

21世纪

高等学校电子信息类规划教材



现代电子装联工艺基础

余国兴 主编



西安电子科技大学出版社
<http://www.xduph.com>

西安电子科技大学教材建设基金项目

21 世纪高等学校电子信息类规划教材

现代电子装联工艺基础

主编 余国兴

参编 黄 进 贾建援

西安电子科技大学出版社

2007

内 容 简 介

本书以现代电子产品装联工艺与材料为主,系统、全面地介绍了现代电子装联工艺的基础理论和工艺技术。全书共十章,内容包括电子装联技术概论,现代电子装联的主要工艺流程,表面贴装元件,焊接工艺材料和焊接机理,装联可靠性基础,表面组装工艺(SMT)的印刷、贴片和回流焊技术,通孔插装工艺(THT)的波峰焊技术以及装联组件的清洗技术。书中尤其突出了无铅焊接的基本内容。

本书可作为高等院校电子组装工艺方向的本科生教材,也可供电子产品制造业的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

现代电子装联工艺基础/余国兴主编. —西安:西安电子科技大学出版社,2007.5

21世纪高等学校电子信息类规划教材

ISBN 978-7-5606-1815-9

I. 现… II. 余… III. 电子设备—装配(机械)—高等学校—教材 IV. TN605

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 039205 号

责任编辑 任 婧 云立实

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

http://www.xduph.com E-mail: xdupfxb@pub.xaonline.com

经 销 新华书店

印刷单位 陕西光大印务有限责任公司

版 次 2007年5月第1版 2007年5月第1次印刷

开 本 787毫米×1092毫米 1/16 印 张 16.125

字 数 380千字

印 数 1~4000册

定 价 20.00元

ISBN 978-7-5606-1815-9/TM·0039

XDUP 2107001-1

如有印装问题可调换

本社图书封面为激光防伪覆膜,谨防盗版。

前 言

电子装联技术是电子制造技术的重要组成部分，也是一般电子产品制造的核心工艺技术。目前，电子装联技术已经发展成为一门涉及材料科学、物理与化学、传热学、焊接技术、精密机械、电子与控制技术、生产质量管理等多学科交叉的应用学科。研究、发展和运用这项技术需要掌握现代电子装联技术的基本知识。

为了适应学科建设和培养具备电子装联基础知识人才的需要，我们特编写了《现代电子装联工艺基础》和《现代电子装联工艺装备技术基础》两本教材，今后还将根据教学实践要求，考虑编写一本装联生产管理方面的教材，这样的规划基本涵盖了电子装联的主要内容。全套教材由贾建援教授组织策划并担任主编。

本书以电子装联工艺为主要内容，介绍了电子装联的基本概念、主要的工艺流程和表面贴装元件，焊接工艺材料和焊接机理、装联可靠性基础，表面组装工艺的锡膏印刷、贴片和回流焊技术，通孔插装工艺的波峰焊技术以及装联组件的清洗技术。书中着重体现了装联技术的基本理论、实现原理和最新发展，尤其突出了无铅焊接的基本内容。

本书由余国兴主编。参加编写的人员及其分工为：贾建援(第1、2章)，黄进(第3章)，余国兴(第4~10章)。

本书得到西安电子科技大学2005年度教材建设立项资金资助，深圳中兴通讯股份有限公司邱未召副总裁、樊融融高工为该教材的编写和我们实地考察其电子装联生产线提供了热情的帮助，在此一并表示诚挚的感谢。

本书在编写中参考了许多国内外公开出版的文献资料和编者在一些技术讲座中所收集的资料，并在书中直接引用了其中的一些图片、数据等内容。它们均已列入参考文献，在此特向原著者表示敬意和感谢。

目前，国内外以电子装联工艺为教学内容的本科生教材并不多见，因此编写这样一本教材对于编者而言也是一项探索性的工作。限于编者水平，本书无论是在体系结构还是在具体内容上都难免存在错误和不足，有些专题也未在书中有所体现，因此恳请各位专家和读者批评指正，以期今后能有机会加以改正和完善。

对本书的意见请反馈至：yugx@mail.xidian.edu.cn。

编 者

2006年11月

目 录

第 1 章 绪论	1	3.2.7 片式微调电容器.....	48
1.1 电子装联技术概述.....	1	3.3 电感器.....	50
1.1.1 基本概念.....	1	3.3.1 绕线型片式电感器.....	50
1.1.2 电子装联技术的地位.....	3	3.3.2 多层型片式电感器.....	52
1.1.3 电子装联技术的基本内容.....	4	3.3.3 卷绕型片式电感器.....	52
1.2 电子装联技术的发展过程.....	5	3.4 机电元件.....	53
1.2.1 早期的装联技术.....	5	3.4.1 轻触开关.....	53
1.2.2 通孔插装技术.....	6	3.4.2 片式旋转开关.....	54
1.2.3 表面组装技术.....	7	3.4.3 片式滑动接触开关.....	55
1.2.4 微组装技术.....	8	3.4.4 钮子开关.....	57
1.3 电子装联工艺的研究内容.....	10	3.4.5 表面组装继电器.....	58
1.3.1 工艺的概念.....	10	3.4.6 连接器.....	59
1.3.2 电子装联工艺.....	11	第 4 章 焊料合金	62
第 2 章 装联工艺流程	12	4.1 无铅化要求.....	62
2.1 THT 与 SMT 技术.....	12	4.1.1 无铅化趋势.....	62
2.1.1 THT 技术.....	12	4.1.2 对无铅焊料合金的总体要求.....	65
2.1.2 SMT 技术.....	13	4.2 锡铅焊料合金.....	67
2.1.3 混装技术.....	14	4.2.1 成分与类型.....	67
2.2 组装类型.....	14	4.2.2 基本性能.....	69
2.3 工艺流程.....	15	4.2.3 组织与状态图.....	71
2.4 生产线组成.....	19	4.3 无铅焊料合金.....	75
第 3 章 表面贴装元器件	20	4.3.1 概述.....	75
3.1 电阻器.....	20	4.3.2 Sn-Ag 系合金.....	77
3.1.1 矩形片式电阻器.....	20	4.3.3 Sn-Bi 系合金.....	82
3.1.2 圆柱形片式电阻器.....	24	4.3.4 Sn-Cu 系合金.....	83
3.1.3 片式电阻器的试验项目和方法.....	26	4.3.5 Sn-Zn 系合金.....	85
3.1.4 电阻网络.....	27	4.4 无铅焊料合金的基本性能.....	86
3.1.5 片式微调电位器.....	29	4.4.1 物理性能.....	86
3.2 电容器.....	34	4.4.2 机械性能.....	89
3.2.1 多层片式瓷介电容器.....	34	4.4.3 润湿特性.....	91
3.2.2 管形瓷介电容器.....	37	4.4.4 其它特性.....	92
3.2.3 片式铝电解电容器.....	39	4.5 工艺上的考虑.....	93
3.2.4 片式钽电解电容器.....	41	4.5.1 关于共晶合金.....	93
3.2.5 片式薄膜电容器.....	44	4.5.2 焊接工艺窗口.....	94
3.2.6 片式云母电容器.....	46	4.5.3 焊料合金的选择流程.....	97

第 5 章 焊接机理	98	7.2.2 锡膏印刷工艺	182
5.1 焊接中的润湿	99	7.3 点胶	185
5.1.1 润湿条件	99	7.3.1 粘接机理	186
5.1.2 焊料润湿性测定	104	7.3.2 贴片胶	187
5.2 界面反应	108	7.3.3 贴片胶的涂布与固化	190
5.2.1 扩散与溶蚀	108	7.4 贴片	192
5.2.2 状态图的作用	112	7.4.1 贴片任务	192
5.2.3 焊接中的界面反应	113	7.4.2 贴片的基本过程	193
5.2.4 焊接后的界面反应	121	第 8 章 回流焊工艺	196
5.3 金属的氧化及去除	123	8.1 回流焊工艺特点	196
5.3.1 氧化机理	123	8.2 传热学基础	198
5.3.2 环境的影响	125	8.2.1 基本概念	198
5.3.3 去氧化机制	127	8.2.2 热传导	199
5.4 助焊剂	129	8.2.3 热对流	200
5.4.1 助焊剂的功能要求	129	8.2.4 热辐射	202
5.4.2 助焊剂的组成与分类	131	8.3 红外对流类回流焊	203
第 6 章 材料性能与装联可靠性	135	8.3.1 概述	203
6.1 机械可靠性	135	8.3.2 红外回流焊	204
6.1.1 材料的基本力学性能与可靠性	136	8.3.3 红外热风回流焊	205
6.1.2 蠕变	142	8.3.4 回流曲线的设置	206
6.1.3 热疲劳	145	8.3.5 无铅回流曲线	211
6.1.4 焊点结构对可靠性的影响	153	8.3.6 回流曲线的测试	213
6.1.5 界面可靠性	154	8.4 气相回流焊	214
6.2 PCB 的可靠性	155	8.4.1 加热原理	214
6.2.1 PCB 概述	155	8.4.2 焊接过程	215
6.2.2 聚合物概述	158	8.4.3 气相回流焊的特点	216
6.2.3 PCB 的可靠性问题	161	8.5 局部回流焊	217
6.3 元器件引出的可靠性问题	163	8.5.1 激光回流焊	217
6.3.1 晶须问题	163	8.5.2 热压棒回流焊	218
6.3.2 焊点剥离	164	8.6 典型焊接缺陷	219
6.3.3 元器件的耐热性	166	第 9 章 波峰焊工艺	222
6.4 电化学可靠性问题	166	9.1 波峰焊	222
6.4.1 污染源	166	9.1.1 波峰焊的基本原理	222
6.4.2 电迁移	169	9.1.2 波峰焊的主要问题	223
6.4.3 电化学腐蚀	172	9.2 助焊剂涂布	226
6.4.4 电化学可靠性评价	175	9.2.1 涂布方法	226
第 7 章 锡膏印刷与贴片	176	9.2.2 涂布注意事项	227
7.1 锡膏	176	9.3 焊接工艺	228
7.1.1 锡膏的基本组成	176	9.3.1 影响波峰焊的因素	228
7.1.2 锡膏的主要特性	177	9.3.2 温度曲线	230
7.2 锡膏印刷	178	9.3.3 波峰焊的主要类型	231
7.2.1 模板	179	9.4 波峰焊工艺系统评估	232
		9.5 波峰焊的常见缺陷	233

第 10 章 清洗工艺	235	10.3 清洗工艺	240
10.1 污染物的类型和危害	235	10.3.1 与清洗剂相关的工艺流程	240
10.1.1 颗粒型污染物	235	10.3.2 清洗方式	241
10.1.2 离子型污染物	236	10.3.3 工艺条件对清洗的影响	245
10.1.3 非离子型污染物	236	10.4 清洗质量评定	246
10.2 清洗剂	237	10.4.1 电子产品清洁度标准	246
10.2.1 CFCs	237	10.4.2 测试方法	247
10.2.2 常用清洗剂类型	238	参考文献	249
10.2.3 清洗剂的选用原则	239		

第1章 绪 论

电子制造技术是电子信息产业的基础,对推动社会经济发展和科技进步有着举足轻重的作用。电子装联技术是电子制造技术的重要组成部分。随着现代电子产品的不断发展和广泛应用,电子装联技术已经成为现代电子产品制造业的重要支柱,成为现代电子产品制造过程中不可缺少的基本技术。

1.1 电子装联技术概述

1.1.1 基本概念

电子产品一般分为半导体芯片、电子元器件、电路组件(部件)、整机和系统等形式。半导体芯片是组成集成电路(电子元器件)的基本要素,电子元器件是构成电路组件的最小单元,电路组件又是整机和系统的基本单元。这些产品一般都是在各类专业化的企业中,根据其制造特点采用不同的制造技术来分别加工的。为了正确认识和把握不同产品的制造特点,电子工程采用了封装的概念,将电子产品的制造过程划分成不同层次或阶段加以研究。封装除了提供基本的电气连接、机械支撑和物理保护作用外,还有按模块化、规格化、标准化设计与制造的功能。

1. 电子封装

根据电子产品的功能特征和制造特点,封装一般分为四个等级。

1) 零级封装(裸芯片级)

零级封装是指通过制膜、氧化、扩散、制版、光刻等工艺技术在硅晶片上制作出半导体的基本芯片和电极,以开发材料的电子功能,实现所要求的元器件特性。因此,零级封装主要涉及特征尺寸在 $10\ \mu\text{m}$ 量级以下领域的芯片制造过程,所加工的芯片除了键合区裸露在外,整个芯片表面只有一层氮化硅或二氧化硅钝化保护层,故有裸芯片之称。显然,裸芯片是现代电子产品的基本要素。

2) 一级封装(元器件级)

一级封装是从裸芯片入手,利用膜技术和微细连接技术先将裸芯片和其它构成要素布置、固定及键合连接在框架或基板上,再引出接线端子,并通过可塑性绝缘介质将电子元器件灌封固定、按印检查等工序来完成最终的封装体,以确保元器件的可靠性并便于与外电路连接。一级封装可以对单个裸芯片进行封装,也可以将多个裸芯片装载在多层基板上以构成多芯片组件(Multi Chip Modules, MCM)。因此,一级封装产品是电子元器件,它是构成绝大多数电路组件、整机和系统的实际最小单元。

一般的电子产品制造企业所用的电子元器件都是从半导体厂家直接购入的。例如，常见的双列直插封装(Double Inline Package, DIP)、小外形封装(Small Outline Package, SOP)、四方扁平封装(Quad Flat Package, QFP)、球栅阵列封装(Ball Grid Array, BGA)等元器件都是一级封装的产品。一级封装为芯片提供了各种功能保护，使其避免外力损害和受内外环境的影响。同时，通过在芯片基板上布线，以及芯片键合引线与元器件引脚端子的互连，将芯片的微细引线间距(Pitch)调整到了通用的规格尺寸。图 1.1 显示了 DIP 的基本结构。

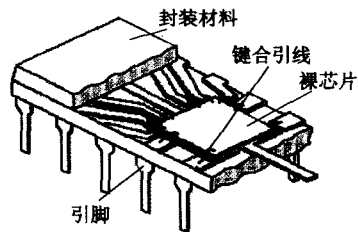


图 1.1 DIP 的基本结构

MCM 是将多个芯片封装在一起，并与其它元器件一起构成具有部件或系统级功能的多芯片组件。与单芯片封装相比，MCM 具有更高的封装密度，能够更好地满足电子系统微型化发展的要求，因此是目前电子封装技术的主要发展趋势。

3) 二级封装(板卡级)

二级封装是根据电路设计要求，将多个元器件安装在印刷电路板(Printed Circuit Board, PCB)等电路基板上，从而形成板卡级的电路模块或功能组件的过程。一般在电路板上还设有接插件，以便与其它板卡级模块互连。板卡级电路模块是电子产品整机和系统的主要部件，例如个人电脑中的主板、内存条，手机中的电路主板等都是二级封装的产品。

4) 三级封装(系统级)

三级封装是将板卡级电路模块、必要的机电产品或元器件等互连，从而形成最终的电子产品整机的过程。例如将个人计算机中主板与内存条、硬盘、电源等互连并装入机箱，组成一个完整的计算机系统的过程。对一些大型系统，有时还需要通过整机、分系统之间的互连来实现整个系统的功能。

总的来看，电子封装过程是一项涉及从硅片开始到电子产品系统实现的综合技术过程，其发展将依靠并带动电子材料、微电子技术、先进制造技术及装备等一大批基础产业的发展。

2. 电子装联技术

在实际生产中，微电子行业一般将零级封装和一级封装称为电子封装(Electronics Packaging)，主要是指半导体的制造过程，这也是微电子技术的核心和发展最为活跃的部分。就一般的电子产品制造业而言，主要涉及的是二级封装和三级封装。二级封装也常称为电子装联或组装过程，主要是形成板卡级的电路功能模块。本书所讲到的电子产品就是指由二级封装所加工的产品，它们所采用的封装技术即为电子装联技术。三级封装则是产品的最终装配过程。

因此，电子装联技术(Electronics Assembly Technology)主要涉及在工业生产条件下进行二级封装的技术。它是一项根据电路设计要求，将电子元器件准确、可靠地安装在印刷电路板上，从而形成符合一定电气与机械连接要求的电路模块的制造技术。图 1.2 显示了由不同装联技术所组装的电路模块。对于有些产品，通过电子装联就可以直接实现整机的产品功能。同时，随着装联技术的发展，二级封装也已开始直接采用裸芯片进行装联(如后文中所介绍的 COX 技术)，这使得一级封装和二级封装之间的界线开始变得模糊起来。

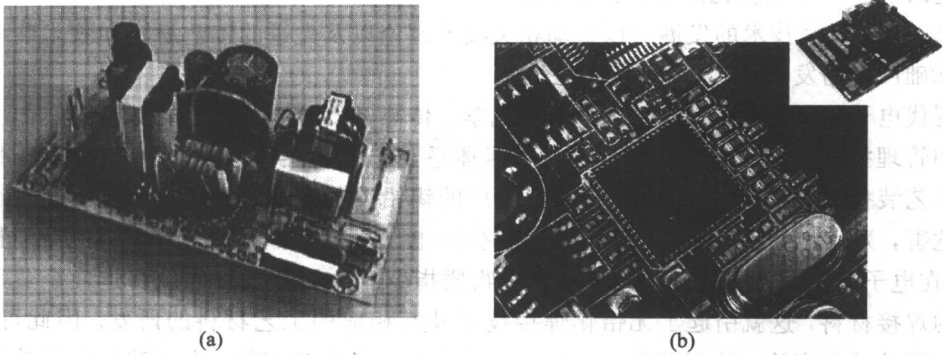


图 1.2 由不同电子装联技术所组装的电路模块
(a) 通孔插装技术的装联组件；(b) 表面组装技术的装联组件

1.1.2 电子装联技术的地位

目前,几乎所有的电子产品都包含了板卡级(二级封装)的电路模块,因此电子装联成为现代电子产品制造中一项必不可少的基本过程,其基础性地位主要体现在以下几个方面。

(1) 电子产品(特别是具有高技术附加值的高密度封装产品)的价值实现与电子产品制造业经济效益的实现都离不开现代电子装联技术。

目前,电子信息产业已成为世界性的支柱产业,它对世界经济发展起着巨大的推动作用。据 2005 年的有关资料统计,我国 2005 年集成电路的需求量大约为 360 亿块,到 2010 年,估计将达到 800 亿块,如此多的集成电路只有通过各种装联技术才能转变成电子产品整机出售。另据 Prismark report 2004 预测,到 2007 年,全球各类电子产品(包括计算机、通讯器材、汽车、军事和消费类电子产品等)的产值将从 2002 年的 8690 亿美元发展到 11 210 亿美元,其中仅亚洲(除去日本)的产值就达 3860 亿美元。这些产值也必须通过各种装联技术将各种电子材料、元器件等转变成产品整机才能得到体现。

(2) 电子装联技术已经成为现代工业条件下电子产品制造的基本技术。

微电子技术的飞速发展在对现代电子产品设计提供丰富的内容和支持的同时,也使其更加依赖电子装联技术。仅就封装技术而言,自 1958 年世界上第一块集成电路(Integrated Circuit, IC)问世以来,代表性的 IC 封装就由早期的插入式 DIP(引脚 4~64 条)发展到四边引脚的表面组装型 QFP 等(引脚可达数百条),之后又由 QFP 等发展到面阵列引脚的 BGA 封装(引脚可达上千条)。引脚间距也由 DIP 时的 2.54 mm 迅速缩小到了 0.3 mm,并有可能进一步缩小。自 20 世纪 90 年代起,封装形式也开始由单芯片封装向多芯片封装、三维模块封装等方向发展。与此同时,片式阻容元件尺寸规格由 1975 年的 3.2 mm×1.6 mm 缩小到了现在的 0.3 mm×0.15 mm,PCB 也由双面板发展到了 60 多层。因此,在以电子材料、大规模集成电路设计、制造和封装技术以及基板制造技术为核心的微电子技术的迅速发展为现代电子产品向多功能、高性能和轻薄小型化方向发展提供巨大支撑的同时,也由于元器件的种类繁多、密集的引脚与微小的外形而使得产品的装联难度更大,产品的设计制造过程对各种装联技术的依赖性更强。如果没有现代化装联技术的支持,各

种先进的电子产品也就无法进行工业化规模生产。

(3) 电子装联技术的发展可以带动相关技术理论以及先进的工艺材料和技术装备等一大批基础产业的发展。

现代电子装联技术是一项涉及物理、化学、传热学、材料学、焊接技术、机械、电子、控制和管理技术等多学科领域的综合性技术体系,其发展离不开相关的基础理论、技术方法和工艺装备的支撑。例如,在目前广泛使用的锡铅焊料中,铅对环境和人类健康有着较大的危害,为此,2006年7月1日实施的我国《电子信息产品污染防治管理办法》和欧盟《关于在电子电气设备中禁止使用某些有害物质指令》(RoHS)两项制度将迫使企业采用无铅化的焊接材料,这就引起了无铅化焊接技术及其相应的工艺材料的研发。因此可以说,一项制度的颁布实施就在世界范围内构建了一个巨大的新兴市场。由于我国电子装联技术的许多关键设备一直需要进口,为此早在2001年,在国家发展计划委员会与科技部根据“十五”科技发展专项规划和“十五”高技术产业发展专项规划制定的《当前优先发展的高技术产业化重点领域指南》中,就将电子产品整机装联设备和工模具列为重点发展方向。因此,通过对装联技术的研究除了可以形成具有我国自主知识产权的核心技术和提高科技竞争力外,还可以带动相关基础产业的发展。

1.1.3 电子装联技术的基本内容

关于电子装联技术的内容,可以从广义和狭义两方面来理解。

从广义上讲,电子装联技术是一项包括电子元器件、电路板、装联设计、装联工艺技术以及生产质量管理等方面内容的综合技术体系,涉及到许多学科领域的内容。主要包括:

(1) 元器件和电路板是装联的对象,其丰富的内容和发展水平不断地对装联技术提出要求,从而推动了装联技术的发展。这其中,以微处理器和存储器为代表的集成电路制造技术本身就是一个非常活跃的领域,其不断提高的性能和日益增强的功能对电子信息技术革命起着巨大的推动作用。数十年来,封装技术一直追随着IC的发展步伐,几乎每出现一代IC就会有一代封装技术随之产生。继BGA之后,芯片级封装(Chip Size Package, CSP)、硅圆片级集成封装(Wafer Scale Integration, WSI)以及各种多芯片封装形式更是层出不穷,它们在为产品设计提供丰富的选择的同时,也极大地丰富了装联技术的内容、促进了装联技术的发展。从装联技术的发展历程来看,微电子技术的发展始终是推动装联技术发展的直接动力,而装联技术的发展与普及又为微电子技术的进一步发展提供了广阔的空间。

(2) 装联设计既是产品设计的一个组成部分,又对元器件与电路板的发展和使用提出要求,同时还对装联工艺提供指导。现代电子产品正在向高度集成化的高性能和轻薄、小型化方向发展,这就要求在产品之初即要充分考虑到高密度封装设计。因此,装联设计首先是电路设计的一部分,需要按功能、价格和可靠性要求进行电路功能最优划分,同时还要结合电路板设计与元器件布局以解决电路在热、机、电、磁方面的问题;此外,它还是装联工艺设计的重要组成部分,需要解决装联对象与装联组件的装联工艺性,确定装联方式与工艺流程等方面问题。因此,装联设计的基础理论和设计技术对电子产品性能、可靠性和制作成本具有重要的意义。综合考虑电子产品性能进行电路设计与装联工艺设计是装联设计的发展方向。

(3) 装联工艺技术是根据装联设计要求将装联对象组装在一起,从而形成电子产品组件这一过程中所涉及的各项技术,它包括装联工艺、工艺材料和技术装备三方面的内容。工艺材料和技术装备是装联工艺技术的物质基础,装联工艺(过程与方法)则是装联得以实现的前提条件。目前,无铅焊接已成为取代传统锡铅焊接的必然趋势,但其焊接温度要高出锡铅焊料约 35°C 以上,可能危及包括元器件、电路板在内的组装质量并可能导致现有设备的普遍升级。因此,包括焊锡膏、助焊剂在内的各类工艺材料的研发一直都是装联工艺技术的主要内容。而高精尖的装联工艺装备本身就是高科技的产物,其研发能力体现了一个国家或企业的综合技术实力(例如我国先进的贴片机、微组设备几乎都是进口)。此外,装联中的工艺控制问题也往往成为企业提高产品质量和生产率、降低生产成本的突出问题。

(4) 构成装联技术的最后一项是与之相关的各种法律法规、行业标准和企业内部生产质量管理体系建设等方面的内容。其目的是使电子装联技术的各项内容符合社会经济与行业健康发展要求,并便于企业内部实行制度化管理,充分发挥这项技术的社会效益与经济效益。例如,欧盟制定的《报废电子电气设备指令》(WEEE)与《关于在电子电气设备中禁止使用某些有害物质指令》(RoHS),都是为了减少电子产品与制造中的有害物质对环境的危害。加强元器件的标准化工作能提高技术装备的通用性,减少包括元器件包装、存储管理方面的浪费。由于现代电子装联技术已发展成为一项庞大的综合技术体系,其技术难度高,资金投入大,因此加强企业内部的各项制度建设更是提高企业经济效益的重要措施。

从狭义上讲,电子装联技术仅指装联工艺技术(在某些场合,也指装联设计与装联工艺技术两个方面),这主要是面向采用该技术的电子产品制造业的用户而言的。企业直接使用采购的元器件在电路设计和装联设计要求的指导下进行元器件布置、PCB设计并按照装联工艺组织生产。这时,企业的着眼点回归产品装联质量、生产成本和生产效率等制造业的基本问题。本书所讲的内容主要涉及的是狭义方面的装联技术。

1.2 电子装联技术的发展过程

电子装联技术从无线电技术诞生的那一刻起就相伴诞生,并随着元器件的发展水平和电子产品工业化大生产的需求而不断地发展和变化,从而表现出电子装联技术的内容和发展水平总是与装联对象——电子元器件和电路板相适应的特点。这其中,每一种装联技术从出现到成为时代主流都与元器件的充分发展和广泛普及密切相关。若从有源器件的发展历程来考察相应的装联技术,目前的电子装联技术已大体经历了四个发展阶段,并开始进入其第五个发展阶段。

1.2.1 早期的装联技术

自1875年美国G. R. Carey发明光电真空管(Phototube)至20世纪50年代,电子技术主要处于电子真空管时代^①。这一时期的装联技术主要以手工方式将电子管等长引脚大

^① 另一种普遍观点认为,电子管时代始于1883年爱迪生发明真空管至20世纪60年代的这一期间。

型元器件(常通过管座)插装在绝缘或金属底盘上,再通过管座引线焊接而组成电路。收发报机、电子管收音机等都是这一时期的典型产品。

1947年,世界上第一只晶体管在美国贝尔实验室研制成功。20世纪50年代世界上第一台波峰焊机在英国出现。与此同时,自20世纪50年代后期,晶体管开始逐步占领市场,电子装联技术转向以手工(或半自动)方式将晶体管、轴向引线的分立式元件插装在印刷电路板的焊接通孔中,再通过手工焊接或浸焊(或波峰焊接)等方式进行电路连接。这一时期的典型产品是半导体收音机和黑白电视机。

早在1936年,英国人 Paul Eisler 便已发明了酚醛树脂基板的铜箔板上通过金属箔腐蚀法制造印刷电路板的技术。但直到晶体管的问世和应用以后,特别是1950年和1953年,以金属箔腐蚀法制成的单面 PCB 和采用电镀法制成的具有金属化通孔的双面 PCB 在美国相继问世,印刷电路板才逐步开始在电子装联中大量采用。

电子管和晶体管时期的装联技术是现代电子装联技术的初始发展阶段。在这一时期,有源器件的种类有限,装联技术的机械化程度较低(例如1964年,日本夏普公司销售的第一台全晶体管电子计算器 CS-10A 就是手工装焊的,在其基板上甚至还保留了一个电子管),但晶体管的装联技术已经具备了通孔插装技术的基本特征。

1.2.2 通孔插装技术

1958年,世界上第一块集成电路在美国德州仪器公司研制成功;到1965年,双列直插封装器件(DIP)开始实用化。此后,这种以 DIP 封装的集成电路迅速成为中小规模 IC 的主导产品,同时,晶体管等分立元件依然占据着部分市场。因此,从20世纪60年代后期至70年代中后期,以晶体管和 DIP 为代表的插入式元器件共同占据着电子元器件市场的主导地位。

随着 DIP 等插入式元器件的大量使用,电子装联技术此时也发展成为将元器件的引脚直接插入到印刷电路板的焊接通孔中,再在电路的引脚伸出面上通过波峰焊接技术实现电路装联。这时的装联技术也称为通孔插装技术(Through-Hole Technology, THT),其所插装的元器件主要是带有较长引脚的分立式晶体管、电阻、电容器和一些中、小规模集成电路等(见图 1.3)。此时的印刷电路板已广泛采用环氧玻璃布基的双面板,并出现了按金属化通孔工艺制造的多层 PCB(于1961年在美国首度出现),其布线密度较之单面板也有了很大的提高。

在这一时期,DIP 的引脚范围为 4~64 条,其引脚间距为 2.54 mm,分立元件的引线直径为 0.5~0.9 mm,因此 PCB 需要按 2.54 mm 网格打孔布线。PCB 的打孔需要和元器件较大的外形尺寸都限制了元器件在电路板上的组装密度,因此,THT 的组装件依然较大(见图 1.2(a))。但是由于这时的电子技术已经有了充分的发展,并且随着装联对象与各项装联技术的日渐丰富与成熟,以及随着机械化的元器件插装技术和组装件的整体波峰焊接技术极大地提高了 THT 的生产效率,因此使得 THT 成为插装类元器件装联技术的一个高峰。彩色电视机便是这一时期的代表性产品。

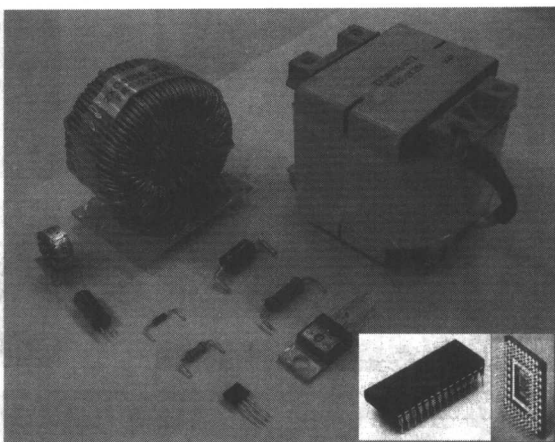


图 1.3 由 THT 技术或手工装联的部分元器件

1.2.3 表面组装技术

1967年,第一块大规模集成电路(Large Scale Integration, LSI)在美国问世,IC引脚也开始增多。密集的引脚使 THT 在 PCB 布线、元器件插装及组装密度方面的问题随之增加。同时,在 20 世纪 60 年代,瑞士钟表业通过引入无引脚元件和小外形封装集成电路,并采用将其直接贴、焊在印刷电路板焊盘表面的方法实现了电子表的小型化。这也是今天的表面组装技术(Surface Mount Technology, SMT)的雏形,其先进性在当时也很快地引起了业界的重视。随着 20 世纪 70 年代各种短引脚扁平 IC 封装(如 SOP、QFP 以及无引脚阻容元件,统称片式元器件(Chip Component))的相继推出,多层 PCB 技术的实质性发展以及 SMT 专用焊料和技术装备的研制成功,特别是在 20 世纪 70 年代后期至 80 年代初,各种高性能、低价格的组装技术装备纷纷面世,使得装联技术从此进入了 SMT 时代。

1977年,第一块超大规模集成电路(Very Large Scale Integration, VLSI)的出现,更是进一步促使了 IC 向多引脚、细间距的方向发展。随着 QFP 等四边引线封装器件的引脚间距从 1.27 mm 迅速下降到了 0.3 mm,由数百条引脚引起的共面性、对中性问题也大大增加了贴装工艺的难度,于是,使得早在 20 世纪 60 年代初就已经出现的面阵列球形焊料端子封装(BGA)在 80~90 年代又重新进入了人们的视野。1991年,由 Motorola 公司等开发的塑封 BGA 使得面阵列引脚封装技术实用化。此后,新的面阵列封装 IC 相继出现(如 20 世纪 90 年代中期美国的微型球栅阵列封装 μ BGA、日本的芯片尺寸封装 CSP(Chip Scale Package),封装面积/芯片面积之比更是达到 1.2 以下),其 I/O 引脚直接分布在封装体的底面,这在适应 I/O 数快速增长的同时,也极大地改善了组装的工艺性和组件的电气性能。与此同时,SMT 的各项技术内容也更加成熟,组装不良率下降到了百万分之十以下。SMT 终于在 20 世纪 90 年代发展成为现代电子装联的主流技术,成为了电子装联技术史上的又一个高峰。

装联元器件小型化、IC 的高度集成化以及封装形式的多样性是 SMT 区别于 THT 的显著特征。图 1.2(b)显示的是已经由表面组装技术组装的电路模块(局部),图 1.4 给出了能由表面组装技术装联的部分元器件的外形。

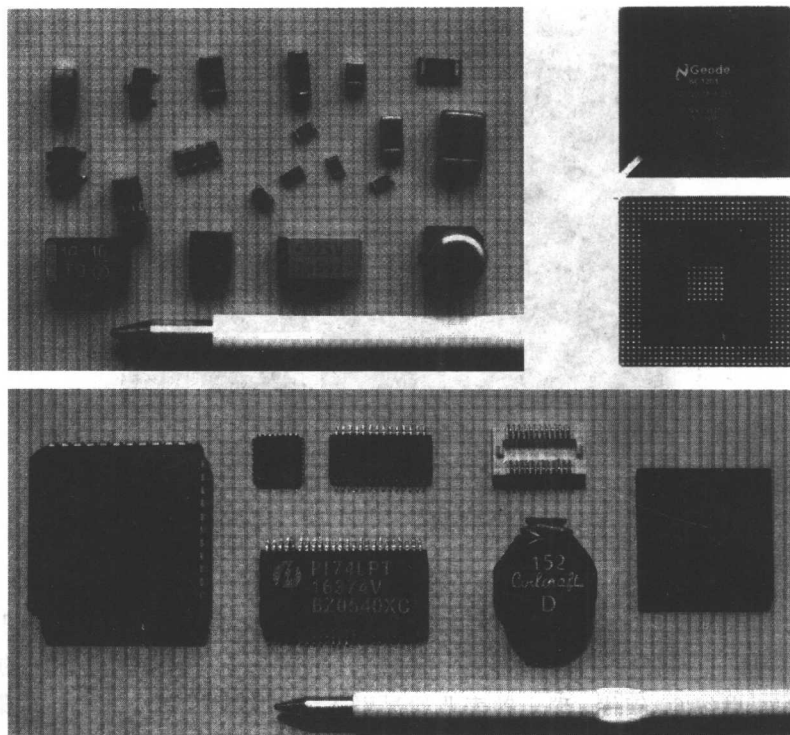


图 1.4 由 SMT 技术装联的部分元器件的外形

1.2.4 微组装技术

随着现代电子产品向高速、多功能和小型化方向的发展,自 20 世纪 80 年代起,直接利用未封装的裸芯片进行电路组装的各类微组装技术(Microelectronics Packaging Technology, MPT)开始兴起,追求更高的电路性能和封装密度^①是其总的目标。MPT 的出现是对传统电子产品设计与制造观念的发展,是在现代电子产品向高度集成化方向发展的条件下,整合从裸芯片开始的各种资源进行系统整体设计,使电子制造由独立分散型向集中统一型、单纯生产型向设计主导型转变的结果。

MPT 现已形成一个技术群体。其一般特点是采用多层高密度电路基板,通过微细互连技术和先进封装工艺在裸芯片与电路基板甚至裸芯片之间直接进行电路连接与封装,从而形成高度集成的高性能电子组件。其实现的途径包括将封装的许多功能由基板来承担以减小封装环节和体积,将多个裸芯片封装在一块基板内以实现大规模系统的中枢电路,在多层基板中直接埋藏积层阻容元件等以实现电路的高速化与小型化等等。因此 MPT 的组装件是一级和二级封装直接接合的产物(甚至在某些场合是零级与二级封装相结合的产物)。在 MPT 技术中,用户主导设计特征明显,与一般通用的标准化 IC 器件相比,MPT 的组件功能都是由用户主导设计的。由于取消了一个封装环节、缩短了电路引线,因此 MPT 显著地提高了组件的装联密度,改善了电气性能,成为现代电子装联技术的新高峰。

^① 封装密度是指电路板单位面积可组装的元器件数或可实现的焊点数。

其中,最具代表性的 MPT 包括以下几种:

1. 板载芯片技术(Chip on X, COX)

根据基板 X 的类型区分,板载芯片技术包括 COB(印刷电路板, X: Board)、COF(有机膜片, X: Film)、COG(玻璃基板, X: Glass)、COS(硅片基板, X: Silicon)等。图 1.5 显示了 COB 的技术原理。

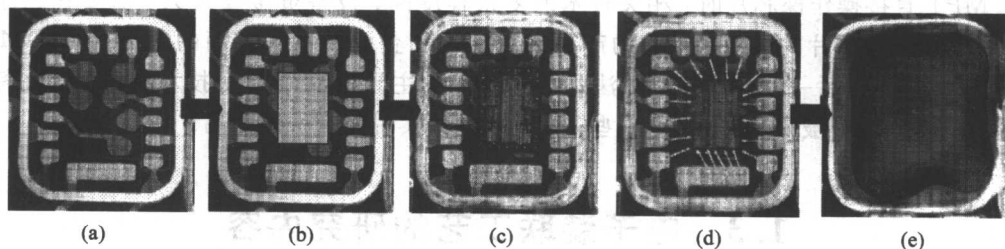


图 1.5 COB 的技术原理

(a) 基板; (b) 点胶; (c) 贴片; (d) 引线; (e) 封装

装联时,除采用正装芯片(芯片端子焊区在芯片上表面)通过引线键合与基板互连外,还大量采用倒装片(Flip Chip, FC, 焊区端子凸点在芯片底面)技术将芯片装联到基板焊盘上。电路互连后,经测试合格再用树脂胶等进行封装。由于 COX 技术中 IC 芯片直接与电路基板组装,减少了组装环节,缩小了相关电路的占用空间,使得产品更加轻薄。但是它也具有芯片需与基板 X 热匹配,封装后无法维修,对裸芯片供应的依赖性强等特点。目前,COX 技术已在智能卡、计算器、高端笔记本电脑、摄像机等组装中得到应用。

2. 多芯片模块技术(Multichip Module, MCM)

多芯片模块是 20 世纪 80 年代初发展起来的一种混合集成电路,是由多个裸芯片封装在一块电路基板构成的一个独立的电路功能模块。因此, MCM 以模块为系统的功能色彩非常强,一个 MCM 组件就相当于一个分系统,几块 MCM 装联到一起就能实现系统级的功能。MCM 的组装密度一般超过了 30%,而 SMT、COB 等组装密度一般在 30% 以下。

MCM 的核心是电路基板技术。根据所采用的基板类型, MCM 现已发展成 MCM-L (Laminate, 采用厚膜导体布线的多层印刷电路板)、MCM-C (Ceramic, 采用厚膜导体布线的陶瓷多层基板)及 MCM-D (Deposition, 采用薄膜导体布线的光刻技术形成多层互连基板)等,并已在超高速计算机系统、航天电子设备和军用产品中得到应用。

3. 硅圆片规模集成封装(Wafer Scale Integration, WSI)

WSI 的基本思想是实现硅圆片上的系统(System on Wafer)。它通过把电路按功能分类,并将其直接制作在同一硅片上,再在硅片上布线连接(必要时引出端子之后)来进行整体封装,从而实现电路的极端高速化和小型化。例如将 CPU、存储器和辅助电路制作在同一硅片上的计算机等。WSI 一般都要利用半导体工艺中的有关技术。

4. 三维立体组装(3D 组装)

3D 组装包括了封装层次、芯片层次和硅圆片层次的三维组装。例如芯片层次的三维组装思想是把裸芯片一片一片叠加起来,并沿芯片的侧边缘和垂直方向进行互连,从而将以往在水平方向的组装过程变成沿垂直方向的立体组装,所用的多层电路板中常埋置阻容元件等。

除此之外,随着近年如单封装系统(System in a Package, SiP)、芯片上系统(System on a Chip, SoC)等新封装形式的不断出现,使得原有的四级封装划分界线已经变得模糊,原来仅用于零级的封装技术也已不断地向组件级和系统级扩展。

目前, MPT 的许多具体技术已经进入实用阶段,发达国家已经开始考虑工业化生产(例如,2004年东芝公司投资2000亿日元在大分县建设生产系统集成电路的工厂)。但是由于 MPT 直接操作裸芯片时,相关技术的复杂程度高、设备资金投入大、需要在超净环境进行,加之裸芯片的供应、企业的产品设计定位和企业效益等方面的考虑,使得 MPT 还远未(甚至在今后一段时间内也无法)取得 SMT 的主导地位, MPT 技术将更多地在此特定或尖端技术领域中被采用。此外,有些 MPT 技术离实用尚有一段距离。

1.3 电子装联工艺的研究内容

1.3.1 工艺的概念

工艺是我国对工业制作技艺的总称,该名称是20世纪50年代由前苏联传入我国的。在英美等国,一般称为制造技术,在日本则称为生产技术。这都体现了它与一般的设计技术、检测技术等有所不同。

工艺是指生产者利用生产工具对各种原材料、半成品进行加工或处理,最终使之成为产品的方法与过程。工艺的直接表现,一是方法,主要是产品加工所涉及的技术,这可以从其英文单词“technology”中反映出来;二是过程,即产品加工是按照工艺要求顺序进行的,这一点也在另一个英文单词“process”中有所体现。因此,可以认为,只要有生产,就得有工艺。

在现代工业生产条件下,产品的生产过程都是按照工艺要求来组织实施的。因此,从过程角度看,产品的制造过程也就是产品的加工工艺过程;同时,工艺也是企业指导、组织生产的技术依据,是产品制造的技术手段。因此,从技术角度看,产品的制造技术也就是工艺技术。工艺及其先进性已经成为企业核心技术的基本要素,决定了企业生产的现代化水平。它与设计能力、员工素质、管理水平一起构成了企业的核心竞争力。一般而言,成功的原理性设计并不等于就能生产出高质量的产品,甚至同样的技术与设备在不同厂家也会有不同的产品质量和生产效益。这其中,产品的生产工艺起到了决定性的作用。同样地,一个国家的工业水平落后必然包含了工艺水平落后的因素。因此需要重视对生产工艺的研究。

工艺的研究内容包括材料、装备、方法、人力和管理等各个层面。材料包含了作为加工对象的原材料以及作为加工技术实现中所必需的工艺材料(如焊接中的焊料、助焊剂等)两方面。材料是整个工艺乃至整个工业的源头,即“制作材料者制作技术”。将给定的材料加工成最终的产品必然涉及对其加工特性即工艺性、加工方法等问题的研究;装备包括了产品加工所必需的机器设备、工装模具、仪器仪表等,是工艺得以实现的物质基础;方法是工艺的灵魂,它以思想、概念、原理、要求等形式存在并对材料的利用与加工、装备的操作与控制、制作的设计与安排提供具体的要求和指导,是将材料、装备有机结合并顺利组