

文章编号 1004-924X(2017)增-0113-07

## TMT 三镜原理演示系统轴系结构设计及精度测试

赵宏超<sup>1\*</sup>, 姜海波<sup>1</sup>, 安其昌<sup>1,2</sup>, 郭鹏<sup>1,2</sup>, 杨飞<sup>1</sup>

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院大学, 北京 100039)

**摘要:**为验证三十米望远镜项目(TMT)三镜系统的轴系跟踪系统设计,设计、加工制造了一个比例为1/4的原理演示系统。对影响该系统回转精度、重复性指向精度的误差来源进行研究。首先,设计了一套方位轴系和俯仰轴系均采用双排角接触预紧球轴承作为支撑的回转系统,以满足三镜系统复杂工况的需要。然后,建立了该系统的有限元模型,以预测原理演示系统的性能。最后,测量了两个垂直轴的晃动误差以及在两个工况下系统的重复性指向误差。仿真结果表明,系统的第一阶谐振频率可达35.9 Hz,能够满足前期设计要求;实验验证中,采用傅里叶谐波理论处理后得到俯仰轴系的晃动误差约为1.91"(PV),方位轴晃动误差约为2.5"(PV)。后期的重复性指向实验显示,三镜原理演示系统的重复性指向精度约为2.77"(RMS)。仿真和实验结果证明三镜系统轴系的设计方案合理,测试方法可行,能够达到预期效果。

**关键词:**三十米望远镜;俯仰-方位轴系;晃动误差;谐波理论;重复性指向误差

中图分类号:TH751 文献标识码:A doi:10.3788/OPE.20172513.0113

## Design and tests of shafting structure in giant steerable science mirror prototype system

ZHAO Hong-chao<sup>1\*</sup>, JIANG Hai-bo<sup>1</sup>, AN Qi-chang<sup>1,2</sup>, GUO Peng<sup>1,2</sup>, YANG Fei<sup>1</sup>

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,  
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*

2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)*

*\* Corresponding author, E-mail: zhaohcciom@163.com*

**Abstract:** To develop a smooth tracking mechanism for Thirty Meter Telescope (TMT) in the gravity-invariant condition, a 1/4 scale, functionally accurate version of the Giant Steerable Science Mirror (GSSM) prototype was developed for pre-construction. The error sources influencing the rotation and pointing accuracies of the system were investigated. Due to complicated working conditions, a shafting system for the GSSM was designed with angular contact ball bearings as support of the azimuth-altitude system. Then, a detailed finite element model was constructed to verify the performance of this system. Wobble tests were performed. In addition, a repeatability test was designed and carried out to verify the pointing accuracy of the system. The first modal frequency is approximately 35.9 Hz, which meets the design requirement well. Moreover, the wobble error of the altitude axis is approxi-

收稿日期:2017-05-17;修订日期:2017-06-12.

基金项目:中国科学院青年创新促进会资助项目(No. 2016198);国家自然科学基金资助项目(No. 11673080, No. 11403022)

mately 1.91"(PV), while the one for azimuth axis is approximately 2.5"(PV). The repeatability of the GSSM is up to 2.77"(RMS) by the test data. The results indicate that the proposed shafting system is feasible and can achieve the requirements of the TMT.

**Key words:** Thirty Meter Telescope(TMT); alt-azimuth shafting; Wobble error; harmonic theory; pointing repeatability

## 1 引言

当现代通信天线系统逐渐小型化时,为了达到深空探测的目的以及高分辨率成像的需求,射电望远镜和光学望远镜正朝着愈来愈大的方向发展。得益于现代加工技术的巨大进步,大型反射镜的制造难度逐渐降低。进入 21 世纪以来,世界各地出现了多台 8 m 以上的望远镜。这些巨型望远镜主要应用于黑洞起源和黑洞能量分布、银河系构成、宇宙大爆炸等研究上。口径的增大带来了成本级数式的增长,为确保项目的顺利进行,系统而详尽的概念设计及分析尤为必要。本文依托于三十米望远镜(Thirty Meter Telescope, TMT)项目开展相应的研究和工作。该项目已于 2014 年 10 月在夏威夷开建,这一望远镜与欧洲南方天文台主持建造的四十二米望远镜(E-ELT)是人类历史上天文望远镜中的巨无霸<sup>[1-3]</sup>。作为一个国际合作项目,长春光机所承担了 TMT 三镜系统的设计制造工作<sup>[4]</sup>。

为验证 TMT 三镜系统的核心技术,我们以 1/4 的比例设计了一套原理演示系统(Giant Steerable Science Mirror System, GSSMP)。尺寸上,GSSMP 大部分关键尺寸为全模型的 1/4;受光学加工限制,缩比镜厚度为 12.5 mm,是原来镜子厚度的 1/8。刚度上,系统第一阶谐振频率为原系统的两倍,即 30 Hz。精度上,为匹配全模型 3.5"(RMS)的重复性指向精度,GSSMP 选型过程中对精度进行了控制,可用来模拟全模型的指向精度性能。因此,本文针对这一结构设计进行了误差分析和有限元仿真,并在检测和试验条件下对系统精度进行了验证。

国内外诸多重大项目都建造过小比例演示系统,以验证方案的可行性。并开展前期实验,以指导后期项目的正常开展。GSSMP 会大大提高 TMT 的建设速度,为全模型的设计和制造提供巨大帮助。

## 2 GSSMP 轴系结构设计

### 2.1 望远镜轴系组成

跟踪架结构形式多种多样,主要有地平式、极轴式、水平式、T 形架结构以及六杆万向平台式等。前 3 种结构形式广泛应用于大口径地基光电望远镜的结构设计中。这 3 种典型跟踪架在结构设计上区别较大。地平式结构形式较为单一,组成跟踪架的两个轴相互垂直,垂直地面的轴系称为方位轴系,水平安置且垂直于方位轴的轴系称为水平轴系(也称为俯仰轴)<sup>[5-6]</sup>。这种结构的俯仰轴结构由转台、左右立柱(叉臂结构)以及轴系本身组成。极轴式跟踪架也有两个轴,分别为极轴和赤纬轴,其中,极轴平行于天轴指向北极。水平式跟踪架也由两根相互垂直的旋转轴组成,一根指向南北称为经轴,另一根垂直于经轴,称为纬轴,其结构形式也较为单一。

以上三种跟踪架形式在功能上都能够满足三镜系统指向跟踪的要求,但各有优缺点。考虑到三镜系统在望远镜中的位置,地平式跟踪架对于光线的遮拦最小,能够有效提高望远镜的集光效率,所以这里选择地平式作为最终方案。

### 2.2 GSSMP 结构组成

由于 TMT 的终端设备放置在左右两侧的奈氏平台上,经过三镜的光线与望远镜的俯仰轴有一定夹角,因此三镜系统在 TMT 中的位姿伴随望远镜姿态和仪器位置的变化而不断变化。这对三镜系统的支撑和跟踪架提出了严苛挑战。

另外,轴系形式决定了望远镜的回转性能。滚子轴系的刚性较好,球轴承轴系的摩擦力矩及波动范围较小,因此,许多球轴承支承的望远镜指向精度和 jitter 值好于大多数滚子轴承支承的望远镜。为满足 TMT 对于 Jitter 的要求,方位、俯仰轴系都采用了双列角接触球轴承的支撑方案,俯仰轴系的支撑形式多种多样,其中主要有以下 3 种主要形式:(1)轴系一端采用端面轴承和径向轴

承支撑的固定端,另一侧采用轴向可窜动的径向轴承支撑结构;(2)使用两对圆锥滚子轴承支撑的结构形式,例如 DCT 望远镜;(3)采用两对角接触球轴承支撑的结构形式,如 TNG 望远镜<sup>[5-6]</sup>。由于三镜系统在望远镜观测过程中随俯仰轴的转动而运动,因此,GSSMP 采用最后一种俯仰轴方案,以应对不断变化的俯仰轴与重力方向的夹角。

GSSMP 三维设计如图 1 所示,方位轴代表 Z 向,俯仰轴代表 X 向,Y 向由右手螺旋定则确定。GSSMP 跟踪架部分由方位轴系和俯仰组成。其中,方位轴系采用交流力矩伺服电机直接驱动,使用一个双列角接触球轴承作为支撑元件、一个 32 位高分辨率圆光栅作为位置反馈元件,并且配备有一个能够自主旋转的绕线机构;俯仰轴系与方位轴系结构一致,采用双电机驱动的方案。

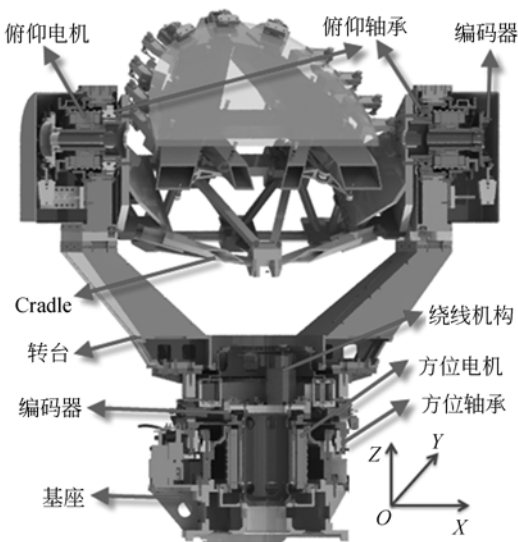


图 1 GSSMP 简图

Fig. 1 Overview of GSSMP



图 2 Cradle 三维模型

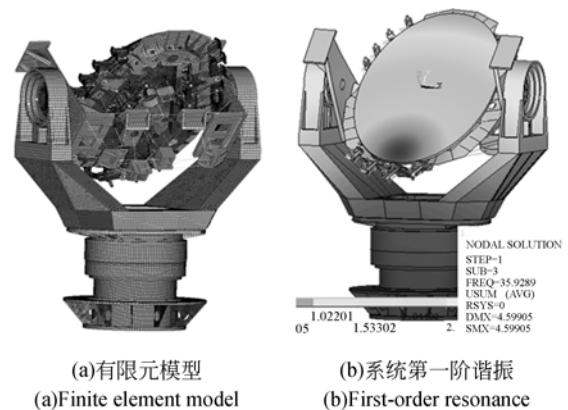
Fig. 2 Three-dimensional model of Cradle

### 2.3 桁架式四通设计

TMT 设计要求三镜系统的俯仰轴线需与三镜镜面重合,所以设计了一个摇篮式的桁架结构(Cradle)代替传统意义上的四通结构,如图 2 所示。这一结构轴向刚度较弱,能够平衡俯仰轴两端温度变化引起的应力,用以匹配俯仰轴系的设计。

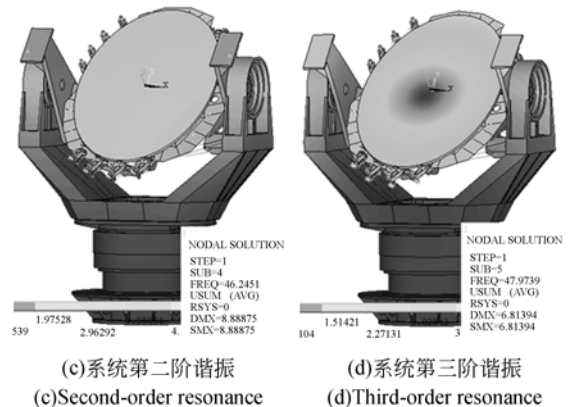
### 2.4 系统级有限元分析

TMT 对三镜系统第一阶谐振频率的要求为 15 Hz,相应的 GSSMP 为 30 Hz。为评价结构的刚度,前期使用 ANSYS 软件对 GSSMP 进行了详尽的有限元仿真分析,其中对结构部分进行了详尽的网格划分,非结构部分使用 mass 单元进行模拟。同时,为了更精确地模拟 GSSMP,轴承滚动体采用相同数量的预紧杆单元进行了模拟<sup>[6]</sup>。有限元模型如图 3(a)所示。经过计算,可得系统的前三阶谐振。其中,第一阶固有频率为 35.93 Hz,振型为转台左右摆动,如图 3(b)所示;



(a)有限元模型  
(a)Finite element model

(b)系统第一阶谐振  
(b)First-order resonance



(c)系统第二阶谐振  
(c)Second-order resonance

(d)系统第三阶谐振  
(d)Third-order resonance

图 3 GSSMP 模态分析结果

Fig. 3 Modal analysis results of GSSMP

第二阶固有频率为 44.24 Hz, 振型为转台前后摆动, 如图 3(c) 所示; 第三阶固有频率为 47.97 Hz, 振型为三镜绕光轴转动, 如图 3(d) 所示。由此可知, 结构第一阶谐振频率满足设计要求。

### 3 误差分析与检测

#### 3.1 误差分析

传统上, 方位轴系的晃动误差主要来自于推力球轴承的轴向跳动<sup>[7]</sup>。因此, 方位轴系晃动误差  $\delta_R$  为:

$$\delta_R = \frac{\sigma_A}{D_m}, \quad (1)$$

式中:  $\sigma_A = 0.004$  mm, 为轴承的轴向实测跳动量;  $D_m = 380$  mm, 为轴承的球组节圆直径。计算可得,  $\delta_R = 2.17''$ 。

影响俯仰轴晃动的主要因素是轴承的晃动及跨距<sup>[8]</sup>。因此, 俯仰轴的晃动量  $\delta_T$  为:

$$\delta_T = \frac{2\sigma_T}{L}, \quad (2)$$

式中:  $\sigma_T = 0.004$  mm, 为轴承的径向实测跳动量;  $L = 1230$  mm, 为两套轴承的跨距。计算可得,  $\delta_T = 1.00''$ 。

#### 3.2 晃动误差测量

本设计中方位轴承采用预紧式双列角接触球轴承。一周共有 36 个固定螺钉, 其中单个预紧螺钉的预紧力矩大约为 34 N·m。根据厂商指导, 最终将 36 个螺钉的预紧力矩调整为  $(31 \pm 0.5)$  N·m 的水平。使用分辨率为 0.1'' 的电子水平仪分两次互相垂直的放置在方位轴系的转台上, 在  $\pm 720^\circ$  范围内旋转方位轴系, 每隔  $30^\circ$  记录读数一次。通过傅里叶级数展开后, 去除常数项、一阶项后即为测量结果。最后将两侧数据的结果取均方根, 得到方位轴的晃动量。

测试结果是关于方位角以  $2\pi$  为周期的函数  $W_i$ <sup>[9-10]</sup>, 利用傅里叶级数展开后可得:

$$W_i = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^n [a_k \cos(k\theta) + b_k \sin(k\theta)], \quad (3)$$

$$a_0 = \frac{2}{n} \sum_{i=0}^{n-1} W_i, \quad (4)$$

$$a_k = \frac{2}{n} \sum_{i=0}^{n-1} W_i \cos(k\theta), \quad (5)$$

$$b_k = \frac{2}{n} \sum_{i=0}^{n-1} W_i \sin(k\theta), \quad (6)$$

式中:  $\theta$  为采样点间隔角度;  $k$  为谐波次数;  $a_0$  为常数项;  $a_k, b_k$  为第  $k$  个谐波函数的傅里叶级数系数。计算后, 常数项及前二阶谐波函数系数如表 1 所示。

表 1 傅里叶级数系数

Tab. 1 Coefficients of Fourier series

$a_0$	$a_1$	$b_1$	$a_2$	$b_2$
-46.30	4.82	-1.47	0.05	-1.44

理论上, 常数项代表系统偏差, 可以去除。一阶谐波函数代表回转轴线的倾斜误差, 属于测量误差, 消去不影响实验质量和测试精度; 二次谐波函数反映了轴承滚动的圆度误差<sup>[11-12]</sup>。将常数项、一阶项去除后, 可得这一位置下方位轴的晃动量  $\delta_{1-m}$  为 1.7''。谐波函数曲线如图 4 所示。

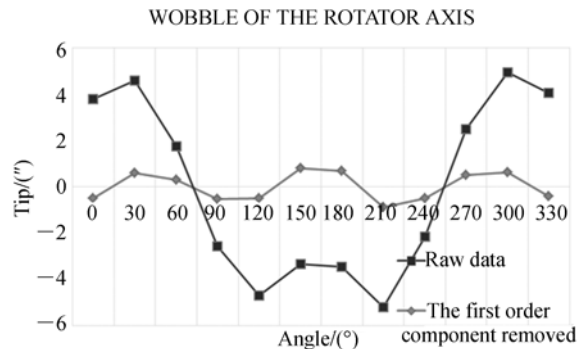


图 4 方位轴系晃动误差曲线

Fig. 4 Harmonic curves of wobbling for azimuth axis

本实验中, 检测仪器电子水平仪的精度为 1.0'', 分辨率为 0.1''。仪器的误差一般满足正态分布, 因此, 由仪器引起的重复性指向精度的不确定度  $\zeta_e$  为 0.3''。本实验共重复进行了 6 次, 结果如表 2 所示。

表 2 多次测量结果记录

Tab. 2 Record of measurements

Times	1	2	3	4	5	6
PV/(°)	1.7	1.6	1.7	1.8	1.8	1.5

测量数据的不确定度按照 A 类不确定度计算, 则有:

$$U_m = kS_x^-, \quad (7)$$

其中: $k$ 表示不确定度扩展系数, $S_x$ 表示测量数据的标准差。其中,自由度为 5,置信概率取 97.5%,查  $t$  分布表,得  $k=2.571$ 。因此, $U_m=0.3''$ 。

因此,本次测量的不确定度为:

$$U = \sqrt{U_m^2 + \zeta_c^2} = 0.4'' \quad (8)$$

另一个位置下的晃动量  $\delta_{2_m}=(1.8 \pm 0.4)''$ 。

故方位轴的晃动量可表示为:

$$\delta_{R_m} = \sqrt{\delta_{1_m}^2 + \delta_{2_m}^2} = (2.5 \pm 0.6)'' \quad (9)$$

俯仰轴的检测方法有别于方位轴,其原理如图 5 所示。在俯仰轴一端放置一块平面反射镜,轴线方向上安装一台  $0.10''$  精度的自准直仪。首先粗调平面反射镜,使其反射像进入视场。然后精调反射镜,使其在自准直仪内的轨迹圆尽量的小。数据处理方法与方位轴相同。



图 5 水平轴系晃动误差测量实验

Fig. 5 Set-up for altitude axis wobble test

通过测量可得,俯仰轴系的晃动误差为  $(1.91 \pm 0.31)''$ 。将误差分析与检测结果对比后发现,由于轴承引起的误差在两个轴系中分别占 86.8% 和 52.6%。由此说明,GSSMP 中轴承的晃动是引起轴系晃动的主要原因,采用标准轴承构建的轴系能够满足 TMT 轴系精度的要求。

## 4 GSSMP 重复性指向实验

### 4.1 结构对系统重复性指向精度的影响

作为三十米望远镜(TMT)三镜系统的演示验证系统,GSSMP 并不是一个完整的光学系统。GSSMP 仅包含一块椭圆形平面镜,所以提出两种用来验证跟踪架重复性指向精度的方法:平面镜配合自准直仪法和激光跟踪仪测量法。根据前期计算,对于 4 m 级的三镜系统,后一种方法在精度上是可行的,但在演示验证系统中难以满足精度要求。所以,在 GSSMP 中采用第一种方法,测试工装如图 6 所示。首先将 GSSMP 放置在一个倾斜台上,以模拟它在望远镜中的工况;其次,将一个小平面镜安装在三镜位置,用以表征三镜的指向;最后,在远处使用一台 API 自准直仪对准平面镜。实验过程如下:先将倾斜台放平,转动跟踪架保证平面镜与自准直仪对正,记录方位、俯仰编码器的读数;然后,随机运动两轴到任一位置后再返回上一位置,记录自准直仪的读数变化;多次测量。调整倾斜台角度为  $5^\circ$ ,重复上一步骤,并记录数据。

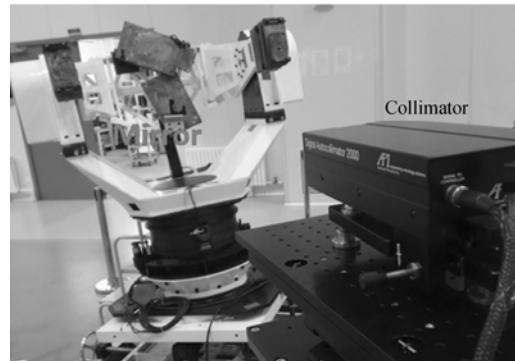


图 6 重复性指向精度测量实验

Fig. 6 Repeatability test of pointing accuracy

实际测量结果计算可知,倾斜角  $0^\circ$  位置,方位轴的重复性指向误差  $\epsilon_{z0}$  为  $1.11''$ ,俯仰轴的重复性指向误差  $\epsilon_{A0}$  为  $0.57''$ ;倾斜角  $5^\circ$  位置,方位轴的重复性指向误差  $\epsilon_{z5}$  为  $1.23''$ ,俯仰轴的重复性指向误差  $\epsilon_{A5}$  为  $0.56''$ ,误差分布如图 7 数据所示。综上所述,从  $0^\circ \sim 5^\circ$  位置,方位轴的重复性指向精度有所下降,但俯仰轴的重复性指向精度有所上升。这是由于重力在轴承轴向和径向方向的

分量变化导致的。另外,结构上方位轴系与悬臂梁更为接近。所以,倾覆力矩对方位轴的轴系精度影响也明显较大。

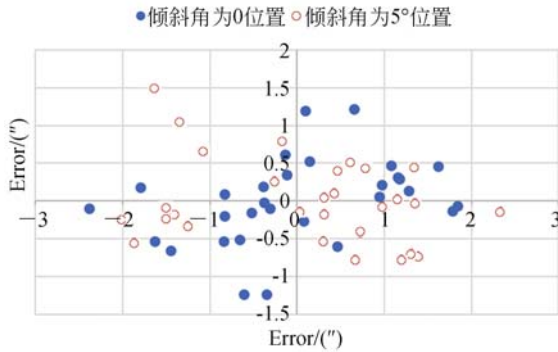


图 7 重复性指向误差

Fig. 7 Plot of pointing residuals

因此,当倾斜角度为  $90^\circ$  时,方位轴系工况最差。此时,方位轴系的重复性指向精度可由下式进行估计:

$$\epsilon_{z90} = \epsilon_{z0} + \frac{\sin 90^\circ}{\sin 5^\circ} (\epsilon_{z5} - \epsilon_{z0}) = 2.49'', \quad (10)$$

式中:  $\epsilon_{z,x}$  代表在倾斜角  $X^\circ$  时,方位轴系的重复性指向精度。因此,在实验室条件下,系统的重复性指向误差为:

$$\epsilon_s = \sqrt{\epsilon_{z90}^2 + \epsilon_{A0}^2} = 2.55'', \quad (11)$$

式中:  $\epsilon_{A,x}$  代表在倾斜角  $X^\circ$  时,俯仰轴系的重复性指向精度。本实验中,方位、俯仰轴系仅使用一个读数头的数据,多读数头的对比数据和结论不在本文中论述。

#### 4.2 温度对重复性指向精度的影响

除了由加工、安装等结构因素引起的重复性指向误差,温度对重复性指向精度的影响较大。由温度引起的误差理论上是具有重复性的,但是在实际操作中,这一误差包含有许多的非重复性

项。为研究这一误差对系统重复性指向精度的影响,在有限元模型中,在水平轴系方向上施加一个  $1^\circ\text{C}$  的温度梯度。分析结果显示,在这一温度梯度的影响下,系统的指向误差约为  $1.80''$ 。

根据站址的前期调研可知,TMT 塔台内的温度梯度最大为  $6^\circ\text{C}/\text{h}^{[1]}$ ,因此,温度引起的指向误差可表示为:

$$\epsilon_T = T_G \cdot S_T \cdot C_T = 6 \times 1.8 \times 10\% = 1.08'', \quad (12)$$

式中:  $T_G$  代表塔台内的温度梯度,  $S_T$  代表指向精度对温度的灵敏度;  $C_T$  代表温度梯度中随机成分含量,此处取  $10\%^{[13]}$ 。

因此,GSSMP 系统的重复性指向精度可表示为:

$$\epsilon = \sqrt{\epsilon_s^2 + \epsilon_T^2} = 2.77''. \quad (13)$$

该结果小于  $3.5''$  (RMS),能够满足 TMT 对三镜系统的重复性指向要求。

## 5 结 论

本文的研究对象是三十米望远镜三镜原理演示系统的跟踪架,它由一个双排角接触预紧球轴承 ZKLDF325 构成方位轴系,由一对 ZKLDF100 构成俯仰轴系。采用有限元分析方法得到了系统的前三阶固有频率和振型,其中第一阶模态频率大于  $35.9\text{ Hz}$ 。装配后,对轴系进行了精度检测,检测结果显示:方位轴晃动误差为  $2.5''$  (RMS),俯仰轴晃动误差为  $1.91''$  (RMS),与误差分析结果一致。通过重复性指向精度测试实验和相应计算,系统的最大重复性指向误差约为  $2.77''$  (RMS),满足设计要求。由此证明三镜系统轴系设计方案正确,能够为全模型的建造提供合理的设计指导和全面的数据支撑。

#### 参考文献:

- [1] KERLEY D, SMITH M, DUNN J, *et al.*. Thirty Meter Telescope (TMT) narrow field infrared adaptive optics system (NFIRAOS) real-time controller preliminary architecture [J]. SPIE, 2016, 9913: 99134J-99134J-19.
- [2] EZAKI Y, KATO A, HATTORI T, *et al.*. Over-

view of key technologies for TMT telescope structure[J]. SPIE, 2016, 9906: 99060Y-99060Y-16.

- [3] GRAY P, CIATTAGLIA E, DUPUY C, *et al.*. E-ELT assembly, integration, and technical commissioning plans[J]. SPIE, 2016, 9906: 99060X-99060X-10.
- [4] 赵宏超, 张景旭, 杨飞, 等. 30 m 望远镜三镜系统运动学接口设计及分析[J]. 光学学报, 2015 (3):

- 128-135.
- ZHAO H CH, ZHANG J X, YANG F, *et al.*. Kinematic coupling design and analysis for 30 m telescope tertiary mirror system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015 (3): 128-135. (in Chinese)
- [5] 王槐, 代霜, 吴小霞. 600 mm 薄镜面主动光学望远镜轴系结构设计[J]. *红外与激光工程*, 2015, 44(4): 1260-1266.
- WANG H, DAI SH, WU X X. Shafting structure design in a 600mm thin mirror active optics telescope [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(4): 1260-1266. (in Chinese)
- [6] 王显军. 大型望远镜测角系统误差的修正[J]. *光学精密工程*, 2015, 23(9): 2446-2451.
- WANG X J. Correction of angle measuring errors for large telescopes [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(9): 2446-2451. (in Chinese)
- [7] 苏燕芹, 张景旭, 陈宝刚, 等. 谐波分析方法在提高精密转台回转精度中的应用[J]. *红外与激光工程*, 2014, 43(1): 274-278.
- SU Y Q, ZHANG J X, CHEN B G, *et al.*. Harmonic analysis application in accuracy improvement of precise turntable [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(1): 274-278. (in Chinese)
- [8] PATEL N A, NISHIOKA H, HUANG C W L. Control and monitoring software for the Greenland Telescope[J]. *SPIE*, 2016, 9913: 991308-991308-8.
- [9] GUERRA J C, BRUSA G, CHRISTOU J, *et al.*. The LBT experience of adaptive secondary mirror operations for routine seeing and diffraction limited science operations [J]. *SPIE*, 2013, 8860: 141-149.
- [10] 苏燕芹, 张景旭, 陈宝刚, 等. TMT 三镜系统方位轴组件轴承设计[J]. *红外与激光工程*, 2013, 42(12): 3289-3294.
- SU Y Q, ZHANG J X, CHEN B G, *et al.*. Design of assembly bearing in TMT tertiary mirror system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(12): 3289-3294. (in Chinese)
- [11] 王槐, 代霜, 张景旭. 大型地平式望远镜的方位轴系支撑结构[J]. *光学精密工程*, 2012, 20(7): 1509-1516.
- WANG H, DAI SH, ZHANG J X. Azimuth shafting bearing structure in a large alt-azimuth telescope [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(7): 1509-1516. (in Chinese)
- [12] 范磊, 张景旭, 邵亮, 等. 采用液压 Whiffle tree 的大口径主镜轴向支撑 [J]. *红外与激光工程*, 2013, 42(8): 2126-2131.
- FAN L, ZHANG J X, SHAO L, *et al.*. Axial support for large aperture primary mirror based on hydraulic Whiffle tree [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(8): 2126-2131. (in Chinese)
- [13] MCPHERSON A M, CRAIG S C, SUTHERLAND W. Project VISTA: a review of its progress and overview of the current program[C]. *Astronomical Telescopes and Instrumentation. International Society for Optics and Photonics*, 2003, 82-93.

#### 作者简介:



赵宏超(1985—),男,山东泰安人,博士研究生,2009年于吉林大学获得学士学位,2014年于中国科学院大学获得博士学位,主要从事望远镜轴系设计技术的研究。Email: zhaohcciomp@163.com