

投影物镜热效应的快速求解算法

骆 聪^{1,2} 巩 岩¹

(¹ 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)

² 中国科学院大学, 北京 100049

摘要 为了加快投影物镜内部温度场和表面变形的求解速度, 提出了一种快速求解算法。获得不同入射光强分布与透镜温度场及应变场之间的转换矩阵, 对入射光强分布进行多项式分解, 并将多项式系数与转换矩阵相乘实现镜片内部节点温度及表面面形变化的快速求解。通过求解三片不同类型透镜的节点温度与表面变形, 验证了这一算法的求解精度与计算时间: 直接进行有限元求解时, 计算时间为 600 s; 而快速求解法的求解时间缩短至 0.2 s, 且它的计算时间不随节点数量的增多而增加。快速求解法对温度的求解精度可以达到 0.002 °C, 对面形 Zernike 系数的求解精度可以达到 0.005 nm, 能够满足像差求解过程对温度与面形求解精度提出的要求。

关键词 测量; 热效应; 温度场; 镜面变形; 多项式拟合; 转换矩阵

中图分类号 TH703 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.0712003

A Fast Method for Calculating the Thermal Effect in Projection Objective Lenses

Luo Cong^{1,2} Gong Yan¹

(¹ State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Jilin, Changchun 130033, China
² University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract A new method is mentioned which can be used to simulate the thermal effect in the projection objective lens with fast speed. The method improves the solving period by separating the all solution to two steps: the first step is to obtain the transfer matrix between intensity distribution of the incident beam and thermal effect (including lens temperature and surface deformation). The second step is to express the intensity distribution with polynomial coefficients and multiply the fitting coefficients by the transfer matrix. The solving-time and the precision of the method are validated by analyzing the thermal effects on three different lenses with 0.2 s to get the node temperature and the Zernike coefficients of the surface deformation, while the general finite element analysis (FEA) method needs 600 s. Another advantage of the new method is that the solving-time isn't lengthened with more nodes. Temperature peak valley (PV) error is 0.002 °C, and fitting error of Zernike coefficient is 0.005 nm. The accuracy can match the requirement of calculating system aberration.

Key words measurement; thermal effect; temperature field; surface deformation; polynomial fit; transfer matrix

OCIS codes 120.6780; 120.6810; 120.4880; 350.6830

1 引 言

投影光刻物镜是一种用于电子芯片投影曝光的光学系统, 其分辨率达到了自身的衍射极限。为了

实现这种极限分辨率, 在工作过程中, 系统波前差必须小于 $\lambda/40$ ^[1]。系统中能够引入像差的因素(重力导致的镜面变形、面形加工误差、装调位置误差、振

收稿日期: 2014-02-18; **收到修改稿日期**: 2014-03-14

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金(41104122)、科技部国际合作项目(2011DFR10010)

作者简介: 骆 聪(1987—), 男, 博士研究生, 主要从事光机系统集成设计与分析方面的研究。

E-mail: luocong@foxmail.com

导师简介: 巩 岩(1968—), 男, 博士, 研究员, 主要从事短波光学、光机系统集成等方面的研究。

E-mail: gongy@sklao.ac.cn

动以及系统热效应等)^[2]都必须加以考虑,并将其影响降至最低。在所有这些因素中,热效应的影响是非常严重而特殊的:它与照明条件及掩膜图案有关,只在系统工作的时候出现,大小是实时变化的,这使其无法在光学元件设计制造和系统装调过程中消除^[3]。

为了减小热效应对系统性能的影响,各投影物镜制造商分别采用了恒温水套^[4]、红外热补偿^[5]、变形镜波前补偿^[6]、镜面电热温度补偿^[7]及自由照明^[8]等热控和热像差校正措施^[9]。这些措施需要镜片温度分布、投影物镜像差等参数作为输入,由于在工况条件下这些系统参数的实时检测具有结构复杂、成本高、采样点少等缺点,因此投影物镜生产厂商多采用实时像质监测和数值模拟计算相结合的方法为温控和像质补偿系统提供输入^[10-11]。数值模拟可以提供系统运行中任意时刻任意节点的数据,而实时检测获得数据的准确性,可以用实时检测数据对数值模拟数据进行修正。目前采用的数值模拟方法多为直接有限元算法,但是由于投影物镜的结构复杂,节点极多,此方法计算需要耗费大量的机能且实时性不好。针对这一问题和投影光刻物镜掩膜图案多变、照明条件多变、各镜片光强分布不均匀的特点,本文提出了一种变照明条件下透镜温度和热变形的快速计算方法,极大地加快了获取系统像差信息的速度,而且此算法对计算精度的影响也很小。

2 快速求解方法的原理与步骤

在柱坐标系下,对一个导热系数恒定的物体,它的热传导基本方程如下:

$$\nabla^2 T(r, z, t) + \frac{1}{k} g(r, z, t) = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T(r, z, t)}{\partial t}, \quad (1)$$

式中 k 为系统导热系数, $\alpha \equiv k/\rho c_p$ 为系统的热扩散系数, $T(r, z, t)$ 为温度, $g(r, z, t)$ 为产热率。在照明形式和掩膜图案已经给定的情况下,投影物镜中的光强分布是稳态的,设为 $I(r)$ 。透镜所用材料为熔融石英,其在 193 nm 处得吸光系数为 0.4%/cm,故透镜内部产热率则产热率正比于光强。取上下表面光强分布的平均值作为光束在透镜范围内的光强分布,则有 $g(r, z, t) = g(r, z) = g(r) \propto I(r)$;

根据秦硕等^[12]提出的投影物镜温控措施:在物镜工作中始终保持镜片上某一区域的温度为 $(22 \pm 0.01)^\circ\text{C}$ 。假设这一区域位于透镜边缘与镜座接触

的位置 S_1 , 则有边界条件 1: $T = T_0 = 22^\circ\text{C}$ 。

投影物镜内部充有流动的正压 N_2 , 因此存在对流散热。为了不对镜片面形产生影响,所充 N_2 的流速很慢,可以将其视为自然对流边界条件,根据文献^[13]将对流换热系数设为 $h = 6 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。因此对于透镜边缘不与镜座接触的位置 S_2 , 有边界条件 2: $k \frac{\partial T}{\partial n} + h(T - T_0) = 0$ 。

镜片表面的增透膜会吸收 0.2% 的光能,即上下表面存在与入射光强分布相关的热流边界条件,热流量 $q(r) \propto I(r)$, 故对上下镜面 S_3 有边界条件 3: $k \frac{\partial T}{\partial n} + h(T - T_0) = q(r)$ 。将上述边界条件代入(1)式,可以得到:

$$\nabla^2 T + \frac{1}{k} g(r) = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t}, \quad (2)$$

$$\text{B. C. } T = T_0 = 22^\circ\text{C}, \quad S_1$$

$$k \frac{\partial T}{\partial n} + h(T - T_0) = 0, \quad S_2$$

$$k \frac{\partial T}{\partial n} + h(T - T_0) = q(r), \quad S_3$$

$$\text{I. C. } T(t = 0) = T_0 = 22^\circ\text{C}$$

设 $V = T_0 + T_1 + T_2$, 并对光强进行多项式分解 $I(r) = \sum_{i=1}^m a_i i_i(r)$, 则 $g(r)$ 和 $q(r)$ 可表示为 $g(r) = \sum_{i=1}^m a_i g_i(r)$ 和 $q(r) = \sum_{i=1}^m a_i q_i(r)$ 。此时方程化为如下两个方程组:

$$\nabla^2 \theta_i + \frac{1}{k} g_i(r) = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial \theta_i}{\partial t}, \quad (3)$$

$$\text{B. C. } \theta_i = 0, \quad S_1$$

$$k \frac{\partial \theta_i}{\partial n} + h\theta_i = 0, \quad S_2$$

$$k \frac{\partial \theta_i}{\partial n} + h\theta_i = 0, \quad S_3$$

$$\text{I. C. } \theta_i(t = 0) = 0$$

和

$$\nabla^2 w_i = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial w_i}{\partial t}, \quad (4)$$

$$\text{B. C. } w_i = 0, \quad S_1$$

$$k \frac{\partial w_i}{\partial n} + h w_i = 0, \quad S_2$$

$$k \frac{\partial w_i}{\partial n} + h w_i = q_i(r), \quad S_3$$

$$\text{I. C. } w_i(t = 0) = 0$$

此时,透镜的温度变化可以表示为

$$T_1 + T_2 = \sum_1^m a_i \theta_i + \sum_1^m a_i \omega_i = \sum_1^m a_i (\omega_i + \theta_i), \quad (5)$$

分别求解(5)式每一个温度场对应的热变形,并对其进行 Zernike 分解:

$$U = \sum_{i=1}^m a_i U_i = \sum_{i=1}^m a_i \sum_{k=1}^l c_k U_{z_k} = \sum_{k=1}^l \sum_{i=1}^m a_i c_k U_{z_k} = [a_1 \ a_2 \ \dots \ a_i \ \dots \ a_m] \begin{bmatrix} c_{11} & \dots & c_{l1} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ c_{1n} & \dots & c_{ln} \end{bmatrix} [U_{z_1} \ U_{z_2} \ \dots \ U_{z_k} \ \dots \ U_{z_l}]^T = \mathbf{A} \cdot \mathbf{C} \cdot \mathbf{U}_z, \quad (7)$$

式中 $c_{k_1} = c_{k_2} = \dots c_{k_j} \dots = c_{k_n} = c_k$, \mathbf{U}_z 为 Zernike 项 $Z_1 \dots Z_n$ 组成的矩阵。

如果利用 Zernike 多项式拟合入射光强,则快速计算方法的步骤如下所述:

- 1) 求解 Zernike 项作为入射光强分布时的温度场 ($\omega_i + \theta_i$), 保存温度数据;
- 2) 求解 Zernike 项作为入射光强分布时的热变形 U_{z_k} , 并对面形变化进行 Zernike 拟合获得 c_k ;
- 3) 利用 Zernike 多项式对实际的入射光进行拟合并获得各项系数 a_i ;
- 4) 根据(5)式和(7)式计算温度场和透镜上下表面的热变形。

前两步在投影物镜的结构确定后即可通过有限元方法计算完成,后两步在给出照明模式和掩膜图案后进行。这种求解方法虽然在前期增加了许多运算量,但是在投影物镜工作时的运算仅包含矩阵乘法,因此运算速度会有明显的提升,能够极大地减少波前校正系统的响应时间。

$$U_i = F(\omega_i + \theta_i) = \sum_{k=1}^l c_k U_{z_k}. \quad (6)$$

根据陈旭等^[14]的研究。热变形场与温度场之间有线性变换关系,因此总的热变形可以表示为

3 快速求解方法的有限元验证

相比于直接有限元法,快速求解算法中增加了光强拟合项,这极有可能导致温度与面型求解精度的降低。为了验证快速求解算法在求解速度上的优势以及对求解精度的影响,分别采用直接有限元法和快速求解算法计算了三种透镜的温度场与应变场,并对两组求解结果进行了对比分析。

3.1 有限元模型

实验中使用的三种镜片如下所述:口径 200 mm 的平板玻璃和上表面曲率半径分别为 1000 mm 和 -1000 mm 的平凸(凹)透镜,镜片边缘厚度均为 20 mm,镜框采用三点粘结固定的径向挠性支撑结构,胶层厚度为 0.01 mm。透镜支撑结构的三维结构简图如图 1(a)所示。入射光强分布则采用了热效应最严重的偶极照明模式,如图 1(b)所示。透镜的边界条件与第二部分所述相同。

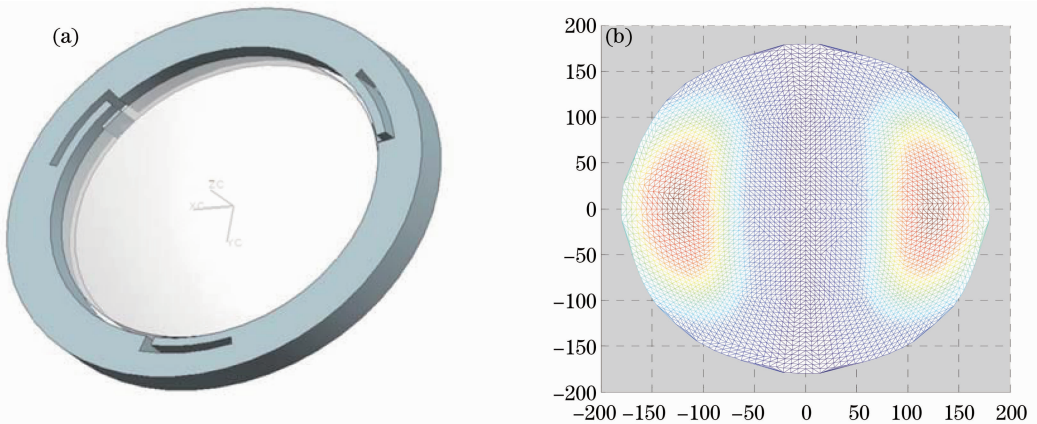


图 1 (a)有限元模型示意图;(b)入射光强分布图
Fig.1 (a) Sketch of FEA model; (b) intensity distribution of the incident beam

在投影物镜的工作过程中,掩模板的更换一般以批次为单位,一个批次的时间在十几分钟至几十分钟之间,不同批次之间需要对透镜进行冷却和像差检测。利用上述有限元模型,分析了在一个批次(此处取 20 min)时间内三个镜片的瞬态温度场及其导致的热变形,时间步长取 50 s。当有限元模型中的网格节点数为 100000 时,直接进行有限元求解(FEA)需要耗时约 10 min,采用快速求解法仅仅耗时 0.2 s。由于有限元求解方法的限制,当节点更多时直接求解法耗费的计算时间会急速增加,但是快速求解法却不受节点数目的影响,计算时间始终保持不变。

3.2 求解精度与误差来源

图 2 展示了通过直接有限元计算方法得到的温度与面型变化云图,其中第一行是三个透镜的温度云图,第二行为上表面的热变形云图,第三行为下表面的热变形云图;从左至右,三列分别对应着平凸透镜、平凹透镜和平板玻璃。可以看出,由于透镜类型的不同三个镜片在同样的工作条件下所产生的热变形也有着明显的区别。通过求解这些温度场和热变形,可以验证快速求解方法对不同类型面型变化的适应性,以确定其是否可以用于对任意类型的透镜进行温度与热变形求解。

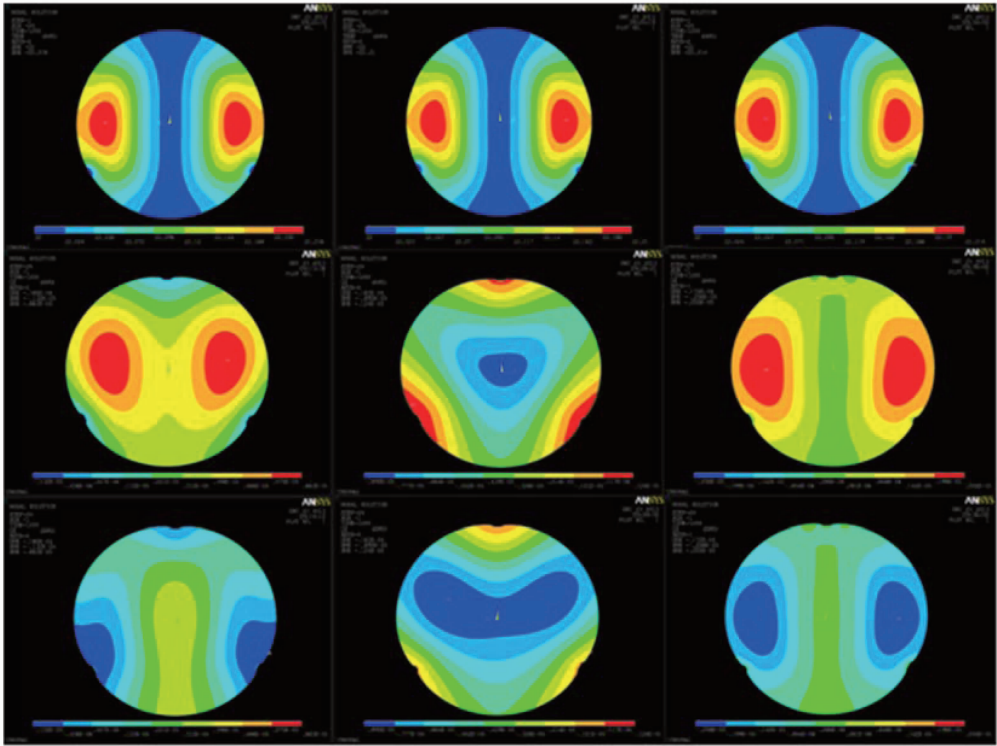


图 2 1200 s 时三个镜片的温度与面形变化云图

Fig. 2 Contour of temperature and deformation for three lenses at time of 1200 s

3.2.1 温度求解精度

表 1 对比了在 1200 s 时直接有限元求解与快速求解得到的节点温度,公式中的 T_G 代表了直接求解获得的节点温度, $A \cdot T_z$ 代表快速求解方法获得的节点温度。对比表中的数据可以发现:对于不同类型的镜片,直接有限元法与快速求解法之间的温度求解误差几乎相等;节点温度求解误差的峰谷(PV)值(0.002 °C)只有温度变化值(0.2 °C)的 1%,标准差(SD)则不到其 0.15%。这表明在温度求解方面,对于各类透镜快速求解算法的求解精度均不低于直接有限元法。

表 1 快速求解法的温度求解精度

Table 1 Solving accuracy of the new method on temperature

$A \cdot T_z - T_G$	Lens1	Lens2	Lens3
PV / ($10^{-3} \text{ }^\circ\text{C}$)	1.83	1.70	1.79
Standard deviation σ / ($10^{-3} \text{ }^\circ\text{C}$)	0.28	0.26	0.27

3.2.2 面形求解精度

在光学系统的热分析中,面形变化最终以 Zernike 系数的形式导入光学系统,故在此处将面形求解精度(DZ)定义为直接有限元法求解获得的 Zernike 系数与快速求解获得的 Zernike 系数之间的差值。

图 3 和图 4 展示了快速求解与直接求解得到的 Zernike 系数之间差值的绝对值,从中可以看出:对

于不同类型的透镜, Zernike 系数求解误差的分布不同, 上下表面求解误差的分布也不同; 但是第 5、12、21、32 项处的求解误差在 6 个面中都比较大, 这 4 项为 Zernike 多项式中的二叶像差项, 考虑到照明模式为偶极照明形式, 可以认为这 4 项的误差代表了快速求解方法对 Zernike 系数的求解误差; 另外, 所有项的求解误差中最大的为 0.005 nm, 这一值完全可以满足像差求解系统对面型求解精度的要求。即在面形变化求解方面, 快速求解算法的精度也与直接有限元法相当, 不会降低像差求解系统的精度。

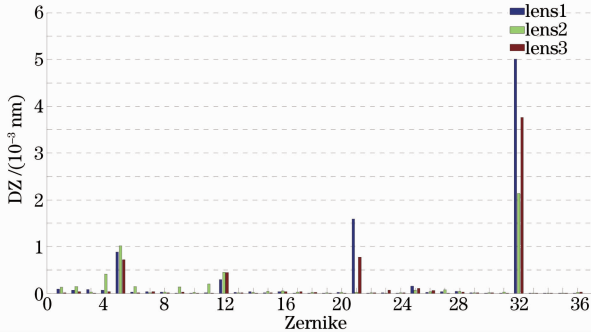


图 3 快速求解法与直接有限元求解法获得的 Zernike 系数之间的差(上表面)

Fig. 3 Calculation error of Zernike coefficients between the new method and direct FEA (top surface)

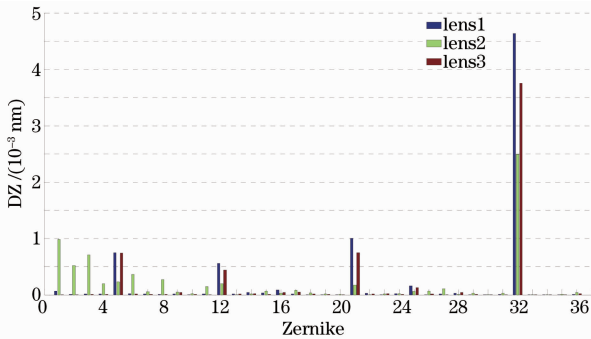


图 4 快速求解法与直接有限元求解法获得的 Zernike 系数之间的差(下表面)

Fig. 4 Calculation error of Zernike coefficients between the new method and direct FEA (bottom surface)

3.2.3 求解误差来源

相对于直接求解方法, 快速求解方法的误差来源有两个: 1) 光强分布的多项式分解过程; 2) 各光强分解项作为照明条件时面形变化的 Zernike 多项式拟合过程。温度求解过程仅包含了来源 1, 而表面变形的求解过程将来源 1 与 2 均包含在内, 因此对表面变形的拟合误差进行分析即可明确两个误差源对求解精度的影响。

在下述分析中对比了三种求解方法的精度, 它

们分别是:

1) 对光强进行分解, 调用不同光强分布时的节点位移并乘以光强分解获得的系数获得此光强分布下的节点位移, 之后与有限元直接求解的节点位移进行对比;

2) 直接有限元求解, 提取表面变形, 进行 Zernike 多项式拟合, 对比拟合后的节点位移与直接有限元求解获得节点位移;

3) 快速求解算法获得 Zernike 系数, 据此求解节点位移并与直接有限元求解获得的节点位移进行对比;

图 5 对比了方法 1 的节点位移求解误差与光强拟合误差在整个镜面上的分布, 两者非常近似。而且拟合误差在整个镜面上的分布形式对应了第 5、12、21、32 项的 Zernike 系数, 再考虑到图 3 与图 4 中的面型 Zernike 求解误差, 可以得到结论: 热变形的 Zernike 多项式系数求解误差主要来自于光强拟合误差, 如果提高光强拟合精度, 则热变形的 Zernike 多项式系数求解精度也会提高。采用了前 36 项 Zernike 多项式进行光强拟合, 此时系数求解误差小于 0.005 nm。

图 6 对比了三种面形求解方式的误差, 其中 A 组代表了光强分解阶段产生的误差, B 组代表了对节点位移进行 Zernike 拟合时产生的误差, 而 C 组代表了整个快速求解过程中产生的误差。通过 A 组图像, 可以看出光强分解误差以及矩阵乘法对求解精度的影响很小; 而 B 组与 C 组表明最主要的误差来源是面形的拟合误差, 虽然不是在同一阶段进行面形的 Zernike 分解, 但是方法 2 和方法 3 获得的拟合面型与原始面型之间的误差几乎完全形同。面形拟合误差过大主要是因为透镜支撑区域节点位移的变化很剧烈, 采用前 36 项 Zernike 多项式进行拟合时会导致边缘位置的节点位移求解误差较大。如果将拟合项数从 36 项提高至 128 项, 拟合误差的 PV 值将降至 0.06 nm。

3.2.4 求解精度与时间的关系

镜片温度与面形随时间的变化速度呈负指数形, 其增长速度逐渐放缓并趋于 0。而且对于不同的照明形式与照明光强, 镜片温度与表面变形随时间的变化曲线有着明显的区别。因此虽然上文中的论述证明了快速求解方法在 1200 s 时具有足够高的求解精度, 但是在整个求解过程中, 精度随时间的变化趋势并不清楚。为了研究这一变化趋势, 求解了平板玻璃在 2400 s 内的热效应。

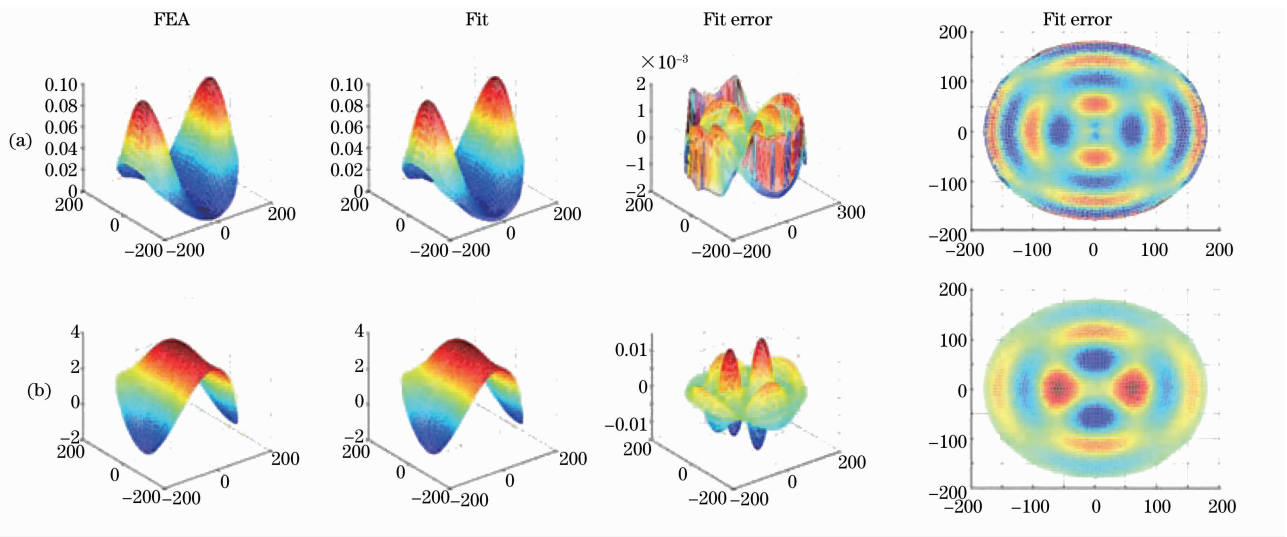


图 5 方法 1 的节点位移求解误差与光强拟合误差的对比。(a) 光强分布；(b) 表面变形

Fig. 5 Error of the displacement along Z axis versus the error of fitting the intensity distribution. (a) Intensity distribution; (b) surface deformation

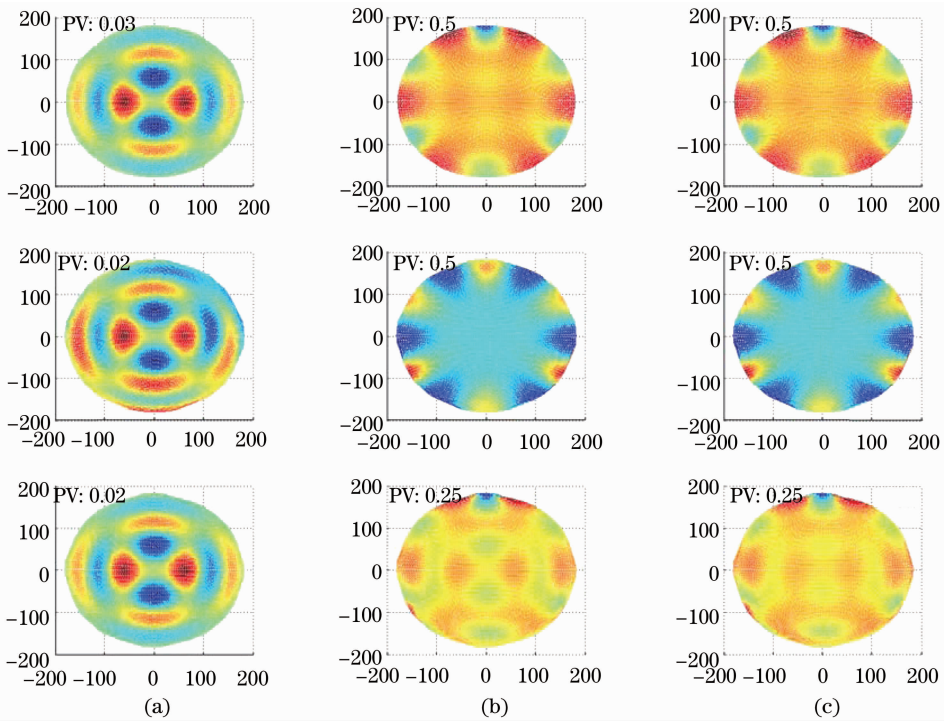


图 6 三种方法的节点位移求解误差。(a) 方法 1；(b) 方法 2；(c) 方法 3

Fig. 6 Error of node displacement for three methods. (a) Method 1; (b) method 2; (c) method 3

图 7 中是平板温度拟合误差随时间的变化曲线,从中可以看出随着时间的推移、镜片温度的升高,温度求解误差逐渐增大,但是一段时间后趋于稳定。PV 值代表了节点温度求解误差最大值与最小值之间的差,PV 值趋于稳定说明对镜片内每一点的温度求解误差都已达到最大,而且此时的求解误差与 1200 s 时的求解误差几乎相等。

由于在求解系统像差时,导入光学系统中的是

面形变化的 Zernike 系数,因此在考察面形求解精度随时间的变化时采用了系数较大的第 1、3、4、5、9、11、12 项及系数求解误差较大的第 5、12、21、32 项 Zernike 系数作为考察项,并绘制了这 9 项的求解误差随时间的变化曲线,如图 8 所示。可以看出求解误差较大的项始终是 5、12、21、32 这 4 项,其他 5 项虽然在分解中所占比重较大,但是求解误差很小。并且这 4 项的误差随着时间的增加逐渐趋于稳定,最终

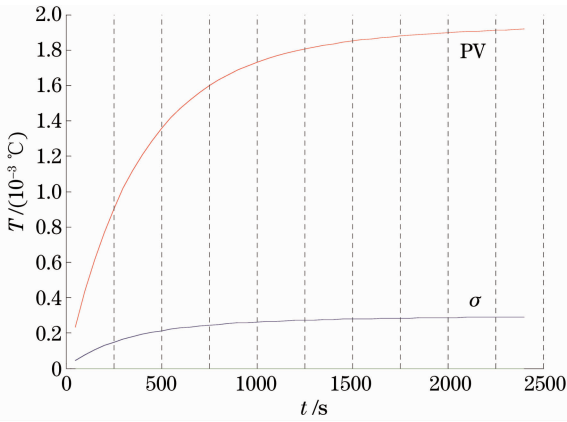


图 7 平板温度求解误差随时间的变化

Fig. 7 Error of temperature in glass plate versus time

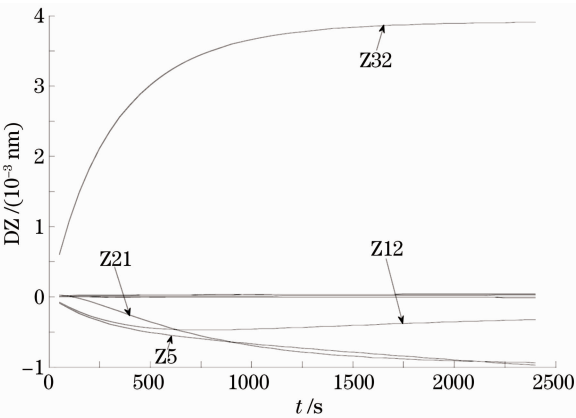


图 8 镜面变形 Zernike 系数的求解误差随时间的变化
Fig. 8 Error of Zernike coefficients of surface deformation versus time

都没有超过 0.004 nm,表明此快速求解方法的精度能够在整个时间范围内满足求解精度的要求。

4 结 论

提出的快速算法将投影物镜热效应的模拟计算分解为前期的转换矩阵求解与后期的矩阵乘法。通过对不同类型透镜在在 1200 s 内的瞬态温度场与热变形场的求解,验证了此算法的计算速度和精度:采用此算法时,单透镜热效应的求解时间可以降至 0.2 s,远低于采用直接求解法所需的 10 min,而且快速求解法的计算时间不随有限元模型节点的增多而增加,非常适合具有详细细节的高精度热效应求解;当光强分布与表面变形均采用前 36 项 Zernike 多项式拟合时,相比于直接有限元法,快速求解算法的温度求解误差 PV 值仅为 0.002 °C,表面变形的 Zernike 系数求解误差也小于 0.005 nm,这一求解精度不低于直接有限元法。通过提高光强拟合与面形拟合的精度,还可以进一步地减小此方法的求解

误差,以适应更高的求解精度要求。可见将此算法用于投影物镜的热像差求解中,可以在不影响求解精度的条件下极大地提升求解速度,减少像差校正系统的响应时间,当然此算法也可用于快速求解其他具有主动温控措施的光学系统的热效应。

参 考 文 献

- 1 T Matsuyama, Y Ohmura, D M Williamson. The lithographic lens: its history and evolution [C]. SPIE, 2011, 6154: 615403.
- 2 M van de Kerkhof, E van Setten, A Engelen, *et al.*. Imaging performance optimization for hyper-NA scanner systems in high volume production [C]. SPIE, 2008, 6924: 69241W.
- 3 S Halle, M Crouse, A Jiang, *et al.*. Lens heating challenges for negative tone develop layers with freeform illumination a comparative study of experimental versus simulated results [C]. SPIE, 2012, 8326: 832607.
- 4 Chen Xu'nan, Yu Guobin, Zhang Jin. A constant-temperature water jacket of sub-micron lithography objective lens, China: 00223787. 3[P]. 2001-05-30.
陈旭南, 余国彬, 张 津. 亚半微米光刻物镜的恒温水套, 中国: 00223787. 3[P]. 2001-05-30.
- 5 T Nakashima, Y Ohmura, T Ogata, *et al.*. Thermal aberration control in projection lens [C]. SPIE, 2008, 6924: 69241V.
- 6 Y Uehara, T Matsuyama, T Nakashima, *et al.*. Thermal aberration control for low k1 lithography [C]. SPIE, 2007, 6520: 65202V.
- 7 F Staals, A Andryzhyieuskaya, H Bakker, *et al.*. Advanced wavefront engineering for improved imaging and overlay applications on a 1.35 NA immersion scanner [C]. SPIE, 2011, 7973: 79731G.
- 8 J Lim, K Kang, S Kim, *et al.*. Advanced scanner matching using freeform source and lens manipulators [C]. SPIE, 2011, 7973: 79732A.
- 9 J Bekaert, L VanLook, G Vandenberghe, *et al.*. Characterization and control of dynamical lens heating effects under high volume manufacturing conditions [C]. SPIE, 2011, 7973: 79730V.
- 10 P Liu, M Snajdr, Z Zhang, *et al.*. A computational method for optimal application specific lens control in microlithography [C]. SPIE, 2010, 7640: 76400M.
- 11 Y Ohmura, T Ogata, T Hirayama, *et al.*. An aberration control of projection optics for multi-patterning lithography [C]. SPIE, 2011, 7973: 79730W.
- 12 Qin Shuo, Gong Yan, Yuan Wenquan. High precision temperature control for projection lens with long time thermal response constant [J]. Optics and Precision Engineering, 2013, 21(1): 108-114.
秦 硕, 巩 岩, 袁文全, 等. 大时间热响应常数投影物镜超高精度温度控制[J]. 光学精密工程, 2013, 21(1): 108-114.
- 13 Yang Shiming, Tao Wenquan. Heat Transfer [M]. Beijing: Higher Education Press, 2006. 7-8.
杨世铭, 陶文铨. 传热学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2006. 7-8.
- 14 Chen Xu, Yuan Wenquan, Feng Yutao, *et al.*. Study of the error of the reference lens in absolute spherical testing and the thermal deformation model establishment [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(2): 0212002.
陈 旭, 袁文全, 马玉涛, 等. 绝对检验参考镜误差分析与热变形模型建立[J]. 光学学报, 2011, 31(2): 0212002.

栏目编辑: 韩 峰