

文章编号 1004-924X(2022)23-3090-07

基于彗差和像点偏移的大口径望远镜 次镜姿态校正

朱 熠*, 王建立, 陈 涛, 吴小霞, 李宏壮

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘要:大型望远镜的次镜支撑系统受重力影响,在不同俯仰角状态下会引入不同幅度的姿态误差,导致系统光路偏移,最终影响终端成像设备。如果不进行次镜姿态校正,在望远镜俯仰运动过程中,像点偏移过大,会导致精跟踪系统超限失效问题,基于望远镜主次镜光学设计参数,利用次镜的曲率中心点和主次镜光路的无彗差点以及次镜六自由度平台,建立了一种次镜姿态校正方法,基于望远镜俯仰角进行次镜姿态校正。通过次镜姿态校正,使望远镜仰角变化时精密跟踪系统前端光路的最大偏移角度由 12.85" 优化至 1.80"。该次镜姿态校正方法易于实现,效果明显,能够满足精密跟踪系统前端的光路粗对准需求,保证高分辨成像系统性能。

关键词:主动光学;大型望远镜;次镜;无彗差点

中图分类号:TP394.1;TH691.9 **文献标识码:**A **doi:**10.37188/OPE.20223023.3090

Attitude correction of secondary mirror in large telescope using coma and imaging point position

ZHU Yi*, WANG Janli, CHEN Tao, WU Xiaoxia, LI Hongzhuang

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Science,
Changchun 130033, China)

* Corresponding author, E-mail: 13998211017@139.com

Abstract: A secondary mirror mount in a large telescope introduces different attitude errors at different elevations, reducing the accuracy of the imaging device. In particular, large SiC telescopes suffer from this problem. Without correction of the secondary mirror attitude, a large error of imaging point position was introduced that result in an overload of the precision tracking system. By considering the optical design parameters of the telescope, a secondary mirror correction method based on the coma-free point (CFP) and center of curvature was developed. Stewart platform is used to correct the attitude of secondary mirror based on the telescope elevation. The alignment error before the precision tracking system is reduced from 12.85" to 1.80", as a result of the attitude correction of the secondary mirror. The correction method is simple and effective, allowing for coarse alignment of the precision tracking system and preserving the accuracy of the imaging system.

Key words: active optics; large telescope; secondary mirror; coma free point

收稿日期:2022-08-30;修订日期:2022-11-08.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 12133009)

1 引 言

为了克服重力、环境温度和镜体加速度等因素对大口径主镜面形精度的影响,在望远镜系统运行中校正和维持主镜镜面的面形精度,保证后端成像系统的成像质量,3 m级以上的大口径望远镜均基本采用主动光学技术^[1-3]。主动光学由 R. N. Wilson, F. Franza 和 L. Noethe 于 1987 年提出,并应用于 ESO New Technology Telescope (NTT) 3.58 m 大口径望远镜的主镜支撑^[4]。主动光学系统不仅要协同波前检测系统和力促动器,主动检测和校正主镜镜面面形,实现主镜主动支撑;还需要维持主镜和次镜的相对位置,保证后端成像质量。

针对同轴双反射镜系统,可通过焦点偏心、轴上彗差、轴外三叶像差等参数获得主次镜之间的光轴偏离量,进行光路装调修正^[5-9]。该方法同样适用于主动光学系统的次镜姿态控制。当主镜位置闭环稳定控制后,通过上述参数的测量和解算,能够得到次镜当前的姿态误差量,从而进行反馈修正。本文针对大口径望远镜主动光学系统次镜的姿态控制需求,结合前述的同轴双镜系统光轴对准方法,建立了一种基于波前检测和像点偏移的次镜姿态校正方法,通过大口径望远镜主动光学系统的夏克-哈特曼波前传感器和用于对准的成像相机的采集数据,解算次镜姿态误差,并通过次镜六自由度平台进行补偿校正。

2 次镜姿态校正方法

图 1 为大型望远镜典型主动光学系统原理图。本文提出了基于次镜的近轴曲率中心点和近轴无彗差点的次镜姿态校正方法。曲率中心点为次镜顶点处曲率半径对应的球心,当次镜以曲率中心点为球心,沿球面小幅值旋转时,不会改变焦平面焦点位置,即像点偏移量不变。次镜以无彗差点为球心,沿球面小幅值旋转时,不会改变轴上波前像差中的彗差分量。

无彗差点的位置受次镜镜面种类的影响。卡塞格林式望远镜的无彗差点坐标计算公式为^[10]:

$$Z_{\text{CFP}} = \frac{s_2}{\left(\frac{m_2 + 1}{2m_2} \right) \left[1 - \left(\frac{m_2 + 1}{m_2 - 1} \right) b_{s2} \right]} \quad (1)$$

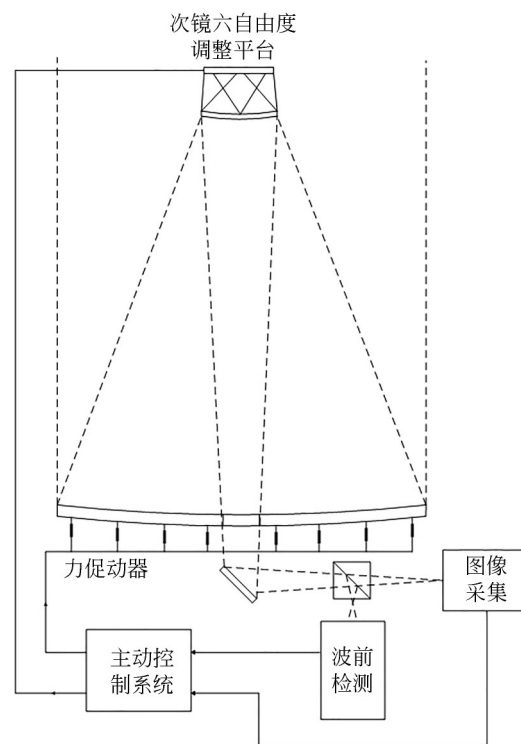


图 1 主动光学系统原理图

Fig. 1 Schematic diagram of active optics system

式中: s_2 为次镜与主镜主焦点之间的距离; m_2 为次镜的几何角放大率, $m_2 = \mu_1/\mu_2$; b_{s2} 为次镜非球面度,如图 2 所示。

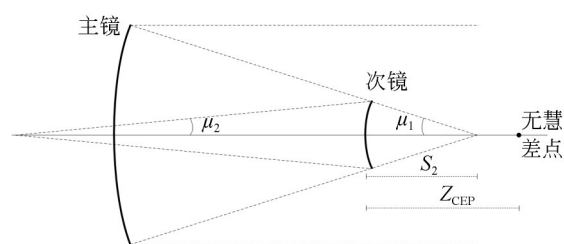


图 2 主次镜系统无彗差点相关参数

Fig. 2 Parameters of coma free point of primary and secondary mirrors

当次镜镜面为非球面时, $b_{s2} \neq 0$ 时,次镜无彗差点与次镜曲率中心点不重合,可以通过无彗差点和曲率中心点实现次镜姿态校正。其基本流程为:首先检测次镜后端焦平面上像点的偏移量,并基于次镜无彗差点校正焦平面的像点位置,使像点位于视场中心;然后,采集次镜后端轴上的波前像差,提取其中的彗差分量,并基于次

镜曲率中心点校正彗差,修正光路对准。

次镜姿态具有6个自由度,按次镜光轴定义直角坐标系 z 轴,则6自由度分别为 x, y, z 方向的平移和旋转。由于同轴系统次镜为旋转对称镜面, z 轴旋转无影响,次镜姿态调整需求为次镜的 x, y, z 方向平移和 x, y 轴旋转的调整,如图3所示。其中, z 方向平移对应离焦,用于系统调焦; x, y 方向平移和 x, y 轴旋转耦合为焦平面像点的偏移和轴上彗差,以曲率中心点和无彗差点为基准旋转次镜进行补偿校正。为此,针对次镜可能产生的姿态误差,除了系统离焦量,还需要提供4个自由度的姿态误差检测。次镜以一点为球心沿球面旋转,可分解为次镜以该点为圆心在两个垂直方向旋转,即等效为耦合 x, y 方向平移和 x, y 轴旋转的2个自由度的姿态调整。因此,当次镜曲率中心点和无彗差点不重合时,曲率中心点与无彗差点分别提供2个自由度的次镜姿态调整,能够校正次镜 x, y 方向的平移和 x, y 轴的旋转。

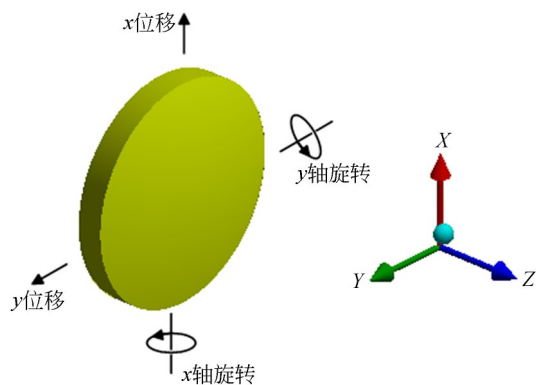


图3 次镜姿态的4个自由度

Fig. 3 Four DOF of secondary mirror's attitude

3 仿 真

本文通过Zemax进行光学建模,并通过matlab进行望远镜主次镜系统,以及基于设计参数的望远镜次镜等效无彗差点的仿真计算,以验证本文提出的次镜姿态校正方法的有效性。

在Zemax仿真环境下建立望远镜的主次镜光路及后端成像焦面光路,并将焦平面定义为像面。正入射的平行光经过主次三镜反射后进入波前检测光路,并汇聚在焦平面。次镜姿态正确

时,焦点位于光轴上,即像点位于像面中心,同时无彗差。当次镜处于错误姿态时,则会出现像点偏离像面中心,或者像点出现彗差。图4为Zemax仿真光路模型。

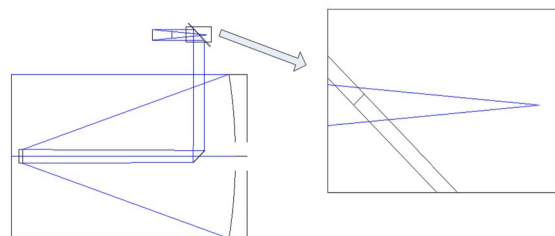


图4 Zemax光路模型2D图

Fig. 4 Two-dimensional diagram of Zemax optical model

通过4 m望远镜主次镜仿真模型的仿真计算,验证采用曲率中心点校正彗差的能力。然后,在仿真模型上以标定拟合法计算次镜无彗差点的位置,确定无彗差点的有效性;同时,确认曲率中心点和无彗差点位置具有足够大的差异,能够实现有效的次镜姿态校正。

3.1 曲率中心点仿真

通过在仿真模型上对次镜进行平移和自转,实现次镜沿曲率中心点的近轴旋转,并由此仿真计算次镜沿曲率中心点引入的彗差变化。次镜沿某个圆心在 x 方向旋转 α ,在近轴等效于次镜在 x 方向的位移 d 及绕 y 轴的自转 β ,且:

$$\begin{cases} \beta = \alpha \\ d = R \tan\left(\frac{\alpha\pi}{180}\right) \end{cases} \quad (2)$$

其中 R 为旋转半径,当 R 设置为曲率半径时即为沿曲率中心点旋转。由于次镜镜面旋转对称,因此单个方向的旋转仿真足够验证各个方向的特性。本文采用 x 方向旋转,即次镜 x 方向平移和 y 轴自转。

图5为次镜以曲率中心点为圆心, x 方向正向旋转的旋转角度与由此引入的轴上彗差(x 向彗差)及拟合曲线,图6为不同旋转角度对应的像点形状。在近轴范围内($<0.4^\circ$),次镜绕曲率中心旋转角度与彗差量呈良好的线性关系,因此通过波前检测得到的轴上彗差,快速精确地计算出彗差校正对应的次镜姿态调整量。当旋转角度在 0.1° 时,引入的彗差量约为 $4.4 \mu\text{m}$ 。主动光学

系统进行次镜姿态校正时,待校正的彗差量级一般在 $\pm 1\lambda$ ($\lambda=0.633\text{ }\mu\text{m}$),对应的次镜调整量为:平移 14.6 mm,旋转 0.014° 。次镜调整机构的位移精度应在 0.1 mm 以上,旋转精度在 0.001° 以上。

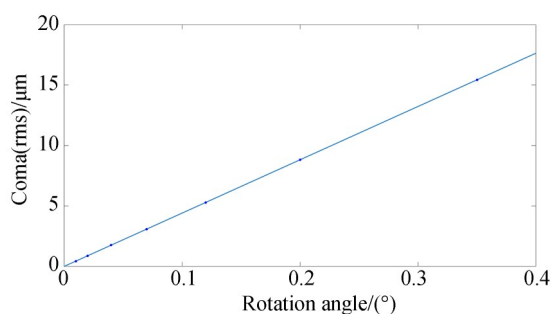


图 5 次镜基于曲率中心旋转指定角度与彗差的关系

Fig. 5 Relationship between angle of rotation by center of curvature and coma

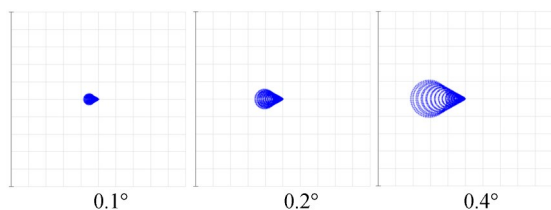


图 6 次镜基于曲率中心旋转指定角度后的像点弥散

Fig. 6 Simulation of image points after rotation by center of curvature

3.2 无彗差点仿真

通过在仿真模型的次镜上施加平移和自转,进行无彗差点的仿真计算。式(1)的主次镜系统无彗差点计算为次镜旋转对应彗差和次镜平移对应彗差在近轴小幅值条件下为线性映射,由此得到一个等效无彗差点,沿该点做圆面运动不引入彗差。将次镜沿一个方向自转一个角度,由此产生轴上彗差;然后,通过对应方向的平移,补偿自转产生的彗差,并记录自转角度和平移距离,作为一组仿真标定数据。每组近轴标定数据能计算出一个无彗差点位置。不同幅值的多组近轴数据计算结果基本一致,说明存在稳定的无彗差点,可以通过无彗差点进行针对像点偏移的次镜姿态修正。

表 1 为旋转 $0.01^\circ\sim 1.0^\circ$ 产生彗差后再通过平移抵消彗差的仿真结果。在近轴(0.5° 以内),

无彗差点位置基本稳定。对标定结果进行最小二乘线性拟合计算无彗差点半径,结果为 -466.95 mm ,即次镜无彗差点位于轴上次镜后端 -466.95 mm 。该点位置与曲率中心点位置(次镜后端 $-1\,013.33\text{ mm}$)具有明显差异,能有效地校正次镜姿态。

表 1 无彗差点仿真标定结果

Tab. 1 Result of CFP calibration in Zemax

旋转/(°)	平移/ μm	无彗差点半径/mm
0.01	-0.081 49	-466.904 453 2
0.04	-0.325 97	-466.910 469 2
0.15	-1.222 49	-466.958 311 2
0.30	-2.445 57	-467.073 656 2
0.50	-4.080 49	-467.601 746 5
1.00	-8.187 39	-469.102 892 2

4 实 验

大口径光电成像望远镜全天区运行,且使用高分辨成像系统时,主要目标为低轨运动目标,观测过程中,可能存在大幅度的望远镜俯仰角变化。由于不同俯仰角的重力影响,由望远镜俯仰角变化引入的次镜姿态偏差较大,如果不进行补偿,会严重影响后端成像系统的工作性能。

4.1 次镜校正能力标定

采用天区位置稳定的北极星作为信标,并通过改变次镜六自由度平台位置调整次镜光路。首先,将像点调整至视场中心。望远镜继续指向北极星信标,将次镜沿无彗差点进行 x 轴旋转和 y 轴旋转,分别旋转 $0.031, 0.063, 0.113, 0.188, 0.281^\circ$,并记录对应的像点偏移量。图 7 和图 8 为 $154''$ 视场内星点在 x 轴旋转 $0.031, 0.113,$

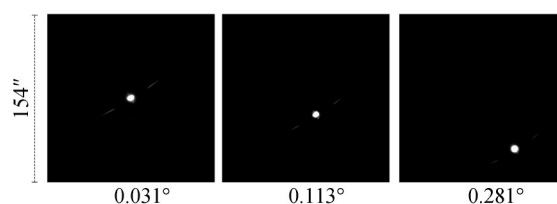


图 7 次镜基于无彗差点 x 轴方向旋转指定角度后星点

Fig. 7 Star images with CFP x -axis rotation of secondary mirror

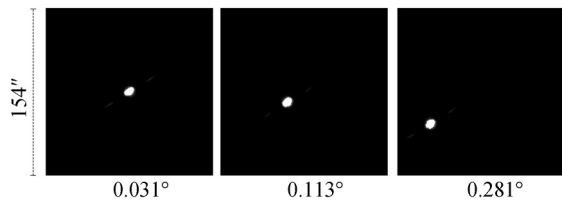
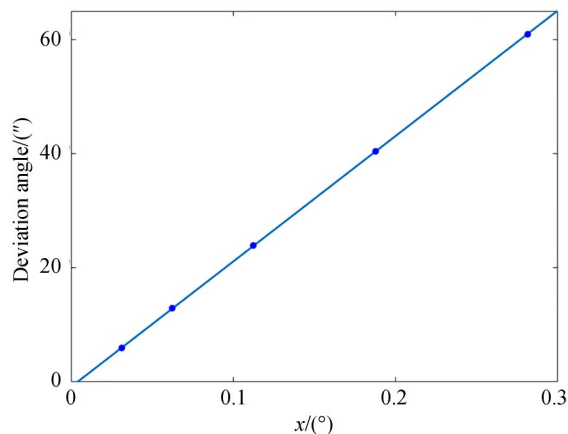


图 8 次镜基于无彗差点 y 轴方向旋转指定角度后星点
Fig. 8 Star images with CFP y -axis rotation of secondary mirror



0.281°和 y 轴旋转 0.031, 0.113, 0.281°时的位置偏移,其偏移呈明显的线性比例,位移方向正交,且旋转后像点无彗尾形状特征,不引入额外的彗差。图 9 为沿无彗差点旋转角度与产生的像点偏移量,以及曲线拟合。可以看出,检测标定数据呈明显的线性分布且两方向的变化速率一致,在近轴部分可以通过次镜无彗差点旋转实现快速精确的像点偏移校正。

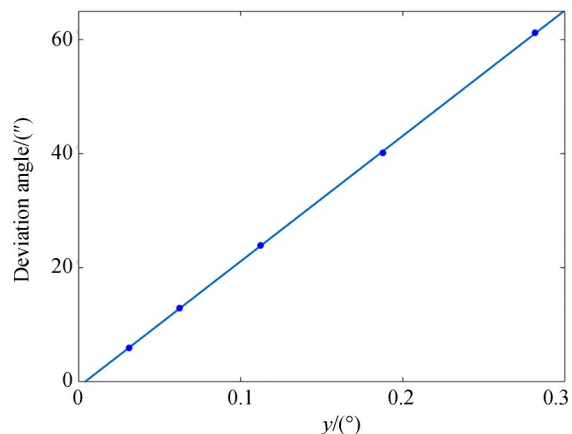


图 9 次镜 x 轴方向旋转和 y 轴方向旋转与像点偏移角度的拟合曲线
Fig. 9 Fitting lines of imaging point position and rotation of x -axis and y -axis

然后,沿曲率中心在 x 方向和 y 方向进行 2° 和 4° 的大幅值旋转,并引入 1 mm 离焦,以观察波前变化影响。上述处理后的星点图如图 10 所示,旋转后产生明显的彗差,且方向正交;尽管进行了大幅值旋转,引入了大幅值彗差,像点仍位于中心附近。因此,采用次镜曲率中心旋转,能有

效校正次镜姿态误差引入的彗差。

4.2 次镜校正效果

图 11 为次镜的校正效果。通过次镜校正,像点由偏移状态修正回视场中心;且像点由具有彗差特征的拖尾弥散斑,恢复为能量集中的圆形亮斑。在各个角度均进行次镜校正,保证像点处于视场中心,且像点无彗差特征,则可以保证望远镜在俯仰运动过程中次镜姿态保持正确。

图 12 为次镜无主动校正时的高分辨成像系统前端的精密跟踪对准系统在望远镜仰角变化时的像点图。在指向北极星(37°仰角)时,像点基本在十字靶标旁边,偏差为 1.12'';指向 11°低仰角时像点向左上偏移,偏差为 7.12'';指向 77°高仰角时,像点位于视场边界,偏差为 12.85''。在高分辨成像系统工作时,需要精密跟踪系统控制快反镜调整光路,将像点维持在视场中心附近。当俯仰引入的像点偏移过大时,由快反镜修正引入的光轴指向偏差会影响高分辨成像系统的成像精度;更严重时,像点偏移量超出快

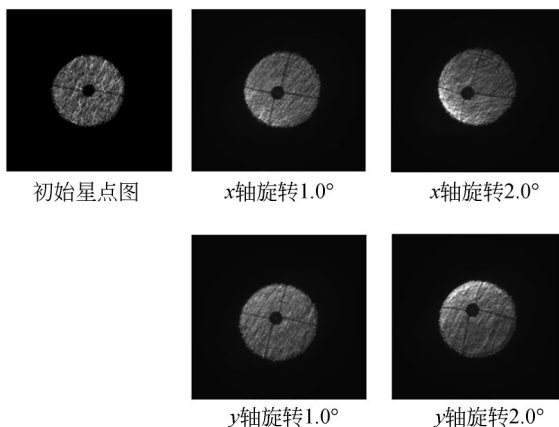


图 10 曲率中心旋转后的离焦星点图
Fig. 10 Unfocused star images with rotation of curvature center

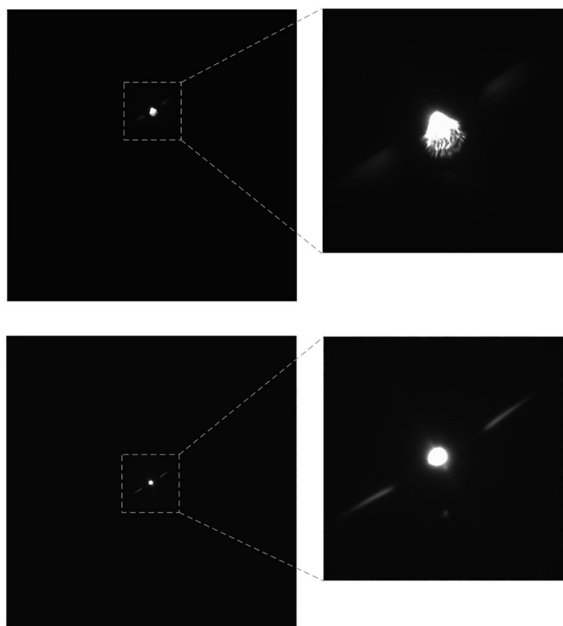


图 11 次镜校正前后的星点图及放大图

Fig. 11 Star images and scaled images with and without correction of secondary mirror

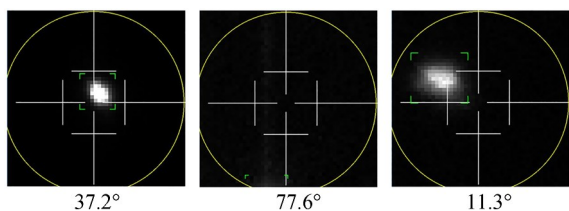


图 12 无次镜校正时各角度精跟像点位置

Fig. 12 Imaging point positions at different elevations without correction of secondary mirror

反镜的动态范围,精密跟踪系统无法正常工作,导致高分辨成像系统无法成像。因此,需要采取次镜主动校正,以补偿仰角变化引入的像点偏移。

图 13 为加入次镜校正后,3 个俯仰角度下的精跟视场像点图。除了进行初始对准的指向北极星时的像点(37°)以外,在低俯仰角(24°)和高俯仰角(75°)时像点均在视场中心十字附近,最大偏差为 $1.80''$ 。

将上述有无次镜校正时的精跟像点偏移量进行整理,并绘制曲线,如图 14 所示(彩图见期刊电子版)。其中,红色曲线为无次镜校正时不同仰角像点偏移采样数据以及拟合的曲线;蓝色曲线为有次镜校正时不同仰角像点偏移采样数据以及拟合的曲线。通过次镜校正,像点偏

移幅度在 $2''$ 以内,大幅减轻了精密跟踪系统闭环校正的负担,能够保证后端成像系统正常工作。

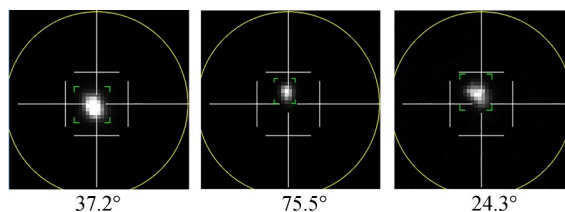


图 13 有次镜校正时各角度精跟像点位置

Fig. 13 Imaging point positions at different elevations with correction of secondary mirror

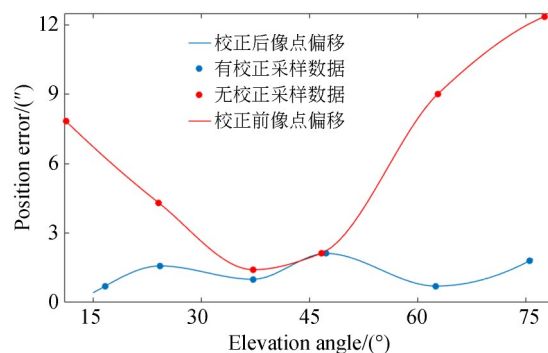


图 14 有无次镜校正精跟视场像点偏心量

Fig. 14 Imaging point position error with and without correction of secondary mirror

5 结 论

本文基于大口径望远镜工作中俯仰角度变化下次镜姿态的调整需求,提出了一种基于次镜曲率中心和无彗差点次镜姿态校正方法。通过 Zemax 仿真验证了该方法的有效性,然后将该方法应用于大口径望远镜。实验结果表明:通过该方法校正次镜姿态,望远镜俯仰运动中次镜姿态引入的成像偏移由 $12.85''$ 缩减至 $1.80''$,有效降低了后端精密跟踪系统视场对准校正的负担,保证了高分辨成像系统的成像质量。

该方法将经典的无彗差点理论应用于大口径望远镜次镜姿态校正,简单易实现,效果显著,能够满足精密跟踪系统前端的光路粗对准需求,保证精密跟踪系统的正常运行。

参考文献:

- [1] MARTIN H M, CUERDEN B, DETTMANN L R, *et al.* Active optics and force optimization for the first 8.4-m LBT mirror [C]. *SPIE Astronomical Telescopes + Instrumentation. Proc SPIE* 5489, *Ground-Based Telescopes, Glasgow, United Kingdom*. 2004, 5489: 826-837.
- [2] SCHIPANI P, NOETHE L, MAGRIN D, *et al.* Active optics system of the VLT survey telescope [J]. *Applied Optics*, 2016, 55(7): 1573-1583.
- [3] SMITH B, CHYLEK T, CUERDEN B, *et al.* The active optics system for the Discovery Channel Telescope [J]. *Proc. of SPIE*, 2010, 7399: 73991T.
- [4] WILSON R N, FRANZA F, NOETHE L. Active optics [J]. *Journal of Modern Optics*, 1987, 34(4): 485-509.
- [5] 曹玉岩, 王建立, 陈涛, 等. 基于 Hexapod 平台的地基大型光学望远镜失调误差主动补偿[J]. *光学精密工程*, 2020, 28(11): 2452-2465.
- CAO Y Y, WANG J L, CHEN T, *et al.* Active compensation of aberration for large ground-based telescope based on Hexapod platform [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2020, 28(11): 2452-2465. (in Chinese)
- [6] 赵宏超, 张景旭, 杨飞, 等. 1.2 m 望远镜次镜支撑结构设计[J]. *光学精密工程*, 2017, 25(10): 2614-2619.
- ZHAO H CH, ZHANG J X, YANG F, *et al.* Secondary mirror supporting structure for 1.2 m telescope [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2017, 25(10): 2614-2619. (in Chinese)
- [7] 赵海波, 赵伟国, 董吉洪, 等. 大型空间望远镜次镜调整机构精度分析与测试[J]. *光学精密工程*, 2019, 27(11): 2374-2383.
- ZHAO H B, ZHAO W G, DONG J H, *et al.* Accuracy analysis and testing for secondary mirror adjusting mechanism in large space telescope [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2019, 27(11): 2374-2383. (in Chinese)
- [8] ESCOLLE C, MICHAU V, FERRARI M, *et al.* Misalignment estimation for active telescopes [J]. *CEAS Space Journal*, 2019, 11(4): 553-559.
- [9] HERRERA J, NAJERA M R, GUERRERO C A. Off-axis exact ray tracing algorithm for zero coma point determination in classical and non-classical reflective telescopes [J]. *Revista Mexicana De Astronomía y Astrofísica*, 2022, 58(1): 37-45.
- [10] WILSON R N. *Reflecting Telescope Optics I* [M]. Second Edition. New York: Springer Berlin Heidelberg, 2004.

作者简介:



朱 熠(1987—),男,辽宁沈阳人,博士,工程师,2011年于大连理工大学获得学士学位,2020年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事大口径望远镜波前检测和主动光学控制算法方向的研究。E-mail: 13998211017@139.com