

文章编号:1001-5078(2022)06-0870-05

· 光纤传感及光通讯技术 ·

基于FBG的悬臂梁式微力与微位移传感单元

彭星玲¹, 茶映鹏¹, 叶建雄², 刘萍先¹

(1. 南昌工程学院 江西省精密驱动与控制重点实验室, 江西 南昌 330099; 2. 浙江机电职业技术学院, 浙江 杭州 310053)

摘要:设计了一种基于光纤布拉格光栅(fiber Bragg grating, FBG)的微力与微位移双物理量传感单元,采用矩形悬臂梁型弹性体结构以及两片FBG布片方式,提高了力和位移灵敏度,实现了温度补偿,位移灵敏度可通过改变悬臂梁的固定位置和长度进行调整。对传感单元的性能进行了理论分析和实验验证,结果表明:在0~1.2 N测量范围内,力实验灵敏度为889 pm/N,理论和实验的平均相对误差为6.6%,力分辨力为1.1 mN,位移灵敏度随着悬臂梁长度 L 的增大而减小,位移灵敏度在 L 为149 mm时为60.7 pm/mm,在 L 为99 mm时为200.3 pm/mm,位移分辨力为5 μ m,传感单元的线性度均达0.999以上,保持了优良的线性,可以满足不同量程的微力和微位移应用场合。

关键词:光纤布拉格光栅;悬臂梁;微力传感;微位移传感

中图分类号:TN253 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2022.06.012

Cantilever beam type micro-force and micro-displacement sensing unit based on fiber Bragg grating

PENG Xing-ling¹, CHA Ying-peng¹, YE Jian-xiong², LIU Ping-xian¹

(1. Jiangxi Province Key Laboratory of Precision Drive & Control, Nanchang Institute of Technology, Nanchang 330099, China; 2. Zhejiang Institute of Mechanical & Electrical Engineering, Hangzhou 310053, China)

Abstract: In this paper, a dual physical quantity sensing unit of micro-force and micro-displacement based on fiber Bragg grating (FBG) is designed. A rectangular cantilever beam type elastic body structure and two FBG patch methods are adopted, which can improve the force and displacement sensitivity and realize temperature compensation. The displacement sensitivity can be adjusted by changing the fixed position and length of the cantilever beam. The performance of the sensing unit is theoretically analyzed and experimentally verified. The results show that the force test sensitivity is 889 pm/N in the 0~1.2 N measurement range, the theoretical and experimental average relative error is 6.6%, and the force resolution is 1.1 mN. The displacement sensitivity decreases with the increase of the cantilever beam length L . The displacement sensitivity is 60.7 pm/mm and 200.3 pm/mm respectively, when L is 149 mm and 99 mm. The displacement resolution is 5 μ m and the linearity of the sensing unit is above 0.999, which maintains an excellent linearity and can meet the application of micro-force and micro-displacement of different ranges.

Keywords: fiber Bragg grating; cantilever beam; micro-force; micro-displacement

1 引言

力和位移是表征物体受力或变形状况的显著

参量,力和位移传感器能够实现称重^[1-2]、多维力^[3-5]、结构件变形^[6-8]和运动部件位移^[9-11]等

基金项目:江西省教育厅科研技术研究项目(No. GJJ180937)资助。

作者简介:彭星玲(1988-),女,博士,副教授,主要从事光纤传感与自动检测技术方面的研究。E-mail: pengxingling0223@163.com

收稿日期:2021-08-06

参数测量,从而对于精密加工中机床表面变形、切削力,精密测控中机器人指力腕力,大坝桥梁飞机等结构件的安全监测等具有重要意义。与传统电学类传感器相比,基于 FBG 的力或位移传感器具有显著的优势,如微型尺寸,耐腐蚀能力强,抗电磁干扰、电气绝缘性好、可进行波长编码,不受光源功率波动和系统损耗的影响,抗干扰能力强,测量精度高,易于联网形成智能传感网络^[12-13]。因此,基于 FBG 的力或位移传感器受到越来越多学者的关注。冯艳等人^[1]设计了一种灵敏度可调的小量程称重传感器,在 0~2 N 的加载范围内,理论与实验灵敏度之间的平均相对误差为 6.46%。VIEIRA J C 等人^[2]将 FBG 传感器埋置在硅橡胶托盘底部制作了称量单元,在 5 mN~5 N 范围内获得了良好的实验结果。汪苏等人^[5]设计了一种用于机器人腕部结构的 FBG 多维力传感器,力灵敏度约为 6.7 pm/N。REN Hongliang 等人^[9]设计了一种结构紧凑的悬挂式 FBG 力与位移传感器,其力与位移灵敏度分别是 -345.2 pm/N 和 -219.69 pm/mm,力分辨力为 2.9 mN。郭永兴等人^[10]制作了一种滑动式 FBG 位移传感器,在 0~100 mm 的测量范围中,灵敏度为 20.11 pm/mm。陈宇佳等人^[11]设计了一种弓型 FBG 微位移传感器,量程为 1mm 时,传感器的灵敏度为 2.02 pm/ μm ,线性相关系数为 0.9983。FBG 在力和位移测量两方面都大有可为,但对于同时测量微力和微位移,且灵敏度可调满足不同量程要求这方面的研究报道还很少。

本文通过在悬臂梁上粘贴 FBG 的方式,设计了一种基于双 FBG 的悬臂梁式微力和微位移传感单元。该传感单元结构简单操作灵活,能够实现温度补偿,力灵敏度和分辨力高,通过调整悬臂梁固定端的位置可实现位移灵敏度可调可控,可满足不同量程的不同灵敏度的微力和微位移应用场合。

2 利用悬臂梁进行力和位移传感的工作原理

FBG 在应变和温度的作用之下,产生的弹光效应、热光效应和热膨胀效应将会使 FBG 的有效折射率和光栅的周期发生变化,从而引起 FBG 反射波的峰值波长变化,轴向应变和温度变化量引起的反射峰值波长的相对变化为^[14]:

$$\Delta\lambda_B/\lambda_B = K_{\varepsilon_x}\varepsilon_x + K_T\Delta T \quad (1)$$

式中, K_{ε_x} 表示轴向应变灵敏系数; K_T 表示温度灵敏系数,通过监测 FBG 传感器的中心波长偏移量,可获得外界信息参数。

轴向应变灵敏系数和温度灵敏系数与传感器的结构息息相关,传感单元的结构起着外界信号传递的作用,结构合理的传感单元可以对 FBG 传感性能起到结构化调节的作用。悬臂梁结构简单,强度较高,加工容易,黏贴方便,作为传感单元的弹性体结构,容易实现高灵敏度的力和位移的测量。

传感单元结构如图 1 所示,通过托盘支点 A 向传感梁施加作用力,托盘固定在悬臂梁自由端,悬臂梁的另一端通过两个内六角螺钉和楔块结构固定住,固定端的位置可通过调松螺钉后,让悬臂梁左右移动来调节自由端 A 点与固定端 C 点之间的距离 L ,FBG 距离自由端的距离为 L_1 ,距离固定端的距离为 L_2 ,且 $L = L_1 + L_2$ 。传感梁的上下两表面相同位置粘贴 FBG 后,自由端离 FBG1 和 FBG2 的位置 L_1 便保持固定,而两支 FBG 在悬臂梁的上下表面对称安装可构成差动式传感,能消除环境温度变化的影响,同时可提高力灵敏度。

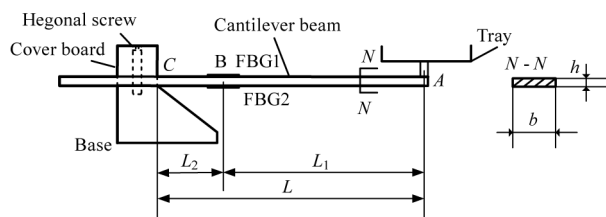


图 1 悬臂梁式传感单元示意图

Fig. 1 Schematic diagram of cantilever beam type sensing unit

悬臂梁右侧受力 F 作用时,FBG1 受到拉力产生正应变,FBG2 受到压力产生负应变。当应变和温度同时变化时,梁上、下面的应变数值相等,符号相反,故 FBG1 和 FBG2 产生大小相等方向相反的应变。

设传感梁的弹性模量为 E ,惯性矩 $I_y = \frac{bh^3}{12}$;

b 为梁宽; h 为梁厚,所测力为 F ,则 FBG1 和 FBG2 安置位置处轴向应变分别为:

$$\begin{cases} \varepsilon_{x1} = \varepsilon_x = \frac{6FL_1}{Ebh^2} \\ \varepsilon_{x2} = -\varepsilon_x = -\frac{6FL_1}{Ebh^2} \end{cases} \quad (2)$$

由式(1)可得:

$$\begin{cases} \Delta\lambda_{B1}/\lambda_B = K_{\varepsilon x}\varepsilon_x + K_T\Delta T \\ \Delta\lambda_{B2}/\lambda_B = -K_{\varepsilon x}\varepsilon_x + K_T\Delta T \end{cases} \quad (3)$$

进一步可得:

$$\begin{aligned} \Delta\lambda_B/\lambda_B &= (\Delta\lambda_{B1} - \Delta\lambda_{B2})/\Delta\lambda_B \\ &= 2K_{\varepsilon x}\varepsilon_x = K_F F \end{aligned} \quad (4)$$

由于二氧化硅光纤 $K_{\varepsilon x} = 0.784/\varepsilon$, 则力灵敏度系数为:

$$K_F = \frac{9.41L_1}{Ebh^2} \quad (5)$$

根据材料力学理论,悬臂梁的挠曲轴近似微分方程为^[15]:

$$d^2\omega/dx^2 = \frac{F(L-x)}{EI_y} \quad (6)$$

式中, ω 为梁受力变形后的挠度值,根据边界条件固定端处横截面的转角 $d\omega/dx = 0$, 挠度 $\omega = 0$, 对悬臂梁的挠曲轴微分方程积分两次可得悬臂梁挠度方程为^[15]:

$$\omega(x) = \frac{F}{EI_y} \left(\frac{Lx^2}{2} - \frac{x^3}{6} \right) \quad (7)$$

而最大挠度发生在悬臂梁的自由端,即 $x = L$ 处,将 $x = L$ 代入式(7),自由端的位移 s_z 等于梁的最大挠度 $\omega(L)$,即为:

$$s_z = \omega(L) = \frac{4FL^3}{Ebh^3} \quad (8)$$

将 $L = L_1 + L_2$ 代入式(4)和式(7)得:

$$\Delta\lambda_B/\lambda_B = \frac{2.35L_1h}{L^3}s_z = K_{s_z}s_z \quad (9)$$

则位移灵敏度系数为:

$$K_{s_z} = \frac{2.35L_1h}{L^3} \quad (10)$$

3 传感实验与结果

进行力与位移测量时,制作了总长为 180 mm, $b = 22$ mm, $h = 0.6$ mm 的矩形悬臂梁。FBG 沿轴向被环氧树脂胶粘贴在梁的上下表面,其中央部位固定于 $L_1 = 86$ mm 的 B 处,栅区的长度为 10 mm,采用光纤光栅网络分析仪监测 FBG 反射谱的中心波长 λ_B 。悬臂传感梁采用 304 不锈钢,其弹性模量 $E = 190$ GPa, L 在 99 ~ 149 mm 的范围内可调。悬臂梁式传感单元实物图如图 2 所示。

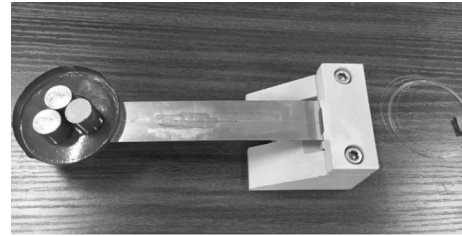


图 2 悬臂梁式传感单元实物图

Fig. 2 Picture of cantilever beam type sensing unit

传感性能实验中,在传感梁上下表面相同位置处分别粘贴相同 FBG,上表面的 FBG 标记为 FBG1,下表面的 FBG 标记为 FBG2,它们在室温时的初始中心波长分别为 $\lambda_{B1} = 1550.117$ nm, $\lambda_{B2} = 1550.095$ nm。在每一个 A 点位置处,重物质量从 0 ~ 120 g,相应的力为 0 ~ 1.2 N,中间间隔 0.2 N 进行加载力传感实验,反复进行三次实验取平均值,在加载力的同时,采用游标卡尺测量悬臂梁自由端的位移变化值 s_z ,传感单元的力和位移传感性能如图 4 ~ 6 所示。

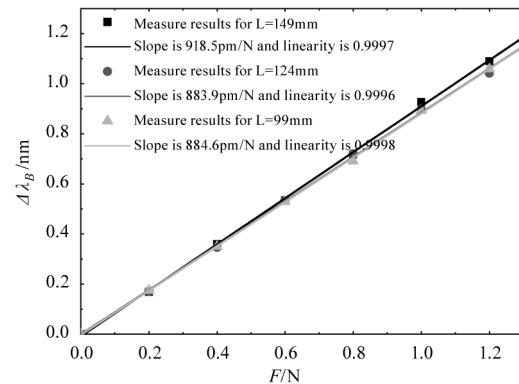


图 3 长度 L 不同时 FBG 的力传感性能

Fig. 3 Force sensing of FBG when length L is different

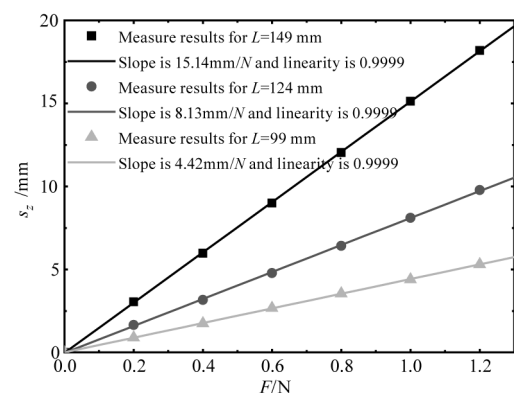


图 4 长度 L 不同时位移对力的响应性能

Fig. 4 Respond of displacement vs force when length L is different

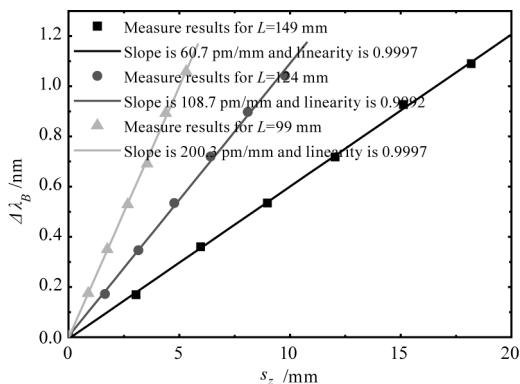


图5 长度 \$L\$ 不同时 FBG 的位移传感性能

Fig. 5 Displacement sensing of FBG when length \$L\$ is different

实验结果表明:在 0 ~ 1.2 N 范围内,悬臂梁长度分别从 99 mm 增加到 124 mm 和 149 mm 时,随着力的增加,波长产生了红移,力灵敏度基本保持不变,平均实验力灵敏度为 889 pm/mm,位移随着力的增加而线性增大,位移灵敏度随着 \$L\$ 的增大而减小,传感单元的力和位移的线性度均达 0.999 以上,保持了优良的线性。

4 传感器灵敏度与分辨力分析

4.1 力灵敏度与分辨力分析

基于第 2.1 节理论推导的公式和第 3 节的实验结果,对传感单元的力灵敏度与分辨力进行分析与讨论。在传感梁的材料,横截面和光纤的粘贴位置一定的情况下(文中 \$L_1 = 86\$ mm),该传感单元结构参数 \$L\$ 的可调范围为 99 ~ 149 mm, \$L_2\$ 可调范围为 13 ~ 63 mm。将悬臂梁的参数代入式(5)可得 \$K_F = \frac{9.41 \times L_1}{E \times b \times h^2} = 537.8 \times 10^{-6} \text{ N}^{-1}\$, 令 FBG 中心波长 \$\lambda_B = 1550.1\$ nm,该传感单元的力理论灵敏度 \$k_F = K_F \times \lambda_B = 833.6\$ pm/N,与实验平均灵敏度 889 pm/N 的相对误差为 6.6%。解调仪波长分辨率为 1 pm,则力分辨力可达 1.1 mN。从理论分析和实验结果可知:调整悬臂梁的长度并不能增加力灵敏度系数,力灵敏度系数 \$K_F\$ 由参数 \$L_1\$、\$E\$、\$b\$、\$h\$ 共同调节,通过调整黏贴位置增加 \$L_1\$,减小悬臂梁的宽度和厚度,以及选择弹性模量较小的材料如铝、锌等材料,可以提高力灵敏度和分辨力。

4.2 位移灵敏度可调分析

根据式(10)可知该传感单元的位移理论灵敏度 \$k_{s_z} = \frac{2.35L_1h}{L^3} \times \lambda_B\$, 传感单元的位移灵敏度可通

过调节悬臂梁的固定位置 \$C\$ 实现结构化可控制,位移灵敏度由参数 \$L_1\$ 和 \$L\$ 共同调节。\$L_1\$ 一定时,位移灵敏度随着 \$L\$ 的增加而减小,\$L\$ 一定时,灵敏度随着 \$L_1\$ 的增加而增大。当 \$L_1\$ 不变时,其大小随 \$C\$ 点位置变化情况如图 5 所示,实验灵敏度随着 \$L\$ 的增大而减小,与理论分析结果相符。根据传感单元中 FBG 的实际位置 \$L_1 = 86\$ mm,悬臂梁的结构参数,FBG 的中心波长 \$\lambda_B = 1550.1\$ nm, \$L_{\max} = 149\$ mm, \$L_{\min} = 99\$ mm,计算可得 \$k_{s_{z\min}} = 56.8\$ pm/mm, \$k_{s_{z\max}} = 193.7\$ pm/mm。实验位移灵敏度分别为 60.7 pm/mm 和 200.3 pm/mm,理论与实验结果的平均相对误差分别为 6.9%,3.4%,在 \$L\$ 为 99 mm 时,位移分辨力可达 5 \$\mu\text{m}\$。综合分析力和位移灵敏度的理论值和实验结果可知:在提高 \$L_1\$ 的前提下,尽可能的减小悬臂梁的总长度 \$L\$,不仅可以提高力灵敏度,也可进一步提高位移灵敏度和分辨力。

5 结论

本文所设计的微力和微位移传感单元应用差动 FBG 传感器的波长漂移消除了温度误差,结合可调式悬臂结构实现了位移灵敏度的可控制。实验研究表明,力传感单元在 0 ~ 1.2 N 的加载范围内,力平均灵敏度约为 889 pm/N,线性度不低于 0.999,理论灵敏度与实验灵敏度之间的平均相对误差为 6.6%,力分辨力为 1.1 mN。在悬臂梁长度为 99 mm 时,位移灵敏度高达 200.3 pm/mm,位移分辨率为 5 \$\mu\text{m}\$。通过优化结构参数,传感器的性能可进一步提高,能够满足不同量程的不同灵敏度力与位移测量场合,尤其对于微力和微位移测量应用前景广阔。

参考文献:

- [1] Feng Yan,Zhang Jin,Zhang Zhen, et al. Fiber Bragg grating weighing unit with adjustable sensitivity [J]. Acta Photonica Sinica,2017,(10):37-42. (in Chinese) 冯艳,张劲,张震,等. 灵敏度可调的光纤布喇格光栅称量传感单元[J]. 光子学报,2017,(10):37-42.
- [2] Vieira J C,Morais O M F,Vasques C M A, et al. A laboratory prototype of a weight measuring system using optical fiber Bragg grating sensors embedded in silicone rubber[J]. Measurement,2015;58-66.
- [3] Liu Mingyao,Bing Junjun,Zhou Weijian, et al. New three-axis milling force measurement method based on fiber bragg grating [J]. Chinese Journal of Scientific Instru-

- ment, 2018, (1): 49 - 57. (in Chinese)
- 刘明尧, 邴俊俊, 周伟剑, 等. 基于光纤光栅的三维铣削力测量方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2018, (1): 49 - 57.
- [4] Zhou Xinglin, Sheng Zhonghua, Yuan Chenqi, et al. Research on strain transfer characteristics of FBG three-dimensional force sensor [J]. Instrument Technique and Sensor, 2019, (5): 9 - 13. (in Chinese)
- 周兴林, 盛中华, 袁琛琦, 等. 光纤光栅三向力传感器的应变传递特性研究[J]. 仪表技术与传感器, 2019, (5): 9 - 13.
- [5] Xu Huichao, Miao Xingang, Wang Su, et al. A robot multi-dimensional FBG force sensor [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2016, 50(12): 1881 - 1884. (in Chinese)
- 许会超, 苗新刚, 汪苏, 等. 一种机器人多维光纤光栅力传感器[J]. 上海交通大学学报, 2016, 50(12): 1881 - 1884.
- [6] Tan C H, Shee Y G, Yap B K, et al. Fiber bragg grating based sensing system: early corrosion detection for structural health monitoring [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2016, 246: 123 - 128.
- [7] Yong Zheng, Da Huang, Lin Shi. A new deflection solution and application of a fiber Bragg grating-based inclinometer for monitoring internal displacements in slopes [J]. Measurement Science and Technology, 2018, 29(5): 055008.
- [8] Wu Jinghong, Ye Shaomin, Zhang Jiqing, 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): 113 - 121. (in Chinese)
- 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): 113 - 121.
- [9] Li Tianliang, Ren Hongliang. A hybrid FBG displacement and force sensor with a suspended and bent optical fiber configuration [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2017, 268: 117 - 125.
- [10] Guo Yongxing, Xiong Li, Kong Jianyi, et al. Sliding type fiber bragg grating displacement sensor [J]. Optics and Precision Engineering, 2017, 25(1): 50 - 58. (in Chinese)
- 郭永兴, 熊丽, 孔建益, 等. 滑动式光纤布拉格光栅位移传感器[J]. 光学精密工程, 2017, 25(1): 50 - 58.
- [11] Tan Yuegang, Chen Yujia, Li Ruiya, et al. High-precision bow-shaped fiber bragg grating micro-displacement sensors [J]. Optics and Precision Engineering, 2018, 26(3): 40 - 48. (in Chinese)
- 谭跃刚, 陈宇佳, 李瑞亚, 等. 高精度弓型光纤光栅微位移传感器[J]. 光学精密工程, 2018, 26(3): 40 - 48.
- [12] Zhang Yang, Guan Baiou. High-sensitivity distributed bragg reflector fiber laser displacement sensor [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2009, 21(5): 280 - 282.
- [13] Ren Yue, Zhang Yumin, Zhong Guoshun, et al. Steel capillary packaging and high temperature characteristics of fiber grating sensor [J]. Laser & Infrared, 2020, 50(5): 598 - 601. (in Chinese)
- 任越, 张钰民, 钟国舜, 等. 管式光纤光栅高温传感器封装及温度特性[J]. 激光与红外, 2020, 50(5): 598 - 601.
- [14] 廖延彪. 光纤光学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2000.
- [15] Qu Yufeng, Zhang Long, Zhu Ling, et al. Novel weigh sensors based on fiber bragg grating Sensing Technology [J]. Chinese Journal of Luminescence, 2007, (3): 412 - 416. (in Chinese)
- 翟玉锋, 张龙, 朱灵, 等. 光纤光栅称重传感器研究[J]. 发光学报, 2007, (3): 412 - 416.