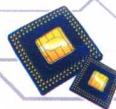


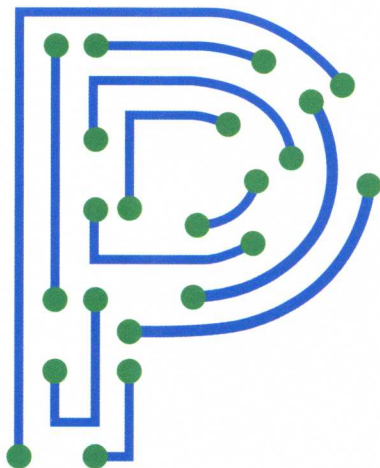


华章科技

Pearson



电子电气工程师技术丛书



# PRINCIPLES OF POWER INTEGRITY FOR PDN DESIGN

Robust and Cost Effective Design for High Speed Digital Products

# PDN设计之电源完整性

## 高速数字产品的鲁棒和高效设计

[美] 拉里·D. 史密斯 埃里克·博加廷 著 陈会 张玉兴 译  
(Larry D. Smith) (Eric Bogatin)



机械工业出版社  
China Machine Press



电子电气工程师技术丛书

# PDN设计之电源完整性

## 高速数字产品的鲁棒和高效设计

### PRINCIPLES OF POWER INTEGRITY FOR PDN DESIGN

Robust and Cost Effective Design for High Speed Digital Products

[美] 拉里·D. 史密斯 埃里克·博加廷 著 陈会 张玉兴 译  
(Larry D. Smith) (Eric Bogatin)



机械工业出版社  
China Machine Press

## 图书在版编目 (CIP) 数据

PDN 设计之电源完整性: 高速数字产品的鲁棒和高效设计 / (美) 拉里·D. 史密斯 (Larry D. Smith), (美) 埃里克·博加廷 (Eric Bogatin) 著; 陈会, 张玉兴译. —北京: 机械工业出版社, 2019.6

(电子电气工程师技术丛书)

书名原文: Principles of Power Integrity for PDN Design: Robust and Cost Effective Design for High Speed Digital Products

ISBN 978-7-111-63000-5

I. P… II. ①拉… ②埃… ③陈… ④张… III. 数字电路 - 电路设计 IV. TN79

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2019) 第 122785 号

本书版权登记号: 图字 01-2017-3416

Authorized translation from the English language edition, entitled Principles of Power Integrity for PDN Design: Robust and Cost Effective Design for High Speed Digital Products, ISBN: 978-0-13-273555-1 by Larry D. Smith; Eric Bogatin, published by Pearson Education, Inc, Copyright © 2017 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 China Machine Press, Copyright © 2019.

本书中文简体字版由 Pearson Education (培生教育出版集团) 授权机械工业出版社在中华人民共和国境内 (不包括香港、澳门特别行政区及台湾地区) 独家出版发行。未经出版者书面许可, 不得以任何方式抄袭、复制或节录本书中的任何部分。

本书封底贴有 Pearson Education (培生教育出版集团) 激光防伪标签, 无标签者不得销售。

## PDN 设计之电源完整性

### 高速数字产品的鲁棒和高效设计

出版发行: 机械工业出版社 (北京市西城区百万庄大街 22 号 邮政编码: 100037)

责任编辑: 张梦玲

责任校对: 殷虹

印刷: 北京市荣盛彩色印刷有限公司

版次: 2019 年 7 月第 1 版第 1 次印刷

开本: 186mm × 240mm 1/16

印张: 28.25

书号: ISBN 978-7-111-63000-5

定价: 199.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

客服热线: (010) 88379426 88361066

投稿热线: (010) 88379604

购书热线: (010) 68326294

读者信箱: hzit@hzbook.com

版权所有·侵权必究

封底无防伪标均为盗版

本书法律顾问: 北京大成律师事务所 韩光 / 邹晓东

众所周知，电子系统涉及半导体材料与相关的制作工艺、电子元器件、电路原理、电路仿真与分析工具、电路板设计与布线以及测试仪器等方方面面的内容。在众多的电子“冲击波”中，电源及其相关行业是一个非常重要的方面。可以毫不夸张地说，离开了电源就不可能有真正的电子电路，更别说复杂的电子系统。因此，在电子信息领域，人们对电源及其电路的研究由来已久，并且形成了严格的理论与实践体系。

随着电子技术和工艺的不断发展与进步，电源理论与技术也需要与时俱进，特别是随着工作频率的不断提高，电源的完整性跟信号的完整性问题一样突出，并吸引了众多的科研人员投入精力来研究电源电路设计中的问题，并产生了很多科研成果，本书正是该背景下的产物。原作者 Larry D. Smith 和 Eric Bogatin 撰写的电源完整性巨著《Principles of Power Integrity for PDN Design—Simplified》于 2017 年由培生教育出版集团出版发行，并由机械工业出版社引进且委托我们将其翻译为中文。在深感荣幸的同时，又倍感压力巨大，因为本书内容涉及电源的方方面面。此外，译者还担负繁重的科研和教学任务，因此，时间上也非常紧迫。不过，为了让中文版早日与国内读者见面，我们克服了重重困难完成了本书的翻译工作。基于上述原因，本书的翻译难免会存在一些瑕疵甚至错误，希望读者及时指出以便再版时进行修订，不胜感激。

本书内容丰富，主要涉及到如下方面：第 1 章简单分析了什么是 PDN 和为什么工程上的低阻抗非常重要。第 2 章对阻抗进行了完整的讨论，它是评估鲁棒性 PDN 的基础。第 3 章介绍了低阻抗测量技术。第 4 章揭示了电感的本质，即它是如何受物理设计的影响，并从物理设计的角度对回路电感进行了评估。第 5 章回顾了电容器的特性及其个体和组合体的性能。第 6 章介绍了 PDN 内连接中电源和地平面关键重要的特性，以及电容器与平面是如何相互作用的。第 7 章探索了 PDN 相互连接的作用，即为信号回路电流提供低阻抗。第 8 章讨论了 PDN 最重要的特性，即由片上电容产生的峰值阻抗和封装引线电感。为了减小这些寄生参数，本章也介绍了在 PCB 上可以采取哪些有效措施。第 9 章描述了由 CMOS

电路产生的电流的特性，这个电流谱如何与 PDN 阻抗曲线相互作用。第 10 章汇集了所有的原理和过程，说明如何设计 PDN 中某个特征来满足性能目标。

本书由电子科技大学陈会副教授翻译第 3~6 章，并负责全书的统稿与校对，其余部分由电子科技大学张玉兴教授负责翻译。在本书的翻译过程中，还得到了教研室部分学生的支持和帮助，在此一并致谢。

译者

2019 年 5 月

电子科技大学

## 本书焦点

电子工业中的电源完整性问题是一个容易混淆的课题——部分原因是不能很好地定义和涉及的问题太广泛，每个问题都有一套属于自己的根本原因和解决方案。这里有一个普遍的共识是：电源完整性领域包括从电压调整模块 (VRM) 到片上核心电源“轨”以及片上电容。

VRM 与芯片之间是封装和印制板上的相互连接，封装和印制板常常载有分立式电容器，这些电容器有与之有关的安装电感。电源分配网络 (PDN) 是指在 VRM 和片上  $V_{dd}-V_{ss}$  电源“轨”之间的所有相互连接 (通常是感性的)，以及储能元件 (通常是容性的) 和损耗机构 (阻尼)。

电源完整性是指从芯片看向电路的所有有关的电源特性。信号通过空腔，在印制板和地平面上会产生什么噪声？这是信号完整性问题还是电源完整性问题？由 I/O 开关电源产生的电压噪声是片上  $V_{cc}$  和  $V_{ss}$  电源“轨”完整性问题还是信号完整性问题？最终连接到 VRM 并通过公共封装电感进入的电流产生的这个噪声有时称为开关噪声或“地跳动”。

信号和电源完整性之间的灰色区域对解决电源完整性具有深远的影响。在印制板上加上去耦电容常常能解决  $V_{dd}$  核心噪声，但是这很少能改善由宽带信号感应的空腔噪声。一般情况下，印制板上的电容器很少或不能改善回路平面的跳动噪声。在一些情况下，产生的并联谐振实际上可能会增加空腔与信号的交调。

解决问题的第一步是清晰地确定问题，然后正确地识别出根本原因。一个准确定义的问题常常只要几步就可求解。对问题高效率求解的前提是基于问题的实际根本原因。

本书聚焦于与  $V_{dd}$  “轨”上噪声有关的特殊的电源完整性问题， $V_{dd}$  “轨”给片上核心逻辑供电，使其执行相关功能。由片上  $V_{dd}$  “轨”开关信号供电的门与片上其他门进行通信，

不需要像 I/O 一样传输出芯片。由核心有源部分引起的瞬时电流会在  $V_{dd}$  “轨”上产生噪声，有时定义它为“自我攻击”。减小这个问题影响的原理、分析方法和推荐的设计也能应用于其他信号完整性、电源完整性和 EMI 的问题，但本书的焦点是  $V_{dd}$  “轨”上的自我攻击。

## 其他电源完整性或信号完整性问题及其解决方法

术语“电源完整性”太复杂，无法解决一般设计中的所有问题。相反，我们需要清楚地识别设法要解决的特殊问题以及对每个特殊问题的最好设计实践。

完整系统设计中的一些次要问题有时也归类为电源完整性问题。

- 由 I/O 开关、地弹跳在  $V_{cc} - V_{ss}$  轨上引起的噪声和开关噪声： $V_{cc}$  轨上的自我攻击。
- 负载阻抗的改变在 VRM 上引起的噪声：VRM 的自我攻击。
- 信号通过不连续的返回路径引起的信号失真：信号路径的自我攻击。
- 来自供电轨和传输到 VRM 的噪声，以及板级 PDN 互连上的污染。
- 在封装上的电压噪声和来自所有源的板级 PDN 互连之间的交调，耦合到  $V_{dd}$  轨上。
- 在封装上的电压噪声和来自所有源的板级 PDN 互连之间的交调，耦合到 I/O 电源轨上。
- 在封装上的电压噪声和板级 PDN 互连之间的交调，以及耦合到 PDN 的一个信号。

这些问题中的每一个都有不同的根源，为减小其影响有最好的不同系列的设计实践。这些课题有些属于信号完整性，有些属于电源完整性。

为了避免大家认为所有电源完整性问题是相同的（一组解应用于所有问题），工程师和设计者应该习惯仔细地描述寻找到的问题而不是使用电源完整性或信号完整性这种大标题来说明。

印刷品、参考文献可提供大量的 PDN 设计建议。盲目地跟随其中的任何一个都是危险的。不幸的是，很多建议要么是错误的，要么是自相矛盾的。部分原因是它们仅面向上述问题之一，而且不正确地将这些建议广泛用于解决所有的电源完整性问题。

明确问题的特殊性、根本原因，才能找出最好的设计实践。

## 鲁棒性 PDN 设计面对的挑战

低劣的 PDN 设计会导致产品失败。诊断 PDN 失败的原因是很困难的，因为它们很难重现。有时，失败原因是由一系特殊问题的微码组合引起的，这造成考核 PDN 质量困难。PDN 设计中必须考虑鲁棒性。

除了低阻抗 VRM 以外，有些印制板的 PDN 实际上只要求鲁棒性。其他 PDN 可能要求电容数值的特殊组合并且要安装在特殊的位置，然后仅对鲁棒性提出一定限制。

每个 PDN 都是唯一的，有自己的内情。每一个都有自己的功能要求、芯片特征、微码和价格上的设计约束、性能、风险和研发周期。仅遵循其他人认为最好的设计原理来有效地设计鲁棒性 PDN 是很困难的，一个坚实的设计方法起着重要的作用。

在任何工程领域中，对包括电源完整性在内的很多问题的共同回答是“……视情况而定”，回答“……视情况而定”的仅有方法是清楚地定义这个问题，然后对这个特殊问题进行分析，找出根源和不同的解法。

开始就准确高概率地进入 PDN 的最有效的设计过程(和多数高性能产品设计方法)是基于 4 个元素的。

- 从建立最好的设计实践开始
- 理解信号与相互连接彼此作用的基本原理——麦克斯韦方程的基本应用原理
- 识别需避免的共同问题和它们的根源
- 对于每个特殊的产品详情和限制，使用有效探索设计领域的举足轻重的设计工具，找到适宜的价格—性能—风险—研发周期之间的折中。

很多课题的目标是在可接受的价格、风险和周期内，找到满足性能目标的可接受设计。

本书为实现电源完整性工程提供坚实的理论基础，识别在 PDN 设计中所遇共同问题的根源，遵循这个最好的设计实践并且执行工程折中分析来平衡价格、性能、周期和风险。

## 本书的对象

本书减少了数学上的形式主义，揭示了电源完整性背后重要的工程原理。如果需要详细的数学推导和复杂的数值仿真，那么请参考其他的书。

这并不是说数学上的严密不重要——每个电子工程专业的学生应该都知道。作为实际工程，能应用这些原理来解决问题比从麦克斯韦方程中推导出每一个详情更加重要。

本书是以为高性能系统特殊设计的一套方法作为基础，以建立最好的设计原理为起点。每一个设计都是特定的，都有自己的故事、系统性能目标和价格、风险和周期限制。这意味着你不能盲目地跟随每一个设计指南，而必须有自己的判断。

这并不意味着要夺取你的 3D 全波仿真器和对每一件事情的仿真。这种做法将是一种难以置信且无效的过程，不能保证会成功地转换为一种可接受的答案。

工程判断的基础是理解基本原理——这是麦克斯韦方程的实际应用——确定需避免的问题和根源，确认分析工具来有效地探索设计区域并找到可接受的答案。对于应用一套方法来设计鲁棒性 PDN 系统来说，本书是指导方针。

两位作者在信号和电源完整性领域有着 70 年以上的工程经验，在本书中提取出以电源完整性作为基础的最重要的工程原理。



有足够的数学知识可使一个实践工程师会快速得到一个学习曲线以实现折中分析，并且识别什么是重要的——等价值——什么是不重要的。

使用简略的方程式澄清哪一项是重要的，以及如何组合它们来影响结果。它们用于更详细地重申原理。当这些方程式加上数字时，它们属于“第一攻击线”。

在可能的地方，我们将举一些简单的例子以说明分析的近似性。在合适的地方，会介绍测试工具的测量和真实系统，以例证这些原理的真实工作以及它们能很好地应用于工程判断。

如果 PDN 设计是你的未来，那么你会发现，本书是你成功的必读书籍。

## 本书易于浏览的 5 个特点

为了使工程师更加有效地使用本书，我们提炼出 5 个特点。

我们已经尽了最大的努力来处理这种真实问题的复杂性，使其成为最简单的形式，以识别它们的基本原理和如何应用它们。近似作为原理量化的方法已应用到具体的问题中。由于它们是帮助我们校准工程判断的第一步，所以我们能确定仿真结果的意义。

在可能的地方，分析结果用数字图表的形式来表示。具有延伸说明的图表会告诉你文字和方程并行的故事。

每一个章节都提炼出我们认为最为重要的结论或者旁观者的观察，并将其作为提示展示给大家。这些使读者可以轻松浏览本书或者回忆知识亮点。

在每一章的末尾，我们都附加了总结部分，作为这一章中最重要的概括。阅读这一章后，它们应该是很明显的和可预期的。

最后，后面章节广泛使用的 PDN 谐振计算器电子数字表格可在网站上找到，网址为 [informit.com/title/9780132735551](http://informit.com/title/9780132735551) 和 [www.beTheSignal.com](http://www.beTheSignal.com)。电源完整性方面的补充信息也可在这两个网站中找到。

## 本书大纲

本书是为电源完整性工程师编写的训练手册，用于成功进行 PDN 设计，学习对策、基本原理和技巧。

第 1 章概述 PDN 的定义和为什么工程上低阻抗是如此重要。我们引入阻抗这个概念作为重要的设计特征和 PDN 性能的指示器，也引入了最为重要的优值来描绘 PDN 的设计目标——目标阻抗。我们的目标是在可接受的价格、风险并满足性能和周期目标的情况下，使设计的 PDN 阻抗曲线低于目标阻抗。

第 2 章对阻抗进行了详细的回顾，它是评估鲁棒性 PDN 的基础，尤其对串联和并联

RLC 电路的特性进行了回顾。这些电路决定了 PDN 阻抗曲线的基本特性。元件集合的阻抗曲线仿真作为基本技巧引入。任何版本中免费的 SPICE 仿真器都可作为阻抗分析器。

第 3 章介绍低阻抗测量技术。典型的 PDN 目标阻抗范围是  $1\Omega$  到低于  $1\text{m}\Omega$ 。测量元件和整个 PDN 领域中非常低的阻抗时要用特殊技术。

第 4 章揭示电感的本质，它是什么、它是如何受物理设计影响的，以及从物理设计特征中如何评估回路电感。PDN 的相互连接采用工程上低回路电感，这是减小峰值阻抗的重要方法。当电感不能继续减小时，重要的是要知道它的大小，这样就可以评价它的影响了。

第 5 章回顾电容器的特性、个体以及组合在一起的行为。它们是使阻抗轮廓成型和管理峰值的主要元件。介绍了由电容器组成的 5 个用于降低峰值阻抗的一般策略。特别介绍了低安装电感的关键工程步骤。

第 6 章介绍 PDN 内连接中电源和地平面关键且重要的特性，以及电容器与平面是如何相互作用的。平面最为重要的特性——扩散电感——被详细地探索。另外我们指出从芯片电路的电源质量角度来看，平面腔体谐振根本不重要。

第 7 章探索 PDN 内连接另外的作用：为信号回路电流提供低阻抗。当信号通过它们时，开关噪声、地弹跳都是在地平面上产生噪声的问题。这属于信号完整性领域，它有别于电源完整性问题。因为开关噪声的根源与核心  $V_{\text{dd}}$  轨的 PDN 噪声不同，所以解决方法也不同。我们要仔细区分重要的信号完整性和电源完整性。

第 8 章探索 PDN 最重要的特性：由片上电容和封装引线电感产生的峰值阻抗，为减小这个峰值，在印制板上可以做些什么。我们会指出，为克服由于这个峰值产生的限制，如何平衡所有的设计原理。

第 9 章描述由 CMOS 电路产生的电流特性，以及这个电流谱如何与 PDN 阻抗曲线相互作用。介绍 3 个重要的瞬时电流波形：时钟边缘脉冲、阶跃瞬时电流和重复性方波电流。这些波形与不同的 PDN 特性相互作用。我们指出，最为重要的是 3 个元素——阻抗曲线、瞬时电流和激励电压——如何共同相互作用。已知任意两个元素，能够评估第三个。

第 10 章汇集所有的原理和过程，说明如何设计 PDN 中某个特征来满足性能目标。特别地，引入基本分析技术的简单的电子表格程序，它梦幻般地加速了基本满足设计要求的产生过程。我们会浏览一些设计场景并且给出本书引入的电源原理的设计例子。从测量数据中可看到，发展出来的 PDN 参数与测量得到的性能匹配得很好。

关于本书教辅资源，只有使用本书作为教材的教师才可以申请，需要的教师请联系机械工业出版社华章公司，电话：010-88378991，邮箱：wangguang@hzbook.com。

## 致 谢 | Acknowledgements |

作者衷心地感谢评阅者辛苦的工作和花费的时间，他们对初稿提出了重要且中肯的意见，他们的帮助使这本书对读者更有价值。我们对 Todd Hubing、Chris Padilla、Jay Diepenbrock 和 Istvan Novak 表示衷心的感谢。

|                                 |    |
|---------------------------------|----|
| 译者序                             |    |
| 前 言                             |    |
| 致 谢                             |    |
| <b>第 1 章 电源分配网络工程</b> .....     | 1  |
| 1.1 电源分配网络的定义及关心它的原因 .....      | 1  |
| 1.2 PDN 工程 .....                | 4  |
| 1.3 PDN 的鲁棒性设计 .....            | 5  |
| 1.4 建立 PDN 阻抗曲线 .....           | 8  |
| 1.5 总结 .....                    | 9  |
| 参考文献 .....                      | 9  |
| <b>第 2 章 PDN 阻抗设计基本原理</b> ..... | 10 |
| 2.1 关心阻抗的原因 .....               | 10 |
| 2.2 频域中的阻抗 .....                | 10 |
| 2.3 阻抗的计算或仿真 .....              | 12 |
| 2.4 实际电路元件与理想电路元件 .....         | 15 |
| 2.5 串联 RLC 电路 .....             | 17 |
| 2.6 并联 RLC 电路 .....             | 18 |
| 2.7 串联和并联 RLC 电路的谐振特性 .....     | 19 |
| 2.8 RLC 电路和真实电容器的例子 .....       | 22 |
| 2.9 从芯片或电路板的角度观察 PDN .....      | 24 |
| 2.10 瞬态响应 .....                 | 27 |
| 2.11 高级主题：阻抗矩阵 .....            | 30 |
| 2.12 总结 .....                   | 35 |
| 参考文献 .....                      | 35 |
| <b>第 3 章 低阻抗测量</b> .....        | 36 |
| 3.1 关注低阻抗测量的原因 .....            | 36 |
| 3.2 基于 $V/I$ 阻抗定义的测量 .....      | 36 |
| 3.3 基于信号反射的阻抗测量 .....           | 37 |
| 3.4 用 VNA 测量阻抗 .....            | 40 |
| 3.5 示例：测量 DIP 中两条引线的阻抗 .....    | 42 |
| 3.6 示例：测量小导线回路的阻抗 .....         | 44 |
| 3.7 低频下 VNA 阻抗测量的局限性 .....      | 47 |
| 3.8 四点开尔文电阻测量技术 .....           | 49 |

|                         |                         |     |                                  |                                    |     |
|-------------------------|-------------------------|-----|----------------------------------|------------------------------------|-----|
| 3.9                     | 双端口低阻抗测量技术              | 51  | 4.16                             | 高级主题: 利用 3D 场求解器<br>计算 S 参数并选取回路电感 | 107 |
| 3.10                    | 示例: 测量直径为 1in 的铜环<br>阻抗 | 54  | 4.17                             | 总结                                 | 111 |
| 3.11                    | 夹具伪像说明                  | 57  | 参考文献                             | 112                                |     |
| 3.12                    | 示例: 测量通孔的电感             | 59  | <b>第 5 章 实用多层陶瓷片状<br/>电容器的集成</b> | 113                                |     |
| 3.13                    | 示例: 印制板上的小型 MLCC<br>电容器 | 62  | 5.1                              | 使用电容器的原因                           | 113 |
| 3.14                    | 高级主题: 测量片上电容            | 66  | 5.2                              | 实际电容器的等效电路模型                       | 114 |
| 3.15                    | 总结                      | 74  | 5.3                              | 并联多个相同的电容器                         | 115 |
|                         | 参考文献                    | 75  | 5.4                              | 两个不同电容器间的并联谐<br>振频率                | 116 |
| <b>第 4 章 电感和 PDN 设计</b> |                         | 76  | 5.5                              | PRF 处的峰值阻抗                         | 118 |
| 4.1                     | 留意 PDN 设计中电感的原因         | 76  | 5.6                              | 设计一个贴片电容                           | 121 |
| 4.2                     | 简单回顾电容, 初步了解<br>电感      | 76  | 5.7                              | 电容器温度与电压稳定性                        | 122 |
| 4.3                     | 电感的定义、磁场和电感的<br>基本原则    | 78  | 5.8                              | 多大的电容是足够的                          | 124 |
| 4.4                     | 电感的阻抗                   | 82  | 5.9                              | 一阶和二阶模型中实际<br>电容器的 ESR             | 125 |
| 4.5                     | 电感的准静态近似                | 84  | 5.10                             | 从规格表中估算电容器的<br>ESR                 | 128 |
| 4.6                     | 磁场密度                    | 86  | 5.11                             | 受控 ESR 电容器                         | 130 |
| 4.7                     | 磁场中的电感和能量               | 88  | 5.12                             | 电容器的安装电感                           | 131 |
| 4.8                     | 麦克斯韦方程和回路电感             | 90  | 5.13                             | 使用供应商提供 S 参数的<br>电容器型号             | 137 |
| 4.9                     | 内部及外部电感和趋肤深度            | 92  | 5.14                             | 如何分析供应商提供的 S<br>参数模型               | 139 |
| 4.10                    | 回路电感、部分电感、自电感和<br>互电感   | 95  | 5.15                             | 高级主题: 更高带宽的电容<br>模型                | 141 |
| 4.11                    | 均匀圆形导体                  | 96  | 5.16                             | 总结                                 | 149 |
| 4.12                    | 圆形回路中电感的近似              | 98  | 参考文献                             | 150                                |     |
| 4.13                    | 紧密结合的宽导体的回路<br>电感       | 100 | <b>第 6 章 平面和电容器的特性</b>           | 151                                |     |
| 4.14                    | 均匀传输线回路电感的<br>近似        | 103 | 6.1                              | 平面的关键作用                            | 151 |
| 4.15                    | 回路电感的简单经验法则             | 106 |                                  |                                    |     |

|  |            |                                  |            |
|--|------------|----------------------------------|------------|
| 6.2 平面的低频特性: 平行板电容 .....               | 152        | 7.2 涉及峰值阻抗问题的原因 .....            | 199        |
| 6.3 平面的低频特性: 边缘场电容 .....               | 153        | 7.3 通过较低阻抗和较高阻尼来降低腔体噪声 .....     | 202        |
| 6.4 平面的低频特性: 功率坑中的边缘场电容 .....          | 156        | 7.4 使用短路通孔遏制腔体谐振 .....           | 204        |
| 6.5 长窄腔回路电感 .....                      | 159        | 7.5 使用多个隔直电容抑制腔体谐振 .....         | 211        |
| 6.6 宽腔中的扩散电感 .....                     | 160        | 7.6 为抑制腔体谐振, 估计隔直电容器的数量 .....    | 213        |
| 6.7 从 3D 场求解器中获得扩散电感 .....             | 166        | 7.7 为承受回路电流, 需要确定隔直电容器的数量 .....  | 217        |
| 6.8 集总电路中串联和并联的自谐振频率 .....             | 168        | 7.8 使用未达最佳数量的隔直电容器的腔体阻抗 .....    | 220        |
| 6.9 探讨串联 LC 谐振的特性 .....                | 171        | 7.9 扩散电感和电容器的安装电感 .....          | 222        |
| 6.10 扩散电感和源的接触位置 .....                 | 172        | 7.10 使用阻尼来遏制由一些电容器产生的并联谐振峰 ..... | 223        |
| 6.11 两个接触点之间的扩散电感 .....                | 174        | 7.11 腔体损耗和阻抗峰的降低 .....           | 225        |
| 6.12 电容器和腔的相互作用 .....                  | 178        | 7.12 使用多个容量的电容器来遏制阻抗峰 .....      | 227        |
| 6.13 扩散电感的作用: 电容位置在何时重要 .....          | 179        | 7.13 使用受控 ESR 电容器来减小峰值阻抗高度 ..... | 228        |
| 6.14 饱和扩散电感 .....                      | 182        | 7.14 处理回路平面最为重要的设计原理的总结 .....    | 230        |
| 6.15 空腔模态共振和传输线特性 .....                | 183        | 7.15 高级主题: 使用传输线电路对平面建模 .....    | 231        |
| 6.16 传输线和模态共振的输入阻抗 .....               | 186        | 7.16 总结 .....                    | 233        |
| 6.17 模态共振和衰减 .....                     | 187        | 参考文献 .....                       | 234        |
| 6.18 空腔二维模型 .....                      | 190        |                                  |            |
| 6.19 高级主题: 使用传输阻抗探测扩散电感 .....          | 193        |                                  |            |
| 6.20 总结 .....                          | 198        |                                  |            |
| 参考文献 .....                             | 198        |                                  |            |
| <b>第 7 章 信号返回平面改变时, 信号完整性的探讨 .....</b> | <b>199</b> | <b>第 8 章 PDN 生态学 .....</b>       | <b>235</b> |
| 7.1 信号完整性和平面 .....                     | 199        | 8.1 元件集中在一起: PDN 生态学和频域 .....    | 235        |
|  |            | 8.2 高频端: 芯片去耦电容 .....            | 237        |
|  |            | 8.3 封装 PDN .....                 | 242        |

|      |                                      |     |
|------|--------------------------------------|-----|
| 8.4  | Bandini 山                            | 246 |
| 8.5  | 估计典型的 Bandini 山频率                    | 250 |
| 8.6  | Bandini 山的固有阻尼                       | 252 |
| 8.7  | 具有多个通孔对接触的电源-地平面                     | 254 |
| 8.8  | 从芯片通过封装看 PCB 腔体                      | 257 |
| 8.9  | 空腔的作用: 小印制板、大印制板和“电源旋涡”              | 259 |
| 8.10 | 低频端: VRM 和它的大容量电容器                   | 263 |
| 8.11 | 大容量电容器: 多大的电容值足够                     | 265 |
| 8.12 | 优化大容量电容器和 VRM                        | 267 |
| 8.13 | 建立 PDN 生态学系统: VRM、大容量电容器、腔体、封装和片上电容器 | 270 |
| 8.14 | 峰值阻抗的基本限制                            | 272 |
| 8.15 | 在具有一般特性的印制板上使用单数值的 MLCC 电容器          | 275 |
| 8.16 | 优化单个 MLCC 电容器的数值                     | 278 |
| 8.17 | 在印制板上使用 3 个不同数值的 MLCC 电容器            | 281 |
| 8.18 | 优化 3 个电容器的数值                         | 284 |
| 8.19 | 选择电容值和最小电容器数目的频域目标阻抗法                | 285 |
| 8.20 | 使用 FDTIM 选择电容器的值                     | 287 |
| 8.21 | 当片上电容是大的和封装引线电感小的时候                  | 289 |
| 8.22 | 使用受控 ESR 电容器是一种替换的去耦策略               | 293 |
| 8.23 | 封装上的去耦电容器                            | 295 |

|      |                      |     |
|------|----------------------|-----|
| 8.24 | 高级主题: 同一供电电路上多个芯片的影响 | 299 |
| 8.25 | 总结                   | 301 |
|      | 参考文献                 | 302 |

## 第 9 章 瞬时电流和 PDN 电压噪声

|      |                                     |     |
|------|-------------------------------------|-----|
| 9.1  | 瞬时电流如此重要的原因                         | 303 |
| 9.2  | 平坦阻抗曲线、瞬时电流和目标阻抗                    | 304 |
| 9.3  | 使用平坦阻抗曲线, 估计计算目标阻抗的瞬时电流             | 305 |
| 9.4  | 通过电路芯片的实际 PDN 电流曲线                  | 306 |
| 9.5  | 电容以 $V_{ss}$ 和 $V_{dd}$ 为参考时的时钟边缘电流 | 310 |
| 9.6  | 测量的例子: 嵌入式控制器处理器                    | 311 |
| 9.7  | PDN 噪声的真实原因——时钟边缘电流如何驱动 PDN 噪声      | 313 |
| 9.8  | 支配 PDN 阻抗峰的方程                       | 317 |
| 9.9  | 描述 PDN 特征的最为重要的电流波形                 | 320 |
| 9.10 | PDN 对脉冲动态电流的响应                      | 322 |
| 9.11 | PDN 对动态电流阶跃变化的响应                    | 324 |
| 9.12 | PDN 在谐振时对方波动态电流的响应                  | 326 |
| 9.13 | 目标阻抗及瞬态和 AC 稳态响应                    | 328 |

|                           |   |     |       |  |     |
|---------------------------|---|-----|-------|--|-----|
| 9.14                      | 电抗元件、 $q$ 因子和峰值<br>阻抗对 PDN 电压噪声的影响      | 332 | 10.8  | 具有 3 个环路的 PDN 谐振计算<br>器电子数据表                     | 381 |
| 9.15                      | 恶劣波                                     | 336 | 10.9  | 性能指标   | 384 |
| 9.16                      | 存在恶劣波时的鲁棒性设计<br>策略                      | 341 | 10.10 | 阻尼和 $q$ 因子的重要性                                   | 386 |
| 9.17                      | 来自开关电容器负载的时钟<br>边缘电流脉冲                  | 343 | 10.11 | 使用开关电容器模型来激励<br>PDN                              | 391 |
| 9.18                      | 由一系列时钟脉冲组成的瞬<br>时电流波形                   | 349 | 10.12 | 三峰 PDN 脉冲、阶跃和谐振<br>响应：瞬态仿真的相关性                   | 392 |
| 9.19                      | 高级主题：实际 CMOS 场合<br>应用时钟门控、时钟吞咽和<br>电源选通 | 354 | 10.13 | 时域和频域中独特的 $q$ 因子                                 | 397 |
| 9.20                      | 高级主题：电源选通                               | 357 | 10.14 | 上升时间和阻抗峰激励                                       | 402 |
| 9.21                      | 总结                                      | 360 | 10.15 | 三峰 PDN 的改善：减小<br>Bandini 山的回路电感和<br>MLCC 电容器容量选择 | 407 |
|                           | 参考文献                                    | 361 | 10.16 | 三峰 PDN 的改善：较好的<br>SMPS 模型                        | 410 |
| <b>第 10 章 PDN 设计的实用方法</b> |   | 362 | 10.17 | 三峰 PDN 的改善：封装上<br>的去耦电容器                         | 412 |
| 10.1                      | 重申 PDN 设计中的目标                           | 362 | 10.18 | 改进前和改进后的 PDN 的<br>瞬态响应                           | 416 |
| 10.2                      | 最重要的电源完整性原理<br>总结                       | 363 | 10.19 | 再次审视瞬时电流的假设                                      | 421 |
| 10.3                      | 为探索设计空间引入的电子<br>数据表格                    | 368 | 10.20 | 实际的限制：风险、性能<br>和价格折中                             | 422 |
| 10.4                      | 第 1~12 行：PND 输入电压、<br>电流和目标阻抗参数         | 371 | 10.21 | 测量中的 PDN 特征的逆向<br>工程                             | 424 |
| 10.5                      | 第 13~24 行：零阶浸入（时钟<br>边缘）噪声和片上参数         | 372 | 10.22 | 仿真与测量的相关性  | 428 |
| 10.6                      | 安装电感和电阻参数的抽取                            | 374 | 10.23 | PDN 阻抗测量和电压特征<br>的仿真总结                           | 433 |
| 10.7                      | 典型的电感印制板和<br>封装的几何分析                    | 379 | 10.24 | 总结   | 434 |
|                           |   |     |       | 参考文献   | 435 |



# 电源分配网络工程

## 1.1 电源分配网络的定义及关心它的原因

电源分配网络(PDN)包括从电压调整模块(VRM)到片上电路的所有电源间的相互连接。一般而言,它包括印制板上电源和地平面、电缆、连接器和所有与电源有关的电容器。图 1-1 是一个典型的计算机印制板的例子,它具有多个 VRM 和传递电源、地到所有有源器件焊盘的路径。

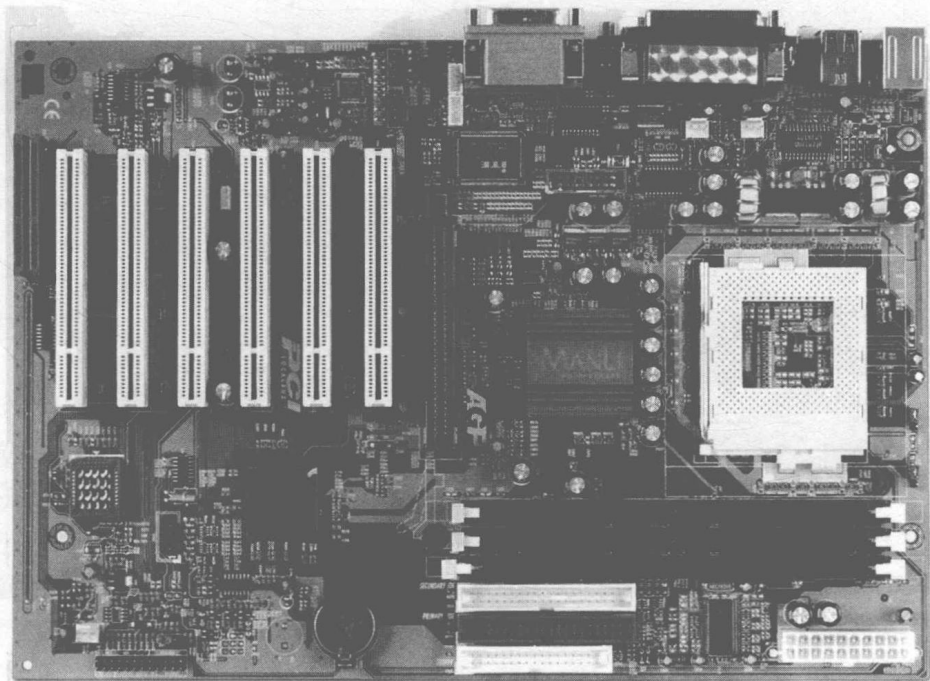


图 1-1 一个典型的具有多个 VRM 和有源器件的计算机主板。PDN 包括所有从 VRM 焊盘到片上电路的相互连接

PDN 的目的如下所示。

- 为实现所有功能的有源器件分配低噪声 DC 电压和电源。