

引用格式: JIANG Dong-xu, SUN Bao-yu, LI Ying-chun, *et al.* Effect of Thermally Induced Gradient Index on Imaging Quality of Aspherical Optical System[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2020, 49(1): 0111001

姜东旭,孙宝玉,李迎春,等.热致梯度折射率对非球面光学系统成像质量的影响[J].光子学报,2020,49(1):0111001

热致梯度折射率对非球面光学系统成像质量的影响

姜东旭¹,孙宝玉¹,李迎春¹,林洁琼¹,王冬雪¹,王文攀²

(1 长春工业大学,长春 130012)

(2 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所,长春 130033)

摘 要:机载相机在上升过程中,由于温度降低和镜头各部分材料的导热率大小不同,镜头部分会产生温度梯度,从而导致非球面光学系统产生梯度折射率.利用有限元分析软件对镜头部分进行瞬态热分析以模拟机载相机上升过程中温度的变化情况,将有限元分析不同时间节点温度分布结果导入编写的折射率梯度系数拟合程序,将所求解的梯度折射率系数通过镜面类型接口在光学软件中建立光学系统模型.利用点列图的弥散斑半径评价不同时间节点梯度折射率对成像质量的影响.结果表明,机载相机刚升入工作高度时温度梯度最大,对成像质量影响也最严重,梯度折射率系数随着温度梯度系数的降低而降低,同时成像质量提高,该结果对光学系统的设计具有指导意义.

关键词:梯度折射率;温度梯度;瞬态热分析;非球面光学系统;非线性拟合;成像质量

中图分类号:TH744

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20204901.0111001

Effect of Thermally Induced Gradient Index on Imaging Quality of Aspherical Optical System

JIANG Dong-xu¹, SUN Bao-yu¹, LI Ying-chun¹, LIN Jie-qiong¹,
WANG Dong-xue¹, WANG Wen-pan²

(1 Changchun University of Technology, Changchun 130012)

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

Abstract: During the ascent of the airborne camera, due to the temperature drop and the thermal conductivity of the material of each part of the lens, the lens portion can have a temperature gradient, which causes the aspherical optical system to produce a gradient index. Using the finite element analysis software to perform transient thermal analysis on the lens part to simulate the temperature change during the ascent of the airborne camera, the finite element analysis of the temperature distribution results of different time nodes was introduced into the prepared refractive index gradient coefficient fitting program, and the solution was solved. The gradient index coefficient established the optical system model in the optical software through the mirror type interface, and use the speckle radius of the dot-column diagram to evaluate the influence of the image quality on the gradient index of the different time nodes. The results show that the temperature gradient of the airborne camera is the highest when it is lifted into the working height, and the influence on the imaging quality is also the most serious. The gradient refractive index coefficient decreases with the decrease of the temperature gradient coefficient, and the imaging quality is

基金项目:科技部国家重点研究发展计划项目(No.2016YFE0105100)

第一作者:姜东旭(1995—),男,硕士研究生,主要研究方向为光机系统仿真.Email:jiangdx0322@163.com

导 师:孙宝玉(1971—),女,教授,博士,主要研究方向为机械 CAD/CAE,精密机械微驱动.Email:wdysbyl@163.com

通讯作者:李迎春(1984—),女,讲师,博士,主要研究方向为复杂曲面先进光学制造技术.Email:279453588@qq.com

收稿日期:2019-07-06;录用日期:2019-09-17

<http://www.photon.ac.cn>

improved, which has guiding significance for the optical system design.

Key words: Gradient index; Temperature gradient; Transient thermal analysis; Aspheric optical system; Nonlinear fitting; Imaging quality

OCIS Codes: 110.3000; 220.4830; 000.6850

0 引言

热传递^[1]现象在自然界十分普遍,由于热传递在介质中的快慢和方向不同,介质中会产生温度梯度,从而形成梯度折射率(Gradient Index, GRIN).在实际应用中,光学系统通常要求能在一定范围的温度下工作,在众多影响中温度对透镜玻璃材料光学性能的影响最为显著^[2-4].姬文晨等对轴向温度梯度下的红外光学系统进行热光学特性分析,对透镜的面型精度与轴向温度梯度以及所导致的光学性能成像质量进行了研究^[5];刘光等提出对光机热集成方法进行灵敏度分析,对于不同梯度温度下的空间相机主镜部件的面型精度进行了研究分析,为空间相机的主动校正奠定了基础^[6];廖志波等针对空间相机窗口非均匀温度分布的特点,提出建立非序列光路和复杂光瞳的方法对光学系统成像质量进行了研究^[7];刘盛典等对非均匀温度下的卡塞格伦光学系统进行了仿真分析,并对非均匀温度下所引起的透镜热弹性变形所导致的卡塞格伦光学系统成像质量进行了研究^[8].吴卫等对红外光学系统进行热光学分析,并用 Zernike 多项式来表示镜面的热弹性变形,然后分析其光学系统成像性能^[9].韩旭等^[10]采用光机热集成分析方法对温度变化下的透射式红外光学系统进行分析,结果表明一定温度范围内光学系统成像质量满足要求.朱峰等^[11]利用光机热集成分析方法对红外光学系统进行分析并对镜筒壁厚进行了优化,减小温度引起的透镜变形,提高了成像质量.

本文分析了温度和折射率之间的关系并给出了相关方程,通过有限元分析软件对机载非球面光学系统进行瞬态热分析,模拟光学系统上升过程的温度变化,导出镜面的温度数据,计算各个节点的折射率,并结合文献^[12]利用非线性最小二乘法对折射率进行拟合求解梯度折射率系数,最后在光学设计软件中利用点列图^[13]对非球面光学系统进行成像质量评价.

1 梯度折射率理论

在研究介质梯度折射率的过程中,为了准确地描述介质梯度折射率分布规律^[14],将梯度折射率分布模型分为四种:1)轴向梯度分布;2)径向温度分布;3)层状梯度分布;4)球梯度分布.对非球面光学系统进行热光分析的过程中,通常只考虑温度引起的镜面热弹性变形,而把折射率看作一个常数.机载相机在上升过程中,由于热传递的存在,镜筒和内部会形成温度梯度,从而会导致梯度折射率.本节将介绍一种描述热致梯度折射率分布的方法,首先利用有限元软件对光学系统进行瞬态热分析^[15]以仿真机载相机上升段温度变化,通过各节点温度计算各点的节点的折射率值.

光学系统透镜折射率与温度之间关系式为^[16]

$$\Delta n_{\text{abs}} = \frac{n_0^2 - 1}{2n_0} \left[D_0 \Delta T + D_1 \Delta T^2 + D_2 \Delta T^3 + \frac{E_0 \Delta T + E_1 \Delta T^2}{\lambda - \lambda_{ik}^2} \right] \quad (1)$$

式中, Δn_{abs} 为绝对折射率变化量; n_0 为参考温度下波长 λ 玻璃折射率; ΔT 为温度相对于参考温度的温度差; D_0 、 D_1 、 D_2 、 E_1 、 E_2 、 λ_{ik} 为常量.

Zemax 光学软件提供了多种梯度折射率接口,由于式(1)中包含笛卡尔坐标系中坐标、镜片材料参考温度下的折射率以及热致折射率,通过式(1)与瞬态热分析的透镜表面各点的坐标和温度结果相结合,利用编程软件可以编写热致梯度折射率拟合算法,所以根据式(1)可得

$$n = n_0 + n_{x_1} x + n_{x_2} x^2 + n_{y_1} y + n_{y_2} y^2 + n_{z_1} z + n_{z_2} z^2 \quad (2)$$

其用矩阵形式可表示为 $\mathbf{AX}=\mathbf{Y}$.

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} x_1 & x_1^2 & y_1 & y_1^2 & z_1 & z_1^2 \\ x_2 & x_2^2 & y_2 & y_2^2 & z_2 & z_2^2 \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ x_i & x_i^2 & y_i & y_i^2 & z_i & z_i^2 \end{bmatrix}, \mathbf{X} = \begin{bmatrix} n_{x_1} \\ n_{x_2} \\ n_{y_1} \\ n_{y_2} \\ n_{z_1} \\ n_{z_2} \end{bmatrix}, \mathbf{Y} = \begin{bmatrix} n_1 - n_0 \\ n_2 - n_0 \\ \cdots \\ \cdots \\ \cdots \\ n_i - n_0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

通过式(3),可得折射率的残差方程

$$\begin{cases} v_1 = n_1 - n_0 - (n_{x_1} x_1 + n_{x_2} x_1^2 + n_{y_1} y_1 + n_{y_2} y_1^2 + n_{z_1} z_1 + n_{z_2} z_1^2) \\ v_2 = n_2 - n_0 - (n_{x_1} x_2 + n_{x_2} x_2^2 + n_{y_1} y_2 + n_{y_2} y_2^2 + n_{z_1} z_2 + n_{z_2} z_2^2) \\ \dots \\ v_i = n_i - n_0 - (n_{x_1} x_i + n_{x_2} x_i^2 + n_{y_1} y_i + n_{y_2} y_i^2 + n_{z_1} z_i + n_{z_2} z_i^2) \end{cases} \quad (4)$$

建立目标函数

$$F = \min \sum_{i=1}^m v_i^2 \quad (5)$$

通过最小二乘法^[17]即可对目标函数求解其极值,求解热致梯度折射率系数 n_{x_1} 、 n_{x_2} 、 n_{y_1} 、 n_{y_2} 、 n_{z_1} 、 n_{z_2} ,将所求解的梯度温度系数添加到光学软件模型中,这样温度所导致的梯度温度折射率即可被添加到透镜中。

2 有限元仿真分析

2.1 机载相机非球面光学系统

本文的研究对象是机载相机非球面光学系统,机载相机主要用于农业、火灾以及工业等方面的航拍,在成像光学系统方面,非球面的使用可以在一定程度上减轻光学系统的重量,十分有利于光学系统的设计。机载相机三维结构如图1,主要由光学系统、镜筒、支座、基座和 CCD 等组成。本文对镜筒和非球面光学系统部分进行瞬态热分析以仿真机载相机上升过程的温度环境变化,由于镜筒和镜片材料热学性能不同,机载相机上升过程中,镜筒温度和镜片会产生温度梯度,从而导致梯度折射率。镜筒是由铝制成的,非球面光学系统由六片透镜组成,其中第二片透镜的第二面为非球面,每个镜片都由不同的材料制成,各材料热学属性如表1。

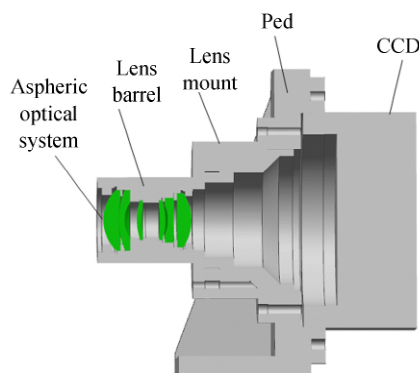


图1 机载相机三维结构

Fig.1 Three-dimensional structure of the airborne camera

表1 材料热学属性

Table1 Material thermal properties

Material	Conductivity/ (W · m ⁻¹ · K ⁻¹)	Young's modulus/MPa	Density/ (t · mm ⁻³)	Specific heat/ (MJ · t ⁻¹ · K ⁻¹)	Poisson's ratio	Expansion/°C
Aluminum	217.7	6.9 × 10 ⁴	2.70 × 10 ⁻⁹	8.88 × 10 ⁷	0.33	2.40 × 10 ⁻⁵
H-ZBAF50	0.67	8.6 × 10 ⁴	3.77 × 10 ⁻⁹	5.4 × 10 ⁸	0.279	9.00 × 10 ⁻⁶
H-F13	0.96	8.4 × 10 ⁴	2.69 × 10 ⁻⁹	8.08 × 10 ⁸	0.231	9.90 × 10 ⁻⁶
H-ZK6	0.83	8.3 × 10 ⁴	3.54 × 10 ⁻⁹	6.9 × 10 ⁸	0.267	7.90 × 10 ⁻⁶
H-ZK20	1.02	7.7 × 10 ⁴	3.66 × 10 ⁻⁹	7.6 × 10 ⁸	0.271	9.00 × 10 ⁻⁶
F2	0.883	5.7 × 10 ⁴	3.50 × 10 ⁻⁹	8.58 × 10 ⁸	0.221	1.20 × 10 ⁻⁵

2.2 光学系统瞬态热分析

机载相机的工作高度为1 km,载机的上升速度为3~5 m/s,到达工作高度大约需要900 s左右,假设机载相机和地面的初始温度都是20℃,1 km的高度温度大约为12.5℃。对镜筒部分建立有限元网格模型,共有79 536个六面体单元,其中螺栓连接处进行了固定约束,与空气接触六面体单元建立热对流单元,图2为镜

筒部分有限元网格模型.

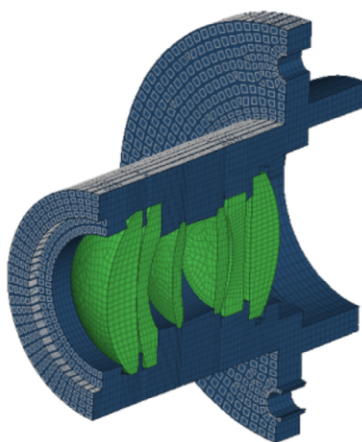


图2 镜筒有限元网格模型

Fig.2 Finite element mesh model of the lens barrel

对非球面光学系统进行瞬态热分析,为了与常温下的成像性能进行对比,分别分析镜头内部时间节点的温度分布,图3~7分别为开始工作时,工作10 min、20 min、30 min、40 min时的透镜温度分布.通过透镜温度分布图,可以看出由于材料导热率的不同,透镜边缘温度和透镜中心产生径向梯度温度,由于窗口周围热对流单元较多,光学透镜组的第一片透镜的第一面与第六面透镜的第二面产生轴向梯度温度.

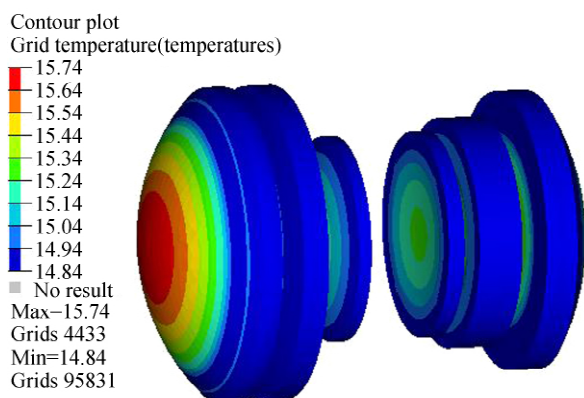


图3 开始工作时透镜温度分布

Fig.3 Lens temperature distribution at the beginning of operation

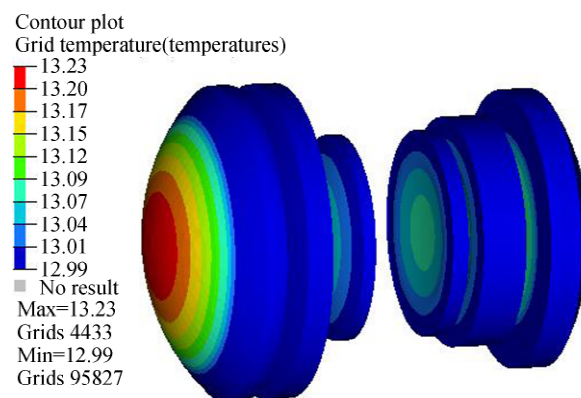


图4 工作10 min时透镜温度分布

Fig.4 Lens temperature distribution at 10 min

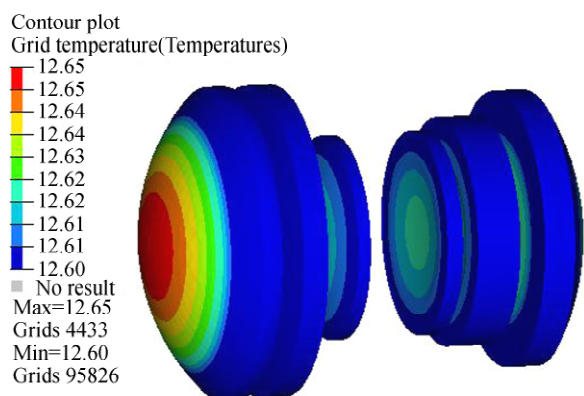


图5 工作20 min时透镜温度分布

Fig.5 Lens temperature distribution at 20 min

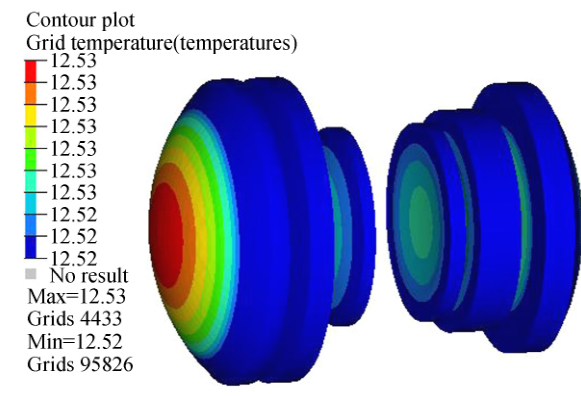


图6 工作30 min时透镜温度分布

Fig.6 Lens temperature distribution at 30 min

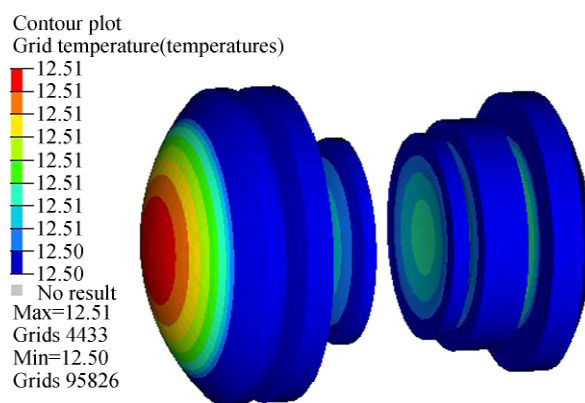


图7 工作 40 min 时透镜温度分布

Fig.7 Lens temperature distribution at 40 min

2.3 梯度折射率系数求解

利用第 1 节中的折射率梯度系数拟合算法,首先将三个时间的各透镜的温度进行提取,导入编写的梯度系数拟合程序,各透镜的参考折射率 n_0 选用波长 λ 为 587.6 nm,参考温度为 20℃ 的折射率,由于光学设计软件提供的接口不能将连续的两个透镜镜面设置为梯度折射率面,所以需将各透镜的第一面节点温度进行提取.表 2~6 分别为开始工作时,工作 10 min、20 min、30 min、40 min 时的各透镜梯度折射率系数,可以看出,由于温度梯度减小,热致梯度折射率也相应地减小.

表 2 开始工作时梯度折射率系数

Table 2 Gradient index coefficient at the beginning of work

No.	n_0	n_{x_1}	n_{x_2}	n_{y_1}	n_{y_2}	n_{z_1}	n_{z_2}
1	1.658 44	5.22×10^{-7}	-3.52×10^{-9}	1.58×10^{-11}	3.43×10^{-9}	5.09×10^{-7}	3.44×10^{-9}
3	1.625 88	9.54×10^{-7}	-2.09×10^{-9}	5.94×10^{-11}	1.18×10^{-8}	1.60×10^{-6}	1.18×10^{-8}
5	1.612 72	-2.66×10^{-8}	2.24×10^{-10}	-1.65×10^{-12}	-2.02×10^{-10}	-2.43×10^{-8}	-2.02×10^{-10}
7	1.617 2	-5.07×10^{-8}	2.69×10^{-10}	-7.15×10^{-12}	-6.61×10^{-10}	-6.70×10^{-8}	-6.62×10^{-10}
9	1.620 04	2.79×10^{-6}	-3.45×10^{-8}	2.90×10^{-10}	2.38×10^{-8}	2.24×10^{-6}	2.37×10^{-8}
11	1.658 44	3.05×10^{-6}	-6.89×10^{-8}	-2.13×10^{-11}	9.66×10^{-10}	8.29×10^{-8}	9.52×10^{-10}

表 3 工作 10 min 梯度折射率系数

Table 3 Working for 10 min gradient refractive index coefficient

No.	n_0	n_{x_1}	n_{x_2}	n_{y_1}	n_{y_2}	n_{z_1}	n_{z_2}
1	1.658 44	4.97×10^{-7}	-3.29×10^{-9}	1.33×10^{-11}	2.96×10^{-9}	4.39×10^{-7}	2.96×10^{-9}
3	1.625 88	6.97×10^{-7}	-1.84×10^{-9}	3.87×10^{-11}	7.79×10^{-9}	1.05×10^{-6}	7.79×10^{-9}
5	1.612 72	-1.14×10^{-8}	6.51×10^{-11}	-6.27×10^{-13}	-8.86×10^{-11}	-1.07×10^{-8}	-8.85×10^{-11}
7	1.617 2	-2.78×10^{-8}	1.75×10^{-10}	-1.77×10^{-12}	-1.73×10^{-10}	-1.75×10^{-8}	-1.73×10^{-10}
9	1.620 04	1.69×10^{-6}	-2.03×10^{-8}	1.50×10^{-10}	1.23×10^{-8}	1.17×10^{-6}	1.23×10^{-8}
11	1.658 44	2.19×10^{-6}	-4.85×10^{-8}	-1.51×10^{-11}	6.07×10^{-10}	5.20×10^{-8}	5.98×10^{-10}

表 4 工作 20 min 梯度折射率系数

Table 4 Working for 20 min gradient refractive index coefficient

No.	n_0	n_{x_1}	n_{x_2}	n_{y_1}	n_{y_2}	n_{z_1}	n_{z_2}
1	1.658 44	2.77×10^{-7}	-1.92×10^{-9}	5.38×10^{-12}	1.15×10^{-9}	1.71×10^{-7}	1.15×10^{-9}
3	1.625 88	3.78×10^{-7}	-1.52×10^{-9}	1.59×10^{-11}	3.16×10^{-9}	4.27×10^{-7}	3.16×10^{-9}
5	1.612 72	6.79×10^{-9}	-9.11×10^{-12}	9.78×10^{-13}	1.38×10^{-10}	1.66×10^{-8}	1.38×10^{-10}
7	1.617 2	-2.43×10^{-8}	2.09×10^{-10}	-3.59×10^{-13}	-3.74×10^{-11}	-3.78×10^{-9}	-3.74×10^{-11}
9	1.620 04	1.07×10^{-6}	-1.24×10^{-8}	7.15×10^{-11}	5.89×10^{-9}	5.56×10^{-7}	5.89×10^{-9}
11	1.658 44	1.25×10^{-6}	-2.65×10^{-8}	-5.89×10^{-12}	2.95×10^{-10}	2.53×10^{-8}	2.90×10^{-10}

表5 工作 30 min 梯度折射率系数

Table 5 Working for 30 min gradient refractive index coefficient

No.	n_0	n_{x_1}	n_{x_2}	n_{y_1}	n_{y_2}	n_{z_1}	n_{z_2}
1	1.658 44	2.27×10^{-7}	-1.32×10^{-9}	4.38×10^{-12}	1.00×10^{-9}	1.01×10^{-7}	9.12×10^{-10}
3	1.625 88	3.36×10^{-7}	-1.21×10^{-9}	1.30×10^{-11}	3.08×10^{-9}	3.97×10^{-7}	2.91×10^{-9}
5	1.612 72	6.47×10^{-9}	-7.07×10^{-12}	8.37×10^{-13}	1.21×10^{-10}	1.36×10^{-8}	1.16×10^{-10}
7	1.617 2	-1.83×10^{-8}	1.36×10^{-10}	-2.69×10^{-13}	-3.00×10^{-11}	-2.98×10^{-9}	-3.32×10^{-11}
9	1.620 04	9.73×10^{-7}	-1.01×10^{-8}	6.95×10^{-11}	5.01×10^{-9}	5.56×10^{-7}	5.13×10^{-9}
11	1.658 44	1.11×10^{-6}	-2.42×10^{-8}	-5.23×10^{-12}	2.73×10^{-10}	2.33×10^{-8}	2.00×10^{-10}

表6 工作 40 min 梯度折射率系数

Table 6 Working for 40 min gradient refractive index coefficient

No.	n_0	n_{x_1}	n_{x_2}	n_{y_1}	n_{y_2}	n_{z_1}	n_{z_2}
1	1.658 44	1.97×10^{-7}	-1.22×10^{-9}	4.28×10^{-12}	9.30×10^{-10}	9.61×10^{-8}	8.82×10^{-10}
3	1.625 88	3.15×10^{-7}	-1.17×10^{-9}	1.16×10^{-11}	2.99×10^{-9}	3.87×10^{-7}	2.71×10^{-9}
5	1.612 72	6.35×10^{-9}	-7.01×10^{-12}	8.15×10^{-13}	1.07×10^{-10}	1.29×10^{-8}	1.03×10^{-10}
7	1.617 2	-1.53×10^{-8}	1.23×10^{-10}	-2.55×10^{-13}	-2.86×10^{-11}	-2.57×10^{-9}	-3.20×10^{-11}
9	1.620 04	9.69×10^{-7}	-9.51×10^{-9}	6.73×10^{-11}	4.59×10^{-9}	5.37×10^{-7}	4.93×10^{-9}
11	1.658 44	1.01×10^{-6}	-2.34×10^{-8}	-5.11×10^{-12}	2.67×10^{-10}	2.18×10^{-8}	1.50×10^{-10}

3 成像质量分析

本文中机载相机非球面光学系统的基本参数:焦距 $f' = 80$ mm,视场角: $H \times V = 28^\circ \times 28^\circ$,工作波段:可见光,探测器像元: $5.5 \mu\text{m}$,工作环境: $-40 \sim 50^\circ\text{C}$.光学系统由六片透镜组成,其中第四面镜面为非球面.本文将采用点列图对光学系统的成像质量,图8为波长 $\lambda = 587.6$ nm 光学系统点列图的设计值.

将不同时间所求解的梯度折射率系数通过 Gradient 4 接口导入到光学设计软件中,图9~13分别为开始做工作时、工作 10 min、工作 20 min、工作 30 min 和工作 40 min 时不同梯度折射率下光学系统点列图的拟合值.

表7为三个视场不同梯度折射率下的非球面光学系统点列图半径,刚升入工作高度时,热致梯度折射率最大,三个视场成像质量也随之降低,随着工作时间的延长,热致梯度折射率降低,三个视场成像质量也得到了提高.结果表明热致梯度折射率的降低使得非球面光学系统成像质量提高.

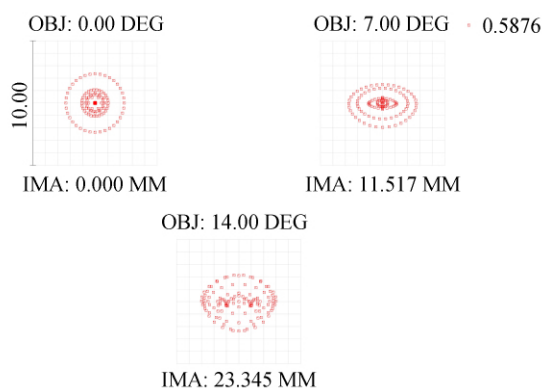


图8 光学系统点列图设计值

Fig.8 Optical system point map design value

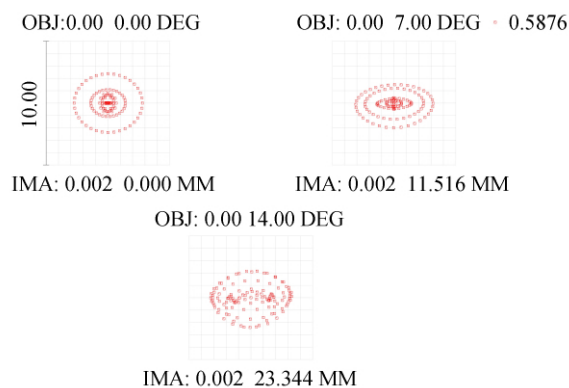


图9 开始工作时点列图拟合值

Fig.9 Point map fit value when starting work

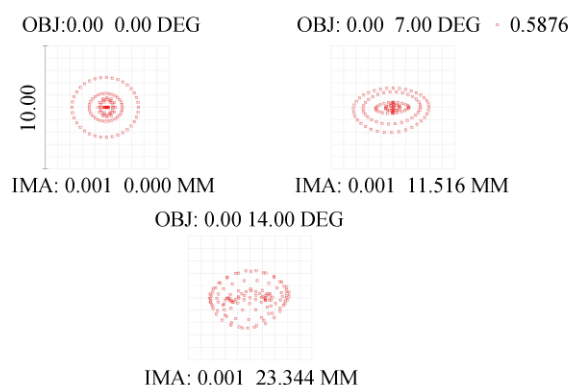


图 10 工作 10 min 点列图拟合值

Fig.10 Working for 10 min point map fitting value

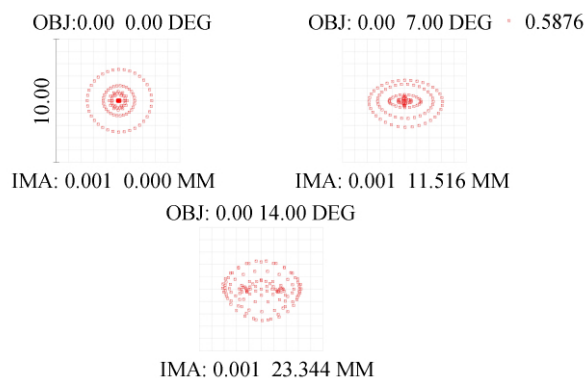


图 12 工作 30 min 点列图拟合值

Fig.12 Working for 30 min point map fitting value

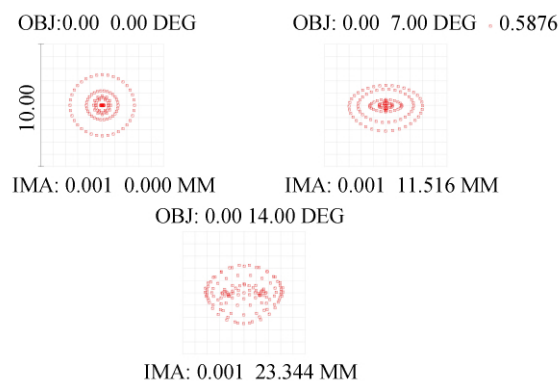


图 11 工作 20 min 点列图拟合值

Fig.11 Working for 20 min point map fitting value

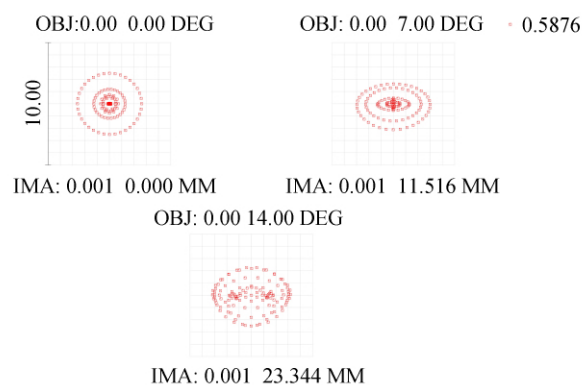


图 13 工作 40 min 点列图拟合值

Fig.13 Working for 40 min point map fitting value

表 7 不同梯度折射率光学系统点列图弥散斑半径

Table 7 Diffraction spot radius of different gradient index optical systems

Field angle	RMS/ μm					
	Design	Start working	Working 10 min	Working 20 min	Working 30 min	Working 40 min
Zero-field	1,405	1,538	1,53	1,529	1,534	1,526
Half-field	1,527	1,72	1,701	1,687	1,686	1,682
Full-field	2,033	2,216	2,2	2,185	2,182	2,180

4 结论

机载相机非球面光学系统上升过程中相机内部会产生温度梯度,从而导致梯度折射率,本文提出了一种梯度折射率对光学系统成像质量分析方法.首先对镜筒部分进行瞬态热分析以仿真机载相机上升过程中的温度环境变化,再提取透镜镜面节点温度,编程求解不同时间的梯度折射率系数,最后在光学软件中建立梯度折射率光学系统模型,通过点列图评价热致折射率对光学系统成像质量的影响.结果表明,机载相机升到工作高度,随着工作时间的延长,热致梯度折射率系数降低,非球面光学系统的成像质量提高.本文所提方法可以预测热致折射率对光学系统成像质量的影响,对光学系统设计具有指导意义.

参考文献

- [1] JIANG Qing. Material thermodynamics [M]. Beijing: Higher education press, 2011.
蒋青. 材料热力学[M]. 北京:高等教育出版社, 2011.
- [2] LI J, GAUZIA S, WU S T. High temperature-gradient refractive index liquid crystals[J]. *Optics Express*, 2004, **12**(9): 2002-2010.
- [3] MCLAUGHLIN P O, MOORE D T. Models for the thermal expansion coefficient and temperature coefficient of the refractive index in gradient-index glass[J]. *Applied Optics*, 1985, **24**(24): 4342-4348.
- [4] RENN C N, SYNOVEC R E. Refractive index gradient detection of biopolymers separated by high-temperature liquid chromatography[J]. *Journal of Chromatography A*, 1991, **536**: 289-301.

- [5] JI Wen-chen, ZHANG Yu, HUANG Pan, *et al.* Influence of axial temperature gradient on optical performance of infrared lens[J]. *Laser & Infrared*, 2015, **45**(9): 1100-1104.
姬文晨, 张宇, 黄攀, 等. 轴向温度梯度对红外透镜光学性能的影响[J]. 激光与红外, 2015, **45**(9): 1100-1104.
- [6] LIU Guang. Research on key technology of active thermal optics of space camera based on thermal integration of optical machine [D]. Changchun: University of Chinese Academy of Sciences (Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences), 2019.
刘光. 基于光机热集成的空间相机主动热光学关键技术研究[D]. 长春: 中国科学院大学(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所), 2019.
- [7] LIAO Zhi-bo, JIAO Wen-chun, FU Rui-min. Simulation analysis of thermal optical performance of space camera optical window[J]. *Applied Optics*, 2011, **32**(3): 407-410.
廖志波, 焦文春, 伏瑞敏. 空间相机光学窗口热光学性能的仿真分析[J]. 应用光学, 2011, **32**(3): 407-410.
- [8] LIU Sheng-dian. Analysis of the influence of non-uniform temperature change on Cassegrain optical system[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015.
刘盛典. 非均匀温度变化对卡塞格伦式光学系统的影响分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
- [9] WU Wei, BAI Yu, CHEN Chi. Infrared system application of optomechanical heat integration[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, **48**(6): 0618002.
吴卫, 白瑜, 陈驰. 光机热集成方的红外系统应用[J]. 红外与激光工程, 2019, **48**(6): 0618002.
- [10] HAN Xu, ZHANG Jian, GAO Tian-yuan, *et al.* Research on thermal integration analysis method of transmissive infrared optical system[J]. *Infrared Technology*, 2018, **40**(12): 20-25.
韩旭, 张健, 高天元, 等. 透射式红外光学系统光机热集成分析方法的研究[J]. 红外技术, 2018, **40**(12): 20-25.
- [11] ZHU Feng, ZHANG Yu, JI Wen-chen, *et al.* Optimization design of infrared tube wall thickness based on ansys[J]. *Value Engineering*, 2017, **36**(14): 85-88.
朱峰, 张宇, 姬文晨, 等. 基于 ANSYS 的红外镜筒壁厚优化设计[J]. 价值工程, 2017, **36**(14): 85-88.
- [12] SONG Xi-fa. Research on photothermal integration and imaging analysis[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2015.
宋席发. 光机热一体化研究及成像分析[D]. 北京: 北京理工大学, 2015.
- [13] MA Hong-chuan, FAN Hong-bo, LIN Yu, *et al.* Overview of thermal integration analysis of thermal imager[J]. *Infrared Technology*, 2019, **41**(2): 134-141.
马宏川, 范宏波, 林宇, 等. 热像仪光机热集成分析综述[J]. 红外技术, 2019, **41**(2): 134-141.
- [14] QIAO Ya-tian. Gradient index optics [M]. Beijing: Science Press, 1991.
乔亚天. 梯度折射率光学[M]. 北京: 科学出版社, 1991.
- [15] JIANG Ren-kui. Structural dynamics analysis and optimization of sky survey camera[D]. Chengdu: University of Chinese Academy of Sciences (Institute of Optoelectronic Technology, Chinese Academy of Sciences), 2018.
蒋仁奎. 巡天相机结构动力学分析与优化[D]. 成都: 中国科学院大学(中国科学院光电技术研究所), 2018.
- [16] LIU L H. Finite element solution of radiative transfer across a slab with variable spatial refractive index [J]. *International Journal of Heat & Mass Transfer*, 2005, **48**(11): 2260-2265.
- [17] LI Qing-yang. Numerical analysis[M]. Beijing: Tsinghua University Press Co., Ltd., 2001.
李庆扬. 数值分析[M]. 北京: 清华大学出版社有限公司, 2001.

Foundation item: National Key Research and Development Program of the Ministry of Science and Technology (No. 2016YFE0105100)