

文章编号: 1672-8785(2024)04-0039-07

基于光纤传感技术的工程 监测应用研究

贾振安^{1,2,3,4} 李亚港^{1,2,3,4*} 姚 健^{1,2,3,4}

(1. 西安石油大学理学院, 陕西 西安 710065;

2. 陕西省油气资源光纤探测工程技术研究中心, 陕西 西安 710065;

3. 陕西省油气井测控技术重点实验室, 陕西 西安 710065;

4. CNPC 重点实验室——油藏光纤动态检测研究室, 陕西 西安 710065)

摘 要: 光纤传感技术作为当前热门技术之一, 在工程监测领域有着许多重要应用。通过探讨光纤传感技术在工程形变监测中的应用案例, 展示了其在工程监测领域的重要性。光纤传感技术利用光纤作为传感元件, 可以实现对形变的连续、实时监测, 并提供高精度的监测数据。通过布设应变光缆和温度补偿光缆, 在合璧津高速公路 K134 段高架桥上进行了监测实验。结果表明, 光纤传感技术能够准确评估结构的变形情况, 并通过温度补偿算法消除了温度变化对数据的影响。通过几何方法计算沉降位移, 可以实现对沉降位移的估算。

关键词: 光纤传感技术; 工程形变监测; 应变光缆; 温度补偿

中图分类号: TN253 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2024.04.006

Research on Engineering Monitoring Applications Based on Fiber Optic Sensing Technology

JIA Zhen-an^{1,2,3,4}, LI Ya-gang^{1,2,3,4*}, YAO Jian^{1,2,3,4}

(1. School of Science, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, China;

2. Shaanxi Engineering Research Center of Oil and Gas Resource Optical Fiber Detection, Xi'an 710065, China;

3. Shaanxi Key Laboratory of Measurement and Control Technology for Oil and Gas Wells, Xi'an 710065, China;

4. Key Laboratory of CNPC-Research Laboratory for Optical Fiber Dynamic Detection of Oil Reservoirs, Xi'an 710065, China)

Abstract: As one of the current hot technologies, optical fiber sensing technology has many important applications in the field of engineering monitoring. The application cases of optical fiber sensing technology in engineering deformation monitoring are discussed, and its importance in the field of engineering monitoring is demonstrated. Optical fiber sensing technology can realize continuous real-time monitoring of deformation and provide high-precision monitoring data by using optical fiber as the sensing element. The monitoring experiment is

收稿日期: 2023-11-02

基金项目: 陕西省教育厅重点实验室科研计划项目(18JS093); CNPC 测井重点实验室基金项目(20216328)

作者简介: 贾振安(1959-), 男, 陕西咸阳人, 教授, 主要从事纤维光学、光纤传感、光纤通信和光电子学等领域的教学与研究工作。

*通讯作者: E-mail: liyagang97@163.com

carried out on the K134 section viaduct of Hebijin Expressway by laying strain optical cable and temperature compensation optical cable. The results show that the optical fiber sensing technology can accurately evaluate the deformation of the structure and eliminate the influence of temperature change on the data through the temperature compensation algorithm. The settlement displacement can be estimated by geometric calculation.

Key words: fiber optic sensing technology; engineering deformation monitoring; strain optical cable; temperature compensation

0 引言

随着技术的不断发展和项目规模的日益庞大,确保工程的安全性、稳定性以及高效性成为各行各业关注的焦点。在工程监测领域中,传统的监测方法存在着一些局限性,如监测范围有限、监测精度不高、数据实时性等问题。为了克服这些困难,人们迫切需要一种全新的监测技术^[1]。

光纤传感技术作为一种非常有前景的技术,已经在工程监测领域得到了广泛应用。光纤传感技术利用光纤作为传感器,对环境中的影响因素进行敏感监测,并通过测量光信号的变化来获取相关数据^[2]。这种技术有着高精度、分布式监测、实时性和经济性等优势,成为工程监测领域的热点研究方向^[3]。相较于传统的工程监测,光纤传感技术具有较多优势,可以实现对较大范围内的形变进行连续、实时监测。通过将光纤布置在工程结构或地表下,可以实现对整个结构或监测区域的形变进行全面、细致的监测^[4]。这使得工程人员能够及时了解和评估工程结构或地质体的变形情况,以便及时采取措施进行修复或管理。

光纤传感技术具有高灵敏度和高分辨率的特点^[5],因此对形变的微小变化具有很高的敏感度,能够检测到极小的形变。光纤传感技术还可以实现毫米级甚至亚毫米级的形变分辨率,可以提供更准确、细致的形变监测数据。光纤传感技术同时还具有分布式传感能力和多参数监测的特点^[6]。通过在光纤中引入不同类型的传感器元素,可以实现对多个参数(如温度、应变、位移等^[7-8])的同时监测。这为工程形变监测提供了更多的信息,并能够全面评估

多个因素对工程结构或地质体的影响^[9]。本文以光纤传感技术为基础,探索将分布式光纤传感技术应用于工程形变监测的可行性和有效性。希望本文的探讨和实证研究能够为工程形变监测实践提供有益的参考和指导,为工程项目的安全和效率提供更好的保障。

1 原理

光纤传感技术的工作原理基于光的传播和全反射现象。光纤由一个较高折射率的纤芯和一个较低折射率的包层组成^[10]。当光从折射率高的纤芯进入折射率低的包层时,光在界面上的入射角大于临界角,发生全反射,并沿着光纤传播^[11]。这种传输方式使光能够在光纤中延长传播距离,并减少信号损耗,保持信号的稳定性和强度^[12-14]。光纤传感技术利用光纤作为传感元件和传输元件,其横截面结构如图1所示:光纤由纤芯和包层组成,纤芯的折射率(n_1)大于包层的折射率(n_2)^[15]。这种结构使光信号能够在光纤中通过全反射的方式进行传输。

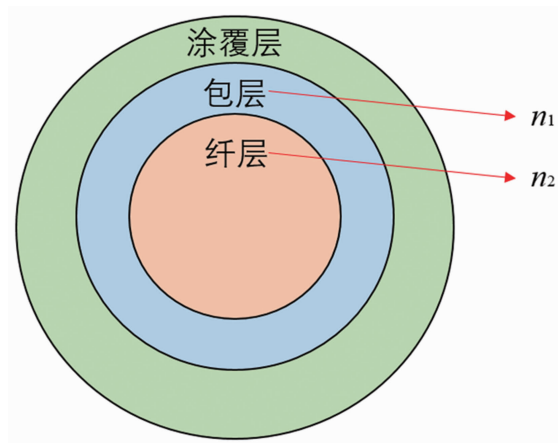


图1 光纤结构示意图

在光纤传感技术中, 通过适当设计和调控光纤的结构与材料, 可以实现对光信号的调制和感知环境参数的变化。例如, 在光纤中引入传感器元件(如微弯、光栅、涂层等)后, 当环境参数发生变化时, 会引起光信号的幅度、相位或频率的变化。这样, 光纤传感技术就可以通过对光信号的测量和分析来获取环境参数的信息。

环境参数的变化会改变光纤的传输特性, 进而对传感器信号产生影响。例如, 温度的变化会导致光纤长度的微小变化, 从而改变光的传输路径和速度。同样, 应变或压力的变化也会引起光纤结构的微弯或形变, 进一步影响光的传输。为了将这些环境参数的变化引入光纤中, 通常在光纤传感器的光纤中引入一些特殊的传感器元件: 可以是光纤的微弯、光纤的切割或缺陷, 或者在光纤上涂敷特殊材料。

为了获取环境参数的信息, 对光信号的测量和分析是至关重要的。在测量过程中, 通常使用适当的光学器件和探测器对光信号进行接收和转换。常见的测量方法包括光强度测量、时域反射/传输测量和频域分析等。通过分析测量得到的光信号, 可以提取、解析和解释与环境参数变化相关的信息。此外, 将光纤布置在需要监测的位置, 可以对大范围的环境参数进行连续、实时的监测。光纤传感技术对环境参数变化的敏感度很高, 可以检测到微小的变化, 并提供高分辨率的监测数据。此外, 光纤传感技术的分布式传感能力和多参数监测的特点使其在许多应用领域具有广泛的适用性。其工作流程如图 2 所示。

总体而言, 光纤传感技术是一种基于光的测量原理, 利用光纤作为传感元件来实现对环境参数的监测。通过光信号的传输和变化, 光纤传感技术能够实现高精度、分布式和实时的监测。在特定的应用场景中, 结合特定的传感器元件和测量方法, 光纤传感技术可以实现对不同环境参数的高效监测。

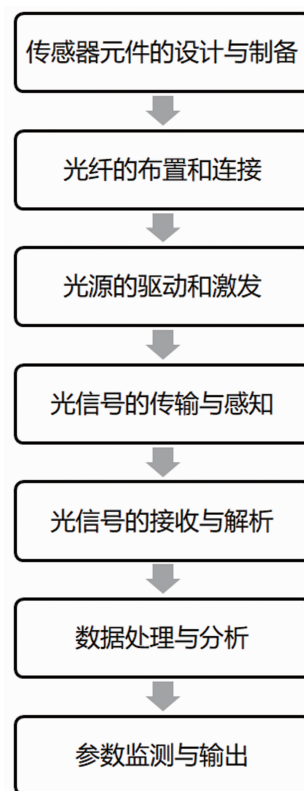


图 2 光纤传感技术的工作流程

2 工程监测案例

2.1 监测方案

以合璧津高速公路 K134 段高架桥为本次光纤传感技术工程监测应用的实例, 在高速路高架桥与路基交界的部分, 根据指定的俯视角度, 在路基上布设监测光缆来进行路基沉降形变监测实验。设计的监测区域如下: 桥墩位置分别位于横向 20 m 和 16 m 处, 整个监测区域距离桥墩位置大约 1 m。在布设路径上, 红色表示应变光缆的铺设路径, 用于测量不同位置路基产生的沉降; 蓝色表示温度补偿光缆的铺设路径, 用于补偿温度变化引起的测量误差。

在本次光纤传感技术工程监测应用中, 为了实现对高速路高架桥与路基交界部分的沉降形变的连续监测, 我们在路基上布设了应变光缆和温度补偿光缆(见图 3)。其中, 应变光缆的铺设路径用红色标出, 主要用于测量不同位置路基产生的沉降; 温度补偿光缆的铺设路径用蓝色标出, 主要用于补偿温度变化引起的测量误差。监测区域距离桥墩位置大约 1 m, 桥

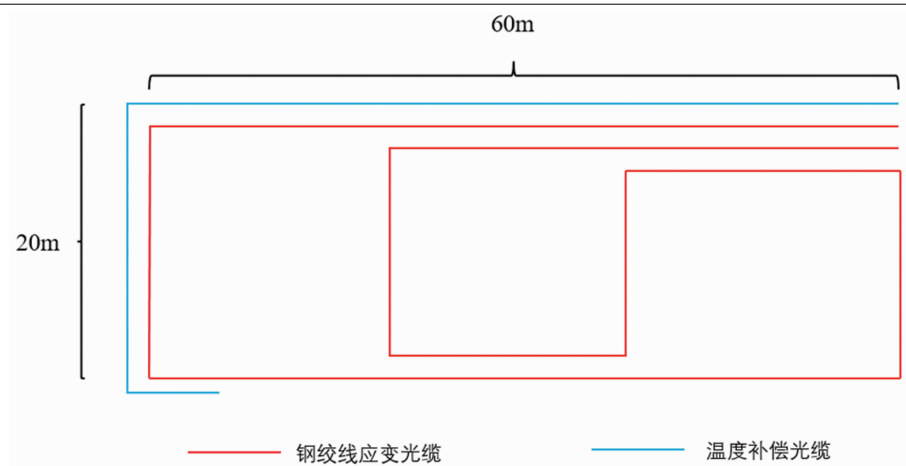


图 3 光缆布置图

墩位置分别位于横向 20 m 和 16 m 处。为了确保监测数据的准确性,我们根据指定的俯视角度进行了铺设路径的设计,以确保监测光缆与路基的接触面积最大化。通过对监测数据的分析,我们可以准确评估结构的变形情况,并及时采取必要的措施,保障高速公路的安全和效率。

这样设计的监测区域可以有效地监测高速公路高架桥与路基交界部分的沉降变形情况。应变光缆的铺设路径将提供不同位置路基沉降的数据,而温度补偿光缆的铺设路径则可以帮助消除温度变化对测量数据的影响。在施工前对线路进行勘测,确定相关的线路标记和光缆铺设路径。接下来使用工具和机械设备在确定的铺设路径上挖掘沟槽,确保足够的深度和宽度:深度约为 40 cm,宽度约为 30 cm。将准备好的光缆沿着设计好的路径进行铺设,注意避开尖锐石子和其他可能损坏光缆的障碍物。使用适当的夹具和固定材料将光缆固定到沟槽底部,并确保光缆的正确位置,起到固定和保护的作用。

2.2 监测结果

总共设置 3 次监测,每次监测跨度为 2 个月,其监测结果的微应变如图 4 所示,温度测量结果如图 5 所示,补偿后的监测结果如图 6 所示。

由图 4 可以看出,第三次监测微应变波动范围最大,第二次监测波动范围次之,第一次

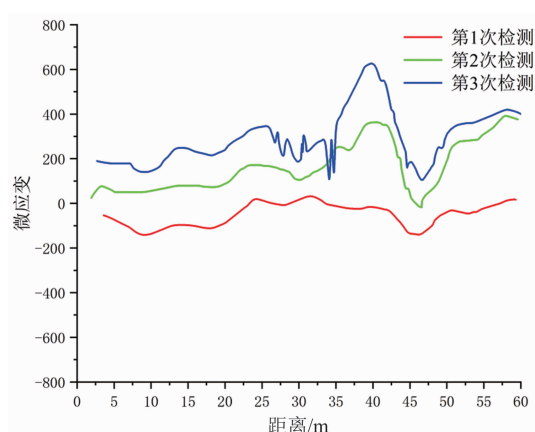


图 4 测得的应变结果

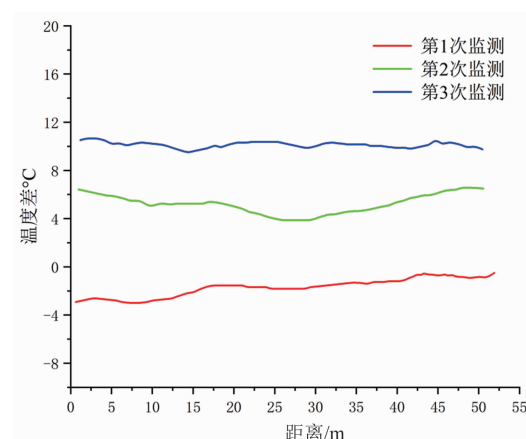


图 5 温度测量结果

监测波动范围最小。随着时间的增加,总体规律为监测下的波动越来越小。由图 5 可以看出,在测量温度时,第三次的温度最高,第二次次之,第一次最低。随着测量次数的增加,温度越来越高;随着距离的增加,温度总体上变化幅度不大。

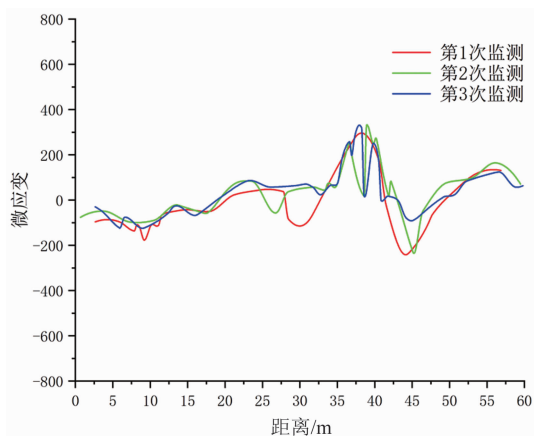


图 6 温度补偿后测得的应变结果

经过温度补偿后, 应变结果的波动会得到修正, 显示的结果会更加准确和稳定。温度变化会导致材料膨胀或收缩, 进而引起应变信号的变化。这可能干扰对结构变形的准确监测。采用温度补偿算法可以消除温度变化对应变结果的影响, 从而得到更精确的结构变形数据。这种补偿过程通常通过在监测系统中安装温度传感器来实时获取环境温度, 并将其应用于应变数据的计算中。修正后的应变结果将显示出结构自身的沉降、挠度或应变情况, 比只考虑温度变化的原始应变结果更能反映结构本身的状态。这有助于对结构安全性进行准确评估, 并及时采取必要的措施。从图 6 可以看出, 经过温度补偿后的微应变趋势变化总体上一致。

2.3 沉降估算

为了实现定量的沉降位移监测, 我们基于监测到的应变曲线, 采用几何方法估算出沉降位移。通过监测应变曲线来估算沉降位移是一种常见的方法。一般的步骤如下: (1) 采集数据。使用应变传感器或其他合适的监测设备进行沉降位移的应变数据采集。这些传感器通常与构造物相关部分或周围的测点一起安装。(2) 确定应变-位移关系。在监测过程中, 需要建立应变-位移关系模型。该模型将已知的应变数据与已知的沉降位移数据进行对比和校准。这个关系模型可以通过实验室测试或者先前的研究得到。(3) 建立应变曲线。将采集的应变数据绘制成曲线, 一般以时间为横坐标,

以应变值为纵坐标。该曲线通常展示了随时间变化的趋势。(4) 用几何方法计算位移。根据已建立的应变-位移关系模型和应变曲线的数据, 可以利用几何方法来估算沉降位移。选择适当的算法将应变曲线转换为相应的位移曲线。

采用几何方法计算位移是一种常见的方法, 可通过应变曲线的几何特征估算出沉降位移。具体步骤如下: (1) 数据采集和处理。首先, 选择合适的应变传感器并进行布置, 以获取与沉降位移相关的应变数据。确保传感器的准确性和灵敏度, 并根据具体需求以一定频率进行数据采集。接着对采集到的应变数据进行预处理, 如去除噪声和偏移。(2) 绘制应变曲线。以时间为横轴, 以应变值为纵轴, 将预处理过的应变数据绘制成应变曲线。确保曲线的平滑性, 并仔细检查数据的准确性和连续性。(3) 确定参考点位置。选择应变曲线中的一个参考点 (如曲线起点或某个特定时间点) 作为基准位置。将该点的位移设为 0, 并将其对应的应变值标记为 0 应变。(4) 划定测量区域。根据监测对象的特性, 确定一个测量区域, 即应变曲线的一段特定区域。该区域应包含明显的位移特征, 并且在该区域内的应变变化与位移变化呈线性关系。(5) 确定区域斜率。在所选的测量区域内选择两个点, 并计算它们之间的斜率。通常情况下, 可以选择两个最接近的点或者通过拟合直线来获得更准确的斜率。(6) 位移计算。根据所选的参考点和确定的斜率, 可以通过几何方法来计算位移。对于每个测量区域内的点, 将其应变值与参考点的应变值相减, 再将差值除以斜率, 即可得到该点的位移。(7) 结果解读与验证。对估算出的位移结果进行解读和验证。

本文采用简化的几何模型确定光缆长度变化。如图 7 所示, 光缆原本的长度为 l , 经路基沉降后变为 $l + \Delta l$ 。其中, Δl 表示光缆的长度变化量。根据光缆的长度变化, 可以计算出相应的应变大小。应变是指单位长度的变化

量,通常用 ϵ 表示。因此,根据定义,应变 ϵ 可以计算为 Δl 除以 l ,即 $\epsilon = \Delta l / l$ 。应变与沉降位移关系如下:根据已知的应变与沉降位移的关系模型,可以由应变计算出沉降位移。这个关系模型可能是基于实验数据或以往的研究得出的,通常是通过对比应变测量和相应沉降位移数据得到的。根据应变与沉降位移关系模型,将计算得到的应变值代入 $\epsilon = \Delta l / l$,从而求解沉降位移 d 。

根据图 7 中的模型得到图 8 所示的土体应变结果。可以看出,沉降估计的结果分别为 65 mm、68 mm、63 mm。对沉降估算结果进行分析后发现,在监测区域内沉降位移的大小存在一定的差异。其中,沉降位移最大为 68 mm,其位置为距离桥墩 16 m 处;沉降位移最小为 63 mm,其位置为距离桥墩 20 m 处。这表明在该监测区域内,路基沉降的情况存在一定的空间差异,不同位置的沉降情况也不尽相同。通过对沉降位移的监测和分析可以及时发现和解决潜在的结构安全问题,保障高速公路

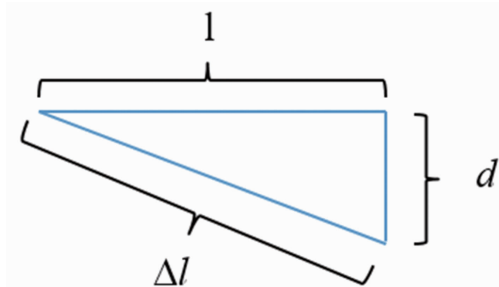


图 7 几何模型

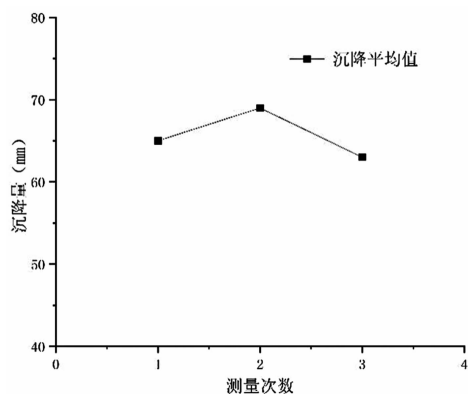


图 8 沉降估算结果

的正常运行和使用。同时,这也为类似的工程形变监测提供了有益的参考和指导,为工程项目的安全和效率提供了更好的保障。

3 结束语

本文以合璧津高速公路 K134 段高架桥为监测案例进行研究。通过布设应变光缆和温度补偿光缆,实现了对高架桥与路基交界部分的沉降形变的连续监测。通过分析监测结果,可以准确评估结构的变形情况,并及时采取必要的措施。考虑到温度变化会对应变结果产生一定影响,我们采用温度补偿算法进行修正。经温度补偿后,应变结果能够更准确地反映结构本身的状态,从而对结构安全性进行准确评估。通过几何方法并利用应变曲线的几何特征,可以估算出沉降位移。这种方法通过应变曲线的斜率和参考点的位移计算得到沉降位移,从而实现对沉降位移的估算。

本文的探讨和实证研究为工程形变监测提供了有益的参考和指导,也为工程项目的安全和效率提供了更好的保障。随着光纤传感技术的不断发展和应用,相信它将在工程监测领域发挥越来越重要的作用,为社会发展做出更大的贡献。未来的研究方向包括进一步提高光纤传感技术的精度和灵敏度、开发更多的光纤传感器类型以及如何更好地将光纤传感技术应用于不同类型的工程监测领域。此外,可以探索如何将光纤传感技术与其他监测技术相结合,从而实现更全面、准确的监测。

参考文献

- [1] 赖健聪. 光纤传感技术在道路结构荷载监测中的应用 [J]. 广东土木与建筑, 2023, 30(5): 116-118.
- [2] 夏中杰. 基于光纤传感技术的高速公路路基沉降变形监测方法研究 [J]. 交通世界, 2023, 30(12): 44-46.
- [3] 周晏, 李兵祖. 基于光纤传感技术的隧道结构安全监测系统研究 [J]. 铁道勘察, 2023, 49(2): 118-123.

- [4] 潘学忠. 分布式光纤传感技术在岩溶地区桩基检测中的应用 [J]. *安徽建筑*, 2023, **30**(2): 165–166.
- [5] 隋微波, 温长云, 孙文常, 等. 水力压裂分布式光纤传感联合监测技术研究进展 [J]. *天然气工业*, 2023, **43**(2): 87–103.
- [6] 施豪. 基于分布式光纤传感技术的深基坑坑底回弹监测应用研究 [J]. *北京测绘*, 2022, **36**(12): 1624–1627.
- [7] 燕东源, 李长作, 郝海龙, 等. 基于分布式光纤传感技术的边坡岩土体变形智能监测 [J]. *自动化与仪器仪表*, 2022, **39**(12): 176–180.
- [8] 张亚妹, 孙淦, 白晓宇, 等. 基于光纤传感技术的泥岩地基动力打入桩施工效应现场试验 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2023, **42**(S1): 3731–3742.
- [9] Su H, Kang Y. Design of system for monitoring seepage of levee engineering based on distributed optical fiber sensing technology [J]. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 2013, **9**(12): 358784.
- [10] Wu C, Feng Z, Yang H, et al. Evolution mechanism of rock slope slide based on fiber optic sensors [J]. *Journal of Nanoelectronics and Optoelectronics*, 2017, **12**(9): 913–919.
- [11] Wu P, Tan D, Lin S, et al. Development of a monitoring and warning system based on optical fiber sensing technology for masonry retaining walls and trees [J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2022, **14**(4): 1064–1076.
- [12] Jun L C, Long Y C, Hong H G, et al. Multi-gas leakage synchronous monitoring system based on the distributed optical fiber sensing technology [J]. *Journal of Computational Methods in Sciences and Engineering*, 2022, **22**(2): 615–621.
- [13] Chen W, Wang J, Wan F, et al. Review of optical fiber sensors for electrical equipment characteristic state parameters detection [J]. *High Voltage*, 2019, **4**(4): 271–281.
- [14] Wei X, Zhu J. Capturing the instantaneous flow structure in gas-solid circulating fluidized bed using high-speed imaging and fiber optic sensing [J]. *Chemical Engineering Science*, 2019, **207**: 713–724.
- [15] Murray A, Graham D, Minto C. Application of distributed fiber-optic sensing for pipeline integrity and security [J]. *Pipeline & Gas Journal*, 2021, **248**(3): 52–54.