

杜善义 冷劲松 王殿富 著

智能材料 系统和结构



科学出版社
Science Press

7/122201
1.12

智能材料系统和结构

杜善义 冷劲松 王殿富 著

科学出版社

2001

内 容 简 介

本书内容涉及智能材料的概念和研究现状、智能材料系统和结构中的传感器和作动器、电流变体材料及其智能结构、电流变体材料器件应用、光纤智能材料和结构、智能复合材料结构的振动主动监控以及复合材料成型过程的智能监控等。每章后均附有参考文献供读者查阅。

本书可供从事智能材料、复合材料的工程人员参考，也可作为相关研究人员及研究生的参考书和教材。

图书在版编目 (CIP) 数据

智能材料系统和结构/杜善义, 冷劲松, 王殿富著. - 北京: 科学出版社, 2001. 5

ISBN 7-03-008123-4

I. 智… II. ①杜… ②冷… ③王… III. 智能材料-基本知识
IV. TB381

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2000) 第 61448 号

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

丽源印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2001 年 5 月第 一 版 开本: 850×1168 1/32

2001 年 8 月第一次印刷 印张: 10

印数: 1—2 500 字数: 260 000

定价: 26.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换〈新欣〉)

前 言

智能材料系统和结构是当今材料科学技术发展的前沿和热点，它除了具有普通结构材料的承载功能外，还具有传感、分析、判断、执行等综合功能，是一种具有“生命”功能的材料。正因为如此，世界各国的国防、工业部门对智能材料非常重视并投巨资开展该领域的研究。经过近 10 年的发展，智能材料和结构在航空、航天等国防及民用工业领域的应用得到很大发展，已从基础性研究逐步发展到原理性样机及实用化阶段。

我们知道，“智能”是人和动物所具备的一种能进行分析、判断和动作的高级智慧能力。20 世纪 80 年代末期，科学家们首先将“智能”概念与材料及结构相结合，提出智能材料和结构的概念，这就为材料科学的发展提供了一个崭新的研究方向。智能材料结构和系统通常包括传感器、作动器、中央处理器、通信网络和母体材料等五个主要部分，用埋入母体材料的传感器对外界环境变化进行监测，并将此信息通过通信网络实时地反馈到中央机中，经过进行分析、判断并发出动作指令给作动器，对环境的变化作出及时的响应。智能材料和结构涉及材料、电子、光学、力学、信息等多学科的综合性研究领域，它的发展也将带动这些相关学科的发展。

哈尔滨工业大学智能材料系统和结构中心从 1992 年开始进行智能材料和结构的研究，以“材料-结构-系统”一体化的思想，从材料的制备、结构的复合到系统的综合进行研究。研究内容包括光纤传感器、电流变体作动器、智能结构振动主动监控系统、复合材料工艺在线监控系统、电流变体减振器、隔振器、复合材料工艺设计系统等，并取得了一定研究成果。其中“智能复合材料结构及其振动主动监控系统研究”获 1997 年航天总公司

科技进步一等奖，目前正努力使电流变体材料及其主动控制器件研究达到实用商品化。

智能材料系统与结构作为多学科交叉领域，内容极为丰富，学术思想非常活跃，新颖观念日新月异，力图覆盖其全貌决非易事。本书所述的内容仅反映了哈尔滨工业大学智能材料系统和结构中心以及国内外近年在智能材料和结构有关领域的研究成果。本书由浅入深，从智能材料和结构的概念，论述到当前典型的智能材料和结构，最后，论述其在不同领域的应用实例等。为了读者查阅和引用方便，每章后面均列出了与该章有关的参考文献。本书确是一本关于智能材料系统和结构研究的专著，可作为从事复合材料、力学、光学、信息科学、化学和有关工程研究人员的参考书。

作者特别感谢张博明副教授，刘彦菊、杨万忠、李辰砂和陈吉安博士，本书许多章节为他们博士学位论文的内容。在写作过程中他们还花了大量时间和精力协助打字和校对，没有他们的努力和贡献，本书是很难完成的。作者也十分感谢美国 Vermont 大学 Peter Fuhr 教授和 Dryver Huston 教授为本书有关章节提供了宝贵的研究资料。

本书在立题和编辑出版过程中，一直得到科学出版社的帮助与支持，深表感谢。

作者期望本书能够传播和推动智能材料在中国应用和发展，但由于作者水平有限，一定存在诸多不足和错误之处，恳请读者不吝指正。

目 录

第一章 绪论	(1)
1.1 智能材料系统和结构的概念	(1)
1.2 智能材料系统和结构的研究现状与应用前景	(6)
1.3 智能材料系统和结构的研究范围和发展趋势	(11)
第二章 智能材料系统和结构中的传感器和作动器	(15)
2.1 概述	(15)
2.2 光纤传感器	(17)
2.2.1 光纤传感器的结构原理及分类	(17)
2.2.2 智能材料系统和结构中常用的光纤传感器	(26)
2.3 压电材料	(38)
2.4 形状记忆材料	(42)
2.5 电流变体材料和磁流变体材料	(45)
2.6 磁致伸缩材料和电致伸缩材料	(49)
第三章 电流变体材料及其智能材料结构	(52)
3.1 概述	(52)
3.1.1 电流变学的发展背景	(52)
3.1.2 电流变材料的发展现状	(54)
3.1.2.1 无水电流变体	(54)
3.1.2.2 复合型电流变体	(55)
3.1.2.3 单相电流变体	(56)
3.2 电流变效应及其产生机理	(57)
3.2.1 纤维化理论	(58)
3.2.2 “水胶”理论	(59)
3.2.3 双电层极化理论	(60)
3.2.4 介电极化机理	(62)
3.3 电流变效应的动态模拟	(65)

3.4	电流变体的研制及其特性	(71)
3.4.1	影响电流变体性能的因素	(72)
3.4.2	电流变体的组分要求	(74)
3.4.2.1	电流变体的连续相	(75)
3.4.2.2	电流变体的分散相	(77)
3.4.2.3	电流变体的添加剂	(81)
3.4.3	电流变体的性能评价	(83)
3.5	电流变体对智能材料结构振动特性的影响	(90)
3.5.1	含电流变体智能层合梁结构的振动特性	(91)
3.5.2	含电流变体智能层合板结构的振动特性	(104)
3.6	电(磁)流变体材料的工程应用	(107)
第四章	电流变流体材料器件及其在工程中的应用	(112)
4.1	电流变流体器件设计及其影响因素	(113)
4.1.1	无电场时的 ER 流体	(113)
4.1.2	外加电场时的 ER 流体	(115)
4.1.3	ER 流体驱动电源的要求	(117)
4.2	电流变流体隔振器的研究	(119)
4.2.1	电流变流体隔振器的基本模型	(120)
4.2.2	电流变流体隔振器的性能测试	(125)
4.2.3	电流变流体隔振器的主动控制	(128)
4.3	电流变流体的减振器研究	(133)
4.3.1	电流变流体减振器结构设计的研究现状	(135)
4.3.1.1	基于剪切模式的滑动电极式减振器	(135)
4.3.1.2	基于流动模式的固定电极式减振器	(136)
4.3.1.3	基于复合模式的滑动电极减振器	(137)
4.3.1.4	基于剪切模式的盘形电极减振器	(137)
4.3.1.5	挤压膜减振器	(139)
4.3.2	滑动电极 ER 流体减振器的设计与性能测试	(140)
4.3.3	新型结构电流变体减振器的设计与性能测试	(146)
4.3.3.1	原理及设计	(146)
4.3.3.2	电流变流体减振器性能的计算机模拟	(149)
4.3.3.3	电流变流体减振器性能的实验研究	(153)

4.4 含电流变流体减振器半主动悬挂系统的研究	(158)
4.4.1 车辆悬挂系统的研究进展	(158)
4.4.2 含半主动智能悬挂系统的车辆减振特性分析	(160)
4.4.2.1 系统建模	(160)
4.4.2.2 振动方程的统计线性化	(164)
4.4.2.3 振动统计量的求解	(167)
4.4.2.4 典型算例分析	(167)
第五章 埋光纤智能材料和结构的研究	(174)
5.1 概述	(174)
5.2 光纤传感器与复合材料兼容性的研究	(176)
5.2.1 埋光纤对智能复合材料力学性能的影响	(176)
5.2.2 光纤传感器的耐用性	(182)
5.3 光纤智能材料和结构的工艺技术研究	(184)
5.4 智能材料和结构系统中的光纤传感器的研究	(190)
5.4.1 用于智能材料和结构系统的光纤振动传感器的研究	(190)
5.4.1.1 端口耦合式光纤振动传感器	(190)
5.4.1.2 基于多模光纤模斑分析的光纤振动传感器	(195)
5.4.2 用于智能材料和结构系统的光纤模斑温度传感器	(204)
5.5 埋光纤智能材料和结构的应用	(206)
5.5.1 光纤智能结构损伤监测系统的研究	(206)
5.5.2 光纤智能建筑结构的应用	(212)
第六章 智能复合材料结构的振动主动监控	(220)
6.1 概述	(220)
6.2 基于模糊逻辑的智能复合材料结构振动主动监控系统	(224)

6.2.1	模糊关系及模糊控制研究	(224)
6.2.1.1	模糊关系	(224)
6.2.1.2	模糊控制	(225)
6.2.2	智能复合材料结构振动主动监控系统	(227)
6.2.2.1	时域信号的振动主动监控	(228)
6.2.2.2	频域信号的振动主动监控	(228)
6.3	基于神经网络的智能材料结构的振动主动控制	
		(235)
6.3.1	人工神经网络的类型和主要特点	(235)
6.3.1.1	神经元模型	(236)
6.3.1.2	多层前向神经网络的基本结构	(237)
6.3.1.3	神经网络的非线性映射能力	(238)
6.3.1.4	神经网络在控制中的主要作用	(240)
6.3.2	悬臂梁结构的振动控制	(241)
6.3.2.1	控制系统及分析	(241)
6.3.2.2	悬臂梁振动控制系统分析	(242)
6.3.2.3	神经网络在振动控制中的应用	(245)
6.3.2.4	神经网络的设计	(246)
6.3.3	含电流变流体的智能材料结构神经网络振动主动控制	
		(247)
6.3.3.1	反向传播 (back propagation, BP) 算法	(248)
6.3.3.2	BP 算法的改进算法	(252)
6.3.3.3	神经网络训练样本的选取和训练	(255)
6.3.3.4	神经网络的测试	(257)
第七章	复合材料成型过程的光纤在线实时监控	(260)
7.1	树脂基复合材料成型过程的基本模型	(261)
7.1.1	热-化学模型	(264)
7.1.2	树脂流动-纤维作用模型	(265)
7.1.3	气泡活动模型	(268)
7.1.4	残余应力模型	(270)
7.2	光纤固化监测传感器的研究现状	(272)
7.3	应用多模模斑谱光纤传感器监测复合材料固化	

过程.....	(277)
7.3.1 多模光纤的模斑功率谱密度.....	(281)
7.3.2 模斑谱光纤传感器机理及验证.....	(283)
7.3.3 应用多模模斑谱光纤传感器监测复合材料的固化	(286)
7.4 应用光纤微弯传感器监测复合材料固化过程	(289)
7.4.1 光纤微弯传感器原理.....	(289)
7.4.2 复合材料固化过程的实时监测.....	(292)
7.5 复合材料成型工艺过程在线控制专家系统.....	(296)
7.5.1 复合材料成型过程的优化设计.....	(296)
7.5.2 复合材料成型工艺过程的专家系统.....	(300)

第一章 绪 论

1.1 智能材料系统和结构的概念

可以用材料做成构件或器件.材料与信息、能源并列为人类赖以生存,现代文明赖以发展的三大支柱.人类历史经历了石器时代、青铜器时代,以及后来的铁器时代等,每一个时代的发展和变迁,都伴随着材料科学技术的进步.20世纪初,合成材料尤其是复合材料的出现,使材料科学的发展取得了突破性的进展,复合材料具有强度高、重量轻、耐腐蚀等优点,广泛应用于航空、航天、汽车、建筑等许多工业领域.20世纪80年代以来,现代航天、航空、电子、机械等高新技术领域取得了飞速的发展,人们对所使用的材料提出了越来越高的要求,传统的结构材料或功能材料已不能满足这些技术的要求,材料科学的发展由传统的单一的仅具有承载能力的结构材料或功能材料,向多功能化、智能化的结构材料发展^[1].80年代末期,受到自然界生物具备的某些能力的启发,美国和日本科学家首先将智能概念引入材料和结构领域,提出了智能材料和结构的新概念,如图1.1所示.一般认为,智能是相对人和动物而言的,是一种能获取、存贮知识并运用知识解决问题的能力.顾名思义,所谓智能材料与结构即一种对所给的特别的激励能进行判别并按预定方式做出反应的材料,这样的材料可以是自然产生的或由人工引入多种性能产生的智能系统.智能材料在一定意义上具有感知功能、信息处理功能和执行功能,即具有获取、识别、处理和执行信息之能力,并且可以自动调解并具有自诊断、自适应、自修复、损伤抑制、寿命预报等能力,表现出动态的自适应性^[2~4].

目前国外对于智能材料和结构采用了多种词汇进行表述,如:

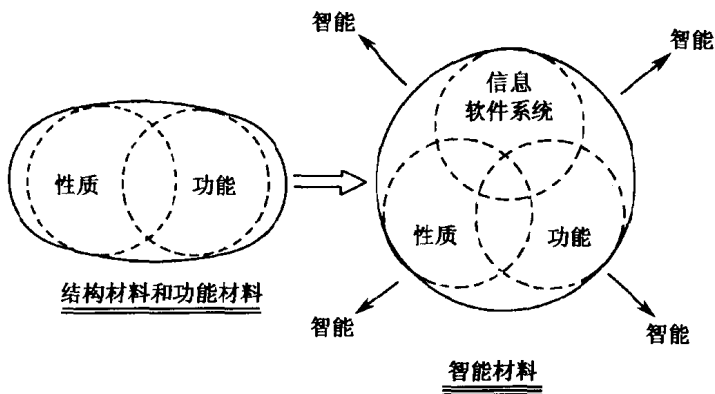


图 1.1 智能材料和结构与普通材料的区别

smart materials, intelligent materials, smart structures, intelligent structures, adaptive structures 等. 国内目前对此翻译尚未统一, 出现了多种译法, 如智能材料、机敏材料、聪敏材料、智能结构、灵巧结构、自适应结构等, 并且一些有关文章将智能结构和智能材料均统一称为“智能材料”. 单纯从词汇来理解, “smart”可以表示灵活、机敏、迅速感觉、机智、聪敏等, 而“intelligent”则可表示具有学习、预测、建立关系、推理、决策等更具抽象思维的能力. 因此, “intelligent materials”比“smart materials”要复杂和高级, 是仿生命功能的材料和结构. 图 1.2 为典型的智能材料和结构的示意图.

简而言之, 所谓智能材料一般是指以最佳条件响应外界环境变化, 且按这种变化显示自己功能的材料. 它们可以感到外界环境的变化, 并针对这种变化作出瞬时主动响应, 具有自诊断、自适应、自修复和寿命预报以及靠自身驱动完成特定功能(如振动控制)的能力. 智能材料和结构密切相关, 互为一体, 因此确切说法应为智能材料系统和结构(简称智能材料). 它是材料科学、人工智能、信息科学、机械科学、生物科学、化学和物理等学科高度发展的产物, 也是这些学科的交叉. 目前所讲的智能材料, 通常是宏观意义上的智能材料, 即所谓智能材料系统与结构, 它包括以下五部分: 母体

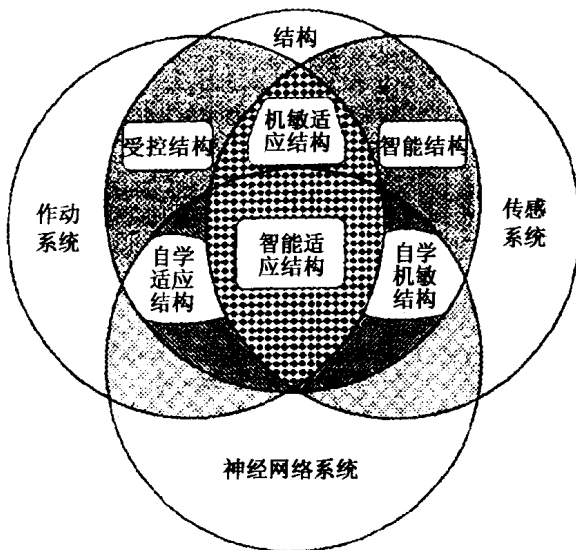


图 1.2 智能结构概念示意图^[5]

材料；传感器；作动器；通信网络；中央处理器等，如图 1.3 所示。其工作原理为，当外界环境发生变化时，结构状态会发生一定的变化，此时通过结构内的传感器可以收集到结构状态变化的信息，并将此信息通过通信网络传输给中央处理器进行处理解释，中央处理器根据解释结果发出指令给作动器，使结构状态发生变化以适应环境的变化。传感器的主要功能是感知外界环境条件以及材料自身所发生的变化，被感知的变化参数是多种多样的，如环境的温度、压力、湿度，结构的位移、速度、加速度、应力、应变，材料内部的损伤、裂纹，光、电、磁信号的变化等。中央处理器的任务是对传感器的信号进行处理、分析并做出决策，发出相应的控制信号给作动器，中央处理器主要包括高速 CPU 硬件和人工智能软件。作动器可以根据中央处理器发出的信号作出相应的响应，从而达到调整结构状态的目的。这种响应通常是改变智能材料结构的形状、尺寸、力学、光学性能，或其他物理性能。通信网络通常是用于连接传

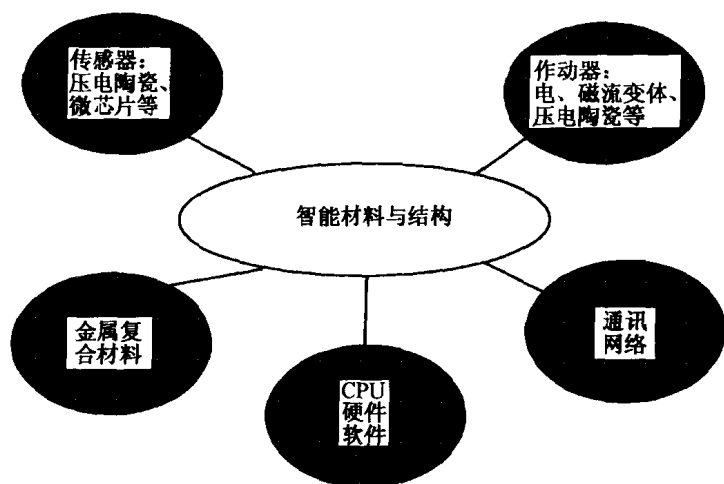


图 1.3 智能材料系统与结构

传感器、控制器和作动器的介质,可以选用金属导线、导电薄膜、光纤等,通信网络的结构要依赖于传感器与作动器的选择,既要考虑到信号传送的可靠性,也应顾及布线对智能结构的影响.通常选用的母体材料为纤维增强复合材料,这是因为该材料更适合工艺中实施将各种传感器、作动器等埋入结构内部,目前也开发出将光纤传感器在高温下埋入金属基复合材料中的方法.目前用于智能结构的传感器主要包括压电材料传感器、电阻应变计、微芯片传感器、光纤传感器等.压电传感器的压电性是指电介质在压力作用下发生极化而在两端表面间出现电位差的性质,该类传感器就是利用压电材料的这一特性实现机械信号向电信号转换.作为传感器,压电材料一般有压电晶体、压电纤维、压电陶瓷和压电聚合物等.电阻应变计具有结构简单,成本便宜,且技术上成熟的优点,但由于其难于埋入结构内部,只适用于贴在结构表面,因此应用于智能材料系统和结构中较为困难.计算机的一些微芯片也可作为传感器,但由于微芯片的不连续,故使用该传感器需要许多连接导线,造成布线复杂、不易埋放等问题,且不能耐高温和固化中压力,这些均

限制了微芯片的应用. 光纤传感器是 70 年代末期才提出的一种新型传感器, 由于其体积小、质量轻、灵敏度高、动态范围大等特点, 可用于易燃、易爆、高电场及强磁场等恶劣环境中, 并且由于其与复合材料结构的良好兼容性, 使其可以方便地埋入复合材料中, 成为智能结构用传感器的首选材料. 目前应用的作动器主要包括压电材料 (piezoelectric material)、形状记忆材料 (shape memory material)、电致伸缩材料 (electrostrictive material)、磁致伸缩材料 (magnetostrictive material)、电流变流体材料 (electrorheological fluid, ERF)、磁流变流体材料 (magnetorheological fluid, MRF)、电致主动聚合物 (electro-active polymer, EAP) 等. 这些材料各有优缺点, 比如压电材料、电(磁)致伸缩材料产生的作动力较小, 形状记忆材料存在滞后响应的问题等, 其中电(磁)流变体材料和电致主动聚合物材料由于具有响应速度快、作动力大的优点, 因此较适合用于智能结构的主动振动控制中^[6~10].

智能材料和结构的分类方法很多, 按使用母体材料的种类可以分为非金属系智能材料(包括智能复合材料、高分子系智能材料)、金属系智能材料等, 按照材料的智能特性又可以分为: 可以改变材料特性(如力学、光学、机械)的智能材料; 可以改变材料组分与结构的智能材料; 可以监测自身健康状况的智能材料; 可以进行自我调节的智能生物材料(如人造器官、药物释放系统); 可以改变材料功能的智能材料等. 其中高分子系智能材料主要是高分子凝胶, 即三维高分子网络与溶剂组成的体系, 高分子网络的交联结构使它不能溶解而保持一定的形状, 而分子链上的一些亲溶剂基团又使其被溶胀达到某一平衡体积. 溶胀的推动力与大分子链和溶剂分子间相互作用、网络内大分子链的相互作用以及凝胶内和外界介质间离子浓度差所产生的渗透压相关. 智能高分子凝胶主要用于层压材料的极性、非极性材料的粘合.

1.2 智能材料系统和结构的研究现状与应用前景

现代航空、航天、舰船、原子能、交通、机械、建筑等工业领域的发展,使得原来应用的各种材料,除了具有使用功能外,还要求具有安全性,即具有实现自诊断、损伤抑制、自修复和寿命预报等功能^[11,12].智能材料和结构则完全可以实现这些要求,智能材料和结构的概念一经提出,立即引起美国、日本及欧洲等发达国家重视,并投巨资成立专门机构开展这方面研究.智能材料的研究最早开展于美国,1984年美国陆军科研局首先对智能旋翼飞行器的研究给予赞助,要求研制出能自适应减小旋翼叶片振动和扭曲的结构.随后,在美国国防部 FY92 - FY96(即代号 UR1)计划的支持下,美国陆军科研局和海军科研局对智能材料研究给予了更大资助,对其进行了更广泛的研究.陆军科研局侧重于旋翼飞行器和地面运输装置的结构部件振动、损伤检测、控制和自修复等,而海军科研局则计划用智能材料减小潜艇的振动噪声,提高其安静度.美国空军也于 1989 年提出宇航器智能蒙皮的研究计划,即 PEN-VAL 计划^[13],并将其落实在美国空军科研预测 II 中,确定为急需发展的、有创造性的项目,该项目的目标是在 2002~2003 年完成整体装有智能蒙皮飞机的飞行试验.同时,原美国战略防御计划局(SDIO)也提出将智能结构用于“针对有限攻击的全球保护系统”(GPALS)中,解决天基自主监视和防御系统难于维护及结构振动扰动等问题,以提高其对目标的跟踪和打击能力.美国的各大学和公司,如波音飞机公司、麦道飞机公司等也都投巨资开展智能材料的研究,继美国之后,日本、英国、加拿大、法国、德国等国家相继组织大学和科研机构进行该领域的研究.加拿大在其雷达卫星(radarsat)的合成孔径雷达(SAR)天线结构上采用智能材料,对其形状和振动进行监控.日本科技厅在其科技发展预测报告称,将在 2010 年开发出具有识别、传递、输出和环境响应功能的智能材料^[14,15].

目前,智能材料的研究经过基础性研究与探索,已在基本原理、传感器研制、作动器研制、功能器件与复合材料之间匹配技术、智能材料成型工艺技术、智能材料在特殊环境下的性能评价、主动控制智能器件等方面开展了许多工作,取得较大突破.并且,已经从基础性研究进入到预研和应用性研究阶段,预计在 2000 年以后将在一批实际结构上局部应用,在 2010~2020 年智能材料的研究将全面实用化,从实验室研究进入实际结构全面实用阶段.

智能材料和结构的研究目前主要有两条技术路线.一条是美国提出的将传感器、处理器和致动器埋入结构中,通过高度集成制造智能结构,即所谓智能结构.另一条是日本提出的将上述智能结构中的传感器、致动器、处理器与结构的宏观结合变为在原子、分子层次上的微观“组装”,从而得到更为均匀的物质材料,如图 1.4 所示,即所谓智能材料.创造人工原子(artificial atoms)并实现其三

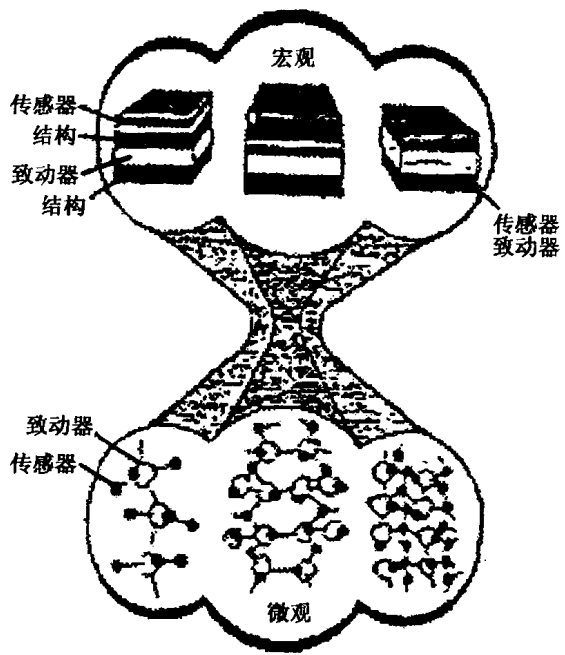


图 1.4 智能结构和智能材料