

文章编号: 1672-8785(2022)09-0041-12

基于布里渊光频域分析技术的 桥梁监测试验研究

杜传伟¹ 胡 涛^{1*} 袁 明² 韩 强² 李业宏¹ 王嘉钰¹

(1. 齐鲁理工学院土木工程学院, 山东 济南 250200;

2. 中电科思仪科技股份有限责任公司, 山东 青岛 266555)

摘 要: 布里渊光频域分析(Brillouin Optical Frequency Domain Analysis, BOFDA)技术是分布式光纤传感技术的一种。回顾了BOFDA的发展历史, 介绍了BOFDA的最新应用进展情况, 并提出了基于BOFDA测量桥梁挠度的新方法。通过光纤布设研究提出在桥梁底面采用全面粘贴的方式布设光纤, 并分析了光纤应变表征桥梁挠度的理论, 最后进行了基于BOFDA的室内桥梁模型测量试验研究。试验结果表明, 百分表实测桥梁模型的挠度与桥梁模型上分级集中荷载及模型下表面的光纤应变变化均成正比例关系; BOFDA光纤应变可以标定桥梁模型变形范围, 且光纤应变表征的桥梁模型挠度和百分表实测挠度值基本一致。因此, 采用BOFDA技术进行桥梁挠度测量是可行的。

关键词: 布里渊光频域分析; 桥梁挠度; 变形监测; 模型试验

中图分类号: TU99; TU196+.1 **文献标志码:** A

DOI: 10.3969/j.issn.1672-8785.2022.09.007

Research on Bridge Monitoring Experiment Based on Brillouin Optical Frequency Domain Analysis Technology

DU Chuan-wei¹, HU Tao^{1*}, YUAN Ming², HAN Qiang², LI Ye-hong¹, WANG Jia-yu¹

(1. School of Civil Engineering, Qilu Institute of Technology, Jinan 250200, China;

2. Ceyear Technologies Co., Ltd., Qingdao 266555, China)

Abstract: Brillouin optical frequency domain analysis (BOFDA) is a kind of distributed fiber sensing technology. In this paper, the development history of BOFDA is reviewed, and the latest application progress of BOFDA is introduced. A new method of measuring bridge deflection based on BOFDA is proposed as well. Firstly, through the study of optical fiber layout, it is proposed that the optical fiber is laid on the bottom of the bridge

收稿日期: 2022-06-17

基金项目: 国家自然科学基金项目(52108371); 山东省高校大学生创新训练基金项目(S202113998090); 教育部产学研合作协同育人项目(202102351007)

作者简介: 杜传伟(1988-), 女, 山东济南人, 讲师, 硕士, 主要从事光纤传感技术和绿色建材等方面的研究。

***通讯作者:** E-mail: Cumtb.hutao@gmail.com

in a comprehensive pasting way. Then the theory of optical fiber strain characterizing the bridge deflection is analyzed. Finally, the experimental study of indoor bridge model measurement based on BOFDA is carried out. The experimental results show that the deflection of the bridge model measured by the dial indicator is in direct proportion to the graded concentrated load on the bridge model and the fiber strain on the lower surface of the model. The deformation range of the bridge model can be calibrated by BOFDA fiber strain, and the deflection of the bridge model characterized by fiber strain is basically consistent with the deflection measured by the dial indicator. Therefore, it is feasible to use BOFDA technology for bridge deflection measurement.

Key words: Brillouin optical frequency domain analysis; bridge deflection; deformation measurement; model test

0 引言

自 2009 年高锟由于光纤传输方面的成就获得诺贝尔奖以来, 光纤一直被视为过去几十年的顶级发明之一^[1]。它不仅彻底改变了电信系统, 而且给传感和计量技术带来革命性的影响, 并开创了光纤传感技术等新的应用领域。光纤由玻璃纤维组成, 不需要外部电源, 因此具有抗雷电、抗电磁干扰、防爆、耐腐蚀、免维护、重量轻和耐久性长等许多优异的特性。由于能任意方便布设成神经网络系统, 它可用于长距离和大范围的分布式测量^[2], 由此成为出色的传感器。其中, 分布式光纤传感(Distributed Fiber Optic Sensing, DFOS)技术中的光纤本身不仅是光信号的传播媒介, 而且也是传感器, 不再需要其他任何的附属传感器。DFOS 可以通过光散射效应感知光纤上任何一点的温度、应变和振动信息等^[4]。因此, 随着

20 世纪 80 年代光时域反射(Optical Time Domain Reflector, OTDR)技术的出现, DFOS 发展迅速, 目前已经广泛应用于电力、石油钻探、采矿、建筑、消防安全和地质灾害监测等各行各业^[3]。

根据激光在光纤中传播时产生的光散射效应, DFOS 可分为拉曼、瑞利和布里渊三种分布式光纤传感技术(见图 1)。

激光在光纤中传播时, 激光中的电磁波与光纤粒子(原子和分子)发生相互作用。这种相互作用会产生一个依赖于时间的偏振偶极子, 它可以产生称为光散射的二次电磁波^[1]。由于光纤并非均匀介质, 因此会产生一些后向散射信号, 分为瑞利散射、拉曼散射和布里渊散射。其中, 瑞利散射是一个弹性散射过程。散射光的波长与入射光的波长相同。检测到的信号通常是随时间变化的功率强度或后向散射光

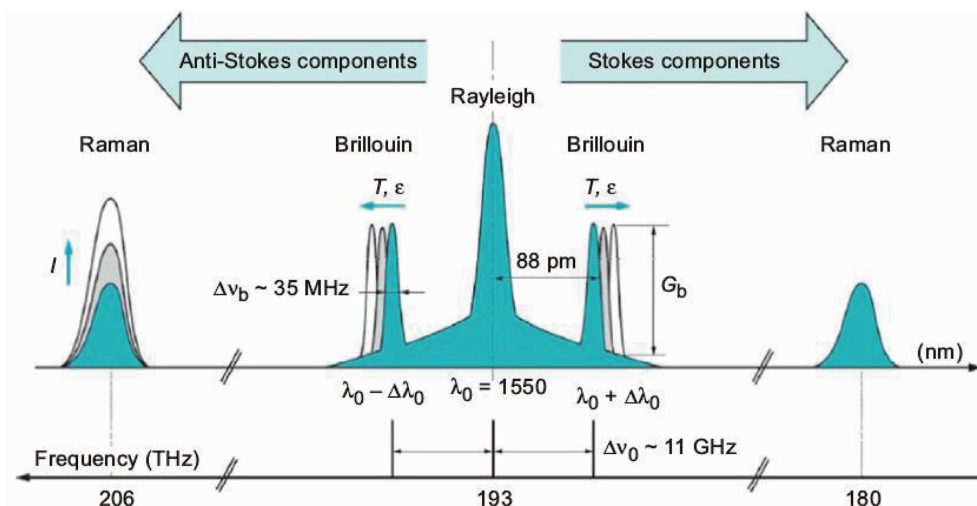


图 1 二氧化硅(SiO_2)光纤中注入 1550 nm 激光时的散射现象光谱^[5]

的偏振状态,可用于确定沿光纤的断裂和不均匀性。拉曼散射是一种非弹性散射过程。由于电能和声能被交换,出现频率小于入射光源的斯托克斯光和频率大于入射光源的反斯托克斯光。其中,反斯托克斯光的强度随温度的升高而显著增大。拉曼散射主要用于温度监测。布里渊散射是光纤中传播的光脉冲与光纤中的声波相互作用的结果。由于原子在光纤中以声速振动,散射光会发生多普勒频移,产生与温度及应变有关的布里渊频移(Brillouin Frequency Shift, BFS)。因此,布里渊散射通过监测 BFS 来实现光纤中应变/温度变化的传感测量^[6]。由于布里渊散射可以用来同时监测应变和温度,其监测技术日益成为各国研发的重点。

虽然 BOFDA 技术起步晚于布里渊光时域反射(Brillouin Optical Time Domain Reflector, BOTDR)技术和布里渊光时域分析(Brillouin Optical Time Domain Analysis, BOTDA)技术,但它由于具有信噪比高、成本低、测试精度高、空间分辨率高和动态范围大等优点而备受关注。本文主要探讨 BOFDA 传感技术及其应用进展,并尝试将其应用于桥梁挠度变形监测。

1 BOFDA 技术

1.1 BOFDA 技术的进展

利用布里渊光频域技术进行光纤无损检测最早是由 Ghafoori-Shiraz H 等^[7]在 1985 年提出的设想。1996 年, Garus D 等^[8]首次提出 BOFDA 技术的基本原理,研究了正弦调制光经过单模光纤时泵浦光和探测光强度变化的行为,并通过数值模拟证明了 BOFDA 用于分布式温度和应变测量的可行性。1997 年, Garus D 等^[9]在 1 km 长的单模光纤实验演示中实现了 3 m 的 BOFDA 空间分辨率。2005 年, Yari T 等^[10]采用 BOFDA 技术对飞机结构健康监测进行了研究,证实了在 50 mm 截面上测量受激布里渊散射光的能力。2011 年, Bernini R 等^[11]利用信号处理技术实现了 3 cm 高空间分辨率和 30 MHz 光谱分辨率的 BOFDA 布里渊

传感。2013 年, Minardo A 等^[12]对孔径为 50 μm 的聚合物光纤进行了分布式温度测量,表明聚合物光纤的 BOFDA 分布式温度测量是可行的。2013 年, Wosniok A 等^[13]采用线性 BOFDA 在二氧化硅单模光纤中进行了分布式应变测量,并讨论了信噪比下降以及开发基于 POF 分布式布里渊传感器的优势。2018 年, Zeni L 等^[14]采用高通滤波器补偿了影响 BOFDA 测量的畸变项,成功进行了 8 mm 空间分辨率下的实验测试研究。2018 年, Kapa T 等^[15]实现了 63 km 长度 BOFDA 的温度和应变监测。2019 年, Kapa T 等^[16]通过分布式拉曼放大和数字高通滤波器,成功在 99.5 km 光纤长度处实现了 30℃ 温度变化的检测。2021 年, Karapanagiotis C 等^[24]基于卷积神经网络的信号后处理方法将 BOFDA 温度测试时间缩短了 9 倍以上,极大提高了 BOFDA 的测试效率。由此可见, BOFDA 在监测精度、测量距离和测试时间等方面得到了快速发展。

1.2 BOFDA 技术的最新应用进展

近年来,随着 BOFDA 技术层面的进步,其应用范围也日益广泛。2018 年, Zhang Q 等^[17]利用 BOFDA 和 FBG 技术进行了钢筋混凝土结构中的内部和表面裂缝及其发展的检测。2018 年, 缪长健等^[18]对海上超长 PHC 管桩的内力进行了 BOFDA 试验研究。2019 年, 卢毅等^[19]采用 BOFDA 对砂-黏土互层垂向变形进行了物理模型试验研究。2020 年, 冯维一等^[25]采用 BOFDA 对聚乙烯管道进行了微弯检测试验研究。2021 年, Nöther N 等人^[23]采用 BOFDA 进行了桩基和混凝土梁的现场试验测试研究,说明了光纤监测巨大的成本优势和经济性。2022 年, Karapanagiotis C 等^[20]采用 BOFDA 进行了二氧化硅聚酰亚胺涂层光纤中的分布式相对湿度传感的试验研究。2022 年, Catalano E 等^[21]基于高分辨率 BOFDA 和主动加热掺铒光纤的分布式液位传感器,实现了沿 9 cm 长的加热光纤以 5 mm 的液位分辨率来测量液位位置。2022 年, Zhu H H 等^[22]利用

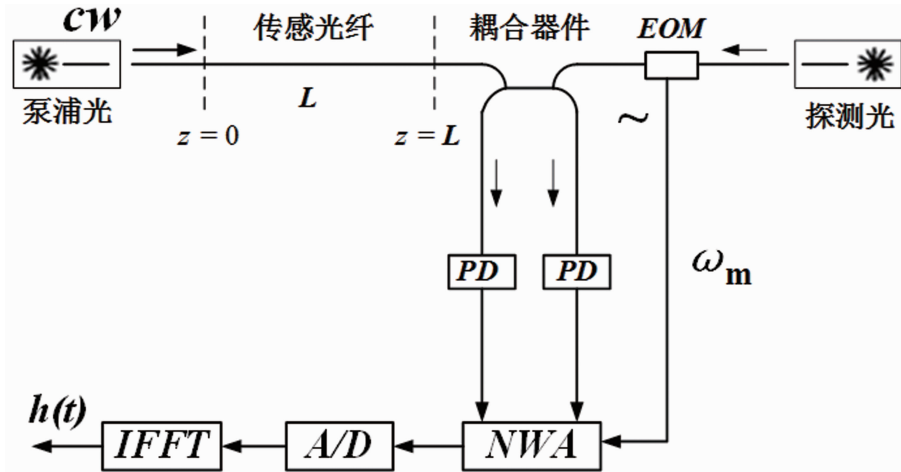


图2 BOFDA 基本配置^[8]: NWA 网络分析仪、EOM 电光调制器、PD 光电二极管、A/D 模数转换器

BOFDA 技术监测了相邻开挖引起的隧道衬砌纵向和周向应变分布。通过对近几年来 BOFDA 在应用层面的资料整理可知, BOFDA 因独特的低成本、长距离、高分辨率、高测试精度等特点, 已经成为各国在各类工程监测应用中研究的热点。

1.3 BOFDA 监测原理

1.3.1 BOFDA 系统配置

BOFDA 基于复杂的基带传递函数进行测量。该传递函数将沿光纤相向传播的泵浦光和探测光波的振幅与光纤的几何长度 L 联系起来。BOFDA 的基本配置如图2所示。

图2中, 窄线宽泵浦光的连续光从被测单模光纤的一端入射; 窄线宽探测光的连续光从另一端进入, 其频率比泵浦光的频率降低了相当于光纤特征布里渊频率的量。例如, 对于标准通信单模光纤, 在 $1.3\ \mu\text{m}$ 处, 该特征频率约为 $13\ \text{GHz}$, 在此配置中, 探测光由具有可变角度调制频率 ω_m 的电光调制器(Electro-Optical Modulator, EOM)进行振幅调制。对于 ω_m 的每个值, 调制探测光强度和调制泵浦光强度的交替部分记录在传感器光纤的末端。在该配置中, 光电探测器(Photodetector, PD)的输出信号被馈送至网络分析仪(Network Analyzer, NWA)。NWA 用于确定测试光纤的基带传递函数 $H(j\omega)$ 。NWA 的输出通过模数转换器(Analog-to-Digital converter, A/D)进行数字

化, 并被馈送至信号处理器。该处理器通过快速反傅里叶变换(Inverse Fast Fourier Transform, IFFT)进行运算。IFFT 后的数据表现了测试光纤的脉冲响应, 体现为沿光纤的温度和应变分布。

1.3.2 BOFDA 测量技术的数学描述

对于角度调制频率 ω_m , 泵浦光和探测光强度在 $z=L$ (见图2)时的傅里叶变换分别为

$$\begin{cases} X_p(j\omega)|_{\omega_m} = F[I_p(L, t)|_{\omega_m}] \\ X_s(j\omega)|_{\omega_m} = F[I_s(L, t)|_{\omega_m}] \end{cases} \quad (1)$$

基带传递函数为

$$H(j\omega) = \frac{X_p(j\omega)|_{\omega_m}}{X_s(j\omega)|_{\omega_m}} = A(\omega)\exp[j\Phi_{H(\omega)}] \quad (2)$$

式中, $A(\omega)$ 和 $\Phi_{H(\omega)}$ 分别表示振幅和相位。

光纤的时间脉冲响应为

$$h(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} H(j\omega) \exp(j\omega t) d\omega \quad (3)$$

显然, 在式(3)中把 t 替换为 $2nz/c$, 可将检测时间 t 转换为发生布里渊相互作用的具体光纤位置 z , 从而得到测试光纤中任意一点 z 的空间脉冲响应 $h(z)$ 。 n 表示光纤的折射率, c 表示真空中的光速。

1.3.3 BOFDA 的关键参数

1.3.3.1 BOFDA 的最大传感距离

BOFDA 的最大传感距离可通过频域方法研究得到。对于分布式测量, NWA 的参考信号以等距频率阶跃 Δf_m 逐步进行调制频率扫

描。基于 IFFT, 该参考信号变换到时域, 产生离散脉冲响应。频率步长 Δf_m 决定基带传递函数, BOFDA 光纤传感长度则受到 Δf_m 的限制。BOFDA 最大传感距离可表示为

$$L_{\max} = \frac{c}{2n} \cdot \frac{1}{\Delta f_m} \quad (4)$$

式中, c 为真空中的光速, n 为光纤的折射率。当步进频率为 2 kHz 时, 最大光纤长度为 51.4 km。根据目前的文献调研, BOFDA 的最大传感距离可达 100 km^[16]。

1.3.3.2 BOFDA 的空间分辨率

BOFDA 的空间分辨率也称为两点分辨率, 即 BOFDA 感知光纤上任意两事件点之间的最小可分辨距离^[11]:

$$\Delta z = \frac{c}{2n} \cdot \frac{1}{f_m^{\max} - f_m^{\min}} \quad (5)$$

式中, $f_m^{\max}$ 和 $f_m^{\min}$ 分别表示最大和最小调制频率。空间分辨率描述了 BOFDA 系统沿传感器光纤区分不同温度/应变状态(不同 BFS)的小规模事件的能力, 是 BOFDA 空间测量的真实精度。截至目前, BOFDA 可用于实际测试的最高空间分辨率为 5 mm^[21]。

1.4 BOFDA 的应变和温度测量

在 BOFDA 中, 窄线宽连续泵浦光或反向传播的窄线宽连续探测光的渐进正弦振幅调制, 提供了沿传感器光纤的局部应变和温度梯度的空间分辨率信息^[27]。所有局部应变 ϵ 和温度变化 ΔT 由沿传感光纤分布的布里渊增益谱(Brillouin Gain Spectra, BGS)来确定(见图 3)。

标准单模光纤的每个位置对应的 BGS 都呈现为洛伦兹曲线形式(见图 3(b)), 从中可以分析出 BFS 中心频率值 f_B 。 f_B 定义为布里渊增益谱能量最强时的频率, 其大小取决于光纤中的温度和应变, 即

$$f_B(T, \epsilon) = C_T(T - T_R) + C_\epsilon \cdot \epsilon + f_{B0}(T_R = 20^\circ\text{C}, 0) \quad (6)$$

式中, C_T 和 C_ϵ 分别描述了布里渊温度系数和布里渊应变系数。

1.5 BOFDA 技术的优点

综上所述, BOFDA 技术不仅具有长达 100 km 的传感距离、毫米级别的高空间分辨率、高测试精度、高重复测试性能^[26]和多频信号同时测量处理的优点, 而且还具有以下的独特优势:

(1) 与 BOTDA 概念相比, BOFDA 技术的主要优点是可以直接在窄基带条件下操作。BOFDA 测量带宽由 NWA 窄带滤波器决定, 通常在调制频率 Δf_m 附近的 kHz 范围内, 而 BOTDA 测量带宽至少为 100 MHz^[27]。

(2) 由于信噪比与测量带宽成反比, 频域技术中窄带宽的运用提高了信噪比^[28], BOFDA 可以显著提高信噪比至 50 dB。而 BOTDA 为了抑制测量中的噪声, 通常需要平均几千次。

(3) BOFDA 的另一个优点是避免使用昂贵的高速电子设备来产生和检测短激光脉冲, 从而降低了系统成本。

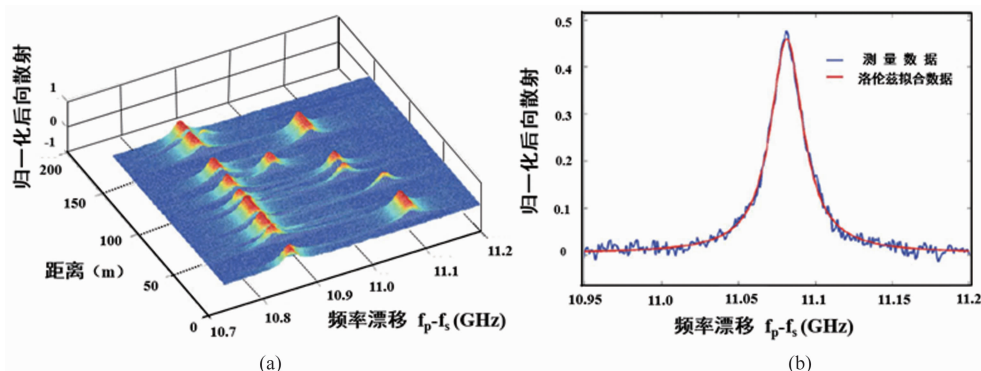


图 3 不均质光纤在 100 MHz 频率下的应变变化的布里渊增益光谱^[27]: (a) 3D 布里渊增益图谱; (b) $z=20$ m 处的布里渊增益光谱曲线图

(4)从理论上,BOFDA通过数字处理技术缩短了测量时间^[24];另一方面,用数字电路取代昂贵的NWA,为BOFDA提供了决定性的成本优势。

2 基于BOFDA测量桥梁挠度变形的应用研究

为了进一步验证BOFDA应用在桥梁结构健康工程监测中的可行性及准确性,本文模拟在单跨桥梁模型的跨中位置上分级施加集中荷载,进行基于BOFDA的桥梁挠度测量室内模型试验研究。

2.1 光纤应变表征桥梁挠度的光纤铺设方式

根据光纤应变测量原理,通过合理的光纤布设,可以利用光纤应变进行光纤变形的几何测量,再结合桥梁挠度垂向位移变形特点,计算出桥梁挠度变形。

常用的光纤布设技术方法是内部植入法和表面粘贴法。对于混凝土桥梁,采用混凝土浇筑植入光纤不仅极易破坏光纤,无法确保成活率,而且在监测过程中无法进行光纤的长期实时维护;而混凝土表面刻槽植入法工作量大,且现场施工操作难度大、危险性高。因此,混凝土桥梁通常都是采用表面粘贴法进行光纤布设。显然,在现场应用中,桥梁正常的交通荷载极易破坏桥梁顶面布设的光纤。这是现场监测极难克服的问题,因此本文尝试在桥梁底面

沿跨度方向布设光纤,并通过测量光纤的应变变化来进行桥梁挠度变形表征,从而实现桥梁挠度的BOFDA分布式光纤测量。

2.2 光纤应变定量表征桥梁挠度理论分析

在桥梁底面水平布设光纤并利用光纤应变表征桥梁挠度变化时,根据光纤变形段的光纤应变分布来确定桥梁挠度分布是基于BOFDA进行桥梁挠度分布式测量的关键。

为此,我们假设以下条件来进行研究:

(1)预拉伸光纤AC水平布设在桥梁的底面,光纤直线段AC随桥梁挠度变化沉降变形为曲线段A'C'(见图4),发生应变变化。

(2)假设光纤AC直线段以外的部分无应变变化,A点和C点保持初始状态 $\epsilon_A = 0$, $\epsilon_C = 0$ 。

(3)AC段光纤受到桥梁沉降变形影响而产生轴向拉伸,光纤应变为正值,为正应变曲线分布。

(4)假设AC段光纤有且只有一个最大沉降位移点,也即假设AC之间的一点M为梁结构最大挠度的位置。

假设BOFDA的采样分辨率为光纤长度 Δl ,AM段光纤中第*i*个采样间隔光纤段的光纤应变为 ϵ_i ,原始长度 Δl 变形后的长度*l*为

$$l = \Delta l \cdot (1 + \epsilon_i) \quad (7)$$

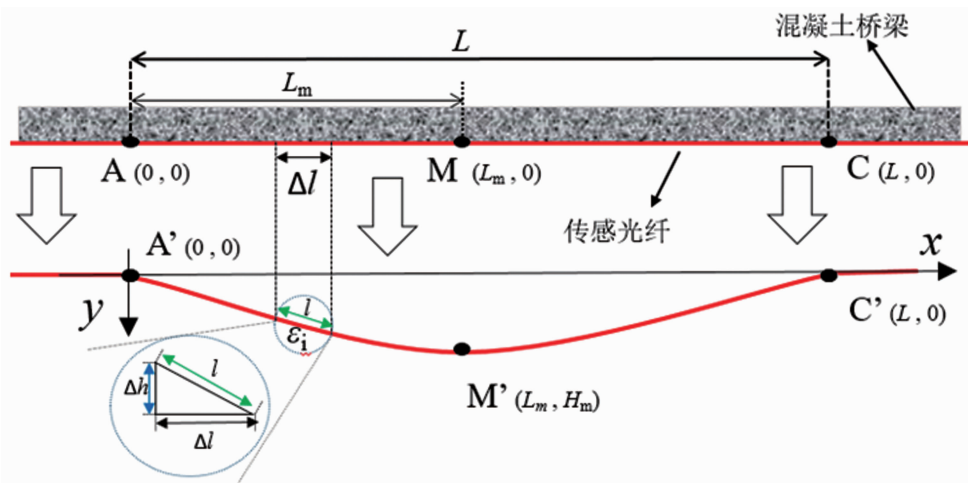


图4 混凝土梁沉降监测中光纤布设和光纤变形示意图

任意第 i 个采样间隔的垂向变形变化量 Δh_i 为

$$\Delta h_i = \Delta l \cdot \sqrt{\epsilon_i^2 + 2\epsilon_i} \approx \Delta l \cdot \sqrt{2\epsilon_i} \quad (8)$$

显然, 如图 4 所示, 当 M 点为光纤最大沉降位移点时, 对光纤变形段 AC 上任意采样间隔的沉降位移作积分或累加计算, 就可得到 A 点到最大沉降位移点 M 之间(或者 C 点到 M 点之间)任意点的垂直位移量。可见, 通过式 (9) 可以进行桥梁沉降变形段任意点的挠度测量。其中, 桥梁沉降变形最大挠度 M 点的位置通常位于桥梁变形区间的中点位置, 或者位于桥梁底面布设光纤应变变化段的中点位置。

$$H_{AM} = \Delta l \cdot \sum_{i=1}^m \sqrt{2\epsilon_i + \epsilon_i^2} \quad (m = \frac{L_m}{\Delta l}) \quad (9)$$

3 基于 BOFDA 的桥梁挠度测量模型试验

为验证 BOFDA 桥梁挠度测量理论, 本文进行了室内模型试验: 利用一个两端固定支撑的等密度板来模拟桥梁结构, 并在等密度板中间分级施加集中荷载, 使等密度板发生挠度变形。由于只考虑等密度板的应变和变形, 可忽略等密度板的力学、物理性质等对变形的影响。本文通过直接在等密度板底面粘贴预拉伸传感光纤来进行挠度变形测量。模型试验中的光纤固定方式与工程应用实际略有不同, 但原理一致。

3.1 BOFDA 测量设备和传感光纤

在模型试验中, 采用德国 Fibris Terre 公司制造的 fTB 2505 光频域分析仪(见图 5)。它可以实时监测光纤沿线的温度和应变, 其测量精度可达 $2 \mu\epsilon$ 或 0.1°C , 采样间隔达 0.05 m , 空间分辨率为 0.5 m , 最大测试距离长达 25 km 。测试时, BOFDA 使用了 0.05 m 的采样

分辨率, 折射率设定为 1.468 , 仪器的起始频率和终止频率分别设定为 10.5 GHz 和 11.0 GHz , 光纤的中心频率为 10.8390 GHz , 频率间隔为 5 MHz 。

试验采用直径为 0.9 mm 的聚氨酯紧套传感光纤(见图 5(b)), 其应变系数为 $0.05 \text{ MHz}/\mu\epsilon$, 温度系数为 $1.2 \text{ MHz}/^\circ\text{C}$ 。本次试验在地下实验室内进行。经实际测试, 试验过程中的室内温度变化不超过 5°C 。因此, 本次试验只考虑光纤应变影响的布里渊增益谱中心频率的移动^[29]。

3.2 模型试验测试系统设置

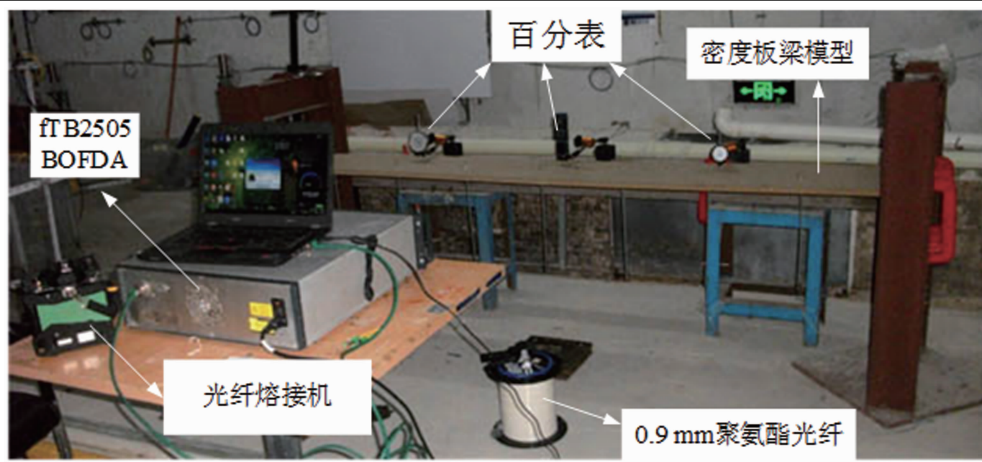
桥梁挠度变形测量模型试验布置如图 6 所示。模型试验按照如下步骤进行设置: (1) 将 2300 mm 长的等密度木板的两端放在支架上, 模拟桥梁结构的桥面板, 制作单跨室内桥梁模型。(2) 沿等密度板底面中线, 用环氧树脂将光纤粘贴在等密度板的底面。(3) 在等密度板上表面的板长度 $L/2$ 和 $L/4$ 位置上安装百分表来监测其垂直位移变化。(4) BOFDA 通过光纤跳线分别连接测试光纤的两端, 构成完整的光纤应变测量回路系统(见图 6)。

3.3 试验过程

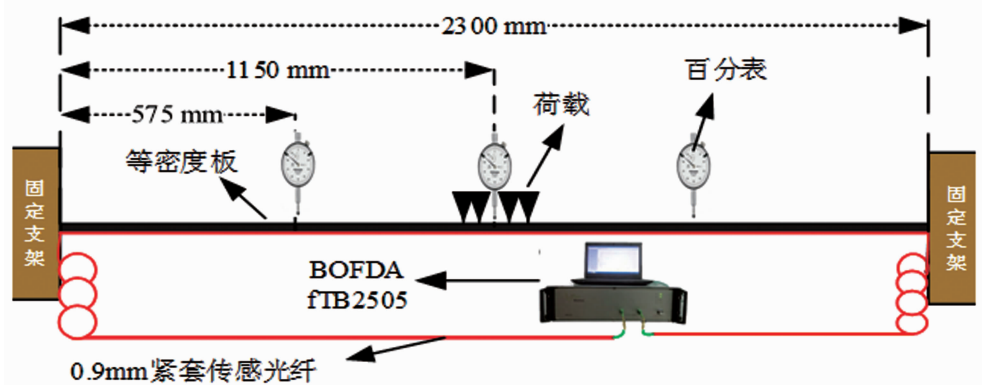
在桥梁模型中间位置上施加集中荷载前, 进行光纤应变初值测试, 并将测试值作为初始应变; 同时读取测试位移的三个百分表的初始读数。试验过程中, 在桥梁模型长度方向的中间位置 $L/2$ 处分级施加集中荷载。最初荷载为 20 N , 逐渐分级施加到 30 N 、 40 N 、 50 N 、 60 N 、 70 N 、 80 N 。每次增加荷载, 桥梁模型在上覆荷载的作用下弯曲沉降。静止一段时间, 等桥梁模型的状态稳定以后, 首先用 BOFDA



图 5 (a) BOFDA 测试仪器 fTB2505; (b) 测试光纤



(a)模型试验整体布置现场图



(b)模型试验整体布设示意图

图 6 光纤应变量化梁结构挠度的模型试验布置图

进行应变测试,然后记录百分表读数,完成之后再分级加载荷载,并进行下一次的测量测试。在本次室内模型试验中,将三个百分表监测的桥梁模型垂直位移作为实测挠度值。本文定义光纤轴向拉伸变形的拉应变为正应变,光纤轴向压缩变形的压应变为负应变。

3.4 试验结果

通过 BOFDA 监测得到以下结果:桥梁模型变形段光纤应变呈现正应变分布,且随荷载分级施加光纤应变不断增大(见图 7(a))。施加第一级 20N 集中荷载后,应变曲线在左侧距桥梁模型中点 675.62 mm 位置的应变数值突然抬升,在右侧距离桥梁模型中点 675.62 mm 位置的应变数值突然下降为初始状态值。随着集中荷载的逐渐分级施加,应变段光纤应变曲线呈现逐渐增大(抬升)现象,变化段在距离等密度板中点 $-675.62 \sim 675.62$ mm 的长度区间。

从图 7(b)可以看出,随着集中荷载逐渐分级施加,桥梁模型产生明显与光纤应变段范围一致的沉降变形段,其沉降位移逐渐增大。桥梁模型底面粘贴光纤应变段的应变数值不断增大,应变曲线高度不断抬升,说明此时光纤应变不仅能表征桥梁模型的变形范围,而且可定性表征桥梁模型沉降变形程度,光纤应变随桥梁模型挠度的增大而增大。

4 梁挠度变化的光纤应变定量表征及分析讨论

按照本文光纤应变量化桥梁挠度变形的理论,并根据各个采样间隔试验得到的光纤应变曲线变化段的应变分布,通过式(9)可以推算得到模型实验中桥梁模型沉降变形的挠度分布。本文利用 Matlab 软件进行计算求解,得到了桥梁模型挠度分布曲线(见图 8)。

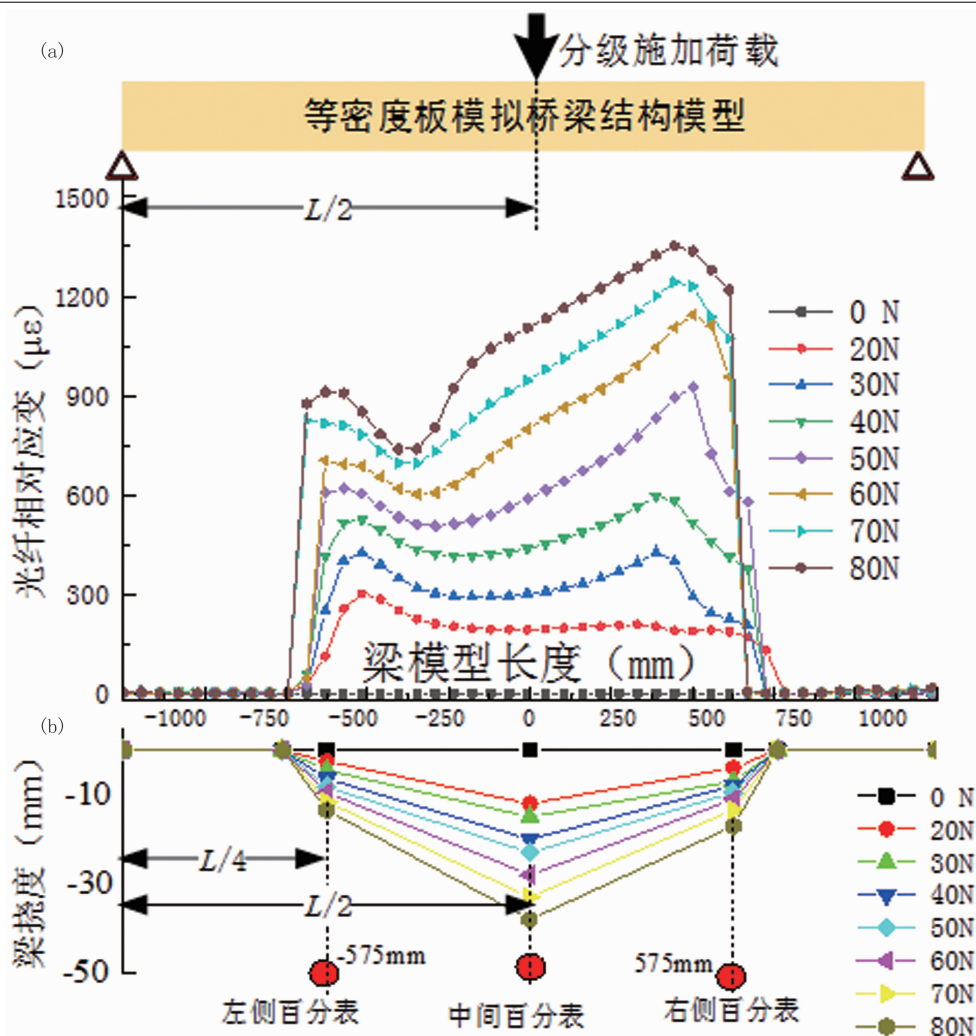


图 7 光纤差分应变曲线和百分表实测挠度

随着试验中桥梁模型中间位置集中荷载逐级施加, 光纤应变量化表征的桥梁模型挠度逐渐增大, 挠度分布与百分表实测挠度分布基本一致。将距离桥梁模型两端各 $L/4$ 和梁中点 $L/2$ 处百分表测量的桥梁模型垂直位移变化量, 与这三个位置光纤应变量化表征的梁挠度变化进行对比, 发现两侧 $L/4$ 处的百分表测量数据和光纤应变计算数据的最大误差小于 0.5 mm, 二者基本一致; 桥梁模型中点的百分表测量值比桥梁挠度的计算值稍微大一点, 最大误差为 1.53 mm, 仍在误差可容许范围内。由此可见, 百分表测量挠度与光纤应变量化表征的桥梁模型挠度基本一致(见图 9)。

试验结果表明, 基于 BOFDA 的光纤应变分布可以标定桥梁挠度变化的范围和表征桥梁

沉降变形程度, 且光纤应变也可以定量表征桥梁挠度变化, 说明基于 BOFDA 技术进行桥梁挠度的分布式测量是有效和可行的。

5 结论

本文对基于 BOFDA 的桥梁挠度测量的基本理论进行了分析, 并搭建了桥梁模型挠度变化室内模型试验。沿桥梁跨度方向将光纤粘贴布设在桥梁底面, 随着桥梁模型中间位置集中荷载的逐级施加, 桥梁模型沉降位移不断增大, 基于 BOFDA 测得的光纤应变也逐级增大。由此可见, 光纤应变分布曲线不仅能反映光纤变形段的范围, 而且也能定量表征桥梁挠度变形程度。通过实验数据分析发现, 基于 BOFDA 的挠度计算值的最大相对误差仅为 5.3%, 与百分表测量挠度基本一致, 验证了

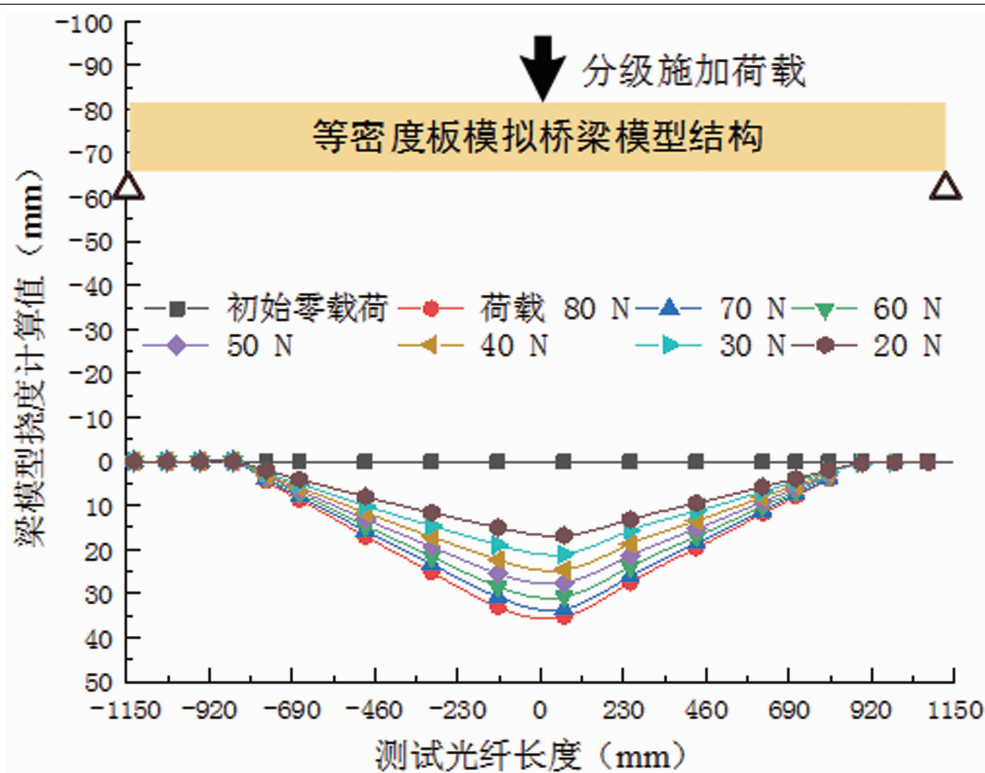


图 8 模型试验光纤应变表征梁挠度曲线

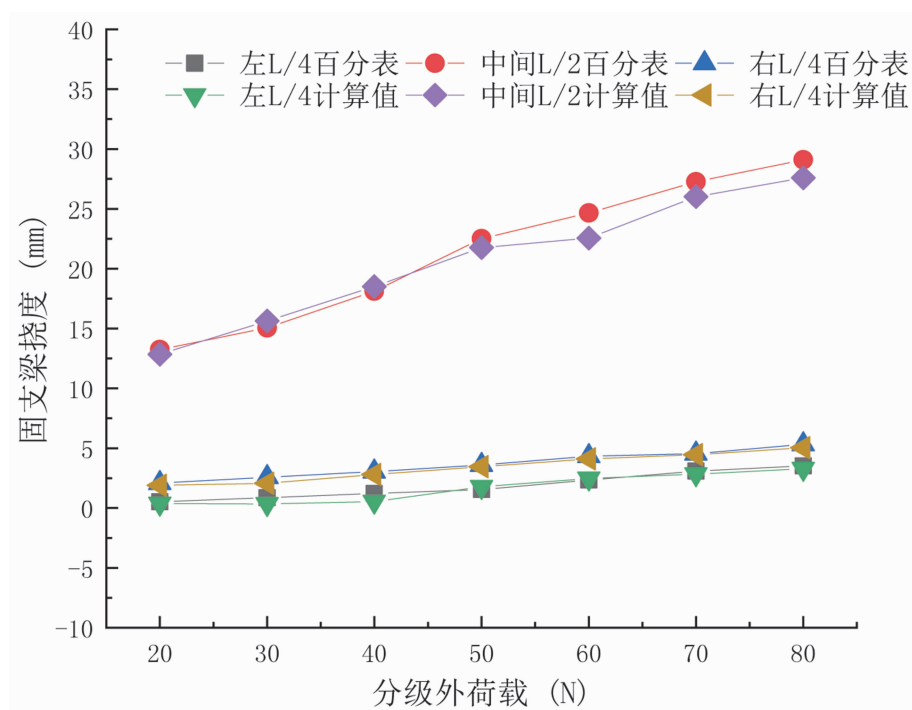


图 9 百分表测量与光纤应变量化值比较曲线

BOFDA 在桥梁挠度测量领域应用的有效性和可行性。

与其它分布式光纤传感技术相比, BOFDA 由于具有高空间分辨率、高测试精度、高

重复测试性能等优点, 在桥梁、隧道等岩土工程领域有着非常好的应用前景。本文通过室内模型试验验证了 BOFDA 技术在桥梁挠度领域应用的可行性, 为后续 BOFDA 在桥梁领域更

深入的应用研究以及在其他土木工程各种领域的应用提供了参考。但本文并未对更复杂的桥梁挠度测量模型进行试验分析。如果将 BOFDA 应用在实际工程中, 还需要进行更为深入、复杂的桥梁挠度模型试验来加以支撑。后续将采用深度学习理论等更先进的分析技术对基于 BOFDA 的更复杂的桥梁挠度分析模型进行优化、研究和试验, 为加速 BOFDA 技术在桥梁等土木工程领域的推广和应用提供支撑。

参考文献

- [1] Domingues M F F, Radwan A. *Optical Fiber Sensors for IoT and Smart Devices* [M]. New York: Springer Publishing Company, Incorporated, 2017.
- [2] Adachi S. Distributed optical fiber sensors and their applications [C]. Chofu: SICE Annual Conference, 2008.
- [3] Hartog A H. *An introduction to distributed optical fibre sensors* [M]. Boca Raton: CRC press, 2017.
- [4] Bao X, Chen L. Recent progress in distributed fiber optic sensors [J]. *Sensors*, 2012, **12**(7): 8601–8639.
- [5] Khadour A, Waeytens J. *Monitoring of concrete structures with optical fiber sensors* [M]. Cambridge: Woodhead Publishing, 2018.
- [6] Güemes J A. *Fiber optics sensors* [M]. Berlin: Springer, 2013.
- [7] Ghafoori-Shiraz H, Okoshi T. Fault location in optical fibers using optical frequency domain reflectometry [J]. *J Lightwave Technol*, 1986, **4**: 316322.
- [8] Garus D, Krebber K, Schliep F, et al. Distributed sensing technique based on Brillouin optical-fiber frequency-domain analysis [J]. *Optics letters*, 1996, **21**(17): 1402–1404.
- [9] Garus D, Gogolla T, Krebber K, et al. Brillouin optical-fiber frequency-domain analysis for distributed temperature and strain measurements [J]. *Journal of light wave technology*, 1997, **15**(4): 654–662.
- [10] Yari T, Ishioka M, Nagai K. Structural Health Monitoring Using Brillouin Optical Frequency Domain Analysis [C]. Tokyo: National Committee for IUTAM, 2004.
- [11] Bernini R, Minardo A, Zeni L. Distributed sensing at centimeter-scale spatial resolution by BOFDA: Measurements and signal processing [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2011, **4**(1): 48–56.
- [12] Minardo A, Bernini R, Zeni L. Distributed temperature sensing in polymer optical fiber by BOFDA [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2013, **26**(4): 387–390.
- [13] Wosniok A, Mizuno Y, Krebber K, et al. L-BOFDA: a new sensor technique for distributed Brillouin sensing [C]. *SPIE*, 2013, **8794**: 879431.
- [14] Zeni L, Catalano E, Coscetta A, et al. High-pass filtering for accurate reconstruction of the Brillouin frequency shift profile from Brillouin optical frequency domain analysis data [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2017, **18**(1): 185–192.
- [15] Kapa T, Schreier A, Krebber K. 63 km BOFDA for Temperature and Strain Monitoring [J]. *Sensors*, 2018, **18**(5): 1600.
- [16] Kapa T, Schreier A, Krebber K. A 100-km BOFDA assisted by first-order bi-directional Raman amplification [J]. *Sensors*, 2019, **19**(7): 1527.
- [17] Zhang Q, Xiong Z. Crack Detection of Reinforced Concrete Structures Based on BOFDA and FBG Sensors [J]. *Shock and Vibration*, 2018, **2018**: 1–10.
- [18] 缪长健, 施斌, 郑兴, 等. 海上超长 PHC 管桩 BOFDA 内力测试 [J]. *南京大学学报 (自然科学版)*, 2018, **54**(6): 1057–1063.
- [19] 卢毅, 宋泽卓, 于军, 等. 基于 BOFDA 的砂-黏土互层垂向变形物理模型试验研究 [J]. *高校地质学报*, 2019, **25**(4): 481–486.
- [20] Karapanagiotis C, Hicke K, Wosniok A, et al. Distributed humidity fiber-optic sensor based on BOFDA using a simple machine learning approach [J]. *Optics Express*, 2022, **30**(8): 12484–12494.
- [21] Catalano E, Vallifuoco R, Zeni L, et al. Distributed liquid level sensor based on Brillouin Optical

- Frequency-Domain Analysis [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2022, **22**(7): 6601–6605.
- [22] Zhu H H, Wang D Y, Shi B, et al. Performance monitoring of a curved shield tunnel during adjacent excavations using a fiber optic nervous sensing system [J]. *Tunneling and Underground Space Technology*, 2022, **124**: 104483.
- [23] Nöther N, Facchini M. Distributed fiber-optic strain sensing: Field applications in pile foundations and concrete beams [C]. PaloAlto: International Workshop on Civil Structural Health Monitoring, 2021.
- [24] Karapanagiotis C, Wosniok A, Hicke K, et al. Time-efficient convolutional neural network-assisted Brillouin optical frequency domain analysis [J]. *Sensors*, 2021, **21**(8): 2724.
- [25] 冯维一, 刘礼华, 张旭苹, 等. 基于 BOFDA 的 PE 管道微弯变形检测方法 [J]. *光通信技术*, 2020, **44**(12): 33–36.
- [26] 王兴, 施斌, 魏广庆, 等. 土木与岩土工程监测新技术——BOFDA 的性能与特点 [J]. *防灾减灾工程学报*, 2015, **35**(6): 763–768.
- [27] Wosniok A. *Distributed Brillouin Sensing: Frequency-Domain Techniques* [M]//Peng G D. *Handbook of Optical Fibers*. Berlin: Springer, 2018.
- [28] 曹鼎峰, 施斌, 严珺凡, 等. BOFDA 技术综述及用于岩土工程监测的可行性研究 [J]. *防灾减灾工程学报*, 2013, **33**(S1): 132–137.
- [29] 侯公羽, 胡涛, 李子祥, 等. 基于 BOFDA 的覆岩采动“两带”变形表征研究 [J]. *采矿与安全工程学报*, 2020, **37**(2): 224–237.