

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



# 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 猿大 孕悦市场，未来 缘年还将成为全球第 圆大 孕悦市场。中国市场的商机令世界各国 陨公司心动不已，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 陨人才为例，据不完全统计，全国目前定位于 陨设计的企业大约 圆园多家，陨设计人员还不到 源园人，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 陨设计人才保守估计在 缘万人左右，如果要保证整个 陨设计产业正常运作，人才需求量则高达 圆- 缘万。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 陨公司的当务之急。

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 愿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：

- 《灾灾早匀陨与数字电路设计》
- 《灾匀陨与数字电路设计》
- 《可编程逻辑器件和 耘设计技术》
- 《印制电路板设计》
- 《孕悦电路设计入门与应用》
- 《匀陨仿真与 孕悦设计》
- 《陨原理与应用》
- 《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 50 多年的历史了。印制电路板就是通常所说的 孕片 (孕片、孕片、孕片)。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 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 孕片、孕片、孕片以及 孕片、孕片等。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 源个部分：第 源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 源部分重点讨论印制电路板



# 目 录

丛书序		猿
前言		猿
第 1 章 印制电路板概述	猿	猿
1.1 印制电路板基础	猿	猿
1.1.1 印制电路板的发展	猿	猿
1.1.2 印制电路板的分类	猿	猿
1.1.3 印制电路板的基板选择	猿	猿
1.2 印制电路板的元素	猿	猿
1.2.1 工作层面	猿	猿
1.2.2 元器件封装	猿	猿
1.2.3 铜膜导线	猿	猿
1.2.4 焊盘	猿	猿
1.2.5 过孔	猿	猿
1.3 印制电路板的阻燃性和电气性能	猿	猿
1.3.1 印制电路板的阻燃性	猿	猿
1.3.2 印制电路板的电气性能	猿	猿
第 2 章 印制电路板的设计原则和方法	猿	猿
2.1 印制电路板的加工流程	猿	猿
2.2 印制电路板的设计流程	猿	猿
2.2.1 印制电路板的总体设计流程	猿	猿
2.2.2 原理图的设计流程	猿	猿
2.2.3 电路板的设计流程	猿	猿
2.3 印制电路板的基本设计方法	猿	猿
2.3.1 印制电路板设计的基本工艺	猿	猿
2.3.2 表面贴装技术	猿	猿
2.4 印制电路板的基本设计原则	猿	猿
2.4.1 印制电路板的抗干扰设计原则	猿	猿
2.4.2 印制电路板的热设计原则	猿	猿
2.4.3 印制电路板的抗振设计原则	猿	猿
2.4.4 印制电路板的可测试性设计原则	猿	猿
第 3 章 电磁兼容性分析	猿	猿
3.1 电磁兼容性概述	猿	猿
3.1.1 电磁兼容性的定义	猿	猿
3.1.2 电磁兼容的相关概念	猿	猿
3.1.3 共模干扰和差模干扰	猿	猿
3.1.4 电磁兼容的费用	猿	猿
3.2 电磁兼容控制技术	猿	猿
3.2.1 传输通道抑制	猿	猿
3.2.2 空间分离	猿	猿
3.2.3 时间分隔	猿	猿
3.2.4 频率管理	猿	猿
3.2.5 电气隔离	猿	猿
3.3 电磁兼容控制技术在 PCB 封装中的应用	猿	猿
3.4 印制电路板中的电磁兼容问题	猿	猿
3.4.1 信号完整性	猿	猿
3.4.2 减小传导发射和辐射发射	猿	猿
3.5 印制电路板中的电磁兼容设计	猿	猿
3.5.1 印制电路板的元器件选择	猿	猿
3.5.2 印制电路板的元器件布局	猿	猿
3.5.3 印制电路板的布线	猿	猿
3.5.4 印制电路板的接地设计	猿	猿
3.5.5 模拟/数字混合印制电路板的设计	猿	猿
3.5.6 印制电路板设计时的电路措施	猿	猿
3.6 高速印制电路板仿真	猿	猿
3.6.1 高速印制电路板仿真概述	猿	猿
3.6.2 高速印制电路板仿真中的电磁兼容分析	猿	猿
3.7 印制电路板电磁兼容分析工具介绍	猿	猿
3.7.1 系统级电磁兼容分析软件	猿	猿
3.7.2 高频电磁场仿真软件	猿	猿
3.7.3 高频电磁场仿真软件	猿	猿
3.7.4 高频电磁场仿真软件	猿	猿
3.7.5 高频电磁场仿真软件	猿	猿
3.7.6 高频电磁场仿真软件	猿	猿
3.7.7 高频电磁场仿真软件	猿	猿
3.7.8 高频电磁场仿真软件	猿	猿
3.7.9 高频电磁场仿真软件	猿	猿
3.7.10 高频电磁场仿真软件	猿	猿
3.7.11 高频电磁场仿真软件	猿	猿
3.7.12 高频电磁场仿真软件	猿	猿
3.7.13 高频电磁场仿真软件	猿	猿
3.7.14 高频电磁场仿真软件	猿	猿
3.7.15 高频电磁场仿真软件	猿	猿
3.7.16 高频电磁场仿真软件	猿	猿
3.7.17 高频电磁场仿真软件	猿	猿
3.7.18 高频电磁场仿真软件	猿	猿
3.7.19 高频电磁场仿真软件	猿	猿
3.7.20 高频电磁场仿真软件	猿	猿
3.7.21 高频电磁场仿真软件	猿	猿
3.7.22 高频电磁场仿真软件	猿	猿
3.7.23 高频电磁场仿真软件	猿	猿
3.7.24 高频电磁场仿真软件	猿	猿
3.7.25 高频电磁场仿真软件	猿	猿
3.7.26 高频电磁场仿真软件	猿	猿
3.7.27 高频电磁场仿真软件	猿	猿
3.7.28 高频电磁场仿真软件	猿	猿
3.7.29 高频电磁场仿真软件	猿	猿
3.7.30 高频电磁场仿真软件	猿	猿
3.7.31 高频电磁场仿真软件	猿	猿
3.7.32 高频电磁场仿真软件	猿	猿
3.7.33 高频电磁场仿真软件	猿	猿
3.7.34 高频电磁场仿真软件	猿	猿
3.7.35 高频电磁场仿真软件	猿	猿
3.7.36 高频电磁场仿真软件	猿	猿
3.7.37 高频电磁场仿真软件	猿	猿
3.7.38 高频电磁场仿真软件	猿	猿
3.7.39 高频电磁场仿真软件	猿	猿
3.7.40 高频电磁场仿真软件	猿	猿
3.7.41 高频电磁场仿真软件	猿	猿
3.7.42 高频电磁场仿真软件	猿	猿
3.7.43 高频电磁场仿真软件	猿	猿
3.7.44 高频电磁场仿真软件	猿	猿
3.7.45 高频电磁场仿真软件	猿	猿
3.7.46 高频电磁场仿真软件	猿	猿
3.7.47 高频电磁场仿真软件	猿	猿
3.7.48 高频电磁场仿真软件	猿	猿
3.7.49 高频电磁场仿真软件	猿	猿
3.7.50 高频电磁场仿真软件	猿	猿
3.7.51 高频电磁场仿真软件	猿	猿
3.7.52 高频电磁场仿真软件	猿	猿
3.7.53 高频电磁场仿真软件	猿	猿
3.7.54 高频电磁场仿真软件	猿	猿
3.7.55 高频电磁场仿真软件	猿	猿
3.7.56 高频电磁场仿真软件	猿	猿
3.7.57 高频电磁场仿真软件	猿	猿
3.7.58 高频电磁场仿真软件	猿	猿
3.7.59 高频电磁场仿真软件	猿	猿
3.7.60 高频电磁场仿真软件	猿	猿
3.7.61 高频电磁场仿真软件	猿	猿
3.7.62 高频电磁场仿真软件	猿	猿
3.7.63 高频电磁场仿真软件	猿	猿
3.7.64 高频电磁场仿真软件	猿	猿
3.7.65 高频电磁场仿真软件	猿	猿
3.7.66 高频电磁场仿真软件	猿	猿
3.7.67 高频电磁场仿真软件	猿	猿
3.7.68 高频电磁场仿真软件	猿	猿
3.7.69 高频电磁场仿真软件	猿	猿
3.7.70 高频电磁场仿真软件	猿	猿
3.7.71 高频电磁场仿真软件	猿	猿
3.7.72 高频电磁场仿真软件	猿	猿
3.7.73 高频电磁场仿真软件	猿	猿
3.7.74 高频电磁场仿真软件	猿	猿
3.7.75 高频电磁场仿真软件	猿	猿
3.7.76 高频电磁场仿真软件	猿	猿
3.7.77 高频电磁场仿真软件	猿	猿
3.7.78 高频电磁场仿真软件	猿	猿
3.7.79 高频电磁场仿真软件	猿	猿
3.7.80 高频电磁场仿真软件	猿	猿
3.7.81 高频电磁场仿真软件	猿	猿
3.7.82 高频电磁场仿真软件	猿	猿
3.7.83 高频电磁场仿真软件	猿	猿
3.7.84 高频电磁场仿真软件	猿	猿
3.7.85 高频电磁场仿真软件	猿	猿
3.7.86 高频电磁场仿真软件	猿	猿
3.7.87 高频电磁场仿真软件	猿	猿
3.7.88 高频电磁场仿真软件	猿	猿
3.7.89 高频电磁场仿真软件	猿	猿
3.7.90 高频电磁场仿真软件	猿	猿
3.7.91 高频电磁场仿真软件	猿	猿
3.7.92 高频电磁场仿真软件	猿	猿
3.7.93 高频电磁场仿真软件	猿	猿
3.7.94 高频电磁场仿真软件	猿	猿
3.7.95 高频电磁场仿真软件	猿	猿
3.7.96 高频电磁场仿真软件	猿	猿
3.7.97 高频电磁场仿真软件	猿	猿
3.7.98 高频电磁场仿真软件	猿	猿
3.7.99 高频电磁场仿真软件	猿	猿
3.7.100 高频电磁场仿真软件	猿	猿
第 4 章 信号完整性分析	猿	猿

源页	信号完整性概述 .....	源远	远源页	印制电路板设计的检查 .....	页苑
源圆	影响信号完整性的主要因素 .....	源苑	远源页	印制电路板 阅读分析与优化 工具 简介 .....	页苑
源猿	信号完整性分析模型 .....	源愿	远源圆	印制电路板的可测试性 .....	页贡
源猿页	印制电路板设计的 分析模型 .....	源愿	远源圆页	印制电路板的可测试性概述 .....	页贡
源猿圆	分析模型的选用 .....	源猿	远源圆圆	印制电路板的测试策略 .....	页缘
源源	信号完整性设计 .....	源猿	远源圆猿	印制电路板可测试性设计技术 概述 .....	页苑
源源页	信号反射的形成 .....	源源	远源源	几种可测试性设计技术 .....	页德
源源圆	阻抗匹配与端接技术 .....	源缘	第 苑章	多层印制电路板的设计 .....	页德
源源猿	端接技术的仿真分析 .....	页园	苑页	印制电路板的制作流程 .....	页猿
源源源	串扰分析 .....	页贡	苑圆	叠层的设计 .....	页源
源缘	信号完整性设计工具介绍 .....	页怨	苑圆页	电源和地的设计 .....	页缘
源缘页	利用 软件进行印制电路板 级仿真与分析 .....	页怨	苑圆圆	布线 .....	页远
源缘圆	其他信号完整性仿真工具 介绍 .....	页园	苑圆猿	层的结构 .....	页苑
源缘猿	信号完整性测试仪 .....	页园	苑圆源	设计的一些规则 .....	页愿
源远	建立企业内部的 部门 .....	页苑	苑圆缘	特征阻抗 .....	页贡
第 缘章	印制电路板的电源设计 .....	页愿	苑圆页	特征阻抗的计算 .....	页园
缘页	电源完整性简介 .....	页愿	苑圆圆	阻抗控制 .....	页园
缘圆	电源噪声的起因及危害 .....	页愿	苑圆源	经典叠层 .....	页苑
缘猿	电源阻抗设计 .....	页怨	苑圆页	源层板 .....	页苑
缘源	同步开关噪声的分析 .....	页园	苑圆圆	远层板 .....	页苑
缘缘	去耦电容的使用 .....	页贡	苑圆猿	层板 .....	页愿
缘缘页	电容引线的影晌 .....	页园	苑圆源	层以上 .....	页怨
缘缘圆	电容介质和电压的影响 .....	页猿	第 愿章	高速印制电路板的设计 .....	页贡
缘缘猿	温度的影响 .....	页源	愿页	基本概念 .....	页贡
缘缘源	其他电容的使用 .....	页源	愿圆	传输线理论 .....	页远
缘远	印制电路板的地设计 .....	页缘	愿圆页	普通点对点布线的缺点 .....	页远
缘远页	地的种类 .....	页远	愿圆圆	无线均匀传输线 .....	页苑
缘远圆	接地方式和接地电阻 .....	页苑	愿圆猿	常见传输线 .....	页苑
缘苑	印制电路板的回流设计 .....	页愿	愿圆缘	传输线效应的对策 .....	页园
缘苑页	印制电路板上的回流分类 .....	页愿	愿圆页	合理确定信号走线的长度 .....	页园
缘苑圆	分割电源平面与 的仿真 .....	页怨	愿圆圆	合理叠层 .....	页贡
第 远章	印制电路板的可制造性与 可测试性 .....	页缘	愿圆猿	终端匹配 .....	页贡
远页	印制电路板的可制造性 .....	页缘	愿圆源	合理规划走线的拓扑结构 .....	页贡
远页页	印制电路板可制造性设计 概述 .....	页缘	愿源	高速电路设计技巧 .....	页园
远页圆	印制电路板生产工艺与设计 .....	页远	愿页	叠层 .....	页园
远页猿	印制电路板的可制造性设计 规范 .....	页园	愿页圆	走线 .....	页园
			愿页猿	高速电路中的去耦设计 .....	页园
			愿页缘	高速时钟电路的设计 .....	页苑
			愿页页	时钟源的电源滤波 .....	页苑
			愿页圆	时钟走线上的串扰问题 .....	页怨

源源源 延时的调整 .....	源源	源源源 各种射频电路的设计准则 .....	源源
源源源 时钟总线上时钟接收器的 去耦 .....	源源	<b>第 10 章 印制电路板设计系统</b>	
源源源 时钟信号的布线 .....	源源	—— 印制电路板 .....	源源
<b>源源 通孔的设计 .....</b>	源源	源源源 印制电路板概述 .....	源源
源源源 机械尺寸的选择 .....	源源	源源源 印制电路板设计系统的发展历史 .....	源源
源源源 通孔电容的计算 .....	源源	源源源 印制电路板设计系统的主要特点 .....	源源
源源源 通孔电感的计算 .....	源源	源源源 印制电路板设计系统的基本操作界面 .....	源源
<b>第 11 章 射频印制电路板的设计 .....</b>	源源	源源源 原理图设计 .....	源源
源源 射频电路简介 .....	源源	源源源 新建原理图文件 .....	源源
源源 射频微波理论知识 .....	源源	源源源 装载元件库 .....	源源
源源源 无源器件 .....	源源	源源源 放置元件并布局 .....	源源
源源源 射频传输线理论 .....	源源	源源源 原理图的布线工具 .....	源源
源源源 史密斯圆图概念 .....	源源	源源源 原理图的绘图工具 .....	源源
源源源 二端口网络与杂参数 .....	源源	源源源 原理图的 标题 .....	源源
源源源 阻抗变换及匹配 .....	源源	源源源 原理图的报表生成 .....	源源
源源 射频微波电路设计 .....	源源	源源源 印制电路板设计 .....	源源
源源源 高功率放大器 .....	源源	源源源 新建 源源文件 .....	源源
源源源 低噪声放大器 .....	源源	源源源 添加元件封装库和网络 .....	源源
源源源 混频器 .....	源源	源源源 元件自动布局 .....	源源
源源源 频率源 .....	源源	源源源 元件手工布局 .....	源源
源源源 射频微波滤波器 .....	源源	源源源 源源自动布线 .....	源源
源源 射频印制电路板设计 .....	源源	源源源 源源手工布线 .....	源源
源源源 射频电路的设计措施 .....	源源	源源源 源源的 源源和报表生成 .....	源源
源源源 射频印制电路板的分区技巧 .....	源源	<b>参考文献 .....</b>	源源

# 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。1946年，美国贝尔实验室首先采用了“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。1947年，美国通用电气公司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 3 个时期：

#### 1. 印制电路板的诞生期 (1946 年至 20 世纪 60 年代末期)

1946 年，美国贝尔实验室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 1947 年底应用于无线电接收机中。

### 1. 1 印制电路板的试产期（20 世纪 50 年代）

自从 1948 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（孕基材），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，它是一种采用孕基材的单层印制电路板。

### 1. 2 印制电路板的实用期（20 世纪 50 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（猴基材）。1954 年起，日本的公司开始大量使用猴基材材料。1950 年，美国光电路公司开发出浓厚铜化学镀铜液（愧兑原原溶液），开始了新的加成法制造工艺。日立公司引进了愧兑原原技术，目的是用于解决猴基材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，猴基材的质量不断提高。1953 年起，日本有好几家制造商开始批量生产猴基材、工业电子设备用猴基材和民用电子设备用孕基材。

### 1. 3 印制电路板的快速发展期（20 世纪 50 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。1956 年起，通信行业中的电子交换机开始使用猴层的印制电路板；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 5 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源层向远层、愿层、员层、圆层、源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 0.254mm 向 0.127mm、0.076mm、0.0508mm 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，可以实现印制电路板上的元器件安装。

### 1. 4 印制电路板的高速发展期（20 世纪 60 年代）

20 世纪 60 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。1960 年后，孕层高密度化也明显得到提高，这时已经可以生产出 20 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。

### 1. 5 印制电路板的革命期（20 世纪 70 年代至今）

20 世纪 70 年代前期，印制电路板的发展经历了一段低谷时期。1970 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。1975 年开始，积层法印制电路板开始进入了实用期，产量开始急剧增加；附元件封装形式也开始进入到球栅阵列（邦粤）和芯片级封装（愧孕）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 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。

### 1.1.1 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（铜箔层）和底层（铜箔层）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，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源层、远层、愿层、壳层等。例如在源层板中，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。

### 1.1.2 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。

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猿大类,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。

(员) 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。

员 酚醛纸层压板。这种印制电路板的使用温度可以达到 苑园~ 员缘益,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。

圆 环氧纸层压板。这种印制电路板的使用温度可以达到 怨园~ 员园益,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。

猿 聚酯玻璃毡层压板。这种印制电路板的使用温度可以达到 员园~ 员缘益,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。

源 环氧玻璃布层压板。这种印制电路板的使用温度可以达到 员缘益,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。

(圆) 挠性印制电路板 一般来说,挠性印制电路板(云云)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。

员 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 愿园~ 员缘益,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和变形现象,因此设计人员在焊接过程中要格外小心。

圆 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 员缘益的环境下连续工



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

表 夙夙 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	云夙夙夙	经济性，阻燃
			云夙夙圃	高电气性能， 阻燃（冷冲）
			鞣鞣鞣夙	高电气性能（冷冲）
			鞣夙夙经济性	经济性（冷冲）
	玻璃布基板	环氧树脂覆铜箔板	云夙夙夙	高电气性能，阻燃
			云夙夙原	
			云夙夙原缘	阻燃
			夙夙再	
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	夙夙云夙夙夙 夙夙云夙夙圃	（夙夙云夙夙原阻燃）； （夙夙云夙夙原非阻燃）
		玻璃毡（芯）—玻璃布（面）— 环氧树脂覆铜箔板	夙夙云夙夙夙	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	夙夙夙	
		碳化硅基板	夙夙夙	
		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		

## 夙夙 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

装、铜膜导线、焊盘和过孔等。下面将对上面的各个元素进行一下简单讨论，使读者熟悉印制电路板的基本组成。

## 1.1.1 工作层面

在 PCB 设计的过程中，设计人员将会根据设计的需要来决定使用哪种形式的印制电路板。一般来说，根据电路板导电层数的不同，印制电路板可以为单层板、双层板和多层板。在印制电路板的实际设计过程中，设计人员往往会遇到工作层面的选择问题，可见掌握印制电路板的工作层面是十分必要的。

对于印制电路板来说，工作层面可以分为两大类，分别是信号层（Signal Layer）、内部电源/接地层（Internal Power/Plane Layer）、机械层（Mechanical Layer）、防护层（Protective Layer）、丝印层（Solder Mask Layer）和其他工作层面（Other Working Layers）。下面将对上面的各个工作层面进行一下简单介绍。

**（1）信号层** 在印制电路板的设计过程中，信号层的功能主要是用来放置与信号有关的对象，它可以分为顶层、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，不能放置元器件。

**（2）内部电源/接地层** 在印制电路板的设计过程中，内部电源/接地层主要用来放置电源和接地线，目的是为电路提供电源和接地点，从而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。

**（3）机械层** 在印制电路板的设计过程中，机械层主要用来放置物理边界和放置尺寸标注等信息，目的是起到相应的提示作用。通常，大多数 PCB 开发工具可以为设计人员提供多达 16 层的机械层，从而满足实际设计的需要。

**（4）防护层** 在印制电路板的设计过程中，防护层包括锡膏层和阻焊层两大类：锡膏层主要用于将表面贴装元器件粘贴在 PCB 上，阻焊层用于防止焊锡镀在不应该焊接的地方。其中，锡膏层包括顶层锡膏层（Top Solder Paste）和底层锡膏层（Bottom Solder Paste），阻焊层包括顶层阻焊层（Top Solder Mask）和底层阻焊层（Bottom Solder Mask）。

**（5）丝印层** 在印制电路板的设计过程中，丝印层主要用来在印制电路板的顶层和底层表面绘制元器件封装的外观轮廓和放置字符串等，例如元器件的具体标号、标称值、厂家标志和生产日期等，同时它也是印制电路板上用来焊接元器件位置的依据。可以看出，丝印层的作用是使印制电路板具有可读性，便于电路的安装和维修等。

**（6）其他工作层面** 在印制电路板的设计过程中，印制电路板中还具有一些特殊的工作层面，目的是为了满足不同具体设计的需要。通常，印制电路板中还具有的工作层面有 4 种，分别是禁止布线层（No Drill Layer）、钻孔导引层（Drill Guide Layer）、钻孔图层（Drill Plot Layer）和复合层（Composite Layer）。

## 1.1.2 元器件封装

一般来说，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，它是使元件引脚和印制电路板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。可以推断出，不同的元器件可以使用同一个元器件封装，而同种元器