

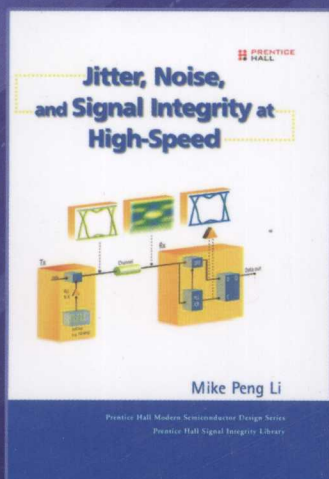
国外电子与通信教材系列

PEARSON

# 高速系统设计

## ——抖动、噪声和信号完整性

Jitter, Noise, and Signal Integrity at High-Speed



[美] 李 鹏 (Mike Peng Li) 著

李玉山 潘 健 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

# 高速系统设计—— 抖动、噪声与信号完整性

Jitter, Noise, and Signal Integrity  
at High-Speed

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

## 内 容 简 介

本书着重介绍了最新的抖动、噪声、误码(JNB)和信号完整性(SI)问题的解决方案,内容涉及理论、分析、方法和应用。本书讨论了链路部件和整个系统中的JNB及SI难题;论述了与JNB及SI有关的术语、定义、基本概念和产生根源;给出了最新的理论、分析、方法和实际对象,引导读者从最基本的数学、统计学、电路与系统模型出发直到最终应用。本书的重点在于研究时钟及串行数据通信中的应用问题,涵盖JNB及SI的仿真、建模、诊断、调试及一致性测试等。

本书可以作为电子通信类学科的博士生、硕士生的选修课程教材,也可以作为通信电路与系统设计工程师自学抖动、噪声及其信号完整性问题的研究必读和参考手册。

Authorized translation from the English language edition, entitled Jitter, noise, and signal integrity at high-speed, 978-0-13-242961-0 by Mike Peng Li., published by Pearson Education, Inc, publishing as Prentice Hall, Copyright ©2008 Pearson Education, Inc.

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:01-2008-1961

### 图书在版编目(CIP)数据

高速系统设计:抖动、噪声与信号完整性/(美)李鹏(Li, M. P.)著;李玉山等译.

北京:电子工业出版社,2009.7

(国外电子与通信教材系列)

书名原文:Jitter, Noise and Signal Integrity at High-Speed

ISBN 978-7-121-08906-0

I. 高… II. ①李…②李… III. 数据通信-通信系统-系统设计-教材 IV. TN919

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 081059 号

策划编辑:马 岚

责任编辑:段丹辉

印 刷:涿州市京南印刷厂

装 订:涿州市桃园装订有限公司

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:15.5 字数:414 千字

印 次:2009 年 7 月第 1 次印刷

定 价:38.00 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，教授级高级工程师 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

李鹏博士(Dr. Mike Peng Li),是世界领先芯片公司 Altera 的首席架构师与杰出工程师。在国际通信学术前沿领域是一位杰出的披荆斩棘、破浪前行者。这本有关抖动、噪声及信号完整性的专著被翻译成自己的母语,应该是值得自豪和有成就感的事件。

最近 10 年,铜信道的速率大多为 5~6 Gb/s;光纤信道的多数速率为 8~10 Gb/s。在这种高速传输下的链路抖动,必须做到亚皮秒(ps)以下才能获得满意的误码率。而噪声更是无处不在,低信噪比一直是误码的主要根源。说到底,抖动与噪声干扰,是信号(数据)完整性研究中最基础的对象。当前,从芯片、印制板再到大系统,高密度电/光互连的信号完整性问题正以主角的身份,俨然对高速电路与系统设计指标提出严峻的挑战。

本书所针对的,就是抖动、噪声这两种影响通信系统数据(信号)完整性乃至误码率的“顽症”。作者在研究中创立了尾部拟合抖动分离算法;提出确定性抖动、随机抖动、总抖动等框架体系;率先应用随机信号及线性理论去分析高速链路系统等。

本书从时域、频域、统计域角度全方位地对发送器、接收器、信道、均衡、时钟恢复子系统的抖动、噪声、误码率及其信号完整性机理、建模与测试等问题进行深入浅出的论述,堪称一部凝聚作者汗水结晶的开拓式专著。

目前,国际上鲜有从高速链路底层着力探讨抖动/噪声的专业论著。希望本书能吸引国内通信业、电子行业的同行关注具有可靠性属性的抖动、噪声一类的信号完整性问题,并藉此推动国内在高速领域的研究与国际完全接轨并尽快付诸工程应用。

本书由西安电子科技大学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:潘健、刘洋、张木水、李丽平、贾琛、路建民、刘婷婷、吴文婧、王林林、杨丽湘、白凤莲、董巧玲等。诚然,技术性专著的翻译加工主要是正确理解加准确陈述的过程。其中的各个环节,一定存在诸多错误与不妥之处,切盼得到同行和读者们的不吝赐教。

电子工业出版社高教分社的马岚老师、段丹辉老师付出了辛勤的劳动,提出许多好的建议;作者李鹏博士审读了中文书稿。本书出版也得到了国家自然科学基金(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支持。译者在此一并表示真挚的谢忱!

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,也可以作为通信电路与系统设计工程师自学抖动、噪声及其信号完整性问题的研究必读和参考手册。

李玉山

于西安电子科技大学电路 CAD 研究所

2009 年 6 月

# 前 言

摩尔定律依然指引着世界半导体产业的技术路线图。目前,集成电路(IC)的特征尺寸已经降到 65 nm,近期还将进一步做到 45 nm、32 nm,甚至 22 nm 等。它将使得 IC 系统具有更多的功能及更强的数据处理能力。显然,一个高效的复杂多功能系统需要快速的输入输出(I/O)能力。所以,当先进的 IC 系统中晶体管数目不断增加时,I/O 的速度也在不断地升高。

尽管特征尺寸的降低及 I/O 速度的升高赋予系统更好的功能和性能,它们同时也带来了技术上的挑战。I/O 速度的升高使得链路总的可用最大抖动预算——单元区间(UI)必将相应地减小。为了确保整个链路系统能有较好的误码率(BER),此时最严峻的挑战就是要降低抖动。特征尺寸减小带来另一个非常严峻的挑战是功率密度和功率损耗必须小于某一约束的限度,或者说要采用低功耗设计。这时,必须降低噪声以便在低功耗/低电压信号时能保持一个合理的信号噪声比(SNR),从而噪声指标又变成了一个很关键的因素。当信道材料不变时,在同样有损信道条件下随着数据速率的升高,高频分量将迅速增加,这时的数据信号衰减和退化将加剧。信号的衰减和退化造成的信号完整性(SI)问题主要表现为确定性抖动及噪声。出于成本效益的考量,一般采用常规信道材料及多种高速 I/O 标准的技术途径去提高 I/O 链路的数据速率,这时对抖动、噪声及 SI 的挑战将会更加严峻。

今天,面向计算机的应用主要以铜线作为信道,其高速 I/O 速率标准大都设计为 5~6 Gb/s,其中包括:PCI Express II (5 Gb/s),Serial ATA III (6 Gb/s)以及 FB DIMM I (3.2,4.0,4.8 Gb/s)等。这些标准的下一代数据速率可能会提高到 8~12 Gb/s。另一方面,面向网络的一些应用主要以光纤作为信道,大多数速率都设计为 8~10 Gb/s,例如 Fibre Channel 8X(8.5 Gb/s),Gigabit Ethernet (GBE) 10X(10 Gb/s)以及 SONET OC-192(10 Gb/s)等。这些网络 I/O 链路的下一代数据速率可能会加倍或翻两番到 17~40 Gb/s。在 10 Gb/s 时,UI 为 100 ps;而 40 Gb/s 时,UI 仅为 25 ps。为了维持一个好的 BER(例如  $10^{-12}$ ),这类数据率下 I/O 链路中的随机抖动必须在亚皮秒(ps)甚至更低,这是一项十分严峻又具挑战性的任务。可以想象,将来随着数据率进一步的提高,抖动、噪声和 SI 带来的挑战将会变得更加严重。

20 多年来,出版了许多信号完整性的书籍。但是书中涉及抖动、噪声和 BER 的部分都相当简短。只有两本书比较详细地论述过抖动,但由于它们已经过去了 15~17 年,与现在关于抖动、噪声及 SI 的知识及认知水平相比,那些内容也显得过时了。

过去 10 年中的巨大进展已经为抖动、噪声和信号完整性建立了新的理论和算法。关于抖动的定理及分析,抖动分量中的确定性抖动(DJ)、随机抖动(RJ)以及相关数学模型正在成为对抖动加以量化的更好度量。关于抖动跟踪,抖动传递函数已被广泛应用于定量求解抖动、噪声及信令的输出和冗余度分析。基于概率密度函数(PDF)、累积分布函数(CDF)以及相应卷积运算的统计信号分析方法正逐渐取代常规落后的、简单又不准确的峰-峰值和 RMS 等度量。正规地采用线性时不变(LTI)定理,加上统计信令及电路定理,可以求解链路系统及其子系统内的抖动、噪声和信令性能等。



与此同时,在高速网络和计算机 I/O 链路的体系结构和数据传输速度方面也取得了巨大的进展。总的来说,这些标准提出的体系结构都是以几个 Gb/s 的速率串行传输,在接收器采用时钟恢复电路(CRC)提取时钟时序。CRC 可以跟踪并降低接收器输入端的低频抖动以维持接收器及整个系统良好的 BER 性能。已经开发出许多时钟及数据恢复算法与电路,其中有些是基于锁相环(PLL)、相位内插(PI)及过采样(OS)的。每一种时钟恢复都给出了不同的抖动传递函数、跟踪能力及其特色。为了减轻或者补偿有损信道造成的信号退化影响,已经研究出多种先进的均衡技术及电路,包括线性均衡(LE)、判决反馈均衡(DFE)等。为了应对在新的数倍 Gb/s 高速 I/O 链路中出现的新体系结构、数据速率、时钟恢复及均衡等问题带来的挑战,已经研究出一些新的定理、算法、设计及测试技术。

过去 10 年,在对抖动、噪声及 SI 的理解、建模和分析方面,建立了全新的理论、算法和方 法学。同时也研究出了用于减缓抖动、噪声及 SI 的链路结构、理论、算法和电路。然而,还没有一本系统论述并集中介绍抖动、噪声及 SI 最新进展的书籍。本书就是为了填补这方面的空白而撰写的。

本书试图以全面系统、深入易懂的方式对涉及时钟和 I/O 链路信令中抖动、噪声以及 SI 的基本原理、最新理论算法、建模、测试、分析方法加以评价和论述。本书涵盖的重点专题有:抖动和噪声的分离理论和算法;用于分析输出及冗余度的抖动传递函数;时钟及 PLL 抖动;对链路系统及其子系统(包括发送器、接收器、信道、参考时钟、PLL)抖动、噪声及 SI 等的建模、分析与测试技术。

在第 1 章中,首先概述在通信链路系统中有关抖动、噪声及 SI 的基础知识。接着,讨论各种抖动、噪声及 SI 的内在机理;介绍抖动和噪声的统计处理技术。然后,进一步讨论抖动和噪声分量的概念、定义及其必要性和重要性。最后,把对抖动、噪声及 SI 的讨论纳入到通信系统的框架之中。

有了第 1 章关于抖动、噪声、SI 和链路通信系统的宏观描述,第 2 章深入地介绍必要的相关数学知识。这一章讨论了与抖动、噪声及 SI 相关的统计学和随机处理理论,线性系统和信令的线性时不变(LTI)理论以及将统计学与 LTI 相结合的理论等。

在第 3,4 章中,根据第 2 章中引入的统计学和随机理论,采用合适的 PDF, CDF 以及功率谱密度(PSD),给出抖动、噪声、SI 以及 BER 的量化指标。第 3 章,我们用 PDF 和 PSD、分量 PDF 与整体 PDF 的关系,以及分量 PSD 与整体 PSD 的关系来定量表征每个抖动和噪声分量。第 4 章,在一个二维(2-D)的框架内联合讨论抖动和噪声。给出抖动和噪声联合的 PDF(如眼图轮廓),以及抖动和噪声联合的 CDF(如 BER 轮廓)数学表征。

在第 5,6 章中,研究将抖动和噪声分解为各个层次的分量。第 5 章采用普遍认同的尾部拟合法,基于抖动的 PDF 或 CDF 函数,将抖动分解成确定性抖动(DJ)和随机抖动(RJ)分量。第 6 章介绍基于抖动实时函数或自相关函数的分离技术,将其分离成第一层和第二层抖动分量,包括数据相关性抖动(DDJ)、占空失真(DCD)、符号间干扰(ISI)、周期性抖动(PJ)、有界非相关抖动(BUJ)以及 RJ 等。介绍采用傅里叶变换(FT)的抖动谱或者 PSD 估计。这一章同时介绍了时域和频域的分离技术。

前面已经准备了足够的基础知识,包括统计抖动、噪声和 SI;从分量的抖动或噪声 PDF, PSD 构建整体的 PDF, PSD;从抖动或噪声整体的 PDF, PSD 分离出分量的 PDF, PSD 理论和算法;下面就着手解决实际问题。高频时的时钟和 PLL 抖动是改善性能的主要障碍,我们将重点

探讨时钟和 PLL 应用中的抖动问题。第 7 章专门研究时钟抖动。从时钟抖动的定义出发,揭示它对于同步和异步系统的影响。然后介绍三种不同的抖动类型:相位抖动、周期抖动和周期间抖动,以及其物理含义、模型和在时域和频域中的相互关系。最后,讨论了相位抖动与相位噪声的关系和映射数学模型,给出了一个微波/射频(RF)领域广泛使用的时钟和 PLL 性能的频域测度。第 8 章重点讨论 PLL 中的抖动和噪声。首先,介绍时域和频域用于 PLL 的 LTI 模型以及定性和定量分析方法。其次,介绍采用时域互相关函数和频域 PSD 的一般抖动/噪声分析及建模技术。再次,给出 2 阶、3 阶 PLL 中抖动、噪声和传递函数全面深入的建模分析方法。

第 9,10,11 章专门研究高速链路中的抖动、噪声及 SI,包括三个重要的方面:物理机理;建模与仿真技术;测试与验证技术。为了真正理解抖动、噪声及 SI,第 9 章专门研究其物理机理。第 9 章给出子系统,包括发送器、接收器、信道和参考时钟的体系结构,以及内部的抖动、噪声和 SI 物理机理。第 10 章研究高速链路系统及子系统的定量建模与分析。已经研究出根据 LTI 定理对子系统建模的方法,再用 LTI 的级联对整个系统建模。该章给出了子系统,包括发送器、接收器和信道等子系统的抖动、噪声和信令模型。均衡化和时钟恢复中的重要元素也体现在建模中,这里的均衡包括线性和 DFE 两种类型。第 11 章研究高速链路系统及子系统的测试与分析技术。该章给出链路子系统,包括发送器、接收器、信道、参考时钟和 PLL 的测试需求及方法。参考接收器由参考时钟恢复及均衡器组成,对该接收器抖动、噪声、信令输出的最新测试方法,以及用于测试该接收器冗余度的最坏情况抖动、噪声、信令产生方法也一并给出。在该章末尾,介绍了链路系统层次的测试方法,如环回(loopback)法等。此外,对片上自建内测试(BIST)与片外测试如何折中选择也进行了讨论。

第 12 章是全书的总结,探讨了抖动、噪声及 SI 的研究发展趋势、前景展望和面临的新挑战。

本书的主要读者对象是工业界高速电路、器件和系统领域的工程师和管理人员。不同方面的工程师,包括设计工程师、测试工程师、应用工程师和系统工程师,不管是已经涉足或者是将要涉足抖动、噪声、信号完整性和高速链路这一领域,都可以从阅读本书中受益。本书的另一类读者对象是在本领域或是将要进入本领域的研究人员、教授和学生。本书的宗旨是帮助读者对抖动、噪声、信号完整性和高速链路信令及性能,获得一个全面的理解。

## 致 谢

我要感谢许多不同的人在不同的时间、用不同的方式、直接或间接地给我以鼓励与支持，帮助我完成这本书的写作和出版。

这里，需要特别感谢我作为研究生、研究员、科学家、工程师、技术负责人、技术执行官的过程中提携并帮助我成长的指导导师、团队同事及业内的同行朋友。他们是：王水教授（中国科技大学）、James Horwitz 教授（得克萨斯大学阿灵顿分校）、Gordon Emslie 教授（俄克拉何马州立大学斯蒂尔沃特分校）、Kevin Hurley 博士（加州大学伯克利分校）、Robert Lin 教授（加州大学伯克利分校）、Burnie West 博士 [Credence, (已退休), Milpitas, CA]、Dennis Petrich 先生（Wavecrest, Eden Prairie, MN）、John Hamre 先生（Wavecrest, Eden Prairie, MN）、Tim Cheng 教授（加州大学圣巴巴拉分校）、Gordon Roberts 教授（加拿大 McGill 大学）、Mani Soma 教授（西雅图华盛顿大学）、David Keezer 教授（亚特兰大佐治亚理工学院）、Wenliang Chen 博士（TI, Richardson, TX）、Masashi Shimanouchi 先生（Credence, Milpitas, CA）、Takahiro Yamaguchi 博士（日本 Advantest 公司）、Yi Cai 博士（LSI, Allentown, PA）、Mark Marlett 先生（LSI, Milpitas, CA）、Gerry Talbot 先生（AMD, Boxborough, MA）、Andy Martwick（Intel, Hillsborough, OR）、TM Mak 先生（Intel, Santa Clara, CA）和 LT Wang 博士（SynTest, Sunnyvale, CA）等。

衷心感谢我的上司、Wavecrest 公司的首席执行官和总裁 Dennis Leisz 先生对于技术创新所具有的激情和想象力。感谢他对我多年来的支持、鼓励和友情。

我与本书内容有关的许多出版物都是与 Jan Wilstrup 先生合著或者是共同发明的，本人心存感激。我十分珍惜在合作撰写被广泛引用的论文和专利过程中，彼此间那种既刺激又诱人的讨论、辩论和质询。与 Jan 的合作和讨论帮助我树立并深化了本书学科领域中的观点和看法。

感谢 Prentice Hall 出版社的编辑出版人员，包括出版合作人 Bernard Goodwin 和编辑助理 Michelle Housley！感谢他们的坚持、一贯支持、进度跟踪、鼓励以及完成初稿/出版稿过程中的耐心。

最后，我要衷心感谢我的家人在本书撰写中所给予的长期鼓励与帮助。没有他们坚定的支持，就不可能有本书的出版。首先向我的妻子晓燕（Mercia）致以最深挚的谢意，由于周末和晚上都投入写书而无暇照顾家庭，使得她常常要一人操持家务，我铭记着她过去四年里的宽容与体贴。同时，对我的儿子 Eric 和 George 表示歉疚，错过了参与许多他们课后的活动，等想要补偿时已经为时晚矣，而他们却表现出了高度的谅解。最后，向我的父母致以崇高的感恩之意，感激他们从我幼年起的智力启蒙与培育时给予的启迪与关爱。

# 目 录

第 1 章 绪论 .....	1
1.1 抖动、噪声和通信系统基础 .....	1
1.1.1 什么是抖动、噪声和信号完整性 .....	1
1.1.2 抖动和噪声如何影响通信系统的性能 .....	2
1.1.2.1 误码机理 .....	2
1.1.2.2 误码率 .....	3
1.2 时序抖动、幅度噪声和信号完整性的根源 .....	3
1.2.1 固有噪声和抖动 .....	4
1.2.1.1 热噪声 .....	4
1.2.1.2 散弹噪声 .....	4
1.2.1.3 闪烁噪声 .....	4
1.2.2 噪声转化为时序抖动 .....	4
1.2.3 非固有噪声和抖动 .....	5
1.2.3.1 周期性噪声和抖动 .....	5
1.2.3.2 占空失真(DCD) .....	6
1.2.3.3 符号间干扰(ISI) .....	6
1.2.3.4 串扰 .....	7
1.3 抖动、噪声的统计信号描述 .....	9
1.3.1 峰-峰值和均方根 RMS 描述 .....	9
1.3.2 抖动或噪声的概率密度函数及分量描述 .....	10
1.4 抖动、噪声和 BER 的系统描述 .....	11
1.4.1 参考基准选取的重要性 .....	11
1.4.2 串行数据通信中的抖动传递函数 .....	11
1.5 抖动、噪声、BER 和信号完整性研究述评 .....	13
1.6 全书概要 .....	14
参考文献 .....	16
第 2 章 抖动、噪声及信号完整性的统计信号与线性理论 .....	17
A 部分: 概率, 统计量和随机信号 .....	17
2.1 随机变量及其概率分布 .....	17
2.1.1 随机变量和概率 .....	17
2.1.1.1 基本定义 .....	17
2.1.1.2 联合概率 .....	18

2.1.1.3	条件概率	18
2.1.1.4	统计独立性	18
2.1.2	概率分布函数	19
2.1.2.1	概率密度函数(PDF)	19
2.1.2.2	累积分布函数(CDF)	19
2.1.2.3	PDF 和 CDF 之间的关系	20
2.1.2.4	多个相关变量的 PDF	20
2.1.2.5	多维随机变量的 PDF 和 CDF	21
2.1.2.6	独立变量的 PDF 和 CDF	21
2.1.2.7	两个随机变量之和的 PDF	21
2.2	统计估计	23
2.2.1	数学期望或均值	23
2.2.2	方差	24
2.2.3	矩	24
2.2.3.1	二阶中心矩与方差	25
2.2.3.2	三阶中心矩及偏度	25
2.2.3.3	四阶中心矩及峰度	25
2.2.4	切比雪夫不等式	25
2.2.5	相关性	26
2.3	采样与估计	27
2.3.1	采样估计与收敛	27
2.3.1.1	均值、均方差和峰-峰值估计	27
2.3.1.2	大数定理	28
2.3.1.3	估计量的收敛性	29
2.3.2	中心极限定理	29
2.4	随机过程与谱分析	30
2.4.1	随机过程的 PDF 和 CDF	30
2.4.2	随机过程的统计估计量	30
2.4.3	几种随机过程形式	32
2.4.3.1	广义平稳随机过程(WSS)	32
2.4.3.2	狭义平稳随机过程	32
2.4.3.3	各态历经随机过程	32
2.4.3.4	不同随机过程之间的关系	33
2.4.4	信号功率和功率谱密度(PSD)	34
2.4.4.1	PSD 的定义	34
2.4.4.2	PSD 和维纳-辛钦定理	35
B 部分:	线性系统理论	36
2.5	线性时不变系统	36
2.5.1	时域分析	36

2.5.2	频域分析 .....	37
2.5.3	LTI 系统的性质 .....	39
2.5.3.1	交换律 .....	39
2.5.3.2	分配律 .....	39
2.5.3.3	结合律 .....	39
2.5.3.4	级联性 .....	39
2.6	LTI 系统的统计估计量 .....	40
2.6.1	均值 .....	40
2.6.2	自相关函数 .....	40
2.6.3	均方值 .....	40
2.7	LTI 系统的功率谱密度 .....	41
2.7.1	输出的功率谱密度 .....	42
2.7.2	输出自相关函数 .....	42
2.8	小结 .....	43
	参考文献 .....	43
<b>第 3 章</b>	<b>抖动及噪声的根源、机理与数学模型 .....</b>	<b>44</b>
3.1	确定性抖动(DJ) .....	44
3.1.1	数据相关性抖动(DDJ) .....	44
3.1.1.1	基本理论 .....	44
3.1.1.2	RC LTI 系统的 DDJ 估计 .....	45
3.1.1.3	仿真 .....	46
3.1.1.4	占空失真 .....	49
3.1.1.5	符号间干扰(ISI) .....	50
3.1.1.6	DDJ 的通用模型 .....	50
3.1.2	周期性抖动(PJ) .....	50
3.1.2.1	单 PJ 的 PDF .....	51
3.1.2.2	单 PJ 的频谱 .....	52
3.1.2.3	双 PJ 的 PDF .....	52
3.1.2.4	双 PJ 的频谱 .....	54
3.1.2.5	多 PJ( $N > 2$ )的 PDF .....	55
3.1.2.6	多 PJ( $N > 2$ )的频谱 .....	55
3.1.3	有界不相关抖动 BUJ .....	56
3.1.3.1	BUJ 的 PDF .....	56
3.1.3.2	BUJ 的频谱 .....	57
3.2	随机抖动 .....	58
3.2.1	高斯抖动 .....	58
3.2.1.1	高斯分布的 PDF .....	58
3.2.1.2	高斯抖动的 PSD .....	59
3.2.2	高阶 $f^{-\alpha}$ 抖动 .....	60

3.2.2.1	$f^{\circ}$ 抖动的 PDF	60
3.2.2.2	$f^{\circ}$ 的 PSD	62
3.3	总抖动 PDF 与 PSD	62
3.3.1	总抖动的 PDF	62
3.3.2	总抖动的 PSD	63
3.4	小结	63
	参考文献	64
<b>第 4 章</b>	<b>抖动、噪声、误码率及相互关系</b>	<b>65</b>
4.1	眼图和 BER 要点	65
4.2	总抖动 PDF 与各分量 PDF 的关系	65
4.2.1	总抖动的 PDF	66
4.2.2	抖动 PDF 的卷积	66
4.2.3	眼图结构对应的抖动 PDF	67
4.3	总噪声 PDF 与各分量 PDF 的关系	68
4.3.1	总幅度噪声的 PDF	68
4.3.2	噪声 PDF 的卷积	68
4.3.3	眼图结构对应的噪声 PDF	69
4.4	时序抖动和幅度噪声的联合 PDF	70
4.4.1	通用二维 PDF	70
4.4.2	二维高斯分布	70
4.5	BER 与抖动/噪声的关系	71
4.5.1	时序抖动和 BER	71
4.5.2	幅度噪声和 BER	72
4.5.3	抖动和噪声共同作用下的 BER	74
4.6	小结	77
	参考文献	77
<b>第 5 章</b>	<b>统计域抖动及噪声的分离与分析</b>	<b>78</b>
5.1	抖动分离的原因和目的	78
5.1.1	实际抖动分析及测试中的直接观测量	78
5.1.2	表征、诊断和调试中的需求	78
5.1.3	统计域中抖动分离方法概述	79
5.2	基于 PDF 的抖动分离	79
5.2.1	针对 PDF 的尾部拟合法	79
5.2.1.1	总抖动的 PDF 及其与 DJ PDF 和 RJ PDF 的关系	79
5.2.1.2	算法实现	80
5.2.1.3	蒙特卡罗仿真	82
5.2.2	通过反卷积确定 DJ 的 PDF	84
5.2.2.1	反卷积原理	84

5.2.2.2	反卷积仿真	85
5.3	基于 BER CDF 的抖动分离	86
5.3.1	针对 BER CDF 的尾部拟合法	87
5.3.2	“变换的” BER CDF 的尾部拟合法	88
5.3.3	从 BER CDF 或 $Q$ 因子中估计 DJ PDF	90
5.3.4	从 BER CDF 中估计总抖动 TJ	90
5.4	直接型双狄拉克抖动分离法	91
5.4.1	总抖动 PDF	92
5.4.2	总 BER CDF	92
5.4.3	直接型“双 $\delta$ ” DJ 模型的精度	94
5.4.3.1	对应 DJ PDF 变化范围的 BER CDF 误差	94
5.4.3.2	对应 BER CDF 值变化范围的 DJ 误差	96
5.5	小结	97
	参考文献	98
<b>第 6 章</b>	<b>时域、频域抖动及噪声分离与分析</b>	<b>99</b>
6.1	抖动的时域及频域表征	99
6.1.1	抖动的时域表示	99
6.1.2	抖动的频域表示	99
6.1.2.1	直接傅里叶变换频谱	99
6.1.2.2	抖动 PSD	101
6.2	DDJ 分离	101
6.2.1	基于抖动时间函数的分离法	101
6.2.2	基于傅里叶频谱或 PSD 的分离法	103
6.2.3	从 DDJ 中分离 DCD 和 ISI	103
6.3	PJ, RJ 及 BUJ 分离	105
6.3.1	基于傅里叶频谱	105
6.3.2	基于 PSD	106
6.3.3	基于时域方差函数	106
6.4	脉宽拉缩	108
6.4.1	PWS 的定义	108
6.4.2	PWS 的平均和 DDJ	109
6.4.3	PWS 估计	109
6.5	时域、频域抖动分离法对比	110
6.6	小结	111
	参考文献	111
<b>第 7 章</b>	<b>时钟抖动</b>	<b>112</b>
7.1	时钟抖动	112
7.1.1	时钟抖动的定义	112



7.1.2	时钟抖动的影响	113
7.1.2.1	同步系统	113
7.1.2.2	异步系统	115
7.2	几种抖动的定义和数学模型	116
7.2.1	相位抖动	116
7.2.2	周期抖动	117
7.2.3	周期间抖动	117
7.2.4	相互关系	118
7.2.4.1	时域	118
7.2.4.2	频域	120
7.3	时钟抖动与相位噪声	121
7.3.1	相位噪声	121
7.3.2	相位抖动到相位噪声的转换	123
7.3.3	相位噪声到相位抖动的转换	123
7.4	小结	125
	参考文献	126
<b>第 8 章</b>	<b>锁相环抖动及传递函数分析</b>	<b>127</b>
8.1	锁相环简介	127
8.2	PLL 时域及频域行为	128
8.2.1	时域建模与分析	128
8.2.2	频域建模与分析	129
8.3	PLL 功能及参数分析	130
8.3.1	功能分析	130
8.3.1.1	相位响应与幅度响应	130
8.3.1.2	PLL 冲激/阶跃响应	130
8.3.1.3	伯德图	131
8.3.1.4	极点和零点	132
8.3.2	参数分析	132
8.4	PLL 抖动及噪声分析	134
8.4.1	相位抖动功率谱密度(PSD)	134
8.4.2	方差及 PSD	136
8.5	二阶 PLL 分析	136
8.5.1	系统传递函数	136
8.5.2	特性参数	138
8.5.3	抖动及传递函数分析	139
8.5.3.1	基于时域方差函数的方法	140
8.5.3.2	实验结果	140
8.6	三阶 PLL 分析	144
8.6.1	系统传递函数	144