



光纤传感的后起之秀——分布式传感

摘要

随着对光纤中非线性效应研究的不断深入,光纤分布式传感器得到了广泛的研究和应用.本文介绍了光纤传感的应用领域,综述了基于布里渊散射、拉曼散射及瑞利散射3种散射光实现不同类型光纤分布式传感的原理,最后从光纤分布式传感优势方面对其未来发展方向进行了展望.

关键词

光纤光学;分布式传感;光散射;周界安防

中图分类号 TN253

文献标志码 A

0 引言

光纤是光波的传输媒介,是现代信息网络的基石,在通信领域中用于信息交换.但光纤本身属于一种物理媒介,外界环境的变化可以影响光纤的几何参数和光学参数,而这些参数的变化与外界环境存在一定规律,由此产生了光纤传感技术.光纤传感器作为传感器中一支新秀,以其抗电磁干扰能力强、电绝缘、易于组网、能够进行分布测量等许多独特优势,解决了许多传统传感器无法解决的问题,且能够在极端恶劣条件下使用,因此在多个领域受到世界各国的关注并日益显现出其重要作用^[1-5].

光纤传感器的经典之作光纤光栅传感器、光纤陀螺等已在军事、地质勘探、电力等部门得到推广应用.近年来,光纤传感器逐步向分布式、智能化和网络化方向发展.光纤分布式传感器作为光纤传感家族的后起之秀,因其独特的应用环境而备受青睐.光纤分布式传感的核心技术是实现分布式测量,就是使用一根或多根光纤实现长距离连续测量,并能够准确给出某一点上的应变、损伤、振动或温度等信息变化,能够实现大范围的监控.其中基于非线性光学散射机理的长距离分布式传感,光纤既充当传感器又充当信号传输通道,因此具有非常突出的优势,是监测领域上主要的研究方向.基于散射的分布式传感,监测距离可达到几十千米,分辨率高、响应速度快,又可用于各种特殊场所,因此受到研究者的关注和研究^[6-7].

1 分布式光纤传感原理

由于制作工艺和精度的限制,导致光纤的折射率并不绝对均匀.当光通过不均匀介质时,一部分会偏离原传播方向的现象称为光的散射^[8].根据入射光频率和散射光频率的关系将光的散射分为3类:瑞利散射、布里渊散射和拉曼散射.检测不同的散射光则可实现不同类型的分布式光纤传感器^[9].

1.1 基于瑞利散射光的分布式光纤传感器

光纤纤芯折射率的不均匀性导致了瑞利散射,这种不均匀性的产生是光纤制造工艺不完善或光纤微观上的不稳定性造成的,这是不可避免的,因此瑞利散射不可能消除.量子力学机制解释为:通过某一虚能级的跃迁过程使一个入射光子转换成一个能量与入射光子相同的散射光子^[7].20世纪70年代,Barnoski等^[10]根据光纤后向瑞利

收稿日期 2017-02-08

资助项目 国家自然科学基金(61675063);河南省科技攻关计划(162102210021)

作者简介

张锦龙,男,博士,副教授,主要研究领域为光通信和光传感技术.zjl@henu.edu.cn

1 河南大学 物理与电子学院,开封,475001

2 北京邮电大学 电子工程学院,北京,100876

散射光的特点成功研制出光时域反射计(Optical Time-Domain Reflectometry, OTDR).光时域反射计通过测量瑞利散射的后向散射信号,从而得到光纤上散射的强弱分布.OTDR 常用于光纤断点诊断和光纤的光损耗情况分析.基于瑞利散射的 OTDR 技术虽最早被研究并投入使用,但由于测量精度较低,且很难实现长距离检测,因此工程中很少应用.

在 OTDR 基础上,人们提出了基于相位敏感光时域反射计(Φ -OTDR)的分布式光纤传感系统^[9,11]. Φ -OTDR 光源采用了超窄线宽激光器,光相干度较高,它既具有干涉型振动传感的高灵敏度,又具有 OTDR 的分布式实时监测能力. Φ -OTDR 除具有分布式光纤传感技术的一切优势之外,还具有空间分辨率高、定位精度高、多点同时定位等优势,是目前最适合边界安防的技术^[7,11],因此近年来该技术成为国内外的研究热点.

1.2 基于布里渊散射光的分布式光纤传感器

布里渊散射(Brillouin Scattering)是指入射到光纤中的光波与光纤内的弹性声波发生相互作用而产生的一种光散射现象.基于布里渊散射的分布式光纤传感就是利用其背向散射信号实现对外界物理量的测量的^[12].当激光功率达到布里渊散射阈值时,随之产生背向布里渊散射光信号.由于布里渊散射光与泵浦光的频移量与传感光纤温度和所受应力成正比,故检测布里渊散射频移量可以用来测量温度和应力,从而实现温度和应力分布式传感.实际应用中,先测量出背向布里渊散射光的强度和频率,再根据相关参数得到传感光纤的应变及温度情况.目前基于布里渊散射的分布式光纤传感技术研究难点在于自发布里渊信号相比瑞利散射非常微弱,还与瑞利散射光的波长非常接近.如何滤掉瑞利散射以提取自发布里渊散射是学者们研究的重中之重^[11].

泵浦光和散射光发生干涉效应会激发声波场,声波场会反过来增强布里渊效应,如此反复循环从而产生受激布里渊散射(SBS).基于受激布里渊散射的分布式光纤传感依据机制不同分为两种传感方式:一为布里渊增益型,产生机制为脉冲光的频率高于连续光的频率,脉冲光的能量向连续光转移,这种传感方式的缺点是仅适用于短距离传感;二为布里渊损耗型,产生机制与增益类型相反,脉冲光频率低于连续光,连续光的能量向脉冲光转移,这种传感方式克服了增益型的缺点,实现了长距离传感,适用于大范围监测系统.基于受激布里渊散射的分布式光

纤传感技术中探测器接收到的光强大小与脉冲光和连续光的频率之差相关,当两束光的频差等于光纤各点的布里渊频移时,接收到的光强最大.因此可以通过扫描探测光波长实现布里渊频移的测量,从而实现传感光纤各点温度和应变分布式传感^[11,13-14].BOTDA 系统最突出的优势是散射信号强,大大降低了信号解调的难度,且可用于长距离传感,测量精度高;缺点是系统结构复杂,任意器件的参数变化都会引起整个系统性能改变,实际使用中很难使系统稳定下来.而且该系统需要双端激光注入传感光纤,不仅提高了成本,而且工程应用不方便.

1.3 基于拉曼散射光的分布式光纤传感器

拉曼散射是由泵浦光子与光纤中的光学声子相互作用而产生的一种非弹性散射,会产生两种强度相当的频率成分,一为泵浦光子吸收光学声子的反斯托克斯光,二为泵浦光子释放光学声子的斯托克斯光^[11].在拉曼散射光中,斯托克斯光光强几乎不受光纤轴向温度变化的影响,而反斯托克斯光光强随温度变化而变化.将两束光强做对比,再根据光强与温度变化的对应关系即可得到光纤各点温度.拉曼散射信号是极其微弱的,因此给解调技术提出了很高的要求.另外微弱的散射信号,对于长距离传感来说,实现起来也是非常困难的.

2 分布式光纤传感应用领域

光纤传感领域主要有两个大的发展方向:原理研究和应用开发.随着技术日趋成熟,对传感器的实用化开发成为整个领域发展的热点和关键.分布式光纤传感器以其独特的优势,适用于传统电学传感器无法发挥作用的恶劣环境及工况下.其重要应用领域如下:

2.1 石油石化领域

分布式光纤传感器可应用于火灾安全监测预警系统,能满足石油石化领域对火灾报警及安全监测的需求.我国制订的《线型光纤感温火灾探测器》国家标准,为分布式光纤传感技术在石油石化领域应用的技术革新提供了方向.石油井下往往存在高温、高压、腐蚀和电磁干扰等恶劣环境,传统电学传感器无法工作.分布式光纤传感器可以在这种极端条件下正常工作,包括高温、高压(几十兆帕以上)以及强烈的冲击与振动,同时因其具有分布式测量能力,可以测量被测参数的空间分布,确保完成测量.分布式光纤传感技术在天然气储运、罐区火灾报警、管道泄

漏监测、管道第三方破坏等领域也具有广阔的应用前景^[15]。

2.2 冶金、煤矿领域

将分布式光纤传感器深入到几百米的煤矿矿井,就可用于监测瓦斯浓度、温度、震动、矿压等数据。因为光纤传感只传光、不带电,在煤矿这样的特殊场所,就成了安全的“听诊器”,可以为煤矿安全生产进行预防和诊断。目前冶金领域也采用了高压分布式光纤传感器,填补了该领域的技术空白。基于光谱吸收传感技术的光纤传感综合安全监控系统可以在数十千米范围内对瓦斯浓度、矿压、水压、温度和地震波等进行监测,并可以形成煤矿综合安全信息监测网,有效提高瓦斯预报的准确性和前瞻性,对于减少瓦斯爆炸事故、减少人员伤亡具有重大意义^[16]。

2.3 智能电网领域

随着智能电网的建设,对配电网电缆运行状态实时监测的要求越来越高,研究新型传感与测量技术并应用于智能配电网中的电缆监测已成趋势。采用分布式光纤测温技术对电缆实时监测,建立相应的负荷温度曲线,可以实现对电缆运行温度的监控。

针对电力市场领域的分布式光纤测温系统、变压器油温测量系统等,可用于监视电厂设备,以满足电力自动化建设的需要。为了能够在电力系统中提供连续高空间分辨率的监视,需要采用分布式光纤温度传感器系统^[16-17]。

2.4 交通隧道领域

基于分布式光纤传感器的隧道结构监测和火灾报警监测系统非常适用于交通隧道领域。如城市地铁隧道中,要求传感系统抗电磁干扰、组网便利且有较高的传输带宽。将分布式光纤温度传感器应用在地铁隧道火灾预警系统,能够及时有效地监测地铁隧道的温度变化,为地铁隧道火灾预警和定位提供强有力的技术保障^[16]。

2.5 土木工程领域

土木工程和基础设施在使用过程中,由于服役时间长、环境恶劣、疲劳效应和材料老化等原因,其结构将不可避免地产生抗力衰减或损伤积累,为突发灾难性事故埋下隐患。针对重大工程和基础设施的健康监测和诊断是贯穿整个工程生命周期的工作^[18-19]。从工程施工、运营管理一直到拆除都需要准确、全面地测量结构的参数信息。传统的传感监测系

统获取的结构参数信息容易漏检,不能完全反映实际状态,而且寿命较短。分布式光纤传感器恰当地解决了这些问题,为大型设施智能健康监测系统的研发提供了崭新的途径,适合长期实时监测土木工程结构。

2.6 周界安防领域

随着恐怖分子活动日益频繁、人口流动量急剧上升,对安防体系能否实时监控预警提出了更高要求。其中周界安防作为第一道防线,显得尤为重要。周界安防系统既要能对各种入侵事件及时响应,又要有长距离监控、高精度定位、高抗电磁干扰等特性,这就出现了光纤周界监控预警系统^[20]。该系统是基于分布式传感技术的安全报警系统,它将光缆作为传感传输二合一的器件,通过对直接接触及并传递给光缆的各种扰动,进行实时监控。采集扰动数据后可以智能识别,判断出威胁的来源,实现系统预警和实时告警,从而对入侵设防区域的威胁行为进行监测和预警。

2.7 海底检测领域

海底管道是海上油气运输的主要形式,而海底管道运行于海底,工作条件较陆地管道更加恶劣,历史上曾多次发生海底管道破坏事故。一旦发生事故,原油泄漏将污染海洋环境,后果非常严重,因此海底管道安全运行迫切需要实时监测设备。海底恶劣的环境令电类传感器望而止步,分布式光纤传感技术则在海底管道监测中被广泛利用。海底电缆由于接触船舶的锚和渔具等,不可避免外伤损坏,因此检测由外伤引起的海底电缆变形也是一项重要工作。同时海底电缆的工作缆温也必须实时监测^[21-22]。采用分布式光纤传感系统,只需施工时随海底电缆敷设传感光纤就可提供整条电缆的运行温度和应变信息,有效地预防和定位海底电缆安全事故。

3 国内外研究现状

分布式光纤传感器因其与众不同的特性和应用环境,一直备受瞩目。特别是光纤传感器逐步成熟并开始应用于广阔的市场,其研究和开发在世界范围内引起了高度关注。预计2018年光纤传感器市场规模将达到43.3亿美元。从光纤传感技术研究上看,美国的研究起步最早,在军事和民用领域的应用方面都是世界最先进的。在军事方面,他们重点研究和开发用于水下探测和航空监测的分布式光纤传感器等。这些研究都分别由美国空军、海军、陆军和国家

宇航局的支持并有许多大公司的资助.同时美国的很多大学、研究单位和公司都开展了光纤传感器在民用方面的研究和开发,如斯坦福大学、弗吉尼亚理工大学、Babcock & Wilcox 公司、Accufiber 公司、Fidberdy-Elamies 公司、EOTec 公司、Optical 技术公司等,他们研发的分布式光纤传感器用于监测电力系统的电流、温度等重要参数,监测桥梁和重要建筑物的应力变化,检测肉类和食品的细菌和病毒等.数据显示目前美国光纤传感器民用领域的研究开发已大大超过军用领域.

日本和西欧等发达国家也高度重视光纤传感器的研究与开发.日本在 20 世纪 80 年代便制定了“光控系统应用计划”,该计划旨在将光纤传感器用于大型工厂,以解决强电磁干扰和易燃易爆等恶劣环境中的信息测量、传输和生产过程的控制.东芝、日本电气等公司和研究机构,研发出了具有一流水平的民用光纤传感器组成光纤传感器网络系统,把分散在工厂各场所的信息进行时序化处理,并以全光方式收集.这种网络装置可连接 1 000 个以上的传感器.西欧各国的大型企业和公司也积极参与了光纤传感器的研究与开发和市场竞争,如英国的标准电讯公司、法国的汤姆逊公司和德国的西门子公司等.

我国光纤传感器行业前些年主要以学术研究为主,产业化程度较低,近些年国内光纤传感器生产企业快速发展,很快进入产业化阶段.国家“863”计划以及“973”计划也开始重视全分布式光纤传感技术领域,表明了基于全分布式光纤传感技术的光纤传感网络将是未来的主要研究方向^[23].光纤传感器行业的发展重心由科研机构转向生产企业,产生了一批具有竞争力的企业.为了扭转产业发展对国外技术严重依赖的局面,在光纤传感产业前瞻性技术、核心技术等方面增强我国产业自主发展能力,国家发展改革委批准建设了光纤传感技术国家工程实验室.目前国内从事光纤传感器产业化的公司在各个领域进行了大量的研究,其中相当数量的研究成果具有很高的实用价值并达到世界先进水平.

4 未来发展趋势

只有在应用领域获得突破才能促进技术发展,分布式光纤传感的应用正以蓬勃之势在各个行业领域展开,产生了巨大的经济效益^[9].目前,我国分布式光纤传感技术已接近世界先进水平,有充足的发展空间和应用环境.特别是极限性能和恶劣环境下,

分布式光纤传感器扮演着重要角色,近年来发展的速度超过了点式的传感器.分布式适合大型结构,它的独特性能几乎不可代替,是今后光纤传感的发展方向.此技术的应用将加速我国物联网和智慧城市建设的发展,其应用必将带来愈来愈大的经济效益.经过 30 多年的技术沉淀及市场发展,我国光纤传感器市场产业化格局已经形成.从单一的技术推广逐步转向成熟的整体解决方案,一批具有先进技术的中小型高新技术企业群体正在形成并推动我国光纤传感市场的蓬勃发展.因此,我们有理由对光纤分布式传感器的未来充满信心.

参考文献

References

- [1] Li X L, Sun Q Z, Wo J H, et al. Hybrid TDM/WDM-based fiber-optic sensor network for perimeter intrusion detection [J]. Journal of Lightwave Technology, 2012, 30 (8): 1113-1120
- [2] Hu Z S, Yang Q H, Qiao B. Design of interference distributed fiber-optic underwater long gas pipeline leakage detection system [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2012, 49 (7): 070602
- [3] Zhang L, Wang Z N, Li J, et al. Ultra-long dual-sideband BOTDA with balanced detection [J]. Optics & Laser Technology, 2015, 68 (3): 206-210
- [4] Zhang X P, Qiao W Y, Sun Z H. A distributed optical fiber sensing system for synchronous vibration and loss measurement [J]. Optoelectronics Letters, 2016, 12 (5): 375-378
- [5] 王峰, 潘运, 王威, 等. 偏振光时域反射技术对多点扰动检测的研究进展 [J]. 集成技术, 2016, 5 (5): 1-10
WANG Feng, PAN Yun, WANG Wei, et al. The research progress of detecting multi-disturbing events for polarization optical time domain reflectometer [J]. Journal of Integration Technology, 2016, 5 (5): 1-10
- [6] Zhang C X, Zhang Z W, Zheng W F, et al. Study of a quasi-distributed optical fiber sensing system based on ultra-weak fiber bragg gratings [J]. Chinese Journal of Lasers, 2014, 41 (4): 0405004
- [7] Zou D B, Liu H, Zhao L, et al. Research of signal recognition of distributed optical fiber vibration sensors [J]. Laser Technology, 2016, 40 (1): 86-89
- [8] 陈劲勤, 王峰, 张旭苹, 等. POTDR 振动传感系统的数据处理与分析方法 [J]. 电子测量与仪器学报, 2016, 30 (11): 1671-1678
CHEN Mengmeng, WANG Feng, ZHANG Xuping, et al. Data processing and analysis method of POTDR vibration sensing system [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2016, 30 (11): 1671-1678
- [9] Peng F, Wu H, Jia X H, et al. Ultra-long high-sensitivity Φ -OTDR for high spatial resolution intrusion detection of pipelines [J]. Optics Express, 2014, 22 (11): 13804-13810

- [10] Bamoski M K, Rourke M D, Jensen S M, et al. Optical time domain reflectometer [J]. *Applied Optics*, 1977, 16(9):2375-2379
- [11] Zhan Y G, Wang K, Yu Q, et al. Influences of intrusion signal's characteristics on detection performances of the distributed sensor based on phase-sensitive optical time domain reflectometer [J]. *Journal of Applied Remote Sensing*, 2015, 9(1):094093
- [12] 罗健斌,郝艳捧,叶青,等. OPPC 线芯温度的分布式布里渊散射光纤传感技术[J]. *电力系统自动化*, 2013, 37(13):114-120
LUO Jianbin, HAO Yanpeng, YE Qing, et al. A distributed fiber sensing technology based on Brillouin scattering for OPPC wire core temperature measurement [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2013, 37(13):114-120
- [13] Zhan Y G, Yu Q, Wang K, et al. Optimization of a distributed optical fiber sensor system based on phase sensitive OTDR for disturbance detection [J]. *Sensor Review*, 2015, 35(4):382-388
- [14] Zhan Y G, Yu Q, Wang K, et al. A high performance distributed sensor system with multi-intrusions simultaneous detection capability based on phase sensitive OTDR [J]. *Opto-Electronics Review*, 2015, 23(3):187-194
- [15] 韩玲娟,王强,范昕炜,等.分布式光纤传感水下天然气管道泄漏的 SPE 诊断法[J]. *激光与光电子学进展*, 2016, 53(5):263-268
HAN Lingjuan, WANG Qiang, FAN Xinwei, et al. Underwater gas pipeline leakage diagnostic method by distributed optical fiber sensor based on SPE [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(5):263-268
- [16] 方星,刘建奎.分布式光纤传感技术在采煤塌陷残余变形监测上的应用[J]. *合肥工业大学学报(自然科学版)*, 2016, 39(2):260-264
FANG Xing, LIU Jiankui. Application of distributed optical fiber sensing technology in monitoring residual deformation in coal mining subsiding area [J]. *Journal of Hefei University of Technology (Natural Science)*, 2016, 39(2):260-264
- [17] Ukil A, Braendle H, Krippner P. Distributed temperature sensing: Review of technology and applications [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2012, 12(5):885-892
- [18] 高磊,陈晖东,余湘娟,等.岩土与地质工程中分布式光纤传感技术研究进展[J]. *水利水电工程学报*, 2013(2):93-99
GAO Lei, CHEN Huidong, YU Xiangjuan, et al. Advance of the distributed optical fiber technology in geotechnical and geological engineering [J]. *Hydro-Science and Engineering*, 2013(2):93-99
- [19] 何建平,徐俊.基于分布式光纤传感技术的铁路路基岩溶土洞塌陷监测[J]. *铁道建筑*, 2016(2):111-115
HE Jianping, XU Jun. Monitoring of collapse of karst cavern under railway subgrade based on distributed optical fiber sensing technology [J]. *Railway Engineering*, 2016(2):111-115
- [20] 叶雯.基于分布式光纤传感技术的边境远程监控系统[J]. *公安海警学院学报*, 2016, 15(1):4-6
YE Wen. Border remote monitoring system based on distributed optical fiber sensing technology [J]. *Journal of China Maritime Police Academy*, 2016, 15(1):4-6
- [21] 任鹏,申宇,李轩,等.深海立管姿态监测的分布式光纤传感技术[J]. *中国海洋平台*, 2014, 29(2):26-32
REN Peng, SHEN Yu, LI Xuan, et al. A distributed fiber optic sensing technology for shape monitoring of deepwater riser [J]. *China Offshore Platform*, 2014, 29(2):26-32
- [22] Li L, Tang S F. Distributed optical fiber gas sensing system with shared laser [J]. *Laser Technology*, 2014, 38(3):384-388
- [23] 赵立.我国光纤传感器市场发展前景分析[J]. *光通信研究*, 2014(1):45-48
ZHAO Li. Analysis on market status quo of Chinese optical fiber sensor industry and its market prospective [J]. *Study on Optical Communications*, 2014(1):45-48

A rising star in fiber optic sensor: Distributed sensor

ZHANG Jinlong¹ WANG Yongjun² TIAN Feng² ZHANG Zhengyan¹

¹ School of Physics and Electronics, Henan University, Kaifeng 475001

² School of Electronic Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876

Abstract With the deepening study of nonlinear effect in optical fiber, the distributed optical fiber sensor has been widely studied and applied. In this paper, the application of optical fiber sensor is introduced. To realize different types of fiber distributed sensing, the principle of three kinds of scattered light based on Brillouin scattering, Raman scattering, and Rayleigh scattering is summarized. Finally, the future development direction of fiber distributed sensing is prospected.

Key words fiber optic; distributed sensor; light scattered; perimeter security