

基于曲率传感的主焦巡天望远镜集成检测方法

安其昌^{1,2*}, 吴小霞^{1,2}, 李洪文^{1,2}, 蔡雨岐³

(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. 吉林省智能波前传感与控制重点实验室, 吉林 长春 130033;

3. 哈尔滨工业大学, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要:通过对望远镜进行曲率波前感知, 以更好地实现主焦巡天望远镜的集成检测。首先, 利用傅立叶光学理论分析了主焦巡天望远镜曲率传感过程以及多环节动态稳定性传递基本原理。其次, 对主焦巡天望远镜集成检测中的静态校正与动面形测量过程进行误差分析。然后, 分析了调节过程中的自由度锁定。最后, 通过实验实现了集成检测过程的原理贯通。所获得的波前探测残差优于 $0.08\lambda(\lambda=633\text{ nm})$ 。空间分辨率为 0.1 m , 时间分辨率为 0.2 Hz 。本方法可有效提升主焦点大口径大视场望远镜的成像质量, 利用曲率传感非干涉、高鲁棒的特点, 降低了集成检测过程对外界环境稳定性的需求, 为未来更加精细的时域天文学观测提供助力。

关键词:曲率传感; 波前像差; 主焦巡天望远镜; 集成检测

中图分类号: TH751

文献标志码: A

doi: 10.37188/CO.2023-0010

Assembling and test method for main focus survey telescope based on curvature sensing

AN Qi-chang^{1,2*}, WU Xiao-xia^{1,2}, LI Hong-wen^{1,2}, CAI Yu-qi³

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences,

Changchun 130033, China;

2. Jilin Provincial Key Laboratory of Intelligent Wavefront Sensing and Control, Changchun 130033, China;

3. Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

* Corresponding author, E-mail: anjj@mail.ustc.edu.cn

Abstract: The integrated detection of the main focus telescope is realized by sensing the curvature wavefront of the telescope. First of all, the curvature sensing process of the main focus telescope and the basic principle of dynamic stability transfer in multiple links are analyzed using Fourier optics theory. Secondly, the error analysis of static correction and dynamic surface shape measurement in the integrated detection of the main focus telescope is carried out. After that, the degree of freedom locking in the adjustment process is

收稿日期: 2023-01-06; 修订日期: 2023-02-05

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No. 62005279, No. 12133009); 中国科学院青年创新促进会 (No. 2020221); 吉林省科技发展计划 (No. 20220402032GH)

Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 62005279, No. 12133009); the Youth Innovation Promotion Association of CAS (No. 2020221); Jilin Science and Technology Development Program (No. 20220402032GH)

analyzed. Finally, the principle of the integrated detection process is realized through experiments. The obtained wavefront detection residual is better than 0.08λ ($\lambda=633\text{ nm}$). The spatial resolution is $10/\text{m}^{-1}$, and the temporal resolution is 0.2 Hz . This method can effectively improve the imaging quality of main focus telescope with the large-aperture large-field, and reduce the demand for the stability of the external environment in the integrated detection process by using the non-interference and high robustness characteristics of the curvature sensor, so as to provide assistance for the more detailed time-domain astronomical observation in the future.

Key words: curvature sensing; wavefront aberration; main focus telescope; integrated detection

1 引言

暗物质与暗能量的高精度观测,对于构建更加准确的宇宙模型具有十分重要的意义。引力透镜巡天作为暗物质、暗能量观测的重要“探针”,可对暗物质、暗能量分布进行精细描绘,对于验证暗物质模型(冷暗物质、混合暗物质及热暗物质模型)以及揭示暗能量本质均有十分重要的意义。

全景巡天望远镜和快速反应系统(Panoramic Survey Telescope And Rapid Response System, Pan-STARRS)、盖亚全天天体测量干涉仪(Global Astrometric Interferometer for Astrophysics, Gaia)、大型巡天望远镜(Large Synoptic Survey Telescope, LSST)等正在开展的快速重复、大视场的照相巡天,将获取大量引力透镜数据^[1-4],为探索暗物质与暗能量的形成、分布和演化提供重要线索。

精细引力透镜观测对星点椭圆率等参数的要求也空前提高,传统方法无法实现对系统的全面表征。同时,为对更加暗弱的目标成像,需要进行极深场曝光,传统观测任务中,亮度较小的杂散光与天光地影的影响将随着积分时间的延长而加剧,彻底改变了现有的扰动误差统计学特性。本文拟通过对波前、频率、传递函数等进行多维度融合全息感知,最终面向集成检测以及主动调控过程(二者的区别仅限于调节范围以及可控自由度)构建有效的补偿机制。

波前传感方案按照处理数据来源可分为光瞳面波前传感以及焦平面波前传感^[5-10]。哈特曼传感器作为历史悠久的瞳面波前探测器件在 Hobby Eberly Telescope、Southern African Large Tele-

scope 等通用望远镜以及 Large Sky Area Multi-Object Fiber Spectroscopy Telescope 等光谱巡天望远镜上有着广泛的应用^[11-12]。但是以上望远镜每个观测周期仅仅需要波前传感系统工作几次,因此,其空间与时间分辨率均存在局限性。大口径大视场主动光学照相巡天望远镜除了有较高的时空分辨率要求外,由于其具有视场大、元件失调敏感、遮拦比高、焦面空间紧张等特点,其波前传感系统需要做到实时测量且不能附加过多的校正光路。不仅如此,广义的主动光学系统还包括热控系统,通过与热控系统的协同与后期数字化补偿。可有效提升精细巡天观测的科学产出能力。

2 曲率传感基本原理

曲率传感器是由 Roddier 在 1988 年所提出的,其基本原理为通过焦前与焦后像的光强分布估计波前曲率变化,并解算波前信息,由于其可以适应紧张的焦面空间与视宁极限观测模式,同时可与探测系统采用相同的器件,便于系统封装、图像采集以及后期维护,已广泛应用于现有的大口径大视场望远镜波前传感系统之中。

利用复光场理论可以表征波前信息,如式(1)所示:

$$W(x, y) = P(x, y)e^{j\Phi(x, y)}, \quad (1)$$

其中, $P(x, y)$ 、 $\Phi(x, y)$ 分别为系统幅值与相位, x , y 为光瞳坐标,而光强可以由复光场自身及其共轭的乘积获得,如式(2)所示:

$$I(x, y) = W(x, y)W^*(x, y), \quad (2)$$

其中, $W(x, y)$ 为系统波前根据曲率传感的基本原

理, 波前相位曲率与光强沿光轴方向的差分成正比, 如式(3)所示。

$$\frac{I_1(x,y) - I_2(x,y)}{I_0 \cdot 2\Delta z} \approx -\nabla^2 \Phi(x,y) \quad (3)$$

其中, $I_1(x,y)$, $I_2(x,y)$ 分别为焦前焦后的能量分布, I_0 为总光强值, Δz 为离焦量。利用式(3)进行波前曲率估计, 并基于波前曲率估计进行两次数值积分, 以获得波前原始表达, 根据所分解的各项 Zernike 多项式系数值, 以 Zernike 多项式作为基底的统一分解, 对系统的波前像差进行反馈调节。对望远镜系统进行调节迭代。曲率传感原理如图 1 所示。

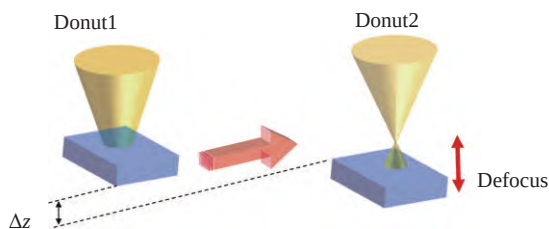


图 1 曲率传感原理图

Fig. 1 Schematic diagram of curvature sensing

主焦巡天望远镜校正镜组尺寸大、谐振低, 因此需要考虑其抖动(Jitter)对波前的影响^[13], 系统调制传递函数与传统的光学系统质量评价方法具有直接映射关系, 针对主焦巡天望远镜, 设 $PSF(x,y,t)$ 为 t 时刻的点扩散函数:

$$PSF_T = \frac{1}{T} \int_0^T PSF(x,y,t) dt \quad (4)$$

其中 PSF_T 为表征稳定性的动态点扩散函数, T 为积分时间。

根据 PSF 与 MTF 的关系, 即傅立叶变换, 第 i 个环节的 MTF 设为 $MTF_{T,i}$ 。总的 MTF_T 如式(5)所示, 可用于表征高频稳定性

$$MTF_T = \prod_{i=1}^N MTF_{T,i}(u,v,T) \quad (5)$$

其中, 其中 u,v 为空间频率, T 为积分时间, N 为系统环节总数。在静态光学系统评价的基础上, 利用动态传递函数可建立起机械谐振、系统控制以及光学系统之间的关系。最终实现对多时相边界交互效应在时空频域上的有效表征。

空间分辨率方面, 假设主镜为 10 m, 100 pixel × 100 pixel, 可得极限分辨率为 0.1 m。时间分辨率

方面, 大口径大视场主动光学望远镜为视宁极限系统, 因此, 需要长时间曝光仪平滑大气, 同时, 也需要考虑光电转化器件的读出时间, 因此, 积分时间与读出时间共计 5 s, 可得时间分辨率为 5 s (0.2 Hz)。波前传感测量的时间和空间分辨率分布如图 2 所示, 其中时间分辨率以对应带宽(横轴)表示, 空间分辨率以空间频率表示。在此, 需要利用曲率传感实现尽可能多的自由度感知(从二维图像获取多维层析数据), 并配合协调方程实现自由度锁定。通过两者协同作用实现大口径大视场望远镜的集成检测与主动调控。

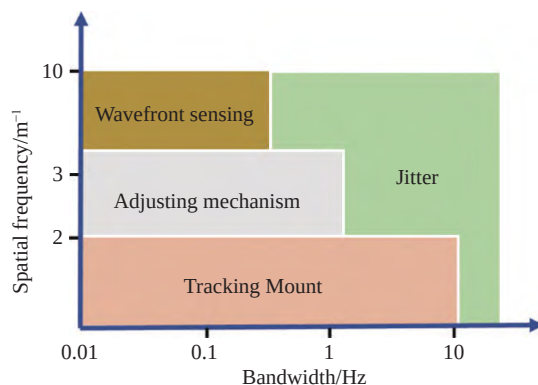


图 2 波前传感测量的时间和空间分辨率

Fig. 2 Time and spatial resolution of wavefront sensor measurement

3 曲率传感集成检测精度分析

为实现更加精细的观测, 需要使用波前传感系统对望远镜进行主动调控。根据曲率传感基本原理, 对带有中心遮拦的波前传感流程进行仿真验证。曲率传感波前传感分析如图 3(彩图见期刊电子版)所示, 基于菲涅尔衍射基本定理, 可得焦前与焦后的离焦星点像如图 3(a)~3(b) 所示。可见, 在自由空间传播过程中对离焦星点像的形态进行了调制。基于该调制过程, 并通过迭代收敛的方式兼顾大动态范围与高精度, 所获得波前如图 3(c) 所示, 可得波前传感精度优于 15%, 单次测量残差假设为 0.5λ ($\lambda=633$ nm), 通过一次迭代可使残差优于 0.08λ 。通过重建波前与原始波前对比可发现, 重建波前与原始波前的趋势相同, 在边界处, 存在少量的空间频率截断所产生的“振铃效应”, 但这仅影响高阶分量, 不影响主动光学波前传感与校正环节。

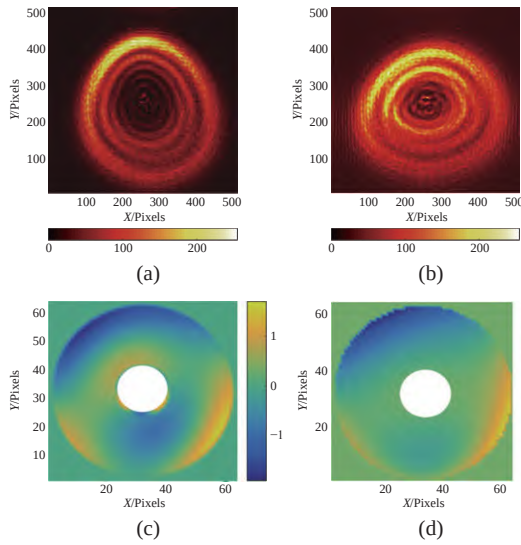


图3 波前复原精度验证实验结果。(a)焦前光强分布;(b)焦后光强分布;(c)重建波前;(d)原始波前

Fig. 3 Wavefront restoration accuracy verification experiment results. (a) Pre-focal light intensity distribution; (b) light intensity distribution of extra focus; (c) reconstructed wavefront; (d) original wavefront

4 集成检测过程抖动(Jitter)影响分析

大口径光电设备抖动误差具有来源复杂、能量传递总量大、边界非线性与异变性强等特点, Actively-Corrected Coronagraph for Exoplanet System Studies (ACCESS) 是美国航天局的下一代空间类地行星探索计划^[14], 为了实现超长时曝光, 以 36 个加速度计的分布式测量为反馈, 使光轴稳定性达到了 10 nrad。抖动作为一种影响中频稳定性的因素, 其来源主要为轴系转动、拖链机构传递、风载以及地基所传导的外部震动。由于主焦点组件校正镜组体积重量较大, 引起的谐振下降会进一步凸显抖动的影响。因此在集成检测过程中, 需要充分考虑抖动对最终检测效果的约束。本文采用曲率传感方式, 1 μm (RMS)抖动扰动下的波前如图 4(彩图见期刊电子版)所示。

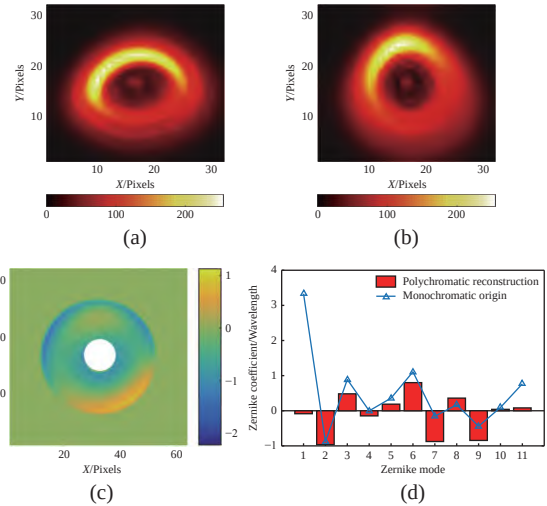
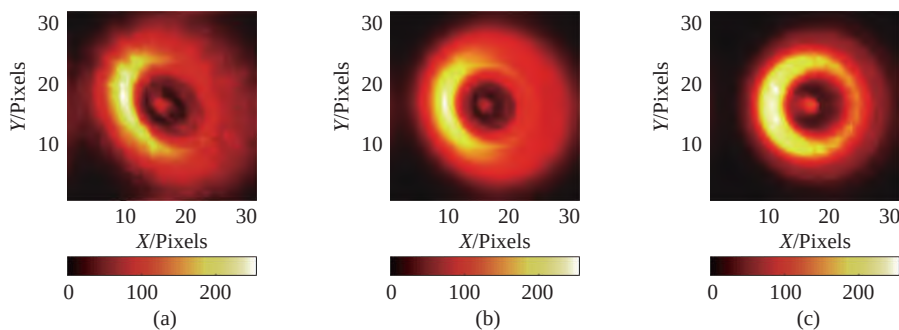


图4 1- μm 抖动影响下的波前感知情况。(a)焦前光强分布;(b)焦后光强分布;(c)重建波前;(d)多色重建波前与单色原始波前结果对比

Fig. 4 Wavefront perception under the influence of 1- μm Jitter. (a) Pre-focal light intensity distribution; (b) light intensity distribution of extra focus; (c) reconstructed wavefront; (d) comparison of reconstructed wavefront and original wavefront

5 倾斜自由度锁定与曲率传感

对于大口径大视场望远镜而言, 为了获得高质量成像结果, 需要实时修正系统失调所引入的像差, 同时还需要考虑光学元件自身的变形, 其主动光学系统所承担的任务艰巨。不仅如此, 所有光学形式的大口径大视场望远镜均对系统失调十分敏感, 不论是集成检测还是主动调控过程, 均需要尽可能降低系统自由度(降维)。主镜定位后, 需要对校正镜组件的倾斜误差进行调节。基于自由度与像差的映射关系, 结合力协调与位移协调约束方程, 明晰全视场内像差的竞争与再平衡机制, 最终实现自由度的锁定与协调。绕偏置点进行旋转过程中, 离焦星点像与对应波前如图 5(彩图见期刊电子版)所示。



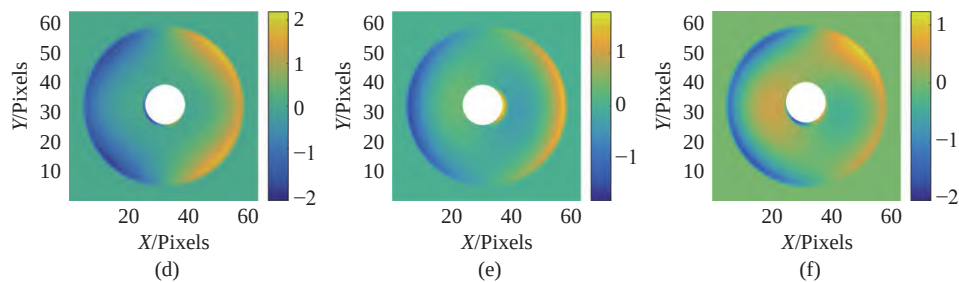


图5 绕偏置点旋转下的离焦星点像与系统波前。(a)第一次修正离焦星点像;(b)第二次修正离焦星点像;(c)第三次修正离焦星点像;(d)第一次修正系统波前;(e)第二次修正系统波前;(f)第三次修正系统波前

Fig. 5 The defocus donut and system wavefront under rotation around the offset point. (a) First corrected defocus donut; (b) second corrected defocus donut; (c) third corrected defocus donut; (d) first corrected system wavefront; (e) second corrected system wavefront; (f) third corrected system wavefront

若使该旋转中心引入的附加像差最小,即满足足像差校正的独立性。基于系统光学设计与外部载荷边界条件的对称性与周期性,与绕顶点旋转相比,采用一定偏置可保证轴上视场像差稳定,并在此基础上平衡轴外像差。绕偏置点倾斜焦前光强分布如图6所示。

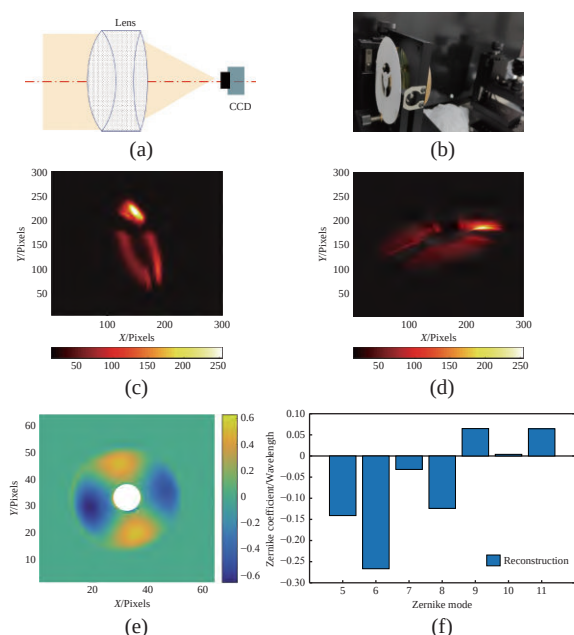


图6 利用单个透镜的验证平台与验证结果。(a)光路原理图;(b)实验现场图;(c)焦前光强分布;(d)焦后光强分布;(e)波前解算结果;(f)低阶像差估计

Fig. 6 Verification platform using single lens and its verification results. (a) Schematic diagram of optical path; (b) experimental set up diagram; (c) inter focus intensity distribution; (d) extra focus intensity distribution; (e) wavefront solution results; (f) low order aberration estimation

6 可行性验证实验

首先利用单个透镜验证轴外视场的感知能力。利用单个透镜的验证平台如图7所示。

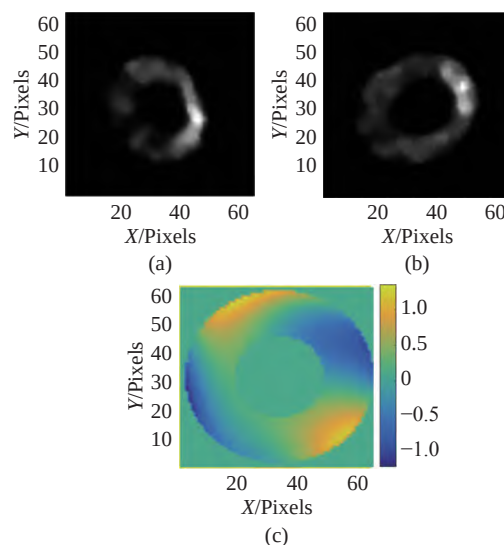


图7 外场实验验证结果。(a)焦前光强分布;(b)焦后光强分布;(c)波前解算结果

Fig. 7 Verification results of field experiment. (a) Intensity distribution of intra focus; (b) intensity distribution of extra focus; (c) wavefront solution results

利用望远镜对自然导星成像,验证在大气、温度、色散等诸多外界因素影响下的探测能力,验证平台及其检测结果如图7所示,与设计值 1λ ($\lambda=633\text{ nm}$)相比,像差类型(像散)与幅值(1.1λ ($\lambda=633\text{ nm}$))均一致。

7 结 论

传统的巡天望远镜仅以能量集中度作为反馈条件,无法实现高精度测光,面向下一代高精度时域天文研究。为实现更高的测量精度,需要对其多维参量进行感知与调控,进一步提高感知与调控能力。因此,本文对传统曲率波前探测方法进行了补充与改进,利用两幅同向离焦图提取波前

相位,选取临近视场的导星,同时保证其与视场的对称性。在提取星点像后,通过曲率传感计算波前。构建协调方程约束下的自由度与像差耦合映射关系。基于自由度锁定策略,实现主焦点组件调整,所获得的波前探测残差优于 0.08λ ($\lambda=633\text{ nm}$)。空间分辨率为 0.1 m ,时间分辨率为 0.2 Hz 。同时,在调节过程中,利用曲率传感非干涉、高鲁棒的特点,降低了对外界环境稳定性的需求。

参考文献:

- [1] 姜晰文,赵金宇,吕天宇,等. 大口径主焦点式光学系统的设计与装调[J]. 光学精密工程, 2022, 30(23): 2987-2994.
JIANG X W, ZHAO J Y, LV T Y, *et al.*. Design and alignment of large-aperture prime focus optical system[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2022, 30(23): 2987-2994. (in Chinese)
- [2] FLAUGHER B, BEBEK C. The dark energy spectroscopic instrument (DESI)[J]. *Proceedings of SPIE*, 2014, 9147: 91470S.
- [3] GREGGIO L, REJKUBA M, GONZALEZ O A, *et al.*. A panoramic VISTA of the stellar halo of NGC 253[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2014, 562: A73.
- [4] FLAUGHER B, DIEHL H T, HONSCHEID K, *et al.*. The dark energy camera[J]. *The Astronomical Journal*, 2015, 150(5): 150.
- [5] 安其昌,吴小霞,张景旭,等. 大口径主动光学巡天望远镜大动态范围曲率传感[J]. 红外与激光工程, 2021, 50(10): 20210224.
AN Q CH, WU X X, ZHANG J X, *et al.*. Large dynamic range curvature sensing for large-aperture active-optics survey telescope[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2021, 50(10): 20210224. (in Chinese)
- [6] SCHOBBER C, BEISSWANGER R, GRONLE A, *et al.*. Tilted wave Fizeau interferometer for flexible and robust asphere and freeform testing[J]. *Light:Advanced Manufacturing*, 2022, 3: 48.
- [7] 安其昌,姜晰文,李洪文,等. 基于差分传递函数法的大口径平面镜检测[J]. 中国光学(中英文), 2022, 15(5): 992-999.
AN Q CH, JIANG X W, LI H W, *et al.*. Detection of large aperture flat mirror based on the differential optics transfer function method[J]. *Chinese Optics*, 2022, 15(5): 992-999. (in Chinese)
- [8] GENG Z CH, TONG ZH, JIANG X Q. Review of geometric error measurement and compensation techniques of ultra-precision machine tools[J]. *Light:Advanced Manufacturing*, 2021, 2(2): 211-227.
- [9] FRATZ M, SEYLER T, BERTZ A, *et al.*. Digital holography in production: an overview[J]. *Light:Advanced Manufacturing*, 2021, 2(3): 283-295.
- [10] 朱沁雨,陈梅蕊,陆焕钧,等. 微透镜阵列衍射效应对夏克-哈特曼波前探测器的影响分析[J]. 中国光学(中英文), 2023, 16(1): 94-102.
ZHU Q Y, CHEN M R, LU H J, *et al.*. Analysis of influence of diffraction effect of microlens array on Shack-Hartmann wavefront sensor[J]. *Chinese Optics*, 2023, 16(1): 94-102. (in Chinese)
- [11] TYSON J A, WITTMAN D M, HENNAWI J F, *et al.*. LSST: a complementary probe of dark energy[J]. *Nuclear Physics B - Proceedings Supplements*, 2003, 124: 21-29.
- [12] VOSTEEN A, DRAAISMA F, VAN WERKHOVEN W, *et al.*. Wavefront sensor for the GAIA mission[J]. *Proceedings of SPIE*, 2010, 10565: 105650L.
- [13] HARTLIEB S, RINGKOWSKI M, HAIST T, *et al.*. Multi-positional image-based vibration measurement by holographic image replication[J]. *Light:Advanced Manufacturing*, 2021, 2(4): 425-433.
- [14] TRAUGER J, STAPELFELDT K, TRAUB W, *et al.*. ACCESS: a NASA mission concept study of an actively corrected coronagraph for exoplanet system studies[J]. *Proceedings of SPIE*, 2008, 7010: 701029.

作者简介:



安其昌(1988—), 男, 山西太原人, 博士, 副研究员, 中国科学院青促会会员。2011 年于中国科学技术大学获得工学学士学位, 2018 年于中国科学院大学获得博士学位, 现任职于中国科学院长春光机所, 研究方向为大口径光机系统检测装调。E-mail: anjj@mail.ustc.edu.cn

《发 光 学 报》

—EI 核心期刊(物理学类; 无线电电子学、电信技术类)

《发光学报》是中国物理学会发光分会与中国科学院长春光学精密机械与物理研究所共同主办的中国物理学会发光分会的学术会刊。该刊是以发光学、凝聚态物质中的激发过程为专业方向的综合性学术刊物。

《发光学报》于1980年创刊, 曾于1992年, 1996年, 2000年和2004年连续四次被《中文核心期刊要目总览》评为“物理学类核心期刊”, 并于2000年同时被评为“无线电电子学、电信技术类核心期刊”。2000年获中国科学院优秀期刊二等奖。现已被《中国学术期刊(光盘版)》、《中国期刊网》和“万方数据资源系统”等列为源期刊。英国《科学文摘》(SA)自1999年; 美国《化学文摘》(CA)和俄罗斯《文摘杂志》(AJ)自2000年; 美国《剑桥科学文摘社网站》自2002年; 日本《科技文献速报》(CBST, JICST)自2003年已定期收录检索该刊论文; 2008年被荷兰“Elsevier Bibliographic Databases”确定为源期刊; 2010年被美国“EI”确定为源期刊。2001年在国家科技部组织的“中国期刊方阵”的评定中, 《发光学报》被评为“双效期刊”。2002年获中国科学院2001~2002年度科学出版基金“择重”资助。2004年被选入《中国知识资源总库·中国科技精品库》。本刊内容丰富、信息量大, 主要反映本学科专业领域的科研和技术成就, 及时报道国内外的学术动态, 开展学术讨论和交流, 为提高我国该学科的学术水平服务。

《发光学报》自2011年改为月刊, A4开本, 144页, 国内外公开发行。国内定价: 40元, 全年480元, 全国各地邮局均可订阅。《发光学报》欢迎广大作者、读者广为利用, 踊跃投稿。

地 址: 长春市东南湖大路3888号

《发光学报》编辑部

邮 编: 130033

电 话: (0431)86176862, 84613407

E-mail: fgxbt@126.com

国内统一刊号: CN 22-1116/O4

国际标准刊号: ISSN 1000-7032

国内邮发代号: 12-312

国外发行代号: 4863BM

http://www.fgxb.org