

doi: 10.3969/j.issn.1000-8349.2024.02.12

上海天文馆双焦点可切换一米望远镜 主焦点的天体测量精度评估

方文奉^{1,2}, 姚嵩³, 于涌^{1,2}, 王磊³, 单星美³, 慎露润¹, 王琦¹,
陈振东¹, 林清³, 杜芝茂³, 姚迦文³

(1. 中国科学院上海天文台, 上海 200030; 2. 中国科学院大学天文与空间科学学院, 北京 100049; 3. 上海天文馆(上海科技馆分馆), 上海 201306)

摘要: 上海天文馆望舒天文台的双焦点可切换一米望远镜是目前国内建成的最大口径的科普天文望远镜。该望远镜采用人工切换主焦点和耐式焦点的双焦点设计方案, 耐式焦点主要应用于大众科普的目视观测, 主焦点配备了大靶面科学级 CMOS 终端, 视场达到 $1.5^\circ \times 1.1^\circ$ 。较大的观测视场除了适合开展重要的天象直播活动以外, 还可以充分应用于新星和超新星巡天搜索、太阳系小天体和人造天体监测等科研课题的研究。基于实测资料, 对该望远镜主焦点的天体测量精度进行分析评估, 结果表明: 对于信噪比大于 5 的星象, 星象位置的重复测量精度优于 0.1 pixel; 当信噪比为 30 时, 重复测量精度优于 0.05 pixel。以高精度的 Gaia DR3 星表作为参考星表, 分析得出该望远镜主焦点 CMOS 观测图像的非线性特征明显, 归算时需要用到 3 阶 (20 参数) 模型。对于测试观测资料, 亮于 15 mag 的恒星观测精度约为 0.05"; 观测精度随着星等变暗逐渐下降, 17.5 mag 的恒星观测精度约为 0.1"。

关键词: 望远镜; 底片参数模型; 精度分析

中图分类号: P123.2+2 **文献标识码:** A

1 引言

上海天文馆双焦点可切换一米望远镜 (Double-focus One-meter Telescope, DOT), 是一台以 R-C 系统为基础的地平式望远镜, 主镜有效口径为 1 m, 采用人工切换主焦点和耐式焦点的双焦点设计方案, 如图 1 所示。DOT 望远镜置于上海天文馆望舒天文台, 地处上海市浦东新区临港新城, 于 2021 年吊装并初调完成。DOT 望远镜的设计用途主要为夜间公众观测和天文摄影, 同时可用于开展学生科教和部分科研课题研究。

收稿日期: 2023-11-02; 修回日期: 2023-12-19

资助项目: 国家重点研发计划 (2022YFE0116800); 国家自然科学基金 (12073062)

通讯作者: 姚嵩, yaos@sstm.org.cn



图 1 上海天文馆双焦点可切换一米望远镜

DOT 望远镜是目前国内已建成的最大口径的科普天文望远镜。国际上可供借鉴的类似望远镜有日本群馬县立天文台 1.5 m 口径望远镜^[1]、韩国国立果川科学馆的 1 m 口径反射望远镜^[2]等, 这些望远镜在使用目镜对大众开展科普工作的同时, 也配置了光谱仪、科学级相机等专业仪器进行天文学研究。类似地, DOT 望远镜在耐式焦点下提供了目视观测系统, 可服务于大众科普宣传。主焦点配备了大靶面科学级 CMOS 终端, 具有大视场的特点, 在实际应用中除了可以开展展源天体科普观测和月食等天象直播活动之外, 也期望能够在新星和超新星巡天搜索、太阳系天体和人造天体的监测等一些科研观测方面发挥作用。据调研, 目前对太阳系天体和人造天体等目标的地基观测精度通常在几十至几百毫角秒量级, 例如, 张西亮等人利用丽江 2.4 m 望远镜开展近地小行星定位观测, 精度优于 $0.3''$ ^[3]; 严丹等人利用云南天文台 1 m 望远镜开展海王星卫星观测, 精度为 $0.03''$ ^[4]; 张会彦等人利用上海天文台 1.56 m 望远镜观测海王星卫星和天王星卫星, 观测精度为 $0.02'' \sim 0.3''$ ^[5, 6]。为了证明 DOT 望远镜主焦点也能开展类似工作, 其天体测量精度成为一个重要的性能指标, 对望远镜可开展的课题选择有参考和指导意义。本文第 2 章介绍望远镜主要参数和试验观测数据情况, 第 3 章为观测图像处理 and 天体测量精度分析, 第 4 章为结束语。

2 望远镜参数与观测资料

DOT 望远镜主焦点焦比为 $f/2$, 工作波长为 $400 \sim 800 \text{ nm}$, 配备了一台科学级彩色 CMOS (QHY411) 相机, 其阵列为 $14\,304 \times 10\,748 \text{ pixel}$, 像素尺寸为 $3.76 \mu\text{m}$, 观测视场为

$1.5^{\circ} \times 1.1^{\circ}$ 。QHY411 相机的响应带宽为 $400 \sim 1000 \text{ nm}$ ，量子效率峰值达到 0.92。在观测期间，该相机采取半导体风冷方式制冷，芯片温度低于环境温度约 -30°C 。为评估 DOT 望远镜主焦点的天体测量精度，2023 年 9 月 6 日对 3 个天区开展了观测，观测信息列于表 1，曝光时间为 10 s，没有使用滤光片。相机采用 $\text{binning}=2$ 模式，对应空间角分辨率为 $0.73''/\text{pixel}$ 。图 2 为一幅典型的观测图像示例。图 3 为星象半峰全宽的直方分布图， x 方向均值为 2.76 pixel ($2.0''$)， y 方向均值为 2.48 pixel ($1.8''$)。

表 1 3 个观测天区中心的位置和参考星数目

天区序号	赤经 (J2000)	赤纬 (J2000)	图像数目	参考星平均数
1	22h58min47s	$30^{\circ}26'41''$	40	2 066
2	22h58min47s	$30^{\circ}56'33''$	20	2 474
3	22h59min10s	$29^{\circ}56'41''$	10	1 206

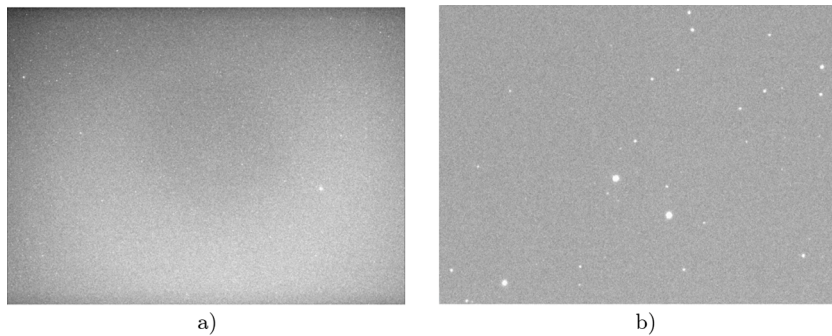


图 2 a) 为 DOT 望远镜主焦点观测图像示例 ($\alpha: 22\text{h}58\text{min}47\text{s}$, $\delta: 30^{\circ}56'33''$)；b) 为视场中央区域 ($9.4' \times 6.2'$) 的放大

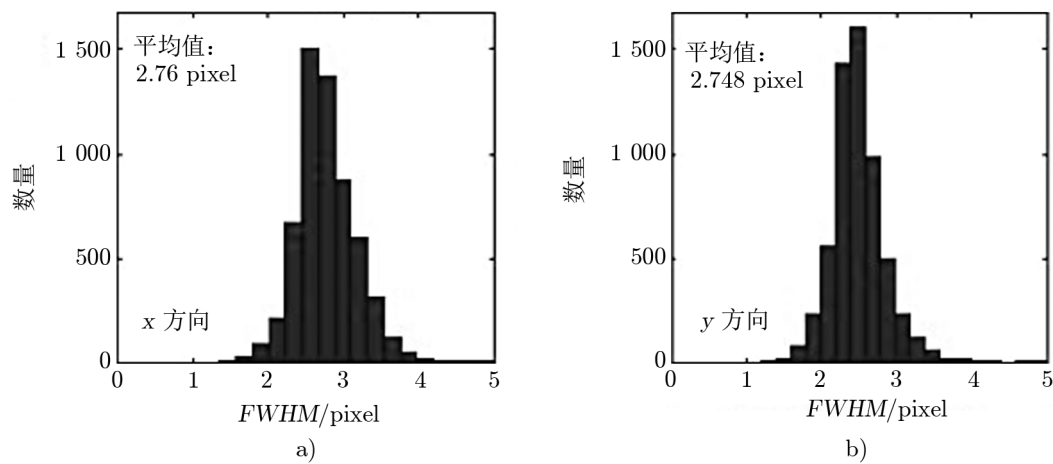


图 3 星象半峰全宽的分布

3 观测图像处理与精度分析

3.1 观测图像处理

观测图像处理包括图像预处理、星象检测与量度坐标计算和恒星匹配识别等步骤。在图像预处理中, 首先对原始观测图像做本底、暗场和平场改正, 表 2 列出了预处理图像的信息, 然后对图像背景进行多项式拟合, 扣除天光引起的图像背景不均匀^[7]。星象检测采用“连通域方法”^[8], 星象量度坐标计算采用“二维修正矩”方法^[9], 恒星匹配识别采用“弧长匹配”方法^[10], 恒星星表选取 Gaia DR3 星表^[11, 12]。

表 2 预处理图像的信息

序号	图像类型	曝光时间/s	帧数	观测方式
1	本底	0.0	10	关闭天窗和镜头盖、0 s 曝光
2	暗场	10.0	10	关闭天窗和镜头盖、10 s 曝光
3	平场	0.1 ~ 0.5	16	傍晚、天顶附近天区

3.2 星象量度坐标的重复精度分析

利用同一天区的连续多帧观测图像, 考察星象量度坐标的重复精度, 它反映了观测图像噪声对星象位置测量的影响。首先, 通过共同星, 利用多项式拟合消除不同观测图像之间的像场平移、旋转和较差大气折射引起的像场形变; 然后, 对于每颗共同星, 计算多组星象量度坐标 (x 坐标和 y 坐标) 的标准偏差, 以表征星象量度坐标的重复性。取 20 帧星数较密集的主焦点观测图像, 包含约 2 400 颗恒星。图 4 表示星象量度坐标的标准偏差随星象信噪比的分布。可见, 随着星象信噪比的增加, 星象量度坐标的重复性总体变好: 当信噪比大于 5 (对应 $10^{0.7}$) 时, 星象量度坐标的重复测量精度优于 0.1 pixel; 当信噪比为 30 (对应 $10^{1.5}$) 时, 重复测量精度优于 0.05 pixel; 当信噪比进一步增加时, 星象越来越趋于饱和, 导致量度坐标的重复性略差。

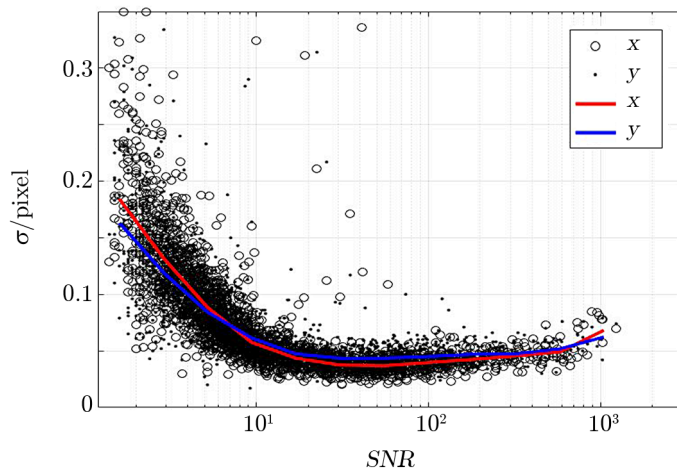


图 4 星象量度坐标的重复测量精度随星象信噪比的分布

3.3 底片参数模型分析

底片参数模型用来描述观测图像上量度坐标系与天球理想坐标系之间的系统差,包括平移、旋转、比例尺差和像场畸变。常见的底片参数模型有1阶(6参数)、2阶(12参数)、3阶(20参数)、4阶(30参数)等模型。上海天文馆 DOT 望远镜主焦点视场较大,约为 $1.5^\circ \times 1.1^\circ$ 。大视场的成像容易出现突出的非线性特征,需要通过实测资料的检验,确定观测图像的最佳底片参数模型。

我们以 Gaia DR3 作为参考星表,按照标准天体测量程序,将参考星由星表位置计算至观测方向,消除由较差大气折射和较差光行差等天文因素引起的星场形变;根据“心射投影”规则,计算得到参考星的理想坐标 (ξ, η) ;研究在不同底片模型下,参考星残差的分布和标准偏差结果,选取模型参数最少、标准偏差最小且残差分布随机的模型为最佳归算模型。对于 2023 年 9 月 6 日观测的全部 70 幅图像,图 5 展示出不同底片参数模型下的标准偏差结果。可见,当采用 3 阶模型时,标准偏差与更高阶模型的结果一致,此时全部图像的标准偏差均值为 $0.066''$ 。

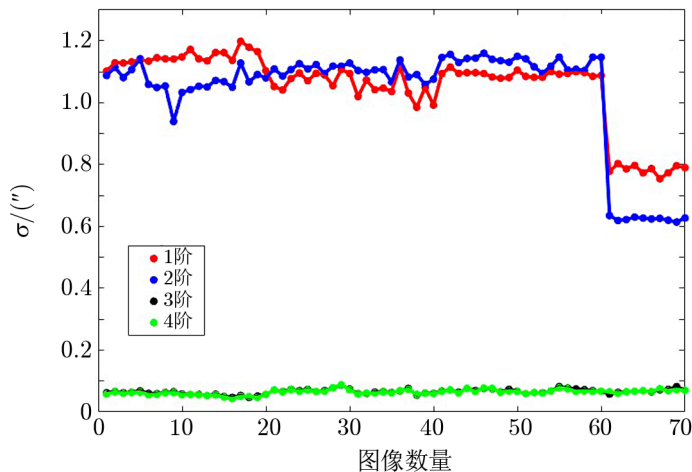
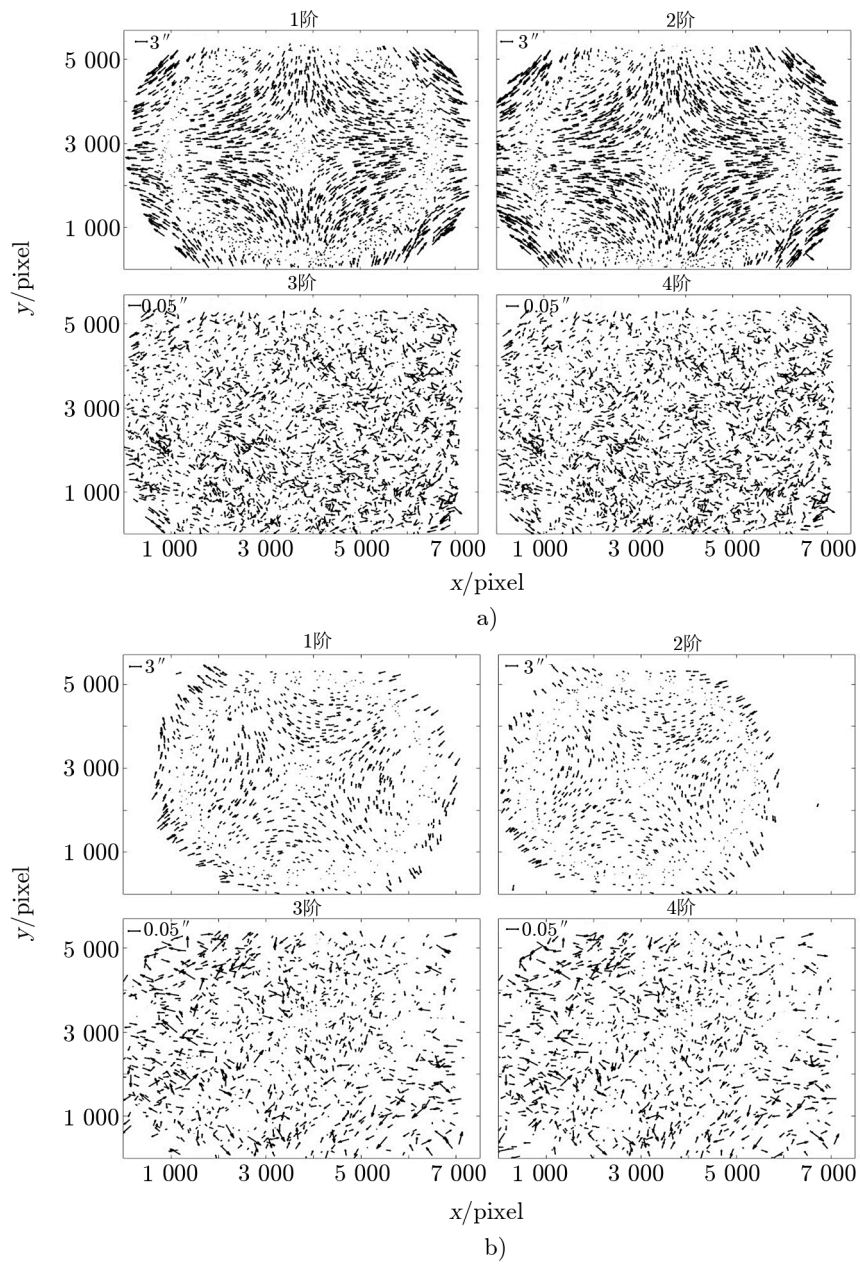


图 5 使用不同阶底片参数模型归算的参考星标准偏差结果

值得注意的是,在采用 1 阶和 2 阶模型归算时,后 10 幅图像的标准偏差相比于前 60 幅发生较大变化,而 3 阶和 4 阶模型的结果则相对稳定。其主要原因为,受天气变化影响,后 10 幅图像的参考星数量降低近一半,这种改变在底片模型不准时显著影响模型参数的拟合,同时因“ 3σ ”规则剔除了残差超限的参考星,导致 1 阶和 2 阶模型归算时的标准偏差结果降低。我们以第 60 幅和第 61 幅观测图像为例,图 6 为采用不同阶底片参数模型归算时的参考星残差分布图。可见,采用 1 阶和 2 阶模型时,参考星残差存在显著的系统性畸变;采用 3 阶模型时,残差表现为随机分布,并且与 4 阶模型的结果一致。这表明对于上海天文馆 DOT 望远镜的主焦点观测,3 阶底片参数模型最佳,可以准确描述观测图像的成像模式。



注: a) 为第 60 幅图像, 参考星数量为 2 433 颗; b) 为第 61 幅图像, 参考星数量为 1 133 颗。

图 6 使用不同阶底片参数模型归算的参考星残差分布

3.4 天体测量精度分析

为了分析 DOT 望远镜主焦点的天体测量精度, 以 Gaia DR3 作为参考星表, 在采用 3 阶底片参数模型归算情况下, 研究不同星等下的位置残差。对于亮于 18 mag 的恒星, Gaia DR3 星表提供的恒星位置精度、视差和年自行精度优于 0.1 mas, 因此, 参考星位置残差完全反映了设备本身的观测误差。我们以 0.5 mag 为步长, 根据

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum \Delta^2}{n}}, \quad (1)$$

计算不同星等区间的均方根误差, 其中 Δ 为每颗参考星的观测误差, n 为参考星的数目。图 7 表示参考星归算位置残差、均方根误差和参考星数量随星等的分布。可见, 对于亮于 15 mag 的恒星, 观测精度约为 0.05", 观测精度随着星等变暗逐渐下降, 17.5 mag 的恒星观测精度约为 0.1"。

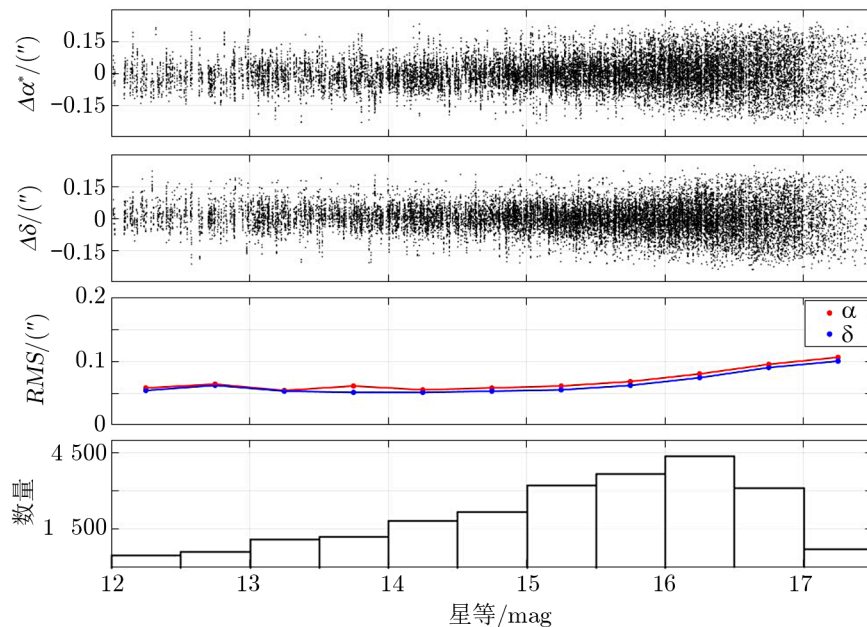


图 7 参考星归算位置残差、均方根误差和参考星数量随星等的分布

4 结束语

DOT 望远镜是目前国内建成的最大口径的科普天文望远镜。该望远镜耐式焦点主要应用于大众科普的目视观测, 主焦点配备了大靶面科学级 CMOS 终端, 视场达到 $1.5^\circ \times 1.1^\circ$ 。较大的观测视场除了适合开展重要的天象直播活动, 还可以充分应用于新星和超新星巡天搜索、太阳系小天体和人造天体监测等科研课题的研究。

本文基于实测资料, 对 DOT 望远镜主焦点的天体测量精度进行分析, 结果表明: 对于信噪比大于 5 的星象, 星象量度坐标的重复精度优于 0.1 pixel; 当信噪比为 30 时, 星象量度坐标的重复精度优于 0.05 pixel。以 Gaia DR3 星表作为参考, 本文比较了 4 种模型的归算结果, 得出: DOT 望远镜主焦点 CMOS 观测的非线性特征明显, 即在底片参数模型中, 星象量度坐标 (x, y) 对理想坐标 (ξ, η) 的影响达 3 次方项, 考虑 3 阶 (20 参数) 底片模型后, 对于测试观测资料, 亮于 15 mag 的恒星观测精度约为 0.05", 观测精度随着星等变暗逐渐下降, 17.5 mag 的恒星观测精度约为 0.1"。本项测试工作显示, DOT 望远镜主焦点天体测量性能与常规地基天文望远镜观测精度相当。本文工作为今后利用该望远镜开展具体科研课题观测提供有价值的参考依据。

参考文献:

- [1] Hashimoto O, Malasan H L. J Phys: Conf Ser, 2019, 1231: 012015
- [2] Gwacheon National Science Museum (sciencecenter.go.kr). <https://www.sciencecenter.go.kr/scipia/display/planetarium/observation>, 2024
- [3] Zhang X L, Yu Y, Wang X L, et al. Research in Astronomy and Astrophysics, 2015, 15: 435
- [4] Yan D, Qiao R C, Zhang H Y, et al. Icarus, 2022, 372: 114728
- [5] Zhang H, Yu Y, Yan D, et al. Research in Astronomy and Astrophysics, 2022, 22: 035006
- [6] Zhang H Y, Qiao R C, Yu Y, et al. AJ, 2022, 164: 37
- [7] 于涌, 李岩, 毛银盾, 等. 天文研究与技术, 2013, 10(4): 359
- [8] 李仪芳, 刘景琳. 科学技术与工程, 2008, 8(9): 2492
- [9] 冒蔚, 季凯帆, 李彬华. CCD 天体测量学. 昆明: 云南科技出版社, 2003: 62
- [10] 于涌, 毛银盾, 李岩, 等. 中国科学院上海天文台年刊, 2010, 31: 89
- [11] Gaia Collaboration. A&A, 2016, 595: A1
- [12] Gaia Collaboration. A&A, 2022, 674: A1

Evaluation of Astrometric Performance at the Prime Focus of the Double-focus One-meter Telescope at the Shanghai Astronomy Museum

FANG Wen-feng^{1,2}, YAO Song³, YU Yong^{1,2}, WANG Lei³, SHAN Xing-mei³,
SHEN Lu-run¹, WANG Qi¹, CHEN Zhen-dong¹,
LIN Qing³, DU Zhi-mao³, YAO Jia-wen³

(1. Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China;
2. School of Astronomy and Space Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
3. Shanghai Astronomy Museum(Branch of Shanghai Science and Technology Museum), Shang-

hai 201306, China)

Abstract: The Double-focus One-meter Telescope, located at the Wangshu Observatory of the Shanghai Astronomy Museum, is currently the largest aperture telescope dedicated to popular science in China. The telescope adopts a dual-focus design scheme that allows manual switching between the prime and Nasmyth focus. The Nasmyth focus primarily serves visual observations for popular science, while the prime focus is equipped with a scientific-grade CMOS sensor, offering a field of view of $1.5^\circ \times 1.1^\circ$. The larger field of view is suitable not only for live broadcast events but also for extensive research on various topics such as surveys of novae and supernovae, investigations of small celestial bodies in the solar system, and monitoring of artificial satellites. The astrometric precision at the prime focus of the telescope was analyzed and evaluated based on actual observation data. The results indicate that for star images with a signal-to-noise ratio greater than 5, the repeatability of measured coordinates is better than 0.1 pixel. When the signal-to-noise ratio is 30, the repeatability improves to better than 0.05 pixel. Using the high-precision Gaia DR3 catalog as the reference, the analysis reveals the presence of significant non-linear characteristics in the observation images obtained at the prime focus of the telescope. Consequently, a 3-order model (20-parameter) is necessary for data reduction. For the test observation data, the observational precision for stars brighter than 15th magnitude is approximately $0.05''$, with the precision decreasing gradually as the magnitude becomes fainter. The observational precision for 17.5th magnitude is around $0.1''$.

Key words: telescope; plate parameter model; accuracy analysis