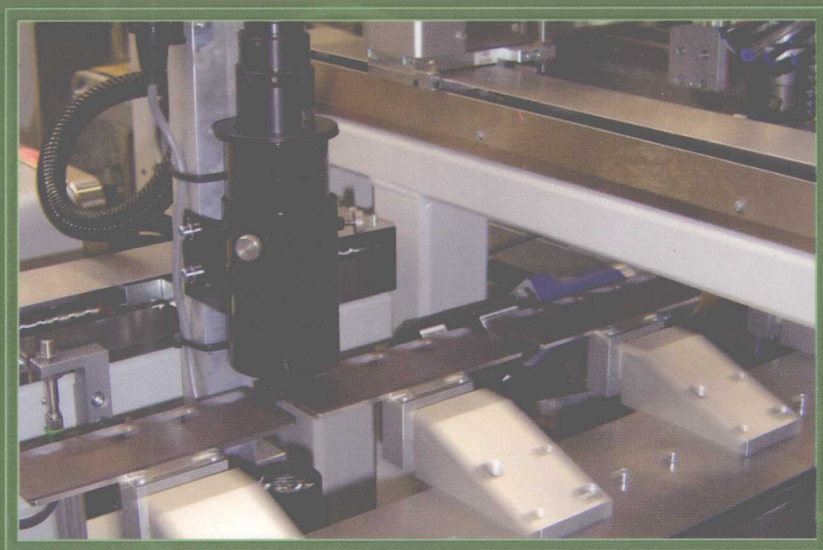


“十一五”国家重点图书出版规划项目·先进制造新技术丛书

# 微系统自动化 装配技术

◎ 李玉和 刘志峰 编著 ◎



电子工业出版社  
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

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

先进制造新技术丛书

# 微系统自动化装配技术

李玉和 刘志峰 编著



电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

## 内 容 简 介

本书对微系统自动化装配技术的有关基本理论和方法做了较全面的论述,荟萃了微系统自动化装配技术领域的有关资料和科研成果,反映了这一学科领域的最新进展。

全书共分为7章,内容包括微系统装配技术概述、微夹持驱动与操作技术、微系统装配视觉技术、微系统装配控制技术、微型机器人技术、微纳自组装技术、微系统装配设计与实践。

本书适用于微机电系统(MEMS)工程、测控技术与仪器、电子精密机械及机电一体化、工业自动化设备与系统等专业的师生使用,同时也可供从事微纳米机电系统研究、设计、制造和使用的工程技术人员学习和参考。

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

微系统自动化装配技术 / 李玉和, 刘志峰编著. —北京: 电子工业出版社, 2008.3

(先进制造新技术丛书)

ISBN 978-7-121-05621-5

I. 微… II. ①李… ②刘… III. 微电子技术—自动化—装配(机械)—高等学校—教材 IV. TN4

中国版本图书馆CIP数据核字(2007)第194034号

策划编辑: 李 洁

责任编辑: 康 霞 文字编辑: 韩玲玲

印 刷: 北京市天竺颖华印刷厂

装 订: 三河市金马印装有限公司

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

开 本: 787×980 1/16 印张: 15 字数: 345千字

印 次: 2008年3月第1次印刷

印 数: 4000册 定价: 30.00元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题, 请向购买书店调换。若书店售缺, 请与本社发行部联系, 联系及邮购电话: (010) 88254888。

质量投诉请发邮件至 [zlt@phei.com.cn](mailto:zlt@phei.com.cn), 盗版侵权举报请发邮件至 [dbqq@phei.com.cn](mailto:dbqq@phei.com.cn)。

服务热线: (010) 88258888。

# 序

制造业是国民经济与国家安全的重要支柱。21世纪经济全球化和全球信息化的趋势对制造企业提出了严峻的挑战，同时也提供了良好的发展机遇。一场以信息化为特征的全球化的制造业革命正在波澜壮阔地展开。制造企业间竞争的要素是企业产品(P)及其上市时间(T)、质量(Q)、成本(C)、服务(S)、环境(E)、知识(K)。国内外的实践表明，融合了信息、管理、材料、自动化等高新技术的制造技术——“先进制造技术”，是支持制造企业“产品创新、管理创新、技术创新”，实现其“全球化、敏捷化、信息化、集成化、智能化、绿色化”，进而提高制造企业竞争力的良策与有效途径。

建国50余年来，经过全国上下的艰苦奋斗，我国制造业已成为国民经济的重要组成部分，其工业增加值已占我国生产总值的47.3%，并跃居世界第四位，即我国已从一个制造弱国发展为世界制造大国，但还不是强国，因为我国制造业工业增加值仅为美国的1/4、日本的1/2。在我国《中长期科学和技术发展规划纲要》中指出了我国制造工业的差距：“制造技术基础薄弱，创新能力不强；产品以低端为主；制造资源、能源消耗大，污染严重”。我们的目标要成为世界制造强国，这是历史赋予我们的责任，我们为此还要作出艰巨的努力。

在我国《中长期科学和技术发展规划纲要》中指出：当前先进制造技术的新变化是“信息化、高技术化、绿色化和发展尖端制造技术”。因此，本丛书将围绕这些新变化，以组成先进制造系统为基点，从系统总体技术、产品设计技术、产品加工生产与装备技术、经营管理与决策技术、产品试验技术、系统集成支撑环境技术等六个方面来组织其内容。

本丛书主要面向制造企业管理者与技术人员，因此其内容特点是“先进、实用、精练、简洁”，并提供成功的应用案例。

本丛书由中国机械工程学会机械工业自动化分会、中国自动化学会制造技术专业委员会、全国工业自动化系统与集成标准化技术委员会和电子工业出版社共同组织与筹划。

本丛书的著者是来自企业、学校、科研院所中从事先进制造技术研究开发与应用的科技与管理专家。丛书的大量内容取自他们各自参与的研究开发与应用项目，因此在这里要衷心感谢有关项目中一起工作的团队，感谢他们的努力与作出的贡献。

我们期望本丛书能促进我国制造企业创新能力和水平的提高，能为我国从制造大国向制造强国转变的历史任务中作出微薄的积极贡献。

敬请读者批评指正。



中国工程院院士

2007年9月

# 前 言

随着科学技术的进步,人类对世界的认识不断深入,由宏观世界逐渐向微观世界扩展,特别是20世纪末微机电系统的兴起,为“微、纳米级”的制造技术提供了新的发展领域。同时促进了微电子技术、宇航工业、材料科学、生物工程等学科的发展,必将引起新的设计与制造的革命;其研究的尺度深入到介观(纳米)和微观,利用现代微制造技术(光、机、电)、纳米技术、计算机技术、仿生学原理、新材料等高新技术,为人类的生存和发展提出了新的研究课题和新的研究途径与方法,将导致人类进一步认识微观世界,使之向智能化、微型化、集成化、芯片化和系统工程化发展,并为人类的进步做出新的贡献。

“微系统自动化装配技术”是“微、纳米级的制造工程”的前沿技术之一。本书总结了编著者长期的教学经验与科研工作成果,荟萃了有关微装配与微操作技术的设计理论和成果,反映了这一学科领域的当代发展水平,使学生充分了解与掌握该领域中的学术动态和最新成就。

本书共分七章。第1章综述了国内外微装配与微操作技术学科领域当代的发展现状与发展趋势,并介绍了微装配与微操作技术的组成与应用。第2章介绍了微夹持技术研究概况、微夹持器类型,重点研究了微夹持器驱动技术的设计方法;结合梳齿结构静电驱动微夹持器实例进行了设计,包括设计、工艺结构及加工工艺研究、微夹持特性分析与仿真,并对微夹持器微观操作中的黏附现象进行了建模与分析。第3章阐述了视觉技术的基本原理、视觉系统的组成,包括图像轮廓增强、目标图像边缘检测算法、目标识别与定位技术及自动调焦技术等,并给出了实验结果。第4章对微系统装配中的控制方法进行概述,介绍了控制方法的原理及其分类,并对典型的控制系统进行实例分析说明。第5章介绍了微型机器人国内外概况与发展趋势、微型机器人的分类与系统组成,阐述了微型机器人的驱动技术及驱动方法及纵弯式压电微电机驱动的设计、电磁微电机的设计及磁致伸缩驱动设计;同时还介绍了几种微型机器人典型应用系统。第6章对自组装技术的发展进行概述;介绍了自组装的原理、分类以及在微系统装配中的典型应用。第7章包括系统总体设计、系统组成模块、系统建模、坐标变换与标定、微动工作台设计、控制系统及其优化、系统实验结果与分析。

本书第1章由李庆祥编写,第2~5章和第7章由李玉和编写,第6章由刘志峰编写,全书由李玉和统稿。

由于编著者水平有限,书中难免有不妥甚至错误之处,殷切希望读者提出宝贵意见。

编著者

2007年9月于清华园

# 目 录

第 1 章 微系统装配技术概述	(1)
1.1 概述	(1)
1.1.1 微机电系统 (MEMS) 概述	(1)
1.1.2 微装配 (Micro Assembly) 系统概述	(3)
1.2 微系统装配技术	(6)
1.2.1 微装配发展阶段	(9)
1.2.2 微装配方法	(9)
1.2.3 微装配分类	(15)
1.3 微装配系统的组成、功能及特点	(17)
1.3.1 系统组成	(17)
1.3.2 系统特点	(18)
1.3.3 系统功能	(19)
1.4 微系统装配发展方向	(20)
第 2 章 微夹持驱动与操作技术	(21)
2.1 微夹持驱动与操作技术概述	(21)
2.1.1 微夹持技术概况	(21)
2.1.2 微夹持器类型	(23)
2.2 微夹持驱动技术	(32)
2.2.1 静电驱动	(32)
2.2.2 热驱动	(39)
2.2.3 电磁驱动	(41)
2.2.4 压电驱动	(43)
2.2.5 超磁致伸缩驱动	(48)
2.3 微操作技术	(50)
2.3.1 微操作技术概述	(50)
2.3.2 微操作的特点	(52)
2.3.3 微操作黏附现象	(53)
2.3.4 人-机交互微操作环境	(59)



2.3.5	典型微操作技术及应用	(60)
2.4	微夹持器的设计与实践	(64)
2.4.1	微夹持器总体方案	(64)
2.4.2	微夹持器的结构设计	(66)
2.4.3	微夹持器加工工艺设计	(73)
2.4.4	微夹持特性分析与仿真	(78)
<b>第3章</b>	<b>微系统装配视觉技术</b>	<b>(82)</b>
3.1	视觉技术概述	(83)
3.1.1	基本原理	(83)
3.1.2	视觉系统的组成	(84)
3.2	视觉系统功能与实现	(85)
3.2.1	系统功能	(85)
3.2.2	视觉实现	(86)
3.3	图像处理技术	(87)
3.3.1	图像预处理	(87)
3.3.2	边缘检测	(91)
3.3.3	目标识别	(93)
3.3.4	图像特征跟踪	(100)
3.4	自动调焦技术	(101)
3.4.1	自动调焦原理与方法	(101)
3.4.2	图像处理法自动调焦	(104)
3.4.3	微装配自动调焦实现	(109)
3.5	深度信息提取	(112)
3.6	视觉技术的应用	(115)
3.6.1	典型微装配视觉系统	(115)
3.6.2	发展趋势	(118)
<b>第4章</b>	<b>微系统装配控制技术</b>	<b>(120)</b>
4.1	概述	(120)
4.2	控制技术	(121)
4.2.1	虚拟现实技术	(121)
4.2.2	视觉伺服控制技术	(122)
4.2.3	过程仿真	(126)
4.2.4	人-机交互技术	(127)

4.3 典型应用	(129)
4.3.1 基于微机器人的微装配系统 FMMS	(129)
4.3.2 基于视觉伺服的微装配系统	(130)
<b>第 5 章 微型机器人技术</b>	<b>(135)</b>
5.1 微型机器人概述	(136)
5.1.1 概述	(136)
5.1.2 系统分类	(139)
5.1.3 系统组成	(140)
5.2 微型机器人驱动技术	(142)
5.2.1 驱动方法概述	(142)
5.2.2 压电微电机驱动	(147)
5.2.3 电磁微电机驱动	(151)
5.2.4 磁致伸缩驱动	(154)
5.3 微机器人装配发展趋势及典型应用	(156)
5.3.1 发展趋势	(156)
5.3.2 典型应用	(156)
<b>第 6 章 微/纳自组装技术</b>	<b>(161)</b>
6.1 微纳自组装概述	(161)
6.1.1 基本原理	(161)
6.1.2 系统特点	(162)
6.2 自组装概念与原理	(163)
6.2.1 自组装概念	(163)
6.2.2 自组装分类及原理	(163)
6.3 微纳系统自组装技术	(170)
6.3.1 纳米技术的发展	(170)
6.3.2 MEMS 中的自组装技术	(172)
6.4 自组装的典型应用及发展趋势	(175)
6.4.1 制造纳米机械器件	(175)
6.4.2 用自组装进行微器件装配	(176)
6.4.3 自组装的发展趋势	(177)
<b>第 7 章 微系统装配设计与实践</b>	<b>(178)</b>
7.1 系统总体设计	(178)



7.1.1	系统组成	(178)
7.1.2	系统模块	(180)
7.1.3	系统建模	(183)
7.2	微动工作台设计	(188)
7.2.1	结构组成	(188)
7.2.2	驱动器设计	(189)
7.2.3	柔性机构的设计	(190)
7.3	驱动控制系统	(203)
7.3.1	驱动系统	(204)
7.3.2	控制系统	(207)
7.4	系统装配实验	(211)
7.4.1	系统标定	(211)
7.4.2	实验结果与分析	(215)
	参考文献	(223)

# 01

## 第 1 章

# 微系统装配技术概述

### 1.1 概述

#### 1.1.1 微机电系统 (MEMS) 概述

随着现代科学技术的发展和科技水平的不断提高,人们对微观领域的研究逐渐深入,微机电系统 (MEMS) 兴起,使之进入亚纳米、原子量级的研究时代。早在 1959 年,著名物理学家、诺贝尔奖获得者 R.P. Feynman 就预言了 MEMS 这一新技术的诞生。美国是最早研究并试制微机械的国家,1970 年斯坦福大学就对 MEMS 开始了研究,目前美国国会已将 MEMS 作为 21 世纪重点发展的学科之一。美国从事微机电系统研究的单位主要有以斯坦福大学、麻省理工学院、犹他大学为首的高校,以 IBM、加州弗里蒙特新传感器制造公司为代表的大企业,以及伯克利传感器与致动器中心、圣迪亚等大型国家实验室。继美国之后,日本和西欧各国也相继将 MEMS 研究列为重点发展领域。日本已将微机械列入国家重点课题,以东京大学、东北大学、名古屋大学为首的高校正着手于微机械的基础研究,主要从事微致动器与微

器件及其应用、微机电系统构筑与控制方法、微细加工技术、微小孔加工、微复合加工和微装配技术的研究；东北大学主要从事微型传感器、微型阀、微型泵及微致动器等的研究；日本大学已成立微机械专业，正式培养专业从事微机械工作的本科生、硕士生和博士生；此外，包括日立、索尼、松下等在内的 25 家大公司参与了微机械工艺制造技术，通商产业省机械研究所等三家国家级研究所进入微机械的实用研究工作，从而在日本形成了官、学、民共同从事机械研究和开发的形势。德国从事微机械研究的单位主要有慕尼黑夫琅霍费固体工艺研究所、卡尔斯鲁厄核研究中心微结构研究所、法兰克福的巴特勒研究所及达尔姆施塔特大学等，目前德国在微机械研究中创造了 LIGA 微细加工工艺，并在微型泵、传感器、立体微型结构、微型机械元件、悬臂执行机构中取得了令人瞩目的成绩。

我国 MEMS 研究工作尚处于起步阶段，初步有了一支研究队伍并取得了一些成果。要跟上世界发展 MEMS 的步伐，跻身 21 世纪先进技术之列，需要做很多努力。在国家自然科学基金委、973、863 和国防科工委基金的资助下，我国从 20 世纪 90 年代开始也开展了相关研究，目前已成为微机械研究最为炽热的国家，并在微型泵、微型机械元件、传感器、立体微型结构、悬臂执行机构、微装配等方面取得了可喜进步。在微操作方面，1992 年中科院化学所研究员用自己研制的 STM，在计算机控制下，得到了线宽为 10 nm 的字符和图案；中科院北京真空物理实验室研究了一种新的表面原子操纵方法，并成功地在室温条件下，在硅单晶原子排列的表面上直接提走硅原子，形成平均宽度为 2 nm 的线条。同时中科院的科研人员还能在硅表面上沿一直线方向取出原子后再将这些原子堆成另一直线，实现了可提、可植一条线硅原子的技术。这些是我国科学家在原子级操纵和原子级加工领域的突破，并将在高密度信息存储、纳米电子器件、量子阱器件、新型材料的组成和物种再造方面产生非常重要的影响。表 1.1 所示为微机电系统国内外发展情况。

表 1.1 微机电系统国内外发展情况

国家	起始时间	主要研究单位	主要研究内容	应用范围
美国	20 世纪 60 年代中期	斯坦福大学 麻省理工学院 犹他大学 国际商用机器公司 加州弗里蒙特新传感器制造公司 伯克利传感器与致动器中心 圣迪亚等大型国家实验室	微致动器 微传感器 微结构 微泵 微传动元件 扫描隧道显微镜 原子力显微镜	微型惯性器件及其 组合 MIMU
德国	20 世纪 90 年代初	慕尼黑夫琅霍费固体工艺研究所 卡尔斯鲁厄核研究中心微结构研究所 法兰克福的巴特勒研究所 达尔姆施塔特大学	LIGA 微细加工工艺 微型泵 立体微型结构 微型机械元件 悬臂执行机构	汽车工业

续表

国家	起始时间	主要研究单位	主要研究内容	应用范围
日本	20 世纪 90 年代	东京大学 东北大学 名古屋大学 日立公司 索尼公司 松下公司	微致动器 微型传感器 微器件 微型阀 微型泵 微机电系统 微细加工技术 微装配技术操作系统	诊断和治疗 系统
俄罗斯		俄罗斯应用力学研究所	精密微机械惯性传感器硅加速 度计	生物医学装置和显 示设备小型分析仪器
中国	20 世纪 80 年代末	清华大学 重庆大学 浙江大学 长春光机所 上海冶金所电子部 13 所 半导体研究所 北京大学微电子所	微型驱动器 微型传感器 微型机电系统 微装配技术 微型惯性组合系统 微型机械制造工艺 微型卫星	人员/运载器导航 系统
英国		萨瑞卫星技术公司	微型卫星	思纳米卫星
韩国		三星技术公司	微型机电系统	

### 1.1.2 微装配 (Micro Assembly) 系统概述

微机电系统的发展十分迅猛,并带动和开创了微电子学、微机构学、微摩擦学、微细加工技术、微装配技术等许多新的研究领域。随着 MEMS 的发展,其产品功能增多且不断集成化、复杂化,涉及不同的加工工艺和制作材料以及复杂外形,如小型药泵、多功能微传感器以及微光学部件等不同种类的 MEMS 器件,靠单纯的单件加工工艺很难实现。在这种情况下,微装配与微操作技术研究及装配设备开发成为必然趋势。

微器件和微系统装配是目前制造业的热点之一,其应用产品及设备市场如图 1.1 和图 1.2 所示。随着世界 MEMS 产品需求量的快速增长,对微细加工和装配技术提出了更高的要求。在目前的技术条件下,一次性加工出具有多功能集成的微系统还不尽如人意,有时微系统集成尚需熟练装配工利用镊子和显微镜等器械来完成,这种制作方式大大限制了微系统技术的产业化。微系统装配的自动化已成为制约微制造发展的瓶颈问题,建立面向微型装配的作业系统成为迫切要求。为此,研究人员提出了微装配系统、微装配机器人以及微型工厂等概念,利用特殊的微机器人实现微小零件的运输和装配,这样既可以节约能源,又可提高加工精度,改善工作效率,是实现微装配自动化的一个较好的研究思路和研究方向。

目前,微机械的研究已经从基础研究阶段逐步跨入开发和实用阶段。但是,从加工制造角度考虑,微机械不限于狭义的机械力学中的机械,它代表一切具有能量转化、传输等功能的效应,包括力、热、声、光、磁,乃至化学、生物等;并不是传统机械电子的直接微型化,在物质结构、尺度、材料、制造工艺和工作原理等方面远远超出传统机械电子的概念和范畴。同时,为保证系统的高精度、高效率、高柔性、协调性和低成本,实现微机械产品的理想性能,要综合利用现代先进的设计、加工和信息处理技术,以及并行工程、虚拟制造等先进的

制造技术。一方面，人们正在开发制造的新技术、新工艺，发明新的 MEMS 器件；另一方面，也正致力于 MEMS 的产业化。但产业化面临关键技术的挑战和各种因素的束缚，概括起来主要有以下几个方面。



图 1.1 微装配产品

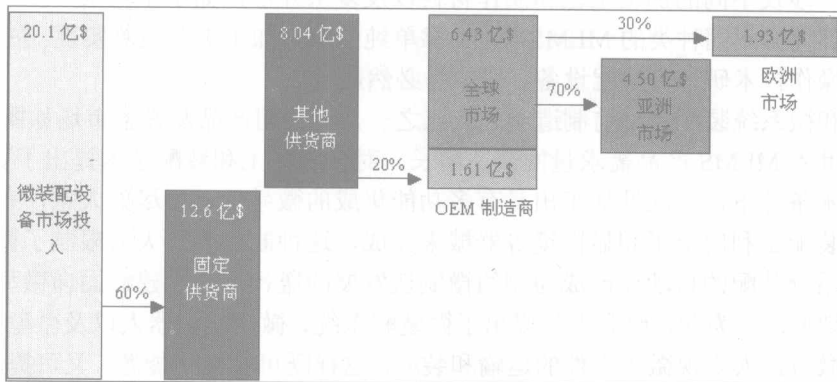


图 1.2 微装配设备市场前景

(1) 由于 MEME 产品不如 IC 产品规模大，但其产品种类却比 IC 产品多得多，难以形成像 IC 那样的规模，因此阻碍了 MEMS 产业化发展。

(2) 需要更先进的计算机软件对 MEMS 进行辅助设计、掩模版设计、工艺模拟、器件仿真、结构分析等，但 MEMS 种类繁多，通用的 MEMS CAD 软件仍面临困难。

(3) 目前的 MEMS 技术还难以加工 3D 几何模型的显微结构，多数为二维或二维半结构

的加工，因此需要更先进的加工技术和工艺，以便能够加工更复杂、功能更多的器件。

(4) 需要 MEMS 标准化制作技术的进一步发展。由于 MEMS 产品种类多，就其通用性而言，MEMS 加工工厂很难达到标准的 IC 加工工厂水平，即集中制造模式在 MEMS 中并不适用。目前还没有一个多种用途的标准微加工工艺，所以每一个微系统都需要特定的加工工艺。

(5) MEMS 装配和封装技术作为加工的最后工艺，对最终产品的质量影响极大，因此也阻碍了 MEMS 产业化发展。分析表明，在微型传感器的制造过程中，80%的废品来自于装配和封装过程。

(6) MEMS 器件设计周期长，加工系统的柔性差，自动化程度低。

(7) 微机械技术在加工目的、加工设备、制造环境、材料选择和处理、测量方法和仪器等方面都有其特殊性。

图 1.3 和图 1.4 分别显示了微装配系统的技术性能要求及其自动化发展的挑战。

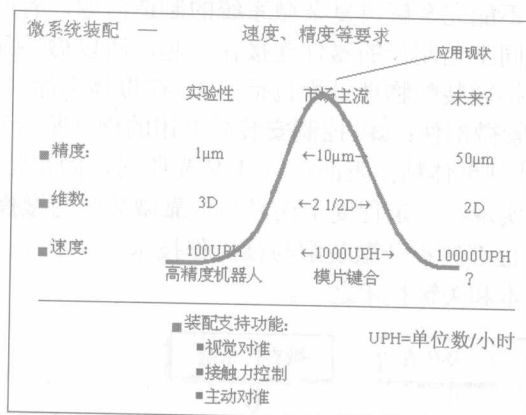


图 1.3 微装配系统技术性能要求



图 1.4 微装配系统自动化挑战



## 1.2 微系统装配技术

微系统研究带动了一些基本微单元，如微致动器以及微构件的研制开发。目前，大多数微加工还仅限于传统的工艺过程。尽管已有一些新型的三维微加工工艺（如 LIGA 工艺、微电火花工艺等），但是要想构建一个微传感器、微致动器等多微功能单元集成化的微系统仍然是一项非常困难的事情。

微系统不是传统机械系统的模拟缩小，因为传统机械系统各部件的复杂程度不均，用几何方式模拟缩小这样的结构，其复杂部分的微小化十分困难。所以微系统不必追求复杂的机械结构，而是着眼于用多个简单的机械元件完成复杂的工作。微型机械器件一般也做成一次性的，短时间使用的必须追求较长的使用寿命。同时，由于材料兼容性问题，仅依靠微电子工艺和辅助加工工艺并不能完全解决复杂微系统的制造问题，有时必须采用微系统装配技术（即微装配技术）将不同工艺制作的器件连接在一起，所以微装配成为一种制造复杂微系统的重要手段。常用的粘接微装配物理过程包括：① 在母体上涂（或喷）光敏胶；② 采用微夹钳、微吸管等工具夹紧微部件；③ 控制安装微夹钳的微动平台移动，将部件精密定位到安装位置；④ 释放微部件到母体粘接表面；⑤ UV 光照射，固化粘接。

因此，三维微系统的实现在一定程度上还必须依靠微装配与微操作技术，如图 1.5 所示，同时微系统的改进、修复也都离不开微装配与微操作技术。从这个意义上讲，微装配与微操作技术是微系统的一项基本和关键技术之一。

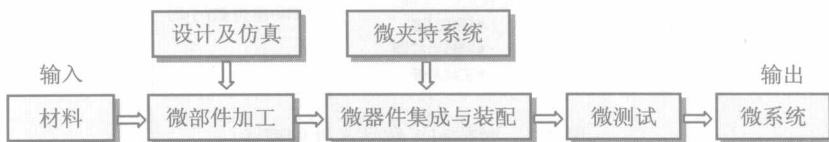


图 1.5 微系统工艺过程

微装配常用于以下场合。

(1) 组装不兼容材料制作的微部件。一个完整的微系统往往由不同材料制作的部件组成，由于热膨胀系数、化学性质、强度、形状等因素，许多部件不可能通过键合、封装等微电子工艺组合装配在一起，这就需要采用微操作方法将微部件定位到正确位置，然后通过胶粘、焊接和激光烧结等方法将其连接装配。如图 1.6 所示为科隆大学研制的微型混频器，这种微型混频器需要将微检测器与波导器件准确连接，然后用光敏胶固定在基底通道（ $2\mu\text{m}\times 1600\mu\text{m}$ ），采用微操作的方法可以实现微系统（部件）装配的要求。

(2) 由采用表面工艺加工的薄膜建立铰链结构（Pop-up Hinges）。

(3) 在微系统与不同尺度的其他系统间建立接口或连接。

(4) 微系统中运动器件的制作与安装。

由于封装技术不能直接用于装配微系统中的运动部件，所以需要采用微操作辅助制造和装配。如图 1.7 所示是用微夹钳夹持 LIGA 工艺制作的齿轮，用于微型齿轮变速箱的装配。

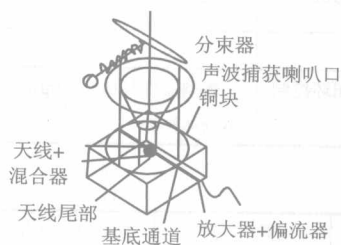


图 1.6 微型混频器

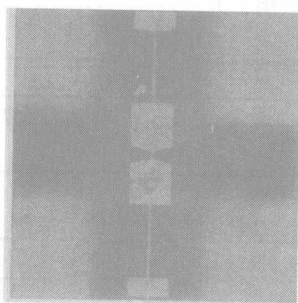


图 1.7 微系统装配应用

近年来，微装配技术已成为 MEMS 和微机器人领域的研究亮点。各国政府和企业投入大量资金对其进行研究，比较著名的研究机构有德国 Karlsruhe 大学 IPR 研究所（Buerkle, Fatikow）、日本 Nagoya 大学微系统工程部（Arai, Fukuda）、美国 Minnesota 大学机械工程学院（Vikramaditya, Nelson）、美国麻省 RLE 研究所（Freeman）等。我国自 1997 年起将微操作方面的研究列入了 863 机器人主题和国家攀登计划，针对生物操作和 MEMS 器件组装、装配、微焊接和立体观测等作业，开展精密定位技术、微操作器、作业工具、显微立体视觉系统和智能控制等 MEMS 微装配关键技术的研究，主要研究立项有全光学生物微操作系统（1997~2000 年）、生物工程中微注射操作机器人系统产品样机的研制（1998~2000 年）、多机器人控制系统平台的研究（1998~2000 年）、面向生物工程的微驱动机器人系统（NKTY-MT02, NKTY-MR-03）（2000 年）等，参与微操作的主要研究单位有清华大学、北航机器人研究所、长春光学精密机械研究所、大连理工大学微系统研究中心、哈工大机器人研究所、南开大学机器人与信息自动化研究所、中国科技大学等。

经过近十年的发展，微装配方面的研究取得了很大进展，已逐步形成微装配机理、MEMS 传感和测试技术、显微立体视觉技术、新型微操作器、微操作控制技术、人-机交互操纵微操作环境和实际应用等主要研究方向。

表 1.2~1.5 所示为微装配技术领域国内外研究现状。

表 1.2 微装配技术国外研究现状

研制机构	研制项目	特点	具体应用
美国 Sandia 实验室	微型齿轮装配系统	微型器件用于 LIGA 技术加工	外径 100 $\mu\text{m}$ ，中心孔直径 50 $\mu\text{m}$ ，微型齿轮装配
美国纽约仁斯利理工学院自动化技术研究所	光纤自动装配的微装配系统	直线定位精度达到 0.02 $\mu\text{m}$ ，旋转定位精度可达 3 弧秒	光纤自动装配

续表

研制机构	研制项目	特点	具体应用
华盛顿大学生物机器人研究室	蛋白质晶体操作和处理的微细作业系统	系统控制精度可达 $0.7\mu\text{m}$	蛋白质晶体操作
德国 Karlsruhe 大学	MINIMAN 微型机器人	定位精度 $1\mu\text{m}$	—
慕尼黑工业大学	微组装系统 SATURN	采用计算机视觉伺服闭环控制方法	微型器件胶粘, $500\mu\text{m}$ 微小物体排列

表 1.3 国外微装配申请专利

序号	专利名称	国家	批准时间(年)
1	Micromanipulation method and apparatus	美国	2000
2	Micro-positioning system	美国	2002
3	Micromanipulation device for minute work	英国	2002
4	Microinjection assembly and methods for microinjection and reimplanting avian	美国	2002
5	Shovel micromanipulation knife for department of ophthalmology	英国	1999
6	Micro-positioning system	英国	2002

表 1.4 微装配技术国内研究现状

研制单位	研制项目	特点	具体应用
清华大学	微型器件装配系统研究	二维平面内定位对准, 精度达 $10\mu\text{m}$	微轴、孔定位装配
南开大学	面向生物工程的微操作机器人系统	—	直径 $12\sim 13\mu\text{m}$ , 厚度 $5\mu\text{m}$ 细胞转基因注射
上海交通大学	高精度的微位移测控系统	控制精度可达 $0.7\mu\text{m}$	毫米级器件装配
北京航空航天大学	生物工程微操作系统研究	获得 $1\mu\text{m}$ 定位精度	白老鼠卵细胞显微操作实验
中国科技大学	全光学生物微操作系统	利用光镊、光刀技术	细小生物细胞和活体的捕捉、移动、切割和融合等
大连理工大学	MEMS 微操作系统	显微立体成像, 控制精度达 $0.3\mu\text{m}$	细胞转基因操作
哈尔滨工业大学	基于显微视觉柔顺混合控制微操作机器人	位移分辨率 $0.01\mu\text{m}$	直径 $200\mu\text{m}$ 轴和 $220\mu\text{m}$ 孔装配
西安交通大学	基于显微视觉反馈的微装配作业系统	外径 $400\mu\text{m}$ 轴和内径 $415\mu\text{m}$ 孔装配	微轴、孔装配
南京航空航天大学	智能制造中的微操作/微装配系统基础研究	采用局部特征目标识别方法, 解决有遮挡的目标识别	微轴、孔装配