



国防特色学术专著·仪器科学与技术

“十二五”国家重点图书  
出版规划项目

# 光纤白光干涉传感技术

GUANGXIAN BAIGUANG GANSHE CHUANGAN JISHU

苑立波 杨军 著

北京航空航天大学出版社

北京理工大学出版社 哈尔滨工业大学出版社  
哈尔滨工程大学出版社 西北工业大学出版社



国防特色学术专著·仪器科学与技术

“十二五”国家重点图书  
出版规划项目

# 光纤白光干涉传感技术

苑立波 杨军 著

**北京航空航天大学出版社**

北京理工大学出版社 哈尔滨工业大学出版社  
哈尔滨工程大学出版社 西北工业大学出版社

## 内 容 简 介

本书主要围绕光纤白光干涉应变与温度传感技术进行了较为专门的阐述。首先,概述了光纤智能结构的基本概念,简要回顾了光纤白光干涉传感技术的发展历程,比较、说明了光纤白光传感器的优缺点;其次,详细讨论了白光干涉光纤应变与温度传感器的传感机理,分析了光纤传感器与基体材料的相互作用及其力学传递特性;最后,较为详细地探讨了多种可能的白光干涉式准分布光纤多路复用传感技术,展示了其基本的环形传感网络拓扑结构,并给出了若干简化解调系统的例子。

本书可供光电测量、光纤传感技术、仪器仪表设计、智能材料与结构以及土木工程领域中的健康结构监测等专业的科研人员和工程技术人员阅读,也可供高等院校相关专业的研究生、高年级学生参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

光纤白光干涉传感技术 / 苑立波, 杨军著. --北京  
: 北京航空航天大学出版社, 2011. 5  
ISBN 978 - 7 - 5124 - 0366 - 6

I. ①光… II. ①苑…②杨… III. ①光纤传感器—  
研究 IV. ①TP212.14

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 034480 号

版权所有, 侵权必究。

## 光纤白光干涉传感技术

苑立波 杨军 著

责任编辑 刘晓明

\*

北京航空航天大学出版社出版发行

北京市海淀区学院路 37 号(邮编 100191) <http://www.buaapress.com.cn>

发行部电话:(010)82317024 传真:(010)82328026

读者信箱: [bhpress@263.net](mailto:bhpress@263.net) 邮购电话:(010)82316936

涿州市新华印刷有限公司印装 各地书店经销

\*

开本:787×1 092 1/16 印张:12.5 字数:320 千字

2011 年 5 月第 1 版 2011 年 5 月第 1 次印刷 印数:3 000 册

ISBN 978 - 7 - 5124 - 0366 - 6 定价:39.00 元

# 前 言

光纤传感器以其在复合材料与结构应用中的优势,开启了一个新的研究领域——光纤智能结构,从而使建筑结构工程师可以在其设计中引入光纤传感系统。用这些传感系统装备的高楼、大坝和桥梁等建筑结构就拥有了一个信息传递中枢系统,能够在地震或暴风雨后,或者在建筑结构使用一段时间后,报告其健康状况。

智能结构的实现首先需要有一个能够感知并传导材料变化的神经系统,并且该神经系统本身可以作为材料结构的一部分。光纤传感技术由于具有以下特点,因此可以用来充当这种神经系统:首先,光纤传感器具有尺寸小和柔韧性较好的特点,因此可以直接集成到复合材料中;其次,在一条光纤光路中可以集成多个传感器,实现多路复用,从而降低传感系统的造价并减少输入和输出的连接点数量;最后,由于光纤材料自身的特性,决定了光纤传感器是电绝缘的,而且不受电磁场的干扰。

光纤白光干涉传感技术是一种基于白光干涉原理的传感测量方法,它除了具有抗干扰能力强、可进行绝对物理量测量的优点外,还具有不受电磁场影响、本质上安全防爆、体积小、质量轻、耐腐蚀和灵敏度高等优点,可用于许多传统传感器难以涉足的极端恶劣的场合。它们可以被安装在有限的空间中,并能在极限温度、腐蚀、真空和危险的环境中正常工作,使以前诸多极为棘手的监测、监控难题得到解决。该技术的应用领域涵盖航空航天、能源、环保、自动控制以及建筑施工等诸多国民经济领域,尤其在周界警戒与防护系统中备受青睐,已逐渐成为信息获取、信息识别、状态监测等重要手段之一。20多年来经过众多学者的共同努力,光纤白光干涉传感技术得到了不断的发展与完善。

本书的目的是介绍基于光纤白光干涉的传感器设计、复用和组网技术,利用改进的光纤白光干涉传感技术来满足大型结构健康监测的要求。本书重点介绍如下几个方面:

- ① 埋入结构内部的光纤应变传感器单元的设计;
- ② 光纤保护层对埋入式传感器性能影响的理论分析;
- ③ 埋入式光纤白光干涉传感器的力学性能和热性能;
- ④ 光纤白光干涉传感器多路复用技术的理论和试验;
- ⑤ 光纤白光干涉传感系统在大型智能结构中的组网技术及其环路拓扑结构。

光纤传感系统可以感知应力和温度信息。由于光纤既可作为感知器,又可作为传输数据的信道,因此理论上可以测量沿光纤长度上任意一点所受的应变和温度。这个独特的性质使光纤能够在监测建筑结构时对结构的潜在危险提供早期

预警,也可以检测地面运动或超载造成的结构中某处的超额应力。此外,还可以将一根标准的光纤分布安装在一个或一组建筑结构中,用来监测结构中的过热点并给出过热点的具体位置。这种光纤传感技术可以在极早期发现可能发生的断裂或火灾,从而可以最大限度地减少人员伤亡和财产损失。

这种新的光纤传感监测技术有4个主要的应用领域:

- ① 结构的健康监测和损伤评估;
- ② 实验力学的应力分析与测量;
- ③ 周界安全的监测与预警;
- ④ 系统的设备运行状态报告和管理控制。

第①个应用领域包括对不同种类混凝土结构(如混凝土梁、柱、拱和板)的弯曲和挠度的测量。由于很难对复杂结构的应变场建立准确的模型,因此在实验力学的应力分析与测量领域,即第②个应用领域,可以利用光纤白光干涉传感技术测量复杂结构的应变场,然后通过比较应变场和挠度的实际测量值以及模型计算值确定更精确的设计参数,进而提高结构的安全性并降低建造成本。光纤白光干涉传感技术特别适合的第③个应用领域是目前市场需求日益凸显的周界安全的监测与预警,如国境边界线的入侵警戒与防护;围栏的悬挂式防卫;高速公路两侧以及飞机场周界的防护;核电站等重要区域的周边防护警戒。第④个应用领域包括桥梁的交通流量测量和机场跑道的监测。这种监测系统能够确定大型或高速卡车通过桥梁时超载路段的长度和流量,也可以监测机场跑道的飞机着陆情况。传感系统获得的这些信息可以帮助人们评估类似事件对建筑结构造成的影响。

基于以上考虑,发展实际的光纤白光干涉传感和测量技术是十分重要的。本书为设计和制作实际的监测系统提供了理论与技术上的支持,这种监测系统具有易于安装、成本低、可靠性高、可以多点测量和多路复用的特点,为深入开展工程技术研究,如国家边境安防,机场、核电站等重要区域的周界警戒,水库大坝、桥梁、山体斜坡、高速公路或超高层建筑等大型结构中安装或埋入光纤传感器的实际工程技术应用等,提供了有价值的方法和经验。

光纤传感器(FOS)技术的研究已经有40年的历史。与之前的电传感器相比,光纤传感器具有一系列优点,这些优点正在改变现有产品的制作方式,并为许多新系统的出现创造了机会。质量轻、尺寸小、抗高温和抗电磁场干扰等优点使光纤传感技术在工业领域,尤其是在光纤智能结构中具有广阔的应用前景。因此,近年来分布式和多路复用光纤传感技术引起了人们广泛的研究兴趣,发展了多种方法来实现全光纤传感系统。目前已经有多种成功用于智能结构的光纤传感器案例,如光纤布拉格光栅传感器、基于布里渊散射的BOTDR系统等。本书中的研究主要集中在测量分区以及区域内平均尺度较长的光纤白光干涉传感技术,这是因为在众多的建筑结构监测应用中,必须采用大尺度传感器才能实现区

域测量的目标。基于大型建筑结构的要求,进一步发展光纤白光干涉传感技术,如大尺度光纤传感器的设计及其复用技术、提高光纤传感器多路复用能力的方法和传感器的组网技术,对于实际应用具有非常重要的意义。

除了具备光纤传感器所共有的优点外,白光干涉技术还可以进行绝对形变的测量,这对以高相干度激光为光源的传统光纤干涉仪来说是无法实现的。光纤白光干涉仪的另一个优点是不需要使用相对复杂的时域或频域复用技术,就可以在空间相干域将多个传感器的信号复用到一路光信号中。另外,由于光纤白光干涉传感系统的传感器部分仅由一段标准光纤构成,因此传感器的结构简单,成本低,易于制作和安装,并且传感器的长度选择具有很大的灵活性,可以短至几厘米,也可以长至数十米甚至数百米。以上这些特性使光纤白光干涉传感系统对使用者具有较大的吸引力。

本书共有9章,分为3个主要部分。第一部分由第1章构成,主要对光纤白光干涉传感技术和光纤智能结构的相关问题进行了概述。第二部分由第2章~第6章组成,详细地论述了与光纤白光干涉传感器相关的技术基础问题,包括光纤白光干涉传感基本原理、光纤传感器设计与制备的相关问题;针对混凝土基体和土基体这两种典型的应用过程中的基本问题,给出了若干实验基础研究结果;针对传感器感知性能的力学传递特性,介绍了光纤传感器与其周围材料之间的相互作用模型。第三部分包括第7章~第9章,主要讨论了基于白光干涉的光纤传感技术的多路复用传感技术,以及基于环形拓扑结构的传感网络工作原理、具体应用及其解调系统的简化方法。

本书涉猎的内容是作者十几年工作积累的结果。作者特别感谢 Farhad Ansari 教授,他目前作为土木工程系的主任在美国伊利诺斯大学工作。作者有幸在1995—1997年间,在他的指导下开展了将光纤传感器应用于土木工程的跨学科研究工作。作者还要感谢清华大学土木工程学院的李庆斌教授,书中一些关于混凝土与光纤相互作用的实验就是在清华大学共同完成的;感谢同济大学桥梁工程系的章关永教授的有益讨论,使得作者能够对桥梁结构有所了解;感谢香港理工大学机械工程系的周利民教授以及香港理工大学电机工程系的靳伟教授,本书的后3章主要是在香港完成的,没有他们的指导与帮助,这些工作是难以完成的;感谢香港理工大学机电工程系的 Y. L. Hoo 博士、居剑博士在实验方面的帮助;感谢周爱博士、宋红彬博士、朱晓亮博士不辞辛劳地协助将作者多年来所发表的论文翻译、整理成中文。

由于作者水平有限,书中难免存在不妥之处,敬请读者批评指正。

作 者  
2010年8月于哈尔滨

# 目 录

<b>第 1 章 导 言</b> .....	1
1.1 智能结构的概念 .....	1
1.2 光纤传感器在智能结构中的应用 .....	2
1.3 结构健康监测的需求 .....	4
1.4 光纤白光干涉仪发展的简要回顾 .....	8
1.5 用于结构健康监测的白光干涉式光纤传感器的优点.....	10
1.6 小 结.....	11
参考文献 .....	11
<b>第 2 章 光纤白光干涉应变与温度的测量方法</b> .....	18
2.1 引 言.....	18
2.2 光纤应变与温度传感基本方程.....	18
2.3 光纤白光干涉仪工作原理.....	20
2.4 应变和温度测量技术.....	23
2.4.1 应变测量原理.....	24
2.4.2 温度测量原理.....	25
2.5 热表观应变与温度补偿技术.....	25
2.6 小 结.....	27
参考文献 .....	27
<b>第 3 章 埋入式光纤传感器的设计、集成与安装</b> .....	29
3.1 引 言.....	29
3.2 预埋金属基封装结构传感器.....	29
3.2.1 金属封装结构设计.....	29
3.2.2 用于形变测量的光纤制备.....	30
3.2.3 传感器集成.....	31
3.3 预埋环氧基封装结构传感器.....	31
3.3.1 传感器设计.....	31
3.3.2 硅橡胶模型的制备.....	32
3.3.3 预埋环氧基传感器的制备.....	33
3.4 预埋混凝土基传感器.....	34
3.5 预埋土体传感器.....	35
3.6 将传感器安装于结构中的相关问题.....	38
3.7 小 结.....	41

参考文献 .....	41
<b>第 4 章 用于混凝土构件的基础实验 .....</b>	<b>42</b>
4.1 引言 .....	42
4.2 光纤白光干涉引伸计 .....	42
4.2.1 系统结构 .....	42
4.2.2 光程分析方法 .....	43
4.2.3 信号强度计算方法 .....	45
4.3 应变测量的基础实验 .....	46
4.3.1 混凝土试件的准备 .....	46
4.3.2 应变传递过程 .....	48
4.3.3 表贴光纤引伸计测量方法 .....	48
4.3.4 埋入式光纤引伸计测量方法 .....	50
4.4 温度测量 .....	53
4.5 CTOD 测量 .....	55
4.6 温度与 CTOD 两用测量方法 .....	58
4.7 小结 .....	59
参考文献 .....	59
<b>第 5 章 用于土体形变测量的基础实验 .....</b>	<b>60</b>
5.1 引言 .....	60
5.2 土力学传感器的标定 .....	60
5.2.1 标定试验装置 .....	60
5.2.2 实验结果 .....	61
5.3 土坝模型形变的测量 .....	62
5.3.1 土坝模型 .....	62
5.3.2 实验结果 .....	64
5.4 边坡模型形变的监测 .....	64
5.4.1 高边坡模型 .....	64
5.4.2 实验结果 .....	65
5.5 小结 .....	66
<b>第 6 章 光纤传感器和基体材料的相互作用 .....</b>	<b>67</b>
6.1 引言 .....	67
6.2 应变传递函数 .....	68
6.3 主体材料中的线性应变分布 .....	72
6.4 温度影响与表观应变 .....	77
6.5 实验评估方法 .....	78
6.5.1 埋入环氧基体材料中的光纤的应变响应 .....	78



6.5.2 埋入水泥基体材料的光纤传感器的温度特性	82
6.6 小 结	84
参考文献	85
<b>第 7 章 光纤白光干涉传感器的多路复用技术</b>	<b>87</b>
7.1 引 言	87
7.2 光纤开关多路复用方案	87
7.3 光纤环形谐振腔多路复用技术	90
7.3.1 线性阵列复用方法	90
7.3.2 平行阵列复用方法	96
7.3.3 $M \times N$ 传感器阵列	99
7.3.4 传感器复用容限的评估方法	102
7.4 长 F-P 谐振腔多路复用技术	105
7.5 Mach-Zehnder 与 Fizeau 干涉仪串接复用技术	112
7.5.1 传感线阵	112
7.5.2 传感矩阵	118
7.6 Mach-Zehnder 干涉仪串接复用技术	121
7.7 Mach-Zehnder 与 Michelson 干涉仪的组合复用技术	126
7.8 改进的 Michelson 光纤干涉仪多路复用方法	129
7.8.1 Michelson 光纤干涉仪自相关多路复用技术	129
7.8.2 改进的 Michelson 光纤干涉仪多路复用方法	130
7.9 相关问题讨论	133
7.9.1 偏振效应	133
7.9.2 光纤传感器的长度优化	136
7.10 小 结	136
参考文献	136
<b>第 8 章 基于环形拓扑的光纤白光干涉传感器网络</b>	<b>139</b>
8.1 引 言	139
8.2 Michelson 解调系统	140
8.2.1 Michelson 解调仪	140
8.2.2 光路分析	140
8.2.3 传感器的干涉信号幅值	141
8.2.4 多路复用容限评估	143
8.2.5 实验结果	144
8.2.6 偏振效应	146
8.3 Mach-Zehnder 解调系统	147
8.3.1 Mach-Zehnder 解调仪	147
8.3.2 光程分析	148

8.3.3	传感器干涉信号幅值 .....	149
8.3.4	多路复用容量的评估 .....	151
8.3.5	测试方法 .....	153
8.3.6	偏振态的影响 .....	154
8.4	双环光纤传感器网络拓扑结构 .....	154
8.4.1	双环多路复用原理 .....	155
8.4.2	输出信号特性 .....	156
8.4.3	复用容量的评估 .....	159
8.5	小结 .....	163
	参考文献 .....	163
<b>第9章</b>	<b>解调系统的重构与简化 .....</b>	<b>165</b>
9.1	引言 .....	165
9.2	基于 Michelson 干涉仪的系统简化方法 .....	165
9.2.1	简化的 Michelson 干涉仪阵列 .....	165
9.2.2	基于 $2 \times 2$ 耦合器的 Michelson 干涉仪简化结构 .....	167
9.2.3	基于 $3 \times 3$ 耦合器的简化传感解调系统 .....	171
9.3	一种简化的 Mach - Zehnder 和 Michelson 干涉仪组合系统 .....	177
9.4	基于 Fabry - Perot 谐振腔的简化系统 .....	179
9.5	小结 .....	182
	参考文献 .....	182
<b>结    语</b>	.....	<b>184</b>
<b>附录</b>	<b>符号说明 .....</b>	<b>186</b>

# 第1章 导言

## 1.1 智能结构的概念

20世纪末,多学科的交叉应用使工程设计理念发生了革命性的改变,并赋予无生命的结构以智能的特性。材料与结构工程、传感系统、执行与控制系统以及神经网络等多个学科的相互融合产生了多种多样的结构<sup>[1]</sup>,其重要性如图 1.1 所示。这一新技术的应用可以使某一结构能够感知、响应外界的环境,并根据环境的变化自动调节自身的状态。这一转向对于工程学科而言意义深远,使我们得以看到未来这一技术的影响。

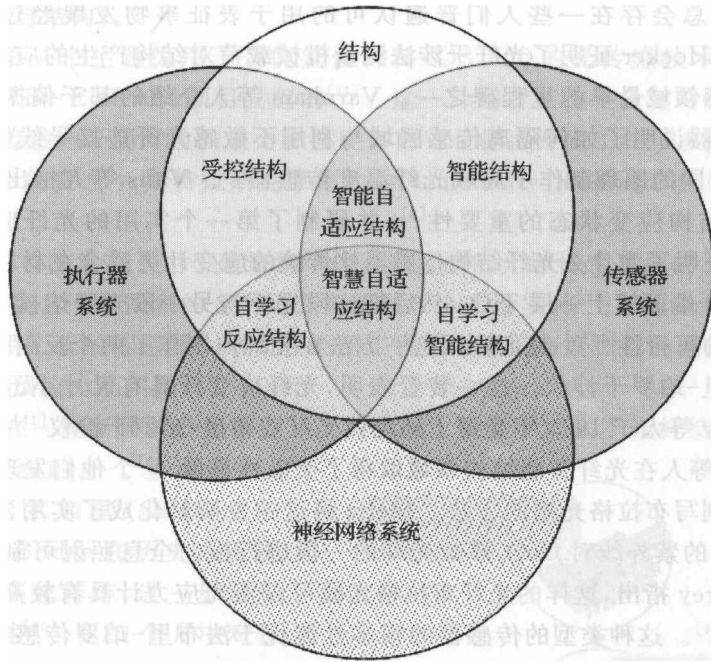


图 1.1 材料与结构、传感系统、执行与控制系统和自适应学习神经网络四个学科相互交叉形成的结构特性 (Measures, 1992)

“智能”这一术语已广泛用于人们的日常用语之中<sup>[2]</sup>,而自诊断是智能结构发展的第一步。当一个结构产生故障或受到损坏时,如果自身不能感知,那么就很难称之为“智能”。在实现结构自诊断功能的众多方法中,将光纤传感器集成到结构中是最有发展前景的方法之一,通常称之为“结构集成”。所谓“结构集成”,就是将传感器固定在结构表面或埋入结构内部,并将传感器看做整个结构的一部分,从而使结构具有内置的传感特性。这种传感系统能够连续监测主结构的状态并对施加在主结构上的载荷(热载荷和机械载荷)作出响应,因此在许多工业领域能够提高安全性能和经济效益。

Measures 在 1989 年对“智能结构”进行了阐述<sup>[3]</sup>,提出“被动控制式智能结构”,是指在结

构中集成了光纤传感系统以检测结构的状态;而“主动控制式智能结构”除了包含结构集成的光纤传感系统外,还有执行系统。1990年 Wada 等人提出,将仅包含传感元件的结构称为“感知结构”更合适<sup>[4]</sup>。

本书中,将下面 3 类系统统称为智能结构:

- ① 结构集成的传感系统;
- ② 结构集成的传感和执行系统,执行控制系统使用感知信息来改变结构状态;
- ③ 结构集成的传感和执行系统,并能够从经验中学习的结构。

本书中所提及的传感系统主要是指基于光纤技术的传感系统。

## 1.2 光纤传感器在智能结构中的应用

由于受研究人员知识局限性的影响,对任何新产生的学科进行准确的描述都不是一件容易的事情。然而,总会存在一些人们普遍认可的用于表征事物发展经过的里程碑事件。1978年 Butter 和 Hocker 证明了光纤干涉法测量机械载荷对结构产生的应变<sup>[5]</sup>,可以将其看做是光纤结构传感领域最早的里程碑之一。Varnham 等人介绍的基于偏振的光纤应变仪<sup>[6]</sup>也很重要,此传感器说明了如何隔离传感区域与利用不敏感光纤连接导线构成局部传感器。Corke 等人使用相同的原理制作了局域光纤温度传感器<sup>[7]</sup>。Valis 等人指出“应变张量”的测量对于唯一确定结构应变状态的重要性<sup>[8]</sup>,并研制了第一个实用的光纤应变花(strain rosette)<sup>[9]</sup>,同时也证明了为什么光纤结构传感器比传统的应变计更适合在材料中集成。Lee 和 Taylor 提出在光纤端面镀上一层  $\text{TiO}_2$ ,然后把这段光纤与另一段光纤熔接在一起,从而在光纤内形成反射镜的可行性<sup>[10]</sup>。他们利用这一方法在光纤内制作了两个反射镜,形成了第一个内腔式光纤法布里-珀罗干涉仪。这一装置表明,光纤应变计具有尺寸小、灵敏度高的特点。与此同时,Murphy 等人于 1991 年介绍了外腔式光纤法布里-珀罗干涉仪<sup>[11]</sup>。

1978 年 Hill 等人在光纤智能结构领域取得了突破性进展<sup>[12]</sup>。他们发现了利用紫外线照射在光纤纤芯内刻写布拉格光栅的方法。Meltz 将这一发明转化成了实用器件<sup>[13]</sup>,并指出了用波长为 248 nm 的紫外线对  $\text{GeO}_2$  掺杂光纤的一段进行横向全息照射可制成纤芯布拉格光栅的可能性。Morey 指出,这样的光纤布拉格光栅可以使光应力计具有较高灵敏度而光纤连接导线并不灵敏<sup>[14]</sup>。这种类型的传感器的很多性能优于法布里-珀罗传感器,例如传感器尺度的多样性和生产的自动化使在制作光纤的过程中用强紫外线照射即可完成光栅的制作<sup>[15-18]</sup>。横向全息光栅写入方法已基本被成本更低的相位掩膜技术(phase mask technique)取代<sup>[19]</sup>。1992 年,Measures 等人开发了一种简易的被动读取光纤光栅的方法<sup>[20]</sup>。目前,越来越多的光纤布拉格光栅询问系统已被世界上许多公司商用化。

Sirkis 和 Haslach 首先认识到在将光信号解释成基体材料的应力之前,应对一些主要问题进行论述,无论此光信号是来自法布里-珀罗干涉仪的相位变化还是布拉格光栅传感器的波长变化<sup>[21]</sup>。

任何重视结构统一性的复合材料用户都将受益于简单的内置光纤损伤测试系统。嵌入光纤的断裂是一种最简易的损伤评价技术。最初为实现这一概念的尝试而构建的系统只能检测重度损伤<sup>[22,23]</sup>。Measures 等设计了一种特殊的刻蚀处理方法,这种方法使光纤的损伤灵敏度可调整到几乎肉眼看不出的冲击损伤也能得以测量<sup>[24]</sup>。嵌入到飞行器机翼前缘的刚体成功

展示了这种光纤能够检测冲击引起的断层区域的能力<sup>[25,26]</sup>。

光纤结构传感器的多路复用串行和并行阵列及分布式应力测量代表了当前光纤结构传感的发展及应用领域的热点。一些课题组包括美国海军研究实验室(the U. S. Naval Research Laboratory)<sup>[27,28]</sup>、肯特大学(University of Kent)<sup>[29]</sup>、南安普顿大学(University of Southampton)<sup>[30-32]</sup>和多伦多大学(University of Toronto)<sup>[33]</sup>已经在这一领域取得了重大成就。

专题会议的出现是确认新研究领域蓬勃发展的晴雨表。1988年 SPIE 在波士顿首次主办的光纤智能结构和智能皮肤会议也可归类为光纤结构传感领域<sup>[34]</sup>。美国于1991年11月组织的有关智能材料和自适应结构的研讨会是第一个涵盖了智能自适应结构各个领域的国际会议。但早在1990年,在夏威夷的檀香山(Honolulu)就举办了美日智能材料和系统的专题研讨会<sup>[35]</sup>。

专门学术杂志的创办也是对一个新领域认可的更清晰的标志。1990年 Technomic Publishing, Inc. 出版社 Craig Rogers 主编出版了《智能材料系统和结构》;1992年英国物理学会(the Institute of Physics)出版了 Richard O. Claus, Gareth J. Knowles 和 Vijay K. Varadan 主编的《智能材料与结构》。

这一领域的第一个主题为用于智能复合材料(OSTIC)的光传感技术的欧洲计划是于1988年作为 BRITE - EURAM 项目发起的<sup>[36]</sup>。这一计划旨在在复合材料中演示动态应力测量以及利用单根传感光纤同时检测应力和温度。前一目标由开发了相干多路复用偏振计传感器的 Bertin et Cie 负责<sup>[37]</sup>。斯特拉斯克莱德大学(University of Strathclyde)主要承担了后一研究目标的工作<sup>[36]</sup>。

1992年12月首次发起了用于建筑物结构健康监测的光纤传感系统的 BRITE - EURAM II 计划,其中包括来自5个国家的8个研究机构和5个工业实体<sup>[38]</sup>。这一3年计划的目标是要演示民用和军用工程的传感器。然而在民用工程中考虑了高度加载的基体,例如斜拉索、悬吊缆、绷绳地锚和预应力筋用锚具。

1993年首次在一座新建的公路桥的预浇筑混凝土桥梁中埋入了光纤结构传感器阵,这是光纤结构健康监测的一个里程碑<sup>[39]</sup>。

加拿大南部的卡尔加里(Calgary)的 Beddington Trail Bridge 在历史上首次在桥梁中使用了碳纤维,进一步提高了此进展的重要性<sup>[40]</sup>,在20个月中对各传感器进行不定期监测,以跟踪碳纤维和钢筋所经受的应力。

第一座所谓的“智能桥梁”为新结构智能传感核心网的形成开创了先例。在加拿大,这个重要新方案是为了将复合材料与光纤结构传感应用到建筑工业中而确立的。这项工作最初是基于如图1.2所示的5个主题展开的。为规划一持续性的5年研究计划,在美国国家科学基金会(the U. S. National Science Foundation)、州立高速公路管理局和新

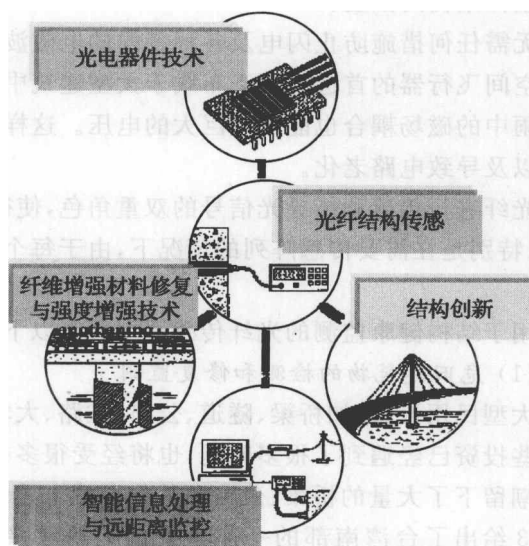


图 1.2 智能桥梁的 5 个主题

泽西交通部(the New Jersey Department of Transportation)的资助下,召开了一个国际性研讨会。这一5年计划的目标是实现光纤传感技术在建筑材料和桥梁中的应用<sup>[41]</sup>。

在易震区急需改善建筑物结构设计,以提高抗破坏性地震的能力和开发可减轻地震影响的技术。为便于最新信息的交流和传播(包括全面测试和新技术演示),美国国家科学基金会专门成立了结构控制研究小组<sup>[42]</sup>。

过去20年光纤结构传感领域经历了从相当粗糙的实验室实验研究到可与传统技术相抗衡的商业化监测系统的重大转变。然而使这项技术方兴未艾的是新型测量而不是传统结构健康监测技术的实用化,例如大尺度、串行复用和真正意义上的分布测量系统等。与此监测技术发展相媲美的是,钢材在建筑工业领域和铝制品在航空航天领域应用的先进合成材料的出现。各种各样新技术的结合将引领多功能智能材料新时代的前沿不断向前发展。

### 1.3 结构健康监测的需求

为什么建筑物需要监测系统呢? Aktan 等给出了两个原因说明了为何要将结构健康监测系统嵌入桥梁中<sup>[43]</sup>。第一,人们需要了解桥梁的实际承载环境和相应的桥梁响应。目前在人们对桥梁的实际承载尤其是极限承载的理解和桥梁所经历的承载之间存在重大差距。在对于桥梁的寿命和老化的理解中,这一差距变得更为显著。第二,结构健康监测系统可决定这种自动采集的信息能否减少目测的需求,从而提供一个结构趋于破损的客观指标。

为什么要用光纤传感技术进行结构健康监测呢? 这是很多正在面对新技术的工程师们提出的很有道理的问题。这里需要作一些论述。光纤传感器可以进行一些对于传统测量技术来说不实际或不经济的测量,例如金属箔式应变计。光纤传感器在很多方面优于基于电的传感器,比如尺寸小,质量轻,对应变和温度变化敏感,抗腐蚀,抗疲劳,带宽宽等。因为光纤具有绝缘性,因此可与FRP复合材料或混凝土兼容;操作安全,不易起火或爆炸,不受电磁波干扰,不影响基体结构的强度。

无需任何措施防止闪电及各种各样的电磁波的特性,使光纤传感器成为监测大型民用建筑和空间飞行器的首选。对于布线于大型建筑中的电传感系统,即使没有直接的闪电,猛烈的暴风雨中的磁场耦合也能产生巨大的电压。这样的电压很有可能会烧毁电子系统中的各种元器件以及导致电路老化。

光纤进行传感和传导光信号的双重角色,使得光纤传感器的结构要比传统的传感器简单得多;特别是在需要传感阵列的情况下,由于每个传感阵列包含了很多传感器,这种优势尤为明显。

用于结构健康监测的光纤传感器主要有以下几方面的应用。

#### (1) 危旧建筑物的检测和修复监测

大型民用设施,如桥梁、隧道、公路、铁路、大坝、海港和机场,都融入了巨大的经济投入,近来这些投资已经遇到了很多问题,也将经受很多根本性的变化。19世纪五六十年代兴起的建筑大潮留下了大量的桥梁、公路和其他混凝土建筑,这些建筑都亟需修复或重建。作为实例,图1.3给出了台湾南部的一座主要的大桥于2000年5月倒塌时的景象。在这场事故中,16辆汽车和1辆摩托车受损,22人受伤。如果之前对这座大桥进行结构监测,或许能够避免这场重大事故的发生。通常通过辨别建筑物的异常振动方式和频率,或不规则的应变分布,监

测其静态和动态响应,就可以获知结构健康状况。



图 1.3 台湾大桥倒塌时的图片

为修复和加固既存的破损混凝土结构,不得不对损坏的结构进行翻新,而采用纤维增强聚合物(FRP)板材和包裹材料是一种很有前景的选择。如图 1.4 和图 1.5 所示,智能纤维增强聚合物修复和加固部件的发展也将促使结构加固和光纤监测系统的使用。

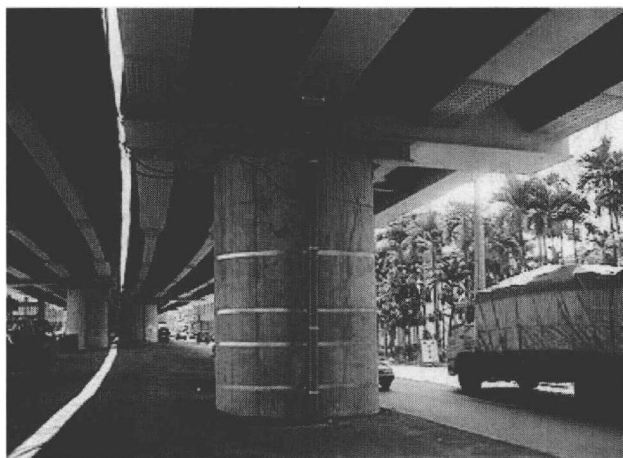


图 1.4 桥梁修复时光纤集成结构检测的潜在应用

在地震、爆炸或撞击后,可应用这些传感监测技术对既存建筑物进行结构整体性的评价以及确定所受损害的程度。当超载的卡车驶过桥梁,需要对桥梁的响应进行监测时,这种传感监测技术也可找到用武之地。

## (2) 新材料的使用和创新的结构设计

出于对新建筑设计上的考虑,目前的经济思潮引发了从“建设成本”到“寿命成本”的转变。这种形式的变迁带动了创新的设计和非传统材料的使用。例如:纤维增强聚合物材料的应用已走向更富有想象力的结构的最前沿,这些结构具有非常优越的性能,如需要很少的维护和低

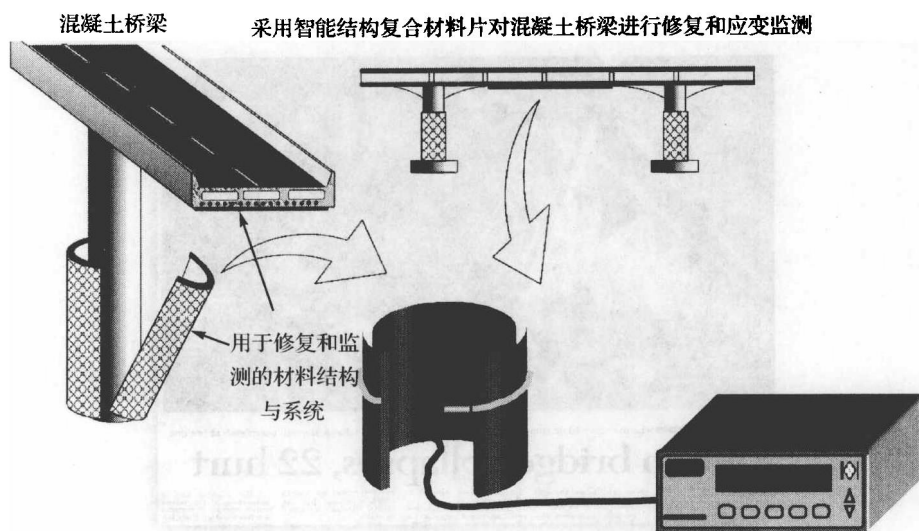


图 1.5 结构加固和监测系统

寿命成本等<sup>[44]</sup>。纤维增强聚合物材料在以下方面优于钢材：

- ① 高强度质量比；
- ② 高硬度质量比；
- ③ 较强的抗腐蚀性，如抗盐水；
- ④ 可适应复杂的形状；
- ⑤ 碳和芳族聚酰胺纤维增强聚合物具有优良的抗疲劳特性；
- ⑥ 免受电磁波干扰；
- ⑦ 低热膨胀轴向系数(特别是 CERP)。

然而，纤维增强聚合物材料也有其缺点：

- ① 高成本；
- ② 低弹性系数；
- ③ 低破坏应变和很多破坏模式；
- ④ 高轴向侧向强度比；
- ⑤ 长期强度低于短期强度；
- ⑥ 易受紫外线损伤。

纤维增强聚合物中三种主要的纤维为碳、芳族聚酰胺和玻璃。纤维的支撑基体通常是一些形式的热硬化环氧树脂。

显然，与传统材料相比，这些新材料可在更加广泛的范围内满足性能要求。然而这些材料的使用范围也面临着减小的趋势，因为很难将它们融入那些在破坏发生时可提供诉讼保护的设计规范中。随着经验的积累，为反映这些材料的应用，不久以后很有可能对设计规范进行修改。将这些具有创新性的结构与内嵌式光纤结构健康监测传感器结合起来，可弄清这些新材料的运行状况，有助于减少隐患，促进纤维增强聚合物在建筑业中的广泛应用。

显然，很多重要的因素都促使光纤结构健康传感在今后 10 年的建筑业中成为至关重要的新技术。有迹象表明，纤维增强聚合物材料将取代混凝土内嵌入的钢材，这种材料在修复和



加固既存混凝土建筑中的应用也将快速增长<sup>[45,46]</sup>。

### (3) 健康状况监测和无损伤评价

有时一些事故本身不会导致伤亡,但会削弱建筑物的强度,从而引发更加严重的事故。如果在这些建筑物的适当位置嵌入某种形式的健康监测系统,就很有可能避免这些严重事故的发生。

令人满意的结构健康监测系统应该能够识别危急状况,调整扫描频率和动态范围,对一些应该保存的数据和可以忽略的数据进行初步评价;同时,可将那些被视为相关的信息,如响应强度和形变模式,转化成视觉图形,这样工程师们即可很快作出评定。

持续不断的结构健康监测可提高建筑物的安全系数。通常的条件监测都是通过建筑物内的传感器集成器件进行的。最好的例子就是光纤智能螺栓。光纤的外径小(通常小于250 μm),便于螺栓或其他元器件以一种不影响整体性和器件强度的方式埋入。这意味着埋入的器件可以作为建筑物的一个固定部分进行测试,这是任何传感应变计不可比拟的。图1.6给出的示例为一嵌有光纤传感器的螺栓。

光纤传感器也可设计成感应热和力学信息的传感器。此外,理论上光纤同时作为传感部件和感应信息传导通道的独一无二的特性,可使其获得长度方向上任意一点的应变和温度信息。此特性使一根光纤可对主要的高危电力传输线进行预警<sup>[47]</sup>,也可探测出由于来自地面某点不可承受的移动而引起的输油管道上的过应力。一根贯穿于一座建筑物或建筑物群的光纤也可以对过热点的状况进行报警并提供该过热点的位置信息。这项技术也可在足够早的阶段获知火灾点,从而减少物资损害和人员伤亡。

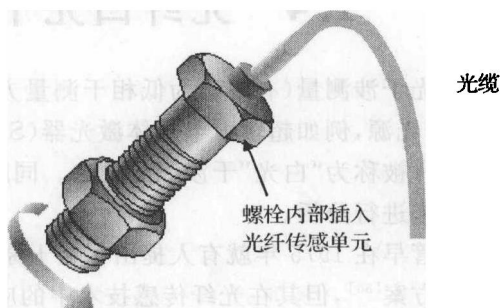


图 1.6 嵌有光纤传感器的螺栓

一般而言,很多不同的领域可从以下3方面受益于集成结构健康监测:

- ① 改善性能;
- ② 降低成本;
- ③ 提高安全性。

实际上,可以预见4类测量技术将成为新的监测技术:

- ① 结构健康监测和损伤评价;
- ② 实验应力分析;
- ③ 周界安全的监测与预警;
- ④ 系统的设备运行状态报告和管理控制。

第①类应用包括对各种混凝土结构的倾斜和弯曲进行测量,如横梁、柱、拱和平板。在现场试验应力分析中,可对一些很难建模的复杂结构进行应力场的测量。通过对实际的应力场及倾斜与计算模型预测的结果进行比较,可确定更加准确的设计系数,从而使建筑物更加安全和经济。在第②类应用中,由于很难对复杂结构的应变场建立准确的模型,因此在实验应力分析领域,可以利用光纤白光干涉传感技术测量复杂结构的应变场,然后通过比较应变场和挠度的实际测量值以及模型计算值,确定更精确的设计参数,进而提高结构的安全性并降低建造成