

光机系统的一体化仿真分析

肖 阳^{1,2} 徐文东¹ 赵成强¹

¹中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800

²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 建立了光机一体化仿真方法, 从而实现了对光学系统的性能评估。利用 Ansys 有限元软件进行热-结构仿真, 将得到的数据文件进行刚体位移分离时采用新的评价函数, 通过设置位移参量和随机值验证计算精度达到 0.3%。运用 Householder 算法做 Zernike 拟合, 将拟合系数作为与 ZEMAX 进行通信的数据接口, 并采用动态数据交换技术实现 Matlab 与 Zemax 的数据交换。在此基础上给出一个角度检测物镜仿真的实例, 得到了光学畸变随温度变化的曲线, 说明为达到 1" 的测量精度, 需保证工作温度范围为 14~26 °C。

关键词 光学设计; 热变形; 刚体位移; Zernike 拟合; 动态数据交换; 光学畸变

中图分类号 TH74 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201636.0722002

Integrated Simulation of Opto-Mechanical System

Xiao Yang^{1,2} Xu Wendong¹ Zhao Chengqiang¹

¹ Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China

² University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract An integrated simulation method is established, and the performance assessment of optical systems is obtained, accordingly. New assessment functions are used for rigid-body displacement separation, which is conducted by deformation data from the Ansys thermal simulation. The computational accuracy of 0.3% is tested through setting displacement parameter and random value. Householder algorithm is adopted for Zernike fitting, and the Zernike coefficients are used as the interface for data exchange with Zemax, which is achieved by dynamic data exchange technology. The simulation of an objective lens is taken as an example, and a distortion-thermal curve is presented. The result indicates that in order to guarantee measuring accuracy of 1", the working temperature should be in the range from 14 °C to 26 °C.

Key words optical design; thermal deformation; rigid-body displacement; Zernike fitting; dynamic data exchange; optical distortion

OCIS codes 220.1010; 120.6810; 120.4880

1 引 言

光机结构在复杂的环境如热、重力等作用下会产生应力应变, 进而影响其整体性能, 因此进行仿真计算是非常必要的。常常通过计算各种热效应、重力效应来考察最终系统的波像差变化, 这在大口径干涉系统^[1-2]、可调支撑结构^[3]、光学表面检测^[4]、激光器系统^[5-6]中都有广泛的应用。在某些光学系统中畸变、调制传递函数等光学性能的变化已被关注^[7-8], 然而目前机械-光学的仿真往往是分立进行的, 尚无通用的光机一体化仿真软件。很多情况下只讨论了各种效应造成的面型畸变, 即均方根(RMS)值和峰谷(PV)值, 却无法直观地得到这种畸变对于最终光学像质的影响; 且 Zemax 内置的环境仿真功能过于简略, 无法对具体的机

收稿日期: 2016-01-15; **收到修改稿日期:** 2016-03-09

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金(61501435)

作者简介: 肖 阳(1991—), 男, 硕士研究生, 主要从事光学设计、光机系统仿真等方面的研究。

E-mail: xy1152165681@126.com

导师简介: 徐文东(1966—)男, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事光机系统设计方面的研究。

E-mail: xuwendong@mail.siom.ac.cn(通信联系人)

械结构得出准确结果。因此依据这些独立的仿真结果来评价和设计光机系统,可能导致系统指标过于严格,或者不符合空间环境稳定性要求等问题。目前已有不少关于热-结构仿真和光学仿真的讨论,如文献[9]提出的栅格点作为数据接口方法,文献[10]提出的干涉图插值法以及 Zernike 拟合方法等。其中 Zernike 多项式不仅能精确地表示一个表面,且在连续单位圆上正交,而且其每项可以对应特定的光学像差^[11-12]。故本文采用 Householder 算法做 Zernike 拟合,同时通过改进刚体位移分离方法减小了数据处理误差。通过引入动态数据交换(DDE)技术,建立了一套集成的仿真系统,并用此方法对一个角度检测物镜的畸变特性进行了仿真,给出了其工作温度范围。

2 原理与方法

2.1 光机一体化仿真结构模型

搭建的仿真结构框图如图 1 所示。利用 Ansys 有限元软件对热-结构进行建模,将得到的数据文件依次经过刚体位移分离、Zernike 拟合后通过动态数据交换导入 Zemax 中进行光学仿真,并读取仿真结果数据图表,从而直观地分析热环境、应力等因素对最终像质的影响。系统采用人机交互的方式提高其易用性,热-结构仿真的结果文件作为基本的数据来源,用户只需输入光学表面数量、Zernike 多项式项数、所需光学特性曲线、文件存储目录等参量,程序即可自动运行,并显示和存储最终结果以供分析。

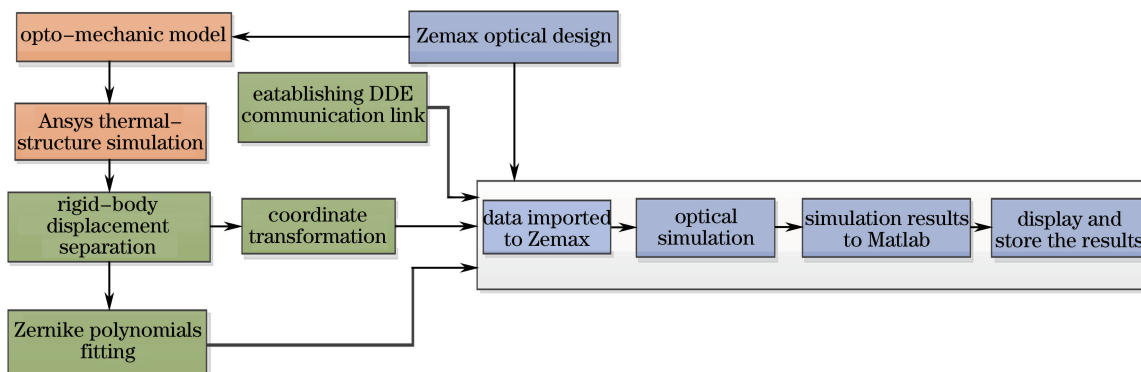


图 1 光机一体化仿真结构模型

Fig. 1 Opto-mechanical integration simulation model

2.2 刚体位移分离

Ansys 热仿真得到的形变数据包括由支撑结构的形变造成的刚体位移(离焦、偏心和倾斜)和透镜在热效应与支撑结构的作用下产生的应力形变,因此在进行 Zernike 拟合之前,必须先将这两种形式的形变分离开来^[13]。采用齐次坐标变换建立镜面形变前后节点坐标的关系方程组,并利用最小二乘法求解刚体位移。

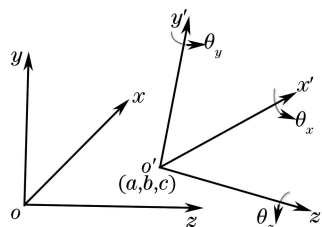


图 2 齐次坐标变换

Fig. 2 Homogeneous coordinate transformation

如图 2 所示,原始坐标系中水平向右为 z 正方向,竖直向上为 y 正方向,垂直纸面向里为 x 正方向,符合 Zemax 里面的坐标系定义。经过热形变之后,刚体位移等效于一个坐标系变化,即平移量对应 (a, b, c) ,而倾斜则对应于坐标旋转 $(\theta_x, \theta_y, \theta_z)$,设表面畸变为 $(\delta_x, \delta_y, \delta_z)$,节点原始坐标为 (x, y, z) ,形变后的坐标为 (x', y', z') ,则满足关系^[13]

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -\theta_z & \theta_y & a \\ \theta_z & 1 & -\theta_x & b \\ -\theta_y & \theta_x & 1 & c \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \delta_x \\ \delta_y \\ \delta_z \end{bmatrix}. \quad (1)$$

对于每个节点 (x_i, y_i, z_i) ,均满足(1)式,从而得到如下方程组

$$\begin{cases} \delta_{xi} = x'_i - x_i + \theta_z \times y_i - \theta_y \times z_i - a \\ \delta_{yi} = y'_i - y_i + \theta_x \times z_i - \theta_z \times x_i - b \\ \delta_{zi} = z'_i - z_i + \theta_y \times x_i - \theta_x \times y_i - c \end{cases} \quad (2)$$

在求解刚体位移的过程中,可认为所有畸变量之和为最小值时能得到最准确的刚体位移,即建立如下目标函数

$$D = \sum_{i=1}^n (\delta_{xi}^2 + \delta_{yi}^2 + \delta_{zi}^2) = \sum_{i=1}^n [(x'_i - x_i + \theta_z \times y_i - \theta_y \times z_i - a)^2 + (y'_i - y_i + \theta_x \times z_i - \theta_z \times x_i - b)^2 + (z'_i - z_i + \theta_y \times x_i - \theta_x \times y_i - c)^2], \quad (3)$$

求导后,有

$$\frac{\partial D}{\partial \theta_x} = \frac{\partial D}{\partial \theta_y} = \frac{\partial D}{\partial \theta_z} = \frac{\partial D}{\partial a} = \frac{\partial D}{\partial b} = \frac{\partial D}{\partial c} = 0. \quad (4)$$

通过(1)~(4)式解 6 个未知参数来得到准确解。然而通过实验发现,这种方法似乎并不能保证其可靠性,求解误差比较大。另一种思路,对每个独立的节点分别建立目标函数

$$D_i = \delta_{xi}^2 + \delta_{yi}^2 + \delta_{zi}^2 = (x'_i - x_i + \theta_z \times y_i - \theta_y \times z_i - a)^2 + (y'_i - y_i + \theta_x \times z_i - \theta_z \times x_i - b)^2 + (z'_i - z_i + \theta_y \times x_i - \theta_x \times y_i - c)^2, \quad (5)$$

取极值后有

$$\frac{\partial D_i}{\partial \theta_x} = \frac{\partial D_i}{\partial \theta_y} = \frac{\partial D_i}{\partial \theta_z} = \frac{\partial D_i}{\partial a} = \frac{\partial D_i}{\partial b} = \frac{\partial D_i}{\partial c} = 0. \quad (6)$$

将所有节点数据代入,即可得到一组方程,此超定方程的最小二乘解即为刚体位移参数,代入初始方程(2)式即可得到面型畸变量。为了验证算法的可靠性,首先设置一组刚体位移参量,并且通过引入随机数来模拟畸变的大小以验证算法的可行性,由此计算得到形变后的坐标。再利用上面的算法求取刚体位移参数,通过对比设置值和计算值可判定算法的可靠性。结果如表 1 所示,其中畸变量设置为 $0.001 \times (-1)^{(i)} \times R_{\text{and}}$, R_{and} 产生 0 到 1 的随机数, $(-1)^{(i)}$ 表示不同节点畸变量的符号。由表 1 可以看出,拟合误差小于 0.3%,满足精度要求。

表 1 刚体位移分离精度分析

Table 1 Rigid-body displacement separation precision analysis

Parameter	Set value	Calculated value
Rotate about x axis	0.01	0.010034102800716
Rotate about y axis	0.01	0.010011077607437
Rotate about z axis	0.01	0.009980440441373
Offset along x axis	0.1	0.099997761976899
Offset along y axis	0.2	0.199999595689398
Offset along z axis	0.3	0.300000656104355

2.3 Zernike 多项式拟合

由于 Zernike 多项式具备各项正交性和与光学像差相对应的优点,因此在面型表达和波前测量等领域得到广泛应用^[14]。Zemax 中提供了 Zernike 多项式数据接口,其前 9 项的笛卡尔坐标形式以及对应的物理意义如表 2 所示^[11]。

表 2 Zernike 多项式
Table 2 Zernike polynomials

Item number j	$Z_j(x, y)$	Physical significance
1	1	Piston
2	x	Tilt X
3	y	Tilt Y
4	$2x^2 + 2y^2 - 1$	Power
5	$x^2 - y^2$	Astigmatism X
6	$2xy$	Astigmatism Y
7	$3x^3 + 3xy^2 - 2x$	Coma X
8	$3x^2y + 3y^3 - 2y$	Coma Y
9	$6(x^2 + y^2)^2 - 6(x^2 + y^2) + 1$	Primary spherical

项数的增大代表取到了更高阶像差。比如：10~16 项代表 5 级像差，17~25 项代表 7 级像差，26~36 项代表 9 级像差等。设原始坐标节点数据归一化后得到的径向坐标为 (x_i, y_i) ，去除刚体位移之后的轴向畸变数据为 δ_{zi} ，则可得

$$\delta_{zi} = \sum_{j=1}^n q_j Z_j(x_i, y_i), \quad (7)$$

式中 $Z_j(x_i, y_i)$ 代表对应节点处 Zernike 项的值， q_j 则代表对应项的 Zernike 系数，将所有节点数据代入，则可得方程组

$$\mathbf{Z}\mathbf{q} = \boldsymbol{\delta}, \quad (8)$$

式中 \mathbf{Z} 为 $m \times n$ 的系数矩阵， \mathbf{q} 为待求 Zernike 系数向量， $\boldsymbol{\delta}$ 为 δ_{zi} 构成的向量。由于节点数 $m > n$ ，所以 (8) 式为超定方程，并不存在确定解，只有满足

$$\|\boldsymbol{\Delta}\|^2 = \|\mathbf{Z}\mathbf{q} - \boldsymbol{\delta}\|^2 \quad (9)$$

的值最小的解。在求此最小二乘解时，目前常用的 Gram-Schmit 正交化方法存在不稳定性问题。当拟合项数取得较多时，可能会在构造归一化函数系时出现相关^[15]。而根据数值分析的基本理论，可将系数矩阵分解为一个正交矩阵与一个上三角矩阵 \mathbf{R} 的乘积，从而利用正交矩阵的性质来求最小二乘解，典型的正交分解方法即 Householder 变换^[16]。比较而言，Gram-Schmit 算法在精度上略高于 Householder 变换，运算复杂度上也比后者简单，而 Householder 方法则可以避免由数据离散导致的基底函数不正交的问题，稳定性更好。由于计算机的强大计算能力可以抵消由运算复杂度导致的时间消耗的问题，且 Householder 方法可以满足计算精度上的要求，为保证系统的通用性，故采用 Householder 算法来做拟合。

对于 (8) 式中的 Zernike 系数矩阵 \mathbf{Z} ，经过 n 次 Householder 变换后可以转化为上三角矩阵的形式

$$\mathbf{Z}_n = \mathbf{Q}\mathbf{Z} = \mathbf{H}_n \mathbf{H}_{n-1} \cdots \mathbf{H}_1 \mathbf{Z} = \begin{pmatrix} \mathbf{R} \\ \mathbf{O} \end{pmatrix}. \quad (10)$$

在 (9) 式两边同时左乘 Householder 矩阵 \mathbf{Q} ，设

$$\mathbf{Q}\boldsymbol{\delta} = \begin{pmatrix} \mathbf{c}_{n \times 1} \\ \mathbf{d}_{m-n \times 1} \end{pmatrix}, \quad (11)$$

则结合 (10) 式可得

$$\mathbf{Q}\boldsymbol{\Delta} = \begin{pmatrix} \mathbf{R} \\ \mathbf{O} \end{pmatrix} \mathbf{q} - \mathbf{Q}\boldsymbol{\delta} = \begin{pmatrix} \mathbf{R} \\ \mathbf{O} \end{pmatrix} \mathbf{q} - \begin{pmatrix} \mathbf{c} \\ \mathbf{d} \end{pmatrix}. \quad (12)$$

由 Householder 矩阵性质可知

$$\|\boldsymbol{\Delta}\|^2 = \|\mathbf{Q}\boldsymbol{\Delta}\|^2 = \|\mathbf{R}\mathbf{q} - \mathbf{c}\|^2 + \|\mathbf{d}\|^2, \quad (13)$$

因此要使该值最小，直接求解 $\mathbf{R}\mathbf{q} = \mathbf{c}$ 即可。

利用上述方法，分别选取 9 项、28 项、36 项 Zernike 多项式进行了拟合，其均方根值和峰谷值的拟合精度分别为 0.031679384897650λ 和 0.169377709910810λ 、 0.012992484843918λ 和 0.127939247403640λ 、 0.01294762077565λ 和 0.127322517944171λ 。由此可以看出，随着项数由 9 项到 28 项，拟合精度存在一定

程度提高,然而当项数增大到 36 项时精度并没有更显著的改善,反而降低了求解效率。因此一般采用 36 项多项式进行拟合。

2.3 Zemax 动态数据交换机制的建立

DDE 是允许各 Windows 应用程序间交换数据的通信机制,应用程序可以借助 DDE 通话实现彼此间的通信^[17]。Zemax 内置有 DDE 服务器,而 Matlab 可以作为客户端来请求建立联系,这样就可以实现以 Matlab 为平台,一方面可以读取 Ansys 热仿真得到的离散数据,在经过数值计算之后,又可以通过 DDE 将相关数据传送给 Zemax 得到新的光学仿真结果,同时也能够将 Zemax 得到的数据、图表等内容读取出来查看结果,从而极大地简化了光机一体化仿真流程。建立的 DDE 通信的结构框图如图 3 所示。数据输入的过程中,刚体位移绕三坐标轴的倾斜分量以及沿 x 、 y 轴平移分量(即 θ_x 、 θ_y 、 θ_z 、 a 、 b)可以通过设置 coordinate break 面实现,或者直接的面型参数的 tilt/decenter 部分输入。要注意的是坐标转换过程,因为在 Ansys 中分析得到的数据都是基于全局坐标系,而 Zemax 中的数据则是基于局部坐标系,即下一个面的坐标都是以前一个面为参考的,所以某个面经过平移和倾斜后必须及时恢复,以保证后续的面都不受影响。而刚体位移的 z 向偏移部分则对应于镜头数据编辑器(LDE)中的厚度部分,同样需要做一个全局坐标到局部坐标系的转换才能保证数据传递的准确性。

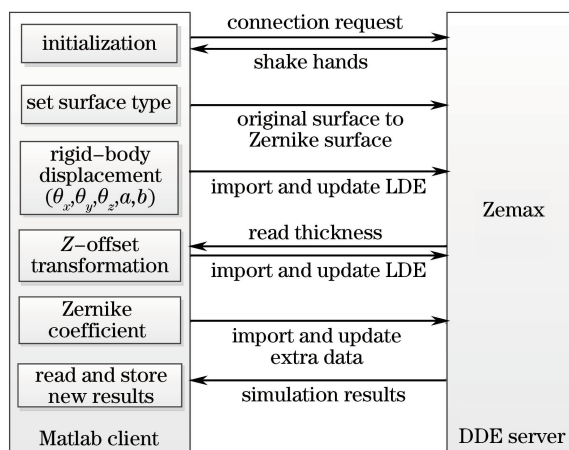


图 3 动态数据交换模型

Fig. 3 Dynamic data exchange model

3 角度检测物镜畸变分析

图 4 为角度检测物镜,其主要功能是进行平行光角度精密测量,用于飞机玻璃检测、平面度测量等。此物镜的全视场为 1.8° ,综合检测精度要达到 $\pm 1''$ 。所采用的 CCD 像素数为 2048×2048 ,通过亚像素算法测定的光斑中心精度可达到 $1/10$ pixel,对应的角度误差约为 $\pm 0.3''$,由温度引起的角度偏差要求小于 $\pm 0.5''$ 。由于温度引起的角度偏差在光学系统中体现为畸变量的变化,因此下面将对畸变进行重点分析。

在建立热仿真模型时,采用了与 Zemax 完全一致的全局坐标系,原点选在镜组中轴线上且位于系统左侧,这样可以保证后续数据处理方便。另外在网格划分时对机械结构部分采用了较为稀疏的网格划分,而

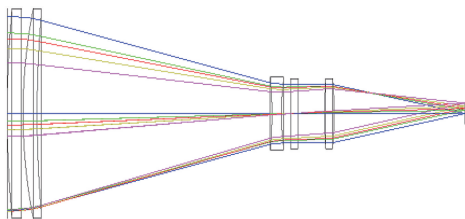


图 4 角度检测物镜设计图

Fig. 4 Angle measuring objective lens layout

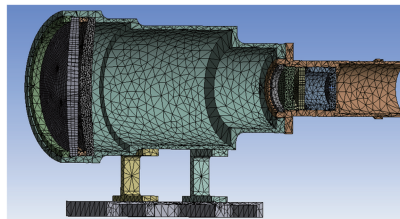


图 5 有限元网格划分

Fig. 5 Finite element meshing

透镜则划分了更多的节点和单元数,并保证网格的均匀性和对称性,这样利于满足 Zernike 多项式的正交性和提高拟合精度,同时也提高了仿真效率。网格划剖面如图 5 所示。该望远系统组成部分的材料特性如表 3 所示。

表 3 材料特性
Table 3 Material properties

Material	H-K9L	H-ZF6	H-F1	H-ZLAF3	LY12
Young's modulus /(10^7 Pa)	7920	9087	7847	12068	7000
Shear modulus /(10^7 Pa)	3270	3633	3197	4663	2700
Poisson's ration	0.211	0.251	0.227	0.294	0.3
Thermal conductivity /[W/(m·k)]	0.75	0.75	0.75	0.75	162
Coefficient of thermal expansion /(10^{-7} /K)	83	92	81	64	236
Density /(g/cm^3)	2.52	3.24	2.63	4.5	2.78

为了说明热仿真的正确性,以第一面的仿真结果为例。对支板底座施加固定支撑,对系统施加 $0\text{ }^\circ\text{C}$ 载荷,初始温度设为 $20\text{ }^\circ\text{C}$,则可得第一面的形变,如图 6 所示。

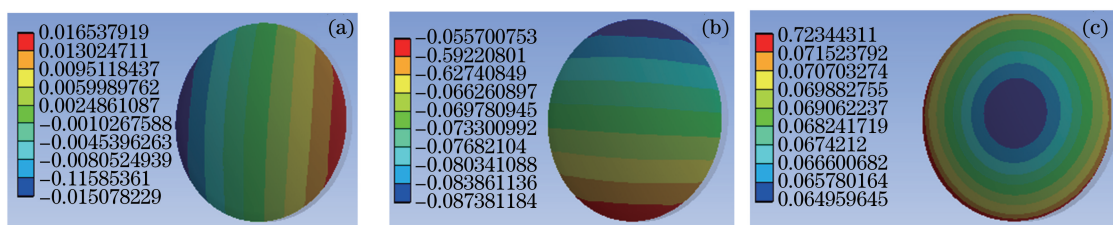


图 6 $0\text{ }^\circ\text{C}$ 载荷时第一面的形变云图。(a) X 方向; (b) Y 方向; (c) Z 方向

Fig. 6 Deformation contour of the first surface at $0\text{ }^\circ\text{C}$ temperature-load.

(a) X-deformation; (b) Y-deformation; (c) Z-deformation

如图 6 所示, x 方向的形变大致是以 y 轴对称分布的, y 方向的形变是以 x 轴对称分布的, y 方向形变的绝对值相比 x 方向的形变大,这是由于支板的刚体位移造成的。 z 轴形变皆为正且呈一定的中心分布,这是由于 $0\text{ }^\circ\text{C}$ 载荷的冷缩作用,而且金属的热胀系数大于玻璃,所以对透镜产生的压力导致边缘处的形变量大于中心处的形变量。同理,在加载大于环境温度的温度载荷时也可见系统的热胀效应,因此认为仿真符合预期。

接下来,对该结构施加不同的温度载荷,并利用上述的步骤将结果导入 Zemax,得到的畸变数据如表 4 所示。

表 4 畸变-温度表
Table 4 Distortion-temperature

Temperature / $^\circ\text{C}$	10	12	14	16	18	20
Distortion /%	0.02107350	0.02612331	0.03115314	0.03618749	0.04125939	0.04631043
Temperature / $^\circ\text{C}$	22	24	26	28	30	32
Distortion /%	0.05136389	0.05644308	0.06148951	0.06653637	0.07160802	0.07667142

为了直观反映温度对检测精度的影响,将表 4 中的畸变值换算成以“ μm ”做单位,并取其与参考温度的畸变差值,得到的曲线如图 7 中蓝色点线所示,红色实线则表示满足精度要求的最大畸变差值。由图 7 可以看到,在一定范围内畸变值与温度载荷呈正相关关系,畸变的变化会导致与标定的畸变(此畸变事先测定后是可以算法消除的)产生偏差从而降低测量精度。为保证系统测量值的准确性,系统工作的温度范围必须控制在 $14\sim 26\text{ }^\circ\text{C}$ 范围内。

4 结 论

建立了一套光机一体化仿真流程,完成了刚体位移分离,通过采用新的目标函数得到了更好的分离效果,通过实验验证了计算误差小于 0.3% 。采用 Householder 算法进行 Zernike 多项式拟合,验证了项数增

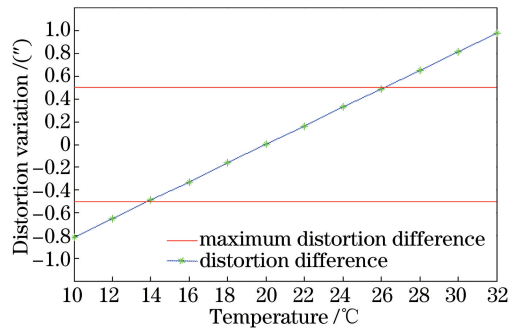


图 7 畸变变化-温度曲线

Fig. 7 Distortion variation-temperature curve

大时拟合精度的变化,取 36 项多项式时拟合表面的峰谷值达到 0.127322517944171λ ,均方根值达到 0.012947620775565λ ,满足光学表面的面型要求。建立了 DDE 通道实现数据的自动交换,通过人机交互的方式提高了系统的易用性。并针对某精密测量镜头对畸变要求高的情况进行了系统仿真,得到了畸变随温度的变化曲线,给出了保证精度条件下的温度范围,对仪器使用的环境条件和温控的设置等有一定指导作用。

参 考 文 献

- Xu Rongwei, Liu Liren, Liu Hongzhan, *et al.*. Support schemes and thermal deformation analysis of large aperture interferometer mirrors[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, 25(6): 809-815.
徐荣伟, 刘立人, 刘宏展, 等. 大型干涉仪镜子的支撑设计与温度变形分析[J]. *光学学报*, 2005, 25(6): 809-815.
- Zhou Yi, Yang Shujuan, Zhang Junwei, *et al.*. Thermal transfiguration analysis for the large aperture optical element of switchyard in ICF driver target area[J]. *Chinese J Lasers*, 2010, 37(1): 125-130.
周 忆, 杨淑娟, 张军伟, 等. 惯性约束聚变靶场编组站大口径光学元件的热变形分析[J]. *中国激光*, 2010, 37(1): 125-130.
- Wu Zhihui, Wang Dongping, Hua Yangyang, *et al.*. Influence of adjustable supporting force on surface shape of optical element[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, 52(12): 122201.
吴志会, 王东平, 华洋洋, 等. 可调支撑力对光学元件面形的影响[J]. *激光与光电子学进展*, 2015, 52(12): 122201.
- Chen Hua, Shi Zhenguang, Sui Yongxin, *et al.*. Thermal deformation analysis of optical surfaces caused by environmental temperature during interferometric testing[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(1): 0112007.
陈 华, 史振广, 隋永新, 等. 干涉检测中环境温度引起的镜面变形分析[J]. *光学学报*, 2011, 31(1): 0112007.
- 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.
- Hu Xiaochuan, Wang Du, Chen Lixia, *et al.*. Effect analysis of self-correction method based on the prediction model of deformable mirror with thermal deformation[J]. *Chinese J Lasers*, 2015, 42(12): 1202001.
胡小川, 王 度, 陈丽霞, 等. 基于变形镜热形变预估模型的自校正效果分析[J]. *中国激光*, 2015, 42(12): 1202001.
- Stoeckel G, Crompton D, Perron G. Advancements in integrated structural/thermal/optical(STOP) analysis of optical systems[C]. SPIE, 2007, 6675: 66750D.
- Xu Yao, Huang Yifan, Chang Jun. Investigation of flexible element in passive athermalisation[J]. *Chinese J 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.
- Zhu Bin, Yang Yi, Pang Jinxiang, *et al.*. The development of integrated optomechanical simulation platform [J]. *Electronics Optics & Control*, 2012, 19(7): 75-79.
朱 彬, 羊 毅, 庞金祥, 等. 光机一体化仿真系统开发[J]. *电光与控制*, 2012, 19(7): 75-79.
- Liu Shaobin, Yang Hongbo. New data transform method for thermal/mechanical/optical integrated analysis interferogram interpolation[J]. *Journal of Applied Optics*, 2007, 28(5): 553-558.
刘勺斌, 杨洪波. 一种用于光机热集成分析的新方法: 干涉图插值法[J]. *应用光学*, 2007, 28(5): 553-558.
- Born M, Wolf E. Principles of optics[M]. Yang Jiasun, Transl. Beijing: Science Press, 1978: 182-190.

- 玻 恩, 沃尔夫. 光学原理[M]. 杨葭孙, 译. 北京: 科学出版社, 1978: 182-190.
- 12 Zhou Liansheng, Yu Xinfeng, Wu Zhihui, *et al.*. Analysis of influence factors of thermal aberrations based on the small lens system[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014, 51(9): 092204.
周连生, 于新峰, 吴志会, 等. 基于小物镜系统的热像差影响因素分析[J]. *激光与光电子学进展*, 2014, 51(9): 092204.
- 13 Zhang Ying, Ding Zhenmin, Zhao Huijie, *et al.*. Rigid-body displacement separation of optics in optical-structural-thermal integrated analysis[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(10): 2763-2767.
张 颖, 丁振敏, 赵慧洁, 等. 光机热集成分析中镜面刚体位移分离[J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(10): 2763-2767.
- 14 Coronato P A, Juergens R C. Transferring FEA results to optics codes with Zernikes: A review of techniques[C]. SPIE, 2003, 5176: 128-136.
- 15 Li Xianhui. Study on the integrated optomechanical analysis optical surface post-process system [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2004: 12-19.
李贤辉. 光机集成有限元分析光学面型后处理研究与实现[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2004: 12-19.
- 16 Yan Qingjin. Numerical analysis[M]. Beijing: Beihang University Press, 2000: 87-92.
颜庆津. 数值分析[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2000: 87-92.
- 17 Zhang Wenjing, Liu Wenguang, Liu Zejin. Dynamic data exchange between ZEMAX and MATLAB[J]. *Journal of Applied Optics*, 2008, 29(4): 553-556.
张文静, 刘文广, 刘泽金. ZEMAX 与 MATLAB 动态数据交换及其应用研究[J]. *应用光学*, 2008, 29(4): 553-556.