

# 激光与光电子学进展

## 连续光栅阵列光纤传感技术及应用

甘维兵<sup>1\*</sup>, 姜茹<sup>2</sup>, 李成立<sup>2</sup>, 杨明红<sup>1\*\*</sup>

<sup>1</sup>武汉理工大学光纤传感技术国家工程实验室, 湖北 武汉 430070;

<sup>2</sup>武汉理工大学信息工程学院, 湖北 武汉 430070

**摘要** 相比于传统分布式光纤传感, 连续光栅阵列光纤传感技术具有大容量、长距离、高密度等特点。主要综述了国内外连续光栅阵列的在线制备技术、解调方法及其典型应用, 并对连续光栅阵列光纤传感技术的发展趋势进行了展望。

**关键词** 光纤光学; 连续光栅阵列; 温度监测; 应力监测; 振动监测; 典型应用

中图分类号 O436

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.1306007

## Continuous Grating Array Sensing Technology and Its Applications

Gan Weibing<sup>1\*</sup>, Jiang Ru<sup>2</sup>, Li Chengli<sup>2</sup>, Yang Minghong<sup>1\*\*</sup>

<sup>1</sup>National Engineering Laboratory for Fiber Optic Sensing Technology,

Wuhan University of Technology, Wuhan, Hubei 430070, China;

<sup>2</sup>School of Information Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan, Hubei 430070, China

**Abstract** The continuous grating array sensing technology has the characteristics of large capacity, long distance, high density, and so on, if compared with the traditional distributed optical fiber sensing technology. This article reviews the on-line fabrication technology, demodulation methods and typical applications of continuous grating arrays at home and abroad. The development trend of the continuous grating array sensing technology is also outlined.

**Key words** fiber optics; continuous grating array; temperature monitoring; strain monitoring; vibration monitoring; typical applications

**OCIS codes** 060.3735; 060.2300; 060.2310; 060.2370

## 1 引言

与传统的电类传感技术相比, 光纤传感技术具有本质防爆、抗电磁干扰、抗腐蚀、耐高温、体积小、重量轻等诸多优势, 特别适合应用于恶劣环境<sup>[1]</sup>。基于时分复用的分布式光纤传感技术具有分布式测量的优点, 但是其信号微弱、响应速度慢、精度低, 且只能测量温度、应变等少数参量。基于波分

复用的传统光纤光栅传感技术具有信号强、响应快、可实现多参量组网等特点, 但是受限于光源带宽, 其传感测量的点数有限, 且熔接组网损耗较大。现有的光纤传感技术均很难满足物联网时代对传感网络大容量、长距离、多参量、高精度的要求, 急需发展新型的光纤传感技术。

基于波分、时分混合复用的光纤传感网络是近十年来的研究热点之一, 然而混合复用网络中的传

收稿日期: 2021-04-06; 修回日期: 2021-05-22; 录用日期: 2021-05-24

基金项目: 国家自然科学基金(62025505)

通信作者: \*ganweibing@whut.edu.cn; \*\*minghong.yang@whut.edu.cn

感理论、多重光栅串扰和阴影效应、连续光栅制备技术等很多关键科学问题还没有得到突破,其中大容量阵列光栅传感光纤的制备是国内外尚未解决的技术难题。近些年来,在国家自然科学基金重大项目“光纤传感网关键器件与技术研究(61290310)”的资助下,武汉理工大学在国内率先实现了超弱光栅阵列的动态制备及其解调,解决了光纤传感大规模组网多年来的技术难题。首次实现了单纤复用能力超过10万只光纤光栅传感器,解决了温度、应变、振动等大容量、多参量分布式测量难题,推动了大容量光纤传感网络技术的发展,可满足我国多个重大领域对大容量、长距离、高精度、多参量传感网络的迫切需求,已在电力、交通、石油勘探等领域得到了广泛应用。大容量低损耗阵列光纤光栅动态制备关键技术与应用的相关工作于2019年获得国家技术发明奖二等奖。

## 2 光栅阵列传感技术

### 2.1 在线制备技术

采用单脉冲曝光方法动态制备光纤光栅是目前比较理想的方法之一。1993年,Dong等<sup>[2]</sup>首次报道了在光纤拉丝过程中写入光纤光栅的实验,采用脉冲宽度为20 ns的KrF准分子激光,通过聚焦透镜、分束镜以及全反射镜将激光分束聚焦在纤芯上,在拉丝过程中成功地在掺锗光纤上制备了反射率为2%的阵列光纤光栅,但反射光谱出现了啁啾现象。1994年,Askins等<sup>[3]</sup>在Dong等的基础上进行了相应的改进,通过计算机自动控制系统调整全发射镜的角度以改变干涉场干涉条纹的间距,制备出了450个不同中心波长的阵列光纤光栅,但这些光栅的反射率和线宽都不尽相同。2005年,Chojetzki等<sup>[4]</sup>在掺锗15%(摩尔分数)的光敏光纤中采用“Talbot”干涉装置在线制备了100个阵列光纤光栅,其传输损耗高达16 dB/km。2010年,Rothhardt等<sup>[5]</sup>采用拉丝塔在一根光纤上制备出了1000多个阵列光纤光栅,其中心波长分别在830 nm和1550 nm附近,传输损耗仅为3 dB/km,可用于振动和应力应变测量。

2013年,武汉理工大学光纤传感技术国家工程实验室在含18%(摩尔分数)GeO<sub>2</sub>和10%(摩尔分数)B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>的Ge/B共掺光敏光纤上,采用相位掩模板在光纤拉丝过程中成功制备了全同弱光纤光栅阵列,其在线制备工艺<sup>[6]</sup>如图1所示。光纤拉丝

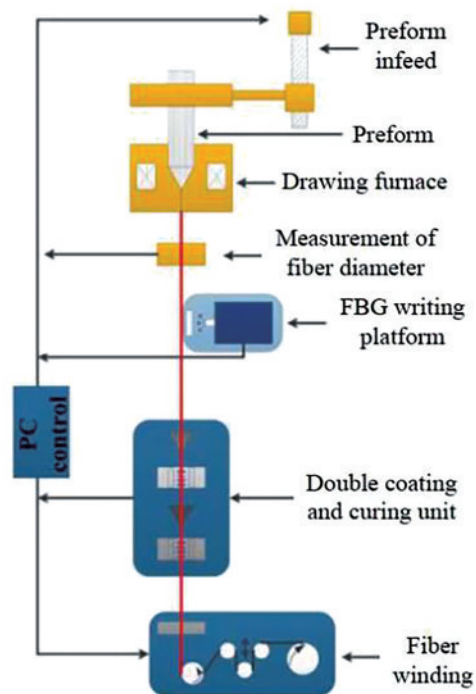


图1 光栅阵列在线动态制备系统<sup>[6]</sup>

Fig. 1 On line fabrication system of grating array<sup>[6]</sup>

机塔高8.5 m,拉丝速度为2~200 m/min,所使用的紫外准分子激光器为Opto Systems CL5300型,最高频率为300 Hz,脉冲宽度为10 ns,最大脉冲能量为40 mJ,光斑尺寸为6 mm×12 mm。采用一个凸透镜和一个凹透镜对光斑进行缩束整形,光束通过柱透镜透过尺寸为10 mm×10 mm的相位掩模板,然后在裸光纤上聚焦曝光。该系统在裸光纤完成涂覆前采用单脉冲写入光栅,可以精确控制光栅写入位置、强度和中心波长等,相邻光栅的间距在0.1 m以上可调。该系统所制备的光栅阵列中心波长具有良好的一致性,波动范围在70 pm以下,单个光栅反射率达到0.03%,抗拉强度达到60 N<sup>[7]</sup>。

国外干涉动态成栅方法通常采用多光学元件的分光、合光形成干涉条纹,极易受温度、振动等环境影响,光栅的一致性和重复性较差<sup>[8]</sup>。采用掩模板形成稳定干涉条纹的动态成栅,受环境影响较小,所制备的阵列光栅具有良好的一致性与重复性<sup>[9]</sup>,易实现规模化生产。采用以上两种方法动态制备的光栅阵列的光谱特征如图2所示。武汉理工大学首次采用193 nm激光单脉冲动态成栅技术,实现了单纤超10万个且传输损耗小于0.5 dB/km的大容量低损耗光栅阵列传感光纤的规模化生产。

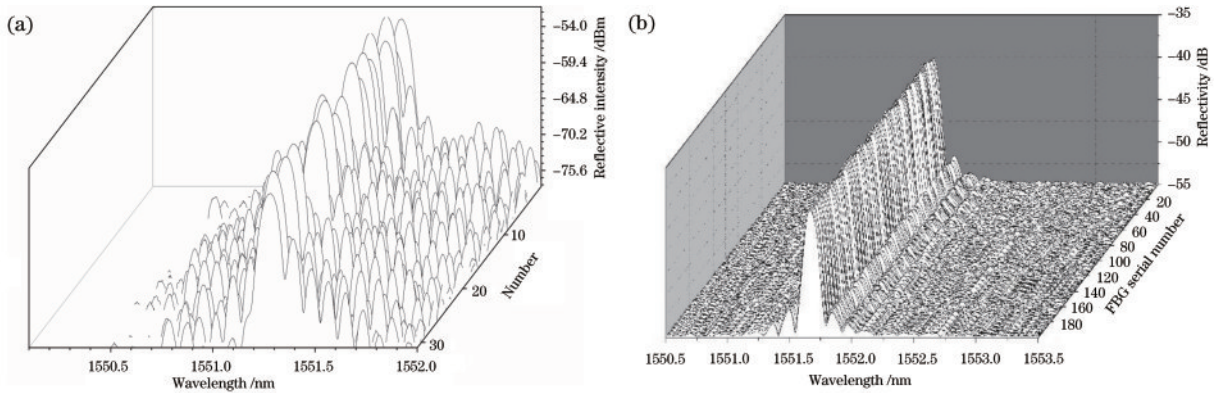


图 2 光栅阵列的光谱示意图。(a)合成干涉法<sup>[8]</sup>;(b)掩模法<sup>[9]</sup>

Fig. 2 Grating array spectra. (a) Synthetic interferometry<sup>[8]</sup>; (b) mask method<sup>[9]</sup>

### 2.2 光栅阵列的解调原理

波长解调和相位解调是光栅阵列传感中的两种主要解调方法,通过解调光栅阵列中每个光栅中心波长的变化,可以实现分布式温度和应变测量。2012年,Wang等<sup>[10]</sup>提出了基于全同弱光栅阵列的分布式传感网络,采用可调激光器作为光源,通过波长扫描的方法得到每个光栅的反射光谱,成功解

调出 12 个间距为 1.5 m 的光栅阵列反射光谱,波长解调精度为 10 pm。2014年,Hu等<sup>[11]</sup>提出了一种全同弱光栅阵列的波长解调系统,采用两个半导体光放大器(SOA)和一个高速 CCD 模块来重建光栅光谱,在包含 843 个全同弱光栅的阵列上进行了分布式温度实验,系统灵敏度和分辨率分别达到 9.2 pm/°C 和 0.11 °C,如图 3 所示。

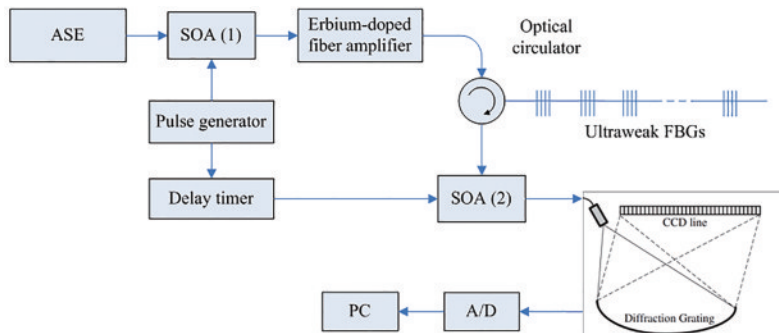


图 3 基于双 SOA 的光栅阵列解调原理<sup>[11]</sup>

Fig. 3 Demodulation principle of grating array based on double SOA<sup>[11]</sup>

2016年,Ma等<sup>[12]</sup>提出了基于色散方案的分布式光栅阵列解调技术,通过在系统中引入色散补偿光纤,将反射脉冲的波长偏移转换为时延变化,然后通过互相关和抛物线拟合算法,精确计算了与布拉格波长相关的时延,对 2014 个间距为 1 m 的弱光栅阵列实现了分辨率为 9 pm 的波长解调。2018年,Zhou等<sup>[13]</sup>将色散技术和微波光子学技术相结合以进行光栅阵列的高速解调,反射信号与原始微波混合产生差频,当光栅波长变化时,光纤色散效应将引起差频频率变化,通过检测频率的变化可以实现光栅的波长解调。该方法可以实现反射率为 0.1%、空间分辨率为 1 m 的弱光栅阵列的波长解调,动态解调速率高达 40 kHz,波长解调精度约为 8 pm。

通过相位解调方法可以实现分布式振动解调,

2015年,Wang等<sup>[14]</sup>提出了基于弱光栅阵列的分布式振动传感系统,该系统采用非平衡迈克耳孙干涉仪,使相邻光栅的反射脉冲产生干涉,然后通过 3×3 耦合器解调算法,解调出振动信号的幅值、频率和位置信息。该系统的声压灵敏度为 -158 dB,频率响应范围为 450~600 Hz。2018年,Liu等<sup>[15]</sup>报道了基于双脉冲和外差检测方法的光栅阵列分布式振动传感系统,控制两个探测脉冲之间的时延和相邻弱光栅之间的间隔,使相邻光栅的反射脉冲产生干涉,然后通过外差相干检测和希尔伯特变换进行了相位解调。该系统最小可检测的光纤长度变化为 14.63 nm,最小探测频率低至 0.2 Hz。2019年,Shan等<sup>[16]</sup>提出了一种基于光栅阵列和自外差检测的分布式声波传感系统,采用两个具有不同频移的

声光调制器(AOM)产生双脉冲,通过解调双脉冲产生拍频信号的相位变化以还原振动信号。该方法降低了系统的噪声,可以在长度为 42 km 的传感光纤尾端实现空间分辨率为 11.7 m 的振动信号测量,频响范围为 8 Hz~1 kHz。2019 年, Muanenda 等<sup>[17]</sup>报道了基于全同弱光栅阵列的高信噪比分布

式振动传感系统,采用微分交叉相乘的相位生成载波(PGC-DCM)算法解调相位变化。该算法不需要复杂的相位卷绕计算,可以消除谐振频率,提高系统信噪比。2013 年,武汉理工大学提出了基于光栅阵列和 3×3 耦合器算法的分布式振动传感系统<sup>[18]</sup>,其传感原理如图 4 所示。

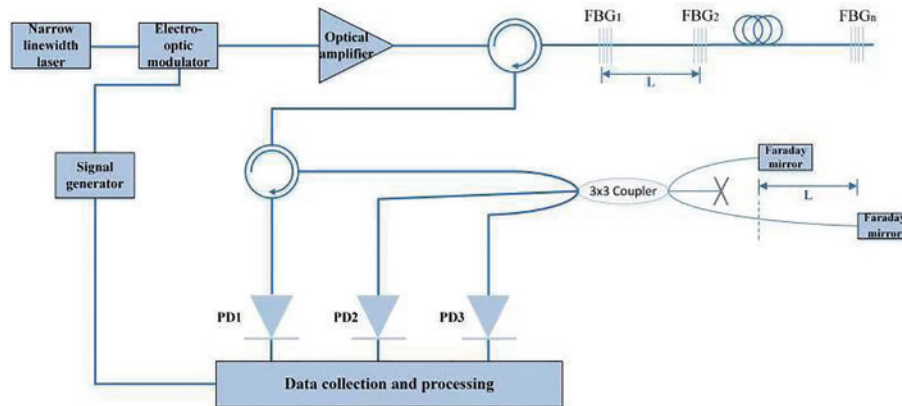


图 4 基于光栅阵列和 3×3 耦合器算法的分布式振动传感原理<sup>[18]</sup>

Fig. 4 Principle diagram of distributed vibration sensing based on grating array and 3×3 coupler algorithm<sup>[18]</sup>

窄线宽激光器发出的连续光被电光调制器(EOM)调制成脉冲光,调制后的脉冲光经掺铒光纤放大器(EDFA)放大后被注入到间距为  $L$  的光栅阵列中,为了使相邻光栅反射回来的脉冲光不发生重叠, $L$  与探测脉冲宽度  $\tau$  应满足  $L \geq \tau c/n$ ,其中  $n$  为光纤的有效折射率, $c$  为光在光纤中传播的速度。光栅阵列中的每一个光栅会在不同时刻反射回一个脉冲光,这些反射回来的脉冲光进入一个非平衡的迈克耳孙干涉仪,该干涉仪由一个 3×3 耦合器、两个法拉第镜和一段延时光纤组成,延时光纤的长度与相邻光纤光栅的间距均为  $L$ 。每个光纤光栅反射回来的光信号进入非平衡的迈克耳孙干涉仪后会被分成两个脉冲光,经法拉第镜反射后在不同时刻反射回 3×3 耦合器,它们之间的时延为  $2Ln/c$ 。由于相邻光纤光栅的间距也为  $L$ ,第  $i$  个光栅经有延时光纤的反射臂反射回来的光脉冲与第  $(i+1)$  个光栅经没有延时光纤的反射臂反射回来的光脉冲在整个系统中传播的光程是相等的,因此会在 3×3 耦合器处相遇并产生干涉<sup>[19]</sup>。

### 3 光栅阵列传感技术的典型应用

#### 3.1 电力行业中大型空冷岛的温度监测

电力行业中火力发电系统对空冷凝汽器的大范围温度监测有迫切需求。夏季环境温度高,需要合理调整百叶窗的开合度,使循环冷却水温度处于

一个合理的温度范围内,以达到煤耗最小的目的。而在冬季,由于北方地区比较寒冷,直接空冷凝汽器的冷却管束极易受冻,监控温度可以防止散热器出现局部冻结现象,避免停机事故<sup>[20]</sup>。由于直接空冷凝汽器的翅片管束数量庞大,很难通过大规模加装温度测点来实现凝汽器翅片管束温度的测量。

目前主要采取两种方式进行监测:一是人工测量,采用非接触式红外测温枪对凝汽器的每一列、每一个面上的所有翅片管束进行温度测量,但该方法劳动量大且效率低;二是在线监测,采用特制的感温电缆对每个空冷凝汽器翅片管束进/出口的空气温度进行测量,然而该方法需要加装大量温度测点,投资大且后期维护量大。针对以上检测技术存在的不足,武汉理工大学开发了基于光栅阵列传感光纤的空冷岛散热器测温技术,并于 2016 年 3 月在新疆五彩湾发电厂 1 号机组进行了实验,如图 5 所示。

每组散热器高 25 m,由 4 片 6.2 m×2.7 m 散热片组成,共 192 片。采用间距为 1 m 的光栅阵列传感光缆对散热片进行监测,每片布设 32 个温度测点(每层 4 个测点,共 8 层),合计 6144 个测点。传感器的测温范围为  $-40 \sim 120$  °C,测量精度为  $\pm 1$  °C,分辨率为 0.1 °C。

长期的运行监测结果表明,系统对散热器温度分布的检测满足热工部门日常运行管理的需要,为空冷岛的安全运行和节能降耗提供了有力的技术

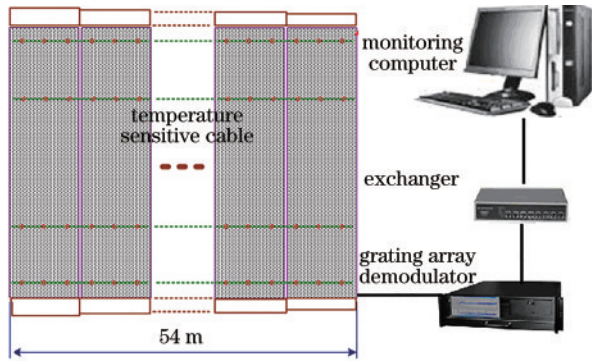


图 5 基于光栅阵列传感技术的空冷岛温度监测系统  
Fig. 5 Temperature monitoring system of air-cooled island based on grating array sensing technology

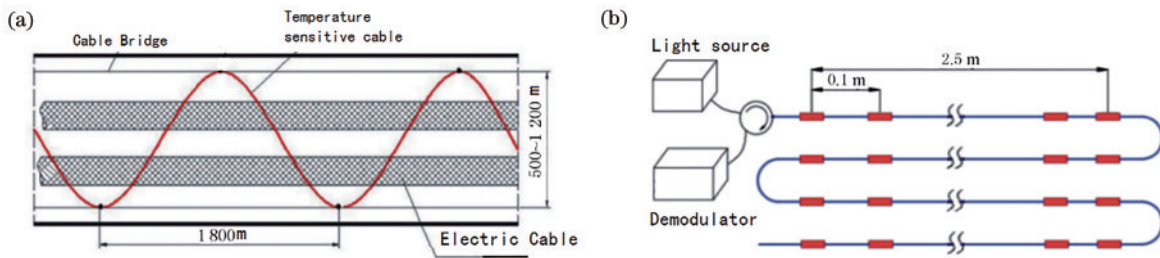


图 6 电缆廊道的火灾监测系统<sup>[21]</sup>。(a) 传感光缆布设方式；(b) 光栅阵列解调原理  
Fig. 6 Fire monitoring system for cable corridor<sup>[21]</sup>. (a) Arrangement of sensing optical cable; (b) demodulation principle of grating array

国家新标准(GB16280—2014)针对电缆廊道等领域规定了“小尺寸(10 cm)高温响应性能”指标,国内外光纤传感产品均无法满足此标准。为了更好地满足电缆廊道内动力电缆火灾报警系统的要求,武汉理工大学于2017年提出了基于分布式光栅阵列传感技术的新一代感温火灾报警系统,该成果是唯一获得国家消防认证的光纤传感技术产品。该技术可实现厘米量级的空间分辨率,可对温度场进行精细感知;监测距离在千米量级,可以实现长距离的监测覆盖;测温精度为 $\pm 1^\circ\text{C}$ ,能够响应10 cm空间范围内的小规模火源,并能准确定位温度异常位置,其温度监测曲线<sup>[21]</sup>如图7所示。

现场测试结果表明,光栅阵列传感光纤测温技术能够很好地满足电缆廊道内温度场监测及动力电缆早期火灾报警的应用需求,解决了电缆廊道和高压电缆等领域的小规模火源检测难题。

### 3.3 地铁列车定位及隧道外部入侵监测

由于城市轨道交通的飞速发展,地铁隧道覆盖面越来越广,如何确保地铁隧道不受附近基坑开挖的影响已成为当前迫切需要解决的问题。传统人工检测方法费时费力,诊断结果主观性较强,无法适应轨道交通的快速发展。

支撑。目前,基于光栅阵列传感光纤的空冷岛散热器测温技术已经在一些电厂得到推广应用,满足了空冷岛大容量、高密度温度分布测量的需求。

### 3.2 电缆廊道的火灾监测

葛洲坝水利枢纽是我国长江干流上的第一座大型水利枢纽工程,其船闸被誉为万里长江第一闸,是世界上最大的内河船闸之一<sup>[21]</sup>。葛洲坝电缆廊道位于船闸两侧,单侧桥架长约280 m,整个闸室电缆桥架长度约为650 m,桥架共5层,各层电缆敷设宽度为0.5~1.2 m,单层桥架电缆长度约为1 km,5层总长为5 km。电缆廊道的火灾监测场景<sup>[21]</sup>如图6所示。

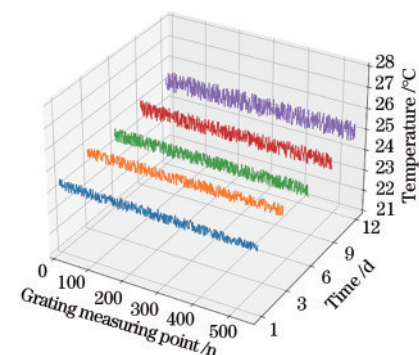


图 7 全部测点在不同时刻的温度曲线<sup>[21]</sup>  
Fig. 7 Temperature curves of all measuring points at different moments<sup>[21]</sup>

武汉理工大学于2017年成功开发出了基于光栅阵列传感技术的分布式振动监测系统,利用干涉仪提高振动传感信号的灵敏度和频率响应,并在武汉地铁7号线进行了实验。该实验区间总长约为3 km,地铁隧洞埋深为20~30 m,内部有直道和弯道并有普通道床和减震道床,具有广泛的代表性。如图8所示,在隧道洞壁和道床上分别铺设一根光栅阵列振动传感光缆,采用特殊工艺将光缆紧固在待测结构表面,光栅阵列解调仪安装在车站控制室。

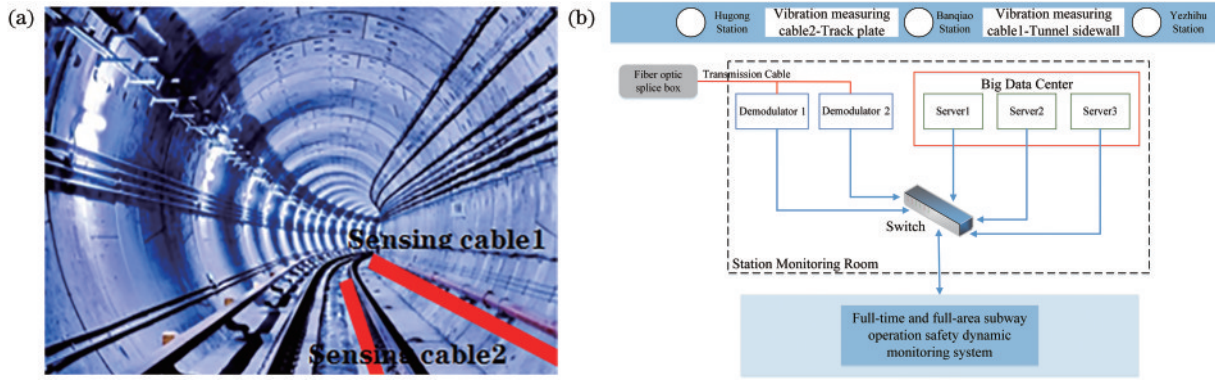


图 8 基于光栅阵列传感技术的分布式振动监测系统<sup>[22]</sup>。(a)振动光缆敷设示意图;(b)系统架构  
Fig. 8 Distributed vibration monitoring system based on grating array sensing technology<sup>[22]</sup>. (a) Schematic of vibration cable laying; (b) system architecture

基于光栅阵列传感技术的分布式振动监测系统可实时获取列车位置、速度和行驶方向等信息<sup>[22]</sup>。当列车依次经过不同测区时,振动信号强度会发生明显变化。根据同一时刻不同测区振动信号强度的差异,可以定位列车位置信息;根据不同时刻所有测区的振动信号变化趋势,可以推测列车的行驶方向;根据振

动信号的持续时间和列车长度,可以推算行驶速度。

与此同时,在地铁正上方地面上采用  $10^4$  kg 的破碎机敲击钢板,模拟地铁隧道周围外部入侵为<sup>[23]</sup>。破碎机机头分别以脉冲和连续方式敲击钢板,隧道内洞壁上的传感光缆感知的振动信号<sup>[24]</sup>如图 9 所示。

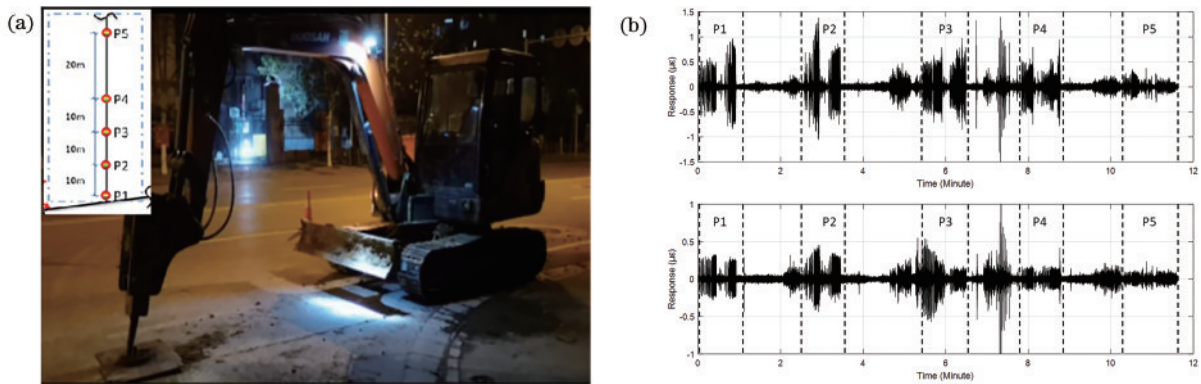


图 9 系统外部入侵及振动信号识别<sup>[24]</sup>。(a)破碎机实验场景;(b)不同工况下的振动曲线  
Fig. 9 System external intrusion and vibration signal recognition. (a) Crusher test scenario; (b) vibration curves at different operating conditions

多次实验结果显示,对于隧洞埋深为 20 m 的地铁隧道,洞壁上的传感光缆可明显感知地面沿隧道水平方向 50 m 范围内大型机械外部施工时的振动信号,并且能够准确定位。

### 3.4 油井分布式温度和振动测量

分布式光纤声波传感器 (Distributed Acoustic Sensor, DAS) 近些年已经成为油气勘探领域中极具发展潜力的新一代地震检测技术。目前,国外从事该领域研究的公司主要有 Silixa、OptaSense、Sercel 和 Fotech 公司。2015 年,电子科技大学与东方地球物理勘探公司在华北冀东油田进行了井下实验,采集到超过 3 万个地震信号;同年,山东省科

学院提出了一种基于全同弱反射光栅阵列的分布式振动传感系统;2016 年,武汉理工大学开发了基于光栅阵列技术的分布式温度和振动传感监测系统,并在油井勘探领域进行了相关实验研究。

在中国石化江汉油田实验井下进行了分布式温度和振动监测实验,通过地滑轮和塔台上的天滑轮将光缆垂直放入井中。在实验过程中,分三次将传感光缆放入井中,每次下井深度大约为 180 m,每放入一次传感光缆,测试一次温度,其实验场景和温度测量曲线如图 10 所示。

可以看出,随着井深的增加,温度逐渐上升,井下 500 m 处的温度约为  $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,此时地表的温度为

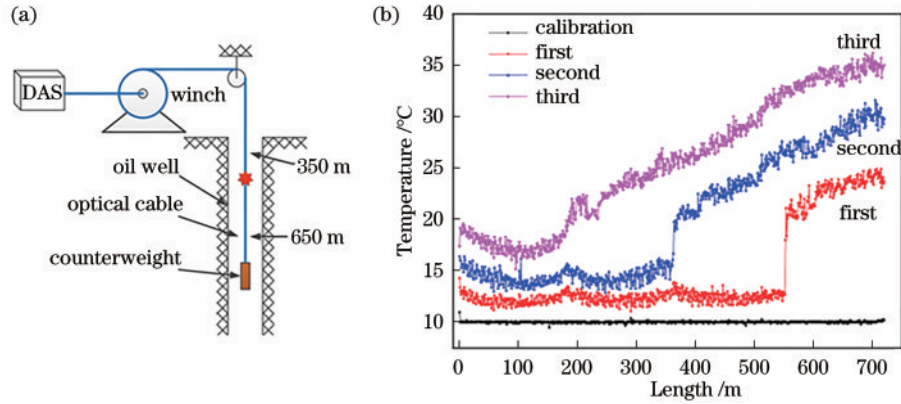


图 10 基于光栅阵列传感技术的油井监测系统。(a)油井监测实验场景;(b)分布式温度监测曲线  
 Fig. 10 Oil well monitoring system based on grating array sensing technology. (a) Oil well monitoring test scenario;  
 (b) distributed temperature monitoring curves

20 °C左右。因此可得,随着下井深度的增加,温度逐渐上升,且上升梯度约为 3 °C/100 m。待井下放入的传感光缆长度达到 500 m 后,在井口采用铁锤

敲击油井壁进行分布式振动传感实验,振动光缆相邻光栅间距为 5 m,传感光缆在井内不同深度处的时域曲线如图 11 所示。

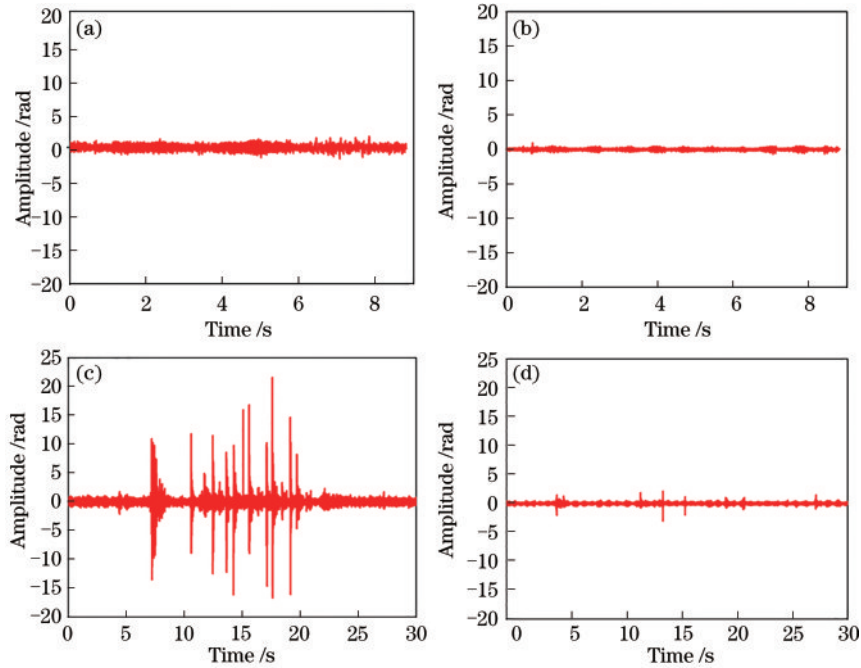


图 11 敲击油井壁时不同深度处光缆的振动信号图。(a)悬挂 10 m 处;(b)悬挂 480 m 处;(c)紧贴井壁 10 m 处;  
 (d)紧贴井壁 480 m 处

Fig. 11 Vibration signals of optical cable at different depths when oil well wall is knocked. (a) Being suspended at 10 m;  
 (b) being suspended at 480 m; (c) being close to shaft wall at 10 m; (d) being close to shaft wall at 480 m

由图 11 可知,当光缆自由悬挂在油井中时,由于油井中的液体吸收声波,铁锤敲击管壁时传感光缆几乎感知不到外界振动信号;当光缆贴着油井管壁时,传感光缆能够较好地感知振动信号,且能很好地还原信号。另外,随着井深的增加,传感光缆感知的井口振动信号减弱。由以上分析可知,传感

光缆与油管的耦合情况直接决定了振动信号的检测质量。

### 3.5 其他领域的应用

光栅阵列传感技术在其他方面还有许多潜在的应用。

1) 智能电缆。将光栅阵列传感光纤植入到电

缆内部,通过监测电缆温度分布,可以实现运营荷载、局部损伤及故障的监测;通过监测电缆振动分布,可以防范外部入侵及盗挖事件。

2) 应力分布监测。光栅阵列传感光纤经过特殊封装后被植入到混凝土结构内部,实现混凝土结构寿命、裂缝病害及刚度的监测与评估。

3) 周界入侵。采取挂网、地理或墙贴的方式,将光栅阵列振动传感光缆固定在围墙上或地面,实现入侵过程的智能分析与判断,其误报率极低。

4) 管线泄漏监测。将光栅阵列传感光缆沿管道进行敷设,通过感知管线周围的温度变化或振动信号特征来定位和判断管道内的介质是否发生泄漏,同时可以通过振动信号来识别人员或机械对管道的伤害。

5) 机场智能跑道。将光栅阵列传感网络布设在机场跑道混凝土内部,实现跑道道面破损状态、飞机滑行信息以及车辆定位等的监测与智能分析。

6) 智能高速公路。在高速公路上全程布设大容量、多参量光栅阵列传感网络,结合现有视频监控系,实现真正意义上的高速公路智能化。

## 4 总结与展望

武汉理工大学近十年来专注光纤光栅阵列传感技术的研究,解决了光纤高光敏性与低损耗相互制约的难题,为大容量光栅阵列的制备提供了核心关键材料;攻克了动态拉纤和静态成栅工艺难以兼顾的关键技术难题;开发了成熟的掩模板动态制备光栅方法,提出了稳定的干涉条纹成栅工艺,制备了具有良好一致性与重复性的大容量光栅阵列;发明了光栅阵列传感光纤免应力成缆技术,有效解决了温度和应变快速解耦的国际技术难题。

光栅阵列传感技术为物联网技术提供了新的传感方法和技术手段,具有良好的发展前景。该技术已经在空冷岛大容量分布式温度场监测、电缆廊道小规模火灾监测、大容量分布式振动传感网络等方面得到了一定的应用,在输油管线泄漏监测、高铁沿线周界入侵及智能高速公路等领域有较好的应用前景。同时,随着成缆技术水平的不断提高,基于光栅阵列技术的大容量应变传感光缆有望获得突破,为大型结构工程的结构健康监测提供新的思路。

## 参 考 文 献

[1] Willsch R. Application of optical fiber sensors: technical and market trends[J]. Proceedings of SPIE,

2000, 4074: 24-31.

- [2] Dong L, Archambault J L, Reekie L, et al. Single pulse Bragg gratings written during fibre drawing[J]. Electronics Letters, 1993, 29(17): 1577-1578.
- [3] Askins C G, Putnam M A, Williams G M, et al. Stepped-wavelength optical-fiber Bragg grating arrays fabricated in line on a draw tower[J]. Optics Letters, 1994, 19(2): 147-149.
- [4] Chojetzki C, Rothhardt M W, Ommer J, et al. High-reflectivity draw-tower fiber Bragg gratings: arrays and single gratings of type II[J]. Optical Engineering, 2005, 44(6): 060503.
- [5] Rothhardt M, Becker M, Chojetzki C, et al. Strain sensor chains beyond 1000 individual fiber Bragg gratings[C]//Bragg Gratings, Photosensitivity, and Poling in Glass Waveguides 2010, June 21-24, 2010, Karlsruhe, Germany. Washington, D. C.: OSA, 2010: JThA53.
- [6] Yu H H, Zheng Y, Guo H Y, et al. Research progress in online preparation techniques of fiber Bragg gratings on optical fiber drawing tower[J]. Journal of Functional Materials, 2014, 45(12): 12001-12005. 余海潮, 郑羽, 郭会勇, 等. 光纤光栅在线制备技术研究进展[J]. 功能材料, 2014, 45(12): 12001-12005.
- [7] Huang J B, Ding P, Tang J S. Progress in fabrication, demodulation and application of weak fiber Bragg grating array[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(17): 1700005. 黄俊斌, 丁朋, 唐劲送. 弱反射光纤光栅阵列制备、解调与应用进展[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(17): 1700005.
- [8] Guo H Y, Tang J G, Li X F, et al. On-line writing identical and weak fiber Bragg grating arrays[J]. Chinese Optics Letters, 2013, 11(3): 030602.
- [9] Guo H Y, Qian L, Zhou C M, et al. Crosstalk and ghost gratings in a large-scale weak fiber Bragg grating array[J]. Journal of Lightwave Technology, 2017, 35(10): 2032-2036.
- [10] Wang Y M, Gong J M, Dong B, et al. A large serial time-division multiplexed fiber Bragg grating sensor network[J]. Journal of Lightwave Technology, 2012, 30(17): 2751-2756.
- [11] Hu C Y, Wen H Q, Bai W. A novel interrogation system for large scale sensing network with identical ultra-weak fiber Bragg gratings[J]. Journal of Lightwave Technology, 2014, 32(7): 1406-1411.
- [12] Ma L M, Ma C, Wang Y M, et al. High-speed distributed sensing based on ultra weak FBGs and



- chromatic dispersion[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2016, 28(12): 1344-1347.
- [13] Zhou L, Li Z, Xiang N, et al. High-speed demodulation of weak fiber Bragg gratings based on microwave photonics and chromatic dispersion[J]. Optics Letters, 2018, 43(11): 2430-2433.
- [14] Wang C, Shang Y, Liu X H, et al. Distributed OTDR-interferometric sensing network with identical ultra-weak fiber Bragg gratings[J]. Optics Express, 2015, 23(22): 29038-29046.
- [15] Liu T, Wang F, Zhang X P, et al. Interrogation of ultra-weak FBG array using double-pulse and heterodyne detection[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2018, 30(8): 677-680.
- [16] Shan Y Y, Ji W B, Dong X Y, et al. An enhanced distributed acoustic sensor based on UWFBG and self-heterodyne detection[J]. Journal of Lightwave Technology, 2019, 37(11): 2700-2705.
- [17] Muanenda Y, Faralli S, Oton C J, et al. Dynamic phase extraction in high-SNR DAS based on UWFBGs without phase unwrapping using scalable homodyne demodulation in direct detection[J]. Optics Express, 2019, 27(8): 10644-10658.
- [18] Luo Z H, Wen H Q, Guo H Y, et al. A time- and wavelength-division multiplexing sensor network with ultra-weak fiber Bragg gratings[J]. Optics Express, 2013, 21(19): 22799-22807.
- [19] Gao Y H. Study on optimal operation of direct air cooling units of thermal power plant[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2018: 6-14.
- 高蕴华. 火力发电厂直接空冷机组运行优化技术研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2018: 6-14.
- [20] Ding P, Wu J, Kang D, et al. Detection of acoustic wave direction using weak-reflection fiber Bragg gratings[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(5): 0506002.
- 丁朋, 吴晶, 康德, 等. 采用弱反射光纤布拉格光栅的声波方向检测[J]. 中国激光, 2020, 47(5): 0506002.
- [21] Jiang T, Wang Y T, Wang S Q, et al. Field test of fire alarming system for cable tunnel based on distributed fiber grating array sensing technology[J]. Transportation Science & Technology, 2018(4): 171-174.
- 江涛, 王宇庭, 王世琪, 等. 分布式光栅传感技术在电缆廊道火灾报警领域的应用研究[J]. 交通科技, 2018(4): 171-174.
- [22] Zhu D F, Wang Y J, Yang Y, et al. Urban rail train positioning and speed measuring method based on grating array[J]. Acta Photonica Sinica, 2019, 48(11): 159-166.
- 朱东飞, 王永皎, 杨焯, 等. 基于光栅阵列的城市轨道交通列车定位与测速方法[J]. 光子学报, 2019, 48(11): 159-166.
- [23] Gan W B, Li S, Li Z Y, et al. Identification of ground intrusion in underground structures based on distributed structural vibration detected by ultra-weak FBG sensing technology[J]. Sensors, 2019, 19(9): 2160.
- [24] Nan Q, Li S, Yao Y, et al. A novel monitoring approach for train tracking and incursion detection in underground structures based on ultra-weak FBG sensing array[J]. Sensors, 2019, 19(12): 2666.