光电技术及应用

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2023091802

基于角度偏差自校正的光纤形状传感结构设计

王春霞[1]，刘云朋[2*]

（焦作大学 1. 机电工程学院；2. 人工智能学院，河南 焦作 454000）

摘　要： 光纤形状传感中FBG的放置角度误差会影响曲率的计算精度，从而增大形状反演的误差。为了实现传感胶棒的角度自校正，设计了一种自校正形状传感结构，在传感胶棒的感知截面上布设9个FBG，以120°等角度间隔作为基准位置，分别提取±10°位置上的应变，从而实现FBG响应与角度偏差的函数映射。提出了一种基于角度偏差自校正算法，通过适应度函数完成对传感参量α与k的阈值优化，实现任意角度偏差的自校正。仿真分析不同α与k条件下的响应关系，发现α具有很好的线性变化特性，k仅随主敏感FBG波动的特性。在单截面实验中，加载0～100 N应力变化后，9个FBG的平均响应度介于[－1.012 με/N，0.987 με/N]之间。响应度的正负可以表征弯曲方向，相邻FBG的响应也具有很好的线性度。在组合截面实验中，根据反演结果重建传感胶棒三维结构，输出各点位坐标和应力值信息。

关键词： 光纤形状传感；自校准；角度偏差；传感胶棒；组合探测

中图分类号： TP212.14　**文章编号：** 1001－5868(2024)01－0130－07

Design of Fiber Shape Sensing Structure and Angle Deviation Self-correction Algorithm

WANG Chunxia[1], LIU Yunpeng[2]

(1. Collage of Mechanical and Electrical Engineering; 2. Collage of Artificial Intelligence, Jiaozuo University, Jiaozuo 454000, CHN)

Abstract: The error in placement angle of the fiber Bragg grating (FBG) in fiber optic shape sensing can affect the accuracy of curvature calculation, thereby increasing the error of shape inversion. To achieve self-correction of the angle of the sensing rubber rod, a self-correction shape sensing structure was designed. Nine FBGs were deployed on the sensing cross-section of the sensing rubber rod, with equal angle intervals of 120° as the reference positions, and strains were extracted at ±10° positions, thereby completing the functional mapping of the FBG response and angle deviation. A self-correction algorithm based on angle deviation is proposed, which optimizes the threshold of sensing parameters α and k through the fitness function to achieve self-correction of any angle deviation. A simulation analysis of the response relationship under different α and k conditions revealed that α had good linear variation characteristics, and k only fluctuated with the main sensitive FBG. In the single section experiment, the average response of the nine FBGs was between [－1.012 με/N, 0.987 με/N] after loading 0～100 N stress changes. The positive or negative response characterized the bending direction, and the responses of adjacent FBGs had good linearity. In the composite cross-section experiment, the three-dimensional structure of the sensing rubber rod was reconstructed based on the inversion results, and the coordinates and stress values of each point were output.

收稿日期：2023－09－18.

基金项目：河南省科技计划项目(232400411191).

* **通信作者：**刘云朋

Key words：fiber optic shape sensing；self calibration；angular deviation；sensing rubber rod；combination detection

0　引言

基于形状传感的状态监测与智能控制在航空航天[1]、生物医学[2]以及智能制造[3]等领域有着广阔的应用前景。传统的形状传感器主要采用电阻率传感器和 MEMS(Microelectro Mechanical Systems)传感器[4]。电阻率传感器价格便宜，易于实现，但体积大，测试精度低，仅适用于一些低端工业产品中。虽然 MEMS 传感器可以制作得很小，实现高精度检测，但电控类传感器的传感单元都是有源控制的，容易受到电磁干扰，并且环境适应性相对较差，例如潮湿环境易导致其短路、腐蚀等。相反，光纤传感技术具有抗电磁干扰、耐腐蚀、成本低等特点，基于此的形状传感设计也成为了一个研究热点。

将具有感知能力的光纤布拉格光栅(Fiber Bragg Grating，FBG)[5-8]刻制在多根光纤上，并按照一定的空间位置布设在待测体上，构成光纤三维位置检测系统。Bernini 等[9]采用光纤传感测试了长度为 2 m 的管道形状，其测试结果的角度误差为 36%，精度较低。Kim 等[10]对同一测试位置的曲率进行多次测量取均值，再由校准矩阵完成形状误差修正，其测试精度提升了约 20%，但该系统需要进行预标定，这限制了其应用范围。吕家豪等[11]通过在曲率标定函数模型中引入曲率修正参数，降低了曲率反演的误差。但由于实际布设 FBG 的误差并不属于模型误差，所以该方法无法提高弯曲方向对应的测试精度。随着光纤制作工艺技术的提高，一些研究工作者采用多芯光纤完成形状传感，例如美国 TSSC 公司的 Pathfinder 等。尹国路等[12]采用三根刻制 FBG 的光纤获得曲率数据，完成了对目标穿刺位置形状的三维重构。Khan 等[13]利用多芯结构测量导管姿态，然后通过反演应变分布计算目标位置的曲率值，从而实现了导管位置的重建。付彩玲等[14]总结了瑞利散射的光频域反射技术(OFDR)在形状传感中的应用，其位置分辨精度优于 100 m，但 OFDR 的工作距离较短，测试精度会随测试距离的增加而大幅下降，故限制了其应用领域。李天梁等[15]采用 FBG 与人工智能构建穿刺形状传感器，形状重构误差达 0.84 mm，弯曲方向最大误差 1.02°。尹国路等[16]针对 FBG 形状传感器的残余应力进行测试，实现了 100 με 以下的残余应力干扰，提高了形状重构的数据精度。何超等[17]采用 FBG 阵列结构实现了几十米量级上应力分布与位置偏移的形状重建，末端重建精度达 1.3 mm。

相比传统短距离形状传感而言，基于 FBG 的形状传感也逐渐成为了一项研究热点。现有文献多侧重于提高系统测试精度，相比之下，本文更侧重对基于 FBG 形状传感器的偏差校正，从而提高形状传感的复用度与稳定性。本文采用角度偏差自校正的方法通过仿真分析获得不同角度偏差条件下 FBG 阵列的响应分布特性，再根据标准位置的解算数据进行自适应修正，从而解决不同夹持位置需要重新标定的问题，并将其应用于智能装配系统[18]中的末端位姿传感，使装配体形状特征可应用于装配轨迹自动调校。

1　光纤形状传感器结构设计

传感胶棒与待测体固定在一起，主要有两种固定方式，一种是待测体穿过胶棒内径，外部 FBG 阵列完成对待测体形状变化的实时监测；另一种是待测体与胶棒轴线平行并紧贴固定。分别面向智能装配过程中，小尺寸夹持机械臂与大尺寸对接结构的形状传感应用。由此可知，分布在胶棒上的 FBG 阵列的波长响应可以唯一地表征胶棒的三维形状，从而提供待测体的位姿信息。

为了获取目标柱体的形状变化信息，采用在半径为 r 的传感胶棒上间隔 d 固定 9 个 FBG 传感器。当传感胶棒无外部应力作用时，FBG_1，FBG_4，FBG_7 在同一条直线上，方向与传感胶棒 z 轴平行。FBG_2，FBG_5，FBG_8 和 FBG_3，FBG_6，FBG_9 同理。在界面 A 处建立坐标系 xoy，FBG_1，FBG_2，FBG_3 分别位于传感胶棒外径圆形上的三个点，同时，它们与 x 轴的夹角分别是 0°，120°，240°。传感胶棒以任意位置弯曲，最大弯曲位置在 P 点(设此时曲率为 k)，FBG_1 与 P 点的夹角为 α，整体结构如图 1 所示。当传感胶棒的形状发生变化时，系统可以根据 9 个 FBG 传感器的不同响应关系计算胶棒的偏转角度，从而实现形状传感。

为了给出传感胶棒形状与 FBG 网络的量化模型，首先对界面 A 的应力分布进行分析。则三个测

试点上的应变值[19]可表示为：

$$\begin{cases}\varepsilon_1 = kr\cos(\alpha+\phi_1)\\ \varepsilon_2 = kr\cos(\alpha+\phi_2)\\ \varepsilon_3 = kr\cos(\alpha+\phi_3)\end{cases} \tag{1}$$

其中，k 表示对应 P 点位置上的曲率，r 表示传感胶棒的半径，ϕ_1，ϕ_2，ϕ_3 为 FBG 与 x 轴的角度值，如图 1 中标注所示。每个 FBG 传感器对应的波长响应[20]有：

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = (1-P_e)\Delta\varepsilon + (\alpha_f+\xi_f)\Delta T \tag{2}$$

其中，$\Delta\lambda$ 表示波长变化量，λ 表示初始波长值，P_e 是 FBG 的应变系数，α_f 和 ξ_f 分别是 FBG 的热膨胀系数与热光系数。测试系统中采用额外的 FBG 用于温度补偿，故其温度的影响可以抵消，从而应变可表示为：

$$\Delta\varepsilon = \frac{1}{1-P_e}(\Delta\lambda - C_T\lambda) \tag{3}$$

其中，C_T 为温度补偿系数，为常数。可见，应变可以通过测试波长偏移量计算得到。则将式(3)代入式(1)，可对 k 与 α 进行解算。由于 ε_1，ε_2，ε_3 可以通过计算波长偏移量得到，则用于表征传感胶棒形状的参量 k 与 α 可表示为：

$$k = \frac{1}{3r}\sqrt{[(\varepsilon_1-\varepsilon_2)+(\varepsilon_1-\varepsilon_2)]^2-(\varepsilon_2-\varepsilon_3)^2},$$

$$\alpha = \frac{\sqrt{3}}{2}\tan^{-1}\left(\frac{\varepsilon_2-\varepsilon_3}{2\varepsilon_1-\varepsilon_2-\varepsilon_3}\right) \tag{4}$$

其中，ε_1，ε_2，ε_3 分别是 FBG_1，FBG_2 和 FBG_3 测量的应变值。由此可见，在一个已知 FBG 位置分布的截面上，通过采集 FBG 的波长偏移量可以计算应变值，从而计算传感胶棒任意弹性弯曲的角度分布关系，其中，k 表征弯曲强度，α 表征 xoy 平面的角度。当测试截面的数据叠加后，就可以获得间隔 d 距离的 Q 点截面的弯曲强度与角度关系。以此类推，采用多个探测截面可以重建传感胶棒在三维空间的复杂形状变化关系。在实验中，本文选取 9 个 FBG 传感器完成 3×3 矩阵的空间形状识别。

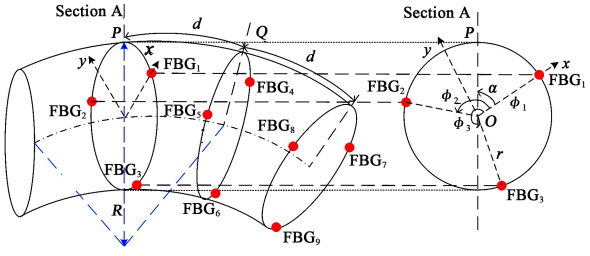


图 1 光纤形状传感器上的 FBG 分布及其角度关系图

2 形状参数自校准算法设计

传感胶棒作为形状传感的载体。当获取相邻两个截面上的 α_1 和 α_2 时，可以通过界面距离 d 计算传感胶棒在 z 轴方向的角度偏移量，从而完成传感胶棒三维形状的演算。首先，将传感胶棒一端固定于测试平台，另一端承载标准重物，并在胶棒顶部的最大形变边界位置放置 FBG_1，设此为 x 轴方向，采用量角器获得 FBG_2 和 FBG_3 的位置并固定剩余 2 个 FBG 传感器。然后，根据标准位置上的应力加载获得 3 个 FBG 的回波响应，以此作为标准值，并交替将 FBG_2 与 FBG_3 放置在胶棒最大形变边界位置上，完成测试数据的对齐，形成标准数据集。最后，对任意方向弯曲的胶棒进行弯曲角度测试，形成测试集。对测试集进行分析，完成标准值逼近的优化。算法步骤如下：

(1)采集各 FBG 传感器的波长偏移数据，导入解调模块后换算得到任意位置上的应变值，以界面 A 为例有 ε_1，ε_2 和 ε_3，作为起始数据；

(2)设置对应界面上 FBG 的角度值，由于以 FBG_1 为 x 轴位置，故 $\theta_1=0°$，而 FBG_2 和 FBG_3 存在一定的安装误差，故采用 $\theta_2=120°\pm\Delta\theta$ 和 $\theta_3=240°\pm\Delta\theta$ 表示，其中，$\Delta\theta$ 是角度校正值；

(3)采用选择、交叉和突变的方式对角度 θ_1，θ_2，θ_3 进行自校准，建立实测应变值 ε_1，ε_2 和 ε_3 与理论应变值 ε'_1，ε'_2 和 ε'_3 之间的函数关系，定义该函数为适应度函数 f，以实际测量应变与理论计算应变的偏差为依据，函数表达有：

$$f = k_i\lg\left(\sum_{i=1}^{3}\sqrt{(\varepsilon_i-\varepsilon'_i)^2}\right) \tag{5}$$

(4)根据实际测试结果对适应度函数中的参数设置进行比较分类，当结果小于阈值时，可以接受并通过拟合输出 k 和 α。如果比较结果大于阈值，则重复步骤(2)至(4)，实现测试值对理论值位置的逼近。整体算法流程如图 2 所示。

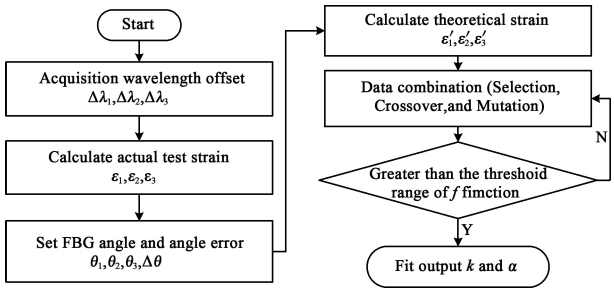
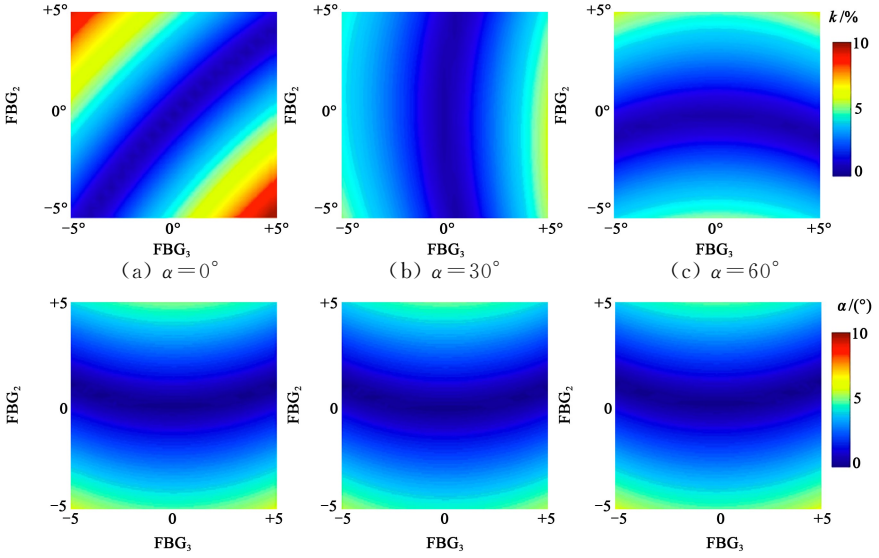


图 2 基于数据组合分析的形状参数自校准算法流程

3　仿真分析

通过对数据组合过程中参数匹配变化的权重调试实现测试应变值与理论应变值之间的适应度函数的仿真分析。在 ANSYS 软件中，将不同 k 值和 α 值作为感知层数据进行遗传迭代，并将角度在 ±5° 偏差范围内的响应结果进行重建，从而获得 FBG 阵列响应与胶棒形状位姿的唯一对应关系及精度。对于 xoy 平面的二维数据而言，种群数设置为 50×50；数据组合中选择参数设置为随机值，突变概率为 0.01，交叉概率为 0.7，迭代次数 500。将以上初始参数代入公式(5)，不同 k 值条件下的 α 值和不同 α 值条件下的 k 值的仿真结果如图 3 所示。



(a) $\alpha=0°$　(b) $\alpha=30°$　(c) $\alpha=60°$

(d) $k=0.01\ m^{-1}$　(e) $k=0.02\ m^{-1}$　(f) $k=0.03\ m^{-1}$

图 3　不同 k 和 α 条件下的 α 和 k 的变化量

图 3(a)，(b)和(c)表示当 α 分别为 0°，30°和 60°时，k 值随 FBG_2 和 FBG_3 装配角度偏差变化的曲率波动变化。三个角度值的选取可以表征整个测试胶棒的角度变化，因为当其达到 90°时，相当于经历一个完整周期，其与 0°的效果一致，故以此三个角度作为 k 值误差波动的仿真范围选取依据。当 $\alpha=0°$ 时，曲率参数波动最大，其边缘处可达 10%，这是由于此时应力方向与 FBG 轴线重合，产生最大曲率位置。由图 3(a)至图 3(c)的变化可以看出，应力施加的角度与曲率误差存在明显的偏转对应关系，这是通过不同 FBG 判别传感胶棒三维形状的依据。从三组仿真结果可以看出，当 FBG_2 与 FBG_3 的放置误差正相关时，k 值均值就可以持续保持在 5.0% 以内。可见，安置 FBG 时，采用以 FBG_1 为标准位置的两次等距安装要优于顺序等距安装的测试效果。

图 3(d)，(e)和(f)表示当 k 分别为 0.01，0.02 和 0.03 m^{-1} 时，α 值随 FBG_2 和 FBG_3 曲率变化的角度偏差波动变化。由三幅图可以看出，角度偏差受 FBG_2 的影响十分明显，而在 FBG_2 曲率不变的条件下，FBG_3 对其影响十分有限。分析认为这是由于最大曲率位置介于 FBG_1 和 FBG_2 所导致的，FBG_3 距离最远，所以响应很弱，由此可知通过任意两组 FBG 的响应就能计算得到应力的作用分区。可见，计算 α 和 k 可以唯一地反演传感胶棒上的应力方向与强度。

4　实验

4.1　单截面角度自校准

实验系统由 BG-ASE 型激光器(扫频范围 1 530～1 560 nm)、光耦合器、9 根 FBG 传感器(中心波长从 1 533 nm 开始，每 2 nm 间隔一个中心波长，有效光栅长度为 2 mm)、FI-202 型光纤解调仪(解调频率为 10 kHz，分辨率为 1 pm)组成。感知胶棒的材质选用聚氨酯，具有较好的弹性与韧性。其长度为 50 cm，直径为 5 cm，泊松比为 0.43，杨氏模量为 426.3 MPa。系统及 FBG 分布如图 4 所示。

采用量角器确定 FBG_1，FBG_2 和 FBG_3 的固定位置，测量最大曲率面(应力施加面)与 FBG_1 的夹角 α。在三个 FBG 的标准位置上 ±10°分别粘贴一

个 FBG，从而得到一个 3×3 的角度铺设误差组合，共计 27 种组合形式。传感胶棒的左侧采用夹持固定的方式，右侧采用可调压力计完成载荷定量增加，其施力范围为 0～100 N，分辨率为 1 N。测试过程中，分别选取 $\alpha_1 \in (0°, 90°)$ 和 $\alpha_2 \in (90°, 180°)$ 两个范围进行测试（分别对应图 4 中红色与绿色），应力从 0 增加至 100 N，每 5 N 记录一次 FBG 的波长偏移变化，测试结果如图 5 所示。

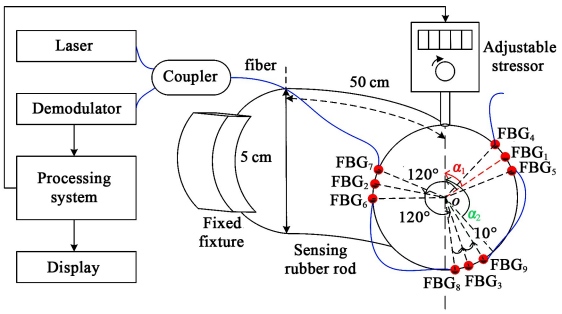
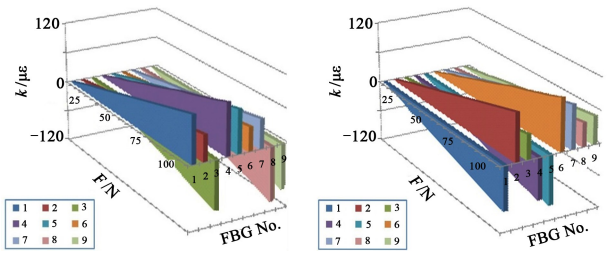


图 4 系统组成及传感胶棒上 FBG 分布



（a）$\alpha=50°$ （b）$\alpha=150°$

图 5 在不同 α 区间中 0～100 N 范围内各 FBG 应变响应值

如图 5(a)所示，当 $\alpha=50°$ 时，FBG_1，FBG_4 和 FBG_5 具有明显的应变响应，其中 FBG_4 最大，100 N 时 k 为 98.5 με，平均响应度为 0.987 με/N。而 FBG_1 与 FBG_5 响应值分别递减，平均响应度分别为 0.903 με/N 和 0.824 με/N。计算可知，三个测试值的衰减程度与其角度值正相关，即 cos 40°，cos 50°和 cos 60°的递降变化。由此证明系统可以采用 FBG_1 的标准位置对布置误差进行修正。该规律在 FBG_2 和 FBG_3 的两组角度偏差同样适用，FBG_2，FBG_6 和 FBG_7 为 0.489 με/N，0.446 με/N 和 0.544 με/N，FBG_3，FBG_8 和 FBG_9 为 −0.906 με/N，−1.012 με/N 和 −0.828 με/N。如图 5(b)所示，当 $\alpha=150°$ 时，FBG_1，FBG_4 和 FBG_5 变成了负向敏感，其平均响应度分别为 −0.819 με/N，−0.758 με/N 和 −0.904 με/N。相反，FBG_3，FBG_8 和 FBG_9 变为了正向敏感，其平均响应度分别为 0.449 με/N，0.429 με/N 和 0.523 με/N。对比两组测试数据的变化可知，当任意应力作用于传感胶棒时，不同的 α 区间将指向不同 FBG 的响应，由此可以根据传感胶棒上响应的 FBG 序号及强度反演准确的 α 和 k，从而给出准确的三维形状。同时，两组测试中所有 FBG 随应力增加的曲线均符合线性递变，故当确定 α 时，k 可以通过初始位置的应力值计算得到。

4.2 组合截面形状反演

完成单截面上对布设误差自校准后，将用于标定计算的 FBG_4－FBG_9 去掉，改为图 1 中 FBG_4－FBG_9 的分布形式，形成在传感胶棒轴心方向上等距排列的组合截面结构，$d=20$ cm。由此在传感胶棒末端施加 0～100 N 的递变应力，将实测数据导入传感胶棒对应点位后重建如图 6 所示。

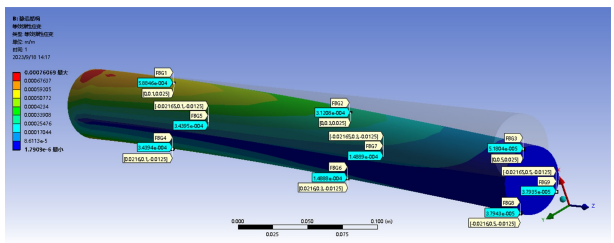


图 6 对应 FBG 应力值及其形状重建

图 6 中 9 个点位的标注从上到下依次是 FBG 序号、应变计算值和反演坐标值。将各 FBG 测试得到的应力值通过反演计算得到对应点位置的曲率，然后重建各个点的三维位置，就可以得到测试点重建的坐标位置。以情况 1 为例，FBG 阵列的响应数据如表 1 所示。

由表 1 可知，对于固定位置外部应力而言，应力递增对应的波长偏移量变化是单调的，正负取决于应力与 FBG 的轴线夹角，在(−90°，+90°)范围内为正向，在(−90°，−180°)和(+90°，+180°)为负向。递增变化程度与角度具有一定的相关度，可以用于对形状角度的识别。FBG_1－FBG_9 的应力值与其反演曲率所计算的坐标如图 6 所示。该测试结果与其理论位置的计算相对误差最大值为 3.56%，最小值为 1.45%，平均误差为 2.31%。可以看出，每间隔长度 d 输出一组单截面角度与曲率，即传感胶棒的轴向分辨率由 FBG 分布间距决定，其可根据实际所测结构而进行调节。

表 1　应力递变条件下各 FBG 的应变响应值

FBG	F/N									
编号	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
1	9.51	18.98	27.32	36.23	45.15	54.06	62.97	71.88	80.79	89.71
2	4.44	9.58	14.36	19.36	23.89	29.29	34.70	39.19	44.26	49.88
3	−8.68	−17.85	−27.68	−36.48	−44.69	−53.68	−62.35	−72.36	−82.36	−92.35
4	10.33	19.57	29.90	39.81	49.25	60.15	69.58	78.15	87.25	98.50
5	8.78	17.59	25.24	33.25	41.04	49.25	57.69	65.27	73.68	81.56
6	4.02	8.65	12.85	16.95	21.66	26.48	31.58	37.58	41.66	45.34
7	4.92	10.62	16.84	21.50	26.58	32.51	38.24	43.44	49.58	55.48
8	−9.54	−19.55	−30.71	−40.65	−50.14	−59.25	−71.25	−80.25	−90.88	−102.36
9	−8.65	−16.75	−25.36	−33.54	−41.36	−48.69	−57.48	−65.77	−74.36	−84.36

5　结论

本文设计了一种基于角度偏差解算的形状参数自校准算法，用于基于 FBG 阵列的圆柱形胶棒结构的形状传感。通过对传感胶棒上 FBG 的分布角度进行标准偏差测试，获取标准位置 5°范围内放置偏差对系统测试结果的响应分布，由此构建了适应度函数并依据适应度参数完成了单截面与组合截面的形状反演实验。实验结果显示，9 个 FBG 的平均响应度均优于±1.012 με/N，其符号可表征弯曲方向，并且相邻 FBG 具有很好的线性度。验证了其可以有效反演待测体形状信息的特性。

参考文献：

[1] Liu Honglin, Zhu Zhengwei, Zheng Yong, et al. Experimental study on an FBG strain sensor[J]. Opt. Fiber Technol., 2018, 40(1): 144-151.

[2] 赵士元，崔继文，陈勐勐. 光纤形状传感技术综述[J]. 光学精密工程，2020，28(1)：10-29.
Zhao Shiyuan, Cui Jiwen, Chen Mengmeng. Review on optical fiber shape sensing technology[J]. Optics and Precision Engineering, 2020, 28(1): 10-29.

[3] Beisenova A, Issatayeva A, Tosi D, et al. Fiber-optic distributed strain sensing needle for real-time guidance in epidural anesthesia[J]. IEEE Sens. J., 2018, 18(19): 8034-8044.

[4] Jin J, Zhang Y, Zhu Y, et al. Analysis and correction method of axial strain error in multi-core fiber shape sensing[J]. IEEE Sens. J., 2020, 20(21): 12716-12722.

[5] 郭永兴，杨跃辉，熊　丽. 双层正交的光纤布拉格光栅柔性形状传感技术[J]. 光学精密工程，2021，29(10)：2306-2315.
Guo Yongxing, Yang Yuehui, Xiong Li. Double-layer orthogonal fiber Bragg gratings flexible shape sensing technology[J]. Optics and Precision Engineering, 2021, 29(10): 2306-2315.

[6] 殷礼鑫，刘智超，刘春辉. 基于 FBG 阵列的曲面结构状态感知系统[J]. 中国激光，2021，48(24)：121-130.
Yin Lixin, Liu Zhichao, Liu Chunhui. Surface structure state perception system based on FBG array[J]. Chinese J. of Lasers, 2021, 48(24): 121-130.

[7] 冯雨钦，王　佩，刘泽华，等. 二维分布式光纤形状传感应变传递研究[J]. 传感器与微系统，2022，41(5)：31-35.
Feng Yuqin, Wang Pei, Liu Zehua, et al. Research on strain transfer of two dimensional distributed optical fiber shape sensor[J]. Transducer and Microsystem Technol., 2022, 41(5): 31-35.

[8] 张冬伟，金　靖，朱云鸿，等. FBG 形状传感器应变传递与传感性能研究[J]. 半导体光电，2020，41(6)：833-838.
Zhang Dongwei, Jin Jing, Zhu Yunhong, et al. Research on strain transmission and sensing performance of FBG shape sensor[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2020, 41(6): 833-838.

[9] Bernini R, Minardo A, Zeni L. Vectorial dislocation monitoring of pipelines by use of Brillouin-based fiber-optics sensors[J]. Smart Mater. Struct., 2008, 17(1): 015006,

[10] Kim J S, Guo J Z, Chatrasingh M, et al. Shape determination during needle insertion with curvature measurements[C]// 2017 IEEE/RSJ Inter. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS), 2017: 201-208.

[11] 吕佳豪，董明利，何彦霖，等. 引入曲率与角度校正的柔性机构三维形状多芯光纤重构方法[J]. 红外与激光工程，2021，50(5)：120-126.
Lv Jiahao, Dong Mingli, He Yanlin, et al. Three-dimensional shape multi-core fiber reconstruction method of flexible mechanism by introducing curvature and angle correction[J]. Infrared and Laser Engineering, 2021, 50(5): 120-126.

[12] 尹国路，徐　州，蒋　锐，等. 基于光频域反射仪的光纤分布式三维形状传感技术[J]. 光学学报，2022，42(1)：0106002.
Yin Guolu, Xu Zhou, Jiang Rui, et al. Optical fiber distributed three-dimensional shape sensing technology based on optical frequency-domain reflectometer[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(1): 0106002.

[13] Khan F, Donder A, Galvan S, et al. Pose measurement of flexible medical instruments using fiber Bragg gratings in multi-core fiber[J]. IEEE Sensors J., 2020, 20(18): 10955-10962.

[14] 付彩玲，彭振威，李朋飞，等. OFDR 分布式光纤温度/应

变/形状传感研究进展[J]. 激光与光电子学进展，2023，60(11)：91-101.

Fu Cailing，Peng Zhenwei，Li Pengfei，et al. Research on distributed fiber temperature/strain/shape sensing based on OFDR[J]. Laser & Optoelectronics Progress，2023，60(11)：91-101.

[15] 李天梁，宋珍珍，陈发银，等. 光纤光栅与人工智能融合的形状自感知穿刺针[J]. 光学精密工程，2023，31(2)：160-167.

Li Tianliang，Song Zhenzhen，Chen Fayin，et al. Fiber Bragg grating and artificial intelligence fusion for shape self-sensing puncture needle[J]. Optics and Precision Engineering，2023，31(2)：160-167.

[16] 尹国路，徐 州，朱 涛. 光纤形状传感器封装过程中残余应力的分布式实时监测[J]. 光学学报，2022，42(16)：22-28.

Yin Guolu，Xu Zhou，Zhu Tao. Distributed real-time monitoring of residual stress during packaging process of optical fiber shape sensor[J]. Acta Optica Sinica，2022，42(16)：22-28.

[17] 何超江，何彦霖，骆 飞，等. 引入应变灵敏度矩阵的探针形状光纤测量方法[J]. 红外与激光工程，2021，50(12)：400-408.

He Chaojiang，He Yanlin，Luo Fei，et al. Needle shape optical fiber measurement method introducing strain sensitivity matrix[J]. Infrared and Laser Engineering，2021，50(12)：400-408.

[18] 王春霞，刘云朋. 基于光纤传感的工业生产线智能装配系统[J]. 红外与激光工程，2022，51(10)：214-219.

Wang Chunxia，Liu Yunpeng. Intelligent assembly system of industrial production line based on optical fiber sensing[J]. Infrared and Laser Engineering，2022，51(10)：214-219.

[19] Henken K，Van Gerwen D，Dankelman J，et al. Accuracy of needle position measurements using fiber Bragg gratings[J]. Minim. Invasive Ther. Allied Technol.，2012，21(6)：408-414.

[20] 王景芝. 基于FBG阵列的滑动探测系统设计[J]. 激光与红外，2020，50(4)：481-485.

Wang Jingzhi. Design of sliding detection system based on FBG array[J]. Laser & Infrared，2020，50(4)：481-485.

作者简介：

王春霞(1980—)，女，河南省温县人，硕士，副教授，研究方向：检测技术与自动化、集成电路设计；

刘云朋(1983—)，男，河南省上蔡县人，硕士，教授，研究方向：计算机技术。