

## 基于 FBG 阵列的曲面结构状态感知系统

殷礼鑫<sup>1,2</sup>, 刘智超<sup>1,2\*</sup>, 刘春辉<sup>1,2</sup><sup>1</sup>长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022;<sup>2</sup>长春理工大学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** 针对由应变场变化和环境载荷等因素引起的结构变形问题,设计了一种基于光纤光栅传感网络的自由曲面结构状态感知系统,提出了基于布拉格光栅(FBG)阵列测试数据的三维曲面重建算法。通过 ANSYS 对曲面结构加载不同状态载荷,仿真分析了其应变场分布规律,在 100 N 时其最大形变量为 0.243 mm,并根据应力场分布特性确立了 FBG 阵列的位置。搭建了曲面位置偏移及三维应力场分布的测试系统。实验结果表明,Handyscan 测量数据与实际测量数据的绝对误差均保持在 0.026 mm 之内,说明三维重构曲面可以很好地反映实际曲面受应力后的面形变化,其变形曲面重构的 FBG 各测量点数据与 Handyscan 测量数据的相对误差均保持在 6.67% 之内,平均相对误差均小于 4.53%。所得结果验证了系统的可行性。该测试技术可用于飞行器结构健康监测中蒙皮面形偏差监测及应力场分析。

**关键词** 光纤光栅; 结构变形; 三维重构; 空间曲面结构; 结构健康监测

**中图分类号** TP212; TP253

**文献标志码** A

**doi:** 10.3788/CJL202148.2406001

## 1 引言

随着国内航空航天领域的迅猛发展,实际应用对现代飞机的安全、高效、长寿命与经济性等要求也越来越高,而基于光纤光栅(FBG)传感网络的航天飞行器结构健康监测得到越来越多的重视<sup>[1]</sup>。飞机在停滞阶段会受到自身重量影响而发生形变,在飞行阶段会因受到风阻力等因素而影响周围的应变场,这使得机身和机翼等部分受到损伤<sup>[2]</sup>。因此研究飞行器结构的健康监测具有重要的应用价值。

近年来,国外基于光纤光栅的传感阵列在对曲面面形的应变测量和重建方面的应用广泛,因此光纤光栅传感器在航空航天研究领域有着重大的突破和发展,而大型飞机工作的环境复杂多变<sup>[3-5]</sup>,对结构感知器件的性能要求高,目前用于结构健康监测的方法如数字摄像法、压电传感器法以及三坐标法等<sup>[6-9]</sup>均具有测量过程复杂、仪器相对笨重、操作复杂等特点,不适用于进行飞行器结构的实时监测<sup>[10]</sup>。因此基于光纤光栅传感器的飞行器结构状

态检测技术研究成为重点。2013 年, Kahandawa 等<sup>[11]</sup>分析了光纤布拉格光栅传感器在纤维增强聚合物航空航天结构的健康监测中的用途;2019 年, Sebastian 等<sup>[12]</sup>采用有限元法分析侧孔光纤布拉格光栅传感器的压力响应,优化了侧孔封装参数,其与裸光纤光栅传感器相比,压力灵敏度提高了近  $10^5$  倍,光纤光栅传感器的压力灵敏度得到大幅提高。2018 年,曲道明等<sup>[13]</sup>分析了光纤光栅波长漂移与柔性蒙皮弯曲曲率的关系,验证了变形机翼柔性蒙皮形状光纤传感实时监测的技术可行性;2019 年,章亚男等<sup>[14]</sup>建立了光纤光栅成  $90^\circ$  分布的形状传感器的应变传递数学模型,通过将应变传递率引入形状重建中,提高重建精度,缩小末端误差。

综上所述,当前国内外对板状结构和特定结构的研究较多,而对于自由曲面结构整体的状态感知的研究少之又少,所以在面向飞行器整体结构形态变化实时监测方面<sup>[15-17]</sup>,关于基于 FBG 阵列的曲面结构状态感知系统的研究并不多见。为实现自由曲面结构变形的检测和曲面结构重构<sup>[18-19]</sup>,本文以飞

收稿日期: 2021-03-22; 修回日期: 2021-04-27; 录用日期: 2021-05-17

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)

通信作者: \*lzc@cust.edu.cn

行器的结构健康监测与曲面重构为研究背景,通过对自由曲面结构进行整体的应变场变化监测,利用 FBG 阵列来测量曲面结构的曲率信息和应变,并构建三维重构算法对曲面结构进行三维重构,从而达到实时感知曲面结构状态的目的。

## 2 曲面结构形态感知与三维重构方法

### 2.1 FBG 测量原理

FBG 是在光纤纤芯内介质折射率呈周期性调制的一种光纤无源器件<sup>[20]</sup>,根据耦合模理论,当宽带光在光纤光栅中传输时,满足 Bragg 中心波长条件的光被反射,反射光的中心波长为

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

式中: $\lambda_B$  为 Bragg 中心波长; $n_{\text{eff}}$  为光纤光栅的有效折射率,即折射率调制幅度的平均值; $\Delta$  为光纤光栅的周期或间距。由(1)式可知,光纤光栅的反射光中心波长取决于有效折射率  $n_{\text{eff}}$  和光栅周期  $\Delta$ 。

在温度已标定的情况下,当光纤光栅受到应变  $\epsilon$  影响时,Bragg 波长的变化量  $\lambda_B$  可以表示为

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

式中: $P_e$  为有效弹光系数,约为 0.216; $\Delta\lambda_B$  为光纤光栅中心波长的变化量。

通过在曲面结构表面粘贴 FBG 传感器,建立待测点的光纤光栅中心波长的偏移量与该点的应变值的关系,从而得到被测点的曲率信息。如图 1 所示,选取曲面上一段厚度为  $h$ 、长度为  $R$  的微元段进行分析,其中 FBG 传感器粘贴于该微元段的中间位置,微元上下表面的变化量为  $\Delta R$ , $\theta$  表示圆弧对应的圆心角, $\rho$  表示曲率半径。当对曲面微元结构施加载荷时,曲面微元结构的上表面被拉伸、下表面被压缩,在压缩与拉伸两个变形间存在一个位置、长度保持不变且应变为零的中性层(图 1 中虚线位

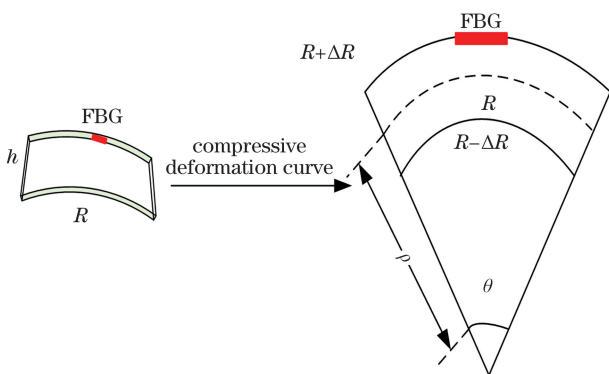


图 1 变形前后微元段示意图

Fig. 1 Schematic diagram of micro-element segment before and after deformation

置)。变形前后的微元段如图 1 所示。

如图 1 所示,由于该曲面结构为等厚度曲面结构,根据材料力学与弧长公式,可知

$$\begin{cases} R = \rho \times \theta \\ R - \Delta R = \left(\rho - \frac{h}{2}\right) \times \theta \end{cases}, \quad (3)$$

化简为

$$k = \frac{1}{\rho} = \frac{2}{h} \times \frac{\Delta R}{R} = \frac{2}{h} \times \epsilon. \quad (4)$$

将(2)式代入(4)式可得 FBG 中心波长偏移量与曲率  $k$  的关系式为

$$k = \frac{1}{\rho} = \frac{2\Delta\lambda_B}{\lambda_B(1 - P_e)h}. \quad (5)$$

对于确定的 FBG,反射中心波长  $\lambda_B$  和有效弹光系数  $P_e$  为常数。因此只要知道被测微元的厚度  $h$ 、FBG 传感器的中心波长偏移量  $\Delta\lambda_B$ ,将其代入(5)式就可以得到待测点的曲率值,而计算得出的各测点处曲率值为后续的三维曲面重构算法提供了理论支撑。

### 2.2 三维重构算法

对于曲面变形结构来说,将曲面结构分解成为无数条平面曲线,其中心思路是将曲面结构分成  $N$  段曲线,如图 2 所示,令其中一段曲线的起始点为  $O$  点,通过计算终点坐标以及坐标增量,如此递推算出其他曲线段的坐标,最后由曲线还原整个曲面。根据微分几何原理,曲率和弧长信息可以决定曲面的形状,在对曲面结构的状态感知中,通过 FBG 测量点的应变信息和波长偏移量信息,可以得到该点的曲率信息,最后达到三维曲面重构。

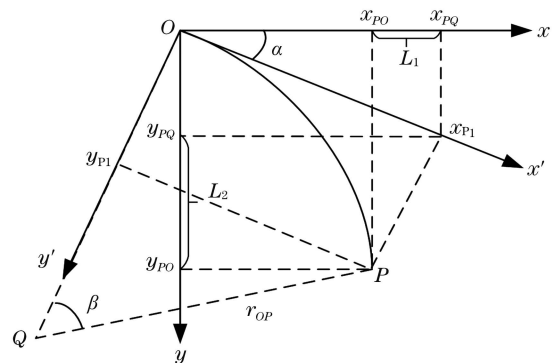


图 2 坐标转换示意图

Fig. 2 Schematic diagram of coordinate conversion

如图 2 所示,取某一段变形曲线所在位置建立第一坐标系  $xOy$ ,过  $O$  点作曲线  $OP$  的切线,为  $Ox'$ ,过  $O$  点作  $Ox'$  的垂线为  $Oy'$ ,建立第二坐标系  $x'Oy'$ , $P$  点在  $xOy$  上的坐标为  $(x_{PO}, y_{PO})$ , $P$  点在

$x'Oy'$  上的坐标为  $(x_{P1}, y_{P1})$ ,  $s$  为曲线  $OP$  的弧长,  $\alpha$  为曲线  $OP$  的切线  $Ox'$  与  $x$  轴的夹角,  $\beta$  为曲线  $OP$  的圆心角,  $r_{OP}$  为曲线  $OP$  的曲率半径。根据微分几何关系,  $\alpha$  与曲率、弧长之间存在的关系为

$$\alpha = \int_{s=0}^{300} k(s) ds. \quad (6)$$

如图 2 所示,  $x_{PQ}$  是点  $P$  在坐标系  $x'Oy'$  下的横坐标  $x_{P1}$  在  $x$  坐标轴的投影,  $y_{PQ}$  是点  $P$  在坐标系  $x'Oy'$  下的横坐标  $x_{P1}$  在  $y$  坐标轴的投影, 由三角几何知识可知

$$\begin{cases} L_1 = y_{P1} \times \sin \alpha \\ L_2 = y_{P1} \times \cos \alpha \end{cases} \quad (7)$$

在第一坐标系  $xOy$  中, 由于  $L_1$  为  $x_{PQ}$  与  $x_{PO}$  的坐标之差,  $L_2$  为  $y_{PQ}$  与  $y_{PO}$  的坐标之差, 则

$$\begin{cases} L_1 = x_{PQ} - x_{PO} = x_{P1} \times \cos \alpha - x_{PO} \\ L_2 = y_{PO} - y_{PQ} = y_{PO} - x_{P1} \times \sin \alpha \end{cases} \quad (8)$$

联立(7)、(8)式可得

$$\begin{bmatrix} x_{PO} \\ y_{PO} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha \\ \sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{P1} \\ y_{P1} \end{bmatrix} \quad (9)$$

在第二坐标系  $x'Oy'$  中, 由三角形  $\Delta QP y_{PQ}$  可得

$$\begin{cases} x_{P1} = r_{OP} \times \sin \beta \\ y_{P1} = r_{OP} \times (1 - \cos \beta) \end{cases} \quad (10)$$

在第二坐标系  $x'Oy'$  中, 根据微分几何中曲率半径与弧长的关系, 可得

$$\begin{cases} \beta = \frac{s}{r_{OP}} \\ r_{OP} = \frac{r_O + r_P}{2} = \frac{k_O + k_P}{2k_O k_P} \end{cases}, \quad (11)$$

式中:  $r_O, r_P$  分别表示  $O, P$  两点的曲率半径。联立(9)~(11)式可得

$$\begin{bmatrix} x_{PO} \\ y_{PO} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha \\ \sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{k_O + k_P}{2k_O k_P} \times \sin \frac{s}{r_{PO}} \\ \frac{k_O + k_P}{2k_O k_P} \times \left(1 - \cos \frac{s}{r_{PO}}\right) \end{bmatrix}, \quad (12)$$

联立(5)式与(12)式可得

$$\begin{bmatrix} x_{PO} \\ y_{PO} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha \\ \sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{(1 - P_e) h}{4\Delta\lambda_{B,O} \Delta\lambda_{B,P}} \times \sin \frac{s}{r_{PO}} \\ \frac{(1 - P_e) h}{4\Delta\lambda_{B,O} \Delta\lambda_{B,P}} \times \left(1 - \cos \frac{s}{r_{PO}}\right) \end{bmatrix}, \quad (13)$$

式中:  $\Delta\lambda_{B,O}$  与  $\Delta\lambda_{B,P}$  分别为在  $O, P$  两点测得的光纤中心波长偏移量。利用(13)式可求出  $P$  点相对于  $O$  点的坐标增量  $x_{PO}$  以及  $y_{PO}$ 。按照上述流程便可求出整条曲线的坐标增量, 循环直至无数条变形曲线全部计算完成, 最后将所有曲线段一一相连。对于大型复杂的工件来说, 此算法具有精度高、计算量少等优点。

### 3 测试系统设计

#### 3.1 仿真设计

本文主要研究的待测物是 6061 铝合金材料且厚度均匀的自由曲面外向结构, 板厚度为 3 mm, 板密度  $\rho$  为 2.89 g/m<sup>3</sup>, 弹性系数  $E$  为 68.9 GPa, 泊松比  $\nu$  为 0.330。为了了解待测件表面受施压时的变形程度, 通过 ANSYS workbench 模块对待测件施加载荷, 由仿真结果可以看出自由曲面结构表面的应变场分布趋势, 图 3(a)、(b)分别为加载 40 N、100 N 时飞行器板壳表面的应变场分布。

图 3 是通过 ANSYS 有限元分析软件给定四边固定等约束条件得到的待测件结构表面应变分布图。图 3(a)为施加 40 N 载荷时待测件结构的形变分布, 图 3(b)为施加 100 N 载荷时待测件结构的形变分布, 由图 3(a)、(b)可以看出, 复杂面形工件表面在受载荷作用时, 形变变化较大区域分别分布在工件的中心两侧, 施加 100 N 载荷时最大形变量为 0.2425 mm, 施加 40 N 载荷时最大形变量为 0.1213 mm。而在形变最大值以外, 越远离中心点的位置形变越小。根据图中应变场分布趋势, 可以确定 FBG 的位置分布。在应变变化梯度明显的位置处粘贴 FBG 传感器, 光纤分布成 90° 分布, 这样有利于感知应变变化。工艺上采用胶水将传感器紧密粘合在工件表面, 传感器采用塑料封装方式, 更能有效地贴合复杂面形, 从而提高测量精度。

#### 3.2 系统构成

系统由扫频激光器、耦合器、光纤光栅解调仪、压力器、设计的自由曲面等组成。通过仿真分析可知, 在图 4 所示的系统整体结构的形变最大处以及曲率变化较大处粘贴 FBG 传感器, 共计 6 个 FBG 传感器, 将其依次相连, 形成 FBG 传感网络。扫频激光器发出的激光经过耦合器进入 FBG 传感器, 所测信号经耦合器的耦合后, 在光纤光栅解调仪上实时显示解调结果。

由图 4 中的系统整体结构示意图可以看出, 由



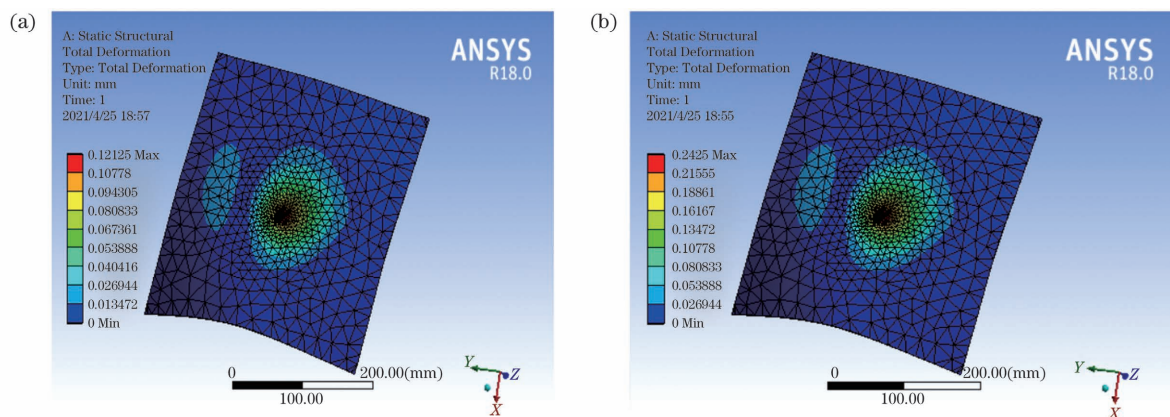


图 3 待测件结构表面应变分布图。(a)施加载荷为 40 N;(b)施加载荷为 100 N

Fig. 3 Surface strain distributions of structure to be tested. (a) Load is 40 N; (b) load is 100 N

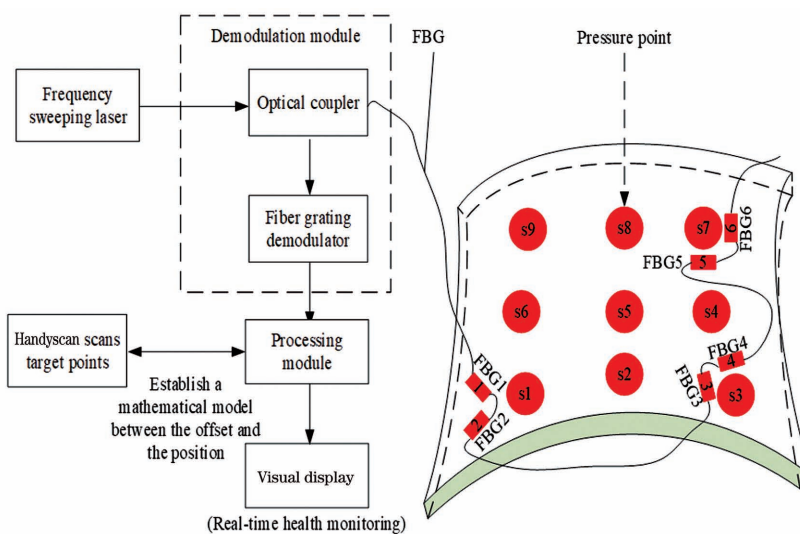


图 4 系统整体结构示意图

Fig. 4 Schematic diagram of overall system structure

于曲面结构具有复杂性,所以在自由曲面结构上选择 9 个位置进行不同载荷的施压变形分析,这 9 个位置几乎覆盖整个结构,说明测试位置的全面性,并记录在 9 个位置处施加不同载荷时光纤的中心波长偏移量。根据图 3 中 ANSYS 仿真的施压形变分布图,可得 s1、s3 处曲率较大,s7 处形变变化大。

## 4 实验验证与分析

### 4.1 实验过程

建立基于 FBG 传感器的三维应变场曲面,实验装置的实物图如图 5 所示,选取合适的元器件,包括 Handyscan 手持双目扫描仪、FBG 传感器、自由曲面、压力器、光纤光栅解调仪、光纤耦合器等,搭建曲面位置偏移及三维应力场分布的实验测试系统。所选取的 6 个 FBG 传感器的边模抑制比均为 18.75 dB,栅区长度为 10 mm,其中心波长分别是:

1530.1795, 1539.6166, 1542.8915, 1547.5220, 1549.2798, 1552.6104 nm。

实验所用宽带光源为光纤光栅解调仪内部的自带光源,其光谱宽度为 1525~1565 nm,光源平坦度  $\leq 2$  dBm。光纤光栅解调仪的解调范围为 1525~1565 nm,最小分辨率为 0.5 pm。

先将光纤都连接起来,接入解调仪,测试每个光纤的中心波长,以保证光纤无损坏。在弯曲结构上分布式地贴上光纤,调整中心波长,并使其物理值为 0。此时压力计为 0 N。开始施压,并记录 0, 20, 40, 60, 80, 100 N 时物理值的变化量,在记录每一个压力时,改变施压位置,从而达到记录更多光纤实际变化的目的。利用 Handyscan 手持双目扫描仪辅助结构状态感知系统,实验中将靶标点按照合理选择的最优位置粘贴在工件上,利用 Handyscan 手持双目扫描仪扫描靶标点,在软件 VXelements 上得到

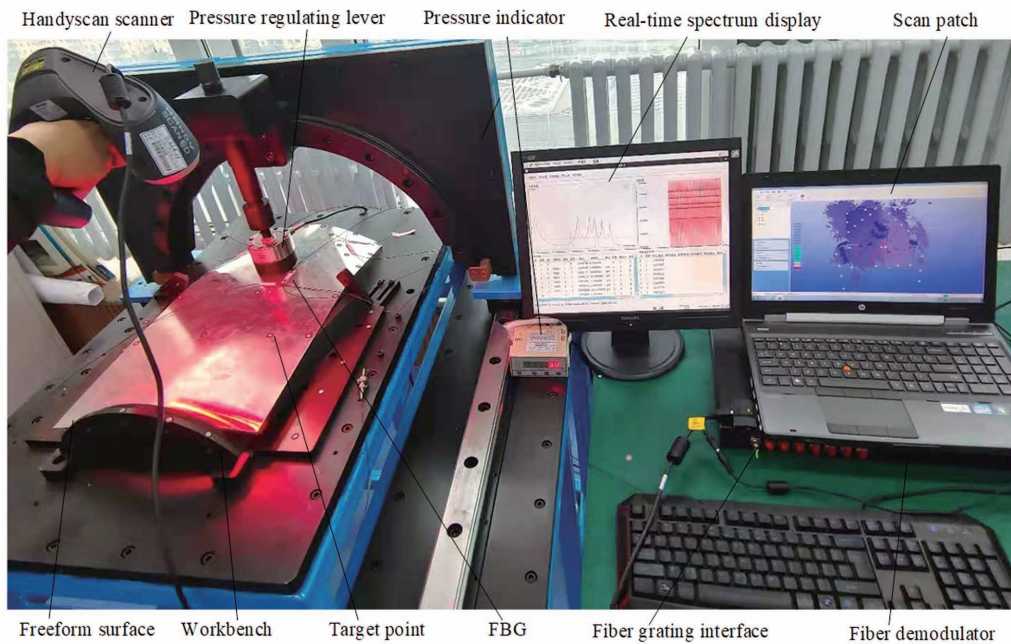


图 5 实验装置的实物分布图

Fig. 5 Physical distribution diagram of experimental device

靶标点的定位标点,然后扫描整个待测件表面面形。由于实验误差的存在,极个别点的定位会略有偏差,但并不影响实验结果。利用 MATLAB 处理扫描结果,计算出施力前后定位标点的空间偏移量。

#### 4.2 实验结果与分析

施加载荷时分别测量粘贴的 6 个光纤所在位置的物理值偏移量,并记录 0, 20, 40, 60, 80, 100 N 时物理值的变化量,在不发生塑性变形的条件下,观察工件在不同压力下不同位置所受微应变  $\mu\epsilon$  的变化。FBG 传感器反射谱中心波长偏移量  $\Delta\lambda_B$  与被测点产生的微应变  $\mu\epsilon$  成正比。记录各施力点处在相同压力时 FBG 传感器所产生的中心波长变化值,对于不同被测点,每 10 s 取中心波长的偏移量值,即  $\Delta\lambda_B$  的大小,并连续记录 9 组数据,以保证高测量精度,如图 6 所示。

由图 6 可知,横坐标表示的施加载荷范围为 0~100 N,纵坐标表示每个光纤在受到一定的载荷时的中心波长偏移量。结合图 6 和 2.1 节 FBG 测量原理可知,应变应与 FBG 中心波长偏移量呈一次函数关系,2.2 节三维重构算法表明曲率与光纤中心波长偏移量呈正相关关系。如图 6 所示,当施压点在 s1、s2、s3、s5、s8 时,如图 6(a)、(b)、(c)、(e)、(h)所示,FBG3 和 FBG4 的中心波长偏移量是随着施加载荷的增大而减小,而其他 4 个则相反;当施压点在 s6、s9 时,如图 6(f)、(i)所示,FBG4 和 FBG5 的中心波长偏移量随着施加载荷的增大而增大,而

其他 4 个则相反;当施压点在 s4、s7 时,如图 6(d)、(g)所示,FBG2 和 FBG3 的中心波长偏移量随着施加载荷的增大而减小,而其他 4 个则相反。综上所述,由于施加不同载荷时,施压点在 s1、s2、s3、s5、s8 处的波长偏移量的变化趋势相同,选取 s2 点 FBG 的测量数据与 ANSYS 仿真值、Handyscan 测量数据进行对比。同理,对 s7、s9 处数据进行对比实验。

当压力器的施压力固定为 100 N 时,通过对实验数据的拟合,可以准确地分析待测件表面粘贴的 6 个 FBG 传感器在压力作用下的应变变化。对被测件 6 个 FBG 传感器的实际测量应变值与仿真应变值进行对比分析。

图 7 横坐标表示实验粘贴的 FBG 个数,纵坐标表示当受到 100 N 的力时,根据 2.1 节 FBG 测量原理[(2)式]推导出的 6 根 FBG 的中心波长偏移量,即每个 FBG 传感器在 100 N 压力作用下的应变值。然后与相同条件下 ANSYS 仿真值进行对比,可以看到实验所测应变与仿真值的绝对误差最大为  $0.7 \mu\epsilon^{-1}$ ,相对误差均小于 2.81%。实验中 FBG 应变片组在相同受力下监测到的被测工件应变的最大变化量为  $28.5 \mu\epsilon^{-1}$ ,而在相同受力条件下 ANSYS 仿真值的应变最大变化量为  $28.3 \mu\epsilon^{-1}$ 。结果表明通过 FBG 测量的方法精度高且该精度接近理论值。

对曲面状结构中心的三块区域施加大小不同的载荷。本文采用线性插值法进行变形重构实验,结合 ANSYS 仿真形变值、实际测量形变值、



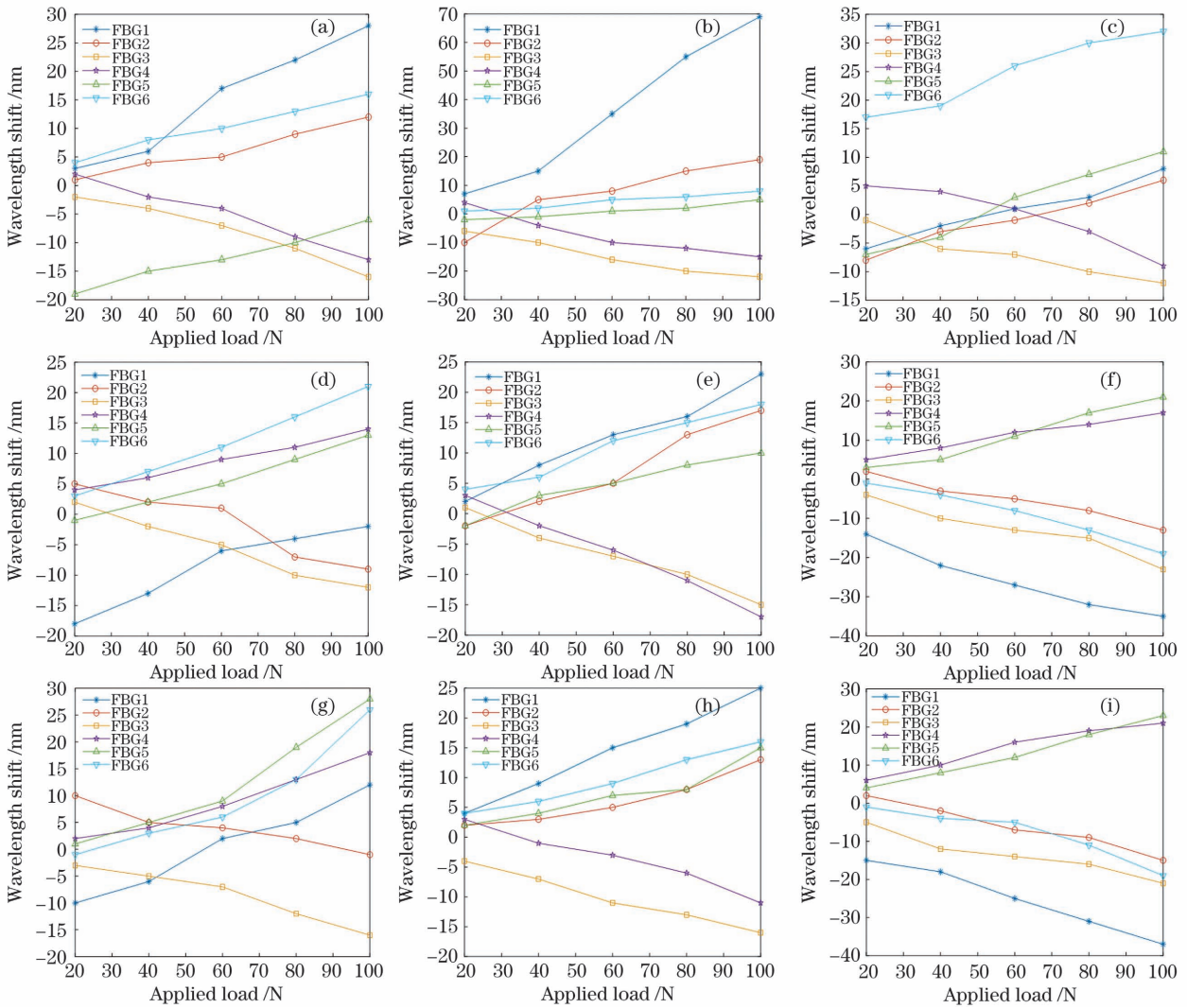


图 6 不同施压点位置的光纤波长偏移量示意图。(a)施压点在 s1;(b)施压点在 s2;(c)施压点在 s3;(d)施压点在 s4;(e)施压点在 s5;(f)施压点在 s6;(g)施压点在 s7;(h)施压点在 s8;(i)施压点在 s9

Fig. 6 Schematic diagrams of fiber wavelength offsets at different pressure points. (a) Pressure point is at s1; (b) pressure point is at s2; (c) pressure point is at s3; (d) pressure point is at s4; (e) pressure point is at s5; (f) pressure point is at s6; (g) pressure point is at s7; (h) pressure point is at s8; (i) pressure point is at s9

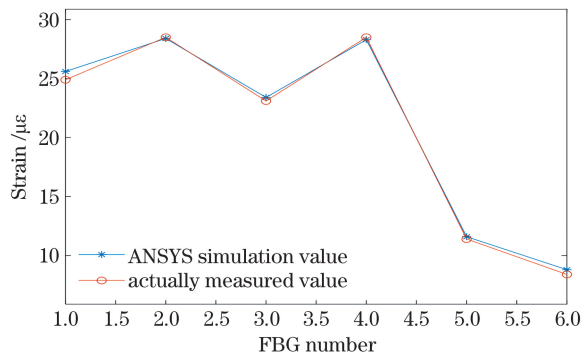


图 7 实际测量应变值与仿真值对比分析图

Fig. 7 Comparison and analysis diagram of actually measured strain values and simulated values

Handyscan 手持双目扫描仪测量获得的待测件空间偏移量结果,对重构效果进行误差分析,引入相对误

差  $\sigma$ 、绝对误差  $\Delta$ ,以评估三维曲面重构算法的准确性,如表 1~3 所示。

由表 1~3 可以看出,对比 Handyscan 扫描仪与 FBG 阵列测试数据发现,通过 FBG 阵列所得到的测试数据接近 Handyscan 扫描仪测量得到的数据。Handyscan 扫描仪扫描的是定位标点的中心处,该位置与实际点位有偏差,并且在扫描面片时会出现许多毛刺杂点,所以,对被测工件施力前后坐标点处 Handyscan 测量数据与 ANSYS 仿真值有一定的误差。Handyscan 测量数据与实际测量数据的绝对误差均保持在 0.026 mm 之内,FBG 阵列测试数据与 Handyscan 测量数据的相对误差均保持在 6.67% 之内,平均相对误差均小于 4.53%。因此,由应变传感器反演出的受力区域内的空间偏移量值

表 1 施压点在 s2 时的误差分析表

Table 1 Error analysis table when pressure point is at s2

FBG number	Deformation value /mm			Absolute error $\Delta$ /mm	Relative error $\sigma$ /%
	ANSYS	FBG	Handyscan		
1	0.215	0.231	0.221	0.010	4.32
2	0.239	0.252	0.244	0.008	3.17
3	0.351	0.403	0.377	0.026	6.45
4	0.327	0.312	0.301	0.011	3.52
5	0.134	0.149	0.142	0.007	4.70
6	0.138	0.151	0.141	0.010	6.62

表 2 施压点在 s9 时的误差分析表

Table 2 Error analysis table when pressure point is at s9

FBG number	Deformation value /mm			Absolute error $\Delta$ /mm	Relative error $\sigma$ /%
	ANSYS	FBG	Handyscan		
1	0.214	0.221	0.223	0.002	0.90
2	0.229	0.233	0.246	0.013	5.58
3	0.113	0.123	0.115	0.008	6.50
4	0.102	0.112	0.105	0.007	6.25
5	0.335	0.342	0.331	0.011	3.22
6	0.329	0.335	0.327	0.008	2.39

表 3 施压点在 s7 时的误差分析表

Table 3 Error analysis table when pressure point is at s7

FBG number	Deformation value /mm			Absolute error $\Delta$ /mm	Relative error $\sigma$ /%
	ANSYS	FBG	Handyscan		
1	0.123	0.141	0.136	0.005	3.54
2	0.132	0.135	0.126	0.009	6.67
3	0.252	0.257	0.246	0.011	4.28
4	0.247	0.252	0.268	0.016	6.35
5	0.312	0.324	0.337	0.013	4.01
6	0.331	0.349	0.338	0.011	3.15

接近 Handyscan 测量结果,这符合实验预期效果。对 ANSYS 仿真结果与实际测量形变值、Handyscan 手持双目扫描仪测量获得的待测件空间偏移量结果进行对比分析,结果证明利用 FBG 阵列来实时监测曲面结构状态感知的方法具有可行性。

在对模型的三维应变场分布进行检测时,模型受压力等因素产生变形,导致粘贴在其表面的 FBG 中心波长发生偏移,对所得的中心波长偏移量通过 MATLAB 软件进行线性插值运算处理,得到的三维重构曲面模型如图 8 所示。通过 Handyscan 扫描定位标点以及面片,然后经过 Qualify 点云处理

得到的重构曲面如图 9 所示。

本文研究的系统重构效果理想,适用于多种变形情况,其中采用线性插值法所得的重构效果图如图 8 所示。基于 2.2 节的三维重构算法,通过对待测物施加载荷得到 FBG 中心波长偏移量。根据 2.2 节数学模型推导公式,可以得到测量点的坐标,然后依次推导出其他点的坐标,利用 MATLAB 进行线性插值,可得三维曲面重构模型图。对比图 8 与图 9 可得,经过第 2 节的三维重构算法得到的三维重构曲面近似接近于 Handyscan 扫描得到的曲面。粘贴的 FBG 传感器数量越多,重构效果越接近

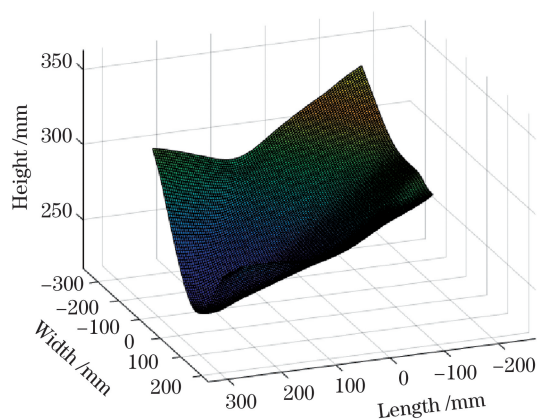


图 8 MATLAB 三维曲面重构图

Fig. 8 Three-dimensional surface reconstruction by MATLAB

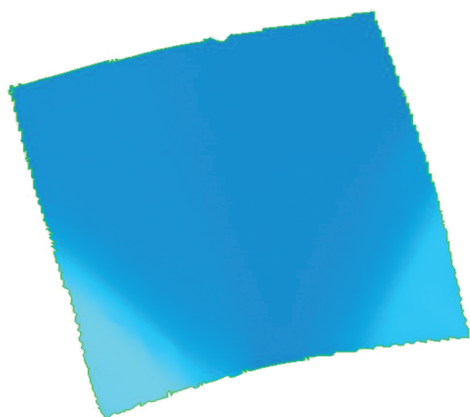


图 9 Qualify 点云处理后三维曲面图

Fig. 9 Three-dimensional surface map after Qualify point cloud processing

实际情况, 重构曲面和理想曲面之间的偏差越小, 这为证明利用 FBG 阵列来达到实时监测曲面结构状态变化提供了有力支撑。

## 5 结 论

以航天器曲面结构为研究对象, 采用线性插值法对空间曲率进行连续化处理, 提出了基于 FBG 阵列测试数据的三维重建算法, 最后搭建了一套曲面位置偏移及三维应力场分布的测试系统。给出了符合复杂面形结构的 FBG 传感器网络分布设计, 并结合自由曲面应变检测实验, 对应变敏感位置的测试数据进行了优化处理, 该研究为飞行器结构健康监测的布局、设计提供了新的理论与数据支撑。所研究的基于光纤光栅传感网络的自由曲面结构状态感知系统和三维曲面重构算法能够比较精确地重构、再现复杂自由曲面, 不仅验证了相关研究思路的可行性, 同时为进一步实现航天飞行器典型结构形态实时感知和重构提供了有益的思路方法和技术储备。

## 参 考 文 献

- [1] Wei L, Liu Z, Li H C, et al. Fiber Bragg grating vibration sensor based on sensitive structure for “土”-shaped beam[J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(11): 1106004.  
魏莉, 刘壮, 李恒春, 等. 基于“土”字形梁增敏结构的光纤光栅振动传感器[J]. *光学学报*, 2019, 39(11): 1106004.
- [2] Wang H H, Peng S M, Gui X, et al. High-sensitivity fiber Bragg grating strain sensor based on single-mode-multimode-singlemode tapered structure [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(13): 132802.  
王洪海, 彭思敏, 桂鑫, 等. 基于单模-多模-单模拉锥结构的高灵敏度光纤布拉格光栅应变传感器[J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(13): 132802.
- [3] Yan J, Li W, Jiang M S, et al. Shape perception and three-dimensional reconstruction technology of plate structure based on fiber Bragg grating sensor [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(11): 1106006.  
闫洁, 李伟, 姜明顺, 等. 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[J]. *中国激光*, 2020, 47(11): 1106006.
- [4] Luo B B, Xie L, Wang Y J, et al. Performance optimization of excessively tilted fiber grating cantilever beam vibration sensor [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(8): 0806006.  
罗彬彬, 谢浪, 王亚杰, 等. 极大倾角光纤光栅悬臂梁振动传感器性能优化[J]. *光学学报*, 2019, 39(8): 0806006.
- [5] Ioannou A, Theodosiou A, Caucheteur C, et al. Direct writing of plane-by-plane tilted fiber Bragg gratings using a femtosecond laser [J]. *Optics Letters*, 2017, 42(24): 5198-5201.
- [6] Liu F, Ma W L, Guo X. Study on radial pressure sensing characteristics of EVA sensitivity enhanced fiber grating[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(10): 1006001.  
刘丰, 马文龙, 郭璇. EVA 增敏的光纤光栅径向压力传感特性研究[J]. *光学学报*, 2015, 35(10): 1006001.
- [7] Zhang R X, Zhu Z B, Wu G H. Static pure strain sensing using dual-comb spectroscopy with FBG sensors [J]. *Optics Express*, 2019, 27(23): 34269-34283.
- [8] Yu C W, Lei S C, Chen W S, et al. Downhole fiber optic temperature-pressure innovative measuring system used in Sanshing geothermal test site [J]. *Geothermics*, 2018, 74: 190-196.
- [9] Kim J M, Kim C M, Choi S Y, et al. Enhanced strain measurement range of an FBG sensor embedded in seven-wire steel strands [J]. *Sensors*,



- 2017, 17(7): 1654.
- [10] Szebényi G, Blöbl Y, Hegedüs G, et al. Fatigue monitoring of flax fibre reinforced epoxy composites using integrated fibre-optical FBG sensors [J]. *Composites Science and Technology*, 2020, 199: 108317.
- [11] Kahandawa G C, Epaarachchi J, Wang H, et al. Extraction and processing of real time strain of embedded FBG sensors using a fixed filter FBG circuit and an artificial neural network [J]. *Measurement*, 2013, 46(10): 4045-4051.
- [12] Sebastian S, Sridhar S, Shiva Prasad P, et al. Highly sensitive fiber Bragg grating-based pressure sensor using side-hole packaging[J]. *Applied Optics*, 2019, 58(1): 115-121.
- [13] 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.
- [14] Zhang Y N, Fan D, Shen L Y, et al. Strain transmission and accuracy experiment of FBG thin-diameter shape sensor [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2019, 27(7): 1481-1491.  
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.
- [15] Wang Y H, Zhang M Y, Liu X Y, et al. Research on comparison of fiber Bragg grating and static resistance used in Jacked model pipe pile test [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2019, 30(10): 1079-1085.  
王永洪, 张明义, 刘雪颖, 等. 光纤光栅和静态电阻在静压模型管桩测试中的对比试验研究[J]. *光电子·激光*, 2019, 30(10): 1079-1085.
- [16] Skvortsov M I, Wolf A A, Dostovalov A V, et al. Distributed feedback fiber laser based on a fiber Bragg grating inscribed using the femtosecond point-by-point technique[J]. *Laser Physics Letters*, 2018, 15(3): 035103.
- [17] Cheng L, Wang Q, Li J X, et al. A posture evaluation method for a large component with thermal deformation and its application in aircraft assembly [J]. *Assembly Automation*, 2014, 34(3): 275-284.
- [18] Li Y L, Sun Q H, Li X W. Real-time *in situ* monitoring of internal stress of the electroplating processes using FBG sensors[J]. *Applied Physics A*, 2019, 125(12): 1-9.
- [19] Yan S, Zhang J J, Sun B Z, et al. *In situ* measurement of strains at different locations in 3-D braided composites with FBG sensors[J]. *Composite Structures*, 2019, 230: 111527.
- [20] Liang L, Zhu Z H, Wang H, et al. Research on testing technology of helicopter blade load based on FBG[J]. *Journal of Optoelectronics·Laser*, 2019, 30(12): 1280-1285.  
梁磊, 朱振华, 王慧, 等. 基于光纤光栅的直升机桨叶载荷测试技术研究[J]. *光电子·激光*, 2019, 30(12): 1280-1285.

## Surface Structure State Perception System Based on FBG Array

Yin Lixin<sup>1,2</sup>, Liu Zhichao<sup>1,2\*</sup>, Liu Chunhui<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> College of Optoelectronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China;

<sup>2</sup> Key Laboratory of Optoelectronic Measurement and Control and Optical Information Transmission Technology of Ministry of Education, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China

### Abstract

**Objective** The current methods for structural health monitoring are suitable for real-time monitoring of aircraft structures because they have the characteristics of the complicated measurement process, high quality, and complicated operations. Therefore, the aircraft structure state detection technology based on fiber grating sensors is becoming increasingly important. Aiming at structural deformation problems caused by strain field changes and environmental loads, the overall strain field change monitoring of the free-form surface structure is performed, and the fiber Bragg grating (FBG) array is used to measure and obtain the curvature information and strain of the structure, using structural health monitoring and three-dimensional (3D) surface reconstruction in the aircraft as the research background. To achieve the goal of real-time perception of the state of the curved surface structure, a

three-dimensional reconstruction algorithm is built to reconstruct the surface structure in three dimensions.

**Methods** The finite element model of the free-form surface structure is established using ANSYS simulation software to understand the degree of deformation of the specific surface of the test piece under different pressures. The static stress simulation software performs a numerical simulation of the strain field distribution under different loads of 0, 20, 40, 60, 80, and 100 N, which is gradually increasing. The simulation results show the strain distribution trend of the surface strain field of the free-form surface structure. The maximum deformation is 0.243 mm at 100 N, and the position of the FBG array is determined by the stress field distribution characteristics. A test system for surface position offset and three-dimensional stress field distribution is built, a free-form surface structure state sensing system based on the fiber grating sensor network is designed, and a three-dimensional reconstruction algorithm based on FBG array test data is proposed.

**Results and Discussions** When the load is applied, we measure the center wavelength shift of the fiber grating at the positions of the six fibers, record the change in physical value at 0, 20, 40, 60, 80, and 100 N, and observe microstrain under the condition of no plastic deformation. Under different pressures, the microstrain  $\mu\epsilon$  changes at different positions of the workpiece. The strain should have a linear functional relationship with the FBG center wavelength offset, and the three-dimensional reconstruction algorithm in section 2.2 demonstrates that the curvature is positively correlated with the fiber center wavelength offset (Fig. 6). Because the wavelength shift of the pressure points s1, s2, s3, s5, and s8 has the same changing trend when different loads are applied, we choose FBG measurement data at point s2 to compare with ANSYS simulation values and Handyscan measurement data. Similarly, data comparison experiments at s7 and s9 are conducted (Fig. 6). When the pressure of the pressure gauge is fixed at 100 N, the maximum change in the strain of the FBG strain gauge group monitored under the same force is  $28.5 \mu\epsilon^{-1}$ , and the simulated value of ANSYS has the largest strain under the same force. The amount of change is  $28.3 \mu\epsilon^{-1}$ . When compared to the simulated strain data, the maximum absolute error between the experimentally measured strain and the simulated value is  $0.7 \mu\epsilon^{-1}$ , and the relative error is less than 2.81% (Fig. 7). It demonstrates that the FBG method of measurement has high precision and it is close to the theoretical value (Fig. 7). The test data obtained by the FBG array is close to the data measured by the Handyscan scanner using the two measurement methods. Since the Handyscan scans the center of the positioning punctuation, it deviates from the actual position, and there will be many burrs when scanning the surface. Therefore, the Handyscan measures the coordinate points before and after the force is applied to the workpiece to be tested. There is an error between the data and the ANSYS simulation value. The absolute error of Handyscan measurement data and actual measurement data is kept within 0.026 mm. The relative error of each measurement point data of the FBG reconstructed from the deformed surface and the Handyscan measurement data is kept within 6.67%, and the average relative error is less than 4.53% (Tables 1–3). Therefore, the spatial offset value in the force-bearing area reversed by the strain sensor is close to the Handyscan measurement result, which is consistent with the expected effect of the experiment. The 3D reconstruction surface obtained by the 3D reconstruction algorithm is approximately close to the surface scanned by the Handyscan. The more the pasted FBG sensors are, the closer the reconstruction effect to the actual situation is and the smaller the deviation between the reconstructed surface and the ideal surface is. It provides strong evidence that the FBG array can be used to monitor the curved structure's state change in real-time (Figs. 8 and 9).

**Conclusions** This paper uses the spacecraft surface structure as the research object, uses linear interpolation to continuously process the space curvature, proposes a 3D reconstruction algorithm based on the FBG array test data, and finally builds a set of surface position offsets and a 3D stress field distribution test system. This paper presents the FBG sensor network distribution design that conforms to the complex surface structure, combined with the free-form surface strain detection test, optimizes the test data corresponding to the variable sensitive position, and provides new theories and data for aircraft structural health monitoring support layout design. The free-form surface structure state sensing system and 3D surface reconstruction algorithm based on the fiber grating sensor network investigated in this paper can more accurately reconstruct and reproduce complex free-form surfaces, which not only validates the feasibility of related research ideas but also helps to further realize the spacecraft real-time perception and reconstruction of typical structural forms, therefore providing useful ideas and technical reserves.

**Key words** fiber Bragg grating; structural deformation; three-dimensional reconstruction; spatial surface structure; structural health monitoring

**OCIS codes** 060.2370; 060.3735; 130.6010