基于小物镜系统的热像差影响因素分析

周连生　于新峰　吴志会　芮大为　张　巍

中国科学院长春光学精密机械与物理研究所应用光学国家重点实验室, 吉林 长春 130033

摘要　光机热集成分析是光机结构设计中的重要环节,对光学系统像质的预测与补偿有着重要的参考价值。针对小物镜系统,进行光机热集成分析,结果表明该系统产生的热像差较大,影响系统光学性能,其中温度升高导致折射率变化引入的系统热像差较大;结构热变形引入的系统热像差较小,可以忽略;镜片与支撑结构之间的导热、上下窗口的空气扰动、机械结构外表面的环境对流也会存在一定影响,但影响较小。由此可知系统热像差的主要影响因素是热载的大小,设计过程中减少透镜厚度及材料吸收率,降低系统热载,是减小光学系统热像差最为有效的途径。

关键词　光学设计;光机热集成分析;热像差;有限元法;Zernike多项式;折射率均匀性;热载

中图分类号　TH744　　**文献标识码**　A　　**doi**: 10.3788/LOP51.092204

Analysis of Influence Factors of Thermal Aberrations Based on the Small Lens System

Zhou Liansheng　Yu Xinfeng　Wu Zhihui　Rui Dawei　Zhang Wei

State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, *China*

Abstract　Thermal structural optical integrated analysis is an effective way to estimate optical image quality during optical and mechanical design stage. Thermal structural optical integrated analysis of a small lens system is conducted. The results indicate that thermal aberrations of the system are higher, affecting optical properties of the system. Contribution to the thermal aberrations induced by change of refractive index is larger than that by surface deformation. Thermal conductance between the lens and the support structures, air turbulence in the upper and lower windows, and environmental convection of the outer surface of the mechanical structure influence the thermal aberrations finitely, and the primary influence factor is thermal load. Reducing thickness of the lens and absorption rate of materials will decrease thermal load and thermal aberrations of the system decreased effectively.

Keywords　optical design; thermal structural optical integrated analysis; thermal aberrations; finite element method; Zernike polynomials; uniformity of refractive index; thermal load

OCIS codes　220.3740; 220.1000; 110.3000; 110.6820

1　引　　言

近年来,随着集成电路工业的迅猛发展,要求光刻机分辨率与生产率不断提高,离轴照明的采用及曝光剂量的增加是满足高分辨率及高生产率的两种重要手段[1]。但上述方式的采用不可避免地引入另一种导致像质劣化的现象,称为热像差。这就要求在光刻物镜设计、制造及装调各个环节均有严格的控制和精细的分析,尤其是在设计阶段准确预测热像差并采取相应的补偿措施[2-3]。

光刻物镜在工作过程中吸收部分曝光能量,一方面使得透镜温度升高,改变了光学材料的折射率,另一方面使得透镜与支撑结构之间产生温差,由于材料膨胀系数的不同,导致透镜产生变形。上述两种因素均

收稿日期: 2014-03-16; **收到修改稿日期**: 2014-04-19; **网络出版日期**: 2014-07-25

基金项目: 国家科技重大专项(2009ZX02205)

作者简介: 周连生(1987—),男,硕士,研究实习员,主要从事光机结构设计与分析方面的研究。

E-mail: zhoulian200608@126.com

187

会导致光学设计系统产生一定的热光学误差，表现为波像差，畸变劣化，进而降低成像质量，影响系统分辨率。合理的光机热集成分析能够综合评估光学系统，改进系统设计，提高系统的光学性能，避免单一分析造成的设计缺陷。

设计阶段充分考虑温度变化导致的像质劣化，并采用相应的补偿措施，在光机热集成设计中得到了广泛的应用[4-10]。陈华等[11]分析了物镜系统的热变形、温度致折射率变化、应力双折射等几种因素对光学系统像质的贡献；Nakashima等[2]则针对投影物镜的热像差问题，采用可动镜片结合红外热补偿技术(IAC)，实现了不同照明模式及掩模下的热像差补偿；Scott Halle等[3]则在光刻机上采用一种新的热像差补偿元件，使得Zernike像差的补偿能够延伸至64项。但是上述分析都是从整体上考虑系统的热光学性能，并没有从具体的结构细节与环境扰动等因素思考，对实际的结构设计及环境约束并不能起到较为明确的指导意义。

本文从光刻投影物镜工程实用角度出发，以小物镜系统为例，对光机结构的激光热源的强度、支撑结构的换热能力、上下窗口的空气扰动及光学系统外部环境进行光机热集成分析，以期为投影物镜系统设计及分析提供指导性意见。

2 Zernike多项式拟合

为了方便更好地分析像差成分，一般将计算得到的透镜表面变形、折射率均匀性及波像差进行多项式拟合，其中用途最多的是Zernike多项式拟合。本文中对温度变化引入的折射率均匀性及变形量均做了上述处理，并且在光学像质成分分析中同样也采用了Zernike多项式拟合。

Zernike多项式具有以下两个优点：1)可以直观地描述光学表面面形，当描述波像差时，其各项与Seidel像差存在对应关系，物理意义非常明确；2)单位圆内各项正交，去掉或是修改某些项不会对其他项有影响，可以消除一些随机因素的干扰[12-13]。

极坐标下，其表达式为[14]

$$z(r,\theta)=\sum_{n}\sum_{m}\left[A_{nm}P_{nm}(\rho)\cos(m\theta)+B_{nm}P_{nm}(\rho)\sin(m\theta)\right], \tag{1}$$

其中，

$$P_{nm}(\rho)=\sum_{j=0}^{\frac{n-m}{2}}\frac{(-1)^{j}(n-j)!}{j!\left(\frac{n+m}{2}-j\right)!\left(\frac{n-m}{2}-j\right)!}\rho^{n-2j}, \tag{2}$$

式中$m\leqslant n$，且n和m的取值同为奇数或同为偶数，n为径向级次，m为方位角频率，ρ是归一化半径，θ为方位角。采用Fringe Zernike多项式前37项来描述透镜由温度变化导致的折射率均匀性及热变形。

3 光机热集成分析

3.1 光机结构介绍

图1为小物镜系统模型，光学系统由三片球面透镜组成，设计光源波长为632.8 nm，系统焦距为516.86 mm。采用NX软件建立系统有限元模型，如图2所示，单元总数为625352个。镜片材料为融石英，镜框材料为不锈

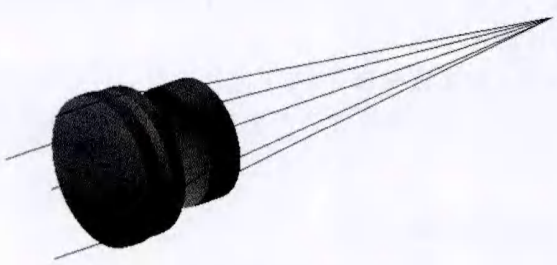


图1 物镜系统

Fig.1 Lens system



图2 有限元模型

Fig.2 Finite element model

钢430F，材料属性如表1所示。

表1 材料属性

Table 1 Material property

Material	Density /(kg/m^3)	Specific heat / [J/(kg·K)]	Thermal conductivity / [W/(m·K)]	Thermal expansion coefficient /(1/℃)	Young's modulus /MPa	Poisson's ratio
Fused silica	2205	741	1.37	5.8×10^{-7}	73000	0.17
430F	7700	460	26.1	1.04×10^{-5}	200000	0.27

3.2 照明仿真分析

采用Light Tools照明仿真软件，建立积分光源，模拟632.8 nm激光照明进行分析，获得各光学表面的入射、出射与吸收的二维辐照度网格数据。图3为光瞳面辐照度分布，对于本文应用的光学系统，光瞳面即为第一表面。表2为各镜片的吸收能量大小。

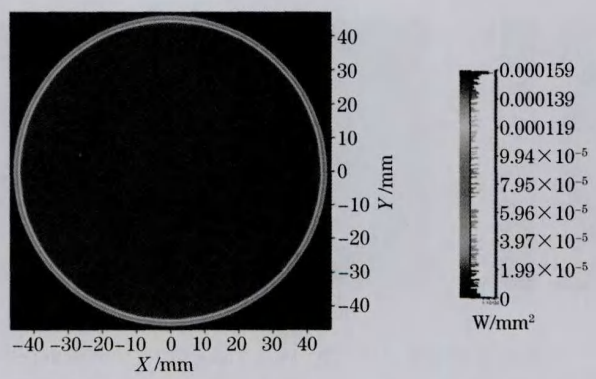


图3 辐照度分布

Fig.3 Irradiance distribution

表2 各镜片的吸收能量

Table 2 Absorbed energy of each lens unit: mW

Lens No	Lens 1	Lens 2	Lens 3	Total
Absorbed energy	9.22	8.97	10.47	28.67

3.3 热仿真分析

图4为小物镜系统换热示意图。热仿真分析的过程中，上下窗口外表面与空气之间的对流换热系数设为5 W/(m^2·℃)，镜框外表面与恒温水套间隙为3 mm，恒温水套控制温度为22 ℃。镜片与镜片之间、镜片与镜框之间以气体为传热介质进行热量传递，通过基于路径距离的热耦合方式考虑；热载以照明仿真辐照度

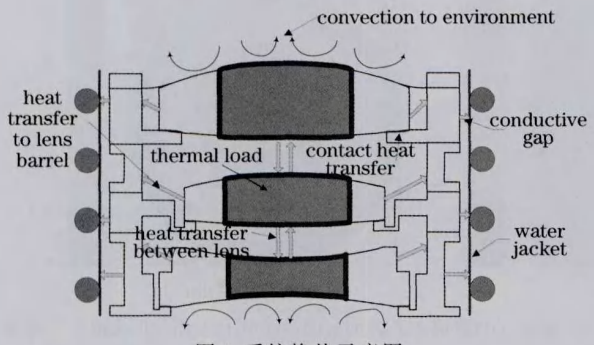


图4 系统换热示意图

Fig.4 Schematic diagram of system heat transfer

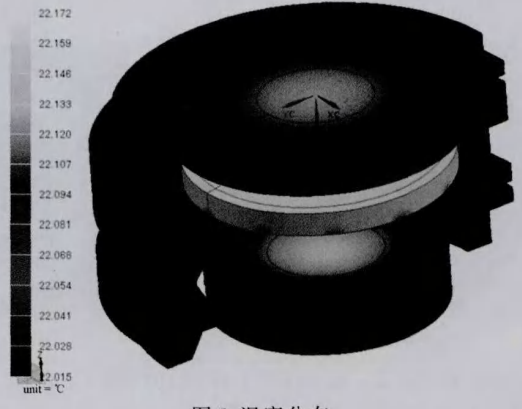


图5 温度分布

Fig.5 Temperature distribution

数据为依据，采用Matlab编程，获得各镜片热载的体分布形式。

图5给出了相应的温度变化，由于系统吸收热量较小，计算得到的系统最高温度为22.172 ℃，各镜片温度分布较均匀，在镜片与镜框接触导热区域温度有所降低，而镜框整体温度维持在22 ℃。

3.4 热光学分析

当系统热分析完成后，输出透镜的温度场数据，通过SigFit软件进行Thermal-optic分析，求解透镜由于温升导致的折射率均匀性变化。

从图6可以看出，折射率均匀性中主要成分是Power及球差，而非对称项像散、三叶等则较小，这与采用的照明模式有关。图中rms表示均方根值。图6(c)中得到的折射率均匀性误差较小，是由温度分布和透镜形状共同决定的。光程差计算公式为

$$D_{\mathrm{OP}}=-\sum_{i=1}^{N}\Delta l_i\Delta n_i=-\sum_{i=1}^{N}\Delta l_i\frac{\partial n}{\partial T}\Delta T_i, \tag{3}$$

式中N为沿着光学路径的积分步数，Δl_i为与第i个积分点相关的路径长度，Δn_i为第i个积分点的折射率变化，ΔT_i为第i个积分点的温度变化。

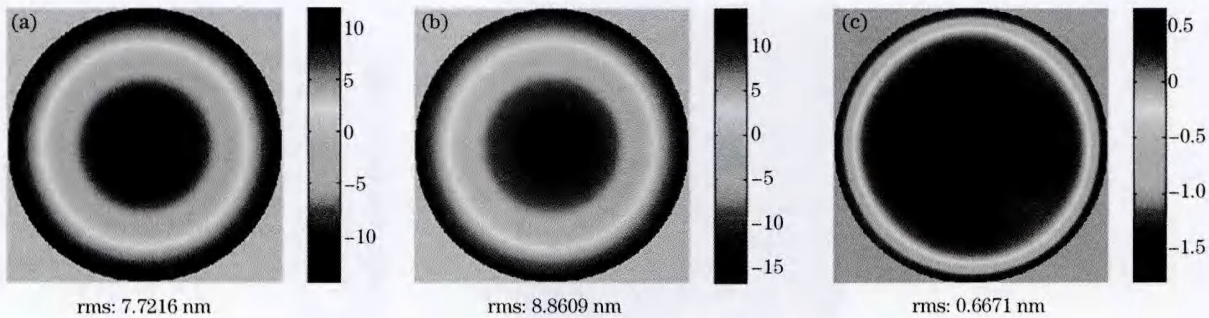


图6 透镜折射率均匀性分布。(a)透镜1; (b)透镜2; (c)透镜3

Fig.6 Distribution of refractive index uniformity of the lens. (a) Lens 1; (b) lens 2; (c) lens 3

根据(3)式可知透镜不同位置的D_{OP}主要与镜片厚度和温度有关。由于透镜3中心的温度较高但厚度较薄而边缘的温度较低但厚度较厚，透镜中心的D_{OP}与边缘的D_{OP}数值较为接近，因此使得透镜3的折射率均

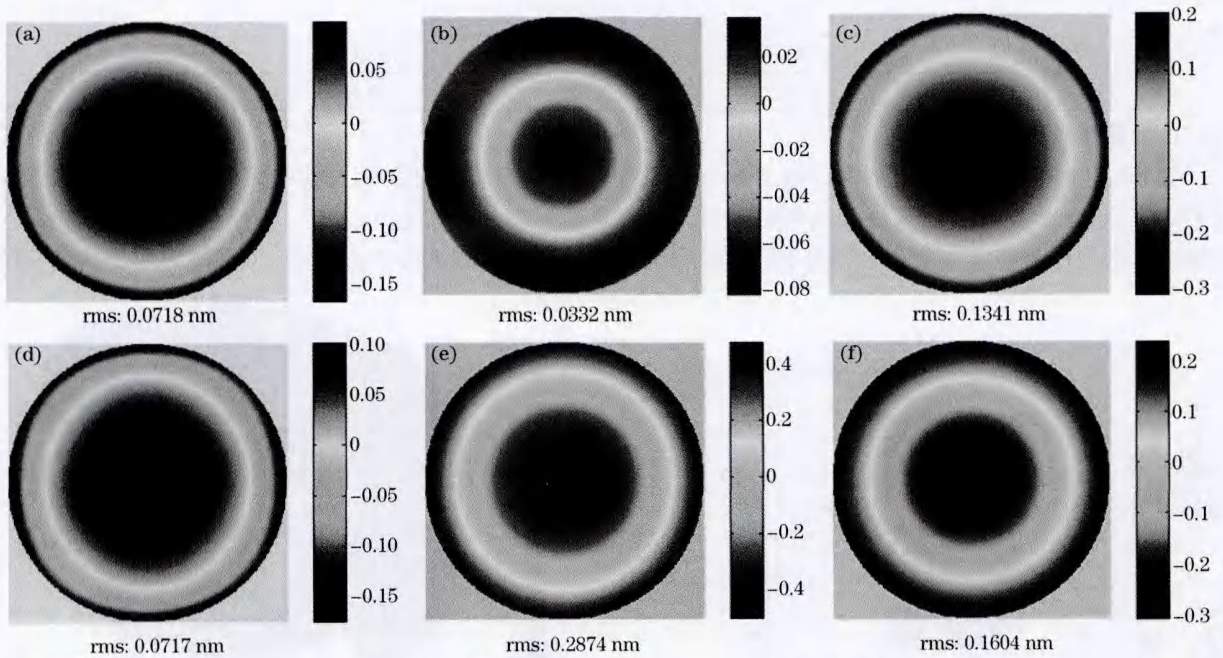


图7 表面面形拟合。(a)透镜1上表面; (b)透镜1下表面; (c)透镜2上表面; (d)透镜2下表面; (e)透镜3上表面; (f)透镜3下表面

Fig.7 Surface shape fitting. (a) Upper surface of lens 1; (b) lower surface of lens 1; (c) upper surface of lens 2; (d) lower surface of lens 2; (e) upper surface of lens 3; (f) lower surface of lens 3

匀性误差较小。

3.5 结构热变形分析

结构热变形分析以热仿真分析结果作为输入条件，忽略重力对镜片面形的影响，采用NX Natran模块求解物镜系统结构热变形，得到节点位移和应力分布。系统中镜片节点位移幅值较小，且各镜片只有在受支撑区域存在应力，说明镜片抵抗此种程度的热扰动的能力较强，初步估计结构热变形对系统波像差的影响较小。将镜面变形进行Zernike多项式拟合，获得各个透镜上、下表面的面形，如图7所示。

3.6 光学像质分析

将计算得到的折射率均匀性数据加载到光学分析软件Code V中，得到系统热像差及像质成分，分别如图8、图9所示。折射率均匀性引入的热像差为8.07 nm，主要成分为Power和球差，说明热像差对系统光学性能产生较大影响，主要影响系统最佳焦面；将表面面形数据输入到Code V软件，获得由于系统热变形引入的热像差为0.11 nm，与系统初始波像差26.47 nm相比较小。

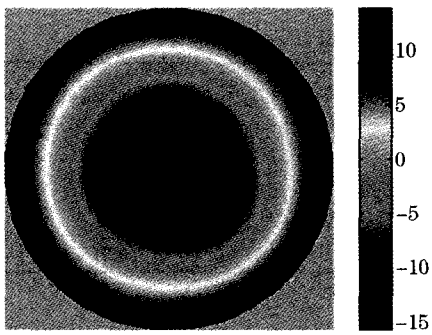


图8 稳态热像差

Fig.8 Steady thermal aberrations

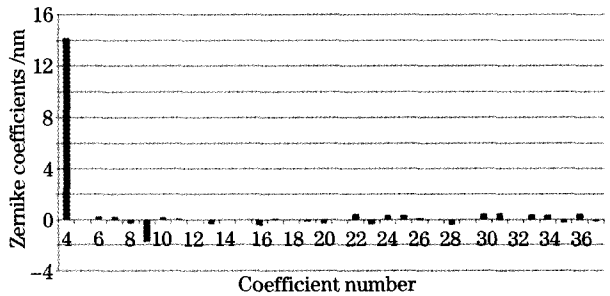


图9 稳态热像差像质成分

Fig.9 Image quality composition of steady thermal aberrations

比较折射率变化引入的热像差与热变形引入的热像差，结果表明后者对系统波像差的贡献远小于前者，因此针对此系统，在以后的热像差分析中不考虑热变形这一因素对热像差的影响。

4 系统热像差影响因素研究

图4中给出了热像差分析过程中影响分析准确性的因素。其中系统热源、接触导热、空间对流及外部环境均会对镜片温度分布产生影响。因此，展开热光集成分析，研究以上4种影响因素对系统热像差的贡献。

4.1 照明计量与系统热像差的关系

物镜系统产生热像差的根本原因是系统受到激光照射，照明计量是影响系统热像差的关键因素。给定照明计量的范围为初始能量的80%~120%，以此分析照明计量对热像差的影响，结果如图10所示。

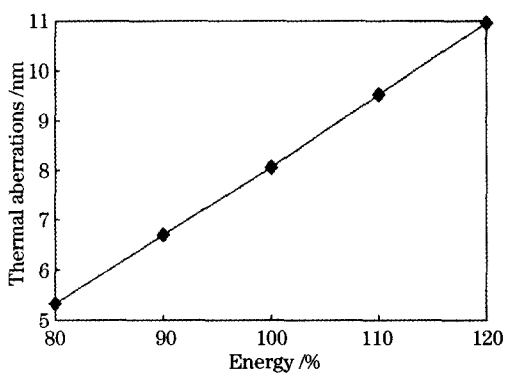


图10 热像差与照明计量关系

Fig.10 Thermal aberrations versus illumination energy

图10中数据表明，当辐照能量增大时，其他条件均不变的前提下，系统热像差相应增大，即照明计量与系统热像差成线性关系。因此，光机热集成分析中热载的准确与否，是影响热像差大小的关键。通过减小

透镜厚度及材料吸收率均可以减少透镜吸收的能量，有效降低热载对系统热像差的影响。

4.2 透镜导热对系统像质的影响

镜片受激光光源照射升温后，与周围的结构和内部环境进行换热，其中镜片与支撑结构之间的导热换热是其散热的主要途径之一。针对此种结构，主要考虑镜片与支撑结构直接接触的情况，以及中间施加导热结构胶，增强导热后的影响，最后分析无接触热阻时理想的导热情况的系统热像差，明确镜片与支撑结构间的导热情况对系统热像差的贡献。

从表3可以看出，当镜片与支撑结构间没有导热结构胶时，系统热像差较大；在添加导热结构胶后，增强了镜片的散热，降低了透镜的平均温度，进而减小系统热像差，并且导热能力越强的结构胶，改善系统热像差能力越强；当完全接触即无接触热阻时，镜片与支撑结构间的导热能力最强，同时也为支撑结构形式固定时，采用导热结构胶，增强导热时热像差可以达到的极限，约为7.70 nm。通过4种工况的比较，表明镜片与支撑结构之间的导热散热会对系统热像差有一定程度的影响，但不是主要因素。

表3 镜片导热对系统热像差的影响

Table 3 Influence of heat conduction of lens on thermal aberrations

Thermal condition	Contact heat transfer coefficient /[W/(m²·℃)]	Thermal aberrations/nm
Direct contact	700	8.37
Epoxy glue	1500	8.07
Room temperature vulcanized silicone	9000	7.77
Ideal of thermal conductivity	---	7.70

4.3 上下窗口空气扰动

系统的上下窗口不可避免地接触到环境，空气气流扰动会对系统热像差产生影响。针对上下窗口与外部空气间的对流换热情况，进行热光集成仿真分析。系统最高温度变化和热像差变化如图11所示。

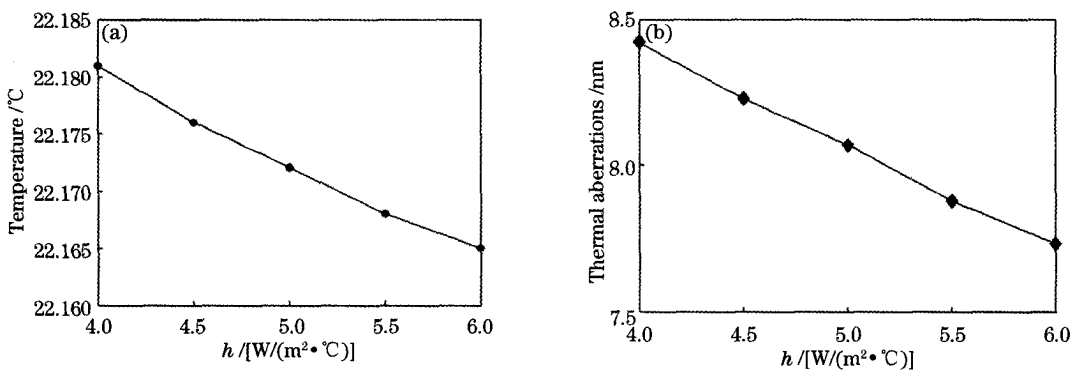


图11 空气扰动的影响。(a)温度与空气对流关系；(b)热像差与空气对流关系

Fig.11 Influence of air turbulence. (a) Temperature versus air convection; (b) thermal aberrations versus air convection

从图11可以看出，上下窗口空气扰动可以降低系统温度，但随着扰动的加强，对系统温度的影响将减弱；同时扰动对热像差有一定影响，在对流换热系数变化2 W/(m²·℃)时，热像差变化0.69 nm。加快上下窗口表面的空气流动，可以增强系统与周围环境之间的换热，降低系统热像差。

4.4 机械结构外表面环境影响分析

热边界条件对系统温度场分布有着重要的影响，因此周围环境的稳定与否、对系统散热的贡献大小均是热光集成分析必不可少的环节。针对这一问题，物镜系统机械结构外表面采用恒温水套对其进行温度控制，保证镜框外表面温度稳定在22 ℃。对恒温水套与镜框外表面的空气传热间隙展开分析，以明确恒温水套与镜框的有效作用距离。具体分析如图12所示。

空气间隙越小时，系统波像差也越小，恒温水套对系统温度的控制越强，而随着间隙增大，恒温水套对系统温度的控制逐渐减弱，当间隙达到5 mm以后，恒温水套与镜框之间的距离不再对系统的热像差构成影响，系统温度和热像差均保持不变。因此恒温水套与镜框外表面形成的空气间隙应该在5 mm以内，才能为系统提供稳定的工作环境。

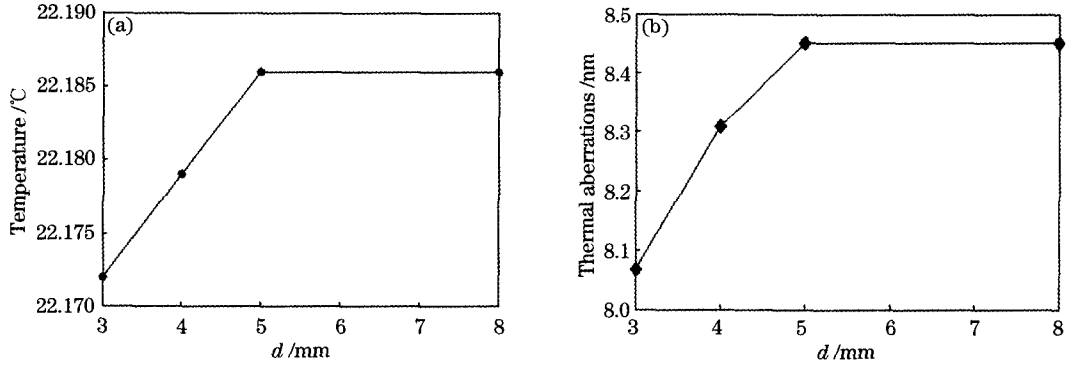


图 12 传热间隙的影响。(a)温度与传热间隙关系;(b)热像差与传热间隙关系

Fig.12 Influence of heat transfer gap. (a) Temperature versus heat transfer gap; (b) thermal aberrations versus heat transfer gap

5 结 论

采用光、机、热集成的分析方法,对小物镜系统在特定照明模式下的热像差及其影响因素进行了分析。分析结果表明:温度变化导致的光学材料的折射率改变是热像差产生的主要原因,而热变形产生的系统热像差较小,可以忽略;在影响热像差大小的因素中,热载是影响系统热像差的根本因素,系统产生的热像差大小基本上与热载呈线性变化趋势;而镜片与支撑结构之间的导热、上下窗口的空气扰动、机械结构外表面的环境对流均会对系统热像差产生影响,但不是主要因素,因此减少透镜厚度及材料吸收率可以降低系统热载,有效减小光学系统热像差。

参 考 文 献

1 Liu Fei, Li Yanqiu. Design of high numerical aperture projection objective for industrial extreme ultraviolet lithography [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(2): 0222003.
刘 菲, 李艳秋. 大数值孔径产业化极紫外投影光刻物镜设计[J]. 光学学报, 2011, 31(2): 0222003.

2 Toshiharu Nakashima, Yasuhiro Ohmura, Taro Ogata, *et al*.. Thermal aberration control in projection lens [C]. SPIE, 2008, 6924: 69241V.

3 Scott Halle, Michael Crouse, Aiqin Jiang, *et al*.. Lens heating challenges for negative tone develop layers with freeform illumination: a comparative study of experimental vs. simulated results [C]. SPIE, 2012, 8326: 832607.

4 Shi Jinfeng, Wu Qingwen, Zhang Jianping, *et al*.. Thermal-optical analysis for optical window of high-altitude and high-speed aerial camera [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(4): 0422004.
石进峰, 吴清文, 张建萍, 等. 高空高速航空相机光学窗口的热光学分析[J]. 光学学报, 2012, 32(4): 0422004.

5 Lin Zhaorong. Thermal-optical analysis of a typical R-C imaging system's primary optical equipment [J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2006, 27(2): 23-27.
林招荣. 典型R-C系统主光学装置的热光学分析[J]. 航天器返回与遥感, 2006, 27(2): 23-27.

6 Wang Ping, Zhang Guoyu, Wang Wei, *et al*.. Passive athermal design of aerial zoom lenses [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(9): 0922006.
王 平, 张国玉, 王 伟, 等. 航空变焦距镜头被动消热设计[J]. 光学学报, 2012, 32(9): 0922006.

7 Chen Changzheng, Zhao Guijun, Zhang Xingxiang, *et al*.. A calculating method for temperature tolerance of space telescope [J]. Optics and Precision Engineering, 2007, 15(5): 668-673.
陈长征, 赵贵军, 张星祥, 等. 空间光学镜头可适应边界温度的CAE计算方法[J]. 光学 精密工程, 2007, 15(5): 668-673.

8 Jia Yong, Gao Yunguo, Shao Shuai. Opto-mechanical optimization for laser expander system under thermal loads [J]. Chinese J 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.

9 Yang Tianxing, Huang Wei, Shang Hongbo, *et al*.. Effect of material inhomogeneity on the image quality of optical systems with extremely small aberration [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(11): 112202.
杨添星, 黄 玮, 尚红波, 等. 材料折射率非均匀性对极小像差光学系统像质的影响[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(11):

112202.

10 Fang Yu, Xiang Libin, Lü Qunbo, *et al*.. Design of optical window thickness and influence of its deformation on multi-spectral camera's optical performance [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(4): 0422007.

方 煜, 相里斌, 吕群波, 等. 光学窗口厚度设计及形变对相机性能影响[J]. 光学学报, 2013, 33(4): 0422007.

11 Chen Hua, Yang Huaijiang, Yu Xinfeng, *et al*.. Simulated and experimental study of laser-beam-induced thermal aberrations in precision optical systems [J]. Appl Opt, 2013, 52(18): 4370-4376.

12 Li Qikai. Zernike polynomials fitting in cryogenic optical thermal integration analysis [J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2010, 31(4): 45-50.

李其锴. Zernike多项式拟合用于低温光学镜头热集成分析[J]. 航天返回与遥感, 2010, 31(4): 45-50.

13 Liu Jiaguo, Li Lin. Study on the data transfer interface in the thermal/structural/optical integrated analysis [J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2007, 27(5): 427-431.

刘家国, 李 林. 光机热集成分析中数据转换接口研究[J]. 北京理工大学学报, 2007, 27(5): 427-431.

14 Max Born, Emil Wolf. Principles of Optics [M]. London: Pergamon Press Ltd, 1970. 523-532.