

三十米望远镜三镜底支撑的优化设计

王富国

(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 三十米望远镜(TMT)是一台 Ritchey-Chrétien(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,重量达到 1.8 t,三镜系统需要把来自次镜的光折转到望远镜两侧耐氏平台上的一系列科学仪器上,具有跟踪和快速定向功能。三镜支撑系统必须保证镜面面形优于 $\lambda/5$ (波长 $\lambda=632.5$ nm)或者均方根(RMS)斜度小于 $1 \mu\text{rad}$ 。支撑系统包括底支撑系统和侧支撑系统,底支撑系统采用 18 点 Whiffletree 结构,通过优化分析,面形 RMS 值达到 118.5 nm。针对三镜在支撑结构作用下的面形不能满足设计要求的特点,提出了采用力矩进行校正的方法,使镜面面形满足了设计要求。

关键词 光学设计;三十米望远镜;三镜;底支撑;优化设计

中图分类号 TH751 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP50.092202

Optimization Design of TMT Tertiary Mirror Axial Support

Wang Fuguo

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

Abstract Thirty Meter Telescope (TMT) is a 30 m Ritchey-Chrétien optical-infrared telescope. Its tertiary mirror (TMT M3) is an elliptical flat mirror with the aperture of 3.594 m×2.568 m and weight of 1.8 t. The M3 system reflects the light coming from the secondary mirror system (M2S) to the science instruments that are located on the Nasmyth platforms, and the M3 System must rotate and tilt as the telescope tilts about the elevation axis and tracks astronomical objects across the sky. The M3 support system should support the M3 mirror so that the mirror surface figure will be less than $\lambda/5$ (wavelength $\lambda = 632.5$ nm) or root-mean-square (RMS) slope will be less than $1 \mu\text{rad}$. The M3 support system includes axial support system and lateral support system. The axial support system uses 18-point whiffletree structure, and after optimization the RMS mirror surface figure achieves 118.5 nm. When the tertiary mirror surface figure error cannot meet the requirement with the support structure, correct moment is used to correct the surface figure error.

Key words optical design; Thirty Meter Telescope; tertiary mirror; axial support; optimization

OCIS codes 220.4880; 220.1080; 130.1750

1 引言

三十米望远镜(TMT)是由美国及加拿大发起的地基巨型光学-红外天文观测设备。TMT 建成后将在揭示暗物质和暗能量的本质、探测宇宙第一代天体、理解黑洞的形成与生长、探测地外行星等前沿科学领域做出重大突破性发现。

TMT 口径为 30 m,采用 Ritchey-Chrétien(R-C)光学系统,地平式机架,TMT 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。来自无限远的星光经主镜、次镜和三镜折向望远镜俯仰轴两侧的耐氏平台上的科学仪器上,设置的仪器覆盖波长范围为 $0.31\sim 28 \mu\text{m}$ ^[1]。

我国有望以 10%规模的实物贡献和一定比例的运行费用,成为 TMT 的建设伙伴之一,中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获准参加 TMT 三镜系统的研制。三镜系统包括一个椭圆形的平面镜,其口径

收稿日期: 2013-04-24; 收到修改稿日期: 2013-05-10; 网络出版日期: 2013-08-05

作者简介: 王富国(1979—),男,博士,副研究员,主要从事大型望远镜支撑设计和仿真方面的研究。

E-mail: wfg@163.com

为 3594 mm×2568 mm,厚度为 100 mm,材料为微晶玻璃,重量约为 1811 kg。

TMT 的三镜系统不同于一般望远镜的三镜系统,它要求具有跟踪、快速定向、跟踪和引导等功能。根据望远镜控制系统的指令,在 TMT 望远镜进行俯仰轴跟踪转动时,三镜系统能主动保持三镜的瞄准指向和跟踪精度。在望远镜变更工作设备、指向新的科学目标以及望远镜出现偏移、摆动、振动等情况时,三镜系统能定位三镜,并可以指向科学仪器。此外,还要保证在望远镜上的拆装、维修及清洁的方便性和安全性^[2]。

根据光学设计的要求,要求三镜系统在光轴方向的占空比不得大于 $\phi 3500$ mm 的圆锥,尤其是侧支撑结构不能在椭圆镜的短轴方向占用太多的空间,因此从方案的开始阶段就要考虑结构设计的空间要求。三镜系统的拆装和维修是在望远镜光轴水平状态进行的。望远镜不工作时,三镜的镜面是朝下的,这在一般望远镜的三镜中也不多见。三镜的支撑结构必须满足这种特殊的要求^[3]。

国内外对这种 4 m 量级的单块反射镜,一般采用的是主动光学技术,比如美国的 3.67 m 的 AEOS 望远镜和 4.1 m 的 SOAR 望远镜均采用了主动光学技术,国外采用被动支撑方式的口径比较大的望远镜主要有美国的机载 2.7 m SOFIA 望远镜。国内大口径望远镜的制造技术落后于国外,口径比较大的望远镜主要有拼接的 LAMOST 和国家天文台兴隆观测站的 2.16 m 望远镜,2.16 m 主镜采用的是被动支撑方式。纵览国内外大口径望远镜,对于 4 m 量级的单块反射镜,基本上全部采用了主动支撑方式。鉴于此,对于 4 m 量级的 TMT 三镜,本文对其被动支撑方式进行了详细的优化分析。

2 底支撑方案

TMT 最初的设计是采用 60 点的主动支撑方式,面形均方根(RMS)值可以达到 $\lambda/60$ (λ 为波长),具有较好的支撑性能,但是结构过于复杂,需要庞大的控制系统,可靠性不如被动支撑方式。后经进一步论证,通过主镜和变形镜对三镜的面形校正之后,可以校正一些低阶像差,从而降低对三镜面形的要求,因此决定采用结构更加简单、技术上更加成熟的 Whiffletree 结构。对于一个 4 m 量级的三镜,厚度只有 100 mm,采用 18 点支撑,支撑点的位置对面形值的影响非常明显,必须对支撑点的位置进行详细的优化,求得最佳的支撑点位置^[4-6]。

椭圆形反射镜不同于圆形反射镜,不具有旋转对称性,因此 18 个支撑点有两种不同的分布形式,分别为图 1(a)和(b)所示。必须对这两种支撑方式分别优化对比分析,确定最优的底支撑形式。

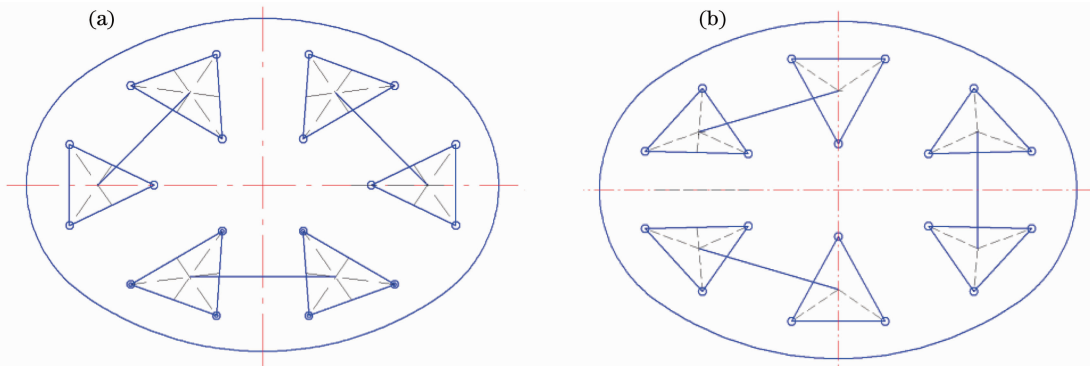


图 1 两种底支撑点分布形式

Fig. 1 Two different axial support point distributions

3 底支撑优化分析

因为模型具有对称性,为了减小计算量,建立了三镜的 1/4 模型, x 轴(短轴)方向约束 y 向的平动, y 轴(长轴)约束 x 向的平动,在 z 轴(垂直于镜面)方向约束 z 向的平动,约束位置为 4.5 个圆形区域(因为是 1/4 模型),每个圆形区域的直径大小为 25 mm,重力方向垂直于 z 轴^[7-8]。

模型采用直角坐标系,椭圆的中心为坐标原点,长轴为 x 轴,短轴为 y 轴。优化变量为 4.5 个圆形区域的坐标值,因为有一个支撑点位于坐标轴上,因此共 9 个变量,目标函数为镜面的 RMS 值。为了增加计算

精度,一般在支撑点附近的网格比较密,如果把这些节点全部进行统计计算 RMS,因为采样点的密度不同,会造成优化结果不准确,因此在优化中,只取支撑点附近部分节点计算 RMS,取点的原则是保证支撑点附近和支撑点以外的地方的采样点的密度基本一致,这样优化结果将比较准确。

利用 ANSYS 建立优化模型,采用自动划分网格的方法,单元类型主要有五面体和六面体,三镜模型的材料参数如表 1 所示。

表 1 三镜材料的参数表

Table 1 Tertiary mirror material properties

Elasticity modulus /MPa	Density /(g/mm ³)	Poisson's ratio	Thermal expansion coefficient /(10 ⁻⁶ K ⁻¹)
9.1×10^4	2.53×10^{-9}	0.25	0.05

优化时采用零阶方法和一阶方法相结合的方法^[9],优化后的结果为:第一种分布方式的面形峰谷(PV)值为 546.9 nm,RMS 值为 109.7 nm;第二种分布方式的面形 PV 值为 581.5 nm,RMS 值为 98.7nm。图 2(a)和(b)分别为两种支撑方式优化后的变形云图。

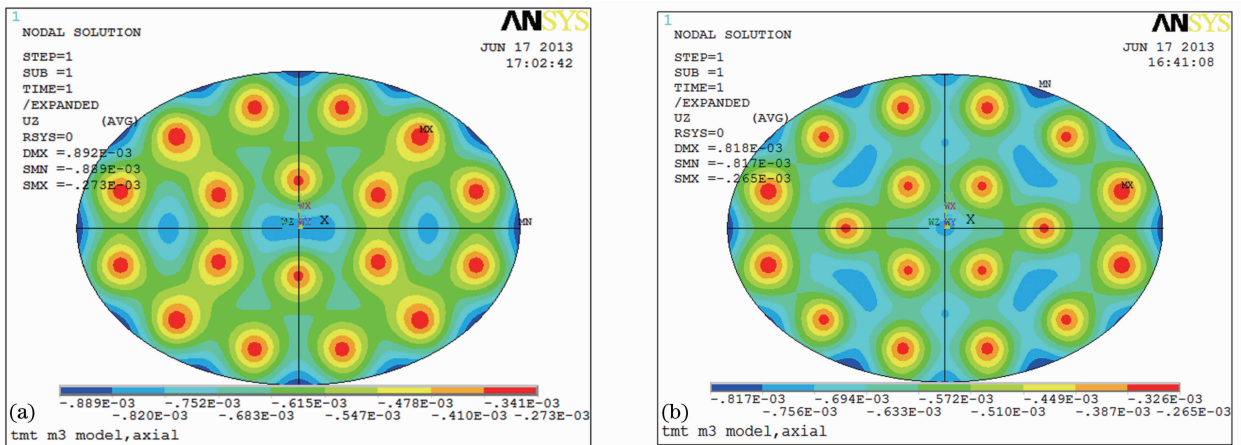


图 2 两种方案的优化结果云图

Fig. 2 Optimization results of two support plans

从前面的优化分析可以看出,两种支撑点分布形式均具有较好的支撑效果,但对于三镜支撑组件孤立的部分,由于整个三镜支撑系统安装在三镜定位器组件(简称 M3PA)中,因此支撑系统接口的合理性也很重要。考虑到三镜在望远镜中特殊的位置,其支撑结构最好关于椭圆的长轴对称,力学性能比较好。因此从面形指标、力学性能以及与 M3PA 接口合理性等方面进行了对比分析,具体见表 2。

表 2 两种支撑方案的对比分析

Table 2 Comparison between two different support plans

	RMS /nm	Force performance	Interface rationality to M3PA
Plan A	109.7	General	General
Plan B	98.7	Better	Better

从表 2 可以看出方案二具有更好的综合效果,因此选择第二种分布形式作为底支撑的最终方案。

4 面形校正

按照前面的分析结果,建立三镜支撑系统的有限元模型^[10-11],分析三镜底支撑系统的支撑性能。图 3 为三镜支撑系统的有限元模型,分析三镜在受 z 向重力时镜面变形结果,分析结果为 PV 值 2541.3 nm,RMS 值 533.8 nm。镜面变形中有较大的倾斜量,这种倾斜量作为系统误差可以去除,图 4 为去除倾斜后的镜面变形云图。

由图 4 可以看出,去除倾斜后的面形仍然没有达到很好的支撑效果,造成这种现象的原因,一是由于支撑结构自身的重量造成实际的平衡点位置有一定的误差,二是因为每个支撑点的支撑力不相等,对支撑结构造成的变形也不相等^[12-13]。因此需要对各个支撑力进行校正。在图 5 所示的示意图中,在连接处施加矫正

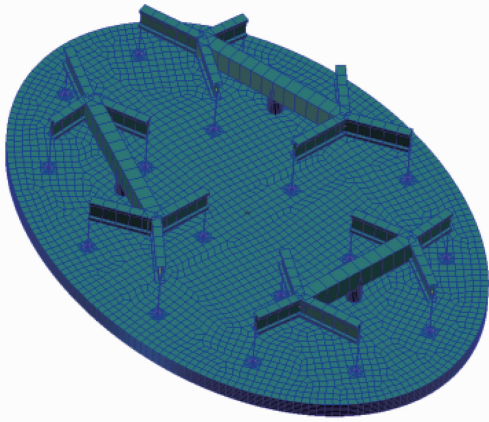


图 3 三镜底支撑系统的有限元模型

Fig. 3 Finite element model of the axial support system for tertiary mirror

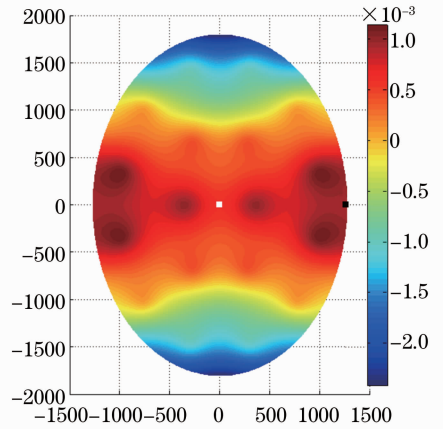


图 4 三镜在支撑系统作用下的变形云图

Fig. 4 Tertiary mirror deformation with the support system

力矩,经优化分析计算,得到各个校正力矩的大小,如表 3 所示。

施加矫正力矩后,考虑 z 方向重力时,去除倾斜后的镜面变形云图如图 6 所示。显然,图 6 所示的变形云图与图 4 优化后的云图很接近,校正后镜面变形的 PV 值为 616.7 nm,RMS 值为 103.78 nm,基本达到了裸镜优化时的面形,满足了设计要求,说明这种支撑方式合理可行。

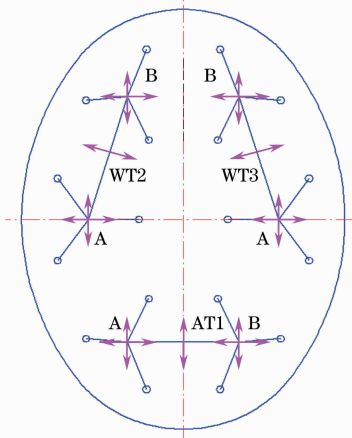


图 5 校正力矩的分布

Fig. 5 Distribution of correction moments

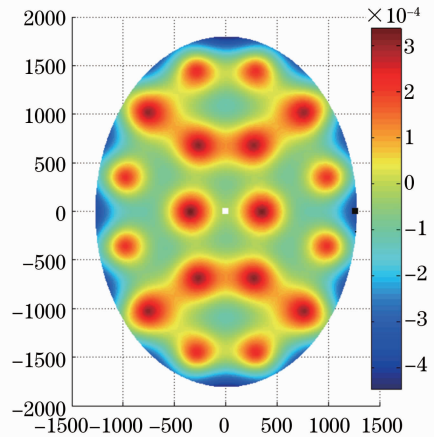


图 6 三镜校正后的变形云图

Fig. 6 Tertiary mirror deformation after correction

表 3 矫正力矩的大小(单位: $10^3 \text{ N}\cdot\text{mm}$)

Table 3 Correction moments (unit: $10^3 \text{ N}\cdot\text{mm}$)

Number	1	2	3	4	5	6	7	8
Moment	-3.9428	-1.3305	44.955	-9.3736	-5.7494	5.9944	-10.723	-26.512
Number	9	10	11	12	13	14	15	
Moment	3.0892	3.0892	-12.032	-8.7002	21.547	9.2521	2.2508	

在进行面形校正时没有考虑温度的影响,这是因为本文主要考察结构的力学性能对面形的影响,并在此基础上评价支撑方案的力学性能。由于温度带来的影响正在进行更深入的研究。

5 结 论

在总结国内外大口径反射镜支撑方式的基础上,结合 TMT 的具体要求,提出了两种不同的三镜底支撑点分布形式,并进行了优化分析,通过比较,确定最优的底支撑点分布形式。进一步建立了底支撑系统的有限元模型,分析发现三镜在支撑系统作用下的面形没有达到设计要求,提出采用校正力矩的方法进行校正。

校正后的面形达到了裸镜优化后的面形,满足了设计要求。

参 考 文 献

- 1 University of California, California Institute of Technology, The Association of Canadian Universities for Research in Astronomy, TMT Observatory Corporation. Thirty Meter Telescope Construction Proposal [EB/OL]. <http://www.tmt.org/sites/default/files/TMT-Construction-Proposal-Public.pdf>. 2007-09-12.
- 2 TMT Observatory Corporation. Design Requirements Document For Tertiary Mirror System (M3S) [EB/OL]. http://www.tmt.org/sites/default/files/documents/applications/pdf/design_requirements_document_2012-07.pdf. 2012-07-25.
- 3 Hans J Kärcer, Peter Eisenträger, Martin Süß. Mechanical principles of large mirror supports [C]. SPIE, 2010, 7733, 77332O.
- 4 Wang Fuguo, Yang Hongbo, Yang Fei, *et al.*. Optimization and analysis for the axis support points position of the large aperture mirrors [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(6): 877–880.
王富国, 杨洪波, 杨 飞, 等. 大口径主镜轴向支撑点位置优化分析[J]. *红外与激光工程*, 2007, 36(6): 877–880.
- 5 Myung K Cho. Performance prediction of the TMT tertiary mirror support system [C]. SPIE, 2008, 7018: 70184F.
- 6 Hans J Kaercher, Peter Eisentraeger, Martin Süß. Mechanical principles of large mirror supports [C]. SPIE, 2010, 7733: 77332O.
- 7 Shao Liang, Yang Fei, Wang Fuguo, *et al.*. Design and optimization of supporting system for 1.2 m lightweight SiC primary mirror [J]. *Chinese Optics*, 2012, 5(3): 229–234.
邵 亮, 杨 飞, 王富国, 等. 1.2 m SiC 轻量化主镜支撑系统优化设计[J]. *中国光学*, 2012, 5(3): 229–234.
- 8 Wang Baoxu, Wu Fan, Jiang Shilei, *et al.*. Optomechanical analysis and structure optimization of infrared Cassegrain optical system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(7): 1872–1878.
汪宝旭, 伍 凡, 蒋世磊, 等. 卡式红外光学系统光机分析及结构优化[J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(7): 1872–1878.
- 9 Zhong Xianyun, Fan Bin, Zeng Zhige, *et al.*. Design simulation and optimization for the flexure displacement support structure based on $\phi 1.8$ m lightweight reflector [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(3): 0322002.
钟显云, 范 斌, 曾志革, 等. $\phi 1.8$ m 轻质镜能动磨盘技术抛光的柔性限位支撑设计仿真与优化分析 [J]. *光学学报*, 2012, 32(3): 0322002.
- 10 Yang Fei, Ming Ming, Chen Baogang, *et al.*. Influence of diversification of elevation to the opto-mechanical system of 1.23 m telescope [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, 49(3): 032201.
杨 飞, 明 名, 陈宝刚, 等. 仰角变化对 1.23 m 望远镜光机系统的影响[J]. *激光与光电子学进展*, 2012, 49(3): 032201.
- 11 Ma Chuntao, Luo Hongxin, Wang Jie, *et al.*. Surface error measurement of plane mirrors based on oblique incidence [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, 48(7): 071201.
马春桃, 罗红心, 王 劼, 宋 丽. 斜入射法检测平面反射镜的面形误差[J]. *激光与光电子学进展*, 2011, 48(7): 071201.
- 12 Han Guangyu, Cao Lihua, Gao Yunguo, *et al.*. Supporting and assembling for primary mirrors of 1m aperture telescopes [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, 20(9): 1922–1928.
韩光宇, 曹立华, 高云国, 等. 1 米望远镜主反射镜的支撑和装配[J]. *光学精密工程*, 2012, 20(9): 1922–1928.
- 13 Zhao Lei, Gong Yan. Design and analysis for the high-precision lens support structure of the objective for the lithography [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(9): 0922001.
赵 磊, 巩 岩. 光刻物镜中透镜高精度支撑结构的设计及分析[J]. *光学学报*, 2012, 32(9): 0922001.