

引用格式: CHEN Baojin, GONG Yan, WU Quanying, et al. A Modeling Method for Non-Axisymmetric Thermally Induced Refractive Index Fields[J]. Acta Photonica Sinica, 2026, 55(7):0722002

陈宝璿, 巩岩, 吴泉英, 等. 一种非轴对称热致折射率场建模方法[J]. 光子学报, 2026, 55(7):0722002

一种非轴对称热致折射率场建模方法

陈宝璿¹, 巩岩^{2,3,4,5}, 吴泉英¹, 张景博¹, 郑汉青^{2,3,4}, 孙友红², 钱龙杰², 丁超²

(1 苏州科技大学 物理科学与技术学院, 苏州 215009)

(2 中国科学院苏州生物医学工程技术研究所医用光学室, 苏州 215163)

(3 江苏省先进诊疗技术与装备重点实验室, 苏州 215163)

(4 医学成像科学与技术系统全国重点实验室, 苏州 215163)

(5 苏州国科医工科技发展(集团)有限公司, 苏州 215163)

摘 要: 针对高功率激光照射下透镜内部形成的非轴对称温度场, 现有折射率模型难以兼顾表达精度与光线追迹稳定性。本文提出一种非轴对称热致折射率场建模方法。沿光轴方向将透镜温度场分层, 并在各层内采用二维高斯函数对垂直光轴方向温度分布进行拟合, 结合材料温度-折射率关系实现温度场到折射率场的映射。进一步将模型封装成动态链接库接口, 实现光学设计软件对折射率及其梯度的实时查询与追迹计算。以隐形切割激光头为例, 分析了分层数对温度拟合误差与光学评价结果的影响规律, 并完成了非轴对称温度场下的波前畸变与焦面漂移评估, 验证了该方法的可行性与工程适用性。

关键词: 热效应; 有限元分析; 折射率; 温度场; 光线追迹

中图分类号: TN249

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20265507.0722002

0 引言

随着高功率激光在精密加工、光刻和材料处理等领域的广泛应用, 光学元件吸收能量引起的热效应对系统性能的影响已不容忽视。受限于装调误差、结构遮挡、光束偏转或光斑整形^[1]等因素, 透镜常处于非轴对称照射状态。这种不均匀的能量沉积打破了温升分布的轴对称性, 导致系统内部在径向与轴向均产生显著的三维非对称温度梯度。通过材料的热光效应, 这种温度场将进一步转化为非均匀折射率场, 产生热像差并导致成像质量退化。

光机热集成分析已成为评估热效应对光学性能影响的核心手段^[2-5]。现有研究通过建立有限元热弹性分析与光学设计软件的耦合流程, 指出热致折射率变化是导致成像性能退化的主导机制之一^[6]。为实现有限元结果向光学软件的高精度传递, Zernike 多项式拟合等方法被用于构建数据接口以提升传递一致性^[7]。相关文献进一步强调, 在非均匀热载荷作用下镜片内部折射率的空间不均匀性是影响成像质量的关键因素^[8]。并有研究利用 Zemax 中的梯度折射率模型探讨了温度梯度对成像性能的影响^[9]。

有限元输出的离散温度数据需要转化为光学软件可加载的折射率解析模型。由于非轴对称温度场对应的折射率分布比较复杂, 现有标准模型对这种非轴对称折射率场的表征能力不足, 难以捕捉其空间分布特征。若采用单一复杂的解析式进行全局拟合, 在描述强梯度、非轴对称分布时极易产生局部梯度异常, 导致光线追迹算法因不收敛而中断, 降低了复杂温度工况下像差评价的计算鲁棒性。

针对上述问题, 本文提出基于分层温度拟合的热致折射率建模方法。沿光轴方向将透镜划分为若干

基金项目: 国家重点研发计划(2023YFF0721200)

第一作者: 陈宝璿(1997—), 男, 硕士研究生。Email: 1812208814@qq.com

通讯作者: 巩岩(1968—), 男, 研究员, 博士, 主要研究方向为光学系统设计, 光机系统集成技术。Email: gongy@sibet.ac.cn; 吴泉英(1965—), 女, 博士, 教授, 主要研究方向为光学仪器设计与信息处理。E-mail: wqcyh@usts.edu.cn

收稿日期: 2026-01-11; **录用日期:** 2026-04-17

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

层,在每层内利用高斯函数拟合垂直于光轴方向的温度分布,并结合温度-折射率关系构建局部的热致折射率。这种轴向分层、径向拟合的策略将复杂的三维折射率场转化为分段解析模型,从根本上规避了全局高阶拟合导致的局部梯度异常,显著提升了光线追迹的计算鲁棒性。进一步地,本文将该算法封装为动态链接库(Dynamic Link Library, DLL),实现了与光学软件的集成,为复杂热工况下的像质评价提供了高效、可靠的仿真手段。

1 方法与模型

1.1 分层高斯拟合方法

当激光离轴入射时,透镜的吸收将入射能量转化为沿光束路径分布的非均匀体热源,导致温升在光束覆盖区域达到峰值并向四周扩散。由于光束轴线与元件光轴存在偏移,使得温度场失去旋转对称性,呈现显著的三维非轴对称分布。图1展示了离轴照射下光束轨迹与温度场之间的对应关系。

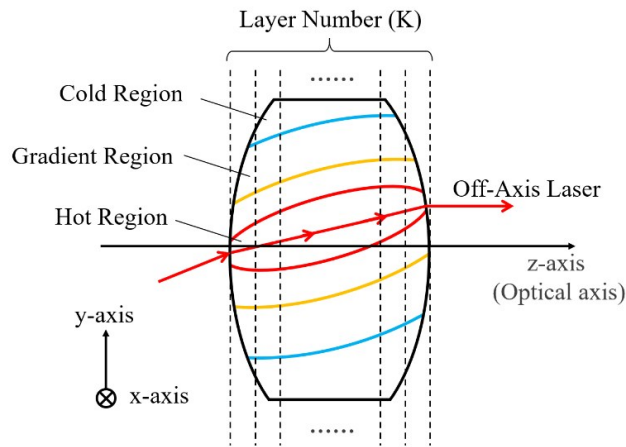


图1 离轴照射下透镜温度分布与分层示意图

Fig 1 Schematic of the temperature distribution and layer division of the lens under off-axis irradiation

本文采用元件局部坐标系,其中 z 轴沿光轴方向。光线追迹过程中,光学软件通过 DLL 接口实时调用折射率模型,输入空间位置 (x, y, z) 并返回该点折射率 n 及其一阶偏导数^[10]。软件对渐变折射率介质采用基于最大步长 Δt 的步进策略,且沿 z 方向更新折射率状态^[11],因此数值稳定性对轴向梯度 $\partial n/\partial z$ 尤为敏感。较大的 $\partial n/\partial z$ 会使单步内的折射率变化量剧增,加速数值误差累计,进而导致追迹中断或光线丢失。特别是在非轴对称折射率场下,轴向梯度 $\partial n/\partial z$ 随空间位置剧烈波动,这种不一致性使得高梯度区域成为数值计算失稳的高风险区。

为了规避追迹中断与光线丢失风险,本文沿光轴方向将透镜划分为 K 个互不重叠的子层^[12],如图1所示,并在各层内独立构建温度解析模型。这种分段描述策略通过离散化轴向梯度,有效缓解了全局高阶拟合带来的导数突变,从而在数学架构上保障了追迹算法的鲁棒性与计算稳定性。

为了确定非轴对称工况下最适宜的温度表征函数,本文设定环境温度为 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$,表面热对流系数设定为 $5\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$,利用有限元法模拟 100 W 高功率激光束以 $\theta=2^{\circ}$ 倾斜入射至一块凸透镜表面提取其内部温度分布。图2展示了沿轴向等间距采样的10个温度横截面。可以看出,受激光束轨迹影响,各截面温度均呈现单峰状向外平滑衰减的形态,而 2° 离轴夹角打破了旋转对称性,导致高温核心区产生径向偏移。基于各层温度场在峰值强度、衰减跨度及中心位置的变化,本文再在每个轴向层段内引入带中心偏移的二维高斯函数进行描述^[13]。

在光学软件执行光线追迹时,通过 DLL 接口实现对任意空间位置 (x, y, z) 折射率的动态查询。接口首先依据查询点的轴向坐标 z 检索其所属层段,并实时加载该层对应的二维高斯模型参数,以重构非轴对称的局部温度场。随后,算法基于材料的温度-折射率关系将拟合温度转化为折射率 n ,并进一步求解该点关于坐标轴的偏导数。最后, DLL 将这些数据实时返回给软件,从而支撑光线追迹计算。

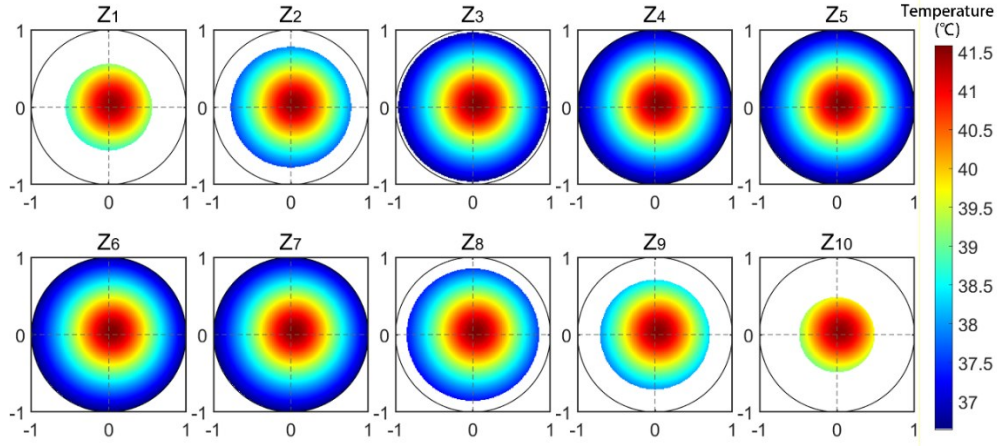


图2 凸透镜沿光轴方向均匀取样的10个温度横截面。

Fig 2 Temperature distributions of the ten cross-sections taken along the optical axis of the convex lens.

1.2 热致折射率模型

为在光学软件追迹过程中稳定调用热致折射率模型,本文采用轴向分段的实现策略。根据温度场数据确定透镜有效轴向区间 $[z_{\min}, z_{\max}]$ 。将该区间内沿 z 方向划分为 K 个互不重叠的层段,层边界定义为

$$z_i = z_{\min} + (i-1) \frac{z_{\max} - z_{\min}}{K}, \quad i = 1, \dots, K+1 \quad (1)$$

进一步定义层索引函数 $k(z)$ 用于确定任意查询点 (x, y, z) 所属层段:

$$k(z) = \begin{cases} i, & z \in [z_{i-1}, z_i), \\ K, & z \in [z_{K-1}, z_K] \end{cases} \quad (2)$$

在第 k 层内,垂直光轴方向的温度分布采用带中心偏移的二维高斯函数进行描述

$$T_k(x, y) = A_k \exp\left(-\frac{(x - x_{0,k})^2}{2\sigma_{x,k}^2} - \frac{(y - y_{0,k})^2}{2\sigma_{y,k}^2}\right) + B_k, \quad (3)$$

其中 $(x_{0,k}, y_{0,k})$ 表示高温中心相对几何中心的偏移量, $\sigma_{x,k}$ 与 $\sigma_{y,k}$ 为 x - y 平面内沿 x, y 两个方向的展宽参数, A_k 为幅值系数, B_k 为基底项。

取参考温度 T_0 ,定义第 k 层的温升分布 $\Delta T_k(x, y) = T_k(x, y) - T_0$,根据材料的温度-折射率关系^[14],设参考条件下基准折射率为 n_0 ,将折射率变化写为

$$\Delta n_k(x, y) = \frac{n_0^2 - 1}{2n_0} \left[D_0 \Delta T + D_1 \Delta T^2 + D_2 \Delta T^3 + \frac{E_0 \Delta T + E_1 \Delta T^2}{\lambda^2 - S_{tk} \lambda_{tk}^2} \right] \quad (4)$$

于是第 k 层折射率为

$$n_k(x, y) = n_0 + \Delta n_k(x, y), \quad (5)$$

其中, n_0 为参考温度下,工作波长 λ 处的材料基准折射率, $D_0, D_1, D_2, E_0, E_1, S_{tk}, \lambda_{tk}$ 为透镜材料的折射率温度系数常数。由式(2)和式(5)可得到透镜内部折射率场的分段表达

$$n(x, y, z) = n_{k(z)}(x, y), \quad (6)$$

除了折射率 n 外,DLL接口还需返回其空间梯度 $(\partial n / \partial x, \partial n / \partial y, \partial n / \partial z)$ 。第 k 层内折射率由温升分布 $\Delta T_k(x, y)$ 间接决定,根据链式法则,折射率 n_k 沿 x 方向偏导为

$$\frac{\partial n_k}{\partial x} = \frac{\partial n_k}{\partial (\Delta T_k)} \cdot \frac{\partial (\Delta T_k)}{\partial x} = \frac{\partial n_k}{\partial (\Delta T_k)} \cdot \frac{\partial T_k}{\partial x}, \quad (7)$$

其中

$$\frac{\partial n_k}{\partial (\Delta T_k)} = \frac{n_0^2 - 1}{2n_0} \left[D_0 + 2D_1 \Delta T_k + 3D_2 \Delta T_k^2 + \frac{E_0 + 2E_1 \Delta T_k}{\lambda^2 - S_{tk} \lambda_{tk}^2} \right], \quad (8)$$

结合式(3)的二维高斯温度模型,可得

$$\frac{\partial T_k}{\partial x} = -A_k \exp\left(-\frac{(x-x_{0,k})^2}{2\sigma_{x,k}^2} - \frac{(y-y_{0,k})^2}{2\sigma_{y,k}^2}\right) \frac{x-x_{0,k}}{\sigma_{x,k}^2}, \quad (9)$$

将式(8)和式(9)带入式(7),便可求出第 k 层内折射率在 x 方向的梯度。同理可得在 y 方向的梯度 $\partial n_k/\partial y$ 。

本文采用轴向分层策略表征折射率沿 z 向的变化,折射率在层内近似不随 z 变化,因此层内轴向梯度取 $\partial n/\partial z=0$ 。轴向的空间梯度特征通过层间模型参数的切换体现,层边界处的归属遵循层索引函数规则。令 $G_x=\partial n/\partial x, G_y=\partial n/\partial y, G_z=\partial n/\partial z$,则DLL接口在任意查询点返回的数值为

$$\{n, G_x, G_y, G_z\} = \left\{ n_{k(z)}(x, y), \frac{\partial n_{k(z)}}{\partial x}, \frac{\partial n_{k(z)}}{\partial y}, 0 \right\}. \quad (10)$$

2 应用实例

为了验证提出的折射率场建模方法的可行性与实用性,本文以设计的隐形切割激光头为对象开展光机热集成分析,评估温度场引起的光学玻璃折射率变化对系统性能的影响。

待分析光学系统的焦距为9 mm,工作波长为1099 nm,数值孔径NA为0.83,物方视场为0.315 mm,对应的最大半视场角约为 1° 。镜组的光学玻璃来自成都光明,镜筒材料采用钛合金TC4。表1列出了仿真中涉及材料的热物理参数以及玻璃的透过率。

表1 有限元分析材料参数与玻璃透过率
Table 1 Material parameters for finite element analysis and glass transmittance

Material	Young's modulus (GPa)	Poisson's ratio	Density(g· cm ⁻³)	CTE (10 ⁻⁶ · K ⁻¹)	Conductivity(W /(m·K))	Transmittance@λ =1099nm
H-BAK7GT	82.41	0.243	2.83	7.2	0.79	0.999
H-ZF88	108.81	0.243	3.52	6.0	0.89	0.999
H-BAK8	73.78	0.241	3.18	7.4	0.94	0.999
H-ZF88GT	108.81	0.243	3.52	6.0	0.89	0.999
H-ZK20	76.94	0.271	3.66	7.8	0.62	0.999
H-K7	67.94	0.224	2.54	8.5	0.94	0.999
H-LAK53B	121.69	0.294	4.22	5.7	0.71	0.999
H-K9L	79.2	0.211	2.52	7.6	0.93	0.999
TC4	121	0.34	4.51	7.7	7.96	—

有限元模型采用了高质量的六面体网格划分,如图3所示。仿真环境温度设为25℃。考虑到环境散热,透镜表面及镜筒外表面均设置了5 W/(m²·K)的对流传热系数。镜筒与镜片之间的接触按理想热接触处理。

通过非序列光线追迹,模拟功率为20 W的高斯光束在 $\theta=1^\circ$ 倾斜角的轴外入射至镜组的照射情况。透镜表面镀有增透膜,在工作波长1099 nm处透过率设置为99.8%。追迹程序会根据透过率设置,基于能量守恒定律自动计算玻璃材料与表面膜层的吸收损耗。随后将计算得到的镜组体吸收功率密度分布,作为体热源导入有限元分析模型。如图4所示,在考虑对流换热等热边界条件的基础上,通过稳态热分析获得该工况下的温度场分布结果^[15]。受 1° 倾斜角的影响,透镜温度场内部呈现出明显的非轴对称分布特征。后续本文将根据该离轴工况下L1~L8各镜片的温度数据,进行折射率场建模并开展误差分析,验证本文的建模方法在非轴对称热负载下的有效性与适用性。

3 结果与分析

3.1 温度场拟合与误差评估

针对有限元热分析得到的三维非轴对称温度场,本文提取了各透镜的温度数据点,每个数据点包含局

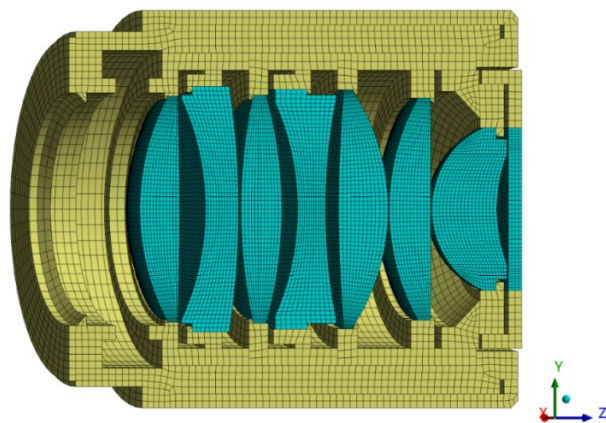


图3 物镜有限元网格模型
Fig. 3 Finite element mesh model of the objective

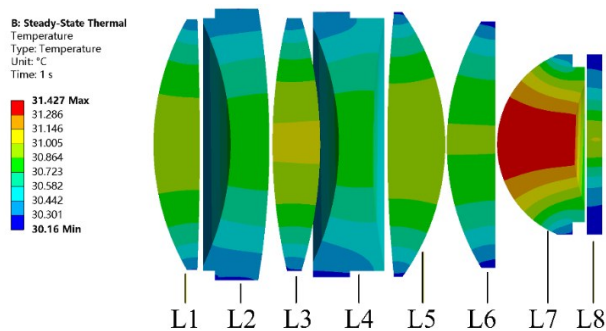


图4 倾斜入射工况下物镜镜组的稳态温度场
Fig. 4 Steady-state temperature field of the objective lens group under tilted incidence

部坐标 (x, y, z) 及对应的温度 T 。按照第1章提出的分层高斯拟合算法,沿光轴 z 方向划分为 K 个层段,并对各层数据点进行最小二乘拟合,得到每层二维高斯函数参数及对应的轴向边界 (z_{k-1}, z_k) 。所有层段参数汇总为分层参数表,供后续折射率计算与DLL接口读取。以镜片L3为例,在划分层数 $K = 10$ 的情况下,表2列出了详细的拟合参数,其中Layer代表层段编号, N_{pts} 为该层参与拟合的点数, z_{k-1} 和 z_k 为层段的轴向边界,其余参数对应了式(3)中的二维高斯拟合系数。

为了验证分层拟合算法对整片透镜三维温度场的还原程度,本文将透镜内部所有原始数据点按轴向坐标分配至相应层段,调用对应的层拟合参数计算拟合温度。将拟合值与原始值进行对比,引入均方根误差(Root Mean Square Error, RMSE)与决定系数(Coefficient of Determination, R^2)作为拟合误差指标。如图5

表2 镜片L3在K = 10分层条件下的拟合参数表
Table 2 Fitted parameters of lens L3 under the K = 10 layers setting

Layer	N_{pts}	A_k	$x_{0,k}$	$y_{0,k}$	$\sigma_{x,k}$	$\sigma_{y,k}$	B_k	z_{k-1}	z_k
1	894	10.552	1.03E-04	0.065	22.629	22.623	20.479	-6.324	-6.020
2	2257	30.014	6.25E-05	0.059	37.677	37.667	1.020	-6.020	-5.716
3	4609	49.915	2.94E-05	0.048	46.475	46.485	-18.861	-5.716	-5.412
4	6153	54.893	2.06E-05	0.041	48.232	48.242	-23.834	-5.412	-5.108
5	6729	53.946	2.43E-05	0.042	48.234	48.242	-22.896	-5.108	-4.804
6	5994	54.002	2.14E-05	0.043	48.233	48.242	-22.946	-4.804	-4.500
7	5233	52.531	2.94E-05	0.048	48.238	48.242	-21.481	-4.500	-4.196
8	2993	36.220	5.49E-05	0.058	41.271	41.268	-5.182	-4.196	-3.892
9	1593	16.864	1.01E-04	0.064	28.600	28.595	14.170	-3.892	-3.588
10	685	3.367	1.61E-04	0.069	12.717	12.713	27.668	-3.588	-3.284

所示,各镜片的拟合 RMSE 均随分层数增加而显著下降,并在 $K \geq 7$ 后趋于稳定。镜片 L7 由于温度梯度较为复杂,拟合误差下降趋势更明显。综合考虑计算效率和拟合精度的收敛性,本文在后续分析中统一取分层数 $K = 10$ 。此外,为了消除各镜片温升范围对 RMSE 评价的影响,进一步引入归一化均方根误差(Normalized Root Mean Square Error, NRMSE),定义为 RMSE 与该镜片最大温升之比。

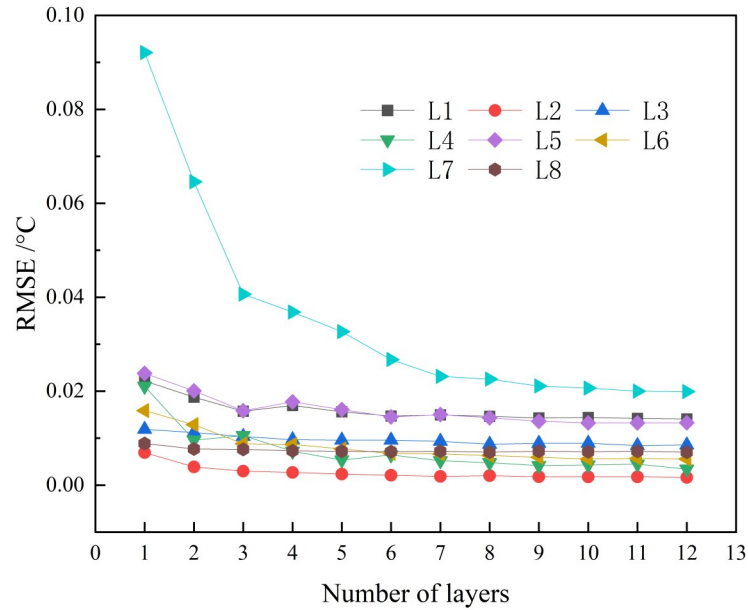


图5 各镜片温度场拟合 RMSE 随分层数的变化

Fig. 5 Variation of the RMSE for fitting temperature fields of each lens with the number of layers

表 3 汇总了各镜片在选定分层数下温升范围与拟合误差指标,镜片的决定系数 R^2 分布在 0.9939 至 0.9999 之间,表明拟合模型对原始温度场具有极高的还原水平。同时,各镜片的 RMSE 均控制在 0.02 °C 以内,NRMSE 均处于 0.0033 至 0.0225 之间。结果表明该方法具有较高的拟合精度,能够准确的表征复杂的温度分布特征。

表 3 各镜片温度范围与拟合误差指标

Table 3 Temperature ranges and fitting error metrics for each lens

Lens ID	$T_{\min}$ (°C)	$T_{\max}$ (°C)	ΔT (°C)	RMSE (°C)	NRMSE	R^2
L1	30.310	30.951	0.641	0.014	0.0225	0.9939
L2	30.304	30.816	0.512	0.002	0.0033	0.9999
L3	30.303	31.043	0.740	0.009	0.0121	0.9983
L4	30.295	30.832	0.537	0.004	0.0070	0.9991
L5	30.277	31.010	0.733	0.013	0.0180	0.9960
L6	30.257	30.891	0.633	0.005	0.0081	0.9992
L7	30.311	31.450	1.139	0.019	0.0165	0.9953
L8	30.233	31.027	0.794	0.007	0.0086	0.9988

3.2 折射率场建模与光学评价

在 3.1 节完成透镜的分层温度场拟合后,本文通过编写用户自定义 DLL 接口实现热致折射率变化在光学设计软件中的实时计算。在光线追迹过程中,软件将光线的三维坐标实时传递至 DLL 接口,DLL 根据坐标位置读取对应的分层拟合参数,计算该点的局部温度,进而结合式(4)与式(5)计算出各坐标点的最终折射率 n ,如图 6 所示。

在温度场拟合过程中,每一个分层数 K 均对应一组独立的拟合参数。镜片 L7 的 RMS 对 K 的变化最敏感,本文通过 DLL 接口分别加载其在不同 K 值下的参数表,以评估分层数对算法数值稳定性的影响。如图

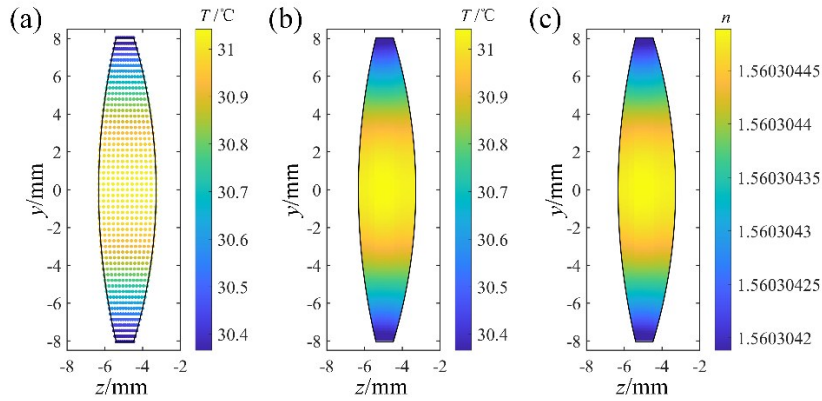


图6 镜片L3在y-z平面上的剖面图。(a)原始温度点云;(b)分层拟合温度场;(c)热致折射率

Fig. 6 Cross-sectional views of lens L3 in the $y-z$ plane. (a) original temperature point cloud; (b) layered fitted temperature field; (c) thermally induced refractive-index

7所示,当 $K \geq 9$ 以后,系统的波前RMS与P-V均趋于平稳,不再随着 K 的增加而变化。结果表明,随着轴向细分程度的提升,由分层近似带来的数值误差逐渐收敛。这证明了该算法具有可靠的数值稳定性,且将 K 取值为10可以满足仿真精度要求。

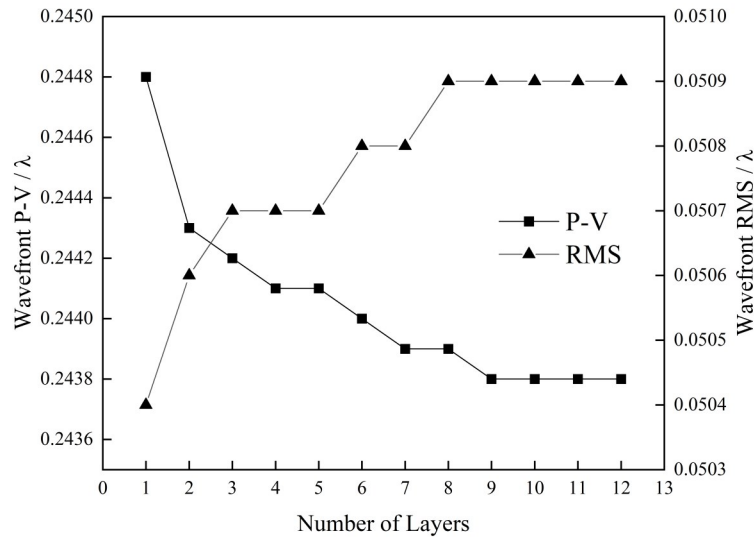


图7 系统波前P-V与RMS随镜片L7分层数的变化

Fig. 7 System wavefront P-V and RMS versus the number of layers for lens L7

本文以功率为20 W,倾斜角 $\theta = 1^\circ$ 的离轴入射工况为代表,评估热致折射率变化对隐形切割激光头像质的影响。如图8所示,定义镜组加载折射率模型前的波前为参考波前,加载后的波前为热致波前,两种状态相减得到热致波前差。该结果不考虑光学玻璃的热变形,仅反映温度场引起的折射率变化对波前的影响。结果显示,在 1° 离轴工况下,热致波前差的RMS为 0.0212λ ,尽管离轴入射引入了非对称温度场,但热致波前像差仍表现为以离焦项为主的特征。这表明对于该隐形切割系统而言,小角度离轴入射引起的热致折射率变化并未显著改变像差的空间分布特性,系统性能退化主要体现为热诱导的焦点漂移。

在此基础上,本文采用RMS光斑半径与离焦量的关系曲线对焦点漂移进行定量评价,如图9所示。曲线最低点对应系统的最佳像面位置。结果显示,在20 W的激光照射达到稳态后,最佳像面位置沿光轴负方向偏移了约 $0.16\mu\text{m}$ 。上述分析表明,本文提出的折射率场建模方法配合DLL接口,能够在该激光切割系统中实现从非均匀温度场到光学性能的预测,并输出波前差与焦面漂移等关键评价指标,为光学系统热效应的预测与补偿提供了有效的分析手段。

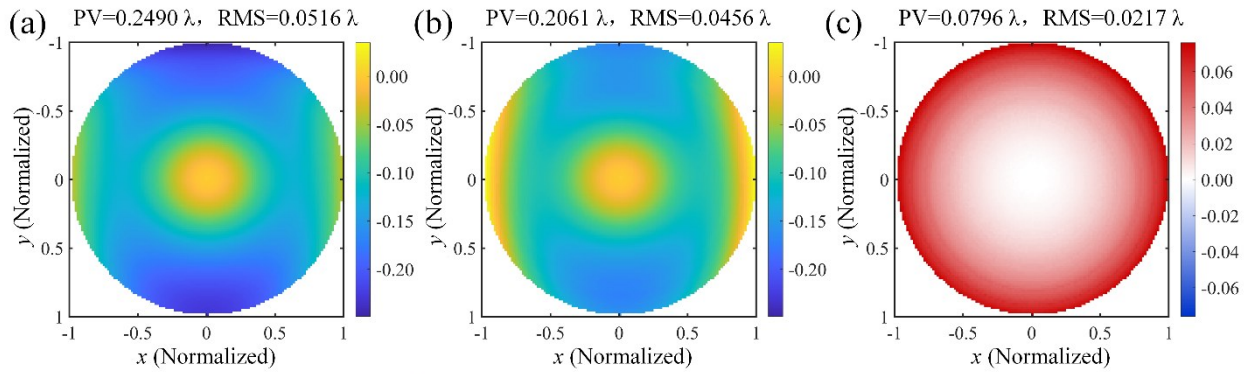


图8 离轴照射工况下的波前分布。(a)参考波前;(b)热致波前;(c)热致波前差

Fig. 8 Wavefront maps under off-axis illumination. (a) reference wavefront; (b) thermally induced wavefront; (c) thermally induced wavefront difference

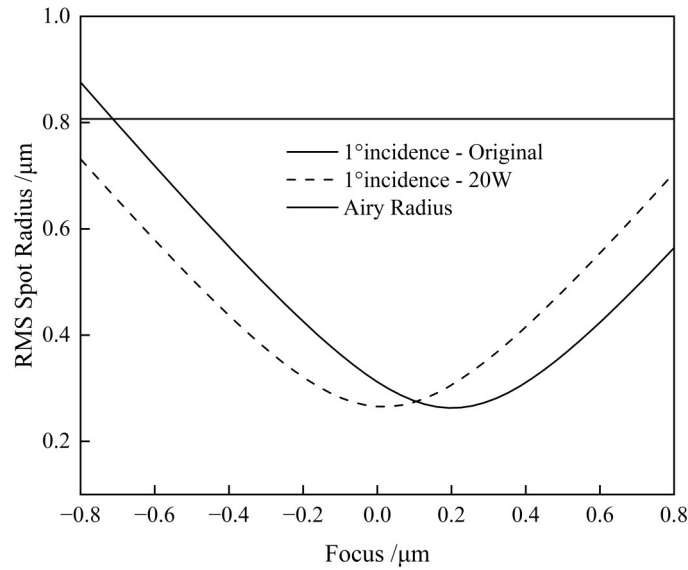


图9 RMS光斑半径随离焦量的变化曲线

Fig. 9 RMS spot radius versus focus shift curves

4 结论

本文提出了一种面向非轴对称温度场的分层折射率场建模方法,成功将有限元得到的离散温度数据转换为光学设计软件可加载、可供逐层查询的折射率模型,有效解决了复杂热致折射率场难以稳定参与光线追迹与像质评估的问题。实例验证表明,合理选择分层数可以有效控制温度拟合误差与像质评估误差,在保证计算可靠性的同时验证了方法的可行性。该方法的层内函数形式具有灵活性和可扩展性,建模时可以根据不同的热分布形态更换相应的表达式,以适配更多样的复杂工况。本方法为高功率激光系统在激光诱导的非轴对称热环境下,开展光机热集成分析与补偿设计提供了有效手段。

参考文献

- [1] LI Ben, ZHOU Jingfeng, WANG Yi, et al. Finite Element Thermal Analysis of Optical Lenses in 10 kW Rectangular Spot Laser Space Combiner[J]. Acta Photonica Sinica, 2022, 51(2): 135-146.
李奔, 周井锋, 王艺, 等. 10 kW 矩形光斑激光空间合束器光学透镜的有限元热分析[J]. 光子学报, 2022, 51(2): 135-146.
- [2] CHEN Chi, DONG Tingting, PAN Haijun. Optothermal-mechanical integrated analysis method for optothermal effects [J]. Optics & Optoelectronic Technology, 2015, 13(3): 64-70.
陈驰, 董亭亭, 潘海俊. 光致热效应的光机热集成分析方法[J]. 光学与光电技术, 2015, 13(03): 64-70.
- [3] PAN Yue, XU Xiping, QIAO Yang. Optical-structural-thermal analysis of zoom infrared dual-band projection lens[J]. Ac-

- ta Optica Sinica, 2018, 38(5): 242-249.
- 潘越, 徐熙平, 乔杨. 变焦红外双波段投影镜头的光机热分析[J]. 光学学报, 2018, 38(5): 242-249.
- [4] DU Weifeng, LIU Yongzhi, GAO Wenjie, et al. Analysis of passive athermalization structure design and integrated opto-mechanical-thermal of zoom lens of photoelectric countermeasure platform[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(13): 166-176.
- 杜伟峰, 刘永志, 高文杰, 等. 光电对抗平台变焦镜头被动消热差结构设计与光机热集成分析[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(13): 166-176.
- [5] WU Yao, XU Mingming, CHEN Sujuan, et al. Application of thermal/structural/optical integrated analysis to ultraviolet lens of hyperspectral imaging spectrometer[J]. Journal of Applied Optics, 2016, 37(2): 262-266.
- 武耀, 徐明明, 陈素娟, 等. 光机热集成分析在高光谱成像仪紫外镜头中的应用[J]. 应用光学, 2016, 37(02): 262-266.
- [6] HAN Xu, ZHANG Jian, GAO Tianyuan, et al. Research on thermal integration analysis method of transmissive infrared optical system[J]. Infrared Technology, 2018, 40(12): 1136-1141.
- 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): 1136-1141.
- [7] WU Wei, BAI Yu, CHEN Chi. Infrared system application of optomechanical heat integration[J]. Infrared and Laser Engineering, 2019, 48(6): 414-419.
- 吴卫, 白瑜, 陈驰. 光机热集成方法的红外系统应用[J]. 红外与激光工程, 2019, 48(06): 414-419.
- [8] MA Hongchuan, FAN Hanbo, 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(02): 134-141.
- [9] JIANG Dongxu, SUN Baoyu, LI Yingchun, et al. Effect of Thermally Induced Gradient Index on Imaging Quality of Aspherical Optical System[J]. Acta Photonica Sinica, 2020, 49(01): 60-67.
- 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(01): 60-67.
- [10] ZHANG Q P, TAN Y, REN G, et al. Ray tracing method of gradient refractive index medium based on refractive index step[J]. Applied Sciences, 2021, 11(3): 912.
- [11] ANSYS, Inc. Ansys Zemax OpticStudio 2025 R2 User Guide[EB/OL]. (2025-07)[2026-03-25]. https://ansyshelp.ansys.com/public/Views/Secured/Zemax/v252/zh-Hans/OpticStudio_User_Guide/index.html.
- [12] KANG Shouwan, CAI Tianfang. Relationship Between Layer Number and Computational Error in a Multilayer “Staircase” Approximation Method[J]. Acta Photonica Sinica, 1996, (08): 724-731.
- 康寿万, 蔡天芳. 多层“台阶”近似方法中层数与计算误差的关系[J]. 光子学报, 1996, (08): 724-731.
- [13] YAO Changcheng, GONG Yan. Research on temperature distribution of deep ultraviolet lithographic projection objective [J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(5): 276-285.
- 姚长呈, 巩岩. 深紫外光刻投影物镜温度特性研究[J]. 中国激光, 2016, 43(05): 276-285.
- [14] SONG X F, LIL, HUANG Y. Method of determining effects of heat-induced irregular refractive index on an optical system[J]. Applied Optics, 2015, 54(25): 7701-7707.
- [15] ZHOU Chao. Thermal Analysis of Large Telescope Structure[J]. Acta Photonica Sinica, 2014, 43(04): 118-122.
- 周超. 大口径望远镜结构热分析[J]. 光子学报, 2014, 43(04): 118-122.

A Modeling Method for Non-Axisymmetric Thermally Induced Refractive Index Fields

CHEN Baojin¹, GONG Yan^{2,3,4,5}, WU Quanying¹, ZHANG Jingbo¹, ZHENG Hanqing^{2,3,4}, SUN Youhong², QIAN Longjie², DING Chao²

(1 School of Physical Science and Technology, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215009, China)

(2 Medical Optical Research Laboratory, Suzhou Institute of Biomedical Engineering and Technology, Chinese Academy of Sciences, Suzhou 215163, China)

(3 Jiangsu Key Laboratory of Advanced Diagnosis and Treatment Technology and Equipment, Suzhou 215163, China)

(4 State Key Laboratory of Biomedical Imaging Science and System, Suzhou 215163, China)

(5 Suzhou GK Medtech Science and Technology Development (Group) Co., Ltd. Suzhou 215163, China)

Abstract: This paper aims to develop a stable and accurate modeling method for thermally induced

refractive-index fields in lenses under non-axisymmetric heating conditions. The target problem is the transformation of discrete three-dimensional temperature data from finite element analysis into a refractive-index model that can be directly loaded into optical design software for ray tracing and image-quality evaluation. To address the contradiction between field representation accuracy and numerical robustness in ray tracing, a segmented analytical strategy is established for complex off-axis thermal conditions. The method is further verified on a stealth dicing laser head so that the influence of thermally induced refractive-index variation on wavefront quality and focus position can be quantitatively predicted within an optothermal integrated analysis framework. A layered Gaussian regression scheme was proposed to represent the non-axisymmetric internal temperature field of a lens. Along the optical axis, the effective axial interval of the lens was divided into K non-overlapping layers. Within each layer, the transverse temperature distribution on the plane perpendicular to the optical axis was fitted by a two-dimensional Gaussian function with offset center, amplitude, spread parameters, and background term. Based on the material thermo-optic relation, the fitted temperature rise in each layer was converted into the corresponding refractive-index increment, and a piecewise refractive-index field was constructed. To improve tracing stability, the axial variation was represented by parameter switching between adjacent layers, while the axial refractive-index gradient inside each layer was approximated as zero. A user-defined dynamic link library was then developed to return the refractive index and its spatial derivatives at arbitrary coordinates during optical tracing. For validation, an optothermal integrated simulation was carried out for a stealth dicing laser head with focal length 9 mm, wavelength 1099 nm, numerical aperture 0.83, and maximum half field angle about 1° . Under a 20 W Gaussian beam with 1° tilted off-axis incidence, the absorbed power obtained from non-sequential ray tracing was imported into the finite element model as a volumetric heat source, and the resulting temperature data of lenses L1 to L8 were used for fitting, model loading, and optical evaluation. The proposed method reproduced the three-dimensional temperature fields of all lenses with high fidelity. As the number of layers increased, the fitting root mean square error decreased significantly and became stable after $K \geq 7$, indicating convergence of the layered approximation. Considering both computational efficiency and fitting accuracy, $K=10$ was selected for subsequent analysis. For lenses L1 to L8, the coefficient of determination ranged from 0.9939 to 0.9999, the RMSE remained below 0.02°C , and the normalized RMSE was within 0.0033 to 0.0225, confirming that the method can accurately characterize complex non-axisymmetric temperature distributions. After the fitted parameters were loaded into the DLL, the refractive-index field of the lens could be reconstructed in optical software in real time. Numerical stability analysis using lens L7 showed that when $K \geq 9$, the system wavefront RMS and P-V no longer changed noticeably with increasing layer number. Under the representative 20 W and 1° off-axis incidence condition, the RMS of the thermally induced wavefront difference was 0.0212λ . Although the heating condition was non-axisymmetric, the induced aberration was still dominated by defocus. The focus-shift analysis based on RMS spot radius versus defocus further showed that, after the system reached steady state, the best image plane shifted by about $0.16\text{ }\mu\text{m}$ along the negative optical-axis direction. These results verify that the proposed method can complete the prediction chain from finite element temperature field to refractive-index field and then to optical-performance metrics. The layered refractive-index modeling method provides a practical interface between non-axisymmetric thermal analysis and optical performance evaluation. It can transform discrete thermal results into a queryable analytical refractive-index model with sufficient fitting accuracy and reliable tracing stability. The method is suitable for optothermal integrated analysis of high-power laser systems under asymmetric thermal loads. Because the in-layer basis function is replaceable, the framework also has good extensibility for other temperature-field morphologies and more complicated engineering conditions.

Key words: Thermal effects; Finite element analysis; Refractive index; Temperature field; Ray tracing

OCIS Codes: 120.6810; 350.6830; 080.5692; 110.2760

CSTR: 32255.14.gzxb20265507.0722002