

变焦红外双波段投影镜头的光机热分析

潘越, 徐熙平, 乔杨

长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022

摘要 为了避免环境温度变化影响红外双波段目标模拟器的投影图像质量, 对其变焦投影镜头进行了光机热分析。建立了变焦投影镜头的有限元分析模型, 通过对非稳态的热应力问题进行准静态处理, 完成了有限元模型的热分析和静力学分析, 并求解出整机随温度变化的位移云图。通过有限元数据转换算法将离散节点的坐标数据转化为矢高变形数据, 利用 Householder 算法完成了基于 Zernike 多项式的镜面热变形拟合, 并将拟合系数导入光学设计软件, 得到了不同温度下变焦投影镜头的热分析结果。结果表明, 当温度在 10~30 °C 区间时, 投影图像质量对整机的热变形不敏感。

关键词 光学设计; 热光学特性; 有限元; Zernike 拟合; 变焦镜头

中图分类号 TH74

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.0522001

Optical-Structural-Thermal Analysis of Zoom Infrared Dual-Band Projection Lens

Pan Yue, Xu Xiping, Qiao Yang

*School of Opto-electronic Engineering, Changchun University of Science and Technology,
Changchun, Jilin 130022, China*

Abstract In order to avoid the influence of the ambient temperature change on the projection image quality of the infrared dual-band target simulator, the integrated optical-structural-thermal analysis of the zoom projection lens of this simulator is conducted. The finite element analysis model of the zoom projection lens is established. By the quasi-static treatment to the unsteady thermal stress, the thermal analysis and the statics analysis are finished. The displacement nephogram of overall unit versus temperature is also obtained. The discrete node coordinate data are converted into the vector deformation data by the finite element data conversion algorithm. The surface thermal deformation of each lens is fitted by the Householder algorithm based on the Zernike polynomials. If the fitting coefficients are imported to the optical design software, the thermal analysis results of the zoom projection lens under different temperatures can be obtained. The results show that the projection image quality is insensitive to the thermal deformation of the overall unit when the temperature is in the range of 10-30 °C.

Key words optical design; thermal optical property; finite element; Zernike fitting; zoom lens

OCIS codes 220.4880; 220.3620; 120.6810

1 引 言

某些红外光学系统(如机载变焦镜头)工作在温度极端变化的环境中, 系统中的光学元件的外形尺寸、折射率、空气间隔等均会受到严重影响, 这种影响会使光学系统产生波前畸变, 改变焦距, 导致像面漂移, 降低光学性能^[1-2]。热光学分析能对温度变化的影响作出预判, 从而确定光学系统的温度适应区间, 以保证其在严苛环境下仍可正常使用^[3]。

一般情况下, 热光学分析多针对反射式光学系统, 讨论单个反射面的热变形, 对于透射式光学系统往往忽略其机械结构的影响, 只考虑各透镜表面的热变形。通过这种分析方法无法获得面型变形对像质的影响^[4-5], 光机热集成分析正是在这种背景下提出的, 其通过对光机结构的有限元模型加载边界条件, 获得变形后的光学元件表面离散节点的坐标数据, 利用数据转换算法和曲面拟合算法, 得到曲面拟合系数, 并导入光学设计软件, 以求解温度变化后的

收稿日期: 2017-09-28; 收到修改稿日期: 2017-12-06

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金(61605016)、吉林省科技发展计划(20160204062GX)

作者简介: 潘越(1989—), 男, 博士, 讲师, 主要从事光电系统总体技术方面的研究。E-mail: jiliny@163.com

光学系统性能^[6-7]。

红外双波段目标模拟器主要用于红外双波段成像系统的半实物仿真测试^[8-9],本文针对其变焦投影镜头进行了光机热集成分析,根据镜头的结构特点,运用手动划分和自动划分相结合的方式构建了网格模型,在求解整机位移云图后,利用Householder算法完成了基于Zernike多项式的镜面热变形拟合,并最终求解出了镜头的温度适应区间。

2 变焦投影镜头的光机设计

2.1 光学设计

变焦投影镜头的工作波段分别为中波 3.2~4.8 μm 和长波 8~12 μm,可实现两档变焦,视场分别为±3.75°和±1.875°,采用双通道、共口径的结构形式,由两数字微镜器件(DMD)分别生成长波和中波红外动态场景,主光路为长波红外光通道,折转光路为中波红外光通道。变焦投影镜头采用三组式设计,其中前固定组具有正光焦度,变倍组具有负光焦度,后固定组具有正光焦度,引入两非球面以增加光学系统设计的自由度^[10]。变焦后,加装光栅尺的精密电控平移台带动变焦投影镜头整体作沿轴运动,以补偿出瞳位置的偏差,图1所

示为变焦投影镜头的光路。

光学设计结果:在两视场内,长波和中波的能量集中度均大于80%;长波双视场在10 lp/mm处的调制传递函数(MTF)值大于0.4,中波双视场在10 lp/mm处的MTF值大于0.7,两波段内各视场的MTF值均接近衍射极限;双波段大视场的畸变均在0.5%以内,双波段小视场的畸变均在0.1%以内;成像质量满足使用要求。

2.2 光机结构设计

变焦投影镜头的光机结构如图2所示,其主要由前固定组、变倍组、后固定组、小型步进电机、编码器、双色合束镜、DMD等组成。镜筒1、套筒、镜筒2均有定位台阶面,相互对准后通过端面法兰结构将前、后固定组与套筒固定。套筒与凸轮筒为配对部件,套筒外侧与凸轮筒内侧分别有凸环状的经阳极硬化处理的轴承面,具有良好的耐磨性。凸轮筒两端有外齿轮,与小型步进电机和编码器的外齿轮啮合,电机带动凸轮筒作周向转动时,即带动变倍组沿导轨作线性运动。由于投影镜头要实现两档变焦,变倍组在变焦过程中运动到两个极限位置即可,因此凸轮筒有三个沿周向120°分布的变倍直线槽(展开后为斜直线),套筒有三个沿周向120°分布的水平辅助导向槽。

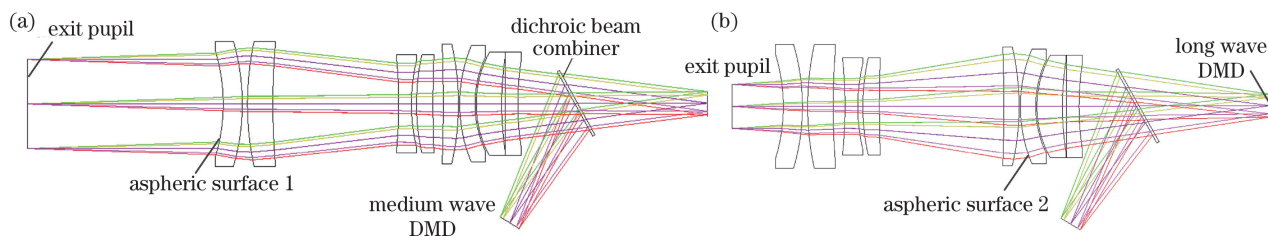


图1 不同焦距下变焦投影镜头的光路。(a)长焦距;(b)短焦距
Fig. 1 Light path of zoom projection lens under different focuses.

(a) Long focus; (b) short focus

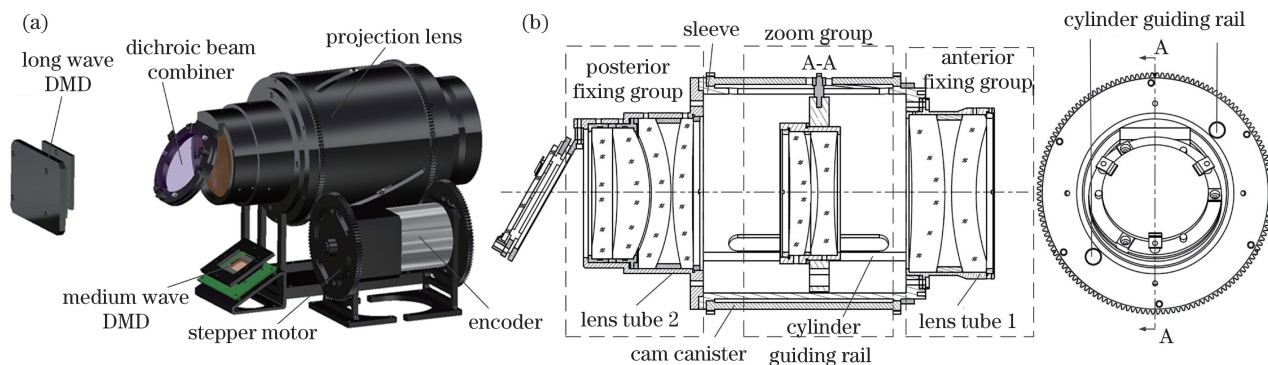


图2 变焦投影镜头的光机结构。(a)整体结构;(b)镜头结构

Fig. 2 Opto-mechanical structure of zoom projection lens. (a) General structure; (b) lens structure

3 变焦投影镜头的有限元建模及热分析

变焦投影镜头的景象生成器件为 DMD,其设计为后向散热,通过粘贴于芯片靶面后方的散热片导出热量,DMD 的靶面温度与环境温度基本相同,不存在轴向热源,因此只考虑温度均匀变化的情况即可^[11]。

只考虑温度均匀变化时,可将变焦投影镜头的热稳定性分析归为求解非定期的热应力问题。非定期指温度或应力随时间改变,由于室温变化十分缓慢,可忽略影响,故温度变化过程被分解为一连串短时间内的平衡状态,并在每一时刻按照当时的温度分布计算出热应力,这种方法即为非定期热应力问

题的准静态处理方法^[12]。

3.1 有限元建模

利用有限元分析软件建立网格模型,去除非关键零件,并对某些零件的非关键特征进行简化处理,通过自动划分和手动调整的方式进行网格划分,光学元件各表面的网格密度大于结构件的,划分后的单元总数为 114786 个。其中导向柱采用一维梁单元划分,用于粘接透镜的环氧树脂胶(3M2216)层采用三维六面体单元划分,其余零件大部分为高质量六面体单元,不同区域的交接处自动生成四面体过渡单元。建模结果如图 3 所示,镜头的材料属性见表 1。

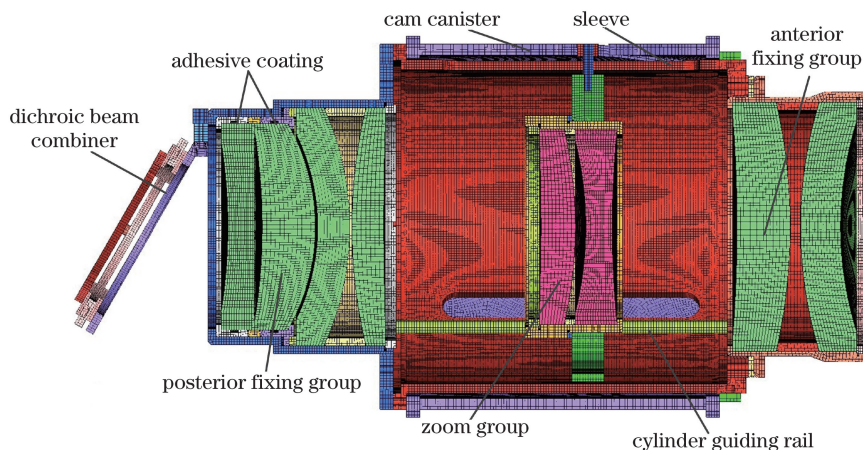


图 3 变焦投影镜头的网格模型

Fig. 3 Mesh model of zoom projection lens

表 1 变焦投影镜头各元件的材料属性

Table 1 Material properties of each component of zoom projection lens

Material	Elastic modulus /GPa	Linear expansion coefficient /($10^{-6} K^{-1}$)	Density /($g \cdot cm^{-3}$)	Poisson ratio
ZnS	7.45	4.6	4.08	0.290
AMTIR1	2.20	12.0	4.49	0.266
ZnSe	7.03	7.1	5.27	0.280
Ge	10.37	6.1	5.32	0.278
Al6061	68.20	23.6	2.68	0.332
40Cr	205.80	11.0	7.85	0.300
16Mn	212.00	11.3	7.85	0.310
3M2216	0.689	102.0	1.47	0.430

3.2 热分析结果

将有限元模型导入求解器,定义单元属性并设置工况,输入各元件材料的力学属性,最大温差设为 25 °C,变化时长设为 10 h,起始温度设为 10 °C,将温度范围细分为 100 个子区间进行热分析,图 4 所示为温度变化量为 13.1 °C 和 21.3 °C 时的变焦投影镜头的温度场分布。

从图 4 可以看出,随温度的升高,由于各材料属性的差异,温度分布变得越来越不均匀,高温区域有一部分集中在双色合束镜位置。由于硬铝材料的热胀系数是 ZnSe 的三倍以上,使用弹性元件的夹持方式可避免双色合束镜发生松动。对变焦投影镜头进行约束,并根据温度场的分布结果进行静力学分析,经解算获得整机随温度变化的位移云图,图 5 所

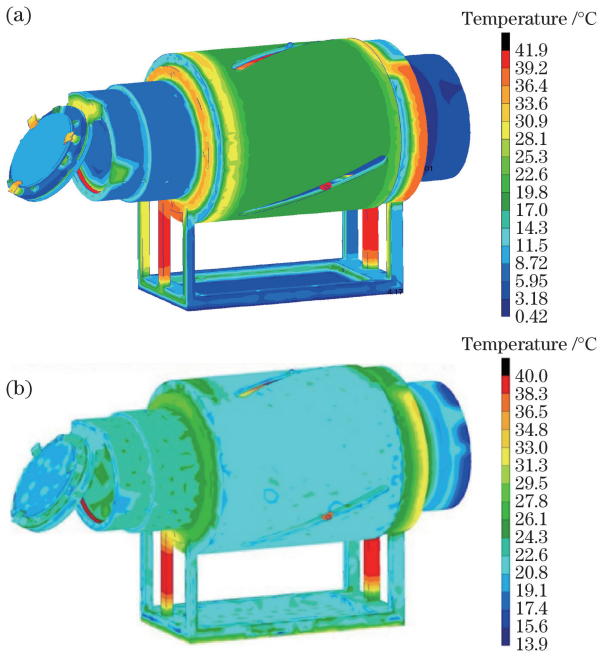


图 4 不同温度变化量下变焦投影镜头的温度场分布。

(a) 13.1 °C (b) 21.3 °C

Fig. 4 Temperature field distribution of zoom projection lens under different temperature variations.

(a) 13.1 °C (b) 21.3 °C

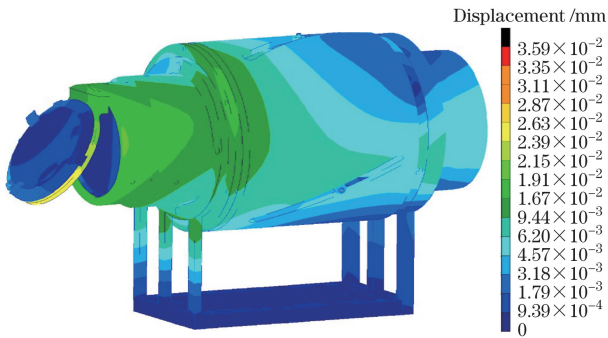


图 5 温度变化量为 25 °C 时的位移云图

Fig. 5 Displacement nephogram when temperature variation is 25 °C

示为温度变化量为 25 °C 时的位移云图。

3.3 有限元数据转换算法

提取透镜各表面的离散节点坐标数据,将其转化为矢高数据,如图 6 所示,变形后初始表面点 P_0 移动到点 P_1 位置,平行于光轴的线段 P_1T 的长度即为点 P_1 处基于矢高的变形值。在光学设计完成后,可获得各透镜初始面型的矢高方程^[13],其表示式为

$$z = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (K + 1)c^2r^2}} + \sum_{i=1}^8 a_i r^{2i}, \quad (1)$$

式中 z 为矢高,锥面度 $K = -e^2$ (e 为自然常数), c 为非球面的顶点曲率, r 为相距原点的距离, a_i 为

偶次非球面系数 ($i = 1, 2, \dots, 8$)。

变形前 XY 平面上点 P_0 的坐标通过有限元分析获得,设为 (x, y) , 则有

$$r_{P_0} = \sqrt{x^2 + y^2}, \quad (2)$$

式中 r_{P_0} 为变形前 XY 平面上点 P_0 与原点的距离。变形后 XY 平面上点 P_0 的坐标变化量同样通过有限元分析获得,设为 $\Delta x, \Delta y$, 同样根据(2)式可得距离变化量 Δr , 将二者代入(1)式中,当面型为球面时,(1)式中的偶次非球面系数 a_i 为 0, 矢高变化量为

$$\Delta z_{\text{sag}} = z(r_{P_0}) - z(r_{P_0} + \Delta r). \quad (3)$$

点 P_0 沿光轴方向的坐标变化量 Δz 同样可通过有限元分析获得,则线段 P_1T 的长度为

$$L_{P_1T} = \Delta z' = \Delta z_{\text{sag}} + \Delta z = z(r_{P_0}) - z(r_{P_0} + \Delta r) + \Delta z. \quad (4)$$

由于计算中未使用初始表面节点的矢高 z , 因此在进行有限元分析时不需要在各透镜的光学表面与光轴的交点处设置局部坐标系, 以上计算过程通过编程实现, 应提取足够多的坐标点以保证变形后曲面的拟合精度。

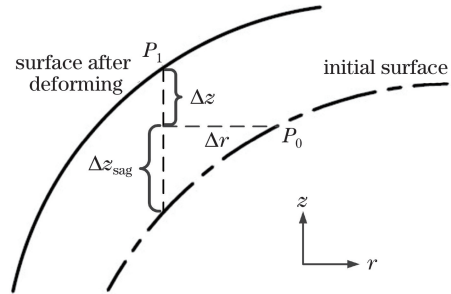


图 6 基于矢高的变形示意图

Fig. 6 Schematic of deformation based on vector height

4 变焦投影镜头的热光学特性分析

4.1 基于 Zernike 多项式的镜面热变形拟合

变焦投影镜头由 8 片透镜和一块平行平板组成(双色合束镜), 共有 18 个光学表面, 现以两非球面为例拟合热变形的 Zernike 系数。非球面的热变形可以用 Zernike 多项式线性表示为

$$\sum_{j=1}^N a_j Z_j(x_i, y_i) = \Delta z', \quad (5)$$

式中 N 为 Zernike 多项式的项数, $Z(\cdot)$ 为 Zernike 多项式, $\Delta z'$ 即为根据(4)式转化的矢高数据。将笛卡儿坐标系下节点的 (x_i, y_i) 坐标转化为极坐标 $(r_i \cos \theta_i, r_i \sin \theta_i)$ (r_i 为极径, θ_i 为极角), 假设共选取 m 个采样点, 利用 Zernike 多项式的前 36 项表

示镜面变形,则有

$$\begin{cases} a_1 Z_1(r_1, \theta_1) + a_2 Z_2(r_1, \theta_1) + \dots + \\ a_{36} Z_{36}(r_1, \theta_1) = \Delta z'_1 \\ a_1 Z_1(r_2, \theta_2) + a_2 Z_2(r_2, \theta_2) + \dots + \\ a_{36} Z_{36}(r_2, \theta_2) = \Delta z'_2 \\ a_1 Z_1(r_3, \theta_3) + a_2 Z_2(r_3, \theta_3) + \dots + \\ a_{36} Z_{36}(r_3, \theta_3) = \Delta z'_3 \\ \dots \\ a_1 Z_1(r_m, \theta_m) + a_2 Z_2(r_m, \theta_m) + \dots + \\ a_{36} Z_{36}(r_m, \theta_m) = \Delta z'_m \end{cases} \quad (6)$$

(6)式可写为

$$\mathbf{Z}\mathbf{A} = \Delta\mathbf{Z}', \quad (7)$$

式中 \mathbf{Z} 为 $m \times 36$ 的 Zernike 多项式矩阵, \mathbf{A} 为待求解的系数列向量, $\Delta\mathbf{Z}'$ 为矢高变形的列向量。由于 $m \gg 36$, (7) 式为超定方程组, 利用 Householder 变换法求解^[14-15], 经过 n 次 Householder 变换后, 得到

$$\mathbf{Z} = \mathbf{Q}\mathbf{R}, \quad (8)$$

式中 \mathbf{Q} 为 $m \times m$ 的正交矩阵, \mathbf{R} 为上三角矩阵。假设

$$\boldsymbol{\sigma} = \Delta\mathbf{Z}' - \mathbf{Z}\mathbf{A}, \quad (9)$$

用 \mathbf{Q}^T (T 代表转置) 乘 (9) 式两端, 有

$$\mathbf{Q}^T \boldsymbol{\sigma} = \mathbf{Q}^T \Delta\mathbf{Z}' - \mathbf{Q}^T \mathbf{Z}\mathbf{A} = \mathbf{Q}^T \Delta\mathbf{Z}' - \mathbf{R}\mathbf{A}. \quad (10)$$

因为 \mathbf{Q}^T 为正交矩阵, 则有

$$\|\boldsymbol{\sigma}\|_2^2 = \|\mathbf{Q}^T \boldsymbol{\sigma}\|_2^2 = \|\mathbf{Q}^T \Delta\mathbf{Z}' - \mathbf{R}\mathbf{A}\|_2^2. \quad (11)$$

超定方程组不存在确定解, 只存在满足 (11) 式的最小解, 令

$$\mathbf{Q}^T \Delta\mathbf{Z}' = \begin{bmatrix} \mathbf{C} \\ \mathbf{D} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{R}\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_1 \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} \mathbf{A}, \quad (12)$$

式中 \mathbf{C} 为 n 维列向量, \mathbf{D} 为 $(m-n)$ 维列向量, \mathbf{R}_1 为 $n \times n$ 的上三角方阵, $\mathbf{0}$ 为 $(m-n) \times n$ 的零矩阵。则有

$$\|\boldsymbol{\sigma}\|_2^2 = \|\mathbf{C} - \mathbf{R}_1 \mathbf{A}\|_2^2 + \|\mathbf{D}\|_2^2. \quad (13)$$

为使 (13) 式取得最小值, 则有

$$\mathbf{A} = \mathbf{R}_1^{-1} \mathbf{C}, \quad (14)$$

即可求得 Zernike 多项式的系数列向量 \mathbf{A} 。

求解过程通过编程软件实现, 图 7 所示为非球面 1 和非球面 2 的归一化热变形的拟合结果。

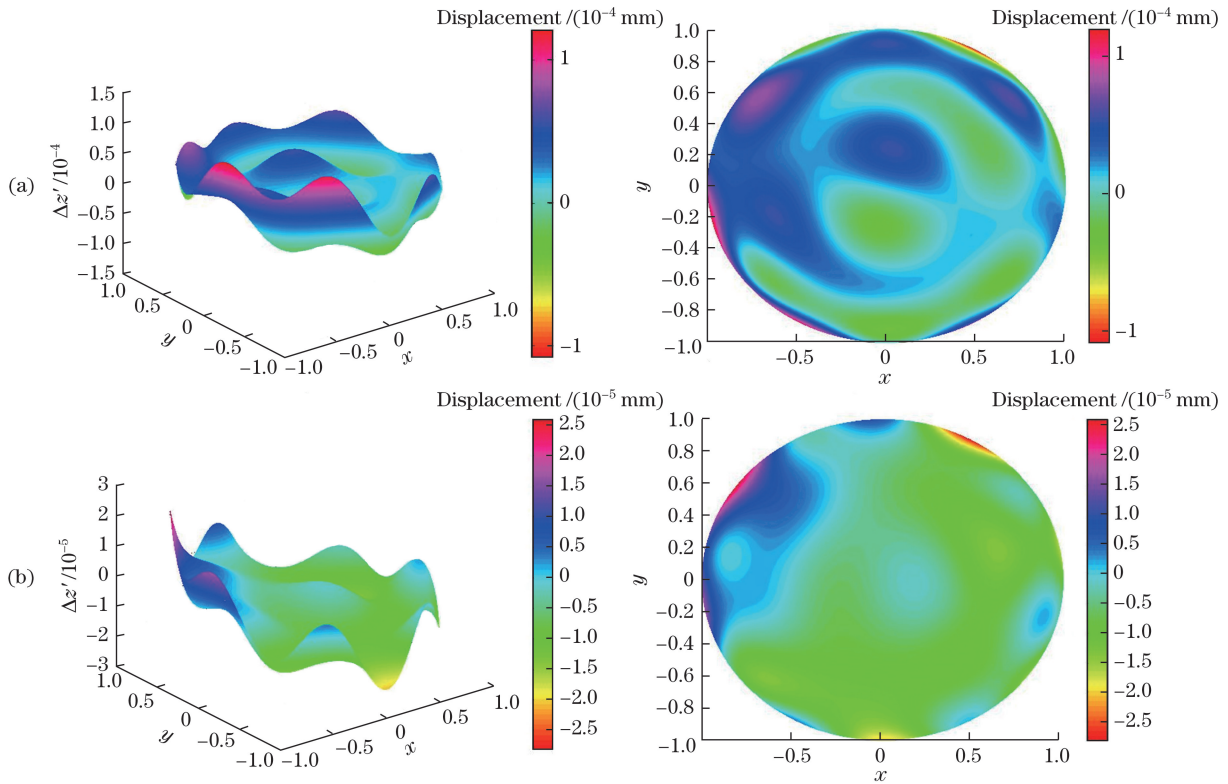


图 7 非球面热变形的拟合结果。(a)非球面 1;(b)非球面 2

Fig. 7 Fitting results of thermal deformation of aspheric surfaces. (a) Aspheric surface 1; (b) aspheric surface 2

从图 7 中可以看出, 非球面 1 归一化热变形的拟合结果的数量级为 10^{-4} , 非球面 2 的为 10^{-5} , 非球面 2 较非球面 1 受温度变化影响更小, 结合力学分析位移的结果, 可以认为镜面热变形在合理范围内。

4.2 热光学特性分析

将各镜面的热变形对应的 Zernike 多项式系数导入光学设计软件, 得到变焦投影镜头在温度变化后的 MTF 曲线, 图 8 和图 9 所示分别为长波双视场投影镜头在 10°C 和 35°C 下的 MTF 曲线, 图 10 和

图 11 所示分别为中波双视场投影镜头在 10 ℃ 和 35 ℃ 下的 MTF 曲线,其中 T 为子午方向视场, S 为弧矢方向视场。

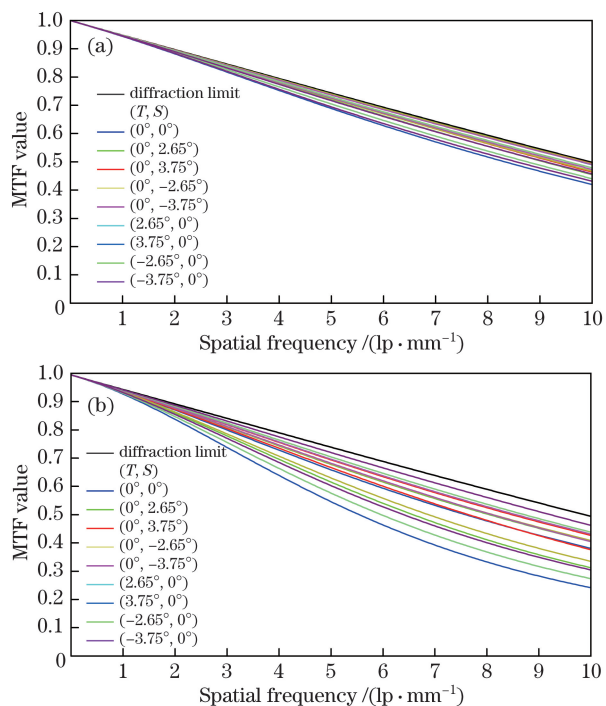


图 8 不同温度下的长波大视场 MTF 曲线。(a) 10 ℃ ; (b) 35 ℃

Fig. 8 MTF curves of long-wave wide field under different temperatures. (a) 10 ℃ ; (b) 35 ℃

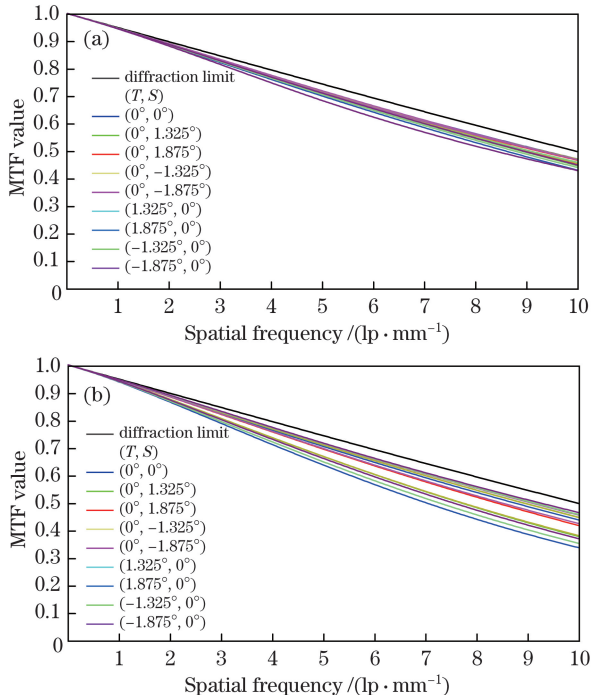


图 9 不同温度下的长波小视场 MTF 曲线。

(a) 10 ℃ ; (b) 35 ℃

Fig. 9 MTF curves of long-wave small field under different temperatures. (a) 10 ℃ ; (b) 35 ℃

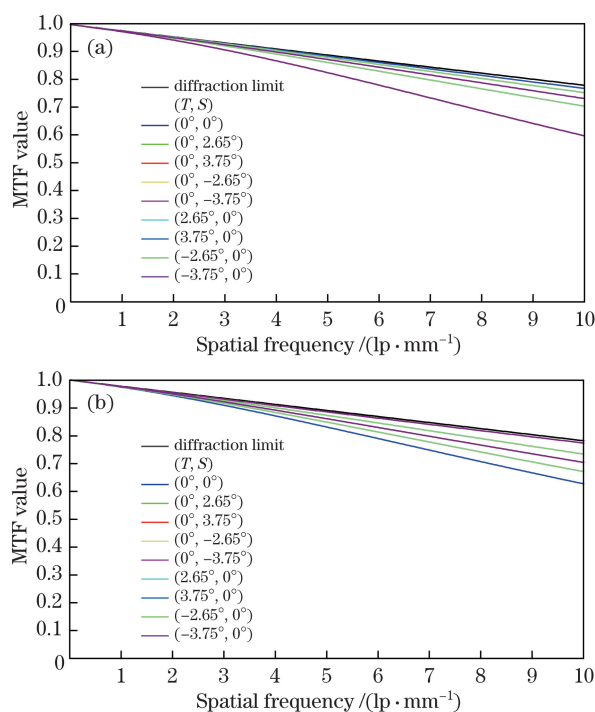


图 10 不同温度下的中波大视场 MTF 曲线。

(a) 10 ℃ ; (b) 35 ℃

Fig. 10 MTF curves of medium-wave wide field under different temperatures. (a) 10 ℃ ; (b) 35 ℃

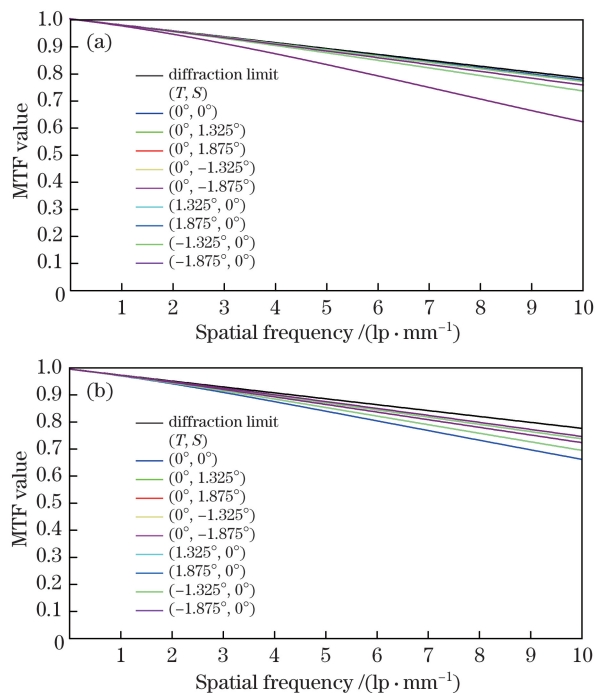


图 11 不同温度下的中波小视场 MTF 曲线。

(a) 10 ℃ ; (b) 35 ℃

Fig. 11 MTF curves of medium-wave small field under different temperatures. (a) 10 ℃ ; (b) 35 ℃

如图 8,9 所示,当温度为 10 ℃ 时,长波双视场在 10 lp/mm 处的 MTF 值均大于 0.4。当温度上升

到 35 °C 时,长波大视场下的部分视场在 10 lp/mm 处的 MTF 值减小到 0.3 以下,中心视场受整机温度变化的影响最严重,在 10 lp/mm 处的 MTF 值约减小 33.7%。长波小视场下的部分视场在 10 lp/mm 处的 MTF 值保持在 0.4 以上,中心视场在 10 lp/mm 处的 MTF 值约减小 13.7%。如图 10,11 所示,当温度为 10 °C 和 35 °C 时,中波双视场在 10 lp/mm 处的 MTF 值均大于 0.6,受整机温度变化的影响较小。由此可知,当工作环境温度变化范围为 10~30 °C 时,投影图像质量对整机热变形不敏感,常规实验室环境的温度即可满足要求。

5 结 论

分析了变焦红外双波段投影镜头的光机热集成,构建了变焦投影镜头的有限元模型,并进行了热分析和静力学分析,求解出了整机随温度变化的云图。运用 Householder 变换法拟合了基于 Zernike 多项式的镜面热变形,分析了不同温度下变焦投影镜头的光学性能。光机热集成分析结果表明:各镜面的热变形均在合理范围内,投影镜头受温度变化影响较小;温度为 10 °C 时,长波双视场在 10 lp/mm 处的 MTF 值均大于 0.4,中波双视场在 10 lp/mm 处的 MTF 值均大于 0.6;温度为 35 °C 时,长波双视场在 10 lp/mm 处的 MTF 值减小到 0.3 以下,中波双视场在 10 lp/mm 处的 MTF 值仍大于 0.6,可认为变焦红外双波段投影镜头的温度适应区间为 10~30 °C。该区间满足实验室环境的使用要求,投影图像质量对整机热变形不敏感,光机结构设计合理。

参 考 文 献

- [1] Jia Y, Gao Y G, Shao S. Opto-mechanical optimization for laser expander system under thermal loads[J]. Chinese Journal of Lasers, 2014, 41(1): 0116003.
贾勇,高云国,邵帅.热载荷下激光扩束系统的光机优化设计[J].中国激光,2014,41(1):0116003.
- [2] Zhou J, Li J, Wang Q F, *et al.* Optimized design of infrared opto-mechanical systems based on the spontaneous emission suppression[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(3): 0322003.
周军,李娟,王庆丰,等.基于自发辐射抑制的红外光机系统优化设计[J].光学学报,2015,35(3):0322003.
- [3] Xu Y L, Tian H Y, Liu J. Integrated opto-mechanical analysis of a long-focus airborne camera under overloads[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(8): 082202.
- 徐钰蕾,田海英,刘剑.长焦距航空遥感器过载载荷下的光机集成分析[J].激光与光电子学进展,2014,51(8):082202.
- [4] Liu Z G, Zhu J Q. Integrated opto-mechanical analysis of large octagonal Nd:glass support system[J]. Chinese Journal of Lasers, 2007, 34(3): 308-312.
刘志刚,朱健强.大口径八边形钕玻璃片支撑系统的光机集成分析[J].中国激光,2007,34(3):308-312.
- [5] Xu Y, Huang Y F, Chang J. Investigation of flexible element in passive athermalisation[J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(1): 0116001.
许尧,黄一帆,常军.挠性压圈在被动式热分析中的应用研究[J].中国激光,2015,42(1):0116001.
- [6] Xiao Y, Xu W D, Zhao C Q. Integrated simulation of opto-mechanical system[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(7): 0722002.
肖阳,徐文东,赵成强.光机系统的一体化仿真分析[J].光学学报,2016,36(7):0722002.
- [7] Shi J L, Ren G. Integrated analysis and simulation of opto-mechanical system[J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(10): 2867-2870.
史建亮,任戈.光机系统集成分析仿真研究[J].光学学报,2009,29(10):2867-2870.
- [8] Pan Y, Xu X P, Qiao Y. Opto-mechanical structural design for 8-12 μm infrared dynamic thermal image simulator[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36(8): 1854-1859.
潘越,徐熙平,乔杨.8~12 μm 红外动态热像模拟器光机结构设计[J].仪器仪表学报,2015,36(8):1854-1859.
- [9] Pan Y, Qiao Y, Xu X P. Study on general design of dual-DMD based infrared two-band scene simulation system[C]. SPIE, 2017, 10256: 102563Y.
- [10] Qu R, Deng J. Methods of correcting between-band chromatic aberration in infrared dual-band dual-field of view athermalized optical design[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(1): 0122006.
曲锐,邓键.红外双波段双视场消热差光学系统设计中消波段间色差条件(方法)的研究[J].光学学报,2015,35(1):0122006.
- [11] Li Y W, Yang H B, Cheng Z F, *et al.* Thermal/structural/optical integrated design for optical window in aerial remote sensor[J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(8): 2103-2106.
李延伟,杨洪波,程志峰,等.航空遥感器光学窗口光机热一体化设计[J].红外与激光工程,2012,41(8):2103-2106.
- [12] Song X F, Li L, Huang Y F. Method of determining effects of heat-induced irregular refractive index on an optical system[J]. Applied Optics, 2015, 54(25),

- 7701-7707.
- [13] Zhang B L, Li D, Zhang S J, *et al.* Design of aspheric fisheye lens and study of distortion correction algorithms[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(12): 1222001.
张宝龙, 李丹, 张少敬, 等. 非球面鱼眼镜头设计及畸变校正算法研究[J]. *光学学报*, 2014, 34(12): 1222001.
- [14] Lan G P, Wang X, Liang W, *et al.* Optical design and thermal analysis for the active-focusing aerial camera objective[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(3): 0322006.
蓝公仆, 汪旋, 梁伟, 等. 主动调焦式航空相机物镜光学设计及温度仿真分析[J]. *光学学报*, 2012, 32(3): 0322006.
- [15] Liu M, Zhang G Y, Geng S B, *et al.* Opto-mechanical structure design and thermal optical analysis on zoom lenses of optical-electronic platform[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(8): 0812003.
柳鸣, 张国玉, 耿树彬, 等. 光电平台变焦镜头光机结构设计及热光学分析[J]. *光学学报*, 2015, 35(8): 0812003.