

谢穆武, 庞智勇, 黄跃群, 等. 基于FBG的长距离隧洞自动化监测[J]. 水利水电技术(中英文), 2026, 57(1): 234-248. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2026.01.018

XIE Muwu, PANG Zhiyong, HUANG Yuequn, et al. FBG-based automated monitoring of long-distance tunnels[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2026, 57(1): 234-248. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2026.01.018

基于FBG的长距离隧洞自动化监测

谢穆武¹, 庞智勇², 黄跃群³, 李正良³, 张振⁴, 刘耀儒²

(1. 湖南省水利水电勘测设计规划研究总院有限公司, 湖南长沙 410007; 2. 清华大学水利水电工程系, 北京 100084; 3. 湖南省水利发展投资有限公司, 湖南长沙 410000; 4. 苏州南智传感科技有限公司, 江苏苏州 215128)

摘要:【目的】长距离隧洞工程在现代基础设施建设中占据重要地位, 开展隧洞监测对确保其安全性和可靠性至关重要。传统电测方法因供电、数据采集和远距离传输等问题, 在长距离隧洞监测中面临挑战。为解决长距离隧洞监测数据传输的难题, 【方法】提出了一套基于光纤布拉格光栅(Fiber Bragg Grating, FBG)的长距离隧洞多源数据自动化监测与传输方案。该方案构建了包含感知层、传输层和应用层的集成化监测系统架构, 利用5G网络技术和云平台实现了变形、渗压及锚杆应力等数据的自动化传输、存储、统计和分析, 达到了高效的数据处理和实时监测的目的。将所提方案应用于中国湖南某隧洞工程, 完成了长度超过20 km隧洞的连续监测, 验证了FBG技术在长距离数据传输方面的稳定性和可行性。【结果】监测结果显示: 光纤监测数据与电测数据在各监测阶段的均值相近, 二者在位移、渗压和锚杆应力监测方面的最小相对误差分别为0.46%、3.23%和2.37%。【结论】4个多月的监测结果表明, 光纤传感技术能够稳定获取并传输大量满足精度要求的监测数据。此外, 两者监测数据量值接近, 变化规律一致, 表明光纤监测结果具有较好可靠性。所提FBG感测技术方案为长距离隧洞的安全监测提供了一种可行的新思路。

关键词: FBG; 隧洞监测; 数据长距离传输; 多源数据; 自动化监测; 变形; 长距离隧洞

DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2026.01.018

开放科学(资源服务)标志码(OSID):

中图分类号: TV213.4

文献标志码: A

文章编号: 1000-0860(2026)01-0234-15



FBG-based automated monitoring of long-distance tunnels

XIE Muwu¹, PANG Zhiyong², HUANG Yuequn³, LI Zhengliang³, ZHANG Zhen⁴, LIU Yaoru²

(1. Hunan Water Resources and Hydropower Survey, Design, Planning and Research Co., Ltd., Changsha 410007, Hunan, China; 2. State Key Laboratory of Hydrosience and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 3. Hunan Provincial Water Resources Development & Investment Co., Ltd., Changsha 410007, Hunan, China;

收稿日期: 2025-02-19 修回日期: 2025-03-13; 录用日期: 2025-03-14; 网络出版日期: 2025-03-17

基金项目: 国家自然科学基金项目(52179105); 犬木塘水库工程科技创新资助项目

作者简介: 谢穆武(1968—), 男, 高级工程师, 专业院院长, 学士, 主要从事水利水电工程、水运工程的检测监测、工程地质、工程物探等领域研究。E-mail: 1054543391@qq.com

通信作者: 刘耀儒(1974—), 男, 教授, 清华大学水利水电工程系河川枢纽与建设管理研究所所长, 博士, 主要从事水工结构与岩石力学研究。E-mail: liuyaoru@tsinghua.edu.cn

©Editorial Department of Water Resources and Hydropower Engineering. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

4. Suzhou NanZee Sensing Technology Co., Ltd., Suzhou 215128, Jiangsu, China)

Abstract: [Objective] Long-distance tunnel engineering plays a critical role in modern infrastructure construction, where tunnel monitoring is essential to ensure safety and reliability. Traditional electrical measurement method face challenges in long-distance tunnel monitoring due to power supply constraints, data acquisition limitations, and signal attenuation over extended transmission distances. [Methods] To address these challenges, a fiber Bragg grating (FBG)-based automated multi-source monitoring and transmission scheme was proposed. An integrated monitoring system architecture was constructed, comprising perception, transmission, and application layers. Automated transmission, storage, statistical analysis, and visualization of deformation, seepage pressure, and bolt stress data were achieved through 5 G network technology and cloud platforms, enabling efficient data processing and real-time monitoring. The proposed scheme was applied to a tunnel project in Hunan, China, achieving continuous monitoring over 20 km, which validated the stability and feasibility of FBG technology in long-distance data transmission. [Results] Monitoring result indicated that fiber-optic and electrical measurements exhibited closely aligned mean values across monitoring phases, with minimum relative errors of 0.46%, 3.23%, and 2.37% in displacement, seepage pressure, and bolt stress monitoring, respectively. [Conclusion] Over four months of monitoring demonstrated that fiber-optic sensing technology stably acquired and transmitted large volumes of data meeting accuracy requirements. Additionally, the proximity in data magnitudes and consistency in variation patterns between the two method confirmed the reliability of fiber-optic monitoring. The proposed FBG-based sensing scheme offers a viable new approach for safety monitoring in long-distance tunnel engineering.

Keywords: FBG; tunnel monitoring; long distance data transmission; multi-source data; automated monitoring; deformation; long distance tunnels

0 引言

长距离隧洞工程在现代基础设施建设中扮演着重要角色, 不仅连接了地理上分隔的区域, 还为资源传输提供了必要的通道。然而, 复杂赋存环境下, 隧洞结构的安全性和稳定性面临着诸多挑战, 特别是在长期使用过程中, 围岩变形、应力变化等问题可能威胁隧洞的安全运行。因此, 建立有效的长距离隧洞监测系统, 对保障其安全稳定运行至关重要^[1-2]。

传统电测方法在隧洞监测中虽然广泛应用, 但存在若干局限性^[3-4]。长距离隧洞中的传统电测法监测方案如图 1 所示。首先, 常规测试供电方式难以满足长距离信号传输的需求, 导致数据采集点受限。其次, 由于信号衰减的影响, 远距离的数据传输精度会显著下降。如果采用在监测断面钻孔布线的方式, 则成本高昂且布设难度大, 在恶劣环境下的适用性也受到限制, 同时增加了施工难度和后期维护的工作量。这些问题表明, 传统的电测方法在长距离隧洞监测中

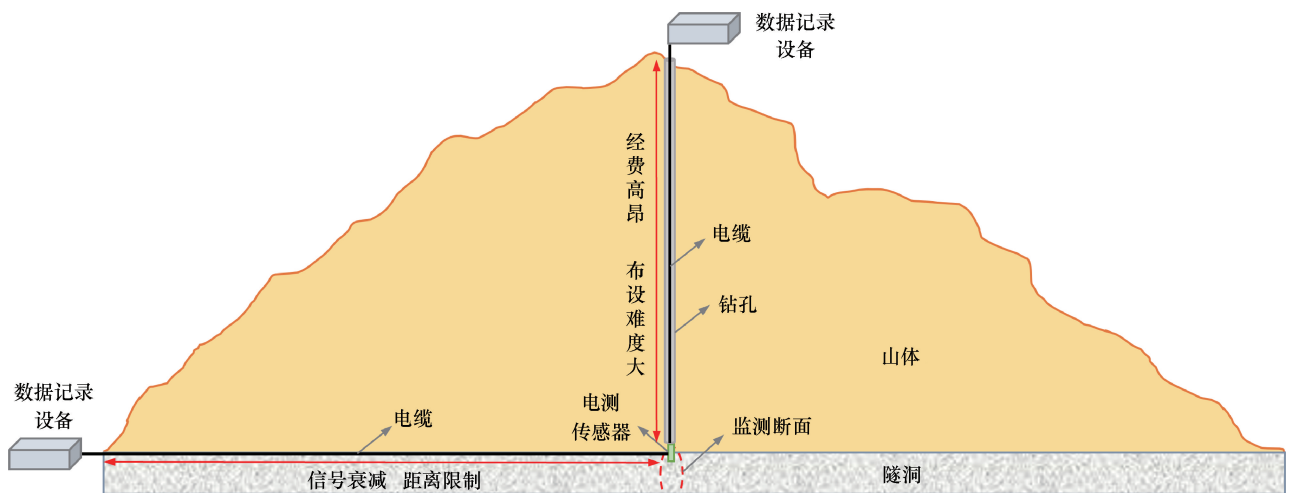


图 1 长距离隧洞中的传统电测法监测方案示意

Fig. 1 Schematic of conventional electrical monitoring in long distance tunnels

遇到瓶颈, 亟需新的解决方案。

近年来, 光纤传感技术的发展为上述难题带来了转机。作为一种新兴的监测手段, 光纤布拉格光栅 (Fiber Bragg Grating, FBG) 传感器凭借其高灵敏度、抗电磁干扰、小型化以及非侵入式安装等优点, 逐渐成为长距离隧洞监测的理想选择^[5-8], 也适用于监测极寒和高海拔等极端环境中隧洞结构的应力应变^[9]。与传统电测法相比, FBG 监测方法具有监测距离更长、单位长度造价更低、耐久性更好、维护费用更低以及适用场景更广等诸多优势^[10], 如表 1 所列。FBG 感测技术利用光波作为载体, 通过复用多个传感器可以实现对不同位置或多种物理参数的同时监控, 并且得益于光纤的低损耗特性, 能够构建长距离、大规模的分布式传感网络^[11]。目前已有相关学者致力于探索光纤传感技术在隧洞监测中的应用。施斌等^[12]采用一种钻孔全断面分布式光纤监测技术, 以获得地面沉降过程中的多种监测数据。张玉芳等^[13]在隧洞现场布设千米级长度的分布式光纤进行应变监测。杨忠民^[14]基于分布式光纤传感技术的特点, 提出了隧洞衬砌变形监测技术方案, 为分析隧洞所处滑坡体的稳定性提供监测数据支撑。黄井武等^[15]采用分布式光纤感测技术, 研究了输水隧洞内压加载过程中衬砌结构的力学行为。李震等^[16]将光纤监测技术应用于公路隧道火灾的监测、定位与规模预测。李佳程^[17]研发了 FBG 沉降仪并应用于西藏多雄拉 TBM 隧道工程。LI 等^[18]通过施作超前孔将 FBG 传感器应用于隧洞 TBM 掘进过程中围岩全过程的变形监测。SONG 等^[19]使用 FBG 传感技术以监测隧洞开挖引起的周围岩土体的变形。JIANG 等^[20]和 LIU 等^[21]采用超弱 FBG 振动传感阵列获取地铁隧道振动信号。ZHU 等^[22]将光纤传感技术应用于中国苏州一条弯曲盾构隧洞的监测。LI 等^[23]使用 FBG 传感器获取隧洞地质力学模型试验中的结构应变。KIM 等^[24]将基于 FBG 的温度传感器模块应用于地下综合管廊的温度监测。WANG 等^[25]将 FBG 技术应用于中国四川天府新区城市地下空间的多物理信息的监测。GUO 等^[26]提出了一种新型高吸水性聚合物涂层的超弱光纤布拉格光栅传感器, 用于隧道中的漏水监测和定位。SUN 等^[27]采用 LG-FBG 传感系统来监测管道变形并提出一种两阶段分析方法以量化变形。XU 等^[28]提出了一种采用多模光纤的 FBG 传感器, 可同时监测扭矩和温度或应变。光纤传感监测技术在隧洞围岩、衬砌管片结构以及桥梁等领域均有一定的应用与前景^[29-32]。

表 1 FBG 方法与传统电测法对比

Table 1 Comparison of the FBG method with conventional electrodiagnostic methods

指标	传统电测法	光纤布拉格光栅法
监测长度范围	0.1~2.0 km	数千米至数十千米
单位长度造价/元·km ⁻¹	12 000	5 000
长距离扩展成本	随距离线性增加	随距离非线性降低 (复用优势)
使用年限/a	5~8	10~20
年均维护费用	安装造价的 10%~20%	安装造价的 5%左右
适用场景	小范围、低干扰环境	大范围、极端环境

然而, 尽管上述研究取得了一定成果, 但 FBG 感测技术在实际工程应用中仍面临一些挑战^[33]。一方面, FBG 感测技术在千米级长隧洞中的稳定监测与数据传输有待进一步验证; 另一方面, 如何实现系统自动化集成, 保证数据传输的可靠性与及时性也是一个不容忽视的问题。因此, 本文提出了一种基于 FBG 的长距离隧洞多源数据自动化监测与传输方案。该方案旨在为解决长距离隧洞监测数据传输的难题提供一个高效、可靠的应对思路。方案提出了包含感知层、资源层和应用层的监测系统集成架构。感知层负责部署 FBG 传感器, 用于实时获取隧洞内部的变形、渗压和锚杆应力等多源数据; 资源层通过 5 G 网络技术和云平台系统, 实现了数据的自动化传输、存储、统计和分析; 应用层则提供了一个基于云平台的用户友好界面, 服务于工程师和技术人员进行数据分析和决策支持^[34]。为验证光纤传感技术在长距离数据传输方面的可行性与数据的可靠性, 将所提方案应用于超过 20 km 的长距离隧洞的监测任务。

1 光纤传感技术与现场监测布置

1.1 光纤光栅传感技术

光纤布拉格光栅感测技术是一种基于光学波导中周期性折射率调制的高灵敏度测量方法^[35]。FBG 利用紫外光曝光的方法将入射光的相干场图形写入纤芯, 使纤芯的折射率发生周期性变化, 从而产生周期性调制, 在单模光纤的纤芯内形成永久性空间相位光栅。FBG 的基本原理是当光栅受到拉伸、挤压及热变形时, 检测光栅反射信号的变化^[36]。

FBG 折射率沿光纤轴向呈周期性分布, 具有良好的波长选择特性, 满足布拉格衍射条件的波长为 λ_B 的入射光在 FBG 处被耦合反射, 其它波长的光则会全部通过而不受影响, 反射光谱在 FBG 中心波长 λ_B 处出现峰值。FBG 感测技术原理如图 2 所示。

λ_B 受温度、应变变化影响而改变, 且满足线性

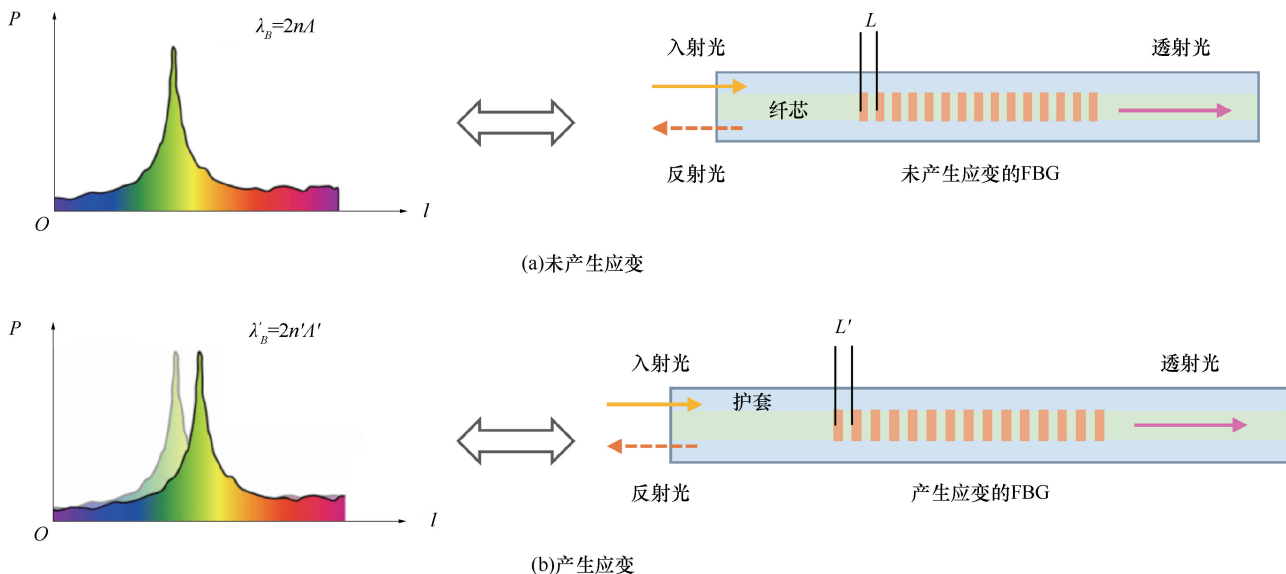


图 2 FBG 感测技术原理

Fig. 2 Principle of FBG sensing technology

关系

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_B} = (1 - P_e)\varepsilon + (\alpha + \zeta)\Delta T \quad (1)$$

式中, $\Delta\lambda$ 为 FBG 波长变化量; ε 为光纤轴向应变; ΔT 为温度变化; P_e 为光纤光弹系数; α 为光纤热膨胀系数; ζ 为光纤热光系数。

FBG 感测技术以其独特的优势, 广泛应用于各类场景。以其高灵敏度和多参量监测能力, 能够精确检测微小的物理变化, 并通过复用技术实现在单根光纤中对多个位置或不同物理参数的同时监控。该技术拥有出色的抗电磁干扰性能, 适用于强电磁环境; 同时, 由于其基于光波传感, FBG 传感器具备长期稳定性和耐用性, 能够在恶劣条件下提供可靠数据。结合光纤的低损耗传输优势, FBG 还能构建长距离、大规模的分布式传感网络。

1.2 不同集成思路对比分析

使用 FBG 感测技术进行长距离隧洞监测可考虑不同的线路集成思路, 串联、并联和混合拓扑的特性对比如表 2 所列。串联拓扑集成是从光纤光栅解调仪出发, 使用单根光纤依次将隧洞各断面的 FBG 传感

器联结, 该集成思路具有较高的光功率利用率和较低成本, 但容错性低, 单点故障将影响整条链路的正常运行。并联拓扑集成是从光纤光栅解调仪出发, 通过分光器将光信号分配到多条独立光纤支路, 每条支路布置独立 FBG 传感器。光信号经分光器分发至各支路后, 各支路的 FBG 传感器独立反射特定波长, 反射信号沿原路返回解调仪。该集成思路具有极高的容错性, 但由于分光器损耗导致光功率利用率较低, 同时使用更多光纤使得成本增加。混合拓扑集成结合串联与并联拓扑, 采用分层设计, 主分光器分配光信号至多条主支路, 主支路内可进一步串联 FBG 传感器或嵌套次级分光器形成子支路。通过多层级分光与串联组合, 实现广域覆盖与局部密集监测的平衡。该集成思路光功率利用率较高, 成本适中, 具有较高容错性。对隧洞监测断面线性分布且在单个监测断面测点集中分布的感测需求有良好适用性。因此, 所提监测方案采用混合拓扑集成思路, 对隧洞不同监测断面光纤线路并联, 同一监测断面光纤传感器串联。当某一监测断面发生故障时, 其余监测断面仍可正常工作。

表 2 不同集成思路特性对比

Table 2 Comparison of the characteristics of different integration ideas

特性	串联拓扑	并联拓扑	混合拓扑
传感器密度	低(沿线性路径分布)	高(局部区域)	适中(线性分布、局部加密)
容错性	低(单点故障影响整条链路)	高(支路独立)	较高
光功率利用率	高(单链路连续传输)	低(分光器损耗主导)	平衡分光与串联损耗
适用场景	长距离线性监测	复杂空间布局、冗余设计	长距离关键部位监测
成本	低(单根光纤)	高(更多光纤)	适中(多根光纤)

1.3 基于 FBG 的长距离隧洞围岩监测

基于 FBG 的长距离隧洞围岩自动化监测方案如图 3 所示, 采用混合拓扑集成思路, 基于该光纤监测方案开展现场布置, 如图 4 所示。整个监测方案与系统可划分为感知层、传输层和应用层。首先, 在感知层, 在隧洞各监测断面布置 FBG 传感器, 实时获取隧洞各项信息。其次, 在传输层, 将传感器测得信号通过引线光缆沿着洞壁引至集成点, 集成点保护箱固定在隧洞排水一侧洞壁上, 防止过车、施工刮蹭损坏。在线路集成点处, 将测点引线光缆与主光缆对接, 使得不同点位的监测线路集成到主光缆内一同引入监测站。主光缆同样沿隧洞排水一侧洞壁上固定引出隧洞。为验证光纤光栅传感技术在远距离隧洞监测数据传输方面的可行性, 同时为节省长距离布置光缆的人力成本, 选择隧洞出口附近的合适断面作为监测断面, 并将主光缆引出隧洞后连接长度为 20 km 的多芯光缆。集成至监测站后, 通过光纤接续盒将主光

缆每根纤芯熔接光纤跳线, 将标记好的跳线一一接入分光器后, 再接入光纤光栅解调仪, 完成设备集成。再通过 5 G 网络技术将数据发送至云服务器, 从而实现整体监测单元的网络化控制。最后, 在应用层, 基于云平台系统, 对获取的监测数据进行自动化存储、统计和分析。通过传输网络可以实时在线监测、查看监测结果, 最终达到自动化监测的目的。

与传统电测方法相比, 本方案在安装流程上更加便捷。例如使用电阻应变片时需逐个粘贴传感器, 并独立布线连接采集设备。而本方案使用的 FBG 传感器出厂预接, 可一体安装, 熔接两端, 解调仪自动识别所有传感器, 大幅缩短传感器安装耗时。在数据采集方面, 传统人工数据采集方法具有低时效性、数据处理滞后性和人为误差累积等弊端。所提 FBG 传感系统通过硬件集成和光纤传输, 实现了自动化监测, 并基于 5 G 网络和云平台监测系统对数据进行云端可视化展示与分析。

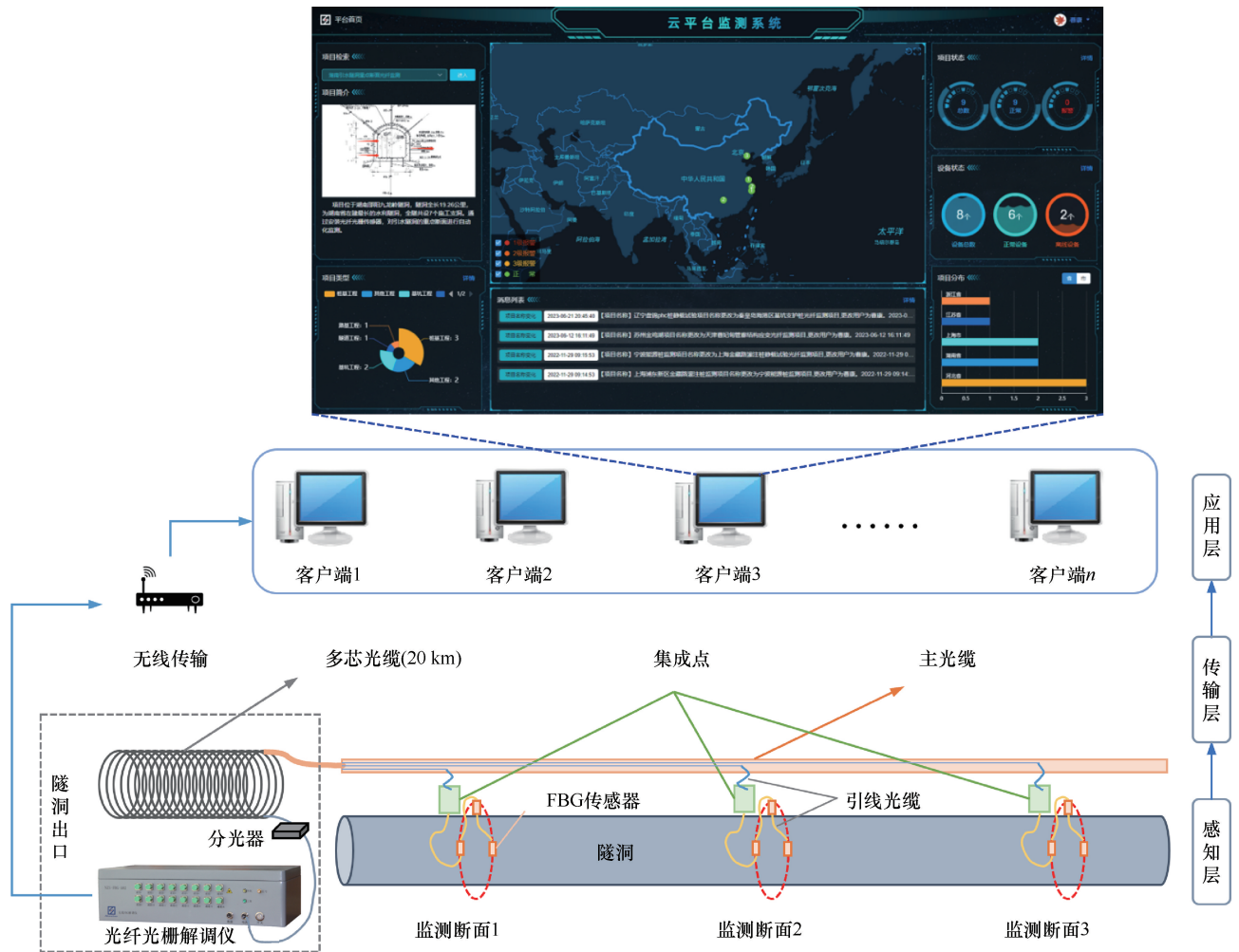


图 3 基于 FBG 的长距离隧洞围岩自动化监测方案

Fig. 3 Automated monitoring scheme for long-distance tunnel surrounding rock based on FBG technology

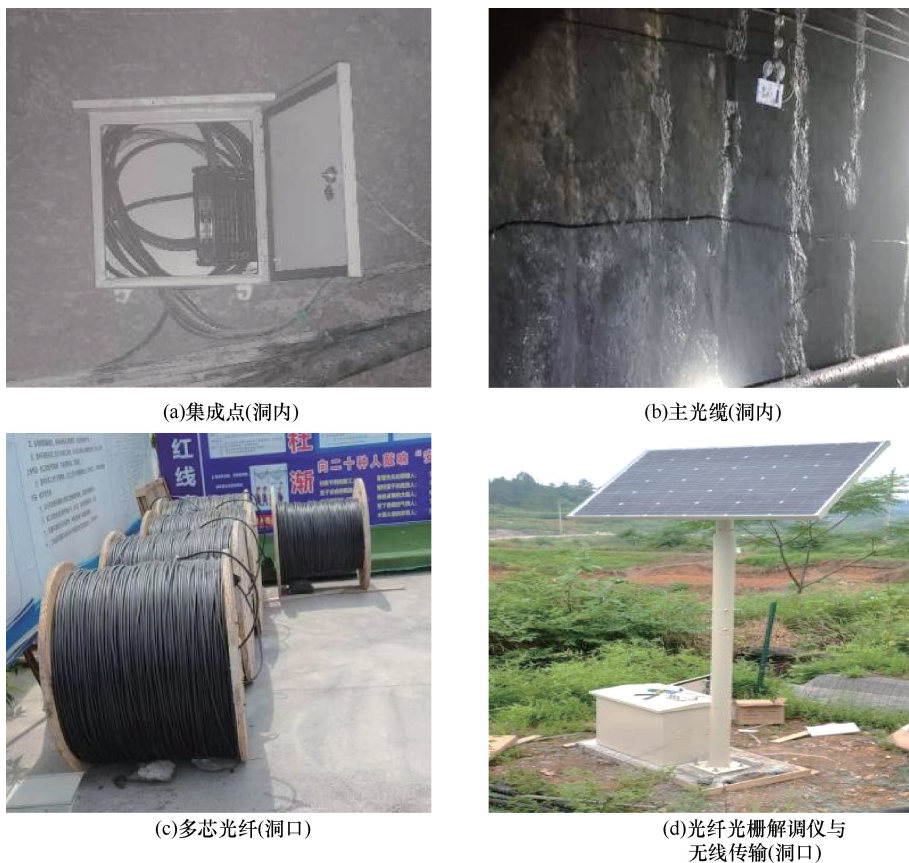


图 4 光纤监测方案现场布置

Fig. 4 Field deployment of fiber optic monitoring scheme

为确保光纤在长距离隧洞传输和恶劣环境中的物理安全并延长使用寿命,采用带有保护层的铠装光纤(Armored Fiber)。铠装光纤的内部结构如图 5 所示,从外到内分别由 PVC 外护套、芳纶、螺旋钢管、紧包光纤和光芯组成。在光芯外层包裹了一层层坚固的保护材料,编织成类似盔甲的形式,从而提供额外的机械保护,防止物理损伤、挤压、潮湿和腐蚀等的

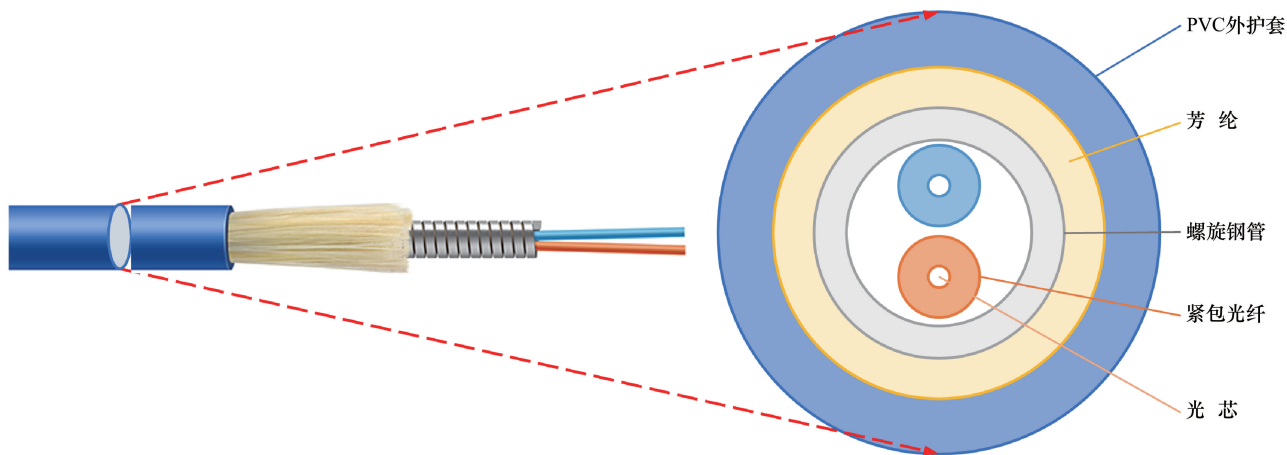


图 5 铠装光纤结构示意图

Fig. 5 Armored fiber optic structure diagram

影响,从而提高系统的耐久性。

1.4 监测断面布置

该洞段隧洞出口断面桩号为 18+320。为便于现场光纤监测测试,共选取了邻近隧洞出口的 3 个隧洞断面作为监测断面。其中,监测断面 1 所处隧洞桩号为 18+350,距离隧洞出口 30 m,如图 6(a)所示;监测断面 2 和监测断面 3 所处隧洞桩号分别为 19+500 和 19+910,距离隧洞出口分别为 1 180 m 和 1 590 m,如图 6(b)所示。

2 隧道监测 FBG 传感器布置

2.1 监测变量和传感器

依据工程需要,对隧洞变形、渗压和锚杆应力进行监测。各监测断面传感器布置如表 3 所列。在监测断面 1 和监测断面 2 安装光纤光栅位移计,每个断面布设两个孔,每个孔内串联安装 3 支光纤光栅位移计,每支位移计间距 3.3 m,共计安装 12 支光纤光栅位移计。各监测断面的 FBG 位移计布置如图 7(a)所示。

在监测断面 1 和监测断面 2 安装光纤光栅渗压计,每个断面布设两个孔,孔深 0.5 m,每个孔内安装 1 支光纤光栅渗压计,共计安装 4 支光纤光栅渗压计。各监测断面的 FBG 渗压计布置如图 7(b)所示。

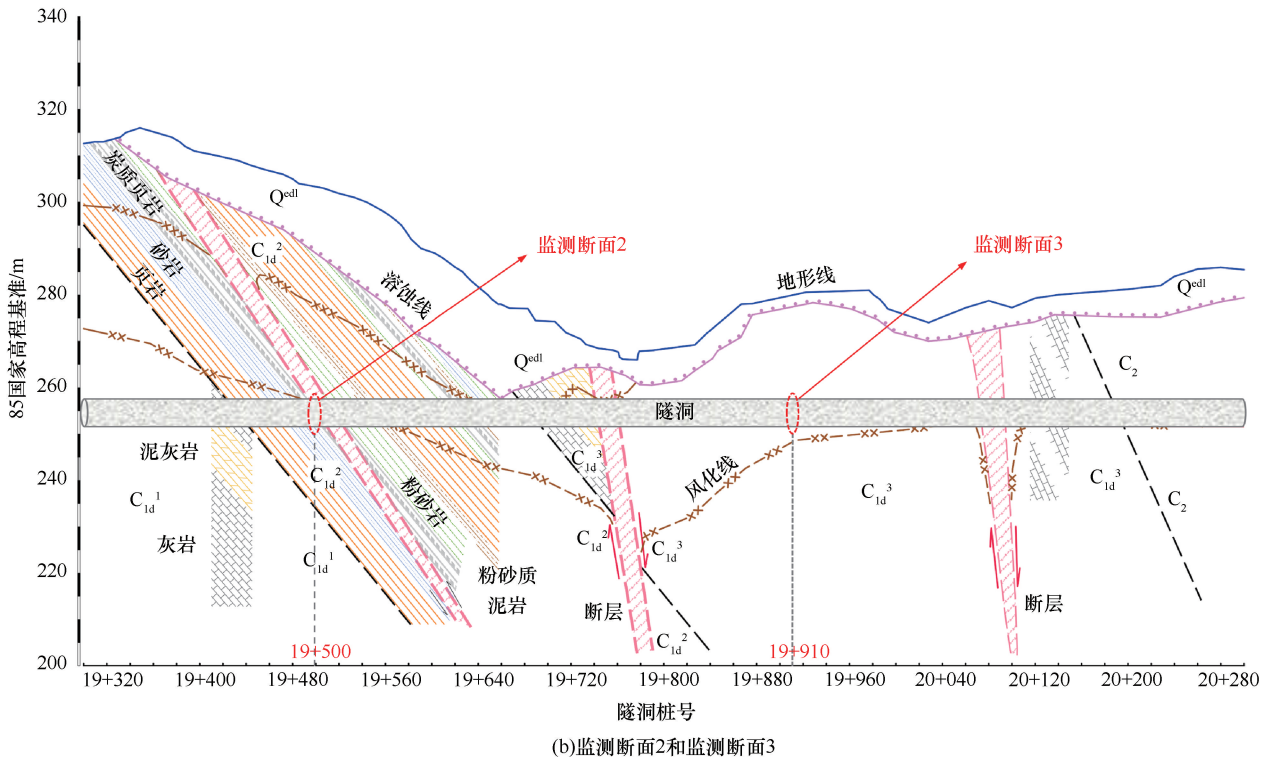
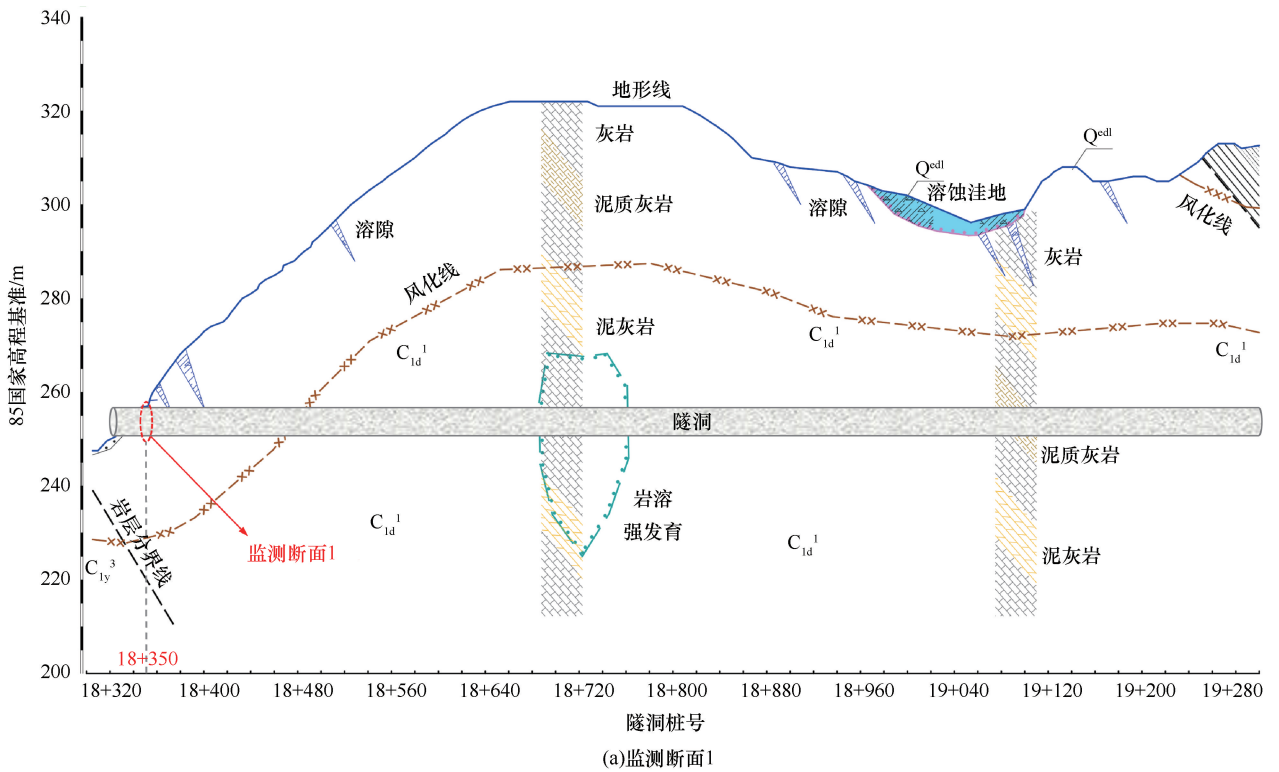


图 6 基于 FBG 的监测断面位置示意

Fig. 6 Schematic of FBG-based monitoring section locations

在监测断面 3 安装光纤光栅锚杆应力计, 布设 3 个孔, 在每个孔内锚杆的指定位置安装 1 支光纤光栅锚杆应力计。接有锚杆应力计的锚杆埋设在岩体的钻孔中并用水泥砂浆封固。监测断面的 FBG 钢筋应

力计布置如图 7(c) 所示。

2.2 FBG 传感器相关特性与参数

隧洞基岩位移变形监测使用 FBG 位移计, 如图 8 (a) 所示。其利用光纤光栅固定在传感梁上作为微

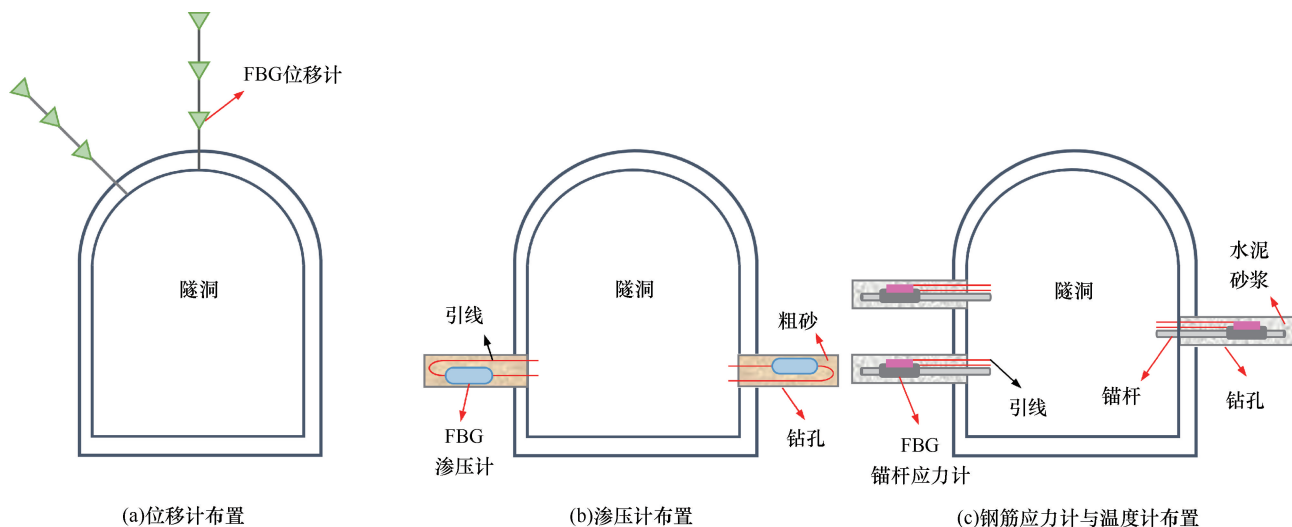


图 7 监测断面的传感器布置

Fig. 7 Sensor arrangement for monitoring sections

表 3 监测断面传感器布置

Table 3 Monitoring section sensor arrangement

隧洞桩号	监测断面编号	布置传感器类型	传感器数量
18+350	监测断面 1	FBG 位移计	6
		FBG 渗压计	2
19+500	监测断面 2	FBG 位移计	6
		FBG 渗压计	2
19+910	监测断面 3	FBG 锚杆应力计	3

形将引起传感器内弹性传感梁的变形, 使光纤光栅周期改变, 从而导致输出波长发生变化, 测量时利用光纤光栅解调仪测量传感器的输出波长, 再经换算即可得到待测结构体的位移变化量。传感器内部自带温度传感元件, 同时具备温度自补偿和环境温度测量的功能。

隧洞基岩渗水压力监测使用 FBG 渗压计, 如图 8 (b) 所示。其主要适用于地下孔隙水压力、油气压力、隧洞渗水压力等液体压力测量, 具有尺寸小巧、可串联测量、一孔多埋、耐腐蚀、长期稳定性好等优点。

FBG 锚杆应力计如图 8(c) 所示。其利用光纤光栅作为微测力元件, 通过轴向拉伸或压缩对传感器弹性敏感元件产生的作用力变化对光纤光栅波长的影响来测量钢筋轴力。光纤光栅锚杆应力计主要由弹性敏感元件段、固定焊接段、光纤引线及光纤光栅组成, 具有无变径结构、长期稳定性好等优点。各传感器的技术参数如表 4 所列。

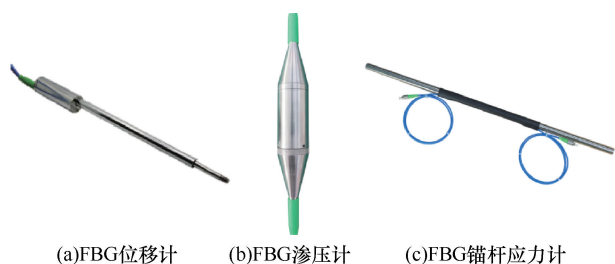


图 8 基于 FBG 的监测传感器

Fig. 8 FBG-based monitoring sensors

传感元件, 待测结构因受力或者温度变化等产生的变

表 4 FBG 传感器参数

Table 4 Parameters of each FBG sensor

性能参数	FBG 位移计	FBG 渗压计	FBG 锚杆应力计
量程	0~200 mm	0~0.2 MPa	-100~300 MPa
分辨率/F. S.	<0.1%	0.1%	<0.1%
非线性度/F. S.	<1.0%	<1.0%	<1.0%
工作温度/℃	-20~+80	-20~+80	-20~+80
光栅中心波长/nm	1 510~1 590	1 510~1 590	1 510~1 590
外形尺寸	φ28×200 mm	φ50×22 mm	22 mm
连接方式	熔接或 FC/APC 插接	熔接或 FC/APC 插接	熔接或 FC/APC 插接
安装方式	钻孔埋设	钻孔埋设	焊接、螺纹连接

2.3 FBG 传感器布设

在布设前需进行钻孔, 钻进过程中, 泥浆密度要适中以保证钻孔的稳定性, 不能有塌孔、缩径现象。成孔后, 对钻孔进行一次扫孔处理, 并用清水进行洗孔。光纤光栅位移计提前组装完成后, 通过 PVC 管为载体放入孔内, 然后通过管孔底返浆的方式注浆封孔。FBG 位移传感器现场布设过程如图 9 所示, 经历了传感器的组装、联结、安装与封孔等工序。

FBG 渗压计现场布设过程如图 10 所示。FBG 渗压计安装前应将仪器在清水中浸泡 8 h 以上, 确保仪器达到饱和状态, 以该状态下的测试值作为传感器初值。将渗压计与光纤引线连接, 渗压计位置采用尼龙纱网过滤网对传感器进行包裹并充填粒径 5 ~ 10 mm 的粗砂。将光纤光栅渗压计放入钻孔指定位置, 使用粗砂回填, 并用快干水泥完成钻孔封口, 安装完成后记录光谱和波长, 并做好引线保护工作。

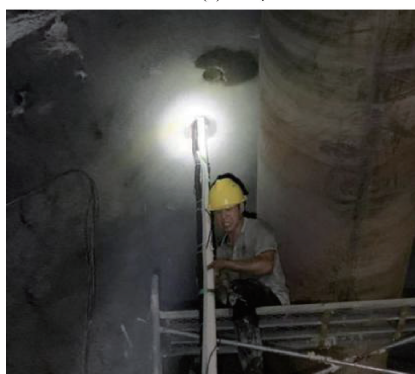
FBG 锚杆应力计现场布设过程如图 11 所示。提前将光纤光栅温度计绑扎固定在锚杆应力计上, 作为其温度补偿传感器。采用绑条焊接的方法对应力计进行固定。将接有锚杆应力计的锚杆埋设在岩体钻孔中并用相同的锚固工艺进行安装。传感器引线引出孔口位置采用穿套钢丝软管的方式对引线进行加强保护。



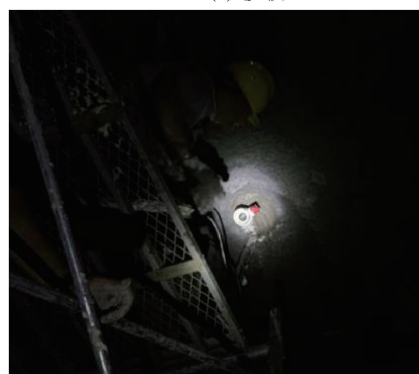
(a) 组 装



(b) 连 接



(c) 安 装



(d) 封 孔

图 9 FBG 位移传感器布设过程

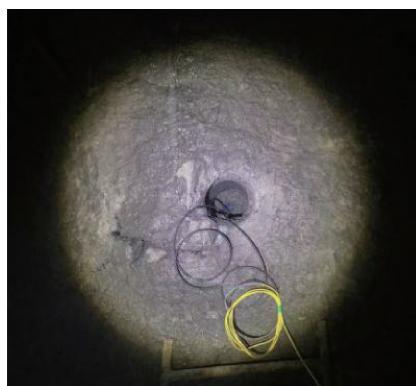
Fig. 9 FBG displacement sensor installation process

3 监测数据分析

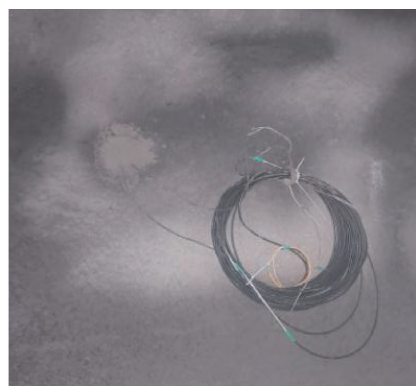
基于上述 FBG 传感器测得的围岩位移精度为 0.01 mm, 锚杆应力精度为 0.001 MPa, 渗水压力精度为 0.000 1 MPa。参考我国《公路隧道施工技术规范》(JTG/T 3660—2020) 要求, 隧洞内围岩位移最低测量精度为 0.1 mm, 锚杆应力和渗水压力最低测量精度为 0.01 MPa。获取的监测数据均满足精度要求。



(a) 组 装



(b) 安 装



(c) 封 孔

图 10 FBG 渗压计布设过程

Fig. 10 FBG manometer installation process

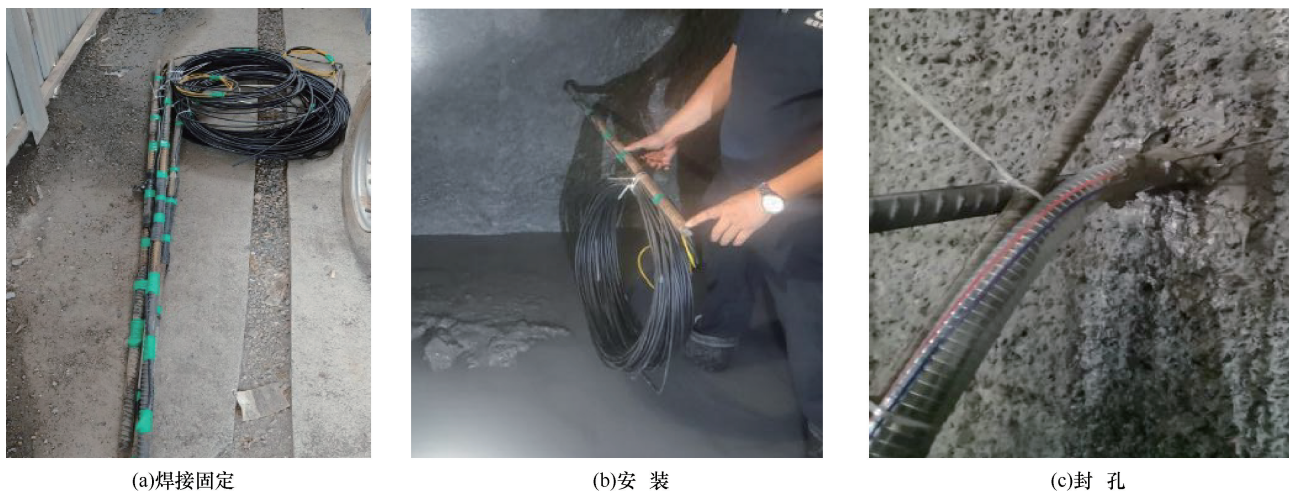


图 11 FBG 锚杆应力计布设过程

Fig. 11 FBG anchor stress sensor deployment process

3.1 变形监测数据分析

由 FBG 位移计得到的监测断面 1 的拱肩围岩变形如图 12(a) 所示。由图 12 可以看到, 断面拱肩变形波动相对平稳。7 月, 洞壁处围岩变形在 $-2 \sim 0$ mm 之间波动, 距洞壁 3.3 m 和 6.6 m 深处围岩变形在 $0 \sim 2$ mm 之间波动。现场注浆时, 洞壁处和距洞壁 3.3 m 深处围岩变形发生较为明显的增大。之后, 洞壁处围岩变形在 $0 \sim 2$ mm 之间波动, 距洞壁 3.3 m 深处围岩变形在 $2 \sim 3$ mm 之间波动, 距洞壁 6.6 m 深处围岩变形在 $1 \sim 2$ mm 之间波动, 整体随时间趋于相对平稳变化。总体而言, 监测断面拱肩处围岩变形呈现如下规律: 距洞壁 3.3 m 深处 > 距洞壁 6.6 m 深处 > 洞壁处。

由 FBG 位移计得到的监测断面 2 的拱顶围岩变形如图 12(b) 所示。由图 12 可以看到, 在监测初期,

断面顶部围岩变形在 $2 \sim 4$ mm 之间。现场注浆时, 洞壁处、距洞壁 3.3 m 深处和距洞壁 6.6 m 深处, 围岩变形均有明显的变化, 后又趋于相对平稳变化。围岩变形随时间逐渐趋稳时, ZG19+500 断面顶部洞壁处围岩变形在 $4 \sim 6$ mm 之间波动, 距洞壁 3.3 m 深处围岩变形在 $3 \sim 5$ mm 之间波动, 距洞壁 6.6 m 深处围岩变形基本稳定在 4 mm 左右。总体而言, 距洞壁 3.3 m 深处和距洞壁 6.6 m 深处围岩变形基本一致, 洞壁处围岩变形相对明显。

3.2 渗压监测数据分析

由 FBG 渗压计得到的监测断面 1、断面 2 的渗透压力如图 13 所示。由图可以看到, 各监测断面左右两侧渗水压力变化相对平稳, 在 $0 \sim 0.003$ MPa 间波动, 等效于 $0 \sim 0.3$ m 水头; ZG18+350 断面右侧渗水

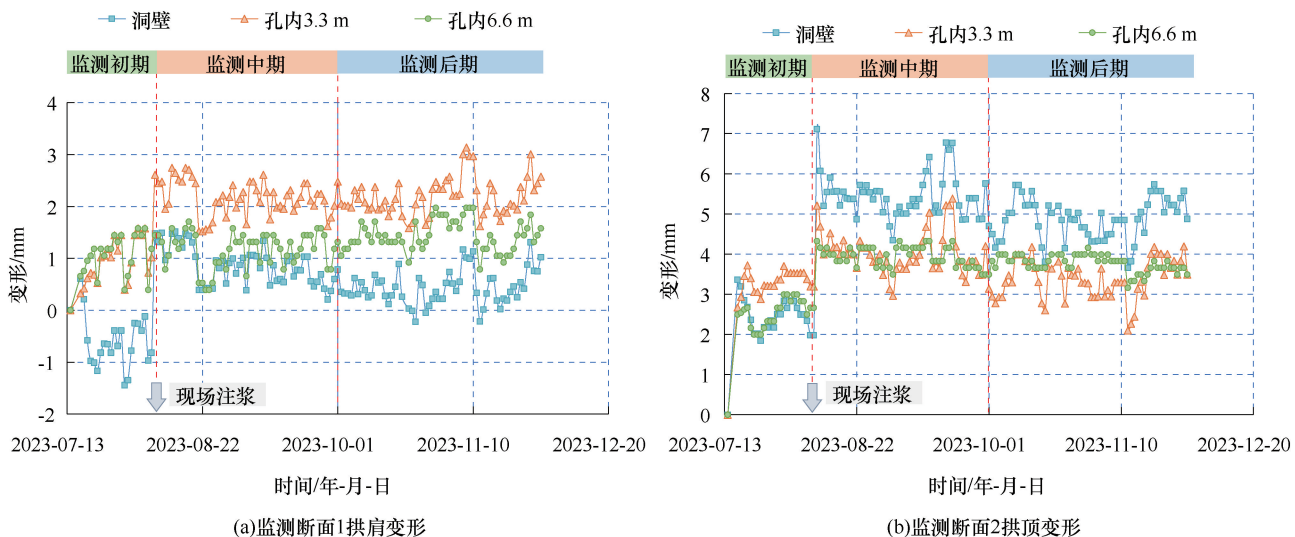


图 12 监测断面变形曲线

Fig. 12 Monitoring of section displacement curves

压力在 0~0.005 MPa 之间波动, 等价于 0~0.5 m 水头; ZG18+350 断面左侧渗水压力波动相对明显, 但波动范围较小, 监测点的渗压在 -0.003~0.005 MPa 间波动。

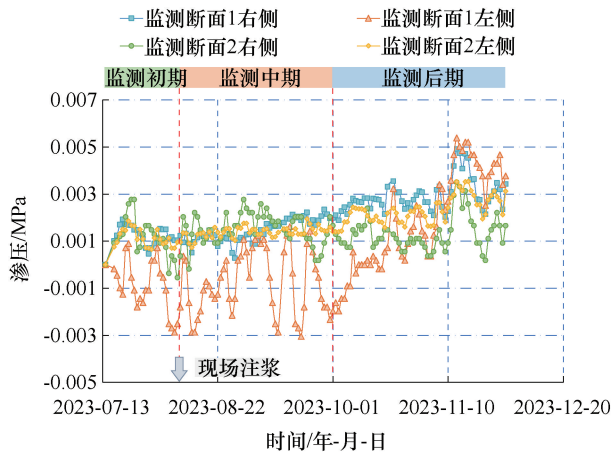


图 13 监测断面渗压曲线

Fig. 13 Seepage pressure curves for monitoring sections

3.3 锚杆应力监测数据分析

由 FBG 锚杆应力计得到的监测断面 3 的应力曲线如图 14 所示, 其中, 锚杆应力正值代表受拉, 负值代表受压。由图可以看到, 监测断面左侧直墙和右侧直墙监测点处, 锚杆应力波动相对平稳, 监测值在 -1~2 MPa 范围波动。监测断面左侧拱肩监测点处, 锚杆应力在 2023 年 9 月 5 日有较为明显的增大, 后又趋于相对平稳, 最终稳定在 6 MPa 左右。

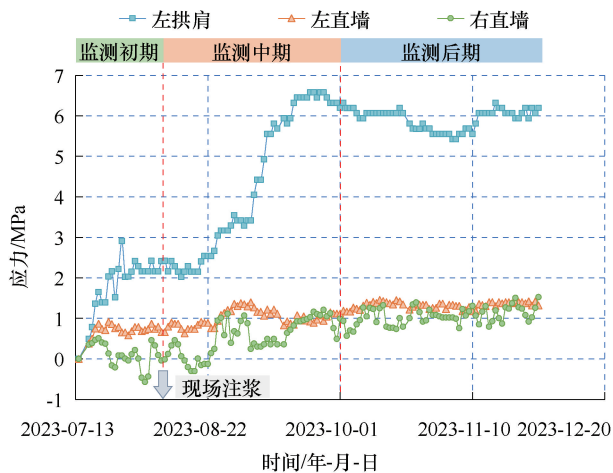


图 14 监测断面 3 的应力曲线

Fig. 14 Stress curves for monitoring section

4 与传统电测法监测数据对比分析

4.1 传统电测法布置

为进一步验证所提基于 FBG 的长距离隧洞围岩

多源数据监测的可行性, 将通过光纤传感获取的数据与传统电测法获取的相近监测断面数据进行对比分析。光纤监测断面和传统电测断面位置如图 15 所示, 光测断面 1 与电测断面 1、光测断面 2 与电测断面 2 以及光测断面 3 与电测断面 3 这三组监测断面是基本相邻的, 同时围岩性质基本一致, 保证了后续对这三组断面监测数据分别进行对比分析的合理性。

4.2 光纤监测和传统电测的结果对比

选取第一组监测断面(光测断面 1 与电测断面 1)不同深度的光纤监测变形数据与电测法变形数据, 得到对比曲线如图 16 所示。由图 16 可以看到: 光纤监测位移数据随时间呈波动状, 电测位移数据相对较为稳定, 随时间缓慢先减小后增大再减小。二者测得的位移数据大致分布在 -1~3 mm, 光纤监测得到的变形数据整体而言与电测变形基本吻合。不同监测阶段光纤监测与电测位移均值对比如表 5 所列, 两种监测方法在不同阶段的位移均值基本一致, 最小相对误差为 0.46%, 最大相对误差为 12.50%。

表 5 不同监测阶段光测与电测位移均值对比

Table 5 Comparison of mean values of optical and electrical displacements at different monitoring stages

监测阶段	3 m 深			6 m 深		
	光测/mm	电测/mm	相对误差/%	光测/mm	电测/mm	相对误差/%
监测初期	0.028	0.030	6.67	0.027	0.025	8.00
监测中期	0.171	0.194	11.86	0.056	0.064	12.50
监测后期	0.086	0.078	10.26	0.218	0.219	0.46

选取第二组监测断面(光测断面 2 与电测断面 2)的光纤监测渗压数据与电测法渗压数据, 得到对比曲线如图 17 所示。由图 17 可以看到: 在相近监测断面, 光纤监测得到的渗透压力随时间呈波动状变化, 但基本稳定在 1kPa 量值上下。电测法得到的渗透压力随时间缓慢增大后略有减小, 大致为 0~4 kPa, 整体而言略大于光纤监测渗透压力。不同监测阶段光纤监测与电测渗压均值对比如表 6 所列, 两种监测方法在监测初期和监测中期的渗压均值基本一致, 相对误差分别为 5.67%和 3.23%; 监测后期二者均值有一定偏差, 相对误差为 39.65%, 但量值较小, 绝对误差在可接受范围内。

选取第三组监测断面(光测断面 3 与电测断面 3)的光纤监测应力数据与电测法应力数据, 得到对比曲线如图 18 所示。由图 18 可以看到: 在断面左壁处, 光纤监测得到的应力在监测初期缓慢增大, 在监测中

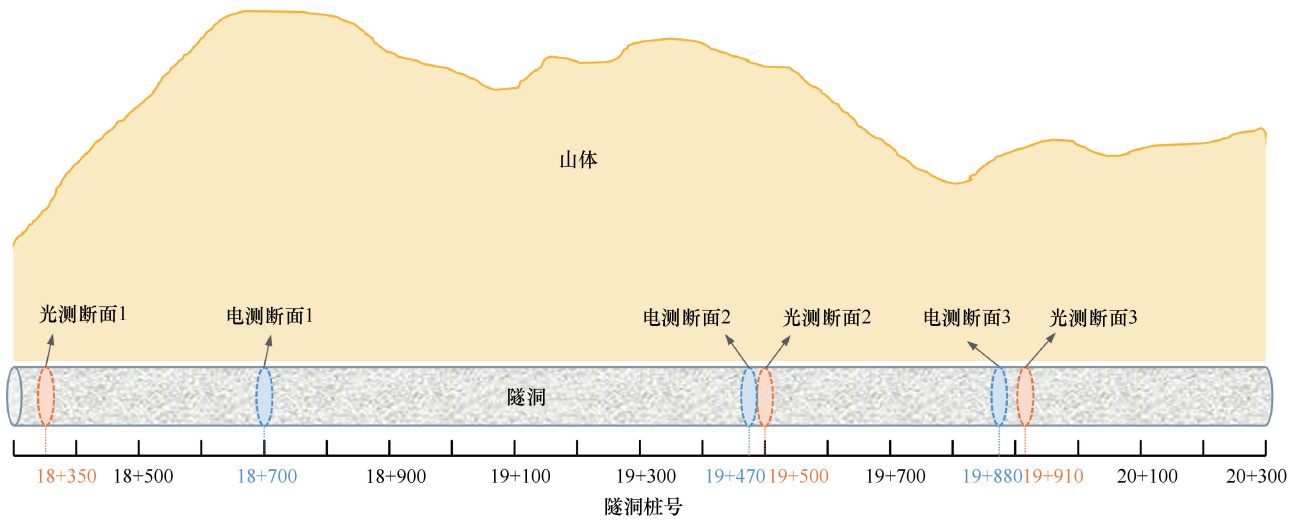


图 15 光纤监测与电测断面在隧洞中的位置示意

Fig. 15 Schematic of the location of fiber optic and electrical survey sections in the tunnel

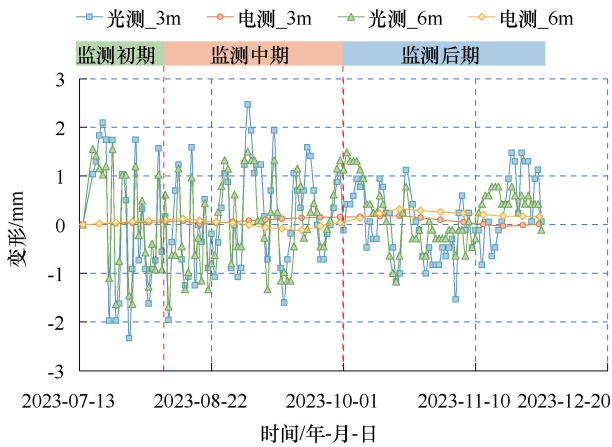


图 16 光纤监测与电测变形对比曲线

Fig. 16 Comparison curves of fiber optic monitoring and electrical deformation measurement

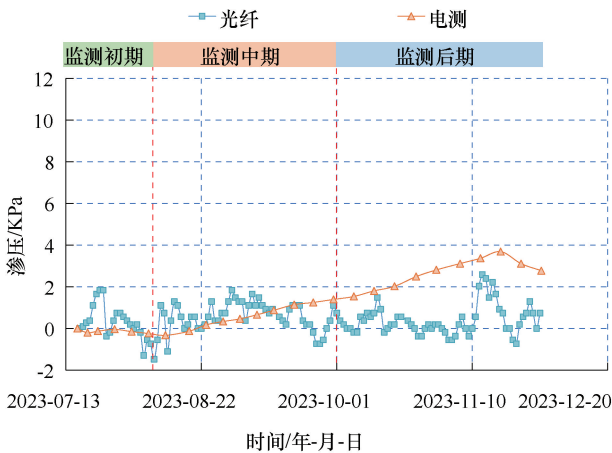


图 17 光纤监测与电测渗压对比曲线

Fig. 17 Comparison curve between fiber optic monitoring and electrical seepage pressure measurement

表 6 不同监测阶段光测与电测渗压均值对比

Table 6 Comparison of mean values of optical and electrical pressure at different monitoring stages

监测阶段	光测/kPa	电测/kPa	相对误差/%
监测初期	0.233	0.247	5.67
监测中期	0.607	0.588	3.23
监测后期	1.554	2.575	39.65

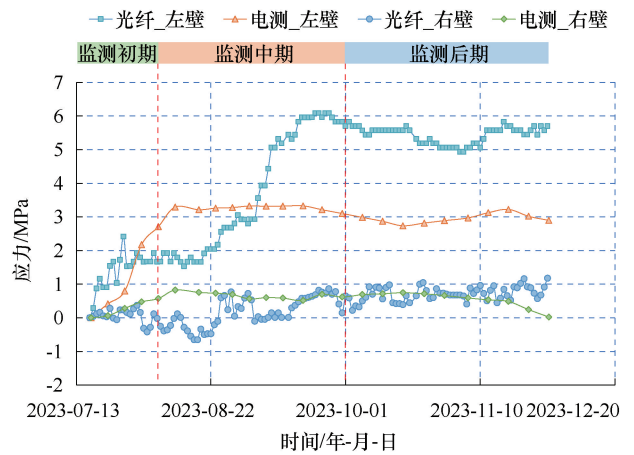


图 18 光纤监测与电测应力对比曲线

Fig. 18 Comparison curve of optical fiber monitoring with electrical measurement of stress

期应力值增长速率加快, 在监测后期应力逐渐趋稳, 量值稳定在 5.5 MPa 左右。电测得到的应力在监测初期随时间逐渐增大, 后基本稳定在 3 MPa 左右。电测应力在监测初期增长得比光纤监测应力快, 但保持稳定时应力量值相较于光纤监测应力值偏小。整体而言, 光纤监测应力曲线变化明显, 稳定时量值相对较大; 电测应力曲线呈现先增大后稳定的趋

势, 稳定时量值相对较小。二者的监测数据在变化规律上基本相似。在断面右壁处, 光纤监测得到的应力随时间缓慢增加, 应力处于 $-1 \sim 1$ MPa。电测法得到的应力先略微增大后略有减小, 整体量值很小, 基本稳定在 $0 \sim 1$ MPa。光纤监测应力与电测应力在监测前期量值有一定差异, 在监测中后期二者监测应力量值较为接近, 大致分布在 $0 \sim 1$ MPa, 且基本保持稳定。不同监测阶段光纤监测与电测应力均值对比如表 7 所列, 两种监测方法在监测初期和监测中期的应力均值基本一致; 在监测后期, 左侧洞壁处二者测得的应力均值有一定偏差, 右侧洞壁处二者应力均值基本一致。两种监测方法在不同监测阶段的最小相对误差为 2.37%, 最大相对误差为 39.78%。

光纤监测和电测法得到的监测数据量值较为接近, 变化趋势基本一致, 验证了基于 FBG 的长距离隧洞围岩监测的可行性与可靠性。

5 结果讨论

将 FBG 监测方法与其他新型监测技术进行比较, 不同监测技术的特性对比如表 8 所列。光纤布拉格光栅方法凭借其高精度、强抗干扰性和工程经济性, 在长距离隧洞关键部位精准监测中具有不可替代性; 而分布式光纤技术更适用于大范围整体变形趋势监测。

布里渊散射型光纤技术具有长距离测量能力, 其在大中型建筑工程及长距离分布式监测中发挥重要作用。不过, 由于信号处理的复杂性, 导致响应时间较长, 且系统复杂度较高, 成本也相应增加。

拉曼散射型光纤在温度监测方面表现突出, 对温

度变化极为敏感, 适用于诸如建筑物渗漏和火灾监测等场合。尽管如此, 相比其他类型的光纤传感技术, 拉曼散射型光纤的空间分辨率较低, 这限制了其在某些高精度监测场景中的应用。

瑞利散射型光纤以其低成本和高空间分辨率著称, 适用于短距离振动监测等任务。虽然这种技术的成本相对较低, 但其有效传感距离较短, 不适合用于长距离监测项目。

合成孔径雷达干涉测量 (Interferometric Synthetic Aperture Radar, InSAR) 技术能够在大面积区域内提供毫米级的地表形变测量精度, 具备全天候作业能力。然而, 大气延迟效应和几何畸变问题仍然是影响 InSAR 数据准确性的重要因素。同时, 该技术不适用于地表以下的隧洞变形监测。

对比结果表明: 相较于传统电测方法, 本方案突破了隧洞监测数据传输的距离限制。相比 InSAR 技术, FBG 感测方法更适合隧洞结构健康监测。与三种分布式光纤监测方法相比, 所提方法在满足该隧洞长距离测量的同时具有较高的测量精度。但与布里渊散射型光纤相比, 监测距离仍存在提升空间。

李凯等^[37]将应用于桥梁健康监测中的光测法与电测法的结果进行对比, 得出电测法与光纤光栅传感器监测数据基本一致, 适用于结构健康监测的结论, 与本文所得结论一致。LI 等^[18]基于 FBG 测得的隧洞开挖过程中的围岩最大变形超 50 mm, 而本文测得的围岩变形数据最大量值小于 8 mm, 这与本文开始对断面进行监测的时间距隧洞开挖超 6 个月, 此时围岩变形已基本收敛。后续相关对比验证研究可优化监测测试时间段, 使监测对比结果更加显著和可靠。

表 7 不同监测阶段光测与电测应力均值对比

Table 7 Comparison of mean values of optical and electrical stress at different monitoring stages

监测阶段	左 壁			右 壁		
	光测/mm	电测/mm	相对误差/%	光测/mm	电测/mm	相对误差/%
监测初期	1.485	1.521	2.37	0.314	0.346	9.25
监测中期	3.736	3.263	14.50	0.466	0.558	16.49
监测后期	5.231	3.150	39.78	0.611	0.540	13.15

表 8 不同监测技术方法特性对比

Table 8 Comparison of the characteristics of different monitoring technology methods

监测技术方法	优 点	缺 点	应 用
光纤布拉格光栅	抗电测干扰、测量精度高、长距离测量(>20 km) 长距离测量(>50 km) 良好的温度敏感性 成本低、空间分辨率高 高精度、大范围、全天候	光栅制备工艺复杂 响应时间较长、成本高 空间分辨率较低 传感距离短 大气延迟效应、几何畸变	隧洞、桥梁、地下空间等 大中型建筑工程监测等 建筑物渗漏、火灾监测等 短距离震动监测等 地质灾害监测等
布里渊散射型光纤			
拉曼散射型光纤			
瑞利散射型光纤			
InSAR			

6 结 论

为解决长距离隧洞监测数据传输的难题, 本文将 FBG 感测技术应用于隧洞工程, 主要结论如下。

(1) 提出了一套完整的基于 FBG 的长距离隧洞多源数据自动化监测与传输方案, 搭建了包含感知层、传输层和应用层的监测系统集成架构。从 FBG 传感器的布置、数据的有线与无线传输, 到云平台监测系统, 实现对获取的变形、渗压和锚杆应力等监测数据进行自动化监测、传输、存储、统计和分析。

(2) 完成了 20 km 的长距离隧洞的监测, 验证了光纤传感技术在长距离数据传输方面的可行性。对选取隧洞断面进行 4 个多月的连续监测结果表明, 光纤传感技术在数据获取与长距离传输方面具有较好的稳定性。

(3) 与传统电测法数据进行对比, 结果表明, 在各监测阶段, 光纤监测数据与电测数据均值总体上接近, 二者在位移、渗压和锚杆应力监测方面的最小相对误差分别为 0.46%、3.23% 和 2.37%, 变化规律基本一致, 光纤监测结果较可靠, 可以应用于长距离隧洞的围岩、衬砌的位移、应变等的监测, 为长距离隧洞提供了一种可行的监测方法。

参考文献 (References):

- [1] 何勇军, 范光亚, 徐海峰, 等. 输水隧洞安全监控与预警技术研究进展[J]. 东北水利水电, 2014, 32(10): 48-50.
HE Yongjun, FAN Guangya, XU Haifeng, et al. Research progress on safety monitoring and early warning technology of water transmission tunnels [J]. Water Resources & Hydropower of Northeast, 2014, 32(10): 48-50.
- [2] 黄永涛, 郑栋, 李少林, 等. 城市深埋隧洞安全监测设计[J]. 人民长江, 2024, 55(S1): 144-148.
HUANG Yongtao, ZHENG Dong, LI Shaolin, et al. Urban deep buried tunnel safety monitoring design[J]. Yangtze River, 2024, 55(S1): 144-148.
- [3] 王韬, 聂玉山. 长距离引水隧洞监测设备通讯链路研究[J/OL]. 中国农村水利水电, 2025: 1-8.
WANG Tao, NIE Yu-shan. Research on communication link of monitoring equipment for long distance water diversion tunnel [J/OL]. China Rural Water and Hydropower, 2025: 1-8.
- [4] 李胜存, 范青豪, 黄星. 分布式光纤监测技术在长大深埋水工隧洞中的应用[J]. 河南科技, 2023, 42(21): 9-12.
LI Shengcun, FAN Qinghao, HUANG Xing. Application of distributed fiber optic monitoring technology in long and deep buried hydraulic tunnels[J]. Henan Science and Technology, 2023, 42(21): 9-12.
- [5] 李子祥. 基于光纤监测技术的地铁暗挖隧道分布式变形感知研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2022.
LI Zixiang. Research on the Distributed Deformation Sensing of the

- Underground Subway Tunnel Based on the Optical Fiber Monitoring Technology[D]. Beijing: China University of Mining & Technology (Beijing), 2022.
- [6] 侯公羽, 张世欧, 崔迪, 等. 分布式光纤传感器在大体积混凝土筏板基础中的耦合性能研究[J]. 岩土力学, 2025, 46(4): 1-13.
HOU Gongyu, ZHANG Shiou, CUI Di, et al. Research on coupling performance of distributed fiber optic sensor in mass concrete raft foundation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2025, 46(4): 1-13.
- [7] 彭勃. 光纤测振技术在高铁轨下结构病害自动监测中的应用[J]. 铁道勘察, 2023, 49(4): 75-81.
PENG Bo. Optical fiber vibration detecting technology and its application in structure's diseases monitoring for high-speed railway [J]. Railway Investigation and Surveying, 2023, 49(4): 75-81.
- [8] 韦昊南, 商峰, 刘毅, 等. 输水管道异常振动的分布式光纤声测定位方法研究[J]. 中国水利水电科学研究院学报(中英文), 2025, 23(2): 184-193.
WEI H N, SHAGN F, LIU Y, et al. Research on localization method for distributed acoustic monitoring of abnormal vibrations in water pipeline [J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2025, 23(2): 184-193.
- [9] LI Chuan, YANG Lubing, LUO Chuan, et al. Frost heaving strain monitoring for lining structure in extreme cold and high-altitude area with FBG strain sensors[J]. Measurement, 2022, 196: 110918.
- [10] GONG Hongkui, KIZIL M S, CHEN Zhongwei, et al. Advances in fibre optic based geotechnical monitoring systems for underground excavations [J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2019, 29(2): 229-238.
- [11] 何辰靖, 李志波, 赵强. 光纤布拉格光栅应变传感器应用综述[J/OL]. 光通信研究, 1-9[2025-01-22].
HE Chenjing, LI Zhibo, ZHAO Qiang. Review of the application of Fiber Bragg Grating strain sensors [J/OL]. Study on Optical Communications, 1-9[2025-01-22].
- [12] 施斌, 顾凯, 魏广庆, 等. 地面沉降钻孔全断面分布式光纤监测技术[J]. 工程地质学报, 2018, 26(2): 356-364.
SHI Bin, GU Kai, WEI Guangqing, et al. Full section monitoring of land subsidence borehole using distributed fiber optic sensing techniques[J]. Journal of Engineering Geology, 2018, 26(2): 356-364.
- [13] 张玉芳, 杨忠民, 李健, 等. 基于小波去噪的分布式光纤形变监测预警优化研究[J/OL]. 北京大学学报(自然科学版), 1-14[2025-01-22].
ZHANG Yufang, YANG Zhongmin, LI Jian, et al. Early warning optimization of distributed optical fiber in deformation monitoring based on wavelet denoising [J/OL]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 1-14[2025-01-22].
- [14] 杨忠民. 分布式光纤在隧洞变形监测中的应用[J]. 铁道建筑, 2021, 61(4): 75-78.
YANG Zhongmin. Research on application of distributed optical fiber in tunnel deformation monitoring [J]. Railway Engineering, 2021, 61(4): 75-78.
- [15] 黄井武, 王德洋, 严振瑞, 等. 基于光纤传感的盾构输水隧洞内压加载原位试验研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2023, 31(2): 387-399.

- HUANG Jinwu, WANG Deyang, YAN Zhenrui, et al. In-situ experimental study on the behavior of water conveyance tunnel under high internal pressure using fiber optic sensing technique[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2023, 31(2): 387-399.
- [16] 李震, 冷先伦, 殷秋雨. 基于分布式光纤监测的隧道火灾温度分布特征研究[J]. 现代隧道技术, 2022, 59(6): 132-139.
- LI Zhen, LENG Xianlun, YIN Qiuyu. Research on the temperature distribution characteristics of tunnel fire based on distributed optical fiber monitoring[J]. Modern Tunnelling Technology, 2022, 59(6): 132-139.
- [17] 李佳程. 西藏多雄拉 TBM 隧道施工光纤监测技术研究[D]. 南京: 南京大学, 2019.
- LI Jiacheng. Study on Optical Fiber Monitoring Technology for TBM Tunnel Construction in Duoxiongla Mountain of Tibet[D]. Nanjing: Nanjing University, 2019.
- [18] LI Chaoyi, HOU Shaokang, LIU Yaoru, et al. Analysis on the crown convergence deformation of surrounding rock for double-shield TBM tunnel based on advance borehole monitoring and inversion analysis [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2020, 103: 103513.
- [19] SONG Huaibo, PEI Huaifu, ZHU Honghu, et al. Monitoring of tunnel excavation based on the fiber Bragg grating sensing technology [J]. Measurement, 2021, 169: 108334.
- [20] JIANG Jinpeng, GAN Weibing, HU Yue, et al. Real-time monitoring method for unauthorized working activities above the subway tunnel based on ultra-weak fiber Bragg grating vibration sensing array [J]. Measurement, 2021, 182: 109744.
- [21] LIU Fang, XU Biao, WANG Honghai, et al. Online long-distance monitoring of subway vibration reduction effect using ultra-weak fiber Bragg grating arrays [J]. Measurement, 2023, 217: 113057.
- [22] ZHU Honghu, WANG Deyang, SHI Bin, et al. Performance monitoring of a curved shield tunnel during adjacent excavations using a fiber optic nervous sensing system [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2022, 124: 104483.
- [23] LI Yong, WANG Hanpeng, CAI Weibing, et al. Stability monitoring of surrounding rock mass on a forked tunnel using both strain gauges and FBG sensors [J]. Measurement, 2020, 153: 107449.
- [24] KIM H J, LEE M, JUNG W S, et al. Temperature monitoring techniques of power cable joints in underground utility tunnels using a fiber Bragg grating [J]. ICT Express, 2022, 8(4): 626-632.
- [25] WANG Jing, WANG Donghui, ZHU Honghu, et al. Subsurface multi-physical monitoring of urban development zone using a fiber optic nerve system [J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2024, 24: 562-566.
- [26] GUO Junyi, FANG Jinhui, SHI Bin, et al. High-sensitivity water leakage detection and localization in tunnels using novel ultra-weak fiber Bragg grating sensing technology [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2024, 144: 105574.
- [27] SUN Zhen, WANG Xin, HAN Tianran, et al. Pipeline deformation monitoring based on long-gauge fiber-optic sensing systems: Methods, experiments, and engineering applications [J]. Measurement, 2025, 248: 116911.
- [28] XU Jiadong, LIU Ting, DAI Xinyi, et al. Multi-mode fiber Bragg grating for simultaneous detection of strain, torsion and temperature [J]. Optics & Laser Technology, 2024, 179: 11293.
- [29] 孙义杰, 张丹, 童恒金, 等. 分布式光纤监测技术在三峡库区马家沟滑坡中的应用 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2013, 24(4): 97-102.
- SUN Yijie, ZHANG Dan, TONG Hengjin, et al. Research of distributed fiber optic sensing technology in monitoring of Majiagou landslide of Three Gorges [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2013, 24(4): 97-102.
- [30] 程刚, 王振雪, 朱鸿鹄, 等. 基于分布式光纤感测的岩土体变形监测研究综述 [J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(19): 51-70.
- CHENG Gang, WANG Zhenxue, ZHU Honghu, et al. Research review of rock and soil deformation monitoring based on distributed fiber optic sensing [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(19): 51-70.
- [31] WANG Shun, MADAN A, ZHAO Chaoyang, et al. Experimental study on strain of SFRC tunnel lining segments using a comprehensive embedded optical fiber sensing system [J]. Measurement, 2023, 223: 113791.
- [32] LI Dongsheng, ZHOU Zhi, OU Jinping. Development and sensing properties study of FRP-FBG smart stay cable for bridge health monitoring applications [J]. Measurement, 2011, 44: 722-729.
- [33] 魏广庆, 施斌, 胡盛, 等. FBG 在隧道施工监测中的应用及关键问题探讨 [J]. 岩土工程学报, 2009, 31(4): 571-576.
- WEI Guangqing, SHI Bin, HU Sheng, et al. Several key problems in tunnel construction monitoring with FBG [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(4): 571-576.
- [34] 温国威. 水工隧洞安全监测技术应用研究 [J]. 水利技术监督, 2024(9): 30-33.
- WEN Guowei. Research on the application of safety monitoring technology of hydraulic tunnels [J]. Technical Supervision in Water Resources, 2024(9): 30-33.
- [35] 丁宝艳, 赵强, 陈东营, 等. 光纤布拉格光栅压力传感技术与应用进展 [J]. 光通信研究, 2024(3): 75-86.
- DING Baoyan, ZHAO Qiang, CHEN Dongying, et al. Technology and application progress of Fiber Bragg Grating pressure sensing [J]. Study on Optical Communications, 2024(3): 75-86.
- [36] 杨兴, 胡建明, 戴特力. 光纤光栅传感器的原理及应用研究 [J]. 重庆师范大学学报(自然科学版), 2009, 26(4): 101-105.
- YANG Xing, HU Jianming, DAI Teli. Principle and typical current applications of Fiber Grating sensors [J]. Journal of Chongqing Normal University(Natural Science), 2009, 26(4): 101-105.
- [37] 李凯, 周煜, 廉经伟, 等. 应用于桥梁健康监测中光测法与电测法的试验对比与探讨 [J]. 质量检测, 2020, 38(8): 64-67.
- LI Kai, ZHOU Yu, LIAN Jingwei, et al. Comparison and discussion on the application of light test and electric test in health monitoring of bridge [J]. Construction Quality, 2020, 38(8): 64-67.

(责任编辑 王海锋)