

大口径望远镜中三镜技术现状及发展趋势

杨飞 王富国 陈宝刚 张丽敏

(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 为了充分了解三镜在大口径望远镜系统中体现的功能,满足口径日益增大的望远镜系统研制要求,对国内外大口径望远镜中应用的三镜系统进行技术性的调研和总结。从望远镜光学系统结构发展、口径变化、功能要求等三方面对三镜系统进行详细的技术阐述,并结合三十米望远镜(TMT)三镜系统的概念设计进行了具体的技术说明。结果表明,三镜在望远镜系统,尤其是大口径望远镜中的作用越来越突出,并且随着望远镜技术的发展,对三镜系统赋予的功能要求也越来越丰富与严格。

关键词 光学设计;三镜系统;三镜支撑技术;大口径望远镜;三十米望远镜

中图分类号 P111.2;TH751 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP50.050005

Status and Development of Tertiary Mirror Technology in Large Aperture Telescope

Yang Fei Wang Fuguo Chen Baogang Zhang Limin

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

Abstract In order to comprehend the functions of tertiary mirror applied in large aperture telescopes and meet the requirements for developing large aperture telescope, the technologies of tertiary mirror systems are summarized from the development of optics system configuration, variation of aperture and variation of functionality. A more detailed description about the tertiary mirror technology is given with the conceptual design of Thirty-Meter Telescope (TMT) tertiary mirror system. The tertiary mirrors play a more and more important role in telescopes, especially in large aperture telescopes. With the development of telescope technology, the requirements for tertiary mirrors also become more and more strict, and the functions of tertiary mirrors become more and more variable.

Key words optical design; tertiary mirror system; support technology of tertiary mirror; large aperture telescope; Thirty-Meter Telescope

OCIS codes 220.4880; 110.6770; 230.2090; 220.1140

1 引言

所有早期的光学望远镜都是透射式望远镜,采用透镜进行成像,它们的历史可以追溯到1608年。因为不同波长的光经过玻璃时会发生弯曲或不相等折射后焦点不同,折射望远镜常常会产生色差。而对于不同颜色的光,反射的方向不会发生变化,因此反射望远镜不会产生色差。第一台实际的光学反射望远镜由牛顿于1668年制作成功。

望远镜经过四百多年的发展,从小口径的透射式光学系统,逐渐发展到当代的以大口径反射式为主的光学系统^[1]。众所周知,望远镜口径越大,集光能力越强,空间分辨率越高,望远镜能观测到的距离就越远。望远镜技术的发展与人类探索宇宙的热情与努力是分不开的。

望远镜的发展将为人类捕捉到越来越多的光学信息,同时也将对望远镜的系统、望远镜的结构和设计带来新的变革。

由于大面积均匀透明玻璃材料的制造困难、透射元件的吸收和色散以及大型透镜边缘支撑的压力变形

收稿日期: 2013-01-21; **收到修改稿日期**: 2013-03-07; **网络出版日期**: 2013-04-28

基金项目: 中国科学院三期创新基金资助课题。

作者简介: 杨飞(1982—),男,硕士,助理研究员,主要从事地在大口径光电望远镜光机系统方面的研究。

E-mail: yangflying@163.com

等问题,现代望远镜主要采用反射式的光学系统以及一种特殊的广角视场的折反射系统。在反射系统中,因为焦点的不同可以分为主焦点、牛顿焦点、卡塞格林焦点、奈斯密司焦点及折轴焦点。这些焦点在光路、焦距、像差和镜面位置特点上均有不同的地方。大视场、大口径的折反射系统主要是指施密特照相系统,目前由于光导纤维在天文上的应用,施密特系统也正在用于大视场多目标天体的光谱工作^[2]。

在望远镜口径越来越大的发展态势下,为了提高望远镜的使用效率,需对望远镜系统的焦点进行充分的利用,亦即使望远镜具备多焦点的功能。因此,作为转换焦点,提高大口径望远镜功能的关键元件三镜的作用越来越受到大家的关注。本文从望远镜系统中三镜的功能和结构形式方面对三镜技术的发展进行总结,并结合三十米望远镜(TMT)三镜系统的概念设计展开具体讨论,以为望远镜技术指标的实现和研制成本的控制提供参考。

2 国内外三镜技术现状及发展趋势

2.1 三镜功能

大口径望远镜的光学系统以主次镜两镜系统为主,如图 1 所示,即卡塞格林式(简称卡式)或者 Ritchey-Chretien 式(简称 R-C 式)系统。而三镜的功能正逐渐从简单的光束折转发展到更多的望远镜系统跟踪瞄准、波前校正等方面。

在光束折转方面,三镜可将来自次镜的光束折转至不同的焦点,如奈斯密司焦点、折轴卡塞格林焦点、Coude 焦点、卡塞格林焦点等。在中国科学院长春光学精密机械与物理研究所(CIOMP)研制的 1.23 m 望远镜中,三镜具备绕主光轴的旋转功能,能够使望远镜焦点在位于水平轴头的奈斯密司焦点、Coude 焦点以及四通上的折轴卡塞格林焦点之间进行切换,以满足望远镜不同的实验要求。1.23 m 望远镜如图 2 所示,其三镜为八边形平面镜,其长短轴尺寸为 300 mm×214 mm^[3]。

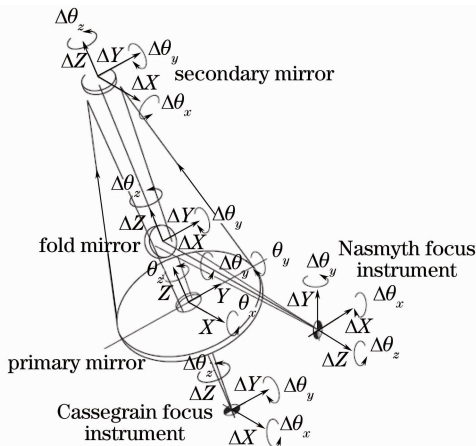


图 1 主次三镜光学系统原理结构图

Fig. 1 Main optical system configuration of three-mirror telescope



图 2 CIOMP 的 1.23 m 望远镜

Fig. 2 1.23 m telescope of CIOMP

Gran Telescopio Canarias (GTC) 10 m 口径望远镜中的三镜系统同样也具备光束折转功能,与 1.23 m 望远镜不同之处是 GTC 望远镜的三镜还具备收拢功能,即将三镜在光路中收起,以便让来自于次镜的光束达到卡塞格林焦点。通过三镜的旋转和收拢,可实现 2 个奈斯密司焦点和 4 个折轴卡塞格林焦点的切换以及卡塞格林焦点的使用。GTC 望远镜光学系统结构如图 3 所示,三镜为椭圆形平面镜,长短轴尺寸为 1510.9 mm×1062.7 mm^[4]。

作为功能最强大的天文望远镜之一,The Very Large Telescope (VLT)也拥有与 GTC 望远镜系统功能类似的三镜系统。如图 4 所示,三镜为椭圆形平面镜,尺寸为 1250 mm×880 mm^[5]。

在光束折转方面,为了实现望远镜光学系统不同的功能,或者构建不同的光学系统,也可以采用多个三镜进行切换,即放置在不同位置的三镜满足不同光学系统焦点位置的要求。如 The Stratospheric Observatory For Infrared Astronomy (SOFIA),为一台安装在 Boeing 747 飞机上的 2.5 m 口径望远镜系

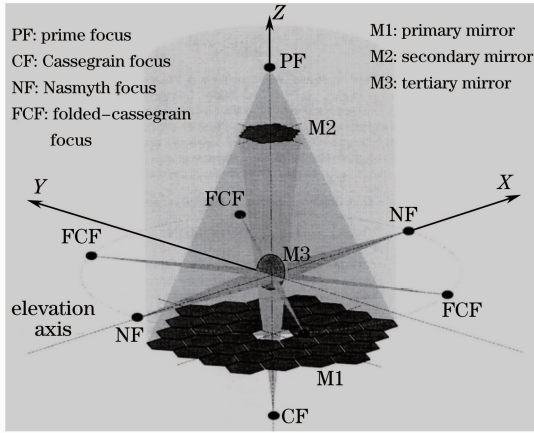


图3 GTC望远镜光学系统原理结构图

Fig. 3 Optical system of GTC telescope

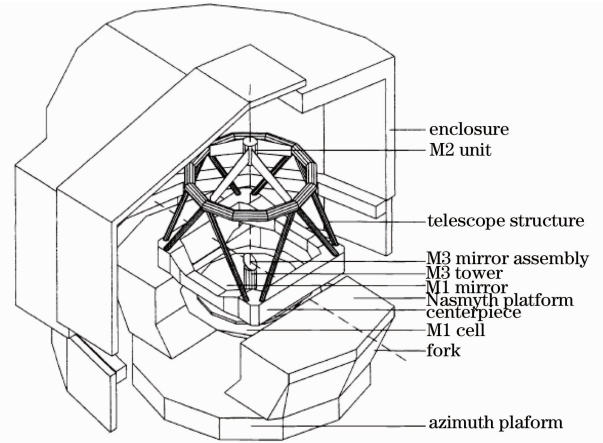


图4 VLT望远镜结构图

Fig. 4 Configuration of VLT telescope

统,其光学基本结构为一个拥有奈斯密司焦点的“真”卡塞格林系统,由凹面抛物面主镜、凸面次镜以及两个平面三镜组成。在奈斯密司结构中,光束通过两镜卡塞格林系统后被平面三镜折转,通过奈斯密司镜筒至压力舱区域的焦面。这种布局允许焦面科学终端设备在“衬套”环境中连续观测。SOFIA利用两个三镜,三镜#1是分色镜,反射红外线至科学终端设备焦面,透射可见光束至三镜#2,三镜#2反射光束至焦面成像,用来跟踪和指向。这种布局能够减少红外科学终端设备的背景散射,而且允许稳定的可见光焦面成像。交叉光路的方法在结构中减少空气轴承的直径,使科学终端设备接口更紧凑。如图5所示,三镜#1为分色镜,材料为Herasil,镀分色金膜,尺寸为 $0.5\text{ m}\times 0.35\text{ m}$;三镜#2为全反射平面镜,材料为Zerodur,镀铝膜,尺寸为 $0.5\text{ m}\times 0.35\text{ m}$ ^[6]。

也有望远镜为多个主光学系统联合工作而采用多个三镜进行光束折转的,如The Large Binocular Telescope (LBT)就备有两个三镜,每个三镜单元都安装在一个旋转平台上,可将光束折转至望远镜上4个不同的科学终端设备。两个三镜的设计是为了满足折轴格雷果里焦面和系统光学链的焦点要求,每个三镜单元安装在一个展开的桁架摆臂上,该结构与望远镜俯仰轴结构相连,允许三镜在光轴上根据望远镜观测要求进行移动。如图6所示,三镜为八边形,尺寸为 $640\text{ mm}\times 540\text{ mm}$ ^[7]。

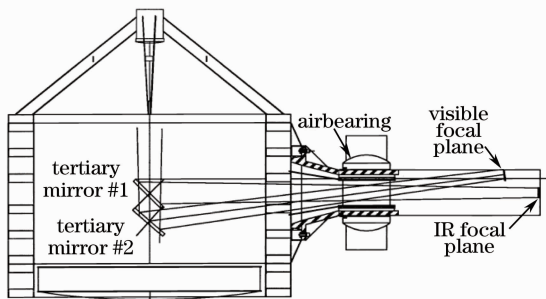


图5 SOFIA望远镜原理结构图

Fig. 5 Configuration of SOFIA telescope

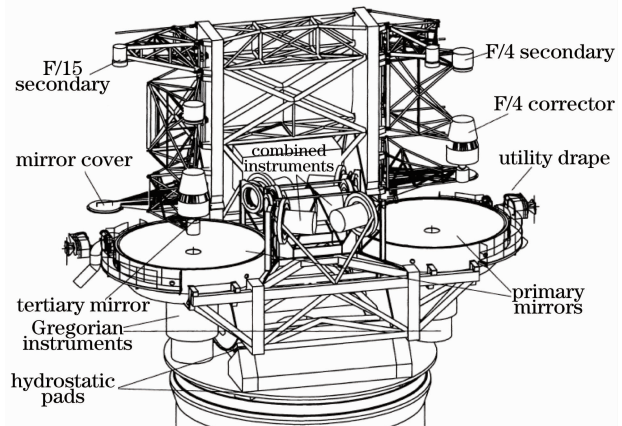


图6 LBT望远镜结构图

Fig. 6 Configuration of LBT telescope

三镜也可以参与望远镜系统跟踪与瞄准。对于地平式望远镜,为了抵消跟踪观测时的俯仰运动,就要求三镜与望远镜的俯仰轴具备相同的跟踪与瞄准功能。如The Large Millimeter Telescope (LMT)为一台口径为50 m、工作在毫米波段的单筒望远镜,其三镜就安装在一个定位机构上,能够提供俯仰方向的跟踪功能,而且三镜能够转动 180° 以切换光束至不同探测器。如图7所示,LMT三镜为椭圆形平面镜,尺寸为 $1.1\text{ m}\times 1.67\text{ m}$ ^[8]。

正在开展概念设计的美国三十米望远镜(TMT),光学系统为 Ritchey-Chretien 系统,拥有两个奈斯密司平台,其三镜系统要求具备更高精度的跟踪与瞄准功能。由于 TMT 望远镜装载了 7 个不同的科学终端设备,这 7 个科学终端设备仅有一个位于水平轴上,其余的都分布在奈斯密司平台上,因此在望远镜观测天文目标时,三镜需具备很高的跟踪与瞄准精度,通过三镜的二维运动准确地将来自于次镜的光束折转至不同的科学终端设备。如图 8 所示, TMT 三镜为椭圆形平面镜,尺寸为 $3.594\text{ m} \times 2.536\text{ m}^{[9]}$ 。

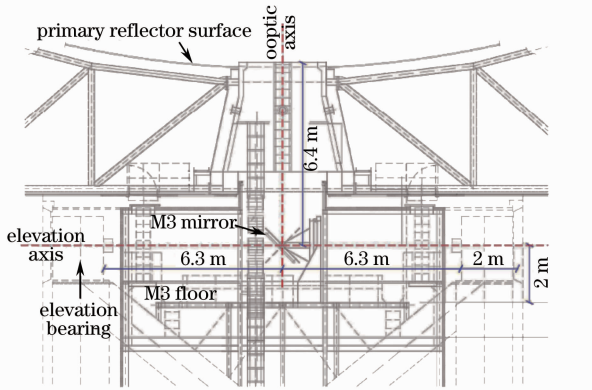


图 7 LMT 望远镜结构图

Fig. 7 Configuration of LMT telescope

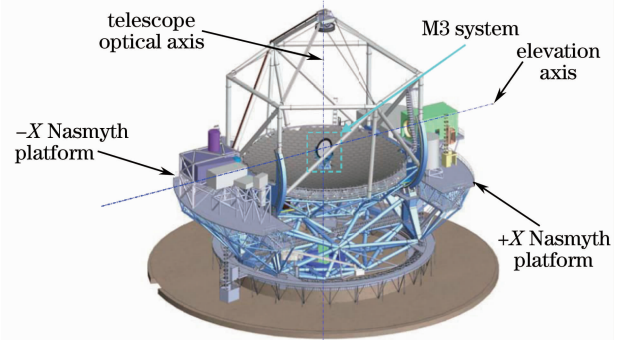


图 8 TMT 望远镜结构图

Fig. 8 Configuration of TMT telescope

为了使望远镜具备更完美的成像质量,三镜系统也逐渐具备波前校正的功能。如 The Southern Astrophysical Research Telescope (SOAR) 望远镜中,三镜具备波前整体倾斜校正功能,能够提供光束的 50 Hz 快速控制,用来补偿大气的扰动,配合望远镜主动光学的 Ritchey-Chretien 光学系统,实现 $0.18''$ 的成像质量。三镜同时还具备折转功能,能够将光束直接导向两个奈斯密司焦点或 3 个折轴卡塞格林焦点中的某一个焦点。如图 9 所示,SOAR 望远镜三镜为椭圆形平面镜,尺寸为 $640\text{ mm} \times 455\text{ mm}^{[10]}$ 。

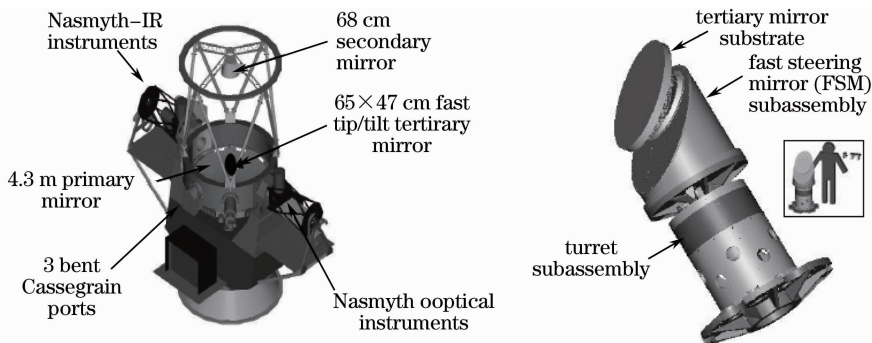


图 9 SOAR 望远镜及三镜结构

Fig. 9 SOAR telescope and its tertiary mirror

为了更好的校正望远镜光学系统的波前误差,三镜在望远镜技术的发展趋势下可引入自适应光学(AO)技术。下一代地基望远镜的口径将会是在 $30 \sim 100\text{ m}$,在这个量级上只能采用类似 Keck 望远镜的拼接形式。因此将 AO 技术引入三镜,使三镜成为一个拼接镜系统,不仅是具有高空间频率校正能力的变形镜(自适应光学),而且还有校正拼接镜望远镜系统相位误差的能力(能动光学),能够对望远镜光学系统的波前误差进行更有效的补偿。也就是说三镜既具备能动光学,又具有自适应光学的双重能力。如图 10 所示^[11]。

表 1 总结了上述各种三镜的功能尺寸及材料。

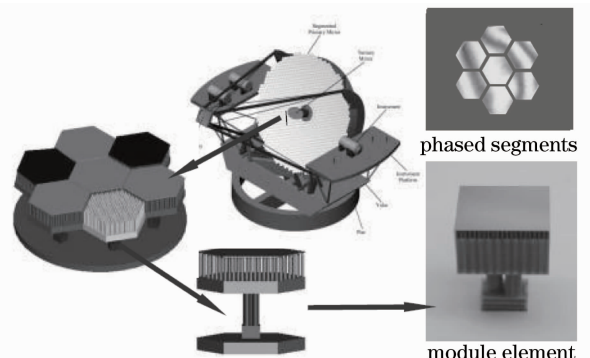


图 10 引入自适应光学技术的三镜系统

Fig. 10 Tertiary mirror system with adaptive optics

表 1 三镜技术综述

Table 1 Summary of tertiary mirrors

Telescope	Tertiary mirror function	Tertiary mirror size /mm	Mirror structure	Mirror material
1.23 m-CIOMP	Relay light	300×214	Solid	Zerodur
GTC	Relay light	1510.9×1062.7	Solid	Zerodur
VLT	Relay light	1250×880	Lightweight	Zerodur
SOFIA	Relay and refract light	500×350	Solid	Herasil, Zerodur
LBT	Relay light	640×540	Lightweight	Borosilicate
LMT	Tracking	1100×1670	Solid	Aluminum
TMT	Tracking	3594×2536	Solid	Zerodur
SOAR	Tip/tilt correction for wavefront	640×455	Lightweight	ULE

2.2 三镜结构形式

三镜结构形式首先与三镜在望远镜中的功能有着密切联系。其次,对于大口径望远镜,三镜的结构尺寸随着望远镜主镜口径的增大而逐渐增大,因此,三镜结构形式与其尺寸大小也密切相关。

一般而言,对于功能简单的三镜系统,三镜会采用普通的实体镜结构;具备波前整体校正功能、需要进行快速控制的三镜系统,三镜会采用轻量化结构,以提高系统控制带宽;具备能动光学或自适应光学功能的三镜系统,将会采用薄镜、超薄镜、拼接镜等更为复杂的结构形式。前述各种三镜的结构特点分别列于表 1 中。

在大口径望远镜中,常用作光学镜体的材料如表 2 所示^[12],可根据三镜具体功能进行选择和应用。

表 2 望远镜镜体光学材料

Table 2 Summary of mirror materials for telescope

Parameters	Zerodur	ULE	SiO ₂	Borosilicate	Be	SiC
Denisty ρ / (g/cm ³)	2.53	2.21	2.20	2.2	1.85	3.05
Young modulus E /GPa	90.3	67.6	70	63	290	390
Specific stiffness E/ρ / (10 ⁶ m) (higher is better)	3.6	3.1	3.2	2.8	15.1	12.8
Thermal conductivity λ / [W/m·K]	1.46	1.31	1.38	1.12	159	185
Coefficient of thermal expansion (CTE) α / (10 ⁻⁶ /K ⁻¹)	0.02(0.01)*	0.03	0.55	3.2	11.4	2.6
Thermal stability α/λ / (10 ⁻⁸ m/W) (smaller is better)	1.37(0.68)*	2.30	39.90	285.7	7.17	1.49

* On special requests

2.3 三镜支撑技术

三镜支撑技术与三镜的口径大小、结构形式以及功能是密切相关的。对于口径较小的实体镜,可将镜体视为刚体,采用三点定位的原则进行支撑,如 1.23m 望远镜的三镜采取的支撑结构即为背部的三点支撑^[3]。SOAR 望远镜的三镜采取的也是三点支撑,通过 3 个 Invar 块和 3 个钛合金 Bipod 柔性片均布在 2/3 半径上,采用柔性环节可以减少安装和热应力,如图 11 所示^[10]。

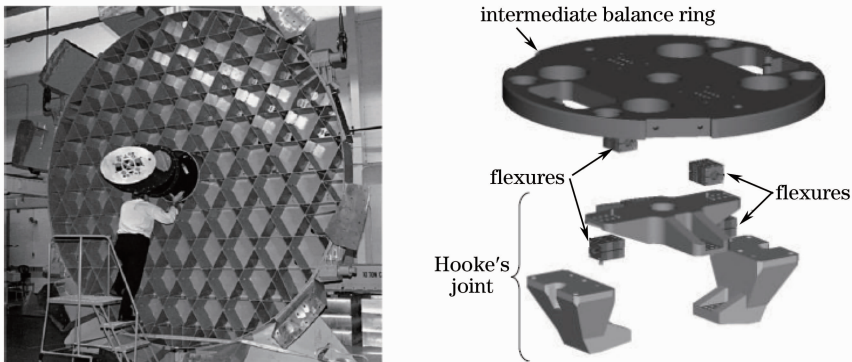


图 11 SOAR 三镜支撑结构

Fig. 11 Tertiary mirror support system of SOAR

对于口径更大的三镜,支撑方面的技术与大口径主镜支撑技术类似,有被动支撑与主动支撑,对引入自适应光学的三镜系统,其支撑方式将是拼接镜面能动光学与变形镜自适应光学相结合的方式。

3 TMT 中三镜技术的应用

3.1 三镜系统功能

由于 TMT 拥有两个奈斯密司平台,用以搭载 7 个不同的科学终端设备,而这 7 个科学终端设备仅有一个位于水平轴上,因此在望远镜观测天文目标时,三镜需具备高精度的跟踪与瞄准功能,通过三镜的二维运动准确地将来自于次镜的光束折转至某一个科学终端设备。为了切换不同的科学终端设备,三镜还需具有绕主次镜光轴方向的旋转运动功能。总而言之,TMT 三镜除了具备光束折转功能外,还具备高精度的跟踪与瞄准功能。

3.2 三镜系统概念设计

为了实现三镜的合理支撑和功能实现,三镜系统需开展三镜抛光检测、支撑结构、跟踪定位以及控制方面的概念设计。

支撑结构包括底支撑和侧支撑。基于三点定位的原则,支撑结构均采用被动支撑 Whiffletree 结构。其中底支撑点的布局以表面变形均方根(RMS)值为最小目标函数,不约束支撑力的大小。然后,更进一步的优化是为每组支撑力选择大小,但不以加大表面 RMS 值为代价。图 12 所示为采用 18 点底支撑进行布局优化后的变形云图,能达到 120 nm 的 RMS 值。

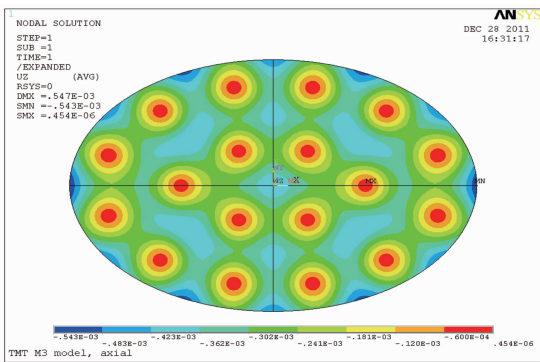


图 12 TMT 三镜底支撑有限元分析结果

Fig. 12 Finite element analysis (FEA) result for axial support of tertiary mirror of TMT

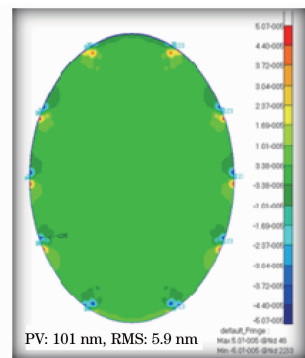


图 13 TMT 三镜侧支撑有限元分析结果

Fig. 13 FEA result for lateral support of tertiary mirror of TMT

侧支撑采用 12 点支撑。图 13 所示为进行布局优化后的变形云图,能达到 5.9 nm 的 RMS 值。在计算机辅助设计(CAD)的基础上,进行了支撑结构的概念设计,如图 14 所示。

跟踪定位结构采用两轴结构形式,以满足三镜二维跟踪瞄准以及焦点切换的功能。其中绕主次镜光轴方向的转动通过方位轴来实现,绕三镜短轴方向的俯仰运动通过促动器驱动三镜支撑单元来实现,如图 15 所示。

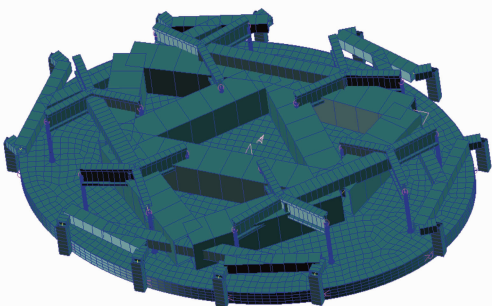


图 14 TMT 三镜支撑结构模型

Fig. 14 CAD model of TMT tertiary mirror support structure

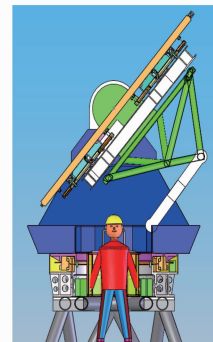


图 15 TMT 三镜系统概念设计方案

Fig. 15 Conceptual design of TMT tertiary mirror system

4 结束语

随着望远镜技术的不断进步,大口径望远镜中三镜系统的相关技术也得到了相应的发展与进步,三镜的功能也越来越丰富。作为下一代大口径望远镜中关键的光学元件之一,能动光学、自适应光学、精密控制等先进技术在三镜上的应用也会日益扩展。

参 考 文 献

- 1 Cheng Jingquan. Principles of Astronomical Telescope Design[M]. Beijing: China Science & Technology Press, 2002
程景全. 天文望远镜原理和设计[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2002
- 2 Dingqiang Su, Xiangqun Cui, Yanan Wang *et al.*. Large Sky Area Multi-object Fiber Spectroscopic Telescope (LAMOST) and its key technology[C]. *SPIE*, 1998, **3352**: 76~90
- 3 Yang Fei, Zhang Jingxu, Zhang Limin. Design of a multi-freedom fine tuning structure for the third mirror[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2008, **16**(s): 159~162
杨 飞, 张景旭, 张丽敏. 三镜多自由度微调机构方案设计[J]. 光学精密工程, 2008, **16**(s): 159~162
- 4 Lotti Jochum, Javier Castro, Nicholas Devaney. Gran Telescopio Canarias: current status of its optical design and opto-mechanical support system[C]. *SPIE*, 1998, **3352**: 621~631
- 5 W. Bollinger, H. -J. Juraneck, S. Schulte *et al.*. Opto-mechanical design and testing of the VLT tertiary mirrors[C]. *SPIE*, 2000, **4003**: 108~114
- 6 Peter A. Jones, David F. House, Frederic J. Sturgis. An optical assembly concept for SOFIA[C]. *SPIE*, 1994, **2199**: 286~297
- 7 J. M. Hill. The Large Binocular Telescope Project[C]. *SPIE*, 1997, **2871**: 57~68
- 8 David M. Gale. Mechanical alignment of tertiary mirror and positioned on the LMT telescope[C]. *SPIE*, 2008, **7018**: 70183M
- 9 Myung K. Cho. Performance prediction of the TMT tertiary mirror support system[C]. *SPIE*, 2008, **7018**: 70184F
- 10 John T. Stein, Conrad Neufeld. A fast steering tertiary mirror for the SOAR telescope[C]. *SPIE*, 2004, **5495**: 340~347
- 11 Thomas R. Price, Mark A. Ealey. Adaptive tertiary mirror for segmented mirror control[C]. *SPIE*, 2004, **5166**: 157~164
- 12 Hans F. Morian, Reiner Mackh. ZERODUR for lightweight secondary/tertiary mirrors[C]. *SPIE*, 1998, **3352**: 140~150