

文章编号 1004-924X(2012)09-1922-07

## 1 m 望远镜主反射镜的支撑和装配

韩光宇<sup>1,2\*</sup>, 曹立华<sup>1,2</sup>, 高云国<sup>1</sup>, 乔健<sup>1</sup>, 薛向尧<sup>1</sup>

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 长春理工大学, 吉林 长春 130022)

**摘要:**考虑大口径光学望远镜中主反射镜的支撑精度直接影响光电探测设备的整机性能,本文根据光学系统对口径为1 000 mm的主镜的支撑精度要求和光电设备中主镜的使用情况,采用轴向和径向组合支撑的结构形式来完成对主镜的支撑,并通过有限元法对支撑位置进行理论分析和计算。实验显示,在轴向18点浮动支撑、径向3点柔性支撑的情况下,主镜能够达到较高的面形精度。针对传统装调工艺不能获得理想的面形精度,探索了新的主镜装调方法。用干涉仪对带有支撑的主镜进行实时测量并进一步进行修磨,使主镜在装配完成后达到 $\lambda/18$ 的面形精度。该方法满足了本项目的指标要求,也为更大口径主镜的装调提供了一种新的思路。

**关键词:**大口径望远镜;主镜;支撑结构;面形精度

**中图分类号:**TH75;TH703 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20122009.1922

## Supporting and assembling for primary mirrors of 1 m aperture telescopes

HAN Guang-yu<sup>1,2\*</sup>, CAO Li-hua<sup>1,2</sup>, GAO Yun-guo<sup>1</sup>, QIAO Jian<sup>1</sup>, XUE Xiang-yao<sup>1</sup>

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,  
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*

2. *Changchun University of Science & Technology, Changchun 130022, China*)

\* *Corresponding author, E-mail: hanlamost@163.com*

**Abstract:** As the support accuracy of primary mirror of a large caliber optical telescope directly influences the overall unit of opto-electrical detecting equipment, this paper presents a support structure combined an axial support and a radial support for the primary mirror with a diameter of 1 000 mm according to the requirements of an optical system for support accuracy. Furthermore, the finite element method is used to analyze and calculate the support positions theoretically. Experiments show that when a 18-point floating support is used in the axial support and a 3-point resilient mounting in the radial support, the higher surface figure accuracy for the primary mirror can be reached. As traditional assembling and adjusting techniques can not reach the ideal surface figure accuracy, it explores a new assembling and adjusting approach to the primary mirror. An interferometer is applied to the measurement of the primary mirror with a support in real-time, then it is grinded again to obtain the higher accuracy. After the primary mirror is assembled, its surface figure accuracy reaches  $\lambda/18$ . The results

收稿日期:2012-03-10;修订日期:2012-04-28.

基金项目:中国科学院三期创新工程资助项目

not only meet the index requirements of the project, but also offer a new way to assemble and adjust larger caliber primary mirrors.

**Key words:** large aperture telescope; primary mirror; support structure; surface figure accuracy

## 1 引言

随着航天技术的发展,各种先进的测控技术不断涌现,以此为基础发展起来的光电探测设备在现代化科学技术、工业生产、航空和深空探测等领域的应用日益广泛。在现代靶场中,光电探测设备是获取外弹道数据和飞行装调最基本的测量手段之一;在卫星激光测距方面,它在检测大陆板块移动、地壳形变、地球自转和极移,改进地球重力场和地心引力常数,精密卫星定轨等研究中均具有重要作用。在航空领域光电探测设备作为主要的测控手段,可以跟踪探测航天器并确定其形状、大小、坐标和运动状态,是空间碎片监测的一种主要工具。

光电探测设备的聚光能力和空间分辨率是两项重要指标。聚光能力越强越能发现更远更暗的目标;空间分辨率越高则更能看清目标的细节。根据瑞利判断,光电探测设备的角分辨力与光学系统入瞳直径成正比,即在波长一定的情况下,口径越大,系统的分辨力越高、聚光能力也越强,系统的作用距离也就越远,因此,在深空探测领域里,大口径光电探测设备的地位越来越突显出来。

国外很早就致力于大口径设备的研制,例如1994年5月,美国空军研究实验室定向能理事会在新墨西哥州柯特兰空军基地星火光学靶场研制的3.5 m口径望远镜系统以及1997年在夏威夷毛伊岛光学站建立的口径为3.67 m的AEOS望远镜系统,都是技术非常先进的地基式光电探测设备。国内大口径设备的研制也在进行中,口径为1 m的激光测距设备也已投入了使用<sup>[1-2]</sup>。随着口径的增大,作为光电探测设备主要部件的主反射镜(简称主镜)的直径和重量会增加,在地球重力场的作用下,主镜会发生变形,从而造成光学系统的成像质量降低。为了减小主镜的变形,普遍采用有限元分析的方法来确定主镜支撑结构受力点的位置,使其变形最小,从而获得较高的主镜面形精度<sup>[3-10]</sup>。但是在实际装调过程中,受到加

工精度、装配精度的影响,支撑点不能完全放置在理论位置,这使得实际获得的面形精度不能达到理论值。本文以研制的某设备中 $\phi 1\ 000$  mm口径主镜为研究对象,在进行理论计算的基础上,探索新的主镜装调方法,并得出了一定的结论。

## 2 主镜模型

为了减小温度梯度对主镜面形精度的影响,主镜选用热膨胀系数较小的微晶玻璃。采用如下数据进行主镜建模:通光口径为 $\phi 1\ 000$  mm,外径为 $\phi 1\ 050$  mm,中心孔直径为 $\phi 230$  mm,边缘厚度为150 mm,要求装配后主镜面形精度rms优于35 nm。主镜有限元模型如图1所示。

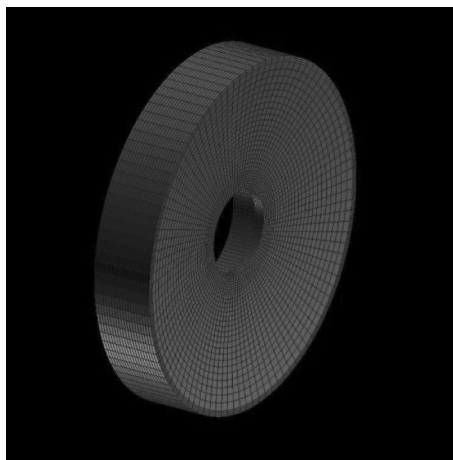


图1 主镜有限元模型

Fig. 1 Finite element model of primary mirror

## 3 主镜支撑方案理论分析

在工作过程中,主镜需要围绕旋转轴O相对于重力场,光轴在俯仰角 $\alpha$ 为 $0\sim 90^\circ$ 做相对运动,如图2所示。需要设计合理的机械支撑结构,控制主镜上力的分布,当重力方向相对于主镜发生变化时,使光学表面变化最小。根据主镜的运动方式,通常设计成中心轴定位,轴向支撑和径向支撑组合的方式;当 $\alpha=0^\circ$ 时,只有轴向支撑起作用;

当  $\alpha=90^\circ$  时,只有径向支撑起作用;当  $\alpha$  在  $0\sim 90^\circ$  时,两种支撑同时起作用<sup>[11]</sup>。因此在设计中,需要轴向支撑和径向支撑两种机械支撑结构,两种支撑结构与中心轴共同构成主镜支撑系统。

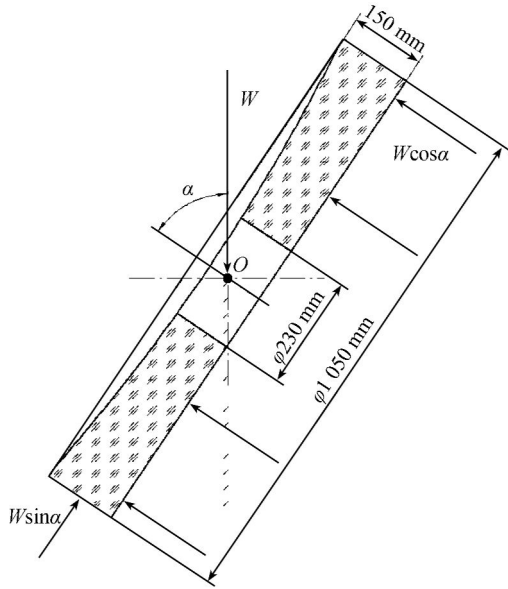


图 2 主镜受力示意图

Fig. 2 Sketch of stressed primary mirror

### 3.1 轴向支撑设计

对该主镜轴向支撑采用 18 点浮动支撑方案,每个支撑点选用直径  $\varphi 80$  mm 的圆盘。当  $\alpha=0^\circ$  时,主镜的全部重量均由轴向的 18 个支撑点承担。轴向支撑示意图如图 3 所示。通过有限元进行分析优化计算,确定了两个支撑圈的直径  $\varphi_1$ ,  $\varphi_2$  分别为 820 mm 和 522 mm。有限元分析结果如图 4 所示,结果表明在此状态下主镜表面变形量  $rms=10.63$  nm,即  $\lambda/59$  ( $\lambda=632.8$  nm),满足使用要求。

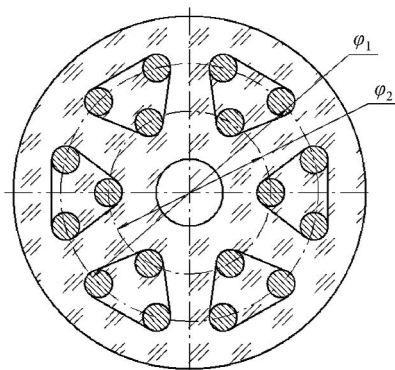


图 3 轴向支撑示意图

Fig. 3 Sketch of axial support on primary mirror

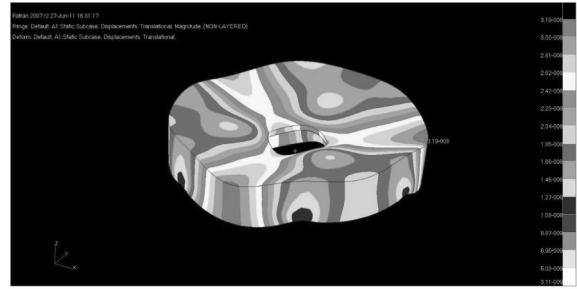


图 4 轴向支撑有限元分析结果

Fig. 4 FEM analyzed result of axial support

### 3.2 径向支撑设计

采用在主镜上下两个半圆周面上分别安装 3 个柔性支撑的方式,当  $\alpha=90^\circ$  时,主镜的全部重量均由下圆周面径向的 3 个支撑点承担。径向支撑示意图如图 5 所示。通过有限元进行分析优化,确定了 3 个支撑点的角度  $\beta=45^\circ$ 。有限元分析结果如图 6 所示,结果表明在此状态下主镜表面变形量  $rms=19.57$  nm ( $\lambda/32$ ),满足使用要求。

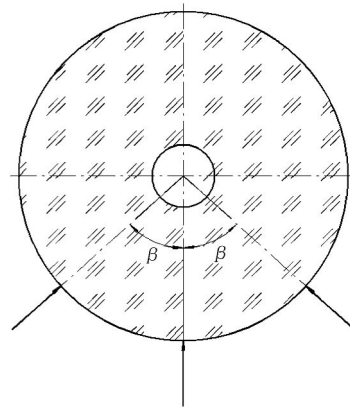


图 5 径向支撑示意图

Fig. 5 Sketch of radial support on primary mirror

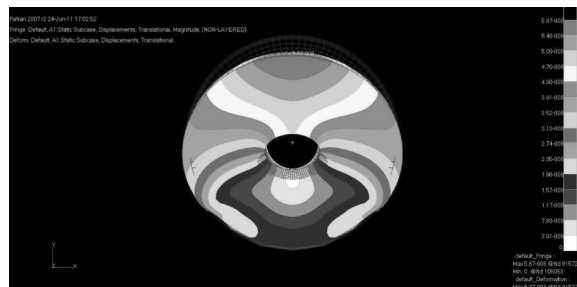


图 6 径向支撑有限元分析结果

Fig. 6 FEM analyzed result of radial support

### 4 主镜装调

随着主镜光轴俯仰角  $\alpha$  的变化,主镜表面变形  $\delta_\alpha$  为:

$$\delta_\alpha = \sqrt{(\delta_A \sin \alpha)^2 + (\delta_R \cos \alpha)^2}, \quad (1)$$

式中: $\delta_\alpha$ 为主镜表面变形量; $\delta_A$ 为光轴水平时的表面误差; $\delta_R$ 为光轴垂直时的表面误差; $\alpha$ 为主镜光轴偏离垂直轴的角度。

从以上的设计、分析可知,主镜在轴向、径向组合支撑状态下,当  $\alpha=90^\circ$  时主镜重量对其面形的影响最大。这是因为当  $\alpha=90^\circ$  时,主镜重量仅由 3 点支撑;而当  $\alpha=0^\circ$  时主镜由 18 点支撑,主镜受力比较均匀,因而面形精度也较好。所以在装调和检测过程中,当  $\alpha=90^\circ$  时满足面形精度要求,则意味着在其余角度位置均能满足要求。

#### 4.1 主镜面形变化产生原因

传统的主镜装调方法是采用调整、修磨支撑结构来完成的,但是在本文的主镜实际装调过程中,发现无论如何调整主镜的支撑结构,均不能达到理想的面形精度。经过分析,其原因为上述设计是建立在理论研究上的,而在实际加工和装调过程中面临着许多不理想的情况。例如,主镜的加工误差、支撑结构的加工和装调误差以及组合装调误差等。

对面形精度影响最大的是主镜在加工和检测过程的径向支撑状态与实际使用时的不同。主镜在加工装调过程中,采用的是钢带支撑方式,这种径向支撑方式的优点是主镜径向受力均匀,容易获得较好的面形精度,因此在光学检测中的应用非常广泛。但是这种技术不适于反射镜光轴有俯仰变化的系统,因此,还未成功应用于望远镜系统。本文实际采用了上面描述的 3 点柔性径向支撑方式。两种支撑状态不同,必然会造成主镜的径向受力发生变化,带来的结果就是主镜面形发生变化。

采用干涉仪和补偿器组合的方法测量主镜的面形误差<sup>[12-13]</sup>。测量仪器选用 PhaseCam6000 型超小巧动态 4D 干涉仪,其近乎瞬时的测量速度,使它对于振动和气流扰动不敏感,可以在一般的工作间实现测量。检测形式如图 7 所示。

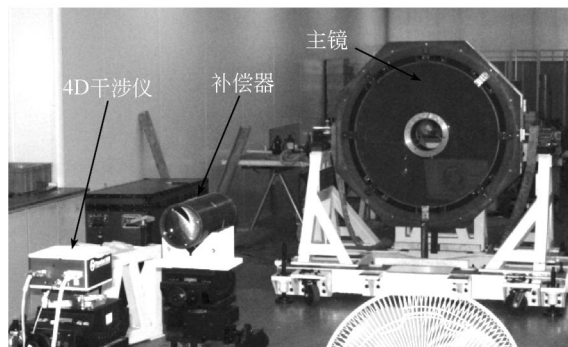


图 7 主镜检测

Fig. 7 Testing of primary mirror

主镜磨制完成之后,利用钢带支撑对主镜进行检测,所达到的面形精度  $rms = 18.92 \text{ nm} (\lambda/33)$ ,检测后的面形如图 8 所示。

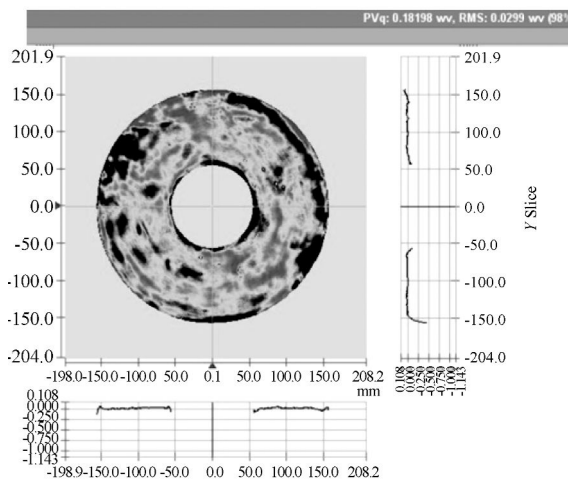
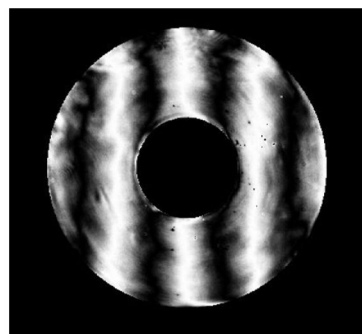


图 8 钢带支撑后面形精度

Fig. 8 Surface figure accuracy with metal band support

将磨制好的主镜放入主镜室中,经过传统装调方法反复装调,最好的面形精度仅为  $rms = 52.73 \text{ nm} (\lambda/12)$ 。检测后的面形如图 9 所示。

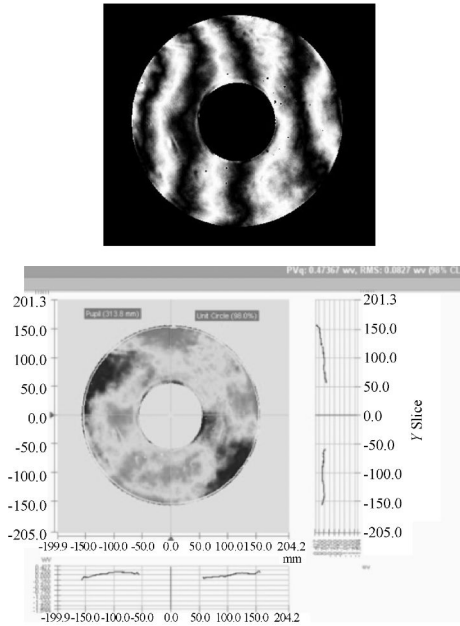


图 9 三点柔性支撑面形精度

Fig. 9 Surface figure accuracy of three point floating support

从检测结果来看,当径向支撑发生变化后,主镜面形发生了较大变化,面形精度无法满足使用要求。

#### 4.2 新的装调方法

在以往的研制过程中,主镜装调都是通过调整径向支撑的方式进行的,由于主镜口径小、重量轻,径向支撑作用力也比较小,其面形精度自然也变化不大,调整径向支撑后,就能够满足使用要求。但是本文主镜的外径为  $\phi 1\ 050\ \text{mm}$ ,质量达到了  $296\ \text{kg}$ ,作用在 3 个柔性支撑点的径向力比较大,单纯的调整机械支撑已经无法满足要求,必须探索新的装调方法。

本次装调采用了将主镜安装在主镜室后对主镜修磨的方案,即先将磨制好的主镜装配在主镜室内,精细调整轴向支撑和径向支撑,使主镜达到最好的面形,如图 9 所示;之后在带有支撑的情况下,对主镜进行修磨,使其达到最好状态。修磨完成后,对该主镜进行镀反射膜,并重新装调复位,镀膜前后,径向支撑点必然会有少许变化从而带来主镜面形的变化,但是最终面形能够满足要求即可。

根据装调方案,主镜与主镜室装调完成后,在带有支撑的状态下开始对主镜进行修磨。修磨后的面形精度  $\text{rms}=21.82\ \text{nm}(\lambda/29)$ ,如图 10 所示。

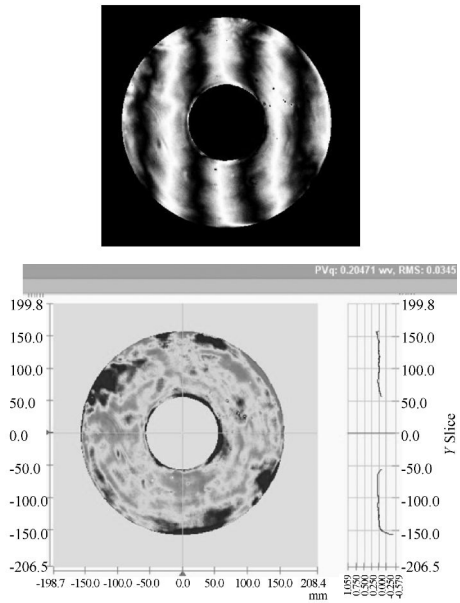


图 10 带有支撑修磨的主镜面形精度

Fig. 10 Surface figure accuracy of primary mirror with support coping

在主镜镀膜完成后,重新将主镜安装到主镜室内,并精密装调轴向支撑和径向支撑,经过检测后,面形精度  $\text{rms}=35.16\ \text{nm}(\lambda/18)$ 。检测结果如图 11 所示。

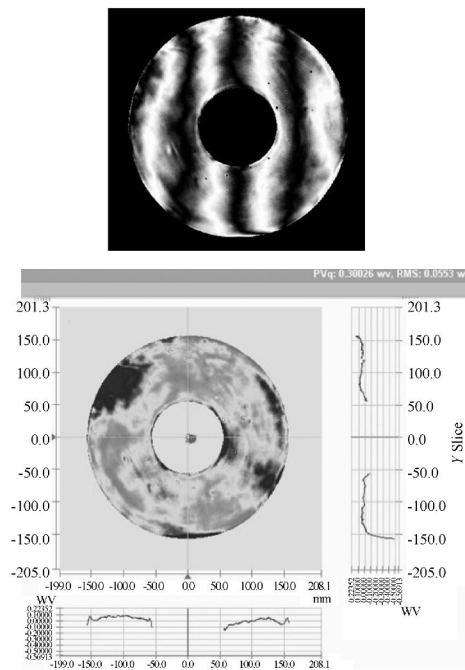


图 11 最后装调的主镜面形精度

Fig. 11 Surface figure accuracy of primary mirror after final assembling and adjusting

至此,主镜的装调工作全部结束,从检测结果可知,能够满足指标要求。

## 5 结 论

本文首先在理论计算的基础上,确定了对主镜采用轴向和径向组合的支撑结构形式,对有限元分析表明,采用该支撑方式能够达到理

想的面形精度。在传统装调方法的基础上,探索了在带有主镜室支撑情况下修磨主镜的方法,利用该方法完成了对口径  $\phi 1\ 050\ \text{mm}$ ,质量为 296 kg 主镜的装调,其面形精度达到了  $\lambda/18$ ,完全能够满足指标要求。该装调方法不仅满足了本项目的指标要求,同时也拓宽了大口径主镜装调的思路,为后续更大口径主镜的装调提供了借鉴。

## 参考文献:

- [1] 李东源. 国外的地基对空间目标光电探测系统浅析[J]. 光电对抗与无源干扰, 2003, 69(1): 9-11.  
LI D Y. The foreign ground-based electro-optic detecting system to the space targets [J]. *Electro-optics & Passive Countermeasures*, 2003, 69(1): 9-11. (in Chinese)
- [2] 韩光宇, 张国玉, 曹立华, 等. 卫星激光测距中发射光路光机结构设计[J]. 仪器仪表学报, 2011, 32(7): 1669-1674.  
HAN G Y, ZHANG G Y, CAO L H, *et al.*. Opto-mechanical structural design of laser emitting system for SLR[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2011, 32(7): 1669-1674. (in Chinese)
- [3] 孙宁. 1 m 口径主反射镜支撑系统的优化设计[J]. 中国光学与应用光学, 2010, 3(6): 644-648.  
SUN N. Optimal design of support system for a 1 m diameter primary mirror [J]. *Chinese Journal of Optics and Applied Optics*, 2010, 3(6): 644-648. (in Chinese)
- [4] 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]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, 19(5): 1022-1029. (in Chinese)
- [5] 吴小霞, 杨洪波, 张景旭, 等. 大口径球面镜支撑系统的优化设计[J]. 光子学报, 2009, 38(1): 129-132.  
WU X X, YANG H B, ZHANG J X, *et al.*. Optimal design of support system for the large-aperture catadioptric sphere mirror [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, 38(1): 129-132. (in Chinese)
- [6] 韩光宇, 邵帅, 高云国, 等. 主镜侧支撑结构分析与优化[J]. 机械设计与制造, 2009, 7: 214-215.  
HAN G Y, SHAO SH, GAO Y G, *et al.*. The analysis & optimal for azimuthal support of primary mirror [J]. *Machinery Design & Manufacture*, 2009, 7: 214-215. (in Chinese)
- [7] 李福, 阮萍, 赵葆常. 重力作用下平面反射镜变形研究[J]. 光子学报, 2005, 34(2): 272-275.  
LI F, RUAN P, ZHAO B CH. Study on the surface deformation of flat reflector under gravity load [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, 34(2): 272-275. (in Chinese)
- [8] 梁文科, 刘顺发. 次镜支撑结构的力学性能分析[J]. 仪器仪表学报, 2007, 28(5): 859-864.  
LIANG W K, LIU SH F. Mechanical analysis of secondary mirror supporting structure [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2007, 28(5): 859-864. (in Chinese)
- [9] 张磊, 郑建平, 付跃刚, 等. 大口径反射光学系统的支撑结构设计[J]. 仪器仪表学报, 2005, 26(8)(增): 461-463.  
ZHANG L, ZHENG J P, FU Y G, *et al.*. The supporting structure design for large aperture optical reflecting system [J]. *Chinese journal of Scientific Instrument*, 2005, 26(8)(Supp.): 461-463. (in Chinese)
- [10] 徐加慧, 夏立新, 陈诚. 基于有限元法的主镜底支撑的优化[J]. 机械制造与设计, 2004(3): 67-69.  
XU J H, XIA L X, CHEN CH. Optimization analysis for the underside support of the primary mirror by the finite element method [J]. *Machinery Design & Manufacture*, 2004(3): 67-69. (in Chinese)
- [11] 约德. 光机系统设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 2008.  
YODER R R. *Opto-Mechanical Systems Design* [M]. Beijing: China Machine Press, 2008. (in Chinese)

- [12] 明名,杨飞,陈宝刚,等. 补偿器法检测非球面过程中易出现的误区[J]. 光电工程,2010,37(10):116-121.  
MING M, YANG F, CHEN B G, *et al.*. The mistake during the process of testing aspheric mirror using compensator[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2010, 37(10):116-121. (in Chinese)

- [13] 陈旭,刘伟奇,康玉思,等. Offner 补偿器的结构与装调[J]. 光学精密工程,2010,18(1):88-93.  
CHEN X, LIU W Q, KANG Y S, *et al.*. Design and tolerance analysis of Offner compensator[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, 18(1):88-93. (in Chinese)

#### 作者简介:



韩光宇(1972—),男,吉林梨树人,副研究员,博士研究生,2004年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得硕士学位,主要研究方向为光学精密机械结构设计。E-mail:hanlamost@163.com



乔健(1980—),男,山西忻州人,副研究员,2008年于吉林大学获得博士学位,主要从事光电仪器设备的设计与研究。E-mail:qiaojj99065@163.com



曹立华(1971—),男,吉林磐石人,研究员,博士研究生,1994年于西安交通大学获得学士学位,主要研究方向为光学仪器总体设计。E-mail:cao0983@sina.com



薛向尧(1981—),男,河北唐山人,博士,2011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,主要从事光学精密机械结构与误差分析方面的研究。E-mail:xuexiangyao@126.com



高云国(1955—),男,山东乳山人,研究员,博士生导师,1982年于哈尔滨科技大学获得学士学位,1991年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得硕士学位,主要从事光电仪器总体设计方面的研究。E-mail:gaoyg\_gjs@163.com.cn