

doi: 10.3788/gzxb20124101.0021

主焦点式光学系统的光机结构与装调检测

王富国, 王志, 明名, 李宏壮, 吕天宇

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033)

摘 要:针对应用在极轴式望远镜中的主焦点式光学系统,从主镜的支撑设计与分析、主镜的装调检测、校正镜组件的设计装调和系统的装调检测等方面进行了深入的研究.充分应用了有限元法分析主镜的支撑、定心仪检测光轴的同轴度、平行光管检测系统像质等,得出了主焦点式光学系统的一般装调检测方法.装调后的主镜面形检测结果均方根值达到 0.0428λ ,校正镜组的光轴同轴误差达到 $12.4''$.对系统的像质评价采用能量集中度法,成像在靶面上的星点 80% 能力集中度在 $24\ \mu\text{m} \times 24\ \mu\text{m}$ 范围以内,达到设计指标要求,说明系统结构设计合理,装调检测方法可行.该方法和思路可推广至其他主焦点式光学系统的装调检测工作.

关键词:主焦点光学系统;结构设计;装调;检测

中图分类号:TH751

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2012)01-0021-5

0 引言

主焦点光学系统具有大相对口径的特点,一般都在焦点前加入数块透镜组成校正镜组,扩大可用视场和消除像差等.在透镜组的前端装有 CCD 成像系统,由于不存在库德光路,这样光学系统的机械结构就自成一个单独的系统,结构简单,易于实现模块化设计.

虽然主焦点式光学系统相对简单,但是校正镜组全部为透镜,口径较大,数量比较多,在进行光机结构设计时,必须充分考虑各个镜片之间的空气间隔、同轴度误差在要求的公差范围之内,同时还需要考虑装调检测的方便性.另外由于主镜和校正镜组单独时均不成像、分段式镜筒和较多的配合面等原因造成装调检验的困难^[1].

本文以某极轴式望远镜为研究对象,从光机结构设计、有限元分析到系统的装调和检测等进行了详细地讨论,得出了主焦点式光学系统的一般装调检测方法.

1 光学系统和光机结构

光学系统的主要参量为:有效通光口径 $D = 680\ \text{mm}$,系统焦距 $f = 830\ \text{mm}$,视场 $2\omega = 4.8^\circ$, $F = 1.22$.光学设计要求 RMS 弥散斑半径小于 $12.5\ \mu\text{m}$,80% 的能量集中度集中在 $16\ \mu\text{m}$ 以内,面

形误差的 RMS 达到 $\lambda/15$.根据光学系统设计的结构参量和技术指标要求,进行了系统的光机结构设计,图 1 为光机结构简图.

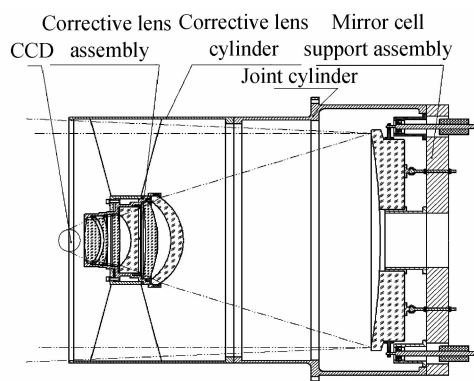


图 1 光机结构简图

Fig.1 Opto-mechanical structure view

主光学系统的结构主要包括以下几个组成部分:主镜室组件、连接筒组件、校正镜筒组件、校正镜组件、调焦组件等.主镜室组件要保证主镜指向任意方向时,其面形均满足设计要求,连接筒筒连接在四通上,校正镜筒筒上安装有校正镜组件和调焦组件,在设计时对主镜室组件、主镜支撑效果、连接筒筒壁厚和筋的厚度、校正镜筒筒的壁厚和筋的分布以及校正镜筒筒四叶架等结构部分充分采用了有限元分析的方法进行了优化设计^[1-8].主光学系统的设计思想是把光学部分设计成为一个独立的部件,确定好与跟踪架的接口关系后,装调工作可并行开展,

基金项目:国家高技术研究发展计划资助

第一作者:王富国(1979-),男,副研究员,主要研究方向为大型望远镜支撑设计和仿真方面. Email:wfg109@163.com

收稿日期:2011-08-10;修回日期:2011-11-24

加快工作进度。

2 主镜的支撑设计和装调检测

2.1 主镜的支撑设计

主镜作为光学系统的核心部件,其支撑效果直接影响主镜的面形准确度.由于该光学系统应用于某极轴式望远镜,在极轴式望远镜中,主镜既要绕赤经轴转动,又要绕赤纬轴转动,而重力方向是一定的,因此在结构设计中,要求主镜各个姿态下受到重力的影响时,其面形准确度都能保持在光学设计要求的范围内.同时还需要对主镜进行有效的定位,限制其六个方向的自由度,使主镜与其他光学元件的相对位置关系保持稳定不变,以有效实现光学系统的功能。

主镜支撑结构分为底支撑组件、侧支撑组件、芯轴组件、防转组件、防翻组件等几部分^[9],其中底支撑采用 whiffle tree 的结构形式,共分为 3 组,每组均可调,用于主镜的轴向卸荷和限制光轴方向即 Z 轴的位移自由度以及绕 X 和 Y 轴方向的旋转自由度;侧支撑用于主镜的径向卸荷;芯轴组件用于主镜的径向定位,并且可承受部分主镜的径向载荷,限制主镜沿 X 和 Y 轴方向的位移自由度;防转组件用于限制主镜绕光轴方向即 Z 轴的旋转自由度;防翻组件起到对主镜的防护作用,主镜室支撑效果图如图 2 所示。

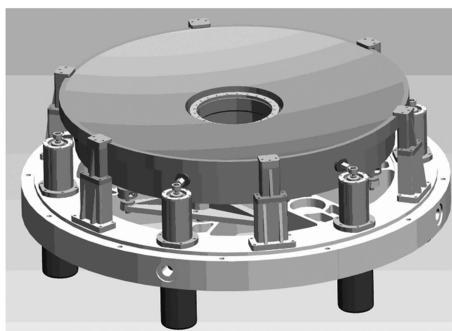


图 2 主镜室三维效果图

Fig. 2 The primary mirror cell diagrammatic sketch

对于极轴式望远镜,主镜的受力状态不同于地平式望远镜,极轴式结构的赤经轴和垂直方向有一定的夹角,所以当赤经轴旋转时,主镜的受力状态也随之变化.为了使侧支撑的支撑效果不变,要求侧支撑结构必须均匀分布,因此采用了六点均匀分布的杠杆平衡重的结构形式,而没有采用地平式望远镜中常用的推拉剪切式结构。

利用有限元分析软件 Nastran 对主镜的侧支撑效果进行了有限元仿真分析,模型采用六面体单元,分析主镜在侧支撑状态下的面形.主镜室水平放置时设为 0° ,分析了主镜室系统在自重作用下从 -90°

~ 90° 时的镜面变形情况,所得侧支撑时的镜面变形误差 RMS 值曲线如图 3 所示.从变形曲线可以看出,镜面在主镜室中的侧支撑效果较好。

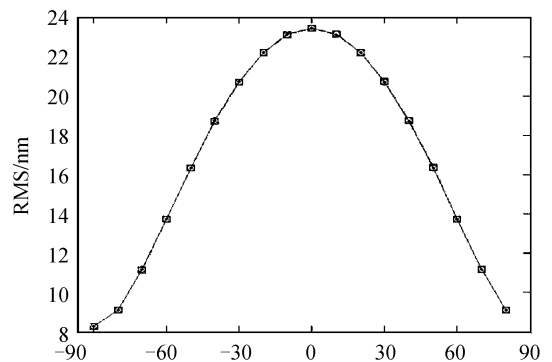


图 3 主镜变形云图

Fig. 3 The primary mirror deformation contour

2.2 主镜的装调

主镜的装调主要是完成主镜的光轴和主镜室的机械轴同轴,包括偏心 and 倾斜^[3-6].首先安装好底支撑、侧支撑和防翻机构,将主镜放置在主镜室里,然后在底支撑和侧支撑的支撑垫上利用光学结构胶将主镜和支撑结构粘结在一起,通过芯轴保证主镜中心孔的机械轴和主镜室的机械轴同轴,但是由于芯轴和主镜是通过球头而实现线接触的,因此主镜光轴和主镜室的机械轴的同轴度还需要精确调整^[7-8].方法是把主镜和主镜室放置在定心仪的旋转平台上,把主镜室的安装基准面调至水平,准确度应在 $2''$ 以内,如图 4.当定心仪转台带着主镜旋转时,被检光学表面的球心有一个微小的变动量 δ ,则反射像改变 2δ ,这个量经定心仪系统放大后为 α ,则球心的变化量为: $\delta = \alpha / 2\beta$,换算成角度量为 $\gamma =$

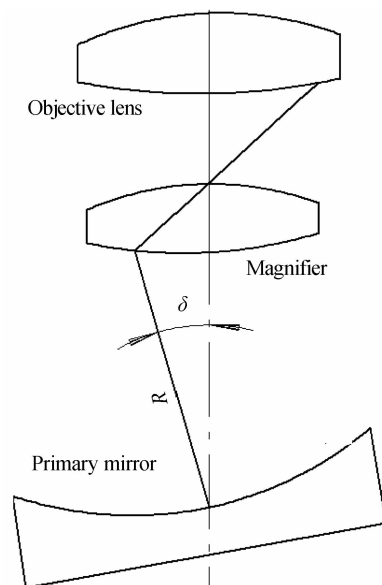


图 4 装调工作原理图

Fig. 4 Assembly and alignment operating principle sketch



图5 主镜装调

Fig. 5 The primary mirror alignment

$3438\alpha/R$,如果作为测微自准直仪使用,则被测角按以下公式计算: $\gamma=206265\delta/2f'$ ($''$).其中, β_i 为内调焦系统放大倍率, β_c 为转像显微物镜放大倍率, f' 为内调焦系统出射平行光时与转像显微物镜的组合焦距^[6].图5为装调的工作原理图.通过主镜室的三个底支撑点调整主镜的光轴,使 γ 的倾斜量小于 $10''$,剩余的倾斜量通过校正镜组补偿.

2.3 主镜的检测

主镜的检测采用的是补偿检验法:利用补偿器把非球面的主镜反射面补偿成球面波后,采用4D干涉仪进行检验.为了充分地检测侧支撑的效果,共检测了主镜的四种状态.在主镜室中,最好的支撑效果是检测面形RMS达到 0.0428λ ,像散只有 0.0334λ ,最差的面形RMS也达到了 0.0536λ ,达到了光学设计的要求,说明主镜的支撑设计是合理可行的,表1为四种不同状态下主镜面形的检测结果,图6为四种不同状态下主镜面形的干涉条纹和面形轮廓图.

表1 四种不同状态下的检测结果

Table 1 Test results in four different conditions

	Condition1	Condition2	Condition3	Condition4
PV(λ)	0.30	0.22	0.28	0.22
RMS(λ)	0.054	0.043	0.053	0.044

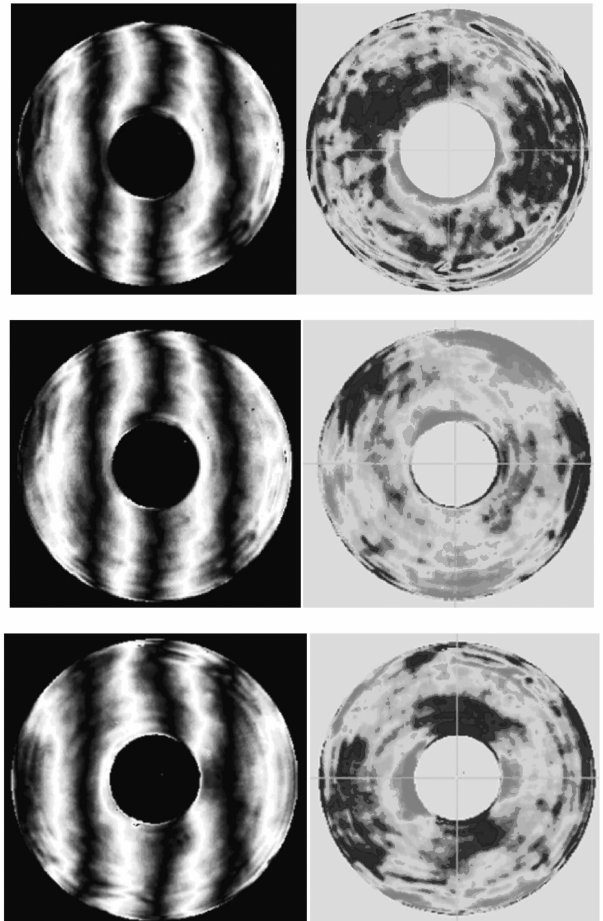
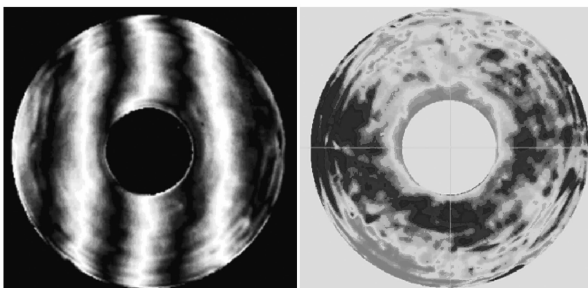


图6 主镜在四种状态下的干涉条纹和面形轮廓图

Fig. 6 The primary mirror interference fringe and surface figure outline drawing in four different conditions

3 校正镜组的结构设计和装调检测

校正镜组是光学系统中另一个重要部分,通过四翼梁连接在校正镜筒中^[2],其特点是全部为透镜,数量多,重量大,口径也比较大,尤其是最大的透镜 L_1 口径达到 $\phi 280$ mm,这就要求镜座的设计尽量不要增加太大的遮拦比,透镜之间利用隔圈或压圈固定,设计完成后的镜座和透镜总重22 kg,最大遮拦口径为 $\phi 298$ mm.对于校正镜组来说,如何保证每片透镜之间的同轴度和倾斜是装调的重点和难点,在实际装调中,充分的借助定心仪对每片透镜依次调整倾斜和偏心.各个透镜之间的装调量误差如表2所示.

表2 允许的最大装调量误差

Table 2 Max alignment error tolerance

No.	L_1	L_2	L_3	L_4	L_5	L_6
Max tilt magnitude	$40''$	$40''$	$40''$	$60''$	$30''$	$40''$
Airspace/mm		0.010	0.015	0.020	0.010	0.010

先把镜座在定心仪上找正,调整后的水平端跳达到 $1''$,径向端跳达到 $1''$ 。按照透镜的直径大小从小到大依次装入镜座中,每装入一块透镜均利用定心仪校正透镜上下表面的光轴和镜座的机械轴的同轴度,如图7所示。所有的透镜安装完毕后,把测得单片透镜的光轴偏差输入软件进行处理,得出拟合的最佳光轴和镜座的机械轴的偏差为 $12.4''$,符合光学设计要求。

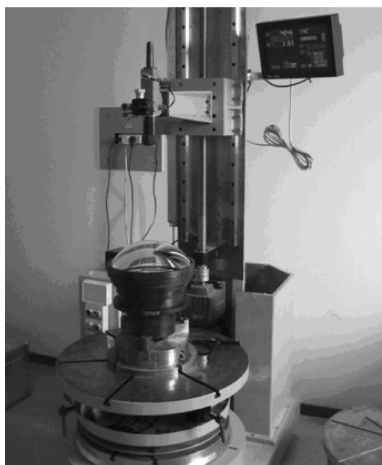


图7 校正镜组的装调检测

Fig. 7 The corrective lens assembly alignment and test

4 系统装调检测与像质评价

系统的装调步骤是先把连接镜筒安装在主镜室上,并且调整连接镜筒的机械轴和主镜室的机械轴的同轴度,这部分工作需要定心仪上利用内调焦放大镜完成,如图8。把校正镜组安装在校正镜筒上,然后整体安装在连接镜筒上。两部分光轴的倾斜误差可以相互补偿而抵消掉一部分,偏心误差可以通过连接镜筒和校正镜筒之间的调整环节进行调整。



图8 连接镜筒的装调

Fig. 8 Junction mirror cylinder alignment

光学系统的像质评价方法主要有星点检验、波像差测试和光学传递函数测试以及能量集中度法等。星点检验是用目视法通过观察焦点前后星点像,检验光学系统的球差、彗差、像散、镜头存在的玻璃材料条纹和装配应力变形等缺陷,但是星点检验受人的主观因素影响比较大,不具备量化的结果。利用干涉仪进行波像差测试虽然灵敏度高,能反映装调的微小误差以及镜面的微小变形,但是由于主焦点式光学系统不存在折转光路,把干涉仪以及干涉仪的调整装置放置在光路中会造成很大的遮拦,造成测量结果的不准确。因此本文采用能量集中度法进行像质评价,它是利用一个小视场高灵敏度的测试 CCD 安装在靶面处,观察星点成在靶面上像的大小,利用软件的方法评价星点像所占的像元素数。

系统的装调装置如图9所示,在光学系统的靶面处放置一个分辨率为每个像元 $6\mu\text{m}$ 的测试 CCD 相机,利用一个长 10m ,口径 600mm 平行光管,在光源处放置一个圆形的 $100\mu\text{m}$ 的星点,通过检测平台的旋转和赤纬轴的俯仰运动,可以得到全靶面的星点像,通过软件分析得出成像在靶面上的星点大小 80% 能力集中度在 4×4 个像元以内,如图10,符合光学设计要求,说明系统结构设计合理,装调检测方法可行。

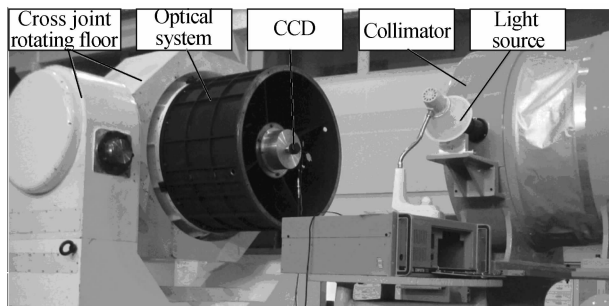


图9 系统的装调检测

Fig. 9 System alignment and test

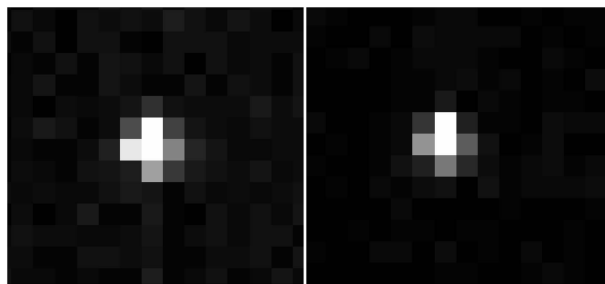


图10 星点图

Fig. 10 Star point plot

5 结论

本文从工程实际出发,根据极轴式望远镜的特点,进行了光机结构设计。尤其是主镜的侧支撑不同

于水平式经纬仪的推拉剪切支撑,采用了六点均匀分布的形式,使得主镜在任意方位的受力情况均相同,利用有限元对设计进行了优化,装调后采用干涉仪检测的结果为镜面 RMS 达到 0.0428λ 。

在装调过程中,多次利用定心仪调整检测光轴和机械轴的同轴度,提高了装调效率。针对星点检验的不足,提出了采用能量集中度的方法对像质进行评价,直观简便。文中采用的装调检测方法和步骤对类似的光学系统的装调具有一定的借鉴意义。

参考文献

- [1] WANG Fu-guo, YANG Fei, CHEN Bao-gang, *et al.* Lager aperture and prime focus optical system structure lightweight design and analysis[J]. *Infrared Technology*, 2011, **33**(1): 4-8.
王富国,杨飞,陈宝刚,等. 大口径主焦点式光学系统轻量化结构设计、分析与试验[J]. *红外技术*, 2011, **33**(1): 4-8.
- [2] WANG Fu-guo, ZHANG Jing-xu, YANG Fei, *et al.* Research on the crossed-plate type support structure of the second mirror[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(3): 674-676.
王富国,张景旭,杨飞,等. 四翼梁式次镜支撑结构的研究[J]. *光子学报*, 2009, **38**(3): 674-676.
- [3] LUO Miao, ZHU Yu-tian. Application of computer-aided alignment to off-axis cassegrain system[J]. *Optical Technique*, 2008, **34**(4): 514-517.
罗森,朱永田. 计算机辅助装调方法在离轴卡塞格林系统中的应用[J]. *光学技术*, 2008, **34**(4): 514-517.
- [4] LIN Zhi-lai, XUE Dong-lin, ZHANG Xue-jun. Optical and mechanical design for long focal length and wide-field optical system[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2008, **16**(12): 2485-2490.
李志来,薛栋林,张学军. 长焦距大视场光学系统的光机结构设计[J]. *光学精密工程*, 2008, **16**(12): 2485-2490.
- [5] SUN Jing-wei, CHEN Tao, WANG Jian-li. Research of the technique of computer-aided alignment for the primary and secondary mirrors [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, **18**(10): 2156-2163.
孙敬伟,陈涛,王建立. 主次镜系统的计算机辅助装调[J]. *光学精密工程*, 2010, **18**(10): 2156-2163.
- [6] WEI Quan-zhong, YE Hua-shou, WANG Zhao-xun. Television interior focusing and centering instrument ant and its application [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 1998, **25**(6): 106-110.
魏全忠,叶华寿,王肇勋. 电视内调焦定心仪及其应用[J]. *光电工程*, 1998, **25**(6): 106-110.
- [7] SUN Jing-wei, CHEN Tao, WANG Jian-li, *et al.* R-C Telescope alignment based on out-of-focous stellar image[J]. *Optical and Precision Engineering*, 2011, **19**(4): 728-736.
孙敬伟,陈涛,王建立,等. 基于离焦星点像的 RC 式望远镜装调技术[J]. *光学精密工程*, 2011, **19**(4): 728-736.
- [8] GONG Dun, TIAN Tie-yin, WANG Hong. Computer-aided alignment of off-axis three-mirror system by using Zernike coefficients[J]. *Optical and Precision Engineering*, 2011, **19**(4): 728-736.
巩盾,田铁印,王红. 利用 Zernike 系数对离轴三反射系统进行计算机辅助装调[J]. *光学精密工程*, 2010, **18**(8): 1754-1759.
- [9] ZHANG Li-min, WU Yuan-hao. Design of multiple DOF fine tuning mechanism for 45° tilting mirror [J] *Acta Photonica Sinica*, 2010, **29**(12): 2139-2142.
张丽敏,吴元昊. 45° 倾斜镜多自由度精调结构设计研究[J]. *光子学报*, 2010, **29**(12): 2139-2142.

Opto-mechanical Structure Design, Alignment and Test of Prime Focus Optical System

WANG Fu-guo, WANG Zhi, MING Ming, LI Hong-zhuang, LÜ Tian-yu

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

Abstract: Based on the prime focus optical system applied on the polaxis telescope, the primary mirror support design and analysis, the primary mirror alignment and test, corrective lens assembly design and alignment to system alignment and test were detailed discussed. The finite element method was used to analysis the primary mirror support, the centering facility was used to test the optic axis concentricity, and the collimator was used to test system image quality. A general method was obtained that is suitable for the prime focus optical system alignment and test. The primary mirror surface figure RMS is 0.0428λ after alignment, and the corrective lens assembly coaxial error achieves $12.4''$. The energy centralization method was adopt to evaluate system image quality, and star point 80% energy concentrate degree was in 4×4 pixels on target area, which achieved design requirements. The results indicate system design is reasonable and alignment method is proper. This method also can be used to another prime focus optical system alignment and test.

Key words: Prime focus optical system; Structure design; Alignment; Test