

文章编号:1673-2049(2015)03-0081-08

巨型射电望远镜结构日照非均匀温度场特性

刘岩¹, 钱宏亮², 范峰²

(1. 长安大学 建筑工程学院, 陕西 西安 710061; 2. 哈尔滨工业大学 土木工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150090)

摘要:采用瞬态传热有限元分析方法,建立了综合考虑太阳辐射、空气对流换热、阴影遮挡等因素的望远镜整体结构日照温度场精细化数值模型;选取最不利工况对其进行日照作用分析,明晰了该类结构非均匀温度场分布特性,获得基于望远镜变位的日照作用对主反射面精度全过程影响规律,并揭示了该效应分布特性的内在原因。所得研究成果为未来结构施工、传感器布设及促动器的热变形调控提供了实时数据参考。

关键词:巨型射电望远镜结构;太阳辐射;阴影遮挡;非均匀温度场;热变形

中图分类号:TU393.304 **文献标志码:**A

Characteristics of Non-uniform Solar Temperature Field for Large Radio Telescope Structure

LIU Yan¹, QIAN Hong-liang², FAN Feng²

(1. School of Civil Engineering, Chang'an University, Xi'an 710061, Shaanxi, China;

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

Abstract: The refined numerical model of the solar temperature field for telescope overall structure was established by transient heat transfer finite element method, with the factors of solar radiation, air convection heat transfer, shadow in surrounding environment, etc. taken into consideration at the same time. The worst-case weather condition was selected to analyze the solar effect for them and the distribution of non-uniform solar temperature field for the telescope structure was figured out. The influence law of main reflector surface precision by the time course was acquired during the change of pitch and azimuth angles, and the essence of the effect distribution characteristics was revealed. The study results can provide valuable real time data reference for the future construction, sensor arrangement and thermal deformation control of actuator.

Key words: large radio telescope structure; solar radiation; shadow shade; non-uniform temperature field; thermal deformation

0 引言

目前,热分析是望远镜结构研究的一个难点和热点,对该结构日照非均匀温度场效应的研究越来越成为人们关注的重点。

日照作用源于一昼夜内太阳东升西落在物体表

面产生的非均匀温度变化,这种变化受到太阳辐射、阴影遮挡、大气温度等诸多因素的影响,在时间和空间上往往表现出短时急变、分布不均等特征,因此,采用常规手段分析则变得很困难。

首先,如何建立合理简化且能反映实际情况的传热边界条件是求解结构温度场的关键;其次,望远

镜在整个运行过程中存在着许多连续的工作状态,对存在的每种工作状态,结构的非均匀温度场都具有唯一性;同时,上述提及的热传递方式引起的非均匀热变形又会影响到主反射面精度,导致电性能有所下降。因此在对望远镜结构日照非均匀温度场特性研究的基础上,系统、全面地掌握日照非均匀温度场对结构的作用效应及机理,详细统计、分析不同工作状态主反射面温度场效应的分布规律及精度的控制具有重要意义。

1 望远镜台址环境

本文研究对象为新疆 110 m 射电望远镜,拟选址在奇台,位于新疆昌吉州,准噶尔盆地东南部。地处东经 $89^{\circ}13' \sim 91^{\circ}22'$,北纬 $42^{\circ}25' \sim 45^{\circ}29'$,属于中温带大陆性半荒漠干旱性气候。查历年资料,年平均风速为 $3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,最热月 7 月,该月平均气温为 22.6°C ,最高 39°C ,最低 14°C 。选取 7 月 15 日晴朗无云天气进行模拟,日出时间为 05:00,日落时间为 17:00,这一天大气温度时程如图 1 所示。

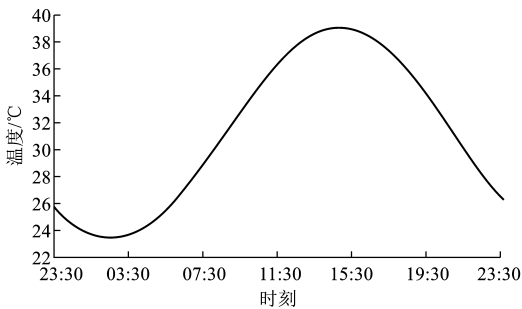


图 1 奇台地区 7 月 15 日大气温度时程

Fig. 1 Temperature Time-history of Atmosphere at Qitai Area in July 15

2 日照作用分析

2.1 瞬态温度场分析模型

日照作用分析的本质是热平衡分析,对于望远镜结构而言,它具体通过热传导、热对流及热辐射来实现,完成结构自身热量的传递和结构与周围环境的热量交换,使得望远镜结构与周围环境这个热系统处于一种瞬态的热平衡状态^[1]。

根据新疆 110 m 射电望远镜结构几何尺寸、材料热物理特性等,以大型通用有限元软件 ANSYS 为分析平台,同时结合 MATLAB 及 FORTRAN 建立了如图 2 所示的望远镜结构数值分析模型,对应的 3 种热传递模拟实现方式见表 1。

分析时采用 Shell57 单元作为空间壳单元,可

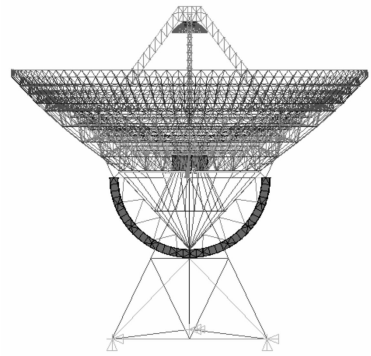


图 2 日照分析模型

Fig. 2 Solar Analysis Model

表 1 有限元分析采用的模拟单元

Tab. 1 Simulating Element in Finite Element Analysis

热传递方式	模拟单元
热传导	Link33, Shell57
热对流	Link34, Surf152
天空、地面辐射	Link31

考虑面内热传导,且每个节点只有一个温度自由度, Surf152 单元为一种表面效应单元,可考虑板件与空气的对流换热。对于杆系部分,依据其实际截面面积建立 Link33 热传导单元和 Link34 热对流单元,而以 Link31 作为点辐射单元,用来模拟构件与天空、地面的辐射换热。在有限元模型建立过程中,俯仰齿轮以及核心筒板件的热辐射吸收率取为 0.15,天空、地面辐射发射率按照实际情况选取^[2-6]。

2.2 日照阴影分析

以 90° 俯仰角为例,说明反射面阴影遮挡的计算方法。如图 3 所示,某一时刻,一束平行光从东边投射过来,反射面右半部分对光的传播路径起到了遮挡作用,从而在反射面左边区域内形成阴影。据此原理,沿着反射面周边一圈分别找到边缘点在反射面上的投影点,便可得到阴影区与光照区的分界线。在阴影区内,构件接受不到阳光的照射,而在阴影区外,构件受到阳光的直接照射,将吸收大量的太阳辐射热能,这种强烈的反差会导致反射面不同区域产生较大的温差。

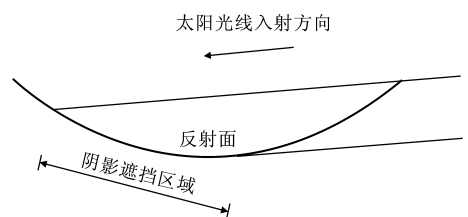


图 3 阴影形成示意

Fig. 3 Schematic of Shadow Formation

本文针对不同俯仰角(各排从左至右依次代表 $5^\circ, 45^\circ, 90^\circ$)下的模型进行计算,分别选取7月15日这一天的几个典型时刻,给出了它们的阴影分布,如图4所示。图4中反射面阴影遮挡分为3个区,A区代表反射面凹面受到照射,凸面受到遮挡;B区代表反射面凹、凸面均受遮挡;C区代表反射面凹面受到遮挡,凸面受到照射。可以看出:早晨太阳从东方升起,反射面率先在西边的凹面受到照射,由于自身遮挡,逐渐向东进入阴影区段;随着太阳升高,自身阴影遮挡效应逐步减弱,直射范围加强,反射面凹面受到照射的区域面积越来越大,直到过了正午时分,反射面的阴影分布呈现出与上午相反的结果。

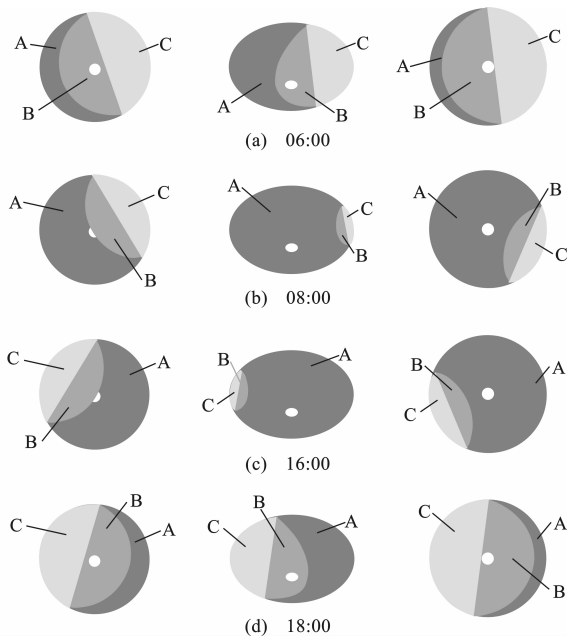


图4 不同时刻下阴影分布状态对比

Fig. 4 Shadow Distribution Comparisons at Different Moments

2.3 太阳辐射

太阳辐射是射电望远镜结构的主要热源,太阳辐射穿过大气来到地面的热量随时间和空间发生变化。通常采用地平坐标系,以太阳高度角 β_s 、方位角 α_s 来表示太阳所处的位置,如图5所示,其中, P 为地面观察点, S 为正南方向, z 为竖直铅垂方向。

此外,太阳在天空中的运动还与观测点的地理纬度 φ 、太阳赤纬角 δ 、日期及当天的时刻有关。根据以上参数便可以计算出望远镜各构件的太阳辐射量^[7-10]。

2.4 对流换热

对流换热是一种流体和固体表面间的热量传递过程,它是热对流和热传导综合作用的结果,也称对

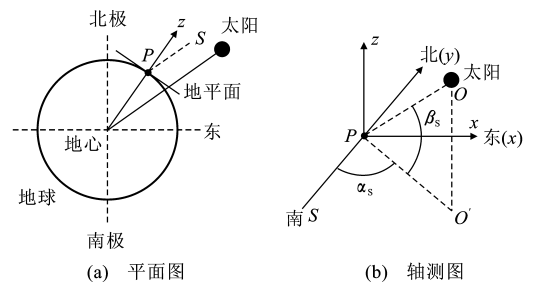


图5 地平坐标系

Fig. 5 Horizon Coordinate System

流传热。在对流换热过程中,热量的传递是通过分子运动产生的“导热”和流体微团之间形成的“对流”这2种作用来完成,传热强度不仅和对流运动形成方式有关,而且还和流速、流体的物理特性参数、固体表面性质、外形、位置及几何尺寸等因素息息相关。在不同状况下,传热强度会发生成倍甚至是数百倍的变化,导致对流换热是一个受到诸多因素影响且其强度变化幅度很大的复杂过程。因此求坐落于某位置处望远镜的对流换热系数时,首先需要确定这些参数与观测点地理位置的关系,各参数计算可参考文献[11]。

110 m 射电望远镜结构各构件对流换热系数与构件尺寸、风速有关,与望远镜俯仰角无关,故以俯仰角 90° 为例,选取3种典型风速 $1.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (有记录的最小日平均风速), $3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (年平均风速), $4.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 对组成望远镜结构的各构件进行对流换热系数计算,得到不同风速下结构杆单元及板单元的对流换热系数统计结果,如图6,7所示。

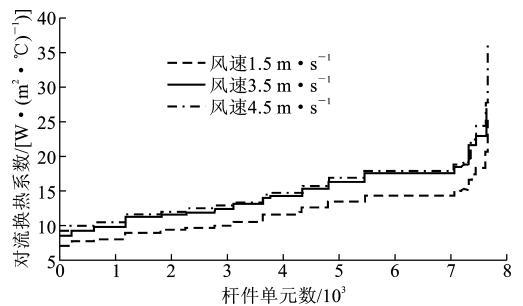


图6 杆件对流换热系数统计结果

Fig. 6 Statistical Results of Convective Heat Transfer Coefficients for Bars

从图6中可以看出:以对流换热系数大小来表征该热传递强弱相对关系,无论是杆单元还是板单元,都表现出风速越大,构件对流换热系数越大的规律,这表明风速的增大会显著加强构件与周围环境的传热能力;具体来看,杆单元绝大多数的对流换热系数值集中在 $10 \sim 20 \text{ W} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{C})^{-1}$ 之间,而

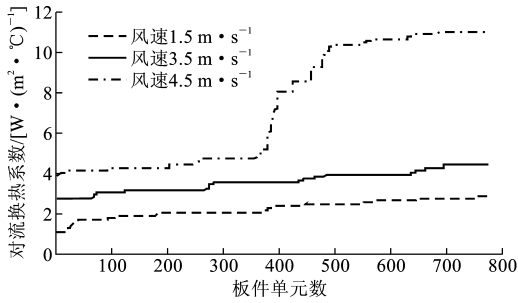


图7 板件对流换热系数统计结果

Fig. 7 Statistical Results of Convective Heat Transfer Coefficients for Plates

Transfer Coefficients for Plates

剩余的少部分集中在 $30 \sim 40 \text{ W} \cdot (\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$ 之间,这是因为背架结构主要为圆钢管型材,杆件截面较小,与周围环境的接触面积较小,下部支架由于均采用焊接箱型截面钢梁,与周围空气接触面很大,因此,该部分构件的对流换热系数较大。从图7可以看出,板件单元与圆钢管对流换热系数相比较小,大部分构件的对流换热系数处在 $2 \sim 5 \text{ W} \cdot (\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$ 之间。这是因为该结构中的板件主要来自封闭的扇形齿轮和核心筒,即各板件只有一面和周围空气接触,另一面不与空气接触,并且沿着厚度方向很薄,即厚度这一维度的面在对流换热中的贡献极为微弱,因此其对流换热能力大幅降低。

2.5 辐射换热

结构与环境发生的长波辐射换热包括:结构与天空发生的辐射换热,结构与地面发生的辐射换热。在计算长波辐射换热时,需计算辐射面间角系数。各构件天空辐射角系数 φ_s 、地面辐射角系数 φ_G 计算方法按照文献[12]中的方法,将天空和地面简化为无限大平面,计算简图见图8,其中, n_1, n_2 分别为垂直于 A_1, A_2 平面的方向。辐射角度系数的计算公式为

$$\int \varphi_s \Delta F = \int_0^{2\pi} \frac{1}{2} [1 + \cos(\varphi)] r L d\varphi = \pi r L \quad (1)$$

$$\int \varphi_G \Delta F = \int_0^{2\pi} \frac{1}{2} [1 + \cos(\varphi)] r L d\varphi = \pi r L \quad (2)$$

$$\varphi_s = \frac{\int \varphi_s \Delta F}{\sum \Delta F} = \frac{\pi r L}{2\pi r L} = 0.5 \quad (3)$$

$$\varphi_G = \frac{\int \varphi_G \Delta F}{\sum \Delta F} = \frac{\pi r L}{2\pi r L} = 0.5 \quad (4)$$

式中: ΔF 为反射面单元面积; r 为反射面所在平面半径; L 为入射点(抛物面上)和反射点(地面上)两点间的距离。

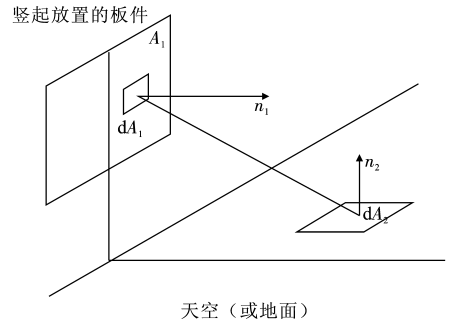


图8 辐射角系数计算示意

Fig. 8 Calculation Diagrammatic Sketch of Radiation Angle Coefficient

3 日照非均匀温度场特性分析

3.1 非均匀温度场分布特性

根据前述的理论知识分别计算反射面日照阴影、太阳辐射热流密度、杆件单元对流换热系数、板件单元对流换热系数、天空辐射角系数、地面辐射角系数,得到各热交换的相关计算数据,据此将热荷载施加于结构上,选取最热月晴朗无云天气这一最不利工况(7月15日),基于能量守恒原理,对望远镜结构进行全天的温度场时程分析,从而获得望远镜不同姿态下的非均匀温度场分布^[13-20],其计算流程如图9所示。

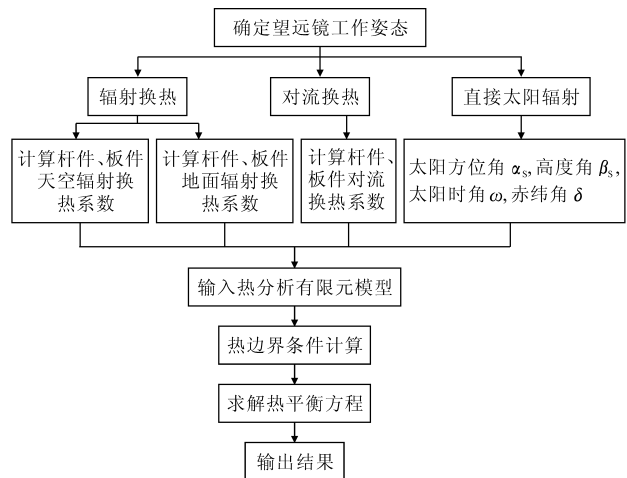


图9 望远镜结构温度场计算流程

Fig. 9 Calculation Flowchart of Temperature Field for Telescope Structure

Field for Telescope Structure

这里以俯仰角 $90^\circ, 45^\circ, 5^\circ$ 为例,在风速 $U = 1.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 下,计算望远镜结构温度场,其统计结果如图10~12所示。为了更加直观地表现出该温度场的时间分布特性,以俯仰角 90° 为例,选取06:00,08:00,16:00,18:00时刻,给出结构相应的日照温度场分布,如图13所示。可以看出,110 m

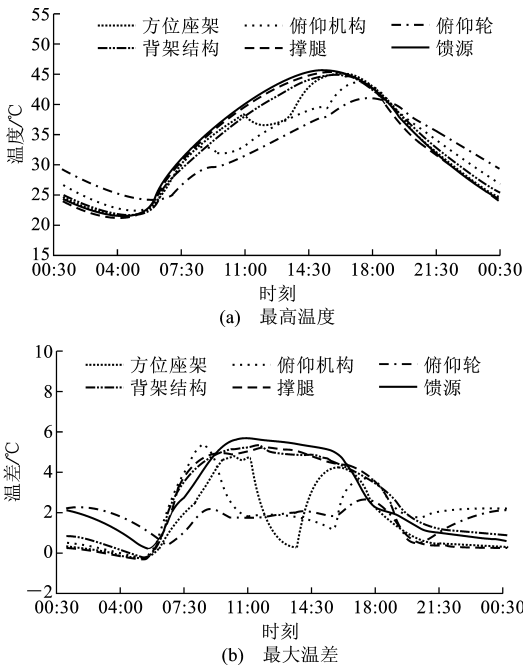


图 10 90°俯仰角时结构最高温度和最大温差
Fig. 10 Maximal Temperature and Maximal Temperature Difference of Structure at Pitch Angle 90°

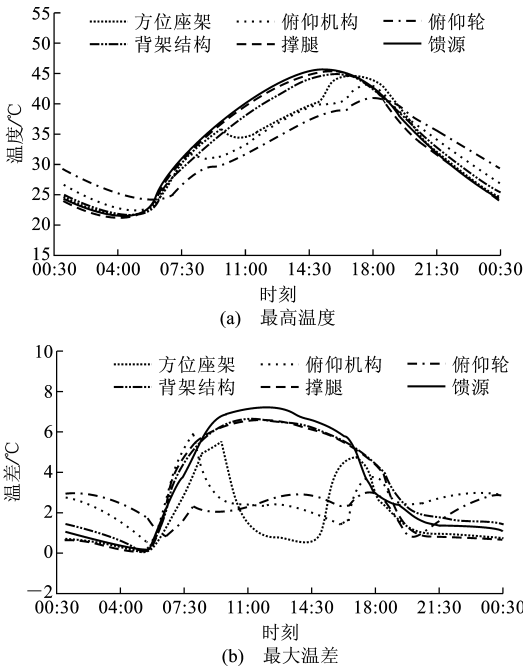


图 11 45°俯仰角时结构最高温度和最大温差
Fig. 11 Maximal Temperature and Maximal Temperature Difference of Structure at Pitch Angle 45°

射电望远镜结构日照非均匀温度场具有如下分布特性:

(1)各俯仰角情况下,从傍晚 19:00 至次日凌晨 05:00,太阳位于地平线以下,各构件表面无直接太阳辐射作用,因而各构件最高温度与大气温度十分

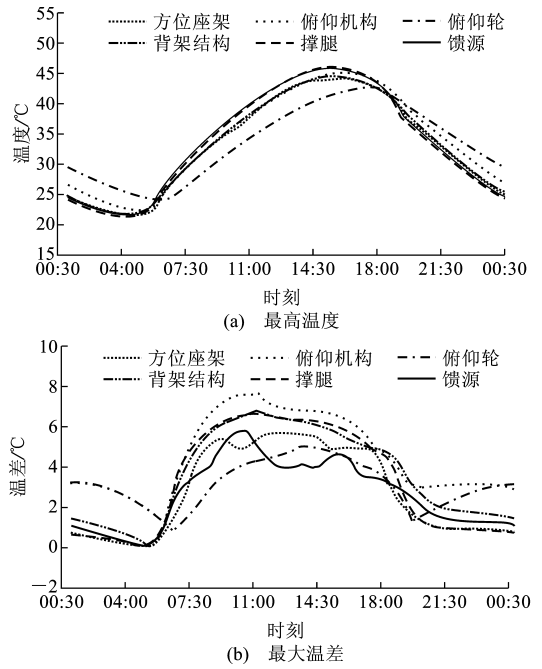


图 12 5°俯仰角时结构最高温度和最大温差
Fig. 12 Maximal Temperature and Maximal Temperature Difference of Structure at Pitch Angle 5°

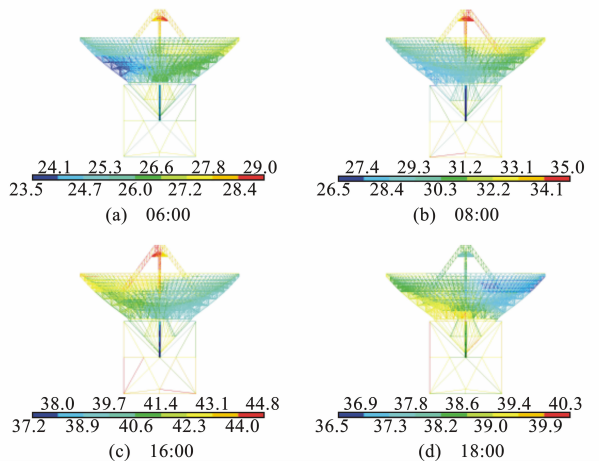


图 13 不同时刻望远镜结构温度场分布(单位:°C)
Fig. 13 Temperature Field Distribution of Telescope Structure at Different Moments (Unit:°C)

接近;从凌晨 05:00 到傍晚 19:00,太阳位于地平线以上,构件不被遮挡的表面将直接受到太阳辐射作用,所以各构件最高温度要显著高于空气温度。

(2)太阳升起后,随着时间推移各构件最高温度值持续攀升,方位座架、背架结构、副反射面(馈源处)、撑腿、俯仰机构、扇形齿轮分别于 16:00, 15:30, 15:00, 14:30, 17:00, 17:30 左右温度达到最大,在此之后,各构件的温度逐步下降,直至凌晨 05:00 降至最低值,近乎与此时的大气温度相等。

(3)各部分构件温差均从凌晨 05:00 左右开始

显著增大,且均在上午 09:30 之前达到最大值,在此之后,温差的波动仍较为明显,直到下午 18:00 左右,温差开始显著减小,并于夜晚 20:00 左右减至 2°C 以下,这是由于太阳高度降低,太阳直接辐射强度减弱所致。

(4)方位座架的温差分布较为特别,上午 09:30 至下午 14:30 时间段内,其温差先减小后增大,对于 90° 和 45° 俯仰角,呈现明显的 V 字形变化趋势,在中午 12:30 左右减至最低值,分别约为 0.63°C 和 0.58°C ;对于 5° 俯仰角,则没有呈现如此规律,其温差最低点并不在 12:30 左右出现,而是在 09:00 和 14:30 左右出现,且温差最低值达到了 4.6°C 。

3.2 日照非均匀温度场对反射面精度的影响

望远镜反射面为等厚度的轻质铝蜂窝薄板,通过促动器连接在背架结构上弦,背架结构上弦在设计时就按照标准的抛物面成型。在日照作用下,结构会产生相应的热变形,而根据前述分析可知这样的热变形对各工作姿态具有不同的非均匀性,会破坏上弦原有的几何形状,影响望远镜工作性能。因此需要分析日照作用对各工作姿态下反射面精度的影响程度,统计各节点偏离标准抛物面的位移,为将来促动器的调节量提供细致全面的参考,具体计算流程如图 14 所示。

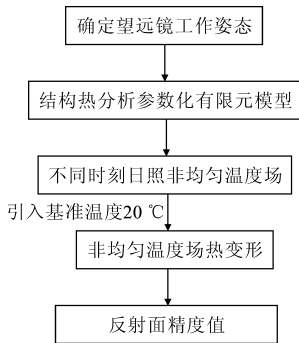


图 14 日照作用下反射面精度计算流程

Fig. 14 Calculation Flowchart for Reflector Surface Precision Under Solar Effect

具体以 5° , 45° , 90° 俯仰角时望远镜结构为例(图 15),选取前述 3 种典型风速: 1.5 , 3.0 , 4.5 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,分别对这 3 种工作姿态下的结构在 7 月 15 日这一天的日照温度场效应进行分析,获得不同风速下结构的最大节点位移及反射面精度时程,如图 16~18 所示。

从图 16~18 可以看出:

(1)同一风速、不同俯仰姿态下结构最大节点位移的变化规律近似相同,均是从 05:00 开始显著加

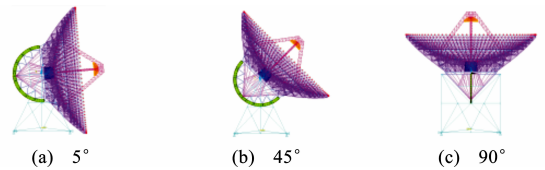


图 15 各俯仰角时望远镜结构模型

Fig. 15 Telescope Structure Models at Different Pitch Angles

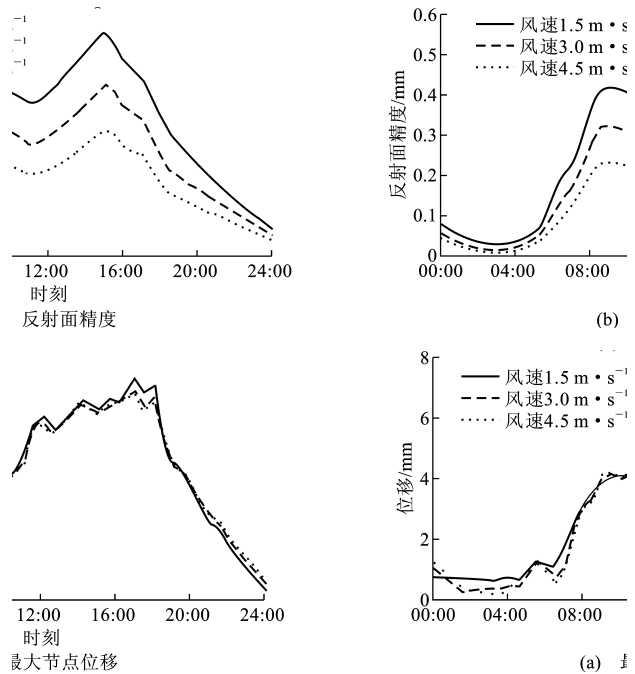


图 16 5° 俯仰角时不同风速下的最大节点位移与反射面精度

Fig. 16 Maximal Nodal Displacement and Reflector Surface Precision Under Different Wind Velocities at Pitch Angle 5°

大,傍晚 18:00 时达到极值,且在时间历程中伴随有小的回落以及再起的小波峰值,极值基本维持在 $7\sim 7.5$ mm 之间;此后开始迅速下降,直到夜间 00:00 结构最大节点位移几乎趋于 0,因为此时结构温度已经与周围大气温度近似一致。风速提高后,由温度场引起的反射面精度值和节点位移最大值均有不同程度的减小,且反射面精度值的变化幅度较大。

(2)对于俯仰角为 45° 和 90° 的模型,一天中反射面精度值随时间变化曲线形如“驼峰”:05:30~08:00 以及 17:00~20:00 两个时间段中变化剧烈。其原因是该时间段内太阳高度角逐渐增大或减小,背架结构的部分杆件被主反射面遮挡,但还有一部分杆件能够被太阳光线照射,使得背架结构未被照射区域的杆件温度略大于空气温度,被太阳照射区

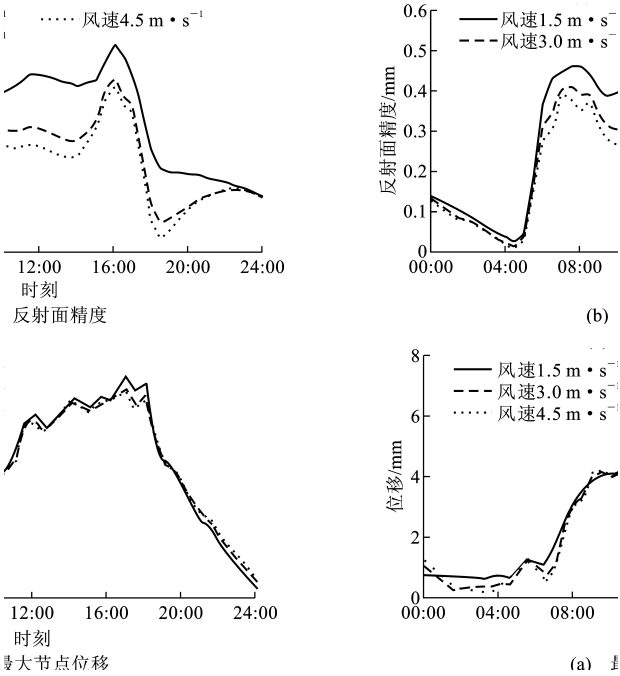


图 17 45°俯仰角时不同风速下最大节点位移与反射面精度

Fig. 17 Maximal Nodal Displacement and Reflector Surface Precision Under Different Wind Velocities at Pitch Angle 45°

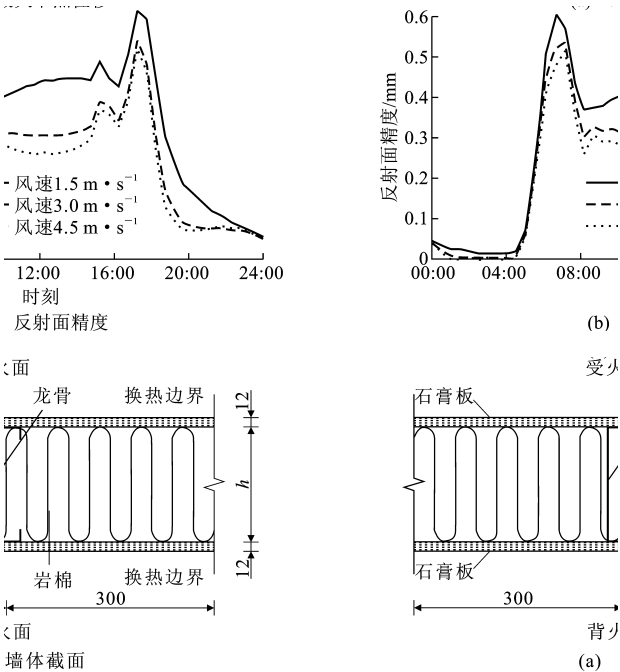


图 18 90°俯仰角时不同风速下的最大节点位移与反射面精度

Fig. 18 Maximal Nodal Displacement and Reflector Surface Precision Under Different Wind Velocities at Pitch Angle 90°

域的杆件温度要显著高于空气温度,因而反射面精

度值的空间分布呈现出较强的非均匀性。

(3)对于 5°俯仰角,日照期间的 2 个反射面精度极值相差较为明显,且第 1 个极值出现时间较 45°, 90°俯仰角几乎晚 1 h,大小仅为第 2 个极值的 72%。这是由于 5°俯仰角望远镜近乎处于指平状态,太阳从地平线升起时,入射光与反射面中心轴近似平行,在太阳升起的这段时间里,反射面几乎完全被照射,阴影遮挡效应极为微弱,因此在上午时段,反射面精度不能较早地出现极值(只要反射面中心轴与水平面有明显夹角,那么太阳升起必然会在反射面上形成显著的阴影遮挡区)。

4 结 语

(1)建立了综合考虑太阳辐射、空气对流换热、阴影遮挡等因素的全可动望远镜结构温度场精细化数值模型。综合分析了结构所处的复杂热环境,指出太阳辐射、天空辐射、地面辐射、空气对流等因素是影响结构非均匀温度场的重要因素,确定了各因素对结构影响的简化计算方法,编写了反射面日照阴影、对流换热系数、辐射换热角系数的计算模块。

(2)选取最热月晴朗无云天气这一最不利工况对新疆 110 m 射电望远镜结构进行了温度场参数化有限元分析,统计了不同俯仰角、不同风速下结构温度场的时间特性和空间特性。结果表明:太阳直接辐射作用是影响反射面温度场分布的主要因素;工作时风速越大,反射面温度越接近气温,温度场梯度越小,分布趋向于均匀化。

(3)后续进一步取得了日照变化在望远镜变位中伴随不同风速对主反射面精度的时间历程影响,并揭示了该效应分布特性的本质原因,也为未来促动器的热变形调控提供实时数据参考。

参考文献:

References:

[1] CHAMBERLIN R A. Temperature Measurements on the Leighton Telescope; Surface Memo No. 2[R]. Hawaii: Caltech Submillimeter Observatory, 2003.

[2] DOYLE D, PILBRATT G, TAUBER J. The Herschel and Planck Space Telescopes[J]. Proceedings of the IEEE, 97(8): 1403-1411.

[3] LIU N, HU B, YU Z W. Stochastic Finite Element Method for Random Temperature in Concrete Structures[J]. International Journal of Solids and Structures, 2001, 38(38/39): 6965-6983.

[4] JIANG W C, GONG J M, TU S D, et al. Modelling of

- Temperature Field and Residual Stress of Vacuum Brazing for Stainless Steel Plate-fin Structure [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2009, 209(2): 1105-1110.
- [5] 凯尔别克 F. 太阳辐射对桥梁结构的影响 [M]. 刘兴法, 译. 北京: 中国铁道出版社, 1981.
KEHLBECK F. Effect of Solar Radiation on Bridge Structure [M]. Translated by LIU Xing-fa. Beijing: China Railway Publishing House, 1981.
- [6] 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 Hong-liang, LIU Yan, FAN Feng, et al. The Analysis on Solar Radiation of Shanghai 65 m Radio Telescope [J]. *Engineering Mechanics*, 2012, 29(10): 378-384.
- [7] 彭友松, 强士中, 李松. 哑铃形钢管混凝土拱日照温度分布研究 [J]. *中国铁道科学*, 2006, 27(5): 71-75.
PENG You-song, QIANG Shi-zhong, LI Song. Temperature Distributions in Dumbbell Cross Section Concrete-filled Steel Tube Arches Due to Solar Radiation [J]. *China Railway Science*, 2006, 27(5): 71-75.
- [8] ROMERO L F, TABIK S, VIAS J M, et al. Fast Clear-sky Solar Irradiation Computation for Very Large Digital Elevation Models [J]. *Computer Physics Communications*, 2008, 178(11): 800-808.
- [9] GUEYMARD C A. The Sun's Total and Spectral Irradiance for Solar Energy Applications and Solar Radiation Models [J]. *Solar Energy*, 2004, 76(4): 423-453.
- [10] SHEN C, HE Y L, LIU Y W, et al. Modelling and Simulation of Solar Radiation Data Processing with Simulink [J]. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 2008, 16(7): 721-735.
- [11] 刘岩. 超大口径全可动望远镜结构选型及精度控制 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
LIU Yan. Structural Selection and Accuracy Control of the Large Aperture All-movable Telescope [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013.
- [12] SIEGEL R, HOWELL J R. *Thermal Radiation and Heat Transfer* [M]. 3rd ed. New York: Hemisphere, 1992.
- [13] 陈宝春, 刘振宇. 日照作用下钢管混凝土桁拱温度场实测研究 [J]. *中国公路学报*, 2011, 24(3): 72-79.
CHEN Bao-chun, LIU Zhen-yu. Research on Thermal Field Test of Concrete Filled Steel Tubular Truss Arch Under Solar Radiation [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2011, 24(3): 72-79.
- [14] 方志, 汪剑. 大跨预应力混凝土连续箱梁桥日照温差效应 [J]. *中国公路学报*, 2007, 20(1): 62-67.
FANG Zhi, WANG Jian. Sun Light Thermal Difference Effect on Long-span PC Continuous Box Girder Bridge [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2007, 20(1): 62-67.
- [15] 陈宝春, 刘振宇. 钢管混凝土脱粘构件温度场研究 [J]. *中国公路学报*, 2009, 22(6): 82-89.
CHEN Bao-chun, LIU Zhen-yu. Research on Temperature Field of CFST Debonding Members [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2009, 22(6): 82-89.
- [16] BREMER M, GREVE A. Front and Rear Perspective Heated Prototype Panels for the IRAM 15 m Telescopes [C]//ESTEC. *Proceedings of the 28th ESA Antenna Workshop on Space Antenna Systems and Technologies*. Noordwijk: Netherlands Technology Press, 2005: 943-960.
- [17] CHENG J Q. *The Principles of Astronomical Telescope Design* [M]. New York: Springer, 2009.
- [18] DARYABEIGI K. Heat Transfer in Adhesively Bonded Honeycomb Core Panels [J]. *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, 2002, 16(2): 217-221.
- [19] ELBADRY M, GHALI A. Temperature Variations in Concrete Bridges [J]. *Journal of Structural Engineering*, 1983, 109(10): 2355-2374.
- [20] GOLDSTEIN R J, ECKERT R G, LEBELE W E, et al. Heat Transfer — A Review of 2000 Literature [J]. *Heat and Mass Transfer*, 2002, 45(14): 2853-2957.