

硬件电路工程师从入门到提高丛书

# 印制电路板设计

姜雪松 陈绮 许灵军 范博 编著



机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS



硬件电路工程师从入门到提高丛书

# 印制电路板设计

姜雪松 陈绮 许灵军 范博 编著



机械工业出版社

随着微电子技术的快速发展,印制电路板广泛应用于各个领域,目前几乎所有的电子设备中都包含相应的印制电路板。可见,掌握印制电路板的相关知识对于硬件工程师来说是十分重要的。

本书从实际应用的角度出发,详细地介绍了印制电路板设计的基本理论知识、印制电路板相关问题的分析与设计、不同类型印制电路板的设计方法和技巧,以及相应的开发软件。全书可以分为4个部分:第1部分介绍印制电路板的基本理论知识,第2部分重点讨论印制电路板设计的相关问题,第3部分重点介绍了常见印制电路板的设计方法和技巧,第4部分主要讨论常用开发软件 Protel DXP 的使用。

本书内容丰富、全面系统、实用性强,可以使读者快速全面地掌握印制电路板设计的知识。本书既可作为高等院校相关专业的教材或参考书,同时也可以作为广大硬件电路设计工程师必不可少的工具书或培训教材。

## 图书在版编目 (CIP) 数据

印制电路板设计/姜雪松等编著. —北京:机械工业出版社, 2005.10  
(硬件电路工程师从入门到提高丛书)

ISBN 7-111-17595-6

I. 印... II. 姜... III. 印刷电路—设计 IV. TN410.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 120260 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)  
责任编辑:张俊红 版式设计:冉晓华 责任校对:申春香  
封面设计:陈沛 责任印制:石冉  
保定市印刷厂印刷

2006 年 1 月第 1 版第 1 次印刷

787mm×1092mm  $\frac{1}{16}$ ·21.5 印张·532 千字

0001—4000 册

定价:36.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

本社购书热线电话 (010) 68326294

封面无防伪标均为盗版

# 硬件电路工程师从入门到提高丛书

## 编 委 会

主 编	姜雪松		
副主编	张俊红	张 凯	
编 委	方华刚	姜立冬	蒋 亮
	李晓凯	齐兆群	张 蓬
	赵 鑫	叶 琅	许灵军

# 丛 书 序

随着我国经济建设的发展和科学技术的不断进步，以往有些硬件电路设计的书籍内容已经比较陈旧、落后，难以适应高等院校教学和硬件电路工程师的要求。特别是在电子学和通信技术发展神速、社会发展日新月异的今天，如何适应这种情况和要求，已经成为一个必须认真考虑的问题。

如今，我国已成为全球增长潜力最大的电子产品消费大国，同时也是全球最大的移动电话市场和第3大PC市场，未来5年还将成为全球第2大半导体市场。中国市场的商机令世界各国IT公司心动不已，竞相调整中国战略，纷纷加大投资。这种情况必将导致对硬件电路工程师的海量需求。以IC人才为例，据不完全统计，全国目前定位于IC设计的企业大约200多家，IC设计人员还不到4000人，大都是小作坊模式，每个企业只有两三人掌握某一方面芯片的专长。从总体上看，按未来几年的市场需求，每年所需IC设计人才保守估计在5万人左右，如果要保证整个IC设计产业正常运作，人才需求量则高达20~50万。可见，提高硬件电路设计的人才教育，加强硬件电路工程师的人才储备，已经成为高等院校和各大IT公司的当务之急。

硬件电路设计是一门涉及到多门学科、实用性非常强的技术，因此硬件电路设计人员的培养需要进行大量的实践，而不仅仅是纸上谈兵。对于硬件电路设计人员的培养，除了需要培养具体的设计技术和设计技巧外，更为重要的是需要培养设计人员的创新意识。为此，组织一套理论严谨、内容新颖、实用性较强的硬件电路设计丛书，将会对我国的硬件电路设计人才的培养起到很大的推动作用。机械工业出版社的领导和编辑们独具慧眼，选题准确，决策果断，通过对硬件电路设计的相关选题进行层层筛选，最终选定了8个十分具有代表性的选题；同时组织了一批多年从事硬件电路设计、具有丰富实践经验的硬件电路设计工程师来进行编写，目的是保证这套丛书的质量和实用性。这套硬件电路工程师从入门到提高丛书包括：

- 《Verilog HDL 与数字电路设计》
- 《VHDL 与数字电路设计》
- 《可编程逻辑器件和 EDA 设计技术》
- 《印制电路板设计》
- 《Protel DXP 电路设计入门与应用》
- 《HyperLynx 仿真与 PCB 设计》
- 《DSP 原理与应用》
- 《嵌入式系统原理与应用》

这套丛书从实际应用的角度出发，详细介绍了目前硬件电路设计的各个主要方面。这套丛书非常重视可读性，内容深入浅出，便于读者自学；同时也非常注重实践性，列举了典型的工程实例，体现了硬件电路设计书籍的实践性，从而可以使读者快速高效地掌握相关领域的知识。这套丛书面向所有的硬件电路工程师和立志于成为硬件电路工程师的相关专业人

员，既可以作为高等院校相关专业高年级本科生、研究生的教材或者教学参考书，同时也可以作为各类从事电子系统设计的科研人员硬件电路工程师的应用参考书。

最后，预祝机械工业出版社硬件电路工程师从入门到提高丛书取得成功，为我国硬件电路工程师的人才培养和发展贡献一份力量。同时对参与这套丛书工作的各位作者、出版社的领导和编辑们表示衷心的感谢，感谢你们为我国硬件电路工程师的人才培养和储备所作的努力！

**硬件电路工程师从入门到提高丛书编委会**

# 前 言

自印制电路板诞生开始至发展到今天，已经将近有 70 年的历史了。印制电路板就是通常所说的 PCB (Printed Circuit Board)。一般来说，设计人员把按照预定设计在绝缘材料上制成的印制线路、印制元件或两者组合而成的导电图形称为印制电路；而把在绝缘材料上提供元器件之间电气连接的导线图形称为印制线路。这样，对于上面印制电路或印制线路的成品板来说，通常将它们称之为印制电路板，有时也可以简称为印制板。

随着微电子技术的快速发展，特别是晶体管在电子系统和设备中的广泛使用，目前印制电路板广泛应用于各个领域，几乎所有的电子设备中都包含相应的印制电路板。只要存在集成电路等电子元器件，它们之间的电气连接就需要采用印制电路板来进行连接，它提供了集成电路等电子元器件固定装配的机械支撑、实现集成电路等电子元器件之间的布线和电气连接或者电绝缘、提供所要求的电气特性；同时还可以为自动锡焊提供阻焊图形，以及为元器件插装、检查和维修提供识别字符和图形等。可见，掌握印制电路板的相关知识对于硬件工程师来说是十分重要的。

随着微电子技术和集成电路的快速发展，越来越多的高校学生或技术人员希望成为 IC 设计中的一员。对于硬件电路工程师来说，印制电路板的知识是他们必须掌握的一项基本技能。但是如今的硬件电路工程师还存在着一定的思想误区，认为自己只需要掌握印制电路板的设计就可以了，即掌握采用常用的开发软件来绘制印制电路板的具体方法。实际上，硬件电路工程师仅仅掌握开发软件的使用是远远不够的，这样并不能解决印制电路板实际设计过程中的众多问题，例如一些电磁兼容问题和信号完整性问题。同时，随着社会就业竞争的日益加剧，仅仅掌握印制电路板设计软件的基本使用方法往往是不够的，因此只有掌握了印制电路板设计的相关理论知识才能够在竞争中脱颖而出。

如今图书市场上已经出版了大量有关印制电路板设计的图书，但是这些图书的立足点都是基于印制电路板设计软件的介绍，例如 Protel 99SE、Protel DXP 以及 Power PCB 等。实际上，这类介绍印制电路板设计软件的图书并不能满足一个真正硬件电路设计工程师的需要，他们迫切需要一本能够指导其进行印制电路板设计的书籍，一本能够解决印制电路板设计所遇问题的书籍，而不是一般单单介绍印制电路板设计软件的书籍。本书正是从这个角度出发，力求能够满足硬件电路工程师实际设计的需要，目的是能够为他们的实际设计提供一些有建设性的指导。与其他的印制电路板设计的书籍不同，本书将会着重介绍印制电路板设计的基本理论知识、印制电路板相关问题的分析与设计、不同类型印制电路板的设计方法和技巧以及相应的开发软件，力求建立一个有关印制电路板设计的完整知识体系。相信通过本书的学习，读者不仅能够绘制印制电路板，而且能够设计出性能优良、可靠性良好的印制电路板，从而成为一名印制电路板设计专业的硬件工程师。

本书将从实际应用的角度出发，全面系统地介绍印制电路板设计的各方面知识。全书可以分为 4 个部分：第 1 部分介绍印制电路板的基本理论知识，主要内容包括印制电路板的概述、印制电路板的设计流程、印制电路板的设计原则和方法；第 2 部分重点讨论印制电路板

设计的相关问题，主要介绍了印制电路板的电磁兼容性分析、信号完整性分析、电源设计、可制造性和可测试性分析；第3部分介绍了常见印制电路板的设计方法和技巧，重点讨论了多层印制电路板的设计、高速印制电路板的设计和射频印制电路板的设计；第4部分主要讨论常用的印制电路板设计软件，将介绍 Protel DXP 的具体使用。需要说明的是，为了保持所用软件及仿真图的原样，书中部分图形符号和文字符号并未按国家标准修改处理，希望读者注意。

本书内容丰富、全面系统、实用性强，可以使读者快速全面地掌握印制电路板设计的知识。本书既可作为高等院校相关专业的教材或参考书，同时也可以作为广大硬件电路设计工程师必不可少的工具书或培训教材。

本书由姜雪松、陈绮、许灵军和范博共同编写，书中包含着作者多年来设计印制电路板的经验总结。其中，许灵军编写了第3章和第4章的内容，范博编写了第7章和第8章的内容，其余的章节由姜雪松和陈绮共同编写，全书由姜雪松统稿。在本书编写的过程中，张凯、方华刚、姜立冬、蒋亮、齐兆群、张蓬、赵鑫、叶琅、许灵军等编委会成员对本书的结构安排提供了宝贵的意见；赵海波、尤晓丽、葛树涛、程显奎和张博完成了全书的文字校对工作；邹德智、李玉红、刘磊、张学静、曹霖、李晓凯和吴鹏完成了书中资料的整理工作，这里向他们表示由衷的感谢。另外，作者在编写本书的过程中参考了不少专家和学者的著作、学术论文和经验总结等，在此对他们表示最诚挚的谢意！

限于作者的理论水平和实际开发经验，书中难免存在一些错误或不足之处，恳请广大读者和相关专家批评指正。

作 者



# 目 录

## 丛书序

## 前言

## 第 1 章 印制电路板概述 ..... 1

### 1.1 印制电路板基础 ..... 1

#### 1.1.1 印制电路板的发展 ..... 1

#### 1.1.2 印制电路板的分类 ..... 3

#### 1.1.3 印制电路板的基板选择 ..... 5

### 1.2 印制电路板的元素 ..... 6

#### 1.2.1 工作层面 ..... 7

#### 1.2.2 元器件封装 ..... 7

#### 1.2.3 铜膜导线 ..... 9

#### 1.2.4 焊盘 ..... 9

#### 1.2.5 过孔 ..... 10

### 1.3 印制电路板的阻燃性和电气性能 ..... 11

#### 1.3.1 印制电路板的阻燃性 ..... 11

#### 1.3.2 印制电路板的电气性能 ..... 12

## 第 2 章 印制电路板的设计原则和方法 ..... 16

### 2.1 印制电路板的加工流程 ..... 16

### 2.2 印制电路板的设计流程 ..... 20

#### 2.2.1 印制电路板的总体设计流程 ..... 20

#### 2.2.2 原理图的设计流程 ..... 21

#### 2.2.3 电路板的设计流程 ..... 23

### 2.3 印制电路板的基本设计方法 ..... 25

#### 2.3.1 印制电路板设计的基本工艺 ..... 25

#### 2.3.2 表面贴装技术 ..... 27

### 2.4 印制电路板的基本设计原则 ..... 28

#### 2.4.1 印制电路板的抗干扰设计原则 ..... 28

#### 2.4.2 印制电路板的热设计原则 ..... 31

#### 2.4.3 印制电路板的抗振设计原则 ..... 34

#### 2.4.4 印制电路板的可测试性设计原则 ..... 35

## 第 3 章 电磁兼容性分析 ..... 37

### 3.1 电磁兼容性概述 ..... 37

#### 3.1.1 电磁兼容性的定义 ..... 37

#### 3.1.2 电磁兼容的相关概念 ..... 37

#### 3.1.3 共模干扰和差模干扰 ..... 38

#### 3.1.4 电磁兼容的费用 ..... 40

### 3.2 电磁兼容控制技术 ..... 41

#### 3.2.1 传输通道抑制 ..... 41

#### 3.2.2 空间分离 ..... 44

#### 3.2.3 时间分隔 ..... 45

#### 3.2.4 频率管理 ..... 45

#### 3.2.5 电气隔离 ..... 46

### 3.3 电磁兼容控制技术在 IC 封装中的应用 ..... 46

### 3.4 印制电路板中的电磁兼容问题 ..... 48

#### 3.4.1 信号完整性 ..... 48

#### 3.4.2 减小传导发射和辐射发射 ..... 49

### 3.5 印制电路板中的电磁兼容设计 ..... 49

#### 3.5.1 印制电路板的元器件选择 ..... 50

#### 3.5.2 印制电路板的元器件布局 ..... 55

#### 3.5.3 印制电路板的布线 ..... 57

#### 3.5.4 印制电路板的接地设计 ..... 63

#### 3.5.5 模拟/数字混合印制电路板的设计 ..... 65

#### 3.5.6 印制电路板设计时的电路措施 ..... 67

### 3.6 高速印制电路板仿真 ..... 68

#### 3.6.1 高速印制电路板仿真概述 ..... 68

#### 3.6.2 高速印制电路板仿真中的电磁兼容分析 ..... 70

### 3.7 印制电路板电磁兼容分析工具介绍 ..... 74

#### 3.7.1 系统级 EMC/EMI 分析软件 EMC-Workbench ..... 74

#### 3.7.2 高频电磁场仿真软件 IE3D ..... 76

#### 3.7.3 EMC-Scanner (电磁兼容扫描仪及热辐射扫描仪) 介绍 ..... 80

## 第 4 章 信号完整性分析 ..... 86

4.1 信号完整性概述 .....	86	6.1.4 印制电路板设计的检查 .....	167
4.2 影响信号完整性的主要因素 .....	87	6.1.5 印制电路板 DFM 分析与优化 工具 CAM350 简介 .....	169
4.3 信号完整性分析模型 .....	89	6.2 印制电路板的可测试性 .....	171
4.3.1 印制电路板设计的 SI 分析模型 .....	89	6.2.1 印制电路板的可测试性概述 .....	171
4.3.2 SI 分析模型的选用 .....	93	6.2.2 印制电路板的测试策略 .....	175
4.4 信号完整性设计 .....	93	6.2.3 印制电路板可测试性设计技术 概述 .....	177
4.4.1 信号反射的形成 .....	94	6.2.4 几种可测试性设计技术 .....	178
4.4.2 阻抗匹配与端接技术 .....	95	<b>第 7 章 多层印制电路板的设计</b> .....	183
4.4.3 端接技术的仿真分析 .....	100	7.1 印制电路板的制作流程 .....	183
4.4.4 串扰分析 .....	101	7.2 叠层的设计 .....	184
4.5 信号完整性设计工具介绍 .....	109	7.2.1 电源和地的设计 .....	185
4.5.1 利用 APSIM 软件进行印制电路板 级仿真与分析 .....	109	7.2.2 布线 .....	186
4.5.2 其他信号完整性仿真工具 介绍 .....	130	7.2.3 层的结构 .....	187
4.5.3 SIA3000 信号完整性测试仪 .....	132	7.2.4 设计的一些规则 .....	188
4.6 建立企业内部的 SI 部门 .....	137	7.3 特征阻抗 .....	191
<b>第 5 章 印制电路板的电源设计</b> .....	138	7.3.1 特征阻抗的计算 .....	192
5.1 电源完整性简介 .....	138	7.3.2 阻抗控制 .....	192
5.2 电源噪声的起因及危害 .....	138	7.4 经典叠层 .....	196
5.3 电源阻抗设计 .....	139	7.4.1 4 层板 .....	197
5.4 同步开关噪声的分析 .....	140	7.4.2 6 层板 .....	197
5.5 去耦电容的使用 .....	141	7.4.3 8 层板 .....	198
5.5.1 电容引线的影响 .....	142	7.4.4 10 层以上 .....	199
5.5.2 电容介质和电压的影响 .....	143	<b>第 8 章 高速印制电路板的设计</b> .....	201
5.5.3 温度的影响 .....	144	8.1 基本概念 .....	201
5.5.4 其他电容的使用 .....	144	8.2 传输线理论 .....	206
5.6 印制电路板的地设计 .....	145	8.2.1 普通点对点布线的缺点 .....	206
5.6.1 地的种类 .....	146	8.2.2 无线均匀传输线 .....	207
5.6.2 接地方式和接地电阻 .....	147	8.2.3 常见传输线 .....	217
5.7 印制电路板的回流设计 .....	148	8.3 传输线效应的对策 .....	220
5.7.1 印制电路板上的回流分类 .....	148	8.3.1 合理确定信号走线的长度 .....	220
5.7.2 分割电源平面与 EMI 的仿真 .....	149	8.3.2 合理叠层 .....	221
<b>第 6 章 印制电路板的可制造性与 可测试性</b> .....	155	8.3.3 终端匹配 .....	221
6.1 印制电路板的可制造性 .....	155	8.3.4 合理规划走线的拓扑结构 .....	221
6.1.1 印制电路板可制造性设计 概述 .....	155	8.4 高速电路设计技巧 .....	222
6.1.2 印制电路板生产工艺与设计 .....	156	8.4.1 叠层 .....	222
6.1.3 印制电路板的可制造性设计 规范 .....	162	8.4.2 走线 .....	222
		8.4.3 高速电路中的去耦设计 .....	224
		8.5 高速时钟电路的设计 .....	227
		8.5.1 时钟源的电源滤波 .....	227
		8.5.2 时钟走线上的串扰问题 .....	229

8.5.3 延时的调整 .....	229	9.4.3 各种射频电路的设计准则 .....	271
8.5.4 时钟总线上时钟接收器的 去耦 .....	230	<b>第 10 章 印制电路板设计系统</b>	
8.5.5 时钟信号的布线 .....	230	——Protel DXP .....	273
<b>8.6 通孔的设计</b> .....	231	<b>10.1 Protel DXP 概述</b> .....	273
8.6.1 机械尺寸的选择 .....	231	10.1.1 Protel 设计系统的发展历史 .....	273
8.6.2 通孔电容的计算 .....	232	10.1.2 Protel DXP 的主要特点 .....	274
8.6.3 通孔电感的计算 .....	232	10.1.3 Protel DXP 的基本操作界面 .....	276
<b>第 9 章 射频印制电路板的设计</b> .....	233	<b>10.2 原理图设计</b> .....	286
<b>9.1 射频电路简介</b> .....	233	10.2.1 新建原理图文件 .....	287
<b>9.2 射频微波理论知识</b> .....	233	10.2.2 装载元件库 .....	291
9.2.1 无源器件 .....	234	10.2.3 放置元件并布局 .....	293
9.2.2 射频传输线理论 .....	236	10.2.4 原理图的布线工具 .....	300
9.2.3 Smith 圆图概念 .....	240	10.2.5 原理图的绘图工具 .....	305
9.2.4 二端口网络与 $S$ 参数 .....	243	10.2.6 原理图的 ERC .....	310
9.2.5 阻抗变换及匹配 .....	244	10.2.7 原理图的报表生成 .....	311
<b>9.3 射频微波电路设计</b> .....	247	<b>10.3 印制电路板设计</b> .....	314
9.3.1 高功率放大器 .....	248	10.3.1 新建 PCB 文件 .....	314
9.3.2 低噪声放大器 .....	252	10.3.2 添加元件封装库和网络 .....	320
9.3.3 混频器 .....	258	10.3.3 元件自动布局 .....	322
9.3.4 频率源 .....	259	10.3.4 元件手工布局 .....	323
9.3.5 射频微波滤波器 .....	264	10.3.5 PCB 自动布线 .....	326
<b>9.4 射频印制电路板设计</b> .....	266	10.3.6 PCB 手工布线 .....	327
9.4.1 射频电路的设计措施 .....	267	10.3.7 PCB 的 DRC 和报表生成 .....	331
9.4.2 射频印制电路板的分区技巧 .....	268	<b>参考文献</b> .....	333

# 第 1 章 印制电路板概述

一般来说,所谓印制电路板就是通过电路板上的印制导线、焊盘以及金属化过孔等来实现电路元器件各个引脚之间的电气连接,它也常被称为印制板,即通常所说的 PCB (Printed Circuit Board)。

## 1.1 印制电路板基础

对于设计人员来说,印制电路板的设计就是用来将相应的设计思想转换成相应的印制导线、焊盘以及金属化过孔等,其目的是实现相应的设计。如果想要设计出性能优良、结构美观的印制电路板,设计人员必须对印制电路板的基础知识具有一定的了解。本节将首先介绍印制电路板的发展,接下来将重点讨论印制电路板的分类和基板选择。

### 1.1.1 印制电路板的发展

随着微电子技术的快速发展,特别是晶体管在电子系统和设备中的广泛应用,电子系统和设备的功能与结构变得十分复杂,因此最初采用手工搭建电路的方法已经远远不能满足设计的需要了,这时出现了印制电路板的概念。1903年,Albert Hanson 首先采用了“线路”的概念,并把它应用于电话交换系统。这种概念是把薄薄的金属箔切割成线路导体,然后再把它们黏合在石蜡纸上,最后在上面同样贴上一层石蜡纸,这样便构成了现今印制电路板的结构雏形。1936年,Paul Eisner 博士真正发明了印制电路板的制作技术,自此印制电路板便迅速发展起来,并获得了广泛的应用。

一般来说,设计人员把按照预定设计在绝缘材料上制成的印制线路、印制元件或者两者组合而成的导电图形称为印制电路;而把在绝缘材料上提供元器件之间电气连接的导电图形称为印制线路。这样,对于上面印制电路或者印制线路的成品板来说,一般就将它们称之为印制电路板,也可以称之为印制板。

如今,印制电路板广泛应用于各个领域,几乎所有的电子设备中都包含相应的印制电路板,小到电子手表、计算器、电子玩具,大到计算机、通信设备、广播电视等。只要存在集成电路等电子元器件,它们之间的电气连接就需要采用印制电路板来进行连接。它提供了集成电路等电子元器件固定装配的机械支撑、实现集成电路等电子元器件之间的布线和电气连接或者电绝缘、提供所要求的电气特性;同时还可以为自动锡焊提供阻焊图形,以及为元器件插装、检查和维修提供识别文字符号和图形符号等。

自印制电路板诞生开始至发展到今天,已经将近有 70 年的历史了,纵观印制电路板的发展历史,可以将它划分为 6 个时期:

#### 1. 印制电路板的诞生期 (1936 年至 40 年代末期)

1936 年,Paul Eisner 博士真正发明了印制电路板的制作技术,印制电路板由此诞生了。在这个历史时期,印制电路板采用的制造方法是加成法,即在绝缘板表面添加导电材料来形

成导电图形，采用的具体制造工艺是涂抹法、喷射法、真空沉积法、蒸发法、化学沉积法和涂敷法等。当时，采用上面所述生产技术的印制电路板曾在 1936 年底应用于无线电接收机中。

### 2. 印制电路板的试产期（20 世纪 50 年代）

自从 1953 年起，通信设备制造业开始对印制电路板重视起来。这时开始采用的制造工艺是减成法，它的具体制造方法是采用覆铜箔纸基酚醛树脂层压板（PP 基材），然后采用化学药品来溶解除去不需要的铜箔，这样剩下的铜箔就形成了电路。在这个历史时期，采用的腐蚀液的化学成分是三氯化铁，其代表产品是索尼公司制造的手提式晶体管收音机，它是一种采用 PP 基材的单层印制电路板。

### 3. 印制电路板的实用期（20 世纪 60 年代）

在这个历史时期，印制电路板采用覆铜箔玻璃布环氧树脂层压板（GE 基材）。1960 年起，日本的公司开始大量使用 GE 基板材料。1964 年，美国光电路公司开发出沉厚铜化学镀铜液（CC-4 溶液），开始了新的加成法制造工艺。日立公司引进了 CC-4 技术，目的是用于解决 GE 基板在初期有加热翘曲变形、铜箔剥离等问题。随着材料制造商技术的逐步改进，GE 基材的质量不断提高。1965 年起，日本有好几家制造商开始批量生产 GE 基板、工业电子设备用 GE 基板和民用电子设备用 PP 基板。

### 4. 印制电路板的快速发展期（20 世纪 70 年代）

在这个历史时期，印制电路板专业制造公司大量出现，同时各个公司开始使用过孔来实现印制电路板之间的层间互连。1970 年起，通信行业中的电子交换机开始使用 3 层的印制电路板；之后大型计算机开始采用多层印制电路板，因此多层印制电路板得到了快速的发展。这个时期，超过 20 层的印制电路板采用聚酰亚胺树脂层压板作为绝缘基板。

这个时期的印制电路板从 4 层向 6 层、8 层、10 层、20 层、40 层以及更多工作层面发展，同时实现了高密度化（细线、小孔、薄板化），具体的导线宽度和间距从 0.5mm 向 0.35mm、0.2mm、0.1mm 发展，印制电路板单位面积上布线密度大幅提高。另外，印制电路板上原来的插入式安装技术逐渐过渡到表面贴装技术。这个时期的另一个重要突破是实现了自动装配线，可以自动实现印制电路板上的元器件安装。

### 5. 印制电路板的高速发展期（20 世纪 80 年代）

20 世纪 80 年代，印制电路板处于高速发展的时期，它广泛应用于各个领域，逐渐成为电子系统和设备制造中必不可少的一个组成部分。同时，多层印制电路板获得了飞速发展，它逐渐代替了单层板和双层板而成为了设计的主流。1980 年后，PCB 高密度化也明显得到提高，这时已经可以生产出 62 层的玻璃陶瓷基印制电路板，这种高密度化进一步促进了移动通信和计算机的发展。

### 6. 印制电路板的革命期（20 世纪 90 年代至今）

20 世纪 90 年代前期，印制电路板的发展经历了一段低谷时期。1994 年，印制电路板开始恢复其发展，其中挠性印制电路板获得了较大的发展。1998 年开始，积层法印制电路板开始进入到了实用期，产量开始急剧增加；IC 元件封装形式也开始进入到球栅阵列（BGA）和芯片级封装（CSP）等封装阶段。如今，印制电路板的发展方向主要表现在机械化、工业化、专业化、标准化和智能化等方向，它已经形成一门在电子工业领域中新兴的、强大的印制电路制造工业。另外，主导 21 世纪的创新技术的纳米技术，将会极大地带动电子元器件

的研究开发,从而引起印制电路板制造工业的革命性发展。

### 1.1.2 印制电路板的分类

在实际的应用中,印制电路板的种类十分繁多,因此分类方法也就多种多样。通常,印制电路板既可以按照覆铜板导电层数来进行分类,同时也可以按照印制电路板的基材性质进行分类,另外还可以按照印制电路板的基材强度来进行分类。

#### 1. 按照覆铜板导电层数来进行分类

对于设计人员来说,按照覆铜板导电层数来进行分类是一种最为常见的分类方法。按照这种分类方法,印制电路板可以分为单层板、双层板和多层板3种类型。

(1) 单层板 单层板是一种一面有覆铜、另一面没有覆铜的较为简单的印制电路板,因此它只能够在覆铜的一面进行布线并放置元器件。一般来说,单层板结构简单、不需要打过孔,并且成本较低,因此批量生产的简单电路设计通常会采用单层板的形式。

单层板初听起来好像很容易设计,实际上并非如此。由于单层板只允许在覆铜的一面上进行布线,并且不允许导线交叉,因此单层板的布线难度较大,并且布通率很低。虽然说设计人员可以采用飞线的方法来对未布通的导线进行布线,但是飞线过多会增加焊接印制电路板的工作量,并且飞线很容易脱落,所以通常只有非常简单的电路才会采用单层板的设计方案,否则通常采用双层板的设计方案。

(2) 双层板 双层板是一种两面都有覆铜、两面都可以进行布线操作的印制电路板。双层板包括顶层(Top Layer)和底层(Bottom Layer)两个层面,其中顶层一般为元器件层,底层为焊锡层。由于双层板两面都可以布线,并且可以采用过孔来进行顶层和底层之间的电气连接,因此双层板的应用范围十分广泛,是目前应用最为广泛的一种印制电路板结构。

在双层板的制作过程中,由于需要制作连接顶层和底层的金属化过孔,因此它的生产工艺流程要比单层板复杂,成本也较高。一般来说,双层板其实无所谓元器件层和焊锡层面,因为这两个层面都既可以安装元器件,也可以用来布线。但是为了区别起见,它的两个工作层面通常被分为顶层和底层,而且通常规定顶层用来安放元器件,底层用来进行布线,这是根据实践经验总结出来的一个规律。

(3) 多层板 随着集成电路技术的不断发展,元器件的集成度越来越高,元器件的引脚数目越来越多,印制电路板中的元器件连接关系也越来越复杂,这时双层板已经不能满足布线的需要和电磁干扰的屏蔽要求,因此出现了多层板。所谓多层板就是指包含了多个工作层面的印制电路板,除了顶层和底层之外,它还包括信号层、中间层、内部电源和接地层等。

一般情况下,多层板中的导电层数为4层、6层、8层、10层等。例如在4层板中,顶层和底层是信号层,在顶层和底层之间是电源层和接地层。在多层板中,设计人员可以利用印制电路板的多层结构来解决电路中的电磁干扰问题,从而提高了电路系统的可靠性。由于多层板布线层数多、走线方便、布通率高、连线短以及面积小等优点,目前大多数较为复杂的电路系统均采用多层印制电路板的结构。

#### 2. 按照印制电路板的基材性质进行分类

在印制电路板的设计过程中,设计人员可以按照印制电路板的基材性质进行相应的分类。按照这种分类方法,印制电路板可以分为两大类,分别是有机印制电路板和无机印制电路板。

一般来说,有机印制电路板主要是由树脂、增强材料和铜箔等材料来构成的,而其中的树脂材料有可以分为酚醛树脂、环氧树脂、聚酰亚胺等。目前,常见的印制电路板都是有机印制电路板。无机印制电路板主要是由陶瓷和铝等材料来构成的,即通常所说的厚薄膜电路,通常广泛应用于高频电子仪器中。

### 3. 按照印制电路板的基材强度来进行分类

在印制电路板的设计过程中,设计人员也可以按照印制电路板的基材强度来进行相应的分类。按照这种分类方法,印制电路板可以分为3大类,分别是刚性印制电路板、挠性印制电路板和刚挠结合印制电路板。

(1) 刚性印制电路板 通常,设计人员把采用刚性基材制成的印制电路板称为刚性印制电路板。目前,常见的刚性印制电路板主要包括酚醛纸层压板、环氧纸层压板、聚酯玻璃毡层压板和环氧玻璃布层压板等。

1) 酚醛纸层压板。这种印制电路板的使用温度可以达到 $70 \sim 105^{\circ}\text{C}$ ,它的主要特点是在高湿度环境下基材的绝缘电阻会明显减小,但是当湿度降低时,绝缘电阻将会增加。一般来说,温度过高将会引起酚醛纸层压板的炭化现象,这将使它的绝缘电阻降到很低。另外在正常的温度范围内,印制电路板的基材有可能会发生变黑现象。

2) 环氧纸层压板。这种印制电路板的使用温度可以达到 $90 \sim 110^{\circ}\text{C}$ ,它的主要特点是电气性能和非电气性能要比酚醛纸层压板好得多。对于设计人员来说,环氧纸层压板是一种较为常见的印制电路板类型。

3) 聚酯玻璃毡层压板。这种印制电路板的使用温度可以达到 $100 \sim 105^{\circ}\text{C}$ ,它的主要特点是具有良好的电气性能,同时抗冲击性也较强,因此可以应用于很宽的频率范围内和高湿度环境下。另外,聚酯玻璃毡层压板的力学性能介于纸质材料和玻璃布材料之间。

4) 环氧玻璃布层压板。这种印制电路板的使用温度可以达到 $130^{\circ}\text{C}$ ,它的主要特点体现在力学性能上,特别是在抗冲击性、弯曲强度、翘曲率、尺寸稳定性和耐焊接热冲击性等方面都具有良好的性能,同时它也具有良好的电气性能。

(2) 挠性印制电路板 一般来说,挠性印制电路板(FPC)又可以称为柔性印制电路板,或者称为软性印制电路板,它是以聚酰亚胺或聚酯薄膜等材料为基材制成的一种具有高可靠性和较高曲挠性的印制电路板。目前,广泛使用的挠性印制电路板主要包括聚酯薄膜、聚酰亚胺薄膜和氟化乙丙烯薄膜等。

挠性印制电路板作为一种特殊的电子互连的基础材料,具有十分显著的特点,它不但可以进行静态弯曲,同时还可以作动态的弯曲、卷曲和折叠等;另外还可以在三维空间随意移动和伸缩等。采用挠性印制电路板可以缩小体积,实现产品的薄、轻、小等特点,因此挠性印制电路板迅速地从军品转向民用。近年来涌现出的几乎所有的高科技电子产品都大量采用了挠性印制电路板,例如折叠手机、数码相机、数码摄像机、汽车卫星方向定位装置、液晶电视和笔记本电脑等。

1) 聚酯薄膜印制电路板。这种印制电路板的使用温度可以达到 $80 \sim 130^{\circ}\text{C}$ ,它的主要特点是在加热时可以形成可收缩式线圈,即具有较好的可挠性,另外它还具有良好的电气性能,同时受周围环境的湿度影响较小。需要注意的是,聚酯薄膜在温度较高时容易产生软化变形现象,因此设计人员在焊接过程中要格外小心。

2) 聚酰亚胺薄膜印制电路板。这种印制电路板可以在温度高达 $150^{\circ}\text{C}$ 的环境下连续工

作,另外采用氟化乙丙烯作为中间胶膜的特殊熔接型聚酰亚胺薄膜则可以在高达 250℃ 的环境下进行工作。聚酰亚胺薄膜的主要优点是具有良好的可挠性和良好的电气性能,缺点是环境的湿度将会对其性能造成一定的影响。

3) 氟化乙丙烯薄膜印制电路板。这种氟化乙丙烯薄膜通常是和聚酰亚胺或者玻璃布结合起来制成层压板的,它的焊接温度可以达到 250℃。氟化乙丙烯薄膜的主要优点是具有良好的可挠性和良好的稳定性,同时具有较好的耐酸性、耐碱性、耐潮性和耐有机溶剂性;缺点是层压时在层压温度下导电图形容易发生移动。

(3) 刚挠结合印制电路板 利用挠性材料并在不同区域与刚性基材结合制成的印制电路板称为刚挠结合印制电路板,即在同一个结构中,既有刚性印制电路板使用的材料,同时又有挠性印制电路板和多层印制电路板使用的材料。通常,刚挠结合印制电路板的主要特点是它的某些性能可能会因为使用的黏合剂不同而发生显著的改变。目前,刚挠结合印制电路板一般包括以下 5 种类型:

- 1) 1 型板:增强型的挠性单层板;
- 2) 2 型板:增强型的挠性双层板;
- 3) 3 型板:增强型的挠性双层板,含有过孔;
- 4) 4 型板:刚挠结合多层印制电路板,含有过孔;
- 5) 5 型板:组合刚挠印制电路板,刚性印制板与挠性印制黏层数多于 1 层。

### 1.1.3 印制电路板的基板选择

在印制电路板的加工过程中,具体的操作步骤是:首先在绝缘性能很高的材料上,通过一定的电子工艺覆盖一层导电性能良好的铜膜,这样就构成了生产印制电路板所必需的材料——覆铜板;然后按照电路设计的要求,在覆铜板上刻蚀出导电图形并且钻出元器件引脚安装孔、实现电气互连的过孔和固定整个电路板所需的螺钉孔等;最后设计人员就能够获得设计电子系统所需的印制电路板。

在上面的加工过程中,设计人员通常把绝缘性能很高的材料称作基材,而把覆铜板称作基板。可以看出,基板是加工印制电路板的重要材料,基板的质量将会直接影响到印制电路板的质量。一般来说,设计人员常常需要根据电路的设计要求、耐温要求、工作频率和电压高低等来选择合适的基板,同时结合电路的复杂程度来确定工作层面的数目。表 1-1 给出了印制电路板基板材料的基本分类表,希望读者对其能够有所了解。

通过上面的介绍可以看出,基板对于印制电路板的影响是很大的。对于印制电路板的加工厂商来说,一个好的基板应该具备以下几个特征:

- 1) 具有良好的机械强度,能够承受一定的振动、撞击和扭曲等作用;
- 2) 具有足够的平面度,能够适应自动化的组装工艺要求;
- 3) 具备承受组装工艺中热处理和冲击的能力;
- 4) 具备承受多次返修的能力,能够进行多次的拆除和焊接等操作;
- 5) 能够满足印制电路板厂商的制造工艺;
- 6) 具有良好的电气性能,例如阻抗和介电常数等。

随着材料技术和制造技术的快速发展,基板技术也随之进一步发展。可以预测,未来基板技术的发展方向体现在以下几个方面:



- 1) 基板具有更细的引线和间距工艺;
- 2) 基板具有较小的温度膨胀系数;
- 3) 基板具有更好的热传导性能;
- 4) 基板具有更好的尺寸、较多的层数和较好的温度稳定性;
- 5) 基板阻抗可以进行控制。

表 1-1 基板材料的基本分类表

分类	材质	名称	代码	特征	
刚性覆铜薄板	纸基板	酚醛树脂覆铜箔板	FR-1	经济性, 阻燃	
			FR-2	高电气性能, 阻燃(冷冲)	
			XXXPC	高电气性能(冷冲)	
			XPC 经济性	经济性(冷冲)	
	玻璃布基板		环氧树脂覆铜箔板	FR-3	高电气性能, 阻燃
			聚酯树脂覆铜箔板		
			玻璃布—环氧树脂覆铜箔板	FR-4	
			耐热玻璃布—环氧树脂覆铜箔板	FR-5	G11
			玻璃布—聚酰亚胺树脂覆铜箔板	GPY	
			玻璃布—聚四氟乙烯树脂覆铜箔板		
复合材料基板	环氧树脂类	纸(芯)—玻璃布(面)—环氧树脂覆铜箔板	CEM-1, CEM-2	(CEM-1 阻燃); (CEM-2 非阻燃)	
		玻璃毡(芯)—玻璃布(面)—环氧树脂覆铜箔板	CEM3	阻燃	
	聚酯树脂类	玻璃毡(芯)—玻璃布(面)—聚酯树脂覆铜箔板			
		玻璃纤维(芯)—玻璃布(面)—聚酯树脂覆铜箔板			
特殊基板	金属类基板	金属芯型基板			
		包覆金属型基板			
	陶瓷类基板	氧化铝基板			
		氮化铝基板	AlN		
		碳化硅基板	SiC		
		低温烧制基板			
	耐热热塑性基板	聚砜类树脂基板			
		聚醚酮树脂基板			
	挠性覆铜箔板	聚酯树脂覆铜箔板			
		聚酰亚胺覆铜箔板			

## 1.2 印制电路板的元素

对于设计人员来说, 印制电路板是一个十分复杂的设计实体, 它通常是由多种元素构成的, 从而完成一个复杂的功能。一般来说, 印制电路板的元素主要包括工作层面、元器件封