

低温红外镜头设计仿真方法及试验验证

高有道¹, 李福东¹, 沈正祥², 丁琳¹, 胡斌¹, 徐绍伟¹

(1. 北京空间机电研究所, 北京 100094;
2. 同济大学物理科学与工程学院, 上海 200092)

摘要: 在低温环境下镜头结构会产生热变形, 对镜头光学传递函数 (MTF) 及离焦量均会产生影响, 从而影响光学成像质量。在此基于某红外遥感器, 针对 210 K 低温工作环境, 设计了一套具备热卸载功能的透射式低温镜头。对其建立有限元模型, 并加载模拟在轨工作环境温度场, 得到热变形数据, 最终计算出镜头 MTF 及离焦量变化, 并通过该仿真分析手段对低温镜头结构进行优化设计。低温镜头装调完成后, 将低温镜头及其他配合测试设备置于真空罐内, 在常温与低温环境条件下, 对光学系统 MTF 及最佳焦面位置进行测试标定。测试结果表明, 各项偏差在可接受范围之内, MTF 仅变化 0.2%, 说明使用的低温镜头多场耦合仿真方法是可靠的, 能够对红外遥感器低温镜头设计进行指导。

关键词: 光学设计; 低温镜头; 仿真; MTF; 离焦; 测试

中图分类号: V19 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA20200397

Simulation method and its test verification of cryogenic infrared lens design

Gao Youdao¹, Li Fudong¹, Shen Zhengxiang², Ding Lin¹, Hu Bin¹, Xu Shaowei¹

(1. Beijing Institute of Space Mechanics & Electricity, Beijing 100094, China;
2. School of Physical Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: At low temperature, the lens structure will produce thermal deformation, which will affect the modulation transfer function (MTF) and defocus of the lens, thus affecting the quality of optical imaging. Based on an infrared remote sensor, a set of transmission cryogenic lens with thermal unloading function was designed for the 210 K low-temperature working environment. The finite element model was established, and the thermal deformation data was obtained by loading the simulation of the in-orbit working environment temperature field. Finally, the variation of lens MTF and defocusing amount were calculated, and the structure of cryogenic lens was optimized through this simulation analysis method. After the installation and adjustment of the cryogenic lens, the cryogenic lens and other test equipment were placed in a vacuum tank, and MTF and the best focal plane position of the lens were tested and calibrated under ambient temperature and low temperature conditions. The test results show that the errors are within the acceptable range, the MTF variation is only 0.2%, indicating that the cryogenic lens multi-field coupling simulation method is reliable and can guide the design of cryogenic lens for infrared remote sensor.

Key words: optical design; cryogenic lens; simulation; MTF; defocusing; test

收稿日期: 2020-10-11; 修订日期: 2020-12-13

基金项目: 国家重点研发计划 (2018YFB0504400)

作者简介: 高有道, 男, 工程师, 硕士, 主要从事空间遥感器光机设计工作。

0 引言

遥感器自身的光机背景热辐射是影响系统的探测灵敏度提升的主要因素。随着对微弱目标探测应用需求的提升,要求红外遥感器具备更高的信噪比与灵敏度,需要设计一套能够在低温环境下工作的红外光学系统,从而实现遥感器的高信噪比与高灵敏度^[1-3]。低温镜头光学元件的加工与装调一般都在常温下进行,红外透镜常用硅或锗等材料,其热膨胀系数与折射率温度系数较大,在低温下光学元件折射率及支撑结构实际尺寸都将发生非线性变化,进而引起镜头的光轴指向位置、镜子的面形、镜间距及相对焦面位置变化,导致成像质量下降,因此进行光机热耦合仿真分析并进行试验验证十分必要。

文中以某红外遥感器为例,设计了一套具备热卸载功能的透射式低温镜头,镜头工作环境为 210 K,在低温镜头设计时,利用光机热耦合仿真分析对低温镜头设计方案进行校核并优化。首先利用有限元分析软件对镜头进行热变形分析,并利用 Zernike 多项式拟合得到镜子的面形,最终通过光学 Zemax 软件计算出光学传递函数及离焦量变化情况^[4-7],根据仿真结果进一步对低温镜头结构进行优化设计,最终通过在真空罐内进行试验验证仿真分析结果的可靠性。

1 低温镜头设计与多场耦合分析

1.1 低温镜头结构设计方案

根据使用要求,光学系统工作温度为 210 K,据此设计了一套具备热卸载功能的低温镜头,其由六个透镜组成,每片透镜装框后再分别装筒。整个镜头的结构组成主要包括透镜、透镜支撑结构、透镜组件支撑筒及连接件。低温镜头在常温下装调,低温(210 K)条件下工作。

为了保证低温工作环境下光学性能满足要求,低温镜头镜片及支撑结构均采用热卸载结构,低温透镜径向通过环形卸载槽和胶斑两个环节实现热卸载,径向的支撑刚度可通过三种方式调节:一是改变卸载槽的层数,周向长度和轴向宽度来调节;二是改变胶斑的数量,截面积和厚度来调节;三是可以通过拖框安

装处的卸载槽进行调节。设计方案示意图如图 1(a)所示。

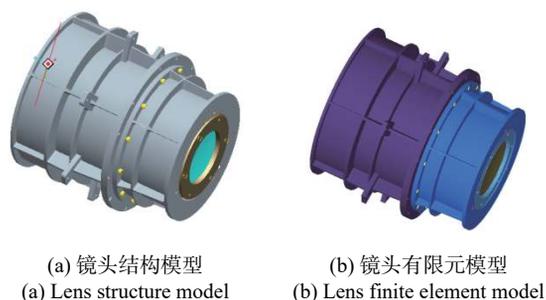


图 1 低温镜头设计方案示意图

Fig.1 Design scheme of cryogenic lens shows

1.2 低温镜头热变形分析

用 Hypermesh 软件对低温镜头建立有限元模型,结构单元主要为四面体单元、六面体单元及壳单元,一共有 37728 个节点,29017 个网格,如图 1(b)所示。

有限元模型里卡片设置时选取 293 K 作为参考温度,镜头设定工作温度为 210 K。低温镜头工作轨道为地球同步轨道,使用 Thermal Desktop 软件对镜头有限元模型热仿真分析得到模拟在轨状态温度场,加载该温度场,计算低温镜头节点位移。隐藏其他零件,得到镜子节点位移分布云图如图 2 所示。

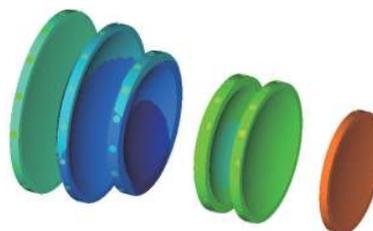


图 2 镜子节点位移分布云图

Fig.2 Nephogram of displacement distribution of lens nodes

镜片节点的变形包括刚体位移和表面变形,刚体位移会引起光学像发生倾斜与离轴等,表面变形才真正能够反映镜子的面形精度。镜子的刚体位移主要包含沿 x 、 y 、 z 三个坐标系的平移量 T_x 、 T_y 、 T_z ,以及绕三个坐标系旋转的偏转量 R_x 、 R_y 、 R_z 六个自由度,可利用 Sigfit 软件对刚体位移变化量进行求解提取^[8-9],六片镜子刚体位移求解结果见表 1,其中 11、12 分别代表第一个镜子的正反两个面,其他以此类推。

表 1 镜子刚体位移

Tab.1 Rigid body displacement of lens

Mirror number	T_x	T_y	T_z	R_x	R_y	R_z
11	-2.7949E-04	9.9660E-03	-6.0877E-02	7.1514E-06	-1.5074E-06	-5.8983E-07
12	-8.1982E-04	9.3528E-03	-5.6416E-02	7.0429E-06	-1.5240E-06	-5.8931E-07
21	-3.9439E-04	1.2825E-02	-3.4461E-02	1.4481E-05	-2.0520E-06	-7.9392E-07
22	1.6542E-05	1.3727E-02	-2.8960E-02	1.3445E-05	-3.9253E-06	-7.9809E-07
31	3.8012E-04	1.1789E-02	-6.2370E-03	-2.1042E-07	-1.6917E-06	-7.8651E-07
32	-4.8088E-05	1.1473E-02	-1.9305E-03	-7.3894E-07	-2.7398E-06	-7.9127E-07
41	-7.1167E-05	1.1914E-02	5.8549E-02	1.1449E-05	-1.3130E-06	-3.1968E-07
42	-9.3400E-04	1.2348E-02	6.3718E-02	1.1444E-05	-2.6384E-06	-3.2117E-07
51	3.9997E-05	1.1358E-02	6.3480E-02	1.6506E-05	-9.3102E-07	-4.2036E-07
52	-1.0513E-03	1.1771E-02	7.0715E-02	1.5050E-05	-4.2598E-06	-4.1898E-07
61	-1.1529E-03	1.2242E-02	1.1839E-01	8.7089E-06	-4.1861E-06	-1.6503E-07
62	-9.5614E-04	1.2250E-02	1.2138E-01	8.9706E-06	-3.0556E-06	-1.6429E-07

1.3 低温镜头光学性能评价

拟合光学组件面形变化方法的有很多,如 Chebyshev 多项式、Zernike 多项式、Seidel 多项式等,其中 Zernike 多项式用来拟合镜子热应力变形面形时,具有拟合精度高、误差小等优点,并能被 Zemax、Code V 等光学软件所接受,在此,采用 Zernike 多项式作为有限元分析与光学分析之间的接口工具。

Zernike 多项式的具体表达式为:

$$Z_n^m(\rho, \theta) = R_n^m(\rho)\theta_n^m(\theta) \quad (1)$$

式中: Z_n^m 为 Zernike 多项式; n 为多项式的阶数, $n=0, 1, \dots$; m 为与 n 相关的序号,其值与 n 同奇偶,且绝对值小于或等于阶数。

根据表 1,镜子热变形输出结果包括镜子每一个节点变形前坐标 (x, y, z) 与变形量 $(\Delta x, \Delta y, \Delta z)$ 。假设镜子表面面形有 m 个节点,将计算文件数据代入 n 项 Zernike 多项式可得线性方程组:

$$\begin{cases} S_1(x_1, y_1) = q_1 Z_{11}(x_1, y_1) + q_2 Z_{12}(x_1, y_1) + \dots + q_n Z_{1n}(x_1, y_1) \\ S_2(x_2, y_2) = q_1 Z_{21}(x_2, y_2) + q_2 Z_{22}(x_2, y_2) + \dots + q_n Z_{2n}(x_2, y_2) \\ \dots \\ S_m(x_m, y_m) = q_1 Z_{m1}(x_m, y_m) + q_2 Z_{m2}(x_m, y_m) + \dots + q_n Z_{mn}(x_m, y_m) \end{cases} \quad (2)$$

令 $S_m(x_m, y_m) = S_m$, $Z_{mn}(x_m, y_m) = Z_{mn}$, 公式 (2) 可写为矩阵形式:

$$\begin{bmatrix} S_1 \\ \dots \\ S_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} q_1 \\ \dots \\ q_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Z_{11} & \dots & Z_{1n} \\ \dots & \ddots & \dots \\ Z_{m1} & \dots & Z_{mn} \end{bmatrix} \quad (3)$$

可简写为 $S = qZ$, 其中 $S = (S_1, S_2, \dots, S_m)^T$ 为每一个节点变形值; $Z = (Z_{ij})$ 为 $m \times n$ 矩阵, i 为节点个数, j 为 Zernike 多项式的第 j 项; $q = (q_1, q_2, \dots, q_n)^T$ 为 n 项 Zernike 多项式的系数。

通常用最小二乘法来获得 $q = (q_1, q_2, \dots, q_n)^T$ 的最小二乘解,将得到的数据代入 MATLAB 求解 Zernike 多项式系数,计算时需要去除镜面节点数据的刚体位移。文中仅列出了镜片 2 的 Zernike 多项式前 37 项系数结果,如表 2 所示,拟合出镜片 2 面形如图 3 所示。

表 2 在 210 K 温度下拟合镜子 2 的 Zernike 系数

Tab.2 Zernike coefficients of lens 2 fitted at 210 K

Zernike number	Lens 1 first side	Lens 1 second side
1	-0.00039554	-0.00019119
2	-0.00165545	0.00129153
3	0.0006715	-0.0053511
4	0.0005297	0.0011647
5	0.0489164	0.055137
...
37	0.00015646	-0.00004436

该过程需要根据面形计算结果对镜头设计进行反复迭代,直至达到光学设计要求,以上计算结果为数轮迭代后的最终结果。

将获得的 Zernike 系数、刚体位移值等代入 Ze-

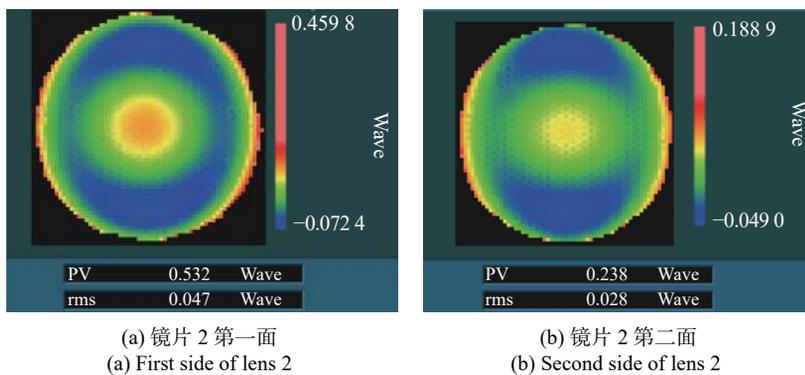


图 3 镜子 2 面形示意图 (去除刚体位移)

Fig.3 Surface shape diagram of lens 2 (removing rigid body displacement)

max 软件中进行分析, 可得离焦量与光学系统 MTF。计算所得低温工况下离焦量与原始光学设计值分别为 $70.189 \mu\text{m}$ 与 $73.56 \mu\text{m}$, 见表 3, 低温工况下 MTF 与原始光学设计值分别为 0.6324 与 0.6586, 如图 4 所示。由此可见, 在低温下低温镜头离焦量与 MTF 均相比原始光学发生了一定的变化。

表 3 光学系统离焦量

Tab.3 Defocus of optical system

Category	Defocusing amount/ μm
Theoretical design	73.56
210 K fitting	70.189

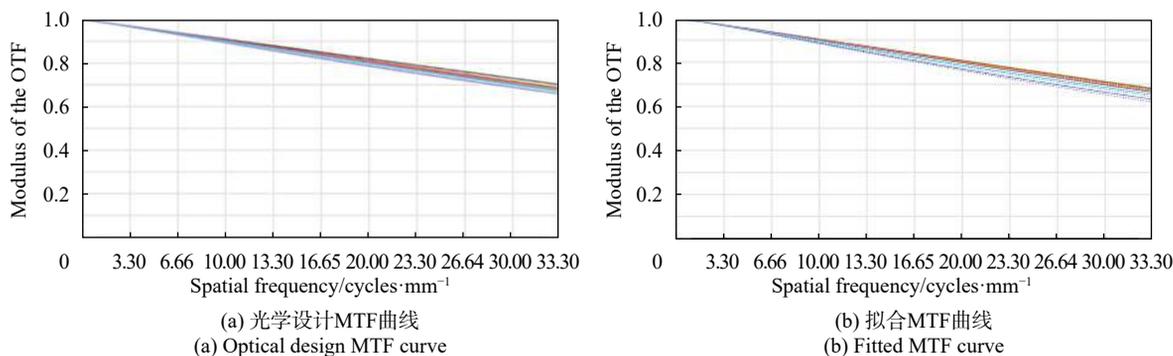


图 4 光学系统 MTF 曲线

Fig.4 MTF curve of optical system

通过表 3 与图 4 可看出, 低温工况下离焦量、MTF 值利用仿真分析所得结果与原始光学设计值存在微小偏差, 主要有以下三个影响因素: 一是材料的线膨胀系数设置, 在仿真分析时所设置的线膨胀系数为一个固定值, 但是有限元模型所加载的温度场并不是恒定的, 不同材料的线膨胀系数随着温度变化会随之发生改变, 这样设置会造成一定的误差; 二是二者加载的温度场有差异, 原始光学所赋温度为一恒定值, 但是仿真分析所加载温度场为使用 Thermal Desktop 软件模拟在轨状态温度场; 三是建模误差, 建立有限元模型时采用不同类型的单元网格进行划分得到的结果也会有微小偏差, 且建模时将模型中的安装螺钉、

安装孔与小凸台等局部结构特征进行简化处理, 这些都会给最终计算结果带来误差, 但这些误差属于常规误差, 带来的影响均在可接受范围之内。

2 试验验证

低温镜头常温装调及力学试验完成后, 需在真空罐中对光学系统性能指标进行验证。单独镜头无法测试 MTF 等光学指标, 需要配合探测器及其他电子学设备测试系统传函来对镜头设计方案进行验证。验证分两个工况进行: 一种是相机在真空罐内常温状态进行测试; 另一种是在真空罐内将相机光学系统温度控制在 210 K 进行测试。测试项目为相机分别在

常温与低温状态下利用真空罐附带平行光管配合靶标、黑体辐射源进行镜头组件像质测试及焦面位置标定等。参试设备有低温镜头组件、调焦机构、探测器

组件、电子学设备、五维调整平台、四杆靶标、平行光管、及地检图采等。

测试产品在真空罐内布置图如图 5 所示。

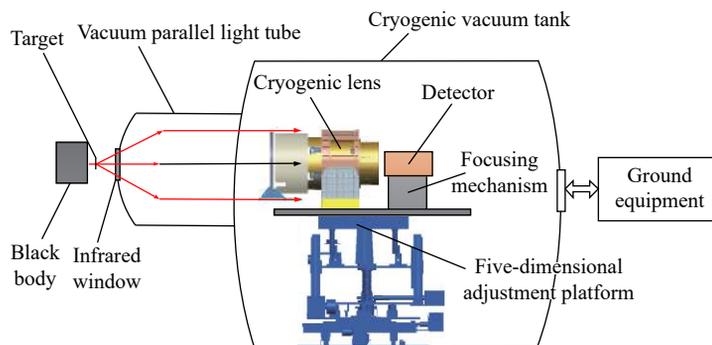


图 5 测试产品组成示意图

Fig.5 Schematic diagram of test product composition

在规定的试验工况下,通过采用标定过焦曲线的方式进行最佳焦面位置标定与 MTF 测试,以确定该工况的最佳焦面位置。

(1) 最佳焦面位置确定方法:在试验过程中,利用相机调焦机构进行调焦,以 MTF 测试结果为判断依据,MTF 值最大处所对应的位置为最佳焦面位置。调焦机构的调节范围根据离焦量仿真结果并加以足够的安全余量进行确定,该调焦机构设计调节范围为 $\pm 2\text{ mm}$,步长 $5\text{ }\mu\text{m}$,足以满足实际使用需求。

(2) MTF 测试及计算方法:黑体前放置四杆靶标,通过平行光管准直后在像面上成奈奎斯特频率的杆靶标图像,利用公式(4)计算 MTF:

$$MTF = \frac{\pi V_1 - V_2}{4 V_1 + V_2} \quad (4)$$

式中: V_1 为亮条纹 DN 值; V_2 为暗条纹 DN 值。

测试准备,相机低温镜头等均放置在真空罐里面,采用独立温控小舱进行控温,如图 6 所示。各种支撑及其他设备均采用主被动控温措施,使其他产品状态与常温测试状态保持一致,目的是排除这些因素对测试结果的干扰。测试时将四杆靶标放在平行光管的焦点处,首先在常温下进行测试,对四杆靶标进行成像,调节调焦机构调整焦面位置并找寻到 MTF 值最大处,此时焦面所处位置为常温最佳焦面位置,记录调焦机构位置与 MTF 最大值。

相机低温镜头每一个镜片边缘均粘贴有测温热敏电阻,罐内测试时能通过测温热敏读取镜头温度

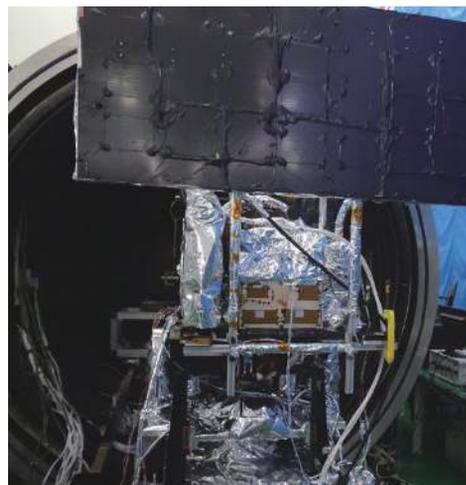


图 6 罐前准备示意图

Fig.6 Schematic diagram of tank preparation

实时数值,当镜头温度稳定波动在 $(210\pm 1)\text{ K}$ 时,对相机成像测试,调节调焦机构找寻到 MTF 最大值,并记录此时焦面位置与 MTF 值,此时调焦机构在低温真空罐带动焦面探测器组件寻找到最佳焦面位置时所调节的数值即为低温测试的离焦量。

常温与低温下测试 MTF 时四杆靶标成像如图 7 所示。

根据图 7 试验结果,常温下测试系统 MTF 为 0.2861,低温 210 K 测试系统 MTF 为 0.2854。

理论设计、拟合仿真及试验结果见表 4。

通过表 4,拟合仿真结果表明低温环境下镜子面形变化将导致红外光学系统离焦量与 MTF 发生变化,设计低温镜头时需要充分考虑低温环境对光学系

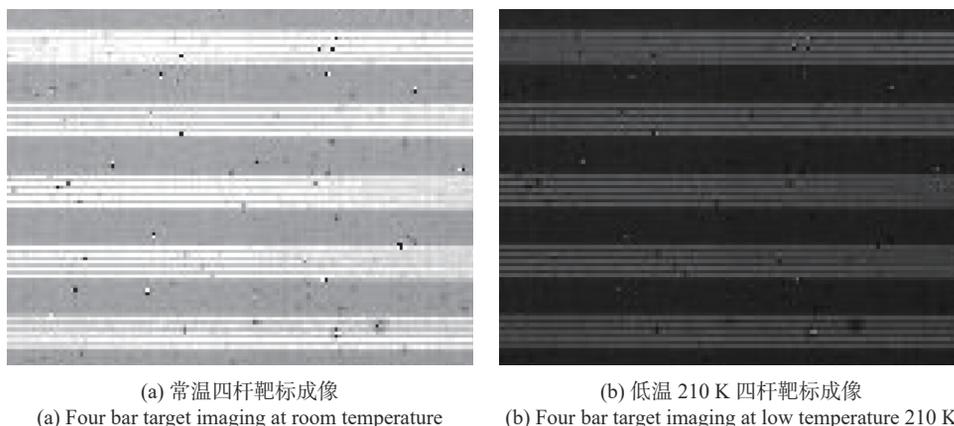


图 7 MTF 测试图

Fig.7 MTF test diagram

表 4 理论设计、拟合仿真及试验结果

Tab.4 Theoretical design, fitting simulation and test results

Working condition	MTF	Defocusing amount/ μm
Theoretical design (210 K)	0.658 6 (Cryogenic lens)	73.56
Simulation fitting (210 K)	0.632 4 (Cryogenic lens)	70.189
Room temperature test (293 K)	0.286 1 (System)	—
Low temperature test (210 K)	0.285 4 (System)	71.2

统带来的影响;低温测试光学系统离焦量与拟合仿真结果比较吻合,离焦量误差为 1.44%,低温测试在最佳焦面位置处 MTF 值与常温 MTF 测试结果相比仅退化了 0.2%,均在可接受范围之内。

3 结 论

文中以某具备热卸载能力的红外低温镜头为例,采用光机热多场耦合分析手段,对其在 210 K 低温工作环境下光学评价指标 MTF 及离焦量进行分析,并搭建了常温与低温测试系统,开展了实测试验,对镜头在常温与低温下光学评价指标试验验证。从对比分析结果中可以看出,低温环境对光学系统产生的影响不可忽视,但是通过耦合仿真优化,设计结果与试验结果比较接近,可认为对低温镜头进行光机热耦合仿真方法合理可行,对于低温镜头的设计具有指导意义,对后续其他类似产品的研制有很好的工程价值。

参考文献:

[1] Michael T M, Marie B, Michael D, et al. Systems engineering on the James Webb space telescope [C]//SPIE, 2010, 7738: 1002-1015.

[2] Masayuki H, Katsuhiro N, Shoji T, et al. Thermal design and its on-orbit performance of the AKARI cryostat [J]. *Cryogenics*, 2008, 48(5): 189-197.

[3] Song Junru, Xing Hui, Pei Jingyang, et al. Measurement and error analysis of encircled energy of cryogenic lens [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(7): 0717007. (in Chinese)

[4] Zhu Feng, Zhang Yu, Chen Ji, et al. Analysis of thermal optical properties for athermal infrared lens [J]. *Laser & Infrared*, 2017, 47(10): 1299-1304. (in Chinese)

[5] Wang Yue, Wang Bo, Liu Shiping, et al. Analysis of effect of cryocooler's micro vibration on MTF for space infrared remote sensing camera [J]. *Spacecraft Recovery and Remote Sensing*, 2015, 36(3): 61-68. (in Chinese)

[6] Sui Jie, Cheng Huiyan, Yu Chengwu, et al. A thermal stability analysis and simulation method for boresight axis of star sensor [J]. *Aerospace Control and Application*, 2017, 43(4): 37-41. (in Chinese)

[7] Wang Zhaoli, Liang Jiangtao, Zhao Miguang, et al. Lens mount for cryogenic refractive optics cooled by mechanical cryocooler [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(2): 0218006.

[8] Yang Jiawen, Huang Qiaolin, Han Youmin. Application and simulation in fitting optical surface with Zernike polynomial [J]. *Spacecraft Recovery and Remote Sensing*, 2010, 31(5): 49-55. (in Chinese)

[9] Shi Yanfei, Zhang Yu, Huang Pan, et al. The influence of infrared lens surface change on imaging quality in thermal environment [J]. *Optical Technique*, 2018, 44(3): 365-370. (in Chinese)