

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2209890

# 基于圆柱体耦合结构的液漏检测光纤传感器\*

李莹洁 侯钰龙 沈三民 刘艳芳 牛亚南

(中北大学仪器科学与动态测试教育部重点实验室 太原 030051)

**摘要:** 针对现有侧耦合结构的液漏监测光纤传感器耦合结构损耗大、一致性低的问题,提出了一种圆柱体缺陷耦合结构的液漏传感器。通过 Zemax 软件进行光纤耦合仿真,对比分析圆柱、圆锥与半球体三种结构,在插入损耗相差较小的情况下,圆柱体耦合结构具有更高的耦合率。对聚合物光纤(POF)进行加工,得到插入损耗为 0.31 dB 的圆柱体耦合结构。LED 灯带作为扫描光源,对带有耦合结构的光纤进行检测能力验证,当耦合介质由空气变为水时,光功率强度变化可达 32.8% 以上。实验结果表明,圆柱体耦合结构与现有耦合结构相比损耗明显降低,所涉及的光纤传感器能够对液漏进行有效检测。

**关键词:** 光纤传感;液漏检测;侧向耦合;多源

**中图分类号:** TH741 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.4020

## Optical fiber sensor for liquid leakage detection based on cylindrical coupling structure

Li Yingjie Hou Yulong Shen Sanmin Liu Yanfang Niu Yanan

(Key Laboratory of Instrumentation Science &amp; Dynamic Measurement, Ministry of Education, North University of China, Taiyuan 030051, China)

**Abstract:** Aiming at the problems of high loss and low consistency of the coupling structure of the existing liquid-leakage monitoring fiber sensor with side coupling structure, a liquid-leakage sensor with cylinder defect coupling structure was proposed. The optical fiber coupling simulation is carried out by Zemax software, and the cylindrical, cone and semi-sphere structures are compared and analyzed. The cylindrical coupling structure has higher coupling rate when the insertion loss difference is small. Polymer fiber (POF) was processed to obtain a cylindrical coupling structure with insertion loss of 0.31 dB. The LED lamp belt is used as the scanning light source to verify the detection ability of the optical fiber with coupling structure. When the coupling medium changes from air to water, the optical power intensity changes up to 32.8% or more. The experimental results show that the loss of the cylindrical coupling structure is significantly lower than that of the existing coupling structure, and the optical fiber sensor can effectively detect the liquid leakage.

**Keywords:** optical fiber sensing; liquid leakage detection; the lateral coupling; multi-source

## 0 引言

液漏检测在半导体工厂和电力设施等领域有着重要的应用。常见的液漏检测方法有超声波检测法<sup>[1]</sup>、负压波<sup>[2-3]</sup>和应力波检测法<sup>[4]</sup>。由于声信号的交叉敏感性,这些测量方法在复杂空间中的效果有限。

随着光纤技术的发展,越来越多的传感器使用光纤作敏感元件来探测各种物理量<sup>[5-8]</sup>。和传统的传感器相比,光纤传感器有抗电磁干扰、本征绝缘以及分布式传感等优势。

目前大多数基于光纤的液体泄漏检测方法的原理是光纤的散射<sup>[9-12]</sup>(即拉曼、布里渊和瑞利),基于瑞利散射的光纤传感器主要对泄漏点周围的振动和声音敏感<sup>[13]</sup>,基于拉曼散射的光纤液漏传感器主要对泄漏点附近温度场的变化较为敏感,布里渊散射的波长受光纤周围温度或应力分布的影响<sup>[14]</sup>。这些技术都需要将液体泄漏信息转换为声音、温度或应变信号非常耗时,会影响系统的实时性能。

最近,有关学者提出了一种光纤多源扫描定位的准分布式漏水传感器<sup>[15]</sup>,基于光纤侧向耦合效应,通过缺陷耦

收稿日期:2022-05-10

\* 基金项目:山西省自然科学基金(20210302124211)项目资助

合结构与 LED 灯带之间的折射率变化直接反映泄漏事件, 响应速度快。该传感系统主要由柔性 LED 灯带、POF (polymer optical fiber) 光纤及光功率计构成, 结构简单、测量成本低。但现有耦合结构的加工大多使用微型钻机, 虽然加工出的敏感结构耦合效率较高, 但该种方式加工出的结构一致性较差且光纤损耗太高, 光纤损耗过大会使得测量范围变小。因此缺陷耦合结构亟待改善。

为解决上述问题, 对光纤侧耦合结构进行一系列的分析 and 优化, 提出了一种圆柱形缺陷耦合结构。并采用新的加工工艺, 使得结构有更高的侧耦合效率和更低的插入损耗, 结构一致性更好, 为液漏检测提供了更优的解决方案。

### 1 基本原理

本文设计的液漏检测结构如图 1 所示, 该结构由 LED 灯带和侧向耦合结构的光纤组成, 当有液漏发生时就会引起结构中间折射率的改变, 从而改变耦合进光纤内部的光强, 通过光功率计即可检测到该变化<sup>[16]</sup>。

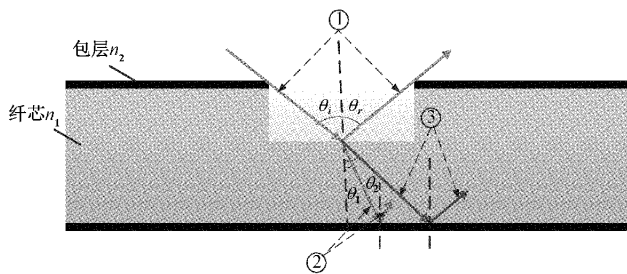


图 1 液漏检测结构

假设光纤纤芯、包层、空气或其他液体的折射率分别为  $n_1, n_2, n_3$ , LED 发出的光线通过耦合结构进入纤芯, 图中  $\theta_i$  为入射角、 $\theta_r$  为反射角, 当耦合区域介质由空气变为水时, 根据斯涅尔定律

$$\sin\theta_{i1} = \frac{n_3 \sin\theta_i}{n_1} \quad (1)$$

光线的折射角会从  $\theta_{i1}$  增加到  $\theta_{i2}$ , 其在纤芯-包层界面的入射角也随之增大, 使得侧面耦合到的光强增大(图 1 中 ②为耦合区域为空气时的光线, ③为液漏时的光线)。

液漏传感器示意图如图 2, 相邻耦合结构间隔 5 cm, LED 灯带以一定时序扫描, 左端为光功率计。在未漏液时, 光功率计测出的耦合光强序列随着耦合结构到光功率计距离的增大而减小; 当有液体泄漏时, 水流到耦合结构上, 柔性灯带扫描到漏水点, 该点由于光耦合强度增大, 相应的光功率发生突变, 结合灯带的扫描时序即可确定液漏发生的位置。

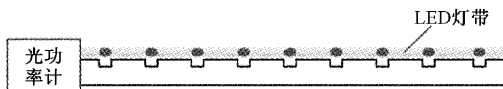


图 2 液漏传感器示意图

### 2 光纤耦合结构仿真

多源扫描定位方法通过在光纤侧面加工耦合结构实现传感, 但侧向耦合结构实际上破坏了光纤的结构, 造成光纤传输性能降低。耦合结构越大, 耦合进光纤的光功率越高, 同时损耗也越大。因此对于一个敏感结构, 其侧向耦合效率和插入损耗是两个关键性的参数, 需要深入研究。

Zemax 是一款经典的光学产品设计与仿真软件, 该软件具有序列、非序列和混合式三种模型, 其中非序列模型用来分析成像和非成像系统的杂散光线、散射和照明问题, 可对光线进行分析追迹。本文将对圆柱、圆锥、球三种耦合结构采用光线追迹的方法来分析光纤传输性能。

#### 2.1 模型建立

光纤直接耦合仿真结构如图 3 所示, 光源采用软件预设置的波长为 635 nm 且功率与实验中所需 LED 相符的光源, 光功率探测器置于光纤右端。固定光源和光纤位置不变, 当光源从光纤左端传输时, 光功率可探测到光源在无准直的情况下光纤能够耦合的功率  $P_0$ 。在光纤侧面进行布尔运算得到带有缺陷结构的光纤, 此时探测器的值为光源受到耦合结构的损耗后所剩的功率  $P_1$ 。通过改变耦合结构的形状和大小来研究插入损耗的变化。所述耦合结构的插入损耗(I)计算方法如下:

$$I = -10 \lg \left( \frac{P_1}{P_0} \right) \quad (2)$$

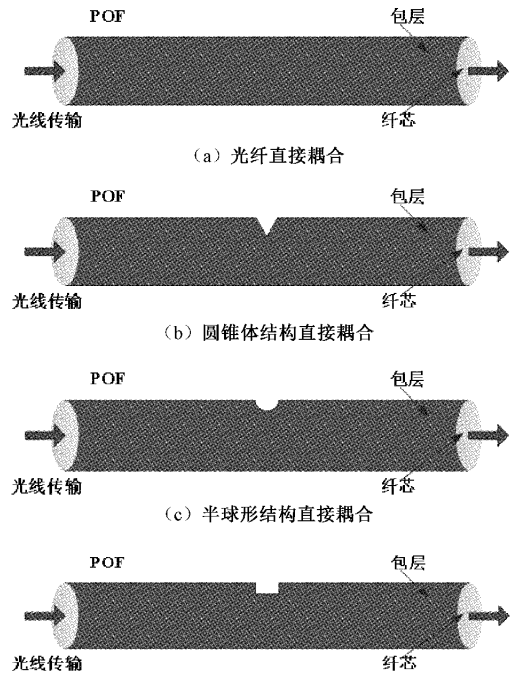


图 3 直接耦合模型

侧耦合仿真模型如图 4 所示, 将光源置于耦合结构正上方, 光功率探测器置于光纤末端, 用来检测缺陷结构的侧耦合率。侧耦合率计算如下:

$$\eta = \frac{P_s}{P_L} \times 100\% \quad (3)$$

其中,  $P_L$  为 LED 输出功率,  $P_s$  为液漏探头的输出功率。

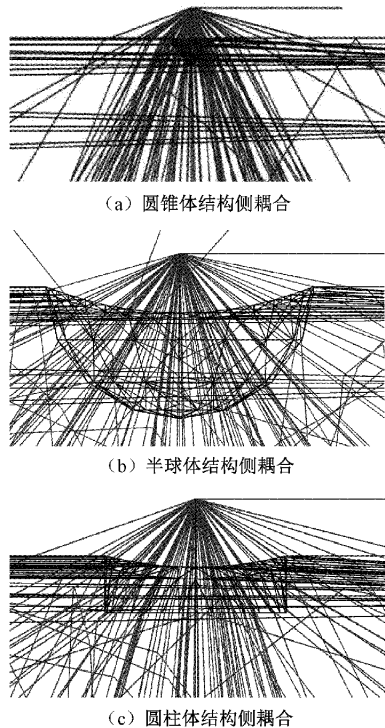


图 4 三种结构侧耦合模型

## 2.2 仿真分析

通过图 4 侧耦合模型可以看出,相同的条件下,光源通过不同耦合结构的光纤时透射出去光线不同。光线在光纤中传播的条件是耦合进来的光线在纤芯和包层发生全反射,即

$$n_1 \sin \alpha_c = n_2 \sin 90^\circ \quad (4)$$

只有耦合进光纤的光线角度  $\geq \alpha_c$  时,才会使光线发生全反射,避免光线在纤芯和包层临界面发生折射。因此入射光线  $\theta_i \geq \arcsin \frac{n_1 \sin \alpha_c}{n_3}$  才能耦合进光纤进行传输。

当入射光线经过不同的耦合结构时,发生折射后形成的光路传输也不同。通过光路可看出,  $\theta_i$  在一定范围内,光线在通过圆柱体耦合结构发生折射后,入射进纤芯的光线角度变大,而通过圆锥体耦合结构时变小,半球形结构对入射光线的传输路径影响不大。因此满足全反射的入射光线角  $\theta_{i\text{圆柱}} < \theta_{i\text{半球}} < \theta_{i\text{圆锥}}$ , 即通过圆锥体耦合结构透射出去的光线最多。

对 3 种结构在半径、深度相同的情况下仿真,得到的插入损耗与侧耦合率结果如图 5 所示。

通过仿真可以发现,随着缺陷结构的变大,侧耦合效率越高,但插入损耗随之增大;相同条件下圆锥体的插入损耗最小但侧耦合效率最低(光纤自身损耗 200 dB/km,与单结

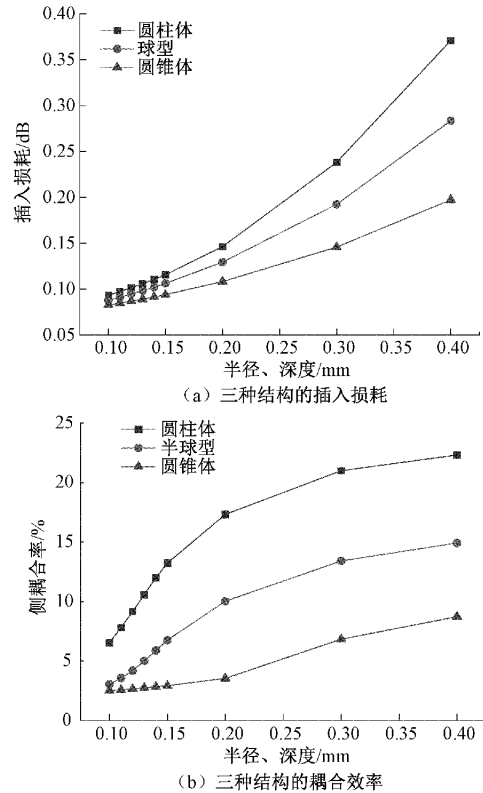


图 5 三种结构的插入损耗、侧耦合率

构插入损耗相比可忽略)。而耦合光强太小时容易受到可见光的干扰,不易分辨漏水事件和可见光干扰的变化。

综上,在损耗性相差较小的情况下,耦合效率成为光纤传输关键因素,通过对 3 种结构的耦合性对比分析,选择圆柱体为侧耦合结构。

## 3 光纤侧耦合结构加工及测试

实验采用直径为 2 mm 的 POF 光纤,纤芯和包层厚度分别为 1 960  $\mu\text{m}$  和 20  $\mu\text{m}$ ,折射率分别为 1.49 和 1.41。由于加工的耦合结构半径大于 0.16 mm 时光纤容易断裂,而结构半径小于 0.1 mm 时实际侧耦合进的光源太小,因此本文对半径为 0.11~0.15 mm 的圆柱体耦合结构进行加工测试。

### 3.1 耦合结构的加工

本文采用的加工机器为广东大族粤铭提供的激光雕刻机,该机器可通过上位机进行控制,激光功率可手动调节。通过改变光功率来控制耦合结构的深度。激光器有多种加工模式,通过多次试验,最终在切割模式下进行 POF 光纤的加工。通过改变激光出射能量即可雕刻出所需要的耦合结构,不同出射功率与结构深度的关系如表 1 所示。

表 1 激光器不同出射功率与结构深度的关系

激光功率/%	15	16	17	18	18.5	19
结构深度/mm	0.09	0.10	0.11	0.12	0.13	0.14

3.2 耦合结构性能测试

测量侧耦合效率及单个结构损耗功率的实验装置示意图如图 6 所示, 光纤固定在特制铝板上, LED 光源 (M660F1, Thorlabs) 固定在滑轨上, 移动滑轨即可改变光源与耦合结构的相对位置, 该光源不需要光学隔离来取代易受回声干扰的激光光源, 稳定性较好。光源通过缺陷结构耦合到 POF, 其输出功率的变化最终经过左端连接的光功率计 (PM100USB, Thorlabs) 在上位机上显示。

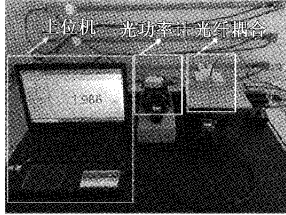


图 6 实验测试示意图

为了保证实验的准确性, 本文截取长度相同的 25 根光纤, 端面经过研磨后, 在每根光纤上均匀地加工五个耦合结构并对其性能进行测试, 每根光纤上的耦合结构参数如表 2 所示。因为耦合结构的长度远大于光的波长, 所以没有考虑倏逝场效应。经过测试得到不同耦合结构的传输性能如图 7 所示, 拟合斜率  $K = P_{i+1} - P_i$  ( $i$  为光纤上从光功率计端开始的第  $i$  个耦合结构) 即为平均损耗功率。

表 2 耦合结构参数

光纤个数	激光功率/%	结构半径/mm
1~5	15	0.11
6~10	16	0.12
11~15	17	0.13
16~20	18	0.14
21~25	19	0.15

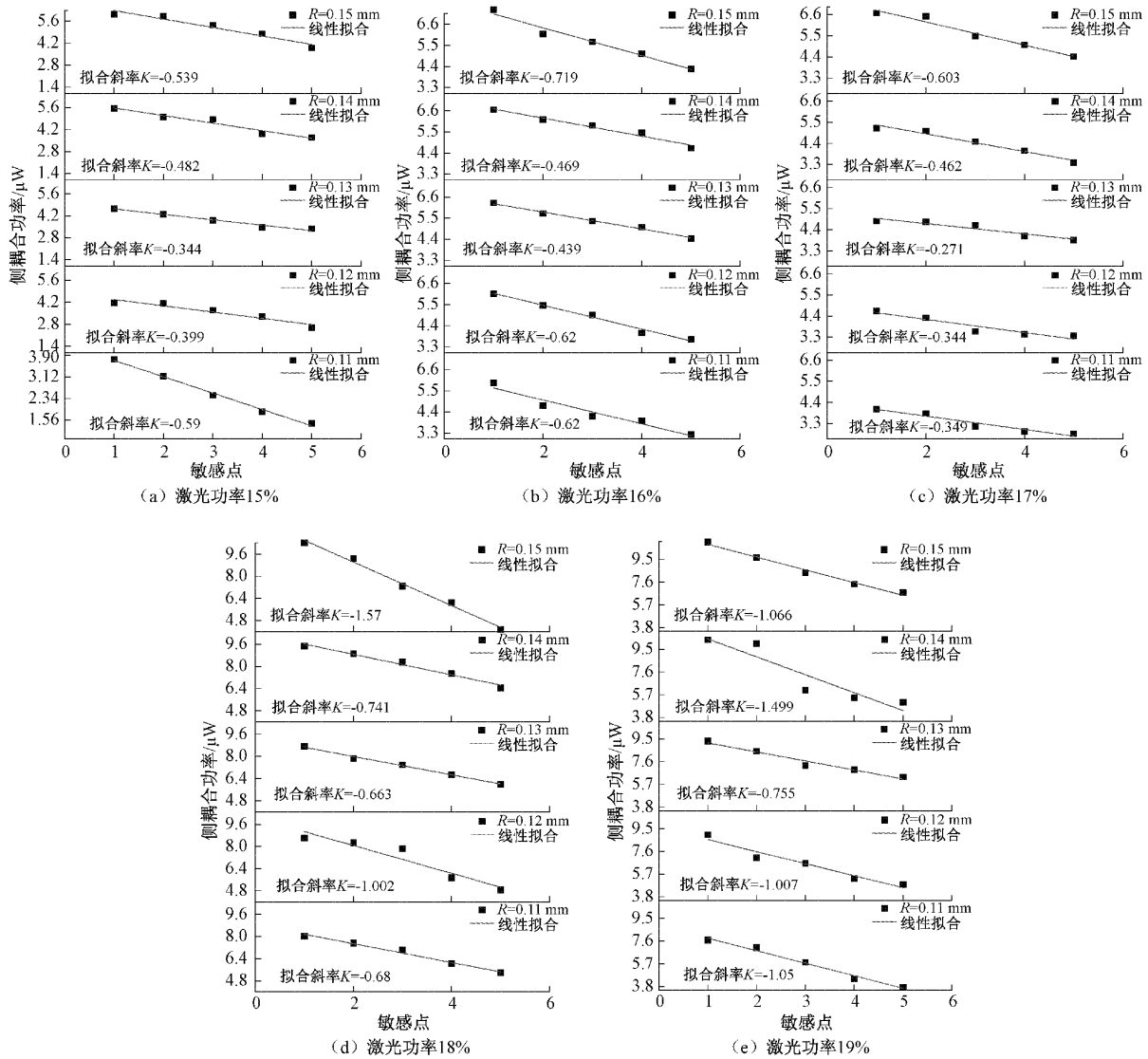


图 7 不同耦合结构的传输性能

实验结果得到的侧耦合效率与仿真结果基本吻合,但由于现实条件的限制,耦合结构的插入损耗相对仿真结果较大。

通过实验可以看出,每根光纤上的耦合结构损耗率几乎相同,证明该机器加工的结构一致性强。结构大小、半径为 0.13 mm 时光纤传输损耗相对较低,半径 0.15 mm 耦合效率虽然大,但损耗也最大,不能满足长距离测试。在结构加工过程中发现当激光功率在 18%~20% 时,光纤纤芯会出现裂缝,破坏光纤结构,使得损耗过大;当功率大于 20% 时,光纤直接断裂,不能满足实际需要。

综上,考虑单个液漏探头的性能和整个液漏传感的系统的测量范围,选择激光功率在 15%~17%、半径为 0.13 mm 的圆柱进行滴水检测。

### 3.3 检测能力测试

使用注射器依次向每个点添加一滴水(约为 0.5 mL),并记录输出功率的变化,每次实验都是在灯珠与耦合结构的水被完全清除后才进行下一次测量,重复测量多次并记录最低值进行比较。

将传感器在有水和无水情况下的输出功率差视为脉冲强度的一种表现形式,脉冲强度越大,缺陷耦合结构的实验效果越好。脉冲强度变化可表示为:

$$C = \frac{P'_s - P_s}{P_s} \times 100\% \quad (5)$$

其中,  $P_s$ 、 $P'_s$  分别为耦合介质为空气、水的输出功率。不同耦合结构下脉冲强度变化如表 3 所示。

表 3 不同耦合结构的脉冲强度变化

激光功率	15%	16%	17%
敏感点			
1	25.696%	34.041%	41.017%
2	27.847%	32.8%	39.739%
3	24.682%	34.312%	44.654%
4	27.746%	34.286%	32.341%
5	25.148%	33.496%	49.276%

从实验结果可以看出,耦合结构越深脉冲强度变化越大,但在激光功率为 17% 下加工的耦合结构每个结构脉冲强度变化相差较大,16% 下五个耦合结构脉冲强度变化在 32.8%~34.312%,结构一致性更高。

## 4 结 论

本文基于光纤多源扫描定位的准分布式漏水传感器检测原理,对不同的侧耦合结构进行了分析对比。通过 Zemax 仿真,对比分析光线在 3 种结构下的传输性能,初步确定采用圆柱体结构;再通过激光雕刻机对光纤进行加工、分析,最后通过实验确定出传输性能较高的结构参数,在激光功率为 17% 下加工的半径为 0.13 mm 的圆柱体结

构插入损耗为 0.31 dB,其脉冲强度变化可达 32.8% 以上。为侧耦合结构在光纤传感器上的应用提供了一定的理论基础与实验验证。

### 参考文献

- [1] 许少波,罗琪. 超声波流量计在输油管道泄露监测系统中的应用[J]. 电视技术,2019,43(10):68-70.
- [2] 张卫国. 基于负压波法的不同泄漏孔的管道泄漏检测研究[J]. 石化技术,2018,25(8):303.
- [3] LANG X, LI P, CAO J, et al. A small leak localization method for oil pipelines based on information fusion[J]. IEEE Sensors Journal, 2018, 18(15): 6115-6122.
- [4] 陈洪斌. 基于光纤传感器的天然气管道泄漏应力波检测技术研究[D]. 秦皇岛:燕山大学,2012.
- [5] 范彩玲,王高,师钰璋,等. 光纤束透过率测试技术研究[J]. 国外电子测量技, 2021, 40(2):56-59.
- [6] 沈平. 光纤传感[J]. 光学与光电技术,2021,19(2):1-4.
- [7] 向洋,孙世政,党晓圆,等. 基于光纤布拉格光栅的流量温度复合传感研究[J]. 电子测量与仪器学报,2021, 35(4):15-22.
- [8] 王雪,张宇,张芷源. 分布式光纤传感技术的特点与研究现状论述[J]. 科技创新与应用,2022,12(6):99-101.
- [9] 单一男,马智锦,曾旭,等. 基于分布式光纤传感技术的结构变形估计方法研究[J]. 仪器仪表学报,2021, 42(4):1-9.
- [10] 刘颖刚,车伏龙,傅海威,等. 光纤布拉格光栅折射率传感研究进展[J]. 光电技术应用,2015(1):1-7.
- [11] 黄妍,李培岩,吕国辉,等. 基于倾斜光纤布拉格光栅的乙醇汽油中乙醇含量检测[J]. 激光与光电子学进展,2022,59(1):111-117.
- [12] XU Y, LI J, ZHANG M J, et al. Pipeline leak detection using raman distributed fiber sensor with dynamic threshold identification method [J]. IEEE Sensors Journal, 2020, 20(14):7870-7877.
- [13] 王雪,张宇,张芷源. 分布式光纤传感技术的特点与研究现状论述[J]. 科技创新与应用,2022,12(6):99-101.
- [14] 胡彦君. 基于塑料光纤的 LPG 温度抑制和折射率传感器特性研究[D]. 太原:中北大学,2021.
- [15] ZHANG Y, HOU Y, ZHANG Y, et al. A cost-effective quasi-distributed liquid leakage sensor based on the polymer optical fiber and flexible lamp belt with LEDs[J]. Optics Express, 2018, 26(8):10152.
- [16] 张峰,崔永俊,侯钰龙. 基于 STM32 的光纤侧向耦合漏液监测系统设计[J]. 电子测量技术,2021, 44(10):156-161.

### 作者简介

李莹洁,硕士研究生,主要研究方向为光纤传感器。

E-mail:1079533372@qq.com

沈三民,副教授,硕士生导师,主要研究方向为智能探测与识别、电路与系统。

E-mail:shensanming@nuc.edu.cn