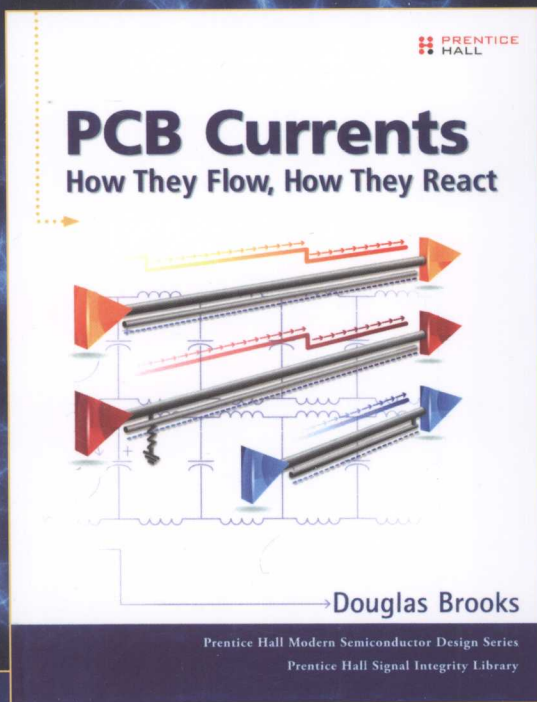


PEARSON

PCB电流与信号 完整性设计

[美] 道格拉斯·布鲁克斯 (Douglas Brooks) 著
丁扣宝 韩雁 译

PCB Currents
How They Flow, How
They React

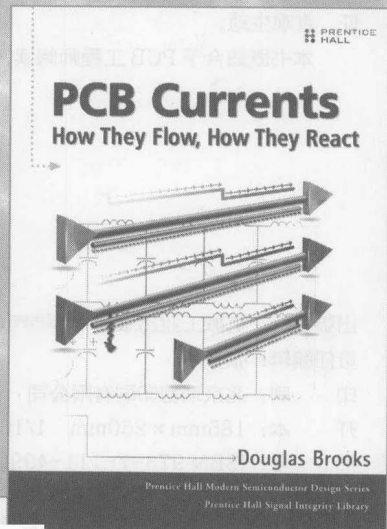


PCB电流与信号 完整性设计

[美] 道格拉斯·布鲁克斯 (Douglas Brooks) 著

丁扣宝 韩雁 译

PCB Currents
How They Flow, How
They React



图书在版编目 (CIP) 数据

PCB 电流与信号完整性设计 / (美) 布鲁克斯 (Brooks, D.) 著; 丁扣宝, 韩雁译. —北京: 机械工业出版社, 2015.5

(国外电子与电气工程技术丛书)

书名原文: PCB Currents: How They Flow, How They React

ISBN 978-7-111-49997-8

I. P… II. ①布… ②丁… ③韩… III. 印刷电路—信号设计 IV. TN410.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 080309 号

本书版权登记号: 图字: 01-2013-6493

Authorized translation from the English language edition, entitled *PCB Currents: How They Flow, How They React*, 9780133415339 by Douglas Brooks, published by Pearson Education, Inc., Copyright © 2013.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced or transmitted in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopying, recording or by any information storage retrieval system, without permission from Pearson Education, Inc.

Chinese simplified language edition published by Pearson Education Asia Ltd., and China Machine Press Copyright © 2015.

本书中文简体字版由 Pearson Education (培生教育出版集团) 授权机械工业出版社在中华人民共和国境内 (不包括中国台湾地区和中国香港、澳门特别行政区) 独家出版发行。未经出版者书面许可, 不得以任何方式抄袭、复制或摘录本书中的任何部分。

本书封底贴有 Pearson Education (培生教育出版集团) 激光防伪标签, 无标签者不得销售。

本书从电子学的基本概念出发, 全面阐述了 PCB 上电流的性质和流动规律, 详细探讨了现代 PCB 设计中的特殊问题, 提出了优化方案, 论述了由电磁耦合引起的信号完整性问题, 还提出了应对甚高频谐波和极短波长复杂挑战的解决方案。本书将理论性与工程实践性于一体, 尽量减少烦琐的数学论证, 直观生动。

本书既适合于 PCB 工程师阅读, 也可作为相关专业研究生和高年级本科生的参考教材。

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: 北京瑞德印刷有限公司

版次: 2015 年 6 月第 1 版第 1 次印刷

开本: 185mm × 260mm 1/16

印张: 12.25

书号: ISBN 978-7-111-49997-8

定价: 49.00 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；也正是这样的优势，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Thomas L. Floyd、Charles K. Alexander、Behzad Razavi、John G. Proakis、Stephen Brown、Allan R. Hambley、Albert Malvino、Mark I. Montrose、David A. Johns、Peter Wilson、H. Vincent Poor、Dikshitulu K. Kalluri、Bhag Singh Guru、Stephane Mallat等大师名家的经典教材，以“国外电子与电气工程技术丛书”为总称出版，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：hzjsj@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

最近 20 多年来, 印制电路板 (Printed Circuit Board, PCB) 越来越像一个具有电阻、电容和电感的组件, 而不仅仅是一个互连平台。因此 PCB 设计者需要了解相关的电子学知识, 以便能更有效地处理诸如走线阻抗匹配等现代 PCB 设计中的问题。

本书从电子学的基本概念出发, 全面阐述了 PCB 上电流的性质和流动规律, 讨论了电压源和电流源, 详细探讨了现代 PCB 设计中的特殊问题, 提出了相关的设计方案。作者富有启发性地总结了由电流引起的信号完整性问题, 对每一个常见问题提出了实用的设计方案, 此外, 还提出了应对甚高频谐波和极短波长等复杂挑战的方案。

本书的编写融理论与工程实践于一体, 尽量减少烦琐的数学论证, 直观生动, 是作者相关工作成果和各类研讨会的心血结晶。

本书既适合于从事现代 PCB 设计的技术人员参考, 也可作为相关研究生和高年级本科生的参考教材。

本书由浙江大学微电子与光电子研究所丁扣宝副教授和韩雁教授翻译。为表述准确, 译者在翻译过程中较多地采用了直译法。虽力求完美, 但难免存在错漏及不妥之处, 望读者不吝指正。

丁扣宝 韩雁

2014 年 10 月于浙江大学求是园



中国电子科技出版社

中国电子科技出版社出版

电子邮箱: hzj@hzbook.com

电子邮箱: hzj@hzbook.com

联系电话: (010) 88379504

联系地址: 北京丰台区右安门内大街 26 号

邮政编码: 100077

前 言

我大部分的职业生涯都是在电子行业的各种岗位上度过的，最近 20 年一直从事与印制电路板设计有关的工作，这令我感到非常开心，通过写文章和研讨会报告，也结识了许多业内人士。我很幸运地受邀参与全球各地的研讨会。同行们对我也一直很好。

优秀的 PCB 设计人员是具有出色图形认知能力的艺术家。这么多年后，我依然惊奇于设计师观看计算机屏幕、抓取走线的始端，然后布放走线、通过众多的等效屏幕使其到达线网的另一端的才能，并且他们总是能精确地知道自己在哪儿。完成后的电路板看上去美极了，几乎就是一件艺术品。这个工作有时被贬低为“点的连接而已”，但其实它远不止如此。

最近 20 年来，PCB 设计人员不得不面对另一类需求。电路板已经开始像一个具有电阻、电容和电感的组件，而不仅仅是一个互连平台。因此 PCB 设计者需要对电子元器件和电流有所了解——不需要很多，不必成为工程师，但确实应该知道工程师所知道的很多知识。

在学术访问期间触动我的是，即使 PCB 设计师能够处理很复杂的电路和要求，他们也很少有人受过正规的电子学训练，因此即使走线的阻抗匹配很重要，他们中的很多人也不知道阻抗的含义。他们必须关心串扰和 EMI 问题，但却不知道这些是什么或是怎么发生的，当然还有地弹现象。

在 UP 传媒集团 Pete Waddell 的支持下，我在 20 世纪 90 年代早期的好几个 PCB 设计展会上开办了基础电子学方面的研讨会。Prentice Hall 在 2003 年出版了我关于 PCB 设计的著作 *Signal Integrity Issues and Printed Circuit Board Design*，希望这能对很多设计人员提供有用的帮助。虽然我对这些成就感到满意，但总觉得它不像预想中那么突出。

这种感觉促使我编写了当前这本书。

主题

本书的主题是电流：它是什么，它怎么流动，以及它如何起作用。每一章在特定的条件下讨论了电流的特定性质。

结构安排

本书分为四部分：

- 第一部分 电流的性质
- 第二部分 基本电路中电流的流动
- 第三部分 电压源和电流源
- 第四部分 电路板上的电流

电子学的基本粒子是电子，该领域称为电子学不是偶然的。宇宙中所有元素都由质子、中子和电子构成。质子带正电荷，电子带负电荷。基本粒子（事实上是整个宇宙）是“电荷中性的”，我的意思是，质子和电子的数量几乎到处相等。

如果电子不移动，那什么也不会发生。我们可以有由电荷的定域差引起的静电场，这些电荷场很重要。但是，直到电子开始在这些场内移动，游戏才开始真正有趣。当电子移动时，根据定义我们就有了电流，这是电子学的一切所在。

第一部分包括电流的基本性质。第 1 章介绍电流（电子流）的基本定义。具体而言，1A 电流是 1s 内通过一个表面的 6.25×10^{18} 个电子的流量。第 2 章介绍了几个电流概念，从频率和波形到传播速度再到电流的测量，以及如何进行这些测量。第 3 章介绍五个基本的电流定律。

□ 电流在回路中流动。

□ 回路中的电流处处恒定。

□ 欧姆定律（电流、电压和阻抗间的关系）。

□ 基尔霍夫第一定律（进入节点的电流等于流出节点的电流）。

□ 基尔霍夫第二定律（回路电压之和为 0）。

重要的是要认识到，即使需要求解最复杂的电路，从概念上说，上述这些就是所需要的一切。AC（交流）和电抗的引入增加了电路的复杂性，但从概念上说，增加得并不多。简单地将一个电路拆为 n 个独立的回路，用基尔霍夫和欧姆定律建立一个联立方程组，再使用矩阵代数求解。从概念上说，这很直观（说起来容易），电子与电气工程（EE）专业的典型课程包含了很多这方面的教材。EE 课程体系的其他课程包括了如何实际求解那些电路问题和计算的技术。

第二部分包括各种电路概念，从电阻电路开始，接着是电抗电路（电容和电感），然后是阻抗（将所有这些元件组合在一起时所发生的）。其余章节包括时间常数、变压器、差分电流和半导体等内容。

重要的是注意到，实际上我们面对的仅有三种无源元件：电阻、电容和电感。从真正意义上讲，这些元件占据了频谱的特殊位置。电容在一端（当频率趋向无穷大时，阻抗趋于 0，电压相移趋于 -90° ），电感在另一端（当频率趋向无穷大时，阻抗趋于无穷大，相移趋于 $+90^\circ$ ）。电阻占据两者之间的特殊位置（阻抗与频率无关，相移为 0）。这三个事实放之四海皆准，永远不会改变。

第三部分包括电压源和电流源。如果我们想得到电流（即电子流），那么需要知道电子从哪里来以及如何迫使它们移动。

第四部分处理由印制电路板引入的特定问题。大多数（应该承认不是全部）电子系统里面都有电路板。如果频率足够高（或者如我指出的，真正的问题是如果上升时间足够快），或者电流足够大，电路板将会出现哪些需要处理的特殊问题。

各章节包括了像电流和走线温度、传输线和反射、耦合电流/EMI/串扰）、电流分布、趋肤效应、介质损耗以及过孔等内容。

最后要说的是，最后一章处理了由电流引起的信号完整性问题。在我的职业生涯中，关于电路板信号完整性问题在电子行业的发展中经历了四个阶段。第一个阶段微不足道，没有任何问题；第二个阶段主要涉及电路板自身电感引起的问题；第三个阶段涉及高频引起的视在电阻的变化（即趋肤效应或介质损耗），这些不是真正的电阻改变，但它们的表现就像是电阻变化了；第四个阶段发生于谐波频率非常高以及波长非常短的情况下，以致在如此短的物理距离内极难求解。第 22 章介绍了处理这些问题的各种设计方法。

本书还有三个附录：附录 A 涉及麦克斯韦方程组和位移电流的概念；附录 B 介绍并给出了眼图的简要解释；附录 C 更多的是个人笔记。在我的职业生涯中，我多次听说过关于 PCB 消亡的

预测，但每一次他们都错了，且总是由于相同的原因，附录 C 给出了我的观点并解释了理由。

但当你认识到当今几乎所有的电子元器件都是在电路板上互连的，我相信读者面看起来就不会窄了。无疑，在电视机和计算机中有电路板，在报警器、灌溉控制、调光器、洗衣机和烘干机、冰箱、烤箱、定时器、时钟，以及不计其数的其他产品中也有电路板，且谁又能数得清现代汽车中有多少块电路板呢？

读者对象

本书是针对 PCB 设计人员和可能成为 PCB 设计人员的人们编写的。本书没有严格的 EE 专业学位课程所要求的深度。然而，它对在其他学位课程中重视电子学简介的学生是有益的。这样的课程可见于大学层次、贸易学校层次、社区学院或针对现在的设计人员以增加他们基础知识的特定课程中。不管是什么原因，对当初在学校里初次学到的知识已感觉“生疏”的工程师们而言，本书也是有益的。

本书有意以简单易懂的方式来写作，将数学认证最小化。电子学的性质是电子的流动，是随时间变化的现象，按照定义，这涉及微积分的情形。我敢肯定 EE 专业的学生在受教育阶段学到的微积分知识比他们曾认为的要更多。一些公式的使用是不可避免的，欧姆定律就是其中一个，但我试图尽量少地使用公式，而仅使用本领域中我认为最重要的那些。

致谢

我已经在 PCB 设计行业工作 20 多年了。在这段时间里，有很多人帮助、指引我成长，因此我也希望寻求有助于该行业和从业人士成长的方式。尤其是 Pete Waddell 先生鼓励我先写些文章，然后开办研讨会，并提供给我进行这些工作的交通工具，本书正是起始于那个早期鼓励的最终成果。

在此过程中，很多与我有关的人总是帮助和鼓励我，我也从中学到了很多。他们涉及所有参与关于信号完整性问题研讨会的人们，人数太多而难以统计和提及。

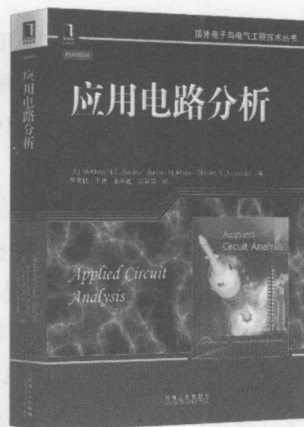
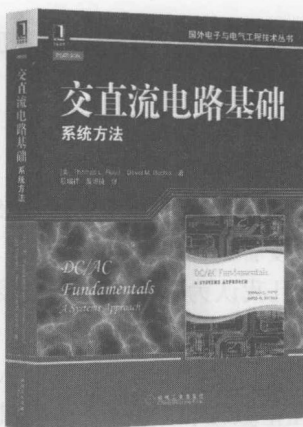
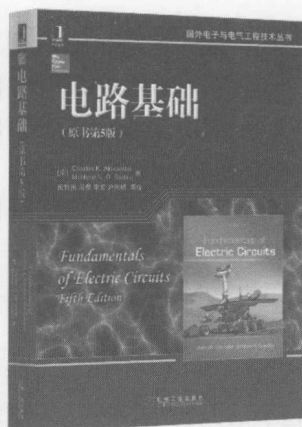
Dave Graves 是我满 20 年的合作伙伴，我很感激他这么多年来支持和奉献。我也经常给他看我写的文章和报告的草稿，我无法告诉你当他的回应是“不得要领！你在想说什么？”时，我曾经从头开始了多少次。由于他的评述和支持，一切都变得更好。由于我已经退休了，我们也在各走各的人生路，但我依然怀念那段友谊。

我也要感谢三家供应商，他们这些年来对我的文章和研讨会活动提供了慷慨的支持。Mentor Graphics 公司、HyperLynx 公司（现在是 Mentor 的一部分）和 Polar Instruments 公司当我需要软件许可和技术支持时总是随时给我提供帮助。我感谢他们在进行这些支持时没有试图通过任何方式对我施加任何控制。

我享受书稿的写作过程，现在完稿了，我感慨良多，但有很多人是“真正地”对这个项目的最终完成感到高兴，特别是我非技术背景的妻子，她觉得或许现在我可以真正退休了。

最后，我感谢来自 Prentice Hall 出版社的 Bernard Goodwin 先生的支持和鼓励，这是他第二次帮助并指导我完成出版流程，我期望他和读者一起来判定这一切都是值得的。

推荐阅读



电路基础 (原书第5版)

作者: (美) Charles K. Alexander 等 译者: 段哲民 等 ISBN: 978-7-111-47088-0 定价: 129.00元

本书是电类各专业“电路”课程的一本经典教材,被美国众多名校采用,是美国最有影响力的“电路”课程教材之一。本书每章开始增加了中文“导读”,适合用做高校“电路”课程双语授课或英文授课的教材。本书前4版获得了极大的成功,第5版以更清晰、更容易理解的方式阐述了电路的基础知识和电路分析方法,并反映了电路领域的最新技术进展。全书总共包括2447道例题和各类习题,并在书后给出了部分习题答案。

交直流电路基础: 系统方法

作者: (美) Thomas L. Floyd 译者: 殷瑞祥 等 ISBN: 978-7-111-45360-4 定价: 99.00元

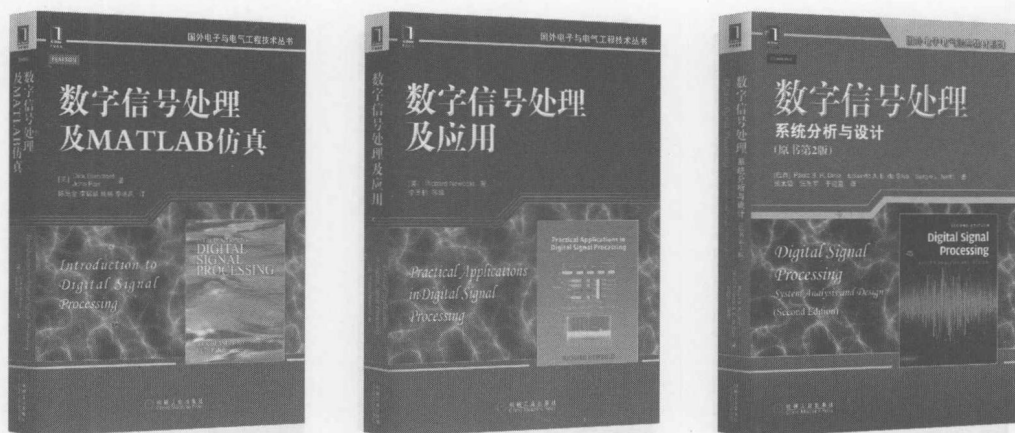
本书是知名作者Floyd的最新力作,在国外被广泛使用。本书系统介绍了直流和交流电路理论,强调直流/交流电路基本概念在实际系统中的应用。全书丰富的实例,有助于学生的理解系统模块、接口和输入/输出信号之间的关系。书中实例使用Multisim进行仿真,并提出在模拟电路与系统和排除故障中存在的问题及解决方法。本书可作为电子信息、电气工程、自动化等电类专业的电路课程教材。

应用电路分析

作者: (美) Matthew N. O. Sadiku 等 译者: 苏育挺 等 ISBN: 978-7-111-47077-9 定价: 99.00元

本书可作为高等院校电类专业“电路分析”课程的教材,以更清晰、生动、易于理解的方式来阐述电路分析的方法。全书分为两部分,第一部分包括第1~10章,主要介绍直流电路;第二部分包括第11~19章,主要介绍交流电路。本书可以作为大学两学期或三学期的教材,授课教师也可选择适当的章节,将其用作一学期课程的教材。

推荐阅读



数字信号处理及MATLAB仿真

作者：Dick Blandford 等 译者：陈后金 等 书号：978-7-111-48388-5 定价：95.00元
中文版 出版时间：2015年1月

本书是美国伊凡斯维尔大学电子与计算机工程专业的DSP课程教材，注重理论与应用相结合，前7章重点讲述数字信号处理基础理论和知识，包括DSP的概述、线性信号和系统概念、频率响应、抽样和重建、数字滤波器的分析和设计、多速率DSP系统；后4章侧重于DSP应用，包括数字滤波器的实现、数字音频系统、二维数字信号处理和小波分析。本书可作为电子信息、通信、控制、仪器仪表等相关专业本科生的DSP课程教材，对初级DSP工程师也是一本实用的参考书。

数字信号处理及应用

作者：Richard Newbold 等 译者：李玉柏 等 中文版 预计出版时间：2015年5月

本书基于真实设备与系统，研究如何进行数字信号处理的软硬件设计与实现，详细阐述了模拟和数字信号调谐、复数到实数的变换、数字信道化器的设计以及数字频率合成技术，并重点讨论了多相滤波器（PPF）、级联的积分梳状（CIC）滤波器、数字信道器等业界常用的一些的信号处理应用。本书适合即将进入信号处理领域的大学毕业生，也适合有一定DSP设计经验的业界工程师阅读。

数字信号处理：系统分析与设计（原书第2版）

作者：Paulo S. R. Diniz 等 译者：张太镒 等 ISBN：978-7-111-41475-9 定价：85.00元
英文版 ISBN：978-7-111-38253-9 定价：79.00元

本书全面、系统地阐述了数字信号处理的基本理论和分析方法，详细介绍了离散时间信号及系统、傅里叶变换、z变换、小波分析和数字滤波器设计的确定性数字信号处理，以及多重速率数字信号处理系统、线性预测、时频分析和谱估计等随机数字信号处理，使读者深刻理解数字信号处理的理论和设计方法。本书不仅可以作为高等院校电子、通信、电气工程与自动化、机械电子工程和机电一体化等专业本科生或研究生教材，还可作为工程技术人员DSP设计方面的参考书。

推荐阅读



基于运算放大器的模拟集成电路设计 (英文版·第4版)

作者: Sergio Franco ISBN: 978-7-111-48933-7 出版时间: 2015年1月 定价: 99.00元

本书着重理论和实际应用相结合,重点阐述模拟电路设计的原理和技术直观分析方法;主要包括运算放大器的基本原理和应用、涉及运算放大器的静态和动态限制、噪声及稳定性问题等诸多实际问题,以及面向各种应用的电路设计方法三大核心内容,强调物理思想,帮助读者建立电路设计关键的洞察力,可作为电子信息、通信、控制、仪器仪表等相关专业本科高年级及研究生有关课程的教材或主要参考书,对电子工程师也是一本实用的参考书。

模拟电路设计:分立与集成(英文版)

作者: Sergio Franco ISBN: 978-7-111-48932-0 出版时间: 2015年1月 定价: 119.00元

本书是针对电子工程专业且致力于将模拟电子学作为自身事业的学生和集成电路设计工程师而准备的,前三章介绍二极管、双极型晶体管和MOS场效应管,注重较为传统的分立电路设计方法,有助于学校通过物理洞察力来掌握电路基础技术;后续章节介绍模拟集成电路子模块、典型模拟集成电路、频率和时间响应、反馈、稳定性和噪声等集成电路内部工作原理(以优化其应用)。本书涵盖的分立与集成电路设计内容,有助于培养读者的芯片设计能力和电路板设计能力。

模拟CMOS集成电路设计(英文版)

作者: Behzad Razavi ISBN: 978-7-111-43027-8 出版时间: 2013年8月 定价: 79.00元

本书介绍模拟CMOS集成电路的分析与设计。从直观和严密的角度阐述了各种模拟电路的基本原理和概念,同时还阐述了在SOC中模拟电路设计遇到的新问题及电路技术的新发展。本书由浅入深,理论与实际结合,提供了大量现代工业中的设计实例。全书共18章。前10章介绍各种基本模块和运放及其频率响应和噪声。第11章至第13章介绍带隙基准、开关电容电路以及电路的非线性和失配的影响,第14、15章介绍振荡器和锁相环。第16章至18章介绍MOS器件的高阶效应及其模型、CMOS制造工艺和混合信号电路的版图与封装。本书可供与集成电路领域有关的各电类专业的高年级本科生和研究生使用,也可供从事这一领域的工程技术人员自学和参考。

目 录

出版者的话

译者序

前言

第一部分 电流的性质

第 1 章 电子和电荷	2
1.1 电子流	2
1.2 原子结构	3
1.3 绝缘体	4
1.4 电荷场	4
1.5 磁场	5
1.6 驱动电流的力	6
1.7 电压与电流	8
1.8 电流方向	9
1.9 半导体空穴流	9
第 2 章 基本的电流概念	11
2.1 电流类型	11
2.2 传播速度	16
2.3 电路的时序问题	18
2.4 电流的度量	20
2.5 测量技术	28
2.6 热、噪声和电流阈值	32
第 3 章 基本的电流定律	34
3.1 电流在回路中流动	34
3.2 回路中的电流处处恒定	34
3.3 欧姆定律	35
3.4 基尔霍夫第一定律	36
3.5 基尔霍夫第二定律	37

第二部分 基本电路中电流的流动

第 4 章 电阻电路	40
4.1 电阻率	40

4.2 电阻的电流和相位	41
4.3 串联电阻	42
4.4 并联电阻	42
4.5 功率和能量	43
4.6 电阻分压器	44

第 5 章 电抗电路：电容器和电容

5.1 电容的性质	46
5.2 电容的定义	46
5.3 电流“通过”电容器	47
5.4 AC 电流“通过”电容器	47
5.5 位移电流	48
5.6 电容的欧姆定律	48
5.7 容抗与频率的关系图	49
5.8 电容的相移	49
5.9 电容器的组合形式	51
5.10 电容器功耗	52
5.11 电容公式	52

第 6 章 电抗电路：电感器和电感

6.1 电感的性质	53
6.2 电感的定义	54
6.3 DC 电流“通过”电感器	55
6.4 AC 电流“通过”电感器	55
6.5 电感的欧姆定律	56
6.6 感抗与频率的关系图	56
6.7 电感相移	57
6.8 电感器的组合形式	58
6.9 电感器功耗	59
6.10 电感的一般公式	59
6.11 趋肤效应	59

第 7 章 电抗电路：谐振

7.1 串联谐振	61
7.2 并联谐振	63

第 8 章 阻抗	65	13.5 通过二极管的电流	108
8.1 阻抗的含义	65	13.6 双极晶体管	109
8.2 阻抗的大小	65	13.7 场效应晶体管	110
8.3 阻抗相位	67		
8.4 串联 RLC 电路示例	69	第三部分 电压源和电流源	
8.5 并联 RLC 电路示例	72	第 14 章 电压源和电流源	114
8.6 功率因数	74	14.1 基本电压源和电流源	114
8.7 谐振时的 RLC 电路	74	14.2 理想电压源和电流源	114
8.8 谐振点附近 R 的影响	75	14.3 等效电路	114
8.9 阻抗的组合形式	76		
第 9 章 实际元件和寄生效应	78	第四部分 电路板上的电流	
9.1 电阻器	78	第 15 章 电流在电路板上的流动	118
9.2 电感器	78	15.1 信号电流	118
9.3 电容器	79	15.2 电源电流	118
9.4 元件间的耦合	79	15.3 返回电流	119
9.5 自谐振	79	第 16 章 电流和走线温度	120
第 10 章 时间常数和滤波器	83	16.1 基本概念	120
10.1 RC 时间常数	83	16.2 历史背景	121
10.2 L/R 时间常数	86	16.3 各种关系	122
10.3 RC 滤波器	88	16.4 熔断电流	123
10.4 品质因数 Q	91	第 17 章 电流反射	124
第 11 章 变压器	93	17.1 一个命题	124
11.1 磁场回顾	93	17.2 基本问题	124
11.2 耦合效率——铁心	95	17.3 临界长度	125
11.3 耦合效率——频率限制	95	17.4 传输线	126
11.4 耦合效应——匝数比	96	17.5 终端	128
11.5 电流和阻抗比	97	17.6 反射系数	129
11.6 变压器损失和效率	98	17.7 耦合影响阻抗的方式	130
11.7 绕组极性:楞次定律	99	17.8 电流如何流动	134
第 12 章 差分电流	100	17.9 差分电流如何流动	135
12.1 概念	100	第 18 章 耦合电流/EMI/串扰	137
12.2 一些说明	101	18.1 基本概念	137
12.3 差模和共模(奇模和偶模)	102	18.2 天线	138
12.4 模式转移或转换	103	18.3 EMI	139
第 13 章 半导体	105	18.4 串扰	140
13.1 电子壳层回顾	105	第 19 章 电流分布和旁路电容	147
13.2 半导体掺杂	105	19.1 问题的本质	147
13.3 半导体二极管结	106	19.2 传统方法	149
13.4 齐纳二极管	107	19.3 电源分布阻抗方法	150

19.4 采用哪种方法 155

第 20 章 随频率变化的电阻和有损传输线 157

20.1 趋肤效应 157

20.2 介质损耗 160

20.3 传输线损耗 161

第 21 章 电流和过孔 164

21.1 过孔功耗 164

21.2 过孔电感 165

21.3 过孔特征阻抗 166

21.4 过孔内的反射 167

21.5 盲孔和埋孔 169

第 22 章 电流和信号完整性 170

22.1 历史视角 170

22.2 PCB 设计规则 171

22.3 差分走线设计规则 176

22.4 过孔设计规则 177

22.5 相信这些设计规则的原因 177

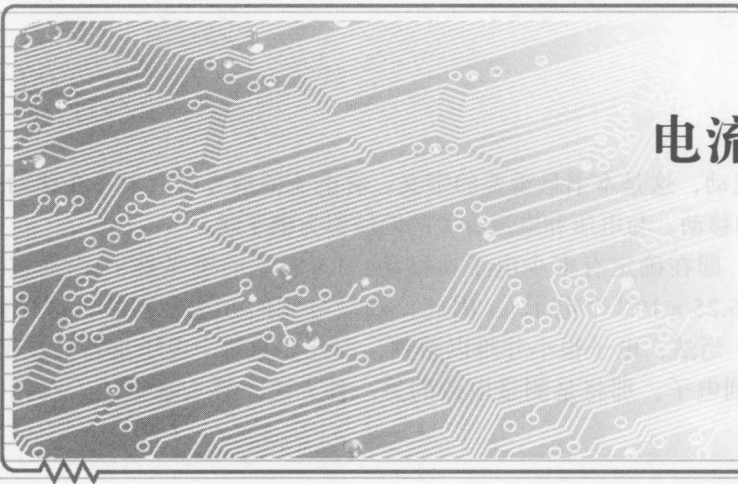
附录 A 电流和麦克斯韦 179

附录 B 眼图 181

附录 C 电路板的消亡 183

第一部分

电流的性质



第 1 章

电子和电荷

1.1 电子流

电流是电子的流动，这是本书最重要的定义。有电流的地方就有电子在移动；没有电流的地方就没有电子的移动。与电压和电流有关的领域称为**电子学**。

当测量电流时，即在确定有多少电子在移动。1A 电流的定义是 1s 内通过某处（或某个面）1C 的电荷（ 6.25×10^{18} 个电子）。因此，测量电流的方法是实际计算单位时间内通过某处电子的数量。当然，电子很小并难以看到，因此要对每个电子进行计数是不现实的，但如果我们可以看到电子，那将是测量电流的另一种方法。第 2 章阐述了实际电流的测量方法。

技术注解：

一些人认为上面说法不正确，他们认为电流是一股光子流或一种波动现象。然而这些说法并不全错，其核心概念是正确的。诺贝尔物理学奖得主 Richard Feynman 这样说道[⊖]：

在核内有三个质子（可与三个电子交换光子）的原子（如锂原子），它的第三个电子比另两个（其已占完了可能的空间）离原子核更远，与质子交换的光子也比较少。这使得这个电子很容易在来自其他电子的光子的影响下，逃离自己所属的核。大量的这种原子聚在一起，就很容易失去它们各自的第三个电子，从而形成一个在原子与原子之间到处游动的电子海。它对任何一个小的电力（光子）都会有反应，从而形成电流（这是锂金属的导电情况）。氢和氦原子不会将它们的电子丢失给其他原子，它们是“绝缘体”。

电子能够移动之所以重要，是因为如果它在我们的控制之下，有了这些信息，我们就可以做些有用的事情。设想我们沿着导体以某一频率前后移动电子，该频率与我们正在听的一些音乐的音调（频率）相同。当音乐声较大时，我们移动更多的电子；当音乐声比较安静时，我们移动较少的电子。也就是说，我们让电子流（电流）的大小正比于音乐的音量，因而电流的频率和大小就构成了对音乐的模拟。在房间里传递音乐的方法有很多种，但电流是远程传递（模拟的）音乐很方便的方法。

或者设想在某个时间点，在电路某处放置大量的电子，在另一时间点放置少量电子，这两种不同数量级的电子能代表信息的一位[⊖]。如果有数千或数百万这样的点可以利用（就像在微处理器中），我们就能将这些信息位组合成有意义的通信或信息处理系统。

⊖ Richard Feynman, *QED: The Strange Theory of Light and Matter* (Princeton, NJ: Princeton University Press, 1985). 113。

⊖ 信息的一位是指“是”或“否”的回答中的信息量。它构成了二进制或数字逻辑的基础。

1.2 原子结构

电子是原子结构中的一种粒子。原子的一种简单模型如图 1-1 所示。该模型表明原子包含三种基本的粒子：质子、中子和电子。质子和中子紧紧地耦合在原子的中心，即原子核里，电子则围绕着核做同心圆周运动^①。该模型称为行星模型，这是因为这些电子类似于围绕太阳运行的行星，这是大约一百年前人们对原子结构的典型理解。现在知道，原子远比这复杂得多。尽管如此，这个简单模型对理解电流的基本性质还是很有用的。

质子和中子非常相似，只有一点不同：每个质子有一个单位的正电荷，而中子没有电荷。每个电子有一个单位的负电荷。自然界中所有稳定的元素必须呈电中性，因此在任何元素（原子）中质子和电子数必须相等。

原子中的质子数（由此可得到电子数）称为原子序数。用原子序数可将自然界的元素区分开来。例如，氢原子序数为 1，一个氢原子有一个质子和一个电子；氦原子序数为 2，一个氦原子有两个质子和两个电子；铜原子序数为 29，因此它包含 29 个质子和 29 个电子。

一个原子的原子量（有时也称为原子质量）近似等于原子核中的质子数和中子数之和。氢原子序数为 1，之所以原子量也为 1，是因为它没有中子。氦原子量为 4（其原子序数为 2）是因为一个氦原子有两个质子和两个中子。铜的原子量是 64，是因为它有 29 个质子和 35 个中子^②。

元素周期表是展示原子结构信息和区分不同元素的主要方法。在学校学过化学的任何人都见过周期表（至少我希望是这样）。在网上搜索“周期表”将出现数百万个检索结果。基于网络的周期表（相对于基于课本的）的主要优点是：它往往更生动，更有助于对其所传递信息的理解。

最有助于我们理解的是弄明白在原子核的周围，原子的电子是怎样组织的。一般认为电子在围绕原子核的同心球轨道上（有时称为能带或壳层），但对此有非常明确的规则。每个球层能容纳的电子数有一个最大值，并且必须按次序填充该球层。也就是说，每个内层的球层必须先被填满，然后电子才能开始填充下一个球层。第一个球层能容纳两个电子，一个氢原子有 1 个电子在这一球层上，一个氦原子有两个电子在这一球层上，以进行填充。锂（原子序数 3）有两个电子填充在最内层以及 1 个电子在下一球层上。

元素最外球层（或能带）称为价带。这种价带的性质对我们和对电流都很重要。电子带负电荷，自然地被带正电的质子所吸引。电子在不同能带的能级就是阻止它们坍塌进入原子核内的能量，这类似于行星对太阳的万有引力吸引。行星如果不具有围绕太阳旋转的能量，它们将坍塌进入太阳内。如果某元素的价带有 1 个电子，则会离核较远，即更松散地与原子连在一起，有时（不完全恰当）称它是一个“自由”电子。另一方面，当一个价带完全被电子填满时，这些电子也将被核束缚得相对紧一些。

回到电流是电子的流动这一观点中。其电子松散地包含在价带中的那些元素，例如，价带中仅有一个电子的元素，它们释放出这些电子相当容易，因而，这些元素表现为导体，电子能相对自由地穿过这样的导体，而不需要施加过多的外部能量。另一方面，那些紧紧束缚

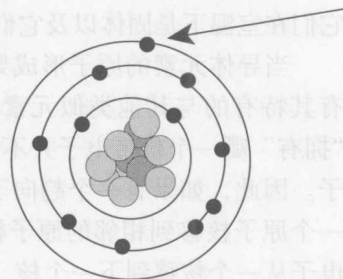


图 1-1 原子的行星模型

① 实际上，它们并不占据同心圆轨道，而是处于不同的能量“壳层”上。

② 原子的原子序数将其界定为一种元素。一种元素的不同同位素具有不同的原子量。