

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2108411

基于FBG柔性传感器的形状重构*

王彦¹, 金萍¹, 赵慧², 葛子阳¹, 蒋超¹

(1. 安徽工业大学电气与信息工程学院 马鞍山 243000; 2. 山东华宁矿业集团有限公司 山东 271400)

摘要:基于PDMS材料封装的光纤光栅(FBG)柔性传感器检测物体形状,研究了传感器个数与布局对不同形状物体重构精度的影响。使用COMSOL仿真软件验证了算法的准确性,制备了4个FBG柔性传感器并对其进行曲率标定,将传感器分布在铝合金板上,均等分布3和4个FBG柔性传感器重构的最小相对误差分别为-6.12%和0.48%,实验结果表明,使用4个传感器的重构效果较好。因此,在7组不同布局选择4个传感器,铝合金板一端分别施加4种不同重量的砝码,间隔为260、100、90 mm和150、150、150 mm的布局方式相对误差小,重构效果好,且在第7组的相对误差都是最小,分别为6.22%、-1.01%、-2.52%和-3.22%。本文制备的FBG柔性传感器为软机器人形状重构领域提供了应用基础。

关键词: PDMS; FBG柔性传感器; COMSOL仿真; 曲率标定

中图分类号: TN253 TH741

文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 460.40

Shape reconstruction based on the FBG flexible sensor

Wang Yan¹, Jin Ping¹, Zhao Hui², Ge Ziyang¹, Jiang Chao¹

(1. School of Electrical and Information Engineering, Anhui University of Technology, Ma'anshan 243000, China; 2. Shandong Huaning Mining Group Co., Ltd, Shandong 271400, China)

Abstract: This article detects the shape of objects based on the flexible fibre optic grating (FBG) sensors encapsulated in PDMS material. The influence of the number and layout of sensors on the reconstruction accuracy of objects of different shapes is discussed. The accuracy of the algorithm is evaluated by using COMSOL simulation software. Four FBG flexible sensors are designed and calibrated for curvature. The sensors are distributed on the aluminium plate. The minimum relative errors for the equally distributed 3 and 4 FBG flexible sensor reconfiguration are -6.12% and 0.48%, respectively. Experimental results show that the reconstruction is better when 4 sensors are utilized. Therefore, by selecting 4 sensors in 7 different sets of dispositions, the layout has small relative error under the condition of 4 different weights. The specific is that the interval values of one end of the aluminium alloy plate are 260, 100 and 90 mm, respectively. For the other end, the interval values are 150, 150 and 150 mm, respectively. The effect of reconstruction is well and all have the smallest relative errors in the seventh group of 6.22%, -1.01%, -2.52%, and -3.22%, respectively. The designed FBG flexible sensor provides the basis for applications in the field of soft robot shape reconstruction.

Keywords: PDMS; FBG flexible sensors; COMSOL simulation; curvature calibration

0 引言

21世纪以来,国内外对机器人技术的发展越来越重视,机器人技术被认为是对未来新兴产业发展具有重要意义的高技术之一。与传统的刚性机器人相比,软机器人的身体、执行器、控制器和电源都是由柔软或可扩展的

材料制成的,这些材料可以弯曲和扭曲,具有很高的曲率,因此,软机器人具有连续和大部分变形的结构。由上述特点,软机器人在工业和医疗领域具有巨大的应用潜力^[1]。

软机器人在感知物体形状方面十分重要,采用的传感器主要包括:激光传感器、电容式触觉传感器和压阻式触觉传感器等,但这些传感器在应用中存在若干问题。

收稿日期:2021-08-14 Received Date: 2021-08-14

* 基金项目:安徽省科技重大专项(201903a05020029)资助

激光传感器可以实现无接触远距离测量^[2],但在恶劣环境下无法应用。现有的压阻式、电容式^[3-4]传感器与柔性材料的相容性差,难以进行准确探测。因此,为了适应复杂恶劣的环境并与柔性材料兼容,需要研究有效的柔性传感方法。

光纤传感器具有体积小、重量轻、结构简单、灵敏度高、响应速度快的优点,且在恶劣环境下具有诸如敏感和抗干扰能力强等特性,因此,光纤分布式传感器在软机器人上具有应用前景。为了保证光纤光栅的稳定性和使用寿命,在实际使用过程中,需要对光纤光栅进行特殊的封装形式。目前应用较为广泛的封装方式包括:基片式封装^[5]、金属管式封装^[6]、聚合物封装等^[7]。对光纤光栅进行不同程度的封装有利于提高传感器的灵敏度和抗剪切能力,也对光纤光栅起到很好的保护作用。张雄雄等^[8]将FBG封装在硅胶基体中,并将硅胶基体与聚氯乙烯薄片贴合形成柔性硅胶曲率传感器。许会超等^[9]提出了一种基于光纤布拉格光栅的柔性触觉传感器,该传感器采用3×3FBG阵列作为柔性传感元件,聚二甲基硅氧烷(PDMS)材料构成双层柔性基体。光纤光栅在机器人手臂应用方面较为广泛,Sareh等^[10]介绍了一种用于软机器人手臂的姿势感应系统,该系统集成了一组宏弯拉伸传感器。Zhang等^[11]针对自由度较大的软机器人手臂的形状检测和重构问题,设计了一种分布式光纤光栅传感器阵列,并简化了基于曲率信息和Frenet框架的形状重构算法。赵利明等^[12]建立了光纤触觉传感器三维模型,验证光纤传感方法在仿生柔性触角形状感知的可行性。以上研究为光纤光栅在物体形状感知方面的应用拓宽了基础,但在形状感知过程中传感器弯曲形态的获知方面还欠缺研究。

本文提出并制作了基于PDMS材料作为光纤光栅封装基体的FBG柔性传感器,主要研究光纤光栅中心波长漂移量与传感器因接触物体弯曲而产生的曲率之间的关系,并探究传感器布局对形状重构的影响,为软机器人对复杂物体的形状感知提供基础。

1 光纤传感器的曲率测量原理

根据光纤布拉格光栅(fiber Bragg grating, FBG)的传感理论,FBG传感器弯曲变形使光栅周期发生变化。FBG的反射波长满足以下公式:

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

式中: λ_B 为FBG的中心波长; n_{eff} 为有效折射率; Λ 为光栅周期。FBG传感器受到压缩或拉伸时即仅受到轴向应变 ε 时,FBG的光栅周期会发生变化,导致中心波长发生漂移。假设外界温度恒定不变,中心波长漂移量 $\Delta\lambda$ 与

轴向应变的关系可以表示为:

$$\Delta\lambda = \lambda_B \cdot (1 - P_\varepsilon) \cdot \varepsilon \quad (2)$$

式中: P_ε 为有效弹光系数(0.22)。

设FBG柔性传感器符合理想变形条件。在柔性弯曲变形区内,弯曲内侧受压缩作用变短,而弯曲外侧受拉伸作用变长。在缩短和伸长的两个变形区域之间,有一纤维层的长度始终不变即应变量为0,称之为应变中性层^[13]。设中性层的曲率半径为 R ,当产生形变时,中性层、压缩层和伸长层的变化如图1所示。其中虚线表示中性层, L 为微元长度, ΔL 表示结构微元长度的变化量, θ 表示微元形变时圆弧对应的圆心角。则FBG柔性传感器的弯曲半径、弯曲角度和微元长度之间的关系可以表示为:

$$L = R \cdot \theta \quad (3)$$

则FBG在弯曲状态下有:

$$\begin{cases} L - \Delta L = (R - h/2) \cdot \theta \\ L + \Delta L = (R + h/2) \cdot \theta \\ \varepsilon = \Delta L/L \end{cases} \quad (4)$$

解得上述方程组,可得:

$$k = \frac{1}{R} = \frac{2\varepsilon}{h} \quad (5)$$

式中: k 为弯曲曲率, h 为柔性传感器厚度。由式(4)和(5)可以求出曲率与中心波长偏移量的关系:

$$k = \frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B \cdot (1 - P_\varepsilon) \cdot h} \quad (6)$$

对于FBG柔性传感器而言, $\lambda_B, h, P_\varepsilon$ 均为常量,因此弯曲曲率 k 与波长偏移量 $\Delta\lambda$ 呈线性关系,只要检测FBG柔性传感器测点的中心波长偏移量 $\Delta\lambda$ 即可获得曲率 k 的大小,为基于曲率信息的平面旋转坐标算法提供理论基础。

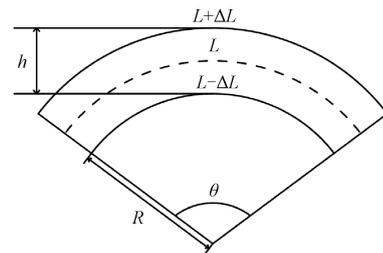


图1 传感器弯曲状态

Fig. 1 Bending status of the sensor

2 平面坐标旋转算法

由于FBG传感器测量的曲率数据是离散的,可以采用插值算法获得连续曲率,然后根据曲率数据重建模型的弯曲曲线。本文以平面坐标旋转理论为基础,结合曲线曲率与弧长等几何关系,对求得的坐标进

行几何递推^[14],得到整条曲线多点的坐标值,再将坐标点依次连接得到整条连续的曲线,从而实现变形曲线的重构。

图 2 是曲线重构原理,首先建立初始固定坐标系 $X-Z$, O 是原点, X 轴指向曲线在原点弯曲的切线方向, Z 轴与 X 轴垂直,然后在曲线上选取多个等弧长的点作为每个运动坐标系的原点,每个运动坐标系的 X 轴均是指向曲线在该原点的切线方向,由于每段弧长很短,可以假定弧段为圆弧段,因此可计算出下一个点在该运动坐标系的相对坐标值,再通过旋转坐标矩阵将运动坐标系顺时针旋转 θ 角度得到该点的固定坐标系,即可计算得到下一个点在固定坐标系的绝对坐标:

$$R = \frac{k_1 + k_2}{2k_1k_2} \quad (7)$$

$$\alpha = \frac{s}{R} \quad (8)$$

$$\begin{cases} x = R\sin\alpha \\ z = R(1 - \cos\alpha) \end{cases} \quad (9)$$

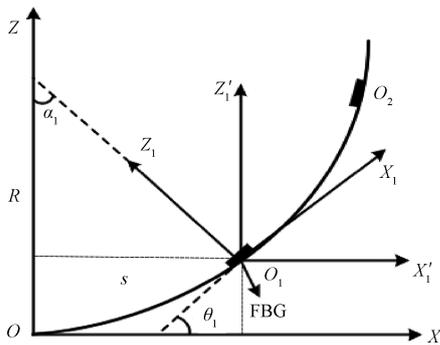


图 2 形状重构原理

Fig. 2 Schematic of shape reconstruction

以 O_1O_2 点为例,式(7)中 R 为圆弧半径, k_1 、 k_2 表示两点的曲率,式(8)中 α 是圆弧的圆心角,根据几何关系列出式(9),其中 x 、 z 表示 O_2 点在运动坐标系 X_1-Z_1 中的相对坐标值。

$$\theta = \int_0^s k(s) ds \quad (10)$$

$$\begin{cases} X = x\sin\theta - z\cos\theta \\ Z = x\cos\theta + z\sin\theta \end{cases} \quad (11)$$

式(10)中 θ 表示点 O_1 处的切线与 X 轴之间的角度, $k(s)$ 是曲率的函数;式(11)中 X 、 Z 是根据坐标旋转公式计算 O_2 点在固定坐标系 $X'-Z'$ 的绝对坐标值。重复以上计算步骤得出多个在初始固定坐标系 $X-Z$ 中的绝对坐标,在 MATLAB 中将这离散点通过直线连接,即可重构出弯曲曲线。

3 有限元结构仿真与分析

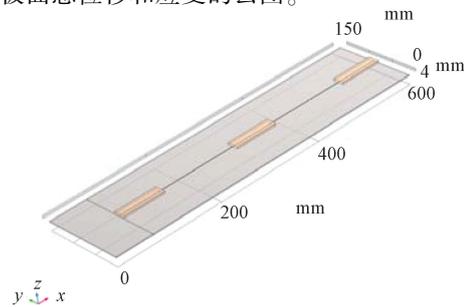
采用 COMSOL 仿真软件验证平面坐标旋转算法的准确性。在 COMSOL 的物理场选择固体力学模块并设置稳态求解,绘制几何模型如图 3(a),设置铝合金板的尺寸为 $600\text{ mm} \times 150\text{ mm} \times 2\text{ mm}$,光纤纤芯与包层外径为 0.125 mm ,封装硅胶的尺寸为 $80\text{ mm} \times 20\text{ mm} \times 4\text{ mm}$,其材料参数如表 1 所示。

表 1 光纤与硅胶的材料参数

Table 1 Material parameters of optical fibre and silicone

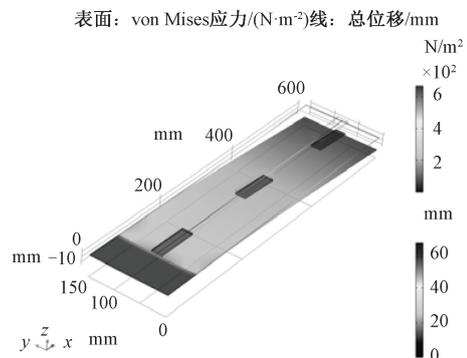
材料名称	弹性模量 /GPa	泊松比	密度 /($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)
铝合金板	71	0.3	2 750
裸光纤	72	0.17	2 203
硅胶	0.01	0.48	1 084

对铝合金板左端长 70 mm 区域进行固定约束,右端进行边界载荷使板面发生向下弯曲,再对模型进行网格划分,因模型相对简单,选择物理场划分即可。全部构建完成进行仿真研究,图 3(b)是结构受力变形图,右边分别表示板面总位移和应变的云图。



(a) 几何模型

(a) Geometrical model

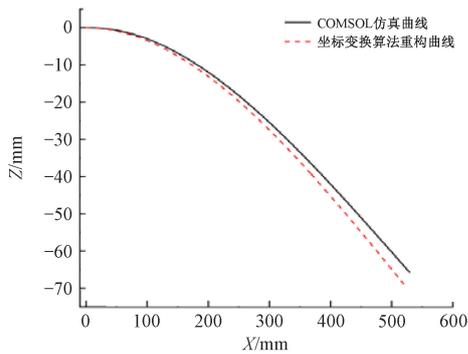


(b) 结构受力变形图

(b) Diagram of structural force deformation

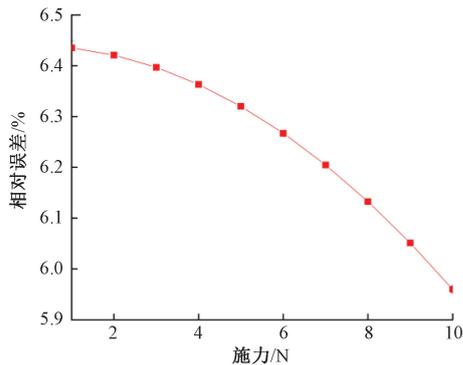
图 3 COMSOL 中铝合金板的几何模型和受力变形图
Fig. 3 Geometric model and force deformation diagram of the aluminium alloy plate in COMSOL

根据选用铝合金板的尺寸,仿真使用3个FBG柔性传感器均等分布在铝合金板中间位置,其中每个传感器间隔为225 mm。如图4(a)所示是在铝合金板一端施加10 N的边界载荷时重构形状,图4(b)表示施加1~10 N的边界载荷重构形状与真实形状的相对误差,其中施加边界载荷越大相对误差越小,最大相对误差为6.435 0%,由此验证平面坐标旋转算法的准确性。



(a) 施加10 N边界载荷时的仿真变形与重构变形的对比

(a) Simulated deformation versus reconstructed deformation with the applied 10 N boundary load



(b) 在施加边界载荷1~10 N的情况下重构形状与仿真形状的相对误差

(b) Relative error between reconstructed and simulated shapes with applied boundary load of 1~10 N

图4 使用3个FBG柔性传感器形变对比图与相对误差

Fig. 4 Comparison chart of deformation and relative errors using 3 FBG flexible sensors

4 实验结果与分析

4.1 FBG柔性传感器的制备与标定

本文采用PDMS对光纤光栅进行埋入式封装,由于板结构长度为600 mm,基于前期COMSOL的仿真分析,及考虑到传感器的成本及安装难度,制备了4个相同尺寸的FBG柔性传感器,半埋入长度大于40 mm可忽略涂层与硅胶之间的相对滑移^[15],因此本文封装尺寸为

80 mm×20 mm×4 mm,4个FBG柔性传感器FBG1、FBG2、FBG3和FBG4中心波长分别为1 549.94、1 544.93、1 545.90和1 554.90 nm。

如图5所示是FBG柔性传感器曲率标定装置,环境温度恒定在24℃,依次对4个传感器进行曲率标定实验,分别在0、3.61、5.13、6.30、7.31和8.20 m⁻¹的6个不同弯曲曲率下进行。为了减小误差的影响,每个FBG在同一曲率标定4次,并取中心波长偏移量的平均值作为该曲率下的标定数据。图6是4个FBG柔性传感器在不同曲率下的波长偏移。

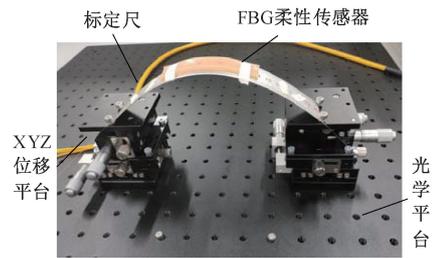
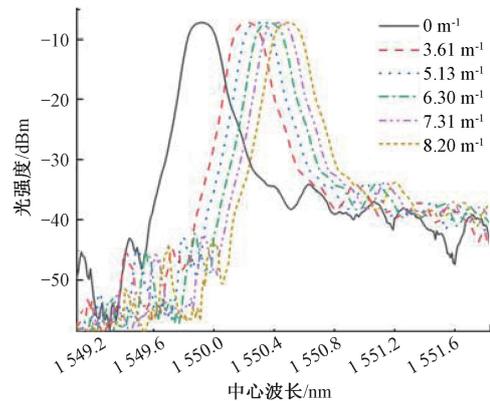


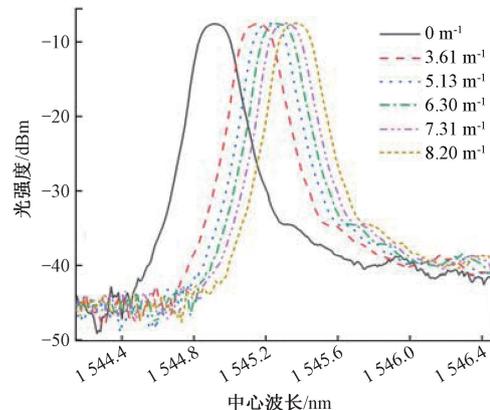
图5 FBG柔性传感器实物图与曲率标定装置

Fig. 5 Physical view of FBG flexible sensor with curvature calibration device



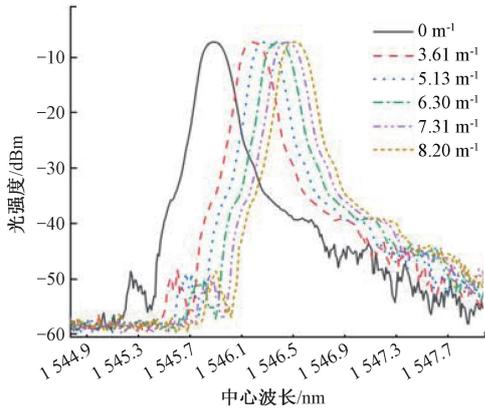
(a) FBG1波长偏移

(a) FBG1 wavelength shift

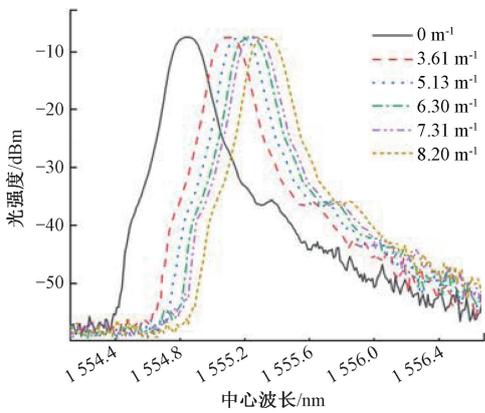


(b) FBG2波长偏移

(b) FBG2 wavelength shift



(c) FBG3 波长偏移
(c) FBG3 wavelength shift



(d) FBG4 波长偏移
(d) FBG4 wavelength shift

图 6 4 个 FBG 在不同曲率下的中心波长偏移
Fig. 6 Central wavelength shift of the four FBGs at different curvatures

计算每个测量点在不同曲率的波长变化量,利用最小二乘法进行线性拟合,图 7 表示 4 个 FBG 柔性传感器的波长偏移量与曲率的关系,4 个 FBG 的确定系数 R^2 分别为 0.996 0、0.996 2、0.997 6 和 0.995 6,拟合效果较好,如表 2 所示是 4 个 FBG 的总波长偏移和平均灵敏度。

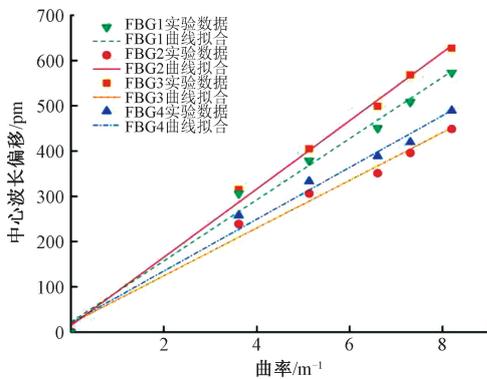


图 7 4 个 FBG 的中心波长偏移与弯曲曲率的关系
Fig. 7 Central wavelength offset versus bending curvature for four FBGs

表 2 4 个 FBG 的总波长偏移和平均灵敏度
Table 2 Total wavelength offset and average sensitivity of four FBGs

	总波长偏移/nm	平均灵敏度/(pm/m^{-1})
FBG1	0.570 4	68.583 5
FBG2	0.474 8	57.664 0
FBG3	0.604 3	71.978 1
FBG4	0.506 5	61.711 5

4.2 实验系统

本文搭建了如图 8 所示的实验系统,选用 $600 \text{ mm} \times 150 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$ 的铝合金板使一端固定在铁架上,将 FBG 柔性传感器规律的分布在板面中间,在板的另一端施加不同重量的砝码使其产生形变,利用激光位移传感器测量铝合金板末端位移以及记录铝合金板弯曲实物图,作为实际形状,同时将测量的数据导入 MATLAB 中利用平面旋转坐标算法重构弯曲形状,将两者进行对比,分析算法重构的精度。如图 9 所示,分别是铝合金板一端施加 500 g 与 1 000 g 重量的弯曲实物图与重构图重叠。

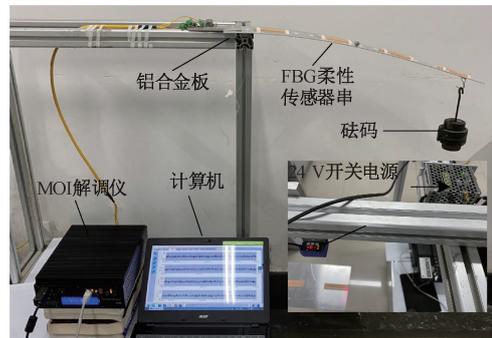
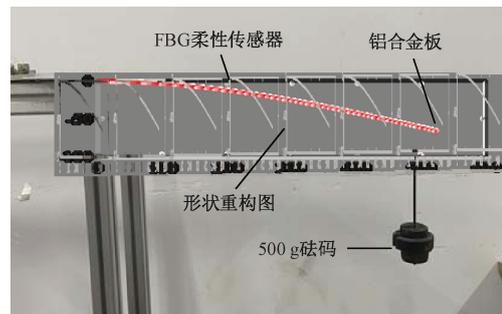
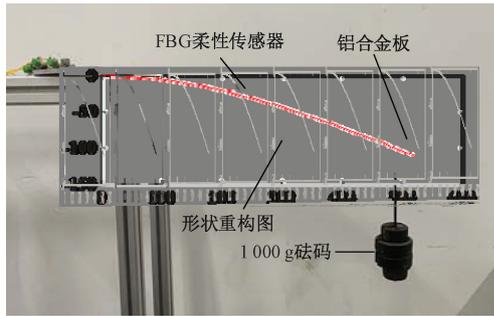


图 8 FBG 柔性传感器形状重构实验
Fig. 8 Experimental system of FBG flexible sensor shape reconstruction



(a) 施加 500 g 重量
(a) Applied 500 g weight



(b) 施加1 000 g重量
(b) Applied 1 000 g weight

图9 弯曲实物图与重构图重叠

Fig. 9 Bending of the physical drawing overlaid with the reconstructed drawing

4.3 均等分布传感器

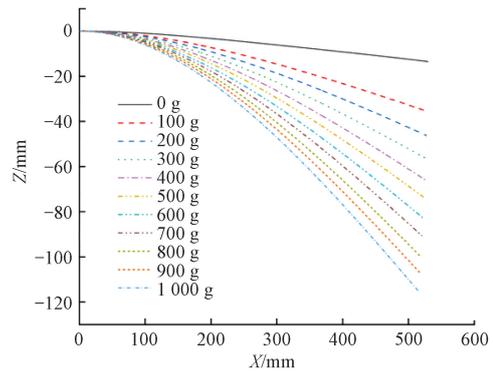
在铝合金板面均等分布3个FBG柔性传感器,每个传感器间隔225 mm,将铝合金板一端固定,另一端从无施加到施加10个不同重量的砝码,分别为100、200、300、400、500、600、700、800、900和1 000 g,表3是测量11个不同重量下铝合金板末端位移,在不同重量下板截面的弯曲程度不同,图10(a)所示是重构出的板截面,图10(b)所示是重构结果的相对误差折线图,最大相对误差为-12.16%,最小相对误差为-6.12%。

表3 11个不同重量铝合金板末端位移

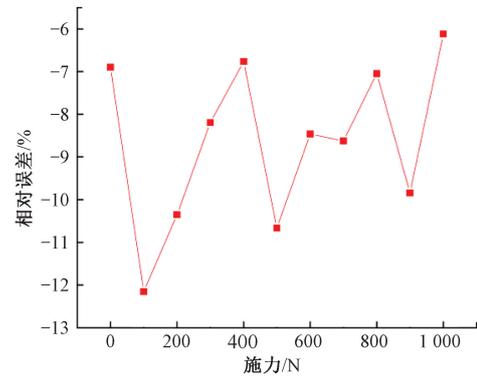
Table 3 End displacement of ten aluminium alloy plates of different weights

重量/g	末端位移/mm
0	21.5
100	40.5
200	51.6
300	61.4
400	70.6
500	82.5
600	90.4
700	99.2
800	107.4
900	118.5
1 000	122.5

在铝合金板面均等分布4个FBG柔性传感器,每个传感器间隔150 mm,如图11(a)是由4个柔性FBG



(a) 板截面形状重建
(a) Plate section shape reconstruction

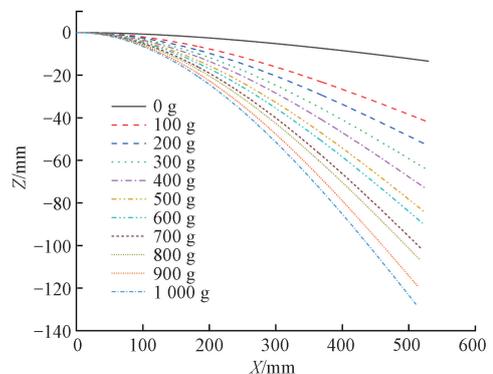


(b) 相对误差
(b) Relative error

图10 3个FBG的铝合金板末端施加不同重量的截面形状重构和相对误差

Fig. 10 Reconstruction of cross-sectional shape and relative error in applying different weights to the end of the aluminium alloy plate using three FBGs

传感器重构出的板截面,图11(b)是重构结果的相对误差折线图,最大相对误差为4.17%,最小相对误差为-0.48%。由实验结果可知,使用4个传感器重构的结果效果更好。



(a) 板截面形状重建
(a) Plate section shape reconstruction

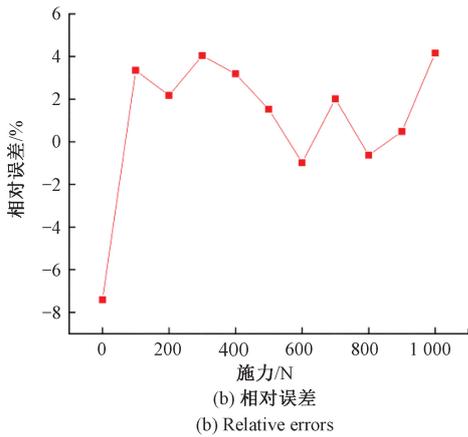


图 11 4 个 FBG 的铝合金板末端施加不同重量的截面形状重构和相对误差

Fig. 11 Reconfiguration of cross-sectional shape and relative errors in applying different weights to the end of the aluminium alloy plate using four FBGs

4.4 不均等分布传感器

在铝合金板面不均等分布 4 个传感器如图 12 所示, 分布方式如表 4 所示。

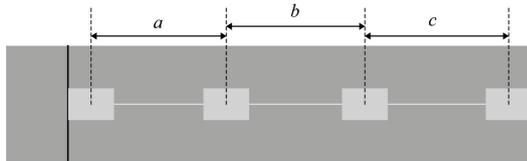


图 12 铝合金板分布 4 个传感器

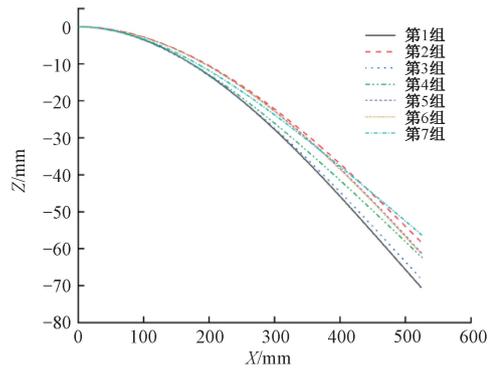
Fig. 12 Distribution of 4 sensors in the aluminium plate

表 4 4 个传感器不同间隔分布方式

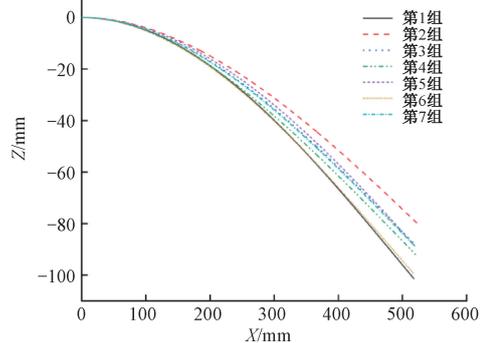
Table 4 Different spacing distribution of four sensors

	mm		
	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>
第 1 组	90	100	260
第 2 组	110	120	220
第 3 组	130	140	180
第 4 组	150	150	150
第 5 组	180	140	130
第 6 组	220	120	110
第 7 组	260	100	90

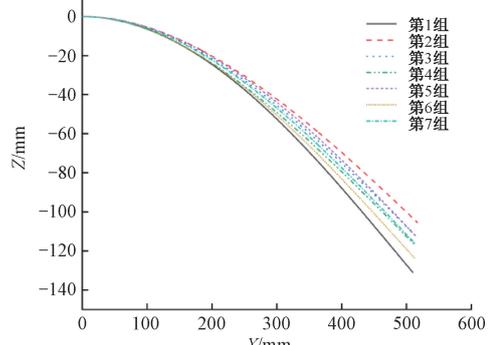
每组施加不同重量的砝码分别为 200、500、800 和 1 000 g, 如图 13 分别为相同重量不同分布的板截面形状重构图, 如图 14 是对应的相对误差条形图, 在第 4 组和第 7 组分布方式的相对误差较小, 重构效果较好, 且在第 7 组的相对误差都是最小, 分别为 6.22%、-1.01%、-2.52% 和 -3.22%。



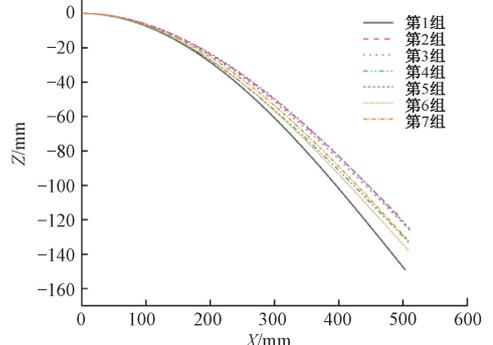
(a) 200 g different distribution reconfiguration charts



(b) 500 g different distribution reconfiguration charts



(c) 800 g different distribution reconfiguration charts



(d) 1 000 g different distribution reconfiguration charts

图 13 相同重量不同分布重构截面图

Fig. 13 Reconstructed cross section of the same weight with different distribution

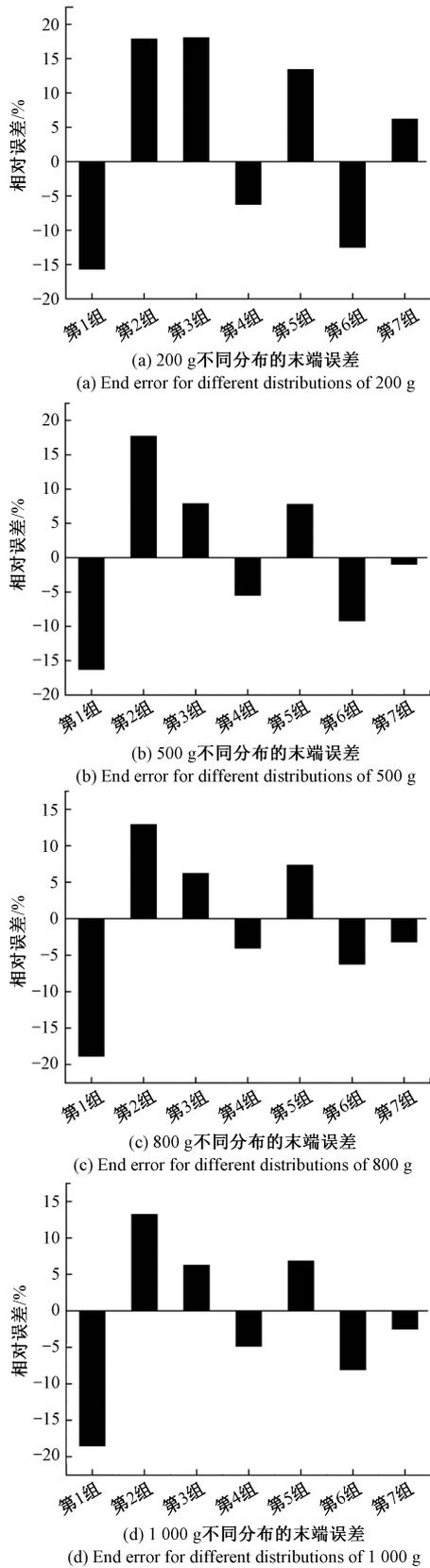


图 14 相同重量不同分布对应的相对误差
Fig. 14 Relative error of different distributions corresponding to the same weight

5 结 论

本文通过对光纤光栅的传感与测量原理的理论分析,利用 PDMS 材料对 FBG 传感器进行封装制作成柔性传感器,通过曲率与中心波长偏移的关系对 FBG 柔性传感器进行曲率标定,为了检测传感器在实际应用中的灵敏度和精度,利用平面旋转坐标算法重构铝合金板截面变形形状。先采用 COMSOL 仿真软件验证算法得到准确性,再搭建相应的实验平台,结果表明,均等分布 4 个 FBG 柔性传感器,重构的最大误差为 4.17%,最小相对误差为-0.48%,而均等分布 3 个传感器重构最大相对误差为-12.16%,最小相对误差为-6.12%,相比实验结果,使用 4 个 FBG 传感器的重构效果更好,因此,在 7 组不均等分布时选择 4 个 FBG 传感器,并在铝合金板一端分别施加 200、500、800 和 1 000 g 砝码的重量,在间隔为 150、150、150 mm 和 260、100、90 mm 的分布方式相对误差小,重构效果较好,且在第 7 组相对误差都是最小,分别为 6.22%、-1.01%、-2.52% 和 -3.22%。本文仅在铝合金板面做实验,没有讨论在不同物体上的情况,因此后续将继续探究更为复杂的物体形状重构实验。

参考文献

- [1] MIRIYEV A, STACK K, LIPSON H. Soft material for soft actuators [J]. *Nature Communications*, 2017, 8(1):1-8.
- [2] 高天禹, 马雨婷, 韩成哲, 等. 基于激光测距与单目视觉的微型无人机室内目标人物搜索方法研究[J]. *中国科学:技术科学*, 2020, 50(7):971-982.
GAO T Y, MA Y T, HAN CH ZH, et al. Research on indoor target character search method of micro UAV based on laser ranging and monocular vision [J]. *China Science: Technical Science*, 2020, 50(7):971-982.
- [3] 郭茹月, 鲍艳. 二维导电材料/柔性聚合物复合材料基可穿戴压阻式应变传感器的研究进展[J/OL]. *精细化工*: 1-17 [2021-03-31]. <https://doi.org/10.13550/j.jxhg.20200847>.
GUO R Y, BAO Y. Research progress of two-dimensional conductive material/flexible polymer composite based wearable piezoresistive strain sensors [J/OL]. *Fine Chemicals*: 1-17 [2021-03-31]. <https://doi.org/10.13550/j.jxhg.20200847>.
- [4] 许德成, 郭小辉. 电容式滑觉传感器设计与应用[J]. *传感器与微系统*, 2015, 34(11):85-88.
XU D CH, GUO X H. Design and application of capacitive slip sensing sensors [J]. *Sensors and Microsystems*, 2015, 34(11):85-88.
- [5] 于秀娟, 余有龙, 张敏, 等. 铜片封装光纤光栅传感器

- 的应变和温度传感特性研究[J]. 光子学报, 2006(9): 1325-1328.
- YU X J, YU Y L, ZHANG M, et al. Strain and temperature sensing characteristics of copper encapsulated fiber grating sensors [J]. Journal of Photonics, 2006(9): 1325-1328.
- [6] 董新永, 温午麒, 魏玉花, 等. 光纤布喇格光栅的金属管封装与电调谐[J]. 光子学报, 2001(4): 422-424.
- DONG X Y, WEN W Q, WEI Y H, et al. Metal tube encapsulation and electrical tuning of fiber Bragg gratings[J]. Journal of Photonics, 2001(4): 422-424.
- [7] 赵浩成, 梁芳楠, 刘茜秀, 等. 应用于聚合物复合弹性体柔性封装的阳极键合[J]. 复合材料学报, 2021, 38(1): 111-119.
- ZHAO H CH, LIANG F N, LIU X X, et al. Anodic bonding applied to flexible packaging of polymer composite elastomers [J]. Journal of Composites, 2021, 38(1): 111-119.
- [8] 张雄雄, 宋言明, 孙广开, 等. 柔性复合基体光纤布拉格光栅曲率传感器[J]. 红外与激光工程, 2019, 48(2): 206-212.
- ZHANG X X, SONG Y M, SUN G K, et al. Flexible composite substrate fiber Bragg grating curvature sensor[J]. Infrared and Laser Engineering, 2019, 48(2): 206-212.
- [9] 许会超, 苗新刚, 汪苏. 基于 FBG 的机器人柔性触觉传感器[J]. 机器人, 2018, 40(5): 634-639, 722.
- XU H CH, MIAO X G, WANG S. A flexible tactile sensor for robot based on FBG [J]. Robotics, 2018, 40(5): 634-639, 722.
- [10] SAREH S, NOH Y, LI M, et al. Macrobend optical sensing for pose measurement in soft robot arms [J]. Smart Materials and Structures, 2015, 24(12): 125024.
- [11] ZHANG Z, WANG X, WANG S, et al. Shape detection and reconstruction of soft robotic arm based on fiber bragg grating sensor array [C]. 2018 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO), IEEE, 2018: 978-982.
- [12] 赵利明, 董明利, 李红, 等. 仿生柔性触角形状感知光纤传感方法研究 [J]. 激光与红外, 2018, 48(4): 509-514.
- ZHAO L M, DONG M L, LI H, et al. Research on bionic flexible tentacle shape sensing fiber optic sensing method [J]. Laser and Infrared, 2018, 48(4): 509-514.
- [13] 曲道明, 孙广开, 孟凡勇, 等. 光纤植入聚酰亚胺薄膜柔性曲率传感器 [J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(1): 109-116.
- QU D M, SUN G K, MENG F Y, et al. Fiber-implanted polyimide film flexible curvature sensor [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(1): 109-116.
- [14] ZHUANG W, SUN G, LI H, et al. FBG based shape sensing of a silicone octopus tentacle model for soft robotics [J]. Optik, 2018, 165: 7-15.
- [15] 葛子阳, 王彦, 秦楠, 等. 正向压力下 FBG 柔性传感器界面滑移的应变误差分析 [J]. 光子学报, 2020, 49(10): 43-51.
- GE Z Y, WANG Y, QIN N, et al. Strain error analysis of FBG flexible sensor interface slip under forward pressure [J]. Journal of Photonics, 2020, 49(10): 43-51.

作者简介



王彦(通信作者), 分别在 1997 年和 2002 年于安徽工业大学获得学士学位和硕士学位, 2008 年于南京航空航天大学获得博士学位, 现为安徽工业大学教授, 主要研究方向为智能监测与控制, 光纤传感。

E-mail: wangyan@ahut.edu.cn

Wang Yan (Corresponding author) received her B.Sc. degree and M.Sc. degree both from Anhui University of Technology in 1997 and 2002, and received her Ph.D. degree from Nanjing University of Aeronautics and Astronautics in 2008. She is currently a professor at Anhui University of Technology. Her main research interests include smart monitor and control and optical fiber sensor.