



国际信息工程先进技术译丛
集成电路与半导体技术系列

PEARSON
Prentice
Hall

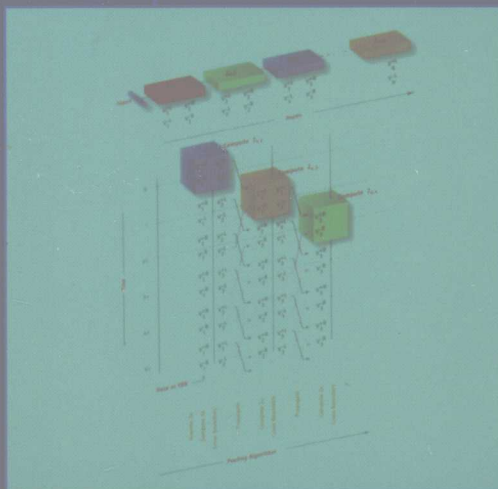
数字信号完整性：互连、封装的建模与仿真

**Digital Signal Integrity
Modeling and Simulation
with Interconnects and
Packages**

(美) Brian Young 著
李玉山 蒋冬初 等译



 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



TP271
78

国际信息工程先进技术译丛

集成电路与半导体技术系列

数字信号完整性： 互连、封装的建模与仿真

(美) Brian Young 著
李玉山 蒋冬初 等译



机械工业出版社

本书全面论述了数字系统及传输中的信号完整性问题；以数字系统为背景，在引入信令属性和互连模型的概念之后，介绍了反射、串扰、同时开关噪声等典型问题，以及互连线的多端口模型；以建模为主线，深入探讨了：电感、电容、电阻等无源元件模型，多引脚寄生参数的测量技术，互连的集总模型和宽带模型等。在提高篇讨论了端接、电源分布和先进封装等高级应用范例。

本书对于从事数字信号完整性及电磁兼容技术的研究或设计开发人员来说，是一本难得又实用的工程参考书。

图书在版编目 (CIP) 数据

数字信号完整性：互连、封装的建模与仿真 / (美) 杨 (Young, B.) 著；李玉山等译. —北京：机械工业出版社，2008. 10

(国际信息工程先进技术译丛)

集成电路与半导体技术系列

书名原文：Digital Signal Integrity: Modeling and Simulation with Interconnects and Packages

ISBN 978-7-111-25315-0

I. 数... II. ①杨... ②李... III. 数字系统 IV. TP271

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 158794 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑：吉 玲 责任编辑：吉 玲 李 宁

责任校对：刘志文 封面设计：马精明 责任印制：杨 曦

三河市国英印务有限公司印刷

2009 年 1 月第 1 版第 1 次印刷

169mm × 239mm · 24 印张 · 463 千字

0001—3000 册

标准书号：ISBN 978-7-111-25315-0

定价：50.00 元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换
销售服务热线电话：(010)68326294

购书热线电话：(010)88379639 88379641 88379643

编辑热线电话：(010)88379768

封面无防伪标均为盗版

顾问委员会名单

联合主任: Ernest S. Kuh (葛守仁) 院士 University of California, Berkeley 主

王阳元 院士 北京大学 主

常务副主任: 洪先龙 教授 清华大学 副

成 员 (美国部分, 按英文字母排序):

Prof. Chung-Kuan Cheng	University of California, San Diego
Prof. Tim Cheng	University of California, Santa Barbara
Prof. Jason Cong	University of California, Los Angeles
Prof. Niraj K. Jha	Princeton University
Dr. Tony Ma	Synopsys Inc.
Prof. Jan M. Rabaey	University of California, Berkeley
Prof. Kaushik Roy	Purdue University
Prof. Sachin Sapatnekar	University of Minnesota
Prof. Wayne Wolf	Georgia Institute of Technology
Prof. Martin Wong	University of Illinois at Urbana-Champaign

成 员 (中国部分, 按姓氏笔画排序):

毛军发教授	上海交通大学
叶以正教授	哈尔滨工业大学
刘伟平研究员	中电华大电子公司
李晓维研究员	中科院计算所
孙玲玲教授	杭州电子工业大学
陈大同博士	上海展迅公司
陈弘毅教授	清华大学
陈贵灿教授	西安交通大学
吴有亮 (David Wu) 教授	香港中文大学
严晓浪教授	浙江大学
郝跃教授	西安电子科技大学
唐志敏研究员	中科院计算所
唐璞山教授	复旦大学
章倩苓教授	复旦大学

编辑委员会名单

主任:	洪先龙 教授	清华大学
秘书:	Dr. Yiran Chen	Seagate Technology
成员 (按汉语拼音排序):		
	Prof. Yu (Kevin) Cao	Arizona State University
	Prof. Deming Chen	University of Illinois at Urbana-Champaign
	Dr. Yiran Chen	Seagate Technology
	池保勇 副教授	清华大学
	Prof. Yun Chiu	University of Illinois at Urbana-Champaign
	范东睿 副研究员	中科院计算所
	Prof. Chao Huang	Virginia Polytechnic Institute and State University
	贾新章 教授	西安电子科技大学
	Dr. Hai Li	Seagate Technology
	李玉山 教授	西安电子科技大学
	马昱春 博士	清华大学
	Dr. Huangqiang Wu	Spansion Inc.
	Dr. Xiaoning Qi	Intel Co.
	Dr. Qing Su	Synopsys Inc.
	Prof. Sheldon X. -D. Tan	University of California, Riverside
	Prof. Yuan Xie	Pennsylvania State University
	喻文健 博士	清华大学
	Prof. Lin Zhong	Rice University

序 言

二十多年的改革开放造就了一个经济持续高速发展、各个方面生机勃勃的中国。随着国外先进技术的引进,我国大多数企业的竞争力有了显著提高。但在日新月异的新兴科技领域,中国的高科技企业的人才素质和科研水平与发达国家相比,仍然有相当大的差距。学习国外先进的技术理论和成熟的技术经验,使之与我国技术发展的实践相结合,走出一条中国企业的快速成长壮大之路,已经成为科研技术人员和高校师生的共识。

机械工业出版社作为全国优秀出版社,始终坚持为科技、为教育服务的方针,以促进我国科学技术发展为己任。2007年初,机械工业出版社决定集中组织人力,编辑和翻译出版一套涵盖广泛学科领域的“国际信息工程先进技术译丛”(以下简称译丛)。机械工业出版社电工电子分社的吉玲副社长找到我,委托我组织国内外一批学者,编纂译丛的“集成电路与半导体技术系列”。

近些年来,随着半导体行业的飞速发展,国内陆续地引进和翻译出版了一些以国外经典高校教材为主的集成电路设计与制造技术的外版图书。但从效果上来说,由于国内外产业结构、发展阶段和未来方向的不同,高校以及科研人员对图书的接受程度不是十分理想。为了解决这一问题,本系列丛书将针对高校师生以及工程人员,适当涵盖入门级的其他读者,翻译和出版涵盖集成电路设计、制造,以及辅助设计等各个方面的图书。每个方面引进一本或几本经典著作。在专题的选择上,其内容力求符合中国产业发展实际。在具体的图书选择上坚持:1)内容要经典,实用;2)符合国情和集成电路产业发展需要,图书内容不窄、不专、不落后;3)对于技术有比较系统、全面的阐述,有实例,有方法,可供读者借鉴与参考。

系列的翻译和出版是海内外许多著名专家学者心血的结晶。系列丛书在筹备之初,就组建了顾问委员会和编辑委员会来共同保证所选图书的学术水平和翻译质量。顾问委员会的主任由近代电子电路和系统理论的主要奠基人之一、美国国家工程院院士、中国科学院外籍院士、美国伯克利大学的 Ernest S. Kuh(葛守仁)教授以及中国科学院院士王阳元共同担任。一大批海内外知名的专家学者出于对中国集成电路与半导体技术教育和产业发展的关心与支持,应邀担任了顾问委员会的委员,他们中包括国际国内顶尖大学和科研机构的教授学者,业界顶尖公司的技术领袖,代表了国际国内集成电路与半导体技术领域研究与教学的最高水平。

编辑委员会负责整套丛书的翻译和编辑工作。编辑委员会由来自国内外著名高校的教授和知名企业的研究人员组成。他们都担任着第一线的教学和科研任务,对世界集成电路及半导体技术的教育和产业现状有着深刻的了解和体会。在繁重的教学和科研工作之余,他们承担了图书选择、联系译者和组织翻译、审校等具体工作。

在这里,我们要由衷地感谢每一位译者所付出的辛勤劳动。丛书的译者都是由顾问委员会和编辑委员会从国内知名高校奋战在教学与科研第一线的著名专家学者中甄选出来的,他们的科研方向、技术背景和所选图书高度切合,基本代表了我国在这一领域学术著作翻译的最高水平。

译丛的引进和动作,从市场调研与选题策划、每本图书的推荐与论证、对译者水平的考察与遴选、翻译规范与译校要求的确定、对译稿的质量控制,到版式、封面和插图的设计等各方面,都坚持了高水平和高标准的原则。我们力求给读者奉献一套译文准确、文字流畅,从内容到形式都尽可能保持原著风格的集成电路与半导体技术的精品图书。

洪先龙(教授)

编辑委员会主任

顾问委员会常务副主任

译者序

从本质上看,高速 IC、PCB 和系统的核心技术就是微波背景和环境下的互连设计与信号完整性分析。高速高密度电路与系统的发展趋势表明:具有无源元件属性的互连正在取代有源器件的地位,跃升为高速电路与系统设计的主角。这样,对数字信号完整性进行剖析的理论和技術就成了实现高速互连设计所必备的底层支撑与保障。因此,要想精通高速互连设计技术,就必须对信号完整性拥有更深入的理解与掌握。

本书全面论述了数字系统及传输中的信号完整性问题。内容包括:数字系统与信令、信号完整性概念、互连拓扑结构、传输线理论应用、互连的宽带模型及集总参数模型、电磁及电路仿真技术等。作者以数字系统为对象,在引入信令和互连模型概念之后,介绍了反射、串扰、同时开关噪声等典型问题描述以及互连线多端口模型。书中以建模为主线,深入探讨了电感、电容、电阻等无源元件模型;多引脚寄生参数的测量技术;互连的集总模型和宽带模型等。在提高篇部分,则讨论了端接、电源分布和先进封装等高级应用范例。

书中论及的内容与国内已经出版的“信号完整性分析”一书覆盖面多有重叠,堪称姊妹篇。但是,本书的视角、高度和着力点多有不同,深入的理论论述相当完整、经得起推敲。作者 Brian Young (杨·布赖恩) 博士,携模拟微波封装及电磁计算方面的雄厚基础跨到数字封装互连设计与分析这一领域。他对一些信号完整性的本质问题,用准确的数学推导给出清晰明了的答案,令人拍案叫绝。许多常用的结论和公式都可以在本书中找到深入的探讨及证明。本书是数字信号完整性领域的一部经典力作,在深入浅出的论述中,作者为读者提供了一套完整翔实的工程技术资料。对于国内从事信号完整性、电源完整性、数据完整性、电磁完整性的研究、设计及分析人员,对于需要深入理解高速互连设计与信号完整性原理的产品开发、制造及测试人员,都是一本不可多得又实用的基础性工程手册,可以放在案头供随

时查阅。

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的教师和部分博士生、硕士生共同翻译并由李玉山审定。参与审校和翻译的人员有：蒋冬初、张木水、高崧、王胜源、闫旭、曲咏哲、丁同浩、刘洋、白幸杏、倪乐真、甘伟、李维、肖琳、陈倩雪、吕博、弓化云、白凤莲、董巧玲等。目前，国内更多的人正在投身开垦并耕耘信号完整性的学术土壤，本书就是为这片土地添加上一袋“进口化肥”。诚然，我们也在不断的学习之中，翻译中一定有诸多不妥之处，切盼得到同行和读者们的不吝赐教。

机械工业出版社电工电子分社的吉玲副社长付出了辛勤的劳动，提出许多好的建议。本书出版也得到国家自然科学基金 (No. 60672027、60871072)、教育部博士点基金 (No. 20050701002) 和西电研究生院研究型课程项目的支持。译者在此一并表示感谢。

本书可以作为电子通信类学科博士生、硕士生的选修课程教材，也可以作为电子设计工程师的信号完整性问题的自学参考书。

李玉山

于西安电子科技大学电路 CAD 研究所

前言

若干年前，互连对微处理器一类数字器件的电气性能影响非常小，工程师只要用一些简单的经验法则就可以解决问题。但是，当时钟频率、总线宽度和总线速度不断增加时，封装及互连就变得非常重要。以前总是把半导体器件性能作为关键因素，现在许多情况下变成是由于封装互连而限制或限制了系统的性能。这种角色的反转将逐渐变得习以为常，未来的封装互连将会更加成为电子设计的主导，就像网络越来越重要一样。

封装互连技术已经快速发展成为决定电气性能的一个重要领域，这使得能够用于培训的资料非常短缺。大部分资料都是以分散的应用笔记形式出现，许多当时非常有用的资料很快又会过时（例如，关于 ECL 的笔记而不是 CMOS 的相关资料）。有些则出现在一些不易见到的技术文献中。因此，许多机构已经意识到这一领域非常急需专门的技术知识，企业内没有专家可能立即成为新领域的带头人。

本书反映了我通过搜集各种资料并开展数字信号完整性建模与仿真研究方面所作的尝试。其中很大一部分工作是通过电磁仿真和（或）测量来研究封装及互连的建模。出于研究的需要，本书所覆盖的技术内容广泛，包括电磁仿真、传输线理论、频域建模、时域建模、模拟电路仿真、规范信号传输的数字信号令以及一些结构问题、今后的发展远景等。广泛的技术跨度使得这一研究成为一项既有趣又富有挑战性的工作。因为我相信投入这一领域的工程师数量将会迅速增加以适应技术发展的新趋势，所以我希望本书能给工程师提供一套足够的知识、方法、手段来帮助他们在此领域获得成功。

本书的目的是给读者提供一份条理清晰、自成一体的整套资料，因此，书中只列出很少的参考文献。书中的内容在本领域算不上是新的知识，其中的技术成果是大量技术文献、应用笔记以及工业标准的作者们贡献出来的。

本书的章节安排从广泛的、一般性的主题逐渐过渡到专门的建模技术。重点放在严格的推导和多导体互连上。第 1 章讨论了信号完整性在数字系统中的重要性。第 2、3 章介绍了信号和信号完整性问题。第 4~7 章介绍了基本无源元件的具体概念，重点放在多导体互连上。信号完整性详细仿真中的一个难点就是建立诸如接插件、封装、边缘连接件和总线的多导体互连模型。第 8 章介绍了互连的实测描述，重点在多引脚互连中微小寄生参数的测量上。第 9、10 章介绍了互连建模，区分为低频集总建模和高频宽带建模。考虑到互连在物理上的尺寸经常很

小, 集总建模往往是一种最佳选择。第 11 章扩展了前面有关信号完整性主题的范围, 对前面各章中的概念和素材, 举出一些高级应用实例加以说明。

我用的是 Cyrix 处理器、Tyan 主板的微机以及 Linux 操作系统, 本书书稿采用 LATEX2 ϵ 进行排版。文本部分采用 T ϵ L/Tk 编制的文本编辑器进行编辑; 电路采用 Berkeley SPICE 3f4 进行仿真; 图形用 Xfig 绘制; 符号运算使用 MathematicaTM⊖软件。

我是从原先的模拟微波封装和电磁数值计算方面跨入到数字封装这一领域的。因此, 需要一个外在的原动力才能促使我前行。这里, 特别感谢当我初涉本领域时 Aubrey Sparkman 与我进行过的许多有趣的讨论; 很高兴后来又能和 Greg Pitner 一起工作, 感谢他向我提出了许多尖锐的问题。感谢 Joel Dietz 鼓励我开始写这本书; 感谢 Francis Bostick 和 Robert Flake 安排我采用本书初稿为得克萨斯大学的研究生讲授封装课程; 感谢 Bruce Wagner 为我提供了线卡并拍摄出一些图像。非常感谢我的启蒙技术导师, 包括我的父亲 Charles Young 以及 Joe Owens 等。写书是一项系统工程, 所以还必须特别感谢我心爱的妻子 Monica Carlson, 多年来她为此牺牲了大量的时间。

Brian Young

Austin, Texas

⊖ Mathematica 是沃尔夫勒姆研究公司 (Wolfram Research, Inc.) 的商标。

目 录

序言

译者序

前言

第1章 数字系统与信令	1
1.1 提高性能时的折衷	1
1.1.1 体系结构	1
1.1.2 总线的位宽和速度	3
1.1.3 电源分布	4
1.1.4 拓扑结构和负载	4
1.1.5 逻辑电平和信令	5
1.1.6 功耗	5
1.2 信令标准和逻辑系列	6
1.2.1 噪声容限	9
1.2.2 建立与保持时间	10
1.2.3 驱动器	10
1.2.4 线性驱动器建模	16
1.2.5 接收器	17
1.2.6 接收器建模	20
1.3 互连	20
1.4 数字系统建模	27
1.4.1 数字波形的模拟特性	28
1.4.2 建模、频率分量、带宽	29
1.4.3 工艺差异	36
1.4.4 高速系统建模的挑战	37
第2章 信号完整性	39
2.1 传输线	39
2.1.1 时域解	40
2.1.2 方向独立性	42

2.1.3 频域解	43
2.1.4 阻抗边界	49
2.2 理想点到点信令	49
2.2.1 快边沿与慢边沿	51
2.2.2 源端端接加并联端接	51
2.2.3 仅源端端接	51
2.3 非理想信令	53
2.3.1 同步与异步	54
2.3.2 入射翻转	54
2.4 不连续引起的突变	56
2.4.1 拉普拉斯变换	57
2.4.2 容性负载	58
2.4.3 串联电感	58
2.4.4 并联电容	64
2.4.5 阻抗台阶	66
2.5 串扰	68
2.5.1 容性串扰	69
2.5.2 感性串扰	71
2.5.3 总串扰	72
2.6 拓扑结构	73
2.7 同时开关噪声	76
2.8 系统时序	77
2.8.1 最高时钟频率	77
2.8.2 眼图	78
2.8.3 错位、抖动与容限	79
2.8.4 双数据率	83
2.9 习题	83
第3章 同时开关噪声	87
3.1 SSN 的成因	88
3.1.1 片上开关	88
3.1.2 片外开关	90
3.1.3 SPICE 仿真示例	93
3.2 有效电感	96
3.3 片外 SSN 的相关性	97

3.4	SSN-引起的错位	99
3.5	排组的快速仿真	99
3.6	习题	102
第4章	多端口电路	103
4.1	Z-和 Y-参数	103
4.2	S-参数	104
4.2.1	定义	105
4.2.2	电路 S-参数的计算	106
4.3	多端口的 S-, Y-, Z-参数之间的转换	108
4.4	S-参数的归一化	109
4.5	矩阵化简	110
4.5.1	空激励	110
4.5.2	公共电压激励	111
4.6	习题	112
第5章	电感	116
5.1	电磁表征概述	117
5.2	电感的定义	118
5.2.1	细导线定义	118
5.2.2	基于场的定义	121
5.2.3	基于能量的定义	121
5.3	互感的定义	122
5.3.1	细线定义	122
5.3.2	基于场的定义	124
5.3.3	基于能量的定义	124
5.3.4	符号	125
5.4	用诺依曼公式计算	125
5.4.1	细导线回路的外部电感计算	126
5.4.2	圆环导线内部电感的计算	127
5.4.3	电感的频率相关性	128
5.5	局部电感的定义	129
5.6	局部自感及局部互感公式	130
5.6.1	两条平行导线间的局部互感	130
5.6.2	圆导线的局部自感	131

5.6.3	两条共线导线的局部互感	132
5.6.4	解决方案小结	132
5.7	电路符号	133
5.8	模态分解	134
5.8.1	对角化	134
5.8.2	电路理论	135
5.8.3	手工实现	136
5.8.4	无源性	137
5.9	局部电感的非唯一性	139
5.10	开环建模	140
5.11	参考线的设置	143
5.12	模型化简	146
5.13	习题	146
第6章	电容	152
6.1	电容的定义	152
6.2	多导体间的电容	154
6.3	基于能量的电容定义	157
6.4	频率相关性	158
6.5	电容的电路方程	159
6.6	模态分解与无源性	160
6.6.1	模态分解	160
6.6.2	无源性	161
6.7	参考基准和电容	162
6.8	模型化简	163
6.9	习题	163
第7章	电阻	165
7.1	集肤效应	166
7.2	电流挤近	169
7.3	PEEC 方法	170
7.3.1	一般公式	171
7.3.2	专用求解器	172
7.3.3	电路中的解	174
7.3.4	实际问题	174

7.3.5 举例: 用 PEEC 法计算同轴电感	174
7.4 梯形网络	175
7.5 互阻	179
7.6 习题	180
第 8 章 寄生参数测量	182
8.1 测量次数	182
8.2 阻抗分析仪	183
8.3 矢量网络分析仪	184
8.3.1 标定	186
8.3.2 单个集总寄生参数提取	187
8.3.3 用 VNA 测量多端口网络	187
8.3.4 参数类型转换	190
8.3.5 史密斯圆图	191
8.4 时域反射计	193
8.4.1 电感提取	194
8.4.2 电容提取	195
8.4.3 阻抗轮廓	196
8.4.4 层剥落	198
8.4.5 分辨率	202
8.4.6 多端口 TDR 测量	203
8.5 折衷	204
8.6 习题	204
第 9 章 集总建模	206
9.1 传输线简介	206
9.2 双样本多导体建模	207
9.3 单样本多导体建模	209
9.3.1 π -形网络拓扑结构	209
9.3.2 T -形网络拓扑结构	210
9.3.3 实际问题	211
9.4 内部节点	212
9.5 频率相关性	214
9.6 迭代阻抗与带宽	215
9.7 模型化简	218

9.7.1 平行引线	218
9.7.2 开路, 短路和匹配引线	218
9.7.3 多余引线	219
9.7.4 对称	219
9.8 特殊互连的描述途径	220
9.8.1 QFP	220
9.8.2 边缘连接件	221
9.8.3 BGA	222
9.8.4 内部节点	222
9.9 通用拓扑结构	223
9.10 多支路网络	225
9.11 习题	227
第10章 宽带建模	229
10.1 传输线集总建模	229
10.1.1 集总建模的限制	229
10.1.2 多集总模型	230
10.2 耦合传输线	231
10.2.1 电报方程	232
10.2.2 模态分解	233
10.2.3 模态分解示例	237
10.3 集肤效应模型	245
10.4 黑盒建模	245
10.4.1 单端口	246
10.4.2 多端口	253
10.5 习题	258
第11章 信号完整性提高篇	260
11.1 差分信令	260
11.2 端接	262
11.2.1 寄生效应和位置	262
11.2.2 静态功耗和电流驱动需求	262
11.2.3 电压摆幅	265
11.2.4 二极管端接	265
11.2.5 源端端接	266