

国外电子与通信教材系列

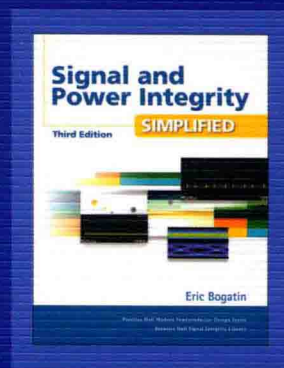
Pearson

Signal and Power Integrity — Simplified, Third Edition

信号完整性与电源 完整性分析 (第三版)

[美] Eric Bogatin 著

李玉山 刘洋 等译
初秀琴 路建民



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>

教材系列

信号完整性与电源完整性分析

(第三版)

Signal and Power Integrity — Simplified
Third Edition

[美] Eric Bogatin 著

李玉山 刘洋 等译
初秀琴 路建民

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。主要讲述信号与电源完整性分析及物理设计概论,4类信号与电源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,求解信号与电源完整性问题的4种实用技术途径,推导和仿真背后隐藏的解决方案,以及改进信号与电源完整性的推荐设计准则等。本书还讨论了信号与电源完整性中S参数的应用问题,并给出了电源分配网络的设计实例。书中每章都添加了复习题,并在附录D中给出了答案。

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与电源完整性问题的根源,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与电源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, Third Edition, 9780134513416 by Eric Bogatin, published by Pearson Education, Inc. Copyright © 2018 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 PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY. Copyright © 2019.

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:01-2018-7255

图书在版编目(CIP)数据

信号完整性与电源完整性分析:第三版/(美)埃里克·伯格丁(Eric Bogatin)著;李玉山等译.

北京:电子工业出版社,2019.4

书名原文:Signal and Power Integrity – Simplified, Third Edition

国外电子与通信教材系列

ISBN 978-7-121-35931-6

I. ①信… II. ①埃… 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(2019)第014618号

策划编辑:马 岚

责任编辑:马 岚 特约编辑:马爱文

印 刷:三河市华成印务有限公司

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:32.5 字数:832千字

版 次:2005年4月第1版

2019年4月第3版

印 次:2019年4月第1次印刷

定 价:129.00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)88254888,88258888。

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。

本书咨询联系方式:classic-series-info@phei.com.cn。

奉献一部书之所以称为“奉献”，是因为这是一项需要作者奉献才能完成的工作。每一位作者都会告诉你，写作是鲜有社交的寂寞之道。埋头写作和研究的人，很容易将自己置身于尘世之外。成功的作者或者不结婚，或者与一位理解并支持自己的配偶结婚。这些配偶倾其所能为对方提供了能让创新种子萌芽的环境。

我的夫人苏姗就是这样一位耐心地承受孤寂的人，使我有足够的时间奉献给这本书的第一版、第二版和第三版的写作。同时，她也是我停泊真实世界的港湾，使我在寂寞写作和社交活动之间找到一个健康的平衡点。第三版是她和我共同努力的成果。因此，我要说的话就是：将这第三版奉献给她！

译者序

广义信号完整性,又称为电气完整性(Electrical Integrity),是指所有与数字信号完整性相关的分析与设计技术,其中包括信号的波形噪声和时序抖动,电源的地弹和纹波,以及场与路之间的干扰和抗干扰等。

2003年9月, Eric Bogatin 所著的本书第一版问世,其深入浅出、雅俗共赏的大家风范得到读者的一致好评。其中译本自2005年出版后,深受中国广大工程技术人员的普遍欢迎。

当前,国内对信号完整性的研究开发堪称斗转星移,读者对国外著作的需求也已今非昔比。因此,我们依然珍惜这次第三版中译本的出版契机。本着为读者呈现精品的宗旨,结合译者15年间采用本书前两版的教学体验,推敲琢磨,竭力使译文更好地贴近“信、达、雅”的准则,少留缺憾。

与本书第一版相比,第二版新增了第12章和第13章,将信号完整性扩展到电源完整性领域。第三版除了对正文的斟酌更新、补充完善和拓展延伸,在每章的末尾都添加了复习题,并在附录D中给出了复习题的参考答案。这样,读者在学习时可以加入考查环节,以厘清对内容的理解,并尝试采用分析技术有针对性地解决工程问题。目前,广义信号完整性分析与设计技术已被国内业界掌握并应用,然而这一研发领域仍有不断深化的空间和提升的前景。

第三版的翻译工作仍由西安电子科技大学电路CAD研究所里研究信号完整性的教师和部分博士生、硕士生共同完成,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、王君、李先锐、尚玉玲、董巧玲等。另外,索之玲、寻建晖、辛东金、戴翔宇、张超余、张文博、赵国荣等参加了部分相关工作,在此一并表示感谢。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. 61871453、No. 61501345、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、西电-是德(Keysight)高速电路信号完整性联合实验室,以及西安电子科技大学研究生院的立项资助。恳切希望读者在学习及使用中予以检视和指正!

本书适合作为电子通信类学科专业博士生、硕士生或本科生的“信号完整性分析”课程的教材。此外,本书也适合作为电子系统与电路设计工程师解决电气完整性问题的技术参考书。

李玉山

2019年1月于西安电子科技大学

第三版前言

与本书第二版相比，第三版有一个非常重要的增补：在每一章末尾都附上一批重点考查题，籍以加深读者对本书知识的理解。

大学生和工程师将受益于这个契机，认真查看自己是否掌握了每一章的重要信息，并学会运用这些原理去解决实际问题。

自从本书第二版出版以来，信号完整性和电源完整性的原理及应用并未改变。当我在世界各地对这些主题发表演讲时，我发现其中的基本原理比以往任何时候都更重要。

我常常惊讶地发现，即使实际问题很复杂，也能采用基本的工程原理和简单的评判方法加以解决，并获得更升华的新见解。这就是本书的重点和特点。

本书的第一版和第二版是以为世界各地成千上万工程师们开设的“信号完整性与电源完整性”课程的教案为蓝本的。第三版则基于科罗拉多大学博尔德分校 130 多名选课研究生的实践演练素材，并新增了几个采用高速串行链路的最新实例。学生们反馈给我的建议是，希望通过实践演练能够考核并加深自己的理解能力。当我向专业工程师咨询是否在每章结尾添加复习题时，也得到了他们的强力支持。

工程师们都愿意正视自己所面对的难题和挑战。每当遇到难题，总是要设法解决问题，从而把绊脚石变为垫脚石。

有人认为经由实践途径的学习效果最好。我认为并非完全正确。我认为实践演练能加强对所学基本原理的理解，但并不见得必须从实践中才能学习得到。在我们把基本原理应用到真实世界时，无论是在实验室中进行测量解释及模拟仿真，还是在面对实际问题时，我们在脑海中都会尝试如何应用基本原理这一过程。工程师们已告诉我，在解决问题时“终会产生共鸣”。

在本书每一章的末尾附有 20 ~ 35 个复习题，这些复习题会迫使读者思考一些原理，借用它们叩击读者的思维。附录 D 汇总了所有复习题并给出了答案。其他补充资料还可以通过网站 www.beTheSignal.com 获取。

Eric Bogatin
2017 年 9 月

第二版前言

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，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影响着电源配送，还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，修整出完美的电源分配网络阻抗曲线。

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。借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，才可能涌现好的问题解决方案。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。

本书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、连接器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。

商业报道中不完整甚至矛盾的描述使不少人感到困惑，这些人可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，还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、连接器、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，然后再制作硬件。这样就有可能制作出稳健性(robust)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、连接器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，包括集成电路封装、印制电路板、电缆和连接器，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。

本书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结构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，都会感受到瞬时阻抗。若瞬时阻抗恒为常量，比如具有均匀横截面传输线的情况，其信号质量就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更多。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着本质的联系。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，除少数情况以外，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，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。

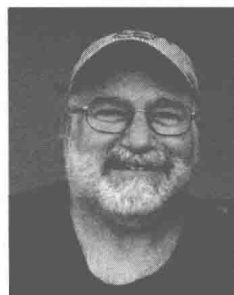
在第二版的出版过程中，我的审稿人 Greg Edlund、Tim Swetten 和 Larry Smith 给出了非常出色的意见和建议，我从这些专家身上学到很多知识。我的出版策划 Bernard Goodwin 总是非常耐心并积极支持我，我超过了交稿期限也不曾抱怨过。

在第三版中，我的许多学生，包括科罗拉多大学的学生、Teledyne LeCroy 信号完整性学会的订阅者，以及工业界的专业工程师等，都鼓励我为本书添加些复习题及答案。为此我积极尝试收集在多次公共培训中被问及的问题，并将它们相应地添加到内容相关的章的末尾。感谢我所有的学生，无论年轻或年长，感谢你们忘我地去辨析难题并将意见反馈给我。

感谢你们所有的友情支持与鼓励！

作者简介

Eric Bogatin(埃里克·伯格丁)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公司、Sun Microsystems、Interconnect Devices公司和Teledyne LeCroy担任过高级研究员或管理职位。2011年, Eric的Bogatin公司被Teledyne LeCroy收购。



Eric目前是Teledyne LeCroy的信号完整性理论实践方面的“传教布道师”,一直在创建并展示着与高性能视野相关的最新应用教材。利用分析技术和测量工具, Eric能够将复杂的问题转化为实用的设计与测量实践知识。

2012年以后, Eric一直担任科罗拉多大学博尔德分校的兼职教授,在信号完整性、互连设计和PCB设计等方面讲授研究生的课程。

Eric为*PCD&F Magazine*, *Semiconductor International*, *Electronic Packaging and Production*, Altera公司, Mentor Graphics公司, *EDN*和*EE Times*等每月定期撰写技术专栏。目前, Eric还是*Signal Integrity Journal*(www.SignalIntegrityJournal.com)的编辑。

Eric著作颇丰,他著有300多部作品,其中许多发表在网站www.beTheSignal.com上,供大家下载。Eric定期出席DesignCon、IEEE EMC研讨会、EDI会议及IPC设计委员会的例会并发表讲演。

Eric与Larry Smith合作撰写并出版了颇受欢迎的*Principles of Power Integrity for PDN Design - Simplified*。

Eric是DesignCon的2016 Engineer of the Year Award(2016年度工程师奖)的获得者。

如果需要,可以通过发邮件至eric@beTheSignal.com与Eric联络。

目 录

第 1 章 信号完整性分析概论	1	2.14 测量的带宽	46
1.1 信号完整性、电源完整性与 电磁兼容的含义	2	2.15 模型的带宽	47
1.2 单一网络的信号完整性	4	2.16 互连的带宽	48
1.3 串扰	7	2.17 小结	51
1.4 轨道塌陷噪声	8	2.18 复习题	51
1.5 电磁干扰	11	第 3 章 阻抗与电气模型	53
1.6 信号完整性的两个重要推论 ..	11	3.1 用阻抗描述信号完整性	53
1.7 电子产品的趋势	12	3.2 阻抗的含义	54
1.8 新设计方法学的必要性	16	3.3 实际电路元件与理想电路元件 ..	55
1.9 一种新的产品设计方法学	16	3.4 时域中理想电阻器的阻抗	57
1.10 仿真	18	3.5 时域中理想电容器的阻抗	58
1.11 模型与建模	20	3.6 时域中理想电感器的阻抗	59
1.12 通过计算创建电路模型	22	3.7 频域中的阻抗	60
1.13 三种测量技术	25	3.8 等效电路模型	63
1.14 测量的作用	27	3.9 电路理论和 SPICE	64
1.15 小结	28	3.10 建模简介	67
1.16 复习题	29	3.11 小结	69
第 2 章 时域与频域	30	3.12 复习题	70
2.1 时域	30	第 4 章 电阻的物理基础	71
2.2 频域中的正弦波	31	4.1 将物理设计转化为电气性能 ..	71
2.3 在频域解决问题	32	4.2 互连电阻的最佳近似式	72
2.4 正弦波的特征	33	4.3 体电阻率	73
2.5 傅里叶变换	34	4.4 单位长度电阻	74
2.6 重复信号的频谱	35	4.5 方块电阻	75
2.7 理想方波的频谱	36	4.6 小结	77
2.8 从频域逆变换到时域	37	4.7 复习题	77
2.9 带宽对上升边的影响	39	第 5 章 电容的物理基础	79
2.10 上升边与带宽	41	5.1 电容器中的电流流动	79
2.11 “有效”的含义	42	5.2 球面电容	80
2.12 实际信号的带宽	44	5.3 平行板近似式	81
2.13 时钟频率与带宽	45	5.4 介电常数	82

5.5	电源、地平面及去耦电容	83	7.6	前沿的空间延伸	133
5.6	单位长度电容	85	7.7	“我若是信号”	134
5.7	二维场求解器	87	7.8	传输线的瞬时阻抗	136
5.8	有效介电常数	90	7.9	特性阻抗与可控阻抗	137
5.9	小结	92	7.10	常见的特性阻抗	139
5.10	复习题	92	7.11	传输线的阻抗	141
第6章	电感的物理基础	94	7.12	传输线的驱动	144
6.1	电感是什么	94	7.13	返回路径	145
6.2	电感法则之一：电流周围会形成闭合磁力线圈	94	7.14	返回路径参考平面的切换	147
6.3	电感法则之二：电感是导体电流1 A 时周围的磁力线匝数	96	7.15	传输线的一阶模型	154
6.4	自感和互感	97	7.16	特性阻抗的近似计算	157
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	98	7.17	用二维场求解器计算特性阻抗	159
6.6	局部电感	99	7.18	n 节集总电路模型	163
6.7	有效电感、总电感或净电感及地弹	102	7.19	特性阻抗随频率的变化	167
6.8	回路自感和回路互感	106	7.20	小结	168
6.9	电源分配网络和回路电感	108	7.21	复习题	169
6.10	每方块回路电感	111	第8章	传输线与反射	170
6.11	平面对与过孔的回路电感	112	8.1	阻抗突变处的反射	170
6.12	有出砂孔区域的平面对的回路电感	113	8.2	为什么会有反射	171
6.13	回路互感	114	8.3	阻性负载的反射	173
6.14	多个电感器的等效电感	115	8.4	驱动器的内阻	175
6.15	电感分类	116	8.5	反弹图	176
6.16	电流分布及集肤深度	117	8.6	反射波形仿真	177
6.17	高磁导率材料	122	8.7	用时域反射计测量反射	178
6.18	涡流	123	8.8	传输线及非故意突变	180
6.19	小结	125	8.9	多长需要端接	181
6.20	复习题	125	8.10	点到点拓扑的通用端接策略	183
第7章	传输线的物理基础	127	8.11	短串联传输线的反射	185
7.1	不再使用“地”这个词	127	8.12	短并联传输线的反射	186
7.2	信号	128	8.13	容性终端的反射	187
7.3	均匀传输线	129	8.14	走线中途容性负载的反射	189
7.4	铜中电子的速度	130	8.15	中途容性时延累加	191
7.5	传输线上信号的速度	131	8.16	拐角和过孔的影响	191
			8.17	有载线	194
			8.18	感性突变的反射	196
			8.19	补偿	199
			8.20	小结	200
			8.21	复习题	200

第 9 章 有损线、上升边退化与材料特性	202	10.17 串扰与时序	275
9.1 有损线的不良影响	202	10.18 开关噪声	277
9.2 传输线中的损耗	204	10.19 降低串扰的措施	279
9.3 损耗源: 导线电阻与趋肤效应	205	10.20 小结	280
9.4 损耗源: 介质	208	10.21 复习题	280
9.5 介质耗散因子	210	第 11 章 差分对与差分阻抗	282
9.6 耗散因子的真实含义	211	11.1 差分信令	282
9.7 有损传输线建模	214	11.2 差分对	285
9.8 有损传输线的特性阻抗	217	11.3 无耦合时的差分阻抗	286
9.9 有损传输线中的信号速度	218	11.4 耦合的影响	288
9.10 衰减与 dB	220	11.5 差分阻抗的计算	292
9.11 有损线上的衰减	223	11.6 差分对返回电流的分布	294
9.12 频域中有损线特性的度量	227	11.7 奇模与偶模	298
9.13 互连的带宽	230	11.8 差分阻抗与奇模阻抗	300
9.14 有损线的时域行为	233	11.9 共模阻抗与偶模阻抗	301
9.15 改善传输线眼图	235	11.10 差分/共模信号与奇模/偶模电压分量	303
9.16 多大的衰减算大	237	11.11 奇模/偶模速度与远端串扰	304
9.17 小结	238	11.12 理想耦合传输线或理想差分对模型	307
9.18 复习题	238	11.13 奇模及偶模阻抗的测量	308
第 10 章 传输线的串扰	240	11.14 差分及共模信号的端接	310
10.1 叠加	241	11.15 差分信号向共模信号转化	313
10.2 耦合源: 电容和电感	241	11.16 电磁干扰和共模信号	316
10.3 传输线串扰: NEXT 与 FEXT	242	11.17 差分对的串扰	319
10.4 串扰模型	244	11.18 跨越返回路径中的间隙	321
10.5 SPICE 电容矩阵	245	11.19 是否要紧耦合	323
10.6 麦克斯韦电容矩阵与二维场求解器	247	11.20 根据电容和电感矩阵元素计算奇模及偶模	324
10.7 电感矩阵	251	11.21 阻抗矩阵	325
10.8 均匀传输线上的串扰和饱和长度	252	11.22 小结	327
10.9 容性耦合电流	254	11.23 复习题	327
10.10 感性耦合电流	256	第 12 章 S 参数在信号完整性中的应用	329
10.11 近端串扰	258	12.1 一种新基准: S 参数	329
10.12 远端串扰	260	12.2 S 参数的定义	330
10.13 减小远端串扰	264	12.3 S 参数的基本公式	331
10.14 串扰仿真	265	12.4 S 参数矩阵	333
10.15 防护布线	269	12.5 返回损耗与插入损耗	335
10.16 串扰与介电常数	274		

12.6	互连的透明度	338	网络	385	
12.7	改变端口阻抗	340	13.12	多层陶瓷电容器(MLCC)	386
12.8	50 Ω 均匀传输线 S_{21} 的相位	341	13.13	等效串联电感	388
12.9	均匀传输线 S_{21} 的幅值	343	13.14	回路电感的解析近似	390
12.10	传输线之间的耦合	346	13.15	电容器装连的优化	395
12.11	非 50 Ω 传输线的插入损耗	350	13.16	电容器的并联	399
12.12	S 参数的扩展	353	13.17	添加电容器以降低并联谐振 峰值	402
12.13	单端及差分 S 参数	354	13.18	电容器容值的选取	404
12.14	差分插入损耗	357	13.19	电容器个数的估算	407
12.15	模态转化项	359	13.20	每 nH 电感的成本	409
12.16	转换为混模 S 参数	361	13.21	靠个数多还是选合适值	410
12.17	时域和频域	362	13.22	修整阻抗曲线的频域目标阻 抗法	414
12.18	小结	364	13.23	何时要考虑每 pH 的电感	417
12.19	复习题	365	13.24	位置的重要性	420
第 13 章	电源分配网络	367	13.25	扩散电感的制约	422
13.1	电源分配网络的问题	367	13.26	从芯片看过去	424
13.2	问题的根源	369	13.27	综合效果	427
13.3	电源分配网络最重要的设计 准则	370	13.28	小结	428
13.4	如何确定目标阻抗	370	13.29	复习题	429
13.5	不同产品对电源分配网络的 要求不同	376	附录 A	102 条使信号完整性问题最 小化的通用设计规则	431
13.6	电源分配网络工程化建模	376	附录 B	100 条估计信号完整性效应 的经验法则	435
13.7	稳压模块	378	附录 C	参考文献	441
13.8	用 SPICE 仿真阻抗	379	附录 D	复习题答案	442
13.9	片上电容	380			
13.10	封装屏障	381			
13.11	未加去耦电容器的电源分配				

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以消除这些问题。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^① 长的线条如何影响典型驱动器的信号完整性。

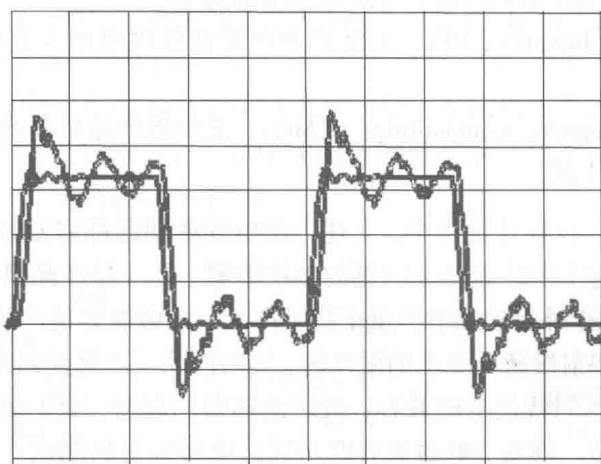


图 1.1 100 MHz 时钟产生后，从信号驱动器芯片输出的两种波形：没有外加引出连线(平滑曲线)的情况和输出端连接一段 2 in 长的 PCB 线条(振铃曲线)的情况。其中，纵轴每格表示 1 V，横轴每格表示 2 ns。使用 Mentor Graphics HyperLynx 仿真

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。

① 1 in(英寸) = 2.54 cm。——编者注