

一种针对大口径天线热变形的快速预测方法*

雷震[†] 秦展鹏

(长安大学机械工程学院 西安 710006)

摘要 针对大型反射面天线热致变形计算效率低的问题, 提出一种快速预测天线热变形的快速预测方法. 该方法首先建立了天线单块面板的热分析模型, 然后通过数值计算分析了面板上下表面、背架与面板、背架与环境等不同温差下的天线变形规律, 最后拟合出一种线性回归关系实现结构热变形的快速计算; 采用该回归关系预测天线结构变形, 预测结果与仿真变形结果吻合较好, 同时用试验测量的方法验证了温差与热变形符合线性关系; 将该方法应用于110 m反射面天线热变形计算中, 结果发现日照下的结构变形主要以背架变形为主.

关键词 技术: 大口径天线, 太阳, 温度效应, 方法: 热变形试验, 摄影测量

中图分类号 P111; **文献标识码**: A

1 引言

反射面天线因其具有高增益、窄波束等特性, 广泛应用于深空探测、载人航天、雷达通信等领域^[1-2]. 随着对深空探测和射电天文研究的不断深入, 反射面天线逐渐朝着大口径、高频率的方向发展, 任何微小变形都将引起天线性能的下降, 日照温度作为天线所受的主要载荷之一, 其引起的天线结构变形会对反射面的型面精度造成较大影响^[3-5].

目前, 国内外学者对于大口径天线日照热致变形的研究相对较少, 主要集中于中小口径天线日照变形场的仿真模拟和实测分析. 国内易乐天等人对新疆天文台25 m天线进行了热力耦合分析, 建立了天线座架位移场与方位轴偏差的几何关系, 从而实现了由实测温度到座架变形的快速计算^[6]. 李鹏等人对“嫦娥工程”的40 m天线进行机电耦合分析, 指出温度对电性能的影响与变形的分布形式密切相关^[7]. 孙继先等人通过实验测量的方法研

究了德令哈13.7 m天线的热变形规律, 发现日照热造成了天线撑腿结构的不规则变形, 从而引起方位轴的倾斜周期性变化^[8]. 付丽等人通过实验测量了佘山25 m天线不同时刻的温度情况, 并运用全息法评估其主面变形, 结果表明温度对天线主反射面精度影响较大^[9]. 李旺等人采用距离反比插值方法重构了TM (Tianma) 65 m天线背架结构温度场, 发现了不同方向的温差会造成天线指向误差的变化^[10]. 国外Attoli等人对Sardinia 32 m天线进行了热仿真分析, 指出座架的热变形会对反射面精度产生较大影响^[11]. Greve等人采用动态与静态相结合的方法对IRAM (Institute for Radio Astronomy) 30 m进行研究, 发现温度梯度引起的变形会对天线的指向精度造成较大影响^[12]. 以上大部分学者主要通过有限元仿真或温度传感器测量的方法将获得的温度作为载荷施加于结构上计算变形. 但由于大口径天线结构庞大且较为复杂, 其热变形计算将消耗大量的计算时间, 分析效率较低. 为

2024-05-08收到原稿, 2024-07-22收到修改稿

*国家自然科学基金项目(12203008)、长安大学中央高校基本科研业务费(300102253204)资助

[†]592267459@qq.com

了节省热变形计算时间, 提高计算效率, 本文提出一种快速预测天线热变形的方 法. 该方法以待建 QTT (QiTai Radio Telescope) 一块面板的有限元数值模型为基础, 通过数值方法抽离出结构变形

与温差之间的回归关系, 然后利用有限元仿真与试验测量的方法对抽离出的数学关系进行验证, 确定回归关系的准确性. 最后将该方法应用于 QTT 热变形计算中, 方法流程如图1所示.

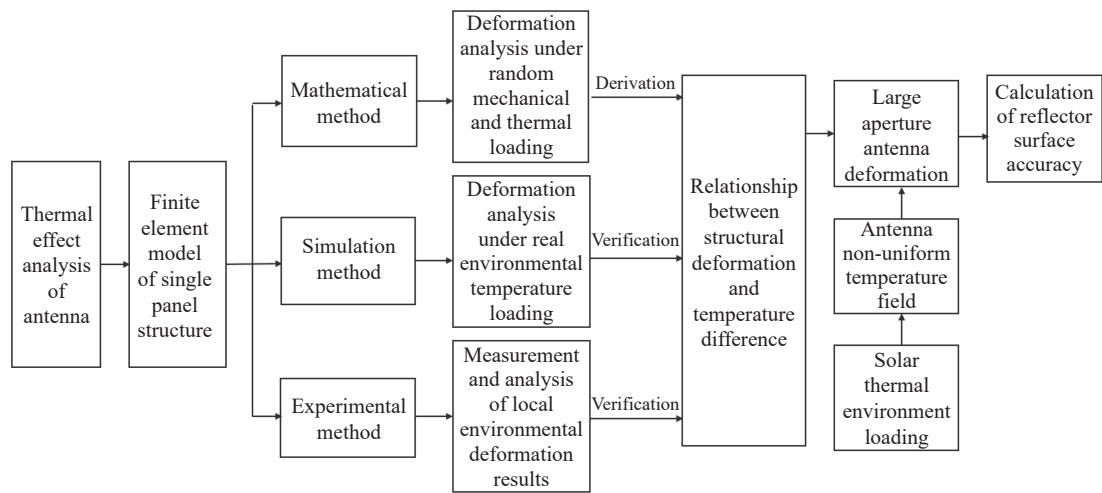


图 1 热变形预测方法分析流程

Fig. 1 Analysis process of thermal deformation prediction method

2 天线热环境模型

天线结构主要通过热辐射、热传导、热对流 3 种方式来实现周围环境与自身热量的交换, 而这

几种传热方式又与云层厚度、风速等因素息息相关, 在上述因素的共同作用下, 天线与周围环境所组成的热系统处于一种瞬态热平衡状态^[13], 具体热传递途径如图2所示.

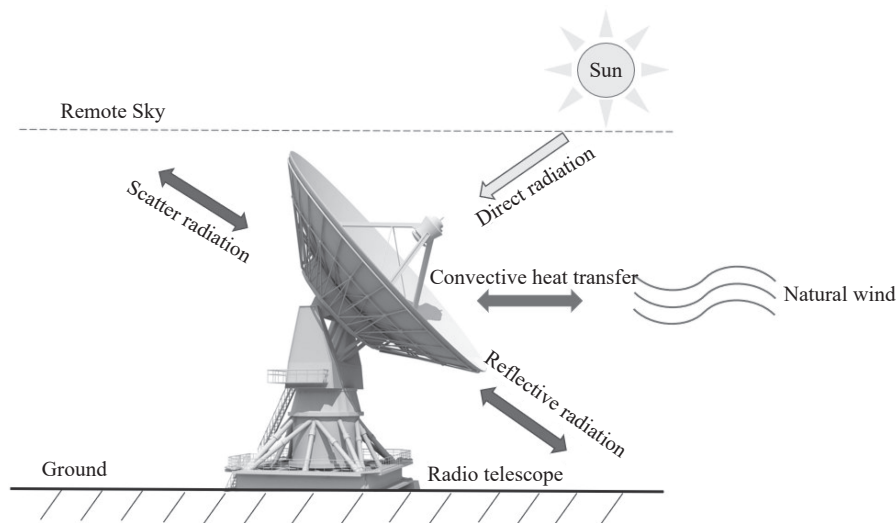


图 2 天线换热简图

Fig. 2 Heat transfer diagram of the antenna

2.1 ASHRAE晴空模型

太阳辐射作为天线吸收热能的主要来源会受到太阳的位置、大气质量以及天线的姿态等诸多因素的影响. 太阳辐射强度的定义包含多种数学模型, 其中比较有代表性的是ASHRAE晴空模型^[14], 该模型描述了天线接收太阳辐射的3种形式: 直接辐射、反射辐射与散射辐射.

太阳辐射穿过大气层到达目标物体过程中, 部分能量会被气体、水汽、云层和灰尘等物质分散和吸收, 太阳穿过大气层未被分散或吸收而直接到达物体表面的能量为直接辐射, 经天空散射、地面散射后到达目标物体的能量为散射辐射, 经过目标物体周围物体反射后间接到达物体的辐射量为反射辐射, 分别定义如下, 直接辐射:

$$G_{ND} = \frac{A}{\exp(B/\sin\beta_s)} C_N \cos\theta, \quad (1)$$

式中, A 为地球大气层外(大气粒子量为零)的太阳辐射强度; C_N 为大气清洁系数; β_s 为太阳高度角; B 为大气消光系数; θ 为太阳入射光束与倾斜构件表面法线所形成的夹角.

散射辐射:

$$G_{d\theta} = 0.5CG_{ND}(1 + \cos\alpha_s), \quad (2)$$

式中, C 为散射辐射系数, α_s 为物体表面与水平地面间的夹角.

反射辐射:

$$G_R = 0.5(\sin\beta_s + C)G_{ND}\rho_g(1 + \cos\alpha_s), \quad (3)$$

式中, ρ_g 为地面反射率, 与构件周围的地面材料有关.

则天线接收的太阳总辐射量为:

$$G_t = \gamma(G_{ND} + G_{d\theta} + G_R) = \gamma[\max(\cos\theta, 0) + 0.5C(1 + \cos\alpha_s) + 0.5\rho_g(1 + \cos\alpha_s)]G_{ND}, \quad (4)$$

式中, γ 为天线表面的日照辐射吸收率, 由于天线表面通常涂有白漆, 故 γ 一般取0.3^[15].

2.2 对流换热模型

天线处于自然对流热环境中, 其与环境间的对流换热可以用牛顿冷却公式来表示:

$$Q_c = h_c(T_w - T_f), \quad (5)$$

式中, T_w 为壁面温度; T_f 为周围流体温度; $h_c = 4.0v + 5.6$ 用于取值^[16], 其中 v 为风速.

2.3 净长波辐射模型

净长波辐射是指射电望远镜与地面及远空的辐射换热, 由斯忒潘-波耳兹曼定律将射电望远镜表面的净长波辐射表述为^[17]:

$$Q_r = 0.5\varepsilon\sigma[(1 - \cos\alpha_s)(T_g^4 - T_f^4) + (1 + \cos\alpha_s)(T_{sky}^4 - T_f^4)], \quad (6)$$

式中, σ 为斯忒潘-波耳兹曼常量, 其值为 $5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K}^4)$; ε 为天线发射率; T_{sky} 为远空温度; T_g 为地面温度.

2.4 瞬态热平衡方程

射电望远镜的结构热分析遵循能量守恒定律, 其瞬态热分析的能量平衡方程可表述为^[18]:

$$C\dot{T} + K T = Q, \quad (7)$$

式中, T 为温度向量, 是待求解的参数; $\dot{T}$ 为温度向量对时间的导数; C 为比热矩阵, 与结构质量分布、材料参数、比热容等有关; K 为热传导矩阵, 包括热传导参数、对流换热参数与热辐射相关参数等; Q 为热输入矩阵, 主要与太阳辐射、热边界等环境参数有关.

3 天线结构热变形与温差关系探究

大口径反射面天线由数千块精密面板组合拼接而成, 每块面板包含较多的单元, 因此采用传统方法计算整个反射面结构热变形的过程将消耗大量的计算时间, 分析效率较低. 为了更好地探究结构变形与日照之间的关系并提高计算效率, 本节以待建的QTT单块面板为例, 分析在温度载荷作用下面板变形与温差之间的关系.

3.1 QTT某单块面板模型

单块面板在受到日照作用影响时会产生面板屈曲现象, 主要表现为竖直方向(Z 向)的变形, 而在水平方向(X 与 Y 向)的变形量很小. 其时间尺度

通常为一天,具体体现在白天面板朝外膨胀,而夜晚朝里凹陷,如图3所示.其中,点A表示面板在初始状态下的某个参考位置,点A'表示在受到温度梯度作用后该参考点移动到的新位置.引起面板屈曲的原因主要包括:构件的材料差异、面板上下表面之间的温差、背架与面板的温差等^[19].

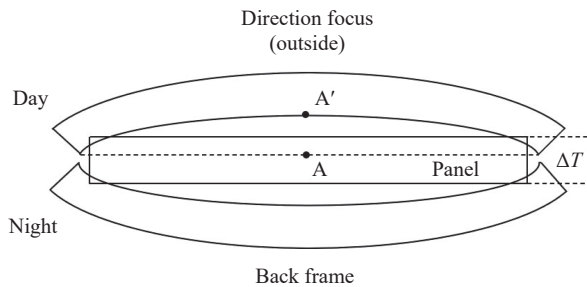


图 3 由温度梯度造成的面板屈曲

Fig. 3 Panel deformation caused by temperature gradient

基于上述理论,现以QTT单块面板进行分析,其有限元模型如图4所示,主要包括反射面面板、背架等构件,该模型共有7318个单元、3483个节点,面板材料为铝,背架材料为钢,材料的热物理参数如表1所示.背架与4个螺栓通过直接固定的方式来模拟其与反射面之间的连接,同时对B位置施加全约束,C、D、E这3处位置施加旋转与Z向的位移约束.

3.2 数学建模方法

3.2.1 单因素温差影响分析

反射面天线的日照变形场分布受众多因素的影响,其中背架与面板的温差、面板上下表面的温差以及背架与环境之间的温差对结构变形场的影响较为关键,现采用单一变量法分析各个温差对天线面板变形场的影响.

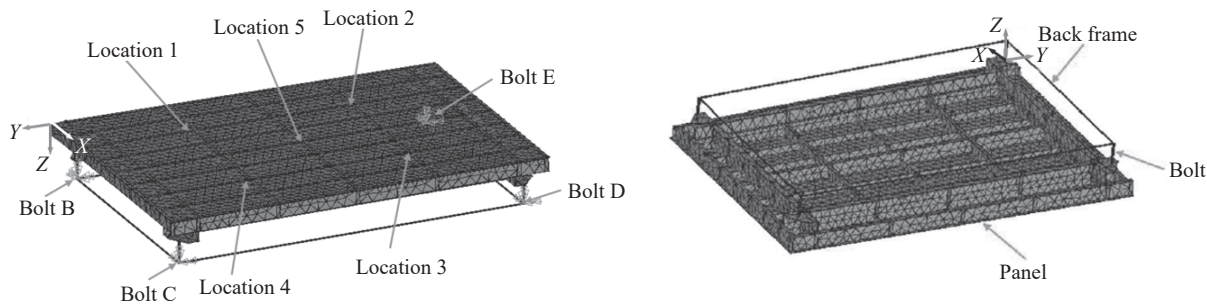


图 4 某单块面板的有限元模型

Fig. 4 Finite element model of a single panel

表 1 材料热物理参数
Table 1 Thermal and physical parameters of materials

Materials	Density /(kg · m ³)	Thermal Conductivity /(W · m ⁻¹ · K ⁻¹)	Thermal Expansion Coefficient/K ⁻¹	Specific Heat Capacity /(J · kg ⁻¹ · K ⁻¹)
Aluminum	2.78 × 10 ³	190.0	2.34 × 10 ⁻⁵	875
Steel	7.85 × 10 ³	49.8	1.116 × 10 ⁻⁵	465

(a)面板与背架均匀温度变化导致的面板屈曲(背架与环境间的温差)

图5为对面板与背架施加相同的均匀温度载荷后面板的变形分布云图,分析变形云图可知,当施加均匀温度载荷后,面板朝外凸起,结构变形场呈

现出中间高、四周低的分布趋势,这是由于背架与螺栓的4个接触位置施加了固定约束;同时面板屈曲量随着温度载荷的升高而持续增加.

由上述分析结果可知,在受到均匀温度载荷时,面板中心的变形量远大于其余位置.因此本节

主要探究温差与面板中心节点的变形关系. 根据图中的变形数据, 拟合出均匀温度载荷与面板屈曲量之间的关系如(8)式所示, 可见当温度载荷 ΔT_1 增加时, 面板屈曲量也增加, 两者满足线性关系, 即

$$\Delta Z = 0.03875\Delta T_1 + 0.00065,$$

(8)

式中, ΔT_1 为背架与环境的温差($^{\circ}\text{C}$), ΔZ 为 Z 向变形量(mm).

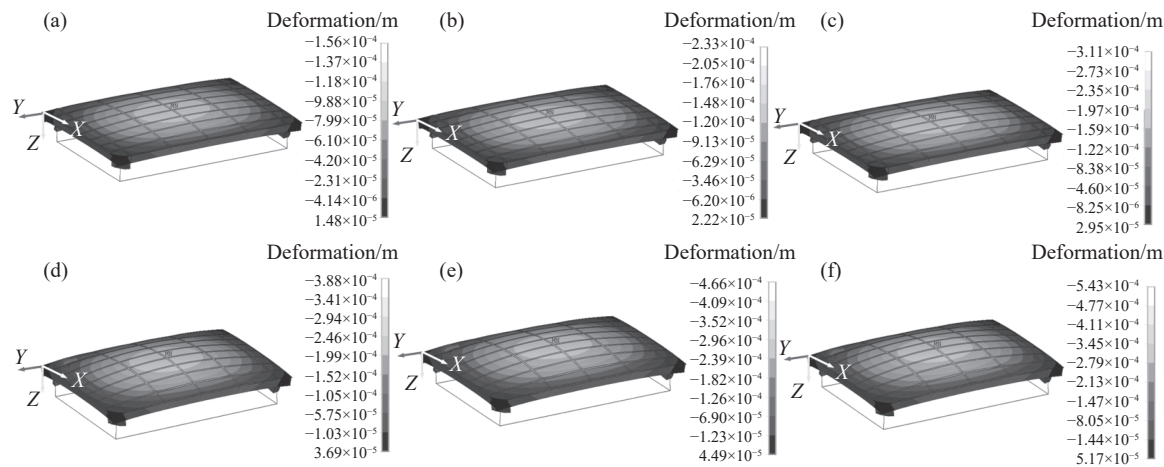


图 5 均匀温度载荷下面板变形图; (a)、(b)、(c)、(d)、(e)、(f)分别是均匀温度载荷为24 $^{\circ}\text{C}$ 、26 $^{\circ}\text{C}$ 、28 $^{\circ}\text{C}$ 、30 $^{\circ}\text{C}$ 、32 $^{\circ}\text{C}$ 、34 $^{\circ}\text{C}$ 时的面板变形图, 变形量单位为m, 放大倍数为500.

Fig. 5 Panel deformation diagram under uniform temperature load; (a), (b), (c), (d), (e), and (f) are panel deformation diagrams for uniform temperature loads of 24 $^{\circ}\text{C}$, 26 $^{\circ}\text{C}$, 28 $^{\circ}\text{C}$, 30 $^{\circ}\text{C}$, 32 $^{\circ}\text{C}$, and 34 $^{\circ}\text{C}$, respectively, with deformation in unit of m and magnification of 500.

(b)背架与面板的温差导致的面板屈曲

对于长期处于野外环境下的天线, 由于面板与背架具有不同的材料性质, 在受到日照影响时往往表现出不同的温度. 为探究两者之间的温差

对面板结构变形的影响规律, 现对背架与面板分别施加不同的均匀温度载荷, 结构变形情况如表2所示.

表 2 面板与背架不同温差下的变形结果
Table 2 Deformation results of panel and back frame under different temperature differences

Panel Temperature/ $^{\circ}\text{C}$	Frame Temperature/ $^{\circ}\text{C}$	Panel Center Deformation Value/mm	Panel Temperature/ $^{\circ}\text{C}$	Frame Temperature/ $^{\circ}\text{C}$	Panel Center Deformation Value/mm
36	35	0.620	42	35	0.846
38	35	0.695	44	35	0.942
40	35	0.771	46	35	0.997

由表中的变形数据可知, 面板与背架之间的温差越大, 面板屈曲量也越大, 拟合关系如(9)式所示, 分析该关系可以发现面板与背架之间的温差与面板屈曲量之间呈线性关系.

$$\Delta Z = 0.03879\Delta T_1 + 0.03778\Delta T_2,$$

(9)

式中, ΔT_2 为面板与背架的温差($^{\circ}\text{C}$).

(c)面板上下表面温差所导致的面板屈曲
由于面板具有一定的厚度, 在受到太阳辐射

时其上下表面表现出不同的温度分布,这可能造成面板的弯曲,现对面板上下表面分别施加不同的均匀温度载荷,同时为了消除背架与面板之间的温差对结果的影响,将背架与面板下表面温度

设为一致,面板的结构变形情况如表3所示,上、下表面温度分别记为STP (Surface Temperature of the Panel)和USTP (Underside Surface Temperature of the Panel).

表 3 面板上下表面不同温差下的变形结果
Table 3 The deformation results of the panel's upper and lower surfaces under different temperature differences

STP/℃	USTP/℃	Panel Center Deformation Value/mm	STP/℃	USTP/℃	Panel Center Deformation Value/mm
36	35	0.597	39	35	0.644
37	35	0.613	40	35	0.659
38	35	0.628	41	35	0.675

由表中数据可知,面板上下表面间的温差越大,面板屈曲量也越大,两者拟合关系式为:

$$\Delta Z = 0.01554\Delta T_3 + 0.03877\Delta T_4, \tag{10}$$

式中, ΔT_3 为面板上下表面的温差(℃), ΔT_4 为面板下表面与环境的温差(℃).

结合以上3种情况的分析结果可知,面板屈曲量与各个温差之间都符合线性关系,即温差越大面板变形量也越大. 因此可以通过温差的变化来预估天线面板变形结果,以实现面板变形的快速计算.

3.2.2 多因素温差影响分析

为了减少单因素分析的结果误差,提高分析的准确性与合理性,现采用正交试验设计方法^[20-21]对多因素与目标之间的关系进行探究. 根据上一节的分析结果,选择面板上下表面的温差、面板与背架的温差以及背架与环境之间的温差作为试验因素,面板中心的Z向变形量作为分析指标,因素与水平如表4所示,具体设计方案及计算结果如表5所示.

根据正交试验计算结果,拟合出以上3种因素与分析目标之间的回归关系如下:

$$\Delta Z=0.0388\Delta T_1+0.0379\Delta T_2+0.0157\Delta T_3. \tag{11}$$

分析上式可知,天线日照热致变形与各个温差之间满足线性回归关系,因此可以采用该关系来实现天线结构变形的快速计算. 但由于大口径反射面天线所选材料以及结构并不相同,故对于不同

的天线来说需要重新对温差与变形之间的关系进行推导从而应用于整个结构上.

表 4 3因素3水平表
Table 4 Three factors and three levels table

Lever	Factor		
	$\Delta T_1/^\circ\text{C}$	$\Delta T_2/^\circ\text{C}$	$\Delta T_3/^\circ\text{C}$
1	0.6	0.8	5
2	1.2	1.6	10
3	1.8	2.4	15

表 5 正交试验设计方案
Table 5 Orthogonal experimental design scheme

Experiment Number	Factor			Panel Center Deformation Value/mm
	$\Delta T_1/^\circ\text{C}$	$\Delta T_2/^\circ\text{C}$	$\Delta T_3/^\circ\text{C}$	
1	1	1	1	0.23389
2	1	2	3	0.65158
3	1	3	2	0.48808
4	2	1	3	0.63064
5	2	2	2	0.46714
6	2	3	1	0.30363
7	3	1	2	0.44620
8	3	2	1	0.28270
9	3	3	3	0.70038

3.3 物理模型仿真

为验证数学模型所推导的天线结构变形与温差之间关系的准确性, 现选取夏至日6月21日晴天无云且风速为3 m/s时的工况对QTT单块面板进行全天候温度场与变形场分析. 图6为结构温

度场分布云图, 时间分别为8: 00、10: 00、12: 00、16: 00 (地方时), 分析温度云图可知, 天线结构的日照温度场呈现绕太阳直射点的放射梯度状分布, 具有非均匀、时变性等特点.

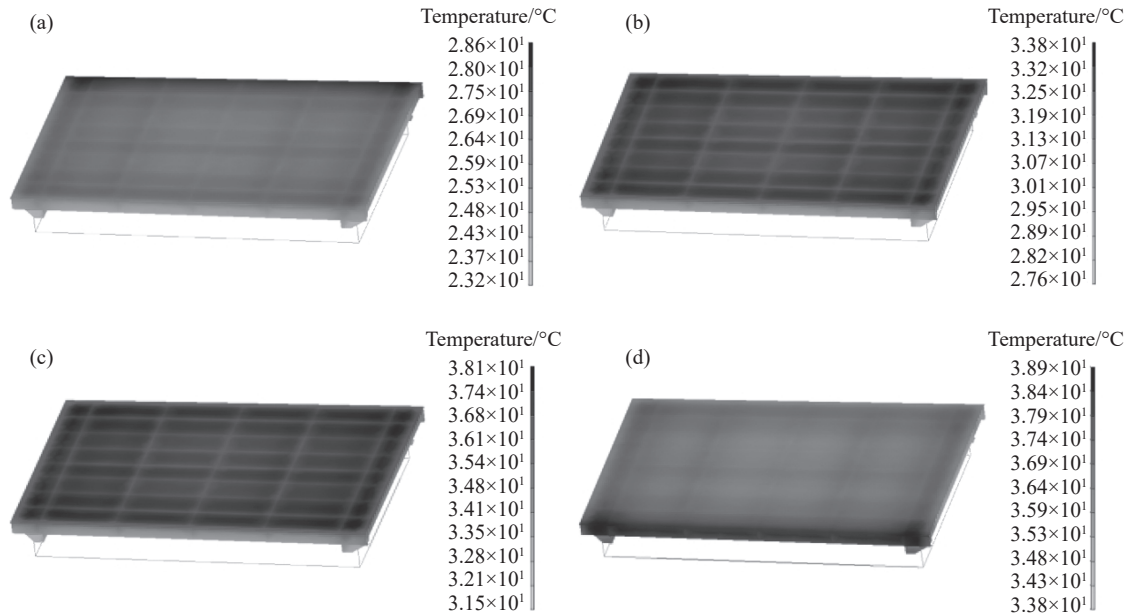


图6 当地不同时刻单块面板温度场分布, 其中图(a)、(b)、(c)、(d)分别为当地时间8: 00、10: 00、12: 00、16: 00的温度分布云图.

Fig. 6 Temperature field distribution of a single panel at different local times, where (a), (b), (c), and (d) correspond to the temperature contours at 8: 00, 10: 00, 12: 00, and 16: 00 local time, respectively.

在只考虑温度载荷的情况下, 选取图4所示的约束方式对以上不同时刻温度场下的结构变形进行求解. 图7为结构热变形分布云图, 分析该云图可知: 日照热引起的结构变形主要集中于面板中心处, 而其余位置的变形相对较小; 同时随着太阳辐射的增强, 面板屈曲量也随之增加.

现随机选择图4所示的几个位置对以上4个时刻数学模型与物理模型的面板变形结果进行验证, 两者的变形对比结果如图8所示. 分析该结果可知, 通过数学模型计算(Mathematical model calculation, MMC)与物理模型仿真(Physical model simulation, PMS)得到的面板变形结果整体呈现出良好的一致性, 两者的计算结果整体相差不大, 最大误差仅为7.4%, 这说明通过温差关系来计算结构变形的方法是可行的.

3.4 试验模型验证

本节预采用单相机数字摄影测量系统对单块简化铝板(800 mm×800 mm×2 mm)的铝板、螺栓以及环梁组成)开展变形场数值模拟试验, 以验证数学模型所推导的温差与结构变形之间的关系. 试验采用的仪器主要包括无线温度采集器、温度数据接收器、尼康SB-400 (Speedlight Bounce)相机、圆形回光反射标志(靶标点)、编码标志以及碳纤维基准尺等. 其中, 温度采集器需在探头处涂抹硅脂, 并采用铝箔胶带贴于试验对象背部, 其主要与接收器通过射频通讯实现温度数据的无线采集与数据传输; 回光反射标志贴于试验对象表面, 主要用来反射光线以实现被测目标物的消隐; 编码标志以及碳纤维基准尺用来实现拍摄的自动定向与测量点的自动匹配.

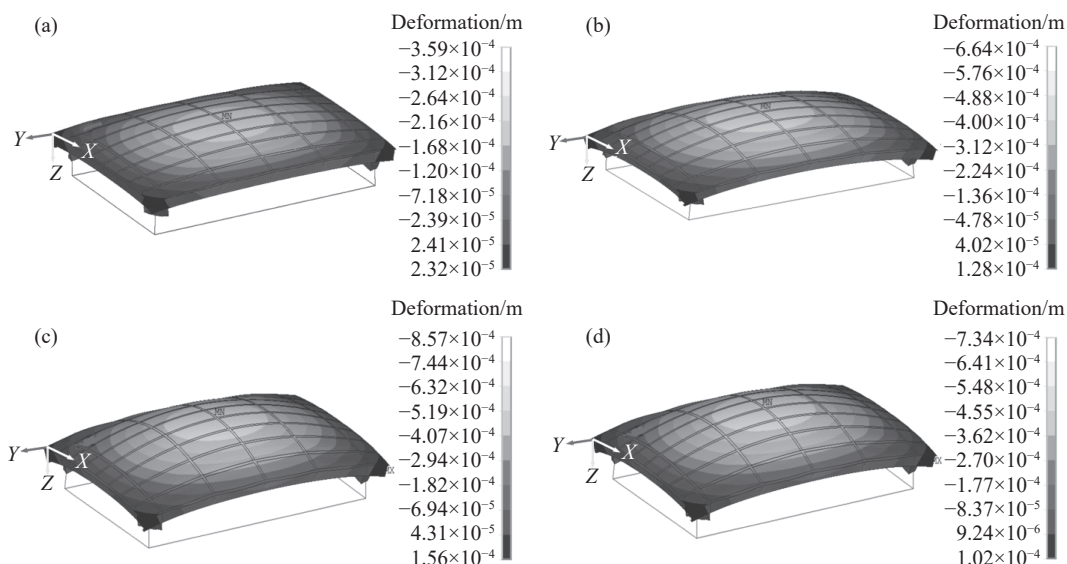


图 7 当地不同时刻单块面板热变形分布云图, 其中图(a)、(b)、(c)、(d)分别为当地时间8: 00、10: 00、12: 00、16: 00的变形云图.

Fig. 7 Thermal deformation cloud diagrams of a single panel at different local times, where (a), (b), (c), and (d) correspond to the deformation contours at 8: 00, 10: 00, 12: 00, and 16: 00 local time, respectively.

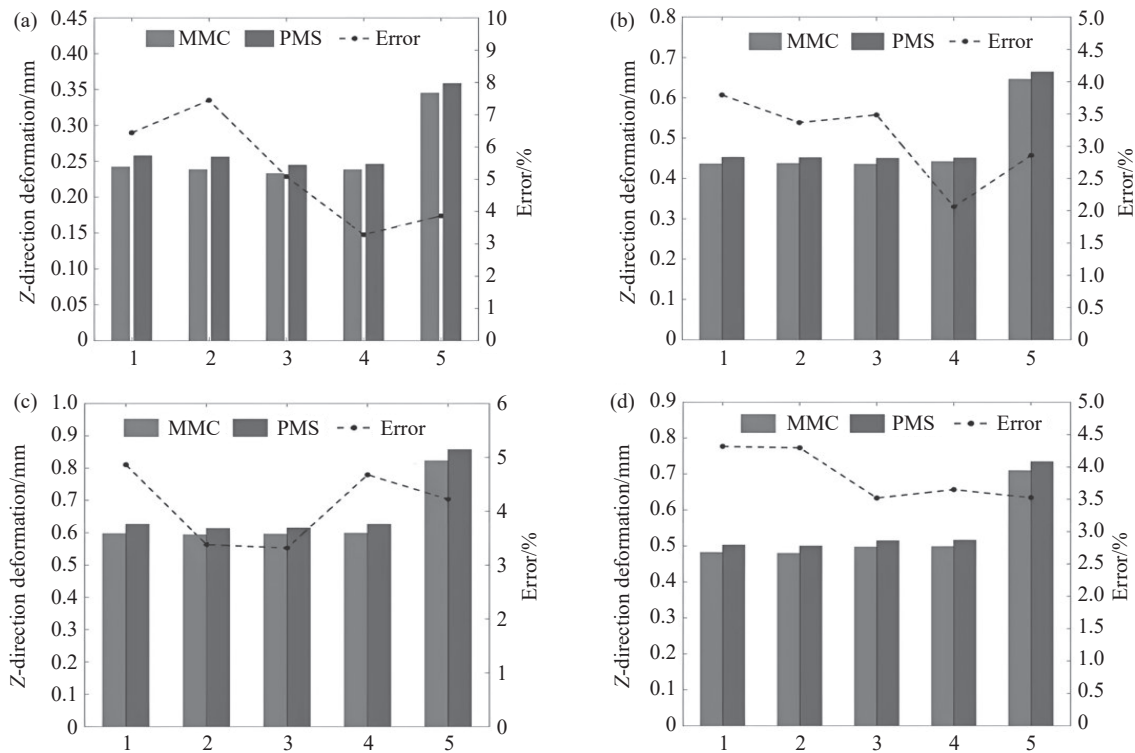


图 8 当地不同时刻两模型变形结果对比图, 其中, 图(a)、(b)、(c)、(d)分别为当地时间8: 00、10: 00、12: 00、16: 00的对比图.

Fig. 8 Comparison diagrams of deformation results for the two models at different local times, where (a), (b), (c), and (d) correspond to the comparison plots at 8: 00, 10: 00, 12: 00, and 16: 00 local time, respectively.

试验具体方案如下: 首先将试验对象放置于稳定地面上并进行固定操作, 防止在测量过程中发生相对位移, 然后在其表面及周围布设靶标点、编码标志及摄影基准尺, 通过测量相机对靶标点和基准尺进行多角度数字摄影并采集原始照片, 最后利用V-STARS (Video-Simultaneous Triangulation and Resection System)三维坐标测量系统对数据进行处理后获得面板表面摄影靶标点的三维坐标. 通过公式计算可得本次试验的测量精度

为 $0.01 \text{ mm}^{[22]}$, 试验靶标点位置分布与背部结构见图9, 试验现场见图10.

对获得的靶标点Z向变形进行插值处理, 得到整个铝板的变形场分布如图11所示, 时间分别为14: 28、14: 33、14: 39、14: 55 (地方时). 分析变形场云图可知, 在太阳辐射作用下, 面板的变形场呈现出与仿真结果相似的分布趋势(中间高、四周低), 伴随着太阳辐射的减弱, 面板屈曲量也随之降低. 试验测量的温度及变形结果见表6.

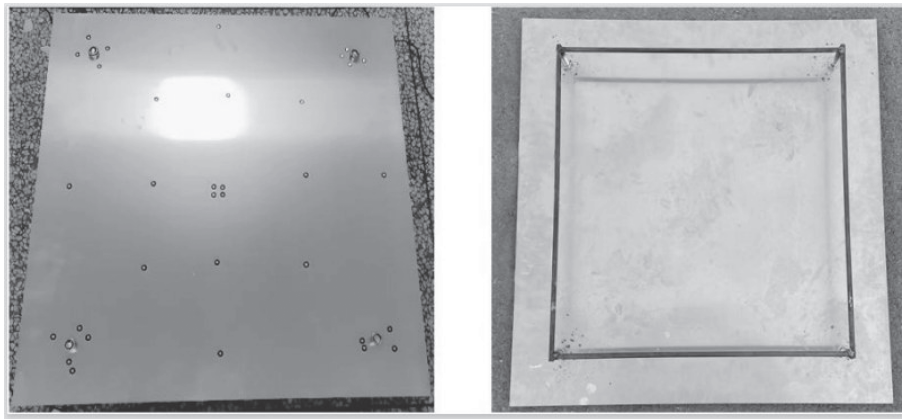


图 9 靶标点位置示意与铝板背部结构图

Fig. 9 The position of the target point and the back structure diagram of the aluminum plate



图 10 现场示意图

Fig. 10 Site schematic diagram

根据上述试验结果, 拟合出温差与变形之间的关系为:

$$\Delta Z = -0.03479\Delta T_1 + 0.02434\Delta T_2 + 0.1535. \quad (12)$$

分析上式可知, 在实测条件下, 面板结构变形与各温差之间满足线性关系, 同时对比拟合系数的大小可以看出, 背架与环境间的温差是影响面板变形的关键性因素. 结合(11)式的分析结果发现: 数学计算与试验模拟所得到的回归方程都符合线性关系, 这说明通过线性回归方程计算天线热变形的方法是可行的, 但由于试验模拟时采用了简化铝板结构导致两者得到的回归关系存在差异性.

4 案例应用

现以一口径为110 m的反射面天线作为应用对象, 使用热分析软件获得其结构温度场, 然后采用前文所推导的天线结构变形与温差之间的线性回归关系来实现主反射面变形场的快速计算, 具体计算流程如图12所示.

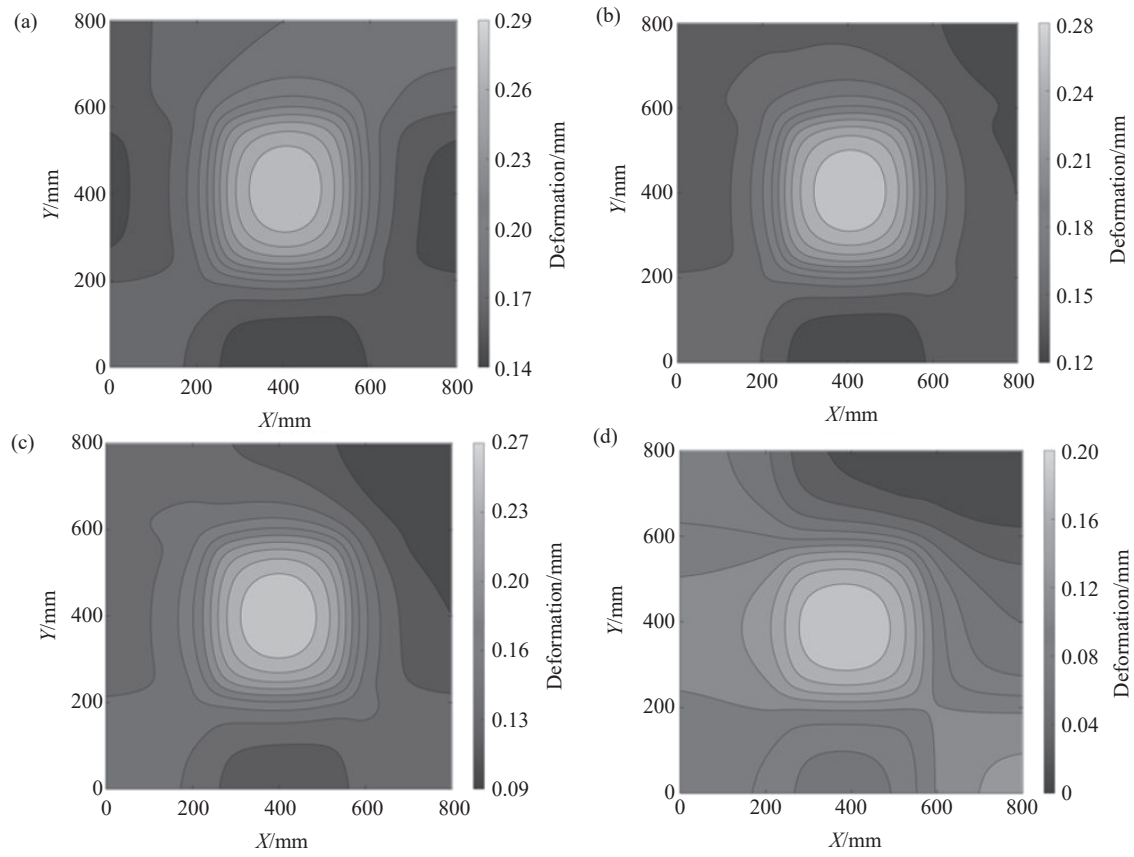


图 11 铝板不同时刻变形图, 其中, 图(a)、(b)、(c)、(d)分别为当地时间14: 28、14: 33、14: 39、14: 55的铝板变形图.

Fig. 11 Deformation diagrams of the aluminum plate at different times, where (a), (b), (c), and (d) correspond to the deformations at 14: 28, 14: 33, 14: 39, and 14: 55 local time, respectively.

表 6 试验结果

Table 6 Experimental results

Panel	Frame	Ambient	Panel Center
Temperature /°C	Temperature /°C	Temperature /°C	Deformation Value/mm
54.2	40.1	34.2	0.462
45.5	37.3	35.1	0.362
44.3	36.4	33.5	0.353
38.1	35.1	34.6	0.251

图13为该天线某版本的有限元模型, 其主要由主反射面(Panels of the Main Reflector, PMR)和背架结构(Back Up Structure, BUS)组成, 两者分别采用SHELL63单元与BEAM188单元进

行建模. 设置天线俯仰角为 90° , 方位角为 0° , 对该模型进行全天候温度场时程分析.

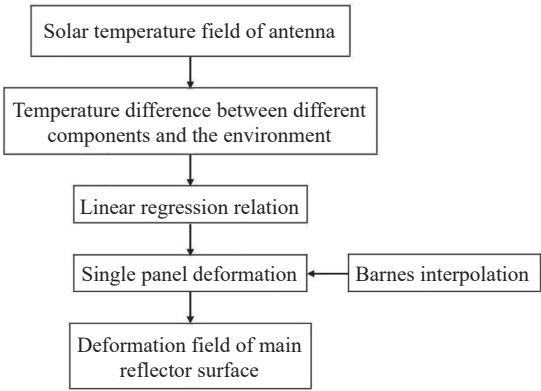


图 12 面板变形场计算流程

Fig. 12 Calculation process of panel deformation field

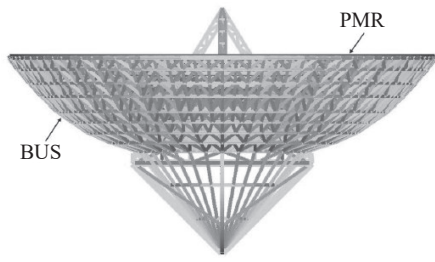


图 13 QTT有限元模型

Fig. 13 Finite element model of QTT

图14-16分别为风速为3 m/s时不同时刻下天

线主反射面与背架上弦节点的温度场分块云图, 由图中的温度数据可以获得每块面板不同构件与环境之间的温差, 然后将其代入(11)式所抽离的线性回归方程计算每块面板的变形数据, 最后通过Barnes插值算法即可获得整个主反射面的变形场分布.

图17-19给出了不同时刻下反射面热变形云图, 分析变形结果可知: 日照下反射面自身温度场所引起的结构变形以局部变形为主, 主要表现为部分面板的凸起与凹陷; 整体变形沿径向逐步向外呈“元宝状”分布, 在靠近边缘处主要以扭转变形为主.

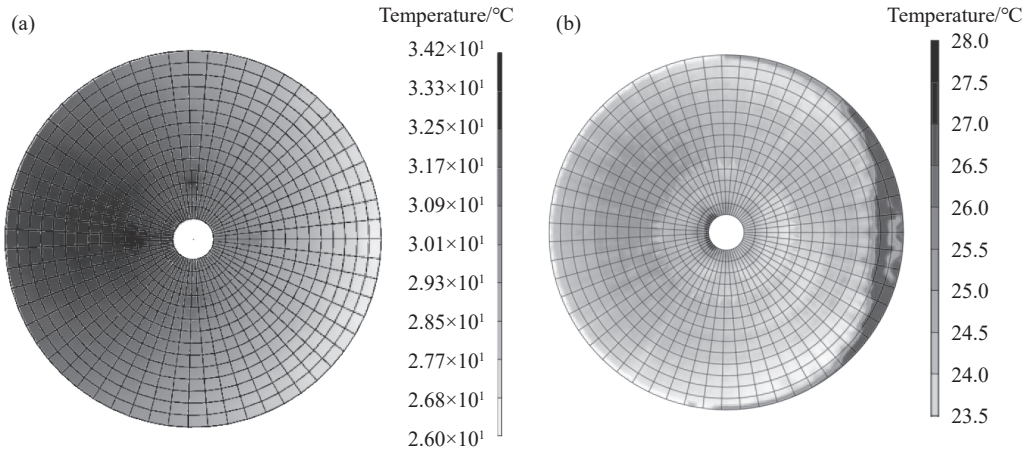


图 14 8: 00 110 m 天线结构温度场, 其中(a)为主反射面温度场, (b)为背架温度温度场.

Fig. 14 Temperature distribution of the 110-meter antenna structure at 8: 00, where (a) shows the temperature field of the main reflector, and (b) shows the temperature field of the back frame.

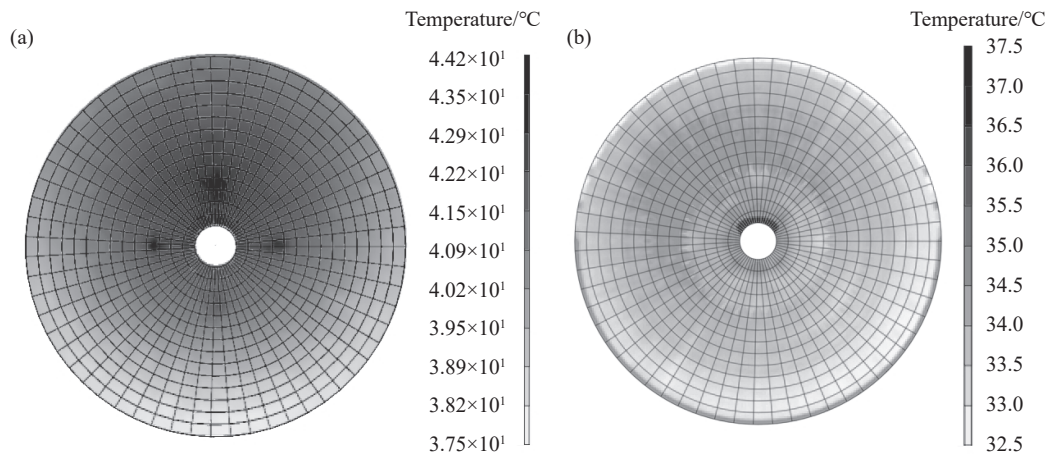


图 15 12: 00 110 m 天线结构温度场, 其中(a)为主反射面温度场, (b)为背架温度温度场.

Fig. 15 Temperature distribution of the 110-meter antenna structure at 12: 00, where (a) shows the temperature field of the main reflector, and (b) shows the temperature field of the back frame.

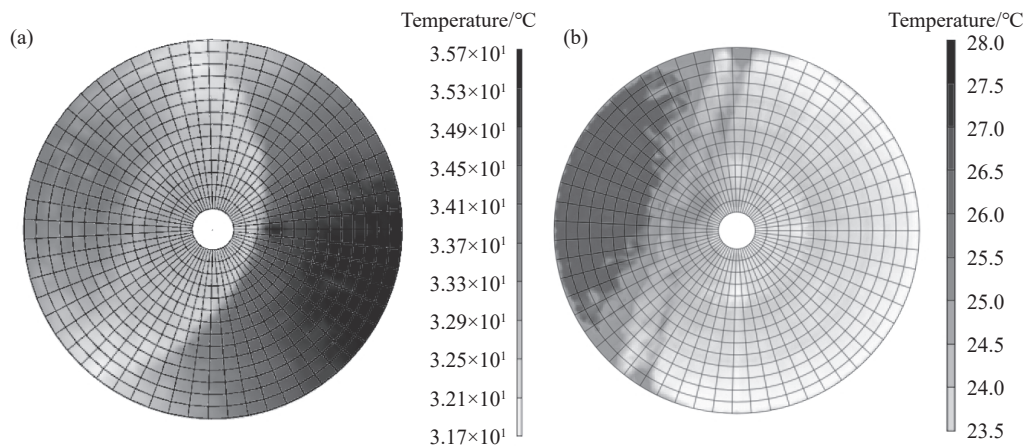


图 16 18: 00 110 m 天线结构温度场, 其中(a)为主反射面温度场, (b)为背架温度场。

Fig. 16 Temperature distribution of the 110-meter antenna structure at 18: 00, where (a) shows the temperature field of the main reflector, and (b) shows the temperature field of the back frame.

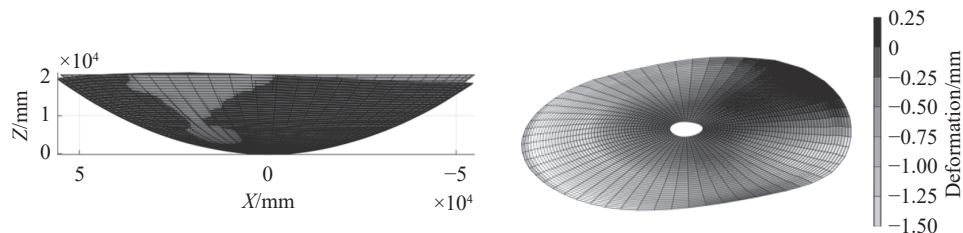


图 17 当地时间5: 00 110 m 天线反射面变形场

Fig. 17 Deformation field of the 110 m antenna reflector at 5: 00 local time

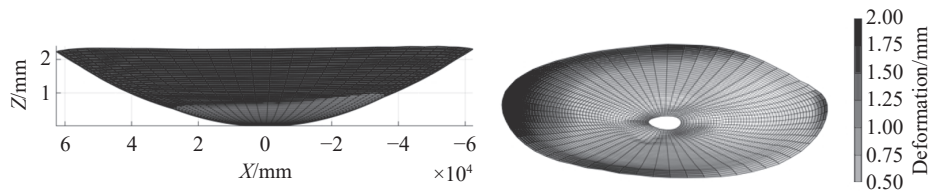


图 18 当地时间9: 00 110 m 天线反射面变形场

Fig. 18 Deformation field of the 110 m antenna reflector at 9: 00 local time

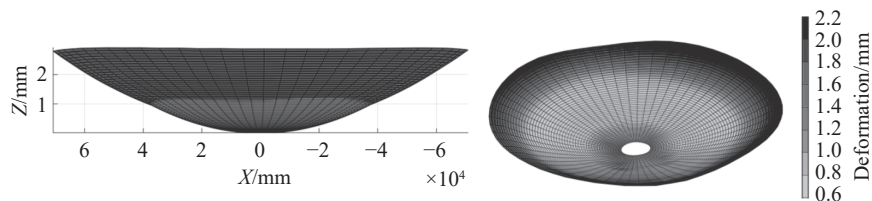


图 19 当地时间15: 00 110 m 天线反射面变形场

Fig. 19 Deformation field of the 110 m antenna reflector at 15: 00 local time

图20给出了在俯仰角为 90° , 不同风速下(1.5 m/s、3 m/s、4.5 m/s)反射面的型面精度分布曲线, 分析该曲线可知: 同一俯仰角, 不同风速下的RMS (Root Mean Square)曲线具有相似的变化趋势, 都呈现“马鞍状”分布, 在接近日出/日落时(5:00/19:00), 太阳光侧照于天线, 从而导致RMS值开始发生剧烈变化; 随着风速的增大, RMS值越小, 这是因为风速的增大会造成结构整体温差降低, 从而造成背架的不均匀变形减小, 反射面精度升高。

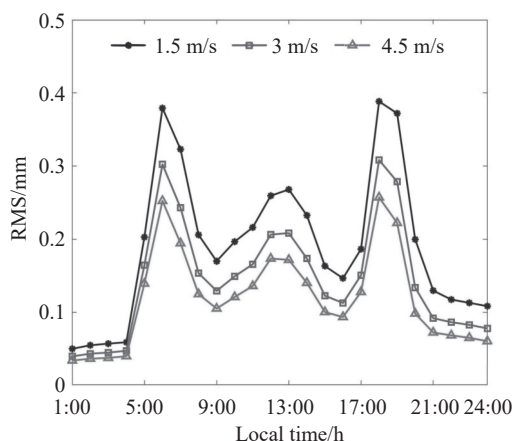


图 20 主反射面型面精度

Fig. 20 The surface accuracy of main reflecting surface

5 结论

针对现有大型反射面天线变形场计算效率低的问题, 本文结合有限元仿真及试验测量, 提出一种简单、高效且快速的方法来预测大口径反射面天线的热变形。主要结论如下:

(1)天线的结构变形可用背架与面板、面板上下表面、背架与环境3种温差来进行描述, 从而实现天线面板变形场的快速预测。通过物理仿真与数字摄影测量试验验证了数学建模方法所抽离的

回归关系的合理性。

(2)将该方法应用于110 m反射面天线热变形计算中, 结果发现日照下的结构变形主要以背架变形为主, 而反射面自身温度场所引起的结构变形较小。

参考文献

- [1] 严粤飞, 王从思, 李帅, 等. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2022, 52: 5
- [2] 杜彪, 伍洋, 张一凡, 等. 无线电通信技术, 2016, 42: 1
- [3] Greve A, Bremer M. Measured Thermal Behaviour of Radio Telescopes. Thermal Design and Thermal Behaviour of Radio Telescopes and Their Enclosures. Berlin, Heidelberg: Springer, 2010: 173
- [4] 连培园, 朱敏波, 王伟, 等. 机械工程学报, 2015, 51: 165
- [5] 王惠, 宁云炜, 闫浩. 天文研究与技术, 2018, 15: 208
- [6] 易乐天, 许谦, 李琳, 等. 天文研究与技术, 2022, 19: 438
- [7] 李鹏, 段宝岩, 郑飞, 等. 机械工程学报, 2012, 48: 136
- [8] 孙继先, 左营喜, 杨戟, 等. 天文学报, 2014, 55: 246
- [9] 付丽, 王锦清, 徐平. 中国科学院上海天文台年刊, 2011, 1: 62
- [10] 李旺, 付丽, 王旭, 等. 天文学进展, 2023, 41: 292
- [11] Attoli A, Stochino F, Buffa F. Structures, 2022, 03: 901
- [12] Greve A, Dan M, Penalver J. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1992, 40: 1375
- [13] 刘岩, 钱宏亮, 范峰. 建筑科学与工程学报, 2015, 32: 81
- [14] 刘树堂, 龙期亮. 建筑钢结构进展, 2012, 14: 35
- [15] Fan F, Jin X F, Shen S Z. Advances in Structural Engineering, 2009, 12: 503
- [16] Ho D, Liu C H. Journal of Structural Engineering, 1989, 115: 1681
- [17] Mcquiston F C, Parker J D, Spitler J D. Heating Ventilating and Air Conditioning: Analysis and Design. Beijing: Chemical Industry Press, 2005: 153
- [18] 陶文铨. 传热学. 第5版. 北京: 高等教育出版社, 2019: 95
- [19] Greve A, Bremer M, Penalver J, et al. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2005, 53: 851
- [20] 何为, 唐斌. 优化试验设计方法及数据分析. 北京: 化学工业出版社, 2012: 1-49
- [21] 张成军. 实验设计与数据处理. 北京: 化学工业出版社, 2009: 8
- [22] 丁华. 摄影测量学基础. 北京: 清华大学出版社, 2018: 117

A Fast Prediction Method for Thermal Deformation of Large Aperture Antenna

LEI Zhen QIN Zhan-peng

(School of Mechanical Engineering, Chang'an University, Xi'an 710006)

ABSTRACT In order to solve the problem of low computational efficiency of thermal deformation of large reflector antennas, this paper proposes a method to quickly predict the thermal deformation of antennas. Firstly, the thermal analysis model of the single panel of the antenna is established. Then, the deformation law of the antenna is analyzed by numerical calculation under different temperature differences between the upper and lower surfaces of the panel, the back frame and the panel, the back frame and the environment. Finally, a linear regression relationship is fitted to realize the rapid calculation of the thermal deformation of the structure. The regression relationship is used to predict the deformation of the antenna structure. The predicted results are in good agreement with the simulated deformation results. At the same time, the linear relationship between temperature difference and thermal deformation is verified by experiment. This method is applied to the thermal deformation calculation of 110 m reflector antenna. The results show that the structural deformation under sunshine is mainly the deformation of the back frame.

Key words techniques: large-diameter antenna, Sun, thermal effect, methods: thermal deformation test, digital photogrammetric