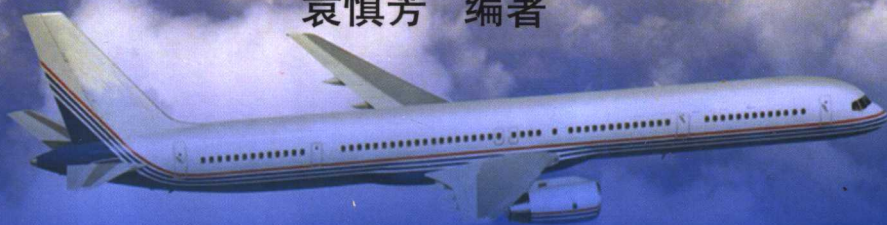


结构健康监测

Structural Health Monitoring and Damage Control

袁慎芳 编著



國防工業出版社

National Defense Industry Press

结构健康监控

Structural Health Monitoring and Damage Control

袁慎芳 编著

国防工业出版社

·北京·

图书在版编目(CIP)数据

结构健康监测/袁慎芳编著. —北京:国防工业出版社,
2007.4

ISBN 978 - 7 - 118 - 04974 - 9

I. 结… II. 袁… III. 建筑结构—监视控制 IV.
TU317

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 012575 号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100044)

国防工业出版社印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 850 × 1168 1/32 印张 10½ 字数 267 千字

2007 年 4 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—3000 册 定价 36.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)68428422

发行邮购:(010)68414474

发行传真:(010)68411535

发行业务:(010)68472764

作者简介

袁慎芳，女，1968年生，南京航空航天大学航空科技智能材料与结构重点实验室教授、博士生导师，教育部新世纪优秀人才、江苏省333学术带头人培养对象、国际结构控制学会中国分会理事、中国航空学会青年工作委员会委员、中国航空学会测试专业委员会委员、江苏省测试计量协会在线监测委员会理事长、中国电子学会高级会员、江苏省妇联执行委员会委员。1990年以来，主要从事结构健康监测、传感器与测试系统等方面的科研与教学工作。2001年—2002年为美国伊利诺伊大学芝加哥分校客座访问教授。先后承担近30项国家及省部级科研项目。已出版专著1部，发表文章80余篇，其中SCI收录10篇。先后获得国家发明三等奖1项、国家优秀教学成果二等奖1项、省部级科技进步奖6项，申请国家发明专利8项，已获授权3项。2002年被中国知识产权局及中国妇联联合授予“巾帼优秀发明者”称号，2003年被评为江苏省优秀科技工作者。

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。为了促进国防科技和武器装备建设事业的发展,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,原国防科工委于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. 在国防科学技术领域中,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,对国防科技和武器装备发展具有较大推动作用的专著;密切结合国防现代化和武器装备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,密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的新工艺、新材料内容的专著。
4. 填补目前我国科技领域空白并具有军事应用前景的薄弱学科和边缘学科的科技图书。

国防科技图书出版基金评审委员会在总装备部的领导下开展工作,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,由总装备部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,原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和武器装备建设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 第五届评审委员会组成人员

主任委员	刘成海			
副主任委员	王峰	张涵信	程洪彬	
秘书长	程洪彬			
副秘书长	彭华良	蔡镭		
委员	于景元	王小谟	甘茂治	刘世参
(按姓名笔画排序)	杨星豪	李德毅	吴有生	何新贵
	佟玉民	宋家树	张立同	张鸿元
	陈冀胜	周一宇	赵凤起	侯正明
	常显奇	崔尔杰	韩祖南	傅惠民
	舒长胜			

前 言

结构健康监测的研究是一个多学科综合交叉的前沿研究领域,内容涉及材料、测控、力学、机械、信息通信等多个科学研究领域,围绕该技术至今国内外已开展了近 20 年的研究。该技术主要针对与人民群众生命安全密切相关、服役期长、造价及维护费用较高的国防武器装备和国民经济基础设施,研究提高这些结构安全性、降低其维护费用、延长其使用寿命的方法。结构健康监测技术采用智能材料结构的新概念,利用集成在结构中的先进传感/驱动元件,在线实时地获取与结构健康状况相关的信息,结合先进的信号信息处理方法和材料结构力学建模方法,提取结构损伤特征参数,识别结构的状态,并对结构的不安全因素,在其早期就加以控制以消除安全隐患或控制安全隐患的进一步发展,从而实现结构健康自诊断、自修复,保证结构的安全和降低维修费用。

本书是国内第一本全面论述结构健康监测的概念、研究意义、主要研究内容、实现方法及国内外最新研究进展的著作。全书共分 8 章。第 1 章介绍了结构健康监测的概念、研究目的、系统组成、主要研究内容、研究现状及发展趋势,并比较了常规无损检测方法同结构健康监测方法的区别。第 2 章对结构健康监测系统中常用的传感元件进行了讨论,这些传感元件包括光纤传感元件、压电传感元件、电阻应变元件、疲劳寿命元件及碳纤维。第 3 章对结构健康监测系统的集成技术进行了论述,包括功能器件同结构的集成方法、相互的影响、健康监测网络的实现等。第 4 章对应用于结构健康监测的信号处理方法进行了详细讨论,这些方法包括信

号的时域、频域及时频域的分析方法。第5章对模式识别、人工神经网络、多主体协作、遗传算法等结构健康监测中常用的信息处理方法进行了论述。第6章主要讨论了常用的结构健康监测原理,包括基于结构应力应变分布、结构振动、声发射、主动 Lamb 波、机电阻抗等的结构健康监测方法。第7章介绍了结构损伤的控制方法,包括基于形状记忆合金、空芯光纤、空芯纤维等的损伤控制和修复方法。第8章对结构健康监测技术目前已展开的应用及功能验证举例进行了介绍。

南京航空航天大学智能材料与结构航空科技重点实验室是国内最早开展结构健康监控技术研究的单位之一,本书总结了实验室近20年来的研究成果和国内外相关研究领域的最新进展。希望本书能为从事结构健康监控研究的科研人员、工程应用单位的技术人员提供有益参考,本书也可作为高等院校博士生、研究生、本科生的教材。

本书的出版得到了国防科技图书出版基金的资助和国防工业出版社的大力支持。感谢我的同事梁大开教授、石立华教授多年的合作,感谢我的学生吴键、彭鸽、王强、余振华、邱雷、常琦、周国鹏、张恒萍、殷悦、孙亚杰、胥宝春、尚盈、徐欣、赵霞、曹俊、刘小会、张道越,他们为本书的完成收集、翻译了大量文献,书中很多实验结果及图表都出自他们之手。感谢重庆大学光电学院陈伟民教授、朱永博士,江苏省交通科学研究院工程检测中心张宇峰博士为本书第8章的撰写提供了宝贵实例资料。

本书内容涉及的范围较广,由于本人水平有限,书中难免有错误和不妥之处,恳请读者批评指正。

袁慎芳

2006年8月

于南京航空航天大学

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 结构健康监控的概念及任务	1
1.2 结构健康监控系统的组成	4
1.3 结构健康监控技术的主要研究内容	6
1.3.1 集成制造技术	6
1.3.2 建模和性能分析技术	7
1.3.3 结构健康监控中的功能器件	8
1.3.4 智能监测方法	10
1.3.5 损伤控制方法	10
1.3.6 结构状态的特征参数提取技术	10
1.3.7 结构健康监控技术在实际工程结构中的实验验证	11
1.4 结构健康监测与传统无损检测方法的比较	12
1.5 现状及发展趋势	18
参考文献	23
第 2 章 结构健康监控中的传感元件	26
2.1 光纤传感元件	26
2.1.1 迈克尔逊干涉型光纤传感器	28
2.1.2 偏振型光纤传感器	29
2.1.3 微弯型光纤传感器	31
2.1.4 法布里—珀罗干涉型光纤传感器	32
2.1.5 光纤光栅传感器	33

2.1.6	光时域反射传感器	44
2.1.7	布里渊光纤传感器	45
2.1.8	光纤传感器性能对比	46
2.2	压电元件	47
2.2.1	压电效应	47
2.2.2	压电元件的分类	48
2.2.3	压电方程	49
2.2.4	压电元件的主要性能	51
2.2.5	常用测量电路	53
2.2.6	压电复合材料	56
2.3	电阻应变传感元件	59
2.4	疲劳寿命元件	62
2.5	碳纤维	64
	参考文献	66
第3章	结构健康监控系统的集成技术	68
3.1	功能器件与材料结构的集成方法	68
3.1.1	智能夹层技术	69
3.1.2	光纤传感器编入三维编织复合材料 结构的方法	73
3.2	功能元件与材料结构集成后的性能	76
3.2.1	表面粘贴压电元件的失效实验	76
3.2.2	光纤埋入结构后的性能	79
3.2.3	智能夹层埋入结构的性能	82
3.2.4	光纤编入编织复合材料后的性能	84
3.3	计算机测控系统	86
3.4	传感网络的实现方法	87
3.4.1	光纤传感网络	88
3.4.2	现场总线技术	91

3.4.3	无线传感网络	97
	参考文献	105
第4章	结构健康监测中的信号处理技术	108
4.1	信号的分类方法	108
4.2	信号滤波方法	112
4.3	时域信号分析方法	116
4.3.1	时域波形特征	116
4.3.2	时域统计特征	119
4.4	频域分析法	121
4.5	时频域分析法	124
4.5.1	小波变换	125
4.5.2	Hilbert - Huang 方法	135
	参考文献	144
第5章	结构健康监测中的信息处理技术	146
5.1	模式识别	146
5.2	人工神经网络	150
5.2.1	神经元及神经网络结构	150
5.2.2	常用学习规则	154
5.2.3	神经网络的功能	161
5.2.4	小波神经网络	165
5.2.5	应用实例	168
5.3	多主体协作技术	173
5.4	遗传进化计算	182
5.4.1	遗传算法的基本原理	182
5.4.2	应用实例	184
	参考文献	190

第 6 章 结构健康监测系统的监测原理	192
6.1 基于结构应力应变分布的结构健康监测.....	192
6.1.1 监测原理	192
6.1.2 监测实例	193
6.2 基于结构振动分析的结构健康监测.....	196
6.2.1 结构振动的激励	196
6.2.2 结构状态的识别方法	197
6.2.3 监测实例	199
6.3 基于声发射的结构健康监测.....	201
6.4 基于主动 Lamb 方法的结构健康监测	205
6.4.1 Lamb 波的基本理论.....	206
6.4.2 Lamb 波的建模方法.....	211
6.4.3 Lamb 波信号的激励.....	217
6.4.4 基于 Lamb 波损伤散射信号的监测方法	221
6.4.5 监测实例	225
6.4.6 基于 Lamb 波信号峰值特征的监测方法	228
6.5 基于机电阻抗法的结构健康监测.....	232
6.5.1 监测原理	232
6.5.2 监测实例	234
参考文献	238
第 7 章 结构损伤控制方法	241
7.1 基于形状记忆合金的损伤控制方法.....	241
7.1.1 形状记忆合金的基本特性	241
7.1.2 带孔结构应力分布的控制	246
7.1.3 结构损伤的抑制	253
7.2 基于空芯光纤和空芯纤维的损伤控制方法.....	257
7.2.1 基于空芯光纤的损伤自修复	257

7.2.2 基于中空纤维的损伤自修复	262
7.3 基于微囊方式的结构自愈合技术	266
参考文献	268
第8章 结构健康监测技术的功能验证	270
8.1 航空航天飞行器结构健康监测	270
8.1.1 针对飞机机翼盒段的功能验证	270
8.1.2 在欧洲 Eurofight 战机上的功能验证	285
8.2 土木结构健康监测	290
8.2.1 大佛寺长江大桥健康监测系统	290
8.2.2 江阴长江公路大桥健康监测系统	298
8.2.3 渤海海洋平台结构实时安全监测系统	313
参考文献	315

Table of Contents

Chapter 1 Introduction	1
1.1 Concept and objectives	1
1.2 System components	4
1.3 Research aspects	6
1.3.1 Integration and manufacturing methods	6
1.3.2 Modeling and performance analyzing methods	7
1.3.3 Functional elements	8
1.3.4 Smart monitoring methods	10
1.3.5 Damage controlling methods	10
1.3.6 Structural damage signature extraction methods	10
1.3.7 Experimental evaluation and demonstration	11
1.4 Difference from traditional NDT methods	12
1.5 Current developments and applications	18
Reference	23
Chapter 2 Sensor technologies	26
2.1 Optical fiber sensors	26
2.1.1 Michelson interferometer fiber sensor	28
2.1.2 Polarized fiber sensor	29
2.1.3 Microbend optic fiber sensor	31
2.1.4 F – P interferometer fiber sensor	32
2.1.5 Optic fiber grating sensor	33

2.1.6	Optical time domain reflectometry(OTDR) sensor	44
2.1.7	Brillouin fiber sensor	45
2.1.8	Comparison of optic fiber sensors	46
2.2	Piezoelectric sensors	47
2.2.1	Piezoelectric effect	47
2.2.2	Piezoelectric elements	48
2.2.3	Piezoelectric equations	49
2.2.4	Performances of piezoelectric elements	51
2.2.5	Common measuring circuits	53
2.2.6	Piezoelectric composites	56
2.3	Electric resistance sensors	59
2.4	Fatigue life gauge	62
2.5	Carbon fiber	64
	Reference	66

Chapter 3 Integration technologies 68

3.1	Functional component integration methods	68
3.1.1	Smart Layer technology	69
3.1.2	Incorporating optic fiber sensors into the 3 - D braided composites	73
3.2	Performance of functional elements after integrated with the structures	76
3.2.1	Failure experiment of the surface mounted piezoelectric elements	76
3.2.2	Performances of the structure embedded with optic fiber	79
3.2.3	Performances of the structure embedded with Smart Layer	82

3.2.4	Performances of the optic fiber incorporated in the braided compositel structures	84
3.3	Data acquisition and control system	86
3.4	Monitoring sensor network developments	87
3.4.1	Optic fiber sensor network	88
3.4.2	Field – bus technology	91
3.4.3	Wireless sensor networks	97
	Reference	105
Chapter 4	Signal processing technologies	108
4.1	Classification of signals	108
4.2	Signal filtering methods	112
4.3	Time domain signal analysis	116
4.3.1	Time domain features of signal waveform ...	116
4.3.2	Time domain statistic characteristics	119
4.4	Frequency domain signal analysis	121
4.5	Time – frequency domain signal analysis	124
4.5.1	Wavelet transform	125
4.5.2	Hillbert – Huang method	135
	Reference	144
Chapter 5	Information processing technologies	146
5.1	Pattern recognition	146
5.2	Artificial neural network	150
5.2.1	Neuron and neural network architectures ...	150
5.2.2	Common learning rules	154
5.2.3	Capabilities of neural networks	161
5.2.4	Wavelet neural networks	165
5.2.5	Applications	168
5.3	Multi – agent cooperation technique	173