

文章编号 1004-924X(2014)02-0369-07

发射望远镜的设计与装调

孙敬伟, 吕天宇, 姚丽双, 刘杰

(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:根据发射望远镜的结构特点,设计了口径为 270 mm 的梅逊反射无焦卡塞格林式发射望远镜并对其进行了装调与检测以满足激光发射及激光准直性的要求。基于光学原理确定了同轴反射式光学结构的设计方法和系统参数。用有限元分析方法对比桁架式与圆筒式主支撑结构以及三翼梁和四翼梁次镜支撑结构在不同工况下的变形,选定桁架式三翼梁支撑结构用于该望远镜。通过设计适当的主、次镜装调结构,配合干涉仪和自准直平面镜,分析了次镜偏心引起的系统像差,得到灵敏度矩阵并用于系统的装调和检测。得到的结果显示系统的波前误差 RMS 为 0.1467λ , PV 为 0.73941λ ($\lambda=632\text{ nm}$)。检测结果表明,桁架式结构的镜头能满足发射望远镜系统对像质的要求,可实现激光发射并保证激光的准直性。

关键词:发射望远镜;桁架;调整机构;偏心误差;灵敏度矩阵;自准直检验

中图分类号:TH751 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20142202.0369

Design and assembly of transmitter-telescope

SUN Jing-wei, LÜ Tian-yu, YAO Li-shuang, LIU Jie

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

* Corresponding author, E-mail: sunjw@ciomp.ac.cn

Abstract: On the structure characteristics of emission telescopes, this paper designs and assembles a 270 mm Mersenne reflecting afocal Cassegrain transmitter-telescope to achieve the laser emission and laser collimation. Firstly, the design method for an on-axis reflected system was determined and its system parameters were given. Based on the finite element method, the deformations of cylinder and truss primary mirror supporting structures and that of the three-beam and four-beam secondary mirror support structures were analyzed in the different working conditions, and the three-beam secondary mirror support structure and the truss structure were chosen to be used in the telescope. Furthermore, systematic optical aberration caused by the secondary mirror decentration was analyzed by adjusting primary and secondary mirror structures with the help of an interferometer and an autocollimation plane mirror and a sensitivity matrix was obtained to assembly, adjust and test the system. Finally, obtained results show that the systematic wavefront aberration RMS and PV are 0.1467λ , and 0.73941λ respectively. It is proved that the design of the transmitter-telescope has a better imaging quality and satisfies the requirements of the optical design and laser emission.

收稿日期:2013-07-01;修订日期:2013-08-15.

基金项目:中国科学院三期创新工程支持项目;中科院长春光学精密机械与物理研究所创新工程重点支持项目

Key words: transmitter-telescope; truss structure; adjustment structure; misalignment error; sensitivity matrix; autocollimation test

1 引言

用于激光发射的望远镜系统一般采用无焦式反射望远镜,由于要保证入射和出射都为平行光^[1-3]。这类特殊用途的望远镜系统既要满足望远镜系统的一般设计要求,又要满足激光发射的特殊要求。由于望远镜的系统波像差直接影响到激光发射的准直性,因此须确保望远镜系统具有良好的光学性能^[4-6],故需要设计一套合理的光学和机械结构,使其免受自重的影响或将这种影响降低到可接受的限度。由于系统要在保证刚度的条件下尽可能的减轻质量,并保证系统的各个组件可调整并方便检测和装调,这就对系统设计提出了更高的要求。

为了满足激光发射的要求,本文对口径为 270 mm 的梅逊反射无焦卡塞格林式发射望远镜进行了设计、分析、装调和检测,在成功地将激光的能量集中度控制在理想范围内的同时,实现了光学系统的结构轻量化和高稳定性并便于装调和检测。

2 设计原理

2.1 光学设计原理

一般望远镜的光学系统可以选用折射式或者反射式;其中折射式光学系统的特点是视场大、无遮拦损失和像差容易通过光学设计校正等;缺点是大口径的光学镜头成本高、制造困难、光能损失高和支撑装夹困难等,故一般用于口径不超过 250 mm 的光学镜头。反射式的特点为无色差、成本低、制造加工容易,支撑简单等,一般用于口径较大且视场较小的光学系统。鉴于该系统口径为 270 mm,故选用了常用的反射式光学系统。反射式光学系统包含同轴和离轴两种。同轴式光学系统精度高、易装调,但系统有遮拦损失;离轴式光学系统无遮拦,但光学元件的支撑结构加工精度低,尤其是装调比较复杂,且所占空间大。考虑到离轴式光学系统的装调难度,本系统选用同轴式。最后,该发射望远镜选用了梅逊无焦反射

卡塞格林、同轴式光学系统,系统参数如表 1 所示。

表 1 发射望远镜系统参数

Tab. 1 Parameters of transmitter-telescope

Parameters	Value
Pure aperture/mm	270
Abscured ratio	0.26
Field of view/($'$)	± 2
Operating wavelength/nm	589.159
Angle of divergence/mrad	0.11

图 1 所示为系统的光学结构,系统主要由主次镜组成。主镜和次镜光轴和系统的主光轴重合,主次镜都采用抛物面,能保证系统的入射光和出射光都是平行光,这种结构的望远镜即梅逊反射无焦卡塞格林式望远镜(Mersenne reflecting afocal Cassegrain form telescope)。

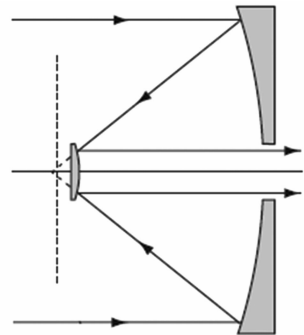


图 1 发射望远镜结构图

Fig. 1 Schematic layout of transmitter-telescope

2.2 结构设计原理

卡塞格林光学系统主要由主镜和次镜组成,一般认为主镜的曲率中心和顶点组成的光轴即为系统的主光轴;要保证系统处于较好的工作状态,尽量保证次镜的光轴和系统的主光轴重合。因此,主镜的支撑和主光轴的调整机构、系统的主支撑、次镜的支撑结构以及次镜的位置调整是设计的重点。通常次镜是由若干个薄梁片支撑。梁片的数量越多,其支撑刚度越大,系统遮拦越大;相反,梁片的数量过少则支撑刚度很难满足要求。

常见的结构是三翼梁、四翼梁支撑。

望远镜的主支撑结构对系统的刚度有很大的影响,会影响主镜与次镜之间的位置关系。望远镜主支撑结构形式主要包含圆筒式和桁架式。圆筒式结构刚度高,但重量大、抗风阻能力弱,普遍应用于小型的望远镜中。而桁架式结构以其质量轻,结构简单,易加工、抗震能力强、拆装方便及运输便利等优点被广泛应用于大型望远镜结构设计中。

3 仿真分析

基于上述理论,本文结合发射望远镜的特点,对比分析三翼梁及四翼梁次镜支撑方案、圆筒式及桁架式镜头结构,对镜头进行合理设计。

3.1 初步设计结构

根据发射望远镜的特点及光学设计参数,理论设计圆筒式结构及桁架式结构如图2、3所示。

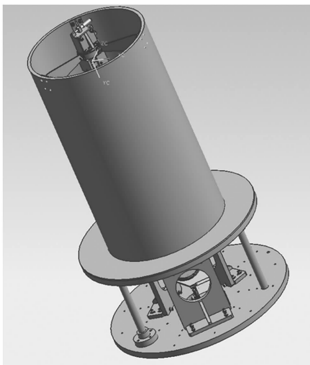


图 2 圆筒式结构

Fig. 2 Cylinder type configuration

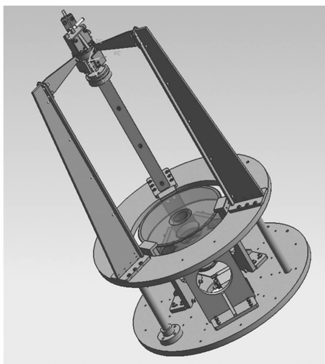


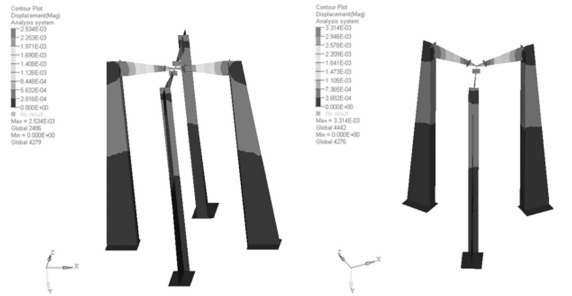
图 3 桁架式结构

Fig. 3 Truss configuration

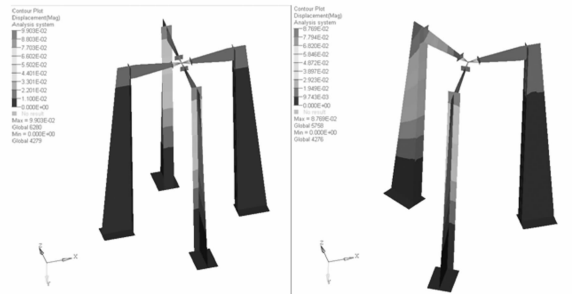
为了系统轻量化的要求,主镜初步确定采用 3 点支撑,支撑结构采用轻量化处理后的结构。

3.2 静力学仿真

利用有限元软件 Hyper Mesh 对支撑次镜的桁架式结构进行建模分析,分别对三翼梁、四翼梁进行建模和对比。自重作用下,当光轴垂直时,四翼梁最大偏移为 2.534×10^{-3} mm(图 4a),三翼梁的整体最大偏移为 3.31×10^{-3} mm(图 4b);当光轴位于 30° 天顶角时,四翼梁沿垂直于光轴方向偏移 9.903×10^{-2} mm(图 4c),三翼梁沿垂直于光轴方向偏移 8.769×10^{-2} mm(图 4d)。



(a)光轴竖直四翼梁变形图 (b)光轴竖直时三翼梁变形图
(a) Deformation of four-beam for apeak axis (b) Deformation of three-beam for apeak axis



(c)30°天顶角四翼梁变形图 (d)30°天顶角三翼梁变形图
(c) Deformation of four-beam with zenith angle of 30° (d) Deformation of three-beam with zenith angle of 30°

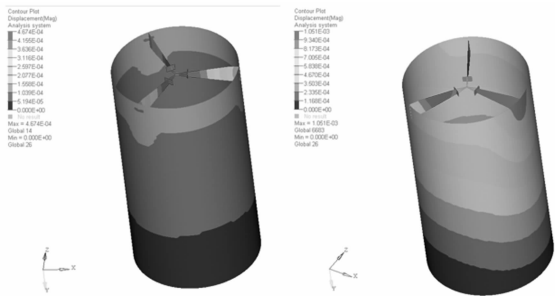
图 4 三翼梁、四翼梁变形图

Fig. 4 Deformations of three-beam structure and cross-plate structure

分析得出,三翼梁与四翼梁的变形量很小(量级低于 0.1 mm),实际应用中只需要保证变形量低于毫米量级即不会对系统刚度造成影响。在光轴指向天顶时,四翼梁由于增加了刚度,整体变形优于三翼梁;而光轴在一定的俯仰状态时,四翼梁的性能反不及三翼梁;在考虑降低遮拦比及轻量

化的情况下,选用三翼梁结构支撑次镜。

对圆筒式结构有限元建模,对比分析它和采用桁架式结构的优缺点。分别分析当光轴处于竖直状态和与天顶成 30° 时,结构在自重作用下的变形。对于圆筒式结构,光轴指向天顶时结构变形较小,最大值为 4.674×10^{-4} mm,圆筒结构变形云图见图 5(a);而当天顶角为 30° 时结构变形相对较大,最大值为 1.051×10^{-3} mm,结构变形云图见图 5(b)。



(a)光轴竖直结构变形图 (b)30度天顶角结构变形图
(a)Deformation when axis apeak (b)Deformation when is 30°

图 5 圆筒式结构变形图

Fig. 5 Deformations of cylinder type

这两个状态下,圆筒式结构都优于桁架配合翼梁的结构;然而对于本光学系统,分析结果表明采用桁架式结构的量级为 10^{-3} mm,而在实际应用中低于 1 mm 的结构变形可满足系统刚度的要求,并且桁架相比圆筒质量大大减小,因此本光学系统采用桁架式结构配合三翼梁实现支撑。

3.3 系统的调整机构

望远镜在光学设计、加工制造等方面都存在不可避免的误差;当温度变化时,结构的热变形也可能引起系统结构的变化而产生离焦。为了降低误差对系统质量的影响,必须针对光学系统进行装调和检测,而为了实现系统的装调,需要保证主镜能够进行位置的调整。主镜的口径为 270 mm,不进行光轴的平移调整,仅保证其倾斜量可以调整即能实现系统要求。如图 6 所示,主镜放置在 3 个均布 120° 的支撑点上,这 3 个支撑点下设计了调整螺杆,可以实现主镜光轴的倾斜控制。图 7 所示为次镜的调整和支撑结构。次镜的位置对于系统像差具有非常重要的作用,因此除了沿光轴方向的旋转不需控制以外,其余 5 个自由度都需要实现位置的调整和锁紧,包括 2 个方向的

平移,2 个方向的倾斜和沿光轴的平移。图 7 所示的结构完全能够实现调整的要求。

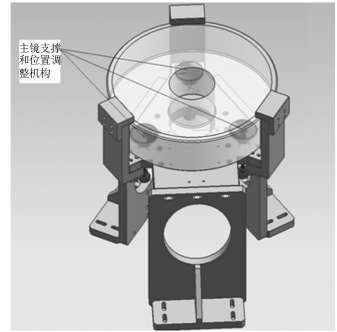


图 6 主镜支撑和调整机构

Fig. 6 Support and adjustment of primary mirror

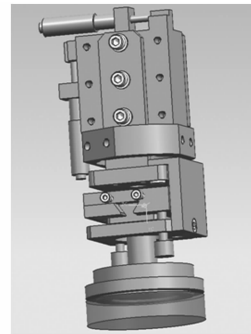


图 7 次镜支撑和调整机构

Fig. 7 Support and adjustment of secondary mirror

4 装调与检测

在实际中实现装调和检测,其基本原理为利用干涉仪和平面镜进行主次镜系统的自准直检验。图 8 所示为卡塞格林式望远镜系统的轴上自准检验,此方法需借助于和主镜相同口径的平面反射镜和干涉仪,还需能将该平面反射镜旋转某一个角度以及将其精确固定在该位置的机械装置。进行轴上自准检验时,将干涉仪调整对焦到系统像面上。

由于次镜的平移量有限,首先要保证主镜安装时和系统同心。可以借助于数显表打表实现,同时要保证主光轴竖直,需借助于贴在主镜上边面的平面镜配合主镜底面的 3 个倾斜调整实现。主镜位置调整完成后,就将主镜的光轴作为系统的主光轴以及装调检测的基准,不再轻易调整。

进行次镜相对主镜的调整。次镜光轴相对于

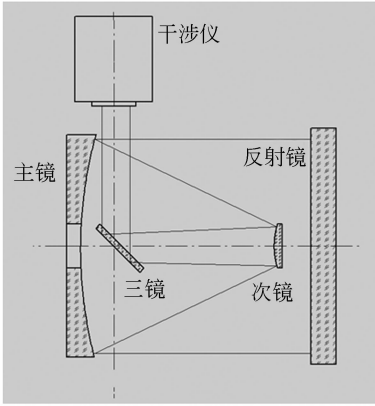


图 8 自准检验原理图

Fig. 8 Schematic diagram of auto-collimation test

主镜光轴的未对准会产生离焦、彗差和像散等像差。次镜光轴相对于主镜光轴的位置和姿态误差包括 Z 轴方向的离焦量、沿 X、Y 方向的横向偏移和绕 X、Y 的倾斜,如图 9 所示。由于次镜的轴对称特性,只有沿光轴 Z 向旋转的自由度不会引入像差。

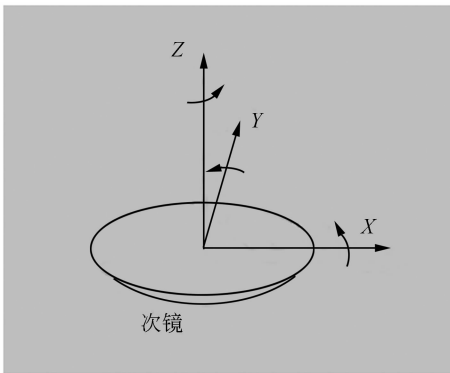


图 9 次镜 6 个自由度

Fig. 9 Secondary mirror with 6 degrees of freedom

下面考虑当系统存在装调偏心误差时系统的彗差和像散。彗差和像散的矢量波像差为:^[7-10]

$$\begin{cases} W_{coma} = W_{131} [(H - A_{131}) \cdot \rho] \rho^2 \\ W_{ast} = \frac{1}{2} W_{222} (H^2 - 2HA_{222} + B_{222}^2) \cdot \rho^2 \end{cases} \quad (1)$$

其中: W_{131} 、 W_{222} 分别为三阶彗差和像散的系数,而 A_{131} 、 A_{222} 、 B_{222} 分别为偏心导致的对像差的偏离向量。

观察发现,系统彗差(H 项)随视场角变化情况较为简单,仅仅为一阶,而由于偏心和倾斜导致的装调彗差(A_{131} 项)在整个视场为恒定的,不随

视场角发生变化;像散项的变化则比较复杂,二次像散(H^2 项)与视场角成二阶变化,线性像散($2HA_{222}$ 项)则为包含视场角和由于装调引入的偏离矢量的耦合,恒定像散(B_{222}^2 项)仅受偏离矢量的平方的影响,和视场角无关。参照文献[8]中关于像散和倾斜的关系:

$$\begin{aligned} z_5 &= B_0(\theta_x^2 - \theta_y^2) + B_1(\theta_x \alpha_x - \theta_y \alpha_y) + B_2(\alpha_x^2 - \alpha_y^2) \\ z_6 &= 2B_0 \theta_x \theta_y + B_1(\theta_x \alpha_y + \theta_y \alpha_x) + 2B_2 \alpha_x \alpha_y \end{aligned} \quad (2)$$

其中: θ_x, θ_y 分别代表 x 和 y 方向的视场角。由此,可以推导出灵敏度矩阵为:

$$\begin{pmatrix} C_5 \\ C_6 \\ C_7 \\ C_8 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} y^2 - x^2 & x & y & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 2xy & y & x & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & y & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & x & 1 & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \alpha_0 \\ \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \alpha_3 \\ \alpha_4 \\ \beta_0 \\ \beta_1 \\ \beta_2 \end{pmatrix} \quad (3)$$

利用光学软件 Zemax,设定对称的几个视场位置,首先得出无装调偏心扰动时的 Zernike 系数,求出像散和彗差中不受装调误差影响的 2 个系数 α_0, β_0 ,接着每次设定调整次镜的相应单位偏心量得出相应的像散和彗差的 Zernike 系数,减去无扰动系数,得到的即为由于偏心和倾斜导致的像差系数,最后利用最小二乘法拟合求取其系数。

表 2 灵敏度矩阵中的装调系数

Tab. 2 Coefficients of sensitivity matrix

像差	符号	DecX	DecY	TiltX	TiltY
二次像散	α_0	0	0	0	0
线性像散	α_1	0	0	0	0
线性像散	α_2	0	0	0	0
常数像散	α_3	0	0	0	0
常数像散	α_4	0	0	0.809 5	-0.809 5
线性彗差	β_0	0	0	0	0
常数彗差	β_1	0	-0.575 6	-2.320 8	0
常数彗差	β_2	-0.575 6	0	0	2.320 8

由此可以推断,偏心误差主要引入的是系统

彗差,且该彗差和偏心量满足正比例关系,而倾斜误差则同时引入彗差和像散。这就指导了装调过

程:首先装调次镜系统的倾斜消除像散,接着重点调整偏心配合倾斜消除系统的彗差。

$$\begin{pmatrix} C_5 \\ C_6 \\ C_7 \\ C_8 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0.809\ 5 & -0.809\ 5 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ -0.575\ 6 & 0 & 0 & -2.320\ 8 \\ 0 & -0.575\ 6 & -2.320\ 8 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \text{DecX} \\ \text{DecY} \\ \text{TiltX} \\ \text{TiltY} \end{pmatrix} \quad (4)$$

自准直平面镜需要借助于调整架支撑,图 10 所示为发射望远镜放置在调整架的实物图,调整



图 10 系统装调实物图

Fig. 10 Scheme of system alignment

架上部为自准直平面镜,干涉仪的光通过三镜反射进入系统,利用检测的结果指导调整次镜的位置,装调完成后检测结果如图 11 所示,实验结果显示系统波前误差 $RMS=0.146\ 7\lambda$, $PV=0.739\ 41\lambda$ 。

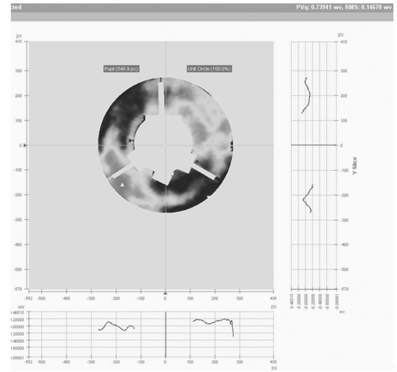


图 11 系统检测结果

Fig. 11 Testing result

通过调整结果可以看出,发射望远镜的设计和装调结果足够满足系统的像质要求。

5 结 论

根据发射望远镜结构设计特点,对圆筒式结构及桁架式结构进行了结构设计、静力学及仿真分析。对比实验显示:在 270 mm 的镜头尺寸下,三翼梁与四翼梁结构、圆筒式结构与桁架式结构的刚度满足系统的设计要求,但是桁架三翼梁式结构的轻量化率较高。

系统装调过程中,对主镜和次镜进行了装调。通过设计相应的次镜安装结构及调整机构,配合灵敏度矩阵的求取,获得了满足系统要求的成像质量。实验结果表明,桁架式结构的镜头能满足发射望远镜系统像质的要求。说明该发射望远镜的设计满足光学系统的要求,可成功实现其功能。



参考文献:

[1] WILSON R N. *Reflecting Telescope Optics I* [M]. Springer, Berlin,2001.

[2] WILSON R N. *Reflecting Telescope Optics II*

[M]. Springer, Berlin,2001.

[3] 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,2002,300-305.

CHENG J Q. *Theory and design of astronomical telescope* [M]. Beijing: Science Press, 2002, 300-

- 305.
- [4] BELY P Y. *The Design and Construction of Large Optical Telescopes* [M]. USA: Springer, 2002: 220-242.
- [5] 徐亮,赵建科,薛勳. 月基望远镜探测能力的地面标定[J]. 光学精密工程, 2012, 20(5): 972-977.
XU L, ZHAO J K, XUE X. Detectability calibration of lunar-based optical telescope on ground[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(5): 972-977. (in Chinese)
- [6] 王智,李朝辉. 月基极紫外相机光机结构设计[J]. 光学精密工程, 2011, 19(10): 2427-2433.
WANG ZH, LI CH H. Design of optical-mechanical structure for lunar-based extreme ultraviolet camera[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(10): 2427-2433 -977. (in Chinese)
- [7] SHACK R V. Influence of alignment errors of a telescope system on its aberration field [J]. *Proc. SPIE*, 251, 146-153, 1980.
- [8] BUCHROEDER R A. *Tilted component optical systems* [D]. Tucson: University of Arizona, Tucson, Arizona, 1976.
- [9] 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.
SUN J W, CHEN T, WANG J L. Computer-aided alignment for primary and secondary mirrors[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(10): 2156-2163. (in Chinese)
- [10] 孙敬伟, 陈涛, 王建立. 基于离焦星点图的 RC 式望远镜装调技术[J]. 光学精密工程, 2011, 19(4): 728-736.
SUN J W, CHEN T, WANG J L. RC telescope alignment based on out-of-focus stellar image[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(4): 728-736. (in Chinese)

作者简介:



孙敬伟(1983—),男,吉林乾安人,博士,助理研究员,2005年于同济大学获得学士学位,2008年于汕头大学获得硕士学位,2011年于长春光机所获得博士学位,主要从事机械设计制造以及大口径望远镜系统装调和检测方面的研究。E-mail: blizzardsjw@163.com



吕天宇(1986—)男,吉林长春人,硕士,助理研究员,2011年于哈尔滨工业大学获得硕士学位,主要研究方向为光学设计和检测装调。

(版权所有 未经许可 不得转载)