

DOI:10.19650/j.cnki.cjsi.J2514170

高分辨力光纤倾斜仪研究及地形变固体潮监测*

张发祥¹, 李俊涛¹, 倪家升¹, 李惠玲², 林秀娜²

(1. 齐鲁工业大学(山东省科学院)山东省计算中心(国家超级计算济南中心)算力互联网与信息安全教育部重点实验室 济南 250014; 2. 泰安地震监测中心站 泰安 271000)

摘要:针对传统电子监测手段在地球物理观测中的局限性,开发了一种基于法布里-珀罗(F-P)干涉腔的光纤倾斜仪系统。设计了结合垂直摆机构与双F-P干涉腔的传感结构,采用差分测量方法有效抑制环境噪声和温度漂移,并优化了干涉光路和相位解调算法,显著提升了倾斜角度的检测精度。实验验证表明,该光纤倾斜仪系统在 $-181.6''\sim 181.6''$ 的测量范围,倾角灵敏度达到 $2\ 435\ \text{nm}/''$,分辨力为 $0.000\ 078''$,表现出极高的精度和稳定性。在泰安地震监测中心站开展的连续观测实验中,光纤倾斜仪成功记录了固体潮的周期性变化,且其波形与VP型垂直摆倾斜仪的观测数据吻合良好,验证了该系统在地壳形变监测中的高分辨率和低漂移特性。此外,实验期间系统还成功捕捉到了多次地震事件,展示了固体潮和地震同步监测的可行性。与传统VP型垂直摆倾斜仪的对比中,光纤倾斜仪不仅能够准确记录标准地震信号,还能捕捉到微小的地震信号,表明该仪器在灵敏度和噪声抑制方面具有明显优势。开发的光纤倾斜仪系统为地壳形变测量和地震观测提供了新的手段,具备较高的分辨力和灵敏度,满足地震行业标准,该系统能够有效监测固体潮波形和地震事件,具有广泛的应用前景。该技术为地震监测和地壳动力学研究提供了可靠依据,有望推动地球物理观测设备的创新与发展。

关键词: 光纤倾斜仪; 固体潮监测; 法布里-珀罗干涉仪; 光纤传感技术

中图分类号: TH76 TN253 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.40

High-resolution fiber optic inclinometer research and solid tide monitoring for terrain deformation

Zhang Faxiang¹, Li Juntao¹, Ni Jiasheng¹, Li Huiling², Lin Xiuna²

(1. Key Laboratory of Computing Power Network and Information Security, Ministry of Education, Shandong Computer Science Center (National Supercomputer Center in Jinan), Qilu University of Technology (Shandong Academy of Sciences), Jinan 250014, China; 2. Tai'an Earthquake Monitoring Center Station, Tai'an 271000, China)

Abstract: To overcome the limitations of traditional electronic monitoring methods in geophysical observations, this study develops a fiber optic inclinometer system based on a Fabry-Pérot (F-P) interferometric cavity. The system combines a vertical pendulum mechanism with dual F-P interferometric cavities, using differential measurement techniques to effectively suppress environmental noise and temperature drift. The interferometric optical path and phase demodulation algorithm are optimized to significantly enhance the precision of tilt angle detection. Experimental results demonstrated that the system achieves a tilt sensitivity of $2\ 435\ \text{nm}/''$ and a resolution of $0.000\ 078''$ within a measurement range of $-181.6''$ to $181.6''$, showing excellent precision and stability. Continuous monitoring experiments conducted at the Tai'an Seismic Monitoring Center Station successfully recorded periodic solid earth tide variations, with the waveforms closely matching those observed by a VP-type electronic inclinometer, confirming the system's high resolution and low drift characteristics. Furthermore, multiple seismic events were captured during the experiment, demonstrating the feasibility of simultaneous monitoring of solid earth tides and seismic activity. In comparison with the traditional VP-type electronic inclinometer, the fiber optic inclinometer not only accurately recorded standard seismic signals but also detected small seismic signals, indicating a clear advantage in terms of sensitivity and noise suppression. This fiber optic inclinometer system provides a new tool for

收稿日期: 2025-06-17 Received Date: 2025-06-17

* 基金项目: 国家自然科学基金项目(U23A20379)、山东省泰山学者青年专家项目(tsqn202306254)资助

crustal deformation measurement and seismic observation, with high resolution and sensitivity that meet seismic industry standards. The experimental results show that the system can effectively monitor solid earth tide waveforms and seismic events, demonstrating significant potential for widespread application. This technology provides a reliable basis for earthquake monitoring and crustal dynamics research and is expected to contribute to innovations in future geophysical observation equipment.

Keywords: fiber-optic inclinometer; solid tide monitoring; Fabry-Perot interferometer; fiber-optic sensing technology

0 引言

研究表明,地球固体潮的变化可能与地震的孕震过程密切相关^[1-2],某些地震的发生时间与潮汐应力存在一定的统计相关性^[3-5]。因此,精确测量固体潮的形变特征,对地震预测研究具有重要的科学价值。

当前对固体潮的监测主要依赖于重力仪^[6]、倾斜仪等设备。其中重力仪虽然精度较高,但成本昂贵且维护要求高,对环境要求苛刻。传统的VP型垂直摆倾斜仪对监测环境要求极高,难以克服长距离低损耗传输、抗电磁干扰、防水耐腐蚀等环境适应性问题,应用普及性受限。相比之下,光纤传感技术因其高灵敏度、低损耗、本质无源、抗电磁干扰等优点,在地震监测、地壳形变测量等领域展现出广阔的应用前景^[7-16]。近年来,高精度光纤倾斜仪研究取得一定进展。Yang等^[9]开发了一种基于法布里-珀罗(Fabry-Pérot, F-P)干涉仪和带惯性质量块的垂直悬臂梁结构的高分辨力动态光纤倾斜仪,通过对F-P腔长的绝对测量,实现了倾斜角的实时解调,在 $\pm 1^\circ$ 的测量范围,达到了 $0.03''$ 的倾角分辨力。Cui等^[10]利用光纤布拉格光栅法布里-珀罗(fiber Bragg grating Fabry-Pérot, FBG-FP)腔设计的倾斜仪,通过差分信号将温度漂移抑制至 $0.028''/^\circ\text{C}$,实现了 $179.9\text{ pm}/^\circ$ 的倾斜角度灵敏度和 $0.02''$ 的分辨力。Zhuang等^[11]提出了一种外置传感结构的光纤非本征法布里-珀罗干涉仪倾角传感器,实现了 20 nrad ($0.004''$)的高分辨力倾斜测量和 $0.0041\text{ }\mu\text{rad}/^\circ\text{C}$ 的温度交叉灵敏度,但测量范围只有 $7.17\text{ }\mu\text{rad}$ ($1.5''$)。Yang等^[12]提出了一种基于钟摆结构的光纤法布里-珀罗(F-P)传感器,通过快速解调算法,实现了倾角和振动的同时测量,在 $-2.8^\circ\sim 2.6^\circ$ 的测量范围,倾角分辨力为 $0.023''$ 。Wang等^[13]基于动态游标效应与推挽结构的光纤倾斜仪实现了 $0.5\text{ }\mu\text{rad}$ ($0.1''$)级别的灵敏度。张文涛等^[14]基于光纤迈克尔逊干涉仪开发的倾斜仪对固体潮信号进行研究,在温度变化较平缓时记录到固体潮波形,与理论固体潮对比波形趋势基本一致。然而,目前基于光纤干涉的倾斜监测系统仍难以满足地形变监测和地震监测研究的精度要求,难以获得高质量的固体潮波形,仍然需要更高分辨力、测量范围、温度稳定性和操作便捷性^[17-19]。因此,进一步提升光纤F-P传感技术性能,对于解决现有光纤技术检测精度和灵敏度的瓶颈,实现高质量的固体潮

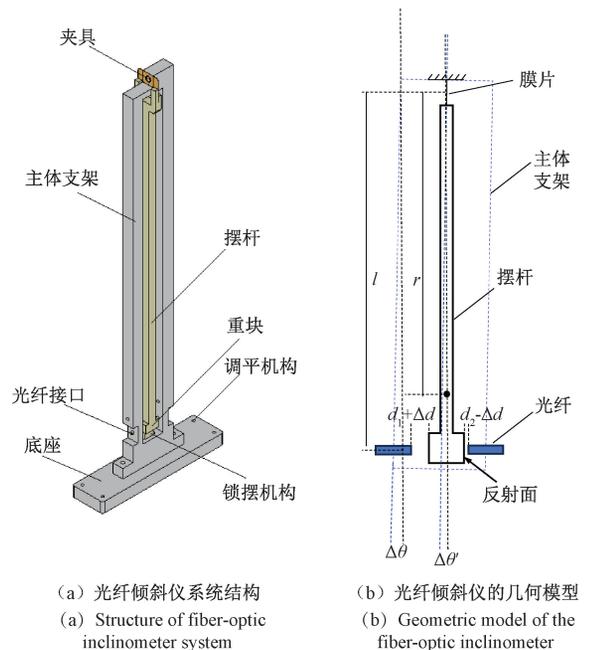
观测,具有重要作用。

本研究设计并实现了一种基于F-P干涉腔原理的垂直摆光纤倾斜仪系统,通过双腔差分测量与结构参数优化,实现极高的分辨力和稳定性。在地震台站进行地壳形变观测和地震监测,成功采集到高质量的固体潮信号和有效的地震信号,验证了同步监测固体潮和地震的可行性,有望为地壳形变测量、地震观测提供新的手段,在地震观测仪器中具有良好的应用潜力。

1 传感器原理及传感器制作

1.1 F-P干涉仪测量倾斜原理

光纤F-P干涉腔原理的垂直摆光纤倾斜仪系统结构如图1(a)所示。其中倾斜测量的摆系由夹具、摆杆和重块构成。夹具与摆杆之间通过薄膜片连接,以使摆杆能够绕薄膜片中心自由摆动。摆杆和重块通过重力作用保持铅垂状态,当地壳发生倾斜时,主体支架随地壳倾斜,摆系与主体支架产生相对位移。高分辨力的倾角检测通过安装在底部光纤接口中的光纤F-P干涉腔传感器实现。在该结构中,由摆杆末端重块与通过光纤接口插入



(a) 光纤倾斜仪系统结构
(a) Structure of fiber-optic inclinometer system
(b) 光纤倾斜仪的几何模型
(b) Geometric model of the fiber-optic inclinometer

图1 垂直摆光纤倾斜仪系统结构

Fig. 1 Vertical pendulum fiber-optic inclinometer system structure

的固定光纤端面构成两个反射镜形成 F-P 干涉腔。摆的倾斜导致的重块与主体支架的相对位移会使 F-P 干涉腔的腔长发生变化,反射光的相位和相对强度会根据干涉腔间距的变化发生改变,从而形成干涉条纹的光谱位移。这些光谱位移可以被精确检测,从而反映出重块位移变化量。采用两路光纤 F-P 干涉腔同步检测摆杆末端重块位移变化并进行差分运算,进而降低环境噪声和摆系结构引起的温度漂移的影响,以实现高稳定性的测量。

当倾斜仪倾斜 $\Delta\theta$ 角时,在地球引力场作用下,摆杆将保持与虚拟水平地球地面近似垂直,同时,主体支架与倾角仪一起倾斜,主体支架与摆杆之间的角度变化即为倾角仪的测量倾斜角,设 $\Delta\theta'$ 。两个 F-P 腔干涉仪的腔长将发生变化,如图 1(b) 所示。倾斜仪倾斜角的变化可以描述为:

$$\Delta\theta' = \arcsin\left(\frac{\Delta d}{l}\right) \approx \frac{\Delta d}{l} \quad (1)$$

式中: Δd 为 F-P 腔干涉仪的腔长变化量; l 为摆杆的摆长,并且 $\Delta d \ll l$ 。对于两个 F-P 腔干涉仪的腔长测量值 d_{FP1}, d_{FP2} , 根据几何关系,满足 $2\Delta d = d_{FP1} - d_{FP2}$ 。

达到力学平衡时,设重力加速度为 g , 有:

$$mg \cos(\Delta\theta)r \sin(\Delta\theta') + M\Delta\theta' = mg \sin(\Delta\theta)r \cos(\Delta\theta') \quad (2)$$

式中: M 为膜片转动刚度; r 为摆杆重心与膜片旋转中心距离; m 为摆杆质量。

膜片转动速度如式(3)所示。

$$M = Ebt^3/12c \quad (3)$$

式中: E 为膜片材料的杨氏模量; b, t, c 分别为膜片的宽度、厚度、长度。

$\Delta\theta, \Delta\theta'$ 均为微小变化量,式(2)近似解为:

$$\Delta\theta' \approx \left(1 - \frac{M}{mgr + M}\right) \Delta\theta \quad (4)$$

从而得到

$$\Delta d = \left(1 - \frac{M}{mgr + M}\right) l\Delta\theta \quad (5)$$

由式(5)可知,F-P 腔干涉仪腔长变化与倾斜仪倾斜角度成正比,通过测量腔长变化可以线性还原倾角变化。

定义光纤倾斜仪的灵敏度为 $S = 2\Delta d / \Delta\theta$, 由式(5)可知,在固定的重力加速度场下,倾角测量灵敏度受摆杆长度、膜片转动刚度、摆杆质量、摆杆重心与膜片旋转中心距离影响,当摆杆结构参数确定时,膜片转动刚度对灵敏度有显著影响。选用铍青铜材料的薄膜片,杨氏模量为 130 GPa, 宽度为 8 mm, 长度为 4 mm, 摆杆质量为 0.12 kg, 重力加速度 9.98 m/s^2 , 对膜片厚度对灵敏度的影响数值仿真如图 2 所示。

由图 2 可知,当膜片厚度减小到 0.1 mm 时,灵敏度趋近最大值,达到 $2540 \text{ nm}/''$, 可以作为制作光纤倾斜仪的结构参数。

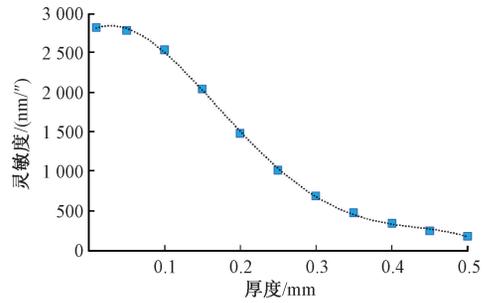
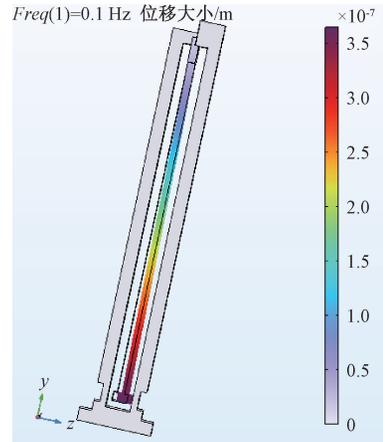


图 2 倾斜仪的灵敏度和膜片厚度的关系

Fig. 2 Relationship between the sensitivity of the inclinometer and the thickness of the diaphragm

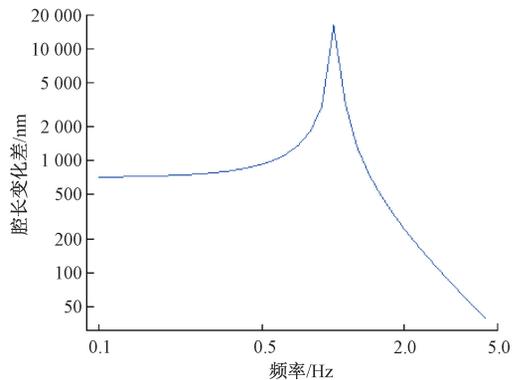
1.2 振动响应仿真

利用 COMSOL 有限元分析软件对倾斜仪的振动响应进行仿真。根据光纤倾斜仪结构的对称性,其振动响应主要来源于水平向加速度作用下的摆杆位移。仿真其在竖直方向 1 g 恒定重力加速度下,水平方向 $1 \mu\text{g}$ 加速度扰动的频域响应特性,如图 3(a) 所示。得到其谐振频率约为 1 Hz, 在 0.2 Hz 以下低频加速度灵敏度为 $725 \text{ nm}/\mu\text{g}$,



(a) 水平加速度下位移分布

(a) Distribution of displacement under horizontal acceleration



(b) 幅频响应曲线

(b) Amplitude-frequency response

图 3 倾斜仪的水平加速度响应仿真

Fig. 3 Simulation of the horizontal acceleration response of the inclinometer

如图3(b)所示,表明光纤倾斜仪对水平方向的地震信号具有极高的灵敏度。

1.3 基于干涉光谱的腔长检测

F-P 腔干涉仪干涉信号反射强度可表示为^[20-21]:

$$I_0 = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos\left(\frac{4\pi nd}{\lambda} + \varphi\right) \quad (6)$$

式中: I_1 和 I_2 分别为从光纤端面和相邻重块的反射面反射的光强; φ 为两个端面反射回来的光波的初相位差; n 为腔体的折射率,空气中约为 1。

当式(2)中余弦函数内的变量等于 $(2N+1)\pi$ 时,就会产生相消干涉, N 为整数。干涉光谱的自由光谱范围 (free spectral range, FSR) 可表示为:

$$FSR = \frac{\lambda^2}{2d} \quad (7)$$

式中: λ 为入射光的波长。

假设光谱检测范围内存在完整的 j 干涉峰,其中第 i 个干涉峰的波长 λ_i 与腔长 d 直接相关,可表示为:

$$\frac{4\pi nd}{\lambda_i} = [2k - 2(i - 1) + 1]\pi \quad (8)$$

其中, k 是第 1 次峰值对应的干涉阶数,应为整数。因此, k 可以由第 1 个和第 j 个波峰波长求得:

$$k = \frac{(2j - 3)\lambda_j + \lambda_1/2}{2(\lambda_j - \lambda_1)} \quad (9)$$

通过光纤解调仪检测每个波峰波长,实时求取 k 值,从而可以实时解析腔长为:

$$d = \frac{1}{4}(2k + 1)\lambda_1 \quad (10)$$

由于同时确定光谱检测范围内的波峰阶数和波长,因此可以在波峰大范围变化时,仍然实现高精度检测,实现大动态范围腔长测量。

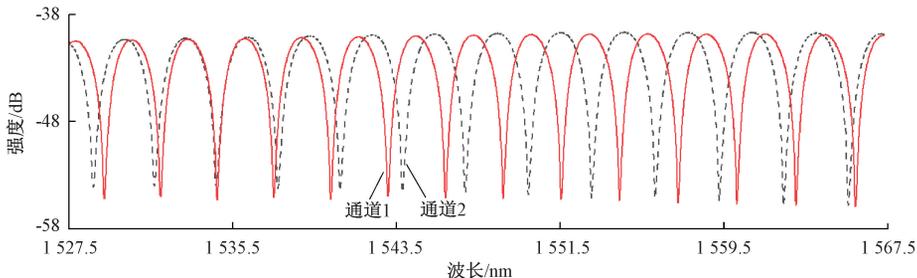


图5 光纤倾斜仪的2个通道反射光谱

Fig. 5 Two channel reflection spectra of the fiber-optic inclinometer

光纤倾斜仪测试系统实物如图6所示,其中,采用扫描激光器作为解调仪光源,通过耦合器实现多通道同步检测。光信号通过环形器进入倾斜仪的 F-P 腔中发生干涉,其反射光经过环形器进入光电探测器转换为电信号,并被数据采集卡采集,发送到电脑主板的解调程序,并根据

2 实验研究

2.1 传感器测试装置

光纤倾斜仪测试系统如图4所示。

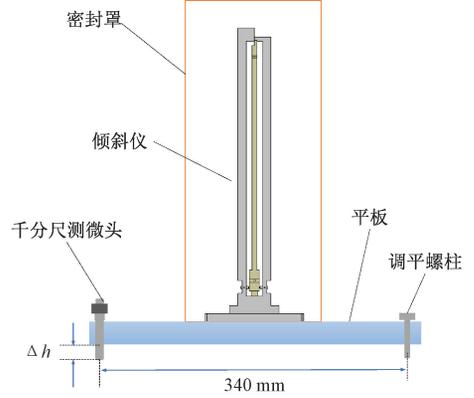


图4 光纤倾斜仪的测试装置

Fig. 4 Test device of fiber-optic inclinometer

倾斜仪主体支架与底座采用钢瓦合金材料,提供稳定的支撑平台,并降低温度敏感性。通过调平机构和水平仪确保安装面水平。参照地震行业标准 DB/T 31.1-2008^[22]中的测量方法,通过平板、调平螺柱和千分尺测微头构建了倾角测量平台,对光纤倾斜仪的倾斜灵敏度进行测量。在测量中,将光纤倾斜仪放置于密封罩中,使其环境温度场较为稳定,并在摆杆底部使用 100 cs 粘度的硅油作为阻尼液,以抑制摆的共振。F-P 干涉腔采用聚焦光纤获得高精度干涉条纹^[20,23-24]。

反射光谱如图5所示,条纹可见度达到 15 dB,两个通道的自由光谱范围分别约为 2.8 和 3.1 nm。

式(10)解析算法,实现大动态范围高分辨力的腔长解调。

2.2 倾角灵敏度测量

调节千分尺测微头从 -0.3 mm 逐步变化到 0.3 mm,对应平板倾角从 $-181.6''$ 变化为 $181.6''$,以 10 Hz 的采样率检测并记录两个通道的腔长,如

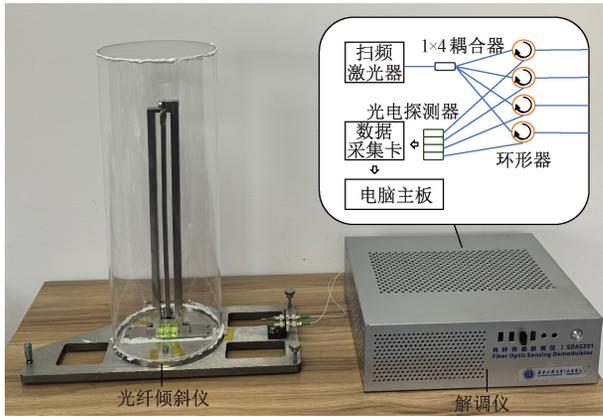
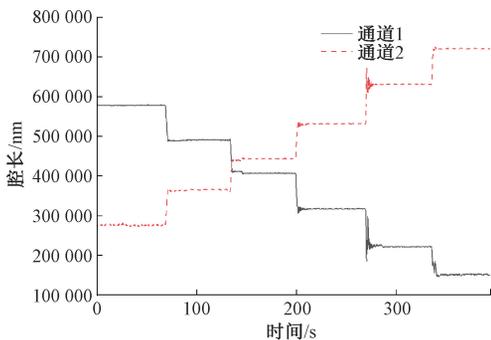


图 6 光纤倾斜仪测试系统实物

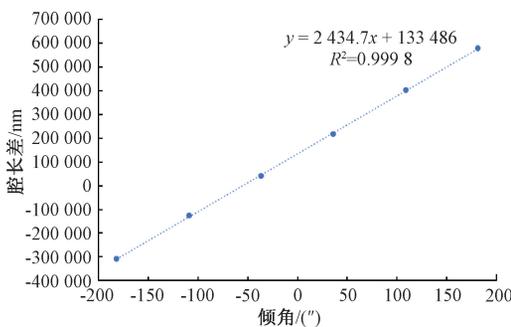
Fig. 6 Physical test system of the fiber-optic inclinometer

图 7(a) 所示。对不同倾角测量点的两个通道腔长平均值进行差分, 绘制腔长差值与倾角的关系曲线, 如图 7(b) 所示。拟合曲线表明腔长差值与倾角存在良好线性关系, 相关系数达到 0.999 8, 得到倾角灵敏度测试结果为 2 435 nm/°, 接近于 2 540 nm/° 的理论值, 表明制作的光纤倾斜仪实现了设计的高灵敏度倾角测量。



(a) 光纤倾斜仪 2 个通道的腔长变化记录

(a) Recording of cavity length change in two channels of fiber-optic inclinometer



(b) 腔长差值与倾角的关系曲线

(b) Curve of cavity length difference versus inclination angle

图 7 倾角灵敏度测量

Fig. 7 Inclination sensitivity measurement

2.3 分辨力测试

为了测量光纤倾斜仪的分辨力, 通过紧定螺钉将仪器的摆杆锁止, 并置于安静环境中, 记录 1 min 的波长差值, 通过差分运算, 得到腔长变化量, 如图 8 所示。

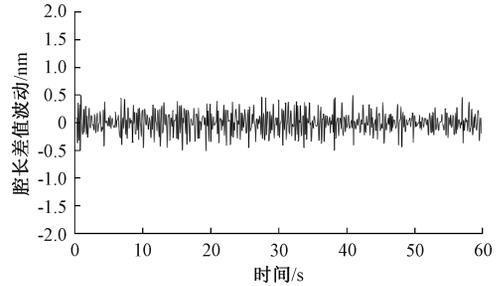


图 8 安静环境中锁止状态 1 min 内腔长差值波动量记录

Fig. 8 The fluctuation of the cavity length difference within 1 minute in the locked state in the quiet environment

1 minute in the locked state in the quiet environment

通过计算腔长差值波动量的标准差 (standard deviation, SD), 可得到腔长测量分辨力约为 0.19 nm。因此, 根据测量分辨力和倾斜仪的灵敏度, 可以估算出倾斜角度测量的分辨力为 0.000 078°, 理论横向加速度分辨力为 0.26 ng。结果表明, 光纤倾斜仪可以实现极高的倾角分辨力, 达到地震行业标准 DB/T 45-2012^[25] 中要求的分辨力应优于 0.000 2°。

2.4 温度漂移测试

为了评估光纤倾斜仪温度漂移, 在地下室安静环境中采用电热台对倾斜仪底部加热, 并用电子温度计 (FLUKE961B) 同步记录温度, 获得升温 and 降温过程的温度和倾角变化曲线如图 9 所示。

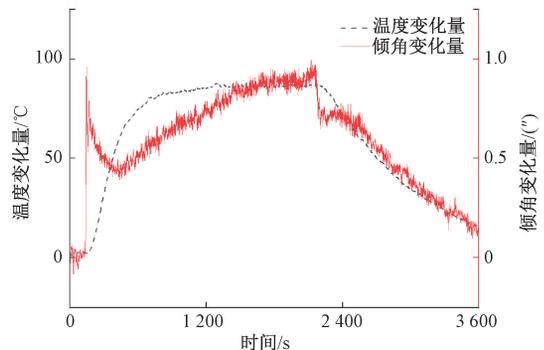


图 9 安静环境中倾角随温度变化曲线

Fig. 9 Inclination angle variation curve with temperature in quiet environment

光纤倾斜仪的倾角变化主要包括温度变化初始阶段底座快速倾斜变化和倾斜仪整体随温度缓慢变化导致的输出倾角变化。在 85°C 温度变化范围下, 倾角变化约为 0.9°, 可以估算倾斜仪的温度漂移约为 0.010 6°/°C。

将设计的光纤倾斜仪与其他文献中光纤倾斜仪对比,如表1所示。

表1 光纤倾斜仪性能参数比较

Table 1 Performance parameters comparison of fiber-optic inclinometers

倾斜仪	测量范围/(°)	分辨率/(")	动态范围	温漂/("/°C)
文献[9]	±60	0.030 000	2.40×10^5	
文献[10]	0~12	0.020 000	4.00×10^5	0.028 00
文献[11]	±29	0.004 000	8.30×10^5	0.000 86
文献[12]	-168~156	0.023 000	8.40×10^5	
文献[13]	±12	0.100 000	1.44×10^4	
文献[26]	-450~600	1.500 000	2.30×10^4	2.160 00
本文	±3	0.000 078	4.60×10^6	0.010 60

由表1可知,本文设计的光纤倾斜仪在分辨率、动态范围方面得到显著提升,并且将温度漂移抑制在较低的水平。当观测环境温度的稳定性优于0.02℃时,光纤倾斜仪的温漂可以控制在小于地震行业标准 DB/T 45-2012^[25]中要求的分辨力应优于0.000 2"的水平。

3 地倾斜和地震观测

在泰安地震监测中心站开展连续观测实验。光纤倾

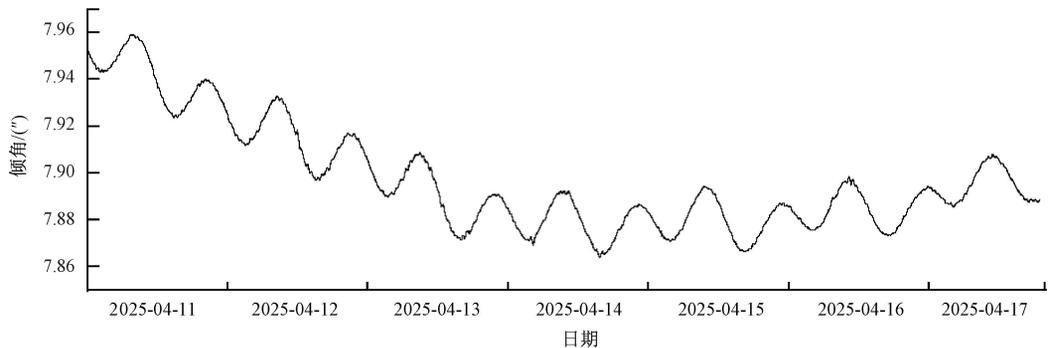


图11 光纤倾斜仪监测数据(分钟值)

Fig. 11 Monitoring data of the fiber-optic inclinometer (minute-level values)

有极高的倾角分辨力和极低的漂移率。通过1个月的连续观测,得到固体潮汐观测参数M2波月潮幅因子相对中误差为0.015 4,满足地震行业标准 DB/T 45-2012^[25]中要求的 ≤ 0.02 。在实验期间,光纤倾斜仪成功捕捉到多次不同距离不同震级的地震事件。图13给出了光纤倾斜仪与VP型垂直摆倾斜仪监测数据秒值对比结果,可见,光纤倾斜仪能够清晰记录监测期间

斜仪安装在观测山洞5号摆墩,进行东西向观测,如图10所示。仪器采样率设置为1 Hz,以便长期采集数据。

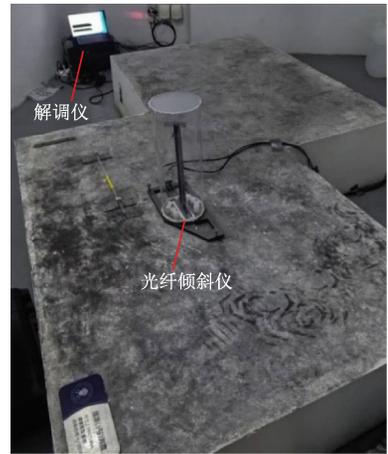


图10 垂直摆光纤倾斜仪观测现场

Fig. 10 Vertical pendulum fiber-optic inclinometer is used to observe the site

成功记录了固体潮的周期性特征。图11展示了光纤倾斜仪连续观测1周的倾角曲线(分钟值),其中可以明显观察到每日周期性的倾斜变化。

将结果与泰安地震监测中心VP型垂直摆倾斜仪记录的东分量固体潮倾斜数据进行对比,如图12所示,发现固体潮汐分量较好吻合,说明本研究的光纤倾斜仪能够准确捕捉地壳的潮汐形变特征(振幅约0.02"),具

所发生的地震事件。

图12、13(b)中,VP型垂直摆倾斜仪在4月14日下午短暂缺数据,是由于电源调试期间仪器停电造成的。光纤倾斜仪的解调仪使用另外供电系统,未受影响。

图14显示了7天内记录的典型地震事件信号,与中国地震台网正式测定的地震事件一致,表明采用基于垂直摆的光纤倾斜仪进行地形变固体潮与地震同步

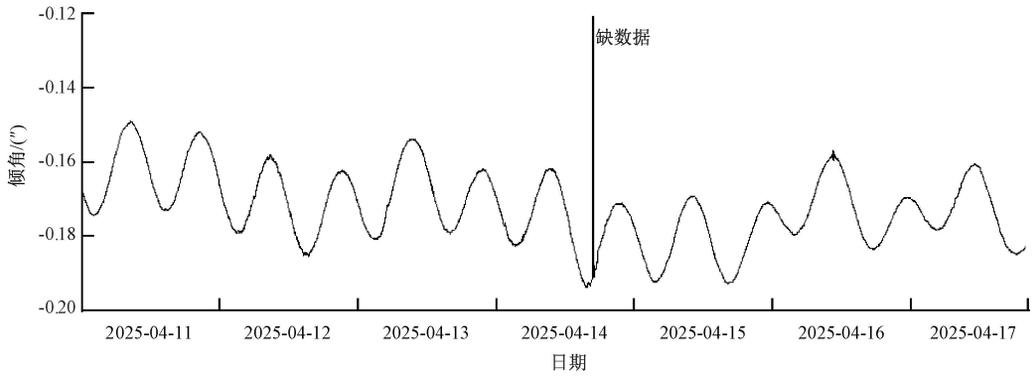
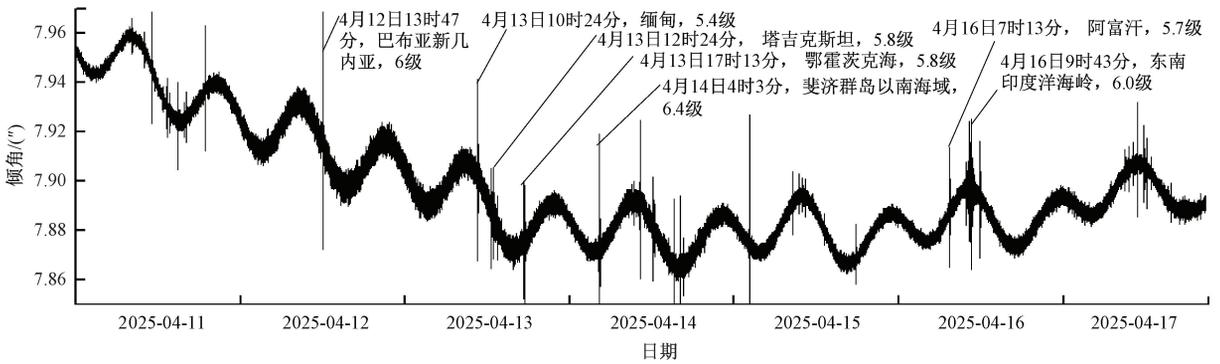
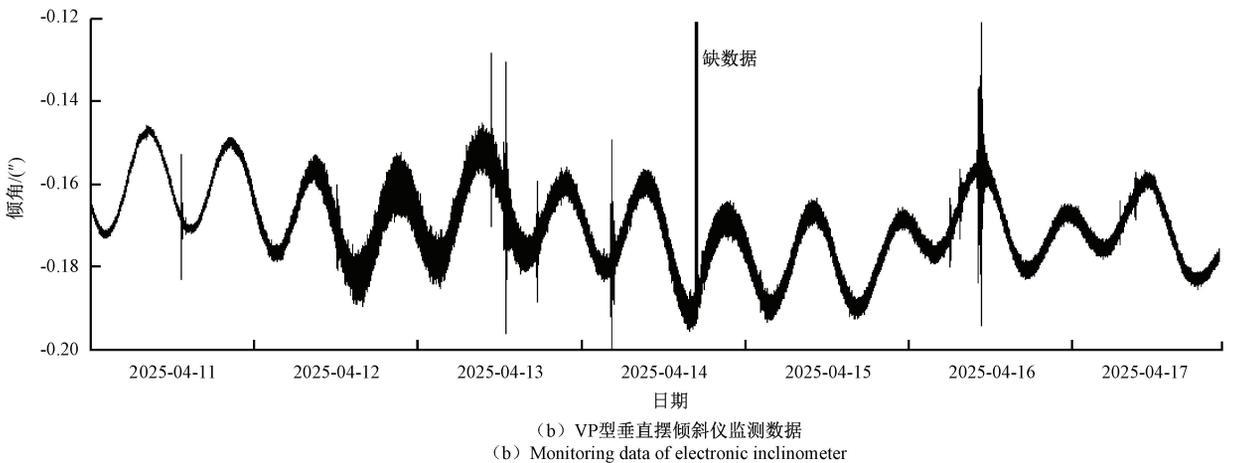


图 12 VP 型垂直摆倾斜仪监测数据(分钟值)

Fig. 12 Monitoring data of the VP-type electronic inclinometer (minute-level values)



(a) 光纤倾斜仪监测数据
(a) Monitoring data of fiber-optic inclinometer



(b) VP型垂直摆倾斜仪监测数据
(b) Monitoring data of electronic inclinometer

图 13 光纤倾斜仪与 VP 型垂直摆倾斜仪监测数据对比(秒值)

Fig. 13 Comparison of monitoring data between fiber-optic and electronic inclinometer (second value)

监测的可行性。此外,将光纤倾斜仪与 VP 型垂直摆倾斜仪对比看(图 15),两者在微小地震信号监测结果上具有一定的差异。光纤倾斜仪除记录典型地震信号与 VP 型垂直摆倾斜仪一致外,还能够记录更多 VP 型垂直摆倾斜仪未记录的微小地震信号,表明光纤倾斜仪

有更大的灵敏度差异以及观测噪声抑制能力,能够记录传统 VP 型垂直摆倾斜仪难以探测到的微小信号。这一现象表明,光纤倾斜仪在高灵敏度地震监测方面具有显著优势,也验证了光纤倾斜仪在地震监测和地壳动力学研究中的应用潜力。

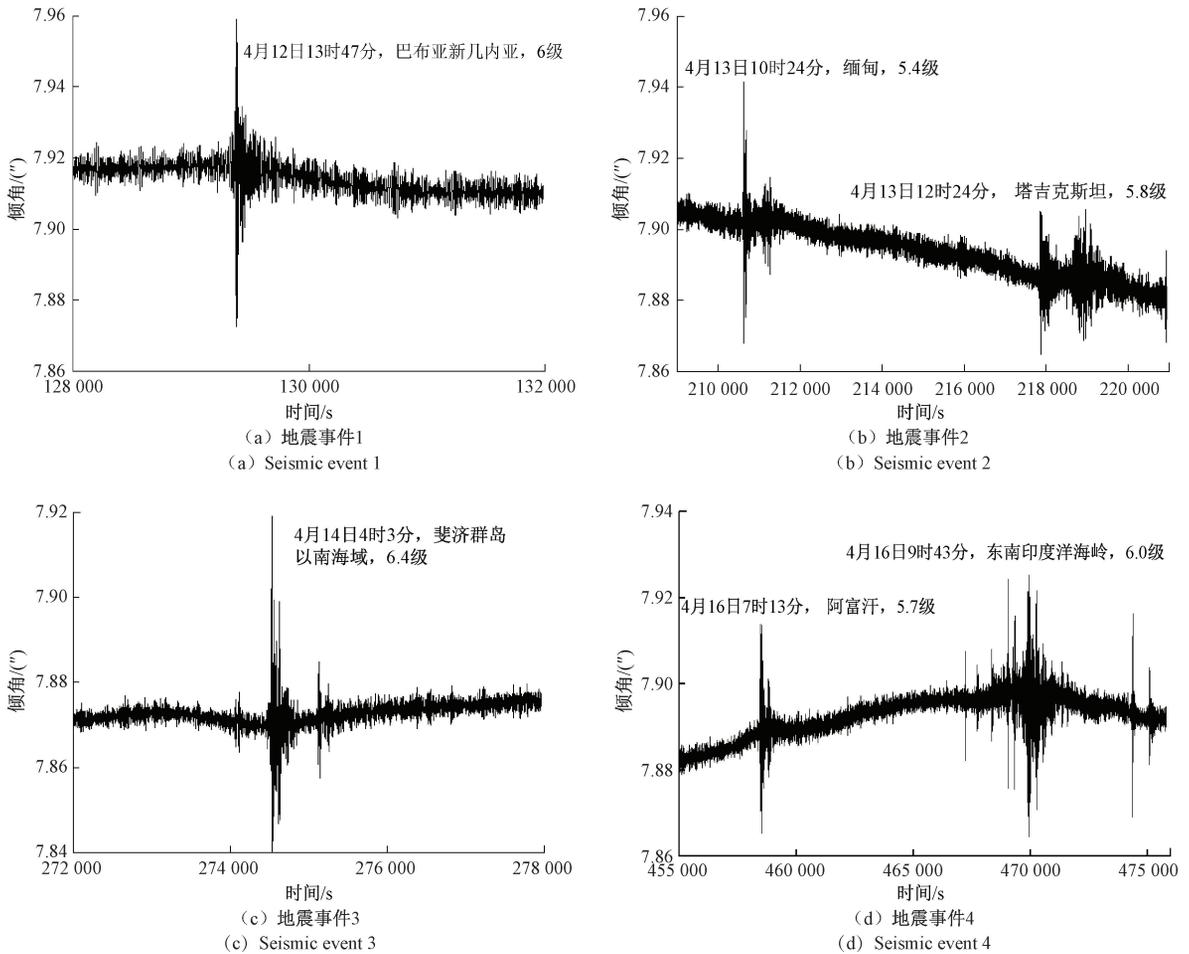


图 14 光纤倾斜仪监测的地震信号

Fig. 14 Seismic signals monitored by fiber-optic clinometer

4 结 论

本研究设计并实现了基于 F-P 干涉的垂直摆光纤倾斜仪系统,成功应用于地壳形变监测和地震同步监测。实验结果表明,系统倾角分辨力达到 $0.000\ 078''$,动态范围达到 4.6×10^6 ,并具有 $0.010\ 6''/^\circ\text{C}$ 的低漂移率特征,能够获取清晰的固体潮汐观测数据,与 VP 型垂直摆倾斜仪观测结果一致。在实验期间,系统成功捕捉到多次地震事件,与 VP 型垂直摆倾斜仪及中国地震台网正式测定的地震事件一致。此外,系统还能够记录到 VP 型垂直摆倾斜仪未记录的微小地震信号,展现了其高灵敏度监测的潜力。本研究的结果验证了采用光纤倾斜仪进行地壳形变观测和地震同步观测的可行性,为光纤传感器在地球物理监测中的应用提供了实验依据。作为一种分辨力更高、能够捕捉微弱前兆信号与微震活动的新型监测手段,该系统有望在地壳形变精细测量与地震监测

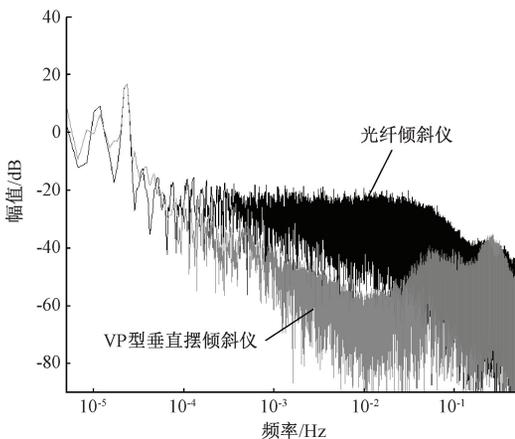


图 15 2 种仪器的系统噪声功率谱对比

Fig. 15 Comparison of system noise power spectrum of two instruments

网络中成为传统仪器在灵敏度与动态范围方面的一种替代方案。

参考文献

- [1] MÉTIVIER L, DE VIRON O, CONRAD C P, et al. Evidence of earthquake triggering by the solid earth tides[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2009, 278(3/4): 370-375.
- [2] YAN R Y, CHEN X D, SUN H P, et al. A review of tidal triggering of global earthquakes[J]. *Geodesy and Geodynamics*, 2023, 14(1): 35-42.
- [3] IDE S, YABE S, TANAKA Y. Earthquake potential revealed by tidal influence on earthquake size-frequency statistics[J]. *Nature Geoscience*, 2016, 9(11): 834-837.
- [4] BUCHOLC M, STEACY S. Tidal stress triggering of earthquakes in Southern California[J]. *Geophysical Journal International*, 2016, 205(2): 681-693.
- [5] BEAUCÉ E, POLI P, WALDHAUSER F, et al. Enhanced tidal sensitivity of seismicity before the 2019 magnitude 7.1 Ridgecrest, California earthquake [J]. *Geophysical Research Letters*, 2023, 50(14): 104375.
- [6] 张宁, 陈高俊, 刘路, 等. 超导重力仪研制与固体潮观测[J]. *地球物理学报*, 2024, 67(12): 4493-4502.
- ZHANG N, CHEN G J, LIU L, et al. Development of superconducting gravimeter and observation of solid earth tide[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2024, 67(12): 4493-4502.
- [7] HUANG W ZH, ZHANG W T, LI L, et al. Review on low-noise broadband fiber optic seismic sensor and its applications[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2023, 41(13): 4153-4163.
- [8] CARVER C J, ZHOU X. Polarization sensing of network health and seismic activity over a live terrestrial fiber-optic cable[J]. *Communications Engineering*, 2024, 3(1): 91.
- [9] YANG Y, MA X B, CHEN K, et al. A high-resolution dynamic fiber-optic inclinometer[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2018, 283: 305-312.
- [10] CUI P, ZHANG W T, SONG Y. High resolution inclinometer based on vertical pendulum and fiber Bragg grating Fabry-Perot cavity[J]. *Chinese Optics Letters*, 2018, 16(11): 110603.
- [11] ZHUANG Y Y, CHEN Y ZH, ZHU CH, et al. Probing changes in tilt angle with 20 nanoradian resolution using an extrinsic Fabry-Perot interferometer-based optical fiber inclinometer[J]. *Optics Express*, 2018, 26(3): 2546-2556.
- [12] YANG Y, WANG EN Y, CHEN K, et al. Fiber-optic Fabry-Perot sensor for simultaneous measurement of tilt angle and vibration acceleration [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2018, 19(6): 2162-2169.
- [13] WANG SH, YANG Y W, MOHANTY L, et al. Ultrasensitive fiber optic inclinometer based on dynamic Vernier effect using push-pull configuration[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2022, 71: 1-8.
- [14] 张文涛, 黄稳柱, 楼明涂. 利用光纤倾斜仪记录固体潮[J]. *地震地磁观测与研究*, 2022, 43(S1): 411-412.
- ZHANG W T, HUANG W ZH, LOU M G. The application of the optical fiber clinometer to solid tide measurement[J]. *Seismological and Geomagnetic Observation and Research*, 2022, 43(S1): 411-412.
- [15] 王巧云, 闻旭, 王纪龙, 等. 基于 L 型轮辐结构膜片的窄频光纤 F-P 声波传感器研究[J]. *仪器仪表学报*, 2024, 45(5): 110-117.
- WANG Q Y, WEN D, WANG J L, et al. Study on narrow-frequency fiber-optic F-P acoustic wave sensor based on L-shaped spoke structure diaphragm [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2024, 45(5): 110-117.
- [16] 杨玉强, 张钰颖, 高佳乐, 等. 一阶光学游标效应的全光纤温度传感器[J]. *电子测量与仪器学报*, 2024, 38(4): 234-240.
- YANG Y Q, ZHANG Y Y, GAO J L, et al. All-fiber temperature sensor based on first-order optical Vernier effect[J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2024, 38(4): 234-240.
- [17] GRAVIROV V V, DESHCHEREVSKII A V, KUZMIN Y O, et al. Improvements in high-precision tiltmeter instrument systems located in an underground geophysical observatory[J]. *Seismic Instruments*, 2022, 58(4): 363-378.
- [18] XU X, CHEN ZH, LI H, et al. Design of a high-precision component-type vertical pendulum tiltmeter based on FPGA[J]. *Sensors*, 2023, 23(18): 7998.
- [19] YANG F X, GUAN D X, LI X D, et al. Application research on high-precision tiltmeter with rapid deployment capability[J]. *Sensors*, 2025, 25(5): 1559.
- [20] ZHANG F X, XU Z W, JIANG SH D, et al. Ultrahigh-resolution and large-dynamic-range temperature sensor based on fiber-optic EFPI cavity [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2023, 23(7): 6857-6863.
- [21] 李太文, 刘志远, 韩博, 等. 基于游标效应的高灵敏度光纤 Fabry-Perot 热式流速传感技术研究[J]. *仪器仪表学报*, 2025, 46(6): 48-58.

- LI T W, LIU ZH Y, HAN B, et al. Research on high-sensitivity fiber-optical Fabry-Perot thermal flow velocity sensing technology based on the vernier effect [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2025, 46(6): 48-58.
- [22] 全国地震标准化技术委员会. 地震观测仪器进网技术要求. 地壳形变观测仪 第 1 部分: 倾斜仪: DB/T 31.1-2008[S]. 北京: 中国地震局, 2008.
National Technical Committee for Earthquake Standardization. Technical requirements of instruments in network for earthquake monitoring. The instrument for crustal deformation observation. Part 1: Tiltmeter: DB/T 31.1-2008[S]. Beijing: China Earthquake Administration, 2008.
- [23] 余鑫宇, 范典, 周次明, 等. 基于光纤法布里珀罗干涉的扭矩测量方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(3):202-209.
YU X Y, FAN D, ZHOU C M, et al. Research on the torque measurement method based on fiber-optical Fabry-Perot interference [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(3):202-209.
- [24] 童杏林, 陈士猛. 基于 Fabry-Perot 干涉的高温温度、压力、应变、振动传感器研究进展[J]. 光学与光电技术, 2022, 20(1):1-13.
TONG X L, CHEN SH M. Research progress of temperature, pressure, strain and vibration sensors based on Fabry-Perot interference at high temperature [J]. Optics & Optoelectronic Technology, 2022, 20(1):1-13.
- [25] 全国地震标准化技术委员会. 地震地壳形变观测方法地倾斜观测: DB/T 45-2012[S]. 北京: 中国地震局, 2012.
National Technical Committee for Earthquake Standardization. The method of earthquake-related crustal monitoring-crustal tilt observation: DB/T 45-2012[S]. Beijing: China Earthquake Administration, 2012.

- [26] GUO J, ZHU CH, TANG Y, et al. Temperature-insensitive inclinometer based on transmission line Fabry-Perot resonators[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2022, 71:1-10.

作者简介



张发祥 (通信作者), 2012 年于中国科学院半导体研究所获得博士学位, 现为齐鲁工业大学 (山东省科学院) 研究员, 主要研究方向为光纤传感、智能感知技术。

E-mail: zhangfx@semi.ac.cn

Zhang Faxiang (Corresponding author) received his Ph. D degree from the Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences in 2012. He is currently a researcher at Qilu University of Technology (Shandong Academy of Sciences). His main research interests include fiber-optic sensing technology and intelligent sensing technology.



李俊涛, 2023 年于齐鲁工业大学获得学士学位, 现为齐鲁工业大学硕士研究生, 主要研究方向为光纤形状感知、深度学习检测方法及应用。

E-mail: 19863681262@163.com.

Li Juntao received his B. Sc. degree from Qilu University of Technology in 2023. He is currently a master's student at Qilu University of Technology. His main research interests include fiber shape perception, deep learning-based detection methods, and their application.



李惠玲, 2010 年于防灾科技学院获得学士学位, 现为泰安地震监测中心站工程师, 主要研究方向为地壳形变监测。

E-mail: 501611067@qq.com

Li Huiling received her B. Sc. degree from the Institute of Disaster Prevention in 2010. She is currently an engineer at the Tai'an Seismic Monitoring Center Station. Her main research interest includes crustal deformation monitoring.