

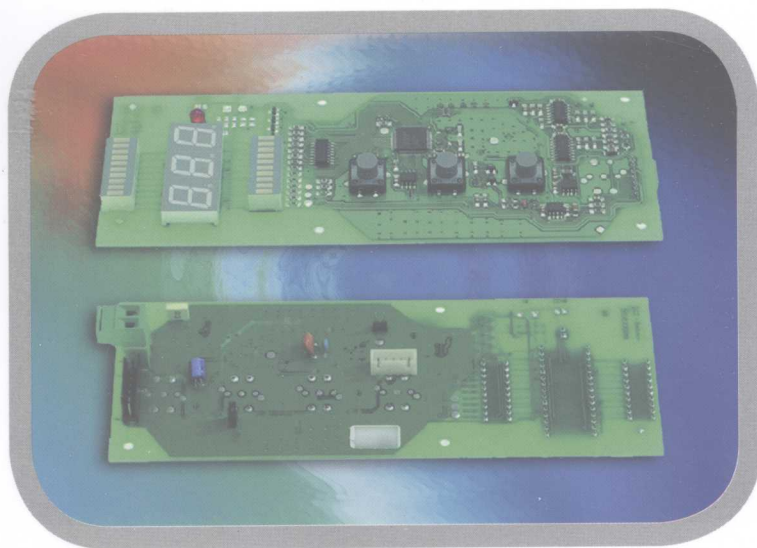


从校园到职场
CONG XIAOYUAN DAO ZHICHANG

印制电路板工程设计

——专业技能入门与精通

姜雪松 程绪建 王鹰 等编著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



从校园到职场

印制电路板工程设计

——专业技能入门与精通

姜雪松 程绪建 王 鹰 等编著



机械工业出版社

本书有效地将 PCB 基础知识、PCB 设计软件和电磁兼容设计三者结合起来,全面系统地讨论了 PCB 工程设计知识,主要包括基础知识、基本元器件、PCB 的设计原则和方法、设计软件 Protel 2004、电磁兼容基础、电磁兼容设计、信号完整性问题、Protel 2004 的信号完整性分析、仿真分析软件 HyperLynx、高速电路 PCB 的设计和射频电路 PCB 的设计,最后给出了一个锁相频率合成电路的 PCB 设计实例来加深和巩固所介绍的知识。

本书的主要读者对象是从事 PCB 工程设计的相关技术人员和工程师,主要包括 PCB 的基础设计人员、软件设计人员和 EMC 分析人员等。本书既可以作为高等学校电子电气相关专业的教材或者参考书,同时也可作为相关领域技术工程师的培训教材。

图书在版编目(CIP)数据

印制电路板工程设计:专业技能入门与精通/姜雪松等编著. —北京:机械工业出版社,2009.10

(从校园到职场)

ISBN 978-7-111-27887-0

I. 印… II. 姜… III. 印刷电路-电路设计 IV. TN410.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 129263 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑:张俊红 责任编辑:朱 林 版式设计:张世琴

责任校对:张晓蓉 封面设计:饶 薇 责任印制:李 妍

北京汇林印务有限公司印刷

2010 年 1 月第 1 版第 1 次印刷

184mm×260mm·25.25 印张·627 千字

0001—3000 册

标准书号:ISBN 978-7-111-27887-0

定价:58.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心:(010) 88361066

门户网:<http://www.cmpbook.com>

销售一部:(010) 68326294

教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售二部:(010) 88379649

读者服务部:(010) 68993821 封面无防伪标均为盗版

前 言

随着电子科学技术和集成电路技术的不断发展,各种电路系统的科研人员、设计工程师、应用工程师和测试工程师等人才供不应求,其职业前景十分广阔。对于电路系统设计人员来说,印制电路板(PCB)的设计则成为他们所必须掌握的一项技能,否则将会有“落伍”之感。

在 EDA 技术席卷全球的今天,社会就业竞争的日益加剧,对于 PCB 的设计来说,设计人员仅仅是掌握 PCB 设计软件的使用是远远不够的,因为设计工作中往往会涉及很多与设计软件无关的工程设计要点,而忽略这些工程要点的设计往往会导致设计工作的失败。可见,现在社会所需要的全面型和成熟型电路设计人才应该是那种全面了解 PCB 设计的基础知识,熟悉 PCB 的常用设计软件,同时又能够解决实际工程设计问题(电磁兼容问题和信号完整性问题等)的专业型人才。

目前,有关 PCB 设计的书籍随着广大读者的迫切需求而逐渐成为图书市场上的热点。很多 PCB 相关图书的立足点都是基于 PCB 设计软件的介绍,例如 Protel 99SE、Protel DXP、PADS2005 和 Cadence 等。另外,也有大量的有关电磁兼容设计和信号完整性分析的图书以及少量介绍有关 PCB 基础知识的图书。市场上能够将 PCB 基础知识和电磁兼容设计结合起来的图书非常少,而能够将 PCB 基础知识、PCB 设计软件和电磁兼容设计三者结合起来的图书几乎没有,远远不能满足如今全面型和成熟型电路设计人员的需求。

正是基于满足全面型和成熟型电路设计人员对于 PCB 书籍的需求,本书的编写完全立足于 PCB 的工程设计,全面阐述了 PCB 的基础知识、PCB 设计软件、PCB 仿真分析软件、电磁兼容分析和信号完整性分析等内容,力图全面展现 PCB 工程设计的相关知识。通过这本书的学习,希望读者们能够掌握 PCB 工程设计的相关知识,并且能够在实际的设计工作中应用本书的内容来指导自己的工作。

本书从实际应用的角度出发,全面系统地讨论了 PCB 工程设计的知识,主要包括基础知识、基本元器件、PCB 的设计原则和方法、设计软件 Protel 2004、电磁兼容基础、电磁兼容设计、信号完整性问题、Protel 2004 的信号完整性分析、仿真分析软件 HyperLynx、高速电路 PCB 的设计和射频电路 PCB 的设计。本书的最后给出了一个锁相频率合成电路的 PCB 设计实例,目的是帮助读者加深和巩固对前面内容的理解,同时也给出了一些射频 PCB 设计的方法和技巧,相信会对读者有一定的帮助。

本书由北京邮电大学姜雪松、二炮驻骊山微电子公司军事代表室程绪建和二炮装备研究院四所王鹰共同编写,书中包含了作者从事 PCB 设计工作中的经验总结。参与本书编写工作的还有姜海亭、夏钦东、杜平、田雪、刘磊、尤晓丽、郑涛、王志强、杜强、姜雪辉、蒋建新、林丽君、刘艳梅、刘建华、程显奎、邹德智、张博、娄序东、丁玉香、姜海燕、李晓凯、张海涛、韩丽琴和姜善春,在这里对他们的辛勤工作表示由衷的

感谢。作者在编写本书的过程中也参考了不少专家和学者的著作、学术论文和经验总结等。没有这些帮助，本书是不可能顺利完成的，在这里对他们表示最诚挚的谢意！有些学术论文和经验总结已经无法找到出处，因此未能在参考文献中列出，这里深表歉意。

本书的主要读者对象是从事 PCB 工程设计的相关技术人员和工程师，主要包括 PCB 的基础设计人员、软件设计人员和 EMC 分析人员等。同时，本书也可以作为高等学校电子电气相关专业的教材或者参考书以及相关领域技术工程师的培训教材。

限于作者的理论水平和实际开发经验，书中难免存在一些不足之处或者错误，恳望读者们和相关专家批评指正。

编 者
2009.9

目 录

前言

第1章 基础知识 1

1.1 PCB的发展历史 1

1.2 PCB的基本构成元素 2

1.3 PCB的分类 7

1.4 PCB的设计流程 9

1.4.1 PCB设计的技术要求 9

1.4.2 PCB设计的原则 11

1.4.3 PCB的总体设计流程 12

1.4.4 原理图的绘制流程 14

1.4.5 PCB的绘制流程 15

1.4.6 PCB的叠层方案 17

1.4.7 PCB的工厂加工流程 19

1.4.8 PCB设计的基板选择 24

1.4.9 PCB设计的基本工艺 26

1.5 PCB设计的常用EDA软件 27

1.5.1 Protel 软件 28

1.5.2 Cadence 软件 29

1.5.3 Mentor 软件 32

第2章 基本元件 37

2.1 电阻 37

2.1.1 常见的电阻 37

2.1.2 电阻的主要参数 39

2.2 电容 40

2.2.1 常见的电容 41

2.2.2 电容的主要参数 42

2.2.3 电容的物理特性 43

2.2.4 电容的选择 47

2.3 电感 47

2.3.1 电感的主要参数 47

2.3.2 铁氧体和铁氧体磁珠 48

第3章 PCB的设计原则和方法 50

3.1 PCB的基本设计原则 50

3.1.1 抗干扰设计原则 50

3.1.2 热设计原则 52

3.1.3 抗振设计原则 53

3.1.4 可测试性设计原则 54

3.2 PCB的可制造性 55

3.2.1 通孔插装元器件的可制造性 设计规范 55

3.2.2 表面贴装元器件的可制造性 设计规范 58

3.2.3 PCB的设计检查 59

3.3 PCB的可测试性 61

3.3.1 PCB的可测试性设计 61

3.3.2 PCB可测试性的条件 62

3.3.3 PCB的测试方法 63

3.3.4 可测试性设计技术 65

第4章 PCB设计软件——Protel 2004 69

4.1 Protel 2004 基础 69

4.1.1 Protel 2004 的发展历史 69

4.1.2 Protel 2004 的组成模块和新增 特点 70

4.1.3 Protel 2004 的安装和卸载 71

4.2 Protel 2004 的基本设计环境 73

4.2.1 Protel 2004 的系统参数设置 73

4.2.2 菜单栏 75

4.2.3 工具栏、状态栏、命令行和 标签栏 77

4.2.4 工作窗口面板 78

4.2.5 Protel 2004 的文件管理 79

4.3 Protel 2004 的原理图设计 80

4.3.1 新建项目文件和原理图文件 80

4.3.2 菜单栏、工具栏和视图管理 80

4.3.3 原理图的图纸设置 82

4.3.4 加载和卸载元件库 83

4.3.5 原理图中元器件的放置 86

4.3.6 原理图中元器件的布局 89

4.3.7 原理图的布线 93

4.3.8 原理图的修饰说明 100

4.3.9 原理图的电气规则检查、编 译和修正 105

4.3.10 原理图的报表生成	106	6.1.4 模拟地和数字地的分割问题	177
4.3.11 原理图设计中的常见问题	109	6.1.5 PCB 的接地设计规则	178
4.4 Protel 2004 的 PCB 设计	111	6.1.6 搭接技术	180
4.4.1 新建 PCB 文件	111	6.2 PCB 的元器件选择规则	181
4.4.2 PCB 编辑器的工作界面	114	6.2.1 电路元件	181
4.4.3 电路板的规划	117	6.2.2 集成电路	183
4.4.4 加载和卸载元器件封装库	120	6.3 PCB 的元器件布局规则	184
4.4.5 加载元器件封装和网络	121	6.3.1 特殊元器件的布局规则	185
4.4.6 PCB 中元器件的布局	123	6.3.2 功能单元的布局规则	185
4.4.7 PCB 的布线	125	6.3.3 元器件的通用布局规则	185
4.4.8 PCB 设计的后期处理	132	6.4 PCB 的布线规则	186
4.4.9 PCB 的设计规则检查	134	6.4.1 PCB 走线的基本特性	186
4.4.10 PCB 的报表生成	135	6.4.2 PCB 走线的阻抗特性	186
4.4.11 PCB 设计中的常见问题	140	6.4.3 PCB 布线的通用规则	191
第 5 章 电磁兼容基础	144	6.4.4 PCB 的高频信号布线规则	193
5.1 电磁兼容的相关概念	144	6.4.5 多层 PCB 的布线	193
5.1.1 电磁兼容	144	6.5 多层 PCB 的设计规则	194
5.1.2 电磁骚扰和电磁干扰	144	6.5.1 5/5 规则	194
5.1.3 传导耦合	146	6.5.2 20H 规则	195
5.1.4 辐射耦合	148	6.5.3 Rent 规则	196
5.1.5 电磁兼容的重要性	149	6.6 旁路与去耦	196
5.2 电磁兼容术语	150	6.6.1 电容的选择计算	197
5.2.1 基本概念术语	151	6.6.2 旁路电容	198
5.2.2 骚扰波形术语	152	6.6.3 去耦电容	198
5.2.3 干扰控制术语	154	6.6.4 去耦电容的布局	199
5.2.4 测量术语	156	6.7 PCB 设计时的电路措施	199
5.2.5 设备分类术语	158	第 7 章 PCB 的信号完整性问题	201
5.2.6 接收机与发射机术语	159	7.1 信号完整性问题	201
5.2.7 功率控制及供电网络阻抗 术语	161	7.1.1 信号完整性的定义	201
5.2.8 电压变化与闪烁术语	162	7.1.2 信号完整性问题的表现形式	201
5.3 电磁兼容的标准化	163	7.1.3 信号完整性分析中的几个基 本概念	205
5.3.1 电磁兼容标准化组织	163	7.2 信号反射的解决方案	206
5.3.2 电磁兼容标准体系	165	7.2.1 端接技术	206
5.3.3 国际电磁兼容标准	166	7.2.2 走线拓扑结构	211
5.3.4 我国电磁兼容标准	167	7.3 信号串扰的解决方案	212
第 6 章 PCB 的电磁兼容设计	171	7.3.1 串扰的形成原因	212
6.1 电磁干扰的解决措施—— 接地	171	7.3.2 串扰的特性和抑制原则	214
6.1.1 地的定义和分类	171	7.3.3 保护走线和分流走线	215
6.1.2 接地方式	172	7.3.4 分割技术	216
6.1.3 地环路干扰及抑制措施	174	7.3.5 3W 规则	216
		7.4 电源完整性问题	217

7.4.1 电源完整性的定义	218	10.2.1 传输线方程的推导	312
7.4.2 同步开关噪声的抑制	219	10.2.2 传输线的特性参数	314
7.4.3 电源阻抗的设计	219	10.2.3 理想传输线及工作状态	315
7.4.4 回流设计	220	10.2.4 传输线的集肤效应	318
第8章 Protel 2004 的信号完整性分析	226	10.2.5 传输线的常见形式及其计算	319
8.1 Protel 2004 的信号完整性分析概述	226	10.3 传输线效应及其解决措施	324
8.1.1 信号完整性分析的流程	226	10.3.1 传输线效应	324
8.1.2 信号完整性分析规则的设置	228	10.3.2 传输线效应的解决措施	325
8.2 信号完整性分析器	233	10.4 高速 PCB 的设计技巧	326
8.2.1 信号完整性分析器的启动	233	10.4.1 高速 PCB 的布线技巧	326
8.2.2 信号完整性分析器的设置	234	10.4.2 高速 PCB 的去耦设计	329
8.3 信号完整性分析实例	238	10.4.3 时钟电路设计	331
8.3.1 层堆栈的设置	238	10.4.4 PCB 传输线的特征阻抗分析	335
8.3.2 设置信号完整性分析规则	239	第11章 射频电路 PCB 的设计	337
8.3.3 信号完整性分析的配置	239	11.1 射频基础知识	337
8.3.4 信号完整性分析的波形显示	242	11.1.1 无源元件的高频特性	337
8.3.5 信号完整性分析的注意事项	246	11.1.2 Smith 圆图	340
第9章 PCB 仿真分析软件——HyperLynx	249	11.1.3 二端口网络及性能参数	343
9.1 HyperLynx 基本概述	249	11.2 收发信机的系统设计	344
9.2 LineSim 仿真	251	11.2.1 无线通信系统的基本组成	344
9.2.1 HyperLynx 的启动	251	11.2.2 收发信机的性能指标要求	346
9.2.2 LineSim 的仿真流程	251	11.2.3 发射机的设计方案	348
9.2.3 时钟网络的 SI 分析	262	11.2.4 接收机的设计方案	349
9.2.4 时钟网络的 EMC 分析	267	11.3 射频模块	353
9.2.5 LineSim 中的串扰仿真	270	11.3.1 低噪声放大器	353
9.3 BoardSim 仿真	274	11.3.2 功率放大器	354
9.3.1 BoardSim 的仿真流程	274	11.3.3 滤波器	355
9.3.2 用批处理模式进行快速整板分析	284	11.3.4 混频器	356
9.3.3 用批处理模式进行详细分析	287	11.3.5 频率源	356
9.3.4 BoardSim 的交互式仿真	293	11.4 射频电路 PCB 的设计	358
9.3.5 BoardSim 中的串扰仿真	296	11.4.1 材料选择	358
9.4 多板仿真	302	11.4.2 设计措施	359
9.4.1 创建一个多板项目文件	302	11.4.3 分区技巧	360
9.4.2 对多板文件进行 SI 分析	304	11.4.4 射频模块的设计准则	361
第10章 高速电路 PCB 的设计	308	第12章 PCB 设计实例——锁相频率合成电路	363
10.1 高速电路中的基本概念	308	12.1 项目的提出和设计方案	363
10.2 传输线理论	312	12.1.1 项目的提出	363
		12.1.2 设计方案	364
		12.2 项目元件库的创建	366

12.2.1	原理图符号库的添加	366	12.3.6	原理图的报表生成	380
12.2.2	建立原理图符号库	368	12.4	锁相频率合成电路的 PCB 设计	381
12.2.3	PCB 封装库的添加	369	12.4.1	新建 PCB 文件	381
12.2.4	建立 PCB 封装库	370	12.4.2	元器件封装的导入和工作 层面设置	383
12.3	锁相频率合成电路的原 理图设计	372	12.4.3	PCB 的元器件布局	384
12.3.1	新建原理图文件和工程	372	12.4.4	PCB 的自动布线	387
12.3.2	元器件的放置和布局	372	12.4.5	PCB 的手工布线	390
12.3.3	原理图的连接绘制	376	12.4.6	PCB 的铺地	392
12.3.4	原理图的 ERC	377	12.4.7	PCB 的 DRC	394
12.3.5	原理图中元器件的自动 标识	378	参考文献		396

第1章 基础知识

印制电路板的定义是通过电路板上的印制导线、焊盘和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,以满足实际设计的要求。印制电路板的英文全称为 Printed Circuit Board,简写为 PCB,本书采用 PCB 这种简写形式。

一般来说,PCB 在电子设备中的功能体现在以下几个方面:

- 1) 为集成电路等电子元器件的固定和装配提供机械支撑;
- 2) 为集成电路等电子元器件之间的布线和电气连接提供实现手段;
- 3) 为电路板上的元器件装配提供阻焊图形;
- 4) 为元器件的插装、检查、维修提供识别字符和图形等;
- 5) 其他一些辅助功能。

本章将对 PCB 的基础知识进行介绍,希望读者能够对 PCB 的发展历史、基本构成元素、设计流程和加工工艺等有一个清晰的认识。

1.1 PCB 的发展历史

如今,PCB 已经广泛应用在各个领域,它已经成为各种电子设备不可缺少的一个重要部分。离开了 PCB,已经很难想象电子设备将如何构成以及如何工作。

自从 PCB 诞生以来,发展到今天已经有 70 多年的历史了。在 70 年的发展过程中,PCB 发生了一些重要变革,从而促进了 PCB 的快速发展,使其迅速应用到各个领域。纵观 PCB 的发展历史,这里可以将它划分为 6 个时期。

1. PCB 的诞生期

PCB 诞生期的时间为 1936 年至 20 世纪 40 年代末期。1903 年,Albert Hanson 首先使用了“线路”的概念,并把它应用于电话交换系统。这种概念的设计思想是把薄金属箔切割成线路导体,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 PCB 的结构雏形。1936 年,Paul Eisner 博士真正发明了 PCB 的制作技术,通常将这个时间作为 PCB 真正诞生的时间。

在这个历史时期,PCB 采用的制造方法是加成法,即在绝缘板表面添加导电性材料来形成导体图形,采用的具体制造工艺是涂抹法、喷射法、真空沉积法、蒸发法、化学沉积法和涂覆法等。当时,PCB 的典型应用是用于无线电接收机中。

2. PCB 的试产期

PCB 试产期的时间段为 20 世纪 50 年代。随着 PCB 的发展,从 1953 年起,通信设备制造业开始对 PCB 逐渐重视起来,并开始大量使用 PCB。

在这个历史时期,PCB 采用的制造工艺是减成法,具体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。这时,PCB 采用的腐蚀液的化学成分是三氯化铁,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 PCB。

3. PCB 的实用期

PCB 的实用期是指 20 世纪 60 年代。1960 年起，日本公司开始大量使用 GE 基板（覆铜箔玻璃布环氧树脂层压板）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），从而开始了新的加成法制造工艺。日立公司引进了 CC-4 技术，用于解决国产 GE 基板在初期有加热翘曲变形、铜箔剥离等问题。随着材料技术的逐步改进，GE 基材的质量不断提高。1965 年起，日本开始出现一些制造商来批量生产 GE 基板、工业用电子设备用 GE 基板和民用电子设备用 PP 基板。

4. PCB 的快速发展期

PCB 的快速发展期是指 20 世纪 70 年代。在这个历史时期，专门制造 PCB 的公司开始大量出现，同时开始采用过孔技术来实现 PCB 的层间互连。1970 年起，通信行业中的交换机开始使用 3 层的 PCB，后来大型计算机也开始采用多层 PCB，多层 PCB 得到了快速发展。这个时期，超过 20 层的 PCB 采用聚酰亚胺树脂层压板作为绝缘基板。

在 PCB 的快速发展期，PCB 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，具体的导线宽度和间距从 0.5mm 向 0.35mm、0.2mm、0.1mm 发展，PCB 单位面积上布线密度大幅提高。另外，PCB 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 PCB 上的元器件安装。

5. PCB 的高速发展期

PCB 的高速发展期是指 20 世纪 80 年代。在这个历史时期，PCB 获得了空前发展，广泛应用于各个领域，已经成为电子设备生产和制造工业中不可缺少的一个组成部分。同时，多层 PCB 设计成为了设计主流。

1980 年后，PCB 高密度化也明显得到了提高，已经可以生产 62 层的玻璃陶瓷基 PCB，这种高密度化进一步促进了移动通信和计算机等领域的快速发展。

6. PCB 的革命期

PCB 的革命期为 20 世纪 90 年代到现在。20 世纪 90 年代初期，PCB 的发展经历了一段低谷时期。1994 年，PCB 开始恢复其发展，其中挠性 PCB 获得了较大发展。1998 年开始，积层法 PCB 开始进入到了实用期，产量开始急剧增加，IC 器件封装形式也开始进入到 BGA 和 CSP 等封装阶段。

目前，PCB 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，并且它已经形成一门在电子工业领域中新兴的、强大的 PCB 制造工业。随着科学技术的不断进步，纳米技术开始逐渐兴起并应用，它会带动电子元器件的不断发展和进步，相信这一技术将会引起 PCB 制造工业的革命性发展。

1.2 PCB 的基本构成元素

一般来说，PCB 的基本构成元素包括工作层面、元器件封装、导线、焊盘和过孔等，

它们组成了一个非常复杂的设计实体,从而完成一个复杂的功能。

1. 工作层面

根据电路板导电层数的不同,PCB 可以为单层板、双层板和多层板。在多层 PCB 的设计过程中,往往会遇到工作层面的选择问题,因此根据不同的设计要求,应该选择什么样的工作层面成为一个非常重要的设计问题。可见,掌握 PCB 的各个工作层面的含义和具体功能是十分重要的。

PCB 的工作层面主要包括信号层 (Signal Layer)、电源/接地层 (Internal Plane)、机械层 (Mechanical Layer)、防护层 (Mask Layer)、丝印层 (Silkscreen Layer) 和其他工作层面 (Other Layer)。下面对它们进行简单介绍。

(1) 信号层

信号层主要用来放置与信号有关的对象,它分为顶层、底层和中间层。通常,顶层和底层用来放置元器件和布线;中间层主要用来进行布线操作。

(2) 电源/接地层

电源/接地层主要用来放置电源和接地线,为电路提供电源和接地点,使得元器件接电源和接地的引脚不需要经过任何铜膜导线而直接连接到电源和接地线上,这样可以避免一些设计问题的出现,例如地环路干扰等。

(3) 机械层

机械层的功能是用来描述电路板的机械结构和放置标注说明等,没有具体的电气连接特性。例如,机械层可以用来定义电路板的物理边界,以避免元器件等放置到物理边界之外。一般来说,大多数的 PCB 设计软件都可以提供很多层的机械层,可以满足设计的需要。

(4) 防护层

防护层可以分为两大类:阻焊 (Solder Mask) 层和助焊 (Paste Mask) 层。其中:阻焊层用来保护铜线和防止元器件被焊到不正确的地方,一般称之为绿油。为了使 PCB 适应波峰焊等焊接形式,一般情况下 PCB 上焊盘以外的地方都有阻焊,以阻止这些部位上锡。

助焊层用来提高焊盘的可焊性能。在 PCB 上,经常看到的比焊盘略大的各浅色圆斑就是通常所说的助焊。在进行波峰焊等焊接之前,常在焊盘上涂上助焊剂,这样可以提高 PCB 的焊接性能。

(5) 丝印层

丝印层用来标识各元器件在 PCB 上的具体位置,例如元器件封装的外观轮廓和字符串等,目的是方便电路的安装和维修。通常,PCB 上的白色文字和符号就是设计人员常说的丝印。在 PCB 中,丝印内容包括元器件标号、标称值、元器件外廓形状和厂家标志、生产日期等。

不少初学者在设计丝印层的有关内容时,只注意文字符号放置得整齐美观,忽略了实际制出的 PCB 效果,字符不是被元器件挡住就是进入了助焊区域被涂抹,还有的把元器件标号打在相邻元器件上,这些设计都将会给装配和维修带来很大不便。

(6) 其他工作层面

PCB 中还具有一些特殊的工作层面,设置这些工作层面的目的是为了满足不同设计设计的需要。例如,PCB 中具有的其他工作层面还有 4 种:Keep-Out Layer (禁止布线层)、Drill Guide (钻孔导引层)、Drill Drawing (钻孔图层) 和 Multi-Layer (复合层)。

2. 元器件封装

元器件封装是指实际的电子元器件或者集成电路的外观尺寸，例如元器件引脚的分布、直径以及引脚之间的距离等，它是使元器件引脚和 PCB 上的焊盘保持一致的重要保证。

由于元器件封装只是元器件的外观和引脚的位置分布，因此纯粹的元器件封装仅仅是一个空间的概念。也就是说，不同的电子元器件可以使用同一个封装，而同种元器件也可以有不同的封装形式，例如“RES”通常代表电阻，它可以有 AXIAL-0.3、AXIAL-0.4 和 AXIAL-0.6 等几种封装形式。可见，在取用需要焊接的元器件时，设计人员不仅要知道电子元器件的名称，而且还要知道电子元器件的封装形式，否则在设计过程中将会出现问题。

一般来说，元器件封装可以分为针脚式封装和表贴封装两大类。

1) 针脚式封装一般是针对针脚类元器件而言的。具有针脚式封装的元器件在进行焊接时，首先要将元器件的针脚插入到焊盘的元器件孔上，然后才能进行相应的焊接操作。

2) 表贴封装一般是针对表贴元器件而言的。具有表贴封装的元器件在进行焊接时，要求它的焊盘只能分布在电路板的顶层或者底层。

在 PCB 的设计过程中，元器件封装的编号原则为：元器件类型 + 引脚距离（或者引脚数）+ 元器件外形尺寸。例如，元器件封装的编号为 AXIAL-0.3，表示元器件封装为轴向的、两引脚间的距离为 300mil^①；元器件封装的编号为 DIP-16，表示元器件封装为双列直插式、引脚数目为 16 个；元器件封装的编号为 RB7.6-15，表示元器件封装为极性电容类、两引脚间的距离为 7.6mm、元器件的直径为 15mm。

对于元器件来说，常见的分立元器件封装主要包括二极管类、电容类、电阻类和晶体管类等等；常见的集成电路类主要包括单列直插式和双列直插式等。

(1) 二极管类

二极管类封装的编号一般为 DIODE-xx，其中数字 xx 表示二极管类引脚间的距离。例如，封装编号为 DIODE-0.5 表示引脚间的距离为 500mil。

(2) 电容类

电容类封装可以分为非极性电容类和极性电容类。其中：非极性电容类封装的编号为 RADxx，数字 xx 表示封装引脚间的距离。极性电容类封装的编号为 RBxx-yy，数字 xx 表示引脚间的距离，数字 yy 表示元器件的直径。

(3) 电阻类

电阻类封装可以分为两类：普通电阻类和可变电阻类。其中：普通电阻类封装的编号为 AXIAL-xx，数字 xx 表示引脚间的距离。可变电阻类封装的编号为 VRx，数字 x 表示元器件的类别。

(4) 晶体管类

晶体管类封装的形式多种多样，编号原则也略有不同。

(5) 集成电路类

集成电路类封装主要包括两类，它们分别是单列直插式和双列直插式。其中，单列直插式封装的编号为 SIL-xx，数字 xx 表示单列直插式集成电路的引脚数。双列直插式封装的编号为 DIP-xx，数字 xx 表示双列直插式集成电路的引脚数。

^① 1mil = 25.4 × 10⁻⁶m。

3. 导线

导线是覆铜板经过电子工艺加工后在 PCB 上形成的铜膜走线,通常也称为铜膜导线。导线的主要功能是用来连接 PCB 上的各个焊点,它是 PCB 中最为重要的部分。

导线的主要指标包括两个:导线宽度和导线间距,这两个方面的尺寸是否合理将直接影响到元器件之间能否实现电路的正确连接关系。

导线宽度主要取决于 PCB 的生产因素,例如生产底板精度、生产工艺、导线厚度的均匀性和导线所能承受的电流负荷的大小。一般来说,规定的导线宽度既包括设计宽度和允许的误差外,也包括规定的最小线宽。导线宽度的选择原则是在不违反实际电气连接特性的前提下,尽量设计宽度较大的导线。

导线间距是指相邻导线之间的间距,通常希望相邻导线之间的间距必须足够宽,目的是用来满足电气连接的具体需要,同时也便于操作和进行生产加工。除此之外,导线间距的大小还应该考虑导线之间的电压大小,这个电压包括正常的工作电压、附加的波动电压、过电压以及一些重复或者偶尔产生的峰值电压。

另外,除了导线宽度和导线间距之外,还有一个安全间距的概念。在 PCB 设计中,为了避免或者减小导线、过孔、焊盘以及元器件之间的相互干扰现象,需要在这些对象之间留出一定的间距,这个距离一般称为安全间距。

在 PCB 的绘制过程中,还有一个预拉线的概念。预拉线是在系统装入网络报表后自动生成的,它只是用来指引 PCB 布线的一种连线,有时候也称为飞线。需要注意的是,预拉线与导线有着本质的区别:

1) 预拉线只是在形式上表示 PCB 中各个焊盘之间的连接关系,实际上并没有任何电气连接意义;

2) 导线则是根据预拉线指示的焊盘连接关系,而在 PCB 上布置的具有实际电气连接意义的连线。

4. 焊盘

PCB 上所有元器件的电气连接都是通过焊盘来完成的,它是 PCB 设计中最常接触、最为重要的基本构成元素。根据焊接工艺的不同,PCB 中的焊盘可以分为两种类型:一种是非过孔焊盘,用于单层板中表贴元器件的焊接;一种是元器件孔焊盘,用于双层板和多层板中针脚式元器件的焊接。

对于非过孔焊盘来说,它的参数主要包括孔径尺寸和焊盘尺寸。通常,孔径尺寸跟 PCB 的制造精度和需要焊接的元器件或者组装件的引脚尺寸直接相关。具体的设计原则是:非过孔焊盘的孔径尺寸稍大于元器件或者组装件的引脚尺寸即可;焊盘尺寸应该在保证焊接质量和电气性能的基础上尽可能小。

在 PCB 设计中,用来安装元器件或者组装件引脚的焊盘通常是采用圆形焊盘。对于过孔焊盘来说,圆形焊盘的主要尺寸是孔径尺寸和焊盘尺寸,焊盘尺寸一般是孔径尺寸的两倍;对于非过孔焊盘来说,圆形焊盘的主要尺寸是焊盘尺寸,用来作为测试焊盘、定位焊盘和基准焊盘等。

一般来说,设计人员需要根据元器件的形状、大小、布局情况、受热情况和受力方向等因素来综合进行考虑选择焊盘的具体形状,而不应该千篇一律地只使用圆形焊盘。目前,PCB 的设计软件通常能够提供圆形、矩形、八角形和圆方形等焊盘,但在实际设计中这些

焊盘有时并不能够满足要求,这时设计人员需要自己编辑焊盘。

设计人员自己编辑焊盘时,除了考虑元器件的形状、大小、布局情况、受热情况和受力方向等因素外,还需要考虑以下原则:

- 1) 在焊盘形状长短不一致时,要考虑连线宽度与焊盘特定边长的大小差异不能过大。
- 2) 在元器件引脚比较密的情况下,为了保证阻焊绿油,可以根据实际元器件情况对焊盘宽度适当调整。
- 3) 各元器件焊盘孔的大小要按照元器件引脚粗细分别编辑确定,原则是孔的尺寸比引脚直径大 $0.2 \sim 0.4\text{mm}$ 。

5. 过孔

为了实现双层板和多层板中相邻两层之间的电气连接,这时需要在连通导线的交汇处钻上一个公共孔,这个公共孔通常称为过孔 (Via)。从制造工艺上来讲,过孔的孔壁圆柱面上通常采用化学沉积的方法镀上一层金属,目的是连通中间各层需要连通的铜箔,而过孔的上下两面一般做成普通的焊盘形状,用来直接与上下两面的电路相通,当然也可以不进行连接。可见,过孔是多层 PCB 的重要组成部分之一,钻孔的费用通常占 PCB 制板费用的 $30\% \sim 40\%$,它的作用可以分为两类:一是用作各层间的电气连接;二是用作器件的固定或定位。

根据过孔的制作工艺,它可以分为盲孔 (Blind Via)、埋孔 (Buried Via) 和通孔 (Through Via) 3 种类型。

- 1) 盲孔位于 PCB 的顶层和底层表面,具有一定深度,用于表层电路和下面的内层电路的连接,孔的深度通常不超过一定的比率 (孔径)。
- 2) 埋孔是指位于 PCB 内层的连接孔,它不会延伸到电路板的表面。
- 3) 通孔是穿过整个电路板,可用于实现内部互连或作为元器件的安装定位孔。

这里,盲孔和埋孔都位于电路板的内层,层压前利用通孔成形工艺完成,在过孔形成过程中可能还会重叠做好几个内层;通孔在工艺实现上更容易、成本较低,因此绝大部分 PCB 都采用它,而不用另外两种过孔。如果不加特殊说明,本书所说的过孔均作为通孔考虑。

过孔的主要参数包括过孔孔径和过孔外径。其中:过孔孔径是指过孔的内径,它一般与 PCB 的板厚和密度相关。过孔孔径不宜太大,孔径过大将使生产加工变得困难,同时会增加成本;过孔外径是指过孔的最小镀层宽度。通常,过孔外径的大小主要也是和生产厂家的制作水平密切相关的,同时过孔的内外径大小一般应该满足不大于它的最大比例,即内径/外径 = 60% 。

过孔对于 PCB 的设计来说是十分重要的。一般来说,设计人员对于过孔的使用应该遵循以下几个原则:

- 1) 尽量少用过孔,一旦选用了过孔,务必处理好它与周边各实体的间隙,特别是容易被忽视的中间各层与过孔不相连的线和过孔的间隙。
- 2) 过孔尺寸不宜太大,否则会增加成本,也会带来生产加工的困难。
- 3) 过孔需要的载流量越大,所需的过孔尺寸越大,例如电源层和地层与其他层连接所用的过孔应当大一些。
- 4) 电源和地的引脚要就近打过孔,过孔和引脚之间的引线越短越好,因为它们会导致电感的增加。同时电源和地的引线要尽可能粗,以减少阻抗。

5) 在信号换层的过孔附近放置一些接地的过孔,以便为信号提供最近的回路。甚至可以在 PCB 上大量放置一些多余的接地过孔。

由于过孔在 PCB 中的重要性,因此过孔对电路设计的影响是很明显的,不好的过孔设计是产生电路故障的主要原因之一。过孔设计经常遇到的问题是由于过孔镀层的断裂而导致电路的印制导线开路,后果是导致电路不能正常工作。

孔内壁中间断裂的原因是基板制造时镀金的工艺不够好,而在转弯处的断裂主要是由于热循环造成的。因此,生产厂家保证 PCB 的镀金工艺是解决过孔好坏的重要途径。另外,用来解决过孔的断裂问题还可以采用两种其他的方法:一种方法是正确设计过孔的孔径尺寸和外径尺寸;另一种方法是在生产过程中,可以采用焊锡或者阻焊剂将过孔完全填充起来。

1.3 PCB 的分类

在实际的应用中,PCB 的种类十分繁多。根据不同的分类标准和方法,可以将 PCB 划分为不同的种类。下面介绍 3 种不同的分类方法。

1. 按照基材性质来分类

按照加工 PCB 的基材性质,PCB 可以分为有机 PCB 和无机 PCB。其中,有机 PCB 主要是由树脂、增强材料和铜箔等材料来构成的,而其中的树脂材料又可以分为酚醛树脂、环氧树脂、聚酰亚胺等;无机 PCB 主要是由陶瓷和铝等材料构成的,即通常所说的厚薄膜电路,它广泛应用于高频电子仪器中。目前,常见的 PCB 都是有机 PCB。

2. 按照基材强度来分类

按照加工 PCB 的基材强度,PCB 可以分为刚性 PCB、挠性 PCB 和刚挠结合 PCB,下面对其进行介绍。

(1) 刚性 PCB

刚性 PCB 是指采用刚性基材制成的 PCB,常见的刚性 PCB 主要包括酚醛纸质层压板、环氧纸质层压板、聚酯玻璃毡层压板和环氧玻璃布层压板等。

1) 酚醛纸质层压板。这种 PCB 的使用温度可以达到 $70 \sim 105^{\circ}\text{C}$,特点是在高湿度环境下基材的绝缘电阻会明显减少;但是当湿度降低时绝缘电阻将会增加。需要注意的是,温度过高将会引起酚醛纸质层压板的炭化现象,使它的绝缘电阻降到很低。另外,在正常的温度范围内,PCB 的基材有可能会发生变黑现象。

2) 环氧纸质层压板。这种 PCB 的使用温度可以达到 $90 \sim 110^{\circ}\text{C}$,特点是电气性能和非电气性能都要比酚醛纸质层压板好得多。

3) 聚酯玻璃毡层压板。这种 PCB 的使用温度可以达到 $100 \sim 105^{\circ}\text{C}$,特点是具有良好的电气性能,同时抗冲击性也较强,可以应用于很宽的频率范围内和高湿度环境下。需要注意的是,聚酯玻璃毡层压板的机械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 PCB 的使用温度可以达到 130°C ,特点主要体现在机械性能上,特别是抗冲击性、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 also 具有良好的电气性能。

(2) 挠性 PCB

挠性 PCB 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 PCB, 有时候也称为柔性 PCB 或软性 PCB。目前, 广泛采用的挠性 PCB 包括聚酯薄膜、聚酰亚胺薄膜和氟化乙丙烯薄膜等。

1) 聚酯薄膜。这种 PCB 的使用温度可以达到 $80 \sim 130^{\circ}\text{C}$, 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和变形现象, 因此在焊接过程中要格外小心。

2) 聚酰亚胺薄膜。这种 PCB 可以在温度高达 150°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°C 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。这种氟化乙丙烯薄膜通常是和聚酰亚胺或者玻璃布结合来制成层压板的, 它的焊接温度可以达到 250°C 。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。

挠性 PCB 作为一种特殊的电子互连的基础材料, 具有显著的特点, 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, 还可以在三维空间随意移动和伸缩等。采用挠性 PCB 可以缩小体积, 实现产品的薄、轻、小等特点, 因此挠性 PCB 迅速地从军品转向到民用, 获得了广泛应用。

(3) 刚挠结合 PCB

刚挠结合 PCB 是指利用挠性材料并在不同区域与刚性基材结合制成的 PCB, 即在同一个结构中既有刚性 PCB 使用的材料, 同时又有挠性 PCB 和多层 PCB 使用的材料。目前, 刚挠结合 PCB 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 PCB, 含有过孔;
- 5) 5 型板: 组合刚挠 PCB, 刚性印制板与挠性印制黏层数多于 1 层。

3. 按照覆铜板导电层数来分类

按照覆铜板的导电层数, PCB 可以分为单层板、双层板和多层板, 这是一种最为常见的分类方法。

(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 PCB, 因此它只能够在覆铜的一面进行布线并放置元器件。由于实现简单, 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。

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, 因此目前已经很少使用这种单层板了。

(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 PCB。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