

电子工程技术丛书

# 印制电路板(PCB) 设计技术与实践 (第3版)

● 黄智伟 编著



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>

电子工程技术丛书

# 印制电路板（PCB） 设计技术与实践

（第3版）

黄智伟 编著

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

## 内 容 简 介

本书共 15 章, 重点介绍了印制电路板 (PCB) 的焊盘、过孔、叠层、走线、接地、去耦合、电源电路、时钟电路、模拟电路、高速数字电路、模数混合电路、射频电路的 PCB 设计的基本知识、设计要求、方法和设计实例, 以及 PCB 的散热设计、PCB 的可制造性与可测试性设计、PCB 的 ESD 防护设计等。

本书内容丰富, 叙述详尽清晰, 图文并茂, 并通过大量的设计实例说明了 PCB 设计中的一些技巧与方法, 以及应该注意的问题, 工程性好, 实用性强。

本书可以作为工程技术人员进行电子产品 PCB 设计的参考书, 也可以作为本科院校和高职高专电子信息工程、通信工程、自动化、电气、计算机应用等专业学习 PCB 设计的教材, 还可以作为全国大学生电子设计竞赛的培训教材。

未经许可, 不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。  
版权所有, 侵权必究。

### 图书在版编目 (CIP) 数据

印制电路板 (PCB) 设计技术与实践 / 黄智伟编著. —3 版. —北京: 电子工业出版社, 2017.7  
(电子工程技术丛书)

ISBN 978-7-121-31558-9

I. ①印… II. ①黄… III. ①印制电路—电路设计 IV. ①TN41

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 108318 号

责任编辑: 刘海艳 (lhy@phei.com.cn)

印 刷: 北京京师印务有限公司

装 订: 北京京师印务有限公司

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: 42 字数: 1075.2 千字

版 次: 2009 年 8 月第 1 版

2017 年 7 月第 3 版

印 次: 2017 年 7 月第 1 次印刷

印 数: 2 000 册 定价: 128.00 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 zlts@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: lhy@phei.com.cn。

本书是《印制电路板（PCB）设计技术与实践》的第3版。本书第1版从2009年出版以来已经多重印，是学习PCB设计技术的首选书籍之一。随着PCB设计技术的发展和研究的深入，一些新的PCB设计技术和要求不断出现，为满足读者需要，又对本书的第2版进行了修订，补充和增加了EBG等一些新的PCB设计技术，以及高速数字接口、模数混合电路的PCB设计和设计实例等内容。

PCB设计是电子产品的设计中不可缺少的重要环节。随着电子技术的飞速发展，集成电路的规模越来越大，体积越来越小，开关速度越来越快，工作频率越来越高，PCB的安装密度也越来越高，层数也越来越多，PCB上的电磁兼容性、信号完整性及电源完整性等问题相互紧密地交织在一起。对正在从事PCB设计的工程师而言，在进行PCB设计时，需要考虑的问题也越来越多，要实现一个能够满足设计要求的PCB也变得越来越难。要设计一个能够满足要求的PCB，不仅需要理论的支持，更需要的是工程实践经验。

本书是为从事电子产品设计的工程技术人员编写的一本介绍PCB设计的基本知识、设计方法与方法的参考书。本书没有大量的理论介绍和公式推导，而是从工程设计要求出发，通过介绍大量的PCB设计实例，图文并茂地说明PCB设计中的一些技巧与方法，以及应该注意的问题，具有很好的工程性和实用性。

本书共15章。第1章为焊盘的设计，介绍了元器件在PCB上的安装形式，焊盘、Make设计的一些基本要求，以及通孔插装元器件、SMD元器件、DIP封装的器件、BGA封装的器件、UCSP封装的器件、Direct FET封装的器件等焊盘设计实例。第2章介绍了过孔模型，过孔焊盘与孔径的尺寸，过孔与焊盘图形的关系，微过孔、背钻的设计要求与实例。第3章介绍了PCB的叠层设计的一般原则，多层板工艺，多层板设计实例，以及利用PCB分层堆叠抑制EMI辐射的设计方法，PCB电源/地平面设计，利用EBG降低PCB电源/地平面的EMI。第4章介绍了寄生天线的电磁辐射干扰，PCB上走线间的串扰，PCB传输线的拓扑结构，低电压差分信号（LVDS）的布线，以及PCB布线的一般原则及工艺要求。第5章介绍了地线的定义，地线阻抗引起的干扰，地环路引起的干扰，接地的分类，接地的方式，接地系统的设计原则，以及地线PCB布局的一些技巧。第6章介绍了去耦滤波器电路的结构与特性，RLC元件的射频特性，去耦电容器的PCB布局设计，PDN中的去耦电容，去耦电容器的容量计算，片状三端子电容器的PCB布局设计，X2Y<sup>®</sup>电容器的PCB布局设计，铁氧体磁珠的PCB布局设计实例，小型电源平面“岛”供电技术，掩埋式电容技术的PCB布局实例，以及可藏于PCB基板内的电容器。第7章为电源电路设计实例，介绍了开关型调节器PCB布局的基本原则，DC-DC转换器的PCB布局设计指南，便携式设备电源管理电路的PCB布局设计实例，DPA-Switch DC-DC转换器的PCB设计实例，开关电源的PCB设计实例。第8章介绍了时钟电路PCB设计的基础，时钟电路布线、时钟分配网



络、延时的调整、时钟源的电源滤波等时钟电路 PCB 的设计技巧。第 9 章介绍了模拟电路 PCB 设计的基础，不同封装形式的运算放大器、蜂窝电话音频放大器、D 类功率放大器等模拟电路的 PCB 设计实例，消除热电压影响的放大器 PCB 设计。第 10 章介绍了高速数字电路 PCB 设计的基础，Altera 的 MAX<sup>®</sup> II 系列 CPLD PCB 设计实例，LatticeXP LFXP3TQ-100 最小系统 PCB 设计实例，微控制器电路 PCB 设计实例，以及高速接口信号的 PCB 设计。第 11 章介绍了模数混合电路的 PCB 分区，模数混合电路的接地设计，ADC 驱动器电路的 PCB 设计，ADC 的 PCB 设计，DAC 的 PCB 设计，模数混合电路 PICtail<sup>™</sup> 演示板的 PCB 设计，12 位称重系统的 PCB 设计，传感器模拟前端 (AFE) 的 PCB 设计，以及模数混合系统的电源电路 PCB 设计。第 12 章介绍了射频电路 PCB 设计的基础，射频接地、隔离、走线等射频电路 PCB 的设计技巧，射频小信号放大器 PCB 的设计要求与实例，射频功率放大器 PCB 的设计要求与实例，混频器 PCB 的设计要求与实例，以及 PCB 天线设计实例，加载 EBG 结构的微带天线设计，以及射频系统的电源电路 PCB 设计。第 13 章介绍了 PCB 散热设计的基础，PCB 散热设计的基本原则，以及 PCB 散热设计实例，器件的热特性与 PCB 散热设计，以及裸露焊盘的 PCB 散热设计。第 14 章介绍了 PCB 可制造性设计的基本概念、设计管理、设计控制、设计检查和评审检查清单实例，以及 PCB 可测试性设计的基本概念、可测试性检查、可测试性设计的基本要求。第 15 章介绍了 PCB 的 ESD 防护设计基础，常见的 ESD 问题与改进措施，PCB 的 ESD 防护设计方法。

需要说明的是，由于本书重点介绍 PCB 设计技术，业内大量数据需要采用英制长度单位，所以这里先给出主要的转换公式： $1\text{in}(\text{英寸})=25.4\text{mm}(\text{毫米})$ ， $1\text{mil}(\text{千分之一英寸})=0.0254\text{mm}$ 。本书的部分数据有时直接用英制单位标注。

本书在编写过程中，参考了大量的国内外著作和资料，得到了许多专家和学者的大力支持，听取了多方面的意见和建议。潘礼工程师对本书的内容及组织提出了宝贵的建议，戴焕昌绘制了书中的大部分插图，南华大学的王彦教授、朱卫华副教授、陈文光教授、李圣副教授，张翼、李军、张强、税梦玲、欧科军、李扬宗、肖志刚等人也参加了本书的编写，在此一并表示衷心的感谢。

由于水平有限，不足之处在所难免，敬请各位读者批评指正。

黄智伟 于南华大学  
2017年5月

|  |    |
|--|----|
| 第 1 章 焊盘的设计                                  | 1  |
| 1.1 元器件在 PCB 上的安装形式                          | 1  |
| 1.1.1 元器件的单面安装形式                             | 1  |
| 1.1.2 元器件的双面安装形式                             | 1  |
| 1.1.3 元器件之间的间距                               | 2  |
| 1.1.4 元器件的布局形式                               | 4  |
| 1.1.5 测试探针触点/通孔尺寸                            | 8  |
| 1.1.6 Mark (基准点)                             | 8  |
| 1.2 焊盘设计的一些基本要求                              | 11 |
| 1.2.1 焊盘类型                                   | 11 |
| 1.2.2 焊盘尺寸                                   | 12 |
| 1.3 通孔插装元器件的焊盘设计                             | 12 |
| 1.3.1 插装元器件的孔径                               | 12 |
| 1.3.2 焊盘形式与尺寸                                | 13 |
| 1.3.3 跨距                                     | 13 |
| 1.3.4 常用插装元器件的安装孔径和焊盘尺寸                      | 14 |
| 1.4 SMD 元器件的焊盘设计                             | 15 |
| 1.4.1 片式电阻、片式电容、片式电感的焊盘设计                    | 15 |
| 1.4.2 金属电极的元件焊盘设计                            | 18 |
| 1.4.3 SOT 23 封装的器件焊盘设计                       | 19 |
| 1.4.4 SOT-5 DCK/SOT-5 DBV (5/6 引脚) 封装的器件焊盘设计 | 19 |
| 1.4.5 SOT89 封装的器件焊盘设计                        | 20 |
| 1.4.6 SOD 123 封装的器件焊盘设计                      | 21 |
| 1.4.7 SOT 143 封装的器件焊盘设计                      | 21 |
| 1.4.8 SOIC 封装的器件焊盘设计                         | 21 |
| 1.4.9 SSOIC 封装的器件焊盘设计                        | 22 |
| 1.4.10 SOPIC 封装的器件焊盘设计                       | 22 |
| 1.4.11 TSOP 封装的器件焊盘设计                        | 23 |
| 1.4.12 CFP 封装的器件焊盘设计                         | 24 |
| 1.4.13 SOJ 封装的器件焊盘设计                         | 24 |
| 1.4.14 PQFP 封装的器件焊盘设计                        | 25 |
| 1.4.15 SQFP 封装的器件焊盘设计                        | 25 |

|                 |  |           |
|-----------------|--|-----------|
| 1.4.16          | CQFP 封装的器件焊盘设计                             | 26        |
| 1.4.17          | PLCC (方形) 封装的器件焊盘设计                        | 27        |
| 1.4.18          | QSOP (SBQ) 封装的器件焊盘设计                       | 27        |
| 1.4.19          | QFG32/48 封装的器件焊盘设计                         | 27        |
| 1.5             | DIP 封装的器件焊盘设计                              | 28        |
| 1.6             | BGA 封装的器件焊盘设计                              | 29        |
| 1.6.1           | BGA 封装简介                                   | 29        |
| 1.6.2           | BGA 表面焊盘的布局和尺寸                             | 30        |
| 1.6.3           | BGA 过孔焊盘的布局和尺寸                             | 33        |
| 1.6.4           | BGA 信号线间隙和走线宽度                             | 34        |
| 1.6.5           | BGA 的 PCB 层数                               | 35        |
| 1.6.6           | $\mu$ BGA 封装的布线方式和过孔                       | 36        |
| 1.6.7           | Xilinx 公司推荐的 BGA、CSP 和 CCGA 封装的 PCB 焊盘设计规则 | 36        |
| 1.6.8           | VFBGA 焊盘设计                                 | 39        |
| 1.6.9           | LFBGA 焊盘设计                                 | 40        |
| 1.7             | UCSP 封装的器件焊盘设计                             | 41        |
| 1.7.1           | UCSP 封装结构                                  | 42        |
| 1.7.2           | UCSP 焊盘结构的设计原则和 PCB 制造规范                   | 42        |
| 1.7.3           | UCSP 和 WCSP 焊盘设计实例                         | 44        |
| 1.8             | DirectFET 封装的器件焊盘设计                        | 46        |
| 1.8.1           | DirectFET 封装技术简介                           | 46        |
| 1.8.2           | Sx 系列外形器件的焊盘设计                             | 47        |
| 1.8.3           | Mx 系列外形器件的焊盘设计                             | 48        |
| 1.8.4           | Lx 系列外形器件的焊盘设计                             | 48        |
| <b>第 2 章 过孔</b> |  | <b>50</b> |
| 2.1             | 过孔模型                                       | 50        |
| 2.1.1           | 过孔类型                                       | 50        |
| 2.1.2           | 过孔电容                                       | 50        |
| 2.1.3           | 过孔电感                                       | 51        |
| 2.1.4           | 过孔的电流模型                                    | 51        |
| 2.1.5           | 典型过孔的 $R$ 、 $L$ 、 $C$ 参数                   | 52        |
| 2.2             | 过孔焊盘与孔径的尺寸                                 | 52        |
| 2.2.1           | 过孔的尺寸                                      | 52        |
| 2.2.2           | 高密度互连盲孔的结构与尺寸                              | 54        |
| 2.2.3           | 高密度互连复合通孔的结构与尺寸                            | 56        |
| 2.2.4           | 高密度互连内核埋孔的结构与尺寸                            | 57        |
| 2.3             | 过孔与焊盘图形的关系                                 | 58        |
| 2.3.1           | 过孔与 SMT 焊盘图形的关系                            | 58        |
| 2.3.2           | 过孔到金手指的距离                                  | 59        |
| 2.4             | 微过孔  | 59        |

|            |                        |            |
|------------|------------------------|------------|
| 2.5        | 背钻                     | 60         |
| 2.5.1      | 背钻技术简介                 | 60         |
| 2.5.2      | 背钻设计规则                 | 61         |
| <b>第3章</b> | <b>PCB的叠层设计</b>        | <b>65</b>  |
| 3.1        | PCB叠层设计的一般原则           | 65         |
| 3.2        | 多层板工艺                  | 67         |
| 3.2.1      | 层压多层板工艺                | 67         |
| 3.2.2      | HDI印制板                 | 68         |
| 3.2.3      | BUM(积层法多层板)工艺          | 70         |
| 3.3        | 多层板的设计                 | 71         |
| 3.3.1      | 4层板的设计                 | 71         |
| 3.3.2      | 6层板的设计                 | 72         |
| 3.3.3      | 8层板的设计                 | 73         |
| 3.3.4      | 10层板的设计                | 74         |
| 3.4        | 利用PCB叠层设计抑制EMI辐射       | 76         |
| 3.4.1      | PCB的辐射源                | 76         |
| 3.4.2      | 共模EMI的抑制               | 77         |
| 3.4.3      | 设计多电源层抑制EMI            | 78         |
| 3.4.4      | 利用拼接电容抑制EMI            | 78         |
| 3.4.5      | 利用边缘防护技术抑制EMI          | 81         |
| 3.4.6      | 利用内层电容抑制EMI            | 82         |
| 3.4.7      | PCB叠层设计实例              | 83         |
| 3.5        | PCB电源/地平面              | 85         |
| 3.5.1      | PCB电源/地平面的功能和设计原则      | 85         |
| 3.5.2      | PCB电源/地平面的叠层和层序        | 86         |
| 3.5.3      | PCB电源/地平面的叠层电容         | 90         |
| 3.5.4      | PCB电源/地平面的层耦合          | 90         |
| 3.5.5      | PCB电源/地平面的谐振           | 91         |
| 3.6        | 利用EBG结构降低PCB电源/地平面的EMI | 92         |
| 3.6.1      | EBG结构简介                | 92         |
| 3.6.2      | EBG结构的电路模型             | 96         |
| 3.6.3      | 支撑介质对平面型EBG结构带隙特性的影响   | 98         |
| 3.6.4      | 利用EBG结构抑制SSN噪声         | 101        |
| <b>第4章</b> | <b>走线</b>              | <b>103</b> |
| 4.1        | 寄生天线的电磁辐射干扰            | 103        |
| 4.1.1      | 电磁干扰源的类型               | 103        |
| 4.1.2      | 天线的辐射特性                | 103        |
| 4.1.3      | 寄生天线                   | 106        |
| 4.2        | PCB上走线间的串扰             | 107        |
| 4.2.1      | 互容                     | 107        |



|        |                            |     |
|--------|----------------------------|-----|
| 4.2.2  | 互感                         | 108 |
| 4.2.3  | 拐点频率和互阻抗模型                 | 110 |
| 4.2.4  | 串扰类型                       | 111 |
| 4.2.5  | 减小 PCB 上串扰的一些措施            | 112 |
| 4.3    | PCB 传输线的拓扑结构               | 115 |
| 4.3.1  | PCB 传输线简介                  | 115 |
| 4.3.2  | 微带线                        | 115 |
| 4.3.3  | 埋入式微带线                     | 116 |
| 4.3.4  | 单带状线                       | 117 |
| 4.3.5  | 双带状线或非对称带状线                | 117 |
| 4.3.6  | 差分微带线和差分带状线                | 118 |
| 4.3.7  | 传输延时与介电常数 $\epsilon_r$ 的关系 | 119 |
| 4.3.8  | PCB 传输线设计与制作中应注意的一些问题      | 119 |
| 4.4    | 低电压差分信号 (LVDS) 的布线         | 125 |
| 4.4.1  | LVDS 布线的一般原则               | 125 |
| 4.4.2  | LVDS 的 PCB 走线设计            | 127 |
| 4.4.3  | LVDS 的 PCB 过孔设计            | 131 |
| 4.5    | PCB 布线的一般原则                | 132 |
| 4.5.1  | 控制走线方向                     | 132 |
| 4.5.2  | 检查走线的开环和闭环                 | 132 |
| 4.5.3  | 控制走线的长度                    | 133 |
| 4.5.4  | 控制走线分支的长度                  | 134 |
| 4.5.5  | 拐角设计                       | 134 |
| 4.5.6  | 差分对走线                      | 135 |
| 4.5.7  | 控制 PCB 导线的阻抗和走线终端匹配        | 136 |
| 4.5.8  | 设计接地保护走线                   | 136 |
| 4.5.9  | 防止走线谐振                     | 137 |
| 4.5.10 | 布线的一些工艺要求                  | 137 |
| 第 5 章  | 接地                         | 141 |
| 5.1    | 地线的定义                      | 141 |
| 5.2    | 地线阻抗引起的干扰                  | 141 |
| 5.2.1  | 地线的阻抗                      | 141 |
| 5.2.2  | 公共阻抗耦合干扰                   | 147 |
| 5.3    | 地环路引起的干扰                   | 148 |
| 5.3.1  | 地环路干扰                      | 148 |
| 5.3.2  | 产生地环路电流的原因                 | 149 |
| 5.4    | 接地的分类                      | 150 |
| 5.4.1  | 安全接地                       | 150 |
| 5.4.2  | 信号接地                       | 150 |
| 5.4.3  | 电路接地                       | 151 |

|              |                       |            |
|--------------|-----------------------|------------|
| 5.4.4        | 设备接地                  | 152        |
| 5.4.5        | 系统接地                  | 153        |
| 5.5          | 接地的方式                 | 153        |
| 5.5.1        | 单点接地                  | 153        |
| 5.5.2        | 多点接地                  | 155        |
| 5.5.3        | 混合接地                  | 156        |
| 5.5.4        | 悬浮接地                  | 157        |
| 5.6          | 接地系统的设计原则             | 157        |
| 5.6.1        | 理想的接地要求               | 158        |
| 5.6.2        | 接地系统设计的一般规则           | 158        |
| 5.7          | 地线 PCB 布局的一些技巧        | 159        |
| 5.7.1        | 参考面                   | 159        |
| 5.7.2        | 避免接地平面开槽              | 160        |
| 5.7.3        | 接地点的相互距离              | 162        |
| 5.7.4        | 地线网络                  | 163        |
| 5.7.5        | 电源线和地线的栅格             | 164        |
| 5.7.6        | 电源线和地线的指状布局形式         | 166        |
| 5.7.7        | 最小化环面积                | 167        |
| 5.7.8        | 按电路功能分割接地平面           | 169        |
| 5.7.9        | 局部接地平面                | 170        |
| 5.7.10       | 参考层的重叠                | 172        |
| 5.7.11       | 20H 原则                | 173        |
| <b>第 6 章</b> | <b>去耦合</b>            | <b>175</b> |
| 6.1          | 去耦滤波器电路的结构与特性         | 175        |
| 6.1.1        | 典型的 RC 和 LC 去耦滤波器电路结构 | 175        |
| 6.1.2        | 去耦滤波器电路的特性            | 177        |
| 6.2          | RLC 元件的射频特性           | 179        |
| 6.2.1        | 电阻(器)的射频特性            | 179        |
| 6.2.2        | 电容(器)的射频特性            | 179        |
| 6.2.3        | 电感(器)的射频特性            | 180        |
| 6.2.4        | 串联 RLC 电路的阻抗特性        | 181        |
| 6.2.5        | 并联 RLC 电路的阻抗特性        | 181        |
| 6.3          | 去耦电容器的 PCB 布局设计       | 182        |
| 6.3.1        | 去耦电容器的安装位置            | 182        |
| 6.3.2        | 去耦电容器的并联和反谐振          | 188        |
| 6.4          | 使用去耦电容降低 IC 的电源阻抗     | 192        |
| 6.4.1        | 电源阻抗的计算模型             | 192        |
| 6.4.2        | IC 电源阻抗的计算            | 193        |
| 6.4.3        | 电容器靠近 IC 放置的允许距离      | 194        |
| 6.5          | PDN 中的去耦电容            | 198        |

|              |                                 |            |
|--------------|---------------------------------|------------|
| 6.5.1        | 去耦电容器的电流供应模式                    | 198        |
| 6.5.2        | IC 电源的目标阻抗                      | 199        |
| 6.5.3        | 去耦电容器组合的阻抗特性                    | 200        |
| 6.5.4        | PCB 上的目标阻抗                      | 202        |
| 6.6          | 去耦电容器的容量计算                      | 203        |
| 6.6.1        | 计算去耦电容器容量的模型                    | 203        |
| 6.6.2        | 确定目标阻抗                          | 204        |
| 6.6.3        | 确定大容量电容器的容量                     | 204        |
| 6.6.4        | 确定板电容器的容量                       | 205        |
| 6.6.5        | 确定板电容器的安装位置                     | 206        |
| 6.6.6        | 减少 $ESL_{cap}$                  | 207        |
| 6.6.7        | m $\Omega$ 级超低目标阻抗设计            | 208        |
| 6.7          | 片状三端子电容器的 PCB 布局设计              | 208        |
| 6.7.1        | 片状三端子电容器的频率特性                   | 208        |
| 6.7.2        | 使用三端子电容器减小 ESL                  | 210        |
| 6.7.3        | 三端子电容器的 PCB 布局与等效电路             | 210        |
| 6.7.4        | 三端子电容器的应用                       | 212        |
| 6.8          | X2Y <sup>®</sup> 电容器的 PCB 布局设计  | 213        |
| 6.8.1        | 采用 X2Y <sup>®</sup> 电容器替换穿心式电容器 | 213        |
| 6.8.2        | X2Y 电容器的封装形式和尺寸                 | 213        |
| 6.8.3        | X2Y 电容器的应用与 PCB 布局              | 214        |
| 6.9          | 铁氧体磁珠的 PCB 布局设计                 | 216        |
| 6.9.1        | 铁氧体磁珠的基本特性                      | 216        |
| 6.9.2        | 片式铁氧体磁珠                         | 217        |
| 6.9.3        | 铁氧体磁珠的选择                        | 219        |
| 6.9.4        | 铁氧体磁珠在电路中的应用                    | 220        |
| 6.9.5        | 铁氧体磁珠的安装位置                      | 221        |
| 6.9.6        | 利用铁氧体磁珠为 FPGA 设计电源隔离滤波器         | 222        |
| 6.10         | 小型电源平面“岛”供电技术                   | 229        |
| 6.11         | 掩埋式电容技术                         | 229        |
| 6.11.1       | 掩埋式电容技术简介                       | 229        |
| 6.11.2       | 使用掩埋式电容技术的 PCB 布局实例             | 230        |
| 6.12         | 可藏于 PCB 基板内的电容器                 | 232        |
| <b>第 7 章</b> | <b>电源电路设计实例</b>                 | <b>233</b> |
| 7.1          | 开关型调节器 PCB 布局的基本原则              | 233        |
| 7.1.1        | 接地                              | 233        |
| 7.1.2        | 合理布局稳压元件                        | 234        |
| 7.1.3        | 将寄生电容和寄生电感减至最小                  | 235        |
| 7.1.4        | 创建切实可行的电路板布局                    | 236        |
| 7.1.5        | 电路板的层数                          | 237        |

|        |                                   |     |
|--------|-----------------------------------|-----|
| 7.2    | DC-DC 转换器的 PCB 布局设计指南             | 237 |
| 7.2.1  | DC-DC 转换器的 EMI 辐射源                | 237 |
| 7.2.2  | DC-DC 转换器的 PCB 布局的一般原则            | 238 |
| 7.2.3  | DC-DC 转换器的 PCB 布局注意事项             | 239 |
| 7.2.4  | 减小 DC-DC 变换器中的接地反弹                | 245 |
| 7.2.5  | 基于 MAX1954 的 DC-DC 转换器 PCB 设计实例   | 251 |
| 7.2.6  | 基于 ADP1850 的 DC-DC 降压调节器 PCB 设计实例 | 254 |
| 7.2.7  | DPA-Switch DC-DC 转换器的 PCB 设计实例    | 258 |
| 7.3    | 开关电源的 PCB 设计                      | 260 |
| 7.3.1  | 开关电源 PCB 的常用材料                    | 260 |
| 7.3.2  | 开关电源 PCB 布局的一般原则                  | 262 |
| 7.3.3  | 开关电源 PCB 布线的一般原则                  | 264 |
| 7.3.4  | 开关电源 PCB 的地线设计                    | 265 |
| 7.3.5  | TOPSwitch 开关电源的 PCB 设计实例          | 267 |
| 7.3.6  | TOPSwitch-GX 开关电源的 PCB 设计实例       | 269 |
| 第 8 章  | 时钟电路的 PCB 设计                      | 272 |
| 8.1    | 时钟电路 PCB 设计的基础                    | 272 |
| 8.1.1  | 信号的传播速度                           | 272 |
| 8.1.2  | 时序参数                              | 273 |
| 8.1.3  | 时钟脉冲不对称的原因                        | 274 |
| 8.2    | 时钟电路 PCB 设计的一些技巧                  | 276 |
| 8.2.1  | 时钟电路布线的基本原则                       | 276 |
| 8.2.2  | 采用蜘蛛形的时钟分配网络                      | 277 |
| 8.2.3  | 采用树状式的时钟分配网络                      | 278 |
| 8.2.4  | 采用分支结构的时钟分配网络                     | 278 |
| 8.2.5  | 采用多路时钟线的源端端接结构                    | 279 |
| 8.2.6  | 对时钟线进行特殊的串扰保护                     | 280 |
| 8.2.7  | 固定延时的调整                           | 280 |
| 8.2.8  | 可变延时的调整                           | 281 |
| 8.2.9  | 时钟源的电源滤波                          | 282 |
| 8.2.10 | 时钟驱动器去耦电容器安装实例                    | 283 |
| 8.2.11 | 时钟发生器电路的辐射噪声与控制                   | 284 |
| 8.2.12 | 50~800MHz 时钟发生器电路 PCB 设计实例        | 285 |
| 第 9 章  | 模拟电路的 PCB 设计                      | 287 |
| 9.1    | 模拟电路 PCB 设计的基础                    | 287 |
| 9.1.1  | 放大器与信号源的接地点选择                     | 287 |
| 9.1.2  | 放大器的屏蔽接地方法                        | 288 |
| 9.1.3  | 放大器输入端电缆屏蔽层的接地形式                  | 289 |
| 9.1.4  | 差分放大器的输入端接地形式                     | 291 |
| 9.1.5  | 有保护端的仪表放大器接地形式                    | 292 |

|         |   |     |
|---------|---|-----|
| 9.1.6   | 采用屏蔽保护措施  | 292 |
| 9.1.7   | 放大器电源的去耦  | 293 |
| 9.2     | 模拟电路 PCB 设计实例   | 294 |
| 9.2.1   | 不同封装形式的运算放大器 PCB 设计实例                                   | 294 |
| 9.2.2   | 放大器输入端保护环设计   | 297 |
| 9.2.3   | 单端输入差分输出放大器 PCB 的对称设计                                   | 300 |
| 9.2.4   | 蜂窝电话音频放大器 PCB 设计实例                                      | 301 |
| 9.2.5   | 参数测量单元 (PMU) 的 PCB 布线要求                                 | 305 |
| 9.2.6   | D 类功率放大器 PCB 设计实例                                       | 309 |
| 9.3     | 消除热电压影响的 PCB 设计   | 312 |
| 9.3.1   | PCB 上的热节点   | 312 |
| 9.3.2   | 温度等高线   | 313 |
| 9.3.3   | 电阻的 PCB 布局和热电压模型  | 313 |
| 9.3.4   | 同相放大器的热电压模型   | 314 |
| 9.3.5   | 消除热电压影响的同相和反相放大器 PCB 设计                                 | 315 |
| 9.3.6   | 消除热电压影响的差动放大器 PCB 设计                                    | 316 |
| 9.3.7   | 消除热电压影响的双运放同相放大器 PCB 设计                                 | 316 |
| 9.3.8   | 其他消除热电压影响的 PCB 设计技巧                                     | 317 |
| 第 10 章  | 高速数字电路的 PCB 设计  | 319 |
| 10.1    | 高速数字电路 PCB 设计的基础  | 319 |
| 10.1.1  | 时域与频域   | 319 |
| 10.1.2  | 频宽与上升时间的关系  | 321 |
| 10.1.3  | 时钟脉冲信号的谐振频率   | 321 |
| 10.1.4  | 电路的四种电性等效模型   | 322 |
| 10.1.5  | “集总模型”与“离散模型”的分界点                                       | 323 |
| 10.1.6  | 传播速度与材料的介电常数之间的关系                                       | 324 |
| 10.1.7  | 高速数字电路的差模辐射与控制  | 325 |
| 10.1.8  | 高速数字电路的共模辐射与控制  | 330 |
| 10.1.9  | 高速数字电路的“地弹”与控制  | 332 |
| 10.1.10 | 高速数字电路的反射与控制  | 334 |
| 10.1.11 | 同时开关噪声 (SSN) 控制   | 339 |
| 10.2    | Altera 的 MAX <sup>®</sup> II 系列 CPLD PCB 设计实例           | 342 |
| 10.2.1  | MAX <sup>®</sup> II 系列 100 引脚 MBGA 封装的 PCB 布板设计实例       | 342 |
| 10.2.2  | MAX <sup>®</sup> II 系列 256 引脚 MBGA 封装的 PCB 布板设计实例       | 342 |
| 10.3    | Xilinx Virtex <sup>™</sup> -5 系列 PCB 设计实例               | 343 |
| 10.3.1  | Xilinx PCB 设计检查项目                                       | 344 |
| 10.3.2  | Virtex <sup>™</sup> -5 FPGA 的配电系统设计                     | 346 |
| 10.3.3  | Virtex <sup>™</sup> -5 FPGA 1.0mm BGA FG676 封装 PCB 设计实例 | 357 |
| 10.4    | LatticeXP LFXP3TQ-100 最小系统 PCB 设计实例                     | 359 |
| 10.5    | 微控制器电路 PCB 设计实例   | 361 |



|         |                                       |     |
|---------|---------------------------------------|-----|
| 10.5.1  | 微控制器电路 PCB 设计的一般原则                    | 361 |
| 10.5.2  | AT89S52 单片机最小系统 PCB 设计实例              | 363 |
| 10.5.3  | ADuC845 单片数据采集最小系统 PCB 设计实例           | 365 |
| 10.5.4  | ARM S3C44B0X 最小系统 PCB 设计实例            | 368 |
| 10.5.5  | ARM STM32 最小系统 PCB 设计实例               | 369 |
| 10.5.6  | TMS320F2812 DSP 最小系统 PCB 设计实例         | 372 |
| 10.6    | 高速接口信号的 PCB 设计                        | 376 |
| 10.6.1  | 注意高速接口的一些关键信号                         | 376 |
| 10.6.2  | 降低 PCB 玻璃纤维与环氧树脂的影响                   | 376 |
| 10.6.3  | 高速信号导线设计要求                            | 377 |
| 10.6.4  | 高速信号的参考平面                             | 378 |
| 10.6.5  | 高速差分信号线布局                             | 380 |
| 10.6.6  | 连接器和插座连接                              | 381 |
| 10.6.7  | 通孔的连接                                 | 382 |
| 10.6.8  | 交流耦合电容器的放置                            | 383 |
| 10.6.9  | 高速信号线的弯曲规则                            | 384 |
| 10.6.10 | PCB 的叠层要求                             | 384 |
| 10.6.11 | ESD/EMI 注意事项                          | 385 |
| 第 11 章  | 模数混合电路的 PCB 设计                        | 386 |
| 11.1    | 模数混合电路的 PCB 分区                        | 386 |
| 11.1.1  | PCB 按功能分区                             | 386 |
| 11.1.2  | 分割的隔离与互连                              | 387 |
| 11.2    | 模数混合电路的接地设计                           | 388 |
| 11.2.1  | 模拟地 (AGND) 和数字地 (DGND) 的连接            | 388 |
| 11.2.2  | 模拟地和数字地分割                             | 392 |
| 11.2.3  | 采用“统一地平面”形式                           | 394 |
| 11.2.4  | 数字和模拟电源平面的分割                          | 395 |
| 11.2.5  | 最小化电源线和地线的环路面积                        | 396 |
| 11.2.6  | 模数混合电路的电源和接地布局示例                      | 398 |
| 11.2.7  | 多卡混合信号系统的接地                           | 400 |
| 11.3    | ADC 驱动器电路的 PCB 设计                     | 404 |
| 11.3.1  | 高速差分 ADC 驱动器的 PCB 设计                  | 404 |
| 11.3.2  | 差分 ADC 驱动器裸露焊盘的 PCB 设计                | 405 |
| 11.3.3  | 低失真高速差分 ADC 驱动电路的 PCB 设计              | 406 |
| 11.4    | ADC 的 PCB 设计                          | 410 |
| 11.4.1  | ADC 接地对系统性能的影响                        | 410 |
| 11.4.2  | ADC 参考路径的 PCB 布局布线                    | 412 |
| 11.4.3  | 3.3V 双路 14 位 ADC 的 PCB 设计             | 413 |
| 11.4.4  | 16 位 SAR ADC 的 PCB 设计                 | 422 |
| 11.4.5  | 24 位 $\Delta$ - $\Sigma$ ADC 的 PCB 设计 | 427 |

|               |                                |            |
|---------------|--------------------------------|------------|
| 11.5          | DAC 的 PCB 设计                   | 430        |
| 11.5.1        | 一个 16 位 DAC 电路                 | 430        |
| 11.5.2        | 有问题的 PCB 设计                    | 431        |
| 11.5.3        | 改进的 PCB 设计                     | 433        |
| 11.6          | 模数混合电路 PICtail™ 演示板的 PCB 设计    | 435        |
| 11.7          | 12 位称重系统的 PCB 设计               | 438        |
| 11.7.1        | 12 位称重系统电路                     | 438        |
| 11.7.2        | 没有采用接地平面的 PCB 设计               | 438        |
| 11.7.3        | 采用接地平面的 PCB 设计                 | 439        |
| 11.7.4        | 增加抗混叠滤波器                       | 440        |
| 11.8          | 传感器模拟前端 (AFE) 的 PCB 设计         | 441        |
| 11.9          | 模数混合系统的电源电路 PCB 设计             | 446        |
| 11.9.1        | 模数混合系统的电源电路结构                  | 446        |
| 11.9.2        | 低噪声线性稳压器电路 PCB 设计例             | 448        |
| <b>第 12 章</b> | <b>射频电路的 PCB 设计</b>            | <b>451</b> |
| 12.1          | 射频电路 PCB 设计的基础                 | 451        |
| 12.1.1        | 射频电路和数字电路的区别                   | 451        |
| 12.1.2        | 阻抗匹配                           | 453        |
| 12.1.3        | 短路线和开路线                        | 455        |
| 12.1.4        | 平面传输线                          | 457        |
| 12.1.5        | 平面微带线谐振结构                      | 460        |
| 12.1.6        | 定向耦合器                          | 461        |
| 12.1.7        | 功率分配器                          | 462        |
| 12.1.8        | 滤波电路的实现                        | 463        |
| 12.1.9        | 微带天线                           | 465        |
| 12.1.10       | 寄生振荡的产生与消除                     | 471        |
| 12.2          | 射频电路 PCB 设计的一些技巧               | 474        |
| 12.2.1        | 利用电容的“零阻抗”特性实现射频接地             | 474        |
| 12.2.2        | 利用电感的“无穷大阻抗”特性辅助实现射频接地         | 475        |
| 12.2.3        | 利用“零阻抗”电容实现复杂射频系统的射频接地         | 476        |
| 12.2.4        | 利用半波长 PCB 连接线实现复杂射频系统的射频接地     | 477        |
| 12.2.5        | 利用 1/4 波长 PCB 连接线实现复杂射频系统的射频接地 | 477        |
| 12.2.6        | 利用 1/4 波长 PCB 微带线实现变频器的隔离      | 478        |
| 12.2.7        | PCB 连线上的过孔数量与尺寸                | 478        |
| 12.2.8        | 端口的 PCB 连线设计                   | 479        |
| 12.2.9        | 谐振回路接地点的选择                     | 480        |
| 12.2.10       | PCB 保护环                        | 480        |
| 12.2.11       | 利用接地平面开缝减小电流回流耦合               | 481        |
| 12.2.12       | 隔离                             | 483        |
| 12.2.13       | 射频电路 PCB 走线                    | 485        |

|         |                                       |     |
|---------|---------------------------------------|-----|
| 12.3    | 射频小信号放大器 PCB 设计                       | 487 |
| 12.3.1  | 射频小信号放大器的电路特点与主要参数                    | 487 |
| 12.3.2  | 低噪声放大器抗干扰的基本措施                        | 488 |
| 12.3.3  | 1.9GHz LNA 电路 PCB 设计实例                | 490 |
| 12.3.4  | DC~6GHz LNA 电路 PCB 设计实例               | 490 |
| 12.4    | 射频功率放大器 PCB 设计                        | 491 |
| 12.4.1  | 射频功率放大器的电路特点与主要参数                     | 491 |
| 12.4.2  | 40~3600MHz 晶体管射频功率放大器 PCB 设计实例        | 493 |
| 12.4.3  | 60W、1.0GHz、28V 的 FET 射频功率放大器 PCB 设计实例 | 494 |
| 12.4.4  | 0.5~6GHz 中功率射频功率放大器 PCB 设计实例          | 495 |
| 12.4.5  | 50MHz~6GHz 射频功率放大器模块 PCB 设计实例         | 497 |
| 12.4.6  | 蓝牙功率放大器 PCB 设计实例                      | 498 |
| 12.4.7  | 3.3~3.8GHz、15W 的 WiMAX 功率放大器 PCB 设计实例 | 499 |
| 12.5    | 混频器 PCB 设计实例                          | 501 |
| 12.5.1  | 混频器的电路特点与主要参数                         | 501 |
| 12.5.2  | 1.3~2.3GHz 高线性度上变频器电路 PCB 设计实例        | 503 |
| 12.5.3  | 825~915MHz 混频器电路 PCB 设计实例             | 504 |
| 12.5.4  | 1.8~2.7GHz LNA 和下变频器电路 PCB 设计实例       | 507 |
| 12.5.5  | 1.7~2.2GHz 下变频器电路 PCB 设计实例            | 509 |
| 12.6    | PCB 天线设计实例                            | 511 |
| 12.6.1  | 300~450MHz 发射器 PCB 环形天线设计实例           | 511 |
| 12.6.2  | 868MHz 和 915MHz PCB 天线设计实例            | 515 |
| 12.6.3  | 915MHz PCB 环形天线设计实例                   | 517 |
| 12.6.4  | 紧凑型 868/915MHz 天线设计实例                 | 519 |
| 12.6.5  | 868MHz/915MHz/955MHz 倒 F PCB 天线设计实例   | 520 |
| 12.6.6  | 868MHz/915MHz/920MHz 微型螺旋 PCB 天线设计实例  | 521 |
| 12.6.7  | 2.4GHz F 型 PCB 天线设计实例                 | 522 |
| 12.6.8  | 2.4GHz 倒 F PCB 天线设计实例                 | 524 |
| 12.6.9  | 2.4GHz 小尺寸 PCB 天线设计实例                 | 524 |
| 12.6.10 | 2.4GHz 蜿蜒式 PCB 天线设计实例                 | 525 |
| 12.6.11 | 2.4GHz 折叠偶极子 PCB 天线设计实例               | 527 |
| 12.6.12 | 868MHz/2.4GHz 可选择单/双频段的单极子 PCB 天线设计实例 | 528 |
| 12.6.13 | 2.4 GHz YAGI PCB 天线设计实例               | 529 |
| 12.6.14 | 2.4GHz 全波 PCB 环形天线设计实例                | 530 |
| 12.6.15 | 2.4GHz PCB 槽 (slot) 天线设计实例            | 530 |
| 12.6.16 | 2.4GHz PCB 片式天线设计实例                   | 530 |
| 12.6.17 | 2.4GHz 蓝牙、802.11b/g WLAN 片式天线设计实例     | 531 |
| 12.7    | 加载 EBG 结构的微带天线设计                      | 531 |
| 12.7.1  | 利用叉型 EBG 结构改善天线方向图                    | 531 |
| 12.7.2  | 利用电磁带隙结构实现锥形方向图                       | 533 |

|               |   |            |
|---------------|---|------------|
| 12.7.3        | 利用级联电磁带隙结构减少双频微带天线的互耦                     | 534        |
| 12.7.4        | 利用电磁带隙结构改善微带天线阵性能                         | 536        |
| 12.8          | 射频系统的电源电路 PCB 设计                          | 537        |
| 12.8.1        | 射频系统的电源管理                                 | 537        |
| 12.8.2        | 射频系统的电源噪声控制                               | 541        |
| 12.8.3        | 手持设备射频功率放大器的供电电路                          | 546        |
| 12.8.4        | 用于 RFPA 的可调节降压 DC-DC 转换器 PCB 设计           | 549        |
| 12.8.5        | 具有 MIPI®RFFE 接口的 RFPA 降压 DC-DC 转换器 PCB 设计 | 556        |
| <b>第 13 章</b> | <b>PCB 的散热设计</b>                          | <b>563</b> |
| 13.1          | PCB 散热设计的基础                               | 563        |
| 13.1.1        | 热传递的三种方式                                  | 563        |
| 13.1.2        | 温度 (高温) 对元器件及电子产品的影响                      | 564        |
| 13.1.3        | PCB 的热性能分析                                | 564        |
| 13.2          | PCB 散热设计的基本原则                             | 565        |
| 13.2.1        | PCB 基材的选择                                 | 565        |
| 13.2.2        | 元器件的布局                                    | 567        |
| 13.2.3        | PCB 的布线                                   | 569        |
| 13.3          | PCB 散热设计实例                                | 571        |
| 13.3.1        | 均匀分布热源的稳态传导 PCB 的散热设计                     | 571        |
| 13.3.2        | 铝质散热芯 PCB 的散热设计                           | 572        |
| 13.3.3        | PCB 之间的合理间距设计                             | 573        |
| 13.3.4        | 散热器的接地设计                                  | 575        |
| 13.4          | 器件的热特性与 PCB 散热设计                          | 576        |
| 13.4.1        | 器件的封装形式                                   | 576        |
| 13.4.2        | 与器件封装热特性有关的一些参数                           | 579        |
| 13.4.3        | 器件封装的基本热关系                                | 580        |
| 13.4.4        | 常用 IC 封装的热特性                              | 582        |
| 13.4.5        | 器件的最大功耗声明                                 | 587        |
| 13.4.6        | 最大功耗与器件封装和温度的关系                           | 588        |
| 13.5          | 裸露焊盘的 PCB 散热设计                            | 591        |
| 13.5.1        | 裸露焊盘简介                                    | 591        |
| 13.5.2        | 裸露焊盘连接的基本要求                               | 595        |
| 13.5.3        | 裸露焊盘散热通孔的设计                               | 597        |
| 13.5.4        | 裸露焊盘的 PCB 设计示例                            | 599        |
| <b>第 14 章</b> | <b>PCB 的可制造性与可测试性设计</b>                   | <b>603</b> |
| 14.1          | PCB 的可制造性设计                               | 603        |
| 14.1.1        | PCB 可制造性设计的基本概念                           | 603        |
| 14.1.2        | PCB 的可制造性设计管理                             | 605        |
| 14.1.3        | 不同阶段的 PCB 可制造性设计控制                        | 606        |
| 14.1.4        | PCB 的可制造性设计检查                             | 609        |