先进光纤传感技术专题

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2022012202

基于弱反射光栅阵列的覆土储罐泄漏监测方法

甘维兵[1]，涂世宇[2]，柳　苗[2]，姜　茹[2]，王　宇[2]，刘　念[2]，张　翠[1]*

（武汉理工大学 1. 光纤传感技术与网络国家工程研究中心；2. 信息工程学院，武汉 430070）

摘　要： 储罐在覆土情况下，可能会因土壤压力导致罐体变形从而产生泄漏，故采取可靠的罐体泄漏在线监测技术，在确保储罐生产安全中显得尤为重要。为解决目前储罐泄漏安全监测存在的定位精度低、响应速度慢、监测范围小等问题，文章采用弱反射型布拉格光栅阵列（FBG）双波长波分/时分混合复用组网技术实现对覆土储罐表面温度全时、全域在线监测。FBG阵列测温精度为±1 ℃，传感器空间分辨率为1 m，经过对覆土储罐两个月的数据监测和高压充水实验，分别验证了传感器在覆土情况下的长期稳定性和可靠性。结果表明，将FBG应用到储罐监测中，将有效提高储罐的生产安全性，具有较大的推广应用价值。

关键词： 覆土储罐；混合复用；光栅阵列；全时全域；泄漏监测

中图分类号： TN253　**文章编号：** 1001－5868(2022)04－0683－06

Leakage Monitoring Method of Earth-Covered Storage Tank Based on Weak Reflection Grating Array

GAN Weibing[1], TU Shiyu[2], LIU Miao[2], JIANG Ru[2], WANG Yu[2], LIU Nian[2], ZHANG Cui[1]

（1. National Engineering Research Center of Fiber Optic Sensing Technology and Networks;
2. College of Information Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, CHN）

Abstract: When the storage tank is covered with soil, the tank body may be deformed and leak due to soil pressure. Therefore, it is particularly important to adopt reliable online monitoring technology for tank leakage to ensure the safety of storage tank production. To solve the problems of low positioning accuracy, slow response time, and small monitoring range in the current storage tank leakage safety monitoring, this paper adopted a new generation of weak reflection fiber Bragg gratings (FBGs) dual-wavelength wavelength division/time division hybrid multiplexing networking technology to achieve full time and full area online monitoring of the surface temperature of earth-covered storage tanks. The temperature measurement accuracy of the FBGs array was ±1 ℃, and the spatial resolution of the sensor was 1 m. After two months of data monitoring and high-pressure water filling experiments on the earth-covered storage tanks, the long-term stability and reliability of the sensor in the earth-covered situation were verified. The results show that the application of FBGs to storage tank monitoring will effectively improve the production safety of storage tanks and has great value for promotion and application.

Key words: earth-covered storage tank; hybrid multiplexing; fiber grating array; full-time global; leak monitoring

收稿日期：2022－01－22.

基金项目：城市燃气管网泄漏爆炸风险防控与应急处理关键技术研究项目(2021BCA218).

* **通信作者：**张　翠　　**E-mail:** zc@whut.edu.cn

0 引言

目前，储罐大多处于地面之上，一旦发生泄漏，可能会引发多米诺效应[1-3]，造成严重后果。为降低传统储罐的安全风险，使用覆土储罐来替代传统地面储罐[4]。储罐覆土后降低了泄漏危害、避免蒸汽云爆炸和次生灾害，且储罐运行温度场恒定，具有更高的安全性和操作稳定性。然而，覆土后的储罐受土壤压力较大，导致罐体有可能发生变形而产生泄漏，从而带来安全隐患[5-6]。为此，需要采用较为先进的技术手段为覆土后的罐体结构健康进行监测。

储罐泄漏检测技术主要有液位计法、声波法、分布式光纤传感技术等。其中液位计法结构简单、成本低[7-8]，但测量精度较低且实时性较差；声波法可实现对储罐的泄漏监测[9]，但测量误差较大，无法准确定位泄漏位置；分布式光纤传感技术可以判断当前储罐的泄漏状态[10]，但定位精度有限，响应速度较慢。因而，对覆土后的储罐进行实时、准确和全面的监测成为亟需解决的问题。

针对以上技术存在的不足，本文采用大容量、高密度的弱反射光栅阵列(FBG)技术对覆土后的储罐外表面进行全时、全域温度监测。根据储罐发生泄漏时周围温度场发生急剧变化这一特征，采用光栅阵列温度传感光缆对泄漏点温度变化进行准确感知，从而满足测量精度高、响应速度快、覆盖面广的监测需求。

1 弱反射光栅阵列制备与传感原理

1.1 弱反射光栅阵列传感光纤制备

拉丝塔在线制备光栅阵列工作原理如图 1 所示。首先将原材料光纤预制棒送入高温熔炉中进行光纤制备，通过光纤测径仪对制出的光纤进行测量，并将数据上传到计算机软件系统；系统根据需要的光纤直径，调整熔炉温度或送料速度制作出所需的裸光纤；软件系统根据拉丝速度及长度控制 FBG 刻写平台的刻写速度；利用相位掩模板方法刻写低反射率的弱光栅，对刻写好的光栅再进行涂覆固化。为保证光纤的机械强度，通过系统控制拉丝塔对裸光纤进行涂覆固化；涂覆固化完成后，再对光纤进行张力及拉丝长度测量，系统根据测量结果调整光纤缠绕速度，最终完成光纤收盘。

1.2 弱反射光栅阵列技术传感原理

如图 2 所示，与普通光纤光栅不同的是，弱反射 FBG 的反射率非常小，可低至万分之一，且反射带宽非常窄，保证了光源发射的入射光在穿过光栅后有足够强的光能继续向前传播通过更多的光纤光栅，从而实现光纤光栅的大容量复用[11-13]。

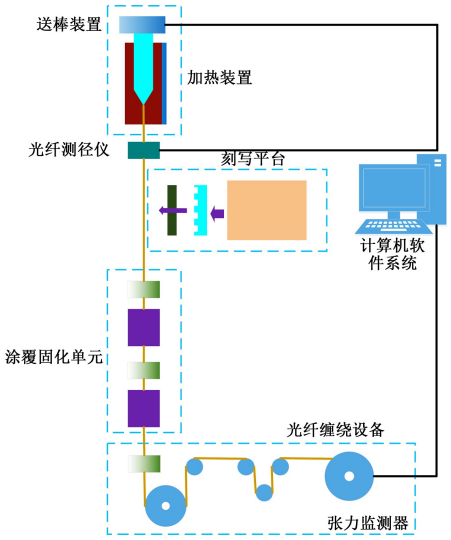


图 1 在线拉丝相位掩模板刻栅系统

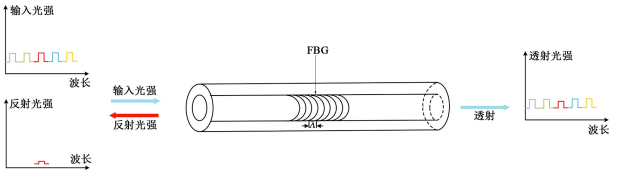


图 2 弱反射 FBG 传感原理

由光纤光栅模式耦合理论及相位匹配条件可推导出 FBG 的中心波长 λ_B 与光栅周期 Λ 和有效折射率 n_{eff} 的关系式[14]：

$$\lambda_B = n_{eff}\Lambda \tag{1}$$

反射光的中心波长 λ_B 跟光栅周期 Λ 和有效折射率 n_{eff} 有关，而光栅周期 Λ 和有效折射率 n_{eff} 又受外界温度和应变的影响，光纤布拉格光栅的中心波长漂移量 $\Delta\lambda_B$ 与温度变化量 ΔT 的关系满足下式：

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (\alpha + \zeta_f)\Delta T + (1 - P_e)\Delta\varepsilon \tag{2}$$

式中，α 是光纤热光系数，ζ_f 是光纤热膨胀系数，P_e 是光纤弹光系数。所以当外界被测参量如储罐泄漏导致温度发生变化时，就会导致光纤光栅中心波长发生偏移，即光纤光栅反射光的中心波长的变化可以准确反映外界被测参量的变化情况。

对于单模掺锗石英光纤而言，单位温度下光纤热光系数 $\alpha = 7 \times 10^{-6}$，光纤热膨胀系 $\zeta_f = 0.5 \times 10^{-6}$。所以在不考虑应力变化的情况下，理论上中

心波长为 1 553 nm 的光栅时，温度每升高 1 ℃，光纤光栅波长漂移量为 11.6 pm。

2　覆土罐泄漏监测系统与传感器组网设计

2.1　覆土罐泄漏监测系统组成

本系统主要由信息感知单元、解调单元和处理单元三部分组成。感知单元由敷设在储罐罐体表面的温度传感光缆组成，根据传感器数量，将其划分为 102 个测区；解调单元主要由光栅阵列解调仪完成对信号的解调；处理单元主要包括计算机和软件部分。基于光栅阵列传感技术的覆土罐泄漏监测系统架构如图 3 所示。

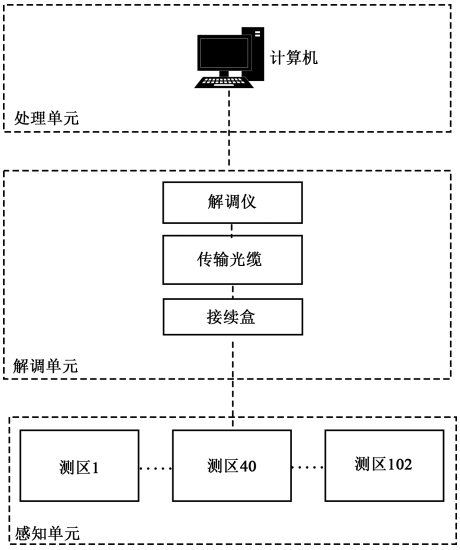


图 3　系统架构

当储罐发生泄漏时，罐体表面温度发生急剧变化，使得该泄漏点光纤光栅传感器中心波长发生偏移，光栅阵列解调仪对波长信号进行解调，并将解调完毕的信号传输至处理单元，经过软件计算后由计算机输出储罐泄漏信息，并进行预警提示及存储本次泄漏信息。

2.2　基于波分/时分混合复用的组网技术

大型储罐泄漏监测覆盖面较广，所需的传感光栅数量较多，需采用复用能力强的 FBG 技术。常用的光复用技术包括：波分复用技术、时分复用技术以及混合复用技术等。

波分复用技术（Wavelength Division Multiplexing，WDM）[15] 是在一条光纤链路上串联若干不同中心波长的光纤布拉格光栅。窄带入射光信号经光纤传输，不同位置的光栅反射回来的光信号波长不同，可通过波长信息来确定光栅位置，实现对光栅位置的定位。

时分复用技术（Time Division Multiplexing，TDM）[16] 采用串联结构，单根传感光纤上复用多个间距相同中心波长一致的弱反射光栅。脉冲光源经光纤传输，不同位置的弱光栅其反射光信号的传播时延不同，通过延时时间可解调出各个光栅的波长信息。

以上两种单一复用方式都存在各自的局限性，无法满足大规模的组网需求。波分复用受光源的带宽限制，单通道最多只能复用 30 只传感器，无法满足大规模组网需求。而时分复用光栅间距相对固定，空间分辨率低，要求光栅的中心波长一致，对于解调系统而言信道利用率低。

光信号经过光环形器入射到光栅阵列中，反射光携带不同光栅的波长信息。其中 FBG11～FBG21 的中心波长各不相同，其反射光中心波长为双波长（λ_1=1 551 nm 和 λ_2=1 553 nm），其间距为 1 m，相同波长 FBG 间距为 2 m。通过波分时分混合复用，可以实现大容量 FBG 复用，其复用能力为单个波段的光纤布拉格光栅数量 n 与不断波段个数 m 的乘积。基于波分/时分（WTDM）混合复用网络具有大容量、高分辨率、高信噪比等优点，弱反射光栅阵列的覆土储罐泄漏监测系统采用了波分/时分混合复用传感网络，解决光纤传感大规模组网的难题，其架构如图 4 所示。

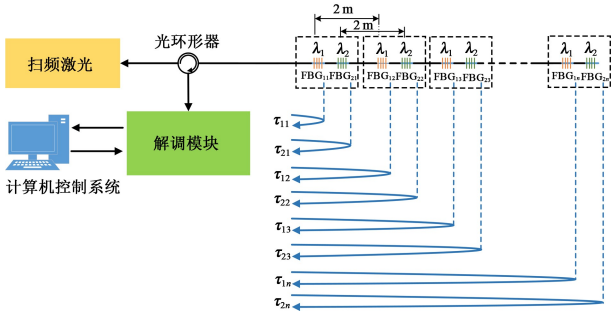


图 4　波分/时分混合复用的传感网络

3　实验数据分析

3.1　覆土情况下传感器性能分析

覆土储罐泄漏监测系统于 3 月中下旬顺利搭建完成，采用光栅间距为 1 m 的新一代弱反射光栅阵列（FBG，−40 dB）传感光缆对覆土储罐表面温度进行全时、全域在线监测。为验证环境温度对土壤内

部温度影响程度，随机选取 4 月 4 日当天 5 个传感测区数据进行分析，记为 Area1～Area5，探讨短时间内土壤内部温度变化情况，如图 5 所示。

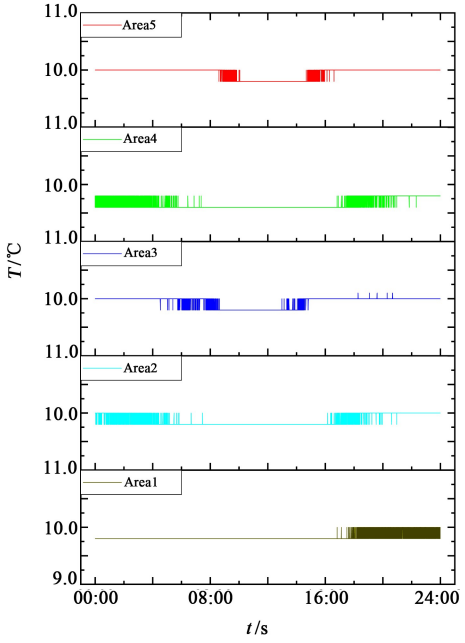


图 5 单日温度变化趋势

由图 5 可知，4 月 4 日 Area1～Area5 温度基本保持恒定，温度波动±0.1 ℃，处于传感器正常范围内，所以储罐覆土后内部温度场较为恒定，拥有更高的安全性和操作稳定性，适合采用弱反射光栅阵列温度传感器测量储罐表面温度变化状况。

为验证弱反射光栅阵列传感器在覆土后是否能够正常工作，对 Area1～Area5 在 2 个月内的数据进行分析，探讨光栅阵列传感光缆在覆土后的稳定性和可靠性，如图 6 所示。

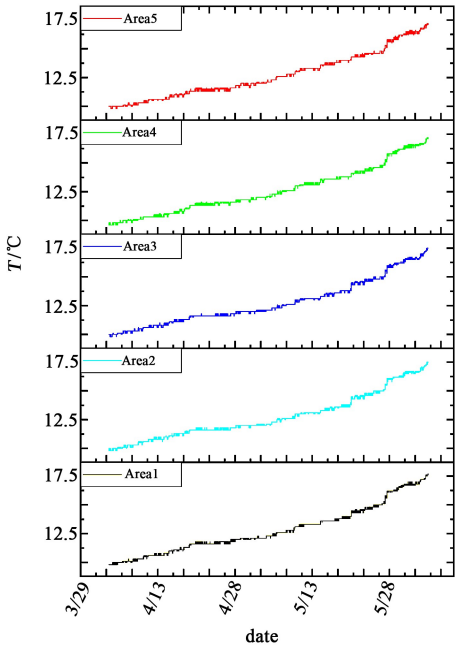


图 6 部分传感区域数据趋势

由图 6 可知，在 4 月 4 日，5 个传感测区中 Area4 温度最低为 9.6 ℃，Area5 温度最高为 10 ℃，两个测区温度相差 0.4 ℃；在 6 月 3 日 Area4 温度最低为 17.1 ℃，Area1 温度最高为 17.6 ℃，两个测区温度相差 0.5 ℃。实验结果表明：土壤内部温度较为恒定，测区之间温差相对较小；系统测温精度较高，可以达到 0.5 ℃；随着外部环境温度的缓慢上升，覆土后的光栅阵列传感器测试温度值也随着上升，各测区温度上升趋势十分一致。

3.2 弱反射光栅阵列温度响应实验

由于储罐目前运行良好，并未发生泄漏现象，为验证光栅阵列传感器测量储罐表面温度变化的准确性以及实时响应性，采用充水实验模拟泄漏工况带来储罐表面温度变化场景，即向储罐内注入大量温度高于土壤内部温度的工业用水(38 ℃)，检验覆土储罐外表面光栅阵列传感器感知温度变化的准确性及可靠性。

将充水实验分为三阶段：充水前、充半罐水、充满水。传感器按物理分布情况分为下半部分和上半部分。由于传感器数目较多，本文根据传感器分布情况在下、上部分各抽取 4 个传感测区分别记为 Area1～Area4，Area5～Area8。

把充水前记为初始状态，由于还未开始充水，此时 Area1～Area8 的温度基本一致；首次充水至一半水位时，受水温影响，下半部 Area1～Area4 温度急剧上升，上半部 Area5～Area8 受热传导影响缓慢上升，此过程结束后，静置一段时间，由于水位处于储罐的一半，故下半部分区域温度明显比上半部分温度高，此过程记录为半水位状态；第二次充水完毕后记录为满水位状态，此时由于储罐充满水，Area1～Area8 的温度基本一致。为验证 FBG 测量数据准确性，每种工况状态使用高精度电子温度计收集 1 min 罐内数据，最终取平均值计算后作为当前工况下高精度电子温度计测试值，初始状态测量罐内温度，半水位状态以及满水位状态时测量罐内水温。在不同工况下，各区域温度如表 1 所示。

初始状态时，使用高精度电子温度计测量罐内环境温度，测量值与 Area1～Area8 温度差在 1 ℃内。半水位与满水位状态时，使用高精度电子温度计测量罐内水温与对应水位测区温差在 1 ℃以内。

Area1～Area8 完整注水过程如图 7 所示。

表 1　不同工况下各区域温度

工况信息	下半部				上半部				高精度电子温度计
	Area1	Area2	Area3	Area4	Area5	Area6	Area7	Area8	
初始状态/℃	22.5	23.1	22.7	23.5	22.7	23	22.2	22.7	23.1
半水位/℃	29.8	30.1	30.1	30.7	24.2	24.6	23.7	23.7	30.4
满水位/℃	30.7	31.2	30.7	31.5	30.8	31.2	30.2	30.7	30.8

图 7 中初始状态各区域温度在 23 ℃附近，首次充水持续 4.5 h，其间 Area1～Area4 受水位变化影响温度急剧上升，温度趋势基本一致，受热传导影响，Area5～Area8 温度缓慢上升。静置 19.5 h 观察 Area1～Area8 温度变化，在此期间，Area1～Area4 因散热温度略有下降，Area5～Area8 受热传导影响温度继续上升。静置完毕后，继续充水 5 h 直至充满罐，此过程中原罐内水温因充水有所上升，因此 Area1～Area4 温度同时上升，Area5～Area8 受水位变化影响温度急剧上升。实验结果表明：FBG 实时性较好，当水位达到对应传感区域时，能快速监测到温度变化。各测区温度上升趋势一致，相同区域测区之间温差不到 1 ℃表明 FBG 准确性良好。

综合可得，FBGs 在土壤下工作性能依然保持良好，且储罐覆土后内部温度场恒定，适合 FBGs 测量储罐表面温度变化状况。在充水过程中，当水位达到对应测区时，FBGs 可以实时监测到温度变化，表明 FBGs 对温度变化十分敏感。相同部位传感区域在充水时温度变化趋势基本一致，并且在测量过程中，与高精密温度计差值在 1 ℃内，表明传感器具有良好的准确性。总体来说，此次试验验证了本系统对温度变化监测的可靠性及实时性，也证明本系统在覆土罐泄漏监测领域的可行性。

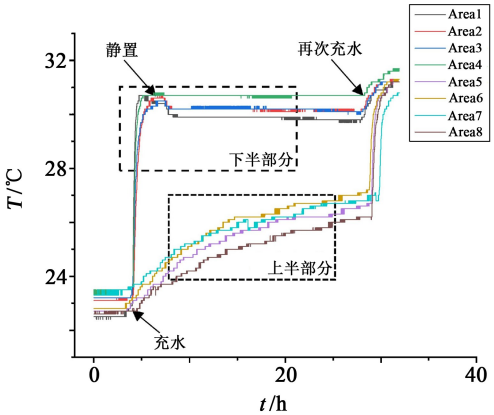


图 7　充水实验数据趋势图

4　结论

本文采用弱反射光栅阵列传感光缆作为温度感知单元，具有大容量、定位精度高、响应速度快、测量范围大等优点，很好地解决了当前覆土储罐泄漏全时、全域监测需求。通过对多个传感测区长达 2 个月的数据进行分析，证明弱反射光栅阵列温度传感光缆在覆土后仍可保持较好的稳定性。在充水实验中，弱反射光栅阵列传感光缆对温度变化十分敏感，尤其是在水位上升过程中，不同传感测区温度变化趋势十分一致，并与高精度电子温度计温差在 1 ℃内，验证了其准确性及可靠性。本次冲水实验表明该系统完全满足温度监测实时性以及准确性的要求，表明其在覆土罐泄漏监测领域的可行性。

参考文献：

[1] 韦善阳，王　川，胡庆革. 储罐泄漏爆炸影响范围研究[J]. 消防科学与技术，2015，34(1)：22-25.
Wei Shanyang，Wang Chuan，Hu Qingge. Research on the influence range of oil tank leakage and explosion[J]. Fire Science and Technology，2015，34(1)：22-25.

[2] 贾海海，何　毅，张玉玺，等. 大型储罐主动安全防护系统设计及应用[J]. 油气储运，2017，36(10)：1206-1211.
Jia Haihai，He Yi，Zhang Yuxi，et al. The design and application of active safety protection system for large oil tanks[J]. Oil and Gas Storage and Transportation，2017，36(10)：1206-1211.

[3] 伍　壮，侯　磊，伍星光，等. 安全防护对原储罐区多米诺火灾事故发生概率的影响[J]. 安全与环境工程，2020，27(1)：166-172.
Wu Zhuang，Hou Lei，Wu Xingguang，et al. Impact of safety protection on the probability of Domino fire accidents in crude oil tanks[J]. Safety and Environmental Engineering，2020，27(1)：166-172.

[4] 王世茂，杜　扬，高建丰，等. 半地下覆土立式储罐内部油气爆炸冲击荷载实验研究[J]. 振动与冲击，2017，36(22)：239-244.
Wang Shimao，Du Yang，Gao Jianfeng，et al. Experimental study on shock load of oil and gas explosion inside semi-underground vertical oil tank[J]. Vibration and Shock，2017，36(22)：239-244.

[5] 吴　鸣，吴剑锋，林　锦，等. 地下储罐泄漏区污染源的自动识别[J]. 环境科学学报，2013，33(12)：3251-3259.
Wu Ming，Wu Jianfeng，Lin Jin，et al. Automatic identification of pollution sources in leakage area of underground tanks[J]. J. of Environmental Science，2013，33(12)：3251-3259.

[6] 黄海亮，焦光伟，秦 琴，等. 覆土油库区域滑坡灾害危险性评价[J]. 油气储运，2017，36(10)：1133-1138.
Huang Hailiang，Jiao Guangwei，Qin Qin，et al. Risk assessment of landslide hazards in overburdened oil depots[J]. Oil and Gas Storage and Transportation，2017，36(10)：1133-1138.

[7] Zhang W，Dong M，Zhu L，et al. Research on dynamic method of liquid level detection based on the probe type capacitance sensor[J]. AASRI Procedia，2012，3：546-552.

[8] 史皓天，张洪朋，顾长智，等. 电感-电容双模式液压油污染物检测传感器[J]. 机械工程学报，2020，56(2)：20-26.
Shi Haotian，Zhang Hongpeng，Gu Changzhi，et al. Inductance-capacitor dual mode hydraulic oil pollutant detection sensor[J]. J. of Mechanical Engineering，2020，56(2)：20-26.

[9] Lukonge A B，Cao X. Leak detection system for long-distance onshore and offshore gas pipeline using acoustic emission technology：A review[J]. Trans. of the Indian Institute of Metals，2020，73：1715-1727.

[10] 张智娟，郭文翰，徐志钮，等. 基于Φ-OTDR的光纤传感技术原理及其应用现状[J]. 半导体光电，2019，40(1)：9-16.
Zhang Zhijuan，Guo Wenhan，Xu Zhiniu，et al. Principle and application status of optical fiber sensing technology based on Φ-OTDR[J]. Semiconductor Optoelectronics，2019，40(1)：9-16.

[11] Chai J，Du W，Yuan Q，et al. Analysis of test method for physical model test of mining based on optical fiber sensing technology detection[J]. Optical Fiber Technol.，2019，48：84-94.

[12] Gurpreet K，Patterh M S. Suppression of four wave mixing in wavelength division multiplexed system with hybrid modules[J]. Optik，2014，125(15)：3894-3896.

[13] 甘维兵，艾凌云，涂世宇，等. 基于弱光栅阵列应变传感的驼峰溜放监测方法研究[J]. 半导体光电，2020，41(4)：566-571.
Gan Weibing，Ai Lingyun，Tu Shiyu，et al. Research on hump rolling monitoring method based on weak grating array strain sensing[J]. Semiconductor Optoelectronics，2020，41(4)：566-571.

[14] 张冬伟，金 靖，朱云鸿，等. FBG形状传感器应变传递与传感性能研究[J]. 半导体光电，2020，41(6)：833-838，844.
Zhang Dongwei，Jin Jing，Zhu Yunhong，et al. Strain transfer and sensing performance of FBG shape sensor [J]. Semiconductor Optoelectronics，2020，41(6)：833-838，844.

[15] Gan W，Tu S，Tao Y，et al. Opto-mechatronics system for train-track micro deformation sensing[J]. Sensors，2022，22(1)：296.

[16] Yu Z H，Zhang Q，Wang H，et al. Tunable optical delay line for optical time-division multiplexer [J]. Optics Communications，2017，395：217-220.

作者简介：

甘维兵(1978—)，男，湖北省武汉市人，博士，副研究员，主要从事光纤传感技术及应用方面的研究工作。