

• 机械工程 •

DOI:10.15961/j.jsuese.202200674



本刊网刊

大型射电望远镜日照热误差及其补偿的仿真研究

雷震^{1,2}, 宁亮¹, 陈浩祥¹, 赵武林², 项斌斌³, 李东伟²

(1. 长安大学 工程机械学院, 陕西 西安 710006; 2. 中国电子科技集团公司第三十九研究所, 陕西 西安 710016;
3. 中国科学院 新疆天文台, 新疆 乌鲁木齐 830011)

摘要: 射电望远镜广泛应用于射电天文、测控导航等领域, 随着其工作频率的升高、口径的增大, 日照引起的结构热变形对其性能的影响愈发严重; 本文针对待建的新疆 110 m 口径射电望远镜, 建立了其日照热力耦合模型, 分析了天线在不同时刻、风速及姿态下的温度、变形情况, 总结了结构日照温度场、变形场的时空分布特征, 最后采用最佳吻合抛物面方法对反射面精度进行了评价, 并通过副反射面位置补偿量的变化趋势揭示了天线热变形的共性规律及机理。结果表明: 对于日照引起的天线热变形误差, 风速越大, 结构温度分布越均匀, 其越接近等温膨胀变形, 反射面形状精度越高; 温差引起的结构不均匀变形是反射面精度下降的主要原因, 温差越大结构的不均匀变形越大, 反射面的形状精度越低; 同一姿态不同风速下反射面热误差空间分布具有相似性, 该分布与太阳直射点位置直接相关, 且会跟随直射点位置发生变化, 但由于日照强度、风速等因素的不同, 其变形幅度不同。各种姿态下反射面精度变化规律相似, 与风速的相关性均为反射面精度随风速上升而提高; 采用副反射面位置补偿技术可明显缓解日照热误差影响。本文的分析方法与结论对大口径全可动射电望远镜的设计建造及其热误差控制具有一定参考价值。

关键词: 射电望远镜; 日照热误差; 热变形; 反射面精度; 热误差补偿

中图分类号: TN82

文献标志码: A

文章编号: 2096-3246(2024)01-0245-11

射电望远镜广泛应用于射电天文、测控导航等领域, 可通过特定形状的反射面实现电磁波向馈源的汇聚。然而环境载荷会使其结构产生机械形变, 引起反射面形状误差进而降低望远镜的性能^[1]。重力、风载对天线性能的影响及其控制方法已较为成熟^[2-6], 钱宏亮等^[3]研究了上海 65 m 天线在重力及风载作用下, 主反射面精度的变化情况。Antebi 等^[4]分析了天线如何在重力情况下使用副面变形调整保证天线的精度。热对低频、中小口径天线性能的影响并不明显, 且可以通过采用天线罩、温控系统等进行控制, 但目前筹建的新疆 110 m 大口径全可动射电望远镜 (QTT) 口径大、工作频率高, 且新疆地区日照强烈, 太阳辐射所引入的结构热误差问题亟须重视^[7-8]。

目前, 国内外学者对大口径全可动射电望远镜

热行为的研究较少, 主要对中小型口径的射电望远镜进行了实测研究和数值模拟。Greve 等^[9]通过大量实验分析, 改进了 IRAM-30m 天线的温控系统, 使天线性能得到明显改善。Bremer 等^[10]进一步构建了 IRAM-30 m 天线热变形的简化数据模型, 实现了热误差实时计算。Ambrosini 等^[11]将实测温度数据加载到 VLBI-32 m 天线有限元模型上对天线热变形进行了预测。MacDonald^[12]和 DiCarlo 等^[13]针对带天线罩的 37 m 天线 (HUSIR) 研究了其太阳/风/温度及电磁性能变化情况。Tsela 等^[14]针对南非的 LLR 望远镜建立了其数据驱动的热梯度及精度预测模型。连培园等^[15]针对天线日照温度场分布特征提出了温度场实时预估方法。常文文^[16-17]、易乐天^[18]等建立了南山站 25 m 天线反射面的有限元模型, 探讨了天线面板、座架等结

收稿日期: 2022-07-01

基金项目: 国家自然科学基金项目 (12203008); 陕西省自然科学基金基础研究计划面上项目 (2021JM-150); 中国博士后科学基金项目 (2020M683598)

作者简介: 雷震 (1988—), 男, 副教授, 博士。研究方向: 天线结构设计; 计算力学。E-mail: 592267459@qq.com

网络出版时间: 2023-11-09 20:29:53 网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/51.1773.TB.20231108.1528.001>

构由于太阳辐照引起的非均匀温度场及热致变形。刘泽鑫等^[19]对武清70 m天线座架也进行了类似研究。钱宏亮等^[3]通过数值模拟的方法,研究了上海65 m天线在日照温度场作用下,主反射面精度的变化趋势。

日照热在天线结构上产生的温度场具有非均匀性、时变性等特点,使天线热变形呈现出复杂的时空分布以及多因素相关性。热环境、天线姿态等不确定性因素,使得依据经验公式评估天线热变形精度的方法难以满足现代天线的设计要求^[20-21]。为保证QTT的正常运行,研究其在日照作用下的热变形及其变迁规律一方面可为其热误差补偿提供参考,另一方面可用于预测未来一段时间内天线热变形的趋势,提前规划调整方案。

本文首先对QTT的热问题进行了建模,对天线在典型夏至日的温度场及变形情况进行了数值模拟,分析了不同情况下反射面精度的变化情况及其规律;最后给出了几种工况下副面的位置补偿量,通过分析补偿前后主反射面的光程差,探讨了天线热误差的时空分布规律及其影响机理,有助于预估、理解天线日照热误差问题,并为热补偿方案提供依据。

1 天线分析模型

1.1 热环境建模

天线与外界的热量传递途径如图1所示,主要包括天线接收太阳辐射、天线与空气的对流换热、天线与地面和远空的辐射换热。换热过程与风速、大气清洁度、地面温度、天空温度等因素密切相关。天线结构在上述因素的共同作用下形成瞬态时变的温度场。

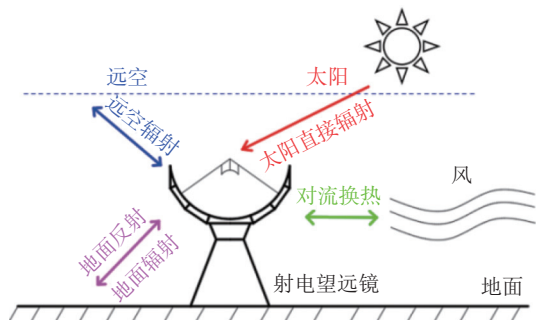


图1 射电望远镜换热简图

Fig. 1 Heat transfer diagram of a radio telescope

1.1.1 太阳辐射热模型

太阳辐射热模型是用于计算地球上的物体接收到的日照热功率的数学模型,常用的有Dilger模型^[9]和ASHRAE晴空模型^[22-23],本文采用ASHRAE晴空模型计算天线接收到的太阳热辐射功率。

ASHRAE晴空模型^[23]中地面物体接收的太阳辐射由直接辐射、散射辐射和反射辐射3部分构成,其

中穿过大气层直射物体的部分为直接辐射,被周围环境反射后间接照向物体的部分称为反射辐射,被大气中的灰尘等分子散射的部分为散射辐射。

直接辐射强度 G_{ND} 计算方法如下:

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

式中: A 为大气质量为零时的太阳辐射强度; B 为大气消光系数; β_s 为太阳高度角; C_N 为大气清洁度; θ 为太阳对构件表面的入射角,若 $\cos \theta$ 小于0则表示构件处于阴影中。

散射辐射强度计算方法如下:

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

式中, C 为散射辐射强度, α 为物体表面相对于地面的倾角。

反射辐射强度计算方法如下:

$$G_R = 0.5p_g G_{tH}(1 + \cos \alpha) \quad (3)$$

式中: p_g 为地面反射率,一般取0.3^[24]; G_{tH} 为落在壁面之前的水平面或地面上的总辐射量, $G_{tH} = (C + \sin \beta_s)G_{ND}$ 。

入射到天线表面的太阳辐射热流密度为:

$$G_t = G_{ND} + G_{d\theta} + G_R = (\cos \theta + 0.5C(1 + \cos \alpha) + 0.5p_g(1 + \cos \alpha)(\sin \beta_s + C))G_{ND} \quad (4)$$

天线实际得到的太阳热流密度为:

$$Q_s = \gamma G_t \quad (5)$$

式中, γ 为天线表面的太阳辐射吸收率,天线表面一般涂有白漆,故 γ 取值为0.3^[24]。

ASHRAE模型中 A 、 B 、 C 这3个系数可通过中国辐射强度观测数据拟合得到^[25], C_N 、 β_s 、 α 、 θ 可根据天线地理位置及构件空间方位计算得到^[16]。

1.1.2 对流换热模型

天线与环境的对流换热可用牛顿换热定律^[26]表述如下:

$$Q_c = h_c(T_s - T_x) \quad (6)$$

式中: h_c 为对流换热系数,其取值Saetta^[27]建议使用公式 $h_c = 4.0V + 5.6$,其中 V 为风速; T_x 为构件表面温度; T_s 为环境温度,可按下式计算^[26]:

$$T_s(t) = 0.5(T_{smax} - T_{smin})\sin(15(t-9)) + 0.5(T_{smax} + T_{smin}) \quad (7)$$

式中, T_{smax} 、 T_{smin} 分别为环境最高温度、最低温度, t 为时间。

1.1.3 净长波辐射模型

净长波辐射指天线与地面、远空的辐射换热。天

线表面得到的净长波辐射可表述为^[22]:

$$Q_r = \varepsilon \sigma (F_{wg}(T_g^4 - T_x^4) + F_{ws}(T_{sky}^4 - T_x^4)) \quad (8)$$

式中: ε 为发射率; σ 为黑体辐射系数; F_{wg} 、 F_{ws} 分别为构件表面对地面、天空的辐射角系数; T_{sky} 为远空温度; T_g 为地面温度, 可按下式计算:

$$T_{sky}(t) = T_s(t) + M \quad (9)$$

$$T_g(t) = T_s(t) + E \cdot \sin((t-9) \times 15) + F \quad (10)$$

式中, E 、 F 、 M 为常量, 取值可见文献[28-29]。

1.1.4 瞬态温度场模型

天线结构的热分析遵循热力学第一定律, 瞬态热分析的能量平衡方程为^[30]:

$$C\dot{T}(t) + K(t)T(t) = Q(t) \quad (11)$$

式中, C 为比热矩阵, 考虑系统内能的增加, T 和 $\dot{T}$ 分别为温度向量以及其对时间的导数, K 为传导矩阵, 包含导热系数、对流系数及辐射率和形状系数等, Q 为节点热流率向量。

1.2 阴影遮挡与辐射传热系数

1.2.1 天线主反射面阴影遮挡

QTT主反射面直径110 m, 面积巨大, 在太阳转动过程中, 面板会对自身产生遮挡, 明暗区及分界点示意如图2所示。根据光线追踪原理, 可以找到反射面边缘点在反射面上的投影点, 进而得到反射面阴影区与太阳照射区的分界线, 计算公式如下:

$$N(t, A_Z, E_L) = X' - X_0 \quad (12)$$

式中: $N(t, A_Z, E_L)$ 为太阳入射光线方向向量, 是关于时间 t 、天线方位角 A_Z 与俯仰角 E_L 的函数; X' 为反射面边缘点; X_0 为反射面与太阳入射光线的交点。

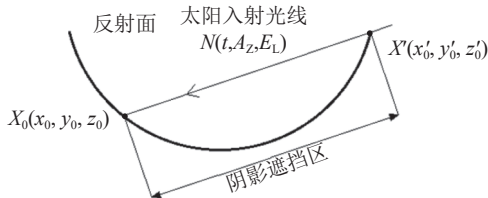


图2 反射面太阳照照明暗区及分界点示意图

Fig. 2 Self shading effect of reflector

1.2.2 辐射角系数

物体之间的辐射换热除了与物体绝对温度有关, 还与换热表面之间的相对位置有关, 辐射角系数^[31]描述了这种关系, 两微元表面之间的辐射角系数如图3所示, 计算公式如下:

$$X_{d1,d2} = \frac{I_{b1} \cos \theta_1 d\Omega_1 dA_1}{E_{b1} dA_1} = \frac{dA_2 \cos \theta_1 \cos \theta_2}{\pi r^2} \quad (13)$$

式中: I_{b1} 为常数; E_{b1} 为微元表面相对于黑体的辐射

力; θ_1 、 θ_2 分别为 dA_1 、 dA_2 的维度角; $d\Omega_1$ 为微元表面 dA_1 对 dA_2 所张的立体角; r 为 dA_1 到 dA_2 的半径。

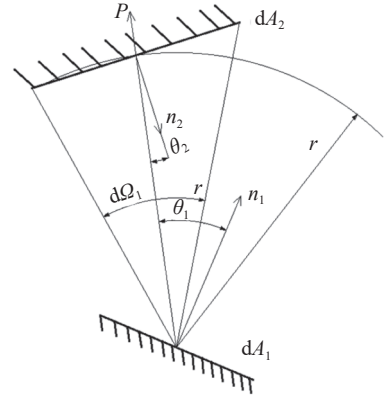


图3 微元表面辐射角系数

Fig. 3 Surface radiation shape factor

1.3 主反射面精度分析及副反射面补偿方法

图4为天线变形分析示意图, 变形后其反射面形状不再是理想抛物面, 电磁波不再完全汇聚于原设计焦点^[32](图4中 F 点), 为缓解上述问题, 大口径射电望远镜基本都采用“保型”设计, 即要求各个姿态下重力变形后的反射面形状皆尽可能接近参数不同的抛物面^[1](图4中虚线), 这样将馈源移动到新的抛物面的焦点上(图4中 F' 点)后, 能够较好恢复原来的天线性能。图4中 u_A 与 w_A 为顶点的两个方向位移, 上述虚拟抛物面被称为最佳吻合抛物面^[32], 变形后的反射面相对于最佳吻合抛物面对应点之间半光程差的均方根误差值(R_{RMS})作为衡量反射面精度的指标。

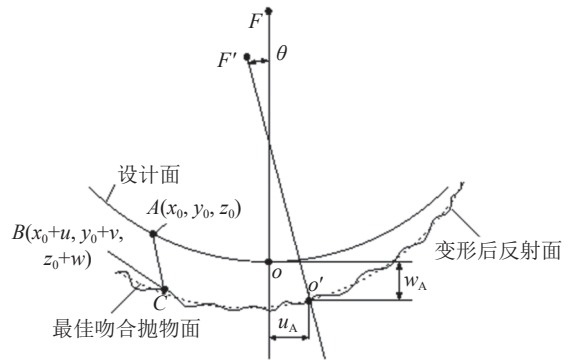


图4 天线变形分析示意图

Fig. 4 Diagram of the antenna deformation analysis

图5为设计抛物面经过位姿刚性变换及焦距变换得到最佳吻合抛物面的过程。OXYZ 及 $O_1X_1Y_1Z_1$ 分别为原设计抛物面、最佳吻合抛物面的坐标系, 原点 O 与 O_1 分别为它们的顶点, OZ 与 O_1Z_1 分别为它们的焦轴, 任意点在两个坐标系下坐标分别为 (x, y, z) 和 (x_1, y_1, z_1) , 设计抛物面方程为:

$$x^2 + y^2 = 4fz \quad (14)$$

最佳吻合抛物面方程为:

$$x_1^2 + y_1^2 = 4(f+h)z_1 \quad (15)$$

式(14)~(15)中, f 、 h 分别为设计抛物面的焦距及焦距的变化量。

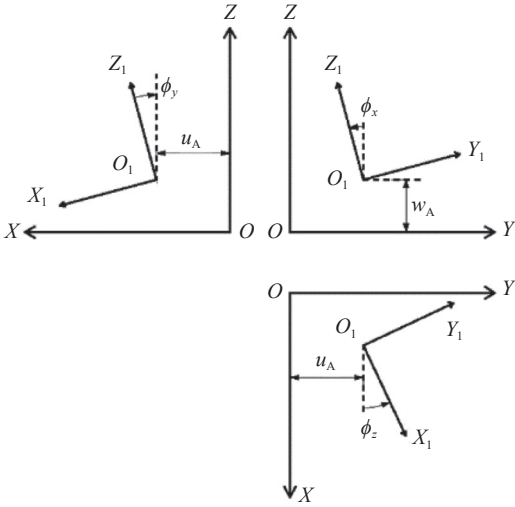


图 5 刚体位姿变换示意

Fig. 5 Rigid body pose transformation

由图5可知,在旋转量十分微小情况下,其线性化坐标转换方程为:

$$\begin{cases} x_1 = (x - u_A) - z\phi_y + y\phi_z, \\ y_1 = (y - v_A) - x\phi_z + z\phi_x, \\ z_1 = (z - w_A) - y\phi_x + x\phi_y \end{cases} \quad (16)$$

式中, u_A 、 v_A 、 w_A 为最佳吻合抛物面相对于设计面的平移量, ϕ_x 、 ϕ_y 、 ϕ_z 为相对各轴的旋转量,上述6个参数为待定值。

将式(16)带入式(15),略去其2阶微量,可得到最佳吻合抛物面在原设计面坐标系下的方程:

$$\begin{aligned} & x^2 + y^2 + 2yzf_x - 2xzfy - 2x(u_A + 2ff_y) - \\ & 2y(v_A - 2ff_x) + 4fw_A - 4z(f+h) = 0 \end{aligned} \quad (17)$$

因为抛物面为圆周对称结构,故反射面绕焦轴转动量 ϕ_z 对天线性能无影响,可以省略,最终得到含6个参数的最佳吻合抛物面方程。

变形后的抛物面相对于最佳吻合抛物面的误差如图4所示,略去2阶微量,得到逐点误差关于上述待定参数的线性表达式如下:

$$\begin{aligned} \Delta = & \frac{1}{2\sqrt{f(f+z)}}(x(u - u_A) + y(v - v_A) - 2f(w - w_A) - \\ & 2hz + y\phi_x(z + 2f) - x\phi_y(z + 2f)) \end{aligned} \quad (18)$$

式中, x 、 y 、 z 为反射面节点坐标, u 、 v 、 w 分别为节点对应的位移,上述6个参数为已知量。

最佳吻合抛物面的参数应使 Δ^2 达到最小值,上述问题为线性最小二乘问题;对 Δ^2 求关于6个待定参

数的偏导,并令其为零,即得到关于最佳吻合抛物面参数的线性方程组:

$$\mathbf{A}\mathbf{X} = \mathbf{d} \quad (19)$$

式中, $\mathbf{A}$ 为节点的初始位置信息矩阵, $\mathbf{X}$ 为最佳吻合抛物面的参数向量, $\mathbf{d}$ 为变形后反射面的节点位移信息矩阵。

则以均方根值为度量的反射面精度的计算方式如下:

$$R_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{\min(\sum \Delta^2)}{N}} \quad (20)$$

式中, N 为背架上弦节点数量^[1], R_{RMS} 反映了反射面的形状偏离抛物面的程度。

天线主面热变形的精度评价及副面补偿计算流程如图6所示,即根据反射面的热变形数据,由式(19)~(20)确定与之对应的最佳吻合抛物面参数及天线热变形面精度(R_{RMS}),将副反射面的焦点调整到上述新的主反射面焦点位置(见图4)即可部分实现天线误差补偿, R_{RMS} 越小则说明热变形后反射面形状越接近于抛物面,补偿效果越好。

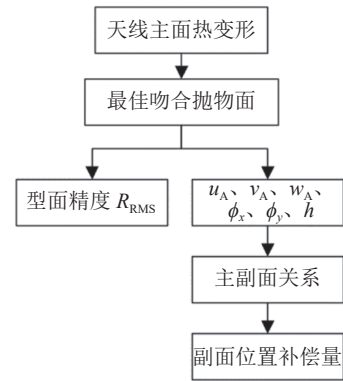


图 6 精度评价及副面补偿量计算流程

Fig. 6 Accuracy evaluation and subreflector repositioning

副反射面的位置调整量与最佳吻合参数的关系如下:

$$\begin{cases} U_X = u_A + f\phi_y, \\ U_Y = v_A - f\phi_x, \\ U_Z = w_A + h \end{cases} \quad (21)$$

式中, U_X 、 U_Y 、 U_Z 分别为副反射面3个方向的位置调整量。

2 结果与分析

2.1 天线有限元模型及分析流程

QTT反射体的有限元模型如图7所示。天线桁架材料为钢,反射面材料为铝,材料的热特性见表1。天线热力耦合分析流程如图8所示。

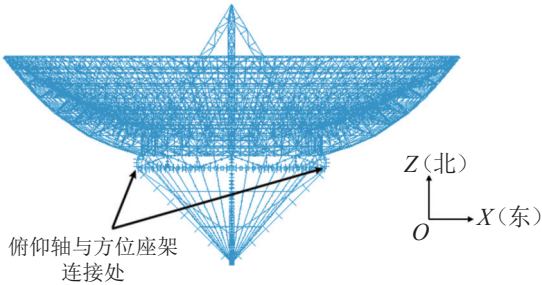


图 7 天线反射体模型
Fig. 7 Antenna reflector model

表 1 材料参数

Tab. 1 Material parameters

材料	密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	比热容/ ($\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	导热系数/ ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	热膨胀系数/ $^{\circ}\text{C}^{-1}$
铝	2.78×10^3	875	190.0	2.340×10^{-5}
钢	7.85×10^3	465	49.8	1.116×10^{-5}

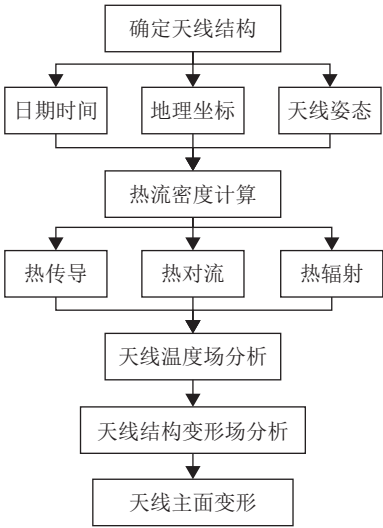


图 8 天线热力耦合分析流程
Fig. 8 Thermal-mechanical coupling analysis process

2.2 热误差分析及补偿

日照温度变化具有一定的时间尺度,本文研究天线在季节性均匀温度变化与逐日温度变化两种情况下的响应情况。

2.2.1 季节性热误差分析

天线反射体通过俯仰轴与方位座架连接(如图7所示),根据轴承连接处是否允许反射体沿轴承轴向移动,本文选取两种极端的俯仰轴约束方式:全约束(FC)、对称浮动约束(SFC)。

表2为奇台县季节温度统计数据。由表2可知, QTT台址四季环境温度在 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内变化。以天线俯仰角 90° 、参考温度 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 为例,分析天线结构在不同约束方式、不同环境温度条件下,反射面精度(R_{RMS})的变化趋势,计算结果如图9所示。

表 2 奇台县四季温度

Tab. 2 Seasonal temperature in Qitai County

季节	平均高温/ $^{\circ}\text{C}$	平均低温/ $^{\circ}\text{C}$
春季	16.2	2.2
夏季	29.6	15.3
秋季	13.5	0.4
冬季	-6.7	-19.3

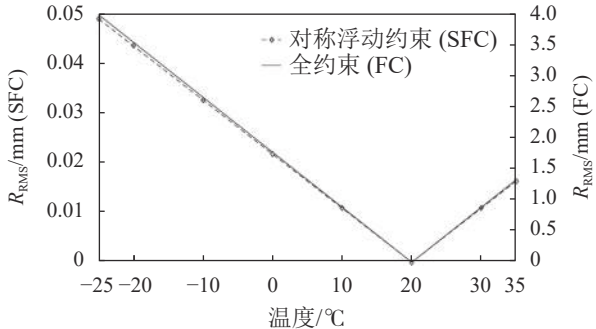


图 9 不同工况下的 R_{RMS}

Fig. 9 R_{RMS} under different working conditions

由图9可知,俯仰轴的约束方式对反射面精度影响很大,两种约束方式下的 R_{RMS} 变化趋势相同,但对称浮动约束方式下的反射面 R_{RMS} 只有全约束方式下的1/80。所以在天线的设计建造过程中应尽量减小座架对俯仰轴的热应力约束,即允许反射体沿轴承轴向有一定游隙。目前实际天线中已自然存在此效应,这也是夏天与冬天夜晚温度虽相差很大,但天线仍可以正常工作的原因。

由上述分析可知,俯仰轴的对称浮动约束方式更接近实际情况,此约束方式下的天线在均匀温升时,反射面精度几乎不受影响。

2.2.2 日照温度场及变形场分析

2011年1月1日—11月1日, QTT台址晴天约占40.3%,为所有天气中占比最高;台址风速 $\leq 3.0\text{ m/s}$ 的占比约为50.3%,风速 $\leq 4.0\text{ m/s}$ 的占比为69.5%^[7]。选取典型工况对天线结构进行全天的温度场、变形场时程分析:2011年6月21日,晴天无云,风速分别取0、1.5、3.0 m/s,采用俯仰轴对称浮动约束;天线俯仰角姿态如图10所示,分别取 0° 、 45° 和 90° ,方位角取 90° 。

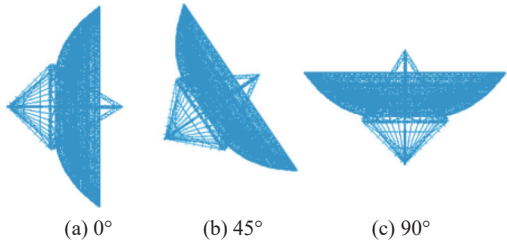


图 10 各俯仰角姿态

Fig. 10 Attitude of each pitch angle

天线仰天姿态下温度场分布特征及机理探讨如

下: 图11至图14分别为06: 00、08: 00、14: 00、18: 00的天线桁架与主反射面的温度场分布情况(俯仰角90°、风速3.0 m/s)。由图11至图14可知, 日照热在天线结构上产生的温度场呈现出不均匀、时变的特点: 日出时太阳位于天线的东偏北方向, 日落时太阳位于天线的西偏北方向; 06: 00~18: 00, 太阳在反射面上的直射点由西南向东南逆时针转动。在06: 00和18: 00, 由于太阳侧照天线及反射面遮挡, 天线温度场的不均匀性更为明显, 桁架最高温度分别为24.0℃、37.1℃, 均高于同时刻反射面的温度最大值(23.2℃、35.7℃)。08: 00、14: 00的反射面可分为3个比较均匀的温度区域, 即高温区、过渡区和低温区; 这两个时刻反射面最高温度分别为32.4℃、45.2℃, 均高于同时刻桁架的最大温度值27.9℃、40.3℃, 反射面与桁架的温差分别为4.5℃、4.9℃。

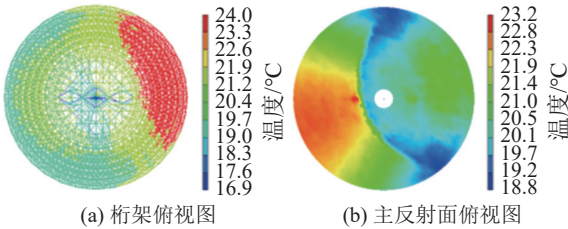


图 11 06:00天线温度场分布

Fig. 11 Distribution of antenna temperature field at 06:00

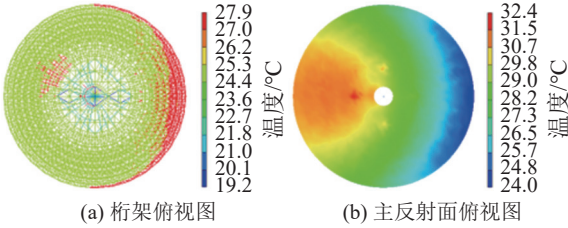


图 12 08:00天线温度场分布

Fig. 12 Distribution of antenna temperature field at 08:00

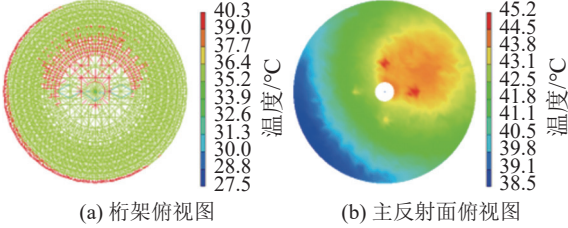


图 13 14:00天线温度场分布

Fig. 13 Distribution of antenna temperature field at 14:00

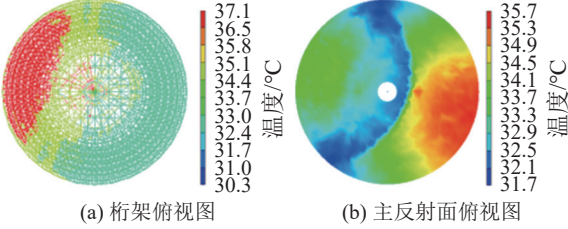


图 14 18:00天线温度场分布

Fig. 14 Distribution of antenna temperature field at 18:00

天线仰天姿态下温差特点及机理探讨如下: 图15、16给出了背架的温度/温差变化曲线。可见, 不同风速下背架的温度/温差变化规律相同: 从05: 00到19: 00, 太阳高度角大于0°, 背架受到太阳辐射, 故其最高温度高于空气温度。不同风速下背架的温度最大值均出现在14: 00左右, 最高温度可达39.7℃(3.0 m/s)、41.7℃(1.5 m/s)。从19: 00到次日凌晨05: 00, 背架温差较小, 且其温度低于空气温度, 这是由于夜晚无太阳直接照射, 而远空温度低于空气温度, 背架向远空散热。背架的温差双峰分别出现在06: 00、18: 00, 风速3.0 m/s时分别为4.8℃、5.1℃, 风速1.5 m/s时分别为6.5℃、6.9℃。在05: 00、19: 00时, 太阳侧照背架, 所以不同风速下背架的温差会急剧变化; 从05: 00到19: 00, 不同风速下背架温差分别在4~5℃(3.0 m/s)、5~7℃(1.5 m/s)范围内变化。

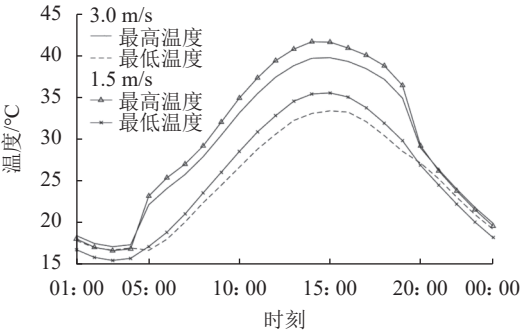


图 15 背架温度

Fig. 15 Temperature of backup structure

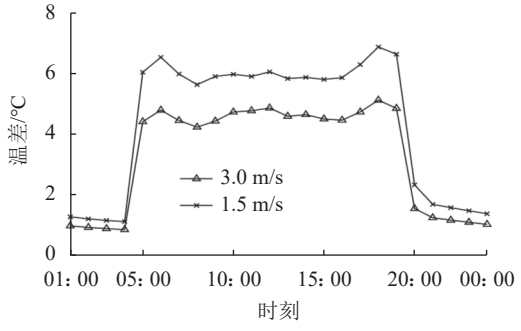


图 16 背架温差

Fig. 16 Temperature difference of backup structure

风速对温度场的影响及机理探讨如下: 由图15、16中不同风速曲线对比可见, 随着风速增大, 背架的温升、温差减小。这是由于在太阳辐射强度一定的条件下, 风速越大, 对流换热越强烈, 背架高温区相对于空气的温升越小, 而不同风速下背架的最低温度本就与空气温度相仿, 故总体温差减小。由分析依据可知, 上述结论在天线任意俯仰角下都成立。

仰天姿态下天线热变形规律分析如下: 图17~20分别为对应于图11~14温度场的反射面热变形形状。在非均匀温度场的作用下, 反射面变形可分为两部

分:一部分是由结构整体温升产生的变形,另一部分是由结构温度梯度产生的变形。前者占主导,但其对反射面精度几乎没有影响;后者导致反射面出现以扭转、畸形为主的不均匀变形。

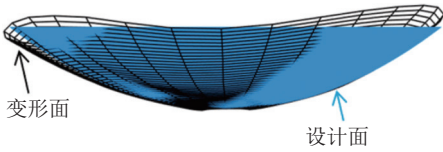


图 17 06:00主反射面变形云图

Fig. 17 Deformation cloud of the main reflector at 06:00

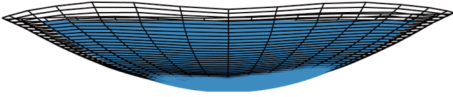


图 18 08:00主反射面变形云图

Fig. 18 Deformation cloud of the main reflector at 08:00

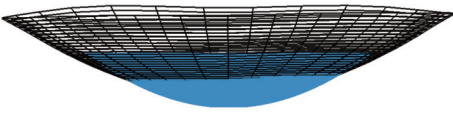


图 19 14:00主反射面变形云图

Fig. 19 Deformation cloud of the main reflector at 14:00

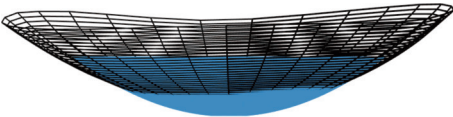


图 20 18:00主反射面变形云图

Fig. 20 Deformation cloud of the main reflector at 18:00

反射面不同时刻的热变形具有不同特点,整体沿俯仰轴呈现出“元宝”状的变形趋势,反射面边缘变形与扭转角度较大,且温差越大其不均匀变形程度越大(对比图19及20)。

2.2.3 日照热误差及其补偿分析

如图4所示,定义 R_{RMS_d} 为变形后反射面相对于原设计抛物面的均方根值,其反映了反射面偏离原设计面的程度,即绝对变形情况。变形后反射面点 B 到原来位置(A)的偏差记为 Δ_1 ,其计算如下:

$$\Delta_1 = \|AB\| \quad (22)$$

则 R_{RMS_d} 计算公式为:

$$R_{RMS_d} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N \Delta_1^2}{N}} \quad (23)$$

图21为俯仰角 90° 、不同风速下 R_{RMS_d} 曲线。仰天姿态下反射面绝对变形随时间、风速变化规律及其机理分析如下:05:00至19:00,绝对变形量随太阳高度角先增大后减小,最大值出现在12:00左右,原因是此时太阳辐射强度最大;在05:00和19:00, R_{RMS_d} 会发生“跳跃”式突变,因此时天线经历了太阳入射角度的状态变化。风速方面: R_{RMS_d} 随风速增大而减

小,因为风速越大,天线与环境间的换热速率越快,结构整体的温升越小,由热引起的绝对变形量就越小。

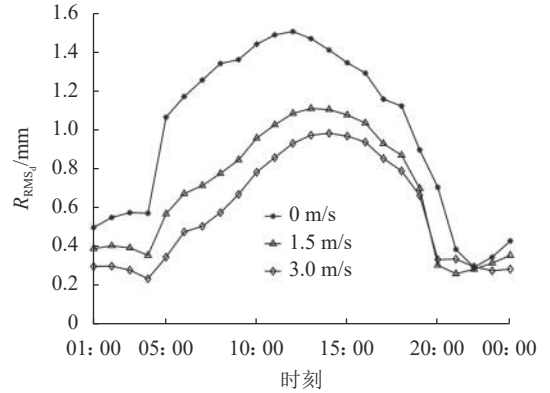


图 21 俯仰角 90° ,不同风速下 R_{RMS_d}

Fig. 21 R_{RMS_d} at different wind speeds at pitch Angle of 90°

仰天姿态下反射面宏观变形时空特征分析:由最佳吻合抛物面的定义可知其参数变化反映了反射面宏观的位姿变化情况,故由式(21)即可得到副面的位置调整量 U_X 、 U_Y 、 U_Z ,亦可用于评价反射面的宏观刚体移动。

图22为俯仰角 90° 下副反射面补偿量。

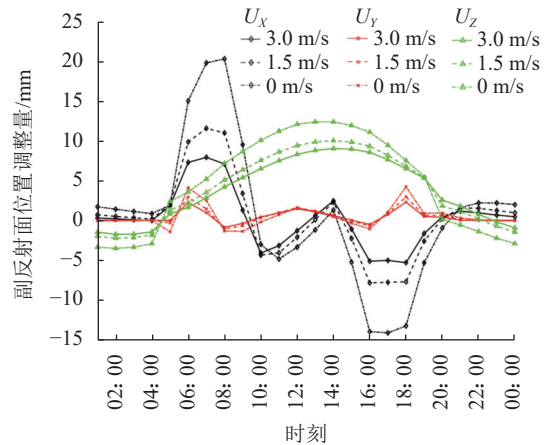


图 22 不同风速下副反射面位置调整量

Fig. 22 Position adjustment of subreflector at different wind speeds

由图22可得出以下结论:

1) 副反射面沿 X 轴(俯仰轴)的位置调整量关于12:00呈“奇函数”对称。其原因为:04:00到07:00,太阳在天线的东偏北方向升起(见图11),侧照 X 轴正半轴一侧的天线结构,被照射侧结构温度高于另一侧,使反射体受热膨胀沿 X 轴正向产生偏移,此时天线结构的温差最大,故补偿量达到最大;从07:00至10:00,随着太阳高度角增大,太阳照射区逐渐“翻过”反射面,出现在 X 轴负半轴一侧的天线结构上(见图2),其变形趋势与04:00至7:00的相反,故副面沿 X 向的补偿量开始减小;10:00至12:00,太阳照射位置靠近天线中心,导致结构温度的不均匀性减小,所以补偿

量幅值较小;中午12:00之后,太阳与天线相对位置的变化情况与上午时段刚好相反,故补偿量的变化规律也与上午时刻相反。

2)05:00至14:00,随天线结构温升的增大,其热膨胀变形量一直增大,故副反射面沿Z轴(焦轴)的补偿量单调增大;14:00至20:00,随天线结构温升的减小,补偿量单调减小。

3)风速的影响:对比图22中不同风速的结果可知,补偿量的变化趋势相同但幅值不同。其原因为:风速增大,天线与环境间的换热速率越快,导致背架温差减小,使得其热变形减小,补偿量自然就减少了。

结合温度场、变形场、绝对变形量以及补偿量数据,QTT日照热变形的规律及机理总结如下:

1)太阳侧面照射天线时,即照射反射面凸面,不均匀变形最剧烈;从侧照到部分照射反射面凹面或者相反的过程(见图2),结构不均匀变形会经历峰值;其发生具体时间取决于天线-太阳所呈现出的相对姿态。

2)温度分布的非均匀性是结构不均匀变形的主要原因,温差越大不均匀变形程度越大。

3)风速不改变温度场的空间分布,只影响其幅值;不同风速下同一姿态反射面的热变形具有相同的变化趋势,热变形随风速增大而减小。

在QTT热误差控制及其补偿中,可利用上述规律,通过连续测量天线的温度场、风速及太阳辐射强度等数据,对未来反射面的热变形变化趋势进行预测,形成补偿方案。

2.2.4 补偿后反射面精度分析

图23~25为采用副反射面位置补偿后,不同工况下反射面 R_{RMS} 的变化曲线。由图23~25可知, R_{RMS} 曲线皆形如“马鞍”,且数值远小于 R_{RMS_d} 曲线。 R_{RMS} 在05:00、19:00会发生急剧变化,因此刻太阳侧照天线;在13:00, R_{RMS} 出现谷底。不同风速下 R_{RMS} 时间变化趋势相同,但数值随风增强而减小,这是由于大风加快了天线与环境间的对流换热,背架整体的温差变小,反射面不均匀热变形随之减小,使得反射面形状精度变高。

俯仰角为45°、90°时的 R_{RMS} 具有与类似变化趋势,但波峰/波谷出现的时间及持续时间不同,这是由于不同姿态下太阳-天线相对位置不同,从而导致太阳“翻过”反射面的时间不同。

图26、27为同一时刻不同风速下主反射面光程差的分布云图,对比可知:风速对反射面光程差的空间分布趋势没有影响;但随风速增大,背架温差变小,反射面的光程差减小。图27、28为不同时刻同一风速下光程差的分布云图,可见其分布绕天线方位轴转

动,与太阳入射角有相关性。对比左右图可知,采用副反射面位置补偿可有效减小天线的热误差。

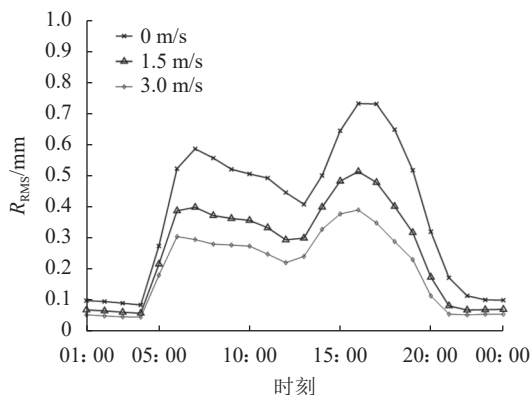


图 23 俯仰角0°不同风速下 R_{RMS}

Fig. 23 R_{RMS} at different wind speeds with pitch angle of 0°

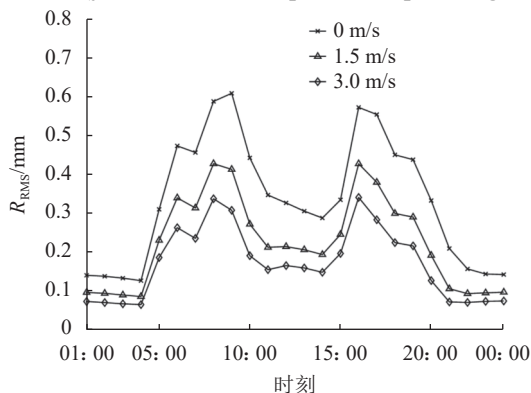


图 24 俯仰角45°不同风速下 R_{RMS}

Fig. 24 R_{RMS} at different wind speeds with pitch angle of 45°

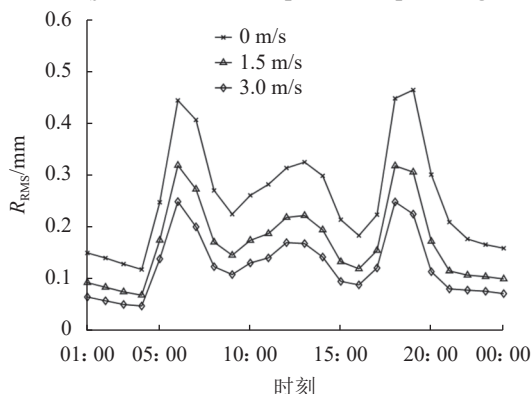


图 25 俯仰角90°不同风速下 R_{RMS}

Fig. 25 R_{RMS} at different wind speeds with pitch angle of 90°

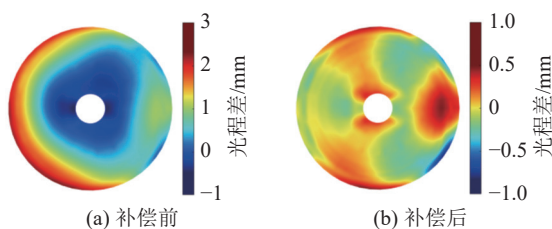


图 26 08:00光程差, 风速1.5 m/s

Fig. 26 Optical path difference at 08:00, wind speed 1.5 m/s

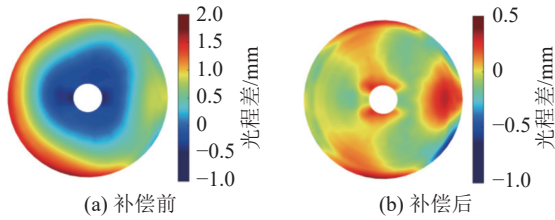


图 27 08:00光程差, 风速3.0 m/s

Fig. 27 Optical path difference at 08:00, wind speed 3.0 m/s

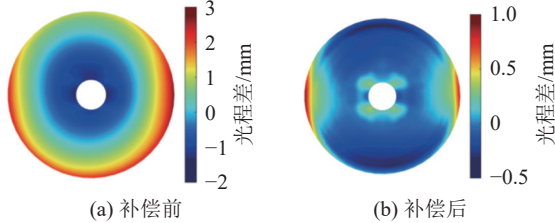


图 28 12:00光程差, 风速3.0 m/s

Fig. 28 Optical path difference at 12:00, wind speed 3.0 m/s

3 结 论

本文通过有限元仿真研究了多工况下 QTT 主反射面的热误差及其副反射面位置补偿,总结了其日照温度场、热变形、型面精度以及副反射面位置补偿量的数值、变迁规律以及机理。上述规律及机理有助于估计、理解天线日照热误差问题并为热补偿方案提供依据。主要结论如下:

1) 天线反射体与座架连接处应采取热应力释放措施,减弱座架对反射体的热膨胀约束。

2) 温差导致天线结构产生的不均匀变形是其反射面精度下降的主要原因,且温差越大反射面精度越差;均匀温升对反射面精度几乎没有影响。

3) 风速不改变天线结构的温度场分布,只影响其幅值;随风速减小,结构的温差增大,反射面精度随之变差。

4) 天线和太阳的相对位置决定了天线的热变形分布;当天线与太阳相对位置相同时,无论天线绝对姿态如何,其具有相似的热变形分布,但由于日照强度、风速等因素的不同,天线结构变形量的幅值不同。

5) 日照非均匀温度场导致天线结构产生不均匀热变形,大大降低了反射面精度,采用副反射面位置补偿措施可明显改善日照热误差的影响。

参考文献:

- [1] Greve A, Bremer M. Thermal design and thermal behaviour of radio telescopes and their enclosures[M]. Heidelberg: Springer, 2010.
- [2] Akabane K. A large millimeter wave antenna[J]. *International Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 1983, 4(5):

793–808.

- [3] Qian Hongliang, Liu Yan, Fan Feng, et al. Surface precision analysis on main reflector of 65 m antenna structure[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(11): 3027–3033. [钱宏亮, 刘岩, 范峰, 等. 65 m 天线结构主反射面形精度分析[J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(11): 3027–3033.]
- [4] Antebi J, Zarghamee M S, Kan F W, et al. A deformable sub-reflector for the Haystack radio telescope[J]. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 1994, 36(3): 19–28.
- [5] Ries P, Hunter T R, Constantikes K T, et al. Measuring and correcting wind-induced pointing errors of the green bank telescope using an optical quadrant detector[J]. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 2011, 123(904): 682–691.
- [6] Zhou Chao, Yang Hongbo, Wu Xiaoxia, et al. Influence of wind loading on the 1.2 m telescope[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(5): 889–893. [周超, 杨洪波, 吴小霞, 等. 1.2 m 望远镜风载作用分析[J]. *红外与激光工程*, 2011, 40(5): 889–893.]
- [7] Na Wang. Xinjiang Qitai 110 m radio telescope[J]. *Scientia Sinica (Physica, Mechanica & Astronomica)*, 2014, 44(8): 783–794. [王娜. 新疆奇台 110 米射电望远镜[J]. *中国科学: 物理学 力学 天文学*, 2014, 44(8): 783–794.]
- [8] Yan Yuefei, Wang Congsi, Li Shuai, et al. Development of large-aperture radio telescopes and applications of coupled structural-electromagnetic theory[J]. *Scientia Sinica (Physica, Mechanica & Astronomica)*, 2022, 52(12): 1–18. [严粤飞, 王从思, 李帅, 等. 大型射电望远镜天线发展动态及机电耦合应用[J]. *中国科学: 物理学 力学 天文学*, 2022, 52(12): 1–18.]
- [9] Greve A, Bremer M, Penalver J, et al. Improvement of the IRAM 30-m telescope from temperature measurements and finite-element calculations[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2005, 53(2): 851–860.
- [10] Bremer M, Greve A. A dynamic thermal model for design and control of an 800-element open-air radio telescope[C]// *Proceedings of the Integrated Modeling of Complex Optomechanical Systems*, SPIE Proceedings. Kiruna: SPIE, 2011.
- [11] Ambrosini R, Grueff G, Morsiani M, et al. Analysis of the alidade temperature behaviour of the medicina VLBI radiotelescope[J]. *Astrophysics and Space Science*, 1996, 239(2): 247–258.
- [12] MacDonald M E. Measured thermal dynamics of the haystack radome and HUSIR antenna[J]. *IEEE Transactions on*

- [Antennas and Propagation](#),2013,61(5):2441–2448.
- [13] DiCarlo A, Chung K H. Radome-enclosed antenna's temperature and velocity fields[J]. [Applied Thermal Engineering](#), 2013,50(1):437–444.
- [14] Tsela P L, Combrinck W L, Botha R C, et al. A proposed mathematical model of thermal variations on the HartRAO Lunar Laser Ranging telescope for enhanced test of Earth-Moon system dynamics[J]. [South African Journal of Geology](#), 2016,119(1):83–90.
- [15] Lian Peiyuan, Zhu Minbo, Wang Wei, et al. Estimation method of temperature field of large axial symmetric reflector antenna in real-time[J]. [Journal of Mechanical Engineering](#), 2015,51(6):165–172. [连培园, 朱敏波, 王伟, 等. 一种轴对称反射面天线温度场实时预估方法[J]. [机械工程学报](#), 2015, 51(6):165–172.]
- [16] Chang Wenwen, Aili Yusuf. An analysis of thermal characteristics of the dish of a 25 m radio antenna based on the ASHRAE clear-sky model[J]. [Astronomical Research & Technology-Publications of National Astronomical Observatories of China](#), 2015,12(1):23–29. [常文文, 艾力·玉苏甫. 基于ASHRAE晴空模型的25米天线面板热特性分析[J]. [天文研究与技术-国家天文台台刊](#), 2015,12(1):23–29.]
- [17] Chang Wenwen, Aili Yusuf, Xu Qian, et al. Thermal characteristics analysis of 25 m antenna mounts based on the finite element method[J]. [Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering](#), 2015,34(5):812–816. [常文文, 艾力·玉苏甫, 许谦, 等. 基于有限元方法的25 m天线座架结构热特性分析[J]. [机械科学与技术](#), 2015,34(5):812–816.]
- [18] Yi Letian, Xu Qian, Li Lin, et al. Study on non-uniform temperature field and thermal deformation of antenna alidade[J]. [Astronomical Research & Technology](#), 2022,19(5):438–446. [易乐天, 许谦, 李琳, 等. 天线座架非均匀温度场及热致变形研究[J]. [天文研究与技术](#), 2022,19(5):438–446.]
- [19] Liu Zexin, Zhang Hongbo, Kong Deqing, et al. Simulation analysis and measurement of thermal effect of Wuqing 70-meter antenna frame[J]. [Progress in Astronomy](#), 2022,40(3):453–465. [刘泽鑫, 张洪波, 孔德庆, 等. 武清70 m天线座架日照热效应仿真分析及测量[J]. [天文学进展](#), 2022,40(3):453–465.]
- [20] Subrahmanyam R. Photogrammetric measurement of the gravity deformation in a Cassegrain antenna[J]. [IEEE Transactions on Antennas and Propagation](#), 2005,53(8):2590–2596.
- [21] Granet C, Zhang H Z, Forsyth A R, et al. The designing, manufacturing, and testing of a dual-band feed system for the Parkes radio telescope[J]. [IEEE Antennas and Propagation Magazine](#), 2005,47(3):13–19.
- [22] Shen Chao, He Yaling, Liu Yingwen, et al. Modelling and simulation of solar radiation data processing with Simulink[J]. [Simulation Modelling Practice and Theory](#), 2008,16(7):721–735.
- [23] McQuiston F C, Parker J D, Spitler J D. Heating, ventilating, and air conditioning: analysis and design[M]. 6th ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2005.
- [24] Fan Feng, Jin Xiaofei, Shen Shizhao. Effect of non-uniform solar temperature field on cable-net structure of reflector of large radio telescope-FAST[J]. [Advances in Structural Engineering](#), 2009,12(4):503–512.
- [25] Yan Han, Zhang Hongyan. Comparison of different radiation models for numerical simulation of solar radiation[J]. [Energy Conservation Technology](#), 2015,33(5):428–431. [严寒, 张鸿雁. 不同辐射模型在太阳辐射数值模拟中的比较[J]. [节能技术](#), 2015,33(5):428–431.]
- [26] Liu Shutang, Long Qiliang. Analysis of the temperature field of steel members in sunshine based on ASHRAE clear-sky model[J]. [Progress in Steel Building Structures](#), 2012,14(5):35–43. [刘树堂, 龙期亮. 基于ASHRAE晴空模型的日照作用下钢构件的温度场分析[J]. [建筑钢结构进展](#), 2012,14(5):35–43.]
- [27] Ho D, Liu C H. Extreme thermal loadings in highway bridges[J]. [Journal of Structural Engineering](#), 1989,115(7):1681–1696.
- [28] Jiang Huifei, Liao Shuhua, Ye Erkejiang, et al. Statistical analysis on relationship between soil surface temperature and air temperature[J]. [Chinese Journal of Agrometeorology](#), 2004,25(3):1–4. [姜会飞, 廖树华, 叶尔克江, 等. 地面温度与气温关系的统计分析[J]. [中国农业气象](#), 2004,25(3):1–4.]
- [29] Liu Senyuan, Huang Yuanfeng. Discussion on effective sky temperature[J]. [Acta Energiæ Solaris Sinica](#), 1983,4(1):63–68. [刘森元, 黄远锋. 天空有效温度的探讨[J]. [太阳能学报](#), 1983,4(1):63–68.]
- [30] 石伟. 有限元分析基础与应用教程[M]. 北京: 机械工业出版社, 2010.
- [31] 何燕, 张晓光, 孟祥文. 传热学[M]. 北京: 化学工业出版社, 2015.
- [32] 叶尚辉, 李在贵. 天线结构设计[M]. 西安: 西北电讯工程学院出版社, 1986:53–72.

Numerical Study on Solar Thermal Error and its Compensation of Large Radio Telescope

LEI Zhen^{1,2}, NING Liang¹, CHEN Haoxiang¹, ZHAO Wulin², XIANG Binbin³, LI Dongwei²

(1.School of Construction Machinery, Chang'an Univ., Xi'an, 710006, China;

2.39 Inst. of China Electronics Technol. Group, Xi'an 710016, China;

3.Xinjiang Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sci., Urumqi 830011, China)

Abstract: Radio telescope is widely used in the fields of radio astronomy and navigation. The electromagnetic performance of radio telescope is heavily affected by the structural thermal deformation due to solar heating as the working frequency and aperture increases. To understand the solar thermal behaviors of the 110 m telescope to be built in Xinjiang, we established a thermal-mechanical coupling model to simulate the temperature/displacement fields at different solar times and wind speeds, and concluded the spatial and temporal characteristics. Then we evaluated the reflector precision using the best fit parabolic method and revealed the law and mechanism of antenna thermal deformation by the trend in sub-reflector's position compensation. Results show that large wind speed leads to uniform expansion and thus high reflector accuracy when the solar heating causes thermal deformation error. The decrease in reflector accuracy is largely attributed to the non-uniformly deformation of antenna structure caused by non-uniform temperature filed. Larger temperature difference results in more non-uniformly deformation and thus lower reflector accuracy. For the antennas with the same attitude but different wind speeds, they have similar reflector error distributions that can change with the position of sunlight direct incident point. However, the magnitude of deformation varies with the sunlight intensity and speed. The reflector precision increases with the increasing wind speed and has a similar law of variation for various attitudes. The thermal error can be greatly compensated by the sub-reflector repositioning. The approach and results of this paper will provide valuable guidelines for the design and construction of large radio telescope as well as its thermal error control.

Key words: radio telescope; thermal error; thermal deformation; reflector accuracy; thermal error compensation

(编辑 陈雪)

引用格式: Lei Zhen,Ning Liang,Chen Haoxiang,et al.Numerical study on solar thermal error and its compensation of large radio telescope[J].Advanced Engineering Sciences,2024,56(1):245–255.[雷震,宁亮,陈浩祥,等.大型射电望远镜日照热误差及其补偿的仿真研究[J].工程科学与技术,2024,56(1):245–255.]