

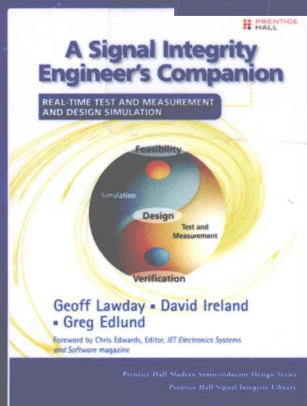
国外电子与通信教材系列

PEARSON

信号完整性指南

—— 实时测试、测量与设计仿真

A Signal Integrity Engineer's Companion
Real-Time Test and Measurement and Design Simulation



[英] Geoff Lawday 著
David Ireland
Greg Edlund

阎照文 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

信号完整性指南

——实时测试、测量与设计仿真

A Signal Integrity Engineer's Companion
Real-Time Test and Measurement and Design Simulation

電子工業出版社·

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书是高速数字设计中现代信号完整性测试和测量方面全面、权威、极具实践价值的指导手册。此领域的三位顶级专家将指导你对现代逻辑信号检测和嵌入式系统故障进行系统地诊断、观察、分析和排除。作者用简单易懂的语言,介绍了嵌入式系统从规格定型到前仿真的整个生命周期,描述了其中的关键技术和概念。本书介绍了怎样使用实时测试和测量技术,解决当今不断增长、难于满足的互操作性和兼容性要求,给出详细、完整的案例分析,使读者学会如何应对一般设计上的挑战,包括:不增加任何额外费用确保接口与正时间裕度之间的同步操作;计算总的抖动预算;在高速串行接口设计中管理复杂的折中问题。

本书适合作为信号完整性相关领域的电子工程师和片上系统设计人员的参考指南,也适合作为信号完整性相关专业方向的研究生教材。

Authorized translation from the English language edition, entitled *A Signal Integrity Engineer's Companion: Real-Time Test and Measurement and Design Simulation*, 9780131860063 by Geoff Lawday, David Ireland, Greg Edlund, 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 © 2010.

本书简体中文版由Pearson Education 培生教育出版亚洲有限公司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。

本书简体中文版贴有 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:01-2008-5684

图书在版编目(CIP)数据

信号完整性指南:实时测试、测量与设计仿真/(英)劳迪(Lawday, G.), (英)爱尔兰(Ireland, D.), (英)艾德兰德(Edlund, G.)著;阎照文等译.-北京:电子工业出版社,2010.4
(国外电子与通信教材系列)

书名原文:A Signal Integrity Engineer's Companion: Real-Time Test and Measurement and Design Simulation
ISBN 978-7-121-10597-5

I. ①信… II. ①劳… ②爱… ③艾… ④阎… III. ①数字信号-信号检测 IV. ①TN911.72

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第052194号

策划编辑:马 岚

责任编辑:史鹏举

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:21.75 字数:557千字

印 次:2010年4月第1次印刷

定 价:49.00元

凡所购买电子工业出版社的图书有缺损问题,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 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

序 言

我们很容易被当今的言论误导，电子工程领域也不可避免。如“数字化”和“数字融合”这类术语都包含了潜台词，就是你不得不去担心那些1和0；越来越多的电子设计师不断探寻要将模拟转化为二进制逻辑。但这是个错觉。事实远非如此，模拟范畴正以日益微妙、潜在破坏性的方式渗透到电子设计的各个领域。

由于需要使用数字控制来对信号形式进行压缩和重塑而变得更加复杂。预加重在驱动器之前电路中的作用几乎是微不足道的。尽管这个处理可以提高接收机解码信号的能力，但也会对附近其他接收机造成不利的干扰。更糟糕的是，干扰可能主要依赖被传输的数据。从这一点不难看出间歇情况，很明显，随机 Heisenbugs（间歇性、不确定性错误）可以在操作期间突然弹出，并在你尝试添加仪器找出故障根源时很快消失掉。

信号完整性问题已经提出很多年，但这些问题往往是系统设计中一些孤立的微不足道的部分。今天，所有的趋势都指向了信号衰变得越来越坏。开关速度不断上升，对电源轨道提供的电压却在不断下降。

但这个趋势并不全是技术方面的。最大的问题可能来自商业决策的结果：降低生产成本的压力迫使设计师考虑廉价的元件、封装和基底；并且要求设计师在较少的时间内完成工作。

某些市场，如蜂窝手机，公司希望能够很快地生产变型产品。产品在货架上可能只有6~9个月。超过6个月的设计在市场上可能只是一个宣传品或废品：他们能做的只是推断目前的趋势和期望。定型产品到上市销售的时间越近，得到利益的机会就越多。但是这样不会帮助设计小组尽快设计手机。

核心芯片可以被设计用于不同的手机。但是一个新的屏幕或者键盘，或者从直板转换到翻盖的设计，都意味着电路板布局必须改变。随着电路板上元件的更小化布局，你会突然发现，芯片制造商做出的设计决策不符合新的布局要求。这意味着要快速转换项目来创造一个现有手机的简单变体以便适应新市场，乍看起来少了很多难以解决的问题。

本书中，作者将带着你遍历数字设计师可能会用到的方法，确保不容易受到模拟特性可能对它们产生的干扰。这是综合处理方法，它显示了如何在虚拟世界和现实世界中工作，才能避免信号完整性问题的综合方法。联想到信号完整性是一个被“黑色魔术”技术主导的主题，这是很诱人的。但是有大量的科学技术可以帮助时间紧缺的工程师确保一个高速、低电压总线可以在系统终端正常工作。

本书描述了建模和行为仿真怎样让工程师在项目的初期做出明智的决定。这涉及一些棘手的课题，如传输线建模——在未来几年将是极其重要的一种技能。

同样重要的是找出在原型中引起错误的地方的能力，并能够追踪问题的根源。在探测、示波器使用和时域反射等章节提供了符合实际的建议，超越逻辑1和0看问题的最好方法是深入了解由真实世界产生的电磁场环境。

本书并不全是讲述有线的世界：最后一章涉及无线世界，以及由新定义的软件无线电架构提出的挑战。

本书对每个电子工程实验室来说是不可缺少的，因为越来越多的人会发现他们不得不与那些依赖软件驱动数字系统的模拟基础结构打交道。在这样一个数字世界中，本书从来没有像现在这样重要。

Chris Edwards，英国伦敦 IET “*The IET Electronics Systems and Software*” 编辑。

Chris Edwards 报道电子学、IT 和其他科技事物。他作为编辑，拥有超过 15 年的新闻经验。他目前是 “*Electronics Systems and Software*” 的自由职业编辑，该杂志由英国工程与技术学会出版 (IET)，并且定期给 “*Engineering and Technology*” (原 *IEE Review*)、 “*Information Professional*”，以及面向青少年的新的科技杂志 “*Flipside*” 投稿。

前 言

关于本书

我们生活在一个高速数字化的时代，嵌入式系统开发者在许多情况下必须应用新的设计方法并完成复杂的信号完整性测试和测量。本书引导读者了解嵌入式系统设计的整个生命周期，从规格定型和仿真到测试和测量。本书的特点是解决信号完整性工程中最棘手的问题，这些问题常常是在产品开发中导致延迟的根源——上市时间是信号完整性工程师的致命弱点。通过考虑从仿真到测试和验证的整个生命周期，你能看到仿真与实时测试之间新的相互作用，这些相互作用带来了新的设计方法。一个典型的例子是新的高速串行总线的设计和实施，在这里仿真和实时测试密不可分地联系在一起，尤其是设计将驱动器预加重与接收机均衡化装置结合起来。

著名的教育家、哲学家阿基米德说，“我们必须学会从实践中学习”，本书将努力做到这点。通过描述实际的应用，可以学习作者在嵌入式系统设计、仿真、测试和测量方面的经验。更重要的是，你受到了鼓舞，在信号完整性工程设计的整个生命周期中考虑和采取良好的习惯做法。

今天尤其重要的是需要满足标准规定的一致性和互操作性的需求。因此本书要探讨一致性测试的要求，并把互操作性设计看做一个重要的主题。除了一致性测试要迁移到高速串行总线之外，这两个议题本身在信号完整性工程中都会适宜一些实际应用例子。因此，高速串行总线及与它们相关的低电压差分信号的设计和测试是关键的主题，将贯穿本书的几个主要章节。然而，信号完整性工程的基础是对一致性测试和互操作性设计的理解，并且需要更新或学习信号的采集、测试、测量和设备仿真的基础，因此这也是本书的大部分内容。

团队工作已经变成工程师在设计、开发和测试数字系统的常规。团队成员要建立起友谊并定期互相提出意见，特别是在当今复杂的高速数字世界中。开发或测试数字系统的任务十分复杂，甚至设计一个看似简单的电路也可能产生问题。例如，工程师可能设计一个满足所有需求的简单数字电路，然而，一年后，某个芯片发生了改变，因为新的芯片更便宜并具有相同的功能。出乎工程师预料的是，新的芯片具有较小的器件尺寸，以此来降低成本和开关时间，从而导致更快的边沿速率和信号完整性问题！这引出了已证明的一句话“有两种类型的设计工程师，一些已经遇到信号完整性问题，而另一些将会遇到。”正如我们所看到的，如果一个设计对边沿速率是敏感的，那么它的元件规范必须使边沿速率成为一个正式产品参数，因为它无法预测硅生产制造工艺的发展。本书的目的是成为工程师的好伴侣，并且成为工程师团队的一部分，它提供对设计规格、仿真、测试和测量的理解，并且伴随着在设计整个生命周期中能够保持信号完整性的一些重要意见。

虽然我们可以采取大的视角，但还是有一些工程师需要知道的相当小的问题，就像他们所说，“还是害怕提问”。例如，如果设计师怀疑出现地弹（ground bounce）或在参考信号上

的更精确的瞬态响应，并且想用示波器来测量地线，那么探针在哪里连接地呢？事实上，它通常是连接一个坚实的逻辑0。此外，为什么一个最先进的示波器当测量地弹时给出50%的测量误差？那么，示波器的带宽通常指定在-3 dB点上，并且在指定的示波器带宽的限制下测量的电压将会显示为实际电压值的一半。此外，测量电压是很重要的，但考虑电流这一项——因为在地线上的电流尖峰将产生串扰和伪开关转换。我们可以继续进行下去；存在来自于间歇性的建立和保持违规所造成的无数个信号完整性的挑战，所引起的问题范围从亚稳态到电磁感应串扰。能够预见信号完整性问题并知道如何去避免它们是本书的根本。

本书的另一个特点是原始资料的结合。关于信号完整性的理论内容是建立在科学的规律及显著性假设之上的，本书的来源是作者的专业经验、发表的论文、同事的工作及其应用。本书是对原始材料的连贯组合，并且被扩展，提供对现代信号完整性应用的理解。本书中更关心的是实际问题。每章都集中在信号完整性工程师的日常活动，给出来自工业的建议和插图描述。实用性成为本书的中心主题。

21世纪是移动通信、计算机、数字广播等媒体相融合的数字时代，并且消费者希望媒体是透明的技术。简单来说，体育迷希望在他或她的移动电话、笔记本电脑和个人音乐播放器或数字电视上可以实时观看赛事，价格合理并且具有绝对的可靠性。我们也可以举出许多其他的来自工业、医药、军队的例子。今天，数字设计师或维修工程师都期待着在信号完整性工程中完成设计，它是系统支持的核心，这些都将在未来产生出创新的技术。本书反映了这个趋势。

读者对象

信号完整性工程是一个年轻、不断发展的学科，在这个领域很少有人宣称对它完全了解。对于作者来说写本书也是一个探索的旅程，并且我们有充分的理由相信对于你这将是一个有益的旅程。毫不怀疑，本书中讨论的一些议题将会引起争论，因为在工程学分支中有许多工作需要规范。然而，无可争议的原理是本书所提供的，它是依据信号完整性工程的。这些原理给予那些工程师一个基础，在这个基础上来建立对信号完整性工程所必要的知识和理解力。因此，本书是推荐给信号完整性工程师初学者和实践工程师来阅读的，据此作者描述了良好实践应用的前景，并显示了现代数字系统的发展、测试和验证。

虽然本书是自然分割成不同主题的章节，但是有一个共同的主线贯穿于全书。每章在讨论复杂的设计或测试之前，通过描述主题的必要前提，提供给读者一个指导。所以，有经验的工程师可跳跃一章的开始并集中在应用和高级主题的细节，就可以掌握主题的方法。没有任何一本信号完整性的书宣称是无所不包的，本书也不例外。你可能需要通过Prentice Hall出版社出版的深入的信号完整性系列理论书籍来巩固对信号完整性设计理论的理解。然而，本书在为广大读者解决信号完整性工程方面，大部分内容是自我包容的。

本书结构

为了指导你的嵌入式系统设计的整个生命周期，包括规格、仿真、测试和测量，本书在结构上尽可能按照开发周期的时间顺序来布置。然而为了包含信号完整性工程的各个方面，并为读者阅读提供一个连贯的主线，章节的次序是产品生命周期流程与信号完整性主题自然

分组的一个折中方案。因此，一致性和串行总线仿真这两部分内容被放置到了本书的后半部分，而前些章节是这些更先进主题的先决条件。

第1章：引言

本章带你进入设备和电路仿真的世界中，这是一个现代数字产品成功开发过程中的主要阶段。一个发人深省的例子是，设计师在上市时间的强烈压力下，很容易会忽略对操作裕度的真正理解——网络在超出了生产和运行条件的情况下还能可靠地运行吗？在产品的使用生命周期中将会碰到这种情况。可预期的主要失败机制是什么？它们之间是怎样互相作用的？其中一些复杂的仿真问题，将在引言中重点介绍。但是更重要的一点是，这些讨论将为引入更深入的章节提供方法，在那些章节将深入研究所关心的问题。

在仿真之后，引言将详细地描述在信号完整性工程测试和测量方面的一些主要创新。例如，要克服一些传统的信号完整性工程问题，设备制造商当前需要在驱动设备和接收机内部使用新的集成信号处理功能，以便能应用信号预加重和均衡化。然而，不正确地应用预加重会产生不必要的过冲、串扰和噪声。这是一个解决当今信号完整性问题的复杂例子。本章对这些问题提出了一些粗浅的看法，并通过眼图的基本描述提出了解决这类问题的途径，形成了当今许多自动化兼容性测试和信号分析测量的基础。

第2章：芯片到芯片的时域特性和仿真

本章涵盖了在CMOS状态机中存储信息的电路，以及它是如何失效的。一系列SPICE仿真和数据预算介绍了共同时钟架构，这是芯片之间数字信号传输三个模式中的第一个。尽管源同步和高速串行模式在当代系统中更为普遍，共同时钟架构并没有消失。对于共同时钟传输来说，一个可靠的办法是将有用的东西存储到工具箱中。

IO电路在信号完整性工程中扮演一个关键的角色，但是我们很少去关注它的示意图。CMOS IO电路已经使用无数次了，第2章将考察它们相关的电气特性。本章还包括为这个电路使用行为模型时我们所做的假设。研究这些电路为理解更深奥的电路提供了基础。本章和其他章都反复提到在信号完整性仿真中使用模型的精确性和质量。

第3章：信号路径分析

本章描述基于直观的时域反射（TDR）技术的信号路径分析。详细描述了TDR测量理论及其应用，给出TDR是理解如阻抗失配和电路板（PCB）问题等信号完整性影响的基础。特别地，它提供了一个描述一些主要信号完整性挑战和解决方法的理想工具。本章也介绍了矢量网络分析（VNA），这是一个用于其他事情的重要的频域测量方法，可以精确地描述高速信号路径的特性。本章的特别功能是介绍低电压差分信号（LVDS）路径的设计、开发和测试。然而，对基本传输线理论的理解是在信号路径设计中做出良好实践的基础。

今天，应用高速数字信号传输，即使是最短的无源PCB走线也能够表现出传输线的效应。传输线理论包含电磁场概念，一般需要复杂的数学分析。然而，使用TDR可以直观地引导对传输线理论的基本理解，即使一些基本概念需要少量的简单计算。

第4章：DDR2 案例研究

DDR2案例研究解决了共同源同步总线的问题：这个接口在产品寿命周期之外将可以用正的时间裕度进行操作，而不会产生由过度保守引起的高成本吗？这一做法涉及一步一步地

使接口分离——理解一个DIMM连接器生成多少毫伏(mV)的串扰和由它引起多少皮秒(ps)的眼图闭合。在项目计划的压力下,经常试图收集一套模型,构建仿真并完成演练。本章引领读者做深入的研究。

第5章:实时测量:探测

本书的核心是挑战数据采集问题,即检查理想的非侵入式探针存在的隐含问题。怎样才能现代信号完整性测量中实现信号的高保真度,怎样才能避免不必要的测量假象呢?人们仔细研究了模拟信号测量的过程,证明了正确连接待测系统的重要性,因为高速数字信号的模拟特性决定了信号完整性。本章对探测提供实际的建议,并提出了如何避免探针的问题。特别值得注意的是,本章给出了当今快速信号和低电压差分信号(LVDS)的探测。

第6章:测试和调试:示波器和逻辑分析仪

本章从模拟和数字两方面来回顾现代信号完整性测试,因为在当今高频设计中,这两者之间存在不可分割的联系。重点是在频率超过1GHz的频段,而选择的测量工具是数字示波器和逻辑分析仪。本章提供了实际的例子,说明怎样详细地观测模拟和数字波形,并提供必要的的数据,以便理解最具挑战性的信号完整性时间预算问题,如建立和保持时间违规行为、数据偏移和亚稳态。实际插图显示了这些问题,并显示了它们是怎样被检测和调试的。

第7章:用信号源去重构实际信号

整个信号完整性工程中的核心主题是数字电路在模拟特性方面的行为分析,尤其是数字电路的行为是怎样被决定的。本书的一些章节专门针对用于仿真模型的方法,在这种方法中计算机生成的输出以不同的形式显示信号和数据,来响应一系列的仿真输入。然而,用来决定一个实际电路或原型的实时特性和操作的基本方法是外部控制和观察电路或待测设备。本书的大部分是关于信号采集和测量的,并且本章提供了一个平衡,它是关于另一方面——信号源——它用来控制电路。简言之,本章是关于外部提供的信号,它在电子测量中作为一种实时激励来使用。本章描述、揭秘了现代信号源的复杂问题,并显示了它是如何用来强调数字电路以暴露信号完整性缺陷的。

第8章:信号分析和一致性

数字系统的增值,如新的高速总线,创造了大量的互操作性和一致性标准。本章说明实时测试和测量如何成为一致性测试的基石。它描述了各种标准,特别强调高速串行总线,并说明为什么在频率超过2.5GHz时,实时测试和测量是实现一致性的唯一出路。用于一致性验证的逻辑分析仪和示波器的实际使用是要被检查的,而诸如眼图和统计分析等技术将被详细讨论。本章对于那些需要理解、满足规定的一致性测试任务的信号完整性工程师是必不可少的阅读内容。

第9章:PCI Express 案例研究

高速串行(HSS)是在芯片之间传输数据的三大模式的最后一种,PCI Express是一个很好的高速串行接口例子。PCI特殊兴趣小组发布了一系列规则,这些规则可以使设计走出麻烦。然而,要么强迫设计师背离良好的传输路线,要么破坏一些规则,或者为了另一个而放弃一个,这种情况经常发生。在这种情况下,对于理解每个互连元件对抖动预算会造成多少贡献,并且在计算所有的相关影响之后还能剩余多少皮秒是有帮助的。从一系列模型和设计

规则开始，第9章检查每个元件在时域和频域中的特性，并且在某一时刻将它们联合起来以便达到总的抖动预算。

第10章：无线信号

蜂窝技术和无线数据网络的成功使得基本射频（RF）元件的价格直线下降。这使得制造商可以在传统的军事和通信市场之外嵌入相对复杂的RF设备到所有的民用产品中。射频发射机已经非常普遍，它能够在众多的嵌入式系统中找到。因此本书将介绍RF测试和测量用于信号完整性工程。此外，鉴于面临当今高速逻辑装置的行为特性的挑战，本章还介绍了对一些射频参数如抖动是怎样被测量的。本章给出了一个详细的对实时频谱分析仪（RTSA）的使用，也提供了对扫描频谱分析仪（SA）和矢量信号分析仪（VSA）的详细介绍。

相关网站资源

www.informit.com/title/0131860062

彩色照片和插图

本书的一些章节使用了插图和照片，以此让读者参与到仪器的应用。特别是描述测试和测量的章节使用逻辑分析仪、示波器和频谱分析仪显示时，量化、简化了很难、冗长的文字说明部分。然而，与其他大多数书籍一样，插图采用单色印刷，因此某些图片的细节或特征可能会丢失。所以，请从网站www.informit.com/title/0131860062下载图形文件，以查看彩色图像，并可以将它们与下面三章相关的文字内容联系起来：

- 第6章 测试和调试：示波器和逻辑分析仪
- 第8章 信号分析和一致性
- 第10章 无线信号

仿真模型

第2章、第4章和第9章说明了使用三种接口模式的案例研究的皮秒分配：共同时钟、源同步和高速串行。

第2章中使用的模型套件包括传统的3.5 V 0.5 μm 的CMOS工艺、IO电路和某些简单网络的SPICE晶体管模型。

第4章主要描述标准DDR2 IO电路、损耗传输线、过孔和DIMM连接器的行为仿真。虽然这一章讨论了DIMM连接器的串扰，但是模型套件只包含单线模型，因为DIMM连接器模型是专有的。

第9章中的PCI Express案例研究需要更精确的互连模型：再加上球栅阵列、相应的过孔场和边缘连接器的S参数表示。这些仿真在安捷伦（Agilent）的ADS库中使用了简单的100 Ω 去加重驱动器模型。这个模型不包括在套件中。

所有的模型都适合在SPICE或行为仿真器中的仿真。

关于作者



Dr. Geoffrey Lawday 目前是英国新白金汉大学泰克 (TeRtronix) 测量实验室的主任, 他在计算机学院讲授嵌入式系统设计和高性能计算。他拥有萨里大学计算机工程学士和硕士学位, 在布鲁内尔大学获得时频信号分析方面的博士学位。他在信号完整性工程方面的研究已反映在他的出版物中, 如对引入新的串行总线的评论发表在著名的电气工程师学会的期刊上。



David Ireland 有超过 30 年的测试和测量方面的经验, 从成为 Racal 的工程学徒, 在那里他获得了正式的电子工程师资格, 直到目前成为泰克欧洲设计及制造市场部经理。由于他在关于高速数字系统设计、测试和测量以及信号完整性的论文和协作讲习班所做的贡献, 他成为举世公认的欧洲嵌入式系统工程师。



Greg Edlund 在信号完整性的职业生涯始于 1988 年在超级计算机系统公司 (Supercomputer System, Inc.) 工作, 在那里他仿真和测量了用于计算机矢量寄存器的双极嵌入式 RAM 的时间特性。从那以后, 他为克雷研究公司 (Cray Research, Inc.)、数字设备公司 (Digital Equipment Corp.) 和 IBM 公司开发和测试了其他 9 个高性能计算平台。他有从许多才华横溢的工程师那里学习的好运气, 而他的注意力集中在 IO 电路和互连元件的建模、仿真和测量上。坚实的物理基础和实际工程经验结合在一起形成一个对优化性能、可靠性和成本方面可贵的观点。

关于译者

本书由阎照文、田国亮、于晓丰、张兰兰、韩轶峰、付路、王刚、车明明、韩雅静翻译, 具体分工如下: 田国亮翻译第 1~3 章、前言和术语表, 于晓丰翻译第 4 章, 张兰兰翻译第 5、6 章, 韩轶峰翻译第 7、8 章, 付路翻译第 9、10 章。全书由阎照文负责审校、定稿, 并得到王刚、车明明和韩雅静的协助。

由于水平所限, 翻译的不足之处在所难免, 欢迎读者批评指正, E-mail: yanzhaowen@buaa.edu.cn。

致 谢

Peter Bush编辑对本书的准备和出版做出了独特和广泛的贡献。Peter Bush拥有利兹大学物理学士学位，毕业后他成为柯达公司的一名开发工程师。技术开发工作使得Peter Bush成为“*Electronics Power*”杂志的执行编辑，并成为著名的电气工程师学会(IEE)的总编辑。因此，作者很高兴Peter Bush在本书的研究和编写中承担重大职责。目前，Peter Bush是公共关系公司彼得布什通信的董事、经理，并且以电子仪器及其应用方面的杰出文章和白皮书享有盛名。总之，David和Geoff十分感谢Peter在本书的创作过程中的个人鼓励和专业支持。

David和他在泰克的同事负责本书的大部分内容，如果没有他们的帮助和指导，本书是无法完成的。特别地，还要感谢MAPL的Dave Fink，VSPL的Mark Briscoe，LAPL的Mike Juliana，EOPL的Dmitry Smolyansky，SSPL的Bob Buxton，EMEA Marketing的Trevor Smith、Jon Mees和UKAE的John Marrinan，以及在不经意间被忽视的任何个人。当然，感谢泰克公司在销售、市场营销及产品线上的广大团队，他们在本书的研究和准备上献出了各自的业余时间。

特别要感谢Altera公司的专家Bob Blake的指导和他对本书的出版所做的重大贡献，并且感谢Altera公司慷慨给予版权许可，公布其预加重和均衡化插图。

Greg在他的职业道路上很幸运，他遇到了许多优秀的工程师，从他们那里学习了很多东西。他特别感谢Gene Sluss，他在超级计算机公司的集成电路设计方面提供了指导。Greg也感谢Dale Becker和Wayne Vlasak，他们在IBM指导过他，并与他共享了工程师的经验。数字设备公司(Digital Equipment Corp.)拥有丰富、优秀的传统技术，Greg和Bob Haller在这里一起共事过两年。Amanda Mikhail是一个值得信赖的同事，他为周围的人树立了榜样，富有杰出的奉献精神。

Geoff以个人名义和作者一起深深地感谢Prentice Hall的编辑团队——特别是Bernard Goodwin和Michelle Housley——感谢他们在艰辛的探索航程中所表现出来的帮助和耐心。Geoff还要借此机会感谢在学校、大学和工作场所那些激起他工程热情的人们，这些人很多，不胜枚举。然而，他必须要感谢在新白金汉大学给予他鼓励和建议的同事和学生——特别是学校负责人Peter Harding；还有在彼得布什通信公司的Dawn和Jean，他们总是很开朗乐于助人。

深深地感谢来自Honeywell、Intel和Agilent公司的专家，他们给出了专业的指导、评价和批评。只要有可能，我们会听取他们的意见并修改文稿；然而，出现任何错误仍然由作者完全负责。

这是共同作者所创作的，可以理解，作者无法感谢到为本书做出贡献的所有人，在此向那些没有感谢到的人表示歉意。我们尽可能感谢我们的专业朋友和同事，深深地感谢我们家人的耐心和支持，没有这些本书可能永远都不会完成。

目 录

第 1 章	引言	1
1.1	生命周期：开发仿真策略的动机	1
1.2	原型：互连高速数字信号	6
1.3	预加重	9
1.4	实时测试和测量的必要性	11
	小结	19
第 2 章	芯片到芯片的时域特性和仿真	20
2.1	根本原因	20
2.2	CMOS 锁存器	20
2.3	时序故障	23
2.4	建立和保持限制	23
2.5	芯片定时的公共时钟	26
2.6	建立和保持 SPICE 仿真	27
2.7	定时预算	28
2.8	共同时钟 IO 定时	30
2.9	使用标准负载的共同时钟 IO 定时	32
2.10	共同时钟结构的限制	36
2.11	IO 电路内部	36
2.12	CMOS 接收机	37
2.13	CMOS 差分接收机	38
2.14	引脚电容	39
2.15	接收机的电流电压特性	40
2.16	CMOS 推挽式驱动器	40
2.17	输出阻抗	42
2.18	输出上升时间和下降时间	43
2.19	CMOS 电流模驱动器	44
2.20	IO 电路的行为建模	45
2.21	CMOS 推挽式驱动器的行为模型	46
2.22	行为建模的假设条件	48
2.23	IBIS 模型介绍	48
2.24	IBIS 标题	52
2.25	IBIS 引脚列表	52

2.26	IBIS 接收机模型	52
2.27	IBIS 驱动器模型	53
2.28	行为建模的假设条件	54
2.29	SPICE 模型与 IBIS 模型比较	55
2.30	IO 电路模型的正确性和质量	56
	小结	59
第 3 章	信号路径分析	60
3.1	传输线环境	61
3.2	阻抗特性、反射与信号完整性	63
3.3	反射系数、阻抗和 TDR 的概念	65
3.4	观察真实世界的电路特性	70
3.5	TDR 分辨率因子	71
3.6	差分 TDR 测量	74
3.7	信号完整性应用的频域测量	75
	小结	78
第 4 章	DDR2 案例研究	79
4.1	从共同的前身演变而来	79
4.2	DDR2 信号	81
4.3	写时序	83
4.4	读时序	84
4.5	对 IO 的逐渐认识	86
4.6	片外驱动器	86
4.7	片上终端	87
4.8	上升波形和下降波形	88
4.9	互连敏感度分析	89
4.10	导体损耗和介质损耗	91
4.11	阻抗容差	94
4.12	引脚到引脚的电容变化	96
4.13	字节内的长度变化	96
4.14	DIMM 连接器串扰	96
4.15	参考电压交流噪声和电阻容差	100
4.16	边坡降因子	101
4.17	最终读写时间预算	101
4.18	保守源	104
	小结	105
第 5 章	实时测量：探测	107
5.1	现代示波器探针剖析	107