

文章编号 1004-924X(2018)04-0850-07

巨型望远镜方位轴系的集成系统

胡守伟^{1,2,3*}, 宋晓莉^{1,2}, 张 惠^{1,2,3}

(1. 中国科学院 南京天文光学技术研究所, 江苏 南京 210042;

2. 中国科学院 天文光学技术重点实验室, 江苏 南京 210042; 3. 中国科学院大学, 北京 100039)

摘要:为了解决巨型望远镜潜在的结构变形对方位轴系支撑和精密驱动的影响,基于组合轴承和驱动车载的概念,提出了一种集成具有轴承及驱动两个功能的机械装置。此套机械装置采用了静液压油垫和直接驱动技术。直接驱动和液压油垫组合安装在承载机构上,可以减小电机间隙变化以便提高驱动系统的效率,此机械装置包含一套运动副连接,该连接允许底部静液压油垫与滑动导轨紧密贴合而上部连接到方位轴移动结构上(就方位轴而言),由此机械装置在运行时只会受到底部滑动轨道平整度的影响而不受上部移动结构大尺度变形的影响。之后通过 ANSYS 对机械装置进行了静力学仿真,以验证模型的准确性。分析结果证明:系统在设置运动副连接和未设置运动副连接两种情况下,施加 Z 轴方向力矩时,关注点的位移由 14.3 μm 减小为 0.85 μm ;施加 X 轴方向力矩时,关注点的位移由 12.9 μm 减小为 1.26 μm ,运动副连接层可以显著吸收望远镜方位轴移动结构变形引起的力矩,从而不会将该作用力矩强加给静液压油垫和驱动系统。该项设计为巨型望远镜高精度轴系和精密驱动的研制提供了可靠的设计依据和技术支持。

关键词:巨型望远镜;机械装置;静液压油垫;直接驱动;运动副;ANSYS 仿真

中图分类号:P111.2;TH751 文献标识码:A doi:10.3788/OPE.20182604.0850

Integrated system of azimuth structure for extremely large telescopes

HU Shou-wei^{1,2,3*}, SONG Xiao-li^{1,2}, ZHANG Hui^{1,2,3}

(1. *Nanjing Institute of Astronomical Optical & Technology, Chinese Academy of Sciences, Jiangsu 210042, China;*

2. *Key Laboratory of Astronomical Optics & Technology, Chinese Academy of Sciences, Jiangsu 210042, China;*

3. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)*

** Corresponding author, E-mail: swhu@niaot.ac.cn*

Abstract: In order to reconcile large deformations of the azimuth structure for the Extremely Large Telescope(ELT), an innovative mechanism based on hydrostatic bearings and linear drives was established and it combined both the bearing and drive functions. Placed motors close to hydrostatic bearings allowed a fairly constant air-gap to be maintained despite the dimensions of the structure. This allowed the motor to be designed with a relative small air-gap and consequently higher efficiency for a defined motor dimension. The connection of each of the frames to the mobile structure was through a kinematical connection, such that the lower part was properly positioned with respect to the track,

收稿日期:2017-09-01;修订日期:2017-10-15.

基金项目:联合基金项目(A11);国家自然科学基金资助项目(No. 11673045)

while the upper part was connected to the azimuth structure (in the case of the azimuth mechanism). Thus the mechanism was only affected in performance by the small-scale deformation of the track and not by large-scale deformation of the structure. Then, the static analysis of the mechanism was simulated by ANSYS and verified its mechanical model. Analysis results indicate that the displacement of the point of concern decreases from $14.3 \mu\text{m}$ to $0.85 \mu\text{m}$ when the Z -axis moment is applied in both cases of the mechanism with kinematical joint and without kinematical joint. When the X -axis moment is applied, the displacement of the point of interest decreases from $12.9 \mu\text{m}$ to $1.26 \mu\text{m}$. The design can offer a reliable guidance and advanced technique paths for developing the high precision azimuth shafting and precision actuation of the extremely large telescope.

Key words: extremely large telescope; mechanism; hydrostatic bearings; linear motors; kinematical joint; ANSYS simulation

1 引言

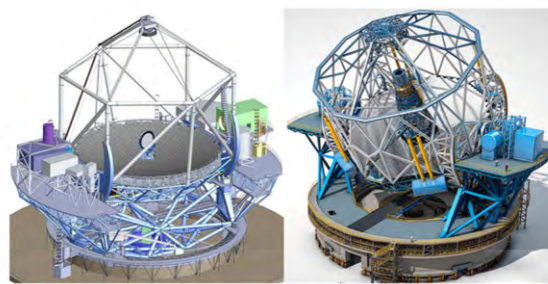
自二十世纪七八十年代以来,光学、力学、计算机、自动控制和精密机械方面一些新技术的出现,突破了望远镜口径的限制,望远镜制造技术迅速发展。特别是主动光学技术的出现,使得望远镜设计思想有了一个飞跃。

20世纪90年代,一批代表着最先进技术的8~10 m级光学和红外望远镜相继建成。其中,典型代表有欧洲南方天文台的VLT^[1-2],美、英、加合作的GEMINI^[3],日本的SUBARU^[4],口径都在8 m左右;美国的Keck I、Keck II望远镜的主镜采用了拼接技术,其口径都是10 m^[5]。我国研制的大天区面积多目标光纤光谱望远镜LAMOST,主镜口径为 $6.7 \text{ m} \times 6 \text{ m}$,由37块1.1 m子镜拼接而成^[6]。

现代巨型地基光学红外望远镜大多采用地平式结构,它包含绕水平轴线旋转的俯仰轴系和绕垂直轴线旋转的方位轴系。位于望远镜下部的方位轴系支撑整个系统并与地基相连接,同时为望远镜提供方位回转轴线,实现方位角测量、跟踪驱动、角速度和角加速度的测量及反馈等功能。方位轴系承载数百吨乃至上千吨回转部件的重量,具有极高的运动精度和良好的稳定性,从而保证望远镜平稳、精确、高重复性和超低速运行等工作特性^[7]。因此,研制具有大载荷、高刚度和低摩擦性能的方位轴系支撑和精密驱动系统是确保巨型望远镜研制成功的关键技术之一。本文设计了用于20~50 m口径望远镜方位轴系支撑和精密驱动集成系统,提出了运动副柔性连接方法。

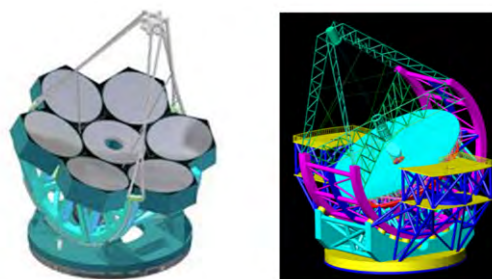
2 典型方案分析

近年来,国际上正在研制中的20~50 m主镜口径的巨型地基天文光学望远镜主要有:美国三十米望远镜(TMT)^[8-11](图1(a))、24.5 m大麦哲伦望远镜(GMT)^[12-13](图1(c))以及欧洲南方天文台的39 m极大望远镜(E-ELT)(图1(b))^[14-15]。



(a)三十米望远镜
(a)TMT

(b)39 m极大望远镜
(b)E-ELT



(c)24.5 m大麦哲伦望远镜
(c)GMT

(d)中国巨型望远镜
(d)CFCT

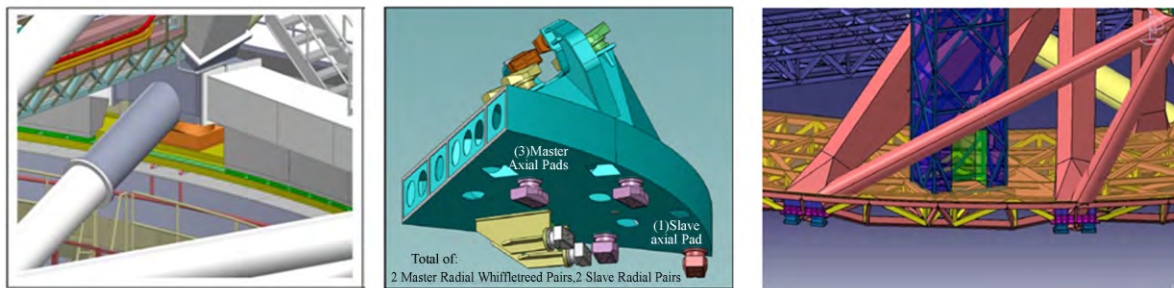
图1 在建的巨型望远镜渲染图

Fig. 1 Rendered images for extremely large telescopes under construction

中国也开展了巨型望远镜的研究工作,提出了未来中国巨型望远镜方案(Chinese Future Giant Telescope, CFGT),主镜口径为 30 m^[16-17],如图 1(d)所示。

由于巨型望远镜的方位轴系要具有大承载重

量、高运动精度和良好的稳定性等特性,通用的推力球轴承、推力滚子轴承等的结果尺寸、承载能力和回转精度难以满足要求,国外的大口径望远镜均专门设计了巨型方位轴系支撑和驱动装置^[18-20],如图 2 所示。



(a) TMT 望远镜六个方位轴静液压油垫之一
(b) GMT 望远镜方位轴 1/4 基座底部静液压油垫
(c) E-ELT 望远镜的方位轴静液压油垫系统

(a) One of the six azimuth bearing pads for TMT
(b) Pads on bottom side of azimuth structure 1/4 support pedestal for GMT
(c) Azimuth bearing system for E-ELT

图 2 静液压油垫系统结构简图

Fig. 2 Illustration of hydrostatic bearing systems

美国 30 m 望远镜的方位轴系采用了 6 个较大的静液压油垫,如图 2(a)所示。这种布局的优点是方位轴系整体结构简洁,力的传递路径较为清晰;缺点是使用较大尺寸的油垫会增加角端不稳定性,且单个油垫承载的负荷很大,容易产生较大变形,因此,对导轨加工精密要求高,降低了望远镜的整体刚度。大麦哲伦望远镜 GMT 的方位轴系采用了类似 GEMINI 望远镜离散化的静液压油垫支撑方案,如图 2(b)所示。每个方位轴基座下方安装 3 个小型定位油垫,1 个浮动油垫,对方位轴导轨形成过约束,液压油垫产生的力的变化依赖于导轨的表面精度,因此,通过对导轨进行精加工和现场调整的方式来提高导轨精度,从而使液压油垫产生的力的变化达到最小。此种设计提高了系统刚性,但是对导轨的加工精度要求较高,且方位轴底盘需要保证一定的柔性;欧南台极大望远镜 E-ELT 同时在三条导轨上采用了 36 个小型离散化的轴向静液压油垫,其中在方位轴结构负荷较大的位置使用了双静液压油垫支撑,负荷较小的位置使用了单静液压油垫支撑,如图 2(c)所示。为防止静液压油垫因对导轨形成的过约束以及导轨误差而在运行过程中产生搁浅现象,设

计人员对导轨系统的各种最坏工况进行了大量有限元分析,以确保轴系支撑系统能够正常工作。

3 集成系统的构成及其工作原理

3.1 集成系统的硬件构成

结合国内 30 m 口径望远镜项目的实际需求,并借鉴国外巨型望远镜方位轴系支撑结构,基于固定导轨设计了用于巨型望远镜方位轴的轴系支撑和精密驱动系统,如图 3 所示。

此套支撑和精密驱动系统集成了 3 种基本装置:(1)组装在轨道上的驱动装置,位于固定结构上,其上表面构成线性电动机的定子,转子放置在每个机架上,与定子相对应地保持恒定且其值非常低(小于 1 mm);(2)支撑装置,它包括至少一条轨道,该轨道平行于电机定子导轨表面,每个机架上的多个静液压油垫支撑于该滑动导轨上,它们支撑移动结构并确保正确定位和闭合线性电机的定子/转子;(3)每个机架和移动结构之间的连接装置,该装置通过运动学柔性连接件承载,作用类似球窝接头,允许两者(机架和移动结构)之间的相对运动,但是刚性地作用在垂直方向上。

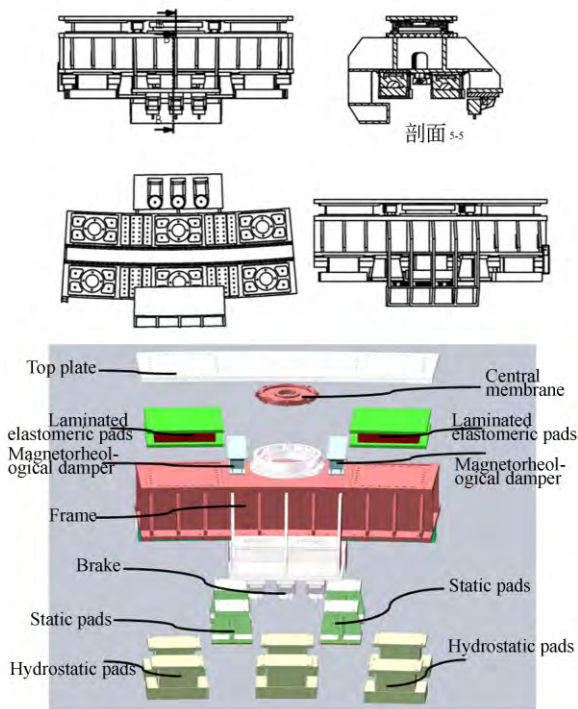


图 3 集成系统的二维图及爆炸视图

Fig. 3 Two-dimensional engineering drawing and exploded view of integrated system

该系统在每个机架中安装有制动单元,所有这些制动单元安装在静液压油垫的滑动轨道内环的圆盘上。每个机架上的柔性层附有阻尼器,以减少地基内部装置(如液压设备)振动对望远镜的影响。同时,每个机架上还安装有地震防翘起结构,所有这些防翘起机构作用于静液压油垫滑动轨道的外边缘,如图 4 所示。

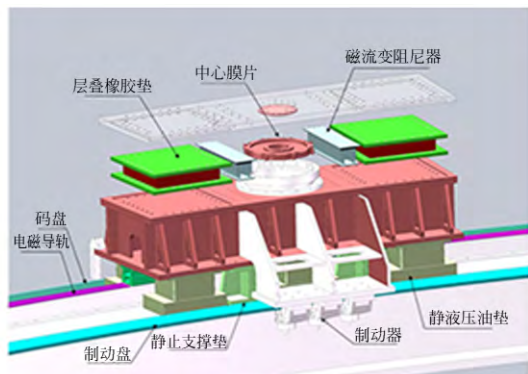


图 4 方位轴车载系统解决方案

Fig. 4 Proposed solution for azimuth mechanism truck system

多组系统通过锚固的方式安装在望远镜方位轴的结构底部且支撑于滑动导轨上,通常均匀分布。因此,这套装置只有在通过滑动轨道时受导轨小尺度变形的影响,而不受移动结构大尺度变形的影响。

3.2 集成系统工作原理

该系统的基本工作原理为:望远镜方位轴系通过静液压油垫系统提供轴系支撑,静液压油垫作用于滑动轨道上且维持大约 $60 \sim 70 \mu\text{m}$ 的薄膜油层。安装在机架上的直线电机转子与固定导轨上的定子闭合产生方位轴运转所需的驱动力矩。每个机架在可移动结构上定义一套连接机构,该机构包括具有保持水平刚性且竖向相对柔性的膜片连接件,该连接件占据连接装置的中心区域,以便传递直线电机驱动力矩,如图 5 所示,在其上支撑平行于机架上方的刚性板,同时在两个元件机架和刚性板之间设置层叠橡胶垫,适于保持垂直方向的刚性连接,但是允许相对旋转的柔性力矩,而不发生附加力矩。系统通过允许机架和结构之间相对移动的运动学柔性连接来拖动移动结构,以保证系统的静液压油垫和驱动电机仅在其运行中受到滑动轨道小尺度变形的影响,而不受跟踪架移动结构大尺度变形的影响。当望远镜地基基础设施存在振动时,连接机构附有的磁流变阻尼器可以增加阻尼力抑制相应的振动传递到望远镜的上部结构。若望远镜发生了突发性紧急情况或对操作人员构成危险时,制动器可以对系统进行紧急制动以避免发生意外情况。地震发生时,系统上的防翘起机构可以防止方位轴系脱离轨道而损坏望远镜仪器。图 6 是该集成系统的工作原理图。

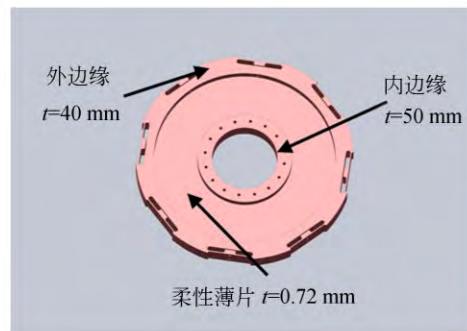


图 5 中心膜片(殷钢)

Fig. 5 Central membrane(Invar)

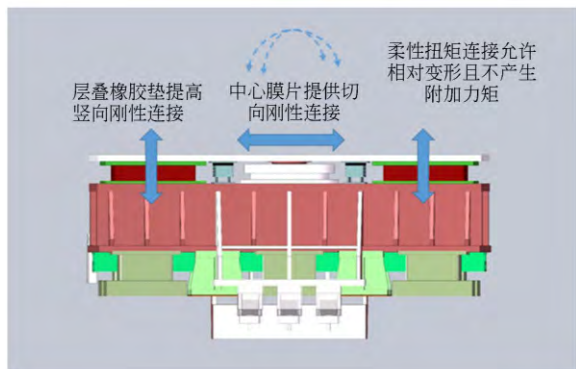


图 6 运动副连接概念。装置保持竖向和切向刚度，以便传递重力载荷和电机力矩，但同时上部结构如果发生变形可以保持柔性

Fig. 6 Kinematical joint concept. It is stiff in vertical and tangential directions, in order to transmit dead loads and motor torque, but it is flexible if upper structure deflects

4 有限元仿真分析

利用有限元软件 ANSYS 分别对系统包含运

动副连接和不包含运动副连接两种形式进行了仿真。依据系统的实际工作情况，分别施加相对于方位轴径向（ X 轴方向）和切向（ Z 轴方向）的恒定力矩为 $1\ 000\ \text{N} \cdot \text{m}$ 。

系统在上述两种运动副连接情况下的等效位移云图和等效应力云图如表 1 所示。

在无运动副连接的情况下，系统在承受上述 Z 轴方向力矩载荷时，静液压油垫外环分布区域发生了明显的翘曲变形，而最大应力多发生在静液压油垫内环支撑的作用位置；同等情况下，在承受上述 X 轴方向力矩载荷时，机架发生绕 X 轴的倾覆变形，最大应力发生在静液压油垫受压一侧。在施加 Z 轴方向力矩载荷情况下，系统采用运动副连接后，主要变形发生在运动副柔性连接单元，表现为内环区域受压外环区域受拉，静液压油垫分布区域均未发生明显的变形，最大应力发生在运动副连接层内环分布区域；同等情况下，在承受上述 X 轴方向力矩载荷时，系统只在运动副柔性连接层产生了绕 X 轴的倾覆变形，静液压油垫分布区域同样没有发生较为明显的变形，最大应力发生在运动副连接层受压的区域。

表 1 系统的位移、应力分布图

Tab. 1 Displacement and stress distributions of mechanism struck system

	运动副连接 Z 轴方向扭转载荷施加	运动副连接 X 轴方向扭转载荷施加	无运动副连接 Z 轴方向扭转载荷施加	无运动副连接 X 轴方向扭转载荷施加
等效位移云图				
等效应力云图				

系统在有无运动副连接两种情况下的有限元分析结果如表 2 所示。由表 2 可知，当系统无运动副连接施加 Z 轴方向力矩时，关注点位移（最大变形静液压油垫油腔中心点）为 $1.43 \times 10^{-2}\ \text{mm}$ ，系统最大位移为 0.02 ，最大应力为 $2.78\ \text{MP}$ ；在相同载荷情况下，设置运动副连接后，关注点位移降为 $8.47 \times 10^{-4}\ \text{mm}$ ，系统的最大应力降为 1.49

MP ，最大变形则由于运动副的柔性特性增加为 $5.52\ \text{mm}$ ；当系统无运动副连接施加 X 轴方向力矩时，关注点位移为 $1.29 \times 10^{-2}\ \text{mm}$ ，系统最大位移为 0.02 ，最大应力为 $0.62\ \text{MP}$ ；在相同载荷情况下，设置运动副连接层后，关注点位移降为 $1.26 \times 10^{-3}\ \text{mm}$ ，系统的最大应力降为 $0.11\ \text{MP}$ ，最大变形同样由于运动副的柔性特性增加为 $1.08\ \text{mm}$ 。

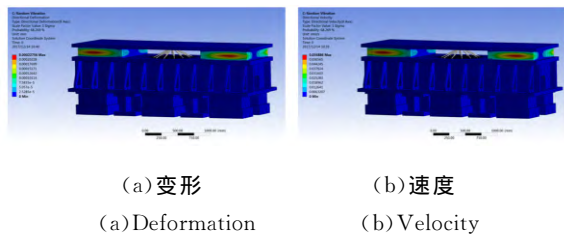
表2 静力分析组合结果

Tab.2 Combination results of static analysis

工况	关注点位移/mm	系统最大位移/mm	系统最大应力/MP
无运动副连接 Z 轴方向力矩	1.43×10^{-2}	0.02	2.78
无运动副连接 X 轴方向力矩	1.29×10^{-2}	0.02	0.62
运动副连接 Z 轴方向力矩	8.47×10^{-4}	5.52	1.49
运动副连接 X 轴方向力矩	1.26×10^{-3}	1.08	0.11

通过比较可知,结构误差引起的失配力矩可以被运动副显著吸收而不会强加给静液压油垫和驱动系统。

望远镜在运行过程中可能受风荷载和不确定性外界干扰力的影响,对该装置进行了随机振动分析,结果如图9所示。分析结果表明,外界不确定性扰动力对该装置引起的变形、速度、加速度以



(a) 变形

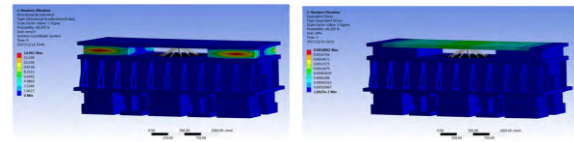
(a) Deformation

(b) 速度

(b) Velocity

参考文献:

- [1] QUATTRI M, DIMICHINO F, MARCHIORI G, et al.. VLT 8-m unit telescope main structure: design solutions and performance calculation [J]. SPIE, 1994, 2199: 986-996.
- [2] European Southern Observatory. *The VLT White Book* [M]. ESO, 1998.
- [3] RAYBOULD K, GILLETT P E, HATTON P, et al.. Gemini telescope structure design [J]. SPIE, 1994, 2199: 376-393.
- [4] MIYAWAKI K, ITOH N, SUGIYAMA R, et al.. Mechanical structure for the SUBARU Telescope [J]. SPIE, 1994, 2199: 754-761.



(c) 加速度

(c) Acceleration

(d) 应力

(d) Stress

图9 随机振动分析结果

Fig.9 Results of random vibration analysis

及应力均发生在柔性层,该装置柔性连接层具有较强的抗干扰能力,对于保证望远镜轴系的平稳、均匀运行具有良好的效果。

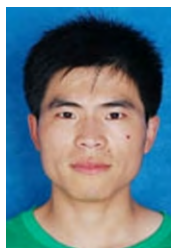
5 结论

本文为了调节巨型望远镜方位轴结构的大变形对轴系支撑和驱动系统产生的影响,提出了一种具有运动副柔性连接的机械装置,该集成系统具备轴承及驱动两个功能。介绍了机械装置的结构和工作原理,然后根据实际情况进行了有限元仿真分析。分析结果证明:同不包含柔性连接相比,系统在设置运动副连接后,施加 Z 轴方向力矩时,关注点的位移由 $14.3 \mu\text{m}$ 减小为 $0.85 \mu\text{m}$;施加 X 轴方向力矩时,关注点的位移由 $12.9 \mu\text{m}$ 减小为 $1.26 \mu\text{m}$,运动副连接可以显著吸收巨型望远镜方位轴结构变形引起的作用力矩而不会传递给静液压油垫和驱动系统。同时,该装置对外界随机扰动力具有良好的吸振作用,可以保证望远镜轴系的正常运行,本设计为巨型望远镜研制提供了支持。

- [5] MEDWADOWSKI S J. Structure of the keck telescope -An overview [C]. *Proceedings of the International Symposium on Large Telescopes Japanese National Large Telescope and Related Engineering Developments*, Springer, 1989: 33-43.
- [6] 张景旭. 地基大口径望远镜系统结构技术综述 [J]. 中国光学, 2012, 5(4): 327-336.
ZHANG J X. Overview of structure technologies of large aperture ground-based telescopes [J]. *Chinese Optics*, 2012, 5(4): 327-336. (in Chinese)
- [7] 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 shaft-

- ing bearing structure in a large Alt-azimuth telescope[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(7): 1509-1516. (in Chinese)
- [8] SZETO K, ROBERTS S, GEDIG M, *et al.*. TMT telescope structure system: design and development [J]. *SPIE*, 2006, 6267: 62672Q.
- [9] TSANG D, AUSTIN G, GEDIG M, *et al.*. TMT telescope structure system: seismic analysis and design[J]. *SPIE*, 2008, 7012: 70124J.
- [10] NELSON J, SANDERS G H. The status of the thirty meter telescope project[J]. *SPIE*, 2008, 7012:70121A.
- [11] USUDA T, EZAKI Y, KAWAGUCHI N, *et al.*. Preliminary design study of the TMT Telescope structure system: overview [J]. *SPIE*, 2014, 9145: 91452F.
- [12] JOHNS M, MCCARTHY P, RAYBOULD K, *et al.*. Giant Magellan telescope: overview [J]. *SPIE*, 2012, 8444: 84441H.
- [13] BERNSTEIN R A, MCCARTHY P J, BIGELOW B C, *et al.*. Overview and status of the giant Magellan telescope project[J]. *SPIE*, 2014, 9145: 91451C.
- [14] MARCHIORI G, BUSATTA A, GHEDIN L, *et al.*. The E-ELT project: the telescope main structure detailed design study[J]. *SPIE*, 2012, 8444: 84440O.
- [15] GÓMEZ C, AVILÉS A, BILBAO A, *et al.*. E-ELT seismic devices analysis and prototype testing [J]. *SPIE*, 2012, 8449: 844918.
- [16] SU D G, WANG Y N, CUI X Q. A configuration for future giant telescope[J]. *Chinese Astronomy and Astrophysics*, 2004, 28(3): 356-366.
- [17] LI G P, YANG D H. Preliminary structure design and analysis of the Chinese Future Giant Telescope [J]. *SPIE*, 2004, 5495: 204-215.
- [18] GUNNELS S. The Giant Magellan Telescope (GMT): hydrostatic constraints [J]. *SPIE*, 2010, 7733: 77334Z.
- [19] The E-ELT Project Office. *The E-ELT Construction Proposal*[M]. München: European Southern Observatory, 2011.
- [20] TMT Observatory Corporation. *TMT Construction Proposal*[M]. Washington: TMT Observatory, 2007.

作者简介:



胡守伟(1987—),男,山东临沂人,博士研究生,2011年于中国海洋大学获得学士学位,2014年于中国科学院南京天文光学技术研究所获得硕士学位,主要从事天文技术与方法方面的研究。E-mail: swhu@niaot.ac.cn



宋晓莉(1978—),女,河南平西人,副研究员,2001年于安徽理工大学获得硕士学位,2012年于中国科学院南京天文光学技术研究所获得博士学位,主要从事大型天文望远镜机架驱动、控制方面的研究。