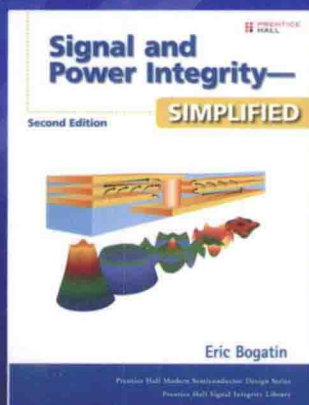


国外电子与通信教材系列

PEARSON

信号完整性与 电源完整性分析 (第二版)

Signal and Power Integrity: Simplified
Second Edition



[美] Eric Bogatin 著

李玉山 刘洋 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

信号完整性与电源完整性分析

(第二版)

Signal and Power Integrity: Simplified
Second Edition

[美] Eric Bogatin 著

李玉山 刘 洋 等译

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

内 容 简 介

本书全面论述了信号完整性与电源完整性问题。主要讲述信号完整性分析及物理设计概论,6类信号完整性问题的实质含义,物理互连设计对信号完整性的影响,电容、电感、电阻和电导的特性分析,求解信号完整性问题的4种实用技术途径,推导和仿真背后隐藏的解决方案,以及改进信号完整性的推荐设计准则等。本书还讨论了信号完整性中S参数的应用问题,并给出了电源分配网络的设计实例。本书强调直觉理解、实用工具和工程素养。作者以实践专家的视角指出造成信号完整性问题的根源,并特别给出了设计阶段前期的问题解决方案。

本书是面向电子行业设计工程师和产品负责人的一本具有实用价值的参考书,研读此书有助于在信号完整性问题出现之前提前发现并及早加以解决。同时,本书也可作为相关专业本科生及研究生的教学用书。

Authorized translation from the English language edition, entitled *Signal and Power Integrity: Simplified*, Second Edition, 9780132349796 by Eric Bogatin, published by Pearson Education, Inc., publishing as Prentice Hall, Copyright © 2010 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 © 2015.

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:01-2010-0932

图书在版编目(CIP)数据

信号完整性与电源完整性分析(第二版)/(美)伯格丁(Bogatin, E.)著;李玉山等译.

北京:电子工业出版社,2015.1

(国外电子与通信教材系列)

书名原文:Signal and Power Integrity: Simplified, Second Edition

ISBN 978-7-121-24490-2

I. ①信… II. ①伯… ②李… III. ①信号分析-高等学校-教材 ②电源电路-电路分析-高等学校-教材
IV. ①TN911.6 ②TN710

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第232442号

策划编辑:马 岚

责任编辑:马 岚

印 刷:北京市李史山胶印厂

装 订:北京市李史山胶印厂

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 字数:691千字

版 次:2005年4月第1版

2015年1月第2版

印 次:2015年1月第1次印刷

定 价:59.00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。

译 者 序

广义的信号与电源完整性(Signal and Power Integrity),可泛指由有源器件和无源元件引起的所有信号电压和电流的异常现象,包括幅度上的噪声与干扰,时序上的抖动与错位等。

作者 Eric Bogatin 所著的本书第一版,即《信号完整性分析》,是美国培训高速电路设计工程师的背景教材,其深入浅出、雅俗共赏的大家风范得到各方面的一致好评。其中译本自 2005 年出版以来,也受到中国的广大工程技术人员的普遍欢迎。第二版继承了第一版的写作风格和特点,把复杂的问题简约化。除了对原有的前 11 章进行了适当的修改和补充完善之外,作者用同样的格调撰写了新的第 12 章“S 参数在信号完整性中的应用”和第 13 章“电源分配网络”。尤其值得推荐的是第 13 章,作者从芯片到系统对电源完整性进行的分析着实精彩实用。

当前,国内对信号与电源完整性的研究开发已是斗转星移,读者对国外原著的需求也已今非昔比。因此,我们分外珍惜这次第二版中译本的出版契机。本着为读者呈现精品的宗旨,结合 10 多年来采用本书第一版的教学体验,推敲琢磨,未敢懈怠,竭力使译文更好地贴近“信、达、雅”的准则,少留缺憾。

第二版的翻译仍由西安电子科技大学电路 CAD 所研究信号完整性的教师和部分博士生、硕士生参与并由李玉山统稿、审校和定稿。参与翻译的人员有:刘洋、初秀琴、路建民、李先锐、尚玉玲、董巧玲等。另外,高崧、闫旭、蒋冬初、潘健、丁同浩、曲咏哲、贾琛、白凤莲等参加了部分相关工作。电子工业出版社马岚编辑的使命感和敬业风范是本书出版的品质保障。

本书的出版得到国家自然科学基金(No. 61301067、No. 61102012、No. 60871072 和 No. 60672027)、教育部博士点基金(No. 20050701002)、教育部“超高速电路设计与电磁兼容”重点实验室基金,以及西安电子科技大学研究生院研究型课程立项的资助。同时,恳切希望读者在学习及使用中予以检视和指正!

本书可以作为电子通信类学科专业博士生、硕士生“信号完整性分析”课程的教材。此外,这一教材也可以作为电子系统与电路设计工程师解决信号完整性问题的技术参考书。

李玉山

2014 年 10 月于西安电子科技大学

前 言

从本书第一版出版至今，信号完整性的原理并未发生改变。发生变化的是随着高速链路的大量应用，电源完整性正在成为开发新产品能够成功还是失败的关键角色。

除了在大多数章节，尤其是在差分对和损耗章节中充实了许多内容和示例之外，第二版新增了两章，目的是针对当今的工程师和设计师们的实际需求提供一个坚实的基础。

第 12 章是新增的一章，深入介绍了在信号完整性中如何使用 S 参数。只要你遇到的是高速链路问题，就会接触到 S 参数。由于采用的是高速数字设计师们所不熟悉的频域语言表示，常常令人望而生畏。正如本书的所有章节，第 12 章提供了一个理解这一格式的坚实基础，以便让所有工程师可以充分利用 S 参数的强大功能。

新增的另一章是关于电源完整性的第 13 章。这一问题不断进入设计工程师的视野。对于高速应用，电源分配路径的互连不仅仅影响着电源配送，而且影响着信号的返回路径，以及电磁兼容测试认证能否通过。

我们从最基本的内容出发，讨论电源分配互连的角色，分析不同的设计和工艺如何影响电源分配网络性能的优劣。介绍平面阻抗的基本原理、扩散电感、去耦电容器、电容器的回路电感等。这些有价值的感悟将有助于培养工程师的直觉，从而使他们能够运用自己的创造力去综合出新的设计。在实现一个新创意的过程中，与设计密不可分的工作是性能分析。通过分析，可以找出性能与价格的折中方案，修整出完美的 PDN 阻抗曲线。

如果你是信号完整性方面的一位新手，那么本书将是你的入门教材。籍此奠定一个坚实的基础，从此可以使你的信号完整性设计做到首次成功！次次成功！

第一版前言

“一切都应该尽可能简单，而不只是简单一点。”

——阿尔伯特·爱因斯坦

通常，人们一提到印制电路板和集成电路封装设计，常常会想到电路设计、版图设计、CAD 工具、热传导、机械工程和可靠性分析等。随着现代数字电子系统突破 1 GHz 的壁垒，PCB 板级设计和集成电路封装设计必须考虑信号完整性(SI)和电气性能问题。

凡是介入物理设计的人都会不同程度地左右产品的性能。所有的设计师都应该了解自己的设计如何影响信号完整性，至少可以做到与信号完整性专业的工程师进行技术上的沟通。

传统的设计方法学是：根据要求研制产品样机，然后进行测试和调试。如今，产品的上市时间和产品的成本、性能同等重要，采用传统做法的效率将很低。因为，一个设计如果在开始阶段不考虑信号完整性，就很难做到首件产品一次成功。

在当今的“高速”世界里，从电气性能的角度看，封装和互连对于信号不再是畅通和透明的，因此需要新的设计方法学，以保证产品设计的一次成功率。这种新设计方法学的本质是立足于可预见性的。为此，首先要尽量应用已经成熟的来自工程经验积累的设计规则，其次要用量化的手段对期望的产品性能进行预估。这种工程设计途径与猜测途径不同，工程途径中要充分利用 4 种重要的技术工具：经验法则、解析近似、数值仿真和实际测量。在设计仿真过程中，还要尽可能早一点对产品的性能和成本进行评估和折中。设计早期进行分析和折中处理，对上市时间、产品成本和风险的影响最大。解决问题的途径可以归结为：首先分析信号完整性问题的起源，然后利用教材提供的工具找出最优的解决方案，并加以验证。

设计过程是充满直觉的过程，解决问题的灵感源自想象力和创造性的神秘世界。人们头脑中首先涌现出一个好主意，然后凭借技术训练中提供的分析能力，就能进一步将这个好主意变成解决问题的实际方案。方案的最终验证肯定要要进行计算机仿真，但是它毕竟代替不了我们的直觉能力。相反，只有对工作机理、原理、定义和各种可能性的深入掌握，才有可能涌现出一个好的问题解决方案。所以，为了做到能通过直觉推断去寻找问题答案，需要不断地提高理解力和想象力。

这本教材强调的是培养解决问题的直觉途径。全书内容的安排就是为了使读者能掌握从芯片、封装、电路板、连接到连线电缆的所有互连设计及所用材料对电气特性的影响。

商业报导中不完整甚至矛盾的描述使不少人感到困惑，这些人可以把本书当成学习的入门起点。而那些对电子设计比较有经验的人，也可以通过本书的学习，最终理解数学公式的真正物理含义。

本书从最基本的参数术语出发进行论述。例如，传输线阻抗是一段互连的基本电气特征，它描述了信号感受到的互连电气特征及信号与互连之间的相互作用。大多数信号完整性的问题来自对 3 个参数之间的混淆：阻抗、特性阻抗及信号所遇到的瞬时阻抗。甚至对于有经验的工程师而言，这三者的区别也很重要。本书没有使用复杂的数学描述，而是直接将这些概念及其含义介绍给读者。

进一步，我们在基本层面上为读者介绍一些新的专题。在其他大多数信号完整性书籍中并不涉及这个层次。这些专题包括：局部电感（有别于回路电感）、地弹和电磁干扰起因、阻抗、传输线突变、差分阻抗、有损线衰减导致眼图塌陷等。关注这类研究对于新的高速互连方案是至关重要的。

工程师为了能尽快找到解决问题的最佳方案，除了深入掌握基本原理之外，必须拥有实用的商业化技术工具。这些工具一般分为两类：分析型工具和测量型工具。分析型工具的基础是计算，测量型工具通过测量完成表征与描述。本书介绍了许多种这样的工具，给出它们的使用指南和具体参数值的示例。

目前有 3 类分析工具：经验法则、解析近似和数值仿真。它们的准确度和难度各不相同。每一个都很有用，适用于不同场合。每个工程师都应该将这些工具留存备用。

经验法则的例子包括“单位长度线段的自感约为 25 nH/in”。如果最需要的是快速求解而不是准确求解，这些经验法则就显得特别适用。

绝大多数场合下，信号完整性中的公式只给出定义或近似表示。解析近似对于开拓设计空间、兼顾设计难度和性能指标是必要的。然而，随意过分的近似是有风险的。人们一般不会同意在近似程度未知的前提下，安排 1 个月的时间，冒险用 1 万美元的代价去制作印制电路板（PCB）。

如果设计签发（sign off）时要求给出准确的结果，就必须用到数值仿真工具。在过去的几年里已经研制成功一代全新的工具，这些新工具非常好用又很准确。它们可以预估特性阻抗、串扰和任意截面传输线的差分阻抗，也可以仿真出任意一种终端端接对信号的可能影响。使用新一代的工具不需要很高的学历，任何一个工程师都能从中受益。

数值仿真的质量唯一地取决于元器件电气描述的质量，即等效电路模型。工程师们都学过信号处理用的门电路模型，但是很少考虑过互连的电路模型。15 年以前，互连对于信号还是畅通透明的，那时把互连看成理想的导线，既没有阻抗，也没有时延。考虑了这些参数项之后，就需要将它们表示成集总寄生参数。

目前高速数字系统的时钟已经超过 100 MHz，信号完整性问题使首件产品很难做到一次成功。真实的导线，包括键合线、封装引线、芯片引脚、电路板走线、连接件、连线电缆等，都是造成信号完整性问题的根源。为此，必须充分理解这些“模拟电路”效应，通过针对性设计设定参数值，进行全面的系统级仿真，然后再去制作硬件。这样就有可能制作出鲁棒性好的产品，并尽快推向市场。

本书从各种常见的系统中选取了一些示例，其内容涉及芯片内互连、键合线、倒装芯片装连、多层电路板、DIP、PGA、BGA、QFP、MCM 等接插件及电缆，书中介绍的工具有助于设计工程师和项目负责人了解包括它们在内的系统仿真技术，更好地理解芯片封装、电路板、连接件等无源元件对系统性能的影响。书中还给出了对重要电气参数及技术折中方案进行工程评估的方法。

大多数教材强调理论推导和数学上的严格，本书则侧重于直观的分析理解、实用技术及工程实践。我们把电子工程和物理学的基本原理应用于封装和互连问题，构建出理解的基本框架和解决问题的方法学。本书采用时/频域测量、二维和三维场求解器、传输线仿真、电路仿真器及解析近似等多种技术和工具，构造出经过验证的封装和互连等效电路模型。

这里着重关注模型的两个特征：它的准确度如何？它的带宽如何？回答这些问题的唯一途径是测量。只有通过测量才能极大地降低设计风险。

本书介绍了3类测量仪器,并对测量数据加以解释。这3类仪器是阻抗分析仪、矢量网络分析仪(VNA)及时域反射计(TDR)。书中通过对真实互连进行测量的示例,包括IC封装、印制电路板、电缆和连接件,阐明测量原理并对这类表征型工具的输出测量值加以解释。

本教材面向具有不同专业技能和训练背景的人员,包括设计工程师、项目负责人、销售和市场部经理、工艺研发人员和科学家。书中阐述的要点是:高速数字系统的互连设计难点是什么,需要克服哪些技术障碍才能在高频时正常工作。

我们基于电子工程和物理学的原理,分析数字信号通过整个互连时引起的信号完整性问题。引入等效互连电路模型的概念,是为了预估出性能的量化指标。本教材的大量篇幅用这种电路模型分析互连对系统电气性能的影响。这些影响可以归结为4类噪声问题:反射、串扰、轨道塌陷及电磁干扰。

本书素材源自作者讲授短期和整学期系列课程的教材。授课对象是芯片封装、印制电路板组装和系统设计方面的工程师。这些人需要在设计时考虑互连对电气性能的影响。本书有助于理解物理几何尺寸和材料特性的设计如何影响电气性能。

关于信号完整性,至少应该记住下列一些重要原则。这里给出的是条目纲要,书中将陆续给出进一步的详尽论述。

信号完整性问题的10个基本原则

1. 提高高速产品设计效率的关键是:充分利用分析工具实现准确的性能预估,使用测量手段验证设计过程、降低风险并提高所采用设计工具的可信度。
2. 将问题实质与表面现象剥离开来的唯一可行途径是:采用经验法则、解析近似、数值仿真技术或测量工具获得数据,这是工程实践的本质要素。
3. 任何一段互连,无论线长和形状,也无论信号的上升边如何,都是一个由信号路径和返回路径构成的传输线。一个信号在沿着互连前进的每一步,都会感受到一个瞬时阻抗。如果瞬时阻抗恒为常数,比如具有均匀横截面传输线的情况,那么其信号质量将会获得奇迹般的改善。
4. 把“接地”这一术语忘掉,由于它所造成的问题比用它解决的问题还要多。每一路信号都有返回路径。抓住“返回路径”,像对待信号路径一样去寻找并仔细处理返回路径,这样有助于培养解决问题的直觉能力。
5. 当电压变化时,电容器上就有电流流动。对于快速变化的边沿,即使印制电路板边缘和悬空导线之间的空气隙形成的边缘线电容,都可能拥有很低的阻抗。
6. 电感与围绕电流周围的磁力线匝数有本质的联系。只要电流或磁力线匝数发生改变,在导线的两端就会产生电压。这一电压是导致反射噪声、串扰、开关噪声、地弹、轨道塌陷及电磁干扰的根源之一。
7. 当流经接地回路电感上的电流变化时,在接地回路导线上产生的电压称为地弹。它是造成开关噪声和电磁干扰的内在机理。
8. 以同频率的方波作为参照,信号带宽是指有效正弦波分量的最高频率值。互连模型的带宽是指在这个最高的正弦频率上,模型仍能准确地预估互连的实际性能。在使用模型进行分析时,一定不要让信号的带宽超过模型的带宽。

9. 记住，除了少数情况之外，信号完整性中的公式给出的是定义或近似。在特别需要准确的场合就不要使用近似。
10. 有损传输线引起的问题就是上升边退化。由于集肤深度和介质损耗，损耗随着频率的升高而增加。如果损耗随着频率的升高而保持不变，上升边就不会发生变化，这时的有损线只是增添了一些不便而已。
11. 影响研发进度并造成产品交货推迟，是企业付出的最昂贵代价。

致 谢

许多同事、朋友和学生影响并造就了我的许多观点，这些观点已写入本书第一版和第二版中。在英特尔、思科、摩托罗拉、阿尔特拉(Altera)、高通、雷声(Raytheon)和其他公司中，约有几千位工程师参加过我的培训课程，他们给我提出了许多有益的反馈意见，指出什么样的解释是对的和不对的。

在第二版的出版过程中，我的审稿人 Greg Edlund、Tim Swettlen 和 Larry Smith 给出了非常出色的意见和建议，我从这些专家身上学到很多知识。

我的出版策划 Bernard Goodwin 总是非常耐心并积极支持，甚至当我超过了第二版的交稿期限时，也不曾抱怨。

感谢你们所有的友情支持与鼓励！

作者简介

Eric Bogatin 于 1976 年获麻省理工学院物理学士学位，并于 1980 年获亚利桑那大学物理硕士和博士学位。从事信号完整性和互连设计领域的研究长达 30 多年。Eric 曾在 AT&T 贝尔实验室、Raychem、Sun 微系统公司及 Interconnect 元器件等公司担任过高级研究及管理职位。



当他意识到工业界急需信号完整性方面的高级技术培训时，即着手创办了 Bogatin Enterprises 公司，目前已经发展成为信号完整性培训服务业的世界领先的品牌。作为“信号完整性的传道士”，Eric 将复杂的问题变成实用的设计原理，正在影响着分析技术及测量工具的工程化。

多年来，他为全世界范围内的 5000 多名工程师开办了大量生动的课程，包括传输线、差分对、开关噪声、地弹、电源分配网络及电磁干扰等。在他的课程中，还介绍了互连表征用的 TDR 和 VNA 测量技术。

除此之外，Eric 还是一位发表了 300 多篇文献的高产作者，其中许多文献都公布在他的网站 www.beTheSignal.com 上，供免费下载。Eric 定期出席多种学术会议，包括 DesignCon、西部 PCB、Mentor 用户集团会议、封装互连协会 (IPC) 的设计日活动等。

近 10 年来，Eric 每月定期为杂志《印制板设计与制造 (PCD&F)》、《国际半导体》、《电子封装与生产》、《Altera 通讯》、《Mentor 通讯》撰写专栏文章。他还是《印制板设计与制造》和《微互连通讯》杂志社的编委。

许多工程师通常都比较熟悉信号完整性的电磁特性，但 Eric 同时还在互连工艺方面具有相当丰富的经验。他还撰写了另外 4 本关于封装工艺的专著，其中包含大量实例，涉及互连的各个层次，从芯片内直到封装、插头座、内插件、电路板、连接件和电缆等。

2005 年，他意识到基于网络远程教育的重要性，遂在 www.beTheSignal.com 上开办了在线课程。他是推出信号完整性全套课程的第一家网络公司，内容包括讲座、实验和测验等环节，任何个人或公司只要提出订单即可获得。

目 录

第 1 章 信号完整性分析概论	1	2.16 互连的带宽	44
1.1 信号完整性的含义	2	2.17 小结	46
1.2 单一网络的信号质量	3	第 3 章 阻抗与电气模型	47
1.3 串扰	6	3.1 用阻抗描述信号完整性	47
1.4 轨道塌陷噪声	7	3.2 阻抗的含义	48
1.5 电磁干扰	9	3.3 实际的与理想的电路元件	49
1.6 信号完整性的两个重要推论	10	3.4 时域中理想电阻器的阻抗	51
1.7 电子产品的趋势	11	3.5 时域中理想电容器的阻抗	51
1.8 新设计方法学的必要性	14	3.6 时域中理想电感器的阻抗	52
1.9 一种新的产品设计方法学	15	3.7 频域中的阻抗	53
1.10 仿真	15	3.8 等效电路模型	55
1.11 模型与建模	17	3.9 电路理论和 SPICE	57
1.12 通过计算创建电路模型	19	3.10 建模简介	59
1.13 三种测量技术	21	3.11 小结	62
1.14 测量的作用	23	第 4 章 电阻的物理基础	63
1.15 小结	25	4.1 将物理设计转化为电气性能	63
第 2 章 时域与频域	26	4.2 互连电阻的最佳近似式	64
2.1 时域	26	4.3 体电阻率	65
2.2 频域中的正弦波	27	4.4 单位长度电阻	66
2.3 在频域解决问题	28	4.5 方块电阻	67
2.4 正弦波的特征	29	4.6 小结	69
2.5 傅里叶变换	30	第 5 章 电容的物理基础	70
2.6 重复信号的频谱	31	5.1 电容器中的电流流动	70
2.7 理想方波的频谱	32	5.2 球面电容	71
2.8 从频域逆变换到时域	33	5.3 平行板近似式	72
2.9 带宽对上升边的影响	34	5.4 介电常数	72
2.10 上升边与带宽	36	5.5 电源、地平面及去耦电容	74
2.11 “有效”的含义	37	5.6 单位长度电容	75
2.12 实际信号的带宽	39	5.7 二维场求解器	78
2.13 时钟频率与带宽	40	5.8 有效介电常数	80
2.14 测量的带宽	41	5.9 小结	82
2.15 模型的带宽	43		

第 6 章 电感的物理基础	83	7.13 返回路径	131
6.1 电感是什么	83	7.14 返回路径参考平面的切换	133
6.2 电感法则之一: 电流周围会形成 闭合磁力线圈	83	7.15 传输线的一阶模型	140
6.3 电感法则之二: 电感是导体电流 1 A 时周围的磁力线匝韦伯数	84	7.16 特性阻抗的近似计算	143
6.4 自感和互感	85	7.17 用二维场求解器计算特性 阻抗	144
6.5 电感法则之三: 周围磁力线 匝数改变时导体两端产生感 应电压	87	7.18 n 节集总电路模型	148
6.6 局部电感	88	7.19 特性阻抗随频率的变化	152
6.7 有效电感、总电感或净电感 及地弹	91	7.20 小结	153
6.8 回路自感和回路互感	94	第 8 章 传输线与反射	154
6.9 电源分配网络和回路电感	97	8.1 阻抗突变处的反射	155
6.10 每方块回路电感	99	8.2 为什么会有反射	155
6.11 平面对与过孔的回路电感	100	8.3 阻性负载的反射	157
6.12 有出砂孔区域的平面回路 电感	102	8.4 驱动器的内阻	159
6.13 回路互感	103	8.5 反弹图	160
6.14 多个电感器的等效电感	103	8.6 反射波形仿真	161
6.15 电感分类	104	8.7 用 TDR 测量反射	162
6.16 电流分布及集肤深度	105	8.8 传输线及非故意突变	164
6.17 高导磁率材料	110	8.9 多长需要端接	165
6.18 涡流	111	8.10 点到点拓扑的通用端接策略	167
6.19 小结	113	8.11 短串联传输线的反射	169
第 7 章 传输线的物理基础	114	8.12 短并联传输线的反射	170
7.1 不再使用“地”这个词	114	8.13 容性终端的反射	171
7.2 信号	115	8.14 走线中途容性负载的反射	173
7.3 均匀传输线	115	8.15 中途容性时延累加	174
7.4 铜中电子的速度	117	8.16 拐角和过孔的影响	175
7.5 传输线上信号的速度	117	8.17 有载线	178
7.6 前沿的空间延伸	119	8.18 感性突变的反射	180
7.7 “我若是信号”	120	8.19 补偿	182
7.8 传输线的瞬时阻抗	122	8.20 小结	184
7.9 特性阻抗与可控阻抗	123	第 9 章 有损线、上升边退化与材料 特性	185
7.10 常见的特性阻抗	125	9.1 有损线的不良影响	185
7.11 传输线的阻抗	127	9.2 传输线中的损耗	187
7.12 传输线的驱动	129	9.3 损耗源: 导线电阻与趋肤效应	188
		9.4 损耗源: 介质	190
		9.5 介质耗散因子	192
		9.6 耗散因子的真实含义	194
		9.7 有损传输线建模	196

9.8	有损传输线的特性阻抗	200	11.5	差分阻抗的计算	271
9.9	有损传输线中的信号速度	201	11.6	差分对返回电流的分布	273
9.10	衰减与 dB	202	11.7	奇模与偶模	277
9.11	有损线上的衰减	205	11.8	差分阻抗与奇模阻抗	279
9.12	频域中有损线特性的度量	209	11.9	共模阻抗与偶模阻抗	280
9.13	互连的带宽	212	11.10	差分/共模信号与奇模/偶模 电压分量	282
9.14	有损线的时域行为	215	11.11	奇模/偶模速度与远端 串扰	283
9.15	改善传输线眼图	217	11.12	理想耦合传输线或理想差分 对模型	286
9.16	预加重与均衡化	219	11.13	奇模及偶模阻抗的测量	287
9.17	小结	219	11.14	差分及共模信号的端接	289
第 10 章	传输线的串扰	220	11.15	差分信号向共模信号转化	292
10.1	叠加	220	11.16	电磁干扰和共模信号	295
10.2	耦合源: 电容和电感	221	11.17	差分对的串扰	298
10.3	传输线串扰: NEXT 与 FEXT	222	11.18	跨越返回路径中的间隙	300
10.4	串扰模型	223	11.19	是否要紧耦合	302
10.5	SPICE 电容矩阵	224	11.20	根据电容和电感矩阵元素 计算奇模及偶模	302
10.6	麦克斯韦电容矩阵与二维场 求解器	227	11.21	特性阻抗矩阵	304
10.7	电感矩阵	230	11.22	小结	305
10.8	均匀传输线上的串扰和饱和 长度	231	第 12 章	S 参数在信号完整性中的 应用	307
10.9	容性耦合电流	234	12.1	一种新基准: S 参数	307
10.10	感性耦合电流	236	12.2	S 参数的定义	308
10.11	近端串扰	238	12.3	S 参数的基本公式	309
10.12	远端串扰	240	12.4	S 参数矩阵	311
10.13	减小远端串扰	244	12.5	返回及插入损耗仿真	313
10.14	串扰仿真	245	12.6	互连的透明度	316
10.15	防护布线	249	12.7	改变端口阻抗	317
10.16	串扰与介电常数	254	12.8	50 Ω 均匀传输线 S21 的 相位	319
10.17	串扰与时序	255	12.9	均匀传输线 S21 的幅值	320
10.18	开关噪声	257	12.10	传输线之间的耦合	323
10.19	降低串扰的措施	259	12.11	非 50 Ω 传输线的插入 损耗	327
10.20	小结	260	12.12	S 参数的扩展	330
第 11 章	差分对与差分阻抗	261	12.13	单端及差分 S 参数	331
11.1	差分信令	261			
11.2	差分对	264			
11.3	无耦合时的差分阻抗	265			
11.4	耦合的影响	267			

12.14	差分插入损耗	334	13.16	电容器的并联	375
12.15	模态转化项	336	13.17	添加电容器降低并联谐振 峰值	378
12.16	转换为混模 S 参数	338	13.18	电容器容值的选取	380
12.17	时域和频域	339	13.19	电容器个数的估算	383
12.18	小结	341	13.20	每 nH 电感的成本	385
第 13 章	电源分配网络	343	13.21	靠个数多还是选合适值	386
13.1	PDN 的问题	343	13.22	修整阻抗曲线的频域目标 阻抗法	390
13.2	问题的根源	345	13.23	何时要考虑每 pH 的电感	394
13.3	PDN 最重要的设计准则	346	13.24	位置的重要性	397
13.4	如何确定目标阻抗	346	13.25	扩散电感的制约	399
13.5	不同产品对 PDN 的要求 不同	352	13.26	从芯片看过去	401
13.6	PDN 工程化建模	352	13.27	综合效果	403
13.7	稳压模块	354	13.28	小结	405
13.8	用 SPICE 仿真阻抗	355	附录 A	100 条使信号完整性问题最小化 的通用设计规则	407
13.9	片上电容	356	附录 B	100 条估计信号完整性效应的 经验法则	411
13.10	封装屏障	357	附录 C	参考文献	417
13.11	未加去耦电容器的 PDN	361			
13.12	多层陶瓷电容器(MLCC)	362			
13.13	等效串联电感	364			
13.14	回路电感的解析近似	366			
13.15	电容器装连的优化	371			

第1章 信号完整性分析概论

“设计师可以分成两类，一类已经遇到了信号完整性问题，另一类即将遇到信号完整性问题。”

——某公司的一条警句

当今，随着时钟频率的日益提高，信号完整性问题变得日趋严重。设计人员用以解决信号完整性问题和设计新产品的时间也日益缩短。产品设计人员将一个产品投入市场只有一次机会，所以该产品必须第一次就能成功运行。如果在产品设计周期中不能尽早确定和消除信号完整性问题，产品的研制就可能失败。

提示 随着时钟频率的提高，发现并解决信号完整性问题成为产品开发的关键。成功的秘诀是精通信号完整性分析技术，并能采取高效设计过程消除这些问题。只有娴熟地运用新的设计规则、新的技术和新的分析工具，才能实现高性能设计，并日益缩短研发周期。

在高速产品中，物理设计和机械设计都将导致信号完整性问题。图 1.1 表明了印制电路板 (printed circuit board, PCB) 上一段简单的 2 in 长的线条如何影响典型驱动器的信号完整性。

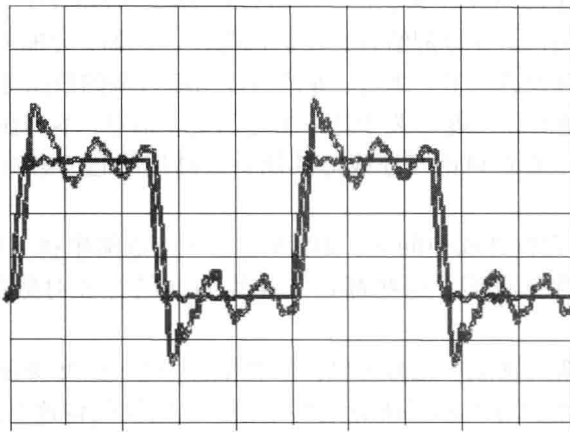


图 1.1 100 MHz 时钟产生后，从信号驱动器芯片输出的两种波形：没有外加引出连线（平滑曲线）的情况和输出端连接有一段 2 in 长的 PCB 线条（振铃曲线）的情况。其中，纵轴每格表示 1 V，横轴每格表示 2 ns。本图由 Mentor Graphics 的 Hyperlynx 仿真得出

通常，设计过程是极富直觉和创造性的。要想尽快完成合格的设计，激发关于信号完整性的设计直觉是至关重要的。所有涉及产品的设计师们都应该了解信号完整性如何影响整个产品的性能。通过在直觉和工程实践的层次上理解信号完整性的基本原理，参与设计过程的每个设计师就能体会到他们的决定对系统性能所产生的影响。本书主要介绍理解和解决信号完整性问题的基本原理，直观定量地给出信号完整性问题的工程背景知识。

1.1 信号完整性的含义

在时钟频率只有 10 MHz 的年代, 电路板或封装设计的主要挑战就是如何在双层板上布通所有信号线, 以及如何在组装时不破坏封装。由于互连线并未影响过系统性能, 所以互连线本身的电气特性并不重要。在这种意义下, 可以说“对信号而言, 过去的互连线是畅通透明的”。

例如, 如果一个器件输出一个上升边约为 10 ns 且时钟频率为 10 MHz 的信号, 那么即使是最粗糙的互连线, 电路也可以正常工作。由手工连线而成的样机与最终规范布线的印制板产品一样都能正常工作。

但是, 现在的时钟频率提高了, 信号上升边也已普遍变短。对于大多数电子产品而言, 当时钟频率超过 100 MHz 或上升边小于 1 ns 时, 信号完整性效应就变得重要了, 通常将这种情况称为高频领域或高速领域。这些术语意味着在互连线对信号不再透明的产品与系统中, 如果不小心就可能出现一种或多种信号完整性问题。

从广义上讲, 信号完整性指的是在高速产品中由互连线引起的所有问题。它主要研究当互连线与数字信号的电压电流波形相互作用时, 其电气特性如何影响产品的性能。

所有这些问题分为以下 3 种情况:

1. 时序;
2. 噪声;
3. 电磁干扰 (electromagnetic interference, EMI)。

时序本身就是一个复杂的研究领域。在一个时钟周期内, 必然发生一定数量的操作, 必须在预算中划分某段较短的时间, 并分配给各种不同的操作。例如, 分配一些时间给门翻转、将信号传送至输出门、等待时钟进入下一级门、等待门读出输入端的数据等。尽管互连线严重影响时序预算, 但本书不讨论时序问题。关于这一主题的更多信息, 本书在附录中为感兴趣的读者列出了一些参考书。本书重点讨论互连线对其他一般高速问题的影响, 其中大部分为噪声问题。

我们听到过许多信号完整性噪声问题, 如振铃、反射、近端串扰、开关噪声、非单调性、地弹、电源弹、衰减和容性负载等。这些都是互连线的电气特性对数字信号波形造成的不同影响。

乍看起来, 要考虑的新问题似乎无穷无尽, 非常混乱, 这一点反映在图 1.2 中。数字系统设计师或电路板设计师中很少有人熟悉所有这些术语, 他们仅仅将这些问题标记为早期产品设计雷区中的弹坑, 发现一个算一个。怎样才能弄清所有这些信号完整性问题呢? 难道仅仅列一个不断增加的清单并定期进行补充吗?

以上列出的所有与信号完整性噪声问题有关的效应, 都与下面 4 类特定噪声源之一有关:

1. 单一网络的信号完整性;
2. 两个或多个网络间的串扰;
3. 电源和地分配中的轨道塌陷;
4. 来自整个系统的电磁干扰和辐射。

这 4 种类型如图 1.3 所示。一旦知道 4 种问题中的每种噪声的来源, 找出和解决这种问题的一般方案就很清楚了。这就是能把各种信号完整性噪声问题分为以上 4 种类型的原因。