



智能材料结构

ZHINENG CAILIAO
JIEGOU

陶宝祺 主编



國防工業出版社

智能材料结构

陶宝祺 主编

熊克 袁慎芳 陈勇 刘果 等编著

国防工业出版社

· 北京 ·

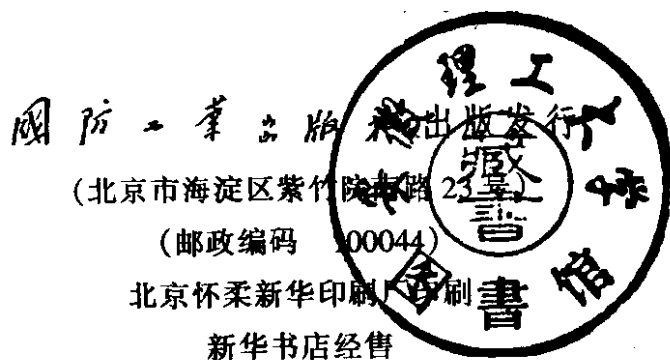
图书在版编目(CIP)数据

智能材料结构/陶宝祺主编:—北京:国防工业出版社,
1997(1999.8重印)

ISBN 7-118-01720-5

I.智… II.陶… III.智能材料-结构性能 IV.TB39

中国版本图书馆 CIP 数据核字(97)第 05343 号



开本 850×1168 1/32 印张 14 $\frac{1}{8}$ 366 千字
1997 年 4 月第 1 版 1999 年 8 月北京第 2 次印刷
印数:1501—3000 册 定价:25.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

致 读 者

本书由国防科技图书出版基金资助出版。

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分,又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技事业的发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,国防科工委于1988年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。

国防科技图书出版基金资助的对象是:

1. 学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。
2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技发展具有较大推动作用的专著;密切结合科技现代化和国防现代化需要的高新技术内容的专著。
3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合科技现代化和国防现代化需要的新工艺、新材料内容的科技图书。
4. 填补目前我国科技领域空白的薄弱学科和边缘学科的科技图书。
5. 特别有价值的科技论文集、译著等。

国防科技图书出版基金评审委员会在国防科工委的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书,由国防工业出版社列选出版。

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承

担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。在改革开放的新形势下,国防科工委率先设立出版基金,扶持出版科技图书,这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版,随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物,是对出版工作的一项改革。因而,评审工作需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,这样,才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技工业战线广大科技工作者、专家、教授,以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

国防科技图书出版基金
评审委员会

国防科技图书出版基金

第二届评审委员会组成人员

名誉主任委员	怀国模		
主任委员	黄 宁		
副主任委员	殷鹤龄	高景德	陈芳允
	曾 铎		
秘 书 长	刘琯德		
委 员	尤子平	朱森元	朵英贤
(按姓氏笔划为序)	刘 仁	何庆芝	何国伟
	何新贵	宋家树	张汝果
	范学虹	胡万忱	柯有安
	侯 迁	侯正明	莫梧生
	崔尔杰		

前 言

智能材料结构(Smart/Intelligent Materials and Structures)是一门新兴起的多学科交叉的综合科学。80年代末随着材料技术和大规模集成电路技术的进步,美国军方首先提出了智能材料与结构的设想和概念,随后展开了大规模的研究。如今,它的发展非常迅速,并且越来越受到重视。

一副没有机械传动装置的人造机翼能使飞机像鸟一样灵活地飞翔,一台机器人能像昆虫那样敏捷地运动,一种生物材料能自动地将药剂输送到指定器官的某个部位上,一幢建筑物具有强度和刚度自适应调节能力及通讯和报警自动化功能,诸如此类来自于自然界的灵感和想象构成了人们研究智能材料结构的智慧源泉,而现代科学技术的发展和需求又为这项研究打下了坚实的基础。

从工程的角度来说,智能材料结构是将仿生命功能的材料融合于基体材料中,使制成的构件具有人们期望的智能功能。从解剖学的角度来看,智能材料结构相当于一个由骨骼(Skeleton)、神经(Nerve)、肌肉(Muscle)和大脑(Brain)组成的系统。这其中基体材料(Matrix)相当于人体的骨骼;融合于基体材料中的传感元件(Sensor)相当于神经系统,具有感官功能;驱动元件(Actuator)相当于人体的肌肉;处理和控制系统(Processing and Control System)可视为人的大脑,它根据从传感元件得到的信息,经分析判断后指挥驱动元件动作,实现自诊断(Self-Diagnosis)、自修复(Self-Renovation)、自适应(Self-Adaptation)等功能。

南京航空航天大学自1991年成立智能材料与结构研究所以来,集中了力学、材料、光学、机械、计算机和测控技术等多学科的研究人员及博士后和博士研究生30多名,在国家自然科学基金、

航空科学基金和高等院校博士学科点专项科研基金的资助下,对智能材料结构进行了广泛深入的研究,并在埋入式传感器、埋入式驱动器、强度自诊断自适应和形状自适应智能材料结构、直升机旋翼自适应减振、形状自适应机翼结构等方面取得了突破性的成果。

智能材料结构的研究内容是非常丰富的,它模糊了材料与结构之间的界限。智能材料结构的重要性体现在它的研究与材料学、物理学、化学、力学、电子学、人工智能、信息技术、计算机技术、生物技术、加工技术及控制论、仿生学和生命科学等许多前沿科学及高技术密切相关,同时它拥有巨大的应用前景和社会效益。尽管智能材料结构的应用目前尚处于初级阶段,研究工作还需要在许多方面有新的突破,但它依然前景光明,并会像计算机芯片那样引起人们的重视并推动诸多方面的技术进步,开拓新的学科领域并引起材料与结构设计思想的重大变革。

为了促进我国在智能材料与结构领域中的研究和发展,我们编著了《智能材料结构》这本书,书中融入了南京航空航天大学近五年的研究成果和研究方法,反映了当前最新的研究动态和成果,并阐述了研究中存在的问题和今后的研究方向。鉴于目前尚缺乏系统地介绍智能材料结构的专著,本书的编排分为基础和应用两部分。全书共分八章,第一章至第四章是基础理论,主要论述并介绍智能材料结构的定义及应用前景、智能材料结构中采用的传感元件(光导纤维、电阻应变丝、疲劳寿命箔、压电陶瓷等)和驱动元件(形状记忆合金、压电陶瓷、电流变体等)、信息处理方法(模式识别、人工神经网络、小波理论等);第五章至第七章分别阐述了强度自诊断自适应以及形状自适应智能材料结构、减振降噪智能材料结构和自适应控制器的设计方法;第八章对智能天线、智能建筑结构和新型智能材料结构作了介绍。本书涉及材料学、力学、电学、测控技术等多个学科,因此每章内容由浅入深,各章内容相对独立而全书又具系统性,以便于各方面人员阅读。

本书由南京航空航天大学陶宝祺教授主编,参加编著工作的还有熊克、袁慎芳、陈勇、刘果、石立华、梁大开、马扣根、袁家斌、吴

耀军、陈仁文、方明等。在本书所介绍的很多内容中,许多博士后和博士研究生为之付出了辛勤的劳动,他们是:陶云刚、王征、李长春、秦太验、梅胜敏、周洋、施步洲、顾月清、朱晓锦、万建国、金江、朱甫金、何存富、郭玉林、杨春、杨涛、朱晓荣等。在编写过程中,南京航空航天大学王宝恩教授提供并翻译了大量的国外文献,朱金福教授提供了大量的资料,顾仲权教授、于盛林教授和周述才老师给予了大力支持和热情帮助,在此一并深致谢意。

南京航空航天大学在智能材料与结构的研究过程中,一直得到国家自然科学基金、航空科学基金和高等院校博士学科点专项基金的资助和航空工业总公司科技局的大力支持,在此表示衷心的感谢。

本书在编写过程中,一直得到国防工业出版社的关心和支持,在此深表感谢。

作者真诚希望本书能起到加强交流和抛砖引玉的作用。由于时间和水平的限制,书中一定存在着不妥与错误之处,恳请读者批评指正。

编 著 者

一九九六年十一月

内 容 简 介

智能材料结构是将结构材料、传感元件、驱动元件、信息处理和控制系统以及计算机技术等融为一体的新型结构和新技术。本书是一本较全面和系统地阐述智能材料与结构的著作,书中编入了作者及研究生们的研究成果和研究方法,编入了国外最新的研究动态和结果。内容包括:智能材料结构的定义和应用前景、埋入式传感元件、埋入式驱动元件、信息处理方法、强度自诊断自适应和形状自适应智能材料结构、减振降噪智能材料结构、自适应控制理论和方法,最后介绍了智能天线、智能建筑结构和新型智能材料结构。

本书的编排分为基础和应用两部分。前四章为基础理论,后四章为应用研究。书中涉及材料学、力学、电学、测控技术等多个学科,因此每章内容由浅入深,各章内容相对独立,全书又具系统性,这样为各方面人员的阅读提供了便利。

本书可供从事材料、机械、力学、航空、航天、土建等方面的研究和设计人员及大专院校教师和研究生、本科生参考。

ISBN 7-118-01720-5/TH·119

定价:25.00元

目 录

第一章 智能材料结构的定义和应用前景	(1)
§ 1-1 材料技术发展的历史回顾	(1)
§ 1-2 智能材料结构的概念	(3)
§ 1-3 智能材料结构设计的特点——材料设计与结构设计制造 一体化	(6)
§ 1-4 智能材料结构的应用前景	(10)
§ 1-5 智能材料结构的研究内容	(16)
第二章 智能材料结构中的驱动元件	(22)
§ 2-1 概述	(22)
§ 2-2 形状记忆合金	(23)
一、形状记忆效应的基本概念	(23)
二、形状记忆合金的变形	(29)
三、NiTiInol 合金特性	(32)
四、埋入形状记忆合金的复合材料性能	(44)
§ 2-3 压电元件	(57)
一、概述	(57)
二、压电方程	(59)
三、压电元件的主要性能	(64)
四、压电材料性能的测试	(67)
五、常用压电材料	(76)
六、压电材料在智能结构中的应用前景	(84)
§ 2-4 电流变体驱动材料	(86)
一、电流变现象	(86)
二、电流变性能的实验方法和装置	(90)
三、现有材料的成分和性能	(99)
四、应用前景	(107)

§ 2-5 磁致伸缩材料	(111)
§ 2-6 形状记忆聚合物	(113)
一、概述	(113)
二、聚氨酯形状记忆聚合物材料的性质	(114)
三、采用纤维加强的形状记忆聚合物复合材料	(119)
§ 2-7 可以反复收缩和膨胀的聚合胶体	(120)
一、概述	(120)
二、化学能转变为机械能的聚合胶体	(121)
三、电化能转变为机械能的聚合胶体	(122)
四、聚合胶体制成的驱动器结构	(123)
第三章 智能材料结构中的传感元件	(124)
§ 3-1 概述	(124)
§ 3-2 埋入式光导纤维传感器	(124)
一、基本原理	(125)
二、埋入式功能型光纤传感元件	(131)
三、埋入式非功能型光纤传感元件	(147)
四、光纤微弯传感元件	(160)
五、改变散射损耗的光纤传感网络	(165)
§ 3-3 电阻应变丝	(166)
一、概述	(166)
二、对埋入结构中的电阻应变丝的要求	(167)
三、变换电路及电源电压值和电流值的确定	(169)
§ 3-4 疲劳寿命丝(箔)	(173)
一、疲劳寿命丝的机理	(173)
二、疲劳寿命丝(箔)在智能结构中的应用	(175)
§ 3-5 碳纤维传感元件	(179)
§ 3-6 半导体传感元件	(181)
第四章 智能材料结构的信息处理方法	(183)
§ 4-1 概述	(183)
§ 4-2 统计决策模式识别法	(186)
一、几何分类法	(187)
二、概率分类法	(196)
§ 4-3 人工神经网络	(201)

一、概述	(201)
二、多层感知器及其 BP 算法	(206)
三、自组织(Kohonen)神经网络	(233)
四、小波变换和 B 样条小波神经网络	(240)
第五章 强度自诊断及预报疲劳寿命的智能复合	
材料结构	(254)
§ 5-1 结构的强度自诊断概述	(254)
§ 5-2 光导纤维智能复合材料的强度自诊断结构	(255)
§ 5-3 电阻应变丝智能复合材料的强度自诊断结构	(261)
§ 5-4 采用少量传感器的平板自诊断构件	(265)
§ 5-5 埋入压电元件进行自诊断的智能结构	(272)
一、应用声发射原理检测裂纹的产生	(272)
二、结构件半缺陷(或损伤)及周围连接件的诊断	(281)
三、结构中缺陷类型的诊断	(285)
§ 5-6 预报构件疲劳寿命的智能复合材料结构	(295)
第六章 强度和形状自适应智能材料结构	(298)
§ 6-1 概述	(298)
§ 6-2 强度自适应结构	(300)
一、利用 SMA 改善带孔结构的应力分布	(301)
二、利用 SMA 抑制复合材料结构的损伤	(308)
三、埋入 SMA 丝(或箔)的自适应预应力复合材料连接件	(311)
§ 6-3 自适应机翼	(312)
一、自适应机翼用于气动弹性操纵的研究背景	(312)
二、无舵面的自适应机翼	(314)
三、自适应机翼的模型分析	(315)
四、气动分析和对比	(321)
五、SMA 用于气动弹性操纵的初步实验	(327)
§ 6-4 具有分布式压电元件的自适应结构	(328)
§ 6-5 直升机自适应旋翼	(335)
一、自适应旋翼静态变形分析	(336)
二、悬臂梁试件的实验和计算分析	(342)
三、自适应旋翼模型的实验分析	(345)
四、自适应旋翼的一些设想	(353)

第七章 减振降噪自适应智能结构	(360)
§ 7-1 智能材料与结构减振降噪技术概述	(360)
§ 7-2 主动减振智能结构	(363)
一、主动减振智能结构的组成	(363)
二、典型主动减振智能结构	(364)
三、主动减振智能结构的研究动向	(375)
§ 7-3 主动降噪智能结构	(277)
一、主动降噪智能结构的几种主要控制方法	(378)
二、主动降噪智能结构在工程实际中的应用	(382)
三、主动降噪智能结构的发展前景	(384)
§ 7-4 减振降噪智能结构中控制器的设计	(384)
一、正位反馈控制	(385)
二、最优控制法	(389)
三、基于自适应滤波的前馈控制	(397)
四、局部/全局控制	(401)
五、神经网络在控制器设计中的应用	(407)
第八章 其它智能结构	(415)
§ 8-1 前言	(415)
§ 8-2 智能天线	(415)
一、智能天线结构中的天线元件	(415)
二、智能天线中天线阵列的构造形式	(417)
§ 8-3 民用建筑中的智能结构	(419)
一、光纤传感器在混凝土固化监测中的应用	(419)
二、在桥梁工程中的应用实例	(421)
三、在混凝土砖及大坝上的应用	(424)
四、在房屋建筑中应用	(426)
参考文献	(429)

第一章 智能材料结构的定义和应用前景

§ 1-1 材料技术发展的历史回顾

材料技术直接影响着人类的文明。人类历史分为石器时代、青铜器时代和铁器时代等,每一新时代的到来都是由于人类对产品更高的追求造成的。在 20 世纪末和 21 世纪初,随着人类对先进技术的不懈追求,合成材料,包括陶瓷、塑料以及各种复合材料在材料领域中处于统治地位。

人类最早以天然材料作为工具,这些材料包括纤维、皮、骨骼、角以及石头和矿石。在旧石器时代,人类通过摩擦铁矿石和燧石产生火星,用来点燃易燃材料。随着人类开始食用煮熟食物,需要烧水、煮烹的用具,就促进了陶瓷的发展,将柔软的粘土制成石头一样坚硬的材料。在中石器和新石器时代,人们开始用不同的材料去装饰陶器和窑洞;采用木头、石头制成各种工具去耕地、收割谷物及碾磨谷粉;并用纤维、亚麻、芦苇和动物毛发织成各种布。在新石器时代后期,人们由于书写的要求,开始利用太阳的热量晒干粘土片,在其上书写文字。高温窑的发明促进了金属的冶炼,出现了青铜和铁器。

青铜器时代是从公元前 3500 年到公元前 1000 年,青铜由铜和锡组成,是人类最早发明的合金。这个时代的工具和武器是用青铜制成的,反映了人们已利用铸造技术生产工具和武器,这个时代的典型手工艺品是杯、缸、装饰品、盔、剑和盾。科学的进步,使人们知道铁矿石的存在,但由于炼铁需要 1500℃ 的高温设备,炼铜仅

需 900°C , 因此炼铜出现在炼铁之前。

铁器时代起源于公元前 1500 年的亚洲某些地区。铁比铜坚硬, 来源又丰富。铁器时代的早期, 科学家阿基米德等发明了多种机械设备, 如滑轮、杠杆、液压机和螺旋切割机等, 促进了铁器时代的发展。另外水泥的发现影响了整个欧洲, 这种结构材料很快用于路面、建筑物、桥梁和沟渠等方面。

天然磁铁很早就被中国人发现, 并应用它发明了指南针, 以后世界各国在航海中都加以应用, 促进了世界贸易的发展。直到 18 世纪钢出现以前, 铁一直是社会中的主要材料。钢和铁的应用也促进了英国的工业革命。

青铜、铁、钢等都是应用天然材料制成的, 它们的成本高, 原料受区域的限制, 因此合成材料就应运而生了。1860 年, 在实验室中发明了赛璐珞、假象牙, 1908 年发明了合成玻璃纸, 1909 年发明了酚醛塑料。合成材料的发展越来越受重视, 塑料工业也迅速发展起来。由于构成合成材料的主要元素为碳、氢、氧和氮, 它们可以从煤、石灰石、石油和水中得到, 恰当地将它们合成一些微结构, 就能得到符合需要的合成材料, 可以做成硬的、软的、防水的、透明的、耐腐蚀的和隔热的各种产品。由于合成材料的可塑性和可裁性, 易于建成加工流水线, 目前已在多种工业中代替金属, 如汽车外壳、电器外壳、包装件、医疗器械和人工器官等。在合成材料中, 尤其引人注目的是纤维复合材料, 它是由纤维和基体等两种或两种以上单元材料结合而成。新一代复合材料的特点是重量轻、强度硬度高、耐腐蚀。航空工业采用碳纤维、高强度玻璃纤维、陶瓷纤维等作为增强材料, 获得了高强度、高硬度及耐高温的复合材料, 并已在飞机重要受力构件上应用。目前已出现了全复合材料飞机和直升机, 预计到 2000 年, 商用飞机上应用的复合材料将占飞机总重量的 65%。在汽车工业中大量采用聚合物基复合材料(SMC), 制成汽车外壳及各种零件, 它的外形美观, 并且可大大减轻汽车重量, 节省大量开支。先进的复合材料还在各种工业机械、运动器具、自行车中大量采用。因此今日的材料时代是合成材料时代。

今天,合成材料的生产已实现了设计制造的一体化。近年来,在高温陶瓷材料、光学纯玻璃材料、超导材料和镓砷化合物的半导体材料方面都进入了应用阶段,智能材料结构、纳米材料、梯度功能材料、生物材料的研究已取得很大进展。当今军事、商业、医学、交通、电子等领域又对材料、信息、生物工程三方面提出了更加迫切的要求,为此科技界提出先进材料技术、信息技术和生物技术为当今世界的三大技术。其中先进材料技术又是三大技术的基础,它的发展将是非常迅速的,并且将对人类生活产生比微电子芯片更大的冲击。

§ 1-2 智能材料结构的概念

智能材料结构是将驱动件和传感件紧密融合在结构中,同时也将控制电路、逻辑电路、信号处理器、功率放大器等集成在结构中,通过机械、热、光、化学、电、磁等激励和控制,使智能材料结构不仅具有承受载荷的能力,还具有识别、分析、处理及控制等多种功能,并能进行数据的传输和多种参数的检测,包括应变、损伤、温度、压力、声音、光波等,而且还能够动作,具有改变结构的应力分布、强度、刚度、形状、电磁场、光学性能、化学性能及透气性等多种功能,从而使结构材料本身具有自诊断、自适应、自学习、自修复、自增值、自衰减等能力。

随着科学技术的发展和需要,智能材料结构的诞生主要有三个方面的原因:①复合材料的普遍使用,迫切需要解决它的强度诊断和刚度变化等问题,使得驱动件和传感件很容易融合进入材料,组成整体,从而具有人们期望的多种用途,同时驱动件和传感件材料的发展以及材料集成技术上的突破,也使得智能材料结构的出现成为可能;②对材料的机械、电子、化学、物理、热等多方面的耦合技术探索取得成绩,以往对结构材料仅研究它的机械性能,对电学材料感兴趣是电学性能,对动作材料仅注意它的激励方法和驱动性能,材料科学的发展,使得人们对机械、电子、动作等材料的多