

文章编号 1004-924X(2017)10-2599-08

基于液压支撑的大口径主镜稳像技术

李剑锋*, 吴小霞, 李玉霞, 孙敬伟, 宿馨文

(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: 望远镜的俯仰运动会使主镜相对镜室的位置发生改变, 进而影响望远镜的稳定成像。为了校正主镜位置变化, 本文提出了利用液压支撑对主镜相对镜室位置进行实时控制, 实现对主镜稳像的方法。利用实验室现有的 1.23 m SiC 主镜为监测目标搭建了测试系统, 设计了基于 6 个位移传感器的位置监测系统。在未启用和启用液压稳像技术两种状态下, 测试了主镜位置变化, 并对主镜位置进行解算, 试验结果表明液压支撑技术有确实的稳像效果。当镜室转动 40° 时, 未稳像的主镜其 X 向平移变化为 $150\ \mu\text{m}$, 绕 X 轴转角为 $2.5''$ 。采用液压稳像后, X 向平移变化减小为 $3\ \mu\text{m}$ 而绕 X 轴转角减小为 $0.4''$ 。测试结果表明, 基于液压支撑的主镜稳像技术可以实现对主镜位置的实时检测和控制。

关键词: 大口径望远镜; 主镜; 稳像技术; 液压支撑

中图分类号: TH743; TH703 文献标识码: A doi: 10.3788/OPE.20172510.2599

Position control technology of large aperture mirror based on hydraulic support

LI Jian-feng*, WU Xiao-xia, LI Yu-xia, SUN Jing-wei, SU Xin-wen

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

*Corresponding author, E-mail: ljfengli@126.com

Abstract: The pitching rotation of a telescope will cause the relative displacement between a primary mirror and its cell, and the displacement will influence on the stabilizing image of a telescope. To correct the relative displacement of the primary mirror, a method for stabilizing images of the primary mirror was proposed based on a hydraulic support to control the displacement between primary mirror and cell. A 1.23 m SiC mirror in our lab was used to complete the online measuring experiment and a mirror position measuring system with 6 Line Variable Differential Transformer (LVDT) was established. Under two cases with or without image stabilizing technologies based on hydraulic support, the displacement between mirror and cell was measured, and the 5 freedom of mirror was computed by using the measured data from sensors. Experimental results indicate that the proposed technology based on hydraulic support has excellent stabilizing image ability. Under the case without the image stabilization technology, the mirror displacement of Z direction is about $150\ \mu\text{m}$ and the angle around X axis is $2.5''$ when the rotation angle of mirror is 40° . However, the X displacement has reduced to 3

收稿日期: 2017-06-02; 修订日期: 2017-06-27.

基金项目: 中国科学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)

μm and the angle reduced to $0.4''$ when this technology is conducted. It concludes that the stabilizing image technology based on hydraulic support can implement the determination and control of primary mirror position in real time.

Key words: large aperture telescope; primary mirror; image stabilization technology; hydraulic support

1 引言

望远镜的稳像一般是指利用快速反射镜在望远镜头光路后端对成像点位置进行闭环控制,但该技术需要光路成像在快速反射闭环用相机的靶面内,快速反射镜才能起作用。对于大型望远镜,主镜和次镜的位置都会随着俯仰转动发生变化,从而导致后端像点漂移,温度变化、风载作用等其他干扰也会引起光路改变,因此,在装调完毕后主次镜的相对位置变化不大。传统解决办法是调整次镜位置,但次镜位置的调整可能会带来彗差等相差变化。尤其是采用库德光路的望远镜,如果单纯调整次镜,主镜光轴和机械轴不重合,最终像面出现画圈现象,甚至像点会飞出靶面,这时快速反射镜稳像将无法起作用^[1-5]。

针对这一问题,国外大型望远镜,尤其是具有库德系统的望远镜,除使用次镜补偿位置外,一般还利用液压系统^[6-9]或类似 Stewart 六杆机构形成硬点^[10-12]来实时调整主镜的位置。如欧南台的 8 m VLT 望远镜、美国 8 m Gemini 望远镜、美国军方的 4 m AEOS 望远镜等,都采用液压支撑技术对主镜进行稳像控制;而美国的 MMT 等望远镜则使用六杆机构进行主镜稳像。液压支撑技术由于支撑点更多,支撑刚度更大,有利于主镜抵抗风载干扰,因此相比六杆技术更有优势。目前,该技术在国外的应用相对成熟,而国内还主要集中在液压支撑对主镜面型影响的研究上,且主要是理论研究^[13-16],并未见相关技术的试验验证,而对液压支撑稳像技术的研究则更少。

本文采用试验方法研究了基于液压支撑的主镜稳像技术,以实验室现有的 1.23 m SiC 主镜为监测目标搭建了测试系统,设计了基于 6 个位移传感器的位置监测系统。在未启用和启用液压稳像技术两种状态下测试了主镜的位置变化,并以文献^[18]中提出的方法对主镜位置进行解算,分析了液压支撑技术的稳像效果。

2 主镜稳像试验系统设计

1.23 m SiC 主镜稳像主要是控制主镜相对镜室的位置变化。基于液压的稳像系统主要由液压支撑系统、位置检测系统及位置解算部分组成,控制框图如图 1 所示。从图中可以看到,液压支撑系统是动作单元,负责对主镜位置进行调整;位置检测单元是反馈单元,为液压系统动作提供反馈参考。主镜稳像系统类似一种恒值控制系统,主要应对主镜俯仰转动、温度变化、风载等干扰的影响。其中,主镜的俯仰运动引起的扰动是有规律的,本文主要针对该扰动的影响进行研究。

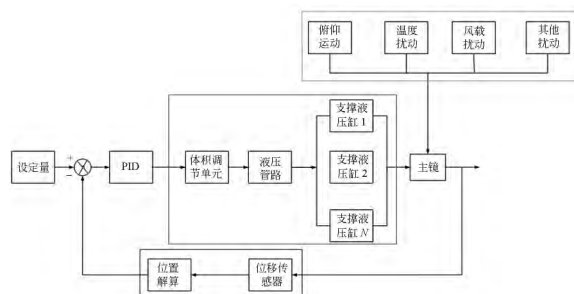


图 1 基于液压支撑的主镜稳像技术控制框图

Fig. 1 Block diagram of mirror image stabilization control technology based on hydraulic supports

2.1 液压支撑系统原理

镜子支撑的理想情况是主镜像一片飘在水上的叶子,每个部分受到的支撑力相同。液压支撑系统便是基于该设计思想进行设计的,图 2 为液压系统原理。如图 2 所示,主镜的液压支撑为被动支撑,在主镜背面的每个支撑点安装液压缸,并将轴向液压缸分为 3 个区域,同一区域的液压缸联通在一起,构成连通器。根据连通器原理每个液压缸的压强相同,因此每个液压缸输出的支撑力也是相同的,该原则和机械式 whiffletree 原理相同^[7]。

液压系统除了支撑主镜重量外,还要调节主镜的位置。为实现这一目的,每个区的液压缸都

连接一个体积调节单元。体积调节单元由伺服液压缸组成,伺服缸的出油口和液压分区连接。通过伺服液压缸的活塞杆伸长或收缩,可以控制伺服缸的油量,从而调整某个液压分区的油量,即调整该区域所支撑主镜部分的高度,达到了调控主镜位置的目的。

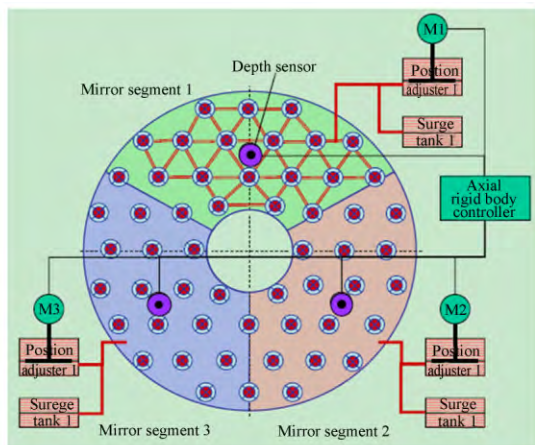


图 2 液压轴向支撑原理图^[11]

Fig. 2 Principle diagram of axial hydraulic support

侧向液压支撑系统和轴向支撑原理一样,也是利用连通器原理实现对主镜侧向的支撑,同时也是用体积调节单元完成对主镜侧向位置的调节。

2.2 主镜位置测量原理

由于主镜的轴向和侧向支撑不可能有无限的刚度,当镜室绕俯仰轴转动时,主镜相对于镜室会发生位置变化,可以利用在镜室上安装的位移传感器来测量主镜的位置变化^[6-7]。首先,位移传感器测出主镜相对镜室的位移量,然后利用位置解算方法得到主镜相对镜室的位置变化。

本文测量主镜和镜室相对运动的位移传感器有 6 个^[17-18],分为两组,每组 3 个,分别安装在主镜的背面和侧面,具体的安装位置如图 2 所示。测试时转动镜室,同时利用 6 个传感器记录转动过程中主镜相对镜室的移动量。位移传感器不能直接得到主镜的 5 个自由度和径向膨胀量,需要通过解算算法将 6 个传感器的测量值转化为主镜的自由度偏差。利用文献^[18]中提出的方法解算出主镜的 5 个自由度和主镜的径向膨胀,其中 5 个自由度包括: X, Y, Z 向 3 个平移和绕 X, Y 轴转角。最终得到主镜位置随测试时间的变化曲线。

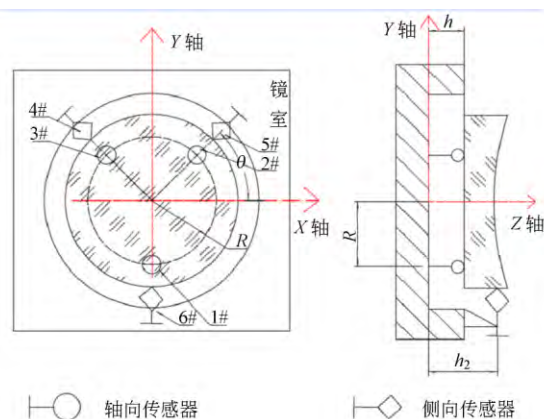


图 3 主镜位置测量传感器布置

Fig. 3 Fixed positions of sensors

2.3 试验系统搭建

图 4 所示为搭建的主镜位置检测系统,主镜为 1.23 m SiC 镜,通过轴向和侧向支撑安装在镜室上。镜室安装在支架上,并且可以绕支架的旋转轴转动,以模拟望远镜的俯仰运动。其中轴向使用 9 个液压支撑缸,分为 3 组。侧向使用 8 个液压支撑缸,分为两组。另外侧向设置一对切向杆,用于控制主镜转动和 X 向平移。

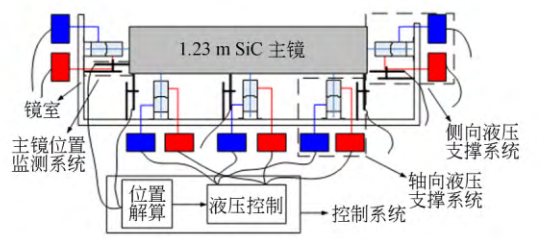
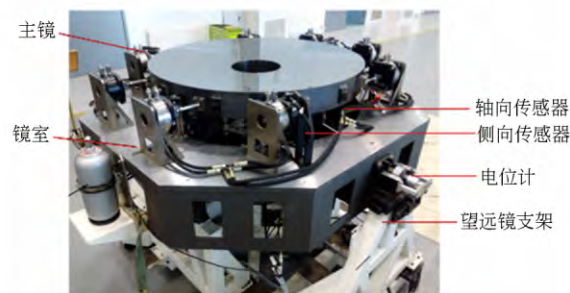


图 4 主镜位置测试平台

Fig. 4 Experiment system for position measurement of primary mirror

位置监测系统使用的 6 个位移传感器为绝对式直线位移传感器 (Linear Variable Differential Transformer, LVDT), 具有精确的绝对零点位

置,在断电并重新上电后可再次获取主镜的绝对位置。LVDT 的线性度为 0.1%,电子量程为 $-2.5 \sim 2.5$ mm,灵敏度为 4.5 V/mm。LVDT 所用的数据采集卡具有 4 路 24 bit 的模拟输入通道,输入量程为 ± 10 V,采样率设定为 5 000 Hz。

在镜室转动轴上安装电位计,用于测量镜室绕轴转动的角度。电位计采集电压值,电压值和角度的换算关系为 2.5 V 对应 90° ,默认初始角度为 0。供电电源负责提供 3 路 24 V 直流电压给 LVDT,PC 负责处理采集数据。

测试中转动镜室使主镜受到俯仰运动扰动,通过位移传感器记录未使用油液支撑闭环和使用液压支撑闭环两种情况下主镜的位置变化,以评估基于液压支撑的主镜稳像技术的可行性。

3 结果和讨论

3.1 重复性测试

为验证测试结果的可信性,首先进行了重复性测试,重复性试验未使用液压支撑系统稳像模式。试验中通过 5 次转动镜室达到位置极限,再转动回原位,期间记录电位计及位移传感器的测量值。试验中由于镜室的俯仰运动不是使用电机,而是采用测试人员手动实现的,因此每次俯仰转动的角度不一致,只能保证每次俯仰转动角度大致在 40° 附近,更大的俯仰角由于结构限制不能实现。图 5 给出了电位计和 5 号传感器的测量值。

从图中可以看出,在俯仰运动中主镜相对镜室的位置变化规律基本是固定的。随着俯仰角的增大,5 号传感器测得主镜相对镜室的变化也逐渐增大;当俯仰角减小时,测量值又减小回零;当转角在 40° 附近时,5 号传感器的测量值变化为 $-70 \mu\text{m}$ 。在 5 次测量得到的曲线不能重合,这是因为所有测试都是通过测试人员手动转动实现的,转动的开始时间和结束时间及最大俯仰角都不能精确控制。图 6 将图 5 测试数据绘制成 5 号传感器测量值随俯仰角的变化曲线,其中只截取了转动开始到转到最大俯仰角这一段的数据。从图 6 中可以看到,5 次测试数据的重复性不错,尤其是在转角小于 20° 时;当转角大于 20° 时,第 5 次测试曲线略有偏离,这是由测试误差导致的。

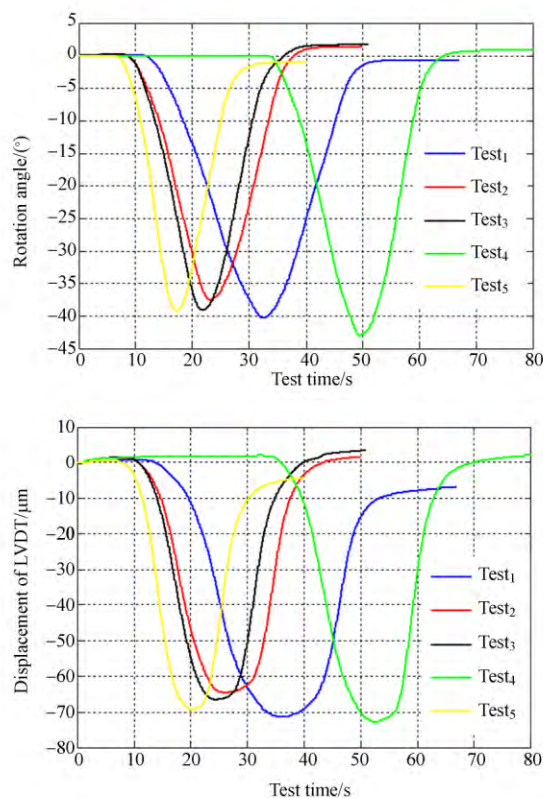


图 5 重复测试数据

Fig. 5 Repeated test data

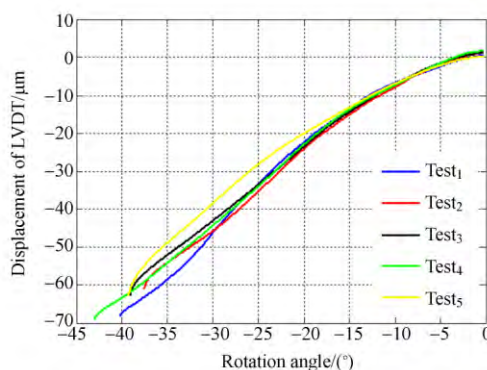


图 6 重复测试位移随转角的变化曲线

Fig. 6 Repeated test curves of displacement vs. rotation angle of mirror

3.2 未使用液压稳像技术情况下主镜的位置变化

图 7 为使用液压稳像情况下主镜俯仰转动的测试曲线,图 8 给出了此次测试中 6 个位移传感器的测量数据。从图 7 中可以看到,该次测试的最大俯仰角接近 40° ,转速最大为 $-5 (^\circ)/\text{s}$ 。图 8 为位移传感器测量值随测试时间的变化曲线。从图中同样可以看到测量值都随着转角的增大而增大。比较轴

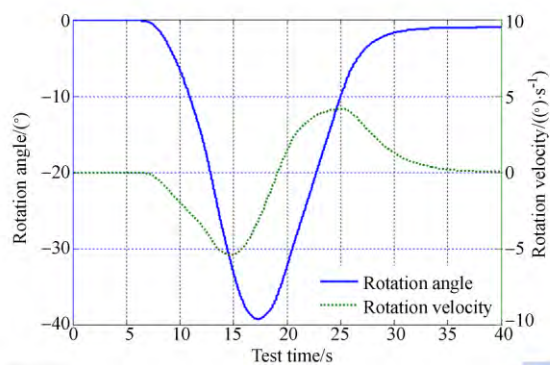


图 7 未稳像情况下主镜俯仰转动的测试曲线

Fig. 7 Test curves of rotation angles of mirror without position control

向 3 个位移传感器和侧向 3 个位移传感器的测量值,可以看到轴向传感器的测量值变化较小。轴向 3 号传感器的测量值变化最大为 $8\text{ }\mu\text{m}$,而侧向 2 号传感器的测量值变化量达到 $180\text{ }\mu\text{m}$ 。因此,可以认为主镜的轴向支撑刚度要大于侧向支撑刚度。

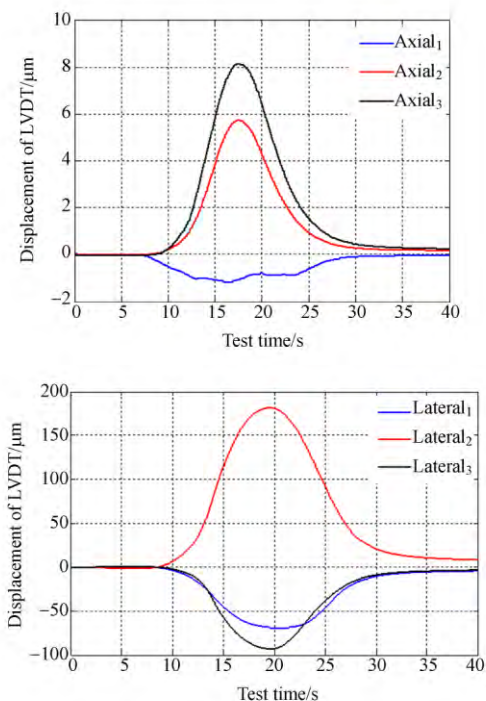


图 8 未稳像情况下主镜俯仰转动的 LVDT 测试曲线

Fig. 8 LVDT test curves without position control

3.3 使用液压稳像技术情况下主镜的位置变化

图 9 给出使用液压稳像情况下主镜俯仰转动的测试曲线,图 10 给出了此次测试中 6 个位移传感器测得的数据。

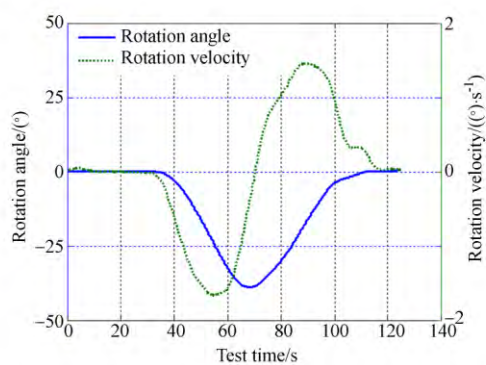


图 9 稳像情况下主镜俯仰转动测试曲线

Fig. 9 Test curves of rotation angles of mirror with position control

从图 9 中可以看到,最大俯仰角接近 40° ,转速最大为 $-2\text{ (}^\circ\text{)/s}$ 。图 10 为位移传感器测量值随测试时间的变化曲线。从图中同样可以看到,由于液压支撑的闭环稳像作用,6 个位移传感器的测量值都变化不大。轴向位移传感器的测量值变化最大为 $2\text{ }\mu\text{m}$,侧向 4 号和 5 号位移控制在 $3\text{ }\mu\text{m}$,只有 6 号变化量达到 $15\text{ }\mu\text{m}$ 。另外,测量值的变化趋势和俯

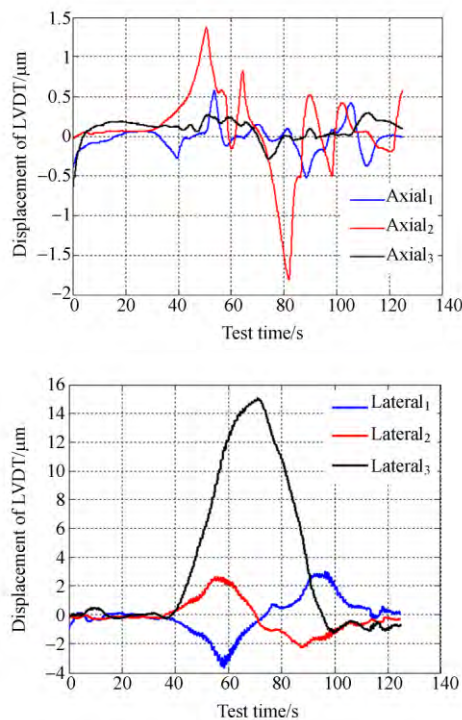


图 10 未稳像情况下主镜俯仰转动的 LVDT 测试曲线

Fig. 10 LVDT test curves without position control

仰角变化也不再具有相关性,只有 6 号传感器的测量值和俯仰角有较强的相关性。之所以 6 号位移传感器的表现与其它传感器不同是由于 6 号传感器与侧向液压支撑方向存在差异,从而造成闭环效果不够好。

3.4 结果分析

3.4.1 主镜位置变化与角度及转速的相关性

图 11 给出了未稳像情况下 4 号位移传感器测量值和转角测量值的对比结果。从图中可以清楚看到在未稳像情况下,位移传感器的测量值变化和主镜俯仰转动角高度相关。当主镜做俯仰转动时,主镜重力方向和主镜光轴夹角的变化导致主镜分配在轴向和侧向支撑上的重力分量发生改变。而轴向和侧向支撑刚度不变,从而导致主镜在轴向和侧向都会相对镜室发生位置变化,分布在镜室上的位移传感器会检测到该变化,因此一般认为位移传感器测量值的变化与俯仰角之间应该满足正弦或余弦的关系。图 12 给出了测得曲线和正弦函数拟合曲线的对比,从图中可以看出两者趋势相同,但仍然存在一定差别。两者之间的误差可能是由于镜室变形导致的,位移传感器测量值是镜室和主镜相对距离的变化,主镜位置改变和镜室变形均会导致传感器测量值改变。

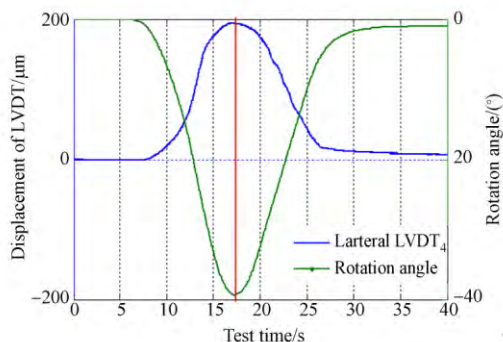


图 11 未稳像情况下 4 号位移传感器和转角测试对比曲线

Fig. 11 Test curves of 4# LVDT and rotation angles without position control

图 12 给出了稳像情况下 4 号位移传感器测量值和转速曲线的对比图。从图中可以清楚看到在稳像情况下,位移传感器测量值变化和主镜俯仰转动速度存在相关性。这是由于液压稳像系统从控制角度出发可以认为是恒值控制系统。恒值控制系统主要应对扰动对系统的影响,本文研究的俯仰运动即是扰动之一,控制效果与扰动的强

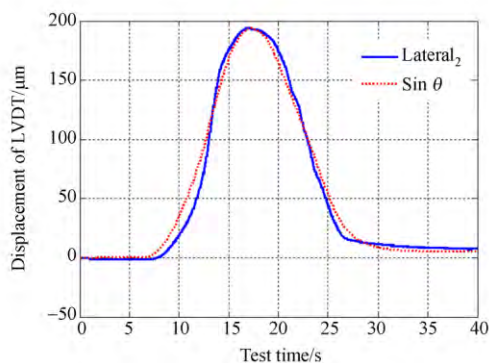


图 12 测试曲线与正弦拟合曲线的对比

Fig. 12 Test curve of 4# LVDT and fitting curve

烈程度有关,俯仰运动转速越快扰动越剧烈,而闭环系统的控制效果会比较差,因此从测试结果上体现为传感器测量值和俯仰转速相关。

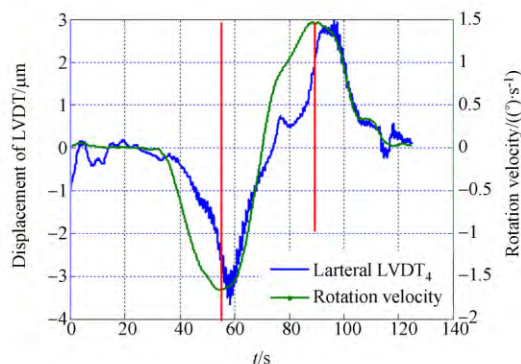


图 13 稳像情况下位移传感器和转角测试对比曲线

Fig. 13 Test curves of 4# LVDT and rotation angles with position control

3.4.2 稳像结果

将 LVDT 的测量值代入文献[18]中的主镜位置解算公式,可以得到不同情况下主镜 5 个自由度的变化。图 14 和图 15 分别给出了未稳像和稳像两种情况下主镜自由度的变化曲线。图 14 中上图为主镜的平移自由度变化值,下图为主镜绕 X 轴和 Y 轴转动的自由度。从图同样可以看出,主镜沿 Z 向平移相对 X 向和 Y 向平移很小,再次说明主镜侧向支撑的刚度较弱。变化最大的是 X 向平移,在转动 40° 的情况下,即达到 150 μm。而绕 X 轴的转角自由度最大,变化达到 2.5°。在利用液压支撑系统进行稳像以后,同样 40° 俯仰角情况下,主镜平移自由度变化最大为 Y 向平移 10 μm,而 X 向平移减小到 3 μm。转动自

由度可以控制在 $0.7''$ 以内,其中绕 X 轴转角小于 $0.4''$,绕 Y 轴转角小于 $0.7''$ 。测试数据表明,使用

液压支撑系统对主镜进行闭环稳像控制有确实的效果。

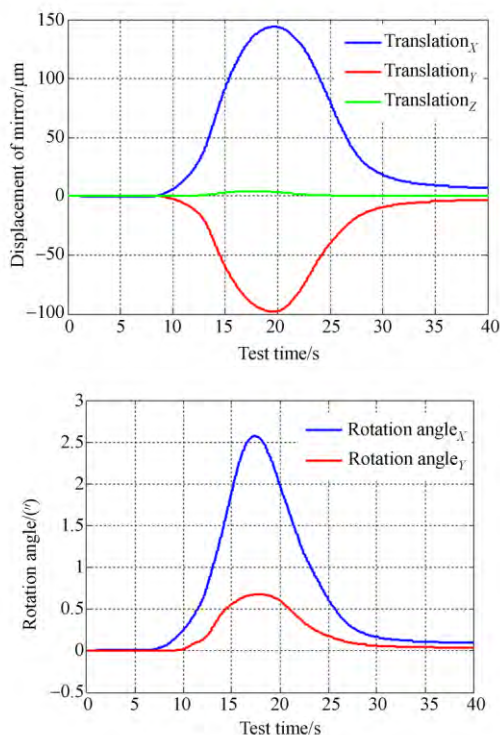


图 14 未稳像情况下主镜自由度的变化曲线

Fig. 14 Curves of 5 freedoms of primary mirror without position control

4 结 论

本文提出了基于液压支撑的主镜稳像技术思路,设计了 1.23 m SiC 主镜稳像试验平台,利用安装在镜室的 6 个 LVDT 测量主镜和镜室之间的位置变化,并利用液压支撑对主镜位置进行实时调整。测试及理论仿真分析结果表明:主镜相对于镜室的位置变化随俯仰转角的增大而增大,且在支撑结构固定的情况下,主镜相对镜室的位置变化有固定规律,基本满足俯仰角的正弦关系;利用液压支撑系统对主镜位置进行闭环控制时,

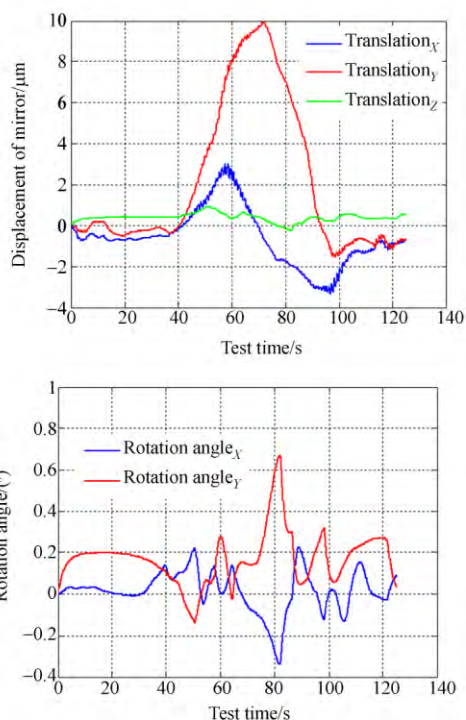


图 15 稳像情况下主镜自由度的变化曲线

Fig. 15 Curves of 5 freedoms of primary mirror with position control

主镜位置变化不再依赖转角,而与俯仰轴转速有较强的相关性,即转速越快,主镜相对原来位置的偏离也越大。利用液压支撑系统对主镜位置进行闭环控制确实可以减小主镜相对镜室的偏离。如果没有控制,主镜相对镜室 X 向的最大平移偏离为 $150 \mu\text{m}$,绕 X 轴的最大转角为 $2.5''$ 。闭环控制后, X 向的最大平移偏离为 $3 \mu\text{m}$,绕 X 轴的最大转角偏离为 $0.4''$,稳像效果显著。由此证明基于液压支撑的主镜稳像技术确实可行。该技术可以实时检测和控制主镜位置,为大型望远镜稳像提供了一条可行的技术路线。

参考文献:

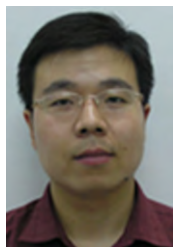
- [1] 程景全. 天文望远镜原理和设计[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2003.
CHENG J Q. *Principles of Astronomical Telescope Design*[M]. Beijing: China Science and Tech-

nology Press, 2003. (in Chinese)

- [2] 李振伟, 杨文波, 张楠. 水平式光电望远镜静态指向误差的修正[J]. 中国光学, 2015, 8(2): 263-269.
LI ZH W, YANG W B, ZHANG N. Static pointing error of level mounting optoelectronic telescope[J]. *Chinese Optics*, 2015, 8(2): 263-269. (in Chinese)

- [3] 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)
- [4] 明名, 吕天宇, 吴小霞, 等. 大气色散对 4m 望远镜成像分辨力的影响与校正[J]. 中国光学, 2015, 8(5): 814-822.
MING M, LÜ T Y, WU X X, *et al.*. Influence of atmospheric dispersion on image resolution of 4 m telescope and correction method[J]. *Chinese Optics*, 2015, 8(5): 814-822. (in Chinese)
- [5] 王建立, 刘欣悦. 智能光学概念及发展[J]. 中国光学, 2013, 6(4): 437-448.
WANG J L, LIU X Y. Concept and development of smart optics[J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(4): 437-448. (in Chinese)
- [6] DEVRIES J, NEILL D, HIKEMAN E. LSST telescope primary/tertiary mirror hardpoints [J]. *SPIE*, 2010, 7739: 77391J.
- [7] STEPP L, HUANG E, CHO M K. Gemini primary mirror support system[J]. *SPIE*, 1994, 2199: 223-238.
- [8] STEFANO S, LEGRAND P, BATY A, *et al.*. Design and construction of the VLT primary mirror cell; support of the large, thin primary mirror[J]. *SPIE*, 1997, 2871: 314-325.
- [9] KIMBRELL J E, GREENWALD D. AEOS 3.67-m telescope primary mirror active control system[J]. *SPIE*, 1998, 3352: 400-411.
- [10] ASHBY D S, KERN J, HILL J M, *et al.*. The large binocular telescope primary mirror support control system description and current performance results[J]. *SPIE*, 2008, 7018: 70184C.
- [11] HULL C, GUNNELS S, JOHNS M, *et al.*. Giant Magellan telescope primary mirror cells[J]. *SPIE*, 2010, 7733: 773327.
- [12] GRAY P M, HILL J M, DAVISON W B, *et al.*. Support of large borosilicate honeycomb mirrors [J]. *SPIE*, 1994, 2199: 691-702.
- [13] 吴小霞, 李剑锋, 宋淑梅, 等. 4 m SiC 轻量化主镜的主动支撑系统[J]. 光学 精密工程, 2014, 22(9): 2451-2457.
WU X X, LI J F, SONG SH M, *et al.*. Active support system for 4 m SiC lightweight primary mirror[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(9): 2451-2457. (in Chinese)
- [14] 邵亮, 吴小霞, 陈宝钢, 等. SiC 轻量化主镜的被动支撑系统[J]. 光学 精密工程, 2015, 23(5): 1380-1386.
SHAO L, WU X X, CHEN B G, *et al.*. Passive support system of light-weighted SiC primary mirror[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(5): 1380-1386. (in Chinese)
- [15] 邵亮, 吴小霞, 杨飞, 等. SiC 轻量化主镜液压 whiffletree 支撑系统的改进[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(11): 3820-3824.
SHAO L, WU X X, YANG F, *et al.*. Improvement on hydraulic whiffletree support system for SiC light-weight primary mirror[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(11): 3820-3824. (in Chinese)
- [16] 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)
- [17] 李玉霞, 刘昌华, 王建立, 等. 大型望远镜主镜位姿解算与监测系统设计[J]. 电子测量与仪器学报, 2015, 29(5): 766-774.
LI Y X, LIU CH H, WANG J L, *et al.*. Design of large telescope primary mirror position resolving and monitoring system[J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2015, 29(5): 766-774. (in Chinese)
- [18] 李剑锋, 崔素辉. 望远镜主镜位置解算算法研究[J]. 长春理工大学学报: 自然科学版, 2016, 39(1): 9-13.
LI J F, CUI S H. Study on the position resolving algorithm of telescope primary mirror[J]. *Journal of Changchun University of Science and Technology: Natural Science Edition*, 2016, 39(1): 9-13. (in Chinese)

作者简介:



李剑锋(1982—),男,河北石家庄人,博士,副研究员,2004 年于大连理工大学获得学士学位,2009 年于中国科技大学获得博士学位,主要从事精密光机结构设计。E-mail: ljfengli@126.com



吴小霞(1981—),女,江苏盐城人,博士,研究员,2003 年于吉林大学获得学士学位,2008 年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,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