

1 m 太阳望远镜光轴变化检测与改正

柳光乾^{1,2} 校启公^{1,2} 邓林华^{1,2} 李银柱¹ 刘 忠¹

(¹中国科学院国家天文台/云南天文台, 云南 昆明 650011)
²中国科学院大学, 北京 100049)

摘要 针对 1 m 太阳望远镜主光学系统光轴与其光电导行系统光轴在望远镜跟踪过程中的相对变化对光电导行跟踪精度的影响,从望远镜的光机电系统结构出发,分析了光电导行闭环跟踪时光轴变化引入的跟踪误差变化规律,提出了光轴变化的检测方法。经过实测表明,光轴的最大相对变化是 46",且变化只与望远镜指向的高度角有关,与望远镜指向的方位角无关,结构重力变形是引起光轴变化的主要因素。在光电导行系统中引入光轴变化的软件修正模型来改善光轴变化引起的光电导行闭环长期跟踪误差。

关键词 测量; 1 m 太阳望远镜; 光电导行; 光轴相对变化; 跟踪精度

中图分类号 P111.2 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201340.0108004

Detection and Calibration of Optical Axes Change for One Meter Solar Telescope

Liu Guangqian^{1,2} Xiao Qigong^{1,2} Deng Linhua^{1,2} Li Yinzhū¹ Liu Zhong¹

(¹Yunnan Observatory of National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Kunming, Yunnan 650011, China
²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract During a 1 m solar telescope tracking process, the relative change between the telescope optical axis and its auto-guiding system optical axis decreases tracking accuracy. According to the structure of the telescope optical, mechanical and electric control systems, the tracking error of auto guider caused by the change of optical axes is analyzed, and the detection method of the optical axes change is provided. The test results show that the maximum relative change of the optical axes is 46". It varies only with the telescope altitude angles, independent of telescope azimuth angles. The major factor to cause the telescope optical axes change is telescope structure distortion under its gravity. The software correction model of the telescope optical axes which changes in the auto-guiding system is introduced to improve the long-term tracking accuracy decreased by the optical axes change.

Key words measurement; one meter solar telescope; auto guider; relative changes of optical axes; tracking accuracy

OCIS codes 120.1680; 120.4640; 220.4840; 230.2090; 350.1260

1 引 言

现代天文望远镜均配备了灵敏度较高的光电导行(也称光电跟踪)系统来满足对观测目标进行长时间高精度的跟踪要求,导行系统的信标通常从主光学系统中引出,如云南天文台丽江 2.4 m 望远镜。但也有一些特殊结构的望远镜,如云南天文台 1 m 太阳望远镜(NVST),为改善望远镜观测时大气视

宁度,采用了真空镜筒,其导行系统的信标来自于独立装配在镜筒背上的小口径导行镜,这也是为了有效减小导行光路系统中的热控问题。独立结构的导行系统工作时,必须保证导行镜光轴与主光学系统的光轴平行,但在望远镜跟踪目标的过程中,姿态不断变化并受到重力的影响,光轴之间不再保持平行,从而影响光电导行的正常工作,引入慢变的跟踪误差。

收稿日期: 2012-08-02; **收到修改稿日期**: 2012-08-30

基金项目: 国家自然科学基金(11003041, 11103077)资助课题。

作者简介: 柳光乾(1978—),男,博士研究生,主要从事望远镜控制方面的研究。E-mail: lgq@ynao.ac.cn

导师简介: 刘 忠(1968—),男,博士,研究员,主要从事天文光学技术方面的研究。E-mail: lz@ynao.ac.cn

NVST 对其光电导行的跟踪精度要求,短期是 $0.3''/30\text{ s}$,长期是 $1''/10\text{ min}$ 。长期跟踪误差正是对导行镜光轴与主镜系统光轴之间相对变化提出的要求。NVST 虽然在结构设计上充分考虑了光轴的变化问题,并就其主光学系统的机械安装进行了等弯沉设计,但该望远镜投入使用后,导行镜光轴与主镜系统光轴之间的相对变化不得而知。因此,本文根据 NVST 光机电系统结构,提出检测方法,并进行实测,最后建立了光轴相对变化的修正模型来改善光电导行的跟踪性能。

2 NVST 系统结构

NVST 有效口径为 0.98 m ,有效焦距约为 45 m ,光学系统是修正的 Gregorian 系统,机架结构为地平式(方位-高度)装置,真空镜筒长约为 3.5 m ,直径

约为 1.2 m 。望远镜焦面位于光谱仪上平台平面,该平台放置 NVST 的多个终端系统,包括太阳光球和 $\text{H}\alpha$ 色球的高分辨率成像系统,如图 1 所示。在图 1(b)所示的 NVST 光学系统中,W1 是真空镜筒的封窗,主镜 M1 是抛物面反射镜,M2 和 M3 是椭圆面反射镜,M4~M7 是平面反射镜, F_1 是 M1 焦点, F_2 是 M2 焦点, F_3 是 M3 焦点。望远镜镜筒背部装有口径为 5 cm 的导行镜,如图 1(c)所示,NVST 通过导行镜终端的电荷耦合器件(CCD)系统采集全日面像并计算其质心位置变化来实现主镜系统对太阳某一局部活动区的长时间高精度跟踪。这种采用独立导行镜闭环跟踪模式要求望远镜在跟踪过程中主镜系统光轴和导行镜光轴必须始终保持指向日面上的同一点,既两个光学系统光轴要严格保持平行。

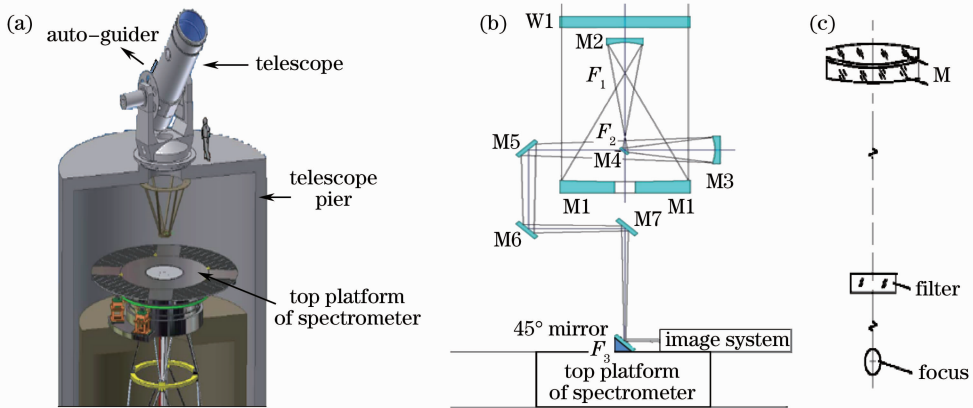


图 1 (a) NVST 系统结构;(b) NVST 光路结构;(c)导行镜光路结构

Fig.1 (a) NVST system structure; (b) NVST optical system; (c) NVST guider's optical system

NVST 这类地平式装置结构的望远镜在跟踪过程中的最大特点之一就是望远镜视场中的像存在旋转,且这种旋转除了与天体在地平坐标系中的变化规律有关外,还受到望远镜自身光学系统的影响,主要是其中的平面反射镜。根据图 1(b)和图 1(c),NVST 的 1 m 主光学系统和导行系统中的像旋转是完全不同的。文献[1,2]给出了详细的分析。

造成导行镜光轴与主光学系统的光轴相对的因素众多,其中主要因素有:1) 支撑主光学系统的镜筒结构受重力变形引起主镜 M1 和第一附镜 M2 之间的光轴弯沉^[3];2) 导行镜及终端 CCD 支撑结构受重力变形引起的光轴变化;3) 导行系统与主镜镜筒接口的安装基座受重力变形引起的光轴变化^[4]。详细分析每一因素造成的光轴变化的变化规律和量级相当复杂,光轴变化对 NVST 造成的影响最终是引起光电导行闭环跟踪的长期误差,如何测量光轴

变化并进行修正对 NVST 更为必要。

测量光轴变化的方法众多,如文献[5~13]提到的测量方法,这些方法的特点是与其所用的系统息息相关,NVST 如果采用类似附加机构的方法,系统势必会变得更加复杂,同时影响 NVST 的正常观测。国内外常采用指向误差模型^[14~16]来处理天文望远镜机械制造、安装等引入的指向和长期跟踪误差,包括光轴变化引入的误差。例如,应用广泛的 TPOINT 指向误差模型中就有一项是处理光轴变化引入的误差。但这种测量光轴变化的方法测量精度不高,这是因为指向误差模型采用的是统计求解,光轴变化引入的定位跟踪误差与望远镜的方位轴和高度轴不垂直引入的误差存在很大的相关,光轴变化引入误差采用的是经验模型。而且指向误差模型处理的只是望远镜主光学系统的光轴变化,而 NVST 还要考虑导行镜和其他因素引入的光轴变

化,即主光学系统的光轴与导行镜光轴之间的相对变化。因此,NVST 光轴实测要另寻方法。

3 NVST 光轴变化引入的跟踪误差变化分析

NVST 在跟踪过程中,M1~M7 随方位轴转动,M1,M2,M4 随高度轴转动。当望远镜长时间跟踪某一颗星时,以导行系统光轴所对应的 CCD 坐标为基准点进行闭环跟踪。理想情况下,导行镜光轴与主镜系统光轴之间保持平行,则星像在 NVST 的高分辨率成像系统中始终保持在其 CCD 上某一固定位置。当导行镜光轴与主镜系统光轴之间存在固定偏差,由于像的旋转,则星像在 NVST 高分辨率成像系统的 CCD 轨迹为圆。当导行镜光轴与主镜系统光轴之间存在相当变化时,则星像在 NVST 高分辨率成像系统的 CCD 上的轨迹变得较为复杂。

NVST 光学系统中,M4 平面镜较为特殊,表现为两个方面:1) 光到达该镜面上时,没经过任何平面反射镜,其平面上像的旋转与光导行系统中像的旋转一致;2) 该平面镜的中心在望远镜镜筒的高度旋转轴上。因此,光电导行进行闭环跟踪时,星像轨迹变化不存在旋转,只存在光轴变化量,如图 2 所示。遗憾的是不能在该平面上直接测量星像轨迹,

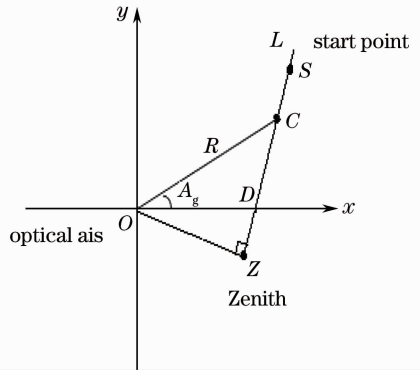


图 2 NVST 光学系统中 M4 平面上星像轨迹
Fig. 2 Star image movement in M4 plane of NVST optical system

但它与高分辨率成像系统之间的差别只是像的旋转。图 2 中,点 O 为光轴在 M4 上的位置,点 S 为镜筒指向东边或西边且高度接近地平时星像位置,点 Z 为望远镜指向天顶时星像位置。对星进行东升西落的连续观测时,星像在直线 L 上的运动就是光轴的变化,且从点 S 运动到点 Z 再回到点 S,点 S 与点 Z 之间的距离就是最大光轴弯沉量。设点 C 代表某时刻星像的位置,点 C 到光轴点 O 的距离为 R,转角 A_g 为它与点 O 之间连线对 x 轴正向的夹角。则 R 和 A_g 可由(1)式表示。

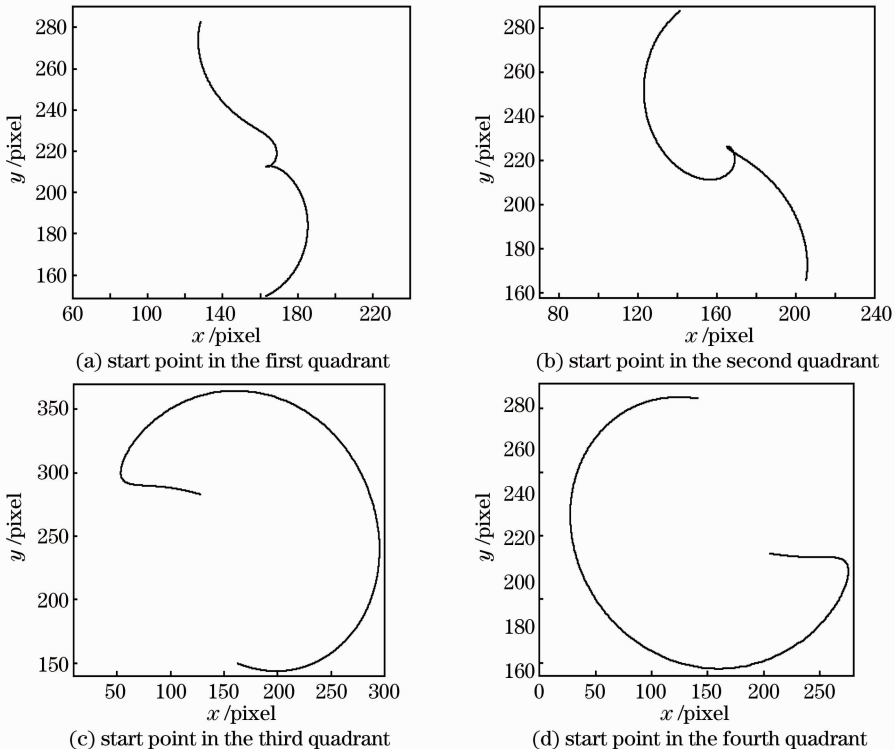


图 3 NVST 高分辨率成像系统在 CCD 平面上的星像轨迹

Fig. 3 Star image movement in the CCD plane of NVST high-resolution imaging system

$$R = \sqrt{x_c^2 + y_c^2}, \quad A_g = \arctan\left(\frac{y_c}{x_c}\right). \quad (1)$$

高分辨率成像系统星像旋转角为^[2]

$$\theta = (A - \pi) + (E - \pi/2) + A_g, \quad (2)$$

式中 A 为望远镜方位角。 E 为望远镜高度角。 当两光轴的初始偏差不同时,即对应于星像在 M4 上的不同初始点 A ,根据(1)式和(2)式,可以求得星像在高分率成像系统的 CCD 上的运动轨迹,如图 3 所示。

图 3(a)~(d)分别表示 NVST 主光学系统光轴与导星镜光轴有不同初始偏差,即分别对应星像起始点在 M4 平面的第 1~4 象限时,星像在高分辨率成像系统的 CCD 上的运动轨迹。模拟分析表明:1) 当光电导行闭环时,星像在高分辨率成像系统的 CCD 上的运动轨迹与光轴初始偏差关系很大;2) 从高分辨率成像系统的 CCD 上的运动轨迹中求解光轴变化需经过图 2 的模型进行反演,即先求像旋中心,再求 R ,最后求 C 相对于点 S 或点 Z 的距离。

4 光轴变化的实测

4.1 实测方法

由于 NVST 主要考虑的是光电导行系统光轴与主光学系统光轴之间的相对变化,因此,事先要将望远镜指向天顶,调整两个光轴的平行度,并以此时

的光轴为基准,测定光轴之间的相对变化。根据 NVST 的运行情况,选取尽量接近天顶的亮星作为观测目标,然后对该星进行闭环跟踪,时间跨度为所能观测到该星的整个夜晚,对天气条件要求很高,空间跨度要求望远镜的镜筒指向高度从地平到天顶,尽量能达到望远镜高度能工作的极限范围。测量的方法为:1) 对星像在光电导行系统光轴上的位置闭环,测量星像在高分辨率成像系统中 CCD 上的位置变化^[17,18];2) 对星像在主光学系统光轴上的位置闭环,测量星像在光电导行系统中 CCD 上的位置变化。高分辨率成像系统中像的旋转与望远镜方位角和高度角都有关,方位轴和高度轴在 CCD 上的方向不断变化,方法 1 只能测到光轴整体变化。方法 2 中,星像在光电导行系统中 CCD 上的位置变化方向与望远镜方位轴和高度轴方向严格对应。因此,可以测到光轴分别在方位轴和高度轴两个方向的变化,但要事先采用方法 1 跟踪过中天的星来标定主光学系统光轴在高分辨率成像系统中 CCD 上对应的初始位置。因此,两种方法需要交叉测量。

4.2 实测结果

采用第 1 种方法测量时,即导行系统中的星像闭环,在高分辨率成像系统中记录星像轨迹变化,实测结果如图 4 所示。

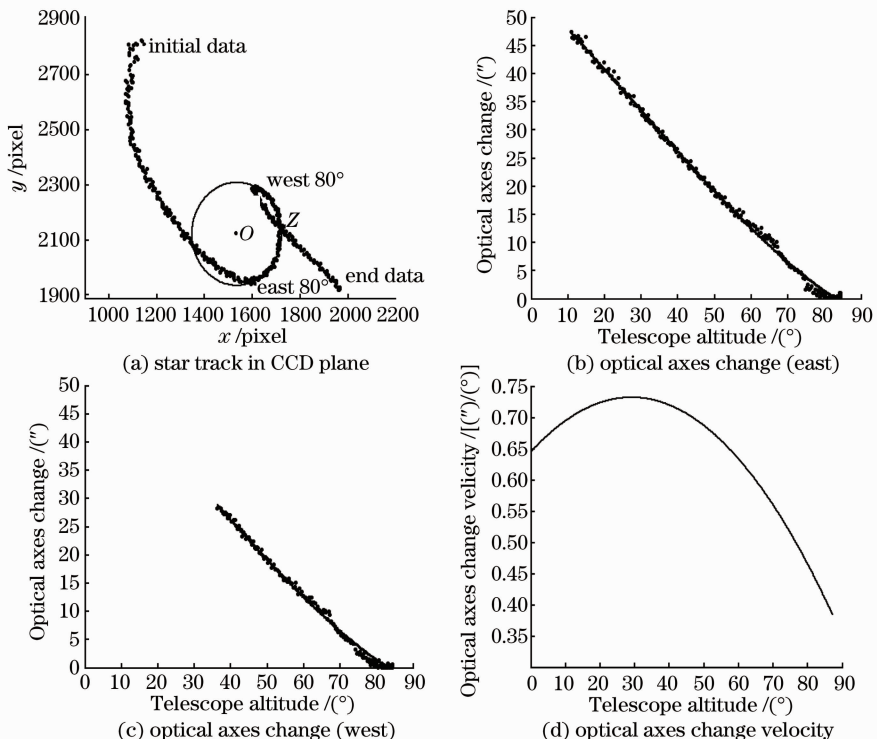


图 4 方法 1 的光轴相对变化实测结果

Fig. 4 Measured results of optical axes relative change by the first method

从图 4(a)可以看出,光电导行闭环时,高分辨率成像系统中星像变化轨迹不呈点或者圆形,表明 NVST 导行镜光轴与主光学系统光轴存在变化。图 4(a)经过图 2 所示的模型进行反演,得到图 4(b)和(c),分别表示过中天前后光轴变化随望远镜镜筒指向高度的变化。采用最小二乘法对图 4(b)拟合,得到光轴变化随镜筒指向高度的变化规律为

$$\delta = -0.053 \times (0.0012E^3 - 0.0984E^2 - 12.1285E + 1008.8). \quad (3)$$

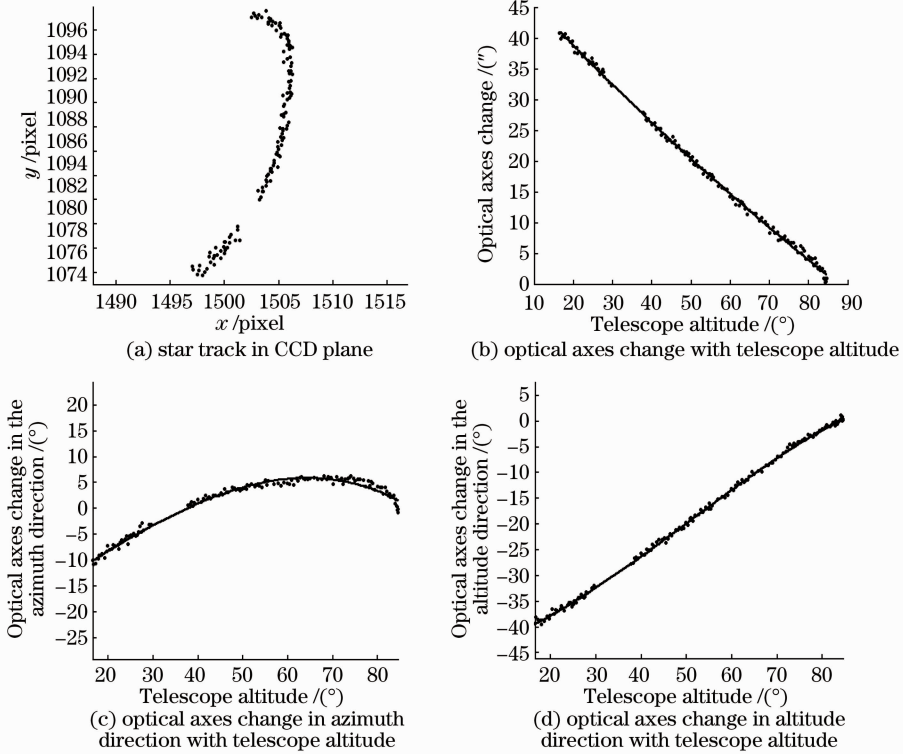


图 5 方法 2 的光轴相对变化实测结果

Fig. 5 Measured results of optical relative change by the second method

采用第 2 种测量方法,即对高分辨率图像中的星像闭环,测量星像在导行系统中的变化,测量结果如图 5 所示,所测结果图 5(b)与图 4(b)是基本相同的。从图 5(a)还可以方便地求出光轴在两个正交方向的变化,即望远镜的方位方向和高度方向,结果如图 5(c)和图 5(d)所示,随望远镜镜筒指向高度变化的变化规律为

$$\delta_A = -5.3532 \times 10^{-5} E^3 + 0.0008E^2 + 0.5638E - 19.4807, \quad (4)$$

$$\delta_E = -5.8598 \times 10^{-5} E^3 + 0.00089E^2 + 0.1995E - 144.8849. \quad (5)$$

(4)式和(5)式描述的光轴变化模型可用于光电导行系统对光轴变化的修正,经过模型修正后,再采用第 1 种方法测量 NVST 的光轴变化,得到模型修正前

该变化规律也能与图 4(c)吻合,表明光轴变化与镜筒指向的方位无关。镜筒指向高度从 10° 变化到 85° 时,光轴相对变化量约为 $46''$ 。根据(3)式,还可以得到光轴变化速率随镜筒指向高度角的变化关系。由图 4(d)所示,当镜筒指向高度由 0° 逐渐变大时,光轴变化速度逐渐增大,其中在高度角 30° 左右,光轴变化最快,速度为 $0.8''/(\circ)$,然后变化速度又逐渐减小。

后光轴的变化对比如图 6 所示。光电导行闭环引入模型修正光轴的相对变化后,跟踪误差基本不随望远镜的指向高度变化。

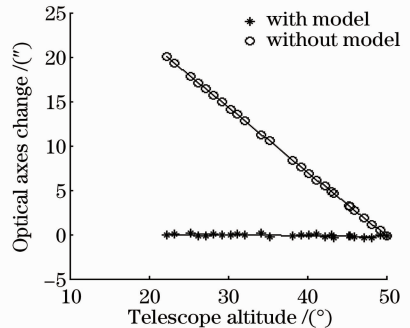


图 6 光轴变化修正前后的长时间跟踪误差对比

Fig. 6 Long tracking error with and without correction model of optical axes change

5 结 论

望远镜光轴变化与其具体的结构有关。对 NVST 来讲,主光学系统光轴与导行镜光轴之间的相对变化影响了光电导行闭环的长期跟踪精度,针对这一问题开展了研究工作,提出了适用于 NVST 的检测方法。实测的结果表明,光轴的最大相对变化量约 $46''$,镜筒指向高度在 30° 附近时,最大变化速度为 $0.8''/(\circ)$,约 $1.7''/10 \text{ min}$ 。因此,当 NVST 进行太阳光谱观测时,特别需要控制系统长时间高精度观测目标,光电导行闭环跟踪要考虑光轴变化。

参 考 文 献

- Liu Guangqian, Lu Ruwei. The image field rotation of the auto-guide unit of the solar telescope in yunnan observatory [J]. *Publications of Yunnan Observatory*, 2003, (4): 28~33
柳光乾, 卢汝为. 云台红外太阳望远镜中光电导行系统的像场旋转[J]. *云南天文台台刊*, 2003, (4): 28~33
- Liu Gangqian, Fu Yu, Cheng Xiangming. Image rotation and disrotatory control for the spectrum apparatus of one meter solar telescope [J]. *Astronomical Research & Technology*, 2012, **9**(1): 86~92
柳光乾, 付 玉, 程向明. 1米太阳望远镜光谱仪像旋转及消旋控制[J]. *天文研究与技术*, 2012, **9**(1): 86~92
- Zhou Chao, Yang Hongbo, Wu Xiaoxia *et al.*. Structural analysis of ground-based large telescope[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, **19**(1): 138~145
周 超, 杨洪波, 吴小霞等. 地基大口径望远镜结构的性能分析[J]. *光学精密工程*, 2011, **19**(1): 138~145
- Cheng Xiangming, Chen Linfei, Xu Jun *et al.*. Mechanical design of the auto-guiding telescope of the YNST [J]. *Astronomical Research & Technology*, 2011, **8**(2): 196~204
程向明, 陈林飞, 许 骏等. YNST 光电导行镜机械设计[J]. *天文研究与技术*, 2011, **8**(2): 196~204
- G. Hussain, M. Ikram. Optical measurements of angle and axis of rotation[J]. *Opt. Lett.*, 2008, **33**(6): 2419~2421
- G. Moretto, J. R. Kuhn. Optical performance of the 6.5-m off-axis new planetary telescope[J]. *Appl. Opt.*, 2000, **39**(16): 2782~2789
- He Yumei, Tang Guomao. Alignment for radial Hartmann test system[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(S2): 243~247
何玉梅, 汤国茂. 径向哈特曼检测系统的光轴对准[J]. *中国激光*, 2009, **36**(S2): 243~247
- Zhang Chu, Zhou Bing, Shen Xueju *et al.*. Study of the calculation method for accurately adjusting laser-range-finder's three-optic-axes to parallel to each other[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2002, **10**(6): 650~654
张 维, 周 冰, 沈学举等. 精确校正激光测距仪三光轴平行的理论计算方法研究[J]. *光学精密工程*, 2002, **10**(6): 650~654
- Ling Jun, Liu Bingqi, Zhao Xilin. The comparison and discussion of several testing methods about optical-axis parallelism[J]. *J. Appl. Opt.*, 2003, **24**(1): 43~45
凌 军, 刘秉琦, 赵熙林. 几种光轴平行性测试方法的比较与探讨[J]. *应用光学*, 2003, **24**(1): 43~45
- He Hehao, Ye Lu, Zhou Xingyi *et al.*. Theory and precision analysis of testing apparatus of parallel depth[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2007, **34**(5): 52~56
贺和好, 叶 露, 周兴义等. 平行度测试仪原理及其测量精度分析[J]. *光电工程*, 2007, **34**(5): 52~56
- Gao Ming, Feng Xiaoli, Zhao Wencai. Design of optical system for measuring the optical axis parallelism of multi axial system in field[J]. *Optical Technique*, 2011, **37**(1): 114~119
高 明, 冯小利, 赵文才. 外场多光轴平行性测试的光学系统设计[J]. *光学技术*, 2011, **37**(1): 114~119
- Huang Weijia. A discussion about measurement method of parallelism of optical axis of binocular telescope [J]. *Optical Instruments*, 2000, **22**(1): 7~10
黄卫佳. 双筒望远镜光轴平行度测量方法的讨论[J]. *光学仪器*, 2000, **22**(1): 7~10
- Hai Wang, Yuanxing Zhao. Pointing model for LAMOST experiment set[C]. *SPIE*, 2006, **6267**: 62673A
- R. L. Meeks. Improving Telescope Mechanical Errors Estimates Using Pointing Data[D]. Colorado: Colorado State University, 2003
- R. L. Meeks. Sources of uncertainty in telescope pointing models[C]. *SPIE*, 2004, **5497**: 140~148
- Mao Wei, Ji Kaifan, Li Binhua *et al.*. Celestial Measuring Based on CCD[M]. Kunming: Yunnan Technology Press, 2003
冒 蔚, 季凯帆, 李彬华等. CCD 天体测量学[M]. 昆明: 云南科技出版社, 2003
- Ding Xiaohua, Liu You, Yu Qifeng *et al.*. CCD noise calibration and its application in edge location[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(1): 99~104
丁晓华, 李 由, 于起峰等. CCD 噪声标定及其在边缘定位中的应用[J]. *光学学报*, 2008, **28**(1): 99~104

栏目编辑:何卓铭