

空间相机波像差灵敏度及集成仿真方法

薛志鹏, 丛杉珊, 孙美娇, 张雷*, 刘金全, 于鑫

(长光卫星技术股份有限公司, 吉林 长春 130102)

摘要: 针对一种空间相机新型单杆主承力结构, 采用波像差灵敏度模型和集成仿真分析两种方法, 实现光机结构轻量化设计过程中的系统波像差评价, 以保证在力学条件下的成像质量。所提出的波像差灵敏度方法能够基于波像差与失调量的线性关系进行构建, 对于以相机成像质量为约束条件指导光机结构的优化设计具有重要意义。首先, 基于光学系统的失调原理, 推导了光学元件失调量与系统波像差的灵敏度模型。然后, 采用有限元方法获取力学工况下的节点位移量, 并基于最佳拟合 (best-fit) 方法计算主、次镜的失调量, 对失调后的系统进行光学分析得到系统的波像差。最后, 针对 5 kg 级空间光学相机, 采用所提出的两种方法进行了建模与分析, 并开展了相应的重力工况分析与试验。灵敏度分析方法相对于光机集成软件仿真方法误差为 16.8%, 所提出的方法能够应用于设计阶段对系统成像性能的快速评估。

关键词: 微纳卫星; 空间相机; 光机集成优化; 力学性能; 波像差

中图分类号: O436 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20220109

Wavefront aberration sensitivity and integrated analysis method for spaceborne camera

Xue Zhipeng, Cong Shanshan, Sun Meijiao, Zhang Lei*, Liu Jinquan, Yu Xin

(Chang Guang Satellite Technology Co., Ltd., Changchun 130102, China)

Abstract: Aiming at a new type of single cantilever main support structure of space camera, both wave aberration sensitivity model and integrated simulation analysis are proposed to calculate the camera's wave aberration in the lightweight design of optomechanical structure, so as to ensure the imaging quality under mechanical conditions. The proposed wave aberration sensitivity method can model based on the linear relationship between wave aberration and misalignment, which is of great significance to guide the optimal design of optomechanical structure under the constraint of the camera imaging quality. Firstly, the sensitivity model of optical element misalignment and wavefront aberration is derived based on the principle of optical system misalignment. Then, the nodal displacements under mechanical condition are obtained by finite element method, and the misalignment of primary and secondary mirrors is calculated based on best-fit fitting method. The wavefront aberration of the camera is obtained by the optical analysis of the misaligned system. Finally, the two methods proposed in this paper are used for modeling and analysis of a 5 kg level space optical camera, and the corresponding gravity condition analysis and test are also performed. The error of sensitivity model is 16.8%

收稿日期: 2022-02-17; 修订日期: 2022-05-07

基金项目: 吉林省科技发展计划重点研发项目 (20220201029GX)

作者简介: 薛志鹏, 男, 助理研究员, 博士, 主要从事光机集成设计与优化方面的研究。

通讯作者: 张雷, 男, 研究员, 博士生导师, 博士, 主要从事光学遥感卫星、航天结构方面的研究。

compared with the optomechanical integrated simulation method, and the sensitivity model can be applied to the rapid calculation of system imaging performance in the design phase.

Key words: micro-nano satellite; spaceborne camera; optomechanical integrated optimization; mechanical performance; wavefront aberration

0 引言

近年来,随着微纳遥感卫星星座的发展,对空间光学相机的尺寸和质量提出了更为严格的要求,需要轻量化程度更高的光机结构来进一步实现紧凑型光学遥感相机的设计^[1]。轻量化程度高的设计不仅要在结构性能和质量参数间进行权衡,还将导致光学相机对于重力、振动和冲击等力学条件更为敏感,易受工作环境影响而引起光学系统成像质量的下降。对于同轴空间相机来说,主支撑结构用于固定主镜与次镜的相对位置关系,而主镜与次镜的系统失调量会影响相机成像质量^[2]。所以,空间相机的主次镜支撑结构设计及分析技术一直是国内外学者研究的重点^[3-4]。董得义等人^[5]采用集成仿真分析的方法对空间离轴相机在重力载荷作用下的系统波像差变化进行了研究,并在装调完成后进行了翻转前后的波像差对比测试。

基于有限元方法,采用拓扑优化、尺寸优化等方式对主支撑结构进行优化设计是一种普遍应用的结构设计方法^[6]。多学科设计优化是一种处理复杂耦合系统的集成分析方法,已被广泛应用于微纳卫星的总体设计^[7]。对于轻量化相机的光机结构优化设计,越来越多的学者采用光机集成分析的方式在设计过程中以保证光学成像性能为约束条件之一进行系统级闭环分析^[8-9]。采用光学、结构、热学软件集成仿真的方式进行集成仿真分析,设定好软件间的交互接口和文件,即可分析系统在力学、热学条件下的成像性能。然而,软件间的仿真计算量大、数据交互不方便,不利于在优化设计阶段的仿真迭代^[10-11]。

为了在优化迭代设计过程中提高方程解算效率,一般会采用线性近似的方式来建立模型来代替仿真软件^[12]。光学线性模型经常被用于快速地根据光学元件的状态对成像性能和视轴稳定性进行预测。Howard^[13]系统地总结了 James Webb 空间望远镜在 2003~2009 年的开发过程中进行光机热集成建模与分

析所采用的光学线性模型和集成分析方法。Riva^[14]提出了基于光学追迹构造光学灵敏度矩阵来改进光机结构的优化设计方法。Keith 等人^[15]基于 Zernike 多项式构建了光学表面变形相对于波像差的灵敏度模型。Blaurock^[16]介绍了在光机热集成分析中的灵敏度计算方法。

目前对于同轴式空间相机多采用桁架式主支撑结构来实现高轻量化率设计^[7,17],为了保证结构的力学稳定性,桁架支撑结构通常采用三根以上的桁架杆组成支撑系统,存在遮拦比大和工艺难度大等问题。文中针对空间微纳光学遥感相机所采用的单悬臂式支撑结构优化设计与验证需求,开发了用于其力学条件下成像质量研究的集成分析方法。依据系统波像差与光机结构失调量的灵敏度构建光学线性模型,相比于传统集成仿真分析,该方法能够通过光学线性模型直接对结构分析结果进行处理得到波像差的变化,在光学系统设计不更改的条件下,集成分析过程中不需要再进行光学软件的操作,流程相对简单、效率高。采用所提出的方法对所设计的支撑结构进行了重力工况下的集成仿真分析和实验验证。

1 光学线性模型

1.1 波像差灵敏度的计算

光学元件在力学和热学条件作用下会产生相应的变形,主要包括表面的高阶变形与元件的刚体位移。其中,刚体位移主要包括光学元件在空间六个自由度的平移和旋转,这些位移会使该元件相对于光学系统产生离轴、偏心 and 倾斜等误差,这些误差会进一步降低光学系统的波像差。定义刚体的平移和旋转运动如下:

(1) 沿坐标系的平移运动 D_x, D_y, D_z (D_x 和 D_y 为偏心运动, D_z 为离轴运动);

(2) 沿坐标系的旋转运动 T_x, T_y, T_z (T_x 和 T_y 为倾斜运动, T_z 为旋转运动)。

在分析过程中,为了快速计算扰动条件下所产生

的元件刚体位移对于系统波像差的影响,假设系统波像差是光学元件刚体位移量的线性函数,即系统波像差能够通过光学灵敏度系数和元件的刚体位移量相乘计算得到。也就是说,灵敏度系数直接反映了系统波像差对元件刚体位移误差的敏感程度,即:

$$W_{ij} = L_{ij}D_{ij} \quad (1)$$

式中: i 和 j 分别表示光学元件和自由度编号; D 代表光学元件某一自由度上的刚体位移失调量; L 代表光学元件在该自由度失调量的灵敏度; W 为由 D 失调量引起的系统波像差。

考虑所有光学元件各自由度方向上的系统失调量引起光学系统整体波像差的变化为:

$$W = \sqrt{\sum W_{ij}^2} \quad (2)$$

上式的灵敏度矩阵是光学系统的固有属性,不仅可以指导光学系统的设计和误差分配,还可以应用在光机集成分析中,对光学系统波像差进行快速计算。光学灵敏度系数的计算可以使用光学设计软件进行,通过手动添加每个元件/表面的刚体扰动并计算相应的系统波像差变化来获得。

1.2 刚体位移的计算

光学元件的刚体位移不能直接计算得到,一般采用有限元法对光学元件进行离散后,光学元件由有限元节点和网格来表示,而通过对有限元结果的后处理得到变形后元件的刚体位移。元件在六个自由度上的刚体运动而产生的第 i 个节点的平移为:

$$\begin{aligned} d\tilde{x}_i &= D_x + z_i T_y - y_i T_z \\ d\tilde{y}_i &= D_y - z_i T_x + x_i T_z \\ d\tilde{z}_i &= D_z + y_i T_x - x_i T_y \end{aligned} \quad (3)$$

式中: x_i, y_i, z_i 为第 i 个节点的坐标位置。

有限元分析完成后,采用最佳拟合 (best-fit) 算法对结果进行后处理,从元件所有节点的变形中提取刚体位移。定义误差函数

$$E = \sum_i w_i (dx_i - d\tilde{x}_i)^2 + w_i (dy_i - d\tilde{y}_i)^2 + w_i (dz_i - d\tilde{z}_i)^2 \quad (4)$$

式中: w_i 为权重函数; (dx_i, dy_i, dz_i) 为有限元计算得到的变形后的节点 i 的坐标; $(d\tilde{x}_i, d\tilde{y}_i, d\tilde{z}_i)$ 为使用公式 (2) 计算刚体运动后的节点 i 的坐标。通过求函数 E 的最小值来确定光学元件表面的刚体位移。

1.3 集成分析流程

集成仿真分析流程如图 1 所示。根据光学分析手段的不同,光机热集成仿真分析可以分为两种。一种是全部基于商业软件工具,按照流程逐级进行仿真分析,有限元分析软件根据力学或热学载荷计算得到光学元件变形后的节点坐标位置,对该结果数据进行后处理得到光学元件的高阶表面变形及刚体位移,并基于这些失调量对光学分析软件中的元件模型进行相应修改,最终分析得到在该扰动条件下的系统性能变化。另一种是直接基于光学系统的灵敏度分析结果获得光学线性模型,在得到光学元件的位移后根据灵敏度方程获得系统性能的变化。

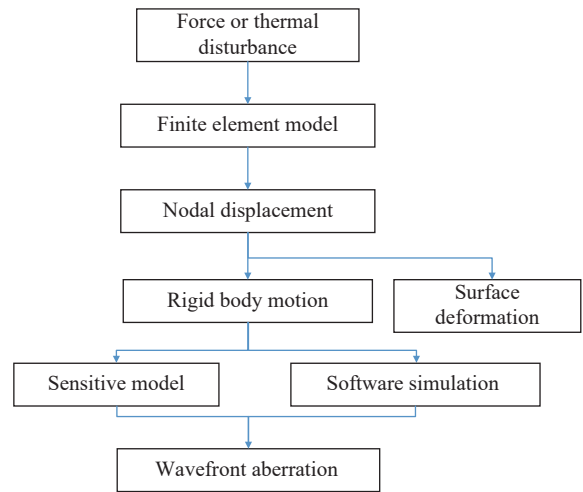


图 1 光机热集成仿真流程

Fig.1 Flow diagram of opto-mechanics integrate simulation

2 结构设计与集成分析

2.1 空间相机设计方案

空间相机运行在 500 km 的轨道高度上,相机质量在 5 kg 以内,并具有全色、RGB 以及近红外五个波段。光学系统采用同轴两反加校正镜的形式。该相机由于光学系统的跨距较大,同时镜头口径较大,采用传统的承力筒或桁架式结构很难满足相机的质量要求。因此采用单杆支撑作为主承力结构,其设计过程困难、复杂,仅应用在部分国外的空间遥感相机上,如日本/欧盟联合开发的地球云和气溶胶辐射探测卫星 (EarthCARE) 中的大气激光雷达 (ATLID) 相机及美国研制的 GIFTS 无焦望远镜。单杆主承力结构

由主承力板、主支撑杆及次镜支架三部分组成,如图 2 所示。

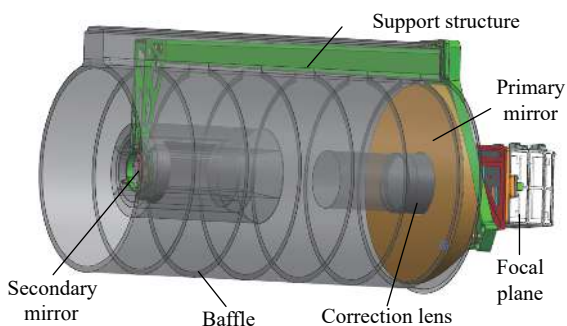


图 2 空间相机三维模型

Fig.2 3D model of space camera

2.2 波像差灵敏度分析

光学系统设计完成后,为了得到主镜(primary mirror, PM)、次镜(secondary mirror, SM)失调量对于系统波像差的影响,从而指导光机系统的设计,分别进行了主镜、次镜在平移和旋转方向的波像差灵敏度分析。平移和旋转的单位失调量增量分别设置为 $1\ \mu\text{m}$ 和 $1''$ 。通过分别分析主、次镜各失调量引起的光学系统波像差,获得在各个失调位置处对应的系统波像差,并将结果绘制如图 3 和图 4 所示。

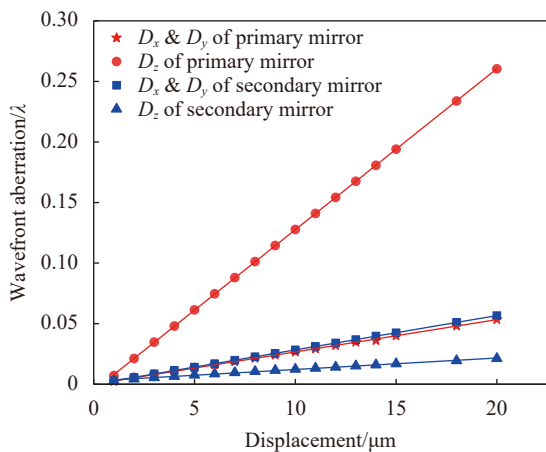


图 3 主、次镜位移与波像差关系

Fig.3 Relationship between displacement and wavefront aberration of primary mirror and secondary mirror

可以看出,主镜和次镜的位移和倾斜失调量与系统波像差具有非常好的线性关系,根据平面直线公式进行拟合,得到各线性关系的斜率和截距如表 1 所示。

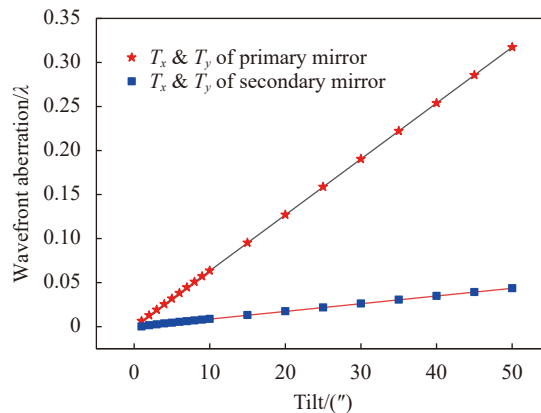


图 4 主、次镜倾斜量与波像差关系

Fig.4 Relationship between tilt and wavefront aberration of primary mirror and secondary mirror

表 1 拟合参数

Tab.1 Fitting parameters

Misalignment	Sensitive ($\lambda/\mu\text{m}; \lambda/(\prime\prime)$)	Intercept/ λ
PM- D_x	2.67E-03	5.16E-06
PM- D_y	2.67E-03	5.16E-06
PM- D_z	1.33E-02	5.29E-02
PM- T_x	6.35E-03	-3.90E-06
PM- T_y	6.35E-03	-3.90E-06
SM- D_x	2.84E-03	-1.33E-05
SM- D_y	2.84E-03	-1.33E-05
SM- D_z	9.55E-04	2.67E-03
SM- T_x	8.75E-04	-1.85E-04
SM- T_y	8.75E-04	-1.85E-04

2.3 光机集成仿真分析

光机结构有限元模型如图 5(a) 所示,网格数量为 137337,重力方向为 $-X$ 方向。其在重力条件下的静力学变形云图如图 5(b) 所示。对有限元分析结果进行后处理,提取主镜和次镜的有限元节点坐标及位移量,进行叠加得到变形后的节点坐标位置,并分别使用主镜和次镜表面的节点基于公式 (3) 和公式 (4) 进行主镜和次镜六个方向刚体位移的计算,结果如表 2 所示,其在 X 方向的平移量和绕 Y 方向的旋转量与变形云图一致。将主镜和次镜的刚体位移量分别与表 1 中对应的灵敏度系数相乘,得到每个位移量引起的系统波像差变化如表 2 所示。并基于公式 (2) 计算得到系统波像差变化为 0.0569λ 。

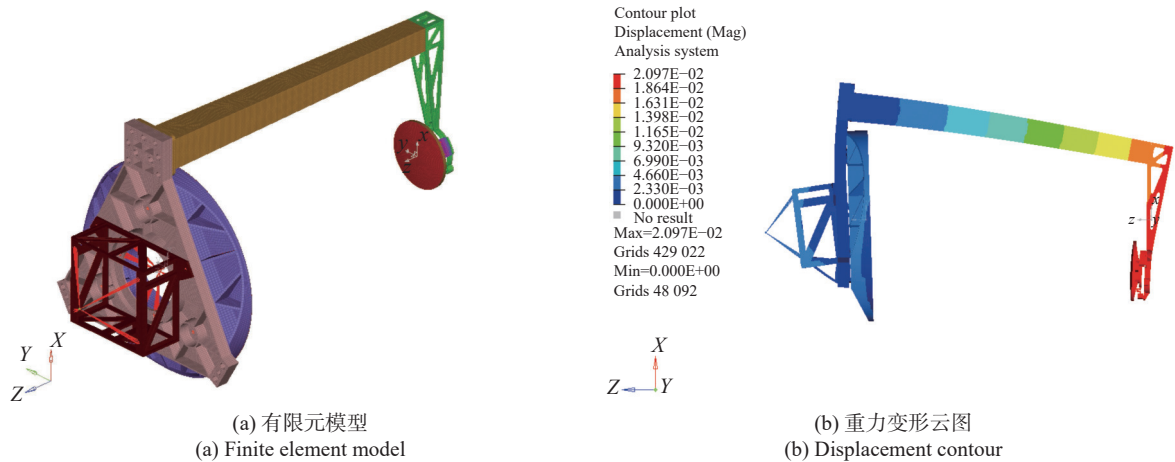


图 5 有限元模型 (a) 及变形云图 (b)

Fig.5 Finite element model (a) and displacement contour (b)

表 2 主镜及次镜的刚体位移

Tab.2 Rigid body displacements of primary mirror and secondary mirror

Subassembly	Direction	D_x	D_y	D_z	T_x	T_y	T_z
PM	Misalignment/mm; (")	-2.324E-03	1.233E-06	3.684E-04	-1.63E-06	4.70E-04	2.075E-08
	Wavefront aberration/ λ	6.20E-03	3.29E-06	4.90E-03	3.73E-05	1.07E-02	0
SM	Misalignment/mm; (")	-1.903E-02	-1.415E-04	7.777E-03	3.59E-06	-6.83E-04	8.248E-07
	Wavefront aberration/ λ	5.40E-02	4.01E-04	-7.38E-03	1.13E-05	-2.15E-03	0

最后,为了进行对比,根据表 2 中主镜和次镜的刚体位移量修改光学软件中的主镜和次镜的位置和倾斜量,进行分析得到重力条件下的系统波像差为 0.0487 λ ,如图 6 所示,可见该光机结构的设计具有非常好的静刚度,使主镜和次镜的位移量和角度偏移量都非常小,从而使重力对光机系统成像质量的影响非常小。基于公式 (5) 计算所提出方法相对于软件仿真结果的误差为 16.8%,说明灵敏度分析具有足够的精度,在初步设计阶段用于快速对系统波像差预测。

$$W_E = |W_M - W_S| / W_S \times 100\% \quad (5)$$

式中: W_E 为两种方法的计算误差; W_M 为基于灵敏度分析模型的波像差计算结果; W_S 为基于软件仿真的

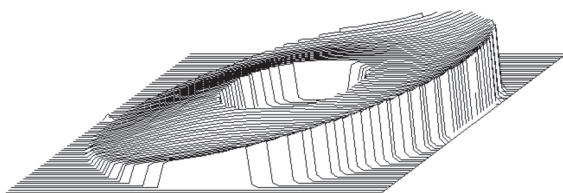


图 6 光学软件分析结果

Fig.6 Optical software analysis results

波像差计算结果。

3 重力工况试验对比分析

装调后的光机系统采用自准方法进行各视场波像差的检测。如图 7 所示,在相机焦面位置放置干涉仪,相机入光口处放置平面反射镜,干涉仪发出的光经过光学系统,经平面反射镜反射后再入射到光学系统中,光线原路返回至于干涉仪中产生干涉条纹,从而进行波像差检测。为了进一步验证所设计的主承力

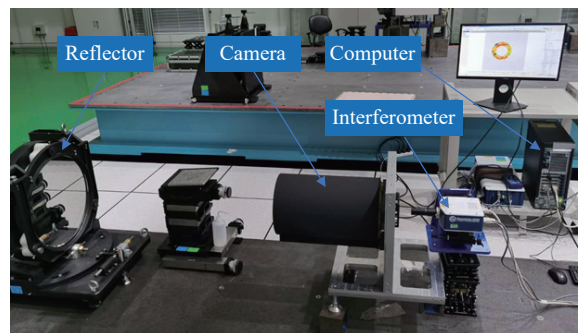


图 7 波像差测试装置

Fig.7 Wavefront aberration measurement setup

结构的性能对系统波像差的影响,分别进行了正向和反向重力工况下的波像差测试。其中,反向重力工况为相机倒置稳定后进行波像差测试。

图 8 所示为两种工况下的中心视场波像差测试结果,并汇总于表 3 中。可见系统波像差在正向和反向重力工况下的差别非常小,最大误差在 10% 以内,证明了光机结构具有非常好的力学稳定性。

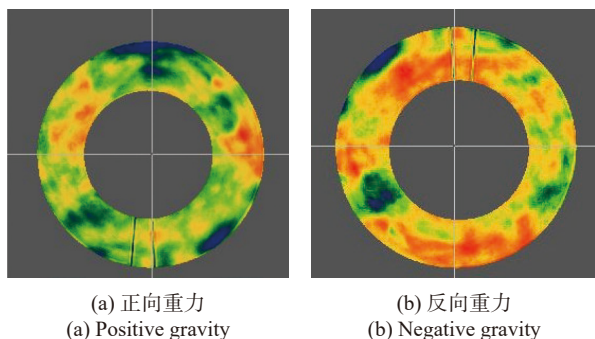


图 8 中心视场波像差测试结果

Fig.8 Wavefront aberration measurement results of central field of view

表 3 波像差测试结果

Tab.3 Wavefront aberration measurement results

Direction	Positive/ λ	Negative/ λ	Error
Central FOV	0.053 1	0.051 8	-2.45%
Right FOV	0.074 8	0.081 4	8.82%
Left FOV	0.068 3	0.069 4	1.61%
UP FOV	0.065 43	0.063 9	-2.34%
Down FOV	0.053 9	0.056 5	4.82%

4 结 论

根据微纳航天遥感相机在保证成像质量条件下的轻量化设计需求,介绍了一种新型单杆主承力结构,并提出了以波像差灵敏度分析法指导光机结构的快速优化设计,以光机集成仿真分析进行设计验证的研制方法。然后通过正、反重力工况的波像差测试,对所设计的主承力结构稳定性进行了验证。结果证明,灵敏度分析方法相对于光机集成软件仿真方法误差为 16.8%,其精度满足在初步设计优化阶段快速对系统性能进行预测的需求。使用该方法所设计的轻量化微纳遥感相机在地面正、反重力工况下各视场波

像差差别较小,波像差最大变化在 10% 以内,说明系统成像性能优异且具有非常好的力学稳定性。

参考文献:

- [1] Ye Zhao, Li Xiwei, Wang Chao, et al. Survey of technological development of optical payload for micro-nano satellite [J]. *Spacecraft Engineering*, 2016, 25(6): 122-130. (in Chinese)
- [2] Li Xianbin. Research on secondary mirror's correction technology for the misaligned wave aberration of large aperture space remote sensor[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2020. (in Chinese)
- [3] Wei Lei. Design and optimization for main support structure of a space camera with large field of view and long focal length[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2017. (in Chinese)
- [4] Shao Mengqi, Zhang Lei, Li Lin, et al. Optimization design of supporting backplate for ultra-light space camera [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(3): 0322001. (in Chinese)
- [5] Dong Deyi, Li Zhilai, Xue Donglin, et al. Integrated optomechanical analysis and experiments for influence of gravity on wavefront aberration of space camera [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, 24(8): 1917-1926. (in Chinese)
- [6] You Zheng, Li Guanhua. Application of multidisciplinary design method in the system design of micro nano satellite [J]. *Aerospace China*, 2010(4): 36-38, 40. (in Chinese)
- [7] Wang Tailei, Zhang Lei, Jia Xuezhi, et al. Optimized design of integrated ultra-light main supporting structure for micro-nano remote-sensing camera [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(7): 0728009. (in Chinese)
- [8] Shao M, Zhang L, Jia X. Optomechanical integrated optimization of a lightweight mirror for space cameras [J]. *Applied Optics*, 2021, 60(3): 539-546.
- [9] Doyle K B, Genberg V L, Michels G J. Integrated Optomechanical Analysis [M]. 2nd ed. United States of America: SPIE Press, 2012.
- [10] Wen Jingyang. Research on methods and techniques of optomechanical integrated analysis [D]. Xi'an: Xidian University, 2008. (in Chinese)
- [11] 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. (in Chinese)
- [12] Xue Zhipeng, Li Ming, Jia Hongguang, et al. Modal method

- based dynamics analysis of cantilever type elastic structure [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 23(8): 2250-2257. (in Chinese)
- [13] Andersen T, Howard J M, Enmark A. Optical integrated modeling activities for the James Webb Space Telescope (JWST) [C]//Integrated Modeling of Complex Optomechanical Systems. International Society for Optics and Photonics, 2011, 8336: 83360E.
- [14] Riva M. A new optomechanical structural optimization approach: coupling FEA and raytracing sensitivity matrices [C]//Proceedings of SPIE, 2012, 8449: 844919.
- [15] Doyle K B, Genberg V L, Michels G J. Integrated optomechanical analysis of adaptive optical systems [C]//Proceedings of SPIE, 2004, 5178(1): 20-28.
- [16] Blaurock C, McGinnis M, Kim K, et al. Structural-thermal-optical performance (STOP) sensitivity analysis for the James Webb Space Telescope[C]//Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, 2005, 5687: 56870V.
- [17] Liu Pai, Huang Qiaolin, Yang Jukui. Research on support structure between primary and secondary mirror in large-aperture and long-focal-length space camera [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2014, 35(3): 60-67.