

文章编号 1004-924X(2015)07-2051-09

## 500 m 口径球面射电望远镜瞬时抛物面 拟合精度的预估与改善

薛建兴\*, 王启明, 古学东, 赵清, 甘恒谦  
(中国科学院 国家天文台, 北京 100012)

**摘要:**依据 500 m 口径球面射电望远镜(FAST)主动反射面工作原理及相关结构尺寸,基于反射面单元动态面形精度分析研究了 FAST 瞬时抛物面的拟合精度。首先,以反射面单元为研究对象,自节点开始推导考虑了机构运动的反射面单元动态面形精度计算方法。然后,提取不同区域 19 块反射面单元的各自 9 种初始面形工况,给出了分析算例。最后,基于单元动态精度特性,提出瞬时抛物面机械本体拟合精度及考虑馈源照明函数的半光程差拟合精度预估方法,并给出 2 种改善措施,即扩大可控区至 300 m 抛物面外一层节点靶标,及抛物面周围节点靶标向球心、中心反向各自偏移 4 mm。结果表明:反射面单元初始面形应优选面形精度 RMS 为 2 mm 的波浪式面板。改进控制策略后机械本体拟合精度提高至 RMS 为 3.938 mm,优于 RMS 为 5 mm 的设计指标,此时半光程差拟合精度 RMS 为 0.629 mm。该项研究对确定反射面单元初始面形及调节瞬时抛物面拟合精度很有意义。

**关键词:**500 m 口径球面射电望远镜;反射面单元;初始面形;动态面形;面形精度;瞬时抛物面;拟合精度

**中图分类号:**TH751 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20152307.2051

## Estimation and improvement for fitting accuracy of instantaneous parabolic reflector in FAST

XUE Jian-xing\*, WANG Qi-ming, GU Xue-dong, ZHAO Qing, GAN Heng-qian

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

\* Corresponding author, E-mail: j.x.xue@bao.ac.cn

**Abstract:** According to the working principle of the active reflector surface in Five-hundred-meter Aperture Spherical radio Telescope (FAST) and its structure dimension, the fitting accuracy of instantaneous parabolic reflector for the FAST was researched based on analysis of the dynamic surface accuracy of reflector element. Firstly, a reflector element was selected as research object, its calculating formulas taking the mechanism movement into account were deduced from a joint to solve dynamic surface accuracy. Then, by taking 19 reflector elements from different regions for examples, the characteristics under 9 initial surface types were analyzed correspondingly. Finally, based on the dynamic characteristics of reflector element, the fitting accuracy estimation methods of instantaneous parabolic surface were proposed, including mechanical surface precision and semi-optical path difference surface accuracy with feeding lighting function. Furthermore, two improved measures for surface accuracy

收稿日期:2015-01-22;修订日期:2015-03-21.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 11173035)

were given, and they were enlarging joint controlling area to next joint target ring of parabolic surface border, and offsetting the outer ring joint targets by 4 mm to the sphere center and also moving center targets by 4 mm to reserve direction. Results demonstrate that the panel with surface accuracy RMS 2 mm is a preferential selection for initial surface type of reflector element. After changing control strategy, the mechanical surface accuracy increases to RMS 3.938 mm, better than the index RMS 5 mm. Meanwhile, the semi-optical path difference surface accuracy reaches to RMS 0.629 mm. This research has important significance for ensuring reflector element initial surface type and adjusting fitting accuracy of the instantaneous parabolic reflector.

**Key words:** Five-hundred-meter Aperture Spherical radio Telescope (FAST); reflector element; initial surface; dynamic surface; surface accuracy; instantaneous parabolic reflector; fitting accuracy

## 1 引言

500 m 口径球面射电望远镜 (FAST) 是我国重大科技基础设施建设项目, 建成后将成为国际上最大、最灵敏的单口径射电天文望远镜<sup>[1-2]</sup>。反射面面形精度是衡量望远镜综合性能的重要指标之一, 直接影响望远镜的工作效率。通常以反射面实际坐标与理想抛物面拟合误差 (Root Mean Square, RMS) 来衡量反射面面形精度。FAST 反射面单元初始面形精度  $\text{RMS} \leq 2 \text{ mm}$ , 300 m 瞬时抛物面拟合精度  $\text{RMS} \leq 5 \text{ mm}$ , 其实现方法有别于传统望远镜<sup>[3-5]</sup>, 具有如下特点:

首先, 所有反射面单元初始面形精度 RMS 的调节基准均为球面。实际运行时, 机构运动会使反射面单元与该基准发生改变, 同一球面反射面单元将拟合瞬时抛物面不同部位, 而抛物面不同部位的曲率半径并不相同<sup>[6]</sup>。因此, 反射面单元所拟合的瞬时抛物面的面形精度 RMS 是实时变化的。

其次, 虽然反射面单元所拟合的瞬时抛物面面形精度 RMS 是不断变化的, 但并没有直接测量反射面单元面板靶标, 仅可测量节点靶标位置, 且未实现实时测量, 即使可由节点靶标推算反射面单元拟合的瞬时抛物面面形精度 RMS, 但并没有相关研究, 这将不利于瞬时抛物面拟合精度调节。

本文忽略重力、温度等因素, 考虑机构运动, 利用球面拟合抛物面所导致的反射面单元面板靶标的实际坐标与理想瞬时抛物面拟合误差 RMS

随时间动态变化的规律, 定义该特性为反射面单元动态面形精度 RMS 问题, 并推导计算方法, 以研究其变化规律及其与瞬时抛物面拟合精度的关系, 给出了瞬时抛物面拟合精度预估方法及改善措施。本文方法将为反射面单元初始面形确定、瞬时抛物面拟合精度调节提供参考。

## 2 结构简介

FAST 利用贵州喀斯特洼坑作为台址, 在洼坑内铺设 500 m 球冠状反射面, 通过主动控制形成抛物面以汇聚电磁波, 采用轻型钢索拖动馈源平台实现望远镜的指向跟踪<sup>[1]</sup>, 其建成效果及工作原理如图 1 所示。其中: 主动反射面工作原理见图 1(b): 即借助圈梁编织 6 670 根长约 11 m 的钢索, 形成口径为 500 m 的球冠状索网, 将约 4 300 块三角形反射面单元铺设在 2 225 个节点上。观测期间, 通过促动器、下拉索和节点调节反射面单元径向位置, 以便在 500 m 口径基准球面反射面背景上, 形成不断移动的 300 m 口径瞬时抛物面, 实现天体观测。

## 3 反射面单元动态面形精度计算方法

瞬时抛物面经过反射面单元时, 在支撑机构运动的情况下, 计算面板靶标实际及理论的运动轨迹, 依据二者的拟合误差来分析反射面单元动态面形精度变化规律。步骤为: (1) 分析反射面单元及其支撑机构; (2) 推导基准球面时三节点靶标到单元面板靶标的计算公式; (3) 解算观测期间三

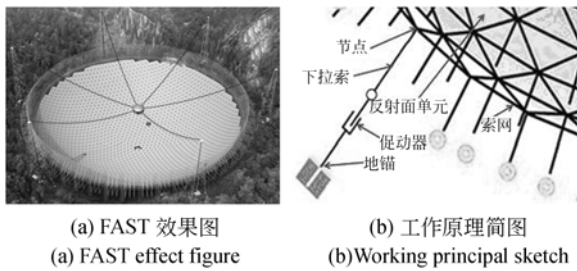


图 1 FAST 效果图与工作原理简图

Fig. 1 FAST effect figure and working theory sketch

节点靶标的运动轨迹;(4)求解面板靶标的实际运动轨迹;(5)推算面板靶标的理论运动轨迹;(6)计算反射面单元动态面形精度。

### 3.1 反射面单元及其支撑机构分析

图 1(b)中反射面单元及其支撑简化模型如图 2 所示,将地锚、促动器及下拉索支链等效为移动副,驱动节点运动,节点上方为靶标,反射面单元通过自由度分别为 3、4、5 的运动机构与节点连接,则模型自由度的计算公式为:

$$F = 6n - \sum_{k=1}^5 kp_k, \quad (1)$$

式中: $F$ 为模型自由度; $n$ 为活动构件数; $k$ 为运动副级别; $p_k$ 为 $k$ 级运动副个数。计算可得 $F=3$ ,即该模型的自由度为 3,驱动数为 3,满足成为机构条件,且为静定结构。

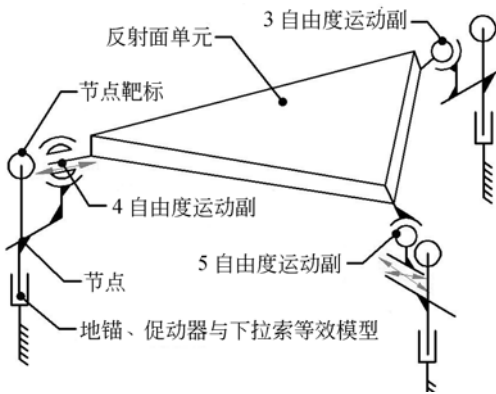


图 2 反射面单元及其支撑简化模型

Fig. 2 Simplified model of reflector element and its supporting structure

### 3.2 基准球面时三节点靶标到单元面板靶标的推导

以基准球面球心  $O$  为笛卡尔坐标系原点,  $x$ 、 $y$ 、 $z$  分别为东、北、上方位,反射面单元及其支撑

空间位置关系见图 3,已知  $A$ 、 $B$ 、 $C$ 、 $D$  等参数<sup>[7-8]</sup>,自节点靶标推导单元面板靶标的方法如下:

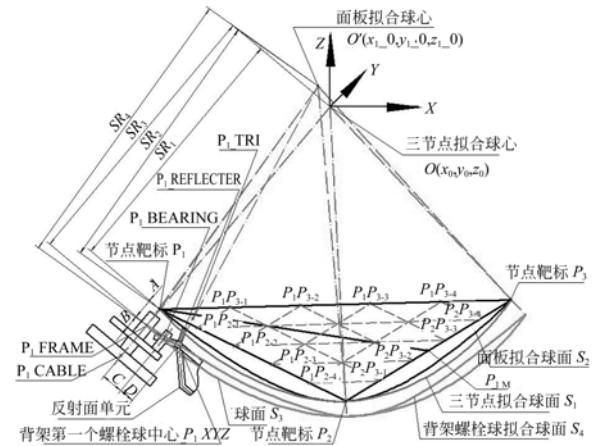


图 3 反射面单元及其支撑空间位置关系

Fig. 3 Space position of reflector element and its supporting

(1)以点  $O$  与  $P_1\_CABLE$  确定直线  $L_1$ ,以点  $O$  为球心、 $SR_1$  为半径的球面为  $S_1$ ,可解得  $L_1$  与  $S_1$  交点  $P_1$ 。同理可得:  $P_2$ 、 $P_3$ 。

(2)确定过  $P_1$ 、 $P_2$ 、 $P_3$  三点、半径为  $SR_2$  的球面  $S_2$  的球心  $O'$ 。

(3)  $P_1\_FRAME$  为  $L_1$  上一点,且在以  $O$  为球心、 $SR_3$  为半径的球面  $S_3$  上,故可解得该点坐标。

(4)令  $SR_4 = |\overrightarrow{O'P_1\_FRAME}|$ ,则以点  $O'$  为球心、 $SR_4$  为半径的球面为  $S_4$ 。背架第一个螺栓球的中心为  $P_1\_XYZ$ ,该点在球面  $S_4$  上,且满足:

$$|\overrightarrow{O'P_1\_XYZ}| = SR_4. \quad (2)$$

(5)角  $P_2P_1P_3$  平分线与底边交于  $P_{1M}$ ,则该点到各边距离相等,且该点在直线  $P_2P_3$  上,据此可解得  $P_{1M}$  坐标。

(6)直线  $OP_1$  的方向向量为  $s$ ,  $P_1P_{1M}$  的方向向量为  $t$ ,则这两条直线所确定平面的法向量可表示为  $n = s \times t$ ,点  $P_{1XYZ}$  在该平面上,满足:

$$|\overrightarrow{P_1P_{1XYZ}} \cdot n| = 0. \quad (3)$$

(7)点  $P_{1XYZ}$  到  $OP_1$  距离为  $C+D$ ,即<sup>[9]</sup>:

$$C+D = |\overrightarrow{OP_{1XYZ}} \times s| / |s|. \quad (4)$$

(8)联立式(2)~式(4),得  $P_{1XYZ}'$ 、 $P_{1XYZ}''$  两组解,需排除 1 组,方法为:求解  $O'P_{1XYZ}'$  与  $P_1$ 、 $P_2$ 、 $P_3$ ,确定平面交点  $P_{1TRI}$ ,判断该点是否在

$\Delta P_1 P_2 P_3$  内。若该点与  $P_3$  在边  $P_1 P_2$  的同一侧，则向量  $\overrightarrow{P_1 P_{1TRI}} \times \overrightarrow{P_1 P_2}$  与  $\overrightarrow{P_1 P_3} \times \overrightarrow{P_1 P_2}$  数量积大于零。相反，则小于零。同理，可确定其它两点与两边的相对位置关系。当结果均在同一侧时，判定  $P_{1TRI}$  在  $\Delta P_1 P_2 P_3$  内，该点即所求解。另 1 组解可采用同样方法判别。

(9) 关节轴承等其它点可由图 3 条件相应解得。

(10) 依次调换节点靶标及对应 C、D 参数，重复步骤(1)~(9)，可求解其它 2 角点以上坐标。

(11) 求解面板靶标：求  $\Delta P_1 P_2 P_3$  各边 5 等分；求  $P_{12-2} P_{13-2}$ 、 $P_{12-3} P_{13-3}$ 、 $P_{12-4} P_{13-4}$  的 2、3、4 等分；计算以上各点与球面  $S_2$  交点。

(12) 以上靶标相对于  $S_2$  的面形精度 RMS 为零，若分析其它工况，可调节等分点与基准球面的距离。

### 3.3 解算观测期间三节点靶标的运动轨迹

当观测  $(H, \delta)$  射电源时，抛物面顶点为<sup>[10-11]</sup>：

$$\begin{cases} x_d = (R+h)\cos\delta\sin H \\ y_d = (R+h)(\sin\varphi\cos\delta\cos H - \cos\varphi\sin\delta) \\ z_d = -(R+h)(\cos\varphi\cos\delta\cos H + \sin\varphi\sin\delta) \end{cases} \quad (5)$$

式中： $R$  为基准球面半径； $\varphi$  为大窝沟地理纬度； $H$  为赤经； $\delta$  为射电源赤纬； $h$  为抛物面顶点到基准球面距离； $H$ 、 $\delta$  的约束条件为：

$$\begin{cases} \varphi - \varphi_{\max} \leq \delta \leq \varphi + \varphi_{\max} \\ |H| \leq \arccos\left[\frac{\cos\varphi_{\max} - \sin\varphi\sin\delta}{\cos\varphi\cos\delta}\right] \end{cases} \quad (6)$$

其中  $\varphi_{\max}$  为望远镜观测的最大天顶角。

望远镜跟踪该射电源时，需补偿地球自转角度，当前时刻  $t$  的射电源时角为：

$$H(t) = H_0 + \omega t, \quad (7)$$

式中  $\omega$  为地球自转角速度，单位为 rad/s。

抛物面焦比  $f/D=0.4611$ ，见图 4，准平面与对称轴的交点  $P\_DDOWN$ 、焦点  $P\_DUP$  可由下式解得：

$$(x-x_d)^2 + (y-y_d)^2 + (z-z_d)^2 = (0.4611D)^2. \quad (8)$$

根据旋转抛物面的定义，点  $P\_BW$  满足：

$$|P\_BWP\_DUP| = |P\_BWP\_ZPM|, \quad (9)$$

同时，该点在直线  $OP\_S$  上，即：

$$\frac{xbw - x_0}{xs - x_0} = \frac{ybw - y_0}{ys - y_0} = \frac{zbw - z_0}{zs - z_0}. \quad (10)$$

联立(9)、(10)可得  $P\_BW$  坐标。当依次将反映基准球面状态的三组节点靶标作为  $P\_S$ ，由此可分别得到跟踪射电源时三节点靶标的运动轨迹。

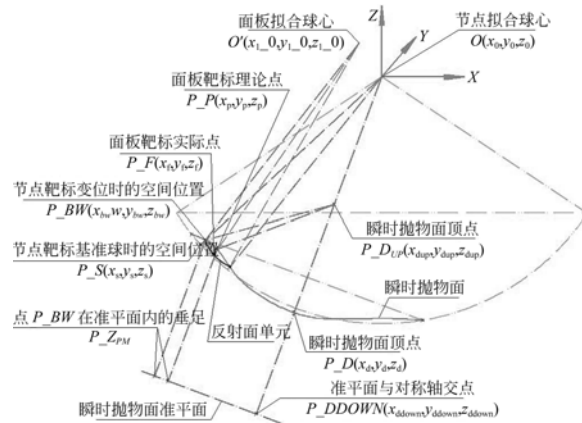


图 4 反射面单元与节点运动计算模型

Fig. 4 Movement calculation model of reflector element and joint

### 3.4 求解面板靶标实际运动轨迹

在 ADAMS 中建立 3.2 节 39 组关键点，以三角形连接 21 组面板靶标，形成 25 块面板子单元；以盘状、圆柱连接角点坐标搭建反射面单元支承机构<sup>[12]</sup>，将 3.3 节求得的节点靶标轨迹作为三节点径向位移驱动。运行该机构模型，可输出 21 组面板靶标实际运动轨迹。

### 3.5 推算面板靶标理论运动轨迹

假设  $t$  时刻某反射面单元在瞬时抛物面内，如图 4 所示，则球心  $O'$ 、三节点靶标运动轨迹、面板靶标实际点  $P\_F$  可分别参照 3.2~3.4 节计算得到。进而利用以下条件可解得面板靶标的理论点  $P\_P$ ：该点在直线  $O'P\_F$ 、瞬时抛物面上。当依次选取该面板靶标其它时刻对应的实际运动轨迹作为  $P\_F$  点时，即可得到该点的理论运动轨迹。若  $P\_F$  为其它 20 组面板靶标的运动轨迹，采用同样方法，则可得到 21 组面板靶标理论运动轨迹。

### 3.6 计算反射面单元动态面形精度

计算反射面单元 21 组面板靶标实际与理论运动轨迹  $t$  时刻位置误差，则该瞬时反射面单元面形精度 RMS 为：

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{21} (|P_i P_i F_i|)^2}{21}} \quad (11)$$

求取各瞬时反射面单元面形精度 RMS,即可得到反射面单元动态面形精度。

### 4 算例分析

如图 5 所示,以瞬时抛物面顶点轨迹  $L_0$  穿过 7 号反射面单元,望远镜处于快速跟踪运行模式为例,研究不同分布区域及初始面形下的反射面单元动态面形精度变化规律。该工况下望远镜总计运行 1 051 4 s,即 175.2 min。

拟选取如图 5 所示的 13 处不同区域反射面单元作为分布区域。 $L_1$ 、 $L_2$  为与  $L_0$  平行、距离相等的两条轨迹曲线, $L_0$  穿过 5~9 号反射面单元, $L_1$  穿过 2~4 号, $L_2$  穿过 10~12 号。圆环  $C_0$  为 5 257 s 的 300 m 瞬时抛物面,其中心位于  $L_0$  中点, $C_1$ 、 $C_2$ 、 $C_3$  为  $C_0$  的同心圆。1、5、9、13 号反射面单元在  $C_1$  上,2、4、6、8、10、12 号在  $C_2$  上,3、11 号在  $C_3$  上。

反射面单元初始面形以过三节点靶标、 $SR_2$  为半径的球面为测量基准,拟采用图 6 中的 9 种形式,包括:理想球面面形,即形式 1;面板靶标全部上移 2 mm,即形式 2;面板靶标全部下移 2 mm,即形式 3;考虑到三组支链机构具有不同的自由度,依次自三节点靶标中的某一节点开始,以波浪形式上移或下移面板靶标 2 mm,即形式 4~9。

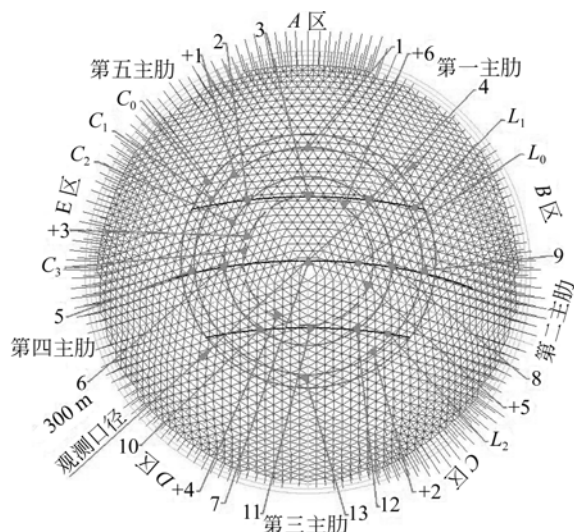


图 5 抛物面顶点轨迹及反射面单元分布

Fig. 5 Trajectory of parabolic vertex and distribution of reflector elements

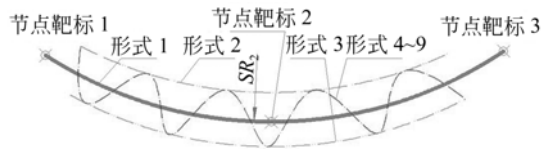


图 6 反射面单元 9 种不同初始面形

Fig. 6 9 kinds of initial surfaces of reflector element

按第 3 节得到的 9 种工况的计算结果如图 7 所示,分析可知:

(1)被同一轨迹穿过的反射面单元动态面形精度变化趋势一致;

(2)反射面单元的动态面形精度呈“w”形,即当反射面单元作为瞬时抛物面周圈及中心时,除形式 3 初始面形外,其余瞬时面形精度 RMS 均大于 5mm,即为形式 1 的理想面形,为此,应改善周圈及中心瞬时面形精度;

(3)初始面形为形式 2、3 的极端情况时,不同工况会产生不同面形精度,但总处于 9 种不同初始面形的最优或最差状态,应避免采用该两种形式;

(4)波浪初始面形 4~9 的反射面单元具有相近的动态面形精度,而周期过短波浪面形会使“粗糙度”变大,面板靶标间距不宜过小,建议采用该种形式。

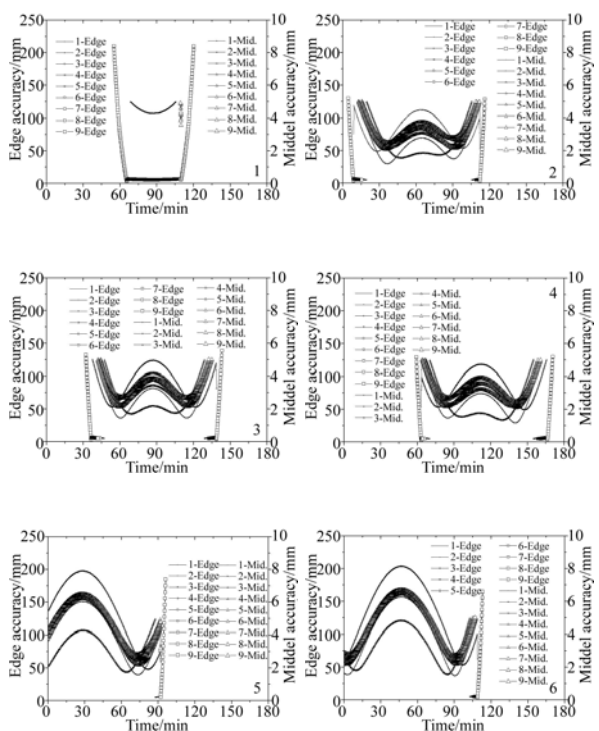


图 5 抛物面顶点轨迹及反射面单元分布

Fig. 5 Trajectory of parabolic vertex and distribution of reflector elements

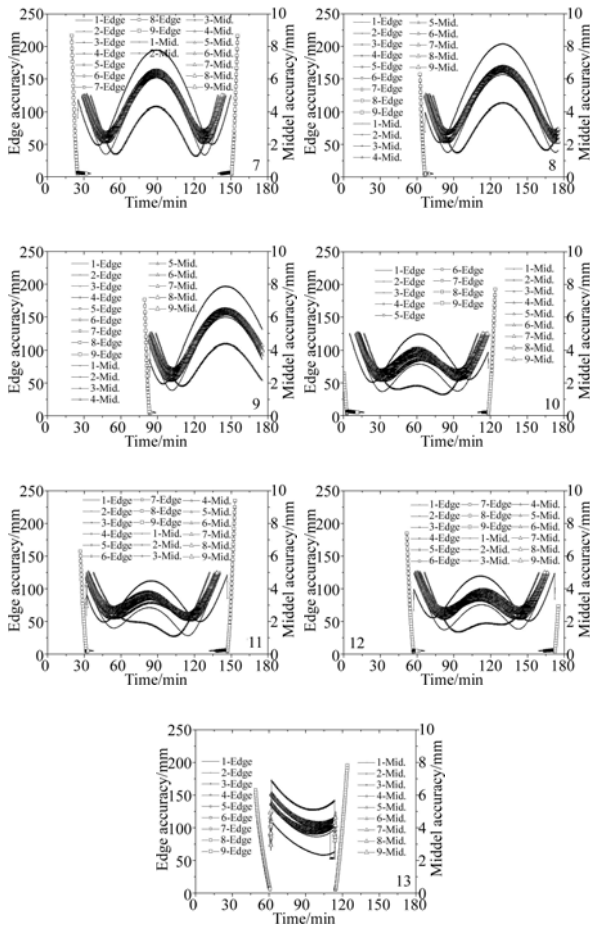


图 7 13 块反射面单元在 9 种初始面形下的动态面形精度  
Fig. 7 Dynamic surface accuracy of 13 reflector elements under 9 kinds of initial surfaces

表 1 反射面单元在 5 257 s 时的面形精度 RMS

Tab. 1 Surface accuracy RMS of reflector elements at 5 257 s (mm)

圆环 $C_1$	1	5	9	13	+1	+2	均值
精度 A	5.46	3.91	4.17	4.25	4.19	3.59	4.26
圆环 $C_2$	2	4	6	8	10	12	均值
精度 B	2.38	2.33	2.37	2.40	2.34	2.33	2.36
圆环 $C_3$	3	11	+6	+3	+4	+5	均值
精度 C	3.43	3.12	3.09	3.39	3.86	3.59	3.41

为进一步分析反射面单元动态面形精度的变化规律,新增 6 块反射面单元,如图 5 中 +1~+6,采用形式 4。定义  $C_1, C_2, C_3$  上的反射面单元瞬时面形精度分别为 A, B, C。表 1 给出了瞬时抛物面中心在  $L_0$  中点(即 5257s)时反射面单元瞬时面形精度。分析可知:精度 A 的离散度较大,精度 B、C 的一致性较好。结合图 7 可知,  $C_1$

上的反射面单元处于抛物面边缘,面形精度变化率较大以致其离散度较大。但总体变化趋势表明:反射面单元面形精度具有以瞬时抛物面顶点为中心的对称性。

### 5 300 m 瞬时抛物面拟合精度预估

依据被同一轨迹穿过的反射面单元的动态面形精度的变化趋势一致及反射面单元面形精度具有以瞬时抛物面顶点为中心的对称性,提出了一种千余块球面反射面单元拟合 300 m 瞬时抛物面面形精度计算方法。该面形精度用  $RMS_{300mech}$  表示,其数值可体现 300 m 瞬时抛物面内所有反射面单元机械表面本体对瞬时抛物面的拟合能力,具体流程如图 9 所示。

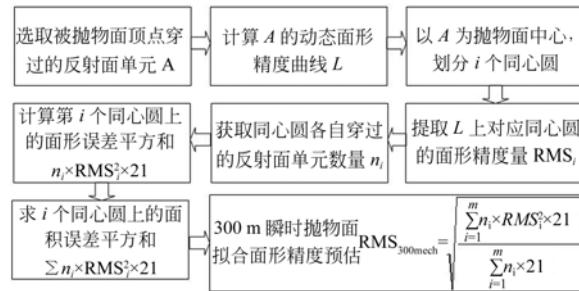


图 8 拟合精度预估流程

Fig. 8 Estimation procedure of fitting accuracy

但以上方法存在不足,即  $RMS_{300mech}$  为同一值时,实际面形可为多种形式。为此,考虑馈源照明函数及半光程差的影响,使用因子对原公式进行修正。该方法可体现望远镜对反射面单元面形精度的实际需求。

FAST 馈源照明函数服从随偏离中心角度  $\theta$  的  $N(0, \sigma^2)$  高斯分布,令抛物面边界  $F(\theta_{border})$  与中心  $F(\theta_{center})$  之比为 0.05,可得  $\sigma = 23.2$ 。根据角度  $\theta$  与观测半径  $r$  的几何关系,可得到随观测半径  $r$  变化的馈源照明函数  $F(r)$ ,将其作为不同半径区域反射面单元的馈源照明敏感修正因子,即:

$$F(r) = \frac{\exp\left(-\frac{(\arctan(r/(fD - (R - \sqrt{R^2 - r^2}))))^2}{2\sigma^2}\right)}{\sqrt{2\pi\sigma}} \quad (12)$$

20 世纪 70 年代,Ruse 给出了半光程差与法向误差转换关系<sup>[13]</sup>,即可得到修正因子  $C(r)$  为:

$$C(r) = \frac{1}{\sqrt{1 + (r/2f)^2}} \quad (13)$$

若忽略反射面单元靶标  $F$  和  $C$  的差异,采用同心圆对应的  $i$  个离散点  $F_i$ 、 $C_i$  代替式(12)、(13)连续函数,则馈源照明函数的半光程差拟合精度可用式(14)中  $RMS_{300\text{assess}}$  表示。其含义为:基于反射面机械本体特性,得到综合望远镜馈源照明特性下的反射面半光程差拟合精度,特别适用于机械本体拟合精度相同时的不同面形比较。

$$RMS_{300\text{assess}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m n_i \times C_i^2 \times RMS_i^2 \times 21 \times (F_i / \sum_{i=1}^m F_i)}{\sum_{i=1}^m n_i \times 21}} \quad (14)$$

以 A 选取 7 号反射面单元为例,  $i=19$ , 第  $i$  个同心圆上的反射面单元数量  $n_i$  见表 2, 计算得到的  $RMS_{300\text{mech}}$  为 62.047 mm, 不满足 RMS 5 mm 设计指标, 此时  $RMS_{300\text{assess}}$  为 4.581 mm。

表 2  $i$  与  $n_i$  的对应关系

Tab. 2 Relationship between  $i$  and  $n_i$

$i$	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$n_i$	117	159	147	128	122	124	101	93	91
	10	11	12	13	14	15	16	17	18
	77	67	69	50	47	35	28	14	12
									1

## 6 300 m 瞬时抛物面拟合精度改善

反射面单元是用于改善 300 m 瞬时抛物面拟合精度的基本可控单元, 由其动态面形精度算例的结论可知, 当其拟合瞬时抛物面周圈及中心时, 面形精度较差, 应给予改进。为此, 采用如下措施。

首先, 分析反射面单元进出瞬时抛物面时的拟合精度, 图 9(a) 给出了进入时的示意。结合图 7, 当第一节点靶标  $P_1$  进入瞬时抛物面时, 该点被控制在抛物面上, 第二、三节点靶标  $P_2$ 、 $P_3$  位于基准球面上, 三点径向差最大, 拟合精度最差; 当  $P_1$  继续进入,  $P_2$  与  $P_3$  仍未进入瞬时抛物面时,  $P_1$  点仍被控制在抛物面上,  $P_2$  与  $P_3$  位于基

准球面上, 但  $P_2$ 、 $P_3$  逐渐靠近瞬时抛物面周圈, 径向差不断减小, 见图 9(b), 拟合精度逐渐提高; 当三点均进入瞬时抛物面, 拟合精度  $RMS_{300\text{mech}}$  提高至约 6 mm。为此, 可通过扩大节点靶标控制区域至抛物面外一层节点靶标以改善拟合精度, 即第一节点靶标进入瞬时抛物面时, 其它 2 节点靶标也被控制在瞬时抛物面上。经计算, 原  $RMS_{300\text{mech}}$  提高到 4.971 mm, 满足 RMS 5 mm 指标, 此时  $RMS_{300\text{assess}}$  为 0.754 mm。

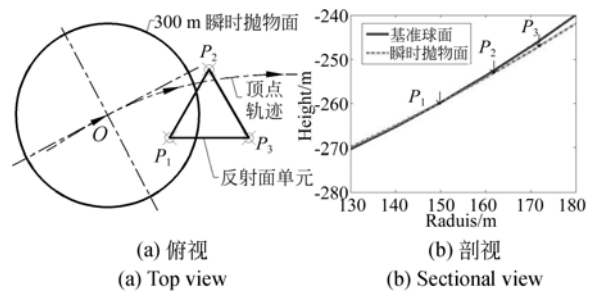


图 9 反射面单元进入抛物面时刻  
Fig. 9 Moment of reflector element entering parabolic surface

其次, 图 7 中心区域表明, 即使形式 1 反射面单元三节点靶标均在瞬时抛物面上, 面形精度 RMS 仍大于 5 mm, 相反形式 3 最小。为此, 可使节点靶标偏离瞬时抛物面以改善拟合精度, 分别将周圈节点向球心、中心反向偏移一定距离, 得到瞬时抛物面拟合精度与偏移量曲线见图 10。结果表明, 周圈、中心的偏移最优值均为 4 mm。若以上两区域同时偏移, 可得  $RMS_{300\text{mech}}$  为 3.938 mm, 优于设计指标 RMS 5 mm, 此时  $RMS_{300\text{assess}}$  为 0.629 mm。

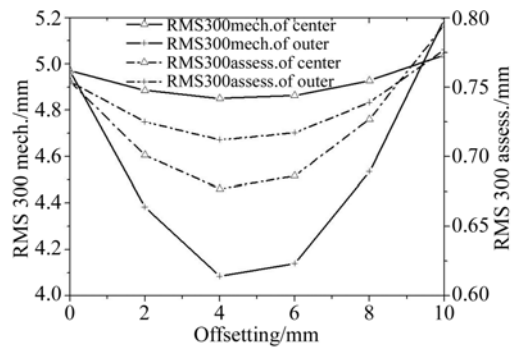


图 10 拟合精度与节点偏移的关系  
Fig. 10 Relationship between fitting accuracy and joint offsetting

## 7 结 论

本文依据 FAST 主动反射面的工作原理及相关结构尺寸,基于反射面单元动态面形精度分析,对 FAST 瞬时抛物面拟合精度进行了研究。本文研究成果可为反射面单元初始面形确定及瞬时抛物面拟合精度调节提供参考,结果表明:(1)被同一轨迹穿过的反射面单元的动态面形精度变化趋势一致,且反射面单元面形精度以瞬时抛物于顶点为中心具有对称性;(2)当反射面单元处于瞬时抛物面周圈及中心时,除形式 3 初始面形外,其余瞬时面形精度 RMS 均大于 5 mm,即使为形式 1 的理想面形;(3)初始面形为形式 4~9 的反

射面单元动态面形精度相近,处于形式 2、3 曲线之间,建议 FAST 优选前者,避免后者;(4)扩大控制区域至抛物面外一层节点靶标,及抛物面周圈节点靶标向球心、中心反向各自偏移 4 mm,可将  $RMS_{300\text{mech}}$  提高至 3.938 mm,优于设计指标  $RMS_5$  mm,此时  $RMS_{300\text{assess}}$  为 0.629 mm。

文中给出了反射面单元动态面形精度的变化规律,以及其与 300 m 瞬时抛物面拟合精度的关系,但仅考虑了运动学问题,后期会开展与其适应的反射面测控硬件规划、动力学、模型修正下的面形精度研究。FAST 工程正处于建造阶段,相关面形精度试验条件尚不具备,后续工作中会给出详实的试验结果。

## 参考文献:

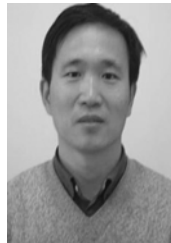
- [1] NAN R D. Five hundred meter aperture spherical radio telescope (FAST) [J]. *Science in China: Series G Physics, Mechanics & Astronomy*, 2006, 49(2):129-148.
- [2] 宋立强,王启明,郭永卫. 太阳辐照 500m 口径球面射电望远镜的温度分布[J]. *光学 精密工程*, 2011, 19(5):951-958.  
SONG L Q, WANG Q M, GUO Y W. Temperature distribution of FAST under solar radiation [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(5): 951-958. (in Chinese)
- [3] 王伟,段宝岩,马伯渊. 一种大型反射面天线面板测试与调整方法及其应用[J]. *电子学报*, 2008, 36(6): 1114-1118.  
WANG W, DUAN B Y, MA B Y. A method for panel adjustment of large reflector antenna surface and its application [J]. *ACTA ELECTRON SINICA*, 2008, 36(6): 1114-1118. (in Chinese)
- [4] 陈夫林,张景旭,吴小霞,等. 620mm 薄镜面的主动支撑结构及面形校正[J]. *光学 精密工程*, 2011, 19(5):1022-1029.  
CHEN F L, ZHANG J X, WU X X, et al. Supporting structure of 620 mm thin primary mirror and its active surface correction [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(5): 1022-1029. (in Chinese)
- [5] 钱宏亮,柳叶,范峰,等. 上海 65m 射电望远镜非均匀温度场及其效应[J]. *光学 精密工程*, 2014, 22(4):970-978.  
QIAN H L, LIU Y, FAN F, et al. Non-uniform temperature field and effects of Shanghai 65m radio telescope [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(4): 970-978. (in Chinese)
- [6] 甘恒谦. FAST 反射面误差计算和望远镜接收机前端[D]. 北京:中国科学院研究生院, 2010.  
GAN H Q. Reflector tolerance calculation of FAST and front end of radio telescope [D]. Beijing: Graduate University of Chinese Academy of Sciences, 2010. (in Chinese)
- [7] 朱忠义. FAST 上层机构变位分析及主索节点接口设计报告[R]. 北京:北京市建筑设计研究院有限公司, 2014.  
ZHU Z Y. Report on displacement analysis of FAST upper mechanism and connection design of main cable joint [R]. Beijing: Beijing Institute of Architectural Design, 2014. (in Chinese)
- [8] 古学东,赵保庆,王启明,等. FAST 反射面单元设计制造工程任务书[R]. 北京:国家天文台, 2014.  
GU X D, ZHAO B Q, WANG Q M, et al. Task document of FAST reflector element design and manufacture [R]. Beijing: National Astronomical Observatories, 2014. (in Chinese)
- [9] 傅文德. 求点到直线距离的几种方法[J]. *高等数学研究*, 2010, 13(2):43-44.  
FU W D. Several methods of solving distance from point to line [J]. *Studies in College Mathematics*, 2010, 13(2):43-44. (in Chinese)
- [10] 朱文白. FAST 望远镜天文规划和馈源支撑的相关

- 研究[D].北京:中国科学院研究生院,2006.
- ZHU W B. *Research on astronomical planning and feed support for FAST*[D]. Beijing: Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, 2006. (in Chinese)
- [11] 于东俊,张志伟,袁卉,等. FAST反射面不同区域促动器运动规律分析[R].北京:国家天文台,2013.
- YUAN D J, ZHANG ZH W, YUAN H, *et al.* . Moving regulation analysis of actuators from different regions in FAST reflector [R]. Beijing: *National Astronomical Observatories*, 2013. (in Chinese)
- [12] 陈立平. 机械系统动力学分析及ADAMS应用[M].北京:清华大学出版社,2005.
- CHEN L P. *Kinetics Analysis of Mechanical System and ADAMS Application* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005. (in Chinese)
- [13] JOHN R. Antenna tolerance theory- a review [J]. *Proceedings of the IEEE*, 1966, 54(4): 633-642.

#### 作者简介:



薛建兴(1982—),男,天津人,硕士,工程师,2007年于北京理工大学获得硕士学位,主要从事天文技术与方法、机械设计及理论、虚拟样机仿真分析等方面的研究。E-mail: jxxue@bao. ac. cn



古学东(1964—),男,河北沧州人,硕士,高级工程师,1989年于北京科技大学获得硕士学位,主要从事天文仪器、机械结构的设计、分析及研究。E-mail: xdgu@nao. cas. cn



王启明(1961—),男,辽宁沈阳人,博士,研究员,2000年于东北大学获得博士学位,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

(本栏目编辑:马 健)

(版权所有 未经许可 不得转载)