

微系统原理与技术

傅建中 胡旭晓 编著

机械工业出版社

前 言

微系统技术是在微米量级内设计、制造和集成的技术。经过近二十几年的发展，微系统正逐步迈向工业化，目前已广泛用于汽车工业、航空航天、国防军工、信息技术、无线通信、分析化学、生物工程、制药等行业。微系统技术是综合众多学科的理论 and 知识，运用各种最先进的设计技术、加工技术、检测和控制技术、系统技术而形成的一个高新技术领域。

本书共分 17 章。第 1 章介绍微系统的基本概念和特点，并对微系统的动力学和非线性特征作了描述。第 2 章主要介绍微尺度理论和效应，论述了微尺度固体力学的塑性应变梯度理论，微流体力学及微尺度热传导和微尺度理论的研究方法。第 3 章介绍微系统设计技术，包括微系统设计流程、方法、设计的关键技术和计算机辅助设计。第 4 章介绍微系统的制造技术，主要介绍目前主流的微制造技术的工艺和方法，包括光刻和刻蚀技术、~~微细加工~~技术和准 ~~微细加工~~技术、微细特种加工技术、软刻蚀技术、激光微加工技术及微 ~~纳米~~米压印技术，并对激光加工建模和微 ~~纳米~~米压印建模技术作了较详细的描述。第 5 章介绍微系统的检测技术，主要包括扫描探针显微镜、三维微视觉检测技术、微构件中干涉检测技术及微结构材料特性检测技术。第 6 章介绍微系统的集成及控制技术，包括微传感器系统、微传感器信息融合、微传感器系统的自检自适应自学习、微致动器及其控制技术、微进给驱动器及其应用及微电子组装技术及 ~~封装~~封装。第 7 章介绍一类典型微系统——芯片实验室技术，包括典型芯片实验室、芯片实验室器件设计例子及著名芯片实验室研究机构介绍。

本书大部分内容是浙江大学为研究生开设的微系统与微制造技术选修课讲义。本书可以作为高校相关专业研究生和高年级本科生的选修课教材和课外读物，也适合微系统技术和专业人员及对微系统技术感兴趣的有关人员阅读。

本书由浙江大学微系统研究与发展中心的傅建中教授（第 1 章、第 2 章、第 3 章、第 4 章、第 7 章）和胡旭晓副教授（第 5 章、第 6 章）编写，最后由傅建中进行了全书的统稿。书中参考了国内外大量公开发表的科研成果和论文，在此对他们的辛勤劳动表示衷心的感谢。

由于作者水平有限，加之微系统技术的发展极为迅猛，本书很难全面反映微系统技术的学科前沿，而且在编写中难免会有一些疏漏和错误，恳请读者批评指正。

目 录

前言

| | |
|---------------------------|---|
| 第 1 章 微系统概述..... | 1 |
| 1.1 微系统的基本概念与特点 | 1 |
| 1.2 微系统的动力学及非线性特征 | 1 |
| 1.2.1 微系统的力学特征 | 1 |
| 1.2.2 微系统的动力学特征 | 1 |
| 1.2.3 微系统动力学的非线性特征 | 1 |
| 1.3 微系统的应用前景 | 1 |
| 参考文献 | 1 |
| 第 2 章 微尺度理论及效应 | 2 |
| 2.1 微尺度固体力学 | 2 |
| 2.1.1 塑性应变梯度理论的本构关系 | 2 |
| 2.1.2 平衡变分关系 | 2 |
| 2.2 微尺度流体力学 | 2 |
| 2.2.1 微尺度流动特点 | 2 |
| 2.2.2 微流体双电层效应 | 2 |
| 2.2.3 微流体电渗流 | 2 |
| 2.3 微尺度热传导 | 2 |
| 2.4 微尺度理论的研究方法 | 2 |
| 参考文献 | 2 |
| 第 3 章 微系统的设计技术 | 3 |
| 3.1 微系统设计流程 | 3 |
| 3.2 微系统设计方法 | 3 |
| 3.2.1 微系统模块化设计 | 3 |
| 3.2.2 微系统集成化设计 | 3 |
| 3.3 微系统设计关键技术 | 3 |
| 3.4 微系统仿真 | 3 |
| 3.4.1 微系统仿真的体系结构 | 3 |
| 3.4.2 微系统仿真软件 | 3 |
| 参考文献 | 3 |

| | |
|----------------------------|----|
| 第 9 章 微系统的制造技术 | 9 |
| 9.1 光刻和刻蚀技术 | 9 |
| 9.1.1 掩模制备 | 9 |
| 9.1.2 薄膜沉积 | 10 |
| 9.1.3 光刻 | 13 |
| 9.1.4 湿法刻蚀 | 15 |
| 9.1.5 干法刻蚀 | 16 |
| 9.2 镀膜技术和准 镀膜技术 | 16 |
| 9.2.1 镀膜技术 | 16 |
| 9.2.2 准 镀膜技术 | 17 |
| 9.2.3 镀膜 准 镀膜技术的应用技术 | 17 |
| 9.2.4 镀膜技术的发展趋势 | 18 |
| 9.3 微细特种加工技术 | 18 |
| 9.3.1 微细电火花加工技术 | 18 |
| 9.3.2 微细电化学加工技术 | 19 |
| 9.3.3 微细超声加工技术 | 19 |
| 9.4 软刻蚀微加工技术 | 19 |
| 9.4.1 软刻蚀的关键——弹性印章 | 19 |
| 9.4.2 微接触印刷 | 20 |
| 9.4.3 微模塑和相关技术 | 20 |
| 9.4.4 近场光刻蚀 | 20 |
| 9.4.5 多层软刻蚀 | 20 |
| 9.4.6 软刻蚀的应用 | 20 |
| 9.4.7 软刻蚀技术的发展趋势 | 20 |
| 9.5 激光微细加工技术 | 20 |
| 9.5.1 红外激光微细加工技术 | 20 |
| 9.5.2 准分子激光微细加工技术 | 20 |
| 9.5.3 飞秒激光微细加工技术 | 20 |
| 9.6 微米压印技术 | 20 |
| 9.6.1 纳米压印技术的典型工艺 | 20 |
| 9.6.2 纳米压印技术的演变工艺 | 20 |
| 9.6.3 纳米压印过程建模 | 20 |
| 9.6.4 纳米压印机 | 20 |
| 9.6.5 纳米压印技术的应用 | 20 |
| 9.6.6 纳米压印技术发展趋势 | 20 |

| | |
|--------------------------------|----|
| 参考文献 | 页码 |
| 第 3 章 微系统的检测技术 | 页码 |
| 3.1 扫描探针显微镜 (SPM) 测量技术 | 页码 |
| 3.1.1 扫描隧道显微镜 (STM) 测量技术 | 页码 |
| 3.1.2 原子力显微镜 (AFM) 测量技术 | 页码 |
| 3.2 三维微视觉检测技术 | 页码 |
| 3.2.1 三维视觉检测原理 | 页码 |
| 3.2.2 图像的分割 | 页码 |
| 3.2.3 微机构中三维视觉技术 | 页码 |
| 3.3 微构件中干涉检测技术 | 页码 |
| 3.3.1 迈克尔逊干涉系统 | 页码 |
| 3.3.2 双频激光干涉系统 | 页码 |
| 3.3.3 激光双焦干涉系统 | 页码 |
| 3.3.4 扫描白光干涉系统 | 页码 |
| 3.4 微结构材料特性检测技术 | 页码 |
| 3.4.1 残余应力和弹性模量的测量 | 页码 |
| 3.4.2 刚度和硬度的测量 | 页码 |
| 3.4.3 抗拉强度和失效应变的测量 | 页码 |
| 3.4.4 热导率和热扩散率的测量 | 页码 |
| 参考文献 | 页码 |
| 第 4 章 微系统的集成及控制技术 | 页码 |
| 4.1 微传感器系统 | 页码 |
| 4.1.1 压阻式压力微传感器系统 | 页码 |
| 4.1.2 力平衡式硅微加速度传感器系统 | 页码 |
| 4.2 微传感器信息融合 | 页码 |
| 4.2.1 两个参量的微传感器信息融合 | 页码 |
| 4.2.2 三个参量的微传感器信息融合 | 页码 |
| 4.2.3 阵列式气敏传感器的信息融合 | 页码 |
| 4.3 微传感器系统的自检、自适应、自学习 | 页码 |
| 4.3.1 微传感器系统的自检和自适应功能 | 页码 |
| 4.3.2 微传感器系统的自学习功能 | 页码 |
| 4.4 微致动器及其控制技术 | 页码 |
| 4.4.1 静电致动 | 页码 |
| 4.4.2 压电致动 | 页码 |
| 4.4.3 电磁致动 | 页码 |

| | |
|----------------------------------|----|
| 远图原 热致动器 | 原原 |
| 远缘 微进给驱动器及其应用 | 缘远 |
| 远缘原 压电陶瓷驱动器及其特点 | 缘远 |
| 远缘圆 压电陶瓷驱动器在步进扫描光刻机工件台中的应用 | 缘远 |
| 远匝 微电子组装技术及封装 | 匝远 |
| 远匝原 微电子组装技术 | 匝远 |
| 远匝圆 封装 | 匝圆 |
| 参考文献 | 匝原 |
| 第 苑章 典型微系统——芯片实验室 | 苑原 |
| 苑原 典型芯片实验室 | 苑原 |
| 苑圆 芯片实验室中的器件设计 | 苑远 |
| 苑原 著名的芯片实验室研究机构 | 苑圆 |
| 参考文献 | 苑原 |

第 1 章 微系统概述

1959年美国物理学家、诺贝尔奖获得者理查森·费曼在加州理工学院举行的全美物理学会年会上，作了题为“在底部建造”的报告，首先提出微型机械的设想^[1]。1960年硅微压力传感器问世，其主要部件是硅膜和压敏电阻，主要技术是体硅腐蚀工艺。其后，尺寸为微米级的齿轮、齿轮泵、气动轮及连接件等微型机构相继利用硅加工方法开发出来。1969年美国加州大学伯克利分校利用牺牲层腐蚀工艺和静电驱动研制出转子直径为微米级的硅微静电电动机，证明了硅微加工方法在制作三维可动机电系统上的可行性^[2]，如图 1-1 所示。

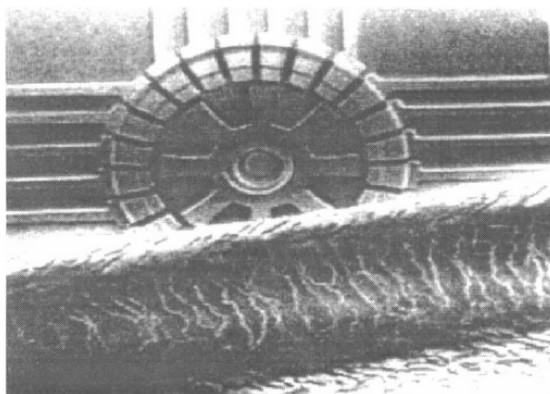


图 1-1 微静电电动机，为表明尺度的微小，在电动机的前面同时显示了一段人的头发丝^[2]

1984年 12 月 20 日，国际机器人和自动化委员会组织有关微系统的讨论会，许多微机电系统的先驱者参与了这次会议。从 1984 年到 1985 年，来自 12 个国家的 15 名科学家联名提出了“小机器，大机遇：关于新兴领域——微动力学的报告”的国家计划建议书，并声称：“由于微动力学（微系统）在美国的紧迫性，在这样一个新的重要技术领域，我国应该在与其它国家的竞争中走在前面”。其后，微机电系统的研究得到美国 NSF（国家自然科学基金会）和 DARPA（美国国防部先进研究计划署）的大力资助。在过去的十年中，发达国家政府部门和私营企业在该项新兴技术上投入了大量的资金^[3]。日本通产省自 1985 年度开始实施为期 5 年、总投资 100 亿日元的“微型机械技

理和控制电路，直至接口、通信和电源等于一体的微型器件或系统。它可分成几个独立的功能单元。物理、化学或生物信号输入，通过微传感器转换为电信号，经过信号处理（模拟的或数字的）后，由微执行器与外界作用。每一个微系统可以采用数字或模拟信号（电、光、磁等物理量）与其他微系统进行通信。图 猿原猿为一个完整的微系统结构图^[續]。

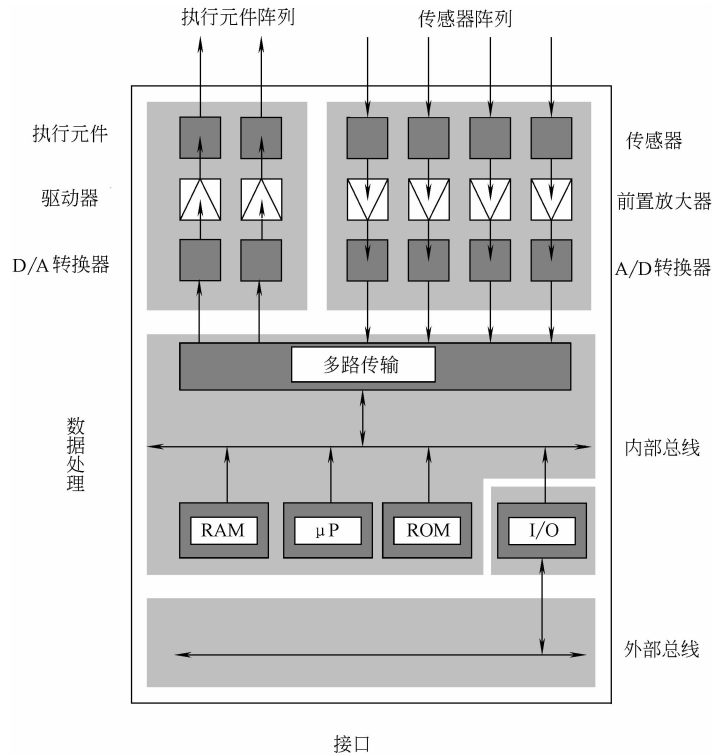


图 猿原猿 完整的微系统结构图^[續]

国际电技术委员会（~~国际电技术委员会~~）的定义概括了各国的共性：“微系统是微米量级内的设计和制造技术。它集成了多种元件，并适于以低成本大量生产。”由于微系统应用的广泛性，有人说它是一种设计制造微系统的技术平台、一类可用的物理产品和一种方法学。

微系统发展的目标在于，通过微型化、集成化来探索新原理、新功能的元件和系统，开辟一个新技术领域和产业。它可以完成大尺寸机电系统所不能完成的任务，也可嵌入大尺寸系统中，把自动化、智能化和可靠性提高到一个新的水平。总结微系统技术的现状和发展，可以大致归纳出以下一些特点^[远翔]：

源

员 微型化：体积小、重量轻、耗能低、惯性小、谐振频率高、响应时间短。

圆 材料：以硅为主要材料，其机械电器性能优良。强度、硬度和杨氏模量与铁相当，密度类似铝，热导率接近钼和钨。地球表面有 圆豫 的石英，几乎是取之不尽的。

猿 可批量生产：用硅微加工在一片硅片上可一次制造成百上千个微型机电装置，或制造出数个完整的微型机电系统，有利于大批量生产，降低生产成本。

源 集成化：把不同功能、不同敏感方向或致动方向的多个传感器或执行器集成于一体，或形成微传感器阵列、微执行器阵列，甚至把各种功能的器件集成在一体形成复杂的微系统，可以完成复杂的工作；微传感器、微执行器与微电子器件集成在芯片上构成可靠性和稳定性高的微机电系统，具有信号获取、处理和控制的功能。

缘 采用广泛的物理、化学和生物原理，如力、加速度、热、磁、电、浓度、活性等变量，通过光电、光导、压阻、压电、霍耳效应等变成电信号进行处理和 控制，并集约了当今科学技术发展的许多尖端成果。

远 微系统是纳米世界与宏观世界之间的中间媒介，可作为对纳米技术的研究工具和操作平台，也是纳米技术的主要应用对象之一。混合纳机械和微系统的可行性和高性能受到人们的关注。把纳系统和微系统结合或集成起来，可发挥更大的作用。

员圆 微系统的动力学及非线性特征

微系统有两个显著的特点：一是尺度效应所带来的微科学问题（微材料学、微力学、微摩擦学、微制造学、微电子学、微光学、微化学等）；二是多能域耦合所导致的多学科交叉问题（机、电、磁、热、光、声、化学、生物等功能的集成与信息的多重耦合）^[1]。这就迫使人们不得不致力于研究各个相关学科中的微观乃至微观的科学问题，以及在这种尺度上的相互作用，这也是微系统分析、设计、制造和运行的基础。由于上述两个特点，使得微系统非线性比常规宏观系统更为普遍，而这样的微系统的动力学问题除了与宏观系统的非线性动力学有相似的共性之外，也有一些固有的特殊性。

员圆员 微系统的力学特征

微系统力学属于细微尺度力学范畴，主要包括：微运动学与微动力学理论、力原电原热原光原磁原化学原生物耦合力学、微结构与材料力学理论、微摩擦学、微传热学、微系统的力学设计与优化理论、微测量技术^[2]。

在支配物理现象的所有作用力中，长度尺度是表征作用力类型的基本特征量。由于特征长度的微小化，在微系统中表现出静电力、表面张力、弹性力和线性力、重力、惯性力和电磁力。因此，在微系统中，与体力相比表面力起主要作用，特别是微系统中器件的表面积与体积之比很大，更加突出和强化了表面力和其他表面效应的作用。表面力是微系统中摩擦力的主要来源，尺度越小，相对摩擦力越大。因而摩擦力和黏性力成为微系统的主要问题^[1]。范德瓦耳斯力是微系统中另一种表面力，只要存在与其他表面的接触，这种力就有显著影响，如长而薄的多晶硅梁和大而薄的梳状驱动结构。

许多力学现象在宏观世界和微观世界中往往有很大不同。作为常规机械润滑用的润滑油在微机械里其黏性的影响变得很大；运动副中摩擦力可能不再与正压力成正比，而主要来自分子及原子间的相互作用；静电力在宏观系统中常被忽略，而在微系统中静电致动则成为最常见的驱动方式之一。

1.1 微系统的动力学特征

微系统动力学研究微系统在各种力作用下运动状态的定性和定量的变化规律。微系统涵盖面很广，以至于远远超出了微系统力学所能涉及的领域，如化学微系统、生物微系统等。因此，本书中微系统动力学的概念不仅限于微系统力学的框架内，而是一个广义的概念。

微系统动力学的特征与特征长度有关。不同量级特征长度的微系统的动力学甚至可能由具有本质区别的不同理论体系来描述。从物理学观点，微观微系统（ $\geq 1\mu\text{m}$ ）动力学可以认为遵守经典牛顿力学，我们可以用尺度分析；当分析细观微系统（ $100\text{nm} \sim 1\mu\text{m}$ ）的动态行为时，我们必须使用薛定谔方程（包括扩展的薛定谔方程）来考虑布朗分子运动的影响，并且不能进行尺度分析；而对纳观微系统（ $\approx 100\text{nm}$ ）则需要应用量子统计动力学^[2]。昆虫是微飞行器（微机器人）的很好例子，微飞行器与常规尺度飞行器的空气动力学特性显然不同，大型鸟类和飞机在较高雷诺数条件下利用升力飞行，而像蚊子、蜜蜂这类小昆虫以及微飞行器则是在低雷诺数条件下利用阻力飞行，因为在低雷诺数条件下阻力相对于升力占主导地位^[3]。

1.2 微系统动力学的非线性特征

在微系统中，存在着固有非线性（初始应力、大位移、热传输效应和非线性材料性质等）和通过耦合产生的非线性。此外，还存在一些尚未引起注意的机械非线性，包括大变形、表面接触、蠕变、时变质量和非线性阻尼。

多能域耦合是除了材料、几何等宏观系统常见的非线性因素外的一种非线性特征。微系统中的微致动器是把其他形式能量转换为机械能而产生微米级的

远

运动的微器件。目前，常用的微致动方式有：电磁致动、静电致动、压电致动、形状记忆合金致动、热致动、化学反应致动等。由于微致动中包含有电磁、静电、压电、热力等问题，所以，微动力学系统是一个力原电原磁原热等耦合的非线性系统，而且多数属于强耦合非线性。多能域耦合问题是不同微系统装置系统水平模拟的核心。微传感器至少包括两个能域，且常常包括源-缘个能域^[58]。例如，靠电容传感的准静态加速度计是弹性、惯性力学、静电学和流体力学几个域的交叉，除很小的运动情况外，这些耦合是固有的非线性。图 1-1 为微系统技术所包含的学科和内容^[59]。



图 1-1 微系统技术所包含的学科和内容^[59]

1.2 微系统的应用前景

微系统的应用主要集中在三个方向：微传感器（MEMS）、微致动器（MEMS）和微系统（MEMS）。

微传感器具有体积小、质量轻、响应快、灵敏度高和成本低的优势。目前开发的微传感器可以测量各种物理量、化学量和生物量，例如位移、速度、加速度、压力、应力、应变、声、光、电、磁、热、黏度、离子浓度及生物分子浓度等^[1]。

微致动器用于提供各种运动和控制。目前应用的微致动器主要有微型电动机、微型镊子、微型泵、微型阀及微型光学器件、打印机喷头和硬盘磁头等^[2]。

将微传感器、微致动器及相关的信号处理和电路集成在一起，能完成一定功能的微系统是研究的最终目标。数字化微镜器件、光谱分析系统、微传输系统和微流量控制系统是正在研究的几种微系统^[3]。

微系统的快速发展只不过十多年的时间，却已在各个应用领域显示出强大的生命力，甚至单个种类的微器件就形成了一个较大规模的产业，如硅微加速度计、喷墨打印头、硅微压力传感器等。随着各种微细加工技术的发展，在各个学科领域里都涌现出新的微器件，如汽车工业中，微加工的加速度传感器广泛用于控制安全气囊的打开，压力传感器用于控制发动机的燃烧状况^[4]。根据市场研究公司 Yole Développement 发布的报告，美国 MEMS 市场（包括 MEMS 制造设备）市场从目前至 2015 年间的复合平均年增长率将超越 15%，在 2015 年度达到 100 亿美元的规模。虽然目前 MEMS 市场仍由少数器件主宰，如压力传感器、加速度计、喷墨打印头、数字微镜等，但微传感器的发展将要替代相当一部分现有传感器，而信息微系统和生物微系统将有突破性的发展，如生物芯片、微流控芯片、光通信和无线通信微器件和系统等。自从 1995 年美国发表了“MEMS 国防部两用技术工业评估最终报告”，更多的研究机构对 MEMS 军事应用寄予厚望。西方科学家预计：在 5 年内，微型军备就将服役。

MEMS 在微型化、集成化的发展过程中为探索新原理、新功能的器件或系统开辟了新的技术领域和产业。MEMS 的发展将极大地促进各类产品的袖珍化、微型化与便携化，它可以成数量级地提高器件与系统的功能密度、信息密度与互联密度，因而能大幅度地节能、节材。面对 21 世纪，MEMS 将逐步走向实用化，并被广泛地用于国防、航空、航天、通信、环保、生物工程、医疗、制造业、农业和家庭。图 1.2 为微系统从基础到应用的结构图^[5]。

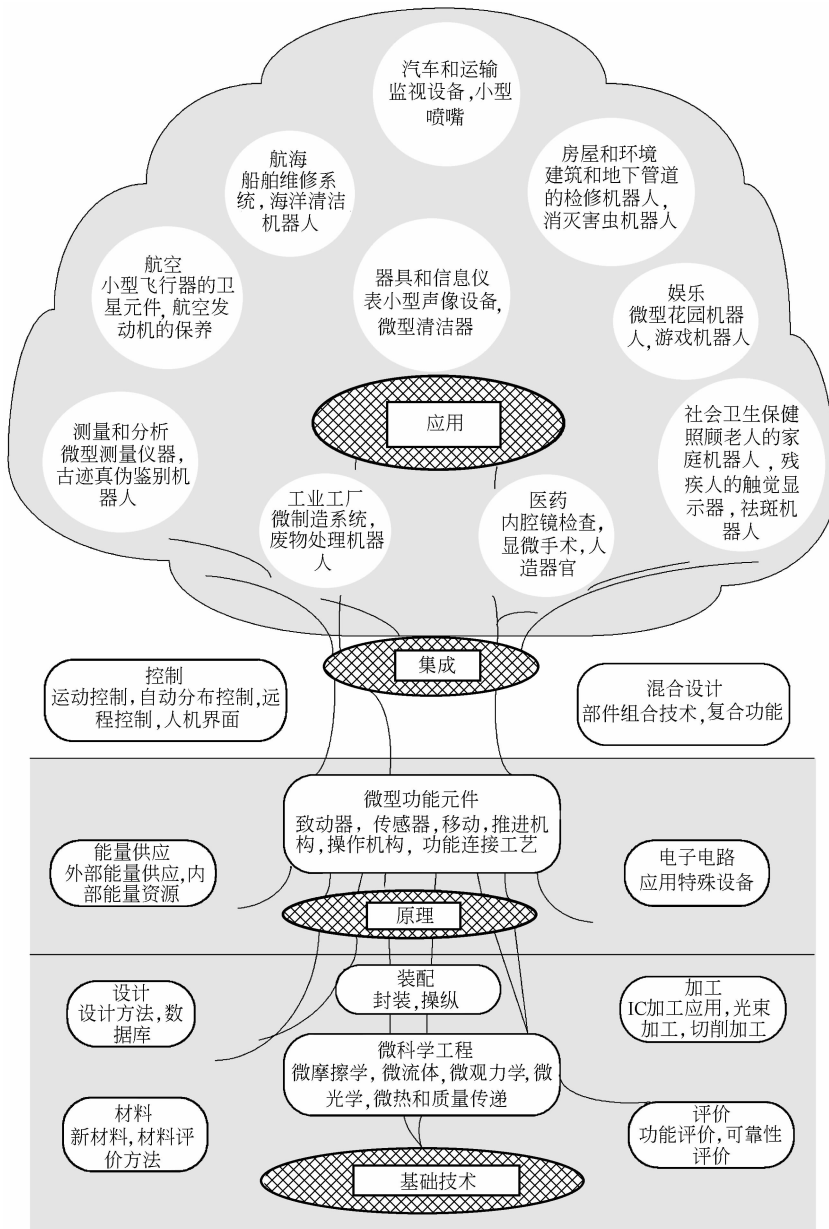


图 员景缘 微系统从基础到应用的结构图^[16]

第 10 章 微尺度理论及效应

微尺度理论是以微尺度效应的产生机理、影响、控制和应用为主要研究对象的学科。当物体尺度的减少所导致的区别于常规尺度下的新现象、新规律可归因于微尺度效应。新规律和新现象的产生必然有其物理上的内在原因。尺度效应的物理机制可分为两大类：当物体的尺度与载能粒子的平均自由程相当或更大时，常规尺度下的连续介质假定不再成立，如描述流动和传热的 Navier-Stokes 方程、傅立叶定律也不再适用，此时的尺度效应的物理机制称为第一类。第二类的情况有很大不同，物体的尺度还没有小到连续介质假定不能成立的程度，所有常规尺度下的基本方程和定律仍然适用，只是由于尺度的减小，使得影响物理量的各因素的相对重要性发生了变化，从而出现新的现象和规律。目前，微系统技术中所遇到的微尺度效应的物理机制基本上属于第二类。微尺度理论的研究主要是面向材料、微器件和微系统。其基本框架涵盖了材料、物理、热学、力学、电子等多个学科，其中研究得比较深入的有以下几个学科。

10.1 微尺度固体力学

近年来，随着人们对固体材料强度和破坏机理研究和探索的不断深入，同时也随着实验技能的不断提高，人们对材料力学行为的认识已由宏观层次逐步向着细、微观层次不断深入。通过对一些新现象的探索和研究，例如对金属材料在细观层次所表现出的尺度效应的研究，已经带动了一个新的、更精细的并计及尺度效应的唯象学理论——塑性应变梯度理论的提出、不断完善及进一步应用，在此基础上，结合材料破坏的细观结构断裂过程区模型，可刻划出材料由细观微结构特征到宏观力学行为的全过程^[1]。

塑性应变梯度理论的结构特征可简述为：在传统弹塑性理论的框架下，增加考虑位移二阶导数项（应变梯度项）的影响（以不变量形式出现在本构关系中），而这些应变梯度不变量与传统应变不变量之间在长度量纲上将存在差异，为此，在本构关系中引入了若干个长度参量对两者进行量纲匹配，而由这些长度参量刻划上述金属材料在微米层次所表现的尺度效应；在传统弹塑性理论可适用的范围，应变梯度项的影响可忽略不计。为了保持理论的完整性，也相应地定义了与应变梯度功共扼的应力梯度量，并发展了适合应变梯度情况的数值方法。应用塑性应变梯度理论可以有效地刻划金属材料在微米层次所表现出的尺度效应，同时