

# 结构健康监测 光纤光栅传感技术

李宏男 任亮 著

» JIEGOU JIANKANG JIANCE  
GUANGXIAN GUANGSHAN CHUANGAN JISHU

中国建筑工业出版社

TU317/25

2008

# 结构健康监测 光纤光栅传感技术

李宏男 任亮 著

中国建筑工业出版社

## 图书在版编目 (CIP) 数据

结构健康监测光纤光栅传感技术/李宏男, 任亮著. —北京:  
中国建筑工业出版社, 2008  
ISBN 978-7-112-09809-5

I. 结… II. ①李…②任… III. 光纤器件-光电传感器-应用-  
工程结构-监测 IV. TU317

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 002987 号

本书从光纤光栅的基本理论及制作工艺出发, 全面介绍了基于光纤光栅传感技术的各种传感器以及光纤光栅技术在重大工程结构健康监测中的应用。具体内容包括: 光纤光栅的基本理论、种类、光纤光栅传感器阵列的指标以及各种光纤光栅解调技术; 光纤光栅的各种写入技术; 系统介绍了测量各种物理量的光纤光栅传感器; 从应变传递角度系统分析了光纤光栅传感器的应变传递机制及其动态特性; 详细介绍了光纤光栅传感器在模型试验中的应用; 并系统详细介绍了光纤光栅传感器在地源热泵系统、建筑物、海洋石油平台、桥梁以及大坝等重大工程结构中的应用状况。

本书可作为从事土木、光学工程专业的研究和设计人员, 以及高等院校的教师、研究生和高年级本科生的参考书。

\* \* \*

责任编辑: 赵梦梅

责任设计: 赵明霞

责任校对: 关键 张虹

## 结构健康监测 光纤光栅传感技术 李宏男 任亮 著

\*

中国建筑工业出版社出版、发行 (北京西郊百万庄)

各地新华书店、建筑书店经销

北京红光制版公司制版

北京蓝海印刷有限公司印刷

\*

开本: 787 × 1092 毫米 1/16 印张: 19½ 字数: 472 千字

2008 年 5 月第一版 2008 年 5 月第一次印刷

印数: 1—2500 册 定价: 45.00 元

ISBN 978-7-112-09809-5

(16473)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

## 前 言

对重大工程结构进行实时健康监测、及时识别结构的累积损伤并评估其使用性能和寿命,对可能出现的灾害提前预警,建立相应的安全预警机制,不仅对于提高结构的安全性和可靠性具有重大的科学意义,而且可以降低结构的运行和维护费用,具有可观的经济效益,已经成为未来工程的必然要求,也是 21 世纪人类亟待解决的重要课题。光纤光栅可以埋入结构,对其内部的应变等参数进行实时的高分辨率和大范围监测,是未来智能结构的集成光学神经,也是目前健康监测首选的传感器之一。由于光纤光栅具有不受电磁场干扰和光路光强波动影响、具有绝对测量和易于实现波分复用的准分布式传感等突出优点,自发明以来得到迅猛发展。

光纤光栅技术经过 20 余年的发展,现已成为光纤通信和传感领域中最重要器件之一,形成了一个庞大的产业和一个稳定的研究领域,并且随着全光通信网络和光纤传感技术的发展将会发挥越来越重要的作用。在光纤传感方面,光纤光栅为光纤传感技术开辟了一个新的应用研究领域,可以制作温度、应变、压力、位移、加速度、电流、电压、磁场、频率、浓度等参量的光纤光栅传感器。而且,由于其具有波分复用的特点,可以构成大型的传感网络。

光纤光栅就其本身来说在技术上已趋于成熟,国内外从事光纤光栅研究和应用的人员数以万计,已发表论文数千篇,在光纤光栅的传感理论、形成机理、制作方法、不同物理量传感原理、应变传递理论以及工程应用等方面已取得大量的研究成果。该方面的内容分散在各种文献中,国内外已出现了几部论述光纤光栅传感原理的书籍,但针对光纤光栅不同物理量传感技术、传感器设计、应变传递理论以及在土木工程应用方面,尚未见到有关书籍出现。为形成较为完整的光纤光栅传感器原理及工程应用的学科体系做一点贡献,更好推动光纤光栅传感技术的发展,有必要对我们的研究成果及最新的有关光纤光栅传感技术方面进行一次总结。

本书力图从结构健康监测的角度介绍光纤光栅传感技术的基础理论、方法及实际应用。全书分为七章,第一章为绪论,介绍了光纤传感器特别是光纤光栅传感器在结构健康监测中的应用现状以及光纤光栅传感器的优点及研究方向;第二章系统的分析了光纤光栅的光敏特性和光纤光栅的基本理论,介绍了光纤光栅的种类,光纤光栅传感器阵列的指标以及各种光纤光栅解调技术;第三章主要阐述了光纤光栅的各种写入技术,其中有内部写入法、干涉法、点光源写入法等,重点介绍了目前最常用的相位掩模法;第四章系统讨论了测量各种物理量的光纤光栅传感器,如应变、温度、压力、剪力、加速度、倾斜角、湿度、氢气浓度等;第五章从应变传递角度系统分析了光纤光栅传感器的应变传递机制及其动态特性;第六章详细介绍了在几种模型试验中的应用,分别为混凝土梁模型、海底管线模型和仿真混凝土大坝模型;第七章详细介绍了光纤光栅传感器在地源热泵系统、建筑物、海洋石油平台、桥梁以及大坝等重大工程结构中的应用状况。

本书是作者及其合作者多年研究工作的总结，他们是作者的博士生李东升和孙丽，硕士生周广东、高东伟和嵇雪衡等。在编写过程中，硕士生倪向雷等为本书的出版进行了大量的整理和校对工作。书中的部分实验资料来自林皋院士和周晶教授等人的试验。研究工作还得到国家自然科学基金（50408031）、国家‘十一五’科技支撑计划（2006BAJ03B05，2006BAJ06B08）、高等学校学科创新引智计划（B08014）以及教育部创新团队资助计划（IRT0518）等项目资助。在此作者一并表示深深的谢意。

希望本书的出版能够给从事结构健康监测以及光纤传感技术领域的科研和工程技术人员、高校相关专业的师生有所帮助。鉴于作者水平有限，书中必有错误和疏漏之处，恳请读者指正和赐教。

**李宏男**

2007年于大连理工大学

# 目 录

<b>第一章 绪论</b> .....	1
1.1 引言 .....	1
1.2 光纤健康监测研究和应用现状 .....	1
1.3 光纤健康监测系统构成 .....	3
1.4 光纤传感器 .....	3
1.5 光纤光栅传感器 .....	5
1.6 研究方向 .....	9
参考文献 .....	10
<b>第二章 光纤光栅基本原理</b> .....	12
2.1 引言 .....	12
2.2 光纤光栅的光敏性及光学特性 .....	13
2.2.1 光纤光栅的光敏性 .....	13
2.2.2 光纤光栅的光学特性 .....	14
2.3 光纤光栅基本理论 .....	16
2.3.1 光纤基本结构与传输原理 .....	16
2.3.2 光纤光栅传感基本原理 .....	16
2.3.3 光纤光栅模式理论 .....	19
2.3.4 光纤光栅的光谱特性分析 .....	20
2.3.5 光纤光栅的种类 .....	23
2.4 光纤光栅传感器阵列的指标 .....	27
2.5 光纤光栅解调技术 .....	31
2.5.1 边缘滤波器法 .....	32
2.5.2 可调谐滤波器法 .....	35
2.5.3 干涉法 .....	38
参考文献 .....	39
<b>第三章 光纤光栅写入方法</b> .....	41
3.1 光纤材料的紫外增敏技术 .....	41
3.2 内部写入法制作光纤光栅 .....	42
3.3 干涉法制作光纤光栅 .....	43
3.3.1 分振幅干涉法 .....	43

3.3.2	分波前干涉法	45
3.4	点光源写入法	46
3.5	相位掩膜法	47
3.5.1	写入光斜入射	48
3.5.2	写入光正入射	49
3.5.3	利用相位掩膜板法制作光纤光栅	50
3.5.4	改变相位模版的周期	51
3.6	光纤光栅制作中旁瓣的抑制	53
3.7	光纤光栅的写入光源	55
	参考文献	57
<b>第四章</b>	<b>光纤光栅传感器</b>	<b>59</b>
4.1	引言	59
4.2	光纤光栅应变传感器	60
4.2.1	基片式封装	61
4.2.2	嵌入式封装	63
4.2.3	金属管式封装	66
4.2.4	夹持式封装光纤光栅应变传感器	69
4.2.5	光纤光栅金属化封装	73
4.3	光纤光栅温度传感器	76
4.3.1	基片式光纤光栅温度传感器	77
4.3.2	聚合物封装光纤光栅温度传感器	78
4.3.3	金属管式光纤光栅温度传感器	78
4.4	光纤光栅位移传感器	81
4.4.1	拉杆式位移传感器	81
4.4.2	微位移传感器	83
4.5	光纤光栅压力传感器	83
4.5.1	边压力传感器	83
4.5.2	基于弹簧管悬臂梁的光纤光栅压力传感的研究	84
4.5.3	基于正弦机构力放大原理的高灵敏度光纤光栅压力传感器	86
4.5.4	高压压力传感器	87
4.6	光纤光栅剪力传感器	88
4.6.1	理论分析	89
4.6.2	实验分析	92
4.7	光纤光栅加速度传感器	92
4.7.1	早期的光纤光栅加速度传感器	92
4.7.2	基于悬臂梁的光纤光栅加速度传感器	93
4.7.3	L形悬臂梁加速度传感器	95
4.7.4	光纤光栅的三维加速度传感器的研究	97

4.8	光纤光栅倾斜传感器 .....	100
4.9	光纤光栅流量传感器 .....	102
4.9.1	光纤光栅涡街流量计 .....	103
4.9.2	光纤光栅互相关流量传感器 .....	105
4.10	光纤光栅化学传感器 .....	108
4.10.1	湿度传感器 .....	108
4.10.2	光纤光栅氢气浓度传感器 .....	110
4.11	光纤光栅电磁传感器 .....	113
4.11.1	动态磁场 .....	113
4.11.2	电压测量 .....	114
4.11.3	电流测量 .....	117
4.12	光纤光栅水声传感器 .....	122
4.12.1	光纤光栅直接测量水声 .....	122
4.12.2	平面型光纤光栅水听器 .....	124
4.13	应变与温度同时测量 .....	131
4.13.1	参考光纤光栅法 .....	131
4.13.2	长周期光纤光栅与光纤光栅组合法 .....	132
4.13.3	双波长光纤光栅法 .....	133
4.13.4	光纤光栅二阶谐波法 .....	134
4.13.5	闪耀光纤光栅 .....	135
4.13.6	超结构光纤 Bragg 光栅法 .....	136
4.13.7	不同掺杂的光纤光栅 .....	137
4.13.8	不同包层直径光纤光栅 .....	138
4.14	光纤光栅传感器的可靠性 .....	139
4.14.1	光纤性质对光纤传感器可靠性的影响 .....	139
4.14.2	加工过程对光纤传感器可靠性影响 .....	143
4.14.3	封装与安装对光纤传感器可靠性的影响 .....	143
	参考文献 .....	145
<b>第五章</b>	<b>光纤光栅传感器的应变传递理论 .....</b>	<b>151</b>
5.1	前言 .....	151
5.2	埋入式光纤传感器的应变传递研究现状 .....	153
5.3	埋入式光纤传感器的应变传递分析 .....	160
5.3.1	光纤光栅传感器的应变传递 .....	160
5.3.2	光纤光栅传感器的应变传递分析 .....	160
5.3.3	结果与讨论 .....	164
5.4	埋入式光纤光栅传感器多层粘接情况下的应变传递 .....	165
5.5	埋入式光纤光栅传感器应变传递率的各种影响参数分析 .....	166
5.5.1	中间层厚度的影响 .....	167



5.5.2	光纤光栅传感器长度及中间层厚度的影响	167
5.5.3	中间层弹性模量的影响	168
5.5.4	中间层泊松比的影响	169
5.6	非轴向力作用下埋入式光纤光栅传感器的应变传递分析	169
5.6.1	光纤光栅传感器的应变传递分析	171
5.6.2	试验及结果分析	174
5.6.3	小结	176
5.7	引入基体弹性模量的应力传递	177
5.7.1	研究背景	177
5.7.2	光纤光栅应变传感器的应力传递分析	179
5.7.3	多个中间层的光纤光栅传感器应变传递分析	184
5.7.4	应变传递影响参数分析	186
5.7.5	小结	189
5.8	光纤光栅传感器的反射光谱和外界应力之间的关系	190
5.9	表面粘贴式光纤传感器应变传递机制分析	190
	参考文献	193
<b>第六章</b>	<b>光纤光栅动态响应特性分析</b>	<b>196</b>
6.1	引言	196
6.2	光纤光栅应变传感器的设计种类	196
6.2.1	应变波的传播过程	197
6.2.2	应变波传到光纤光栅应变传感器的滞后时间	198
6.2.3	光纤光栅应变传感器的可测频率的估计	199
6.3	光纤光栅应变传感器在低频振动系统中的应用	201
6.3.1	模型介绍	201
6.3.2	试验设备	202
6.3.3	试验结果分析	202
	参考文献	204
<b>第七章</b>	<b>光纤光栅传感器在模型实验中的应用</b>	<b>205</b>
7.1	引言	205
7.2	混凝土固化期收缩应变监测实验	205
7.2.1	概述	205
7.2.2	传感器布设	206
7.2.3	混凝土养护期收缩应变监测实验数据分析	207
7.2.4	小结	209
7.3	碾压仿真混凝土大坝分段模型实验	209
7.3.1	引言	209
7.3.2	模型设计及激励系统	210

7.3.3	传感器布设方法	210
7.3.4	数据采集系统	211
7.3.5	试验过程	211
7.3.6	随机波激励下光纤光栅传感器监测到的应变响应	212
7.3.7	健康状况评价	216
7.3.8	小结	217
7.4	海底管线模型地震实验	217
7.4.1	引言	217
7.4.2	模型设计及激励系统	217
7.4.3	传感器布置及数据采集系统	218
7.4.4	试验结果	218
7.4.5	小结	220
7.5	海洋船只模型实验	220
7.5.1	试验背景及传感器布置	220
7.5.2	试验内容及测量结果	221
	参考文献	224
<b>第八章 光纤光栅传感器在工程中的应用</b>		<b>225</b>
8.1	引言	225
8.2	在地源热泵系统中的应用	225
8.2.1	引言	225
8.2.2	温度监测系统	226
8.2.3	监测结果分析	227
8.2.4	小结	230
8.3	在建筑结构中的应用	230
8.3.1	引言	230
8.3.2	传感器布设位置	231
8.3.3	传感器布设工艺	232
8.3.4	大连理工大学综合实验楼施工阶段的监测	234
8.3.5	小结	236
8.4	在大跨度空间结构健康监测中的应用	236
8.4.1	项目背景	236
8.4.2	大屋顶网架结构监测系统总体框架	237
8.4.3	传感系统	239
8.4.4	大屋顶网架光纤光栅传感系统	240
8.4.5	光纤光栅传感系统和电致传感系统的比较	242
8.5	单立柱海洋石油平台健康监测应用实例	243
8.5.1	项目背景	243
8.5.2	传感器布置图	243

8.5.3	安装流程	243
8.5.4	单立柱海洋石油平台的健康检测	244
8.5.5	小结	248
8.6	在南堡油田石油平台健康监测中的应用	248
8.6.1	项目概况	248
8.6.2	监测内容	249
8.6.3	监测原理	249
8.6.4	计算分析及监测点选择	250
8.6.5	传感器以及仪器安装调试	251
8.6.6	数据采集软件	252
8.6.7	监测流程	253
8.6.8	监测系统标定	253
8.6.9	工作日报	255
8.6.10	数据分析——荷载监测	258
8.6.11	工作总结与展望	258
8.7	在桥梁监测中的应用	259
8.7.1	加拿大 Calgary 附近的 Beddington Trail 大桥	260
8.7.2	我国滨州黄河公路大桥	262
8.7.3	哈尔滨四方台大桥	264
8.8	在地铁监测中的应用	266
8.9	在大坝监测中的应用	268
8.10	在架空输电线环境荷载监测中的应用	269
8.10.1	监测背景	270
8.10.2	架空输电线理论模型	271
8.10.3	监测结果	272
8.11	在航空航天复合材料/结构健康监测中的应用	274
8.11.1	航空航天用复合材料简介	275
8.11.2	在航空航天健康监测中的应用	275
8.11.3	在航空航天工程应用中存在的问题及解决方法	278
8.11.4	小结	282
	参考文献	282
	<b>附录 A 光纤的基本知识</b>	<b>285</b>
	<b>附录 B 常用光纤无源器件</b>	<b>291</b>

# 第一章 绪 论

## 1.1 引 言

重大工程结构的健康监测与诊断越来越受到社会各界的广泛重视,对灾害的提前预警或在灾害发生后评估结构的损伤程度及其剩余寿命已成为当前各国学者们研究的热点<sup>[1]</sup>。同时,智能结构控制也成为防灾减灾的一个新兴学科,把人复杂的感知、信息处理和响应的机能外推映射到工程结构中去,从而使结构能够对内部状态的变化和外部环境的刺激作出适当的反应,使其能够像人一样具有进行自我感知、自我诊断和自我调节并适应环境的功能,是未来工程结构的发展方向<sup>[2]</sup>。

无论是结构的健康监测还是智能结构控制,对结构当前状态的实时测量都是其中必不可少的一环,光纤传感器由于其突出的优点而成为智能系统的首选传感器。光纤传感器最早的应用是1979年由美国航空航天局组织将光纤传感器尝试性地埋入复合材料内部,监测其应变和温度,之后光纤传感器在飞行器领域和复合材料中取得了越来越多的应用,并逐渐向其他领域扩展,呈现了蓬勃发展的态势。但是,由于光纤传感系统的价格昂贵和它的研究历史较短等原因,光纤传感器在土木工程结构中应用还不多见。然而,由于它固有的优点,势必将在很多场合取代传统传感器<sup>[3]</sup>。

## 1.2 光纤健康监测研究和应用现状

国际上将光纤传感器用于大型工程结构的健康监测时间不长,目前正处于从萌芽到发展的过渡期。1989年,Mendez等人<sup>[4]</sup>首先提出了把光纤传感器用于混凝土结构的检测。之后,日本、英国、美国、德国等许多国家的研究人员先后对光纤传感系统在土木工程中的应用进行了研究。日本、美国和瑞士的光纤传感器在土木工程中的应用领域相对较广泛,已经从混凝土的浇筑过程扩展到桩柱、地基、桥梁、大坝、隧道、大楼、地震和山体滑坡等复杂系统的测量或监测。

Idriss等联合美国联邦公路局在新墨西哥州的Rio Puerco桥上安装了40个SOFO位移光纤传感器和24个温度传感器(如图1.1和图1.2所示),光纤传感器在浇筑前预埋入结构

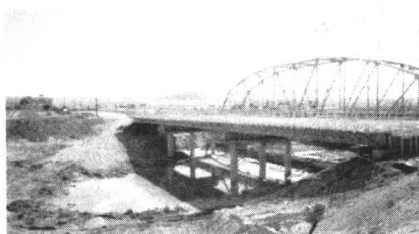


图 1.1 Rio Puerco 桥图

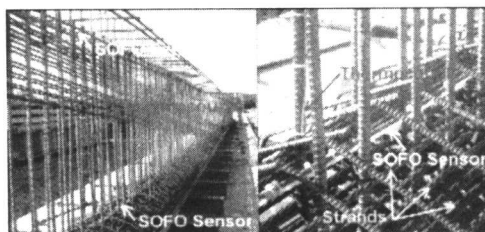


图 1.2 光纤传感器埋入位置图

中，用于监测预制梁的预应力损失。结果表明，浇筑温度对早期混凝土的预应力损失影响非常大，浇筑温度越低，其预应力损失越严重<sup>[5][6]</sup>。Kronenberg 和 Glisic 等在瑞士和法国边界一个发电站水库的大坝（Emosson Dam）上安装了光纤传感器（如图 1.3 所示）。由于一些原有的传感器操作不方便，对温度、湿度和电磁场等敏感，安装困难，所以用光纤传感器取代传统的传感器来测量坝体的裂纹和基础的位移。安装了两根超长位移计，一根长 30m，另一根 60m。测试结果表明光纤传感器与原来的杆式伸长计结果非常吻合，测量结果更精确，更灵敏。唯一的缺点是需要约 60 天左右的传感器校正时间，用于调整光纤传感器涂覆层在运输过程中的变形<sup>[7][8]</sup>。Inaudi 等在一个现存的隧道旁 30m 距离处修建的另一个隧道壁上安装了 8 个距离不等的光纤伸长计，安装位置为从已存的隧道通向新隧道的小孔洞中（如图 1.4 所示），用于监测修建隧道时土石方的受压情况。测量结果表明，距离隧道钻孔机（即新隧道位置）较近的光纤伸长计有较大的应变，伸长计的变形量与距新隧道垂直距离的远近呈指数下降趋势<sup>[9]</sup>。Inaudi 及他们的小组到 2001 年为止在约 9 年时间内共在桥梁，水坝，隧道，发电站等 70 多个不同场合成功安装了约 1500 个光纤传感器，用于检测结构的应力、应变、振动、损伤和裂缝等或者进行大型结构的健康监测，其中 95% ~ 100% 都达到了预期的设计功能<sup>[10][11]</sup>。Pietro 等<sup>[12]</sup>详细探讨了光纤光栅（Fiber Bragg grating sensor）传感器的原理、检测方法、应变与温度信号分离的各种解决办法，并指出光纤地震检波器，光纤地震仪等可以用于测量岩石变形，隧道监测和地震测量。Udd 等<sup>[13]</sup>在一座桥上安装了光纤光栅传感器，测试结果表明，该传感器不仅可以监测车辆的行驶速度，而且可以称量运动中车辆的重量，对交通流量进行分类，其灵敏度甚至可以检测到桥上的跑步者或者成人的行走。

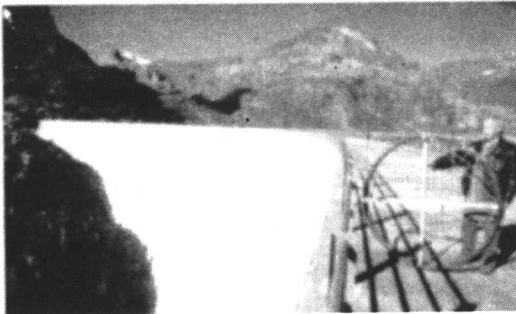


图 1.3 Emosson 大坝光纤传感器安装图



图 1.4 Mt.Terri 隧道光纤传感器安装图

光纤传感器是一个新兴蓬勃发展起来的行业，许多公司都在致力于研制并开发新类型、功能或更加廉价的光纤传感器产品，几乎每天都有新型光纤传感器在申报或者获得专利。美国已有专利利用光纤传感器测量地下钻孔时孔表面的竖向地震响应，利用测量动应变来测量一点处的三向加速度等。欧洲有公司采用光纤传感器利用基站与测量站之间的距离变化来测量 20km 以内的山体滑坡或者地面运动，此种光纤传感器在全球定位系统等中也将起到积极的作用。目前各种新型的光纤传感器层出不穷，从结构的静应力<sup>[14]</sup>、振动的测量<sup>[15]</sup>到结构应变的健康监测等<sup>[16][17]</sup>。

1998 年，欧盟几个发达国家联合成立了一个“混凝土结构性能评估集成监测系统”（Smart Project）项目，有 8 家公司等联合组成。根据该项目的研究结果<sup>[18][19]</sup>，光纤健康监

测可使系统的运行费用降低 10% ~ 20%，而且其模型对未来新建项目具有启发意义，可使其整个使用期总费用额外节省约 10%。如果光纤传感器在土木工程中成功地应用，不仅会节省很多测量监测费用，有着巨大的经济效益；同时也会使测量精度进一步提高，能够测量许多过去很困难或者根本无法测量的量。对于大型桥梁、水坝等基础设施的监测水平会有很大程度的提高，更加可靠地保证人民群众的生命安全，有着巨大的社会效益。

与国际上光纤传感器的迅猛发展相比，我国近几年才开展这方面的研究工作。刘雄等<sup>[20]</sup>分析和比较了光纤传感器与普通传感器的优缺点，研制了光纤钢环位移计和光纤测力计等并将其应用在实际测量中。哈尔滨工业大学智能材料系统和结构中心的冷劲松等人<sup>[21]</sup>研制成功了端口耦合式光纤振动传感器和基于多模光纤模斑监测的光纤振动传感器并测试了其性能。梁磊和姜德生等<sup>[22]</sup>讨论了光纤传感器与混凝土结构的相容性问题，并据此研制出一种新型的光纤传感器。潘树新和刘耀炜<sup>[23]</sup>总结了地震科学发展的历史，指出观测技术的革新和进步可能是地震科学焕发青春的途径之一，光纤传感器在地震前兆观测中具有广泛的应用前景。赵廷超、黄尚廉等<sup>[24]</sup>讨论和分析了机敏土建结构中埋入光纤传感器问题，对结构内部的状态参数如应力、应变、温度等的无损检测，以及对结构整体性、安全性评估的原理和方法。李辰砂等<sup>[25]</sup>阐述了光纤监测复合材料成型过程的原理和可行性，研制了两种分别依据相位调制和强度调制的光纤传感器，用于监测复合材料固化过程中的内部变化历程。查开德<sup>[26]</sup>研制成功了用于大型结构应变测量的光纤传感器，并介绍了这种光纤传感器的原理、结构和实验研究结果。

### 1.3 光纤健康监测系统集成

光纤智能健康监测系统集成主要由以下三部分构成：光纤传感器系统，信号传输与采集系统，数据处理与监测系统。其中光纤传感器系统包括光纤传感器的选型，选择具体的调制方式和符合性能要求的光纤传感器，然后需考虑光纤传感器的拓扑方式，最后要考虑传感器的安装是外表粘贴式还是内部埋入式。信号传输与采集系统包括光纤传感器的校正、采样模块以及海量实时数据的存储结构和方式。数据处理与监测部分是健康监测系统的核心部分，包括大量数据的有效性分析、结构健康性能指标的参数选择、结构运行状态的可视化系统以及相应的灾害提前预警功能等。光纤智能健康监测系统的各部分之间是相互联系、缺一不可的，每一部分都是整个系统的有机组成部分。由于目前光纤传感器的标准化程度还不高，不同类型的传感器一般都需要特定的解码系统，因而一旦传感器确定后，相应的信号采集与处理系统也随之而定。所以光纤传感器的优化布置方法和实时信号的分析监测便成为光纤智能健康监测系统集成应用的关键问题。

进行监测时，光纤传感器测量到的结构实时状态信号经过信号传输与采集系统送到监测中心，进行相应的处理和判断，从而对结构的健康状态进行评估。若监测到的关键健康参数超过设定的阈值，则通过即时信息（SMS）、E-mail 等方式及时通知相关的管理机构，以便采取相应的应急措施，以避免造成重大的人员和财产的损失。

### 1.4 光纤传感器

光导纤维的应用是传感器领域的重大突破，起源于光纤通信技术。在光通信利用中发

现当温度、应力等环境条件变化时，引起光纤传输的光波强度、相位、频率、偏振态等变化，测量光波量的变化，就可知道导致这些变化产生的温度、应力等物理量的大小，根据这些原理便可研制出光导纤维传感器。

光纤传感器所用光纤与普通通信光纤基本相同，都由纤芯、包层和涂覆层组成。光纤纤芯的主要成分为二氧化硅，其中含有极微量的掺杂剂，一般为二氧化锗，用以提高纤芯的折射率，形成全内反射条件的弱导光纤将光限制在纤芯中。纤芯的直径在  $5 \sim 50\mu\text{m}$  之间，其中单模光纤为  $9\mu\text{m}$ ，多模光纤为  $50\mu\text{m}$ 。包层主要成分也为二氧化硅，直径为  $125\mu\text{m}$ 。涂覆层一般为环氧树脂、硅橡胶等高分子材料，外径为  $250\mu\text{m}$ ，用于增强光纤的柔韧性、机械强度和耐老化特性<sup>[27]</sup>。而有些类型的光纤传感器由于使用的场合不同需要对普通光纤做些加工处理，使其对特定的信号更加敏感。

光纤传感器按照是否对所测量的信号进行调制一般可分为两类：非本征型和本征型。非本征型光纤传感器中的光纤，只起信号传输作用，由另外的探测装置对载波光进行调制获取信号，检测原理及所能测量的信号比较简单<sup>[28]</sup>。因为非本征型光纤传感器中的光纤只起信号传输作用，与普通传感器中的导线作用相当，因而还不能称为严格意义上的光纤传感器。本征型光纤传感器不仅传输信号，也起传感作用，即通过光纤自身的光敏效应、光弹效应、双折射效应、法拉第效应、荧光效应等把待测量调制为光的强度、相位、偏振或者波长的变化。本征型光纤传感器又称为功能型光纤传感器或内调制型光纤传感器、全光纤传感器。通常所说的光纤传感器均指本征型光纤传感器。光纤传感器按照测量的空间分布情况可以分为点传感器、准分布式传感器和分布式传感器。其中后两种传感器是光纤传感器所特有的功能，既能够在用一根光纤测量结构上空间多点或者无限多自由度的参数分布，这可以说是传感器技术的根本变革。

光纤传感器系统的基本原理如图 1.5 所示。

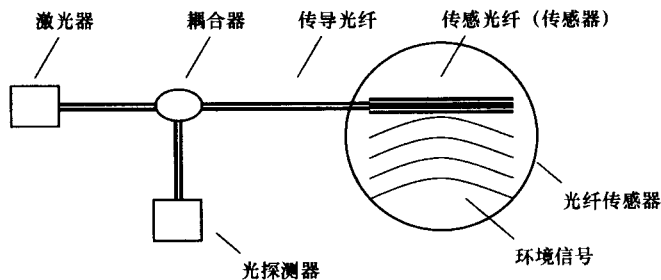


图 1.5 光纤传感器系统示意图

激光器发出的光在传感区域受环境信号的调制后经耦合器进入光探测器，解调后而得出环境信号。图 1.5 为反射式传感器系统的示意图，若为透射式，则光探测器置于传感光纤的末端。图 1.5 中的传导光纤与传感光纤为一根光纤，但一般传感部分都需经过特别处理以便使光纤只对一种或者几种感兴趣的信号敏感，例如光纤微弯应变传感器通过齿形槽或者两根光纤绞绕使传感光纤部分有一个预变形使其对应变敏感，而布拉格光栅光纤传感器则在传感光纤部分形成了一个或数个芯内体光栅使其对某一个或者几个特定波长的光敏感。因为光纤传感器的调制原理种类繁多，特定的传感器必须与相应的光源和解调设备一起使用，因此下文所说的光纤传感器均指光纤传感器系统。

光纤传感器与传统传感器相比有许多优点：(1) 质量轻、体积小。普通光纤外径为  $250\mu\text{m}$ ，最细的传感光纤直径仅为  $35\sim 40\mu\text{m}$ ，可在结构表面安装或者埋入结构体内部，对被测结构的影响小，测量的结果是结构参数更加真实的反映。埋入安装时可检测传统传感器很难或者根本无法监测的信号，如：复合材料或者混凝土的内部应力或者温度场分布、电力变压器的绝缘检测、山体滑坡的监测等。(2) 灵敏度高。光纤传感器采用光测量的技术手段，一般为微米量级。采用波长调制技术，分辨率可达到波长尺度的纳米量级。(3) 耐腐蚀。由于光纤表面的涂覆层是由高分子材料做成，耐环境或者结构中酸碱等化学成分腐蚀的能力强，适合于智能结构的长期健康监测。(4) 抗电磁干扰。当光信息在光纤中传输时，它不会与电磁场产生作用，因而信息在传输过程中抗电磁干扰能力很强。(5) 传输频带较宽。通常系统的调制带宽为载波频率的百分之几，光波的频率较传统的位于射频段或者微波段的频率高几个数量级，因而其带宽有巨大的提高。便于实现时分或者频分多路复用，可进行大容量信息的实时测量，使大型结构的健康监测成为可能。(6) 分布或者准分布式测量，能够用一根光纤测量结构上空间多点或者无限多自由度的参数分布，是传统的机械类、电子类、微电子类等分立型器件无法实现的功能，是传感器技术的新发展。(7) 使用期限内维护费用低。

总体来看，光纤传感器的研究与应用美国和日本处于领先地位，欧洲紧随其后。美国偏重于军事应用，主要是应变光纤传感器和抗恶劣环境的特种光纤传感器，日本偏重于民用，而欧洲则开展了领域广泛的光纤传感器研究与应用。比较著名的一些光纤传感器设备公司有：美国的 Blue Road Research, IFOS 公司等，日本的 Idec Izumi 公司、Hitachi 公司和 Sunx 公司，欧洲的 Smartec, Osmos-group (York Sensors), Ominisens 公司等。

## 1.5 光纤光栅传感器

光纤光栅 (Fiber Bragg Grating) 传感器属于波长调制型非线性作用的光纤传感器<sup>[29]</sup>。Bragg 这个名字起源于 X 射线结晶学的先驱 Bragg 父子，他们发现准单色射线源从某一个特定角度入射晶体中，所有的反射光集中到一个特定的方向上，在光纤光栅中也有类似的效果。通过待测量调制入射光束的波长，测量反射光的波长变化进行检测。由于波长是一个绝对参数，不受总体光强水平、连接光纤及耦合器处的损耗或光源能量的影响，因此比其他光调制方式更加稳定。光纤光栅传感器是在光纤的一段范围内沿光纤轴向使纤芯折射率发生周期性变化而形成的芯内体光栅，是一种准分布式传感器。

光纤光栅是将通信用光纤的一部分利用掺锗光纤非线性吸收效应的紫外全息曝光法而制成的一种称为 Bragg Grating 的纤芯折射率周期性变化光栅。通常的光会全部穿过此 Bragg Grating 而不受影响，只有特定波长的光 (波长为  $\lambda_b$ ) 在布拉格光栅处反射后会再返回到原来的方向 (参照图 1.6)。在布拉格光栅处施加外力，光栅的间隔产生变化后，反射回来的光的波长也会相应发生变化。Bragg 波长  $\lambda_b$  同时受布拉格光栅周期和纤芯有效折射率扰动的影响，因而通过监测布拉格波长的变化即可测出应变和温度扰动。

1978 年，Hill 等人发现了光纤的光敏性，制作出世界上第一支光纤布拉格光栅 (FBG)<sup>[30]</sup>。Meltz 等人<sup>[31]</sup>于 1989 年采用横向侧面曝光技术制作光纤光栅，光纤光栅技术引起了人们的重视。之后各种新的制作方法和各种新型光纤光栅相继被提出，例如：啁啾光



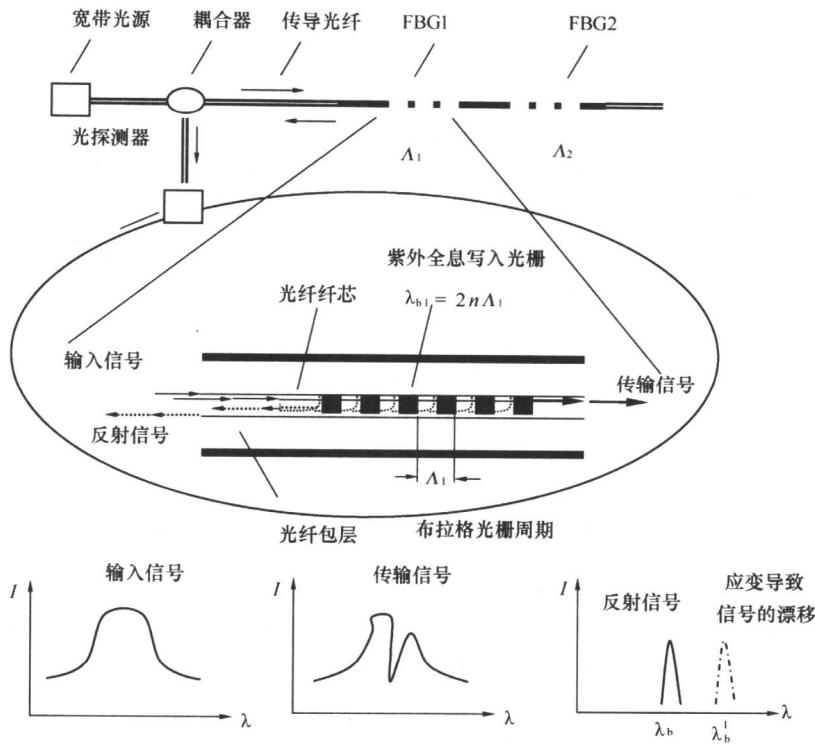


图 1.6 光纤光栅传感原理图

栅 (CFG) 和长周期光纤光栅 (LPG) 等。随着光纤光栅制造技术的不断完善, 应用成果的日益增多, 使得光纤光栅成为目前最有发展前途、最具有代表性的光纤无源器件之一。光纤光栅的应用大大提高了光纤器件的性能, 在光纤通信和光纤传感领域有着广泛的应用前景。由于光纤光栅的出现, 使许多复杂的全光纤通信和传感网成为可能, 极大地拓宽了光纤技术的应用范围。

在光纤通信方面, 光纤光栅为光纤激光器、波分复用器、光放大器、色散补偿器、波长变换器、光分插复用器和光交叉互连等关键部件提供了很好的解决方案。例如, 利用光纤光栅的窄带高反射率特性构成光纤反馈腔, 依靠掺铒光纤等为增益介质即可制成光纤激光器, 用光纤光栅作为激光二极管的外腔反射器, 可以构成外腔可调谐激光二极管; 利用光纤光栅可构成: Michelson 干涉型、Mach-Zehnder 干涉型和 Fabry-Perot 干涉型的光纤滤波器; 利用非均匀光纤光栅滤波器可以制作成光纤色散补偿器<sup>[32]</sup>。

基于光纤光栅的光通信器件特点

表 1.1

器件名称		特 点
光源	DFB 光纤光栅激光器	边模抑制比和频率稳定性均优于 DBR (distributed Bragg reflector); 稳定的功率输出; 可以构成多波长激光器
	DBR 光纤光栅激光器	可获得比 DFB (distributed feedback) 更高的模式选择性, 便于严格控制波长, 获得稳定的单模运行; 输出功率高; 稳定的功率输出; 商用化最好的可调谐激光器
	光纤光栅外腔激光器	极低的温度依赖性; 极低的阈值电流; 很高的边模抑制比; 极低的啁啾量; 可获得窄线宽的稳定激光输出