

doi:10.3788/gzxb20184711.1106002

基于椭圆位移放大结构的光纤光栅位移传感器

吕国辉^{1,3}, 周泊宁^{1,3}, 王朝钲^{1,3}, 王明扬^{1,3}, 张岩^{1,3}, 姜旭²

(1 黑龙江大学 电子工程学院, 哈尔滨 150080)

(2 黑龙江大学 数据科学与技术学院, 哈尔滨 150080)

(3 黑龙江大学 光纤传感技术国家地方联合工程研究中心, 哈尔滨 150080)

摘 要: 针对采用悬臂梁或变形圆环作为光纤光栅位移传感器的弹性形变结构时, 位移灵敏度较低的问题, 采用新型的椭圆位移放大机构对位移探杆的微小位移量进行放大, 改变椭圆放大器的机械尺寸调整传感器的位移分辨率。当椭圆位移放大机构的长度为 60 mm, 宽度为 19.8 mm, 中间最大宽度为 30 mm 时, 探杆的机械位移放大倍率约为 2 倍。当量程变化为 0~100 mm 时, 实验测得光纤光栅位移传感器的分辨率为 6.1 pm/mm, 位移量和对应波长移动线性相关系数为 0.998 52。适于机械装备和土木工程的结构位移高精度在线监测。

关键词: 光纤光栅; 位移传感器; 椭圆位移放大结构

中图分类号: TP212.1

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2018)11-1106002-6

Fiber Grating Displacement Sensor Based on Elliptical Mechanical Amplification Structure

LYU Guo-hui^{1,3}, ZHOU Bo-ning^{1,3}, WANG Chao-zheng^{1,3},

WANG Ming-yang^{1,3}, ZHANG Yan^{1,3}, JIANG Xu²

(1 College of Electronic Engineering, Heilongjiang University, Harbin 150080, China)

(2 College of Data Science and Technology, Heilongjiang University, Harbin 150080, China)

(3 Research Center for Fiber Optic Sensing Technology National Local Joint Engineering, Heilongjiang University, Harbin 150080, China)

Abstract: In order to solve the practical problem of low displacement sensitivity when a cantilever beam or deformed ring is used as an elastic deformation structure of a fiber Bragg grating displacement sensor, a new elliptical displacement amplification mechanism was chosen to amplify the mini-shifting of the displacement, and the displacement resolution of the sensor was adjusted by changing the mechanical size of the elliptical amplifier. When the length of the elliptical displacement amplifying structure is 60 mm, the width is 19.8 mm, and the maximum width in the middle is 30 mm, the magnification of the mechanical displacement is amplified by 2 times. When the range changes from 0 to 100 nm, the resolution of the fiber Bragg grating displacement sensor measured in the experiment is 6.1 pm/mm, and the linear correlation coefficient of displacement and corresponding wavelength shift is 0.998 52. The sensor can be effectively applied to high-precision on-line monitoring for structural displacement of mechanical equipment and civil engineering.

Key words: Fiber Bragg grating; Displacement sensor; Elliptical displacement amplifying structure

OCIS Codes: 060.2300; 060.2370; 060.3735; 120.0280

0 引言

位移传感器作为一种精密测量物体相对位置的重要传感器件,已在铁路^[1]、桥梁^[2]、水利^[3-4]、钻井^[5-7]、

基金项目:黑龙江省科技攻关项目(No.GZ11A306)和黑龙江省大学生创新创业项目(No.201710212029)资助

第一作者:吕国辉(1972-),男,教授,博士,主要研究方向为光纤传感技术. Email:lvguohui@hlju.edu.cn

通讯作者:姜旭(1974-),女,工程师,硕士,主要研究方向为光纤传感及传感信息计算机处理. Email:1995042@hlju.edu.cn

收稿日期:2018-06-30;录用日期:2018-08-29

<http://www.photon.ac.cn>

滑坡监测^[8-9]等重要领域得到广泛的应用.近年来以光纤光栅(Fiber Bragg Grating, FBG)为敏感单元的位移传感技术日益受到工程技术领域的认可.与传统的电测位移传感器相比,光纤光栅拥有全光无电、绝对测量、高灵敏、无零漂、质量轻、体积小、成本低、抗电磁干扰、抗腐蚀等优异特性,正是这些独特优势使得光纤光栅位移传感器逐渐取代传统电测位移传感器在工程监测领域中的垄断地位.目前国内外光纤光栅位移传感器大致可分为以下几类:弹簧应变式光纤光栅位移传感器^[10]、差动悬臂梁式光纤光栅位移传感器^[11]、拉绳悬臂梁结构光纤光栅位移计^[12]和变形圆环弹性体光纤光栅位移传感器等几类^[13],早期位移传感器的位移和力学转换单元多采用悬臂梁结构,其测量机理主要是在悬臂梁表面粘接光纤光栅应变传感器,当位移变化时引起悬臂梁的形变,解调出光纤光栅的应变值后通过挠度计算公式得到悬臂梁垂直变形,即推导出悬臂梁的移动端在弹簧的牵拉下的垂直位移,该方案的优点是原理清晰,结构简单,易于加工制作,但在悬臂梁表面很难实现均匀粘贴光纤光栅,不均匀粘贴会引起光栅间距的啁啾变形,进而影响测量结果的准确性,再有受悬臂梁结构的位移应变转换量程的限制,弹簧应变式位移传感器分辨率相对较低^[14].武汉理工大学研究了以变形圆环为弹性体的位移传感器,当变形圆环受到拉力的作用时,粘贴在变形环上下表面的FBG会产生相应的波长变化,解决了悬臂梁正反两面直接粘贴光纤光栅产生的波形畸变问题,提高了位移传感器的可靠性和测量精度,其不足之处在于FBG变形环无法起到位移放大的作用,无法适用于小量程高分辨率的位移测量应用场合.针对在相同位移情况下提高弹性体形变这一目标,可以采用机械结构对位移进行放大,高灵敏度光纤光栅压力传感器就是一种基于正弦机构形变放大设计^[15],但这种应用于膜片微小形变的机械放大,其量程在微米量级,不适合用于位移传感器的应用工况.

针对上述问题,为提高传感器的位移灵敏度,本文提出了一种能对位移进行机械放大的椭圆形结构,它可以将水平方向上的位移量在竖直方向上放大两倍,这样相当于间接的将光纤光栅的应变变量放大了两倍,而且光纤光栅是在预应力范围内进行拉伸变化,不用担心位移传感器过载时拉断光纤光栅,特别适合位移传感器的微位移放大,能够有效改善传统位移传感测量精度.

1 理论基础及设计分析

1.1 光纤光栅传感及椭圆位移机械放大原理

1.1.1 光纤光栅传感的原理

光纤光栅是在一维结构的光纤纤芯内部通过激光刻写形成折射率周期调制的光无源器件,当光纤光栅受到外界的温度或应变作用时,会直接改变光纤内部折射率调制的周期和栅区的有效折射率,光纤光栅的中心波长与其栅距和有效折射率之间的关系为

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

式中, λ_B 为FBG的谐振耦合波长, n_{eff} 为光纤纤芯处的有效折射率, Δ 为光栅的周期,满足布喇格反射条件(1)的光波信号被反射,其余的光透过光纤光栅,形成透射谱.光纤光栅波长的偏移量表示为

$$\Delta\lambda_B = 2\Delta n_{\text{eff}}\Delta + 2n_{\text{eff}}\Delta\Delta \quad (2)$$

式中, Δn_{eff} 对应光纤的弹光效应, $\Delta\Delta$ 表示光纤光栅的周期变化.当光纤光栅受到环境的温度和应力变化影响时,光栅微结构的周期和有效折射率的数值产生变化,导致中心波长发生变化.通过解调设备解调出光纤光栅传感器的中心波长的变化,就可以确定待测部位相应物理量的变化.

1.1.2 基于三角放大原理的椭圆位移放大机构

位移传感器的核心元件是位移和力学参量转换的弹性体结构,为提高光纤光栅位移传感器的位移探测灵敏度,本文提出了一种基于三角形放大原理的能对微小位移进行机械放大的椭圆形机械结构^[16],该结构紧凑,位移放大倍数调整灵活,基于三角形放大原理^[17]设计的原理图如图1.

由图1可知,杆的长度 m 不变,当水平方向形成一个位移 X 时,在竖直方向上就会形成一个位移

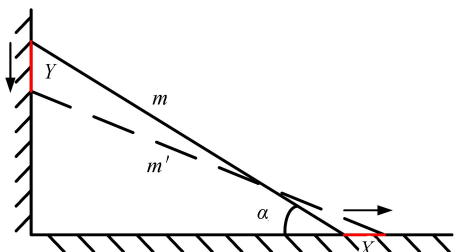


图1 三角形放大原理图
Fig.1 Triangle enlarge schematic

Y, 设位移放大倍数为 A, 有

$$A = \frac{Y}{X} \quad (3)$$

水平位移 X 除了会引起竖直方向位移 Y 的变化之外, 还会使角度 α 产生微小改变 $\Delta\alpha$, 由此可得

$$X = m \cos \alpha - m \cos (\alpha + \Delta\alpha) \quad (4)$$

$$Y = m \sin (\alpha + \Delta\alpha) - m \sin \alpha \quad (5)$$

由式(3)、(4)、(5)可得

$$A = \frac{Y}{X} = \frac{\tan \alpha (\cos \Delta\alpha - 1) + \sin \Delta\alpha}{(1 - \cos \Delta\alpha) + \tan \alpha \sin \Delta\alpha} \quad (6)$$

本文设计的传感器只针对微小的位移量进行测量, 通常被测位移十分微小, 最大仅为几十微米, 角度 α 的增量 $\Delta\alpha$ 也十分微小, 因此有无穷小等价带换原理可将 $\sin \Delta\alpha$ 等价于 $\Delta\alpha$, $1 - \cos \Delta\alpha$ 等价于 $(\Delta\alpha)^2/2$. 将等价换算后的结果带入式(6)得到

$$A \approx \frac{1}{\tan \alpha} \quad (7)$$

对应不同的 α , Y/X 的值不同, 由此可知放大倍数 A 只与角 α 有关, 根据三角形放大原理, 将转换单元设计为椭圆形结构, 具体尺寸为: 椭圆结构外边缘长为 60 mm, 两直边宽度为 19.8 mm, 中间最大宽度为 30 mm. 根据上述机械设计尺寸可得, 通过以上推导证明了椭圆位移放大机构可以将水平方向的位移在竖直方向上放大两倍, 因此椭圆位移放大机构可有效增加位移探测灵敏度.

本文选用弹性好、抗拉能力强的 65 锰钢作为椭圆位移放大机构采用的钢材料, 其弹性模量为 196.2 GPa. 位移放大机构采用椭圆弹性结构设计, 四个角采用椭圆弹性铰链设计, 既满足了机构的弹性体需求也使整个结构更加稳定, 图 2 是用 NX8.5 设计的椭圆位移放大机构的结构, 具体尺寸如图 2.

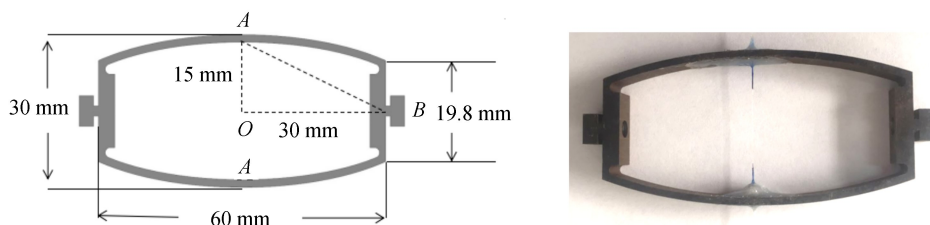


图 2 椭圆位移放大结构示意图和实物图

Fig.2 Ellipse displacement magnification mechanism diagram

1.2 基于椭圆机械结构放大的光纤光栅位移传感器设计与封装

基于椭圆机械结构放大的光纤光栅位移传感器结构示意图如图 3. 在椭圆位移放大机构的上下拱形结构的中间位置打两个小孔, 将光纤光栅穿过, 使栅区处于弹性体的几何中心, 根据传感器的量程施加一定的预应力, 在两个小孔处用树脂将光纤和弹性体固化在一起. 将椭圆位移放大机构的左端与传感器外壳固定, 右端连接一个拉伸弹簧, 当弹簧给位移放大机构一个向右的拉力时, 位移放大机构产生一定的形变量, 上下两端同时向中间发生形变, 这样就将水平方向上的位移量转换为竖直方向上预应力光纤光栅的形变量. 本文结

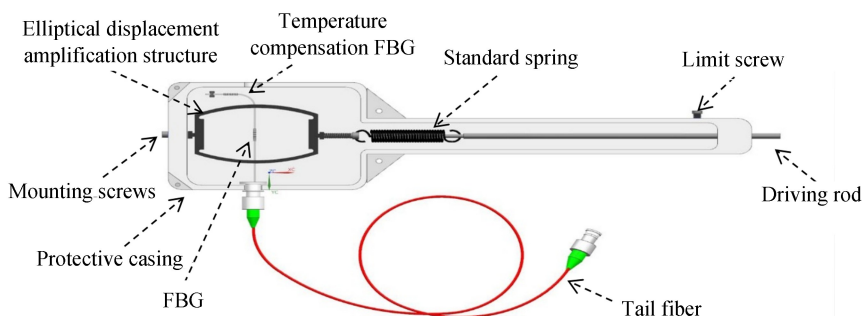


图 3 基于椭圆机械结构放大的光纤光栅位移传感器示意图

Fig.3 Fiber grating displacement sensor schematic diagram based on elliptical mechanical structure magnification

构可将弹性体的水平位移放大两倍.当用已知的位移长度牵拉金属传动杆时,通过光纤光栅波长解调仪读出光纤光栅的波长改变量,就可得到位移与波长改变量的对应关系,获得线性关系曲线,实现传感器的标定,即可对未知的位移量进行测量.

2 椭圆机械位移放大弹性体结构仿真结果与分析

按 1.1.2 节设计的弹性体的具体机械尺寸,用 NX8.5 绘制 3D 效果图.建立传感器数值仿真模型,将仿真模型导入 Workbench14.5,定义模型的材料属性包括弹性模量、泊松比和材料密度等参数.对模型整体进行网格划分,并对仿真模型一端施加固定约束,另一端施加拉力得到仿真模型的动态效果图.对仿真模型施加不同的拉力得出相应的机械位移放大数值,采集的形变数据分析拉力与机械形变的对应关系,为传感器的结构尺寸设计提供依据,图 4 为仿真效果图示意图.

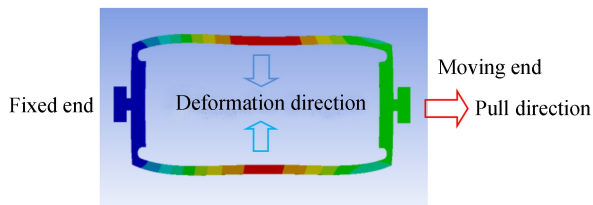


图 4 椭圆位移放大机构仿真图
Fig.4 Ellipse displacement amplification mechanism simulation

当金属传力杆在位移的牵拉下使弹簧发生形变时,椭圆位移放大机构的红色区域形变量数据如表 1 所示.设计椭圆机械结构放大的光纤光栅位移传感器的量程是 100 mm,当弹簧的伸长量从 0 mm 到 100 mm 时,仿真中施加的最大拉力是 46N,由图 5 可知,在量程范围内拉力和弹性体的形变具有良好的线性,满足光纤光栅位移传感器的设计需求.

表 1 椭圆位移放大机构形变量数据

Table 1 Deformation data of ellipse displacement amplification mechanism

Strain/N	Deformation/mm
5	0.004 53
10	0.009 06
15	0.013 6
20	0.018 1
25	0.022 6
30	0.027 2
35	0.031 7
40	0.036 2
45	0.040 8
50	0.045 3

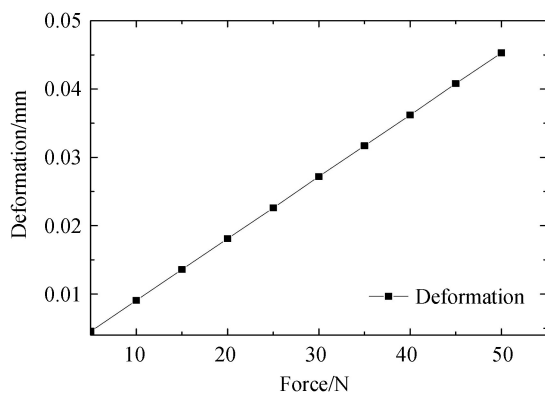


图 5 椭圆位移放大机构形变量曲线图
Fig.5 Deformation curve of ellipse displacement amplification mechanism

3 光纤光栅位移传感器封装制作

椭圆放大位移传感器的组装过程主要集中在光纤光栅和弹性体的固定与保护,首先用螺丝将椭圆位移放大机构固定在壳体上,椭圆位移放大机构的另一端连接一个固定螺丝,在螺丝帽处开一个贯穿孔与弹簧的一端挂钩相连,弹簧的另一端挂钩与传动杆相连,然后将白色套管套在两侧的尾纤上,将保护装置的每个部件按顺序依次穿进尾纤,再拧紧固定在壳体两侧的 U 型槽内,接着就是在白色套管外侧再套一层铠装,这样就可以最大程度的保护光纤光栅,然后将铠装与保护装置压紧并套上绿色塑料护套,最后就是研磨 FC/APC 光纤跳线接头.本文

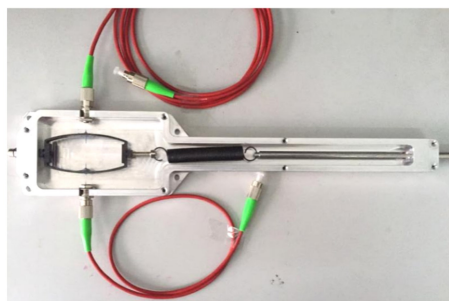


图 6 基于位移放大机构的传感器组装图
Fig.6 Sensor assembly diagram based on displacement magnification mechanism

研制的椭圆位移放大机构的实物图如图 6 所示.

4 传感器的标定与数据分析

采用精密材料拉伸试验机对位移传感器进行标定,材料拉伸试验机的内部集成了精密的光栅尺,位移控制精度可以达到 10 微米,用于位移的基准.具体的标定位移和光纤光栅的波长数据如表 2 所示,使用 Origin 软件对传感器标定数据进行处理和分析,得到基于椭圆机械结构放大的光纤光栅位移传感器的标定拟合直线,如图 7 所示,其线性相关系数为 0.998 52.

表 2 椭圆位移放大机构实验数据表

Table 2 Elliptic displacement amplification mechanism experimental data sheet			
Deformation/mm	Wavelength 1/nm	Wavelength 2/nm	Wavelength average/nm
0	1 556.319	1 556.301	1 556.310
5.08	1 556.274	1 556.258	1 556.266
10.16	1 556.239	1 556.221	1 556.230
15.24	1 556.205	1 556.185	1 556.195
20.32	1 556.175	1 556.155	1 556.165
25.40	1 556.142	1 556.121	1 556.131
30.48	1 556.114	1 556.092	1 556.103
35.56	1 556.083	1 556.060	1 556.071
40.64	1 556.053	1 556.032	1 556.042
45.72	1 556.021	1 556.002	1 556.011
50.80	1 555.992	1 555.971	1 555.981
55.88	1 555.962	1 555.942	1 555.952
60.96	1 555.931	1 555.910	1 555.921
66.04	1 555.904	1 555.878	1 555.891
71.12	1 555.872	1 555.843	1 555.857
76.20	1 555.845	1 555.815	1 555.830
81.28	1 555.813	1 555.787	1 555.800
86.36	1 555.785	1 555.766	1 555.775
91.44	1 555.754	1 555.736	1 555.745
96.52	1 555.733	1 555.718	1 555.725
101.6	1 555.701	1 555.679	1 555.690

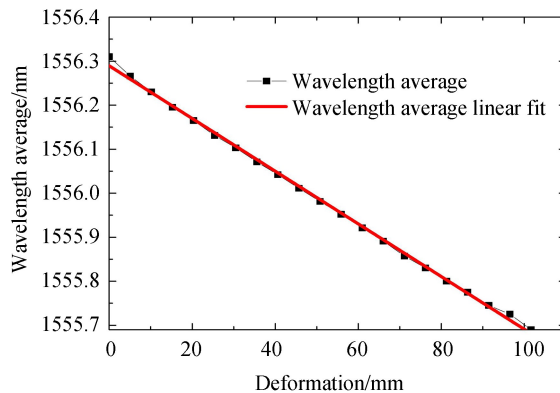


图 7 椭圆位移放大机构实验曲线

Fig.7 Ellipse displacement magnification experimental curve

5 结论

本文提出并研制了一种基于椭圆机械位移放大的新型光纤光栅位移传感器,传感器的波长位移灵敏度为 6.1 pm/mm.由标定实验得到的位移和波长变化曲线,计算出椭圆机械结构放大的光纤光栅位移传感器的线性相关系数达到 0.998 52,说明基于机械位移放大原理的位移传感器的结构设计是合理可行的,该传感器在小量程、高位移分辨率、强电磁干扰等应用场合具有广阔的应用前景,结合温度补偿可用于于工程结构的长期在线监测.

参考文献

- [1] GAO Chao, LIU Bang, GUO Yong-cai. A shearing displacement sensing device for slope slip[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, **44**(3): 0306002.
高潮, 刘邦, 郭永彩. 面向边坡滑移的剪切位移传感装置[J]. 光子学报, 2015, **44**(3): 0306002.
- [2] LI Li. Study on key technology of FBG displacement sensor system[D]. Tianjin: Tianjin University, 2007: 39-50.
李丽. 光纤光栅位移传感系统关键技术的研究[D]. 天津: 天津大学, 2007: 39-50.
- [3] HE Jun, DONG Hui-juan, ZHOU Zhi, *et al.* A kind of new displacement sensor based on FBG for engineering[J]. *Journal of Harbin University of Science and Technology*, 2010, **15**(5): 61-64.
何俊, 董惠娟, 周智, 等. 一种适合工程应用的新型光纤光栅位移传感器[J]. 哈尔滨理工大学学报, 2010, **15**(5): 61-64.
- [4] LIU Bo, NIU Weng-cheng, YANG Yi-fei, *et al.* Precision displacement measurement based on fiber Bragg grating sensor[J]. *Nanotechnology and Precision Engineering*, 2005, **3**(1): 53-55.
刘波, 牛文成, 杨亦飞, 等. 基于光纤布喇格光栅传感器的精密位移测量[J]. 纳米技术与精密工程, 2005, **3**(1): 53-55.
- [5] GUAN Bo-ou, LIU Zhi-guo, KAI Gui-yun, *et al.* Study on displacement sensing of fiber Bragg grating based on cantilever structure[J]. *Acta Photonica Sinica*, 1999, **28**(11): 983-985.
关柏鸥, 刘志国, 开桂云, 等. 基于悬臂梁结构的光纤光栅位移传感研究[J]. 光子学报, 1999, **28**(11): 983-985.
- [6] NG Jun-hong, ZHOU Xiao-qun, YANG Xiu-feng, *et al.* A simple temperature-insensitive fiber Bragg grating displacement sensor[J]. *Optics Communications*, 2017, **273**(2): 398-401.
- [7] RAWASHDEH E, REVEL P, PRELLE C. Cones-assembled grating for long-range fiber-optic linear displacement sensor [C]. 2015 International Conference on Photonics, Optics and Laser Technology (PHOTOPTICS), Berlin, 2015: 147-155.
- [8] LI T. A high-sensitivity fiber Bragg grating displacement sensor based on transverse property of a tensioned optical fiber configuration and its dynamic performance improvement[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2017, **17**(18): 5840-5848.
- [9] GUO Yong-xing, XIONG Li, KONG Jian-yi, *et al.* Sliding fiber Bragg grating displacement sensor[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2017, **25**(1): 50-58.
郭永兴, 熊丽, 孔建益, 等. 滑动式光纤布喇格光栅位移传感器[J]. 光学精密工程, 2017, **25**(1): 50-58.
- [10] WANG Jun-jie, FU Xiang-hong, JIANG De-sheng, *et al.* Research of differential optical fiber grating displacement cell and its temperature characteristic[J]. *Journal of Wuhan University of Technology*, 2007, **29**(12): 112-115.
王俊杰, 付晓红, 姜德生, 等. 差动式光纤光栅位移计及其温度特性的研究[J]. 武汉理工大学学报, 2007, **29**(12): 112-115.
- [11] ZHANG Yan-jun, TIAN Yong-sheng, FU Xing-hu, *et al.* An adjustable-range fiber optic Bragg grating displacement sensor[J]. *Electronic Engineering*, 2017, **44**(6): 626-632.
张燕君, 田永胜, 付兴虎, 等. 可调量程拉绳式光纤布喇格光栅位移传感器[J]. 光电工程, 2017, **44**(6): 626-632.
- [12] 李维来, 代鑫, 潘建军, 等. 一种光纤光栅变形环的钢轨或桥梁位移监测装置[P]. 武汉: CN 102607425. A, 2012-7-25.
- [13] ZHU Su-ran, XIA Hao-jie, LIU Fang-fang, *et al.* Research on microdisplacement sensor based on fiber Bragg grating [J]. *Tool Technology*, 2013, **49**(8): 61-65.
朱肃然, 夏豪杰, 刘芳芳, 等. 基于布喇格光纤光栅的微位移传感器的研究[J]. 工具技术, 2013, **49**(8): 61-65.
- [14] TIAN Xiao-dan, ZHANG Hui-xin, LIU Wen-yi, *et al.* Temperature compensated fiber grating displacement sensor[J]. *Electron Device*, 2016, **39**(3): 576-580.
田晓丹, 张会新, 刘文怡, 等. 温度补偿型光纤光栅位移传感器[J]. 电子器件, 2016, **39**(3): 576-580.
- [15] WANG Jun-jie, JIANG De-sheng, XIE Guan-mo, *et al.* High sensitivity fiber grating pressure sensor based on the principle of force amplification of sine[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2006, **27**(7): 783-786.
王俊杰, 姜德生, 谢官模, 等. 基于正弦机构力放大原理的高灵敏度光纤光栅压力传感器[J]. 仪器仪表学报, 2006, **27**(7): 783-786.
- [16] MA Hong-wen, YAO Shao-ming, WANG Li-quan, *et al.* Analysis of the displacement amplification ratio of bridge-type flexure Hinge[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2006, **132**: 730-736.
- [17] YANG Zhi-gang, LIU Deng-yun, CHEN Hong-peng, *et al.* Micro-displacement magnifying mechanism used in piezo-stack pump[J]. *Optics & Precision Engineering*, 2007, **15**(6): 884-888.
杨志刚, 刘登云, 吴丽萍, 等. 应用于压电叠堆泵的微小位移放大机构[J]. 光学精密工程, 2007, **15**(6): 884-888.

Foundation item: Scientific and Technological Project of Heilongjiang Province (No. GZ11A306) and the Project of Innovative Entrepreneurship in Heilongjiang Province (No. 201710212029)

引用格式: LYU Guo-hui, ZHOU Bo-ning, WANG Chao-zheng, *et al.* Fiber Grating Displacement Sensor Based on Elliptical Mechanical Amplification Structure[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, **47**(11): 1106002

吕国辉, 周泊宁, 王朝钲, 等. 基于椭圆位移放大结构的光纤光栅位移传感器[J]. 光子学报, 2018, **47**(11): 1106002