

Mc  
Graw  
Hill  
Education

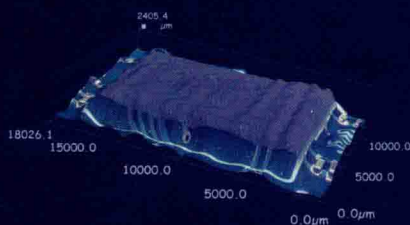
# 印制电路手册

(原书第6版·中文修订版)

[美] Clyde F. Coombs, Jr. 主编  
乔书晓 王雪涛 陈黎阳 等 编译

## PRINTED CIRCUITS HANDBOOK

SIXTH EDITION



科学出版社

# 印制电路手册

(原书第6版·中文修订版)

[美] Clyde F. Coombs, Jr. 主编  
乔书晓 王雪涛 陈黎阳 等 编译



科学出版社

北京

图字：01-2012-4734号

## 内 容 简 介

本书是Printed Circuits Handbook第6版的中文简体修订版。由来自世界各地的印制电路领域的专家团队撰写，内容包含设计方法、材料、制造技术、焊接和组装技术、测试技术、质量和可接受性、可焊性、可靠性、废物处理，也涵盖高密度互连（HDI）技术、挠性和刚挠结合印制电路板技术，还包括无铅印制电路板的设计、制造及焊接技术，无铅材料和无铅可靠性模型的最新信息等，为印制电路各个相关的方面都提供权威的指导，是印制电路学术界和行业内最新研究成果与最佳工程实践经验的总结。

本书是印制电路制造行业的技术手册，适合行业管理者、设计者、工程师和相关技术人员参阅。

### 图书在版编目（CIP）数据

印制电路手册：原书第6版·中文修订版/（美）克莱德·F.库姆斯（Clyde F. Coombs, Jr.）主编；乔书晓等编译.—北京：科学出版社，2018.8

书名原文：Printed Circuits Handbook, Sixth Edition

ISBN 978-7-03-058141-9

I.印… II.①克…②乔… III.印制电路-电路设计-手册 IV.TN41-62

中国版本图书馆CIP数据核字（2018）第135054号

责任编辑：喻永光 杨 凯 责任制作：魏 谨

责任印制：张克忠 封面设计：张 凌

北京东方科龙图文有限公司 制作

<http://www.okbook.com.cn>

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码：100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2018年8月第 一 版 开本：787×1092 1/16

2018年8月第一次印刷 印张：84

字数：2 200 000

定价：398.00元

（如有印装质量问题，我社负责调换）

**Clyde F. Coombs, Jr.**  
**Printed Circuits Handbook, Sixth Edition**  
**0-07-146734-3**

Copyright © 2008 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 China Science Publishing & Media Ltd. This edition is authorized for sale in the People's Republic of China only, excluding Hong Kong, Macao SAR and Taiwan.

Copyright © 2015 by McGraw-Hill Education and China Science Publishing & Media Ltd.

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）教育出版公司和中国科技出版传媒股份有限公司合作出版。此版本未经授权仅限在中华人民共和国境内（不包括香港特别行政区、澳门特别行政区和台湾）销售。

版权 ©2015 由麦格劳 - 希尔（亚洲）教育出版公司与中国科技出版传媒股份有限公司所有。

本书封面贴有 McGraw-Hill Education 公司防伪标签，无标签者不得销售。  
北京市版权局著作权合同登记号：01-2012-4734

### 主编简介

Clyde F. Coombs, Jr. 已经从惠普公司退休了，他曾在惠普公司担任电子工程师和经理。在现今的专业出版领域，他是一位非常成功的编辑，他开发和编辑了所有先前 5 个版本的《印制电路手册》，还编辑了《电子仪器手册》和《通信网络测试与测量手册》——3 本麦格劳 - 希尔最畅销的技术手册。

# 中译本修订版序

《印制电路手册（原书第6版）》原著（Printed Circuits Handbook, Sixth Edition）的出版，距今已有近10年。在这10年中，印制电路技术一直在先进的元器件封装技术、无铅焊接技术和3D打印技术等推动下快速发展，一些10年前刚刚崭露头角、很不成熟的技术得到了大量应用。因此，《印制电路手册（原书第6版）》有必要及时修订内容，以适应新的技术发展的需要。

2015年，在《印制电路手册（原书第6版）》的翻译阶段，我们就注意到，作为占全球PCB产值50%以上的中国，还没有这样全面、系统的行业技术工具书，译者们和不少同行都希望尽快推出符合中国印制电路行业现状、反映中国制造先进技术水平的中文修订版。

而近几年来，尤其是《印制电路手册（原书第6版）》出版后的2年来，中国印制电路行业迎来了大的发展机遇，更多的公司受到资本市场的青睐，成功在国内上市，这为中国印制电路行业的转型升级和高速发展注入了强大的动力。我们有理由相信，中国的印制电路行业能够抓住这个机遇，在未来10年或者更短的时间内完成从印制电路大国到印制电路强国的转变，完成从传统技术到先进技术的转变，完成先进材料和设备从进口到国产的转变，完成从传统制造到信息化或智能化制造的转变。这个行业，需要更多的中国声音。

正因如此，科学出版社于2017年4月份开始筹备《印制电路手册（原书第6版）》的修订工作，寄望于反映印制电路技术在国际和国内的最新发展状况，并为中国印制电路行业带来新的有具体意义的指南。

本修订版中，20%的章节为新增或者新编，超过24%的章节进行了大幅度修订，30%的章节进行了小幅度修订。新增的《PCB的信号完整性》和《PCB的电源完整性》，很好地反映了业内在设计部分关注的重点。《PCB制造的信息化》更是中国印制电路行业从传统制造到智能化制造所必经阶段，最能反映目前国内印制电路行业变革的阶段性需求，提供了PCB制造业信息化建设的基本方向和思路。新增的《金属基PCB的制造》和《高速PCB的制造》，则及时反映了这些特定要求产品的迅速发展。新增的《PCB的失效分析》，是笔者多年积累的失效分析经验提炼，对PCB的失效分析很有指导意义。来自业内的专家们对各部分，尤其是制造、工程和设计、裸板测试、挠性印制板部分的各章节进行了大幅度修订，从而使这些内容能跟上技术的进步，贴近中国印制电路行业，具有中国温度。除此之外，其他章节也都进行了不同程度的审校。

感谢梁景鸣、巫勤富、李子达（第3~6章）、柳珩（第11~14章）、吕峰（第40章、第47章、第52章）、莫欣满（第62~64章、66章）的编译和审校。王雪涛、陈黎阳和乔书晓亦完成了部分内容的编译和审校，并对全部内容进行了复核。全书由乔书晓统稿和总审。感谢他们将近一年时间的辛苦付出，感谢他们家人的理解和支持！感谢深圳市兴森快捷电路科

技股份有限公司对本书修订工作的大力支持!

再次感谢为《印制电路手册(原书第6版)》出版做出过贡献的译者、审校者,以及所有关心、支持本书出版和修订工作的学者、专家和业内人士。

显然,在有限的时间内把所有先进的印制电路技术悉数纳入修订版是困难的。但毫无疑问,所有参与修订的人员都希望尽可能把前沿的技术与思路分享给读者,以希望为印制电路行业的发展贡献自己的力量。同时因为能力有限和时间关系,我们再次恳请广大读者不吝赐教!同学习,共进步!

关于本书的任何交流与意见,可邮件联系:

乔书晓(技术) [qsx@chinafastprint.com](mailto:qsx@chinafastprint.com)

喻永光(编辑) [597070376@qq.com](mailto:597070376@qq.com)

# 前言

随着欧盟（EU）有害物质限制指令（RoHS）的实施，印制电路行业已被迫在经历一场史无前例的技术革命，其结果通常被称为“无铅”。除了铅，限制的材料还有几种，但读者会发现这个术语贯穿了整本书。这样强调的原因是，消除元件和电路板互连焊料中的铅对行业的影响巨大。

这些变化并不是由市场或技术的进步需求所驱动的。相反，他们立法的理由是这样可以造福社会。虽然实际的效果，无论是正面还是负面的，消除印制电路板组件中的铅对全球环境的影响，成了争论的来源。但现实是它已经在全球范围内被采用，并成为设计、制造、组装印制电路的事实。

自印制电路板开始使用以来，锡铅焊料一直是互连的基础，所有已经开发的相关材料和工艺都以此为中心。因此，向新焊接合金的突然转变，必定会给相关的或受其影响的工艺和技术带来许多问题，因为它们现在必须适应和改变，以满足无铅的要求。不能依靠过去的经验或以前的文献来寻求这些问题的解决办法。本书的目的就是提供尽可能具体且尽可能多的细节信息，使用已经存在的行业标准，或具有良好的技术基础并已经在工作中被证明的最佳实践。

其中，焊料的冶金和配合面的变化最明显。然而，所有的替代焊料合金都比共晶焊料有更高的熔化温度，这就需要新的基材、新的组装工艺，以及新的测试、检验和可靠性的标准和方法。谈及具体的无铅替代合金时，我们开始从元素周期表中寻找候选元素，并考虑当这些元素组成合金时的效果。因此，对于给定的应用，我们依靠物理学和材料学来帮助确定合适的替代材料。同样，为了帮助读者选择在更高的组装和操作温度、更快的组装速度下的最好的基材，我们也对材料的化学性质做了描述。

自欧盟颁布无铅指令以来，在这种新形势下定义和预测产品的可靠性问题，已经采纳了大量的企业意见。预测模型和历史都是基于锡铅合金的，而无铅合金需要新的模型。在这个版本中，我们已经增加了新的材料，并且扩大了关于该主题现有的讨论。

虽然无铅技术革命已经得到了很多的关注，但是随着行业继续满足更高的电路和元件密度、更快的电路的需要，无铅技术仍然有着重要的渐进式改变。因此，印制电路板将被设计得越来越小，或者越来越大，以满足具体应用的需要。本书的更新能帮助读者取得这方面的进步。此外，随着印制电路行业持续地全球性发展，以及同时来自减少上市时间和量产时间的持续压力，迫切需要一个覆盖布局和设计信息及通信的，使供应链中的每一个组织元素，在最少的人工干预和最小的设计说明延迟下，能够有效运行的国际标准。我们首次在章节中增加了描述整个过程的这部分内容。另外，我们也引入了关于埋入式元件和敷形涂层的讨论，二者都是许多技术应用的重要问题。

本版讲述了印制电路工艺中的这些新元素，包括革命性的和渐进性的，同时仍然保持了其在技术基础中的基本地位。无论前沿技术变得多么复杂，所有印制电路板的核心仍是各种形式的镀覆孔。这仍然是 20 世纪的重要技术成就之一。虽然在镀覆孔基础上，印制电路技术经过多年的发展，变得更加可靠、高效和可复制，但在本书第 1 版中描述的内容在第 6 版中仍然适用。因此，这些新技术仍然能找到介绍性信息，经验丰富的从业者则能找到标准工艺技术和最佳实践来帮助他们了解该领域的最新发展。

随着工业的不断发展，印制电路板已经变得更加专业化。这就需要人们去规范标准文档和通信技术，以及去了解所有供应商在整个产业链中的特定功能。因此，必须知道每一步的工艺能力和工艺局限性。在设计电路板时，头脑中必须对这些十分清楚。并且必须在电路板产品的责任从设计者到制造者，再到装配者，一直到最终用户之前，事先达成一致的可接受标准。这也形成了之前没有深入涉足印制电路问题，而现在需要在工作中找到对印制电路性能至关重要的应用知识的一群人。本书也同样为这些人提供了信息。在书中，他们不仅能找到对理解问题有用的基本信息，也能找到对所有成功的价值链的开发和管理的具体指南。

虽然业界倾向于用术语“印制线路”或“蚀刻线路”作为本书的主题，但“印制电路”已成为世界认可的代表工艺和产品的术语。因此，我们将交替使用这些术语。

印制电路技术中所有这些变化的影响都体现在这本书中，超过 75% 的章节要么是被修订过，要么是新添加到本版中的。这意味着，第 6 版包含第 1 版以来的最新信息。

感谢国际电子工业联接协会（IPC）的领导和员工们的合作和支持，不只是这个版本，先前的所有版本也一样。IPC 在 Ray Pritchard（现已退休）和 Dieter Bergman 的领导下，到 2007 年已成立 50 周年。IPC 已经做出了巨大的贡献，不仅仅是对电子行业，还对这个越来越依赖电子产品的世界。特别感谢 Jack Crawford 在提供和确认 IPC 材料上的帮助，这些材料对本版的筹备至关重要。

最后，我由衷地感谢所有参与本书编写工作的作者们，他们耗费了大量的时间和精力来准备这本书的内容，他们为这本著作和行业做出了巨大的贡献！

主编 Clyde F. Coombs, Jr.



# 目 录

## 第 1 部分 PCB 的技术驱动因素

---

### 第 1 章 电子封装和高密度互连

|                    |    |
|--------------------|----|
| 1.1 引言             | 3  |
| 1.2 互连 (HDI) 变革的衡量 | 3  |
| 1.3 互连的层次结构        | 5  |
| 1.4 互连选择的影响因素      | 6  |
| 1.5 IC 和封装         | 8  |
| 1.6 密度评估           | 10 |
| 1.7 提高 PCB 密度的方法   | 11 |

### 第 2 章 PCB 的类型

|                  |    |
|------------------|----|
| 2.1 引言           | 16 |
| 2.2 PCB 的分类      | 16 |
| 2.3 有机与无机基板      | 17 |
| 2.4 图形法和分立布线法印制板 | 18 |
| 2.5 刚性和挠性印制板     | 18 |
| 2.6 图形法制作的印制板    | 19 |
| 2.7 模制互连器件 (MID) | 22 |
| 2.8 镀覆孔技术        | 22 |
| 2.9 总结           | 24 |

## 第 2 部分 材 料

---

### 第 3 章 基材介绍

|                  |    |
|------------------|----|
| 3.1 引言           | 27 |
| 3.2 等级与标准        | 27 |
| 3.3 基材的性能指标      | 31 |
| 3.4 FR-4 的种类     | 34 |
| 3.5 层压板的鉴别       | 35 |
| 3.6 粘结片的鉴别       | 38 |
| 3.7 层压板和粘结片的制造工艺 | 39 |

### 第 4 章 基材的成分

|            |    |
|------------|----|
| 4.1 引言     | 43 |
| 4.2 环氧树脂体系 | 44 |

|                                    |     |
|------------------------------------|-----|
| 4.3 其他树脂体系 .....                   | 46  |
| 4.4 添加剂 .....                      | 48  |
| 4.5 增强材料 .....                     | 51  |
| 4.6 导体材料 .....                     | 56  |
| <b>第 5 章 基材的性能</b>                 |     |
| 5.1 引 言 .....                      | 62  |
| 5.2 热性能、物理性能及机械性能 .....            | 62  |
| 5.3 电气性能 .....                     | 72  |
| <b>第 6 章 基材的性能问题</b>               |     |
| 6.1 引 言 .....                      | 75  |
| 6.2 提高线路密度的方法 .....                | 75  |
| 6.3 铜 箔 .....                      | 76  |
| 6.4 层压板的配本结构 .....                 | 79  |
| 6.5 粘结片的选择和厚度 .....                | 81  |
| 6.6 尺寸稳定性 .....                    | 81  |
| 6.7 高密度互连 / 微孔材料 .....             | 83  |
| 6.8 CAF 的形成 .....                  | 85  |
| 6.9 电气性能 .....                     | 90  |
| 6.10 低 $D_k/D_f$ 无铅兼容材料的电气性能 ..... | 100 |
| <b>第 7 章 无铅组装对基材的影响</b>            |     |
| 7.1 引 言 .....                      | 102 |
| 7.2 RoHS 基础知识 .....                | 102 |
| 7.3 基材的兼容性问题 .....                 | 103 |
| 7.4 无铅组装对基材成分的影响 .....             | 104 |
| 7.5 关键的基材性能 .....                  | 105 |
| 7.6 无铅组装对 PCB 可靠性和材料选择的影响 .....    | 116 |
| 7.7 总 结 .....                      | 118 |
| <b>第 8 章 无铅组装的基材选型</b>             |     |
| 8.1 引 言 .....                      | 120 |
| 8.2 PCB 制造与组装的相互影响 .....           | 120 |
| 8.3 为具体的应用选择合适的基材 .....            | 124 |
| 8.4 应用举例 .....                     | 129 |
| 8.5 无铅组装峰值温度范围的讨论 .....            | 130 |
| 8.6 无铅应用及 IPC-4101 规格单 .....       | 130 |
| 8.7 为无铅应用附加的基材选择 .....             | 131 |
| 8.8 总 结 .....                      | 132 |

**第 9 章 层压板的认证和测试**

|              |     |
|--------------|-----|
| 9.1 引 言      | 133 |
| 9.2 行业标准     | 134 |
| 9.3 层压板的测试方案 | 136 |
| 9.4 基础性测试    | 137 |
| 9.5 完整的材料测试  | 140 |
| 9.6 鉴定测试计划   | 150 |
| 9.7 可制造性     | 151 |

**第 3 部分 工程和设计****第 10 章 PCB 的物理特性**

|                      |     |
|----------------------|-----|
| 10.1 PCB 的设计类型       | 155 |
| 10.2 PCB 类型和电子电路封装类型 | 159 |
| 10.3 连接元件的方法         | 163 |
| 10.4 元件封装类型          | 163 |
| 10.5 材料的选择           | 166 |
| 10.6 制造方法            | 169 |
| 10.7 选择封装类型和制造商      | 170 |

**第 11 章 PCB 设计流程**

|                            |     |
|----------------------------|-----|
| 11.1 设计目标                  | 172 |
| 11.2 设计流程                  | 172 |
| 11.3 设计工具                  | 178 |
| 11.4 选择一套设计工具              | 183 |
| 11.5 CAE、CAD 和 CAM 工具的彼此接口 | 184 |
| 11.6 设计流程的输入               | 184 |

**第 12 章 电子和机械设计参数**

|                       |     |
|-----------------------|-----|
| 12.1 PCB 设计要求         | 186 |
| 12.2 电气信号完整性介绍        | 186 |
| 12.3 电磁兼容性概述          | 189 |
| 12.4 噪声预算             | 190 |
| 12.5 信号完整性设计与电磁兼容     | 191 |
| 12.6 电磁干扰 (EMI) 的设计要求 | 195 |
| 12.7 机械设计要求           | 199 |

**第 13 章 PCB 的电流承载能力**

|                   |     |
|-------------------|-----|
| 13.1 引 言          | 207 |
| 13.2 导体 (线路) 尺寸图表 | 207 |
| 13.3 载流量          | 208 |

|   |     |
|---|-----|
| 13.4 图 表  | 210 |
| 13.5 基线图表                                       | 214 |
| 13.6 奇形怪状的几何形状与“瑞士奶酪”效应                         | 220 |
| 13.7 铜 厚  | 221 |
| <b>第 14 章 PCB 的热性能设计</b>                        |     |
| 14.1 引 言  | 223 |
| 14.2 PCB 作为焊接元件的散热器                             | 223 |
| 14.3 优化 PCB 热性能                                 | 224 |
| 14.4 热传导到机箱                                     | 231 |
| 14.5 大功率 PCB 散热器连接的要求                           | 233 |
| 14.6 PCB 的热性能建模                                 | 233 |
| <b>第 15 章 数据格式化和交换</b>                          |     |
| 15.1 数据交换简介                                     | 237 |
| 15.2 数据交换过程                                     | 238 |
| 15.3 数据交换格式                                     | 242 |
| 15.4 进化的驱动力                                     | 253 |
| 15.5 致 谢  | 253 |
| <b>第 16 章 设计、制造和组装的规划</b>                       |     |
| 16.1 引 言  | 255 |
| 16.2 一般注意事项                                     | 256 |
| 16.3 新产品设计                                      | 257 |
| 16.4 布局权衡规划                                     | 261 |
| 16.5 PCB 制造权衡规划                                 | 267 |
| 16.6 组装规划权衡                                     | 273 |
| <b>第 17 章 制造信息、文档和 CAM 工具转换 ( 含 PCB 制造与组装 )</b> |     |
| 17.1 引 言  | 276 |
| 17.2 制造信息                                       | 276 |
| 17.3 初步设计审查                                     | 281 |
| 17.4 设计导入                                       | 286 |
| 17.5 设计审查和分析                                    | 291 |
| 17.6 CAM 工装工艺                                   | 291 |
| 17.7 额外的流程                                      | 300 |
| 17.8 致 谢  | 301 |
| <b>第 18 章 PCB 制造信息化</b>                         |     |
| 18.1 引 言  | 302 |
| 18.2 PCB 企业信息化战略匹配                              | 304 |
| 18.3 PCB 企业信息化总体架构                              | 307 |

|                          |                              |     |
|--------------------------|------------------------------|-----|
| 18.4                     | PCB 企业信息化总体架构的建立和实施 .....    | 311 |
| 18.5                     | 主要信息化系统介绍 .....              | 316 |
| 18.6                     | 总 结 .....                    | 320 |
| <b>第 19 章 埋入式元件</b>      |                              |     |
| 19.1                     | 引 言 .....                    | 322 |
| 19.2                     | 定义和范例 .....                  | 322 |
| 19.3                     | 埋入式电阻 .....                  | 323 |
| 19.4                     | 埋入式电容 .....                  | 331 |
| 19.5                     | 埋入式电感 .....                  | 332 |
| 19.6                     | 将分立的 SMT 元件埋入多层 PCB 内部 ..... | 332 |
| 19.7                     | 埋入式电阻、电容的相关标准 .....          | 333 |
| <b>第 20 章 PCB 的信号完整性</b> |                              |     |
| 20.1                     | 引 言 .....                    | 335 |
| 20.2                     | 传输线与特征阻抗 .....               | 336 |
| 20.3                     | 传输线仿真建模 .....                | 339 |
| 20.4                     | 反射的产生与抑制 .....               | 341 |
| 20.5                     | 串扰的产生与抑制 .....               | 343 |
| 20.6                     | 仿真案例 .....                   | 347 |
| <b>第 21 章 PCB 的电源完整性</b> |                              |     |
| 21.1                     | 引 言 .....                    | 353 |
| 21.2                     | 电源分配网络 .....                 | 353 |
| 21.3                     | 电源噪声的来源 .....                | 354 |
| 21.4                     | 目标阻抗 .....                   | 355 |
| 21.5                     | 去耦电容 .....                   | 356 |
| 21.6                     | IR Drop (直流压降) .....         | 360 |
| 21.7                     | 电源 / 地平面噪声 .....             | 361 |
| 21.8                     | 仿真案例 .....                   | 361 |
| <b>第 4 部分 高密度互连</b>      |                              |     |
| <b>第 22 章 HDI 技术介绍</b>   |                              |     |
| 22.1                     | 引 言 .....                    | 369 |
| 22.2                     | 定 义 .....                    | 369 |
| 22.3                     | HDI 的结构 .....                | 372 |
| 22.4                     | 设 计 .....                    | 375 |
| 22.5                     | 介质材料与涂敷方法 .....              | 376 |
| 22.6                     | HDI 制造工艺 .....               | 386 |

**第 23 章 先进的 HDI 技术**

|                  |     |
|------------------|-----|
| 23.1 引 言         | 395 |
| 23.2 HDI 工艺因素的定义 | 395 |
| 23.3 HDI 制造工艺    | 397 |
| 23.4 下一代 HDI 工艺  | 420 |

**第 5 部分 制 造****第 24 章 钻孔工艺**

|                     |     |
|---------------------|-----|
| 24.1 引 言            | 427 |
| 24.2 孔及其评价方法        | 427 |
| 24.3 钻孔方法           | 430 |
| 24.4 钻孔流程           | 432 |
| 24.5 钻 头            | 432 |
| 24.6 涂层刀具           | 437 |
| 24.7 PCB 钻机         | 439 |
| 24.8 盖板和垫板          | 441 |
| 24.9 钻孔常见问题及原因分析与对策 | 443 |
| 24.10 特殊孔的加工方法      | 445 |

**第 25 章 成 像**

|              |     |
|--------------|-----|
| 25.1 引 言     | 448 |
| 25.2 感光材料    | 448 |
| 25.3 干膜型抗蚀剂  | 450 |
| 25.4 液体光致抗蚀剂 | 451 |
| 25.5 打印光致抗蚀剂 | 452 |
| 25.6 光致抗蚀剂工艺 | 452 |
| 25.7 可制造性设计  | 468 |

**第 26 章 多层板材料和工艺**

|                  |     |
|------------------|-----|
| 26.1 引 言         | 471 |
| 26.2 PCB 材料      | 472 |
| 26.3 多层结构的类型     | 483 |
| 26.4 ML-PCB 工艺流程 | 499 |
| 26.5 层压工艺        | 510 |
| 26.6 层压过程控制及故障处理 | 517 |
| 26.7 层压综述        | 520 |

**第 27 章 电镀前的准备**

|           |     |
|-----------|-----|
| 27.1 引 言  | 521 |
| 27.2 工艺用水 | 521 |

|      |          |     |
|------|----------|-----|
| 27.3 | 孔壁的预处理   | 524 |
| 27.4 | 化学镀铜     | 528 |
| 27.5 | 常见问题     | 533 |
| 27.6 | 孔金属化的新技术 | 536 |
| 27.7 | 致 谢      | 537 |

## 第 28 章 电 镀

|      |         |     |
|------|---------|-----|
| 28.1 | 引 言     | 539 |
| 28.2 | 电镀的基本原理 | 539 |
| 28.3 | 电镀铜     | 544 |
| 28.4 | 镀铜液检测技术 | 549 |
| 28.5 | 电镀锡     | 554 |
| 28.6 | 电镀镍     | 557 |
| 28.7 | 电镀金     | 559 |
| 28.8 | 致 谢     | 561 |

## 第 29 章 直接电镀

|       |             |     |
|-------|-------------|-----|
| 29.1  | 引 言         | 562 |
| 29.2  | 直接金属化技术概述   | 562 |
| 29.3  | 钯基体系        | 563 |
| 29.4  | 碳 / 石墨体系    | 565 |
| 29.5  | 导电聚合物体系     | 566 |
| 29.6  | 其他方法        | 566 |
| 29.7  | 不同体系的工艺步骤比较 | 567 |
| 29.8  | 水平工艺设备      | 568 |
| 29.9  | 工艺问题        | 568 |
| 29.10 | 总 结         | 568 |

## 第 30 章 PCB 的表面处理

|       |                  |     |
|-------|------------------|-----|
| 30.1  | 引 言              | 570 |
| 30.2  | 可供选择的表面处理        | 572 |
| 30.3  | 热风焊料整平           | 573 |
| 30.4  | 化学镀镍 / 浸金 (ENIG) | 575 |
| 30.5  | 有机可焊性保护膜         | 578 |
| 30.6  | 化学沉银             | 581 |
| 30.7  | 化学沉锡             | 584 |
| 30.8  | 电镀镍 / 金          | 586 |
| 30.9  | 其他表面处理           | 589 |
| 30.10 | 组装兼容性            | 590 |
| 30.11 | 可靠性测试            | 592 |
| 30.12 | 特定主题             | 593 |

## 第 31 章 阻焊工艺与技术

|                       |     |
|-----------------------|-----|
| 31.1 引 言              | 595 |
| 31.2 常用阻焊油墨类型         | 595 |
| 31.3 工艺流程             | 596 |
| 31.4 阻焊与表面处理和表面组装的兼容性 | 607 |
| 31.5 阻焊涂层的性能要求及测试标准   | 607 |
| 31.6 发展趋势             | 611 |

## 第 32 章 蚀刻工艺和技术

|                  |     |
|------------------|-----|
| 32.1 引 言         | 612 |
| 32.2 一般注意事项      | 612 |
| 32.3 抗蚀层的去除      | 615 |
| 32.4 蚀刻剂         | 618 |
| 32.5 其他 PCB 构成材料 | 628 |
| 32.6 其他非铜金属      | 629 |
| 32.7 蚀刻线路形成的基础   | 630 |
| 32.8 设备和技术       | 635 |

## 第 33 章 机械加工和铣外形

|                      |     |
|----------------------|-----|
| 33.1 引 言             | 643 |
| 33.2 冲孔(穿孔)          | 643 |
| 33.3 覆铜箔层压板的冲裁、剪切及切割 | 645 |
| 33.4 机械铣外形           | 647 |
| 33.5 激光铣外形           | 653 |
| 33.6 刻 痕             | 655 |
| 33.7 板边倒角            | 656 |
| 33.8 平底盲槽的加工         | 657 |
| 33.9 特殊平底槽的加工        | 657 |

## 第 34 章 高速 PCB 的制造

|             |     |
|-------------|-----|
| 34.1 引 言    | 659 |
| 34.2 材料的选择  | 659 |
| 34.3 关键加工工艺 | 673 |
| 34.4 性能检测   | 683 |

## 第 35 章 金属基 PCB 的制造

|                |     |
|----------------|-----|
| 35.1 引 言       | 689 |
| 35.2 散热原理      | 690 |
| 35.3 结构与特性     | 691 |
| 35.4 主要类别      | 693 |
| 35.5 工艺流程与制作要点 | 694 |



## 第 6 部分 裸板测试

### 第 36 章 裸板测试的目标及定义

|              |     |
|--------------|-----|
| 36.1 引 言     | 699 |
| 36.2 HDI 的影响 | 699 |
| 36.3 为什么测试?  | 700 |
| 36.4 电路板故障   | 702 |

### 第 37 章 裸板测试方法

|               |     |
|---------------|-----|
| 37.1 引 言      | 705 |
| 37.2 非电气测试方法  | 705 |
| 37.3 基本电气测试方法 | 706 |
| 37.4 专业电气测试方法 | 711 |
| 37.5 数据和夹具的准备 | 715 |
| 37.6 组合测试方法   | 720 |

### 第 38 章 裸板测试设备

|                    |     |
|--------------------|-----|
| 38.1 引 言           | 722 |
| 38.2 针床夹具系统        | 722 |
| 38.3 专用的(硬连线的)夹具系统 | 722 |
| 38.4 飞针测试系统        | 724 |
| 38.5 通用网格测试系统      | 724 |
| 38.6 飞针/移动探针测试系统   | 734 |
| 38.7 验证和修复         | 736 |
| 38.8 测试部门的规划和管理    | 737 |

### 第 39 章 HDI 裸板的特殊测试方法

|                |     |
|----------------|-----|
| 39.1 引 言       | 739 |
| 39.2 精细节距倾斜针夹具 | 740 |
| 39.3 弯梁夹具      | 740 |
| 39.4 飞 针       | 741 |
| 39.5 耦合板       | 741 |
| 39.6 短路平板      | 741 |
| 39.7 导电橡胶夹具    | 742 |
| 39.8 光学检测      | 742 |
| 39.9 非接触式测试方法  | 742 |
| 39.10 组合测试方法   | 743 |