

文章编号 1004-924X(2023)12-1735-06

基于条纹传感的大口径透镜检测方法

安其昌^{1,3}, 王 鹏^{1,2,3}, 刘欣悦^{1,3*}, 吴小霞^{1,3}, 李洪文^{1,3}, 王宝刚⁴, 郭 伟⁴

(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. 中国科学院大学, 北京 100039;

3. 吉林省智能波前传感与控制重点实验室, 吉林 长春 130033

4. 中国人民解放军 95975 部队, 甘肃 酒泉 732750)

摘要:为实现大口径透镜组的高质量集成,亟需一套透射波前检测系统,其可实现米级跨度上的微米级精度检测。针对大口径透射波前质量检测难题,采用非窄带干涉与条纹跟踪相结合的方法,获得元件相对倾斜以及支撑结构所引入的系统波前变化。首先,基于光纤互联架构,设计了子孔径分时复用测系统;其次,建立了斜率测量与最终系统波前的映射关系,分析了斜率重建过程对不同空间频率波前的影响;最后,利用桌面实验系统,针对探测原理进行了验证测试,在测试波长 1 550 nm 时,干涉感知信噪比优于 15 dB,测量范围优于 5 μm ,探测精度优于 0.5 μm 。本文所提出的方法可实现大口径透射波前大范围、高鲁棒、高精度的检测,具有重要的意义,特别是对于未来大口径大视场望远镜的建设。

关键词:大口径巡天望远镜;大口径透镜;光学检测;条纹追踪

中图分类号: TP394.1; TH691.9 **文献标识码:** A **doi:** 10.37188/OPE.20233112.1735

Detection method of large aperture lens based on fringe tracking

AN Qichang^{1,3}, WANG Kun^{1,2,3}, LIU Xinyue^{1,3*}, WU Xiaoxia^{1,3}, LI Hongwen^{1,3},

WANG Baogang⁴, GUO Wei⁴

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China;

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

4. People's Liberation Army 95975 troops, Jiuquan 732750, China)

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

Abstract: To achieve high-quality integration of large-aperture lens groups, a transmission wavefront detection system that can achieve micron-level accuracy detection on a meter-scale span is urgently needed. In this study, to solve the problem of large-aperture transmission wavefront quality detection, the relative tilt of components and the change in the system wavefront introduced by the support structure were obtained by combining non-narrowband interference with fringe tracking. First, according to the optical fiber interconnection architecture, a sub-aperture time-sharing multiplexing measurement system was designed. Second,

收稿日期:2022-11-03;修订日期:2023-01-17.

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

the mapping relationship between the slope measurement and the final system wavefront was established, and the effects of the slope reconstruction process on the wavefront at different spatial frequencies were analyzed. Finally, a desktop experimental system was used to validate the detection principle. At the test wavelength of 1550 nm, the interference-sensing signal-to-noise ratio was >15 dB, the measurement range was better than $5 \mu\text{m}$, and the detection accuracy was higher than $0.5 \mu\text{m}$. Using the proposed method, the large-aperture lens transmission wavefront can be detected over a wide range, with high robustness and high accuracy; this is of considerable significance for the construction of large-aperture large-field of view telescopes.

Key words: large aperture sky survey telescope; large aperture lens; optical detection; fringe tracking

1 引言

依托大视场望远镜进行高精度的暗物质、暗能量巡天观测,对于探索宇宙起源、完善宇宙学模型、预测宇宙演化方向均有着十分重要的意义。望远镜的分辨力与口径成正比、集光能力与口径的平方成正比。为观测到更加深远的宇宙与更加精细的星系结构以及扩展数据来源、提升探测效率,未来大视场巡天望远镜的口径将越来越大^[1-2]。

大口径大视场望远镜系统为了对星系结构形态进行长周期的精细观测(通过弱引力透镜效应研究暗物质作用机理等),对全视场的像差均有严格的限制^[3-4]。为实现该测量精度,除主镜等反射元件外,大口径透镜组(所有光学形式的大口径大视场望远镜均需配备)的集成检测所引入的误差也必须被严格控制^[5-7]。

目前,大口径透镜组集成检测方法可分为接触与非接触两条技术路线^[8-12]。对于接触测量,主要方法为三坐标测量(应用于初始的检测阶段)。该方法通过探测直接获取其几何厚度和镜面参数,但无法获得透镜组内部界面信息,同时也有可能划伤光学表面。非接触方法主要分为基于几何光学与物理光学两条技术路线。具体来说,几何光学方法利用各个界面的光线偏折,从而确定获得元件倾角与位置信息,包括图像法(基于各个镜面顶点的反射,范围大,精度低)以及轴向色散法(测量范围仅限于色散区通过各界面的共聚焦反射,精度高),但是,其缺点在于无法兼顾测量范围与精度,同时严重依赖透镜面形、材料折射率曲线等先验参数。而基于物理光学的测试方法,则利用相干光(差动共焦法、计算全息图)与部分相干光(光学相干层析)进行干涉测量。与几何光学方法相比,精度高、范围大,是下一代测量手段的发展趋势^[13]。但是,干涉元件

体积重量较大易受到外界扰动,同时,零位测量所需要的检具必须和待测系统一一对应,通用性降低、成本高,精度溯源困难。以上因素严重限制了干涉测量方法应用范围的进一步拓展。

2 检测系统的构成及其工作原理

本文针对大口径透镜组接触检测应用场景受限、精度不足以及干涉零位检测环境要求高、通用性差的现状,采用“光纤互联+非零位测量”的思路。通过光波导进行光子的输运与合成,有效降低系统体积重量^[14-18]。利用大数值孔径光纤在焦点处发射(光源),形成准平面波,基于部分零位检测方法,结合高效率光子耦合技术,实现条纹跟踪剪切差模测试,并基于斜率进行波前的重建。基于条纹传感的大口径透镜检测检测系统如图 1 所示。

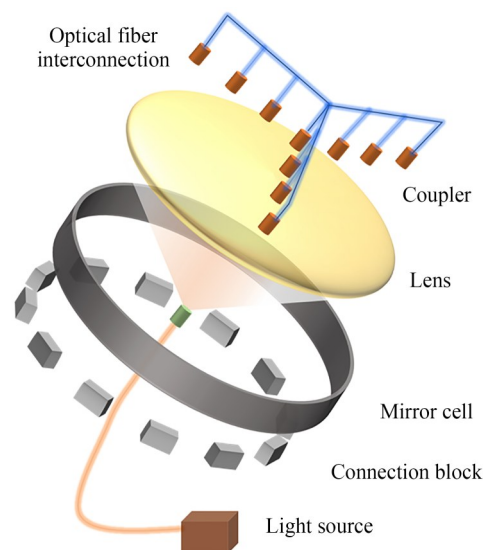


图 1 基于条纹传感的大口径透镜检测检测系统
Fig. 1 Detection system of large aperture lens based on fringe sensing

通过光纤连接,另相邻的两路发生干涉,宽带光干涉条纹强度为:

$$I_i^A = \left[|E_{i1}|^2 + |E_{i2}|^2 - 2|E_{i1}||E_{i2}|\sin\left(\frac{2\pi}{\lambda_i}(\delta_i)\right) \right] \text{sinc}\left(\frac{\delta_i}{\lambda_i^2}\Delta\lambda\right), \quad (1)$$

其中: $k_i = \frac{2\pi}{\lambda_i}$ 为波数, $|E_{i1}|^2$ 与 $|E_{i2}|^2$ 为分别为两路

$$\begin{aligned} FFT(I_i^A) = & FFT\left\{ \left[|E_{i1}|^2 + |E_{i2}|^2 - 2|E_{i1}||E_{i2}|\sin\left(\frac{2\pi}{\lambda_i}(\delta_i)\right) \right] \text{sinc}\left(\frac{\delta_i}{\lambda_i^2}\Delta\lambda\right) \right\} = \\ & \left[|E_{i1}|^2 + |E_{i2}|^2 \right] \text{rect}\left(\frac{\lambda_i^2\omega}{2\Delta\lambda(\delta_i)}\right) - 2j|E_{i1}||E_{i2}|\text{Delta}\left(\omega - \frac{2\pi}{\lambda_i}(\delta_i)\right), \end{aligned} \quad (2)$$

其中: $\text{Delta}(\bullet)$ 为脉冲函数, $\text{rect}(\bullet)$ 为方波, ω 为空间频率。 $i1, i2$ 分别表示干涉的束光, δ_i 是系统两路之间的光程差(Optical Path Difference, OPD),可见,干涉条纹具有特征频率 $k_i(\delta_i)$ 可通过频域获得。在此,假设两路的光强相同,针对实际的检测系统,可通过标校获取由于波导吸收,波导弯曲,向后散射,耦合过程等因素所引入的相位误差与强度衰减。

在获得两路的相位差 δ_i 后,由于采样间距 l_i 已知,因此,可获得该处的波前斜率 S_i 。波前 W_i 则为斜率的一次数值积分,如式(3)所示:

$$W_i = \sum S_i l_i. \quad (3)$$

特定口径排布仅可以针对特定的空间频率,针对不同的口径排布,利用式(2),可建立异构子孔径下的宽带条纹追踪理论模型,并对透射波前不同的空间频率进行测试。

3 仿真分析

大口径透镜组的集成检测均采用定心仪安装的方法(如DECAM, SUBARU等),其基本假设为透镜的顶点近似为平面,并利用该平面进行光线反射与元件位姿的计算。针对球面镜而言,该检测边界较容易满足。

未来的大口径透镜组为追求更强的像差校正能力,越来越多地采用自由曲面,其顶点斜率偏离平面较大(其顶点斜率误差所带来的影响在米级的口径上也加剧了失调);不仅如此,利用定心仪仅能约束元件的偏心与倾斜两个自由度,而对于未来的大口径透镜组集成检测,需要更高阶

光强, λ 是通道光谱中心波长, $\Delta\lambda$ 是带宽; $i1, i2$ 分别表示干涉的束光, δ_i 是系统两路之间的光程差(OPD), λ_i 和 $\Delta\lambda$ 是已知的。

在此基础上,利用光谱分散条纹的均值跟踪最大对比度的延迟位置,并在频域上对其进行分析,对式(1)进行傅里叶变换后的结果如式(2)所示:

次的像差检测以实现更加精细的元件调节。

首先,根据公式(1),构建二维干涉条纹检测仿真模型,通过频域分析,可获得两个方向的特征频率分量。通过功率谱坍塌求和的方法,可分别获得两个方向的特征频率。并根据特征频率获取相位信息。二维干涉仿真条纹及其功率谱如图2所示。

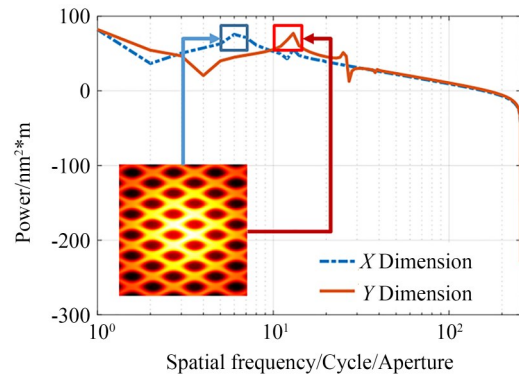


图2 二维干涉仿真条纹及其功率谱

Fig. 2 Two-dimensional interference simulation fringes and their power spectra

其次,利用条纹跟踪获得的斜率信息以及不同采样率下重建的波前如图3所示,针对大口径望远镜透镜组集成检测需求,针对利用37阶Zernike多项式所生成的波前(模拟大口径透镜的透射波前)采用 10×10 与 30×30 的斜率采样与重建间隔,其低阶像差均方根差别低于5%。考虑到系统复杂性与成本的限制,可选用10~15路的探测回路数量。

10×10 采样下,波前重建Zernike多项式系数对比如图4所示。

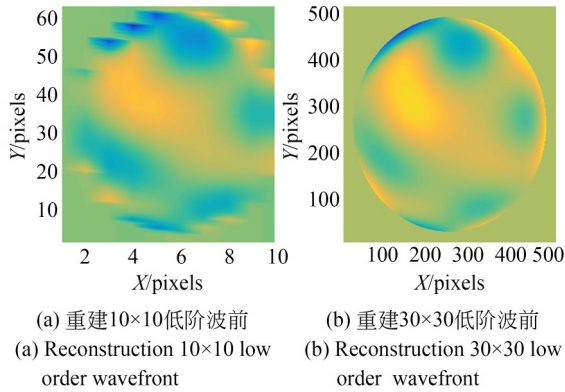
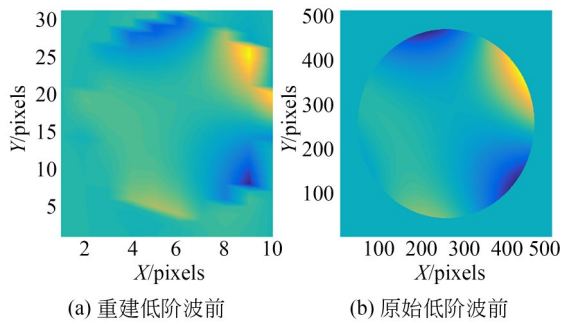
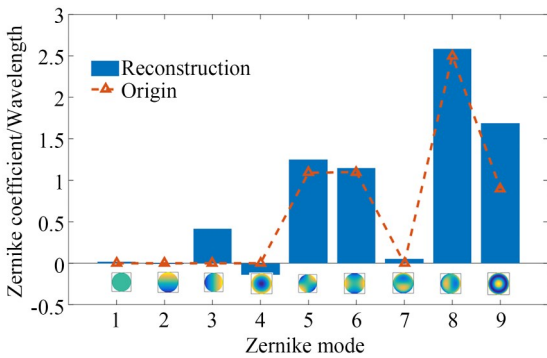


图 3 利用条纹跟踪获得的斜率信息以及不同采样率下重建的波前

Fig. 3 Using slope information obtained by fringe tracking and wavefront reconstruction at different sampling rates



(a) Reconstruction of low order wavefront (b) Original low order wavefront



(c) 波前重建zernike多项式系数对比 (c) Comparison of wavefront reconstruction zernike polynomial coefficients

图 4 利用条纹跟踪获得的斜率信息重建波前精度 Fig. 4 Accuracy of wavefront reconstruction using slope information obtained from fringe tracking

4 实验验证

在此采用小口径高精度平行光管进行模拟验证,焦点处发射的相干光,通过透镜组转化为

接近平面波的出射波前。在出瞳侧,利用耦合器(两路)实现空间光与波导内光的高效耦合,光子耦合干涉实验原理与现场如图 5 所示。

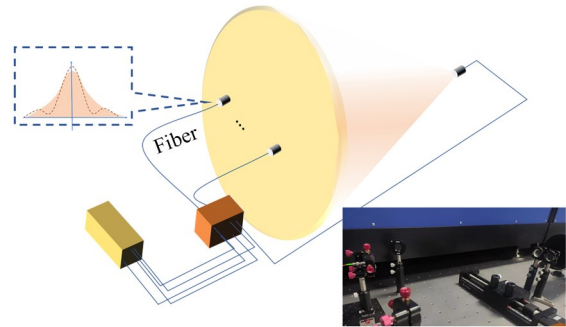


图 5 基于光纤互联的光源透射与光束耦合实验验证系统 Fig. 5 Experimental verification system of light source transmission and beam coupling based on optical fiber interconnection

在利用光纤互联架构收集光子之后,可通过干涉(迈克尔逊式干涉光路)获得两路之间的相位差,1 550 nm 干涉测量结果及其功率谱如图 6 所示,通过功率谱可知,第一的峰值处,感知信噪比优于 15 dB(峰值高度与底部噪声高度比值),并根据基线长度可获得精确角度信息。利用小口径平行光管进行验证除了验证两路的干涉测量外,也可以实现对精度溯源的验证,即在实际的外场检测过程中,由于无法实现对全部通路一次性的精度校验。因此,将采用小口径光管对两路进行验证。在保证两路精度符合要求后,针对下一路进行验证。两路之间,为保证校验效果,可采用刚性较大的连接方式,以实现精度的顺利

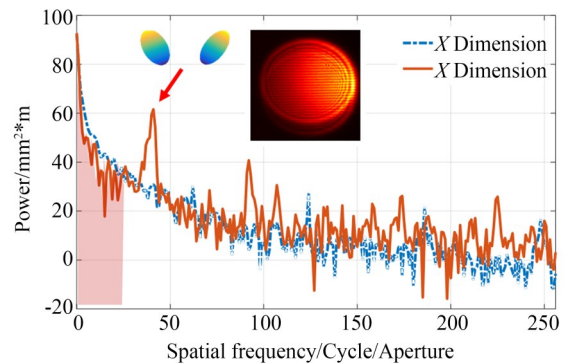


图 6 1 550 nm 干涉测量结果及其功率谱 Fig. 6 Measurement results and power spectrum of 1 550 nm interference

传递。

利用宽带光可消除 2π 模糊,有效提升测量动态范围。为降低色散误差对最终探测精度的影响,在此采用 $1\ 550\ \text{nm}+1\ 630\ \text{nm}$ 的双波长架构,利用精密移相器,对两路进行 $5\ \mu\text{m}$ 的移相测量, $5\ \mu\text{m}$ 移相干涉结果如图 7 所示,可明显观测到包络移动,因此,实现了优于 $5\ \mu\text{m}$ 的测量范围。根据图 7 中干涉条纹两条干涉条纹间像素数量(4 个像素),因此,可得探测精度优于 $1.5/(4-1)=0.5\ \mu\text{m}$ 。

5 结 论

目前的大口径透镜检测,主要针对小口径的球面与旋转对称非球面,不仅无法测量自由曲面,同时也无法针对大口径透射波前进行测量。通过对波前斜率的监控,抑制了共模误差,最终可实现对透镜支撑误差、元件间失调以及镜体几何参数异变的探测。在测试波长 $1\ 550\ \text{nm}$ 下,干涉感知信噪比优于 $15\ \text{dB}$,测量范围优于 $5\ \mu\text{m}$,探测精度优于 $0.5\ \mu\text{m}$ 。

参考文献:

- [1] NEILL D, ANGELI G, CLAVER C, *et al.* Overview of the LSST Active Optics System[C]. *Modeling, Systems Engineering, and Project Management for Astronomy VI*, SPIE, 2014, 9150: 91500G.
- [2] 郭宁馨,张景旭,刘昌华,等. 大口径大视场望远镜探测器平面度检测方法综述[J]. *激光与红外*, 2020, 50(4):387-395
GUO N X, ZHANG J X, LIU C H, *et al.* Overview of CCDs flatness test method for large aperture and wide-field telescope [J]. *Laser & Infrared*, 2020, 50(4):387-395(in Chinese)
- [3] AN Q, WU X, LIN X, *et al.* Large survey camera collimation and alignment at the observation site by curvature sensing[J]. *Optik*, 2021, 242: 167273.
- [4] AN Q, WU X, LIN X, *et al.* Alignment of DE-Cam-like large survey telescope for real-time active optics and error analysis [J]. *Optics Communications*, 2021, 484: 126685.
- [5] ROODMAN A, REIL K, DAVIS C. Wavefront Sensing and the Active Optics System of the Dark

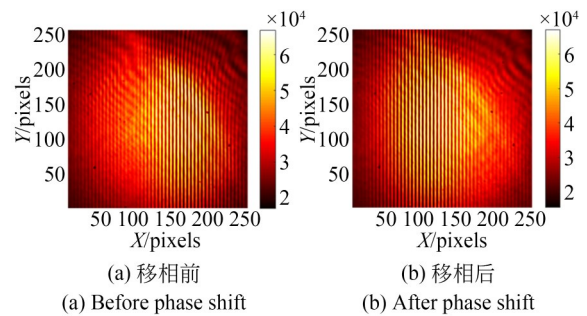


图 7 $1\ 550\ \text{nm}+1\ 630\ \text{nm}$ 的双波长干涉结果

Fig. 7 Double wavelength interference results of $1\ 550\ \text{nm}+1\ 630\ \text{nm}$

本文方法主要具有两个优点,在测量原理方面,结合斜率检测高鲁棒,大范围的特点,实现部分零位检测,扩大的系统的使用范围与检测能力;检测架构方面,采用光纤互联的方式,有效降低了系统的体积、重量与功耗,避免了体光学元件造成的杂散衍射等影响,同时,由于单个口径较小,所受到的大气扰动也较小。本文的方法对于大口径大视场望远镜的集成检测与系统计量具有较好的指导意义。

- Energy Camera [C]. *SPIE Proceedings, Ground-based and Airborne Telescopes V. Montréal, Quebec, Canada*. SPIE, 2014: 421-438.
- [6] 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(5): 992-999.
AN Q C, 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(5): 992-999. (in Chinese)
- [7] 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, LÜ T Y, *et al.* Design and alignment of large-aperture prime focus optical system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2022, 30(23): 2987-2994. (in Chinese)
- [8] WESTORT K K. Design and Fabrication of High Performance Relay Lenses[C]. *SPIE Proceedings, Optical Systems Engineering IV. Cambridge*. SPIE, 1985: 40-49.
- [9] LANGEHANENBERG P, DUMITRESCU E,

- HEINISCH J, *et al.* Automated Measurement of Centering Errors and Relative Surface Distances for the Optimized Assembly of Micro-Optics[C]. *SPIE Proceedings, Micromachining and Microfabrication Process Technology XVI. San Francisco, California*. SPIE, 2011: 91-98.
- [10] LANGEHANENBERG P, RUPRECHT A, OFF D, *et al.* Highly Accurate Measurement of Lens Surface Distances Within Optical Assemblies for Quality Testing[C]. *SPIE Proceedings, Optical System Alignment, Tolerancing, and Verification VII. San Diego, California, USA*. SPIE, 2013: 116-123.
- [11] RAINER W, ALAIN C, FABRICE G. A novel low coherence fibre optic interferometer for position and thickness measurements with unattained accuracy[J]. *Optical Sensing II*, 2006, 6189: 618918.
- [12] ZHAO W Q, SUN R D, QIU L R, *et al.* Lenses axial space ray tracing measurement[J]. *Optics Express*, 2010, 18(4): 3608.
- [13] 黄邦重, 曹良才. 面向高通量的多通道复用数字全息成像技术[J]. *中国光学(中英文)*, 2022(6): 1182-1193.
HUANG ZH ZH, CAO L C. Multi-channel multiplexing digital holographic imaging for high throughput[J]. *Chinese Optics*, 2022(6): 1182-1193. (in Chinese)
- [14] HILWEG C, SHADMANY D, *et al.* Limits and prospects for long-baseline optical fiber interferometry[J]. *Optica*, 2022, 9(11): 1238.
- [15] MARTINOD M A, MOURARD D, BÉRIO P, *et al.* Fibered visible interferometry and adaptive optics: friend at CHARA[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2018, 618: A153.
- [16] PERRIN G, WOILLEZ J, LAI O, *et al.* Interferometric coupling of the keck telescopes with single-mode fibers[J]. *Science*, 2006, 311(5758): 194.
- [17] COLAVITA M M, WIZINOWICH P L, AKESON R L, *et al.* The keck interferometer[J]. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 2013, 125(932): 1226-1264.
- [18] GONTÉ F, WOILLEZ J, SCHUHLER N, *et al.* VLT Interferometer Upgrade for the 2nd Generation of Interferometric Instruments [C]. *SPIE Astronomical Telescopes + Instrumentation. Proc SPIE 9907, Optical and Infrared Interferometry and Imaging V, Edinburgh, United Kingdom*. 2016, 9907: 528-538.

作者简介:



安其昌(1988—),男,汉族,山西太原人,博士,副研究员,中国科学院青年创新促进会成员。2011年于中国科学技术大学获得工学学士学位。于2018年于中国科学院大学获得博士学位,现就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