doi: 10.15940/j.cnki.0001-5245.2022.02.005

新疆天文台25 m南山射电望远镜日照温度场研究*

易乐天1,2,3 许谦1,2,3† 干娜1,2,3

(1 中国科学院新疆天文台 乌鲁木齐 830011)
(2 中国科学院射电天文重点实验室 乌鲁木齐 830011)
(3 新疆射电天体物理重点实验室 乌鲁木齐 830011)

摘要 中国科学院新疆天文台25 m南山射电望远镜(25 m NSRT)受日照导致天线结构温度不均匀,其指向 精度和效率均有一定程度的损失.为研究25 m NSRT日照下的热力学特性,构建了晴空下射电望远镜热环境 参数和热力学有限元模型,考虑了射电望远镜背架、面板等结构件对光线的反射和遮挡作用,通过比较25 m NSRT典型观测工况下各构件的平均温度、均方根温差、单位温差特征距离等特性参数,发现各部件热容量的 差异是天线部件间存在大尺度温差现象的主要原因;分析了各类俯仰角和太阳照射角下天线背架结构的温度分 布特征,表明日照区域的背架结构温度呈近似线性分布,平均梯度可达0.25°C·m⁻¹.

关键词 射电望远镜,太阳辐射,温度分布,温度梯度,温度效应 中图分类号: P111; 文献标识码: A

1 引言

中国科学院新疆天文台25 m南山射电望远镜 (25 m NanShan Radio Telescope, 25 m NSRT)为方 位-俯仰轮轨式赋形卡赛格伦双反射面天线. 25 m NSRT于1993年竣工正式投入使用, 2015年完成天 线结构升级改造,可观测频率提升至43 GHz.可 观测频段的提升对天线指向精度和型面精度提出 了新的需求.根据K波段指向测量数据, 25 m N-SRT在晴朗的昼间指向误差最高可达10″-30″,这 部分误差的主要来源是太阳照射引起的热致天线 结构形变,大大限制了其在K、Q波段的观测效率. 25 m NSRT面临的热致天线误差问题广泛存在于 国内外众多工作中的中、高频射电望远镜.如何准 确获取天线结构的热力学特性是国内外天线工程 师面临的技术难题之一^[1-9]. Greve等^[10]在30 m口 径射电望远镜天线上布设了156个温度传感器,利 用温度测量数据分析了天线热力学特性,并利用结 构有限元方法分析计算了由温度梯度带来的天线 误差. 钱宏亮等^[11]在考虑了太阳辐照、对流换热、 天线结构阴影遮挡等边界条件下,利用有限元方 法分析了中国科学院上海天文台天马65 m口径射 电望远镜主、副反射面和天线杆系结构在日照作 用下的温度场分布和热致结构变形. 付丽等^[12]利 用红外热像仪测量了25 m口径天线主反射面在一 天内不同时刻的温度分布情况,并利用全息法测 量了由温度不均匀导致的主反射面型面误差. 孙

2021-05-15收到原稿, 2021-07-15收到修改稿

*国家自然科学基金项目(11803077、U1931139),中国科学院青年创新促进会(Y202019),中国科学院天文台站设备 更新及重大仪器设备运行专项,新疆维吾尔自治区自然科学基金项目(2021D01B111),新疆维吾尔自治区天池百人计划 2017,新疆维吾尔自治区天山雪松计划(2020XS12)资助

[†]xuqian@xao.ac.cn

继先等^[13]在中国科学院紫金山天文台德令哈观测 站13.7 m口径天线上布设了78个温度传感器,研究 了望远镜天线主反射面天线温度分布与天线面型 和主副反射面定位关系之间的规律,通过利用隔热 材料包裹支腿的方式减小了温差,改善了望远镜的 指向精度.

综合现有相关文献可见,获取热力学特性的方 法可分为两类:一类是通过布设大量传感器进行实 测.由于天线结构复杂,在较大口径的天线上布设 大量温度传感器,布设、维修以及更换均比较困难; 另一类方法是通过数值建模仿真,建立射电望远镜 所处台址环境、天线姿态与天线结构温度场之间 的量化关系.通过数值建模仿真能够从整体上获取 多种工况下天线结构的温度场分布,是获取天线热 力学特性的有效手段.本文在考虑晴空下天线部件 间阴影遮挡因素的前提下,对25 m NSRT 天线和 影响其热力学特性的主要热环境参数进行建模,通 过仿真获取其在多类典型太阳照射条件下天线结 构的温度场,探讨25 m NSRT天线结构温差现象的 成因,并通过计算温度分布特征参数分析天线在晴 空下的热力学特性.

2 25 m NSRT天线热力学建模

25 m NSRT天线结构处于时刻变化的热环境中,其热力学状态应处于瞬态准平衡状态.将天线结构连续温度场离散化后,天线结构应满足矩阵形式的瞬态动力学平衡方程:

$$\boldsymbol{C}(\boldsymbol{T})\dot{\boldsymbol{T}} + \boldsymbol{K}(\boldsymbol{T})\boldsymbol{T} = \boldsymbol{Q}(\boldsymbol{T})\,,\qquad(1)$$

其中,**T**为天线结构温度矩阵,为待求解的变量; **C**(**T**)为比热矩阵,由结构质量分布和材料比热参 数决定;**K**(**T**)为热传导矩阵,由结构材料导热参 数、对流参数以及热辐射相关参数决定;**Q**(**T**)为 热输入列阵,在天线热力学仿真中主要由太阳辐射 参数等各类热环境参数决定.

天线结构热力学模型的核心即为构建和求解 上述方程.随着计算机性能和热力学有限元商业软 件的发展,只需建立准确的热环境参数和太阳辐射 参数模型,并在任一处理软件中建立天线几何模 型,设置结构材料力学及热力学参数,进行单元属 性配置和网格划分,即可通过构建和求解上述矩阵 方程实现天线结构温度场仿真.

2.1 晴空下射电望远镜热环境参数建模

热力学建模首先需分析对天线结构温度分布 起主要作用的热环境因素,并以参数量化描述对天 线结构温度分布起主要作用的热交换过程.25 m NSRT这类不含天线罩的天线工作在露天环境,与 外界热量交换的热源或热沉主要为太阳、空气、 地面以及天空,能量交换形式包括热传导、热对流 和热辐射.表1列出了射电望远镜所处可变环境的 主要热源或热沉,主要热交换形式以及所对应的热 环境参数,包括太阳总辐射功率*G*_T、气温*T*_a、自 由对流换热系数*h*_c、天空背景辐射温度*T*_s以及地 面温度*T*_g.

表 1 可变热环境下射电望远镜的主要热交换形式及对应热 参数

Table 1 Main thermal interaction form of a radio telescope with the variable thermal environment and corresponding thermal parameters

Heat source	Thermal	Corresponding		
or sink	interaction	thermal parameter		
Sun	Radiation	G_{T}		
Air	Radiation	T_{a}		
	Convection	$h_{ m c}$		
Sky	Radiation	$T_{ m s}$		
Ground	Radiation	$T_{ m g}$		

 $(1) 气温T_a$

一般来说晴空下的气温在一天内的变化周期 性较强,可用余弦函数进行近似.因气温属于易测 物理量,也可采取传感器直接进行测量,以测量数 据作为热力学模型的输入参数.本文采取气象站 直接测量,测量精度为0.1°C,采样时间间隔设置为 15 s.图1为2020年6月21日乌鲁木齐南山观测站气 温24 h内随时间(UTC+6)变化的曲线,下文中的仿 真工况均取自图中曲线.

(2)天空背景辐射温度T_s

射电望远镜与天空存在的能量交换主要通过

红外波段散射形式,能量交换量主要由T_s决定,其 计算公式为^[14]:

$$T_{\rm s} = e_{\rm s}^{\frac{1}{4}} T_{\rm a} \,, \tag{2}$$

es为天空发射率,计算如下:

$$e_{\rm s} = e_0 + e_h + e_z \,, \tag{3}$$

$$e_0 = 0.71 + 0.56(T_{\rm D}/100) + 0.73(T_{\rm D}/100)^2$$
, (3a)

$$e_h = 0.013 \cos(2\pi t/24),$$
 (3b)

$$e_z = 0.00012(p_A - 1000),$$
 (3c)

其中, *T*_D为以K为单位的当地平均露点温度; *t*为以小时为单位的当地时间; *p*_A为以mbar为单位的当地气压.





Fig. 1 The air temperature at Urumqi NanShan Observatory on June 21, 2020

(3)地面温度 T_g

太阳照射到射电望远镜周围的地面,经过地面 漫反射,能量主要以红外波段散射的形式照射到天 线结构上,地面温度取值可按照下式进行计算:

$$T_{\rm g} = T_{\rm a} + \Delta T_{\rm g} \,, \tag{4}$$

其中 ΔT_{g} 为温差范围,根据南山观测站气象站实测数据,夏季晴朗的白天 ΔT_{g} 可取5°C–10°C,夜晚可取–5°C–10°C.

(4)自由对流换热系数h_c

25 m NSRT为无天线罩和主动热控手段的天线,可认为天线结构处于自由对流换热环境.处于空气中物体的自由对流换热系数与风速、物体表面形状、物体表面与空气之间的温差等因素有关.

为降低计算模型的复杂程度,自由对流换热系数计 算方法按下式计算^[9]:

$$h_{\rm c} = 4.0v + 5.6\,,\tag{5}$$

其中v为风速,单位为m·s⁻¹.2020年6月21日乌鲁 木齐南山观测站实测10 min平均风速随时间变化 的曲线如图2所示,根据图中实测风速及(5)式可计 算出一天内的自由对流换热系数.为简化计算模 型,对计算出的对流换热系数每10 min进行一次平 均,并将其作为对流条件输入模型.



Fig. 2 The wind speed at Urumqi NanShan Observatory on June 21, 2020

2.2 太阳辐射模型

射电望远镜受到的太阳辐射包括直接辐射、 散射辐射以及反射辐射.直接辐射指主要集中于 0.3-3 μm波段的短波辐射^[15],是天线接收到热辐 射热量的主要来源,与太阳高度角、天线表面位 姿、表面吸收率、表面反射率等参数有关;与太阳 入射方向呈θ角的任意平面,其受到的太阳直接辐 射*G*d由下式计算:

$$G_{\rm d} = A C_{\rm N} e^{-B/\sin\beta} \cos\theta \,, \tag{6}$$

其中, A为太阳辐射常数($W \cdot m^{-2}$), B为大气消光 系数, C_N 为大气清洁因子, β 为太阳高度角. 物体表 面接受到的散射辐射包括天空背景散射辐射和地 面反射散射辐射, 其波长一般在3 μ m以上, 辐射强 度一般与物体表面与水平面的夹角 α 、大气散射因 子C以及地面反射系数 ρ_{g} 等参数有关,天空背景散 射辐射强度 G_{s} 及地面反射辐射强度 G_{r} 分别计算如 下:

$$G_{\rm s} = 0.5C(1 + \cos\alpha)G_{\rm d}\cos\theta\,,\tag{7}$$

$$G_{\rm r} = 0.5\rho_{\rm g}(1+\cos\alpha)(C+\sin\beta)G_{\rm d}/\cos\theta.$$
 (8)

ρ_g根据天线周边覆盖土壤类型取值,草地取0.2、碎石路面取0.3-0.4、冰雪覆盖的地面取0.8-0.95.
(6)-(8)式中其余各项参数随观测站气候及地理经纬度的不同差异很大,需通过实测进行标定.通过在南山观测站布设了一台太阳总辐射传感器,各参数测定如表2所示.

表 2 (6)-(8)式中相关参数标定值 Table 2 Calibrated value of parameters listed in

Eqs. $(0)^{-}(8)$						
Parameter	$A \ / (\mathrm{W} \cdot \mathrm{m}^{-2})$	B	$C_{\rm N}$	C	$ ho_{ m g}$	
Value	1089.45	0.21	1	0.13	0.3	

图3为物体表面吸收率 $\gamma = 1$ 的水平表面在 2020年6月21日实测和理论计算的太阳总辐射功率 曲线,其中实线为根据上述参数理论计算所得太阳 总辐射功率,虚线为采用一台太阳总辐射传感器在 南山站所测得的实际数值.





Fig. 3 Total solar radiation power $G_{\rm T}$ curve on June 21, 2020

综上所述,任意物体表面能够吸收的太阳总辐

射功率G_T为:

$$G_{\rm T} = \gamma (G_{\rm d} + G_{\rm s} + G_{\rm r}) \,. \tag{9}$$

(9)式中表面吸收率γ根据天线结构件材料表 面处理工艺不同,其取值范围如表3所示.

表 3 经不同工艺处理后的表面吸收率 Table 3 The surface absorptivity under different

treatment processes				
Surface treatment process	Absorptivity γ			
Polished without any paint	0.1 – 0.2			
Zinc-Rich alkyd paint	0.2			
TiO_2 paint	0.3 - 0.4			
White paint	0.4 – 0.5			
Black paint	0.8 - 0.85			

2.3 天线结构建模

25 m NSRT天线由反射体、方位-俯仰型轮轨 式座架、天线俯仰机构、天线方位机构、高频仓、 副面撑腿、副反射面背架、调整机构以及换馈机 构等部件组成. 经改造后主反射面直径25 m,副 反射面直径3 m,主副反射面焦径比0.3,主反射面 分为6圈,共计304块主反射面面板(Panel);背架结 构(Back Up Structure, BUS)包括16根辐射梁,中 心体为正八边形棱柱体,8根伞形支撑,连接支撑到 与俯仰轴成±45°、±67.5°的中心体底部外轮廓上, 以加强中心体及天线反射体的支撑刚度.副面撑 杆采用空间桁架结构固接在辐射梁的相应上弦节 点.副反射面采用碳纤维增强型复合材料(Carbon Fibre Reinforced Polymer, CFRP)构成,天线结构 所使用的材料、单元属性以及对应的热力学参数 如表4所示.

以往针对天线热力学分析所建立的天线结构 几何模型,一般都采取一维线单元对天线背架进行 简化建模.一方面是因为这些几何模型一般继承自 结构力学分析模型,而一维线单元中的梁、杆单元 对结构力学分析而言具备足够的精度;另一方面 采取一维单元建模能够大幅降低有限元模型的自 由度,提升求解效率.但在射电望远镜结构温度场 有限元分析模型建立的过程中,要着重针对热力学 分析中起主要作用的载荷因素进行建模,而不能简 单地照搬结构静力学分析模型.对于太阳辐射温度 场分析而言,其最主要且最复杂的输入载荷为太阳 辐射.而采用一维线单元对背架众多结构件进行简 化,无法直接反映背架与自身、背架与面板或其他 结构件的互相遮挡和反射关系,从而给辐射分析带 来误差,进而影响温度场求解精度.钱宏亮等^[11]根 据光线投影算法计算杆件的日照系数,在保留一维 线单元背架的基础上解决了背架与其自身及天线 其他构件的互遮挡问题.该方法尚不能解决的问题 是背架构件间的二次反射问题.除此之外采取一维 线单元的背架模型无法求解杆件截面内的温度梯 度分布.随着计算工作站性能的提升及各类有限元 商业软件的发展,各类求解器能够求解的模型单元 数和自由度上限大大提高,使得对天线所有结构 件用二维面单元建模成为可能.尽管采取全二维 面单元建模会显著提升模型自由度、降低求解效 率,但射电望远镜热力学特性分析对数值求解时间 并无高要求,因此本文对25 m NSRT所有结构件都 采取二维面单元建模.图4为左视图视角下的25 m NSRT热力学有限元模型.

表 4 天线部件使用材料、单元属性及相应热力学参数 Table 4 Materials, element properties, and thermodynamic parameters of the antenna components

Component	Panel	Secondary reflector	Others
Materials	Aluminium alloy	CFRP with quasi-isotropic ply	Steel
Element properties	Plate	Shell	Shell
Density $/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	2800	1600	7870
The second sector $I(\mathbf{W} = -1 \mathbf{V}^{-1})$	027	23 in fiber direction	50
I nermal conductivity $/(W \cdot M^{-1} \cdot K^{-1})$	237	1.5 in thickness direction	
Specific heat capacity $/(J \cdot kg^{-1} \cdot {}^{\circ}C^{-1})$	880	1000	480



图 4 25 m NSRT热力学有限元模型(左视图)

Fig. 4 Thermodynamic finite element model of 25 m NSRT (left view)

3 25 m NSRT结构温度场分布与热 力学特性分析

在一天的不同时刻,太阳光线会以不同的入射 角度照射到天线结构上,此外天线的方位、俯仰角 随着观测源位置的变化而改变,引起阴影遮挡情况 的变化,使得天线结构主要的热流输入情况较为复 杂,同时气象环境参数的变化也影响着天线结构温 度分布,因此很难找到一种或少数几种代表性的热 力学工况,能够表征天线所有的热力学特性.但对 天线热力学特性的分析并不需要对所有热力学条 件下的天线结构温度场分布进行计算,只需通过对 可能出现的极端热力学工况下的温度场分布进行 求解,分析在这些极端工况下天线结构温度场在空 间上的分布特征,从而对天线结构热力学特性有整 体性的认识.

在夏至日时太阳直射北回归线, 地理纬度处于

43.5°N的南山站在正午时刻太阳高度角为一年中 最大.假设当日正午时天气晴朗,25 m NSRT正在 对某射电源进行短时间内的跟踪观测,天线工作 姿态与太阳照射角的相对位置基本不变,则可认 为此时天线上的结构温度分布差异应该大于其他 热力学工况,属于一种可能发生的典型极端工况. 因此将仿真工况时间设定为2020年6月21日,天线 俯仰角设定为45°,天线方位角设定为90°(正东方 向). 定义太阳入射角ω为天线指向和太阳光线两者 在水平面的投影间的夹角. 在此工况下正午12时ω = 90°, 温度场初始条件为天线结构温度分布均匀 且等于0点时的气温. 仿真气温和风速输入按照如 图1及图2所示的实际测量数据设置, 其他天线热环 境参数、太阳辐射模型和天线结构模型根据第2节 所述方法建立. 对天线结构温度场进行瞬态求解可 得到如图5所示的正午12时的天线结构温度分布图.





图5 (a)为等轴测视图下25 m NSRT天线结构 在上述工况下的温度分布云图,图5 (b)为另一视角 下的温度分布云图,在该视图中太阳光线以垂直纸 面向里的方向入射,便于观察天线各构件间的遮挡 关系.

从图5 (a)中可以看出, 晴空太阳照射下天线结 构存在较明显的温差现象. 最显著的温差现象为部 件间的平均温度差: 天线主反射面及反射体背架的 平均温度显著高于俯仰大齿轮及天线座架等的平 均温度. 基于热力学原理定性分析, 可认为原因主 要有两点: (1)由于构成材料比热接近, 俯仰大齿轮 及天线座架等大质量部件的热容显著高于小质量 部件; (2)天线各部件的传导、辐射和对流传热能力 不足以形成部件间的温度平衡. 二者共同作用使天 线存在部件级尺寸的温差.

除此之外, 部件内部的小尺寸构件也存在温 差. 以天线主反射的各面板为例, 天线主反射面面 板上的高温区域位于抛物面下缘, 存在3个低温区 域: 上方扇形低温区域、馈源仓边缘区域以及位 于下缘上方附近的低温区域. 从图5 (b)中可看出, 这3个低温区域分别是由背架遮挡、馈源仓遮挡以 及副反射面遮挡而形成的. 相邻面板温度分布也并 不连续, 这是因为面板间的缝隙阻断了相邻面板的 热传导, 且各面板对应的太阳入射角不同. 这些温 差现象表明,天线部件内部温差形成的主因是天线 构件自遮挡、互遮挡以及各构件表面的太阳入射 角差异.

除定性分析外,还可通过对提取仿真所得温度 数据进行处理,定量分析温差特性.可通过计算天 线构件平均温度、均方根温差、最大温差和单位 温差特征距离来量化描述天线结构的空间热力学 特性.

若天线某部件共有N个节点, T_i 代表第i个节点 的温度, \bar{T} 为这N个节点的平均温度, 那么该部件的 温差RMS (Root Mean Square)值 T_{RMS} 为:

$$T_{\rm RMS} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i} \left(T_i - \bar{T}\right)^2} \,. \tag{10}$$

单位温差特征距离*L*定义为沿太阳光线入射方向,温度平均值每下降1°C时天线结构件的平均几何尺度,可通过最小二乘拟合法进行计算:

$$\bar{L} = \frac{\overline{x^2} - \bar{x}^2}{\overline{xT(x)} - \bar{x}\overline{T(x)}},$$
(11)

其中x为沿入射方向的距离, T(x)为入射方向距离 为x的节点的温度值, \bar{x} 为所有节点对应x的平均值, \bar{x}^2 为所有节点对应 x^2 的平均值, $\overline{T(x)}$ 为该距离下对 应的节点集合的平均温度.

天线主要结构部件包括主反射面面板(Panels of the Main Reflector, PMR)、背架结构(BUS)、 座架(Alidade)、副反射面撑腿(Quadpods)、副反 射面背架(Secondary reflector Back Up Structure, SBUS)、副反射面面板(Panels of the Secondary Reflector, PSR).表5列出了上述工况下仿真计算 出这些结构部件的热力学特性参数,包括平均温 度 $T_{\rm m}$ 、 $T_{\rm RMS}$ 、最大温差TD_{max}以及L:

反射面背架是保持抛物面天线型面精度主要 构件,其热致变形是影响主反射面型面精度的主要 因素之一,故有必要对其进行进一步的热力学特性 分析.由于背架的结构形式较为复杂,主反射面以 及各杆件间存在相互遮挡和反射关系,背架结构的 热力学特性难以用简单的工程经验就能完全确定. 当太阳光线以不同入射角ω照射到天线上,会引起 背架上不同的温度分布情况.本文对不同太阳入射 角ω和俯仰角EL下正午时刻背架的均方根温差进 行了计算,结果如表6所示.

表 5 数值仿真所得天线各部件热力学特性参数 Table 5 The thermodynamic parameters of antenna components obtained by numerical

simulation					
Antenna	$T_{\rm m}$	$T_{\rm RMS}$	$\mathrm{TD}_{\mathrm{max}}$	\bar{L}	
component	$^{\circ}\mathrm{C}$	$^{\circ}\mathrm{C}$	$/^{\circ}C$	$/(m \cdot^{\circ} C^{-1})$	
PMR	36.4	5	18.8	2.3	
BUS	27.9	1.7	11.3	4.1	
Alidade	23.2	1	5.5	6.7	
Quadpods	29.5	2.6	17.5	3.2	
SBUS	22.6	0.1	0.5	10.5	
PSR	22	0.5	1.4	8.7	

表 6 不同入射角和俯仰角下的背架结构均方根温差(°C) Table 6 The RMS of BUS temperature difference at different incident and elevation angles (°C)

ω EL	5°	30°	45°	60°	90°
0°	2.48	2.2	2.02	1.66	1.42
30°	2.47	2.18	1.94	1.43	1.22
60°	2.41	2.05	1.88	1.32	1.13
90°	2.28	1.88	1.70	1.27	0.95
120°	2.13	1.69	1.50	1.05	0.89
150°	1.99	1.49	1.26	0.99	0.66
180°	1.93	1.39	1.10	0.82	0.58

由于天线结构具有对称性, ω在210°至360°的 温度分布情况与上表中所列工况一致, 故在此不重 复列出.由表中可以看出, 当ω为0°、EL较低时, 背 架上的均方根温差更大.可见在同一天内光线照射 背架区域越多, 会在背架上产生更大的温度梯度.

以EL = 45° 、 $\omega = 90^{\circ}$ 时的观测工况为例分析 天线背架结构温度空间特性.图6为该工况下天线 背架上杆件中间节点温度沿着口径方向的分布,沿 着太阳入射方向,处于日照区域的节点温度呈现明 显的梯度分布,将温度分布点进行线性拟合后,可 见该工况下温度特征梯度约为0.25°C·m⁻¹.处于 阴影区域的节点温度呈平均分布,经线性拟合后特 征温度梯度为0.04°C·m⁻¹.



Fig. 6 Temperature distribution on antenna BUS along the aperture direction at $EL = 45^{\circ}$ and $\omega = 90^{\circ}$

4 结束语

本文采用实测校准的方法,对25 m NSRT热力 学环境参数以及天线结构进行了详细建模.模型在 太阳辐射分析中能够反映反射面面板、背架结构、 俯仰支撑机构、副反射面系统等部件的太阳辐射 互遮挡作用,实现对不同太阳照射条件下天线任意 俯仰角观测工况的温度场仿真.本文一方面通过对 同一天内不同太阳入射角、不同俯仰角工况下的 天线温度分布进行了计算,比较了不同工况下天 线背架节点温差分布特性;另一方面,对夏至日极 端工况下天线结构各部件平均温度、均方根温差、 温度特征尺度等参数进行计算,提取出对天线型面 精度影响较大的关键部件的温度分布特性.由于天 线部件间热容量的巨大差异,部件间的温度梯度最 为明显.处于阴影遮挡下的天线背架结构温度接近 均匀分布,而处于日照区域的结构节点温度分布呈 现明显的小梯度特点.本文工作可为同类型射电望 远镜天线温度测量传感器布设以及热致天线误差 分析提供参考.

参考文献

- Prestage R M, Constantikes K T, Balser D S, et al. SPIE, 2004, 5489: 1029
- [2] Ukita N, Ezawa H, Ikenoue B, et al. PNAOJ, 2007, 10: 25
- [3] Bayley A M, Davis R J, Haggis J S, et al. A&A, 1994, 283: 1051
- [4] Fan F, Jin X F, Shen S Z. Advances in Structural Engineering, 2009, 12: 503
- [5] 许谦, 王从思, 易乐天. 天文学报, 2020, 61: 44
- [6] 王从思,王娜,连培园,等.高频段大型反射面天线热变形补偿技术.北京:科学出版社,2018:42-45
- [7] 王从思, 刘鑫, 王伟, 等. 宇航学报, 2013, 34: 1523
- [8] 连培园,朱敏波,王伟,等. 机械工程学报, 2015, 51: 165
- [9] 王惠, 宁云炜, 闫浩. 天文研究与技术, 2018, 15: 208
- [10] Greve A, Bremer M, Penalver J, et al. ITAP, 2005, 53: 851
- [11] 钱宏亮, 钟杰, 范峰. 土木工程学报, 2014, 47: 39
- [12] 付丽, 王锦清, 徐平. 中国科学院上海天文台年刊, 2011, 1:62
- [13] 孙继先, 左营喜, 杨戟, 等. 天文学报, 2014, 55: 246
- [14] Greve A, Bremer M. Thermal Design and Thermal Behaviour of Radio Telescopes and Their Enclosures. Berlin, Heidelberg: Springer, 2010: 99-100
- [15] Duffie J A, Beckman W A. Solar Engineering of Thermal Processes. 4th ed. Hoboken, New Jersey, USA: John Wiley & Sons Inc., 2013: 68-71

Study on the Structural Temperature Field of XAO 25 m NanShan Radio Telescope under Solar Radiation

YI Le-tian^{1,2,3} XU Qian^{1,2,3} WANG Na^{1,2,3}

(1 Xinjiang Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011)
 (2 Key Laboratory of Radio Astronomy, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011)
 (3 Key Laboratory of Xinjiang Radio Astrophysics, Urumqi 830011)

ABSTRACT It is observed that both the pointing accuracy and efficiency of the 25 m NanShan Radio Telescope (25 m NSRT), Xinjiang Astronomical Observatory (XAO), Chinese Academy of Sciences, are impaired by the non-uniform temperature field in antenna structure, mainly caused by solar radiation. In order to study the thermal characteristics of 25 m NSRT, we construct thermal environment parameters and thermodynamic finite element model of the NanShan radio telescope, taking into account both the reflection and shielding effects between structural components, such as backup structure and panels. By comparing parameters such as the average temperature, root mean square temperature difference and characteristic dimension under unit temperature difference, it is observed that there are large temperature differences between each component of the telescope due to significant discrepancy in heat capacity of these components. The temperature distribution of antenna backup structure at different elevation and solar angles are analyzed. The results show that in illuminated region the temperature of the backup structure is linearly distributed, with an average gradient of $0.25^{\circ}C \cdot m^{-1}$.

Key words radio telescope, solar radiation, temperature distribution, temperature gradient, temperature effect