

Mc
Graw
Hill

PRINTED CIRCUITS HANDBOOK

SEVENTH EDITION

[美] 小克莱德·F. 库姆斯 哈皮·T. 霍顿 著
Clyde F. Coombs, Jr. Happy T. Holden

陈力颖 译

印制电路手册 设计与制造

清华大学出版社

Mc
Graw
Hill

PRINTED CIRCUITS HANDBOOK

SEVENTH EDITION

[美] 小克莱德·F. 库姆斯 哈皮·T. 霍顿 著
Clyde F. Coombs, Jr. Happy T. Holden

陈力颖 译

印制电路手册

设计与制造



清华大学出版社
北京

Clyde F. Coombs, Jr. and Happy T. Holden

Printed Circuits Handbook, Seventh Edition

ISBN: 978-0-07-183395-0

Copyright © 2016, 2008, 2001, 1996, 1988, 1979, 1967 by McGraw-Hill Education.

All Rights reserved. No part of this publication may be reproduced or transmitted in any form or by any means, electronic or mechanical, including without limitation photocopying, recording, taping, or any database, information or retrieval system, without the prior written permission of the publisher.

This authorized Chinese translation edition is jointly published by McGraw-Hill Education and Tsinghua University Press Limited. This edition is authorized for sale in the People's Republic of China only, excluding Hong Kong, Macao SAR and Taiwan.

Copyright © 2019 by McGraw-Hill Education and Tsinghua University Press Limited.

版权所有。未经出版人事先书面许可,对本出版物的任何部分不得以任何方式或途径复制或传播,包括但不限于复印、录制、录音,或通过任何数据库、信息或可检索的系统。

本授权中文简体字翻译版由麦格劳-希尔(亚洲)教育出版公司和清华大学出版社有限公司合作出版。此版本经授权仅限于中华人民共和国境内(不包括中国香港、澳门特别行政区和中国台湾地区)销售发行。

版权© 2019 由麦格劳-希尔(亚洲)教育出版公司与清华大学出版社有限公司所有。

北京市版权局著作权合同登记号 图字: 01-2016-9914

本书封面贴有 McGraw-Hill 公司防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话: 010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

印制电路手册:设计与制造/(美)小克莱德·F.库姆斯(Clyde F. Coombs, Jr.), (美)哈皮·T.霍顿(Happy T. Holden)著;陈力颖译.—北京:清华大学出版社,2019

书名原文: Printed Circuits Handbook(Seventh Edition)

ISBN 978-7-302-52294-2

I. ①印… II. ①小…②哈… ③陈… III. ①印刷电路—电路设计—手册 IV. ①TN41-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 038452 号

责任编辑:赵凯

封面设计:李召霞

责任校对:焦丽丽

责任印制:沈露

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座

邮 编:100084

社总机:010-62770175

邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质量反馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

课件下载: <http://www.tup.com.cn>, 010-83470236

印 装 者:清华大学印刷厂

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm

印 张:42.75

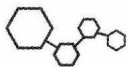
字 数:1041千字

版 次:2019年11月第1版

印 次:2019年11月第1次印刷

定 价:129.00元

产品编号:072770-01



译者序

随着电子产品的日益增多,印制电路板技术也日新月异。近十几年,我国印制电路板制造业发展迅速,总产值、总产量双双位居世界第一。未来印制电路板生产制造技术的发展趋势是在性能上向高密度、高精度、细孔径、细导线、小间距、高可靠、多层化、高速传输、轻量、薄型等方向发展。

《印制电路手册》作为行业排名第一的印制电路指南,其第七版的出版恰逢第一版出版 50 周年。本书的内容也根据近年来技术的革新而进行重新修订,其内容及结构变化较大。考虑到原书第七版内容非常宽泛,涉及印制电路板行业的方方面面,经本书编辑建议,将原书分为三册翻译出版。此举便于读者各取所需,有针对性地进行阅读。这三册内容按照设计与制造(原书的第 3、4、5、6 部分)、制造与焊接(原书的第 1、6、8、9 部分)、测试与可靠性(原书的第 2、7、10、11、12 部分)几大方面进行划分。本书是关于设计与制造的内容,这种方式算是一种出版的创新,希望可以帮助那些真正热爱本书的读者。

原著内容较多,尽管译者之前参与过本书第六版的翻译工作,但仍觉得翻译工作量很大,非常感谢以下人员协助本书的翻译和审校工作:王焱、倪立强、谭康、张长胜、臧涛、胥世俊、汤勇、翦彦龙。

对比第六版,第七版的内容和结构均有较大变化,尽管竭尽一切可能保证译文的准确性,但仍难免出现翻译的疏漏和不当之处,恳请各位读者批评指正。

陈力颖

于天津工业大学泮湖



前 言

在现今和可预见的将来,本书为读者提供了在印制电路板领域取得成功的工具。在印制电路板领域,越来越多的设计师或用户机构不仅来自不同制造厂商,各自采用单独的布图和语言,最重要的是,在用户所说的需求和制造厂商生产制造能力的理解上有着严重的分歧,而这恰恰是一个极大的机遇。“供应链”一词一般被定义用于非垂直一体化组织的问题,但在这里,我们首次将专注于与印制电路相关的供应链要素。当用户将其当前需求及期望委托给外部制造厂商时,不能夸大所关心的需求。具有解决这些问题经验的作者专门撰写了相关文章,为读者提供了处理这些问题的相关信息,并将有助于指导这些问题的解决,使各方受益。

此外,随着印制电路作为所有电子设备的基本构件的普及和发展,其越来越重要,与其相关的问题可以在整个工程和制造生产中找到,而不仅仅是在工程和采购中的设计和布局及制造中的组装。在某种程度上,许多工作人员需要了解印制电路;需要了解以前没有关心的技术和行业的问题。本书也为非印制电路专业人员提供参考,以查找有关过程问题的信息和答案。它也有助于向各个组织或部门的成员及潜在的供应商提出恰当的问题,同时发展整个关系范围。

从一开始,印制电路不仅是最重要的技术发展之一,也是最不容易理解和掌握的技术之一。其经常被误认为是“商品”,并且是以电路板或生产组装的初始成本为基础购买的。事实上,没有像“标准”或“通用”印制电路这样的东西。每个电路板实际上都是一个“特定应用的互连系统”,可以对其使用的最终产品的性能、质量、可靠性和成本产生巨大的影响。早期的设计和制造过程中可能已经解决的一个问题,直到产品在使用中才是最明显的,解决这个问题是最困难和最昂贵的。本书帮助读者在供应链的每个步骤处理这些问题,其中包括用户组织以及供应商组织内存在的这些问题。具体来说,本书引入了一些全新的部分,完全致力于理解和使用印制电路供应链本身。供应链管理的一般问题已经有很好的记录;然而,将它们应用于由印制电路产生的具体问题,需要专门的理解,在本书中仅做一般的讨论。

在介绍解决供应链问题的新工具的同时,本书仍然提供多年来发展的印制电路技术和工艺的详细描述,并在本版本中得到更新。它仍然是印制电路技术的唯一参考书。同时,编写本书时,我们会尽可能地讨论在处理和使用这些流程制造的电路板时,读者和供应商应考虑的问题是解决以下问题:什么是帮助读者知道供应商是否有能力为用户提供所需要的最终产品?什么是不合理的期望?如何证明最初所期望的结果,并保持一段时间?

在采用合同制造来生产和组装电路板时,用户失去了定义设计规则的能力。通过与供应商建立合作伙伴关系,最终产品的成功将需要用户的需求与制造组织的能力相匹配。为了使设计师、用户和制造商之间关于印制电路问题的沟通更加清晰和高效,本版还增加新章节,并扩展了电路板的设计和布局及组装相关的章节内容。这些内容包括有关设计和布局的基础知

识、高性能板、CAD 工具、制造设计和信息交换系统和标准的附加信息。

随着电子产品变得越来越复杂,期望的性能水平越来越高,以前没有出现过的数量,以及新的流程和材料挑战,如“无铅”焊接,使用组织不得不承担更多的质量责任并将产品的可靠性提供给供应商组织。考虑到新的基础材料和组装过程,本书还包含关于电路板的可靠性的关键新材料和组装。这些章节是为本书专门开发的,其中大部分内容在其他地方都不可用,并允许用户达成合理的过程控制协议和验收标准,以确保满足需求。

随着印制电路湿法和制造工艺对全球环境的影响,及其使用寿命结束时对组装板的关注,RoHS(有害物质限制)的问题,特别是“无铅”问题已经造成了行业前所未有的危机。有关材料和制造过程所产生的变化影响的具体信息被记录和描述。例如,对于无铅焊料,我们从元素周期表开始,并定义了替代合金的可能性。因此,物理和材料科学被用来描述可用的替代品。

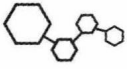
这些补充的最终结果基本上是编写一本新书,而不仅仅是一个新版本。这些章节中有 25% 的内容是新增的,只有 16% 的内容是由以前版本转载的。

本书的出版恰逢第一版出版 50 周年。这本书第一版共有 16 章,由 11 位作者撰写。此版本为第七版,共有 38 位作者贡献了 71 章内容。这清楚地反映了技术的发展,以及随着时间的推移,印制电路用户群的扩大。本书在这个时间长度上对印制电路领域的从业人员非常重要;这一点实际上应该归功于撰写者,他们运用其各自领域的专业知识并花费了大量的时间贡献了一些章节。有人说这本书的作者名单看起来像印制电路行业的“名人录”。读者可以利用作者名单信息来解决问题。

我们也感谢国际电子工业联接 IPC 协会,其为这本书的每一版本都提供了全面的合作与支持。我们特别要感谢 IPC 经理 Anne Marie Mulvihill, David Bergman 和 Greg Munie(其也完成其中一章的编写)的积极帮助和鼓励。他们的努力为我们实现这一大规模和超复杂的项目提供了重大支持。

Clyde F. Coombs, Jr.

Happy T. Holden



目 录

第 1 章 基材介绍	1
1.1 引言	1
1.2 等级与标准	1
1.2.1 NEMA 工业层压热固化产品	2
1.2.2 IPC-4101“刚性及多层印制板基材规范”	6
1.2.3 IPC-4103“高速/高频应用的基材规范”	6
1.2.4 IPC/JPCA-4104“高密度互连和微孔材料规范”	8
1.3 基材的性能指标	9
1.3.1 玻璃化转变温度 T_g	9
1.3.2 热分解温度(T_d)	12
1.4 FR-4 的种类	13
1.4.1 FR-4 的多样性	13
1.4.2 FR-4 的寿命	13
1.4.3 FR-4 的 UL 等级: FR-4.0 和 FR-4.1	13
1.5 层压板鉴别	14
1.6 粘结片鉴别	16
1.7 层压板和粘结片的制造工艺	17
1.7.1 传统的制造工艺	17
1.7.2 粘结片的制造	18
1.7.3 层压板的制造	20
1.7.4 直流或连续金属箔制造工艺	22
1.7.5 连续制造工艺	22
1.8 参考文献	22
第 2 章 基材的成分	23
2.1 引言	23
2.1.1 环氧树脂体系	24
2.1.2 环氧树脂	24
2.1.3 双官能团环氧树脂	25
2.1.4 四官能团和多官能团环氧树脂	26

2.2	其他树脂体系	26
2.2.1	环氧树脂混合物	27
2.2.2	双马来酰胺三嗪(BT)/环氧树脂	28
2.2.3	氰酸酯	28
2.2.4	聚酰亚胺	28
2.2.5	聚四氟乙烯(PTFE,特氟龙)	28
2.2.6	聚苯醚(PPE)	28
2.2.7	无卤树脂体系	28
2.3	立法问题	29
2.3.1	化学阻燃剂	29
2.3.2	无卤体系	30
2.3.3	其他类型的树脂及配方	33
2.4	添加剂	33
2.4.1	固化剂和固化促进剂	33
2.4.2	紫外线抑制剂/荧光辅助剂	33
2.4.3	无机填料	34
2.5	增强材料	35
2.5.1	编织玻璃纤维	35
2.5.2	纱线命名	37
2.5.3	玻璃纤维布	37
2.5.4	其他增强材料	42
2.6	导体材料	43
2.6.1	电解铜箔	43
2.6.2	光面处理铜箔或反向处理铜箔	47
2.6.3	压延退火铜箔	48
2.6.4	铜箔纯度和电阻率	48
2.6.5	其他类型铜箔	49
2.7	参考文献	49
第3章	基材的性能	50
3.1	引言	50
3.2	热性能、物理性能及机械性能	50
3.2.1	热机械分析 T_g 和 CTE	50
3.2.2	CTE 值	51
3.2.3	测量 T_g 的其他方法	52
3.2.4	分解温度	53
3.2.5	分层时间	56
3.2.6	耐电弧性	58
3.2.7	铜箔剥离强度	58

3.2.8	吸水 and 吸湿	59
3.2.9	阻燃性	59
3.3	电气性能	60
3.3.1	介电常数或电容率	60
3.3.2	损耗因子或损耗角正切($\tan \delta$)	62
3.3.3	绝缘电阻	62
3.3.4	体积电阻率	62
3.3.5	表面电阻	62
3.3.6	电气强度	63
3.3.7	介质击穿	63
3.4	其他测试方法	64
3.5	参考文献	64
第4章	PCB的基材性能问题	65
4.1	引言	65
4.2	提高线路密度的方法	65
4.3	铜箔	66
4.3.1	HTE 铜箔	66
4.3.2	低粗糙度铜箔和反向处理铜箔	66
4.3.3	薄铜箔	67
4.3.4	高性能树脂体系用铜箔	67
4.3.5	铜箔粗糙度和信号衰减	67
4.4	层压板的配本结构	70
4.4.1	单张料和多张料结构	71
4.4.2	树脂含量	72
4.4.3	层压板的平整度和弯曲强度	72
4.5	粘结片的选择和厚度	72
4.6	尺寸稳定性	73
4.6.1	尺寸稳定性的测试方法	73
4.6.2	提高尺寸稳定性	74
4.7	高密度互连/微孔材料	75
4.8	导电阳极丝的形成	76
4.8.1	CAF 测试	78
4.9	电气性能	82
4.9.1	介电常数和损耗因子的重要性	82
4.9.2	高速数字信号基础	83
4.9.3	针对电气性能选择基材	85
4.9.4	无铅兼容 FR-4 材料的电气性能	88
4.10	低 D_k/D_f 无铅兼容材料的电气性能	91

4.11	树脂和玻璃微 D_k 效应	92
4.12	参考文献	96
第 5 章 无铅组装对基材的影响		97
5.1	引言	97
5.2	RoHS 基础知识	97
5.3	基材的兼容性问题	98
5.3.1	无铅组装的缺陷问题	98
5.3.2	无铅组装及长期可靠性问题	99
5.4	无铅组装对基材成分的影响	100
5.5	关键基材性能	100
5.5.1	对玻璃化转变温度的关注	101
5.5.2	分解温度的重要性	102
5.5.3	吸水率	105
5.5.4	分层时间	108
5.5.5	无铅组装对其他性能的影响	109
5.6	对 PCB 可靠性和材料选择的影响	111
5.6.1	材料类型和性能与组装可靠性的例子	112
5.6.2	材料类型/性能与长期可靠性例子	112
5.6.3	理解对电气性能的潜在影响	114
5.7	总结	114
5.8	参考文献	115
第 6 章 基材选择		116
6.1	引言	116
6.2	选择材料的热可靠性	117
6.2.1	PCB 制造与组装的注意事项	117
6.3	选择热可靠性的基材	122
6.3.1	测试工具和测试方法概述	122
6.3.2	IPC 规格表	125
6.3.3	总结	127
6.4	电气性能材料选择	127
6.4.1	基材成分对电气性能的影响	128
6.4.2	PCB 制造对基材的影响	129
6.4.3	电气性能基材分类	129
6.4.4	总结	132
6.5	CAF 应力	132
6.5.1	选择材料时的一般注意事项	132
6.5.2	CAF 试验工具、测试结果和失效分析实例	133

6.5.3	对 CAF 的总结	137
6.6	参考文献	137
第 7 章	层压板认证和测试	138
7.1	引言	138
7.1.1	RoHS 及无铅焊接要求的影响	138
7.1.2	材料评估过程	139
7.2	行业标准	139
7.2.1	IPC-TM-650	139
7.2.2	IPC 规格表	139
7.2.3	美国材料与试验学会	140
7.2.4	美国国家电气制造业协会	140
7.2.5	NEMA 等级	140
7.3	层压板测试方案	141
7.3.1	数据比较	141
7.3.2	双重测试方案	141
7.4	基础性测试	142
7.4.1	外观	142
7.4.2	铜箔剥离强度	142
7.4.3	焊接热冲击试验	143
7.4.4	玻璃化转变温度	144
7.4.5	热分解温度	144
7.5	完整的材料测试	145
7.5.1	机械测试	145
7.5.2	热机械性能测试	147
7.5.3	电气性能	153
7.5.4	其他层压板性能	155
7.5.5	额外测试	156
7.5.6	粘结片测试	156
7.6	鉴定测试计划	156
7.7	可制造性	157
第 8 章	设计、制造和组装的规划	159
8.1	引言	159
8.1.1	设计规划和成本预测	159
8.1.2	设计规划和生产规划	159
8.2	一般注意事项	160
8.2.1	规划的概念	160
8.2.2	可生产性	162

8.3	新产品设计	162
8.3.1	扩展设计过程	162
8.3.2	产品定义	162
8.4	规格: 获得系统描述	163
8.4.1	预测指标和可生产性规划	163
8.4.2	非指标	165
8.4.3	品质因数指标	165
8.4.4	品质因数线性方程	165
8.5	布局权衡规划	167
8.5.1	平衡密度方程	167
8.5.2	布线需求	168
8.5.3	布线容量	168
8.5.4	布局效率	168
8.5.5	选择设计规则	169
8.5.6	布线需求计算的典型例子	171
8.6	PCB 制造权衡规划	172
8.6.1	制造复杂性矩阵	172
8.6.2	预测可生产性	173
8.6.3	完整的电路板复杂性矩阵例子	177
8.7	组装规划权衡	179
8.7.1	组装复杂性矩阵	179
8.7.2	组装复杂性矩阵例子	180
8.8	参考文献	182
第 9 章	PCB 的物理特性	183
9.1	引言	183
9.2	PCB 或衬底类型	184
9.2.1	单面或双面 PCB	185
9.2.2	多层 PCB	185
9.2.3	挠性电路板	185
9.2.4	刚挠结合板	185
9.2.5	背板	185
9.2.6	构建双面 PCB	185
9.2.7	多芯片模块	186
9.3	连接元件的方法	186
9.3.1	仅通孔	186
9.3.2	单面贴装	186
9.3.3	双面贴装	187
9.3.4	用上述方法组合压接	187

9.4	元件封装类型	187
9.4.1	引言	187
9.4.2	通孔式	187
9.4.3	表面贴装	187
9.5	材料选择	189
9.5.1	引言	189
9.5.2	聚酰亚胺体系	189
9.6	制造方法	189
9.6.1	冲压成型	189
9.6.2	辊压成型	190
第 10 章	电子设计自动化和印制电路设计工具	191
10.1	PCB 设计工具概述	191
10.2	PCB 设计工具的使用	192
10.2.1	原理图仿真工具	192
10.2.2	PCB 布局工具	193
10.2.3	信号完整性和 EMI/EMC 软件工具	193
10.3	主要的 PCB 设计工具	194
10.3.1	Mentor Graphics 公司的 Xpedition 和 PADS	194
10.3.2	Cadence 设计系统——Allegro 和 OrCAD	195
10.3.3	Zuken 的 CR-5000,CR-8000 和 CADSTAR	196
10.3.4	Altium 的 Altium Designer	196
10.3.5	拦截技术——Pantheon	196
10.3.6	Keysight Technologies (以前称为 Agilent EEsof) ——EDA ADS	196
10.3.7	National Instruments——Ultiboard 和 Multisim	197
10.4	低成本 PCB 设计工具	197
10.4.1	Labcenter Electronics——Proteus	197
10.4.2	CadSoft——Eagle	197
10.4.3	Westdev Ltd. ——Pulsonix 和 Easy-PC	197
10.4.4	DEX2020——AutoTRAX	198
10.4.5	Visionics——EDWinXP	198
10.4.6	IBF——TARGET 3001	198
10.4.7	Novarm——DipTrace	198
10.5	免费的 PCB 设计工具	198
10.5.1	Altium——CircuitMaker	198
10.5.2	Sunstone Circuits——PCB123	198
10.5.3	ExpressPCB	199
10.5.4	Advanced Circuits——PCB Artist	199

10.5.5	KiCad——EDA 软件套件	199
10.5.6	RS Components——DesignSpark PCB	199
10.5.7	ZenitPCB——ZenitPCB 布局	199
10.5.8	Osmond——OsmondPCB	199
10.5.9	gEDA——gEDA PCB	199
10.5.10	Fritzing——PCB 视图	200
10.5.11	EasyEDA——EasyEDA 编辑器	200
10.6	信号完整性和 EMC 工具	200
10.6.1	SiSoft——量子通道设计器和量子——SI	200
10.6.2	ANSYS——HFSS and Slwave	200
10.6.3	Polar Instruments——Si9000e	201
10.6.4	CST——CST Studio Suite	201
10.6.5	Sonnet Software——Sonnet Suites	201
10.6.6	E-System Design——Sphinx	201
10.6.7	IBM/Moss Bay EDA——EMSAT	201
10.6.8	EMS Plus——FEMAS	202
10.7	需考虑的关键问题	202
10.8	扩展	202
10.8.1	主要的 PCB 设计工具	202
10.8.2	低价 PCB 设计工具	203
10.8.3	免费 PCB 设计工具	203
10.8.4	信号完整性和 EMC 工具	203
10.8.5	PCB 设计展会	203
10.8.6	PCB 设计刊物	204
第 11 章	PCB 设计过程	205
11.1	引言	205
11.2	虚拟原型过程	207
11.2.1	选择零件	207
11.2.2	构件模型	208
11.2.3	模拟拟议的网络	208
11.2.4	建立初步网表	208
11.2.5	分析电力输送需求	209
11.2.6	分析布局空间需求	209
11.2.7	构建 PCB 堆叠并将平面分配给电力系统	209
11.2.8	制定初步布局规则	210
11.2.9	构建网表	210
11.2.10	执行逻辑仿真	210
11.2.11	将零件放置在表面上	210

11.2.12	提取时域分析的预计网格长度	210
11.2.13	执行时序分析	211
11.2.14	执行热分析	211
11.2.15	基于热和时序分析调整放置	211
11.2.16	制定最终布局规则	211
11.2.17	PCB 布局	212
11.2.18	后端设计规则检查	213
11.2.19	PCB 制造文件	213
11.2.20	档案设计	214
11.3	进行从硬件原型到虚拟原型的转换	214
第 12 章	电子和机械设计参数	215
12.1	电气和机械设计参数概述	215
12.2	数字信号完整性概述	216
12.2.1	信号传输期间可能出现的波形错误	217
12.2.2	导致信号完整性问题的原因	218
12.2.3	快速驱动器边沿速率	218
12.2.4	物理传输线特性	219
12.2.5	传输线的四个关键电气特性	220
12.2.6	特征阻抗	221
12.2.7	传输线上的信号反射	222
12.2.8	走线占传输线的长度	222
12.2.9	阻抗不匹配	223
12.2.10	3T 方法	223
12.3	终止的网络和终止使用的类型	226
12.3.1	数字串扰	228
12.3.2	PCB 中的串扰说明	228
12.3.3	最小化串扰准则	230
12.3.4	介电效应和参考层间距	230
12.3.5	铜厚度	232
12.3.6	减少并联耦合长度以减少串扰	232
12.3.7	增加走线间距以减少串扰	232
12.3.8	更改电介质材料	232
12.4	差分信号介绍	234
12.4.1	每秒多千兆位 SERDES 信号简介	235
12.4.2	平衡损失预算	235
12.4.3	背板互连转换中的损耗	236
12.4.4	PCB 互连损耗	236
12.4.5	芯片级损耗补偿	237

12.5	电压完整性介绍	238
12.5.1	最佳电压分配需要	238
12.5.2	配电网作为输电线路	238
12.5.3	用于配电网的不同类型的分立电容器	239
12.5.4	PDN 应用的电容器物理特性	240
12.5.5	与安装配置相关的引线长度电感	242
12.6	电磁兼容性介绍	245
12.6.1	PCB 中 EMI 的产生	245
12.6.2	传输线布线以确保最佳信号完整性	246
12.6.3	RF 返回路径	246
12.6.4	RF 返回路径中的违例或拆分	248
12.6.5	接地概念与方法	248
12.6.6	信号参考	249
12.6.7	系统的接地方法	249
12.6.8	单点接地方法	249
12.6.9	多点连接到单参考点(也称为多点接地)	250
12.6.10	混合接地	250
12.6.11	PCB 电子产品安全中参考地的两个原因	251
12.7	机械设计要求	253
12.7.1	机械设计的一般要求	253
12.7.2	尺寸和公差	254
12.7.3	机械安装 PCBA	254
12.7.4	安装机壳之后的 PCB 的物理支撑	254
12.7.5	固定 PCBA	255
12.7.6	拔取 PCBA	255
12.7.7	冲击和振动	255
12.7.8	机械冲击	256
12.7.9	振动	256
12.7.10	冲击和振动	256
12.8	边缘安装的类型	257
12.8.1	电路板扰度	257
12.8.2	PCBA 的固有(基本)共振	258
12.9	致谢	259
12.10	参考文献	259
第 13 章	印制电路板的设计基础	261
13.1	软件选择	261
13.2	标准	261
13.2.1	电路板种类的应用	262

13.2.2	生产性水平	262
13.2.3	通用标准目标	262
13.3	原理图	263
13.3.1	原理图标准	263
13.3.2	原理图软件	263
13.4	零件	264
13.5	垫片	266
13.6	新的电路板设计	267
13.7	放置	270
13.8	平面	273
13.9	堆叠	274
13.10	布局	275
13.11	整理	281
13.12	保存	282
13.13	结论	282
第 14 章	电流在印制电路中的承载能力	284
14.1	引言	284
14.2	导体(走线)尺寸特性	284
14.3	基线图	289
14.3.1	基线测试	289
14.3.2	铜平面(建模)	291
14.3.3	基板材料	292
14.3.4	板厚度	292
14.3.5	环境	292
14.3.6	芯板厚度	293
14.3.7	平行导体	293
14.3.8	其他研究领域	294
14.4	总结	294
14.5	参考文献	294
第 15 章	PCB 散热性设计	295
15.1	引言	295
15.2	PCB 作为焊接到元件的散热片	295
15.3	优化 PCB 的热性能	296
15.3.1	跟踪布局的影响	296
15.3.2	热平面	298
15.3.3	热通孔	300
15.3.4	PCB 上的元件间距	302