

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

<http://www.sciencep.com>

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

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:

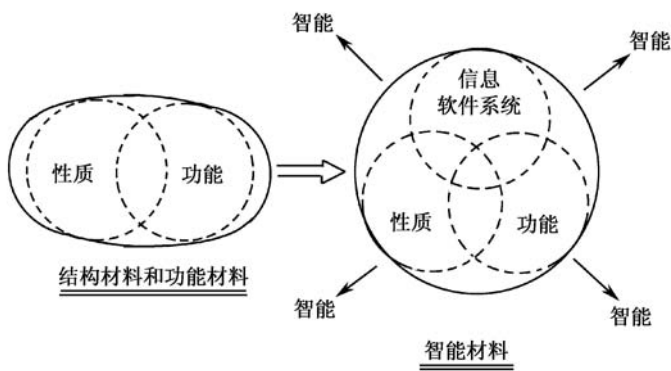


图 1.1 智能材料和结构与普通材料的区别

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

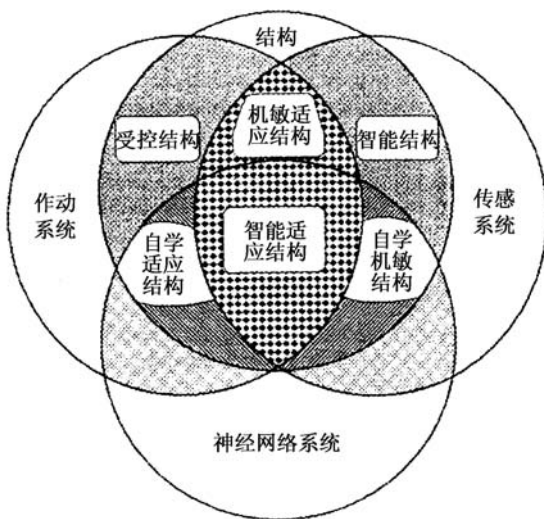


图 1.2 智能结构概念示意图^[5]

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

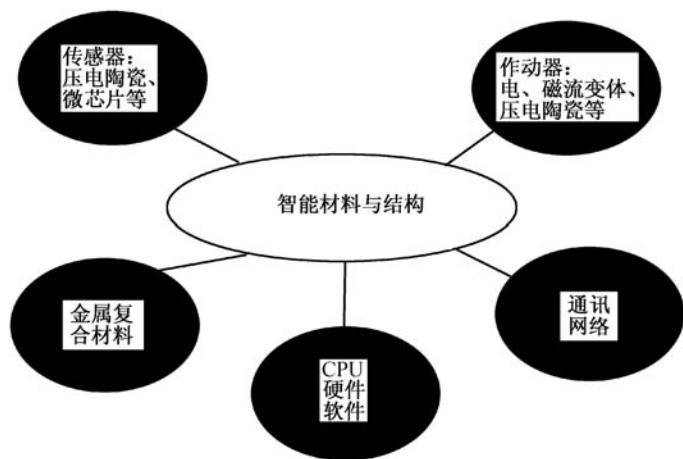


图 1.3 智能材料系统与结构

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 PENVAL 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中称,将在 2010 年开发出具有识别、传递、输出和环境影响功能的智能材料^[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

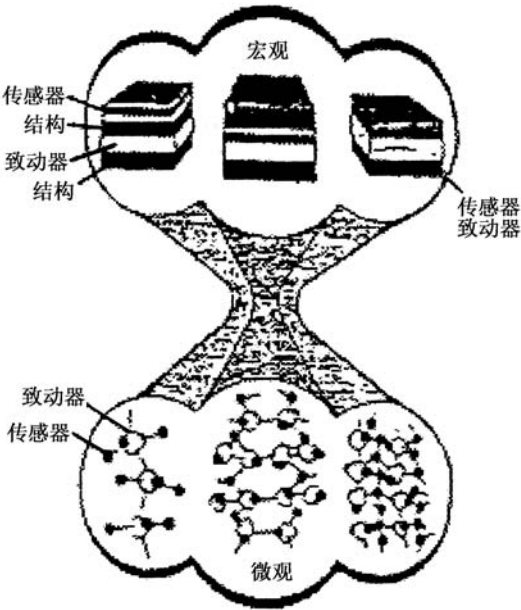


图 1.4 智能结构和智能材料

维任意排列,是人工材料的极限,也是智能材料的最终目标^[16,17]。目前,该方面的研究处于基础理论研究阶段,主要集中在理论研究、设计和制造、分析与表征、其他支撑技术的开发等。其中理论研究在于建立用来阐明智能材料的各种功能和结构性质以及进行合理设计的科学可行的理论,建立理论模型并预测智能材料的功能和行为;设计和制造研究之目的是发展一种制造和设计密切结合的“设计-制造”方法,从而实现在结构的立体构造上进行设计并预测必要特性和基本智能的设计制造手段。将使用超级计算机通过计算机辅助设计(CAD)技术确定单原子或单分子在结构中的位置,并利用CAD技术各个层次上进行有效的结构设计,目前使用超级计算机已可优化和促进与相转变现象相关的成分和条件。分析与表征技术将用来评价智能材料的结构和特性,预测新现象和新功能,分析与表征技术和实验技术对智能材料的制造极为重要,这些技术包括扫描隧道显微镜(STM)、原子间力显微镜(AFM)、质子-电子谱技术、电子光谱技术、X射线技术等。其他相关的技术包括用于设计制造的计算机技术、数据库技术、超纯材料制备技术、极限条件下非平衡态的测定技术等^[18~20]。

国外在微观水平智能材料的制备方面至少采用了两种不同的思路^[21]。其一是以生物材料为蓝本,力图将传感、处理和致动功能结合在一个集团中形成一种均匀的材料,其类似一个神经元(见图1.5(a))。制备智能材料的另一思路是采用集成电路的制备思想。通过在原子或分子水平上实现材料的设计和结构控制,来达到传感、处理和致动功能的系统化并制备出具有信息和软件内涵的材料。按照这种思路可制备复杂、多层、高度有序的智能材料(见图1.5(b))。采用这一思路制备智能材料时,将有可能利用如凝胶、Langmuir-Blodgett技术等化学手段,以及离子束沉积和注入,激光熔融和烧蚀,等离子刻蚀,化学气相沉积等物理手段来实现。当前的科学技术手段已能够在单分子或单原子水平上实现分子或原子排列的设计和控制(如应用Langmuir-Blodgett技术进行分子排列和组装),并已在原子和分子水平杂混结构控制、原子(分子)簇和

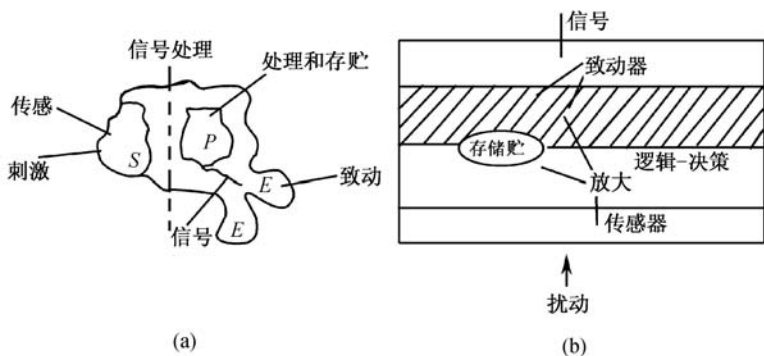


图 1.5 智能材料可能的制备方案

原子、分子聚集体的功能控制、超晶格、高分子凝胶相变、物质的非平衡性与智能的关系等方面进行了广泛的研究;已掌握了在原子、分子层次上进行精确分析和表征的现代技术方法和手段(如利用具有原子分辨率的扫描隧道显微镜 (STM) 和原子力显微镜 (AFM) 技术),并且在材料结构的计算机辅助设计等各个方面都有重大进展^[20,22]。

宏观智能材料即智能结构的研究开展得更为广泛,主要侧重于通过形成的智能结构,对结构进行健康监控、形状控制和改变、振动控制、损伤抑制和修复、工艺过程监控、精确定位等,在航空、航天、舰船、交通、能源、汽车、建筑、机械、电子等军用和民用领域具有广泛的应用前景:

(1) 复合材料以其优异的性能已经得到广泛的应用,但由于工艺上的分散性,其质量难以得到保证.而埋入光纤传感器的智能结构则可以解决这一问题.通过光纤传感器可以监测复合材料成型过程中内部的固化温度、应力、黏滞度、湿度等工艺参数,从而实现其工艺过程的在线式监测,并及时改进固化工艺,提高复合材料制品的可靠性^[23]。

(2) 宇航飞行器、空间站结构的无损检测主要基于 X 射线照相技术、超声波、涡流技术等,这些方法仪器昂贵,且不准确,维护

的时间过长,费用很高.而埋有光纤传感器的智能结构则可以完成从飞行器的制造到使用过程的在线健康监控,如图 1.6 所示^[5].

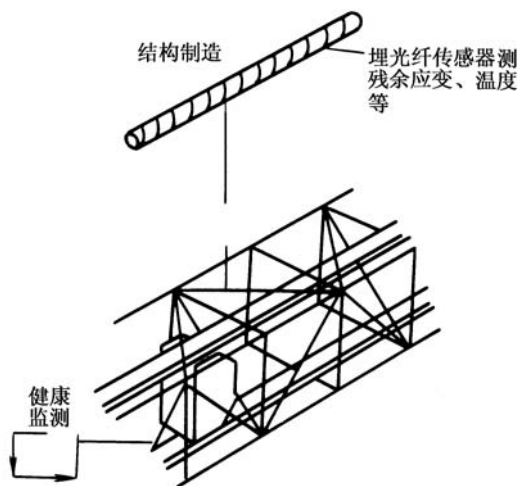


图 1.6 应用智能结构的空天平台安全监控系统

(3)许多空间飞行系统,如飞行器的翼面、基于雷达的空间系统(SBA)、基于激光的空间系统(SBC)、轻质量的空间站等场合需要一个集传感、评价和消除结构振动的主动振动控制系统.智能结构通过传感器将结构振动的信息传送给处理器并进行评价,然后对作动器发出指令,从而达到振动主动控制的目的,如卫星太阳帆板张开时的颤振控制、空间站对接过程中低频振动的控制.

(4)智能结构还可以实现埋入的公用传感器和公用信号处理器的系统集成化,减小信号源的重叠,降低成本,减少动力消耗,减轻重量,通过埋入保形天线,省去雷达天线罩,以增强其隐身特性.

(5)含有智能材料的主动振动控制器件,比传统的被动控制器件具有更大的优点.如汽车减振器、隔振器等,通过实时的调整阻尼,可以更加有效地提高汽车的平顺性和安全性.

(6)在智能材料与结构中埋入光纤传感器和用于数据连络的

特种光纤会在许多特殊应用场合起到常规电子仪器无法替代的作用,具有无可比拟的优势.例如在高超音速(马赫数大于5)的飞行器环境,“冷”表面温度近于 1500°F ^①,常规电子仪器必须主动降温至低于 250°F 才能工作,而利用特种光纤只需降至 1000°F 便可轻松适应.还有,在要求构架具有“再组合”能力的飞行器中,只有基于光纤传感器的智能材料与结构才具有探测、评估和对结构损伤做实时相应动作的能力.

(7)将智能结构用于舰艇的壳体,既可以对结构进行安全性监测和振动控制,又可以通过改变结构的特性,避开敌方雷达的探测信号,达到隐身的目的.

(8)将智能材料用于桥梁、高速公路、建筑等结构中,可以形成所谓的智能桥梁、智能公路及运输系统、智能建筑等,通过埋入的传感器对这些结构的健康状态进行实时监测,并通过作动器采取相应的措施.目前该方面的研究取得了令人瞩目的进展,光纤传感器已经被埋入许多桥梁以进行安全性监测.

1.3 智能材料系统和结构的研究范围和发展趋势

智能材料作为21世纪的新材料,它的诞生被誉为可与本世纪半导体材料诞生相比美的新技术革命.智能材料系统和结构的研究涉及材料科学、化学、力学、生物、微电子技术、分子电子学、计算机、控制、人工智能等学科与技术,是多学科综合交叉的研究领域,因此智能材料系统和结构的研究范围十分广泛,涉及的学科领域众多.当前智能材料与结构的研究内容主要包括以下几个方面:

(1)传感器和作动器材料的研究

新型传感器和作动器材料的研究,是智能材料系统和结构研究的基础,它的研究进展很大程度上决定了智能材料系统和结构的实用化进程.

① $^{\circ}\text{F}$ 为非法定单位, $^{\circ}\text{F}$ 与 K (绝对温度)的关系为 $1\text{K}=5/9(^{\circ}\text{F}+459.67)$

(2)智能材料系统和结构的设计和模拟

包括智能材料与结构的优化设计、分析和性能模拟技术、传感器和作动器的优化铺放等。

(3)信号处理方法及高速中央处理器的研究

包括神经网络、模糊控制、小波分析等人工智能信号处理技术以及高速并行处理芯片的研究。

(4)智能材料的集成制造技术研究

包括智能材料的传感器和作动器的置入技术、组装及自动化生产技术。

(5)智能结构系统的应用研究

a.智能复合材料成型工艺的在线监控技术.以测量固化进程中表征参量的传感器为基础,结合复合材料固化机理模型和控制准则组成固化在线监控系统,可以从根本上提高复合材料制品的生产过程可靠性。

b.智能结构健康监控系统的研究.通过埋入结构中的传感器和作动器,对结构的安全状况进行在线监测和控制,如建筑、桥梁、大坝、公路运输系统、飞行器、舰船等使用过程中的寿命、损伤产生及扩展、损伤的抑制及修复等。

c.智能结构振动主动控制系统的研究.利用智能材料的传感器,对结构的振动进行实时的监测,同时,利用作动器并结合相应的控制规律,对结构的振动进行主动控制。

d.形状自适应改变智能结构的研究.包括可变形状自适应机翼、空间伸展机构等。

e.智能蒙皮的研究.将微型化的电子系统与功能材料和结构材料相结合,使结构材料不仅具有常规的承载能力和自适应结构的动作功能,而且还具有电子设备的某些功能。

随着未来航空、航天、机械、电子、建筑、交通等军用及民用工业领域的发展,必将对智能材料系统和结构的应用提出更高的要求,而智能材料系统和结构也必将向更高层次发展,其发展趋势将体现在以下几个主要方面:

(1) 传感器和作动器的多功能集成

一种传感器和作动器具有多个功能,是未来传感器和作动器的发展趋势,如埋入智能建筑结构中的光纤传感器既可以监测结构的应力、应变,同时又可以监测它的腐蚀情况.作动器既可以改变形状,又可以改变自身的颜色等.

(2) “材料-结构-系统”一体化的智能系统自动化设计与制造

未来的智能材料应该实现从材料的制备到结构的制造,进一步形成智能系统的整个过程的自动化.

(3) 智能材料器件的微小型化

智能材料器件与微型机电系统 MEMS 的结合,使得智能材料系统更加小型化,小型化是未来发展的一个重要方向,例如,利用智能材料制造微型飞行器、微型机器人等.

(4) 智能材料系统和结构中各器件的自动修复和替换技术

智能材料系统和结构中各个器件在使用过程中,将不可避免地面临损坏、失效等问题,发展自动修复和替换技术,将对提高智能材料结构使用的可靠性具有十分重要的意义.

智能材料系统和结构作为一门崭新的交叉学科,它的研究必然会带动材料、计算机、电子、光学、化学、机械等相关学科的发展,从而促进科学技术的整体进步.我们相信,不久的将来,智能材料系统和结构将在我们的生活中发挥更大的作用.

参考文献

- [1] 杜善义、冷劲松,光纤智能化复合材料及其监控系统研究,力学进展,1992(4), 496~502.
- [2] T.Takagi, A Concept of Intelligent Materials, U.S.-Japan Workshop on Smart/Intelligent Materials Systems, Technomic Publishing Company Inc., 1990, 3~10.
- [3] C. A. Rogers, Intelligent Materials Systems. The Dawn of a New Materials Age, Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 1993, 4(1), 4~12.
- [4] C.A.Rogers, The Intelligent Material System Concept, U.S.-Japan Workshop on Smart/Intelligent Material Systems, Technomic Publishing Company Inc., 1990, 330, 331.
- [5] E. Udd, Fiber Optic Smart Structures, John Wiley & Sons Inc., 1995, 172.

- [6] 杜善义、冷劲松,智能复合材料及智能结构的研究,第二届中国功能材料及其应用技术学术会议,大会特邀报告,功能材料,1995,26(10).
- [7] 冷劲松,智能材料和结构的发展,青年科学家论坛,特邀报告,中国科学技术协会,1996年3月.
- [8] 冷劲松、刘彦菊、杜善义,智能材料及智能结构的研究进展,首届海内外中华青年学者材料科学技术研讨会,材料研究学报,1995年10月.
- [9] J.S. Leng, et al., Vibration Active Control of Smart Structures Incorporating ER Actuators and Fiber Optic Vibration Sensor Based on The Speckle Detection, SPIE's 6th Annual International Symposium on Smart structures and Materials, SPIE 3668, 1~5 March 1999, CA, USA.
- [10] Y.J. Liu, J.S. Leng, ER Smart Fluids Properties and Applications, Journal of Materials Science and Technology, 13(5), 1997, 440~442.
- [11] R.S. Rogowski, J.S. Heyman and R.O. Claus, The Evolution of Smart Composite Materials, NASA Tech. Breifs, 1988, 20~22.
- [12] 江水、李兴丹、吴代华, Smart 结构及其应用,力学进展,1994,24(3),53~46.
- [13] J.M. Lochocki, Smart Skins, a Development Roadmap, 1989, SPIE 1170, 19~47.
- [14] J.M. Sater, Strategic Defensive Initiative Organization Adaptive Structures Program Overview, Second Joint U.S. - Japan Conference on Adaptive Structure, Technomic Publishing Company, 1992, 493~509.
- [15] J. M. Sater, Adaptive Structures Programs for the Strategic Defense Initiative Organization, AIAA, 92-2338-cp, 1992, 369~377.
- [16] B.Z. Jang, Smart Materials: Ceramics Polymers and Composites, Materials Eng. Program, Auburn University, AI 36849.
- [17] M. V. Gandhi and B. S. Thompson, Smart Materials and Structures, Chapman & Hall, 1992.
- [18] M. Aizawa, Concept of Intelligent Biomaterials, U.S. - Japan Workshop on Smart/ Intelligent Materials Systems, Technomic Publishing Company Inc., 1990, 37~43.
- [19] K. Takahash, Intelligent Materials for Future Electronics, U.S. - Japan Workshop on Smart/ Intelligent Materials Systems, Technomic Publishing Company, Inc., 1990, 149~154.
- [20] 张陟,智能材料研究动向简述,材料导报,1992,5,64~68.
- [21] T. Takagi, A Concept of Intelligent Material and the Current Activities of Intelligent Materials in Japan, First European Conference on Smart Structures and Materials, Glasgow, 1992, 13~18.
- [22] S. Miyata, Molecular Assembly for Intelligent Materials, U.S. - Japan Workshop on Smart/ Intelligent Materials Systems, Technomic Publishing Company, Inc., 1990, 179~186.
- [23] 杜善义、冷劲松,先进复合材料的纤维光学法无损评价,宇航材料工艺,1992,(5).

第二章 智能材料系统和结构中的传感器和作动器

2.1 概 述

智能材料系统和结构主要包括传感器、作动器、母体材料、通信网络和控制器(即微处理器).图 2.1 为智能结构系统的原理图.当外界环境发生变化时,传感器首先对外界的信号进行检测,并将信号通过通讯网络传到控制器中,控制器进一步对信号进行分析识别,同时发出控制指令,指挥自适应地改变结构的状态,如形状、刚度、颜色、位置等^[1].

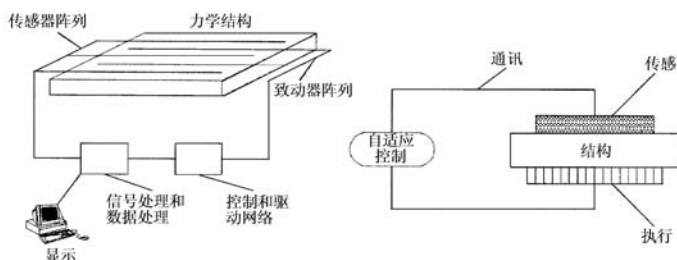


图 2.1 智能结构系统的原理图

传感器和作动器是通过相应材料不同的物理效应来实现传感和动作的功能的,选择不同的传感器和作动器材料,将产生不同功能的智能材料系统和结构.表 2.1 为可用的部分传感器和作动器材料,利用这些材料可以研制相应的传感器和作动器^[2].

根据智能材料与结构特殊的应用环境和工作方式,对传感器和作动器提出一般性的要求:

(1)兼容性要求.主要指传感器、作动器与材料结构的兼容性,

表 2.1 部分传感器和作动器材料

物理效应	聚合物	无机物
压电效应	聚偏氟乙烯 聚偏二氟乙烯 液晶聚合物	压电锆酸盐 压电钛酸盐 石英
热电效应	聚偏氟乙烯 Langmuir-Bladgett 聚合物 铁电体聚合物 超晶格聚合物	三甘氨酸硫酸盐 铅基掺镧锆酸盐 铅基掺镧钛酸盐
光致电压效应	多炔/n-硫化锌 聚(N-乙炔基吡唑)+部分 青染料	硅材料 砷化镓 铋化铜
电动力学效应	聚电解质凝胶离子聚合物	烧结离子玻璃
温差电动效应	腈基聚合物 聚钛管	铈化铅 Cu100/Cu57Ni43 硒化铋
磁致伸缩效应	分子铁磁体聚合物	镍 镍钛合金
压电电阻效应	多炔 热解聚丙烯腈聚合物	金属材料 半导体材料
热致电阻效应	聚(p-亚苯基亚乙烯基)合物	金属和金属氧化物 钛酸盐陶瓷 半导体材料
磁致电阻效应	聚乙炔 热解聚乙烯基乙酸酯	镍钛合金 镍钴合金
化学电阻效应	聚吡咯 聚噻吩 离子导电聚合物 电荷传递络合物	钨 金属氧化物 钛酸盐 氧化钴
光电导效应	铜钛管 聚噻吩络合物	内掺杂半导体材料 外掺杂半导体材料

目的是在材料中埋入或在表面粘贴传感器和作动器不会损害结构的完整性.同时,还要能够与智能结构系统的其他电气设备兼容.

(2)稳定性要求.主要是指传感器和作动器自身工作性能的稳定可靠及抗干扰能力.

(3)响应带宽要求.传感器和作动器应该具有较高的响应速度和较宽的频率响应频带.

(4)传感器精度的要求.传感器要具有较高的灵敏度和测量精度.

(5)作动器驱动力的要求.作动器应该产生足够大的变形和较大的驱动力,同时要具有较小的能耗.

目前应用于智能材料系统与结构的传感器主要有光纤传感器、压电传感器、电阻应变丝、微芯片传感器等.常用的作动器主要包括电流变体和磁流变体、形状记忆合金、压电材料、磁致伸缩材料和电致伸缩材料等.这些传感器和作动器还不能完全满足上述的所有要求,它们都有各自的特色,但也同样存在一些问题有待进一步改进.将不同的传感器和作动器用于同一个智能材料系统和结构,采用混合传感器和作动器的方案,利用它们各自的优点,是未来智能材料系统和结构发展的方向.

2.2 光纤传感器

2.2.1 光纤传感器的结构原理及分类

光纤传感器是 20 世纪 70 年代中期发展起来的一种新型传感器.它是光纤和光通讯技术迅速发展的产物,与以电为基础的传感器相比有本质的区别.光纤传感器用光而不用电来作为敏感信息的载体,用光纤而不用导线来作为传递敏感信息的介质,因此,它同时具有光纤及光学测量的一些极其宝贵的特点^[3]:

①电绝缘.因为光纤本身是电介质,而且敏感元件也可用电介质材料制作,因此光纤传感器具有良好的电绝缘性,特别适用于高压供电系统及大容量电机的测试.

②抗电磁干扰.这是光纤测量及光纤传感器的极其独特的性能特征,因此光纤传感器特别适用于高压大电流、强磁场噪声、强

辐射等恶劣环境中,能解决许多传感器无法解决的问题。

③非侵入性 .由于传感头可做成电绝缘的,而且其体积可以做得很小(最小可做到只稍大于光纤的芯径).因此,它不仅对电磁场是非侵入式的,而且对速度场也是非侵入式的,故对被测场不产生干扰.这对于弱电磁场及小管道内流速、流量等的监测特别具有实用价值。

④高灵敏度 .高灵敏度是光学测量的优点之一.利用光作为信息载体的光纤传感器的灵敏度很高.它是某些精密测量与控制的必不可少的工具。

⑤容易实现对被测信号的远距离监控.由于光纤的传输损耗很小,因此光纤传感器技术与遥测技术相结合,很容易实现对被测场的远距离监控.这对于工业生产过程的自动控制以及对核辐射、易燃、易爆气体和大气污染等进行监测尤为重要.表 2.2 为光纤的特征以及能有效利用这些特征的光纤传感器的使用范围。

表 2.2 光纤的特征与测量时所应用的范围

光纤的特征	主要关系	测量领域
机械方面 { 线径细 韧度高 重量轻		狭小空间测量 高分辨率测量 飞行体内测量
电气方面 { 绝缘性 无感应		高压下测量 电磁噪音下测量
化学方面 { 耐水性 耐火性 耐腐蚀性		水中、海洋测量 有害气体环境下测量 化学气体环境下测量
传输特性 { 低损耗 宽频带		远距离测量 图像测量
其 他 { 热绝缘性 资源丰富		工业测量 范围广泛的测量

我们知道,以电为基础的传统传感器是一种把被测量的状态转变为可测的电信号的装置,是由电源、敏感元件、信号接收和处理系统以及传输信息所用金属导线组成,见图 2.2. 光纤传感器则是一种把被测量的状态转变为可测的光信号的装置,由光发送器、敏感元件(光纤或非光纤的)、光接收器、信号处理系统以及光纤构成,见图 2.3. 由光发送器发出的光经光纤引导至敏感元件,在这里,光的某一性质受到被测量的调制,已调光经接收光纤耦合到光接收器,使光信号变为电信号,最后经信号处理系统处理得到我们所期待的被测量.由图 2.2 和 2.3 可见,光纤传感器与以电为基础的传统传感器相比较,在测量原理上有本质的差别,传统传感器是以机-电测量为基础,而光纤传感器则以光学测量为基础.光纤系统比类似的电子系统更安全,因为基于介电材料的系统不会产生火花,所以光纤传感技术可以应用在常规电子系统不适合的危险地区.光纤传感器还具有其他优点,如可以使用干涉光学技术,以便在不接触的情况下获得极高分辨率的长度遥测,光纤传感器一般不移动,结构紧凑,结实耐用,几何结构灵活,适用多种应用,构建简单,维护费低,可靠性高,并且比一般传统传感器便宜.另外光纤传感器适合与数字系统连接并可以应用多种信号复用方法,如时分、幅分和数字信号编码.

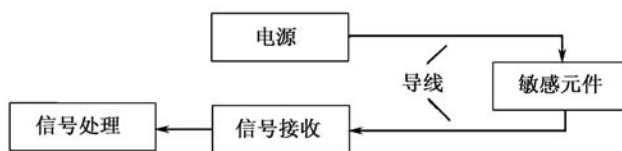


图 2.2 传统传感器示意图

在光纤传感器技术领域里,可以利用的光学性质和光学现象很多.而且光纤传感器的应用领域极广,从最简单的产品统计到对被测对象的物理、化学或生物等参量进行连续监测控制等,都可采用光纤传感器.光纤传感技术发展很快,仅有十几年的历史,就已

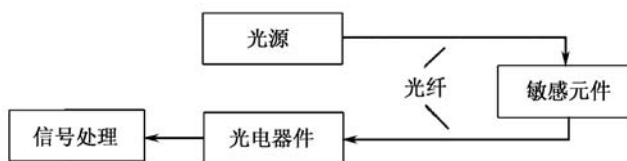


图 2.3 光纤传感器示意图

研制出了百余种光纤传感器.其分类法可根据光纤在其中的作用、光受被测量调制的形式或根据光纤传感器中对光信号的检测方法之不同来划分.

(一)根据光纤在传感器中的作用

虽然使用光源传递信息的历史已很长,如几个世纪以来人们就使用灯塔警告航海人,但直到 70 年代光纤技术或光子学进入通讯工业后,这个领域才真正开始活跃起来.后来光缆传输优点被逐渐认识,因而成为电讯和数据传输系统的首选技术.所以很自然地,当这项技术逐渐成熟时就进入了传感器市场,并且在 80 年代早期就发展了许多应用光纤技术的新型传感器.新的传感器产品不仅利用了光信号编码传输信息的优点,还利用塑料或硅纤维本身的性质产生能表征被测的外部扰动的光电子学信号,具体地说,光信号被传送到承受外部扰动,如动态负载或温度等的区域,将会对光束的辐度、相位、颜色或偏振态等进行调制,被调制光再由探测器接收和分析,产生描述外部扰动的信息.预计光纤传感器将在 10 年后占领传感器市场的很广阔的应用范围.图 2.4 所示为典型的光纤传感器系统^[4].

第一类光纤传感器称为外部光纤传感器,它是利用光纤直径很小的特点.由于光纤只是具有传输作用的系统的被动部件,这类光纤传感器也称非功能型(或称传光型)光纤传感器,其传感功能是利用与光纤无关的现象来实现的,如对光束中断或借助反射光的行为等.光纤在其中仅起导光作用,光照在非光纤型敏感元件上受被测量调制.此类传感器无需特殊光纤及其他特殊技术,比较容

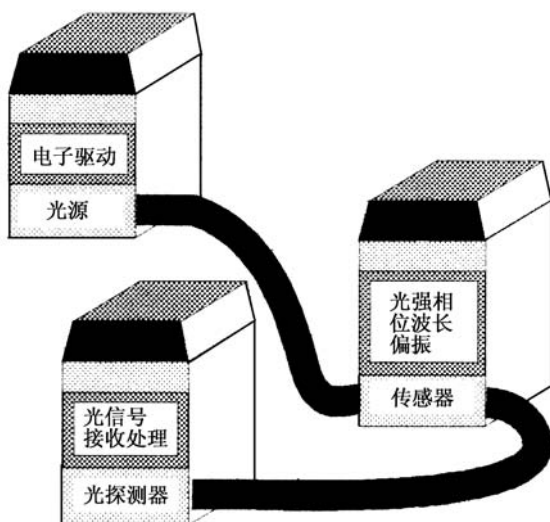


图 2.4 典型光纤传感器系统

易实现,成本低,但灵敏度也较低,适用于对灵敏度要求不太高的场合^[5]。图 2.5 表示外部光纤传感器一般工作原理,图 2.6 给出具有代表性的外部光纤传感器分类及其监测的对象。

随着光纤技术的发展出现了第二类光纤传感器称为内部传感器,也称为功能型(或全光纤型)光纤传感器,光纤在其中不仅是导

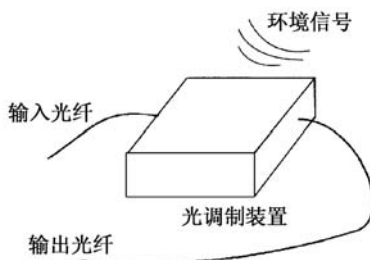


图 2.5 外部光纤传感器一般工作原理