



基于光纤传感的智能材料结构

李剑芝 著



科学出版社

基于光纤传感的智能材料结构

李剑芝 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书从传感器与结构材料耦合的基本原理出发,对光纤传感器的设计制作、光纤植入结构材料界面分析与植入工艺等过程中可能遇到的问题进行了分析探讨。主要介绍了基于光纤传感的智能复合材料结构设计理论、光纤光栅基本理论与温度-应变缠绕问题、具有精确定位功能的全分布式光纤传感方法以及基于光纤传感的智能材料结构成型工艺等内容。

本书可供大专院校高年级学生和研究生学习智能材料结构领域的基本知识,还可供土木工程领域、铁道、水利、航空航天等相关领域的科研与工程技术人员使用和参考。

图书在版编目(CIP)数据

基于光纤传感的智能材料结构/李剑芝著. —北京:科学出版社,2016.6
ISBN 978-7-03-049169-5

I. ①基… II. ①李… III. ①光纤传感器-智能材料-结构-研究
IV. ①TP212

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 142937 号

责任编辑:孙伯元 / 责任校对:郭瑞芝
责任印制:张伟 / 封面设计:蓝正设计

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>

北京教图印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016年6月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2016年6月第一次印刷 印张:11

字数:210 000

定价:68.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

智能材料结构是国务院颁发的《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006—2020年)》中提及的重点开发领域,它是材料、信息和力学等学科前沿交叉领域的研究热点,除了具有普通材料结构的承载功能外,还具有传感、分析、诊断与执行等综合功能,是一种具有生命的结构。正因为如此,世界各国的国防、工业部门对核子能材料结构非常重视,投放巨资开展该领域的研究。经过近10余年的发展,智能材料结构在航空航天等国防及民用工业领域的应用得到很大的发展,已从基础性研究逐步发展到原理性样机及实用化阶段。

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,科学家将智能概念与材料及结构相结合,提出智能材料结构的概念。智能材料结构通常包括传感器、作动器、控制系统、通讯网络与母体材料五大构成部分,由传感器对外界环境的变化进行感知,并将感知信息传递给控制系统,经过分析判断发出指令给作动器,对环境变化做出响应。若从仿生的角度来理解智能材料结构的组成部分,作动器可比喻为生物体的肌肉,自动控制比喻为大脑和神经系统,传感器相当于生物体的五大感觉器官。相信不久的将来,智能材料结构将在我们的生活中发挥更大的作用。

光纤传感技术是一门新兴的、多学科交叉的高科技应用技术,以传感技术为核心的结构健康监测领域逐渐成为结构工程学科的一个重要研究方向。相对于传统的传感器,光纤传感器具有体积小、重量轻、抗电磁干扰、长期监测等独特优势,同时又与结构材料具有与生俱来的天然的相容性,因此基于光纤传感的智能材料结构已成为国际上研究的前沿,必将在航空航天等国防领域及土木建筑、交通等民用工业领域得到更大的发展。

基于光纤传感的智能材料结构研究涉及许多方面,为确保传感可靠、长期有效,应针对智能材料和结构本身的特点、传感系统的结构、光纤传感器和智能结构材料接合界面的兼容性、传感系统的植入工艺及植入后与外部连接等一系列问题全面展开研究。因此,本书从传感器与结构材料耦合的基本原理出发,对光纤传感器的设计制作、光纤植入结构材料界面分析与植入工艺等过程中的可能遇到问题进行了分析探讨。

全书共5章。第1章是绪论,介绍了光纤光栅与全分布式光纤传感器在结构健康检测中的应用现状和两种类型光纤传感器的优缺点。第2章是基于光纤传感的智能复合材料结构设计理论,介绍了光纤与智能材料结构耦合的基本原理及界

面耦合分析理论,并提出了智能复合材料结构的设计目标,阐述了结构系统对传感器元件的要求,然后从数值分析的角度设计并确定传感器的设计尺寸。第3章为光纤光栅基本理论与温度-应变缠绕问题,首先对光纤光栅的温度、应变交叉敏感问题进行深入的理论分析,提出了基于热应力的温度补偿机制,然后进行了传感器的结构设计,并对影响结构设计的因素进行了一系列的理论分析。第4章是具有精确定位功能的全分布式光纤传感方法,介绍了全分布式光纤传感方法的主要参数及其传感原理,提出了基于光纤光栅的全分布式精确定位新方法,并分析了定位精度的影响因素。第5章是基于光纤传感的智能材料结构成型工艺,分析了传感器埋入复合材料工艺的可行性以及总体设计方案的可行性;同时,对光纤光栅智能结构静态传感特性、阻尼性能进行了研究。

本书是作者与合作者多年的研究工作总结。本书的研究工作得到了国家自然科学基金项目(51508349)、河北省自然科学基金项目(E2015210094和E201100058)、河北省教育厅、河北省青年拔尖人才、石家庄铁道大学优秀青年科学基金等项目的资助,在此一并表示感谢。

本书是在课题组成员的通力合作下撰写而成的。其中研究生侯跃敏、孙旭、徐龙祥、房晓伟、柏林瑶均在本书的编写过程中给予了大量帮助,在此对大家表示感谢。

希望本书的出版能够对智能材料结构和光纤传感领域的科研人员、工程技术人员和高校相关专业的师生有所帮助。由于水平有限,时间仓促,书中疏漏之处在所难免,恳请各位专家和读者指正。

李剑芝

于石家庄铁道大学

2016年1月6日

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 智能材料结构概述	1
1.2 光纤传感的特点及应用发展现状	2
1.2.1 光纤传感器的定义、特点及分类	2
1.2.2 光纤传感器的应用发展现状	3
1.3 光纤光栅传感器的特点、应用及发展现状	4
1.3.1 光纤光栅传感器的特点	4
1.3.2 光纤光栅的应用现状	4
1.3.3 光纤光栅传感技术中存在的主要问题	5
1.4 全分布式光纤传感器特点、应用及发展现状	6
1.4.1 全分布式光纤传感技术的特点	6
1.4.2 全分布式光纤传感技术的应用	8
1.4.3 全分布式光纤传感技术存在的主要问题	11
1.5 基于光纤传感的智能复合材料结构特点及发展	12
1.5.1 基于光纤传感的智能复合材料结构特点	12
1.5.2 智能复合材料结构的发展应用	13
参考文献	13
第 2 章 基于光纤传感的智能复合材料结构设计理论	16
2.1 光纤植入复合结构材料的基本原理	16
2.2 光纤与复合材料界面性能研究	17
2.2.1 剪滞分析模型	17
2.2.2 黏结区应力分量的求解	19
2.2.3 裸纤界面数值分析	21
2.3 智能索的结构及功能设计	25
2.3.1 钢索(筋)结构	25
2.3.2 斜拉索的功能设计	26
2.3.3 预应力筋的功能设计	28

2.4	智能钢索中传感系统的要求与设计	28
2.4.1	复合材料与光栅传感器复合模型及分析	29
2.4.2	传感器结构界面数值分析	30
2.4.3	传感器尺寸的设计	38
2.5	本章小结	43
	参考文献	43
第3章	光纤光栅基本理论与温度-应变缠绕问题	45
3.1	光纤光栅的传感原理及其理论分析	45
3.1.1	光栅的耦合模理论	45
3.1.2	光栅应变传感原理及应变灵敏度的理论分析	49
3.1.3	光栅温度传感原理及温度灵敏度的理论分析	50
3.1.4	光栅温度-应变交叉灵敏度的理论分析	51
3.2	光纤光栅温度自补偿功能的实现与传感器结构设计	52
3.2.1	基于材料热应力的光栅温度自补偿机制	52
3.2.2	传感器温度自补偿的原理及结构尺寸设计	53
3.2.3	传感器的应变传感分析	60
3.3	温度补偿结构设计参数的研究	63
3.3.1	光栅温度灵敏度系数的测试与分析	63
3.3.2	封装材料热膨胀系数的测试与分析	65
3.3.3	封装前后的光纤光栅应变灵敏度的研究	67
3.3.4	传感器的温度补偿及应变传感公式的修正	69
3.4	整体式温度补偿结构的应变传感器制作与补偿效果	70
3.4.1	传感器的结构设计	70
3.4.2	传感器的封装制作	74
3.4.3	传感器的温度补偿及应变校核试验	75
3.4.4	结果、分析与讨论	76
3.5	微型光纤光栅应变传感器的结构设计	85
3.5.1	微型光栅应变传感器封装材料热膨胀系数的测定	87
3.5.2	微型光光栅应变传感器的封装工艺的研究	89
3.5.3	微型光纤光栅应变传感器的试验研究	90
3.6	本章小结	93
	参考文献	93
第4章	全分布式光纤传感理论与精确定位方法	95

4.1	光纤中的自发散射谱	95
4.2	全分布式光纤传感技术的主要参数	96
4.3	光纤中的布里渊散射原理和传感机制	97
4.3.1	光纤中的布里渊散射	97
4.3.2	基于布里渊散射的传感机制	103
4.4	基于光纤光栅的全分布式精确定位方法	105
4.4.1	传统的全分布式光纤传感的定位方法	105
4.4.2	利用光纤光栅实现定位的关键技术	106
4.4.3	基于光纤光栅的全分布式精确定位的方法	107
4.5	光纤光栅与布里渊信号耦合特性	109
4.5.1	试验验证	109
4.5.2	结果分析	110
4.6	环境温度及空间分辨率对定位精度的影响	112
4.6.1	试验验证	113
4.6.2	结果分析	114
4.7	基于光纤光栅的布里渊分布式位移传感器	118
4.7.1	基于光纤光栅的布里渊位移传感原理	118
4.7.2	试验	119
4.7.3	1#位移传感器的位移传感特性	121
4.7.4	2#位移传感器的位移传感特性	123
4.8	本章小结	127
	参考文献	127
第5章	基于光纤传感的智能材料结构成型工艺及特性分析	130
5.1	复合材料的成型工艺	130
5.2	增强复合材料智能拉索丝的制备	131
5.2.1	试验设计	131
5.2.2	混杂纤维增强复合材料与光栅的复合工艺研究	133
5.3	混杂纤维增强复合材料的力学性能	136
5.3.1	力学性能样品制备及分析	136
5.3.2	SEM扫描样品制备及分析	138
5.3.3	光栅传感器与复合材料的界面黏结分析	142
5.4	智能材料的阻尼性能	144
5.4.1	CNTs/Ep复合材料的阻尼机理	144

5.4.2	碳纳米管在环氧树脂复合材料中分散结果及分析	149
5.4.3	CNTs/Ep 阻尼性能的试验研究	153
5.4.4	阻尼样品制备	158
5.4.5	阻尼试验结果及分析	158
5.5	智能拉索丝的传感特性	162
5.5.1	应变传感试验系统	162
5.5.2	应变传感测试结果及分析	162
5.6	本章小结	166
	参考文献	167

第 1 章 绪 论

1.1 智能材料结构概述

智能材料的来源可追溯到 20 世纪 70 年代,美国学者 Clause 等将光纤埋入聚合物基碳纤维复合材料中,开创了智能材料结构学科。然而关于智能材料概念的正式提出是在 20 世纪 80 年代中期,同时引发了对智能材料定义的讨论。首先,关于智能材料的英文表述有 smart material、adaptive material 和 smart structures 等,但作者认为 intelligent material 更适合智能材料结构的表述,因为 intelligent 有判断、推理的含义,能更好地诠释智能的含义。肖纪美院士在“智能材料的来龙去脉”一文中,介绍了不同学者对智能材料的定义,并通过逻辑分析对智能材料概念的内涵与外延进行了客观的评述。例如有侧重技术上的定义“在材料和结构中集成有执行器,传感器和控制器”,该定义说明了材料类型与功能,但没有系统集成的指导思想和目标。有侧重科学上的定义“在材料系统微结构中集成智能与生命特征,达到减小质量、降低能耗并产生自适应功能目的”,该定义的问题在于没有材料类型与功能要求。杨大智院士给出了一个相对全面的定义——智能材料是模仿生命系统,能感知环境变化,并能实时地改变自身的一种或多种性能参数,作出所期望的、能与变化后环境相适应的复合材料或材料的复合^[1]。

1988 年,美国陆军研究办公室组织了首届智能材料、结构和数学的专题研讨会;1989 年,日本航空-电子技术审议会提出智能材料研究计划;之后,国际上几乎每年都召开相关的国际会议。总体来说,美国的智能材料研究较为实用,应用需求驱动了研究和开发工作,而日本偏重创新拟人智能的材料系统,试图与自然协调发展。智能材料的设计与工作思路是集传感器、驱动器和控制系统于一体,体现生物(部分)的特有属性。

智能材料结构中两类重要的功能材料是感知材料与驱动材料^[2]。响应与驱动材料(可做成驱动或执行器)是对外界环境条件或内部状态发生变化作出响应或驱动的材料。具有如下特征:①利用上述两种功能材料做成传感器和驱动器;②传感器对外界刺激信号作出感知,得到感知信号;③用信息技术对感知信号进行处理,指令反馈给驱动器;④驱动器作出及时、灵敏、恰当的反应;⑤外部刺激信号消失后,迅速恢复到原始状态。常用驱动/执行材料有压电材料、电致伸缩材料、磁致伸

缩材料、形状记忆材料、电流变流体材料和磁流变流体材料。目前驱动材料在实际应用中仍然存在作动力较小、滞后响应等问题需要解决。感知材料是指具有感知功能的材料(可做成各种传感器),对外界或内部的刺激信号(如光、电、磁、热、化学、应力、应变与辐射等)。常用传感器材料包括压电材料、电阻应变材料、微芯片传感材料与光纤传感材料。上述电类传感材料本身无法在材料结构内连续,需要导线,因此布线复杂,不易埋设,而且不能适应极限工作条件(如高温,高压),应用范围有限。然而,光纤材料由于体积小、质量轻、灵敏度高、动态范围大,可用于易燃、易爆、高电场及强磁场等极限条件,同时与母体复合材料具有优良的兼容性,埋入方便,已成为智能材料结构的首选传感材料。因此,基于光纤传感的复合材料已于雨后春笋般的茁壮成长起来。

1.2 光纤传感的特点及应用发展现状

1.2.1 光纤传感器的定义、特点及分类

光导纤维(简称光纤)最早用于传光及传像。在20世纪70年代初出现低损光纤后,光纤在通信技术中可用于长距离传输信息。然而,光纤不仅可以作为光波的传输媒质,而且由于光波在光纤中传播时,表征光波的特征参量(振幅、相位、偏振态、波长等)因外界因素(如温度、压力、磁场、电场、位移、转动等)的作用而间接或直接的变化,因此光纤可以作为敏感元件来探测各种物理量,这就是光纤的基本传感原理。

与传统的传感器相比,光纤传感器具有一系列独特的、难以比拟的优点:

(1)光波抗电磁干扰能力极强,电绝缘、耐腐蚀,本质安全。

由于光纤传感器是利用光波传输信息,而光纤又是电绝缘、耐腐蚀的传输媒质,因此不怕强电磁干扰,也不影响外界的电磁场,本质安全可靠。这使得它在各种大型机电、石油化工、冶金高压、强电磁场干扰、易燃、易爆、强腐蚀环境中能安全而有效的传感。

(2)灵敏度高。

利用长光纤和光波干涉技术使不少光纤传感器的灵敏度优于一般的传感器。其中有的已由理论和试验验证,如测量水声、加速度、辐射、磁场等物理量的光纤传感器。

(3)重量轻、体积小、外形可变。

光纤具有重量轻、体积小等特点,还具有可绕的独特优势,因此利用光纤制成外形各异、尺寸不同的光纤传感器,与结构具有良好的相容性。这有利于埋入结构材料中,尤其有利于在航空、航天以及狭窄空间中使用。

- (4)对被测介质影响小。
- (5)便于复用,便于成网。
- (6)测量对象范围广泛。

光纤传感器主要由光源、光纤、光检测器和附加装置等组成。光源种类很多,常用光源有钨丝灯、激光器和发光二极管等。光纤传感器可以分为传感型与传光型两大类^[3]。利用外界物理因素改变光纤中的光强度、相位、偏振态或波长,从而对外界因素进行测量和数据传输的传感器,称为传感型(或功能型)光纤传感器。它具有传、感合一的特点,信息的获取和传输都在光纤之中。

1.2.2 光纤传感器的应用发展现状

光纤一问世就受到极大重视,几乎在各个领域都得到了研究与应用,成为传感技术的先导,推动着传感技术的蓬勃发展。随着低损耗光波导在20世纪70年代的实现,光纤已经发展成为现代通信和光传感网络的代名词。光纤传感器的传统终端市场包括航空航天、国防、石油天然气开采、基础设施发展和电信等领域。传统终端市场的发展将继续推进全球光纤传感器市场的增长。通信行业从3G到4G网络的持续过渡、关注智能结构的生长、基础设施建设的新兴增长、石油天然气领域的发展都为光纤市场增长提供了重要机遇。

尚普咨询行业分析师指出:2015~2020年,亚太地区将以12.7%的年均复合增长率成为增速最快的市场。尤其是在新兴市场,如中国和印度,繁荣的制造活动、上升的汽车数量需求、稳定的基础设施建设以及国防支出的增加,都成为两国光纤传感器行业发展的驱动因素。同时,预计到2020年,全球光纤传感器市场预计达35亿美元(约合人民币217.2亿元),这是由在传统终端市场应用可能性的扩大以及新应用领域的新兴机会所推动。

然而在光纤传感领域中,传统光纤传感器绝大部分都是光强型和干涉型的。光强型传感器的信息读取依赖于光强大小,因此光源起伏、光纤弯曲损耗、连接损耗和探测器老化等因素都会直接影响到光纤传感器的测量精度。而干涉型传感器的信息读取是观察干涉条纹的变化,这就要求干涉条纹清晰,而干涉条纹清晰需要两路干涉光的光强相等,这样光纤光路的灵活和连接方便等优点就大打折扣。而且干涉型传感器是一种过程传感器,不是状态传感器,必须要有一个固定参考点,这样就给光纤传感器的应用带来了难度。

近年来,光纤光栅(fiber Bragg grating,FBG)与全分布式光纤传感技术以其分布式、便于组网等独特的优势,在传统的光纤传感技术竞争中日益显示出强大的生命力。

1.3 光纤光栅传感器的特点、应用及发展现状

1.3.1 光纤光栅传感器的特点

1978年加拿大渥太华通信研究中心的 Hill^[4]等首次在掺锗的石英光纤中发现光纤的光敏效应,并制作出世界上第一个光纤光栅,从而引起了光纤传感领域一次新的革命。1989年美国联合技术研究中心的 Meltz 等^[5]以倍频燃料激光器输出的 244nm 的紫外光为光源,用全息干涉法在掺锗石英光纤上研制出第一支布拉格波长位于通信窗口的光纤光栅,使光纤光栅进入实用化。1993年, Hill 又提出利用相位模板制作光纤光栅^[6],使得光纤光栅的工业化生产成为现实。

光纤光栅传感器除了具有普通光纤传感器的优点外,还有一些明显优于传统光纤传感器之处,其中最重要的就是波长编码与便于复用特性。主要特点如下:

(1) 波长编码,抗干扰能力强。

这一方面是因为普通传输光纤不会影响光波的频率特性(忽略光纤的非线性效应);另一方面是因为光纤光栅传感系统从本质上排除了各种光强起伏引起的干扰。例如,光源强度的起伏、光纤微弯效应引起的随机起伏、损耗等都不可能影响传感信号的波长特性,因而基于光纤光栅的传感系统具有很高的可靠性和稳定性。

(2) 便于复用成网。

能构成各种形式的光纤传感网络,尤其是采用波分复用、时分复用技术构成分布式光纤光栅传感器阵列,进行大面积的多点测量。

(3) 光纤光栅传感器可实现绝对测量。

光纤光栅是自参考的,可以绝对测量(在对光纤光栅进行标定后),不必像基于条纹计数的干涉型传感器那样要求初始参考。

(4) 测量结果具有良好的重复性。

(5) 光纤光栅传感器智能复合材料结构。

由于光纤光栅外形与普通光纤无异、结构简单、尺寸小,易于植入复合材料构件或埋入大型建筑物内部,因此以光纤传感为主的智能材料和结构,可以对结构的完整性、安全性、载荷疲劳、损伤程度等状态进行连续实时监测。

1.3.2 光纤光栅的应用现状

随着位相掩模板法的使用、光纤制造技术的不断完善、应用成果的不断出现及世界向信息化社会的迈进,光纤光栅已成为目前最具挑战性和最有发展前途的光纤无源器件之一,极大地促进了光纤通讯和光纤传感领域的发展,并广泛应用于国防、工业与农业生产、环境保护、生物医学、计量测试以及交通运输自动控制等领

域。特别是在光纤传感领域,光纤光栅作为一种性能优良的光纤传感元件,在桥梁、隧道及航空等领域具有很好的应用前景。

在光纤通信领域,光纤光栅的出现使许多复杂的全光通信成为可能。研究表明,光纤光栅以及基于光纤光栅的器件已经能够解决全光通信系统中许多关键技术。例如,光纤光栅可用于制作光纤光栅激光器、WDM波分复用器、色散补偿器以及波长变换器等。

在光纤传感领域,自从1989年美国的Morey等首次进行光纤光栅的应变与温度传感器研究以来,世界各国都对其十分关注并开展了广泛的应用研究。在短短的10多年时间里光纤光栅已成为传感领域发展最快的技术,并在很多领域取得了成功的应用,如土木工程、航天器、船舶、电力、石油工业、医学、化学以及医药等领域。

2004年,欧进萍等^[7]对黑龙江省呼兰河大桥进行健康监测,布设的光纤光栅传感器监测了预应力箱形梁张拉过程的钢筋应变历程,以及箱形梁静载试验的钢筋应变增量与分布。2007年又在四川峨边大渡河拱桥关键性吊杆中成功布设了光纤光栅应变和温度传感器,利用布设好的光纤光栅传感器成功监测了车辆荷载下吊杆应变历程和温度变化过程、同一车辆荷载对不同长度吊杆的影响^[8]。2003年,Magne等^[9]将11个光纤光栅传感器布设在混凝土箱形梁内部,监测桥梁在动荷载作用下的反应,对桥梁的健康状况进行评估。2009年将光纤光栅应变传感器应用到云南小磨高速公路九龙隧道工程^[10]和福建厦门翔安海底工程^[11]中;2009年和2010年分别将光纤光栅应用到青藏铁路多年冻土路基沉降监测和郑州至西安铁路无砟轨道线路工后沉降监测上^[12],2014年段抗等^[13]将光纤光栅光纤位移传感器应用在盐岩地下储气库群模型试验中。2014年孙健等^[14]在神东天隆集团马家塔2号露天矿进行边坡位移的测量。

光纤光栅传感器在其他方面还有很广泛的应用,此处不赘述。

1.3.3 光纤光栅传感技术中存在的主要问题

光纤光栅传感器的应用是一个方兴未艾的领域,有着广阔的发展前景,但在将光纤布拉格光栅传感器更好地应用于实际工程前,还有很多问题需要解决。例如光纤光栅的波长位移检测需要较复杂的技术和仪器设备;需要大功率宽带光源或可调谐光源等。在当前的技术条件下,其检测的分辨率和动态范围也受到一定限制。同时,影响光纤光栅进入实用化的另外一个最重要的障碍便是光纤光栅的温度与应变交叉敏感的问题。这些问题通过改进光纤光栅的解调系统均能得到解决。

(1) 成本问题。

目前光纤光栅的写入设备和解调系统的成本过高,严重制约了光纤光栅传感器的普及。

(2) 信号解调问题。

光纤光栅的传感机理还需进一步研究,尽可能提高光纤光栅传感器的灵敏度系数,或是提高解调系统的分辨率;光纤光栅传感器常在动态系统中应用,对其动态响应特性的研究是很重要的一方面,但目前研究力度仍然不够。

(3) 封装问题。

光纤过于脆弱,必须采用封装手段进行保护,因此,对封装后的光纤光栅传感器的传感机理还需要进一步研究,在保证光纤不被破坏的前提下,尽可能提高其灵敏度。

(4) 传感网络的布设。

光纤光栅为点分布式测量,对传感器的优化布置方法还有待进一步研究,即如何在大型工程结构中以最少的光纤光栅传感器数量来获取尽可能多的信息。

(5) 测量信息处理系统的开发。

由于大型工程结构健康监测系统的重要性,测量要在一定的周期内进行,大量的信息存储和及时从测量信号中计算出设计结构安全性能指标的参数是必须解决的问题。

(6) 交叉敏感问题。

由于光纤光栅对应变和温度同时敏感,当光栅波长发生变化时,无法对应变和温度造成的波长改变加以区分。当光纤光栅用作光通信器件时,对光纤光栅的波长稳定性要求很高,波长受温度影响越小越好。光纤光栅的中心波长漂移,会严重影响其在激光稳频与波分复用等方面的应用;而当光纤光栅用作应变传感元件时,温度变化和应变相互扰动所导致的波长漂移使得传感器难以识别温度和待测参量的响应。

1.4 全分布式光纤传感器特点、应用及发展现状

除光纤光栅传感器外,全分布式光纤传感已成为光纤传感器蓬勃发展的另外一支重要力量。分布式光纤传感技术能够实现大范围测量场中分布信息的提取,可解决目前测量领域的众多难题。分布式光纤传感技术是在 20 世纪 70 年代末提出的,它随着现在光纤工程中仍十分广泛的光时域反射(OTDR)技术的出现而发展起来。在十几年里,产生了一系列分布式光纤传感机理和测量系统,并在多个领域得到应用。目前,这项技术已成为光纤传感技术中最具前途的技术之一。

1.4.1 全分布式光纤传感技术的特点

全分布式光纤传感技术是应用光纤几何上一维特性进行测量的技术,它把被测参量作为光纤位置长度的函数,可以在整个光纤长度上对沿光纤路径分布的外

部物理参量进行连续的测量,提供了同时获取被测物理参量的空间分布状况和随时间变化状态的手段。

与传统测量仪器相比,全分布式光纤传感器除了具有普通光纤传感器的特点外,其最显著的特点就是能够进行连续分布式测量,具体表现如下:

(1)无级连续分布。

无级连续分布是全分布式光纤传感器最独特的优势。无级连续性指全分布式光纤传感器可以准确地感知光纤沿线上任一点的信息,是一种分布式的无级监测,解决了传统点式监测漏检的问题。此外,光纤的柔韧性还可以使全分布式光纤传感技术应用到非标准待测物体表面或待测环境中。

(2)网络智能化。

由于传感器本身就是光纤,全分布式光纤传感系统可以与光通信网络实现无缝连接或者自行组网,通过与计算机网络连接,实现自动检测、自动诊断的智能化检测以及远程遥测和监控。如果将光纤纵横交错铺设成网状,还可构成具有一定规模的监测网,实现对监测对象的三位一体全方位监测,如图 1.1 所示。

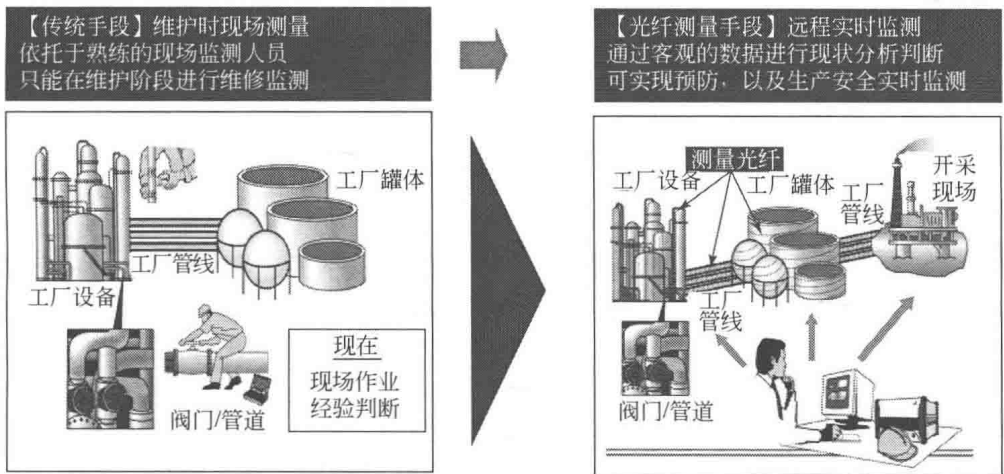


图 1.1 全方位监测示意图

(3)长距离、大容量、低成本。

全分布式光纤传感技术利用光纤感知并传输测量信号,光波在光纤中传输损耗低于 0.2dB/km ,因而,特别适合长距离连续性传感,极大提高了传感容量,可大大降低传感器的成本。现在的大型结构多要求大范围、多参数的测量,传统的监测手段实现全范围监测是相当困难的。因而,在长距离大范围监测的应用中,全分布式光纤传感技术具有其他传感技术无法比拟的性价比优势。

(4) 嵌入式无损监测。

光纤体积小、质量轻,可以作为传感单元的光纤嵌入被测物体内部。由于光纤的直径为微米级,尺寸小,嵌入后不影响材料自身的性能。在智能飞机方面,将光纤直接嵌入复合材料内并形成网络(见图 1.2),就可以实现对机翼、机身、支撑杆、电机与电路等各部分应力、应变、温度与位移等全方位、全程无损监测。

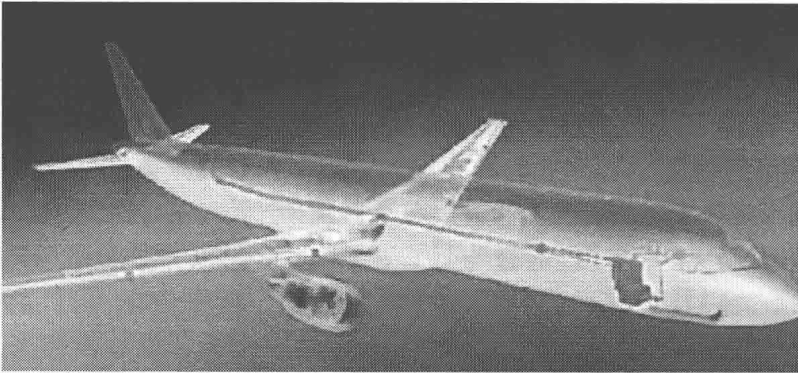


图 1.2 飞机材料中植入光纤的智能皮肤

1.4.2 全分布式光纤传感技术的应用

随着大型基础设施如桥梁、隧道、大坝、大型建筑物以及公路铁路、电力通信网络、油气管道等的不断建设和普及,对它们进行安全健康监测以及及时发现故障、确保国家和人民生命财产安全显得越来越重要。大型基础设施的结构故障诊断、事故预警等安全健康监测具有监测距离长(数十公里以上)、精度要求高(米量级以下)、部位隐蔽(不便于或难以测量)、实时性(瞬态变化)、分布式(连续性)等要求,传统监测手段难以胜任。全分布式光纤传感采用普通光缆即可测量沿光纤长度方向上时间和空间的连续分布信息,完全克服了点式传感器(如光纤光栅传感器)难以对被测场进行全方位连续监测的缺陷,且具有损耗低、易于与结构复合、抗电磁场干扰、信号数据可多路传输等传统传感器所不具备的优越性能,成为目前能源、电力、航空航天、建筑、通信、交通以及安防等诸多领域最为理想的大型设施无损监测技术,显示出诱人的应用前景(见图 1.3)。

目前,全分布式光纤传感技术的研究已经取得了较大进展,并在大型土木工程、隧道交通、石油化工以及高压输电线等领域得到了应用。

1. 在土木工程等领域中的应用

由于环境侵蚀、材料老化和荷载的长期效应等不利因素影响,土木工程等结构将不可避免的产生损伤积累和抗力衰减,其抵抗自然灾害甚至正常环境下的能力