

ZHINENG JIEGOU DE SUNSHANG
ZHENDUAN YANJIU
JIQI CHUANGANQI YOUHUA PEIZHI

智能结构的损伤诊断研究 及其传感器优化配置

董晓马 著



黄河水利出版社

责任编辑 张豫媛
封面设计 郭琦
责任校对 丁虹岐
责任监制 常红昕

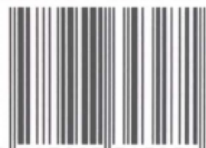
ZHINENG JIEGOU DE SUNSHANG
ZHENDUAN YANJIU
JIQI CHUANGANQI YOUHUA PEIZHI

内 容 提 要

本书介绍了智能结构的损伤诊断技术以及损伤诊断中传感器优化配置方面的研究。其主要内容包括：采用模态分析与神经网络结合技术建立智能结构的多级损伤诊断的网络模型；在对传统的基于频率的结构损伤识别的机理进行阐述的基础上，理论推导了改进的损伤定位指标；分析了应变模态进行损伤定位的局限性，并提出了相应的对策；结合应变模态具有的正交性，提出了基于应变模态保证准则的应变传感器优化配置准则，并研究了采用目前发展起来的改进遗传算法对剩余的传感器的布位进行组合优化。

本书可供从事结构损伤诊断领域的研究人员阅读参考，也可作为力学、土木、机械等相关专业的研究生的参考用书。

ISBN 978-7-80734-327-1



9 787807 343271 >

定 价:15.00 元

智能结构的损伤诊断研究 及其传感器优化配置

董晓马 著

黄河水利出版社

图书在版编目(CIP)数据

智能结构的损伤诊断研究及其传感器优化配置 / 董晓马
著. — 郑州: 黄河水利出版社, 2008.1
ISBN 978—7—80734—327—1

I. 智… II. 董… III. 工程结构—损伤—诊断 IV. TU317

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 205890 号

组稿编辑: 王路平 电话: 0371-66022212 E-mail: wlp@ycrp.com

出版社: 黄河水利出版社

地址: 河南省郑州市金水路 11 号 邮政编码: 450003

发行单位: 黄河水利出版社

发行部电话: 0371-66026940、66020550、66022620 (传真)

E-mail: hhslebs@126.com

承印单位: 河南省瑞光印务股份有限公司

开本: 850 mm × 1 168 mm 1 / 32

印张: 5.125

字数: 150 千字

印数: 1—2 200

版次: 2008 年 1 月第 1 版

印次: 2008 年 1 月第 1 次印刷

定价: 15.00 元

前 言

损伤自诊断功能是智能结构应用的一个非常重要的方向,它是智能结构研究的核心内容之一,而结构损伤诊断方法和传感器的优化配置是关联结构损伤自诊断功能的两个重要问题,这两个问题的研究,对智能结构自诊断功能的研究及其应用具有重要的理论意义和实用价值,因此本书主要介绍了作者在智能结构损伤自诊断方法及其传感器优化配置方面的一些研究成果。

本书的主要内容有:①在对传统的基于频率的结构损伤识别机理进行阐述的基础上,理论推导了基于频率的改进损伤指标(包括改进的损伤定位指标与改进的损伤程度识别指标);②为消除损伤程度对应变模态差矢量的影响,本书对应变模态差矢量进行了标准化,建立了与损伤程度无关的标准化应变模态差指标,并给予了理论证明,且通过复合材料悬臂梁数值算例进行了验证,还提出了一种结合改进的基于频率损伤定位指标与标准化应变模态差的“组合损伤指标”作为网络的输入特征参数进行结构的损伤位置识别;③考虑到避免复合因素的识别,简化损伤诊断问题的复杂性,提出了一种基于模态分析与神经网络的智能结构多级损伤诊断策略,具体内容有基于径向基神经网络(RBFNN)的损伤报警、基于自适应概率神经网络的损伤定位、基于改进BP神经网络的结构损伤程度识别等3个方面,并对它们的基本原理、技术的实现方法进行了研究;④提出一种基于应变模态保证准则的应变传感器优化配置准则以及基于应变模态矩阵信息阵的2-范数,初步拟定一小组传感器布位的方法;⑤研究基于改进遗传算法的剩余传感器布位优化的方法。

本书的研究成果得到了国家自然科学基金委员会的资助，在此表示衷心的感谢。

由于作者水平有限，书中难免有疏漏及错误之处，衷心地希望读者批评指正。

作 者

2007 年 10 月于郑州

目 录

前 言

第 1 章 绪 论	(1)
1.1 智能材料结构概述	(1)
1.2 智能结构的研究现状	(4)
1.3 智能结构的研究内容	(7)
1.4 关于 FBG 智能复合材料结构	(9)
1.5 本书研究的目的	(11)
1.6 本书研究的主要内容	(12)
第 2 章 损伤诊断策略	(16)
2.1 引 言	(16)
2.2 多级损伤诊断策略	(17)
2.3 神经网络技术	(19)
2.4 本章小结	(22)
第 3 章 损伤诊断中模态频率法与应变模态技术及其改进	(23)
3.1 引 言	(23)
3.2 模态分析的基本理论	(25)
3.3 基于模态频率的损伤诊断	(32)
3.4 基于应变模态的损伤诊断	(39)
3.5 数值算例	(44)
3.6 本章小结	(50)
第 4 章 基于神经网络的结构损伤诊断	(51)
4.1 引 言	(51)
4.2 神经网络的介绍	(52)
4.3 基于神经网络的多级损伤诊断	(59)

4.4	悬臂梁数值算例	(74)
4.5	本章小结	(89)
第 5 章	钢尺悬臂梁试验研究	(91)
5.1	引 言	(91)
5.2	试验概况	(92)
5.3	网络识别结果	(98)
5.4	本章小结	(102)
第 6 章	FBG 传感器的优化配置研究	(103)
6.1	引 言	(103)
6.2	基于 SMAC 的应变传感器优化配置准则	(104)
6.3	传感器位置的初步配置	(106)
6.4	应变传感器位置优化的遗传算法	(107)
6.5	算 例	(123)
6.6	本章小结	(128)
第 7 章	总结与展望	(130)
7.1	总 结	(130)
7.2	主要创新之处	(134)
7.3	展 望	(135)
参考文献		(137)

第1章 绪论

1.1 智能材料结构概述

1.1.1 智能材料结构概念

现代空间结构正在向着大型化、复杂化的方向发展,而这些大型复杂结构如飞机、航天飞机、高层建筑、离岸结构、新型桥梁、大跨度网架结构等在复杂的服役环境中将受到设计荷载的作用以及各种突发性外在因素(外来物冲击、地震、爆炸等)的影响,从而在结构的不同位置造成不同程度的损伤。尤其是由复合材料制成的结构,在拉压、冲击或疲劳等荷载作用下,易产生裂纹、纤维脱黏或断裂、脱层等多种形式的内部损伤,这些损伤的隐蔽性强,损伤类型和程度难以判断,较难进行实时检测。这些因素降低了结构工作的可靠性和安全性,如不及时发现和采取相应的措施,会造成结构损伤积累,必将导致结构的突然失效,造成人员伤亡和巨大的财产损失。为了保证结构的安全,就需要一个有效的结构健康监测和损伤检测方法,使损伤积累尚未到达威胁结构安全的程度之前就能够被检测出来,从而对损伤结构给予及时修复,保证结构的安全运行。目前,用传统的无损检测如超声、X射线、CT扫描、涡流检测法等^[1, 2]方法对材料结构进行损伤检测,检测结果基本上能达到人们要求,但是它们所用的仪器笨重、复杂,费用昂贵,且需要大量人力,维护和维修周期较长,根本无法对结构进行实时检测。另外,对于一些不可见、不开敞的部位,该类技术不仅无法实施,甚至要求结构的一些功能停止使用

或停止工作。例如,要求在民用客机停飞、发电机组停止运转的情况下进行测试,这非常不经济、甚至无法做到。

随着材料科学、控制理论、电子技术、计算机技术、传感器技术等高新技术的发展,针对上述问题,众多学者和国家^[3-9]进行了深入研究与探索的基础上,将“智能材料结构(Smart/Intelligent Materials and Structures)”概念引入其中,智能材料结构又称机敏结构,指将传感器和驱动器以及有关信号处理器和控制电路集成在材料结构中,通过机、光、电、热等激励和控制,不仅具有承受载荷的能力,而且具有识别、分析、处理及控制等多种功能,能进行自诊断、自适应、自修复的材料结构^[10-11]。这种集传感器、驱动器、信号处理器和控制系统于一体的材料结构体现了生物特有的属性,赋予结构健康自诊断、环境自适应和损伤自修复等某些智能功能与生命特征,达到增强结构安全、减轻质量、提高性能等目标,把目前广泛使用的离线、静态、被动的检测转变为在线、动态、实时状态下的自监控、自诊断、自修复与自适应,是当今国内外工程与材料领域中最活跃的研究课题之一。

智能材料结构的概念经历了两个发展阶段。将传感元件集成在材料中构成带有内置传感系统的结构,称为被动机敏结构。被动机敏结构能够监测自身的状态变化,从而确定自身结构的完整性、损伤程度、变形以及振动情况等。在被动机敏结构中集成驱动元件就形成主动机敏结构。主动机敏结构不但能感知自身状态的变化,而且能够修正自身的状态以满足不同的需要,例如阻止不希望的振动、改变结构的形状等。

根据智能材料结构组成中所用传感元件的不同,可将智能结构分为压电智能结构、光纤智能结构、形状记忆合金智能结构等;按使用基体材料的不同,可将智能结构分为非金属系智能结构(包括智能复合材料结构、高分子系智能材料结构)与金属系智能

结构。

1.1.2 智能材料结构基本组成

从功能和智能化方面讲,智能材料结构的基本组成如图 1.1 所示,主要是由传感元件、驱动元件、控制系统、传感信息传输以及执行指令传输 5 个部分组成。从解剖学的角度来看,智能材料结构相当于一个由骨骼、神经、肌肉和大脑组成的系统。智能结构的基体材料相当于人体的骨骼,埋入基体材料中的传感元件相当于神经系统,驱动元件相当于人体的肌肉,而处理和控制系统可视为人的大脑。

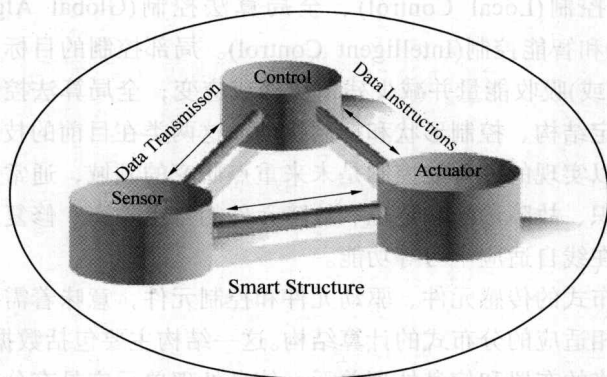


图 1.1 智能结构的基本组成

在智能结构中,使结构感受周围环境变化的一类功能元件叫传感元件,它相当于人的神经系统。通过埋入(或粘贴)于基体材料内部(或表面)的传感元件能够有效地感知外部环境变化和内部状态变化,收集外部和内部信息,它是结构实现智能化的基础。目前,传感元件主要有:光纤传感器、PZT 和 PVDF 压电组件、电阻式组件、形状记忆材料、电磁伸缩材料等。

智能结构中驱动元件应能高度分布、易于集成,它的作用相

当于人的肌肉。驱动元件必须能对结构的机械状态施加足够的影响,能直接将控制器输出的电信号转变为结构的应变或位移,具有改变智能结构的形状、刚度、位置、固有频率、阻尼、摩擦、流体速率及其他机械特性的能力。目前驱动元件主要有:压电元件、形状记忆合金、电致(磁致)伸缩材料、电(磁)流变体、聚合物胶体等。

在智能结构中,控制系统是一个重要的组成部分,它所起的作用相当于人的大脑。智能结构控制系统包括信息处理系统、控制元件以及控制策略与算法,智能结构控制元件集成于结构中,其控制对象就是结构自身。智能结构的控制策略与算法分为三类,即局部控制(Local Control)、全局算法控制(Global Algorithm Control)和智能控制(Intelligent Control)。局部控制的目标是增大阻尼和(或)吸收能量并减少残留位移或应变;全局算法控制的目标是稳定结构、控制形状和抑制扰动。这两类在目前的技术水平下是可以实现的。智能控制是未来重点研究的领域,通常应具备系统辨识、故障诊断和定位、故障元件的自主隔离、修复或功能重构、在线自适应学习等功能。

分布式的传感元件、驱动元件和控制元件,意味着需要有一个与其相适应的分布式的计算结构。这一结构主要包括数据总线、连接网络的布置和信息处理单元。信息处理单元应具有分布式且和中央处理方式相协调的特点,对于复杂的应变系统,还应具有一定的鲁棒性和在线学习功能。

1.2 智能结构的研究现状

美国是最早从事智能材料结构研究的国家,军方和一些政府机构直接参与了这项工作。1979年,美国国家航空航天局(NASA)启动了一项有关智能蒙皮的研究计划,首次将光纤传感器埋入先

进聚合物基复合材料蒙皮中,用以监测复合材料的应变和温度,开始了智能材料结构系统的探索,并形成了光纤智能复合材料的雏形。此后,智能材料结构技术逐渐得到承认和重视;1995年,美国白宫科技政策办公室和国家关键技术评审组将智能材料结构技术列入“国家关键技术报告”;1997年,智能结构则被列为“基础研究计划”的六项战略研究任务之一。美国各军种、弹道导弹防御局(BMDO)和美国航空航天局以及波音、麦道和联合机身等大公司都分别制定了研究与发展计划,如弹道导弹防御局的“自适应结构计划”,陆军研究局的“智能材料与结构计划”,空、海军共同实施的“智能金属结构计划”,空军航天实验室的“智能结构蒙皮计划”,美国航空航天局的“控制-结构相互作用”计划等^[12-15]。美国的一些大学也陆续参与和开展了光纤传感器监控复合材料固化、复合材料结构的无损检测与损伤评估、结构服役期间的工作状态监测以及疲劳、冲击损伤监测等方面的研究^[16-19]。并取得了一些关键性成果。

美国一些研究计划已完成基础研究,进入预研和应用研究阶段。1995年,NASA对采用智能结构的F-15飞机的损伤自诊断以及重组飞行控制系统使飞机安全着陆的能力进行了飞行试验。同年,NASA和喷气推进实验室(JPL)对采用智能自适应结构的大型可展开空间结构进行了飞行试验,空军和海军则采用F/A-18飞机对智能金属结构舱壁进行了飞行试验。1996年春,美国国家弹道导弹防御局和国家空军对前者的“自适应结构计划”研制的智能蒙皮和可用于主动振动控制的压电智能结构进行了飞行演示验证。

欧洲智能材料与结构的研究以英、德、法、意为主。英国的研究涉及智能复合材料损伤监测、结构健康监控、分布式传感器和新型驱动器及其位置优化策略等^[20-29]。1989~1991年,英、法、意3国的7家公司在欧共体的支持下完成了欧洲在此领域的第一

个合作研究计划——复合材料光学传感计划,对采用光纤传感器测量复合材料内部应变、温度与固化监控进行了探索^[30]。德国宇航研究院是欧洲从事这一研究的主要机构,其研究内容包括:自适应结构主动控制技术,传感器和驱动器优化布置,形状记忆合金的物理特性及其在智能结构中的应用等。目前,德国正在对自诊断光纤智能结构进行研究,以用于未来可重复使用飞行器的损伤探测和评估。

日本早在 1984 年即开始了针对航空、航天应用的自适应结构研究,其研究侧重于空间结构的形状控制和主动振动控制^[31-33]。此后,日本在智能陶瓷、金属智能材料、高分子智能材料以及生物智能材料等领域均开展了卓有成效的工作^[34,35]。1989 年,日本航空电子技术审议会提出了进行具有对环境变化做出响应能力的智能型材料的研究,并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、输出和环境响应功能的智能材料^[36,37]。

我国对于这一新兴学科的研究也十分重视。1991 年,国家自然科学基金会将智能结构列入国家高技术研究发展计划纲要的新概念、新构思探索课题,智能结构及其应用直接作为国家高技术研究发展计划(863 计划)项目课题,航空基金于 1993 年起每年都将智能结构列入研究计划项目,此后的资助强度不断加大。目前,国内已有一批研究单位在该领域的研究达到国际先进水平。1991 年,南京航空航天大学率先成立了智能材料与结构研究所,迄今已在强度自诊断自适应结构^[38-42]、结构损伤检测评估^[43-45]、光纤传感技术在结构智能化中的应用^[46-50],以及利用压电元件对结构进行减振降噪等方面取得了阶段性的研究成果^[51-53],并在结构自修复方面也进行了一定的研究^[54-56],且于 2001 年举办了第一届亚太地区智能材料与结构学术研讨会^[57]。重庆大学进行了具有分布式光纤传感系统的自适应结构研究,并使部分研究成果走出了实验室,应用在桥梁、建筑等工程^[58-60]。西安交通大学在压电层合

板、形状记忆合金智能结构等方面作了深入的理论研究工作^[61-66]。此外,中国科学技术大学、哈尔滨工业大学、北京航空航天大学、西北工业大学等院校也都从不同角度对智能结构进行了研究,并取得了多项研究成果^[67-71]。

智能结构的研究目前经过基础性研究与探索,已在基本原理、传感器研制、驱动器研制、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,取得了较大的突破。并且,已经从基础性研究进入到预研和应用性研究阶段。预计若干年后将出现一批应用智能结构相关技术的国防装备与民用设施。

1.3 智能结构的研究内容

智能材料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,当前智能材料结构的研究内容主要包括以下几个方面。

1.3.1 传感元件和驱动元件材料的研究

新型传感元件和驱动元件材料的研究,是智能材料结构研究的基础,它的研究进展很大程度上决定了智能材料结构的实用化进程。

1.3.2 智能材料结构的设计和模拟

将传感元件、驱动元件埋入基体材料以及在基体内布置线路在一定程度上破坏了基体材料的完整性和连续性,影响材料结构

的安全使用,导致结构使用寿命减少。另外,将传感元件埋入到基体材料也将影响传感元件的传感性能。因此,需要对智能材料结构的优化设计、性能模拟技术以及传感元件和驱动元件的优化布置等进行研究。

1.3.3 先进信号处理方法的研究

在智能材料结构中需要使用大量传感器来感知外界环境的变化,这些来自传感器的信息数量巨大,并且存在信息互补、信息冗余,因此需发展更先进的信号处理技术对多输入、多输出信息进行处理,从而使得结构具有演绎、归纳和决策能力。此外,还需要研究智能材料结构损伤特征提取的先进信号信息处理技术以及更先进的控制算法,以使智能材料结构具有损伤自诊断、自适应和自修复的能力。

1.3.4 智能材料结构的集成制造技术研究

智能材料结构的集成制造技术包括智能材料结构的传感元件及驱动元件的埋入技术、组装及自动化生产技术。

1.3.5 智能材料结构的应用研究

(1)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的可靠性。

(2)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驱动器,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。

(3)智能结构振动主动控制系统的研究。利用智能结构的传感

器,对结构的振动进行实时的监测;同时,利用驱动器并结合相应的控制规律,对结构的振动进行主动控制。

(4)形状自适应改变智能结构的研究。包括可变形形状自适应机翼、空间伸展机构等。

(5)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。

1.4 关于 FBG 智能复合材料结构

由于光纤传感器与传统电子传感器相比,具有直径小,柔韧性好,质量轻,灵敏度高,动态范围宽,可靠性高,成本低,抗电磁干扰,耐腐蚀,能应用于高温、高压、腐蚀性强和危险性大的场合等一系列优点^[72],因此应用先进的光纤传感技术对复合材料的制造和服役过程进行监测,得到了美国、英国、日本等国家众多研究者的认可和重视^[73-82],并在研究过程中逐渐形成了“光纤智能复合材料结构”的概念。

将光纤传感器埋入复合材料结构中,赋予了结构自诊断的功能,可用来监测复合材料结构在服役期间的内部损伤,对结构的突发性失效提供预警,预防灾难性事故发生。光纤传感器能够克服一些传统的复合材料损伤检测方法的成本较高、设备复杂并且难以实现在线监测的不足,使得很多损伤能够及时发现和维修,且能够大大提高复合材料结构服役的可靠性,扩展复合材料的使用范围。应用光纤传感器监测复合材料的疲劳过程,能够实现结构在服役过程中疲劳状态的自评估和剩余寿命的自预报,为结构的安全使用和确定维护周期提供依据,为建立结构健康监测系统奠定了基础。

可用于智能复合材料结构的光纤传感器种类很多,主要有特