

## 激光与光电子学进展

基于弱光纤光栅阵列的变电站超长 GIS  
沉降监测研究朱悦林<sup>1</sup>, 朱贵池<sup>2</sup>, 王宁<sup>1</sup>, 王霄<sup>1</sup>, 罗新飞<sup>1</sup>, 徐石<sup>1</sup>, 肖卓君<sup>1</sup>, 李少鹏<sup>3</sup>, 文泓桥<sup>3\*</sup><sup>1</sup>浙江静远电力实业有限公司, 浙江 丽水 323600;<sup>2</sup>国家电网浙江省电力有限公司超高压分公司, 浙江 杭州 310013;<sup>3</sup>武汉理工大学光纤传感技术国家工程实验室, 湖北 武汉 430070

**摘要** 光纤在监测气体绝缘开关设备(GIS)方面具备卓越的抗电磁干扰等显著优势,在高压环境中展现出独特的稳定性和可靠性。此外,基于光纤的弱光纤光栅阵列技术使得光纤传感器实现了规模化部署,具备较高的灵活性和延展性。基于此,将弱光纤布拉格光栅(WFBG)静力水准仪和应变传感光缆结合以实现对GIS的安全监测,前者实现竖直方向上的沉降监测,后者实现水平方向上的位移监测。静力水准仪和应变传感光缆均采用弱光纤布拉格光栅作为敏感元件,以时分复用的方式进行组网,实现对超长GIS基础的长期实时沉降监测。该系统被应用到±800 kV特高压换流站中的GIS设备进行基础沉降监测,包括33只WFBG静力水准仪和325只弱光纤光栅应变传感器,已获取的两个月的监测数据与人工观测数据相符,表明该系统在相关结构监测中具有良好的应用价值。

**关键词** 光纤传感; 沉降监测; 气体绝缘开关设备; 弱光纤光栅静力水准仪; 弱光纤光栅阵列

中图分类号 U196.2

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP240899

Settlement Monitoring of Ultra-Long GIS in Substations  
Based on Weak Fiber Bragg Grating ArrayZhu Yuelin<sup>1</sup>, Zhu Guichi<sup>2</sup>, Wang Ning<sup>1</sup>, Wang Xiao<sup>1</sup>, Luo Xinfeng<sup>1</sup>, Xu Shi<sup>1</sup>, Xiao Zhuojun<sup>1</sup>,  
Li Shaopeng<sup>3</sup>, Wen Hongqiao<sup>3\*</sup><sup>1</sup>Zhejiang Jingyuan Electric Power Industrial Co., Ltd., Lishui 323600, Zhejiang, China;<sup>2</sup>Zhejiang Electric Power Co., Ltd. Ultra-High Voltage Branch, State Grid Corporation of China,  
Hangzhou 310013, Zhejiang, China;<sup>3</sup>National Engineering Laboratory of Fiber Sensing Technology, Wuhan University of Technology,  
Wuhan 430070, Hubei, China

**Abstract** Optical fiber has remarkable advantages such as excellent anti electromagnetic interference in monitoring gas insulated switchgear (GIS), showing unique stability and reliability in high voltage environment. In addition, the weak grating array technology based on fiber enables the large-scale deployment of fiber sensors, which has high flexibility and ductility. Therefore, this paper combines weak fiber Bragg grating (WFBG) static leveling instruments and strain sensing optical fibers, to achieve the safety monitoring of GIS. The former realizes settlement monitoring in the vertical direction, whereas the latter achieves displacement monitoring in the horizontal direction. Both the static leveling instrument and strain sensing optical fiber employ weak fiber Bragg gratings as sensitive components and are interconnected using time-division multiplexing, to achieve long-term real-time settlement monitoring of ultra-long GIS equipment foundations. This system is applied to the monitoring of GIS foundation settlement in a ±800 kV ultra-high voltage converter station, comprising 33 WFBG static levels and 325 WFBG strain sensors. The monitoring data obtained over a two-month period align with manual observation data, indicating its excellent practical value in relevant structural monitoring.

**Key words** optical fiber sensing; settlement monitoring; gas insulated switchgear; weak fiber Bragg grating static level; weak fiber Bragg grating array

收稿日期: 2024-03-15; 修回日期: 2024-04-15; 录用日期: 2024-04-24; 网络首发日期: 2024-05-06

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(62075172)

通信作者: \*whq@whut.edu.cn

## 1 引言

超长室外气体绝缘开关设备(GIS)<sup>[1-2]</sup>主要应用于 500 kV 变电站中,由多组 GIS 元件和 GIS 元件间的主母线组成,其纵向长度可达到数百米。GIS 要求相邻基础设备间的沉降差不得大于 $\pm 10$  mm,这个要求比工业与民用建筑相邻柱基沉降差允许值提高近 10 倍。一旦基础不均匀沉降超过限制值,将会对 GIS 的安全稳定运行带来严重隐患,例如气体泄漏、放电等事故。

现在常用的沉降测量方法一般是应用水准仪、全站仪等设备定期进行人工观测<sup>[3-4]</sup>,不仅工作量大、效率低,而且难以满足实时监测的需求。光纤光栅传感技术具有灵敏度高、抗电磁干扰及便于组网等特性,非常适合在变电站等存在强电磁干扰的环境中工作。但是,传统的光纤光栅静力水准仪采用波分复用的方式来组网,单通道复用的静力水准仪数量一般不超过 5 只(每只静力水准仪需要用到两个光栅——应变光栅和温度补偿光栅),难以满足特高压变电站中数百个监测点的监测需求。

近年来,弱光纤光栅传感技术<sup>[5-7]</sup>在光纤传感领域受到越来越多的关注,其反射率一般在 0.1% 以下,采用时分复用的方式来组网,单根光纤上能复用数千只传感器,已经应用于各种环境下的温度、应变及振动等物理量的检测<sup>[8-11]</sup>,也基于该技术实现了对路基、隧道等场景的变形测量<sup>[12-16]</sup>。

基于光纤传感技术的优点,本文针对 GIS 的结构特点,应用光纤光栅传感技术对 GIS 管线支墩结构的变形进行实时监测,分别采用弱光纤布拉格光栅(WFBG)静力水准仪和应变传感光缆监测竖直方向和水平方向上的地基变化,对采集的数据进行分析处理,得出的结论与人工观测数据相符。

## 2 弱光纤光栅监测系统

基于低反射率光纤光栅(FBG)阵列的时分复用传感系统结合了传统光纤分布式传感与 FBG 传感的优点,在保持传统 FBG 传感响应快、精度高特点的同时还极大提高了系统容量。基于 WFBG 技术的沉降监测系统简图如图 1 所示。

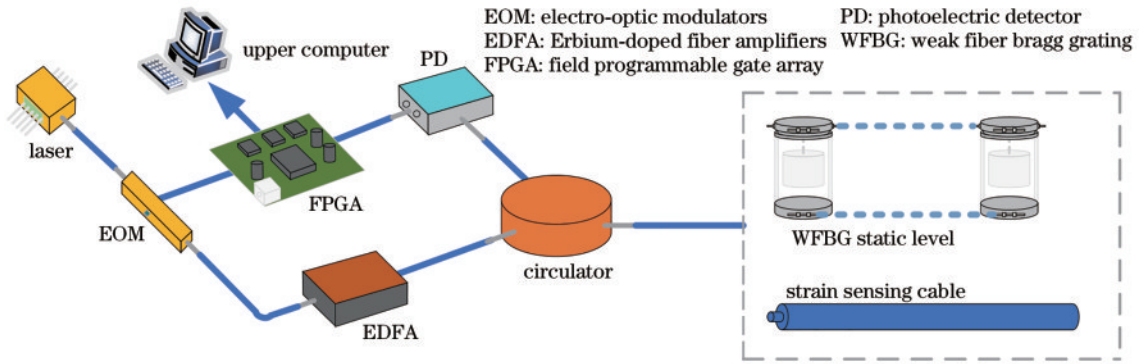


图 1 基于弱光纤光栅技术的沉降监测系统示意图

Fig. 1 Diagram of settlement monitoring system based on weak fiber grating technology

图 1 中,WFBG 静力水准仪内部包含温度补偿光栅和应变光栅,应变传感光缆中刻有多个 WFBG,多个 WFBG 静力水准仪与应变传感光缆形成一个大型监测系统。传感光纤中串联多个具有不同反射中心波长的 WFBG 传感器,这些传感器根据不同的布拉格条件,只反射满足条件的波长,而对不满足条件的波长则进行透射。不同位置的 WFBG 反射光到达光电探测器的时间是不同的,利用时间的差异定位静力水准仪以及应变传感光缆中的 WFBG,第  $i$  个 WFBG 反射光返回的时间  $\tau_i$  可表示为

$$\tau_i = \frac{2n_{\text{eff}}L_i}{c} \quad (1)$$

式中: $\tau_i$  为反射率; $c$  为光速; $n_{\text{eff}}$  为传感器的折射率; $L_i$  近似为第  $i$  个 WFBG 到光电探测器接收端的距离。

经过解调仪可分别解调出对应时刻每个 WFBG 的波长值。应变传感光缆在安装布设前需要进行标定,后续可以根据标定系数计算得到在水平方向上

的位移;WFBG 静力水准仪可以根据解调出的应变光栅波长和温度补偿光栅波长计算沉降值,计算公式为

$$L_\epsilon = \left[ (\lambda_\epsilon - \lambda_{\epsilon 0}) - (\lambda_T - \lambda_{T0}) \times \frac{K_T}{K_{\epsilon 2}} \right] \times K_{\epsilon 1} \quad (2)$$

式中: $L_\epsilon$  为计算得到的沉降值; $\lambda_\epsilon$  和  $\lambda_T$  分别为应变光栅和温补光栅的波长; $\lambda_{\epsilon 0}$  和  $\lambda_{T0}$  分别为应变光栅和温补光栅波长的初始值; $K_{\epsilon 1}$  和  $K_{\epsilon 2}$  分别为沉降变化系数 1 和沉降变化系数 2; $K_T$  为温度补偿系数,可以根据实测数据适当进行调整。

## 3 前期工作

### 3.1 弱光栅静力水准仪测试

为验证方案的可行性,进行了温度补偿实验和沉降模拟实验,并评估其测试精度。温度补偿实验部分,将 WFBG 静力水准仪放置在阳台上,进行了长达 10 d 的测试,对得到的波长数据进行分析处理并计算沉降

值,其中最大的沉降变化值为 0.1854 mm,最小的沉降变化值为 0.0083 mm。沉降模拟实验部分,将两个水准仪放置在一起并连接,其中一个放置在可上下调节的平台上,另外一个固定不动,通过调节平台的高低来控制

液位的变化,进而计算得到沉降值,数据记录如表 1 所示。在本次的实验模拟中,总共进行了 10 次的模拟,5 次向上调节,5 次向下调节,每次调节 5.00 mm,因而向上调节的最大高度为 25.00 mm(相对于初始位置)。

表 1 两个 WFBG 静力水准仪的沉降测量值、理论值和误差

Table 1 Settlement measured value, theoretical value, and error of two WFBG static levels

Number of tests	No. 1 WFBG static level			No. 2 WFBG static level		
	Theoretical value /mm	Measured value /mm	Error /mm	Theoretical value /mm	Measured value /mm	Error /mm
1	-2.50	-2.34	0.16	2.50	2.33	-0.17
2	-5.00	-4.80	0.20	5.00	5.24	0.24
3	-7.50	-7.69	-0.19	7.50	7.73	0.23
4	-10.00	-9.79	0.21	10.00	10.49	0.49
5	-12.50	-12.43	0.07	12.50	12.65	0.15
6	-10.00	-10.20	-0.20	10.00	10.13	0.13
7	-7.50	-7.61	-0.11	7.50	7.62	0.12
8	-5.00	-4.98	0.02	5.00	4.95	-0.05
9	-2.50	-2.27	0.23	2.50	2.58	0.08
10	0.00	0.04	0.04	0.00	-0.09	-0.09

分析表 1 实测沉降值数据可以得到,1 号水准仪实测值和理论值之间的最大误差为 0.23 mm,最小误差为 0.02 mm,2 号水准仪实测值与理论值之间最大的误差为 0.49 mm,最小误差为 0.05 mm。图 2(a)和(b)分别是 1 号水准仪和 2 号水准仪在向上和向下调节过程中的实测沉降值以及拟合曲线。由于每次调节幅度为 5.00 mm,因而两个水准仪的每次液位变化为

2.50 mm。根据图 2(a)和(b)中拟合曲线的一次项系数可以看出,每次调节的变化率均在 2.50 左右,直线拟合的相关系数  $R^2$  值都非常接近 1,说明 WFBG 静力水准仪的线性程度也非常好。平台高度为手动调节且波长变化对应变十分敏感,无法保证每次都能精确调控到指定位置,因而在误差允许范围内的测试结果是可接受的。

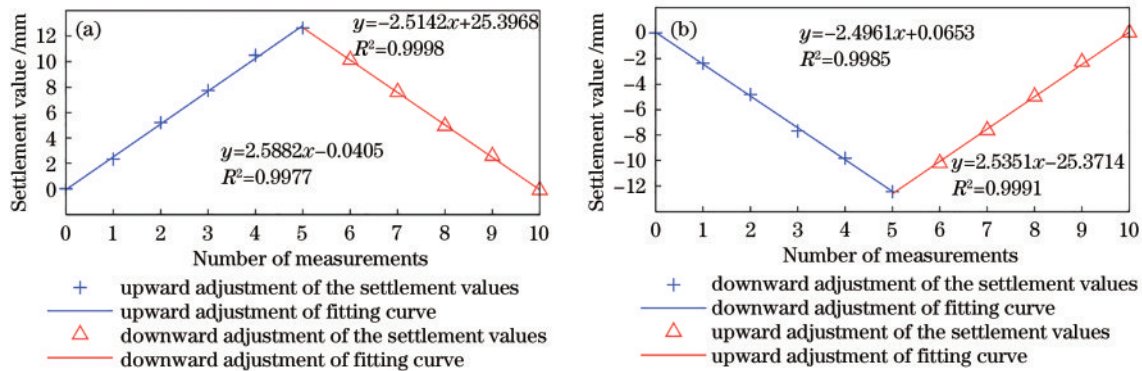


图 2 WFBG 静力水准仪沉降拟合图。(a) 1 号 WFBG 静力水准仪沉降拟合图;(b) 2 号 WFBG 静力水准仪沉降拟合图

Fig. 2 Settlement fitting diagrams of WFBG static levels. (a) Settlement fitting diagram of No. 1 WFBG static level; (b) settlement fitting diagram of No. 2 WFBG static level

### 3.2 应变传感光缆测试

针对变电站监测特点,设计了一种预应力纤维加强筋应变传感光缆,可以通过直接在混凝土浇筑过程中植入来进行分布式传感测量,可广泛应用于灌注桩、路桥、隧道衬砌及大坝等现浇混凝土结构的内应力、变形、损伤监测,尤其适合在高腐蚀环境下的工程中进行长期监测。通过高低温试验箱和拉伸器测试了光缆的温度特性和应变特性,如图 3 所示,温度特性和应变特性均呈现出良好的线性状态。

为了模拟变电站现场应用环境,获取应变传感光缆敷设在混凝土中的传感特性,进行了混凝土埋设模拟实验,设计 C50 混凝土设计配比,进行拌制成型。根据混凝土的轴心抗压强度确定最大加载力,进行分级加载。共设置 10 个加载点,初始加载力设置为 0,步长设置为 40 kN,逐级施加荷载直至 400 kN,然后进行逐级卸载至 0,逐级施加和逐级卸载循环 7 次,实验结果如图 4 所示。



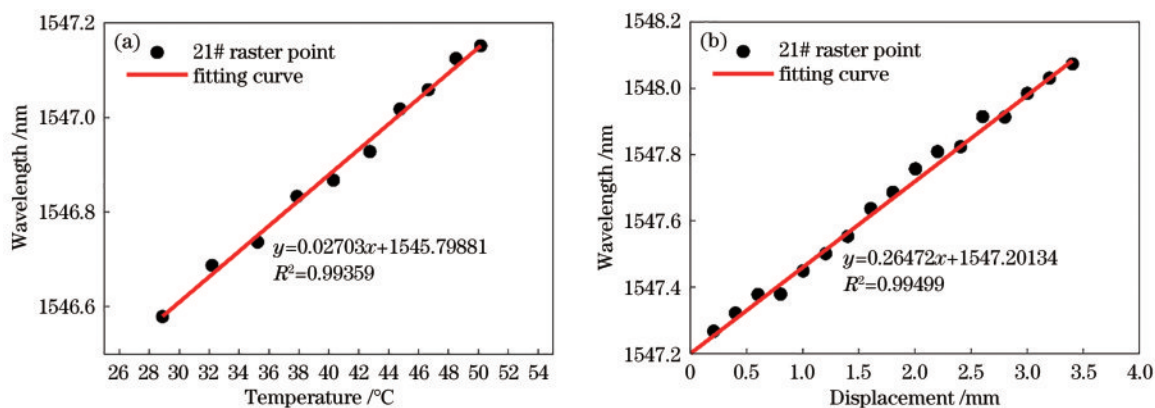


图3 应变传感光缆的温度特性曲线和应变特性曲线。(a)温度特性曲线;(b)应变特性曲线

Fig. 3 Temperature and strain characteristic curves of strain sensing optical cables. (a) Temperature characteristic curve; (b) strain characteristic curve

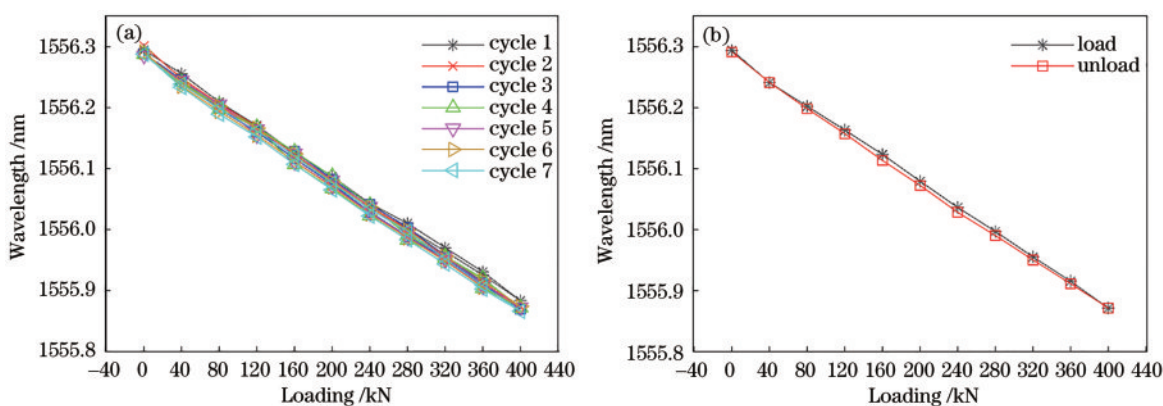


图4 预埋光缆的正、反行程各标定定点响应量均值与荷载的关系及拟合曲线。(a)波长与荷载关系;(b)拟合曲线

Fig. 4 Relationship between mean response and load and fitting curves of embedded optical cable forward and reverse stroke. (a) Relationship between wavelength and load; (b) fitted curve

图4为实验光缆的传感器波长与荷载之间的响应曲线,从中可以看出光缆的波长-荷载响应曲线基本为线性曲线,波长随着压力的增大而减小,通过测试可得光缆的灵敏度为1.04 pm/kN。

#### 4 GIS 沉降监测结果

浙江某±800 kV换流站中安装了大量的GIS,由于地基土的不均匀沉降对GIS管线支墩的建设和安全运营具有重要影响,GIS管线支墩的沉降变形量必须控制在设计要求的范围内。GIS对其支墩之间的相对变形非常敏感,由于该地区受东亚季风的影响,雨量充沛,同时还可能有台风、地震等自然灾害,为了确保GIS的安全稳定运行,对其管线支墩的沉降及水平位移进行监测,评估预测工程最终沉降量和监测其不均匀沉降。

GIS呈线形分布,由一系列独立支墩支撑起来。为了监测这些独立支墩的沉降量,在支墩的外侧挖了安装坑,将WFBG静力水准仪安装在支墩外侧0.45 m深处,水准仪的安装底板用植筋的方法固定在支墩侧面,水准仪之间通过光缆、通液管、通气管等结构相连。每个独立支墩安装一个WFBG静力水准仪,共使用了

33只WFBG静力水准仪,通过连接光缆进行串接。33个监测点呈L形分布,其中1~18号监测点在监测区域西侧,19~33号监测点在监测区域南侧。在独立支墩旁布设了一根应变传感光缆,应变传感光缆的横向伸缩反映了表层土体在水平方向的位移、裂缝等信息,应变光缆总长度为250 m,沿应变光缆分布了325只WFBG应变传感器。两者均连接到控制室的弱光栅信号解调仪上,安装位置的外观如图5所示,其中,圈起来的部分是WFBG静力水准仪安装位置,划线部分是应变传感光缆布设位置。

监测之初,通过调节底板的高度,使得33个监测点位于同一水平面,随后从传感器实测的物理量可直接得到监测点相比初始监测平面的相对沉降量,系统参考点选在24号监测点,同时也是静力水准系统的水箱放置处。监测系统安装完成后,确认传感器安装合格,无损伤及异常,并完成监测系统的联合调试后,进入试运行阶段,在试运行阶段发现问题并解决问题。待系统稳定运行2个月,对采集的数据进行分析。2023年9月20日33个监测点处的沉降如图6所示,GIS管线支墩横向伸缩历程曲线如图7所示。



图 5 WFBG 静力水准仪与应变传感光缆布设图

Fig. 5 WFBG static level and strain sensing optical cable layout diagram

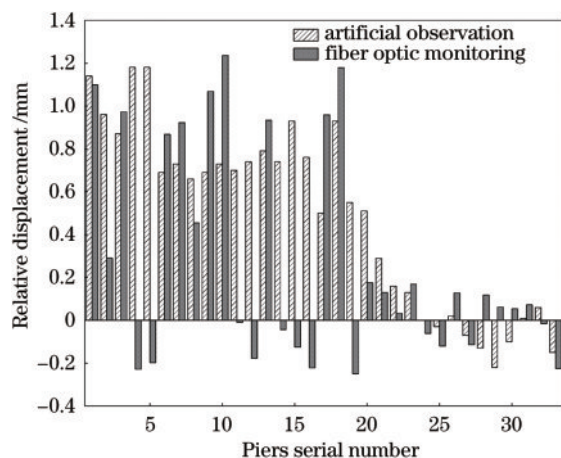


图 6 GIS 管线支墩沉降

Fig. 6 Settlement of GIS pipeline support piers

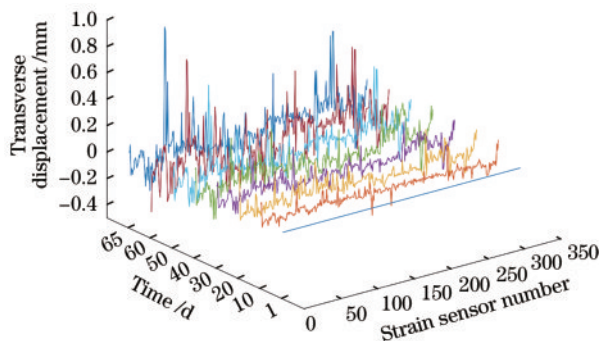


图 7 地表横向位移

Fig. 7 Transverse surface displacement

从图 6 沉降监测结果来看,监测区域南侧的 19~33 号监测点相对于监测区域西侧的 1~18 号监测点有整体沉降(负值表示沉降),最大沉降点是 4 号和 19 号监测点,沉降量约为 0.25 mm,沉降变化趋势与人工观测结果一致。在监测期间,光纤监测结果与人工观测结果之间存在差异的原因可能是光纤监测系统未能充分校正和补偿温度变化,该地区温度波动较大,温度补偿光栅虽然对温度波动进行部分校正,但仍无法完全消除其对监测结果的影响。

图 7 的横向位移结果中,最大横向位移出现在 49 号应变传感器处,最大横向位移为 0.91 mm,旁边的 50 号应变传感器位移量为 0.87 mm,其他监测点监测到的横向位移均较小,水平方向上的变形有限。总体而言,光纤监测结果和人工观测结果的趋势相对吻合,各支墩沉降量和不均匀沉降都比较小,没有趋势性变化规律;支墩的横向位移都较小,在水平方向上的变形有限,仅个别监测点有增大趋势,但绝对数值也不超过 1 mm。

## 5 结 论

本研究将 WFBG 静力水准仪和应变传感光缆联合使用,初步用于监测变电站内 GIS 的变形情况。WFBG 静力水准仪主要负责垂直方向上的沉降监测,而应变传感光缆则用于监测水平方向上的位移。将这两种测量手段联合使用,有望在获得较全面的变形测量数据的同时接入 WFBG 温度传感光缆等传感器阵列进行温度补偿。本文研究结果可提供对 GIS 变形情况进行实时监测的方法,并为设备安全运行和维护提供技术支持。

## 参 考 文 献

- [1] 李漫,冯世涛,杨代勇,等. 气体绝缘金属封闭开关设备故障分析与对策[J]. 吉林电力, 2023, 51(6): 48-52.  
Li M, Feng S T, Yang D Y, et al. Failure analysis and countermeasures of gas insulated metal enclosed switchgear[J]. Jilin Electric Power, 2023, 51(6): 48-52.
- [2] 彭炜文,沈谢林,钱渊泉,等. GIS 设备潜伏性故障识别与诊断研究[J]. 东北电力技术, 2023, 44(8): 51-55.  
Peng W W, Shen X L, Qian Y Q, et al. Research on recognition and diagnosis of latent faults of GIS equipment [J]. Northeast Electric Power Technology, 2023, 44(8): 51-55.
- [3] 张科峰. 静力水准系统在水工建筑物沉降监测中的应用[J]. 长江技术经济, 2022, 6(S1): 137-139.  
Zhang K F. Application of static leveling system in settlement monitoring of hydraulic structures[J]. Technology and Economy of Changjiang, 2022, 6(S1): 137-139.
- [4] 温贤培. 基于液压静力水准仪的综合管廊沉降监测方法研究[J]. 自动化与仪器仪表, 2021(4): 182-185.  
Wen X P. Study on the integrated pipe gallery settlement monitoring method based on hydraulic static level[J]. Automation & Instrumentation, 2021(4): 182-185.

- [5] 黄麟景, 周霄, 樊昕昱, 等. 多机理融合分布式光纤传感技术研究[J]. 光学学报, 2024, 44(1): 0106007.  
Huang L J, Zhou X, Fan X Y, et al. Multi-mechanism distributed fiber-optic sensing technology[J]. Acta Optica Sinica, 2024, 44(1): 0106007.
- [6] 安宁, 尹保军, 陈淑涵, 等. 光纤传感技术研究进展[J]. 燕山大学学报, 2023, 47(5): 441-457.  
An N, Yin B J, Chen S H, et al. Research progress of optical fiber sensing technology[J]. Journal of Yanshan University, 2023, 47(5): 441-457.
- [7] 张旭苹, 张益昕, 王亮, 等. 分布式光纤传感技术研究和应用的现状及未来[J]. 光学学报, 2024, 44(1): 0106001.  
Zhang X P, Zhang Y X, Wang L, et al. Current status and future of research and applications for distributed fiber optic sensing technology[J]. Acta Optica Sinica, 2024, 44(1): 0106001.
- [8] 刘卓瑶, 常建华, 倪海彬, 等. 基于表面等离子体共振效应的单模光纤高灵敏度温湿度传感器[J]. 中国激光, 2023, 50(14): 1410001.  
Liu Z Y, Chang J H, Ni H B, et al. High-sensitivity temperature and humidity sensor based on surface plasmon resonance effect in single-mode fiber[J]. Chinese Journal of Lasers, 2023, 50(14): 1410001.
- [9] 王静. 基于光纤传感技术的温湿度测量系统在工业环境中的应用研究[J]. 计量与测试技术, 2023, 50(9): 29-32.  
Wang J. Research on the application of temperature and humidity measurement system based on optical fiber sensing technology in industrial environment[J]. Metrology & Measurement Technique, 2023, 50(9): 29-32.
- [10] 王文娟, 薛景锋, 张梦杰, 等. 基于光纤传感的结构变形实时监测技术研究[J]. 航空科学技术, 2022, 33(12): 97-104.  
Wang W J, Xue J F, Zhang M J, et al. Research on real-time monitoring technology of structural deformation based on optical fiber sensing[J]. Aeronautical Science & Technology, 2022, 33(12): 97-104.
- [11] 李笑, 高毅, 吴昊, 等. 基于混合输入神经网络的  $\Phi$ -OTDR 系统模式识别方法[J]. 中国激光, 2023, 50(11): 1106003.  
Li X, Gao Y, Wu H, et al. Mode recognition method of  $\Phi$ -OTDR system based on mixed input neural network[J]. Chinese Journal of Lasers, 2023, 50(11): 1106003.
- [12] 孟鹤. 基于光纤传感技术的铁路安全智能监测与识别方法研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2021: 69-86.  
Meng H. Research on intelligent monitoring and recognition methods of railway safety based on optical fiber sensing[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2021: 69-86.
- [13] Zhang X H, Broere W. Monitoring seasonal deformation behavior of an immersed tunnel with distributed optical fiber sensors[J]. Measurement, 2023, 219: 113268.
- [14] 朱栋梁. 基于光纤传感技术的轨道交通工程监测技术研究[D]. 南宁: 广西大学, 2021: 72-94.  
Zhu D L. Research on monitoring of rail transit engineering based on optical fiber sensing technology[D]. Nanning: Guangxi University, 2021: 72-94.
- [15] 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(12): 44-46.  
Xia Z J. Research on monitoring method of expressway subgrade settlement and deformation based on optical fiber sensing technology[J]. Transpo World, 2023(12): 44-46.
- [16] 李俊, 张鼎博, 张昕炜, 等. 基于光纤光栅传感与视频位移计技术的运营期铁路隧道结构安全监测[J]. 激光与光电子学进展, 2023, 60(23): 2312006.  
Li J, Zhang D B, Zhang X W, et al. Safety monitoring of railway tunnel structure during operation period based on fiber grating sensing and video displacement meter technology[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2023, 60(23): 2312006.