

doi:10.13756/j.gtxyj.2025.240164.

光纤光缆技术与应用

茶映鹏, 蔡建军, 彭星玲. 基于FBG的薄板空间形状重构误差分析[J]. 光通信研究, 2025(5):240164.

Cha Y P, Cai J J, Peng X L. Error Analysis of Spatial Shape Reconstruction of FBG-based Thin Plate[J]. Study on Optical Communications, 2025(5): 240164.

基于FBG的薄板空间形状重构误差分析

茶映鹏, 蔡建军, 彭星玲

(江西水利电力大学 精密驱动与装备江西省重点实验室, 南昌 330099)

摘要:【目的】为实现板状结构空间形状快速和准确地检测和重构,将4点光纤布拉格光栅(FBG)串封装到高锰钢薄板表面制成形状传感单元,利用FBG质轻、径细、灵敏度高、抗电磁干扰和可波分复用等优点,文章结合重构算法实现了薄板结构的形状传感和可视化重构。【方法】文章分析了温度修正后的薄板曲率传感与空间形状重构原理,进行了基于FBG薄板结构的温度和曲率标定实验。根据拟合温度灵敏度、曲率灵敏度以及曲率与波长变化量的表达式得到6种情况下的曲率组合,再利用线性插值、二次函数插值或三次样条曲率插值算法对曲率进行插值,得到更多的离散曲率点。通过对曲率进行坐标变换得到薄板的坐标信息后,利用B样条曲面重构薄板的空间形状。【结果】实验测得薄板的曲率灵敏度分别为-0.154、-0.248、-0.257和-0.235 nm/mm,经温度修正显著降低了曲面重构误差,线性插值、二次函数插值和三次样条插值的平均相对误差 R_{mean} 分别为2.47%、2.60%和2.21%,其中三次样条插值在单曲率(1.86%)和变曲率(2.04%)曲面重构中误差最小,表现最优。【结论】该方法通过温度修正可有效削弱环境干扰,结合三次样条插值算法能有效提升曲面重构精度,实现薄板结构位移、曲率和形状的同时预测。

关键词: 光纤布拉格光栅;薄板;曲率传感;温度修正;形状重构误差

中图分类号: TP212; TN253 **文献标志码:** A

Error Analysis of Spatial Shape Reconstruction of FBG-based Thin Plate

CHA Yingpeng, CAI Jianjun, PENG Xingling

(Jiangxi Province Key Laboratory of Precision Drive and Equipment, Jiangxi University of Water Resources and Electric Power, Nanchang 330099, China)

Abstract: 【Objective】In order to realize the rapid and accurate detection and reconstruction of the spatial shape of the plate structure, a 4-point Fiber Bragg Grating (FBG) string is surface-mounted on a high-manganese steel thin plate to form a shape-sensing unit. Leveraging the advantages of FBGs-lightweight, compact size, high sensitivity, immunity to electromagnetic interference, and wavelength-division multiplexing-the system integrates a reconstruction algorithm to achieve shape sensing and visual reconstruction of thin-plate structures. 【Methods】The principle of curvature sensing and spatial shape reconstruction of thin plate after temperature correction is analyzed. The temperature and curvature calibration experiments of thin plate structure based on FBG are carried out. By fitting temperature sensitivity, curvature sensitivity, and the relationship between curvature and wavelength shift, six curvature combinations are derived. Then the curvature interpolation algorithm of linear interpolation, quadratic function interpolation or cubic spline curvature interpolation is used to interpolate the curvature, and more discrete curvature points are obtained. After the coordinate information of the thin plate is obtained by the coordinate transformation of the curvature, the spatial shape of thin plate is reconstructed by using B-spline surface fitting. 【Results】The curvature sensitivity of the sheet metal is experimentally measured as -0.154, -0.248, -0.257 and -0.235 nm/mm, respectively. The error of surface reconstruction is significantly reduced by temperature correction. Among these methods, cubic spline interpolation achieve the lowest error in both single-curvature (1.86%) and variable-curvature (2.04%) surface reconstruction, thus exhibiting the superior performance. 【Conclusion】The proposed method effectively mitigates environmental interference through temperature correction and enhances the surface reconstruction accuracy by employing a cubic spline interpolation algorithm, thereby enabling simultaneous prediction of displacement, curvature, and shape in thin plate structures.

Key words: FBG; thin plate; curvature sensing; temperature correction; shape reconstruction error

0 引言

随着航空航天业的发展,飞行器机翼蒙皮、桁架和翼梁等关键结构在运行过程中受极端气候条件和撞击等外力的影响而发生大尺度变形时,会带来极

大的安全隐患。因此,飞行器关键结构的形状监测尤为重要^[1]。光纤布拉格光栅(Fiber Bragg Grating, FBG)具有质轻、径细、灵敏度高、不受电磁干扰和可波分复用等特点,易于与板状结构集成,实时监测结构变形^[2-3]。2017年, Xu等^[4]通过测量FBG

收稿日期:2024-08-01; 修回日期:2024-08-15; 纸质出版日期:2025-10-10

基金项目:江西省教育厅科技资助项目(GJJ211911);江西省2023年度大学生创新创业训练计划资助项目(S202311319014)

作者简介:茶映鹏(1988-),男,云南凤庆人。工程师,硕士,主要研究方向为光纤传感技术。

通信作者:彭星玲,副教授。E-mail: pengxingling0223@163.com

© Editorial Office of Study on Optical Communications. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

的波长变化实现了波长与板状结构曲率之间的转换,误差约为2.7%;2019年,Jäckle等^[5]提出了一种考虑FBG空间位置的插值方法用于曲线重建,该方法在弧形和S形曲线重建中平均误差分别为1.53和0.47mm;随后,刘智超等^[6-7]利用曲率对板状结构曲面进行B样条重构,平均相对误差小于4.53%;2024年,王彦等^[8]通过三次样条插值对曲率插值后重构的薄板末端位移相对误差在0.55%~8.30%之间。

虽然国内外研究人员研究了曲率与波长之间的转换关系,利用曲率插值和曲线重建的方法实现了形状重构,但曲率传感与形状重构过程中往往忽略了温度变化对波长的影响,由于FBG对温度非常敏感,温度变化会导致曲率测量误差,并且曲率插值方法的不同会进一步影响曲率的准确性,从而影响形状重构精度。故本文研究了基于FBG的薄板结构曲率传感与形状重构算法,推导了可进行温度修正的多点FBG曲率计算公式,分析比较了修正前后不同插值方法带来的曲面重构误差。

1 传感原理以及重构算法

1.1 FBG曲率传感原理

FBG反射中心波长变化量 $\Delta\lambda_B$ 关于应变 ϵ 和温度变化量 ΔT 的表达式为^[9]

$$\Delta\lambda_B = k_\epsilon \epsilon + k_T \Delta T, \quad (1)$$

式中: k_ϵ 为应变灵敏度系数; k_T 为温度灵敏度系数。

假设薄板厚度为 h ,薄板微元长度为 L_1 ,薄板微元增量为 ΔL ,圆心角为 θ 。利用微元法绘制薄板的应变原理图如图1所示。

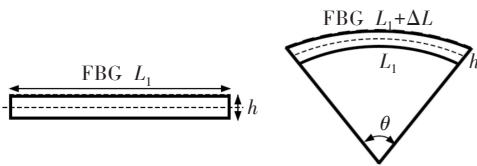


图1 应变原理图

Figure 1 The principal diagram of strain

根据材料力学原理,由文献^[10]和图1可得应变 ϵ 关于曲率 K 的表达式为

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L_1} = \frac{h}{2} K. \quad (2)$$

将式(2)代入式(1)中, i 为对应FBG的点数,令第 i 点的曲率灵敏度 $S_{Ki} = \frac{hK_{\epsilon i}}{2}$, $K_{\epsilon i}$ 为第 i 点FBG对应的应变灵敏度,可得多点FBG曲率 K_i 的理论表达式为

$$K_i = \frac{1}{S_{Ki}} (\Delta\lambda_{Bi} - K_{Ti} \Delta T), \quad (3)$$

式中: $\Delta\lambda_{Bi}$ 第 i 点FBG对应的波长变化量; K_{Ti} 为温度灵敏度。得到 K_{Ti} 后,对温度引起的相应波长变化进行修正,此时的波长变化由弯曲应力引起,能更为准确地反映曲率大小。

1.2 曲率插值算法

常用的曲率插值算法有线性插值、二次函数插值和三次样条插值,通过曲率插值实现离散曲率的近似连续化。

线性插值法是以一次多项式的插值方式将曲率与弧长看成线性关系,利用线性插值法在每相邻的两个离散点之间插值得到弧长 s 对应的曲率 $K(s)$ ^[11],表示为

$$K(s) = as + b, \quad (4)$$

式中, a 和 b 为多项式系数。二次函数插值是利用每3个相邻的点 (x_0, y_0) 、 (x_1, y_1) 和 (x_2, y_2) 构建一个二次多项式,使得多项式通过这些点得到曲率^[12],表示式为

$$K(s) = as^2 + bs + c, \quad (5)$$

式中, c 为多项式系数。

三次样条插值是通过一系列控制点构建分段三次函数,形成一条光滑曲线,通过求解三弯矩方程组得出分段曲线函数组,在各连接点满足二阶连续可导的条件下得到^[13]:

$$\begin{aligned} K_{i-1}(s) &= a_{i-1} + b_{i-1}(s-s_{i-1}) + \\ & c_{i-1}(s-s_{i-1})^2 + d_{i-1}(s-s_{i-1})^3, \\ s_{i-1} &\leq s \leq s_i, \end{aligned} \quad (6)$$

式中: $K_{i-1}(s)$ 为第 i 段弧长对应的曲率; a_{i-1} 、 b_{i-1} 、 c_{i-1} 和 d_{i-1} 均为第 i 段弧长的三次函数系数。

1.3 平面坐标变换算法

将连续的曲率转化成局部坐标 (x_i, z_i) ^[14]:

$$\begin{cases} x_i = R_i(1 - \cos \theta_i) \\ z_i = R_i \sin \theta_i \end{cases}, \quad (7)$$

式中: R_i 为第 i 段的弯曲半径; θ_i 为第 i 段的圆心角。

将上式转换成矩阵形式 $P_{Bi} = [x_i, z_i, 1]^T$,则第 i 点的齐次变化矩阵 T_{Bi} 表示为

$$T_{Bi} = R_{Oi} P_i, \quad (8)$$

式中: R_{Oi} 为第 i 点的旋转矩阵; P_i 为第 i 点的平移矩阵。

第 i 点的累计齐次变化矩阵 T_{Ai} 可表示为^[15]

$$T_{Ai} = T_{Bi} \cdots T_{Bi0} \quad (9)$$

第 i 点的坐标 P_{Ai} 在XOZ坐标系下表示为

$$P_{Ai} = T_{A(i-1)} P_{Bi}, \quad (10)$$

式中： P_{Ai} 为第 i 点在 XOZ 坐标系中的坐标； P_{Bi} 为第 i 点在前一坐标系中的坐标； $T_{A(i-1)}$ 为第 $i-1$ 点在 XOZ 坐标系中累计的齐次变换矩阵。最后利用平面坐标变换算法将离散的曲率得到散乱的坐标点之后，再利用 B 样条曲面重构算法拼接得到一张完整的曲面^[16]。

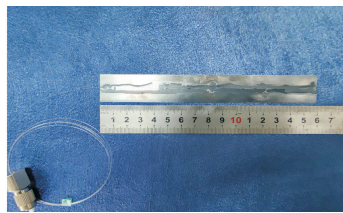
2 实验设备和装置

实验设备和装置如图 2 所示，选用北京基康科技有限公司生产的波长分辨力为 1 pm、精度为 ± 5 pm 的 BGK-FBG-8210 光纤光栅解调仪记录 FBG 中心波长的变化；选用上海博讯实业有限公司 CS501 超级恒温水浴箱为温度标定实验提供恒温环境，温度精度为 ± 0.1 °C；选用聚甲基丙烯酸甲酯 (PMMA) 作为曲率标定材料，定制了 K 分别为 11.76、13.28、15.38 和 17.39 m^{-1} 的 PMMA 空心管；选用弹性模量 $E=220$ GPa 的高锰钢，加工了总长 L 为 160 mm、宽度 w 为 25 mm、厚度 h 为 0.2 mm 的矩形薄板；定制了天工探索(北京)科技有限公司生产的 4 点 FBG 串，出厂时 $FBG_1 \sim FBG_4$ 的中心波长分别为 1 529.99、1 537.51、1 545.03 和 1 552.55 nm，相邻 FBG 间隔 40 mm；采用 2.5:1 环氧树脂 AB 胶，将 FBG 串两端以一定的预应力拉伸后粘贴到高锰钢表面制成形状传感单元。



(a) 曲率标定块与解调仪

(a) Curvature calibration block and demodulator



(b) 基于 FBG 的薄板结构

(b) FBG-based thin plate structure

图 2 实验相关设备

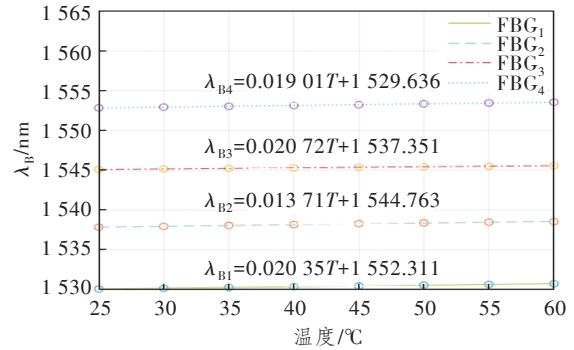
Figure 2 The related experimental equipment

3 形状传感单元的变形标定

3.1 温度标定实验

将粘贴 FBG 串的高锰钢薄板置于超级恒温水

浴箱中，FBG 串的一端与解调仪相连接。将超级恒温水浴箱的水温从 25 °C 加热至 60 °C，再从 60 °C 冷却至 25 °C，每间隔 5 °C 记录 3 次 4 组 FBG 的波长数据，再取平均值，温度标定曲线如图 3 所示。



注： λ_B 为波长； $\lambda_{B1} \sim \lambda_{B4}$ 为 $FBG_1 \sim FBG_4$ 对应的波长。

图 3 温度标定曲线

Figure 3 The calibration curve of temperature

由图中温度标定曲线得到：温度灵敏度系数 K_{T1} 、 K_{T2} 、 K_{T3} 以及 K_{T4} 分别为 19.01、20.72、13.71 和 20.35 $pm/^\circ C$ ，4 组 FBG 温度 T 关于波长 λ_B 的拟合优度 R^2 分别为 0.99、0.99、0.98 以及 0.99。结果表明温度与波长呈良好的线性关系。由于 FBG 封装用到的胶黏剂环氧树脂 AB 胶及高锰钢具有较高的热膨胀系数，4 个 FBG 温度灵敏度系数都高于裸 FBG 的温度灵敏度系数(约 10.5 $pm/^\circ C$)^[17]。

3.2 曲率标定实验

将高锰钢薄板置于有机玻璃标定块内侧进行曲率标定实验，实验时室温为 27.5 °C，实验过程中将光纤串与解调仪相连，观察并记录中心波长的变化，将同一组曲率实验重复 3 次取平均值，通过最小二乘法得到曲率灵敏度和拟合优度，曲率标定曲线如图 4 所示。

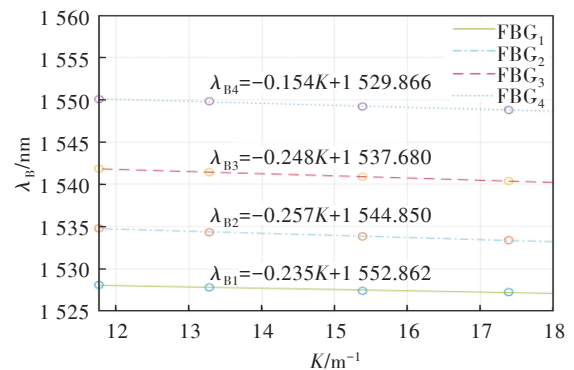


图 4 曲率 K 标定曲线

Figure 4 The calibration curve of curvature K

因 FBG 受到内壁的压力，导致 FBG 的波长与曲率呈负相关，曲率灵敏度 S_{K_i} 分别为 -0.154 、 -0.248 、 -0.257 和 -0.235 nm/mm ，4 组 FBG 曲率

关于波长 λ_B 的拟合优度 R^2 分别为 0.97、0.99、0.99 以及 0.99, 表明曲率与波长线性关系较好。

4 实验结果与误差分析

4.1 曲面重构图

根据标定的 4 种曲率组合得到 6 种情况的曲面: 情况 1 为 $K=11.76 \text{ m}^{-1}$ 的单曲率曲面; 情况 2 为 $K=17.39 \text{ m}^{-1}$ 的单曲率曲面; 情况 3 为由 $K=11.76 \text{ m}^{-1}$ 和 $K=15.38 \text{ m}^{-1}$ 构造的双曲率曲面; 情况 4 为由 $K=13.28 \text{ m}^{-1}$ 和 $K=17.39 \text{ m}^{-1}$ 构造的双

曲率曲面; 情况 5 为由 $K=13.28 \text{ m}^{-1}$ 、 $K=15.38 \text{ m}^{-1}$ 和 $K=17.39 \text{ m}^{-1}$ 构造的 3 曲率曲面; 情况 6 为由 $K=11.76 \text{ m}^{-1}$ 、 $K=15.38 \text{ m}^{-1}$ 和 $K=17.39 \text{ m}^{-1}$ 构造的 3 曲率曲面。温度修正时以 20°C 为基准, 将实验温度调至与基准温度差值为 7.5°C , 将第 3 部分标定得到的温度灵敏度系数和曲率灵敏度系数代入式(3)计算出温度修正后的曲率, 再采用线性插值、二次函数插值和三次样条插值算法进行曲率插值和曲面重构后分别得到 6 种情况下的重构曲面, 与实际的曲面进行对比如图 5 所示。

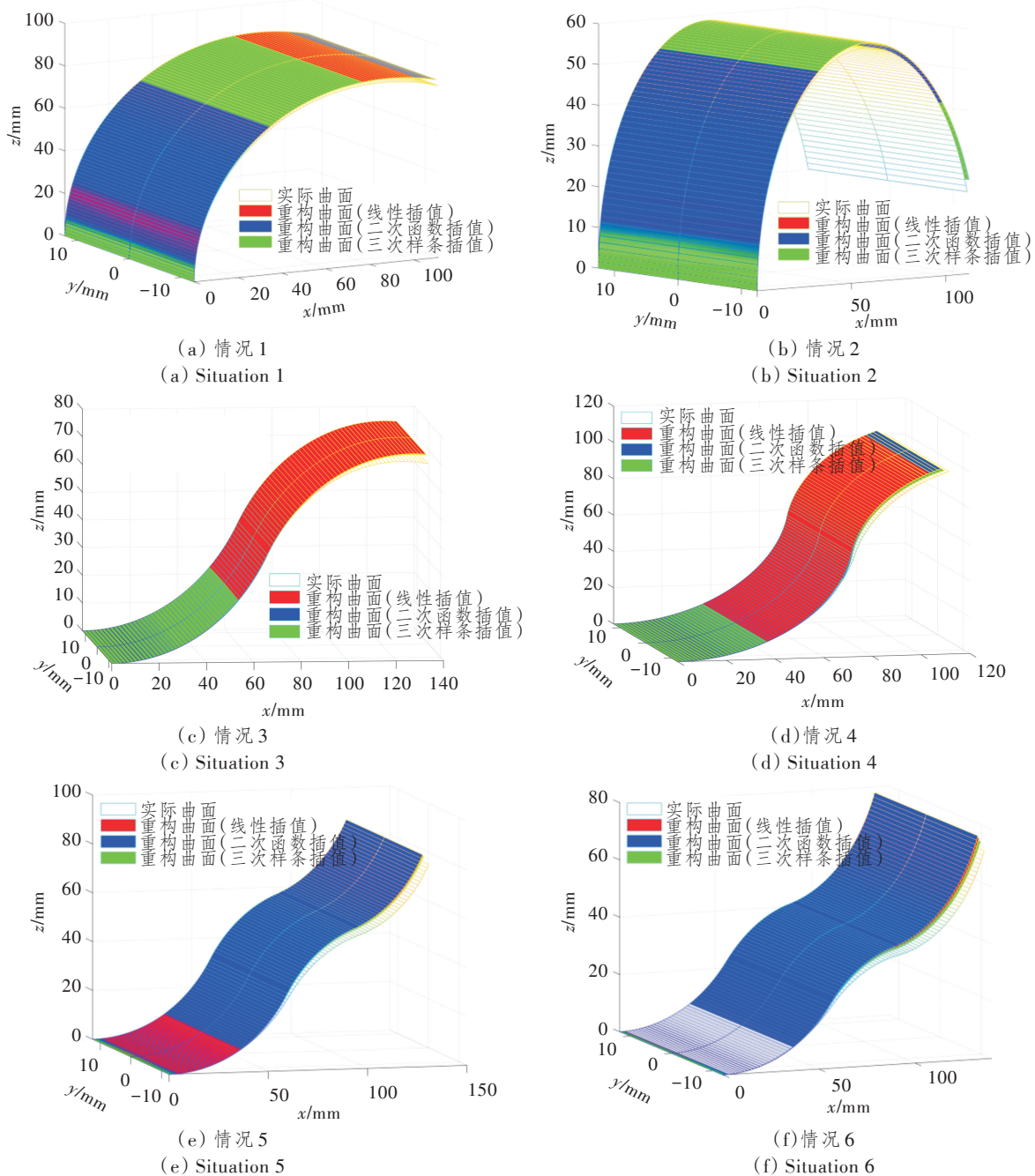


图 5 温度修正后的 6 种曲面

Figure 5 Six types of curves after temperature correction

由图可知,无论是单一曲率的均匀曲面,还是双曲率和 3 曲率的变曲率曲面,对曲率进行温度修正后,采用 3 种插值算法重构得到的曲面形状相似,与实际曲面相接近。但由于曲率插值和坐标变换带来的累计误差,曲面后半段重合度不够高,存在一定的误差。

4.2 误差分析

FBG 形状传感器的重构误差通常用最大绝对误差 E_{\max} 和最大相对误差 R_{\max} 来衡量^[18]。曲面的最大绝对误差 E_{\max} 表达式为

$$E_{\max} = \max(\sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 + (z-z_0)^2}), \quad (11)$$

式中: x 、 y 和 z 为检测点的重构坐标; x_0 、 y_0 和 z_0 为检测点的实际坐标。曲面的最大相对误差 R_{\max} 表达式为

$$R_{\max} = E_{\max}/L, \quad (12)$$

式中, L 为重构材料的长度。

针对 4.1 节中 6 种曲率的组合情况,将修正前后 3 种曲率插值法计算得到的曲率进行坐标变换和曲面重构后得到的 E_{\max} 和 R_{\max} 放入表 1 和表 2 中进行对比分析,得到如下结论:

①修正前 R_{\max} 不超过 7.58%, E_{\max} 不超过 12.13 mm,修正后 R_{\max} 不超过 3.94%, E_{\max} 不超过 6.31 mm,经过温度修正后 R_{\max} 最大减少了 3.64%, E_{\max} 最大减少了 5.82 mm;

②修正前线性插值、二次函数插值和三次样条插值方法的平均相对误差 R_{mean} 分别为 5.20%、5.34% 和 4.89%,修正后 3 种插值方法的平均相对误差 R_{mean} 分别为 2.47%、2.60% 和 2.21%;

③单曲率曲面时,修正后 3 种插值方法得到的 R_{\max} 都在 1.90% 左右,插值效果接近,三次样条插值效果略好;

④变曲率曲面时,三次样条插值效果最好,修正后得到的 R_{\max} 最小为 2.04%。

本文实验结果与其他文献的结果相比,温度修正后采用三次样条插值与曲面重建后的平均相对误差 R_{mean} 为 2.21%,小于文献[4]的相对误差 2.7% 以及文献[6-7]的相对误差 4.53%。温度修正后的相对误差在 1.86%~3.94% 之间,而文献[8]的相对误差在 0.55%~8.30% 之间,验证了算法的可行性。

表 1 3 种曲率插值方法的误差对比(温度修正前)

Table 1 Error comparison of curvature interpolation methods (before temperature correction)

	线性插值		二次函数		三次样条	
	$E_{\max}/$ mm	R_{\max} (%)	$E_{\max}/$ mm	R_{\max} (%)	$E_{\max}/$ mm	R_{\max} (%)
情况 1	5.02	3.14	4.90	3.06	5.06	3.16
情况 2	3.95	2.47	3.94	2.46	4.03	2.52
情况 3	8.92	5.57	8.96	5.60	8.84	5.53
情况 4	10.33	6.46	10.26	6.41	8.71	5.44
情况 5	10.70	6.69	11.12	6.95	10.44	6.53
情况 6	10.95	6.84	12.13	7.58	9.84	6.15
平均误差	8.31	5.20	8.55	5.34	7.82	4.89

表 2 3 种曲率插值方法的误差对比
(7.5 °C 温度修正后)

Table 2 Error comparison of curvature interpolation methods (after 7.5 °C temperature correction)

	线性插值		二次函数		三次样条	
	$E_{\max}/$ mm	R_{\max} (%)	$E_{\max}/$ mm	R_{\max} (%)	$E_{\max}/$ mm	R_{\max} (%)
情况 1	3.04	1.90	3.08	1.92	2.98	1.86
情况 2	3.14	1.94	3.07	1.89	3.01	1.86
情况 3	3.62	2.27	3.58	2.24	3.44	2.15
情况 4	3.79	2.37	3.90	2.44	3.27	2.04
情况 5	4.74	2.96	5.10	3.19	4.32	2.70
情况 6	5.35	3.35	6.31	3.94	4.20	2.62
平均误差	3.95	2.47	3.75	2.60	3.54	2.21

5 结束语

本文设计了基于 FBG 的薄板形状传感单元,分析了该传感单元的曲率传感、插值、坐标变换和 B 样条曲面重构原理,进行了温度与曲率标定实验,将温度修正前后重构的曲面与实际曲面进行了对比。结果表明:修正前线性插值、二次函数插值、三次样条插值方法的 R_{mean} 分别为 5.20%、5.34% 和 4.89%,修正后 3 种插值方法的 R_{mean} 分别为 2.47%、2.60% 和 2.21%;温度修正后 3 种插值算法都能够有效降低形状重构误差,但线性插值算法简单、计算速度快、实时性好且适合重构单曲率曲面,三次样条插值对单曲率和变曲率曲面重构都较为适合,能够获得更好的重构效果。通过理论和实验研究为薄板结构空间形状重构提供了理论和方法支持,为不同场合曲面形状重构时插值算法的选择提供了一定的依据。

参考文献:

- [1] 黄文恺, 梁智洪, 王明华, 等. 数字孪生在航空航天结构设计、制造和运维中的应用与展望[J]. 图学学报, 2024, 45(2): 241–249.
Huang W K, Liang Z H, Wang M H, et al. Application and Prospect of Digital Twin in the Design, Manufacturing, and Operation of Aerospace Structures [J]. Journal of Graphics, 2024, 45(2): 241–249.
- [2] 田婧, 祝连庆, 姚雾峰, 等. 低损耗超声波金属化光纤布拉格光栅传感特性研究[J]. 红外与激光工程, 2024, 53(6): 168–174.
Tian J, Zhu L Q, Yao J F, et al. Sensing Characteristics of Low-Loss Metallized Fiber Bragg Grating by Ultrasonic Welding [J]. Infrared and Laser Engineering, 2024, 53(6): 168–174.
- [3] 丁宝艳, 赵强, 陈东营, 等. 光纤布拉格光栅压力传感技术与应用进展[J]. 光通信研究, 2024(3): 230018.
Ding B Y, Zhao Q, Chen D Y, et al. Technology and Application Progress of Fiber Bragg Grating Pressure Sensing [J]. Study on Optical Communications, 2024(3): 230018.
- [4] Xu L, Ge J, Patel J H, et al. Dual-layer Orthogonal Fiber Bragg Grating Mesh based Soft Sensor for 3-Dimensional Shape Sensing [J]. Optics Express, 2017, 25(20): 24727–24734.
- [5] Jäckle S, Strehlow J, Heldmann S. Shape Sensing with Fiber Bragg Grating Sensors [C]// Bildverarbeitung für die Medizin 2019. Wiesbaden, Germany: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2019: 258–263.
- [6] 张旭, 侯茂盛, 刘智超, 等. 基于光纤布拉格光栅传感器的板壳结构曲面重构算法[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(9): 090603.
Zhang X, Hou M S, Liu Z C, et al. Surface Reconstruction Algorithm of Plate-Shell Structure based on Fiber Bragg Grating Sensor [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(9): 090603.
- [7] 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): 2406001.
Yin L X, Liu Z C, Liu C H. Surface Structure State Perception System based on FBG Array [J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(24): 2406001.
- [8] 王彦, 徐浩雨, 汪俊亮, 等. 环形布设光纤布拉格光栅的三维曲面形状重构[J]. 中国光学(中英文), 2024, 17(2): 398–408.
Wang Y, Xu H Y, Wang J L, et al. Three-Dimensional Surface Shape Reconstruction of Fiber Bragg Gratings in a Ring Arrangement [J]. Chinese Optics, 2024, 17(2): 398–408.
- [9] 黎敏, 廖延彪. 光纤传感器及其应用技术[M]. 北京: 科学出版社, 2018.
Li M, Liao Y B. Optical Fiber Sensor and Its Application Technology [M]. Beijing, China: Science Press, 2018.
- [10] Peng X, Cai J, Gong Z, et al. Design and Measurement of a Parallel-dual FBG Shape Sensor for Elastic Cantilever Beam Structure Shape Reconstruction [J]. Optical Fiber Technology, 2024, 86: 103849.
- [11] He L, Rong F, Wang Z. A New α Algorithm based on Lagrange Linear Interpolating Power Prediction for Photovoltaic Systems [J]. IEICE Electronics Express, 2024, 21(16): 20240267.
- [12] Hu S, Li F, Li X. Weight Hierarchies of a Class of Three-Weight P-ary Linear Codes from Inhomogeneous Quadratic Functions [J]. Applicable Algebra in Engineering, Communication and Computing, 2025, 36(5): 877–896.
- [13] Sun M, Lan L, Zhu C G, et al. Cubic Spline Interpolation with Optimal End Conditions [J]. Journal of Computational and Applied Mathematics, 2023, 425: 115039.
- [14] Wang Q, Li P, Rocca P, et al. Interval-based Tolerance Analysis Method for Petal Reflector Antenna with Random Surface and Deployment Errors [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2023, 71(11): 8556–8569.
- [15] Lynch K M, Park F C. Modern Robotics [M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2017.
- [16] Jiang X, Lin Y. Reparameterization of B-spline Surface and Its Application in Ship Hull Modeling [J]. Ocean Engineering, 2023, 286: 115535.
- [17] Feng D, Zhou W, Qiao X, et al. Compact Optical Fiber 3D Shape Sensor based on a Pair of Orthogonal Tilted Fiber Bragg Gratings [J]. Scientific Reports, 2015, 5: 17415.
- [18] Chen S, Huang J, Liu W, et al. Spectrum Characteristics and Temperature Measurement Error of FBG Sensor based on Rotor Temperature Monitoring System [J]. Optical Fiber Technology, 2023, 78: 103306.