

光纤光栅传感 应用问题解析

孙 丽◎著



科学出版社

光纤光栅传感应用问题解析

孙 丽 著



YZLI0890121694

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书从光纤光栅传感器的基本理论出发,对光纤光栅传感元件在设计、安装和使用过程中可能遇到的问题进行了分析探讨。具体内容包括:光纤光栅的基本理论;光纤光栅传感器设计与制作;光纤光栅传感器应变标定的常见问题分析与处理;光纤光栅传感器的动态响应时间分析计算;光纤光栅传感器可测频率范围计算方法;应变传递误差理论分析与计算方法;光纤光栅传感元件温度补偿技术与温度灵敏度系数计算;FBG-GFRP 智能筋设计与使用过程中的常见问题分析;使用光纤光栅传感器时的数据分析与处理方法。

本书注重理论与实践相结合,既有光纤光栅传感器试验也有现场监测的典型实例,可作为高等院校土木工程、光学工程专业教师、研究生和高年级本科生的参考书,也可供从事光纤传感器技术的研究与开发、生产与应用的科研人员和工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

光纤光栅传感应用问题解析/孙丽著. —北京:科学出版社,2011

ISBN 978-7-03-032781-9

I. ①光… II. ①孙… III. ①光纤器件-光电传感器-研究 IV. ①TP212.14

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 233167 号

责任编辑:沈 建 / 责任校对:包志红
责任印制:赵 博 / 封面设计:耕者设计工作室

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>

北京彩虹伟业印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2012 年 1 月第 一 版 开本: B5 (720×1000)

2012 年 1 月第一次印刷 印张: 12 1/2

字数: 241 000

定价: 60.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

近年来,我国经济发展迅速,大型土木工程和水利工程如雨后春笋,不断兴建。由于环境侵蚀、材料老化、疲劳效应、突变效应等因素的耦合作用,建筑物和构筑物在服役过程中不可避免地产生损伤累积,造成承载力降低,在极端情况下容易引发灾难性的事故。针对重大工程结构进行实时结构健康监测、及时识别结构的累积损伤,对可能出现的灾害提前预警,不仅可以提高结构的安全性和可靠性,还可以降低结构的运行和维护费用。

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逐渐成为结构工程学科的一个重要研究方向。相对于传统传感器,光纤传感器具有体积小、重量轻、可植入结构、可复用以及无电磁干扰等优点,因而成为土木结构健康监测领域应用前景最好的核心传感元件之一。在各种光纤传感器中,光纤光栅传感器由于适用于恶劣环境下的长期监测,成为最具发展前景的电类传感器的替代品。

目前,国内外的研究大都热衷于光纤光栅传感元件的开发,但还没有针对光纤光栅传感元件的统一的、专门的设计标准和安装规范,以及数据处理的规程。在光纤光栅传感器的设计、安装和使用过程中,使用者由于对传感器的设计原理和传感原理的缺乏了解,因而不能正确安装光纤光栅传感器或是不能正确处理获得的传感数据,进而引起测量结果不准确或是长期结构健康监测数据不可靠。

本书从光纤光栅传感器的基本理论出发,与工程实践相结合,对光纤光栅传感元件在设计、安装和使用过程中可能遇到的问题进行了分析探讨。

全书共分八章。第1章是绪论,介绍了光纤光栅传感器在结构健康监测中的应用现状和光纤光栅传感器的优点;第2章介绍了光纤光栅传感理论与传感元件设计;第3章是光纤光栅传感器标定常见问题分析与处理;第4章介绍了光纤光栅动态响应时间与可测频率计算;第5章对考虑温度与埋设角度的复杂光纤光栅应变传递问题进行了深入研究,并对已有的几种埋入式应变传递计算方法进行了分析、比较;第6章是FBG-GFRP智能筋设计与使用过程中的常见问题分析;第7章是光纤光栅传感元件温度补偿技术与温度灵敏度系数计算;第8章详细介绍了使用光纤光栅传感器时的数据分析与处理方法,并在书中列举了土木工程试验中光纤光栅传感器的应用和采用光纤光栅传感器进行现场监测的典型实例。

本书是作者与合作者多年的研究工作总结。

春风化雨,润物无声,深深感谢导师李宏男教授和王苏岩教授多年来的教诲、

关心和支持,以及对本书的大力推荐。感谢大连理工大学的周晶教授、柳春光教授和任亮博士长期以来对作者的支持和帮助。感谢在成书过程中给我巨大帮助的同事、学生以及出版社的编辑。

本书的研究工作得到了国家自然科学基金青年基金项目(10902073)和国家自然科学基金面上项目(51178277)、沈阳市科技局高新技术产业发展与科技攻关计划项目(F11-163-9-00)、住房和城乡建设部科学技术计划项目(2010-k3-57 和 2010-k2-21)等项目的资助,在此一并表示感谢。

希望本书的出版能够对从事结构健康监测和光纤光栅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,恳请读者不吝赐教、指正。

孙 丽

2011 年于沈阳建筑大学

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 大型结构健康监测的必要性	1
1.2 光纤光栅传感器的优越性	2
1.2.1 光纤光栅传感器系统的组成	2
1.2.2 光纤光栅传感器的特点	2
1.3 光纤光栅传感器在健康监测中的应用	3
参考文献.....	5
第 2 章 光纤光栅传感理论与传感元件设计	7
2.1 光纤光栅传感理论	7
2.2 光纤光栅传感器设计准则.....	10
2.2.1 基本原则	10
2.2.2 实际工程中光纤光栅传感器的要求	11
2.2.3 设计流程	11
2.3 光纤光栅应变传感器制作与标定.....	12
2.3.1 传感器结构与封装工艺	13
2.3.2 管式封装光纤光栅应变传感器的温度特性.....	14
2.3.3 管式封装光纤光栅应变传感器的优缺点	16
2.4 光纤光栅钢管封装温度传感器.....	16
2.4.1 传感器的封装结构	16
2.4.2 封装材料选择	17
2.4.3 封装工艺.....	18
2.4.4 温度传感器标定	19
参考文献	20
第 3 章 光纤光栅传感器应变标定常见问题分析与处理	22
3.1 应用等强度梁的应变标定误差分析与修正.....	22
3.1.1 等强度梁工作原理	22
3.1.2 力学分析.....	23
3.1.3 计算结果与标定	26
3.1.4 采用万能试验机的应变标定	27

3.2	不同“基体”材料上的应变灵敏度系数标定	28
3.3	小结	31
	参考文献	32
第4章	光纤光栅动态响应时间与可测频率计算	33
4.1	引言	33
4.2	光纤光栅应变传感器的设计种类	33
4.3	光纤光栅应变传感器动态响应时间	34
4.3.1	应变波的传播过程	34
4.3.2	光纤光栅应变传感器的应变响应时间	36
4.4	光纤光栅应变传感器可测频率的估计	36
4.5	光纤光栅应变传感器在低频振动系统中的应用	40
4.5.1	模型设计	40
4.5.2	传感器布置及数据采集系统	41
4.5.3	动荷载试验	42
4.5.4	试验结果与分析	43
4.6	小结	46
	参考文献	46
第5章	应变传递相关理论与计算	48
5.1	引言	48
5.2	光纤光栅传感器应变传递理论研究现状	49
5.3	考虑温度与埋设角度的应变传递分析	51
5.3.1	基本假设	51
5.3.2	理论分析	51
5.3.3	有限元计算	56
5.3.4	应变传递误差分析	60
5.4	影响应变传递的参数分析	62
5.5	几种埋入式光纤光栅应变传感器应变传递计算公式比较	65
5.5.1	基本假设的对比	65
5.5.2	光纤应变计算公式及其分析模型的对比	66
5.5.3	计算结果的对比	70
5.6	小结	73
	参考文献	74
第6章	FBG-GFRP 智能筋常见问题分析与计算	76
6.1	引言	76
6.2	FBG-GFRP 智能筋设计	77

6.3	FBG-GFRP 智能筋温度灵敏度系数计算	78
6.3.1	编制温度灵敏度计算器	79
6.3.2	FBG-GFRP 智能筋受力的有限元分析	81
6.3.3	温度灵敏度系数计算	83
6.4	FBG-GFRP 智能筋温度灵敏度标定实验	83
6.5	GFRP 筋受压力学性能研究	88
6.5.1	GFRP 筋端部加压锚具设计	88
6.5.2	GFRP 筋受压力学性能试验	89
6.5.3	两种监测方法的试验结果比较	90
6.5.4	极限抗压强度	91
6.5.5	破坏状态分析	93
6.5.6	结论	94
	参考文献	95
第 7 章	光纤光栅传感元件温度补偿技术与温度灵敏度系数计算	96
7.1	光纤光栅温度补偿技术	96
7.1.1	光纤基本结构与传输原理	96
7.1.2	光纤布拉格光栅温度传感模型	98
7.1.3	光纤布拉格光栅应变传感模型	99
7.1.4	均匀轴向应力作用下光纤光栅传感模型	100
7.1.5	光纤布拉格光栅应变传感的温度补偿技术	102
7.2	应力分析法计算温度灵敏度系数方法	103
7.2.1	钢管封装光纤光栅应变传感器温度灵敏度系数计算	103
7.2.2	埋入混凝土的钢管封装应变传感器温度灵敏度系数计算	106
7.2.3	FBG-GFRP 智能筋埋入混凝土工作时的温度灵敏度系数计算	109
7.3	温度灵敏度系数近似计算方法	112
7.3.1	表观温度灵敏度系数法	112
7.3.2	表观温度灵敏度系数法应用	113
	参考文献	115
第 8 章	实际应用中的数据分析与处理	116
8.1	钢筋混凝土固化期收缩应变监测	116
8.1.1	试验采用的光纤光栅传感器类型及其工作特性	116
8.1.2	传感器布设	117
8.1.3	钢筋混凝土养护期收缩应变监测试验数据分析	119
8.1.4	结论	123
8.2	框-剪结构模型振动台试验中的破坏监测	123

8.2.1	模型设计	124
8.2.2	试验加载方案	127
8.2.3	光纤光栅应变传感器的布设与保护	130
8.2.4	光纤光栅应变传感网络拓扑	132
8.2.5	试验结果与分析	135
8.2.6	结论	176
8.3	海底悬跨管段动力特性研究	177
8.3.1	模型与激励系统介绍	178
8.3.2	传感器布置与数据采集系统	179
8.3.3	试验工况	180
8.3.4	钢管封装的光纤光栅应变传感器的工作频率计算	181
8.3.5	两种应变传感元件试验结果比较	181
8.3.6	试验结果分析	183
8.3.7	结论	189
	参考文献	190

第 1 章 绪 论

1.1 大型结构健康监测的必要性

目前我国工程事故频繁发生,如房屋骤然倒塌、桥梁的突然折断等;洪水、地震、飓风、泥石流等自然灾害对建筑物结构造成的损伤;还有一些偶然荷载诸如爆炸、撞击等,都造成了重大的生命财产损失。例如,2008年1月10日起我国江苏、浙江、江西、安徽、湖北、湖南、河南、广东、重庆、广西、四川、云南、贵州、陕西、青海、甘肃、宁夏、新疆和新疆生产建设兵团等19个省级行政区均遭受严重的雨雪、冰冻灾害,房屋倒塌22.3万间,损坏86.2万间;大量输电塔等轻型结构都受到严重破坏^[1,2]。2008年5月12日我国四川省汶川县发生了8.0级的浅源地震,大量房屋、桥梁倒塌破坏,很多地区被夷为平地,倒塌房屋650余万间,人员死伤基本上都是因为房屋建筑倒塌被埋或被砸^[3]。2010年4月14日,我国青海玉树发生了7.5级地震,造成大量房屋破坏,重灾区结古镇的土木、砖木结构房屋几乎全部倒塌或严重破坏,教育、卫生、电力、通信、公路、水利等基础设施也受到严重破坏。2010年8月7日,我国甘肃舟曲县发生特大泥石流灾害,造成大量建筑物倒塌。建筑结构的安全性能、损伤与否、损伤程度等情况关系着人民群众生命和财产安全,因此建筑结构的健康监测与损伤诊断是极其重要的。

结构的健康监测与损伤诊断在土木工程中应用越来越广泛,对灾害的提前预警、结构损伤与否、损伤程度、剩余寿命等已成为建筑结构健康监测研究的热点。对建筑结构进行实时的监测和诊断,发现结构的损伤、测出损伤程度、损伤位置,评估其安全性和剩余寿命,对结构的维护有重要作用,不仅能够提高工程结构的运营效率,而且能够使人民生命和财产安全有更好的保障,目前已经成为土木工程研究发展的一个重要方向。结构健康监测系统可以实时采集结构当前状况的数据,采用一定的损伤识别算法判断结构损伤的程度与位置,及时预测结构的性能变化,有效评估结构的安全性,也可以对突发事件进行预警。智能监控可以实现结构的自我感知、自我诊断以及自我调节,是当前土木工程未来发展的重要方向之一^[4,5]。

无论对结构进行健康监测还是智能控制,结构的实时测量都是必不可少的关键环节。

1.2 光纤光栅传感器的优越性

1.2.1 光纤光栅传感器系统的组成

光纤传感器是通过光纤传输的光波强度、频率、相位、偏振态等变化,测得波长的变化,从而得到被测结构的温度、应力等物理量的大小^[6]。

光纤传感器由纤芯、包层和涂覆层组成。纤芯和包层的主要成分为二氧化硅,为了改善纤芯的折射率,使光全内反射在纤芯中,一般常在纤芯中掺入微量的二氧化锗等掺杂物,纤芯直径一般为 $5\sim 50\mu\text{m}$,包层直径为 $125\mu\text{m}$ 。涂覆层的主要成分一般是环氧树脂、硅橡胶等高分子材料,直径一般为 $250\mu\text{m}$ ^[7]。在有些有特殊需要的场合,为了增强传感特性有时会对光纤进行加工处理。

光纤光栅传感器主要是利用光纤对环境变化的敏感性,由激光器发出光信号,在传感区域经调制后进入耦合器,使待测参数与进入调制区的光相互作用后,导致光的光学性质(如光的强度、波长、频率、相位、偏正态等)发生变化,称为被调制的信号光,在经过光纤送入光探测器,经解调后,获得被测参数。图 1.1 为反射式传感器系统的示意图,若把光探测器放在传感光纤的末端,则为透射式。

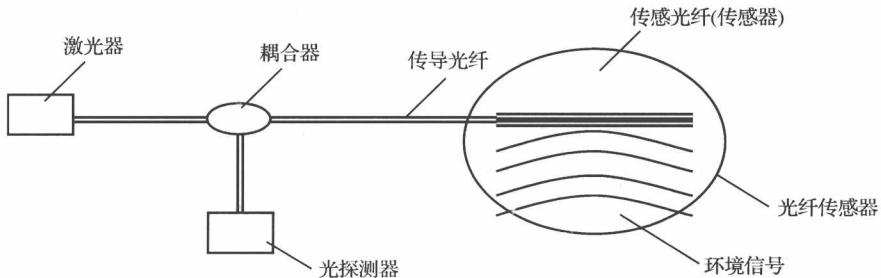


图 1.1 反射式光纤传感器系统示意图

光纤传感器一般由三个环节组成,即信号的转换、信号的传输、信号的接收与处理。其中信号的转换环节,是将被测参数转换成为便于传输的光信号。信号的传输环节,是利用光导纤维的特性将转换的光信号进行传输。信号的接收与处理环节,是将来自光导纤维的信号送入测量电路,由测量电路进行处理并输出。

1.2.2 光纤光栅传感器的特点

1978年, Hill等^[8]在掺锗石英光纤中采用驻波法首次成功地写入光纤光栅。1989年, Morey等^[9]利用两束干涉的紫外光从光纤侧面成功地写入光栅。此后光纤光栅传感技术迅速发展起来,在光纤通信和光纤传感领域中的影响逐渐被世人

所认可,而且成为光通信和光纤传感领域不可缺少的基础性光子元件。

光纤传感器可以分为传感型和传光型两大类。利用外界因素改变光纤中光波的特征参量,从而对外界因素进行计量和数据传输的传感器,称为传感型光纤传感器,它具有传感合一的特点,信息的获取和传输都在光纤中进行。传光型光纤传感器是指利用其他敏感元件测得的特征量,由光纤进行数据传输,它的特点是充分利用现有的传感器,因而便于推广应用。

光纤传感器具有以下显著的优点:

(1) 抗电磁干扰、电绝缘、耐腐蚀、本质安全。光纤光栅传感器主要依靠光波传输信息,不受潮湿环境影响,耐久性好,可以抵抗恶劣环境的影响,安全性较好。

(2) 灵敏度高,精度高。

(3) 重量轻、体积小、可挠曲。常常制成不同大小和不同形状的传感器,以用于特殊环境中,这有利于航空航天以及狭窄空间的应用。

(4) 测量对象广泛。由于其优良的性能,目前已有不同种类的传感器测量物理量、化学参量等,既可以实现点测量,也可以实现分布测量。

(5) 对被测介质影响小,有利于在生物、医药卫生等具有复杂环境的领域中应用。

(6) 便于复用,便于成网,有利于与现有光通信设备组成遥测网和光纤传感网络。

(7) 成本低。有些种类光纤传感器的成本大大低于现有同类传感器。

1.3 光纤光栅传感器在健康监测中的应用

光纤光栅传感器以其自身的优点在结构健康监测中被广泛应用。1989年, Mendez 等^[10]最先提出了采用光纤传感器进行混凝土结构监测。随着研究的不断深入,光纤光栅传感器在结构健康监测中得到了飞速发展。目前,光纤传感器在土木工程中的应用范围非常广,如山体滑坡、桥梁、大楼、大坝等,尤其是复杂的、大型的结构体系中,采用光纤光栅传感器的监测系统监测效果要比其他监测系统好得多。

2002年, Ferraro 等^[11]根据光纤光栅传感器的监测原理,进行了温度和应变信号的传输分离,并采用光纤技术对隧道、岩石变形和地震进行监测。Udd 等^[12]应用光纤光栅传感器对桥梁进行监测,可以监测桥上的车速、车的重量,计算车的流量,其灵敏度甚至可以检测到桥上的行人。2003年6月,同济大学在卢浦大桥健康监测项目中,采用光纤光栅传感器监测了大桥在各种情况下的应力应变和温度变化情况,其成果在东海大桥结构健康监测系统设计中也有体现。2003年9月,上海紫珊光电技术有限公司自主研发了一种光纤光栅传感应变计,对北京中关村

某标志性建筑进行静态应变测量。2007年,黄艳红等^[13]依据光纤光栅传感器的传感原理及其优越性,介绍了光纤光栅传感器在桥梁缺陷监测和结构健康监测中的应用。在山东东营黄河公路大桥的健康监测中,哈尔滨工业大学课题组采用大量的光纤光栅应变传感器和温度传感器进行实时监测^[14],如图 1.2、图 1.3 所示,监测了桥梁施工中各种情况下的温度和应变情况。用 ANSYS 软件对重庆市广阳岛大桥(图 1.4 为刚开始主梁悬臂施工的广阳岛大桥主桥)进行计算分析,针对该桥梁的受力特点,在该桥梁受力较大的截面上布设了光纤光栅-纤维复合筋、光纤光栅应变和温度传感器共 50 余个,用来监测该桥关键截面的受力状态。纤维复合筋内部设置光纤光栅组成智能筋,其直径较大,长度较长(5m),同时发挥了传感器和加强筋的作用,各传感器相应布设图片如图 1.5 所示。

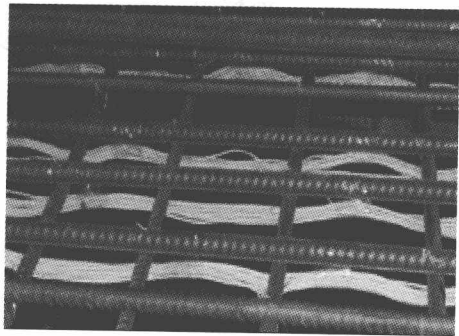
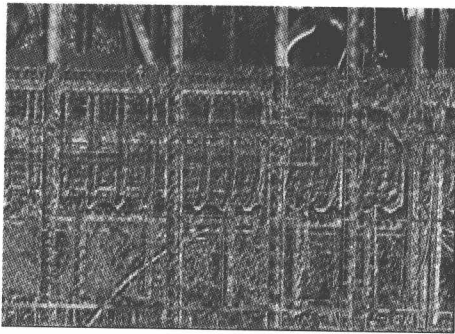


图 1.2 山东滨州黄河大桥光纤光栅传感器布设^[13]

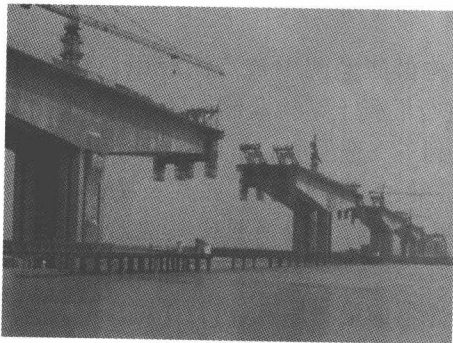


图 1.3 山东滨州黄河大桥光纤光栅监测系统^[13] 图 1.4 悬臂施工阶段的广阳岛大桥主桥^[14]

武汉理工大学将光纤光栅传感器引入桥梁长期健康监测预警系统中^[15],解决了传统监测手段无法长期稳定监测的问题;在江阴长江公路大桥上安装的健康监测系统中,主要监测加劲梁的位移、吊索索力、锚跨主缆索股索力以及主缆、加劲

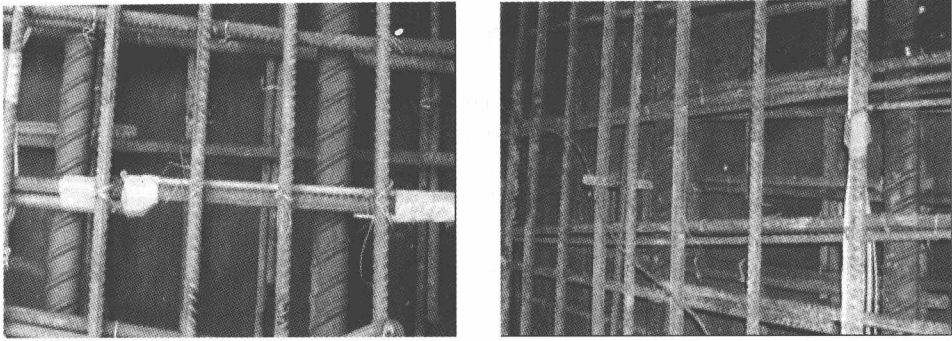


图 1.5 重庆广阳岛大桥光纤光栅传感器布设^[14]

梁、吊索的振动加速度等；在南京长江大桥上安装的健康监测系统中，主要进行温度、风速风向、地震及船舶撞击、墩位沉降，以及恒载几何线性、结构振动、主桁杆件应力、支座位移等方面的监测，工程的实际应用效果表明，基于光纤光栅传感器的结构健康监测系统的独特优良特性，是基于传统传感器健康监测系统所不能比拟的。

2010年7月，由中国地质调查局水文地质环境地质调查中心承担的“十一五”国家科技支撑计划课题“地质灾害监测光纤传感技术应用研究”顺利通过成果验收，该课题组的科研人员成功研制出具有我国自主知识产权的光纤光栅监测解调仪和分布式光纤传感监测系统，并把传感器应用于地质灾害监测中^[16]。

目前，光纤光栅传感器正处于快速发展时期，各个国家都致力于对其应用和性能等的研究，从结构的静应力、振动的测量到结构应变的健康监测等，各种传感器不断更新、改进^[17,18]。

国内外对光纤光栅传感技术的应用研究已经取得了较为丰硕的成果，不少光纤传感器系统已实用化，成为替代传统传感器的商品。光纤传感技术是一门多学科交叉的高科技应用技术，目前国内外的研究大都热衷于传感元件的开发，但还没有针对光纤光栅传感元件的统一的、专门的设计标准和安装规范，以及数据处理的规程。在光纤光栅传感器的设计、安装和使用过程中，使用者由于对传感器的设计原理和传感原理缺乏了解，因而不能正确安装光纤光栅传感器或是不能正确处理获得的传感数据，进而引起测量结果不准确或是长期结构健康监测数据不可靠。

本书基于光纤光栅传感元件的传感原理，系统研究光纤光栅传感器在设计、安装和长期使用过程中的误差问题。

参 考 文 献

[1] 云南日报网. 持续低温、雨雪和冰冻天气已造成 17 个省(区、市、兵团)受灾. <http://www.yndaily.com/>

- html/20080131/news_97_241504.html, 2008.
- [2] 叶列平, 曲哲, 陆新征, 等. 建筑结构的抗倒塌能力——汶川地震建筑震害的教训. 建筑结构学报, 2008, 29(4): 42—50.
- [3] 中国地震台网. 青海省玉树县发生 7.1 级地震. <http://www.cnr.cn>, 2010.
- [4] 李宏男, 阎石, 林皋. 智能结构控制发展综述. 地震工程与工程振动, 1999, 9(2): 29—36.
- [5] Udd E. Overview of Fiber Optic Sensors. Blue Road Research, 2002.
- [6] 孙丽. 光纤光栅传感技术与工程应用研究[博士学位论文]. 大连: 大连理工大学, 2006.
- [7] 陈根祥. 光波技术基础. 北京: 中国铁道出版社, 2000.
- [8] Hill K O, Fuji Y, Johnson D C, et al. Photosensitivity in optical fiber wave-guides; Application to reflection filters fabrication. Appl Phys Lett, 1978, 32(6): 647—649.
- [9] Morey W W, Meltz G, Glenn W H. Fiber optic Bragg grating sensors. Proc SPIE, 1989, 1169: 98—107.
- [10] Mendez A, Morse T F, Mendez F. Applications of embedded optical fiber sensors in reinforced concrete buildings and structures. Proc SPIE, Fiber Optic Smart Structures and Skins II, 1990, 1170: 60—69.
- [11] Ferraro P, Natale G D. On the possible use of optical fiber Bragg gratings as strain sensors for geodynamical monitoring. Optics and Lasers in Engineering, 2002, 37(2-3): 115—130.
- [12] Udd E, Kunzler M, Laylor M H, et al. Fiber grating systems for traffic monitoring. SPIE, 2003, 4337: 510—514.
- [13] 黄艳红, 高晓蓉, 杜路泉. 光纤光栅传感器在桥梁缺陷检测和结构健康监测中的应用. 铁道技术监督, 2007, 11(35): 17—20.
- [14] 周智, 欧进萍. 光纤光栅传感器及其在大型结构工程健康监测领域的应用. 光纤传感器的发展与产业化国际论坛, 哈尔滨, 2007.
- [15] 贾云龙. 光纤光栅传感器下工程结构健康监测系统. 福建建筑, 2010, 06: 62—63.
- [16] 中国地质调查局. “十一五”课题“地质灾害监测光纤传感技术应用研究”研究报告. http://news.rfid-world.com.cn/2010_07/94b14e777631210f.html, 2010.
- [17] Luo F, et al. A fiber optic micro bend sensor for distributed sensing application in the structural strain monitoring. Sensors and Actuators A: Physical, 1999, 75(1): 41—44.
- [18] Hampshire T A, Adeli H. Monitoring the behavior of steel structures using distributed optical fiber sensors. Journal of Constructional Steel Research, 2000, 53(3): 267—281.

第 2 章 光纤光栅传感理论与传感元件设计

随着光纤光栅写入技术的逐步完善,世界各国掀起了光纤光栅技术研究的热潮,各种基于光纤光栅的有源和无源器件也不断涌现。光纤光栅被广泛应用于光纤通信、光纤传感和光信息处理等各个领域。在传感领域中,光纤光栅因其独特的优越性能逐步成为结构监测的重要传感元件。然而,由于对光纤光栅的基本传感特性缺乏完整和清晰的认识,在光纤光栅传感器的设计与布设中存在一定的盲目性和片面性,如光纤光栅传感器在制作过程中没有考虑交叉敏感问题,长期监测的传感系统没有考虑温度补偿问题等。光纤光栅的传输理论与光纤光栅的基本智能传感特性是研究与开发光纤光栅传感器的基础。

2.1 光纤光栅传感理论

光纤是光导纤维的简称。它是工作在光波段的一种介质波导,被广泛应用于通信领域的数据传输。

由于光纤具有数据容量大、传输快、耐久性好、价格低廉等优点,已经成为通信领域的支柱。光纤由纤芯、包层、涂覆层(亦称保护层)、增强纤维和保护套组成的,未加增强纤维和保护套的光纤称为裸光纤,其基本结构如图 2.1 所示。其中纤芯和包层通常由纯石英(SiO_2)组成,它们是光纤的主体,直径约为 $125\mu\text{m}$,对光波的传输起决定性作用。纤芯和包层的组成稍有不同,其原因是在光纤制造过程中添加了少量的其他材料,如硼或锗,这就改变了纤芯和包层折射率特性,从而获得了需要对传导光进行光束束缚的性能,石英玻璃芯的折射率大约是 1.5,而包层的折射率稍小,大约为 1.48,空气的折射率为 1.0。像玻璃一样,光纤完全可以由塑料制成,由塑料制成的光纤一般更便宜,但塑料光纤的衰减(损耗)较大,使其应用受到限制。涂覆层、增强纤维和保护套主要起隔离杂光、提高光纤强度和保护作用,涂覆层是由塑料或丙烯酸组成。光纤可以按多种方式来分类:按传输模式分为单模和多模光纤;按纤芯折射率分布分为阶跃型和梯度型光纤;按偏振态分为保偏光纤和非保偏光纤;按制造材料分为石英光纤、塑料光纤、液芯光纤、晶体光纤、特种光纤等^[1~6]。

光纤工作的基本原理是基于光的全反射原理,即由于纤芯折射率(n_1)大于包层折射率(n_2),但满足数值孔径 $[NA = n_0 \sin\varphi_0 = (n_1^2 - n_2^2)^{1/2}]$, n_0 为空气折射率, φ_0 为相应于临界角的入射角]要求的光线传播到光纤界面,根据菲涅耳(Fresnel)折

射定律可知,当入射角 φ 大于 φ_0 时,入射光将不发生折射,全部沿着纤芯反射向前传播。因此,光纤能把以光的形式出现的电磁波能量利用全反射的原理约束在其界面内,并引导光波沿着光纤轴线的方向前进。

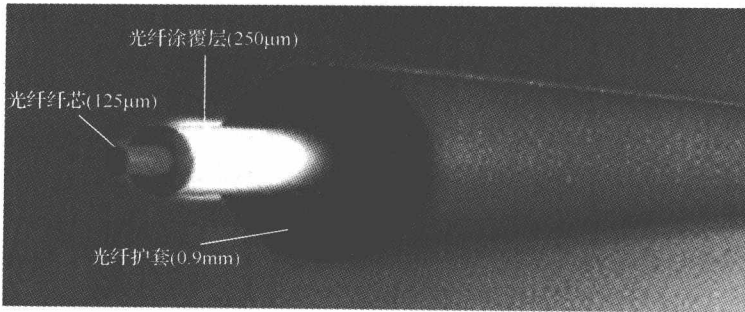


图 2.1 裸光纤基本结构示意图

光纤布拉格光栅是最普遍的一种光纤光栅,它是通过改变光纤芯区折射率,产生小的周期性调制而形成的,其折射率变化通常在 $10^{-5} \sim 10^{-3}$ 之间,将光纤置于周期性空间变化的紫外光源下,即可在光纤芯中产生这样的折射率变化^[7]。用于制作这种光纤光栅的主要制作技术之一是利用两束相干紫外光形成的空间干涉条纹来照射光纤,这样就在光纤芯部形成了永久的周期性折射率调制。光纤光栅的结构如图 2.2 所示。由于周期的折射率扰动仅会对很窄的一小段光谱产生影响,因此,如果宽带光波在光栅中传输时,入射光将在相应的波长上被反射回来,其余的透射光则不受影响,这样光纤光栅就起到了光波选择的作用。对于这类调谐波长反射现象的解释,首先由威廉·布拉格爵士提出,因而这种光栅被称为布拉格光栅,反射条件称为布拉格条件。光纤布拉格光栅的中心波长与有效折射率的数学关系是研究光栅传感的基础。从麦克斯韦经典方程出发,结合光纤耦合模理论,利用光纤光栅传输模式的正交关系,得到布拉格光栅反射波长的基本表达式为

$$\lambda = 2n_{\text{eff}}\Delta$$

式中, n_{eff} 是光纤芯区的有效折射率。光纤周期 Δ 可通过改变两相干紫外光束的相对角度而得以调整,通过这种方法,就可以制作出不同反射波长的布拉格光栅。 λ 为被光纤光栅所反射回去的波长。

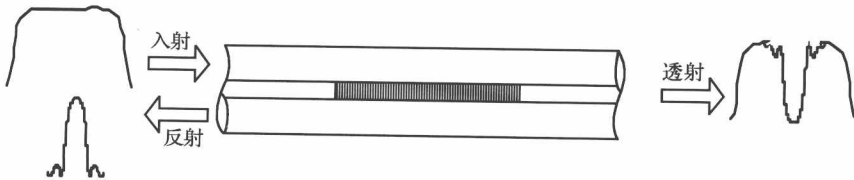


图 2.2 光纤光栅的结构