

600 mm 薄镜面主动光学望远镜轴系结构设计

王 槐,代 霜,吴小霞

(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: 为研究大型望远镜薄镜面主动光学的核心技术,以 600 mm 望远镜为缩比系统,采用高精度标准轴承设计了具有快速装调、高互换性和便于维护等特点的俯仰-方位轴系结构。俯仰轴系由向心角接触球轴承构成,方位轴系由推力球轴承和双列圆柱滚子轴承构成。采用有限元软件 Patran 仿真得到了系统的前三阶固有频率和振型。分析了影响轴系回转精度的误差源,采用谐波理论对轴系误差测量结果进行了处理,得到俯仰轴系晃动误差为 4.2",方位轴系晃动误差为 9.3"。望远镜在外场观星试验中得到了比较理想的成像效果,验证了轴系结构设计的合理性和正确性,并为中小型望远镜高精度轴系的研制提供了设计依据和技术途径。

关键词: 主动光学望远镜; 俯仰-方位轴系; 轴系晃动误差; 谐波理论

中图分类号: TH751 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)04-1260-07

Shafting structure design in a 600 mm thin mirror active optics telescope

Wang Huai, Dai Shuang, Wu Xiaoxia

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

Abstract: An alt-azimuth shafting structure with high precision standard bearings was designed for a 600 mm scaled down model telescope system, which is for studying the large telescope thin mirror active optics technology. It has more benefits including quick installation and adjusting, high interchangeability, and easy maintenance. The altitude shafting is consisted of a pair of radial angular contact ball bearings. The azimuth shafting is consisted of thrust ball bearing and double-row cylinder roller bearing. The lowest three order natural frequencies and the modes were resolved by the finite element simulation software Patran. The error sources were analyzed, which are mainly affecting the shafting rotating accuracy. The measuring results were processed by harmonic theory and it shows good performance in the altitude shafting wobble error of 4.2", and the azimuth shafting wobble error of 9.3". Desirable imaging was got in the stars observing test at the testing field. The design can prove reliability of the shafting structure, and offer a reliable guidance and advanced path for developing the high precision shafting of medium and small sized telescope.

Key words: active optics telescope; alt-azimuth shafting; shafting wobble error; harmonic theory

收稿日期:2014-08-25; 修订日期:2014-09-27

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重大项目专项资金

作者简介:王槐(1980-),男,副研究员,博士,主要从事大型光电望远镜光机结构方面的研究。Email:playsnail@sina.com

0 引言

在地基光电探测设备对空中目标的观测过程中,大型地基光学望远镜发挥着十分重要的作用。过去的20年,在4m级以上口径光学望远镜的研究领域,主动光学技术得到了广泛的应用。和传统的被动支撑方式不同,它通过检测望远镜的波前误差,采用液压、气动等驱动方式,在相对较薄的主镜、次镜乃至三镜的背部各支撑点进行推拉,实时矫正由于重力及温度梯度等引起的镜面变形,从而获得准确、清晰的探测结果。国外采用主动光学技术的大型望远镜系统包括3.5m NTT、3.5m SOR、3.5m TNG、4.1m SOAR、4.2m DCT、6.5 m MMT、8 m Subaru、8 m Gemini、8.2 m VLT、8.4m LBT等。国内中国科学院国家天文台南京天文光学技术研究所于2005年研制的LAMOST望远镜也采用了薄镜面主动光学技术^[1-11]。

为研究大型望远镜薄镜面主动光学的核心技术,研制了600 mm薄镜面主动光学望远镜缩比系统(径厚比为34.4:1的弯月薄镜,镜面曲率半径为2841.2 mm),文中针对其快速装调、高互换性和便于维护的系统要求,设计了基于标准轴承的轴系结构,进行了误差分析,并在检测和试验条件下进行了验证。

1 望远镜轴系结构设计

1.1 望远镜轴系组成

从20世纪90年代开始设计的4m级以上口径的地基光学望远镜都采用了先进的地平式结构,它包含绕水平线旋转的俯仰运动和绕垂直线旋转的方位运动,即俯仰-方位轴系(Altitude-azimuth shafting),如图1所示。这种轴系具有结构简洁、体积小、造价低、圆顶小而轻、随动系统简单、位置稳定性好、可为多个光学测量设备提供接口和承载平台等诸多优点^[12-14]。

俯仰轴系位于望远镜的上部,用于支撑主镜室并与转台相连,同时为望远镜提供俯仰回转轴线。方位轴系处于望远镜的下部,用于支撑整个系统并与基座相连接,同时为望远镜提供方位回转轴线。通过两个轴系的协同工作,实现系统对天空目标的角位置测量、跟踪驱动以及角速度、角加速度的测量和反馈等功能。在承载数十至近百吨回转部件重量的同

时,还要求轴系具有极高的回转精度和稳定性,从而满足望远镜平稳、精确、高重复性以及超低速运行等性能要求^[15-17]。

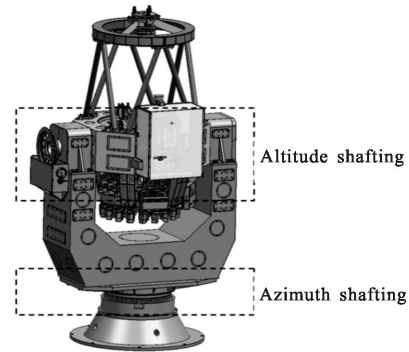


图1 600 mm 主动光学望远镜的俯仰-方位轴系

Fig.1 600 mm active optical telescope alt-azimuth shafting

1.2 典型轴系方案分析

国外大口径主动光学望远镜典型的俯仰和方位轴系方案列于表1。

表1 大口径主动光学望远镜典型的俯仰和方位轴系方案^[1-4]

Tab.1 Typical altitude shafting and azimuth shafting scheme of the large aperture active optics telescope^[1-4]

Telescope	Altitude shafting scheme	Azimuth shafting scheme
3.5 m NTT	Paired mounting angular contact ball bearings	Axial hydrostatic bearing and radial angular contact ball bearing
3.5 m SOR	Sealed roller bearing	Double row ball bearing
3.5 m TNG	Paired mounting angular contact ball bearings	Hydrostatic bearing
4.1 m SOAR	Paired mounting tapered roller bearings	Thrust ball bearing integral with a radial ball bearing

由相关资料可见,由于俯仰轴系承载相对较小,多采用高精度的标准轴承结构,而方位轴系承载相对较大,因此主要采用定制的轴承构成轴系,典型的方案有:

(1) 双列球式转盘轴承

应用于美国3.5m SOR望远镜,原理如图2所示。其属于转盘轴承(又称回转支承),可同时承担径

向、轴向和倾覆力矩载荷。但为增加刚度需要施加预紧力,这将加剧滚动体发生的滑动,进而增大摩擦,驱动电机和伺服控制的设计难度较高。



图 2 双列球式转盘轴承

Fig.2 Double row ball turntable bearing

(2) 轴向液体静压轴承

应用于欧洲南方天文台 3.5 m NTT 望远镜和意大利 3.5 m TNG 望远镜,原理如图 3 所示。摩擦低,功耗小,传动效率高,回转精度高。但液压油性能受温度影响较大,须严格控制油温,以及可靠的供油系统和供电系统,初始研究费用和维护费用较高。因此目前仍主要应用于大型天文望远镜。

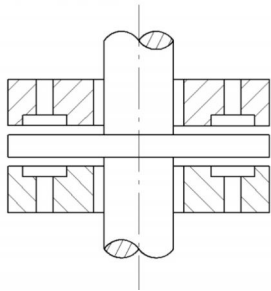


图 3 轴向液压轴承

Fig.3 Axial hydrostatic bearing

(3) 向心柱面滚道球轴承和大接触角推力球轴承一体化设计

应用于美国 4.2 m SOAR 望远镜,原理如图 4 所

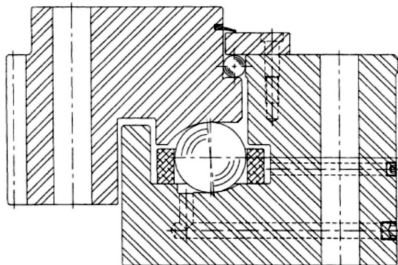


图 4 4.1m SOAR 的一体化方位轴系设计

Fig.4 4.1m SOAR azimuth integral bearing concept

示。具有大承载能力、高轴向刚度和良好摩擦性能等优点。大接触角推力球轴承主要承受轴向载荷,在预

载荷作用下的向心柱面滚道球轴承弥补了前者径向刚度较低的不足。钢球良好的滚动特性有利于减小摩擦阻力,便于在优化摩擦阻力和谐振频率之间实现最佳平衡。

1.3 轴系结构设计

国内传统的中小口径望远镜通常采用特制轴承。在俯仰轴系采用一端固定、一端游动设计,固定端选用一套向心柱面滚道球轴承结合两套平面滚道推力球轴承,游动端采用一套向心柱面滚道球轴承,结构方案如图 5 所示。在方位轴系内圈采用一套向心柱面滚道球轴承径向定位,外圈采用一套多排平面滚道推力球轴承承担轴向载荷,结构方案如图 6 所示。这种设计的优点在于和钢球接触的滚道面都是平面或圆柱面,便于通用机械加工设备加工,相应的检测技术也很成熟。不足之处在于轴承环面精加工需要人工研磨或刮研完成,加工周期长,人员成本高,不利于设备的快速批量化生产。

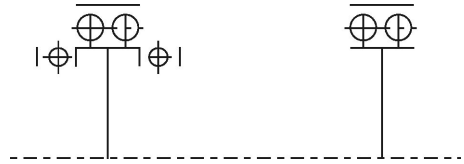


图 5 传统望远镜俯仰轴系结构方案

Fig.5 Traditional telescope altitude shafting structure scheme

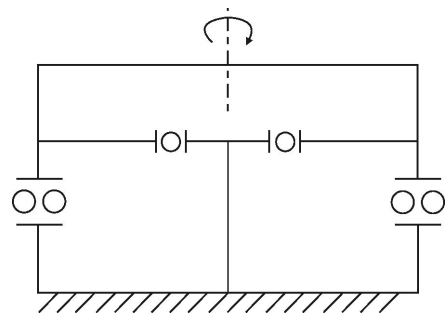


图 6 传统望远镜方位轴系结构方案

Fig.6 Traditional telescope azimuth shafting structure scheme

针对 600 mm 主动光学望远镜研制周期短、结构设计简洁、维修互换性高的设计要求,选用标准轴承设计了望远镜轴系结构。俯仰轴系采用一对 NTN 公司的 7224A 向心角接触球轴承,内径 $\Phi 120$ mm,外径 $\Phi 215$ mm,宽度 40 mm,公称接触角 30° ,径向跳动 0.01 mm。在左右立柱各安装一个,采用面对面的配置方式,如图 7 所示。其优点是在内圈需要过盈装配的情况下,便于安装和调整轴系误差,而且利于设

计施加预紧的轴系结构。

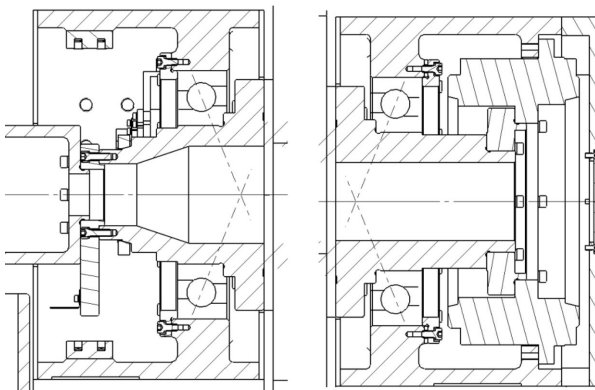


图 7 俯仰轴系结构设计图

Fig.7 Altitude shafting structure design drawing

方位轴系外圈采用 51184 推力球轴承承担轴向载荷,其内径 $\Phi 420$ mm,外径 $\Phi 500$ mm,厚度 65 mm,轴向跳动 0.018 mm。内圈采用 NNU4926 内圈无挡边的双列圆柱滚子轴承径向定位,并承担风载和设备配平时产生的径向扰动和倾覆力矩,其内径 $\Phi 130$ mm,外径 $\Phi 180$ mm,宽度 50 mm,如图 8 所示。这种配置的优点是两种轴承彼此互不干扰,共同实现方位轴系的回转功能。在保证轴系精度满足系统要求的前提下,缩短望远镜加工周期,降低轴系加工难度和设备研制成本。

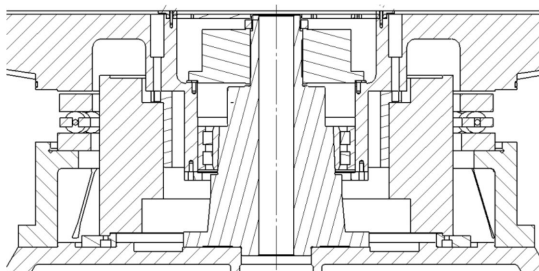


图 8 方位轴系结构设计图

Fig.8 Azimuth shafting structure design drawing

1.4 系统模态仿真分析

为校验系统设计的结构刚度,采用 Patran 软件对望远镜系统的三维模型进行模态分析。网格划分后的有限元模型如图 9(a)所示,经过 Nastran 软件解算得到系统的前三阶固有频率特性。其中一阶固有频率为 20.4 Hz,振型体现为转台以上系统的前后摆动,如图 9(b)所示;二阶固有频率为 46.6 Hz,振型体现为转台以上系统的左右摆动,如图 9(c)所示;三阶

固有频率为 91.5 Hz,振型体现为转台以上系统的上下晃动,如图 9(d)所示。分析表明,对望远镜系统结构刚度影响最大的零件为中部的转台,系统最低固有频率为 20.4 Hz,能够满足设计指标要求。

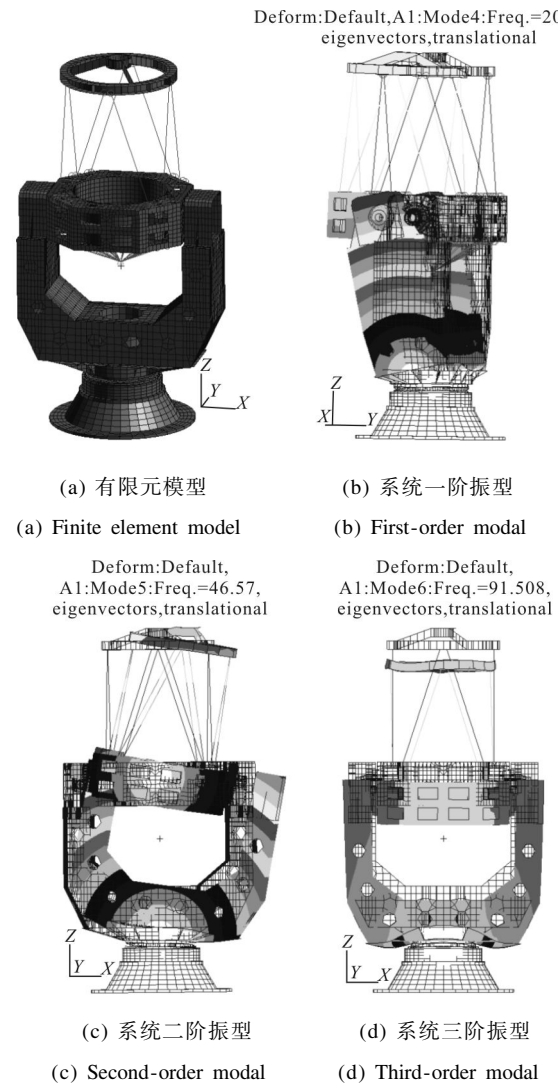


图 9 望远镜系统模态分析结果

Fig.9 Telescope system modal analysis results

2 误差分析及检测结果

2.1 误差分析

俯仰轴系的晃动误差主要是由向心角接触球轴承的径向跳动产生,因此计算俯仰轴系晃动量 δ_{alt} 为:

$$\delta_{alt} = \frac{K_{ia}}{L} \quad (1)$$

式中: K_{ia} 为向心角接触球轴承的径向跳动值, 0.01 mm; L 为两套轴承沿俯仰回转轴线方向的跨距, 1064 mm。得到 $\delta_{alt} = 3.88''$ 。

方位轴系的晃动误差主要来自于推力球轴承的轴向跳动,因此计算方位轴系晃动量 δ_{azi} 为:

$$\delta_{azi} = \frac{S_a}{D_m} \quad (2)$$

式中: S_a 为推力球轴承的轴向跳动值, 0.018 mm; D_m 为推力球轴承的球组节圆直径, 460 mm。得到 $\delta_{azi} = 8.08''$ 。

2.2 检测结果

俯仰轴系装配完成后, 采用光学法检测俯仰轴系晃动误差, 原理如图 10 所示。在俯仰轴系右端面上安装一个可调整的平面反射镜, 反射镜对面安放一台分辨力 0.1'' 的自准直平行光管, 粗调平面反射镜, 使其反射像在平行光管视场内。

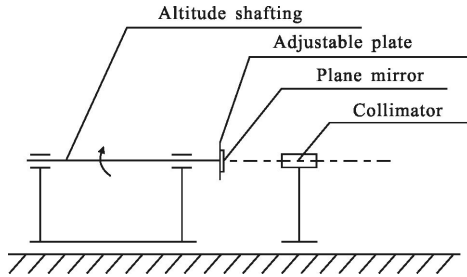


图 10 检测俯仰轴系晃动误差的光学法示意图

Fig.10 Means sketch of optical measuring the altitude shafting wobbling error

旋转俯仰轴, 精调平面反射镜镜面与俯仰回转轴线垂直, 使光管分划板十字交点在旋转一周内的变化量尽量小。每隔 30° 记录一次光管读数, 正反转各两周共测得 4 组数据, 列于表 2。

表 2 光管对俯仰轴系晃动误差的检测结果

Tab.2 Results of the altitude shafting wobbling error with collimator

Measuring position/(°)	Results			
	Clockwise cycle 1	Clockwise cycle 2	Anti-clockwise cycle 1	Anti-clockwise cycle 1
0	14.6	14.6	14.7	14
30	13.2	13.4	13.5	13.3
60	12.4	12	11.7	11.4
90	12	11.6	11.7	11.4
120	14.2	13.5	13.2	13.4
150	16.4	16.4	16	15.5
180	18.3	17.8	17.6	17.4
210	17	16.8	17.4	16.7
240	14.8	13.6	14.7	14.6
270	12.6	12.4	13	12.6
300	13.8	13	13.4	13.5
330	14.1	14.1	14.1	14.1

测量结果是周期为 2π 的关于俯仰轴角位置的周期函数 W_i 。谐波是误差的构成分量, 包含大小、方向和频率三个误差要素, 对此深入研究便于分析轴系晃动产生的原因, 利于消除系统误差。因此采用谐波分析方法, 将 W_i 展开为富氏级数:

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

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

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

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

式中: θ 为采样点间隔角度, $\theta = 0^\circ, 30^\circ, \dots, 330^\circ$; k 为谐波次数; a_0 为常数项; a_k, b_k 为第 k 个谐波函数的富氏系数。

经计算得到公式(3)中的常数项 $a_0 = 28.4$, 同时计算对轴系晃动影响最为显著的前三次谐波函数^[8]为:

$$W_1 = -1.58 \cos \theta - 0.65 \sin \theta \quad (7)$$

$$W_2 = 1.92 \cos(2\theta) - 0.08 \sin(2\theta) \quad (8)$$

$$W_3 = -0.1 \cos(3\theta) - 0.11 \sin(3\theta) \quad (9)$$

由此得到俯仰轴系晃动的前三次谐波函数曲线如图 11 所示。其中常数项 $a_0/2$ 反映的是平面反射镜的光轴与俯仰回转轴线不平行, 属于系统误差, 消去不影响实验质量和测试精度; 一次谐波函数曲线反映出俯仰回转轴线的倾斜误差; 二次谐波函数曲线反映出轴承滚道的圆度误差, 可通过选用高精度轴承来降低; 三次谐波函数曲线反映出由左右轴头和中央四通构成的回转体的不均匀变形, 可通过设计高刚度的俯仰轴系来降低。采用上述方法对检测结果进行数据处理, 得到俯仰轴系的晃动量为 4.2''。

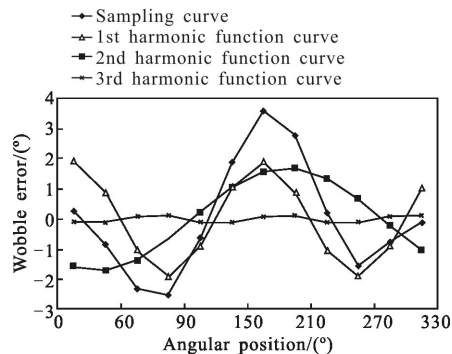


图 11 俯仰轴系晃动误差的前三次谐波函数曲线

Fig.11 Harmonic curves of wobbling components of the altitude shafting wobbling error

方位轴系装配完成后,采用水平仪法检测方位轴系晃动误差,原理如图12所示。将一台分辨力 $0.1''$ 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平面某一位置上,在 $\pm 720^\circ$ 范围内旋转方位轴系,每隔 30° 记录一次水平仪读数,然后采用与俯仰轴系同样的数据处理方法,并将两次数据的结果取均方根,得到方位轴系的晃动量为 $9.3''$ 。

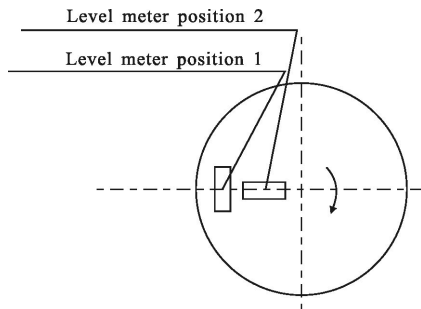


图12 检测方位轴系晃动误差的水平仪法示意图

Fig.12 Level means sketch of measuring the azimuth shafting wobbling error

将误差分析与检测结果对比,由轴承引起的误差在两个轴系中分别占 92.4% 和 87% ,可见相对于前文提及的传统特制轴承,其轴系精度与构成轴承的零件加工、装调以及多个散装零件之间的精度匹配存在复杂关系相比,采用标准轴承构成的轴系其精度主要取决于轴承本身的精度。通过选用高精度的标准轴承,便于保证望远镜的轴系精度。

在望远镜口径逐渐增大的情况下,传统特制轴承将出现钢球数量过多、保持架加工困难、没有相应的加工设备以及通用机械加工工艺难以保证等问题,而采用轴承行业专用设备加工的标准轴承能够很好地解决上述问题。

3 望远镜成像观测结果

望远镜装配后与光、电分系统进行联调,然后开展外场观星试验,如图13所示。夜晚对某恒星进行成像观测,通过波前传感器反馈的信号采用力促动器对主镜面型进行实时矫正,得到矫正前后对比如图14所示(对截图进行了黑白颜色的反转处理)。矫正前由于自重等原因造成的主镜镜面变形对恒星点目标的成像畸变严重,矫正后基本还原了目标的实际像,可见薄镜面主动光学望远镜实际观测效果比较理想,这也从工程应用角度验证了采用标准轴承

进行望远镜轴系结构设计的合理性和正确性。



图13 外场观星试验

Fig.13 Star observation testing

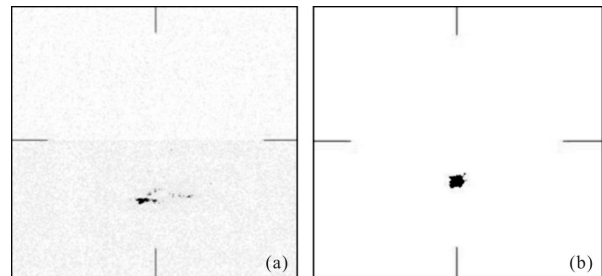


图14 对某恒星成像时主动光学矫正前后图像对比

Fig.14 Comparing of the star images without and with the active optical correction

4 结论

文中针对 600 mm 薄镜面主动光学望远镜设计了俯仰-方位轴系结构。由一对7224A向心角接触球轴承构成俯仰轴系,由51184推力球轴承和NNU4926内圈无挡边的双列圆柱滚子轴承构成方位轴系。采用有限元软件Patran仿真得到了系统的前三阶固有频率和振型。装配后的轴系精度检测结果:俯仰轴系晃动误差为 $4.2''$,方位轴系晃动误差为 $9.3''$,与误差理论分析的结论相近。在外场观星试验中得到了较为理想的成像效果,进一步验证了轴系结构设计的合理性和正确性。说明采用标准轴承的设计轴系能够满足望远镜的精度要求,并具有快速装调、高互换性和便于维护等优点,也为中小型望远镜高精度轴系的研制提供了设计依据和技术途径。

参考文献:

- [1] Frank G, Florian L, Ralf B. A wide field corrector concept

- including an atmospheric dispersion corrector for the ESO-NTT [C]//SPIE, 2012, 8446: 5Z1-5Z7.
- [2] Denman C A, Drummond J, Eickhoff M L, et al. Characteristics of sodium guidestars created by the 50-Watt FASOR and first closed-loop AO results at the Starfire Optical Range[C]//SPIE, 2012, 6272: 1L1-1L12.
- [3] Molinari E, Gurtubai A G, Valle A, et al. The new TNG-DIMM: calibrations and first data analysis [C]//SPIE, 2012, 8444: 10-21.
- [4] Andrei T, Roberto T, Patricio S, et al. Performance of the SOAR adaptive module with UV Rayleigh guide star [C]//SPIE, 2012, 8447: 4H1-4H10.
- [5] Venetiou A J, Bida T A. Discovery Channel Telescope active optics system early integration and test [C]//SPIE, 2012, 8444: 1E1-1E6.
- [6] Packham C, Jones T J, Warner C, et al. Commissioning results of MMT-POL: the 1-5 μ m imaging polarimeter leveraged from the AO secondary of the 6.5 m MMT [C]//SPIE, 2012, 8446: 3R1-3R8.
- [7] Peters-Limbach M A, Groff T D, Kasdin J N, et al. The optical design of CHARIS: an exoplanet IFS for the Subaru telescope [C]//SPIE, 2013, 8864: 1N1-1N5.
- [8] Céline d'Orgeville, Sarah Diggs, Vincent Fesquet, et al. Gemini South multi-conjugate adaptive optics (GeMS) laser guide star facility on-sky performance results [C]//SPIE, 2012, 8447: 1Q1-1Q10.
- [9] Alexandre Cabral, João Coelho, Manuel Abreu, et al. Optical design of a Coudé-Train for a stable and efficient simultaneous feeding of the ESPRESSO spectrograph from the four VLT telescopes [C]//SPIE, 2013, 8785: 0L1-0L5.
- [10] 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 [C]//SPIE, 2013, 8860: 141-149.
- [11] Han Zhongyi, Wang Jianing, Zeng Yizhong. Qsys NOC-based MPSOC design for LAMOST Spectrographs [C]//SPIE, 2012, 8451: 3D1-3D5.
- [12] An Qichang, Zhang Jingxu, Sun Jingwei. TMT third-mirror shafting system alignment based on maximum likelihood estimation [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(11): 3002-3007. (in Chinese)
- 安其昌, 张景旭, 孙敬伟. 基于最大似然估计的 TMT 三镜轴系装调 [J]. 红外与激光工程, 2013, 42(11): 3002-3007.
- [13] Su yanqin, Zhang Jingxu, Chen Baogang, et al. Design of rotator assembly bearing in TMT tertiary mirror system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(12): 3289-3294. (in Chinese)
- 苏燕芹, 张景旭, 陈宝刚, 等. TMT 三镜系统 Rotator 组件轴承设计 [J]. 红外与激光工程, 2013, 42(12): 3289-3294.
- [14] Wang Huai, Dai Shuang, Zhang Jingxu. Azimuth shafting bearing structure in a large Alt-azimuth telescope [J]. *Opt Precision Eng*, 2012, 20(7): 1509-1516. (in Chinese)
- 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.
- [15] Fan Lei, Zhang Jingxu, Shao Liang, 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)
- 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.
- [16] Sun Jingwei, Lv Tianyu, Yao Lishuang, et al. Design and assembly of transmitter telescope [J]. *Opt Precision Eng*, 2014, 22(2): 369-375. (in Chinese)
- 孙敬伟, 吕天宇, 姚丽双, 等. 发射望远镜的设计与装调 [J]. 光学精密工程, 2014, 22(2): 369-375.
- [17] Su Yanqin, Zhang Jingxu, Yang Fei, et al. Conceptual design of rotator assembly bearing in TMT tertiary mirror system [J]. *Opt Precision Eng*, 2013, 21(6): 1510-1517. (in Chinese)
- 苏燕芹, 张景旭, 杨飞, 等. 30 m 望远镜的三镜 Rotator 组件轴承概念设计 [J]. 光学精密工程, 2013, 21(6): 1510-1517.
- [18] Gao Fuhui. Fourier harmonic analysis method for axial system wobbling of the large-scale theodolite [J]. *Optic-Electronic Engineering*, 1998, 25(5): 1-15. (in Chinese)
- 高福晖. 大型经纬仪轴系晃动的傅里叶谐波分析方法 [J]. 光电工程, 1998, 25(5): 1-15.