

光纤光栅传感器的应用概况^{*(20)}

姜德生, 何伟

(武汉理工大学光纤中心, 光纤传感技术国家重点工业性试验基地, 武汉 430070)

摘要:就国外光纤光栅传感器在民用工程结构、航空航天业、船舶航运业、石油化工业、电力工业、核工业、医学等方面的应用作了简单的综述。

关键词:光纤光栅; 传感器; 应用

中图分类号:TN253 **文献标识码:**A **文章编号:**1005-0086(2002)04-0420-11

Review of Applications for Fiber Bragg Grating Sensors

JIANG De-sheng, HE Wei

(National Key Industrial Test Base for Fiber Optic Sensing Technology Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

Abstract: This article presents a systematic review in applications of fiber Bragg grating sensors in many different fields including civil structures, aeronautics and space, ship and marine, oil and chemical industry, electric and unclear power industry, and medicine in the past decades.

Key words: Fiber Bragg grating; Sensor; Application

1 引言

光纤传感器种类繁多,能以高分辨率测量许多物理参数,与传统的机电类传感器相比具有很多优势,如:本质防爆、抗电磁干扰、抗腐蚀、耐高温、体积小、重量轻、灵活方便等,因此其应用范围非常广泛,并且特别适于恶劣环境中的应用。有人说^[1]:1992年世界光纤传感市场约1.9亿美元,1997约3.05亿美元,到2002年预订可达到5.5亿美元。也有人预测:本世纪头10年,仅美国光纤传感器的市场就有50亿美元。

传统的光纤传感器绝大部分都是“光强型”和“干涉型”的。前者的信息读取是测量光强大小。因此光源起伏、光纤弯曲损耗、连接损耗和探测器老化等因素会影响测量精度。后者的信息读取是观察干涉条纹的变化,这就要求干涉条纹清晰,而干涉条纹清晰就要求两路干涉光的光强相等,使光纤光路的灵活和连接的方便等优点将大打折扣,而且它是一种过程传感器,而不是状态传感器,必须要有一个固定参考点,这样就给光纤传感器的应用带来了难度。

光纤光栅传感器除了具有普通光纤传感器的许多优点外,还有一些明显优于光纤传感器的地方,其中最重要的就是它的传感信号为波长调制。这一传感机制的好处在于:(1) 测量信号不受光源起伏、光纤弯曲损耗、连接损耗和探测器老化等因素的影响;(2) 避免了一般干涉型传感器中相位测量的不清晰和对固有参考点的需要;(3) 能方便地使用波分复用技术在一根光纤中串接多个布喇格光栅进行分布式测量。另外,光纤光栅很容易埋入材料中对其内部的应变和温度进行高分辨率和大范围地测量,光纤光栅传感器被认为是实现“光纤灵巧结构”的理想器件^[3]。因此自1989年Morey^[4]首次报道将光纤光栅用作传感以来,受到了世界范围内的广泛重视,并且已经取得了持续和快速的发展。有关光纤光栅传感器的感应原理、性质、制作、解调以及复用技术等,已经有很多文章作了介绍^[5,6],本文旨在对国外光纤光栅传感器的应用开发情况作一简单的综述。

2 民用工程结构中的应用

民用工程中的结构监测是光纤光栅传感器应用

⁽²⁰⁾收稿日期:2001-12-03

* 基金项目:国家自然科学基金资助项目(50179029)

最活跃的领域。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。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)^[7],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炭纤复合材料筋上,对桥梁结构进行长期监测,这在以前被认为是不可能。

1999年夏,在美国新墨西哥 Las Cruces 10号州际高速公路的一座钢结构桥梁上,安装了120个光纤光栅传感器,创造了当时在一座桥梁上使用光纤光栅传感器最多的纪录。这座桥梁于1970年建成,已经出现了许多疲劳裂纹,光纤光栅传感系统不仅可以对标准车辆进行探测和计数,而且要以测量车辆的速度和重量,有了此系统,就能监视动态荷载引起的结构响应、退化和损坏,了解桥梁对交通响应的长期变化。1997年,在美国俄亥俄州的巴特勒县建造了一座全复合材料的桥梁,复合材料在制作过程中埋入了光纤光栅应变传感器,通过互联网可以有规律地监视桥梁的荷载响应和跟踪连接绳索的长期性能。佛蒙特大学的一个研究小组用光纤光栅传感器远距离监测沃特伯里佛蒙特钢构架大桥,测量数据传输到中心计算机进行分析并发布到互联网上。俄勒冈哥伦比亚河谷上的 Horsetail fall 桥是一座古老的桥梁,1914年建成,原为混凝土结构,当初设计没有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了加固,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年开始至今,每个月用便携式光谱仪测量一次数据。

德国德累斯顿附近 A4 高速公路上有一座跨度 72 米的预应力混凝土桥,德累斯顿大学的 Meissner 等人将布喇格光栅埋入桥的混凝土棱柱中,测量荷载下的基本线性响应,并且用常规的应变测量仪器作了对比试验,证实了光纤光栅传感器的应用可行性^[8]。比利时根特的环城运河上建了一座 147 m 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^[9]。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 箱形梁高架桥的建造过程中,使用了 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了监测,32 个光纤光栅分布于箱形梁的不同位置、用扫描法-泊系统进行信号解调^[10]。另外瑞士温特图尔的 Storck 桥也是最早使用光纤光栅传感器的桥梁之一^[11],桥的碳纤增强聚合物缆中安装了光纤光栅传感器对桥梁进行长期监测。加拿大温尼伯湖附近的 Taylor 大桥也用了光纤光栅传感器进行监测^[7]。

为了获得受损桥梁应变分布的更详细信息,美国海军研究实验室在一座 1/4 比例桥梁模型中埋入了 60 个光纤光栅的传感系统,对模型进行了破坏测试^[12]。这套系统的典型响应时间是 0.1 s,非常适合静态应变测量,但不适于动态应变测量,因为受到了用于波长漂移测量的可调法-泊腔滤波器扫描速度的限制。

Dewynter-Marty 等人^[13]制作了一种变形仪进行混凝土应变和裂缝的探测测量。这种装置制作得很精致,约 10~20 cm 长,一光纤光栅附着在一根中心金属传感棒上,传感棒被固定在建筑物上进行测量。在许多实际的应用中,光纤光栅都是通过传递物感应变,而不是直接固定在结构表面,除非可直接将光纤光栅埋进结构中。最近瑞士的研究人员^[14]就将光纤光栅传感器埋入混凝土,对混凝土断裂延伸带的宽度进行了测量。这之前对混凝土断裂延伸带的测量仅限于裂缝的表面或者是间接的内部测量。

美国联邦公路局研究发展计划^[15]中的一部分就是光纤传感器的应用研究。弗吉尼亚 Turner-Fairbank 公路研究中心和美国海军研究实验室合作研制出光纤光栅结构监测系统,这种系统正被安装在几座桥梁的增强混凝土构件中,对应变和车辆载重进行监测。这种技术可用于铁路、密集交通结构、高速公路、桥架及机场跑道的监测,还可用于监测交通工具(包括飞机和轮船以及复合材料制成的构件和零件)的结构条件。他们还在混凝土梁和甲板面板中对此系统进行了测试,混凝土梁和甲板面板中埋入了 32 个光纤光栅传感器,结果表明传感器足以承受混凝土的浇注和凝固,完全可以和常规的传感器媲美甚至更好,混凝土发生裂纹后传感器还完好无损。另外他们还在新墨西哥州立大学设计、制作和使用了一套 32 个光纤光栅的传感系统,制定了一套土木工程师在现有

桥梁上安装光纤光栅传感器的初级指南^[16]。美国联邦公路局光纤研究项目的另一个内容是开发用于道路和场地测量的应变仪^[17]。这些地方很难用常规仪器进行应变监测。目前已经用光纤光栅传感器替代常规的应变片传感元件制作了几种仪器。仪器已经在有重型卡车的道路中进行了评估。

在地下工程和采矿业中,岩石形变的静态测量受到特别的关注,因为地下挖掘和爆破一般会造成周围地层的应力体系变化,这可能引起周围环境不稳定从而威胁工人的安全并造成破坏。德国的 GFZ Potsdam^[18]开发了一种地下岩石挖掘过程中测量应变的光纤光栅传感器—FBX 地脚螺栓。这种新型的传感器是在一根玻璃纤维增强聚合物岩石地脚螺栓中埋入光纤光栅,用于探测岩石构成和岩石工程结构中的静态和动态应变,这些结构包括隧道、洞穴、坑道、或者深层地基。这种传感器很有希望用于监视复杂的地质数据场,如恶劣环境条件下的位移、应变、应力、压力和温度。另外他们还开发了一种光纤光栅地震成像系统^[19],并在瑞士一个地下煤矿坑道中进行了现场试验。新的光纤光栅传感器能被用作地震接收器,测量实际岩块中非常小的应变振动。

在欧洲的 STABILOS 计划中,一种基于宽带掺铒光纤光源和可调法—泊滤波器的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^[20];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^[21]。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 1 mm 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^[22],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商品化,例如,美国的 Blue Road Research 就生产商用的光纤光栅传感器。他们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已卖出去很多,俄勒冈哥伦比亚河谷上的 horsetail fall 桥上用的光纤光栅传感器就是他们生产的。他们生产的埋有横向光纤光栅传感器的承重元件可用于桥梁、隧道、公路的结构应变监测,同时可测量车速,控制交通。他们生产的灵巧垫圈埋有光纤光栅传感器,可以用来监测结构关键部位的螺丝承重情况。他们还开发了一种监测公路结冰的传感器,这种传感器做成 U 形导管,U 形导管底部埋有横向光纤光栅应变传感器,导管空着

或装有水时,车辆的压力传不到底部光纤光栅应变传感器中,如果公路结冰,车辆的压力就会传到光纤光栅传感器中^[23]。在英国,Smart Fibres Ltd 将光纤光栅传感器埋进复合材料中,制成各种灵巧结构,这些结构可用于民用工程中的许多方面。新加坡的 Inventive Fiber^[24]也生产用于结构监测的光纤光栅应变传感器。

3 航空航天业中的应用

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,所需要使用的传感器超过 100 个,因此传感器的尺寸和重量变得非常重要。光纤光栅传感器只有 1 根光纤,敏感元件(光栅)制作在纤芯中,从尺寸小和重量轻的优点来讲,几乎没有其他传感器可以与之相比。因此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好几个光纤光栅传感器的技术专利^[25]。

使用先进的复合材料来制造航空航天结构(如机翼部件)是一个必然的趋势。与金属材料相比,先进的复合材料更能抗疲劳、重量更轻、强度—重量比更好、能够制作复杂的形状、而且抗腐蚀,尤其是很容易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机载传感系统的实时健康和性能监视,这可以减少飞行器重量、缩短检查时间、降低维护成本,从而改善其性能^[26]。Smart Fibres Ltd 为飞机和航天器提供埋有光纤光栅传感器的复合材料灵巧结构,以利于健康和使用的监测、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^[27],对航天飞机进行实时的健康监测。X-33 是一架原型机,设计用来作“国际空间站”的往返飞行。埃姆斯研究中心用无损灵敏压力传感器对直升机旋翼进行测量,他们将光纤光栅传感器埋入一个特别设计的套管中,管厚小于 1.6 mm 可在飞行和风洞试验中提供两维、实时的传感数据^[28]。目前直升机旋翼的压力传感是在机翼上钻孔,将压力传感器放入孔中进行测量。这种有损伤的方法要求对旋翼进行特殊的设计和制造,需耗资一百多万美元。他们还将光纤光栅传感器应用于测量尾部旋翼荷载、转子与机身的作用、机内转子航空动力学、倾斜转子中转子与转子的相互作用,转轴航空动

力学、以及尾流与尾翼的相互作用。兰利研究中心和汉普顿大学合作开发用于空气动力学装置的光纤光栅剪切应力监测传感器^[29]。

美国国家航空和宇宙航行局还有一项计划^[30],就是研究在常温和低温条件下复合材料高压容器的多用光纤传感器,使用的主要技术是各种光纤光栅和干涉传感器,此项研究的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,项目的主要承担机构为马歇尔航天中心。埃姆斯研究中心光子研究室也在为可重复使用运载火箭上低温箱设计特殊的光纤光栅传感器用于健康监视^[31]。这是他们与洛克菲德-马丁公司共同进行的X-33技术项目的一部分。这个项目是为可重复使用运载火箭提供健康管理系统,以便可重复使用运载火箭的维护。其中的一个方面就是载有液态氢和氧的低温箱的维护,新的传感器应能够埋入箱中并承受太空中的恶劣环境,同时可以精确测量箱中的应力及其它有影响的因素。洛克菲德-马丁公司已经确认光纤光栅传感器是一个理想的技术。

Blue Road Research 联合美国海军空战中心和波音幻影工作组,使用 Blue Road Research 生产的光纤光栅传感器对飞机的粘和接头完好性进行了评估^[32]。以前这种评估所常用的方法,如超声波和X射线,非常耗时而且信号难以处理。美国海军研究实验室将光纤光栅传感器固定在飞机轻型天线反射器的不同位置,测量纵向应变、弯曲和扭矩^[7]。由于反射器的支杆很小,不能用常规的电阻应变仪进行测量。

在法国,几个机构合作通过探测复合材料结构内的不可见影响(如分层和裂缝),对战斗机雷达屏蔽的完善性进行评估,复合材料结构内埋有光纤光栅传感器。用于新引擎和高压仓的先进复合材料结构的设计和制造是航空航天业非常关注的问题,最近CEA-LETI也正在开发埋入光纤光栅应变计的高压仓^[21]。

在德国,自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用光纤光栅开发自适应机翼。他们准备花7年时间找到一种结构动态方案优化飞机的航空动力学性能,他们在结构变化监视中使用了静态分布埋入式光纤光栅应变和温度传感器^[21]。

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时复用应变和温度测量系统。同时也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^[21]。

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^[33]。喷气涡轮发动机系统环境具有有高温高压的特征并伴有高速气流及高速、高密度声波,气流的入口温度可低于 -50°C ,喷射口的温度可高达 1500°C ,各种压缩室的压力测量要求达到 15000 kPa 。

英国航空领导了11个合作机构进行研究^[21],目的在于减少20%的飞机检测,这意味着一架20年寿命的飞机将节省两百万美元的检测费。为实现此目的,几种传感技术都纳入研究范围,其中包括光纤光栅传感技术。

4 船舶航运业中的应用

在光纤光栅传感器应用方面,唯一可以和飞行器相提并论的就是船舶了。GCRMTC是一个长期为美国海运业提供真实技术评价的机构,它旨在通过主持资助研究项目,增强美国造船工业的国际竞争力。1998年它与美国海军研究办公室签订了一个五年的合作协议,目的在于协调、实施和督促美国海军和海运公司的科技项目,这些科技项目分布在大学、政府实验室、非营利和营利机构中。最近在GCRMTC的一份报告中对光纤传感系统在船舶制造和船上监测中的应用作了全面的评价,其中提到:随着船载控制系统复杂性的不断增加,要求有越来越多精巧的传感器引入整个船舶。所需要的传感器数量很可能不断增大,并且唯一的限制将只有传感系统的成本。对于传感器的大量需求使得造船工程师对光纤传感器产生了很大兴趣。光纤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。报告中提出的四个任务之一就是光纤光栅传感器的应用开发。现代船用传感器中多达90%是压力或温度传感器,通过选择适当的封装和衬底材料可以将光纤光栅应变传感器转变成温度和压力传感器,利用波分和时分复用原理,一个探测系统的光纤光栅传感器数量可以多达数万个。GCRMTC已经在Orleans大学研制成功用于船舶损伤监测的大规模光纤光栅传感系统。

先进的复合材料越来越多地引入船舶的设计和制造,它可以极大地减轻船舶的重量,这对于快速船舶特别有意义;另外复合材料抗疲劳、抗腐蚀、容易成形。为了获得复合材料结构的强度和成本的优化,必须了解这种结构的完整行为特性。使用模型测量,然后将测量结果按比例推算到实际船舶,是一种常用的

方法。Hjelme 等人^[34]用光纤光栅传感系统对一个按比例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。一种干涉探测的 16 通道波分复用光纤光栅传感器系统被用来进行复合材料面板的冲击测试^[35],这种复合材料面板将用于设计制造气垫双体船。Smart Fibres Ltd 对于船舶用的复合材料灵巧结构非常感兴趣,他们已经在—艘名为 Jacqueline 的游艇上,用复合材料灵巧结构制作了一个 38 m 长的桅杆, Jacqueline 游艇于 1998 年夏天下水进行海上测试。

美国海军对光纤光栅传感技术非常重视,是光纤光栅传感器应用开发的积极参与者。美国海军研究实验室是光纤光栅传感器应用方面领先的机构之一,他们已经开发了用于各种结构中多点应力测量的光纤光栅传感技术,这些结构包括桥梁、大坝、船体甲板、太空船和飞机^[36]。在美国海军的资助下^[37],PHYSICAL SCIENCES, INC. 正在开发船舶结构健康监测系统,一套测试设备将安装到模拟船体甲板上,在静态和慢变化结构应变中,对裸光纤、光纤光栅传感器、基于朗讯科技的遥测纪录系统、包括波长复用等的潜在性能进行测试; SYSTEMS PLANNING & ANALYSIS, INC 正在开发用于海军舰船的开放式体系结构健康监测系统,这套系统基于光纤光栅和数字通信技术,这是一个双目的系统,即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 SYSTEMS PLANNING & ANALYSIS, INC 受阿林顿海军研究办公室的资助,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^[38],这个系统基于商用光纤光栅和通信技术。他们还开发了一种解调装置,这个装置使用数字空间波长复用技术,从而能低成本多复用地进行应变监测,此装置能以 2 kHz 的取样率对多达 120 个分离光纤光栅进行询问。整个系统于 2001 年初进入现场试验,计划 2002 年投入商用。最近他们又从海军接到一个项目^[39],准备采用光纤光栅传感技术和混合空间/波分复用技术实时测量拖曳阵列的三维形状,这种技术对阵列测量的改善将超过现有阵列估算技术一个数量级,从而可增强海军的战术优势。

远海中,船体关键位置的动态应变监测以及超载条件下的及时报警是非常重要的。美国海军研究实验室和挪威海军有一个联合项目:埋入传感系统的复合材料船体,其目标是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^[40]。

法国已经在航道中用玻璃增强塑料闸门代替常规的钢闸门^[21],闸门叶片由厚的玻璃增强塑料制成,用水平扭转梁加固,可绕一个垂直轴转动。其中一个闸门中埋入了五个光纤光栅传感器(一个做温度补偿,四个作应变测量)。实时测量的结果与水平面的变化以及光纤光栅处所预料的应变吻合得很好。这些数据可被设计师用来优化系统。

5 电力工业中的应用

电力工业中的设备大都处在强电磁场中,一般电类传感器无法使用。很多情况下需要测量的地方处在高压中,如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的实时测量,这些地方的测量需要传感器具有很好的绝缘性能、体积小、而且是无源器件,光纤光栅传感器是进行这些测量的最佳选择。有一些电力设备经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,使用分布式光纤光栅传感系统的遥测能力可以极大地减少设备维护费用。因此光纤光栅传感器在电力工业中的应用前景很好。

利用法拉第效应的光纤传感器已被用于配电网中高电压下的大电流测量,但是由于线性双折射、温度和振动所引起的问题,限制了这一技术的应用。一种替代的方法是用常规电流转换器、压电元件和光纤光栅组成的综合系统对大电流进行间接测量^[41],电流转换器将电流转变成电压,电压变化使压电元件形变,形变大小由光纤光栅传感器测量。另有一种改进的方法进一步改善了分辨率^[42],此方法中光纤光栅传感器由基于光纤光栅的法-泊腔代替。

知道高电压、大功率设备(如发电机和变压器)中的局部温度分布,对于了解它们的工作状态以及鉴定新的或修理过的产品质量是至关重要的。设备的缺陷或退化可以通过连续监视线圈绕组的温度变化检查出来。Hammon 等人^[43]演示了用光纤光栅传感器测量高压变压器的绕组温度,长期监测的精度已达到 $\pm 3^{\circ}\text{C}$ 。如果将波分复用技术用于此系统,则可进行实时多点测量。德国西门子公司正在将光纤光栅传感器用于气冷涡轮发电机定子温度的测量^[44],他们用环氧树脂将光纤光栅埋入定子中,光纤光栅经过特殊的封装,以保证在真空和 $4 \times 10^5 \text{ Pa}$ 压强下没有形变,并且对 160°C 温度下环氧树脂中的化学和物理变化不敏感,他们的目标是连续测量范围从 20°C 到 160°C ,测量精度小于 1°C 。同时,他们还在同一发电机中

对大电流进行了测量。

高压传输电缆的积雪超过其承载能力会导致严重事故,特别是高压传输电缆处于难于检查的地方更是一个突出的问题,因此需要在线监视电缆的荷载变化。Ogawa 等人^[45]在 30 km 长的电缆上布置了 10 个光纤光栅,光纤光栅贴在金属板上,金属板固定在电缆上,荷载变化引起的电缆应变经金属板传入光纤光栅,用波分复用技术对光栅反射信号进行解调。对于更长距离高压传输电缆的监测需要更多的光纤光栅,这种情况下解调可以采用时分复用技术,因为光纤光栅之间的距离很大,不需要高速的调制和解调。日本北海道就在用光纤光栅传感器测量高压传输电缆的积雪荷载^[46]。

目前风力涡轮发电机越来越大,从 MW ~ 数 MW。一个输出 1.5 MW 的风力电站需要 70 m 长的叶片,100 m 的塔高。下一代的风力涡轮发电机将达到 5 MW 甚至更大,所需要的叶片超过 100 m,实时监测这些叶片是非常必要的。Smart Fibre Ltd 准备制造复合材料叶片,在制造过程中将光纤光栅传感器埋入复合材料中,对风力涡轮发电机进行长期地实时实地监测。在此应用中,光纤光栅传感器可克服电类传感器受电磁干扰,怕雷击的缺点。

6 石油化学工业中的应用

石化工业属于易燃易爆的领域,电类传感仪器用于诸如油气罐、油气井、油气管等地方的测量存在不安全的因素。光纤光栅传感器因其本质安全性非常适合在石油化工领域里应用。

永久连续的井下传感有利于油田的管理、优化和发展,目前只有少数的油井使用了永久连续井下油田监控系统,而且主要是电类传感器,高温操作和长期稳定性的要求限制了电类传感器的使用。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^[47],挪威的 Optoplan^[48]正在开发用于永久井下测量的光纤光栅温度和压力传感器。“边钻边测”系统对钻井作业是非常有利的,Weis 等人^[49]用光纤光栅制成一个井下光纤光栅调制器,用来跟踪钻井过程中绞盘头的幅度变化。有人在海上钻井平台的复合材料索链中安装光纤光栅传感器用来测试索链棒的强度和疲劳^[50]。美国的 CiDRA^[51]和英国的 Smart Fibres Ltd 都在将光纤光栅传感技术用于海洋石油平台的结构监测。

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,如果不能及时地探测、定位

和修复,可能造成严重的环境污染甚至是灾难性后果,因此开发探测和定位碳氢化合物泄漏的快速反应系统是非常重要的。最近,Spurin 等人^[52]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。将这种光纤光栅传感器置于待测的地方,如果有碳氢化合物的渗漏,聚合物就会膨胀,光纤产生应变,光栅反射的布喇格波长发生漂移,通过监视布喇格波长的漂移就可知道光纤光栅处的石油泄漏情况。在汽油的影响下,这种光纤光栅传感器的布喇格波长漂移 0.1 nm/min。这比环境温度的影响大得多,通常温度影响的布喇格波长漂移小于 0.5 nm。美国 McDermott Technology Inc^[53]正在开发用于高压管道应变和弯曲监测的光纤光栅传感器。

光纤光栅周围化学物质浓度的变化通过倏逝场影响光栅的布喇格波长,利用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 等人^[54]就报道了这种光纤光栅化学传感器。后来 Ecke 等人^[55]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。在纸浆制造过程中,需要用碱性溶液将纤维素从木质素中分离出来,碱性溶液的对比对纸浆的质量是非常重要的,瑞典斯德哥尔摩皇家技术院的 Asseh 等人^[56]用刻蚀方法制作的光纤光栅化学传感器能对碱性溶液的优化配比进行监测。Peng 等人^[57]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,氢化物的变化反映了氢气浓度的变化,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喇格波长。美国马里兰大学工程学院灵巧材料和结构研究中心^[58]用光纤光栅开发了一个分布式氢气泄漏传感系统,系统中有 40 个光纤光栅氢气传感器,准备将其安装在航天飞机主推进器的四周,探测氢气得泄漏,他们也在为 X-33 的复合材料燃料箱开发一个较简单便宜的氢气泄漏监视技术。

长周期光栅是一种光栅周期相对普通光纤光栅较长的特殊光纤光栅,与普通光纤光栅相比,它对光纤包层外材料的折射率变化更敏感,因为长周期光栅将正向导模耦合到几个正向包层模,围绕包层的材料折射率的任何变化都会改变透射光谱的性质,用长周期光纤光栅制作的化学传感器配以适当的解调技术其灵敏度可达到 10^{-7} ^[59]。Zhang 等人^[60]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、己醇、甲基环己烷和正十六烷,Falciai 等人^[61]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。美国的 Luna Innovations^[62]是专门生产光纤传感器的公司,正在开发长周期光纤光栅化学和生物化学传感器,将光纤光栅涂上特殊的活性涂覆层,可以测量低 ppb 浓度的目标分子,目前可测的物质有杀虫剂、内毒素、蛋白质、金属离子、四氯化碳、燃料碳氢化合物、氯化碳氢化合物,另外还可以测湿度。

7 医学中的应用

传感器的小尺寸在医学应用中是非常有意义的,光纤光栅传感器是现今能够做到最小的传感器。光纤光栅传感器能够通过最小限度的侵害方式对人体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。光纤光栅传感器对人体组织的损害非常之小,足以避免对正常医疗过程的干扰。

在许多医学应用中,传统的热电偶和热敏电阻温度计是不适用的。使用高频电流、微波和激光进行热疗法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且拓宽高密度超声波的医疗应用也是一种趋势。在这些医疗实践中,强的电磁场或超声波压力场会在人体组织局部产生每厘米十几度的温度梯度,精确的测出温度分布是非常必要的。一种光纤光栅阵列温度传感器^[63]被设计用来测量超声波、温度和压力场,内部实地地研究病变组织的超声和热性质,传感器的分辨率为 $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$,精度为 $\pm 0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$,测量范围为 $30\sim 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。另一个光纤光栅温度传感系统^[64]被研制用来遥测核磁共振机中的实地温度,探头由四个光纤光栅组成,探头置于核磁共振机中的一个容器中,容器中的磁场约 4.7 T ,用 25 m 长的光纤连接探头和解调仪,系统的分辨率为 $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$,精度为 $\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$,测量范围为 $25\sim 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

光纤光栅传感器还被研究用来进行心脏效率的测量^[65],这种测量基于一种定向热稀释导流管方法。在这种方法中,医生将定向热稀释导流管插入病人的右心房,并注射一种冷冻液,通过测量肺动脉血液的温度,结合脉动率就可确定心脏泵血量,这对于心脏监测是很重要的,目前用于测温的传感器是常规的热敏电阻和热点偶。

巴西的 Wehrle 等人用弹性胶带将光纤光栅应变传感器固定在病人的胸部,通过胸腔的变化,测量呼吸过程的频谱。这种测量可用在电致人工呼吸中,这时病人胸部装有高压电极,通过高压放电刺激隔膜

神经帮助病人呼吸。用光纤光栅传感器控制高压放电的触发,监视病人呼吸情况,有利于改善电致人工呼吸的效果。如果用常规的电类传感器会受到高压放电的干扰。

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^[67],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以绘图设备可以绘出外科校正压力的空间图形,能用于监视患者站立时的脚底压力分布。

诊断超声波设备在医疗中有许多应用,如:超声波外科、超声波热疗及超声波碎石等。超声波设备的输出功率需要用传感器来监视,常规的压电装置易受电磁干扰,信号变形,并且由于探头尺寸的限制,难于确定体内的超声波场。光纤光栅传感器可以克服这些困难,而且能同时测量几个点的超声波场。Fisher 等人^[68]用光纤光栅传感器探测高频($\sim 2\text{ MHz}$)超声波场,由于在超声波波长比光栅短的情况下,在光栅中形成的驻波导致光栅内应变不均匀,从而影响系统的响应,降低了光栅的效率。他们后来用了一个 1 mm 长的光纤光栅测量超声波场,使压力分辨率达到 $\sim 10^{-3}/\sqrt{\text{Hz}}$ ^[69]。目前应用于医学的最高超声波频率为 4 MHz ,如要测量这种频率的超声波,光栅长度应小于 0.5 mm 。

8 核工业中的应用

核工业是个高辐射的地方,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。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,所有这些都不能在设计时预见,因此需要更多的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研究^[70],他们实验测量了各种商用光纤光栅对 γ 辐射的敏感性。他们的研究结果是:光纤光栅的温度敏感系数在 3% 的精度内不受 γ 辐射影响;布喇格反射波的幅度和宽度在 γ 辐射下没有变化;布喇格波长在 γ 辐射下变化不大于 25 pm ,并且 γ 辐射剂量达到 0.1 MGy 时,波长变化饱和。他们认为:光纤光栅温度传感器可能在 γ 辐射水平为 1 MGy 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 neutron 辐射的敏感性^[71],发现光纤载氢不仅可以增强光敏性,也会增加对离子化辐射的敏感性。

日本核能研究院 1999 年 4 月~2000 年 3 月的年度报告^[72]中提到,他们正在日本材料测试反应堆,通过辐射环境测试确保光纤光栅用于核电厂设备和管道的传感,并能在几乎整个反应堆寿命期间忍耐核辐射。

核电站的反应堆建筑或外壳结构是很厚的钢或钢筋混凝土地板和墙,是设计用于防止核泄漏的最后防护屏障,它们所承受的压力对于 900 MW 核电站的单层壳体是 12×10^5 Pa 对于 1300 MW 核电站的双层壳体是 9×10^5 Pa。使用静态分布式光纤光栅传感系统进行遥测将极大地增强可靠性、安全性、并减少维护费用。1995 年,法国的 CEA-LETI、EDF 和 Framatome^[21]就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^[22]。他们将光纤光栅传感器安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监测。

在增压水反应堆核电站中,水被用来吸收热但不沸腾,因为水被保持在高压中,在热-机械循环中管道和接头会发生老化,因此早期泄漏探测是一个重要的课题。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和泄漏。1996 年初,由英国 BICC Cable Ltd^[21]牵头的一个联盟开展了一个为期 3 年的 Brite 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。

高辐射的核废料必须储藏在地下很长时间。德国将研究用布喇格光栅传感器监测地下核废料堆中的应变和温度^[22]。

9 其他方面的应用

光纤光栅传感器在其他方面也有许多应用。例如:

(1) 加速器可用于所有工程的测量,如振动、人射角、事件记录、平台稳定性、车辆暂停控制、地震监测、以及起搏器控制等,用光纤光栅传感器制作的加速器表现出良好的性能^[73]。

(2) 用光纤光栅制作的水听器用来测量水下声场,其性能很好^[74]:线性响应、高灵敏度、高稳定性、宽的动态范围(90 dB)和宽的操作频率范围(从几 kHz 到几 MHz)。

(3) 用光纤光栅制作的机械工具系统结构形变监测传感器^[75]可以探测到实用结构微米量级的形变,其误差为 0.4 %。

(4) Physical Optics Corporation^[76]开发的光纤光栅腐蚀探测器能探测造成腐蚀的因素如潮湿,以及腐蚀生成物如氢氧化物和铝离子。还有一种光纤光栅腐蚀探测器是在光纤的涂敷层中加入某种电化学反应活性物质,这种电化学物质对氧化还原反应敏感。

(5) 埃姆斯研究中心^[77]用光纤光栅制作身份和物品的识别系统,或者是光纤光栅安全系统,钥匙就是一个特别制作的光纤光栅,这种光纤光栅钥匙可以做得很小,很结实,不容易仿造。

(6) 比利时核研究中心的研究人员准备将光纤光栅用于机器人的执行终端或机器手的传感^[78],由于这些遥控工具也必须能在电磁噪声环境中工作,使用传统的电类应变仪需要复杂的设计和大量的屏蔽连接,用光纤光栅应变传感器就可以解决这些问题,传感器可以做得很紧凑,与仪器的连接只需一根光纤。为此他们制作了一种光纤光栅多构件力传感器。

10 结 论

总之,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。目前限制光纤光栅传感器大量实际应用的最主要障碍就是传感信号的解调。正在研究的光纤光栅传感解调方法有许多,但是能够实际应用的解调产品并不多,而且价格昂贵。美国的 Micron Optics 是一家光纤光栅传感解调产品做得比较好的公司,他们用可调 F-P 腔滤波方法生产的 FBGIS,其动态范围约 30 nm,分辨率为 1 pm,测量精度 ± 5 pm,扫描速度 50 Hz,价格约 2 万美元。他们新推出的 FBGSLI 采用可调激光扫描方法,其动态范围 > 30 nm,分辨率为 1 pm,测量精度 ± 5 pm,扫描速度 100 Hz,可以同时四路光纤多达 256 个布喇格光栅进行查询,但价格不便宜,需好几万美元。前面提到的 SYSTEMS PLANNING & ANALYSIS, INC 使用数字空间波长域复用技术,能低成本多复用地进行应变监测,此装置能以 2 kHz 的取样率对多达 120 个分离光纤光栅进行查询。整个系统于 2001 年初进入现场试验,计划 2002 年投入商用,还不知道价格如何。Blue Road Research 推出一种基于啁啾光栅的解调系统,取样率可达 7 kHz,并称最高可达 3 MHz,价格约 5 千美元,但这种解调系统只能解调一个光纤光栅,而且分辨率和精度都不高。美国 Luna 准备今年完成 DGDS 的原型机,号称

可以同时测量 4 根 8 m 光纤上的 3 000 个布喇格光栅传感器, 报价为 10 万美元。如此高的价格很难在实际工程中得到广泛应用, 因此研究开发适于实际工程应用的解调系统, 降低解调系统的成本, 是使光纤光栅传感器能够在实际工程应用中得到推广的关键问题。

参 考 文 献:

- [1] Willsch R. Application of Optical Fibre Sensors: Technical and Market Trends[A]. *Proceedings of the SPIE* [C]. 2000, **4074**: 24-31.
- [2] Othons A, Kalli K. *Fiber Bragg Gratings* [M]. Boston · London: Artech House Inc, 1999, 401.
- [3] Udd U. *Fibre-optic smart structure* [M]. New York: Wiley, 1995.
- [4] Morey W W. *et al.* Fiber optic Bragg grating sensors [A]. *Proc SPIE* [C]. 1989, **1169**: 98-107.
- [5] Rao Y J. In-fibre Bragg grating sensors[J]. *Meas. Sci. Technol.*, 1997, **8**: 355.
- [6] Kersey A D. *et al.* Fiber grating sensors[J]. *IEEE J. of Lightwave Tech.*, 1997, **15**: 1442-1463.
- [7] Friebele P. *et al.* Fibre Bragg grating strain sensors: present and future applications in smart structures [J]. *Optics and Photonics News*, 1998, **9**: 33-37.
- [8] Slowik V. *et al.* Fibre Bragg Grating Sensors in Concrete Technology[J]. *LA CER*, 1998, **3**: 109-119.
- [9] Internet reference: bssm.org/ConferencePage008.html.
- [10] Vohra S T. *et al.* Quasi-Static Strain Monitoring During the 'Push' Phase of a Box-Girder Bridge Using Fiber Bragg Grating Sensors[A]. *European Workshop on Optical Fibre Sensors* [C]. Scotland, UK, 1998.
- [11] Nellen P M. *et al.* Application of fiber optical and resistance strain gauges for long-term surveillance of civil engineering structures [A]. *Proc. SPIE* [C]. 1997, **3043**: 77-86.
- [12] Kersey A D. *et al.* Progress towards the development of practical fibre Bragg grating instrumentation systems[A]. *Proc. SPIE* [C]. 1996, **2839**: 40-63.
- [13] Dewynter-Marty V. *et al.* Concrete strain measurements and crack detection with surface-mounted and embedded Bragg grating extensometer[A]. *Proc of the Optical Fiber Sensors Conf. (OFS-12)* [C]. Williamsburg, VA, USA, 1997, 600-603.
- [14] Denarie E. *et al.* Concrete fracture process zone characterization with fiber optics [J]. *J. of Engineering Mechanics*, 2001, **5**: 494-502.
- [15] Federal Highway Administration. 1996 Research and Technology Program Highlights. Publication No. FH-WA-RD-96-168, Washington D. C., 1996, 41.
- [16] Internet reference: dot.gov/onedot/library/tech-share/flagbg.cfm.
- [17] Chang C C. *et al.* Development of Fiber Bragg Grating Sensor Based Load Transducers[A]. *Proc of the Optical Fiber Sensors Conf. (OFS-12)* [C]. Williamsburg, VA, USA, 1997, 174-177.
- [18] Internet reference: gfhz-potsdam.de/pb5/pb51/html/conny3-en.htm.
- [19] Internet reference: gfhz-potsdam.de/pb5/pb51/html/conny5-en.htm.
- [20] Ferdinand P. *et al.* Mine operating accurate stability control with optical fibre sensing and Bragg grating technology [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1995, **13**(1): 303-313.
- [21] Ferdinand P. *et al.* Applications of Bragg gating sensors in Europe[A]. *Proc. of the Optical Fiber Sensors Conf. (OFS-12)* [C]. Williamsburg, VA, USA, 1997, 14-19.
- [22] Bronnimann R. *et al.* Packaging of Fiber Optics Sensors for Civil Engineering Applications [A]. *Symposium DD, Reliability of Photonics Materials and Structures* [C]. San Francisco, USA, 1998. paper DD7.2.
- [23] Schulz, W L. *et al.* Internet reference: bluerr.com/images/advFOS.pdf.
- [24] Internet reference: inventivefiber.com.sg.
- [25] Foote P D. Fiber Bragg grating strain sensors for aerospace smart structure [A]. *Proc. SPIE* [C]. 1994, **2361**: 162-166.
- [26] Internet reference: nasatech.com/Briefs/Jun98/0698PTB1.html.
- [27] Ecke W. *et al.* Optical Fibre Grating Strain Sensor Network for X-38 Spacecraft Health Monitoring [A]. *Proc. of the SPIE* [C]. 2000, **4185**: 888-891.
- [28] Internet reference: ic.are.nasa.gov/ic/projects/photonics/OS/proposed/bragg.html.
- [29] Internet reference: techreports.larc.nasa.gov/ltrs/PDF/1998/tp/NASA-98-tp207643.pdf.
- [30] Internet reference: nesb.larc.nasa.gov/NNWG/vol8.2/TASKS/MSFC/msfc82-6.html.
- [31] Internet reference: ic.are.nasa.gov/ic/projects/photonics/OS/HealthSensors/health.html.
- [32] Internet reference: bluerr.com/images/adhesive.pdf.
- [33] Zhang L. *et al.* Spatial and wavelength multiplexing architectures for extreme strain monitoring system

- using identical-chirped-grating-interrogationg technique [A]. *Proc. of the Optical Fiber Sensors Conf. (OFS-12)* [C]. 1997, 425-455.
- [34] Hjelme D R, *et al.* Application of Bragg grating sensors in the characterization of scaled marine vehicle models[J]. *Applied Optics*, 1997, **36**:328-336.
- [35] Vohra S T, *et al.* Sixteen channel WDM fiber Bragg grating dynamic strain sensing system for compsite panel slamming tests [A]. *Proc. of the Optical Fiber Sensors Conf. (OFS-12)* [C]. Williamsburg, VA, USA, 1997, 662-665.
- [36] Internet reference; techtransfer.nrl.navy.mil/sel-tech/DistFOsensor.html.
- [37] Internet reference; dodsbir.net/awardlist/absnavy.html.
- [38] Internet reference; photonics.com/spectra/tech/Oct99/techShipshape.html.
- [39] Internet reference; gcrmtweb.engr.uno.edu/gcrmtc/projectpage.asp?id=145.
- [40] Wang G, *et al.* Digital demodulation and signal processing applied to fibre Bragg grating strain sensor arrays in monitoring transient loading effects on ship hulls, *Proc of the Optical Fiber Sensors Conf. (OFS-12)*, Williamsburg, VA, USA, 1997, 612-615.
- [41] Henderson P J. Current metering using fibre-grating based interrogation of a conventional current transformer [A]. *Proc. of the Optical Fiber Sensors Conf. (OFS-12)* [C]. Williamsburg, VA, USA, 1997, 186-189.
- [42] Rao Y J, *et al.* Wavelength-division-multiplexed in-fibre Bragg grating Fabry-Perot sensor system for quasi-distributed current measurement [A]. *proc. of the Ann. Conf. on Applied Optics and Optoelectronics* [C]. Brighton, 1998, 99-104.
- [43] Hammon T E, *et al.* Optical fibre Bragg grating temperature sensor measurements in an electrical power transformer using a temperature compensated fibre Bragg grating as a reference [A]. *Proc. of the 11th International Conf. on Optical Fibre Sensors* [C]. Sapporo, Japan, 1996, 566-569.
- [44] Theune N M, *et al.* Applications of Fiber Optical Sensors in Power Generators: Current and Temperature Sensors [A]. *Proc. OPTO 2000 Conf.* 2000, 22-25.
- [45] Ogawa Y, *et al.* A multiplexing load monitoring system fo power transmission lines using fibre Bragg grating [A]. *Proc. of the Optical Fibre Sensors Conf. (OFS-12)* [C]. Williamsburg, VA, USA, 1997, 468-471.
- [46] Internet reference; omega.com/literature/transactions/volume3/lad2.html.
- [47] Kersey A D. Downhole monitoring in oil reservoirs, *IEICE Trans. Electron.* 2000, **E83-C**:400-404.
- [48] Internet reference; oil-offshore.com/companies/optoplan.html.
- [49] Weis W, *et al.* MWD telemetry system for coil-tubing drilling using optical fiber grating modulators down-hole [A]. *Proc. of the Optical Fiber Sensors Conf. (OFS-12)* [C]. Williamsburg, VA, USA, 1997, 416-419.
- [50] Internet reference; kvaerner.com/oilgas/pr/feature/january2000/composit.pdf.
- [51] Internet reference; cidra.com/opticalsensingsystems/technology/bragg-grating.html.
- [52] Spirin V V, *et al.* Fiber Bragg grating sensor for petroleum hydrocarbon leak detection [J]. *Optics and Laser in Engineering*, 2000, **32**:497-503.
- [53] Berthold J W. Measurement of Axial and Bending Strain in Pipelines Using Bragg Grating Sensors [A]. *SPIE Environmental and Industrial Sensing Conference*. Boston, Massachusetts, 2000.
- [54] Meltz G, *et al.* Fibre grating evanescent-wave sensors [A]. *Proc. SPIE* [C], 1996, **2836**:342-350.
- [55] Ecke W, *et al.* Chemical Bragg grating sensor network basing on side-polished optical fibre [A]. *Proc. SPIE* [C], 1998, **3555**:457-466.
- [56] Internet reference; optics.kth.se/fysik2/RIO97/PDF/RIO97B.PDF.
- [57] Peng Y T, *et al.* The characterization of hydrogen sensor based on palladium electroplated fiber Bragg gratings (FBG) [A]. *Proc. SPIE* [C]. 1999, **3670**:42-53.
- [58] Internet reference; enme.umd.edu/smsrc/research.html.
- [59] Bhatia V, *et al.* Optical fiber long-period gratign sensors [J]. *Optics Letters*, 1996, **21**:692-694.
- [60] Zhang Z, Sirkis J S. Temperature-compensated long-period grating chemical sensor [A]. *Proc. of the Optical Fiber Sensors Conf. (OFS-12)* [C]. Williamsburg, VA, USA, 1997, 294-297.
- [61] Falciai R, *et al.* Optical fiber long period gratings for the refractometry of aqueous solution [A]. *Proc. SPIE* [C]. 1998, **3555**:447-450.
- [62] Internet reference; lunainnovations.com/research/biochemical.htm.
- [63] Rao Y J, *et al.* In-fibre Bragg grating temperature sensor system for medical application [J]. *J. Light-*

- wave Technol*, 1997, **15**:779-785.
- [64] Rao Y J, *et al*. In-situ temperature monitoring in NMR machines with a prototype in-fibre Bragg grating sensor system[A]. *Proc. of the Optical Fiber Sensors Conf.* (OFS-12) [C]. Williamsburg, VA, USA, 1997, 646-649.
- [65] Rao Y J, *et al*. In-fibre Bragg grating flow-directed thermomodulation catheter for cardiac monitoring [C]. *Proc. of the Optical Fiber Sensors Conf.* (OFS-12) [C]. Williamsburg, VA, USA, 1997, 354-357.
- [66] Internet reference: cpgei.cefetpr.br/hypolito/artigos/OFS2000f.pdf.
- [67] Internet reference: ntu.edu.sg/eee/research/report/p067bmerc.pdf.
- [68] Fisher N E, *et al*. Response of in-fibre Bragg gratings to focused ultrasound fields[A]. *Proc. of the Optical Fiber Sensors Conf.* (OFS-12) [C]. Williamsburg, VA, USA, 1997, 190-193.
- [69] Fisher N E, *et al*. Probe for measuring ultrasound fields using short in-fibre gratings[A]. *Proc. SPIE* [C]. 1998, **3555**:451-456.
- [70] Internet reference: sckcen.be/conf/photonics/td-fbg.pdf.
- [71] Gusarov A I, *et al*. High Total Dose Radiation Effects on Temperature Sensing Fiber Bragg Gratings [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1999, **11** (9): 1159-1161.
- [72] Internet reference: jaeri.go.jp/english/annual/1999e/html/chap10.html.
- [73] Stephanus J S, *et al*. Temperature insensitive fiber optic accelerometer using a chirped Bragg grating [J]. *Opt. Eng.*, 2000, **38** (8): 2177-2181.
- [74] Nobuaki Takahashi, *et al*. Characteristics of Fiber Bragg Grating Hydrophone [J]. *IEICE Trans. Electron*, 2000, **E83-C** (3): 275-281.
- [75] Internet reference: batmankjst.ac.kr/~laser/Eng-laser/bk/paper/fibre%20grating.pdf.
- [76] Internet reference: nttc.edu/resources/funding/awards/dod/dodsbir96/phase1/962pload.asp.
- [77] Internet reference: nasatech.com/Briefs/Mar00/AR-C12092.html.
- [78] Internet reference: hades.sckcen.be/people/affernandez/ra-fs.html.

作者简介:

姜德生 (1949—), 男, 教授, 中国材料研究学会理事, 武汉理工大学智能材料与结构学科首席教授、博士生导师, 享受国务院津贴的中年专家, 武汉理工大学光纤中心暨光纤传感技术国家重点工业性实验基地主任。从 1980 年开始从事光纤传感技术和智能材料的研究, 其成果获 1 项国家级奖励, 9 项省部级奖励, 2 项参加世界发明展览。