

文章编号 1004-924X(2011)05-0951-08

# 太阳辐照 500 m 口径球面射电望远镜的温度分布

宋立强\*, 王启明, 郭永卫

(中国科学院 国家天文台, 北京 100012)

**摘要:**为了掌握 500 m 口径球面射电望远镜(FAST)在太阳辐照下的温度分布,弱化它的“太阳灶”问题,保护馈源舱内相关仪器,对太阳辐照 FAST 温度场进行了研究,包括太阳相关参数研究、“太阳灶”问题解析及热流计算、台址地貌对 FAST 的阳光遮挡及不同工况下的 FAST 温度分布等。结果表明,FAST 馈源舱温度分布不仅与反射面反射率、孔隙率和辐照时间有关,而且与馈源舱防护罩的反射率、材料、焦舱位置、微波入口直径等因素有关。当反射面反射率为 0.2、孔隙率为 0.4 时,馈源舱最高温度为 47.56 °C,时间约在 12:00;反射面最高温度为 68.34 °C 时,时间是在 14:00,此时与反射面最低温度为 35.03 °C 时的温差为 33.31 °C。文章还计算了形成太阳灶的时间域,最后为 FAST 的相关设计及使用提出了意见和建议。

**关键词:**500 m 口径球面射电望远镜;太阳灶;馈源舱;反射面;温度分布

**中图分类号:**TH75 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20111905.0951

## Temperature distribution of FAST under solar radiation

Song Li-qiang\*, Wang Qi-ming, Guo Yong-wei

(National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012, China)

\* Corresponding author, E-mail: slqzhy@sina.com

**Abstract:** To master the temperature distribution and "Solar cooker" of a Five-hundred-meter Aperture Spherical Radio Telescope(FAST) and to protect instruments in a feed cabin under the solar radiation, the temperature distributions of the FAST are studied in detail, which includes sun parameters, "Solar cooker" calculation, heat flows and the temperature distribution of the FAST under different work conditions. The results indicate that the feed cabin temperature distribution is not only relevant to the reflector reflectivity, porosity rate, and the radiation time, but also to the reflectivity of the shield, materials, the diameter of microwave inlet and other factors. The analysis results of work conditions show that the reflector reflectivity is 0.2, porosity rate is 0.4 and the maximum temperature of the feed cabin is 47.56 °C at 12:00. Furthermore, the temperature of reflector surface reaches maximum 68.34 °C at 14:00, in which the minimum temperature is 35.03 °C, and the temperature difference of reflector is 33.31 °C. Moreover, the time domain of solar cookers is simulated. Finally, it gives the comments and suggestions for the design and use of FAST. The research in this paper not only obtains the temperature distribution of the FAST, but also provides references for the design and use of the FAST.

收稿日期:2010-06-25;修订日期:2010-11-10.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 10878017);中国科学院国家天文台青年人才基金资助项目

**Key words:** Five-hundred Aperture Spherical Ratio Telescope (FAST); solar cooker; feed cabin; reflector; temperature distribution

## 1 引言

天文仪器中的热问题是相关专家特别关注的问题之一,也是影响仪器精度或破坏仪器的重要因素之一,尤其是其关键部件或区域,热问题严重时会影响相关仪器的使用,甚至会破坏相关仪器或部件。因此,进行天文仪器的热分析以及试验研究对于天文仪器的设计与使用有着重要的科学及现实意义<sup>[1-3]</sup>。

500 m 口径球面射电望远镜 (Five-hundred Aperture Spherical Ratio Telescope, FAST) 是我国重大科技基础设施建设项目,已获国家发改委批复立项。该望远镜由中国科学家独创设计,目前利用贵州独特喀斯特的地形条件和极端安静的电波环境正在研究与建设阶段<sup>[4-6]</sup>。FAST 台址为露天环境,其反射面及馈源舱防护罩受到太阳辐照会引起温度变化,同时,光能也会由反射面反射汇聚辐照馈源舱而形成“太阳灶”,从而会使馈源舱温变幅度增大,有可能会破坏舱内仪器、电线电缆等,甚至会破坏望远镜或对望远镜的使用造成影响。因此,进行太阳辐照 FAST 温度场研究对望远镜的相关设计与观测使用有着十分重要的科学和现实意义<sup>[7]</sup>。针对目前该项目的研究现状,本文对太阳辐照 FAST 的温度分布进行了研究,介绍了太阳相关参数,解析了“太阳灶”问题,研究了台址形貌对 FAST 的阳光遮挡,以及不同条件下 FAST 的温度分布,给出了相关的研究结果。

## 2 FAST 结构示意图及相关参数

FAST 结构示意图如图 1 所示<sup>[7]</sup>。FAST 相关参数<sup>[4]</sup>:口径为 500 m,反射面曲率半径为 300 m;照明区口径:300 m,焦比  $f/D=0.467$ ;台址位

置:经度为  $106.855\ 83^\circ$ ,纬度为北纬  $25.647\ 22^\circ$ 。

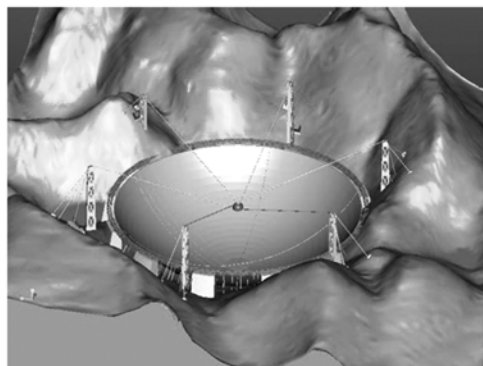


图 1 FAST 结构示意图

Fig. 1 Structure figure of FAST

## 3 太阳相关参数及相互关系

### 3.1 太阳常数<sup>[8]</sup>

一年内的太阳常数是变化的,如式(1):

$$H_0 = 1367 \left[ 1 + 0.033 \cos \left( \frac{360^\circ N}{365} \right) \right], \quad (1)$$

式中  $H_0$  为太阳常数,  $N$  为一年中的日序。

### 3.2 太阳高度角

太阳高度角是地球上某处太阳光入射方向和地平面之间的夹角,是决定地球表面获得太阳热能最重要因素,其表达式如式(2):

$$h_s = \arcsin[\sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos \Omega], \quad (2)$$

式中  $h_s$  为太阳高度角,  $\varphi$  为地理纬度,  $\delta$  为太阳赤纬角,  $\Omega$  为时角。

### 3.3 太阳方位角

太阳方位角即太阳所在的方位,指太阳光线在地平面上的投影与当地子午线的夹角,其计算函数关系如式(3):

$$\cos A_s = \frac{\sin h_s \cdot \sin \varphi - \sin \delta}{\cos h_s \cdot \cos \varphi}. \quad (3)$$

### 3.4 时角

单位时间地球自转角度为时角  $\Omega$ ,其表达式如式(4):

$$\Omega = (t - 12) \times 15^\circ. \quad (4)$$

式中  $t$  为一天内的时间(24 时制)。

### 4 大气对太阳辐照的影响

大气上界的太阳辐射照度取决于太阳高度角、日地距离等因素,而台址的太阳辐射照度会受到大气层的影响<sup>[9-10]</sup>。太阳辐射一部分通过大气直接到达地面为直接太阳辐射,另一部分被大气中的分子、微尘、水汽等吸收、散射和反射。被散射的太阳辐射一部分返回宇宙空间,另一部分到达地面,到达地面的这部分为散射太阳辐射,散射太阳辐射和直接太阳辐射之和称为地面的总太阳辐射。大气对辐射照度的影响因素如图 2 所示。建立台址太阳辐射的数学模型并编程计算,台址太阳辐射热流组成饼图如图 3 所示。在太阳辐射能量中,有 21.4% 被散射掉或返回空中,而台址辐射能量占太阳常数的 79.6%。



图 2 台址太阳辐射的组成模型

Fig. 2 Radiation component of FAST site

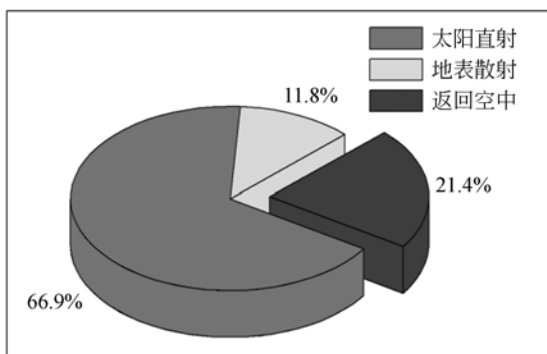


图 3 台址太阳辐射热流组成饼图

Fig. 3 Figure of heat flow component in FAST site

### 5 FAST 温度场研究过程及结果

#### 5.1 FAST “太阳灶”问题解析

馈源舱温度分布是 FAST 温度场研究的主要内容。馈源舱的热源由 3 部分组成:(1)太阳直接辐照馈源舱防护罩,(2)反射面漫反射辐照馈源舱,(3)形成“太阳灶”时产生的热源辐照馈源舱,而太阳灶形成的热源是关注的重点。由于太阳辐照 FAST 反射面会形成“太阳灶”,因此求解在某一时刻馈源舱处的热流值是求解 FAST“太阳灶”问题的有效方法之一。当反射面为球面时,其太阳辐照 FAST 示意图如图 4 所示。阳光入射光

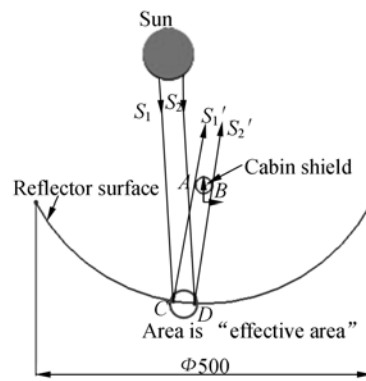


图 4 FAST“太阳灶”问题解析示意图

Fig. 4 Figure of FAST solar cooker

线束的方向向量表示为  $(\eta, \chi, \delta)$ , 设入射光线经过反射面上点  $C(x_0, y_0, z_0)$ , 入射光线方程可用式(5)表示:

$$\frac{x-x_0}{\eta} = \frac{y-y_0}{\chi} = \frac{z-z_0}{\delta} \quad (5)$$

反射面上点 C 的法线方向向量可用式(6)表示:

$$\mathbf{n} = (F_x(x_0, y_0, z_0), F_y(x_0, y_0, z_0), F_z(x_0, y_0, z_0)) = (2x_0, 2y_0, 2z_0) \quad (6)$$

过反射面上点 C 法线方程  $\mathbf{n}$  可用式(7)表示:

$$\frac{x-x_0}{x_0} = \frac{y-y_0}{y_0} = \frac{z-z_0}{z_0} \quad (7)$$

在入射光线  $S_1$  上取一点  $E(x_1, y_1, z_1)$ , 在反射线  $S_1'$  上就有与法线对称的点  $E'(x_2, y_2, z_2)$ , E 点坐标为  $(x_0 + \eta, y_0 + \chi, z_0 + \delta)$ , 则直线  $EE'$  可用式(8)表示:

$$\frac{x-x_1}{x_2-x_1} = \frac{y-y_1}{y_2-y_1} = \frac{z-z_1}{z_2-z_1} \quad (8)$$

进一步可求出反射光线  $S_1'$  并用式(9)表示:

$$\frac{x-x_0}{x_2-x_0} = \frac{y-y_0}{y_2-y_0} = \frac{z-z_0}{z_2-z_0} \quad (9)$$

馈源舱防护罩中心坐标为  $(a, b, c)$ , 其数学方程可用式(10)表示:

$$(x-a)^2 + (y-b)^2 + (z-c)^2 \leq r^2 \quad (10)$$

反射面上满足下列条件的点  $C(x_0, y_0, z_0)$  的集合就是反射面上能够辐照馈源舱的区域, 可用方程组(11)表示:

$$\begin{cases} \frac{x_3-x_0}{x_2-x_0} = \frac{y_3-y_0}{y_2-y_0} = \frac{z_3-z_0}{z_2-z_0} \\ (x_3-a)^2 + (y_3-b)^2 + (z_3-c)^2 \leq r^2 \\ x_0^2 + y_0^2 + z_0^2 = R^2 \\ -300 \leq y_0 \leq -160, x_0^2 + z_0^2 \leq 250^2 \end{cases} \quad (11)$$

通过对 6 月 22 日当天时间的连续仿真研究, 发现在 T10:15~13:45 这个时间段内, 反射面上有一有效区域能够辐照到馈源舱的防护罩, 存在

“太阳灶”。而这个时间段之外则在反射面上没有这一有效区域, 即没有“太阳灶”; 而对于年跨度而言, 也有一时间段有“太阳灶”, 而另一时间段则没有“太阳灶”。能否形成太阳灶的日期域和时间域如表 1 所示。

表 1 FAST“太阳灶”的时间域

项目	日跨度	年跨度
可形成太阳灶时域	10:15~13:45	04-02~09-10
累计时间	3.5 h	161 d

5.2 台址气温日变化过程

环境温度也是影响 FAST 温度场分布的重要因素之一。环境温度是变化的, 也会受到外部环境多种因素的影响, 而晴天的气温日变化过程仍具有一定规律性, 可以用公式(12)表示。

$$\begin{cases} t_a(t) = \frac{t_{amax} + t_{amin}}{2} + \frac{t_{amax} - t_{amin}}{2} \sin \frac{(h+18)\pi}{16} & (0 \leq h < 6) \\ t_a(t) = \frac{t_{amax} + t_{amin}}{2} + \frac{t_{amax} - t_{amin}}{2} \sin \frac{(h-10)\pi}{8} & (6 \leq h < 14) \\ t_a(t) = \frac{t_{amax} + t_{amin}}{2} + \frac{t_{amax} - t_{amin}}{2} \sin \frac{(h-6)\pi}{16} & (14 \leq h < 24) \end{cases} \quad (12)$$

夏至当天即 6 月 22 日为一年内太阳高度角最大和台址气温较高时间, 因此选此日作为研究日期。台址气温日变化过程曲线如图 5 所示, 一天内按照晴朗无云时最高气温为 30 °C, 最低气温为 20 °C, 日内温度变化曲线如图 5 所示。

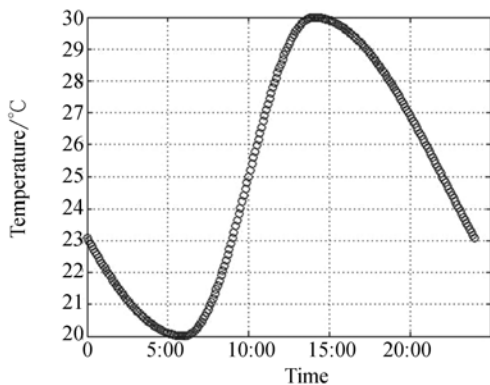


图 5 FAST 台址气温日变化过程曲线

Fig. 5 Change curve of FAST site temperature

5.3 FAST 模型及地貌对反射面阳光遮挡

FAST 模型中引入台址地形数据, 用以研究台址地貌对 FAST 阳光遮挡问题。FAST 及地形数据模型如图 6 所示, 馈源舱模型如图 7 所示。

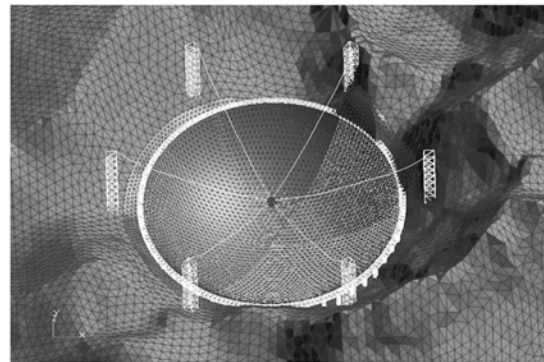


图 6 FAST 与地貌模型

Fig. 6 Models of FAST and site terrain (本图彩色效果见期刊网站 www. ope. net)

在 6 月 22 日夏至当天, 特征时间点台址地貌对反射面的阳光遮挡示意如图 8 所示, 图中黑色

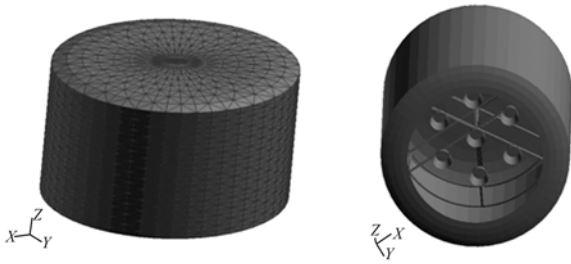


图 7 FAST 馈源舱模型  
Fig.7 Model of FAST feed cabin

区域是反射面被山体遮挡的区域,白色区域是阳光能够照射到的区域。根据地貌对反射面遮挡结果可以看出,从上午的 9:30 到下午的 15:30 这个时间区间内,台址地貌并没有遮挡阳光照射 FAST 反射面,从 6:30 至 9:30 及 15:30 至 18:00 时间内属于局部遮挡,而在早上 6:30 前及 18:00 后台址地貌对 FAST 反射面形成完全遮挡。

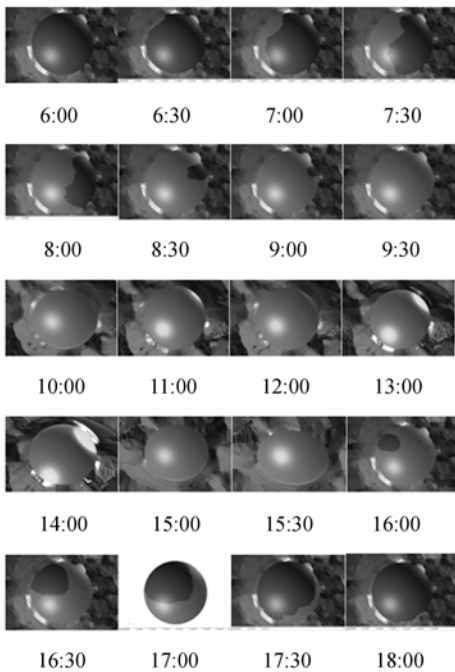


图 8 台址地貌对 FAST 反射面遮挡效果  
Fig.8 Shelter effects of site terrain on FAST

5.4 FAST 温度场研究及结果  
5.4.1 反射面温度分布

FAST 反射面温度分布对于反射面精度有一定影响,设反射面为球面,馈源舱在其运行区域最低点,工况条件如表 2 所示。

表 2 FAST 温度场模拟工况条件表

Tab.2 Work conditions of simulation

反射面 反射率	反射面 孔隙率	空气对 流系数	反射面 材料	反射面 厚度
0.2	0.4	5	铝	1.2 mm

FAST 反射面温度分布的计算结果曲线如图 9 所示。可以看出,反射面最高温度是随着太阳高度角的增大而逐渐升高,在 14:00 达到最高的 68.34℃,而后逐渐下降。同时反射面主要特征点的温变曲线如图 10 所示。就反射面东部边缘点而言,太阳从东方升起时,东部边缘由于太阳光从东部辐照,接收到的热流较小,所以其温度与环境温度相近,而在 9:00 以后才缓慢升高,直到下午 16:00 时达到最高,而后逐渐降低;而反射面上西部边缘与东部边缘的升温趋势相反。

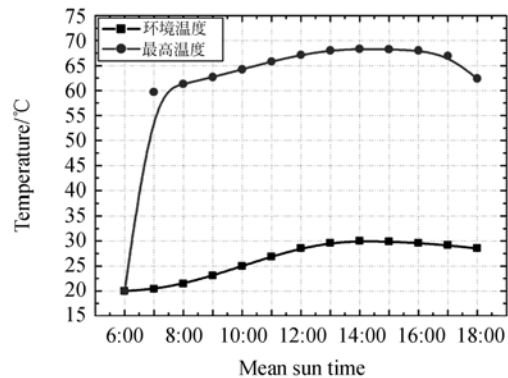


图 9 反射面最高温度曲线

Fig.9 Curves of reflector highest temperature

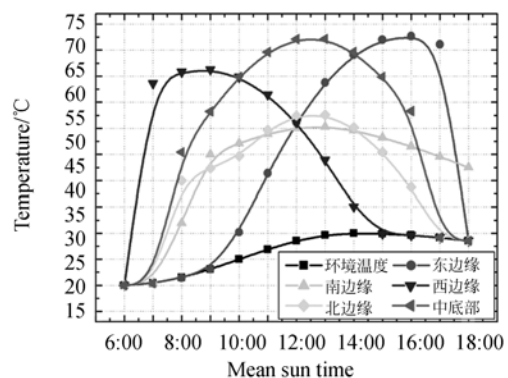


图 10 反射面特征点温变曲线

Fig.10 Temperature curves of reflector keypoints

反射面反射率为 0.2 时不同时间 FAST 温度分布结果云图如图 11 所示,可以看出,反射面上的高温区随时间的变化而逐渐偏移。

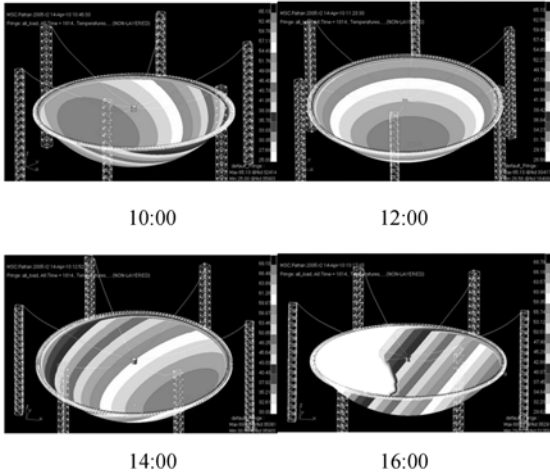


图 11 FAST 温度分布云图

Fig. 11 Temperature distribute of FAST

#### 5.4.2 馈源舱温度分布

馈源舱最高温度变化曲线及主要部件温变曲线如图 12、图 13 所示。可以看出,在 10 : 15 时开始形成“太阳灶”,馈源舱的最高温度逐渐升高,最后在中午 12 : 00 达到最高的 47.56 °C(由于热惯性,最高温度应在 12 : 00 后),而后逐渐下降,在下午 13 : 45 时,太阳灶问题消失,曲线又趋于平缓,而太阳逐渐偏西,馈源舱接收到的热流逐渐增大,所以温变曲线出现上扬趋势;馈源舱中的主要部件温度与防护罩的温度曲线有微小差异。馈源舱温度分布如图 14 所示。

对于馈源舱温变曲线来说,在正午 12 : 00 时的馈源舱最高温度应有热惯性,也就是说,在正午 12 : 00 之后的曲线峰应该较宽或峰值后移,曲线图中体现不明显是因为正午 12 : 00 附近取点较少所致;馈源舱温变曲线中,在上午馈源舱的最高温度从高缓慢减低,这是由于馈源舱防护罩的模型结构以及接收太阳辐射热流的大小决定的,也就是说,早上光线是直射馈源舱的侧面,馈源舱接受到的热流就大,而太阳高度角逐渐增大时,太阳辐照馈源舱逐渐由直射变为斜射而导致馈源舱接收到的热流减少;同理,下午的温度缓慢变高也是由此原因。而馈源舱中的主要部件温变曲线与防护罩温变曲线有所不同。

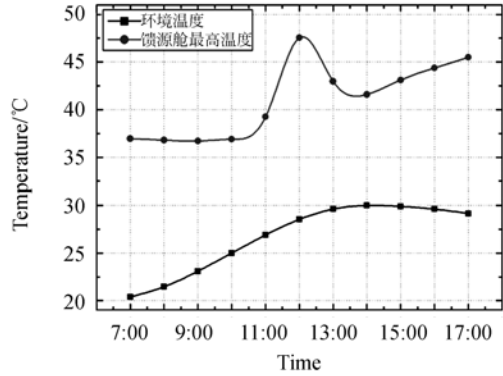


图 12 馈源舱最高温度曲线

Fig. 12 Curves of the highest temperature for feed cabin

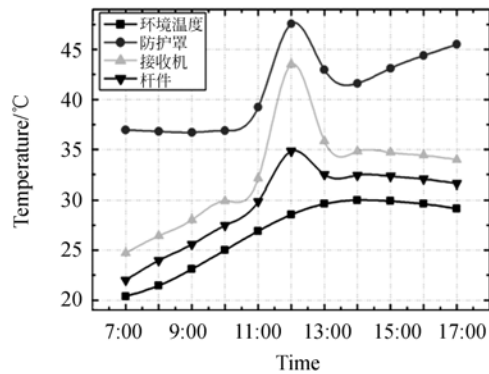


图 13 馈源舱主要部件最高温度曲线

Fig. 13 Curves of the highest temperature for main parts of feed cabin

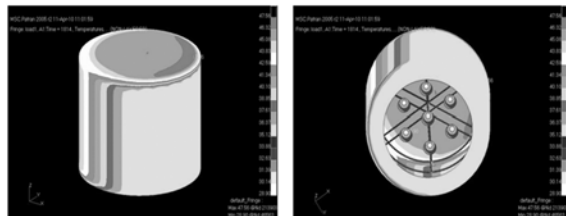


图 14 馈源舱温度分布云图(12:00)

Fig. 14 Temperature distribute of feed cabin

## 6 结 论

根据 FAST 工程的设计及使用需求,进行了详细的太阳辐照 FAST 温度场研究,用于为 FAST 相关设计与望远镜使用提供参考,主要结论为:(1)对于基态反射面,6 月 22 日能形成太阳灶的时间域为 10 : 15~13 : 45;(2)反射面反射率在 0.2 时,反射面最高温度可达到 68.34 °C,时

间在14:00,此时与反射面最低温度 $35.03\text{ }^{\circ}\text{C}$ 有 $33.31\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的温差;(3)正午形成太阳灶,反射面反射率为0.2时,馈源舱最高温度为 $47.56\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;(4)馈源舱温度分布不仅与反射面反射率、孔隙率有关,也与防护罩的反射率、模型结构、微波入口直径、结构材料以及环境温度等因素有关;反射面的温度分布不仅与反射率有关,也与日地相对位置、环境温度等因素有关。

根据FAST温度场研究结果,针对弱化FAST太阳灶问题为相关设计及使用提出如下建议:(1)降低反射面的反射率;(2)提高反射面的孔隙率;(3)提高防护罩的反射率;(4)减小馈源舱防护罩的微波入口直径;(5)选用热性能优异的防护罩材料;(6)反射面表面细部结构尽量粗糙;等等。

对FAST温度场的研究结果及结论,不仅明确了反射面反射率及孔隙率、防护罩反射率及其

结构等设计目标及方向,更重要的是弱化了FAST“太阳灶”问题,保护了馈源舱内仪器与电线电缆,同时为馈源舱仪器及材料温度性能设计提供了重要参考,也为馈源舱内相关降噪设计提供了参考,初步掌握了FAST在太阳辐照下的温度特性。

FAST工程目前处于设计及前期建设阶段,相关温度场试验条件并不具备,在后续工作中,会对密云30 m模型与FAST工程建成后进行温度场试验,届时会给出详实的试验结果。

## 7 致 谢

本课题的开展感谢国家自然科学基金及国家天文台青年人才基金的支持;本工作也感谢南仁东、杨世模、李葭、吴明长等人的意见及建议。

## 参考文献:

- [1] 吴明长,杨世模,陈志远.与白光望远镜的光机热一体化分析[J].红外与激光工程,2009,38(6):1072-1078.  
WU M CH, YANG S M, CHEN ZH Y. Integrated optical-structural-thermal analysis of the Ha and white light telescope [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009,38(6):1072-1078. (in Chinese)
- [2] 吴明长,杨世模,陈志远.和白光望远镜的热光学试验[J].光学精密工程,2009,17(7):1520-1527.  
WU M CH, YANG S M, CHEN ZH Y. Thermo-optical testing of Ha and white telescope [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009,17(7):1520-1527. (in Chinese)
- [3] 吴清文,卢泽生,卢铿,等.空间光学遥感器热分析[J].光学精密工程,2002,10(2):205-208.  
WU Q W, LU Z S, LU E, et al.. Thermal analysis for a space optical remote sensor [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2002,10(2):205-208. (in Chinese)
- [4] 南仁东.FAST—500米口径球面射电望远镜[J].中国国家天文,2009,11:16-23.  
NAN R D. 500 meter aperture spherical telescope [J]. *Chinese National Astronomy*, 2009,11:16-23. (in Chinese)
- [5] 路英杰,任革学.大射电望远镜FAST整体变形索网反射面仿真研究[J].工程力学,2007,24(10):165-170.  
LU Y J, REN G X. Simulation of the cable mesh reflector for the large radio telescope fast[J]. *Engineering Mechanics*, 2007,24(10):165-170. (in Chinese)
- [6] 朱丽春.FAST主反射面自动控制系统[J].科学技术与工程,2006,6(13):1890-1895.  
ZHU L C. The arithmetic control system of active reflector for FAST [J]. *Science Technology and Engineering*, 2006,6(13):1890-1895. (in Chinese)
- [7] 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 Z. 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)
- [8] 王绍武.太阳常数[J].气候变化研究进展,2009,5(1):61-62.  
WANG S W. SUN Constant [J]. *Advances in Climate Change Research*, 2009,5(1):61-62. (in Chinese)
- [9] 陈仁升,康尔泗,李新.任意地形实际天气条件下小时入射短波辐射模型[J].中国沙漠,2006,6(5):773-779.  
CHEN R SH, KANG E S, LI X. Hourly incident solar radiation model under actual weather and terrain conditions: a case study in heihe river basin

[J]. *Journal of Desert Research*, 2006, 6(5): 773-779. (in Chinese)

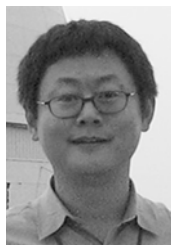
[10] 王步, 华毅杰, 黄鼎业. 大吨位梁太阳辐射温度效应瞬态分析[J]. *结构工程师*, 2002, (4): 29-33.

WANG B, HUA Y J, HUANG D Y. Transient analysis for solar radiation temperature effect on large-tonnage beam [J]. *Structural Engineers*, 2002, (4): 29-33. (in Chinese)

#### 作者简介:



宋立强(1975—),男,吉林长春人,博士,助理研究员,1997年于长春工业大学获得学士学位,2005年于云南师范大学获得硕士学位,2009年于中国科学院国家天文台获得博士学位,主要从事天文仪器分析、设计及试验的研究。E-mail: slqzhy@sina.com



郭永卫(1971—),男,河北人,博士,副研究员,1993年于北京航空航天大学获工学学士学位,2006年于中国科学院国家天文台获理学博士学位,2008年为云南天文台博士后,主要从事天文技术与方法、机械设计 & 理论等方面的研究。E-mail: gyw@bao.ac.cn



王启明(1961—),男,辽宁沈阳人,博士,研究员,1982年于吉林工业大学获工学学士学位,1995年、2000年于东北大学分别获得硕士和博士学位,2002年为清华大学博士后,主要从事天文技术与方法、机械制造、串并联机器人、机械结构动态特性分析等方面的研究。E-mail: qmwang@bao.ac.cn

#### ● 下期预告

## 基于条纹投影法控制薄膜反射镜的成形

张 鹏<sup>1,2</sup>, 张 元<sup>1</sup>, 金 光<sup>1</sup>, 钟 兴<sup>1</sup>

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

为了进一步研究空间薄膜反射镜的成形控制方法,需要反射镜的面形测量值作为回馈和验证。国内外现有薄膜反射镜面形检测的方法存在动态测量不便,测量面形单一的局限性,为解决这些问题,本文提出了基于正弦条纹投影的面形测量方法。基于此方法搭建了测量平台,分析推导表明,该方法测量不确定度 $<0.385\ \mu\text{m}$ ,平台的测量不确定度 $<4.25\ \mu\text{m}$ 。在此平台上对标准球面镜进行了测量,验证了此平台的适用性。最后在此平台上对 $\Phi 300\ \text{mm}$ 静电拉伸薄膜反射镜优化控制下的面形进行了多次测量,得到的中心矢高测量值与理论基本一致,优化后最佳镜面面形 RMS 值为 $5\ \mu\text{m}$ ,PV 值为 $39\ \mu\text{m}$ ,RMS 值相对于优化前减少了 $34.17\%$ ,PV 值减少了 $26.4\%$ 。结果表明,所搭建的基于正弦条纹投影方法的测量平台满足了现阶段薄膜反射镜面形测量的需要,可以快速有效测量面形。