下载的 PowerPoint 讲义以及示例实验的结果等。

## 教师手册

教师手册中包括所有章节后习题的答案: 大约三分之一通过手工完成, 三分之一使用 Multisim 完成, 三分之一使用 OrCAD 完成。本手册也提供了示例实验的结果和印制电路板的布线图(也是在网站上给出)。教师手册的 ISBN 号为 07668-2333-4。教师可通过填写本书后面所附的“教辅资料申请表”索取。

## 作者简介

Mike Jacob 是一个在许多工业领域有着丰富经验的测试和控制工程师。他曾设计过基于微处理器的装填光纤束的包装系统、基于 IR 的转动扭矩的测量仪、军事坦克传动螺栓的上紧控制系统、测试长途运输卡车上的液压舵机的基于 PC 的仪器和控制系统, 对航天飞机的贴片进行激光测试和测量便携人工肾的血液流动速度的电子驱动和接口电路。他曾设计、规划和安装人造肾的自动化制造设备、汽车控制和住宅的瓦特时计量器校准。

Mike Jacob 现今是 McNelly 的著名教授和获奖教师。作为电力工程技术系的顶尖教师, 他曾 6 次获得 CTS 杰出的微电子本科生教学奖(Microelectronics Outstanding Undergraduate Teaching Award); 作为工学院的顶尖教师, 他曾 3 次获得 Dwyer 本科生教学奖。也曾获得 Purdue 大学的本科生教学奖(the Amoco award)、少数派技术协会的 Paradigm 奖和国防部长授予的共同劳务荣誉奖章(因为教育方面的杰出表现)。1999 年, 他被列入 Purdue 大学的 Book of Great Teachers。他在 Purdue 大学教学长达 20 年, 在南卡罗莱纳州的一所社区大学教学 7 年。

他还是一个富有激情的自行车旅行爱好者, 每年都骑着他的斜靠式自行车旅行 8000 英里。他曾经骑着他的自行车从西雅图到印地安那州, 从印地安那州穿过新英格兰到加拿大的新斯科舍省, 然后返回, 穿过大草原和落基山脉, 沿着西海岸线到达南加利福尼亚州。所以睁大您的眼睛, 您有可能在某个夏天返回的路上碰到他。

## 反馈途径

从来没有哪个系统可以精确地按照计划来实现。实际上, 结果的质量更是一个负反馈质量的函数。所以, 请读者与作者或出版商联系, 提出您的宝贵意见。

J. Michael Jacob  
175 Knoy Hall  
Purdue University

Michelle Ruelos Cannistraci  
3 Columbia Circle  
Albany, NY 12212-5015

W. Lafayette, IN 47907  
jacobm@purdue.edu

michelle.cannistraci@delmar.com

## 题献

本书献给那些每天于逆境中仍奋力进取的人们。记住，如果您拒绝吸取失败的教训而一味反复尝试，最终只会失败。最后，重要的是过程，而不是目的。

J. Michael Jacob(Mike), 2001年6月

# 目 录

<b>第 1 章 高等运算放大器原理</b> .....	1
1.1 运算放大器特性 .....	1
1.1.1 电压跟随器 .....	4
1.1.2 同相放大器 .....	6
1.1.3 反相放大器 .....	10
1.2 通用的分析技巧 .....	14
1.2.1 差分放大器 .....	15
1.2.2 仪器放大器 .....	19
1.3 复合放大器 .....	21
1.3.1 功率输出级 .....	22
1.3.2 功率反馈 .....	23
1.4 浮动电源放大器 .....	26
1.4.1 浮动电源 .....	28
1.4.2 放大器 .....	30
1.4.3 容差 .....	33
1.4.4 复合放大器 .....	36
1.5 小结 .....	38
1.6 习题 .....	39
1.7 浮动电源放大器实验 .....	43
<b>第 2 章 功率电子电路布局</b> .....	46
2.1 机械和温度细节 .....	46
2.2 部件布局 .....	52
2.3 内部连线 .....	57
2.3.1 导线规格 .....	57
2.3.2 走线 .....	61
2.4 其他考虑 .....	67
2.5 小结 .....	69
2.6 习题 .....	70
<b>第 3 章 功率参数计算</b> .....	71
3.1 常见波形 .....	71
3.1.1 直流 .....	71
3.1.2 正弦波 .....	72

3.1.3	矩形波	74
3.1.4	三角波	75
3.2	平均值	77
3.2.1	矩形波	78
3.2.2	正弦波	79
3.2.3	三角波	83
3.3	均方根值	86
3.3.1	直流值	87
3.3.2	矩形波	88
3.3.3	三角波	89
3.3.4	正弦波	93
3.4	功率	98
3.4.1	直流电压和电流	101
3.4.2	正弦波	102
3.4.3	矩形波	109
3.5	小结	112
3.6	习题	112
<b>第 4 章</b>	<b>线性功率放大器集成电路</b>	<b>115</b>
4.1	OPA548 运算放大器集成电路	115
4.2	功率计算	120
4.2.1	直流信号到负载	121
4.2.2	正弦信号到负载	124
4.3	散热器	128
4.4	OPA548 的保护	132
4.5	音频功率参数	134
4.6	低功耗音频放大器 IC	138
4.7	大功率音频放大器 IC	144
4.8	小结	148
4.9	习题	149
4.10	功率运算放大器实验	152
<b>第 5 章</b>	<b>分立的线性功率放大器</b>	<b>155</b>
5.1	增强型 MOSFET	155
5.1.1	N 沟道	155
5.1.2	P 沟道	159
5.2	A 类共漏放大器	160
5.2.1	偏置	161
5.2.2	交流工作	161

5.3 B 类推挽式放大器	163
5.3.1 推进式放大器	163
5.3.2 回挽式放大器	167
5.3.3 推挽式放大器	167
5.4 运算放大器驱动的 B 类放大器	169
5.4.1 同相放大器	169
5.4.2 浮动电源放大器	171
5.4.3 版图布局考虑	172
5.4.4 反相放大器	172
5.4.5 运算放大器的选择	176
5.5 线性放大器中的并联 MOSFET	177
5.6 放大器的保护	181
5.6.1 限流	181
5.6.2 热切断	185
5.7 驱动电抗性负载	186
5.8 小结	188
5.9 习题	190
5.10 B 类放大器实验	192
<b>第 6 章 电源开关</b>	<b>196</b>
6.1 开关特性	196
6.1.1 二极管	196
6.1.2 晶体管	198
6.2 并联 MOSFET 开关	203
6.3 低端开关	204
6.3.1 双极型结型晶体管	204
6.3.2 集电极开路的反相器	208
6.3.3 MOSFET 低端开关	209
6.4 高端开关	214
6.4.1 N 沟道高端开关	214
6.4.2 P 沟道高端开关	215
6.4.3 PNP 高端开关	219
6.5 MOSFET 开关驱动器	220
6.5.1 低端 MOSFET 驱动器	222
6.5.2 高端和低端 MOSFET 驱动器	222
6.6 H 电桥	224
6.7 小结	228
6.8 习题	229

6.9	晶体管开关实验	232
<b>第7章</b>	<b>开关电源</b>	<b>235</b>
7.1	补偿稳压器	235
7.1.1	基础知识	235
7.1.2	LM2595 简单转换开关补偿稳压器 IC	243
7.2	升压式稳压器	248
7.2.1	基础知识	248
7.2.2	LM2585 简单转换开关回扫稳压器 IC	254
7.3	线路电压回扫转换器	258
7.3.1	回扫转换器	258
7.3.2	线路电压输入	265
7.4	小结	269
7.5	习题	270
7.6	补偿稳压器实验	273
7.7	升压式稳压器实验	275
<b>第8章</b>	<b>晶闸管</b>	<b>277</b>
8.1	晶闸管器件的特性	277
8.1.1	硅控整流器	278
8.1.2	三端双向可控硅开关	282
8.1.3	低端开关和高端开关	283
8.2	吸收	285
8.2.1	电流上升的临界速度	285
8.2.2	电压上升的临界速度	287
8.3	触发器	291
8.3.1	肖特基二极管	292
8.3.2	双端交流开关	292
8.3.3	光耦合的三端双向可控硅开关触发器	294
8.4	比例功率电路	297
8.4.1	时间比例	297
8.4.2	相角导通	302
8.5	小结	312
8.6	习题	314
8.7	三端双向可控硅开关实验	316
<b>第9章</b>	<b>电源转换和电动机驱动的应用</b>	<b>321</b>
9.1	直流到直流的转换器	321
9.1.1	补偿转换器	321

9.1.2	升压式转换器	324
9.1.3	回扫转换器	326
9.2	交流到直流的转换器	328
9.2.1	单相	328
9.2.2	三相	335
9.3	直流到交流的转换器	344
9.3.1	输入变换器	346
9.3.2	次级线圈	348
9.3.3	微控制器	349
9.3.4	H电桥和驱动器	351
9.3.5	输出滤波器	352
9.3.6	负反馈	354
9.4	永久磁铁电动机驱动器	356
9.4.1	常见问题	356
9.4.2	直流电刷电动机	360
9.4.3	直流无电刷电动机	363
9.5	小结	367
9.6	习题	368
附录 A	各章部分问题的答案	372
附录 B	实验部分和特殊设备	379

# 第1章 高等运算放大器原理

## 引言

为了能够正确地将电功率加到负载上，您必须掌握电源、电源开关、晶闸管、滤波、MOSFET 开关以及线性放大器的使用。然而，要处理这些大电压和高电流的信号，首先必须能够很好地控制小信号。这最好用运算放大器来实现。

您也许对运算放大器的基本特性以及它同相和反相小信号放大器中的使用已经相当熟悉。在本章中，您将巩固这些基础知识。然后将负反馈原理加以扩展，创建一项通用的分析技术，让您能够理解基于运算放大器的任何线性电路的特性。您还能学到带有几个负反馈环的放大器、有源积分器反馈、复合放大器以及基于浮动电源运算放大器的输出电压能够超过 100V 的放大器。

在此，将用 Multisim 和 PSpice 的仿真结果举例说明这些基于运算放大器的工具。与由于一个误算或者疏忽导致器件的熔化和烧毁相比，这种在您实际开启它之前先估计功率电子设计性能的能力能给您提供更多的信息。

## 教学目标

学完本章，您将能够掌握以下技能：

- 定义运算放大器集成电路的输入、输出和增益特性，并且解释它们各自在传统的同相、反相和差分放大器中的含义。
- 应用上述这些特性来决定多种非传统的线性放大器的性能，包括带有有源积分器反馈和功率输出级的复合放大器，以及浮动电源的高压放大器。

## 1.1 运算放大器特性

图 1-1 为运算放大器的传统示意图。通常情况下，使用对称的双电源供电(例如  $\pm 15\text{V}$ )。这些电源电压设置放大器电压的最大值。输出电压不能被驱动至超过电源电压。另外，为了防止对 IC 的损坏，必须保证每一个输入电压都要在这两个电源电压之间。在每个电源引脚和地之间直接连接去耦电容( $0.1\mu\text{F}$ )也很重要。这些都能保证我们可以获得稳定的电源，并且使得共享相同电源的其他放大器影响本级性能的可能性最小。

在内部，运算放大器的组成是高输入阻抗的差分输入后接一个很大增益的电压放大器。从任一输入端向内看，阻抗均为  $1\text{M}\Omega$  或者更多。

$$Z_{\text{in op amp}} \geq 1\text{M}\Omega$$



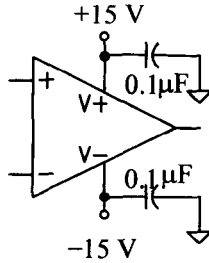


图 1-1 运算放大器符号

运算放大器 IC 的增益称为开环增益， $A_{OL}$ 。它实际上是变化的，并且在正常运作下， $A_{OL} \gg 1000$

从 100 000 到 10 000 000 以上的值也是常有的。运算放大器的简单框图如图 1-2 所示。

$$e_{out} = A_{OL} e_d$$

$$e_{out} = A_{OL} (e_{NI} - e_{INV})$$

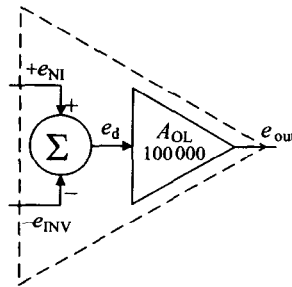


图 1-2 运算放大器框图

由于  $A_{OL}$  从 1000 到 10000000 大小各异，所以输出值似乎完全不可靠。有时输出值可能是 1mV，在另一个时刻，或者使用相同模型的不同 IC，在相同大小的输入情况下输出可能大到 10V！另外，由于有这样大的增益，差分输入必须小到无法测量的程度。甚至在  $A_{OL}=1000$  时，10V 的输出也要求  $e_{NI}$  和  $e_{INV}$  之间的差分输入为 1mV。更小的输出或者更大的增益甚至要求更小的输入。

那么，运算放大器还有什么用呢？关键在于反相输入端。输出的采样必须被反馈到反相输入端。这个负反馈使得两个输入电压之间的差成为所要求的，可忽略不计的小电压。利用 IC 的大开环增益来产生稳定可靠的输出电压，实际上是在补偿增益的变化。

如图 1-3 所示，输出电压通过反馈系数  $\beta$  被减小，这里  $0 \leq \beta \leq 1$ ，并且返回到反相输入端。输出电压取决于  $A_{OL}$  和  $\beta$ 。要确定这种关系，需先找到反馈电压， $v_f$ 。

$$v_f = \beta e_{out}$$

$$v_d = e_{in} - v_f$$

$$v_d = e_{in} - \beta e_{out}$$