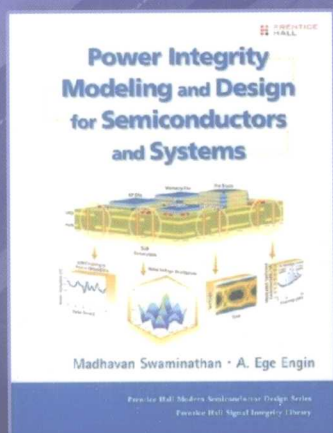


国外电子与通信教材系列

PEARSON

芯片及系统的 电源完整性建模与设计

Power Integrity Modeling and Design
for Semiconductors and Systems



[美] Madhavan Swaminathan 著
A. Ege Engin
李玉山 张木水 等译



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

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

国外电子与通信教材系列

芯片及系统的电源 完整性建模与设计

Power Integrity Modeling and
Design for Semiconductors and Systems

[美] Madhavan Swaminathan 著
A. Ege Engin

李玉山 张木水 等译

电子工业出版社
Publishing House of Electronics Industry
北京·BEIJING

内 容 简 介

本书是有关电源完整性设计和建模方面的一部丰富而又生动的指南。书中通过真实的案例分析和可下载的软件实例,描述了当今高效电源分配和噪声最小化的设计与建模的前沿技术。作者介绍了电源配送网络组成部件、分析技术、测量技术及建模需求;详尽解释了电源/地平面建模,包括平面特性、集总模型、基于分布电路的方案等;介绍了几种先进的时域仿真技术(例如宏模型),并讨论了它们的优缺点;此外还展示了建模技术在多种高级案例中的应用,包括高速服务器、高速差分信令、芯片封装分析、材料特性、嵌入去耦电容器和电磁带隙结构等。

本书可作为研究电源完整性的电子工程师、系统设计师、信号完整性工程师、材料工程师等技术专家及相关专业师生的参考资料;对于研发高速系统分析软件的工程师,同样也会从书中受益。

Authorized translation from the English language edition, entitled POWER INTEGRITY MODELING AND DESIGN FOR SEMICONDUCTORS AND SYSTEMS, 9780136152064 by Madhavan Swaminathan, A. Ege Engin, published by Pearson Education, Inc, publishing as Prentice Hall, Copyright © 2008 Pearson Education, Inc.

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 PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY Copyright © 2009.

本书中文简体字版专有出版权由 Pearson Education(培生教育出版集团)授予电子工业出版社。未经出版者预先书面许可,不得以任何方式复制或抄袭本书的任何部分。

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

版权贸易合同登记号 图字:01-2008-5685

图书在版编目(CIP)数据

芯片及系统的电源完整性建模与设计/(美)斯瓦米纳坦(Swaminathan, M.), (美)恩金(Engin, A. E.)著;李玉山等译. —北京:电子工业出版社, 2009. 8

(国外电子与通信教材系列)

书名原文: Power Integrity Modeling and Design for Semiconductors and Systems

ISBN 978-7-121-09035-6

I. 芯… II. ①斯…②恩…③李… III. 电源电路-电路设计:计算机辅助设计-教材 IV. TN710.02

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 095924 号

责任编辑:冯小贝

印 刷:北京市顺义兴华印刷厂

装 订:三河市双峰印刷装订有限公司

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本:787×1092 1/16 印张:21.5 字数:550 千字

印 次:2009 年 8 月第 1 次印刷

定 价:55.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010)88254888。

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线:(010)88258888。

序

2001年7月间,电子工业出版社的领导同志邀请各高校十几位通信领域方面的老师,商量引进国外教材问题。与会同志对出版社提出的计划十分赞同,大家认为,这对我国通信事业、特别是对高等院校通信学科的教学工作会很有好处。

教材建设是高校教学建设的主要内容之一。编写、出版一本好的教材,意味着开设了一门好的课程,甚至可能预示着一个崭新学科的诞生。20世纪40年代MIT林肯实验室出版的一套28本雷达丛书,对近代电子学科、特别是对雷达技术的推动作用,就是一个很好的例子。

我国领导部门对教材建设一直非常重视。20世纪80年代,在原教委教材编审委员会的领导下,汇集了高等院校几百位富有教学经验的专家,编写、出版了一大批教材;很多院校还根据学校的特点和需要,陆续编写了大量的讲义和参考书。这些教材对高校的教学工作发挥了极好的作用。近年来,随着教学改革不断深入和科学技术的飞速进步,有的教材内容已比较陈旧、落后,难以适应教学的要求,特别是在电子学和通信技术发展神速、可以讲是日新月异的今天,如何适应这种情况,更是一个必须认真考虑的问题。解决这个问题,除了依靠高校的老师 and 专家撰写新的符合要求的教科书外,引进和出版一些国外优秀电子与通信教材,尤其是有选择地引进一批英文原版教材,是会有好处的。

一年多来,电子工业出版社为此做了很多工作。他们成立了一个“国外电子与通信教材系列”项目组,选派了富有经验的业务骨干负责有关工作,收集了230余种通信教材和参考书的详细资料,调来了100余种原版教材样书,依靠由20余位专家组成的出版委员会,从中精选了40多种,内容丰富,覆盖了电路理论与应用、信号与系统、数字信号处理、微电子、通信系统、电磁场与微波等方面,既可作为通信专业本科生和研究生的教学用书,也可作为有关专业人员的参考材料。此外,这批教材,有的翻译为中文,还有部分教材直接影印出版,以供教师用英语直接授课。希望这些教材的引进和出版对高校通信教学和教材改革能起一定作用。

在这里,我还要感谢参加工作的各位教授、专家、老师与参加翻译、编辑和出版的同志们。各位专家认真负责、严谨细致、不辞辛劳、不怕琐碎和精益求精的态度,充分体现了中国教育工作者和出版工作者的良好美德。

随着我国经济建设的发展和科学技术的不断进步,对高校教学工作会不断提出新的要求和希望。我想,无论如何,要做好引进国外教材的工作,一定要联系我国的实际。教材和学术专著不同,既要注意科学性、学术性,也要重视可读性,要深入浅出,便于读者自学;引进的教材要适应高校教学改革的需要,针对目前一些教材内容较为陈旧的问题,有目的地引进一些先进的和正在发展中的交叉学科的参考书;要与国内出版的教材相配套,安排好出版英文原版教材和翻译教材的比例。我们努力使这套教材能尽量满足上述要求,希望它们能放在学生们的课桌上,发挥一定的作用。

最后,预祝“国外电子与通信教材系列”项目取得成功,为我国电子与通信教学和通信产业的发展培土施肥。也恳切希望读者能对这些书籍的不足之处、特别是翻译中存在的问题,提出意见和建议,以便再版时更正。



中国工程院院士、清华大学教授
“国外电子与通信教材系列”出版委员会主任

出版说明

进入 21 世纪以来,我国信息产业在生产和科研方面都大大加快了发展速度,并已成为国民经济发展的支柱产业之一。但是,与世界上其他信息产业发达的国家相比,我国在技术开发、教育培训等方面都还存在着较大的差距。特别是在加入 WTO 后的今天,我国信息产业面临着国外竞争对手的严峻挑战。

作为我国信息产业的专业科技出版社,我们始终关注着全球电子信息技术的发展方向,始终把引进国外优秀电子与通信信息技术教材和专业书籍放在我们工作的重要位置上。在 2000 年至 2001 年间,我社先后从世界著名出版公司引进出版了 40 余种教材,形成了一套“国外计算机科学教材系列”,在全国高校以及科研部门中受到了欢迎和好评,得到了计算机领域的广大教师与科研工作者的充分肯定。

引进和出版一些国外优秀电子与通信教材,尤其是有选择地引进一批英文原版教材,将有助于我国信息产业培养具有国际竞争能力的技术人才,也将有助于我国国内在电子与通信教学中掌握和跟踪国际发展水平。根据国内信息产业的现状、教育部《关于“十五”期间普通高等教育教材建设与改革的意见》的指示精神以及高等院校老师们反映的各种意见,我们决定引进“国外电子与通信教材系列”,并随后开展了大量准备工作。此次引进的国外电子与通信教材均来自国际著名出版商,其中影印教材约占一半。教材内容涉及的学科方向包括电路理论与应用、信号与系统、数字信号处理、微电子、通信系统、电磁场与微波等,其中既有本科专业课程教材,也有研究生课程教材,以适应不同院系、不同专业、不同层次的师生对教材的需求,广大师生可自由选择和自由组合使用。我们还将与国外出版商一起,陆续推出一些教材的教学支持资料,为授课教师提供帮助。

此外,“国外电子与通信教材系列”的引进和出版工作得到了教育部高等教育司的大力支持和帮助,其中的部分引进教材已通过“教育部高等学校电子信息科学与工程类专业教学指导委员会”的审核,并得到教育部高等教育司的批准,纳入了“教育部高等教育司推荐——国外优秀信息科学与技术系列教学用书”。

为作好该系列教材的翻译工作,我们聘请了清华大学、北京大学、北京邮电大学、南京邮电大学、东南大学、西安交通大学、天津大学、西安电子科技大学、电子科技大学、中山大学、哈尔滨工业大学、西南交通大学等著名高校的教授和骨干教师参与教材的翻译和审校工作。许多教授在国内电子与通信专业领域享有较高的声望,具有丰富的教学经验,他们的渊博学识从根本上保证了教材的翻译质量和专业学术方面的严格与准确。我们在此对他们的辛勤工作与贡献表示衷心的感谢。此外,对于编辑的选择,我们达到了专业对口;对于从英文原书中发现的错误,我们通过与作者联络、从网上下载勘误表等方式,逐一进行了修订;同时,我们对审校、排版、印制质量进行了严格把关。

今后,我们将进一步加强同各高校教师的密切关系,努力引进更多的国外优秀教材和教学参考书,为我国电子与通信教材达到世界先进水平而努力。由于我们对国内外电子与通信教育的发展仍存在一些认识上的不足,在选题、翻译、出版等方面的工作中还有许多需要改进的地方,恳请广大师生和读者提出批评及建议。

电子工业出版社

教材出版委员会

主任	吴佑寿	中国工程院院士、清华大学教授
副主任	林金桐 杨千里	北京邮电大学校长、教授、博士生导师 总参通信部副部长，中国电子学会会士、副理事长 中国通信学会常务理事、博士生导师
委员	林孝康	清华大学教授、博士生导师、电子工程系副主任、通信与微波研究所所长 教育部电子信息科学与工程类专业教学指导分委员会委员
	徐安士	北京大学教授、博士生导师、电子学系主任
	樊昌信	西安电子科技大学教授、博士生导师 中国通信学会理事、IEEE 会士
	程时昕	东南大学教授、博士生导师
	郁道银	天津大学副校长、教授、博士生导师 教育部电子信息科学与工程类专业教学指导分委员会委员
	阮秋琦	北京交通大学教授、博士生导师 计算机与信息技术学院院长、信息科学研究所所长 国务院学位委员会学科评议组成员
	张晓林	北京航空航天大学教授、博士生导师、电子信息工程学院院长 教育部电子信息科学与电气信息类基础课程教学指导分委员会副主任委员 中国电子学会常务理事
	郑宝玉	南京邮电大学副校长、教授、博士生导师 教育部电子信息与电气学科教学指导委员会委员
	朱世华	西安交通大学副校长、教授、博士生导师 教育部电子信息科学与工程类专业教学指导分委员会副主任委员
	彭启琮	电子科技大学教授、博士生导师、通信与信息工程学院院长 教育部电子信息科学与电气信息类基础课程教学指导分委员会委员
	毛军发	上海交通大学教授、博士生导师、电子信息与电气工程学院副院长 教育部电子信息与电气学科教学指导委员会委员
	赵尔沅	北京邮电大学教授、《中国邮电高校学报（英文版）》编委会主任
	钟允若	原邮电科学研究院副院长、总工程师
	刘彩	中国通信学会副理事长兼秘书长，教授级高工 信息产业部通信科技委副主任
	杜振民	电子工业出版社原副社长
	王志功	东南大学教授、博士生导师、射频与光电集成电路研究所所长 教育部高等学校电子电气基础课程教学指导分委员会主任委员
	张中兆	哈尔滨工业大学教授、博士生导师、电子与信息技术研究院院长
	范平志	西南交通大学教授、博士生导师、信息科学与技术学院院长

译者序

随着高速高密度数字系统的盛行,电源完整性的重要性日益凸显。人们对它的认识貌似清晰,实则混沌;所涉及的内容貌似孤立,实则全局。广义的信号完整性,涵盖经典的信号完整性(SI)、数据完整性(DI)、电源完整性(PI)、电磁完整性(EMI)四个领域。研究电源完整性,除了分析电源配送网络(PDN)的供电故障之外,还须关注 PDN 参数设计对全局噪声和电磁干扰性能的影响。之前,电子工业出版社已经出版了《信号完整性分析》、《高速系统设计——抖动、噪声与信号完整性》两部中译本。加上这部有关电源完整性一书的出版,正好代表了广义信号完整性研究的前三个方面。而 EMI 的问题与 EMC 多有交叠,国内已经出版了几部相关专著的中译本。

从章节的划分来看,本书结构非常简明。可以认为第 1 章和第 5 章是基础篇与综合篇,其内容面向知识的普及与应用,类似教材知识的升华结晶和总结归纳,不可不读。第 2 章~第 4 章则是专题篇,内容涉及平面建模、SSN 和时域仿真等焦点内容的深度剖析;其中不乏予人启迪的创新思维和独到的分析论述,令人豁然开朗。例如,第 4 章讨论的时域无源性和时延仿真技术,至今仍是困扰电源完整性仿真的瓶颈。

本书是电源完整性方面一部经典力作。作者之一 Madhavan Swaminathan 是本领域公认的专家;他所在的乔治亚理工学院封装研究中心是电源完整性的集大成者和国际前沿技术的领跑者。他们的研究既包含高水平的理论创新,也有着非常实用化的工程开发成果。本书在理论研究及工程开发两方面均有建树。书中有些内容是触手可及的实用化成果,例如目标阻抗、EBC 设计和建模仿真等。有些内容则是条件所限尚未接轨的前期基础性研究,例如材料等,值得国内学者深入研究与思考。

本书由西安电子科技大学电路 CAD 研究所从事信号完整性研究开发的教师和部分博士生、硕士生倾力翻译,并最终由李玉山教授统稿。其他的审校和翻译人员还有:张木水、高崧、闫旭、路建民、曲咏哲、丁同浩、刘洋、贾琛、王胜源、蒋冬初、白凤莲、董巧玲等。诚然,我们都是在不断地“充电”,翻译中定有诸多谬误,切盼专家和学者不吝赐教。

电子工业出版社高等教育分社的马岚、冯小贝编辑付出了辛勤的劳动,提出了不少好的建议。本书的出版得到国家自然科学基金(No. 60672027、No. 60871072)、教育部博士点基金(No. 20050701002)和西电研究生院研究型课程立项的资助。译者在此一并谨致谢忱。

本书涉及的内容广泛精深,读者可以见仁见智、各取所需。对于从事电源完整性理论研究、工程设计及产品开发、制造和测试的技术人员,都是一本难得的好书。本书可以作为电子通信类学科博士生、硕士生的选修课程的教材,也可以作为电子设计工程师分析电源完整性问题时的参考用书。

李玉山

西安电子科技大学电路 CAD 研究所

前 言

我的研究生生涯是在印度南部一个称为 Tiruchirapalli 的小镇上度过的,那时我们经常会遇到由于浪涌电流电压引起宿舍内风扇和电灯等电子设备损坏的情况。当遇到挫折时,我的朋友曾经说过:“我们无力解决电流问题。”当然,他是开玩笑说的,我几乎没有意识到他的话会成为我这些年研究的主题,尽管我的专业领域是半导体和计算机系统,但是始终围绕着电源方面的问题没有变。

电源代表了当今半导体和系统的主要瓶颈。随着近几年晶体管技术向更小特征尺寸发展,摩尔定律使得数以百万计的晶体管可以集成到一个芯片中。有了更低的门电容和电压,更快速的晶体管在新一代计算机中随处可见。然而,增加晶体管的集成度导致集成电路供电电流的增加,相应的功率也会增加。管控吉赫兹(GHz)下供给集成电路的瞬态电流成为半导体工业面临的巨大挑战之一。由于晶体管供电电压的降低,电流切换引起电源供电的动态变化成为一大瓶颈,供电电压的动态变化也称为电源噪声、 ΔI 噪声或同时开关噪声,它也是本书的主题之一。

管控电源完整性是一个过程,通过此过程晶体管供电电压的变化可以维持在一个特定的容限内。电源供电噪声对集成电路的处理速度有直接的影响,因此,提供洁净的电源在计算机系统设计中是一个非常重要的元素。电源配送网络包括芯片内互连、封装及电路板。电路板上又有去耦电容器、铁氧体磁珠、DC-DC 变换器和其他元器件。封装和电路板构成了电源配送网络一个非常关键的部分,这也是本书的重点。

本书涵盖了电源分配的两个方面:设计和建模,重点是建模。本书分为 5 章,其中包括基础和高级的概念。所有章节都包含若干举例来诠释这些概念,其中一些可以使用提供的软件进行重现。这些举例也可以用来评估目前市场上几个商用工具的准确性和速度。

第 1 章“基本概念”是面向刚刚涉足电源完整性领域的工程师和学生的。基础概念主要涵盖在这一章中,包括对电源噪声基本概念的讨论,以及它对计算机系统速度的影响、产生的寄生效应、对高速信号传播中抖动和电压容限的影响等。电源配送网络的设计最好在频域进行,原因在本章中予以讨论。全书基于一个称为目标阻抗的参数,用于评估一个电源配送网络的性能。此参数出现于 20 世纪 90 年代中期,它提供了一个一流的分析方法,此方法可以用于理解电源配送网络响应中各部件的作用。因此,在第 1 章对目标阻抗进行了详细的解释,使用像 Spice 这样的电路仿真器可以重现这些实例。目标阻抗的概念可用于更好地理解去耦电容器的放置。电源配送网络由稳压器模块、去耦电容器、封装和电路板的互连、平面和片上互连等几种部件构成,其中每种部件都在这一章中给出解释。平面代表了现代电源配送网络一个非常关键的部分,它们的频率特性可以减少电源噪声,也可能极大地增加电源噪声。因此,必须对平面特性及其对高级电源配送网络的影响有一个基本的了解。全书围绕着平面建模与设计角度加以论述。第 1 章介绍平面的基本特性,重点在于分析驻波。包括它们出现的频率、容性和感性特性及如何使用去耦电容器减少其影响。电源分配中各部件间的相互作用也和部件本身一样重要。例如,表面贴装器件(SMD)电容器可以和过孔电感互动,造成自谐振频率转移

到较低的频率;芯片可以和封装相互作用从而形成反谐振;或者电源噪声耦合到信号线上,造成过量的抖动。与此现象有关的基础知识都将在第 1 章中阐述。这里提出的方法学,先以频域分析为中心,然后再转到时域分析。作者认为这是分析和设计高级电源配送网络的最佳途径。

电源配送网络包括设计适当的电源平面、具有很好参考平面的信号及平面间妥善放置的去耦电容器,往往会产生最低的电源噪声。因此,第 2 章“平面建模”的焦点是电源平面,其中包括各种可用于平面建模的方法。至今,这样一些方法已被商用工具普遍使用。本章介绍了数值建模的背景,包括建模方法的概述和对设计者有用的举例。读者可以根据这些例子评估商用工具的准确性和速度。深奥的数学公式可用 MATLAB 加以重现,这一点对于电源完整性建模有兴趣的学生和应用工程师而言,是十分有用的。由于麦克斯韦方程组已转化为电路形式,我们相信解析公式是比较容易理解的。建模方法分为集总式建模与分布式建模,每一种都在本章进行了详细的描述。本章从平面对建模开始,然后解释多层平面建模。接着讨论多层平面的耦合效应,其中包括场穿透的概念、孔径耦合、环绕电流等,并对平面建模方法进行定性比较。这种对比技术加上本章的其余部分,可以作为工程师评估商用软件工具的参照基准。

驱动器输出的信号是通过信号线互连传播的。不过,驱动器需要电压和电流才能工作,这些都是由电源配送网络提供的。该信号和电源互连必定产生耦合,一个互连噪声会通过耦合对另一个互连产生噪声。因此,为了实现信号和电源的管控,需要了解信号线和平面之间的耦合机理。

在学习第 3 章“同时开关噪声”时不需要了解太多的数值方法。整个章节是基于电路级实现的,它采用一个称为模态分解的概念。模态分解使信号线和电源配送网络分离,这样每一个都可以独立分析,然后再相结合进行分析。采用简单的 Spice 模型,利用耦合系数和受控电流或电压源就能获取模态分解。这一章需要理解的一个重要概念就是返回电流的作用,每一位电源完整性工程师必须从这个概念出发来最小化电源噪声。

第 4 章“时域仿真方法”描述了将频率响应转换成 Spice 子电路的方法。尽管时域仿真已经比较成熟,但是将宏建模用于时域仿真还是一个新的研究领域。我们将这一章纳入本书,是因为一些商用电子设计自动化(EDA)供应商已开始在此领域开发工具。第 4 章的目的是为了让工程师或学生更好地理解所涉及的问题。本章的前一部分比较容易理解,主要面向使用商用工具的设计师,只需要一定的数学知识。书中应用几个举例来说明一些简单的概念,而这些概念又可以使用 MATLAB 加以重现。本章的后一部分难度较大,主要是针对在数值建模领域研究的学者。本章的目的是给出所涉及问题的概述和可能的解决方案。

第 5 章“应用”给出了第 1 章~第 4 章所讨论问题的实际案例。我们提供了多个取自 Sun、IBM、三井-Oak、美国国家半导体、思科、杜邦、松下和 Rambus 等公司的实例。这些应用包括电源完整性设计和建模两个方面。每一个实例都是精心挑选的,以确保解决电源完整性某个特定的问题。

本书有一点比较好,就是使用我们所提供的软件可以重现这些实例。希望通过这个软件,一些原先只是在论文中讨论过的电源完整性的各种微妙影响,可以让更多的同行重现并加以评估。

Madhavan Swaminathan (M.S.)

A. Ege Engin(A.E.E.)

致 谢

本书讨论的电源完整性工作始于 20 世纪 90 年代中期,当时我有机会与 Sun Microsystem 公司的 Larry Smith 和 Istvan Novak 合作。这次 5 年多的合作为本书中所列举的概念和技术奠定了基础。我永远感激 Larry 和 Istvan 为我提供了关于电源分配问题的见解,随时可用的几种测试工具,以及进行系统级测量的机会。Larry 和 Istvan 都是我的好朋友,我将继续向他们请教。

2000 年左右,通过 SRC 项目,我开始与 IBM 公司的 James Libous 合作。接下来几年的工作引发出电源完整性建模方面一些非常有趣的新想法。在研究中,并不是每个想法都会产生一个有用的解决方案。但是,如果不尝试新观点,进步是不可能的。我永远感激 Jim 无条件支持我的研究,对各种方案的有效性从不提出任何质疑。由于他对 SRC 项目的指导和领导,我的许多学生参与了电源完整性方面非常有意义问题的研究,其中大部分问题已被收入这本书中。

我在 1994 年加入乔治亚理工学院(Georgia Tech),开始对电源完整性进行全面的研 究。后来我成为 Rao Tummala 教授和 Roger Webb 教授带领的课题的新成员,Rao Tummala 教授是前 IBM Fellow,现在是乔治亚理工学院的主任教授;Roger Webb 教授也曾任乔治亚理工学院电气与计算机工程学院的主任。在他们的关怀和指导下,我得以启动一个新的研究项目。我永远感谢他们。

我的力量在于我的学生。我不断对他们的研究工作提出挑战,而且还经常提出一些不合理的要求,但我的学生总是能够如期完成任务。这本书是他们超过 10 年时间的辛勤工作的结晶。我要感谢所有学生的支持,尤其是以下研究生对这本书有直接贡献:Nanju Na, Jinseong Choi, Sungjun Chun, Joongho Kim, Sunghwan Min, Rohan Mandrekar, Jifeng Mao, Jinwoo Choi, Vinu Govind, Krishna Bharath, Abdemanaf Tamabawala, Krishna Srinivasan, Lalgudi Subramaniam, Prathap Muthana, Tae Hong Kim, Ki Jin Han, Janani Chandrasekhar, and Bernard Yang。他们有的已经毕业,但我还会继续与他们保持联系。

我很幸运,近几年一直有几位访问学者在电源完整性领域与我合作。我非常感谢 Hideki Sasaki(NEC 公司)、Takayuki Watanabe(静冈大学)、Yoshitaka Toyota(冈山大学)及 Kazuhide Uriu(松下公司)在此领域所做的工作。

这本书的每一章都已由该领域的专家仔细审查过。我必须感谢以下专家,是他们的仔细审读和反馈确保了这本书的质量。他们是:第 1 章, Tawfik Arabi(Intel 公司)和 Jose Scutt-Aine(伊利诺伊大学);第 2 章, Eric Bogatin(Bogatin 公司)和 Barry Rubin(IBM 公司);第 3 章, Flavio Canavero(都灵大学)和 Bob Ross(Teraspeed 公司);第 4 章, Ram Achar(卡尔顿大学)和 Rohan Mandrekar(IBM 公司);第 5 章, Mahadevan Iyer(乔治亚理工学院)和 Dan Amey(杜邦公司)。

几年来我一直想撰写一部关于电源完整性的著作。当 A. Ege Engin 在 2005 年加入我的研究计划以后,这一切才都变为可能。通过他的辛勤工作和精心策划,我们才能够完成这本书。我非常感谢他。

书中的一个重点就是软件。用户友好的软件开发始终比较困难。我要感谢 Andy Seo, 他

花费了大量时间为 Sphinx 软件程序开发了图形用户界面(在附录 B 中进行了介绍)。同样也很感谢 Sunghwan Min, 由他开发了 BEMP 软件(第 4 章和附录 B 有相关描述)。

最后,我想感谢我的妻子 Shailaja 和女儿 Sharanya 的支持。这本书是我 10 多年的研究成果。在这段时间内,我在几家公司、学术机构和研究组织工作过,并辗转多处。我的妻子和女儿也同我一起奔波,没有她们爱的支持,这本书是不可能完成的。

Madhavan Swaminathan

首先,请允许我对许多评审本书的专家表示感谢,他们的名字已经在上面提及。我攻读博士期间开始从事电源完整性方面的研究。当时,我作为一个研究工程师在柏林的 Fraunhofer 研究所进行可靠性和微集成方面的工作。在我的许多同事中,尤其要感谢 Uwe Keller 和 Umberto Paoletti,我与他们在计算电磁学方面有过激动人心的讨论;并与 Ivan Ndip 进行过高速设计的研究。我在汉诺威大学的博士生导师 Wolfgang Mathis 教授,向我展示了从电路角度在电源完整性建模上可以找出新的思路。我要感谢他及在 Fraunhofer 研究所的合作导师 Herbert Reichl 的指导,他们一直都在支持我的研究。

我博士毕业后转到乔治亚理工学院与 Madhavan Swaminathan 教授一起工作,他鼓励我成为这本书的共同作者,我很感谢他的指导。我也要感谢乔治亚理工学院封装研究中心 Rao Tum-mala 教授的长期支持。

最后,我想感谢我的妻子 Asuman 和儿子 Anka,感谢他们的爱和持久的支持。

A. Ege Engin

谨以此书献给我的父亲 K. Swaminathan,他给予我毅力;献给我的母亲 Rajam Swaminathan,她给予我耐心。我学会并拥有了这两种品质。

Madhavan Swaminathan

献给我的母亲 Tanju 和父亲 Burhan Engin。

A. Ege Engin

关于作者

Madhavan Swaminathan 于 1985 年在印度 Tiruchirapalli 地区工程学院获得电子与通信专业工程学士(B.E.)学位。以后,又分别于 1989 年和 1991 年在美国锡拉丘兹(Syracuse)大学获得电气工程的硕士(M.S.)和博士(Ph.D.)学位。他目前是美国乔治亚理工学院电气与计算机工程学院的电子学 Joseph M. Pettit 教授和封装研究中心的副主任。他还是 Jacket Micro Devices 公司的创始人之一,该公司专门从事无线射频模块的研发。在加入乔治亚理工学院之前,他曾在 IBM 公司超级计算机的封装领域工作。Swaminathan 教授已经发表了 300 多篇学术论文,并拥有 15 项专利。由于他在电源配送方面的成就,已当选为 IEEE Fellow。

A. Ege Engin 在土耳其安卡拉中东理工大学电子工程专业和德国帕德博恩(Paderborn)大学分别获得学士(B.S.)和硕士(M.S.)学位。在 2001 ~ 2004 年期间,他在柏林 Fraunhofer 可靠性和微集成研究所工作。在此期间,他还获得了德国汉诺威(Hannover)大学的博士(Ph.D.)学位。目前,他是美国乔治亚理工学院电气与计算机工程学院的研究工程师和该校封装研究中心的主任研究助理。他在信号和电源完整性建模与仿真领域的相关期刊和会议上发表了 50 多篇学术论文。

目 录

第 1 章 基本概念	1
1.1 引言	1
1.1.1 晶体管的功能	1
1.1.2 电源配送中的问题	3
1.1.3 电源配送在微处理器和 IC 中的重要性	3
1.1.4 电源配送网络	4
1.1.5 电源供电中的跳变	6
1.2 电源配送的简单关系	6
1.2.1 内核电路	7
1.2.2 I/O 电路	9
1.2.3 SSN 产生的时延	12
1.2.4 SSN 影响时序和电压容限	12
1.2.5 电容器与电流的关系	13
1.3 PDN 的设计	13
1.3.1 目标阻抗	13
1.3.2 阻抗和噪声电压	15
1.4 PDN 的组成部件	16
1.4.1 稳压器	17
1.4.2 旁路或去耦电容器	19
1.4.3 封装和电路板中的平面	25
1.4.4 片上电源分配	28
1.4.5 PDN 中的部件	30
1.5 PDN 分析	30
1.5.1 单节点分析	32
1.5.2 分布式分析	36
1.6 芯片 - 封装反谐振: 实例	40
1.7 高频测量	43
1.7.1 阻抗测量	44
1.7.2 自阻抗测量	45
1.7.3 转移阻抗测量	47
1.7.4 完全消除探针电感的阻抗测量	47

1.8	以平面为参考的信号线	47
1.8.1	作为传输线的信号线	48
1.8.2	传输线参数与 SSN 的关系	49
1.8.3	SSN 与返回路径突变的关系	50
1.9	PDN 建模方法学	52
1.10	总结	53
	参考文献	53
第 2 章	平面建模	56
2.1	引言	56
2.2	平面的特性	57
2.2.1	频域	57
2.2.2	时域	58
2.2.3	二维平面	59
2.3	采用局部电感的集总模型	60
2.3.1	提取电感和电阻矩阵	61
2.4	基于分布式电路的方法	64
2.4.1	传输线建模	64
2.4.2	传输矩阵法	65
2.4.3	单元格元件的频率相关特性	70
2.4.4	平面间隙建模	76
2.5	离散化平面模型	78
2.5.1	有限差分法	78
2.5.2	有限时域差分法	85
2.5.3	有限元法	88
2.6	解析法	89
2.6.1	谐振腔法	89
2.6.2	谐振腔模型的网络表示	90
2.7	多平面对	93
2.7.1	过孔耦合	95
2.7.2	导体耦合	103
2.7.3	孔径耦合	106
2.8	总结	113
	参考文献	114
第 3 章	同时开关噪声	117
3.1	引言	117
3.1.1	SSN 的建模方法	117
3.2	简单模型	118
3.2.1	输出缓冲器建模	120

3.3	传输线及平面建模	123
3.3.1	微带线结构	124
3.3.2	带状线结构	126
3.3.3	背靠导体共面波导结构	135
3.3.4	模态分解法小结	137
3.4	模型在时域分析中的应用	139
3.4.1	返回电流产生的平面反弹	139
3.4.2	微带线到微带线的过孔切换	144
3.4.3	分裂平面	148
3.5	模型在频域分析中的应用	151
3.5.1	电源与地平面间的带状线	151
3.5.2	微带线到带状线的过孔切换	152
3.5.3	采用薄电介质减小噪声耦合	155
3.6	M-FDM 扩展至包含传输线	156
3.6.1	复杂电路板设计分析	158
3.7	总结	159
	参考文献	160
第 4 章	时域仿真方法	163
4.1	引言	163
4.2	有理函数法	163
4.2.1	基本理论	163
4.2.2	插值方案	165
4.2.3	有理函数的性质	168
4.2.4	增强无源性	171
4.2.5	电路求解程序中的整合	188
4.2.6	缺点	195
4.3	信号流图(SFG)	197
4.3.1	因果性	197
4.3.2	传递函数因果性	198
4.3.3	最小相位	198
4.3.4	从频率响应中提取时延	200
4.3.5	因果信号流图	201
4.3.6	信号流图计算	203
4.3.7	快速卷积法	205
4.3.8	利用信号流图进行 SI 和 PI 的协同仿真	208
4.4	改进节点分析(MNA)	212
4.4.1	MNA 的含义	212
4.4.2	频域	212
4.4.3	时域	214

4.4.4	含 S 参数的 MNA 公式	215
4.5	总结	219
	参考文献	220
第 5 章	应用	223
5.1	引言	223
5.2	高速服务器	223
5.2.1	内核 PDN 噪声	224
5.2.2	I/O PDN 噪声	230
5.2.3	小结	234
5.3	高速差分信令	234
5.3.1	测试装置说明	235
5.3.2	平面建模	236
5.3.3	主从岛建模	240
5.3.4	有理函数建模	241
5.3.5	模态分解和噪声仿真	243
5.3.6	小结	244
5.4	IC 封装分析	245
5.4.1	用 M-FDM 仿真多层封装	245
5.4.2	HyperBGA 封装的因果仿真	248
5.4.3	小结	250
5.5	提取介电常数及耗散因子	251
5.5.1	问题的定义	251
5.5.2	角点对角点平面探测法	254
5.5.3	建立因果模型	259
5.5.4	小结	263
5.6	嵌入式去耦电容器	263
5.6.1	嵌入式分立薄/厚膜电容器	264
5.6.2	嵌入分立电容器的优点	265
5.6.3	嵌入式厚膜电容器阵列设计	265
5.6.4	IBM 封装集成的嵌入式电容器	270
5.6.5	嵌入式平面电容器	272
5.6.6	小结	279
5.7	电磁带隙(EBG)结构	279
5.7.1	基本理论	280
5.7.2	EBG 结构的响应	282
5.7.3	色散图分析	283
5.7.4	用边缘场和间隙场修正 M-FDM	286
5.7.5	电源平面隔离 EBG 结构的可缩放设计	289
5.7.6	数字 - RF 一体化	292

5.7.7	ADC 负载板设计	293
5.7.8	数字系统 EBG 结构中的问题	295
5.7.9	小结	297
5.8	未来的挑战	298
	参考文献	299
附录 A	304
附录 B	软件清单	309
术语表	310