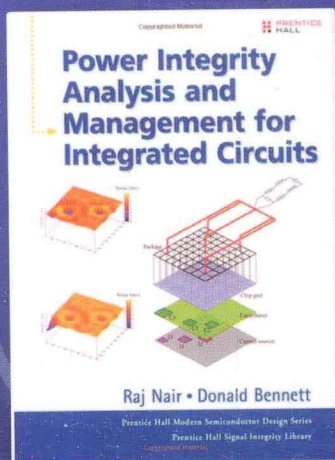


国外电子与通信教材系列

PEARSON

集成电路电源完整性 分析与管理

Power Integrity Analysis
and Management for Integrated Circuits



[美] Rajendran Nair 主编
Donald Bennett

贺雅娟 罗萍 等译

张波 审校



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

集成电路电源完整性 分析与管理

**Power Integrity Analysis and
Management for Integrated Circuits**

[美] Rajendran Nair 主编
Donald Bennett

贺雅娟 罗 萍 等译
张 波 审校

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书全面论述了电源完整性问题,特别是在纳米级工艺下系统芯片的电源完整性的基本概念,揭示了其对于集成电路系统的重要意义,讨论了电源完整性问题在小工艺线宽下所遇到的种种挑战,以及为解决这些问题所引入的先进分析方法、管理技术及可用于设计前期的具有突破性的实用工具。

本书涵盖了电源完整性问题从基础理论到先进技术的各个方面,可作为相关专业本科生及研究生的教学指导用书。同时与其他大多数同类书籍相比,该书更强调直观理解、实用工具和工程实践,因而对于工作在纳米级工艺下,负责信号完整性、电源完整性、硬件设计、系统设计的工程师而言将是不可或缺的参考资料。

Authorized translation from the English language edition, entitled Power Integrity Analysis and Management for Integrated Circuits, 9780137011223 by Rajendran Nair, Donald Bennett, published by Pearson Education, Inc., publishing as Prentice Hall, Copyright © 2010 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 2013.

本书中文简体字翻译版由 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。

本书封面贴有 Pearson Education(培生教育出版集团)激光防伪标签,无标签者不得销售。未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。版权所有,侵权必究。

版权贸易合同登记号图字:01-2010-8182

图书在版编目(CIP)数据

集成电路电源完整性分析与管理 (美)奈尔(Nair, R.) (美)贝内特(Bennett, D.)主编;贺雅娟等译. —北京:电子工业出版社,2013.11

书名原文:Power Integrity Analysis and Management for Integrated Circuits

国外电子与通信教材系列

ISBN 978-7-121-21804-0

I. ①集… II. ①奈… ②本… ③贺… III. ①集成电路—电源电路—高等学校—教材 IV. ①TN86

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 262275 号

策划编辑:陈晓莉

责任编辑:陈晓莉

印刷:北京市李史山胶印厂

装订:北京市李史山胶印厂

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:15.25 字数:390千字

印次:2013年11月第1次印刷

定 价:58.00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 zltts@phei.com.cn,盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线:(010)88258888。



译者序

随着当今集成系统变得日益强大、便携,系统和设备的功率及能耗成为设计的一个关键约束,电源完整性在决定电路功率损耗上起着决定性的作用。对于电源完整性的研究已成为集成电路设计领域的一个重要发展方向。目前国内在电源完整性分析及管理方面的研究还处于初级阶段,关于这个领域的教学和工程指导教材比较单一,缺乏一本能够对电源完整性分析和
管理领域进行总结并及时介绍国际最新技术发展动向的教材。

本书汇集了主编及各位合著者过去 10 年在集成电路领域研究和工作的主要成果。书中从电源完整性的基本概念入手,通过与力学系统及其相关理论的类比,分析了电源完整性在导致集成电路性能差异方面呈现上升趋势的根本原因,并讨论了随着日益缩小的工艺线宽,电路设计工程师在电源完整性问题上所遇到的种种挑战,以及为解决这些问题所引入的先进的分析方法、管理技术和可用于设计前期的具有突破性的实用工具。本书涵盖了电源完整性问题从基础理论到先进技术的各个方面,表述严谨规范,材料全面系统,是目前集成电路电源完整性理论分析与电路设计结合较好的一本书。同时书中以广泛的应用芯片为例提供了相当数量的设计实例,既可作为相关专业的本科生及研究生的教学指导用书,也可以作为从事集成电路设计、开发的工程师的设计参考资料。

本书的翻译工作由电子科技大学微电子与固体电子学院功率集成技术实验室主任张波教授组织完成。实验室多名教师共同参与,其中第 1、2、3、9 章由罗萍教授翻译,第 4、6、8、10 章及附录等由贺雅娟副教授翻译,第 7 章由甄少伟老师翻译,第 5 章由明鑫与周泽坤老师共同翻译。此外,微电子专业多名研究生也参与了本书的翻译工作,在此对他们的积极参与和认真工作表示衷心的感谢。

还要感谢电子工业出版社陈晓莉编审在组织出版和编辑工作中给予的支持和建议。

鉴于译者水平有限,时间仓促,译文难免出现错误和不妥之处,希望读者予以批评指正。

译者

2013 年 5 月

作者简介

Raj Nair 在工业界和学术界有超过 22 年的工作经验,拥有超过 40 个 VLSI 设计和电子产品专利,他对电子系统、电路和器件级电源传输以及电源完整性管理进行了大量的研究。其最引人注目的是在英特尔公司工作时,研究并设计了用于微处理器电源完整性管理的 CMOS 电压调制电路。Raj 建立了 ComLSI 和 Anasim 两家公司,主要研发先进的用于 ULSI 电源完整性分析及管理的专利技术和软件工具,同时也提供 IC 设计以及电源完整性相关的技术咨询服务。



Donald Bennett 博士,器件物理学家,经验丰富的半导体业内专家,Anasim 公司合伙人。Donald Bennett 博士发明了目前正在申请专利的有效电流密度法,这一方法有效改善了对集成电路和系统电源完整性分析的高层次抽象及物理仿真。在加入 Anasim 公司之前,他建立了 QuantumDA 公司,开发并配置 RLCSim 仿真软件,该软件使用 ECD 法可进行电源网格仿真。



前 言

本书是我们在纳米技术时代首次郑重地揭开电源完整性设计的神秘面纱,书中将详细介绍电源完整性的概念与分析方法,以及集成电路的电源完整性管理。

本书重点关注集成电路的电源完整性部分。本书既可作为见习工程师获取集成电路设计简介的教材,也可作为已有一定设计技巧的工程师开发集成系统的有益参考。因此,书中的每一个章节既会强调基本的概念、原理、直观的理解,同时也会讨论一些新概念与新技术。本书与以往著作不同的一点是强调了集成电路及系统行为的真实物理模型。我们在直观地理解电源完整性基本物理意义的基础上,通过与力学系统及其基本法则的对比,探究了集成电路性能差异比例因电源完整性影响而呈现上升趋势并逐渐成为主导的根本原因。

简单的实例更有助于说明电源完整性对于集成电路与系统的重要性。随着当今集成系统变得日益强大、便携,系统和设备的功率及能耗成为设计的一个关键约束。电源完整性,尽管在决定电路功率损耗上起着最主要的作用,但是却较少受人关注。举例而言,我们都知道在娱乐场所中如果将灯光调暗得过快,或电视屏幕亮度的急剧变化对我们的眼睛有害。因此我们想要降低照明能耗完全取决于光噪声的大小。这个道理同样适用于集成电路:一个最基本的方法就是降低电源电压以最大限度地降低功率及能耗,这直接取决于电源噪声的大小,或者说这就是电源完整性。

我们承认,这项工作的动力很大程度源于对高性能微处理器的电源完整性的研究,而不是低功耗片上系统各电路模块的节能需求。通过对未来几代处理器封装技术的研究,我们充分认识到,目前缺少像样的工具来判断电源电压噪声与电路关键路径在时序上的一致性。而在封装设计中,对电源完整性管理元器件,比如封装电容等的布局优化,依然只能在整个设计完成之后再考虑。非物理近似,比如简化电阻—电容模型,常用来分析一个芯片的电源分配网络。我们也很清楚,提取片上互连线、电阻、电容、电感这些关键电磁参数,以及对这些提取了寄生参数的电路模块和系统进行仿真,是高难度且计算复杂度渐长的工作。因此,片上电源分配网络的优化、电路模块的版图布局、去耦电容的分布都会影响到芯片的整体质量。更重要的是,我们已经认识到对电路的电源完整性分析而言,目前缺少的是一种用于芯片设计早期的前端仿真工具,这种仿真工具应该能较好地分配芯片资源,包括金属连线、去耦电容和电源电压垫脚等外部连接。这些因素实际制约着物理设计的质量和设计的自由度,也往往导致芯片资源的过度分配,或过多的重复设计。特别是在纳米级的制造工艺下,更是存在许多挑战。就目前而言,最迫切的还是需要一种广泛的、能进行真实物理模型研究,同时具有前端分析能力的工具。这也将是集成器件持续按比例缩小将遇到的最大挑战。

我们倾其所能,把过去十多年中我们在集成电路这一重要领域所学到的和研究过的内容写进这部书里。根据我们在这一领域的工作经验,通过高层次抽象、物理建模和分析能解决电源完整性方面的诸多挑战。这本书在讲述这些知识的同时,还将介绍一些传统的及先进的应用于电源完整性分析的方法及技术。

虽然我们广泛讨论了功率、电源完整性、电源、电源分配网络设计、电源完整性管理等各方

面必要的知识,但是本书只是非常简单地对这一复杂的课题进行入门级介绍。书中的某些讨论可能显得过于简单,某些内容又显得过于繁缛,有很多插图,甚至会有重复内容。但这样应该会更易于读者掌握所讨论的理论和定理,我们也相信初学者会找到一些非常有用的解释、范例和反复说明。各水平层次的读者也许会发现我们设计的习题还能引发超出教学内容的思考。为了使读者对集成电路的电源完整性有更全面的认识,本书尽量把公式推导作为第一准则,并且着重于直观的理解。当然在公式推理的同时,也适时地给出一些经验解释。

作为一项研究,错误在所难免,我们虚心接受广大读者的意见;我们在书中大胆提出的一些概念尚未得到普遍认可,因此还需要读者们在自己的工作中进行充分验证。我们相信,经验丰富的工程师因为自身工作的关系,在看到书中一些新颖的想法和概念时会与我们产生共鸣,或许还会进行进一步的探索并继续推动这项研究。例如,我们将“差分电源分配法”称为“宽带”电源电压分配法。从事信号完整性分析的工程师可能会欣赏这个概念的提法,因为这与几乎已经取代“单端信号”的“差分信号传输”的概念有相似性。我们还讨论了有源噪声调制,有源噪声调制是一种通过动态改变连接电源网络的阻抗值来提高电源完整性的技术。我们信心十足地提出诸如此类的概念和方法,比如“整体集成”的概念,又比如创造性地通过动态时序分析以电源波动技术来提高电路性能的方法等,尽管这些概念和方法还没有得到足够的应用和经验性的实例来佐证。我们也期待读者和其他研究人员在阅读本书的过程中能发现这些概念是耐人寻味、富于启发性的。

本书结构

整体而言,本书可分为4个不同的部分。第一部分是第1章到第3章,介绍电源完整性的基本知识、器件持续按比例缩小给电源与电源完整性带来的挑战、电源分配的实际应用,以及整体电源完整性对芯片物理设计优化的重要作用。第二部分是第4章到第7章,着重介绍各种电源分配网络的建模、设计与分析。这些章节重点强调了抽象和基于物理层面的分析,同时也提供了大量对于传统电路和基于场解算器技术的讨论。第三部分重点叙述版布局布线和电源完整性管理的各种技术的应用。这一部分由第8、9两章构成,主要讨论了电源完整性管理最新的概念和应用。第10章通过讨论电源完整性的发展趋势及未来的挑战作为本书的结尾。下面是每个章节的简介和推荐的阅读方法。

第1章,“功率、功率传输及电源完整性”,采用物理类比的方法向读者展示了电源和电源完整性的直观理解。例如,将“力—电压类比”用于已有的相关概念,把电学里的电源、电能类比为物理学中等效的物理量。初学者会感觉这一章有助于加强对电源完整性的了解,有经验的工程师则可以略过这些内容,或者也可以浏览这一章,复习并且体会一些重要的概念。

第2章和第3章是本书第一部分的重点,无论是对这一领域的初学者还是对经验丰富的设计者都适用。第2章“巨大规模集成电路及其功率挑战”,通过对比“纳米级”与之前集成电路制造工艺的差异,对CMOS电路按比例缩放和“能量—延时”的基本概念进行深入的讨论。本章为介绍“整体电源完整性”奠定基础,包括芯片电源网格的电感特性,该特性与芯片功耗和性能相关。缺乏对信号传播时所产生的电磁感应的分析将会造成潜在的错误。本章还推导出“按比例缩放—驱动能力”这一直接影响电源完整性和系统性能的关系。第3章“芯片的电源完整性和功率传输优化”,讨论了电源传输和集成电路的电源分配,尤其详细地介绍了“电压调制分配”与高效开关电源转换、缩放之间的关系。这些章节明确地表明片上电磁感应对于芯片

电源分配网络设计的重要性,同时提供了与电源完整性分析相结合的方法。

第4章到第7章,具体讨论了各种电源分配网络建模和分析技术,适用于本领域各个层次的读者。第4章“电源完整性预分析及抽象”,详细介绍了基于芯片和电源分配网络建模的前端分析与抽象。第5章“电源完整性分析与EMI/EMC”,首先对传统的电源分配网络建模和电阻管理进行了详细的描述,讨论了建模方法和数值分析,说明了基于3D场解算器方法的重要性和准确性。这一章随后也阐述了可将这种分析方法用于研究电源完整性与芯片封装中电磁辐射这两者间的密切关系,再一次强调对电源完整性以及EMI进行全面、系统的前端分析的必要性。第6章“电源分配建模与电源完整性分析”,展示了一种由分布的RLC元件构成的建模技术可对片上电源分配进行高效、准确的分析,这一技术也被用来评估不同的降低电源噪声的方法。第7章“有效的电流密度和连续模型”,介绍了一种新型的建模方法,把一个电源分配网络的抽象转变成一个连续模型,从而大大减少了计算的复杂度。这一章提供了众多例证来说明对芯片布局规划进行抽象建模的优点,并将基于连续模型的仿真器与SPICE仿真器进行了比较。

第8章和第9章将工业界对于电源和电源完整性管理的现代化先进技术和概念,以及考虑电源完整性的布局规划加以结合。第8章着重考虑电源完整性的布局布线及芯片设计,并且讨论了电源管理技术对集成电路电源完整性的影响。第9章详细介绍了芯片级和封装级的电源完整性技术,对一些新兴技术,譬如去耦电容沟道长度设计、三井制造工艺、压控电容和有源封装等,进行了一定的探索和研究。这几个章节建议有经验的工程师仔细阅读。

第10章作为结束本书的一个简短章节,讨论了保持器件持续缩小和电子集成度持续增大的先进技术及发展趋势。在这一章中读者会看到大量的实例,展示了集成技术伴随着半导体以及封装技术的发展向3D方向发展的事实。同时对集成技术微型化和低成本的要求进行了详细说明,再次强调了目前在电源、发热和电源完整性方面所面临的诸多挑战。

辅助资料

本书附录为有较多数学运算的章节提供更为详尽的推导细节和理论分析。附录A是基于连续模型对电源网格有效电流密度的详细推导。附录B提供了对亥姆霍兹平面电路方程的推导。

书中提供的所有互联网链接地址目的是使读者能够随时获得最新的可视化仿真结果,以及在线参考文献。同样,在所有章节中的脚注是为了给读者澄清一些不常见的术语和概念。

基于连续模型,能进行芯片电源网格、电路模块仿真及电容抽象的仿真器RLCS.exe,可以从Anasim网站免费下载,链接网址<http://www.anasim.com/category/software/>。这个软件可在微软视窗下使用,安装软件中包括了它的使用手册和一些我们在第4章所提到的实例。

深入研究

第9章的参考文献清单一开头列出了这一领域的其他几部参考书籍,这些书中对印制电路板、平面电路、无源器件、传输线,以及其他一些相关电路做了精彩的论述。我们希望我们的这本书对集成电路和电源完整性技术的讨论能够成为其他同类著作的有益补充,为进一步研究先进的分析方法和电源完整性管理做好铺垫。相信我们在书中讨论的电源完整性建模及如何提高电路设计中的电源完整性分析能力,将会是纳米尺度下促使3D技术和整体集成技术持续发展的关键。我们在这里分享这项研究的成果,希望能为后来者抛砖引玉,在这一领域开展更加深入的研究。

致 谢

在培生教育出版集团 Bernard Goodwin 的再三邀请下,这本书才得以问世。在此,我们对发起这项工作并提供帮助和指导表示感谢。很多专家对本书的内容进行了审阅,使得本书的质量得以不断提高。感谢 Bogatin 公司的 Eric Bogatin、Teraspeed 咨询公司的 Steve Weir、亚利桑那州州立大学的 Michael Kozicki、英特尔公司的 Vijay Nair、美国宾夕法尼亚州立大学的 Seth Wolpert 以及 Dave Cuthbert,感谢他们提供了极其重要的评审意见。我们还要感谢西印度群岛科技大学的 Michael Kozicki 和 Paul Aiken,衷心感谢他们为本书提出了许多详细的、富有建设性的意见。还有一些不知名的审稿人,正是他们的意见与帮助才使得本书取得了目前较为完善的内容与形式。

众多工业界和学术界相关领域里的专家为本书的章节或子章节提供的素材大大提升了本书的内容。日本大阪大学的 Masanori Hashimoto 和 Mentor Graphics 公司的 Navin-Srivastava 撰写了本书第 3 章的主要内容。第 5 章的作者为 Physware 公司的 Swagato Chakraborty、Dipanjan Gope 和 Vikram Jandhyala,华盛顿大学的 Mosin Mondal、Souvik Mukherjee 和 Woopoung Kim,以及德州仪器公司的 Rajen Murugan。瑞典皇家理工学院(KTH)的 Li-Rong Zheng 和芬兰土尔库大学的 Sampo Tuuna 共同撰写了第 6 章的内容。德州仪器公司的 Shane Stelmach 和 Snehamay Sinha 提供了第 7 章的内容。Masanori Hashimoto 同时还撰写了第 9 章中关键的一部分。得克萨斯大学奥斯丁分校的 Leo Mathew 和德州仪器公司的 Mario A. Bolaos 分别提供了第 10 章中多栅极晶体管和封装部分的素材。衷心感谢以上这些同仁们的贡献。第 5 章、第 8 章、第 10 章中的主要内容都是在 Rajen Murugan 的倡议和带领下完成的。感谢他和德州仪器公司在这本书的出版过程中所投入的精力、时间和努力。我们非常荣幸与这样一个优秀的撰稿团队合作。

我们感谢培生教育出版集团的 Michelle Housley 始终关注本书的写作进展,感谢 Arul Gnanadesigan 对本书文字的编辑,纠正了不少冗长、复杂的语句。与同事和朋友们的讨论经常使我们有更清晰的思维,由此感谢英特尔公司的 Siva G. Narendra、James T. Kao、Randy Mooney、Vivek De 及 Bala Natarajan 等人。我们感谢所有帮助过、教育过和启发过我们的人,由于人数众多,就不在此一一列举。

感谢我们的家人,他们毫无怨言地支持我们承担了这项工作,对他们的耐心和鼓励表示由衷的感谢。

合著者简介

Mario A. Bolaños: Mario A. Bolaños 在半导体封装领域有超过 30 年的从业经验,在德州仪器公司封装部门从事封装战略研究,并且主管与大学的战略合作计划。在德州仪器,这个部门负责研究封装技术的新方法。Mario 在世界范围内拥有 10 个专利,以及大量的技术论文和重要的演讲。他于 1976 年获得萨尔瓦多的基督会大学(UCA)电子工程理学学士学位,1995 年在得克萨斯大学达拉斯分校获硕士学位。

Swagato Chakraborty: Swagato Chakraborty 博士是 Physware 公司副总裁。他于 2001 年获印度理工学院(IIT)电子技术和电气通信学士学位,于 2005 年获华盛顿大学电子工程博士学位。他撰写了大约 30 篇期刊和会议论文。他的研究领域包括应用于 SI、PI、EMI 领域的计算机电磁技术和软件开发。

Dipanjan Gopé: Dipanjan Gope, 博士,目前是 Physware 公司的研发副总裁。2005 年到 2007 年他是英特尔公司的高级 CAD 工程师。他于 2000 年在印度克勒格布尔获印度理工学院(IIT)电子技术与电气通信学士学位,分别于 2003 年和 2005 年在美国西雅图获华盛顿大学电子工程硕士和博士学位。目前他已发表了 35 篇期刊和会议论文。

Masanori Hashimoto: Masanori Hashimoto 于 2001 年获得东京大学博士学位。从 2004 年起,他担任大阪大学信息科学与技术学院信息系统工程系副教授。他的研究方向包括超大规模集成电路设计及 CAD,尤其着重于电源完整性、信号完整性、时序分析、可靠性设计以及极低电压电路设计。

Vikram Jandhyala: Vikram Jandhyala 博士是西雅图华盛顿大学副教授,并担任 Physware 公司的首席技术官。他于 1993 年在印度德里获印度理工学院(IIT)电气工程学士学位,分别于 1995 年和 1998 年获伊利诺伊大学厄巴纳-香槟分校(UIUC)电子工程硕士和博士学位。目前他已发表约 150 篇期刊和可检索的会议论文。

Woopoung Kim: Woopoung Kim 自 2008 年以来在德州仪器公司担任设计工程师,进行芯片和封装的协同设计。在加入德州仪器公司之前,2004 年到 2008 年他在加利福尼亚洛杉矶的 Rambus 公司担任高级工程师,从事信号完整性分析。他在佐治亚亚特兰大获佐治亚理工学院(GIT)电子工程博士学位,在韩国大田获韩国科学技术院学士学位和硕士学位。他是 IEEE 高级会员。

Leo Mathew: Leo 在印度的哥印拜陀获得印度国家科学技术院学士学位,于 1992 年获亚利桑那州立大学硕士学位。从 1992 年到 2007 年,他在摩托罗拉和飞思卡尔从事多种器件工艺的开发。他是 Astrowatt 公司的联合创立者和首席技术官,也是“新型设备应用”公司的联合创立者。他目前拥有 40 项授权专利,是《电子时代》2006 年的年度创新人物。

Mosin Mondal; Mosin Mondal 在西雅图获华盛顿大学电子工程博士学位。他分别在印度的 Rice 大学和 Jadavpur 大学获得硕士和学士学位。从 2001 年到 2004 年,他在印度的 Candence 公司担任研究员。他的研究范围包括电源和信号完整性、电路电磁仿真、互连建模以及用于 VLSI 系统的 CAD 等。他已经发表了超过 20 篇期刊和会议论文。

Souvik Mukherjee; Souvik Mukherjee 博士于 2002 年在印度的克勒格布尔获得印度理工学院(IIT)电子工程学士学位,分别于 2004 年和 2007 年在佐治亚技术学院获得硕士和博士学位。自 2007 年 6 月,他在德州仪器公司担任 CAD 工程师/无线领域方法学研究工程师。他的研究领域包括信号完整性和电源完整性分析及应用,以及片上无源器件的电磁建模。Souvik Mukherjee 博士已经发表了 20 多篇会议引用文章、期刊和公司专题报告,并拥有一项专利。他是 IEEE 的会员。

Rajen Murugan; Rajen Murugan 主要从事无线和模拟设计领域的电气-物理协同设计和仿真流程设计。目前他是无线封装部门的高级信号完整性分析工程师,是德州仪器公司的高级研究员。他在电阻层析成像和信号完整性领域拥有专利若干,并在权威杂志上发表论文若干。自 1998 年至今他一直担当物理出版社研究院的学术评审。Rajen Murugan 在加拿大的曼尼托巴大学获得电子工程博士学位。

Snehamay Sinha; Snehamay Sinha 是德州仪器公司 DSP 部门系统协同设计组组长。他于 1995 年在印度孟买获塔塔基础科学研究院的物理学博士学位。他研究领域包括信号和电源完整性、ESD、衬底噪声以及高速电路设计和封装。他在权威杂志、会议和公司专题报告会上发表了大量文章,在 ESD、衬底噪声和封装模型领域拥有 4 项专利。

Navin Srivastava; Navin Srivastava 于 2000 年在印度克勒格布尔获得印度理工学院(IIT)学士学位,于 2009 年在加州圣塔芭芭拉获得加州大学博士学位。他目前在俄勒冈威尔逊维尔的 Mentor Graphics 公司的 Calibre 部门工作。他主要研究 VLSI 的互连技术,该研究曾获得 VLSI 多层互连会议(2005)和 IEEE 微机杂志(2006)的奖励。

Shane Stelmach; Shane Stelmach 是德州仪器公司 EDA 研发部研发主管,主要负责版图布局布线工具的研发。他是德州仪器公司的高级工程师以及协同研发小组组长。他于 1991 年在美国得克萨斯的 A&M 大学获得电子工程学士学位。

Sampo Tuuna; Sampo Tuuna 在芬兰获土尔库大学工程硕士学位。他现在作为研究员在土尔库大学信息技术学院攻读博士学位。他的主要研究领域包括片上噪声和片上互连建模。

Li-Rong Zheng; Li-Rong Zheng 是瑞典皇家理工学院(KTH)的客座教授,并担任中国复旦大学信息技术学院院长。他是瑞典皇家理工学院 iPack VINN 卓越实验室的创立者并担任该实验室主任,他也是瑞典斯德哥尔摩爱立信公司的资深专家。他于 2001 年在瑞典皇家理工学院获得电子系统设计专业博士学位。之后他一直在学术界和工业界从事智慧型环境及媒体感知系统的设计,以及无线片上封装等的研究。他的独著或合著论文多达 200 多篇。

目 录

第 1 章 功率、功率传输及电源完整性	1
1.1 电动势	1
1.1.1 力—电压类比	1
1.2 功率	2
1.2.1 功率的物理类比	3
1.2.2 电源	3
1.2.3 电力电子电路与系统的供电	4
1.3 电源配送	4
1.3.1 中央直流电源传输模块	5
1.3.2 集成电源配送	5
1.3.3 电源分配网络	6
1.3.4 电源配送调节	6
1.4 电源完整性	7
1.4.1 电源完整性降低的原因	8
1.5 练习题	9
参考文献	9
第 2 章 巨大规模集成电路及其功率挑战	11
2.1 指数集成度和半导体尺寸	11
2.1.1 微处理器体系结构的功率发展趋势	12
2.1.2 晶体管尺寸缩小及其影响	12
2.2 功率和能量消耗	15
2.2.1 电容充电的功耗和能耗	16
2.2.2 其他功率损耗	19
2.3 功率、热和电源完整性的挑战	22
2.3.1 电源完整性和缩放造成的影响	22
2.4 练习题	28
参考文献	29
第 3 章 芯片的电源完整性和功率传输优化	30
3.1 功率传输及效率	30
3.1.1 最大功率传输理论	30
3.1.2 电源芯片	31
3.1.3 电源的噪声和闭环功率传输的差分特性	38
3.1.4 噪声和电源完整性	40
3.2 优化芯片的功率传输：片上电感和网格设计	45
3.2.1 片上电源网格分析的等效电路模型	45
3.2.2 负载电流的斜率和电容位置对噪声的影响	46
3.2.3 电源网格功耗分布分析	49

3.2.4	带片上电感的电源网络的鲁棒设计	53
3.3	电源网络成本因素的折中分析和设计	57
3.3.1	功率传输网络设计的成本因素	57
3.3.2	功率传输网络设计的折中分析	58
3.4	练习题	60
	参考文献	61
第4章	电源完整性预分析及抽象	63
4.1	工艺,电压和温度:设计验证空间	64
4.1.1	电源波动分配	64
4.2	后端和前端电源完整性分析	65
4.2.1	集成电路中的电源完整性分析差距	67
4.2.2	前端电源完整性分析	67
4.2.3	芯片组件的抽象	68
4.3	高层次抽象模型的仿真环境	73
4.3.1	连续介质模型	74
4.4	抽象和电源完整性实例分析	74
4.4.1	最佳片上电源网络设计	76
4.4.2	系统级前端仿真	77
4.5	本章小结及巩固	78
4.6	练习题	79
	参考文献	80
第5章	电源完整性分析与 EMI/EMC	81
5.1	引言	81
5.2	通过电源分布网络产生和传播的噪声分析	82
5.2.1	电源和接地噪声来源	82
5.2.2	PDN 中目标阻抗的计算	83
5.2.3	来自 PDN 阻抗的电源—地噪声评估	85
5.3	降低 PDN 中噪声的去耦电容建模	86
5.3.1	板上去耦电容	87
5.3.2	封装级去耦电容	87
5.3.3	片上去耦电容	87
5.4	电源传输网络中的电流设计方法学	89
5.4.1	第一步:尽可能地减小 PDN 的电感	89
5.4.2	第二步:板上去耦电容的使用	91
5.4.3	第三步:封装去耦电容的使用	91
5.4.4	第四步:片上去耦电容的使用	92
5.5	建模方法	93
5.5.1	低频近似	93
5.5.2	高频方法	95
5.5.3	数值方法学分类	95
5.5.4	数值方法比较的一个实例研究	96
5.6	数值方法	98
5.6.1	积分方程方法	98

5.6.2 差分方程方法	100
5.7 电源和信号传递分析方法及限制	102
5.7.1 基于工具范畴的限制	102
5.7.2 工具限制的例证	103
5.8 电源完整性——电磁干扰检测分析	109
5.8.1 PDN 组成部分及相关电源完整性问题	109
5.8.2 由 SSO/SSN 高电流暂态产生的系统级电源轨噪声	110
5.8.3 封装和 PCB 的平面共振	111
5.8.4 系统级去耦优化	112
5.8.5 回路参考平面的不连续性	113
5.9 现有的 EMI 技术的优势和局限	114
5.10 早期的电源完整性检测、EMI 建模及分析流程	115
5.10.1 早期电源完整性组成部分——检测 EMI 流程	115
5.10.2 版图设计、提取及模型建立	116
5.11 SI、PI 和 EMI 总结	126
5.12 练习题	127
参考文献	127
第 6 章 电源分配建模与电源完整性分析	131
6.1 引言	131
6.2 电源分配网络的建模	133
6.3 电源分配模型的数值分析	136
6.4 差模噪声与共模噪声	136
6.5 验证与误差分析	138
6.6 片上总线开关电流建模	142
6.7 总线模型的验证	145
6.8 用以减小电源分布噪声的总线偏斜	148
6.9 实例研究:电源分布噪声的降低	149
6.10 练习题	150
6.11 附录一公式(6-37)的方程系数推导	150
参考文献	151
第 7 章 有效的电流密度和连续模型	155
7.1 电路和模型简化	155
7.2 有效电流密度的定义	155
7.3 有效电流密度和虚拟电流	157
7.4 有导体,绝缘体,和其他组件的网络的对称性	157
7.5 使用 ECD 的一个连续模型	158
7.6 一个基于连续性模型的 IC 版图仿真	164
7.7 连续性模型与 SPICE 模型对比	168
7.8 纳米级 CMOS 集成电路的模型优化	171
7.9 练习题	171
参考文献	172
第 8 章 考虑电源完整性的芯片布局规划与设计	173
8.1 电源完整性设计:纳米时代下的考虑	173

8.1.1	系统要求	173
8.1.2	芯片成本	174
8.1.3	性能	175
8.1.4	功耗最小化	175
8.1.5	其他考虑	175
8.2	电源完整性设计:技术	175
8.2.1	功耗管理	176
8.2.2	电源网格设计	177
8.2.3	芯片布局规划和去耦电容	179
8.3	电源管理和电源完整性	181
8.3.1	电源管理技术	182
8.3.2	电源完整性的含义	185
	参考文献	190
第9章	集成电路与系统中的电源完整性管理	191
9.1	芯片级电源完整性管理	191
9.1.1	主要技术	191
9.1.2	片上噪声测量和建模	192
9.1.3	依赖于电压的去耦电容	196
9.1.4	优势和技术	198
9.2	系统级和封装级的PI管理	199
9.2.1	系统级的PI管理	199
9.2.2	封装上安装的电容	201
9.2.3	有源封装和有源噪声调节	201
9.2.4	封装PI管理小结	205
9.3	练习题	205
	参考文献	206
第10章	集成技术,发展趋势及挑战	208
10.1	芯片级集成	208
10.1.1	低功耗系统的器件结构	208
10.1.2	受益于多个独立栅FinFET结构的应用:SRAM	210
10.1.3	器件结构总结	210
10.2	封装级集成	211
10.2.1	先进封装技术	212
10.3	电源完整性管理模块的集成化趋势	220
	参考文献	221
	补充阅读材料	222
附录A	ECD连续模型的推导	223
附录B	平面电路的亥姆霍茨方程的推导	230

第 1 章 功率、功率传输及电源完整性

功率可以定义为做功的能力,其大小等于单位时间内所做的功或转换的能量。功率越大,移动物体(克服引力、斥力或摩擦力)的能力或转换能量(例如提高物体的温度)的能力就越强。对于电子系统,特别是集成电路,功率通过电压(电动势)和电流(电荷流动)的形式来体现。电能使电子系统实现其相应功能,并在产生、存储、调节电动势或电荷流量的元件间传输。电子电路与系统消耗功率,并将其转换成其他形式的能量或做功。功率传输的完整性(也称为电源完整性)涉及到能量消耗、传输元件、信号源、周围环境等的变化下它的稳定性及不变性。本章后面部分将对功率、功率传输和电源完整性进行阐述,重点讨论其在集成电路和系统中的应用。

1.1 电动势

电动势(emf)的发现归功于物理学家亚历桑德罗·伏特(Alessandro Volta, 1745—1827),伏特发明了电池(或称伏达电堆)。电池具有移动电荷的能力。电池做功的前提是有电动势的存在,因此电池是电动势源。

电动势在国际单位制中的单位是伏特(volt),1伏特等于1焦耳(joule)每库仑(coulomb),焦耳是能量的单位,库仑是电荷的单位。换言之,如果1库仑的电荷在通过某元件后获得1焦耳的能量,那么在元件两端产生的电动势就是1伏特。

由于带电粒子的运动与能量的获得和损耗有关,因此,力学原理常常用来类比解释电学特性,如电动势、电流、功率等。如力—电压类比(force-voltage analogy)是个常见的例子,其中机械力等同于电压。

1.1.1 力—电压类比

力—电压类比(force-voltage analogy)归功于詹姆斯·克拉克·麦克斯韦(James Clerk Maxwell)^①。考虑到力的国际单位(法语简称SI)是牛顿,而电动势的国际单位是伏特,这种类比并不完全吻合。尽管如此,电气行为的许多方面映射了物质对象的行为,并且这种电—机械类比有助于我们对概念的理解。例如,谐振电路的行为与机械钟表的摆动十分类似。

功的单位是焦耳,与力和力作用下的位移有关。因此

$$W(\text{焦耳})=F(\text{牛顿})\cdot d(\text{米}) \quad (1-1)$$

类似的,电压差或电势差等于均匀介质中一库仑电荷从一点移动到另一点所需做的功。因此

$$V(\text{伏特})=\frac{W(\text{焦耳})}{Q(\text{库仑})} \quad (1-2)$$

如果将力与电压按照上面的关系联系起来,那么力学中的距离等价于电学中的电荷。位

^① James Clerk Maxwell, Scottish 理论物理学家和数学家, 1831—1879。

移随时间的变化量(或速度)等价电荷随时间的转移量(或电流)。

动能的表达式为

$$\text{动能} = \frac{1}{2}mv^2 \quad (1-3)$$

式中, m 是物体的质量; v 是物体的速度。同时考虑储藏在电感线圈中能量的表达式为

$$\text{电感储能} = \frac{1}{2}LI^2 \quad (1-4)$$

式中, L 是线圈的电感量; I 是流过线圈的电流。这些表达式表明了质量与电感的等同关系。

弹簧伸长或压缩增大储存在其中的能量的同时,线性地增大了它的回复力。类似的,流过电容元件的电荷增大了储存在电容中的能量的同时,线性地增大了其两端的电动势。根据胡克定律,对弹簧做的功,或称弹性势能的增量表示为

$$\text{弹簧势能} = \frac{1}{2}kx^2 \quad (1-5)$$

式中, k 是弹性系数; x 是伸缩长度。这个关系式与储存在电容中电势能的表达式等同,即

$$\text{电容储能} = \frac{1}{2}CV^2 \quad (1-6)$$

V 与 x 的关系并不明显。弹性势能的表达式可以由力(按照胡克定律为 $k \cdot x$)与位移量(dx)的积分来表示。就像功的基本定义那样,势能的表达式由力·位移 $[(k \cdot x) \cdot x]$ 得到。相似的,电容中势能的表达式也可以从电压·电荷 $[V \cdot (C \cdot V)]$ 得到,这个表达式遵循电学中功的定义,同时也与力—电压类比相一致。

因为电流可以描述为电子或电荷的宏观流动,因此可将流体的静态和动态能量用于电能的分析。重力势能的表达式是 $m \cdot g \cdot h$,这里 m 是物体质量; g 是重力加速度; h 是增加的高度。在与流体的类比中,常常将液柱底部的压力等同为电势差。一个连接两个直径不同但高度相同的装有流动物体的液柱的导管中是没有液体流过的,这是因为管道两端的液体压强相同。这个例子与一根连接具有相同电位不同容量的两个电容的导线中没有电荷流动类似。如果液柱的高度不同,连接液柱的导管将会有液体流过,流动的液体受到导管直径的约束。在电学中,与该物理现象等同的是电动势(电压)和电荷流动(电流)的关系,即欧姆定律:

$$I(\text{安培}) = \frac{V(\text{伏特})}{R(\text{欧姆})} \quad (1-7)$$

式中, R 是电阻,是材料阻碍带电粒子在其原子结构中流动的一种属性。电阻具有吸收能量的属性,同时也具有形成电路中电动势的属性,因为:

$$V = I \cdot R \quad (1-8)$$

据此公式,一部分电动势将会消耗在克服元件对电荷的阻碍作用上,与力学系统中力克服摩擦类似。

另一个用到的类比是力—电流类比(force-current analogy),该类比将电流源与力发生器等同,电压与力学系统的输入速度等同。通过这个类比可以推出电容等同于质量,电感等同于弹性系数的倒数,电阻等同于摩擦力的倒数^[1]。

1.2 功率

功率定义为电压和电流的乘积,后者是电荷的流动速度,常表示为 I 或 i 。电流 I 的单位