

# 光学学报

## 我国光纤传感技术发展路线图

苑立波<sup>1\*</sup>, 童维军<sup>2</sup>, 江山<sup>3</sup>, 杨远洪<sup>4</sup>, 孟洲<sup>5</sup>, 董永康<sup>6</sup>, 饶云江<sup>7</sup>,  
何祖源<sup>8</sup>, 靳伟<sup>9</sup>, 刘统玉<sup>10</sup>, 邹琪琳<sup>11</sup>, 毕卫红<sup>12</sup>

<sup>1</sup>桂林电子科技大学电子工程与自动化学院光子学研究中心, 广西 桂林 541004;

<sup>2</sup>长飞光纤光缆股份有限公司光纤光缆制备技术国家重点实验室, 湖北 武汉 430074;

<sup>3</sup>武汉理工光科有限股份公司, 湖北 武汉 430000;

<sup>4</sup>北京航空航天大学仪器科学与光电工程学院, 北京 100191;

<sup>5</sup>国防科技大学气象海洋学院, 湖南 长沙 410000;

<sup>6</sup>哈尔滨工业大学可调谐激光技术国家级重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001;

<sup>7</sup>电子科技大学信息与通信工程学院光纤传感与通信教育部重点实验室光纤光学研究中心, 四川 成都 611731;

<sup>8</sup>上海交通大学区域光纤通信网与新型光通信系统国家重点实验室, 上海 200240;

<sup>9</sup>香港理工大学电机工程系, 香港 999077;

<sup>10</sup>山东省光纤传感技术重点实验室, 齐鲁工业大学(山东省科学院)山东省科学院激光研究所, 山东 济南 250103;

<sup>11</sup>北京知觉科技有限公司, 北京 100085;

<sup>12</sup>燕山大学信息科学与工程学院, 河北省特种光纤与光纤传感重点实验室, 河北 秦皇岛 066004

**摘要** 四十多年来,我国光纤传感技术在经济发展和市场需求的牵引下快速成长。针对我国光纤传感若干典型的细分技术领域,概括性地给出了各个细分技术的发展历程、技术现状及面临的主要问题,使读者能更好地理解我国光纤传感技术发展的样貌,把握我国光纤传感技术市场需求呈指数型增长的发展趋势。

**关键词** 传感器; 光纤传感技术; 细分技术领域; 指数发展规律; 发展趋势

中图分类号 O436; TN253

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202242.0100001

## Road Map of Fiber Optic Sensor Technology in China

Yuan Libo<sup>1\*</sup>, Tong Weijun<sup>2</sup>, Jiang Shan<sup>3</sup>, Yang Yuanhong<sup>4</sup>, Meng Zhou<sup>5</sup>, Dong Yongkang<sup>6</sup>,  
Rao Yunjiang<sup>7</sup>, He Zuyuan<sup>8</sup>, Jin Wei<sup>9</sup>, Liu Tongyu<sup>10</sup>, Zou Qilin<sup>11</sup>, Bi Weihong<sup>12</sup>

<sup>1</sup>Photonics Research Center, School of Electronic Engineering and Automation, Guilin University of Electronic Technology, Guilin, Guangxi 541004, China;

<sup>2</sup>State Key Laboratory of Optical Fiber and Cable Manufacture Technology, Yangtze Optical Fiber and Cable Joint Stock Limited Company (YOFC), Wuhan, Hubei 430074, China;

<sup>3</sup>Wuhan Ligong Guangke Co. Ltd., Wuhan, Hubei 430000, China;

<sup>4</sup>School of Instrument Science and Opto-Electronic Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China;

<sup>5</sup>School of Meteorology & Oceanography, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410000, China;

<sup>6</sup>National Key Laboratory of Science and Technology on Tunable Laser, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China;

<sup>7</sup>Fiber Optics Research Center, Key Laboratory of Optical Fiber Sensing and Communications,

收稿日期: 2021-05-31; 修回日期: 2021-07-22; 录用日期: 2021-10-08

基金项目: 国家重点研发计划项目(2019YFB2203903)、国家自然科学基金项目(61827819, 61735009)

通信作者: \*lbyuan@vip.sina.com

Ministry of Education, School of Information and Communication Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, Sichuan 611731, China;

<sup>8</sup> State Key Laboratory of Advanced Optical Communication Systems and Networks, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;

<sup>9</sup> Department of Electrical Engineering, Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong 999077, China;

<sup>10</sup> The Key Laboratory of Optical Fiber Sensing Technology of Shandong Province, Laser Research Institute of Shandong Academy of Sciences, Qilu Technology University (Shandong Academy of Sciences), Jinan, Shandong 250103, China;

<sup>11</sup> Beijing Perception Technology Co., Ltd., Beijing 100085, China;

<sup>12</sup> School of Information Science and Engineering, Key Laboratory for Special Fiber and Fiber Sensor of Hebei Province, Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei 066004, China

**Abstract** The development of optical fiber sensing technology in China for more than 40 years is accompanied by the economic development and the traction of market demand. Several typical subdivision techniques of optical fiber sensing in China are summarized in terms of their development history, technical status, and major problems, so that readers can better understand the development of optical fiber sensing technology in China and grasp the exponential growth of market requirements of China's optical fiber sensing technology.

**Key words** sensor; optical fiber sensing technology; subdivision technology fields; exponential development law; development trend

## 1 引言

光纤传感技术经过四十多年的学术研究与技术发展,在近几年形成了加速发展的趋势,其原因主要有2个:1)光纤传感技术已经在若干实际场景中获得了大量应用;2)微纳技术、材料技术及生物技术的发展和應用也为光纤传感技术提供了许多交叉感测的新方法。我国经济的快速发展不仅为光纤传感技术的实际应用提供了广阔的市场,同时也助推了这一领域基础研究的繁荣与进步。光纤传感技术在我国电力、石油、化工、建筑、交通、医疗、环保及军事等领域有着广泛的应用,并且取得了显著的进展,同时学术界和产业界之间的结合日益紧密,光纤传感原理和应用也不断推陈出新。正如未来学家 Ray Kurzweil 所预言的那样,所有信息技术的发展迅猛<sup>[1]</sup>。光纤传感技术与产业的市场需求也按照这种指数规律增长。

鉴于此,本文从细分技术发展的角度,邀请了若干具有代表性的企业和研究机构的专家,分别给出了简明扼要的综述,以期给出一个对细分技术发展情况的理解;综述的光纤传感技术包括特种光纤及器件、光纤光栅传感技术、光纤陀螺技术、光纤水听器技术、布里渊光纤传感技术、相位敏感型光时域反射( $\Phi$ -OTDR)技术和光频域反射(OFDR)光纤传感技术。从典型应用领域综述了光纤传感技术,包括光纤气体传感技术、光纤三维形状传感技术、煤矿光

纤传感技术、油气光纤传感技术和海洋勘探光纤传感技术。最后对我国光纤传感技术的发展愿景给出了简要的说明,指出了我国光纤传感产业发展正处于满足广义摩尔定律<sup>[1]</sup>的指数型技术发展期,同时又处于产量效益莱特定律<sup>[2]</sup>的二律交叠复合加速发展期。通过上述技术发展趋势与市场需求规律的分析,旨在说明我国光纤传感技术的发展历程和目前所处的现状与趋势,助推我国光纤传感技术向着更快、更好的方向发展。

## 2 光纤传感若干关键技术的现状及其发展路径

为了从各个细分技术领域更好地理解光纤传感相关技术的发展概况,本节邀请了我国工作在光纤传感行业中各个领域的专家(他们来自若干个代表性企业和若干所代表性高校)分别就所熟悉的传感技术领域和专题,给出了各个专题概况和技术发展脉络,采用图表结合的简明形式说明主要需求现状,给出近几年本技术进步的里程碑和具有挑战性的问题与难点。

### 2.1 特种光纤及器件

近年来,特种光纤及其传感器件的快速发展,有力地推动了光纤传感技术水平迈上新台阶。光纤传感器用光作为敏感信息的载体,用光纤作为敏感信息的传递媒质,与传统的各类传感器相比,具有一系列独特的优点,如电绝缘性能好、抗电磁干扰能力

强、非侵入、高灵敏度、形状可绕曲、耐腐蚀、防爆、容易实现对被测信号的远距离监控等。随着物联网的兴起和 5G 技术的大规模商用化,应用于传感系统的特种光纤及器件也将迎来蓬勃的发展。

### 2.1.1 工作原理

光纤传感的基本原理是:光源入射的光束经由光纤进入光纤传感器件,在传感器内与外界物质相互作用,该光束成为被待测物理参数调制的光信号,使强度、波长、频率、相位、偏振态等光参量发生变化,光信号再由光纤进入光电器件,经解调器的解调后可获得被测参数。整个过程中,光纤及其传感器件起到信号传输和外界物理量感知的作用,是光纤传感的关键组成部分。不同于远距离传输的通信光纤,为了更敏锐地“感知”外界各种信息,通常需要对光纤的波导结构进行特殊的设计,并将其加工成各种高精度的光纤传感器件。下面列举几类特种光纤及其应用原理。

#### 1) 抗弯曲光纤

该光纤弯曲损耗低、机械强度高,适合小尺寸振动环绕制,在光纤水听器上有重要应用。光纤水听器基于光纤迈克耳孙干涉仪的传感原理,即外界声信号引起光纤形变,改变光信号经传感光纤传输的光相移,并经干涉仪调制成为光强度交变信号。利用配套的光相位解调仪,提取光纤水听器拾取的声信号,利用相关软件展示波形、电压等参数。

#### 2) 保偏光纤

该光纤可产生强双折射效应、可以保持某一方向线偏振的入射光束的偏振态。在以光学相干检测为基础的干涉型光纤传感器中,使用保偏光纤能够保证线偏振方向不变,提高相干信噪比,以实现物理量的高精度测量。例如:在光纤陀螺的应用中,基于光纤环 Sagnac 效应,当光纤环在敏感轴上发生转动时,两束光产生相位差并在 Y 波导处发生干涉,经过耦合器之后到达探测器,经 PIN-FET 接收组件解调出光纤环的旋转角速度。

#### 3) 耐高温光纤

该光纤采用特种耐高温聚酰亚胺涂料涂敷,耐受温度达 300 °C。其主要用于分布式光纤测温系统,该系统基于后向拉曼(Raman)散射原理和光时域反射(OTDR)定位原理,并利用了光纤拉曼散射强度随温度变化的特性。

#### 4) 抗辐射光纤

通过材料和波导的优化设计,抗辐射光纤可减小材料辐致衰减,满足辐照环境下的传感需求,通常

应用于分布式光纤测温系统。

#### 5) 旋转光纤

该光纤具有圆偏振保持能力及抗环境干扰能力。旋转光纤采用高双折射光纤预制棒,在拉丝的过程中进行高速旋转。这种特殊工艺制造的旋转光纤的两个本征模式是椭圆偏振的,其内部固有的双折射能够有效地抵抗外界条件(如温度、弯曲、振动等)导致的双折射,从而有效地保持圆偏振光特性。旋转光纤具有极为突出的抗环境干扰能力,在温度波动和振动条件下都能够确保极高的工作精度,显现出比低双折射光纤更大的优势,主要应用于基于法拉第磁光效应的光纤电流互感器。

#### 6) 瑞利散射增强光纤

瑞利散射增强光纤通过掺杂及浓度控制提高光纤的瑞利散射,主要用于基于瑞利散射的分布式传感系统中。例如:对于  $\Phi$ -OTDR 传感系统,光脉冲传播到受外界振动信号作用的光纤段时,以瑞利散射方式回到探测器的光信号也会产生变化,通过检测散射光信号的变化就可以检测出测量区域的振动情况,同时通过模式识别算法可以准确判断出多种不同的入侵和破坏方式,并能同时实现多点入侵监测和精确定位。

### 2.1.2 技术发展

光纤应用于传感领域也经历了一系列的技术变革,为满足不同应用环境,特种传感光纤技术的发展也从更小尺寸的集成化向更适用于恶劣环境的技术方向发展,光纤传感实用化也取得了长足的进步。

1) 抗弯光纤主要应用于光纤水听器,单个水听器很难获得目标的详细信息,因此需要布放成百上千个探测基元组成大的探测阵列,通过水听器阵列实现声场信号的波束形成,进而实现对水下目标的定位与指向。对于大规模的布放,要求探测阵列及传输光缆体积小、重量轻、易于收放。因此要求作为水听器用的传感光纤的几何尺寸小型化,能耐受更小的弯曲半径,且具有更低的弯曲损耗。抗弯光纤也经历了几何尺寸逐步减小、宏弯损耗逐步降低、弯曲机械可靠性逐步提高的发展历程,其极限弯曲半径已经达到了 5 mm,最大宏观弯曲损耗小于 0.01 dB/turn<sup>[3]</sup>。

2) 保偏光纤主要应用于光纤陀螺,目前对于光纤陀螺应用领域,脱骨架小型化、高精度是发展趋势,保偏光纤也经历了更小几何尺寸、更小可弯曲直径、更稳定的全温性能等发展历程,光纤尺寸从 125/250  $\mu\text{m}$ (表示包层、纤芯直径分别为 250  $\mu\text{m}$  和

125  $\mu\text{m}$ )、80/170  $\mu\text{m}$ , 80/135  $\mu\text{m}$ , 发展到 60/100  $\mu\text{m}$ , 现阶段纤芯直径已开始向 40  $\mu\text{m}$  的尺寸发展<sup>[4]</sup>。

3) 耐高温光纤主要用于光纤分布式测温系统, 应用于一些火灾监测、管道泄漏检测等特殊环境, 因而对光纤的耐温性能有较高要求。普通的单模光纤或多模光纤多使用丙烯酸环氧树脂作为涂覆层, 在长期处于 85  $^{\circ}\text{C}$  以上的环境中时涂覆材料老化失效会导致光纤失去保护, 进而引起损耗增加、甚至通信中断等问题。通过改用耐高温特种涂料及优化制备工艺, 目前使用聚酰亚胺作为涂覆层的耐高温光纤可在 300  $^{\circ}\text{C}$  的环境中长期使用<sup>[5]</sup>。

4) 抗辐射光纤主要用于太空或核电等辐照环境的通信及传感。光纤中掺杂的稀土元素在受到太空中高能粒子的辐照时, 会引起辐致暗化效应, 从而造成光纤损耗的急剧增加, 因此需要研制适用于辐照环境的特种光纤<sup>[6]</sup>。现阶段的抗辐射光纤主要从掺杂材料优化、光纤预处理、后处理工艺等多个方向不断地降低辐致衰减指标。

5) 旋转光纤主要应用于电流互感器系统, 基于磁光效应的传感光纤是全光纤电流互感器的核心材料, 也是影响互感器测量精度及可靠性的重要因素之一。目前比较成熟的旋转光纤是通过在拉丝过程中旋转预制棒制备而成。通过对扭转速率的优化设计, 可以很大程度地消除光纤弯曲造成的线性双折射的影响, 且旋转光纤的机械强度较高, 工艺一致性稳定, 极大地提高了产品的稳定性, 已应用于电力、冶金等领域。

### 2.1.3 需求现状

与通信不同, 光纤传感应用往往伴随了一些特殊的应用环境, 特种传感光纤需求现状如表 1 所示。随着我国各个行业的发展, 物理感知层的传感需求也随之而来, 例如: 光纤陀螺、光纤水听器、光纤电流互感器等对保偏光纤及其器件的需求, 核电站及空间探测领域对抗辐射光纤及器件的需求等, 这些需求不仅对传感光纤的性能提高起到了促进作用, 也对市场产生了强劲的拉动作用。

表 1 特种传感光纤需求现状

Table 1 Demand status of special sensing fiber

Application	Problem	Requirement for optical fiber device
Hydrophone array	Hydrophone array requires large sensing ring size and long term reliability of optical fiber in underwater environment	Reducing fiber size, maintaining high fiber bending mechanical properties, and improving fiber reliability in wet environment
Fiber-optic gyroscope	Fiber optic gyroscope requires high precision and small size of fiber ring	Reducing fiber size, keeping high extinction ratio, and improving winding technology of fine diameter fiber ring
Fiber optic current transformer	Fiber optic current transformers need long-term reliability	Reducing size, reducing rotation period, and improving matching degree of fiber with fiber filter and mirror
Radiation resistant fiber	Radiation resistant optical fiber is needed in nuclear radiation environment to prevent the interruption of optical fiber sensing signal	Reducing radial attenuation of optical fiber

### 2.1.4 挑战性的问题与难点

在特种光纤应用环境中, 不同的应用方向对光纤的要求各不相同, 实现更高技术水平对光纤的各项指标也提出了独特的技术要求。

特种光纤在传感领域的应用已经相当广泛, 并且在大部分领域均有不可替代的作用, 如抗弯光纤在小型化水听器中的应用、细径保偏光纤在高精度陀螺中的应用等, 随着传感技术的更新, 实际应用对各种特种光纤的指标也提出了新的要求。

光纤是光纤传感技术的载体, 随着未来新光纤传感技术的出现以及现有传感技术的升级换代, 必

将产生新的光纤类型以及更高技术要求的各类传感光纤。

## 2.2 光纤布拉格光栅传感技术

光纤布拉格光栅(FBG)是业界公认的种类最多、商用化程度最高、应用领域最广泛的一类光纤传感技术。同其他光纤传感技术相比, FBG 的传感信号强、精度高、响应快, 不受光源波动和链路损耗变化的影响, 抗干扰能力强; 通过合理地设计与封装, 单个传感器可达到很强的环境耐受能力, 同时具有组网复用方式灵活多样的特点。利用光纤光栅作为传感单元, 人们发展了众多类型的 FBG 传感器,

FBG 传感器能够检测温度、应力、应变、位移、加速度等诸多参量信息,广泛应用于土木工程等领域,具体的应用有桥梁、隧道、边坡、大坝等大型建筑的结构健康与安全监测,石油天然气的油藏监测、井下温度/压力传感、管道完整性监测,火电、水电、风电、核电等领域大型电力设施的运行状态监测,大型石油储罐、长交通隧道的快速高精度火灾探测,航空航天结构与材料疲劳特性监测,以及高速公路、高速铁路/地铁、机场道面的智能监测等。

### 2.2.1 工作原理

FBG 的原理是在光纤纤芯形成微纳周期结构,

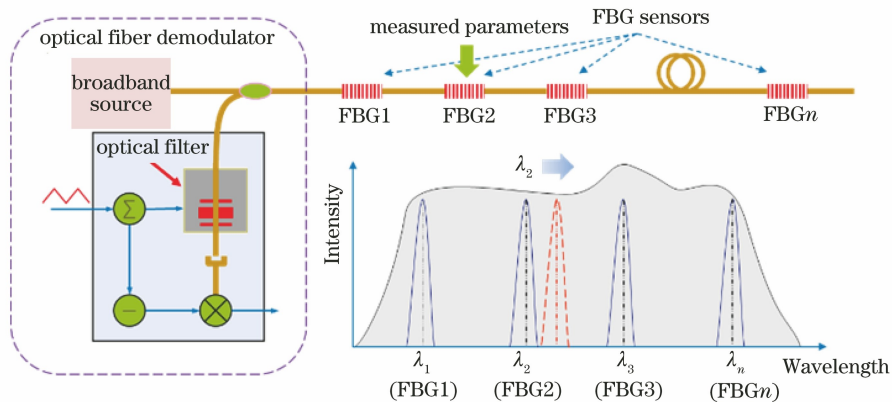


图 1 光纤光栅传感的工作原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of working principle of fiber grating sensing

### 2.2.2 技术发展

光纤的光敏特性早在 1978 年就被发现,但是直到 20 世纪 90 年代,在光纤通信领域和光纤传感领域的一系列里程碑式的技术进步才使得 FBG 的商用化得到快速发展。这里给出了一个文献简表(表 2),概括描述了光纤布拉格光栅传感技术的发展历程。

### 2.2.3 需求现状

FBG 阵列传感是新一代光纤光栅传感技术,其采用拉丝塔在线刻写光纤光栅,利用波分和时分混合复用的方式对海量传感信号进行解调,有机结合了传统“分立式光纤光栅传感”与“分布式光纤传感”各自的优势,是实现大容量、高精度、高密度、长距离、高可靠性光纤传感网络的最有效途径。

近年来,中国在高速铁路、城市轨道交通、高速公路、军用/民用机场、石油天然气管线、大型桥梁与水利设施等大型基础设施的建设及其运营方面一直保持高速发展。这些大型基础设施与重大工程的运行状态监测与安全管理,成为当前急需考虑和解决的首要问题。

FBG 阵列传感作为一种可灵活配置的大规模、

其利用光纤芯材料的光敏特性,通过紫外曝光方法,在纤芯中产生周期性的折射率分布,进而形成一个特定波长的窄带反射滤波器。因此,FBG 传感解调的最基本工作原理就是:外界被测参量变化时,通过解调 FBG 传感器引起反射波长变化,如图 1 所示。

在图 1 中波分复用(WDM)组网技术的基础上,为了进一步增大 FBG 传感网络规模和传感器复用数量,人们还相继发展了其他多种复用技术,包括时分复用(TDM)技术、空分复用(SDM)技术,以及这些技术的混合复用技术等。

长距离、高精度、快响应、多参量、高可靠性的新一代光纤光栅传感新技术,能够为上述重大基础设施的状态监测与安全管理提供完整先进的解决方案,可及时掌握其在役状态、健康状况,对潜在的病害和突发的事件及时地进行预警和报警,以显著提升实时监测能力与安全管理水平。

### 2.2.4 挑战性的问题与难点

分立式 FBG 传感器开始商用至今已有 30 多年的历史,该项技术的关键器件已经全部实现国产化,并在众多领域得到广泛应用。其面临的主要问题是:

1) 极端工作条件下,光纤光栅传感器本身及其熔接组网的可靠性较低,例如油气井下耐高温高压以及抗氢损的能力、核辐照环境下的耐受能力较弱等。

2) 分立式光纤光栅传感器种类繁多、适用场景广泛,目前仍缺少统一的工业标准,极大限制了其发展应用。

FBG 阵列传感技术自 2003 年提出至今已接近 20 年。目前国际上三家机构的相关工作最具代表性:国外的德国莱布尼茨光子技术研究所(IPHT)、比利时 FBGS 公司,以及国内的武汉理工大学光纤

表 2 光纤布拉格光栅传感技术的发展简表

Table 2 Brief table of development of fiber Bragg grating sensing technology

Year	Research content	Ref. No
1978	Hill <i>et al.</i> discovered the photosensitivity of fiber and made the first narrow-band fiber grating filter	[7]
1989	Meltz <i>et al.</i> developed the lateral holographic interferometry method to write the fiber grating in the fiber, which opened the prelude to its practical application	[8]
1992	Askins <i>et al.</i> fabricated a type II fiber grating with excellent thermal stability using a single-pulse high-energy ultraviolet laser	[9]
1993	Several research groups independently developed the phase mask method for fabricating fiber gratings which are more suitable for industrial production	[10-11]
1993	Lemaire <i>et al.</i> found that hydrogen doping at high pressure can greatly improve the photosensitive properties of the fiber	[12]
1993—1994	Several research groups have independently developed a method of on-line writing fiber gratings by drawing column single pulse ultraviolet laser	[13-14]
1997	Erdogan used coupled mode equation to describe the corresponding relationship between the structure and spectral response characteristics of FBG in detail	[15]
2003	Zhang <i>et al.</i> have published an optical time domain demodulation multiplexing method for ultra-low fiber grating array sensing systems	[16]
2004	Two research groups have independently developed a femtosecond laser point-by-point method for writing fiber gratings	[17-18]
2007	The first national standard, i. e. , GB/T 21197 linear optical fiber temperature sensing fire detector of optical fiber sensing, is promulgated in China	[19]
2011	Cusano <i>et al.</i> published a monograph on "fiber bragg grating sensors", comprehensively summarizing the research progress, industrial application, and market expansion of fiber Bragg grating sensing technology	[20]
2018	Yang <i>et al.</i> published a monograph on "fiber optic sensor networks: devices and technologies", in which the latest research achievements of the major projects supported by the National Natural Science Foundation of China were systematically summarized	[21]

传感技术国家工程实验室姜德生院士团队(实现了单根光纤几十万个光纤光栅阵列的工业化生产, 其已在交通、电力、石化等领域实现大规模应用, 为多个行业的智能化发展提供了新的传感手段和方法), 其面临的主要问题是:

1) 面向诸多实际应用场景的光纤光栅阵列传感光缆的成缆关键技术、规模化生产工艺与工程安装规范;

2) 结合实际应用场景需要的光纤光栅阵列海量传感大数据的实时采集、存储、处理以及人工智能模式识别;

3) 面向大型基础设施结构健康监测和重点行业领域安全监测的基础数据库/样本库建设、专家系统与智能化功能平台开发。

### 2.3 光纤陀螺技术

光纤陀螺自 1976 年被提出以来, 已有 45 年的发展历史。尽管相关的理论和技术已达到很高的成熟度, 但光纤陀螺作为一种能实现大量程且极小相位可靠测量的“神奇”干涉型光纤传感器<sup>[22-23]</sup>, 依然是光纤传感和惯性技术领域的研究热点。现阶段的研究

研究焦点集中在提高精度、降低噪声和抑制成本等方面。光纤陀螺是一种基于 Sagnac 效应的光纤旋转传感器, 是光纤和光波器件组成的全固态结构, 无运动部件, 重量轻, 可靠性高, 配置灵活, 通过优化设计可实现高精度、低成本, 是目前惯性技术领域的主流陀螺仪表。进入工程应用的光纤陀螺有开环和闭环干涉型两种, 其中闭环干涉型光纤陀螺的精度高、测量范围大, 为目前主流的光纤陀螺方案。谐振型光纤陀螺的光纤谐振腔短, 具有激光陀螺的可靠性高、精度高、易于维护、寿命长的特点, 具有重要的应用潜力, 为目前光纤陀螺技术领域的主要研究方向之一。光纤陀螺在国防、航空航天、天体运动观测、无人载体(机器人、无人机等)以及其他自主智能系统等领域具有广泛的应用。

#### 2.3.1 工作原理

Sagnac 效应原理如图 2 所示, 如箭头所指, 输入光源 O 的反射光 R 和透射光 T 沿相同的路径传输, 形成两个闭合光路, 并在分光面 J 发生干涉。当环形干涉仪沿与面法线平行的轴旋转时, 顺、逆时针的光波间将产生一个正比于旋转速度的相位差, F

为水平狭缝,  $M_1 \sim M_4$  为偏转镜, P、P' 为探测器。相位差的大小正比于旋转角速度, 而且比例系数由光路包围面积和光频率决定。干涉型光纤陀螺是通过采用长光纤绕制光纤环而成, 从而形成足够大的等效面积, 增大 Sagnac 效应比例系数, 实现旋转速度的测量。闭环干涉型光纤陀螺的基本结构如图 3 所示, 在调制器上施加变台阶高度的数字台阶波以产生反馈相位、通过方波调制开环检测实现闭环控制, 其线性度好、精度高。对于谐振型光纤陀螺, 可用很短的光纤形成光纤谐振腔, 基于环腔内光的谐振特性实现比例系数增大, 其基本原理如图 4 所示。通过测量在光纤谐振腔内顺、逆时针谐振光频率的差  $\Delta f$  实现输入角速度的测量。

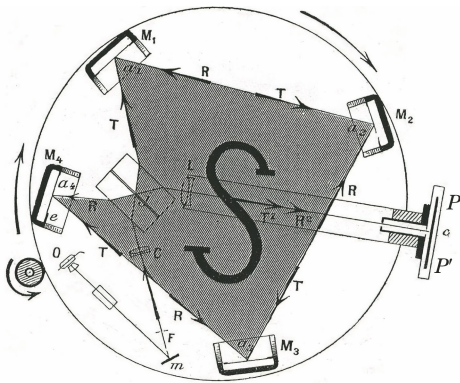
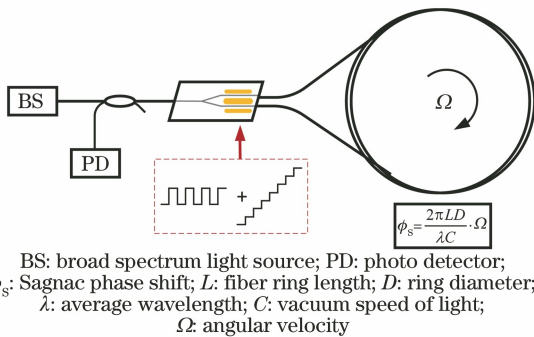


图 2 Sagnac 效应原理示意图<sup>[24]</sup>

Fig. 2 Diagram of principle of Sagnac effect<sup>[24]</sup>



BS: broad spectrum light source; PD: photo detector;  
 $\phi_s$ : Sagnac phase shift; L: fiber ring length; D: ring diameter;  
 $\lambda$ : average wavelength; C: vacuum speed of light;  
 $\Omega$ : angular velocity

图 3 闭环光纤陀螺示意图

Fig. 3 Schematic diagram of closed-loop fiber-optic gyroscope

### 2.3.2 技术发展

经过 45 年的发展, 干涉型开环和闭环光纤陀螺结构和方案已经定型, 已进入大量工程应用阶段, 但在实际的应用中还存在噪声和温度误差偏大的问题。谐振型光纤陀螺与干涉型光纤陀螺的发展历史基本一样。近年来, 研究人员将空芯光纤用于光纤谐振环, 为谐振型光纤陀螺的发展创造了条件, 使其成为一个比较活跃的研究领域。光纤陀螺技术的研发过程堪称一种典型的新技术研发范例。第一个

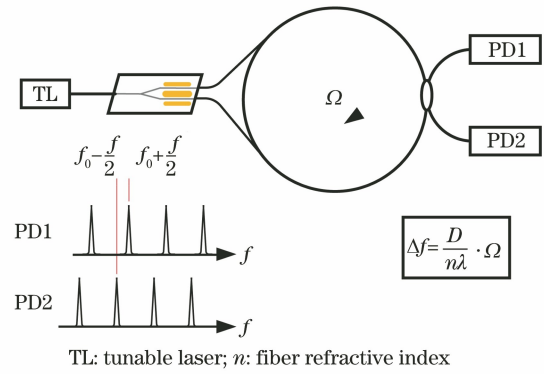


图 4 谐振光纤陀螺示意图

Fig. 4 Schematic diagram of resonant fiber optic gyroscope

10 年(1976—1986 年)<sup>[25-26]</sup> 为光纤陀螺的迅速发展时期, 研究人员在这个期间有很大研究进展: 在原理方案方面, 提出了干涉型开环和闭环方案, 有源、无源和集成谐振陀螺等; 在理论和技术方面, 揭示了光路互易性、Shupe 效应和 Faraday 效应引入误差的机理, 发明了对称绕环技术等; 在关键光学器件方面, 研发了保偏光纤、超辐射发光二极管 (SLD) 光源、集成光学调制器等。在第二个 10 年(1987—1996 年) 期间<sup>[27-28]</sup>, 大功率、光谱稳定的掺铒光纤光源被提出, 强度噪声相关理论和抑制技术得到充分的研究, 这支撑了高精度光纤陀螺的发展, 干涉型光纤陀螺的精度达到 0.0003 ( $^{\circ}$ )/h, 光纤陀螺开始进入实际应用。近年来, 光纤陀螺技术研究主要集中在噪声、温度误差抑制和新方案、新应用等方面, 部分理论和技术如表 3 所示。

### 2.3.3 需求现状

光纤陀螺具有全固态、重量轻等独特的特点, 目前是惯性技术领域各类系统的首选, 在中低精度应用中具有重要作用。随着技术、器件和工艺的成熟, 以及应用领域的不断拓展, 市场对中精度光纤陀螺的需求逐年上升; 理论和实验研究表明, 光纤陀螺能够满足水下舰艇、战略武器装备和行星地震学等的需求, 这些领域对高精度光纤陀螺的需求日益增加。相对其他类型的陀螺技术, 光纤陀螺更适合大批量生产, 具备低成本的潜力。只要在成本和批量上实现突破, 低成本光纤陀螺将成为各类民用系统, 如无人机、无人运输工具、无人驾驶、机器人, 及其他自主智能系统的首选, 市场需求巨大。

### 2.3.4 挑战性的问题与难点

光纤陀螺技术已达到较高的成熟度, 目前该项技术的关键器件已经能够全部实现国产化。系列化的光纤陀螺产品已在海、陆、空、天等领域大量使用,

表 3 光纤陀螺技术的部分理论和技术

Table 3 Partial theories and technologies of FOG

Year	Research contents	Ref. No
2013	Feasibility of using high-precision fiber-optic gyroscope to achieve "1 nautical mile/month" navigation accuracy is discussed	[29-30]
2014	Intensity noise suppression technology based on vertical cancellation of light waves is proposed and verified	[31]
2015	Research reveals the mechanism of cross-modulation errors in resonant fiber-optic gyroscope	[32]
2016	Honeywell reported on the technology and development route for "benchmark" class fiber-optic gyroscope and resonant fiber-optic gyroscope	[33]
2017	iXblue demonstrated the solution and roadmap of a high-precision rotating seismograph based on a large fiber optic ring	[34]
2018	Application potential of fiber-optic gyroscopes in the field of planetary seismology is explained	[35]
2019	Development and application of optical fiber rotating seismograph are reported;	[36]
	zero drift evaluation technology of fiber-optic gyroscope based on the polarization coupling value in the fiber loop measured by OCDP technology is reported	[37]
2020	A new model of drift caused by backscattering of fiber-optic gyroscope is established	[38]
2021	Use of anti-resonant hollow-core fiber for resonant fiber-optic gyroscope significantly improves the performance	[39]

并形成了配套的产业群和较大的市场规模。但面向超高精度惯性系统和大规模低成本应用需求,需要突破的主要问题如下。

1) 面向长航时高精度惯性导航和高灵敏度、低噪声行星地震学六分量地震长期观测需求,高精度光纤陀螺的性能指标还有较大差距。

2) 由温度及其变化引入的漂移和噪声是影响光纤陀螺现场应用性能的主要因素,已有的技术效果有限,期待实用有效的方案和技术。

3) 谐振型光纤陀螺具有独特的优势,具有很大的应用潜力,目前尚处于原理样机研究阶段,未形成实用的方案和技术。

4) 为控制光纤陀螺的制作成本、提高生产效率,关键工艺、装备和关键参数在线监测和控制等方面还存在一些不明确的问题需要揭示和解决。

5) 光纤陀螺具有低成本、大批量生产的应用潜力,但尚缺合适的定型方案、低成本光纤材料、器件和相关的批产工艺。

## 2.4 光纤水听器技术

光纤水听器是一种以光纤为信息传输和传感媒介的新型传感器,它通过高灵敏度的光学相干检测,可实现对水声信号的高精度测量。自 1977 年美国海军实验室发表关于光纤水听器的首篇论文后,各发达国家便积极开展了对光纤水听器的研发。我国光纤水听器研究虽然起步较晚,但自 20 世纪 90 年代以来,也陆续突破了从理论到应用的系列关键技术。相比于传统水听器,光纤水听器具备灵敏度高、

动态范围大、抗电磁干扰、耐恶劣环境、结构灵巧、易于远程传输和大规模成阵等优点,在水下目标探测、石油天然气勘探、地震检测等军事和民用领域都具有重要应用。

### 2.4.1 工作原理

典型的干涉型光纤水听器分为光纤声压水听器和光纤矢量水听器两种,其基本结构均为光纤迈克耳孙干涉仪,如图 5 所示。外界水声信号作用于光纤干涉仪,引起光纤干涉仪两臂长度和有效折射率的改变,导致两臂中传输的光相位被调制,两束被调制的光经法拉第旋镜反射后返回耦合器并发生干涉,相位信号被转化为光强信号。利用光电探测器对光强信号进行探测,再利用相位检测方法解调并还原出外界水声信号。

光纤声压水听器由内外两个圆筒形支撑刚体构成,光纤迈克耳孙干涉仪的两臂分别密绕在内外支撑刚体上,用于探测外界声压信号;三维光纤矢量水听器由耐压外壳、质量块以及  $x$ 、 $y$ 、 $z$  三个方向上的三对弹性柱体构成,三组光纤迈克耳孙干涉仪的两臂分别密绕在这三对弹性柱体上,用于感受外界声压引起的三个方向上的加速度信号。

单光纤分布式水听器是一种仅由一根光纤组成的新型光纤水听器,利用分布式光纤声波传感技术探测水下声信号,具备高可靠性的特点和在空间连续拾取水下声信号的能力。

图 6 给出了光纤水听器的声压探头、矢量探头和声压阵列的实物图片。



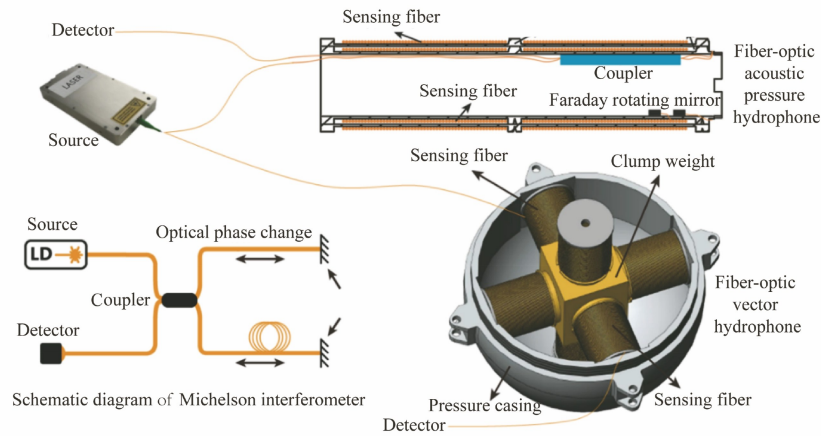


图 5 光纤水听器结构和原理示意图

Fig. 5 Structure and principle diagram of fiber optic hydrophone

图 6 光纤水听器探头和阵列实物图。(a)光纤声压水听器;(b)光纤矢量水听器<sup>[40]</sup>;(c)光纤水听器阵列

Fig. 6 Photo of probe and array of fiber optic hydrophones. (a) Fiber-optic acoustic pressure hydrophone;

(b) fiber-optic vector hydrophone<sup>[40]</sup>; (c) fiber-optic hydrophone array

#### 2.4.2 技术发展

我国光纤水听器技术自提出至今已超过 20 年。自 20 世纪 90 年代末期,国防科技大学在关键光纤器件与光纤水听器系统关键技术方面取得突破,并于 2000 年进行了国内首次光纤水听器海试以来,国内多家单位对光纤水听器技术进行了研究并取得一系列成果,目前光纤水听器技术已经在多个领域实现了应用。表 4 总结了国内光纤水听器技术的发展概要。

#### 2.4.3 需求现状

水听器是实现水下目标探测与通信的主要设备,可分为压电水听器和光纤水听器两种。与传统的压电水听器相比,光纤水听器具有小体积、抗电磁

干扰、易于远程传输和通过复用构成大规模阵列等特点;光纤矢量水听器可以通过声压和振速的线性组合得到心形指向性,可获得 4.8 dB~6 dB 的空间增益,具有大空间增益、单次消除左右舷模糊以及指向性与频率无关的特性,使用单条光纤矢量水听器垂直阵列可以实现目标的距离、深度和方位角的三维定位,所以光纤声压和矢量水听器在水下目标探测、石油天然气勘探、地震监测等军事与民用领域都具有重要的应用前景。在水下目标探测方面,远程传输的大规模岸基阵、装载在舰船及无人潜航器上的轻型拖曳阵、垂直矢量潜标阵等多种形式的光纤水听器阵列都得到了发展;在石油天然气勘探方面,大规模拖曳与岸基阵在实践中得到了检验;在地震

监测方面,光纤矢量地震仪获得了与传统地震仪相当的传感性能,基于现有光缆的单光纤分布式光纤

声/振动传感技术也在石油勘探和地震监测领域取得了突破性进展。

表 4 光纤水听器技术发展简表

Table 4 Brief table of development of fiber optic hydrophone technology

Year	Research content	Ref. No
2000	The first field test of fiber-optic hydrophone in China was conducted	[41-42]
2002	The field test of 32-element fiber-optic hydrophone in China was conducted	[43]
2003	The first field test of fiber-optic vector hydrophone in China was conducted	[44-45]
2006	The field tests of 64-element fiber-optic hydrophone array in China was conducted	[46]
2008	The field tests of 96-element fiber-optic hydrophone towed array in China were conducted	[46]
2011	The first towed array of fiber optic vector hydrophone was applied to shallow water and field test	[47]
2014	400 km transmission fiber optic hydrophone system was realized	[48]
2015	The first deep sea test of vertical array fiber optic vector hydrophone in China was conducted	[49]
2018	1024-element fiber optic hydrophone array was used for marine seismic monitoring	[50]
2020	Fiber-optic vector hydrophone was applied to 6000 m underwater	[49]
2021	Field tests of 64-element fiber laser hydrophone flank array in China were conducted	[51]
2021	Single fiber distributed fiber-optic hydrophone and lake test were realized	[40, 52]

#### 2.4.4 挑战性的问题与难点

我国光纤水听器技术经过二十多年的发展,克服了从基础理论到实际应用的一系列难题,已经在若干领域进入了应用阶段,但在以下方面仍面临着巨大挑战。

1) 光纤水听器的应用朝着深海领域拓展,如何在深海高静水压的恶劣条件下实现光纤水听器的高灵敏度和低本底噪声是需要重点考虑的问题。

2) 光纤水听器朝着远程化方向发展,模拟光中继放大技术的使用有效增加了光纤传输距离,但其所容纳的光纤对数有限,长距离光纤传输还引入了严重的非线性效应,使光纤水听器系统的复用规模和传输距离受到很大限制。

3) 水下目标噪声集中于 100 Hz 以下的频段,而光纤水听器阵列系统本底的  $1/f$  噪声使得低频噪声较大,同时海洋背景噪声也主要分布于该频段,如何在较大的海洋噪声背景下实现光纤水听器对水下目标的有效探测是目前的技术难点。

4) 单光纤分布式光纤水听器相比于分立式干涉型光纤水听器,大大简化湿端结构、提高了可靠性,但噪声抑制能力及水声信号检测稳定性需进一步提高,以拓展其在水下目标探测和石油勘探中的应用。

#### 2.5 分布式布里渊光纤传感技术

分布式布里渊光纤传感可以实现温度和应变等参数在空间上的连续测量,监测距离可达百公里,监测点位可达百万个,在大范围、长距离和大容量传感方面具有传统点式传感器不可比拟的优势;经过多年的发展,分布式布里渊光纤传感在油气管道、高压

输电线和桥梁等大型基础设施的健康监测,以及山体滑坡和路面沉降等地质灾害的监测预警等领域获得了广泛的应用,如图 7 所示。经过多年的发展,基于后向受激布里渊散射的传统分布式光纤传感器性能得到了大幅提升,空间分辨率已经从米量级提升至厘米(时域)和毫米(相关域)量级,测量时间已经从分钟量级降低到毫秒甚至微秒量级,测量距离已经超过 100 km。此外,基于布里渊动态光栅和前向受激布里渊散射的新型分布式传感机制在近几年得到了极大关注。布里渊动态光栅传感可以实现更多参量(包括温度、应变、盐度、静压力和横向压力等)的测量;前向受激布里渊散射可以实现光纤外部环境物质鉴别。

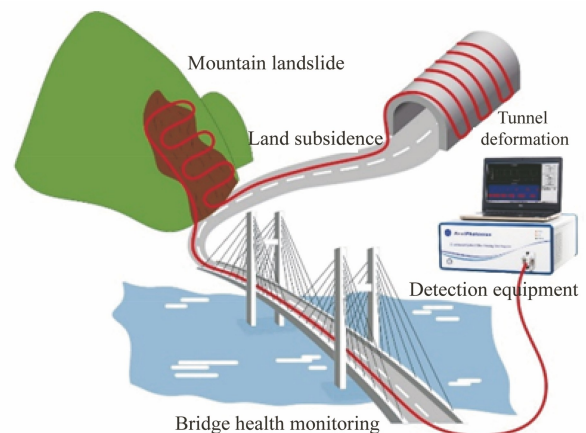


图 7 分布式布里渊光纤传感用于基础设施监测示意图  
Fig. 7 Schematic diagram of distributed Brillouin fiber optic sensing for infrastructure monitoring

##### 2.5.1 工作原理

后向受激布里渊散射在光纤中激发纵向声波,

将散射光和入射光之间的频率差定义为布里渊频移,该参数是光纤温度和应变的函数,石英单模光纤的温度和应变系数一般分别为  $1 \text{ MHz}/^\circ\text{C}$  和  $0.0482 \text{ MHz}/\mu\text{e}$ ,因此可以通过测量布里渊频移来测量温度和应变。布里渊动态光栅本质上是后向受激布里渊散射激发的纵向声波在弹光效应下产生的光栅,它可以测量保偏光纤双折射,进而实现对直接

改变光纤双折射的温度、应变和压力等参数和可受光纤的特殊涂覆层(比如聚酰亚胺)影响的光纤双折射的盐度等参数的传感功能。前向受激布里渊散射在光纤中激发横向声波,这种声波以光纤包层为边界,在光纤横截面内往返振荡,其衰减时间(或对应的谱宽)对环境物质的声波阻抗敏感,因而可以用来对环境物质进行物化特性测量和种类鉴别,如图 8 所示。

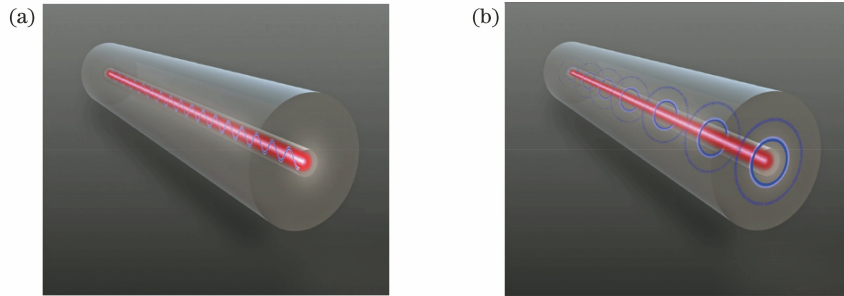


图 8 后向受激布里渊散射、布里渊动态光栅和前向受激布里渊散射原理示意图。(a)后向布里渊散射、布里渊动态光栅;(b)前向受激布里渊散射

Fig. 8 Schematic diagrams of backward stimulated Brillouin scattering (BSBS), Brillouin dynamic grating, and forward stimulated Brillouin scattering (FSBS). (a) Backward stimulated Brillouin scattering (BSBS) and Brillouin dynamic grating; (b) forward stimulated Brillouin scattering (FSBS)

### 2.5.2 技术发展

基于后向受激布里渊散射的传统分布式光纤传感器主要朝以下三个方面发展:1)高空间分辨率、超快测量和超长距离;2)布里渊动态光栅传感主要用

于多参量测量;3)前向受激布里渊散射传感技术方兴未艾,探索分布式测量方案和提高传感性能是目前主要的研究方向。表 5 为布里渊传感技术发展简表。

表 5 布里渊传感技术发展简表

Table 5 Brief table of development of Brillouin sensing technology

Year	Research content	Ref. No
2012,2017	High spatial resolution technique: time-domain differential pulse pair technique	[53-55]
2002,2012,2019	High spatial resolution technique: correlative domain frequency modulation and phase modulation techniques	[56-58]
2012,2018,2020	Ultra-fast measurement technique: quick frequency conversion and optical chirped chain technology	[59-61]
2010,2012,2016	Ultra-long working distance technique: pulse coding, frequency division multiplexing, and image processing techniques	[62-64]
2015,2016,2018	Brillouin dynamic grating: multi-parameter measurement	[65-69]
2018,2020	Forward stimulated Brillouin scattering: a distributed sensing scheme for environmental matter identification	[68-70]

### 2.5.3 需求现状

目前实际应用对分布式布里渊光纤传感技术的需求包括:1)铁路、电网和油气管道等大尺度基础设施监测需要长距离传感;2)光纤陀螺环和光纤水听器环检测需要高空间分辨率;3)火灾监测需要高空间分辨率温度测量以实现火灾早期预警;4)大型桥梁的实时在线监测需要快速测量和高应变灵敏度;5)山体滑坡、路面沉降等地质灾害监测需要配合特殊的应变光缆设计和布设方法;6)核辐射环境下需

要配合抗辐射光纤进行分布式温度和应变测量;7)环境综合监测需要更多的物理和化学量测量。

### 2.5.4 挑战性的问题与难点

目前分布式布里渊光纤传感技术在实际应用中面临的挑战性问题与难点包括:

1) 利用无中继放大实现  $150\sim 200 \text{ km}$  测量距离对于铁路、电网和油气管道监测具有重要意义;

2) 融合布里渊散射、拉曼散射和瑞利散射实现更高性能和更丰富功能传感以满足一些特殊场合

应用;

3) 进行多参量测量的同时消除各参量之间的串扰;

4) 前向受激布里渊散射中的泵浦光和斯托克斯光同向传输,因此无法直接利用飞行时间进行定位,这为实现分布式传感带来了挑战;

5) 小型化、高可靠仪器是在多领域推广应用的重要前提。

## 2.6 $\Phi$ -OTDR/DAS 光纤传感技术

$\Phi$ -OTDR 利用光纤中的相干后向瑞利散射光进行传感,通过解调后向瑞利散射光的强度或相位信息,可实现高灵敏振动/声波分布式探测。近年来,可定量还原外界振动/声波信息的相位解调型  $\Phi$ -OTDR 技术[也称为光纤分布式声波传感(DAS)技术]在研发与应用方面均取得了重大进展。该技术具有传感容量大、感知距离远、采集效率高、运行成本低、使用寿命长等突出优点,已成功应用于地震信号监测、油气资源勘探、管线安全监测等领域。总体来看,目前  $\Phi$ -OTDR/DAS 技术正处于快速发展时期,有望在未来 5 年内达到巅峰,成为新一代的分

布式声波(振动)传感技术,具有不可替代性。

### 2.6.1 工作原理

$\Phi$ -OTDR 技术的工作原理为:外界扰动作用于传感光纤时,会改变传感光纤的折射率,使瑞利散射光产生相位调制,通过解调光纤中后向瑞利散射光脉冲信号的强度或相位信息即可进行分布式传感。两种常见的相位解调型  $\Phi$ -OTDR 系统的基本构成如图 9 所示,相干脉冲光通过环形器注入传感光纤后,产生的后向瑞利散射光返回至光纤前端,通过环形器被光电探测器接收,由解调单元解调还原外界应变变化量信息。强度解调型 OTDR 技术直接运用光电探测器进行强度探测,用于定位外界应变;相位解调型  $\Phi$ -OTDR/DAS 技术运用干涉仪解调或者相干解调方法,由于外界的应变变化量与干涉信号相位成正比,该方法可以定量还原外界应变变化量的大小、频率和相位。图 10 为电子科技大学与中国石油集团东方地球物理勘探有限责任公司联合研制的超灵敏光纤分布式声波传感(uDAS)地震仪架构示意图和实物照片[图片由中油奥博(成都)科技有限公司提供]。

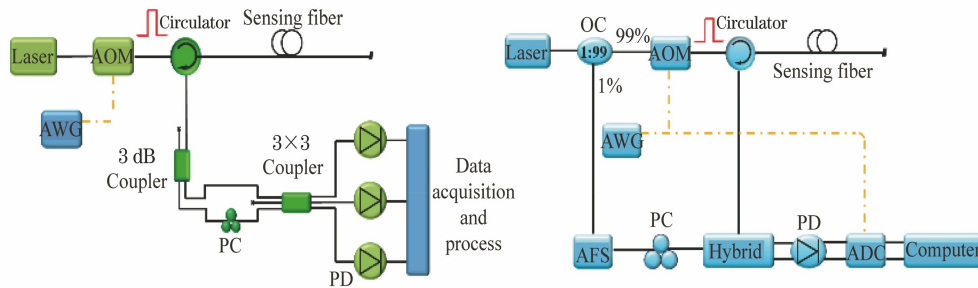


图 9 常见 DAS 系统的结构示意图

Fig. 9 Structural diagram of common DAS system

### 2.6.2 技术发展

近年来,研究人员围绕提高系统灵敏度、拓宽频响范围、延长传感距离等方面,致力于  $\Phi$ -OTDR/DAS 技术的性能提升研究,并已成功将该技术应用于地震传感、油气勘探、管道监测、水声探测等领域。其中,2014 年是  $\Phi$ -OTDR/DAS 技术的发展爆发期。2019 年,上述 uDAS 光纤分布式地震仪通过了中国石油集团组织的成果鉴定,整体达到国际领先水平,在数十个油田获得规模化应用,所得成果入选中国石油“2019 年十大科技进展”。表 6 为近年来  $\Phi$ -OTDR/DAS 技术的主要发展历程。

### 2.6.3 需求现状

现有的点式光纤传感技术仅能探测单点信号,

传感容量有限,实际应用场景有限且成本较高。相比而言, $\Phi$ -OTDR 技术的空间分辨率更高,传感容量更大,传感距离更远,采集时间更短,可实现真正的全分布式声波或振动传感,且使用寿命更长,可靠性更高,尤其是 DAS 技术可以定量还原外界振动/声波信息,更适用于需要高灵敏、大容量、高效率传感的油气勘探、水声探测、管线安全等应用场景。

在油气资源勘探方面,相比于点式电子检波器,DAS 系统部署更简易、采集效率高(可实现全井段地震信号一次性采集)、运行成本低,且更耐高温、高压,寿命长,已成为井中地震检波升级换代的变革性技术,未来有望发展成为油气井长期动态监测的利器(油井 CT);在海洋水声信号监测方面,DAS 系统

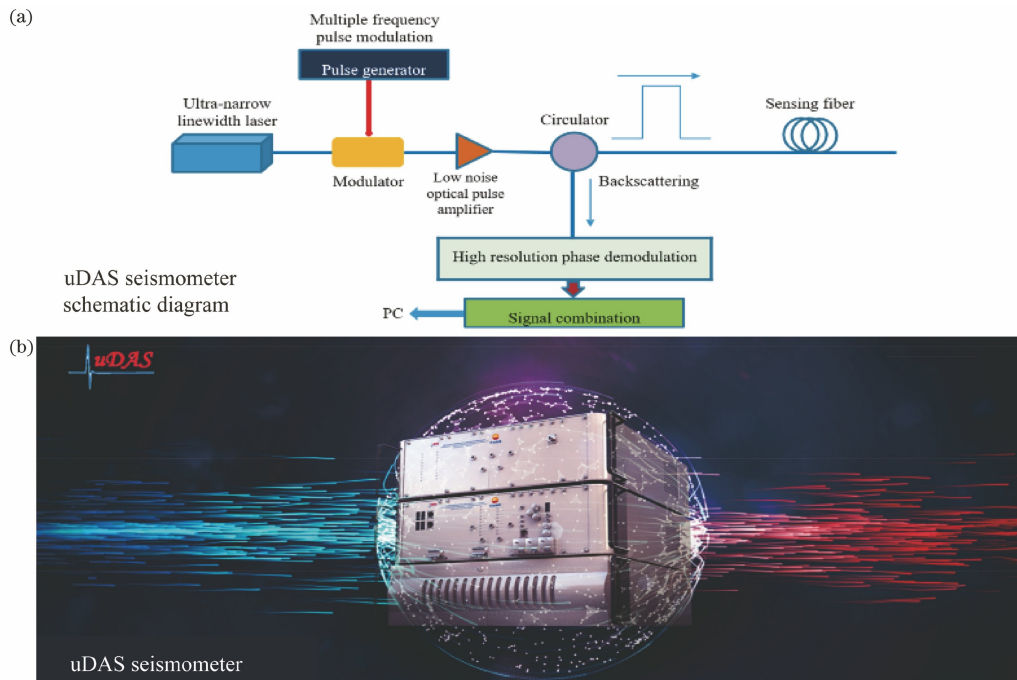


图 10 uDAS 地震仪架构示意图及实物图。(a)示意图;(b)实物图

Fig. 10 Schematic diagram and physical diagram of uDAS seismometer architecture. (a) Schematic diagram; (b) physical diagram

表 6  $\Phi$ -OTDR 技术发展简表<sup>[71]</sup>Table 6 Overview of  $\Phi$ -OTDR technology development<sup>[71]</sup>

Year	Research content	Ref. No
2008	The first practical intensity demodulation $\Phi$ -OTDR based on high power narrow linewidth laser was realized	[72]
2009	62 km intensity demodulation $\Phi$ -OTDR based on double-ended first-order Raman amplification technology was realized	[73]
2011	Phase demodulation type $\Phi$ -OTDR based on digital coherent demodulation was realized	[74]
2013	Phase demodulation type $\Phi$ -OTDR based on MZI and $3 \times 3$ demodulation technology were realized	[75]
2014	Combining double-ended first-order Raman amplification and heterodyne technology to achieve 131 km intensity demodulation type $\Phi$ -OTDR was realized	[76]
2014	Substantial progress had been made in DAS technology used in well oil and gas exploration	[77]
2014	175 km intensity demodulation type $\Phi$ -OTDR based on hybrid zone amplification was realized	[78]
2014	$\Phi$ -OTDR was used for train operation monitoring for the first time	[79]
2015,2016	Phase demodulation type $\Phi$ -OTDR based on I/Q demodulation and heterodyne detection method was realized	[80-81]
2018,2019	DAS was used for natural seismic signal acquisition in which coding technology was used to improve DAS signal-to-noise ratio	[82-83]
2019	DAS was used for submarine seismic monitoring, in which AI algorithm was applied to improve the accuracy of DAS detection and recognition	[84-85]
2020	uDAS had been applied to large-scale oil and gas exploration in wells, and the results had been selected as one of the top ten progress of China Petroleum Technology	[86]
2020	By combining positive and negative frequency multiplexing and first-order Raman amplification technology, 103 km high scanning rate DAS was realized	[87]
2020	uDAS for large-capacity fully distributed underwater acoustic signal detection was realized	[88]
2021	New concepts of sound-sensitive optical fiber and sound-sensitive optical cable were proposed	[89-90]

可实现大容量分布式水声信号探测,在性价比、轻量化、长距离、一致性、可靠性等方面具有突出优势,可望取代点式光纤水听器成为新一代光纤水听系统;在管线安全监测方面,结合分布式光放大技术,DAS 可望实现超长距离无中继传感,适用于城市隧道、油气管道、输电线路、列车铁轨、高速公路等远程安全监测。

#### 2.6.4 挑战性的问题与难点

$\Phi$ -OTDR/DAS 技术自 1993 年被提出以来得到了大量关注,目前已被广泛应用。然而该技术仍存在以下问题:

1)  $\Phi$ -OTDR/DAS 的灵敏度仍有待提升,实现  $f\epsilon/\sqrt{\text{Hz}}$  量级超高灵敏度的 DAS 系统具有很大难度和挑战性。

2)  $\Phi$ -OTDR/DAS 目前仅能感知外界扰动,无法判断其方向,实现三分量声波分布式传感是一个难点。

3)  $\Phi$ -OTDR/DAS 的传感距离仍有待增加,实现低噪声的分布式光放大以提升信噪比、增加传感距离极具挑战。

4)  $\Phi$ -OTDR/DAS 频响范围较小,将百米级距离频响范围拓展至超声波段以实现无损探伤极具挑战。

5)  $\Phi$ -OTDR/DAS 的检测识别精度有待提升,改进复杂环境噪声下弱信号的高精度检测识别 AI 算法是一个难点。

### 2.7 OFDR 光纤传感技术

OFDR 系统中采用线性扫频的激光作为光源来实现相干检测,将光纤中后向散射/反射光的位置信息映射为拍频信号的频率,因此空间分辨能力不受接收机带宽和探测脉冲持续时间的限制,且 OFDR 具有较高的信噪比,尤其适用于空间分辨率在亚毫米至分米级的应用中。OFDR 可用于光纤链路或者光波导器件的诊断、高密度光纤光栅阵列的解调,以及基于瑞利散射实现分布式温度与应变检测。

#### 2.7.1 工作原理

OFDR 的基本结构和工作原理如图 11 所示。光源发出频率随时间线性变化的探测激光,探测激光经放大后注入待测光纤,在光纤中产生后向瑞利散射信号。后向瑞利散射是一种弹性散射,其频率与入射光相同,因此也是线性扫频光信号。后向瑞利散射光经光环行器后在耦合器上与本地光相遇,两者之间的时间差正比于后向瑞利散射在光纤中的往返时间,而线性扫频特性使得两者干涉产生一个

正比于时间差的拍频信号。通过对探测器输出的拍频信号进行傅里叶变换,实现瑞利散射在光纤上的位置与拍频频率之间的映射。对于 OFDR 系统,其空间分辨率取决于光源的扫频范围,其探测距离主要取决于光源的扫频非线性及相位噪声。

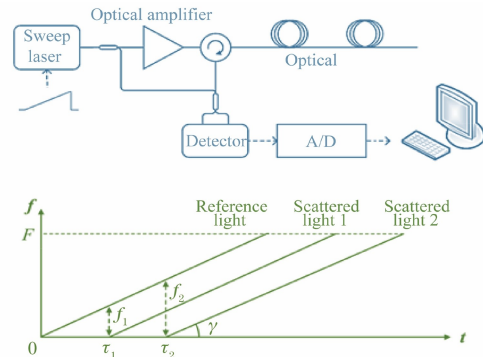


图 11 OFDR 系统结构及其工作原理示意图

Fig. 11 System structure and working principle diagram of OFDR

#### 2.7.2 技术发展

OFDR 技术的发展包括硬件和信号处理两个主要方向。硬件系统方面:主要朝着扫频光源技术方向发展;信号处理方面:主要利用后处理方法补偿扫频激光的相位噪声,以及通过分析后向瑞利散射特征实现分布式检测。表 7 给出了 OFDR 技术的发展梗概。

#### 2.7.3 需求现状

光反射探测技术是分布式光听器的基础,OFDR 技术相对于 OTDR 技术在空间分辨率与动态范围方面具有明显的优势,是亚毫米到分米级分辨率的分布式传感系统的主要实现方案,不仅适用于中短距光纤网络和光器件的状态监测,而且该技术结合光纤光栅光谱或瑞利后向散射信号的分析,可实现温度、应变、振动、形状等外界物理参量的检测。此外,OFDR 技术是高性能的激光雷达和光学相干层析(OCT)等技术的重要实现方法。

#### 2.7.4 挑战性的问题与难点

OFDR 技术经过几十年的发展,其基本原理已经得到了深入研究,并出现了一些商业产品。目前限制该技术推广的主要瓶颈在于扫频光源较难实现且信号技术处理较难优化。

1) 高性能 OFDR 技术需要大扫频范围与低相位噪声的光源,目前只有机械调谐外腔二极管激光器才能同时实现 100 nm 级的扫频范围与 100 kHz 级瞬时线宽,而这种激光器的成本难以降低,使用寿命难以延长;

表 7 OFDR 技术发展简表

Table 7 Brief table of OFDR technology development

Year	Research content	Ref. No
1981	OFDR technology based on incoherent detection was proposed	[91]
1985	OFDR technology based on coherence detection was proposed	[92]
1993	Effect of phase noise in OFDR was analyzed	[93]
1994	OFDR technology based on semiconductor laser was studied	[94]
1997	OFDR technology was applied to optical tomography (OCT)	[95]
2005	Fourier domain sweep laser technology was proposed	[96]
2012	An auxiliary interferometer was proposed to compensate high-order phase noise	[97]
2012	Long distance distributed vibration detection based on OFDR was realized	[98-99]
2013	Simultaneous detection of temperature and strain was realized based on polarization-maintaining fiber	[100]
2015	Time-gated digital assisted optical frequency domain reflectometer (TGD-OFDR) was proposed	[101]
2015	Distributed acoustic sensing based on TGD-OFDR was realized	[102]
2017	External modulation of OFDR realized sweep range of 100 GHz	[103]
2017,2020	Phase sensitive distributed acoustic sensing based on OFDR was realized	[104-105]

2) 基于稳频激光和外调制方式的扫频光源的波长调谐范围比较小,高阶边带调制、非线性效应扩频等技术实现复杂,且调制范围仍然很难超过几个纳米水平;

3) 基于电流直接调制的半导体激光器能够以低成本实现数 GHz 至数十 GHz 的调谐范围,但相位噪声与扫频非线性特性较差,需要研究其改进方案;

4) 实时相位噪声补偿算法及信号分析均需要大量的数据运算,算法的优化及专用处理电路的开发还需要加强。

### 3 若干典型领域中的光纤传感技术的应用情况

为了对典型领域的应用有所把握,本节邀请了将光纤传感技术、产品应用到气体感测、三维形状传感、煤矿安全监测、油气井下测量,以及海洋开发应用等领域的几位专家,分别就所熟悉的应用领域,给出了有关光纤传感技术应用的现状。

#### 3.1 光纤气体传感技术

激光光谱技术基于原子或分子“指纹”特征光谱进行探测,具有选择性好、无需标记等优点。传统的光谱学气体传感器由分立的光学元件构成,使用空间气室作为传感单元,其体积较大,对准比较困难。微纳结构光纤柔性好,可实现光与气体在光纤中的长距离相互作用并保持紧凑的气室结构。微纳结构光纤对光场的束缚强,模场尺寸小,能量密度高,和样品重叠度高,可增强光与气体的

非线性作用,提高检测灵敏度。使用微纳光纤自身作为气室传感单元,简化了光路之间的对准和链接,有助于推动光谱学测量技术向实用化方向发展,便于实现远程探测。利用微纳光纤本身的光学模式、声学模式及热传导等特性,可以实现新型高灵敏的气体传感器。

##### 3.1.1 工作原理

微纳结构光纤光谱学气体测量原理如图 12 所示。光和气体在纤芯内部或表面附近相互作用,改变了光的强度和相位,产生热量、声波或新的光波长等,通过探测这些变化可以得到气体的种类和含量。对于在工作波段吸收较强的气体,可以直接探测其光谱损耗或色散,或者可基于光热、光声效应测量气体吸收泵浦光后引起的探测光的相位变化。对于吸收较弱或没有吸收但具有拉曼活性的气体,可以探测其拉曼光谱、受激拉曼增益或色散。传感光纤可以是空芯光子带隙光纤、空芯反谐振光纤或微纳芯光纤。根据测量需要,工作波长可选择紫外、可见光或红外波段。

##### 3.1.2 技术发展

首次应用微纳结构光纤进行气体测量的报道可以追溯到 2001 年<sup>[106]</sup>。最早研究中用的是实芯微结构光纤<sup>[106-107]</sup>,之后是空芯光纤<sup>[108-109]</sup>。二十年来,研究人员在光纤气室的设计和制作、响应速度的提高、新型检测方法、噪声抑制、灵敏度的提高、动态范围的增大、系统稳定性的提高及实用化方面取得了令人瞩目的进展。表 8 给出了微纳结构光纤气体测量技术发展的简要历程。

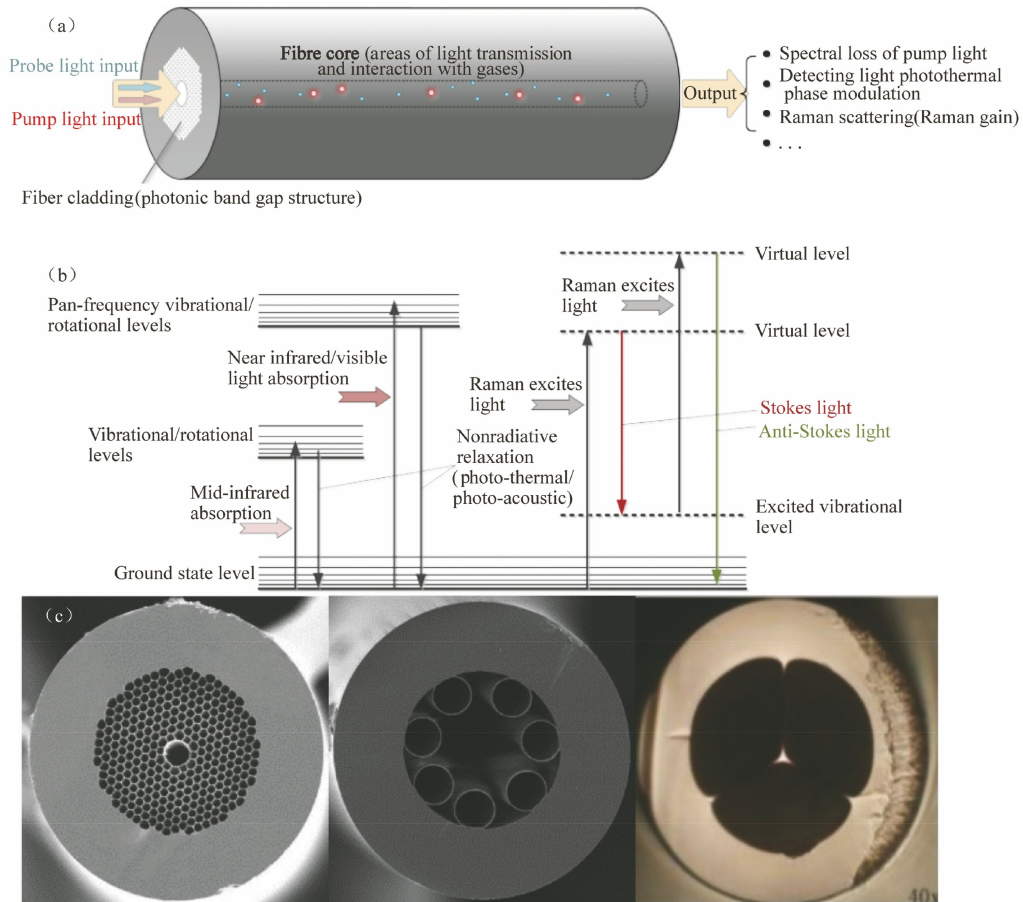


图 12 光纤气体测量基本原理示意图<sup>[110-111]</sup>。(a)光与气体在光纤内部相互作用；  
(b)光与气体作用的物理过程；(c)可用于气体测量的几种微纳结构光纤

Fig. 12 Diagrams of basic principle of optical fiber gas measurement<sup>[110-111]</sup>. (a) Interaction between light and gas within optical fibres; (b) physical process of interaction between light and gas; (c) several micro-nano structure optical fibers used for gas measurement

表 8 微纳结构光纤气体传感技术发展简表

Table 8 Overview of development in micro-nano structure fiber optic gas sensing technology

Year	Research content	Ref. No
2001,2003	Experiments on gas absorption measurement of solid core microstructure fiber were performed	[108-109]
2003	Filling experiment and simulation calculation of microstructure fiber were carried out, and a scheme of lateral grooving (hole) to accelerate gas charging and discharging was proposed	[109]
2004,2005	Gas measurement experiments of hollow core microstructure fiber were performed	[110-111]
2007	Experiment on femtosecond laser lateral drilling of hollow core microstructure fiber was performed	[112]
2010	Experiment on improving response speed of hollow fiber gas sensor by side opening was performed	[113]
2015	Hollow-core fiber photo-thermal interference gas experiment was realized for measurement of acetylene gas at the scale of one billion molecules per billion	[114]
2016	Studying and quantification of photo-thermal phase modulation mechanism in hollow fiber were performed	[115]
2017	Distributed gas detection experiment with hollow fiber photo-thermal interferometry was performed	[116]
2017	Hundreds of lateral micropores were prepared in hollow fiber, and average loss of each hole was less than 0.01 dB	[117]
2017	Experimental demonstration and simulation calculation of photothermal phase modulation enhancement effect in solid-core micro-nano fiber were performed	[118]
2017	Experimental measurement of hydrogen induced Raman gain in hollow fiber was performed	[119]



续表 8

Year	Research content	Ref. No
2019	Distributed hydrogen measurement experiment of hollow fiber stimulated Raman gain was performed	[120]
2019	Stimulated Raman gain gas measurement experiment of solid-core micro/nano fiber was realized for the measurement of hydrogen at the scale of one million molecules	[121]
2019	Experimental measurement of hydrogen in hollow fiber stimulated Raman dispersion was performed	[122]
2020	$10^{-9}$ grade (acetylene) gas measurement and good long-term stability were achieved by using $\sim 5$ cm hollow fiber	[106]
2020	Phase difference photothermal interference gas measurement experiment was realized for measurement of acetylene on the scale of one trillion molecules	[123]
2021	A variety of gas measurement experiments were carried out, and sensitivity of $10^{-9}$ magnitude was achieved	[107,124]
2021	Photoacoustic Brillouin gas measurement with hollow core microstructure fiber was realized	[125]

### 3.1.3 需求现状

航天、航海、能源、食品卫生、环境保护等领域的发展,对气体探测的能力提出了愈来愈高的要求。在空间和海洋探索中,密封舱内工作人员的数量和工作时间不断增加,人员新陈代谢、设备运行和材料释放等因素使狭小空间内空气质量变差。有效监测舱内空气中的痕量气体物质,对于维持健康的空气环境,探测泄漏、过热故障征兆等具有重要意义。在医学领域,呼吸检测是近年来研究的一个热点。呼出气体中包含的痕量气体成分能反映人体特定的生理状况,为一些重大疾病的早期无创诊疗提供了新的方法。在能源工业领域,高精度的气体检测在大型关键设备诊断、燃烧产物分析、炼化过程监测等方面有重要应用。目前常用的气体检测技术包括气相色谱/质谱分析,电化学、光离子化探测等,在测量精度、动态范围、气体种类、成本、体积、在线或远程测量等方面难以满足日益增长的需求。

### 3.1.4 挑战性的问题与难点

在实验室条件下,微纳结构光纤气体传感器已经实现了对多种气体(如甲烷、乙烷、乙炔、氨气、一氧化碳、二氧化碳等)的测量,灵敏度已达到  $10^{-6}$  至  $10^{-12}$  量级。面向不同领域的实际应用,需要解决如下主要问题:

1) 探头技术。优化微纳结构光纤的模式和偏振特性以提升气室的光学稳定性,采用合适的防水、防污、防震包装以适应不同的应用环境。

2) 光学解调技术。光学干涉相位检测系统需具有高灵敏、大动态范围、稳定、小型化和低成本的特点。

3) 光源技术。不同波段,尤其是红外波段的低

成本、可调谐、窄线宽激光器是高灵敏多组分气体测量的关键器件。

## 3.2 光纤三维形状传感技术

近年来,基于光纤的形状传感方法受到了学术界和工业界的广泛关注,并得到了国内外多个研究机构的深入研究,使得动态物体在没有视觉接触情况下的实时远程三维形状重建成为可能。光纤形状传感是一种分布式感测技术,它利用光纤局部应变产生的后向散射信号来探测光纤的弯曲和扭转等信息,对这些信息进行处理以重构光纤的空间形变,从而能够实时持续跟踪动态物体(未知运动)的形状和位置。该技术提供了一种有效的替代现有形状传感的方法,其优点是安装方便、安全、尺寸小巧紧凑、具有灵活性、抗恶劣环境和腐蚀、不需要接近,仅靠感测数值及重构模型即可重建形状。这些优势使得其在医疗、能源、国防、航空航天、结构安全监测以及其他智能结构等领域具有广泛的应用。

### 3.2.1 工作原理

光纤三维形状传感技术的工作原理如图 13 所示。在多芯光纤的每个测量剖面中,通过同时测量不同纤芯的应变确定该位置的三维曲率。随后针对各位置的曲率使用插值或曲线拟合的方法得到整根光纤的曲率函数,最后通过重构算法实现三维形状还原。图 14 给出了全部国产化的四芯光纤三维形状传感系统的几个关键部件。

### 3.2.2 技术发展

光纤三维形状传感技术的发展思路有两个:一是采用多芯光纤;二是采用多根单芯光纤与柱状结构物相结合的方式实现三维形状传感。本文主要基于第一种思路。表 9 为基于多芯光纤的三维形状传感技术发展梗概。

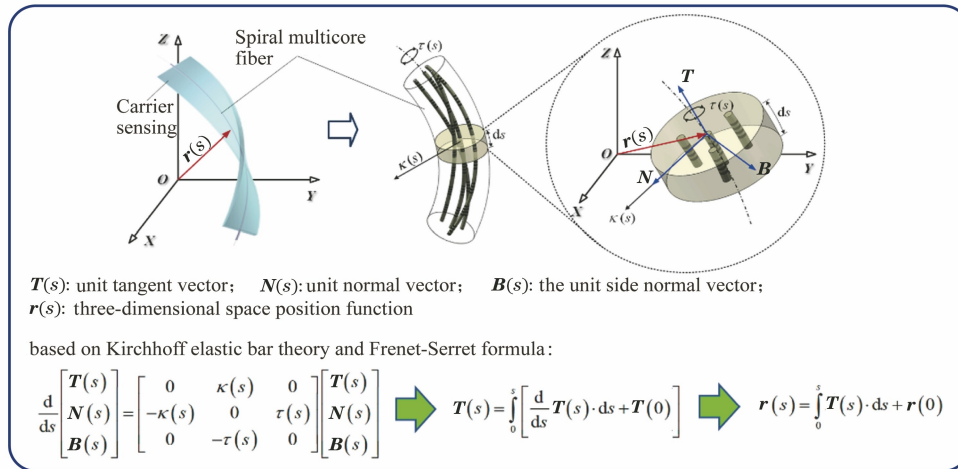


图 13 多芯光纤三维形状传感原理示意图

Fig. 13 Schematic diagram of multi-core fiber 3D shape sensing principle

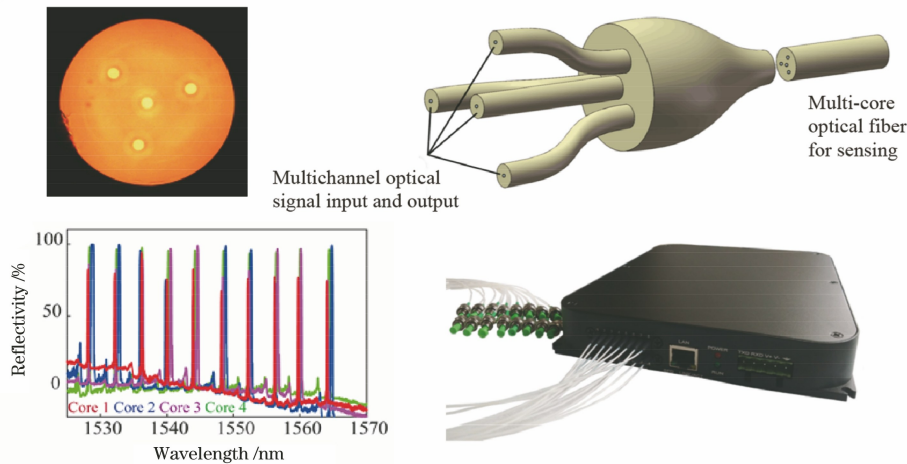


图 14 基于四芯光纤的三维形状传感系统的关键部件(全部国产化)

Fig. 14 Key components of 3D shape sensing system based on four-core fiber (localization)

表 9 多芯光纤三维形状传感技术发展简表

Table 9 Overview of development of multi-core fiber 3D shape sensing technology

Year	Research content	Ref. No
2000	Bending sensor was realized by multi-core fiber FBG	[126]
2003	Three-dimensional curvature measurement was started with the relationship between the FBGs in the multi-core fiber	[127-128]
2004	By integrating the curvature along the optical fiber, 2D and 3D shape reconstructions were initiated	[129-130]
2007	By means of Rayleigh scattering of multi-core fiber, OFDR distributed 3D shape sensing was explored	[131]
2012	By means of Frenet-Serret equation, a new algorithm for 3D continuous parameter reconstruction was developed	[132]
2014	Helical seven-core fiber 3D shape sensing technology was developed	[133]
2016	Distributed 3D shape sensing scheme based on Brillouin scattering was proposed	[134]
2017	3D continuous grating sensing scheme based on multi-core fiber was proposed	[135]
2018	Wing 3D shape sensing was realized	[136]
2019	Performance evaluation of three-dimensional shape fiber optic sensing was used for shape monitoring in nuclear radiation occasions and fiber optic shape sensing for flexible robots	[137-138]
2019	Fiber optic 3D shape sensor was embedded in flexible medical instrument	[139-141]

### 3.2.3 需求现状

如果想要对一个动态的物体进行跟踪,在缺乏视觉接触的情况下,形状感知就显得特别关键。光纤形状传感器为传统的形状感知提供了一种非常有效的替代方法,它允许对形状进行连续、动态、直接的跟踪,而不需要视觉接触。光纤传感器具有结构紧凑、体积小、灵活性强、嵌入能力强等特点,可以很好地附着在被监测的物体上,同时保证了安装的方便性和形状跟踪的有效性。

实际应用中,如输油管线、桥梁结构等大尺度三维形状传感场景,适合将多根单芯光纤与待测物进行组合,并使用布里渊光时域反射技术监测其形状变化;而对于中等尺度或小尺度应用场景,例如机器人、柔性医用器械等,则适合采用多芯光纤阵列 FBG 解调技术或者分布式 OFDR 的曲率积分及形状重构的方法,来实现较高精度的三维形状感测。其中,该技术在医疗领域最具有发展潜力。

### 3.2.4 挑战性的问题与难点

光纤三维形状传感技术经过近二十年的快速发展,目前该项技术涉及的关键器件已经能够实现全部国产化,接近实际应用的水平。国内有多家单位相继开展了有关研究,桂林电子科技大学所研制的基于多芯光纤光栅三维形状传感系统具有动态三维形状感测能力,为工程化应用提供了各项关键技术,近年来逐步应用于若干领域,其面临的主要问题是:

1) 目前使用的多芯光纤的纤芯间距较小,其精度相对于较大纤芯间距的光纤形状传感器还有一定差距。

2) 多芯光纤相关器件性能及技术的提升是多芯光纤形状传感技术进一步发展的关键,如低损耗多芯光纤扇入扇出器件,方便可靠的熔接技术,以及低损耗活动连接技术等。

3) 无论是基于多芯光纤光栅阵列的解调技术,还是基于多芯光纤 OFDR 的解调方案,三维重构算法都有待于进一步的改进。

4) 多芯光纤及其光器件还没有统一的工业标准,不同器件兼容性较差,难以降低成本并推进工业化批量生产。

## 3.3 煤矿光纤传感技术

我国的能源供给 50% 以上来自煤炭,并且我国煤炭的年生产量和消耗量约为 40 亿 t,约占全世界煤炭产能的 45%<sup>[142]</sup>。煤炭生产条件十分复杂,存在瓦斯爆炸、火灾、水害、巷道变形、顶板坍塌、设备故障等隐患问题。光纤传感器无需供电,对于煤矿

井下易燃易爆气体监测和长距离多点巷道围岩变形、岩石应力等在线监测具有独特优势。

近二十年来,半导体激光甲烷传感器的研发和煤矿应用工程化技术的研究较多,经历了从实验室原理验证到工程样机再到近 10 万只光纤传感器在一千余座煤矿的规模化应用。激光甲烷传感器具有全量程、免标校、高选择性、长期稳定可靠性等独特优势,已得到了煤矿行业的普遍认可,并逐步替代传统催化燃烧式甲烷传感器。此外,基于拉曼散射原理和多模光纤的光纤分布式温度传感器在煤矿采空区自然发火隐患在线监测及预警定位方面展现了独特的作用,解决了采空区火灾隐患电子传感器存在检测盲区的难题,该类传感器经历了从隔爆兼本安型到低功耗本安型矿用仪器的升级过程,现已在全国数百个煤矿中对采空区和胶带运输系统进行火灾隐患监测预警方面得到了应用。基于激光/光纤的甲烷、CO 等多种气体传感器,基于光纤光栅的温度、位移、应变、压力、风速等传感器,以及光纤分布式温度、应变、振动和气体传感器将在日益兴起的智能矿山建设中拥有十分广阔的发展空间。

### 3.3.1 矿用激光甲烷气体及光纤传感器工作原理

矿用激光甲烷气体传感器如图 15 所示,该传感器在半导体激光光谱分析的基础上,结合煤矿井下本安电气设计对低功耗的要求,以及各地煤矿不同温度、不同海拔高度和矿井深度对测量的影响,创新地提出了无温控激光光谱自适应分析技术、多谱线温度压力动态补偿技术,以及防尘防潮技术。其原理如图 16 所示,1650 nm 波段的垂直腔面发射激光器 (VCSEL) 光源发出的光分成三路:一路直接被光电二极管检测放大并作为光源功率参考信号 V1;一路进入测量气室后到达探测器,产生信号 V2;一路经过参考气室,该路信号为 V<sub>s</sub>。激光器在锯齿波注入电流驱动下,其输出光功率和波长都被电流调制。



图 15 激光甲烷传感器模块和激光甲烷便携仪<sup>[143]</sup>

Fig. 15 Laser methane sensor module and laser methane portable instrument<sup>[143]</sup>

VCSEL 波长对温度和电流的典型调制系数分别为  $100 \text{ pm}/^\circ\text{C}$  和  $0.45 \text{ nm}/\text{mA}$ 。甲烷在  $1642.91 \text{ nm}$  与  $1653.72 \text{ nm}$  之间存在多个吸收峰,相邻吸收峰的间距约为  $2.75 \text{ nm}$ 。根据参考气室甲烷气体吸收峰位

置,被测气室的光谱吸收信号经光源的归一化处理,转化成被测气体浓度。嵌入在被测气室内的半导体温度、压力传感器生成的信号由微处理器读取并实时修正,以消除环境温度、压力变化的影响<sup>[143]</sup>。

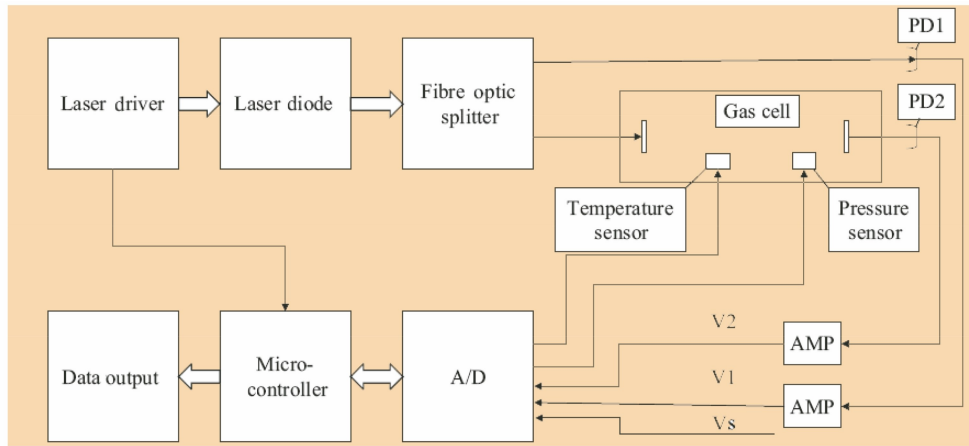


图 16 激光甲烷传感器原理框图

Fig. 16 Schematic diagram of laser methane sensor

### 3.3.2 技术发展

20 世纪 80 年代初 Reid 等<sup>[144]</sup>报道了基于半导体激光器频率调制及甲烷气体吸收峰二次谐波的检测技术,20 世纪 90 年初他们将该检测技术应用于激光甲烷长光程遥测<sup>[144-145]</sup>。为了解决当时  $1650 \text{ nm}$  半导体激光器成本较高的问题,研发了空分复用光纤多点式无源探头用于垃圾填埋场多点甲烷气体监测<sup>[146]</sup>。山东省科学院激光研究所也研发了光纤多点式甲烷传感器,并在多个煤矿对瓦斯抽放管道气体进行在线监测,展示了光纤甲烷传感器优越的抗潮湿特性<sup>[147]</sup>。2009 年武汉理工大学研发了矿用激光甲烷传感器,并在煤矿现场试用<sup>[148]</sup>。山东微感光电子有限公司发明了基于 VCSEL 光源的多吸收峰智能切换、无温控甲烷光谱检测技术,解

决了传统激光甲烷传感器中激光器温控导致的启动电流冲击过大的难题,显著降低了功耗和波动<sup>[149]</sup>。2016 年前激光甲烷传感器通过了由国家煤矿安全标志检测中心组织的温湿度、腐蚀环境等长期可靠性试验,温度、压力补偿、响应时间等矿用产品工程化测试评估,并在多个煤矿进行 6 个月以上的工业性试验<sup>[150-153]</sup>。运行结果表明,相比传统的红外发光管和催化燃烧式传感器等,激光甲烷传感器在精确度、稳定性等方面具有升级换代的优势。2016 年 12 月底原国家煤矿安全监察局在《煤矿安全监控系统升级技术方案》中明确指出推荐使用先进传感器,包括全量程、低功耗、自诊断功能的激光甲烷传感器,这标志着激光甲烷传感器正式进入商业化应用<sup>[154]</sup>。煤矿传感器发展梗概如表 10 所示。

表 10 煤矿传感器发展梗概

Table 10 Overview of development of coal mine sensor

Year	Research content	Ref. No
1981	Research on phase locked detection technology of double frequency based on tunable semiconductor laser	[144]
1986	Experimentation of optical fiber temperature sensor in coal mine in China	[145]
2008	Research on methane telemetry technology based on semiconductor laser	[155]
1998	Research on application technology of fiber optic current sensor in coal mine	[156]
1992	Development of fiber optic multi-point methane sensor and trial of landfill monitoring	[146]
2000	Development of semiconductor laser methane telemeter	[157]
2003	Research on monitoring technology of fiber optic strain sensor in coal mine shaft wall deformation	[158]
2004	Multi-component gas detection based on long wave VCSEL	[159]
1998	Research on fiber optic gas sensor and its gas outburst monitoring in coal mine.	[147]
2009	Mine laser/fiber-optic methane sensors got safety marks	[148]

续表 10

Year	Research content	Ref. No
2010	Application of optical fiber methane monitoring system based on spectral absorption in gas extraction	[160]
2010	Development of fiber optic methane temperature dual parameter sensor	[161]
2011	Development of fiber optic methane sensor with self-diagnostic function	[162]
2011	Multi-absorption peak intelligent tracking technology was invented to realize low power laser methane detection	[149]
2013	Demonstration and application of optical fiber multi-parameter sensor integrated monitoring and early warning system for coal mine safety	[150]
2015, 2016	Low power laser multispectral adaptive methane sensor without temperature control passed long-term reliability test	[151-152]
2016	Laser methane sensor was used in industrial experiments for pressure compensation in several coal mines	[153]
2016	No. 5 of National Coal Mine Safety Administration [2016] recommended the use of laser methane sensors with low power consumption and self-diagnosis function in coal mines with high gas and gas outburst	[154]
2016	Breakthrough was made in the field calibration technology of optical fiber distributed temperature measurement	[163]
2018, 2019	Wireless laser methane sensor for coal mine based on VCSEL fiber multi-point methane sensor network was realized	[164-165]
2019	Establishment of standardized test method for reliability of laser methane sensor in mine	[166]

### 3.3.3 挑战性的问题与难点

煤矿火灾监测预警需要 CO、乙烯、乙炔气体传感器达到亚  $10^{-6}$  检测灵敏度,同时又不受甲烷、CO<sub>2</sub> 的交叉干扰,随着中红外半导体激光器技术的发展,煤矿火灾监测预警技术可望在“十四五”期间取得突破。矿山应变、岩石应力监测要求智能矿山装备含光纤大位移传感器,光纤压力、位移、倾角、振动等传感器需要无线信号传输方式以便减少在矿山恶劣环境对光缆的维护;光纤分布式振动、光纤风速、光纤粉尘传感器,光纤电流、电压传感器,在煤矿井下高湿、粉尘、强机械冲击等情况下的适应性将是下一步研究和突破的重点。

### 3.4 油气光纤传感技术

我国的能源转型符合中国国情,是一个清洁低碳、安全高效的现代能源发展过程,是一个煤、油、气和可再生能源多元协调、多轮驱动的发展过程。在未来相当长的一段时间内,石油是很难被代替的交通燃料和化工原料,其在我国能源革命、能源转型中发挥着不可替代的作用,是仍然需要大力发展的战略能源<sup>[167]</sup>。

自 2006 年,体积压裂的储层改造技术极大地推动了页岩气的开发,引发了能源革命。在这个技术思路的带动下,除了气井之外,油藏改造开发的策略也有了巨大的改变。在越来越长水平段的基础上,水平段改造的强度和密度也不断增大。

2011 年水平井、单井的平均改造段数少于 20 层,而到了 2017 年,单井的平均改造段数超过了 30 层。经过统计,北美地区过去 4 年新钻水平井超过 75000 口。而这些水平井的平均采收率都小于 10%,射孔簇有效性小于 60%,不到 30%的水平段贡献 75%以上的产量。在对油藏的压裂改造过程中,需进行有效、实时的评价,以提高对油井改造的认识,需应用大数据挖掘单井的能力深化对单井油藏的认识,优化油藏设计,使产能递减油井重新变为高产井。因此,传统的技术手段已满足不了石油工业的发展需求。要促进石油工业的进一步发展,必须开发和应用新的技术手段。其中,光纤传感技术就是这些新技术中的一个重要分支,已成为促进石油工业进一步发展的关键技术之一。

#### 3.4.1 技术发展

光纤传感技术在国外石油公司已经得到了广泛应用,是一项较为成熟的技术。随着近几年的迅猛发展,国内各油田公司已加大对该技术的市场化推广力度,目前该技术已实现产业化发展规模,其应用情况如表 11 所示。

目前光纤传感技术已广泛应用于油田测井各个领域,用于监测井下温度、压力、声波、流量等,可有效分析油田储层动用情况,指导油气开发方案设计与调整。

表 11 国内油田光纤传感技术的应用情况

Table 11 Application of optical fiber sensing technology in domestic oil fields

Year	Extension technique	Oil-field
2002	Fiber distributed temperature sensing technology	Caoqiao oil-field <sup>[168]</sup>
2003,2012	Fiber distributed temperature sensing technology	Liaohe oil-field <sup>[169]</sup> and Shengli oil-field <sup>[170]</sup>
2010	Fiber distributed temperature sensing technology	Liaohe oil-field <sup>[171]</sup>
2012	Fiber distributed temperature sensing technology	Daqing oil-field <sup>[172]</sup>
2016	Fiber Fabry-Perot cavity measuring pressure technology	Xinjiang oil-field <sup>[173]</sup>
2019	Fiber distributed acoustic sensing technology	Puguang gas-field <sup>[174]</sup>
2019	Fiber distributed acoustic sensing technology	Xinjiang oil-field <sup>[175]</sup>
2021	Fiber distributed acoustic sensing technology	Zhejiang oil-field <sup>[176]</sup>

### 3.4.2 需求现状

#### 1) 基于拉曼散射的光纤分布式温度传感(DTS)技术

根据光纤自发拉曼散射中反斯托克斯光对温度敏感、其强度受温度调制,而斯托克斯光基本与温度无关的特点,利用 OTDR 原理实现对空间分布温度测量的 DTS 技术。DTS 最早被应用于稠油热采井中监测井筒的温度,丰富的温度资料可以帮助油田经营者更清晰地认识油藏区块,以实现有效开发。传统的测温传感器只能在某个时间内检测间断点的温度。而光纤分布式温度传感技术可以实现在全井范围内连续且长时间的温度监测,因此可以更好地跟踪井下温度剖面的情况。

近几年在稠油热采监测领域,光纤分布式温度传感技术的配套工艺取得了长足的发展。通过结合焦耳-汤姆孙效应与管流过程,可以建立井筒-油藏的耦合作用模型,如图 17 所示。利用整个轮次开采过程中连续监测的温压数据,结合相关的完井和测井数据,能够对油井产液剖面进行解析,这有助于认识油井中油藏的动用情况,有利于改善油藏开发效果<sup>[177]</sup>。

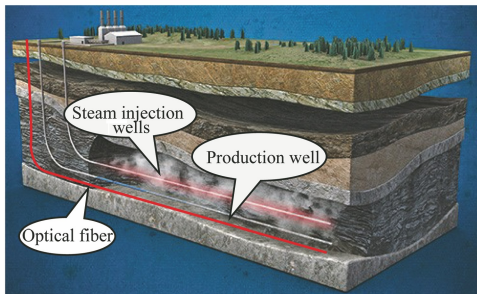


图 17 DTS 测量蒸汽辅助重力泄油(SAGD)水平井井下温度  
Fig. 17 DTS measurement of downhole temperature in steam assisted gravity drainage (SAGD) horizontal wells

#### 2) 光纤法布里-珀罗腔测压技术(PT)

对油井的压力监测是油田开发中的重要内容,

及时精确地获得油藏的井内压力信息,能够有效提高开采效率、保障油井作业的安全、预防灾难事故的发生。传统的井下压力监测所采用的传感器主要为应变压力机与石英晶体压力计。在油井开发中常需要面对复杂的工作环境,而传统的压力监测传感器的测量精度低、可靠性差。根据光纤法布里-珀罗腔的腔长随外界压力的变化而变化的原理来实现对油井中压力的监测,该方法具有抗干扰能力强、安全性高、长期工作稳定等优点,因此在井下监测中得到广泛应用,其应用场景如图 18 所示。

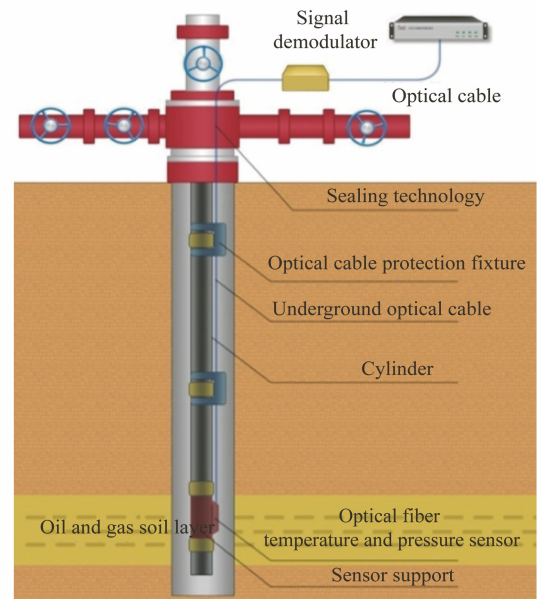


图 18 采用光纤测压技术测量地层压力  
Fig. 18 Formation pressure measured by fiber-optic pressure measurement

#### 3) DAS 技术

基于  $\Phi$ -OTDR 原理对空间分布的振动进行测量的 DAS 技术如图 19 所示,该技术是近几年光纤测井领域的最前沿技术。通过地面控制系统向井下预置的光纤发射光波并由地面接收系统返回的光波

信号。井下发生振动事件时就会产生声波,光纤受到声波的作用后,返回的信号被调制。通过监测和解调井下光纤返回的信号,即可分析井下的振动事

件。通过测量返回信号的振幅、频率和能谱并进行解调,即可实时监测到井下事件发生的过程和状态,如图 20 所示。

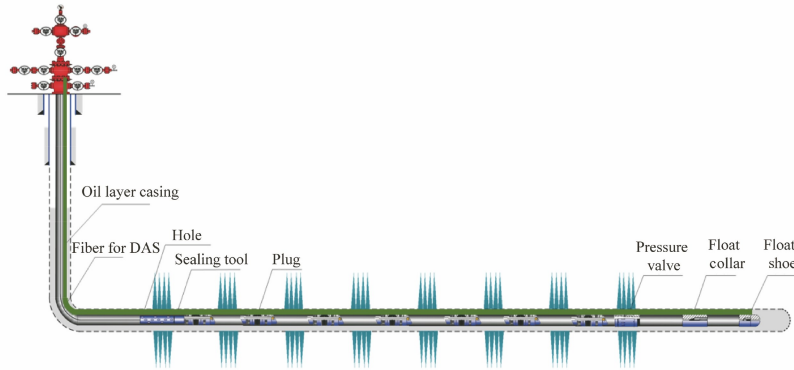


图 19 DAS 应用于油气井套管外监测

Fig. 19 DAS applied to off-casing monitoring in oil and gas wells

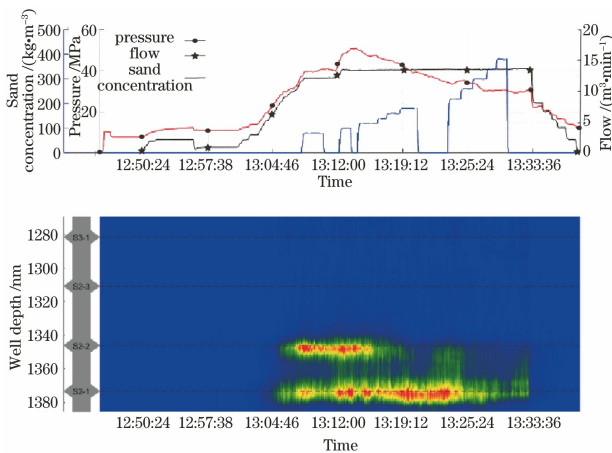


图 20 油气井压裂过程的 DAS 监测效果

Fig. 20 DAS monitoring effect during fracturing of oil and gas well

### 3.4.3 挑战性的问题与难点

#### 1) DTS 技术

典型稠油井的井下温度高达 260~300 °C,并且存在含氢层段,光纤在这种环境下的使用寿命大大缩短,无法实现目标井全生命周期的监测。所以,加大高温耐氢损光纤的研发和试验力度,在关键技术上力争突破是一个迫切的问题。

#### 2) PT

井下测压传感器的加工工艺要求高,可靠性低;在井下高温、含氢环境中,传感器寿命短;解调算法中存在模型不准确导致的模式跳变。

#### 3) DAS 技术

为达到最好的监测效果,需将光纤铺设在油气井套管外、与地层直接接触,但施工难度大;需要进一步提高低频甚至超低频信号采集性能;数据预处理、降噪及人工智能特征提取时,数据量大,算法复杂;油气井的生产过程中,声波信号微弱、信噪比低。

理、降噪及人工智能特征提取时,数据量大,算法复杂;油气井的生产过程中,声波信号微弱、信噪比低。

### 3.5 海洋勘探与监测光纤多参量传感技术

近年来,海洋勘探与监测光纤传感技术受到了学术界和工业界的广泛关注,得到了国内外诸多学者的深入研究,并取得了丰硕的研究成果。研发出的传感器,如海洋光纤温度传感器<sup>[178-179]</sup>、盐度传感器<sup>[180-181]</sup>、深度传感器<sup>[182]</sup>、海洋光纤油污传感器<sup>[49,183-186]</sup>、光纤水听器<sup>[49,187-188]</sup>、海洋光纤流速流向传感器<sup>[189]</sup>、海洋风电光纤磁场传感器<sup>[190]</sup>和光纤地震传感器<sup>[191]</sup>,为了解海洋、认知海洋、经略海洋提供了技术与装备支撑。

#### 3.5.1 光纤多参量传感结构与工作原理

基于多芯光纤(MCF)的多传感机制,单纤海洋温度、盐度、深度、流向和流速传感器结构示意图如图 21 所示。单模光纤(SMF)与 MCF 熔接时,在单模光纤与 MCF 熔接点拉锥,且 MCF 的末端镀有银膜。利用 MCF 的多个纤芯作为干涉臂,实现带有锥区的 Michelson 干涉结构;镀有银膜的 MCF 与制备的微空气腔熔接,形成纤上法布里-珀罗干涉结构;MCF 各个纤芯中写有中心波长或反射率有差异的 FBG。

单光纤海洋温盐深传感器的工作原理为:分析应力、折射率、温度等物理参数对信号光路的影响,得出温度、盐度、深度、流速、流向等水下水文环境参数与复合干涉光场分布的规律,建立多维物理量与信号光谱的数学关系模型。带有锥区的 Michelson 干涉结构通过测量水中折射率,得到水中盐度参量;传感器末端法布里-珀罗干涉结构在静水压的作用

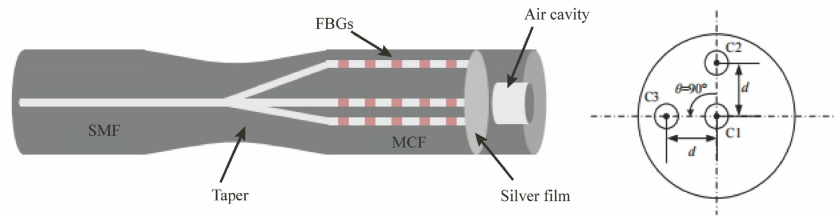


图 21 海洋单纤复合结构中海洋多参量传感器结构示意图

Fig. 21 Schematic diagram of marine multi-parameter sensor in marine single fiber composite structure

下,腔长发生变化,通过解调得到水的深度参量;通过 MCF 中心纤芯的光纤光栅实现温度的测量;水流流过光纤,在水流的作用下 MCF 沿水流方向弯曲,流速流向传感原理示意图如图 22 所示。MCF 不同位置的纤芯在弯曲时受到不同的应变,通过测量不同纤芯上 FBG 波长不同的偏移量,得到光纤弯曲

的方向和曲率,进而通过力学模型得到水流的方向和流速。多参量传感器解调拟通过分解信号频域中高频与低频分量和追踪特征波长实现。应用相应的低通及高通滤波器技术,通过追踪特征峰的漂移,解调信号光谱携带的传感信息,实现多物理参数去耦测量。海洋流速流向测量的实验装置如图 23 所示。

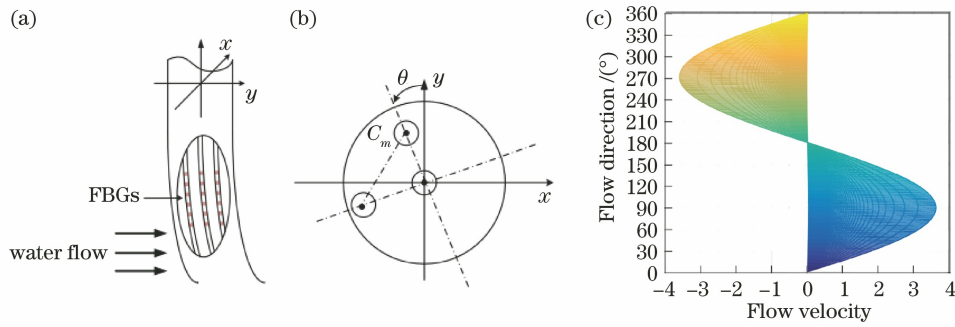


图 22 流速流向传感示意图。(a)传感器结构;(b)弯曲截面;(c)仿真结果

Fig. 22 Schematic diagram of sensing of flow velocity and flow direction. (a) Sensor structure;

(b) bending section; (c) simulation result

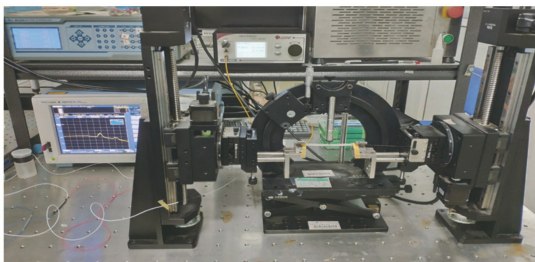


图 23 海洋流速流向测量的实验装置实物图

Fig. 23 Photo of experimental equipment for measurement of marine velocity and flow direction

通过图 23 所示装置,可以实现对光纤光栅曲率半径及方向的测量,从而对传感器的精度及测量范围进行标定,实现海洋流速流向的测量应用。

### 3.5.2 挑战性的问题与难点

各种参量的海洋光纤传感技术经过了近十年的快速发展,其传感结构与关键器件已经能够实现全部国产化,接近实际应用的水平,近几年来逐步进入若干应用领域,其面临的主要问题是:

1) 目前使用的多芯光纤的纤芯位置与间距需

要特制,它关系到传感器的灵敏度和成本,限制了应用开发的速度。

2) 复合结构中的不同种光纤间的低损耗熔接技术是实现海洋光纤传感技术的重要环节。

3) 无论是基于多芯光纤的光栅阵列解调技术,还是复合结构中多参量的解调方案,其重构算法还有待进一步完善。

## 4 我国光纤传感技术发展的愿景

伴随着我国光纤传感技术领域的发展,各高校中相关人才培养的模式也在缓慢地发生着变化,这是因为需求牵引着学术技术化,市场驱动着技术工程化。在这个信息技术发展急速变化的时代,已经很少有机会能够有较多的时间容许人才缓慢地发展来跟随信息技术快速变化的脚步。如何满足人才多样性的需求?如何应对快速发展变化的相关产业?这些问题对各个高校的人才培养方式提出了新的挑战。



从市场的逻辑出发,需求牵引着市场扩展,市场驱动着技术的进步。就光纤传感技术而言,若某项特殊的感测技术有用,这项技术就能得到更深入的研究,就能得到市场更多的投入,该项技术本身才能得到更快的发展与进步。

光纤传感技术的成熟伴随着光纤通信技术的成熟,但是与光纤通信的市场情况则相反。光纤传感市场不仅被各种不同的需求和多样化的应用场景细分,而且能够满足各种应用的支撑性技术也各不相同,这样的现实情况阻碍了资本的投入规模,客观上也制约了光纤传感技术的发展。

时至今日,我国光纤传感技术正处于一个高速发展期,又恰逢我国金融市场的活跃期<sup>[192]</sup>。一方面,细分市场促进工业级骨干企业的崛起,以实现细分市场的整合,完成基础层高可靠性、低成本、规模化的关键材料与器件的供给。这些供给包括三个内容:1)提供适用于具体应用场景的特种传感光纤与光缆;2)提供与特种传感光纤相配套的特种光纤器件;3)提供工业级高可靠性、低成本专用光电信号集成处理芯片或处理模块。另一方面,市场的多样性也促进了那些能够满足应用端细分市场需求的各个行业企业的发展,它们是活跃在各个应用终端的工程应用型企业,能够与各个传统应用领域深度紧密结合。基础器件层工业级骨干企业的需求是少而精,应用端工程技术企业需求是多而强,通过这两类企业的分工协作,以及技术市场风投资本的投入不断加大,我国光纤传感产业链的各个环节的高速成长期已经来临。

从长远来看,按照库兹韦尔的预测,从技术的视角来看,光纤传感技术属于信息技术领域,其发展趋势满足符合指数规律的广义摩尔定律<sup>[1]</sup>;此外,从光纤技术产品的视角来看,随着市场规模的扩大,生产成本的降低趋势与规律可由莱特定律描述<sup>[2]</sup>,具体表述为产量每增加1倍,成本会降低一定的百分比。莱特定律比摩尔定律早几十年被提出,是由航空工程师西奥多·莱特在1936年发现的。我们知道,科技对社会的推动取决于社会对科技的运用水平,其中一个很重要的指标就是价格<sup>[193]</sup>。换言之,价格越低,使用者越多,科技产品对社会的贡献才会越大。因此,量产和规模化应用将是我国对推动光纤传感技术发展的又一重要贡献。展望光纤传感技术的未来,由于技术、经济、市场交互促进,增速必将相互叠加,一个日益清晰的指数型市场需求发展前景已经逐渐展现在我们面前。

**致谢** 感谢本文所有作者对本文所做的贡献。本文2.1节内容由童维军撰写,2.2节内容由江山撰写,2.3节内容由杨远洪撰写,2.4节内容由孟洲撰写,2.5节内容由董永康撰写,2.6节内容由饶云江撰写,2.7节内容由何祖源撰写,3.1节内容由靳伟撰写,3.2节内容由苑立波撰写,3.3节内容由刘统玉撰写,3.4节内容由邹琪琳撰写,3.5节内容由毕卫红撰写。

### 参 考 文 献

- [1] Kurzweil R. Singularity near[M]. Li Q C, Dong Z H, Tian Y, Translated. Beijing: China Machine Press, 2011.  
库兹韦尔. 奇点临近[M]. 李庆诚, 董振华, 田源, 译. 北京: 机械工业出版社, 2011.
- [2] Johnson R C. Moore's law trumped by Wright's law[EB/OL]. (2013-03-07)[2021-05-06]. <https://www.eetimes.com/moores-law-trumped-by-wrights-law/>.
- [3] Shen L, Wu H, Zhao C, et al. Distributed curvature sensing based on a bending loss-resistant ring-core fiber [J]. *Photonics Research*, 2020, 8(2): 165-174.
- [4] Sui N B, Xu T C, Wang Q, et al. Recent research progress of fine polarization maintaining fibers for FOG[J]. *Optical Fiber & Electric Cable and Their Applications*, 2021(2): 8-11.  
隋宁波, 徐天聪, 王琦, 等. 光纤陀螺用细径保偏光纤的最新研究进展[J]. *光纤与电缆及其应用技术*, 2021(2): 8-11.
- [5] Yu L, Guo H L, Lu G Q, et al. Production and performance of heat resistant optical fiber [J]. *Optical Communication Technology*, 2014, 38(6): 8-11.  
俞亮, 郭浩林, 陆国庆, 等. 耐高温光纤的性能与生产工艺[J]. *光通信技术*, 2014, 38(6): 8-11.
- [6] Shao C Y, Yu C L, Hu L L. Radiation-resistant active fibers for space applications [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(5): 0500014.  
邵冲云, 于春雷, 胡丽丽. 面向空间应用耐辐照有源光纤研究进展[J]. *中国激光*, 2020, 47(5): 0500014.
- [7] Hill K O, Fujii Y, Johnson D C, et al. Photosensitivity in optical fiber waveguides: application to reflection filter fabrication [J]. *Applied Physics Letters*, 1978, 32(10): 647-649.
- [8] Meltz G, Morey W W, Glenn W H. Formation of Bragg gratings in optical fibers by a transverse holographic method [J]. *Optics Letters*, 1989, 14

- (15): 823-825.
- [9] Askins C G, Tsai T E, Williams G M, et al. Fiber Bragg reflectors prepared by a single excimer pulse [J]. *Optics Letters*, 1992, 17(11): 833-835.
- [10] Hill K O, Malo B, Bilodeau F, et al. Bragg gratings fabricated in monomode photosensitive optical fiber by UV exposure through a phase mask [J]. *Applied Physics Letters*, 1993, 62(10): 1035-1037.
- [11] Anderson D Z, Mizrahi V, Erdogan T, et al. Phase-mask method for volume manufacturing of fiber phase gratings [C] // Conference on Optical Fiber Communication/International Conference on Integrated Optics and Optical Fiber Communication, February 21, 1993, San Jose, California. Washington, D.C.: OSA, 1993: PD16.
- [12] Lemaire P J, Atkins R M, Mizrahi V, et al. High pressure H<sub>2</sub> loading as a technique for achieving ultrahigh UV photosensitivity and thermal sensitivity in GeO<sub>2</sub> doped optical fibres [J]. *Electronics Letters*, 1993, 29(13): 1191-1193.
- [13] 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.
- [14] Askins C G, Putman 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.
- [15] Erdogan T. Fiber grating spectra [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1997, 15(8): 1277-1294.
- [16] Zhang P, Cerecedo-Núñez H, Qi B, et al. Optical time-domain reflectometry interrogation of multiplexing low-reflectance Bragg-grating-based sensor system [J]. *Optical Engineering*, 2003, 42(6): 1597-1603.
- [17] Martinez A, Dubov M, Khrushchev I, et al. Direct writing of fibre Bragg gratings by femtosecond laser [J]. *Electronics Letters*, 2004, 40(19): 1170-1172.
- [18] Wikszak E, Burghoff J, Will M, et al. Recording of fiber Bragg gratings with femtosecond pulses using a "point by point" technique [C] // Conference on Lasers and Electro-Optics/International Quantum Electronics Conference and Photonic Applications Systems Technologies, May 16-21, San Francisco, California. Washington, D.C.: OSA, 2004: CThM7.
- [19] General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. National Standard (Recommended) of the People's Republic of China: line type heat detectors using optical fibre. GB/T 21197—2007 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2008.
- 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 中华人民共和国推荐性国家标准: 线型光纤感温火灾探测器 GB/T 21197—2007 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [20] Cusano A, Cutolo A, Albert J. Fiber Bragg grating sensors: recent advancements, industrial applications and market exploitation [M]. Sharjah: Bentham Science Publishers, 2011.
- [21] Yang M H, Rao Y J, Jin W, et al. Optical fiber sensor network: devices and technology [M]. Beijing: Science Press, 2018.
- 杨明红, 饶云江, 靳伟, 等. 光纤传感网: 器件与技术 [M]. 北京: 科学出版社, 2018.
- [22] Lefèvre H C. Potpourri of comments about the fiber optic gyro for its 40th anniversary, and how fascinating it was and it still is! [J]. *Proceedings of SPIE*, 2016, 9852: 985203.
- [23] Lefevre H C. The fiber-optic gyroscope [M]. London: Artech house, 2014: 99-105.
- [24] Sagnac G. Sur la preuve de la réalité de l'éther lumineux par l'expérience de l'interférographe tournant [J]. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*, 1913, 157: 1410-1413.
- [25] Ezekiel S, Arditty H J. Fiber-optic rotation sensors and related technologies [M] // Springer series in optical sciences. Heidelberg: Springer, 1982: 32.
- [26] Eric U. Fiber optic gyros: 10th anniversary conf [M]. Cambridge: SPIE, 1987: 719.
- [27] Ezekiel S, Udd E. Fiber optic gyros: 15th anniversary conf [M]. Cambridge: SPIE, 1992: 1585.
- [28] Udd E, Lefevre H C, Hotate K. Fiber optic gyros: 20th anniversary conf [M]. Cambridge: SPIE, 1996: 2837.
- [29] Paturel Y, Honthaas J, Lefèvre H, et al. One nautical mile per month fog-based strapdown inertial navigation system: a dream already within reach? [J]. *Gyroscopy and Navigation*, 2014, 5(1): 1-8.
- [30] Lefèvre H C. The fiber-optic gyroscope: challenges to become the ultimate rotation-sensing technology [J]. *Optical Fiber Technology*, 2013, 19(6): 828-832.
- [31] Guattari F, Chouvin S, Moluçon C, et al. A simple optical technique to compensate for excess RIN in a fiber-optic gyroscope [C] // 2014 DGON Inertial Sensors and Systems (ISS), September 16-17,

- 2014, Karlsruhe, Germany. New York: IEEE Press, 2014: 1-14.
- [32] Ma H, Yan Y, Wang L, et al. Laser frequency noise induced error in resonant fiber optic gyro due to an intermodulation effect [J]. *Optics Express*, 2015, 23(20): 25474-25486.
- [33] Sanders G A, Sanders S J, Strandjord L K, et al. Fiber optic gyro development at Honeywell [J]. *Proceedings of SPIE*, 2016, 9852: 985207.
- [34] de Toldi E, Lefèvre H, Guattari F, et al. First steps for a giant FOG: searching for the limits[C]//2017 DGON Inertial Sensors and Systems (ISS), September 19-20, 2017, Karlsruhe, Germany. New York: IEEE Press, 2017: 1-14.
- [35] Guattari F, de Toldi E, Garcia R F, et al. Fiber optic gyroscope for 6-component planetary seismology[J]. *Proceedings of SPIE*, 2019, 1118: 2867-2884.
- [36] Jaroszewicz L R, Kurzych A, Krajewski Z, et al. The fiber-optic rotational seismograph-laboratory tests and field application [J]. *Sensors*, 2019, 19(12): 2699.
- [37] Yang Y H, Yan H, Li S, et al. Estimation of gyro bias drift due to distributed polarization cross coupling in the fiber coil [J]. *Optics Express*, 2019, 27(7): 10247-10257.
- [38] Morris T A, Digonnet M J F. Discrete model of backscattering drift in fiber optic gyroscopes [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2020, 38(7): 1981-1987.
- [39] Sanders G A, Taranta A A, Narayanan C, et al. Hollow-core resonator fiber optic gyroscope using nodeless anti-resonant fiber [J]. *Optics Letters*, 2021, 46(1): 46-49.
- [40] Meng Z, Chen W, Wang J F, et al. Research progress of fiber optic hydrophone technology [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(13): 1306009.  
孟洲, 陈伟, 王建飞, 等. 光纤水听器技术的研究进展 [J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(13): 1306009.
- [41] Meng Z, Hu Y M, Xiong S D, et al. All polarization maintaining fiber hydrophone array [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2002, 29(5): 415-417.  
孟洲, 胡永明, 熊水东, 等. 全保偏光纤水听器阵列 [J]. *中国激光*, 2002, 29(5): 415-417.
- [42] Ni M, Hu Y M, Meng Z, et al. Study on fiber optic hydrophone unit [J]. *Applied Acoustics*, 2003, 22(2): 1-7.  
倪明, 胡永明, 孟洲, 等. 光纤水听器探头技术研究 [J]. *应用声学*, 2003, 22(2): 1-7.
- [43] Meng Z, Hu Y M, Ni M, et al. Development of a 32-element fiber optic hydrophone system [J]. *Proceedings of SPIE*, 2004, 5589: 114-119.
- [44] Xiong S. Research on the fiber optic vector hydrophone [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2003.
- [45] Xiong S D, Luo H, Hu Y M, et al. Research on interferometric polarization maintaining fiber optic micro-vibration vector sensor [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2004, 31(7): 843-847.  
熊水东, 罗洪, 胡永明, 等. 干涉型保偏光纤微振动矢量传感器研究 [J]. *中国激光*, 2004, 31(7): 843-847.
- [46] Hu Y M, Hu Z L, Luo H, et al. Recent progress toward fiber optic hydrophone research, application and commercialization in China [J]. *Proceedings of SPIE*, 2012, 8421: 183-187.
- [47] Rao W. Study on key techniques of fiber optic vector hydrophone for high resolution seafloor strata detection [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2012.  
饶伟. 光纤矢量水听器海底地层结构高分辨率探测关键技术研究 [D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2012.
- [48] Cao C Y, Xiong S D, Yao Q, et al. Performance of a 400 km interrogated fiber optics hydrophone array [J]. *Proceedings of SPIE*, 2014, 9157: 91579B
- [49] Meng Z, Chen W, Wang J F, et al. Recent progress in fiber-optic hydrophones [J]. *Photonic Sensors*, 2021, 11(1): 109-122.
- [50] Hao X Z, Zhang H Q, Wei C L, et al. Sea trial for fiber-optic hydrophone array used in marine geophysical exploration [J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2018, 37(3): 93-98.  
郝小柱, 张汉泉, 韦成龙, 等. 光纤水听器阵列应用于海洋地震勘探的试验 [J]. *热带海洋学报*, 2018, 37(3): 93-98.
- [51] Gu H C, Huang J B, Yao G F, et al. A 64-element fiber laser hydrophone flank array [J]. *Proceedings of SPIE*, 2021, 11763: 117639G.
- [52] Lu B, Wu B Y, Gu J F, et al. Distributed optical fiber hydrophone based on  $\Phi$ -OTDR and its field test [J]. *Optics Express*, 2021, 29(3): 3147-3162.
- [53] Dong Y K, Zhang H Y, Chen L, et al. 2 cm spatial-resolution and 2 km range Brillouin optical fiber sensor using a transient differential pulse pair [J]. *Applied Optics*, 2012, 51(9): 1229-1235.
- [54] Dominguez-Lopez A, Soto M A, Martin-Lopez S, et al. Resolving 1 million sensing points in an optimized differential time-domain Brillouin sensor [J]. *Optics Letters*, 2017, 42(10): 1903-1906.

- [55] Lee M W, Stiller B, Hauden J, et al. Differential phase-shift-keying technique-based Brillouin echo-distributed sensing[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2012, 24(1): 79-81.
- [56] Hotate K, Tanaka M. Distributed fiber Brillouin strain sensing with 1-cm spatial resolution by correlation-based continuous-wave technique [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2002, 14(2): 179-181.
- [57] Zadok A, Antman Y, Primerov N, et al. Random-access distributed fiber sensing [J]. Laser & Photonics Reviews, 2012, 6(5): L1-L5.
- [58] Ba D X, Li Y, Yan J L, et al. Phase-coded Brillouin optical correlation domain analysis with 2-mm resolution based on phase-shift keying [J]. Optics Express, 2019, 27(25): 36197-36205.
- [59] Peled Y, Motil A, Tur M. Fast Brillouin optical time domain analysis for dynamic sensing [J]. Optics Express, 2012, 20(8): 8584-8591.
- [60] Chu Q, Wang B, Wang H, et al. Fast Brillouin optical time-domain analysis using frequency-agile and compressed sensing[J]. Optics Letters, 2020, 45(15): 4365-4368.
- [61] Zhou D, Dong Y, Wang B, et al. Single-shot BOTDA based on an optical chirp chain probe wave for distributed ultrafast measurement [J]. Light, Science & Applications, 2018, 7: 32.
- [62] Soto M A, Bolognini G, di Pasquale F, et al. Simplex-coded BOTDA fiber sensor with 1 m spatial resolution over a 50 km range[J]. Optics Letters, 2010, 35(2): 259-261.
- [63] Dong Y K, Chen L, Bao X Y. Extending the sensing range of Brillouin optical time-domain analysis combining frequency-division multiplexing and in-line EDFAs [J]. Journal of Lightwave Technology, 2012, 30(8): 1161-1167.
- [64] Soto M A, Ramírez J A, Thévenaz L. Intensifying the response of distributed optical fibre sensors using 2D and 3D image restoration [J]. Nature Communications, 2016, 7: 10870.
- [65] Dong Y, Teng L, Tong P, et al. High-sensitivity distributed transverse load sensor with an elliptical-core fiber based on Brillouin dynamic gratings[J]. Optics Letters, 2015, 40(21): 5003-5006.
- [66] Teng L, Zhang H, Dong Y, et al. Temperature-compensated distributed hydrostatic pressure sensor with a thin-diameter polarization-maintaining photonic crystal fiber based on Brillouin dynamic gratings[J]. Optics Letters, 2016, 41(18): 4413-4416.
- [67] Kim Y H, Kwon H, Kim J, et al. Distributed measurement of hydrostatic pressure based on Brillouin dynamic grating in polarization maintaining fibers[J]. Optics Express, 2016, 24(19): 21399-21406.
- [68] Bashan G, Diamandi H H, London Y, et al. Optomechanical time-domain reflectometry [J]. Nature Communications, 2018, 9(1): 2991.
- [69] Chow D M, Yang Z, Soto M A, et al. Distributed forward Brillouin sensor based on local light phase recovery[J]. Nature Communications, 2018, 9(1): 2990.
- [70] Pang C, Hua Z J, Zhou D W, et al. Optomechanical time-domain analysis based on coherent forward stimulated Brillouin scattering probing[J]. Optica, 2020, 7(2): 176-184.
- [71] Rao Y J, Wang Z N, Wu H J, et al. Recent advances in phase-sensitive optical time domain reflectometry ( $\Phi$ -OTDR) [J]. Photonic Sensors, 2021, 11(1): 1-30.
- [72] Xie K L, Rao Y J, Ran Z L. Distributed optical fiber sensing system based of Rayleigh scattering light  $\Phi$ -OTDR using single-mode fiber laser with high power and narrow linewidth[J]. Acta Optica Sinica, 2008, 28(3): 569-572.  
谢孔利, 饶云江, 冉曾令. 基于大功率超窄线宽单模光纤激光器的  $\Phi$ -光时域反射计光纤分布式传感系统[J]. 光学学报, 2008, 28(3): 569-572.
- [73] Rao Y J, Luo J, Ran Z L, et al. Long-distance fiber-optic  $\Phi$ -OTDR intrusion sensing system [J]. Proceedings of SPIE, 2009, 7503: 75031O.
- [74] Pan Z Q, Liang K Z, Ye Q, et al. Phase-sensitive OTDR system based on digital coherent detection [C] // 2011 Asia Communications and Photonics Conference and Exhibition (ACP), November 13-16, 2011, Shanghai, China. New York: IEEE Press, 2011: 1-6.
- [75] Masoudi A, Belal M, Newson T P. A distributed optical fibre dynamic strain sensor based on phase-OTDR[J]. Measurement Science and Technology, 2013, 24(8): 085204.
- [76] Peng F, Wu H, Jia X H, et al. Ultra-long high-sensitivity  $\Phi$ -OTDR for high spatial resolution intrusion detection of pipelines[J]. Optics Express, 2014, 22(11): 13804-13810.
- [77] Baldwin C. Optical fiber sensing in the oil and gas industry: overcoming challenges[J]. Proceedings of SPIE, 2014, 9157: 9157C4.
- [78] Wang Z N, Zeng J J, Li J, et al. Ultra-long phase-sensitive OTDR with hybrid distributed amplification[J]. Optics Letters, 2014, 39(20): 5866-5869.

- [79] Peng F, Duan N, Rao Y J, et al. Real-time position and speed monitoring of trains using phase-sensitive OTDR [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2014, 26(20): 2055-2057.
- [80] Hartog A, Kader K. Distributed fiber optic sensor system with improved linearity: US9170149B2 [P/OL]. 2015-10-27 [2021-05-09]. <https://patents.google.com/patent/US9170149B2/en?q=9170149>.
- [81] Wang Z N, Zhang L, Wang S, et al. Coherent  $\Phi$ -OTDR based on I/Q demodulation and homodyne detection[J]. *Optics Express*, 2016, 24(2): 853-858.
- [82] Jousset P, Reinsch T, Ryberg T, et al. Dynamic strain determination using fibre-optic cables allows imaging of seismological and structural features[J]. *Nature Communications*, 2018, 9: 2509.
- [83] Wang Z N, Zhang B, Xiong J, et al. Distributed acoustic sensing based on pulse-coding phase-sensitive OTDR [J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2019, 6(4): 6117-6124
- [84] Williams E F, Fernández-Ruiz M R, Magalhaes R, et al. Distributed sensing of microseisms and teleseisms with submarine dark fibers [J]. *Nature Communications*, 2019, 10(1): 5778.
- [85] Wu H J, Liu X R, Xiao Y, et al. A dynamic time sequence recognition and knowledge mining method based on the hidden Markov models (HMMs) for pipeline safety monitoring with  $\Phi$ -OTDR [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2019, 37(19): 4991-5000.
- [86] PetroChina. Top ten scientific and technological progress of PetroChina in 2019[EB/OL]. (2020-01-10)[2021-05-08]. <http://www.cnpc.com.cn/cnpc/sdkjjz/202001/5836516fb34a48e590ebff3caf0afdd6.shtml>.  
中国石油. 中国石油 2019 年十大科技进展 [EB/OL]. (2020-01-10) [2021-05-08]. <http://www.cnpc.com.cn/cnpc/sdkjjz/202001/5836516fb34a48e590ebff3caf0afdd6.shtml>.
- [87] Xiong J, Wang Z N, Wu Y, et al. Long-distance distributed acoustic sensing utilizing negative frequency band[J]. *Optics Express*, 2020, 28(24): 35844-35856.
- [88] Guan H J, Han B, Han Z W, et al. High performance DAS-based optical fiber hydrophone[C] //Asia Communications and Photonics Conference/International Conference on Information Photonics and Optical Communications 2020 (ACP/IPOC), October 24-27, 2020, Beijing. Washington, D. C. : OSA, 2020: M4A.100.
- [89] Yao J Z, Han B, Jiang X L, et al. Cladding softened fiber for sensitivity enhancement of distributed acoustic sensing [J]. *Optics Express*, 2021, 29(6): 8216-8222.
- [90] Han B, Guan H J, Yao J Z, et al. Distributed acoustic sensing with sensitivity-enhanced optical cable[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2021, 21(4): 4644-4651.
- [91] Eickhoff W, Ulrich R. Optical frequency domain reflectometry in single-mode fiber [J]. *Applied Physics Letters*, 1981, 39(9): 693-695.
- [92] Uttam D, Culshaw B. Precision time domain reflectometry in optical fiber systems using a frequency modulated continuous wave ranging technique [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1985, 3(5): 971-977.
- [93] Venkatesh S, Sorin W V. Phase noise considerations in coherent optical FMCW reflectometry [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1993, 11(10): 1694-1700.
- [94] Passy R, Gisin N, von der Weid J P, et al. Experimental and theoretical investigations of coherent OFDR with semiconductor laser sources [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1994, 12(9): 1622-1630.
- [95] Chinn S R, Swanson E A, Fujimoto J G. Optical coherence tomography using a frequency-tunable optical source [J]. *Optics Letters*, 1997, 22(5): 340-342.
- [96] Huber R, Wojtkowski M, Taira K, et al. Amplified, frequency swept lasers for frequency domain reflectometry and OCT imaging: design and scaling principles [J]. *Optics Express*, 2005, 13(9): 3513-3528.
- [97] Ito F, Fan X Y, Koshikiya Y. Long-range coherent OFDR with light source phase noise compensation [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2012, 30(8): 1015-1024.
- [98] Ding Z, Yao X S, Liu T, et al. Long-range vibration sensor based on correlation analysis of optical frequency-domain reflectometry signals [J]. *Optics Express*, 2012, 20(27): 28319-28329.
- [99] Zhou D P, Qin Z G, Li W H, et al. Distributed vibration sensing with time-resolved optical frequency-domain reflectometry [J]. *Optics Express*, 2012, 20(12): 13138-13145.
- [100] Li W H, Chen L, Bao X Y. Compensation of temperature and strain coefficients due to local birefringence using optical frequency domain reflectometry [J]. *Optics Communications*, 2013, 311: 26-32.

- [101] Liu Q, Fan X, He Z. Time-gated digital optical frequency domain reflectometry with 1.6-m spatial resolution over entire 110-km range [J]. *Optics Express*, 2015, 23(20): 25988-25995.
- [102] Wang S, Fan X, Liu Q, et al. Distributed fiber-optic vibration sensing based on phase extraction from time-gated digital OFDR [J]. *Optics Express*, 2015, 23(26): 33301-33309.
- [103] Wang B, Fan X Y, Wang S, et al. Millimeter-resolution long-range OFDR using ultra-linearly 100 GHz-swept optical source realized by injection-locking technique and cascaded FWM process [J]. *Optics Express*, 2017, 25(4): 3514-3524.
- [104] Li J, Gan J, Zhang Z, et al. High spatial resolution distributed fiber strain sensor based on phase-OFDR [J]. *Optics Express*, 2017, 25(22): 27913-27922.
- [105] Li H, Liu Q W, Chen D, et al. High-spatial-resolution fiber-optic distributed acoustic sensor based on  $\Phi$ -OFDR with enhanced crosstalk suppression [J]. *Optics Letters*, 2020, 45(2): 563-566.
- [106] Hoo Y L, Jin W, Ho H L, et al. Evanescent wave gas sensing using microstructure fibre [C] // *Technical Digest. CLEO/Pacific Rim 2001. 4th Pacific Rim Conference on Lasers and Electro-Optics (Cat. No. 01TH8557)*, July 15-19, 2001, Chiba, Japan. New York: IEEE Press, 2001: 8-9.
- [107] Hoo Y L, Jin W, Shi C, et al. Design and modeling of a photonic crystal fiber gas sensor [J]. *Applied Optics*, 2003, 42(18): 3509-3515.
- [108] Hoo Y L, Jin W, Ho H L, et al. Gas diffusion measurement using hollow-core photonic bandgap fiber [J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2005, 105(2): 183-186.
- [109] Ritari T, Tuominen J, Ludvigsen H, et al. Gas sensing using air-guiding photonic bandgap fibers [J]. *Optics Express*, 2004, 12(17): 4080-4087.
- [110] Bao H, Hong Y, Jin W, et al. Modeling and performance evaluation of in-line Fabry-Perot photothermal gas sensors with hollow-core optical fibers [J]. *Optics Express*, 2020, 28(4): 5423-5435.
- [111] Jin W, Bao H H, Zhao P C, et al. Recent advances in spectroscopic gas sensing with micro/nano-structured optical fibers [J]. *Photonic Sensors*, 2021, 11(2): 141-157.
- [112] Hensley C J, Broaddus D H, Schaffer C B, et al. Photonic band-gap fiber gas cell fabricated using femtosecond micromachining [J]. *Optics Express*, 2007, 15(11): 6690-6695.
- [113] Hoo Y L, Liu S J, Ho H L, et al. Fast response microstructured optical fiber methane sensor with multiple side-openings [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2010, 22(5): 296-298.
- [114] Jin W, Cao Y, Yang F, et al. Ultra-sensitive all-fibre photothermal spectroscopy with large dynamic range [J]. *Nature Communications*, 2015, 6: 6767.
- [115] Lin Y C, Jin W, Yang F, et al. Pulsed photothermal interferometry for spectroscopic gas detection with hollow-core optical fibre [J]. *Scientific Reports*, 2016, 6(1): 1-12.
- [116] Lin Y, Liu F, He X, et al. Distributed gas sensing with optical fibre photothermal interferometry [J]. *Optics Express*, 2017, 25(25): 31568-31585.
- [117] Yang F, Jin W, Lin Y C, et al. Hollow-core microstructured optical fiber gas sensors [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2017, 35(16): 3413-3424.
- [118] Qi Y, Yang F, Lin Y C, et al. Nanowaveguide enhanced photothermal interferometry spectroscopy [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2017, 35(24): 5267-5275.
- [119] Yang F, Jin W. All-fiber hydrogen sensor based on stimulated Raman gain spectroscopy with a 1550-nm hollow-core fiber [J]. *Proceedings of SPIE*, 2017, 10323: 103233C.
- [120] Yang F, Zhao Y, Qi Y, et al. Towards label-free distributed fiber hydrogen sensor with stimulated Raman spectroscopy [J]. *Optics Express*, 2019, 27(9): 12869-12882.
- [121] Qi Y, Zhao Y, Bao H H, et al. Nanofiber enhanced stimulated Raman spectroscopy for ultra-fast, ultra-sensitive hydrogen detection with ultra-wide dynamic range [J]. *Optica*, 2019, 6(5): 570-576.
- [122] Bao H H, Jin W, Miao Y P, et al. Laser-induced dispersion with stimulated Raman scattering in gas-filled optical fiber [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2019, 37(9): 2120-2125.
- [123] Zhao P, Zhao Y, Bao H, et al. Mode-phase-difference photothermal spectroscopy for gas detection with an anti-resonant hollow-core optical fiber [J]. *Nature Communications*, 2020, 11(1): 847.
- [124] Chen F F, Jiang S L, Jin W, et al. Ethane detection with mid-infrared hollow-core fiber photothermal spectroscopy [J]. *Optics Express*, 2020, 28(25): 38115-38126.
- [125] Zhao Y, Qi Y, Ho H L, et al. Photoacoustic Brillouin spectroscopy of gas-filled anti-resonant hollow-core optical fibers [J]. *Optica*, 2021, 8(4): 532-538.
- [126] Gander M J, MacPherson W N, McBride R, et al.

- Bend measurement using Bragg gratings in multicore fibre[J]. *Electronics Letters*, 2000, 36(2): 120-121.
- [127] Flockhart G M, MacPherson W N, Barton J S, et al. Two-axis bend measurement with Bragg gratings in multicore optical fiber [J]. *Optics Letters*, 2003, 28(6): 387-389.
- [128] Clements G M. Fiber optic sensor for precision 3-D position measurement: US6888623 [P/OL]. 2004-04-23[2021-05-08]. <https://patents.google.com/patent/US6888623B2/en?q=6888623>.
- [129] Miller G A, Askins C G, Friebele E J. Shape sensing using distributed fiber optic strain measurements [J]. *Proceedings of SPIE*, 2004, 5502: 528-531.
- [130] Zhang L W, Qian J W, Shen L Y, et al. FBG sensor devices for spatial shape detection of intelligent colonoscope [C] // *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2004. *Proceedings. ICRA '04*. 2004, April 26-May 1, 2004, New Orleans, LA, USA. New York: IEEE Press, 2004: 834-840.
- [131] Duncan R G, Froggatt M E, Kreger S T, et al. High-accuracy fiber-optic shape sensing [J]. *Proceedings of SPIE*, 2007, 6530: 65301S.
- [132] Moore J P, Rogge M D. Shape sensing using multicore fiber optic cable and parametric curve solutions [J]. *Optics Express*, 2012, 20(3): 2967-2973.
- [133] Westbrook P S, Feder K S, Kremp T, et al. Integrated optical fiber shape sensor modules based on twisted multicore fiber grating arrays [J]. *Proceedings of SPIE*, 2014, 8938: 89380H.
- [134] Zhao Z, Soto M A, Tang M, et al. Distributed shape sensing using Brillouin scattering in multi-core fibers[J]. *Optics Express*, 2016, 24(22): 25211-25223.
- [135] Westbrook P S, Kremp T, Feder K S, et al. Continuous multicore optical fiber grating arrays for distributed sensing applications [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2017, 35(6): 1248-1252.
- [136] Gherlone M, Cerracchio P, Mattone M. Shape sensing methods: review and experimental comparison on a wing-shaped plate[J]. *Progress in Aerospace Sciences*, 2018, 99: 14-26.
- [137] Floris I, Adam J M, Calderòn P A, et al. Measurement uncertainty of 7-core multicore fiber shape sensors [J]. *Proceedings of SPIE*, 2019, 11199: 111992Q.
- [138] Floris I, Madrigal J, Sales S, et al. Experimental study of the influence of FBG length on optical multicore shape sensors performance [C] // *Asia Communications and Photonics Conference (ACPC)* 2019, November 2-5, 2019, Chengdu, China. New York: IEEE Press, 2019.
- [139] Barrera D, Madrigal J, Delepine-Lesoille S, et al. Multicore optical fiber shape sensors suitable for use under gamma radiation[J]. *Optics Express*, 2019, 27(20): 29026-29033.
- [140] Galloway K C, Chen Y, Templeton E, et al. Fiber optic shape sensing for soft robotics [J]. *Soft Robotics*, 2019, 6(5): 671-684.
- [141] Khan F, Denasi A, Barrera D, et al. Multi-core optical fibers with Bragg gratings as shape sensor for flexible medical instruments [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2019, 19(14): 5878-5884.
- [142] Energy Information Research Center. China's great energy data report (2020) [EB/OL]. (2020-05-21) [2021-05-24]. <https://news.bjx.com.cn/html/20200521/1074323.shtml>. 能源情报研究中心. 中国能源大数据报告(2020) [EB/OL]. (2020-05-21) [2021-05-24]. <https://news.bjx.com.cn/html/20200521/1074323.shtml>.
- [143] Liu T Y, Wang Z W, Li Z, et al. Advance of fiber optic sensors application for coal mine methane and fire hazards monitoring [J]. *Shandong Science*, 2019, 32(5): 110-117. 刘统玉, 王兆伟, 李振, 等. 光纤传感技术在煤矿瓦斯、火灾隐患监测预警中的应用研究进展[J]. *山东科学*, 2019, 32(5): 110-117.
- [144] Reid J, Labrie D. Second-harmonic detection with tunable diode lasers: comparison of experiment and theory[J]. *Applied Physics B*, 1981, 26(3): 203-210.
- [145] Hu T K. The trial of optical fiber temperature sensor in China's coal mine [J]. *Safety in Coal Mines*, 1986, 17(1): 34-36. 胡泰康. 光纤温度传感器在我国煤矿的试用[J]. *煤矿安全*, 1986, 17(1): 34-36.
- [146] Uehara K, Tai H. Remote detection of methane with a 1.66-microm diode laser[J]. *Applied Optics*, 1992, 31(6): 809-814.
- [147] Stewart G, Culshaw B, Tandy C, et al. Multipoint fibre sensors for trace gas monitoring using derivative spectroscopy [J]. *Proceedings of SPIE*, 1998, 3483: 132-136.
- [148] Zhao L. Development of gas optical fiber sensing instrument for coal mine application [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2009. 赵磊. 煤矿瓦斯光纤传感检测仪的研制 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2009.
- [149] Li Y F, Wei Y B, Zhao Y J, et al. Fiber laser gas sensor with self-diagnosis function [C] // *National*

- Conference on Optoelectronics and Quantum Electronics, March 18, 2011, Beijing, China. Beijing: Chinese Institute of Electronics, 2011: 108-110.
- 李艳芳, 魏玉宾, 赵燕杰, 等. 具有自诊断功能的光纤激光瓦斯传感器[C]//全国光电子与量子电子学技术大会论文集. 北京. 北京: 中国电子学会, 2011: 108-110.
- [150] Sun Y J, Liu T Y, Ma J P, et al. Optical fiber integrated monitoring and warning system for coal mine safety production [C]//2013 Coal Technology and Equipment Development Forum Proceedings, October 21, 2013, Beijing, China. Beijing: China National Coal Association, 2013: 64-74.
- 孙亚军, 刘统玉, 马俊鹏, 等. 煤矿安全生产光纤综合监测预警系统[C]//2013煤炭技术与装备发展论坛, 2013, 北京. 北京: 中国煤炭工业协会, 2013: 64-74.
- [151] Li Y F, Wei Y B, Wang X S, et al. Experimental study on laser methane sensor and its reliability[C]//International Conference on Optical Fiber and Optoelectronic Sensor and its Safety Application (OFSIS2015), January 22, 2015, Jinnan, China. Jinan: Department of Science & Technology of Shandong Province, 2015: 97-101.
- 李艳芳, 魏玉宾, 王小松, 等. 激光甲烷传感器及可靠性试验研究[C]//光纤和光电子传感器及其安全应用国际会议(OFSIS2015), 2015, 济南. 济南: 山东省科学技术厅, 2015: 97-101.
- [152] Li Y F, Chang L, Zhao Y J, et al. A fiber optic methane sensor based on wavelength adaptive vertical cavity surface emitting laser without thermoelectric cooler[J]. Measurement, 2016, 79: 211-215.
- [153] Chang L. Laser methane sensor for coal mine based on pressure compensation[J]. Safety in Coal Mines, 2016, 47(6): 126-128.
- 常琳. 基于压力补偿的煤矿用激光甲烷传感器[J]. 煤矿安全, 2016, 47(6): 126-128.
- [154] State Administration of Coal Mine Safety. Notice of the state administration of coal mine safety supervision on printing and distribution of the technical plan for upgrading and modifying coal mine safety monitoring system[EB/OL]. (2016-12-29) [2021-05-07]. [https://www.mem.gov.cn/gk/gwgg/tz\\_01/201701/t20170103\\_235131.shtml](https://www.mem.gov.cn/gk/gwgg/tz_01/201701/t20170103_235131.shtml).
- 国家煤矿安监局. 国家煤矿安监局关于印发《煤矿安全监控系统升级改造技术方案》的通知[EB/OL]. (2016-12-29) [2021-05-07]. [https://www.mem.gov.cn/gk/gwgg/tz\\_01/201701/t20170103\\_235131.shtml](https://www.mem.gov.cn/gk/gwgg/tz_01/201701/t20170103_235131.shtml).
- [155] Ni J S, Chang J, Liu T Y, et al. Fiber methane gas sensor and its application in methane outburst prediction in coal mine [C]//2008 1st Asia-Pacific Optical Fiber Sensors Conference, November 7-9, 2008, Chengdu, China. New York: IEEE Press, 2008: 1-4.
- [156] Chen R G, Wang C X. Application of optic fiber sensing technique in coal mine electric parameters measuring[J]. Coal Mine Automation, 1998, 24(3): 32-34.
- 陈荣光, 汪丛笑. 光纤传感技术在煤矿电参数测量中的应用[J]. 煤矿自动化, 1998, 24(3): 32-34.
- [157] Iseki T, Tai H, Kimura K. A portable remote methane sensor using a tunable diode laser [J]. Measurement Science and Technology, 2000, 11(6): 594-602.
- [158] Chai J. Basic study on crack and deflection of rock by optical fiber sensing technology [D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2003.
- 柴敬. 岩体变形与破坏光纤传感测试基础研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2003.
- [159] Lytkine A, Jaeger W, Tulip J. Multi-species gas detection with long-wavelength VCSEL [J]. Proceedings of SPIE, 2004, 5594: 155-163.
- [160] Zhao Y J, Wang C, Liu T Y, et al. Application in methane extraction of fiber methane monitoring system based on spectral absorption [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2010, 30(10): 2857-2860.
- 赵燕杰, 王昌, 刘统玉, 等. 基于光谱吸收的光纤甲烷监测系统在瓦斯抽采中的应用[J]. 光谱学与光谱分析, 2010, 30(10): 2857-2860.
- [161] Zhao Y J, Chang J, Wang C, et al. Research of fiber couple parameters monitoring system of methane and temperature [J]. Chinese Journal of Lasers, 2010, 37(12): 3070-3074.
- 赵燕杰, 常军, 王昌, 等. 光纤甲烷温度双参数检测系统的研究[J]. 中国激光, 2010, 37(12): 3070-3074.
- [162] Li Y F, Liu T Y, Wei Y B, et al. A low power gas detection method and device based on VCSEL: CN102967580A[P]. 2013-03-13.
- 李艳芳, 刘统玉, 魏玉宾, 等. 一种基于 VCSEL 的低功耗气体检测方法及装置: CN102967580A[P]. 2013-03-13.
- [163] Hou M Y, Wang J Q, Zhao L. Real-time determination method of distributed temperature measuring optical fiber tail position in goaf [J]. China Science and Technology Information, 2016(22): 70-72.
- 侯墨语, 王纪强, 赵林. 煤矿采空区分布式测温光



- 纤尾端位置实时判断方法[J]. 中国科技信息, 2016(22): 70-72.
- [164] Wang L. Research and design of wireless laser methane sensor in coal mine safety monitoring system[J]. Coal Technology, 2019, 38(8): 154-158.  
王璐. 煤矿安全监控系统中无线激光甲烷传感器的研究与设计[J]. 煤炭技术, 2019, 38(8): 154-158.
- [165] Liu T Y, Ning Y N, Jin G X, et al. Fiber optic methane sensor module, fiber optic multi-point methane sensor and system: CN108375555A [P]. 2018-08-07.  
刘统玉, 宁雅农, 金光贤, 等. 光纤甲烷传感模块、光纤多点光电式甲烷传感器及系统: CN108375555A [P]. 2018-08-07.
- [166] Wang X S. Accelerated test of working stability of mine-used laser methane sensor [J]. Industry and Mine Automation, 2019, 45(12): 45-49.  
王小松. 矿用激光甲烷传感器工作稳定性加速试验[J]. 工矿自动化, 2019, 45(12): 45-49.
- [167] Zhang Y Q. Oil is still a strategic energy that needs to be developed vigorously [J]. Energy Review, 2019(3): 1.  
张玉清. 石油仍是需要大力发展的战略能源[J]. 能源评论, 2019(3): 1.
- [168] Shi X F, Cai Z Q, Li Z. The optical fiber distributed temperature measurement system and its application in petroleum well logging[J]. Petroleum Instruments, 2002(2): 20-23, 62.  
史晓锋, 蔡志权, 李铮. 分布式光纤测温系统及其在石油测井中的应用[J]. 石油仪器, 2002(2): 20-23, 62.
- [169] Xu Y L, Chen Q. Wide application of optical fiber temperature measuring system in oil well monitoring [C] // Proceedings of the 11th Annual Meeting of China Petroleum and Chemical Automation, June 1, 2012, Huangshan, China. Beijing: China Petroleum and Chemical Industry Association, 2012: 498-501.  
徐英莉, 陈清. 光纤测温系统在油井监测中的广泛应用[C] // 中国石油和化工自动化第十一届年会论文集, 2012, 黄山. 北京: 中国石油和化工自动化应用协会, 2012: 498-501.
- [170] Zhang Y Q, Du Y X, Wu G W, et al. Research and application of distributed optical fiber temperature monitoring system[J]. China Petroleum Machinery, 2003, 31(6): 6-8, 10.  
张义强, 杜永欣, 吴国伟, 等. 油井分布式光纤测温系统研究与应用[J]. 石油机械, 2003, 31(6): 6-8, 10.
- [171] Liu L C. Application of real-time distributed optical fiber temperature measurement in SAGD [J]. Journal of Shengli College China University of Petroleum, 2010, 24(2): 5-7.  
刘立成. 实时分布式光纤温度测试在SAGD中的应用[J]. 中国石油大学胜利学院学报, 2010, 24(2): 5-7.
- [172] Lin F Z. The fiber optic monitoring technology research of casing strain and formation pressure in production and injection well [D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2012.  
林发枝. 油水井套管外光纤监测套管应变和地层压力技术研究[D]. 大庆: 东北石油大学, 2012.
- [173] Duan S N, Pan Y, Lu Z W. Oilfield application and development trend of optical fiber temperature and pressure dynamic monitoring technology [J]. Technology Supervision in Petroleum Industry, 2016, 32(5): 49-52.  
段胜男, 潘勇, 芦志伟. 光纤温压动态监测技术的油田应用和发展趋势[J]. 石油工业技术监督, 2016, 32(5): 49-52.
- [174] Beijing Fiber Optic Sensing System Engineering Technology Research Center. Optical fiber sensing, from dream to reality [EB/OL]. (2019-08-14) [2021-05-24]. [https://www.sohu.com/a/333807092\\_120058319](https://www.sohu.com/a/333807092_120058319).  
北京市光纤传感系统工程技术研究中心. 光纤传感, 从梦想到现实[EB/OL]. (2019-08-14) [2021-05-24]. [https://www.sohu.com/a/333807092\\_120058319](https://www.sohu.com/a/333807092_120058319).
- [175] Petroleum China. Successful test of distributed fiber optic horizontal well in Xinjiang oilfield [EB/OL]. (2019-11-04) [2021-05-24]. <http://www.cnpc.com.cn/cnpc/cpzx/201911/61025b7f1f944a2a8d66d464167d079a.shtml>.  
中国石油. 新疆油田分布式光纤水平井测试成功[EB/OL]. (2019-11-04) [2021-05-24]. <http://www.cnpc.com.cn/cnpc/cpzx/201911/61025b7f1f944a2a8d66d464167d079a.shtml>.
- [176] China Petroleum News Center. To the depths of the earth "into": Chinese oil geophysical exploration technology observation [EB/OL]. (2021-03-03) [2021-05-24]. <http://news.cnpc.com.cn/system/2021/03/03/030025852.shtml>.  
中国石油新闻中心. 向地球深处“进军”——中国石油物探领域技术进步观察[EB/OL]. (2021-03-03) [2021-05-24]. <http://news.cnpc.com.cn/system/2021/03/03/030025852.shtml>.
- [177] Wang N B, Duan S N, Pan Y, et al. Research on fluid production profile analysis of optical fiber test in steam huff well [C] // 2018 IFEDC International Conference on Oil & Gas Field Exploration and Development, September 18, 2018, Xi'an,

- Shaanxi, China. [S.l.: s.n.], 2018: 9.
- 王宁博, 段胜男, 潘勇, 等. 蒸汽吞吐井光纤测试产液剖面解析的研究[C]//2018IFEDC 油气田勘探与开发国际会议, 2018, 西安. 2018: 9.
- [178] Uma Kumari C R, Samiappan D, Kumar R, et al. Development and experimental validation of a Nuttall apodized fiber Bragg Grating sensor with a hydrophobic polymer coating suitable for monitoring sea surface temperature [J]. *Optical Fiber Technology*, 2020, 56: 102176.
- [179] Jin W, Li X, Wu S, et al. Highly sensitive temperature sensing probes based on liquid cladding elliptical micro/nanofibers [J]. *Optics Express*, 2020, 28(14): 20062-20073.
- [180] Sudarsono S, Yudoyono G, Prajitno G, et al. Detection of salinity in the process of heating seawater by using a directional coupler of the multimode plastic optical fiber with a plane mirror as a reflector[J]. *Journal of Optics*, 2020, 49(1): 48-52.
- [181] Wu S H, Jin W, Bi W H, et al. A robust salinity sensor based on encapsulated long-period grating in microfiber[J]. *Optoelectronics Letters*, 2020, 16(6): 418-422.
- [182] Wang L, Wang Y J, Wang J F, et al. A high spatial resolution FBG sensor array for measuring ocean temperature and depth[J]. *Photonic Sensors*, 2020, 10(1): 57-66.
- [183] Chen L S. Research on sea overflow petroleum detection method based on long period fiber grating [D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2015.
- 陈连生. 基于长周期光纤光栅的海洋溢油检测方法研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2015.
- [184] Tan A L. Study on fiber optic spectroscopy detecting method for petroleum pollutants in water [D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2012.
- 谈爱玲. 水中石油类污染物光纤光谱检测方法的研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2012.
- [185] Lin Y F, Yang J Y, Dong X Y. Heavy metal ions sensor based on signal-to-noise ratio measurement of FBG[J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2016, 27(7): 704-708.
- 林云峰, 杨菁怡, 董新永. 基于FBG反射谱信噪比测量的重金属离子传感器[J]. *光电子·激光*, 2016, 27(7): 704-708.
- [186] Bi W H, Chen J G, Zhang S, et al. Study on the influence factors of the concentration of heavy metals by spectrophotometry [J]. *Acta Physica Sinica*, 2017, 66(7): 149-156.
- 毕卫红, 陈俊刚, 张胜, 等. 基于分光光度法痕量重金属传感模型和影响因素的研究[J]. *物理学报*, 2017, 66(7): 149-156.
- [187] Guo Z, Gao K, Yang H, et al. 20-mm-diameter interferometric hydrophone towed array based on fiber Bragg gratings[J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(11): 1106003.
- 郭振, 高侃, 杨辉, 等. 外径 20 mm 的光纤光栅干涉型拖曳水听器阵列[J]. *光学学报*, 2019, 39(11): 1106003.
- [188] Wang W R, Pei Y Y, Ye L Y, et al. High-sensitivity cuboid interferometric fiber-optic hydrophone based on planar rectangular film sensing [J]. *Sensors*, 2020, 20(22): 6422.
- [189] Zhong Z X, Duan J M, Zhang H, et al. Design of fiber grating water flow direction sensor[J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2020, 51(7): 63-69.
- 钟志鑫, 段君森, 张浩, 等. 光纤光栅水流流向传感器的设计[J]. *水利水电技术*, 2020, 51(7): 63-69.
- [190] Lü J J, Zhang Q, Liu Y L. Developing trend and coping strategies about high sensitive electromagnetic sensor of the sea battlefield [J]. *Computer Measurement & Control*, 2015, 23(11): 3574-3576.
- 吕俊军, 张琼, 刘跃雷. 海战场高灵敏度电磁场传感器研究动向与发展[J]. *计算机测量与控制*, 2015, 23(11): 3574-3576.
- [191] Zhang W T, Huang W Z, Li F. High-resolution fiber Bragg grating sensor and its applications of geophysical exploration, seismic observation and marine engineering [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2018, 45(9): 94-108.
- 张文涛, 黄稳柱, 李芳. 高精度光纤光栅传感技术及其在地球物理勘探、地震观测和海洋领域中的应用[J]. *光电工程*, 2018, 45(9): 94-108.
- [192] People's Daily online. The domestic market access to capital to promote innovative active [EB/OL]. (2020-12-03) [2021-05-24]. <http://capital.people.com.cn/n1/2020/1203/c405954-31953773.html>.
- 人民网. 国内市场进入资本推动创新的活跃期[EB/OL]. (2020-12-03) [2021-05-24]. <http://capital.people.com.cn/n1/2020/1203/c405954-31953773.html>.
- [193] Nagy B, Farmer J D, Bui Q M, et al. Statistical basis for predicting technological progress[J]. *PLoS One*, 2013, 8(2): e52669.