

文章编号 1004-924X(2014)04-0970-09

## 上海 65 m 射电望远镜非均匀温度场及其效应

钱宏亮<sup>1</sup>, 柳 叶<sup>1\*</sup>, 范 峰<sup>2</sup>, 金晓飞<sup>3</sup>

(1. 哈尔滨工业大学(威海) 土木工程系, 山东, 威海 264209;

2. 哈尔滨工业大学 土木工程学院, 黑龙江, 哈尔滨 150090;

3. 中国建筑股份有限公司 技术中心, 北京, 101300)

**摘要:**在最不利气候条件下(7月15日)研究了上海65 m射电望远镜的非均匀温度场及其效应,以掌握其主反射面面型精度在不同风速下受非均匀温度场的影响规律。研究了考虑构件尺寸效应的空气对流、天空辐射以及地面辐射等温度场关键影响因素的计算方法,并建立了温度场分析的有限元模型;对3种典型风速下的非均匀温度场进行分析,并将所得到的非均匀温度场施加到主反射面上,研究了不同风速下反射面精度受非均匀温度场的影响规律,即各节点实际坐标拟合抛物面误差均方根(RMS)随时间的变化规律。结果表明:在年平均风速3.2 m/s条件下,射电望远镜结构的RMS最大值为0.44 mm。当风速由1.0 m/s增大到10.0 m/s时,RMS最大值由0.56 mm减小到0.35 mm,且风速越大非均匀温度场对反射面精度的影响越小。该研究成果可为此类望远镜结构的温度场监测、传感器布设、以及热变形控制措施的选取提供参考信息。

**关键词:**射电望远镜;非均匀温度场;型面精度;时程分析

**中图分类号:**TH753.3 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20142204.0970

## Non-uniform temperature field and effects of Shanghai 65 m radio telescope

QIAN Hong-liang<sup>1</sup>, LIU Ye<sup>1\*</sup>, FAN Feng<sup>2</sup>, JIN Xiao-fei<sup>3</sup>

(1. Department of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology at Weihai, Weihai 264209, China;

2. School of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China;

3. Technical Center, China State Construction Engineering Corporation Ltd., Beijing 101300, China)

\* Corresponding author, E-mail: qianhl@hit.edu.cn

**Abstract:** The non-uniform temperature field and correspond effects of Shanghai 65 m radio telescope were explored in detail on July 15th (one of the worst-case weather conditions) to understand the effect of non-uniform temperature field on the surface precision of main reflector under different wind speeds. By taking member's specific sizes into consideration, the calculation methods for key factors on temperature fields like convection heat transfer coefficient, sky radiation and ground radiation and so on were researched and an integral parametric thermal finite element model was established using thermal analysis module of ANSYS. The non-uniform temperature field was analyzed under three kinds of typical wind speeds. Temperature field results were loaded on main reflector to investigate

收稿日期:21013-11-05;修订日期:2014-01-20.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 51378149);国家“十二五”科技支撑计划资助项目(No. 2012BAJ03B01)

the effect of non-uniform temperature field on surface precision caused by different wind speeds, which was assessed by the Root Mean Square(RMS) values of actual coordinates of each node fitting with an ideal parabolic main reflector. The results indicate that RMS led by thermal deformation can be up to 0.44 mm under a local annual average wind speed of 3.2 m/s. When the wind speed rises from 1.0 m/s to 10.0 m/s, the maximum RMS value falls from 0.56 mm to 0.35 mm and the higher the wind speed, the lower the RMS value. Research results can provide effective references for the temperature field monitoring, sensor arrangement and the thermal control selection of the telescopes.

**Key words:** radio telescope; non-uniform temperature field; surface precision; transient analysis

## 1 引言

中国2012年底建成的上海佘山65 m望远镜为亚洲最大的全方位可动射电望远镜,反射面面积相当于8个标准篮球场的大小,为了满足其在VLBI定位等方面的目标,对其大口径反射面提出了超高精度要求。

结构自重、风和温度场是影响射电望远镜反射面精度的主要因素。反射面精度可以用结构在一定状态下反射面节点实际坐标与理想抛物面间拟合误差的均方根(RMS)的最大值来衡量。结构自重、风对望远镜性能的影响可以通过有限元数值模拟得到,上海佘山65 m望远镜由结构自重和风荷载(风速10 m/s)引起的RMS值分别为0.84和0.5 mm<sup>[1-2]</sup>。对结构精度有影响的温度作用可由太阳辐射、昼夜温度变化、季节性温度变化而引起,其中季节性温差发生速度缓慢而且在常规设计中已有考虑,而对于短时急变的日温差(太阳辐射、昼夜温差)对望远镜反射面精度的影响研究尚未完善。

本文基于巨型口径射电望远镜温度场方面已有的研究成果<sup>[3-5]</sup>,应用ANSYS软件对上海65 m射电望远镜非均匀温度场及其效应进行了分析,在对温度场数值模拟的方法上进行了以下改进:(1)考虑构件形式和尺寸对对流换热的影响;(2)考虑天空、地面辐射换热对结构的影响。为后期望望远镜运行阶段布设温度传感器及选取热变形控制措施提供了依据。

## 2 结构简介

上海65 m射电望远镜位于海拔高度99 m

的上海佘山天文台(31°06'N,121°11'E),结构如图1<sup>[6]</sup>所示,由主反射面、副反射面、支承结构等构成。其中主反射面的焦径比为0.32,支承结构<sup>[3]</sup>包括俯仰齿轮机构;撑腿结构;背架结构和方位座架。俯仰机构为八边形框架井字梁和扇形大齿轮;支撑副反射面的撑腿结构为格构式撑腿;背架结构为肋环形空间桁架;方位座架结构为六边形箱型截面构成的空间框架。

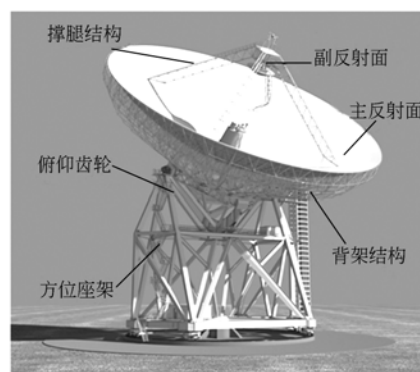


图1 上海65 m射电望远镜

Fig.1 Shanghai 65 m radio telescope

## 3 射电望远镜结构温度场分析方法

### 3.1 基本原理<sup>[4]</sup>

温度场分析符合能量守恒定律,瞬态热分析平衡方程为:

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

式中: $C(T)$ 为比热矩阵,考虑系统内能的增加; $K(T)$ 为传导矩阵,包含导热系数、对流系数及辐射率和形状系数; $\dot{T}$ 为温度对时间的导数向量, $T$ 为节点温度向量; $Q(T)$ 为节点热流率向量,包括热

生成。

ANSYS 软件热分析模块可以方便处理瞬态热平衡问题,利用模型几何参数、材料热性能参数及所施加的边界条件,生成  $C$ 、 $K$ 、 $Q$  矩阵。

### 3.2 热交换方式

射电望远镜结构热交换的方式<sup>[7,8]</sup>包括:①热传导:因构件自身存在温度梯度或相互接触的构件间存在温差而引起的热量交换;②热辐射:绝对零度以上的物体发射电磁能并被其他物体吸收转化为热能的现象,与望远镜温度场相关的热辐射包括:太阳辐射、天空辐射、地面辐射以及各构件间的热辐射,为简化计算,暂不考虑构件间的热辐射作用<sup>[9]</sup>及构件对其他辐射的遮挡;③热对流:在温差作用下,结构与周围流动空气之间发生的热量交换。其中热传导计算相对简单,本文仅对结构与外界环境发生的辐射和对流热交换计算方法进行研究,结构与环境发生热交换方式如图 2 所示。

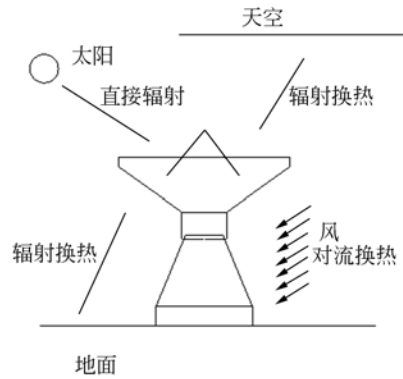


图 2 射电望远镜与环境热交换方式

Fig. 2 Thermal interaction of radio telescope with environment

### 3.3 热交换计算方法

#### 3.3.1 太阳辐射作用<sup>[10-14]</sup>

太阳辐射是结构的直接热源,包括直接辐射,散射辐射和地面反射辐射,其中直接太阳辐射在数值上远远大于后两者。计算直接太阳辐射要考虑阴影遮挡效应,根据文献<sup>[3-7]</sup>单元太阳辐射计算流程如图 3 所示。

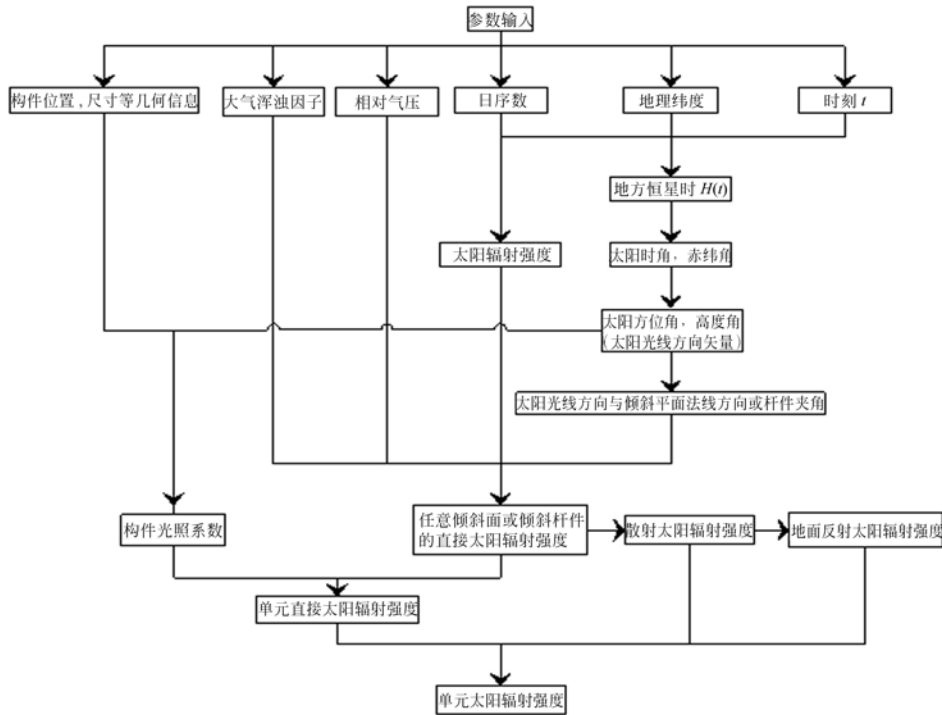


图 3 太阳辐射计算流程图

Fig. 3 Flowchart for calculation of solar radiation

#### 3.3.2 天空、地面辐射作用

天空、地面辐射为长波辐射<sup>[8]</sup>,长波辐射换热

是夜间结构温度降低的主要原因,结构辐射换热热流密度的计算具有高度非线性:

$$q_r = ah_r(T_{sur} - T_r), \quad (2)$$

式中:  $a$  为构件对长波辐射的吸收率;  $h_r$  为辐射换热系数:

$$h_r = e\sigma\varphi(T_r + T_{sur})(T_r^2 + T_{sur}^2), \quad (3)$$

式中:  $e$  为辐射体的辐射发射率;  $\sigma$  是波尔兹曼常数;  $\varphi$  是辐射换热角系数, 与辐射换热面间的相对位置有关;  $T_{sur}$  为构件表面温度;  $T_r$  为辐射发射体温度。

$T_s$  为典型天空温度<sup>[8]</sup>:

$$T_s(t) = 0.0553T_A(t)^{1.5} \text{ (K)}, \quad (4)$$

$T_A$  是大气温度, 气温变化过程用近似正弦函数表示<sup>[4]</sup>:

$$T_A(t) = \frac{1}{2}(T_{Amax} - T_{Amin})\sin[(t-9) \times 15^\circ] + \frac{1}{2}(T_{Amax} + T_{Amin}), \quad (5)$$

其中:  $T_{Amax}$  和  $T_{Amin}$  分别代表一天内最高、最低空气温度, 典型地面温度的取值近似为与气温相关的正弦函数<sup>[8]</sup>:

$$T_G(t) = T_A(t) + 5 \times \sin[(t-8)/12]. \quad (6)$$

### 3.3.3 对流换热

结构构件表面与大气对流换热的热流密度为:

$$q_c = h_c(T_{sur} - T_A), \quad (7)$$

式中:  $h_c$  是对流换热系数, 根据空气动力学相关理论进行计算<sup>[8]</sup>, 需要考虑海拔高度、构件形式及几何尺寸、环境风速、空气导热系数等条件。

对于沿风向方向长度为  $L$  的板对流换热系数, 流体为层流时:

$$h_{cl} = 0.664(RE_L)^{1/2} PR^{1/3} k/L, \quad (8)$$

紊流为:

$$h_{cl} = 0.036(RE_L)^{1/4} PR^{1/3} k/L, \quad (9)$$

式中:  $RE_L$  为 Reynolds 数,  $PR$  为 Prantl 数, 对空气取 0.71,  $k$  为空气热传导系数, 值为  $0.024 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \text{K}^{-1}$ 。Reynolds 数可根据下式计算:

$$RE_L = vL\rho/\mu, \quad (10)$$

式中:  $v$  为气体流动速度 (m/s);  $\rho$  为空气密度 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ), 与海拔高度有关;  $\mu$  为气体绝对黏度, 基本与海拔高度无关取  $17.3 \times 10^{-6} \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1} \text{m}^{-1}$ 。

对于类似于背架结构的网络桁架结构杆件, 杆件对流换热系数为:

$$h_{bd} = 0.33(RE_D)^{1/4} PR^{1/3} k/D, \quad (11)$$

式中:  $RE_D$  为 Reynolds 数, 按照下式计算:

$$RE_D = vD\rho/u, \quad (12)$$

其中:  $D$  为圆管杆件直径或方钢管表面积等效为圆管的直径, 其他参数与板件计算公式中取值相同。

### 3.4 有限元建模

反射面 RMS 受主反射面面外方向上的变形控制, 而由反射面自身温度场引起的该方向变形极小, 因此 RMS 可以根据支承结构上与面板相连点的位置计算<sup>[3]</sup>。

依据上海 65 m 射电望远镜的几何模型应用 ANSYS 软件热分析模块, 建立支承结构与副反射面的热分析有限元模型, 选用单元如表 1 所示, 相应材料热物性参数如表 2 所示。在考虑杆件热对流时, 杆件对流换热密度以节点热流的形式施加在杆件节点上, 俯仰齿轮板对流换热密度则以面荷载形式加载; 各构件的辐射换热流密度以节点热流的方式均分加载在单元节点上。有限元建模时, 交汇构件直接连接到一点, 用以考虑构件在节点处的热交换。图 4 所示为俯仰角为  $90^\circ$ 、方位角为  $0^\circ$  时支承结构的 ANSYS 热有限元模型图。

表 1 ANSYS 模拟单元

Tab. 1 Simulation elements of ANSYS

ANSYS 模拟单元	
热传导	俯仰齿轮 Shell57、杆系 Link33
热对流	俯仰齿轮 Surf152、杆系 Link34
热辐射	Link31

表 2 材料热物性参数

Tab. 2 Parameters of thermal physical characteristics

材料	密度 /( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	比热容 /( $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \text{K}^{-1}$ )	导热系数 /( $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \text{K}^{-1}$ )
钢	7 840	465	49.8

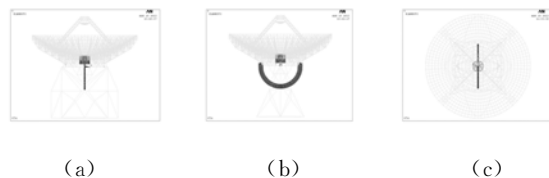


图 4 热分析有限元模型

Fig. 4 Finite element model for thermal analysis

## 4 算例分析

### 4.1 计算假定边界条件及假定

(1) 计算初始条件: 望远镜温度场最不利工况

之一,7月15日天空晴朗无云状态。

(2)算例有限元模型为图5所示的支承结构俯仰角90°状态。

(3)太阳辐射计算过程中,大气浑浊因子取1.8,大气相对气压取0.99,地面反射率取0.2;在计算日照阴影过程中,考虑反射面板对构件的阴影遮挡,不考虑杆件之间的相互遮挡,俯仰齿轮受背架杆件遮挡比较严重,暂不考虑其直接太阳辐射,定义构件光照系数为构件光照区长度与杆件总长度的比值,图5给出了计算日一天中部分时刻杆件光照系数分布。

(4)构件对太阳辐射吸收率为0.4,对长波辐射吸收率为0.8<sup>[8]</sup>。

(5)长波辐射发射率 $\epsilon$ :对于天空取0.8,对地面取0.5;辐射换热角系数参照文献[15]选取; $\sigma$ 取 $5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ 。

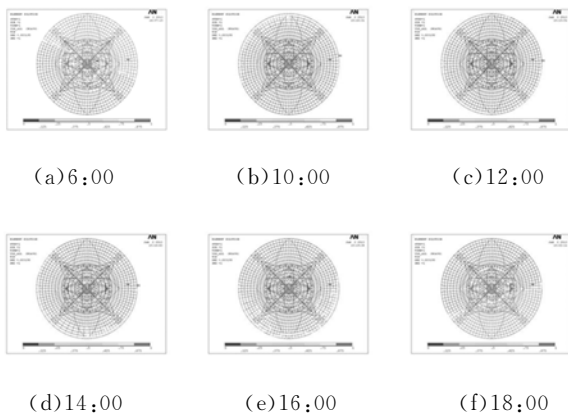


图5 各时刻杆件光照系数

Fig. 5 Light distribution with time under sunshine

(6)日气温最高值、最低值根据上海佘山天文台的7月记录,分别取35和21℃,计算日当天大气温度、天空温度、地面温度时程如图6所示。

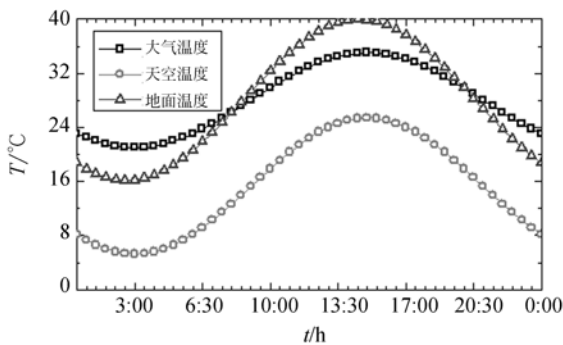


图6 自然环境温度时程

Fig. 6 Temperature schedule of environment

(7)研究风速为1.0,3.2(上海气象局:1971~2000年平均风速)和10.0 m/s<sup>[9]</sup>的三种工况下结构温度场及其效应,计算三种典型风速下构件的对流换热系数,得到不同风速下典型杆件对流换热系数见表3,俯仰齿轮板单元对流换热系数分布如图7所示。

表3 典型杆件对流换热系数表

Tab. 3 Heat transfer coefficient for typical tubes

直 径 /m	对流换热系数/(W·m <sup>-2</sup> ·K <sup>-1</sup> )			直 径 /m	对流换热系数/(W·m <sup>-2</sup> ·K <sup>-1</sup> )		
	风速/ 1.0 m·s <sup>-1</sup>	风速/ 3.2 m·s <sup>-1</sup>	风速/ 10.0 m·s <sup>-1</sup>		风速/ 1.0 m·s <sup>-1</sup>	风速/ 3.2 m·s <sup>-1</sup>	风速/ 10.0 m·s <sup>-1</sup>
0.01	33.82	38.13	75.75	0.17	11.90	18.52	36.79
0.04	20.96	29.34	58.28	0.27	9.87	21.60	42.91
0.10	14.56	16.31	32.39	0.44	8.09	19.88	39.50
0.12	13.54	18.52	36.79	0.60	7.15	16.31	32.39
0.14	12.88	34.20	67.93	0.72	6.65	38.13	75.75

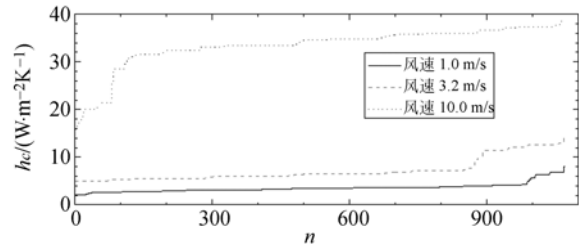


图7 俯仰齿轮板对流换热系数

Fig. 7 Convective heat transfer coefficient of elevation wheel panels

(8)计算时程步长取0.5 h。

#### 4.2 非均匀温度场分析结果

对结构在三种风速(1.0,3.2和10.0 m/s)下进行非均匀温度场时程分析,对计算结果提取整理,得到各工况结构各部分的平均温度、最高温度、温差时程图。图8、图9分别给出了风速3.2 m/s时15:00和18:00时的结构温度场分布。

图10给出了不同风速下一天内各时刻结构不同部位的平均温度,由图可知:

(1)3.2 m/s风速下:日落后到第二天日出前,结构各部分平均温度持续下降直至低于气温,与空气最大温差约为2℃,此现象符合长波辐射换热会导致夜间物体温度降低的自然原理;日出后在5:30~6:00左右,结构各部分平均温度与大气温度基本最为接近。

(2)风速3.2 m/s工况下:日出后各部分温度

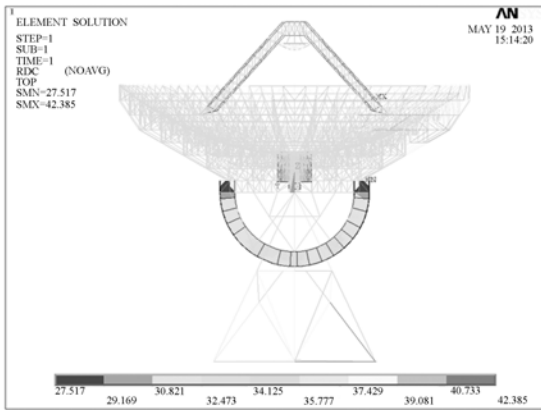


图 8 3.2 m/s 风速下 15:00 时温度场分布

Fig. 8 Distribution of temperature filed under wind speed of 3.2m/s at 15:00

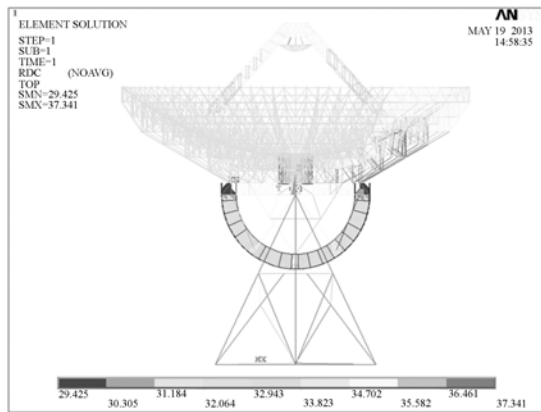
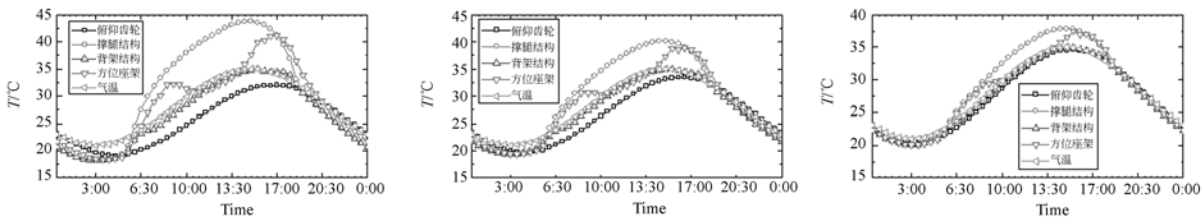


图 9 3.2 m/s 风速下 18:00 时温度场分布

Fig. 9 Distribution of temperature filed under wind speed of 3.2m/s at 18:00



(a) 风速 1.0 m/s (b) 风速 3.2 m/s (c) 风速 10.0 m/s  
 (a) At wind speed of 1.0 m/s (b) At wind speed of 3.2 m/s (c) At wind speed of 10.0 m/s

图 10 一天内不同风速下结构各部分平均温度

Fig. 10 Average temperature from various parts of structure in a day under different wind speeds

迅速升高,撑腿、方位座架平均温度上升速度最快,最大值分别为 40.2 和 39.6 °C。

(3) 风速 3.2 m/s 工况下;背架结构受到阴影遮挡比较严重,且对流换热系数相对较大(表 3),故其平均温度一直接近气温;而同样受阴影遮挡严重的俯仰齿轮则因对流换热系数较小(图 8),其温度一直低于气温。

(4) 三种风速下各部分平均温度变化规律类似,当风速由 1.0 增大到 10.0 m/s 时,各部分平均温度与气温间温差明显减小,平均温度最大值由 44.8 减小到 37.1 °C。

图 11 给出了不同风速下结构各部分构件最高温度,由图可知:

(1) 3.2 m/s 风速下:背架和撑腿在夜间温度略低于气温,其他部分最高温度均高于空气,背架、撑腿最高温度低主要是因为夜间杆件辐射换热较大,且相对方位座架部分杆件尺寸较小,对流换热系数也相对小(表 3)。

(2) 3.2 m/s 风速下:各部分最高温度均在 15:00 左右均达到最高点,最大值出现在撑腿部分,值为 42.5 °C。

(3) 各风速下结构各部分最高温度变化规律相同,结构最高温度随风速的增大而明显减小,当风速由 1.0 增大到 10.0 m/s 时,结构最高温度由 47.3 下降到 39.2 °C。

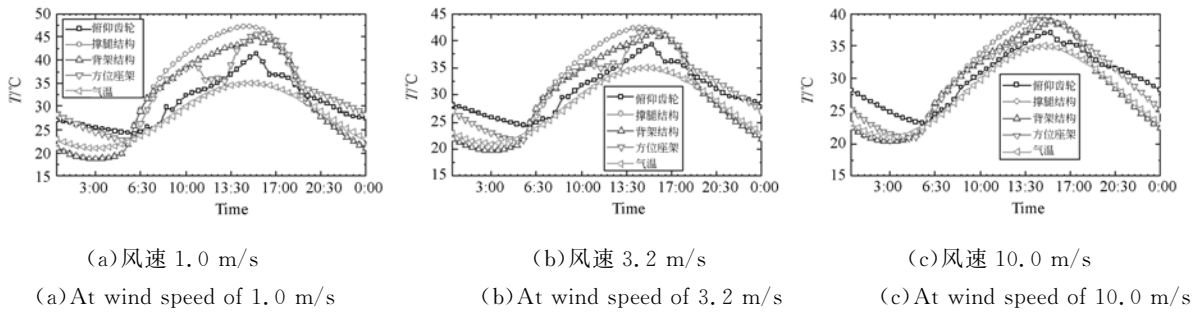


图 11 一天内不同风速结构各部分最高温度

Fig. 11 Maximum temperature from various parts of structure in a day under different wind speeds

图 12 给出了结构各部分构件温差,由图可知:

(1) 3.2 m/s 风速下: 俯仰齿轮、方位座架温差变化幅度大,且最大值明显大于其他构件,二者最大值分别为 11.4 和 10.4 °C; 撑腿和背架温差在 7:00~17:30 时值在 5°C 附近波动,其他时刻则迅速下降直至接近 0 °C。

(2) 不同风速下构件温差变化规律基本相同,风速增大时,构件对流换热系数增大,各部分温度更接近气温,温差减小,温度场分布也随之均匀化;当风速由 1 增大到 10 m/s 时,温差最大值由 15.0 降至 6.9 °C,各部分构件最大温差均减小约 60%。

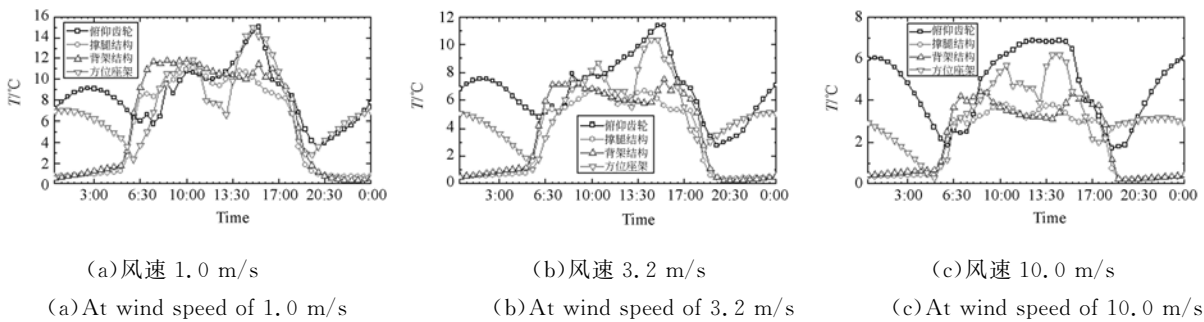


图 12 不同风速下一天内结构各部分温差

Fig. 12 Temperature differences from various parts of structure in a day under different wind speeds

### 4.3 非均匀温度场效应分析

建立该射电望远镜支承结构力学有限元模型,以 4.2 节的温度场结果为温度荷载<sup>[6]</sup>,构件基准温度值取 20 °C<sup>[4]</sup>,对其进行力学求解,得到结构不同时刻的热变形,并统计反射面 RMS 值。

图 13 给出了不同风速下一天内各时刻反射面 RMS。由图可知:

(1) 结构非均匀温度场对反射面 RMS 值有较大影响,有光照时 RMS 值明显大于无光照时;

(2) 风速为 3.2m/s 时,反射面 RMS 在 18:00 时达到一天内的极大值 0.44 mm;在 6:00 和 18:00 时 RMS 值明显大于临近值,主要原因是在这两个时刻,背架只有一部分杆件受到太阳照射,阴阳面现象明显(图 10),温差分布不均最为明显,

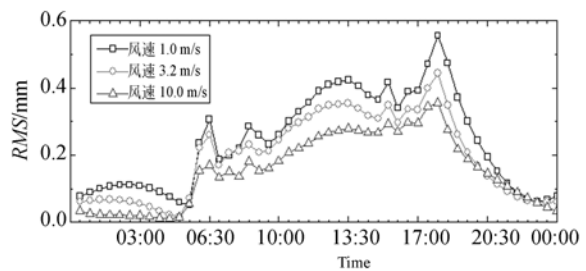


图 13 不同风速下一天内各时刻反射面 RMS 值  
Fig. 13 RMS values under different wind speeds

而对于温差最大值较大的其他时刻,背架温度场较均匀(图 9)。

(3) 各风速工况 RMS 变化规律类似, RMS 值随风速的增加而减小,当风速由 1.0 增大到

10.0 m/s时,RMS最大值由0.56降低到0.35 mm,相对于风速1.0 m/s的工况降低37.5%。

(4)在对望远镜结构进行温度变形控制设计时,增大结构周围空气流动速度可以有效减小反射面RMS值,提高型面精度。

## 5 结 论

根据上海65 m射电望远镜的设计及使用需求,对其非均匀温度场进行了详细的研究,为结构运行阶段温度场监测,温度变形控制措施的采取等提供参考,结果表明:

(1)夜间结构温度整体下降,部分构件温度甚至低于气温。

(2)日出后结构温度上升,俯仰齿轮、方位座架的温差值明显大于结构其他部分,在设计对结构温度场监测的传感器布设方案时应考虑在这两个位置增加测点数。

(3)结构非均匀温度场对结构精度有较大影响,年平均风速下反射面RMS最大值可达0.44 mm(10 m/s风速下RMS最大值为0.35 mm),与重力、风荷载作用下反射面RMS值在同一数量级上,在设计时值得着重考虑。

## 参考文献:

- [1] 范峰. 上海65m射电望远镜天线结构分析核查报告[R]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学空间结构研究中心,2010.  
FAN F. *Mechanical Analysis Report on Shanghai 65 m Radio Telescope Structure* [R]. Harbin: Space Structure Research Center of Harbin Institute of Technology, 2010. (in Chinese)
- [2] 王春圆. 巨型射电望远镜风荷载特性的数值模拟研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2012:80-85.  
WANG CH Y. *Numerical simulation study on characteristics of wind loads of huge radio telescope* [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012:80-85 (in Chinese)
- [3] 钱宏亮,刘岩,范峰,等. 上海65 m射电望远镜太阳辐射作用分析[J]. 工程力学,2012,29(10):378-384.  
QIAN H L, LIU Y, FAN F, et al.. The analysis on solar radiation of Shanghai 65 m radio telescope [J]. *Engineering Mechanics*, 2012, 29(10): 378-

(4)反射面精度与背架结构温度场分布有关,当背架温度梯度明显时RMS值也大,由此可知若采取措施控制有太阳照射时的背架阴影分布,降低结构的阴阳面效应可以减小RMS值,保证型面精度。

(5)根据本文计算边界条件假定,得到结构在不同风速下的温度变化、温差变化规律基本相同:风速增大,结构平均温度最大值、最高温度、最大温差均降低,相应的反射面RMS值也降低;当风速由1.0 m/s增大到10.0 m/s时,平均温度最大值减小7.7℃,最大温差减小8.1℃,最高温度减小8.1℃,RMS值减小0.21 mm;增加结构周围空气流动速度是增加结构温度场均匀程度、减小望远镜温度场对反射面精度影响的有效措施。

## 6 展 望

本文给出了射电望远镜非均匀温度场的研究方法,并分析了特定工况下的结构温度场,后期会开展重力、风、温度场共同作用对结构性能影响的研究。上海65 m射电望远镜温度场监测系统尚在建设中,相关温度场试验条件尚不完善,在后续工作中会给出详实的试验结果。

384. (in Chinese)

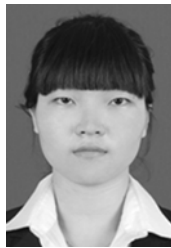
- [4] 金晓飞. 500m口径射电望远镜FAST结构安全及精度控制关键问题研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2010:21-48.  
JIN X F. *Study of key issues of the structural safety and accuracy control of the five-hundred-meter aperture radio telescope* [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010:21-48. (in Chinese)
- [5] 金晓飞,范峰,沈世钊. 巨型射电望远镜(FAST)反射面支承结构日照温度场效应分析[J]. 土木工程学报,2008,41(11):71-77.  
JIN X F, FAN F, SHEN SH ZH. Effect of non-uniform temperature field under sunshine on the structure supporting the reflector of a large radio telescope-FAST [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2008, 41(11): 71-77. (in Chinese)
- [6] 刘国玺,郑元鹏. 上海65米射电望远镜天线方案设计报告[R]. 石家庄:中国电子科技集团公司第五十四研究所,2009.  
LIU G X, ZHENG Y P. *Report on design of*

- Shanghai 65 m antenna structure [R]. Shijiazhuang: The 54th Research Institute of CETC, 2009. (in Chinese)
- [7] 孔祥谦. 有限单元法在热传递学中的应用[M]. 北京:科学出版社, 1998: 57-58.  
KONG X Q. *Application of Finite Element Method on Thermal Transmission* [M]. Beijing: Science Press, 1998: 57-58. (in Chinese)
- [8] BREMER M, GREVE A. *Thermal Design and Thermal Behavior of Radio Telescopes and Their Enclosures*[M]. Berlin:Springer,2010:55-159.
- [9] BREMER M, GREVE A. A dynamic thermal model for design and control of an 800-element open-air radio telescope [C]. *Integrated Modeling of Complex Optomechanical Systems. International Society for Optics and Photonics*, 2011:83360U-1-10.
- [10] 宋立强, 王启明, 郭永卫. 太阳辐照 500 m 口径球面射电望远镜的温度分布[J]. *光学精密工程*, 2011, 19(5): 951-958.  
SONG L Q, WANG Q M, GUO Y W. Temperature distribution of FAST under solar radiation [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(5): 951-958.
- [11] 赵镇南. 传热学[M]. 北京:高等教育出版社, 2002:4-5.
- ZHAO ZH N. *Thermal Transmission* [M]. Beijing: Higher Education Press, 2002: 4-5. (in Chinese)
- [12] 李申生. 太阳能物理学[M]. 北京:首都师范大学出版社, 1996: 68-69.  
LI SH SH. *Physics of Solar Energy* [M]. Beijing: Capital Normal University Press, 1996: 68-69. (in Chinese)
- [13] 凯尔别克 F. 太阳辐射对桥梁结构的影响[M]. 刘兴法, 等, 译. 北京:中国铁道出版社, 1981: 32-33.  
CALE BUICK F. *Effect of Solar Radiation on Bridge Structure* [M]. Translated by LIU X F, et al. Beijing:China Railroad Press, 1981: 32-33. (in Chinese)
- [14] ELBADRY M M, GHALI A. Temperature variations in concrete bridges [J]. *Journal of Structural Engineering*, 1983, 109(10):2355-2374.
- [15] SIEGEL R, HOWELL, JOHN R. *Thermal Radiation Heat Transfer (3rd revised and enlarged edition)* [M]. Washington: Hemisphere Publishing Corp,1993:980-1037.

#### 作者简介:



钱宏亮 (1977—), 男, 江苏南通人, 副教授, 博士生导师, 2000 年、2003 年、2007 年于哈尔滨工业大学分别获得学士、硕士、博士学位, 2012 年于哈尔滨工业大学博士后出站, 主要从事大跨空间结构、天线结构研究。E-mail: qianhl@hit.edu.cn



柳叶 (1989—), 女, 河北承德人, 硕士研究生, 2011 年于哈尔滨工业大学获得学士学位, 主要从事天线结构非均匀温度场研究。E-mail: lyhitwh@126.com

(版权所有 未经许可 不得转载)