

结构健康监测 光纤传感技术研究

徐卫军 刘运飞 陈彦生 编著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

结构健康监测 光纤传感技术研究

徐卫军 刘运飞 陈彦生 编著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书重点介绍了结构健康监测中的光纤传感器的原理、关键技术和应用典型案例。全书共 10 章,既有前人的理论综述,又有作者的应用技术创新。

本书理念清晰、系统完整。可供土木与岩土两大领域的水利、电力、冶金、石化、交通、建筑和军工部门的工程技术人员和高等院校的有关师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

结构健康监测光纤传感技术研究 / 徐卫军, 刘运飞, 陈彦生编著. — 北京: 中国水利水电出版社, 2011.1
ISBN 978-7-5084-8150-0

I. ①结… II. ①徐… ②刘… ③陈… III. ①光纤器件—光电传感器 IV. ①TP212

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第240461号

书 名	结构健康监测光纤传感技术研究
作 者	徐卫军 刘运飞 陈彦生 编著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京市兴怀印刷厂
规 格	140mm×203mm 32 开本 7 印张 188 千字
版 次	2011 年 1 月第 1 版 2011 年 1 月第 1 次印刷
印 数	0001—2000 册
定 价	25.00 元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换
版权所有·侵权必究

结构健康 (Structure's health) 有两层含义, 传统观念认为结构健康主要是结构安全; 现代概念却认为具有可靠性的结构才称为结构健康, 包括: ①结构能承受在使用期内可能出现的各种荷载作用; ②结构具有良好的工作性能; ③结构具有足够的耐久性能; ④结构在设计规定的偶然事件发生时及发生后, 仍能保持必要的整体稳定性。上述①和④称为结构的安全性; ②关系到结构的适用性; ③关系到结构的耐久性。结构的安全性、适用性和耐久性统称为结构的可靠性。因此, 通常将满足可靠性的结构称为健康结构, 或者说只有具备可靠性的结构才算得上结构健康。显而易见, 结构健康比结构安全的要求更高^①。

光纤是光学纤维或光导纤维的简称, 它是 20 世纪 50 年代以后尤其是 70 年代以来获得迅猛发展的一种传光物质。它既能传送紫外光、可见光与红外光, 又能传送高能激光及光信号。由光纤或非光纤的敏感元件、光发送器、光接收器和信号处理系统组成的系统称其为光纤传感器 (fiber-optic sensor)。而利用光纤传感器进行结构健康监测的原理、方法、流程与分析等体系 (System) 则通称为“结构健康监测光纤传感技术 (Fiber-optic sensing technology for structure's health monitoring)”。

目前, 应用于结构健康监测的传感技术主要有 3 种即传统的应力与应变传感技术、多点光纤光栅传感技术和光纤分布式传感技术 (见表 0.1)

① 余岭, 万祖勇, 徐德毅, 朱宏平·水工钢结构智能健康诊断技术研究与进展, 长江科学院院报, 2005, 22 (5)。

表 0.1 结构健康监测常用的 3 种传感技术

传感技术	光纤分布式传感技术	多点光纤光栅传感技术	传统的应力与应变传感技术
传感器	光纤	光纤光栅 FBG	应力感应片
布线	1 根	1 根	测定点数
应变测量精度	30μ	1μ	1μ
分布测量	支持	不支持	不支持
测量点数（单根光纤）	20000 点	10~20 点	1 点
远距离测量	支持	支持	不支持
测量时间	几分钟	实时	实时
测试频率	固定	100Hz	1kHz 以上
抗电磁性	支持	支持	不支持

注 摘自吴浩·光纤传感技术的比较通讯世界，2007（12）。

由表 0.1 可见，与传统的传感器相比，光纤传感器具有轻质，耐腐蚀，耐高温，防水防潮，抗电磁干扰等一系列优点，因此在恶劣环境中颇具用途。而分布式光纤传感技术除具备上述特点以外，还具备实时获取在传感光纤区域内随时间和空间变化的被测量分布信息的能力。准确地说，它可以精确测量光纤沿线上任一点的温度、应力、弯曲、振动等信息，如果把光纤纵横交错连接成网状，则可以构成规模庞大的地毯式动态监测网，实现对目标的实时全方位监测。

从非电量的光纤（光栅）监测角度而言，国内外应用于结构健康监测的非电量光纤技术主要是两大类：一是温度，它涵盖化学量与微波光纤光栅传感监测；二是应变，它涵盖化学量、振动、压力与电磁场光纤光栅传感监测。而在振动光纤光栅传感监测中包括了位移、距离、速度与加速度的监测；在压力光纤光栅传感监测中主要包括液压与流量监测；而在电磁场光纤光栅传感监测中，则主要是电压与电流（见图 0.1）。

相应于图 0.1 的应用领域，则有军工、水利、电力、钢铁冶金、石油化工、交通、建筑以及文物保护等（见表 0.2）。

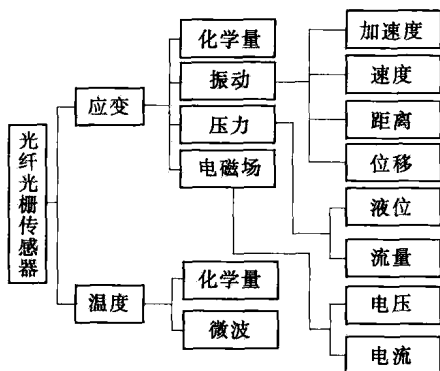


图 0.1 光纤传感器的应用框图

注 引自张承·几类实用化光纤传感器的发展现状分析·光纤光传输技术，2007（2）。

表 0.2 国内外光纤结构安全健康监测应用一览表

序号	监测功能范围		应 用							
			水利	电力	冶金	石化	交通	建筑	军工	其他
1	结构	位置	大坝				路堤	地基	隐蔽所、地下库	
2	缺陷	疲劳	闸门				桥梁		弹管	
3	缺陷	裂缝	混凝土		钢铁	井管	隧道衬砌	混凝土	混凝土	文物
4	结构	应力	坝体	输线塔风振			桥梁振动		地下工程	
5	应力	压力	隧洞			油压				
6	应力	应变	堤、坝体、坝基						地面发射装置	
7	应变	变形	边坡、坝基				边坡、桥梁	地面沉降		
8	结构	温度	坝体				桥梁		地面、地下工程	
9	结构	渗流	堤、闸、坝基					地下室	地下工程	
10	结构	腐蚀	钢筋	钢线材	钢结构	钢材	钢筋	钢筋	飞机、钢板、钢线材	

相应于表 0.2 的光纤传感器测定物体参数的一般应用原理见表 0.3。

表 0.3 光纤传感器测定物体参数的原理

被测物理量	光调制	光学现象	分 类
电流 磁场	偏振光 相位	法拉第效应 干涉现象（磁致伸缩）	光学传感器方式、光纤功能型传感器方式 光纤功能型传感器方式
电压 电场	偏振光 相位	Pockels（二次电光效应） 干涉效应（电的）	光学传感器方式 光纤功能型传感器方式
温度	光强	屏蔽板遮断光路 半导体的透明度变化 荧光辐射	光学传感器方式 光学传感器方式 拾波探头方式
	光谱	热体辐射	拾波探头方式
	偏振光	复合折射率变化	光学传感器方式
角速度 速度 流速	相位	周期效应	光纤功能型传感器方式
	频率	多普勒效应	拾波探头方式
		微带损耗	光纤功能型传感器方式
振动 加速度 压力	光强	屏蔽板遮断光路 光阑反射强度变化	光学传感器方式 光学传感器方式
	偏振光	光弹性效应	光学传感器方式
	相位	干涉现象（光弹性效应）	光纤功能型传感器方式
	频率	多普勒效应	拾波探头方式

注 引自张承. 几类实用光纤传感器的发展现状分析. 光纤光缆传输技术, 2007 (2)。

《结构健康监测光纤传感技术研究》一书旨在总结前人光纤传感技术理论上, 重点给出笔者专事的结构健康监测中的温度光纤传感技术, 包括温度系数的率定、光纤弯曲半径的合理取值、光纤伸长率、光纤测温系统最优预热时间以及光纤光栅传感器性能检验技术和温度与应变交叉敏感问题的研究成果, 并辅以温度与应变相关的结构健康光纤光栅传感技术应用案例。

《结构健康监测光纤传感技术研究》共 10 章。第 1 章绪论,

简述了光纤传感技术的国内外研究与应用现状以及进一步研究问题；第2章是光纤传感器用于结构健康监测的基本原理；第3章是分布式光纤温度监测中的关键技术研究；第4章是光纤光栅传感器性能检验及温度与应变交叉敏感问题研究；第5章是光纤传感器埋设技术研究；第6章是分布式光纤传感器在景洪水电站大坝混凝土温度监测中的应用；第7章是光纤光栅传感器在钢筋混凝土结构健康钢筋腐蚀监测中的应用实验；第8章是光纤光栅传感器在隧道工程健康监测中的应用；第9章是光纤光栅传感器沉降监测系统的应用典型案例；第10章是分布式光纤传感技术的渗流监测理论综述与应用实例。全书由徐卫军策划并主笔撰写前言、绪论、第2章至第6章；刘运飞执笔撰写第7章至第10章；陈彦生参加了部分章节的编撰并对全书进行了统稿。

在成书的过程中，曾得到武汉大学、长江科学院和长江勘测规划设计研究院等单位的领导支持，尤其是武汉大学土木建筑工程学院博士生导师侯建国教授不遗余力的指导，中国水利水电出版社策划编辑林京女士的帮助，终使本书付梓，在此一并谨致谢忱。

鉴于编著者的学识水平有限，书中难免有不妥乃至失误之处，敬请读者不吝指正。

编著者

2011年1月 武汉

目 录

前言

1 绪论	1
1.1 光纤传感技术的国内外研究及应用情况	1
1.2 结构健康监测中的光纤传感技术在国内外的研究概况 及存在的问题	3
1.3 进一步研究的问题	10
2 光纤传感器用于结构健康监测的基本原理	12
2.1 光纤传感器的分类	12
2.2 分布式光纤传感器的监测原理及主要技术指标	13
2.3 光纤光栅传感器的测量原理及主要技术指标	24
2.4 光纤传感器与其他传感器的比较	31
3 分布式光纤温度监测中的关键技术研究	34
3.1 引言	34
3.2 分布式光纤温度系数的率定技术研究	34
3.3 分布式光纤弯曲半径的合理取值研究	50
3.4 分布式光纤的伸长率研究	61
3.5 光纤测温系统最优预热时间研究	66
4 光纤光栅传感器性能检验及温度与应变交叉敏感 问题研究	76
4.1 引言	76
4.2 光纤光栅传感器的技术性能检验指标	76
4.3 光纤光栅传感器技术性能指标的检验结果	79
4.4 光纤光栅传感器技术性能指标的检验结果分析	86

4.5	光纤光栅传感器的应变与温度交叉敏感问题及对策研究	93
4.6	交叉敏感问题处理方法在水布垭工程应用中的效果分析	96
5	光纤传感器埋设技术研究	101
5.1	引言	101
5.2	分布式光纤传感器安装埋设的难点分析	101
5.3	分布式光纤结构形式的改进	103
5.4	碾压混凝土大坝内光缆的埋设方法	106
5.5	混凝土面板堆石坝周边缝部位光缆的埋设方法	108
5.6	光纤光栅传感器的埋设方式及注意事项	110
6	分布式光纤传感器在景洪水电站大坝混凝土温度监测中的应用	113
6.1	引言	113
6.2	工程概况及坝区气象条件	114
6.3	分布式光纤传感网络布置方案	115
6.4	混凝土温度控制标准及分布式光纤观测要求	119
6.5	提高分布式光纤测温精度的技术措施及效果检验	121
6.6	施工期分布式光纤实测成果及分析	128
6.7	运行期分布式光纤实测成果及分析	140
7	光纤光栅传感器在钢筋混凝土结构健康钢筋腐蚀监测中的应用实验	147
7.1	引言	147
7.2	光纤光栅传感器监测钢筋腐蚀原理	152
7.3	光纤光栅钢筋腐蚀传感器实验分析	156
7.4	腐蚀率与波长位移关系的标定	158
8	光纤光栅传感器在隧道工程健康监测中的应用	160
8.1	引言	160
8.2	隧道工程长期健康监测系统	161

8.3	光纤光栅应变传感器在云南小磨高速公路九龙 隧道工程中的应用	164
8.4	光纤光栅应变与温度传感器在福建厦门翔安海底 隧道健康监测中的应用	167
9	光纤光栅传感器沉降监测系统的应用典型案例	173
9.1	引言	173
9.2	上海市临港新城海堤沉降光纤传感技术应用案例	173
9.3	郑州至西安铁路无砟轨道线路工后沉降光纤光栅 监测案例	179
9.4	青藏铁路多年冻土路基沉降光纤监测案例	181
10	分布式光纤传感技术的渗流监测理论综述与 应用实例	186
10.1	引言	186
10.2	时域分布式光纤传感技术的渗流监测理论基础	187
10.3	光纤光栅传感技术温度/渗流监测原理与结构	196
10.4	湖北省清江水布垭枢纽工程坝体渗流光纤光栅 监测实例	200
	参考文献	203

1.1 光纤传感技术的国内外研究及应用情况

光纤 (Optical Fiber) 是 20 世纪后半叶人类的重要发明之一。它与激光器、半导体探测器一起构成了新的光测技术, 即光子学新领域^[1-16]。光纤传感是以光波为载体, 光纤为媒质, 感知和传输外界被测信号的新型传感技术。随着现代物理光学的最新成果的取得和材料学以及加工技术的进步, 光纤传感理论与技术得到了进一步的发展, 为研究、开发高精度、高效率的自动化测试仪器和系统开辟了一条崭新的途径^[17-18]。

1966 年, 英国标准电信研究所的英籍华人高锟 (K. C. Kao) 博士和霍克哈姆 (G. A. Hockham) 博士就光纤技术的前景发表了具有重要历史意义的论文, 该文指出, 若能将玻璃中过渡族金属离子的含量 (重量比) 降低到 10^{-6} 以下, 则光纤的吸收损耗可以降到 10dB/km。这篇论文激励了大量科技工作者为研制低损耗的光纤而努力^[19-20]。1970 年, 美国康宁公司用高纯石英拉制成损耗为 20dB/km 的多模光纤, 证实了高锟等人的设想, 这标志着低损耗光纤的出现, 也为光纤通信提供了可能。随着工艺方法的不断改进, 减小了光纤中杂质对光波的吸收, 光纤损耗不断降低, 石英光纤的损耗在波长 $1.31\mu\text{m}$ 时达到了 0.5dB/km, 在波长 $1.55\mu\text{m}$ 时达到了 0.2dB/km。目前正在研制的氟化物玻璃光纤, 通过降低光纤中的瑞利散射, 能将光纤损耗在波长 $2\sim 5\mu\text{m}$ 时降低到 0.01~0.001dB/km^[21]。近 20 年来, 光纤衰减降低了两个数量级, 带宽成倍增加, 光纤的机械性能不断提高, 用于传感技术的特殊光纤及光纤传感器也开始研制。

美国在光纤传感器方面研究最早, 投资也最大。1977 年,

美国海军研究所（NRL）开始执行光纤传感器系统计划，随后美国宇航局（NASA）、西屋电气公司、斯坦福大学等 30 个主要单位也相继开始从事光纤传感器的研究，并取得了相应的成果^[22-26]。

英国政府特别是贸易工业部十分重视光纤传感技术，早在 1982 年由该部为首成立了光纤传感器合作协会，到 1995 年为止，共有 30 多个成员，其中包括 SiraLtd、中央电气研究所、Delta 控制公司、标准电信研究所以及几所主要大学^[27]。

20 世纪 80 年代初，德国、法国也开始了光纤传感器方面的研究，到 20 世纪 80 年代中期，光纤传感器已达数百种，并开始用于国防、科研及制造等行业，更有部分形成产业化投入市场，但当时大量的都还处于试验阶段^[28]。瑞士、意大利等国也相继开展了光纤传感器的研究工作。

日本制定了 1979~1986 年“光应用计划控制系统”的 7 年规划，投资达 70 亿美元。日本有松下、三菱、东京大学等 24 家著名公司和大学从事光纤传感技术研究。

自 1989 年蒙德兹（Mendez）等首先将光纤传感器埋入混凝土结构中进行结构安全监测以来^[29]，美国、加拿大、日本、英国、德国等国的学者进一步推动了该技术在土木、水利工程中的应用^[30-34]，特别是美国与加拿大两国大规模地开展了有关光纤传感器监控复合材料固化、结构无损检测、损伤监测、识别及评估等方面的研究工作。近年来随着这项技术的日趋成熟，在北美与欧洲等国家已逐步从实验室研究阶段走向商业化应用阶段，一些新型光纤传感器已经投入实际应用。

20 世纪 90 年代起，我国学者也开始探索光纤传感器在土木工程结构监测中的应用。其中清华大学、哈尔滨工业大学、四川联合大学、重庆大学、北京航空航天大学、北京理工大学、武汉理工大学等已在这方面做了大量的研究。我国 1983 年国家科委新技术局在杭州召开了光纤传感器的第一次全国性会议，随后，研究工作开始在高等院校和研究所进行，研究内容着重于光纤电

流传感器。以后工业部门和一些省、市相继对光纤传感技术作了规划。在此基础上,1985年1月国家科委召开了全国光纤传感器技术“七五”规划座谈会。会议提出了15项光纤传感技术科研项目。目前,我国研究的光纤传感器用于测量电流、电压、磁场、温度、压力、位移等物理量方面,已取得了初步成果,并开始了用于光纤传感器的特殊光纤、光源和敏感元件方面的研究,研究工作也不仅在高校和研究所进行,一些科技公司也集中部分科技工作者进行了研制和开发^[35]。

1.2 结构健康监测中的光纤传感技术在国内外的研究概况及存在的问题

1.2.1 结构的损伤监测

在结构损伤监测和损伤评估方面,德国柏林结构养护及现代化研究机构将裸光纤粘结在郊外铁路钢桥的构件上^[36],在联邦材料研究中心试验厅内对其进行远程监测,测得了横向大梁的裂缝开展过程,但裸光纤因缺乏有效保护,试验阶段就遭到了损坏。加拿大多伦多大学提出基于光纤折断原理的损伤定位系统^[23],当材料中某一区域损伤时,通过这一区域的光纤输出功率为零,由此可判断损伤的位置。该方法利用器件太多,不适于大范围测量^[37]。美国科学家把光纤直接埋在建筑材料中作为建筑物的“神经”,从而反映建筑物变形和振动的情况。凯恩等人报道了光纤埋在石墨—环氧树脂无向胶带层间的应用^[38],以及光纤埋入石墨—环氧树脂纤维叠层中的应用。莱默、格洛索普、梅叶斯以及多伦多航天研究所的合作者们,提出了对损伤非常灵敏的刻蚀光纤,这种光纤的特点是增强了损伤部位的反向光,并用之描绘损伤,这是获得内部脱层损伤的一种快捷方法^[39]。维特将硅烷溶液处理的光纤(外直径 $140\mu\text{m}$,多模)埋入织网状复合材料(GRP)叠层中,通过其破损可用于指示结构的疲劳和损伤部位^[40-41],但该方法中这种处理过的光纤疲劳寿命往往比被测对象材料要低,且结构纤细的光纤其安装埋设十分困难,

成活率低。

将光纤作为裂缝传感器最先由 Hale 等人提出^[42-43]。这种传感器是 National Mali-time 研究所在近海结构的结构整体性监测方面的一系列研究成果之一。在混凝土结构裂缝监测方面,若西和勒玛等采用埋入式多模光纤(直径 $100\mu\text{m}$, 在几个截面处把保护层去掉)探测混凝土中的裂缝^[44-45]。当裂缝穿过没有保护层的光纤任一截面时,就会观察到光纤中该点光损耗加大,光强有一个跌落。马斯里、阿布迪雷等将环绕式光纤传感器与已知几何及力学特性的复合材料梁牢固地粘贴在桥的上沿,通过光纤传感器可测得荷载作用下桥梁的曲率变化,从而知道桥梁的曲率变化以及挠曲裂缝的开展情况,其原理是裂缝宽度的增大将引起环绕式光纤中光衰减的增长^[46]。但是,光纤传感器用于结构裂缝监测的前提是结构裂缝与光纤相交,即只有当光纤穿过结构裂缝面时才能通过光纤中光强损耗判断裂缝出现的位置,因此,光纤的布置部位和布置方式是结构裂缝监测的难点和重点。

在国内,我国许多高等院校和科研院所正在开展基于光纤传感技术的结构损伤和裂缝定位监测,如哈尔滨工业大学欧进萍院士在“重大工程结构的智能健康监测”、“钢筋混凝土结构的光纤光栅智能监测”等领域进行了深入研究^[47-49];清华大学、重庆大学、武汉科技大学等也相继开展了混凝土裂缝的发生与发展等内部状态的光纤传感技术的研究。武汉科技大学研制了一种新颖有效的光纤传感测缝仪,适合于水利水电工程和工业与民用建筑的一些关键接触缝的长期在线监测。吴永红、丁睿、刘浩吾、蔡德所等研究了分布式光纤传感技术在结构裂缝监测中的应用^[50-52]。江毅等在光纤裂缝传感器中裂缝宽度与光纤损耗关系方面进行了研究^[53]。这些研究工作大多为光纤传感技术的理论研究或室内模型研究,在工程应用中也同样遇到了光纤布置困难、裂缝定位精度低等问题。

1.2.2 结构的应力应变监测

在结构的应力、应变监测方面,目前研究较深入的有干涉型、光栅型和强度型三种传感方式。美国联合技术研究中心研制了双芯光纤应变计^[37],由两根匹配、互相靠近的单模光芯组成,当相干光注入其中一根芯时,会激励出不同速率的对称、反对称模,从而感应应变。美国佛蒙大学1992年将分布式光纤应力应变传感器安装在威努期基河水电站内,以实时监测大坝混凝土的应力和应变情况。克鲁施维茨等人在混凝土柱中安装了Fabry-Fizeau干涉应变计(EFFI),对混凝土柱内部的应力应变进行了测试^[54];马希尔和钠威报道了在实验室混凝土柱试验中光纤Bragg光栅干涉计的成功应用;霍尔斯特和莱辛把光纤位移计安装在水坝中,用于监测水坝混凝土内部应变大小^[55]。伊斯科特等在混凝土梁的三点弯曲试验中,将单模光纤传感器贴于梁表面和埋入梁内,利用干涉技术测量其应变^[56]。达迪等研制了一种光纤传感器^[57],它是用未包层的低折射单模光纤,用两条金属板条压制在一起,外载荷作用于板条就会引起光纤双折射,在光纤内的两个偏振光模式之间发生干涉,就可以较容易测得双折射,实现对被测对象的应变测试,但测试精度偏低。哈贝尔和霍夫曼使用F-P型光纤传感器,在混凝土桥梁和墙体中测试动力和静力应变,精度达到了 $0.024\mu\epsilon$ (德)和 $0.1\mu\epsilon$ (美)^[58-59],但整个测试系统庞大,对测试环境的要求很高。艾威等将Bragg光栅传感器埋设在混凝土桥梁中,经受了实际工程恶劣环境的考验,表明Bragg光栅传感器的稳定性和耐久性比传统监测技术优越得多^[60-62]。

在国内,清华大学电子工程系近年来也开展了混凝土应变光纤传感技术的研究,重点在梳状光栅型传感器,用于混凝土表面应变的测试,已取得较好效果。哈尔滨工业大学复合材料研究所采用光栅应变计对钢筋混凝土梁的应变进行了测试,试验前还在钢筋混凝土梁表面与光纤传感器同一水平位置处粘贴了电阻应变片。试验过程中,分别应用所埋入的光纤光栅传感器和粘贴在梁

表面的电阻应变片测量梁的应变变化。试验结果表明,光栅应变计实测成果与应变片实测成果基本一致,见图 1.1。在工程应用方面,光纤光栅应变计大多被应用于桥梁等大型结构中,如哈尔滨工业大学的欧进萍院士、武汉理工大学的姜德生教授等带领相关课题研究人员研究了光纤光栅应变计在桥梁结构应变监测中的应用,取得了丰富成果^[63-65],光纤光栅传感器在桥梁结构健康监测中的应用见图 1.2~图 1.3。相对于光纤光栅而言,研究分布式光纤应变传感测试的文献则较少。

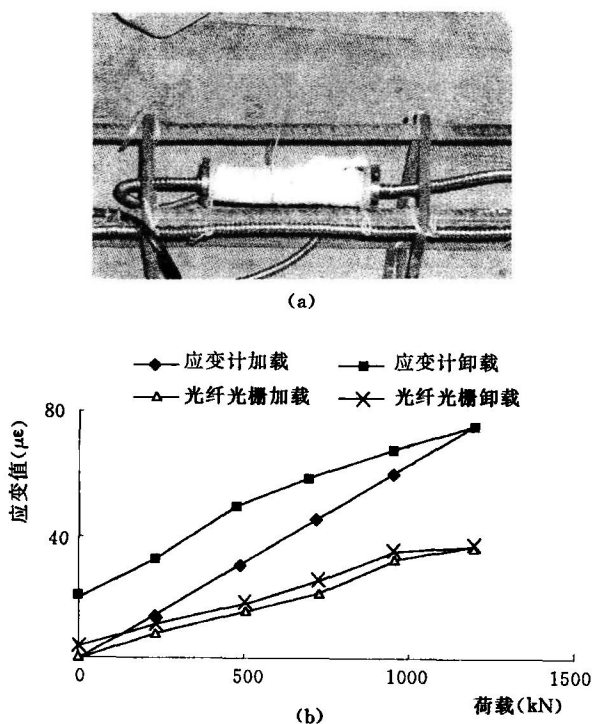


图 1.1 光纤光栅应变计在混凝土梁应变监测中的应用
(a) 埋设在混凝土梁内的光纤光栅应变计;
(b) 光纤光栅应变计和常规应变计实测成果