

摘 要

本文在充分研究光纤光栅智能传感特性的基础上, 针对大型土木工程结构长期健康监测, 研制开发出光纤光栅封装传感器和 FRP-OFBG 复合智能筋, 研究了这些传感器的应变和温度传感特性及其温度补偿方法、以及应变传感的界面传递机理和误差修正, 建立了光纤光栅监测系统, 实现了水泥净浆早期固化光纤光栅监测和实际桥梁结构的施工与阶段性运营监测。(主要研究内容包括以下方面:

在光纤光栅传输理论的基础上, 分析了光纤光栅应变与温度传感及其特性, 以及光栅中心波长变化对传感灵敏度系数的影响, 提出了光纤光栅应变传感的温度补偿原理和方法, 并通过材料试验和等强度梁试验以及温度标定试验研究了光纤光栅的应变与温度传感特性。研究表明: 光纤光栅传感的试验结果与理论分析吻合很好; 光纤光栅只对轴向应力敏感, 而对横向应力不敏感; 在波长变化不大的情况下, 不考虑波长对传感灵敏度的影响, 对测试结果影响很小。

针对土木工程结构长期监测的需要, 从结构形式、材料选择、封装工艺等角度对光纤光栅封装传感器进行了研究。研制开发出了光纤光栅毛细金属管式封装应变传感器、光纤光栅片式封装应变传感器和光纤光栅封装温度传感器, 并对其传感特性进行了试验研究, 还将其用于结构试验进行了验证。结果表明它们是对混凝土内部应变监测、结构表面应变监测和温度监测等性能优良的传感器。

利用纤维增强塑料 (FRP) 的强度特性和光纤布拉格光栅 (OFBG) 的感知特性, 研制开发出 FRP-OFBG 复合智能筋, 对其力学特性、微观结构以及应变和温度传感特性进行了试验研究。对 12 根分别布设 GFRP-OFBG 筋和 CFRP-OFBG 筋传感器、光纤光栅管式封装应变传感器、裸光栅等光纤光栅传感器的 FRP 混凝土梁进行了全过程的静力加载试验, 监测揭示了 FRP 的受力、变形、混凝土开裂, 特别是 FRP 筋的滑移和应变分布等特性。研究结果表明, FRP-OFBG 复合智能筋是兼具受力与传感特性、集结构材料和功能材料于一体的理想土木工程材料; 同时, 它作为传感元件彻底克服了光纤光栅脆弱、布设困难的缺点, 在结构健康监测领域具有十分广阔的应用前景。

研究了光纤传感器应变传感的界面传递机理和误差修正, 推导出了光纤传

传感器的应变多层界面传递和误差修正公式,利用理论和试验结果对自行研制开发的三种光纤光栅封装应变传感器进行了应变传感误差分析和修正,为光纤光栅智能传感元件在结构健康监测中的应用提供了监测结果合理修正的依据。

提出了光纤光栅监测水泥净浆和混凝土固化的方法,研究了光纤光栅在水泥净浆中的埋设工艺,实现了水泥净浆早期固化过程的应变与温度双参量同时监测技术;进行了水泥净浆的光纤光栅固化监测试验,并对埋入光栅固化后的水泥净浆试件进行了压力试验。结果表明:光纤光栅是一种简单可靠的水泥净浆早期固化监测技术,埋入水泥净浆的光纤光栅可以方便地作为浆体固化后试件(构件)受力变形的监测传感元件。

建立了包括传感器、光开关、解调器、数据采集和控制软件在内的大规模、分布式的光纤光栅智能监测系统。研究了光纤光栅现场布设工艺,成功地将 27 个光纤光栅传感器在桥梁施工过程中分别布设到黑龙江呼兰河大桥和黑大公路牛头山大桥上;监测了预应力箱形梁张拉过程的钢筋应变历程和箱形梁静载试验的混凝土和钢筋应变增量与分布;呼兰河大桥建成后,对其阶段性运营监测,监测了车辆荷载下的应变时间历程和大桥温度变化过程,监测结果表明,光纤光栅传感器的稳定性与耐久性满足桥梁结构施工监测与长期健康监测的要求,性能明显优于传统的电阻应变片。最后,针对“黑龙江松花江大桥结构健康监测系统”的局部监测系统需要,完成了能够多点同时监测的“光纤光栅智能局部监测系统”方案和功能设计。

关键词 土木工程结构; 光纤光栅传感器; FRP-OFBG 复合智能筋; 应变多层界面传递; 桥梁结构监测

Abstract

For the sake of long-term health monitoring of large civil infrastructure, the packaged FBG sensors and smart composite FRP-OFBG bars have been studied and developed based on the serious research of FBG's sensing properties. The developed sensors' strain and temperature sensing properties, temperature compensation technique, multi-layer strain transfer mechanics and error modification have also been studied. The FBG monitoring system has been set up. The early stage of cement paste curing and practical bridges under construction and in service have been monitored by FBG. The main contents include:

Firstly, based on the principle of light travel in FBG, the strain and temperature sensing properties have been considered, and the affection of central wavelength on the FBG sensing sensitivities have also been analyzed. Then, the principle and technique for temperature compensation are given when we use FBG as strain sensor. Finally, the FBG sensing properties have been studied by the experiments of materials, equal-strength beam and temperature calibration. The research results show that the experimental results agree well with that from theoretical analyses, that FBG's axial strain sensitivity is much bigger than transverse strain sensitivity, and that the monitoring results of FBGs are acceptable without considering the affection of central wavelength on sensitivity if the central wavelength doesn't change a lot.

Secondly, taken the need of long-term monitoring for civil engineering into account, the structure, materials selection, and package techniques for packaged FBG sensor have been studied. On the basis of research, we have developed mental tube packaged FBG strain sensors, slice packaged FBG strain sensors and packaged FBG temperature sensors, and have analyzed their sensing properties and tested by structural experiments. The research results show that the packaged FBG sensors are excellent to monitor inner strain of concrete structure, structural surface strain and temperature.

Thirdly, the smart FBG-OFBG composite bars have been developed by use of FRP's strength properties and FBG's sensing properties, and their mechanical

properties, micro-structure, strain and temperature sensing properties have also been studied. In order to test FRP-OFBG bars' mechanical and strain sensing properties, the experiment of 12 FRP concrete beams reinforced with GFRP-OFBG bars, CFRP-OFBG bars, tube-packaged FBGs and bare FBGs under whole process dead load has been accomplished, and the deformation of FRP and concrete cracks, especially the slip and strain distribution of FRP, have been monitored. The research results show that the smart FRP-OFBG composite bar is wonderful for its mechanical and sensing properties, so it is a kind of perfect material for civil engineering, which is not only structural material but also function material. As strain sensor, FRP-OFBG completely overcomes the difficulties of FBGs lay-out due to their fragility, and shows prosperity in structure monitoring in civil engineering.

Fourthly, the interface transferring mechanism of FBG strain sensors and error modification have been studied. The equations of multi-layer interface transferring and error modification are derived. Based on the comparison between theoretical and experimental results, the strain error analysis and modification of three kinds of FBG packaged strain sensors are studied, which is the base of the modification of monitoring data from FBG smart sensing elements in Structure health monitoring.

Fifthly, the method that the curing of cement and concrete is monitored by use of FBGs is brought forward, and the technique of bare FBG installation in cement paste has been studied, and the technique of simultaneous strain and temperature monitoring has been realized. The experiments of cement paste curing based on bare FBG and FBG in cement paste under pressure has been finished, and the experimental results show that FBG is reliable to monitor the strain and temperature of the early curing for cement paste, and the FBGs in cement paste can be regarded as wonderful strain sensors.

Sixthly, The FBG monitoring system, consisting of sensors, optical switch, interrogator, data collection and control software, has been set up. The technique of FBG spot installation has been explored, and 27 FBG sensors have been successfully installed in the Heilongjiang Hulan River Bridge and Heida highway Niutoushan Bridge. The strain of the reinforcing steel bars has been monitored during the course of tension with the FBG stain sensors in the prestressed box girder, and the stain increments and distribution of concrete and rebars have also been monitored when the box girder under dead load with FBGs. After the Hulan River Bridge was

finished, the FBG sensors have monitored the strain course under traffic load and temperature changes of the bridge. The fact that the FBG stain sensors have worked normally for 2 years proves that the sensors could satisfy the need of bridge health monitoring long-term structural health monitoring than the electric strain gauge in their durability and stability. Finally, in order to achieve the need of local monitoring system of “Heilongjiang Songhua River Bridge Health Monitoring System”, we have completed the design of project and function to multi-FBGs monitoring system.

Key words infrastructure; optical FBG sensor; smart FRP-OFBG composite bar; multi-layer interface strain transfer; bridge

目 录

摘 要	I
Abstract	III
第 1 章 绪论	1
1.1 课题的提出、背景及意义	1
1.2 土木工程结构健康监测的研究与发展	2
1.2.1 土木工程智能结构体系	3
1.2.2 土木工程结构健康监测的现状与发展趋势	4
1.3 结构局部监测智能传感元件及其定性比较	6
1.4 光纤光栅传感器的研究与应用发展概况	9
1.5 本文的构思与研究内容	22
第 2 章 光纤布拉格光栅智能传感特性	25
2.1 引言	25
2.2 光纤布拉格光栅传输基本理论	25
2.2.1 光纤基本结构与传输原理	25
2.2.2 光纤布拉格光栅结构与原理	26
2.2.3 光纤布拉格光栅传输基本理论	27
2.3 光纤布拉格光栅智能传感特性分析	32
2.3.1 均匀轴向应力下的光纤光栅传感特性分析	32
2.3.2 均匀横向应力下的光纤光栅传感特性分析	33
2.3.3 光纤布拉格光栅温度传感特性	34
2.3.4 光纤布拉格光栅传感灵敏度误差分析	35
2.3.5 光纤布拉格光栅应变传感的温度补偿技术	37
2.3.6 光纤光栅应变与温度的耦合作用分析	39
2.4 光纤布拉格光栅智能传感试验	40
2.4.1 光纤布拉格光栅应变传感试验研究	40
2.4.2 光纤布拉格光栅温度传感标定试验	42

2.5 本章小结	43
第3章 光纤光栅封装传感器	45
3.1 引言	46
3.2 光纤光栅管式封装应变传感器	46
3.2.1 传感器封装结构	46
3.2.2 封装材料选择	47
3.2.3 封装工艺	48
3.2.4 传感器性能试验	51
3.3 光纤光栅片式封装应变传感器	53
3.3.1 传感器封装结构	53
3.3.2 光纤光栅片式封装材料选择	54
3.3.3 光纤光栅片式封装工艺	54
3.3.4 光纤光栅片式封装传感器性能试验	55
3.4 光纤光栅封装温度传感器	56
3.4.1 传感器封装结构	57
3.4.2 封装材料选择	58
3.4.3 封装工艺	58
3.4.4 传感器性能试验	59
3.5 光纤光栅封装传感器在结构试验中的应用	61
3.6 本章小结	64
第4章 FRP-OFBG 筋及其力学与传感特性	66
4.1 引言	66
4.2 FRP-OFBG 筋的制备	67
4.3 FRP-OFBG 截面微观分析	69
4.4 FRP-OFBG 筋力学特性试验	70
4.5 FRP-OFBG 筋传感特性试验	70
4.5.1 FRP-OFBG 应变传感特性试验	70
4.5.2 FRP-OFBG 温度传感特性试验	72
4.6 FRP-OFBG 加筋智能混凝土梁试验研究	74
4.6.1 试验准备	74
4.6.2 试验结果分析与讨论	78

4.6.3 混凝土梁破坏后 FRP-OFBG 筋的 SEM 分析	90
4.7 本章小结	92
第 5 章 光纤光栅应变传感的界面传递特性与误差修正	93
5.1 引言	93
5.2 光纤应变传感界面传递特性	94
5.2.1 埋入式光纤应变传感的界面传递特性	94
5.2.2 表面粘贴光纤应变传感的界面传递特性	101
5.3 光纤光栅应变传感的界面传递特性	107
5.3.1 埋入式光纤光栅应变传感的界面传递特性	107
5.3.2 表面粘贴式光纤光栅应变传感的界面传递特性	109
5.3.3 FRP-OFBG 传感器埋入结构应变传感界面传递特性	110
5.4 光纤光栅应变传感界面传递的平均应变分析	111
5.5 光纤光栅应变传感的误差分析与修正	112
5.5.1 FRP-OFBG 应变传感器埋入结构	112
5.5.2 光纤光栅管式封装埋入结构	114
5.5.3 光纤光栅片式封装粘贴结构表面	115
5.5.4 试验结果误差修正实例	116
5.6 本章小结	117
第 6 章 水泥净浆的光纤光栅固化监测试验	118
6.1 引言	118
6.2 水泥净浆中光纤光栅的布设工艺	119
6.3 水泥净浆固化监测的应变与温度监测方法	121
6.4 水泥净浆的固化监测试验	123
6.4.1 试验准备	123
6.4.2 试验过程与结果分析	124
6.5 埋入光栅固化后的水泥净浆试件受压变形试验	127
6.6 本章小结	128
第 7 章 FBG 智能监测系统及其在桥梁结构中的应用	129
7.1 引言	129
7.2 光纤光栅智能监测系统研究与开发	131
7.2.1 光纤光栅智能监测系统构建	131
7.2.2 可控光开关的研究与开发	133

7.2.3 光纤光栅监测系统软件开发.....	134
7.3 呼兰河大桥的光纤光栅智能监测	135
7.3.1 光纤光栅传感器布设工艺.....	136
7.3.2 预应力箱形梁光纤光栅施工监测.....	138
7.3.3 呼兰河大桥的光纤光栅运营监测.....	140
7.4 黑大公路牛头山大桥光纤光栅施工监测.....	142
7.4.1 传感器布设.....	142
7.4.2 监测试验与结果分析.....	143
7.5 松花江大桥的光纤光栅智能局部监测系统方案.....	145
7.5.1 结构背景与有限元分析	145
7.5.2 光纤光栅传感器布设.....	150
7.5.3 光纤光栅局部智能监测系统.....	153
7.6 本章小结.....	154
结论	155
参考文献.....	158
攻读博士学位期间主要研究成果和发表的学术论文.....	170
致谢	172
个人简历.....	173

Contents

Abstract (in Chinese)	I
Abstract (in English)	III
Chapter 1 Introduction	1
1.1 Background and Signification	1
1.2 Research and Development of Health Monitoring in Civil Engineering	2
1.2.1 Intelligent Structure System of Civil Engineering	3
1.2.2 State-in-art of Health Monitoring in Civil Engineering and Its Developing Trends	4
1.3 Intelligent Sensing Elements for Structural Local Monitoring and Their comparisons	6
1.4 State-in-art of FBG sensors and Developing Trends	9
1.5 Conception and Reseach Contents of The Dissertation	22
Chapter 2 Smart Sensing Properties of FBG	25
2.1 Introduction	25
2.2 The Theory of Light Traveling in FBG	25
2.2.1 Optical Fiber Structure and the Principle of Light Traveling in Optical Fiber	25
2.2.2 FBG Structure and Principle	26
2.2.3 The Basical Theory of Light Traveling in FBG	27
2.3 Analysis of Intelligent Sensing Properties of FBG	32
2.3.1 Analysis of FBG Sensing Properties Under Average Axial Stress	32
2.3.2 Analysis of FBG Sensing Properties Under Average Transverse Stress	33
2.3.3 The Temperature-Sensing Properties of FBG	34
2.3.4 The Error Analysis of FBG Sensitivity	35
2.3.5 The Temperature Compensation for FBG When It Sensing Strian	37
2.3.6 Analysis of the Couple Efection for FBG Sening Strain and	

Temperature	39
2.4 Experiments of FBG Intelligent Sensing Properties	40
2.4.1 Experiments of FBG Strain-Sensing	40
2.4.2 Calibration Experiments of FBG Temperature-Sensing	42
2.5 Summary	43
Chapter 3 Packaged FBG Sensors	45
3.1 Introduction	46
3.2 Strain Sensors of FBG Packaged in Mental Tube	46
3.2.1 Structure of Sensors Packaging	46
3.2.2 Materials Selection of FBG Packaged in Mental Tube	47
3.2.3 Package Technics	48
3.2.4 Experiments of Strain-Sensing for FBG Packaged in Mental Tube	51
3.3 Strain Sensors of FBG Packaged in Mental Slice	53
3.3.1 Structure of FBG Packaged in Mental Slice	53
3.3.2 Materials Selection of FBG Packaged in Mental Slice	54
3.3.3 Package Technics of FBG in Mental Slice	54
3.3.4 Experiments of Strain-Sensing for FBG Packaged in Mental Slice	55
3.4 FBG Packaged for Temperature Sensors	56
3.4.1 Structure of FBG Packaged for Temperature Sensors	57
3.4.2 Materials Selection of FBG Packaged for Temperature Sensors	58
3.4.3 Package Technics	58
3.4.4 Experiments of Temperature-Sensing for FBG Packaged for Temperature Sensors	59
3.5 Structrual Experiment of FBG Packaging Sensors	61
3.6 Summary	64
Chapter 4 FRP-OFBG Bars and Their Mechanical and Sensing Properties	66
4.1 Introduction	66
4.2 FRP-OFBG Bars Fabrication	67
4.3 Micro-Structure Analysis of FRP-OFBG Section	69
4.4 Experiments of FRP-OFBG Bars Mechanics Properties	70
4.5 Experiments of FRP-OFBG Bars Sensing Properties	70
4.5.1 Experiments of FRP-OFBG Strain-sensing Properties	70

4.5.2	Experiments of FRP-OFBG Temperature-sensing Properties	72
4.6	Experiments of Intelligent Concrete Beams Reinforced with FRP-OFBG Bars	74
4.6.1	Experiments Preparation	74
4.6.2	Analysis and Discussion of The Experiment Results	78
4.6.3	SEM Analysis of FRP-OFBG Bars of the Failure Concrete Beams	79
4.7	Summary	92
Chapter 5 Interface Transferring Properties and Error		
	Modification of Optical Fiber Strain Sensing	92
5.1	Introduction	93
5.2	Interface Transferring Properties of Optical Fiber Strain Sensing	94
5.2.1	Interface Transferring Properties of Embedded Optical Fiber Strain Sensing	94
5.2.2	Interface Transferring Properties of Bonded Optical Fiber Strain Sensing	101
5.3	Interface Transferring Research of FBG Strain sensing	107
5.3.1	Interface Transferring Properties of Embedded FBG Strain Sensing	107
5.3.2	Interface Transferring Properties of Bonded FBG Strain Sensing	109
5.3.3	Interface Transferring Properties of FRP-OFBG Strain Sensing Embedded in Structures	110
5.4	Analysis of FBG Average Strain Sensing Interface Transferring	111
5.5	Analysis and Modification of FBG Strain Sensing Error	112
5.5.1	FRP-OFBG Strain Sensing Embedded in Structures	112
5.5.2	FBG Packaged in Metal Tube Embedded in Structures	114
5.5.3	FBG Packaged in Metal Slice Bonded on Structures	115
5.5.4	Examples of Experiment Results Error Modification	116
5.6	Summary	117
Chapter 6 Experiment of Cement Pastes Curing Monitoring		
	Based on FBGs	118
6.1	Introduction	118
6.2	Installation Technics of FBG in Cement Pastes	119
6.3	Technics of Cement Pastes Strain and Temperature simultaneous	

Monitoring with FBGs	121
6.4 Experiments of Cement Pastes Curing Monitoring with FBGs	123
6.4.1 Experiments Preparation	123
6.4.2 Experiments Process and Results Analysis	124
6.5 Experiments of Cement Pastes Specimen with Embedded FBGs under Compressure	127
6.6 Summary	128
Chapter 7 Intelligent FBG Monitoring System and Its applications in practical bridges	129
7.1 Introduction	129
7.2 Research and Development of Intelligent FBG Monitoring System	131
7.2.1 Construction of Intelligent FBG Monitoring System	131
7.2.2 Research and Development of Programmable Optical Switch	133
7.2.3 Development of FBG Monitoring System Software	134
7.3 Intelligent FBG Monitoring of Hulan River Bridge	135
7.3.1 Installation of FBG Sensors on Bridge	136
7.3.2 Construction Monitoring based on FBGs for Prestressed Box Girder	138
7.3.3 Hulan River Bridge in Service Monitoring Based on FBGs	140
7.4 Construction Monitoring based on FBGs for Heida Highway Niutoushan Bridge	142
7.4.1 FBG Installation	142
7.4.2 Experiment of Monitoring and Result Analysis	143
7.5 Scheme of Intelligent FBG Local Monitoring System for Songhua River Bridge	145
7.5.1 Structure Background and FEM Analysis	145
7.5.2 FBG Installation	150
7.5.3 Intelligent FBG Local Monitoring System	153
7.6 Summary	154
Conclusion	155
References	158
Publications	170
Acknowledgments	172
Resume	173

第1章 绪论

1.1 课题的提出、背景及意义

我国是世界经济发展速度最快的发展中国家之一,基础建设的投入占国民生产总值的很大部分。改革开放的20年里,我国建成各类建设项目24万个,其中大型项目845个,仅“八五”期间,全社会固定资产投资总额为61637亿元。据世界银行1995年估算,今后10年中国的基础建设需要投资7000亿美元,以缓解经济进一步快速增长的瓶颈。1998年,中国政府在基础设施方面增加1000亿元投资,对国民经济增长的贡献率达到60%,最终1998年GDP增长率为7.8%^[1]。根据国家统计局2002年公布的最新数据,2001年公路重点项目完成投资1148亿元,比上年增加65亿元,增长6.0%;路网改造完成1164亿元,比上年增加238亿元,增长25.8%;2001年底,全国共有公路桥梁28.4万座、1065万延米,比上年增加0.53万座,其中特大桥梁1580座、141.6万延米,比上年增加123座、9.9万延米。这些建设项目为保证国民经济持续稳定发展、改善人民物质和文化生活条件发挥了巨大的作用。

然而,重大土木工程结构和基础设施,如桥梁、大跨空间结构、超高层建筑、大型水坝、核电站、海洋采油平台以及输油、供水、供气等管网系统,它们的使用期都长达几十年,甚至上百年。在其服役过程中,由于环境荷载作用、疲劳效应、腐蚀效应和材料老化等灾变因素的耦合作用,结构不可避免地产生损伤累积和抗力衰减,从而抵抗自然灾害的能力下降,甚至引发灾难性的突发事件^[2]。例如,1965年英国北海海上石油钻井平台“海上钻石”号失效;1986年中国渤海石油钻井2号平台冬天被海冰推倒;1994年韩国汉城的圣水大桥断塌;1998年宁波大桥在施工过程中主跨折断;1998年江西九江决堤;1999年重庆彩虹大桥突然倒塌;1999年日本发生核泄露;2000年台湾高屏大桥突然断为两截;2001年巴西P-36海洋平台爆炸倒塌;2001年四川宜宾南门大桥桥面断塌等等。这些事故不仅造成了重大的人员伤亡和经济损失,而且产生了极坏的社会影响。虽然有些事故发生前出现了漏洞、桥墩下陷、开裂等症状,可惜缺乏可靠的预警与控制系统,无法避免事故的发生。鉴于上述情况,已建成使用的许多结构和设施急需采用有效的手段监测和评定其安全状况、修复和控制损伤;新建的结构和设施总结以往的经验教训,也已开始增设长期的“健康”监测

系统与损伤控制系统,实时地把握工程结构的全寿命质量与安全状况,确保工程结构使用的安全性、完整性、适用性与耐久性。

结构健康监测的定义^[3]:利用现场的无损传感与结构系统特性分析(包括结构反应),探测结构的性态变化,揭示结构损伤与结构性能劣化。其实,结构监测并不是一个新的概念,对结构的应变、加速度、速度、位移、旋转等参数的测量一直是结构工程的基本方法。由于土木工程结构的特殊性,如结构型式多样、服役周期长、影响结构性能的因素复杂多变等,对其进行健康监测比一般的机械系统要复杂得多。土木工程的健康监测是将性能稳定、耐久性好的智能传感元件埋入或粘贴于结构中,对最能反映结构安全性态的参数进行监测,在此基础上评价结构的安全性、完整性、适用性与耐久性,为结构的维修、报废和预警决策提供可靠的依据。理想的健康监测系统应能在结构损伤出现的较早时期发现损伤,在传感器允许的情况下,结合损伤识别技术确定损伤的位置,评估损伤程度,预测剩余的有效寿命。

结构智能监测集智能传感元件、数据有线或无线采集和实时处理、结构损伤识别、健康诊断与可靠性预测以及远程通讯与数据管理等硬软件系统于一体,是工程理论发展与综合的象征、高新技术开发与集成的标志,同时也是现代结构实验技术的集中体现。结构智能监测已愈来愈成为重大工程结构设计验证、施工控制、安全运营与维修管理的重要保障技术。目前结构健康监测已经成为世界性的研究热点。

结构健康监测分为整体监测与局部监测。结构的整体监测遇到了“损伤定位”这一富有挑战性的难题,而局部监测信息是解决这一难题的金钥匙。不仅如此,基于结构的整体安全性取决于结构关键部位的安全性态这一事实,局部性态信息也可以直接用来评定结构的安全状况,因此,局部监测意义重大。对结构进行整体监测用的位移、加速度等传感器目前已经相对成熟,而局部监测用的传感器,如电阻应变计、振弦传感器等,在耐久性与稳定性上远远不能满足工程实际的需要。因此,研究开发在稳定性与耐久性上满足工程要求的局部监测传感元件是从根本上解决健康监测的核心工作。

1.2 土木工程结构健康监测的研究与发展

客观地说,土木工程结构健康监测得益于“智能材料与结构”的研究与发展。随着航空、航天以及军用高技术的发展,大型空间结构振动的主动控制、机敏自适应机翼形状控制、以及飞机和潜艇结构噪声的主动控制等问题日益突

出, 这些问题的提出与研究推动了“智能材料与结构”概念的形成与高速发展。

“智能材料与结构”是将具有仿生命功能的材料融合于基体材料中, 使制成的构件具有人们期望的“智能”功能, 这种结构成为智能材料结构^[4]。这种“智能”功能表现为模仿生命系统, 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, 作出期望的、能与变化后的环境相适应的复合材料或材料的复合^[5~7]。智能材料主要包括光纤传感器、压电材料、形状记忆合金、磁致伸缩材料、可控流体(包括电流变液和磁流变液)、碳纤维、疲劳寿命丝(箔)、半导体材料等, 它们在航空航天方向的发展受到各领域的广泛关注, 很快被土木工程接受。由于土木工程结构健康监测问题的特殊性, 智能材料在该领域得到充分的发展, 显示出特有的生命力。

1.2.1 土木工程智能结构体系

从土木工程结构的特点和智能材料的性能上考虑, 土木工程智能结构体系包括以下方面, 如图 1-1 所示^[8]。

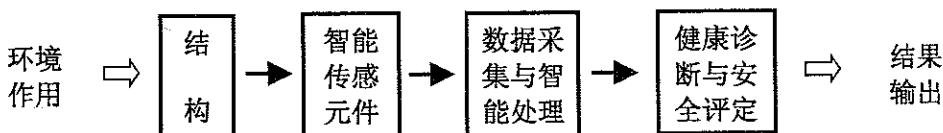


图 1-1 结构的智能监测与诊断系统

Figure 1-1 System of structural smart monitoring and diagnosis

1) 智能传感元件 直接影响土木工程结构健康状态的监测量主要包括三部分: 一为环境要素, 包括风、浪、流、冰甚至地震等特征要素, 以及有害介质的化学成分和含量等; 二为结构部件的局部损伤, 如局部应力、裂纹、疲劳损伤、滑坡和地基沉降等; 三为结构的整体性态参数, 如动力特性和状态反应等。根据监测量的需要, 发展满足稳定性与耐久性、可埋设或附着、大规模分布式的传感元件是这一部分的核心内容。智能感知材料的快速发展, 如光纤、压电材料、形状记忆合金、碳纤维、智能混凝土、电阻应变丝、疲劳寿命丝、半导体材料等, 为土木工程长期智能监测打下了坚实的基础。

2) 传感器优化布置 由于客观的经济与结构运行状态等方面的原因, 布设的传感器数量总是有限的。对于整体监测而言, Penny 等人提出了评价传感器优化布置的 5 条量化准则: 模态置信准则 MAC (Modal Assurance Criterion)、修正模态保证准则 (Modified Modal Assurance Criterion)、SVD (Singular Value

Decomposition) 比、模态所测功能和 Fisher 信息矩阵值^[9]。目前采用的方法主要有模态动能法(MKE)^[10]、有效独立法(EI)^[11]、模型缩减法、奇异值分解法和遗传优化法^[12]等。对于局部监测而言,目前尚没有比较统一的布设方法,通常凭结构概念,考虑有限元分析结果的热点部位来确定。

3) 数据采集与信号智能处理 数据采集的主要内容是各种智能传感元件的信号转换接口和采集软件的开发。信号处理的核心内容是提取结构损伤特征信息,充分利用现代信号处理方法,如高阶谱分析、时—频分析、小波分析、神经网络等方法,对传感器传输来的信息进行智能处理,通过数据融合理论表征结构特征损伤信息,便于对结构进行安全与损伤评价。

土木工程健康监测的结构参数和传感器数量较多,而不同的参数监测采用的传感器原理也大多不一样。多传感器的使用会带来以下四个方面的困难:一是多传感器形成了不同通道的信号;二是同一信号形成了不同的特征信息;三是不同的诊断途径和方法会得出有偏差的诊断结论;四是来自多传感器的监测信息和诊断决策信息具有强烈的不确定性。近年来,不断发展起来的多传感器信息融合技术以其强大的时空覆盖能力和对多源不确定性信息的综合处理能力,越来越成为信息智能处理领域的强有利工具^[13]。

由于结构健康监测突出的是实时监测,因此针对海量数据的管理数据库和网络技术也是信号智能处理的主要研究内容。

4) 健康诊断与安全评定 健康诊断与安全评定主要包括参数识别、损伤评定与定位、结构建模和模型修正、体系可靠度和专家系统等方面的理论、方法和软件。

1.2.2 土木工程结构健康监测的现状与发展趋势

鉴于前述土木工程结构事故的灾难性后果,结构健康监测已经成为国际研究热点,很多国家和地区在结构上尝试着布设了健康监测系统,尽管这些系统设计得很不完善。如英国八十年代后期开始研制和安装大型桥梁的监测仪器和设备,并调查和比较了多种长期监测系统的方案;美国八十年代中后期开始在多座桥梁上布设监测传感器,监测环境荷载、结构振动和局部应力状态,用以验证设计假定、监视施工质量和实时评定服役安全状态。例如,美国威斯康辛一座已有 65 年历史的提升式 Michigan Street Bridge 桥上,安装了世界上第一套全桥远程监测系统,监测将达到设计寿命的该桥梁裂缝扩展情况和其他桥梁状态的变化。佛罗里达州的 Sunshine Skyway Bridge 桥上安装了 500 多个传感器^[14]。美国 FHWA (Federal Highway Administration) 资助研究的无线桥梁整体评估与

监测系统包括位移、应变、转角、加速度等项目的测量。美国仅 1995 年就投资 1.44 亿美元,在 90 座大坝配备了安全监测设备。美国的 Fuhr 等人在佛蒙特州的 Winooski 水电站中布设了光纤振动、压力等传感器组成健康监测系统,并于 1993 年监测到 2# 水轮发电及振动异常,及时排除了故障,避免了事故^[15]。日本在一幢允许一定程度裂缝的大楼上布设了健康监测系统,在经过一次较大规模的地震后增设了光纤传感器,用以监测结构的完整性与大楼的地震反应。实测结果表明,该系统工作良好^[16]。瑞士在 Siggenthal 混凝土桥的建设过程中安装了健康监测系统,该系统由 58 个光纤应变传感器、2 个倾角仪和 8 个温度传感器组成,目的是监测施工过程中和以后长期的变形、屈曲和位移^[17]。

我国土木工程界的专家学者也充分认识到了结构健康监测的必要性,尤其是考虑到我国还处在大规模兴建基础设施阶段,吸收发达国家的经验教训,将结构健康监测与施工监测和竣工试验结合起来,在施工过程中就布设耐久性与稳定性优良的智能传感器,为结构的短期检测与长期健康监测提供可靠的结构性态数据,为结构安全评定、预警以及维修、控制和报废提供科学的依据,同时获取验证结构设计合理性的宝贵原始数据,对于提高土木工程的整体研究与应用水平意义重大。香港青马大桥安装了 500 个加速度传感器、粘贴了大量的应变片和一套 GPS 系统,用以长期监测桥梁的服役安全性,并从结构的动态特性出发,获得了系列研究成果^[18~20]。遗憾的是,布设的应变片在不长的时间内就不能工作,失去了结构的局部性态数据。香港的 Lantau Fixed Crossing 大桥^[21]、以及内陆的虎门桥和江阴长江大桥也都在施工期间装设了传感装置,用以监测建成后的服役安全状态。原中海石油渤海公司为了确保海洋采油平台的服役安全,对海冰条件和平台状态进行了长达 10 余年的监测,在此基础上,欧进萍等实现了渤海 JZ20-2MUQ 平台结构的实时监测与安全评定^[22],并进一步研究了远程网络监测技术。

土木工程结构健康监测虽然已经取得了长足的进步,并在部分结构上得到了尝试,但是严格来说,目前世界上尚没有建立一个完全满足结构需要的长期健康监测系统,究其原因主要归于三点:首先,土木工程结构和基础设施体积大、跨度长、分布面积广,使用期限长,传统的传感设备组成的长期监测系统性能的稳定性、耐久性和分布范围都不能很好地满足实际工程的需要。其次是虽然目前已有部分得到充分发展的智能传感元件,如光纤传感器等,但是由于其成本过高,无法满足土木工程量大、面广的需要,只能作一些尝试性研究或部分应用。三是有效地利用结构实时监测数据来合理地进行结构安全实时评定的理论方法尚需突破。

目前“结构健康监测”的发展日新月异。2002年7月,美国Stanford大学Fu-Kuo Chang教授等人创办“Structural health monitoring”杂志;中、美、日正在积极开展国际合作“重大工程结构的智能健康监测”课题研究;中国国家自然科学基金确定“十五”优先资助领域“重大工程灾害与防治”,并将“重大工程灾变行为与健康监测”列为重要研究内容;“十五”中美地震工程与减轻地震灾害合作研究计划已将“结构智能监测与安全诊断”列入重点研究内容等等国际国内重大事件表明,结构健康监测已经成为一个世界性的研究难点与热点,并成为了土木工程的一个重要研究方向。

结合目前相关科学,如智能材料与结构、计算机技术等迅猛发展,考虑重大工程的客观需要,以下问题是结构健康监测研究的发展方向:

- 1) 高性能大规模分布式的智能传感元件与信号传输系统;
- 2) 多参量、多传感元件监测数据智能处理与数据动态管理技术;
- 3) 结构实时损伤识别、定位与模型修正理论与方法;
- 4) 结构实时健康诊断、可靠度预测与安全预警理论与方法。
- 5) 结构健康监测的集成系统。

1.3 结构局部监测智能传感元件及其定性比较

如前所述,结构健康监测包括整体与局部监测,整体监测的传感元件已经成熟,而局部性态监测的传感元件在稳定性与耐久性上还远不能满足结构的需要。基于这一认识,本节对近年来发展起来的高性能、大规模分布式智能传感材料,如光导纤维、形状记忆合金、压电材料、电阻应变丝、疲劳寿命丝(箔)、碳纤维、半导体材料、智能混凝土等进行必要地概述,并对其定性比较,以选择出适于土木工程健康监测的智能传感材料,作为本课题主要的研究对象。

智能传感材料也称为高性能感知材料,具有生物的某些特性,不需外加辅助就能有效地反应出外界环境的变化并作出响应。用智能材料可以制作性能更加良好的传感元件,特别是制作大规模表面粘附或埋入分布式传感器,从而使结构的重要构件或整体具有感知特性,以便实现结构的实时监测与安全预警的功能。根据智能传感材料与土木工程结构的特殊应用环境和工作方式,对智能传感元件提出普适性的一般要求^[23]:

- I 兼容性要求 要求传感元件与材料有良好的兼容性,埋入的传感元件不损害结构材料的性能,又不能影响传感元件的正常工作。
- II 结构上要求 传感元件及其埋嵌方式和位置要适应结构类型、工作条件

以及可能的破坏形式。

III 性能上要求 性能稳定可靠、耐久性好、频率响应宽和受外界干扰小等。

IV 生产上考虑 智能传感材料的生产工艺必须简单，成本低，易于制作。

1) 光导纤维 光纤作为传感元件主要是光纤的局部变形通过光纤中光的传播发生变化反映出来。光导纤维很细、可传输数据、反应灵敏；对埋置材料性能影响小、对电磁干扰不敏感、熔点高、耐腐蚀，适用于高低温及有害环境；可沿单线多路复用，能实现点测量、线测量和网测量。

2) 形状记忆合金 形状记忆合金是一种兼有感知和驱动功能的智能材料。它的特点是具有形状记忆效应。形状记忆合金用于传感基于它的应变电阻特性。实验表明：形状记忆合金比其它应变敏感材料的电阻率大，但电阻与应变仅在线弹性范围内呈线性关系。

3) 压电材料 压电材料受到机械变形时，有产生电势的能力，称为正压电效应；当施加电压时，有变形的能力，称为逆压电效应。利用正压电效应，压电材料可以制作传感元件；利用逆压电效应，压电材料可制作驱动元件、给结构施加控制力。压电材料制作的传感元件很薄，可以附着或埋置于结构中。

4) 电阻应变丝(箔) 电阻应变片是结构表面局部应变测量最常用的传感元件，性能受基底和胶层的影响，使用寿命短。电阻应变丝可埋置入结构中，与基底材料胶合，性能较稳定，而且可组成各种形状和面积的阵列，防电磁干扰，耐久性较好。电阻应变丝直径很小，仅 $3\sim 10\mu\text{m}$ ，不影响埋置材料的性能。

5) 疲劳寿命丝(箔) 外形上与电阻应变丝(片)相同，但合金成分与热处理方式不同。疲劳寿命丝(箔)的电阻值随交变应变幅值和循环次数单调增加；载荷卸除后，增加的电阻值保持不变。因此，疲劳寿命丝(箔)可以用于结构构件和节点的剩余疲劳寿命预报。

6) 碳纤维 在一定条件下将聚合纤维燃烧可以得到接近于完整分子结构的碳长链，也就是碳纤维。碳纤维通常合成为 $7\sim 30\mu\text{m}$ 一股，具有导电性、化学稳定性、耐高温及高强度和高弹性模量。由于高强度和高弹模量，碳纤维的接触电阻会随着压力的变化而变化，利用这一特性可以用碳纤维制作压力和应变传感器。

7) 半导体材料 半导体材料可用于制作与基体材料融合的模式或薄片式传感元件，是智能传感元件发展的一个重要方向。目前已有的气压硅传感器体积小、价格便宜，可以用于测量结构物表面的风压分布。

8) 智能混凝土 智能混凝土是一种将极少量具有某种特殊功能的材料复合于传统混凝土中的智能材料。与其它用于混凝土结构的智能材料相比，智能混

凝土与传统的混凝土材料具有天然的相容性，是一种应用于混凝土结构的本征智能材料，具有自感知与自调节的智能特性^[24]。

基于土木工程结构局部性态响应智能监测的实际需要，对上述智能材料及其传感器元件各项指标进行定性比较，得到表 1-1 所示的结果。

表 1-1 智能传感元件各项指标定性比较
Table1-1 Qualitative Comparison for smart sensing components

指 标	智能材料与传感元件							
	光导纤维	形状记忆合金	压电元件	电阻应变丝(箔)	疲劳寿命丝(箔)	碳纤维	半导体元件	智能混凝土
加工工艺与成本	中等	中等	中等	低	中等	较低	中等	极低
技术成熟性	良好	良好	良好	好	良好	良好	良好	一般
分布测量(成网)	是	是	是	是	是	是	是	是
嵌入性(兼容性)	优	优	优	良	良	优	中	优
线性度	优	良	优	优	良	良	优	中
灵敏度	优	优	优	良	良	良	优	优
变形能力	优	优	优	优	优	良	良	中
性能稳定性	优	良	优	良	良	优	优	好
耐久性	优	中	良	中	中	优	良	优
监测参数	多	少	少	少	少	多	多	多
响应频率带宽	宽	窄	宽	窄	窄	宽	宽	窄
需外部设备量	多	少	少	少	少	多	多	少

综合比较这些智能传感元件的各项指标，可以得到以下结论：

- 1) 光纤是用于长期监测的理想传感元件。虽然它所需的外部设备最为复杂且昂贵，但它具有性能稳定、多参数测量、分布测量等优点，因而近 10 年来在土木工程应用中倍受重视。
- 2) 疲劳寿命丝是构件寿命预测、评估用最理想的智能材料和传感元件。
- 3) 对土木工程结构进行短期监测，使用这些智能材料都是可行的。其中技术成熟、外部设备要求较少的电阻应变丝、压电元件是比较理想的传感元件；
- 4) 智能混凝土是廉价的结构本征型智能材料，与结构具有天然的兼容性，显示了美好的应用前景。

基于上述比较分析，考虑课题研究需要，选定光纤光栅智能传感元件作为土木工程结构局部应力、应变和温度实时监测重点开发的智能传感元件。

1.4 光纤光栅传感器的研究与应用发展概况

光纤传感技术作为现代通信的产物,是随着光纤及通信技术的发展而逐步发展起来的一门崭新技术。通信领域中,光纤用作传输波导线。光在传输过程中,光纤易受到外界环境的影响,如温度、压力等,从而导致传输光的强度、相位、频率、偏振态等光波量发生变化,通过监测这些量的变化就可以得到相应的物理量。同传统的基于电学量的传感器比较,光纤传感器具有如下的优点:能避免电磁场的干扰,电绝缘性好;耐久性好,具有抵抗包括高温在内的恶劣环境及化学侵蚀的能力;质量轻,体积小,对结构影响小,易于布置;既可以实现点测量,也可以实现分布式测量;可以实现绝对测量;节省线路,只用一根线就可以传送结构状态信号;信号、数据可多路传输,便于与计算机连接,单位长度上信号衰减减小;灵敏度高,精度高;频带宽,信噪比高等。从光纤传感器的传感机理来看,主要分为强度型、干涉型和布拉格光栅波长型三种。

强度型光纤传感器可分为微弯光纤传感器与光时域反射计(OTDR)。光纤微弯传感器的原理是通过探测外界作用导致的光强变化测量该物理量的大小。它是最早研究的光纤传感器,其优点是原理简单、信号调制方便,缺点是外界的直接作用所造成的光强变化较小,加上光纤接头和光沿程损失的影响,所以其测试精度较低,通常需借助变形装置提高灵敏度。光时域反射计(OTDR)的原理是光纤受到外界信号作用时产生反向瑞利散射,用 OTDR 接收并分析,可以推断信号作用的地点与大小。该技术的优点是可以定位和分布式测量,主要缺点是探测设备昂贵和测量精度不高。在土木工程中该技术特别适于探测混凝土裂纹的位置与宽度,具体的应用有:美国的麻省理工学院的 Christopher[1997]^[25]等人利用该技术制成了裂纹探测器;日本的 Toshio(1997)^[26]等人利用该技术进行了分布式应变测量,得到了 $60\mu\epsilon$ 的精度和 1:10000 的空间分辨率。

干涉型光纤传感器的基本原理是:通过被测能量场的作用,使光纤内传输的光波相位发生变化,从而产生干涉,再用干涉测量技术把相位变化转化为强度变化,检测出待测的物理量。这种传感器最大的优点是灵敏度高,适于局部测量,常用的为以下三种:

1) 迈克尔逊(Michlson)干涉传感器 其原理为激光器输出的单色光由分束器分成相等的两束光,一束射向固定的反射镜,然后反射回分束镜,另一束射向可移动的反射镜,反射回分束镜,两束光存在光程差时,由探测器可探测到干涉光。如果将光纤的端面制成镜面,一束作参考光,另一束作测量光,就可以制成应变传感器。瑞士联邦工业学院土木工程系 IMAC 应力分析实验室经过

四年努力,针对土木工程结构开发了一系列基于迈克尔逊原理的光纤传感器与一套用于测量的系统(简称为 SOFO),并将其应用于 Schifffenen 大坝、Versoix 大桥、Meosa 公路桥等的监测,取得很好的效果^[27~29]。

2) 马赫-泽德(Mach-Zehnder)光纤干涉传感器 其原理为由激光器发出的单射光分成相等的两束,一束作参考光,另一束作测量光,在第二个耦合器上干涉,通过测量干涉光就可以得到被测量。

3) 法布里-珀罗(Fabry-Perot)干涉传感器(亦称 F-P 干涉传感器) 其基本原理是利用光纤的端面形成干涉腔,从而导致光程差使得光干涉。F-P 传感器分为透射式与反射式两种。它不需要将一根光纤分束,因此具有单传输线、单端点、灵敏度高等优点,很适合大型结构。加拿大 Roctest 公司开发出了基于 F-P 干涉原理的光学数据采集与处理仪以及适于多种场合的光纤传感器,并在实际工程中的应用效果得到了认可^[30]。

光纤光栅传感器的工作原理是直接或借助某种装置将被测量的变化转化为光纤光栅上的应变或温度变化,从而引起光纤光栅布拉格中心波长的变化,通过建立并标定光纤光栅中心波长的变化与被测量的关系,就可以由光纤布拉格中心波长的变化计算出被测量的值。这种测量方法思路简单,操作方便,很容易为广大工程技术人员和科研人员接受。

表 1-2 三种光纤传感器定性比较

Table1-2 Qualitative Comparison for 3 Kinds of Optical Fiber Sensors

指 标	强 度 型	干 涉 型	光 栅
精度	低	高	高
加工工艺	简单	复杂	较简单
成本	低	高	较低
技术成熟性	成熟	成熟	成熟
可否分布测量(成网)	可以	不	可以
嵌入性(兼容性)	可以	较难	很好
灵敏度	低	高	高
线性度	一般	较好	很好
变形能力	好	差	好
性能稳定	较好	较好	好
耐久性	好	较好	好
监测参数	多	少	多
响应频率带宽	宽	窄	宽
信号解调设备	简单	复杂	复杂

对以上三种光纤传感器进行定性比较,如表 1-2 所示。比较表明,光纤光栅传感器较其他两者具有明显的优点,更适于土木工程结构的健康监测。除普通光纤传感器的上述优点外,光纤光栅传感器的优点主要表现为:既可以实现点测量,也可以实现准分布式测量;测量动态范围只受光源谱宽的限制,不存在多值函数问题;检出量是波长信息,因此不受接头损失、光沿程损失等因素的影响,对环境干扰不敏感;波长编码,可以方便实现绝对测量;单根光纤单端检测,可尽量减少光纤的根数和信号解调器的个数;信号、数据可多路传输,便于与计算机连接,单位长度上信号衰减小;灵敏度高,精度高;光栅制作过程中没有机械损伤,使用方便;光栅的长度小,只有毫米级,测量值空间分辨率高;输出线性范围宽,在 10000 微应变范围内波长移动与应变有良好的线性关系;频带宽,信噪比高等。

除了上述优点外,Alavie^[31]等人将光纤布拉格光栅传感器埋入碳纤维复合材料测其应变的实验表明:在 0~2000 μe 循环 320000 次后,光纤传感器仍没有出现劣化现象;Morey^[32]通过加速老化试验认为光纤布拉格光栅存活寿命大于 25 年。这些优点是其它传感器无法比拟的。

光纤光栅是一种新型的光子器件,它可以控制光在光纤中的传播行为。关心光栅的研究与发展归功于 1978 年加拿大的 Hill^[33](1978)等人在实验室中制作的世界上第一根光纤光栅,以及 1989 年美国的 Meltz^[34]等人发明的紫外侧写入技术。随后,1993 年 Hill^[35]与 Lemaire^[36]分别提出相位掩模成栅技术和低温高压载氢技术。这两项技术相结合极大地降低了光纤光栅的制作成本与容易程度,从而在世界各地掀起了基于光纤光栅应用研究的热潮。自从 1989 年美国的 Morey^[37]等人首次进行光纤光栅的应变与温度传感研究以来,世界各国都对其十分关注并开展了广泛的应用研究,并取得了丰硕的成果,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,并已发展到实际工程应用阶段。

综观光纤光栅在传感领域的研究与发展,本文从以下几方面来概述该领域已经取得的成果:

1) 光纤光栅应变、温度测量及其交叉敏感分离技术

1978 年,Butter^[38]最先推导了裸光纤光栅变形时折射率变化与应变、温度的关系。实际上,应变与温度对光纤光栅的作用是耦合的,因此检测单个光栅的波长变化无法对应变和温度加以区分。解决应变与温度的交叉敏感问题一直是伴随光纤光栅传感技术发展的研究热点。目前,人们主要通过温度补偿法和温度、应变双参数同时测量两种途径解决这一问题。温度补偿的原理是通过某种方法剔除温度扰动引起的波长漂移,使应变测量不受环境温度变化的影响,

归纳起来主要有以下几种:

a) 用一个不受力作用的光栅串连置于与被测对象一致的温度场中,测其温度响应,对应变测量光栅进行补偿。这是最简单又可靠的方法。但是,如何布置补偿光栅是个问题,如在大体积混凝土中的布置问题就是一个典型的实例。

b) 利用聚合物对光纤光栅进行封装降低其温度灵敏系数,减少它对温度的影响。Iwshima^[39](1997)采用该方法使温度灵敏系数降低了一个数量级。这种方法的缺点是无法完全消除温度的影响。

c) Xu^[40](1994)将两根同样的光纤光栅分别粘贴于一矩形梁的上下两侧,当梁发生弯曲时,两光栅分别受到拉、压应变,从而产生的光栅中心波长移动方向相反,由于两光栅的温度灵敏度系数一样,因此应变导致的波长相对移动值与温度无关,这样就实现了温度的自动补偿。

d) Xu^[41](1995)提出了基于啁啾光纤光栅的传感方案。由于啁啾光栅的反射带宽与温度无关,而与应变呈线性关系,从而自动实现温度剔除。该方法的缺点是代价过高。

e) 将两种不同热膨胀系数的材料相结合,设计出温度补偿封装结构。Yoffe^[42](1995)利用该方法使得光栅的温度稳定性提高了一个数量级。该方法的缺点是温度范围有限,而且目前获得啁啾光栅的成本高,取得实际应用尚有困难。

f) 将光栅贴于具有负热膨胀系数的材料上,使得光栅因温度引起的膨胀得到降低。Iwashima^[43](1997)利用该方法使温度稳定性提高了一个数量级。

影响光栅波长变化的不仅是温度膨胀,而且还有热光系数,因此仅对温度膨胀补偿是不可能完全实现温度补偿的。鉴于以上分析与比较,如果同时考虑温度这一监测量,第一种方法是最简单而又可靠的方法。

应变测量时需要剔除温度的影响,但是更多场合需要将温度、应变同时测量。其基本原理是利用两个参量共同对应变和温度进行波长编码,由于灵敏度系数不同可以构成两个独立的方程,通过解方程组来确定应变和温度的大小。这方面的研究较多,归纳起来主要有以下几种:

a) 光栅重叠法 Xu^[44](1994)在一根光纤的同一位置写入两个中心波长相差很大的光栅,利用它们表现出不同的应变和温度响应特性,假定应变与温度感生的布拉格波长是线性且独立无关的,由此可以得到一个只包含两个未知数的方程组,只要确定灵敏系数矩阵就可以通过波长变化值求解方程得到应变与温度值。

b) 光栅焊接法 把两个不同波长的光栅尽量靠近焊接在一块,认为它们处

在相同的应变与温度场中,利用上面的思路求得应变和温度。James^[45](1996)利用该方法方便地同时求得了应变和温度。

c) 二次谐波法 Sivanesan^[46](1999)等人利用光栅的二次谐波与基阶反射波不同的温度、应变响应特性,实现了温度与应变的同时测量。

d) 长周期光栅法 Bhatia^[47](1997)利用长周期光栅不同共振峰具有不同的应变与温度响应特性,根据前述方法通过测定预先选定的两个共振峰的中心波长移动,实现应变与温度的双参数测量。

e) 偏振回旋滤波法 Kanellopoulos^[48](1995)等利用光纤布拉格光栅与偏振回旋滤波器结合的方法,分别实现了应变和温度的双参数测量。

f) 偏振保持法 Lawvence^[49](1996)等人在一根偏振保持光纤上写入波长相差较大的两个光栅实现了应变、温度的同时测量。

2) 光纤光栅准分布式传感技术

光纤光栅准分布传感器是光纤光栅传感器的主要优点,而其概念又特别简单,即把多个布拉格光栅焊接在一起,或是在一根光纤上写入多个光栅,再将它们构成传感网络或者阵列。该项技术的核心工作是光栅信号解调必须有足够的带宽,且具有同时识别多个光栅中心波长的能力,只要满足上述条件,其工作原理与单个光栅完全是一致的。这种技术特别适于场信号的测量。由于分布式测量的意义重大,光纤光栅准分布传感技术得到广泛而深入的研究。下面是近年来较为成功的几个研究实例:

a) Rao^[50](1996)等人采用 11 个传感器说明了布拉格传感网络的可行性与优越性。

b) Davis^[51](1996)等人用光纤阵列对复合材料包覆的混凝土圆柱体的拉压变形进行了测量,测得了 $3800\ \mu\epsilon$ 的最大变形量,该研究说明了光纤阵列的可靠性与高量程性,由此说明光栅阵列完全胜任土木工程结构的实际测量。

c) Dakin^[52](1999)等人用光栅阵列对异质叠合板的疲劳应变场进行了测量,结果表明光栅应变传感较传统电阻应变片有明显的优势。

d) Chan^[53](2000)等人用光纤光栅传感阵列对用复合材料加固的混凝土梁在三点弯曲加载下的应变分布用波长区分测量技术(WDM)进行了测量,得到很好的结果。

3) 多维应变场测量技术

普通光纤光栅对轴向应变敏感,而横向应变不敏感,因此单根光栅不可能

用来测量复杂应变场。要想测量复杂应变场,我们只能采用应变花的形式,这种方法的缺点是光栅用量大,有些复杂应变场,如结构的节点、受集中荷载点等,难以布置光栅。于是人们思考能否只用一根光栅测量多维应变场。这方面取得突出成果的是美国 Blue Road Research 公司的 Udd^[54~56]和 Lawrence^[57]、Schulz^[58~60]等人从 1996 年开始采用在偏振保持光纤上写入两个波长相差很大的光栅,反射谱包含 4 个峰值,在应变与温度作用下构成四个独立的方程,通过标定求得灵敏度矩阵,可以方便地由波长移动值求得复杂应力状态下的三个主应变与温度值。Blue Road Research 公司一直致力于该方面的研究,从理论上严格推证了传感器的数学逻辑关系,从实验上证实了该方法的有效性,并将该传感器发展成产品形式。

4) 间接测量其他物理量

光纤光栅能直接感受的只是应变与温度信号,因此,要想让它测量其它物理量,就必须通过被测量与应变或温度的关系直接或借助某种装置使该物理量间接转化为应变或温度量。目前主要有以下几种:

a) 布拉格加速度传感器 德国的 Willsch^[61] (2000) 等人提出了两种布拉格加速度传感器。它们的区别是其中一个传感器仅用一根光栅,而另一种采用两根光栅。将光栅与小质量块相连,小质量块用弹簧与外壳相连,然后封装成加速度传感盒。当其感受外界加速度时,质量块受到的惯性力部分地传到光栅上,从而使其发生变形,加速度大小与变形存在线性关系,只须标定就可以用作加速度传感。此外,他们考虑普通的光谱分析仪较为昂贵,提出将布拉格光栅反射回来的波长信息转化为强度信息,只需用光电探测器就可以进行信号处理。这种加速度传感器的最大优点就是体积小,可以将多个传感器串在一块,只用一个信号解调器就可以实现信号解调。

b) 布拉格剪应力传感器 布拉格剪应力传感器由 Koulaxouzidis^[62] (2000) 等人提出。其结构形式为:将两片盘用钉子固定,然后将布拉格光栅布置其中,在剪应力下,光纤被伸长,光栅发生的应变与外界剪应力成线性关系,只须测出剪应力下的应变值,就可以计算出剪应力值。由于它结构简单,很容易将其做成很小的结构串联成准分布式传感器。

c) 腐蚀传感器 Greene^[63] (1997) 等人提出布拉格腐蚀传感器,其基本原理为:将一根光纤布拉格光栅置于铝管中,然后对其施力拉伸,使其产生较大的预应变,在预应变恢复前,将管的两端用环氧树脂封住,这样就得到具有残余应变的布拉格光栅。将这根光栅置于腐蚀环境中,金属铝管的腐蚀必然导致

应力松弛, 布拉格光栅的残余应变减少, 从而导致波长偏移, 由波长的偏移判断腐蚀程度的大小。

d) 布拉格光栅测扭矩 Tian^[64] (2000) 等人将布拉格以一定的仰角布置在圆柱体上, 利用扭矩与圆柱侧面上的应变关系求得扭矩。

e) 材料参数测量 Huang Liqun^[65] (2000) 探讨了应用光栅测量材料弹性模量与热膨胀系数的新方法。

f) 布拉格光栅压力传感器 裸光栅对压力灵敏度较低, 因此想要用其测量压力就必须借助其它方法提高其灵敏度。张颖^[66] (2001) 将光栅封装于圆柱形有机聚合物中, 把它作为压力传感器。该装置大大提高了布拉格光栅压力灵敏度系数, 得到-3.14pm/Mpa 的灵敏度系数, 比未封装的光栅提高了 1720 倍。

g) 布拉格光栅测量结构曲率 张颖^[66] (2001) 等人利用弯曲变形梁的曲率与应变的关系方便地得到了最准确的曲率值。

h) 布拉格光栅位移传感器 张颖^[66] (2001) 等人利用悬臂梁外伸端的位移与固定端的应变关系建立了位移与粘贴于固定端的光栅波长移动关系, 制作了极为简单的光栅位移传感器。

i) 布拉格光栅振动测量 德国的 Schmidt-Hathenberger^[67] (1999) 等人将光栅粘贴于锚固头上作为传感器测量岩石的动态变形。

5) 光纤光栅传感信号解调技术

随着人们对光纤布拉格光栅传感器优越性能的认识不断深刻, 光纤光栅解调技术也得到不断发展。人们相继提出了多种传感器解调方案, 归纳起来有两大类, 即准静态解调方案与动态解调方案。准静态解调方法可以分为四种: 调谐滤波法^[68], 可调谐光源扫描法^[69], 傅立叶变换法^[70]和 CCD 空间光谱成像法^[71]。动态解调方案主要是非平衡马赫-泽德干涉解调法和基于啁啾光栅滤波法^[72]。解调技术是光纤光栅传感网络的关键技术之一, 也是目前光纤光栅传感网络工程的应用瓶颈。对国际上已有的主要高分辨率解调技术进行对比, 如表 1-3 所示。

在上面的解调技术中, 扫描 F-P 干涉仪扫描速度慢, 难以满足工程应用中的高速分析要求, 此外, 由于存在动件, 其寿命和可靠性也存在隐患。外差干涉术须引入干涉仪外差调制, 虽可达 1pm 高分辨率, 但干涉仪设计复杂, 不易可靠和稳定地实现。时域取样零差干涉术须引入干涉仪相位调制, 可达 1pm 分辨率, 但其所用到的相位调制干涉仪成本很高, 且稳定性不易保证。空域零差干涉术, 由于无动件扫描和调制, 且分辨率可达 1pm, 因此, 可满足高速分析要求。其难点在于干涉仪的制作和高精度的解调算法。使用体全息光栅光谱仪

有望成为多波长的解调器，但是由于目前光栅和高质量 CCD 过于昂贵，因此，成本太高。基于啁啾光栅滤波器的解调技术，具有好的性价比，但分辨率太低，只适用于一般场合。在上面的解调技术中，空域零差干涉术有望成为高速，高分辨率的性价比最优的解调技术。

表 1-3 主要高分辨率解调技术对比

Table 1-3 Comparison of main Interrogation Techniques

技术种类	特 点	代表公司
时/空域零差干涉 (Homodyne)	无动件扫描， 可达 1pm 分辨率	Optiphase, Inc. Blue Road Research
外差干涉 (Heterodyne)	引入干涉仪的外差调制， 可达 1pm 分辨率	——
扫描 F-P 干涉仪	使用压电扫描，扫描速度相对慢 (108Hz)，可达 1pm 分辨率	MOI
体全息光栅光谱 仪	使用全息光栅和 CCD， 可达 1pm 分辨率	——
啁啾光栅滤波器	简单、高速，可达 3MHz 以上， 但分辨率较低	Blue Road Research

从研究成果商业化情况来看，美国的 Micron optics 公司与 Blue Road 研究所生产的信号解调器性能优越，占市场的主导地位。目前，前者可以达到 10KHz 的探测频率，他们正在开发 3MHz 的探测仪。后者虽然是准静态测试，其产品也可达到 108Hz 的采样频率，基本满足准分布式光栅波长的探测。

6) 光纤光栅传感器应用概况

布拉格光栅传感器的传感机理研究已经逐步成熟，目前的研究开始走向实际工程的应用。由综述文献[73]~[77]可以看出：布拉格光栅传感器在很多领域取得了成功的应用，如航空航天、复合材料、混凝土、高压输电线、医学等领域。下面从民用土木工程、航空航天工业、船舶工业、电力工业、石油化工、核工业、医学等方面的对光纤光栅传感器的具体应用作一简要概述。

a) 民用土木工程 民用工程是光纤光栅传感器应用最活跃的领域，主要集中在桥梁、大坝、隧道等重要结构的健康监测。加拿大卡尔加里附近的 Beddington Trail 大桥是最早使用光纤光栅传感器进行测量的桥梁之一(1993 年)^[78]，16 个光纤光栅传感器贴在预应力混凝土支撑的钢增强杆和碳纤维复合筋上，对光纤光栅的工程应用进行了有益的探索。1997 年，德国的 Meissner 等人将布拉格光栅埋入德累斯顿附近 A4 高速公路上一座跨度 72 米的预应力混凝土桥上，测量荷

载下的线性响应,并且与常规的仪器测试结果作了对比试验,证实了光纤光栅传感器的应用可行性^[79]。Nellen^[80](1997)等人在瑞典 Winterhur Storck 桥的两根碳纤维索上布置了布拉格光栅和标准电阻应变计,实测数据表明两者吻合很好。他们还在瑞士 Alps 的 Luzzone 水电站大体积混凝土坝中埋布拉格光栅传感器,用来监测混凝土的温度与应变变化。Nellen^[81](1999)等人分别在瑞典 Sargan 附近的隧道岩栓和用于 Lucerne 桥预应力索上布置了光纤布拉格光栅传感器。隧道岩栓是用玻璃纤维聚合物制成的,布置布拉格光栅的目的是监测隧道建造与运行状态下砾石的活动状况。后者是用碳纤维聚合物制成的,在制造过程中就埋入了布拉格光栅传感器,用来探测索的应力松弛情况,结果表明布拉格光栅可以监测碳纤维高达 $8000\mu\epsilon$ 的应变值。Fuhr^[82](1997)在美国 Winooski 河上的 Waterbury 大桥的面板上埋入了 8 个布拉格光栅传感器。其中三个直接粘贴到桥面板的钢筋上,两个预先在实验室粘贴到一根钢筋上,然后到现场固定到面板钢筋上,另外三个预先用分层的聚合物材料封装好,再放到钢筋之间。他们对埋入的工艺进行了探讨,认为这些方法是可行的,认为只要光栅能够在埋入过程成活,就能实现预定的目的。他们还探测到了 $50\mu\epsilon$ 的应变值。Seim、Udd^[83](1999)等人为了确证纤维增强材料能否真正适于结构加固与探究复合材料的长期服役状况,他们在美国 Columbia 河峡里的具有历史意义的 Horsetail Falls 桥上复合材料加固过程中布设了 28 个布拉格传感器,以备长达两年的健康监测。

比利时根特的环城运河上建了一座 147m 长的预应力混凝土桥梁,桥的预应力梁在浇筑时埋进了 18 个光纤光栅传感器,利用光纤光栅传感器对桥梁的建设过程进行了监视,并将长期监测桥梁的结构情况

在欧洲的 STABILOS 计划中,一种基于宽带掺铒光纤光源和可调法—泊滤波器光纤光栅传感系统设计用于矿井主梁的长期静态位移测量^[84];另一个用滚动干涉滤波器进行解调的光纤光栅传感网络用来监视瑞士的 Mont-Terri 隧道^[85]。还有一个欧洲的 COSMUS 计划,于 1996 年开始,旨在改善民用工程建设的安全,具体目标为:在建造地下运输系统时,监控 1mm 以内的地下运动,光纤光栅被用来制作带温度补偿的静态分布式应变传感器。瑞士联邦材料测试和研究实验室将光纤光栅传感器安装在 Luzzone 大坝中,对大坝进行安全监测。

目前用于民用工程结构监测的光纤光栅传感器已经开始商品化,例如,美国的 Blue Road Research 在美国海军研究实验室的资助下开发的多轴光纤光栅传感器、横向光纤光栅传感器、灵巧垫圈埋有光纤光栅传感器等,并得到成功的应用。

b) 航天航空工程 航空航天业是一个使用传感器密集的地方，一架飞行器为了监测压力、温度、振动、燃料液位、起落架状态、机翼和方向舵的位置等，需要的传感器数量很大，因此要求传感器的尺寸和重量非常严格。使用先进的抗疲劳、重量轻、比强度高的复合材料来制造航空航天结构是一个必然的趋势，尤其是在复合材料结构的制造过程中埋入光纤光栅传感器，实现飞行器运行过程中的实时健康监测很有实际意义。航空航天业对光纤光栅传感技术非常重视，仅波音公司就注册了几个光纤光栅传感器技术专利^[86]。Smart Fibres Lt.为飞机和航天器提供埋有光纤光栅传感器的复合材料的灵巧结构，以便于结构的损伤探测、设计信息的搜集、制造辅助控制、智能控制以及结构尺寸监测。美国国家航空和宇宙航行局对光纤光栅传感器的应用也非常重视，他们在航天飞机 X-33 上安装了测量应变和温度的光纤光栅传感网络，对航天飞机进行实时的健康监测。他们还研究了常温和低温条件下复合材料高压容器的多用光纤传感器，其应用对象为可重复使用运载火箭以及麦克唐纳-道格拉斯、波音北美和洛克菲德-马丁 3 个公司的复合材料燃料箱，并已经确认光纤光栅传感器是一个理想的技术。

在欧洲，法国的几个机构合作，通过埋入的光纤光栅传感器探测对复合材料结构内部探测，以期对战斗机雷达屏蔽的完善性进行评估，并正在开发埋入光纤光栅应变计的高压仓^[85]。德国 1996 年开始，戴姆勒-奔驰研究中心和戴姆勒-奔驰宇航空中客车以及宇航研究院共同研究光纤光栅自适应机翼^[85]。瑞典的光学研究院与 FFA 正在进行一项 SMART 的国家计划，旨在用光纤光栅传感器开发用于监视战斗机复合材料结构的应变和温度测量系统，并同时准备开发基于先进荷载监视和损伤探测技术的实时健康和操作监视系统^[85]。

加拿大的一个光子研究小组提出用光纤光栅传感器测量飞机喷气涡轮发动机系统的压力和温度^[87]。

c) 船舶工程 现代船舶用传感器中多达 90% 是压力和温度传感器，光纤光栅传感器能够为现代船舶的操作提供瞬时的和丰富的传感信息，进而通过提供船舶操作人员所需要的早期危险报警和损伤评估来保证船舶的安全。

Hjelme 等人用光纤光栅传感系统对一个按比列缩小的双体船模型进行了测量，记录了湿甲板和海浪之间的冲击力、结构的动态荷载以及弯曲力矩^[88]。在美国海军的资助下，PHYSICAL SCIENCES INC.正在开发基于光纤光栅和数字通信技术的船舶结构健康监测系统。该系统既允许现有模拟数据流（通信、火灾报警、电阻应变数据等）的传送，也允许来自多个光纤光栅应变传感器的数字应变数据的传送。目前已经制成用于美国海军舰队结构健康监测的低成本光

纤网络。美国海军研究实验室和挪威海军试验室联合给一艘现役玻璃纤维排雷船安装 100 个以上的光纤光栅传感器, 利用适当的解调和处理方法对船体进行静态和动态的测量^[89]。

法国在一航道中用玻璃增强塑料闸门代替常规的钢闸门, 闸门叶片由厚玻璃增强塑料制成。他们在其中一个闸门中埋入了五个光纤光栅传感器, 四个作应变测量, 一个作温度补偿。实时监测的结果与预料的应变吻合得很好^[85]。

d) 电力工程 电力工业中的设备, 如高压开关、高压变压器绕组、发电机定子等, 都处在强电磁场中。对其变形或温度监测需要绝缘性好、体积小、无源类传感器, 一般电学类传感器无法胜任。一些电力或通讯设备常位于难以到达的地方, 如荒山野岭、沙漠荒原中的传输电缆和中继变电站等, 电学类传感器组成的监测系统因其线路过长难以维护。而光纤光栅传感器的优点正好体现于此。

基于法拉第效应的光纤电流传感器由于线性双折射、温度和振动等问题严重限制它的发展。Henderson 开发了一种由常规电流转换器、压电元件和光纤光栅组成的光纤光栅电流传感器^[90]。Rao 进一步将此传感器中的光纤光栅由基于光纤光栅的法-泊腔代替, 进一步提高了传感器的分辨率^[91]。温度量是了解电力设备工作状态主要手段, Hammon^[92]等人用光纤光栅传感器测量了高压变压器的绕组温度, 长期监测的精度已达到 $\pm 3^{\circ}\text{C}$ 。德国西门子公司将光纤光栅用于气冷涡轮发电机定子温度和发电机的大电流测量^[93]。高压传输电缆的积雪超过其承载能力会导致严重的事故, Ogawa^[94]等人一 30km 长的电缆上布置了 10 个光纤光栅, 监测荷载的变化。

e) 石化工业 石化工业属于易燃易爆的领域, 电学类传感器因为可能冒火花存在不安全的因素, 而光纤光栅传感器是石油化工领域理想的传感元件。

井下油田监控系统有利于油田的管理、优化和发展, 光纤光栅传感器因其抗电磁干扰、耐高温、长期稳定并且抗高辐射非常适合用于井下传感, Weis^[95]等人用光纤光栅制成一个井下传感系统, 用来跟踪钻井过程中绞盘头的幅度变化。

石油碳氢化合物是一种有害物质, 输油管和储油罐的泄漏是非常危险的。最近, Spirin^[96]等人用一种聚合物封装光纤光栅, 这种聚合物遇到碳氢化合物时会膨胀, 没有了碳氢化合物后可恢复, 该封装光纤光栅可用于监测石油的泄漏情况。利用化学物质浓度的变化影响光栅布拉格波长这一事实, 通过对光纤光栅进行特殊处理, 可以制成探测各种化学物质的光纤光栅化学传感器。1996 年, Meltz^[97]等人报道了这种光纤光栅化学传感器。后来 Ecke^[98]等人作了改进, 他们采取抛光光纤侧面的方法制成光纤光栅化学传感器, 能够对诸如石油工业中的

碳氢化合物等化学物质进行快速在线测量。Peng^[99]等人在光纤光栅上镀钯, 制作出光纤光栅氢气传感器。因为钯能够可逆地与氢发生反应, 形成氢化物而氢化物的变化也会改变光纤镀钯层的折射率, 从而通过倏逝场影响光栅的布拉格波长。美国马里兰大学工程学院“智能材料和结构”研究中心用光纤光栅开发了一个分布式氢气泄漏监视系统。Zhang^[100]等人研制的温度补偿长周期光栅传感器可以测量许多化学成分的浓度, 其中包括酒精、乙醇、甲基环乙烷和正十六烷。Falciai^[101]等人研制的长周期光栅化学传感器可以测水溶液中的氯化钙和氯化钠。

f) 核工业 核泄漏对人类是一个极大的威胁, 贝尔格利核电站泄漏的影响至今还没有消除, 因此对于核电站的安全检测是非常重要的。

比利时核研究中心对光纤光栅传感器用于核工业的可行性进行了研究, 认为光纤光栅温度传感器可能在 γ 辐射水平为 1MGy 的环境中保持所需要的性能, 并且可以通过优化光纤光栅的参数减小 γ 辐射敏感性。他们还研究了光纤光栅对中子辐射的敏感性, 发现光纤载氢不仅可以增强光敏性, 也会增加对离化辐射的敏感性^[102]。

1995 年, 法国的 CEA-LETI、EDF 和 Framatome^[85]开始了一个联合计划发展布喇格光栅变形测量仪用于核电厂的混凝土测量。他们将光纤光栅传感器设置在核壳体表面或埋入核壳体中, 对高性能预应力混凝土核壳大墙进行了监测。

核反应堆水管的泄漏和破裂是非常危险的, 极端情况下会使核反应堆熔化造成泄漏。1996 年初, 由英国 BICC Cable Ltd^[85]牵头的一个联盟开展了一个为期 3 年的计划, 旨在开发一种具有完善温度补偿的分布式静态监测系统, 此系统能复用多个光纤光栅应变传感器对高温部件($\sim 550^{\circ}\text{C}$)进行实时寿命预测。

g) 医学 光纤光栅传感器是现今能够做到的最小传感器, 能够通过最小限度的侵害方式对生物组织功能进行内部测量, 提供有关温度、压力和声波场的精确局部信息。

Rao^[103]等人 1997 年设计了一种光纤光栅阵列温度传感器用来测量超声波、温度和压力场, 研究病变组织的超声和热性质, 该传感器的分辨率为 0.1°C , 精度为 $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$, 测量范围为 $30\sim 60^{\circ}\text{C}$ 。他们还开发了另一套光纤光栅温度监测系统^[104], 用来遥测核磁共振机中的容器温度。该系统的分辨率为 0.1°C , 精度为 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$, 测量范围为 $25\sim 60^{\circ}\text{C}$ 。新加坡总医院将南洋理工大学生物医学工程研究中心研制的一种光纤光栅压力传感器用于外科校正, 该传感器监视患者站立时的脚底压力分布。光纤光栅传感器能同时测量几个点的超声波场。超声波诊断设备在医疗中应用广泛, 其设备的输出功率需要用传感器来监视, 常规的压

电传感器易受电磁干扰,并且由于探头尺寸的限制,难于确定体内的超声波场。Fisher^[105]等人用光纤光栅传感器探测了高频超声波场,他们用一个1mm长的光纤光栅测量超声波场,使压力分辨率达到 $10^{-3}/\text{Hz}$ 。

由于“结构健康监测”的兴起,光纤传感器的研究在中国受到高度重视,并开展了大量的工作,不过主要集中在强度型与干涉型光纤传感器,涉及光纤布拉格光栅传感器的较少,主要的原因是目前光纤光栅及其解调器的价格过于昂贵,如刘浩吾、扬朝晖^[106](1996)用F-P光纤传感器对混凝土的应变测量进行了实验研究;杨建良^[107](1997)等人探讨了基于强度增敏的光纤传感阵列;赵延超^[108](1997)等人发展了一种新颖的光纤模域振动传感器,并构建了一种机敏桥面铺装结构,将其成功地用于虎门大桥桥面铺装结构模型实验中;张博明^[23]

(1998)等人分别采用光纤微弯传感器和模斑谱传感器对复合材料的固化过程进行了监测;蔡德所^[109](1998)等人基于OTDR原理,用斜交分布式光纤传感技术对三峡古洞口面板堆石坝工程进行了现场实验,对其裂缝进行了检测。2001年,欧进萍和周智等人在黑龙江呼兰河预应力箱形梁大桥上成功布设了12个光纤光栅应变传感器和3个温度传感器,并进行了施工与运营监测。目前,哈尔滨工业大学、清华大学、重庆大学、南开大学、武汉理工大学、香港理工大学等单位对光纤传感器的应用研究非常重视,投入了大量的人力和物力,得到了系列研究成果,并已经在一些重点示范工程上得到了应用。

综上所述,光纤光栅传感器的优点已逐渐为人们认识,并在很多领域取得了实际的应用,所取得的成果表明,布拉格光栅传感器大有取代部分传统电学量传感器的趋势,有着非常广阔的发展前景。它的开发与应用必将为改造传统产业和提高新的经济增长点注入新的活力。从土木工程的研究与开发角度来看,以下几个方面是目前亟需发展的方向:

- 1) 针对具体的工程结构和不同的监测量,开发便于布设的光纤光栅封装技术;
- 2) 根据结构施工以及结构的特性,选用或开发满足耐久性要求的胶粘剂,研究光纤光栅传感器的布设工艺;
- 3) 根据结构长期健康监测需要,发展光纤光栅变形传感的温度补偿技术;
- 4) 根据反映结构耐久性监测量,如碳化、腐蚀等的需要,开发实用的特种光纤传感器;
- 5) 利用光纤光栅的优点,发展适于结构监测的灵巧传感装置,如冰压力传感器;
- 6) 根据发展智能结构的需要,将光纤光栅与结构材料融合,形成真正意

义上的结构本征智能材料，如与 FRP 结构材料融合；

- 7) 根据发展结构试验技术的需要，利用光纤光栅的优点，拓展光纤光栅传感器的应用技术，如钢筋混凝土的粘结滑移、大体积混凝土的固化监测、钢筋混凝土的徐变、混凝土的裂缝、岩土结构的内部变形、地震波的拾振等；
- 8) 根据结构监测传感器数量很多的特点，构建多点或分布式监测的光纤光栅传感器网络系统，并发展相应的数据采集与监测控制系统。

1.5 本文的构思与研究内容

目前“结构健康监测”已经成为世界性的研究热点。“结构智能监测”是工程理论发展与综合的象征、高新技术开发与集成的标志，同时也是现代结构实验技术的集中体现。结构智能监测已愈来愈成为重大工程结构设计验证、施工控制、安全运营与维修管理的重要保障技术。结构健康监测分为整体监测与局部监测，对结构进行整体监测用的位移、加速度等传感器目前已经相对成熟，而局部监测用传感器，如电阻应变计、振弦传感器等，在耐久性与稳定性上远远不能满足工程实际的需要。研究开发满足工程要求的局部监测传感元件是从根本上实现结构健康监测的核心工作。因此，开展结构局部监测研究显得更为紧迫。

通过对目前已经取得一定进展的智能传感元件，如光导纤维、形状记忆合金、压电材料、电阻应变丝、疲劳寿命丝（箔）、碳纤维、半导体材料、智能混凝土等进行定性比较可以看出，光纤光栅传感器是结构局部监测的最佳选择，本文将以此种传感元件作为研究对象，考虑结构局部监测的客观需要，发展满足结构健康监测长期耐久、稳定性需要的智能传感元件，并进行实验室与实际工程结构应用验证，最后形成初步的光纤光栅局部健康监测系统，为“结构健康监测”的研究与发展提供可靠的技术和手段。

本文在国家 863 计划项目“海洋平台结构的实时监测与检测成像技术”（项目编号：20001AA602023）、国家 863 计划项目“光纤光栅传感网络关键技术研究”和工程化应用”（项目编号：2002AA313110）、国家部门高技术应用发展项目“混凝土结构安全监测的智能化技术”（项目编号：1999-2062）、黑龙江省交通厅高技术项目“哈尔滨松花江斜拉桥运营健康监测系统”等项目研究的资助下，将从结构健康监测的需要出发，系统研究光纤光栅智能传感技术及其工程应用。

本文的构思与研究内容如图 1-2 所示。

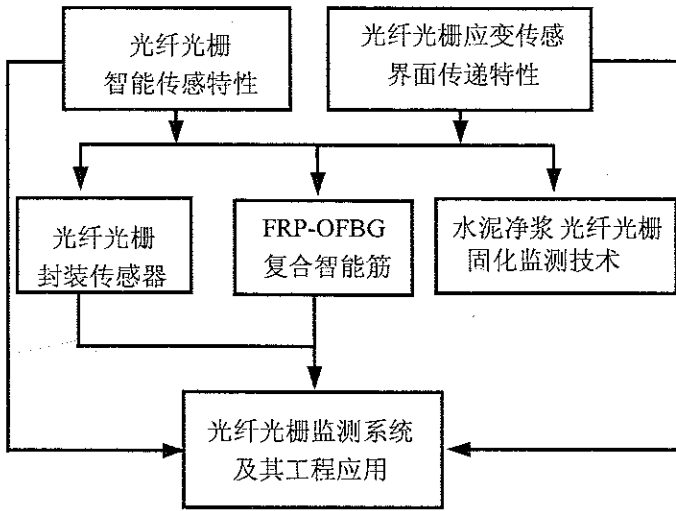


图 1-2 本文构思与主要研究内容

Figure 1-2 Conception and contents of this dissertation

本文主要研究内容包括以下方面:

首先,在光纤光栅传输理论的基础上,分析光纤光栅应变与温度传感及其特性,以及光栅中心波长变化对传感灵敏度系数的影响,研究光纤光栅应变传感的温度补偿原理和方法,并通过材料试验和等强度梁试验以及温度标定试验研究光纤光栅的应变与温度传感特性。

其次,针对土木工程结构长期监测的需要,从结构形式、材料选择、封装工艺等角度对光纤光栅封装传感器进行研究。研制开发光纤光栅毛细金属管式封装应变传感器、光纤光栅片式封装应变传感器和光纤光栅封装温度传感器,并对其传感特性进行试验研究,还将其用于结构试验进行验证。

第三,利用纤维增强塑料(FRP)的强度特性和光纤布拉格光栅(OFBG)的感知特性,研制开发 FRP-OFBG 复合智能筋,对其力学特性、微观结构以及应变和温度传感特性进行试验研究。对 12 根分别布设 GFRP-OFBG 筋和 CFRP-OFBG 筋传感器、光纤光栅管式封装应变传感器、裸光栅等光纤光栅传感器的 FRP 混凝土梁进行全过程的静力加载试验,监测揭示 FRP 的受力、变形、混凝土开裂,特别是 FRP 筋的滑移和应变分布等特性。

第四,研究光纤传感器应变传感的界面传递机理和误差修正,推导光纤传感器的应变多层界面传递和误差修正公式,利用理论和试验结果对自行研制开发的三种光纤光栅封装应变传感器进行应变传感误差分析和修正,为光纤光栅

智能传感元件在结构健康监测中的应用提供监测结果合理修正的依据。

第五，研究光纤光栅监测水泥净浆和混凝土固化的方法，研究光纤光栅在水泥净浆中的埋设工艺，研究水泥净浆早期固化过程的应变与温度双参量同时监测技术；进行水泥净浆的光纤光栅固化监测试验，并对埋入光栅固化后的水泥净浆试件进行压力试验。

第六，建立包括传感器、光开关、解调器、数据采集和控制软件在内的大规模、分布式的光纤光栅智能监测系统。研究光纤光栅现场布设工艺，将光纤光栅传感器在桥梁施工过程中分别布设到黑龙江呼兰河大桥和黑大公路牛头山大桥上；监测预应力箱形梁张拉过程的钢筋应变历程和箱形梁静载试验的混凝土和钢筋应变增量与分布；呼兰河大桥建成后，对其阶段性运营监测，监测车辆荷载下的应变时间历程和大桥温度变化过程。最后，针对“黑龙江松花江大桥结构健康监测系统”的局部监测系统需要，研究能够多点同时监测的“光纤光栅智能局部监测系统”方案，并进行功能设计。

第2章 光纤布拉格光栅智能传感特性

2.1 引言

光纤布拉格光栅因其独特的优越性能在传感领域得到了充分重视与肯定，并逐步成为结构局部监测的重要技术。然而，由于对光纤布拉格光栅的基本传感特性缺乏完整而清晰的认识，导致一些基于光纤布拉格光栅的传感器设计与布设工艺具有盲目性，如长期监测的传感系统没有考虑温度补偿问题、光纤布拉格光栅封装没有考虑交叉敏感问题等。更有甚者，一些人因光纤布拉格光栅的成本问题对其缺乏信心，持排斥态度。

基于这些认识，同时考虑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。本章将对光纤光栅的传输理论和基本智能传感特性，如应变和温度传感、灵敏度误差以及光栅对应变和温度的交叉耦合问题进行严格的理论推证，并提出光纤光栅应变传感的温度补偿简单实用技术，最后通过试验对其传感特性进行研究，说明光纤光栅是适于结构局部健康监测的理想传感元件。这些基础工作是发展光纤光栅传感技术的基本理论与支撑。（注：鉴于光纤布拉格光栅是最普遍的光纤光栅，在本文中如未加特殊说明，FBG 或光纤光栅均指光纤布拉格光栅。）

2.2 光纤布拉格光栅传输基本理论

2.2.1 光纤基本结构与传输原理

光纤是光导纤维的简称，是工作在光波波段的一种介质波导，通常是圆柱形，已经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产业。光纤的基本结构如图 2-1 所示，由纤芯、包层、涂敷层（亦称保护层）、增强纤维和保护套组成。其中纤芯和包层是光纤的主体，约为 $125\mu\text{m}$ 左右，对光波的传输起决定性作用。涂敷层、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。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剃度型光纤；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、玻璃光纤、塑料光纤、液芯光纤、晶体光纤、特种光纤等^[110~112]。

光纤工作的基本原理基于光的全反射现象，即由于纤芯折射率 (n_1) 大于包层折射率 (n_2)，当满足数值孔径 ($NA = n_0 \sin \varphi_0 = (n_1^2 - n_2^2)^{1/2}$ ， n_0 为空气折射率) 要求的光线传播到光纤界面时，根据菲涅耳(Fresnel)折射定律可知， $\varphi > \varphi_0$ 时，入射光将不发生折射，全部沿着纤芯反射向前传播。因此，光纤能将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纤芯内，并引导光波沿着光纤轴线的方向前进。

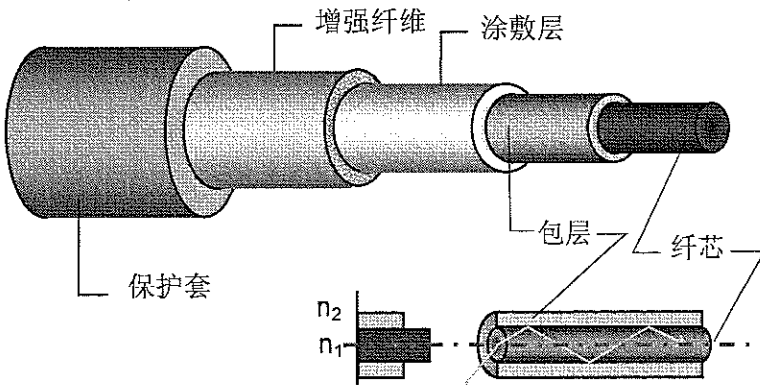
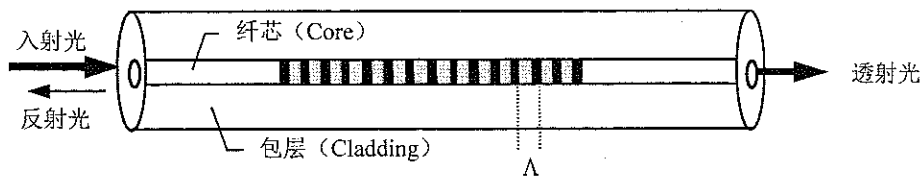


图 2-1 光纤基本结构示意图

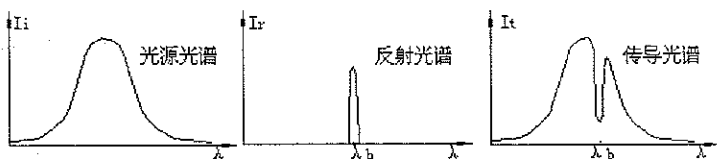
Figure 2-1 Sketch of optical fiber structure

2.2.2 光纤布拉格光栅结构与原理

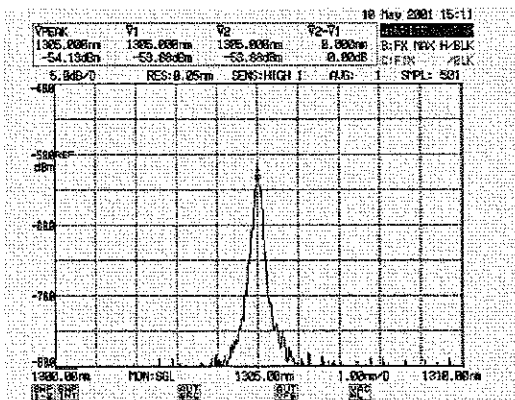
光纤布拉格光栅是最普遍的一种光纤光栅，其光栅周期与折射率调制深度（亦称为有效折射率）均为常数，光栅波矢方向与光纤轴线一致。它是一种性能优异的窄带反射滤波无源器件。光纤布拉格光栅的折射率分布与反射、投射特性如图 2-2 所示。当光波传输通过光纤布拉格光栅时，满足布拉格光栅波长条件 ($\lambda_B = 2n_{eff}\Lambda$) 的光波矢将被反射回来，这样入射光栅波矢就会分成两部分：投射光波矢和反射光波矢，如图 2-2 的 b) ~d) 图所示。这就是光纤布拉格光栅的基本工作原理。光纤布拉格光栅的这种特性基于光栅折射率的周期分布，而这种周期性的折射率分布来自光栅的特殊写入工艺技术，即利用外界能量改变裸光纤上的折射率。目前已有的布拉格光栅写入技术有：相位掩模技术^{[35][113]}、振幅掩模技术^[114]、逐点写入技术^[115]和全息成栅技术^[116]、在线写入技术^[117]等，这些技术中广泛应用的是相位掩模技术。



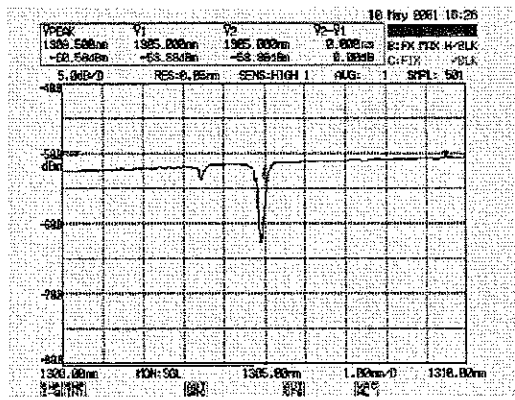
a) 光纤布拉格光栅结构示意图



b) 光波通过布拉格光栅能量分配示意图



c) 光谱仪得到的布拉格光栅反射谱



d) 光谱仪得到的布拉格光栅透射谱

图 2-2 光纤布拉格光栅结构及其反射和投射特性

Figure 2-2 Sketch of FBG structure and its properties of light reflecting and transmitting

2. 2. 3 光纤布拉格光栅传输基本理论

光纤布拉格光栅的中心波长与光栅周期和有效折射率的数学关系是研究光栅传感的基础。下面综合借鉴贾宏志^[118]、张颖^[66]、廖帮全^[119]、梁龙彬^[120]、余有龙^[121]等人的研究成果，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，充分考虑光纤光栅折射率的微扰关系，严格推证光纤布拉格光栅的传输理论，并得到布拉格方程的基本表达式。

考虑电场极化强度，麦克斯韦方程组表达为：

$$\nabla \times H(r, t) = J + \frac{\partial}{\partial t} [\varepsilon(r) E(r, t) + P(r, t)] \quad (2-1)$$

$$\nabla \times E(r, t) = -\frac{\partial}{\partial t} [\mu_0 H(r, t)] \quad (2-2)$$

式中 ∇ —— 哈密顿算符；
 $H(r, t)$ —— 磁场强度矢量；
 $E(r, t)$ —— 电场强度矢量；
 J —— 电流密度；
 $\varepsilon(r)$ —— 张量介电常数；
 μ_0 —— 介质导磁率；
 r —— 空间极坐标矢；
 t —— 横场分量；
 $P(r, t)$ —— 感生极化强度。

对于光纤这种无源、非磁性、绝缘的介质空间而言， μ 为常数，而 J 为 0。光纤微扰感生极化强度 $P(r, t)$ 可以表示为：

$$P(r, t) = [\varepsilon(r) - \varepsilon_0] E(r, t) + P_{per}(r, t) \quad (2-3)$$

式中 ε_0 —— 介电常数；
 $P_{per}(r, t)$ —— 微扰极化强度。

联立方程 (2-1)、(2-2) 和 (2-3) 求解可得

$$\nabla^2 E(r, t) = \mu_0 \varepsilon(r) \frac{\partial^2 E(r, t)}{\partial t^2} + \mu_0 \frac{\partial^2 [P_{per}(r, t)]}{\partial t^2} \quad (2-4)$$

假设模式中只有一个纵向分量，即 TE 模，将微扰波导中的总场展开成各理想模的叠加^[122]：

$$E(r, t) = \sum_v a_v \varepsilon_v(r) \exp[i(\omega t - \beta_v z)] \quad (2-5)$$

$$H(r, t) = \sum_\mu b_\mu h_\mu(r) \exp[i(\omega t - \beta_\mu z)] \quad (2-6)$$

式中 v, μ —— 电场与磁场的下标，即模序；
 a_v, b_μ —— 分解系数；
 β_v, β_μ —— 传播常数。

将式 (2-5) 代入式 (2-4) 可得：

$$\sum_v \left[\frac{d^2 a_v}{dz^2} \varepsilon_v(r, t) e^{i(\omega t - \beta_v z)} + 2 \frac{da_v}{dz} (-i\beta_v) \varepsilon_v(r) e^{i(\omega t - \beta_v z)} \right] = \mu_0 \frac{\partial^2 [P_{per}(r, t)]}{\partial t^2} \quad (2-7)$$

波导振幅慢变化时，我们可以认为： $\left| \frac{d^2 a_v}{dz^2} \right| \ll \left| \beta_v \frac{da_v}{dz} \right|$ 成立，即忽略高阶项，从而得到：

$$\sum_v 2 \frac{da_v}{dz} (-i\beta_v) \varepsilon_v(r) e^{i(\omega t - \beta_v z)} = \mu_0 \frac{\partial^2 [P_{per}(r, t)]}{\partial t^2} \quad (2-8)$$

在极坐标下，光纤波导存在如下正交归一关系^{[119][123][124]}：

$$\int_0^\infty \int_0^{2\pi} \hat{e}_z \cdot (\varepsilon_v \times h_\mu^*) r dr d\phi = 2S_\mu \beta_\mu^* P_\mu \delta_{v\mu} / |\beta_\mu| \quad (2-9)$$

式中 $\hat{e}_z$ —— z 方向的电场单位矢量；
 h_μ^* —— h_μ 的共轭矢量；
 S_μ —— 正交系数，当传播常数为实数时，通常为 1；
 P_μ —— 第 μ 个模的功率；
 ϕ —— 幅角；
 $\delta_{v\mu}$ —— 有两种含义，当 v 和 μ 分别为连续与非连续时，分别代表狄拉克符号和克罗内克符号。

利用光纤极坐标下的正交归一关系，我们将 (2-8) 的两边对 h_μ^* 进行矢积，然后对其结果与 $\hat{e}_z$ 进行标积，将最后的结果从 $0 \sim 2\pi$ 的幅角和 $0 \sim \infty$ 的半径进行积分，我们可以得到

$$\frac{da_\mu^{(+)}}{dz} e^{i(\omega t - \beta_\mu z)} - \frac{da_\mu^{(-)}}{dz} e^{i(\omega t + \beta_\mu z)} = \frac{i\mu_0}{4\beta_\mu P_\mu} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \int_0^\infty \int_0^{2\pi} \hat{e}_z \cdot \{ [P_{per}(r, t)] \times h_\mu^* \} r dr d\phi \quad (2-10)$$

这里，我们考虑传播常数为实数，所以 S_μ 为 1； $a_\mu^{(+)}$ 与 $a_\mu^{(-)}$ 分别为 z 和 $-z$ 方向的耦合传输模，可视为振幅模式。

上式即为光纤中的耦合模基本方程，可用来处理光纤传输模式间的耦合问题。

光纤光栅引起的周期性微扰可通过电介质的微扰来描述^[119]，即

$$\Delta \varepsilon(r) = \varepsilon_0 \Delta n^2(r) \quad (2-11)$$

将上式代入式 (2-3)，可得微扰极化强度为

$$P_{per}(r, t) = \Delta n^2(r) \varepsilon_0 E(r, t) \quad (2-12)$$

为了简单起见, 仅考虑 z 向传播, 而光栅的周期性微扰 $\Delta n^2(r)$ 可视为标量, 将式 (2-5) 代入式 (2-12), 可得

$$P_{per}(r, t) = \Delta n^2(r) \varepsilon_0 \sum_v a_v \varepsilon_v(r) \exp[i(\omega t - \beta_v z)] \quad (2-13)$$

将上式代入式 (2-10), 并考虑 $\frac{\partial^2}{\partial t^2} [\Delta n^2(r) a_v e^{i\omega t}] = -\omega^2 \Delta n^2(r) a_v e^{i\omega t}$, 可得

$$\begin{aligned} & \frac{da_\mu^{(+)}}{dz} e^{i(\omega t - \beta_\mu z)} - \frac{da_\mu^{(-)}}{dz} e^{i(\omega t + \beta_\mu z)} \\ &= -\frac{i\mu_0 \omega^2}{4\beta_\mu P_\mu} \int_0^\infty \int_0^{2\pi} \hat{e}_z \cdot \{[\Delta n^2(r) \varepsilon_0 \sum_v a_v \varepsilon_v(r) e^{i(\omega t - \beta_v z)}] \times h_\mu^*(r)\} r dr d\phi \end{aligned} \quad (2-14)$$

上式的右边可以看成是左边前向波 $a_\mu^{(+)} e^{i(\omega t - \beta_\mu z)}$ 和后向波 $a_\mu^{(-)} e^{i(\omega t + \beta_\mu z)}$ 的驱动波源。只有当满足频率和相位匹配条件才能保证光波的正常传播。为了保证第 v 个模式耦合到第 μ 个模式中, 则必须使上式中的乘积 $\Delta n^2(r) e^{i(\pm\beta_\mu z)}$ 包含有正比于 $e^{\pm i\beta_\mu z}$ 的项。因此, 模式耦合的关系由 $\Delta n^2(r)$ 和 z 的关系决定。

设光纤光栅的微扰周期为 Λ , 为了简单起见, 令 $\Delta n^2(r)$ 可以写成如下的表达式^[119]:

$$\Delta n^2(r) \approx n(r, \phi) \Delta n [\exp(i2\pi z / \Lambda) + \exp(-i2\pi z / \Lambda)] \quad (2-15)$$

这样, $v = \mu$ 时, 式(2-14)的右边就包含了正比于左方 $a_\mu^{(+)} \exp(-i\beta_\mu z)$ 一项, 而如果 $2\pi / \Lambda - \beta_\mu \approx \beta_\mu$, 则该项同样可以驱动左方的 $a_\mu^{(-)} \exp(i\beta_\mu z)$ 项。如果

$$\frac{da_\mu^{(-)}}{dz} = \frac{i\mu_0 \omega^2}{4\beta_\mu P_\mu} a_\mu^{(+)} \int_0^\infty \int_0^{2\pi} \hat{e}_z \cdot \{n(r, \phi) \Delta n \varepsilon_0 e^{i(2\pi / \Lambda - 2\beta_\mu)z} \varepsilon_\mu(r)\} \times h_\mu^*(r) r dr d\phi \quad (2-16)$$

成立, 由 $\Delta n^2(r)$ 的第 v 个模引起的后退波 $a_\mu^{(-)}$ 和前进波 $a_\mu^{(+)}$ 之间的耦合可以描述为:

$$da_\mu^{(-)} / dz = \kappa a_\mu^{(+)} \exp[-i2(\Delta\beta)z] \quad (2-17)$$

其中, κ 为耦合系数, 有以下表达式:

$$\kappa = \frac{i\mu_0 \omega^2}{4\beta_\mu P_\mu} \int_0^\infty \int_0^{2\pi} \hat{e}_z \cdot \{n(r, \phi) \Delta n \varepsilon_0 \varepsilon_\mu(r)\} \times h_\mu^*(r) r dr d\phi \quad (2-18)$$

同理可得

$$da_\mu^{(+)} / dz = \kappa^* a_\mu^{(-)} \exp[i2(\Delta\beta)z] \quad (2-19)$$

其中, $\Delta\beta = \beta_\mu - \pi / \Lambda$ 。以上两式即为光纤光栅周期性波导中传播的前向模和后

向模的耦合方程。由于前向模和后向模满足

$$\frac{d}{dz} \left[|a_{\mu}^{(+)}|^2 - |a_{\mu}^{(-)}|^2 \right] = 0 \quad (2-20)$$

由此说明这两个模式携带的能量是相等的，也说明采用透射谱与反射谱来分析光纤光栅是等效的。

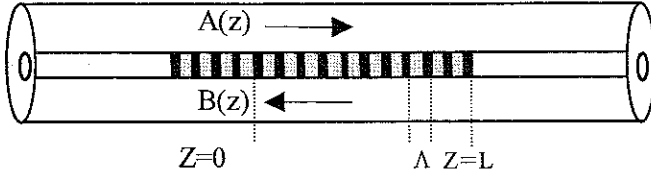


图 2-3 光在光纤光栅中的传播示意图

Figure 2-3 Sketch of light transmitting in FBG

光在光纤光栅中的传输如图 2-2 所示。便于讨论与分析，令 $a_{\mu}^{(+)} = A$ ， $a_{\mu}^{(-)} = B$ 。振幅为 $A(0)$ 的光入射到光纤布拉格光栅周期性微扰区域，在 $z = L$ 处，后向波的振幅为 0，即 $B(L) = 0$ 。当 $0 \leq z \leq L$ 时，对方程 (2-17) 和 (2-19) 求解得到，

$$A(z,t)e^{-i\beta_{\mu}z} = A(0) \frac{\exp(-i\pi z / \Lambda) \{ \Delta\beta sh[S(z-L)] + iSch[S(Z-L)] \}}{(-\Delta\beta) \sinh(SL) + iSch(SL)} \quad (2-21)$$

$$B(z,t)e^{i\beta_{\mu}z} = A(0) \frac{i\kappa \exp(i\pi z / \Lambda) sh[S(z-L)]}{(-\Delta\beta) sh(SL) + iSch(SL)} \quad (2-22)$$

其中， $S = \sqrt{\kappa^2 - (\Delta\beta)^2}$ 。

对于光纤传播常数而言，有以下关系：

$$\Delta\beta = \beta(\omega) - \beta_0, \quad \beta_0 = \pi / \Lambda \quad (2-23)$$

而对于周期性微扰的光纤光栅而言， $\beta(\omega)$ 可以表示为^[119]

$$\beta(\omega) \approx (\omega / C) n_{\text{eff}} \quad (2-24)$$

式中 C —— 光速；

n_{eff} —— 光纤光栅有效折射率。

要使光纤光栅具有最大反射率与最小的透射率，入射光波必须满足相位匹配条件，即 $\Delta\beta = 0$ ，由式 (2-23) 和 (2-24)，可得

$$\beta(\omega) - \beta_0 = (\omega / C) n_{\text{eff}} - \pi / \Lambda = 2\pi n_{\text{eff}} / \lambda_B - \pi / \Lambda \quad (2-25)$$

因此, 满足光纤布拉格光栅的中心波长为

$$\lambda_B = 2n_{eff} \Lambda \quad (2-26)$$

这就是光纤布拉格光栅的基本公式, 它是光纤布拉格光栅传感器研究与开发的基础。

2.3 光纤布拉格光栅智能传感特性分析

由上节推导的光纤布拉格光栅方程可以看出, 任何能够改变光栅有效折射率或光栅周期的物理量都能改变光栅中心波长。应变(或应力)和温度是最能直接显著改变布拉格光栅波长的物理量。当布拉格光栅受到外界应变(或应力)作用时, 光栅周期会发生变化, 同时光弹效应会导致光栅有效折射率变化; 当布拉格光栅受到外界温度影响时, 热膨胀会使光栅周期发生变化, 同时热敏效应会导致光栅的有效折射率变化。目前已有的基于光纤布拉格光栅的各种传感器基本上都是直接或间接地利用应变或温度改变光栅中心波长, 达到测试被测物理量的目的。鉴于此, 充分研究光纤布拉格光栅的应变与温度传感特性、灵敏度误差、应变传感的温度补偿技术以及应变与温度的耦合效应等是研究开发新一代光纤布拉格传感器的基础。下面就这些问题展开研究与阐述。

2.3.1 均匀轴向应力下的光纤光栅传感特性分析

对光纤布拉格光栅方程, 即中心波长的表达式(2-26)两边微分, 得

$$d\lambda_B = 2\Lambda dn_{eff} + 2n_{eff} d\Lambda \quad (2-27)$$

将式(2-27)两端分别除以式(2-26)两边项, 得

$$\frac{d\lambda_B}{\lambda_B} = \frac{dn_{eff}}{n_{eff}} + \frac{d\Lambda}{\Lambda} \quad (2-28)$$

线弹性范围内, 有

$$\frac{d\Lambda}{\Lambda} = \varepsilon \quad (2-29)$$

式中 ε —— 轴向应变。

不考虑波导效应, 即不考虑光纤径向变形对折射率的影响, 只考虑轴向变形的弹光效应, 光纤在轴向弹性变形下的折射率变化如下^[110]:

$$\frac{dn_{eff}}{n_{eff}} = -\frac{n_{eff}^2}{2} [p_{12} - \nu(p_{11} + p_{12})] \varepsilon \quad (2-30)$$

式中 p_{11} 和 p_{12} 是弹光常数, 即纵向应变分别导致的纵向和横向折射率变化; ν

是泊松比。

令 $P = \frac{n_{\text{eff}}^2}{2} [p_{12} - \nu(p_{11} + p_{12})]$ ，由式 (2-28)、(2-29) 和 (2-30)，可得

$$\frac{d\lambda_B}{\lambda_B} = (1 - P)\varepsilon \quad (2-31)$$

上式为光纤布拉格光栅轴向应变下的波长变化数学表达式，它是处理光纤光栅应变传感的基本关系式。可以看出，当光纤光栅的材料一旦确定后，光纤光栅对应变的传感特性系数基本上为一与材料系数相关的常数，这就从理论上保证了光纤光栅作为应变传感器有很好的线性输出。

令 $\alpha_\varepsilon = \lambda_B(1 - P)$ ， α_ε 可视为光栅轴向应变与中心波长变化关系的灵敏度系数，由此可得

$$\Delta\lambda_B = \alpha_\varepsilon \varepsilon \quad (2-32)$$

上式即为光纤光栅中心波长变化与轴向应变的数学关系，它可以方便地将波长变化数据处理成应变结果。对于纤芯是纯石英的光纤情况， $n_{\text{eff}} = 1.456$ ， $p_{11} = 0.121$ ， $p_{12} = 0.270$ ， $\nu = 0.17$ ，得 P 值约为 $0.22^{[110]}$ 。若分别取中心波长为 1545nm 、 1550nm 、 1555nm ，由式 (6) 计算得每微应变导致的波长变化分别为 1.205pm 、 1.209pm 、 1.212pm 。由此表明：中心波长变化不大时，每微应变产生的波长约为 1.2pm ，即 $\alpha_\varepsilon = 1.2\text{pm}/\mu\varepsilon$ 左右。由于采用的光纤不同、写入光栅的工艺不同以及退火工艺的差别，不同光纤光栅的传感灵敏度会有差异，因此不同的光纤光栅必须经过标定才能用作实际测量。

2.3.2 均匀横向应力下的光纤光栅传感特性分析

在弹光效应下，当光栅只受到横向应力且不存在剪应力时，与上节轴向应力下的传感分析方法一样，横向应力导致的光栅折射率变化为：

$$\frac{dn_{\text{eff}}}{n_{\text{eff}}} = -\frac{n_{\text{eff}}^2}{2} \left[p_{12} - \frac{1-\nu}{2\nu} (p_{11} + p_{12}) \right] \varepsilon \quad (2-33)$$

令 $P' = \frac{n_{\text{eff}}^2}{2} \left[p_{12} - \frac{1-\nu}{2\nu} (p_{11} + p_{12}) \right]$ ，由式 (2-28)、(2-29) 和 (2-30)，可得

$$\frac{d\lambda_B}{\lambda_B} = (1 - P')\varepsilon \quad (2-34)$$

同样令 $\alpha'_\varepsilon = \lambda_B(1 - P')$ ， α'_ε 可视为光栅在横向应力下的纵向应变与中心波长变化的灵敏度系数。对 1550nm 的光栅中心波长而言，利用上面的参数可得， P' 值约为 -0.73 ， $\alpha'_\varepsilon = 2.6\text{pm}/\mu\varepsilon$ 。

在只考虑弹光效应时，表面上看来，光纤光栅的中心波长变化对横向应力下的应变更敏感，然而这是一个误解，是因为我们将两者的应变看成是相等的。若从应力灵敏度的角度来看，纵向拉伸的应力灵敏度为约为横向应力的 1.3 倍。因此，弹光效应下，光纤光栅对纵向应力较横向应力更为敏感。若进一步考虑波导效应，在相同的应力作用下，径向应变较前一种情况增加 $(1-\nu)/\nu \approx 5$ 倍，所以波导效应将显著得多，而波导效应与弹光效应正好相反，即减小光栅的横向应变灵敏度。综合考虑弹光和波导效应，光纤光栅对横向应力的灵敏度较纵向小的多，因此在复杂应力状态下，光纤纵向应力引起的波长变化占主要位置。这就是我们通常只考虑光纤光栅纵向应变传感的原因。

2.3.3 光纤布拉格光栅温度传感特性

温度变化既引起光纤布拉格光栅有效折射率的变化（热敏效应），同时由于热膨胀也引起栅距的变化（热膨胀效应）。不考虑波导效应，将式(2-26)对温度 T 取导数，可得

$$d\lambda_B = 2(\Lambda \frac{dn_{eff}}{dT} + n_{eff} \frac{d\Lambda}{dT})dT \quad (2-35)$$

式 (2-26) 两边项分别除上式两端，可得

$$\frac{d\lambda_B}{\lambda_B} = (\frac{1}{n_{eff}} \frac{dn_{eff}}{dT} + \frac{1}{\Lambda} \frac{d\Lambda}{dT})dT \quad (2-36)$$

令 $\frac{dn_{eff}}{dT} = \zeta$ ，即为热光常数； $\frac{1}{\Lambda} \frac{d\Lambda}{dT} = \alpha$ ，即为热膨胀系数，从而可得

$$\frac{d\lambda_{eff}}{\lambda_{eff}} = (\alpha + \frac{1}{n_{eff}} \zeta) dT \quad (2-37)$$

上式即为光纤布拉格光栅温度变化作用下的波长变化数学表达式，它是处理光纤光栅温度传感的基本关系式。可以看出，当光纤光栅的材料一旦确定后，光纤光栅对温度的传感特性系数基本上为一与材料系数相关的常数，这就从理论上保证了光纤光栅作为温度传感器有很好的线性输出。

令 $\alpha_T = \lambda_B (\alpha + \frac{1}{n_{eff}} \zeta)$ ， α_T 为光纤光栅温度传感的灵敏度系数，由此可得

$$\Delta\lambda = \alpha_T \Delta T \quad (2-38)$$

上式即为光纤光栅波长变化与温度变化关系，它可以方便地将波长变化数据处理成温度增量结果。文献[110]给出了常用的石英光纤常数 $\alpha = 0.55 \times 10^{-6} /$

$^{\circ}\text{C}$ 、 $\zeta = 6.8n_{\text{eff}} \times 10^{-6} / ^{\circ}\text{C}$ 、 $n_{\text{eff}} = 1.456$ 。我们可以得到 $\alpha / (\alpha + \zeta / n_{\text{eff}}) = 0.07$ ，由此说明仅仅热敏效应占整个温度效应的 7% 左右。

若分别取光栅中心波长为 1545nm、1550nm 与 1555nm，则相应的灵敏度系数 α_T 分别为 10.76pm/ $^{\circ}\text{C}$ 、10.80pm/ $^{\circ}\text{C}$ 和 10.83pm/ $^{\circ}\text{C}$ 。由此表明：中心波长变化不大时，每摄氏度导致的波长变化约为 10.80pm/ $^{\circ}\text{C}$ 左右。同样的道理，由于采用的光纤不同、写入光栅的工艺不同以及退火工艺的差别，不同光纤光栅的传感灵敏度会有差异，尤其光纤光栅经过封装后，封装材料会极大地改变光纤光栅的温度传感特性，因此不同的光纤光栅必须经过标定才能用作实际测量。

2.3.4 光纤布拉格光栅传感灵敏度误差分析

影响光纤布拉格光栅传感灵敏度的因素很多，如制作光栅的光纤材料、光栅制作工艺、封装材料、退火工艺、使用环境等，任何改变光栅传感条件的因素都有可能或多或少改变光栅的传感灵敏度。为了确证光纤光栅的优越传感特性，在不考虑上述影响因素的前提下，这里研究光纤光栅中心波长变化导致的灵敏度误差。灵敏度误差大小是传感器线性度好坏的直接表征，是关系到光纤光栅能否用于结构长期健康监测的重要问题。下面分别对光纤光栅中心波长变化导致的应变与温度传感灵敏度误差进行定量分析。

1) 光纤布拉格光栅应变传感灵敏度误差分析

考虑波长影响，对 α_{ε} 分别取 $\lambda_B(1-p)$ 和 $(\lambda_B + \Delta\lambda_B)(1-p)$ 时，由式 (2-32) 可知， α_{ε} 的相对误差 $\eta_{\alpha_{\varepsilon}}$ 为

$$\eta_{\alpha_{\varepsilon}} = \frac{(\lambda_B + \Delta\lambda_B)(1-p) - \lambda_B(1-p)}{\lambda_B(1-p)} = \frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} \quad (2-39)$$

由上式和式 (2-32) 可得考虑波长变化导致 α_{ε} 变化的关系式：

$$\Delta\lambda_B = \alpha_{\varepsilon}(1 + \eta_{\alpha_{\varepsilon}})\varepsilon \quad (2-40)$$

当光纤光栅发生实际应变 ε 时，由式 (2-40) 求波长变化，然后由式 (2-39) 反算应变 ε' ，比较两者大小，由此可判定考虑波长变化对 α_{ε} 影响的重要性。 ε' 的计算式为

$$\varepsilon' = (1 + \eta_{\alpha_{\varepsilon}})\varepsilon \quad (2-40)$$

为了方便计算又符合实际情况，光纤光栅的初始中心波长取 $\lambda = 1550\text{nm}$ 、初始灵敏度取 $\alpha_{\varepsilon} = 1.2\text{pm}/\mu\varepsilon$ ，根据上面的方法，得到表 2-1 中的计算结果。由

表可以看出，若发生 $100\mu\varepsilon$ 时，不考虑中心波长变化对 α_ε 影响而产生的绝对误差仅为 $0.08\mu\varepsilon$ ；即使在高达 $5000\mu\varepsilon$ 、 $10000\mu\varepsilon$ 与 $20000\mu\varepsilon$ 的应变下，分别产生的绝对误差也仅为 $3.84\mu\varepsilon$ 、 $7.74\mu\varepsilon$ 和 $15.48\mu\varepsilon$ ，由此说明 α_ε 对中心波长的变化不敏感，对某个光栅而言，将其视为常数对测量结果影响不大，完全能被工程应用接受。

表 2-1 光纤光栅波长变化对计算应变的影响
Table 2-1 FBG wavelength changes' influence on calculation strain

实际应变 ($\mu\varepsilon$)	波长变化 (nm)	灵敏度相对误差 $\eta_{\alpha_\varepsilon}$ (%)	计算应变的绝对 误差($\mu\varepsilon$)
100	0.12	0.0077	0.08
1000	1.2	0.077	0.77
2000	2.4	0.156	1.56
5000	6.0	0.387	3.87
10000	12	0.774	7.74
20000	24	1.548	15.48

由上面的分析说明应变与光栅中心波长的变化有很好的线性关系，证明了光纤光栅是应变传感的理想元件。实际测试时，只要保证结构应变很好的传递给光纤光栅，采用通信光纤光栅（ $\lambda = 1550nm$ 左右）只需简单标定就可以很方便地对结构应变进行测试。同时也说明，外界因素导致的光纤光栅中心波长漂移只要在 nm 量级，它所引起的应变传感灵敏度误差很小，完全能被工程应用接受。从这个角度来看，光纤光栅满足结构长期健康监测需要。

2) 光纤布拉格光栅温度传感灵敏度误差分析

如同应变分析一样，考虑中心波长变化的影响对 α_T 产生的相对误差 η_{α_T} 为

$$\eta_{\alpha_T} = \Delta\lambda / \lambda \tag{2-42}$$

考虑波长变化的计算温度为

$$\Delta T' = (1 + \eta_{\alpha_T}) \Delta T \tag{2-43}$$

初始中心波长取 $1550nm$ ，初始温度灵敏度取 $10.80pm/^\circ C$ ，考虑光栅中心波长变化导致 α_T 变化以及由此导致的计算误差列入表 2-2 中。

由上表可以同样看出，温度不太高时，考虑波长变化对 α_T 的影响很小，不考虑中心波长对温度传感灵敏度的影响，对实际测试时不会带来太大的系统误

差。同时考虑到光纤本身的材料特性，不宜用于测量过高的温度（小于 600℃为宜）。同样证明温度变化与光栅中心波长变化有很好的线性关系，是理想的温度传感元件，满足结构长期温度监测的需要。

表 2-2 光纤光栅波长变化对计算温度的影响
Table 2-2 FBG wavelength changes' influence on calculation temperature

温度变化 (℃)	波长变化 (nm)	灵敏度相对 误差 η_{σ_T} (%)	计算温度的 绝对误差 (℃)
10	0.108	0.007	0.07e-2
50	0.54	0.035	1.75e-2
100	1.08	0.07	6.97e-2
200	2.16	0.139	0.278
300	3.24	0.21	0.627
400	4.32	0.279	1.115
500	5.4	0.348	1.74
600	6.48	0.418	2.508

2.3.5 光纤布拉格光栅应变传感的温度补偿技术

由上面的分析可知，光纤布拉格光栅的温度灵敏度约为应变灵敏度的 10 倍左右。因此，当温度变化较大时，用光纤光栅作应变传感必须考虑如何剔除温度的影响，否则，会因温度的变化而影响应变测量的精度，尤其在结构的健康长期监测中，这个问题十分突出，可以说没有考虑温度补偿的光纤光栅实际结构应变长期监测是没有意义的，因为结构，如桥梁结构、水工结构等的年温差达几十，甚至上百摄氏度。

绪论中谈及的光纤光栅应变测试温度补偿技术主要有不受力光栅温度补偿法、聚合物封装法、啁啾法、负温材料法和应变、温度双参量同时测试法等技术。综合比较这些方法的优缺点，认为聚合物封装法和负温材料法只是消除了光栅热敏的热膨胀部分，不能消除光敏部分；啁啾法成本过高且不一定可靠；而双参量往往因为双光栅的灵敏度系数过于接近，容易导致组成的方程呈现病态，即计算求得的值误差过大。综上所述，考虑结构健康监测本身就需要把握结构温度荷载这一事实，采用不受力光栅温度补偿法是最简单，而又经济可靠

的方法。下面对这一方法进行论述。

在讨论光栅应变传感的温度补偿方法之前，首先论述裸光纤光栅布设到被测构件上的传感特性。

式 (2-37) 推导过程应用的热敏系数 $d\lambda/(\lambda dT) = \alpha$ ，指裸光纤光栅在自由状态下的热膨胀系数，当光栅与被测构件的基体材料融合一起并仅仅受到温度作用时，其热膨胀取决于基体材料的热膨胀情况，而与光栅自身的热膨胀没有太大关系。因为裸光栅与基体材料处于协同变形下，而裸光纤的直径仅为 125 微米，对基体的热膨胀变形不可能产生太大的影响，因此融合体的热膨胀基本上完全由基体材料确定，所以式 (2-37) 的热敏系数 α 应该取基体材料的热膨胀系数。因此布设于结构的裸光栅的温度传感特性可表示为

$$\frac{d\lambda_{eff}}{\lambda_{eff}} = (\alpha_{基体} + \frac{1}{n_{eff}}\zeta)dT \quad (2-44)$$

同样， $\alpha_T = \lambda_B(\alpha + \frac{1}{n_{eff}}\zeta)$ 中的 α 亦必须是 $\alpha_{基体}$ 。在以下温度补偿讨论中的温度传感特性都是这样理解的。

将一根布拉格光栅布设于被测对象，另一根布设于与被测材料一样、温度场一致且不受力的构件上，即保证两者发生同样的温度效应，若不考虑温度与应变的耦合作用，即假定温度与应变导致的中心波长变化是严格线性且相互独立的，根据式 (2-31) 和 (2-35)，令 $K_T = \alpha_{基体} + \frac{1}{n_{eff}}\zeta$ ， $K_\varepsilon = 1 - P$ ，其波长变化分别如下：

$$\frac{\Delta\lambda_{B1}}{\lambda_{B1}} = K_{\varepsilon1}\varepsilon + K_{T1}\Delta T \quad (2-45)$$

$$\frac{\Delta\lambda_{B2}}{\lambda_{B2}} = K_{T2}\Delta T \quad (2-46)$$

联立式 (2-45) 和 (2-46)，令 $\gamma = K_{T1}/K_{T2}$ ，我们可以得到

$$\varepsilon = (\Delta\lambda_{B1}/\lambda_{B1} - \gamma\Delta\lambda_{B2}/\lambda_{B2})/K_{\varepsilon1} \quad (2-47)$$

上式即为考虑光纤光栅中心波长变化的温度补偿关系式。如已知光纤光栅的传感特性和基体材料的热膨胀系数的前提下，通过测量光栅的中心波长变化，可以方便得到经过温度补偿的准确基体应变，同样由式 (2-46) 可以方便得到准确的温度变化值。

若忽略光栅中心波长导致的灵敏度系数影响，由式 (2-32) 和 (2-38) 可知，

温度与应变共同产生的波长变化可由下式表示：

$$\Delta\lambda_B = \alpha_\varepsilon \varepsilon + \alpha_T \Delta T \quad (2-48)$$

出于同样的考虑，两根光栅的波长变化分别如下：

$$\Delta\lambda_{B1} = \alpha_{\varepsilon 1} \varepsilon + \alpha_{T1} \Delta T \quad (2-49)$$

$$\Delta\lambda_{B2} = \alpha_{T2} \Delta T \quad (2-50)$$

式(2-49) - $\psi \times$ (2-50)，得

$$\Delta\lambda_{B1} - \psi \Delta\lambda_{B2} = \alpha_{\varepsilon 1} \varepsilon \quad (2-51)$$

其中 $\psi = \alpha_{T1} / \alpha_{T2}$ 。所以

$$\varepsilon = \frac{\Delta\lambda_{B1} - \psi \Delta\lambda_{B2}}{\alpha_{\varepsilon 1}} \quad (2-52)$$

上式可以看出，在已知光栅传感特性和基体材料的热膨胀系数的情况下，只要测得两根光栅的波长变化值，就可以方便得到剔除温度效应的准确应变值，同时由式(2-50)可以得到准确的温度变化值。

对于不同传感特性的光栅而言，上述方法只需改变 ψ 和 k 值就可以实现只用一个光栅对多个光栅的应变传感进行温度补偿，准分布式应变测量时使用起来很方便。如果光纤布拉格光栅的传感特性一致，而基体材料也一样，即光栅的温度传感系数一致，这样式(2-47)和(2-52)中的 ψ 和 γ 可以取 1，从而将给实际操作带来极大的方便。在后续章节中的具体应用就是基于这样的考虑。

2.3.6 光纤光栅应变与温度的耦合作用分析

实际情况下，光纤布拉格光栅中心波长的变化决定于外力产生的应变与温度的同时作用。在不同应力状态下的热光特性及不同温度状态下的光弹特性有一定的差别，因此有必要研究两者的耦合作用。光栅中心波长视作应变与温度的函数，表示如下：

$$\lambda_B = f(\varepsilon, T) \quad (2-53)$$

将上式展开成泰勒(Taylor)级数，得

$$\begin{aligned} \lambda_B &= f(\varepsilon, T) \\ &= f(\varepsilon_0, T_0) + \frac{\partial f(\varepsilon_0, T_0)}{\partial \varepsilon} (\varepsilon - \varepsilon_0) + \frac{\partial f(\varepsilon_0, T_0)}{\partial T} (T - T_0) \\ &\quad + \frac{\partial^2 f(\varepsilon_0, T_0)}{\partial \varepsilon \partial T} (\varepsilon - \varepsilon_0)(T - T_0) + \frac{\partial^2 f(\varepsilon_0, T_0)}{\partial \varepsilon^2} (\varepsilon - \varepsilon_0)^2 \\ &\quad + \frac{\partial^2 f(\varepsilon_0, T_0)}{\partial T^2} (T - T_0)^2 + \dots \end{aligned} \quad (2-54)$$

$$\text{令 } \lambda_{B0} = f(\varepsilon_0, T_0); \quad \frac{\partial f(\varepsilon_0, T_0)}{\partial \varepsilon} = \alpha_\varepsilon; \quad \frac{\partial f(\varepsilon_0, T_0)}{\partial T} = \alpha_T; \quad \frac{\partial^2 f(\varepsilon_0, T_0)}{\partial \varepsilon \partial T} = \alpha_{\varepsilon T};$$

忽略二阶以上的高阶项, 有

$$\lambda_B - \lambda_{B0} = \alpha_\varepsilon(\varepsilon - \varepsilon_0) + \alpha_T(T - T_0) + \alpha_{\varepsilon T}(\varepsilon - \varepsilon_0)(T - T_0) \quad (2-55)$$

上式中 α_ε 为温度不变时应变导致的波长变化系数, 由光纤的泊松比, 光弹性系数、折射率等决定; α_T 为应变恒定时温度导致的波长变化, 决定于热光系数及温度膨胀系数; $\alpha_{\varepsilon T}$ 是温度与应变共同作用导致的, 上述因素都会对其产生影响, 可由试验来确定。

上述分析虽然给实际传感测量带来困难, 但是可以用来对测量误差进行估计, 定义下式:

$$\beta = \frac{\alpha_{\varepsilon T}(\varepsilon - \varepsilon_0)(T - T_0)}{\alpha_\varepsilon(\varepsilon - \varepsilon_0) + \alpha_T(T - T_0)} \quad (2-56)$$

则 β 越大说明其两者的耦合作用越大, 反之越小, 实际情况可由试验来验证, 从而判断不考虑应变与温度耦合作用带来的测量误差。

2.4 光纤布拉格光栅智能传感试验

2.4.1 光纤布拉格光栅应变传感试验研究

1) 试验设备及材料

本文采用的光纤是通信用单模光纤, 光栅由紫外侧写入而成, 分别由加拿大 Bragg Photonics Inc. 公司和上海紫栅光电公司加工制作。接头采用通用的光纤 FC/APC 跳线头。布拉格中心波长识别与采集系统采用美国 Micron Optics 公司生产的 FBG-SLI 解调器。该仪器基于 F-P (Fabry-Perrot) 干涉原理对布拉格反射谱中心波长进行解调, 具有很高的波长分辨率, 其主要技术指标为: 波长范围为 1525—1565 nm; 波长分辨率为 1pm; 扫描频率为 108Hz; 最多光栅数为四通道 256 个等。

2) 光纤布拉格光栅应变传感试验与结果分析

为了研究不同中心波长的光纤光栅应变传感特性, 本文采用以下两种方法在室温 (20℃左右) 下进行试验。由于试验的时间很短, 温度没有明显变化, 可以不考虑温度影响。

1) 材料试验机法 将中心波长为 1548nm 和 1554nm 的裸光纤光栅用 502

胶粘剂粘贴于经过抛光处理的弹簧钢板上，并在相应位置布设高精度应变片，然后在万能材料试验机上进行张拉试验，得到的试验结果分别如图 2-4 和图 2-5 所示。

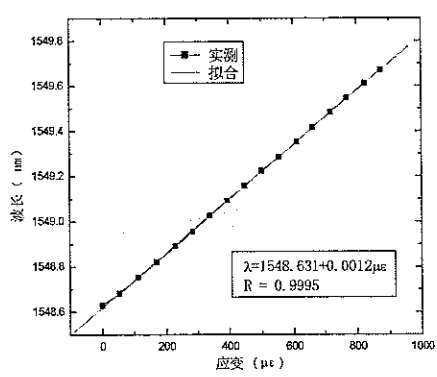


图 2-4 1548nm 光纤光栅波长与应变关系
Figure 2-4 Relationship of wavelength and strain for 1548nm FBG

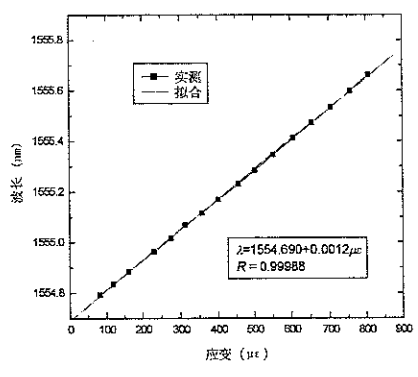


图 2-5 1554nm 光纤光栅波长与应变关系
Figure 2-5 Relationship of wavelength and strain for 1554nm FBG

2) 等强度梁法 将中心波长为 1549nm 的裸光纤光栅用 502 胶粘剂粘贴于 TJ—1 型等强度梁上，并在相应位置布设高精度电阻应变片，通过砝码加载，得到的试验结果如下图 2-6 所示：

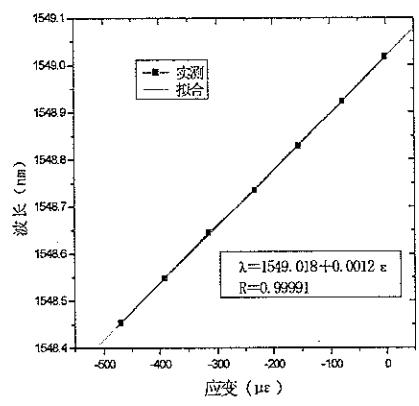


图 2-6 1549nm 光纤光栅波长与应变关系
Figure 2-6 Relationship of wavelength and strain for 1549nm FBG

试验结果可以看出，光纤布拉格光栅的中心波长与应变的相关系数达 0.999 以上，并没有迟滞现象。因此它们存在很好的线性关系，从而证明了光纤布拉格光栅是一种十分理想的应变传感元件。三种中心波长的光纤布拉格光栅在不

同试验方法下得到的波长—应变灵敏度系数均为 $0.0012\text{nm}/\mu\epsilon$ ，即为 $1.2\text{pm}/\mu\epsilon$ ，这与理论分析结果吻合很好，由此证实光纤光栅中心波长的变化对应应变传感系数影响不大，实际测量时可以不予考虑。

2.4.2 光纤布拉格光栅温度传感标定试验

1) 试验准备

温度传感特性标定的可靠性取决于试验温度场的稳定性。为此，为了确证 FRP-OFBG 能否适用环境温度，我们取试验温度场为 $-50^{\circ}\text{C}\sim 80^{\circ}\text{C}$ ，分别在中国计量科学研究院监制的 TYC-1 低温检定无水乙醇槽和水槽中完成，其中 $-50\sim -20^{\circ}\text{C}$ 段在无水乙醇低温试验槽完成，而 $-20\sim 80^{\circ}\text{C}$ 在水槽中完成。试验槽提供的温度场稳定性为 0.01°C 。温度计采用二等水银温度计，精度为 0.04°C 。布拉格中心波长识别系统采用美国 Micron Optics 公司生产的 FBG-SLI (Fiber Bragg Grating—Swept Laser Interrogator)。该标定试验在黑龙江省计量检定测试院完成。

2) 试验结果与分析

将 3 根同批生产的光纤光栅置于温度试验槽中上进行试验，如图 2-7 所示。记录温度计的温度值和光纤光栅的波产值，得到的结果如图 2-8~2-10 所示。

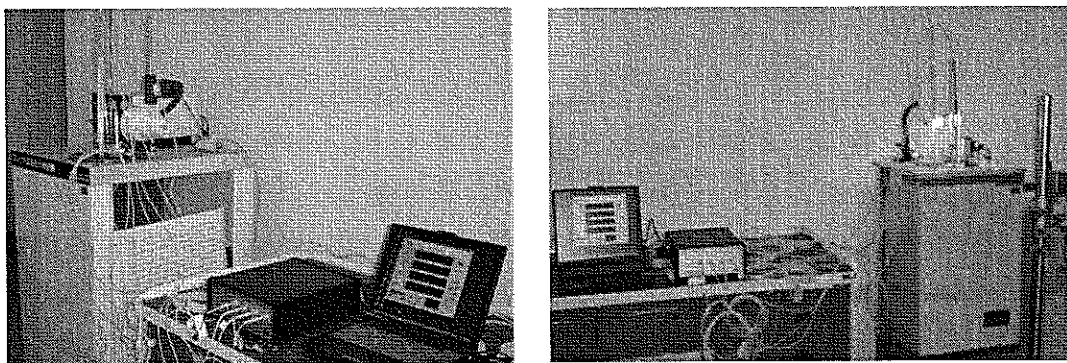


图 2-7 FBG 温度标定试验照片

Figure 2-7 Picture of FBG temperature sensing

由图 2-8~2-10 可以看出，光纤布拉格光栅中心波长与温度的相关系数达 0.999 以上，并没有迟滞现象，证明了光纤光栅具有很好的温度线性响应特性，是一种理想的温度传感元件。在 $-50\sim 80^{\circ}\text{C}$ 范围时，两种光栅试验得到的波长—温度灵敏度系数都为 $0.00937\text{nm}/^{\circ}\text{C}$ 、 $0.00936\text{nm}/^{\circ}\text{C}$ 和 $0.00932\text{nm}/^{\circ}\text{C}$ ，与理论值计算值 $10.8\text{pm}/^{\circ}\text{C}$ 比较接近。由此说明光纤光栅在环境温度下具有很好的温度

传感特性，完全胜任土木工程结构的温度传感需要。在后续的试验或监测过程中，我们采用的同批光纤光栅的温度灵敏系数取上述数值的平均值，即为 $0.00935\text{nm}/^\circ\text{C}$ ，亦为 $9.35\text{pm}/^\circ\text{C}$ 。

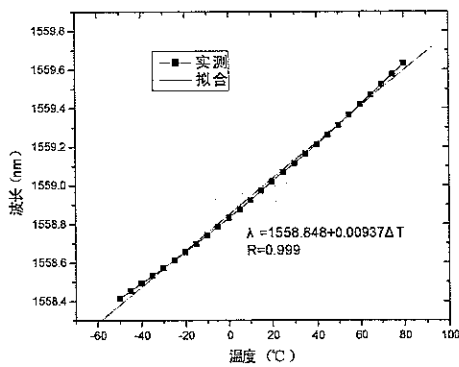


图 2-8 FBG1 温度特性

Figure 2-8 Temperature sensing property of FBG1

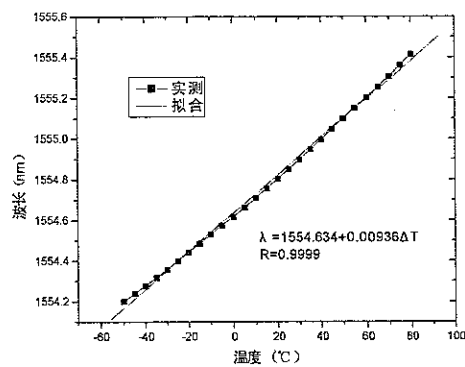


图 2-9 FBG2 温度特性

Figure 2-9 Temperature sensing property of FBG2

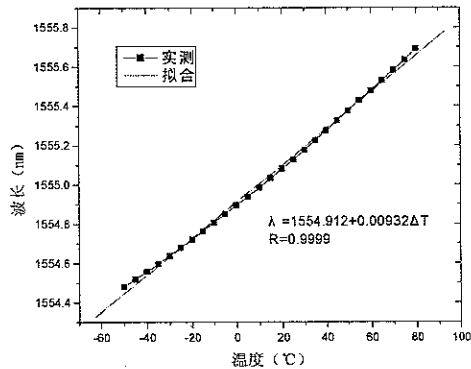


图 2-10 FBG3 温度特性

Figure 2-10 Temperature sensing property of FBG3

2.5 本章小结

首先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，考虑光纤光栅折射率的微扰关系，严格推证了光纤布拉格光栅的传输理论，并得到布拉格方程的基本表达式。然后在布拉格方程的基础上，对光纤光栅应变与温度传感特性分别进行了推证分析，并研究了光栅中心波长

变化对传感灵敏度系数的影响,提出了光纤光栅应变传感的温度补偿方法,理论分析了光纤光栅温度和应变传感的耦合作用。最后通过材料试验和等强度梁试验以及温度标定试验,研究了光纤光栅的应变与温度传感特性。研究表明:

1) 光纤光栅的中心波长与应变和温度有着很好的线性关系,对于中心波长为 1550nm 左右的光纤光栅而言,其应变与温度的灵敏度系数理论计算值分别为 $1.2\text{pm}/\mu\epsilon$ 和 $10.8\text{pm}/^\circ\text{C}$ 左右,试验结果为 $1.2\text{pm}/\mu\epsilon$ 和 $9.35\text{pm}/^\circ\text{C}$,说明了光纤光栅是理想的应变和温度传感元件。

2) 灵敏度误差分析表明,光纤光栅的中心波长小幅度变化对传感灵敏度系数的影响很小,实际工程应用可以不予考虑,说明了光纤光栅是适于结构局部健康监测的理想元件。

3) 光纤光栅对横向应力的灵敏度较纵向小的多,在复杂应力状态下,光纤纵向应力引起的波长变化占主要位置,通常只考虑光纤光栅的纵向应变传感。

4) 由于光纤光栅的应变与温度传感存在耦合作用,应变传感时必须考虑温度补偿,而不受力光栅温度补偿法是最为简单可靠的方法,是兼顾温度量的结构长期局部监测的适用技术。

第3章 光纤光栅封装传感器

3.1 引言

随着光纤通信的发展, 光纤光栅无论在技术成熟度, 还是成本上都已经取得了实质的突破, 将其应用到量大面广的土木工程已经成为现实。很多光电领域的专家学者对光纤光栅的传感特性以及诸多领域的应用作了很多尝试, 取得了较好的成果, 但是, 目前普遍存在一个问题: 光纤光栅传感器的开发者因为缺少应用领域的专门知识, 研究开发的“专业”传感器无法胜任实际的工程需要, 而应用领域的工程师们缺少光纤光栅传感的专门知识, 即使清楚自己的测试需要, 仍无法协调与指导传感器的研究开发, 从而导致了供给与需求的脱节, 这就是“结构健康监测”在土木工程领域的概念与意义虽然已经非常明朗, 但缺少切实可行的局部监测传感元件而没有达到预期效果的根本原因。鉴于此, 针对土木工程结构长期健康监测的实际需要, 充分利用光纤光栅自身的突出优点, 研究开发高质量的适应性强的光纤光栅传感技术具有重要的意义。

目前, 裸光纤光栅的传感特性已经比较清楚, 但是由于裸光纤光栅特别纤细、外径约为 125 微米、主要成分是 SiO_2 , 因此特别脆弱, 尤其它的抗剪能力很差, 直接将其作为传感器无法胜任土木工程粗放式施工, 如混凝土的浇注、钢结构的吊装以及恶劣的服役环境等。因此, 对裸光纤光栅进行二次开发, 即封装或增敏处理, 是将光纤光栅在土木工程领域推广应用的一个重要环节。光纤光栅传感器封装的基本含义是利用高性能材料和灵巧的结构形式, 研究开发出既满足结构实际测试需要, 同时其布设工艺相对简单可靠的智能型传感器。目前, 已有一些学者已经认识到这个问题, 并研究出一些有益的结果, 如 Xu^[125] 等人将光纤光栅固定于中空的玻璃球结构中, 这种装置比裸光栅的压力灵敏度提高了一个数量级; 刘云启^[126] 利用两种聚合物对光纤光栅进行封装, 并研究其压力传感特性, 发现这种封装形式的传感装置压力灵敏度分别是裸光栅的 20 倍和 31.7 倍; 张伟刚^[127] 等人用混合聚合物对光纤光栅进行封装, 并在高低温进行试验, 发现高温时封装光栅对温度不敏感; 董新永^[128] 等人用薄金属管对光纤光栅进行封装, 电流通过该金属管产生热量导致温度变化从而使光栅的波长发生变化, 这种装置可以用来探测电流的大小; 宁提纲^[129] 等人研制了一种负热膨胀

材料对长周期光栅进行封装,降低了光栅的温度敏感系数。综合来看,目前国内外对光纤光栅的传感封装工艺研究很少,尤其是针对土木工程应用的封装技术。

就光纤光栅封装的本质来看,外界的高性能材料并不能改变光纤光栅的固有传感特性,即不会改变其固有的应变与温度传感特性,只是充分利用了高性能材料的变形与温度感应特性,间接地改变了光纤光栅的传感特性。因此,封装光纤光栅传感器的传感特性,并不是光栅自身的,而是封装结构的整体特性。这一基本概念是封装材料的选择与改性以及灵巧结构设计的基本原则。

本章综合考虑土木工程结构,如混凝土结构和钢结构长期变形和温度监测的需要,提出管式封装与片式封装光纤光栅应变传感器以及管式封装光纤光栅温度传感器的基本结构形式,选择合理的封装材料和工艺,研制开发满足土木工程应变与温度监测的光纤光栅封装传感器;最后对其传感特性进行试验研究以及用于结构试验中验证。

3.2 光纤光栅管式封装应变传感器

混凝土结构内部的应变测试一直是困扰土木工程的重要问题,因为混凝土结构属于典型的粗放式施工、服役环境相对恶劣、使用周期长、量大面广的结构形式,传统的传感器远远满足不了实际监测的需要。针对这一问题,同时考虑结构表面的应变测试需要,开发一种结构简单、应变测试精度高、满足结构长期健康监测的光纤光栅管式封装应变传感器十分必要。

3.2.1 传感器封装结构

本文设计的光纤光栅管式封装应变传感器的基本结构形式如图 3-1 和 3-2 所示。适于混凝土结构内部应变监测的光纤光栅管式封装结构主要由毛细金属管、光纤光栅、传输光缆、尾纤、胶粘剂、金属环等组成。考虑混凝土结构的变形特点,即混凝土的应变通常取最大骨料 3 倍距离的平均应变,约为 10cm 左右,而毛细金属管是直接与混凝土接触的传感部位,所以它应该也取 10cm 左右为宜。为了保证毛细金属管能够很好地与混凝土协同变形,在毛细金属管的两侧设置金属环,起到限位的作用。为了防止传输端没有护套的光纤被混凝土冲击,将其封装到毛细管的内部,并将传输光缆的保护套深入胶粘剂中,构成一体。考虑土木工程结构长期健康监测的温度影响与准分布式监测的需要,在尾端设置一段露出的光纤,以便焊接温度补偿光纤光栅或串联其他光纤光栅传感

元件。胶粘剂的主要作用是将毛细金属管与光纤光栅充分地粘结在一起，保证光纤光栅很好地感受混凝土经毛细金属管传递来的应变。

结构表面应变监测的光纤光栅管式封装方式与上述的方法一致，只是取消了金属环。

从光纤光栅毛细金属管封装结构图可以看出，该封装结构即保证了结构应变很好地传递到光纤光栅，同时对光栅起到了很好的保护作用，并保留了光栅的准分布式优点。

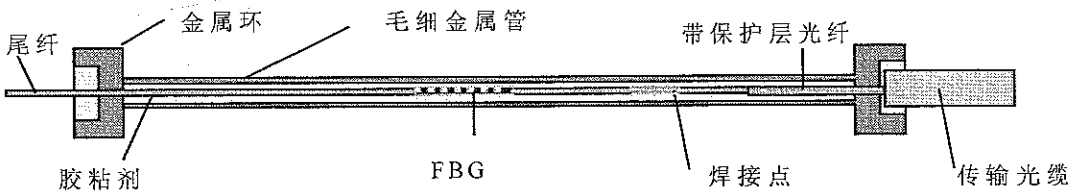


图 3-1 混凝土结构内部应变监测的光纤光栅管式封装示意图

Figure 3-1 Profile of tube packaged FBG for concrete inner strain monitoring

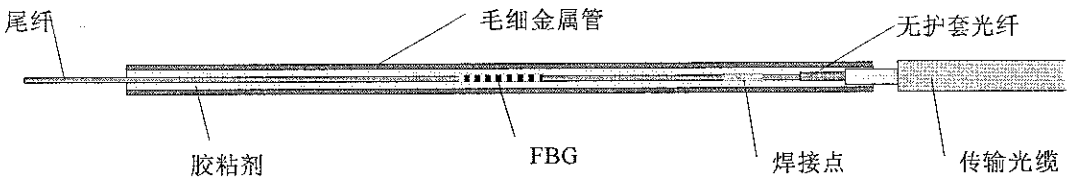


图 3-2 结构表面应变监测的光纤光栅管式封装示意图

Figure 3-2 Profile of tube packaged FBG for surface strain monitoring

3.2.2 封装材料选择

光纤光栅毛细金属管封装主要用到两种材料：毛细金属管材和胶粘剂。为了保证毛细金属管能够很好地传递结构应变，并满足结构健康监测要求，这种金属材料必须具有：耐腐蚀、疲劳特性好、弹性范围宽、与混凝土粘结性能好等特点。考虑不锈钢与混凝土有很好的粘结性，其温度膨胀系数也基本一致，而且具有较好的抗腐蚀性能，我们选用不锈钢作为毛细金属管材。若是针对腐蚀环境过于恶劣的环境，如海洋平台结构，毛细钛合金管是理想的选择。胶粘剂的选择也必须考虑结构应变传递和长期监测需要，因此胶粘剂必须适于光纤和不锈钢的粘结性能，而且具有较高的抗剪强度和耐久性，并能满足封装过程