

# 激光与光电子学进展

## 动态轨道称重光纤布拉格光栅压力传感器的设计

杨洋<sup>1</sup>, 王文成<sup>2,3\*</sup>, 高攀<sup>4</sup>, 杨洋<sup>1</sup>, 贾志宁<sup>1</sup>, 钱戈<sup>4</sup>, 徐志敏<sup>1</sup>, 赵亚丽<sup>1</sup>

<sup>1</sup>河北石油职业技术大学河北省仪器仪表工程技术研究中心, 河北 承德 067000;

<sup>2</sup>河北水利电力学院机械工程系, 河北 沧州 061000;

<sup>3</sup>河北省工业机械手控制与可靠性技术创新中心, 河北 沧州 061000;

<sup>4</sup>承德五岳测控技术有限公司, 河北 承德 067000

**摘要** 将开放式柔性铰链-杠杆结构与金属化光纤布拉格光栅(FBG)相结合,设计了一种用于动态轨道称重的FBG压力传感器。首先,采用金属化FBG,使FBG可以便利地焊接在柔性铰链支架上。然后,使用高响应频率的FBG解调仪快速读取实验数据。最后,利用FBG压力传感器,有效解决了测试系统的电磁干扰问题,并用铰链连接取代刚性连接,以提高传感器的灵敏度。实验结果表明,该传感器的压力灵敏度能达到60.8 pm/t,应变灵敏度为5.653 pm/ $\mu\epsilon$ 。

**关键词** 传感器; 柔性铰链; 动态轨道称重; 金属化; 光纤布拉格光栅

中图分类号 TP212.1;TP212.9

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202259.0328001

## Design of Fiber Bragg Grating Pressure Sensor for Dynamic Track Weighing

Yang Yang<sup>1</sup>, Wang Wencheng<sup>2,3\*</sup>, Gao Pan<sup>4</sup>, Yang Yang<sup>1</sup>, Jia Zhining<sup>1</sup>, Qian Ge<sup>4</sup>,  
Xu Zhimin<sup>1</sup>, Zhao Yali<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Hebei Provincial Instrument Engineering Technology Research Center, Hebei Petroleum University of Technology, Chengde, Hebei 067000, China;

<sup>2</sup>Department of Mechanical Engineering, Hebei University of Water Resources and Electric Engineering, Cangzhou, Hebei 061000, China;

<sup>3</sup>Hebei Industrial Manipulator Control and Reliability Technology Innovation Center, Cangzhou, Hebei 061000, China;

<sup>4</sup>Chengde Wuyue Measurement and Control Technology Co., Ltd., Chengde, Hebei 067000, China

**Abstract** In this paper, an open flexure hinge lever structure is combined with metallized fiber Bragg grating (FBG) to create an FBG pressure sensor for dynamic track weighing. First, metallized FBG is adopted so that it could be easily welded to the flexible hinge bracket. The FBG demodulator with a high response frequency is then used to read experimental data at rapid speed. Finally, electromagnetic interference problem in the testing system is fundamentally solved using the FBG pressure sensor, and the hinge connection is employed to replace the rigid connection to improve the sensor's sensitivity. The experimental results show that the sensor's pressure sensitivity can reach 60.8 pm/t and the strain sensitivity can reach 5.653 pm/ $\mu\epsilon$ .

**Key words** sensors; flexible hinges; dynamic track weighing; metallization; fiber Bragg grating

收稿日期: 2021-01-19; 修回日期: 2021-04-09; 录用日期: 2021-05-08

通信作者: \*wangwencheng\_hbsl@126.com

备注: 一、四作者同名

## 1 引言

动态轨道称重技术是现代科学技术与传统技术相结合的产物,目前已经成为减少轨道运输中超限、超载、交通事故的有效手段,也是实现交通运输管理现代化的基础。传统动态轨道称重方法包括电阻应变片式动态称重仪、压电式动态称重仪、电容式动态称重仪、压力盒式动态称重仪等<sup>[1-4]</sup>。上述传统测试方法都是采用压力传感器进行动态轨道称重,可靠性强、精度高,但压力传感器的安装需要在钢轨上打孔,不可避免地会破坏钢轨的机械性能,且受电磁干扰的影响严重。

随着光纤布拉格光栅(FBG)传感器技术的应用与发展,人们已经将FBG压力传感器应用在管道泄漏监测、桥梁监测、铁路轨道监测、汽车称重等技术领域中<sup>[5-13]</sup>。相比传统机械传感器和电传感器,光纤传感器在钢轨上安装时可采用焊接贴片式安装,不影响钢轨的机械性能,其无源特性也避免了电磁干扰的问题。研究表明,动态轨道称重与轨道结构状态监测、汽车称重等有明显不同,该技术是将FBG压力传感器安装在轨道上,当火车通过轨道时轨道受力产生微变形,并带动FBG传感器受到拉伸,导致进入FBG的反射波长发生变化,从而获得压力与波长的变化关系,实现轨道称重。由于轨道的形变非常微小,普通光纤传感器很难灵敏地感知这种形变,不适用于动态轨道称重。柔性铰链(FHs)具有体积小、无机械摩擦、无间隙和灵敏度高的特点,被广泛应用于微形变领域。近年来,人们提出了多种用柔性铰链结构光纤传感器测量微形变的方法。Antunes等<sup>[14]</sup>基于柔性铰链变形体体积较小的特点,提出了柔性铰链结构适合制作多维加速度计的思路,并开发了一种FBG加速度计,其灵敏度约为90 pm/g,其中, $g$ 为重力加速度。Dai等<sup>[15]</sup>提出了基于柔性铰链的FBG加速度计,其灵敏度为12 pm/g。Liu等<sup>[16]</sup>开发了基于柔性铰链的高灵敏度FBG应变传感器,Peng等<sup>[17]</sup>开展了用于微应变测量的灵敏度增强型FBG传感器的设计与研究。但柔性铰链FBG传感器的结构复杂、安装条件高,且封闭式的柔性铰链结构限制了光纤的伸长量,不适用于动态轨道称重。

为了解决上述问题,基于柔性铰链设计原理与FBG传感器技术,研制了一种适合动态轨道称重的新型FBG压力传感器。该传感器采用开放式柔性

铰链-杠杆结构,具有放大倍数高、结构简单、安装便利的特点,适合测量金属导轨表面的微形变。实验结果表明,相比国外某品牌支架的FBG传感器,该FBG压力传感器的灵敏度和动态轨道称重精度有明显提升。

## 2 开放式柔性铰链支架结构的设计

柔性铰链指在外部载荷作用下,通过材料的变形在相邻刚性杆间产生相对运动的一种运动副结构形式。通常在一个矩形截面或圆形截面梁上由激光或线切割技术削减掉部分材料,形成一个“缺口”,该技术利用材料相对薄弱处实现运动,也被称为切口型柔性铰链<sup>[18]</sup>。为了得到较大的光纤伸长量,结合杠杆原理与柔性铰链原理,设计的开放式柔性铰链支架结构如图1所示。其中,1为短臂固定点,2为柔性支撑,3为支撑,4为长臂自由放大端,支架材料采用65锰钢等具有弹性的金属材料。光纤与长臂自由放大端4固接,短臂固定点1与钢轨焊接固接。设计的开放式柔性铰链支架结构位移放大倍数主要受限于柔性铰链-杠杆结构长臂与短臂长度之比以及柔性铰链的旋转刚度,当柔性铰链旋转刚度较小时,位移放大倍数理论上可以接近该结构长臂与短臂的长度比,光纤的位移放大倍数可以设计得很大。同时,该传感器采用金属化FBG,以提高FBG的抗拉强度和焊接性能,且光栅传感无蠕变,零点不漂移。

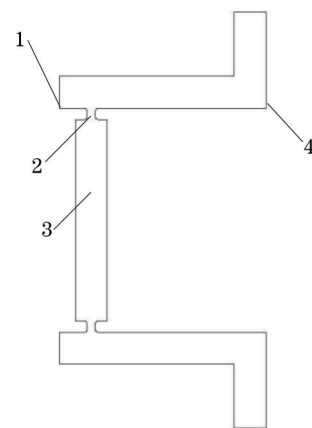


图1 柔性铰链的结构

Fig. 1 Structure of the flexible hinge

## 3 柔性铰链结构支架的放大功能

柔性铰链可分为单轴柔性铰链、双轴柔性铰链以及多轴柔性铰链,典型的单轴柔性铰链包括角圆

型、椭圆形、直圆型、双曲线型、抛物线型等。为了方便研究问题,将图 1 中柔性铰链结构支架的一端看作直圆型单轴柔性铰链,将整体铰链当作两个独立的单轴柔性铰链,如图 2 所示。其中,  $b$  为铰链厚度,  $t$  为凹口处的最小宽度,  $R$  为切口半径,  $H$  为柔性铰链的高度,  $G$  为柔性铰链的总长度。

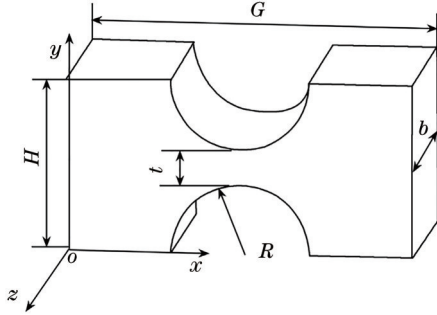


图 2 直圆型单轴柔性铰链的结构

Fig. 2 Structure of the straight-circular single-axis flexure hinge

研究柔性铰链结构特性时,柔性铰链的转动刚度是一个非常重要的参数,该参数与柔性铰链结构支架的放大功能直接相关<sup>[19-21]</sup>。基于材料力学原理和矩阵分析等方法,根据文献[18]得到柔性铰链的转动刚度为

$$K = \frac{M}{\phi} = \frac{EbR^2}{12 \left[ \frac{2s^3(6s^2 + 4s + 1)}{(2s + 1)(4s + 1)} + \frac{12s^4(2s + 1)}{(4s + 1)^{5/2}} \arctan \sqrt{4s + 1} \right]} \quad (1)$$

式中,  $M$  为柔性铰链的转矩,  $\phi$  为柔性铰链在力矩  $M$  作用下绕  $z$  轴的旋转角度,  $s = R/t$ ,  $E$  为支架材料的杨氏模量。  $s = 2$ ,  $E = 2.0 \times 10^2$  GPa,  $b = 2$  mm,  $R = 2.5$  mm 时,计算得到柔性铰链转动刚度  $K = 33.4$  N·m·rad<sup>-1</sup>。柔性铰链结构的放大原理如图 3 所示。

假设柔性铰链结构短臂  $BO$  的长度为  $L$ ,长臂  $OA$  的长度为  $5L$ ,在柔性铰链固定端受力为  $F$ ,铰链位置受转矩为  $M$ ,短臂固定点竖直位移为  $\beta$ ,支架铰链为普通铰链时活动端竖直位移为  $\delta$ ,长臂转角为  $\phi$ ,根据能量法得到

$$\frac{1}{2} F\beta = \frac{1}{2} M\phi, \quad (2)$$

$$M = FL = K\phi, \quad (3)$$

联立(2)式和(3)式,得到

$$\beta = FL^2/K, \quad (4)$$

式中,柔性铰链的转动刚度  $K$  由柔性铰链的材料参

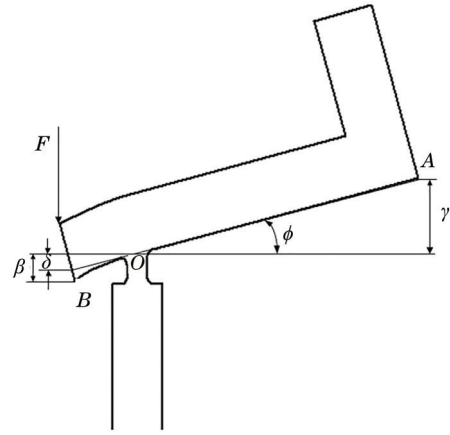


图 3 柔性铰链结构的受力状态

Fig. 3 Force state of the flexible hinge structure

数、结构参数等因素决定,设计的柔性铰链  $K = 33.4$  N·m·rad<sup>-1</sup>。

柔性铰链受力后柔性支撑体由直线变成曲线,从而在弯矩作用下,使传感器支架的放大倍数不再是简单的长臂(游动端)与短臂(固定端)长度之比( $k_0$ )。此时,  $\delta < \beta$ ,放大倍数  $k = \gamma/\beta < k_0$ ,  $k_0 = \gamma/\delta$ 。当长臂转角为  $\phi$  时,固定端位移  $\delta = L \sin \phi$ ,游动端位移  $\gamma = 5L \sin \phi$ ,根据麦克劳林公式可知,  $\sin \phi \approx \phi - \frac{\phi^3}{3!}$ ,最终得到的放大倍数

$$k = \frac{\gamma}{\beta} \approx 5 - \frac{5F^2L^2}{6K^2}. \quad (5)$$

如果  $F = 10^3$  N、 $L = 2$  mm,  $K = 33.4$  N·m·rad<sup>-1</sup>,计算得到的放大倍数  $k = 4.997$ 。当压力达到  $4 \times 10^3$  N 时,在其他参数不变的情况下,放大倍数为 4.95,相对没有弯矩作用时减小了 1%,这表明压力在  $4 \times 10^3$  N 范围时对弯矩作用的影响很小。

## 4 新型传感器中金属化 FBG 的安装

利用激光焊接技术将金属化 FBG 焊接在柔性铰链结构支架上,如图 4 所示。金属化 FBG 的两头分别为两个圆柱形的金属端子,为了防止激光焊接过程中将 FBG 打断,柔性铰链结构支架上端的水平面用金属线切割加工成直径与金属端子相同的半圆型,以保障焊接时能将圆柱形金属体的直径处焊接在支架上,如图 5 所示。该传感器对应变灵敏度的检测依据为 JJF 1682-2017 光栅式测微仪校准规范,测试仪为激光干涉仪(型号为 XL-30/XC-30),测试得到的应变灵敏度为 5.653 pm/ $\mu\epsilon$ ,传感器的标距为 14.0 mm,中心波长为 1550 nm,传感器的支架

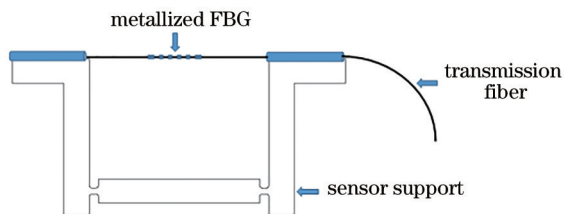


图 4 具有柔性铰链结构的金属化 FBG 传感器

Fig. 4 Metallized FBG sensor with flexible hinge structure

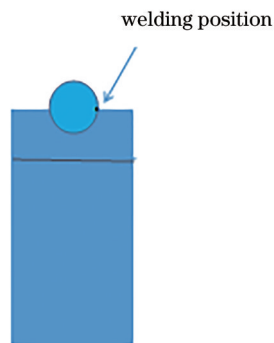


图 5 柔性铰链结构支架与金属化 FBG 的金属端子

Fig. 5 Flexible hinge structure support and metal terminal of metallized FBG

材质为弹簧钢,其杨氏模量  $E=200\text{ GPa}$ 。

## 5 支架安装位置的仿真实验

利用 Solidworks/Simulation 软件建立的仿真实验模型如图 6 所示,以讨论支架在导轨上的安装位置。其中,1 为压力机压头,2 为弹性支架,3 为

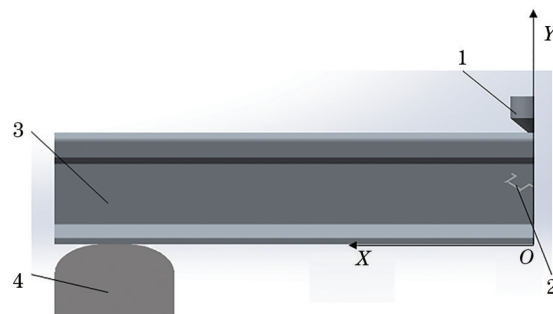


图 6 仿真实验的模型

Fig. 6 Model of the simulation experiment

标准的 50 轨,4 为垫块。实验条件:导轨为标准的 50 轨,钢轨跨距为 600 mm,压力机压头上部添加的压力为 20 t,以 50 钢轨跨距的中心和钢轨下端为圆心建立直角坐标系  $O-XY$ 。

### 5.1 柔性铰链结构支架的方位

为探讨弹性支架在不同位置对形变放大或缩小倍数的影响,进行了对比实验,仿真结果如图 7 所示。可以发现,测试结果与柔性铰链结构支架的安放方位有关。当压力机压头空载时,弹性支架短臂固定点距离为 14 mm;加载后,弹性支架放置在方位 1 且两固定端连线与  $Y$  轴夹角小于  $90^\circ$  时,弹性支架长臂游动端近端距离为 13.985 mm,弹性支架起到位移缩小作用,如图 7(a) 所示;弹性支架放置在方位 2 且两固定端连线与  $X$  轴夹角大于  $90^\circ$  时,弹性支架长臂游动端近端距离为 14.035 mm,弹性支架起到位移放大作用,图 7(b) 所示,因此,后续实验测试均采用方位 2。

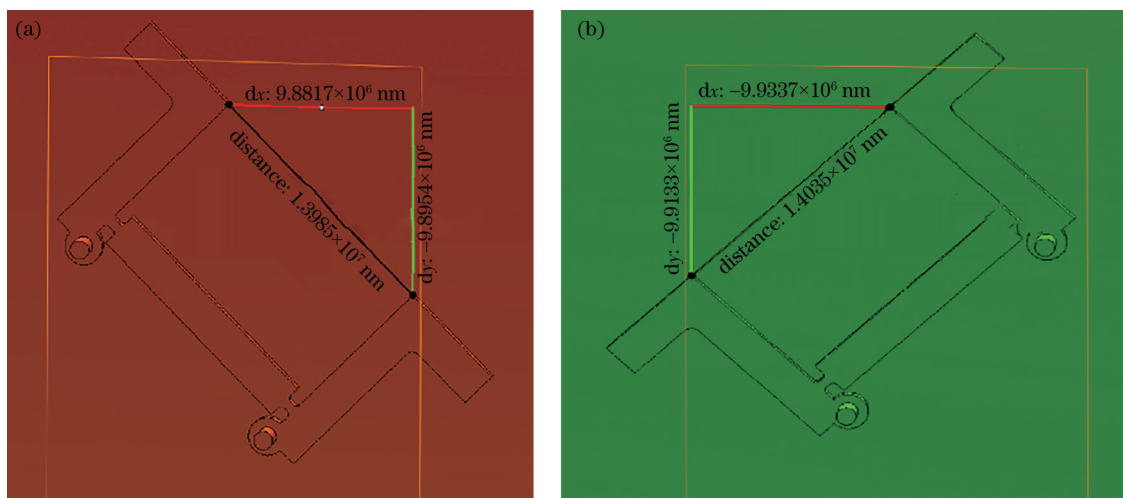


图 7 不同位置对传感器的影响。(a) 方位 1; (b) 方位 2

Fig. 7 Influence of different positions on the sensor. (a) Bearing 1; (b) Bearing 2



### 5.2 柔性铰链结构支架放置位置和角度

在柔性铰链结构支架放置方位仿真实验的基础上,探讨了弹性支架在 50 轨具体位置的仿真对比实验,实验数据如表 1~表 3 所示。可以发现,传感器的弹性支架长臂游动端近端距离放大效果与两

固定端连线和 X 轴夹角及传感器安装位置的固定支点坐标有关。当两固定端连线与 X 轴的夹角为 135° 且安装下方固定支点坐标为 (82 mm, 85.5 mm) 时,可以获得最大的放大值 14.1347 mm。

表 1 弹性支架的横坐标

Table 1 Abscissa of the elastic support installation

Loading /t	Position			Distance between long arms /mm
	Abcissa /mm	Ordinate /mm	Angle /( $^{\circ}$ )	
0	-	-	-	14.0000
20	52	85.5	135	14.0346
20	62	85.5	135	14.0354
20	72	85.2	135	14.0362
20	82	85.5	135	14.1347
20	92	85.5	135	14.0349

表 2 弹性支架的纵坐标

Table 2 Ordinate of the elastic support installation

Loading /t	Position			Distance between long arms /mm
	Abcissa /mm	Ordinate /mm	Angle /( $^{\circ}$ )	
0	-	-	-	14.0000
20	82	55.5	135	14.0371
20	82	65.5	135	14.0381
20	82	75.5	135	14.0377
20	82	85.5	135	14.1347
20	82	95.5	135	14.0364

表 3 弹性支架的角度

Table 3 Angle of the elastic support installation

Loading /t	Position			Distance between long arms /mm
	Abcissa /mm	Ordinate /mm	Angle /( $^{\circ}$ )	
0	-	-	-	14.0000
20	82	85.5	120	14.0385
20	82	85.5	125	14.0412
20	82	85.5	130	14.0832
20	82	85.5	135	14.1347
20	82	85.5	140	14.0631
20	82	85.5	145	14.0328
20	82	85.5	150	14.0291

## 6 对比测试实验

### 6.1 实验装置与测试方法

用某国外支架 FBG 压力传感器和自主研发的柔性铰链结构 FBG 压力传感器进行对比,实验装置如图 8 所示,传感器的实物图如图 9 所示。其中,钢轨为标准的 50 轨,钢轨跨距为 600 mm,两款 FBG 传感器的焊接方式与安装位置完全相同,实验对象以相同的

方式焊接在钢轨侧面。将装有传感器的钢轨安放在压力测试仪内,压力测试仪压在钢轨上,钢轨产生压缩变形,带动传感器弹性支架长臂游动端近端距离增大,使 FBG 伸长变形,FBG 反射的波长发生变化,FBG 解调仪与 FBG 压力传感器相连,以显示波长的变化量;笔记本电脑(PC2)与解调仪相连,实现波长数据的采集与显示;台式电脑(PC1)与压力机相连,用来控制和采集压力机施加给导轨的压力。

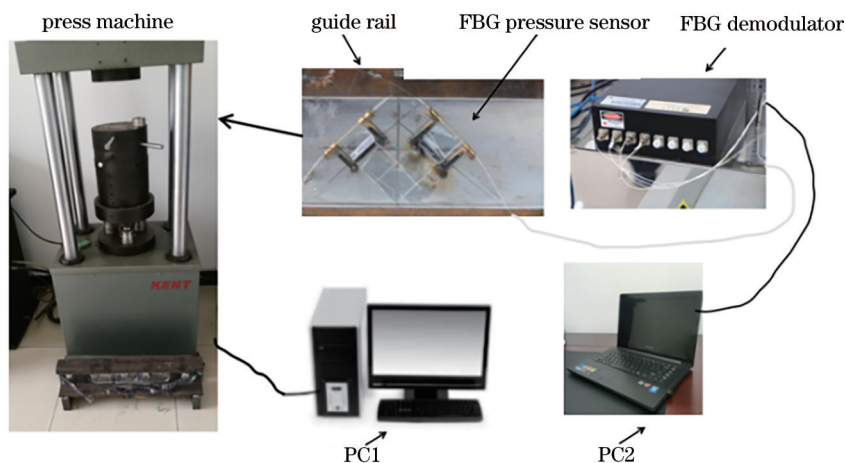


图 8 实验装置示意图

Fig. 8 Schematic diagram of the experimental device

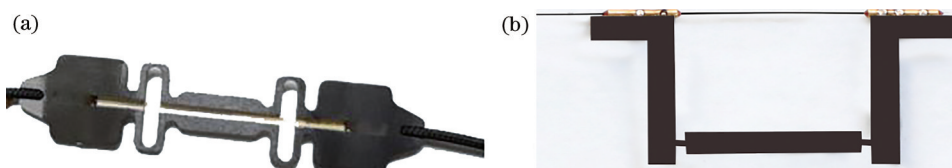


图 9 传感器的实物图。(a)对比传感器；(b)自行开发的传感器

Fig. 9 Physical image of the sensor. (a) Contrast sensor; (b) self-developed sensor

### 6.2 测试结果

当压力测试仪给钢轨施加的压力从 0 逐渐增大时,FBG 压力传感器中的波长会发生偏移,偏移量可由光纤解调仪完成测量。解调仪的型号为 GC-97001C-01-08, 响应频率为 100 Hz, 测量精度为  $\pm 5$  pm, 分辨率为 0.1 pm; 压力测试仪为高精度标准测力仪, 在压力测量范围(50~500 kN)内, 准确度等级  $U_{rel}=0.01\%$  ( $k=2$ ), 编号为 075030377; 通过 PC2 采集波长数据, 通过 PC1 采集对应压力机施加给导轨的压力, 两组对照实验的数据如表 4 和表 5

表 4 对比 FBG 压力传感器的实验数据

Table 4 Experimental data of the Contrast FBG pressure sensor

No.	Pressure /t	Pressurization wavelength /nm	Decompression wavelength /nm
1	1	1550.749	1550.738
2	2	1550.711	1550.698
3	3	1550.687	1550.673
4	4	1550.664	1550.651
5	5	1550.641	1550.630
6	6	1550.618	1550.609
7	7	1550.596	1550.589
8	8	1550.575	1550.568
9	9	1550.553	1550.547
10	10	1550.532	1550.527

所示。可以发现,对比 FBG 压力传感器的应变灵敏度为  $1.4 \text{ pm}/\mu\epsilon$ , 传感器标距为 22 mm, 基底材料为 302 不锈钢, 计算得到该 FBG 传感器的压力灵敏度为  $23.8 \text{ pm}/\text{t}$ ; 自主研发的柔性铰链结构 FBG 压力传感器的压力灵敏度为  $60.8 \text{ pm}/\text{t}$ , 明显高于对比 FBG 压力传感器。

表 5 自研 FBG 压力传感器的实验数据

Table 5 Experimental data of self-developed FBG pressure sensor

No.	Pressure /t	Pressurization wavelength /nm	Decompression wavelength /nm
1	0.5	1546.062	1546.051
2	4	1546.263	1546.220
3	6	1546.391	1546.333
4	8	1546.511	1546.458
5	10	1546.654	1546.592
6	12	1546.771	1546.724
7	14	1546.894	1546.826
8	16	1547.011	1546.968
9	18	1547.128	1547.101
10	20	1547.238	1547.242

## 7 结 论

用具有放大功能的开放式柔性铰链-杠杆结构的 FBG 压力传感器实现动态轨道称重, 在跨距为

600 mm 的 50 钢轨上,传感器的压力灵敏度可达到 60.8 pm/t。研究表明,柔性铰链的弯矩作用在  $4 \times 10^3$  N 压力范围内基本可以忽略不计,新型压力传感器由于采用金属化 FBG 作为传感器件,可以便利地焊接在柔性铰链支架上,使传感器的封装变得简便易行。新型压力传感器借助高响应频率 FBG 解调仪,使高速情况下稳定读取实验数据成为可能。此外,新的测试系统全部采用光信号,抗电磁干扰能力较强,为动态轨道称重提供了一种新的解决方案。下一步工作中,还将考虑温度补偿措施,使传感器适应于大环境温度变化,同时对超出压力范围时弯矩作用不可以忽略情况下的模型进行仿真分析。

### 参 考 文 献

- [1] Liang X P, Liu M X. Installation, debugging and maintenance 300 t of dynamic electronic rail-weighbridge [J]. Weighing Instrument, 2013, 42(4): 24-25, 33.  
梁湘平, 刘沫夏. 300 t 动态电子轨道衡的安装、调试及维护[J]. 衡器, 2013, 42(4): 24-25, 33.
- [2] Tian D Z, Zhang D Q. Development of dynamic track scale system for high-speed continuous track[J]. Railway Engineering, 2010, 50(5): 114-117.  
田德柱, 张大庆. 高速不断轨动态轨道衡系统研制[J]. 铁道建筑, 2010, 50(5): 114-117.
- [3] Lü G. Design and application of dynamic track scale without foundation pit[J]. Science & Technology Information, 2015, 13(2): 2-4.  
吕刚. 无基坑不断轨动态轨道衡的设计与应用[J]. 科技资讯, 2015, 13(2): 2-4.
- [4] Shi Y P, Zhou Q G. New stress measurement method for dynamic weigh rail[J]. Instrument Technique and Sensor, 2011(4): 76-79.  
石延平, 周庆贵. 一种新型动态轨道衡应力检测方法[J]. 仪表技术与传感器, 2011(4): 76-79.
- [5] Zhao Y, Wang Q, Ling Z W. Experimental analysis and leakage location detection of tap water pipe based on distributed optical fiber with selective average threshold[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(3): 030602.  
赵亚, 王强, 凌张伟. 基于选择性平均阈值的分布式光纤自来水管泄漏检测定位及实验分析[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(3): 030602.
- [6] Wang C, Liu Q W, Chen D, et al. Monitoring pipeline leakage using fiber-optic distributed acoustic sensor[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(10): 1006005.  
王辰, 刘庆文, 陈典, 等. 基于分布式光纤声波传感的管道泄漏监测[J]. 光学学报, 2019, 39(10): 1006005.
- [7] Wang D Y, Zhu H H, Zhu Y, et al. Performances of distributed fiber optic strain sensor with thin-walled ring[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(10): 100602.  
王德洋, 朱鸿鹄, 朱泳, 等. 薄壁圆环分布式光纤测力传感器的性能[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(10): 100602.
- [8] Nan Q M. Research on bridge deflection monitoring based on FBG liquid pressure sensors[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2009, 31(12): 78-80, 138.  
南秋明. 基于 FBG 液压传感器的桥梁挠度监测研究[J]. 武汉理工大学学报, 2009, 31(12): 78-80, 138.
- [9] Yang S S, Wei X Z, Yan P. Research progress on fiber-optic pressure sensor for weigh-in-motion[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2012, 34(5): 680-683, 687.  
杨双收, 魏秀珍, 闫平. 光纤压力传感器在称重领域应用的研究进展[J]. 压电与声光, 2012, 34(5): 680-683, 687.
- [10] Shen T, Sun B C, Feng Y. Mach-Zehnder interference all-fiber sensor for measurement of magnetic field and temperature[J]. Optics and Precision Engineering, 2018, 26(6): 1338-1345.  
沈涛, 孙滨超, 冯月. 马赫-曾德尔干涉集成化的全光纤磁场与温度传感器[J]. 光学精密工程, 2018, 26(6): 1338-1345.
- [11] Yang Y, Zhao Y, Lü R Q, et al. Research and development of a multi-parameter integrated optical fiber sensor and calibration system[J]. Infrared and Laser Engineering, 2019, 48(10): 1013006.  
杨洋, 赵勇, 吕日清, 等. 多参量一体化光纤传感器及标校系统的研制与开发[J]. 红外与激光工程, 2019, 48(10): 1013006.
- [12] Li H, Zhao Q C, Jiang S D, et al. FP cavity and FBG cascaded optical fiber temperature and pressure sensor[J]. Chinese Optics Letters, 2019, 17(4): 040603.
- [13] Zhang Z. Application of fiber Bragg grating sensing technology to monitoring of high speed railway track condition[J]. Railway Engineering, 2016, 56(5): 77-81.  
张政. 光纤光栅传感技术在高速铁路轨道状态监测中的应用[J]. 铁道建筑, 2016, 56(5): 77-81.
- [14] Antunes P F C, Marques C A, Varum H, et al. Biaxial optical accelerometer and high-angle inclinometer with

- temperature and cross-axis insensitivity[J]. IEEE Sensors Journal, 2012, 12(7): 2399-2406.
- [15] Dai Y T, Yin G L, Liu B, et al. Medium-high frequency FBG accelerometer with integrative matrix structure[J]. Applied Optics, 2015, 54(11): 3115-3121.
- [16] Liu M Y, Wang W Z, Song H, et al. A high sensitivity FBG strain sensor based on flexible hinge [J]. Sensors, 2019, 19(8): 1931.
- [17] Peng J, Jia S H, Jin Y M, et al. Design and investigation of a sensitivity-enhanced fiber Bragg grating sensor for micro-strain measurement[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2019, 285: 437-447.
- [18] Yu Z Y, Yao X X, Song X D. Design of micro-displacement amplifier based on flexure hinges[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2009, 30 (9): 1818-1822.
- 于志远, 姚晓先, 宋晓东. 基于柔性铰链的微位移放大机构设计[J]. 仪器仪表学报, 2009, 30(9): 1818-1822.
- [19] Li J J. Automated generation of kinetostatic models for planar flexure-based compliant mechanisms[D]. Xi'an: Xidian University, 2019.
- 李佳杰. 平面柔性铰链机构自动化建模方法研究 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2019.
- [20] Huang Z W, Mei J, Ming T X, et al. Design and analysis of micro-displacement mechanism based on flexible hinge[J]. Hoisting and Conveying Machinery, 2017(3): 15-19.
- 黄志威, 梅杰, 明廷鑫, 等. 基于柔性铰链的微位移机构的设计与分析[J]. 起重运输机械, 2017(3): 15-19.
- [21] Zhang Y S, Liu X G, Zhang Y C, et al. Research on the mechanism of magnifying micro displacement by using flexure hinges[J]. Journal of Gansu Sciences, 2011, 23(2): 99-102.
- 张远深, 刘晓光, 张园成, 等. 柔性铰链微位移放大机构的研究[J]. 甘肃科学学报, 2011, 23(2): 99-102.