

# 冻土路基变形场光纤阵列监测体系研究

宋竹兵<sup>1</sup>, 李震<sup>2</sup>, 朱宝山<sup>2</sup>, 赵力国<sup>2</sup>, 周春豪<sup>2</sup>, 袁堃<sup>2</sup>

(1. 山西路桥集团左涉公路有限公司, 山西 晋中 032600; 2. 中交第一公路勘察设计院有限公司  
高寒高海拔地区道路工程安全与健康国家重点实验室)

**摘要:**为适应青藏高原多年冻土区恶劣环境,应对高原多年冻土区路基融沉变形局部变位大、纵向形态变化急剧、分布范围广等问题,有必要研发一套高精度、高韧性、适应大变形并具有自动化功能的高等级公路病害监测体系。该文以布拉格光栅光纤传感监测技术为基础,提出光栅光纤位移阵列传感器设计方法,基于克里金空间插值理论,选取最小估计均方差、平均预测精确度作为变形场预测的评估因子,结合监测成本估算开展光纤阵列优化布置分析,提出基于空间插值优化的冻土路基变形场自动化监测系统。研究结果表明:光栅光纤位移阵列传感器优化设计参数为横向间距 2 m、纵向间距 4~6 m,结合克里金空间插值理论,可实现由点及线、由线及面的冻土路基浅层、深层区域变形精准监测和预估;设计的光栅光纤位移阵列传感器具有测量精度高、可变量程、稳定耐用等优点,易于搭建可扩充、可复制的长期组网监测体系,对实现冻土路基区域性大变形的自动化监测和不均匀沉降灾害的云端化识别具有借鉴意义。

**关键词:**道路工程; 光纤传感阵列; 变形场监测; 高海拔高寒地区; 冻土路基

中国多年冻土主要分布在东北大、小兴安岭、松嫩平原北部以及青藏高原地区,面积达 215 万 km<sup>2</sup>, 占中国国土面积的 22.3%。随着社会经济的迅速发展,青藏高原多年冻土地区人类工程活动越来越频繁,在人类工程活动和环境气候转暖的双重背景下,多年冻土地区出现冻土地温升高、活动层厚度增加、冻土面积减少,进而导致热融变形等工程灾害逐年增加,特别是对于公路工程,由于黑色路面的强吸热作用,对路基下伏多年冻土层的扰动更为剧烈,路基病害更为严重。

多年冻土地区频发的路基融沉病害长期以来一直是冻土工程界的核心研究内容,针对多年冻土路基稳定性问题,一系列特殊路基工程措施被应用在青藏公路上。

随着监测技术的更新,寒区公路工程测量方法逐渐向采集智能化、传输无线化、存储系统化发展。特别是光学测量方法、空间大地测量方法等由于监测范围广、耗费人力少、智能化程度高而在寒区工程中应用前景广阔,如三位激光扫描技术、合成孔径雷达测量技

术、星载 SAR 差分干涉测量技术在多年冻土区工程监测中已开展广泛应用,其精度可以达到厘米级,具有监测范围广、精度高、成本低、全天时全天候等众多独特优势。张伟朋开展了基于三维激光扫描点云数据的高原公路路基变形规律和灾变特征研究;李震等、谭衙霖等、丛充将差分干涉测量技术应用于青藏线多年冻土区路基变形监测、交通走廊地表变形监测。新型监测技术在冻土工程领域的引进应用为冻土区工程安全增添了“砝码”,但在高频采样条件下,三维激光扫描技术、合成孔径雷达测量技术、星载 SAR 差分干涉测量技术等监测成本较高,且只能观测到监测对象表面的变形特征,在受到地面遮盖物或遮挡物影响时,难以保证采样的完整性和连续性。

光纤监测技术是岩土工程检测中的一种新技术,近年来在岩土工程监测中得到广泛应用。该技术具有高精度、满足长期监测需求、易于组网采样的特点,并且完全适应高原低温、大温差、暴风雪频繁、强辐射的恶劣环境。基于此,该文以高海拔高寒地区公路路基

收稿日期:2021-08-18(修改稿)

基金项目:国家重点研发计划项目(编号:2017YFF0108705,2017YFF0108706);中国交建科技研发项目(编号:2020-ZJKJ-PTJS04,2020-ZJKJ-QNCX09,2020-ZJKJ-PTJS12);中交一公院科技创新项目(编号:KCJJ2020-01)

作者简介:宋竹兵,男,高级工程师。E-mail: 1169412350@qq.com

变形场监测为研究对象,引入布拉格光栅光纤传感监测技术,提出适用于冻土路基变形场监测的传感器优化的决策机制和布置算法,设计研发高精度、高韧性、适应大变形的光栅光纤阵列传感,形成冻土路基变形场监测一体化布设施工方法,研究内容可为青藏公路以及寒区公路工程监测体系的建立提供参考。

1 光栅光纤阵列传感设计

根据对青藏公路、214 国道、共玉高速公路等多年冻土地区公路病害的调查和分析,多年冻土地区公路沉降病害主要是由于多年冻土的冻融变化所引起,由于路基下部的多年冻土热状况发生变化,导致多年冻土层融沉变形致使路基发生不均匀沉降,表现为局部变形大、纵向变形形态变化急剧、病害分布范围广,多年冻土路基灾害监测重点之一为路基变形。因此,变形监测应满足面向区域化监测的要求,设计为传感阵列形式,避免传统散点联动布设方式以节约部分成本,同时还需要满足冻土路基大变形沉降监测的需求。

针对冻土路基变形范围广、变形变位大的特点,开展面向区域化的变形监测传感设计。将多个串联的光栅光纤压力传感器通过三通间隔连接布置到满载防冻液且密封连通的液位管上,设定液位管首端布设的传感器为基准液位压力测点,通过测量各个传感器位置处的液位压力,与基准液位压力的液位压力差值即代表各测点相对基准点的液位高差,可计算得出各个测点的相对高程变化,计算式为:

$$\Delta H = \frac{\mu_A - \mu_B}{\gamma_w} \tag{1}$$

式中: $\Delta H$  为测点 A、B 之间的液位差; $\mu_A$ 、 $\mu_B$  分别为测点 A、B 处的液位压力; $\gamma_w$  为防冻液的重度(冰点 60 ℃时为 10.92 kN/m<sup>3</sup>)。

根据式(1),所设计的传感器满足最小测量单位 1 mm 时,需要测量的液位压力约为 0.011 kPa,即光栅光纤压力传感器的测量分辨率应大于 0.011 kPa。同理,为满足路基大变形沉降的测量,光栅光纤压力传感器的测量范围设计为 5~10 kPa,即可满足 0.457~1.373 m 变形量程的测量。设计选取高精度光栅光纤压力传感器,其技术指标列于表 1。

将准分布式压力传感器的液位管封装成位移传感器阵列,相邻传感器之间预留足够冗余长度的液位管,各传感器位置加设沉降板,实现各位置处的传感器可以随土体发生大量程变形(图 1)。

表 1 高精度光栅光纤传感器技术指标

技术指标	单位	指标值
测量范围	kPa	5~10
测量精度	%F.S.	±0.1
分辨率	%F.S.	<0.02
中心波长	nm	1 520~1 570
工作温度	℃	-40~85
连接方式		FC/APC

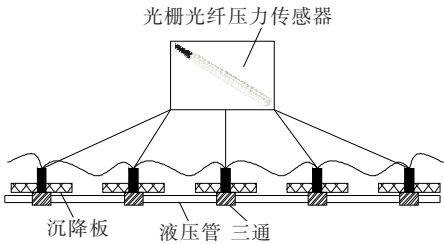


图 1 位移阵列传感设计方案

2 传感阵列优化布置研究

2.1 传感阵列优化布置方法

为了实现冻土路基变形场的监测,需要布设一定数量的传感阵列。在合理控制监测成本的前提下,拟定多种类型的传感阵列布设、布局形式,借助克里金空间插值模型作为空间参数插值方法,以最小估计均方差、平均预测精确度作为变形场预测的评估准则,结合监测成本测算,开展最优传感器布设参数优化分析,为光栅光纤阵列传感的布设参数提供依据。

在进行路基沉降变形实测值克里金插值时,考虑到沉降测值在小范围内不会发生特别大的数值突变,因此选用普通克里金插值方法,即区域变量的期望值在搜寻的邻域内稳定但是未知,插值时相当于在每一个评估位置重新估计期望值,表示为:

$$z^*(x_0) - m = \sum_{i=1}^n \lambda_i [z(x_i) - m(x_i)] \tag{2}$$

式中: $z^*(x_0)$ 为路基沉降变量在  $x_0$  处的估计值; $m$  为路基沉降变量在搜寻邻域内的期望值; $z(x_i)$  为路基沉降变量在搜寻邻域内的真实值; $\lambda_i$  为搜寻邻域内的加权值; $m(x_i)$  为每一个评估位置的重新估计期望值。

以无偏性和估计方差最小作为选取  $\lambda_i$  的标准,即当满足以下条件时  $\lambda_i$  最优:

$$\begin{aligned} E[Z(x_0) - Z^*(x_0)] &= 0 \\ \{Var[Z(x_0) - Z^*(x_0)] = E\{[Z^*(x_0) - \\ &Z(x_0)]^2\} = \min \end{aligned} \tag{3}$$

式中:  $E[\cdot]$  为求取路基沉降变量期望值;  $Var[\cdot]$  为求取路基沉降变量方差。

联合求解式(3)关于权重因子  $\lambda_i$  的线性方程组, 得到路基沉降变量插值的最小估计方差, 再根据式(2)预测未知点的路基沉降变量值。

提取变形场的空间插值预测值, 将平均预测精确度定义为:

$$P = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{z^*(x_i)}{z(x_i)} \quad (4)$$

式中:  $P$  为取路基沉降变量空间插值预测的平均精确度;  $z^*(x_i)$  为路基沉降变量在任一处的真实值。

## 2.2 位移传感阵列优化实例

选取青藏公路某典型路段的道路表面沉降三维激光扫描监测数据[路基宽度 7 m, 测量长度 100 m, 测点分辨率  $X(\text{横向}) \times Y(\text{纵向}) = 0.25 \text{ m} \times 0.25 \text{ m}$ ], 拟定不同的测点布设工况, 开展路基沉降变量空间插值优化分析。该段路基在长期运营过程中发生大范围的不均匀大变形沉降, 路基变形场分布极不均匀, 最大绝对沉降达 0.565 8 m, 整段路基最大差异沉降达 0.306 m。

首先开展路基横向传感器优化分析, 拟定 5 个不同的沉降传感器测点布设工况, 测点由密集到稀疏, 横向间距  $X$  与纵向间距  $Y$  相等, 具体布设参数为  $X, Y$  均取 0.5、1.0、1.5、2.0、2.5、3.0 m。提取不同布设工况条件下对应测点位置的表面沉降监测值, 开展路基沉降变形的空间插值估计, 根据式(3)求解方程组计算最小估计均方差, 结合式(2)对表面沉降进行插值估计, 式(3)、(2)的求解过程均采用 SGeMs 软件进行。提取空间插值结果, 根据式(4)计算平均预测精度, 进一步估算监测成本评定最优传感器布设间距。

图 2 为 5 个不同工况条件下, 表面沉降变量空间插值的最小估计均方差。从图 2 可以看出: 当测点布设间距为  $X, Y = 2.0 \text{ m}$  时, 最小估计均方差相较于  $X, Y = 2.5 \text{ m}$  有大幅提升, 继续增加测点, 最小估计均

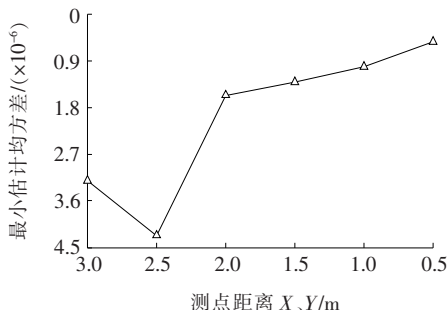


图 2 等间距工况下最小估计均方差

方差提升程度有所减小, 说明继续增加测点对插值精度提升效果逐渐减小。

图 3 为等间距工况下路基表面变形平均预测精确度, 从图 3 可以看出: 不同工况条件下表面变形平均预测精确度均大于 98%, 平均沉降预测误差均控制在毫米级范围内, 插值预测精确度均大于 95%, 说明普通克里金插值方法可以应用于模拟冻土路基的变形场。其中布设间距为  $X, Y = 2.0 \text{ m}$  时, 平均预测精确度有阶段性提高, 随着测点增加, 预测精度提高更为明显。但监测成本势必提升, 结合图 4 分析, 随着布设间距的减小, 需要布设的测点数量呈“指数型”增长, 其中布设间距为  $X, Y = 2.0 \text{ m}$  时, 相比布设间距为  $X, Y = 0.5 \text{ m}$  时, 节约监测成本达 93.4%, 继续增大布设间距, 节约监测成本不明显。综上分析, 可考虑采用  $X, Y = 2 \text{ m}$  的布设间距, 此时测点数量为 200 个。

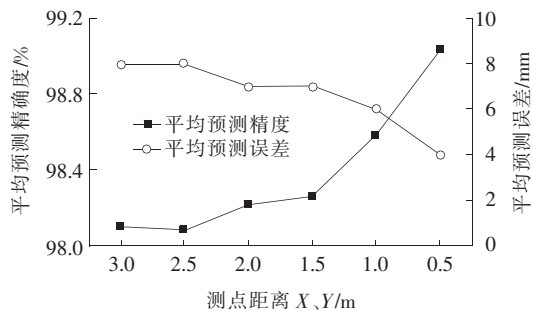


图 3 等间距工况下预测精确度与预测误差

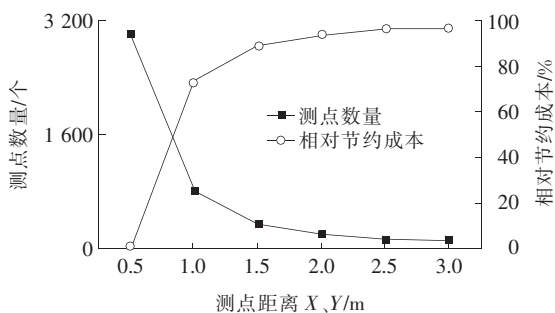


图 4 等间距工况下测点数量与相对节约成本

根据路基横向传感器优化分析, 拟定横向间距  $X = 2 \text{ m}$  不变, 开展路基纵向传感器优化分析, 以期进一步压缩监测成本, 具体布设参数为  $Y = 4, 6, 8, 10 \text{ m}$ , 相关计算结果如图 5~7 所示。当测点布设间距为  $X = 2.0 \text{ m}, Y = 4 \sim 6 \text{ m}$  时, 继续增加测点, 平均预测精度和节约成本提高效果不明显, 平均沉降预测误差仍可以控制在毫米级范围内, 综合考虑建议采用  $X = 2.0 \text{ m}, Y = 4 \sim 6 \text{ m}$  的布设间距, 测点数量为 68~104 个。

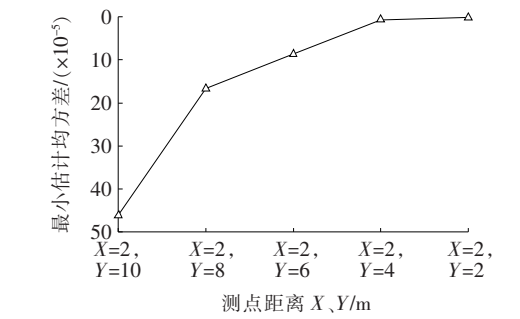


图5 不等间距工况下最小估计均方差

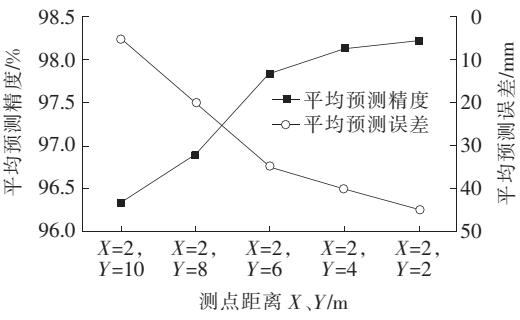


图6 不等间距工况下预测精确度与预测误差

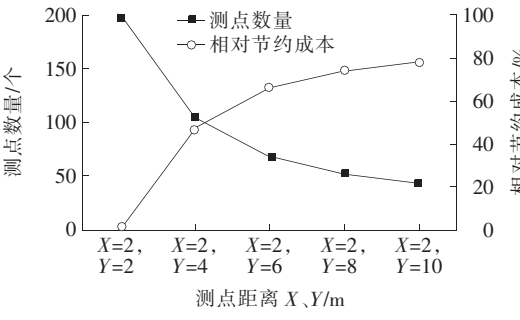


图7 不等间距工况下测点数量与相对节约成本

3 变形场光纤阵列监测方案

3.1 冻土路基变形场监测方案设计

多年冻土层热稳定性的改变导致路基力学稳定性变差,产生路基融沉变形的病害,对路基变形的监测能直接反映出公路病害程度,传统的变形监测方案在安置水准点后,人工通过水准仪进行监测,该方法需要监测人员长期在现场开展监测,当需要监测的断面增加时,费时费力。由于光纤传感技术在位移监测方面有很高的精度,完全可以满足路基变形监测的需求,且设计的光纤阵列传感器可以连续获得监测对象的位移变形,因此可以将光纤横向埋设于路基内对路基整体进行变形监测。同时,为了调控多年冻土层地温稳定性,多年冻土地区采取了一系列特殊路基措施,如块石气

冷路基、通风管路基、热棒路基等,综合考虑天然路基与特殊路基的结构形式,避免块石、通风管、热棒等路基结构对传感器布设造成影响,于填方路基与天然地面交界处设置一处测线,路面结构与路基结构交界处设置一处测线,图8为采用光纤阵列位移传感器进行路基变形监测的方案图。

3.2 冻土路基变形场监测实施方案

冻土路基光栅光纤阵列监测系统的实施过程主要为:测量,机械开挖,传感布设,光纤完好性检测,回填。具体施工步骤为:① 当路基施工填筑到传感器铺设标高后,通过现场测绘,确定横纵向传感器的具体位置;② 通过机械开挖出传感阵列的布设沟位,开挖深度30 cm;③ 先修整机械开挖沟的平整度,然后垫5 cm细沙,依次布设各个横向断面的传感阵列,再用5 cm细沙覆盖;④ 在传感光纤布设完成后,对传感光纤完好程度进行统一检测,确保传感光纤全部完好存活;⑤ 将传感光纤汇总于节点位置,并进行保护,同时将路基回填,并采用机械平整,保证光纤监测系统的布设对路基没有影响。

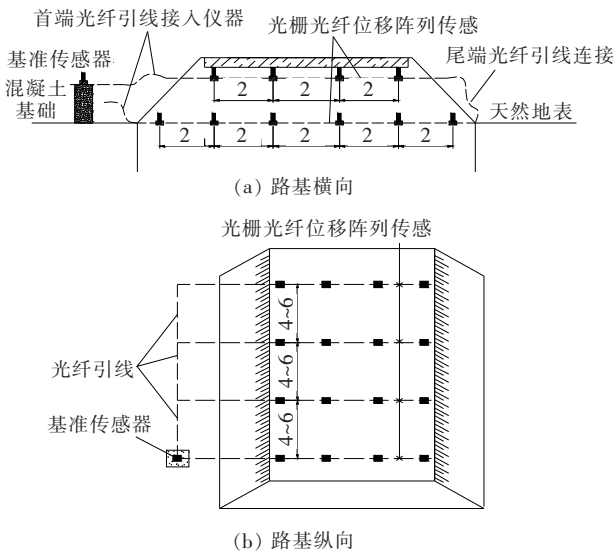


图8 冻土路基变形场监测方案(单位:m)

随着监测断面和监测对象的增加,需要配置的解调仪器数量急剧增加,监测仪器成本大幅提高,并且受限于高原低温、大温差、暴风雪频繁、强辐射的恶劣环境,将监测仪器暴露于外部环境容易影响仪器长期稳定的数据采样。基于光纤传输的稳定性和传输不用接电的优势,设计有线监测兼顾无线传输系统,该系统可以实现多个监测场的实时在线监测,具体实施过程为:① 将各个监测场横向断面布设的传感器集中后,通过



接线盒将各路监测传感的光纤信号接入总线;② 设计选址监控分中心,将总线从各个监测场引入分中心内,总线可以采用道路沿线的通讯光缆(或监测场到分中心距离较短时,可另自行铺设光缆);③ 在分中心内布置光纤解调仪,解调仪与 GPRS 无线传输系统相连接,可实现对总线上的所有传感器进行监测,完成控制每个传感器进行定时自动监测、自动保存数据和自动传输数据的功能。

监控分中心应当能保障在低温环境下数据的采集与传输,配备必要的解调仪器保温箱和防护措施。监测系统将产生海量光栅光纤监测数据,远程数据中心应当实现对监测数据的集成管理,能够按照光栅光纤数据解译方法对数据进行处理,并根据冻土路基变形特征信息的变化做出预警预报,结合冻土地温的分析,评判路基的稳定性并能够进行预警分析和发布,为工作人员提供辅助决策。

结合海量数据监测与大数据分析的冻土路基变形场监测系统具有自动化、非接触、全时域、全覆盖及智能化等特点,将远程硬件管理、远程数据管理相结合方便用户实时在线查看监测对象、监测数据及预测预报信息,将大量适应低温环境的光栅光纤传感进行集成管理和应用,可以有效地形成冻土路基由点及线及面的灾害自动化、长期持续监测,解决高原地区地广人稀、环境恶劣下监测数据的采集难题。

## 4 结 论

建立了基于布拉格光栅光纤传感阵列监测技术的冻土路基状态自动化监测系统,得到以下主要结论:

(1) 普通克里金空间插值最小估计均方差、平均预测精确度以及成本估计计算结果可以为传感优化布置提供依据。计算结果表明:光栅光纤位移阵列传感器优化设计参数为横向间距 2 m、纵向间距 4~6 m。

(2) 设计的光栅光纤位移阵列传感器可以满足多年冻土区路基大范围、大变位位移监测的需求,具有 1 mm 的高测量精度、0.457~1.373 m 可测大量程,适应于高原恶劣环境且稳定耐用。

(3) 冻土路基变形场监测方案适用于各种特殊结构冻土路基,实施方案简单便捷,易于搭建可扩充、可复制的传感阵列长期组网监测体系,实现冻土路基变形场自动化、非接触、全时域的监测及灾害预警。

目前光纤传感监测技术在多年冻土地区应用较

少,克服高寒高海拔的严酷环境、适应冻土路基变形特征是监测体系的研究重点,该文通过初步研究提出的路基灾变监测体系预计将开展室内试验,并在青藏高原多条公路上开展应用试验研究,研究成果将为青藏高原高速公路的顺利实施提供有利的技术支持。

## 参考文献:

- [1] 秦大河. 中国西部环境演变评估综合报告[M]. 北京:科学出版社,2002.
- [2] 朱东鹏,董元宏,刘戈,等. 宽幅沥青路面热效应对其下部土体热状态的影响[J]. 冰川冻土,2014(4).
- [3] Pei W, Jin L, Zhang M, et al. Study of the Time-Dependent Thermal Behavior of the Multilayer Asphalt Concrete Pavement in Permafrost Regions[J]. Construction and Building Materials, 2018, 193(DEC. 30): 162-172.
- [4] 蒋富强,杨永鹏. 青藏高原多年冻土区通风管路基传热规律研究[J]. 铁道工程学报, 2008(11).
- [5] 孙志忠,马巍,李东庆. 青藏铁路北麓河试验段块石路基与普通路基的地温特征[J]. 岩土工程学报, 2008(2).
- [6] Gabriel A K, Goldstein R M, Zebker H A. Mapping Small Elevation Changes over Large Areas: Differential Radar Interferometry[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 1989, 94(B7): 9 183-9 191.
- [7] Hoffmann J, Galloway D L, Zebker H A. Calibrating a Regional Ground-Water Flow and Subsidence Model in Antelope Valley, California, Using in SAR-Derived Subsidence Maps[C]. AGU Fall Meeting Abstracts, 2001.
- [8] 张伟朋. 三维激光扫描在青藏公路路基变形检测中的应用研究[D]. 长安大学硕士学位论文, 2017.
- [9] 李震,李新武,刘永智,等. 差分干涉 SAR 冻土形变检测方法研究[J]. 冰川冻土, 2004(4).
- [10] 谭衡霖,杨松林,魏庆朝. 青藏线多年冻土区路基变形星载 SAR 差分干涉测量应用探讨[J]. 铁道勘察, 2007(5).
- [11] 丛充. 基于 Sentinel-1A 卫星干涉数据的高原冻土走廊地表现形变研究[D]. 北京交通大学硕士学位论文, 2018.
- [12] 黎剑华,张鸿,刘优平,等. 光纤 Bragg 光栅在公路软基沉降监测中的应用[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2011(5).
- [13] 朱鸿鹄,施斌. 地质和岩土工程光电传感监测研究进展及趋势——第五届 OSMG 国际论坛综述[J]. 工程地质学报, 2015(2).
- [14] 柴敬,袁强,李毅,等. 采场覆岩变形的分布式光纤检测试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016(S2).