



WILEY
IEEE

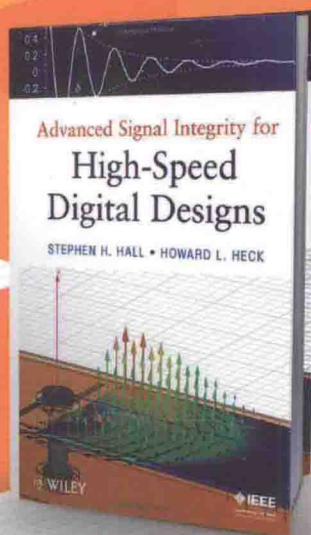
信号完整性工程师必读

Advanced Signal Integrity for High-Speed Digital Designs

高级信号完整性技术

Advanced Signal Integrity for High-Speed Digital Designs

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



中国工信出版集团



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
<http://www.phei.com.cn>

经典译丛·信号完整性工程师必读

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
北京·BEIJING

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, 9780470192351, Stephen H. Hall, Howard L. Heck. Copyright © 2009, John Wiley & Sons, Inc.

All rights reserved. This translation published under license.

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

本书简体中文版专有翻译出版权由美国 John Wiley & Sons 公司授予电子工业出版社。
未经许可,不得以任何手段和形式复制或抄袭本书内容。

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,2015.5

(经典译丛·信号完整性工程师必读)

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

ISBN 978-7-121-25993-7

I. ①高… II. ①霍… ②赫… ③张… III. ①数字信号处理 IV. ①TN911.72

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 094004 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:三河市华成印务有限公司

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

版 次:2015 年 5 月第 1 版

印 次:2015 年 5 月第 1 次印刷

定 价:79.00 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 zlls@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

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. 总结了信号完整性所涉及的电磁场理论。
4. 严谨地拓展了传输线和串扰理论,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快乐,每天都是一种恩赐。

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

反侵权盗版声明

电子工业出版社依法对本作品享有专有出版权。任何未经权利人书面许可，复制、销售或通过信息网络传播本作品的行为；歪曲、篡改、剽窃本作品的行为，均违反《中华人民共和国著作权法》，其行为人应承担相应的民事责任和行政责任，构成犯罪的，将被依法追究刑事责任。

为了维护市场秩序，保护权利人的合法权益，我社将依法查处和打击侵权盗版的单位和个人。欢迎社会各界人士积极举报侵权盗版行为，本社将奖励举报有功人员，并保证举报人的信息不被泄露。

举报电话：(010) 88254396；(010) 88258888

传 真：(010) 88254397

E-mail : dbqq@phei.com.cn

通信地址：北京市万寿路 173 信箱

电子工业出版社总编办公室

邮 编：100036

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
第5章	非理想导体模型	128
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
第6章	电介质的电气特性	161
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
第7章	差分信号	192
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
第8章	物理信道的数学要求	204
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
第9章	数字工程的网络分析	224
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
第 10 章	关于高速信道建模的讨论	270
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
第 11 章	I/O 电路和模型	287
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
第 12 章	均衡	321
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
第 13 章	时序抖动和噪声的建模及其容许值	354
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
第 14 章	用响应曲面模型进行系统分析	391
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
附录 A	常用公式、恒等式、单位和常数	413
附录 B	四端口网络的 T 参数到 S 参数转换	416
附录 C	电路的 F 统计量	418
附录 D	电路的 T 统计量	419
附录 E	粗糙导体的趋肤电阻与内部电感的因果关系	420
附录 F	0.25 μm MOSIS 工艺的 SPICE Level 3 模型	422
	中英文术语对照	423

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 6×10^{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

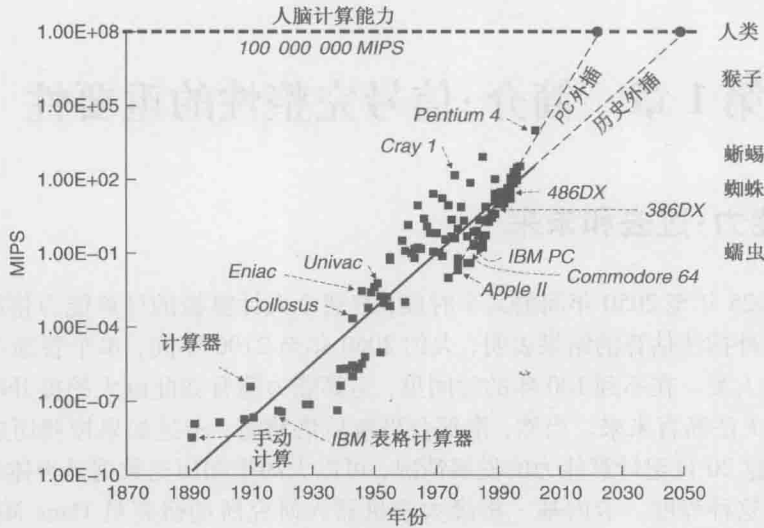


图 1.1 运算能力发展史及用外插法估测的未来运算能力(根据 Moravec[1998] 改编)

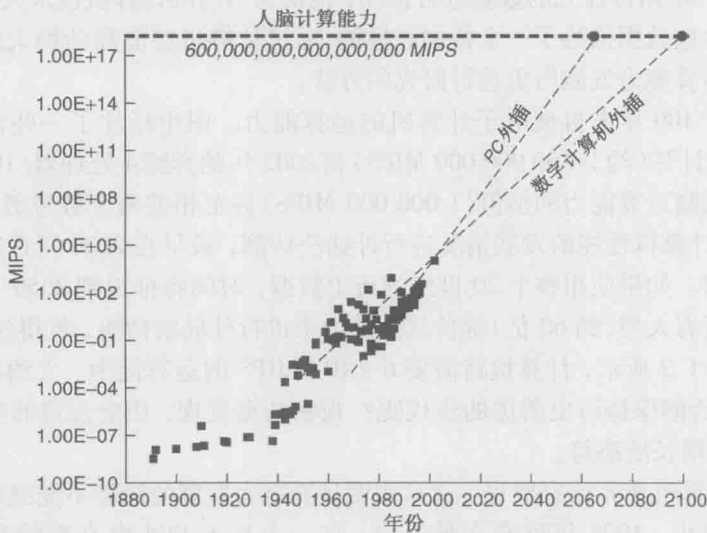


图 1.2 运算能力发展史及用外插法估测的未来运算能力

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。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电脑的移动设计中。

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

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理解。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, 期望对大家有所帮助^①。

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.

^① 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。

第2章 信号完整性的电磁学基础

大部分信号完整性分析都是基于电磁理论的。现有的大量书籍中很多章节都涉及电磁理论的方方面面,如微波、电磁学、光学和数学。这些书籍中的假设、符号和惯例等可能互有冲突,所以基于这些书籍来理解信号完整性时,有时会感到困惑。尽管本书的假想读者应具备电磁学方面的基础知识,不过由于在信号完整性分析中经常用到麦克斯韦方程组以及相关求解公式,所以本章将对它们进行讨论以求尽可能地减少读者的困惑,并使读者从电磁学教科书中出现的朦胧数学计算中找到关联之处。同时,作为后续章节的物理学基础,将电磁场理论集中总结在一起也便于查阅。在这一章中,我们将介绍信号完整性中所需要的麦克斯韦方程组和基本电磁学理论。这些概念会在部分后续章节中使用和详述。本章的分析并不是完整的理论研究,不过仍为研究信号完整性理论基础提供了足够所需要的基本电磁场概念。随着本书的展开,这些基础知识将用来描述更高级的概念。

最开始我们将简要地回顾最普遍的向量算子。由于麦克斯韦方程组是以微分形式进行描述的,因此对向量算子的基本理解,将有助于读者形象化地理解电磁场行为。随后将直接由麦克斯韦方程组推导出自由空间的平面波传播方程。接着再导出波的传播、固有阻抗和光速等概念。然后,静电学和静磁学的理论将被提出来,以解释电场和磁场的物理意义,它们所包含的能量,以及它们与诸如电感和电容等特定电路元件的关系,这些元件将在后续章节中出现。最后,我们还将讨论电磁波所携带的能量,以及它们在不同材料(诸如金属或其他电介质区域)中传播时的反应。电磁理论的其他方面的讨论将在后续章节中给出,但其分析基础将在本章中阐明。

2.1 麦克斯韦方程组

最早发表于1873年的麦克斯韦方程组描述了电磁理论。本节将简述本书后续章节所需要的电磁理论的基本原理。麦克斯韦方程组的广泛学习超出本书的研究范围,我们只介绍那些本书所涉及到的必要知识。另外要注意,作为本书的先决条件,假设读者已经完成基本的电磁理论课程。

式(2.1)至式(2.4)概述了麦克斯韦方程组的微分形式,其单位为SI单位。在需要时,将介绍麦克斯韦方程组的积分形式;不过,由于微分形式易于直观理解,所以为方便起见仍以微分形式为重点。

$$\nabla \times \mathbf{E} + \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = 0 \quad (\text{法拉第定律}) \quad (2.1)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad (\text{安培定律}) \quad (2.2)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho \quad (\text{高斯定理}) \quad (2.3)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (\text{磁力学高斯定理}) \quad (2.4)$$

这里, \mathbf{E} 为电场强度(V/m)

\mathbf{H} 为磁场强度(A/m), 其中: