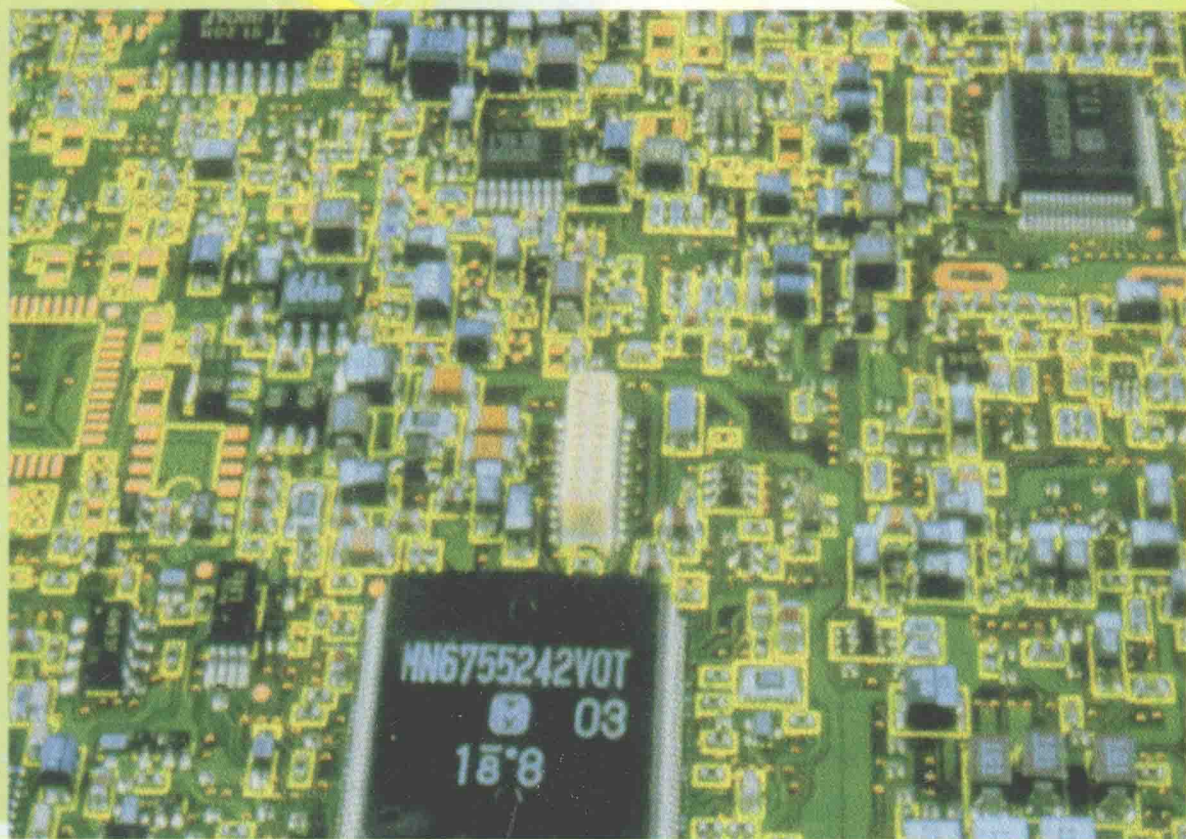


现代电子信息技术丛书

先进电子制造技术

——信息装备的能工巧匠

主编 张立鼎 副主编 周志春



国防工业出版社

先进电子制造技术

—— 制造精密的军工产品

作者：[作者姓名] 编著



国防工业出版社

电子科学研究院组织编著

现代电子信
息技术丛书

先进电子制造技术

——信息装备的能工巧匠

主 编 张立鼎
副主编 周志春

国防工业出版社

·北京·

图书在版编目(CIP)数据

先进电子制造技术:信息装备的能工巧匠/张立鼎主编. —北京:
国防工业出版社, 2000(2001.3 重印)

(现代电子信息技术丛书)

ISBN 7-118-02164-4

I. 先… II. 张… III. 电子设备-生产工艺
IV. TN05

中国版本图书馆 CIP 数据核字(1999)第 46759 号

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号)

(邮政编码 100044)

北京怀柔新华印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 印张 25 566 千字

2000 年 1 月第 1 版 2001 年 3 月北京第 2 次印刷

印数:3001—5000 册 定价:35.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

《现代电子信息技术丛书》编审委员会

名 誉 主 任	胡启立	曹刚川			
主 任	王金城	吕新奎			
常务副主任	童志鹏				
副 主 任	汪致远	王小谟	毕克允	殷鹤龄	于安成
	安卫国	熊和生	徐步荣	张仁杰	邱荣钦
委 员	王 政	夏乃伟	程淑清	杨星豪	侯印鸣
	何非常	黄月江	干国强	杨天行	石书济
	廖复疆	梅遂生	陈景贵	陈光禧	沈能珏
	张立鼎	瞿兆荣	徐泽善		

《现代电子信息技术丛书》总编委

总 编	童志鹏		
副 总 编	邱荣钦	王晓光	
委 员	李德珍	张国敏	

《先进电子制造技术》分册编著人员

主 编 张立鼎

副 主 编 周志春

编著人员 (按姓氏笔划排序)

马 骞 王厚邦 王科利 王德贵

石 磊 朱云鹤 刘 刚 刘寿春

陈志一 张玉华 张立鼎 张金武

张德骞 周志春 赵敬东 俞正平

贾善诚 曹文清 龚俊杰 常志新

崔殿亨 傅展堂 谢廉忠 雷有声

序

信息技术是一个复杂的多层次多专业的技术体系,粗略地可以分为系统和基础两个层次。属于系统层的一般按功能分,如信息获取、通信、处理、控制、对抗(简称为 5C 技术,即 Collection, Communication, Computing, Control, Countermeasure 五个词的第一个字母)等;基础层技术一般按专业分,如微电子、光电子、微波真空电子等。

信息技术革命的火炬是由微电子技术革命点燃的,它促进了计算机技术、通信技术及其他电子信息技术的更新换代,迄今,尚未有尽期。信息技术革命推动产业革命,使人类社会经历了农业、工业社会后进入了信息社会。

大规模集成电路的集成度是微电子技术革命的重要标志,它遵循摩尔(Moore)定律,每 18 个月翻一番,预计可延伸到 2010 年。届时,每个芯片可包含 100 亿(10^{10})个元件,面积可达到 10cm^2 ,作为动态存储器的存储量可达 64Gb(吉比特),接近理论极限 10^{11} 个元件和 256Gb 存储量。微处理器芯片的运算速度每 5 年提高一个数量级,到本世纪末,每个芯片运算速度可达 $10\sim 100$ 亿次每秒,有人认为,实现 2000 亿次的单片微处理器在技术上是可能的。与此相适应,每芯片比特存储量与每 MIPS(兆指令每秒)运算量的成本将呈指数式下降,现在一个 100 兆指令/s 专用数字信号处理芯片只售 5 美元。如果飞机的价格也像微电子那样呈指数式下降的话,70 年代初买 1 块比萨饼的费用在 90 年代就可以买 1 架波音 747 客机。3 年内 1 部电话机将只用 1 块芯片,5 年内 1 台 PC 机的全部功能可在 1 个芯片上实现,6 年内 1 部 ATM 交换机的核心功能也可用 1 个单片完成。由于微处理器芯片价格持续不断地下降,构成了它广泛应用的基础。现在,在一般家庭、汽车和办公室中,就有 100 多个微处理器在工作,不仅是 PC 机,而且在电话机、移动电话机、电视机、洗衣机、烘干机、立体声音响、家庭影院中也有。1 辆高档汽车中包含 20 多种可编程微处理器,1 架波音 777 客机含有 100 多万行的计算机程序代码。

通信技术的进步还得力于光子技术的进步。光通信速率(比特每秒)每两年翻一番,现在实验室中已可做到 10^{12}b/s ,即可将全世界可能传输的全部通信量于同一时刻内在 1 根光纤中传送,或相当于 1s 内传输 1000 份 30 卷的百科全书。通信速率的提高和通信容量的增大,使光通信成本也不断降低,与 80 年代相比,降低了两个数量级。

因特网是全球信息基础设施的雏形,其发展速度惊人。现在每 0.4s 增加

一个用户,每4min增加一个网络。1996年联网数大于10万,联网主机数大于1000万,用户数大于7000万(预计到本世纪末,将大于2亿),PC机总量将达5亿,联网主机达3000万,信息量每5年翻一番。越来越多的公司、团体、机关、个人通过信息网络相互联接,其应用范围从单纯的电子函件通信扩大到远程合作(包括教育、诊断、办公、会议、协作等)、按需点播、多媒体文娱、电子商务、银行、支付等,人类社会生存与发展的另一维空间,即信息空间或称为赛博空间(Cyberspace)正在形成。如果说工业社会是建筑在汽车与高速公路上的话,信息社会则是建筑在信息与信息高速公路上的。政府、军队、经济、金融、电力、交通、电信等关键部门都要依赖于信息基础设施的正常运行。信息技术和信息产业的水平已成为综合国力的重要标志,也是国际竞争力的焦点与热点。

信息技术的飞跃发展及其渗透到各行各业的广泛应用,不仅推动了产业革命,而且也深刻地改变了人们的工作、学习和生活的方式。信息技术不仅扩展了人的视觉、听觉等感知能力,而且还渗透到思维领域,减轻或部分地替代人的脑力劳动,提高思维的效率和质量,实现人的思维能力的延伸,增强人的认知能力。信息作为事物的属性与相互关系的状态的表达是客观存在的,但不是显在的,很多是潜在的,有的是深埋的,有待挖掘与提炼。信息技术大大地丰富了信息采集的内容,提高了信息处理的能力,为人们对客观事物及其规律的认识提供了创新的工具,也为人们正确认识与有效改造主观世界和客观世界提供了源泉,将使社会的物质文明与精神文明建设得到极大的发展。

信息、能源与物质是人类社会赖以生存与发展的三大支柱。在信息社会中,信息是最重要的支柱和最重要的产业,它影响着其他两个支柱的健康发展,包括生产、传输、分配、运行、减少损耗、改善管理、提高效率、降低成本等等;同时,它还能不断地培育与发展新物质和新能源的发明与生产,不断地改善生态环境,从而使人类社会进入可持续发展的健康轨道。

信息革命在带动产业革命的同时也带动军事革命,使得军事技术、武器装备、作战思想、作战方式、战争形态、军事原则、军事条令与部队编成等都将发生深刻的变化。如果农业社会是冷兵器时代,工业社会是热兵器时代,那么信息社会则是信息兵器时代。信息、信息系统与信息化平台、武器与弹药成为战场上的主战兵器。信息优势成为传统的陆地、海洋、空中、空间优势以外的新的争夺领域,并深刻地制约着传统领域的战斗胜负,从而构成信息化战争的新形态。在这种战争中,战争胜负决定于敌对双方掌握信息与信息技术的广度与深度。信息不仅是兵力倍增器,它本身就是武器和目标,是双方必争的制高点。1991年初的海湾战争,被称为硅片战胜钢铁的战争,即源于这样的认识。它开启了赛博空间战、网络战、信息战等簇新的作战方式。

以信息优势为核心的军事革命是建筑在先进的指挥、控制、通信、计算机、情报、监视、侦察及其一体化的信息战能力的基础上的,这个众系之系(系统的系统)我国称为综合电子信息系统,与美军后来提出的 C⁴ISR/TW 相当,它由以下 6 部分组成。

1. 鲁棒的多探测器信息栅格网络。为作战部队提供作战空间感知优势。
2. 先进的指挥控制与作战管理栅格网络。为部队提供作战的先期规划、胜敌一筹的作战部署,执行作战指挥控制与一体化兵力管理能力。
3. 从探测器到射击器的栅格网络。为部队提供精确制导武器的动态目标管理、分配与引导,协同作战,一体化防空,快速战损评估和再打击能力。
4. 联合的通信、导航与定位栅格网络。提供可靠、安全、大容量与高精度的信息,以支持部队的机动行动,确保全面优势。
5. 信息进攻能力。采取侵入、操纵与扰乱等手段,阻碍敌人作战空间感知、认知与有效用兵能力。
6. 信息防护能力。保证我方信息系统的安全,防护敌方对我信息网络的利用、干扰和破坏。

这个系统的系统涉及众多先进的信息技术的横向与纵向的有机集成,它包括雷达和光电的有源与无源探测技术、有线和无线及固定和移动通信技术、计算机硬件和软件技术、精确导航定位技术、航天航空测控技术、信息安全保密技术、电子战技术等横向专业技术的集成;也涉及微电子技术、光子与光电子技术、真空电子技术、压电与传感器技术等先进元器件技术,电子材料技术、电源技术、测试技术、先进制造技术等纵向基础技术的集成。当代军事革命要求在创新的军事思想指引下,发展有层次多专业的纵横集成的信息技术;同时,又要求在先进的信息技术驱动下,培育与发展新的军事思想,并在此基础上推动作战原则、军事条令与部队编成的变革,形成军事革命与信息革命的有机结合。

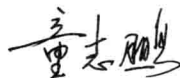
我们正处于世纪之交,党的第十五次代表大会的胜利召开,启动了有中国特色的社会主义事业在邓小平理论的指引下全面进入 21 世纪。我国的国防与军队现代化建设的跨世纪历史进程已经开始。为了适应军事革命环境下的高新技术军事斗争的需要,我军必须拥有信息优势,必须拥有以先进的综合电子信息系统为基础结构的性能优良的武器装备,必须提高部队素质,把人才培养推上新的台阶。

江泽民总书记非常重视人才的培养,他多次指示,要用高新技术知识武装全军头脑。在未来的信息化战场上,知识将成为战斗力的主导因素,敌对双方的较量将更突出地表现为高素质人才的较量。本丛书的编写出版就是为贯彻这个伟大号召提供系统基础知识。全书以先进的综合电子信息系统为龙头,

多层次、全方位地介绍相关的各项先进信息技术,既包括系统技术,也包括基础技术,共 17 个方面,荟萃成 17 个分册。丛书的编写以普及先进信息技术知识为目标,以中专以上文化程度,从事军、民用电子信息技术有关业务的技术人员和管理干部为主要对象,努力做到深入浅出,雅俗共赏,图文并茂,引人入胜,文字简练,语言流畅,学术严谨,论述准确,使其具有可读性、可用性、先进性、系统性与权威性。参加丛书各分册撰写的作者都是长期从事现代信息技术研究与发展的专家,他们在繁重的业务工作的同时,废寝忘食,长期放弃节假日的休息,辛勤耕耘,鞠躬尽瘁,为本丛书做出了卓越的贡献。他们以自己的模范行动,“努力成为先进思想的传播者、科学技术的开拓者、‘四有’公民的培育者和优秀精神产品的生产者”。我谨代表总编委向他们致以衷心的感谢!

本丛书的编写出版得到原国防科工委与原电子工业部领导的大力支持,得到国防工业出版社领导及责任编辑们的积极推动与努力,借此之机,向他们表示由衷的感谢!

中国工程院院士
原电子工业部科技委常务副主任



前 言

本书是《现代电子信息技术丛书》的一个分册，主要介绍国内外电子行业的先进制造技术，特别是以信息技术为支撑的制造技术。制造技术涉及许多产业部门，凡是制造、生产物质产品的行业都可称为制造业。制造业是国民经济和国防的基础产业，而制造技术是其基础技术。先进制造技术是传统制造技术的最新发展，其概念超越了传统制造技术界限。传统制造技术与先进制造技术有明显的区别。

1. 传统制造技术一般指专业制造工艺，是孤立的，是刚性的；而先进制造技术是柔性的，包容了从市场需求、创新设计、工艺技术、生产过程组织和监控、市场信息反馈在内的工程系统，输入的是订单，输出的是产品。

2. 传统制造技术一般以人流为主驾驶生产过程的物流、能量流、决策流；而先进制造技术以信息流为主，驾驶生产过程的物流、能量流、决策流的全过程的系统工程，或者说是人控与自控的区别。

3. 传统制造技术，学科、专业比较单一，界线分明；而先进制造技术不是任何单一学科和技术的发展与延伸，它是各学科、各专业技术之间交叉、融合形成的一门交叉学科和综合技术，是学科和专业技术的群体。

4. 先进制造技术比传统制造技术更重视制造全过程的组织机构和管理体制的简化及合理化，因而产生了一系列技术与管理相结合的生产方式，如物流需求计划管理技术(MRP)、资源计划管理技术(MRP II)、立体仓库等。

总之，先进制造技术是以先进制造工艺技术、计算机应用技术为核心的信息、设计方法、工艺技术、物流工程及相应的管理工程集成的现代制造工程，是先进技术的工程集成，是不断更新发展的高技术体系。

先进制造技术比传统制造技术具有更加明显的效益，极大地提高了劳动生产率，并具有低消耗、高质量、高速度等优势。

1. 物料积压占用资金：传统制造技术是先进制造技术的1~2倍。

2. 投资：同等生产规模，传统制造技术是先进制造技术的3倍，占用生产面积也是先进制造技术的3倍。

3. 生产周期：传统制造技术是先进制造技术的4~10倍。

4. 先进制造技术：产品从设计到投产的时间缩短30%~60%；废品率降低80%~90%；设备利用率提高2~3倍；成本降低50%；人员减少50%。

当今世界随着市场竞争的日益加剧以及全球化市场的形成，先进制造技术已成为一个国家在市场竞争中或战场对抗中获胜的支柱；先进制造技术的水平已经成为衡量一个国家综合实力和科技发展水平及国防实力的重要标志之一。工业发达国家普遍认为，从某种意义上讲，先进制造技术已成为国家命运的主宰。在我国，人们正在改变对先进制

造技术重要性的认识,一些先进的制造技术在部分企事业单位中不断得到推广应用。例如,在军用电子装备科研生产中应用表面组装和微组装先进制造技术,使厚膜电路的线条精度做到 0.01mm ,在 1cm^2 面积上能组装三块裸芯片,不但减轻了重量,而且使体积缩小至原来的 $1/8$ 或 $1/10$ 。相控阵雷达的激励器,体积缩小至原来的 $1/30$,面积缩小至原来的 $1/7$,重量减至原来的 $1/8$ 。从1988年至1997年,先进的计算机集成制造技术有20个典型应用单位,在10个省(市)的40个企业中得到推广。

但是,在国防工业中仍然可以经常听到“重型号、轻工艺”的反映,在民品工业中“重产品、轻制造”的呼声也不小。这说明先进制造技术的重要作用还没有被更多的人所认识及重视,没有把它摆到应有的位置加以应用发展,所以制造技术水平低、生产能力和应变能力差、没有竞争能力,满足不了电子装备研制生产的需要。

本分册的主要内容是与现代电子装备的研制生产关系最为直接、影响最为广泛和深远的现代技术与工业创新之典范——先进电子制造技术,其涉及的内容极其广泛,技术跨度大。为了使读者对这些技术从总体上有个概括的了解,在内容安排上偏重于介绍基本概念、发展水平、实施方法和关键技术;紧密联系实际应用,介绍每项技术是什么?应用该项技术解决什么问题?国内外该项技术的应用水平和发展趋势等。让非专业人员看得懂,对专业人员有所启迪。全书主要内容有:信息化制造技术、电子电路装联技术、印制板与陶瓷基板制造技术、精密与超精密切削加工技术、特种加工技术、特种焊接技术、金属材料与热处理技术、精密成型技术、三防与电磁兼容技术、制造技术管理等。

本分册由电子工业部第二研究所张立鼎任主编,北京761厂周志春任副主编。

各章编写分工如下:第一章由张德骞、石磊编写;第二章由周志春编写;第三章由王德贵编写;第四章第1~9节由王厚邦编写,第10节由贾善诚主笔,崔殿亨、曹文清、谢廉忠、陈志一、刘刚、俞正平参加编写;第五章由傅展堂编写;第六章由刘寿春编写;第七章由朱云鹤编写;第八章由龚俊杰编写;第九章第1节由张玉华编写,第2节由常志新编写,第3节由赵敬东编写,第4节由张金武编写,第5节由雷有声编写,第6节由王科利编写,第7节由张立鼎编写;第十章由马骥编写;第十一章由常志新编写。许宝兴、高宏、朱云鹤、傅展堂参加了全书的审校工作。朱青负责计算机打印和文稿整理工作。

编写过程中得到原电子工业部第二研究所、第十研究所、第十四研究所、第十五研究所、第二十研究所、第三十八研究所、第五十四研究所、北京761厂、宝鸡782厂等单位的大力支持,在此一并致以衷心感谢。

本书编写中参考文献较多,由于篇幅限制,不能全部列出,特向未被列出的参考文献的作者致以诚恳的歉意和感谢。

由于编写水平有限,书中疏漏、欠妥之处恳请读者批评指正。

作 者

内 容 简 介

本书介绍国内外电子行业的先进制造技术，特别是以信息技术为支撑的制造技术。主要内容有：先进制造技术概述，信息化制造技术，电子电路装联技术，印制板与陶瓷基板制造技术，精密与超精密切削加工技术，特种加工技术，特种焊接技术，金属材料与热处理技术，精密成型技术，三防与电磁兼容技术，制造技术管理等。

读者对象：具有中专以上文化程度的制造专业或相关专业的技术人员，管理干部，及大专院校师生。

目 录

第一章 绪论	1
1.1 什么是先进制造技术	1
1.1.1 先进制造技术的概念	1
1.1.2 高技术是先进制造技术的源泉	2
1.2 战场与市场是先进制造技术的用武之地	3
1.2.1 军事需求——先进制造技术发展动力之一	4
1.2.2 市场竞争——先进制造技术发展动力之二	6
1.3 先进制造技术先进在何处?	7
1.3.1 先进制造技术的特点	7
1.3.2 信息革命是先进制造技术发展的重要基础	9
1.4 先进制造技术的内涵	12
1.4.1 先进制造技术的主要内容	12
1.4.2 军事电子装备中的先进制造技术	13
第二章 信息化制造技术	18
2.1 什么是信息化制造技术	18
2.2 信息的分类与编码技术	20
2.2.1 信息的分类	20
2.2.2 信息的编码	22
2.2.3 电子设备厂、所的信息及其分类与编码状况	24
2.3 计算机辅助设计与制造(制作)(CAD/CAM)系统	25
2.3.1 CAD/CAM 技术	25
2.3.2 CAD 技术	26
2.3.3 CAPP 技术	33
2.3.4 CAM 技术	35
2.3.5 CAQC(计算机辅助质量控制)技术	36
2.3.6 PCB 的 CAD/CAM 系统技术	37
2.3.7 FMC/FMS/FML 技术	41
2.4 制造资源计划(MRP II)技术	42
2.4.1 MRP II 是由 MRP 发展而来	43
2.4.2 MRP II	46
2.5 计算机集成制造与集成制造系统(CIM/CIMS)	49
2.5.1 CIM/CIMS 的提出	49
2.5.2 CIMS 的组成	50
2.5.3 CIMS 的信息集成技术	52
2.5.4 CIMS 的效益	54

2.6 并行工程 (CE)	54
2.6.1 CE 的提出	54
2.6.2 对 CE 的理解	55
2.6.3 CE 技术的要点	58
2.6.4 CE 的工作方式	59
2.6.5 CE 过程中的几个关键步骤	60
2.6.6 CE 的效益	61
2.7 敏捷制造 (AM)	62
2.7.1 AM 的由来	62
2.7.2 AM 的基本概念	62
2.8 柔性制造技术 (FMT) 与可承受性制造技术 (AMT)	64
参考文献	67
第三章 电子电路装联技术	68
3.1 概述	68
3.1.1 电子电路装联技术的发展	68
3.1.2 军事电子装备对电路装联技术的要求	69
3.2 表面组装技术概述	69
3.2.1 表面组装技术的组成	69
3.2.2 表面组装工艺概要	71
3.3 表面组装设计	74
3.3.1 表面组装件的设计规则	74
3.3.2 表面组装焊盘图形设计	76
3.4 表面组装材料	77
3.4.1 焊膏	77
3.4.2 贴装胶	79
3.4.3 清洗剂	80
3.5 焊膏和贴装胶涂敷技术	81
3.5.1 焊膏涂敷技术	81
3.5.2 贴装胶涂敷技术	84
3.6 贴装技术	85
3.6.1 贴装机的结构和特征	85
3.6.2 贴装机的类型	87
3.6.3 影响贴装机功能的主要因素	88
3.6.4 视觉系统	88
3.7 焊接技术	90
3.7.1 波峰焊接技术	91
3.7.2 再流焊接技术	93
3.7.3 焊后清洗和免洗	99
3.8 电路组件可靠性、质量检测和返修	100
3.8.1 电路组件的可靠性	100
3.8.2 电路组件质量检测	101

3.8.3 表面组装组件的返修	102
3.9 跨世纪的电路装联技术	103
3.9.1 封装器件的发展	103
3.9.2 微组装技术的兴起和发展	104
3.9.3 CIMS在SMA组装生产线中的应用	104
参考文献	104
第四章 印制板与陶瓷基板制造技术	105
4.1 概述	105
4.1.1 印制板在电子设备中的地位和功能	105
4.1.2 发展简史	106
4.2 印制板基材—覆铜箔层压板	107
4.2.1 分类	107
4.2.2 酚醛纸基覆铜箔层压板	107
4.2.3 环氧玻璃布基覆铜箔层压板	107
4.2.4 复合型覆铜箔层压板	108
4.2.5 耐高温覆铜箔层压板	109
4.2.6 高频基板材料	109
4.2.7 其他特殊覆铜箔板	109
4.3 单面印制板	109
4.3.1 典型工艺流程	109
4.3.2 关键工艺	110
4.4 双面印制板	115
4.4.1 典型工艺路线	115
4.4.2 主要工艺	115
4.5 多层印制板	124
4.5.1 薄覆铜箔板和半固化片	125
4.5.2 关键工艺	126
4.5.3 高密度高精度多层印制板生产技术的发展动向	128
4.6 挠性和刚挠印制板	132
4.6.1 分类	132
4.6.2 材料	133
4.6.3 制造技术	134
4.7 碳膜印制电路板和银浆贯孔印制板	135
4.7.1 碳膜印制电路板	135
4.7.2 银浆贯孔印制板	136
4.8 金属芯印制板	137
4.8.1 铝芯印制板	137
4.8.2 CIC印制板	138
4.9 MCM—L基板	139
4.9.1 MCM—L基材	140
4.9.2 制造技术	140
4.10 陶瓷基板电路制造技术	141

4.10.1 厚膜材料与厚膜元件	142
4.10.2 厚膜电路板制造技术	144
4.10.3 厚膜技术的发展方向	146
4.10.4 薄膜电路制造技术	148
4.10.5 薄膜混合集成电路的发展	152
参考文献	154
第五章 精密和超精密切削加工	155
5.1 概述	155
5.1.1 从传统的切削加工到精密和超精密切削加工	155
5.1.2 什么是精密和超精密切削加工	155
5.1.3 精密和超精密切削加工方法	156
5.1.4 精密和超精密切削加工特点	156
5.1.5 精密和超精密切削加工在军事电子装备制造中的应用	157
5.2 金刚石刀具超精密切削机理及特点	158
5.2.1 金刚石刀具超精密切削机理	158
5.2.2 金刚石刀具超精密切削特点	160
5.3 铝合金零件的精密和超精密车削	160
5.3.1 镜面和虹面车削	161
5.3.2 磁盘车削	161
5.3.3 磁鼓车削	162
5.3.4 波导管车削	163
5.4 铝合金零件的精密和超精密铣削	163
5.4.1 铣削特点、铣削方式和铣削加工的应用	163
5.4.2 平面的精密铣削	164
5.4.3 成形面的超精密铣削	164
5.5 精密和超精密磨料加工	165
5.5.1 精密和超精密磨削	165
5.5.2 精密和超精密研磨	169
5.5.3 精密和超精密抛光	172
5.6 精密滚齿	174
5.7 切削加工的柔性自动化	175
5.7.1 柔性自动化加工方法的类型和基本特点	175
5.7.2 数控加工	178
5.8 精密和超精密切削加工中的误差补偿	183
参考文献	184
第六章 特种加工技术	185
6.1 概述	185
6.1.1 特种加工的产生背景及其特点	185
6.1.2 特种加工的分类	186
6.1.3 特种加工对结构工艺性的影响	186
6.2 电火花加工	187