文章编号 1004-924X(2022)07-0802-11

主动随机送风条件下大口径离轴三反光学系统的 计算机辅助装调

罗 敬¹, 王金鑫^{1,2}, 鞠国浩¹, 尤晨旭¹, 刘奕辰¹, 徐天晓^{1,2}, 李成浩¹, 姜成强¹, 马铭泽^{1,2}, 何 煦¹, 张晓辉¹, 董吉洪¹, 徐抒岩^{1*}
(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 100049)

摘要:气流扰动是决定大口径、长焦距光学系统波前检测精度的重要因素,进而影响光学系统装调的效率和质量。针对 该问题,提出采取主动随机送风来抑制气流扰动对波前检测的影响。实验结果表明,通过主动随机送风,可以提高系统 波前检测的稳定性,Zernike系数测量结果标准差由0.04降低到0.01以下。进一步地,在主动随机送风条件下完成了一 个0.5m有效通光口径,6m焦距的离轴三反消像散光学系统的计算机辅助装调。经过两轮迭代,系统波像差RMS平均 值由0.49λ降低到0.086λ,满足系统像质要求。通过主动随机送风可以有效地抑制气流扰动对大口径、长焦距光学系统 波前检测的影响,从而为计算机辅助装调提供稳定、正确的波前数据,提高了系统装调的效率和质量,这对于研制大口径 光学系统具有重要意义。

关 键 词:计算机辅助装调;离轴三反光学系统;主动随机送风;大口径光学系统;气流扰动 中图分类号:TH74;O435.2 **文献标识码:**A **doi**:10.37188/OPE.20223007.0802

Computer-aided alignment for large-aperture off-axis three mirrors optical system with artificially random air flow

LUO Jing¹, WANG Jinxin^{1,2}, JU Guohao¹, YOU Chenxu¹, LIU Yichen¹, XU Tianxiao^{1,2}, LI Chenghao¹, JIANG Chengqiang¹, MA Mingze^{1,2}, HE Xu¹, ZHANG Xiaohui¹, DONG Jihong¹, XU Shuyan^{1*}

 Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;
 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

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

Abstract: Airflow disturbance becomes critical to wavefront measurements in large-aperture and long focal length optical systems. Hence, airflow disturbances have significant impact on the efficiency and quality of optical alignment. To solve this problem, a method based on an active random air supply is proposed to suppress the influence of air flow disturbances on wavefront measurements. The experimental results show that the standard deviations of the obtained Zernike coefficients are reduced to below 0.01 from 0.04

收稿日期:2021-12-27;修订日期:2022-01-14.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 12003033, No. 61875190)

due to the active random air supply. Furthermore, an off-axis three-mirror anastigmat telescope whose clear aperture is 0.5 m and focal length is 6 m is aligned when random air is actively supplied. After two rounds of computer-aided alignment, the mean RMS of the wavefront error of the optical system is reduced to 0.086λ from 0.49λ , which meets the requirements of the system image quality index. Evidently, the influences of airflow disturbance on wavefront measurements in large aperture and long focal length optical systems can be effectively suppressed by an active random air supply, which is critical to optical alignment in terms of efficiency and quality. This study is of great significance for developing large aperture optical systems.

Key words: computer-aided alignment; off-axis three-mirror optical system; active random air supply; optical system with large aperture; airflow disturbance

1引言

三反消像散光学系统具备宽光谱、大视场、 高成像分辨率、易控制杂散光等特性,在对地遥 感、天文观测中得到了广泛的应用^[1]。JWST^[2]、 CSST^[34]、Euclid^[5]、HabEx^[6]和WFIRST-A^[7]等 均属于三反消像散光学系统。离轴三反光学系 统因孔径离轴或视场离轴实现了无中心遮拦,这 有利于提高系统的光通量和点扩散函数(Point Spread Function, PSF)质量。然而,离轴系统的 非旋转对称性却增加了装调难度,传统的定心装 调方法不再适用,因此,光学装调成为研制离轴 三反光学系统的主要难点之一^[8-11]。

随着科学技术的发展,成像观测精度的要求 越来越高,进而迫使高分辨率光学系统朝大口 径、长焦距方向发展。哈勃望远镜主镜口径2.4m, 系统焦距达到57.6m^[12],其继任者JWST的口径 更是达到6.5m,系统焦距为131.4m^[2]。不断增 大的口径和焦距进一步增加了光学系统的装调 难度。一方面,随着口径的增大和像质的提高, 光学系统中各个镜体的装调公差要求更为严格; 另一方面,目前大多数计算机辅助装调方案均将 系统波像差作为主要的输入信息,其检测精度直 接决定了系统装调的效率和质量^[13]。然而,大口 径、长焦距光路中气流扰动成为决定系统波前检 测精度的关键因素,这会对光学装调造成重要影 响。因此,抑制光学检测中的气流扰动具有重要 意义。

Shi^[14]和陈华等^[15]理论分析了气流扰动对折 射率空间分布的影响机理,建立了相应的数学模 型,并计算了不同状态下气流对波前像差的影 响。姜自波等[16]结合理论分析和实验测量,深入 研究了气流扰动对单镜面形检测结果的影响。 徐抒岩等[17]针对气流扰动下大口径光学系统在 实验室环境下装调困难的难点,提出通过主动送 风来抑制气流扰动对波前检测的影响,取得了较 好的效果。本文在此基础上,进一步提出结合主 动随机送风和动态干涉仪多次平均累加的装调 方案,降低了对风扇阵列的要求,提高了方案的 可靠性和可实施性。通过 Fluent 软件仿真和多 次实验迭代,优化了风扇数量、位置、朝向和风速 等风场设置,最终较好地抑制了气流扰动对大口 径、长焦距光学系统波前检测的影响。最后,在 主动随机送风条件下完成了一个0.5m口径、 6m焦距离轴三反光学系统的装调,取得了良好 的收敛效果和系统像质。

2 基本原理

基于灵敏度矩阵的计算机辅助装调是目前 应用最广泛的装调方法,其基本原理是:小失调 范围内系统各个视场的Zernike系数变化量与失 调量之间近似满足线性关系^[13]。其数学模型可 以表示为:

$$A \cdot \Delta X = \Delta F, \tag{1}$$

其中: ΔX 为系统各个维度的失调量;A为灵敏度 矩阵; ΔF 为各项波像差的变化量,通常用各个视 场波像差的Zernike多项式拟合系数来表示。若 灵敏度矩阵A为满秩矩阵,则式(1)存在唯一 解,有:

$$\Delta X = A^{-1} \cdot \Delta F. \tag{2}$$

即通过灵敏度矩阵的逆与各视场Zemike系 数变化量的乘积便可得到失调量。然而,在离轴 三反消像散光学系统中,次镜和三镜各个维度对 系统波像差的影响并不是相互独立的。比如,次 镜沿 Y轴的偏心与次镜和三镜绕X轴的倾斜均 存在补偿。这表明灵敏度矩阵A的各个列向量 不是线性无关的,不能通过线性组合表示出同等 维度空间内的任意列向量 ΔF 。因此,灵敏度矩 阵A不是满秩,属于奇异矩阵,不存在严格的 逆^[18]。综上,式(1)是矛盾方程组,不存在解 析解。

在许多实际问题中,线性方程组往往都是不 相容的,即方程组没有严格意义的解。在这种情 况下,人们追求的目标是得到不相容方程组的最 优解,即最小二乘解。对于一个失调的光学系 统,输入更多的像差信息可以更加真实地反映出 系统的失调情况,从而更有利于找到方程组的最 优解。因此,通常的做法是增加方程的数目,即 矩阵A的行数。这导致矩阵A不再是方阵,其行 数大于列数。此时,式(1)变为一个超定方程。 根据多元函数的极值理论及矩阵运算和求导规 则,该超定方程的最小二乘解为^[13,18]:

$$\Delta X = \left(A^{\mathrm{T}} A\right)^{-1} A^{\mathrm{T}} \Delta F. \tag{3}$$

式(3)也被称为法方程或者正则方程。然 而,该正则方程的求解依然存在缺陷,即其条件 数通常很大。这是因为离轴三反消像散光学系 统中失调维度多,且波像差与失调参数之间的函 数关系十分复杂,次镜和三镜各个维度失调量之 间存在较为严重的互相关^[13,19]。若系统的灵敏度 矩阵A与测量结果ΔF均不存在误差,通过式(2) 可以解算得到正确的失调量。然而,在测量时不 可避免地会存在测量误差,大条件数会导致解算 结果极易受到测量误差的影响而出现大范围波 动,使得解算的失调量失真^[20]。

建立线性方程组:

$$\binom{100 \ 101}{99 \ 100} \binom{x_1}{x_2} = \binom{201}{199}.$$
 (4)

显然,该方程的精确解为 $X = (1 \ 1)^{\mathrm{T}}$ 。若右

侧矢量存在微小的扰动,即:

$$\Delta F = \begin{pmatrix} 0.01 \\ -0.01 \end{pmatrix}. \tag{5}$$

则式(4)变为:

$$\binom{100 \ 101}{99 \ 100} \binom{x_1}{x_2} = \binom{201.01}{198.99}.$$
 (6)

其解变为 $X = (3.01 - 0.99)^{T}$ 。尽管右侧矢 量的扰动量很小,扰动前后方程的解却差异很 大,若将扰动后的解作为最终结果会导致结果严 重失真。

3 Zernike 系数测量误差对计算机 辅助装调的影响

输入参数测量误差会导致大条件数灵敏度矩阵的解出现大偏差。为了抑制大条件数灵敏度矩阵失调量解算结果随Zernike系数测量误差波动性大的问题,阻尼最小二乘法被提出^[21]。尽管通过添加阻尼因子,可以有效减小灵敏度矩阵的条件数,避免失调量解算结果失真。然而,大的Zernike系数测量误差还是会降低装调结果的收敛效率,装调结果会随Zernike系数误差在一定范围内波动,导致次镜和三镜各个维度存在较大的装调残差。本文将基于一个0.5m口径、6m焦距的离轴三反光学系统,通过数值仿真来说明Zernike系数测量误差对计算机辅助装调的影响。

图1为离轴三反消像散系统光路,系统包含



图1 离轴三反系统光路



主镜、次镜和三镜,它们均为二次曲面。该系统 焦距为6m,入瞳直径为0.5m,有效视场为 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$,各视场设计平均波像差RMS为0.05 λ 。 本文分别计算了无Zernike系数误差、Zernike系 数标准差 σ =0.005以及 σ =0.05三种情况下,次 镜和三镜各个维度失调后经计算机辅助装调的 收敛情况,每种情况下进行10组蒙特卡洛仿真计 算。需要特别指出的是,三种情况下光学系统的 初始失调量是以相同标准差随机生成的。当无 Zernike系数测量误差时,装调前后系统各个视场 的波像差如图2所示(彩图见期刊电子版)。显 然,经计算机辅助装调后,各个视场的波像差回 到了设计水平。次镜和三镜各个维度的装调残 差均为0,如图3所示。



图 2 无 Zernike 系数测量误差时装调前后光学系统各个 视场的波像差 RMS

Fig. 2 Wavefront errors of optical system at different FO-Vs without measurement errors of Zernike coefficients



Fig. 3 Misalignments of SM and TM without measurement errors of Zernike coefficients

当存在标准差 σ = 0.005的 Zernike 系数测量 误差时,系统波像差和各维度失调量装调结果分 别如图 4 和图 5 所示。可以看出,系统各个视场 的波像差基本可以收敛到设计状态,但是相比较 于图 2,存在一定波动。次镜和三镜各个维度存 在一定的装调残差,如图 5 所示,尤其是三镜沿 Y 轴偏心和绕 X 轴倾斜。将 Zernike 系数测量误差 进一步增大,使其标准差 σ = 0.05,结果分别如 图 6 和图 7 所示。显然,各个视场的波像差已很 难收敛到设计状态,次镜和三镜的装调残差也明 显变大。

上述仿真结果表明,基于波前检测的计算机



新4 Zernike系数测重误差 $\sigma = 0.005$ 时装调削后光学系统各个视场的波像差RMS





图 5 Zemike系数测量误差σ=0.005时装调前后次镜和 三镜各个维度的残余失调量

Fig. 5 Misalignments of SM and TM with measurement errors of Zernike coefficients with standard deviation $\sigma = 0.005$



图 6 Zernike 系数测量误差 $\sigma = 0.05$ 时装调前后光学系 统各个视场的波像差 RMS

Fig. 6 Wavefront errors of optical system at different FOVs with measurement errors of Zernike coefficients with standard deviation $\sigma = 0.05$





Fig. 7 Misalignments of the SM and TM with measurement errors of Zernike coefficients with standard deviation $\sigma = 0.05$

辅助装调结果会受到Zernike系数测量误差的显 著影响。Zernike系数测量误差过大,会导致离轴 三反光学系统中次镜和三镜各个维度的装调残 差增大,系统波像差的波动性变大,甚至无法 收敛。

增大通光口径是光学系统提高成像分辨率的主要手段。随着口径的增大,气流扰动成为影响系统波前检测精度,进而影响系统装调效率和质量的关键因素。目前,不管是实验室极限温控,还是使用大型真空罐,均需要付出极大的经济和时间成本。针对上述问题,本文在基于主动送风的大型光学系统波前检测气流扰动抑制方案^[17]的基础上,结合理论仿真和实验迭代,进一步优化了风场设置,将各个风扇的朝向随机化,

彻底扰乱干涉检测光路中的折射率场,使它变成 随机分布,并通过动态数字干涉仪的快速多次累 加,得到了稳定的干涉检测结果。

4 主动随机送风条件下的Zernike 系数测量

实验系统如图 8 所示,由一个 6 m 焦距、 0.5 m 有效通光口径的离轴三反消像散光学系 统、两个六足调整台、自准直平面反射镜、干涉仪 和风扇等组成。结合前期 Fluent软件仿真结果, 并经过多次实验迭代,更改风扇位置,将水平朝 向^[17]改为置于干涉光路的下方,进而采取由下往 上的方式进行主动送风,并优化了风扇到系统光 轴的间距。为扰乱整个光路的温度场和折射率 场,需确保风扇阵列充满整个干涉检测光路,且 所有风扇均摇头摆动,朝向角度随机,各个风扇 之间的相对位姿也随机,最终使得干涉检测光路 的气流随机分布。



图 8 离轴三反系统自准直干涉检测光路 Fig. 8 Optical path for self-collimating interference detection of off-axis three mirror anastigmat telescope

为验证主动随机送风条件下大口径、长焦距 光学系统波前检测数据的稳定性,通过动态干涉 仪对光学系统波前进行多次累加测量。保持图8 中所示光路不变,分别在风扇开启和风扇关闭两 种条件下对系统波前进行测量,每种条件下各测 得10组数据,每组数据均包含500次原始数据的 累加。在上述两种条件下,干涉仪的数据采集模 式、曝光时长、Mask大小,以及干涉仪、次镜和三 镜调整台的位姿等均保持一致,且所有数据均在 同一天测得。实验结果如图9所示,图中给出了 Z₅~Z₁₆在不同环境条件下的稳定性。显然, 图 9(a)数据的稳性明显好于图 9(b)。对两种环 境条件下的数据进行统计计算,各项条纹Zernike 系数的标准差如表1所示。在主动随机送风条件 下,Z₆~Z₁₆的标准差在0.003以下,Z₅的波动稍 大,但也小于0.01。作为比较,关闭风扇后,保持 光路其他元件、参数不变,Z₅标准差增大了近4 倍,达到0.037,其他各阶Zernike系数的稳定性 也明显变差。上述数据充分证明,通过主动随机 送风,可以有效抑制大口径、长焦距干涉检测光



图 9 不同条件下的自准直干涉光路波前检测结果稳定性

Fig. 9 Stability of wavefront measurement results of selfcollimating inteference optical system in different conditions

表1	不同测试条件	下的条纹 Zernike	系数标准差

Tab. 1 Standard deviations of fringe Zernike coefficients under different measuring conditions

Zernike系数	主动送风	无主动送风
Z_5	0.0095	0.0374
Z_6	0.0021	0.018 5
Z_7	0.0014	0.0122
Z_8	0.0010	0.0087
Z_9	0.0004	0.004 0
$Z_{\scriptscriptstyle 10}$	0.001 5	0.0100
$Z_{_{11}}$	0.0013	0.009 5
$Z_{\scriptscriptstyle 12}$	0.0011	0.0058
$Z_{_{13}}$	0.0015	0.006 9
$Z_{_{14}}$	0.0008	0.0078
$Z_{_{15}}$	0.0010	0.006 5
$Z_{_{16}}$	0.0004	0.0037

路的气流扰动,大幅度提高波前检测的稳定性。

上述测试结果验证了数据的稳定性,还需要 进一步验证数据的正确性。若上述波前检测结 果是由风扇送风而额外生成的,那么波前数据必 然和风扇的设置密切相关,尤其是风扇的位置和 朝向。因此,人为地改变光路中的风扇朝向和位 置,如图10所示,风扇阵列处于3种不同的组合 状态。在这3种状态下,保持光路中其他参数和 元件不变,采集系统波前数据,结果如图11所示。 可以发现,尽管风扇阵列的设置发生了很大变 化,但是3种情况下波前检测结果几乎没有区别, Z₆和Z₇的平均值也非常接近,如表2所示。图12 给出了3种不同风扇阵列设置情况下Z₆~Z₃₆的



(a) 模式1 (a) Mode 1



(b) 候式2 (b) Mode 2



(c) 模式3 (c) Mode 3 图 10 干涉检测光路中三种不同的风扇组合 Fig. 10 Three different air fan combinations placed in inteference optical path







Tab. 2 Mean values of Z_6 and Z_7 with three different air fan combinations

Zernike系数	Z_6	Z_7
风扇组合1	-0.1140	-0.0585
风扇组合2	-0.1136	-0.0550
风扇组合3	-0.1117	-0.0563





变化情况,可以看出,所有的Zernike系数在不同 的风扇设置下基本一致。上述实验结果表明,图 9和表1所示的波前检测结果不随风扇设置的不 同而变化,能够表征图8中自准直干涉检测光学 系统的真实波前。

5 实验与结果

由实测数据可知,通过主动随机送风可以提 高大口径、长焦距干涉光路波前检测结果的稳定 性,并得到真实的系统波前结果。下面,我们将 首次在主动随机送风条件下,完成该离轴三反光 学系统的计算机辅助装调。

根据待装调光学系统的特点,通过经纬仪和 激光跟踪仪完成系统粗装调。将干涉仪和自准 直平面反射镜调整到位,经过一段时间连续主动 随机送风后,开始采集系统各个视场的波前数 据,并保持系统一直处于主动随机送风状态。根 据待装调光学系统的视场离轴特点选定5个视 场,包括4个边缘视场和1个中心视场,如图13所 示。测得粗装调完成后系统各个视场的波像差, 如图14所示。系统各视场波前 RMS 平均值为 0.493λ。

通过自编的计算机辅助装调程序,根据测得的各个视场的Zernike系数,解算得到次镜和 三镜的失调量,再通过次镜和三镜底部的六足 台调整次镜和三镜的位姿。调整完成后,再次 检测各个视场的波像差,波前检测结果如图15 所示。各视场波像差 RMS 平均值降为0.094λ。 显然,系统各个视场的波像差明显收敛,表明失 调量解算结果正确。根据该轮检测结果,又解 算得到一组次镜和三镜的失调量,再次调整后, 检测得到各个视场的波像差如图16所示,条纹 Zernike系数如表3所示。各视场波像差 RMS 平 均值进一步降为0.086λ,达到该系统的装调指 标要求。





图 14 粗装调结束后离轴三反光学系统 5个视场的波像差检测结果

Fig. 14 Measured wavefront errors over five different fields of views of off-axis TMA telescope after initial alignment



Fig. 15 Measured wavefront errors over five different fields of views of off-axis TMA telescope after first round CAA



Fig. 16 Measured wavefront errors over five different fields of views of off-axis TMA telescope after second round CAA

表 3 两轮计算机辅助装调后系统各个视场条纹 Zernike 系数

Tab. 3 Measured fringe Zernike coefficients over five different fields of views of off-axis TMA telescope after second round CAA

视场	Z_5	Z_6	Z_7	Z_8	Z_9	Z_{10}	Z_{11}	Z_{12}	Z_{13}	Z_{14}	Z_{15}	Z_{16}
F1	0.0252	-0.1020	-0.0538	-0.0183	0.0588	0.0231	-0.0455	0.0088	0.0015	0.0115	-0.0249	-0.0183
F2	-0.0094	0.0535	-0.0836	0.004 1	0.034 9	0.0662	-0.0303	0.016 1	-0.0406	0.0303	-0.0071	-0.0117
F3	0.2250	0.0162	-0.0203	0.0223	0.0598	-0.0137	-0.0678	0.0224	0.0254	-0.0039	0.0170	-0.0215
F4	-0.0420	0.0055	-0.0812	-0.0110	0.0222	0.1580	-0.0782	0.1320	0.0378	0.0420	0.0254	-0.0100
F5	0.0098	-0.0405	-0.0372	0.0294	0.0208	0.1885	0.0377	0.0109	-0.0372	0.0254	0.0342	-0.0458

6 结 论

本文提出主动随机送风的方案来抑制气流 扰动对大口径、长焦距干涉光路波前检测的影 响。结合仿真结果和多次实验迭代,优化了风 扇阵列的数量、位置、朝向和风速等风场设置, 使得通过主动随机送风可以实现对大口径、长 焦距干涉光路温度场和折射率场的扰动随机 化。测试结果表明,通过主动随机送风可以显 著提高系统波前检测结果的稳定性,Zemike系 数标准差由0.04降低到0.01以下。最后,在主 动随机送风条件下,对一个6m焦距、0.5m通 光口径的离轴三反消像散光学系统进行了装 调。实验结果显示,在稳定的Zernike系数检测 结果下,通过一轮计算机辅助装调,系统各个视 场的波像差 RMS 平均值由 0.49λ降低到 0.094λ;两轮装调后系统各视场波像差 RMS 平 均值达到 0.086λ,满足系统指标要求。由此表 明,通过主动随机送风,可以以极低的成本为大 口径、长焦距光学系统提供稳定、可靠的波前检 测环境,这对于大口径光学系统的研制及应用 具有重要意义。

参考文献:

- [1] LUO J, YOU C X, HE X, et al. Comparisons between an on-axis three-mirror anastigmat telescope and an off-axis one: polarization aberrations[J]. Applied Optics, 2021, 60(22): 6438-6447.
- [2] GARDNER J P, MATHER J C, CLAMPIN M, et al. The James Webb space telescope [J]. Space Science Reviews, 2006, 123(4): 485-606.
- [3] GONG Y, LIU X K, CAO Y, et al. Cosmology from the Chinese space station optical survey (CSS-OS)[J]. The Astrophysical Journal Letters, 2019, 883(2): 203.
- [4] 罗敬,何煦,范阔,等.无遮拦离轴天文望远镜偏振像差分析及其对光学椭率的影响[J]. 光学学报,2020,40(8):55-64.
 LUO J, HE X, FAN K, *et al.* Polarization aberra-

tions in an unobscured off-axis astronomical telescope and their effects on optics ellipticity[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(8): 55-64. (in Chinese)

- [5] LAUREIJS R, AMIAUS J, ARDUINI S, et al. Euclid definition study report[R]. axXiv, 2011.
- [6] MARTIN S R, RUD M, STERN D K, et al. HabEx space telescope optical system [C]. UV/Optical/IR Space Telescopes and Instruments: Innovative Technologies and Concepts VIII. August 6-10, 2017. San Diego, USA. SPIE, 2017: 1039805.
- [7] LEVI M E, KIM A G, LAMPTON M L, et al. Science yield of an improved wide field infrared survey telescope (WFIRST)[EB/OL]. 2011: arXiv: 1105.0959. https://arxiv.org/abs/1105.0959
- [8] 朱时雨,张新,李威.计算机辅助装调与传统基准 传递技术相结合实现三镜消像散系统的装调[J]. 中国光学,2011,4(6):571-575.
 ZHU SH Y, ZHANG X, LI W. Alignment of offaxis TMA system by combining computeraided adjustment and traditional benchmark pass method[J]. *Chinese Optics*, 2011,4(6):571-575. (in Chinese)
- [9] 张学敏,宋兴,候晓华,等.可调焦离轴三反光学 系统的装调[J].光学精密工程,2017,25(6): 1458-1463.
 ZHANG X M, SONG X, HOU X H, *et al.* Alignment of focus-adjustable off-axis reflective optical system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2017, 25(6): 1458-1463. (in Chinese)
- [10] 王彬, 伍凡, 叶玉堂. 离轴三反系统计算机辅助 装调[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(11):

250-256.

WANG B, WU F, YE Y T. Computer aided alignment for off-axis TMA system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(11): 250-256. (in Chinese)

[11] 梅贵, 翟岩, 曲賀盟, 等. 离轴三反系统的无应力装调[J]. 光学 精密工程, 2015, 23(12): 3414-3421.
 MEIG, ZHAIY, QUHM, et al. Stress-free

alignment of off-axis three-mirror system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23 (12) : 3414-3421. (in Chinese)

- [12] LALLO M D. Experience with the Hubble space telescope: 20 years of an archetype [J]. Optical Engineering, 2012, 51: 011011.
- [13] 杨晓飞.三反射镜光学系统的计算机辅助装调技 术研究[D].长春:长春光学精密机械与物理研究 所,2005.
 YANG X F. Study on the Computer-Aided Align-

ment of Three-Mirror Optical System[D]. Changehun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2005. (in Chinese)

- [14] SHI J L, WANG Y, SHENG Y, et al. The optical modeling tool and a simulation method for air turbulence in large opto-mechanical systems [J]. SPIE, 2009, 7506: 75061N.
- [15] 陈华.高精度面形检测中环境扰动因素分析
 [D].长春:长春光学精密机械与物理研究所, 2011.

CHEN H. Analysis of Environmental Disturbance Effects on High Pricision Figure Measurement [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2011. (in Chinese)

[16] 美自波,李新南,季波.空气垂直温度梯度对长 焦镜面检测精度的影响分析[J]. 光学学报, 2015,35(10):142-147.
JIANG Z B, LI X N, JI B. Influence analysis of testing accuracy for long focal length mirror by vertical temperature gradient of air [J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(10):142-147. (in Chinese)

 [17] 徐抒岩,张旭升,范阔,等.大型光学系统波前检测中气流扰动的抑制[J].光学精密工程,2020, 28(1):80-89.

XU SH Y, ZHANG X SH, FAN K, et al. Suppression of airflow turbulence in wavefront meaChinese)
[18] STRANG G. Introduction to Linear Algebra
[M]. 5th Edition. Massachusetts: Wellesley-

Cambridge Press, 2016. [19] 郭继锴, 王治乐, 陆敏.基于主成分分析法的离 轴三反系统装调及其应用[J].光学学报, 2019, 39(3): 341-347.

GUO J K, WANG ZH L, LU M. Off-axis three-mirror anastigmatic system alignment and application based on principal component analysis [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(3): 341-

作者简介:



罗 敬(1992-),男,江西抚州人,博 士,助理研究员,主要从事光学装调与 检测、光学系统偏振像差分析与优化 等 方 面 的 研 究 。 E-mail: luojingopt@ciomp.ac.cn 347. (in Chinese)

[20] 陈建军.计算机辅助装调技术在离轴三反相机装 调中的应用[D].西安:西安光学精密机械研究 所,2013.

CHEN J J. Application of Computer Aided Alignment Technique to an Three-mirror Off-axis Optical System[D]. Xi'an: Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2013. (in Chinese)

[21] RIMMER M. Computer-aided optical alignment method [C]. Adaptive Optics and Optical Structures. International Society for Optics and Photonics, 1990, 1271: 363-368.

通讯作者:



徐抒岩(1963-),男,吉林长春人,硕 士,研究员,博士生导师,参加省部级 课题及国防科研重点工程项目多项, 发表学术论文100余篇,荣获中国载 人航天工程突出贡献奖章,曾宪梓载 人航天基金突出贡献奖,主要研究方 向为空间大口径光学望远镜、光学系 统空间在轨组装等。Email: xusy@ciomp.ac.cn