



国际信息工程先进技术译丛



WILEY
www.wiley.com

高速数字系统的 信号完整性和辐射发射

**Signal Integrity and Radiated Emission of
High-Speed Digital Systems**

(意)

Spartaco Caniggia
Francesca Romana Maradei

著

崔 强 蔡华强
靳 冬 陈 迪

译



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



国际信息工程先进技术译丛

高速数字系统的信号 完整性和辐射发射

(意) Spartaco Caniggia 著
Francesca Romana Maradei

崔 强 蔡华强 靳 冬 陈 迪 译



机械工业出版社

本书详细地讲述了高速数字系统的信号完整性和辐射发射的基本理论,并且总结了设计中得到的实际经验。内容包括高速数字器件、电感、电容、信号线上的反射、串扰、有耗传输线、 ΔI 噪声、PCB 的辐射发射、PCB 中的接地、测量和建模以及差分信号传输和 PCB 中不连续的建模等。

本书可作为高速数字系统的信号完整性和辐射发射设计技术的高级培训教材,也适合作为高等院校电子、通信、电气和自动化等专业研究生的教材。

Signal Integrity and Radiated Emission of High-Speed Digital Systems/by Spartaco Caniggia, Frances-caromana Maradei. ISBN: 978-0-470-51166-4

This edition first published 2008©2008 John Wiley&Sons Ltd.

All Rights Reserved. This translation published under license.

本书原版由 Wiley 公司出版,并经授权翻译出版,版权所有,侵权必究。

本书中文简体翻译出版授权机械工业出版社独家出版,并限定在中国大陆地区销售,未经出版者书面许可,不得以任何方式复制或发行本书的任何部分。

本书封面贴有 Wiley 公司的防伪标签,无标签者不得销售。

本书版权登记号:图字 01-2009-3818

图书在版编目(CIP)数据

高速数字系统的信号完整性和辐射发射/(意)卡尼吉亚(Caniggia, S.), (意)玛拉蒂(Maradei, F.)著;崔强等译. —北京:机械工业出版社, 2010.8

(国际信息工程先进技术译丛)

书名原文: Signal Integrity and Radiated Emission of High-Speed Digital Systems

ISBN 978-7-111-31272-7

I. ①高… II. ①卡…②玛…③崔… III. ①数字信号—信息处理系统
IV. ①TN911.72

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 132573 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:朱林 责任编辑:朱林

版式设计:霍永明 责任校对:李秋荣

封面设计:马精明 责任印制:杨曦

北京中兴印刷有限公司印刷

2010 年 11 月第 1 版第 1 次印刷

169mm×239mm·29.5 印张·625 千字

0 001—3 000 册

标准书号:ISBN 978-7-111-31272-7

定价:88.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心:(010)88361066

门户网:<http://www.cmpbook.com>

销售一部:(010)68326294

教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售二部:(010)88379649

读者服务部:(010)68993821 封面无防伪标均为盗版

译者序

在高速数字系统的设计中，信号完整性和电磁兼容性是两个最重要的方面，它们可以确保设计的产品实现预期的功能和符合相应的法定标准。

本书详细地讲述了高速数字系统的信号完整性和辐射发射的基本理论，并且总结了设计中得到的实际经验。全书共 12 章，分别介绍了高速数字器件、电感、电容、信号线上的反射、串扰、有耗传输线、 ΔI 噪声、PCB 的辐射发射、PCB 中的接地、测量和建模以及差分信号传输和 PCB 中不连续的建模等。本书中作者给出的多数实验直接来自于行业经验，分别使用测量和仿真研究有关 SI 和 RE 的基本机理，验证模型的有效性，同时给实践的工程师提供了设计规则。

需要说明的是，本书是译者在尽量忠实于原书的基础上翻译的，为保持原书特色，书中部分图形符号和文字符号并未按国家标准做修改，请读者注意。

本书可作为高速数字系统的信号完整性和辐射发射设计技术的高级培训教材，也适合作为高等院校电子、通信、电气和自动化等专业研究生的教材。

参加本书翻译的有崔强、蔡华强、靳冬和陈迪。崔强审校了全部翻译稿。在本书翻译过程中，得到原书的两位作者斯巴达克斯·卡尼吉亚教授（原 Italtel 的 EMC 顾问）和佛朗西斯科罗玛纳·玛拉蒂教授（罗马萨皮恩扎大学，现任 IEEE EMC 学会主席）的鼓励和支持，他们还专门为中文版撰写了前言。同时也得到了北京邮电大学吕英华教授的指导、北京邮电大学研究生冀维林同学的帮助。译者在此表示诚挚的感谢。由于译者水平有限，翻译时间紧，书中的不妥之处在所难免，敬请广大读者批评指正。

译者

中文版前言

大约一年前，John Wiley & Sons 公司通知我们本书将被译成中文。基于对中国巨大市场的了解，我们深受鼓舞并感到非常高兴。我们希望本书能够帮助读者在电子系统设计的一些重要方面有所提高，例如信号完整性和辐射发射；并且能够帮助读者通过测量和建模等方法解决实际问题。

斯巴达克斯·卡尼吉亚和弗朗西斯卡罗玛纳·玛拉蒂
2010 年 6 月

序

高速和宽带系统的广泛应用给现代信息和通信设备的设计人员带来了越来越多的挑战。为了使销售的设备能够确保理想的功能和符合法定的标准，基本的有效解决办法是信号完整性（SI）和电磁兼容（EMC）性。

在高速设计领域，在电路板制版之前，必须在设计的早期分析电源和信号完整性的问题。典型的信号完整性问题是反射和串扰，典型的电源完整性问题包括电源系统的输入阻抗、同步开关噪声、PCB的谐振、去耦电容的位置和边缘辐射。电源分布系统对于电源和信号完整性和电磁干扰（EMI）起着重要的作用。当印制电路板经过仔细的电源完整性和信号完整性的分析，能够显著地改进数字系统的电磁兼容性，这是一个共同的经验。为了这个目的，需要分析电源和地之间的输入阻抗，进一步给出信号完整性分析的等效电路模型。同时利用驱动器和接收器的非线性模型，在时域进行同步开关噪声的预测。

本书给出了以上提到的 SI 和 EMC 问题的详细内容，讨论了在电路板的设计时如何仔细考虑信号和电源完整性的问题。通过使用实际的案例研究和可下载的软件例子，著名的行业专家和他的学术合著者例证了当今互连的设计和建模的最好实践，目的是分布电源和有效地减小噪声。

读者将会分享到由数字电路组成的 PCB 系统的 SI 和 EMC 最主要现象的概述。本书的目的是强调设计参数的变化对系统性能的影响，并对设计提供判据。对于提到的所有现象，都建立了数学模型。这些模型中的多数使用了高级公式赋值程序和/或电路仿真器，作者给出了这些仿真的有用例子。

书中的方法和实际例子对于会涉及信号和电源完整性以及电磁干扰的学习者和专业人员，包括电气工程师、系统设计人员和信号完整性工程师，都可作为很有价值的工具。

总之，应该高度赞扬作者编写本书所作的努力，我确信本书的出版对于提高电气和电子系统设计人员的 SI 和 EMC 意识会显著地向前推进一步。考虑到这一点，我推荐本书给读者，并希望每一个成功能归结为本书及其作者。

Flavio Canavero
Politecnico di Torino,
Turin, 2008

前 言

接着 Canavero 教授的序,我们将给出本书有关内容的更多详细信息。写作本书的目的是满足高速数字设计人员的需要,和作为想获得信号完整性、电磁干扰和辐射发射方面知识的电气工程和物理专业学生的辅助材料。本书其中一位作者在电信设计方面有着 30 多年的工业实践经验,另外一位作者是罗马大学的教授,具有研究和大学教学经验。因此,作者的目的是通过使用严格的理论、合适的预测模型以及模型的研究和验证的实验结果,提供给读者 SI (Signal Integrity, 信号完整性)、EMI (ElectroMagnetic Interference, 电磁干扰) 和 RE (Radiated Emission, 辐射发射) 的基本原理。本书的主要目的是通过考虑由数字器件驱动的和加载的互连,研究有关 PCB 及其连接电缆的电磁现象。由于数字器件的非线性性能通过反射、串扰和开关噪声显著地影响互连的性能,因此这是一个要考虑的非常重要的方面。由于 PCB 和电缆的建模有助于显著地减少产品的成本和节约设计时间,因此它也是本书的基本内容。记住 2004 年 12 月的新的欧洲 EMC 规范,这也是一个非常重要的事情。新的规范的主要创新点之一是允许使用合适的计算/仿真模型以证明产品满足官方的限值。因此,可以避免在非常大的半电波暗室或者开阔试验场进行的既费钱又费时的辐射发射测量。

本书中给出的许多模型都是新的(别的书中没有出现过的)并经过实验验证。这些模型有些来自于作者和/或其他研究人员在国际论坛上和出版的专业杂志(例如 IEEE Transactions)上给出的过去的和最近的研究成果。这些模型分别基于使用合适的常用的商业数学软件(如 MathCad, MATLAB®)或者 SPICE-like 电路仿真器的解析法或者等效电路。本书最重要的特点之一是使用商业的全波数值程序研究与信号完整性和辐射发射有关的现象,本书给出了如何仿真三维结构中的 PCB 或仿真测量布置,并解释了所使用的基本参数的含义。本书同时也讨论了如何通过考虑结构的主要部分来建立合适的模型。当研究的 PCB 结构对于关注的频率是电大尺寸时,可通过这些工具证明会出现非常危险的谐振影响。

本书给出的多数实验直接来自于工业实践经验。使用测量和仿真研究有关 SI 和 RE 的基本机理,验证模型的有效性,同时给实践的工程师提供了设计规则。最后再次强调的是,本书的一个重要目的是帮助读者理解和使用 SI 和 EMI 预测的专业软件,例如 Mentor (Hyperlynx)、CST (CST STUDIO SUITE 2008)、ANSOFT (HFSS) 等。这些软件可以从软件公司直接购买,可用于设计前和设计后的仿真。值得指出的是,这些建模工具可以为设计团队提供可靠的数值结果,去掉了设计中的推测,为 SI 和 EMC 工程师提供所考虑的可信的设计推荐。

本书的组织如下:

第1章为介绍性的章节,解释了研究信号完整性和辐射发射的原因,给出了所使用的物理量的基本定义,并举了一些例子支撑基本概念。同时也包括解析公式的介绍材料、用于 SPICE-like 仿真器的电路模型和基于数值方法的全波程序,例如矩量法(Method of Moment, MOM)和有限积分技术(Finite Integration Technique, FIT)。

第2章专门描述了基本系列数字器件的主要特性,如 TTL、CMOS 和 ECL。一些材料似乎没有进行更新,但是作者的目的是给出背景信息,理解基于 CMOS、ECL 和 LVDS 技术的最新开发的高速器件的性能。本章的最后是对标准 IBIS (I/O Buffer Information Specification, 输入/输出缓冲器信息规范)模型的介绍,该模型基于测量或者全电路仿真所得到的 I/V 数据曲线,对于 I/O 缓冲器的建模是一个快速和准确的性能方法。同时本章给出了 SPICE 使用这种模型的例子。

第3章专门介绍电感的概念,电感显著地影响信号完整性和辐射发射的性能。使用严格的理论引入环路的自感和互感作为介绍部分环路的部分电感的概念的基本背景信息。本书中广泛地使用部分电感的概念用于 PCB 上互连线和不连续的建模。附录 A 中给出了计算典型结构电感的公式。

第4章为第3章的补充章节,专门用于介绍电容,它和电感是建模互连线的基础。第3章和第4章的最后分别给出了共模电感、差模电感、共模电容和差模电容的定义,这些概念对于 EMI 滤波器的使用和差模信号传输是非常有用的。

第5章给出了预测数字器件的互连线上反射的方法。本章的创新点是:当互连线存在有源终端以提高缓冲器的驱动器的能力时,如何使用用于数学代码和/或 SPICE 的精确的无耗传输线模型来计算入射到传输线上的信号。

第6章研究了 PCB 上走线之间串扰的最重要方面。在感性和容性耦合基本概念之后,基于传播的奇模和偶模,给出了用于 SPICE 的两条耦合线的精确电路模型。该模型对于串扰和差模信号传输的仿真是非常有用的。对于多于两条耦合线的情况,给出了基于传播的 n 个去耦模的模型,并对 TTL 和 CMOS 器件的 IBIS-like 模型进行了实验验证。

第7章介绍了有耗传输线的基本参数,包括集肤效应、邻近效应和电介质效应。考虑到传输线的参数取决于频率,目前在瞬态域有耗传输线建模的问题还没有得到完全解决。因此,本章的主要目的是给出在时域仿真走线和电缆上的信号完整性的合适的方法。描述了两种方法并进行了实验验证:一种方法是基于矢量拟合技术,它能够通过集总元件(电阻、电感和电容)的网络对传输线的一段建模;另外一种方法是基于传输线的 S 参数的卷积。两种方法都可以使用非线性负载在时域进行直接仿真。附录 B 给出了计算微带线或带状线结构的走线的特征阻抗、时延和衰减的封闭表示式。

第8章研究了 PCB 的电源分布网络(Power Distribution Network, PDN)上由数字器件的开关所引起的噪声,提供了减小这种类型干扰的办法,详细讨论了对可以减小 PDN 阻抗的去耦电容及其引线有效电感的影响的限制,给出了如何使用

SPICE 仿真装有数字器件和去耦电容的不同类型的多层 PCB 的例子，并在时域进行了实验验证。附录 C 给出了基于解析公式、电路仿真和全波数值计算用于在频域预测装有去耦电容的一对电源平面和地平面的 PDN 阻抗和谐振频率。通过电路仿真和测量，研究了数字器件封装的寄生影响引起的地弹和电源反弹。

第 9 章主要讨论 PCB 和连接电缆的辐射发射问题。本章简单介绍了如何对典型的周期数字信号和噪声的频谱建模后，讨论了如何在远场区对共模发射和差模发射建模的问题，目的是满足标准的辐射发射限值。区分这两种发射对于设计规则的建立是非常重要的，以便使用例如 PCB 上的电源和接地平面、EMI 滤波器和屏蔽电缆等解决办法减小辐射发射。考虑到电感和电容等寄生元件，通过所研究的结构等效电路研究发射机理。在进行这种分析时，第 3 章引入的部分电感的概念是基础，同样，结构与其环境之间位移电流的电容的概念也是基础。本章也引入了屏蔽电缆的转移阻抗的概念，给出了辐射发射预测的有关模型。本章的特点之一是利用实验结果对模型的有效性进行验证。本章的最后讨论了如何使用数值技术仿真复杂系统，以得到辐射波瓣图。附录 D 给出了计算 PCB 上的典型结构和辐射发射标准中测量布置的辐射场的封闭表达式。

第 10 章研究了 PCB 上和 PCB 之间有关接地的一些内容。首先讨论的是当返回信号路径与其他信号具有公共路径，受到环境干扰时出现的地环路耦合（Ground Loop Coupling, GLC），引入转移阻抗的概念作为干扰电平的度量，同时给出了 GLC 计算的电路模型，讨论了减小 GLC 的接地技术，对 PCB 的典型连接器结构进行了仿真，目的是获得合适的引脚分配。第二个非常重要的方面是，在典型的多层 PCB 结构中信号电流返回路径的确定，表明了通过使用合适的走线为返回电流提供低阻抗路径的重要性和去耦电容和缝合电容放置的位置。第三个研究的是通过以下方法得到的好处：使用位于整个 PCB 上的去耦电容减小 PDN 上的同步开关噪声（Simultaneous Switching Noise, SSN）；对平面进行分割，以阻止无用电磁波的传播；电源岛的实现；短路过孔和使用 EMI 滤波器。对于位于屏蔽盒中的具有一条连接电缆的复杂结构的 PCB，通过仿真对这些方法进行了讨论和定量。附录 E 引入了节点法，这种方法对于有限大小的返回信号路径的部分有效电感的计算是有用的，这个电感可用于 GLC 的计算和返回电流分布的确定。

第 11 章给出了两种主要的仪器，它们用于表征 PCB 的结构和提取有关高速数字系统中出现的不连续和互连线的电路参数。第一种仪器是时域反射计（Time Domain Reflectometer, TDR），可进行时域测量。根据特征阻抗、时延和损耗对互连线进行表征是非常有用的。第二种仪器是矢量网络分析仪（Vector Network Analyzer, VNA），可进行频域的 S 参数测量。由于高速数字器件工作频率的增加，这些参数变得更加重要。这些参数可以用来确定 PCB 结构的谐振频率、提取 PCB 上的元器件和不连续的电路参数、表征走线的损耗（见第 7 章）。如果不能正确考虑受试器件（Device Under Test, DUT）和测量仪器之间连接线的寄生元件，那么可以使用 SPICE 和数值程序来强调使用人员碰到的误差。本章最后通过与测量的比较，验证

了辐射发射预测的数值模型的有效性。可以表明的是,计算数据和测量数据之间的吻合程度取决于测量布置的不确定度、测量仪器和环境。

第12章为本书的最后一章,讨论了两个重要的问题:差分信号传输和如何对PCB上的不连续性建模。根据SI和EMI,对于理想性能的非常高速的数字系统的设计,差模传输是最有效的传输方式。本章详细讨论了差模信号相比于单端信号的主要优点,引入了系统中进行差分信号传输的标准技术,如高级电信计算架构(Advanced Telecommunications Computed Architecture, ATCA),并给出了根据这种技术实现母板的例子。通过测量(SI和EMI)和电路仿真(串扰)研究了低压差分信号(LVDS)器件的主要特性。本章的最后描述了如何使用简单的等效电路对PCB上的不连续性(例如走线的弯曲,连接器和地间隙)建模。通过使用商用数值程序给出了地间隙的寄生电感参数提取的例子。最后,给出和讨论了集成电路封装类型的连接。

本书中用于计算/仿真的基本模型可从Wiley的网站上下载。附录F给出了以MathCad和MicroCap格式所写的一系列文件。为了运行MicroCap文件,读者可从www.soft-spectrum.com下载MC9的demo版,对于不会使用MathCad的读者,同时在Word文件中给出了解析模型。

我们非常感谢F. Canavero教授、A. Orlandi教授、T. Hubing教授、Elya Joffe博士、M. Borsero博士、V. Ricchiuti博士、B. Ross博士、I. Novak博士、F. Leferink教授、R. DuBroff教授、J. Knighten博士和E. Klink博士的宝贵建议和建设性的评论。特别地,我们非常感激审阅了本书的意达泰尔电信公司的P. Santi博士和帮助进行本书中的一些仿真和所有测量的意达泰尔电信公司的所有EMC和SI的技术人员。

Spartaco Caniggia (原 Italtel EMC 顾问) 和
Francesca Romana Maradei (罗马萨皮恩扎大学)
2008 年

目 录

译者序

中文版前言

序

前言

第1章 数字系统中的信号完整性和辐射发射概述	1
1.1 电源和信号完整性	1
1.1.1 电源分布网络	2
1.1.2 信号分布网络	4
1.1.3 噪声的限制和特征阻抗的设计	6
1.2 辐射发射	8
1.2.1 辐射发射源的定义	8
1.2.2 辐射发射标准	10
1.2.3 实际系统的辐射发射	15
1.3 信号传输和逻辑器件	18
1.3.1 过冲、下冲和稳定状态	18
1.3.2 噪声抗扰性	22
1.3.3 时序参数	22
1.3.4 眼图	24
1.4 数字系统的建模	26
1.4.1 数学工具	26
1.4.2 SPICE-like 电路仿真器	27
1.4.3 全波数值工具	28
1.4.4 专业仿真器	30
参考文献	30
第2章 高速数字器件	32
2.1 输入/输出静态特性	32
2.1.1 电流和电压规范	32
2.1.2 TTL 器件	34
2.1.3 CMOS 器件	36
2.1.4 ECL 器件	37
2.1.5 LVDS 器件	39
2.1.6 逻辑器件的功率和逻辑电平	39

2.2 动态特性: 门的延迟、上升和下降时间	40
2.3 驱动器和接收器的建模	42
2.3.1 驱动器模型的种类	42
2.3.2 驱动器的开关电流路径	42
2.3.3 驱动器的非线性性能模型	43
2.3.4 接收器的非线性性能建模	45
2.4 IBIS 模型	46
2.4.1 IBIS 模型结构	47
2.4.2 IBIS 模型和 SPICE	48
参考文献	50
第 3 章 电感	51
3.1 环路电感	51
3.1.1 耦合环路的电感	51
3.1.2 细导线电路的电感	53
3.1.3 两个耦合环路的等效电路	53
3.1.4 具有一个参考返回导体的两个耦合导体的 L 矩阵	54
3.1.5 三导体导线型传输线 L 的计算	55
3.1.6 与频率相关的内部电感	57
3.2 部分电感	58
3.2.1 耦合环路的部分电感	58
3.2.2 细导线分段的部分电感的通量面积	59
3.2.3 分解成部分电感的环路电感	59
3.2.4 部分自电感和部分互电感	61
3.2.5 两个平行导体之间的电感	63
3.2.6 由部分电感计算环路的电感矩阵	63
3.2.7 与有限接地平面相关的部分电感	64
3.2.8 解决 PCB 上的电感问题	65
3.3 差模和共模电感	67
3.3.1 差模电感	67
3.3.2 共模电感	68
参考文献	69
第 4 章 电容	70
4.1 导体间的电容	70
4.1.1 电容的定义	70
4.1.2 具有参考返回导体的两耦合导体的部分电容和电容矩阵	71
4.1.3 具有参考返回导体的 n 个耦合导体的电容矩阵	72
4.2 差模和共模电容	73
4.2.1 差模电容	73
4.2.2 共模电容	74

参考文献	74
第 5 章 信号线上的反射	75
5.1 互连线的电参数	75
5.1.1 典型的互连线	75
5.1.2 短互连线的等效电路	76
5.1.3 无耗传输线	77
5.1.4 使用部分电感建模传输线	79
5.2 无耗传输线上的人射波和反射波	79
5.2.1 阻性不连续	79
5.2.2 容性不连续	80
5.2.3 端接阻性负载的互连线上的反射	81
5.2.4 互连线的临界长度	82
5.2.5 反射计算的梯格图	83
5.2.6 无耗传输线的精确模型	85
5.2.7 传输线电压的图解法	87
5.3 信号分布的架构	90
5.3.1 点到点结构	91
5.3.2 星形结构	91
5.3.3 链状结构	92
5.3.4 总线型结构	92
5.3.5 H 树形结构	93
5.3.6 梳状结构	93
5.4 传输线的终端	94
5.4.1 戴维南终端	95
5.4.2 串联、并联和交流终端	97
5.4.3 串联终端及其通过电路仿真与其他终端的比较	97
5.4.4 应用于链状结构的戴维南终端和电路仿真	99
5.4.5 应用于链状结构的串联终端和电路仿真	100
5.4.6 应用于总线型结构的戴维南终端和电路仿真	101
5.4.7 终端和互连线的结构	102
5.4.8 终端的性能	103
参考文献	103
第 6 章 串扰	105
6.1 耦合线的集总电路模型	105
6.1.1 具有参考地的双耦合传输线的等效电路	106
6.1.2 容性耦合	107
6.1.3 感性耦合	108
6.1.4 总耦合	109
6.1.5 双耦合传输线的仿真	109

6.2 共模和差模	112
6.2.1 奇偶模的定义	113
6.2.2 基于奇偶模的等效电路	114
6.2.3 差模传输的等效电路	115
6.2.4 由奇偶模仿真点到点结构和链状结构	115
6.3 数字器件的模型: 仿真与测量	118
6.4 无耗多导体传输线的一般分布参数模型	128
6.4.1 n 条无耗耦合传输线的等效电路	128
6.4.2 端接 TTL 和 CMOS 器件的 5 条耦合传输线的测量与仿真	129
6.5 减小串扰的技术	134
6.5.1 减小串扰的方法	134
6.5.2 使用接地走线作为屏蔽的耦合传输线的仿真	135
6.5.3 双耦合传输线的全波数值仿真	136
参考文献	138
第 7 章 有耗传输线	140
7.1 有耗传输线的基本参数	140
7.1.1 有耗传输线的反射机理	141
7.1.2 集肤效应	143
7.1.3 邻近效应	147
7.1.4 有耗介电效应	148
7.1.5 有耗传输线上的数据传输	150
7.2 使用分段法和矢量拟合技术在时域对有耗传输线建模	157
7.2.1 同轴电缆等效电路的提取	157
7.2.2 双绞电缆等效电路的提取	167
7.3 使用散射参数技术在时域对有耗传输线建模	179
7.4 结论	185
参考文献	186
第 8 章 ΔI 噪声	188
8.1 开关噪声	188
8.1.1 电源分布网络	189
8.1.2 开关电流的路径	193
8.1.3 设计规则	203
8.2 电源分布的滤波	204
8.2.1 多层 PCB 的滤波	205
8.2.2 电源分布网络阻抗的测量	210
8.2.3 基于径向传输线理论的 PCB 电路模型	211
8.3 地弹	219
8.3.1 地弹的机理	220
8.3.2 理解地弹机理的电路仿真	221

8.3.3 LVT 基准的测量	223
8.4 串扰和开关噪声	226
8.4.1 具有 3 条耦合线和 74AC04 器件的 SQ 试验电路板的测量和仿真	227
参考文献	230
第 9 章 PCB 的辐射发射	232
9.1 数字信号的频率特征	233
9.1.1 梯形波形的频谱	233
9.1.2 典型噪声频谱	236
9.2 辐射发射的问题	238
9.2.1 导线天线的辐射	239
9.2.2 共模电流和差模电流及其辐射	240
9.2.3 由传输线的不对称输入产生的发射	242
9.2.4 传输线的差模电流和辐射发射	243
9.2.5 传输线的共模电流和辐射发射	245
9.2.6 镜像平面	247
9.3 走线的发射	249
9.3.1 计算微带线结构和带状线结构辐射的天线模型	249
9.4 IC 的发射	255
9.4.1 PCB 上元件的辐射发射机理	255
9.5 实际 PCB 的发射	257
9.6 具有连接电缆的 PCB 的辐射	261
9.6.1 发射源	261
9.6.2 PCB 中走线的电流和电压驱动机理	261
9.7 作为发射源的差分驱动器	274
9.7.1 差分驱动器的共模电流	274
9.7.2 UTP 和 SFTP 电缆的辐射场机理	275
9.8 复杂系统的发射	283
9.8.1 同轴电缆的发射模型	285
9.8.2 孔径的低频模型	290
9.9 辐射波瓣图	295
9.10 辐射发射的要点和设计规则	302
参考文献	305
第 10 章 PCB 中的接地	308
10.1 共模耦合	308
10.1.1 什么是地	308
10.1.2 地环路耦合和转移阻抗	309
10.1.3 接地技术	315
10.2 多层 PCB 中的地和电源分布	317
10.2.1 信号的返回路径	317

10.2.2	电源层和接地层的计划和布局	321
10.2.3	变化参考平面的走线	321
10.2.4	电源平面的分割	322
10.2.5	壕沟/阻挡和桥	323
10.2.6	缝合	324
10.3	PCB 连接器的接地	325
10.3.1	地噪声和转移阻抗	325
10.3.2	引脚的分配	332
10.3.3	PCB 到机壳的接地	334
10.3.4	限制电缆发射的技术	334
10.4	分区和建模	341
10.5	PCB 中接地的要点和设计规则	350
	参考文献	353
第 11 章	测量和建模	355
11.1	时域反射表	356
11.1.1	作为“闭环雷达”的时域反射表	356
11.1.2	TDR 的分辨率和畸变	358
11.1.3	TDR 和有耗线	360
11.1.4	差模 TDR	361
11.2	矢量网络分析仪	361
11.2.1	散射参数的定义	362
11.2.2	网络分析仪的校准	364
11.2.3	通过 S 参数的仿真提取等效电路	366
11.2.4	有关网络分析仪测量和仿真的结论	374
11.3	通过辐射发射测量预测模型的有效性	374
11.3.1	EMC 试验室辐射场测量的不确定度和数值仿真	374
11.3.2	建模辐射源	378
11.3.3	有关辐射发射数值预测模型的有效性与测量比较的结论	381
	参考文献	382
第 12 章	差分信号传输和 PCB 上不连续性的建模	383
12.1	差模信号传输	383
12.1.1	单端传输与差分信号传输	384
12.1.2	PCB 上使用走线的差分互连和 ATCA 标准	386
12.1.3	差分器件：信号电平的比较	388
12.1.4	差分信号的分布和终端	388
12.1.5	LVDS 器件	391
12.2	建模封装和 PCB 上互连的不连续性	405
12.2.1	多层板	405
12.2.2	弯曲走线	406
12.2.3	蛇形走线	407

12.2.4 地槽	408
12.2.5 过孔	411
12.2.6 连接器	412
12.2.7 IC 封装	414
参考文献	415
附录	418
附录 A 部分电感的计算公式	418
A.1 圆导线	418
A.2 母线	419
A.3 应用电感计算公式的例子	421
参考文献	422
附录 B 微带线和带状线的特征阻抗、时延和衰减	423
B.1 微带线	423
B.2 带状线	424
B.3 走线衰减和邻近效应参数	425
参考文献	427
附录 C PCB 的电源分布网络谐振的计算	428
C.1 腔体模型	428
C.2 SPICE 模型	431
C.3 数值模型	432
C.4 仿真的结果	432
参考文献	433
附录 D 简单辐射结构的计算公式	434
D.1 导线结构	434
D.2 导线和接地平面	435
D.3 孔径的发射	436
参考文献	437
附录 E 计算有限接地平面的部分电感的节点法	438
E.1 节点法的等式	438
E.2 应用节点法计算有限接地平面的部分电感	439
参考文献	441
附录 F 互联网上的文件	442
F.1 第 1 章的程序文件	442
F.2 第 2 章的程序文件	442
F.3 第 5 章的程序文件	442
F.4 第 6 章的程序文件	443
F.5 第 7 章的程序文件	443
F.6 第 8 章的程序文件	444
F.7 第 9 章的程序文件	444
F.8 第 10 章的程序文件	445
本书术语英汉对照	447