

基于粒子群算法的支撑臂形态光纤辨识方法^{*}

卢 李¹, 曾 捷¹, 严 刚¹, 陈 亮², 张音旋²,
季宏丽¹, 徐志伟¹

(1. 南京航空航天大学航空航天结构力学及控制全国重点实验室 南京, 210016)

(2. 中国航空工业集团公司沈阳飞机设计研究所 沈阳, 110035)

摘要 为了研究桁架式支撑臂形态在线监测方法, 实现结构姿态精确感知与健康状态评估, 提出了一种基于光纤 Bragg 光栅传感器的支撑臂结构形态监测与反演方法。首先, 借助 ANSYS Workbench 有限元仿真软件, 得到空间桁架式支撑臂在静态载荷作用下的应变响应规律; 其次, 研究了基于斜率和位移方程的支撑臂结构形态重构算法, 结合粒子群算法提升了支撑臂形态重构精度; 最后, 构建了桁架式支撑臂结构形态分布式光纤监测与反演系统, 通过沿支撑臂纵杆粘贴的光纤 Bragg 光栅传感器, 获取支撑臂关键节点应变响应特征, 实现了桁架式支撑臂形态实时监测、反演及可视化。所提出的基于光纤传感器的粒子群形态重构优化方法, 能够为未来航天器结构形状自感知、姿态调整以及形变重构提供技术支撑。

关键词 桁架式支撑臂; 光纤传感器; 形态重构; 粒子群算法

中图分类号 TH741; TP311.1; TP212.9

引 言

桁架式支撑臂具备良好的收拢性能, 其展开后稳定性较好, 因此常在可展开天线阵面、太阳帆及空间大口径望远镜等航天器上作为支撑结构发挥着重要作用^[1]。航天器在轨服役期间, 由于外界环境因素引起的扰动通常会导致桁架式支撑臂出现变形或低频振动, 进而影响航天器主体的工作性能与结构安全。因此, 需要实时监测桁架式支撑臂结构的形态变化, 反馈给控制器用于振动主动抑制, 保障航天器在轨运行期间的安全性、可靠性以及稳定性^[2]。

光纤传感器集信号传输与传感测量为一体, 具有质量轻、芯径细、便于组网及抗电磁干扰等优点, 在航空航天结构健康监测领域受到广泛关注^[3]。Blandino 等^[4]提出一种光频域反射型分布式光纤传感技术, 实现对空间膨胀结构展开与机动过程的三维变形监测。Pollard 等^[5]开发了一种可部署的弹性复合形状记忆合金增强型桁架, 结合光纤光栅传感器实现对桁架应变测量与变形反演。Lally 等^[6]研究了一种基于光纤光栅传感技术的大型可展开桁架结构变形在线监测系统, 用于解决空间天线桁架结构

由于变形引起的观测与成像精度降低问题。Jutte 等^[7]提出了一种基于弯曲载荷下的曲率与应变关系, 可以实现将结构表面应变转化为位移, 并在一些大型机翼伸展结构中进行了应用。Yi 等^[8]采用光纤光栅传感阵列获取被测结构的曲率信息, 基于正交曲率信息和拟合算法, 实现对结构的变形重构与反演。以往对于桁架结构的形态监测, 均是针对简单板式或梁式结构。本研究将基于 Ko 位移理论的形态重构算法应用于复杂多跨桁架式支撑臂结构, 实现了结构的变形重构。

笔者针对由多跨桁架组成的支撑臂结构形态重构精度较低的问题, 提出了一种基于粒子群优化算法的支撑臂形态光纤监测方法。首先, 提出了基于粒子群算法的支撑臂结构形态重构优化方法, 研究了基于斜率和位移方程支撑臂结构形态重构算法; 其次, 通过有限元仿真得到支撑臂结构静载条件下的应变分布与响应规律, 采用粒子群算法实现了静载条件下支撑臂形态重构反演精度的提升; 最后, 构建桁架式支撑臂结构形态分布式光纤监测与反演系统, 实现了桁架式支撑臂形态实时监测、反演及可视化显示。

^{*} 国家自然科学基金资助项目(52275536); 国家重点研发计划资助项目(2024YFF0508403); 直升机旋翼动力学国家级重点实验室基金资助项目(61422202207)

收稿日期: 2023-07-07; 修回日期: 2024-04-14

1 支撑臂形态重构优化

1.1 光纤光栅传感器应变感知原理

根据光纤耦合模理论,由于光纤光栅在纤芯处折射率形成周期性的变化,因此光束射入光纤Bragg光栅(fiber Bragg grating,简称FBG)的栅区中时,满足光栅方程的入射光会被反射,不满足光栅方程的入射光则会穿过光纤光栅继续传输下去。该光栅方程为

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

其中: λ_B 为满足反射要求的光的中心波长; n_{eff} 为光纤光栅介质的折射率; Λ 为光纤光栅的周期。

由于光栅可以反射特定波长的入射光,并且根据式(1)可知,当外界环境发生改变进而影响光纤光栅介质的折射率或者光纤光栅的周期时,均会使得光纤光栅方程中的反射中心波长发生偏移。在不考虑外界温度变化的情况下,光纤Bragg光栅应变传感器原理如图1所示。

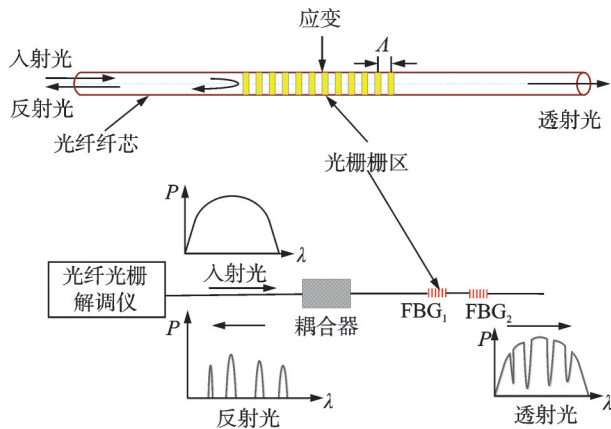


图1 光纤Bragg光栅应变传感器原理

Fig.1 Principle of fiber Bragg grating strain sensor

1.2 基于Ko位移理论的支撑臂形态重构算法

桁架式支撑臂和等效连续梁模型由于载荷的作用而产生相同的位移和速度,同时也具有相同的应变能和动能^[9]。基于此原理,根据支撑臂桁架单元和等效模型之间的几何、材料参数关系,可建立桁架式支撑臂结构的连续梁等效模型。将上、下2根纵杆之间距离定义为等效梁的高度,运用材料力学计算公式,推导出支撑臂的变形挠度与表面应变之间的关系。

根据经典梁理论,可推导出等效连续梁在弯曲状态下的斜率方程、挠度方程与应变之间的关系。由材料力学可知,弯曲状态下梁挠曲线微分方程可

表示为

$$\frac{d^2\omega(x)}{dx^2} = \frac{M(x)}{EI} \quad (2)$$

其中: $\omega(x)$ 为支撑臂沿受力方向上的位移; x 为结构沿伸展方向的位置坐标; $M(x)$ 为结构承受的弯矩载荷; E 为结构弹性模量; I 为结构转动惯量。

支撑臂在弯曲状态下应力与弯矩载荷大小之间的关系为

$$\sigma(x) = \frac{M(x)c}{I} \quad (3)$$

其中: $\sigma(x)$ 为等效梁沿伸展方向上横截面内某一点承受的应力大小; c 为结构表面应变测量点与其中性层的距离。

根据应力与应变之间的关系,结合式(3)可以推导出

$$\epsilon(x) = \frac{\sigma(x)}{E} = \frac{M(x)}{EI} \quad (4)$$

由式(2)和式(4)即可获得结构表面应变测量值与结构弯曲挠度之间的关系为

$$\frac{d^2\omega(x)}{dx^2} = \frac{\epsilon(x)}{c} \quad (5)$$

在支撑臂结构第*i*跨上布置的两个应变测点,如图2所示。通过线性插值可以得到相邻应变测点之间的应变变化与结构位置的关系,即

$$\epsilon(x) = \epsilon_{i-1} - (\epsilon_{i-1} - \epsilon_i) \frac{x - x_{i-1}}{\Delta l} \quad (x_{i-1} < x < x_i) \quad (6)$$

其中: $\Delta l = \frac{x_i - x_{i-1}}{n}$; $\{\epsilon_{i-1}, \epsilon_i\}$ 分别为支撑臂第*i*跨内2个相邻测点的应变响应; $\{x_{i-1}, x_i\}$ 为对应的应变测点位置。

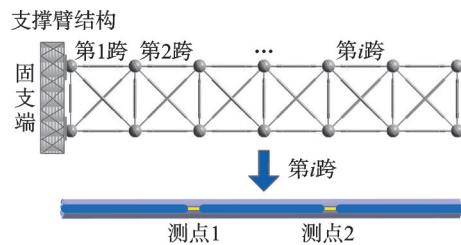


图2 支撑臂结构应变测点布置示意图

Fig.2 Strain measuring point layout diagram of mast

对式(6)进行一次积分,得到支撑臂第*i*跨上的斜率变化关系为

$$\tan \theta(x) = \int_{x_{i-1}}^x \frac{\epsilon(x)}{c} dx + \tan \theta_{i-1} \quad (x_{i-1} < x < x_i) \quad (7)$$

其中: θ 为结构弯曲后转角。

将式(7)所得支撑臂弯曲后的斜率与应变之间的关系方程再一次积分,可以得到支撑臂第*i*跨的弯曲挠度变化方程为

$$\omega(x) = \int_{x_{i-1}}^x \tan \theta(x) dx + \omega_{i-1} = \int_{x_{i-1}}^x \int_{x_{i-1}}^x \frac{\epsilon(x)}{c} dx dx + \int_{x_{i-1}}^x \tan \theta_{i-1} dx + \omega_{i-1} \quad (x_{i-1} \leq x \leq x_i) \quad (8)$$

由式(8)即可求得被测结构上第*i*段即应变测点1和应变测点2之间的挠度变化曲线。重复上述过程,可以依次求得第*n*跨结构的挠度曲线,进而获得结构整体的挠度变化曲线。

1.3 基于粒子群算法的形态重构优化

为提高结构形态重构精度,针对传统传感器离线式标定方法的局限性,提出了一种基于粒子群优化算法的应变-斜率转换系数在线标定的方法,并建立相应的变形重构优化模型,具体如下。

1) 粒子群算法初始化。粒子群算法初始化参数包括:种群数量、迭代次数、惯性权重、学习因子、空间维数以及粒子位置与速度限制范围等^[10]。

2) 获取个体最优解与种群最优解。种群最优解的获得需要根据待优化问题的优化目标定义适应度函数来实现,其中个体最优解为每个粒子搜索到的最佳位置。将当前迭代过程中每一个粒子获得的最优解作为当前种群最优解,再与全局历史最优解进行比较,以实现粒子速度和位置更新。

3) 粒子速度和位置更新公式为

$$V_{id}^{k+1} = \omega V_{id}^k + c_1 \text{random}(0, 1) (P_{id}^k - X_{id}^k) + c_2 \text{random}(0, 1) (P_{gd}^k - X_{id}^k) \quad (9)$$

$$X_{id}^{k+1} = X_{id}^k + V_{id}^{k+1} \quad (10)$$

其中: V_{id}^k 为第*d*维第*i*个粒子在第*k*次迭代时的速度; X_{id}^k 为第*d*维第*i*个粒子在第*k*次迭代时的位置; P_{id}^k 为第*i*个变量第*d*维的个体在第*k*次迭代时的最优解; P_{gd}^k 为群体在第*k*次迭代时的历史最优解; c_1 和 c_2 为加速常数,也称为学习因子; ω 为惯性权重系数,其决定个体历史最佳位置对当前粒子的影响程度。

4) 变形重构精度评价方法。本研究使用均方根误差(root mean squared error, 简称 RMSE)作为结构形态重构优化问题的精度评价函数,即将重构算法计算所得位移值与实际位移值进行比较,以此评估形态重构算法的精度。均方根误差用于表征样

本的离散程度,在做非线性拟合时, RMSE 越小越好。结合变形监测需求和粒子群算法的适应度,采用形态重构的均方根误差计算公式作为粒子群优化算法的适应度函数,即

$$R(j) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (y_1(i, j) - y_0(i, j))^2}{N}} \quad (11)$$

其中: i 为支撑臂位移测点序号; j 为粒子的序号; $y_1(i, j)$ 为加载情况下第*i*个位移测点处通过形态重构算法计算所得位移量; $y_0(i, j)$ 为加载情况下第*i*个位移测点处的实际位移量。

5) 基于粒子群算法的形态重构优化流程。将粒子的初始位置作为形态重构算法初始应变-斜率转换系数,依次记录往后每一次迭代计算获得的结果(适应度函数值)作为粒子当前适应度,然后不断更新个体历史最优位置和群体的历史最优位置,直至满足算法重构精度的目标。基于粒子群算法的形态重构优化流程如图3所示。

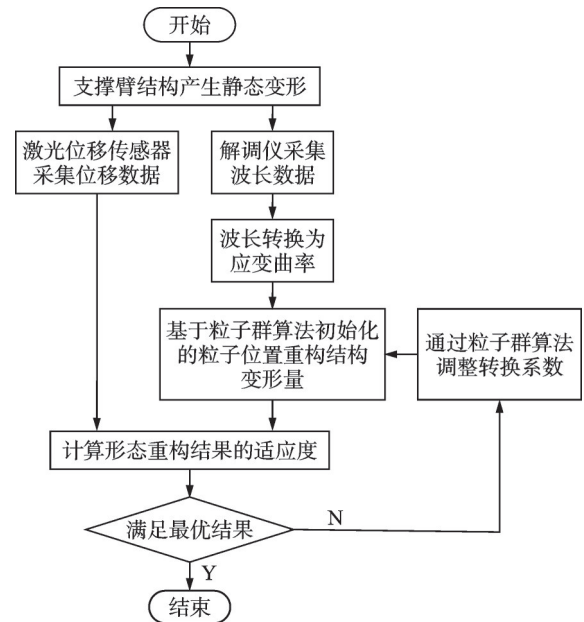


图3 基于粒子群算法的形态重构优化流程图

Fig.3 Flow chart of shape reconstruction optimization based on particle swarm optimization algorithm

2 数值仿真

为了分析静态加载条件下支撑臂结构的应变响应分布情况,在三维建模软件 Solid works 中建立对应的支撑臂几何模型,再将其导入有限元分析软件 ANSYS Workbench 中进行仿真。研究对象为桁架式支撑臂,一共由6跨桁架结构组成,其最小桁架单

元尺寸为 250 mm×250 mm×250 mm,支撑臂总长为 1 500 mm。桁架式支撑臂横截面为正方形,其所有组成杆件均为圆柱形截面,直径为 10 mm。这里将刚性球铰结构简化为集中质量。仿真材料为钢,具体参数如下:弹性模量为 180 GPa;泊松比为 0.3;材料密度为 7 800 kg/m³。

桁架式支撑臂在轨服役期间,通常为一端固定于航天器主体结构,因此仿真分析时可以将其看作单端固支梁结构。桁架式支撑臂仿真示意图如图 4 所示。其中:A 为固支端,B 为加载位置,处于自由端上部横杆中间。

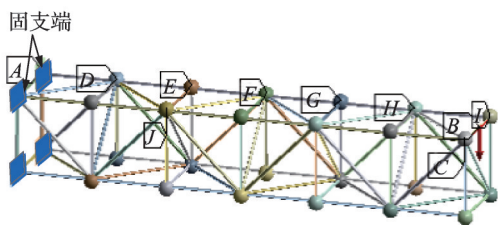


图 4 桁架式支撑臂仿真示意图
Fig.4 Simulation diagram of mast

2.1 支撑臂有限元仿真分析

根据加载方向,在纵杆上表面中轴线设置 2 条分析路径,提取相关路径上的位移及应变分布信息。路径 1、路径 2 均起始于支撑臂仿真模型上侧 2 根纵杆固支端处,终止于自由端。应变响应数据提取路径 1 和 2 的设置如图 5 所示。分别提取 2 条路径上的应变分布信息,作为光纤 Bragg 光栅传感器布局方案与变形重构算法可行性验证的依据。

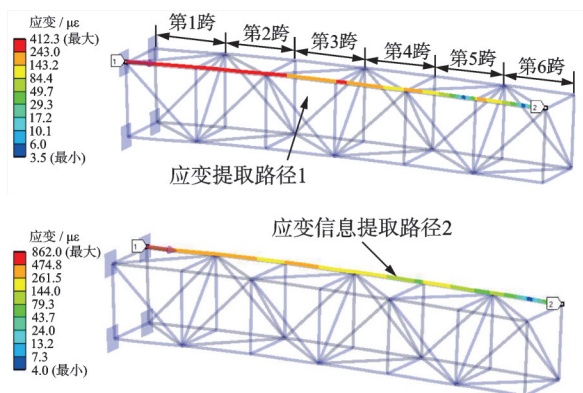


图 5 应变响应数据提取路径 1 和 2 的设置示意图
Fig.5 Schematic diagrams of strain response data extraction path 1 and path 2

由图 5 可知,静态加载时路径 1 与 2 上应变响应最大位置均位于第 1 跨桁架单元和第 2 跨桁架单元的杆件连接处。分别提取路径 1 与路径 2 上的应变

响应数据,其应变分布对比曲线如图 6 所示。由于在桁架式支撑臂结构同一跨相同位置 2 条路径分别对应的 2 个节点所连接杆件数量不一致,因此支撑臂纵杆两端固支条件不一致,导致路径 1 和 2 上各跨应变分布曲线存在差异。

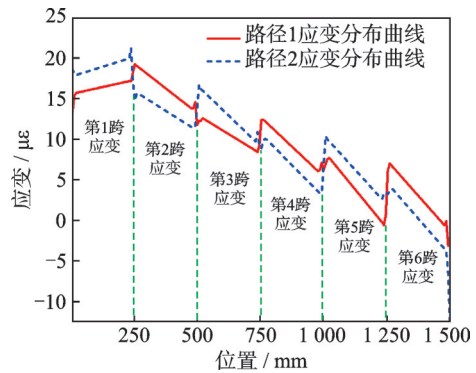


图 6 路径 1 与路径 2 上应变分布对比曲线
Fig.6 Comparison curves of strain distribution on path 1 and path 2

支撑臂可以等效为由 6 个最小桁架单元组成,因此将每一条路径上的应变分成 6 段,每一段长度为 250 mm。由图 6 可知,在每一跨最小桁架单元上应变响应曲线均呈现一定规律,可以将其应变分布看作分段线性。

2.2 静载作用下支撑臂形态重构算法验证

为验证形态重构算法应用于支撑臂结构的可行性,在桁架式支撑臂仿真模型自由端分别施加大小为 1.0 kN 和 1.5 kN 单点静态载荷。提取路径 1 上应变响应数据作为形态重构算法的输入值,计算得到算法重构变形值,再将该值与仿真所得变形量进行对比,以验证算法的可行性。单点加载时变形反演结果与仿真结果对比如图 7 所示。

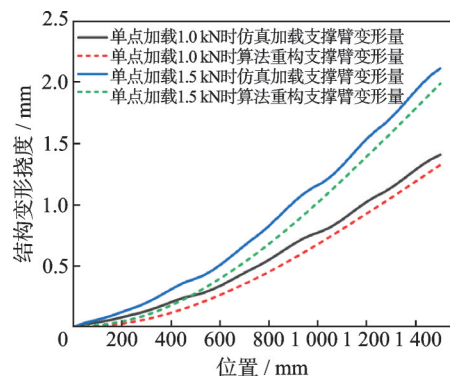


图 7 单点加载时变形反演结果与仿真结果对比
Fig.7 Comparisons between inversion results and simulation results under single point load

图7中,实线表示支撑臂在有限元仿真情况下得到的变形曲线,虚线表示基于Ko位移理论的形态重构算法计算所得变形拟合曲线。横坐标为支撑臂沿伸展方向的位置,纵坐标为支撑臂在不同位置产生的变形量。可以看出,基于算法重构的支撑臂受载后变形曲线与仿真所得变形曲线相比,整体存在一定偏差。随着静态载荷的增加,基于Ko位移理论支撑臂结构形态重构算法所得自由端变形量绝对误差也随之增大,平均相对误差在7%左右波动。

2.3 基于粒子群算法的支撑臂形态重构优化

为了分析粒子群算法对于支撑臂结构形态重构精度优化的效果,在仿真条件下对结构施加单点静态载荷并提取应变响应信息,代入形态重构算法中。将仿真所得结构变形响应作为实际变形数据,对比算法重构变形量与实际变形量,计算均方根误差,将其作为粒子群优化算法的适应度评价数据。迭代过程中群体适应度变化曲线如图8所示。可以看出,随着迭代次数的增加,群体中的粒子快速到达该种群最优状态,其中纵坐标适应度为无量纲,代表形态重构的均方根误差。

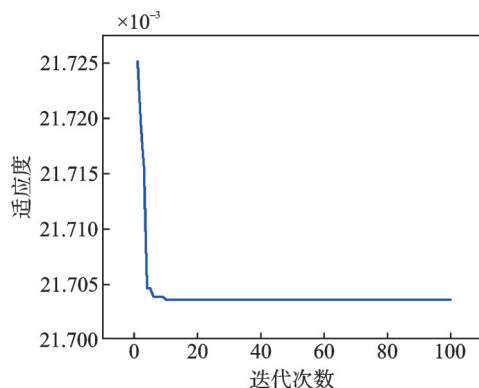


图8 迭代过程中群体适应度变化曲线

Fig.8 Variation curve of fitness of the algorithm during iteration

经过优化后,获得应变-曲率转换系数最佳解,将其作为更新后的系数再重新代入形态重构算法中,计算优化后不同大小加载力作用下的支撑臂结构形态重构曲线。单点加载下优化后重构与仿真结果对比如图9所示。可以看出,优化后形态重构曲线与实际变形曲线较为接近。

通过对比优化前后的形态重构结果与仿真所得结果,计算得到绝对误差以及相对误差变化曲线。优化前后形态重构算法误差对比如图10所示。可以看出,在1.5 kN单点加载时,经过优化后反演误

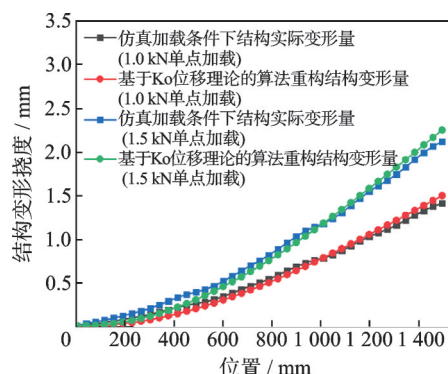
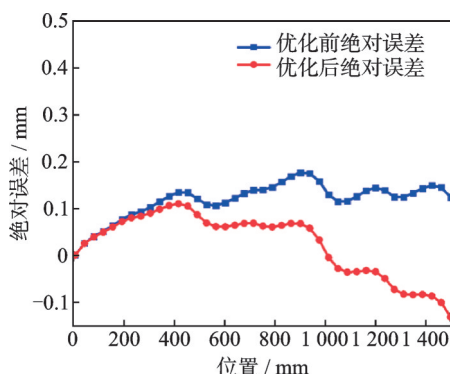


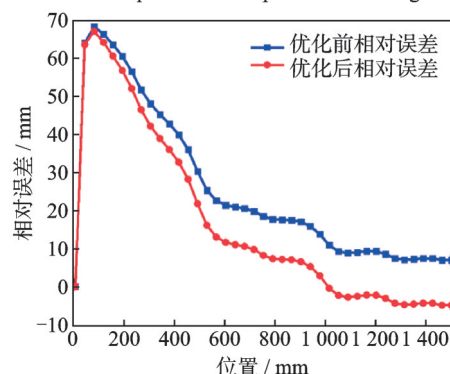
图9 单点加载下优化后重构与仿真结果对比

Fig.9 Comparison between optimized reconstruction results and simulation results under single point loading



(a) 粒子群算法优化前后绝对误差对比曲线

(a) Absolute error comparison curves before and after optimization of particle swarm algorithm



(b) 粒子群算法优化前后相对误差对比曲线

(b) Relative error comparison curves before and after optimization of particle swarm algorithm

图10 优化前后形态重构算法误差对比

Fig.10 Error comparison of deformation reconstruction algorithm before and after optimization

差得到有效减小。靠近自由端,绝对误差与相对误差均呈现变小趋势。

在仿真加载0.5、1.0和1.5 kN作用下,分别计算优化前后的支撑臂形态重构的均方根误差数据,其对比如表1所示。可以看出,与优化前的形态重构均方根误差相比,经过粒子群算法优化后桁架式支撑臂结构形态重构的均方根误差减小约42%,表明粒子群算法能够有效减小支撑臂形态重构误差。

表1 支撑臂形态重构的均方根误差数据优化前后对比
Tab.1 Comparison of RMSE before and after optimization for shape reconstruction of mast

单点加载/ kN	优化前 RMSE	优化后 RMSE	RMSE 减小比例/%
0.5	0.041 4	0.023 7	42.75
1.0	0.082 7	0.047 6	42.44
1.5	0.124 5	0.071 1	42.89

3 试验系统

针对试验条件下单点静态加载作用支撑臂形态重构效果,构建了支撑臂结构形态监测系统,由6跨桁架式支撑臂、固支底座、光纤 Bragg 光栅传感器、MOI-si255 型光纤光栅解调仪(16通道,波长分辨率为 2 pm)、激光位移传感器、数据采集卡、计算机以及形态重构与反演软件模块组成。

将支撑臂一端固支在基座上,模拟边界固支条件。在其自由端施加单点静态载荷,分别采集不同大小载荷作用时支撑臂各测点处的应变响应与实际变形量。基于应变测量信息,结合粒子群算法实现支撑臂结构形态重构效果优化,并将该结果与激光位移传感器直接测量的变形量加以比较与验证。

支撑臂分布式光纤形态监测与反演试验系统如图 11 所示。将光纤 Bragg 光栅传感器沿支撑臂纵杆轴线布置,在每一跨桁架单元纵杆上布置 2 个传感器,因此在支撑臂结构上一共布置了 12 个光纤 Bragg 光栅传感测点。

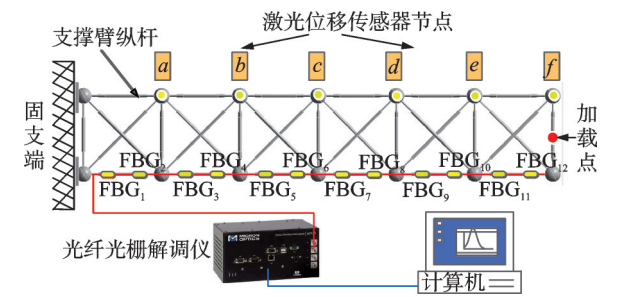


图 11 支撑臂分布式光纤形态监测与反演试验系统
Fig.11 Shape monitoring and inversion experimental system of deployable mast based on FBG sensors

4 试验结果与分析

4.1 自由端静态加载时支撑臂应变响应

单端静态加载试验采用分级加载方式,加载过程中在支撑臂自由端分级施加载荷,从 0 增加至 500 N,每一级增加 50 N。分别采集各级载荷对应

的光纤 Bragg 光栅传感器中心波长偏移量,将其转换为应变响应数据。支撑臂上各测点对应的应变响应如图 12 所示。可以看出,每一跨桁架单元上 2 个 FBG 传感器测点之间的应变幅值呈下降趋势,图中测点 1 和 2 位于支撑臂第 1 跨桁架单元,测点 3 和 4 位于支撑臂第 2 跨桁架单元,以此类推,测点 11 和 12 位于支撑臂第 6 跨桁架单元。在第 2 跨桁架单元上测点 3 处的应变响应值最大,这与有限元仿真分析时路径 1 上应变分布情况类似。此外,随着载荷增大,每一跨 2 个测点对应的应变幅值均呈现单调增大。

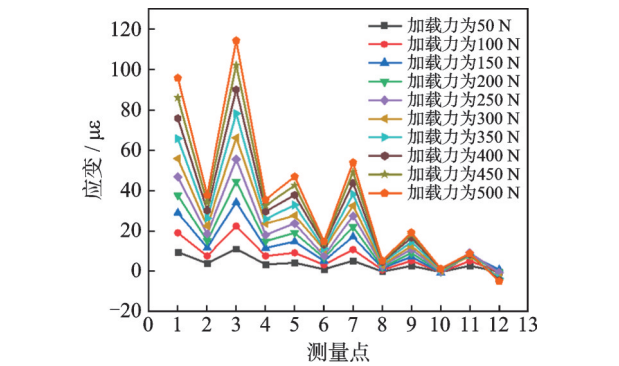


图 12 支撑臂上各测点对应的应变响应
Fig.12 Corresponding strain responses of each measuring point on mast

4.2 基于粒子群算法的形态重构优化

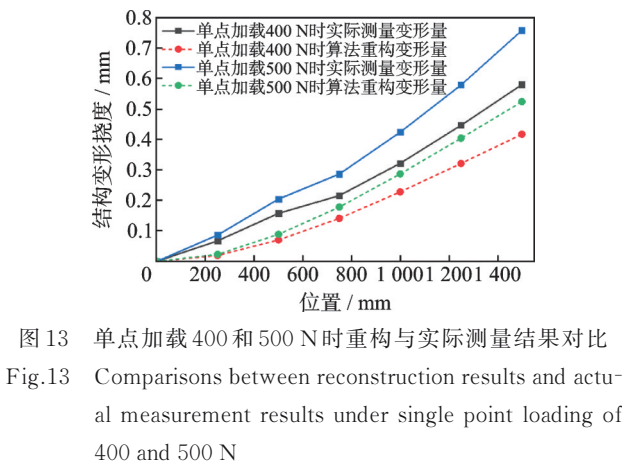
静态单点加载过程中,采用 LK-G85 高精度激光位移传感器测量支撑臂关键节点 a 至 f 的位移变化量。采用 1.3 节所述形态重构流程,结合粒子群算法对支撑臂的应变-斜率转换系数加以标定优化。

形态重构优化过程如下:①在支撑臂自由端施加单点载荷,分别采集结构形变测点 a 至 f 处的实际变形量和应变测点 FBG₁ 至 FBG₁₂ 处的应变响应;②将初始化粒子参数作为形态重构算法的初始应变-斜率转换系数,以此重构支撑臂不同测点处的变形量;③利用上述精度评价方法将均方根误差公式作为粒子优化的适应度函数;④通过迭代计算,不断优化粒子的位置(即转换系数),直至达到最大迭代次数或满足最小适应度要求。

对于多种载荷作用下的最优解,可以采取求平均方式获取全局最优解,也可以按照变形量从大到小进行分段,针对不同变形区间选取不同的转换系数作为最优解。考虑到本研究的支撑臂结构在自由端变形范围较小,因此采用求平均方式获取最优解。

4.3 支撑臂结构变形反演效果验证

单点加载 400 与 500 N 时,算法重构与实际测量结果对比如图 13 所示。可以看出,在单点加载情况下,算法重构变形曲线弯曲趋势与实际较为接近,但反演结果与实际变形相比整体偏小,存在误差。这是由于:①光纤光栅传感器在封装工艺过程中以及与被测件粘贴集成的过程中,封装材料、封装工艺、预紧力大小以及胶水的收缩腐败等都会影响 FBG 传感器的应变传递参数,进而引起测量误差;②支撑臂结构由多跨桁架组成,传感器粘贴数量越少,算法重构变形的精度越低。



为评估粒子群算法对于支撑臂结构形态重构精度优化的效果,对支撑臂施加静态单点载荷并提取结构应变响应,代入形态重构算法。经过粒子群算法优化应变-斜率转换系数后,在静态加载下优化算法适应度变化曲线如图 14 所示。其中,纵坐标适应度为无量纲,代表形态重构的均方根误差。

分别绘制加载力为 400 及 500 N 时,优化后支撑臂形态重构结果对比如图 15 所示。由图可知,在

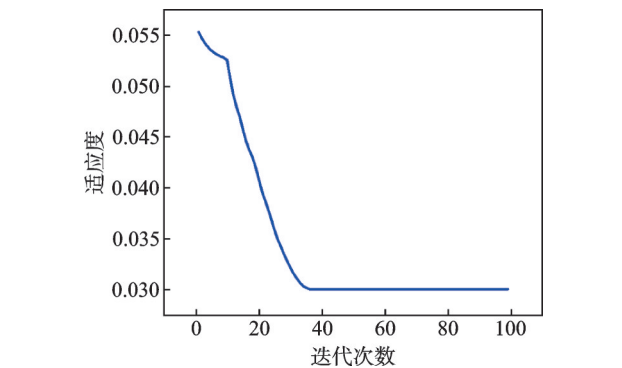


图 14 静态加载下优化算法适应度变化曲线
Fig.14 Variation curve of fitness of the algorithm during iteration under static loads

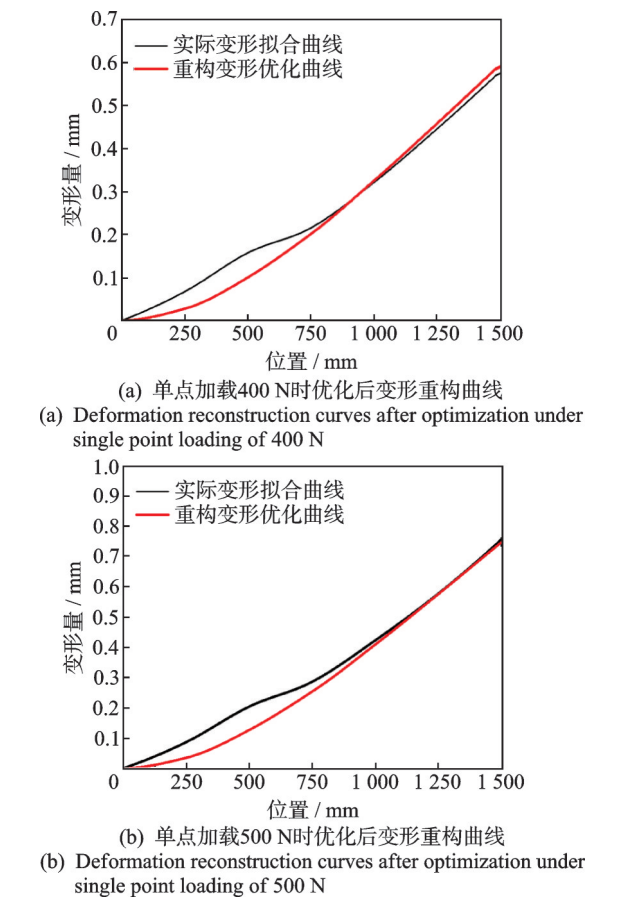


图 15 优化后支撑臂形态重构结果对比
Fig.15 Comparisons of results of shape reconstruction of mast after optimization

距离结构固支端 0~750 mm 范围重构变形量与实际测量结果之间仍存在误差。这是因为在静态单点加载过程中,采用激光位移传感器测量支撑臂关键节点 a 至 c 的变形量时引入了测量误差,而该区间内刚度较大,变形量较小,导致测量误差难以消除。

优化前后形态重构优化结果如表 2 所示。由表可知,经过粒子群算法优化后的支撑臂形态重构均方根误差减小约 70%,这表明试验条件下粒子群算法能够有效降低支撑臂形态重构的误差。

表 2 优化前后形态重构优化结果			
Tab.2 Shape reconstruction results before and after optimization			
单端加载/ N	优化前 RMSE	优化后 RMSE	RMSE 减小比例/%
400	0.105	0.030 0	71.4
500	0.149	0.038 9	73.9

在 400 N 静态加载时,基于形态重构算法所得支撑臂三维变形轮廓,其支撑臂形态重构结果如图 16 所示。

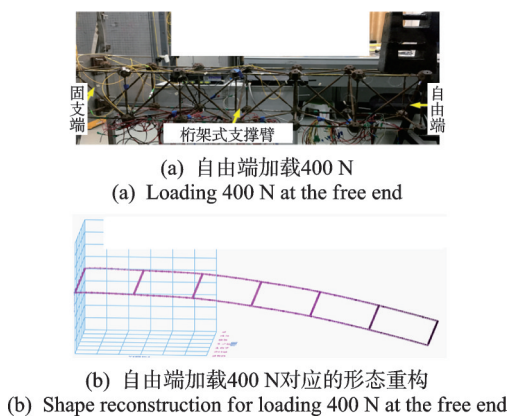


图 16 单端加载 400 N 支撑臂形态重构结果

Fig.16 Results of shape reconstruction mast under single point loading of 400 N

由于支撑臂整体变形量较小,为方便观察,所以三维变形轮廓图显示时需要将实际位移量加以放大。

5 结 论

1) 通过在支撑臂纵杆沿轴线方向布置光纤 Bragg 光栅传感器,采集结构受载后的表面应变信息,根据 Ko 位移理论对应变响应方程进行二次积分,获得不同加载方式下支撑臂对应形态变化特征。

2) 提出了基于粒子群算法的桁架式支撑臂形态重构优化方法,给出了粒子群算法的初始化参数设置方式及其与形态重构优化目标相结合的方法。在此基础上,采用粒子群算法计算得到应变-斜率转换系数最优解,实现了静态加载条件下桁架支撑臂形态重构反演精度的提升。

3) 所提的基于光纤传感器的形态重构方法具有抗电磁干扰、实时性好、多参量集成监测以及无视觉盲区等优点,能够为未来航天器结构形状自感知、姿态调整以及动态变形重构提供技术支撑。

参 考 文 献

- [1] 周思达,周小陈.空间伸展臂的技术现状与难点[J].中国空间科学技术,2014,34(6):38-50.
ZHOU Sida, ZHOU Xiaochen. Development and technical difficulties of deployable space masts[J]. Chinese Space Science and Technology, 2014, 34(6): 38-50. (in Chinese)
- [2] MCPHERSON-BRANDI N, KAUFFMAN J L. Dynamics and estimation of origami-inspired deployable space structures: a review[C]//AIAA Scitech 2019

Forum. San Diego, California: AIAA, 2019: 0480.

- [3] PAK C G. Wing shape sensing from measured strain [J]. AIAA Journal, 2016, 54(3): 1068-1077.
- [4] BLANDINO J, DUNCAN R, NUCKELS M, et al. Three-dimensional shape sensing for inflatable booms [C]//AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference. Austin, Texas: AIAA, 2015: 1807.
- [5] POLLARD E L, MURPHEY T W, SANFORD G E. Experimental and numerical analysis of a DECSMAR structure's deployment and deployed performance[J]. AIAA Journal, 2013, 25(9): 711.
- [6] LALLY E M, REAVES M, HORRELL E, et al. Fiber optic shape sensing for monitoring of flexible structures[C]//Proceedings of SPIE: the International Society for Optical Engineering. San Diego, California: SPIE, 2012: 83452Y.
- [7] JUTTE C, KO W, STEPHENS C, et al. Deformed shape calculation of a full-scale wing using fiber optic strain data from a ground loads test: NASA/TP-2011-215975[R]. California: Armstrong Flight Research Center, 2011.
- [8] YI J C, ZHU X J, ZHANG H S, et al. Spatial shape reconstruction using orthogonal fiber Bragg grating sensor array[J]. Mechatronics, 2012, 22(6): 679-687.
- [9] 柳剑波,王立峰,金栋平.周期胞元平面桁架结构等效动力学分析[J].振动工程学报,2018,31(1):67-73.
LIU Jianbo, WANG Lifeng, JIN Dongping. Equivalent continuum modeling of a kind of planar lattice truss [J]. Journal of Vibration Engineering, 2018, 31(1): 67-73. (in Chinese)
- [10] TIAN C B, WANG Z F, SUI Q M, et al. Design and optimization of FBG implantable flexible morphological sensor to realize the intellisense for displacement[J]. Sensors, 2018, 18(7): 2342.



第一作者简介:卢李,男,1996年9月生,硕士。主要研究方向为传感器及智能仪器技术。

E-mail: luli@nuaa.edu.cn

通信作者简介:曾捷,男,1976年10月生,博士,副教授。主要研究方向为光纤传感技术。

E-mail: zj2007@nuaa.edu.cn