

10-18-2022

Analysis and Research on End-to-end Optical Image Quality of Large Aperture Off-axis Space Telescope

Zhang Ban

Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China; banzhang0711@163.com

Xiaobo Li

Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China; lixiaobo104@163.com

Xun Yang

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

Yuxi Jiang

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

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research](#), [Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Analysis and Research on End-to-end Optical Image Quality of Large Aperture Off-axis Space Telescope

Abstract

Abstract: In order to evaluate the image quality of space on orbit telescope under the comprehensive constraints, *the chain calculation analysis method is adopted. The main error factors of the optical image quality degradation are divided into six static errors and two dynamic errors.* After calculation, the optical system wavefront aberration under the static loading error is reduced to 0.057λ on average. Under the influence of the static and dynamic errors, the 80% energy concentration of point spread function increases gradually. The method can be used to analyze and evaluate the influence of image stabilization control and precise temperature control on the image quality of space telescope, and can identify the key factors that restricting the high image quality of space telescope.

Keywords

chain, space telescope, optical image quality, point spread function(PSF)

Recommended Citation

Zhang Ban, Xiaobo Li, Xun Yang, Yuxi Jiang. Analysis and Research on End-to-end Optical Image Quality of Large Aperture Off-axis Space Telescope[J]. Journal of System Simulation, 2022, 34(10): 2255-2263.

大口径离轴式空间望远镜全链路像质分析研究

班章, 李晓波*, 杨勋, 姜禹希

(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: 针对复杂工况下空间望远镜成像质量难以综合评价的问题, 采用了全链路计算方法对在轨工作的望远镜进行分析。将像质退化的因素归结为 6 项静态误差和 2 项动态误差。经计算, 加载静态误差后光学系统波像差平均下降至 0.057λ ; 受静态和动态误差因素的影响, 全视场点扩散函数 80% 能量集中度角分辨率逐步增大。实验结果表明: 本文采用的方法可用于分析评估精密温控、稳像控制等技术对空间望远镜像质的影响, 同时也是寻找制约望远镜像质优良的关键因素。

关键词: 全链路; 空间望远镜; 光学像质; 点扩散函数

中图分类号: TP391

文献标志码: A

文章编号: 1004-731X(2022)10-2255-09

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.21-0582

Analysis and Research on End-to-end Optical Image Quality of Large Aperture Off-axis Space Telescope

Ban Zhang, Li Xiaobo*, Yang Xun, Jiang Yuxi

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

Abstract: In order to evaluate the image quality of space on orbit telescope under the comprehensive constraints, the chain calculation analysis method is adopted. The main error factors of the optical image quality degradation are divided into six static errors and two dynamic errors. After calculation, the optical system wavefront aberration under the static loading error is reduced to 0.057λ on average. Under the influence of the static and dynamic errors, the 80% energy concentration of point spread function increases gradually. The method can be used to analyze and evaluate the influence of image stabilization control and precise temperature control on the image quality of space telescope, and can identify the key factors that restricting the high image quality of space telescope.

Keywords: chain; space telescope; optical image quality; point spread function(PSF)

引言

观测太空、摄取图像需要精密的光学设备, 空间望远镜具备承担这项任务的能力。为了准确分析实际空间信息, 需要掌握空间望远镜光学系统自身成像水平^[1-3]。光学系统链路仿真方法基于成像物理机制对光学系统自身成像质量进行计算, 可以用于分析研究各误差因素对光学像质的影响^[4]。

相比实验测试分析, 准确的仿真可有效缩短设备研制周期, 节约制造成本。已有研究表明, 将光机电热等多因素集成后, 综合分析空间望远镜成像水平, 便于分析寻找影响像质的关键设计参数, 进而提升光学系统成像质量, 同时避免了制约因素复杂难以综合评价的困难^[5-6]。空间望远镜从设计到研制、从在轨运行到后期维护, 光学系统链路仿真分析研究需要贯穿始终。在轨运行

收稿日期: 2021-07-03 修回日期: 2021-11-03

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFE0205000)

第一作者: 班章(1988-), 男, 博士, 助理研究员, 研究方向为空间光机集成系统全链路仿真分析。E-mail: banzhang0711@163.com

通讯作者: 李晓波(1987-), 男, 硕士, 助理研究员, 研究方向为空间光学遥感器集成仿真。E-mail: lixiaobo104@163.com

的哈勃望远镜采用链路仿真给出不同探测器的点扩散函数(point spread function, PSF), 并形成了仿真分析软件 Tim Tiny^[7], 用于分析不同工作环境下望远镜成像水平^[7-9]; 2020年退役的斯皮策红外空间望远镜采用全链路模拟了低温工作状态下的光学像质^[10]; 即将发射入轨的詹姆斯韦伯望远镜模拟了同轴光学系统下动态点扩散函数^[11]; 欧洲雅典娜空间望远镜采用链路仿真技术预测了在轨工作状态下成像水平, 为后续优化设计提供指导^[12]。目前, 我国已经开展了大口径离轴反射式空间望远镜研究, 该光学系统可以获得高分辨率的点扩散函数, 更加有利于天文学中暗物质的探测研究^[13]。但关于该系统全链路像质计算分析的详细研究很少。

本文开展了在轨工作状态下离轴反射式光学系统成像分析工作, 将光机电热等多因素集成后, 综合对光学系统在轨像质进行评价。计算了空间望远镜运行期间静态和动态2种状态下的像质。将主要静态误差因素分为光学系统设计残差、反射镜加工制造误差、重力场变化误差、在轨温度变化误差、反射镜安装不平度误差和装调误差6项; 将主要动态误差因素分为微振动和精密稳像2项。采用六自由度位置偏移量和镜面形貌变形量2类参数描述镜组件误差模型。镜体制作完成前形貌参数尚未确定, 采用数据融合法模拟形貌误差以统计分析准确性。经过计算, 静态和动态误差下全视场点扩散函数80%能量集中度角分辨率REE 80(radius of 80% encircled energy)依次增大为设计值的1.44倍和1.69倍。采用唯一变量法计算分析各静态误差因素对空间望远镜像质的影响, 其中, 反射镜加工制造误差引起的波前误差退化量最大。

1 全链路仿真模型

在轨工作期间, 空间望远镜主要分为巡视和凝视2种工作模式^[13], 2种模式下摄取的图像信息均由实际信息与空间望远镜光学系统自身点扩

散函数卷积运算获得。为了准确分析实际空间信息, 需要掌握空间望远镜光学系统自身成像水平。当望远镜处于巡视状态下, 实时观测的图像为瞬态光学信息, 造成像质退化的因素由静态误差构成。当望远镜对某一天区凝视观望时, 光学像质退化因素除含有静态误差外, 同时应包含整机抖动、姿态校正、曝光快门开关等因素引起的动态误差。由于整机抖动误差为凝视状态下的主要动态误差因素, 同时其他动态因素对像质的影响相对较小, 本文暂对整机抖动一项动态误差进行计算。

通过将静态误差因素集成至全链路系统中计算得到巡视状态下的点扩散函数。在静态误差基础上叠加动态误差因素计算得到凝视状态下的PSF^[14], 根据能量集中度和椭率定义可以综合分析PSF优良情况^[13], 进而预研设计或加工结果可否满足天文学家等用户的使用需求。

图1为光学全链路仿真分析流程。值得注意的是, 本文设定在轨温度边界条件采用极端工况, 可分析整机像质退化最大情况, 因此将温度变化误差视为静态误差, 通常控温技术可使整机温度变化小于5℃^[15]。

2 在轨静态与动态误差

2.1 静态巡视误差

2.1.1 初始设计残差

本文采用离轴反射式光学系统, 如图2所示。该系统由4片反射镜组成 $M_1 \sim M_4$, F 数为14, 通光口径为2 m, $M_2 \sim M_4$ 镜面积分别为 M_1 的1/20、2/5和1/20, 有效视场为 $1.1^\circ \times 1^\circ$ 。望远镜系统光路图, 经过优化设计, 系统全视场波像差平均值优于 $\lambda/30$, 全视场点扩散函数80%能量集中度角分辨率平均值小于0.1", 达到衍射极限水平^[13]。由于视场具有连续性, 本文在有效视场内选取等角度25视场节点用于评估全视场成像质量, 视场点位置对应各编号位置, 编号13对应中心视场。

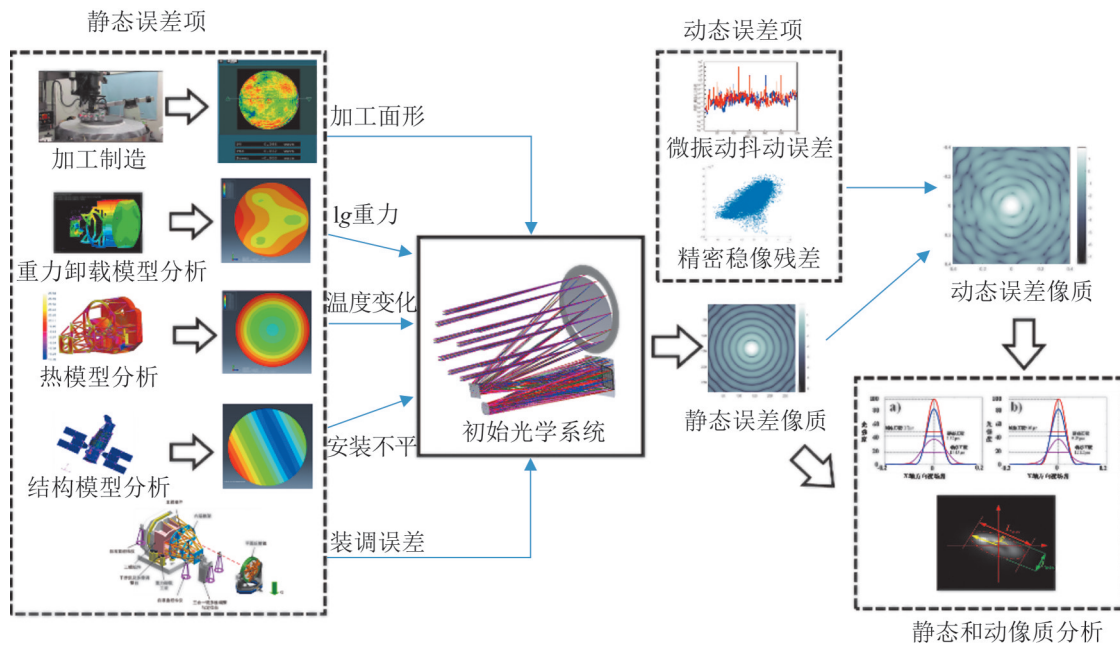


图1 空间望远镜光学链路系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of optical chain system of space telescope

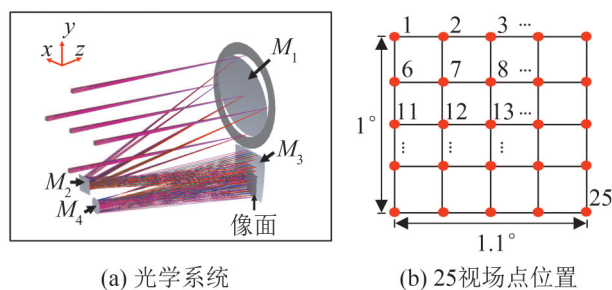


图2 离轴三反射式望远镜

Fig. 2 Location diagram of unobstructed reflective telescope

2.1.2 加工面形误差

镜面加工完成后, 通过测试可得到加工面形, 将测试数据导入仿真分析链路中可计算加工误差引起的像质退化程度。在镜面加工完成前, 本文通过数值模拟的方式预估加工制作产生的镜面形貌变化数据。参照现有的测试结果统计镜面误差频率成分特性^[16], 将形貌变形划分成低、中高频2段。采用Zernike多项式拟合低频成分, 采用函数模拟器生成中高频成分, 再将低、中高频面形误差仿真数据融合。根据统计结果可知, 中高频成分统计量满足正态分布。首先, 生成具有正态分布特点的随机矩阵 q , 要求其期望值为0, 标准差

为1; 然后通过滤波函数对随机矩阵进行滤波, 得到中高频面形误差分布函数:

$$D(x, y) = p(x, y) \otimes q(x, y) \quad (1)$$

式中: $p(x, y)$ 为滤波函数; $q(x, y)$ 为随机矩阵; $D(x, y)$ 为中高频误差分布函数。已知, 滤波函数可通过自相关函数计算得到:

$$p(x, y) = F^{-1} \{ F [A(x, y)]^{1/2} \} \quad (2)$$

式中: $A(x, y)$ 为表面自相关函数。

已知功率谱密度函数与表面自相关函数满足傅里叶变换关系:

$$A(x, y) = \iint PSD(X, Y) e^{-i(Xx + Yy)} dXdY \quad (3)$$

式中: $PSD(X, Y)$ 为功率谱密度函数。通常, 中高频误差表面功率谱密度函数可通过标准差以及相关长度的函数关系进行描述:

$$PSD(X, Y) = \frac{l_x l_y \sigma}{4\pi} e^{-i(X^2 l_x^2 + Y^2 l_y^2)} \quad (4)$$

式中: σ 为面形仿真数据标准差; l_x 、 l_y 分别为面形仿真数据在 x 、 y 方向上的相关长度。设定标准差和相关长度参数, 根据式(1)~(4)计算得到中高频误差函数。

2.1.3 在轨重力变化误差

由于地球与空间环境存在 1g 重力差异，发射入轨前需将各光学元件位置安装至-1g 重力位置。通常各光学元件与桁架之间接触点有限，难以保证各光学元件全部节点均在理想的-1g 位置上，需要在静态像质分析中引入重力场变化误差。

2.1.4 在轨温度变化误差

空间望远镜在轨工作期间，内部装置受热控系统的影响，产生温度变化较小。但外部结构与支撑平台受太阳辐射等因素影响将产生较大温度波动^[13]，进而影响各镜的位置和形貌。设定太阳常数取冬至时刻 1 412 W/m²，地球红外取 235 W/m²，轨道倾角设定 0°，选取高温极限工况对望远镜整体进行热分析，获取各镜位置参数及镜面 RMS 面形。

2.1.5 安装不平度误差

以主镜 M₁ 为例，其口径为 2 m，镜体各安装截面间的距离约为 1 m，由于安装不平造成镜面变形。依次分配各镜的不平度误差为 0.1、0.05、0.08 和 0.05 mm，计算获取各镜的 RMS 面形。

2.1.6 装调误差

在望远镜组装完成前通过蒙特卡洛法模拟系统装调误差。以主镜 M₁ 为基准，在三镜 M₃ 引入六自由度位置误差量，然后根据调控指标，通过调整次镜 M₂ 和像面的位置优化误差量，获取各光学组件的位置参数。将参数加载至设计系统中即得到含有装调误差的光学系统。统计 100 组装调误差引起的波前退化量，选取最大值对应的误差参数作为全链路装调误差参数，统计结果如图 3 所示。

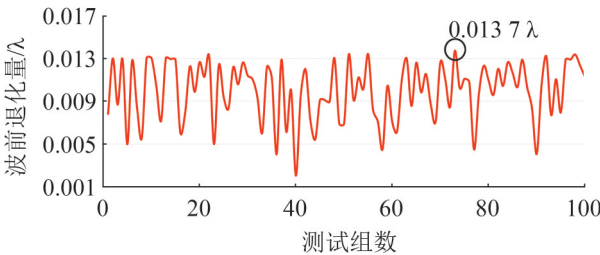


图 3 100 组装调误差引起的全视场波像差退化统计结果
Fig. 3 Statistical results of wavefront aberration degradation in full field of view caused by 100 installation and adjustment error

通过上述计算结果可以评估装调范围是否将退化量控制在要求范围内。本文将统计结果的最大值第 73 组参数作为链路仿真参数，其波前退化量为 0.013 7 λ。

在 6 项静态误差中，在轨温度变化误差、重力场变化误差和系统装调误差 3 项误差会造成光学元件六自由度下的位置偏移，使光学元件的实际位置与设计值存在差异。采用有限元分析方法，加载温度及重力的边界条件后，计算得到各镜六自由度位置偏移量，如表 1 所示。其中，ΔX、ΔY、ΔZ 表示沿轴向的偏移量；ΔRX、ΔRY、ΔRZ 表示绕轴向的偏移量，且满足左手定则。结果表明，3 项误差中温度变化引起偏移量最小，且各向偏移波动平缓，主要由于精密控温后系统温度梯度变化小导致；克服重力变化需要预先沿 x 轴方向调整 M₂ 和 M₄ 的位置，经计算，M₁、M₃ 和像面需要调整的位置随之变大，使系统保持整体移动；装调误差参数由随机分配方法得到，与重力误差类似，当 M₃ 引入的误差较大时，M₂ 的调整量随之增大。

表 1 重力和温度变化引起各镜及像面六自由度位置变化量
Table 1 6-DOF position variation caused by the change of gravity and temperature

光学 组件	ΔX/μm			ΔRX/(")			ΔY/μm			ΔRY/(")			ΔZ/μm			ΔRZ/(")		
	温度	重力	装调	温度	重力	装调	温度	重力	装调	温度	重力	装调	温度	重力	装调	温度	重力	装调
M ₁	1.90	-21	0.01	-0.06	0.62	0.01	2.63	2.40	0.15	0.10	0.48	0.01	-0.20	0.26	0.06	-0.07	0.34	-0.01
M ₂	3.35	-82	-209	-0.55	-2.95	-18.50	-1.75	-0.08	-362	-0.09	-1.08	11.20	-0.15	-1.42	94.63	-0.07	7.02	0.02
M ₃	-0.47	-14.6	51.70	-0.03	0.07	-58.90	3.46	0.78	256	-0.08	0.20	37.20	3.09	2.96	19.55	0.24	-1.74	0.16
M ₄	-0.50	-171	-0.06	0.03	0.36	187	-1.79	-22.20	-0.28	-0.08	19.10	-101	2.20	18.40	-136	-0.91	7.06	-0.03
像面	0.40	-26.7	0.03	-1.23	-0.39	-0.01	0.33	-4.93	0.05	-0.26	-4.31	0.01	1.44	7.76	0.01	0.17	1.84	0.06

分析成像质量除需要考虑各光学元件及像面的六自由度偏移误差外, 还应考虑其表面形貌变化误差。图4为4项误差因素下形貌变化云图。通常加工镜面的磨头形状具有一定尺寸, 经加工后, 镜面形貌误差的中高频成分将多于其他3项误差。

受桁架支撑和传热的影响, 重力与温度误差下各镜形貌起伏量要多于镜面安装不平度误差; 同时, 由于 M_1 和 M_3 镜口径相对较大且支撑连接结构较多, 引起高频面形误差成分多于 M_2 和 M_4 镜。

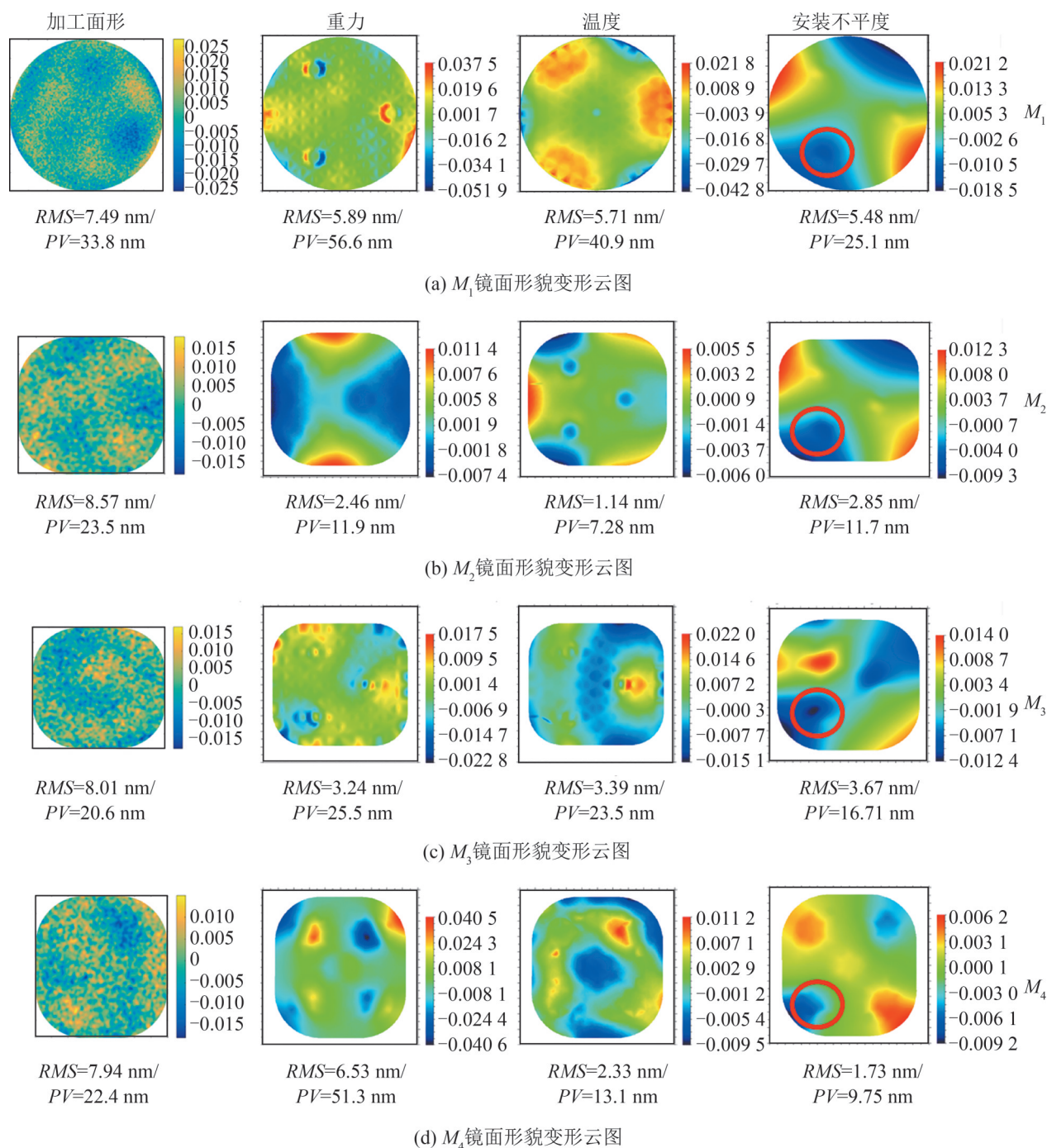


图4 各误差工况下 $M_1 \sim M_4$ 镜面形貌变形云图

Fig. 4 Deformation nephogram of $M_1 \sim M_4$ mirror surface morphology under four term error

对比 4 种误差引起镜面形貌变形云图可知，重力、温度和安装引起的面形变化多为低频成分。由于 M_1 和 M_3 口径相对较大，受支撑与连接结构多的影响，高频成分增多。加工制造引起的各镜面形变化除含有低频成分外，中高频成分要多于其他 3 项误差。

将上述 2 类误差分别以局部坐标系下位置坐标和矢高文件(.int)的形式依次加载至光学系统分析软件中，即可计算各视场静态误差下的光学成像质量。通常，大口径成像系统需选取 PSF 及波前误差对像质进行评价，本文依次计算图 2(b)所示的 25 个视场的 PSF 和全视场波前。

2.2 动态凝视误差

本文主要分析整机抖动误差对望远镜凝视像质造成的影响。受电器设备影响，望远镜对某一天区凝视时的工作环境为振动环境，各镜每一时刻都将产生六自由度的变化。

在精密成像光学系统中平面镜通常具有稳像功能^[1]，可校正低频振动成分，本系统中 M_4 镜具备该项功能。因此，本文按频段将动态误差划分为未经校正的高频抖动误差与校正后的低频稳像残差。高频抖动误差均引起各镜位置实时变化，低频稳像残差引起 M_4 镜实时变化，依次将各时刻下各镜的位置偏移量加载至光学系统分析软件中，计算得到单一时刻下各视场 PSF。

本文选用的光学系统为非相干系统，光强度为线性系统，长时间曝光下的动态 PSF 等于各个时刻 PSF 的叠加。根据后端 CCD 探测器截止频率确定 PSF 采样时间间隔为 1 ms，计算 300 s 持续曝光下的动态 PSF。图 5(a)所示为光学系统加载各静态误差后，相同采样面积下的中心视场 PSF，已知 128 个像素对应的采样间距为 0.4 μm 。在高采样图像中可以看到 PSF 点斑存在明显的旁瓣效应。在静态误差基础上加载动态误差，对比相同采样下图像，动态 PSF 弥散程度增加，能量集中度角分辨率增大，同时椭圆度数值改变，如图 5(b)所示。

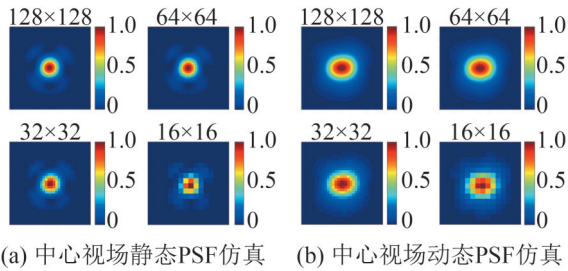


图 5 静态和动态 PSF 计算结果
Fig. 5 Top view of static and dynamic PSF calculation results

3 光学像质计算及分析

3.1 静态像质分析

全链路仿真具有诸多优点，在评估整体像质的同时，可通过控制变量法单独分析各项误差因素引起的像质退化量，改良设计进而提升成像水平。初始光学设计系统波前像差优于 $\lambda/30$ ，能量集中度优于 0.1”，逐一在光学设计系统中加载各项误差，计算全视场像差退化量及点扩散函数 REE 80 退化量，如表 2 所示。结果表明，反射镜加工误差的波前像差退化量最大，且波前退化量与点扩散函数 REE 80 退化量并不严格相关；同时，安装不平度误差对像质造成的影响与设计系统波前退化量接近，因而不可忽视。上述结果表明，优化加工镜面水平、设置合理重力预补偿和温控方案可提升光学系统成像能力，镜面安装不平度误差量超过 0.1 mm 将造成高于 $\lambda/40$ 波前退化量。

表 2 各项静态误差引起全视场的波前差和点扩散函数 REE 80 退化量对比

Table 2 Comparison of wavefront aberration and 80% energy concentration degradation of point spread function caused by static errors		
静态误差项	波前退化量	80% 能量集中度退化量/(")
光学设计系统	优于 $\lambda/30$	优于 0.1
重力变化	0.025 3 λ	0.009 5
温度变化	0.023 0 λ	0.017 9
安装不平度	0.024 0 λ	0.003 5
装调误差	0.013 7 λ	0.004 4
加工制造	0.033 6 λ	0.022 9

3.2 动态像质分析

全链路仿真通过关联光机系统对望远镜LOS抖动进行分析, 评估各视场点像的模糊状态, 以预测工程或科学应用指标满足度。图6为中心视场点LOS抖动随时间变化计算结果。在凝视状态下, 望远镜曝光时长需超过200 s。计算结果表明, 在曝光时长超过20 s后, LOS抖动量趋于稳定, 统计 3σ 误差量小于1/1 000。对此, 在大计算量运算时, 可通过缩短计算时长提升仿真效率。

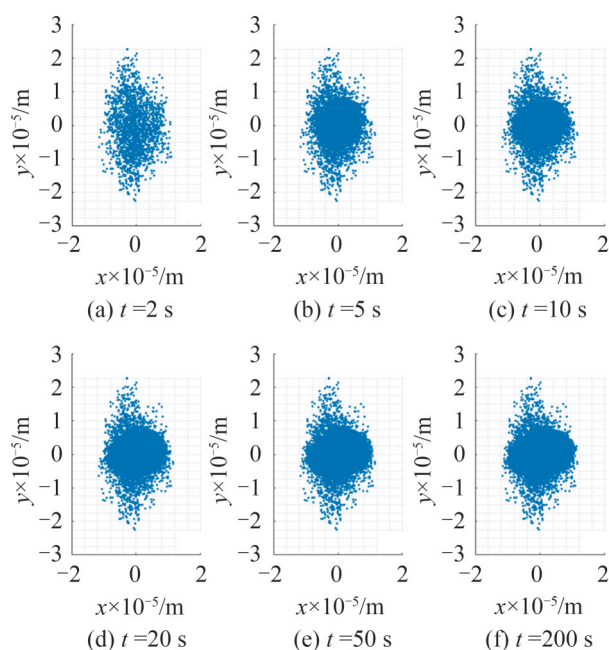


图6 中心视场LOS抖动分析
Fig. 6 LOS jitter analysis of central field of view

采用线性叠加方法计算各视场动态点扩散函数, 图7为第73组仿真链路模型中心视场半高全宽(full-width at half-maximum, FWHM)值对比。 x 轴切向和 y 轴切向的FWHM分别由设计时的9.17、9.09变化为15.43、12.12 μm , 点斑形状由近似圆形转向椭圆形并发生弥散。

图8为25视场动态点扩散函数REE 80退化计算结果。初始设计系统加载静态误差后REE 80平均增加了1.44倍; 进一步加载动态误差后REE 80平均增加了1.69倍。采用离轴系统计算得到的初

始视场像质没有显示关于中心视场对称分布状态, 同时, 受静态和动态误差因素的影响, 全视场PSF REE 80依次退化, 且分布状态平缓, 各项误差因素不会引起局部视场PSF形态锐变。

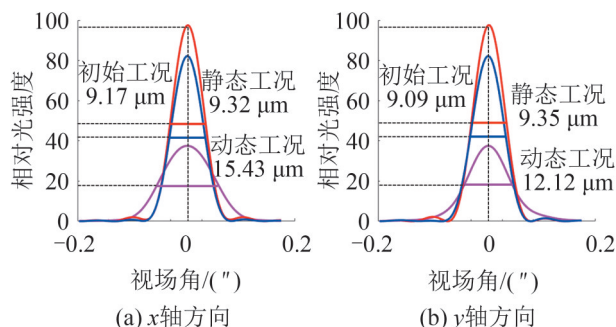


图7 3种模型 x 轴和 y 轴方向PSF横切图及FWHM对比
Fig. 7 Comparison of PSF crosssection and FWHM of x -axis and y -axis under three models

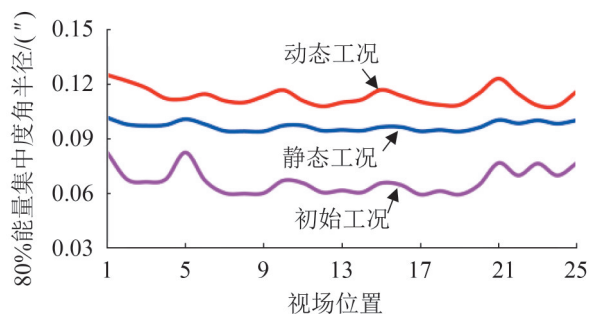


图8 初始设计、静态凝视和动态凝视状态下全视场点扩散函数REE 80对比
Fig. 8 Comparison of 80% encircled energy radius of point spread function under design, static and dynamic conditions

4 结论

本文基于全链路仿真技术对复杂工况下的在轨空间望远镜光学像质进行分析。空间望远镜在轨工作状态分为巡视和凝视两种, 巡视状态下主要误差因素主要由6项静态误差构成, 凝视状态在巡视状态基础上叠加2项动态误差。分别采用为六自由度位置偏移量和形貌变形量两种误差参数表征各项静态误差模型, 进而计算得到静态误差下的PSF; 由于本光学系统为非相干光学系统, 因此采用了各时刻线性叠加方法计算动态误差下的PSF。

计算结果表明, 巡视状态下反射镜加工制造误差造成全视场波像差退化 $0.033\ 6\ \lambda$, 在各项静态误差中造成像质退化量最大。因此可知通过优化镜面加工面形提升望远镜成像水平最为显著; 同时, 凝视状态下全视场PSF REE 80相比巡视状态平均增加了1.44倍, 比设计状态平均增加了1.69倍。全视场PSF REE 80的分布状态平缓, 各项误差因素不会引起局部视场PSF形态锐变。同时, 镜面安装不平度误差量超过 $0.1\ \text{mm}$ 将造成高于 $\lambda/40$ 波前退化量。

采用全链路仿真分析方法可以评价在轨空间望远镜综合各项误差因素下的成像质量, 同时可用于分析造成像质退化的关键因素, 优化设计指标。本文在分析过程中, 引起光学像质退化因素不应局限于现有误差。在未来工作中考虑建立光学系统姿态校正、曝光快门、拼接CCD等误差因素模型并将计算数据引入链路分析系统, 更为全面分析在轨空间望远镜光学像质。

参考文献:

- [1] Kauffmann O B, O Le Fevre, Ilbert O, et al. Simulating JWST Deep Extragalactic Imaging Surveys and Physical Parameter Recovery[J]. *Astronomy and Astrophysics* (S1432-0746), 2020, 4(15): 1-29.
- [2] Pires S, Vandenbussche V, Kansal V, et al. Euclid: Reconstruction of Weak-Lensing Mass Maps for Non-Gaussianity Studies[J]. *Astronomy and Astrophysics* (S1432-0746), 2020, 638(A141): 1-16.
- [3] Li N, Becker C, Dye S. The Impact of Line-of-Sight Structures on Measuring H_0 with Strong Lensing Time-Delays[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*(S1365-2966), 2021, 504(2): 2224-2234.
- [4] Holler M, Lenain J P, M D Naurois, et al. A Run-Wise Simulation and Analysis Framework for Imaging Atmospheric Cherenkov Telescope Arrays[J]. *Astroparticle Physics*(S0927-6505), 2020, 123: 102491.
- [5] 杨勋, 徐抒岩, 马宏财, 等. 径向温度梯度对轻量化反射镜面形精度的影响[J]. *光学精密工程*, 2019, 27(7): 1552-1560.
Yang Xun, Xu Shuyan, Ma Hongcai, et al. Influence of Radial Temperature Gradient on Surface Figure of Lightweight Reflective Mirror[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2019, 27(7): 1552-1560.
- [6] 杨德华, 徐灵哲. 系统仿真在天文望远镜设计中的应用综述[J]. *系统仿真学报*, 2009, 21(10): 2801-2805.
Yang Dehua, Xu Lingzhe. Application Review of System Simulation Technique in Astronomical Telescope Design[J]. *Journal of System Simulation*, 2009, 21(10): 2801-2805.
- [7] Rhodes J D, Massey R J, Albert J, et al. The Stability of the Point Spread Function of the Advanced Camera for Surveys on the Hubble Space Telescope and Implications for Weak Gravitational Lensing[J]. *The Astrophysical Journal Supplement Series*(S1538-4365), 2007, 172(1): 203-218.
- [8] Deppo V D, Focardi M, Middleton K, et al. An Afocal Telescope Configuration for the ESA ARIEL Mission[J]. *CEAS Space Journal*(S1868-2502), 2017, 9(4): 379-398.
- [9] Dournaux J L, Franco A D, Laporte P, et al. Operating Performance of the Gamma-ray Cherenkov Telescope: An End-to-end Schwarzschild-Couder Telescope Prototype for the Cherenkov Telescope Array[J]. *Nuclear Instruments & Methods in Physics Research* (S0168-9002), 2017, 845: 355-358.
- [10] Baker K, Culton E, Lang J, et al. An Updated Re-entry Analysis of the Hubble Space Telescope[J]. *Journal of Space Safety Engineering*(S2468-8967), 2020, 7(3): 404-410.
- [11] 李晓波, 张远清. 集成仿真技术在空间光学遥感器设计中的应用[J]. *装备环境工程*, 2016, 13(4): 102-111.
Li Xiaobo, Zhang Yuanqing. Application of Integrated Simulation Technology in the Design of Space Optical Remote Sensor[J]. *Equipment Environmental Engineering*, 2016, 13(4): 102-111.
- [12] Dauser T, Falkner S, Lorenz M, et al. SIXTE: the Generic X-ray Instrument Simulation Toolkit[J]. *Astronomy and Astrophysics*(S0004-6361), 2019, 630: A66.
- [13] 詹虎. 载人航天工程巡天空间望远镜大视场多色成像与无缝光谱巡天[J]. *科学通报*, 2021, 66(11): 1290-1298.
Zhan Hu. The Wide-field Multiband Imaging and Slitless Spectroscopy Survey to be Carried out by the Survey Space Telescope of China Manned Space Program[J]. *Chinese Journal*, 2021, 66(11): 1290-1298.
- [14] Johannes S, Peter E. Model-based Vibration Control for Optical Lenses[J]. *Multibody System Dynamics* (S1384-5640), 2020, 49: 355-375.
- [15] 于涛, 王永成, 代霜, 等. 基于温度水平的空间相机主动热控系统[J]. *红外与激光工程*, 2015, 44(1): 249-253.
Yu Tao, Wang Yongcheng, Dai Shuang, et al. Active Thermal Control System for Space Camera Based on Temperature Level[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(1): 249-253.

- [16] 吕洋. 光学表面中高频误差对高分辨率成像信噪比影响研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2018.
Lü Yang. Research on Impact of Mid and High Spatial

Frequency Error to Signal to Noise Ratio of Optical Surfaces[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2018.