

DOI:10.16356/j.1005-2615.2023.06.019

面向天线板热变形的有限元模型修正方法

杨 何¹, 王 晨¹, 沈 星¹, 黄天翔¹, 操卫忠², 黄欣婷²,
汪 奕², 袁慎芳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. 南京电子技术研究所, 南京 210008)

摘要: 为满足卫星天线板的在轨热变形测量要求, 需要建立精确有限元模型模拟天线板热变形过程。蜂窝夹层板作为天线板主体结构, 在有限元建模过程中通常需要对其进行简化处理, 导致有限元计算结果与实验测量值之间存在差异。针对上述问题, 进行了高温环境下天线板结构的热变形实验, 得到温度场分布与热变形位移矩阵。通过对温度场拟合得到有限元模型热载荷。在此基础上, 提出了利用天线板有限元模型与实验模型面外位移测量矩阵的均方根误差作为修正目标, 基于多岛遗传算法的有限元模型修正方法, 对模型材料参数与边界条件进行修正。修正后有限元模型的预测精度得到了明显提高。

关键词: 蜂窝夹层板; 热变形; 有限元方法; 模型修正; 卫星天线

中图分类号: V414.1 文献标志码: A 文章编号: 1005-2615(2023)06-1118-08

A Finite Element Model Updating Method for Thermal Deformation of Antenna Plates

YANG He¹, WANG Chen¹, SHEN Xing¹, HUANG Tianxiang¹, CAO Weizhong², HUANG Xinting²,
WANG Yi², YUAN Shenfang¹

(1. State Key Laboratory of Mechanics and Control for Aerospace Structures, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 210016, China; 2. Nanjing Research Institute of Electronics Technology, Nanjing 210008, China)

Abstract: In order to meet the requirements for in-orbit thermal deformation measurements of satellite antenna panels, an accurate finite element model is required to simulate the thermal deformation process of the antenna panels. As the main structure of the antenna panel, the honeycomb sandwich panel usually needs to be simplified in the finite element modelling process, resulting in discrepancies between the finite element calculation results and the experimental measurement values. To address the above problem, thermal deformation experiments of the antenna plate structure under high temperature environment are carried out to obtain the temperature field distribution and thermal deformation displacement matrix. The finite element model thermal load is obtained by fitting the temperature field to it. On this basis, a method of finite element model updating based on the multi-island genetic algorithm is proposed to modify the model material parameters and boundary conditions using the root mean square error of the out-of-plane displacement measurement matrix of the antenna plate finite element model and the experimental model as the correction target. The prediction accuracy of the modified finite element model is significantly improved.

Key words: honeycomb sandwich plate; thermal deformation; finite element method; model updating; satellite antenna

基金项目: 国家自然科学基金(51921003, 52102475)。

收稿日期: 2023-05-18; **修订日期:** 2023-07-02

通信作者: 王晨, 男, 副教授, 博士生导师, E-mail: cwangaero@nuaa.edu.cn。

引用格式: 杨何, 王晨, 沈星, 等. 面向天线板热变形的有限元模型修正方法[J]. 南京航空航天大学学报, 2023, 55(6): 1118-1125. YANG He, WANG Chen, SHEN Xing, et al. A finite element model updating method for thermal deformation of antenna plates[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2023, 55(6): 1118-1125.

受空间环境冷热交变以及电子元件积热的影响,卫星天线板沿厚度方向会存在一个较大的温度梯度^[1],产生的热变形会影响卫星反射面精度甚至对精密结构造成破坏。热载荷下天线板的有限元仿真结果能够为上述问题的解决提供参考。蜂窝板作为天线板的主要结构^[2],由于模型简化等原因,材料的等效参数与实际结构参数之间存在差异,导致有限元计算结果与实际变形量之间亦有差异^[3]。因此通常需要对有限元模型进行修正以匹配实际形变结果。

从20世纪60年代开始,模型修正的基础理论开始逐步形成,这一时期主要是修正结构的总体刚度矩阵与质量矩阵^[4]。Berman等^[5]将模型结构刚度矩阵和质量矩阵的加权范数最小作为目标函数,采用最小二乘法对结构有限元模型进行修正。Chen等^[6]基于上述方法推导了结构刚度矩阵和质量矩阵的修正公式,并简化了修正运算过程。后续Kabe^[7]、Heylen^[8]、Caesar等^[9]陆续在矩阵型和参数型修正相结合的领域展开了相关的研究并取得了不错的研究成果。

到20世纪80年代末,模型修正的研究重点从对总体矩阵的修正转移到对模型的物理参数与几何参数的修正^[3,10]。对于不同的试验加载方式和响应信息,有限元模型修正可以分为基于频率、振型等信息的动力学模型修正方法和基于位移、应变等信息的静力学模型修正方法。Friswell等^[11-12]将模型频响函数的试验测量值与有限元计算值之间的残差作为目标函数,并降低模型阶次来简化修正过程。孙卫青等^[13]提出一种基于响应面模型自适应采样技术的蜂窝板有限元模型快速修正方法。邓苗毅等^[14]利用静载试验响应数据,通过序列二次规划优化算法实现结构分段截面抗弯刚度的识别。He等^[15]提出了将温度场参数与模型物理参数分别修正的高温环境分级模型修正方法。Sun等^[16]通过模型修正对结构热参数进行了辨识。殷海涛等^[17]采用模态试验和有限元建模相结合的综合建模技术,在仅有实验模态参数与几何尺寸条件下得到结构真实动力学特性有限元模型。

现有模型修正方法通常是针对单一结构响应修正模型的单一材料参数,且不考虑边界条件的影响。而卫星天线板所用蜂窝结构的等效模型与蜂窝板蒙皮材料均为各向异性,材料参数较为复杂^[18-19]。蜂窝板面外变形需要测量多点位移值,同时需要考虑支承刚度的变化对结果的影响。针对上述问题,本文首先根据天线板的工作环境建立有限元等效模型,搭建天线板实物模型开展热变形实验;然后基于实验测量的温度值,将拟合后温度载

荷场施加给有限元模型,进行仿真运算并提取模型位移量;最后搭建优化平台,将有限元模型与实验模型的热变形量均方根误差作为目标函数,利用多岛遗传算法修正模型参数。修正后模型热变形量更加接近实验值,可用于后续分析计算。

1 天线板有限元建模方法

1.1 蜂窝板等效计算理论

天线板的基本结构为上下两层复合材料蒙皮与中间蜂窝夹层结构,其中复合材料蒙皮能够建立较为精确的有限元模型,而夹层结构由于蜂窝数量巨大、连接方式复杂,通常采用等效模型代替精确有限元模型。等效模型只考虑蜂窝夹层的整体变形情况,而不考虑单个蜂窝结构的变形情况。

三明治夹心板理论是对蜂窝夹芯进行等效的一种有效方法,假定芯层能抵抗横向剪切变形并且具有一定的面内刚度,上、下表面蒙皮服从Kirchhoff假设,忽略其抵抗横向剪应力的能力,则蜂窝芯层可以等效为一均质的厚度不变的正交各向异性层。正六边形蜂窝胞元和蜂窝板整体结构示意图分别如图1和2所示^[3],其等效弹性参数计算公式为^[3]

$$E_x = E_y = \frac{4}{\sqrt{3}} E_s \frac{t^3}{l^3} \quad (1)$$

$$G_{xy} = \frac{\sqrt{3} \gamma t^3}{2 l^3} E_s \quad (2)$$

$$G_{xz} = \frac{\gamma t}{\sqrt{3} l} G_s \quad (3)$$

$$G_{yz} = \frac{\sqrt{3} \gamma t}{2 l} G_s \quad (4)$$

式中: E_s 、 G_s 为夹芯层材料参数; γ 为修正系数,取1。

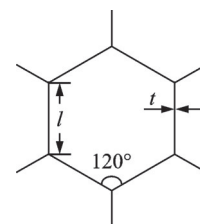


图1 正六边形蜂窝胞元

Fig.1 Positive hexagonal honeycomb cell element

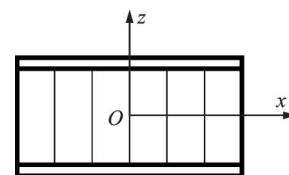


图2 蜂窝板结构

Fig.2 Honeycomb panel construction

1.2 天线板有限元等效型

卫星天线板的上、下蒙皮由4层SW110环氧玻璃布复合而成,单层厚度0.1 mm,自外向内铺层顺序为0°/45°/-45°/90°,规定纤维方向沿1500 mm长度方向为0°。蜂窝夹层采用19.2 mm厚的NH-1型芳纶纸蜂窝。结构整体尺寸为1500 mm×3125 mm×20 mm。在模型四角处T形区域将蜂窝夹层替换为铝块对支撑边界进行加固,其端部通过螺栓与钢架连接。

在商业有限元软件Abaqus®中建立三维拉伸实体模型。定义上下表面的复合层蒙皮,复合层总厚度为0.4 mm,铺层顺序与实际相同,如图3所示。

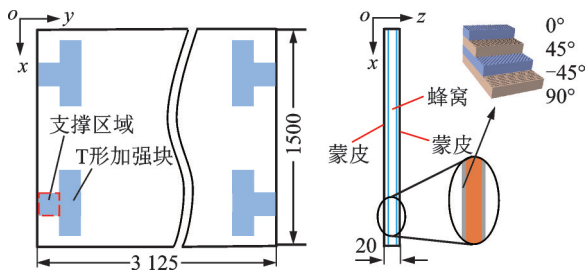


图3 天线板蜂窝夹层模型

Fig.3 Antenna board honeycomb sandwich model

分别赋予蜂窝区域、复合层蒙皮区域与支撑区域不同材料属性,表1为制造商给出的此种天线板材料参数。

表1 有限元材料参数

Table 1 Finite element material parameters

参数	铝	蜂窝等效模型		复合材料	
杨氏模量/ MPa	7×10^4	E_{11}	0.09	E_{11}	24 100
		E_{22}	0.09	E_{22}	22 400
		E_{33}	0.10	—	—
剪切模量/ MPa	—	G_{12}	0.1	G_{12}	4 300
		G_{13}	46.4	G_{13}	1 470
		G_{23}	21.6	G_{23}	1 470
膨胀系数/ K^{-1}	2.32×10^{-5}	α_{11}	1.23×10^{-5}	α_{11}	1.23×10^{-5}
		α_{22}	1.23×10^{-5}	α_{22}	1.23×10^{-5}
		α_{33}	0	α_{33}	—
		—	—	—	—

使用C3D8I单元作为等效蜂窝单元,这种三维单元引入了能增强单元位移梯度的附加自由度,可以克服剪切自锁问题,具有较高的计算精度^[20]。复合层采用经典四节点壳单元(S4R)。

边界条件方面,由于天线板的尺寸较大,支撑件所受支反力较大,因此需要考虑支撑件的弹性形变。在Abaqus中将有限元模型支撑位置的约束条件设置为弹性约束,如图4所示。其中 k_z 为面外支撑刚度, k_y 为面内横向支撑刚度。由于实验方案中

x 方向指向地面,不受形变过程影响,因此不考虑该方向支撑刚度。在初始模型中设置尽可能大的刚度(100 000 N/mm)模拟固支条件,并在后续模型修正环节对其进行修正。

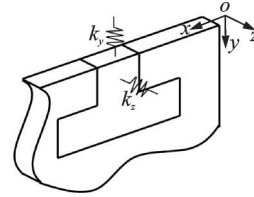


图4 弹性支撑点设置

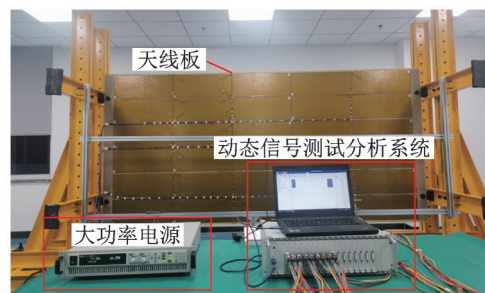
Fig.4 Elastic support point setting

在热载荷方面,目前有关热环境下有限元模型修正领域基本都采用对模型直接施加温度场的方法^[17]。这种方法不考虑热量的传递,通过直接测量温度场并将其施加给有限元模型,更为简便且准确,在本模型中同样采用这种方法。

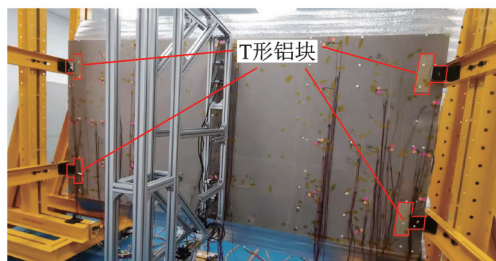
2 天线板热变形静力实验

根据卫星天线板实际工况及有限元建模方案,搭建如图5所示的天线板热变形实验平台。天线板高温面贴有聚酰亚胺薄膜加热片对结构进行加热,通过调整电源功率控制加热温度。非加热面布置有31处光纤传感器,测量温度场的面内分布情况,同时两面对称布置14处W2T-30-FF40型电热偶温度传感器,测量温度场厚度方向的温差分布情况。模型从室温加热10 min至各测量值达到稳定并记录。

在天线板非加热面放置有OD2-N250W150U2型激光位移传感器,能够测量加热过程中模型非加



(a) Element surface with heating



(b) Element surface without heating

图5 实验模型

Fig.5 Experimental model

热面 7×7 个位移测量点的位移变化量。位移测量点分布如图 6 所示。

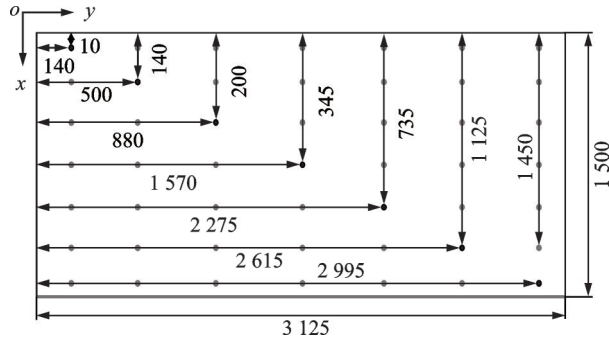


图 6 位移测量点

Fig.6 Displacement measuring points

实验位移测量结果如表 2 所示,冷面光纤温度传感器测量结果如表 3 所示,拟合后天线板表面温度场分布如图 7 所示,冷热面对称电热偶温度器测量结果如表 4 所示。

表 2 实验热变形位移测量值

Table 2 Experimental thermal deformation displacement measurements

行位置	列位置						
	1	2	3	4	5	6	7
1	-0.47	-1.79	-2.43	-3.24	-2.69	-1.93	-0.67
2	0.02	0.22	0.29	0.09	0.13	0.04	-0.10
3	0.10	1.16	1.77	1.86	1.58	1.01	-0.04
4	0.48	2.63	3.59	4.07	3.32	2.21	0.19
5	0.19	1.59	2.09	2.34	2.02	1.35	0.02
6	0.01	0.36	0.29	0.29	0.38	0.24	-0.07
7	-0.43	-1.44	-2.20	-2.47	-1.99	-1.40	-0.42

从表 2 可以看出,模型的厚度方向上存在温差,面内温度场分布也不是均匀的。总体分布情况为模型中上部分温度高,四周温度低,这是模型周围空气热对流造成的。将测量面的温度平均值作为仿真模型的热载荷会导致这种面内温度不均匀的特性丢失,不能很好地表达热载荷的面内特性,导致输出结果不准确。

考虑到上述问题,对现有温度测量结果进行薄

表 3 冷面温度测量位置与测量值

Table 3 Cold surface temperature measurement position and measured values

x/mm	y/mm	温度/°C	x/mm	y/mm	温度/°C	x/mm	y/mm	温度/°C
409	45	27.44	758	755	38.83	758	2385	40.91
758	45	27.13	1152	755	41.11	1152	2385	40.02
758	106	32.04	1470	755	33.88	364	2732	40.82
758	287	38.76	45	1570	39.50	1152	2732	39.62
136	408	39.31	364	1570	41.16	1379	2732	37.61
364	408	40.29	758	1570	39.52	758	2853	39.16
758	408	38.92	1152	1570	39.59	758	3034	32.24
1152	408	39.64	1470	1570	33.89	409	3095	27.00
758	528	39.79	45	2385	40.71	758	3095	26.76
45	755	39.41	364	2385	41.29	1106	3095	26.56
364	755	39.31						

板样条函数插值,将单点测量温度拟合为表面温度场。首先根据冷热面对称温度测量点拟合并计算两个面的温差场;再根据冷面详细温度数据拟合冷面温度场,结合温差场得到热面温度场。如图 7 所示,总体温度分布情况为中心偏上部分温度较高,四周温度较低,无加热面左侧温度整体偏低,符合

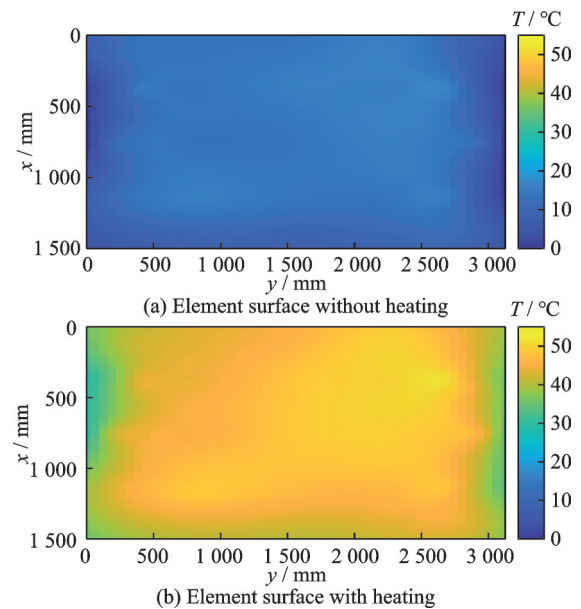


图 7 天线板温度场

Fig.7 Temperature fields of the antenna plate

表 4 冷热面温差测量位置与测量值

Table 4 Locations and measured values of the temperature difference between hot and cold surfaces

x/mm	y/mm	冷面温度/°C	热面温度/°C	温差/°C	x/mm	y/mm	冷面温度/°C	热面温度/°C	温差/°C
350	750	41.24	71.34	30.10	1150	1562	36.14	69.33	33.19
1150	750	36.66	69.76	33.10	350	2375	40.23	75.06	34.83
350	1562	40.75	73.49	32.75	1150	2375	36.91	69.78	32.87
750	1562	37.69	72.50	34.81					

实验测量结果。

将上面拟合得到的温度场用两个 50×50 的位置矩阵表示,采用映射场的方式将温度矩阵添加到 Abaqus 有限元模型中,得到非线性分布的温度场作为模型热载荷。

3 有限元模型修正

3.1 初始仿真结果

模型建立完成后,使用 Abaqus 静力计算模块进行计算。根据实验位移测量点的位置,提取对应位置的有限元仿真值,得到 7×7 个有限元模型位移值,如表5所示。对比表2中实验值可以发现模型变形量偏差较大。

表5 修正前有限元测点位移

Table 5 Finite element measurement point displacements before updating mm

行位置	列位置						
位置	1	2	3	4	5	6	7
1	-0.15	-1.81	-3.02	-3.77	-3.01	-1.83	-0.19
2	0	-0.16	-0.46	-0.67	-0.44	-0.13	0
3	-0.05	0.73	0.99	1.07	0.93	0.69	-0.05
4	-0.41	1.72	2.41	2.62	2.13	1.47	-0.39
5	-0.11	0.88	1.03	0.76	0.81	0.7	-0.1
6	0	0.02	-0.38	-0.95	-0.48	-0.06	0
7	-0.21	-2.07	-3.48	-4.45	-3.32	-1.89	-0.18

3.2 结构参数灵敏度分析

表1中材料参数较多,全部考虑则计算量将无法估量。一般来说,杨氏模量、泊松比与剪切模量三者是由模型等效公式推导得出,有一定理论依据,铝作为支撑处的加强块材料对整体变形的影响可以忽略不计,因此只需要考虑等效蜂窝与蒙皮材料的热膨胀系数即可。同一支撑点处的支撑刚度已在1.2节中分析。为了简化支撑刚度数量,考虑到模型的横向对称性,将4个支撑点按距离地面高度分为上下两组,每组中两个支撑点相同方向的支撑刚度认为相同。参数符号定义如表6所示。

对各材料参数与支撑刚度进行参数灵敏度分析,得到对灵敏度分析结果如图8所示。其中蓝色的条形表示正效应,即因子对结果具有增益;红色则表示反效应,即因子对结果具有抑制。后续模型修正工作中将沿用本节所使用的参数作为修正参数,并着重考虑贡献程度前二的因子。

3.3 模型修正

有限元模型总体优化设计目标为仿真变形与实际变形相符,即在测量点处仿真变形位移与实际变形位移差值最小。使用 $y_i (i=1, 2, 3, \dots, n)$ 来表

表6 参数符号说明

Table 6 Parameter symbol description

变量名称	符号
蒙皮材料1方向热膨胀系数	α_{11SW}
蒙皮材料2方向热膨胀系数	α_{22SW}
蜂窝材料1方向热膨胀系数	α_{11NH}
蜂窝材料2方向热膨胀系数	α_{22NH}
模型顶部y方向支撑刚度	S_{yU}
模型底部y方向支撑刚度	S_{yD}
模型顶部z方向支撑刚度	S_{zU}
模型底部z方向支撑刚度	S_{zD}

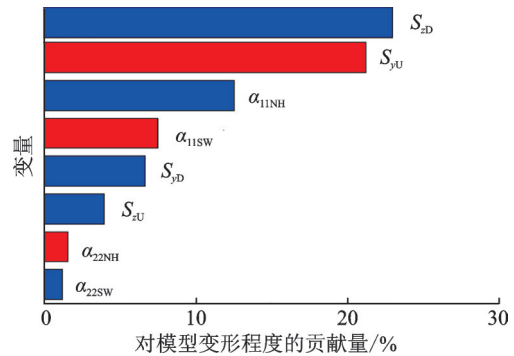


图8 灵敏度分析结果

Fig.8 Sensitivity analysis results

示各测量点的位移测量值, $x_i (i=1, 2, 3, \dots, n)$ 表示与实验测量值相对应的仿真值。根据数学优化方法中的最小二乘法理论,使用均方根误差反映仿真与实验结果的吻合程度。模型均方根误差计算为

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - x_i)^2}{n}} \quad (5)$$

优化目标为最小化仿真与实验测量值的均方根误差,即

$$\min RMSE \quad (6)$$

使用 Isight® 优化平台中的多岛遗传算法^[21]对有限元模型进行优化,它是对传统遗传算法的改进,具有比传统遗传算法更优良的全局求解能力和计算效率,能够有效避免在局部出现最优解的情况。该算法对优化问题解空间的个体进行编码,然后对编码后的个体种群进行遗传操作,通过迭代从新种群中寻找含有最优解或较优解的组合。根据多岛遗传算法计算要求并考虑实际计算代价,初步设定优化迭代数为640代,详细设定如表7所示。

最终修正过程如图9所示。图9中的点代表每一次迭代过程的均方根误差值,最后一次迭代值为最优解。迭代过程总体呈现收敛趋势,均方根误差最小值为0.16 mm。

表 7 多岛遗传算法参数

Table 7 Multi-island genetic algorithm parameters

变量名称	值	变量名称	值
子群规模	10	交叉概率	0.8
岛规模	8	变异概率	0.01
代数	640	岛间迁移率	0.1

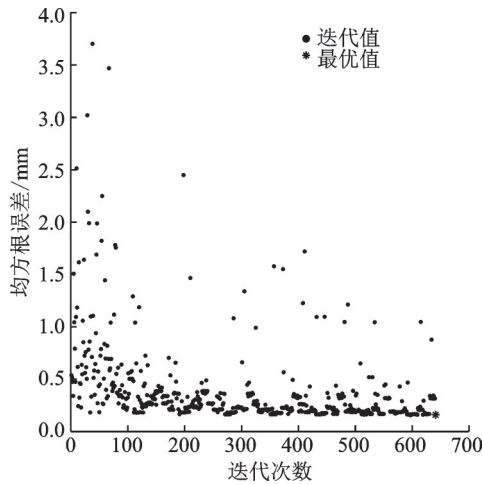


图 9 修正计算迭代过程

Fig.9 Revised calculation iteration process

3.4 结果与误差分析

修正前后各因子的对比情况如表 8 所示,修正后有限元模型热变形位移值如表 9 所示。

表 8 修正前后结果对比

Table 8 Comparison of results before and after correction

参数	修正前	修正后	误差/%
热膨胀系数/ K^{-1}	α_{11NH}	1.23×10^{-5}	1.24×10^{-5} 0.81
	α_{22NH}	1.23×10^{-5}	0.94×10^{-5} 23.5
	α_{11SW}	1.23×10^{-5}	1.27×10^{-5} 3.25
	α_{22SW}	1.23×10^{-5}	1.33×10^{-5} 8.13
支撑刚度/ $(N \cdot mm^{-1})$	S_{yD}	100 000	14 555 85.4
	S_{yU}	100 000	11 086 88.9
	S_{xD}	100 000	4 709 95.3
	S_{xU}	100 000	4 349 95.7

表 9 修正后有限元测点位移

Table 9 Finite element measurement point displacements after updating

行位置	列位置						
	1	2	3	4	5	6	7
1	-0.71	-1.69	-2.52	-3.1	-2.66	-1.96	-0.85
2	0.16	0.21	0.13	0.06	0.16	0.22	0.16
3	0.28	1.21	1.64	1.9	1.74	1.35	0.28
4	0.44	2.37	3.43	4.09	3.49	2.55	0.31
5	0.3	1.47	2.04	2.3	2.0	1.52	0.24
6	0.19	0.32	0.3	0.2	0.25	0.29	0.18
7	-0.59	-1.29	-1.95	-2.4	-2.0	-1.4	-0.6

由于均方根误差不能很好的反映各个测量点的误差情况,因此定义不同位置处的相对误差与平均误差计算为

$$e_i = \frac{y_i - x_i}{y_{\max} - x_{\min}} \times 100\% \quad (7)$$

$$\bar{e} = \frac{|e_1| + |e_2| + \dots + |e_n|}{n} \quad (8)$$

式中: y_{\max} 与 y_{\min} 为实验值的最大、最小值, x_i 与 y_i 为第*i*个测量点的仿真值与实验值。修正前后误差直方图如图 10、11 所示。

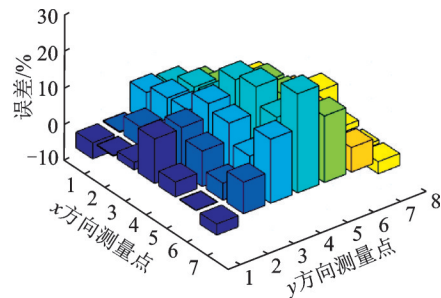


图 10 修正前误差直方图

Fig.10 Error histogram before correction

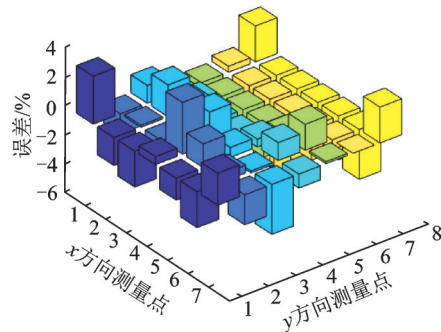


图 11 修正后误差直方图

Fig.11 Error histogram after correction

修正前平均误差为 8.5%,误差最大值为 27.1%,位于模型中部偏下的位置。整体误差分布呈现中间区域偏大,两侧区域偏小的特点。修正后有限元模型最大误差降至 4.7%,平均误差降低至 1.7%,均方根误差由 0.77 mm 降低至 0.16 mm,误差最大处由模型中间位置转移至模型边界处。

对于误差较大位置的转移现象,可能是由于在模型两侧支反力的存在,削弱了材料参数对模型变形量的作用。因此在模型修正前,模型材料参数对热变形程度影响较大的中间区域误差较大,而修正后误差较大位置转移到受支反力影响大的边界区域。

目前对于结构静力学的有限元模型修正案例较少,在文献[22]中对二维桥梁结构的静力学修正结果误差在 3% 左右。本次修正模型为三维结构,平均误差仍要小于文献误差,模型的

总体变形情况相对于修正前更符合实验结果,修正后的模型可以作为该天线板的基准有限元模型。

4 结 论

本文研究了一种面向热变形的卫星天线板结构有限元模型修正方法。首先根据蜂窝板等效理论,将卫星天线板结构与边界条件进行合理简化并建立有限元模型,基于参数灵敏度分析结果确定材料热膨胀系数与支撑刚度作为修正变量。然后拟合天线板实验模型的温度测量值作为热载荷场施加到有限元模型中,进行仿真运算并设置位移监测点,提取模型各监测点的位移量。最终搭建优化平台,将有限元模型各监测点位移量与实验模型的位移量的均方根误差作为目标函数,利用多岛遗传算法对目标模型进行参数修正。修正后模型均方根误差由0.77 mm降低至0.16 mm,仿真模型的变形量更加接近实验测量值,显著改善了在热环境下模型的热变形预示结果。

参考文献:

- [1] 陈宇,李钰,陈丽,等.卫星天线反射面板热变形面形误差检测方法[J].上海航天,2020,37(4):117-127.
CHEN Yu, LI Yu, CHEN Li, et al. Satellite antenna reflector panel thermal deformation surface shape error detection method[J]. Aerospace Shanghai, 2020, 37(4): 117-127.
- [2] 高慎斌.卫星制造技术[M].北京:宇航出版社,1998.
GAO Shenbin. Satellite manufacturing technology [M]. Beijing: Yuhang Publishing House, 1998.
- [3] 秦玉灵,孔宪仁,罗文波.基于响应面方法的碳纤维蜂窝板有限元模型修正[J].振动与冲击,2011,30(7):71-76,86.
QIN Yuling, KONG Xianren, LUO Wenbo. Finite element model updating of carbon fiber honeycomb panel based on response surface methodology[J]. Journal of Vibration and Shock, 2011, 30(7): 71-76, 86.
- [4] 吴晓菊.结构有限元模型修正综述[J].特种结构,2009(1):39-45.
WU Xiaojie. Summary of structural finite element model updating[J]. Special Structures, 2009(1): 39-45.
- [5] BERMAN A, FLANNELLY W G. Theory of incomplete models of dynamic structures[J]. AIAA Journal, 1971, 9(8): 1481-1487.
- [6] CHEN J C, GARBA J A. Analytical model improvement using modal test results[J]. AIAA Journal, 1980, 18(6): 684-690.
- [7] KABE A M. Stiffness matrix adjustment using mode data[J]. AIAA Journal, 1985, 23(9): 1431-1436.
- [8] HEYLEN W. Model optimization with measured modal data by mass and stiffener changes[C]//Proceedings of the 10th International Seminar on Modal Analysis. [S.l.]:[s.n.], 1985.
- [9] CAESAR B. Update and identification of dynamic mathematical models[C]// Proceedings of International Modal Analysis Conference. Los Angeles, USA: [s.n.], 1986: 394-401.
- [10] GIRARDI M, PADOVANI C, PELLEGRINI D, et al. A finite element model updating method based on global optimization[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2021, 152: 107372.
- [11] FRISWELL M I, PENNY J E T. Updating model parameters from frequency domain data via reduced order models[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 1990, 4(5): 377-391.
- [12] FRISWELL M I. Finite element model updating in structural dynamics[M]. [S.l.]: Springer Dordrecht, 1995.
- [13] 孙卫青,程伟.基于响应面全局优化技术的蜂窝板材料性能参数修正[J].材料工程,2019,47(5):159-166.
SUN Weiqing, CHENG Wei. Modification of honeycomb panel material performance parameters based on response surface global optimization technology[J]. Journal of Materials Engineering, 2019, 47(5): 159-166.
- [14] 邓苗毅,任伟新.基于实测挠度、转角和曲率的细长梁分段抗弯刚度识别研究[J].实验力学,2007,22(5):483-488.
DENG Miaoyi, REN Weixin. Research on segmental bending stiffness identification of thin and long beams based on measured deflection, rotation angle, and curvature[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2007, 22(5): 483-488.
- [15] HE C, CHEN G, HE H, et al. Model updating of a dynamic system in a high-temperature environment based on a hierarchical method[J]. Finite Elements in Analysis and Design, 2013, 77: 59-68.
- [16] SUN Kaipeng, ZHAO Yonghui, HU Haiyan. Identification of temperature-dependent thermal-structural properties via finite element model updating and selection[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2015, 52: 147-161.
- [17] 殷海涛,姜金辉,张方,等.基于试验模态参数及结构动力学优化设计的有限元建模[J].国外电子测量技术,2012,31(9):18-22.
YIN Haitao, JIANG Jinhui, ZHANG Fang, et al. Finite element modelling based on experimental modal parameters and optimal design of structural dynamics [J]. Foreign Electronic Measurement Technology,

- 2012, 31(9): 18-22.
- [18] 邓苗毅,任伟新,王复明.基于静力响应面的结构有限元模型修正方法[J].实验力学,2008,23(2): 103-109.
- DENG Miaoyi, REN Weixin, WANG Fuming. Structural finite element model updating method based on static response surface[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2008, 23(2): 103-109.
- [19] 袁昭旭,于开平.高温环境下结构动力学模型修正方法研究[J].振动与冲击,2017,36(15): 171-180.
- YUAN Zhaoxu, YU Kaiping. Research on structural dynamics model updating method in high temperature environment[J]. Journal of Vibration and Shock, 2017, 36(15): 171-180.
- [20] SMITH M. ABAQUS/standard user's manual, Version 2019[M]. [S.l.]: Dassault Systèmes Simulia Corp, 2019.
- [21] SMITH M. Isight user's manual, version 2019[M]. [S.l.]: Dassault Systèmes Simulia Corp, 2019.
- [22] 魏锦辉,任伟新.基于响应面方法的桥梁静动力有限元模型修正[J].公路交通科技,2015,32(2): 68-73.
- WEI Jinhui, REN Weixin. Static and dynamic finite element model updating of bridge beams based on response surface method[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2015, 32(2): 68-73.

(编辑:张蓓)