# 空间伸展臂热应变与热变形光纤监测技术

黄居坤<sup>1</sup>,王 勇<sup>2</sup>,曾 捷<sup>1,3</sup>,于惠勇<sup>1</sup>,吴 肖<sup>1</sup>,卢 李<sup>1</sup>,李翔宇<sup>1</sup>,张旭苹<sup>3</sup> (1.南京航空航天大学 机械结构力学及控制国家重点实验室,江苏 南京 210016; 2.上海宇航系统工程研究所 结构系统研究室,上海 201109; 3.南京大学 智能光传感与调控技术教育部重点实验室,江苏 南京 210093)

摘 要: 针对空间伸展臂在热载荷作用下承载特性与形态变化的监测需求,提出了一种基于分布式光纤传感器的伸展臂结构温度、热应变以及热变形集成监测技术。借助 ANSYS Workbench 有限元分析软件,构建了单端热载荷作用下铝合金空间伸展臂结构热-力模型,分别得到不同局部热载荷下伸展臂轴向温度、热应变以及热变形分布与变化规律。在此基础上,提出了基于有限元分析与热传导理论的两类伸展臂轴向热变形计算方法。构建了分布式光纤传感监测系统,实时监测伸展臂若干关键位置的温度值与应变值,进而反演出结构轴向温度场、应变场连续变化信息。研究表明:采用有限元拟合法与热传导解析法计算所得伸展臂轴向热变形误差分别为 5.256% 与 3.556%。相关成果能够为未来航天器在轨服役状态监测与辨识提供技术支撑。

关键词:空间伸展臂;光纤布拉格光栅传感器;热传导;热应变;热变形

中图分类号: TN 253 文献标志码: A

**DOI:** 10.19328/j.cnki.1006-1630.2020.01.010

# Optical Fiber Monitoring Technology for Thermal Strain and Thermal Deformation of Spatial Deployable Mast

HUANG Jukun<sup>1</sup>, WANG Yong<sup>2</sup>, ZENG Jie<sup>1,3</sup>, YU Huiyong<sup>1</sup>, WU Xiao<sup>1</sup>, LU Li<sup>1</sup>, LI Xiangyu<sup>1</sup>, ZHANG Xuping<sup>3</sup>

(1.State Key Laboratory of Mechanics and Control of Mechanical Structures, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, Jiangsu, China; 2.Structural Systems Research Room, Shanghai Aerospace System Engineering Institute, Shanghai 201109, China; 3.Key Laboratory of Intelligent Optical Sensing and Manipulation, Ministry of Education, Nanjing University, Nanjing 210093, Jiangsu, China)

Abstract: Aiming at the requirement of monitoring the load-bearing characteristics and the morphological changes of spatial deployable masts under thermal load, an integrated monitoring technology for the temperature, thermal strain, and thermal deformation of a deployable mast based on distributed optical fiber sensor is proposed. With the help of the ANSYS Workbench finite element analysis software, the thermal-mechanical model of aluminum alloy spatial deployable mast under single-ended thermal load is established, and the distributions and variations of the axial temperature, thermal strain, and thermal deformation of the deployable mast under different local thermal loads are obtained. On this basis, two kinds of methods for calculating the axial thermal deformation of the deployable mast based on the finite element analysis and the heat conduction theory are proposed, respectively. A distributed fiber-optic sensor monitoring system is constructed to monitor the temperature and strain values at several key positions of the deployable mast in real time, and then the continuous change information of the temperature and strain fields along the axis direction of the structure is retrieved. The results show that the axial thermal deformation errors of the deployable

**收稿日期:**2019-01-10; **修回日期:**2019-12-31

基金项目:国家自然科学基金-联合基金资助项目(U1537102);上海航天科技创新基金资助项目(SAST2018-015);航空科学基金资助项目(20170252004);江苏省重点研发计划产业前瞻与共性关键技术竞争资助项目(BE2018047);江苏高校优势学科建设工程基金资助项目作者简介:黄居坤(1994—),男,硕士研究生,主要研究方向为新型光纤传感技术及其应用。

通信作者:曾 捷(1976—),男,副教授,主要研究方向为光纤传感技术及其在结构健康监测领域应用。

mast calculated by the finite element method and the heat conduction analysis method are 5.256% and 3.556%, respectively. The related results can provide technical support for the monitoring and identification of future spacecrafts in orbit

**Key words:** spatial deployable mast; fiber Bragg grating (FBG) sensor; thermal conduction; thermal strain; thermal deformation

#### 0 引言

空间伸展臂作为一种基本的可伸展结构,不仅是卫星天线系统的重要组成部分,还可以用于太阳帆板和望远镜支架、太空机械手以及空间平台等<sup>[1-2]</sup>。以方形管为单元的空间伸展臂结构,具有收展原理简单、易调节、调节精度高等特点。

卫星天线在轨运行时长期处于高低温循环热载荷作用下,其本体结构在不均匀热载荷作用下存在热胀和冷缩效应,不可避免地产生热应变,导致结构热变形以及疲劳损伤,降低了卫星天线指向精度,进而影响卫星天线在轨运行的可靠性[3-5]。

空间伸展臂在轨服役过程中热属性监测参量 主要包括:温度、热应变以及热变形等。如何准确 快速测量这些参量,对于未来实现航天器结构形态 感知和在轨健康状态辨识具有重要意义。黄桂平 等[6]针对真空环境高低温载荷下航天器变形监测难 点,提出采用数字近景摄影技术,获取卫星天线面 板高低温变形。贾卫芳等[7]提出了一种基于温度补 偿法的光纤光栅热应变监测方法,用于获取单向板 和平纹机织层压复合材料内部应变信息。Sun等[8] 提出了一种基于双光纤 Bragg 光栅的测量系统,用 于测量材料的热膨胀系数与热变形。Kim 等[9]利用 光纤布拉格光栅(Fiber Bragg Grating, FBG)传感 器测量结构热膨胀系数,进而实现对均匀温度载荷 下钢结构试件热变形状态监测。但考虑到航天器 在轨监测实时性与温度载荷分布的非均匀性特征, 如何实现针对非均匀温度载荷作用下空间伸展臂 温度、热应变与热变形分布及变化信息的多参量集 成在线监测显得至关重要。

FBG具有监测参量众多、质量小、柔韧性好、耐腐蚀、抗电磁干扰以及易于分布式组网等优点,能够满足航空航天器在轨监测的诸多特殊要求[10-11]。因此,本文选择以铝合金空间伸展臂方形管单元模型为研究对象,提出采用FBG,结合热传导理论,分别实现针对伸展臂温度、热应变以及热变形的在线实时监测。

# 1 FBG热应变监测原理

FBG 传感器为一种反射型传感器件,当一東宽带光传输到传感器栅区时,在栅区折射率周期性作用下使得只有特定波长附近的光信号反射,而其他光则没有影响。该特定波长称之为 FBG 传感器中心波长 $\lambda_{\rm B}$ ,中心波长取决于光栅周期 $\Lambda$ 与有效折射率 $n_{\rm eff}$ 。根据模式耦合理论,FBG 传感器反射光谱中心波长表达式为 $^{[12-13]}$ 

$$\lambda_{\rm B} = 2n_{\rm eff}\Lambda \tag{1}$$

由式(1)可以看出,任何引起光栅周期、有效折射率变化的因素都能够使得传感器中心波长发生偏移,基于这一原理,FBG传感器具有传感能力,如图1所示。

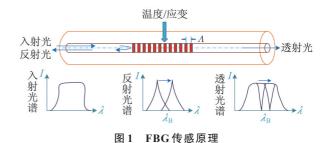


Fig.1 Sensing principle of the FBG sensor

空间服役环境下伸展臂主要受到高、低温热循环载荷作用,FBG在监测伸展臂由于热胀冷缩产生的热应变时,需要对环境温度、应变两个参量进行解析,分别解耦出两个参量对FBG中心波长偏移量的影响,从而得到伸展臂温度与热应变变化信息。

目前FBG温度、应变交叉敏感解耦方法大致可以分为4类:双波长矩阵运算法、双参量矩阵运算法、温度参考光栅法<sup>[14]</sup>以及温度补偿封装法<sup>[15]</sup>。本文选择规格相同的FBG1、FBG2布置于同一待测点,其中,将FBG1与待测点胶接固连,使得其同时受到温度与热应变的信息,FBG1中心波长偏移量为

$$\frac{\Delta \lambda_{\rm B}}{\lambda_{\rm B}} = (1 - P_{\rm eff}) \varepsilon_{\rm T} + (\alpha + \xi) \Delta T \qquad (2)$$

式中: $\alpha$ 为FBG线性热膨胀系数; $\xi$ 为FBG热光系数; $P_{\text{eff}}$ 为纤芯有效弹光系数; $\Delta\lambda_{\text{B}}$ 为热应变FBG中心波长偏移量。

FBG2布置于FBG1所在位置附近,处于仅感温不受力状态,其中心波长偏移量[16]为

$$\frac{\Delta \lambda_{\rm T}}{\lambda_{\rm T}} = (\alpha + \xi) \Delta T \tag{3}$$

式中:Δλ<sub>T</sub>为温度变化FBG中心波长偏移量。

将式(2)减去式(3),可以得到伸展臂热应变  $\epsilon_T$ 为

$$\epsilon_{\mathrm{T}} = \frac{\frac{\Delta \lambda_{\mathrm{B}}}{\lambda_{\mathrm{B}}} - \frac{\Delta \lambda_{\mathrm{T}}}{\lambda_{\mathrm{T}}}}{1 - P_{\mathrm{eff}}} \tag{4}$$

## 2 数值仿真

数值仿真采用铝合金材料构成的伸展臂方形 管单元模型,见表1。

表1 伸展臂材料参数与尺寸

Tab.1 Material parameters and dimensions of the deployable mast

材料	长/mm	宽/mm	高/mm	厚/mm	弹性模 量/GPa	泊松比
铝合金	500	30	30	1	71	0.33

利用 ANSYS Workbench 仿真软件,对伸展臂一端保持恒温加载,其他部位与空气接触形成热对流交换。环境温度设置为  $24 \, ^{\circ}$ ,热对流交换系数为  $8 \, \text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot ^{\circ}$ ,考虑到伸展臂端面截面积较小,故只 考虑伸展臂内壁以及外壁与空气之间热对流交换,数值仿真中分别对伸展臂单端施加  $80 \, ^{\circ} \cdot 120 \, ^{\circ} \cdot ^{\circ}$ 

160 ℃以及 200 ℃ 4 种温度载荷。

当伸展臂一端受到 200 ℃恒温载荷作用时,结构轴向温度分布、热应变分布以及热变形分布,如图 2 所示。

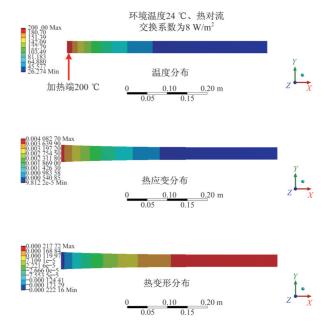


图 2 200 ℃轴向温度、热应变与热变形分布

Fig.2 Distributions of the axial temperature, thermal strain, and thermal deformation at 200  $^{\circ}\mathrm{C}$ 

由图2可以看出:伸展臂处于单端恒温加载时, 热量逐渐由加载端向另一端传递,故温度分布沿着 伸展臂轴向呈现递减趋势,在末端趋于稳定。铝合 金伸展臂热应变与热变形也呈现类似趋势。在热 源附近较大,沿着轴向位置逐渐减小。不同热载荷 下伸展臂轴向温度、热应变以及热变形仿真结果如 图3所示。

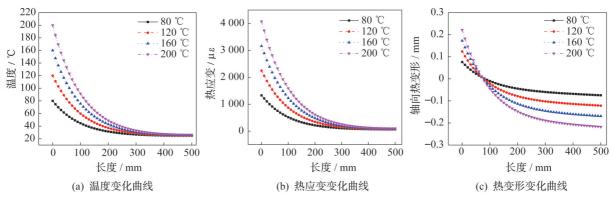


图 3 伸展臂轴向温度、热应变、热变形变化曲线

Fig.3 Variation curves of the axial temperature, thermal strain, and thermal deformation of the deployable mast

#### 3 热变形反演计算方法

# 3.1 基于有限元仿真数据拟合的伸展臂轴向热应 变与热变形计算方法

根据图 3 可以看出:数值仿真所得温度、热应变以及热变形沿着轴向方向变化曲线类似于指数分布曲线,由此可推导出一种基于有限元拟合法的结构热应变与热变形计算方法。建立伸展臂结构轴向位置坐标系,如图 4 所示。图 4 中,A、C点分别为结构两个端面处,B点位于结构的中点。取  $x_A$ =0, $x_B$ =L/2, $x_C$ =L,且A、B、C点应变值  $\varepsilon_1$ 、 $\varepsilon_2$ 、 $\varepsilon_3$ 。



图 4 基于 3 点应变感知的伸展臂示意图

Fig.4 Deployable mast diagram based on three-point strain sensing

根据有限元仿真得到热应变曲线规律呈现指数函数分布,假设伸展臂结构轴向各点热应变变化规律表达式为

$$\varepsilon(x) = a + be^{cx} \tag{5}$$

式中:a、b、c 为关系式系数。根据A、B、C 3点的热应变信息,利用待定系数法,便可得出3个系数关于热应变值的表达式为

$$a = \frac{{\epsilon_2}^2 - {\epsilon_1}{\epsilon_3}}{2{\epsilon_2} - ({\epsilon_3} + {\epsilon_1})} \tag{6}$$

$$b = \epsilon_1 - \frac{\epsilon_2^2 - \epsilon_1 \epsilon_3}{2\epsilon_2 - (\epsilon_3 + \epsilon_1)}$$
 (7)

$$c = \frac{2}{L} \ln \frac{\epsilon_3 - a}{\epsilon_2 - a} \tag{8}$$

将系数带入式(5),得出伸展臂轴向热应变场 函数为

$$\varepsilon(x) = \frac{\varepsilon_2^2 - \varepsilon_1 \varepsilon_3}{2\varepsilon_2 - (\varepsilon_3 + \varepsilon_1)} + \left(\varepsilon_1 - \frac{\varepsilon_2^2 - \varepsilon_1 \varepsilon_3}{2\varepsilon_2 - (\varepsilon_3 + \varepsilon_1)}\right) e^{\left(\frac{2}{L} \ln \frac{\varepsilon_3 - a}{\varepsilon_2 - a}\right)x}$$
(9)

最后计算由于温度变化产生的热变形为

$$\Delta L = \int_{0}^{L} \varepsilon(x) dx = \int_{0}^{L} \frac{\varepsilon_{2}^{2} - \varepsilon_{1} \varepsilon_{3}}{2\varepsilon_{2} - (\varepsilon_{3} + \varepsilon_{1})} + \left(\varepsilon_{1} - \frac{\varepsilon_{2}^{2} - \varepsilon_{1} \varepsilon_{3}}{2\varepsilon_{2} - (\varepsilon_{3} + \varepsilon_{1})}\right) e^{\left(\frac{L}{L} \ln \frac{\varepsilon_{3} - a}{\varepsilon_{2} - a}\right)x} dx$$
(10)

# 3.2 基于热传导理论的伸展臂轴向温度与热变形 计算方法

针对于伸展臂典型方形管结构,不考虑空气与 杆件之间的热传导,可将热量等效为一维传播模式。根据热传导理论与能量守恒定律[17-18],在结构 达到热稳定状态时,热量的传入与传出相等,即

$$Q_x = Q_{\mathrm{d}x+x} + Q_{\mathrm{c}} \tag{11}$$

式中: $Q_x$ 为微单元在x处导入热量; $Q_{dx+x}$ 为微元体在 dx+x处导出的热量; $Q_c$ 为伸展臂热扩散到空气中的热量。

$$Q_x = -\lambda S \frac{\mathrm{d}T}{\mathrm{d}r} \tag{12}$$

$$Q_{\mathrm{d}x+x} = -\lambda S \frac{\mathrm{d}T}{\mathrm{d}x} - \lambda S \frac{\mathrm{d}^2 T}{\mathrm{d}x^2} \mathrm{d}x \tag{13}$$

$$Q_{c} = \alpha p \mathrm{d}x (T - T_{0}) \tag{14}$$

式中: $\alpha$ 为热膨胀系数;p为管状结构的长度; $\lambda$ 为导热系数;S为结构的截面积。

整理上述各式可得

$$\frac{\mathrm{d}^2 T}{\mathrm{d}x^2} - m^2 (T - T_0) = 0 \tag{15}$$

式中: $m = \sqrt{\left(\frac{\alpha p}{\lambda A}\right)}$ ; $T_0$ 为结构初始温度。

根据式(15),得到其通解为

$$T(x) - T_0 = ae^{mx} + be^{-mx}$$
 (16)

式中: a和b为通解常数,可由方程边界条件计算得到。

采用单端加热模式,当伸展臂到达热稳定状态时,则其温度边界条件为:x=0时,T=T(0);x=L时,T=T(L)。

具体情况如图5所示。

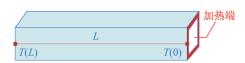


图 5 基于两点温度感知的伸展臂示意图

Fig.5 Deployable mast diagram based on two-point temperature sensing

将边界条件带入式(16),得出通解常数 a和 b:

$$a = \frac{(T(L) - T_0) - (T(0) - T_0)e^{-mL}}{e^{mL} - e^{-mL}}$$

$$b = \frac{(T(0) - T_0)e^{mL} - (T(L) - T_0)}{e^{mL} - e^{-mL}}$$
(17)

将上述 *a* 和 *b* 代入式(16),得到方形管伸展臂轴向温度随几何位置分布方程:

$$T(x) = \frac{(T(L) - T_0)(e^{mx} - e^{-mx}) + (T(0) - T_0)(e^{m(L-x)} - e^{-m(L-x)})}{e^{mL} - e^{-mL}} + T_0$$
(18)

由于温度变化产生的热变形计算公式为

$$\Delta L = \alpha \int_{0}^{L} \left[ T(x) - T_{0} \right] dx \tag{19}$$

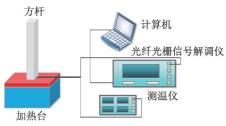
将式(8)带入热变形式(9),通过积分求得伸展 臂热变形为

$$\Delta L = \frac{\alpha (e^{mL} + e^{-mL} - 2)}{m (e^{mL} - e^{-mL})} (T(L) + T(0) - 2T_0) (20)$$

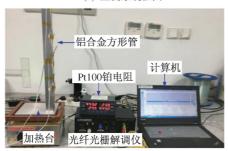
在试验过程中,垂直放置的铝合金方形管伸展 臂模型轴向变形包括重力对其的影响,但是重力引 起的变形量微小,远小于温度变化引起的热变形,故 本文介绍的两种算法均忽略重力引起的微小变形影 响,直接监测反演热胀冷缩引起的结构热变形。

#### 4 试验系统

试验对象为铝合金方形管伸展臂缩比模型,结构材料尺寸与仿真模型一致,轴向长 500 mm,横截面为边长 30 mm 正方形,臂厚为 1 mm。试验系统主要由ET-100 加热试验台(加热范围 20~350  $\mathbb{C}$ ,控温精度在±1 $\mathbb{C}$ )、用于记录FBG中心波长偏移量的 MOI光纤光栅解调仪、用于温度的标定和补偿的 Pt100 铂电阻(测温范围为一200~300  $\mathbb{C}$ )等设备共同组成。基于分布式光纤传感器的单端热载荷作用下伸展臂温度、热应变与热变形监测试验系统,如图 6 所示。



(a) 监测系统框图



(b) 监测试验系统图

图 6 伸展臂温度、热应变与热变形监测试验系统 Fig.6 Test system for monitoring the temperature, thermal strain, and thermal deformation of the deployable mast

在伸展臂中轴线上分别布置串接4个FBG应变传感器和4个FBG温度传感器,用于测量伸展臂表面热应变与温度信息,具体传感器布局形式如图7所示。将伸展臂结构垂直放置于加热台面,保证伸展臂端面与加热台面接触良好。

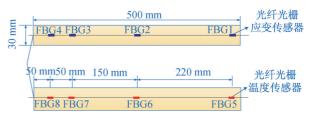


图 7 伸展臂结构表面分布式光纤传感器布局

Fig.7 Distributed fiber optic sensor layout on the surface of the deployable mast

## 5 试验结果与讨论

#### 5.1 伸展臂温度测量与分布反演

通过调节加热台温度,使得伸展臂加热端分别保持80℃、120℃、160℃、200℃恒定温度。依次保持预设温度一段时间,待热电偶显示温度稳定后,记录位于伸展臂轴向不同位置的光纤光栅温度传感器中心波长,如图8所示。

由图 8 可以看出:随着温度升高,各 FBG 传感器中心波长向长波方向偏移,且呈现较好线性关系,但由于 FBG5 黏贴于伸展臂未加热段,温度变化较小,易受到环境温度影响,导致线性度较差。根据 FBG 温度传感原理,将 FBG 中心波长偏移量转化为伸展臂表面温度值,并与有限元仿真结构进行对比,见表 2。

由表 2 可以看出: 当加热端温度恒定时, 伸展臂表面实测温度与有限元仿真所得温度存在一定误差, 这是由于仿真条件下轴向热传导及其与空气热扩散效应均匀。而在真实试验中材料属性呈现一定非均匀性, 环境温度存在微小变化以及热对流不稳定等因素, 会导致实测温度与有限元仿真所得伸展臂轴向温度分布存在稍许偏差。

根据 FBG 传感器实测所得各点离散化的温度信息,基于热传导理论,可以反演得到伸展臂轴向温度场分布,并与有限元仿真轴线温度场曲线对比,如图 9 所示。

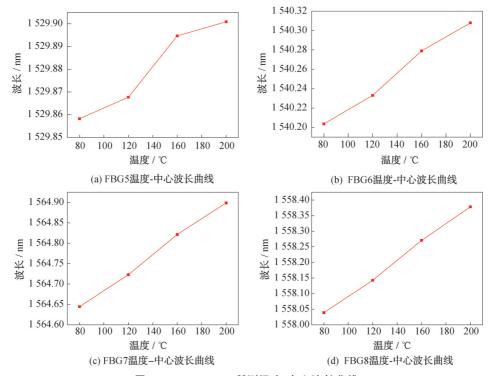


图 8 FBG5~FBG8所测温度-中心波长曲线

Fig.8 Temperature-central wavelength curves measured by FBG5, FBG6, FBG7, and FBG8

#### 表 2 不同温度载荷下伸展臂温度仿真值与光纤传感器实 测值对比

Tab.2 Comparisons of the temperature simulation values of the deployable mast and the measured values of the fiber optic sensor under different temperature loads

位置	温度值						
	仿真温度/℃	80	120	160	200		
加热端	实测温度/℃	80.3	119.6	159.8	199.2		
	相对误差/%	0.37	0.33	0.13	0.40		
中间位置	仿真温度/℃	28.4	31.8	35.4	39.0		
	实测温度/℃	28.1	31.4	35.3	38.4		
	相对误差/%	1.06	1.26	0.28	1.54		
未加热端	仿真温度/℃	24.7	25.2	25.7	26.3		
	实测温度/℃	25.3	26.1	29.0	29.6		
	相对误差/%	2.43	3.57	12.84	12.55		

基于热传导理论推导的结构轴向温度场计算方法,构建基于LabVIEW实时监测系统,导入不同热载荷下FBG传感器测量所得温度值,反演得到伸展臂结构轴向温度曲线以及温度场云图,如图10所示。

#### 5.2 伸展臂结构热应变测量与分布反演

以80℃作为应变测量基准,将得到温度补偿后

的 FBG 应变传感器中心波长变化量转化为应变值, 并与电阻应变片所测应变值进行对比,得到的结构 热应变与温度之间关系曲线,如图 11 所示。由图 11 可以看出:伸展臂温度从 80 ℃变化为 200 ℃时,伸展 臂从加热端开始布置的 FBG 应变传感器 FBG4、 FBG3、FBG2、FBG1 测量的最大热应变值分别为 776.4、445.3、163.8、109.4 με,呈现递减态势。这是 因为热量从加热端向另一端传输,距离越远,热传 导的热量越少,伸展臂温度越低,故导致产生的热 应变值越小。

根据有限元分析拟合所得伸展臂轴向热应变函数,结合FBG实测热应变数据,反演得到伸展臂轴向其他位置应变信息,进而重构出整体热应变场。同样以80℃作为基准,将120℃、160℃以及200℃温度下轴向4个不同位置热应变导入Lab-VIEW可视化实时显示系统,得到伸展臂轴向热应变曲线与应变场云图,如图12所示。

#### 5.3 伸展臂热变形计算结果与分析

将分布式光纤传感器实测温度信息代入热传导解析法,同时将热应变FBG实测值代入有限元拟合法,可以计算得到不同温度载荷作用下伸展臂轴向

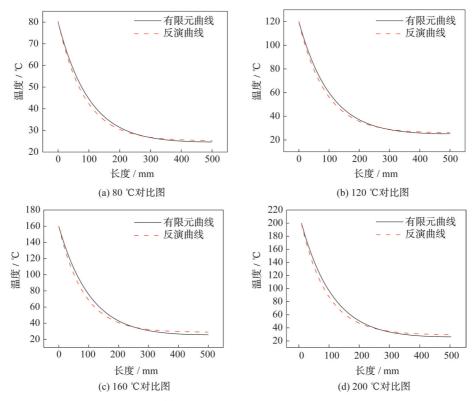


图 9 伸展臂轴向温度反演曲线与有限元曲线对比图

Fig.9 Comparisons of the inversion curve of the axial temperature and the finite element curve of the deployable mast

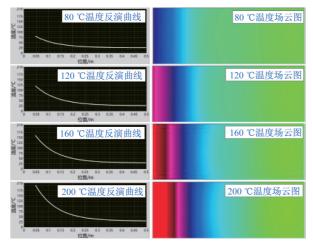


图 10 伸展臂轴向温度响应曲线与温度场云图

Fig.10 Axial temperature response curves and temperature field contours of the deployable mast

热变形状态。最后将上述两种由FBG传感器实测数据反演计算所得结果与有限元仿真所得热变形量进行对比,见表3。

不同温度载荷下伸展臂轴向热变形有限元仿 真结果与计算结果,如图13所示。由图13可见,无 论是热传导解析法还是有限元拟合法,计算所得热 变形值均略微高于有限元仿真结果。这主要是由 于轴向热传导以及空气的热扩散不均匀性所导致, 具体误差对比见表 4。由表 4得出: 热传导解析法计算所得热变形的平均相对误差为 3.56%, 而有限元推导解方法计算热变形量的平均相对误差为 5.26%。有限元拟合法热变形计算误差略大于热传导解析法,表明上述两种热变形计算方法具有较好的热变形反演精度与较强的工程适用性。

# 6 结束语

本文针对空间伸展臂热属性监测需求,研究了一种基于分布式光纤传感器的铝合金方形管伸展臂模型温度、热应变和热变形测量技术。

- 1) 以方形管伸展臂结构为研究对象,提出了基于有限元拟合与热传导理论的两类伸展臂轴向热变形计算方法。
- 2)利用 ANSYS Workbench 仿真软件,构建单端热加载模型,得到伸展臂沿轴温度、热应变与热变形分布特征,为分布式光纤传感器传感网络优化配置提供了依据。
- 3) 通过在伸展臂结构轴向布置的若干离散 FBG 温度传感器与FBG 应变传感器,实时采集结

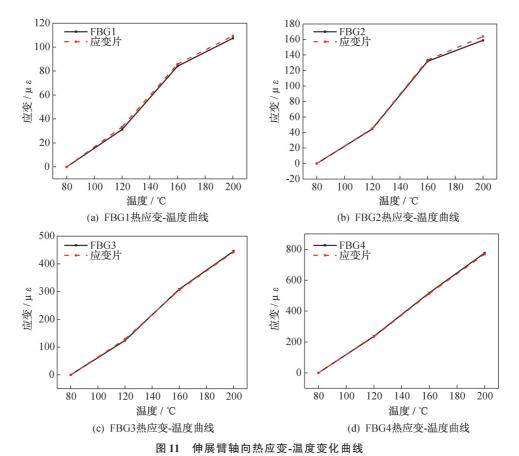


Fig.11 Axial thermal strain-temperature curves of the deployable mast

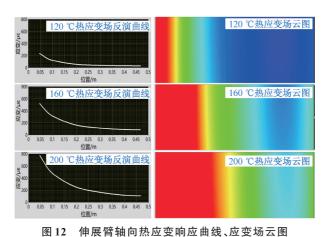


Fig.12 Axial thermal strain response curves and strain field contours of the deployable mast

构温度、应变分布以及变化信息,进而反演出结构轴向温度场与应变场。基于热传导理论解析法与有限元拟合法两种计算方法反演所得结构轴向热变形平均相对误差分别为3.556%、5.256%,验证了两种热变形计算方法的可行性。

4) 本文所提方法具有非视觉测量、实时性好以

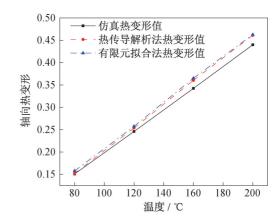


图 13 伸展臂轴向热变形计算结果对比

Fig.13 Comparison of the calculation results of the axial thermal deformation of the deployable mast

及多功能集成监测等优点,能够为在轨实时准确获 取空间伸展臂结构热属性参数,实现空间伸展臂结 构健康监测与形态自适应调节提供有力保障。

5) 后续将分别开展针对不同位置或多源热载 荷同时加载,以及三维复杂航天器结构温度、热应 变与热变形等多物理参量的分布式光纤传感器集成

#### 表 3 不同温度下伸展臂轴向热变形计算值与有限元仿真结果对比

Tab.3 Comparison of the calculated and simulated values of the axial thermal deformation of the deployable mast at different temperatures

温度/℃	80	120	160	200
仿真热变形值/mm	0.151	0.246	0.342	0.440
基于分布式光纤温度测量值的热传导解析法,计算所得热变形/mm	0.152	0.254	0.360	0.461
基于分布式光纤热应变测量值的有限元拟合法,计算所得热变形/mm	0.158	0.257	0.365	0.463

#### 表 4 不同温度下伸展臂轴向热变形仿真值与计算值误差对比

Tab.4 Error comparison between simulation and test values of the axial thermal deformation of the deployable mast at different temperatures

温度/℃	80	120	160	200	平均相对误差
热传导解析法计算所得相对误差/%	0.94	3.17	5.26	4.87	3.56
有限元拟合法计算所得相对误差/%	4.57	4.67	6.63	5.18	5.26

在线监测与反演技术研究。

#### 参考文献

- [1] 冯军,胡明,陈文华,等.空间伸展臂折展单元展开运动特性分析[J].机械设计与制造,2017(8):175-178.
- [2] ZHANG Y, LIN, YANG G, et al. Dynamic analysis of the deployment for mesh reflector deployable antennas with the cable-net structure [J]. Acta Astronautica, 2017, 131:182-189.
- [3] 蒋显全,蒋诗琪,齐宝,等.铝合金高低温力学性能研究及应用前景[J].世界有色金属,2015(10):20-25.
- [4] LIU Y, ZHANG S, GAO Y. A high-temperature stable antenna array for satellite navigation system [J]. IEEE Antennas & Wireless Propagation Letters, 2017, 16(99):1397-1400.
- [5] QI X, HUANG H, BING L, et al. A large ring deployable mechanism for space satellite antenna [J]. Aerospace Science & Technology, 2016, 58:498-510.
- [6] 黄桂平,马开锋,王蔡健,等.卫星天线热真空变形测量 [J].宇航计测技术,2014(2):21-25.
- [7] 贾卫芳,孙宝忠.基于FBG传感器的碳纤维复合材料内部热应变监测[J].玻璃钢/复合材料,2016(2):75-78.
- [8] SUN Y, WANG Y, KIM Y, et al. Dual-configuration fiber Bragg grating sensor technique to measure coefficients of thermal expansion and hygroscopic swelling [J]. Experimental Mechanics, 2014, 54(4):593-603.
- [9] KIM H I, YOON J S, KIM H B, et al. Measurement of the thermal expansion of space structures using fiber Bragg grating sensors and displacement measuring interferometers [J]. Measurement Science & Technology, 2012,21(8):085704.

- [10] VORATHIN E, HAFIZI Z M, GHANI S A C, et al. Real-time monitoring system of composite aircraft wings utilizing fibre Bragg grating sensor [J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 2016, 152:012024.
- [11] 易金聪,朱晓锦,张合生,等.模拟高性能飞行器翼面结构形态的非视觉检测[J].振动、测试与诊断,2014,34(1):20-26.
- [12] HOPF B, KOCH A, ROTHS J. Temperature dependence of glue-induced birefringence in surface-attached FBG strain sensors [J]. Journal of Lightwave Technology, 2016, 34(4):1-10.
- [13] RAJAN G. Experimental study and analysis of a polymer fiber Bragg embedded in a composite material [J]. Journal of Lightwave Technology, 2014, 32(9): 1726-1733.
- [14] 张开宇, 闫光, 孟凡勇, 等. 温度解耦增敏式光纤光栅应变传感器[J]. 光学精密工程, 2018, 26(6): 1330-1337.
- [15] KANG Z, JIANG S, BAI Y, et al. Twin-core fiber-based erbium-doped fiber laser sensor for decoupling measurement of temperature and strain [J]. IEEE Sensors Journal, 2015, 15(12):6828-6832.
- [16] 冯翔宇,曾捷,李钰,等.低温环境光纤光栅反射光谱感应特性研究[J].上海航天,2017,34(1):27-31.
- [17] KUNDU B, BISWAS P, LEE K S. Establishment of modified-one-dimensional and two-dimensional models for two-directional heat conduction in a wet fin assembly [J]. Heat Transfer Engineering, 2016, 38(2):190-205.
- [18] ZHOU Y, HU X X, LI T, et al. Similarity type of general solution for one-dimensional heat conduction in the cylindrical coordinate [J]. International Journal of Heat & Mass Transfer, 2018, 119:542-550.