中文摘要

摘要:本文旨在提出一种简单易行的光纤光栅传感器,使其能应用在一些对 成本有严格要求,对精确要求不是很高的环境中,进一步扩大光纤光栅传感器的 适应范围。

首先针对双光纤光栅传感器做相应的理论分析,然后设计了一种用双啁啾光 纤光栅来实现的应力传感器及一种用保偏光纤光栅来实现的温度传感器:

- 分析了光纤光栅的温度传感原理和应变传感原理,总结了温度与应变交叉 敏感解决办法及封装技术的进展;
- 在光纤布拉格光栅的耦合模理论基础上推导出啁啾光栅和保偏光栅的特 性并得到了相应的仿真图;
- 3) 提出了一种双啁啾光纤光栅应力传感器,并将设计的双啁啾光纤光栅应力 传感器与单片机结合成功构建了一种新型的公路交通流量监视系统。首先 利用单片机的接口技术将传感器输出的模拟信号转化成数字信号,然后用 单片机编程实现数据的处理及分析,成功的通过检测电压的变化来进行轮 轴识别,最后用单片机进行采样运算比较,判断车型。建模仿真结果证明, 此监控系统能很好的识别各种车型,完成对公路交通流量的监控;
- 4) 在研究了保偏光纤光栅特性之后提出了一种温度传感器,利用保偏光纤光 栅构成的激光器来实现温度的传感。从理论上仿真验证了此传感器的可行 性。

关键词:双光纤光栅传感器;温度传感器;应力传感器;啁啾光栅;保偏光纤光 栅

分类号: TN253

iii

ABSTRACT

ABSTRACT: In this work, a simple optical fiber grating sensor is proposed and demonstrated. It can find applications in special environments with lower cost and accuracy, and also it will expend the application of fiber grating sensor.

First of all, we analyze the theory of the dual-fiber Bragg gating sensors. Then we design a stress sensor based on double-chirped fiber grating and a temperature sensor based on double polarization maintaining fiber grating.

- 1) This part consists of three points, namely, the theories of temperature sensor and strain sensor, the solution of temperature and strain cross-sensitivity, and the progress of packaging technology.
- 2) According to the coupled mode theory, we derive the characters of chirped grating and polarization maintaining fiber grating. Simulations are carried out.
- 3) A double-chirped fiber grating stress sensor is proposed in this part. A new traffic monitoring system is constructed based on the combination of the new sensor and single chip. In the proposed scheme, the analog signal is first converted to the digital signal through the single chip interface technology, and then we develop a MPU programming to process acquired data. Finally, the system successfully identifies the axle by detecting voltage changes, and determines the vehicle mode through single chip sampling operations. The results shows that the traffic monitoring system could identify the vehicle mode correctly, accomplish traffic flow monitoring.
- 4) A temperature sensor is proposed based on polarization maintaining fiber grating. By using this sensor and optical maser, the temperature sense could be accomplished. This paper verified the feasibility of the sensor through numerical calculation and simulation.

KEYWORDS: Double fiber grating sensor; temperature sensor; stress sensor; chirped grating; polarization maintaining grating sensor **CLASSNO:** TN253

致谢

本论文的工作是在我的导师宁提纲教授的悉心指导下完成的, 宁提纲教授严 谨的治学态度和科学的工作方法给了我极大的帮助和影响, 我将受益终生。在这 二年多来, 无论在学习方面, 生活方面, 还是思想方面, 宁老师都密切关注着我 的动态, 鼓励我, 支持我, 帮助我。借此机会, 在此衷心感谢这二年多来宁提纲 老师对我的关心、指导和帮助。

周倩、李晶、彭万敬、尹国路、冯树春博士对于我的科研工作和论文都提出 了许多的宝贵意见,在此表示衷心的感谢。

在实验室工作及撰写论文期间,曹毅、吕济根、师家红、毕重颖等同学对我 的工作给予了热情帮助,在此向他们表达我的感激之情。

另外也感谢我的家人,他们的理解和支持使我能够在学校专心完成我的学业。

t

1 引言

光纤是现代化通信网中传输信息的媒质,早在 1966 年的时候,一个在英国实验室工作的英籍华人高馄就大胆地提出了可以将高速的信息光脉冲发送到一根纤细的玻璃丝中的概念,并且做了一系列的实验去验证这个概念,最终证明这个概念是正确的。接着,1970 年美国康宁公司实现了可在室温下连续工作的低损耗光纤和半导体激光器,从而揭开了光纤通信的序幕。而后激光和低损耗光纤的相继问世推动了光纤通信的迅猛发展^[1]。

光纤光栅是利用光纤材料的光敏性,通过紫外光曝光的方法将入射光相干场 图样写入纤芯,在纤芯内产生沿纤芯轴向的折射率周期性变化,从而形成永久性 空间的相位光栅,其作用实质上是在纤芯内形成一个窄带的(透射或反射)滤波 器或反射镜。

1.1 光纤光栅传感器的发展历史及应用现状

1978年,加拿大通信研究中心(Canadian Communication Research Centre)的 K. O.Hill 等人在实验中将波长为 488nm 的氩离子激光入射到掺锗的光纤中^[2],观察到 两束反向传播的 488nm 氢离子激光在光纤中形成的驻波干涉条纹能够导致光纤折 射率沿光纤轴向周期性变化,而且这种变化是永久性的,这就是所谓的"Hill 光栅" ^[3]。这种被称为"Hill 光栅"的器件具有极好的波长选择性,对某一极窄带宽内光 波的反射率接近 100%,而其它波长的光则可以全部通过。"Hill 光栅"的出现,是 掺锗石英光纤非线性研究的重大成果,标志光纤光栅的诞生。但这种光栅响应波 长受激光写入波长的限制,而且具有入射效率低等缺点,使得在很长一段时间里, 这本具有非常大的开发潜力的光子器件及其制作技术并没有得到人们的足够重 视。

1989年,美国东哈特福联合技术研究中心(United Technologies Research Center) 的 GMeltz 等人利用两束相干紫外光形成的干涉条纹从光纤的侧面写入了可以用 于光纤通信红外波段的光折变光纤光栅^[4],发明了紫外侧写入技术。这种方法被称 为横向全息成栅技术 (Transverse Holographic)。相比 Hill 提出的光栅写入法,这种 光栅写入技术不仅提高了光栅的写入效率,而且通过改变两束相干光的夹角,还 可以改变光栅周期,这样就能控制光纤光栅的布拉格波长。另外这种技术可以写 入 Bragg 波长在红外波段的光纤光栅,使制备的光纤光栅在光通信领域中具有潜 在的应用前景。

1993 年, K.O.Hill 等人提出了相位掩模成栅技术,它们先用紫外激光通过相 位模板后的+1级衍射光,这些衍射光相干形成了周期性的明暗条纹,用这些明暗 条纹对光纤进行曝光[5],从而制作出光纤光栅。这项技术对写入光源时间相干性的 限制放宽了,大大降低了光纤光栅的制作难度。正是因为有了相位板写入技术, 光纤光栅才有了一种能大批量复制的能力,这样光纤光栅才真正走向了实用化、 产品化。相位掩模法是到现在为止最成熟的 Bragg 光纤光栅的制备方法,在对激 光光源相干性的要求降低的同时,制备的复杂程度也大大降低,从而大大简化了 光纤光栅的制备过程,这些优点使得光纤光栅的制备过程变得简单化。同年,Bell 实验室的 P.J.Lemaire 等人使用光纤载氢技术简单而有效的增强了光纤的光敏性。 这种方法适用于任何掺锗的光纤。通过光纤的载氢能够将光纤的光敏性上升两个 数量级。这样,可以避免使用价格昂贵的高浓度掺锗光纤,普通便宜的通信光纤 就能容易地制作出高反射率的光纤光栅。光纤高压载氢技术与相位掩模成栅技术 的相结合,使得制作光纤光栅的成本大大降低,从此以后,光纤光栅器件逐渐往 经济化,实用化的方向发展。随着光纤光栅技术的成熟,各国对光纤光栅的研究 飞速发展起来,光栅的写入法不断得到改善,光纤的光敏性逐渐提高,一些特种 光栅也相继问世,各种具有不同传输性能的光纤光栅相继被研制出来,基于光纤 光栅的各种器件不断涌现,促使光纤光栅应用于光纤通信,光纤传感和光信息处 理等众多领域。

光纤光栅的出现使许多复杂的全光通信和传感网络成为可能,并极大地拓宽 了光纤技术应用范围。经过十多年来的研究,已基本探明了光纤光栅传感的机理, 多种用于测量各种物理量的结构光纤光栅传感器已被制作出来。目前,光纤光栅 传感器可以检测的物理量包括应变、应力、温度、陀螺、位移、液面、扭角、转 矩、光声、加速度、电压、压强、电流、磁场、频率、浓度等。与传统的基于电 学量的传感器比较,光纤光栅传感器具有许多独特的优点:

 可靠性好、抗干扰能力强。由于光纤光栅对被感测信息用波长编码,而波 长不受光纤弯曲等因素引起的系统损耗的影响,也不受光源功率波动的影响,它 是一种绝对参量,因此基于光纤光栅的传感器具有很高的可靠性和非常好的稳定 性。

2) 传感探头结构简单小巧,适用于各种不同的应用场合,尤其适合于埋入材料内部构成所谓的智能材料或结构,对智能材料或结构的安全性、损伤程度、载荷疲劳等状态进行连续实时监测。

3) 测量结果具有良好的重复性,光纤光栅经封装后,传感器的使用寿命可大大提高。在不对光纤光栅进行机械硬损伤的前提下,可在测量工作范围内对传感量进行多次重复测量。

4) 光纤光栅传感器可以在对光纤光栅进行定标后作绝对测量,不必像基于条 纹计数的干涉型传感器那样要求初始参考。

5) 可复用性强,采用多个光纤光栅传感器,可以构成分布式光纤传感网络, 进行大范围的多点测量。

6) 光纤光栅可进行多个参数的传感。利用一个或者多个光纤光栅级联,或者利用一个光纤光栅与其它传感器结合,通过测量偏振态、谐振波长等参量的变化就可以实现对多个参数的传感。

7) 光纤光栅的写入技术已比较成熟,便于大批量生产光纤光栅,使得其生产的成本大大降低,整个光栅传感器的成本也由此降低,更有利于传感器的推广使用。

光纤光栅传感器由于具有上述诸多优点,因而被广泛应用于各行各业^{[6]-[9]}。

1) 民用工程中的应用

民用工程结构的健康监测日益引起人们的重视,基础结构的状态,力学参数 的测量对于桥梁、大坝、隧道、高层建筑和运动场馆的维护是至关重要的,通过 测量建筑物的分布应变,可以预知局部荷载的状态。光纤光栅传感器既可以贴在 现存结构的表面,也可以在浇筑时埋入结构中对结构进行实时测量,监视结构缺 陷的形成和生长。另外,多个光纤光栅传感器可以串接成一个网络对结构进行分 布式检测,传感信号可以传输很长距离送到中心监控室进行遥测。因此在民用工 程中,光纤光栅传感器成为结构监测的最重要手段。目前,应用光纤光栅传感器 最多的领域当数桥梁的安全监测^[10]。

俄勒冈哥伦比亚河谷上的 Horsetail fall 桥在 1914 年建的时候没考虑到现今的 交通要求,后来采用纤维增强塑料复合材料对桥梁进行加固。为了监视加固后的 结构情况,28 个光纤光栅传感器安装在两根复合材料加固的混凝土梁上,从1998 年起至今,每个月用便携式光谱仪测量一次数据。

瑞士应力分析实验室和美国海军研究实验室,在瑞士洛桑附近的 Vaux 箱形梁 高架桥建造过程中,用了 32 个光纤光栅传感器对箱形梁被推拉时的准静态应变进 行监测,32 个光纤光栅分布于箱形梁的不同位置、使用扫描法-泊系统进行信号解 调。

2) 在水位遥测中的应用

在光纤光栅技术平台上研制的高精度光学水位传感器专用于江河、湖泊以及 排污系统水位的测量。传感器的精度可达到±0.1%F•S。光纤安装在传感器的内 部,由于光纤纤芯折射率的周期性变化形成了光栅,并反射符合布拉格条件的某 一波长的光信号。当光栅与弹性膜片或其它设备连接在一起时,水位变化会拉伸 或压缩光栅。而且,反射波长会随着折射率周期性的变化而发生变化。这样,根 据反射波长的偏移就可以监测出水位的变化。

3) 航空航天中的应用

航空航天业是一个使用传感器非常密集的地方,为了监测一架飞行器的应变、 温度、振动、起落驾驶状态、燃料液位、超声波场和加速度、机翼和方向舵的位 置等情况,通常需要使用 100 多个传感器,要求传感器重量要尽量轻,尺寸尽量 小,光纤光栅传感器只有一根光纤,敏感元件制作在纤芯中,从尺寸及重量的角 度来讲恰好合适。因此最灵巧的光纤光栅传感器是最好的选择。另外,嵌入材料 中的光纤光栅传感器可实现多点多轴向应变和温度测量,非常适用于飞机的复合 材料存在两个方向应变的情况^[11]-{14]。

4) 电力工业中的应用

光纤光栅传感器和其它的光纤传感设备一样,具有不受电磁干扰、绝缘的特性,非常适合应用于电力工业中。电力工业的设备大多处在强电磁场中,一般电器类传感器无法使用。高压开关的在线监测,高压变压器绕组、发电机定子等地方的温度和位移等参数实时检测都要求传感器绝缘性能好,体积小,并且是无源器件。光纤光栅具有的抗电磁干扰和它的安全性能恰恰满足在这种环境条件下使用。目前,光纤光栅传感器己经应用在高压线负荷的测量,测量变压器线圈温度等电力工业相关参量的测定,随着应用的增加,科学技术的发展,光纤光栅传感器制作成本必将迅速下降,光纤光栅传感器将会在更多的新领域得到应用。所以光纤光栅传感器在电力工业中的应用前景非常好^{[15][16]}。

5) 核工业中的应用

核工业是高辐射的地方,核泄漏对人类是一个极大威胁,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。由于核装 置的老化需要更多的维护和修理,最终必须被拆除,所有的这些都不能在设计时 预见,因此需要更多传感器以便遥控设备,处理不确定情况。同时核废料的管理 也变得越来越重要,需要有监测网络来监视核废料站的状况,对监视网络长期稳 定的要求也是前所未有的。

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深入研究, 他们实验测量了各种商用光纤光栅对 C 辐射的敏感性。他们的研究结果表明:光 纤光栅温度敏感系数在 3%的精度内不受 C 辐射影响;光纤光栅反射波幅度和宽度 在 C 辐射下没有变化;光纤光栅波长在 C 辐射下变化不大于 25pm,并且 C 辐射 剂量到达 0.1MGy 时,波长变化饱和。他们认为可通过优化光纤光栅的参数减小 C 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,而且也会增加对离化辐射的敏感性。

日本核能研究院 1999 年 4 月~2000 年 3 月的年度报告中提到,他们正在本国

测试材料反应堆,通过辐射环境的测试来确保光纤光栅用于核电厂设备和管道的 传感。

6) 医学中的应用

传统医学中所用到的传感器多为电子传感器,由于电子传感器中金属导体很 容易受电流、电压等电磁场干扰而引起传感头周围热效应,这样会导致错误的读 数,这对许多的内科手术是不适用的,尤其是在高微波(辐射)频率、超声波场或激 光辐射的过高热治疗中。近年来,使用高频电流、微波辐射和激光进行热疗以代 替外科手术越来越受到医学界的关注,增大诊断超声系统的超声波输出并拓宽高 密度超声波的医疗应用也是一种趋势,而且传感器的小尺寸在医学应用中也是具 有重要意义的,因为小尺寸对人体组织的伤害较小,而光纤光栅传感器正是到现 在为止能够做到的最小的传感器之一。到目前为止,光纤光栅传感器正是到现 在为止能够做到的最小的传感器之一。到目前为止,光纤光栅传感系统已成功地 检测了病变组织的温度和超声波场,光纤光栅传感器还可用来测量心脏的效率。 在这种方法中,医生把嵌有光纤光栅的定向热稀释导管插入病人心脏的右心房, 并注射一种冷溶液,可测量肺动脉血液的温度,结合脉功率就可知道心脏血液输 出量,这对于心脏的监测是非常重要的。

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出的一种光纤光栅 压力传感器用于外科校正,以便帮助医生监视患者的健康。埋有光纤光栅阵列的 脚压传感垫配上绘图设备可以绘出外科校正压力空间图形,能用于监视患者站立 时的脚底压力分布。

7) 石油工程领域应用

传感器在石油工业中有着极其广泛的应用;例如温度压力测量、流量测量、 测井技术、地震检波技术、长距离管线检测等。但由于石油工业领域中恶劣的外 部环境,给传感器提出了更高的要求,要求结构小巧,并能克服油井中高温、高 压、强腐蚀、易燃易爆、高损耗等恶劣条件。传统电类传感仪器用于这种地方的 测量存在不安全因素,不适合这种在石油工业中的测量。但光纤光栅传感器因其 本质安全性而非常适合在石油工业中应用。

油井井温在石油勘探、开采和生产中是一个及其重要的参数,它对确定油层 的位置、油层的厚度等具有决定性的意义。分布式光纤光栅测温系统的研究为油 井温度的测量提供了一种新的方法,系统采用与光纤光栅天然相容的光纤作为媒 体,因为光纤具有芯径细小、本身绝缘的特点,所以此系统具有安全、可靠、抗 电磁干扰强的优点、并且在恶劣的环境中可以对形状复杂的温度场进行实时的快 速的定位与检测^{[17] [18]}。

除上述应用之外,光纤光栅传感器还在其它很多领域得到了应用,并且许多 方面的性能都比传统机电类传感器更可靠、更稳定、更准确。而且如果在光纤若

干个不同部位写入不同栅距,这样形成的光纤光栅可同时测量若干个不同部位相 对应的物理量及其变化,从而实现准分布式的光纤传感。总之,光纤光栅传感器 的应用是一个方兴未艾的领域,有巨大的发展空间。

1.2 课题研究的目的及意义

随着光纤光栅传感器的广泛应用,越来越多的非常精确的传感器不断被提出 来,但同时其制作工艺复杂,价格高昂,而在一些领域对传感器的精度要求并不 高,像公路交通流量监测,只要当车压过时能够探测出来就可以了,而车的重量 非常高,也就是说只要当一个非常大的压力经过时传感器能够探测出来就可以了, 而不一定要探测出具体受多大的力,同样,铁路隧道的火灾及山体滑坡的预防也 只需要这样一个传感器就可以了,在一个非常高的温度或非常大的力加载时能够 探测出来就可以了,而不必测出具体的值。这样就需要一个制作工艺简单,价格 低廉的传感器。本文所提的啁啾光纤光栅应力传感器就是这样一种传感器,它的 提出让光纤光栅传感器能应用在一些对成本有严格要求的环境中,进一步扩大了 光纤光栅传感器的适应范围。为了验证这个啁啾光纤光栅应力传感器,本文将其 与单片机结合应用在对公路交通流量的监控,通过建模仿真实验得出:本方案为 公路交通流量监测提供了一种行之有效的方式,使道路交通的监测不用仅靠摄像 监控一种手段,而且由于本方案具有建设和维护成本低的特点,特别适合中小城 市道路交通的监控,我们相信这套方案的实现对公路交通流量监测技术的发展具 有积极的意义,同时其低廉的成本也具有广阔的市场前景,希望将来能够实现其 产业化。

本文还提出了利用保偏光纤光栅来实现温度传感的方案,利用保偏光纤光栅 的反射谱具有双峰的特性,将保偏光栅激光器与温度传感巧妙的结合在一起,通 过验证发现,将保偏光纤光栅与温度传感结合起来,能很好的发挥出各自的优势, 这种温度传感器进一步提高了传感器的精度、可靠性并且其生产价格相对传统温 度传感器更低廉,更经济。

1.3 本文研究的主要内容及各章节安排

本文针对双光纤光栅传感器进行了相应的分析并设计了一种用双啁啾光纤光 栅来实现的应力传感器及一种用保偏光纤光栅来实现的温度传感器。依据课题的 研究内容对结构作了如下安排:

第一章描述了光纤光栅传感器的发展历史及应用现状,概括了本文研究的主

要内容及课题研究的目的和意义。

第二章说明了光纤光栅传感器的传感原理及封装技术,包括温度传感,应力 传感及封装材料、封装结构、封装粘贴剂的研究。同时介绍了对温度与应变交叉 敏感方面的研究。

第三章阐述了双啁啾光纤光栅应力传感器的研究,包括啁啾光纤光栅的光谱 特性及仿真分析、双啁啾光纤光栅应力传感器的工作原理及将此传感器与单片机 结合应用在公路交通流量监测时建模仿真的过程与实验结果讨论。

第四章阐述了保偏光纤光栅温度传感器的研究,包括保偏光纤光栅的光谱特 性及仿真分析、保偏光纤光栅温度传感器的工作原理及结果仿真。

第五章总结了论文的主要工作及对后续的展望。

2光纤光栅传感原理及封装技术

光纤光栅是由紫外光写入到光纤纤芯中形成的全息衍射光栅,作为一种相位 光栅,其纤芯折射率变化大致呈周期分布。根据耦合模理论,当宽带光在光纤光 栅中传输时,将会产生模式耦合,满足布拉格条件的光波将反射回入射端,而其 他波长的光则会透射过去,这样入射光就分成了透射光和反射光。光栅的反射波 长或透射波长取决于反向耦合模的有效折射率 n_{ef}和光栅的周期Λ,当光纤光栅所 处环境的温度、应力或其它物理量发生变化时,光栅的周期Λ或纤芯折射率 n_{ef} 也 随之改变,从而使反射光波长发生变化。通过测量反射光波长的变化,就可获得 待测物理量的变化情况。根据这个特性,人们已经研制出基于超结构、布拉格、 长周期等多种结构的光纤光栅传感器,通过检测光纤光栅波长的漂移量或带宽变 化量,可以推测待测物理场的状态。目前,光纤光栅传感器已应用于应变、应力、 温度、陀螺、位移、液面、转矩、光声、加速度、电流、电压、压强、磁场、频 率、浓度等多种物理量的检测^{[19][20][21]}。

光栅 Bragg 条件: $\lambda_{B} = 2\Lambda n_{eff}$ (2-1)

其中 λ_B为 Bragg 波长, n_{eff} 表示光栅的有效折射率,即折射率调制幅度大小的 平均效应, Λ为光栅周期,即折射率调制的空间周期。

将(2-1)式两边微分:

$$d\lambda_{B} = 2\Lambda dn_{eff} + 2n_{eff}d\Lambda \tag{2-2}$$

由(2-1)和(2-2)得

$$\frac{d\lambda_B}{\lambda_B} = \frac{dn_{eff}}{n_{eff}} + \frac{d\Lambda}{\Lambda}$$
(2-3)

从(2-3)式可以得出:只要改变了光栅的周期或光栅的有效折射率,就对应的 改变了光栅的中心波长。当光纤光栅在受到外界的应变作用时,它的周期会发生 改变,同时光弹效应会导致光栅的有效折射率也会发生改变。同样,当光纤光栅 受外界温度的影响时,它的周期会因热膨胀而发生改变,同时光栅的有效折射率 也会因热光效应而发生变化;目前存在的基于光纤光栅的各种各样的传感器的工 作原理大体上都是利用应变或温度的变化来改变光栅的中心波长,从而达到检测 被测物理量的目的。

2.1 光纤光栅的传感原理

2.1.1 温度传感特性

若只考虑光纤受到温度的影响,温度对光纤的影响主要体现在两方面:热光 效应使折射率改变以及热膨胀效应使光栅的周期改变。

将(2-3)式写为:

$$\frac{d\lambda_B}{\lambda_B} = \left(\frac{dn_{\text{eff}}}{n_{\text{eff}} \cdot dT} + \frac{d\Lambda}{\Lambda \cdot dT}\right) \cdot dT \tag{2-4}$$

令 $\frac{dn_{eff}}{n_{eff}} = \zeta, \zeta$ 为热光系数, $\frac{d\Lambda}{\Lambda \cdot dT} = \alpha, \alpha$ 为热胀系数,可得:

$$\frac{d\lambda_B}{\lambda_B} = (\zeta + \alpha) \cdot dT \tag{2-5}$$

$$\Leftrightarrow K_T = \lambda_B(\zeta + \alpha) \tag{2-6}$$

 K_r 为光纤光栅温度传感灵敏度系数,则

$$\Delta \lambda_{B} = K_{T} \cdot \Delta T \tag{2-7}$$

由公式(2-7)可知, Δλ_g与ΔT 有着良好的线性关系^[22]。由于掺杂成分不同,掺 杂浓度也不同,所以各种光纤的膨胀系数 α 和热光系数 ζ 有着很大的差别,因此 各种光纤的温度灵敏度系数差别会比较大。当光栅的制作条件不同及退火工艺的 条件不同时,光纤光栅的温度灵敏度也会有一点点差异。

2.1.2 应变传感特性

若只考虑光纤受到轴向应力的作用,则应力对光纤光栅的影响主要体现在两 个方面: 弹光效应使折射率改变和应变效应使光栅的周期改变。假设光纤光栅的 温度保持不变,可得轴向应变引起的光栅布拉格波长变化如式(2-3)

其中线弹性范围内有

$$\frac{d\Lambda}{\Lambda} = \frac{dL}{L} = \varepsilon \tag{2-8}$$

 ε 为光纤轴向应变导致的光栅周期变化。

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:

$$\frac{dn_{eff}}{n_{eff}} = -\frac{1}{2}n_{eff}^2 [p_{12} - \mu(p_{11} + p_{12})]\varepsilon = -p\varepsilon$$
(2-9)

其中 p_{11} , p_{12} 是轴向应变导致光纤纵向和横向折射率变化的系数, μ 是光纤材 料的泊松比, $\frac{1}{2}n_{eff}^2[p_{12} - \mu(p_{11} + p_{12})] = p$, p为弹光系数。

将(2-8) (2-9)代入(2-3)得:

$$\lambda_{\rm B} = \varepsilon (1-p) \tag{2-10}$$

上式为光纤布拉格光栅轴向应变下的波长变化表达式,当光纤光栅材料确定 后,光纤光栅对应变的传感特性系数基本上就是一个与材料系数相关的常数,光 栅的中心波长与应变表现出很好的线性关系。令

$$\lambda_{B}(1-p) = k_{S} \tag{2-11}$$

k.为光纤轴向应变与中心波长变化的灵敏度系数。则

$$\Delta \lambda_{B} = k_{\varepsilon} \varepsilon \tag{2-12}$$

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 长的变化转化为应变的变化量^[20]。

由上述分析可知,由于光纤光栅传感器同时对温度和应变敏感,当同时考虑 应变与温度时,弹光效应与热光效应会共同引起折射率的改变,应变和热膨胀会 共同引起光栅周期的改变。这样就很难分辨出应变和温度分别引起的波长变化, 因此在实际应用中必须采取措施进行区分。

2.1.3 光纤光栅的温度与应变交叉敏感

从 1993 年起,人们就已经开始研究光纤光栅温度和应力的交叉敏感问题。就 目前的研究进展来看,已提出了多种方案并取得了很大进展。近些年来,更是不 断有新的解决方案出现,这些方案各有优点,适用于各个不同的场合。但是,如 果将所有的目前已公开报道的解决方案统计起来再细分的话,可分为以下三类: 压力去敏、温度去敏(即温度补偿)、温度压力同时区分测量^[23]。下面分别从这几 类传感器的特性出发,列出几种典型的解决方案。

1、压力去敏

对光栅方程进行 Talor 展开式运算时,可以得到:

$$\Delta\lambda_{B} = K_{\varepsilon}\Delta\varepsilon + K_{T}\Delta T + K_{\varepsilon T}\Delta\varepsilon\Delta T + K_{\varepsilon^{2}}(\Delta\varepsilon)^{2} + K_{\varepsilon^{2}}(\Delta T)^{2} + \dots \qquad (2-13)$$

由上式可知,引起波长 $\Delta \lambda_{B}$ 变化的不仅仅是 $\Delta \varepsilon$ 、 ΔT ,还有它们的交叉项和 高阶项,高阶项对波长改变的作用随 ΔT 、 $\Delta \varepsilon$ 的增大而增大,当 ΔT 、 $\Delta \varepsilon$ 很大时, 波长随 ΔT 、 $\Delta \varepsilon$ 变化是非线性的,而当 ΔT 、 $\Delta \varepsilon$ 的变化范围不是很大时, ($\Delta \varepsilon$)² 和 (ΔT)² 的高阶项与前面的一次项及交叉项相比可以忽略,因此上式变成:

$$\Delta \lambda_{R} = K_{c} \Delta \varepsilon + K_{\tau} \Delta T + K_{c\tau} \Delta \varepsilon \Delta T \qquad (2-14)$$

忽略由二阶以上响应灵敏度所产生的非线性效应,从(2-14)式不难看出,如果 没有光纤的轴向应变ε,那么Δλ_g与温度表现出线性关系,则只要光栅处于恒压条 件,便可消除交叉敏感^{[24][25]}。

2、温度补偿

在实验室中,虽然可把光纤光栅压力传感器置于温控装置,进而对其压力特 性进行研究,但在实际应用中,温度却是一个不定的参数,再稳定的恒温环境也 会有波动出现,即光纤光栅压力传感器的交叉敏感问题。研究人员针对这一问题 研究出了不少温度补偿方法,温度补偿法是指使用某种方法或装置将温度扰动引 起的波长漂移剔除掉,从而使应变测量不受环境温度的影响。

目前主要分为温度的过程补偿与结果补偿,过程补偿是指在对应变进行测量 的过程中,温度效应会自动抵消,主要的方法有啁啾光栅,不同光纤对接等。结 果补偿是指在测量后对结果进行某种运算或处理从而剔除或剥离温度效应。温度 补偿对封装技术要求较高,而且对光栅能起到一定的保护作用,但对解调要求稍低。

温度补偿封装法的优点是结构简单、制作简便、经济实用。在每个测量点上 只需要铺设 1 个光栅,不仅可有效地解决温度和应变的交叉敏感问题,还能保护 光纤光栅。根据实际工程应用中各种各样的要求,可以选择合适的封装材料使光 纤光栅传感器在某些特殊的化学环境中具备更高的抗化学腐蚀性,使得光纤光栅 传感器能够更加适用于各种各样条件相对恶劣的工业环境。另外,由温度补偿封 装法制造的传感器具有很多优点,它更加适用于大负载、小温差、大应变、长时 间的工程应用环境,通过对光纤光栅进行封装保护,还可最大可能地保证其成活 率,施工过程中的缓冲与防潮等问题。但是,因为影响光纤光栅波长变化的不仅 仅只有温度膨胀一个因素,组合材料的膨胀、热光系数比等因素也同样影响着光 纤光栅波长的变化,因此,温度补偿封装法只是消除了光纤光栅热敏的热膨胀部 分,并没有消除光敏部分。所以,如今现有的光纤光栅温度封装技术,一方面, 它降低了温度响应的灵敏度,但与此同时它对封装材料的膨胀系数、封装结构的 稳定性等方面也提出了更高的要求^[26]。

3、温度应力同时区分测量

就目前能够实现温度压力同时区分测量的解决方案来看,绝大多数都是基于4 种方法:双波长矩阵法;双参量矩阵法;参考 FBG 法以及改变光纤本身参量。下

面对其进行详细讨论:

1) 双波长矩阵运算法

单个光栅波长无法区分由应力和温度分别引起的波长变化。若要实现同时区 分测量,必须同时测量两个中心波长的变化。双波长矩阵法是当前应用得比较广 泛的一种解决方法。其基本原理是利用两个参量一起对应变和温度进行波长编码。 由于灵敏度系数的不同可以构成两个独立的方程。选择使用 2 个不同参数的光栅 对同一点进行应变和温度测量,在安装光栅时应使它们之间的距离足够近,以保 证它们所受到的应变与所处的温度环境相同。这样,可得到矩阵方程如下:

$$\begin{bmatrix} \Delta \lambda_1 \\ \Delta \lambda_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{T1} K_{\varepsilon 1} \\ K_{T2} K_{\varepsilon 2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta T \\ \Delta \varepsilon \end{bmatrix}$$
(2-15)

K_{T1}、K_{s1}分别为光栅 1 的温度和应变灵敏度; K_{T2}、K_{s2}分别表示光栅 2 的 温度和应变灵敏度, ΔT 和 Δε 代表温度和应变相对于参考值的相应变化。通过检 测光栅 1 的中心反射波长 λ 和光栅 2 的中心反射波长 λ 的变化再解方程组即可确 定应变和温度的大小,为使方程组有解,需满足条件

$$\frac{K_{T1}}{K_{T2}} \neq \frac{K_{s1}}{K_{s2}}$$
(2-16)

即这种同时测量的方法要求两个光栅有不同的应力和温度灵敏系数。另外值 得注意的是,变化值 ΔT 和 $\Delta \varepsilon$ 的准确性程度取决于所用光栅之间温度和应变灵敏 度的相对差异, $K_{r1} = K_{r2}$ 和 $K_{s1} = K_{s2}$ 之间的差异越大,获得的 ΔT 和 ε 的准确度 越高。因此,该方案要求两个光栅有不同的应变或温度灵敏系数,并且两光栅的 灵敏度系数差异越大,获得的温度与应变的准确程度越高。

双波长矩阵法在试验研究方面有很大的优越性,因其易于复用,布设简单, 非常容易实现分布式网络化检测,同时也很容易嵌入到智能结构或复合材料中, 嵌入之后并不影响原结构性能。所以,双波长矩阵法适用于一些相对比较干净和 稳定的理想试验环境中,但对于一些环境比较差的应用场合,这种方法很难达到 理想测量效果。而且双波长矩阵法要求两个波长的光栅必须满足条件(2-16)且差别 越大越好,同时还要求两光栅中心波长相差必须足够大,如果处于同一波段的光 纤光栅参数相近,容易导致组成的方程呈现出病态,即计算求得的值会误差过大, 甚至使测量结果完全陷于失真态。这样就不易于实现应变与温度的区分,所以, 常常使用不同波段的光纤光栅。另外,这种方法需要2个宽带光源,2个光谱分析 仪,系统双光栅制作难度大,操作过程也较为繁琐,因此该方案很难实用化^[26]。 2)双参量矩阵法

该方法类似于双波长矩阵法,不同之处在于双波长矩阵法采用两波长作为参 量进行测量,而该方法采用的是一个参量为波长,而另一个却是其它参量,或者 是除波长外的另外 2 个参量,只要该参量是对应变、温度同时敏感并成线性关系 的物理量 (如功率、频率、时间等),以实现温度不敏感测量或应变与温度的同时 测量^[27]-^[29]。

双参量矩阵法是目前应用较为广泛的一种解决方法,适于某些具有特殊需要 的场合,它的优点是面对各种各样的需要,可以去设计或制造与之对应的各种各 样的光纤光栅传感器,在检测的方法上面也还可以选择不同的参数,而且静态和 动态的检测均可实现,因此可选择的方法很多,而且大多数方法都能满足构成分 布式测量系统的要求。正是由于有这种独特性,可以通过选择现有的材料,掺杂 或合成不同材料,选择合适的参量获得所需的物理、化学等性能,在以后的发展 中,这种多选择特性将更加适应于现代科技领域的应用。双参量矩阵法的不足在 于传感器结构比较复杂,对光纤光栅的制作要求比较高,而且,传感器不再具有 波长调制的优点,从而当受到光源波动或其他因素影响时,其结果会出现误差, 这样原来并不复杂的交叉敏感问题就会变成更复杂,更难解决的掺杂工艺问题。 同时,双参量矩阵法除光纤光栅波长外,还需要检测另一物理量,这就需要有另 一套测量,解调设备,加大了系统的复杂性,在构建分布式测量系统时还要考虑 引用系统与光纤光栅系统的分辨率匹配等问题,同时,不同的解调方法对光纤光 栅的封装也会有不同要求。因此在实际应用中双参量矩阵法有一定的局限性^[26]。

3) 参考光栅法

该方法是选用 2 个相同参数的光栅对同一测量点进行测量。将一个光栅传感 器固定于被测点,使其同时感测应变和温度的变化,而另一个光栅则固定于所测 点之外只对温度或应变进行感测,通过对测得的波长漂移量进行相减,即可求出 温度和压力的变化,实现区分测量,解决交叉敏感问题^{[30][31]}。类似于一个温度或 压力传感器加上一个能够同时感测温度和应变变化的光栅。传统实现方法大多采 用写入光纤的 2 个邻近光栅,其中,一个用一定的材料封装,使其不受外界的应 力影响而只对温度或应力敏感,从而向另外一个对温度和应力同时敏感的光栅提 供温度参考,以实现温度不敏感测量或应变与温度的同时测量。而新的方案则只 需利用一个光栅即可实现应力与温度的同时测量。测量时,将光栅的一部分粘接 在待测点,而另一部分则悬空,前者将同时对温度和应力敏感,而后者只对温度 或应力敏感,这样,可分别得到温度与应力。还有一种技术手段也只需要利用一 个光栅来实现这个方法。对所用的光栅进行分段封装,一段只对温度或应力敏感, 另外一段对温度、应力同时敏感使其产生两个光栅的效果,这样不但缩小了体积, 而且也减少了成本。

参考光栅法主要应用在生物医学、结构的健康监测中。基于该方法的传感系 统设计相对简单,而且操作使用的过程也非常简单,非常容易,并且经济可靠。 还有就是在局部测量时光栅的布设比较简单,补偿的精度也相对较高。参考光栅 法的缺点在于该方法对光纤光栅的要求非常高,对其温度系数、应力系数、掺杂 度、封装等各方面都有特殊的要求;当使用这个方法时,得选择或制造 2 个参数 完全一模一样的光栅,而且还需严格的保证选用的这 2 个光栅的波长温度系数一 样,这是非常困难的,另外,当使用参考光栅法时,在实现准分布式测量网络时, 如何去布设光栅也是个非常复杂,一直有待解决的问题。所以采用参考光栅法的 话有一个基本前提,就是必须事先假定应变的变化与温度的变化对光纤光栅中心 波长的影响是独立的,是互不影响的,也就是温度与应变具有非关联性,而在实 际情况中,受不同温度的影响,2 个相同参数的光纤光栅的光弹系数不相同,同样, 受不一样的应力作用,其热光系数亦会各有差异。所以,当使用这种温度参考光 栅法测量时,由于 2 个相同参数的传感器对各环境因素敏感性的不一样,从而测 量的结果会出现较大的累积误差^[26]。

2.2 光纤光栅的封装技术

目前,光栅封装最常用的方法主要有两种: a.直接粘贴在基底材料上,典型的 为贴片封装^[32]。该方法是采用一种耐高温有机胶技术将光栅封装于铍青铜基底材 料上,基底材料的线膨胀系数比光栅的大,利用基底材料的带动作用使光栅反射 波长变化。b.利用模具或管材灌封,典型的为毛细钢管封装^[33]。该方法是将毛细钢 管套在光栅上面,中间涂上改性丙烯酸酯,然后放入烘箱进一步烘干、固化。在 不改变光纤光栅应变传感灵敏度的同时将其温度灵敏度提高了,为光纤光栅在温 度测量领域的应用提供了一个很好的封装方法。由于毛细钢管的钢管直径太小不 利于灌胶,而将光栅粘在基底上利用基底的热膨胀来压迫光栅的封装方式,也会 使得光栅受到的热膨胀不均匀,因此这两种封装方法都不是很理想。为了弥补上 述封装方法的不足,许多研发人员在封装结构、封装材料以及封装粘结剂方面加 以改进,以期获得更为理想的封装效果。

2.2.1 粘贴剂的研究

光栅封装时粘贴剂的选择十分重要,若粘贴剂的粘结强度不够则会影响封装的质量、传感器的使用寿命和在恶劣环境中工作的能力。由于环氧胶黏剂粘附力强、收缩率较低、化学稳定性好,因而在早期研究中有很多研发人员使用其作为

粘贴剂,但同时环氧胶黏剂的玻璃化转变温度较低、耐温性能较差、固化收缩所 产生的应力较大、粘贴后光纤光栅易出现啁啾现象等缺陷也十分突出。此外,如 直接用环氧胶黏剂进行脆性基底材料上光纤光栅传感器的封装,容易拉裂基底材 料;还有不容忽视的一点是环氧胶黏剂的添加剂有毒。综上所述,环氧胶黏剂并 不是一种最好的粘贴剂,尚需进一步改进。

研发人员对此进行了深入的研究,周红等人提出在环氧胶黏剂中填加纳米 SiO2、TiO2和SiC粒子^[34],这一方面可提高环氧胶黏剂中共价键的结合力,另一 方面也可提高其交联密度。图 2.1 为纳米SiO2粒子与环氧胶黏剂结合的示意图, 图 2.2 为纳米单体粒子与环氧胶黏剂互穿网络示意图。纳米改性后的环氧胶黏剂耐 温性能好,在高温(300℃以上)、高压(40MPa以上)时粘接强度高,且韧性同步提 高,固化收缩率进一步减小,具有应变胶的特性,应注意纳米SiO2、TiO2和SiC 粒子的最佳掺入比例,避免比例过大导致胶黏剂性能下降。改变纳米粒子的掺入 比例还可调整胶黏剂的力学性能,以适应不同的基底材料。对采用改性后环氧胶 黏剂粘贴封装的光纤光栅温度传感器和光纤光栅压力传感器的实验和现场温度测 试表明,FBG粘贴牢固,而且不会引起光栅啁啾,封装后的光纤光栅传感器能适 用于高温、高压和强腐蚀性等恶劣环境。此外,改性后环氧胶黏剂也可作为光纤 光栅传感器的密封用胶。



图 2.1 纳米 SiO2 粒子与环氧胶黏剂结合的示意图

Fig 2.1 Diagram of nano-SiO2 particles combined with epoxy adhesive



图 2.2 环氧胶黏剂的互穿网状结构模型

Fig 2.2 Diagram of interpenetrating network structure model with epoxy adhesive

刘春桐等人提出了一种全金属封装法,其利用焊接技术来取代粘贴剂^[35],具体封装过程是先将锡焊置于一小金属盒内,然后将 FBG 固定于金属盒的中心轴线位置,用酒精灯外焰对金属盒进行加热熔锡焊,使其将光栅完全封装住,再撤去酒精灯,待锡块完全冷却至室温,这就完成了利用锡焊对光栅进行的全金属封装。

利用水浴加热法对全金属封装后的光纤光栅传感器进行温度特性的研究,如图 2.3 所示。实验表明,在 19~60℃的温度范围内,全金属封装后的光栅温度灵敏度为 34.0pm/℃,是封装前的 3.3 倍,且有较好的重复性,可以制作出适合长期使用的 高品质 FBG 传感器。并且全金属封装法避免利用聚合物作为衬底材料或胶黏剂进 行封装的 FBG 传感器在长期使用过程中出现聚合物的蠕变、老化等问题,确保了 光纤光栅传感器的传感性能。但这种全金属封装法会使光栅产生较为严重的啁啾 效应,因而这种取代粘贴剂采用焊接技术的全金属封装依然称不上完美,不过通 过采用对光栅作退火处理等方法降低其啁啾程度,也能获得很好的效果。



图 2.3 FBG 的温度特性实验原理图

由此可见,上面两种方法虽然各自存在缺陷,但总的来说,相比以前的一些 封装粘贴剂均有了很大的提高,也取得了不错的效果。

2.2.2 封装材料的研究

封装材料的性能参数(包括泊松比,弹性模量,线膨胀系数及封装厚度)与光纤 光栅材料的性能参数不一致,往往会造成光栅封装后的温度灵敏度与裸光纤光栅 有很大不同。文献[36]表明,光栅温度灵敏度系数随着封装材料的线膨胀系数、泊 松比及封装厚度的增大而增大。因此,采用线膨胀系数较大的增敏材料封装光栅 是增加其灵敏度的有效途径。

基于上述原理,不少研发人员提出了各自不同的设计方案。于秀娟等人提出 了光纤光栅的铜片封装工艺,其利用线膨胀系数较大的铜来做封装材料,将光栅 用双组分的 M-Bond 610 胶封装在刻有细槽的铜片内部^[37]。铜片封装的光纤光栅结 构如图 2.4 所示。实验表明,与裸光纤光栅的测试结果相比,铜片封装工艺基本不 改变光纤光栅应变传感的灵敏度,但是温度灵敏度系数却提高了 2.78 倍。经过铜 片封装后的光纤光栅最小可探测到的应变和温度变化分别为 1µm 和 0.03℃,十分 便于工程应用。铜片封装工艺的光纤光栅传感器具有结构简单,而且容易固定到 被测物体上,通过复用可以构成光纤光栅传感网络来检测大范围空间应变和温度

Fig 2.3 Experimental principle of FBG temperature characteristics

等物理量,因此比较适用于复合材料、土木工程建筑结构等的健康监测。



图 2.4 铜片封装的光纤光栅

Fig 2.4 The structure of FBG packaged by copper slice

刘春桐等人提出了光纤光栅的铝合金箔片封装工艺,其采用 DG-3S 改性环氧 胶将光纤光栅粘接在下基片上刻出的细槽中,用厚度为 0.1mm 的铝合金箔片作为 衬底材料^[38]。铝合金箔片封装的光栅结构如图 2.5 所示。实验表明,使用铝合金箔 片封装后的光纤光栅传感器与裸光纤光栅相比较,应变灵敏度提高了 1.2 倍,温度 灵敏度提高了 3.02 倍,中心波长的漂移与荷载及温度都具有良好的线性关系,且 有较好的重复性。铝合金箔片封装工艺封装结构简单、轻便、实用、而且适合于 被测体表面具有一定曲率的情况;通过复用还可构成光纤光栅传感网络,用这种 传感网络来检测大面积空间的温度和应变等物理量,适合于汽车轮船等铝合金广 泛应用的行业。



图 2.5 铝合金箔片封装的光栅结构示意图 Fig 2.5 FBG packaging structure by aluminum alloy slice

周国鹏等人提出了新型聚合物封装工艺,其使用特殊方法将裸光纤光栅封装 在两种聚合物构成的基底中,以常见的热熔性材料结合热缩性材料成功地对光纤 光栅进行了封装^[39]。图 2.6 为新型聚合物封装光纤光栅的过程和结构示意图。实验 表明,新型聚合物封装工艺法可以将裸光纤光栅的温度灵敏性提高 6 倍,而且封 装后的光纤光栅保持了良好的应变特性,同时还可以通过调整封装中各组成的成 分比或者对组成做改性,方便地降低或提高封装结构的总线膨胀系数,制成具有 不同温度灵敏度的光纤光栅传感器。新型聚合物封装工艺可很好地满足常温下的 工程应用要求,特别是相对于金属材料,这种封装方法可选择的材料更广泛,且 简单易行,尤其在温度测量方面更有其优势。



图 2.6 新型聚合物封装光纤光栅的过程和结构

从提高光纤光栅的温度灵敏度方面来说,上述三种封装材料中聚合物最好, 铝合金箔片其次,铜片最差。铜和铝合金的优点在于适合应用于航空航天结构, 复合材料,土木工程建筑结构等行业。当铜作封装材料应用于工程结构表面的传 感测量时,封装结构体积较大、柔韧度不够理想,尤其是在有一定曲率的表面上 作业时,粘接和使用都很不方便,限制了使用范围;而用铝合金就很好地解决了 这些问题,并且铝蕴藏丰富,是金属当中含量最多的一种,所以和铜相比,铝合 金更胜一筹;然而从常温下的工程应用方面来看,聚合物比它们两者更有优势, 但是也有不足,那就是用聚合物作衬底材料时在长期使用中会引起蠕变,老化等。

2.2.3 封装结构的研究

优化的封装结构能直接的提高光纤光栅传感器测量的灵敏度,故封装结构的 设计和研发就显得十分重要。不少研究人员提出了各自不同的研究方案。

方涛等人提出了新型钢条封装形式的封装结构,其原理是将光栅用环氧胶黏 剂胶封装于三根钢条之间,并在三根钢条之外再套上金属管,在钢管之中注入导 热膏,用来加快热传导的速度,在灌胶时应一边加热一边灌,这样可以防止导热 膏出现气泡,保证导热的均匀性^[40]。采用新型钢条封装形式封装光栅的结构如图 2.7 所示。实验表明,钢条封装形式的封装结构极大地提升了光纤光栅的热灵敏度, 且线性度好,热传导速度快。钢条封装形式使光栅处于环氧胶黏剂胶之中可以保 证其受热膨胀的均匀性,并且不受外部应力的影响,这样的封装结构有利于灌胶。

Fig 2.6 Process and structure of FBG packaged by the new polymer



图 2.7 新型钢条形式封装 FBG 的结构

Fig 2.7 Structure of FBG packaged by the new steel bars

俞刚等人提出的了一种无需预应力的剪刀型支架封装结构,其是将两个 V 型 支架通过中间铰链连接起来形成剪刀型结构,然后将光纤光栅通过环氧胶黏剂粘 合在两个 V 型支架的左侧内侧面间^[41]。采用剪刀型支架封装光栅的结构如图 2.8 所示。实验表明,剪刀型支架封装结构可使光纤光栅能同时进行温度补偿和调谐, 既保持了光纤光栅体积小的优点,同时又无需给光纤光栅施加预应力,且封装后 光纤光栅不产生啁啾,并可与压电陶瓷结合,扩展光纤光栅布拉格波长的调谐范 围,应变量的调节只和金属丝有关,与支架的材料无关,从而大大简化了设计。



Fig 2.8 Structure of FBG packaged by scissors

虽然上面介绍的两种封装方案较之以前在很多方面已均有很大进步,但各自 也有不足。采用钢条封装形式封装时,传感头的精度会受到一些因素的影响,并 不能绝对保证较高的精度,而且在灌导热膏时也不可避免的会出现气泡;剪刀型 支架封装结构的长期可靠性问题有待进一步研究。同时这两种方案还有一个共同 的缺陷,那就是使用了环氧胶黏剂作粘贴剂(其缺点已在上文中指出)。

2.2.4 小结

光纤光栅传感器的应用是一个方兴未艾的领域,有着非常广阔的发展前景, 而封装技术是决定光纤光栅传感器能否大规模应用的主要因素,有效而廉价的封 装技术是光纤光栅传感器大规模应用于实际工程的瓶颈问题之一。迄今为止,国 内外已经有不少相关研究,在结构、材料、粘贴剂等方面均有了很大的发展,随着研究的深入,根据具体的应用目的,会有越来越多的精度更高、结构更简单、成本更低、更实用的封装方案提出,更进一步促进光纤光栅传感技术的发展。

2.3 本章小结

光栅传感检测技术中存在的温度与应力的交叉敏感问题及封装技术伴随着光 纤光栅传感器的产生并制约其发展,本章先从光纤光栅传感的原理说起,介绍了 温度传感原理,应力传感原理,然后详细说明了温度应力交叉敏感及封装方面现 在的研究进展。虽然很多专家学者在交叉敏感问题及封装技术方面都进行了广泛 深入的研究并提出了诸多解决方案,但随着应用领域的不断扩张其在精度、实用 性、复用性等方面还有很大的提升空间。相信在未来几年中会研究出精度更高、 实用性更强、经济效益更高的解决方案,推动光纤光栅传感器的新发展。

3 双啁啾光纤光栅应力传感器

所谓啁啾光纤光栅 (CFG),是指光纤的纤芯折射率变化的幅度或折射率变化 的周期沿光纤轴向逐渐变大 (小) 而形成的一种光纤光栅。因此,可以把 CFG 看 作是几个反射波长递增的 FBG 的叠加或者几个反射波长递减的 FBG 的叠加,也就 相当于形成了一个多布拉格波长反射光栅阵列,在这上面不同的小段光栅反射对 应的不同波长的光波,这样导波光程就随波长单调递增或者随波长单调递减,从 而在一个范围内形成了连续的反射波长,相位上的表现为相移色散;而带宽上的 表现则为反射谱带宽的展宽。相对于 FBG,CFG 除了具有一般光纤光栅所具有的 特点之外,啁啾光栅能够产生大而稳定的色散,其带宽足以覆盖整个脉冲的谱宽, 是进行色散补偿的理想器件。。

3.1 啁啾光栅的光学特性分析及仿真

3.1.1 啁啾光纤光栅的理论分析

由于可以把 CFG 看作是有数个反射波长的布拉格光栅的叠加,一些相关理论 证实,CFG 传感器的传感原理与 FBG 的基本相同,即当光栅所受的应力、温度或 其它物理量发生变化时都将导致光栅的周期或者光栅的纤芯折射率发生变化,从 而使光纤光栅波长发生位移。但 CFG 和 FBG 在传感领域的应用不同:FBG 是通 过检测光栅波长的位移情况,从而获得待测物理量的变化情况;而 CFG 虽然也是 波长位移信号,但其反射功率比较大,反射谱的带宽比较宽,在一个用来做参考 的一模一样的 CFG 的参照下,其反射光强的变化能够非常方便地表征出待测物理 量的变化情况。特别是在温度及外界影响都不大的情况下,CFG 总的反射光强与 压力成线性关系,这就是本章的理论基础,即 CFG 传感特性利用的是它的强度信 号。

3.1.2 啁啾光栅的特性及仿真

耦合模方程是研究光纤光栅光学特性的基础,对于均匀光栅,耦合模方程可 以直接求解,但对于啁啾光栅来说,光栅参数沿光纤方向发生变化,从耦合模方 程不能得到反射系数和反射率的解析解,只能通过数值计算来分析其光学特性, 通常有两种分析啁啾光栅的方法:传输矩阵法^[42]和直接积分法(龙格-库塔法)^[43]。

研究表明,传输矩阵法运算速度快,精确度高,更适合有关光纤光栅问题的分析 计算,龙格-库塔法会受步长的影响^{[44][45]},所以啁啾光栅光学特性一般是通过基于 耦合模理论的传输矩阵法来求解。

传输矩阵法的思路是:把啁啾光栅分为 M 小段,每一小段都可看成是均匀光 栅,且每段都用一个 2×2 阶矩阵表示。这样,利用传输矩阵可以级联的特点,啁 啾光栅的传输矩阵可以用 M 段均匀光栅矩阵的乘积来表示。需要注意的是,M 的 值不能取太大,虽然 M 值越大,近似为均匀光栅的程度越高,但因为当均匀光栅 只有几个光栅周期长时,耦合模理论会失效,故 M 的值不能无限的大。一般要求 满足 Δz ≥ Λ,即:

$$M \le \frac{2n_{eff}}{\lambda_d} \tag{3-1}$$

 λ_{a} 为初始谐振波长。设第 m 段均匀光栅的传输矩阵为 T_{m} ,穿过第 m 段后的 电场幅度为 A_{m}^{+} 、 B_{m}^{+} ,则穿过第 m 段的电场幅值可以表示为:

$$\begin{pmatrix} A_{m}^{+} \\ B_{m}^{+} \end{pmatrix} = T_{m} \begin{pmatrix} A_{m-1}^{+} \\ B_{m-1}^{+} \end{pmatrix}$$
(3-2)

根据基模耦合方程可知,长度为L的均匀光栅的传输矩阵为:

$$T = \begin{pmatrix} \cosh(\Omega L) - \frac{j\delta}{\Omega} \sinh(\Omega L) & -\frac{jk}{\Omega} \sinh(\Omega L) \\ \\ \frac{jk}{\Omega} \sinh(\Omega L) & \cosh(\Omega L) + \frac{j\delta}{\Omega} \sinh(\Omega L) \end{pmatrix}$$
(3-3)

$$\delta = \frac{\pi}{\Lambda} - (\beta + k_0 \Delta n_0 \Gamma) \tag{3-4}$$

$$k = \frac{\pi}{\lambda} \Delta n_1 \Gamma \tag{3-5}$$

其中 $\Gamma = \int_{0}^{\pi} \int_{0}^{\pi} |\psi|^{2} r dr d\phi$ 为基模的光限制因子。

$$\mathbb{X} R(z) = \frac{\Omega \cosh[\Omega(z - L/2)] - j\delta \sinh[\Omega(z - L/2)]}{\Omega \cosh(\Omega L) + j\delta \sinh(\Omega L)}$$
(3-6)

故第 m 段均匀光栅的传输矩阵 T 可以表示为:

$$T_{m} = \begin{pmatrix} \cosh(\Omega_{m}dz) - \frac{j\delta_{m}}{\Omega_{m}}\sinh(\Omega_{m}dz) & -\frac{jk_{m}}{\Omega_{m}}\sinh(\Omega_{m}dz) \\ \frac{jk_{m}}{\Omega_{m}}\sinh(\Omega_{m}L) & \cosh(\Omega_{m}dz) + \frac{j\delta_{m}}{\Omega_{m}}\sinh(\Omega_{m}dz) \end{pmatrix}$$
(3-7)

式中, dz 表示第 m 段均匀光栅的长度, k_m 和 δ_m 分别为第 m 段均匀光栅的耦 合系数和相位失配因子。

根据矩阵可级联的特点,可以得到长为 L 的线性啁啾光栅的传输矩阵的表达 式为:

$$T = T_1 \times T_2 \times \dots \times T_M \tag{3-8}$$

结合光栅初始边界条件 $A_0^+ = A^+(L/2) = 1$, $B_0^+ = B^+(-L/2) = 0$, 最终反射矩阵 单元幅值 $A_M^+ = A^+(-L/2)$ 和 $B_M^+ = B^+(-L/2)$ 可以表示为:

$$\begin{pmatrix} A_{M}^{+} \\ B_{M}^{+} \end{pmatrix} = T \begin{pmatrix} A_{0}^{+} \\ B_{0}^{+} \end{pmatrix} \mathbb{E} \left[\begin{pmatrix} A^{+}(L/2) \\ B^{+}(L/2) \end{pmatrix} = T \times \begin{pmatrix} A^{+}(-L/2) \\ B^{+}(-L/2) \end{pmatrix}$$
(3-9)

根据式(3-9)可求出 $\rho = B^+(-L/2)/A^+(-L/2)$ 和反射系数 $R = |\rho|^2 = |B(-L/2)|^2$ 以及啁啾光栅时延 $\tau_{\rho} = -\frac{\lambda^2}{2\pi c} \frac{d\theta_{\rho}}{d\lambda}$ 。

通过对啁啾光栅的数值计算,得出啁啾光栅在不同的啁啾量、光栅长度和折 射率调制强度下的反射谱,并分析各个参数对啁啾光栅的影响。图 3.1 是在折射率 调制强度Δn₁ = 4e-4、光栅长度L = 1.4cm,啁啾量Δn = 2e-9的反射谱。



图 3.1 L = 1.4cm, $\Delta n_1 = 4e - 4$, $\Delta n = 2e - 9$ 的啁啾光栅反射谱 Fig 3.1 L = 1.4cm, $\Delta n_1 = 4e - 4$, $\Delta n = 2e - 9$ Reflective spectrum of chirped fiber grating

当啁啾量为3e-9、6e-9,其他参数与图 3.1 中是一样的,即 Δn₁ = 4e-4, L=1.4cm,此时啁啾光栅的反射谱为图 3.2、图 3.3 所示。



图 3.2 L = 1.4cm, $\Delta n_1 = 4e - 4$, $\Delta n = 3e - 9$ 的啁啾光栅反射谱 Fig 3.2 L = 1.4cm, $\Delta n_1 = 4e - 4$, $\Delta n = 3e - 9$ Reflective spectrum of chirped fiber grating



图 3.3 L = 1.4cm, $\Delta n_1 = 4e - 4$, $\Delta n = 6e - 9$ 的啁啾光栅反射谱 Fig 3.3 L = 1.4cm, $\Delta n_1 = 4e - 4$, $\Delta n = 6e - 9$ Reflective spectrum of chirped fiber grating

从图 3.1、图 3.2 及图 3.3 可以看出, 啁啾光纤光栅的反射带宽随着啁啾量的 增大而明显增大,同时反射率峰值也有所下降。所以可以通过调节啁啾光纤光栅 的啁啾量来提高反射谱的带宽,但这个带宽的增加是以牺牲反射率为代价的。

当光栅长度 L = 1.8cm、 L = 2.0cm, 其他参数与图 3.1 中是一样的, 即 $\Delta n_1 = 4e - 4$, 啁啾量 $\Delta n = 2e - 9$, 此时啁啾光栅的反射谱为图 3.4、图 3.5 所示。



图 3.4 L = 1.8cm, $\Delta n_1 = 4e - 4$, $\Delta n = 2e - 9$ 的啁啾光栅反射谱 Fig 3.4 L = 1.8cm, $\Delta n_1 = 4e - 4$, $\Delta n = 2e - 9$ Reflective spectrum of chirped fiber grating



图 3.5 L = 2.0cm, $\Delta n_1 = 4e-4$, $\Delta n = 2e-9$ 的啁啾光栅反射谱 Fig 3.5 L = 2.0cm, $\Delta n_1 = 4e-4$, $\Delta n = 2e-9$ Reflective spectrum of chirped fiber grating

从图 3.1、图 3.4、图 3.5 可知在其他参数都一样的情况下,啁啾光纤光栅的反射带宽随着光栅长度的增大而增加,而反射率峰值几乎不变。

3.2 双啁啾光纤光栅应力传感器工作原理

基于啁啾光栅的应力传感器结构如下:



图 3.6 啁啾光栅应力传感器示意图

该传感器主要由光源、第一环形器、CFG1、第二环形器、CFG2、光探测器、 光电转换模块、信号处理模块、实时显示模块组成。光源接第一环形器的1接口、 第一环形器的2,3接口分别接 CFG1和第二环形器的1接口、第二环形器的2,3 接口分别接 CFG2和光探测器。当 CFG1没有受到压力时,光源发出的光信号会先 经过 CFG1,根据光栅的波长选择性,大部分光会透射出去,一部分光会反射回来, 从 CFG1发射回来的光会经过 CFG2,同样根据波长选择性,CFG2 会将满足条件 的光反射回来,CFG2反射回来的光会被光探测器检测到。

在本系统中所选 CFG1 和 CFG2 的特性相同,其中 CFG1 为待测光栅,用来检 测应力的, CFG2 用来作为参考和判决器件,作为消除温度影响的滤波器,以解决 光纤光栅的温度应变交叉敏感的问题。这样在待测光栅 CFG1 没有受到压力时, CFG1 和 CFG2 的光谱一模一样,从 CFG1 发射回来的光在 CFG2 会全部反射,因 此在光探测器上检测到的光强最强。当待测光栅 CFG1 上有压力作用时,待测光 栅 CFG1 中心波长会向长波长方向漂移,此时 CFG1 和 CFG2 的光谱不完全重叠, 因此从 CFG1 发射回来的光在 CFG2 不会全部反射,只会反射波谱重叠那片区域的 光,所以此时在光探测器上检测到的光强相比前面的会变弱,待测光栅 CFG1 中 心波长向长波长方向漂移的越多光探测器上检测到的光强会越弱,因此将待测光 栅 CFG1 受到的压力为所规定的范围的最大值时对应的光强设为预定值,当光强 低于预定值时则实时显示。

Fig 3.6 Structure of the chirped fiber grating stress sensor

3.3 系统实验验证及结论

为验证双啁啾光纤光栅应力传感器,本文特将其应用在对公路交通流量的监测上,具体实施方案如图 3.7,在双啁啾光纤光栅应力传感器的光探测器后面接光 电转换模块,信号处理模块及实时显示模块。将传感器探测的结果经过光电转换 模块,信号处理模块处理后实时显示最后的结果。



图 3.7 公路交通流量监测示意图 Fig 3.7 Structure of new traffic flow monitoring system

3.3.1 实验硬件装置

1) 光源^[46]

光源是所有光电仪器中的关键部分,它是用来产生带有某种特性的光信号, 而光信号的特性又是决定选用何种光电传感器的主要依据,所以选用正确合适的 光源是光电仪器满足使用要求的基本保证。

在选择光源时一般根据光谱特性和介质的类型来抉择,而考虑的主要是光源 光谱能量分布的特性。采用非相干光源照明,光源的光谱分布应该与接收器的光 谱响应尽量相匹配,这样就可以尽可能提高检测信号的信噪比。若接收器响应的 峰值波长与光源的波长匹配得很好,则在其他波长上出现的"噪声"引起的响应 则会很小。在本实验中,光纤光栅的传感量是对强度进行编码,因此所选择的光 源必须具有稳定性,较宽的带宽及较强的输出功率。

在本实验中选择的光源是 EDFA-ASE 光源。因为 EDFA-ASE 光源在 1530~ 1570nm 波长范围内输出比较平坦,而且输出均大于 10mW,除此之外,它还有噪 声系数小、输出功率稳定等特点,所以我们选择它并且使用 1530~1570nm 波段的 光输出。

2) 光栅

在本实验中,光纤光栅的选取非常重要,在本试验中,光探测器探测到的是 待测光栅与参考光栅的重叠部分的功率,所以重叠部分越多,光探测器所检测到 的越明显,其变化也是线性变化,易于监测。而在实验中待测光栅会受压力作用, 其中心波长会向长波长方向漂移,所以所用光栅的光谱宽度越宽越好,故本实验 中选用的是啁啾光纤光栅,因为相对于 FBG, CFG 具有带宽宽、色散值大而稳定 等独特性能。

选择的 CFG1, CFG2 光谱图如图 3.8 所示,理想状态这两个光栅应该完全重叠,但在实验室由于实验室设备精度有限,再加上外界的干扰,所以有一点出入。





Fig 3.8 Reflection spectrum of dual-chirped fiber grating

3) 探测器

本实验采用 PIN 硅光电二极管作为光电探测器。PIN 光电二极管实质上是在 P-N 结之间加一本征层,它是常用的耗尽层光伏探测器。它是采用高阻纯硅材料及 离子漂移技术形成一个没有杂质的本征层。PIN 管中的本征层对提高器件的灵敏度 和频率的响应起着十分重要的作用。另外,合理选择负载电阻 R 是实际使用 PIN 光电二极管得到高响应频率性能必须考虑的重要问题。

4) 光电转换

经过筛选,采用海特公司 FC 型光电二极管先进行光到电流的转换。部分参数 如表 1:

表 1 光电二极管性	主能参数
------------	------

波长范围	1.0~1.65	μm
线性范围 0V	-70~+10	dBm
响应度 0V	R _{1310nm} ≥0.80 , R _{1550nm} ≥0.85	A/W
暗电流-5V	<5	nA
光敏面直径	300	μm
工作电压	0~10	v
反向偏压	25	v
工作温度 T。	-40~+85	c
正向电流	10	mA
功耗	100	mW

Table 1 parameters of photodiode

放大器选用 AD620, 其性能指标如表 2 示:

表2 放大器性能参数

Table 2 parameters of amplifiers

电源工作范围	$\pm 2.3v \sim \pm 18V$
最大电源电流	1.3mA
最大输人失调电压	25uV
最大失调电流	50uA
最大输人偏置电流	20nA
最小共模抑制比	93dB(G=10)
最大电源电压	± 18V

AD620 芯片的 1、8 管脚要跨接一个电阻来调整放大倍率,7、4 管脚提供正 负相等的电压,由 2、3 脚输入放大电压,由 6 脚得到电压放大后的输出值。脚 5 是参考基准,实验中,脚 5 接+5V 电压。AD620 放大增益关系式为:

$$G = \frac{49.4k\Omega}{R_{\sigma}} + 1 \tag{3-10}$$

由于光电二极管转化的电压很低,本实验采用两级放大,取得很好的效果。

5) 电路实现

电路部分主要采用单片机编程实现计数,我们采用的单片机为AT89S52。见图 3.9。AT89S52是一种低功耗、高性能CMOS8位微控制器,使用Atmel公司高密度非

易失性存储器技术制造,与工业80C51产品指令和引脚完全兼容。



图 3.9 AT89S52 示意图 Fig 3.9 diagram of AT89S52 chip

AT89S52具有以下标准功能:256字节RAM,三个16位定时器/计数器,8k字节 Flash,2个数据指针,看门狗定时器,32位I/O口线,一个6向量2级中断结构,全 双工串行口,片内晶振及时钟电路。另外,AT89S52可降至0Hz静态逻辑操作,支 持2种软件可选择节电模式。

空闲模式下,CPU停止工作,允许RAM、定时器/计数器、串口、中断继续工 作。掉电保护方式下,RAM内容被保存,振荡器被冻结,单片机一切工作停止, 直到下一个中断或硬件复位为止。

实验中要输出八组数据,采用串口输出的方式,减少了管脚的开支,为其他 功能的扩展留出了空间。

通过图3.10的方式扩展,可以输出所需的八组数据,如果需要还可再扩展。



图 3.10 扩展方式

Fig 3.10 mode of expansion

6) 显示方式

数码管显示方式有动态显示与静态显示两种。静态显示方式下,数码管的8段 输入及其公共端电平一直有效,数码管保持连续稳定显示,直到下一个显示的数 字;动态显示的方式下,各个数码管的相同段连接在一起,共同占用8位段引管线, 每位数码管分别由一个相应的I/0口控制,实现分时选通,利用人眼的视觉暂留性, 依次给出各个数码管的公共端加有效信号,与此同时给出该数码管加有效的数据 信号,当全段扫描速度大于视觉暂留速度时,显示就会清晰显示出来。 本实验用的是静态显示的方式,移位寄存器74LS164起到数据锁存器的作用。 图3.11为74LS164的功能表:

	Inputs		Outputs
Clear	Clock	A B	$Q_A Q_B \dots Q_H$
L	X	хх	L L L
н	L	хх	Q _{A0} Q _{B0} Q _{H0}
н	L	нн	$H Q_{An} \dots Q_{Gn}$
н	L	LX	$L Q_{An} \dots Q_{Gn}$
н	L	ХL	$L Q_{4n} \dots Q_{6n}$

图 3.11 74LS164 功能表

Fig 3.11 menu of 74LS164

3.3.2 实验软件设计

本实验由光栅得到的信号须由单片机处理才能得到准确的测量,由于只用一对光栅作为传感器,所以要有一种优质的算法才能准确判断出车辆并进行计数^[47]。





1) 车辆分析

如图 3.12,将车前面几排称为前轮,后面几排称为后轮,将前轮和后轮数量 均为1排的车都称为小轮车,前轮1排,后轮2排的车都称为中型车,前后轮都 大于2排的车都称为大型车。S1、S3、S5、S7表示车轮与地面实际接触的长度; S2表示两前排车轮之间的间隔;S6表示两后排车轮之间的间隔;S4表示前后排车 轮之间的间隔;对于中型车 S2=0,S3=0,对于小型车 S2=S3=S5=S6=0。

2) 车辆轴距参数对比^[47]

	车型	轴距	接地长		
			度 s1		
	奔驰 c 系列	2760mm			
	ALFA 156 2.0AT	2700mm			
小	比亚迪 F0 1.0	2340mm	100mm		
型	标致 206 风尚版	2443mm			
车	北斗星 1.4 经济型	2335mm			
	六平柴系列整车	4700mm	200mm		
中	宇通客车 ZK6139H 三轴客车	6250+1470			
型	三一重工 SY5256GJB1 搅拌运输车	3225mm+1310mm	200mm		
车					
	东风天龙前四后八运油车	1950+4250+1300			
× ا	三一重工 SY5382THB 46III型混凝土泵车	1850mm+4605mm+1310	300mm		
型		mm			
车	三一重工 QY52 汽车起重机	1450mm+3850mm+1350			
		mn			

表3 车辆轴距参数对比

Table 3	compared	of the	e vehicle	wheelbas
---------	----------	--------	-----------	----------

3) 算法设计

在上面所说的小型车,中型车和大型车中,中型车与小型车都可看成是只有 一排前轴或者只有一排后轴的大型车,S1≈S3≈S5≈S7;S2≈S6。以大型车为例列 出大型车的特性参数,如表4所示。

lable 4 parameters of large vehicles					
S1	S2	S4	S8	车轮直径	
0.2	2.66	4. 715	10	0.8	

表4 大型车特性参数

车轮压过光栅时会在光电转换部分产生电信号,根据单片机的定时器对接收 的电信号进行实时采样,如表 4 中大型车,经实际测量车速以及车轮着地长度 S1 的范围,令定时器每隔 1ms 进行一次抽样,由于车速和不同车与地接触的长度不 同,每辆车在 S1 范围内的抽样数不同,设为 a,并设定常数 n,使得 n*a 大于 S2 内的抽样数并且小于 S4 内的抽样数。由于 S4 的长度远远大于 S2 且 S2 的长度远 远大于 S1,则 n 的取值范围将会有很大的空间,所以对车辆的行驶速度及车轮的 型号等数据没有特殊限制; "S1"则为每辆车的特征值。当车辆第一个车轮压过时, 通过转化过来的高电平进行抽样,得到抽样数值 a。车轮压过后,紧接着对后边的 低电平进行抽样,直到下一个高电平到来,抽样数记为 b,若 b<n*a,则表示接着 来的这个车轮也是前轮,此车辆前轮至少为双排,同理,将 S3 内的抽样数记为特 征值,可判断前轮三排、四排……;若 b>n*a,则判断前车轮已过,该轮为后轮, 与判断前轮一样,根据 S5 来判断后轮的个数,若 b>n*a 还没有车轮经过,则表明, 此车辆后轮已经结束,这样前后轮都判断完后记为一辆车。

3.3.3 测量结果及分析



图 3.13 系统实验图 Fig 3.13 Diagram of experimental system

光从CFG1发出,无压力时,两光栅光谱图如3.14,光栅CFG1与光栅CFG2中 心波长完全重叠,这时光探测器探测到光谱图如3.15所示。





Fig.3.14 Reflection spectrum of dual-fiber grating with zero strain suffered





Fig 3.15 Diagram of the spectrum analyzer with zero strain suffered

当有压力作用于所测光栅 CFG1 时,光栅 CFG1 向长波长方向漂移,漂移后的 CFG1 与 CFG2 反射谱及此时光探测器探测到的光谱如图 3.16 所示,从图中可以看 出,当被测光栅受压力作用时,光栅中心波长明显的向长波长方向漂移了,而且 压力越大,漂移越多。



图 3.16 漂移后光谱图

Fig 3.16 Reflection spectrum of the spectrum analyzer after drifting

图 3.17 是没受压力时的光探测器光谱图与受到压力漂移后光探测器光谱图的 叠加图。



图 3.17 漂移前后光谱图

Fig 3.17 Spectrum of original and after drifting

从图 3.17 可以看出,当被测光栅受到压力后,其中心波长向长波长方向漂移, 这样被测光栅的光谱图与参考光栅的光谱图之间的重叠部分明显减少,而光探测 器上监测到的功率发生了明显的衰减。当光强少于所设定的预定值时即可实时显 示,从而做出相应的措施。

实验证明:双啁啾光栅应力传感器系统为公路交通流量监测,铁路隧道火灾 及山体滑坡的预防等一些特殊的环境提供了一套行之有效的方案。一般光栅是通 过其反射回来的波长的改变来反映光栅上所受温度或者应力的改变,这就产生了 其解调的任务所要解决的基本问题,就是要检测出光纤光栅反射中心波长的变化。

对于波长调制型的光栅,一种非常简单非常直接的检测方法是光谱分析仪法。但 光谱仪精度低,体积大而且价格昂贵,这些缺点导致它并不适用于工程的实地测 量。为此,人们又研究出了多种能够适用于工程应用的解调技术,但无论是哪种 解调技术,基本都存在成本高、速度慢的问题。而双啁啾光纤光栅应力传感器调 制解调使用的是光栅的强度特性,在有参考 CFG 条件下,其强度大小会随着外界 压应力和温度的改变而发生改变,用其反射光强度的大小来反映待测物理量的大 小,其相关的解调技术一般采用光栅强度解调,光栅反射功率的变化可以利用光 功率计检测或利用光电二极管检测,这样就大大降低了传感器的成本,提高了传 感器的实用性,而且由于 CFG 的带宽比较宽,所以有效地扩大了传感器的测量范 围。另外由于待测光栅与参考光栅是处于同一环境里,尽管光栅的反射谱会随环 境温度或应力的变化而变化,但同一环境会造成它们两个光栅的偏移变化是相同 的。因此,两个光栅波形叠加的情况不会受到影响,即双光栅输出的光强不会发 生变化,即有效地减小了环境温度变化的影响。

3.4 本章小结

本章在对啁啾光纤光栅的光学特性分析及仿真之后提出了一种双啁啾光纤光 栅应力传感器,并将此应力传感器与单片机结合构建了一种新型公路交通流量监 视系统。首先利用单片机的接口技术将传感器输出的模拟信号转化成数字信号, 然后用单片机编程实现数据的处理及分析,成功的通过检测电压的变化来进行轮 轴识别,最后用单片机进行采样运算比较,判断车型。该系统有效解决了传统的 电类传感器对恶劣环境敏感的问题,具有结构简单、成本低廉、识别准确、抗潮 湿、抗粉尘和抗电磁干扰等优点。而且在城市交通要道以及高速公路监测点埋入 传感器,组建公路监测系统,统一监控,在数据处理方面稍加研究,除了能实现 车流量统计,还能监测公路健康状况,稍加改进后还可对公路上超速超载情况进 行监测等功能,有望大规模应用。

4保偏光纤光栅温度传感器

4.1 光纤温度传感器的概况

温度传感器是基于一个基本的物理量"温度",自然界中的一切过程都与"温 度"息息相关。从伽利略发明温度计开始,人们开始温度测量。温度传感器是最早 开发、应用最广的一类传感器。但真正把温度变成电信号的传感器是由德国物理 学家赛贝发明的。50 年以后,德国人西门子发明了铂电阻温度计。在半导体技术 的支持下,科学家又相继开发了包含半导体热电偶传感器在内的多种温度传感器。 依照波与物质的相互作用规律,声学温度传感器、红外传感器和微波传感器也接 踵而至。而光纤自 20 世纪 70 年代问世以来,随着激光技术的发展,从理论和实 践上都已证明光纤它具有一系列的优越性,光纤在传感技术领域中的应用也日益 受到广泛重视,随着科学技术的发展,涌现了许许多多的光纤温度传感器,并且 可以预料,在新技术革命的浪潮中,光纤温度传感器必将得到广泛的应用,并发 挥出更多的作用。

4.1.1 光纤温度传感器的原理

光纤温度传感器的基本工作原理是将来自光源的光经过光纤送入调制器,待 测参数温度与进入调制区的光相互作用后,导致光的光学性质(如光的强度、波 长、频率、相位等)发生变化,然后再经过光纤送入光探测器,经解调后,获得 被测参数。

光纤温度传感器种类很多^[48],但概括起来按其工作原理可分为功能型和传输 型两种。功能型光纤温度传感器是利用光纤的各种特性(相位、偏振、强度等)随温 度变换的特点,进行温度测定。这类传感器尽管具有"传"、"感"合一的特点, 但也增加了增敏和去敏的困难。传输型光纤温度传感器的光纤只是起到光信号传 输的作用,以避开测温区域复杂的环境。对待测对象的调制功能是靠其他物理性 质的敏感元件来实现的。这类传感器由于存在光纤与传感头的光耦合问题,增加 了系统的复杂性,且对机械振动之类的干扰比较敏感。

4.1.2 光纤温度传感器的研究现状

目前已研制成多种光纤温度传感器。下面介绍几种主要的光纤温度传感器的研 究现状,其中有代表性的为光纤 Fabry-perot 干涉型温度传感器、半导体吸收型光 纤温度传感器、光纤光栅温度传感器三种。

1) 光纤Fabry-perot干涉型温度传感器

此传感器是利用温度改变 Fabry-perot 干涉仪的干涉条纹来测外界温度。

在现有报道的光纤法珀温度传感器中,主要采用两种技术方案,其一是采用 外径大于 125nm 的玻璃毛细管封装,由两个光纤的端面构成光纤法珀腔并采用胶 封的方式固定于温度敏感材料中^{[49][50]},另外一种最近发展起来的技术是采用 MEMS 工艺制作光纤法珀腔^[51]。但是这两种方案工艺都比较复杂,一致性难以保 证,并且胶的老化和蠕变对于传感器的性能影响较大。为了解决该问题,张文涛 等人^[52]提出了一种新型金属封装的光纤法珀温度传感器,其结构如图 4.1 所示。



Fig 4.1 diagram of the F-P fiber temperature sensor Fig 4.2 Principle of the miniature F-P fiber

该传感器采用温度敏感的金属材料作为法珀腔的腔体,利用高精度位移机构 将光纤两端插入金属毛细管中形成低精细度的光纤法珀腔。光纤在金属管的两端 通过胶粘的方式固定。当外界温度发生变化时将直接导致金属毛细管的热膨胀, 带动插入金属管内的光纤移动,从而引起光纤法珀腔的腔长变化。采用这种方案, 避免了胶直接作用于光纤法珀腔腔体上,消除了由于涂胶不匀引起的应力不均匀 现象,简化了封装工艺。同时,金属毛细管的长度即为该温度传感器的标距,它 将决定传感器的灵敏度。该传感器的核心结构为光纤法珀干涉腔(F-P 腔)。在使用 低相干光源时,由于低相干光源都具有一定的光谱宽度,因此可看成是多个波长 入,入,…,入,的迭加。光入射到 F-P 腔后,不断地在 F-P 腔的两个端面之间进行 反射和透射,形成多光束干涉。该传感器的端面反射率很低,反射光的干涉可看 成双光束干涉,当 F-P 腔的腔长是传输光半波长的整数倍时,反射光强最大。通 过对峰值波长移动量的测量即可得到待测温度的变化情况。该传感器具有灵敏度 与传感器的标距成正比的特性,可以通过改变标距的方法方便地调整传感器的灵 敏度。同时,该传感器制作工艺简单、性能稳定、具有很高的实用价值,但是此 传感器所适用的温度并不高。

柯涛等人^[53] 通过在单模光纤 SMF28e 后有轴心偏移地熔接一段特种光子晶体

光纤(MM-HNA-5)制作了一种全光纤微型珐-珀(F-P)干涉仪,原理如图 4.2 所示。

SMF28e 的纤芯直径为 8.2µm,模场直径约为 10.4µm,大于 MM-HNA-5 中间 的纤芯,SMF28e 纤芯的部分区域将处于 MM-HNA-5 光纤的扇形孔中,与其内的 空气相接触,由于空气与 SMF28e 纤芯材料(纯 SiO₂)的折射率不同,所以此交界面 形成 F-P 干涉仪的第一个面,部分的入射光将被此面反射回 SMF28e;另一部分入 射光(由于 SMF28e 的纤芯和 MM-HNA-5 都是纯 SiO₂ 材料,两者熔接面的反射率 很小,可以近似认为没有形成反射面)会耦合进入 MM-HNA-5 中心实芯部分继续 向前传播,在 MM-HNA-5 中心实芯部分的尾端发生反射(尾端与外界空气相接触 处存在折射率差,形成的 F-P 干涉仪的第二个面),由这两束反射光形成干涉。实 验表明:这种传感器可以用于 1200℃的高温测量,且得到当干涉腔长为 3.46mm 时,其光程差灵敏度约为 103nm/℃。这种结构简单、稳定性好、体积小、灵敏度 高、测量范围广的光纤 F-P 干涉微型温度传感器在国防工业领域将具有极大的潜 在应用价值。

虽然上面介绍的两种传感器在各方面均取得了很大的进步,但各自也有不足, 新型金属封装的光纤法珀温度传感器其适用的温度不高且结构复杂,而全光纤微 型珐-珀(F-P)干涉仪制作工艺复杂。

2) 半导体吸收型光纤温度传感器

半导体吸收型光纤温度传感器是利用半导体材料的吸收光谱随温度变化而变 化的特性实现的。光通过半导体材料时,材料会吸收一部分光子能量,当光子能 量超过半导体禁带宽度能量 *E_g(T*)时,传输光的波长发生变化,由于禁带宽度随温 度的变化而变化,因此半导体材料吸收的波长会随温度而变化,同时进入半导体 材料的光强将发生变化。当温度变化时进入半导体材料的光强将发生变化,如果 检测出穿过半导体材料的光强,即可得出对应的温度量。

许忠保等人^[54]利用半导体光吸收原理设计了一种可在高压、强电磁干扰环境下 应用的温度传感器。图 4.3 所示是系统的工作原理图





Fig 4.4 Structure of sensor head

由发光管稳压电源驱动 AlGaAs, InGaAsP 两发光二极管发光,控制电路控制 光开关分时接收来自信号光源(AlGaAs)与参考光源(InGaAsP)发出的光束, 探头中的 GaAs 材料对光有吸收作用,透射光强与温度有关。首先是让测量光通过, 然后是参考光通过,经过的路径和前面完全一样,只是由于探头中的 GaAs 材料对 它来说是完全透明的。两光束通过光纤传输后经 PIN 光电二极管把参考光束和信 号光束转变为电信号,经前置放大、滤波后,通过 A/D 接口到单片机,经除法运 算和数据处理后输出显示。光探头是由半导体材料 GaAs 制作,其厚度约 100μm, 两边抛光,镀增透膜,探头与光纤芯的连接如图 4.4 所示。

实验证明此传感器其温度测量范围在-10~120℃,精确度可达 1℃,响应时间 22s,特别适合超长距离和恶劣环境下的应用。

张英等人^[55]基于半导体 GaAs 对近红外光的吸收波峰值随温度升高向长波长移 动从而引起透射率随温度变化而变化这一特性设计了一种单光路的半导体吸收式 光纤温度传感器。测温系统原理图如图 4.5 所示。



图 4.5 传感器实验原理图









用 7805 稳压器搭建稳压电路驱动红外发光二极管(LED),使 LED 获得稳定的 输出功率,经耦合装置将 LED 光源部分耦合进入光纤,经敏感测头的光能量携带 温度信号通过耦合装置耦合到硅光电三极管,采用集成运放 LM324 进行电压放大 处理,最后进行标定。敏感测头如图 4.6 所示。

采用经研磨并抛光厚度达 200µm, 面积约 2mm×2mm 的 GaAs 片,将其垂直 置于直径为 2.49mm 的陶瓷套管中。将 GaAs 片粘在一边的陶瓷插芯端面,将光纤 对准并固定。实验证明:该单光路光纤温度传感器的测量精度可达到±1℃,响应 时间在 20s 之内,有良好的长期稳定性、重复性;在 20~70℃具有良好的线性, 在这个范围内对某些环境下(如石油工业、电力工业)可得到广泛应用。根据传感头 内的各部分材料特性,以及光纤的热稳定性,这种传感器可在-10~300℃内正常工 作。

由此可见,上面两种传感器后者比前者在响应时间及适用温度范围方面均有 提高,但前者适合超长距离使用。总的来说,虽然这两种传感器性能还不是最佳,

但相比以前的一些传感器而言已有了很大的提高,取得了不错的效果。

3) 光纤光栅温度传感器

光纤光栅温度传感器的工作原理是当光纤光栅所处环境的温度发生变化时, 光栅的周期或纤芯折射率将发生变化,从而使发射光的波长发生变化,通过测量 温度变化前后反射光波长的变化,就可以获得温度的变化情况。

光纤光栅温度传感器增敏的原理是利用光栅对温度和应变同时敏感的特性, 通过合理的结构设计,把光栅和高热膨胀系数材料封装在一起,当被测温度变化 时,通过高热膨胀系数材料的形变向光栅施加一个应变量,使得光栅的返回波长 变化量加大。基于此原则的方法大体上分为两种:

(1) J.L. Cruz 等^[56]提出直接将光栅粘贴在高热膨胀系数材料上,当温度升高时,高膨胀系数材料直接拉动光栅,使光栅的应变加大,返回中心波长的变化量增加。然而,这种增敏方式有明显的缺点:增敏效果受到材料的热膨胀系数制约、分辨率有限、而且伴有啁啾的负面效应。

(2) Jaehoon Jung 等^[57]提出通过采用双金属结构的方法实现温度增敏,效果明显。温度变化时,双金属结构把两种热膨胀系数不同的金属的长度变化量的差转化成光栅长度的变化量,从而提高光栅的温度灵敏度。可是,他们没有对该类型的光纤光栅温度传感器的结构和精度作进一步研究,限制了它的应用范围。

基于上面所提到的两个缺点李阔^[58]等人利用光纤光栅对温度和应变同时敏感 的特性,设计制作了一款双金属光纤光栅温度传感器,在地震前兆观测时能满足 地温观测的精度要求。双金属的温度增敏原理如图 4.7 所示。









Fig.4.8 Structure of dual-tube fiber grating temperature sensor

当温度变化时,材料 A 和材料 B 长度均变化,且 A 长度的变化量比 B 长度的 变化量大得多,A、B 长度的变化量的差值直接传递给了光栅。当光栅的应变发生 变化时,其返回波长会随之发生变化。光栅的应变量越大,返回波长变化量也就 越大。因此,可以通过调整 A 和 B 的长度和选用不同热膨胀系数的材料来控制光 栅的应变量,从而实现高分辨率和高精度的温度测量。实验证明:该传感器的精 度达到±0.05℃,获得了现今光纤光栅温度传感器最高的分辨率 0.0014℃/pm,再 稍微扩展下还能利用这个原理,设计制作一款灵敏度系数可调的高灵敏度光纤光 栅温度传感器^[59],并通过调整高灵敏度光纤光栅温度传感器的灵敏度改变其量程。

由静等人^[60]设计了一种对外加应力应变不敏感的双管式光纤光栅温度传感器。图 4.8 为双管式光纤 Bragg 光栅温度传感器的结构示意图,其中,外套管隔离了外加应力应变向内管的作用,避免了外力通过内管传递给光纤 Bragg 光栅。同时,由于内、外管均是热传导性能良好的金属材料(比如:铜),故温度仍能通过外管和内管传递给光纤 Bragg 光栅,从而使得 Bragg 波长响应温度变化而产生移位。 根据测温实验数据得到光纤光栅温度传感器的各项静态性能指标,光纤光栅温度 传感系统灵敏度为 9.8pm/℃,分辨率为 0.102℃,线性度为 99.88%,重复性误差 1.55%。

上面介绍的两种传感器各有特色,双金属光纤光栅温度传感器能达到非常高的分辨率,能用于地震前兆的观测,而且稍微改变下还能制作出灵敏度系数可调的高灵敏度光纤光栅温度传感器,而后者能实现消除外加应力应变的影响,保障 在实际应用中温度测量的系统精度。

4.1.3 各传感器的优缺点

上面介绍的这三种温度器中干涉型温度传感器温度分辨率高、结构灵巧,但 其噪声干扰大,制作工艺难度较大,信号解调麻烦,因此影响了它的广泛应用^[61]。 半导体吸收型光纤温度传感器探头体积小、灵敏度高、工作可靠、制作容易。但 其主要是适用于高压电力系统中的高温测量等。而光纤光栅温度传感器不仅具有 普通光纤温度传感器的许多优点外,而且还具有一些比其它光纤温度传感器更加 有优势的方面。其中最突出的一点就是光纤光栅温度传感器的传感信号为波长调 制。这一传感机制的好处在于:测量信号不受光源起伏、光纤弯曲损耗的影响, 也不受连接损耗和探测器老化等因素的影响;能在一根光纤中方便地使用波分复 用技术串接多个布拉格光栅进行分布式测量;容易埋人材料中对材料内部的温度 进行高分辨率的测量和大范围地测量;它不需要的固有参考点,同时,还避免了 一般干涉型传感器中相位测量的不清晰。

4.2 保偏光纤的特性分析

保偏光纤简称偏振保持光纤(PMF: Polarization Maintaining Fiber), 是一种能保持线性偏振态的特殊形式的单模光纤。它主要利用光纤的固有高双折射特性,

使其远大于外界环境引起的双折射,使两个偏振模之间不易耦合,维持偏振态的 稳定。保偏光纤的种类很多,按产生双折射的原因大致可以划分成三类:几何形 状致偏型、应力致偏型和波导结构致偏型。目前最常用的高双折射光纤类型是应 力致偏型光纤,其原理是使光纤材料各部分之间的热膨胀系数存在差异,通过热 胀冷缩过程,在材料内部产生热应力,应力的存在导致光纤产生应力双折射。在 制造应力型保偏光纤时,光纤预制棒是通过把两个高浓度掺杂的石英棒(通常采 用硼,磷或铝)放置在芯区的两边而制成。在高温下拉成光纤,光纤拉成后这两 个高掺杂棒在冷却时收缩,但它们的热收缩量受到周围石英的影响,使高掺杂棒 处于拉压力下,通过反作用使光传播所在的纤芯区产生应力沿两个高掺杂的轴存 在着一个拉应力作用,这个轴一般叫做慢轴;而沿与之正交的轴存在着一个压应 力作用,这个轴一般叫做快轴,从而产生双折射现象,为描述这种现象,引入归 一化双折射 B 的概念,即

$$B = \frac{\Delta\beta}{\beta_{xy}} = \frac{2(\beta_x - \beta_y)}{\overline{\beta_x + \beta_y}} = \frac{n_x - n_y}{\overline{n}}$$
(4-1)

常用的保偏光纤有三种,熊猫型保偏光纤,领结型保偏光纤以及椭圆型保偏 光纤。熊猫型光纤中,高掺杂棒是圆的,领结型光纤中,高掺杂区域形状像领结, 椭圆型光纤中,应力包层是椭圆的。

在众多类型的保偏光纤中,真正性能优良得到成熟应用的主要是应力双折射 型保偏光纤,因本文所使用的保偏光纤就是应力双折射型保偏光纤,故我们在这 重点介绍应力双折射型保偏光纤,应力法产生偏振光纤的双折射可以表示为^[62]:

$$B = \frac{2cE\Delta\alpha\Delta T}{1-\nu} (\frac{r_1}{r_2})^2 [1-3(\frac{r_2}{b})^4]$$
(4-2)

$$\varepsilon = (\frac{r_1}{r_2})^2 [1 - 3(\frac{r_2}{b})^4]$$
(4-3)

上式中, c 为相对光弹系数, E 为光纤材料的杨氏模量, V 为泊松比, Δα 为包 层和应力区域的热膨胀系数差, ΔT 为光纤的制造温度和室温的温度差, r_i 为猫眼 应力区的中心位置和纤芯的距离, r_i 为猫眼应力区的半径, b 为熊猫型保偏光纤的 外半径长度, ε 为保偏光纤的椭圆度。

熊猫保偏光纤光栅一般 $\varepsilon=1$,杨氏模量 $E=7.6e9(N/m^2)$,相对光弹系数

c=3.43*e*-12,包层和应力区域的热膨胀系数差Δα=6.64*e*-7,取温度变化范围为 -50~200℃,步长 10℃,由此得出保偏光纤光栅的双折射随温度的变化如图 4.9



图 4.9 保偏光纤光栅双折射与温度的关系



当用紫外光照射的方式在保偏光纤上写入光栅时,写入光栅的反射波长差可 表示为:

$$\Delta\lambda_{\beta} = \lambda_{\beta}^{x} - \lambda_{\beta}^{y} = 2(n_{\text{eff}}^{x} - n_{\text{eff}}^{y})\Lambda$$
(4-4)

为分析方便,假设这两个光栅具有不同的传输常数,但具有相同的周期∧, 对于"熊猫"型保偏光栅,结合(4-2)可得:

$$n_{eff}^{x} - n_{eff}^{y} = \frac{cE\Delta\alpha\Delta T}{1 - \nu} (\frac{r_{1}}{r_{2}})^{2} [1 - 3(\frac{r_{2}}{b})^{4}]$$
(4-5)

结合均匀光纤光栅的反射谱理论公式,令:

$$\delta_x = \frac{\pi}{\Lambda} - \frac{2\pi n_{neff}^x}{\lambda} - \frac{2\pi \Delta n_{eff}}{\lambda}$$
(4-6)

$$\delta_{y} = \frac{\pi}{\Lambda} - \frac{2\pi n_{neff}^{y}}{\lambda} - \frac{2\pi\Delta n_{eff}}{\lambda}$$
(4-7)

$$k = \frac{\pi v}{\lambda} \Delta n_{\text{eff}} \tag{4-8}$$

可得到保偏光纤光栅的反射谱理论公式:

$$r(\lambda) = \frac{\sinh^2(\sqrt{(k^2 - \delta_x^2)L})}{\cosh^2(\sqrt{(k^2 - \delta_x^2)L}) - \frac{\delta_x^2}{k^2}} + \frac{\sinh^2(\sqrt{(k^2 - \delta_y^2)L})}{\cosh^2(\sqrt{(k^2 - \delta_y^2)L}) - \frac{\delta_y^2}{k^2}}$$
(4-9)

由(4-2)及(4-9)可知,保偏光纤的双折射主要由r₂,r₁和b决定,所以通过改变 r₂,r₁和b的值,就可以改变保偏光纤的双折射,从而改变保偏光纤光栅的反射特 性。

当折射率调制量 $\Delta n = 2e-5$, 光栅周期 $\Lambda = 535.6e-9$, 折射率 $n_{ef} = 1.4475$, L = 0.02m 时保偏光纤光栅的反射率如图 4.10







当其他参数均与前面一样,即 Δn = 2e-5, Λ = 535.6e-9, n_{ef} = 1.4475, 仅 L 分别为 0.03 及 0.04 时保偏光纤光栅反射谱如图 4.11 和图 4.12。





Fig.4.11 L = 0.03m Reflective spectrum of Polarization-maintaining fiber grating







对比图 4.10, 图 4.11 和图 4.12 可得:当其他参数保持不变,只变化光栅长度时,随着光栅长度的增加,保偏光纤光栅的反射率增大。

当其他参数保持不变, $\Delta n = 2e-5$, $\Lambda = 535.6e-9$, $n_{eff} = 1.4475$, 这时假定不

受应力的影响,只考虑保偏光纤光栅的温度特性。分别在温度 T 为 20℃,40℃, 60℃时对保偏光纤光栅的 X,Y 方向的反射谱进行了理论仿真,结果如图 4.13, 图 4.14 及图 4.15 所示,虚线代表 X 方向,实线代表的是 Y 方向。





Fig.4.13 T=20°C Reflective spectrum of Polarization-maintaining fiber grating





Fig.4.14 T=40°C Reflective spectrum of Polarization-maintaining fiber grating





Fig.4.15 T=60°C Reflective spectrum of Polarization-maintaining fiber grating

从图 4.13,图 4.14 及图 4.15 可知:当其它参数保持不变,只变化温度时,随 着温度的不断升高,保偏光纤光栅的反射谱会不断的向长波长方向漂移。

当其他参数保持不变, $\Delta n = 2e - 5$, $\Lambda = 535.6e - 9$, $n_{eff} = 1.4475$, 这时假定不 受温度的影响,只考虑保偏光纤光栅的应力特性。分别在应力dL为 1e-6, 3e-6, 6e-6 时对保偏光纤光栅的 X,Y 方向的反射谱进行了理论仿真,结果如图 4.16, 图 4.17 及图 4.18 所示, 虚线代表 X 方向,实线代表的是 Y 方向。





Fig.4.16 $dL = 1e^{-6}$ Reflective spectrum of Polarization-maintaining fiber grating





Fig.4.17 $dL = 3e^{-6}$ Reflective spectrum of Polarization-maintaining fiber grating



图 4.18 $dL = 6e^{-6}$ 的保偏光栅反射谱



从图 4.16,图 4.17 及图 4.18 可知:当其它参数保持不变,只变化应力时,随 着应力的不断增大,保偏光纤光栅的反射谱会不断向长波长方向漂移。

4.3 保偏光纤温度传感器的工作原理

基于保偏光纤光栅的温度传感器结构如图 4.19:





该传感器主要由泵浦源、隔离器、保偏光纤光栅、增益光纤、光电探测器及 频谱仪组成。泵浦源产生的泵浦光经隔离器进入增益光纤,增益光纤在吸收泵浦 光后形成粒子数反转或非线性增益并产生自发辐射,所产生的自发辐射光经受激 放大和保偏光纤光栅的选模作用后,最终形成稳定激光输出。 保偏光栅的光谱如图 4.20。





Fig 4.20 Reflective spectrum of Polarization-maintaining fiber grating

激光器的输出光谱如图 4.21。



当保偏光栅周围温度变化时,保偏光纤光栅的反射谱的中心波长向长波方向 或短波方向移动,反射谱双峰间的间距逐渐变小或变大,导致激光器输出波长差 变化,波长差变化导致光电探测器检测到的拍频信号发生变化,从而频谱仪显示 的频率发生变化,最后根据频谱仪显示的频率从而准确的测量出对应的温度。

4.4 本章小结

本章首先简要介绍了光纤温度传感器的研究现状,然后在对保偏光纤光栅的 光学特性分析及仿真之后提出了一种保偏光纤光栅温度传感器,利用保偏光纤光 栅反射谱具有双峰特性的特性,巧妙的将保偏光纤光栅激光器与温度传感相结合, 用光电探测器检测激光器输出的光功率,然后在频谱仪上显示出频率,最后通过 频谱仪上的结果我们就能得出温度。这套系统测量准确、灵敏度高,抗电磁场能 力强,传输距离远,使用寿命也很长,价格相对传统温度传感器更低廉,使用更 经济。

5总结及展望

5.1 总结

本文以研究光纤光栅传感器的理论及设计为重点,为新器件的研究提供了理 论依据。本文的主要工作及研究成果如下:

1. 介绍了光纤光栅传感器技术的发展历史及应用现状,说明了本课题研究的 目的及意义。

 2. 分析了光纤光栅温度传感原理、应变传感原理、温度与应变交叉敏感解决 办法及封装技术的进展

3. 在耦合模理论的基础上,利用 matlab 编程,结合传输矩阵法分别对啁啾光 纤光栅和保偏光纤光栅的光学特性进行了数值分析与仿真。

4. 设计了一种双啁啾光纤光栅应力传感器并成功与单片机结合应用于对公路 交通流量的监控,建模仿真结果证明:此系统制作工艺简单,价格低廉,能有效 地减小环境温度变化的影响,为公路交通流量监测,铁路隧道火灾及山体滑坡的 预防等一些特殊的环境提供了一套行之有效的方案。

5.设计了一种保偏光纤光栅温度传感器,将保偏光纤光栅构成的激光器和温度传感器结合起来,仿真结果证明其测量准确度、灵敏度高、抗电磁场能力强, 传输距离远,使用寿命也很长、价格相对传统温度传感器低廉、使用更经济。

5.2 展望

 本论文对双啁啾光纤光栅应力传感器建模仿真进行了实验分析,但其仿真 只是针对应力测试的,实际上这套系统还可用来实现温度传感,比如铺设在铁路
 隧道里来实现火警预防,当隧道内起火了,温度超过一定范围即报警。

本文中只对保偏光栅传感器进行了理论仿真,后续可以在理论的基础上进行实验验证。

参考文献

- Grattan K T V, Sun T. Fiber optic sensor technology an overview[J]. Sensor and Actuators, 2000, 82: 40-61
- [2] 赵二刚,光纤光栅液位传感器研究[D]:上海:复旦大学,2009
- [3] Hill K O, Fujii Y, Johnson D C, et al. Photosensitivity in Optical Fiber Wave guides: Application to Reflection Filter Fabrication[J]. Applied Physics Letters, 1978, 32(10): 647-649
- [4] Meltz G, Morey W W, Glem H. Formation of Bragg Grating in Optical Fibers by a Transverse Holographic Method[J]. Optic Letters, 1989, 14: 823-825
- [5] Hill K O, Malo B, Bilodeau F, et al. Bragg Grating Fabricated inmonomode Photosensitive Optical Fiber by UV Exposure through a Phase Mask[M]. Applied Physics Letters, 1993, 62: 1035-1037.
- [6] 姜德生,何伟.光纤光栅传感器的应用概况[J].光电子·激光,2002,13(4):420-429
- [7] Friebele P, et al. Fiber Bragg grating strain sensors: present and future applications in smart structures[J]. Optics and Photonics News, 1998, 9: 33-37
- [8] 彭刚,光纤布拉格光栅传感器耐高温保护及温度增敏研究[D]. 江西: 南昌大学, 2008
- [9] 仪表展览网 <u>http://www.18show.cn/knowledge/d381900.html</u>, 2010
- [10] 白冰,光纤光栅传感器原理与应用研究[J]. 气象水文海洋仪器,2005,1:21-25
- [11] Ecke W, Optical Fiber Grating Strain Sensor Network for X-38 Spacecraft Health Monitoring[J]. SPIE, 2000, 4185: 888-891
- [12] Zhang L, Spatial and wavelength multiplexing architectures for extreme strain Monitoring system using identical-chirped-grating-interrogationg technique[J]. Proc of the Optical Fiber Sensors Conf. (OFS-12), Williamsburg, VA, USA, 1997, pp.425-455
- [13] Ferdinand P, Applications of Bragg grating sensors in Europe, [J]. Proc of the Optical Fiber Sensors Conf. (OFS-12), Williamsburg, VA, USA, 1997, pp.14-19
- [14] Ecke W, et al. Optical Fiber Grating Strain Sensor Network for X-38 Space craft Health Monitoring [A]. Proc of the SPIE[c]. 2000, 4185: 888-891
- [15] Day G W, Faraday effect sensors: a review of recent progress, Advances in optical Fiber Sensors [J]. SPIE PM07, 1992: 11-26
- [16] Henderson P J, Current metering using fiber-grating based in terrogation of a Conventional current transformer[J]. Proc of the Optical Fiber Sensors Conf. (OFS-12), Williamsburg, VA, USA, 1997, pp.186-189
- [17] Kersey A D, Downhole monitoring in oil reservoirs[J]. IEICE Trans. Electron, E83-C, 2000, pp.400-404
- [18] Hjelme D R, Application of Bragg grating sensors in the characterization of scaled marine vehicle models[J]. Applied Optics, 1997, 36, pp.328-336
- [19] 于永森. Bragg 光纤光栅的制作及在传感器和光纤放大器中应用研究: (博士学位论文). 吉林: 吉林大学, 2005
- [20] 王艳.光纤 Bragg 光栅压力传感器的研究[D].大连理工大学. 2007
- [21] 宋利娜. 光纤 Bragg 光栅温度压力传感技术研究[D]. 西北大学. 2008
- [22] 李科. 光纤光栅传感器的研究[J]. 光电子·激光, 2009, 17(5): 564-567
- [23] 吴海峰,王向宇,雍振等. 消除光纤光栅温度压力交叉敏感技术进展[J]. 光通信技术,

2009, 3: 11-13

- [24] WANG Hong-liang, ZHANG Jing, QIAO Xue-guang, et al. A Fiber Bragg Grating Temperature Sensor with High Temperature-Resistance[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2008, 21(6): 964-966
- [25] 禹大宽,乔学光,贾振安等.一种新颖越装的耐高温光纤 Bragg 光栅温度传感器[J].光 子学报,2006,35(2):232-234
- [26] 武胜军,王宏力,张明源.FBG 应变与温度交叉敏感分离方法研究[J].传感器与微系统, 2008,27(3):27-30
- [27] 王目光,李唐军,卓锋等.光纤光栅传感器应变和温度交叉敏感问题分析[J].光通信研 究,2001,108(6):50-53
- [28] 张祝林,杨振坤.双光纤布拉格光栅温度和应变传感研究[J].西安交通大学学报,2004, 38(6):607-610.
- [29] Jin W, Ho H L, Liao Y B, et al. Development of a wavelength detection system for fiber grating sensors[A], advanced sensor systems and applications[C], Proc of SPIE, 2004: 68-76
- [30] 吴传福, 刘有信. 光纤光栅应变传感器温度补偿解决方案[J]. 激光与红外, 2006, 4: 10-14
- [31] 李晓林,张亚勇.光纤光栅温度应力同时区分测量技术的新进展[J].传感器与微系统, 2007,26(31):13-16
- [32] 禹大宽,乔学光,贾振安等.贴片封装的光纤 Bragg 光栅温度传感器[J]. 仪表技术与传感器,2006,9(9):4-7
- [33] 张燕君,王海宝,陈泽贵等.光纤光栅毛细钢管封装工艺及其传感特性研究[J].激光与 红外.2009.39(1).53-55.
- [34] 周红,乔学光,李娟妮等.用于光纤光栅封装的环氧胶黏剂纳米改性研究[J].光电子·激 光. 2009. 20(5). 590-594
- [35] 刘春桐,涂洪亮,李洪才等. 全金属封装光纤光栅的温度传感特性研究[J]. 传感器与微 系统,2008,27(10): 58-60
- [36] 谢剑锋,张华,张国平等.封装材料性能对光纤布拉格光栅温度灵敏度影响分析[J].光 电子·激光,2008,19(9):1158-1162
- [37] 于秀娟,余有龙,张敏等. 铜片封装光纤光栅传感器的应变和温度传感特性研究[J]. 光 子学报,2006,35(9): 1325-1328
- [38] 刘春桐,李洪才,张志利等. 铝合金箔片封装光纤光栅传感特性研究[J]. 光电子·激光, 2007,19(7):905-908
- [39] 周国鹏,张智明. 一种新型封装光纤布拉格光栅传感器的研究[J]. 压电与声光,2008, 30(6): 680-683
- [40] 方涛,金永兴,沈为民. 钢条封装的光纤布拉格光栅温度传感器[J]. 中国计量学院学报, 2007, 18(3): 204-207
- [41] 俞钢,何赛灵. 一种新型的光纤光栅封装装置[J]. 光子学报, 2004, 33(3): 291-293
- [42] Yamada M, and Sakuda K. Analysis of almost-periodic distributed feedback slab wave-guides via a fundamental matrix approach. Applied Optics, 1987, 26(16): 3474-3478
- [43] 金晓峰,张仲先. 非均匀光纤光栅响应特性的研究[J]. 光学学报, 1999, 19(6): 721-727
- [44] 刘勇,叶志清. 龙格-库塔法和传输矩阵法求解非均匀长光纤光栅问题的比较[J]. 江西师 范大学学报,2001,25(1):57-61
- [45] 刘勇,叶志清. 龙格-库塔法与矩阵分析法处理线性啁啾光纤光栅时延特性的差异[J]. 光 通信技术, 2001, 26(1): 54-56
- [46] 杨龙,马岚,黄笑宇等. FBG 传感技术在智能车流量检测系统中的应用[J]. 光电工程系

统技术,2009,24 (5):30-33

- [47] 马岚,杨龙,陈雷等.基于单片机的新型 FBG 公路交通车流量监视系统[J].光纤与电缆 及其应用技术,2009,4:35-38
- [48] 陈艳,王海燕,张朋,等. 简述光纤温度传感器的原来及应用[J]. 技术与应用, 2008, 14: 23-27
- [49] KIST R. The fiber Fabry-Perot and its application as a fiber-optic sensor element[J]. SPIE, 1985, 585: 126-133
- [50] MURPHY KA, GUNTHER M F, MAYR G, et al. EFPI sensor manufacturing and applications[J]. SPIE, 1996, 2721: 476-482.
- [51] WILLSHIRE A J, NIEWCZAS P, MCDONALD J R. An arrayed waveguide grating based multiplexer and interrogator for Fabry-Perot sensors[J]. IEEE sensors Journal, 2005, 5: 964-969
- [52] 张文涛, 戴静云, 孙宝臣. 一种新型金属封装的光纤法珀温度传感器[J]. 微纳电子技术, 2007, 7/8: 207-209
- [53] 柯涛,朱涛,饶云江等.全光纤微型珐-珀干涉式高温传感器[J].红外与激光工程,2010, 39: 106-109
- [54] 许忠保,叶虎年,叶梅. 半导体吸收式光纤温度传感器[J]. 光电技术应用,2004,25: 62-64
- [55] 张英,王海容,蒋庄德. 半导体吸收式光纤温度传感器的研究[J]. 压电与声光,2007, 29: 389-391
- [56] Cruz J L, Dong L, Reekie L. Improved thermal sensitivity of fiber Bragg gratings using a polymer overlayer[J]. Electronics Letters, 1996, 32 (4): 385-387
- [57] Jung J, Nam H, Lee B, et al. Fiber Bragg grating temperature sensor with controllable sensitivity[J]. Applied optics, 1999, 38: 2752-2755
- [58] 李阔,周振安,刘爱春.基于光纤光栅的高精度测温传感器研究[J].地球物理学进展, 2008,23:1322-1325
- [59] 李阔,周振安.一种灵敏度系数可调的光纤光栅温度传感器[J].大地测量与地球动力学, 2009,29: 144-147
- [60] 由静,张晨. 双管式光纤 Bragg 光栅温度传感器[J]. 大坝与安全, 2009, 3: 28-30
- [61] 周广丽, 鄂书林, 邓文渊. 光纤温度传感器的研究和应用[J]. 光通信技术, 2007, 6: 54-57
- [62] 张艳宾, 保偏光纤光栅传感特性的研究[D]. 北京:北京交通大学, 2007

作者简历

雷飞鹏,2008 年 6 月毕业于湖南科技大学电子信息工程专业,同年进入北京交通大学光 波技术研究所电磁场与微波技术专业攻读硕士学位。

第一作者发表论文:

[1] 雷飞鹏,宁提纲,周倩,曹毅,毕重颖,王惠.光纤光栅传感器的封装进展.光纤与电缆及其应用技术.2010, 3

[2] 雷飞鹏,宁提纲,周倩,毕重颖,曹毅,王惠.基于光纤的温度传感器.[J].光电技术应用.2010.5 专利:

- [1] 雷飞鹏,宁提纲,周倩,毕重颖,曹毅,王惠.保偏光纤光栅激光器温度测量装置.[P].中国专利,2010,申请号:201010236240.3
- [2] 雷飞鹏,宁提纲,周倩,曹毅,毕重颖,王惠.温度不敏感光纤光栅公路交通流量监测装置.[P]. 中国专利, 2010, 申请号: 201020218233.6
- [3] 宁提纲, 周倩, 裴丽, 李晶, 胡旭东, 张帆, 雷飞鹏. 一种三角形光纤光栅的制作装置.[P]. 中国 专利, 2009, 公开号: CN101699324A (200910237207.X):
- [4] 李晶,宁提纲,胡旭东,王清华,曹东亚,刘洋,雷飞鹏,孙倩.基于双电极调制器产生毫米波超宽 带脉冲的装置.[P].中国,2008, CN101436873,授权日期: 2009-05-20
- [5] 宁提纲,李晶,胡旭东,曹东亚,孙倩,刘洋,王清华,雷飞鹏.基于三角形光纤光栅的一体化 色散补偿和可调衰减器.[P].中国,2009,ZL200810224238.7:授权日期:2009-10-21 软件著作权:
- [1] 雷飞鹏,宁提纲. 多模光纤模式特性分析软件.[P]. 中国软件著作权, 2010, 2010SRBJ0015 登 记证日期: 2010-02-01
- [2] 宁提纲, 胡旭东, 孙倩, 雷飞鹏, 刘洋. 光纤中超高斯脉冲传输分析软件.[P]. 中国软件著作 权, 2009, 2009SRBJ3893: 登记证日期: 2009.06.18
- [3] 胡旭东, 宁提纲, 陈青艳, 李晶, 王清华, 曹东亚, 孙倩, 刘洋, 雷飞鹏. 高功率铒镱共掺光纤激 光器仿真软件.[P]. 中国软件著作权, 2008, 2008SRBJ3882 登记证日期: 2008.10.23
- [4] 胡旭东, 宁提纲, 陈青艳, 李晶, 王清华, 曹东亚, 孙倩, 刘洋, 雷飞鹏. 斜率效率优化选择准则 的光纤激光器端面反射系数优化软件.[P]. 中国软件著作权, 2008, 2008SRBJ3591: 登记证日 期: 2008.10.16
- [5] 胡旭东, 宁提纲, 陈青艳, 李晶, 王清华, 曹东亚, 孙倩, 刘洋, 雷飞鹏. 六边环形分布的光纤阵 列相干合束仿真软件.[P]. 中国软件著作权, 2008, 2008SRBJ6002 登记证日期: 2008.12.11
- [6] 胡旭东, 宁提纲, 陈青艳, 李晶, 王清华, 曹东亚, 孙倩, 刘洋, 雷飞鹏. 六边环形分布的光纤阵 列非相干合束仿真软件.[P]. 中国软件著作权, 2008, 2008SRBJ6001: 登记证日期: 2008.12.11
- [7] 胡旭东, 宁提纲, 陈青艳, 李晶, 王清华, 孙倩, 曹东亚, 刘洋, 雷飞鹏. 快速优化高功率光纤激 光器端面反射系数软件.[P]. 中国软件著作权, 2008, 2008SRBJ4272: 登记证日期: 2008.10.31
- [8] 胡旭东, 宁提纲, 陈青艳, 孙倩, 雷飞鹏., 刘洋. 圆环形分布的光纤激光器阵列相干合束仿真 软件.[P]. 中国软件著作权, 2008, 2009SRBJ0036 登记证日期: 2009.01.20

学位论文数据集

关键词*	密级*	中图分类号*	UDC	论文资助		
学位授予单位名称	< *	学位授予单位代	学位类别*	学位级别*		
		码*				
北京交通大学		10004				
论文题名*		并列题名		论文语种*		
作者姓名*			学号*			
培养单位名称*		培养单位代码*	培养单位地址	邮编		
北京交通大学		10004	北京市海淀区西	100044		
			直门外上园村 3			
			号			
学科专业*		研究方向*	学制*	学位授予年*		
			L			
论文提交日期*		· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·				
导师姓名*			职称*			
评阅人	副人 答辩委员会主席*		答辩委员会成员			
电子版论文提交格式 文本() 图像() 视频() 音频() 多媒体() 其他()						
推荐格式: application/msword; application/pdf						
电子版论文出版(发布)者 电子版论文出版(发布)地			权限声明			
论文总页数*	论文总页数*					
共 33 项,其中带*为必填数据,为 22 项。						

表 1.1: 数据集页