

# 基于光纤布拉格光栅传感器的板壳结构曲面重构算法

张旭, 侯茂盛\*, 刘智超, 刘涛, 李丽娟

长春理工大学光电工程学院光电测控与光信息传输技术教育部重点实验室, 吉林 长春 130022

**摘要** 随着航空航天制造业和高性能飞行器的不断发展,大曲率板壳结构得到了广泛应用。针对由预应力和尺寸位置偏差等因素引起的装配变形问题,利用光纤布拉格光栅(FBG)传感器对板壳结构的曲面重构算法进行研究。建立了波长偏移量与曲率的关系,得到曲面重构算法所需的曲率数据,应用分段拟合算法计算全部测点的坐标增量,从而实现曲线重构。在此基础上,对实测板壳结构曲面进行重构,并将 ANSYS 仿真曲面测点处的理论数据与实际重构变形曲面测点数据进行对比,结果表明,该算法有效性较高,为板壳结构件的变形预测和修正提供了技术支持。

**关键词** 板壳变形; 光纤布拉格光栅; 曲线拟合; 曲面重构; ANSYS

中图分类号 TN814

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP57.090603

## Surface Reconstruction Algorithm of Plate-Shell Structure Based on Fiber Bragg Grating Sensor

Zhang Xu, Hou Maosheng\*, Liu Zhichao, Liu Tao, Li Lijuan

Key Laboratory of Optoelectronic Measurement and Optical Information Transmission Technology of Ministry of Education, College of Optoelectronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China

**Abstract** With the development of aerospace manufacturing and high-performance aircraft, large-curvature plate-shell structure has been widely used. Aiming at the problem of assembly deformation caused by factors such as prestress and size and position deviation, a fiber Bragg grating sensor is used to study the surface reconstruction algorithm of plate-shell structure. The relationship between wavelength shift and curvature is established, and the curvature data required for the surface reconstruction algorithm is obtained. Segment fitting algorithm is applied to calculate the coordinate increment of all measuring points to realize the curve reconstruction. On this basis, the measured surface of the plate-shell structure is reconstructed, and the theoretical data at the measuring points of the ANSYS simulation surface is compared with the data of the actual reconstructed deformation surface. The results show that the algorithm is highly effective and provides technical support for the deformation prediction and modification of plate-shell structures.

**Key words** plate-shell deformation; fiber Bragg grating; curve fitting; surface reconstruction; ANSYS

**OCIS codes** 060.3735; 060.3738; 120.6650

## 1 引言

随着航天航空等制造业的发展越来越迅速,板壳等薄壁大曲率的工件由于具有质量轻、性能好、厚度薄等优点,被广泛应用于航天航空飞行器的制造中<sup>[1]</sup>。但板壳在安装过程中受预应力等因素的影响

会发生变形<sup>[2]</sup>,进而导致强行装配。目前对几何形状变形检测的方法主要有激光扫描法、三坐标机测量法、光弹性法等,但这些方法操作复杂且测量精度不高。光纤布拉格光栅(FBG)传感器具有传输信号方便、测量精度相对较高、体积小、抗电磁干扰能力强、重复性好等优点,广泛应用于土木工程、医学、航

收稿日期: 2019-12-25; 修回日期: 2019-12-26; 录用日期: 2020-02-10

基金项目: 国家自然科学基金(61703056); 吉林省优秀青年人才基金(20190103154JH)

\* E-mail: 2919639538@qq.com

空航天、电力工程领域<sup>[3]</sup>。

为实现板壳结构变形的测量和修正,需要研究更准确的测量方法和曲面重构算法。本文主要基于FBG传感器检测板壳结构的应变变化<sup>[4]</sup>,并将传感器在应力作用下产生的波长偏移量转换为曲率数据。实验结果表明,基于实测曲率数据的板壳结构曲面重构算法,可应用于制造装配现场的板壳结构变形预测和修正。

## 2 光纤光栅传感原理

FBG传感器是一种相位光栅,通过紫外光刻写,使其纤芯发生永久性周期改变<sup>[5]</sup>。FBG传感器

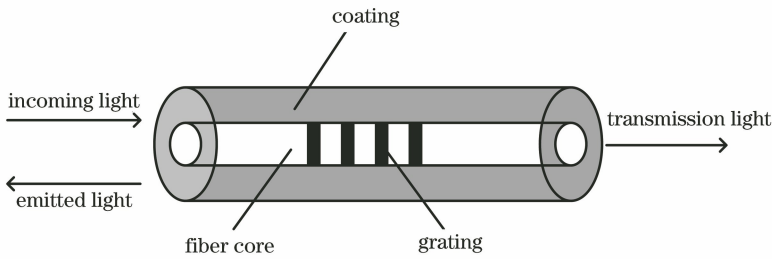


图1 光纤光栅传感原理图

Fig. 1 Schematic diagram of fiber grating sensing

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

式中, $n_{\text{eff}}$ 为纤芯有效折射率, $\Lambda$ 为光栅周期。由于FBG传感器可起到反射镜或滤波器的作用,且应变、温度均可导致 $n_{\text{eff}}$ 和 $\Lambda$ 的变化。将(1)式变换为

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (1 - p_e)\Delta\epsilon + (\alpha_f + \xi)\Delta T, \quad (2)$$

式中, $\Delta\epsilon$ 为作用在光纤上的轴向应变变化量, $\Delta T$ 为温度变化量, $p_e$ 为光纤的弹光系数, $\alpha_f$ 为光纤的热膨胀系数, $\xi$ 为光纤的热光系数。由于实验是在温度恒定的环境中进行,可以忽略温度对实验的影响。即 $\Delta\lambda_B$ 仅与应变有关

$$\Delta\lambda_B = (1 - p_e)\lambda_B\Delta\epsilon, \quad (3)$$

式中, $\Delta\epsilon$ 为变形后的轴向应变 $\epsilon_2$ 减去变形前的应变 $\epsilon_1$ ,即 $\Delta\epsilon = \epsilon_2 - \epsilon_1$ 。利用光纤光栅传感器检测板壳应变时,板壳结构在施加负载范围内产生的变形均为弹性形变,卸载负载后传感器恢复到无应变状态。即每次检测前的 $\epsilon_1 = 0$ 。当光纤的材料确定后, $p_e$ 为定值,设FBG传感器对应变的感应灵敏度,即应变灵敏度系数为 $k_\epsilon$

$$k_\epsilon = (1 - p_e)\lambda_B, \quad (4)$$

可将(3)式改写为<sup>[7]</sup>

$$\Delta\lambda_B = k_\epsilon\Delta\epsilon. \quad (5)$$

$k_\epsilon$ 只与光纤光栅传感器的材料有关,与其在不

的工作原理是利用布拉格光栅效应感知外界待测物理量的变化,如温度、应变。当待测物理量发生变化时,FBG传感器的波长即Bragg波长即会发生偏移。通过测量Bragg的中心波长偏移量,建立偏移量与待测量的关系,可获得待测物理量的变化。

光纤光栅传感原理图如图1所示,利用宽带光源向传感器发射一束宽带光,根据光纤耦合模理论<sup>[6]</sup>,当宽带光的波长等于FBG传感器的布拉格波长 $\lambda_B$ 时,这部分宽带光会被反射,其余波长的光则被透射。当外界的应变、温度等物理量发生变化时,可建立传感器中心波长偏移量 $\Delta\lambda_B$ 与被测物理量的关系。

同材料、形状结构上使用无关,但会受封装形式的影响。本小组对此进行了相关研究,用悬臂梁实验对不锈钢箔片封装后的应变灵敏度系数进行了标定<sup>[8]</sup>,获得实验所需的应变灵敏度系数。

要实现板壳结构表面的三维重构,可根据材料力学、光纤光栅的传感检测原理以及柔性梁纯弯曲理论,将 $\Delta\lambda_B$ 转化为板壳表面的曲率 $k$ 。

在等截面柔性梁上某一点施加轴向力,纯弯曲条件下,截取一段长度为 $L$ ,厚度为 $h$ 的微元结构。假设该微元结构在理想条件下进行变形,当受到外界一对弯矩 $M$ 作用时会产生压缩和拉伸两个变形。在压缩与拉伸两个变形间存在一层纤维层,该纤维层在结构发生形变时的长度保持不变且应变为零,也称为中性层。可利用中性层 $a_1$ 、 $a_2$ 的曲率表示微元的变形情况,设中性层的曲率半径为 $\rho$ ,微元结构发生变形时压缩层和拉伸层的长度变化如图2所示。其中虚线表示中性层, $\Delta L$ 为结构微元长度的变化量, $\theta$ 为微元形变时圆弧对应的中心角。

图2中

$$\begin{cases} L = \rho \cdot \theta \\ L + \Delta L = \left(\rho + \frac{h}{2}\right)\theta, \end{cases} \quad (6)$$

$$\rho = \frac{h}{2} \cdot \frac{L}{\Delta L}. \quad (7)$$

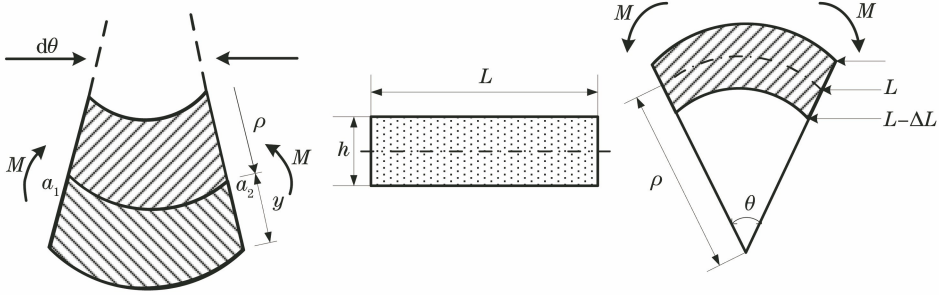


图2 微元结构形变弯曲示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the deformation of the micro-element structure

曲率和曲率半径关系为

$$k = \frac{1}{\rho} = \frac{2}{h} \cdot \frac{\Delta L}{L}, \quad (8)$$

$$\frac{\Delta L}{L} = \epsilon. \quad (9)$$

联立(8)式、(9)式可得

$$k = \frac{1}{\rho} = \frac{2}{h} \cdot \epsilon, \quad (10)$$

式中,  $\epsilon$  为点应变。由(3)式可得到曲率与波长偏移量的关系<sup>[9]</sup>为

$$k = \frac{2}{h} \cdot \frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B(1-p_e)} = \frac{2}{h} \cdot \frac{\Delta\lambda_B}{k_e}. \quad (11)$$

由(11)式可知,要获得被测点处的曲率  $k$ , 只需要知道被测微元的厚度  $h$ 、FBG 传感器的 Bragg 波长偏移量  $\Delta\lambda_B$  及其应变灵敏度系数。上文计算过程中应变量为中间变量,不参与最后的曲率计算,计算得出的各测点处曲率值为后续曲面重构提供数据支持。该方法简化了利用 FBG 传感器重构变曲率板壳结构的流程,缩短了预处理时间。

### 3 基于曲率信息的曲面重构算法

#### 3.1 算法原理

常用的曲面重构算法主要有:基于曲率信息的曲线拟合和基于散乱数据点的 B 样条曲面重构算法<sup>[10]</sup>。任何曲面结构都是由若干条曲线组成的,因此可将实验样件变形后的曲面离散为多条平面曲线。在相邻两个测点的曲率  $k$  间进行多点插值,推导各插值点相对于前一插值点的坐标增量,求得所有插值点的坐标值,完成两测点间曲线的拟合,依次完成所有测点间曲线的拟合,得出整段曲线的拟合曲线,将所有曲线进行 B 样条插值<sup>[11]</sup>重构出变形曲面。曲面重构算法的流程图如图 3 所示。

分段拟合算法的流程图如图 4 所示,其核心原理为将曲线分割成  $N$  段,通过坐标转换进行拟合。

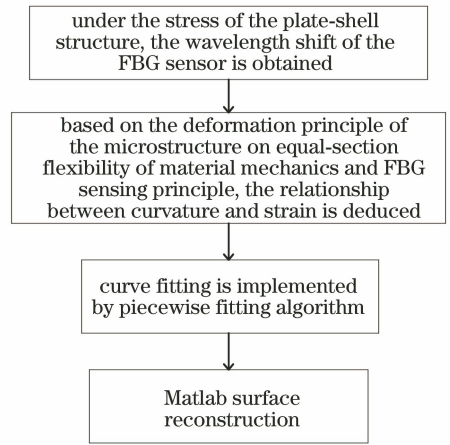


图3 曲面重构算法流程图

Fig. 3 Flow chart of surface reconstruction algorithm

设起点坐标为原点  $(0,0)$ ,根据微分原理递推出每段曲线对于前一段曲线的坐标增量,最终获得整段曲线的坐标<sup>[12]</sup>。将 FBG 传感器检测的测点应变信息利用材料力学和光纤光栅传感原理转换为结构的曲率信息,为曲线拟合算法提供初始数据。

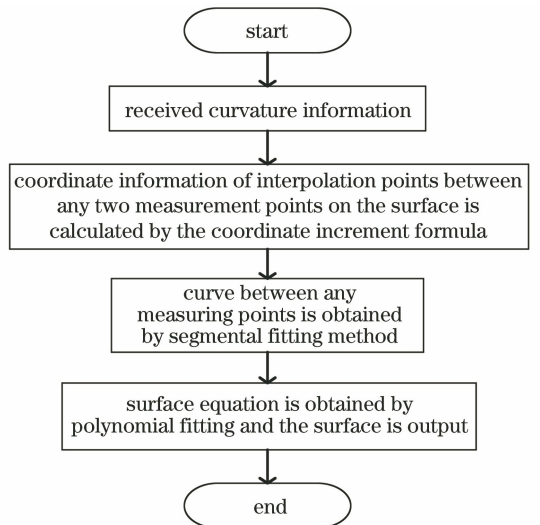


图4 分段拟合算法流程图

Fig. 4 Flow chart of piecewise fitting algorithm

FBG 传感器检测得到的板壳结构数据是离散的,因此要将离散曲率信息连续化<sup>[13]</sup>。曲率信息的连续化处理拟采用线性差值方法,在相邻两个离散的曲率间放入一定数量的差值点。差值点的数量越多,得到的曲率值越多,获得的曲线越平滑,曲线弧段划分图如图 5 所示。

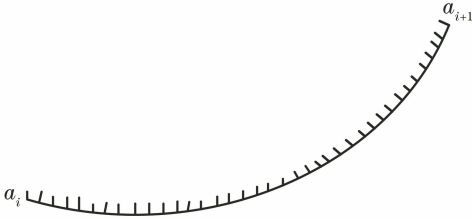


图 5 曲线弧段划分图

Fig. 5 Diagram of curve arc division

设测点  $a_i$  与  $a_{i+1}$  之间曲率是均匀变化的,则弧段内曲率与弧长的线性关系为

$$k(s) = as + b = \frac{k_{i+1} - k_i}{s_{i+1} - s_i} s + \frac{k_i s_{i+1} - k_{i+1} s_i}{s_{i+1} - s_i}, \quad (12)$$

式中,  $a$ 、 $b$  为曲率与弧长线性关系式的系数,  $s$  为弧长。  $k_i$ 、 $s_i$  分别为测点  $a_i$  处的曲率和弧长,  $k_{i+1}$ 、 $s_{i+1}$  分别为  $a_{i+1}$  处的曲率和弧长。在弧段内均等份插入  $n$  个插值点时,可将该弧段看作由  $s_1 \sim s_2$ 、 $s_2 \sim s_3$ 、 $\dots$ 、 $s_n \sim s_{n+1}$  组成的,第  $j$  个插值点的弧长和曲率值可表示为

$$k_j = k_i + \frac{k_{i+1} - k_i}{n + 1} n, \quad (13)$$

$$s_j = s_i + \frac{s_{i+1} - s_i}{n + 1} n. \quad (14)$$

取某一段变形曲线建立平面坐标系  $xy$ ,如图 6 所示。以起点  $A$  为坐标原点建立副坐标系  $x'y'$ ,  $Ax'$  为曲线  $AB$  的切线,  $B$  点在  $xy$  上的坐标为  $(x_{BA}, y_{BA})$ ,在  $x'y'$  上的坐标  $(x_{B1}, y_{B1})$ ,  $\rho_{AB}$  为圆弧  $AB$  的曲率半径,  $\alpha$  为两个半径间的夹角,  $\theta$  为  $Ax'$

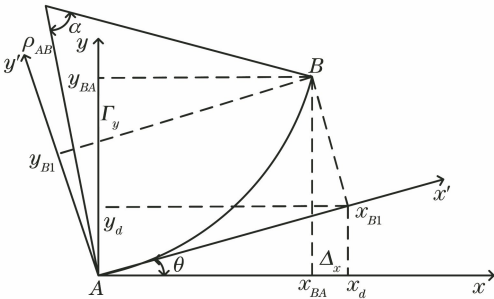


图 6 投影坐标转换重构算法原理图

Fig. 6 Schematic diagram of projection coordinate transformation reconstruction algorithm

与  $Ax$  的夹角。

由曲率的微分几何关系可知

$$k(s) = \frac{\Delta\theta}{\Delta s}, \quad (15)$$

$$\theta = \int_0^s k(s) ds. \quad (16)$$

图 6 中  $x_d$  为点  $B$  在  $x'y'$  坐标系下其横坐标在  $xy$  坐标系的投影,同理  $y_d$  为  $x_{B1}$  在  $xy$  坐标系相对纵轴的投影。在  $xy$  坐标系中

$$x_{BA} = x_d - \Delta_x = x_{B1} \cos \theta - \Delta_x, \quad (17)$$

$$y_{BA} = y_d - \Gamma_y = x_{B1} \sin \theta + \Gamma_y, \quad (18)$$

$$\Delta_x = y_{B1} \sin \theta, \quad (19)$$

$$\Gamma_y = y_{B1} \cos \theta, \quad (20)$$

式中,  $\Gamma_y$  为  $y_d$  与  $y_{BA}$  的差, 联立 (17) 式 ~ (20) 式, 可得

$$x_{BA} = x_{B1} \cos \theta - y_{B1} \sin \theta, \quad (21)$$

$$y_{BA} = x_{B1} \sin \theta + y_{B1} \cos \theta. \quad (22)$$

$B$  点从  $x'y'$  坐标系向  $xy$  坐标系的转换可表示为

$$\begin{bmatrix} x_{BA} \\ y_{BA} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{B1} \\ y_{B1} \end{bmatrix}. \quad (23)$$

$x'y'$  坐标系中

$$x_{B1} = r_{AB} \sin \alpha, \quad (24)$$

$$y_{B1} = r_{AB} (1 - \cos \alpha), \quad (25)$$

$$\alpha = \frac{s}{r_{AB}}, \quad (26)$$

$$r_{AB} = \frac{r_A + r_B}{2} = \frac{\frac{1}{k_A} + \frac{1}{k_B}}{2} = \frac{k_A + k_B}{2k_A k_B}, \quad (27)$$

式中,  $r_A$ 、 $r_B$  分别为  $A$ 、 $B$  两点曲率半径的平均值,  $k_A$ 、 $k_B$  分别为过  $A$ 、 $B$  点的切线曲率。联立 (21) 式 ~ (27) 式, 可得

$$x_{BA} = \frac{k_A + k_B}{2k_A k_B} \sin \alpha \cos \theta - \frac{k_A + k_B}{2k_A k_B} (1 - \cos \alpha) \sin \theta, \quad (28)$$

$$y_{BA} = \frac{k_A + k_B}{2k_A k_B} \sin \alpha \sin \theta + \frac{k_A + k_B}{2k_A k_B} (1 - \cos \alpha) \cos \theta. \quad (29)$$

按上述方法可求出下一段曲线的坐标增量, 依次求出整段曲线上 FBG 测点的全部坐标增量, 最后用直线将所有曲线段连接起来。此方法具有算法简单、精度高等优点。

### 3.2 Matlab 曲线拟合算法仿真

为验证该算法可行性,利用正弦曲线验证该算法的重构精度。将正弦曲线 $(0, \frac{\pi}{2})$ 弧段划分为 100 个曲线段进行重构。重构曲线与原始曲线如图 7 所示。其中实线部分为原始曲线,虚线部分为重构曲线。

$$E = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{\alpha_i - \alpha'_i}{\alpha_i}, \quad (30)$$

式中, $E$  为平均相对误差, $n$  为传感器个数, $\alpha_i$  为仿真数据, $\alpha'_i$  为算法的重构数据值。

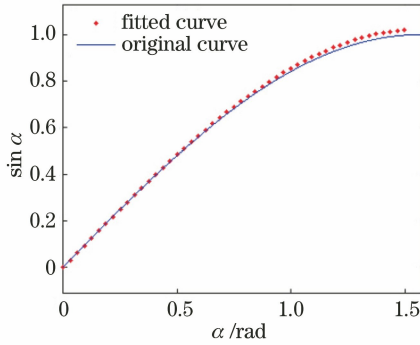


图 7 正弦曲线重构图

Fig. 7 Sinusoidal reconstruction diagram

根据(30)式可计算出拟合曲线和实际原始曲线对应数据点的位置偏差,图 7 中算法重构的正弦曲线与原始正弦曲线的偏差为 0.5%。这表明该重构算法拟合精度高、效果好、算法简单、重构速度快,符合精度要求,具有良好的实用性,且只需知道曲线上某些点的曲率值即可准确重构出该曲线。

### 3.3 实验分析及仿真

利用 Matlab 对拟合好的曲线进行曲面重构,图 8 为实验中的变曲率结构板壳件在 CATIA V5R20 软件中的理论数模,该软件中可测得变曲率板壳结构件各横截面曲线上的曲率值,图中显示了首尾各两条横截面曲线的曲率值。可以发现首尾两端曲线的曲率分别为  $0.008 \text{ mm}^{-1}$  和  $0.005 \text{ mm}^{-1}$ ,曲率变化范围为  $0.005 \sim 0.008 \text{ mm}^{-1}$ 。

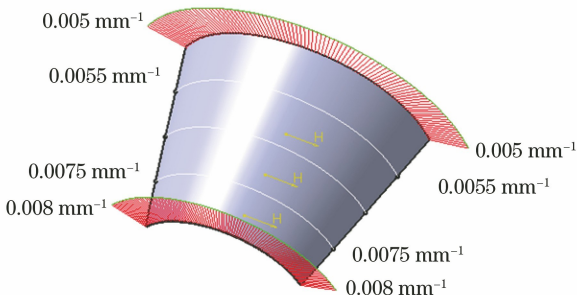


图 8 板壳曲率分布图

Fig. 8 Distribution of plate shell curvature

图 9 为搭建的基于 FBG 传感器的板壳应变检测实验系统,包括实验台、板壳样件、压力计、封装后的 FBG 传感器、电脑、解调仪等。图 10 为 ANSYS 软件仿真得到板壳结构的应变分布图,可以发现,当板壳作用为集中载荷时,其应变分布呈现出以施力点为中心应变逐渐减小的规律,靠近约束端的应变较大。图 11 为采用波分复用网络的 FBG 传感器,

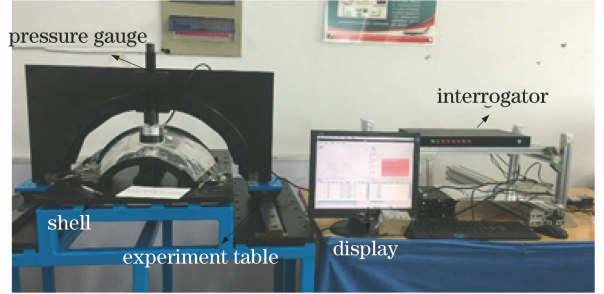


图 9 应变检测实验装置图

Fig. 9 Diagram of experimental device for detecting strain

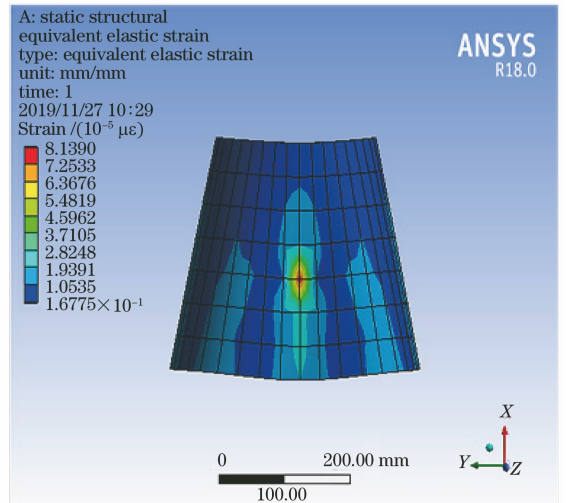


图 10 ANSYS 应变分布图

Fig. 10 Strain distribution of ANSYS

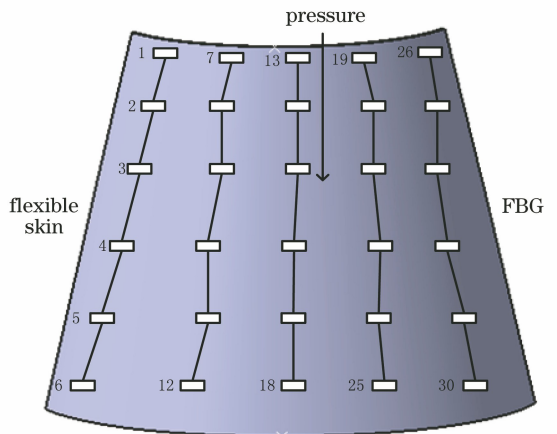


图 11 FBG 传感器分布阵列

Fig. 11 Distributed array of FBG sensors

由 5 个光纤串组成,每个光纤串上串有 6 个光栅,共 30 个 FBG,相邻光纤串的距离为 80 mm,每个光栅间的距离为 48 mm。对板壳施以 10 N 的集中载荷多次实验取均值得到 30 个光栅的波长偏移量,如表 1 所示,由(11)式可得到附近曲线的曲率值,最后代入到 Matlab 算法程序中进行样条插值重构出曲面形态。图 12 为板壳结构在 Matlab 曲面重构算法下的结构图,图 13 为板壳在 ANSYS 有限元静力学仿真分析下的变形图,图 14 为重构曲面与 ANSYS

表 1  $F = -10$  N 时 FBG 传感器波长偏移量

Table 1 FBG sensor wavelength offset at  $F = -10$  N

Measuring point number	3D coordinates of measuring points /mm	Wavelength offset /pm
1	(257,126,9)	20
2	(214,136,10)	15
3	(171,146,10)	15
4	(128,156,11)	14
5	(85,165,12)	14
6	(42,175,13)	13
7	(257,75,62)	12
8	(214,82,69)	12
9	(171,89,75)	13
10	(128,95,82)	12
11	(85,106,89)	11
12	(42,108,96)	13
13	(257,-64,84)	15
14	(214,-82,93)	13
15	(171,-13,102)	14
16	(128,-13,111)	16
17	(85,-14,120)	17
18	(42,-69,129)	15
19	(257,-126,9)	20
20	(214,-82,69)	22
21	(171,-89,75)	24
22	(128,-95,82)	27
23	(85,-101,89)	29
24	(42,-108,96)	20
25	(257,-126,8,9)	18
26	(214,-136,10)	19
27	(171,-146,10)	17
28	(128,-156,11)	15
29	(85,-165,12)	14
30	(42,-175,13)	15

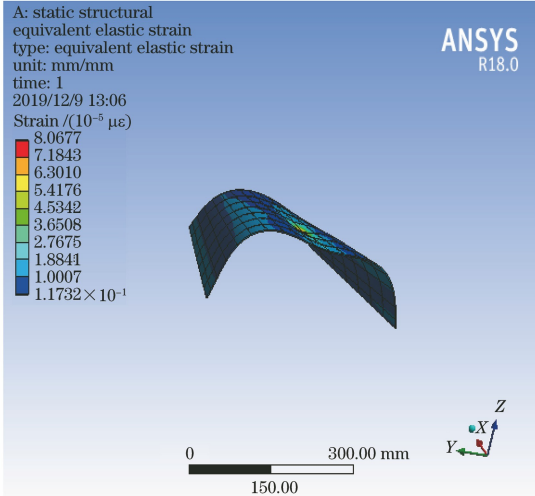


图 12 板壳表面重构图

Fig. 12 Reconstruction of plate surface

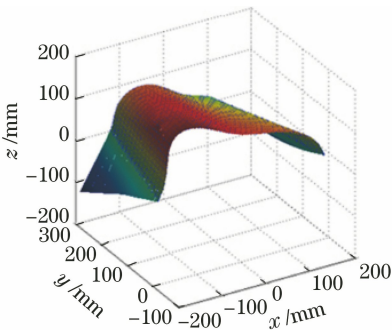


图 13 ANSYS 三维结构图

Fig. 13 Three-dimensional structure diagram of ANSYS

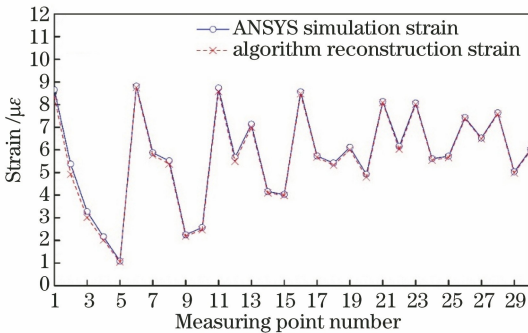


图 14 算法重构测点应变与 ANSYS 仿真应变对比图

Fig. 14 Comparison graph of algorithm reconstruction strain and ANSYS simulation strain

仿真分析的应变对比折线图。

由图 14 可知本算法拟合出的变形曲面测点处的应变与 ANSYS 仿真测点处的应变相对最大误差为 2.50%,接近实际应变值。这表明该算法重构精度较高,且重构效果好。将重构后变形曲面测点三维坐标位移量分别与 ANSYS 仿真后得到曲面结构测点的位移量进行对比,分析应力作用后测点在  $x$ 、 $y$ 、 $z$  三个方向上坐标的变化,结果如图 15~图 17 所示。利用(30)式计算得到  $x$  方向的位移变化误差为 1.82%, $y$  方向的位移变化误差为 1.76%, $z$  方向的位移变化误差为 2.56%。这表明该算法重构精度较高,可较好地重构变形曲面,

满足研究所需精度。

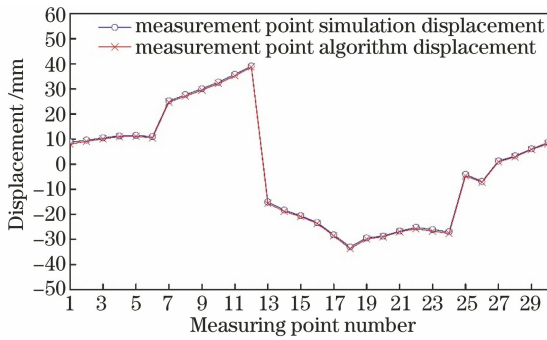


图 15  $x$  方向测点处算法重构位移与仿真位移对比

Fig. 15 Comparison of algorithm reconstruction displacement and simulation displacement at the  $x$ -direction measuring point

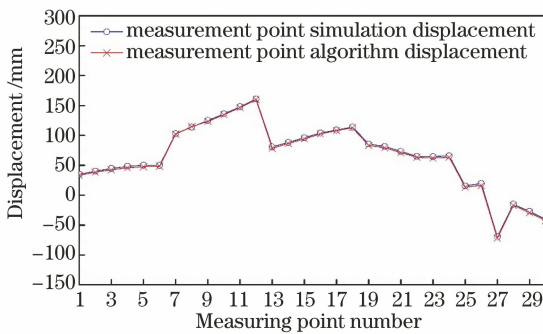


图 16  $y$  方向测点处算法重构位移与仿真位移对比

Fig. 16 Comparison of algorithm reconstruction displacement and simulation displacement at the  $y$ -direction measuring point

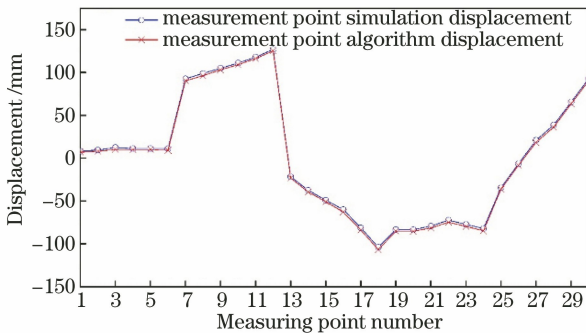


图 17  $z$  方向测点处算法重构位移与仿真位移对比

Fig. 17 Comparison of algorithm reconstruction displacement and simulation displacement at the  $z$ -direction measuring point

## 4 结 论

对板壳结构件的应变检测和基于曲率信息的重构变形曲面算法进行研究,利用 FBG 传感器检测受力板壳结构件测点处的应变信息,通过光纤光栅传感原理建立 FBG 传感器波长偏移量与应变的关系。

利用材料力学原理得到等截面柔性梁在纯弯曲状态下的曲率,推导出应变与曲率的关系式,避免了对应变的计算,提高了数据获取的速度。利用曲率信息对变形曲面进行 B 样条插值重构,将板壳结构件变形后的曲面离散成若干段变形曲线,利用分段拟合算法对变形曲线进行拟合,实现了整段变形曲线的拟合。实验结果表明:拟合曲线相比正弦曲线的最大相对误差为 0.50%,本算法得出重构后的曲面与仿真变形曲面的应变偏差为 2.50%,在各测点的三维坐标位移最大偏差分别为 1.82%、1.76%、2.56%。表明该算法的准确度较高、拟合得到的曲线较光滑,且重构出的变形曲面与 ANSYS 三维结构图吻合,实现了基于 FBG 传感器的板壳结构曲面重构,能够应用于大型板壳结构件装配变形的测量和趋势预测。

## 参 考 文 献

- [1] Zhang J. Modeling and numerical solution for dynamic system of spatial multi rigid bodies and shell structure with large deformation [D]. Beijing: Tsinghua University, 2015.  
章杰. 空间多刚体与大变形板壳结构动力学建模及数值求解研究[D]. 北京: 清华大学, 2015.
- [2] Wu Y H, Zhu S, Xu W, et al. Progress in distributed optical fiber crack sensing engineering[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(9): 090002.  
吴永红, 朱莎, 许蔚, 等. 分布式光纤裂缝传感工程应用研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(9): 090002.
- [3] Yi J C. Shape perception and active monitoring for smart structure using FBG sensor array [D]. Shanghai: Shanghai University, 2014.  
易金聪. 基于 FBG 传感阵列的智能结构形态感知与主动监测研究[D]. 上海: 上海大学, 2014.
- [4] Liu Z C, Wang J Y, Yang J H, et al. Test system for temperature and strain based on new FBG sensor [J]. Journal of Changchun University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2017, 40(6): 20-22, 27.  
刘智超, 王建颖, 杨进华, 等. 基于新型 FBG 传感器的温度应变测试系统[J]. 长春理工大学学报(自然科学版), 2017, 40(6): 20-22, 27.
- [5] Peng H B. Development and application research of distributed optical fiber sensing technology [J]. Engineering and Technological Research, 2019(13): 14-16.

- 彭海斌. 分布式光纤传感技术的发展与应用研究 [J]. 工程技术研究, 2019(13): 14-16.
- [6] Du Y, Yi W S, Liu D, et al. Demodulation system of fiber Bragg grating temperature sensors based on  $3 \times 3$  fiber coupler [J]. Journal of Changchun University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2019, 42(2): 17-21.  
杜洋, 衣文索, 刘丹, 等. 基于  $3 \times 3$  耦合器的光纤光栅温度传感器解调系统 [J]. 长春理工大学学报(自然科学版), 2019, 42(2): 17-21.
- [7] Zhou J H. Study on strain transfer characteristics of fiber Bragg grating sensors [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2010.  
周建华. 光纤光栅传感器应变传递特性研究 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2010.
- [8] Zhang X, Wu J Q, Fan C B, et al. New FBG sensor for board and shell strain detection [J]. Tool Engineering, 2019, 53(9): 90-95.  
张旭, 吴静青, 范成博, 等. 用于板壳应变检测的新型 FBG 传感器 [J]. 工具技术, 2019, 53(9): 90-95.
- [9] Zhang J K, Li H, Sun G K, et al. FBG sensing and reconstruction method for flexible skin shape monitoring [J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2018, 37(10): 19-21, 24.  
张俊康, 李红, 孙广开, 等. 柔性蒙皮形状监测的光纤光栅传感及重构方法 [J]. 传感器与微系统, 2018, 37(10): 19-21, 24.
- [10] Han S. The designing and realization of B-spline surface joining algorithm [D]. Shenyang: Shenyang Normal University, 2019.  
韩松. B样条曲面拼接算法的设计与实现 [D]. 沈阳: 沈阳师范大学, 2019.
- [11] Wang T, Li Z, Wang S, et al. Blades model reconstruction based on speckle vision measurement [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(1): 011501.  
王涛, 李战, 王盛, 等. 基于散斑视觉测量的叶片模型重构 [J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(1): 011501.
- [12] Heymsfield S B, Martin-Nguyen A, Fong T M, et al. Body circumferences: clinical implications emerging from a new geometric model [J]. Nutrition & Metabolism, 2008, 5: 24-27.
- [13] Bernier M, Faucher D, Vallée R, et al. Bragg gratings photoinduced in ZBLAN fibers by femtosecond pulses at 800 nm [J]. Optics Letters, 2007, 32(5): 454-458.