

EDA
EDA 工具应用丛书

印刷电路板(PCB) 设计与制作

(第2版)

曾 峰 巩海洪 曾 波 编著



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

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

EDA 工具应用丛书

印刷电路板 (PCB) 设计与制作

(第2版)

曾 峰 巩海洪 曾 波 编著

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 · BEIJING

内 容 简 介

印刷电路板 (Printing Circuit Board, PCB) 是电子产品中电路元件的支撑件, 它提供了电路元件和元件之间的电气连接。本书详细介绍了 PCB 的设计规范、PCB 电磁兼容性、信号完整性分析、电源完整性设计、PCB 设计的可制造性、可测性、PCB 产品的性能指标、PCB 设计实践、项目管理等内容。阐述了 PCB 设计的理论基础、PCB 的材料科学、元器件在 PCB 电路板安装、表贴、埋藏及绑定方法; 介绍了多层电路板、高频电路、混合信号电路的设计方法和技巧。本书的写作目标定位在 PCB 设计的更高层次上, 介绍 PCB 设计的高级技术, 旨在提高读者的 PCB 设计能力。

本书适合有经验的电子产品设计工程师以及电子类相关专业的学生阅读。

未经许可, 不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。
版权所有, 侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

印刷电路板 (PCB) 设计与制作/曾峰, 巩海洪, 曾波编著. —2 版. —北京: 电子工业出版社, 2005.8
(EDA 工具应用丛书)

ISBN 7-121-01460-2

I. 印… II. ①曾…②巩…③曾… III. 印刷电路—计算机辅助设计—应用软件 IV.TN410.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 067821 号

责任编辑: 雷洪勤

印 刷: 北京市天竺颖华印刷厂

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

经 销: 各地新华书店

开 本: 787×1092 1/16 印张: 18.5 字数: 470 千字

印 次: 2005 年 8 月第 1 次印刷

印 数: 5 000 册 定价: 28.00 元

凡购买电子工业出版社的图书, 如有缺损问题, 请向购买书店调换。若书店售缺, 请与本社发行部联系。联系电话: (010) 68279077。质量投诉请发邮件至 zllts@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

序

PCB 设计是电子产品设计的重要环节之一。电子产品正向工作高速度、元件高密度、存储高容量方向发展。这对印刷电路板设计技术提出了新的挑战。高速度意味着电路在更高频率下工作，当在 1GHz 工作频率时，提取的电路模型就发生了变化，通常条件下的 EDA 工具对电路的时序分析、波形分析、信号完整性分析、电磁噪声分析就不准确，需要新的电路模型来更新现有的 EDA 工具。元件高密度意味着 PCB 设计更复杂、更困难。存储高容量意味着大量新型存储元件的面世，电子元件新型封装形式层出不穷，使 PCB 设计不断更新。

作为一个 PCB 设计工程师，除了熟练掌握 PCB 设计工具的使用之外，还应对 PCB 生产工艺有所了解。与 PCB 生产厂家密切合作，才能设计出可制造性好、抗干扰能力强、性能稳定的印刷电路板。为了写好本书，作者专门请到了 PCB 生产厂的工程师，向他们请教了 PCB 生产的工艺流程，设计工程师与 PCB 加工厂的加工工艺相配合，才是最完美的设计。

PCB 设计工程师，不仅要有丰富的电路知识，还应该具有工业美学的修养。设计的电子产品，除了具备基本的电子功能外，还应美观精巧，它应是一件艺术品。

PCB 设计工程师设计的印刷电路板，在大规模生产线上有许多约束条件。定位标识、封装类型、设计精度等问题，都会影响电子产品的质量。

本书深入探讨了 PCB 设计的可制造性问题、可测试性问题、电源完整性设计问题、信号完整性问题、电磁兼容性问题。阐述了多层板设计、高速板设计、混合信号板设计的基本要求。

PCB 设计是 EDA 工程的重要内容之一，它和 ASIC 设计正在互相渗透。ASIC 设计和 PCB 设计的沟通已经开始，它们之间的桥梁已经开始构建，这是 PCB 设计技术的发展新动向。

三位作者严谨的学风、丰富的设计经验，使得本书与众多的 PCB 设计工具的书风格迥异，内容新颖。他们以创新求实的作风，在 PCB 设计领域探索着、实践着，将他们的设计经验、研究成果奉献给广大读者共享。全书由山东大学曾繁泰统筹审核，文中不妥之处，请广大读者批评指正。

参加本书编写的还有：陈洪震、侯亚宁、王建华、庄明科、赵立春、纪长江、王强、马训国、曾繁恒、李长青、刘现营、张路、张帆、王海楷、李明等同志。

山东大学多屏幕微机研究所
EDA 工程设计中心
曾繁泰

目 录

第 1 章 概述	(1)
1.1 印刷电路板概述	(1)
1.1.1 印刷电路板发展过程	(1)
1.1.2 印刷电路板的分类	(2)
1.1.3 印刷电路板的制作工艺流程	(2)
1.1.4 印刷电路板的功能	(3)
1.1.5 印刷电路板的发展趋势	(3)
1.2 印刷电路板基础	(4)
1.2.1 印制板用基材	(4)
1.2.2 过孔	(9)
1.2.3 导线尺寸	(11)
1.2.4 焊盘尺寸 (外层)	(11)
1.2.5 金属镀 (涂) 覆层	(12)
1.2.6 印制接触片	(13)
1.2.7 非金属涂覆层	(13)
1.2.8 永久性保护涂覆层	(14)
1.2.9 敷形涂层	(15)
1.2.10 印刷电路板的尺寸	(16)
1.2.11 阻燃性	(18)
1.2.12 印刷电路板基板的选择	(19)
1.3 印刷电路板电气性能	(20)
1.3.1 电阻	(20)
1.3.2 载流量	(22)
1.3.3 绝缘电阻	(24)
1.3.4 耐压	(25)
1.3.5 其他电气性能	(26)
1.4 生产实践与设计	(26)
1.5 PCB 设计相关标准	(29)
1.5.1 IPC-2510 系列标准简介	(30)
1.5.2 开发机构及组织	(31)
第 2 章 PCB 设计的一般方法	(33)
2.1 设计流程	(33)
2.1.1 PCB 的总体设计流程	(33)
2.1.2 PCB 的设计流程	(34)

2.2	PCB 布局	(37)
2.3	元件的选择和考虑	(39)
2.4	热处理设计	(40)
2.5	焊盘设计	(41)
2.6	基准设计和元件布局	(44)
2.7	设计文件档案	(46)
2.8	布线	(47)
2.9	布线的检查	(50)
2.10	PCB 生产工艺对设计的要求	(50)
第 3 章	电磁兼容设计	(54)
3.1	电磁兼容的一般知识	(54)
3.1.1	电磁兼容及相关概念	(54)
3.1.2	电磁兼容的一般控制技术介绍	(55)
3.1.3	印刷电路板中的电磁兼容问题	(58)
3.2	电磁兼容设计的一般准则	(60)
3.2.1	电子电路设计的一般准则	(60)
3.2.2	印制电路设计准则	(63)
3.2.3	设备内部走线准则	(64)
3.2.4	底板和机壳设计准则	(65)
3.2.5	布线设计准则	(68)
3.2.6	接地设计准则	(69)
3.3	PCB 中电磁兼容设计方法	(71)
3.3.1	PCB 材料、层、过孔的选择与电磁兼容性	(71)
3.3.2	集成电路芯片与电磁兼容设计	(72)
3.3.3	PCB 板内元器件的布局、互连与电磁兼容设计	(78)
3.4	电磁兼容设计中的电源问题	(80)
3.4.1	电源噪声	(80)
3.4.2	电源线设计	(80)
3.5	PCB 电磁兼容设计中的地线设计	(81)
3.5.1	地线的阻抗	(81)
3.5.2	地线干扰机理	(82)
3.5.3	地线干扰对策	(83)
3.5.4	地线设计的原则	(84)
3.6	电磁兼容设计中的退耦电容	(85)
第 4 章	信号完整性分析	(86)
4.1	信号完整性概述	(86)
4.1.1	基本概念	(86)
4.1.2	信号完整性问题	(88)
4.2	信号完整性解决方法	(91)

4.2.1	PCB 互联中传输线的阻抗及反射	(92)
4.2.2	信号反射的形成	(96)
4.2.3	阻抗匹配与端接方案	(97)
4.2.4	端接技术的仿真分析	(101)
4.2.5	串扰分析	(102)
4.3	PCB 的信号完整性与设计	(108)
4.3.1	信号完整性设计的一般准则	(109)
4.3.2	PCB 设计的 SI 模型与选用	(111)
4.3.3	信号完整性仿真	(113)
4.3.4	基于信号完整性分析的 PCB 设计方法	(114)
4.3.5	PCB 信号完整性设计工具 APSIM-SPI	(115)
第 5 章	电源完整性设计	(117)
5.1	电源完整性概述	(117)
5.1.1	电源完整性设计的基础知识	(117)
5.1.2	电源噪声的起因及危害	(118)
5.2	电源完整性设计方法	(120)
5.2.1	电源分配系统	(120)
5.2.2	同步开关噪声分析	(124)
5.2.3	旁路电容	(127)
5.2.4	电源完整性的 PCB 的布线规则	(129)
第 6 章	PCB 设计的可制造性	(131)
6.1	PCB 设计的可制造性	(131)
6.1.1	PCB 设计的可制造性一般规范	(131)
6.1.2	PCB 设计的检查	(136)
6.1.3	PCB 制造过程中常见的设计问题	(143)
6.1.4	PCB 设计与 IC 芯片封装	(150)
6.2	生产工艺和设计的关系	(153)
6.2.1	锡膏丝印工艺	(154)
6.2.2	点锡膏工艺	(154)
6.2.3	印胶工艺	(154)
6.2.4	贴片工艺	(154)
6.2.5	波峰焊接工艺	(155)
6.2.6	回流焊接工艺	(155)
6.2.7	了解制造能力	(156)
6.3	PCB 基板的选择	(157)
6.4	PCB 的可制造性设计	(158)
6.4.1	通孔插装元件的可制造性设计规范	(158)
6.4.2	表面贴元件的 PCB 可制造性设计规范	(161)

第 7 章	PCB 的可测试性设计	(164)
7.1	概述	(164)
7.1.1	PCB 可测试性的基本概念	(164)
7.1.2	PCB 可测试性的焦点问题	(164)
7.1.3	PCB 可测试性的电气条件	(165)
7.1.4	PCB 可测试性的机械条件	(165)
7.2	PCB 测试的策略	(166)
7.3	PCB 测试方法与缺陷覆盖	(171)
7.4	PCB 的可测性设计	(172)
7.5	PCB 生产的测试	(173)
第 8 章	PCB 的仿真设计	(175)
8.1	仿真的概念	(175)
8.2	电路仿真	(175)
8.2.1	SIM 98 涉及的基本概念	(177)
8.2.2	SIM 98 的仿真分析功能	(182)
8.2.3	波形窗口的操作	(187)
8.3	电路仿真举例	(188)
8.3.1	模拟电路仿真——有源滤波器的仿真	(188)
8.3.2	数字电路仿真举例	(193)
8.4	PCB 级仿真	(197)
8.4.1	PCB 级仿真概述	(197)
8.4.2	前期仿真(线仿真)	(198)
8.4.3	板级仿真	(202)
第 9 章	PCB 设计实践	(207)
9.1	多层电路板设计	(207)
9.1.1	多层电路板设计流程	(207)
9.1.2	多层电路板设计层的选择	(207)
9.1.3	多层电路板设计实例	(212)
9.2	高速电路板设计	(219)
9.2.1	高速信号电路板设计概述	(219)
9.2.2	高频电路布线技巧	(220)
9.2.3	高速 PCB 设计策略	(222)
9.2.4	高速 PCB 设计方法	(223)
9.2.5	高速 PCB 设计技术	(224)
9.2.6	设计高速电路板的注意事项	(226)
9.2.7	HyperLynx 在高速电路板设计中的应用	(228)
9.3	混合信号电路板的设计	(235)
9.3.1	混合信号电路布线基础	(235)
9.3.2	混合信号 PCB 的分区设计	(237)

9.3.3	差分对布线在混合模拟信号 PCB 设计中的应用	(240)
9.3.4	混合信号分析实例	(240)
9.4	PCB 板的静电释放 (ESD) 设计	(244)
9.5	单片机系统印刷电路板设计	(251)
9.5.1	单片机系统印刷电路板设计要求	(251)
9.5.2	单片机系统印刷电路板设计技巧	(251)
第 10 章	PCB 设计项目管理	(253)
10.1	设计管理	(253)
10.1.1	设计管理的重要性	(253)
10.1.2	产品的寿命设计	(253)
10.1.3	设计管理规范化	(254)
10.2	设计审核	(254)
10.2.1	新产品开发过程	(254)
10.2.2	设计完成后设计质量的审核	(255)
10.2.3	印制板的设计质量审核质量记录	(257)
10.3	产品研制中的 EMC 管理	(258)
10.3.1	概述	(258)
10.3.2	产品研制程序	(258)
10.3.3	EMC 设计程序	(259)
10.4	高速 PCB 一体化设计流程	(262)
10.5	电磁兼容设计中的可靠性	(264)
10.6	利用虚拟系统原型加速 PCB 设计	(266)
10.7	CAD/CAM 数据转换的新趋势	(267)
10.7.1	电子 CAD/CAM 数据交换 (ECCE)	(268)
10.7.2	EDIF 4.0.0 扩展应用	(268)
10.7.3	ICP-2510 系列标准	(270)
10.7.4	其他类型数据格式的发展	(271)
10.8	PCB 生产过程控制	(272)
10.9	提高设计自动化程度的方法	(275)
10.10	现代集成制造系统 (CIMS)	(278)
10.11	PCB 装配工业的发展	(281)
10.12	PCB 布局布线技术的发展	(282)
参考文献	(284)

第 1 章 概 述

1.1 印刷电路板概述

1.1.1 印刷电路板发展过程

PCB (Printed Circuit Board) 中文名称为印刷电路板, 又称印制板, 是电子产品的重要部件之一。几乎每种电子设备, 小到电子手表、计算器, 大到计算机、通信电子设备、军用武器系统, 只要存在电子元器件, 它们之间的电气互连就要使用印制板。在大型电子产品的研制过程中, 影响电子产品成功的最基本因素之一是该产品的印制板的设计和制造。印制板的设计和制造质量直接影响到整个电子产品的质量和成本, 甚至影响到电子产品在市场竞争中的竞争力。

在电子技术发展早期, 元件都是用导线连接的, 而元件的固定是在空间中立体进行的。电路由电源、导线、开关和元器件构成, 就像实验室里电工实验电路那样。

随着电子技术的发展, 电子产品的功能、结构变得很复杂, 元件布局、互连布线都不能像以往那样随便, 否则检查起来就会眼花缭乱; 因此, 人们对元件和线路进行了规划。用一块板子为基础, 在板上分配元件的布局, 确定元件的接点, 使用铆钉、接线柱作为接点, 用导线把接点按照电路要求, 在板的一面布线, 另一面装元件, 这就是最原始的电路板。这种类型的电路板在真空电子管时代非常盛行。线路的接法有直线连接(接点到接点的连线拉直)和曲线连接。后来, 大多数人采用曲线连接, 尽量减少使用直线连接。线路都在同一个平面分布, 没有太多的遮盖点, 检查起来容易。这时电路板已初步形成了“层”的概念。

单面敷铜板的发明, 成为电路板设计与制作新时代的标志。布线设计和制作技术都已发展成熟。先在敷铜板上用模板印刷防腐膜图, 然后再腐蚀刻线, 这种技术就像在纸上印刷那么简便, “印刷电路板”因此得名, 英文为 Printed Circuit Board, 简称 PCB。印刷电路板的应用大幅度降低了生产成本, 从晶体管时代到现在, 这种单面印刷电路板一直得到了广泛的应用。随着技术进步, 人们又发明了双面板, 即在板子两面都敷铜, 两面都可腐蚀刻线。

由于电路的复杂性, 有时也用到“飞线”。但电路的布线不是把元件按电路原理简单连接起来就可以, 电路工作时电磁感应、电阻效应、电容效应等都会影响电路的性能, 甚至会引起严重的质量问题, 如自激、信号不完整传输、电磁干扰等问题。飞线的方法只能解决少量的信号交错问题, 数量太多是不可取的。而且, 硬要把所有线路都排在有限的两个面上, 又要降低电磁感应、电阻效应、电容效应, 使得布线设计的任务十分艰巨。线太细太密, 不但加工困难、干扰大, 而且容易烧断和发生断路故障。若保证了线宽和线间距,

电路板的面积就可能太大，不利于精密设备的小型化。这些问题的出现促使了印刷电路板设计和制作工艺的发展。

随着电子产品生产技术的发展，人们开始在双面电路板的基础上发展夹层，其实就是在双面板的基础上叠加上一块单面板，这就是多层电路板。起初，夹层多用做大面积的地线、电源线的布线，表层都用于信号布线。后来，要求夹层用于信号布线的情况越来越多，这要求电路板的层数也要增加。但夹层不能无限增加，主要原因是成本和厚度问题。一般的生产厂都希望以尽可能低的成本获取尽可能高的性能，这与实验室里做的原形机设计不同。因此，电子产品设计者要考虑到性价比这个矛盾的综合体，而最实际的设计方法仍然是以表层做信号布线层为首选。高频电路的元件也不能排得太密，否则元件本身的辐射会直接对其他元件产生干扰。层与层之间的布线应错开成十字走向，以减少布线电容和电感。

1.1.2 印刷电路板的分类

印刷电路板根据制作材料可分为刚性印制板和挠性印制板。酚醛纸质层压板、环氧纸质层压板、聚酯玻璃毡层压板、环氧玻璃布层压板这些都属于刚性印制板；聚酯薄膜、聚酰亚胺薄膜、氟化乙丙烯（FEP）薄膜属于挠性印制板。

挠性印制板又称软性印刷电路板，即 FPC，软性电路板是以聚酰亚胺或聚脂薄膜为基材制成的一种具有高可靠性和较高曲挠性的印刷电路板。此种电路板散热性好，既可弯曲、折叠、卷绕，又可在三维空间随意移动和伸缩。可利用 FPC 缩小体积，实现轻量化、小型化、薄型化，从而实现元件装置和导线连接一体化。FPC 广泛应用于电脑、通信、航天及家电等行业。

刚性印制板和挠性印制板结合起来形成刚—挠性印制板，以实现更薄、更精细导线和更优越互连（取代刚性的转接）的产品。挠性线路将进入高科技领域并形成新一代产品，如 MCM-L，从经济和制造技术角度上看，优选挠性材料将更为有利。

1.1.3 印刷电路板的制作工艺流程

要想设计出符合要求的印制板图，电子产品设计人员需要深入了解现代印刷电路板的一般工艺流程。

(1) 单面印刷电路板的工艺流程

单面覆铜板→下料→（刷洗、干燥）→钻孔或冲孔→网印线路抗蚀刻图形或使用干膜→固化检查修板→蚀刻铜→去抗蚀印料、干燥→刷洗、干燥→网印阻焊图形（常用绿油）、UV 固化→网印字符标记图形、UV 固化→预热、冲孔及外形→电气开、短路测试→刷洗、干燥→预涂助焊抗氧化剂（干燥）或喷锡热风整平→检验包装→成品出厂。

(2) 双面印刷电路板的工艺流程

双面覆铜板→下料→叠板→数控钻导通孔→检验、去毛刺刷洗→化学镀（导通孔金属化）→（全板电镀薄铜）→检验刷洗→网印负性电路图形、固化（干膜或湿膜、曝光、显影）→检验、修板→线路图形电镀→电镀锡（抗蚀镍/金）→去印料（感光膜）→蚀刻铜→

(退锡)→清洁刷洗→网印阻焊图形常用热固化绿油(贴感光干膜或湿膜、曝光、显影、热固化,常用感光热固化绿油)→清洗、干燥→网印标记字符图形、固化→(喷锡或有机保焊膜)→外形加工→清洗、干燥→电气通断检测→检验包装→成品出厂。

(3) 多层印刷电路板的工艺流程

贯通孔金属化法制造多层板工艺流程→内层覆铜板双面开料→刷洗→钻定位孔→贴光致抗蚀干膜或涂覆光致抗蚀剂→曝光→显影→蚀刻与去膜→内层粗化、去氧化→内层检查→(外层单面覆铜板线路制作、B-阶粘结片、板材粘结片检查、钻定位孔)→层压→数控控制钻孔→孔检查→孔前处理与化学镀铜→全板镀薄铜→镀层检查→贴光致耐电镀干膜或涂覆光致耐电镀剂→面层底板曝光→显影、修板→线路图形电镀→电镀锡铅合金或镍/金镀→去膜与蚀刻→检查→网印阻焊图形或光致阻焊图形→印制字符图形→(热风整平或有机保焊膜)→数控洗外形→清洗、干燥→电气通断检测→成品检查→包装出厂。

1.1.4 印刷电路板的功能

印制电路在电子设备中具有如下功能:提供集成电路等各种电子元器件固定、装配的机械支撑;实现集成电路等各种电子元器件之间的布线和电气连接或电绝缘;提供所要求的电气特性,如特性阻抗等;为自动焊锡提供阻焊图形,为元件插装、检查、维修提供识别字符和图形。

有关印制板的一些基本术语如下:在绝缘基材上,按预定设计,制成印刷线路、印制元件或由两者结合而成的导电图形,称为印刷电路。在绝缘基材上,提供元器件之间电气连接的导电图形,称为印制线路,它不包括印制元件。印制电路或者印制线路的成品板称为印制电路板或者印制线路板,也称印制板。有关印制电路板的名词术语和定义,详见国家标准 GB/T2036—94“印制电路术语”。

电子设备采用印制板后,由于同类印制板的一致性,避免了人工接线的差错,并可实现电子元器件自动插装或贴装、自动焊锡、自动检测,保证了电子产品的质量,提高了劳动生产率、降低了成本,且便于维修。

1.1.5 印刷电路板的发展趋势

印制板从单层板发展到双面板、多层板和挠性板,并不断地向高精度、高密度和高可靠性方向发展。不断缩小体积、减少成本、提高性能,使得印制板在未来电子产品的发展过程中,仍然保持强大的生命力。

对于双面板和多层板而言,印制板技术水平的标志是把大批量生产的印制板在 2.50mm 或 2.54mm 标准网格交点上的两个焊盘之间,能布设导线的根数作为标志。在两个焊盘之间布设一根导线,为低密度印制板,其导线宽度大于 0.3mm。在两个焊盘之间布设 2 根导线,为中密度印制板,其导线宽度约为 0.2mm。在两个焊盘之间布设 3 根导线,为高密度印制板,其导线宽度为 0.1~0.15mm。在两个焊盘之间布设 4 根导线,可算超高密度印制板,线宽为 0.05~0.08mm。国外曾有杂志介绍了在两个焊盘之间可布设 5 根导线的印制板。对于多层板来说,还应以孔径大小、层数多少作为综合衡量标志。

密集组装板面打线 (WireBond) 盛行, 镀镍镀金越来越重要, 柱状溴化镍将兴起, PCB 设计与制作技术难度加大, 薄板、大尺寸排板、小孔剧增, 纵横比 (AspectRatio) 加大, 水平反脉冲与垂直反脉冲供电方式被广泛应用, 盲孔镀铜则以垂直自走涡流搅拌方式为宜, 如 UCON。

细线制作困难, 特性阻抗要求也越来越严格, 对线边齐直度要求也逐渐苛求。方式如: 采用薄铜皮、平行光曝光、湿膜薄光阻、部份蚀刻法 (PartialEtching) 或砂带削薄法等进行批量生产。

国内外专家对未来印制板生产制造技术发展趋势的论述基本是一致的, 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、薄型方向发展。在生产工艺上向提高生产率、降低成本、减少污染、适应多品种、小批量生产方向发展。印制电路的技术发展水平, 一般以印制板上的线宽、孔径、板厚/孔径比值为代表。在过去几年, 其发展历程和水平如表 1.1 所示。

表 1.1 印制电路的技术发展水平

项 目 \ 年 度	1970	1975	1980	1985	1990	1998
孔径/mm	1.0	0.8	0.6	0.4	0.3	0.15
线宽/mm	0.25	0.17	0.13	0.10	0.08	0.05
板厚/孔径	1.5	2.5	5	10	20	40
孔密度 (每平方厘米的孔数)	4	7.5	15	25	40	55

1.2 印刷电路板基础

电子设计人员的电路设计思想最终要落实到实体, 即做成 PCB 板。PCB 板的基材及选用, 组成电路各要素的物理特性, 如过孔、槽、导线尺寸、焊盘、表面涂层等, 是设计人员设计时要考虑的要素, 这是设计出高质量的 PCB 板的基础。

1.2.1 印制板用基材

印制板用基材分类如表 1.2 所示。

表 1.2 印制电路板基板材料基本分类表

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	高电性, 阻燃 (冷冲)
			XXXPC	高电性 (冷冲)
			XPC 经济性	经济性 (冷冲)
	环氧树脂覆铜箔板	FR-3	高电性, 阻燃	
	聚酯树脂覆铜箔板			
	玻璃布基板	玻璃布-环氧树脂覆铜箔板	FR-4	

续表

分 类	材 质	名 称	代 码	特 征
刚性覆铜薄板	玻璃布基板	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		
		金属芯型		
		包覆金属型		
	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		
		聚醚酮树脂		
	挠性覆铜箔板	聚酯树脂覆铜箔板		
聚酰亚胺覆铜箔板				

1.2.1.1 刚性印制板用覆铜箔基材

1. 酚醛纸质层压板

酚醛纸质层压板可以分为不同等级。大多数等级能够在高达 70℃~105℃ 温度下使用，长期在高于这种范围温度下工作可能会导致一些性能的降低（但这仍取决于材料的等级和厚度），而且过热会引起炭化，在受影响的区域中，绝缘电阻可能会降至很低值。这样的热源是发热元件，在正常温度范围内，基材可能会发生严重的变黑现象（阳光也能使基材变黑，但不会引起材料性能的改变）。在高湿度环境下放置会使基材的绝缘电阻大幅度减小，然而，当湿度降低时，绝缘电阻又会增加。

2. 环氧纸质层压板

与酚醛纸质层压板相比，环氧纸质层压板在电气性能和非电气性能方面都有较大的提高，包括较好的机械加工性能和机械性能。根据材料的厚度，它的使用温度可达 90℃~110℃。

3. 聚酯玻璃毡层压板

聚酯玻璃毡层压板的机械性能低于玻璃布基材料，但高于纸基材料。然而它具有很好的抗冲击性，并有较好的电气性能，能够在很宽的频率范围内应用，即使在高湿度环境下，也能保持好的绝缘性能。它的使用温度可达到 100℃~105℃。

4. 环氧玻璃布层压板

环氧玻璃布层压板的机械性能高于纸基材料，特别是弯曲强度、耐冲击性、X,Y,Z 轴的尺寸稳定性、翘曲度和耐焊接热冲击都比纸基材料好。这种材料的电气性能也很好，使用温度可达 130℃，而且受恶劣环境（湿度）影响较小。

1.2.1.2 挠性印制板用覆铜箔基材

1. 聚酯薄膜

聚酯薄膜最常用的特性是可挠性，它的特点是加热时能够形成可收缩式线圈。假如使用合适的黏合剂，这种材料可以在 80℃~130℃ 范围内使用。焊接时应特别注意，这种材料在焊接温度下容易产生软化和变形。它具有优良的电气性能，当被暴露在高湿度环境下时，依然能保持其良好的电气性能。其主要特性如下：

- 抗剥强度： $1 \times 10^2 \text{ kg/m}$ ；
- 耐绕曲性和耐化学性符合 IPC 标准；
- 表面电阻不小于 $1.0 \times 10^{11} \Omega$ ；
- 薄膜厚度：0.025~0.125 mm；
- 铜箔厚度：电解铜、压延铜可为 0.018 mm、0.035 mm、0.070 mm、0.10 mm。

2. 聚酰亚胺薄膜

聚酰亚胺薄膜具有良好的可挠性，而且能够通过预热处理去除所吸收的潮气，保证安全焊接。一般黏结型聚酰亚胺薄膜能够在高达 150℃ 温度下连续工作，用氟化乙丙烯（FEP）作为中间胶膜的特殊熔接型聚酰亚胺薄膜并在 250℃ 下使用，作为特殊用途的没有黏合剂的聚酰亚胺薄膜能够在更高的温度下使用。聚酰亚胺薄膜具有优良的电气性能，但可能会吸收潮气而影响性能。其主要特性如下：

- 280℃ 耐焊接时间大于 10 s；
- 抗剥强度大于 $1.2 \times 10^2 \text{ kg/m}$ ；
- 表面电阻不小于 $1.0 \times 10^{11} \Omega$ ；
- 耐绕曲性和耐化学性符合 IPC 标准。
- 薄膜厚度：0.025~0.1 mm；
- 铜箔厚度：电解铜、压延铜可为 0.018 mm、0.035 mm、0.070 mm、0.10 mm。

3. 氟化乙丙烯（FEP）薄膜

FEP 薄膜通常和聚酰亚胺或玻璃布结合在一起制成层压板，在不超过 250℃ 的焊接温度下，具有良好的可挠性和稳定性。它也可以作为非支撑材料使用。氟化乙丙烯薄膜是热塑性材料，其熔化温度为 290℃ 左右。它具有优良的耐潮性、耐酸性、耐碱性和耐有机溶剂性。它主要的缺点是层压时在层压温度下导电图形易发生移动。

多层印制板是由两层以上的导电图形和绝缘材料交错组成的，且它是由单块薄的印制板（单面板或双面板）与绝缘黏结片黏结在一起。这些黏结片是由片材组成的，如浸渍半固化树脂的玻璃布，经多层印制板层压后固化，直到最终成型。

覆铜箔环氧玻璃布，作为单块薄印制板用的覆铜箔基材，与单面和双面印制板用的基材基本相同，通常比单面和双面印制板使用的材料薄，而且它的厚度是标准化的，而不是固定的。它还具有与上述材料相同的基本性能。

浸渍环氧树脂的玻璃布黏结片，在多层印制板生产层工艺中，层压固化是在最终阶段。所以只有在层压后，才表现出它的最终性能。然而值得注意的是，生产工艺和多层印制板的设计可能会对材料的性能产生相当大的影响。

挠性板具有如下特点：

(1) 可进行挠曲和立体组装，取代很多转接部件，达到最大使用有效空间。随着电子产品继续缩小以及立体组装的广泛应用，加上无粘结层覆铜箔基材和可挠性的覆盖膜的使用，使挠性板的质量和可靠性得到了保证，用户已倾向于采用挠性板或钢-挠性板。目前的挠性印制板变曲成 6.35mm 的圆筒形（半径为 3.18mm）时也不会损坏元件或失去可靠性。因此，这种挠性印制板可以制成各种各样的形状，如电机中转子上的应用等。至于钢-挠性印制板结构更是多种多样，这些产品广泛应用于军事、航天航空、计算机、通信设备和汽车工业等。

(2) 可制造更高密度或更精细节距的产品。由于采用更薄的铜箔（如 5mm，9mm 等）和更薄的介质（如聚酰亚胺膜厚可达 25mm），以及不含增强材料（如玻璃布等）来加工更精细线宽与间距，目前操作窗口为 75~150mm，而有些工厂已能常规生产 50mm 的线宽/间距的挠性板。因为含薄铜箔的挠性基材没有采用增强的玻璃纤维，具有很平整的介质表面，故可生产出更陡直、高清晰度和完整的导线来。加上有更高的合格率，因而可克服挠性基材成本较高的问题。在制造微小孔方面，由于没有增强的玻璃纤维布，介质层很薄，因而易于采用冲孔法、化学蚀刻法。作为低成本制造微小孔来说，冲孔和化学蚀刻工艺可能是未来受到重视并普遍应用的方法。

(3) 挠性线路的另一个优点是可以采用卷绕的传送滚筒加工方法（Roll-to-Roll），易于自动化、量产化，从而大大提高了生产率，达到经济性的生产。

根据上述特点，挠性基材具有更易于生产精细或超精细的线宽/间距和微小孔加工的优点，因此，挠性线路板更可能成为 MCM-L 生产的优选方法，实际上它已经开始生产和应用了。

1.2.1.3 刚挠结合印制板

如果同一块印制板中既包括挠性部分又包括刚性部分，即刚性印制板使用的材料，挠性印制板使用的材料和多层印制板使用的材料可以结合在同一个结构中，那么其某些性能可能会因为所使用的黏合剂的不同而发生显著改变。

刚挠结合印制板一般有以下 5 种类型：

- 1 型板：有增强层的挠性单面板；
- 2 型板：增强层的挠性双面板，有过孔；
- 3 型板：有增强层的挠性双面板，有过孔；
- 4 型板：刚挠结合多层板，有过孔；
- 5 型板：组合刚挠印制板，刚性印制板与挠性印制黏层数多于 1 层。

1.2.1.4 氟系高频印制板应用与基板材料简介

电子设备高频化是发展趋势，尤其是在无线网络、卫星通讯日益发展的今天，信息产品正向高速与高频化发展，新一代产品都需要高频基板，高频印制板的应用如表 1.3 所示。

表 1.3 高频印制电路板应用

应用场所	使用频率
Cellular & Pager Telecom	1~3 GHz
个人接收基地台或卫星发射	13~24 GHz
汽车防撞系统 (CA)	75GHz
直播卫星系统 (DBS)	13GHz
卫星降频器 (LNB/LNA)	2~3GHz
家庭接收卫星	12~14GHz
全球卫星定位系统 (GPS) -40°C~85°C	1.57/1.22GHz
汽车、个人接收卫星	2.4GHz
无线携带通信天线系统	14GHz
卫星小型地面站 (VSAT)	12~14GHz
数字微波系统 (基站对基站接收)	10~38GHz

对于表 1.3 中的卫星系统、移动电话接收基站等通信产品必须应用高频电路板, 在未来几年中必然迅速发展, 高频基板就会大量需求。高频基板材料的基本特性要求有以下几点:

(1) 介电常数 (Dk) 必须小而且很稳定, 通常是越小越好。信号的传送速率与材料介电常数的平方根成反比, 高介电常数容易造成信号传输延迟。

(2) 介质损耗 (Df) 必须小, 这主要影响到信号传送的品质, 介质损耗越小, 信号损耗也越小。

(3) 与铜箔的热膨胀系数尽量一致, 因为不一致会在冷热变化中造成铜箔分离。

(4) 吸水性要低, 吸水性高就会在受潮时影响介电常数与介质损耗。

(5) 其他耐热性、抗化学性、冲击强度、剥离强度等也必须良好。

一般来说, 高频可定义为频率在 1GHz 以上。目前较多采用的高频电路板基材是氟系介质基板, 如聚四氟乙烯 (PTFE), 平时称为特氟龙, 通常应用在 5GHz 以上。另外还有用 FR-4 或 PPO 基材, 可用于 1~10GHz 之间的产品, 这三种高频基板特性比较如表 1.4 所示。

表 1.4 高频基板特性

特性	氟系高分子	陶瓷 PPO	环氧 FR-4
介电常数 (Dk)	3.0	0.04~3.38	0.05~4.4
介质损耗 (Df) 10GHz	0.0013	0.0027	0.02
剥离强度/ (N/mm)	1.04	1.05	2.09
热传导性/ (W/mK)	0.50	0.64	—
频率范围	300MHz~40GHz	800MHz~12GHz	300MHz~4GHz
温度范围/°C	-55~288	0~100	-50~100
传输速度 (In/s)	7.95	6.95	5.82
吸水性/%	低	中	高

现阶段所使用的环氧树脂、PPO 树脂和氟系树脂这三大类高频基板材料中, 环氧树脂成本最便宜, 而氟系树脂最昂贵; 而以介电常数、介质损耗、吸水率和频率特性考虑, 氟