

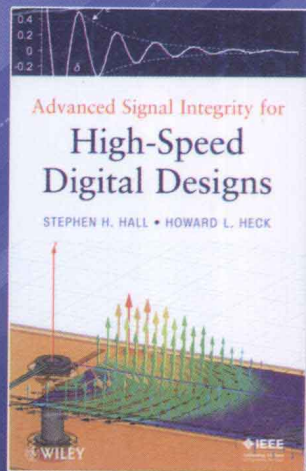
国外电子与通信教材系列

  
WILEY

  
IEEE  
IEEE PRESS

# 高级信号完整性技术

## Advanced Signal Integrity for High-Speed Digital Designs



[美] Stephen H. Hall 著  
Howard L. Heck  
张徐亮 鲍景富 译  
张雅丽 于永斌



电子工业出版社  
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

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

## 内 容 简 介

随着计算机技术的不断发展,以往数字设计中一些可以忽略的因素,在高速数字设计中变成了影响系统性能的重要因素。只有全面理解和把握这些因素,才能设计出满足性能要求的高速数字电路。本书从应用物理、通信以及微波理论的角度,对高速数字设计中的高级信号完整性进行了探讨和分析,涵盖了当今最新的研究成果,是目前信号完整性方面较全面、较先进的书籍。全书共分14章,内容包含了与信号完整性相关的电磁场理论、理想传输线模型、串扰、网络分析、高速信道模型、时延扰动和噪声模型等。

本书的主要特色是用大量的图表,以理论和实践完美结合的方式将诸如应用物理、通信和微波工程等学科的理论和技术引入高速数字设计,有助于工程师或者高校学生们对数字设计中信号完整性的理解和把握。

本书适用于高等院校本科或研究生教学、半导体行业专业工程师培训,以及高速数字设计人员的必备参考书。

Advanced Signal Integrity for High-Speed Digital Designs

ISBN: 978-0-470-19235-1

Stephen H. Hall, Howard L. Heck

Original English Edition Copyright © 2009 by John Wiley & Sons, Inc.

All rights reserved.

This translation published under license.

Authorized Translation of the Edition published by John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey.

No part of this book may be reproduced in any form without the written permission of John Wiley & Sons, Inc.

Copies of this book sold without a Wiley sticker on the back cover are unauthorized and illegal.

本书中文简体版专有出版权由 John Wiley & Sons, Inc. 授予电子工业出版社。专有出版权受法律保护。

本书封底贴有 John Wiley & Sons, Inc. 防伪标签,无标签者不得销售。

版权贸易合同登记号 图字: 01-2009- 6687

## 图书在版编目(CIP)数据

高级信号完整性技术/(美)霍尔(Hall, S. H.), (美)赫克(Heck, H. L.)著;张徐亮等译.

北京: 电子工业出版社, 2011. 1

(国外电子与通信教材系列)

书名原文: Advanced Signal Integrity for High-Speed Digital Designs

ISBN 978-7-121-12674-1

I. ①高… II. ①霍… ②赫… ③张… III. ①信号系统-高等学校-教材 IV. ①TN911.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 256766 号

策划编辑: 马 岚

责任编辑: 李秦华

印 刷: 北京丰源印刷厂

装 订: 三河市鹏成印业有限公司

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: 27.5 字数: 704 千字

印 次: 2011 年 1 月第 1 次印刷

定 价: 49.00 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 zlt@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,除了依靠高校的老教师和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工作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 and 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”。

为做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 | 北京邮电大学校长、教授、博士生导师  |
|     | 杨千里 | 总参通信部副部长，中国电子学会会士、副理事长<br>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<br>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<br>清华大学深圳研究生院副院长 |
|     | 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<br>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<br>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<br>计算机与信息技术学院院长、信息科学研究所所长<br>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<br>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<br>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<br>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                             |
|     | 朱世华 | 西安交通大学副校长、教授、博士生导师<br>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   |
|     | 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<br>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<br>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<br>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

当前,半导体技术的迅猛发展,给数字设计工程师们带来了巨大的挑战。工程师们不得不重新审视高速互连中出现的许多现象,不得不研究对策以解决设计过程中急剧出现的诸多不可预见的问题。这些现象和问题最终都会引起信号的延迟、失真或畸变,甚至产生错误的信号,从而导致系统功能失效。以上这些现象和问题都是信号完整性所涵盖的内容。只有在透彻理解高速互连的诸多现象的基础上,才能很好地完成现在或未来高速数字系统的设计。

本书作者 Stephen H. Hall 和 Howard L. Heck 都是信号完整性方面的资深专家,他们从应用物理、通信,以及微波工程等基础理论和基本技术入手,用大量的实例和图形,深入浅出地讨论了从电磁场理论到信道均衡等与信号完整性相关的诸多内容,讨论了传输线模型、电介质和导体模型,并考虑了其中的频变特性以及导体的表面粗糙度;对串扰、抖动和噪声的原理、模型和容许值预测方法也进行了深入的讨论,并讨论了模型的数学局限性。本书行文流畅,内容紧凑,语言精练,图表丰富,所用例子实用性很强,例子求解步骤清晰详细,分析和讨论了信号完整性方面最新的研究成果,可读性很强。本书每章都附有详尽的、最新的参考文献,对读者进行相关知识的拓展有着极大的帮助;每章都附有大量习题,使读者能够对理论、概念和方法的理解进行全面的验证。

全书分为 14 章,并有 6 个附录及中英文术语对照。本书的翻译工作由电子科技大学的几位老师共同完成,其中张徐亮和张雅丽负责统稿和审校。张徐亮翻译了第 1 章、第 3 章至第 9 章及第 13 章和第 14 章,鲍景富翻译了第 2 章,于永斌翻译了第 10 章和第 12 章,张雅丽翻译了第 11 章。在翻译过程中,赵朝阳对第 4 章至第 8 章,张宇对第 9 章,刘洋洋对第 13 章等进行了大量的基础性工作。

此外,对所有关心和支持本书翻译工作的同事、同仁致以诚挚的感谢!最后,限于译者自身的水平及经验,疏漏和不足在所难免,恳请读者批评指正。

# 前 言

数字设计的发展,已进入设计技术和概念的需求期。这些技术和概念甚至困惑着一些专业的数字系统设计人员。究其原因是缺乏对高级信号完整性的透彻理解,使得诸如个人计算机等数字系统无法设计成功。在传统的设计中,高速互连现象常常可以忽略不计,因为它们对系统性能的影响很微弱。然而,随着计算机技术的不断发展,在众多决定系统性能的因素里,高速互连现象正起着主导作用,常常导致一些不可预见问题的出现,极大地增加了设计的复杂性。因此,每一代计算机设计都要重新理解以前不是关键因素的信号完整性问题,需要一些从前并不需要的新的设计技术。在现代和未来的系统中,如果不能充分理解高速互连现象,那么数字计算只能停滞不前。

本书综合诸如应用物理、通信和微波工程等领域的理论与技术,将其优化组合起来应用到高速数字设计中。书中阐述了一些与高级信号完整性相关的基础知识,不过读者若具有良好的电磁场理论、向量计算、微分方程、统计学和传输线分析等方面的知识,则更容易理解本书内容。本书将以传统的知识为基础,探讨包括信号完整性中与电磁场理论相关的知识和设计现代及未来的数字系统时对信号完整性问题进行电路补偿的均衡方法等前沿话题。为便于读者理解高级信号完整性的概念,书中给出了许多具体的设计实例,并对其中涉及的理论知识进行了极其详细的阐述。其中,很多理论和技术实践都可以直接运用。

## 本书特点

1. 尽可能形象化地描述理论概念。各章中都有大量的图表以辅助进行基本概念讨论。
2. 严密的理论阐述,并使用了现实案例来展示理论在实际中的应用。
3. 总结了理解信号完整性所涉及的电磁场理论。
4. 严密拓展了传输线和串扰理论,以使读者有个基本的理解,并阐述了如何将传输线和串扰理论应用到实际问题中。
5. 探索了物理特性一致的电介质和导体模型,从而将制造工艺和环境效应所带来的频率相关特性、表面粗糙度、物理变形特性等考虑在内。
6. 从实践和理论层面论述了差分信号。
7. 阐述了诸如因果关系、无源性、稳定性以及实数性等模型的数学局限。只有充分考虑这些局限性,才能使仿真结果和实际相一致。
8. 详细阐述了网络理论,包括  $S$  参数和频域分析。
9. 覆盖了诸如非理想电流回路、表格建模和通孔振荡等课题。
10. 论述了 I/O 设计和通道均衡的基础知识。
11. 讨论了时序扰动和噪声的建模和估算的方法。
12. 讨论了用表面响应模型处理多变量数据的系统分析技术。

现代信号系统不断地提出了亟待解决的问题。谁能解决这些问题谁就将决定未来。本书

期望能用解决现代高速数字设计中出现的一些问题,以及用充分的理论知识来武装读者,站在超越本书的角度来解决一些甚至作者也还没有碰到过的问题。

## 致谢

有很多人为本书做出了直接或间接的贡献。我们很幸运有一个云集了优秀的工程师、科学家和出色专家的团体。他们的专业技术知识、智慧和谆谆教诲一直激励着我们。对他们的帮助,我们无限感激;若无他们的帮助,本书将无法完成。

对本书有着直接贡献的有:Ansoft公司的Guy Barnes,他帮我们审阅了书中有关数学的部分,提供了第10章所需的仿真数据,并提供了封面图形;老Stephen Hall, Stephen的父亲,教导了我们分子如何与外加电场交互作用,并将其撰写在第6章的相应小节中;南加利福尼亚大学的Paul Huray,教导了我们电磁场理论的复杂状况,他是优秀的学术楷模;Intel公司的Yun Ling,耐心地检查了书中的数学公式,并细致地纠正了其中的错误;Intel公司的Kevin Slattery,审阅了第2章并不断激励我们完成本书;Intel公司的Chaitanya Sreerama Burt,审阅了各章节,并复核了第2章中所有计算公式;Ansoft公司的Steven Pytel,慎重地审阅了第5章,纠正了一些错误并给出了改进本书的出色的建议;Daniel Hua,检查了结论并帮助求解复杂微分方程;Intel公司的Luis Armenta,审阅了第6章的电介质模型;Tyco的Paul Hamilton,审阅了第6章。Intel公司的Gerardo Romo,审阅了第4章和第12章;Intel公司的Michael Mirmak,他也是现任IBIS开放论坛的主席,审阅了第11章;Intel公司的Richard Allred,审阅了第13章和第14章;Pelle Fornberg和Adam Norman,审阅了第13章中扰动和峰值失真的资料。

Stephen也对以下各位表示感谢:Dorothy Hall, Stephen的母亲,终生的鼓励,不断地灌输热忱、修养和动力等,激励着Stephen成为一名工程师,同时这些也体现在本书的撰写中。Garrett Hall,不仅审阅了各章节、复核了结论,也为简介部分提供了大量的资料及其目的,他是总能鼓动人心的、工作兢兢业业的、值得信赖的、富有情操的朋友,像一个大哥一样关怀着我。

Howard要对Lockheed-Martin公司的Eric Dibble和Intel公司的Martin Rausch表示感谢,感谢他们引领他进入信号完整性领域、帮助他职业的和个人的成长。同时也要感谢Intel公司的Ricardo Suarez-Gartner博士鼓励他撰写此书。

最后,Stephen将他在此书中的工作献给他终身的伴侣、最好的朋友、妻子、他生命中的珍珠——Jodi,并给予他全部的爱和感激,同时也献给他的女儿们,Emily和Julia,感谢她们带给他难以想象的快乐。

Howard将他在本书中的工作献给他漂亮的妻子Lisa,儿子Tyler和Nick,他们的支持和爱让他每天都很快乐,每天都是礼物。

Stephen H. Hall  
Howard L. Heck  
Hillsboro, OR  
July 2008



# 目 录

第 1 章 简介:信号完整性的重要性 .....	1
1.1 计算能力:过去和未来 .....	1
1.2 问题 .....	3
1.3 基础 .....	4
1.4 总线设计的新领域 .....	5
1.5 本书适用对象 .....	5
1.6 小结 .....	5
错误声明 .....	5
参考文献 .....	5
第 2 章 信号完整性的电磁学基础 .....	6
2.1 麦克斯韦方程组 .....	6
2.2 常见向量算子 .....	7
2.3 波的传播 .....	13
2.4 静电学 .....	20
2.5 静磁学 .....	26
2.6 能流和玻印亭向量 .....	32
2.7 电磁波的反射 .....	35
参考文献 .....	38
习题 .....	38
第 3 章 理想传输线基础 .....	40
3.1 传输线结构 .....	40
3.2 无损传输线上信号传播 .....	41
3.3 传输线特性参数 .....	50
3.4 无损传输线参数 .....	55
3.5 传输线反射 .....	70
3.6 时域反射计 .....	83
参考文献 .....	88
习题 .....	89
第 4 章 串扰 .....	91
4.1 互感与互容 .....	91
4.2 耦合波动方程 .....	96
4.3 耦合线路分析 .....	98

4.4	模态分析	111
4.5	串扰最小化	123
4.6	小结	124
	参考文献	124
	习题	124
<b>第5章</b>	<b>非理想导体模型</b>	<b>128</b>
5.1	信号在无边界导电介质中传播	128
5.2	传输线的经典导体模型	131
5.3	表面粗糙度	142
5.4	非理想导体的传输线参数	157
	参考文献	159
	习题	159
<b>第6章</b>	<b>电介质的电气特性</b>	<b>161</b>
6.1	电介质极化	161
6.2	电介质材料的分类	165
6.3	频率相关的电介质行为	165
6.4	物理电介质模型的特性	174
6.5	纤维交织效应	177
6.6	环境变化对电介质行为的影响	181
6.7	有损电介质和实际导体的传输线参数	184
	参考文献	189
	习题	190
<b>第7章</b>	<b>差分信号</b>	<b>192</b>
7.1	消除共模噪声	193
7.2	差分串扰	194
7.3	虚参考平面	195
7.4	模态电压的传输	196
7.5	常用术语	197
7.6	差分信号的缺陷	197
	参考文献	202
	习题	203
<b>第8章</b>	<b>物理信道的数学要求</b>	<b>204</b>
8.1	时域仿真中的频域效应	204
8.2	物理信道的要求	214
	参考文献	223
	习题	223
<b>第9章</b>	<b>数字工程的网络分析</b>	<b>224</b>
9.1	高频电压和电流波	224

9.2	网络理论	228
9.3	S 参数的物理性质	263
	参考文献	268
	习题	268
<b>第 10 章</b>	<b>关于高速信道建模的讨论</b>	<b>270</b>
10.1	建立传输线的物理模型	270
10.2	非理想返回路径	273
10.3	通孔	281
	参考文献	286
	习题	286
<b>第 11 章</b>	<b>I/O 电路和模型</b>	<b>287</b>
11.1	I/O 设计考虑因素	287
11.2	推挽式发射机	288
11.3	CMOS 接收机	296
11.4	ESD 保护电路	297
11.5	片上终端匹配	299
11.6	伯杰图	300
11.7	漏极开路发射机	305
11.8	差分电流模式发射机	308
11.9	低摆幅和差分接收机	310
11.10	IBIS 模型	311
11.11	小结	317
	参考文献	317
	习题	318
<b>第 12 章</b>	<b>均衡</b>	<b>321</b>
12.1	分析与设计背景	321
12.2	连续时间线性均衡器	330
12.3	离散线性均衡器	336
12.4	决策反馈均衡	347
12.5	小结	350
	参考文献	350
	习题	351
<b>第 13 章</b>	<b>时序抖动和噪声的建模及其容许值</b>	<b>354</b>
13.1	眼图	354
13.2	误码率	356
13.3	抖动源及其容许值	362
13.4	噪声源及噪声容许值	369
13.5	峰值畸变分析法	377

13.6 小结 .....	388
参考文献 .....	388
习题 .....	389
<b>第 14 章 用响应曲面模型进行系统分析 .....</b>	<b>391</b>
14.1 模型设计的注意事项 .....	391
14.2 案例分析:10 Gb/s 差分 PCB 接口 .....	392
14.3 基于最小方差拟合的 RSM .....	394
14.4 拟合测量 .....	397
14.5 重要性测试 .....	400
14.6 置信区间 .....	403
14.7 敏感度分析及设计优化 .....	403
14.8 用蒙特卡罗仿真方法预测次品率 .....	406
14.9 RSM 的其他考虑 .....	409
14.10 小结 .....	410
参考文献 .....	410
习题 .....	411
<b>附录 A 常用公式、恒等式、单位和常数 .....</b>	<b>413</b>
<b>附录 B 四端口网络的 <math>T</math> 参数到 <math>S</math> 参数转换 .....</b>	<b>416</b>
<b>附录 C 电路的 <math>F</math> 统计量 .....</b>	<b>418</b>
<b>附录 D 电路的 <math>T</math> 统计量 .....</b>	<b>419</b>
<b>附录 E 粗糙导体的趋肤电阻与内部电感的因果关系 .....</b>	<b>420</b>
<b>附录 F 0.25 <math>\mu\text{m}</math> MOSIS 工艺的 SPICE Level 3 模型 .....</b>	<b>422</b>
<b>中英文术语对照 .....</b>	<b>423</b>

# 第1章 简介:信号完整性的重要性

## 1.1 计算能力:过去和未来

据估计在 2025 年至 2050 年间的某个时候,普通个人计算机的计算能力将超过人脑。根据历史趋势进行外插法估算的结果表明,大约 2060 年至 2100 年间,单个普通个人计算机的运算能力将超过人类。在不到 100 年的时间里,运算能力能有如此巨大的提升吗?这个很难肯定,因为我们无法断言未来。当然,谁都会当事后诸葛亮,不过如果按照历史趋向于不断重复的观点,依据 20 世纪计算能力的发展情况,可以大约推知历史数据是否体现了一定的增长速率足以达到这种程度。卡内基·梅隆大学机器人研究所的研究员 Hans Moravec 估计到一台计算机需要大约 100 兆机器指令/秒(MIPS)的运算能力才足以近似地模仿人脑 [Moravec, 1998]。根据神经元的数量进行估测,他认为当前的计算机技术大致与动物大脑的运算能力相等。这些数据描绘了一个特别有趣味的、通过计算机性能和动物大脑相对照进行阶层集合划分来对运算能力发展历史进行研究的方法。

图 1.1 描绘了 100 年来机械电子计算机的运算能力。图中标注了一些富有意义的数据点,覆盖了从手工计算(约  $1/100\,000\,000$  MIPS)到 2002 年的奔腾 4 处理器(10 000 MIPS),而奔腾 4 处理器与猴脑运算能力的估值(1 000 000 MIPS)甚至相差两个数量级。由图可知,根据 30 多年来个人计算机性能的发展情况进行外插法估测,最早在 2020 年计算机才能与人脑的运算能力相比肩。如果使用整个 20 世纪的历史数据,时间将推迟到 2050 年。如果扩展到使用目前地球上所有人类(约 60 亿)等价运算能力来进行外插法估测,将得到更恶劣的情况。这种情况下,如图 1.2 所示,计算机将需要  $6 \times 10^{17}$  MIPS 的运算能力,大约在 2060 年出现。现在的问题是:是否能保持历史前进的步伐呢?观察数据发现,历史发展非但没有变慢的迹象,事实上呈现出增长的态势。

然而,很多计算机业界行家撰写了文章表明运算能力发展的趋势不能继续保持而且指数增长的时代终将停止。1998 年就有文献报道,在一个基于 FR4 电介质的普通印制电路板(PCB)上,无法支持 300 MHz 以上速度的数据总线 [Porter, 1998]。而目前的普通个人计算机中的基于 FR4 的基板的设计方案超过了这个速度将近 10 倍(PCI Express Gen 2 数据总线运行速度是 5 G/s,它的基准速度是 2.5 G/s)。历史上有很多“专家”错估未来的例子:

不可能有比空气重的飞行器。

——英国数学家和物理学家、英国皇家学会会长 Lord Kelvin 于 1895 年如是说  
研究交流电完全是浪费时间。永远不会有人用它的。

——美国发明家 Thomas Edison 于 1889 年如是说  
高速铁路旅行不太可能,因为旅客不能呼吸,将窒息而死。

——伦敦大学学院的自然哲学和天文学教授 Dionysys Larder 博士(1793-1859)如是说

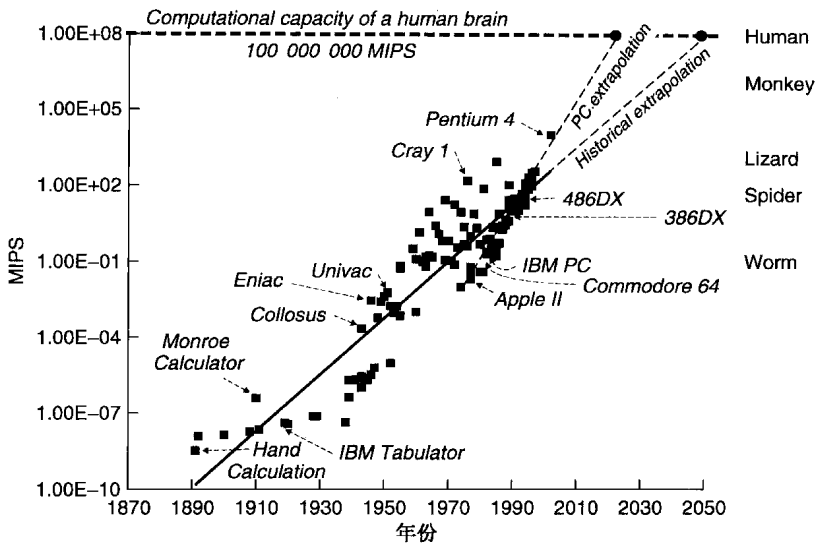


图 1.1 运算能力发展史及用外插法估测的未来运算能力(根据 Moravec[1998]改编)

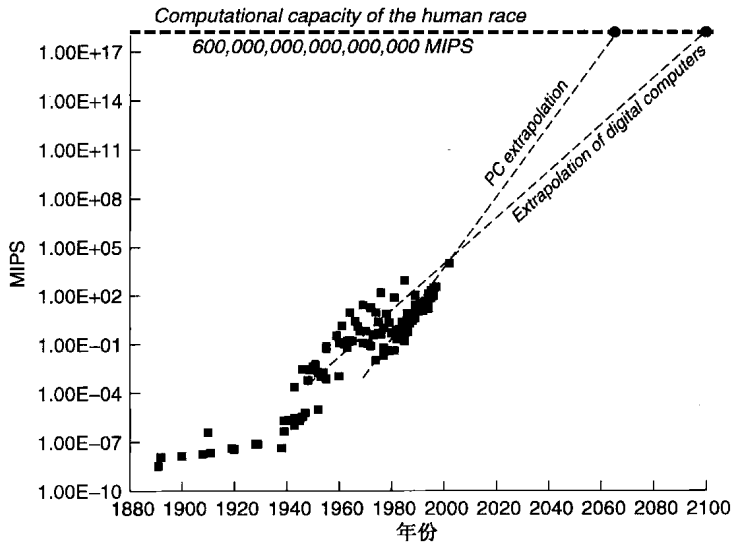


图 1.2 运算能力发展史及用外插法估测的未来运算能力

在 20 世纪 70 年代中期,集成电路能容纳大约 10 000 个元件,足以用  $3\ \mu\text{m}$  大小的设备来构架一台完整的计算机。经验丰富的工程师担心半导体技术已达到其极点。 $3\ \mu\text{m}$  几乎不比光刻芯片的光波长大多少。靠得很近的互连线间的相互作用将对所传输的信号造成破坏。芯片会产生极大的热量,不用冷却单元将无法降温。这样的例子不胜枚举。

计算机发展曲线的研究表明,上面所列问题业界都一一给予了解决。芯片不仅持续发展着,甚至变得更快。受潜在利益的驱使,众多科技公司投入了巨大的资源寻求将“不可能”变成可能的措施:开发更高效的晶体管设计、开发更好的散热器、寻求新的制造工艺、探索更先进的分析技术。历史数据表明,芯片性能将继续以指数速率增长。

历史上,高级运算结构趋向于将各部件微型化,在较小空间里能容纳更多的设备并能正常运作,使得单位体积能实现更多的功能。首先,缩小机械计算器中的齿轮使其更快旋转。

然后,减小电子机械计算器中的继电器尺寸使其更快翻转。接着,数字计算机中的开关,从猎枪子弹般大小的真空管,演变为豌豆大小的晶体管,再演变为微型集成电路芯片[Moravec, 1998]。每一项技术的进步都是有代价的:总会出现很多从来没有考虑过但又亟待解决的新问题。

这些与信号完整性有什么关系呢?信号完整性研究领域是运算能力指数增长的直接产物。除了处理器之外,计算机系统通常由若干集成部件组成,包括存储器、缓存器和芯片组件等。这些部件之间的相互连接整体上称为系统总线。本质上,总线是数字系统中不同部件之间进行数据传输的一组集成的互连线。相应地,为了利用业已提升的处理器的运算能力,系统总线必须以一个较高的数据传输速率工作。举个例子,假如存储总线上数据的传输不够快,那么处理器只能无谓地等待数据的到来。这种瓶颈将导致高效处理器的很多性能无法发挥。因此,总线速率与处理器性能相匹配是至关重要的。

## 1.2 问题

历史上用以匹配总线和处理器性能的方法是从速度和宽度两方面来进行的。速度通过在给定时间内传输更多的字节,来实现更高的信息传输速率。宽度则以并行方式传输更多的字节来实现更多的信息传输。本书从此以后,将总线上信息的传输速率称为总线带宽。

提高总线速率可以克服带宽限制,不过由于多种原因,该方法有很多问题。随着总线频率的快速提升,由总线构成被称为互连线(Interconnect)的各数据通道开始呈现高频行为。这些高频行为一直困惑着传统的数字电路设计人员。这就要求对数字领域中涉及到的微波系统及射频设计中常用的模拟技术和理论有着通透的理解。随着数字系统工作频率的提高,这些模拟效应将更加突出,如果不认真对待,将严重影响系统的整体性能。再者,高速的总线需要更多的电能支撑,而电能是数字系统中极其宝贵的资源,尤其是在依赖于电池供电的诸如笔记本计算机的移动设计中。

增加总线宽度也可以解决带宽问题,但此方法也有其自身的限制。由于封装、插槽、连接器的引脚数增多,以及PCB技术的缺点,实际机械的局限性将随之快速呈现出来。而且,紧密相邻的互连线之间的相互作用将降低信噪比的量级,数据传输因而会变得更加困难。摩尔定律表明,计算机性能每18个月就将翻一番,而总线带宽也必须对应地成比例增加。将总线上传输的信号数翻番能得到足够的带宽。不过这种方法的适用期不会超过两年。增加总线的宽度只是一个短期的“创可贴”(band-aid)而已。而某些场合需要更快的总线速率。

现在的问题是,随着总线设计变得更宽更快,尺寸缩小以提供更强的单位体积内的运算能力,以往的设计前提变得过时,必须开发新的技术。结果,信号完整性领域持续发展,内容囊括了众多与以往的设计无关的新效应。现代总线已变得极快,设计者们必须计算小到毫伏的电压和小到皮秒的时延量。小到这种程度在若干年前是不曾有过的。我们看一下这个问题的真实情况,从一个人鼻尖反射的光线传到他的眼睛上大约需要85 ps的时间,正好是一些现代总线时延基准(分辨率)的10倍左右。总线时延基准尺寸要求的急剧减小带来很多问题。首先,在设计阶段就必须考虑更多的效应。这些效应要么是二阶的,要么是在设计的前几个阶段完全被忽略的,但现在主导着系统的性能。这样一来,需考虑的变量总数增多,导致问题越来越复杂。另外,用传统的方法很难或者说基本上不可能对新出现的变量建模。除

除此之外，当前实验室中的设备通常不适用于分析太小的时序变化，使得验证完整的设计工作很难或者说不可能进行，也很难或者说不可能将模型与实际情况关联起来。

### 1.3 基础

众所周知，数字设计的基础是用代表 1 和 0 的信号来传递信息。这一般包括了发送和接收一系列梯形电压信号。其中高电平表示 1，低电平表示 0。传导数字信号的通道称为互连线。互连线包括了收发信号芯片间的全部电路。这包括芯片封装、连接器、插槽、传输线和通孔。一组互连线称为总线。介于数字信号接收器所能识别的高低电平之间的电压范围称为阈值范围。在这个范围内，接收器要么向上翻转，要么向下翻转。在集成电路中，实际翻转电压随温度、电源电压、硅工艺以及其他因素的变化而变化。从系统设计者的角度来看，阈值范围在接收端通常又分为高电平阈值和低电平阈值，分别为  $V_{ih}$  和  $V_{il}$ 。高于高电平阈值或低于低电平阈值的电平在任何条件下都能保证被接收。这样，设计者就要保证他所设计的系统在任何情况下都能发出一个不低于  $V_{ih}$  的高电平，或不高于  $V_{il}$  的低电平，以确保数据的完整性。

为了最大可能地提高数字系统的运行速度，必须将穿过阈值范围的数据传输的时序不确定性做得最小。也就是说，数字信号的上升或下降必须足够快。理想状态下可以使用无限快的边缘翻转速度。当然，这在实际中是不可能的。实际中边缘翻转时间可以快到 35 ps。读者可以用傅里叶方法分析一下，越快的边缘速度，在信号的频谱图中会发现越多的高频分量。每个导体具有与频率相关的电容、电感、电导和电阻。频率足够高时，这些参数无法忽略。因此，一条互连线不再只是一条单纯的导线而是一个频率相关的、具有分布参数的元件，具有延迟和瞬态阻抗的特性。这些特性在从驱动芯片到接收芯片的波形传播中表现为失真和干扰。互连线是一个与周边设备有着交叉影响的元件，包括电源线、地线、散热片、其他互连线，甚至无线网络。信号不是只存在于传输它的导体中，而是存在于导体周围的局部电场和磁场中。互连线中的信号将影响其他互连线中的信号，或者被影响。在互连线紧密相邻的情况下，所有设备中的电感、电容和电阻等在保证接收端在适当的时延下实现翻转的这个简单任务中起着至关重要的作用。

高速设计中的一个最难的问题是有许多互相依赖的变量影响着数字系统的输出。有些变量可控，有些则使设计者不得不与随机变量打交道。数字设计的难点之一就是对这些可控或不可控的众多变量的处理。通常可以用忽略某些变量或给变量估值的方式来简化问题，不过这样会引起一些原由不明的错误。随着时序的限制性不断增强，对现代设计者来说，过去曾用过的简化方法的可用性急剧降低。本书也将给出处理大量变量的方法，这些问题如处理不当将变得难以驾驭。若没有处理大量变量的策略，不论设计者多么了解实际的系统，最终的设计只能是臆想之作。处理所有变量的最后一步通常是最困难的部分，这往往容易被设计者忽视。因为不能处理大量变量而陷入困境的设计者们，最后转而寻求证明一些“临时解”，并期望它们能代表所有的已知条件。这是一个很危险的猜谜游戏，虽说有时这样的方法无法避免。当然，设计中有一定量的臆测部分，不过设计的目标是最小化系统的不确定性。



## 1.4 总线设计的新领域

技术在不断进步,数字设计已进入一个新的领域,要求有新的设计技术和概念。这些新设计技术和概念甚至最熟练的数字系统设计者也难以理解。事实上,如果不能对本书中罗列的基本原则有着透彻的理解,现在或未来的诸如个人计算机等最新的数字系统是不可能设计出来的。为什么这在从前不成问题呢?原因是从前数字设计者不需要理解这些概念。随着现在数字电路的速度快速发展,不得不对这些概念进行深入了解。熟练的工程师们面临着这样的威胁,如果不适应新的设计理念就会被淘汰。本书将帮助工程师们适应新的形势。

从 Monroe 计算器到奔腾芯片,从打孔卡片到闪存,从真空管到集成电路,计算机性能以指数速率增长着。本书中,我们论述了现代数字设计者在现代或未来高速数字系统设计中碰到大量新的挑战时所需要的、不得不去学习的、以前看来不需要的知识。当传统数字设计者跨入高速设计领域时,他们将对高速逻辑信号有着完全不同的看法。本书将帮助他们触摸高速数字系统中那个怪异的、扭曲的、模糊化的信号波形。

## 1.5 本书适用对象

本书是为信号完整性的深入学习而撰写的。虽然也涉及一些基础知识,但本书假定读者具有良好的电磁场理论、向量计算、微分方程、统计学和传输线分析等方面的知识。本书以传统知识为基础,探讨了现在和未来的数字系统所需要的知识。

## 1.6 小结

当前形势的是:出现许多新问题需要解决。那些能解决这些问题的工程师们将决定未来。本书期望能用解决现代高速数字设计中出现的的问题的必要的、实际的理解,以及充分的理论知识来将读者武装起来,以站在超越本书的角度来解决一些甚至作者也还没有碰到过的问题。

## 错误声明

虽然经过了反复校稿,但有些错误仍属难免。这些错误在随后的印刷中会得到修正,我们还将勘误表汇总在 [ftp://ftp.wiley.com/public/sci\\_tech\\_med/high\\_speed\\_design](ftp://ftp.wiley.com/public/sci_tech_med/high_speed_design), 期望对大家有所帮助<sup>①</sup>。

## 参考文献

- Moravec, Hans, 1998, When will computer hardware match the human brain?, *Journal of Evolution and Technology*, vol. 1.  
Porter, Chris, 1998, High chip speeds spell end for FR4, *Electronic Times*, Mar. 30.

<sup>①</sup> 已根据作者 2009 年 10 月发布的勘误表更正了书中内容——编者注。