

## 激光与光电子学进展

## 增敏型光纤布拉格光栅锚索测力传感器

郭永兴<sup>1,2\*</sup>, 李志雄<sup>3</sup><sup>1</sup>武汉科技大学冶金装备及其控制教育部重点实验室, 湖北 武汉 430081;<sup>2</sup>武汉科技大学机械传动与制造工程湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430081;<sup>3</sup>武汉科技大学精密制造研究院, 湖北 武汉 430081

**摘要** 提出了一种基于光纤布拉格光栅(FBG)的增敏型索力传感器。该传感器的基体为圆柱环状弹性体,3组回字梁间隔120°布置在圆环上,6个FBG分3组按顺序粘贴在回字形梁上,同时在传感器基体上粘贴1个FBG进行对比实验。采用有限元分析方法研究弹性体的应变分布特征,用3组FBG波长漂移量的差值作为传感器的输出信号,实现对锚索应力的测量和温度补偿。压力测试结果表明,基体上FBG的输出信号灵敏度为0.75 pm/kN,而回字梁上FBG输出信号的灵敏度为33.53 pm/kN,增敏效果显著且传感器具有良好的线性度和温度补偿能力。

**关键词** 传感器; 锚索测力传感器; 光纤布拉格光栅; 增敏型索力传感器

中图分类号 TP212.1

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP213245

## Sensitized Fiber Bragg Grating Anchor Cable Force Sensor

Guo Yongxing<sup>1,2\*</sup>, Li Zhixiong<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory of Metallurgical Equipment and Control Technology, Ministry of Education, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, Hubei, China;

<sup>2</sup>Hubei Key Laboratory of Mechanical Transmission and Manufacturing Engineering, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, Hubei, China;

<sup>3</sup>Precision Manufacturing Institute, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, Hubei, China

**Abstract** An enhanced cable force sensor based on fiber Bragg grating (FBG) is proposed. The base of the sensor is a cylindrical ring-shaped elastic body, three groups of Hui word beams are arranged on the ring at 120° intervals, and 6 FBGs are pasted sequentially on the Hui word beams in three groups. Moreover, an FBG is pasted on the sensor substrate for comparative experiments. Finite element analysis is used to study the strain distribution characteristics of the elastomer, and the difference in the wavelength drift of the three groups of FBG is used as the output signal of the sensor to realize the measurement of anchor cable stress and temperature-compensation. The pressure test results show that the sensitivity of the output signal of FBG on the matrix is 0.75 pm/kN, while that of the output signal of FBG on the Hui word beam is 33.53 pm/kN. The sensitization effect is remarkable, and the sensor has good linearity and temperature-compensation ability.

**Key words** sensors; anchor cable force sensor; fiber Bragg grating; sensitized force transducer

## 1 引言

锚索是吊索型桥梁的主要受力部件,如何实现锚索力的实时监测与评定,对整座桥梁的长期安全运营具有重要意义。在桥梁服役过程中,索力如果发生变化,会改变整个桥梁的应力分布,产生额外的未知应力,

进而埋下较大的安全隐患。由于桥梁是复杂的超静定结构,较小的隐患经日积月累也会给整个系统的运行带来很大影响,这些隐患若不能及时排除会造成难以估计的后果<sup>[1-4]</sup>。因此,提供一种稳定、可靠、耐久的索力实时监测方法在桥梁长期服役过程中具有重要意义<sup>[5-7]</sup>。现有索力测量方法包括电阻应变片法、磁通量

收稿日期: 2021-12-15; 修回日期: 2022-01-07; 录用日期: 2022-01-13; 网络首发日期: 2022-01-23

基金项目: 国家自然科学基金(52075397, 51827812)、湖北省自然科学基金创新群体项目(2020CFA033)、山东省重大科技创新工程(2019JZZY020314)、广西重点研发计划(2020AB44003)

通信作者: \*yongxing\_guo@wust.edu.cn

法、油压表测定法、振动测定法、力与垂度关系测定法、三点弯曲法等<sup>[8-13]</sup>。这些方法存在精确度不高或实施难度大的缺点,难以在实际操作中实现长期的索力监测。

光纤布拉格光栅(FBG)具有体积小、测量精度高、耐腐蚀、耐电磁干扰等优点,突破了传统电磁监测技术的局限性,成为索力监测领域最热门的核心传感元件之一<sup>[14-18]</sup>。近年来,人们研究了多种基于FBG的锚索力传感器。例如:陈海清等<sup>[19]</sup>将FBG元件和弹性体相结合,设计了一种新型FBG测力环传感器,实验结果表明,该传感器的测量精度可达 $\pm 2\%$ ,优于其他类型的索力传感器;王佶等<sup>[20]</sup>在武黄高速公路的一座桥上同时设置了FBG传感器和振动传感器,监测结果表明,FBG传感器的性能优于振动传感器;南秋明<sup>[21]</sup>设计了一种差动式结构FBG锚索测力环传感器,该传感器具有的特殊结构极大提高了其灵敏度,并实现了温度自补偿;邓年春等<sup>[22]</sup>为了解决温度与应变对FBG应变传感器交叉影响的问题,设计了一种悬臂梁结构的测力环传感器,在传感器上下表面分别粘贴2个FBG,利用上下光栅的输出结果差消除温度影响;张莹<sup>[23]</sup>开发了一种两端夹持式FBG索力传感器,在大连市某体育馆拉索中的监测结果表明,绳索力传感器在张拉和使用过程中能保持高精度、长距离实时测量;徐辉华等<sup>[24]</sup>在钢绞线中心丝上设置凹槽,设计了一种将FBG封装到凹槽内部的自感知锚索,实验结果表明,该FBG在锚索中的存活率良好且具有较好的线性度和重复性;雷震霖<sup>[25]</sup>设计了一种将FBG埋设在高强螺杆中的FBG锚索测力传感器,通过高强螺杆提升传感器对压力的敏感性。

已有的FBG锚索力传感器研究还存在很多问题,例如:FBG承力时均设计为受压状态,索力增大时,FBG波长向负方向漂移,不符合常规传感器输出随载荷增大而变大的思维方式,易增加数据处理中的失误

率;在桥梁损伤的早期阶段,应变变化通常比较微小,而现有索力传感器大多无法实现桥梁的早期损伤预警。可通过减小基体变形部分的尺寸提升传感器的变形灵敏度,但这种方法对灵敏度的提升非常有限,且传感器通常会安装在桥梁上,减小基体尺寸就会减小其安全系数,不利于工程安全。因此,考虑到工程监测的安全性和实用性,设计一种具有增敏结构的索力传感器具有重要意义。本文在现有研究的基础上,将FBG布置在一种专门设计的特殊回字梁结构上。实验结果表明,相比传统测量方法,该传感器的灵敏度有明显提高,且传感器输出信号的漂移方向和索力相同,便于后续标定实验。

## 2 传感器的设计

### 2.1 光纤布拉格光栅的传感原理

FBG周期性变化的折射率使光在其内部传播时某段特定波长的光会被反射,满足散射条件的反射光在光栅中会表现出很好的反射作用<sup>[26-29]</sup>。FBG的中心波长可表示为

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

式中: $\lambda_B$ 为FBG的中心波长; $n_{\text{eff}}$ 为FBG的有效折射率; $\Lambda$ 为栅格周期。式(1)决定了光栅反射波的波长与其内部参数之间的关系,可以发现,温度变化和应变变化均可以改变光栅的周期和折射率,使FBG反射波的波长发生变化,可表示为

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (\alpha_f + \xi)\Delta T + (1 - P_e)\Delta\epsilon, \quad (2)$$

式中: $\Delta\lambda_B$ 为中心波长漂移量; $\Delta\epsilon$ 为应变变化量; $\Delta T$ 为温度变化量; $\alpha_f$ 为热膨胀系数; $\xi$ 为热光系数; $P_e$ 为弹光系数(常温时约为0.22)<sup>[30]</sup>。

### 2.2 传感器的结构设计

FBG索力传感器的结构如图1(a)所示,弹性基体

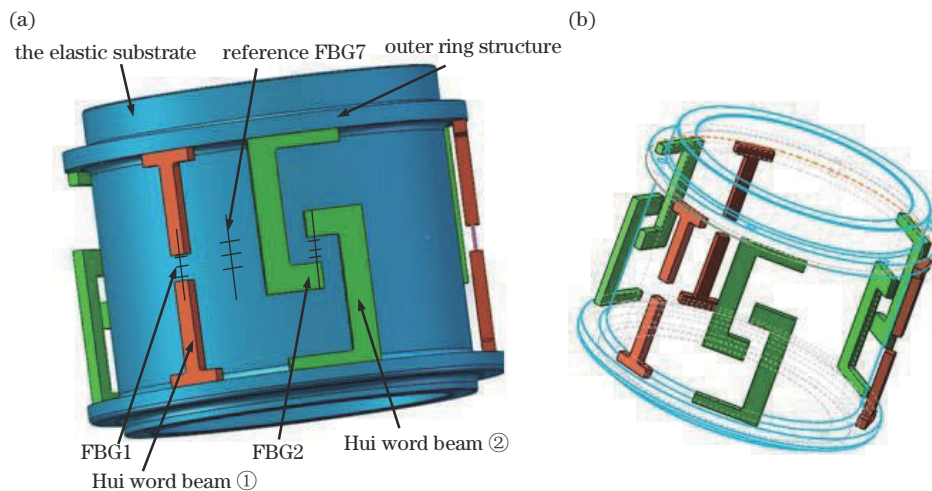


图1 FBG索力传感器的结构。(a)FBG的粘贴示意图;(b)回字梁排列示意图

Fig. 1 Structure of the FBG cable force sensor (a) Schematic diagram of pasting FBG; (b) schematic diagram of arrangement of Hui word beams

外观上为一圆柱环结构,其外部附带两个外圆环结构。设计了两种回字梁结构,即回字梁①和回字梁②。装配过程中,回字梁①和回字梁②配对后组成一组以激光点焊方式固定在外圆环结构的上下表面,如图 1(b)所示。将三组 FBG 间隔  $120^\circ$  固定在基体周围,将中心波长分别为  $\lambda_1 \sim \lambda_6$  的 FBG1~FBG6 以两点封装的方式按序号粘贴在固定好的回字梁上。使用时,FBG1、FBG3 和 FBG5 被压缩,FBG2、FBG4 和 FBG6 被拉伸,将相邻的 FBG1 和 FBG2、FBG3 和 FBG4、FBG5 和 FBG6 的波长变化量相减可进行温度对传感器测量结果的影响,同时也能检测索力的偏载,对误差具有一定的修正作用。将一个波长为  $\lambda_7$  的参考光栅 FBG7 粘贴在基体上进行对比(图 1 中仅展示了 FBG1、FBG2 和参考光栅 FBG7)。使用时锚索从圆柱环中间穿过,索力施加在基体上从而压缩弹性体使其产生形变,形变通过弹性基体上的外圆环结构传递到回字梁上,从而引起回字梁上粘贴的 FBG 产生应变。弹性体与回字梁的弹性模量很大,而 FBG 的弹性模量和横截面积很小,导致 FBG 的应变比弹性体大很多,相比传统的 FBG 锚索测量方式,该方式具有显著的增敏效果。

图 2 为 FBG 的外壳装配示意图。传感器外壳通过螺纹孔固定在外圆环结构上,以实现传感元件以及 FBG 的保护。



图 2 外壳装配示意图

Fig. 2 Schematic diagram of shell assembly

### 2.3 应变分布特征

在工程中传感器的受力较大,因此需得到传感器的应变分布特征,然后用有限元分析软件对传感器进行静应力分析。静应力分析中的传感器模型如图 3 所示。其中,弹性基体和回字梁材料为合金钢,分析中使用的参数:材料的杨氏模量  $E=210$  GPa;泊松比  $\mu=0.28$ ;密度  $\rho=7.7$  g/cm<sup>3</sup>。为便于进行有限元分析,结合实际情况,将 FBG1、FBG2 简化成半径为 0.3 mm 的玻璃圆柱体,连接在回字梁上,材料属性设置为玻璃纤维,分析中使用的参数:材料的杨氏模量  $E=72$  GPa;

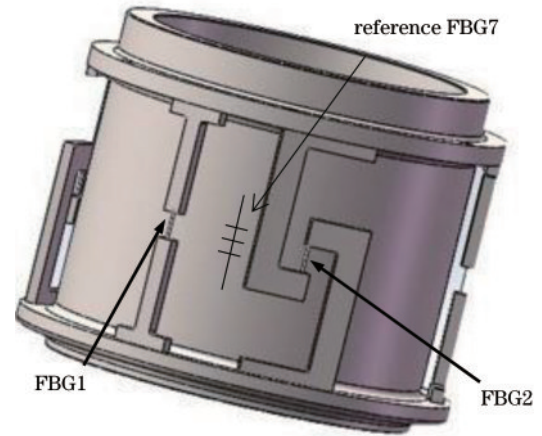


图 3 弹性体简化模型

Fig. 3 Simplified model of elastomer

泊松比  $\mu=0.22$ ;密度  $\rho=2.5$  g/cm<sup>3</sup>。由于参考光栅 FBG7 以全封装的方式布置在基体上,有限元分析过程中将粘贴部位弹性基体的应变作为 FBG7 的应变。

根据上述参数输入材料属性后,对弹性基体施加铰链约束以及一个 50 kN 的轴向力,得到传感器的应变分布如图 4 所示。可以发现,索力传感器模型在荷载作用下,弹性体部分应变很小,应变主要产生在 FBG 部分,其中 1 个 FBG 为正应变,另 1 个 FBG 为负应变。探测结果表明,弹性体部分的应变与 FBG 部分的应变相差一个数量级。

### 2.4 传感器的工作原理

回字梁与 FBG 安装简图如图 5 所示,图 5(a)为回字梁①和 FBG 粘贴示意图,图 5(b)为回字梁②和 FBG 粘贴示意图。对回字梁①和 FBG 进行受力分析可得,回字梁和 FBG 上由应变产生的力  $F$  是相等的,设回字梁与 FBG 的应变、弹性模量和横截面积分别为  $\epsilon_{\text{FBG}}$ 、 $E_{\text{FBG}}$ 、 $S_{\text{FBG}}$  和  $\epsilon_1$ 、 $E_1$ 、 $S_1$ ,可表示为

$$F = \epsilon_{\text{FBG}} \times E_{\text{FBG}} \times S_{\text{FBG}} = \epsilon_1 \times E_1 \times S_1, \quad (3)$$

对式(3)进行变换,得到

$$\epsilon_{\text{FBG}} = \epsilon_1 \frac{E_1 \times S_1}{E_{\text{FBG}} \times S_{\text{FBG}}}. \quad (4)$$

设被测区域总长度为  $L$ ,被测区域的应变为  $\epsilon$ ,长度变化为  $\Delta L$ ,FBG 栅区长度为  $L_1$ ,长度变化为  $\Delta L_1$ ,剩余部分总长度为  $L_2$ ,长度变化为  $\Delta L_2$ ,则存在

$$\begin{cases} \Delta L = \Delta L_1 + \Delta L_2 = L \times \epsilon \\ \Delta L_1 = \epsilon_{\text{FBG}} \times L_1 \\ \Delta L_2 = \epsilon_1 \times L_2 = \epsilon_1 \times (L - L_1) \end{cases}, \quad (5)$$

将式(5)代入式(4),可得到 FBG 与被测区域的应变比值为

$$\epsilon / \epsilon_{\text{FBG}} = \frac{L_1}{L} + \frac{E_{\text{FBG}} \times S_{\text{FBG}}}{E_1 \times S_1} \left(1 - \frac{L_1}{L}\right). \quad (6)$$

由于图 5(a)中被测区域应变  $\epsilon$  可近似看作测力环传感器弹性基体的应变,且 FBG 的弹性模量和横截面积远小于回字梁,因此其比值可以近似为

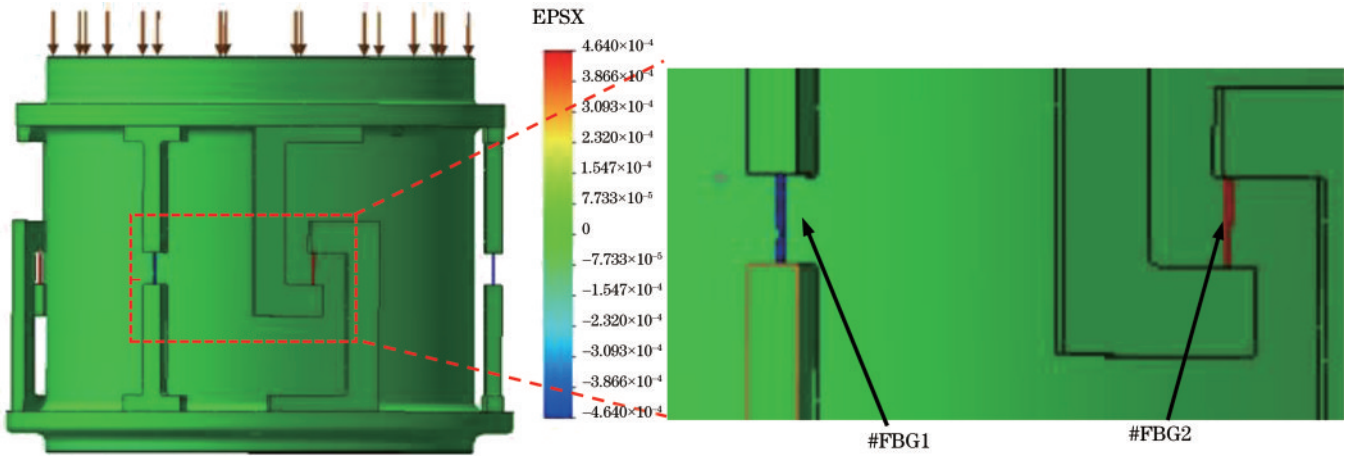


图 4 基于有限元方法的应力分析云图

Fig. 4 Stress analysis cloud map based on finite element method

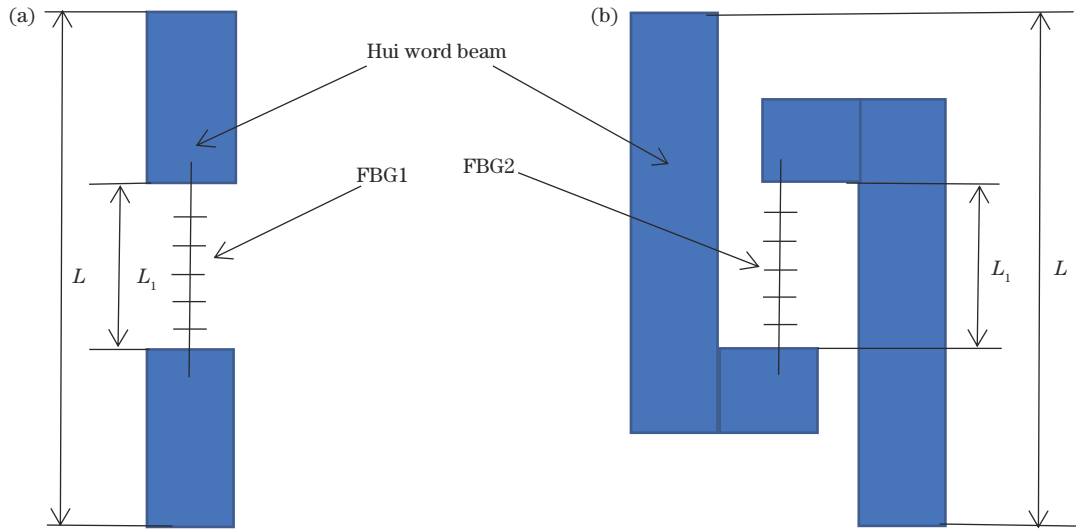


图 5 FBG 和回字梁的安装简图。(a)回字梁①;(b)回字梁②

Fig. 5 Installation diagram of FBG and Hui word beam. (a) Hui word beam ①; (b) Hui word beam ②

$$\epsilon_{\text{FBG}}/\epsilon = L/L_1, \quad (7)$$

设应变灵敏度放大倍数  $k = L/L_1$ , 则

$$\epsilon_{\text{FBG}} = k\epsilon. \quad (8)$$

在图 5(b)中, 相比于回字梁, FBG 的弹性模量与横截面积很小, 回字形结构上产生的切应变可以忽略不计, FBG 受到的轴向力相同, 则回字梁①的分析结果适用于回字梁②。忽略切应变的微小影响后, 二者的应变大小相等, 方向相反, 即回字梁②上的 FBG 的应变可表示为

$$\epsilon_{\text{FBG}} = -k\epsilon. \quad (9)$$

传感器在轴向压力作用下, FBG1 和 FBG2 产生的应变相反, 其中, FBG1 被压缩, FBG2 被拉伸, 且同时受到温度的影响, 将两根 FBG 的波长变化量相减就能抵消温度带来的影响。FBG1 的中心波长为  $\lambda_1$ , FBG2 的中心波长为  $\lambda_2$ , 结合式(2)得到

$$\frac{\Delta\lambda_1}{\lambda_1} - \frac{\Delta\lambda_2}{\lambda_2} = 2(1 - P_e)\Delta\epsilon, \quad (10)$$

当两个 FBG 中心波长相差不大时, 式(10)可表示为

$$\Delta\lambda_1 - \Delta\lambda_2 = 2\lambda(1 - P_e)\Delta\epsilon. \quad (11)$$

设弹性基体的弹性模量为  $E$ , 横截面积为  $S$ , 在轴向力  $F$  作用下, 应变为  $\epsilon$ , 则存在

$$\epsilon = F/(ES). \quad (12)$$

联立式(8)、式(9)、式(11)、式(12), 得到传感器的测量公式为

$$\Delta\lambda_1 - \Delta\lambda_2 = 2k\lambda(1 - P_e)\frac{F}{ES}, \quad (13)$$

设比例系数  $\mu = 2k\lambda(1 - P_e)\frac{F}{ES}$ , 则

$$\Delta\lambda_1 - \Delta\lambda_2 = \mu F. \quad (14)$$

式(14)为传感器测量公式。可以发现, 波长变化量与轴向力呈线性关系。当传感器在轴向索力作用下, 通过测量每组 FBG 产生的波长变化量, 再用正漂移量减去负漂移量, 即可消除温度的影响, 求出其轴向力。计算得到灵敏系数  $\mu$  的理论值近似为 30.15 pm/kN。后

续实验中,为方便描述与计算,按照安装顺序设  $a_1$ 、 $a_2$ 、 $a_3$  和  $a_4$  为传感器的输出信号,可表示为

$$\begin{cases} a_1 = \Delta\lambda_2 - \Delta\lambda_1 \\ a_2 = \Delta\lambda_4 - \Delta\lambda_3 \\ a_3 = \Delta\lambda_6 - \Delta\lambda_5 \\ a_4 = \Delta\lambda_7 \end{cases} \quad (15)$$

式中:  $a_1$ 、 $a_2$ 、 $a_3$  分别对应 FBG1 与 FBG2、FBG3 与 FBG4、FBG5 与 FBG6 的波长漂移量差,三组 FBG 彼此之间间隔  $120^\circ$ ,粘贴在测力环弹性基体的周围,可以用来评估索力的偏载作用;  $a_4$  为参考光栅 FBG7 的波长漂移量,用作灵敏度对比。

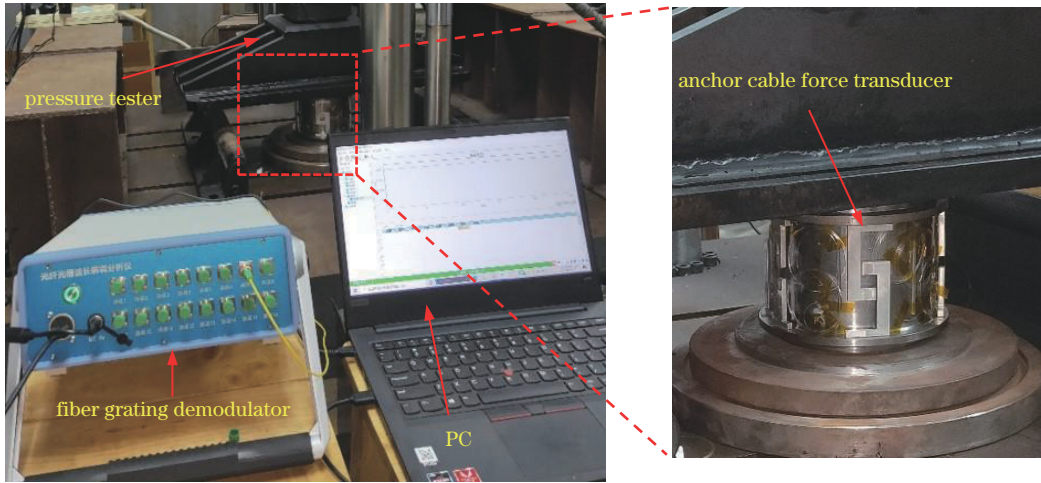


图 6 压力试验机与动态荷载采集系统实物图

Fig. 6 Physical drawing of pressure testing machine and dynamic load acquisition system

### 3.1 索力测量能力测试

将测力环居中对齐放在压力试验机台座中间,下部机座上放置刚度较大的加载板,保证索力传感器受力均匀。开始时按照 0、10、20、30、40、50 kN 的荷载顺序进行加载、卸载 3 次,每级荷载加载完成后等待 10 s,使传感器在荷载下变形均匀,待 FBG 波长稳定,记录波长读数与压力试验机荷载值并开始下次加载。图 7 为整个实验中 FBG1~FBG7 波长漂移量的时程图。对实验数据进行处理,计算  $a_1$ 、 $a_2$ 、 $a_3$  和  $a_4$ 。图 8 为输出信号  $a_1$ 、 $a_2$ 、 $a_3$  和  $a_4$  的时程图。迟滞特性指传感器

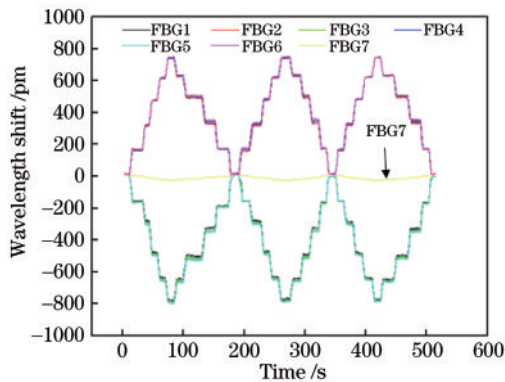


图 7 压力循环测试的时程图

Fig. 7 Time history diagram of the pressure cycle test

## 3 实验结果与分析

图 6 为测试索力传感器所用的压力试验机搭配动态荷载采集系统实物图,最大压力量程为 50 kN,采用液压加压原理提供实验所需荷载。测力环安装在压力试验机(中机试验装备股份有限公司,DDL-200 型,精度为 0.1 kN)的夹板之间,通过十六通道光纤光栅波长解调器(采集频率为 10 Hz,精度为 1 pm,分辨率为 0.01 pm)实时记录 FBG 索力传感器的波长变化。

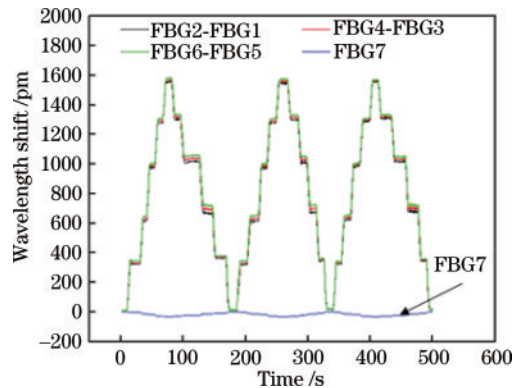


图 8 传感器输出信号时程图

Fig. 8 Time history diagram of the sensor output signal

正反行程中输出与输入不重合的现象,迟滞性误差  $E_t$  可表示为

$$E_t = \frac{\Delta_{\max}}{Y_{FS}} \times 100\%, \quad (16)$$

式中:  $\Delta_{\max}$  为加载与卸载时输出的最大差值;  $Y_{FS}$  为满量程输出值。将实验数据代入式(16)计算 3 次循环加载中最大迟滞为 2.2%,满足压力传感器的应用标准。存在误差的原因一方面是来自压力试验机自身的加载误差,另外一方面,FBG 用胶水以两点封装的形式粘贴在回字梁上,胶水受到外力施压后产生微应变,在外

力消失后并未完全恢复至初始状态。

将每次加载和卸载后的值取算术平均值后代入  $a_1$ 、 $a_2$ 、 $a_3$  和  $a_4$ ，计算结果如图 9 所示。可以发现， $a_1$ 、 $a_2$ 、 $a_3$  的灵敏度相差很小，在整个加载过程中， $a_1$ 、 $a_2$ 、 $a_3$  的索力-波长曲线基本重合。这表明索力传感器在加载的条件下受力均匀，使不同位置的 FBG 产生相同的应变，从而对传感器所受的加载产生一致的波长变化。将 3 次加载过程中  $a_1$ 、 $a_2$ 、 $a_3$  的全部测量数据相加，计算出 1 个总平均值，并将其与  $a_4$  在 3 次加载中的平均值一起进行线性拟合，结果如图 10 所示。可以发现：传感器的线性度  $R^2$  为 0.9998，灵敏度为 33.53 pm/kN，略高于理论计算值 30.15 pm/kN，原因是 FBG 存在粘贴误差。参考 FBG 的灵敏度为 0.75 pm/kN，远低于前者的灵敏度，这表明该传感器确实具有良好的增敏效果。

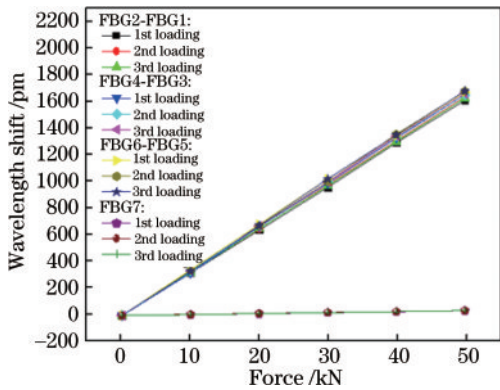


图 9 输出信号波长漂移量随载荷的变化曲线

Fig. 9 Variation curve of output signal wavelength drift with load

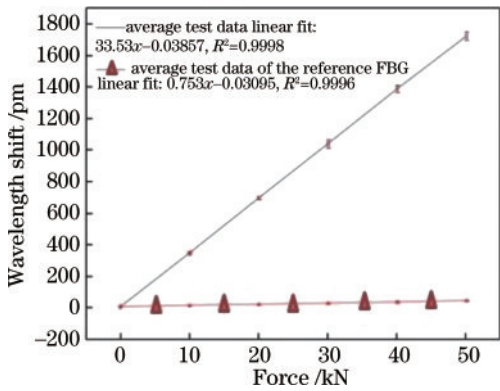


图 10 实验数据平均值的线性拟合结果

Fig. 10 Linear fitting results of the mean value of experimental data

### 3.2 蠕变性能测试

在工程应用中，桥梁长时间面临着外部负载与天气带来的威胁，为了实时监测和评估桥梁系统的性能，索力传感器需要对桥梁斜拉索的受力进行长期监测，而传感器的蠕变性能会极大影响其测量准确性，因此，有必要对索力传感器进行了蠕变性能测试。实验中，将外部荷载设置为 10 kN 保持 4 h 左右，记录其波长数

据。将波长数据取平均值代入拟合曲线中，得到的结果如图 11 所示。可以发现，在较大时间范围内 FBG 的测量数据表现出良好的稳定性。取一时间段的数据放大后发现，测量数据的波动量在 0.5 kN 内，主要原因在于提供载荷的压力试验机自身的误差，这表明传感器具有良好的抗蠕变性。

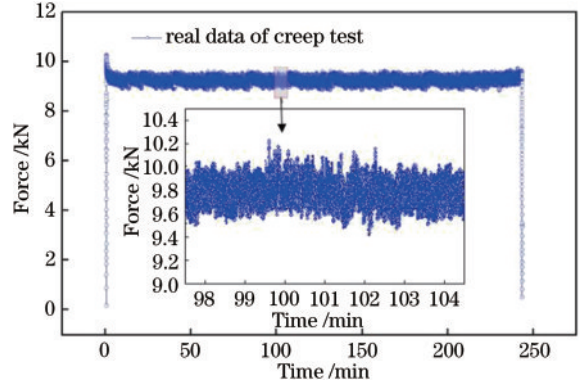


图 11 传感器蠕变性能测试结果

Fig. 11 Creep performance test results of the sensor

### 3.3 温度补偿性能测试

实验设计的传感器在测量时是通过取两两组合的 FBG 的波长漂移量的差值消除温度的影响的。该原理建立在相同温度下 FBG 波长变化量相等的基础上，但实际上在外界温度变化下，FBG 的波长变化量并不完全相等，在计算过程中可能存在误差，因此，有必要对传感器进行温度补偿测试。在温度补偿测试过程中，考虑到实际应用时传感器安装在室外，我国的室外温度范围约为  $-5 \sim 30 \text{ }^\circ\text{C}$ ，实验在冬季进行，室外温差较小，因此，将传感器放置在实验室中。从中午 12 点开始，用空调将室温从  $0 \text{ }^\circ\text{C}$  逐步加温到  $26 \text{ }^\circ\text{C}$ ，再将空调关闭让室温自然冷却，放置 22 h，并用 FBG 波长解调仪实时记录波长变化，结果如图 12 所示。可以发现：FBG1~FBG6 的波长响应基本保持一致，用来以计算索力的  $a_1$ 、 $a_2$ 、 $a_3$  均在 0 附近的 7 pm 范围内。这表明温度发生变化时，测量输出值基本为 0，传感器具备良好的温度补偿能力。

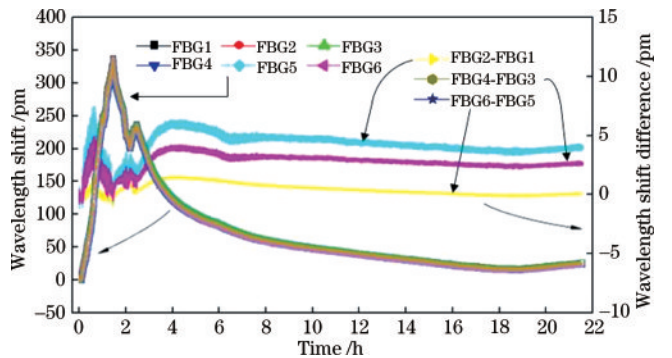


图 12 传感器温度补偿性能测试结果

Fig. 12 Test results of sensor temperature-compensation performance

## 4 结 论

提出一种基于回字梁结构的锚索测力传感器,通过合理布置 7 个 FBG 的位置,显著提升了索力测量的灵敏度,且具备温度自补偿功能。压力测试结果表明,传感器输出信号的灵敏度为 33.53 pm/kN,与传统的索力传感器相比有显著提升。蠕变测试实验和温度补偿测试实验结果表明,该传感器具备良好的温度补偿能力和抗蠕变性能,在桥梁等重要工程的结构安全监测中具有广阔的应用前景。

### 参 考 文 献

- [1] 周勇政, 陈良江, 高策. 我国高速铁路桥梁设计技术及探索[J]. 桥梁建设, 2018, 48(5): 11-15.  
Zhou Y Z, Chen L J, Gao C. Design techniques and exploration of high-speed railway bridges in China[J]. Bridge Construction, 2018, 48(5): 11-15.
- [2] 杨志峰, 曾国良, 江祥林. 基于挠度指标的中小跨径桥梁健康监测系统设计[J]. 中外公路, 2018, 38(6): 162-166.  
Yang Z F, Zeng G L, Jiang X L. Study on designing health monitoring system for short-to-medium span bridges based on deflection index[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2018, 38(6): 162-166.
- [3] 蔡唐涛, 贾彦武. 桥梁倒塌事故问题分析[J]. 筑路机械与施工机械化, 2018, 35(5): 180-184.  
Cai T T, Jia Y W. Analysis and research on causes of bridge collapse accidents[J]. Road Machinery & Construction Mechanization, 2018, 35(5): 180-184.
- [4] 潘晓宇. 中下承拱桥的吊杆锈蚀损伤研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2015: 15-30.  
Pan X Y. Research on damage of corroded hangers in through and half-through arch bridges[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2015: 15-30.
- [5] 肖骁, 陈志华, 刘红波, 等. 结构用拉索的组成与分类[C]//第十四届全国现代结构工程学术研讨会论文集. 天津: 天津钢结构学会, 2014: 359-368.  
Xiao X, Chen Z H, Liu H B, et al. Composition and classification of structural cables[C]//Proceedings of the 14th National Symposium on Modern Structural Engineering. Tianjin: Tianjin Steel Structure Society, 2014: 359-368.
- [6] 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.  
Sun L. Research of fiber Bragg grating sensing technology and engineering application[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2006.
- [7] 杜志泉, 倪锋, 肖发新. 光纤传感技术的发展与应用[J]. 光电技术应用, 2014, 29(6): 7-12, 17.  
Du Z Q, Ni F, Xiao F X. Development and application of optical fiber sensing technology[J]. Electro-Optic Technology Application, 2014, 29(6): 7-12, 17.
- [8] 葛俊颖, 苏木标, 李文平. 一种测量斜拉桥拉索索力新方法: 垂度法[J]. 中国铁道科学, 2018, 39(4): 63-70.  
Ge J Y, Su M B, Li W P. A new method for measuring cable tension of cable-stayed bridge: cable sag method[J]. China Railway Science, 2018, 39(4): 63-70.
- [9] 杨振. 一种新型的索力测量方法研究及应用[D]. 镇江: 江苏科技大学, 2016: 15-24.  
Yang Z. Research and application of a new type of cable force measurement method[D]. Zhenjiang: Jiangsu University of Science and Technology, 2016: 15-24.
- [10] 万霆. 大跨度斜拉桥预应力拉索索力测试方法研究[J]. 江苏建筑, 2013(4): 30-32, 70.  
Wan T. Research on the prestressed cable force testing method of large-span cable-stayed bridge[J]. Jiangsu Construction, 2013(4): 30-32, 70.
- [11] 姚文斌, 程赫明. 用“三点弯曲法”原理测定钢丝绳张力[J]. 实验力学, 1998, 13(1): 79-84.  
Yao W B, Cheng H M. Determination of wire rope tension by means of three points loading flexure[J]. Journal of Experimental Mechanics, 1998, 13(1): 79-84.
- [12] 姚文斌, 何天淳, 王锋. 斜拉桥拉索索力测定的新方法[J]. 仪器仪表学报, 2001, 22(S1): 90-91.  
Yao W B, He T C, Wang F. A new method determining cable tension on cable-stayed bridge[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2001, 22(S1): 90-91.
- [13] 朱传聪. 斜拉索索力识别及其影响因素分析[D]. 广州: 华南理工大学, 2018: 25-45.  
Zhu C C. Cable force identification and analysis of its influencing factors[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2018: 25-45.
- [14] 王汉熙, 胡佳文, 郑晓钧, 等. 中国光纤光栅传感技术专利现状与发展趋势[J]. 武汉理工大学学报, 2016, 38(3): 113-120.  
Wang H X, Hu J W, Zheng X J, et al. The status quo and trend of FBG sensing technology patents in China[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2016, 38(3): 113-120.
- [15] 曹晔, 刘波, 开桂云, 等. 光纤光栅传感技术研究现状及发展前景[J]. 传感器技术, 2005, 24(12): 1-4.  
Cao Y, Liu B, Kai G Y, et al. Present research and perspective development of sensing technology with fiber gratings[J]. Journal of Transducer Technology, 2005, 24(12): 1-4.
- [16] Mamidi V R, Kamineni S, Prasad R L N S, et al. Transducer-based fiber Bragg grating high-temperature sensor with enhanced range and stability[J]. Optical Engineering, 2017, 56(9): 090502.
- [17] Chen C, Yu Y S, Yang R, et al. Reflective optical fiber sensors based on tilted fiber Bragg gratings fabricated with femtosecond laser[J]. Journal of Lightwave Technology, 2013, 31(3): 455-460.
- [18] 赵勇. 光纤光栅及其传感技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2007: 15-28.  
Zhao Y. Optical fiber gratings and sensing technology [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2007: 15-28.
- [19] 陈海清, 黄飞. 光纤光栅测力环及其应用[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2005, 33(5): 58-60.  
Chen H Q, Huang F. The test-force ring of fiber optical gratings and its application[J]. Journal of Huazhong

- University of Science and Technology, 2005, 33(5): 58-60.
- [20] 王佶, 张明远, 卢哲安, 等. 光纤光栅监测技术在桥涵加固中的应用[J]. 安全与环境学报, 2006, 6(2): 124-127.  
Wang J, Zhang M Y, Lu Z A, et al. On application of inspecting technology of fiber Bragg grating in reinforced bridge strain testing[J]. Journal of Safety and Environment, 2006, 6(2): 124-127.
- [21] 南秋明. 光纤光栅测力环在悬索桥索力监测中的应用[J]. 公路交通科技, 2010, 27(3): 64-68.  
Nan Q M. Application of FBG force-testing ring in monitoring cable force of suspension bridge[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2010, 27(3): 64-68.
- [22] 邓年春, 吴东明, 罗铮荣. 温度自补偿光纤光栅应变传感器研制及其在索力测量中的应用[J]. 预应力技术, 2015(2): 3-5, 22.  
Deng N C, Wu D M, Luo Z R. Development of temperature self-compensating fiber grating strain sensor and its application in cable force measurement[J]. Prestress Technology, 2015(2): 3-5, 22.
- [23] 张莹. 基于光纤光栅的索力传感器的研制与应用[D]. 大连: 大连理工大学, 2011.  
Zhang Y. Development and applications of cable tension sensor based on fiber Bragg gratings[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2011.
- [24] 徐辉华, 李俊宏, 覃荷瑛. 光纤光栅自感知预应力锚索在边坡加固中的应用[J]. 中外公路, 2021, 41(4): 11-14.  
Xu H H, Li J H, Qin H Y. Application of FBG self-sensing prestressed anchor cable in slope engineering[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2021, 41(4): 11-14.
- [25] 雷震霖. 基于光纤光栅传感技术的桥梁索力测力环研究与应用[D]. 桂林: 桂林理工大学, 2019: 12-39.  
Lei Z L. Research and application of bridge cable force measuring ring based on fiber Bragg grating sensing technology[D]. Guilin: Guilin University of Technology, 2019: 12-39.
- [26] 倪凯. 光纤光栅制备及传感应用研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2011: 35-39.  
Ni K. Investigation on fabrication and sensing applications of fiber Bragg gratings[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2011: 35-39.
- [27] 苏福根. 光纤布拉格光栅在传感中的应用研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2013: 15-25.  
Su F G. Investigation on applications of FBG in sensing technology[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2013: 15-25.
- [28] Albert J, Shao L Y, Caucheteur C. Tilted fiber Bragg grating sensors[J]. Laser & Photonics Reviews, 2013, 7(1): 83-108.
- [29] 刘统玉, 王兆伟, 李振, 等. 激光/光纤传感技术研究及其在煤矿安全监测预警中的应用[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(13): 1306016.  
Liu T Y, Wang Z W, Li Z, et al. Advance of laser and fiber optic sensors for applications of coal mine safety monitoring and early warning[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(13): 1306016.
- [30] Guo Y X, Li C, Zhou X L, et al. Wide-range fiber Bragg grating tilt sensor based on a cam structure[J]. IEEE Sensors Journal, 2020, 20(9): 4740-4748.