光电技术及应用

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2023062902

基于 WOA 的 FBG 形状传感器铺设角度偏差自矫正模型

尚秋峰[1,2,3]，刘　峰[1*]

（华北电力大学 1. 电子与通信工程系；2. 河北省电力物联网技术重点实验室；
3. 保定市光纤传感与光通信技术重点实验室，河北 保定 071003）

摘　要： FBG 形状传感器的铺设角度偏差导致曲率和挠率测量误差，进而影响形状传感器的重构精度。针对该问题，文章提出了一种基于鲸鱼优化算法（Whale Optimization Algorithm，WOA）的 FBG 铺设角度偏差自矫正模型。重构实验验证了所提方法的有效性，不同形状的远端重构误差分别从 11.66 和 22.6 mm 降低至 5.63 和 10.47 mm，相对误差分别从 2.56％和 4.96％降低至 1.21％和 2.25％，相对误差从 2.56％和 4.96％降低至 0.95％和 2.06％。

关键词： 形状重构；光纤布拉格光栅；误差修正；鲸鱼优化算法

中图分类号： TN253；TH74　**文章编号：** 1001－5868(2023)05－0796－07

Self-Correction Method of FBG Shape Sensor Placement Angle Deviation Based on WOA

SHANG Qiufeng[1,2,3]，LIU Feng[1]

（1. Dept. of Electronic and Communication Engineering；2. Hebei Key Lab. of Power Internet of Things Technology；
3. Baoding Key Lab. of Optical Fiber Sensing and Optical Communication Technology，
North China Electric Power University，Baoding 071003，CHN）

Abstract： The laying angle deviation of FBG shape sensors leads to measurement errors in curvature and torsion，which in turn affects the reconfiguration accuracy of shape sensors. To address this issue，this paper proposes a self-calibration model for FBG laying angle deviation based on whale optimization algorithm（WOA）. The reconfiguration experiment verified the effectiveness of the proposed method. The remote reconfiguration errors of different shapes were reduced from 11.66 and 22.6 mm to 5.63 and 10.47 mm，respectively. The relative errors were reduced from 2.56％ and 4.96％ to 1.21％ and 2.25％，and the relative errors were reduced from 2.56％ and 4.96％ to 0.95％ and 2.06％，respectively.

Key words： shape reconfiguration；FBG；error correction；whale optimization algorithm

0　引言

FBG 形状传感技术利用光纤的小体积和高灵敏度优点，可以将形状传感器直接附着在待测物体表面或者内部，通过形状重构算法实现形状检测的目的[1]。该技术在民用、机械、航空航天、生物和医疗等领域具有巨大的应用潜力。

FBG 形状传感器主要由多芯光纤或多根单模光纤组成，基于曲率测量的 Frenet-Serret 空间微分几何重建算法是目前适用性最广的方法。通过检测特定横截面处 FBG 因轴向应变产生的中心波长漂移，获取各检测点处的弯曲曲率和挠率[2]，最后通过数值积分结合 Frenet-Serret 算法重构物体形状。形状重构时通常存在曲率和挠率的测量误差，该误差主要由 FBG 形状传感器制作过程导致，包括纤芯到中性轴的距离误差[3]、同一截面上 FBG 铺设角度

收稿日期：2023－06－29.
基金项目：河北省自然科学基金项目(E2019502179).
* **通信作者：**刘　峰　**E-mail：** liufeng202204@126.com

误差[4]。对于由单模光纤制备的 FBG 形状传感器，FBG 铺设角度偏差的影响更大[5]。

人们对曲率误差的修正方法进行了广泛的研究。Kim 等[6]通过对同一曲率多次标定取平均值，利用校准矩阵对 FBG 柔性形状传感器进行曲率误差校正，该方法具有较大的随机性且没有考虑到 FBG 铺设角误差的影响，补偿效果不明显。娄小平等[4]通过对自制 FBG 形状传感器的制备和标定过程进行定量分析，确定各个 FBG 的铺设角度偏差对曲率测量误差的影响规律。误差修正过程较为繁琐复杂，主要通过人为方法对实验器材的误差精度进行分析，具有较大的主观性且方法重复性和适用性不够。吕家豪等[7]将曲率修正系数代入曲率标定关系式中，以形状重构误差为评价指标，对曲率标定关系式进行修正，减小曲率测量误差。该方法同样忽视了 FBG 铺设角度对测量曲率的影响。当前的 FBG 铺设角度矫正和曲率误差修正方法主要存在实验复杂度高、重复性较差等问题。

本文基于 Frenet-Serret 框架和误差传递理论，阐述了 FBG 形状传感器测量曲率与 FBG 铺设角偏差之间的关系，提出了一种基于鲸鱼优化算法（Whale Optimization Algorithm，WOA）优化的 FBG 铺设角度偏差自矫正模型，通过实验验证了自矫正模型的可行性和有效性。结果表明，自矫正模型通过修正 FBG 铺设角度偏差，有效提升了形状传感器的重构精度。

1　算法原理

1.1　形状重建理论

Frenet-Serret 方程是 FBG 形状传感器三维形状重构的理论基础，Frenet 标架实际上是一个移动的正交标架，空间曲线一点的 Frenet 标架如图 1 所示[8]。

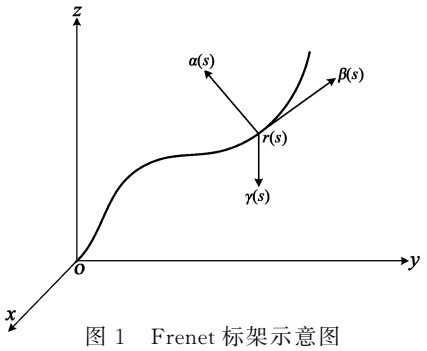


图 1　Frenet 标架示意图

图 1 中，$\boldsymbol{r}(s)$ 表示曲线上 s 点的位置向量，$\boldsymbol{\alpha}(s)$，$\boldsymbol{\beta}(s)$ 和 $\boldsymbol{\gamma}(s)$ 分别表示该点的切向量、法向量和副法向量，三者构成标架正交坐标系统。曲线的切线方向表示曲线的前进方向，法向量方向是曲线弯曲的方向，当曲率是正值时，曲线朝法向量方向移动，副法线的局部运动与曲线的挠率有关[9]。

假设中心曲线表示为单位速度空间曲线，该曲线光滑，沿弧长曲率非零。曲线可以用它本身的曲率 k 和挠率 τ 来重构。设曲线 C 的方程为 $\boldsymbol{r}(s)$。Frenet 标架方程为：

$$\begin{cases} \mathrm{d}\boldsymbol{r}(s)/\mathrm{d}s=\boldsymbol{\alpha}(s) \\ \mathrm{d}\boldsymbol{\alpha}(s)/\mathrm{d}s=k(s)\boldsymbol{\beta}(s) \\ \mathrm{d}\boldsymbol{\beta}(s)/\mathrm{d}s=-k(s)\boldsymbol{\alpha}(s)+\tau(s)\boldsymbol{\gamma}(s) \\ \mathrm{d}\boldsymbol{\gamma}(s)/\mathrm{d}(s)=-\tau(s)\boldsymbol{\beta}(s) \end{cases} \tag{1}$$

式(1)表示的 Frenet-Serret 方程是空间曲线中最重要、最基本的方程。Frenet-Serret 方程描述了空间曲线上每点在空间中的特征，只要已知空间曲线上各点的 $k(s)$ 和 $\tau(s)$，就能利用式(1)重构其形状。

将 FBG 形状传感器的中性轴线近似为一条空间曲线，其形状的重构就可以转化为空间三维曲线的重构问题[4]，根据微分几何思想建立如图 2 所示的运动坐标系。

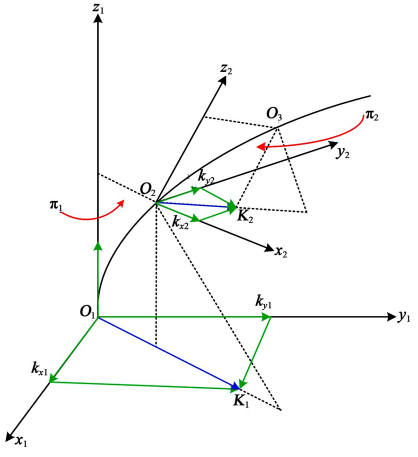


图 2　空间曲线重构示意图

图 2 中，假设 O_1，O_2 和 O_3 分别为空间曲线上沿弯曲方向的三个点，以 O_1 为空间坐标系基点，将曲率看成是与曲线切向量垂直的矢量，以 O_1 点处曲线的切线方向为 z 轴，正交的曲率方向为 x，y 轴。$\boldsymbol{K}_1$ 是正交曲率 $\boldsymbol{k}_{x1}$ 和 $\boldsymbol{k}_{y1}$ 的合成矢量，$\boldsymbol{K}_1$ 与 z 轴构成的面为密切平面 π_1，该圆弧段可看作是密切平面 π_1 上的曲线。以同样的方法在 O_2 点建立运动坐标系，根据 O_2O_3 微弧段弧长和该处的曲率计算出 O_2 点在密切平面 π_1 上的位置，进一步获得其

在固定坐标系中的位置，这样就可以通过在不同密切平面上连接不同半径的微圆弧段而重构出整条空间曲线[7]。

1.2 曲率、挠率的解法

根据 Frenet-Serret 方程和空间曲线的运动坐标系原理，只要已知 FBG 形状传感器上各检测点的曲率 $k(s)$ 和挠率 $\tau(s)$，就能利用式(1)重构传感器形状。FBG 三芯形状传感器结构示意图如图 3 所示，三个 FBG 阵列等角度 120°均匀铺设在基材表面，如图 3(a)所示在检测点截面建立直角坐标系，令各 FBG 相对 x 正半轴的铺设角度为 θ_i。

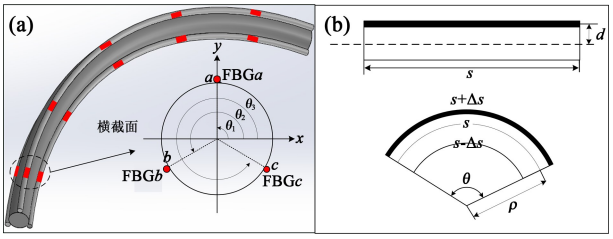


图 3 传感器结构示意图

当形状传感器受力弯曲时，检测点 FBG 因轴向应变 ε 产生中心波长偏移 $\Delta\lambda$。如图 3(b)所示，设 FBG 中心波长为 λ_B，栅区长度为 s，FBG 距中性轴的距离为 d，曲率半径为 ρ，可得到 θ 的表达式为[10-11]：

$$\theta=\frac{s+\Delta s}{\rho+d}=\frac{s}{\rho} \tag{2}$$

根据 FBG 对轴向应变的响应公式解得：

$$\varepsilon=\frac{\Delta s}{s}=\frac{d}{\rho}=kd \tag{3}$$

$$\Delta\lambda=(1-P_e)\lambda_B\varepsilon \tag{4}$$

由式(3)和式(4)推导出检测点 FBG 的感测曲率为[4,10]：

$$k=\frac{2\Delta\lambda}{\lambda_B d(1-P_e)} \tag{5}$$

如图 4 所示，在检测点横截面处建立直角坐标系，规定 FBGa 与中性轴连线作为 y 轴，设检测点各 FBG 的感测曲率为 k_i，得到 $\boldsymbol{k}_x$ 和 $\boldsymbol{k}_y$ 的表达式[4]：

$$\vec{k}_x=\sum_{i=1}^{3}k_i\cos\theta_i x,\vec{k}_y=\sum_{i=1}^{3}k_i\sin\theta_i y \tag{6}$$

此时，检测点弯曲曲率 K 和弯曲方向 β 的表达式如式(7)和(8)所示：

$$K=\sqrt{k_x^2+k_y^2}=\sqrt{\left(\sum_{i=1}^{3}k_i\cos\theta_i\right)^2+\left(\sum_{i=1}^{3}k_i\sin\theta_i\right)^2} \tag{7}$$

$$\beta=\arctan(k_y/k_x)=\arctan\left(\sum_{i=1}^{3}k_i\sin\theta_i\Big/\sum_{i=1}^{3}k_i\cos\theta_i\right) \tag{8}$$

由式(2)～(8)可测得形状传感器检测点的弯曲曲率 K_i 和弯曲方向 β_i，对 K_i 和 β_i 进行插值，可得到一组空间曲线离散点的曲率和挠率信息。进一步对弯曲方向求导即可得到检测点挠率 τ_i，如式(9)所示：

$$\tau_i=\beta_i-\beta_{i-1} \tag{9}$$

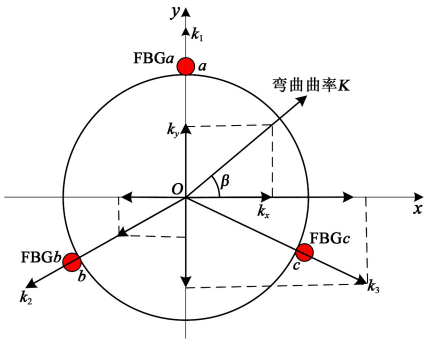


图 4 横截面坐标系

FBG 形状传感器制作时，FBG 通常存在一定的铺设角度偏差，如图 5 所示。

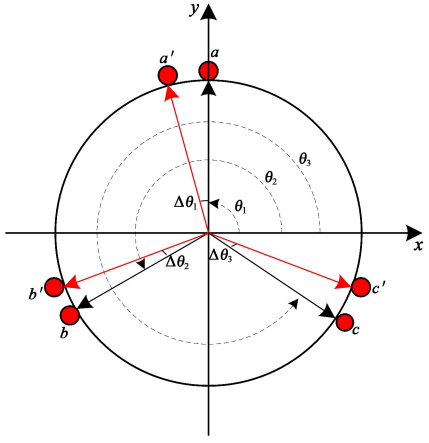


图 5 FBG 铺设角度偏差示意图

FBG 均匀分布时铺设位置为 a 点、b 点和 c 点，此时 FBG 铺设角度 θ_1，θ_2 和 θ_3 分别为 90°，210°和 330°。假设 FBGa，FBGb 和 FBGc 的铺设角度偏差分别为 $\Delta\theta_1$，$\Delta\theta_2$ 和 $\Delta\theta_3$，此时 FBG 实际的铺设位置为 a'，b' 和 c'，不满足均匀铺设条件，利用式(7)～(8)中的计算方法会引入曲率和弯曲方向测量误差[11]，进而导致挠率误差。

将铺设角度偏差代入式(7)～(8)得到检测点曲率和弯曲方向误差修正模型，如式(10)和(11)所示。

$$K=\sqrt{\left(\sum_{i=1}^{3}k_i\cos(\theta_i+\Delta\theta_i)\right)^2+\left(\sum_{i=1}^{3}k_i\sin(\theta_i+\Delta\theta_i)\right)^2} \tag{10}$$

$$\beta=\arctan\left(\sum_{i=1}^{3}k_i\sin(\theta_i+\Delta\theta_i)\Big/\sum_{i=1}^{3}k_i\cos(\theta_i+\Delta\theta_i)\right) \tag{11}$$

2　FBG 铺设角度偏差自矫正模型

由式(8)和(9)可知，检测点曲率和弯曲方向误差修正的前提是确定 FBG 的铺设角度偏差 。本文提出一种基于 WOA 的铺设角度偏差自矫正模型。鲸鱼算法是由 Mirjalili 于 2016 年提出的新型优化算法，模拟生物界座头鲸独特的泡泡网捕猎，通过不断更新迭代座头鲸所处位置寻找猎物，获得最优解，相比 PSO 算法具有寻优精度高、参数少、结构简单等优势[12]。在 WOA 算法中，鲸鱼包围目标猎物时可能并不清楚猎物的实际位置，需要在种群内部不断交流调整，向目标猎物(最优解)移动更新位置，包围捕猎阶段的数学模型如下：

$$D=|CX_{\mathrm{P}}(t)-X(t)| \tag{12}$$

$$X(t+1)=X_{\mathrm{P}}(t)-A.D \tag{13}$$

式中，A 和 C 为向量系数，$X(t)$为当前个体位置，$X_{\mathrm{P}}(t)$为目标个体位置，t 为迭代次数，D 为当前位置距目标位置的距离。A 和 C 数学模型如下：

$$A=2ar_1-a \tag{14}$$

$$C=2r_2 \tag{15}$$

$$a=2-2\frac{t}{\mathrm{Max_iter}} \tag{16}$$

式中，r_1，r_2 为[0,1]之间的随机数，a 为线性收敛因子，Max_iter 为最大迭代次数。气泡网捕食是由鲸鱼发出气泡向猎物不断包围前进，计算出与猎物相差的距离，并以猎物为中心慢慢螺旋逼近猎物(最优解)，更新自身位置，其数学模型为：

$$X(t+1)=D.e^{bl}.\cos(2\pi l)+X_{\mathrm{P}}(t) \tag{17}$$

式中，l 为[−1,1]的任意数，b 为用于规定螺旋形状的常数。鲸鱼完成气泡网捕食和螺旋更新阶段后，便可随机搜寻包围圈内的猎物，当$|A|\geqslant 1$ 时，鲸鱼无法捕捉猎物线索信息，则随机向更远处搜寻猎物，开展全局搜索；当$|A|<1$ 时，开展局部搜索，其数学模型如下：

$$D=|C.X_{\mathrm{rand}}(t)-X(t)| \tag{18}$$

$$X(t+1)=X_{\mathrm{rand}}(t)-A.D \tag{19}$$

构造合适的初始种群和适应度函数是种群优化算法应用的前提，本文将检测点 3 个 FBG 的 $\Delta\theta_i$ 和作为优化参数，对 $\Delta\theta_i$ 随机赋值并编码作为 WOA 的鲸鱼种群。其中单组 $\Delta\theta_i$ 即为单个个体。为了防止算法陷入局部最优，本文引入 Chebyshev 混沌映射初始化种群，提高种群空间均匀分布性[13-14]。其表达式如式(20)所示，式中 $\boldsymbol{x}_t$ 表示[−1,1]范围内生成的 m 维向量，表示初始个体，$\boldsymbol{y}_{t+1}$ 为第 $t+1$ 次映射迭代后初始个体，M 为任意常数。

$$\begin{cases}x_{t+1}=\cos[t.\arccos(x_t)], & -1\leqslant x_t\leqslant 1\\ y_t=x_{t+1}, & t=0,1,2,\cdots,n\\ y_{t+1}=(2/\pi)\arctan[\cos(y_t)]+M, & -1\leqslant x_t\leqslant 1\end{cases} \tag{20}$$

确定好初始种群和待优化参数之后，WOA 通过适应度函数评估种群中个体的适应度。将种群个体(待优化参数 $\Delta\theta_i$)代入式(10)得到不同参数下的测量曲率 K，以测量曲率误差 ΔK 为评价指标构造了式(21)中的多模态适应度函数。式(21)中，K 表示不同铺设角度 $\Delta\theta_i$ 下的测量曲率，K_{true} 表示检测点实际曲率。

$$\Delta K=|K-K_{\mathrm{true}}| \tag{21}$$

适应度函数构造完成后，种群通过包围捕猎、气泡网捕食并螺旋更新和寻找猎物的迭代过程对种群位置进行更新和优化直至找到最佳个体位置。WOA 的搜索行为由概率系数 P 和向量系数 A 控制。在本文中，当适应度函数值 $\Delta K=0$ 时，测量曲率 K 与 $\Delta\theta_i$ 拟合程度最好，最优解中的参数即为检测点 FBG 的铺设偏差角度 $\Delta\theta_i$。

WOA 算法优化步骤如下，优化的详细过程如图 6 所示。

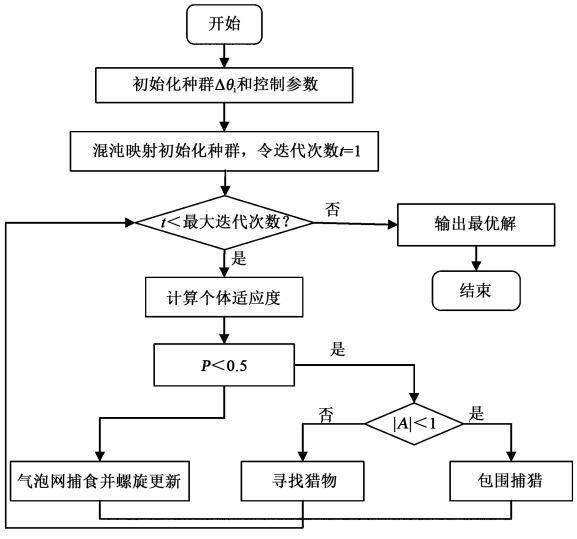


图 6　优化模型流程图

(1)输入固定曲率状态下 FBGa，FBGb 和 FBGc 的感测曲率 k_1，k_2 和 k_3，初始化参数令 $\theta_1=$

$90°$，$\theta_2=210°$，$\theta_3=330°$。

(2)设置输入种群：检测点 FBG 的待优化参数 $\Delta\theta_i$ 在某一范围内被随机赋值并编码，利用 Chebyshev 混沌映射初始化种群。

(3)ARO 优化：通过 ARO 对种群进行优化，包括包围捕猎、气泡网捕食和螺旋更新三个阶段。

(4)公式拟合：根据式(10)对曲率和参数 $\Delta\theta_i$ 进行拟合，得到理论测量曲率。

(5)通过适应度函数比较理论曲率和实际曲率的值，当适应度函数值最小时迭代停止，输出 $\Delta\theta_i$，否则重复步骤(3)～(5)。

3 实验

3.1 实验装置

为了验证误差修正模型的实用性，本文设计了一种 FBG 形状传感器，形状传感器的有效长度为 465 mm。基材采用直径为 1 mm、长度为 517 mm 的镍钛合金丝(Shape Memory Alloys，SMA)，SMA 能够在变形后恢复其原始形状，防止传感光纤长期处于拉伸或者压缩的状态[15-16]。三个 FBG 阵列等间隔分布在基材表面，各 FBG 阵列的参数相同，单个 FBG 阵列直径为 250 μm，栅区长度为 13 mm，等间隔刻有 5 个 FBG，空间分辨率为 100 mm，其中心波长分别为 1 530，1 535，1 540，1 545 和 1 550 nm，复用方式为波分复用，FBG 刻写方式为紫外刻写。FBG 阵列通过环氧树脂粘贴在镍钛合金丝表面[17]。

为了封装 FBG 形状传感器，利用 3D 打印技术设计了基材-光纤夹持装置和标定工具。夹持装置如图 7(a)所示，用以控制 FBG 铺设角度。标定工具如图 7(c)所示，用以控制 FBG 的标定方向。图 7(c)中，组件 1 为长 50 mm、直径 5 mm 的碳钢轴，用于连接组件 2 和组件 3，组件 2 为长 13.5 mm、内径为 5 mm 的六边形轮毂螺母，六边形尺寸与夹持装置一致，用于控制传感器的弯曲方向。组件 3 为直径 10 mm、长度 20 mm 的碳钢轴连接器，该连接器左、右内孔直径分别为 5 和 2 mm，用于连接组件 1，2 和 4。组件 4 为长 50 mm、直径 2 mm 的碳钢轴，用于连接组件 3 和组件 5；组件 5 外尺寸与组件 3 一致，左、右内孔直径分别为 2 和 1 mm，用于连接组件 4 和钛镍合金丝。

首先将 SMA 插入基材-光纤夹持装置，然后利用标定工具将其两端固定，之后从两端穿入 FBG 阵列。基材和 FBG 阵列固定好之后，最中间的光栅位置开始涂胶，当胶水凝固后再将夹持装置向两端滑动，直到涂胶完成，实物如图 7(d)所示。最后取下夹持装置，传感器封装完成。

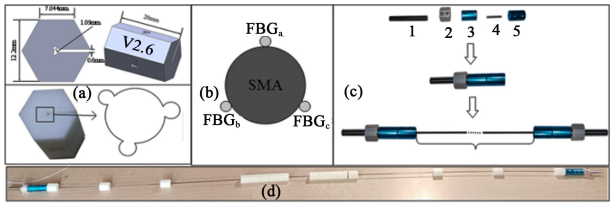


图 7 传感器封装示意图

3.2 FBG 铺设角度偏差矫正

实验构建的 FBG 形状传感解调系统如图 8 所示，整个系统由 FBG 形状传感器、微光解调仪和电脑组成。微光解调仪解调形状传感器各 FBG 光谱，获取其中心波长，之后将解调信号传入电脑执行后续的数据处理。

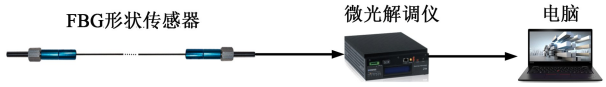
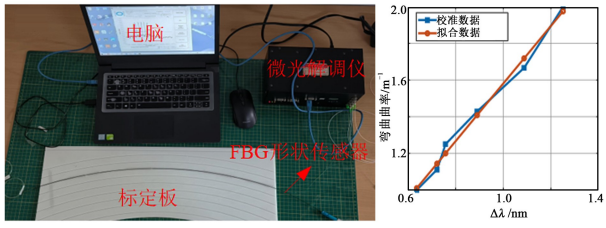


图 8 FBG 形状传感系统图

FBG 形状传感器制作完成后需要对每个 FBG 进行标定，以确定每个 FBG 中心波长变化量与曲率的关系。标定实验系统如图 9(a)所示，该系统主要由 FBG 形状传感器、标定板、微光解调仪、笔记本电脑组成。标定板上刻有曲率为 2，5/3，10/7，5/4，10/9，1 m^{-1} 的标准圆弧和直线凹槽，凹槽深度为 2 mm，宽度为 1.3 mm。当 FBG 标定时，旋转传感器两端的螺母控制标定方向，使待标定 FBG 处于弯曲受力最大的方向，然后将传感器固定在标定板凹槽内，之后利用解调仪对 FBG 进行解调，获取 FBG 的中心波长，最后将解调数据传入电脑进行后续的数据处理。单个 FBG 标定结果如图 9(b)所示。



(a) 实验系统 (b) 标定结果

图 9 标定实验系统及标定结果

FBG 标定完成之后，同样通过标定板固定形状传感器曲率作为 K_{true}，此时根据 FBG 的标定关系式和中心波长偏移数据得到检测点各 FBG 的感测曲率 k_i，将 k_i 代入自矫正模型对 FBG 的铺设角度

偏差和标定误差进行矫正。各检测点 FBG 的铺设角度偏差矫正结果如表 1 所示。

表 1　FBG 铺设角度偏差矫正结果

检测点	铺设角度偏差 $\Delta\theta$/(°)		
	FBGa	FBGb	FBGc
1	2.87	4.56	2.33
2	−3.7	−5.45	8.45
3	4.56	−9.41	2.81
4	5.51	7.65	−3.50
5	−7.4	−3.82	−5.65

3.3　形状重构

利用不同形态下传感器的重构实验对本文提出的误差修正模型进行验证。传感器重构形状的选取是实验的关键，已知任何复杂形状都可以看作是多个曲率和挠率为常数的微弧段组成，理论上只要验证模型对具有恒定曲率和挠率的形状有效，那么对任意复杂的形状同样适用[18]。

实验利用标定板和 3D 打印技术设计了一系列曲率和挠率固定的模具作为传感器的形状载体。如图 10 所示，图 10(a)标定板中刻有多个已知曲率的圆弧，图 10(b)是利用 solidworks 软件设计的螺旋形凹槽，凹槽的周长为 900 mm。将形状传感器分别固定在标定板和 3D 模型的凹槽内进行形状重构实验，试验系统如图 10(c)所示。

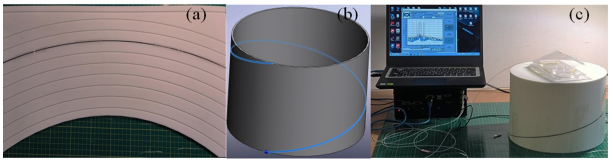


图 10　形状重构模型及实验系统图

FBG 形状传感器的重构误差通常用欧氏距离误差 ΔE 来衡量，如式(22)所示：

$$\Delta E=\sqrt{(x-x_0)^2+(y-y_0)^2+(z-z_0)^2} \tag{22}$$

式中，x，y，z 为检测点的重构坐标；x_0，y_0，z_0 为检测点的实际坐标。重构误差随着检测点距离累增，因此形状重构误差在远端端点处达到最大。本文以远端重构误差 $\Delta E_{\max}$ 和最大相对误差 $R_{\max}$($\Delta E_{\max}$ 与传感器长度的比值)作为评价指标对形状重构结果进行比较分析。

将表 1 中自矫正后的参数代入式(9)～(11)完成曲率和挠率的误差修正，得到修正前后的形状重构结果。图 11 表示 $k=(10/7)\text{m}^{-1}$ 的弧形重构结果，图 12 表示螺旋形状重构结果。误差修正后弧形和螺旋形的远端重构误差分别从 11.66 和 22.6 mm 降低至 5.63 和 10.47 mm，相对误差分别从 2.56%和 4.96%降低至 1.21%和 2.25%，平均相对精度分别提升了 52.7%和 54.6%。

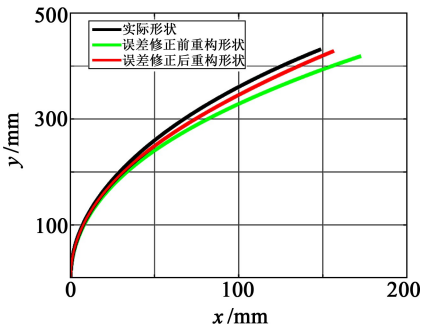


图 11　弧形重构结果

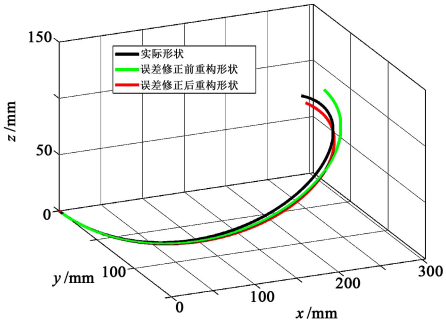


图 12　螺旋形重构结果

其余曲率圆弧重构实验结果如表 2 所示，由表 2 可知经过误差补偿后传感器的远端重构误差平均减少了 6.37 mm，重构精度平均提升了 1.37%。

表 2　弧形重构结果

曲率/m^{-1}	远端重构误差			
	误差修正前		误差修正后	
	绝对误差/mm	相对误差/%	绝对误差/mm	相对误差/%
2	17.75	3.89	9.50	2.04
5/3	11.80	2.59	5.63	1.23
10/7	11.66	2.56	6.17	1.35
5/4	11.72	2.57	5.68	1.25
10/9	10.67	2.33	4.34	0.95
1	12.50	2.74	6.55	1.44

利用 WOA 优化模型自矫正 FBG 铺设偏差角，有效提升形状传感器的重构精度，验证了基于 WOA 优化的误差修正模型的实用性和有效性。

4　结论

本文基于 Frenet-Serret 框架的多芯光纤形状

感测理论，建立了弯曲曲率和挠率与FBG铺设角度偏差之间的理论关系。提出一种利用WOA自动获取FBG铺设偏差角的方法，建立了基于WOA优化的FBG形状传感器铺设角度偏差自矫正模型。设计形状重构实验对自矫正模型的可行性和实用性进行了验证。结果表明：WOA能够简单高效地优化FBG的铺设角度，提升传感器形状重构的精度。与现有的FBG铺设偏差角修正方法相比，本文方法适用性更强、更简单高效，大大提高了实验的可操作性和重复性。

参考文献：

[1] 杨 洋，孔令宇，蔡伟康，等. 光纤形态传感器研究进展[J]. 半导体光电，2022，43(4)：642-654.
Yang Yang，Kong Lingyu，Cai Weikang，et al. Research progress of fiber optic shape sensor [J]. Semiconductor Optoelectronics，2022，43(4)：642-654.

[2] Liu H L，Zhu Z W，Zheng B. Experimental study on an FBG strain sensor[J]. Opt. Fiber Technol.，2018，40：144-151.

[3] Idrisov R，Floris I，Rothhardt M. Characterization and calibration of shape sensors based on multicore optical fibre [J]. Opt. Fiber Technol.，2021，61：102319.

[4] Lou X P，Chen Z Q，Zhuang W. Error analysis and calibration for FBG shape reconfiguration based on non-orthogonal curvatures[J]. Chinese J. of Entific Instrument，2017，38(2)：386-393.

[5] Tan T，Xie Y L，Duan C. Self-calibration method of optical fiber shape sensor placement angle deviation based on GA[J]. Measurement，2022，202：111844.1-111844.9.

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

[7] 吕佳豪，董明利，何彦霖. 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.
Lü Jiahao，Dong Mingli，He Yanlin. Three-dimensional shape multi-core fiber reconfiguration method of flexible mechanism by introducing curvature and angle correction[J]. Infrared and Laser Engineering，2021，50(5)：120-126.

[8] Khan F，Denasi A，Barrera D，et al. Multi-core optical fibers with Bragg gratings as shape sensor for flexible medical instruments[J]. IEEE Sensors J.，2019，19(14)：5878-5884.

[9] 沈林勇，肖 海，钱晋武，等. 智能内窥镜的形状重建和可视化方法研究[J]. 仪器仪表学报，2014，35(12)：2725-2730.
Shen Linyong，Xiao Hai，Qian Jinwu，et al. Shape reconfiguration and visualization of intelligent endoscope[J]. Chinese J. of Scientific Instrument，2014，35(12)：2725-2730.

[10] 高 东，孟凡勇，宋言明，等. 植入光纤光栅的软体驱动器形状传感研究[J]. 仪器仪表学报，2019，40(2)：155-163.
Gao Dong，Meng Fanyong，Song Yanming，et al. Research on the shape sensing of embedded fiber Bragg grating for soft actuator[J]. Chinese J. of Scientific Instrument，2019，40(2)：155-163.

[11] 李 红，祝连庆，刘 锋，等. 裸光纤光栅表贴结构应变传递分析与实验研究[J]. 仪器仪表学报，2014，35(8)：1744-1750.
Li Hong，Zhu Lianqing，Liu Feng，et al. Strain transfer analysis and experimental research of surface-bonded bare FBG [J]. Chinese J. of Scientific Instrument，2014，35(8)：1744-1750.

[12] 张 萍，吴显腾，卢盛欣，等. 基于鲸鱼算法的风机接地网优化设计[J]. 高压电器，2023，59(6)：128-136，153.
Zhang Ping，Wu Xianteng，Lu Shengxin，et al. Optimization design of wind turbine grounding grid based on whale algorithm [J]. High Voltage Apparatus，2023，59(6)：128-136，153.

[13] Zhao J，Gao Z M. The improved mayfly optimization algorithm with Chebyshev map [J]. J. Phys.：Confer. Series，2020，1684(1)：1220-1235.

[14] Mitic M，Vukovic N，Petrovic M，et al. Chaotic fruit fly optimization algorithm [J]. Knowledge-Based Systems，2015，89：446-458.

[15] 章亚男，范 迪，沈林勇，等. FBG细径形状传感器的应变传递和精度实验[J]. 光学精密工程，2019，27(7)：1481-1491.
Zhang Yanan，Fan Di，Shen Linyong，et al. Strain transmission and accuracy experiment on fiber Bragg grating small-diameter shape sensors [J]. Optics and Precision Engineering，2019，27(7)：1481-1491.

[16] Yi X H，Chen X Y，Fan H C，et al. Separation method of bending and torsion in shape sensing based on FBG sensors array[J]. Opt. Express，2020，28(7)：9367-9383.

[17] 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)：70-80.
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)：70-80.

[18] Li S，Hua P D，Ding Z Y. Reconfiguration error model of distributed shape sensing based on the reentered frame in OFDR[J]. Opt. Express，2022，30(24)：43255-43270.

作者简介：

尚秋峰(1968—)，女，河北省保定市人，博士，教授，主要研究方向为光电子与光传感。