

文章编号: 1000-8349(2006)04-0373-07



# 大口径射电望远镜主面误差分析与修正

张巨勇<sup>1,2</sup>, 施浒立<sup>1,2</sup>, 张洪波<sup>1</sup>, 陈志平<sup>3</sup>

(1. 中国科学院 国家天文台, 北京 100012; 2. 中国科学院 研究生院, 北京 100049; 3. 杭州电子科技大学, 杭州 310018)

**摘要:** 建立了 40 m 口径射电望远镜天线结构有限元模型, 依据模型分析结果, 对 40 m 口径射电望远镜天线主面误差进行了分析和数值计算; 从误差修正的角度, 分别对主面误差的最佳拟合修正、安装角预调的工作仰角综合修正进行了分析与数值计算。误差修正后的计算结果表明, 主面精度得到了大幅度的提高。分析结果为该望远镜天线的实际建造提供了参考。

**关键词:** 天文观测设备与技术; 40 m 射电望远镜; 误差修正; 最佳拟合; 预调

**中图分类号:** TN82 : P111.44 **文献标识码:** A

## 1 引 言

主面精度是大口径射电望远镜天线重要的性能指标。在满足主面精度指标的前提下优化天线结构设计方案, 最大限度地减小天线结构的重量和转动惯量, 从而降低产品的造价。然而对大口径天线来说, 单纯地通过优化天线支撑结构, 或采用高弹性模量和对热不敏感的材料等方法来增强结构的刚度, 来减小主面变形以提高主面精度, 常会使结构过于笨重或成本过高, 甚至使设计完全失败<sup>[1]</sup>。为解决这个问题, 就有必要在结构刚性设计的基础上对主面误差进行修正补偿, 从而达到减小主面误差以满足主面精度指标或进一步提高主面精度的目的。

望远镜主面误差的产生主要有两方面的原因: 一是由加工、装配等因素引起主面本身存在的面形误差, 其误差域较小, 它取决于加工、装配等的技术水平; 二为重力、风荷等外在因素引起的结构变形而形成的误差, 其误差域较大, 其中重力引起的变形位移产生的误差属于系统误差; 由于风荷的随机性, 风荷引起的变形位移达到的误差属于随机误差, 但在给定载荷工况时的误差均是可预知的, 因而可采取一定的技术措施进行误差补偿。

本文主要依据 40 m 射电望远镜结构有限元的力学分析结果, 对其主面误差进行了分析

---

收稿日期: 2005-11-29; 修回日期: 2006-06-03

计算;从误差修正角度出发,采用光程几何分析方法对该射电望远镜主面误差的修正进行了分析和数值计算。

## 2 主面误差分析

40 m 口径射电望远镜天线为一圆抛物面天线,主要由天线背架、中心体、主面板、副反射面体、副反射面支撑结构、馈源、俯仰驱动装置、平衡重及各附属装置等组成。经过合理简化与模拟,我们建立了有限元分析模型。模型中共有杆、梁、壳、质量单元等共 6200 余个。承力单元件均为优质碳素钢型材,其材料特性为:弹性模量  $2.1 \times 10^8 \text{ mN/mm}^2$ ,材料密度  $7.8 \times 10^{-6} \text{ kg/mm}^3$ ,泊松比 0.3。经各工况的有限元计算,即可获得相应工况的分析结果。主面板与背架联接的节点位移是本文计算分析的基础。

电磁波在望远镜系统传播中,由于望远镜系统结构加工、装配和荷载引起结构变形等因素,使主面存在面形误差,使电磁波在经主面反射到达副面的路径中产生光程差,造成电磁波的相位误差,使天线效率下降,增益减小。

设射电望远镜天线主面某反射点的变形位移  $u_i$  为  $[u_{xi} \ u_{yi} \ u_{zi}]$ ,法向单位矢量为  $[\gamma_{xi} \ \gamma_{yi} \ \gamma_{zi}]$ ,则该点与未变形时相比,反射电磁波的半光程差<sup>[2,3]</sup>为

$$\rho_i = \mathbf{a} \cdot \mathbf{u}, \quad (1)$$

其中,  $\mathbf{a} = [\gamma_{xi}\gamma_{zi} \ \gamma_{yi}\gamma_{zi} \ \gamma_{zi}\gamma_{zi}]$ ,  $\mathbf{u} = u_i^T$ 。整个主面各点的半光程差可用矩阵  $\mathbf{A}$  和  $\mathbf{U}$  表示为

$$\boldsymbol{\rho} = \mathbf{A}\mathbf{U}, \quad (2)$$

引进反射点对电磁波效应的加权因子  $\omega$  及其矩阵  $\mathbf{W}$ ,则作为主面面形误差(即主面加权半光程差的均方根偏差 *rms*)  $\sigma$  为

$$\sigma = \sqrt{\frac{\boldsymbol{\rho}^T \mathbf{W} \boldsymbol{\rho}}{\sum \omega_n}}, \quad (3)$$

用 Ruze 公式表达主面面形误差对增益下降  $\Delta dB$  的关系式为

$$\Delta dB = 10 \lg(\eta_\rho) = \lg \exp(-(4\pi\sigma/\lambda)^2) = -4.3429(4\pi\sigma/\lambda)^2. \quad (4)$$

为形象理解主面误差,将由于加工、装配和检测等因素引起的主面误差视为定值,它不随工况的变动而变化,即可将其定义为静态误差;而重力、风荷等外载造成主面变形而引起的误差,随工况的变动而变化,非定值,将其定义为动态误差。静态误差取决于加工、装配和检测的技术水平;动态误差与结构受载变形有关,是主面误差的主要来源。40 m 射电望远镜天线主面的误差源与误差合成计算见表 1。

表 1 主面误差源与合成计算

	误差源	$rms/mm$	备注
主面 面形	单块面板加工 $\sigma_1$	$\leq 0.35$ (实板)	经验值
		$\leq 1.60$ (网板)	
		$\leq 1.07$ (平均)	面积加权
	单块面板检测 $\sigma_2$	$\leq 0.10$	仪器精度
	总安装调整 $\sigma_3$	$\leq 0.30$ (实板)	经验值
		$\leq 0.50$ (网板)	
		$\leq 0.42$ (平均)	面积加权
	总装配检测 $\sigma_4$	$\leq 0.10$	经验值
	荷载变形 $\sigma_5$		动态误差
合成 $\sigma$			不相关

注: 合成  $\sigma = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 + \sigma_4^2 + \sigma_5^2}$ , 当总装配预调后, 预调角处所测得的主面面形误差为  $\sigma_m$ , 为主面静态误差源调整后的残差。设计中, 其值估算为  $\sigma_m = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 + \sigma_4^2}$ 。

依据图 1 结构有限元分析结果, 40 m 望远镜天线在自重工况下, 仰角范围为  $0^\circ \sim 90^\circ$  时的主面动态误差曲线在图 1 中标有“未预调和拟合”字样, 主面动态误差 ( $rms$ ) 的最大值为 9.365 mm( $rms$ ), 位于仰角为  $0^\circ$  处; 最小值为 2.894 mm( $rms$ ), 位于仰角  $90^\circ$  处; 整个仰角主面动态误差的均值为 6.562 mm( $rms$ )。自重加风载 (风速设为 17.1 m/s) 的 3 个典型工况, 结果见表 2 中的未拟合栏。

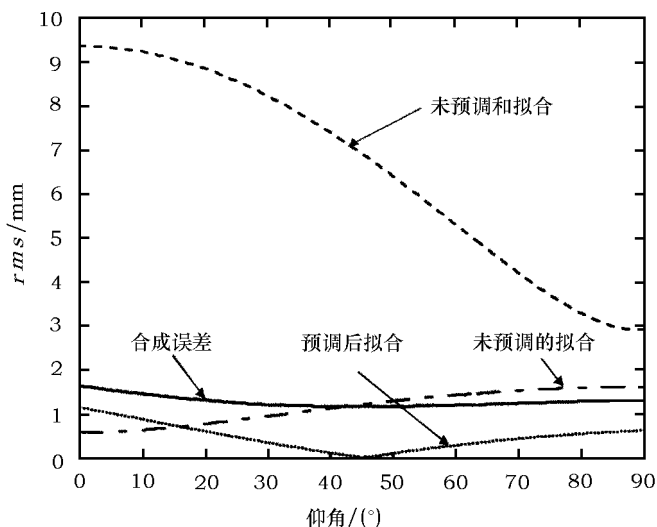


图 1 整个仰角自重下的主面动态误差

表 2 自重加风载的误差值

		mm		
		天线指平, 风水平正吹	天线朝天, 风水平吹	天线指平, 风水平背吹
主面动态误差	未拟合	9.104	2.882	9.101
	拟合	0.592	1.621	0.586
	预调安装	1.013	0.619	1.294
主面动、静态合成误差		1.538	1.313	1.736

### 3 主面最佳拟合误差修正

主面受动载而变形不可避免, 动态误差总是存在的。为了提高主面精度, Hoerner 提出了结构保型设计的方法, 原理是用一抛物面去拟合变形抛物面, 在结构的设计中, 通过结构参数的合理优化, 使拟合面与变形面的残差为零, 同时调整馈源到拟合面的焦点位置。保型设计在理论上是可行的, 但是该设计涉及此类结构的非线性多变量的优化, 往往因为结构的形式而不能保证收敛<sup>[4]</sup>。因而在实际运用时只能退一步而求其次, 要求拟合面与变形面之间的残差尽可能小, 即寻求主面的最佳拟合面。

从望远镜结构的力学分析中也可发现, 在载荷的作用下, 主面各节点发生的位移可以分为两部分: 一是整个主面的刚体运动 (平动和转动) 及主面抛物面焦距的变化; 另一部分是主面各节点之间的相对微小变形。通常情况下前者是主要的, 只考虑这一变化的抛物面就可以作一个新的抛物面去与变形后的主面拟合。这样的拟合抛物面实际上可以有无数个, 但只有一个为主面的最佳拟合面, 即该拟合面与变形面的残差最小。

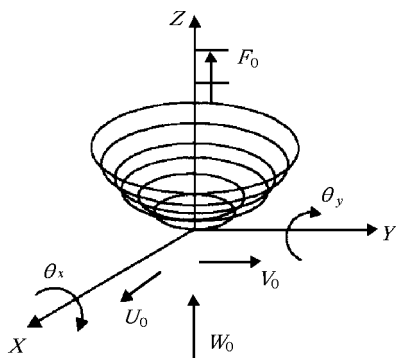


图 2 拟合参数示意图

物面上对应点之间的位移可用矩阵表示为

$$\begin{bmatrix} \Delta u \\ \Delta v \\ \Delta w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -z \\ 0 & -1 & 0 & 0 & z & 0 \\ 0 & 0 & -1 & -z & -y & x \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_0 \\ V_0 \\ W_0 \\ k \\ \theta_x \\ \theta_y \end{bmatrix}. \quad (5)$$

记为:  $\Delta uvw = cH$ 。结合式 (1), 则变形位移点与拟合抛物面上对应点的半光程差可写为

$$\rho_{\text{fit}} = a(u + \Delta uvw). \quad (6)$$

改写为

$$\rho_{\text{fit}} = au + bH, \quad b = ac. \quad (7)$$

主面各点构成的半光程差矩阵为

$$\rho_{\text{fit}} = AU + BH. \quad (8)$$

根据最小二乘原理, 可求拟合面与变形面残差最小的最佳拟合面参数  $\mathbf{H}$ 。考虑各点对电磁波效应的加权因子  $w$  及其矩阵  $\mathbf{W}$ , 则参数可由下式计算:

$$\mathbf{H} = -(\mathbf{B}^T \mathbf{W} \mathbf{B})^{-1} (\mathbf{B}^T \mathbf{W} \mathbf{A} \mathbf{U}), \quad (9)$$

解出最佳拟合面的参数  $\mathbf{H}$ , 求得  $\rho_{\text{fit}}$  后即可由式 (3) 求得最佳拟合面的均方根误差 ( $rms$ )。

40 m 望远镜天线在自重工况下、仰角范围 ( $0^\circ \sim 90^\circ$ ) 时最佳拟合后的主面动态误差曲线在图 1 中标有“未预调的拟合”字样。自重加风载的 3 个典型工况, 最佳拟合 (拟合参数  $\mathbf{H}$  为同仰角自重工况) 后的结果见表 2 中的拟合栏。

通过以上拟合的过程可得到以下的结果:

(1) 自重工况下, 主面整体变形的绝对位移在低仰角时比高仰角大, 但各点之间的相对位移小, 拟合前, 低仰角比高仰角的主面动态误差大, 拟合后, 正好相反。

(2) 自重工况下, 主面动态误差的最大值为 1.615 mm ( $rms$ ), 出现于仰角为  $90^\circ$  时; 主面动态误差的最小值为 0.710 mm ( $rms$ ), 出现于仰角为  $0^\circ$  时; 整个仰角主面动态误差的均值为 1.159 mm ( $rms$ ), 与未做最佳拟合的情况相比, 下降了 82.3%。

(3) 自重加风载的 3 个典型工况, 经拟合补偿修正, 主面动态的误差分别下降了 93.5%、43.8%、93.6%。

由此可见, 最佳拟合使主面动态误差得到了大幅度的修正, 使望远镜主面精度提高, 性能更好。

## 4 主面安装角预调综合误差修正

主面在最佳拟合过程中, 最佳拟合面的半光程差并不显性地依赖  $\mathbf{H}$  参数, 而是依赖于结构的变形。结构的变形是由外载引起的。所以, 最佳拟合面的半光程差是由外载确定的。

自重  $\mathbf{P}$  是天线最重要的荷载, 为一恒矢量, 对主面作用效果随仰角的变化而变化, 由于天线结构是一弹性结构, 因而主面在天线结构自重下的变形随仰角  $\alpha$  的变化是有规律的。相对天线坐标系而言, 任一仰角  $\alpha$  相对参考仰角  $\gamma$  的重力变化量为

$$\mathbf{P}_\alpha = \begin{bmatrix} P_Y & P_Z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \eta \\ \xi \end{bmatrix}, \quad (10)$$

式中,  $\eta = \cos \gamma - \cos \alpha$ ;  $\xi = \sin \gamma - \sin \alpha$ ;  $P_Y$  和  $P_Z$  分别是仰角为  $0^\circ$  和  $90^\circ$  在天线坐标系下的重力矢量。相应地, 半光程差变化量为

$$\rho_\alpha = \begin{bmatrix} \rho_Y & \rho_Z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \eta \\ \xi \end{bmatrix}. \quad (11)$$

这说明, 当只有自重时, 在任一仰角  $\alpha$ , 天线结构变形引起的主面半光程差可由参考仰角  $\gamma$ 、仰角  $0^\circ$  和  $90^\circ$  的半光程差计算得到。实际检测和设计计算中, 最多只要测量或计算 3 个仰角的半光程差, 就可预测天线整个仰角的主面误差, 这对把握天线结构的性能有着十分重要的意义。

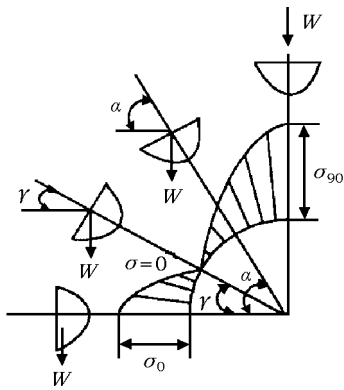


图3 自重预调下整个俯仰角的主面误差示意图

如图3所示,如果选择某一仰角 $\gamma$ 为安装参考角,安装主面板时,调整面板,消除自重引起的主面误差。则在整个工作仰角范围,由于消除了安装角工况时的自重引起的主面动态误差,会使天线主面动态误差的均值减小,即使工作仰角内主面动态误差得到综合修正补偿<sup>[5,6]</sup>。自重预调安装下,任一仰角 $\alpha$ 的最佳拟合面的误差如下<sup>[3]</sup>:

$$\sigma_{\alpha} = (\eta^2 \sigma_Y^2 + \xi^2 \sigma_Z^2 + 2\eta\xi R_{YZ} \sigma_Y \sigma_Z)^{1/2}, \quad (12)$$

式中,  $\sigma_Y$ 、 $\sigma_Z$  分别是仰角 $\alpha$ 为 $0^\circ$ 和 $90^\circ$ 时未预调的最佳拟合面误差;  $R_{YZ}$  是仰角 $\alpha$ 为 $0^\circ$ 和 $90^\circ$ 时未预调最佳拟合面误差的相关系数。对于圆抛物面

天线,由于结构的对称性,相关系数 $R_{YZ}$ 为0,即不相关。

本文将仰角 $45^\circ$ 选为预调安装角进行计算。自重工况预调角安装后,仰角范围主面动态误差值曲线在图1中标有“预调和拟合”字样。自重加风载的3个典型工况,预调安装后(拟合参数 $H$ 为同仰角自重预调安装的工况)结果见表2预调安装栏。

自重工况下,40 m望远镜天线以 $45^\circ$ 预调角安装,在仰角 $0^\circ \sim 16^\circ$ 之间,主面动态误差值上升,仰角在其余范围时主面动态误差值均下降。该天线实际的工作仰角为 $7^\circ \sim 89^\circ$ ,工作仰角范围内主面动态误差在预调安装前、后的均值分别为1.269 mm (*rms*)、0.357 mm (*rms*),下降了71.9%。主面动态误差得到了很好的综合补偿修正。

自重加风载的3个典型工况是主面动态误差在仰角为 $0^\circ$ 时增大,仰角为 $90^\circ$ 时减小,结果与自重工况下主面动态误差曲线的趋势相符。考虑到天线实际工作时,风速达到设计风速的情况很少出现,天线又不在 $0^\circ \sim 7^\circ$ 的低仰角工作,因此,预调安装能很好地使主面的动态误差得到综合修正,提高了望远镜主面精度。

## 5 结束语

本文着重分析了40 m射电望远镜天线主面误差,在未考虑副面和馈源相对理想位置的偏移情况下,主面误差分析的结果是:自重工况下,40 m望远镜天线经最佳拟合和预调安装两项技术修正后,主面动、静态合成误差曲线在图1中标有“合成误差”字样,主面合成误差在工作仰角范围 $7^\circ \sim 89^\circ$ 内的均值为1.248 mm (*rms*);自重加风载的3个典型工况动、静态合成误差见表2合成栏。结果表明经过最佳拟合和安装角预调,能够有效修正望远镜天线主面的动态误差,减小主面动、静态合成误差,提高主面精度,改善望远镜天线的电性能,从而减小望远镜结构设计的难度,降低产品造价。

相信本文的分析结果对大口径同类天线的设计分析具有一定的参考意义。

**参考文献:**

- [1] 施浒立. 博士论文, 北京: 中国科学院北京天文台, 1986
- [2] Ruze J. Proc. of the IEEE, 1966, 1 (54): 633
- [3] Levy R. Structural Engineering of Microwave Antennas, America: IEEE Press, 1996
- [4] 程景全. 天文望远镜原理和设计, 北京: 中国科学技术出版社, 2003
- [5] Levy R. Antenna Bias Rigging for Performance Objective, Arlington: VA, 1977: 94
- [6] Garrido Arenas J E, Cancio B. Microwave Journal, 1999, 42(3): 9

## Reflector Error Analysis and Correction for Large-diameter Radio Telescope

ZHANG Ju-yong<sup>1,2</sup>, SHI Hu-li<sup>1,2</sup>, ZHANG Hong-bo<sup>1</sup>, CHEN Zhi-ping<sup>3</sup>

(1. National Astronomical Observatories, Beijing 100012, China; 2. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Hangzhou Electronic University, Hangzhou 310018, China)

**Abstract:** Reflector error of 40m-diameter radio telescope is analyzed according to displacement datum obtained by mechanical analyses of 40m-diameter radio telescope structure. From the point of view of error correction, reflector dynamic error correction is discussed and calculated by applying the techniques of the best-fitting surface and rigging adjusted. The result shows the error of reflector is fallen distinctly by these corrections. These calculations and analyses provide theoretical bases for 40m-diameter radio telescope engineering.

**Key words:** astronomical facilities and technique; 40m-diameter radio telescope; error correction; best-fitting surface; rigging adjusted