

## TMT 三镜被动支撑系统的概念设计

王富国, 杨 飞, 张景旭

(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(Thirty Meter Telescope)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。支撑系统包括底支撑系统和侧支撑系统,根据 TMT 对三镜的面形要求,提出了底支撑系统采用 18 点 Whiffletree 结构,通过优化分析,面形 RMS 值达到 118.5 nm。针对侧支撑系统,提出了基于 kinematics 原理的 12 点支撑方式,侧支撑作用下的面形 RMS 值为 4.7 nm,两者综合作用下的面形 RMS 值优于 77 nm。按照支撑系统方案,设计了一种满足一定质量和体积要求的支撑系统结构。

**关键词:** TMT; 三镜; 支撑; 概念设计

**中图分类号:** TH751 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2013)05-1269-06

## TMT tertiary mirror passive support system conceptual design

Wang Fuguo, Yang Fei, Zhang Jingxu

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

**Abstract:** TMT (Thirty Meter Telescope) was a Ritchey Chrétien optical-infrared thirty meter telescope with 3.594 m×2.568 m ellipse flat one and 1 800 kg weight. The tertiary mirror system reflected the light coming from the secondary mirror (M2S) to the science instruments which mounted on the telescope Nasmyth platforms. It had tracking and slewing functions. Tertiary mirror support system included axial support system and lateral support system. Based on the mirror surface figure error requirements, the paper proposed axial support system used 18 point whiffletree structure with surface figure RMS of 118.5 nm after optimum. The surface figure RMS can reach 4.7 nm by the lateral support, and the surface figure RMS was less than 77 nm by axial and lateral support. Based on this support program, the mirror support structure is designed to satisfy weighted and volume requirements.

**Key words:** TMT; tertiary mirror; support; conceptual design

收稿日期: 2012-09-11; 修订日期: 2012-10-15

基金项目: 中科院三期创新资助项目

作者简介: 王富国(1979-), 男, 副研究员, 博士, 主要从事大型望远镜支撑设计和仿真方面的研究。Email: wfg@163.com

## 0 引言

TMT(Thirty Meter Telescope)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 R-C 光学系统,地平式机架,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 0.31~28  $\mu\text{m}$ <sup>[1-2]</sup>。

在国家的支持下,国内有望以 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。

## 1 三镜系统要求

TMT 的三镜系统不同于一般望远镜的三镜系统,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中,而且要保证在望远镜上拆装、维修及清洁的方便性和安全性<sup>[3]</sup>。图 1 给出三镜系统在望远镜中的位置。

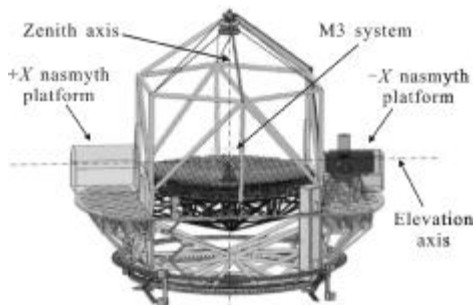


图 1 三镜系统在望远镜中的位置

Fig.1 M3 assembly shown in its location in the telescope

三镜系统包括一个椭圆形的平面镜,其大小为 3 594 mm $\times$ 2 568 mm,厚度为 100 mm,材料为微晶玻璃,质量大约为 1 811 kg。

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  $\phi 3\ 500\ \text{mm}$  的圆锥,如图 2 所示,三镜系统不得超过图中的阴影部分。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是不多见的。三镜的支撑结构必须满足这种特殊的要求<sup>[4]</sup>。



图 2 三镜系统的设计空间示意图

Fig.2 Allocated volume for M3S

## 2 面形要求

三镜的面形值是衡量三镜支撑效果的一个重要指标,三镜面形值的大小是根据整个望远镜的光学设计要求确定的,对于一个由整块主镜构成的望远镜系统,其三镜由于口径比主镜小很多,加工比主镜简单,为了保证整个系统的波面误差,面形的要求会比较高。但是对于 TMT 望远镜来说,其主镜是由 492 块子镜拼接而成的,每块子镜均有三个自由度可调,从宏观的意义上,拼接子镜可以校正一定范围内的波前误差,而且 TMT 还拥有强大的变形镜校正能力,因此可以从一定程度上降低对三镜面形的要求。TMT 对三镜面形的具体校正能力如下<sup>[5]</sup>。

TMT 通过两种方法校正系统的波前误差,第一种方法是利用拼接主镜进行校正,一个单星投影的阴影大小为 1.333 m,在投影空间上(M3 是一个圆)单星的移动量和离轴量成比例,移动的比率为 0.0745 m/('),APS(The Alignment and Phasing System)可以测量轴上波前误差,并利用 M1 的调整功能进行校正,因此,在 M1 的校正能力范围之内,轴上的波前误差可以校正到零,甚至可以减弱 M3 的面形

误差,一个单一的 M1 子镜投影到 M3 的大小为  $1.44/1.333=0.064\ 0\text{ m}$ ,因此子镜的平移、倾斜(tip, tilt)能够校正的 M3 的误差大小约为  $0.06\text{ m}$ 。另外每个子镜均有一个 warping harness,这增加的 18 个自由度可以提供更好的校正能力,约到  $0.015\text{ m}$ ,M1 总有 10 000 个自由度的面形校正能力,能够校正 M1+M2+M3 上任何可重复的变化,例如不同俯仰角时的面形变化。

第二种方法是利用 NFIRAOS 系统(Narrow Field Infrared Adaptive Optics System)校正,NFIRAOS 系统在 M1 每隔  $0.5\text{ m}$  就有一个促动器,它对 M3 的校正能力大约为  $0.5/30*1.333=0.022\text{ m}$ ,DM 一共约有 2 800 个自由度的面形校正能力。

正是因为 TMT 强大的波前误差校正能力,可以降低对三镜面形的要求,其面形要求达到  $1/6\sim 1/5$  波长即可,因此提出 18 点 whiffle tree 底支撑结构,而对于侧支撑提出基于 kinematics 原理的 12 点支撑结构。

### 3 底支撑系统

TMT 最初的设计是采用 60 点的主动光学技术,具有较好的支撑性能,面形 RMS 值可以达到  $1/60$  波长,但是结构过于复杂,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,对三镜面形的要求不是那么高,因此决定采用结构更加简单、技术上更加成熟的 whiffle tree 结构。对于一个  $4\text{ m}$  量级的三镜,厚度只有  $100\text{ mm}$ ,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<sup>[6-7]</sup>,如图 3 所示。

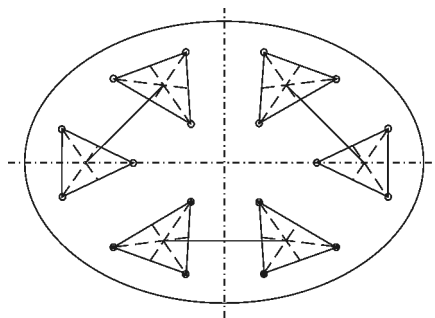


图 3 三镜底支撑点示意图

Fig.3 M3 axial support point diagrammatic sketch

为了加快有限元模型优化分析的运算速度,建立了  $1/4$  的椭圆模型,在每  $1/4$  椭圆内 18 个支撑点将被椭圆的长短轴分成 4.5 个支撑点,为了避免局

部变形过大,每个支撑点假设为直径  $25\text{ mm}$  的支撑垫,自动划分网格,由面单元生成体单元,网格类型为五面体和六面体。优化时只考虑重力的影响,重力方向垂直于镜面,优化变量为 4.5 个支撑点的坐标,共有 9 个变量,目标函数为镜面的 PV 值,因为以 PV 值为目标函数,计算简单、迭代速度快,而且结果和以 RMS 为目标的函数很接近,图 4 为有限元模型。

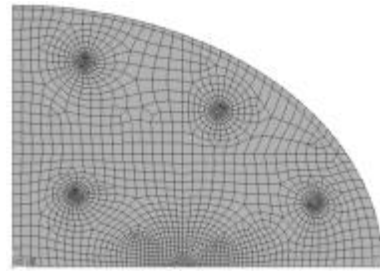
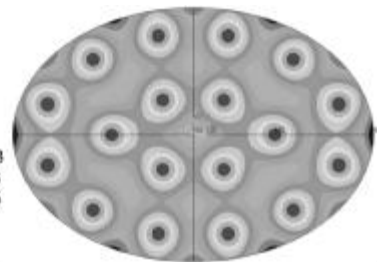


图 4 有限元模型

Fig.4 Finite element model

有限元优化后的面形值为  $PV=518.5\text{ nm}$ ,  $RMS=118.6\text{ nm}$ ,优化结果达到了设计要求。从变形云图可以看出(见图 5),镜面变形过渡均匀,优化结果较好。另外三镜工作时,重力方向并不垂直于镜面,而是有  $32^\circ\sim 48^\circ$  的夹角,因此,三镜工作时的面形是由底支撑和侧支撑共同作用决定的。

Nodal solution  
Step=1  
Sub=1  
Time=1  
/expanded  
UZ  
Rsys=0  
DMX=0.547E-03  
SMN=0.543E-03  
SMX=0.454E-06



-0.543E-03 -0.423E-03 -0.302E-03 -0.181E-03 -0.600E-01

图 5 三镜优化结果云图

Fig.5 M3 optimum result

### 4 侧支撑系统

侧支撑系统除满足支撑面形要求外,支撑形式必须满足系统要求和性能要求。根据 TMT 项目的要求,三镜系统需要每两年拆装一次重新镀膜,每次拆装后将三镜安装进镜室支撑系统上的重复定位精度在光轴方向(z 轴)上小于  $0.025\text{ mm}$ ,另两个方向小于  $0.2\text{ mm}$ 。因观测时间的宝贵,望远镜工作时,每天晚上三镜系统的校正时间要尽可能地短,以不耽误正常观测为准。

侧支撑形式有很多种,比较常用的主要有气压(或液压)、杠杆平衡重以及主动光学技术等。气压或液压的侧支撑形式,每次拆装需要调节压力,重复定位精度差,每次观测时需要校正,而且气压或液压存在容易泄露的危险,很难满足 TMT 望远镜 50 年的使用要求。如果采用杠杆平衡重的侧支撑形式,则会大大降低系统的谐振频率<sup>[9]</sup>,这对于一个巨大的望远镜来说得不偿失。采用力促动器的主动光学技术的侧支撑形式同样存在需要校正的问题。因此选择侧支撑方式,观测时不需校正,不过约束,体积小,结构简单。文中提出了一种新型的基于 kinematics 原理的侧支撑形式。

任何一个刚体都具有六个自由度:沿三个正交轴的平动和转动,当物体被全约束时,所有的运动都被限制了,如果任何一个自由度被过约束了,刚体会因为额外的力而变形,对于采用被动支撑方法的镜体来说,镜体可以看作一个刚体,采用 kinematic 支撑结构,其变形只跟热变形和重力变形有关,而不会影响到镜面面形。

如果一个刚体在三个或者三组互相成  $120^\circ$  夹角的力的作用下,则可以限制三个自由度,如图 6(a)所示的侧支撑形式可以约束  $x$  轴和  $y$  轴方向的平动,以及绕  $z$  轴的转动。已知底支撑可以约束三个自由度,即绕  $z$  轴(光轴)的平动和沿  $x$  轴和  $y$  轴方向的转动,因此底支撑和侧支撑共同作用可以约束六个自由度,既不欠约束也不过约束。考虑到 TMT 三镜口径较大,如果仅三点侧支撑则局部应力较大,因此把每组扩展为 4 个支撑点,每组内 4 个支撑点通过 whiffle tree 结构加以连接,共同构成 12 点的侧支撑结构,可以适应任意方向的重力作用,如图 6(b)所示,每组内的力是相互平行的,而每组之间的力成  $120^\circ$  夹角。

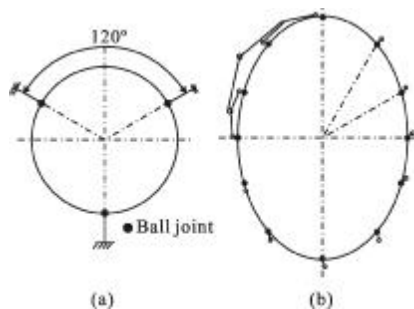


图 6 侧支撑原理图

Fig.6 Lateral support principle

建立三镜的有限元模型,分析重力作用下的镜面面形,假设重力方向沿椭圆长轴方向,有限元分析的面形结果 PV 值等于  $63.9 \text{ nm}$ ,RMS 值等于  $4.3 \text{ nm}$ 。重力方向沿椭圆短轴方向,有限元分析的面形结果 PV 值等于  $99.5 \text{ nm}$ ,RMS 值等于  $5.2 \text{ nm}$ 。由此可见这种侧支撑形式具有优异的支撑性能。图 7 为侧支撑效果的变形云图。

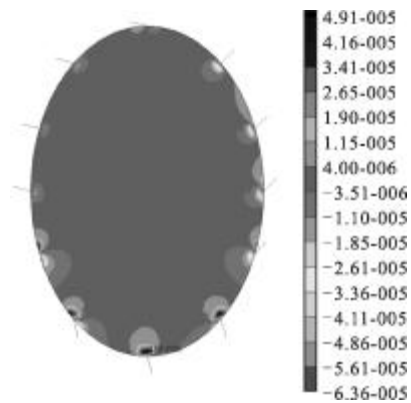


图 7 重力沿长轴方向时镜面 Z 向变形云图

Fig.7 M3 Z direction deformation nephogram with the long axis gravity

通过分析发现,对于平面镜来说,当侧支撑点位于镜面的中性面内时,侧支撑对面形的影响存在以下特点:(1) 支撑点的个数对面形影响不是很大,无论是 8 个侧支撑点还是 12 个支撑点,面形值均小于  $10 \text{ nm}$ ,相对于底支撑的变形小很多;(2) 支撑点的位置对面形影响不大,无论支撑点呈等弧长分布还是呈等角间距分布,面形值几乎相等,因此支撑点位置优化的意义不大,支撑点的位置可以更多地从结构的空问要求考虑;(3) 侧支撑只存在泊松效应,这种影响是局部的,只对支撑点附近的面形有影响,对镜面的中心影响不大,而实际上对光学像质贡献最大就是镜面的中心位置处。

提取镜面节点的 Z 向位移数据,并进行归一化处理,分析镜面节点变形在空间上的分布,从图 8 可以看出,当归一化半径小于 0.8 时,镜面变形值非常小而且集中,Z 向变形值均小于  $1 \times 10^{-5} \text{ mm}$ ,只有当归一化半径大于 0.9 时,少数镜面节点变形值较大而且离散,Z 向变形值均小于  $5 \times 10^{-5} \text{ mm}$ 。进一步验证了在侧支撑作用下,镜面 Z 向变形值在镜面中心部位较小,变形值集中在镜面边缘的侧支撑处,侧支

撑对面形的影响较小。

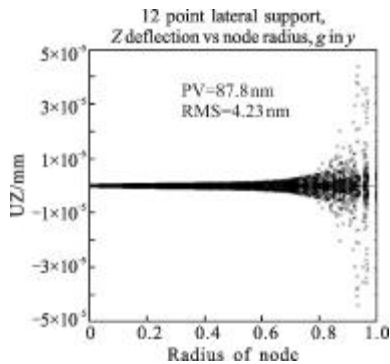


图 8 镜面 Z 向位移与等效半径的关系

Fig.8 Relationship between the mirror Z-direction deformation with equivalent radius

### 5 底支撑和侧支撑共同作用下的支撑性能

望远镜工作时, 三镜的工作状态既不是单纯的底支撑作用也是单纯的侧支撑作用, 而是两者共同作用的效果。当望远镜指向不同的俯仰角和方位角, 三镜指向不同的科学仪器时, 通过对望远镜和三镜之间的坐标变换, 可以解析出表 1 中所示的三镜几种典型的受力状态, 在这几种不同的重力方向作用

表 1 几种典型工作状态下的镜面面形  
Tab.1 Mirror surface figure in several representative conditions

Different direction gravity/mm·s <sup>-2</sup>	PV/nm	RMS/nm
-2 258.262	370.08	64.87
-7 148.547		
-6 327.450		
-8 674.983	167.50	25.48
-3 868.083		
-2 455.443		
0.000	398.34	71.13
-6 936.651		
-6 936.651		
-8 890.83	194.15	30.32
-2 931.228		
-2 931.228		
-839.736	431.01	77.11
-6 244.065		
-7 519.365		
-8 664.192	266.52	44.04
-1 703.016		
-4 276.236		

下, 分别以杆单元和梁单元模拟底支撑和侧支撑, 分析镜面在不同的重力方向下的面形, 得出表 1 所示的面形结果。从分析结果可以看出, 望远镜工作时, 三镜镜面面形值远远优于设计要求, 证明这种支撑方式是切实可行的<sup>[8]</sup>。

### 6 结构设计

TMT 三镜的支撑系统包括基于 Whiffletree 的 18 点底支撑系统和基于 kinematics 原理的 12 点侧支撑系统。支撑系统结构必须满足以下条件<sup>[9-10]</sup>: (1) 由于镜室和支撑结构的力学和热变形对三镜面形的影响在满足设计要求的前提下要尽可能的小, (2) 底支撑和侧支撑必须独立作用, 互不干涉。这就要求底支撑和侧支撑在特定的方向上具有一定的柔性, 底支撑结构只限制三镜在镜面方向(z 轴)的平动, 以及绕 x 轴和 y 轴的转动, 侧支撑只限制另两个方向(x 轴和 y 轴)的平动, 以及绕 z 轴的转动。(3) 质量要求小于 4.5 kg (含三镜), 体积小于 φ3.5 m, (4) 结构简单, 便于拆卸和维修, 可操作性强, 抗震性能好。

基于上述分析结果和设计要求设计了如图 9 所



图 9 三镜支撑系统

Fig.9 M3 support system

示的三镜支撑系统, 该支撑系统具有以下特点: (1) 三镜的镜室不是传统意义上的结构形式, 而仅仅是一个大的三角形, 大大减小了支撑系统的质量, 有效地解决了质量的要求; (2) 底支撑结构是通过直径很小的细杆把三镜和镜室连接在一起, 侧支撑结构在垂直于镜面的方向上具有一定的柔性, 而在另外两个方向上具有刚性, 通过这种设计, 可以有效地解决底支撑和侧支撑作用时互相干涉的问题; (3) 三镜回转部分的接口不是位于短轴方向, 而是位于三镜镜室

的背面,通过一个镜室背部的托架连接到三镜跟踪架的回转轴上,有效解决了支撑结构在三镜短轴方向的占空比,缩小了体积。

## 7 结 论

TMT 三镜是一个 4 m 量级的反射镜,而且具有跟踪和指向功能,这在一般望远镜中是不多见的,其安装、维修和工作时都有一般望远镜三镜所不具有的特点。结合这些特殊的要求,从底支撑和侧支撑方案入手,着重研究了镜面的支撑方式,以及在这些支撑方式下的镜面变形,分析结果表明,底支撑和侧支撑方案切实可行。根据支撑方案和一些其他的要求,设计了三镜的支撑系统。

### 参考文献:

- [1] Silva David R, George Angeli, Corinne Boyer, et al. Thirty meter telescope: observatory software requirements, architecture, and preliminary implementation strategies [C]// SPIE, 2008, 7019: 789974-789992.
- [2] Luc Simard, David Crampton, Brent Ellerbroek, et al. The TMT instrumentation program[C]// SPIE, 2010, 7735:857187-85192.
- [3] Larry Stepp. Thirty meter telescope project update[C]//SPIE, 2012, 8444: 928006-928019.
- [4] Jerry Nelson, Sanders Gary H. The status of the thirty meter telescope project[C]//SPIE, 2008, 7012: 788238-788245.
- [5] Ellerbroek Brent L, Adkins Sean M, Andersen David R, et al. TMT adaptive optics program status report [C]//SPIE, 2012, 8447: 927046-927054.
- [6] 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. (in Chinese)  
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.
- [7] Zhang Dongge, Zhuo Renshan, Li Yaobin. Surrogate models based optimization methods for the axial support points of the primary mirror [J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(2): 409-414. (in Chinese)  
张东阁, 卓仁善, 李耀彬. 反射镜轴向支撑位置优化的代理模型方法[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(2): 409-414.
- [8] Cho Myung K. Performance Prediction of the TMT Tertiary Mirror Support System[C]//SPIE, 2008, 7018: 169.
- [9] Kaercher H J, Peter Eisentraeger, Martin Süß. Mechanical principles of large mirror supports [C]//SPIE, 2010, 7733: 77332O-1-12.
- [10] Wang Baoxu, Wu Fan, Jiang Shilei, et al. Opto-mechanical analysis and structure optimization of infrared cassegrain optical system [J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(7): 1872-1878. (in Chinese)  
汪宝旭, 伍凡, 蒋世磊, 等. 卡式红外光学系统光机分析与结构优化[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(7): 1872-1878.
- [11] Fan Lili, Zhang Jingxu, Jiang Hao, et al. Design of primary mirror support of equatorial telescope[J]. Infrared and Laser Engineering, 2011, 40(3):476-479. (in Chinese)  
范李立, 张景旭, 姜皓, 等. 极轴式望远镜主镜支撑设计[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(3): 476-479.