

光纤智能结构

涂亚庆 刘兴长 编著

Intelligent Structures
Based on Optical Fibers



中国·重庆出版社

CHONGQING PUBLISHING HOUSE · CHINA

00118317

TP210.3
01



光纤智能结构

涂亚庆 刘兴长 编著

Intelligent Structures
Based on Optical Fibers

中国·重庆出版社

CHONGQING PUBLISHING HOUSE · CHINA

图书在版编目 (CIP) 数据

光纤智能结构 / 涂亚庆, 刘兴长编著, 一重庆: 重庆出版社, 2000

ISBN 7-5366-5046-9/TN · 14

I. 光… II. ①涂… ②刘… III. 光纤器件—智能控制 IV. TN253

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2000) 第 27273 号

光纤智能结构

涂亚庆 刘兴长 编著

责任编辑 刘 翼
封面设计 吴庆渝
技术设计 刘黎东

重庆出版社出版、发行
新华书店经销
重庆电力印刷厂印刷

开本 787×1092 1/16 印张 24
字数 570 千 插页 2
2000 年 11 月第 1 版
2000 年 11 月第 1 版第 1 次印刷
印数 1-1000

ISBN 7-5366-5046-9/TN · 14
定价: 35.00 元

内 容 简 介

智能结构是由多学科交叉而逐渐形成的一门新学科，而光纤智能结构又是其中的典型研究方向。本书针对光纤智能结构有关基础问题，从基本的研究思想与方法论、关键技术、以及应用领域等诸方面进行了较系统的阐述。首先综述了智能结构；然后主要以复合材料为对象，阐述了光纤智能结构的集成基础，重点是论述光纤智能结构中的典型光纤传感器(包括光纤应变传感器、光纤微弯传感器、分布式光纤传感器等)、光纤传感器网络和多路复用技术、光纤智能结构的神经网络处理、以及智能结构执行器和控制器等关键技术；最后探讨与介绍了若干光纤智能结构的应用领域，包括状态监测与损伤评估、航空器、土木工程、医学工程、以及军事工程等。

本书可供从事智能结构、以及材料与结构工程、机械与仪器仪表、自动化与信息工程等相关学科的研究、设计和应用的科技工作者阅读与参考，也可作为高等院校有关专业研究生和高年级大学生的课程教材与参考书。

ABSTRACT

Intelligent structures is a newly-developed cross field of various subject, and intelligent structures based optical fibers(ISBOF) is one typical researching direction. In this book, fundamental issues about ISBOF are systematically expounded from views of epistemology and methodology, key techniques, and application fields, etc. This book provides an overview of the fields of intelligent structures firstly. Then, the basis of ISBOF integration are discussed taking composite materials as a host target. The emphases of this book are on introducing key techniques of ISBOF, which include typical fiber optic sensors(including fiber optic strain sensors, fiber optic microbend sensors, and distributed fiber optic sensors), fiber optic sensors networks and multiplexing techniques, neural network processing for ISBOF actuators for ISBOF, and controllers for ISBOF. At last, some application fields of ISBOF are given, which include state monitoring and damage assessment, aircraft, civil engineering, medical engineering, and military engineering.

This book is written as a monograph that can be use as a textbook for graduate students and senior students, and as a valuable reference book for scientists and engineers working in the fields of intelligent structures, material and structure engineering, mechanics and instrumentation, automation, and information engineering, etc.

序 言

人类即将进入 21 世纪, 回眸上一世纪的科技成就, 真是不胜枚举, 令人欢欣鼓舞, 最激动人心的可能是我们已处于信息时代了。计算机的广泛应用使我们加快了改造世界的步伐, 网络化的普及加速了全球一体化的进程, 基因工程的初步尝试则改变了生物的繁衍方式。人们将已取得的科学成就又不断发展、深化、推广应用后, 就又形成一种巨大的力量, 促进着人类向更高的阶段发展。

可是另一方面, 人类正受到空前的威胁与挑战, 土地荒漠化、气候变暖、河流泛滥、森林大火、环境污染, 爱滋病、心血管病, 更是严重影响人类的健康, 不解决这些问题人类将面临不能持续发展。

我们应该怎么办? 就是要用科技力量接受挑战迎接未来。20 世纪信息领域的成就集中在传感多样化, 芯片集成化, 传输网络化, 处理智能化; 人们多么想利用信息等技术来监测地震, 火山的自然结构, 探测桥梁、堤坝的结构现状, 预知飞行器的安全可靠性能……因此人们就想以信息技术与结构相结合解决上述问题, 应运而生的“智能结构”就是这样一个领域。

在“智能结构”中, 由于光纤不受电磁干扰, 频带宽, 可传感温度与压力, 故“光纤智能结构”是典型的研究方向。光纤智能结构集传感、计算、网络、处理、材料于一身, 是一个交叉学科。由于这是一崭新的学科, 在我国知之甚少, 虽有国外个别文章与书籍报道, 但大多支离破碎。

后勤工程学院涂亚庆教授结合自己的研究实践, 并参考大量国内外文献而撰写的《光纤智能结构》一书, 从研究的基本思想与方法论出发, 全面论述了光纤智能结构的集成基础, 典型的光纤传感器, 神经网络处理, 执行器和控制器, 以及光纤智能结构的应用示例。这的确是国内第一本有关的专著, 它的出版必将对这一新兴领域的发展起着巨大的推动作用, 本人在拜读之余, 深感应向社会推荐, 特此冒昧书写此数言, 并向作者表示衷心的感谢。

中国工程院院士 清华大学教授

金明高

前言

在过去的半个世纪中，科学和工程领域中发生了许多革命性转变。传统学术领域在过去是较清晰与独立的，但是近年来，相互强烈地渗透和结合，发生了很大的变化，其结果是令人惊奇的，智能结构就是这样一个领域。

设想一下能够检测自身的健康状况并能自动修复的机构；能够报告自身状态的桥梁和建筑；能够在飞行过程中作出精确调整并适应条件变化的航空和航天飞机；以及可移动的、可改变形状和结构性能的轻质蛛丝状网。通过材料学、结构工程学、传感器技术、执行器技术、信息处理和控制技术等等的结合，这些功能都是可以实现的。在这个被称作“智能材料系统与结构”的新领域里，人们将能够给机器人、土木建筑和各种交通工具等装上有效的神经响应系统。

在这个领域内，一项很重要的支撑技术是光纤传感和通讯网络，它们能测知材料和结构中很苛刻的参数，并且具有很轻的质量、抗电磁干扰、适应不利环境的能力、以及极大的频宽网络效果，使设计者们可以给材料与结构提供与以前的电子传感器相比有重大改进的神经系统，这就是产生光纤智能结构这个领域的主要动因。

光纤智能结构这个领域的最终目的，就是把生物的生命功能注入到人造智能结构中去。然而在现阶段，即使是自然界中最简单的生命形式，也比最先进的人造智能结构更高级。因为自然界中的生命在许多复杂的环境中经过了数十亿年的进化，而人类创造的智能结构才刚刚起步。不过，即使是最初的尝试，其效果也是非常显著的，例如“旅行者号”发回了壮丽的图片，应用传感器和反馈控制发动机的汽车大大改善了性能，而且机器人正广泛地应用于生产当中。

这个领域的工作可以使飞机和宇宙飞船能在起飞前自动诊断其状态，极大地降低对操纵人员的要求，同时提高安全性；可以为机载系统提供预维护和诊断支持，降低停机时间和减少费用；可以让房屋、桥梁和堤坝能够探测火情、水情，进行结构监测，能通过光纤或无线电通讯向控制中心发出警报，请求消防、警察帮助或工人维修。另外，还有一些将有很大进展的领域，例如，生产过程控制，监测地震、火山活动的自然结构，以及未来的医疗系统等。

光纤智能结构所带来的前景是广阔而神奇的。帮助这些未来结构与系统的设计者们梦想成真是本书编著者的最大愿望。

本书是作者参阅了大量国内外文献资料，并结合自己在国家自然科学基金及国家教委“光电技术及系统”重点实验室基金资助下的研究实践而编写的。全书分为4部分16章。第1部分为绪论，即第1章，对智能结构进行了综述；第2部分为结构集成基础，包括2~4章，主要以复合材料应用为对象，对光纤智能结构集成基础进行了论述；第3部分为关键

技术,包括5~11章,主要针对光纤传感器、信号的神经网络处理、以及智能结构执行器和控制器等与光纤智能结构相联系的关键技术进行了论述;第4部分为应用,包括12~16章,对若干光纤智能结构应用领域进行了探讨与介绍。

全书整体结构和资料收集由工学博士涂亚庆教授完成,具体编写以涂亚庆教授为主,刘兴长硕士参与了编写并负责全书的整理工作。全书由中国工程院院士、重庆大学黄尚廉教授主审,中国工程院院士、中国测试技术研究院李同保研究员审阅,并由中国工程院院士、清华大学金国藩教授作序。他们都提出了许多宝贵意见,在此表示最衷心的感谢。

本书引用与借鉴了国内外大量资料,特别是 Eric Udd 及 B. Culshaw 等人主编的文献,在此向有关国内外专家、学者深表感谢,并同时向给予本书顺利付梓提供帮助的有关单位和人员致以诚挚的谢意。

编著者

2000年4月于重庆

目 录

序言	1
前言	1
第1章 绪 论.....	1
1.1 引言.....	1
1.2 智能结构的思想与方法	1
1.3 智能结构研究现状.....	3
1.4 智能结构的关键技术	5
1.4.1 材料与结构	5
1.4.2 传感器.....	6
1.4.3 执行器.....	7
1.4.4 信号处理、通讯与控制	8
1.4.5 结构集成基础.....	9
1.5 光纤智能结构的实现方法.....	9
1.6 智能结构的应用领域	12
1.7 智能结构的前景展望	16
第2章 复合材料结构基础.....	18
2.1 复合材料简介	18
2.2 复合片层	19
2.2.1 片层描述	19
2.2.2 应力与应变分析.....	20
2.2.3 热效应分析	23
2.3 复合叠层	24
2.3.1 叠层复合板理论.....	25

2.3.2	应力与力矩合成	25
2.3.3	叠层简写	27
2.3.4	应力域的计算	28
2.3.5	热效应分析	29
2.3.6	特殊叠层分析	31
2.4	片层断裂分析	33
第 3 章	光纤/复合材料结构的力学分析	39
3.1	应力与应变集中	39
3.1.1	应力与应变集中的分析研究	40
3.1.2	应力与应变集中的数字化实验	42
3.1.3	应变集中的实验观测	46
3.2	裂缝	49
3.2.1	埋入光纤复合材料的微裂缝	49
3.2.2	裂缝的抑制	50
3.3	结构稳定性分析	50
3.3.1	有关结构稳定性的定义	50
3.3.2	复合材料中的光纤包含体	51
3.3.3	准静态负荷	52
3.3.4	低速碰撞负载	53
3.3.5	疲劳负载	54
3.4	传感器性能	55
3.5	未来的发展展望	58
第 4 章	智能结构中的光纤集成	60
4.1	光纤智能结构/复合材料的集成	60
4.1.1	复合材料制造与光纤智能结构	60
4.1.2	光纤与手工敷层复合材料的集成	62
4.1.3	光纤与无层结构复合材料的集成	62
4.1.4	绕丝机械构造	63
4.1.5	自动复合材料结构的制造	63
4.2	光纤涂层设计	64
4.2.1	光纤涂层的力学分析	64
4.2.2	光纤涂层的设计问题	65

4.3 光纤联接方法	68
4.3.1 光纤联接要求	69
4.3.2 光学联接方法与装置	72
4.3.3 联接器设计	75
4.4 未来的发展展望	80
第5章 光纤应变传感器	81
5.1 光纤传感器概况	81
5.2 干涉式应变光纤传感器简介	82
5.3 Fabry-Perot 干涉式光纤传感器	85
5.3.1 基本理论	86
5.3.2 干涉仪(FPPI)	87
5.4 光纤 Bragg 光栅传感器	89
5.4.1 传感原理	89
5.4.2 在智能结构中应用的可能性	90
5.5 双模椭圆芯光纤传感器	92
5.5.1 基本理论	92
5.5.2 传感器设计	93
5.6 光纤应变传感器的灵敏度分析	96
5.6.1 Fabry-Perot、双模及偏振式应变传感器的灵敏度	96
5.6.2 Bragg 光栅光纤应变传感器的灵敏度	100
5.6.3 传感器与基质的耦合及信号译释	101
5.7 光纤应变传感器的解调	102
5.7.1 干涉式光纤传感器的信号补偿	102
5.7.2 转换双波长正交技术	103
5.7.3 准外差相位探测	104
5.7.4 光谱编码/比例解调	106
5.8 光纤应变传感器的应用	107
5.8.1 光纤应变传感器的性能及选择	107
5.8.2 基本应变测量	109
5.8.3 损伤评估	111
5.8.4 复合材料固化监测	111
5.8.5 主动结构控制	113

5.9 总结评述及未来展望	114
第 6 章 光纤微弯传感器	116
6.1 光纤微弯传感原理	116
6.1.1 光纤弯曲损耗的物理光学解释	116
6.1.2 光纤弯曲损耗的几何光学解释	117
6.1.3 光纤微弯损耗的射线分析	118
6.2 光纤微弯传感器分析	119
6.2.1 理论分析	119
6.2.2 标准测试过程与实验技术	121
6.2.3 亮场/暗场	122
6.2.4 传输/反射	123
6.3 光纤微弯传感器的关键问题	124
6.3.1 传感光纤	124
6.3.2 光源	128
6.3.3 引线	129
6.3.4 探测	129
6.3.5 多路复用技术	129
6.3.6 局限性	131
6.4 光纤微弯传感器在智能结构中的应用	131
6.4.1 标准光纤	132
6.4.2 改进光纤	132
6.4.3 集成应变传感	133
6.4.4 集成冲击传感	135
6.4.5 涂层问题	138
6.4.6 埋入传感器问题	139
6.4.7 其它应用概述	139
第 7 章 分布式光纤传感器	141
7.1 分布式传感器的基本概念	141
7.2 OTDR 技术	142
7.2.1 基本原理	142
7.2.2 使用主动光纤元件以增强基本 OTDR 的性能	144
7.3 基于使用 OTDR 监测衰减变化的分布式传感器	145

7.3.1	微弯传感	145
7.3.2	辐射传感	147
7.3.3	温度传感	147
7.3.4	化学传感	150
7.4	基于 Raman 散射、Brillouin 散射及荧光监测的分布式温度传感器	150
7.4.1	基于自发 Raman 散射的传感	151
7.4.2	基于 Brillouin 散射的传感	152
7.4.3	基于时域荧光监测的传感	153
7.5	基于其它反向散射调制方法的分布式传感系统	154
7.5.1	基于偏振光时域反射测量的方法	154
7.5.2	基于伪随机编码源调制的方法	154
7.5.3	基于光学频域反射的方法	155
7.6	透射分布式传感系统	155
7.6.1	用于分布定位的传输频率调制载波方法	156
7.6.2	使用光纤放大的分布式传感	156
7.6.3	使用 Sagnac 干涉仪的干扰定位	157
7.6.4	使用白光干涉仪的传输定位系统	158
7.7	总结评述及未来展望	159
第 8 章	光纤传感器网络和多路复用技术	160
8.1	光纤传感器网络与多路复用	160
8.2	光纤传感器网络的一般形式和原理	161
8.2.1	一般形式	161
8.2.2	信息传输原理	163
8.3	光纤传感器网络分析	165
8.3.1	网络结构	165
8.3.2	网络功耗预估	167
8.3.3	网络中复用传感器的最大数量	168
8.4	光纤传感器多路复用的基本形式	171
8.5	基于强度的光纤传感器多路复用技术	172
8.5.1	时分多路复用	172
8.5.2	频分多路复用	174
8.5.3	码分多路复用	177

8.5.4	波分多路复用.....	178
8.5.5	偏振分割多路复用	179
8.6	基于干涉的光纤传感器多路复用技术.....	179
8.6.1	频分多路复用.....	180
8.6.2	相干多路复用.....	182
8.6.3	时分多路复用.....	183
8.6.4	其它技术.....	185
8.7	其它光纤传感器多路复用技术	187
8.7.1	串联点(准分布)光纤传感器多路复用	187
8.7.2	基于 Bragg 光栅的光纤传感器多路复用.....	188
第 9 章	光纤智能结构的神经网络处理.....	191
9.1	生物神经元的结构、功能与特性.....	191
9.1.1	神经元的结构.....	191
9.1.2	神经元的功能与特性.....	192
9.2	人工神经网络的原理、结构要素与基本特性	192
9.2.1	人工神经元基本工作原理.....	192
9.2.2	人工神经网络的结构要素.....	193
9.2.3	神经网络的基本特性.....	195
9.3	信号处理的 BP 模型及仿真实验	196
9.3.1	BP 模型	196
9.3.2	仿真实验	197
9.4	信号处理的 Kohonen 模型及仿真实验.....	199
9.4.1	Kohonen 模型.....	199
9.4.2	仿真实验	201
9.5	N—模光纤传感系统的神经网络处理.....	202
9.5.1	系统构成及原理	202
9.5.2	训练及测试结果	203
9.6	液晶神经网络实现	203
9.6.1	液晶神经元的实现	203
9.6.2	基于液晶显示的小型神经网络实现.....	205
9.7	神经网络处理在智能天线系统中的应用.....	206
9.7.1	神经网络模型.....	206

9.7.2	训练算法	207
9.7.3	训练与测试结果	208
9.8	神经网络处理在智能结构损伤评估系统中的应用	210
9.8.1	系统构成及原理	210
9.8.2	复合材料结构	210
9.8.3	光纤传感器阵列	211
9.8.4	Kohonen 神经网络	211
9.8.5	测试结果	212
9.9	神经网络处理在智能悬臂梁结构系统中的应用	212
9.9.1	系统构成及原理	212
9.9.2	光纤传感器	213
9.9.3	形状记忆合金执行器	214
9.9.4	神经网络处理结果	214
9.10	总结评述及未来发展	216
第 10 章	智能结构执行器	217
10.1	功能材料概述	217
10.2	压电材料执行器	218
10.2.1	压电材料的功能原理	218
10.2.2	PZT 压电陶瓷简介	220
10.2.3	PZT 执行器设计及应用	221
10.2.4	PVDF 执行器	223
10.3	电子陶瓷复合材料执行器	225
10.3.1	电子陶瓷复合材料特性	225
10.3.2	电子陶瓷复合材料的联接与制造	226
10.3.3	电子陶瓷复合材料原理模型	227
10.3.4	电子陶瓷复合材料应用	228
10.4	电致伸缩执行器	228
10.4.1	电致伸缩特性	228
10.4.2	结构关系	229
10.4.3	应用	229
10.5	形状记忆合金执行器	229
10.5.1	形状记忆效应	229

10.5.2	形状记忆合金特性	230
10.5.3	形状记忆合金原理模型	232
10.5.4	形状记忆合金应用	234
10.6	磁致伸缩执行器	235
10.6.1	Terfenol-D 的工作情况	235
10.6.2	Terfenol-D 的特性	237
10.6.3	磁致伸缩材料原理模型	237
10.6.4	磁致伸缩执行器的应用及局限	238
10.7	电致流变体执行器	239
10.7.1	电致流变现象	239
10.7.2	ER 材料的性能及要求	240
10.7.3	ER 材料的应用	240
第 11 章	智能结构控制器	243
11.1	控制理论的发展概况	243
11.2	经典控制	244
11.3	现代控制	245
11.4	智能控制	246
11.4.1	智能控制发展历程	246
11.4.2	多层递阶智能控制	247
11.4.3	基于知识的专家控制	247
11.4.4	模糊控制	248
11.4.5	神经控制	248
11.4.6	仿人智能控制	249
11.5	智能结构控制器设计	250
11.6	智能空间结构控制器	251
11.6.1	飞船控制类型	251
11.6.2	控制系统组成	252
11.6.3	经典控制方法	252
11.6.4	现代线性最优控制方法	257
第 12 章	状态监测与损伤评估的光纤智能结构	260
12.1	材料与结构损伤机制概要	260
12.2	结构整体性监测及损伤评估的光纤方法	262

12.2.1	对嵌入式整体性监测/损伤评估系统的需求.....	262
12.2.2	负载监测系统.....	263
12.2.3	损伤监测系统.....	263
12.2.4	损伤评估与连续监测.....	264
12.2.5	工程折衷方案.....	264
12.3	光纤智能结构状态监测及损伤评估的应用方法.....	265
12.3.1	金属中的裂缝传感.....	265
12.3.2	复合材料中的撞击损伤传感.....	266
12.3.3	复合材料中其它类型损伤的探测.....	269
12.3.4	光纤声发射及超声波传感器.....	270
12.3.5	其它光纤损伤探测方法.....	273
12.4	状态监测与损伤评估光纤智能结构系统示例.....	273
12.4.1	光纤微弯传感阵列.....	273
12.4.2	阵列信号处理的神经网络方法.....	276
12.4.3	光纤状态监测系统及实验.....	277
第 13 章	航空器的光纤智能结构.....	285
13.1	军用航空器生存能力.....	285
13.1.1	损伤探测.....	285
13.1.2	损伤的扩展.....	285
13.1.3	损伤响应.....	286
13.2	军用航空器的支持能力.....	287
13.3	智能结构应用于军用航空器的技术问题.....	288
13.3.1	材料设计允许度.....	288
13.3.2	粘合质量.....	289
13.3.3	制造的适应性.....	289
13.3.4	维修及逻辑上的支持.....	290
13.3.5	数据有效性.....	290
13.4	用于飞机前翼的光纤智能结构——损伤评估系统.....	290
13.4.1	小试样上的实验.....	291
13.4.2	前翼中的传感层.....	292
13.4.3	测试结果.....	293
13.4.4	此方法的展望.....	294