

文章编号 1004-924X(2014)09-2451-07

4 m SiC 轻量化主镜的主动支撑系统

吴小霞*, 李剑锋, 宋淑梅, 邵 亮, 明 名
(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:针对 4 m 光电望远镜中 SiC 轻量化主镜比刚度大, 面形精度要求高的特点, 提出采用液压 whiffletree 被动支撑并联力促动器主动支撑的轴向液压主动支撑方案。液压被动支撑承担镜重, 主动支撑仅输出校正主镜面形误差所需的主动校正力, 从而减小主动支撑元件力促动器的作用力范围, 提高主动校正力精度。借助于有限元法完成了轴向和侧向支撑系统的优化, 确定了轴向 54 点和侧向 24 点等间距等力($\beta=0.5$)支撑系统设计。当仅有被动支撑作用时, 主镜水平和竖直状态下重力引起的镜面变形误差 RMS 值分别为 37.8 nm 和 82.9 nm。采用主动校正后, 主镜水平和竖直状态下的镜面变形误差 RMS 分别减小到 12.0 nm 和 9.8 nm。不同俯仰角下主镜的镜面变形均能满足面形误差 RMS 不大于 $\lambda/30$ ($\lambda=632.8$ nm) 的指标要求。

关键词: SiC 轻量化主镜; 主动支撑; 液压 whiffletree; 被动支撑

中图分类号: TH751 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20142209.2451

Active support system for 4 m SiC lightweight primary mirror

WU Xiao-xia*, LI Jian-feng, SONG Shu-mei, SHAO Liang, MING Ming

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

* Corresponding author, E-mail: wu-xiaoxia@sohu.com

Abstract: As the SiC lightweight primary mirror in a 4 m photoelectric telescope has high specific stiffness and needs strict surface precision, this paper proposes an axial active support system based on the hydraulic whiffletree passive support for the primary mirror. The hydraulic whiffletree support system was used to support the mirror weight, and the active support was just output active forces to correct mirror surface errors, reduce the active force range and to increase the precision of active force. A 54-point axial support system and a 24-point lateral support system were optimized by the Finite Element Method (FEM), and the parameter of lateral force β was 0.5. With the hydraulic passive support system, the mirror surface deformation Root Mean Square (RMS) values from the gravity of the primary mirror are 37.8 nm and 82.9 nm respectively under horizontal and vertical states. After active correction, the mirror surface error RMS values are reduced to 12.0 nm and 9.8 nm accordingly. Analysis indicates that the mirror surface deformation of 4 m SiC lightweight primary mirror at different pitch angles is less than $\lambda/30$ ($\lambda=632.8$ nm) and meets the requirements of surface errors.

Key words: SiC lightweight primary mirror; active support; hydraulic whiffletree; passive support

收稿日期: 2014-01-20; 修订日期: 2014-02-27.

基金项目: 中科院长春光学精密机械与物理研究所重大创新项目专项基金资助项目 (No. Y3C122E130)

1 引言

主镜是影响望远镜系统成像质量的关键元件,主镜镜面面形误差的来源主要有:镜面光学加工误差、主镜支撑引起的镜面变形误差、重力变形和热变形引起的面形误差等。作用力或力矩产生的主镜面形误差均可以由相同量级的反向作用力或力矩来校正,而不仅仅由主镜自身刚度来保证面形,即无论是弯月薄镜还是轻量化镜都可以采用主动校正力来改善镜面变形,减小镜面面形误差^[1]。欧洲南方天文台(ESO)首先在 3.5 m NTT 中应用主动作用力来校正弯月薄镜的镜面变形中前七项低频误差项^[2-3],后续的 2.6 m VST、3.58 m TNG、3.67 m AEOS、4.3 m SOAR、8.1 m Gemini、8.2 m VLT、8.3 m JNLT 等一系列望远镜均通过主动支撑来控制薄弯月主镜的镜面面形^[4-6],这些弯月主镜一般采用低膨胀材料(Zerodur 或 ULE)。亚利桑那大学成功将主动光学技术应用到 3.5 m SORT、3.5 m WIYNT、6.5 m Magellan、6.5 m MMT、8.4 m GMT、8.4 m LBT 等硼硅酸盐轻量化反射镜上^[7-9]。

国内外主动光学望远镜中所采用的主动支撑系统可分为 3 种类型:(1)采用机电式力促动器主动支撑系统^[5,10-12],以 SOAR、JNLT、LAMOST 为代表;(2)采用液压被动并联机电式力促动器主动支撑系统,以 AEOS、VLT 为代表;(3)在轻量化镜背面采用气压力促动器控制镜面面形的主动支撑系统,以 SORT、MMT 为代表。

4 m 光电望远镜中 SiC 轻量化主镜结构比刚度较大(一阶固有频率约为 149.9 Hz)^[13-20],且其面形精度要求较高(镜面误差 $\text{RMS} \leq \lambda/30$, $\lambda = 632.8 \text{ nm}$),轴向支撑系统若采用单纯的机电式或气压力促动器主动支撑系统,则要求力促动器既具有较大的输出范围,且具有较高的精度,设计中很难实现。为此本文设计了一套适合 SiC 轻量化主镜的液压主动支撑系统,满足主镜低阶像差的主动校正^[21-22]。

2 主镜模型及相关参数

4 m 轻量化主镜所用材料 SiC 的弹性模量 E

为 392 GPa,密度 ρ 为 $3.05 \times 10^{-9} \text{ t/mm}^3$,泊松比 μ 为 0.25,线胀系数为 $2.5 \times 10^{-6} / \text{K}$ 。

4 m SiC 轻量化平凹主镜的镜面曲率半径约为 12 m,镜体边缘厚度为 350 mm,中心孔直径为 500 mm。主镜采用了背部半封闭式扇形轻量化结构形式。主镜质量约为 2.4 t,轻量化率达 77%。

3 液压主动支撑系统方案

以主镜镜面顶点为原点,从主镜指向次镜的光轴方向为 +Z 轴,平行于望远镜水平轴的方向为 X 轴,Y 轴根据右手定则确定,建立直角坐标系。

主动支撑主要是通过轴向力促动器输出主动校正力来实现主镜面形的实时校正。4 m SiC 主镜的每个轴向支撑点处均采用液压 Whiffletree 被动支撑并联主动支撑元件力促动器的方案,如图 1 所示,即每个轴向支撑对主镜的作用力包含液压缸提供的被动支撑力 F_{pa} 和力促动器提供的主动校正力 F_{aa} 两部分,被动支撑力 F_{pa} 承担镜重,主动校正力 F_{aa} 校正主镜面形误差,这种作用力组合形式可大大减小力促动器的作用力范围。

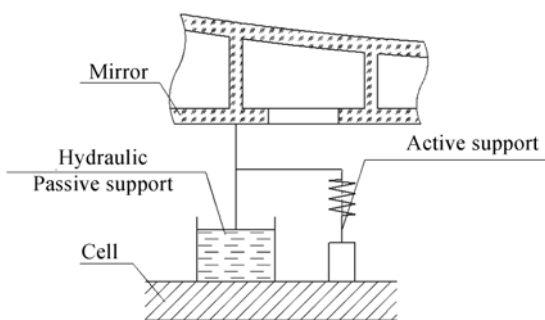


图 1 液压主动支撑原理

Fig. 1 Passive and active axial support

满足独立的液压 whiffletree 被动支撑和独立的力促动器主动支撑系统并联支撑系统的条件有:

(1) 主动支撑系统的主动校正力需满足方程组: $\Sigma F_{\text{aa},i} = 0$, $\Sigma M X_{\text{aa},i} = 0$, $\Sigma M Y_{\text{aa},i} = 0$ 。其中 $F_{\text{aa},i}$ 为每个轴向支撑点的主动校正力, $M X_{\text{aa},i}$ 、 $M Y_{\text{aa},i}$ 为每个主动校正力绕 X 轴和 Y 轴的力矩。

(2) 轴向支撑点呈 120° 对称分布。如图 2 所

示,将主镜 $3n$ 个轴向液压支撑分成 3 个区域,每个区域内液压支撑数量相同,且液压缸的输出支撑力相同。每个扇区内所有支撑点的位置和支撑力确定一个虚拟的轴向定位点,3 个扇区形成 3 个虚拟轴向定位点确定主镜沿光轴的平移(UZ)和绕水平轴和竖直轴的转动(RX 和 RY)。

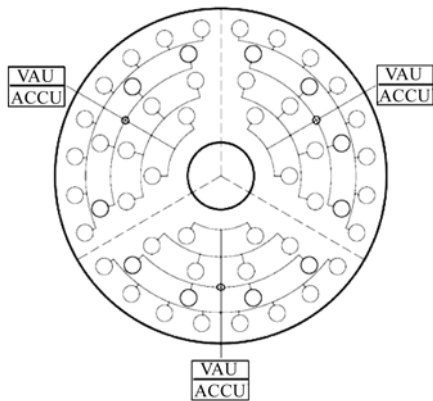


图2 轴向液压支撑系统

Fig. 2 Hydraulic whiffletree axial support system

液压主动支撑结构如图3所示,其被动支撑元件采用自研双腔滚动膜片式液压缸^[23],主动支撑元件采用电机驱动丝杠螺母,弹簧将螺母的直线运动转化为主动作用力。该液压主动控制系统的设计关键是力传感器的设置。如果力传感器安装在主镜与被动支撑之间,测量的则是施加到主镜上的被动力 F_{pa} 与主动力 F_{aa} 之和,即力传感器的量程应大于 $(F_p + F_a)_{max}$ 。力传感器产生的误差包括了滞后、差动的非线性和温度漂移等,例如量程为 500 N 的 Load cell 其温度漂移误差占量程 0.002%、非线性误差占 0.02%、滞后误差占 0.02%,总误差约 0.14 N。

根据该主镜主动支撑标定可知,校正相同量级、不同像差模式时,像散所需的主动作用力最小, $RMS = \lambda/30$ ($\lambda = 632.8 \text{ nm}$) 的像散所需最小主动校正力约为 0.15 N,即为保证主镜校正后的面形优于 $\lambda/30$,主镜容许的最大主动作用力误差在 0.15 N 内。上述分析可知,力传感器误差几乎已经占据了容差范围,并且轴向 N 个支撑点处力传感器的并联柔度会大大降低了主镜的轴向支撑刚度和镜室系统的固有频率。设计中测力元件力

传感器仅监测主动力 F_{aa} 的大小,即可选用小量程力传感器,可明显减小力传感器误差,提高主动作用力的精度。且此时与被动支撑液压缸的轴向刚度相比,主动支撑力促动器的刚度很小,即主镜的支撑刚度由液压被动支撑系统所决定。

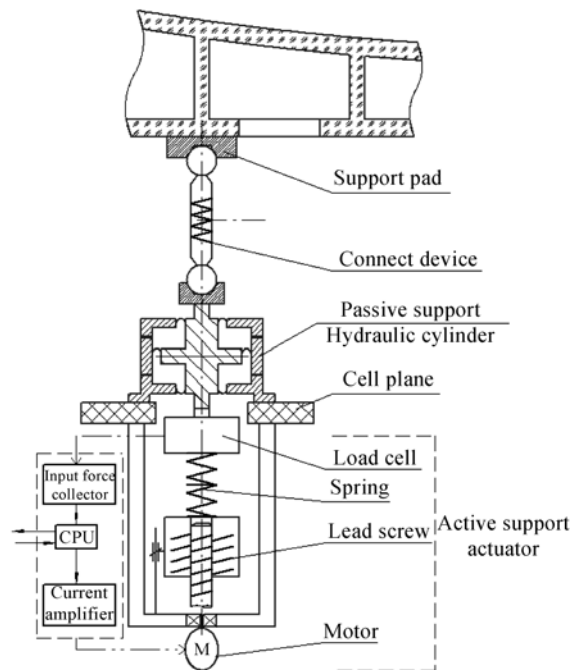


图3 被动液压与主动支撑相结合的轴向支撑

Fig. 3 Passive and active axial support

主镜俯仰角变化时,侧向支撑承担主镜侧向重力分量,可采用液压被动支撑系统方案。将 2 m 个侧向支撑点分成左右对称的两组,2 个区域形成 2 个虚拟侧向定位点,约束主镜沿 Y 轴平移。

4 主镜定位系统

主镜轴向液压支撑系统分成 3 个区域,形成 3 个虚拟轴向定位点约束主镜 UZ、RX 和 RY 3 个自由度;侧向液压支撑点分为左右对称的 2 个区域,形成两个虚拟侧向定位点,约束主镜 UY 自由度;轴向和侧向液压支撑系统未能约束的 2 个自由度(UX 和 RZ)则由一对切向安装在主镜外圆周上的柔性杆^[4]来完成约束。整个主镜的定位系统模型如图4所示,包括 3 个虚拟轴向定位点、2 个虚拟侧向定位点和 1 对切向杆。

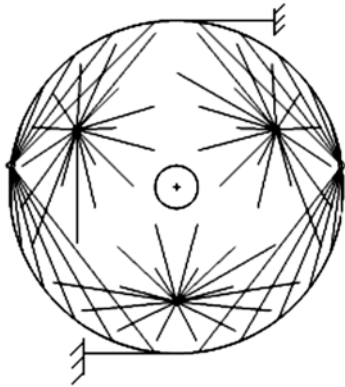


图 4 主镜定位系统有限元模型

Fig. 4 FEM of primary mirror with position system

5 支撑系统优化设计

5.1 轴向支撑

轴向支撑点的数量和位置优化设计时需同时考虑液压 Whiffletree 被动支撑和主动支撑两方面,其主要约束条件有:(1)支撑点需分布在主镜径向筋和环筋的交汇点处;(2)支撑点呈 120° 对称分布;(3)所有支撑点的被动支撑力相同;(4)主动支撑系统可校正的像差项受支撑圈上的最少支撑点数 M 和支撑圈数 N 的限制^[3]。以主镜面形指标要求($\text{RMS} \leq \lambda/30$)为优化目标函数,优化后确定轴向 54 个支撑点的排布方式如图 5 所示,4 个支撑圈上的支撑点数依次为 6、12、12 和 24。

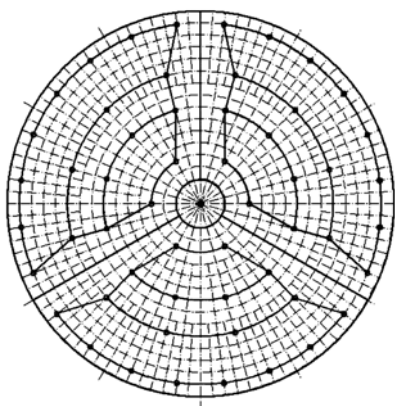


图 5 主镜轴向 54 个液压支撑点的排布方式

Fig. 5 Distribution of axial 54 support points

主镜水平状态时,镜面在液压缸被动支撑下的变形云图如图 6(a)所示,经力促动器初步校正后的变形云图如图 6(b)所示,校正力的计算采用模式定标法^[10,24]。校正前后重力引起的镜面误

差以及各个轴向支撑点对主镜的轴向作用力如表 1 所示。

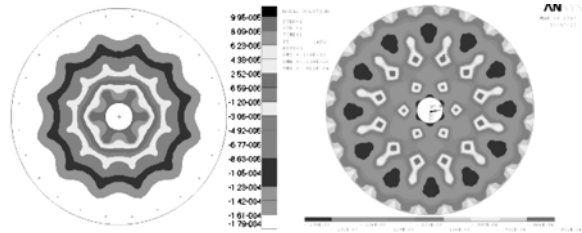


图 6 主镜水平主动初步校正前后的镜面变形

Fig. 6 Mirror deformations before and after active corrections at zenith position

表 1 主镜水平轴向支撑下的镜面变形计算结果

Tab. 1 Mirror deformations and forces before and after active corrections at zenith position

Active 7 correction	RMS /nm	PV /nm	Force of axial support point/N			
			Ring1	Ring2	Ring3	Ring4
Before	37.8	156.8	447.97	447.97	447.97	447.97
After	12.0	58.7	386.65	419.42	557.90	428.30

4 个支撑圈上的主动校正力分别为 61.32、28.55、-109.93 和 19.67 N,由校正结果可见,绝大部分主动校正力用来补偿各支撑圈之间支撑点重量分布不均匀。

5.2 侧向支撑

侧向支撑力设计中具有一个重要变量参数 β ,它是决定切向力的总和占总承重力(镜重)的比率,是影响镜面变形的关键点。该参数定义为:

$$\beta = \frac{F_h}{F_h + F_{lr}} = \frac{F_h}{G}, \quad (1)$$

其中: F_r 和 F_r 分别为径向分力的总和及切向分力的总和。

当镜重为 G ,侧向支撑点数为 n 时,第 i 个侧支撑点侧向支撑力中的切向分量和径向分量分别为:

$$F_{h,i} = \beta \frac{2G}{n} \cos \frac{2(i-1)\pi}{n}. \quad (2)$$

$$F_{lr,i} = (1-\beta) \frac{2G}{n} \sin \frac{2(i-1)\pi}{n}. \quad (3)$$

侧向支撑点一般设置在主镜外圆周与径向加强筋的交汇处。受镜体轻量化结构的限制,4 m SiC 轻量化主镜可采用的侧支撑方式为等间距等力竖直推拉($\beta=0.5$)和等间距不等力($\beta=0.75$)侧支方式。经优化获得主镜采用 24 点侧支撑时

两种情况下 4 m SiC 主镜的侧向支撑力大小和方向如图 7 所示。从支撑结构设计考虑, $\beta=0.5$ 的等间距等力竖直推拉侧支撑中平分在主镜两侧的 24 个液压支撑均匀承担了主镜的镜重,每个侧支撑组件的结构一致;而 $\beta=0.75$ 时,各个侧支撑点的作用力大小和方向均不同,若采用相同的液压缸,则需要通过可调杠杆机构来实现不同的输出力,结构相对复杂。

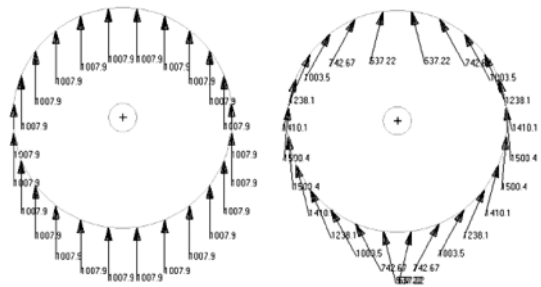


图 7 $\beta=0.5$ 和 0.75 下侧支撑力的大小和方向
Fig. 7 Values and directions of lateral forces for $\beta=0.5$ and 0.75

当望远镜指向水平,主镜竖直状态,两种侧向支撑力作用、主动校正前后镜面面形计算结果如表 2 所示。根据初步主动校正结果可见,对于该 4 m SiC 轻量化主镜, $\beta=0.5$ 的侧向支撑方案的支撑效果略优。结合支撑机构的结构设计,确定采用 $\beta=0.5$ 、等间距竖直推拉液压侧支撑,该侧支撑作用下,主动校正前后主镜的镜面变形云图如图 8 所示。

表 2 两种侧支方案引起的镜面变形

Tab. 2 Mirror deformations caused by different lateral support modes at horizon position

β	RMS/nm	PV/nm	RMS/nm	PV/nm	F_{amax}/N
0.5	82.9	435.5	9.8	107.7	± 101.27
0.75	98.8	463.9	10.9	99.3	± 85.63

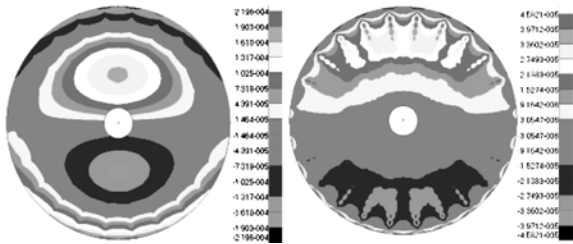


图 8 侧支撑作用下、主动校正前后镜面变形云图
Fig. 8 Mirror deformation diagrams before and after active corrections at vertical position

5.3 轴向和侧向支撑共同作用

4 m SiC 主镜采用 54 点轴向支撑、24 点等间距等力($\beta=0.5$)侧向支撑方案时,不同俯仰角下、主动校正前后主镜镜面的重力变形如图 9 所示。

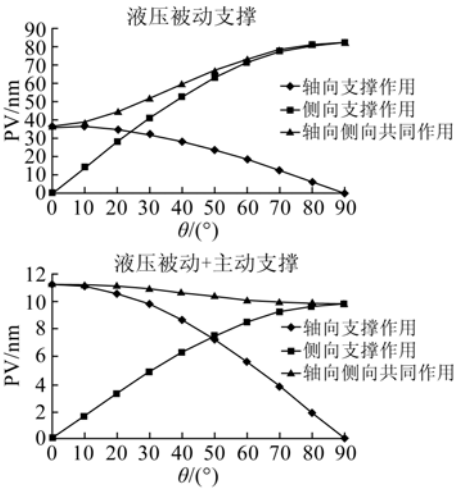


图 9 不同俯仰角下主动校正前后的镜面变形
Fig. 9 Mirror deformations before and after active corrections at different zenith angles

主动支撑系统的初步校正结果表明:当望远镜指向天顶时,校正后的镜面面形误差 RMS 为 12.0 nm;当望远镜指向水平时,校正后的镜面误差 RMS 值为 9.8 nm;随着俯仰角的变化,主镜镜面重力变形 RMS 值均不大于 $\lambda/30$,满足面形误差的设计指标所要求。

6 结 论

本文提出了采用液压 Whiffletree 被动支撑与力促动器主动支撑并联的液压主动支撑方案,该方案减小了力促动器的作用力范围,有利于提供主动校正力的精度。4 m SiC 轻量化主镜仅采用轴向 54 点和侧向 24 点等间距等力($\beta=0.5$)液压被动支撑时,主镜水平状态重力引起的镜面变形误差 RMS 值为 37.8 nm,主镜竖直状态重力引起的镜面变形误差 RMS 值为 82.9 nm,难以满足 $\text{RMS} \leq \lambda/30$ ($\lambda=632.8 \text{ nm}$) 的光学指标要求。在主镜轴向液压 Whiffletree 被动支撑上并联主动校正元件力促动器,采用主动校正后,主镜水平状态镜面变形误差减小到 12.0 nm,主镜竖直状态镜面变形误差减小到 9.8 nm,能够满足面形误差指标要求。

参考文献:

- [1] IWONA A P, ISAAC G. Developing SiC for optical system applications [J]. *SPIE*, 2004, 5524: 14-20.
- [2] WILSON R N. The history and development of the ESO active optics system [J]. *Telescope and instrumentation*, September, 2003; 2-9.
- [3] NOETHE L, ANDREONI G, FRANZA F, *et al.*. Latest developments of active optics of the ESO NTT and the implication for the ESO VLT [J]. *SPIE*, 1991, 1542: 293-296.
- [4] JAMES E, KIMBRELL, DAVID G, *et al.*. AEOS 3.67 m telescope primary mirror active control system[J]. *SPIE*, 1998, 3352:400-411.
- [5] VICTOR L. Krabbendam. active optical system design for 4.2 m SOAR telescope [J]. *SPIE*, 2000, 4003:122-135.
- [6] LARRY STEPP, EUGENE HUANG. Gemini primary mirror support system [J]. *SPIE*, 1994, 2199: 223-238.
- [7] MARTIN H M, ALLEN R G, CUERDEN B, *et al.*. Primary mirror system for the first Magellan telescope [J]. *SPIE*, 2000, 4003: 2-13.
- [8] MARTIN H M, CALLAHAN S P, CUERDEN B, *et al.*. Active support and force optimization for the MMT primary mirror [J]. *SPIE*, 1998, 3352: 412-423.
- [9] MARTIN H M, CUERDEN B, DETTMANN L R, *et al.*. Active optics and force optimization for the first 8.4m LBT mirror [J]. *SPIE*, 2004, 5489:826-837.
- [10] 陈夫林,张景旭,吴小霞,等. 620 mm 薄镜面的主动支撑结构及面形校正[J]. *光学 精密工程*, 2011, 19(5): 1022-1029.
CHEN F L, ZHANG J X, WU X X, *et al.*. Supporting structure of 620 mm thin primary mirror and its active surface correction [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(5): 1022-1029. (in Chinese)
- [11] 张玉芳,李国平. 用于薄镜面主动光学的音圈力促动器设计[J]. *光学 精密工程*, 2013, 21 (11): 2836-2842.
ZHANG Y F, LI G P. Design of voice coil force actuator in thin mirror active optical system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21 (11): 2836-2842. (in Chinese)
- [12] SU D Q, JIANG SH T, ZOU W Y, *et al.*. Experiment system of thin-mirror active optics [J]. *SPIE*, 1994, 2199:609-621.
- [13] 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 whiffletree [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42 (8): 2126-2131. (in Chinese)
- [14] 张舸. 1.5 m 量级 SiC 陶瓷素坯凝胶注模成型工艺[J]. *光学 精密工程*, 2013, 21 (12): 2989-2993.
ZHANG G. Gelcasting process of 1.5 m SiC Ceramic green body [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21 (12): 2989-2993. (in Chinese)
- [15] 徐宏,关英俊. 空间相机 1 m 口径反射镜组件结构设计[J]. *光学 精密工程*, 2013, 21 (6): 1488-1495.
XU H, GUAN Y J. Structural design of 1m diameter space mirror component of space camera [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21 (6): 1488-1495. (in Chinese)
- [16] 李响刚,孙宁,卓仁善,等. 大口径光电经纬仪主反射镜支撑结构设计[J]. *光学 精密工程*, 2013, 21 (12): 3111-3117.
SAN X G, SUN N, ZHAO R SH, *et al.*. Design of supporting structure for primary mirror of large aperture theodolite [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21 (12): 3111-3117. (in Chinese)
- [17] 邵亮,杨飞,王富国,等. 1.2 m 轻量化 SiC 主镜支撑系统优化设计[J]. *中国光学*, 2012, 5 (3): 229-234.
SHAO L, YANG F, WNAG F G, *et al.*. Design and optimization of supporting system for 1.2 m lightweight SiC primary mirror [J]. *Chinese Optics*, 2012, 5 (3): 229-234. (in Chinese)
- [18] 陈伟,丁亚林,惠守文,等. 碳化硅扫描反射镜支撑结构设计[J]. *中国光学*, 2012, 5 (2): 161-166.
CHEN W, DING Y L, HUI SH W, *et al.*. Design of kinematic mount for SiC Scanning reflective mirror [J]. *Chinese Optics*, 2012, 5 (2):161-166. (in Chinese)
- [19] 叶伟楠,董吉洪. 大口径主镜轻量化结构参数的优化设计[J]. *中国光学*, 2012, 5 (3): 222-228.
YE W N, DONG J H. Optimized design of lightweight structural parameters for large-aperture primary mirror [J]. *Chinese Optics*,

- 2012, 5 (3): 222-228. (in Chinese)
- [20] 康健, 宣斌, 谢京江. 表面改性碳化硅基底反射镜加工技术现状[J]. 中国光学, 2013, 6 (6): 824-833.
- KANG J, XUAN B, XIE J J. Manufacture technology status of surface modified silicon carbide mirrors [J]. *Chinese Optics*, 2013, 6 (6): 824-833. (in Chinese)
- [21] 陈宝刚, 明名, 吕天宇. 大口径球面反射镜曲率半径的精确测量[J]. 中国光学, 2014, 7 (1): 163-168.
- CHEN B G, MING M, LV T Y. Precise measurement of curvature radius for spherical mirror with large aperture [J]. *Chinese Optics*, 2014, 7 (1): 163-168. (in Chinese)
- [22] 杨飞, 安其昌, 张景旭. 基于功率谱的反射镜面形评价[J]. 中国光学, 2014, 7 (1): 156-162.
- YANG F, AN Q CH, ZHANG J X. Mirror surface figure evaluation based on power spectral density [J]. *Chinese Optics*, 2014, 7 (1): 156-162. (in Chinese)
- [23] 李剑锋. 望远镜主动支撑用液压缸设计研究[J]. 长春理工大学学报: 自然科学版, 2013, 36 (3-4): 75-80.
- LI J F. Research on the design of cylinder used as the primary mirror support of telescope [J]. *Journal of Changchun University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2013, 36 (3-4): 75-80. (in Chinese)
- [24] 苏定强, 崔向群. 主动光学——新一代大望远镜的关键技术[J]. 天文学进展, 1999, 17 (1): 1-14.
- SU D Q, CUI X Q. Active optics-key technology of the new generation telescope [J]. *Progress in astronomy*, 1999, 17 (1): 1-14. (in Chinese)

作者简介:



吴小霞(1981—),女,江苏盐城人,博士,副研究员,2003年于吉林大学获得学士学位,2008年于中科院长春光机所获得博士学位,主要研究方向为大口径反射镜主动支撑系统设计和系统仿真分析。E-mail: wu-xiaoxia @ sohu. com

(版权所有 未经许可 不得转载)