

FAST“太阳灶”问题及温度场研究^①

宋立强^② 王启明 郭永卫

(中国科学院国家天文台 北京 100012)

摘 要 进行了太阳辐照 500 米口径球面射电望远镜(FAST)的“太阳灶”问题及温度场的研究。研究表明,FAST“太阳灶”问题不仅与反射面反射率、孔隙率、时间点有关,也与馈源舱体的反射率、材料、微波入口直径等因素有关;反射面反射率为 0.2、孔隙率 0.4 时,馈源舱最高温度为 47.56℃;反射面最高温度达到 68.34℃,时间在 14:00。也计算出了形成典型“太阳灶”的时间域,指出,望远镜指向与太阳照射方向之间的夹角大于 3.1°时“太阳灶”问题不明显。该研究为 FAST 的设计和使用提供了弱化、规避、消除“太阳灶”影响的数据和依据。

关键词 500 米口径球面射电望远镜(FAST), 太阳灶, 馈源舱, 反射面, 温度分布

0 引 言

500 米口径球面射电望远镜(five-hundred-meter aperture spherical radio telescope, FAST)是我国正在贵州省建造的重大科技基础设施建设项目,建成后它将成为世界上最大的单口径天文望远镜,可用于研究或解决诸多天文前沿问题^[1-3]。众所周知,天文仪器的热问题一直是专家们研究的重点之一,建造 FAST 时必须考虑其热问题。FAST 可形成瞬时抛物面全天候观测,在白天其反射面及馈源舱防护罩会受太阳辐照而引起温变,更重要的是光能会由反射面反射汇聚辐照馈源舱而形成“太阳灶”,从而导致馈源舱温变幅度增大。当温度达到一定值时可能会破坏舱内仪器、电线电缆等,从而影响望远镜的使用,甚至会造成望远镜的部分损毁,造成严重后果。因此,进行 FAST“太阳灶”问题及温度场研究,掌握其温度特性,以便从相关设计及使用上采取消除或弱化“太阳灶”问题的技术措施,对望远镜工程的建造及其将来的使用来说都具有重要科学意义和现实意义^[4-7]。国内外巨型射电望远镜的温度场研究较少,其“太阳灶”问题研究则更少,因此从一定意义上讲,FAST“太阳灶”问题及温度场研究是一项开创性工作,它将为大口径天文望远镜的同类问题

的解决提供技术路线。

1 FAST 工程及相关参数

FAST 台址设在贵州黔南自治州平塘县境内,目前项目处于台址开挖、结构设计及试验阶段。FAST 主要参数^[1]如下:口径为 500m,反射面曲率半径为 300m;形成瞬时抛物面的照明区口径为 300m,焦比 $f/D = 0.467$;台址经度为 106.85583°,纬度为北纬 25.64722°,靠近北回归线,望远镜指向精度为 8",天空覆盖的天顶角为 40°。FAST 的结构示意图和光学图分别见图 1 和图 2^[7]。

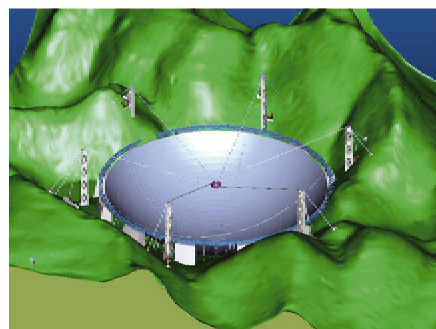


图 1 FAST 结构示意图

① 国家自然科学基金(10878017)和中国科学院国家天文台青年人才基金(0835032002)资助项目。

② 男,1975 年生,博士;研究方向:天文仪器分析与试验研究;联系人,E-mail: slqzhy@sina.com
(收稿日期:2010-12-21)

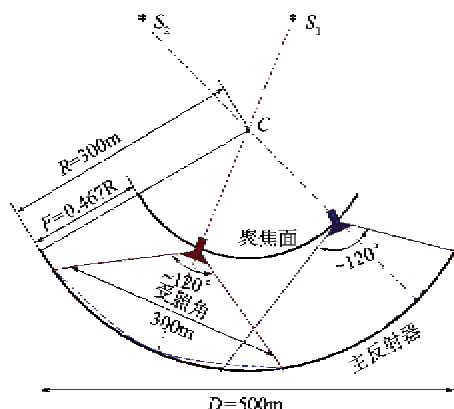


图2 FAST 微波光学图

2 太阳相关参数及相互关系

太阳相关参数较多,有太阳常数、太阳高度角、方位角等,其相互数学关系也是准确计算台址热流及模拟温度场的主要因素之一。

2.1 太阳常数

太阳常数^[8]是进入地球大气的太阳辐射在单位面积内的总量,也是单位时间内投射到地球大气层上界垂直于太阳射线的单位面积上的太阳辐射能,其在一年内的太阳常数是变化的,准确计算出太阳常数对于精确掌握 FAST 的温度特性有着重要意义。太阳常数 H_0 由式

$$H_0 = 1367 \times [1 + 0.033 \cdot \cos(360^\circ \cdot N/365)] \quad (1)$$

表示,其中 N 为一年中的日序。

2.2 太阳高度角

太阳高度角是地球上某个地点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能的最重要因素,也是准确获得 FAST 台址热流的主要参数之一,其与台址纬度、太阳赤纬角及时角有关,用式

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

表示。其中 h_s 为太阳高度角($^\circ$), φ 为地理纬度($^\circ$), δ 为太阳赤纬角($^\circ$), Ω 为时角($^\circ$)。

2.3 太阳方位角

指太阳光线在地平面上的投影与当地子午线的夹角,即太阳所在的方位,用式

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

表示,其中 A_s 为太阳方位角($^\circ$), φ 为地理纬度($^\circ$);

δ 为太阳赤纬角($^\circ$); h_s 为太阳高度角($^\circ$)。

2.4 时角

时角 Ω 为单位时间地球自转的角度,用式

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

表示, t 为一天内的时间(24 时制)。

3 大气对太阳辐照的影响

进入大气层后,太阳辐射会受大气影响而衰减,详细计算大气层对太阳辐射的影响是准确研究 FAST 温度场的重要因素之一^[9,10]。太阳辐射可分为直接太阳辐射和散射太阳辐射。太阳辐射一部分通过大气直接到达地面,此部分是直接太阳辐射,另一部分被大气中的分子、微尘等吸收、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,到达地面部分为散射太阳辐射。本研究解析出了太阳辐射照度达到 FAST 台址的强度,建立了台址太阳辐射的数学模型,并通过编程计算得到了台址太阳辐射热流组成饼图(如图 3 所示),从中看出,辐射能量中有 21.4% 被散射或返回空中,台址辐射能量占太阳常数的 78.6%。

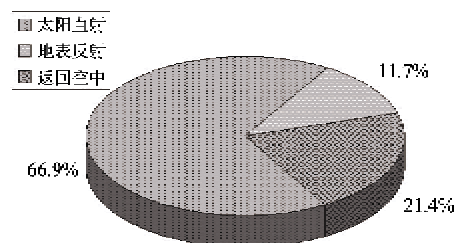


图3 台址太阳辐射热流组成饼图

4 FAST 太阳灶问题解析计算

FAST “太阳灶”问题是温度场研究的重点,其实质是馈源舱的热源计算与温度分布仿真及试验验证。馈源舱接收到的热流由 3 部分组成:(1)太阳直接辐照馈源舱的热流;(2)反射面漫反射辐照馈源舱的热流;(3)由于“太阳灶”问题辐照馈源舱的热流。在 3 种热流成分中,太阳灶问题所产生的热流是计算的重点,建立数学模型并解析在任一时刻馈源舱处的热流值,是解决 FAST “太阳灶”问题的有效方法之一。

阳光入射光束的方向向量为 (η, χ, δ) , 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

表示为

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

反射面上点法线的方向向量表示为

$$\begin{aligned} n &= (F_x(x_0,y_0,z_0), F_y(x_0,y_0,z_0), F_z(x_0,y_0,z_0)) \\ &= (2x_0, 2y_0, 2z_0) \end{aligned} \tag{6}$$

过反射面上点法线方程 n 表示为

$$\frac{x-x_0}{x_0} = \frac{y-y_0}{y_0} = \frac{z-z_0}{z_0} \tag{7}$$

求出反射光线,可用下式表示:

$$\frac{x-x_0}{x_2-x_0} = \frac{y-y_0}{y_2-y_0} = \frac{z-z_0}{z_2-z_0} \tag{8}$$

馈源舱防护罩中心坐标为 (a,b,c) , 其数学方程可用下式表示:

$$(x-a)^2 + (y-b)^2 + (z-c)^2 \leq r^2 \tag{9}$$

反射面上能够辐照馈源舱的区域可用方程组

$$\begin{cases} \frac{x_3-x_0}{x_2-x_0} = \frac{y_3-y_0}{y_2-y_0} = \frac{z_3-z_0}{z_2-z_0} \\ (x_3-a)^2 + (y_3-b)^2 + (z_3-c)^2 \leq r^2 \\ x_0^2 + y_0^2 + z_0^2 = R^2 \\ -300 \leq y_0 \leq -160, x_0^2 + z_0^2 \leq 250^2 \end{cases} \tag{10}$$

表示。

选择年内太阳高度角最大的夏至(6月22日)作为 FAST 温度场的研究特征日(此工况最为恶劣),通过馈源舱在焦面最低点位置时的连续仿真研究发现,FAST“太阳灶”问题并不是时时存在,而是分时段存在,在 10:15-13:45 这个时间段内,有“太阳灶”问题,而此时段之外则没有“太阳灶”问题,如表 1 所示。而对于年跨度而言,也有一时间段有“太阳灶”问题,而另一时间段则没有“太阳灶”问题。反射面的有效区域能够辐照馈源舱的仿真图如图 4 所示。

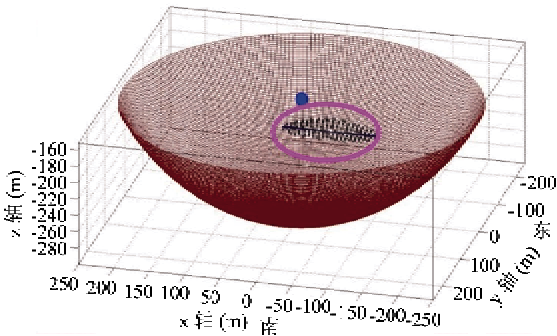


图 4 反射面上辐照馈源舱的区域仿真

表 1 FAST“太阳灶”的时间域

	日跨度	年跨度
太阳灶时域	10:15-13:45	4月2日-9月10日
累计	3.5 小时	161 天

5 台址气温日变化过程

FAST 台址环境温度是变化的,这也是影响 FAST 温度分布的重要因素之一。晴天环境气温日变化过程具有一定规律性,可近似用公式

$$\begin{cases} T_a(t) = T_{av} + T_{am} \sin \frac{(h+18)\pi}{16} & (0 \leq h < 6) \\ T_a(t) = T_{av} + T_{am} \sin \frac{(h-10)\pi}{8} & (6 \leq h < 14) \\ T_a(t) = T_{av} + T_{am} \sin \frac{(h-6)\pi}{16} & (14 \leq h < 24) \end{cases} \tag{11}$$

表示。FAST 温度分布仿真中需要环境温度边界。

式中: $T_{av} = \frac{1}{2}(T_{a\max} + T_{a\min})$ 为日平均气温; $T_{am} = \frac{1}{2}(T_{a\max} - T_{a\min})$ 为日气温变化幅度; $T_{a\max}, T_{a\min}$ 分别为日最高气温和最低气温; h 为一天内的任意时刻 ($0 \leq h < 24$)。

以日内晴朗无云时最高气温为 30℃、最低气温为 20℃ 计算气温变化,得到台址气温日变化过程如图 5 所示,基本遵循正弦曲线变化,上午气温逐渐升高,日内最高气温时间在 14:00,而后气温逐渐下降。

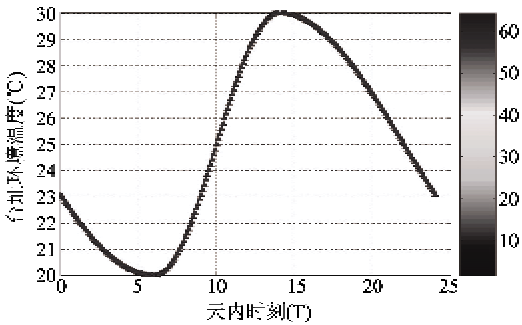


图 5 FAST 台址气温日变化过程曲线

6 FAST 热模型建立及地貌挡光研究

准确建立 FAST 热模型对于研究其温度场有着重要意义,台址地貌对 FAST 会有阳光遮挡,也会影响 FAST 的温度分布,在模型中引入台址地形数据,用以研究台址地貌对 FAST 的阳光遮挡问题。FAST 热模型及地形数据如图 6 所示。

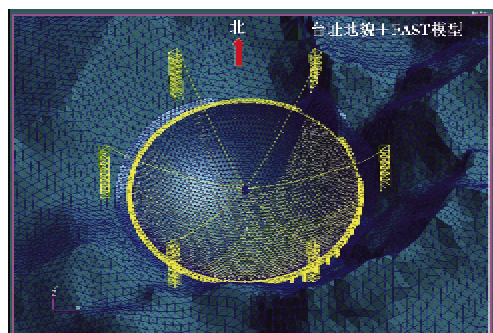


图 6 FAST 与地貌模型

通过对 6 月 22 日当天的不同时间点阳光照射 FAST 及周边地貌进行仿真,不同时间阳光照射 FAST 的方向如图 7 所示,台址地貌对反射面的阳光遮挡示意如图 8 所示。

从上午的 9:30 到下午的 15:30 这个区间内,台址地貌没有遮挡阳光照射 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 6:30 之前及 18:00 之后的太阳高于地平线时台址地貌对 FAST 反射面形成完全遮挡。

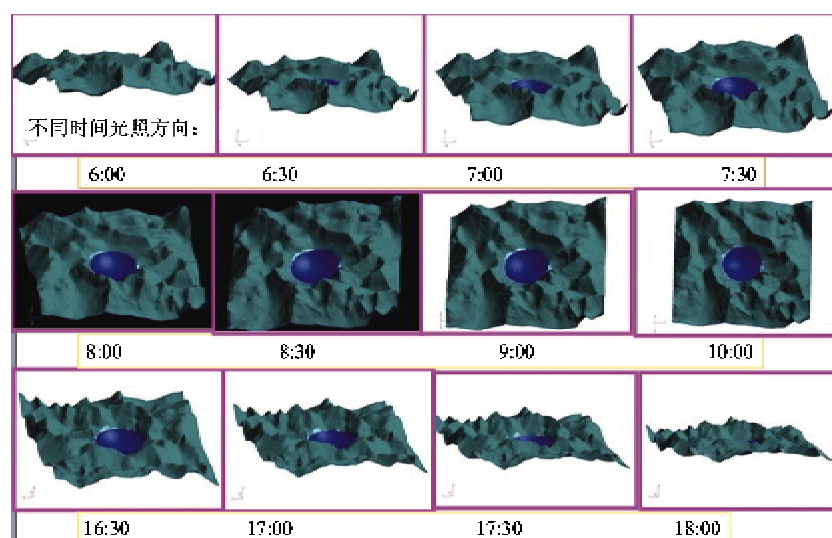


图 7 不同时间的光照方向

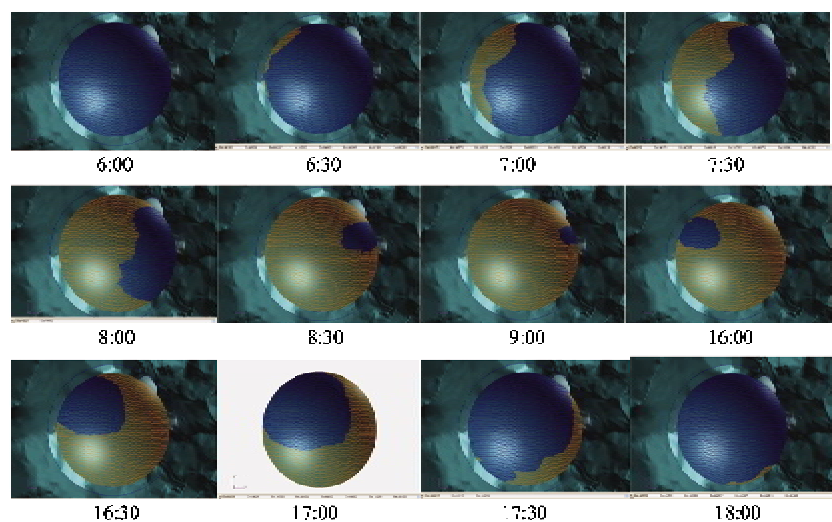


图 8 台址地貌对反射面遮挡效果

7 FAST“太阳灶”及温度场研究

7.1 馈源舱温度分布

FAST 馈源舱温度分布是其太阳灶问题的主要

体现形式,也是本文研究的重点。FAST 温度分布的计算工况如表 2 所示。经过仿真计算,在 10:15 时开始形成 FAST“太阳灶”,馈源舱温度逐渐升高,在中午 12:00 之后达到最高的 47.56℃(由于热惯性,

表 2 FAST 温度场模拟工况条件表

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	1.2mm

最高温度应在 12:00 偏后一些),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多,所以温变曲线出现缓慢上扬。馈源舱最高温度及主要部件温变曲线如图 9 所示,温度分布云图如图 10 所示。

同时也进行了反射面反射率为 0.4、0.6、0.8 时馈源舱的温度分布仿真计算,其计算结果如图 11 所示,可以看出,馈源舱的整体温度随着反射面反射率降低而下降。

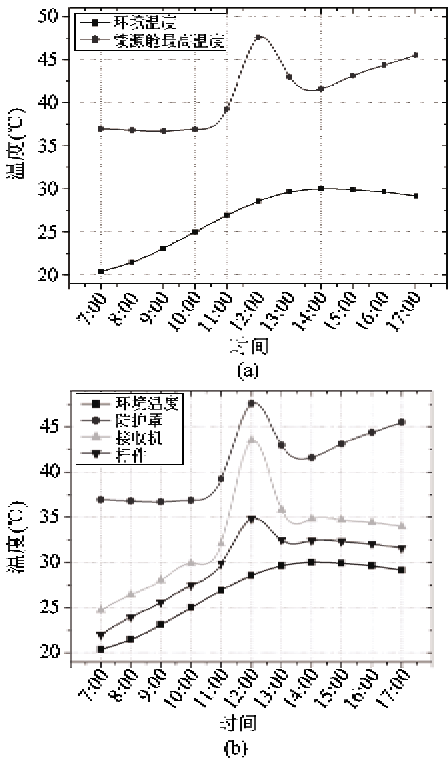


图 9 馈源舱最高温度及主要部件温变曲线

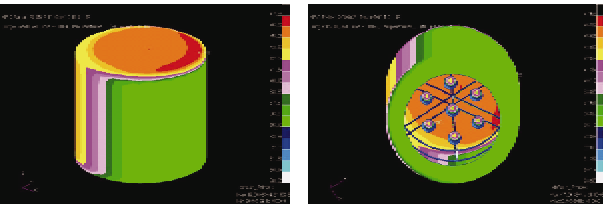


图 10 馈源舱温度分布云图(12:00)

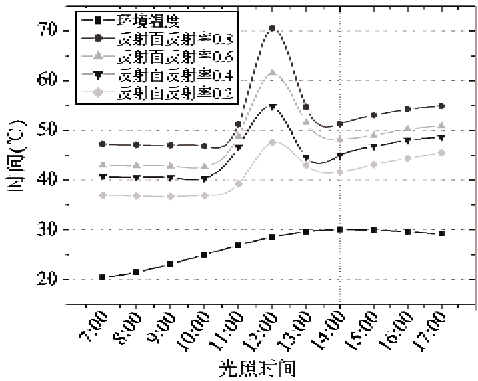


图 11 馈源舱最高温度随反射面反射率变化曲线

7.2 反射面温度分布

经过连续的仿真模拟,FAST 反射面温度分布曲线如图 12 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,而在 14:00 时反射面最高温度达到最高的 68.34℃,而后逐渐下降。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。

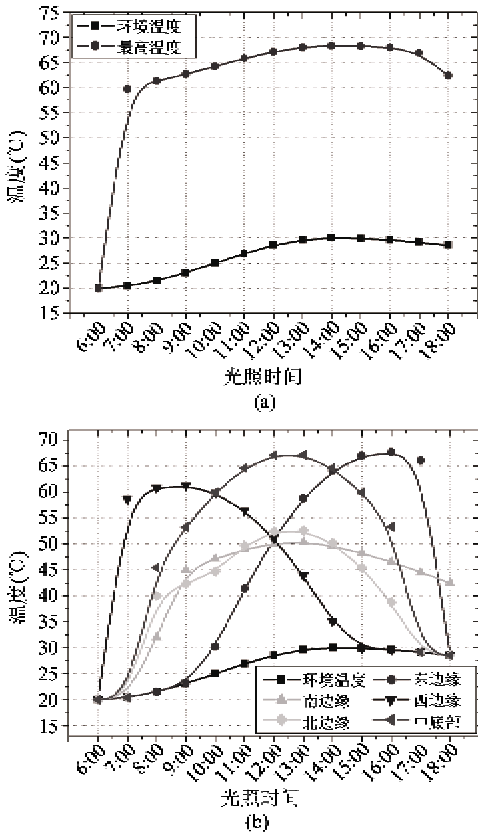


图 12 反射面最高温度及特征点温变曲线

此工况下 FAST 温度分布结果如图 13 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。

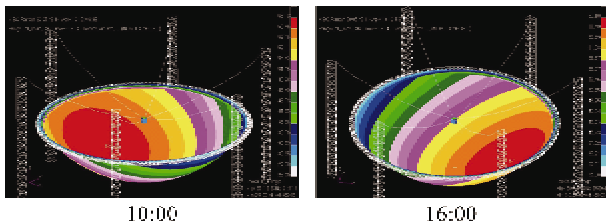


图 13 FAST 温度分布云图

由于 FAST 反射面及其反射率没有确定,所以也进行了反射面反射率为 0.4、0.6、0.8 的温度分布模拟计算,其计算结果见表 3 及图 14 所示。可以看出,反射面反射率越高,则反射面的整体温度越低,而反射面反射率越低,其吸收的热量越多,所以反射面温度越高。

表 3 不同反射率的反射面温度

反射率	环境 温度(℃)	南边缘 (℃)	北边缘 (℃)	中间 底部(℃)	最高 温度(℃)
0.2	28.54	50.04	52.42	67.13	67.13
0.4	28.54	44.88	46.71	58.17	58.18
0.6	28.54	39.58	40.84	48.78	48.78
0.8	28.54	35.51	36.31	41.39	41.39

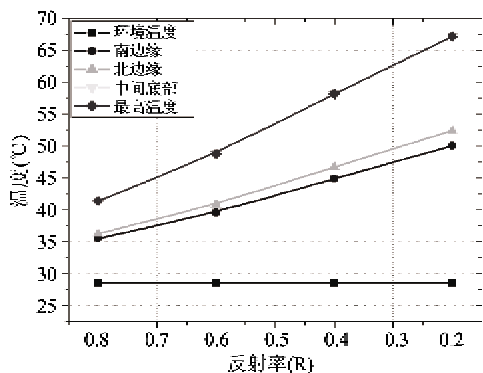


图 14 不同反射率的反射面特征点温度变曲线

7.3 FAST 对源观测工况

为了模拟反射面为球面或局部抛物面的温度分布,分别模拟了当反射面由球面变位至抛物面时其温度分布如图 15 所示,可以看出,两种工况下反射面的温度分布稍有不同,但差别很小。

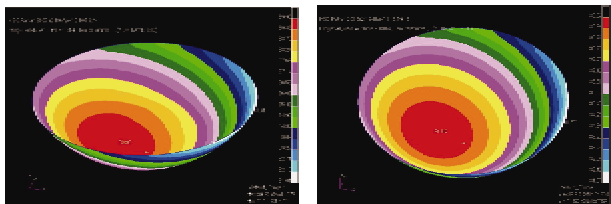


图 15 两种工况下反射面温度分布(11:00)

通过计算得到,当 FAST 形成抛物面对源观测时,望远镜的观测指向与太阳照射方向之间的夹角(锐角)为 3.1° 时,是有无“太阳灶”问题的边界角度,也就是说,当望远镜的观测指向与太阳照射方向之间夹角小于 3.1° 时,就有典型的“太阳灶”问题,反之,就没有“太阳灶”问题。也就是说,观测时,抛物面观测方向与太阳照射方向的夹角小于 3.1° 度时,馈源舱所在位置就是“危险区域”。

7.4 FAST 温度场试验说明

FAST 工程刚刚开工,2016 年竣工,目前尚不具备温度场试验条件,待工程建成后还需进行温度场试验,届时再给出试验结果。

7.5 FAST 相关设计建议

根据 FAST 温度场研究结果,为弱化或消除 FAST“太阳灶”问题对望远镜带来的不利影响,对相关设计提出如下建议:(1)适当降低反射面反射率;(2)提高反射面孔隙率;(3)提高防护罩反射率;(4)减小馈源舱防护罩微波入口直径;(5)选用防护罩热性能优异的材料;(6)望远镜观测指向与太阳照射方向之间夹角应大于 3.1° ;(7)反射面细部结构尽量粗糙。

8 结 论

本文对 FAST 太阳灶问题及温度场进行了研究,也进行了详细的仿真研究,取得了具有一定现实意义及参考价值的研究结果,主要结论如下:

(1) 6 月 22 日当天的球面反射面,能形成太阳灶的时间域为 10:15 – 13:45,其他时间无“太阳灶”问题。

(2) 望远镜的观测指向与太阳照射方向之间的夹角大于 3.1° 时,就无明显“太阳灶”问题。

(3) 反射面反射率为 0.2 时,正午馈源舱最高温度为 47.56°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。

本研究不仅掌握了 FAST 在日照下的温度分布,为馈源舱等结构设计提供参考,而且也弱化或消除了 FAST“太阳灶”问题,保护了馈源舱内仪器设备,消除了其对望远镜的不利影响,具有一定的现实意义和参考价值。

参考文献

- [1] 陈志华,关富玲. 星载抛物面天线反射器太阳辐射热流分析. 工程设计学报, 2007, 14(2):148-152
- [2] 冯刚,安翔,张铎. 空间站大面积太阳翼热分析. 强度与环境, 2001, (1):18-23
- [3] 陈志华,关富玲. 星载抛物面天线反射器瞬态热分析. 固体力学学报, 2008, 29(3):272-276
- [4] 南仁东. FAST—500 米口径球面射电望远镜. 中国天文学, 2009, 11:16-23
- [5] 王宏,郭彦林,任革学等. 500m 口径球面射电望远镜馈源支撑结构体系试验研究与理论分析. 建筑结构学报, 2002, 23(3):63-68
- [6] 朱丽春. FAST 主反射面自动控制系统. 科学技术与工程, 2006, 6(13):1890-1895
- [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. 土木工程学报, 2008, 41(11):71-77
- [8] 王绍武. 太阳常数. 气候变化研究进展, 2009, 5(1):61-62
- [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. 中国沙漠, 2006, 6(5):773-779
- [10] 刑玉明,崔海亭,袁修干. 空间站太阳能吸热器相变蓄热系统瞬态热分析. 太阳能学报, 2003, 24(2):193-196

Study of FAST's “solar cooker” problem and temperature field

Song Liqiang, Wang Qiming, Guo Yongwei

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

Abstract

The temperature distribution and the “solar cooker” problem of the five-hundred-meter aperture spherical radio telescope (FAST) were studied in detail. The results show that the “solar cooker” problem of the FAST is not only relevant to the reflector reflectivity, porosity rate and time point, but also to the reflectivity of the feed cabin, materials, diameter of the microwave inlet and other factors. When the reflector reflectivity is 0.2 and the porosity rate is 0.4, the maximum temperature of the feed cabin is 47.56℃. At the time of 14:00, the temperature of reflector surface reaches the maximum of 68.34℃. When the angle between the direction of sun light and that of the telescope pointing is more than 3.1°, the “solar cooker” problem is not apparent. This work is of practical significance because it provided useful data and scientific bases for design and use of the FAST so as to weak, avoid, and eliminate the harmful effects of the “solar cooker”.

Key words: five-hundred-meter aperture spherical radio telescope (FAST), solar cooker, feed cabin, reflector, temperature distribution