

《《 电子封装技术专业核心课程教材 》》

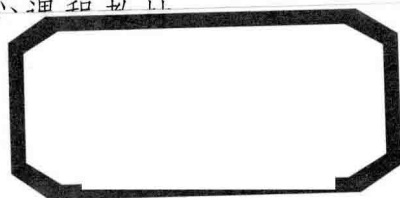
# 电子封装结构设计

田文超 刘焕玲 张大兴 主编



西安电子科技大学出版社  
<http://www.xduph.com>

电子封装技术专业核心课程教材



# 电子封装结构设计

田文超 刘焕玲 张大兴 主编

西安电子科技大学出版社

## 内 容 简 介

本书共7章,包含三大部分内容,分别为电子封装机械结构设计(第1~3章)、电子封装热设计(第4~6章)和电子封装电磁设计(第7章)。电子封装机械结构设计部分主要介绍了封装定义、封装层次、封装内容、封装功能、多种封装结构形式、封装基板技术、机械振动及振动原理、电子产品中最常见的PCB振动和悬挂元件振动;电子封装热设计部分主要介绍了电子封装结构热控制理论基础、电子器件封装热设计和PCB热设计;电子封装电磁部分主要介绍了高速信号和高速电路系统、高速电路中常用电子元件特性及高速电路PCB的布局布线策略。

本书可供机械、电子、微电子、材料等专业的高年级本科生和研究生使用,也可作为相关工程技术人员及科技管理人员的学习参考书。

### 图书在版编目(CIP)数据

电子封装结构设计/田文超,刘焕玲,张大兴主编. —西安:西安电子科技大学出版社,2017.1

电子封装技术专业核心课程教材

ISBN 978-7-5606-4236-9

I. ①电… II. ①田… ②刘… ③张… III. ①电子技术—封装工艺—结构设计 IV. ①TN05

### 中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 323192 号

策划编辑 邵汉平

责任编辑 雷鸿俊

出版发行 西安电子科技大学出版社(西安市太白南路2号)

电 话 (029)88242885 88201467 邮 编 710071

网 址 www.xduph.com 电子邮箱 xdupfxb001@163.com

经 销 新华书店

印刷单位 陕西华沐印刷科技有限责任公司

版 次 2017年1月第1版 2017年1月第1次印刷

开 本 787毫米×1092毫米 1/16 印张 15.5

字 数 357千字

印 数 1~3000册

定 价 32.00元

ISBN 978-7-4236-9/TN

**XDUP 4528001-1**

\*\*\* 如有印装问题可调换 \*\*\*

**本书获得西安电子科技大学教材和  
研究生精品教材立项资助**

西安电子科技大学出版社

# 电子封装技术专业核心课程教材 编审专家委员会

(按姓氏笔画排序)

- |       |     |            |     |     |     |
|-------|-----|------------|-----|-----|-----|
| 主 任   | 王春青 | (哈尔滨工业大学)  |     |     |     |
| 副 主 任 | 田文超 | (西安电子科技大学) |     |     |     |
|       | 刘 颖 | (北京理工大学)   |     |     |     |
|       | 芦 笙 | (江苏科技大学)   |     |     |     |
|       | 吴懿平 | (华中科技大学)   |     |     |     |
|       | 谢 安 | (厦门理工学院)   |     |     |     |
|       | 潘开林 | (桂林电子科技大学) |     |     |     |
| 编 委   | 王凤江 | 王文利        | 王 谦 | 王天曦 | 田艳红 |
|       | 孙凤莲 | 孙东辉        | 安 兵 | 李 明 | 李明雨 |
|       | 张旻澍 | 张新平        | 肖 斐 | 赵修臣 | 周德俭 |
|       | 高宏伟 | 贾建援        | 黄明亮 | 雷永平 | 蔡 坚 |
| 项目策划  | 邵汉平 |            |     |     |     |

# 前 言

当今世界已经进入一个信息化时代，信息化程度的高低已成为衡量一个国家综合国力的重要标志。微电子技术是发展电子信息产业和各项高新技术中不可缺少的基础。微电子工业领域的两大关键性技术分别是芯片制造和电子封装。微电子技术的发展与电子封装的进步是分不开的，芯片功能的实现，需依靠封装来完成信号引出，实现与外界连接和信号传输，因此封装技术是芯片功能实现的重要组成部分。电子封装是将集成电路设计和微电子制造的裸芯片组装为电子器件、电路模块和电子整机的制造过程，或者是将微元件再加工及组合构成满足工作环境的整机系统的制造技术。

电子封装是《2025 中国制造》中第一大类“1. 新一代信息技术”中第一小类“1.1 集成电路及专用设备”中的重点发展的第三部分“集成电路封装”部分，是国家重点发展的领域，也是朝阳产业。

电子封装技术是在保证可靠性的前提下，实现传输速度提高、热量能力扩散、I/O 端口数增加、器件尺寸减小和生产成本降低的主要方法。电子封装技术除芯片设计、芯片制造等半导体器件领域，还包括芯片载体、电子元器件组装、互连等技术，是一门电路、工艺、结构、元件、材料紧密结合的多学科交叉的工程学科，涉及微电子、物理、化学、机械、材料和可靠性等多个研究领域。

随着大规模和超大规模集成电路技术、新型电子材料技术和封装技术的迅速发展，现代军用和民用电子装备正在向小型化、轻量化、高可靠、多功能和低成本方向发展，尤其机载、舰载、星载和终端移动等电子装备，实现小型化和轻量化对于提高电性能和灵活机动性更为关键。电子封装技术正面临着多功能、小型化、轻量化、高密度、高速度、低功耗和高可靠性等发展趋势带来的严峻挑战。随着集成电路技术的发展，芯片上集成的晶体管密度越来越高，集成度越来越大。

美国空军利用大约 20 年时间，收集整理了电子产品事故数据，分析表明：大约 40% 的故障是连接器失效，大约 30% 的故障与电连接相关，大约 20% 的故障与元器件相关。这些故障大多是由于搬运、振动、冲击、热循环引起的。

电子元器件按照摩尔定律的预测，在不断追求高集成度、高密度的同时，带来了新的问题，即高功率、高热量、超多传输线、寄生效应、高热应力、强辐射、串扰过冲等机、电、热、磁及其相互耦合问题。尤其是无铅焊料的要求，对封装又提出了新的挑战。随着电子元器件集成度的提高，封装成本所占总成本的比例快速增长。目前，有关综合描述电子封装中的机、电、热、磁及其相互耦合的书籍还不多。

2013 年，在西安电子科技大学召开了第四届全国电子封装技术本科教学研讨会，经过磋商成立了电子封装技术核心课程教材编写委员会，本书就是在这个背景下编写而成的。

本书从封装的概念出发，由浅入深，配合大量图片、实例和公式，分别介绍了电子封

装结构中所涉及的主要内容。全书共7章，各章主要内容如下：

第1章为电子封装概述，首先介绍了封装定义、封装层次、封装内容、封装功能、封装发展；其次叙述了多种封装结构形式；最后介绍了封装基板技术，内容包括基板组成、材料特性、基板分类、工艺、背板、金属基板、陶瓷基板等。

第2章为机械振动基础，内容包括机械振动概述和振动原理等。本章为第3章的理论基础。

第3章为电子部件机械振动，内容包括电子产品中最常见的PCB振动和悬挂元件振动。

第4章为电子封装结构热控制理论基础，内容包括导热、对流换热、热辐射等。本章为第5、6章的理论基础。

第5章为电子器件封装热设计，内容包括电子芯片封装结构热应力、DIP封装热设计、PGA封装热设计、QFP封装热设计、BGA封装热设计、叠层芯片SCSP封装元件热应力分析和3D封装热设计等。

第6章为PCB的热设计，内容包括PCB上的热源、PCB结构设计、元器件排列方式、PCB走线设计、PCB散热方式等。

第7章为高速电路，内容包括高速信号和高速电路系统、高速电路系统PCB设计简介、高速电路相关电子学术语、高速电路中常用电子元件特性分析等。

第1、2、3章由田文超教授编写，第4、5、6章由刘焕玲副教授编写，第7章由张大兴副教授编写，全书由田文超教授统稿和定稿。

由于编者水平有限，加上电子封装技术的发展日新月异，作者感觉理论和工艺水平等仍欠成熟，书中不足之处在所难免，恳请广大读者不吝指正。

本书在编写过程中，得到了电子封装技术编委会成员的指导和帮助，在此对各委员在百忙之中给予的支持和帮助表示衷心的感谢，同时还要感谢林科碌硕士、卫三娟硕士和崔昊硕士在本书图片处理、文字校对等工作中提供的帮助。

最后感谢西安电子科技大学出版社在本书出版过程中所提供的大力支持。

编者

2016年8月

# 目 录

<b>第 1 章 电子封装概述</b> .....	1
1.1 封装层次和封装功能 .....	1
1.1.1 封装定义 .....	1
1.1.2 封装层次 .....	2
1.1.3 封装内容 .....	4
1.1.4 封装功能 .....	5
1.1.5 封装发展 .....	5
1.2 封装结构形式 .....	7
1.2.1 DIP(双列直插式封装) .....	7
1.2.2 SOP(小外形封装) .....	8
1.2.3 PGA(针栅阵列插入式封装) .....	8
1.2.4 QFP(四边引线扁平封装) .....	9
1.2.5 BGA(球栅阵列封装) .....	9
1.2.6 CSP(芯片级封装) .....	11
1.2.7 3D 封装 .....	11
1.2.8 MCM 封装 .....	13
1.2.9 SOC 技术 .....	14
1.2.10 SIP 技术 .....	16
1.2.11 微系统技术 .....	17
1.3 封装基板技术 .....	19
1.3.1 基板组成和材料特性 .....	20
1.3.2 基板分类和工艺 .....	25
1.3.3 背板 .....	41
1.3.4 金属基板 .....	41
1.3.5 陶瓷基板 .....	42
1.3.6 埋置式多层基板 .....	44
1.3.7 刚挠组合基板 .....	46
习题 .....	46
<b>第 2 章 机械振动基础</b> .....	48
2.1 机械振动概述 .....	48
2.1.1 电子产品的机械环境 .....	48
2.1.2 机械振动对电子产品的危害 .....	50



2.1.3 线性弹性系统的模型化 .....	50
2.2 振动原理 .....	51
2.2.1 机械振动的基本概念 .....	53
2.2.2 振动方程的建立 .....	54
2.2.3 周期振动及其谱分析 .....	55
2.2.4 单自由度自由振动 .....	55
2.2.5 单自由度受迫振动 .....	62
2.2.6 多自由度自由振动 .....	72
2.2.7 多自由度受迫振动 .....	80
习题 .....	82
<b>第3章 电子部件机械振动</b> .....	<b>84</b>
3.1 PCB 振动 .....	84
3.1.1 矩形板振动 .....	85
3.1.2 圆形板振动 .....	88
3.1.3 带肋平板振动 .....	89
3.2 悬挂元件振动 .....	91
3.2.1 无质量梁振动 .....	92
3.2.2 变截面梁振动 .....	93
3.2.3 复合梁振动 .....	95
3.2.4 变压器振动 .....	97
3.2.5 门形结构振动 .....	99
习题 .....	102
<b>第4章 电子封装结构热控制理论基础</b> .....	<b>104</b>
4.1 导热 .....	104
4.1.1 导热的基本定律 .....	104
4.1.2 典型截面导热问题 .....	109
4.2 对流换热 .....	111
4.2.1 对流概述 .....	111
4.2.2 对流控制方程及分析解 .....	112
4.2.3 对流换热的实验关联式 .....	137
4.3 热辐射 .....	141
4.3.1 辐射概述 .....	141
4.3.2 热辐射基本定律 .....	142
4.3.3 热辐射的计算 .....	145
习题 .....	150
<b>第5章 电子器件封装热设计</b> .....	<b>152</b>
5.1 电子芯片封装结构热应力 .....	152
5.1.1 温度场计算 .....	152

5.1.2	应力场计算	156
5.1.3	电子芯片热应力问题简化分析	159
5.2	DIP 封装热设计	160
5.3	PGA 封装热设计	162
5.4	QFP 封装热设计	165
5.5	BGA 封装热设计	166
5.6	叠层芯片 SCSP 封装元件热应力分析	169
5.7	3D 封装热设计	172
	习题	175
<b>第 6 章</b>	<b>PCB 的热设计</b>	<b>177</b>
6.1	PCB 上的热源	177
6.2	PCB 结构设计	178
6.2.1	元器件排列方式	178
6.2.2	PCB 走线设计	183
6.2.3	PCB 材料选择	186
6.3	PCB 散热方式	187
6.3.1	MCM 自然风冷却	189
6.3.2	MCM 组装的 PCB 强迫风冷	195
6.3.3	MCM 组装的 PCB 微通道散热	201
6.3.4	液态金属散热简介	205
	习题	206
<b>第 7 章</b>	<b>高速电路</b>	<b>209</b>
7.1	高速信号和高速电路系统	209
7.1.1	低速信号和高速信号	209
7.1.2	低速电路、高速电路和射频电路	210
7.2	高速电路系统 PCB 设计简介	210
7.2.1	传统的 PCB 设计方法	210
7.2.2	针对高速电路的 PCB 设计方法	211
7.2.3	高速电路系统 PCB 设计关键技术	212
7.3	高速电路相关电子学术语	213
7.3.1	电流	213
7.3.2	电压	213
7.3.3	直流和交流	214
7.3.4	频率	214
7.3.5	谐波	214
7.3.6	滤波	215
7.3.7	时序	215
7.3.8	相移	216

7.3.9 阻抗 .....	216
7.3.10 去耦和旁路 .....	217
7.3.11 差分信号 .....	217
7.3.12 传播时间 .....	218
7.3.13 时间常数 .....	218
7.3.14 带宽 .....	218
7.3.15 传输线 .....	219
7.3.16 反射 .....	219
7.3.17 串扰 .....	220
7.3.18 电磁干扰 .....	221
7.3.19 信号完整 .....	221
7.4 高速电路中常用电子元件特性分析 .....	221
7.4.1 电阻 .....	221
7.4.2 电容 .....	222
7.4.3 电感和磁珠 .....	223
7.5 高速电路的 PCB 设计 .....	225
7.5.1 PCB 基础知识 .....	225
7.5.2 常用 PCB 设计软件 .....	226
7.5.3 高速电路 PCB 设计原则 .....	228
7.5.4 高速电路 PCB 的布局布线策略 .....	231
习题 .....	231
参考文献 .....	233

# 第1章 电子封装概述

1946年2月15日,世界上第一台电子数字积分计算机(Electronic Numerical Integrator And Calculator, ENIAC)问世,如图1.1所示。ENIAC包含70 000个电阻、10 000个电容、1500个继电器和6000个手动开关。ENIAC长30.48米,宽1米,占地面积170平方米,重达30吨。1973年4月,马丁·库帕(美国著名的摩托罗拉公司的工程技术人员)掏出一个约有两块砖头大的无线电话(也许这就是世界上第一部移动电话)给别人打了一通电话。在今天看来,这似乎很难想象。体积庞大、功耗极高的电子系统如今已经很难看到,取而代之的则是小型化、低功耗、高性能、低成本的便携设备。所有这一切都要归功于半导体集成工业和电子封装技术的迅猛发展。

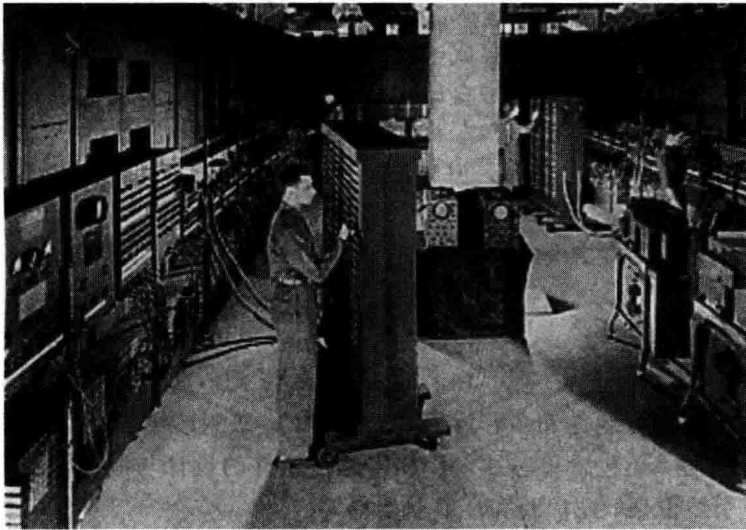


图 1.1 世界上第一台计算机 ENIAC

## 1.1 封装层次和封装功能

### 1.1.1 封装定义

在真空电子管时代,当时还没有“封装”这一概念,将电子管等器件安装在管座上,构成电路设备,一般称为“组装或装配”。“封装”在电子工程上出现并不久远,它是伴随着三极管和芯片的出现而诞生的。集成电路(Integrated Circuit, IC)材料多为硅或砷化镓等,利用薄膜工艺在晶圆上加工,其尺寸极其微小,结构也极其脆弱。为防止在加工与输送过程中,因外力或环境因素造成芯片破坏而导致芯片功能的丧失,必须想办法把它们隔离“包

装”起来；同时，由于半导体元件高性能、多功能和多规格的要求，为了充分发挥其各项功能，实现与外电路可靠的电气连接，必须对这些元器件进行有效的密封，随之出现了“封装”这一概念。

电子封装可定义为：将集成电路设计和微电子制造的裸芯片组装为电子器件、电路模块和电子整机的制造过程，或将微元件再加工及组合构成满足工作环境的整机系统的制造技术。

封装是芯片功率输入、输出同外界的连接途径，同时也是器件工作时产生的热量向外扩散的媒介。芯片封装后形成了一个整体，保护器件不受或少受外界环境的影响。通过一些性能测试、筛选和各种环境、条件和机械的实验，确保器件的可靠性，使之具有稳定的、正常的功能。

集成电路与封装的关系，就像人体大脑与躯体之间的关系。如果说 IC 是“大脑”，那么封装则是“神经”和“骨架”。没有封装，芯片就无法实现其应有的功能。封装起着骨骼支撑、皮肤毛发保护、触摸感受的功能。

### 1.1.2 封装层次

一般来说，电子封装分为三个层次。一级封装也称芯片级封装，如图 1.2 所示。在半导体晶圆分割以后，将一个或多个集成电路芯片用适宜的封装形式封装起来，并将芯片焊区与封装的外引脚用引线键合、载带自动键合和倒装芯片键合连接起来，使之成为有实用功能的电子元器件或组件。

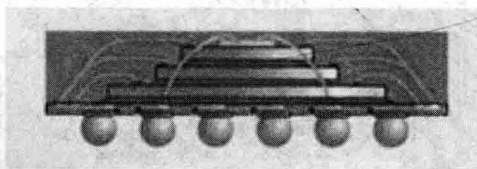


图 1.2 一级封装

一级封装包括单芯片组件和多芯片组件两大类。一级封装不仅包含从晶圆分割到电路测试的整个工艺过程，还包含单芯片组件和多芯片组件的设计与制作，以及各种封装材料如引线键合丝、引线框架、贴片胶和环氧模塑料等。

二级封装也称板级封装，如图 1.3 所示。将一级微电子封装产品连同无源元件一起安装到印制板或其它基板上，成为部件或整机。这一级所采用的安装技术包括通孔安装技术和表面贴装技术。二级封装还包括双层、多层印制板，柔性电路板以及各种基板材料、设计和制作技术。

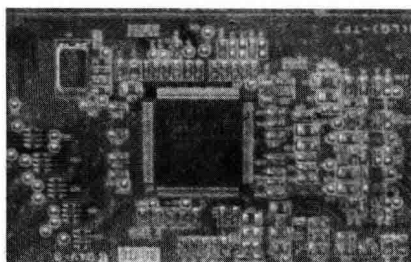


图 1.3 二级封装

三级封装也称系统级封装，如图 1.4 所示。

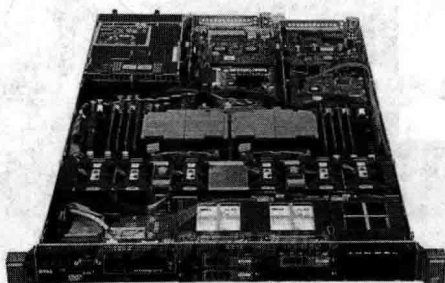


图 1.4 三级封装

将二级封装的产品通过选层、互连插座或柔性电路板与母板连接起来，形成一个完整的整机系统。这一级封装包括连接器、叠层组装和柔性电路板等相关材料、设计与组装技术。

图 1.5 所示为封装划分。一级封装利用引线键合将芯片在基板上固定，并进行隔离保护；二级封装为经一级封装后的各器件在基板上的固定和连接；三级封装为将电路板装入系统中组成电子整机系统。图 1.6、图 1.7 所示分别为手机和笔记本电脑的封装过程。

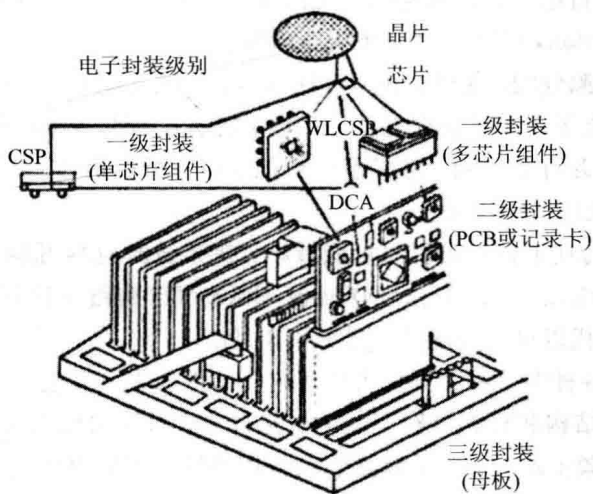


图 1.5 封装划分

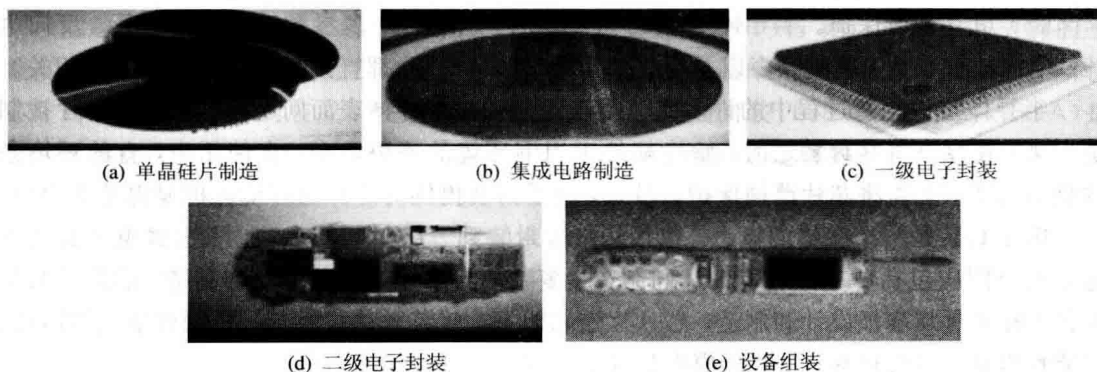


图 1.6 手机封装过程

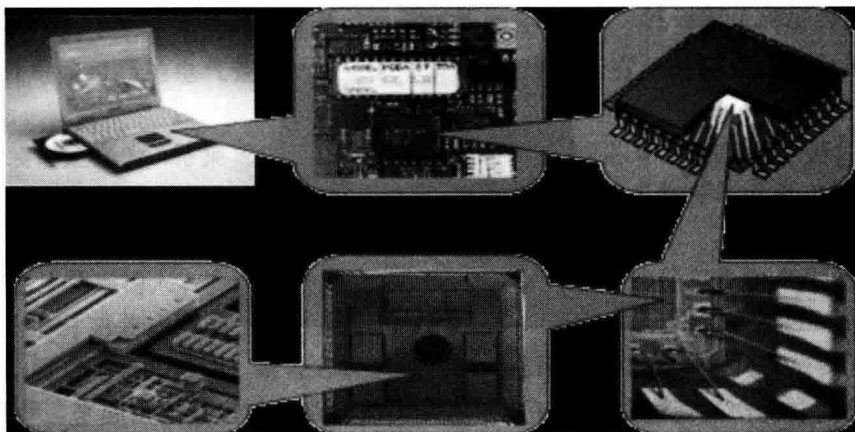


图 1.7 笔记本电脑封装过程

### 1.1.3 封装内容

电子封装的功能是对微电子器件(IC)进行保护,提供能源和进行散热冷却,并将微电子部分与外部环境进行电气和机械连接。无论是单个晶体管芯片,还是超大规模集成电路(Grand Scale Integration, GSI),都必须进行封装。

电子封装包括电源分配、信号分配、散热通道、机械支撑 and 环境保护。

(1) 电源分配。电子封装首先要能接通电源,使芯片与电路流通电流。其次,电子封装的不同部位所需的电源有所不同,应将不同部位的电源分配恰当,以减少电源的不必要损耗。同时还需考虑接地线分配问题。

(2) 信号分配。为使电信号延迟尽可能减小,在布线时应尽可能使信号线与芯片的互连路径及通过封装的输入/输出(Input/Output, I/O)引出的路径达到最短。对于高频信号还应考虑信号间的串扰以进行合理的信号分配布线。

(3) 散热通道。各种电子封装都要考虑器件、部件长期工作时如何将聚集的热量散出的问题。不同的封装结构和材料具有不同的散热效果,对于功耗大的电子封装还应考虑附加热沉或使用强制风冷、水冷方式,以达到在使用温度要求的范围内系统能正常工作。

(4) 机械支撑。电子封装可为芯片和其它部件提供牢固可靠的机械支撑,还能在各种恶劣环境和条件变化时与之相匹配。

(5) 电气环境保护。半导体 IC 和其它半导体器件的许多参数,如击穿电压、反向电流、电流放大系数、低频噪声以及器件稳定性、可靠性等,都直接与半导体表面密切相关。

半导体器件制造过程中的许多工艺措施也是针对半导体表面问题的。半导体芯片被制造出来,在没有将其封装之前,始终都处于周围环境的威胁之中。在使用中,有的环境条件极为恶劣,更需将芯片严加保护。因此,电子封装提供对芯片的环境保护显得尤为重要。

电子封装是一个整体的概念,包括从一级封装到三级封装的多项内容。微电子封装所包含的范围应包括单芯片封装设计和制造、多芯片与系统级封装设计和制造、芯片后封装工艺、各种封装基板设计和制造、芯片互连与组装、封装总体电性能、机械性能、热性能、可靠性设计、封装材料、封装工模夹具及绿色封装等多项内容。

### 1.1.4 封装功能

电子封装具有以下功能:

(1) 电气特征保持功能。由于芯片的不断发展,对芯片的高性能、小型化、高频化、低功耗、集成化等要求越来越高。类似信号完整性、电源完整性、集肤效应、邻近效应、串扰耦合、寄生效应等都会对设备的性能产生影响,在进行封装设计时必须考虑。

(2) 机械保护功能。针对类似航天等特殊环境下的芯片及设备,所承受的高低温、强振动冲击对芯片等的保护要求越来越高。通过封装技术保护芯片表面以及连线引线等,可使其免受外力损害及外部环境的影响。

(3) 应力缓和功能。随着设备应用环境的变化以及芯片集成密度的提高,由热等外部环境的变化或者芯片自发热等都会产生应力。利用封装技术释放应力,以防止芯片等发生损坏。

### 1.1.5 封装发展

自贝尔实验室在1947年发明第一只晶体二极管开始,就进入了芯片封装的时代,经过60多年的发展,芯片封装技术大致经历了四个阶段。

第一阶段以通孔器件和插件为主,芯片封装的形式主要配合手工锡焊装配,因此通常有长长的引脚。典型的封装为铁壳三极管等分立器件和塑料双列直插封装。这类封装因为实现手工低成本电路板焊接,至今仍有一定的市场份额。

第二阶段是随着20世纪80年代自动贴片的需要,各种表面贴片焊接技术(Surface Mount Technology, SMT)迅猛发展。为配合SMT自动贴片的需要,出现了各种表面贴片焊接器件(Surface Mounted Device, SMD)封装。这类封装通常在两翼或周边有扁平的引脚,可以方便地被精确放置到涂了焊膏的电路板上,以配合回流焊连接。因为SMT封装成本相对较低,现在还大量生产,甚至很多只有两三个引脚的二极管、三极管也采用SMT封装,以适应高效率生产。

第三阶段出现在20世纪90年代。随着单芯片功能的复杂化,I/O口越来越多,从最早期的两三个引脚一直发展到约50个以上,终于遇到了瓶颈。因为第二阶段封装引脚只能分布在封装体四周,只是“线”封装。类似四边引线扁平封装(Quad Flat Pack, QFP)的封装技术需要机械冲压切筋成形工艺,将引脚分离。但是随着引脚越来越多,QFP等封装的引脚只能越来越细,节距越来越窄。到后来,如果引脚大于500只,则已很难控制引脚的平整度,SMT轻微的贴片公差都会导致焊锡搭桥或断路,成品率很难保证。20世纪90年代,芯片封装从周边“线”封装成功发展到“面”封装,球栅阵列封装(Ball Grid Array, BGA)是“面”封装的代表,I/O口分布于整个芯片封装体背面,保证了足够的焊点尺寸和节距,工艺难度显著降低,而可靠性却大大增加。BGA封装是目前主流的封装形式。

第四阶段出现在20世纪90年代末和本世纪初。随着电子产品日益微型化,运行速度要求越来越快,尤其是手提电话和个人数据助理(Personal Data Assistant, PDA)等产品越来越集成化、微型化,导致集成电路芯片封装体也相应微型化,这样BGA芯片都显得太大了。提高封装率(封装体和晶片的尺寸比例)的要求变得越来越重要,于是芯片尺寸封装(Chip Scale Package, CSP)技术就发展起来了。



图 1.8~图 1.11 分别为电子封装发展趋势示意图。

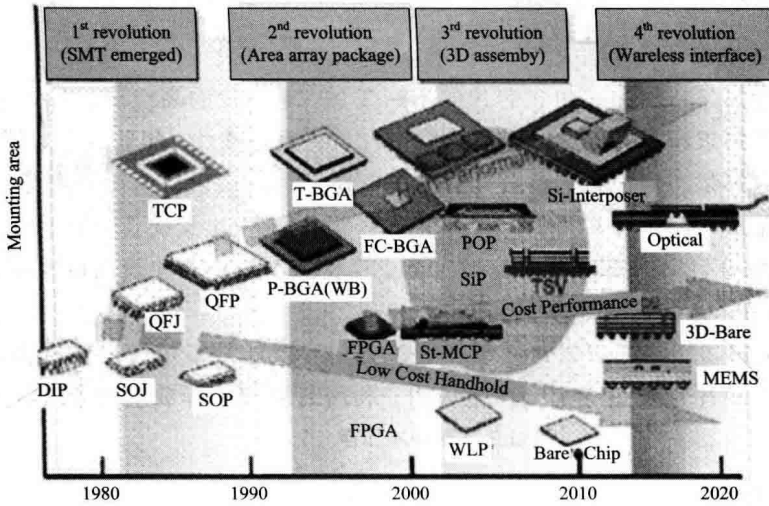


图 1.8 电子封装发展(一)

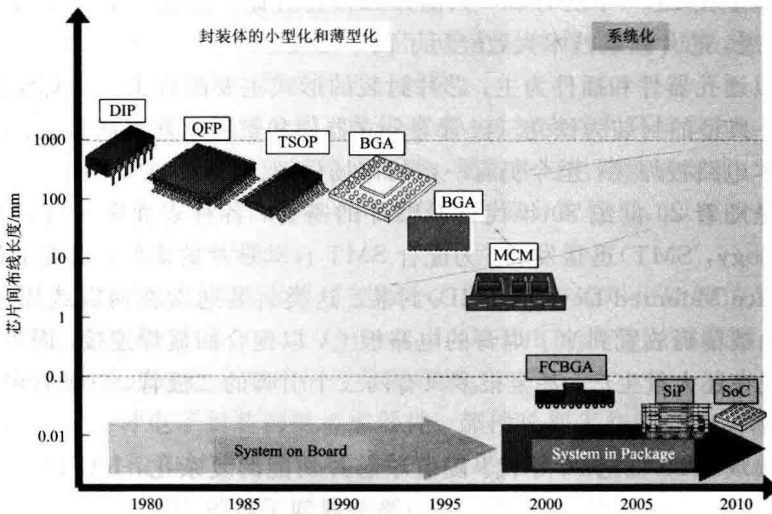


图 1.9 电子封装发展(二)

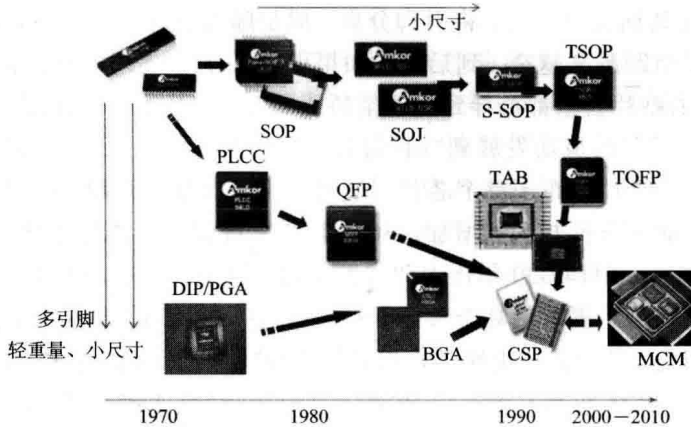


图 1.10 电子封装发展(三)