

基于光纤光栅传感器的板状结构形态感知与 三维重构技术

闫洁, 李伟, 姜明顺*, 张雷, 张法业, 隋青美

山东大学控制科学与工程学院, 山东 济南 250061

摘要 以航天器中结构的形态感知与可视化重构为研究背景, 提出了一种基于准分布光纤光栅传感器网络的板状结构变形监测系统和坐标转换曲面重构算法。首先利用 ABAQUS 有限元分析软件对四边固支平板结构中心点加载的变形状态进行仿真分析, 确定了光纤光栅传感器的位置; 研究并分析了光纤光栅的应变检测原理以及基于坐标变换的三维曲面重构算法; 最终搭建了一套变形检测系统并进行了相关实验。结果表明, 测量点变形量的均方根误差 ≤ 0.04 mm, 相对误差 $\leq 3.5\%$, 该系统可用于航天器板状结构的变形监测。

关键词 光纤光学; 光纤光栅; 板状结构; 曲率信息; 空间曲面; 变形重构

中图分类号 TP212

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202047.1106006

Shape Perception and Three-Dimensional Reconstruction Technology of Plate Structure Based on Fiber Bragg Grating Sensor

Yan Jie, Li Wei, Jiang Mingshun*, Zhang Lei, Zhang Faye, Sui Qingmei

School of Control Science and Engineering, Shandong University, Jinan, Shandong 250061, China

Abstract Taking the shape perception and visualization reconstruction of the structure in the spacecraft as the research background, a plate-shaped structure deformation monitoring system based on a quasi-distributed fiber Bragg grating sensor network and a coordinate conversion surface reconstruction algorithm are proposed. First, the finite element analysis software ABAQUS is used to simulate and analyze the deformation state of the four-side fixed plate structure, and the position of the fiber grating sensor is determined. Then, the strain detection principle of the fiber Bragg grating and the three-dimensional surface reconstruction algorithm based on coordinate transformation are studied and analyzed. Finally, a set of deformation detection systems is built, and relevant experiments are carried out. The results show that the root mean square error of the shape variable of the measured point is no more than 0.04 mm, and the relative error is no more than 3.5%. The system can be applied to the deformation detection of the plate structure in the spacecraft.

Key words fiber optics; fiber Bragg grating; plate structure; curvature information; spatial curved surface; deformation reconstruction

OCIS codes 060.3735; 060.2370; 110.3010

1 引言

近年来航空航天技术发展迅速, 航天器的速度不断提高, 功能也不断增多, 这些变化虽然使结构的整体性能有了一定的提高, 但同时也加大了实际应用对结构稳定性的要求。飞行速度的提高可能会导

致航天器在轨运行期间极易受到气动集中载荷的影响^[1-2], 尤其是对于大型板状结构, 如太阳能帆板、机翼等, 这些结构面积大、质量小, 更容易受到宇宙风以及微电子流等的影响, 产生形态变化^[3], 长时间频繁变形会引起结构的疲劳损伤, 甚至会影响航天器的正常飞行, 造成安全隐患。通过对航天器进行

收稿日期: 2020-04-17; 修回日期: 2020-06-09; 录用日期: 2020-07-13

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFE0201302)、国家自然科学基金(61873333, 61903224)、山东省重点研发项目(2019TSLH0301, 2019GHZ004)

* E-mail: jiangmingshun@sdu.edu.cn

变形监测能够及时获得结构的形态特征,从而对其进行有效控制,减小危险发生的概率^[4-6]。

航天器工作的环境复杂多变,其对于形态感知器件的性能要求是很高的,目前用于大型柔性结构变形监测的方法如数字摄像法、压电传感器法以及三坐标法等^[7-8],均具有测量过程复杂、仪器相对比较笨重、不易操作等特点,不适用于对航天结构的实时监测。光纤布拉格光栅(FBG)具有测量准确度高、能够在恶劣环境下工作、体积小、质量轻、易于构成波分复用/空分复用等传感器网络的优点^[9-10],被广泛应用于智能材料与结构健康监测领域^[11]。

在国外,Rapp等^[12]利用FBG传感器测量二维悬臂梁结构的应变信息,基于数值仿真优化传感器网络布局,利用模态转换矩阵实现了对悬臂梁整体位移场的监测与重构;Panopoulou等^[13]利用FBG传感器收集航天器复合材料的动态响应数据,并且构造了一套新的可以识别损伤位置及状态的结构健康监测体系;Kim等^[14]将FBG传感器用于获取旋转结构的应变值,基于模态分析对旋转梁进行了变形重构;在国内,朱晓锦等^[15]使用FBG传感器阵列采集柔性细杆结构的曲率信息,研究了线性插值法、平方平均值法和曲率为弧长的二次函数的三种曲率连续化方法,最终利用Visual C++和OpenGL技术并结合曲面重构算法实现了结构的三维重构;张

俊康等^[16]以变形机翼薄膜蒙皮形状为研究对象,采用实验方法标定FBG传感器,实现了波长偏移量与曲率之间的准确转换,并且基于曲率信息对不同翼形的蒙皮形状进行了三维重构;周林^[17]将FBG传感器植入树脂基碳纤维复合材料和铝合金胶接结构中,对两种材料的平板进行了高低温循环载荷下的结构热属性监测,并且基于LabVIEW软件构造了板状结构的三维形态实时监测系统。

当前国内外研究人员对飞机机翼、太阳能帆板等单边固支板状结构的研究较多,对于四边固支的板状结构研究较少,本文以航天器的四边固支板状结构为研究对象,利用准分布式光纤布拉格光栅传感器网络获取曲面上多个关键位置的曲率信息,采用坐标转换的算法对变形曲面进行可视化重构,达到了对航天器板状结构变形进行高精度监测的目的。

2 仿 真

航天器通常由承受载荷的舱体结构和供给能量的太阳能帆板组成,如图1所示。作为本文主要的研究对象,航天器舱体结构的外壳由四边固定的铝合金平板组成,弹性模量为70 GPa,泊松比为0.33,密度为 $2.64 \times 10^{-6} \text{ kg/mm}^3$,长为660 mm,宽为660 mm,厚度为3 mm。

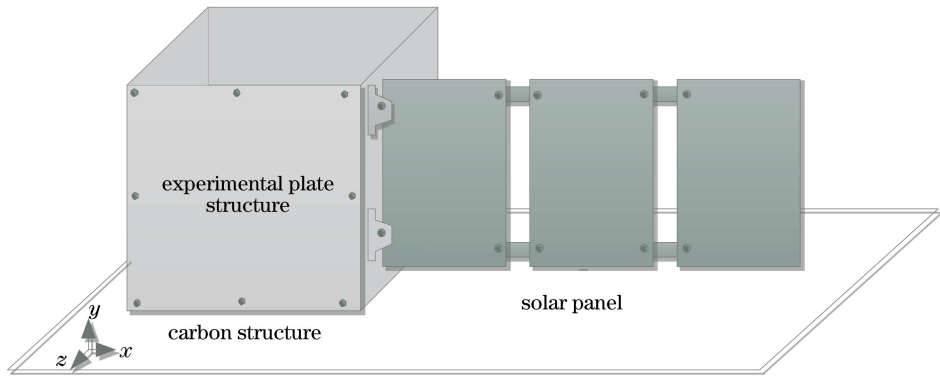


图1 航天器结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of spacecraft structure

模态分析能够获得结构在不同固有频率下的受力情况以及形态特征,实现对传感器的优化布局,另外基于模态分析获取的系统固有频率,可以选择合适的载荷频率以减小发生同频共振的可能性。在实际应用中,外加激励频率并不会太大,只需要对低阶模态进行分析即可,因此频率分析时只提取前三阶应变模态,如图2所示。

图2中一阶固有频率为33.637 Hz,结构中心

承受应力,二阶和三阶固有频率均为84.143 Hz,结构的对称位置承受了大小相等、符号相反的应力;本文研究的主要内容是对板状结构中心区域施加载荷后产生的变形结构的形态感知与三维重构问题,结构的响应主要由一阶模态控制。为了验证以上结论,对结构中心 $60 \text{ mm} \times 60 \text{ mm}$ 的区域施加载荷,使平板中心产生较小位移(0.3 mm)和较大位移(1.8 mm),结果如图3所示。

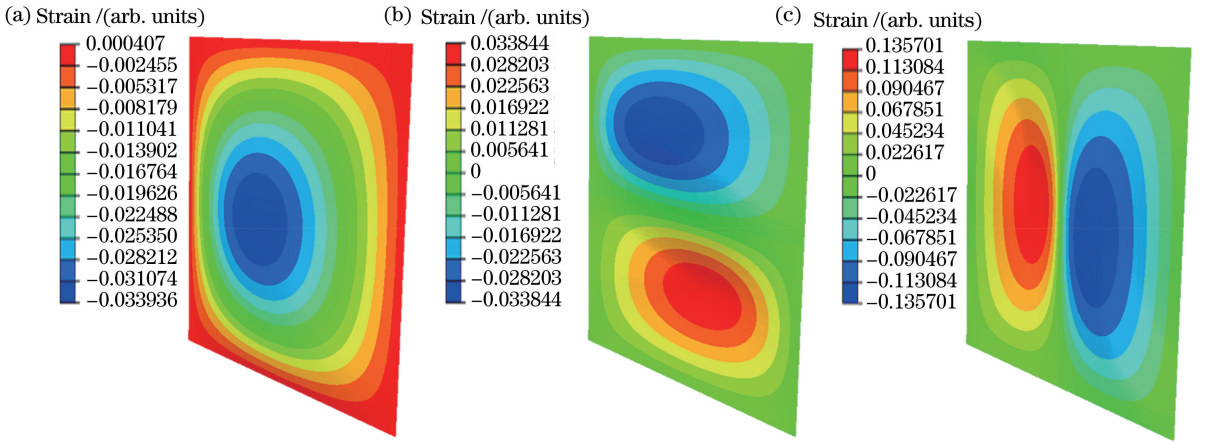


图 2 有限元分析下的模态分析图。(a)一阶应变模态;(b)二阶应变模态;(c)三阶应变模态
Fig. 2 Modal analysis diagrams obtained by finite element analysis. (a) First-order strain mode;
(b) second-order strain mode; (c) third-order strain mode

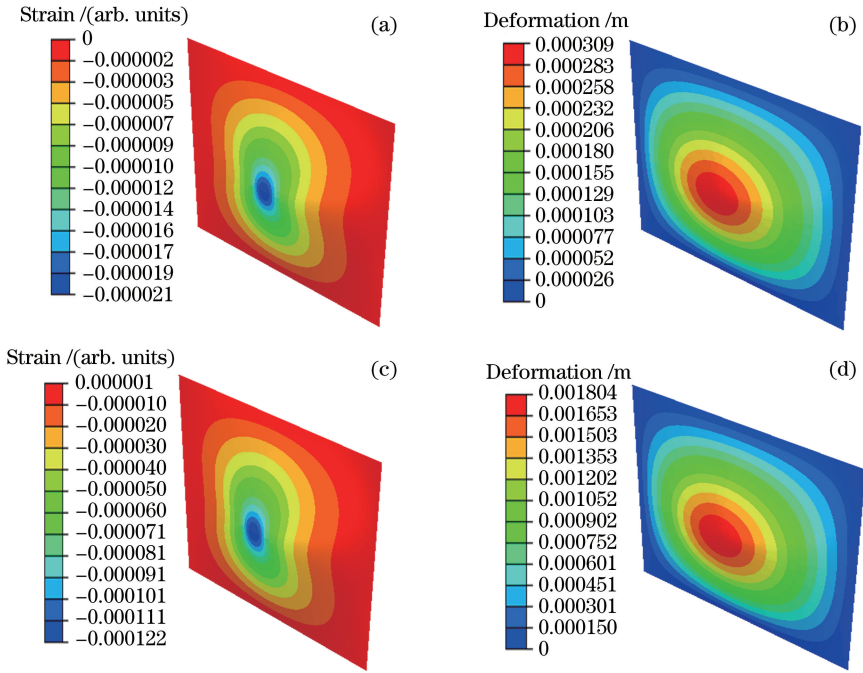


图 3 两种中心位移下的应变云图与变形云图。(a)(b) 0.3 mm;(c)(d) 1.8 mm
Fig. 3 Strain and deformation cloud maps under two central displacements. (a)(b) 0.3 mm; (c)(d) 1.8 mm

在不产生塑性变形的情况下,载荷增大,结构的应变随之增大,二阶和三阶模态分布规律与一阶模态相似,应变呈中心对称且由中心点向四周逐步减小。综合以上分析,为了提高应变监测的准确度和灵敏度,应该尽量在最大应变处布置传感器^[18],另外变形重构曲面要满足四边位移为 0,因而边界处应变的监测也是必不可少的。在不影响测量精确度的情况下,尽量减少传感器的数目,在板状结构的左上角 1/4 处布置正交 FBG 传感器,传感器网络采用波分复用技术,分为 6 个通道,每个通道在一根光纤上有 3 个 FBG 传感器,其反射光中心波长分别为

1530,1534,1538 nm,从而实现结构全局的变形监测,具体传感器网络布置如图 4 所示。

3 三维曲面重构算法

3.1 光纤光栅应变测量原理

当入射光进入光纤后,符合 Bragg 条件的光将被反射,不满足条件的光被透射,Bragg 条件为

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

式中: λ_B 为 FBG 反射光中心波长; n_{eff} 为有效折射率; Λ 为光栅周期。

当外界温度变化或者存在应变时, n_{eff} 和 Λ 会

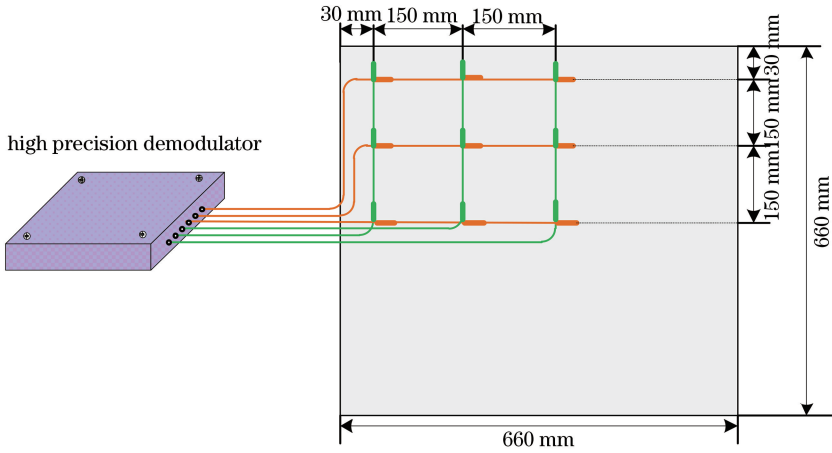


图 4 光纤布拉格光栅传感器网络示意图

Fig. 4 Diagram of fiber Bragg grating sensor network

受到影响,从而导致反射光中心波长发生偏移。保持实验环境温度不变,当结构发生轴向应变时,粘贴在表面的 FBG 传感器随之发生弯曲变形,进而引起反射光中心波长的变化:

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (1 - P_e)\epsilon, \quad (2)$$

式中: $\Delta\lambda_B$ 表示反射光中心波长的偏移量; ϵ 表示轴向

应变; P_e 表示有效弹光系数。

为了获得测量点的曲率,取曲面上的一段微元进行分析,其中 FBG 传感器粘贴于该微元段的长度方向的中间位置,微元段厚度为 h ,长度为 L ,微元段上下表面伸缩量为 ΔL , m 为中性面到上表面的距离, φ 表示圆心角, ρ 表示曲率半径,变形前后的微元段如图 5 所示。

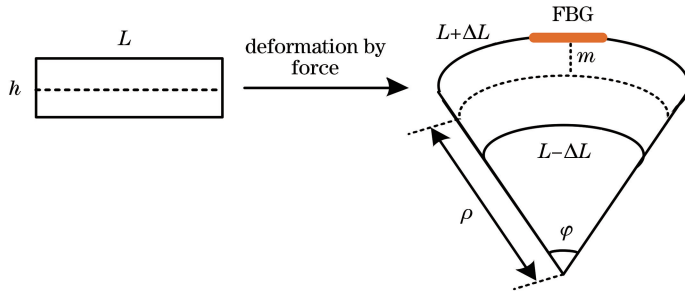


图 5 变形前后微元段示意图

Fig. 5 Diagram of micro-element segment before and after deformation

当受到应力时,结构的一个表面被拉伸,另一个表面被压缩,如图 5 所示,微元上表面变长 ΔL ,下表面变短 ΔL ,所以在上、下表面之间必定存在位置、长度不变的一层,将其称为中性面即图中虚线位置。对于等厚度平板结构来说, m 近似为 $h/2$,由此可以得出轴向应变为

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L} = \frac{(\rho + m)\varphi - \rho\varphi}{\rho\varphi} = \frac{m}{\rho} = \frac{h}{2\rho}. \quad (3)$$

综上所述,根据(2)和(3)式即可得到 FBG 反射光中心波长偏移量与曲率 k 的关系式:

$$k = \frac{2\Delta\lambda_B}{(1 - P_e)h\lambda_B}. \quad (4)$$

在本文中,厚度 h 、有效弹光系数 P_e 和反射光中心波长 λ_B 均为常数,因此只要测得 FBG 反射光

中心波长的偏移量,将其代入(4)式中就可以得到测量点的曲率值。

3.2 基于坐标转换的三维重构算法

确定合适的重构算法是实现板状结构变形监测的关键,变形后的板状结构可以看作是空间曲面,因此只需要对空间曲面的重构问题进行研究即可。首先构造四边固支板状结构的正交网络模型,如图 6 所示。

根据图 6,沿 x 方向的网格线与沿 y 方向的网格线的交点为测量点。为了方便计算并减小误差,取沿 x 、 y 两个方向计算的测量点变形量的平均值作为真实变形值^[19]。

基于坐标变换的三维曲面可视化重构的实现过程主要包括:1)获取曲率信息;2)离散曲率的连续化;3)进行变形曲线的拟合;4)利用三次样条插值完

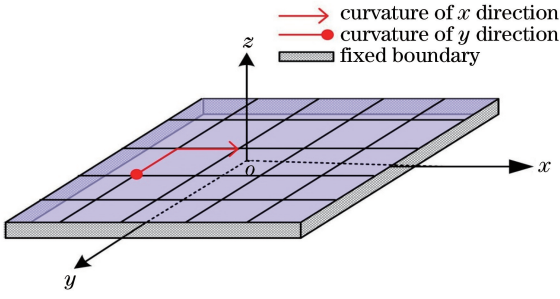


图 6 平板结构正交网络模型示意图

Fig. 6 Diagram of orthogonal network of plate structure
成曲面拟合并且通过 MATLAB 平台实现可视化重构。

因为本文中研究的结构在 x 、 y 方向具有对称性,所以只对 x 方向的曲线拟合进行说明。取变形后的一条曲线进行研究,通过仿真可以看出,板状结构加载变形后,曲面呈现平缓的山峰状,如图 3 所示。对于变形曲面内的曲线来说,中心点的转角最小接近于零,选择中心点作为原点构造的曲线的整体坐标系如图 7 所示,其中 x 轴为 P_0 点的切线, z 轴与切线垂直,此时坐标系的 xoy 面与未变形前的平板面平行。图中 $\widehat{P_0P_1}$ 和 $\widehat{P_1P_2}$ 是两段长分别为 s_1 、 s_2 的圆弧; ρ_1 表示 P_1 点的曲率半径,是曲率 k_1 的倒数; θ_1 表示 P_1 点的圆心角。

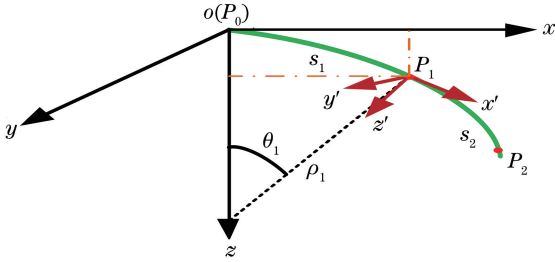


图 7 坐标转换示意图

Fig. 7 Coordinate conversion diagram

根据图 7 所展示的几何关系,得出 P_1 点的坐标为

$$\begin{cases} x_{P_1} = \sin(k_1 s_1) / k_1 \\ y_{P_1} = 0 \\ z_{P_1} = [1 - \cos(k_1 s_1)] / k_1 \end{cases} \quad (5)$$

P_1 点作为坐标递推的初始点,在获取其坐标值时,并不需要进行坐标旋转与平移等操作,因此(5)式即为其在整体坐标系中的坐标。同理,要想求得 P_2 点的坐标,首先需要将 P_0 点的坐标系绕 y 轴顺时针旋转,旋转角为 θ_1 ,然后将坐标系整体平移到点 P_1 ,建立 P_1 点的局部坐标系,由此可以得到点 P_2 在局部坐标系中的坐标为

$$\begin{cases} x_{P_2} = \sin(s_2 k_2) / k_2 \\ y_{P_2} = 0 \\ z_{P_2} = [1 - \cos(s_2 k_2)] / k_2 \end{cases}, \quad (6)$$

式中: k_2 表示 P_2 点的曲率。

求取 P_2 点的坐标时需要进行坐标旋转和坐标平移,因此需要对(6)式进行反向推导,获得其坐标元素构成的矩阵 $[X_{P_2}, Y_{P_2}, Z_{P_2}]$ 为

$$[X_{P_2}, Y_{P_2}, Z_{P_2}] = [x_{P_2}, y_{P_2}, z_{P_2}] \mathbf{M}_1 + [X_{P_1}, Y_{P_1}, Z_{P_1}], \quad (7)$$

式中: \mathbf{M}_1 表示 P_1 点的局部坐标系转换矩阵。

以此类推,采用递推法即可得到曲线上所有点的坐标,其中第 P_n 点的坐标元素构成的矩阵为

$$[X_{P_n}, Y_{P_n}, Z_{P_n}] = [x_{P_n}, y_{P_n}, z_{P_n}] \mathbf{M}_{n-1} \mathbf{M}_{n-2} \cdots \mathbf{M}_1 + [X_{P_{n-1}}, Y_{P_{n-1}}, Z_{P_{n-1}}], \quad (8)$$

式中: \mathbf{M}_n 表示 P_n 点的坐标转换矩阵,可表示为

$$\mathbf{M}_n = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta_n & \sin \theta_n \\ 0 & -\sin \theta_n & \cos \theta_n \end{bmatrix}, \quad (9)$$

式中: θ_n 表示 P_n 点的圆心角。

本文中测量点的变形量是指变形前、后各点的位移,即变形后各点到平板平面的垂直距离。而根据以上步骤计算出的各点坐标是相对于曲线中心点而言的,因此需要对所得坐标进行进一步处理。对于四边固支的结构,其边缘不会产生位移,即曲线末端点的变形量为零。如图 8 所示,假设曲线上任意一点 P_i 的 z 轴坐标为 z_i ,曲线末端点 P_m 点的 z 轴坐标为 z_m ,通过前文可知曲线整体坐标系的 xoy 面与平板平面平行,因此平面中各点的 z 轴坐标均为 z_m ,那么可得 P_i 点的变形量 Δz_i 为

$$\Delta z_i = z_m - z_i. \quad (10)$$

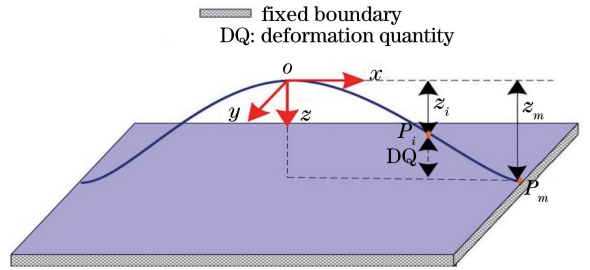


图 8 变形曲线与平板平面的关系示意图

Fig. 8 Diagram of relationship between deformation curve and flat plane

除了上文介绍的基于坐标转换的三维曲面重构算法,Glaser 等^[20]还提出了一种基于挠度曲线的曲

面重构算法,但是这种算法仅适用于以弯曲变形为主的情况,适用范围窄,不具有普遍性。

3.3 曲率连续化公式

实验中得到的曲率是有限离散的,为了满足坐标递推时相邻点曲率近似相等(即在同一条圆弧上)的条件,对其进行连续化处理是必不可少的,另外曲率作为曲线的二阶导数,其本身的连续性是拟合曲线平顺的关键条件。重构效果理想的重要前提就是曲率信息要精确,因此选择合适的插值方式很关键。针对四边固支的板状结构,本文采用了二次函数插值法,由此可以得出曲率 k 与距离固支端弧长 l 之

间的关系式为

$$k = Al^2 + Bl + C, \quad (11)$$

式中: l 表示测量点到边界点的距离; A 、 B 、 C 为系数。

已知连续三点的曲率为 k_n 、 k_{n+1} 、 k_{n+2} ,其距离固支端的距离分别为 l_n 、 l_{n+1} 、 l_{n+2} ,可得

$$\begin{bmatrix} k_n \\ k_{n+1} \\ k_{n+2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_n^2 & l_n & 1 \\ l_{n+1}^2 & l_{n+1} & 1 \\ l_{n+2}^2 & l_{n+2} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_n \\ B_n \\ C_n \end{bmatrix}, \quad (12)$$

利用矩阵求解的知识,即可获得 A_n 、 B_n 、 C_n 的表达式为

$$A_n = \frac{k_n(l_{n+1} - l_{n+2}) + k_{n+1}(l_{n+2} - l_n) + k_{n+2}(l_n - l_{n+1})}{E_n}, \quad (13)$$

$$B_n = -\frac{k_n(l_{n+1}^2 - l_{n+2}^2) + k_{n+1}(l_{n+2}^2 - l_n^2) + k_{n+2}(l_n^2 - l_{n+1}^2)}{E_n}, \quad (14)$$

$$C_n = \frac{k_n l_{n+1} l_{n+2} (l_{n+1} - l_{n+2}) + k_{n+1} l_n l_{n+2} (l_{n+2} - l_n) + k_{n+2} l_n l_{n+1} (l_n - l_{n+1})}{E_n}, \quad (15)$$

$$E_n = (l_n - l_{n+1})(l_n - l_{n+2})(l_{n+1} - l_{n+2}). \quad (16)$$

4 实验验证与分析

实验系统由控制计算机、高精度解调仪、分布式传感器网络以及千分表阵列组成。如图 9 所示,高精度解调仪采集的信息频率为 100 Hz,满足测量速率要求。在本文的设计和测试实验中,为保证传感器的稳定性和可靠性,光纤光栅采用全部粘贴的方法,在之前的研究中,其灵敏度为 $1.22 \text{ pm}/\mu\epsilon$ 。分布式传感器网络包括 18 只光纤光栅应变传感器,实

现了对节点正交方向应变信息的采集。通过遥控电机压缩弹簧对待测面中心区域施加载荷,板状结构产生的变形会引起被测点处产生应变,该应变信息被光纤应变传感器接收,经由高速光纤光栅解调仪进行解调处理,最后输出给计算机,计算机基于获得的应变信息、利用三维曲面重构算法并通过 MATLAB 平台实现变形后板状结构的可视化重构。另外在 a, b, c, d 4 个位置处布置千分表,用来进行被测点真实变形量的采集。

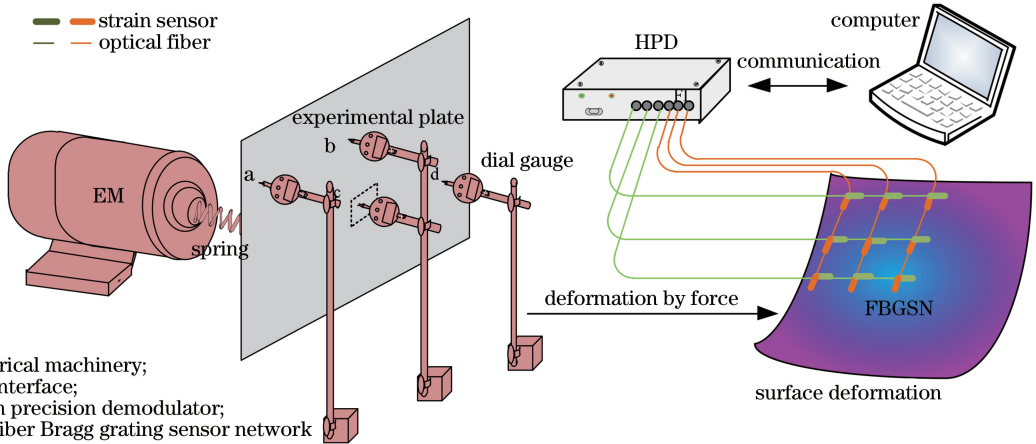


图 9 基于光纤光栅传感技术的变形检测实验系统

Fig. 9 Experimental system of deformation detection based on fiber Bragg grating sensing technology

对板状结构中心 $60 \text{ mm} \times 60 \text{ mm}$ 的区域施加 4 种大小不同的载荷,平板中心点位移量分别为

$0.5, 1.0, 1.5, 2.0 \text{ mm}$ 。本文采用线性插值法和二次函数插值法分别进行变形重构实验,结合实验所

得的变形值 D_m 与反演变形值 D_i , 对两者的重构曲面进行误差分析, 引入绝对误差 Δ , 基于坐标转换的三维曲面重构算法对相对误差 σ 和均方根误差 δ 进行评估, 如表 1~5 所示。

表 1 中心位移为 0.5 mm 的误差分析表

Table 1 Error analysis table for center displacement of 0.5 mm

Measured point	Measured value D_m/mm	Interpolation method	Inversion value D_i/mm	Absolute error Δ/mm	Relative error $\sigma/\%$
a	0.219	Linear	0.223	0.004	1.80
		Quadratic	0.215	0.004	1.80
b	0.319	Linear	0.340	0.021	6.58
		Quadratic	0.313	0.006	1.88
c	0.499	Linear	0.535	0.036	7.21
		Quadratic	0.501	0.002	0.40
d	0.323	Linear	0.348	0.025	7.74
		Quadratic	0.321	0.003	0.93

表 2 中心位移为 1.0 mm 的误差分析表

Table 2 Error analysis table for center displacement of 1.0 mm

Measuring point	Measured value D_m/mm	Interpolation method	Inversion value D_i/mm	Absolute error Δ/mm	Relative error $\sigma/\%$
a	0.441	Linear	0.454	0.013	2.95
		Quadratic	0.432	0.009	2.04
b	0.645	Linear	0.688	0.043	6.67
		Quadratic	0.652	0.007	1.08
c	1.000	Linear	1.084	0.084	8.40
		Quadratic	1.035	0.034	3.40
d	0.648	Linear	0.694	0.046	7.10
		Quadratic	0.645	0.003	0.46

表 3 中心位移为 1.5 mm 的误差分析表

Table 3 Error analysis table for center displacement of 1.5 mm

Measuring point	Measured value D_m/mm	Interpolation method	Inversion value D_i/mm	Absolute error Δ/mm	Relative error $\sigma/\%$
a	0.647	Linear	0.656	0.009	1.39
		Quadratic	0.633	0.014	2.16
b	0.952	Linear	1.024	0.072	7.56
		Quadratic	0.945	0.007	0.74
c	1.499	Linear	1.634	0.135	9.01
		Quadratic	1.551	0.051	3.40
d	0.957	Linear	1.031	0.074	7.73
		Quadratic	0.961	0.004	0.42

表 4 中心位移为 2.0 mm 的误差分析表

Table 4 Error analysis table for center displacement of 2.0 mm

Measuring point	Measured value D_m/mm	Interpolation method	Inversion value D_i/mm	Absolute error Δ/mm	Relative error $\sigma/\%$
a	0.879	Linear	0.878	0.001	0.11
		Quadratic	0.850	0.029	3.30
b	1.279	Linear	1.383	0.104	8.13
		Quadratic	1.267	0.012	0.94
c	2.006	Linear	2.204	0.198	9.87
		Quadratic	2.063	0.057	2.84
d	1.284	Linear	1.392	0.108	8.41
		Quadratic	1.282	0.002	0.16

表 5 不同中心位移下的平均误差分析表

Table 5 Table of mean error analysis under different center displacements

Table	Interpolation method	Average absolute error $\bar{\Delta}$ /mm	Mean relative error $\bar{\sigma}$ /%	Root-mean-square error δ /mm
1	Linear	0.022	5.83	0.024
	Quadratic	0.004	1.25	0.005
2	Linear	0.049	6.28	0.053
	Quadratic	0.013	1.74	0.021
3	Linear	0.076	6.42	0.085
	Quadratic	0.020	1.76	0.034
4	Linear	0.103	6.55	0.124
	Quadratic	0.025	1.81	0.038

误差主要受传感器数目和曲面插值步长大小的影响,当粘贴的传感器数量越多、曲面插值步长越短时,重构效果越接近实际情况,重构曲面和理想曲面之间的偏差越小。表 1~5 表明结构中心载荷增大,重构曲面的平均相对误差和均方根误差也会有所增大,但是在不同的加载方式下,二次函数插值法重构效果要明显优于线性插值法,重构曲面中各点的相对误差均保持在 3.5% 之内,

平均相对误差均小于 2%,均方根误差均小于 0.04 mm,相较于使用线性插值法得到的平均相对误差减小了 4% 左右。综上可知,本文研究的系统重构效果理想,适用于多种变形情况,且可以用于平板结构的变形监测。

采用二次函数插值法所得的重构效果图如图 10 所示,其中 x 轴代表长度, y 轴代表宽度, z 轴代表变形量,单位均为 mm。

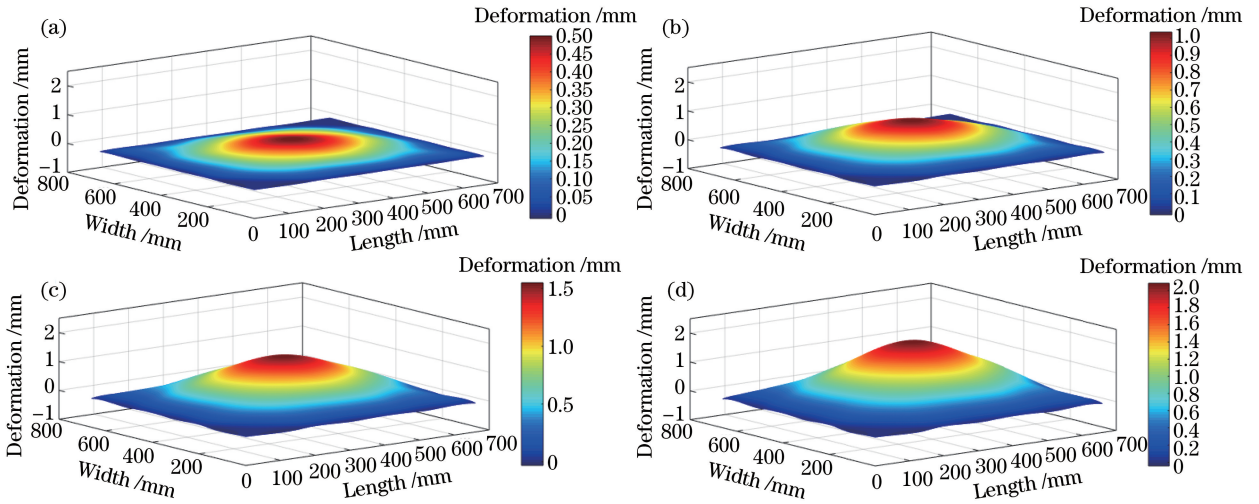


图 10 不同中心位移情况下三维变形曲面的重构图。(a) 0.5 mm; (b) 1.0 mm; (c) 1.5 mm; (d) 2.0 mm

Fig. 10 Reconstruction maps of three-dimensional deformed surfaces with different center displacements.

(a) 0.5 mm; (b) 1.0 mm; (c) 1.5 mm; (d) 2.0 mm

5 结 论

以航天器板状结构为研究对象,利用光纤光栅传感器网络获取节点的空间正交曲率,采用二次函数插值法对空间曲率进行连续化处理,提出了基于曲率信息的、以坐标转换为核心的三维曲面重构算法,最后利用 MATLAB 平台搭建了一套高精度检测板状结构变形的系统。通过将本文方法与采用传统线性插值法所得到的变形重构结果进行比较分

析,发现该变形监测系统具有运行效率高、准确度高、适用范围广等优点。基于光纤光栅传感器网络的变形重构算法不仅可以应用于航空航天方面,在地震监测、桥梁检测等方面也有很好的发展前景。

参 考 文 献

[1] Kim D H, Lee K H, Ahn B J, et al. Strain and damage monitoring in solar-powered aircraft composite wing using fiber Bragg grating sensors[J].

- Proceedings of SPIE, 2013, 8692: 869222.
- [2] Zhang X H, Zhu Y K, Zhang X Y, et al. Research on deformation monitoring technology of aircraft wing beam based on Fiber Bragg grating [C] // 2017 proceedings of Far East nondestructive testing new technology forum, [S.l.]: [s.n.], 2017
张新华, 朱永凯, 张许雅, 等. 基于光纤光栅的飞机翼梁形变监测技术研究[C]//2017 远东无损检测新技术论坛论文集, [出版地不详]: [出版者不详], 2017.
- [3] Zhang H S. Morphological perception and reconstruction of flexible structures based on orthogonal discrete FBG networks [D]. Shanghai: Shanghai University, 2015.
张合生. 基于正交离散 FBG 网络的柔板结构形态感知与重构[D]. 上海: 上海大学, 2015.
- [4] Nicolas M, Sullivan R, Richards W. Large scale applications using FBG sensors: determination of in-flight loads and shape of a composite aircraft wing [J]. Aerospace, 2016, 3(3): 18-32.
- [5] Bang H J, Shin H K, Ju Y C. Structural health monitoring of a composite wind turbine blade using fiber Bragg grating sensors[J]. Proceedings of SPIE, 2010, 7647: 76474H.
- [6] Li D T. Research on distributed optical fiber deformation monitoring technology of flexible structure [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2017.
李丹婷. 柔性结构分布式光纤变形监测技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2017.
- [7] Zhang Y Y. Research on deformation monitoring based on FBG sensor network[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2015.
张钰钰. 基于光纤光栅传感网络的变形监测研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2015.
- [8] Qu D M, Sun G K, Li H, et al. Optical fiber sensing and reconstruction method for morphing wing flexible skin shape [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(1): 144-151.
曲道明, 孙广开, 李红, 等. 变形机翼柔性蒙皮形状光纤传感及重构方法[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(1): 144-151.
- [9] Sun S H, Yu Y L, Li H, et al. Detection technique of stress waves based on fiber Bragg grating [J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(5): 0505002.
孙诗惠, 余有龙, 李慧, 等. 基于光纤光栅的应力波检测技术研究 [J]. 中国激光, 2016, 43(5): 0505002.
- [10] Chen G, Ding K Q, Feng Q B, et al. Strain transfer mechanism of end-bonding fibre Bragg grating sensors based on linear viscoelasticity [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(11): 110604.
陈光, 丁克勤, 冯其波, 等. 线黏弹性端接布拉格光纤光栅传感器应变传递机理[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(11): 110604.
- [11] Quan Z Q, Fang X Q, Xue G Z, et al. Strain transfer coupling mechanism of surface-bonded fiber Bragg grating sensor[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(1): 0104004.
权志桥, 方新秋, 薛广哲, 等. 表面粘贴布拉格光纤光栅传感器的应变传递耦合机理研究[J]. 中国激光, 2020, 47(1): 0104004.
- [12] Rapp S, Kang L, Han J, et al. Displacement field estimation for a two-dimensional structure using fiber Bragg grating sensors [J]. Smart Materials and Structures, 2009, 18(2): 025006.
- [13] Panopoulou A, Loutas T, Roulias D, et al. Dynamic fiber Bragg gratings based health monitoring system of composite aerospace structures [J]. Acta Astronautica, 2011, 69(7/8): 445-457.
- [14] Kim H I, Kang L H, Han J H. Shape estimation with distributed fiber Bragg grating sensors for rotating structures [J]. Smart Materials and Structures, 2011, 20(3): 035011.
- [15] Zhu X J, Ji L X, Zhang H S, et al. Analysis of 3D curve reconstruction method using orthogonal curvatures [J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2011, 19(2): 305-313.
朱晓锦, 季玲晓, 张合生, 等. 基于空间正交曲率信息的三维曲线重构方法分析[J]. 应用基础与工程科学学报, 2011, 19(2): 305-313.
- [16] Zhang J K, Sun G K, Li H, et al. Optical fiber shape sensing of polyimide skin for flexible morphing wing [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(2): 66-72.
张俊康, 孙广开, 李红, 等. 变形机翼薄膜蒙皮形状监测光纤传感方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(2): 66-72.
- [17] Zhou L. Research on structural thermal properties and deformation monitoring method based on optical fiber sensing technology [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2018.
周林. 基于光纤传感技术的结构热属性与变形监测方法研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2018.
- [18] Zhu X J, Lu M Y, Fan H C, et al. Experimental research on intelligent reconstruction based structure vibration shape perception and on fiber grating network [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2009, 30(1): 65-70.
朱晓锦, 陆美玉, 樊红朝, 等. 光纤光栅机敏结构振动形态感知与重构试验研究[J]. 仪器仪表学报, 2009, 30(1): 65-70.

[19] He K. Research on distributed fiber shape sensing and 3D reconstruction technology of flexible structure [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2018.
何凯. 柔性结构分布式光纤形态感知与三维重构技

术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2018.

[20] Glaser R, Caccese V, Shahinpoor M. Shape monitoring of a beam structure from measured strain or curvature[J]. *Experimental Mechanics*, 2012, 52(6): 591-606.