

## 利用恒星对天文观测系统光轴平行性检校

王 阳<sup>1,2</sup>, 黄 煜<sup>1</sup>, 李占峰<sup>1</sup>, 王淑荣<sup>1</sup>

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 应用光学国家重点实验室, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘 要:** 基于地基天文观测系统光轴平行性的校验需求, 建立了一套高精度多光轴平行性检测系统。针对具有成像光谱仪的天文观测系统, 将恒星作为点光源, 利用天文跟踪系统完成对恒星星象及相应光谱数据的同步采集。在光谱维视场中, 成像光谱仪不易准确地确定恒星的位置, 该检测方案利用赤道仪控制系统和成像光谱仪狭缝视场的特点, 对恒星目标进行一维扫描, 将成像光谱仪接收到的恒星能量随着扫描位置进行拟合来确定光谱维视场中心, 通过高斯拟合法来计算光学仪器之间光轴的平行性偏差。试验结果表明: 测量结果不确定度为 1.52", 该检测系统结构简单, 满足成像光谱仪和其它成像仪器野外高精度快速检测光轴一致性的要求。

**关键词:** 测量; 光轴一致性; 恒星; 成像光谱仪; 赤道仪

**中图分类号:** TN247 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201746.0517003

## Calibration of optical axis parallelism by using star for astronomical observation system

Wang Yang<sup>1,2</sup>, Huang Yu<sup>1</sup>, Li Zhanfeng<sup>1</sup>, Wang Shurong<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** To satisfy the requirement of field measurement of optical axis parallelism for the ground-based astronomical observation system, a high-precision multi-optical axis parallel calibration system was put forward. For astronomical observation system which contains the imaging spectrometer, a star was used as a point source, and the star image and its spectrum was synchronous acquisition by using the astronomy tracking system. It was not easy to determine the center of field of view in spectral dimension of the imaging spectrometer, and the scheme takes advantage of control system of the equatorial and a small field of view of the imaging spectrometer, so the center of field of view in spectral dimension was calculated by fitting energy of scanning the target star with respect to the scanning position, then the bias of optical axis parallelism between the instrument was calculated by Gaussian fitting. Experimental results show that the standard uncertainty of this measurement can reach 1.52", and the optical measurement system structure is simple, so it meets the need of field optical axis parallel measurement with high

收稿日期: 2016-09-05; 修订日期: 2016-10-03

基金项目: 国家 863 高技术研究发展计划(2015AA123704)

作者简介: 王阳(1990-), 男, 博士生, 主要从事空间遥感仪器在轨定标源方面的研究。Email: wangyang213@mails.ucas.ac.cn

导师简介: 黄煜(1979-), 男, 副研究员, 硕士生导师, 主要从事空间紫外遥感仪器方面的研究。Email: ssshycn@163.com

precision and high speed between the imaging spectrometer and other imaging instrument.

**Key words:** measurement; optical axis parallelism; star; imaging spectrometer; equatorial telescope

## 0 引言

由于光学仪器在生产和装配过程中,对仪器光轴之间的平行性有严格要求<sup>[1-2]</sup>,目标信息的获取与探测的准确度很大程度上由光轴的一致性决定,但是受到仪器加工和安装条件的限制以及仪器使用和运输过程中,受到周围各种环境条件的影响,仪器各个光轴之间的平行性将会发生不同程度上的变化<sup>[3-4]</sup>,同时为了光电系统在日常使用过程中进行维护,需要对整个系统的光轴平行性进行快速测试以便进行校准。目前,常用的光轴平行性检测方法主要有野外测量与实验室测量两类,主要包括投影靶法<sup>[5]</sup>,大口径平行光管法<sup>[6]</sup>,小口径光管法<sup>[6]</sup>,激光光轴仪法<sup>[5]</sup>,五棱镜法<sup>[6]</sup>,以及分光路投射法<sup>[6]</sup>等,其中实验室测量方法较为成熟,但其难以适应外场测量中各种环境的变化,以满足测试与检测的需要。

地基天文观测系统中的成像光谱仪为了获得月亮的高光谱数据,利用天文望远镜定位月亮在成像光谱仪视场中的位置,使推扫拼接后的图像完整,这需要精确地检测天文望远镜与成像光谱仪的光轴一致性偏差,对地基辐射测量试验开展起到至关重要的作用。由于成像光谱仪的狭缝视场及一维空间的特点,决定了地基天文观测系统不易进行光轴校检,为了准确地确定光轴之间的平行性偏差,文中提出一种基于赤道仪<sup>[7]</sup>天文跟踪系统,将无穷远处的恒星作为瞄准基准,利用 CCD 成像系统将采集到的恒星弥散斑和成像光谱仪中的光谱数据进行数据处理,检测天文望远镜中恒星弥散斑的中心与目标星在成像光谱仪视场位置的偏差量,完成对成像光谱仪系统光轴与天文望远镜可见光轴之间的平行性检校,利用其它目标恒星及月亮边缘对光轴一致性检测方案进行了验证,并对该检测方法进行不确定度的评定。

## 1 光轴平行性校验原理

天文跟踪观测系统如图 1 所示,主要由宽波段成像光谱仪、天文望远镜和赤道仪三部分构成。成像

光谱仪是一台工作在可见波段棱镜色散型成像光谱仪,焦距为 245.6 mm,视场为  $0.7^{\circ} \times 0.0056^{\circ}$ 。天文望远镜的焦距为 207 mm,CCD 像面为  $1\,024 \times 1\,028$ 。图 1 中,天文跟踪系统采用了赤道仪进行跟踪天体,赤道式装置有两条互相垂直的轴系,赤经轴对准地球的北天极来消除地轴自转效应对观星的影响,赤经轴是作为赤道仪的追踪轴,赤道仪只在指向观测目标星时旋转赤纬轴<sup>[7]</sup>。图 1、2 中,成像光谱仪入射狭缝长度方向垂直于赤道仪的赤纬轴和赤经轴,并与空间维平行。

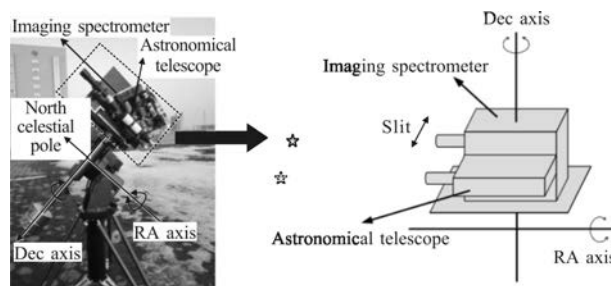


图 1 基于赤道仪的天文观测装置

Fig.1 Astronomical observation system based on equatorial telescope

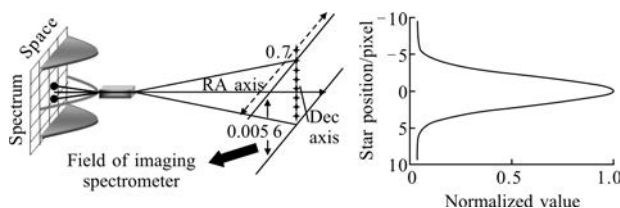


图 2 成像光谱仪光谱维视场中心的确定方法

Fig.2 Method of determining the center of field in spectral dimension of imaging spectrometer

该试验采用的光轴平行性检测系统由赤道仪、天文望远镜、目标恒星组成,见图 1。在赤道仪极轴校准后,将目标恒星置于天文望远镜视场中心,启动恒星跟踪模式。图 2 中,当旋转赤经轴时,目标恒星进入成像光谱仪视场,成像光谱仪有信号产生,此时恒星在狭缝宽度方向视场中的位置就粗略的确定下来,同时旋转赤纬轴以调整恒星在空间维的位置。利用光学系统固有的光轴平行性偏差精确的确定狭缝宽度方向上的中心视场位置。成像光谱仪在赤经方

向以固定角距来扫描目标恒星 (可选择角距有 0.5", 1", 2" 等), 在天文望远镜探测器中记录目标恒星的位置, 利用目标恒星进入成像光谱仪视场到离开视场过程中的信号大小不同, 将获得的信号大小随着天文望远镜中目标恒星的位置进行拟合, 将拟合中心作为光谱维的中心视场位置。

$$f_0 = \frac{1}{n} \left[ \sum_{i=1}^n f(\lambda_i) \right] \quad (1)$$

式中:  $f(\lambda_i)$  为成像光谱仪  $\lambda_i$  波长处目标恒星中心位置;  $n$  为成像光谱仪波段数;  $f_0$  为目标恒星在空间维的中心位置。

确定光学系统之间的光轴平行性偏差。选择光谱维的中心视场附近同步采集的星像和光谱数据, 公式(1)中, 利用高斯法拟合空间维  $\lambda_i$  处的恒星中心位置  $f(\lambda_i)$ , 将在所有波长处  $f(\lambda_i)$  进行求和平均作为空间维的恒星中心位置。利用高斯法确定目标恒星在天文望远镜探测器上中心位置, 计算出成像光谱仪与天文望远镜之间的光轴平行性偏差。

成像光谱仪和天文望远镜的光轴一般不相交, 将其中一条光轴平移使两条光轴相交于一点, 但两光轴的夹角是不变的, 如图 3 所示, 直线 1 和 2 分别

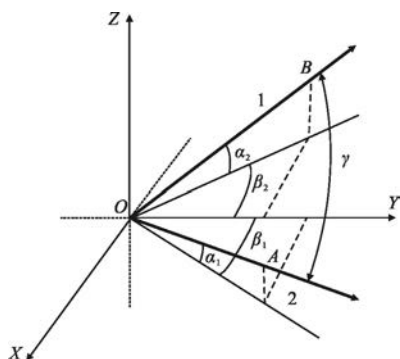


图 3 成像光谱仪与天文望远镜之间的光轴平行性偏差

Fig.3 Bias of optical axis parallelism between imaging spectrometer and astronomical telescope

代表两光轴, 此时两光轴平行性偏差角为  $\gamma$ , 取直线 1、2 距离原点为  $R$  的坐标, 利用坐标系中两点的坐标求两直线间的夹角, 其推导公式如下:

$$\vec{AO} = [R \cos(\alpha_1) \sin(\beta_1), R \cos(\alpha_1) \cos(\beta_1), R \sin(\alpha_1)] \quad (2)$$

$$\vec{BO} = [R \cos(\alpha_2) \sin(\beta_2), R \cos(\alpha_2) \cos(\beta_2), R \sin(\alpha_2)] \quad (3)$$

$$\cos(\gamma) = \frac{\vec{AO} \cdot \vec{BO}}{|\vec{AO}| \times |\vec{BO}|} \quad (4)$$

$$\gamma = \arccos[\cos(\alpha_1) \sin(\beta_1) \cos(\alpha_2) \sin(\beta_2) + \cos(\alpha_1) \cos(\beta_1) \cos(\alpha_2) \cos(\beta_2) + \sin(\alpha_1) \sin(\alpha_2)] \quad (5)$$

$$\Delta\alpha = \alpha_2 - \alpha_1, \Delta\beta = \beta_2 - \beta_1 \quad (6)$$

式中:  $\alpha_1 = \omega_1 x_1, \beta_1 = \omega_1 y_1, \alpha_2 = \omega_2 x_2, \beta_2 = \omega_2 y_2$  天文望远镜和成像光谱仪探测器中的像元空间尺度分别为  $\omega_1, \omega_2$ , 天文望远镜和成像光谱仪的中心视场作为坐标原点, 则目标恒星在天文望远镜和成像光谱仪的坐标位置分别  $(x_1, y_1), (x_2, y_2)$ ,  $\Delta\alpha, \Delta\beta$  分别为在赤经和赤纬方向的偏向角。

由于外场没有较好的方法对其方案进行验证, 所以利用其他目标恒星或者月亮边缘对此检测方案进行验证。以恒星为例, 旋转赤道仪, 将计算出的光轴平行性偏差反映到天文望远镜探测器上, 检测其他目标恒星在成像光谱仪中信号大小, 以及目标恒星在空间维的中心位置。

## 2 试验结果及分析

地面观测过程中, 由于受到大气湍流<sup>[8-9]</sup>、散射, 以及仪器自身的衍射等缘故, 使得目标恒星在探测器上退化为一定展宽的高斯分布, 而高斯拟合法一直都被作为星像定心的标准算法<sup>[10]</sup>。天文望远镜和成像光谱仪在每个位置处连续采集 5 帧数据, 求和并平均<sup>[11]</sup>, 以消除以上因素引起的星像能量扩散的不均匀以及随机噪声的影响, 经过读取目标和背景、调整灰度值、滤波去噪, 对星像进行高斯拟合提取中心坐标。

为了解算出成像光谱仪和天文望远镜光轴之间平行性的偏差, 需要确定恒星在天文望远镜和成像光谱仪视场中的位置。首先, 确定成像光谱仪光谱维的视场中心, 图 2 中, 成像光谱仪对目标恒星进行一维扫描, 同时天文望远镜中星像和成像光谱仪的光谱数据同步采集, 如图 4 所示, 横坐标是目标恒星在天文望远镜探测器上的扫描的位置, 星点(红)是目标恒星经过大气进入仪器视场的信号大小, 圆点(绿)是恒星在望远镜探测器上的定位的标准偏差, 将信号随着扫描的视场位置进行高斯拟合, 将拟合中心作为成像光谱仪光谱维的视场中心, 求得  $x_0 = 658.46$ 。

然后, 确定目标恒星在成像光谱仪空间维的位置, 选择目标恒星在光谱维视场中心附近信号最大的数据。由于光学系统存在色差, 星象在不同波长处

的中心位置不同,图 5(a)、(b)为望远镜中的星象及其中心位置。图 5(c)、(d)为利用公式(1)求得恒星光谱中心在空间维的位置,此时目标恒星在成像光谱仪视场中的坐标位置为(0.014, 12.00)。

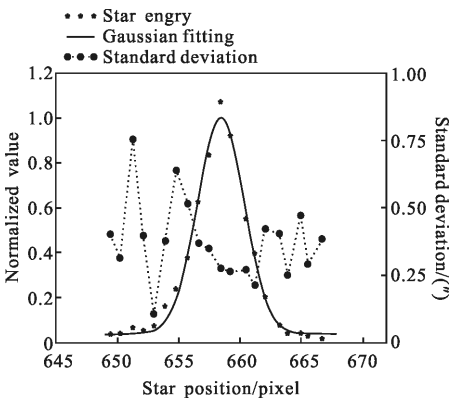


图 4 成像光谱仪光谱维的视场中心位置确定方法

Fig.4 Determination method of center of field in spectral dimension of imaging spectrometer

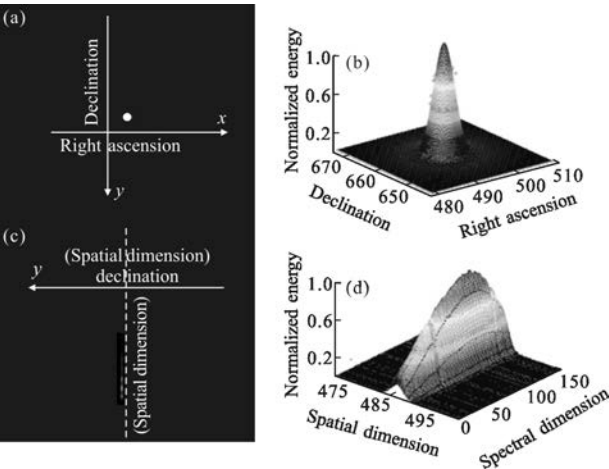


图 5 望远镜和成像光谱仪同步恒星采集

Fig.5 Synchronous acquisition of the star for astronomical telescope and imaging spectrometer

最后, 确定目标恒星在天文望远镜探测器中的位置,当目标恒星在成像光谱仪信号最大时,选择此时同步采集的天文望远镜中的星象,以探测器中心作为原点,图 5(a)、(b)中高斯函数拟合提取星象中心坐标(17.95, -18.31)。

天文望远镜和成像光谱仪探测器像元空间尺度分别是  $\omega_1=5.18''$ ,  $\omega_2=10.91''$ , 将其代入公式(5)、(6), 计算光轴平行性偏差为  $244.11''$ , 其中赤经方向上的平行性偏差为  $92.91''$ , 赤纬方向上的平行性偏差为

$225.73''$ 。利用其他目标恒星及月亮对该方案进行相应的验证,光轴一致性偏差符合一致。

3 检测系统的不确定度评定

检测系统的不确定度主要来源于图像采集处理系统、检测方法、使用环境这三方面。在讨论测量不确定度时,如表 1 所示,在赤经和赤纬两个方向上的不确定度分量可以表示为( $u_x, u_y$ )。

表 1 检校系统的测量不确定度来源  
Tab.1 Measurement uncertainty source of calibration system

| Parameters   | $u_x/('')$     | $u_y/('')$     |
|--|----------------|----------------|
| Gaussian fitting in astronomical telescope detector  | 0.12           | 0.18           |
| Gaussian fitting in spatial dimension of imaging spectrometer                              | 0              | 0.23           |
| Determination of center of the field of spectral dimension calculating by Gaussian fitting | 0.13           | 0              |
| Environment vibration and airflow  | 0.23           | 0              |
| Uncertainty of arc second of per pixel caused by the focus of astronomical telescope       | $0.26('')/m^2$ | $0.26('')/m^2$ |
| Uncertainty of arc second of per pixel caused by the focus of imaging spectrometer         | 0.000 2        | 0.03           |
| Bias of position angle between y axis of astronomical telescope detector and declination   | 0.05           | 0.05           |
| Bias of position angle between y axis of imaging spectrometer detector and declination     | Can be ignored | 0.51           |
| Tracking precision of equatorial telescope   | Can be ignored | Can be ignored |

(1) 天文望远镜中高斯定位的影响。目标恒星在天文望远镜上 5 次重复定位的标准差为(0.28'', 0.41''), 测量结果的标准不确定度分别为(0.12'', 0.18'')。

(2) 空间维的高斯定位的影响。成像光谱仪的空间维中目标恒星重复测量的标准差为 0.52'', y 方向的测量结果的标准不确定度为 0.23''。

(3) 光谱维的中心视场高斯定位的影响。高斯拟



合定位精度为 0.05 pixel。按均匀分布考虑,  $x$  方向的测量结果的标准不确定度为 0.14"。

(4) 大气扰动和大风<sup>[12]</sup>对光谱维的中心视场定位的影响。大气扰动及风引起目标恒星在天文望远镜探测器上的定位最大误差为 0.08 pixel, 按均匀分布考虑,  $x$  方向的测量结果的标准不确定度为 0.23"。

(5) 光学仪器像元空间尺度引起恒星定位的影响。天文望远镜和成像光谱仪像元空间尺度最大偏差分别为  $\Delta w_1=0.025\ 0''$ ,  $\Delta w_2=0.004\ 4''$ 。按均匀分布考虑, 在天文望远镜和成像光谱仪中的定位标准不确定度分别为(0.26", 0.26"), (0.000 2", 0.03")。

(6) 探测器像面与赤道坐标系存在旋转角度。CCD 像面与赤道坐标系最大偏差角为 1/102 4, 引起天文望远镜和成像光谱仪恒星最大定位误差分别为(0.09", 0.09"), (0, 0.88"), 按均匀分布考虑, 在天文望远镜和成像光谱仪中的定位标准不确定度为(0.05", 0.0"), (0, 0.5")。

(7) 由于数据同步采集, 赤道仪的跟踪误差对光轴之间的相对偏差量没有影响, 即被忽略。

由以上分析的影响测量结果的分量合成标准不确定度, 及其扩展不确定度分别为:

$$u_x = \sqrt{u_{1x}^2 + u_{2x}^2 + u_{3x}^2 + u_{4x}^2 + u_{5x}^2 + u_{6x}^2 + u_{7x}^2 + u_{8x}^2 + u_{9x}^2} = 0.39''$$

$$u_y = \sqrt{u_{1y}^2 + u_{2y}^2 + u_{3y}^2 + u_{4y}^2 + u_{5y}^2 + u_{6y}^2 + u_{7y}^2 + u_{8y}^2 + u_{9y}^2} = 0.65''$$

$$U = ku = k\sqrt{u_x^2 + u_y^2} = 1.52'' \quad (k=2) \quad (7)$$

若不计光学系统自身像差等因素引起的不确定度影响, 则此检校系统的测量不确定度在 1.52" 以内, 满足光学系统光轴平行性检测的需求。

## 4 结论及展望

为了对光学系统进行光轴一致性检测, 针对成像光谱仪这类仪器光谱方向非成像及小视场的特点, 文中提出了一种多光轴地面天文观测系统光轴一致性检测方法。该方法利用赤道仪的控制系统, 光轴间固有的平行性偏差以及探测器接收的恒星能量变化来确定成像光谱仪光谱维视场中心, 经过数据处理对系统光轴的平行性偏差进行计算, 并利用其它恒星及月亮进行了检测方案的验证, 光轴平行性偏差符合一致。在此检测过程中主要受到 CCD 像元尺寸, 方位以及恒星定位的影响, 经过不确定分析评

定, 该检测的方法测量不确定度小于 1.52"。该方法操作简单, 数字采集系统测量精度高, 易于实现自动化, 不仅可以用于地基光谱仪系统的光轴一致性检测, 而且可以应用到天基领域。针对在轨光谱仪类型的空间遥感仪器, 具有较少的光轴平行性检测手段, 该方法的应用为在轨光学仪器的光轴平行性检测提供了相关的技术保障。

## 参考文献:

- [1] Song Junru, Xing Hui, Mu Shengbo, et al. Alignment of aerial multi-angle infrared camera [J]. *Optics & Precision Engineering*, 2015, 23(8): 2125–2133. (in Chinese)  
宋俊儒, 邢辉, 穆生博, 等. 航空红外相机的装调[J]. *光学精密工程*, 2015, 23(8): 2125–2133.
- [2] Du Yang, Gao Zhishan. Lens centering using high-precision three coordinate measuring machine [J]. *Optics & Precision Engineering*, 2015, 23(3): 639–644. (in Chinese)  
杜洋, 高志山. 使用高精度三坐标测量仪实现透镜定中心[J]. *光学精密工程*, 2015, 23(3): 639–644.
- [3] Wang S, Li Z, Huang Y, et al. Alignment of optical axis parallelism in multi-axis system [J]. *Chinese Optics Letters*, 2015, 13(s1): 1202.
- [4] Shi Shengbing. Design and realization of test system for testing parallelism and jumpiness of optical axis of photoelectric equipment[J]. *Contact Dermatitis*, 2008, 58(5): 299–306.
- [5] Jin Weiqi, Wang Xia, Zhang Qiyang, et al. Technical progress and its analysis in detecting of multi-axes parallelism system [J]. *Infrared & Laser Engineering*, 2010, 39(3): 526–531. (in Chinese)  
金伟其, 王霞, 张其扬, 等. 多光轴一致性检测技术进展及其分析[J]. *红外与激光工程*, 2010, 39(3): 526–531.
- [6] Liu Yachen, Zhang, Xinlei, Gao Yang, et al. Study of multi-spectral axes parallelism calibration of photoelectric tracking and aiming system[J]. *Journal of Astronautic Metrology and Measurement*, 2015(4): 5–8. (in Chinese)  
刘亚辰, 张新磊, 高扬, 等. 光电跟踪瞄准系统的多光轴平行度校准方法研究[J]. *宇航计测技术*, 2015(4): 5–8.
- [7] He Qiuhui, Kong Dali, Liu Daizhong. On the adjustment of the polaraxis of an equatorial telescope [J]. *Astronomical Research & Technology*, 2010, 7(3): 238–246. (in Chinese)  
何秋会, 孔大力, 刘岱钟. 赤道式天文望远镜极轴调整分析及观测结果[J]. *天文研究与技术*, 2010, 7(3): 238–246.

- [8] Qu Qing, Cao Zhaoliang, Hu Lifa, et al. Greenwood frequency measurement of atmospheric turbulence by phase difference method [J]. *Chinese Optics*, 2015, 8 (1): 121–129. (in Chinese)  
瞿青, 曹召良, 胡立发, 等. 位相差值法测量大气湍流格林伍德频率[J]. 中国光学, 2015, 8(1): 121–129.
- [9] Xiang E, Lu Xiaomeng, Jiang Xiaojun. Lucky imaging system on the 50 cm telescope at Xinglong observatory [J]. *Infrared & Laser Engineering*, 2015, 44(4): 1278–1283. (in Chinese)  
向娥, 卢晓猛, 姜晓军. 基于兴隆观测基地 50 cm 望远镜的幸运成像系统[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(4): 1278–1283.
- [10] Chen W Z, Zhang C H, Zhou X D. Study of star-sky image background characteristics based on local-histogram gaussian fitting method [J]. *Infrared Technology*, 2008, 30(4): 230–233.
- [11] Li Dongning, Wang Chenglong, Wang Liqiu, et al. Comparison of ground-based photometric measurement way [J]. *Chinese Optics*, 2015, 8(3): 456–463. (in Chinese)  
李冬宁, 王成龙, 王丽秋, 等. 地基光度测量方式对比[J]. 中国光学, 2015, 8(3): 456–463.
- [12] Luo Qi, Li Xinyang. Design of optical axis jitter rejection controller for adaptive optics systems [J]. *Infrared & Laser Engineering*, 2016, 45(4): 0432003. (in Chinese)  
罗奇, 李新阳. 自适应光学系统光轴抖动抑制控制器设计[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(4): 0432003.