

基于等强度梁的新型双光纤光栅静力水准仪

孙丽^{1*}, 王兴业¹, 李闯¹, 张春巍²¹沈阳建筑大学土木工程学院, 辽宁 沈阳 110168;²青岛理工大学土木工程学院, 山东 青岛 266033

摘要 为解决建筑结构不均匀沉降监测问题,设计了一种基于等强度梁的新型双光纤光栅静力水准仪,以连通器原理作为基本理论,分析了静力水准仪的传感原理,得出两个光纤光栅的波长变化值的和与沉降变化量呈线性函数关系。水准仪主要包括圆筒容器、连杆、圆柱形浮漂、等强度悬臂梁、光纤光栅和底部支座等构件,在水管连接处使用了防漏液连接装置。基于标定实验数据对双光纤光栅静力水准仪进行静态特性分析,得到的灵敏度为 $15.765 \text{ pm} \cdot \text{mm}^{-1}$,线性度误差为 2.959% ,迟滞性误差为 0.375% ,重复性误差为 1.744% ,相关系数均在 0.99 以上,静态误差为 3.455% ,该方法所得结果符合土木工程结构健康监测的要求,其适用于多种结构的不均匀沉降长期远程监测。双光纤光栅静力水准仪具有方便拆卸、可重新组装的优点,并且能够自行消除温度变化和液体液面高度变化造成的误差,提高不均匀沉降监测的准确性。将双光纤光栅静力水准仪应用到建筑监测中,证实了其监测不均匀沉降的能力。

关键词 光纤光学; 光纤光栅; 不均匀沉降; 静力水准仪; 结构健康监测

中图分类号 TP212; TN253

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.1406005

New Double Fiber Bragg Grating Static Level Based on Equal Strength Beams

Sun Li^{1*}, Wang Xingye¹, Li Chuang¹, Zhang Chunwei²¹ School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, Liaoning 110168, China;² School of Civil Engineering, Qingdao University Technology, Qingdao, Shandong 266033, China

Abstract To tackle the uneven settlement monitoring problem of building structures, we design a new static level with double fiber Bragg gratings based on equal strength beams. According to the basic theory of the communicating vessel principle, the sensing principle of the static level is explained, and it is concluded that the sum of wavelength changes in the two fiber Bragg gratings has a linear relationship with settlement changes. The level mainly includes a cylindrical container, a connecting rod, a cylindrical float, a cantilever beam with equal strength, fiber Bragg gratings, and a bottom support, and a leak-proof connecting device is used at the water pipe joint. The static characteristics of the static level are analyzed with the calibration data. The sensitivity is $15.765 \text{ pm} \cdot \text{mm}^{-1}$, the linearity error is 2.959% , the hysteresis error is 0.375% , the repeatability error is 1.744% , the correlation coefficients are all above 0.99 , and the static error is 3.455% . The results above meet the requirements of structural health monitoring in civil engineering and are suitable for the long-term remote monitoring of uneven settlement of various structures. The designed double fiber Bragg grating static level has the advantages of convenient disassembly and reassembly and can eliminate the errors caused by temperature changes and liquid level changes, improving the accuracy of uneven settlement monitoring. The application of the double fiber Bragg grating static level to building monitoring proves its ability to monitor uneven settlement.

收稿日期: 2021-01-11; 修回日期: 2021-02-07; 录用日期: 2021-02-26

基金项目: 国家重点研发计划子课题(2017YFC1503103-05)、国家自然科学基金(52078310, 51878420)、辽宁省“兴辽英才计划”-科技创新领新人才项目(XLYC1902038)

通信作者: *sunli2009@163.com

Key words fiber optics; fiber Bragg grating; uneven settlement; static level; structural health monitoring
OCIS codes 060.3735; 060.2370; 130.6010

1 引言

目前城市的工程建设发展迅速,无论何种工程建设都需要考虑其在施工和使用阶段的安全问题,不均匀沉降就是必须要面对的安全问题之一。高层建筑物的建筑高度使得自身荷载较大,地基土体在水平方向的承载能力或受力程度不一致时容易出现不均匀沉降的现象。高速铁路的建设标准严格,列车行驶速度快,所以对铁路的平整性提出严格要求,任何超出限值的不均匀沉降都会危及列车行车安全^[1]。地下轨道交通工程由于其深基坑的施工需要,深基坑工程对周边既有结构和土体的影响很大,稍微处理不当就会发生不均匀沉降事故,地铁工程与既有结构的交叉影响监测工作可以对地铁工程施工提供安全保障^[2]。煤矿的过度开采会在矿区地下留下采空区,采空区周边的建筑极容易出现不均匀沉降的问题。面对上述问题,需要一种长期稳定的不均匀沉降监测方法,因此不均匀沉降的监测对维护建筑工程施工与使用阶段的安全,以及保护人民财产安全具有重要意义^[3]。

静力水准监测技术在高层建筑沉降监测^[4]、高速铁路变形监测^[5]、地铁工程沉降监测^[6]和基坑沉降监测^[7]中已经得到应用并取得良好效果。光纤光栅具有质量轻^[8-9]、体积小^[10-11]、抗电磁干扰力强等优点^[12-13],在结构健康监测等领域被广泛使用^[14-18]。本文提出一种基于等强度梁的新型双光纤光栅静力水准仪,该方法可以实现温度自补偿,符合土木工程结构健康监测的要求。

2 光纤光栅静力水准仪的传感原理

2.1 静力水准仪工作原理

两个水准器放置在建筑的不同位置,当出现沉降差值,两个水准器的相对位置表现为一个上升、另一个下降,液面由于连通器原理继续保持在同一水平液面高度。筒内液面上升(下降),浮漂受到的浮力增大(减小),如图 1 所示。

等强度悬臂梁采用等腰三角形的形状,光纤光栅在等强度梁的底面。等强度梁的特点是等强度梁各横截面上应变相等。等强度梁顶点接收到连杆传递的力,发生形变,并带动光纤光栅产生轴向应变变化,等强度梁和光纤光栅之间的应变传递率保持不

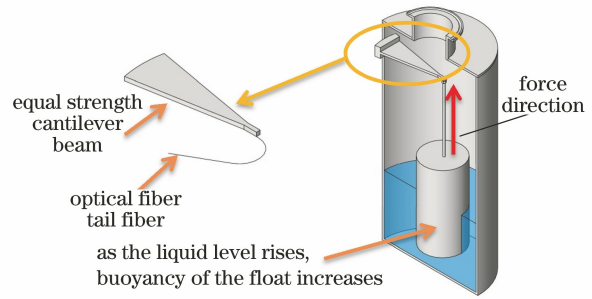


图 1 静力水准仪工作原理图

Fig. 1 Working principle diagram of static level
 变^[19],光纤光栅的中心波长发生漂移。

2.2 单光纤光栅静力水准仪传感原理

先考虑只有 1 个光纤光栅和浮漂的情况,单光纤光栅静力水准仪的原理如图 2 和图 3 所示,水准仪外筒和浮标均为圆柱形结构,且考虑等强度梁梁端变形量存在的影响。

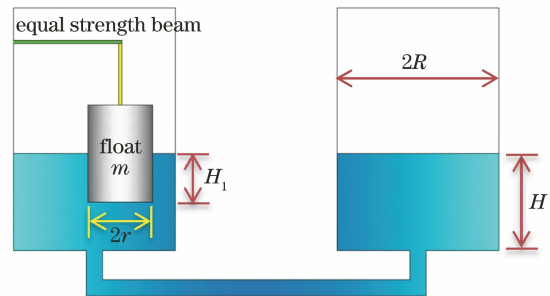


图 2 单光纤光栅静力水准仪沉降前原理示意图

Fig. 2 Schematic diagram of principle of single fiber Bragg grating static level before settlement

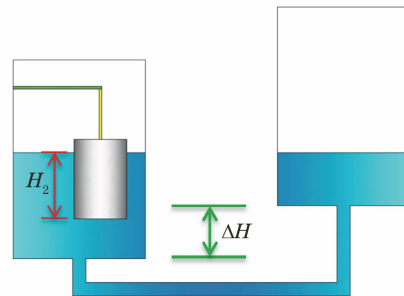


图 3 单光纤光栅静力水准仪沉降后原理示意图

Fig. 3 Schematic diagram of principle of single fiber Bragg grating static level after settlement

在温度场恒定时,光纤光栅的波长漂移量 $\Delta\lambda_B$ 与自身应变变化 ϵ 的关系为

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (1 - P_e)\epsilon, \quad (1)$$

式中: λ_B 为光纤光栅的中心波长; P_e 为光纤的有效弹光系数; ϵ 可以由等强度悬臂梁的应变变化量 $\Delta\epsilon$ 按照固定的应变传递率换算出, 即

$$\epsilon = n\Delta\epsilon, \quad (2)$$

式中: n 为等强度悬臂梁和光纤之间的应变传递率, 可视为一常数。

设圆柱形浮漂的半径为 r , 质量为 m , 液体密度为 ρ 。出现沉降前等强度悬臂梁受到的力 F_1 等于圆柱形浮漂受到的浮力减去浮漂自身重力, 即

$$F_1 = \pi r^2 H_1 \rho g - mg, \quad (3)$$

式中: g 为重力加速度; H_1 为出现沉降前浮漂浸入液体的深度。

等强度悬臂梁顶(图 4)端发生的变形 f_1 为

$$f_1 = \frac{6F_1 l^3}{EBh^3}, \quad (4)$$

等强度悬臂梁受到的应力 σ_1 为

$$\sigma_1 = \frac{6F_1 l}{Bh^2}, \quad (5)$$

等强度悬臂梁产生的应变 ϵ_1 为

$$\epsilon_1 = \frac{\sigma_1}{E}, \quad (6)$$

式中: E 为等强度悬臂梁的弹性模量; l 为等强度悬臂梁的中线长度; B 为等强度悬臂梁的宽度最大值; h 为等强度悬臂梁的厚度。

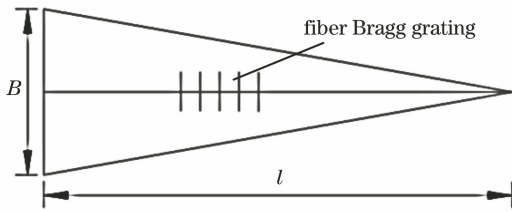


图 4 等强度悬臂梁和光纤光栅

Fig. 4 Equal strength cantilever beams and fiber Bragg grating

同理可得沉降出现后的系统受力状态。出现沉降后等强度悬臂梁受到的力 F_2 为

$$F_2 = \pi r^2 H_2 \rho g - mg, \quad (7)$$

式中: H_2 为出现沉降后浮漂浸入液体的深度。

等强度悬臂梁顶端发生的变形 f_2 为

$$f_2 = \frac{6F_2 l^3}{EBh^3}, \quad (8)$$

等强度悬臂梁受到的应力 σ_2 为

$$\sigma_2 = \frac{6F_2 l}{Bh^2}, \quad (9)$$

等强度悬臂梁产生的应变 ϵ_2 为

$$\epsilon_2 = \frac{\sigma_2}{E}. \quad (10)$$

对比沉降前后的状态, 可以得出液面实际上升的高度 H_0 为浮漂浸入液体深度的增加和悬臂梁变形量。所以液面实际上升高度 H_0 为

$$H_0 = (H_2 - H_1) + (f_2 - f_1). \quad (11)$$

将(3)、(4)、(7)、(8)式代入(11)式可得

$$H_0 = (H_2 - H_1) \cdot \left(1 + \frac{6\pi r^2 \rho g l^3}{EBh^3}\right). \quad (12)$$

流入左侧容器的液体体积 V_l 为

$$V_l = \pi(H_2 - H_1)(R^2 - r^2) + \pi R^2(f_2 - f_1), \quad (13)$$

式中: R 为圆筒容器的半径。

右侧容器流出的液体体积 V_r 应与流入左侧的相等, 即

$$V_r = \pi R^2 \{H - [(f_2 - f_1) + H_2 + (H - H_1) - \Delta H]\}, \quad (14)$$

式中: H 为出现沉降前液面的总高度; ΔH 为沉降高度差。将(13)式和(14)式合并化简得到

$$2[(H_2 - H_1) + (f_2 - f_1)] - \frac{r^2}{R^2}(H_2 - H_1) = \Delta H. \quad (15)$$

将(11)式和(12)式代入(15)式可以得到

$$(H_2 - H_1) = \frac{\Delta H}{2 + \frac{12\pi r^2 \rho g l^3}{EBh^3} - \frac{r^2}{R^2}}. \quad (16)$$

等强度悬臂梁的应变变化量 $\Delta\epsilon$ 为

$$\Delta\epsilon = \epsilon_2 - \epsilon_1 = \frac{6\pi r^2 \rho g l}{EBh^2}(H_2 - H_1). \quad (17)$$

再将(16)式代入(17)式得到

$$\Delta\epsilon = \frac{6\pi r^2 \rho g l}{EBh^2} \cdot \frac{\Delta H}{2 + \frac{12\pi r^2 \rho g l^3}{EBh^3} - \frac{r^2}{R^2}}. \quad (18)$$

(18)式等号右侧除 ΔH 外均为常数, 将所有常数项用 K 表示, 即

$$\Delta\epsilon = K\Delta H, \quad (19)$$

$$\text{式中: } K = \frac{6\pi r^2 \rho g l}{EBh^2} \cdot \frac{1}{2 + \frac{12\pi r^2 \rho g l^3}{EBh^3} - \frac{r^2}{R^2}}.$$

结合(1)式和(2)式可得

$$\epsilon = n\Delta\epsilon = nK\Delta H, \quad (20)$$

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B(1 - P_e)nK\Delta H. \quad (21)$$

可以看出, 光纤光栅的波长变化值与沉降的变化量呈线性函数关系。同理即可推导出浮漂浮力减小即液体流向右侧圆筒容器的情况。

2.3 双光纤光栅静力水准仪传感原理

图 5 和图 6 是两个光纤光栅和浮漂同时测量的双光纤光栅静力水准仪,根据上述论证可进行下面的理论推导。

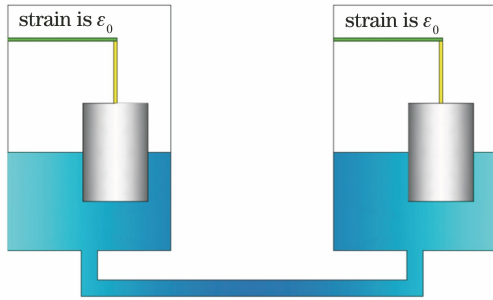


图 5 双光纤光栅静力水准仪沉降前原理示意图

Fig. 5 Schematic diagram of double fiber Bragg grating static level before settlement

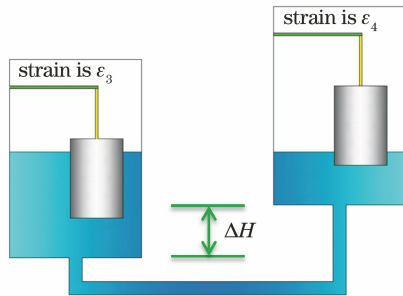


图 6 双光纤光栅静力水准仪沉降后原理示意图

Fig. 6 Schematic diagram of double fiber Bragg grating static level after settlement

理论推导的三个基本假设:

- 1) 假设两个光纤光栅的中心波长是相等的,这是由于同一批次的光纤光栅的中心波长相差甚微^[20],可以忽略不计;
- 2) 假设静力水准仪所在温度场恒定;
- 3) 假设两个悬臂梁和光纤光栅之间应变传递率相同并且保持不变,均等于 n 。

设图 5 中两个等强度悬臂梁的应变均为 ϵ_0 ,图 6 中两个等强度悬臂梁的应变为 ϵ_3 和 ϵ_4 ,并且 ϵ_3 大于 ϵ_4 。根据前面理论推导,两个等强度悬臂梁的应变变化量 $\Delta\epsilon_3$ 和 $\Delta\epsilon_4$ 分别为

$$\begin{cases} \epsilon_3 - \epsilon_0 = \Delta\epsilon_3 = K_3 \Delta H \\ \epsilon_0 - \epsilon_4 = \Delta\epsilon_4 = K_4 \Delta H \end{cases}, \quad (22)$$

式中: K_3 和 K_4 与前面的常数 K 意义相同,此处下角标特指图 6 中的两个等强度悬臂梁。

(22)式中两式相加得

$$\epsilon_3 - \epsilon_4 = (K_3 + K_4) \Delta H. \quad (23)$$

由于 K_3 与 K_4 均为常数,令

$$K_0 = K_3 + K_4, \quad (24)$$

用 ϵ_{B3} 和 ϵ_{B4} 分别表示两个光纤光栅的应变变化量,结合(1)式和(2)式可得

$$\begin{cases} \epsilon_{B3} = n \Delta\epsilon_3 = nK_3 \Delta H \\ \epsilon_{B4} = n \Delta\epsilon_4 = nK_4 \Delta H \end{cases}, \quad (25)$$

$$\begin{cases} \Delta\lambda_{B3} = \lambda_B(1 - P_e)nK_3 \Delta H \\ \Delta\lambda_{B4} = \lambda_B(1 - P_e)nK_4 \Delta H \end{cases}, \quad (26)$$

式中: $\Delta\lambda_{B3}$ 和 $\Delta\lambda_{B4}$ 分别为两个光纤光栅的波长漂移量。

将(26)式中两式相加,可得

$$\Delta\lambda_{B3} + \Delta\lambda_{B4} = \lambda_B(1 - P_e)nK_0 \Delta H. \quad (27)$$

可以看出,双光纤光栅静力水准仪的两个光纤光栅波长变化绝对值的和与沉降的变化量呈现线性函数关系,符合工程化传感器的要求。

静力水准仪基于连通器原理,需要让水准仪的液面与大气相连,所以长期监测过程中,筒内液体会蒸发,使液面同时下降相同的高度,补充液体会使液面同时上升相同的高度,液面的同时上升或下降相同的高度会使得两个等强度悬臂梁的应变同时增大或减小相同的改变量。所以(22)式改写为

$$\begin{cases} \epsilon_3 - \epsilon_0 \pm \epsilon_L = \Delta\epsilon_3 \pm \epsilon_L \\ \epsilon_0 - \epsilon_4 \mp \epsilon_L = \Delta\epsilon_4 \mp \epsilon_L \end{cases}, \quad (28)$$

式中: ϵ_L 为由液面上升或下降造成的等强度悬臂梁的应变变化量,对 $\Delta\epsilon_3$ 和 $\Delta\epsilon_4$ 起相反的影响效果。

将(28)式中两式相加,可得(23)式,所以本装置可以自行消除液面上升或下降造成的误差。

温度的改变会使光纤光栅的中心波长发生漂移,并且温度变化使得两个光纤光栅的中心波长漂移量相同,所以(26)式改写为

$$\begin{cases} \Delta\lambda_{B3} \pm \lambda_T = \lambda_B(1 - P_e)nK_3 \Delta H \pm \lambda_T \\ \Delta\lambda_{B4} \mp \lambda_T = \lambda_B(1 - P_e)nK_4 \Delta H \mp \lambda_T \end{cases}, \quad (29)$$

式中: λ_T 为由温度变化造成的光纤光栅波长的漂移值,对 $\Delta\lambda_{B3}$ 和 $\Delta\lambda_{B4}$ 起相反的影响效果。

将(29)式中两式相加,可得(27)式,所以本装置可以自行消除温度变化造成的误差。

综上所述,可能造成光纤光栅测量结果出现误差的主要因素是温度变化和液体液面高度的变化。但由于双光纤光栅波长差与结构位移差存在定量关系,温度变化和液体液面高度变化都会使得两个光纤光栅测得的数据同时增大或减小,所以本装置能够自行消除温度变化和液体液面高度变化造成的误差。

3 双光纤光栅静力水准仪的结构设计

双光纤光栅静力水准仪(图 7)是将两个相同的

水准器用水管连接而成的,利用连通器的原理控制两个水准器的液面高度,实现不均匀沉降的监测。每个水准器由圆筒容器、连杆、圆柱形浮漂、等强度悬臂梁、光纤光栅和底部支座组成。

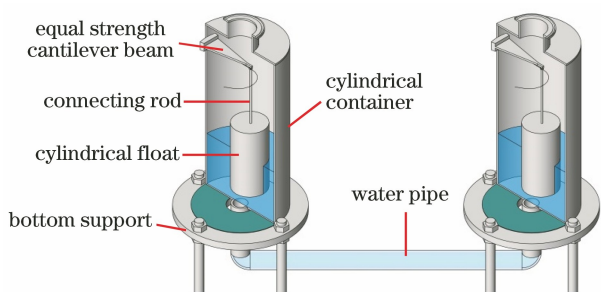


图 7 双光纤光栅静力水准仪的结构设计图
Fig. 7 Structural design drawing of double fiber Bragg grating static level

双光纤光栅静力水准仪在装配时,要保证连杆顶部和等强度悬臂梁顶点存在一定的预压力,使得光纤光栅处在预拉的状态。这是由于:两个光纤光栅必定会有一个光纤光栅的轴向应变减小,这避免了光纤光栅受压损坏,同时防止连杆和等强度悬臂梁顶点处在放松游离状态。

水管接头与橡胶垫片的凹凸面咬合,可以很好地填补连接缝隙。使用金属锁扣加密,进一步消除连接处缝隙。水管连接处无漏液现象出现。图 8 为防漏液连接装置分解组合图。

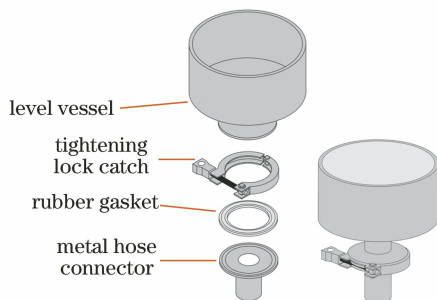


图 8 防漏液连接装置分解组合图
Fig. 8 Exploded assembly drawing of leak-proof connecting device

4 双光纤光栅静力水准仪的标定实验

标定实验用到的设备有光纤光栅同步采集仪、计算机、升降台、高度标尺。图 9 为游标卡尺作高度标尺和等强度悬臂梁实物图。

实验方案如图 10 所示,将两个水准器放在两个升降台上,固定一个升降台的高度,通过改变另一个升降台的高度来模拟两个水准器所处位置由于不均匀沉降造成的高度差。使用高度标尺记录高度变

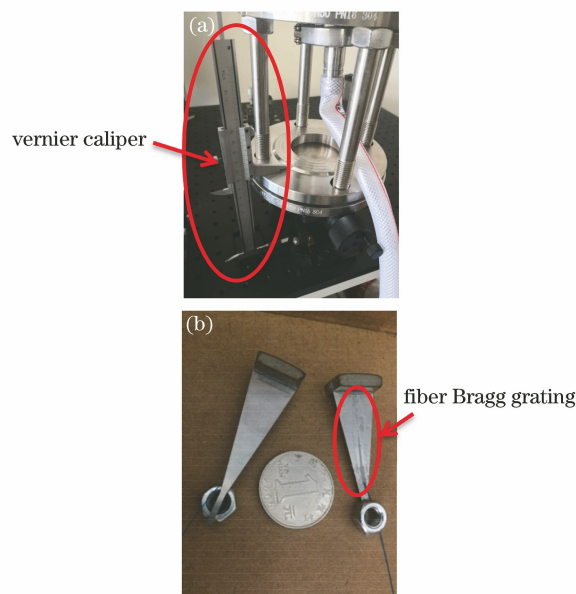


图 9 游标卡尺作高度标尺和等强度悬臂梁实物图。
(a)游标卡尺作高度标尺;(b)等强度悬臂梁实物图
Fig. 9 Vernier caliper as height ruler, and physical drawing of equal strength cantilever beams.
(a) Vernier caliper as height ruler; (b) physical drawing of equal strength cantilever beams

化,并用计算机和光纤光栅解调仪读取光纤光栅的波长值。实验设置 5 mm 为一个步长,从 0 mm 逐步增大到 50 mm 即峰值,再从 50 mm 减小到 0 mm,为一个循环,共记录三次循环的数据。



图 10 双光纤光栅静力水准仪的标定实验
Fig. 10 Calibration test of double fiber Bragg grating static level

5 标定实验结果分析

分别绘制 3 组正行程和逆行程的波长变化值的和与沉降变化量的关系图,如图 11 和图 12 所示。可以看出双光纤光栅静力水准仪具有良好的线性度。

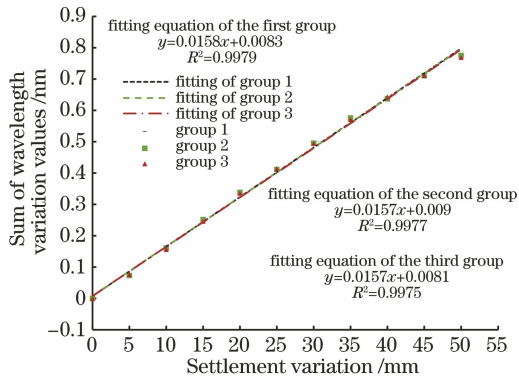


图 11 3 组正行程波长变化值的和与沉降变化量关系图及拟合曲线

Fig. 11 Relationship between sum of positive travel wavelength variation values of three groups and settlement variation, and fitting curve

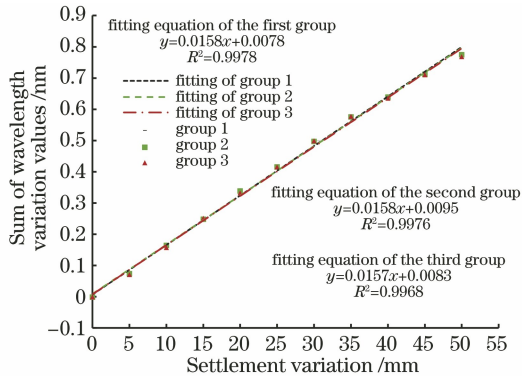


图 12 3 组逆行程波长变化值的和与沉降变化量关系图及拟合曲线

Fig. 12 Relationship between sum of reverse travel wavelength variation values of three groups and settlement variation, and fitting curve

6 双光纤光栅静力水准仪的静态特性分析

分析传感器的线性度、灵敏度、迟滞性和重复性。

6.1 线性度

线性度误差也称非线性误差,其值越小,说明线性度越好,用 e_L 来表示线性度,即

$$e_L = \pm \frac{\Delta\lambda_{\max}}{y_{FS}} \times 100\%, \quad (30)$$

式中: $\Delta\lambda_{\max}$ 为三次标定中正、逆行程实验过程中光纤光栅累计波长差值的和的算术平均值与拟合直线上的参考值之间的最大差值; y_{FS} 为在满量程下光纤光栅累计波长差值的和的变化量。本文的拟合方式均采用最小二乘法进行数据拟合。

利用三次正、逆行程的数据可以算出累计波长

差值的和的平均值。再用最小二乘法拟合出直线 $y=0.01576x+0.00852$ 。将沉降差值依次代入拟合直线得到拟合值,算出偏差绝对值。

由表 1 可知,最大偏差 $\Delta\lambda_{\max}=0.0229 \text{ nm}$,满量程输出 $y_{FS}=0.7740 \text{ nm}$ 。根据(30)式算出 $e_L=2.959\%$,这表明双光纤光栅静力水准仪的线性度良好。

表 1 双光纤光栅静力水准仪的线性度误差

Table 1 Linearity error of double fiber Bragg grating static level

Settlement variation / mm	Arithmetic mean value / nm	Fitted value / nm	Absolute value of deviation / nm
0	-0.0004	0.0085	0.0089
5	0.0734	0.0873	0.0139
10	0.1603	0.1661	0.0058
15	0.2498	0.2449	0.0049
20	0.3360	0.3237	0.0123
25	0.4132	0.4025	0.0106
30	0.4967	0.4813	0.0154
35	0.5755	0.5601	0.0154
40	0.6394	0.6389	0.0005
45	0.7111	0.7177	0.0066
50	0.7736	0.7965	0.0229

6.2 灵敏度

由三组正、逆行程的拟合直线的方程可以得到灵敏度分别为 15.79, 15.83, 15.74, 15.76, 15.73, 15.74 $\text{pm} \cdot \text{mm}^{-1}$ 。因此双光纤光栅静力水准仪的平均灵敏度约为 15.77 $\text{pm} \cdot \text{mm}^{-1}$ 。

6.3 迟滞性

迟滞性又称为回程误差,用 e_H 表示,计算方法为

$$e_H = \pm \frac{\Delta H_{\max}}{y_{FS}} \times 100\%, \quad (31)$$

式中: ΔH_{\max} 为 3 次实验过程中正行程与逆行程光纤光栅累计波长差值的和的偏差值。

由表 2 可知,最大偏差 $\Delta\lambda_{\max}=0.0029 \text{ nm}$,满量程输出 $y_{FS}=0.7740 \text{ nm}$ 。根据(31)式算出 $e_H=0.375\%$,这表明双光纤光栅静力水准仪的迟滞性良好。

6.4 重复性

用贝塞尔法计算标准差,进而求得重复性,即

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2}{N - 1}}, \quad (32)$$

表 2 双光纤光栅静力水准仪的迟滞性误差

Table 2 Hysteresis error of double fiber Bragg grating static level

Settlement variation / mm	Arithmetic mean of positive travel / nm	Arithmetic mean of inverse stroke / nm	Absolute value of deviation / nm
0	-0.0003	-0.0004	0.0001
5	0.0745	0.0724	0.0021
10	0.1595	0.1611	0.0016
15	0.2495	0.2501	0.0006
20	0.3364	0.3356	0.0008
25	0.4119	0.4144	0.0025
30	0.4952	0.4981	0.0029
35	0.5746	0.5764	0.0018
40	0.6399	0.6390	0.0009
45	0.7104	0.7118	0.0014
50	0.7736	0.7736	0.0000

式中: S 为标准偏差; y_i 为实验数据的值; \bar{y} 为实验数据的平均值; i 为正整数, 分别取 $1 \sim N$; N 为实验数据数量。计算得标准偏差数据如表 3 所示。

表 3 标准偏差数据

Table 3 Standard deviation data

Settlement variation / mm	Standard deviation of positive travel wavelength / nm	Standard deviation of reverse travel wavelength / nm
0	0.0004	0.0003
5	0.0019	0.0016
10	0.0029	0.0034
15	0.0028	0.0018
20	0.0017	0.0029
25	0.0015	0.0016
30	0.0011	0.0012
35	0.0031	0.0010
40	0.0028	0.0034
45	0.0003	0.0013
50	0.0045	0.0045

再根据重复性误差计算公式

$$e_z = \pm \frac{\alpha S_{\max}}{y_{FS}} \times 100\%, \quad (33)$$

式中: e_z 为重复性误差; α 为置信系数; S_{\max} 为标准偏差的最大值。

当置信概率取 99.7% 时, 置信系数 $\alpha = 3$, $y_{FS} = 0.7740 \text{ nm}$, 所以算出 $e_z = 1.744\%$ 。

6.5 静态误差

静态误差由线性度误差、迟滞性误差和重复性误差的结果算出, 公式为

$$e_s = \sqrt{e_L^2 + e_H^2 + e_z^2}, \quad (34)$$

计算得 $e_s = 3.455\%$, 满足工程健康监测的要求。

7 双光纤光栅静力水准仪的应用

将双光纤光栅静力水准仪应用到某一房屋建筑上, 监测两个柱子之间出现的不均匀沉降。监测现场如图 13 所示。



图 13 双光纤光栅静力水准仪的工程应用

Fig. 13 Engineering application of double fiber Bragg grating static level

图 14 为两个柱子之间的不均匀沉降监测结果, 其中左边柱子下沉较大时结果为正, 右边柱子下沉较大时结果为负。由监测结果可以判断该建筑目前处于安全状态, 近期不会出现明显的损伤和破坏。

8 结 论

针对建筑结构不均匀沉降监测问题, 研制了一种基于等强度梁的新型双光纤光栅静力水准仪, 对双光纤光栅静力水准仪的传感原理进行了理论推导, 得出光纤光栅波长变化值的和与沉降的变化量呈线性函数关系。对双光纤光栅静力水准仪进行了结构设计, 所设计结构主要包括圆筒容器、连杆、圆柱形浮漂、等强度悬臂梁、光纤光栅和底部支座等构件, 在水管连接处使用了防漏液连接装置。通过实验得到该双光纤光栅静力水准仪的灵敏度为 $15.765 \text{ pm} \cdot \text{mm}^{-1}$, 且具有良好的线性度、迟滞性和重复性, 相关系数均在 0.99 以上, 静态误差为 3.455%, 符合土木工程结构健康监测的要求。

所研发的新型双光纤光栅静力水准仪克服了传统水准仪易受电磁干扰、精度较低等问题, 具有方便拆卸、可重新组装、能够远距离传输数据等优点, 可应用于多种结构的不均匀沉降监测。所提水准仪还可以自行消除温度变化和液体液面高度变化造成的误差, 从而提高了不均匀沉降监测的准确性。

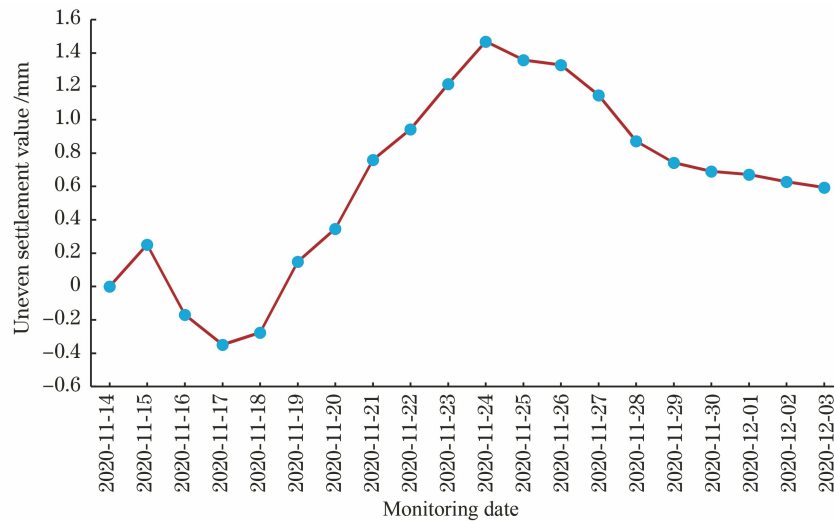


图 14 两个柱子之间的不均匀沉降监测曲线

Fig. 14 Monitoring curve of uneven settlement between two columns

参 考 文 献

- [1] Wang X. Research of automatic settlement monitoring system for long trunk high speed railway [J]. High Speed Railway Technology, 2017, 8(6): 68-73, 83.
王旭. 长大干线高速铁路自动化沉降监测系统研究 [J]. 高速铁路技术, 2017, 8(6): 68-73, 83.
- [2] Wang W D, Shen J, Weng Q P, et al. Analysis and countermeasures of influence of excavation on adjacent tunnels [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(S1): 1340-1345.
王卫东, 沈健, 翁其平, 等. 基坑工程对邻近地铁隧道影响的分析与对策 [J]. 岩土工程学报, 2006, 28(S1): 1340-1345.
- [3] Sun L, Chen C, Sun Q Q. Experimental and finite element analyses on the corrosion of underground pipelines [J]. Science China Technological Sciences, 2015, 58(6): 1015-1020.
- [4] Xue J H, Tan C R, Ruan X Y. Application of static leveling automation in monitoring of the high-rise building settlement [J]. Modern Surveying and Mapping, 2015, 38(6): 49-50.
薛玖红, 谭长瑞, 阮昕宇. 静力水准自动化在高层建筑沉降监测中的应用 [J]. 现代测绘, 2015, 38(6): 49-50.
- [5] Hao G M. Discussion on application of deformation monitoring technology for existing high speed railway subgrade [J]. Beijing Surveying and Mapping, 2018, 32(11): 1331-1334.
郝广明. 既有高速铁路路基变形监测技术应用探讨 [J]. 北京测绘, 2018, 32(11): 1331-1334.
- [6] Wang Z Q. Application of static leveling monitoring in construction of metro works [J]. Tunnel Construction, 2015, 35(S1): 74-79.
王哲强. 静力水准监测手段在地铁工程中的应用 [J]. 隧道建设, 2015, 35(S1): 74-79.
- [7] Tian S W, Liu L, Zhu W X, et al. Application and error analysis of hydrostatic leveling technology to the settlement monitoring of a foundation pit [J]. Engineering of Surveying and Mapping, 2018, 27(2): 45-50.
田松伟, 刘丽, 朱文秀, 等. 静力水准在某基坑沉降监测中的应用及误差分析 [J]. 测绘工程, 2018, 27(2): 45-50.
- [8] Liao Y B, Yuan L B, Tian Q. The 40 years of optical fiber sensors in China [J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(3): 0328001.
廖延彪, 苑立波, 田芊. 中国光纤传感 40 年 [J]. 光学学报, 2018, 38(3): 0328001.
- [9] Jiang D S, He W. Review of applications for fiber Bragg grating sensors [J]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2002, 13(4): 420-430.
姜德生, 何伟. 光纤光栅传感器的应用概况 [J]. 光电子 • 激光, 2002, 13(4): 420-430.
- [10] Sun L, Li C, Li J, et al. Strain transfer analysis of a clamped fiber Bragg grating sensor [J]. Applied Sciences, 2017, 7(2): 188.
- [11] Wu J H, Ye S M, Zhang J Q, et al. Structural health monitoring of large-section tunnel of Jingxiong high-speed railway based on fiber Bragg grating monitoring technology [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(21): 210603.
吴静红, 叶少敏, 张继清, 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 [J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(21): 210603.
- [12] Qin H Y, Zhu W X, Zhang H L, et al.

- Manufacturing and performance analysis of intelligent steel strand embedded with prepressure large scale fiber Bragg grating sensor [J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(4): 0410001.
- 覃荷瑛, 朱万旭, 张贺丽, 等. 内嵌预压式大量程光纤光栅传感器的智能钢绞线的研制与性能分析 [J]. 中国激光, 2017, 44(4): 0410001.
- [13] Liao Y B. Development of optical fiber sensors [J]. Optoelectronic Technology & Information, 2000(3): 27-29.
- 廖延彪. 光纤传感发展近况 [J]. 光电子技术与信息, 2000(3): 27-29.
- [14] Sun L, Li C, Zhang C W, et al. The strain transfer mechanism of fiber Bragg grating sensor for extra large strain monitoring [J]. Sensors, 2019, 19(8): E1851.
- [15] Liao C R, He J, Wang Y P. Study on high temperature sensors based on fiber Bragg gratings fabricated by femtosecond laser [J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(3): 0328009.
- 廖常锐, 何俊, 王义平. 飞秒激光制备光纤布拉格光栅高温传感器研究 [J]. 光学学报, 2018, 38(3): 0328009.
- [16] Sun L, Li C, Zhang C W, et al. Early monitoring of rebar corrosion evolution based on FBG sensor [J]. International Journal of Structural Stability and Dynamics, 2018, 18(8): 1840001.
- [17] Zhou X, Yang M, Zhang W, et al. Fiber hydrogen sensor coated with Pt-WO₃ film based on femtosecond laser micro-processing [J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(12): 1210001.
- 周贤, 杨沫, 张文, 等. 基于飞秒激光微加工的 Pt-WO₃ 膜光纤氢气传感器 [J]. 中国激光, 2019, 46(12): 1210001.
- [18] Wang H H, Peng S M, Gui X, et al. High-sensitivity fiber Bragg grating strain sensor based on singlemode-multimode-singlemode tapered structure [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(13): 132802.
- 王洪海, 彭思敏, 桂鑫, 等. 基于单模-多模-单模拉锥结构的高灵敏度光纤布拉格光栅应变传感器 [J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(13): 132802.
- [19] Wang Y, Zhang Z L, Sun Y Y, et al. The influence of different surface paste on FBG strain transfer [J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2016, 38(1): 106-110.
- 王源, 章征林, 孙阳阳, 等. 不同表面粘贴方式对光纤光栅应变传递的影响 [J]. 压电与声光, 2016, 38(1): 106-110.
- [20] Sun L. Research of fiber Bragg grating sensing technology and engineering application [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2006.
- 孙丽. 光纤光栅传感技术与工程应用研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2006.