

激光与光电子学进展

基于光纤布拉格光栅和增材制造技术的
测斜传感器王南苏^{1,2,3}, 洪成雨^{2,3*}, 苏栋^{2,3}, 张一帆⁴, 王俊^{2,3}¹上海大学力学与工程科学学院, 上海 200444;²深圳大学土木与交通工程学院, 广东 深圳 518060;³深圳大学未来地下城市研究院, 广东 深圳 518060;⁴香港理工大学 3D 打印研究中心, 香港 九龙 999077

摘要 增材制造技术可以制备高灵活度的测斜传感器, 即传感器的灵敏度、分辨率、量程均可以根据需求进行设计与制作, 因此, 基于光纤布拉格光栅和增材制造技术研发了一种新型测斜传感器。为了验证该传感器的性能, 推导了该传感器的测量原理并开展了标定实验和边坡模型加载实验。实验结果表明, 该传感器的测斜灵敏度为 $0.0824 (^{\circ})/\mu\text{m}$, 分辨率为 $12.14 \mu\text{m}/(^{\circ})$, 量程大于 60° ; 且该传感器与线性可变差动变压器传感器的边坡实验结果相吻合, 位移差小于 0.08 mm 。

关键词 光纤光学; 光纤布拉格光栅; 增材制造技术; 测斜传感器

中图分类号 TP393

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.0906005

Inclinometer Sensors Based on Fiber Bragg Grating and
Additive Manufacturing TechnologyWang Nansu^{1,2,3}, Hong Chengyu^{2,3*}, Su Dong^{2,3}, Zhang Yifan⁴, Wang Jun^{2,3}¹School of Mechanics and Engineering Science, Shanghai University, Shanghai, 200444, China;²College of Civil and Transportation Engineering, Shenzhen University, Shenzhen, Guangdong, 518060, China;³Underground Polis Academy, Shenzhen University, Shenzhen Guangdong, 518060, China;⁴University Research Facility in 3D Printing (U3DP), Hong Kong Polytechnic University, Kowloon, Hong Kong, 999077 China

Abstract Additive manufacturing technology can prepare highly flexible inclinometer sensors, i. e., the sensitivity, resolution, and range of the sensor can be designed and manufactured according to requirements. Therefore, this study develops a new type of inclinometer sensor based on fiber Bragg grating and the additive manufacturing technology. In order to verify the performance of the sensor, the measurement principle of the sensor is deduced, and the calibration and slope-model loading experiments are conducted. The experimental results show that the sensor's inclinometer sensitivity is $0.0824 (^{\circ})/\mu\text{m}$, resolution is $12.14 \mu\text{m}/(^{\circ})$, and range is greater than 60° . The sensor is consistent with the slope test results of the linear variable differential transformer sensor, and the displacement difference is less than 0.08 mm .

Key words fiber optics; fiber Bragg grating; additive manufacturing technology; inclinometer sensor

OCIS codes 060.2370; 060.3735

收稿日期: 2020-08-22; 修回日期: 2020-09-29; 录用日期: 2020-10-21

基金项目: 国家自然科学基金(52078303)、国家自然科学基金联合基金(U2034204)

*E-mail: cyhong@szu.edu.cn

1 引言

随着我国经济建设的迅速发展,传统基础设施的规模逐步扩大,其中,边坡问题一直存在于道路、桥梁、建筑物等工程的建设与运营中^[1-4]。近年来,土体滑坡、泥石流等地质灾害导致工程事故频繁发生,严重威胁了我国人民的生命和财产安全。但边坡岩体的构成复杂,岩土工程理论尚未完善,边坡问题只能依靠长期监测进行预防与控制。边坡内部深层土体位移的监测可反映边坡岩体的变形和稳定性,对边坡地质灾害的预防具有重要意义^[5-8]。

目前主要通过基于微机电系统(MEMS)的测斜仪检测深层土体的位移,包括固定式测斜仪和便携式测斜仪。便携式测斜仪操作简单,但需要人工操作,测试效率低,且抗电磁干扰能力差。在工程环境恶劣、人工操作不便的条件下,无法满足边坡实时监测的需要^[9-10]。光纤布拉格光栅(FBG)传感器作为一种新型传感元件,具有尺寸小、精度高、抗电磁干扰能力强等优点^[11-15],被广泛应用于边坡灾害监测中^[16-17]。姚飞等^[18]设计了基于光栅应变片的深部位移传感探头,实现了边坡岩土体内部变化的长期在线监测。陈朋超等^[19]在测斜管上粘接 FBG 应变传感器,实现了边坡内部的土体位移监测。相比传统检测手段,FBG 传感技术具有一定的优越性。李贝等^[20]结合改进的测斜管与高精度 FBG 倾角传感器构成新型分布式测斜系统,成功监测了边坡内部的土体位移,验证了 FBG 倾角传感器在边坡测斜中的有效性。但 FBG 传感器封装困难,且易受外力破坏,在边坡监测的应用中还有待深入研究。

增材制造技术是一种三维(3D)打印技术,具有成本低、速度快、精度高和尺寸可定制等优点。增材制造技术将打印耗材送至加热块使其从固态转化为熔融状态,并根据模型尺寸由打印喷嘴挤出,以实现精准成型,打印耗材包括聚乳酸(PLA)、丙烯腈-丁二烯-苯乙烯(ABS)、尼龙等^[21-23]。增材制造技术制作的传感器可解决传统监测仪成本高、加工耗时等问题,为下一代传感元件的制作提供了一种新方法。近年来,虽然 3D 打印技术发展迅速,但结合 3D 打印技术制作传感器的研究相对较少。沈诗等^[24]结合 3D 打印技术和光纤传感技术研发了具有高灵敏度和稳定性的光纤声发射传感器。施

令飞等^[25]设计了一种基于 3D 打印技术封装的 FBG 测斜传感器,并通过边坡模型实验与有限元仿真验证了该传感器的有效性,但其封装结构简单,无法满足实际工程的需要。本研究将 FBG 技术与增材制造技术相结合,研发了一种新型测斜传感器。同时对 FBG 测斜计进行了系统的标定实验和边坡模型加载实验,验证了该 FBG 测斜传感器测量倾角的有效性。

2 增材制造 FBG 测斜传感器

2.1 FBG 传感原理

FBG 传感器作为一种新型智能传感器,广泛应用于多个领域中^[26]。其光纤结构如图 1 所示,光纤由内到外分为纤芯、包层和涂覆层三部分。FBG 传感器的布拉格光栅部分通过硅光纤的紫外光敏特性写入光纤纤芯内部,形成具有不同周期特性的光栅,光栅周期与温度和应变存在线性对应关系,FBG 的传感原理如图 2 所示。

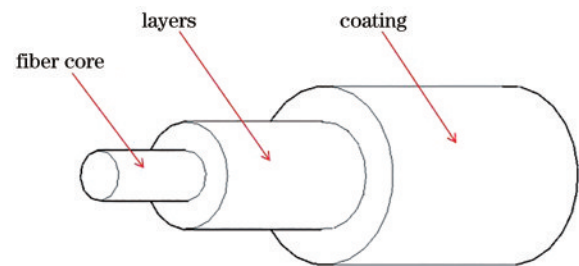


图 1 FBG 传感器的结构

Fig. 1 Structure of the FBG sensor

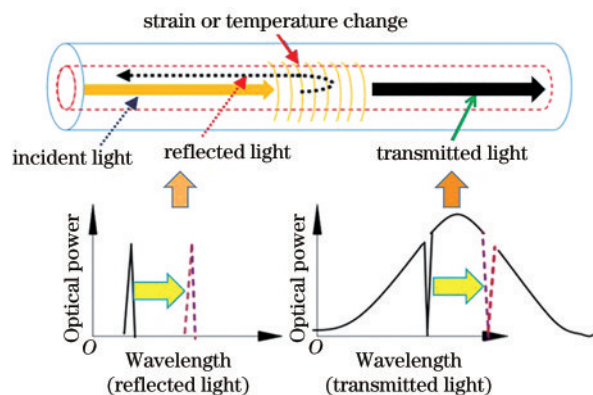


图 2 FBG 传感器的原理

Fig. 2 Principle of the FBG sensor

当输入特定波长的光满足布拉格条件时,该波长的光会发生反射,其余波长的光会发生透射。发生反射光的中心波长可表示为

$$\lambda_B = 2n_{\text{eff}}\Lambda, \quad (1)$$

式中, λ_B 为光栅的中心波长, n_{eff} 为纤芯的有效折射率, Λ 为光栅周期。可以发现, 任何能够改变光栅周期和光栅折射率的物理量都会影响光栅的中心波长, 而温度和应变是直接影响光栅中心波长的物理量。FBG 中心波长的偏移量与应变和温度的关系可表示为

$$\Delta\lambda_B/\lambda_B = (1 - p_e)\Delta\varepsilon + (a + \zeta)\Delta T, \quad (2)$$

式中, p_e 为有效弹光系数, $\Delta\varepsilon$ 为 FBG 的轴向应变变化量, ΔT 为温度变化量, a 、 ζ 分别为 FBG 的热膨胀系数和热光系数。光栅周期会随外界应力应变的变化发生变化, 而光栅的有效折射率会因光弹效应发生变化。外界温度的变化会引起热膨胀, 使光栅周期发生变化, 热敏效应也会引起光栅周期的变化。目前基于 FBG 的传感器主要通过直接或间接改变温度、应变改变 FBG 的中心波长, 从而达到测量待测物理量的目的, 可进一步将(2)式表示为

$$\Delta\lambda_B/\lambda_B = c_\varepsilon\Delta\varepsilon + c_T\Delta T, \quad (3)$$

式中, c_ε 与 c_T 分别为 FBG 的应变系数和温度系数, 可通过标定实验得到。

2.2 FBG 测斜传感器的传感原理

当 FBG 测斜计的倾角发生变化时(顺时针旋转), PLA 杆件的重力分量受到拉力(F)和弯矩(M)作用, 如图 3 中 FBG1 和 FBG2 发生顺时针旋转时分别受到拉伸和压缩作用, 可用两个 FBG 传感器的中心波长变化量反映倾斜角度的大小。其中, L_2 为 PLA 杆件变截面部分的长度, B 为 PLA 杆件变截面部分的宽度。当倾斜角为 α , 且忽略传感器质量和 PLA 杆件自重的情况下, 拉伸力和弯矩可表示为

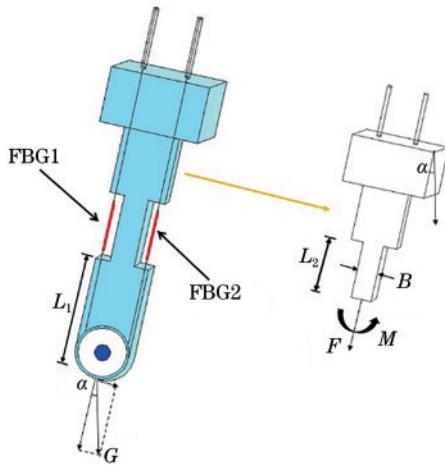


图 3 FBG 传感器的测斜原理

Fig. 3 Inclinometer principle of the FBG sensor

$$F = G \cos \alpha, \quad (4)$$

$$M = GL_1 \sin \alpha, \quad (5)$$

式中, L_1 为重物中心到杆底部的距离, G 为物体的质量。拉伸力 F 与弯曲力矩 M 引起两个 FBG 传感器的应变变化可表示为

$$\varepsilon = \frac{F}{EA} \pm \frac{M}{EI}, \quad (6)$$

式中, E 和 I 分别为 PLA 的弹性模量和惯性矩, A 为杆的底部截面积。将(4)式和(5)式代入(6)式, 得到

$$\varepsilon = \frac{G \cos \alpha}{EA} \pm \frac{GL_1 \sin \alpha}{EI}. \quad (7)$$

联立(6)式和(7)式, 得到

$$\varepsilon = \frac{F}{EA} \pm \frac{M}{EI} = \frac{G}{E} \left(\frac{\cos \alpha}{A} - \frac{L_1 \sin \alpha}{I} \right). \quad (8)$$

由(8)式可知, 当倾斜角由 α_0 变化至 α_1 时, 应变变化量可表示为

$$\Delta\varepsilon = \left(\frac{G \cos \alpha_1}{EA} - \frac{GL_1 \sin \alpha_0}{EA} \right) \pm \left(\frac{GL_1 \sin \alpha_1}{EI} - \frac{GL_1 \sin \alpha_0}{EI} \right) = \frac{\lambda' - \lambda_0}{\lambda_0(1 - P_e)}, \quad (9)$$

式中, λ' 、 λ_0 分别为倾斜角为 α_1 、 α_0 时 FBG 传感器的波长。FBG1 和 FBG2 传感器的应变变化量分别为

$$\Delta\varepsilon_1 = \left(\frac{G \cos \alpha_1}{EA} - \frac{GL_1 \sin \alpha_0}{EA} \right) \pm \left(\frac{GL_1 \sin \alpha_1}{EI} - \frac{GL_1 \sin \alpha_0}{EI} \right) = \frac{\lambda_1' - \lambda_1}{\lambda_1(1 - P_e)}, \quad (10)$$

$$\Delta\varepsilon_2 = \left(\frac{G \cos \alpha_1}{EA} - \frac{GL_1 \sin \alpha_0}{EA} \right) \pm \left(\frac{GL_1 \sin \alpha_1}{EI} - \frac{GL_1 \sin \alpha_0}{EI} \right) = \frac{\lambda_2' - \lambda_2}{\lambda_2(1 - P_e)}, \quad (11)$$

式中, λ_1' 、 λ_1 分别为倾斜角为 α_1 、 α_0 时 FBG1 传感器的波长, λ_2' 、 λ_2 分别为倾斜角为 α_1 、 α_0 时 FBG2 传感器的波长。两个传感单元的应变差可表示为

$$\Delta\varepsilon_2 - \Delta\varepsilon_1 = \frac{2GL_1}{EI} (\sin \alpha_1 - \sin \alpha_0) = \frac{\lambda_2' - \lambda_2}{\lambda_2(1 - P_e)} - \frac{\lambda_1' - \lambda_1}{\lambda_1(1 - P_e)}, \quad (12)$$

式中, E 、 I 、 P_e 、 G 和 L_1 均为常数。由两个 FBG 传感器的波长可直接得到倾斜角的变化量。从(12)式可以看出, 温度变化不会影响两个 FBG 传感器的倾角变化量与波长偏移量之间的相关性。因此, 无需考虑温度对 FBG 测斜传感器的影响。当倾角从 α_0 变化到 α_1 时, 倾角变化量 $\Delta\alpha$ 可表示为

$$\Delta\alpha = \alpha_1 - \alpha_0 = \arcsin \left[\frac{EI}{2GL_1(1 - P_e)} \times \left(\frac{\lambda_2' - \lambda_2}{\lambda_2} - \frac{\lambda_1' - \lambda_1}{\lambda_1} \right) \right], \quad (13)$$

(13)式也可以表示为

$$\Delta\alpha = \arcsin \left[\frac{EI}{2GL_1(1 - P_e)} \left(\frac{\Delta\lambda_2}{\lambda_2} - \frac{\Delta\lambda_1}{\lambda_1} \right) \right], \quad (14)$$

式中, $\Delta\lambda_2/\lambda_2 - \Delta\lambda_1/\lambda_1$ 为波长比的差。已知两侧 FBG 传感器的波长变化量时, 根据(14)式和安装在倾斜传感器内部的两个 FBG 传感器的波长偏移量可计算出倾斜传感器的倾斜角度, 由倾斜角度和位移的关系可进一步得到波长偏移量与位移之间的关系。

2.3 FBG 测斜传感器的结构

PLA 材料打印成型时需要的温度低、模量范围大, 不易发生翘曲。ABS 和碳纤维材料的刚度较大, 制作的 FBG 测斜计对倾角变化不敏感。因此, 实验基于 3D 打印技术用 PLA 材料制作 FBG 测斜计的两个主要部分, 包括主体部分和外壳。首先将 FBG 传感器、重物及 PLA 材料封装在打印的杆件结构中; 当测斜计发生倾斜时, 杆件的重力分量发生变化, 带动 FBG 传感器光栅部分拉伸程度的变化, 从而改变 FBG 的中心波长; 最后通过标定实验测量倾角。FBG 测斜传感器的结构如图 4 所示, 其

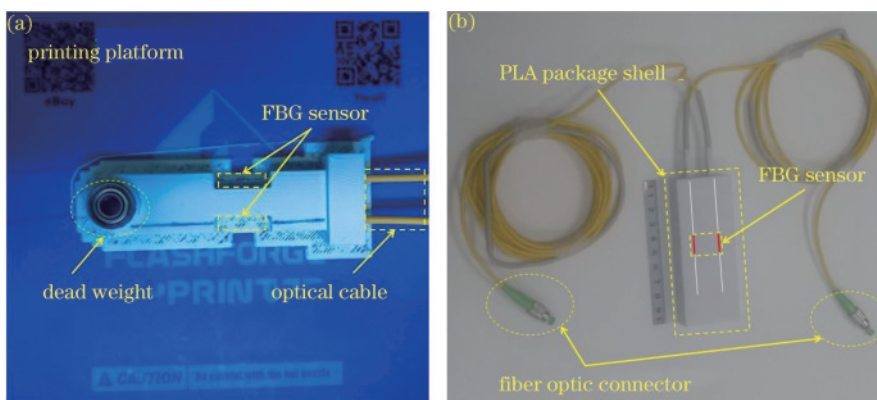


图 5 FBG 测斜传感器的实物图。(a) 主体部分; (b) 外壳部分

Fig. 5 Physical image of the FBG inclinometer sensor. (a) Main part; (b) shell part

3 FBG 测斜传感器的标定

室内标定实验在恒温(26 °C)环境下进行, 设 FBG 测斜计以顺时针旋转的倾斜角度为正。标定实验示意图如图 6 所示, 其中, FBG 解调仪用于采集两个 FBG 传感器的中心波长, 采集频率为 1 Hz。

中, PLA 杆件由多个变截面构成, 从光缆出线口一端至重物, 截面尺寸分别为 30 mm × 10 mm、20 mm × 4 mm、3 mm × 4 mm、20 mm × 4 mm, 金属轴承(重物)的内径为 10 mm, 外壳部分也由 PLA 材料打印, 主体部分通过预留孔位与外壳部分紧密连接。

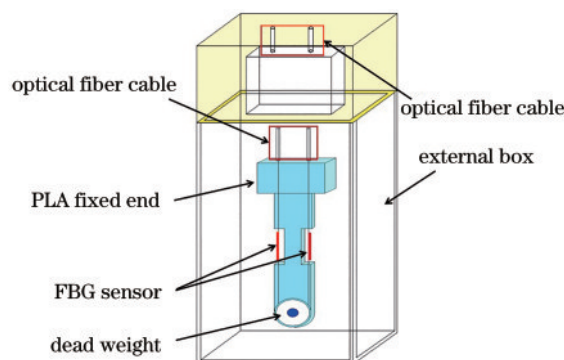


图 4 FBG 测斜传感器与封装结构的示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the FBG inclinometer sensor and package structure

FBG 测斜传感器的实物如图 5 所示。整个传感单元由 3D 打印机一次成型, 填充(45°线性填充)密度为 60%。当打印进程显示为 50% 时, 将 FBG 传感器封装于打印主体内部, 光栅部位裸露, 如图 5(a) 所示。测斜计外壳部分预留出线口与主体部分线缆完全贴合, 线缆出线口用黄管保护, 两端采用跳线与引出的光纤熔接, 便于采集数据, 如图 5(b) 所示。

FBG 测斜计固定在电子倾角仪测量臂上, 电子倾角仪的分辨率为 0.1°。用步进式方法增加角度并进行测斜标定, 每次增加 20°, 停留 20 s, 3 次增至 60°; 反方向以相同的方式增加或减小角度, 每次停留时间与增加角度时保持一致。

FBG1 的波长随时间(标定实验中电子量角仪

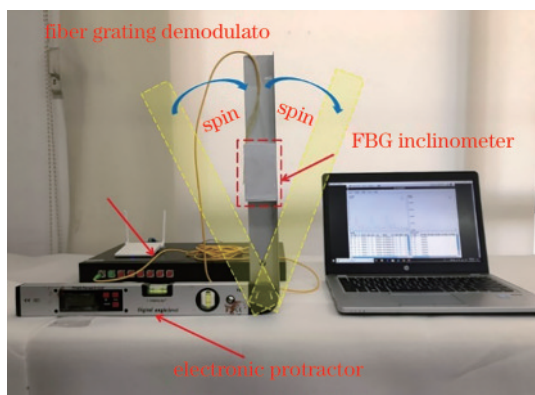


图 6 FBG 测斜传感器的标定实验装置

Fig. 6 Calibration experiment device of the FBG inclinometer sensor

顺时针旋转至 60° 又返回原位置的时间)的变化曲线如图 7(a)所示,可以发现,波长变化量随时间呈阶梯型变化。在 $0\sim 60$ s 时间段内,测斜计为顺时针旋转,FBG1 传感器的波长随时间的增加而增大,角度

每增加 20° ,FBG1 传感器的波长变化量约为 240 pm,原因是重物在光栅方向上产生的重力分量逐渐增大,FBG1 传感器光栅部分受到拉伸作用。在 $60\sim 120$ s 时间段内,测斜计为逆时针旋转,重力分量逐渐减小,FBG1 传感器的波长也逐渐减小,角度每减小 20° ,波长变化量约为 240 pm。在 $120\sim 180$ s 时间段内,测斜计仍为逆时针旋转,角度每增加 20° ,FBG1 传感器的波长变化量约为 480 pm。在 $180\sim 240$ s 时间段内,角度每减小 20° ,FBG1 传感器的波长变化量约为 480 pm。FBG2 的波长随时间的变化曲线如图 7(b)所示,可以发现,FBG2 传感器的波长随时间变化呈步进式增大或减小。在 $0\sim 120$ s 时间段内,FBG2 传感器先顺时针旋转 60° ,再逆时针旋转至初始位置,角度每增加或减小 20° ,FBG2 传感器的波长变化量约为 488 pm。在 $120\sim 240$ s 时间段内,角度每增加或减小 20° ,FBG2 传感器的波长变化量约为 246 pm。

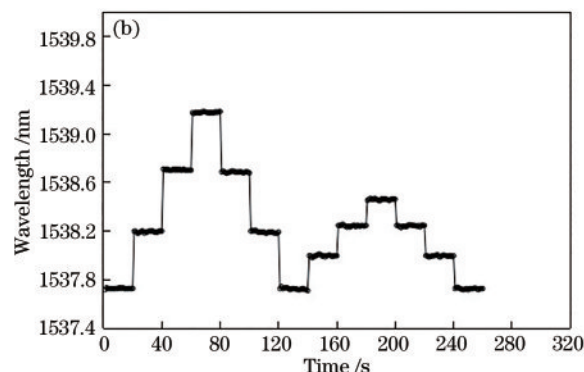
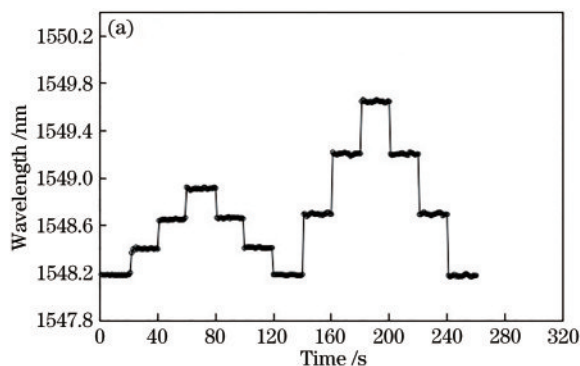


图 7 FBG 传感器波长随时间的变化曲线。(a) FBG1;(b) FBG2

Fig. 7 FBG sensor wavelength change curve with time. (a) FBG1; (b) FBG2

通过实验采集的波长计算出两个 FBG 传感器的波长差,结果如图 8 所示。可以发现,在 $0\sim 60$ s 时间段,即倾斜角度为 $0^\circ\sim 60^\circ$ 时,FBG1 传感器的波长变化量为 728 pm,FBG 采集仪的分辨率为 1 pm,计算得

到新型 FBG 测斜计的精度为 0.0824 ($^\circ$)/pm。FBG2 传感器的最大波长变化量为 1446.1 pm。在 $120\sim 160$ s 时间段内,FBG1 传感器的最大波长变化量为 1466.9 pm,FBG2 传感器的最大波长变化量为 734.0 pm。

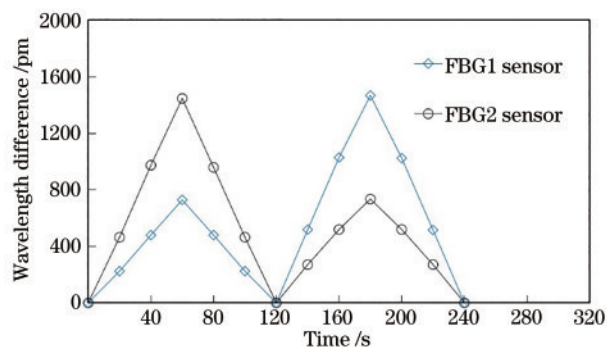


图 8 波长差随时间的变化曲线

Fig. 8 Change curve of wavelength difference with time

测斜传感器波长比的差随倾斜角度的变化曲线如图 9 所示,其中, x 为倾斜角度, y 为波长比差值, R^2 为线性拟合方差值。可以发现,波长比差值的变化量与角度呈良好的线性关系,在 $0^\circ\sim 60^\circ$ 范围内,波长比差值增加了 4.7×10^{-4} 。角度每增加或减小 20° ,波长比差值约改变 15.77×10^{-5} 。

绝对误差为波长比差值的实际值与理论值之差,图 10 为绝对误差随倾斜角度的变化曲线。可以发现,绝对误差均小于 0.9×10^{-5} ,当倾斜角度为 $-20^\circ\sim 60^\circ$ 时,绝对误差均小于 0.2×10^{-5} 。

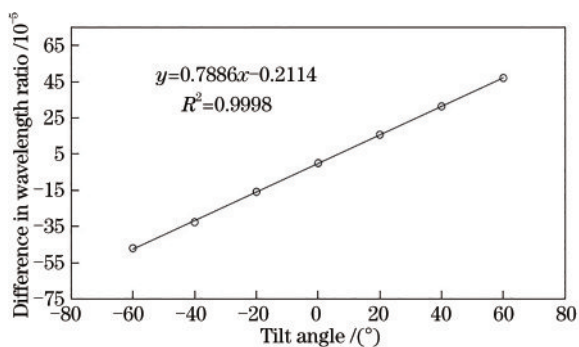


图 9 波长比差随角度的变化曲线

Fig. 9 Change curve of wavelength ratio difference with tilt angle

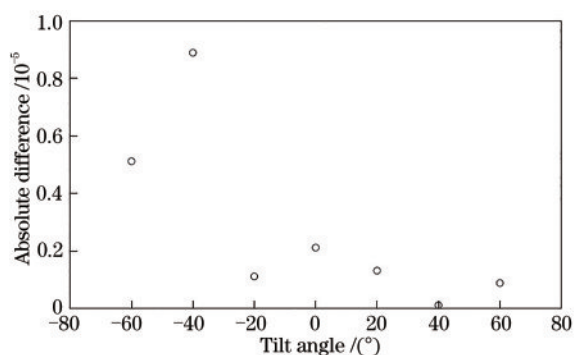


图 10 实际与理论计算值的对比

Fig. 10 Comparison of actual and theoretical calculation values

4 FBG 测斜传感器的验证实验

4.1 FBG 测斜传感器的室内模型实验

用标准砂建立了室内边坡模型,标准砂的物理性

质参数如表 1 所示。室内建立的边坡模型示意图如图 11 所示,其中,模型箱的尺寸为 600 mm × 290 mm × 400 mm,模型箱侧壁均是厚度为 25 mm 的高强度订制透明玻璃,便于制造边坡模型以及观察边坡变形情况。建立的边坡模型最大高度为 290 mm,坡脚为 100 mm,高为 50 mm。模型箱内分别放置两种传感器,包括 FBG 测斜计和线性可变差动变压器(LVDT)位移计,如图 11(a)所示。其中,FBG 测斜计嵌入边坡内部,距底边 210 mm,距非坡面一侧玻璃壁 330 mm,LVDT 位移计安装在斜坡表面。用 CTM8050 万能试验机对平台进行加压,直至边坡破坏,其结构如图 11(b)所示,加载速度为 2 mm/min,采集频率为 10 Hz。

由两个 FBG 传感器计算出波长差,通过波长差的比值得到倾角。FBG 测斜传感器的倾角随时间变化的曲线如图 12 所示,可以发现,倾斜角度随着时间的增加整体呈上升趋势。在 0~75 s 时间段内,倾斜角度基本为 0°。75 s 后,倾斜角度随着时间的增加而增大,上升峰值为 0.45°。

FBG 测斜传感器与 LVDT 位移计的测量结果(传感器所在位置边坡表面的位移量)如图 13 所示,可以发现,FBG 测斜传感器与 LVDT 位移计测量的位移量都随着时间的增加呈上升趋势。LVDT 位移计在 60~95 s 时间段内的位移量比 FBG 测斜传感器大,在 104 s 后,FBG 测斜传感器的位移量大于 LVDT 位移计的位移量,FBG 测斜传感器和 LVDT 位移计的最大位移分别为 0.79 mm 和 0.71 mm,

表 1 砂土的物理参数

Table 1 Physical parameters of the sand

Parameter	Gravity / (kN·m ⁻³)	Proportion	Void ratio	Moisture content / %	Cohesion / kPa	Elastic modulus / MPa
Standard sand	15.83	2.65	0.579	4	0.1	20

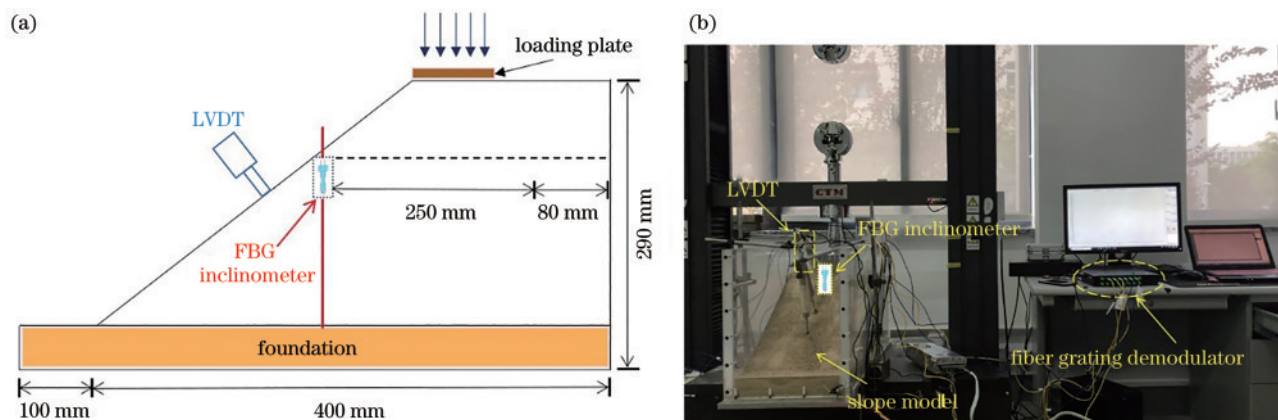


图 11 边坡模型及传感器的布设。(a)传感器的布设;(b)边坡模型的实物

Fig. 11 Slope model and sensor layout. (a) Layout of the sensors; (b) physical object of the slope model

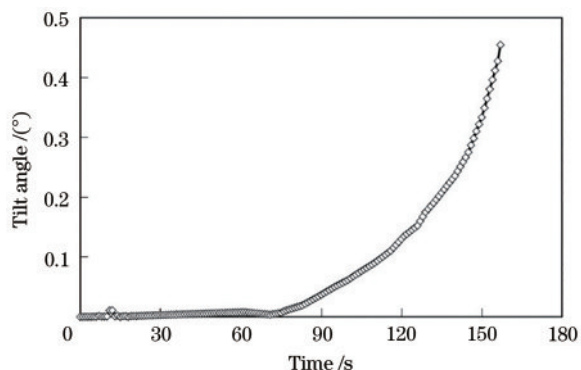


图 12 FBG 测斜传感器的倾斜角度随时间的变化曲线

Fig. 12 Change curve of the tilt angle of the FBG inclinometer with time

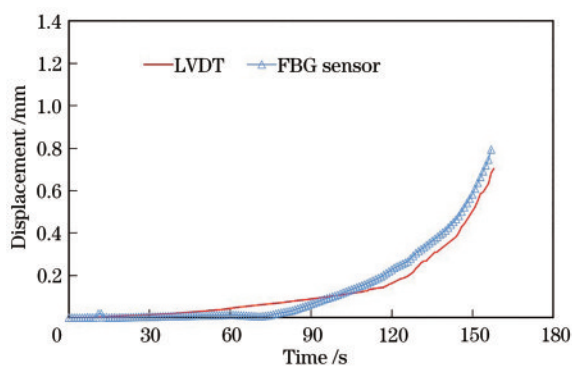


图 13 FBG 测斜传感器与 LVDT 位移计的位移关系曲线

Fig. 13 Displacement relationship curves between FBG inclinometer and LVDT displacement meter

两者的最大位移差为 0.08 mm。

5 结 论

基于增材制造技术和 FBG 传感技术,研发了一种新型传感器,并进行了理论分析和室内标定及模型监测实验。实验结果表明,利用增材制造技术将 FBG 传感器植入打印的主体结构中,可以实现倾角测量。该测斜传感器具有体积小、质量轻、灵敏度高和成型速度快等特点,且具有良好的监测性能,波长比差值与传感器的倾斜角度呈良好的线性关系,线性度为 99%。FBG 测斜计的最小分辨率为 0.0824 (°)/pm,量程大于 60°。边坡实验结果表明,FBG 测斜传感器与 LVDT 位移计的加载结果一致性较好,两者的最大位移差为 0.08 mm,这表明该传感器可监测较小的角度变化。

参 考 文 献

[1] Yang G H, Zhong Z H, Zhang Y C, et al. Analysis of mechanism and mechanical characteristics of landslide

disaster [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(S2): 4009-4017.

杨光华, 钟志辉, 张玉成, 等. 滑坡灾害的机制与力学特性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(S2): 4009-4017.

[2] Sun G L, Tao Z G, Gong W L, et al. Slope disaster monitoring and early warning network system and its engineering application [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2017, 46(2): 285-291.

孙光林, 陶志刚, 宫伟力, 等. 边坡灾害监测预警物联网系统及工程应用[J]. 中国矿业大学学报, 2017, 46(2): 285-291.

[3] Shao N H, Pan Y, Ruan Y W, et al. Stability analysis and slope treatment technology of open-pit slope in alpine region [J]. Mining Research and Development, 2019, 39(11): 1-5.

邵尼华, 潘懿, 阮琰文, 等. 高寒地区露天边坡稳定性分析及边坡治理技术研究[J]. 矿业研究与开发, 2019, 39(11): 1-5.

[4] Li J, Wu S C, Gao Y T, et al. Review of slope micro-seismic monitoring in open-pit mine [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(S2): 3998-4013.

李健, 吴顺川, 高永涛, 等. 露天矿边坡微地震监测研究综述[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(S2): 3998-4013.

[5] Ge H Y, Tu J S. Nonlinear coupled model for predicting slope displacement and its application [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(6): 1808-1812.

戈海玉, 涂劲松. 边坡位移预测的非线性组合模型及应用[J]. 岩土力学, 2011, 32(6): 1808-1812.

[6] Sun Z B, Yang X L. Sliding characteristics analysis of land slide based on the deep displacement [J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science), 2010, 7(2): 43-47.

孙志彬, 杨小礼. 基于深部位移的边坡滑动特征分析[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2010, 7(2): 43-47.

[7] Zhu J J, Ding L T, Fu L J, et al. Study on the dynamic early warning of subgrade slope based on IFOA algorithm [J]. Journal of Henan Polytechnic University (Natural Science), 2020, 39(2): 138-144.

朱家剑, 丁龙亭, 付林杰, 等. 基于 IFOA 算法的路基边坡动态预警研究[J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 2020, 39(2): 138-144.

[8] Song D Q, Wang F, Song H Q, et al. The study of the stability of bank slope in early reservoir impoundment [J]. Journal of Henan Polytechnic University (Natural

- Science), 2016, 35(5): 719-724.
- 宋丹青, 王丰, 宋宏权, 等. 蓄水初期库岸边坡稳定性研究[J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 2016, 35(5): 719-724.
- [9] Wang K, Zhang W Y, Ma F, et al. Monitoring methods of landslide deep deformation and discussion on their application[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2015, 11(1): 204-209.
- 王凯, 张伟毅, 马飞, 等. 滑坡深部变形监测方法与应用探讨[J]. 地下空间与工程学报, 2015, 11(1): 204-209.
- [10] Jiang S H, Zhou Z, Ou J P, et al. Slope deformation monitoring principle based on magnetic gradient tensor [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(10): 1944-1949.
- 江胜华, 周智, 欧进萍, 等. 基于磁场梯度定位的边坡变形监测原理[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(10): 1944-1949.
- [11] Chen J, Guo Y X, Zhang L P, et al. A glass-fiber packaged fiber Bragg grating strain sensor[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(9): 090601.
- 陈剑, 郭永兴, 张礼朋, 等. 一种玻璃纤维封装的光纤布拉格光栅应变传感器[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(9): 090601.
- [12] Hong C Y, Yuan Y, Yang Y Y, et al. A simple FBG pressure sensor fabricated using fused deposition modelling process [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2019, 285: 269-274.
- [13] Hong C Y, Zhang Y F, Borana L, et al. Design, fabrication and testing of a 3D printed FBG pressure sensor[J]. IEEE Access, 2019, 7: 38577-38583.
- [14] Wu J H, Ye S M, Zhang J Q, et al. Research on structural health monitoring of Beijing-Xiong high-speed railway large-section tunnel based on fiber grating monitoring technology [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(21): 210603.
- 吴静红, 张继清, 叶少敏, 等. 基于光纤光栅监测技术的京雄高铁大断面隧道结构健康监测研究[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(21): 210603.
- [15] Ma J X, Wang Y H, Zhang M Y, et al. Experimental study on penetration characteristics of open pipe pile based on fiber Bragg grating sensing technology[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(13): 130602.
- 马加骁, 王永洪, 张明义, 等. 基于光纤布拉格光栅传感技术的开口管桩贯入特性实验研究[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(13): 130602.
- [16] Liu B, Huang X D, Xu J, et al. Experimental study on incline-measurement technology based on fiber Bragg grating [J]. Piezoelectrics & Acousto-optics, 2017, 39(5): 763-766.
- 刘斌, 黄肖迪, 徐剑, 等. 基于光纤布喇格光栅的测斜技术实验研究[J]. 压电与声光, 2017, 39(5): 763-766.
- [17] Zhu H H, Yin J H, Hong C Y, et al. Fiber optic based monitoring technologies of slope engineering [J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2010, 38(3): 6-10, 14.
- 朱鸿鹄, 殷建华, 洪成雨, 等. 基于光纤传感的边坡工程监测技术[J]. 工程勘察, 2010, 38(3): 6-10, 14.
- [18] Yao F, Hu X X, Zeng L Z, et al. Research on deep displacement sensing probe based on fiber grating [J]. Optical Communication Technology, 2019, 43(5): 9-12.
- 姚飞, 胡肖潇, 曾丽珍, 等. 基于光纤光栅的深部位移传感探头研究[J]. 光通信技术, 2019, 43(5): 9-12.
- [19] Chen P C, Li J, Liu J P, et al. Monitoring technology of pipelines using fiber Bragg grating and its application in landslide areas [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(6): 897-902.
- 陈朋超, 李俊, 刘建平, 等. 光纤光栅埋地管道滑坡区监测技术及应用[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(6): 897-902.
- [20] Li B, Zhang D W, Li G F, et al. Research of distributed inclination survey technology and its application in slope anti-sliding pile based on FBG tilt sensor [J]. Journal of Wuhan University of Science and Technology, 2016, 39(6): 450-454.
- 李贝, 张大伟, 李公法, 等. 基于FBG倾角传感器的分布式测斜技术及其在边坡抗滑桩中的应用研究[J]. 武汉科技大学学报, 2016, 39(6): 450-454.
- [21] Muth J T, Vogt D M, Truby R L, et al. Embedded 3D printing of strain sensors within highly stretchable elastomers [J]. Advanced Materials (Deerfield Beach, Fla.), 2014, 26(36): 6307-6312.
- [22] Bao Y Q, Li H. Artificial intelligence for civil engineering [J]. China Civil Engineering Journal, 2019, 52(5): 1-11.
- 鲍跃全, 李惠. 人工智能时代的土木工程[J]. 土木工程学报, 2019, 52(5): 1-11.
- [23] Ge Z H, Chen H, Lei C G, et al. Research on the visualization of 3D printing modeling of multi-material parts [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(23): 231403.
- 葛正浩, 陈浩, 雷聪蕊, 等. 多材料零件3D打印建模可

- 视化研究[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(23): 231403.
- [24] Shen S, Wei H M, Wang J, et al. 3D printing optical fiber Fabry-Perot cavity acoustic emission sensor[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(9): 0906004.
沈诗, 魏鹤鸣, 王俊, 等. 3D打印光纤法布里-珀罗腔声发射传感器[J]. 中国激光, 2020, 47(9): 0906004.
- [25] Shi L F, Hong C Y, Wei X H, et al. Development and verification of new geotechnical engineering FBG inclination sensor [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2019, 32(4): 485-490, 507.
- 施令飞, 洪成雨, 魏显虎, 等. 新型岩土工程FBG测斜传感器的开发与验证[J]. 传感技术学报, 2019, 32(4): 485-490, 507.
- [26] Sui H B, Shi B, Zhang D, et al. Study on distributed optical fiber sensor-based monitoring for slope engineering [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(S2): 3725-3731.
隋海波, 施斌, 张丹, 等. 边坡工程分布式光纤监测技术研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(S2): 3725-3731.