

TMT 三镜面形评价过程

赵宏超,张景旭,张丽敏,张 彬

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所,吉林 长春 130033)

摘 要: TMT 望远镜是一台 R-C 式的 30 m 口径光学红外望远镜,其三镜为椭圆形平面镜,口径为 3.594 m×2.568 m,质量达到 1.8 t。三镜系统需要把来自于次镜的光折转到望远镜两侧奈氏平台的科学仪器上,具有跟踪和快速定向功能,因此三镜位置也是三轴正交运动的结果。三镜支撑系统必须能够在多工况、变载荷的条件下有效保证镜面的面形精度,所以依据 TMT 项目组要求面形结果需优于 1/5 波长($\lambda=632.5$ nm) 或者斜率均方根小于 $1 \mu\text{rad}$ 。以三镜支撑的一种方案为例详细阐述了 TMT 三镜面形评价的过程。这一方案中底支撑采用 18 点 whiffletree 结构形式,侧支撑采用 8 点 A-frame 结构形式。首先通过 ANSYS 建模仿真,然后使用 MATLAB 进行数据后期处理,依次去除结果中包含的刚体位移项、离焦和像散等,最后使用 9 个子孔径来拼接归一化的三镜,同时计算每一个子孔径的斜率均方根。这一数据处理方法有别于以往圆形主镜镜面评价的过程,但适合对 TMT 三镜椭圆镜面面形评价,且在光学系统中斜率均方根比均方根在镜面面形评价上更有意义。对于大口径反射镜镜面面型评价具有重要的指导意义。

关键词: 大口径反射镜支撑; 斜率均方根; TMT; Zernike 多项式拟合; 平面拟合

中图分类号: TH751 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2014)12-3983-05

Prediction of TMT tertiary mirror surface figure

Zhao Hongchao, Zhang Jingxu, Zhang Limin, Zhang Bin

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: TMT (Thirty Meter Telescope) is a thirty meter Ritchey-Chrétien optical-infrared telescope. The Third Mirror (M3) is an elliptical flat mirror, whose aperture is 3.594 m×2.568 m, and the weight is 1.8 ton. The M3 system reflects the light coming from the Secondary Mirror System to the science instruments located on the Nasmyth platforms, so the M3 system rotates and tilts as the telescope rotates about the elevation axis to track astronomical objects across the sky. Due to the M3 support system the mirror figure maintains a high precision. The specification requires that the RMS of the mirror surface figure will be less than $\lambda/5$ ($\lambda=632.5$ nm) or the SlopeRMS will be less than $1 \mu\text{rad}$. This paper took one of the conceptual designs as an example to illustrate the method of evaluating the SlopeRMS. The axial

收稿日期:2010-10-05; 修订日期:2010-12-03

基金项目:中国科学院长春光学精密机械与物理研究所三期创新工程专项基金

作者简介:赵宏超(1985-),男,博士,主要从事望远镜机械设计方面的研究。Email:zhaohcciomp@163.com

support system in this plan used an 18 points whiffletree structure while the lateral support system used an 8 points A-frame structure. The FE model was constructed in ANSYS. Then MATLAB was employed to carry out the data processing. In the data processing program, the rigid movement was removed at first. Then the elliptical mirror was normalized into a circle mirror and the defocus and the astigmatism were eliminated. In the end, the SlopeRMS of nine sub-apertures was calculated. This method for evaluating the mirror surface figure is different from the classic one for the primary mirror, but it is effective to evaluate the elliptical mirror surface figure indeed. This method is meaningful in mirror surface figure evaluation.

Key words: large flat mirror support; slope RMS; TMT; Zernike polynomial; plane fitting

0 引言

30 m 望远镜(Thirty Meter Telescope, TMT)计划是由美国加州理工学院(Caltech)、加州大学系统(UC)和加拿大大学天文研究联盟联合发起的国际合作项目。目前参与的国家主要包括美国、加拿大、中国、日本和印度等^[1]。TMT 口径为 30 m,采用 R-C 光学系统,地平式机架。其主镜由 492 块对角线为 1.44 m 的正六边形离轴非球面子镜拼接而成,集光面积大约为 650 m²,观测波段范围为 0.3~28 μm。TMT 将于夏威夷莫纳克亚峰建造使用,其中中国承担了主镜系统的设计与制造。主镜为椭圆形平面镜,长轴为 3.544 m,短轴为 2.486 m,重达 1.8 t。这种大口径平面反射镜在望远镜历史上也是屈指可数的。

目前,国际上已建成数十个 10 m 级望远镜。其主镜主要有两种:单个主镜或多个子镜拼接而成。4 m 级的单块反射镜支撑上基本都使用了主动支撑技术,如美国 SOAR 望远镜等。TMT 项目组前期设计中也将主镜的支撑方案定为 60 个点的主动支撑^[2],但后续分析认为主镜主动支撑并非必要,主镜主动光学配合自适应技术同样可以使采用被动支撑的主镜发挥出其相应作用。最终采取的主镜支撑方式为被动支撑。文中以设计中的一种方案在光轴竖直工况下为例,结合有限元模拟结果介绍了 TMT 主镜镜面评价的过程与方法。

1 建模方法及问题引入

1.1 TMT 结构特点

望远镜的跟踪架系统由两轴构成:方位轴和俯

仰轴。通常情况下,三镜为了对正不同的焦点只需要调整两个自由度,且在观测过程中三镜与主镜室相对静止。但 TMT 体积庞大,搭建库德光路的难度也随之提高,并且长距离的光路势必会增加光线的损耗。所以 TMT 将光学实验室安置在了转台两侧的奈氏平台上,如图 1 所示。由于三镜反射出的光线不在俯仰轴轴线上,伴随着望远镜俯仰轴的旋转,三镜系统必须相应地旋转和倾斜,以保证光学成像仪器与光学系统的准直,这就需要三镜系统具有跟踪和瞄准的功能。三镜的位置是一个三轴正交运动的结果,这对三镜的支撑系统设计提出了很大挑战。

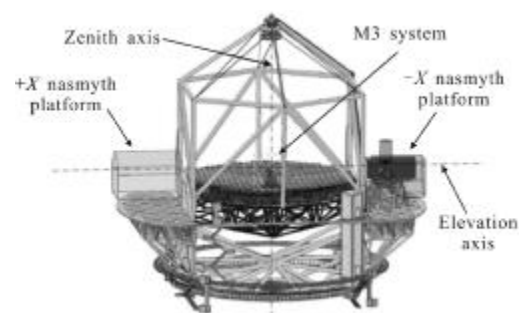


图 1 TMT 简图

Fig.1 TMT sketch map

为应对三轴正交运动这种多工况、变载荷的情况,三镜支撑根据运动学支撑的原理进行设计,底支撑采用 18 点 whiffletree 支撑,以保证支撑系统能够有效地支撑镜子且不过约束^[3];根据椭圆镜的特点,侧支撑采用 8 点 A-frame 侧向支撑,如图 2 所示^[1]。设计阶段使用 ANSYS 建模仿真,按 TMT 项目组镜面面形的评价方法,使用 MATLAB 作为 ANSYS 分析后的数据处理工具。

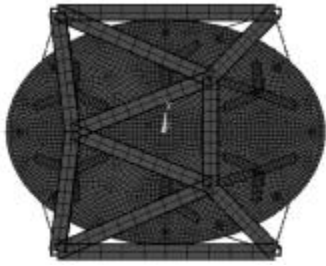


图 2 三镜系统的有限元模型

Fig.2 FE model of tertiary mirror system

1.2 有限元建模及问题描述

使用 ANSYS 建立的三镜有限元模型如图 2 所示。其中镜子使用 solid45 单元划分网格,支撑点位置处单元大小为 12.5 mm,其他单元大小为 50 mm;支撑结构使用 beam188 单元构建,相关连接处根据自由度需要使用 Cerig 进行约束。整个系统重 4.2 t。

仅考虑重力的影响,望远镜指向天顶时,主镜受力方向垂直于镜面,此时主镜面形最差;与之相反,当望远镜打水平时,主镜受力方向平行于镜面,此时主镜面形最优。所以选择望远镜指向天顶的工作状态作为最不利工况进行分析。此时给有限元模型施加垂直于镜面的重力进行仿真,仿真的结果为:RMS=385.2 nm、PV=1689.4 nm。

归一化的三镜大小相当于一个 4 m 级的主镜,两者之间在支撑上比较相似,但又有本质区别。主镜是圆镜子,具有严格的轴对称性质^[4],但椭圆形三镜不同,其本身仅仅关于长轴和短轴对称。因此,当沿光轴方向施加重力时,三镜支撑得到的面形图与主镜支撑得到的结果不同。主镜支撑得到的面形表现出明显的轴对称性质,而 TMT 三镜支撑在该方案中得到的面形受支撑本身关于长轴对称的限制仅仅表现为关于长轴对称。为了去除数据中的无关量,更好地评价支撑效果,使用 MATLAB 作为有限元分析后数据处理的工具及绘图工具。

2 TMT 三镜面形误差计算方法及过程

TMT 三镜面形误差的计算是通过一系列的数据处理得到的,主要由平面拟合、镜子归一化、Zernike 多项式拟合及斜率均方根(SlopeRMS)计算组成。

2.1 ANSYS 与 MATLAB 数据的传递

由于 ANSYS 处理数据及绘图的能力有限,使用

MATLAB 进行数据后处理。计算三镜面形误差需要提取镜面节点在全局笛卡尔坐标系下的原始坐标和变形,在 ANSYS 环境下使用 Vwrite 命令将 ANSYS 仿真结果中镜面节点的原始坐标与变形值数据写入到文本文件中供 MATLAB 使用。

在建立有限元模型的过程中,为了提高计算的精度,支撑点处网格的密度明显大于其他部分,所以镜面数据导入到 MATLAB 后需要对数据进行网格化处理,并根据 TMT 项目组要求,网格大小为 1 mm×1 mm^[5],网格细化的方法采用三次样条插值的方法进行。

2.2 平面拟合及归一化

在 1.2 节中已提及,由于三镜是椭圆镜,支撑结构本身仅关于长轴对称,故 ANSYS 计算后的面形图如图 3 所示。

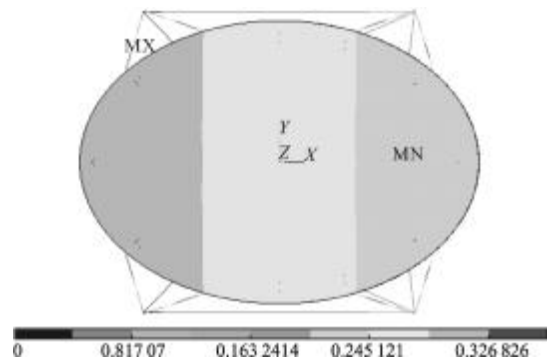


图 3 有限元计算结果云图

Fig.3 Surface figure plot of FEA result

由图 3 可知,镜子除了自身变形外,有一个明显的倾斜。平面拟合的目的就是解算镜子的刚体位移,包括镜子的平移和倾斜^[6]。这个误差被认为是系统误差,在跟踪观测过程中可以去除。根据平面公式:

$$z = ax + by + c \quad (1)$$

推导得到其矩阵形式为:

$$\begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} = \text{inv}([x_i \ y_i \ 1]) \cdot [Uz_i] \quad (i=1 \cdots n) \quad (2)$$

式中: x_i, y_i 为第 i 个节点的 x, y 坐标; Uz_i 为第 i 个节点 z 方向的变形。

计算得:

$$\begin{cases} a = 2.9690e-5 \\ b = -2.7142e-11 \\ c = -0.2657 \end{cases}$$

即有限元模拟的结果中包含有 0.2657 mm 的平

移,以及绕短轴的 0.1231"的转动。将原始数据去除刚体位移后面形云图如图 4 所示,此时 RMS=122.8 nm, PV=702.7 nm,且云图形状基本恢复到了三镜支撑点优化时的水平。

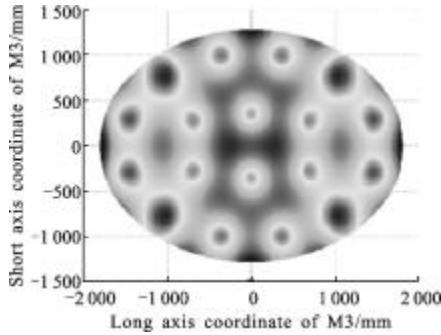


图 4 去除刚体位移后的面形云图

Fig.4 Surface figure plot of M3 after removing translation and tilt

将 x 轴数据除以 $\sqrt{2}$ 使得椭圆镜归一化为圆镜。归一化后的镜面面形云图如图 5 所示。

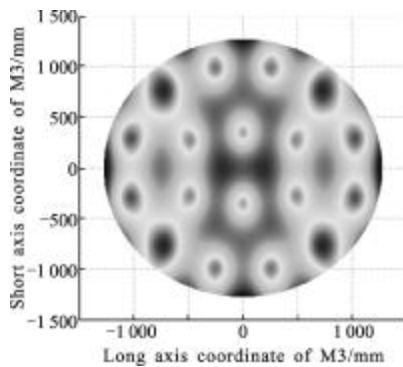


图 5 归一化后的面形云图

Fig.5 Normalized surface figure plot of M3

2.3 去除离焦和像散

二阶 Zernike 多项式拟合的面形误差不会对波前造成影响,所以误差可以使用主镜的主动光学进行校正。这些像差主要为离焦和像散^[5],其多项式形式如公式(3)所示^[7-8]:

$$\begin{cases} Z_4 = \sqrt{3} (2r^2 - 1) \\ Z_5 = \sqrt{6} r^2 \sin(2\theta) \\ Z_6 = \sqrt{6} r^2 \cos(2\theta) \end{cases} \quad (3)$$

为了计算得到面形变形数据中各阶 Zernike 多项式的系数,利用正交多项式正交的特点,使用离散 Zernike 多项式拟合面形数据,如公式(4)所示:

$$a_i = \left(\sum_{j=1}^N S_j \cdot Z_{i,j} \cdot r_j \right) / \left(\sum_{j=1}^N Z_{i,j} \cdot Z_{i,j} \cdot r_j \right) \quad (4)$$

式中: a_i 表示第*i*项 Zernike 系数; S_j 表示第*j*个像素点在光轴方向的变形; r_j 表示第*j*个像素点距离中心点的距离; $Z_{i,j}$ 表示第*j*个像素坐标下第*i*项 Zernike 的值。经计算:

$$\begin{cases} a_4 = 1.76e-5 \\ a_5 = 6.92e-12 \\ a_6 = 3.51e-5 \end{cases}$$

去掉离焦和像散后的云图如图 6 所示。

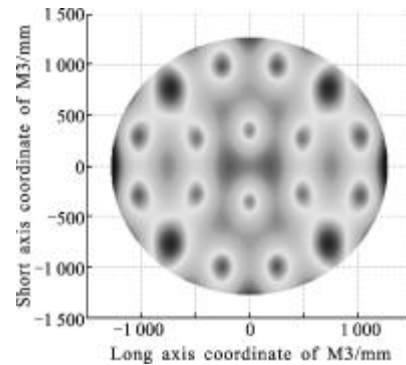


图 6 去除离焦和像散后的面形云图

Fig.6 Surface figure plot of M3 after removing defocus and astigmatism

2.4 SlopeRMS 计算

因为 TMT 主镜支撑采用了主动光学的形式,通过主动校正,可以去除三镜被动支撑引入的低阶像差,所以 TMT 三镜支撑方案最后选择了被动支撑。被动支撑造成的像差很大程度上可由多个拼接子镜的刚体移动进行校正。由于一个单星投影的阴影大小为 1.33 m,可以把三镜离散成直径为 1.33 m 的子孔来衡量其面形。根据 TMT 要求,选择 9 个直径为 1.33 m 的子孔覆盖归一化后的三镜,并依次计算每一个子孔的 SlopeRMS^[5,9]。SlopeRMS 的计算公式如公式(5)所示:

$$\text{SlopeRMS} = \sqrt{\left\langle \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 \right\rangle} \quad (5)$$

其中: $u(x,y)$ 为镜面变形函数。根据差分原理,将三镜表面网格化,网格大小取 TMT 要求的 1 mm×1 mm 网格,公式(5)变换为公式(6)^[10]:

$$\text{SlopeRMS}(n) =$$

$$\sqrt{\frac{1}{(N-1)(M-1)} \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=1}^{M-1} \left(\left(\frac{S_{i+1,j} - S_{i,j}}{h_x} \right)^2 + \left(\frac{S_{i,j+1} - S_{i,j}}{h_y} \right)^2 \right)}$$

式中: N 为三镜短轴方向取样点数; M 为三镜长轴方

向取样点数; S_{ij} 为 (i, j) 像素点的镜面变形值, h_x 、 h_y 分别代表 x 、 y 方向上单位网格的长度。由公式可知, SlopeRMS 反映了镜面变形的局部变化情况。9 个子孔径 SlopeRMS 值如表 1 所示。

表 1 9 个子孔径 SlopeRMS 值

Tab.1 SlopeRMS of nine sub-apertures

Sub-aperture	1	2	3	4	5
SlopeRMS/ μ rad	0.95	0.98	0.97	0.99	0.97
Suba-perture	6	7	8	9	-
SlopeRMS/ μ rad	0.98	0.97	0.99	0.97	-

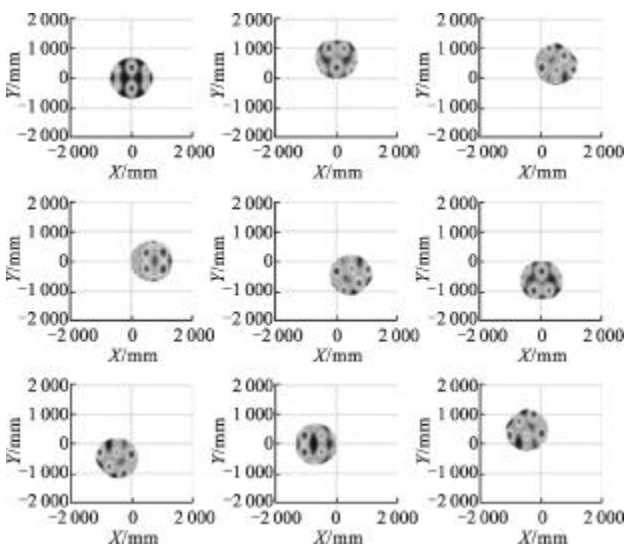


图 7 9 个子孔径云图

Fig.7 Surface figure plot of nine sub-apertures

TMT 要求每一个子孔径的 SlopeRMS 均要小于 1.0μ rad, 根据结果可知, 设计能够满足要求。

4 结论

根据设计方案, 在 ANSYS 中建模仿真, 但囿于 ANSYS 较弱且不直观的数据处理功能, 将有限元仿真的数据导入到 MATLAB 中进行处理, 并根据 TMT 项目组要求逐步去除仿真结果中的系统误差项以及其他能够消除的误差, 最终按要求计算得到了子孔径的 SlopeRMS。计算结果显示, 该设计的支

撑在工作时会带入较小的平移和倾斜以及少量的离焦和像散, 去除这些误差后, 三镜的表面 RMS 值为 122.8 nm , PV 值为 702.7 nm , 9 个子孔径的 SlopeRMS 值均小于 1μ rad, 能够满足设计要求。

文中以三镜光轴竖直时某一设计方案为例, 按 TMT 要求对三镜面形评价过程进行了详细计算和说明, 并引入了 SlopeRMS 的概念。SlopeRMS 代表了镜面微观结构上的高低起伏状况, 在大口径反射镜镜面评价上与 RMS 同样重要, 值得推广与学习。

参考文献:

- [1] TMT Group. Design Requirements Document for Tertiary Mirror System (M3S) [Z]. TMT OPT DRD 07. 006. REL 29, 2012.
- [2] Dan Blanco, Myung Cho, Larry Daggert, et al. Control and support of 4-meter class secondary and tertiary mirrors for the Thirty Meter Telescope [C]//SPIE, 2006, 6273: 62731A.
- [3] Cheng Jingquan. The Principles of Astronomical Telescope Design [M]. New York: Springer, 2009.
- [4] Zhang Yuanyuan, Jing Wei, Cheng Yuntao, et al. Design and finite element analysis of $\Phi 510 \text{ mm}$ SiC ultra-lightweight mirror[J]. Opt Precision Engineering, 2012, 20(8): 1718 - 1724. (in Chinese)
- [5] TMT Group. Tertiary Mirror Surface Figure Specification [Z]. TMT OPT SPE 12. 001. DRF02, 2012.
- [6] Wu Xiaoxia, Wang Minghao, Ming Ming, et al. Calibration of thermal distortion for large aperture SiC lightweight mirror [J]. Opt Precision Engineering, 2012, 20(6): 1243-1249. (in Chinese)
- [7] Sun Jingwei. Alignment technique for the large-aperture telescope based on astigmatism [J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(2): 427-435. (in Chinese)
- [8] Zhang Limin, Zhang Bin, Yang Fei, et al. Design and test of force actuator in active optical system [J]. Opt Precision Engineering, 2012, 20(1): 38-44. (in Chinese)
- [9] Lin Xudong, Liu Xinyue, Wang Jianli. et al. Performance test and experiment of correction capability of 137-element deformable mirror [J]. Opt Precision Engineering, 2012, 21(2): 267-273. (in Chinese)
- [10] Jim Burge. Optical Testing of Mirrors for Giant Telescopes [Z]. US: University of Arizona, 2012.