

光纤传感技术在石油行业应用现状及发展趋势

杨帆, 李斌, 梅文博, 杨琦, 李亮, 安琦

中联煤层气有限责任公司, 北京

收稿日期: 2022年2月21日; 录用日期: 2022年9月27日; 发布日期: 2022年10月9日

摘要

光纤传感技术以光纤作为信息的传感和传输媒介, 信号光作为信息的载体, 通过外界物理量变化直接或间接的改变光纤中光波的振幅、相位、频率、偏振态或波长等参量, 从而实现对外界物理信息的感知。近十余年, 随着技术的进步, 光纤传感技术发展迅速, 相较传统的传感器有更高的灵敏度和精度; 重量轻、体积小, 便于安装; 具有良好的绝缘性、化学稳定性以及抗电磁干扰能力; 可以实现分布式测量, 还能组成传输网络, 实现大规模多点测量。目前已广泛应用于航空航天、土木工程、石油石化、电力系统和医疗诊断等众多领域。光纤技术在石油行业已经广泛应用于石油勘探、井下监测、储存、运输等各个方面, 该技术在石油行业具有良好的发展前景。

关键词

光纤传感技术, 石油行业, 应用, 发展

Application Status and Development Trend of Optical Fiber Sensing Technology in Petroleum Industry

Fan Yang, Bin Li, Wenbo Mei, Qi Yang, Liang Li, Qi An

China United Coalbed Methane Co. Ltd., Beijing

Received: Feb. 21st, 2022; accepted: Sep. 27th, 2022; published: Oct. 9th, 2022

Abstract

Optical fiber sensing technology uses optical fiber as the sensing and transmission medium of information, signal light as the carrier of information, and directly or indirectly changes parameters such as the amplitude, phase, frequency, polarization state or wavelength of the light wave in the

optical fiber through changes in external physical quantities, so as to realize the perception of external physical information. In the past ten years, with the advancement of technology, optical fiber sensing technology has developed rapidly. Compared with traditional sensors, it has higher sensitivity and accuracy; it is light in weight, small in size, and easy to install; it has good insulation, chemical stability and anti-electromagnetic interference ability; can realize distributed measurement, and can also form a transmission network to achieve large-scale multi-point measurement. At present, it has been widely used in many fields such as aerospace, civil engineering, petroleum and petrochemical, power system and medical diagnosis. Optical fiber technology has been widely used in oil exploration, downhole monitoring, storage, transportation and other aspects in the oil industry, and the technology has a good development prospect in the oil industry.

Keywords

Optical Fiber Sensing Technology, Petroleum Industry, Application, Development

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 前言

1970年,康宁公司首次研制成功损耗为20 dB/km的光纤,实现了光纤在通信领域的应用[1],随着国内外研究水平的不断提高,基于光纤的通信、传感技术得到了迅速发展。光纤传感器相较传统的传感器有更高的灵敏度和精度;重量轻、体积小,便于安装;其材质多为石英材料,具有良好的绝缘性、化学稳定性以及抗电磁干扰能力;可以实现分布式测量,还能组成传输网络,实现大规模多点测量。基于以上优势,光纤传感技术在各行各业占据越来越重要的位置。

根据光纤作用的不同,光纤传感器可分为非功能型(传光型)和功能型(传感型)光纤传感器两大类。当前广泛应用的光纤传感技术主要有分布式光纤传感技术、光纤激光水听器技术、光纤光栅传感技术、光纤气体传感技术、光纤电流传感技术和光纤湿度传感技术等。

2. 光纤传感技术发展基本情况

2.1. 分布式光纤传感技术

分布式光纤传感技术基于干涉和背向散射原理,目前广泛应用的主要包括分布式光纤温度传感技术、分布式光纤振动传感技术。

分布式光纤温度传感技术由激光器发出的光脉冲注入光纤后,通过测量光束在光纤中的背向散射光强分布,可获得整段光纤的温度分布信息,同时结合高速信号采集技术,探测激光脉冲返回的时间,可以实现温度变化点的准确定位,并解算出实时的温度信息。目前,分布式光纤温度传感技术已经成熟,并大批量应用。可应用于与隧道矿井火灾监测、电力系统监测、水坝或油气管道等设施渗漏监测,在油井测温、地热井测温、石油储罐监测、油气长输管线监测、电缆监测等领域也有广泛应用。英国 Sensomet 公司推出的 Halo-DTS 型号产品,测量距离达到 60 km,测温精度达到 0.01℃,空间分辨率达到 1 m;美国 Agilent 公司推出的分布式光纤温度传感器产品,可实现测量距离 30 km、8 km、4 km 和 2 km 等不同测量条件,温度分辨率为 1℃,空间分辨率为 1 m [2]。国内在商业化产品方面,杭州山旭光电有限公司 2016 年研发的 DTS8000 分布式光纤测温系统,测温距离达到了 16 km,测温范围为-40℃~700℃,响应时间小于 1 s,

空间分辨率达到了 0.5 m [3]。

分布式光纤振动传感技术利用光纤中光波的物理参数(如相位、偏振等)对振动敏感的特性,连续实时地监测光纤铺设位置的振动情况。根据传感原理,分布式光纤振动传感技术主要可分为基于干涉原理和背向散射原理两类。

加拿大 Ottawa 大学通过在相位敏感光时域反射系统(ϕ -OTDR 系统)中引入时分复用技术,使 ϕ -OTDR 系统对振动的最高检测频率达到 0.6 MHz,空间分辨率达到 1 m [4]。航天九院 13 所目前已研制成 sagnac 型分布式光纤振动传感器、 ϕ -OTDR 型分布式光纤振动传感器两类正式产品,其中 ϕ -OTOR 型分布式光纤振动传感器可实现测量距离 40 km,定位精度 ± 20 m 的技术指标,目前在油气长输管线监测、重要区域周界安防、通信光缆安全运行监测等领域已实现正式应用。

2.2. 光纤激光水听器技术

光纤激光水听器是将“有源”光纤光栅作为敏感元件,在光纤上刻写具有一定相移的光纤布拉格光栅形成分布反馈(DFB)光纤激光器,通过检测外界声压作用于激光器谐振腔上引起的波长变化进而获得水声信号。激光水听器技术目前主要应用于军事和海洋领域。国外研究人员 FosterS 等人在圣文森特海湾进行试验,封装的水听器灵敏度为 -107 dBreHz/Pa,灵敏度高、大动态范围和较好的一致性,达到零级海况探测要求,具备实际应用能力;国内海军工程大学利用半导体所研制的 DFBFL 水听器,在 2.5 kHz~10 kHz 范围内声压灵敏度为 -131.02 dB,波动小于正负 0.7 dB [5]。

2.3. 光纤光栅传感技术

光纤光栅的传感机理是基于波长调制的,外界环境参数(如温度、压力、位移、加速度等)作用于光纤光栅上,改变光栅反射光谱的中心波长,以此进行信息测量[6]。目前,光纤光栅传感器已广泛应用于航天器、建筑物等的温度和应变监测。英国 Smart Fibre 公司的光纤光栅传感系统目前已应用于风力发电、土木结构、飞机、舰船、油井等多个领域;国内航天九院 13 所生产的光纤光栅温度传感器测温范围为 $-40^{\circ}\text{C}\sim+200^{\circ}\text{C}$,温度测量精度为 $\pm 1^{\circ}\text{C}$,光纤光栅应变传感器的测量范围为 $\pm 2500\ \mu\epsilon$,应变分辨率为 $2\ \mu\epsilon$,光纤光栅解调仪最大测量通道可达到 16,测量光谱宽度可达 80 nm。

2.4. 其他光纤传感技术

光纤气体传感技术通过检测光信号的变化实现对待测气体浓度的检测。目前广泛地应用在工业控制、环境监测、医学应用、可燃性气体及毒性气体的实时监控等领域。

光纤电流传感技术相较传统传感器实现低频到高频的广阔频率测量范围。不仅能用于电力系统中电流的测量,而且与电机制造、测量仪器仪表结合,还可研制开发线路事故点的标定装置及事故区的判定装置等一系列电力系统的测量、诊断装置。

光纤湿度传感技术利用当空气中相对湿度发生改变时,敏感元件的物理或化学性质发生改变,导致光纤中传输光信号的物理参量发生改变,进而解算出湿度的相对变化量。解决了航空航天、电子、石化、农业、仓储、烟草等领域的易燃、易爆和强电磁干扰环境中进行湿度测量与控制的难题。

3. 石油行业内光纤技术发展应用情况

不自上世纪 90 年代起,光纤传感技术就开始在石油化工行业开始应用。石油行业光纤传感技术主要应用在石油勘察、测井、有害气体监测和石油储运等工作,包括用于井下检波器、油井温度压力等参数测量、钻井过程中有害气体(如硫化氢)监测、输油气管线监控、输油管道泄露监测、储油罐区光纤监控系统、储油罐区火灾监测预警等。

在光纤温度分布传感技术方面,英国 Sensa 公司一直处于领先地位,其应用于石油井下的基于拉曼散射原理的光纤分布式温度传感器(DTS),可以测量 12 km 内光纤沿途的温度分布情况,并能够复用 6 个温度传感器,且已经连续 9 年在由壳牌勘探开发公司开发的代号 TA-27 的井中进行监测,证明了其可靠性之高。美国 SabeuS 公司利用强度较高的光纤光栅,研制出了油气井下的温度监测系统及传感器,型号 LSDTS-250,并在深度为 12,000 m 的井中使用了 100 个光纤光栅温度传感器进行测量,MPT 系列温度传感器也是由该公司开发出的,能够在 250℃ 的高温下连续工作,但准确度仅为 1℃。美国 CIDRA 公司目前的光纤压力传感器的指标为:测程 0~103 MPa,过压极限 129 MPa,准确度 ± 41.3 kPa,分辨率 2.06 kPa,长期稳定性 ± 34.5 kPa/yr (连续保持 150℃),工作温度范围 25℃~175℃。2001 年该公司的压力传感器在英国 BP 公司的几口井下安装,监测应力变化,结果表明其具有足够的可靠性。美国斯伦贝谢油田服务公司 Doll 研究中心的 Tsutomu Yamate 等人研制成一种对温度不敏感的侧孔布喇格光纤光栅传感器,最高工作温度为 300℃,最高测量压力 82 MPa,在最高测量压力下,对温度的灵敏度极小,可以适用于井下的压力监测。

1996 年,哈里伯顿公司在印度尼西亚的蒸汽驱井应用光纤分布式测温技术对油藏温度监测。Schlumberger 公司在 2000 年开发出了一种分布式温度传感系统(DTS),适用于高温注气井的温度检测,可在 5000 m 的深度下进行 0℃~370℃ 的温度测量,分辨率 1 m,测量精度较低,只能达到 ± 0.5 ℃。2002 年 8 月,世界上第一口安装有多光纤传感器的智能井在 Norsk Hyrdo 公司和 Weatherford 公司的共同努力下得以实现,其运用了光纤光栅传感技术和分布式温度传感技术,智能井位于北挪威海域,代号 E-11C,所能测到的温度范围为-20℃~150℃、测量精度达到 ± 1 ℃、分辨率 ± 0.1 ℃。2007 年,胜利油田采油工艺研究院成功研制了光纤光栅温度压力测试系统,2009-04 将其安装在胜利油田 GO6-28-495 井中,对该井的井底温度、压力进行实时监测。该井为国内第 1 口光纤分层测试分层采油井,为智能完井技术的研究奠定了基础。2014 年 4 月,中国电科 8 所研发的分布式光纤温度传感器产品系统安装到某稠油热采油田某生产井,对井下水平段(1680~1970 米)温度进行连续监测,实现了井下温度 24 小时不间断监测,工作稳定,完全能够满足温度测井要求。2016 年,中国科学院研制的井下光纤检波器完成了井下实验,并已经成功用于油田的井下勘探。

3.1. 光纤传感技术在油田中的应用

3.1.1. 光纤温度测试技术在油井中的应用

井下温度测试数据可以用于产出层位的划分、实时生产剖面监测、套管窜槽和漏失情况判断;尤其对于稠油注蒸汽井,准确、连续、实时地进行井下温度监控,能实现实时注入剖面监测和实时注蒸汽管理。光纤传感器能抗电磁干扰,外形尺寸小,能承受高温高压及腐蚀等极端工况,特别适用于井下温度压力等参数的永久监测。其工作原理是分布式光纤温度测试技术中,光纤本身既是传感器又是信号传输的载体。依据光纤后向拉曼散射原理,光脉冲在光纤中传播,受热时会产生后向散射。光纤所处的环境温度越高,该点的后向散射光的光强度越大,检测散射光强度即可确定测试点的温度;利用光时域反射(OTDR)原理,依据光从入射点到散射点往返的时间,可计算出入射点到散射点的距离。在稠油热采井中,需要向井下注入高温蒸汽,其温度高达 300℃,而耐高温光纤能够耐温-65℃~300℃。

3.1.2. 光纤传感器用于井下检波器 VSP 系统

井下地震波采集具有大动态范围和硬实时性的需求。应用了光纤传感的一套井下 3 维 VSP 采集系统设计方案,可以满足这些需求,并且取得了不错的效果。其工作原理是该井下检波器(FAR)由三维光纤加速度传感器、测量模块、控制模块、供电模块和推靠模块等多个部分组成。若干涉仪的传感臂和参考臂的光纤长度不等,则当光源频率不断变化时,从信号臂和参考臂传出的光存在相位差。利用这个原理将

振动信号通过传感器转为干涉仪的传感臂和参考臂的光信号相对相位漂移,再由 2×2 耦合器把此相位漂移转为光强的变化,最后通过光探测器提取出变化的光强信号。

测试得到一个幅度为 0.05 g , 频率 500 Hz 的正弦波信号经过 VSP 系统后的响应波形。噪音大约在 10^{-4} g 数量级上,因而可以推断地震加速度信号可测的最小值为 10^{-4} g , 测量动态范围(可测量的最大值与最小值之比)大约为 80 dB 。2005 年 10 月,在华北油田进行了地震波采集测量实验。传感器阵列被送至井下 1 km 。由中石油的东方物探公司使用炸药枪模拟地震震源信号。实验结果表明,该 VSP 系统具有 80 dB 的测量动态范围,在 2 k 采样率下信号的采集、处理和传输的总延时仅为 200 ms ,达到了 VSP 系统的实时性要求。

3.2. 光纤传感技术在输油管道中的应用

3.2.1. 基于分布式光纤振动传感的清管器跟踪定位方法

清管作业是长输油气管道投产前或运行中的一项重要工作,而清管器准确跟踪定位是清管作业顺利进行的保障,清管器运动过程中会产生振动,该振动可以使光纤中传输的光波相位发生改变,通过检测该变化可以实现清管器振动信号跟踪定位(图 1、图 2)。

基于分布式光纤传感的清管器在线跟踪定位系统,直接利用管道同沟敷设光缆中的一芯光纤搭建基于相干瑞利散射的分布式光纤传感系统,该系统向光纤内发射光脉冲信号并接收其产生的后向瑞利散射光,由于系统使用的是高相干光源,与相干长度内产生的后向瑞利散射光相互干涉,在光纤没有受到外界扰动时,干涉谱恒定,清管器运行产生的振动作用在光纤上时,导致该处干涉谱发生突变,通过检测该突变信号实现清管器振动信号的检测,记录突变信号发生时间,即可通过公式得到清管器运行位置。

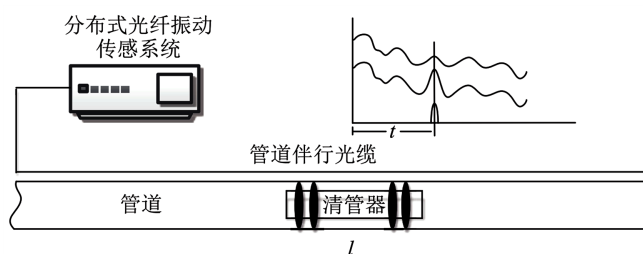


Figure 1. Schematic diagram of pig tracking and positioning system
图 1. 清管器跟踪定位系统原理图

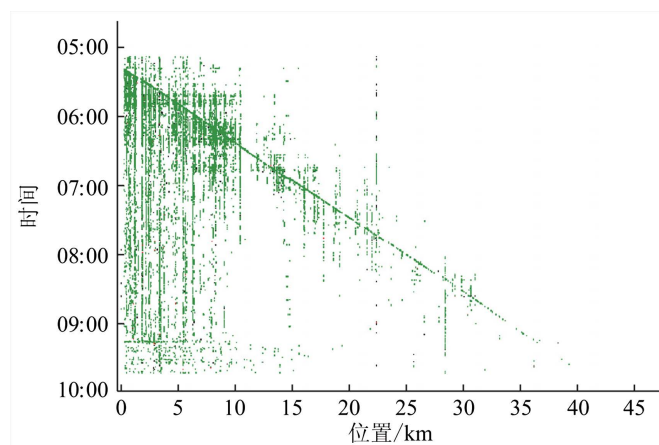


Figure 2. Pig running track diagram
图 2. 清管器运行轨迹图

在西南油气田输气管道清管期间开展了现场试验。该段管道管径 813 mm，运行压力约为 3 MPa。通过光纤跳线与管道同沟光缆中的一芯光纤连接，选取的该芯光纤平均损耗为 0.26 dB/km。2015 年 5 月 6 日使用直皮碗零过盈、直碟皮碗都开槽的直碟混合清管器清管。该段管道的光缆与管道同沟敷设，光缆位于管道上方，垂直距离约 50 cm。检测到的振动信号以瀑布图的形式显示，图中虚线即为清管器运行轨迹，该系统可以实时监测清管器的运行，在损耗为 0.26 dB/km 的条件下，监测距离可以达到 35 km。该技术的定位精度取决于光脉冲的持续时间。

3.2.2. 分布式光纤传感技术在集油系统工程中的应用

分布式光纤传感技术在集油系统工程中的应用为保证油气集输管线系统的安全，防止人为破坏管线或油气泄露等问题发生，利用光纤传感技术对集油系统工程的场站、油气存储区和油气管线等进行实时监测和报警定位。包括周界防范系统、破坏监测系统和光纤测温监测系统三部分(图 3)。

振动系统将光时域反射技术(OTDR)与光纤干涉技术有机结合，当光纤上任意一点振动时，设备第一时间采集到这点的频谱，然后通过模型数据库识别频谱，系统再决定是否报警，同时 OTDR 准确判定何处发生了报警。测温系统用背向光谱分析与分布式光纤定位原理实现。向纤芯中注入激光，系统主机采集并分析背向光谱中与温度敏感的光谱信息，并依据分布式光纤定位原理进行定位计算，从而实现分布式光纤对温度的时时监测。待集输管道投产运行稳定后，收集管道掩埋处的地温数据，并进行系统分析判断，从而针对每条集输管道设定不同的安全报警值，后期运行过程中当温度超过安全报警值时发出报警信息。



Figure 3. Schematic diagram of pipeline monitoring system

图 3. 分管道监测系统示意图

目前，在塔里木油田该集油系统工程中的分布式光纤传感系统运行稳定，可靠性高，能有效对油气工程周界情况，集油管道工况进行实时监控。在陆续发生的 5 次外来人员非法入侵井场及 2 次管道泄漏的事件中，及时准确的进行了报警，有效指导了后续相应的应急处理措施，降低了运行过程中的安全及环保风险，保障了安全。

3.3. 光纤传感技术在储油罐的应用

传统传感器在易燃易爆等特殊环境中应用时存在安全隐患，而且这类传感器寿命短、精度低、稳定性差、调校困难，经常存在误测误报现象。甲烷多通道远程无源光纤传感技术具有很高的测量灵敏度及快速的响应能力；对温度、湿度、电磁等干扰的抵抗力强；无源本质安全的气体传感探头，以及易于形成网络等优点。在油库气体监测中取得了良好的应用效果。

气体传感监测探头仅由气室和光纤组成，不带有任何电路。因此，可以保证监测探头的本质安全性和抗电磁干扰能力。利用波长调制光谱技术和二次谐波检测技术提取微弱的吸收信号，抑制激光器的 1/f 噪声，提高了系统检测的灵敏度，实现了低浓度气体的检测，可调谐二极管激光吸收谱获得甲烷的特征吸收光谱范围内的吸收谱线，从而对甲烷进行定性分析或定量计算。该系统能测定、显示甲烷瞬时浓度，超限报警，采用后备式不间断电源，使得系统的可靠性更强。

在大榭岛油库现场各罐区各位置共安装光纤甲烷气体监测探头 71 个，经过测试可见，在系统运行一年后，各探头检测到的甲烷浓度显示值与标气实际浓度之差均在误差范围内($\leq \pm 0.2\%$)，而且有很高的稳定性，说明该系统长期稳定可靠，符合应用要求。

4. 光纤传感技术发展趋势

4.1. 光纤传感技术总体发展趋势

目前光纤传感技术虽然应用效果良好，但是也存在一些问题：分布式光纤传感技术往往只能测量单一物理量，且在长距离监测中信号干扰问题严重，影响监测效率；光纤激光水听器技术已经基本具备实际应用的水平，但是仍存在体积大、频率高、动态范围小等问题；普通光纤光栅传感器难以应用于高温环境；缺乏耐高温的封装工艺，自身机械强度有待提高等等。

因此，未来的光纤传感技术应当能够实现传感器多物理量同时检测、提高空间分辨率，提高测量距离、降低处理时间等目标；研制小体积、低频低噪声、动态范围大的光纤水听器；耐高温的光纤光栅传感器和封装技术，以及提高光栅和传输光缆的机械强度等成为光纤传感技术发展的主要趋势。

4.2. 光纤传感技术在石油化工行业发展趋势

石油工业属于高损耗、强腐蚀、易燃易爆的领域，测量环境恶劣，因而对应用于这一领域的传感器提出了更高的要求。各种电类传感器用于石油化工行业的测量存在诸多限制。光纤传感器的优点使得光纤传感技术在石油、化工行业中具有广泛的应用前景。

4.2.1. 光纤传感器石油测井发展趋势

目前光纤传感技术在石油测井中已经得到了广泛应用，但是要得到大力推行还需在以下方面提高：1) 提高光纤本身和接头等设备的稳定性，目前存在容易损坏的问题；2) 减少光信号传输过程中的损耗；3) 解决导管悬挂器接头以及光纤接头的设计和安装等问题；4) 如何运用光纤传感器进行石油储层的分析评价等。

4.2.2. 光纤传感器石油测井发展趋势

光纤传感技术的输油气管线智能化监控预警系统已成功应用于输油管道和天然气管道等长距离管道安全监测。可以将此技术推广到石油化工领域高温压力管道的安全监测，且可以结合光纤气体传感系统对部分易燃、有毒等有害气体进行监测。并且在此基础上：1) 提升光纤对声信号的敏感程度光纤对声信号的敏感程度直接影响传感器的灵敏度，光纤增敏还有待于进一步研究。2) 解决光纤包覆材料的老化问题，发生老化后光纤容易遭到破坏还会影响光纤的测量精度。3) 优化检测信号的处理算法，处理算法直接影响到测量的精度和时效。4) 减少光路中光强损失，设计有效的传感结构，降低光路中能量损耗可以提高检测距离和信号强度。

4.2.3. 光纤传感器石油钻采方面的应用的发展趋势

1) 监控钻井与固井过程：将传感器接在钻杆上，可监测钻进时施加在钻杆上的应力和应变。通过测试压力、温度动态资料，就可以在钻进过程中或钻井之后监测所钻井层的状态。

2) 用于智能完井系统: 光纤传感技术与智能完井系统相结合, 可大大改进油气生产过程。有了配备光纤传感器的智能完井系统, 就能实时监测和监控井下工具位置和状态, 井筒、油层中气、液的流动, 有利于确定油、气和水的产出层位, 帮助操作者及时、准确地评价、调整乃至必要时封堵产层。

3) 用于井下设备工作状态监测: 光纤传感器后续可以应用到监测电潜泵、螺杆泵工作温度, 以便评价泵的工作状况, 防止可能出现的故障而提早报警。可以优化泵速, 使其与向井流动特征曲线相匹配, 达到降低成本, 增加油井和油田的产量的目的。

基于光纤传感技术的优点, 光纤传感器在石油、化工领域有着良好的发展前景, 随着光源技术、探测器技术和光学滤光技术等的发展, 光纤传感器将向着实用化、微型化、高可靠性和低成本的方向发展。光纤传感技术会越来越多地应用到石油、化工领域, 为石油、化工工业的健康发展提供巨大的推动力。

5. 总结

当前, 光纤传感技术处于快速发展中, 带动了多个领域的同步发展, 许多控制装置的信息采集有了新的方式。信号传输可以有更高的标准, 许多领域的自动化水平得以提升, 而传感器是获取信息的核心器件。光纤传感器技术今后的发展方向如下。

1) 实现多用途。光纤传感器不仅可以针对一类物理量, 还可以实现多种物理量的同步采集测量。

2) 提升传感器的分辨率与灵敏度, 降低制造成本, 组建网络化的传感器, 控制污染物、湿度、温度对传感参数的影响, 保证特殊领域数据传感的可靠性。

3) 开发新型的传感材料, 保证传感的高灵敏性。

4) 在高温、高压、化学腐蚀等极端条件保证传感器的可靠性。

5) 光纤传感器可以与微机械、微流态学等技术结合。

6) 与计算机互联网技术结合, 实现智能化运行。

光纤传感技术经过多年的发展实现了技术上的进步, 出现了许多实用性产品。但是, 由于多种实际需要, 当前光纤传感技术加强传感器的实用化研究, 提高传感器的性价比。此外, 要研究新传感机理, 开发新式的光纤传感器, 以扩大应用领域。

参考文献

- [1] 郑百超, 王学锋, 薛渊泽, 张海岩. 光纤传感技术的发展趋势[C]//中国航天电子技术研究院科学技术委员会. 第四届航天电子战略研究论坛论文集(新型惯性器件专刊). 中国航天电子技术研究院科学技术委员会: 航天电子发展战略研究中心, 2018: 93-100.
- [2] 陈健沛, 李伟良, 蔡志岗. 分布式拉曼光纤测温系统研究进展[J]. 广东工业大学学报, 2015, 32(3): 102-109.
- [3] 艾慕. 基于拉曼散射的光纤测温系统的改进与优化[D]: [硕士学位论文]. 大连: 大连海事大学, 2017.
- [4] Qin, Z., Zhu, T., Chen, L. and Bao, X. (2011) High Sensitivity Distributed Vibration Sensor Based on Polarization-Maintaining Configurations of Phase-OTDR. *IEEE Photonics Technology Letters*, **23**, 1091-1093. <https://doi.org/10.1109/LPT.2011.2157337>
- [5] 唐波, 黄俊斌, 顾宏灿, 毛欣. 应用于舷侧阵的分布反馈式光纤激光水听器研究[J]. 中国激光, 2016, 43(8): 256-261.
- [6] 李川, 张以谟, 赵永贵, 等. 光纤光栅: 原理、技术与传感应用[M]. 北京: 科学出版社, 2005.