

文章编号: 0253-2239(2010)12-3568-06

# 高功率激光装置透镜误差对鬼像点位置的敏感性研究

张 燕<sup>1,2</sup> 张艳丽<sup>1</sup> 李小燕<sup>1,2</sup> 孙平平<sup>1,2</sup> 朱健强<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>中国科学院上海光学精密机械研究所高功率激光物理国家实验室, 上海 201800)  
<sup>2</sup>中国科学院研究生院, 北京 100049)

**摘要** 作为对高功率激光装置中鬼像的进一步深入研究,在原有鬼像研究的基础上,考虑单透镜鬼像对实际加工、安装中误差的敏感性。运用矩阵光学的方法,推导得到了鬼像点的近似焦距公式,以及由误差引起的鬼像点位置的增加量的一般性表达式。以神光II升级装置中终端光学组件的聚焦透镜参数为例对公式作数值分析,结果表明,透镜曲率半径和中心厚度误差对鬼像的影响较小,部分情况下可以忽略;而中心误差对鬼像的影响很明显,在工程设计中应予以重视。

**关键词** 光学设计;高功率激光装置;鬼像点;敏感性;加工和安装误差

中图分类号 O436 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20103012.3568

## Study on Sensitivities of Ghost Images to Lens Fabrication Errors in High Power Laser Facilities

Zhang Yan<sup>1,2</sup> Zhang Yanli<sup>1</sup> Li Xiaoyan<sup>1,2</sup> Sun Pingping<sup>1,2</sup> Zhu Jianqiang<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>National Laboratory on High Power Laser and Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)  
<sup>2</sup>Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract** As the further discussion on the ghost images in high-power laser facilities, the sensitivities of the ghost images focal positions to lens fabrication errors are analyzed based on the traditional studies. The general expression of ghost images focal length is deduced approximately, and the relation between shifts of ghost images focal position and errors of lens parameters are calculated based on the matrix optics. The numerical calculation results by taking the focal lens of the final optical assembly in SG-II upgraded system as example indicate that the ghost images are sensitive to the lens central errors, but insensitive to the errors of curvature radius and center thickness. It can offer the reference in optical designs.

**Key words** optical design; high-power laser facilities; ghost images focal position; sensitivities; lens practical errors

## 1 引 言

鬼像是激光在元件表面发生多次剩余反射后会聚而成的具有较高能量密度的小光斑。在高功率激光装置中,由于鬼像局部能量密度超过光学元件的损伤阈值而产生破坏,对系统和元件具有很大的潜

在危害;系统中鬼像的数量随着元件光学表面数量的增加和鬼像级数的增长成指数关系增长<sup>[1]</sup>,即系统越复杂,光学元件越多,鬼像就越复杂,越难控制。因此,确定鬼像的位置并避免其损伤光学元件成为激光驱动器光学设计中面临的重要问题之一<sup>[1~3]</sup>,

收稿日期: 2010-02-03; 收到修改稿日期: 2010-05-06

基金项目: 中以高功率激光技术国际合作研究项目(2010FB70490)资助课题。

作者简介: 张 燕(1982—),女,博士研究生,主要从事高功率激光装置杂散光分析和检测等方面的研究。

E-mail: zhangyan@siom.ac.cn

导师简介: 朱健强(1964—),男,博士,研究员,主要从事光学精密机械设计与制造工艺,高功率激光传输和光学仪器等方面的研究。E-mail: jqzhu@mail.shnc.ac.cn

而确定透镜鬼像的分布特点和变化趋势,对于控制和避免系统中鬼像损伤光学元件具有很重要的意义<sup>[4,5]</sup>。

系统中透镜的形状及其位置对于鬼像的形成和分布起决定性作用,相关的研究有很多,侧重分析不同的透镜类型在具体系统中的鬼像分布范围以及如何有效地避开鬼像点的危险区域<sup>[1~5]</sup>。但是对于像美国国家点火装置(NIF)这样复杂的系统,使用的都是大口径光学元件,其加工和安装难度大,元件的绝对误差较大,经多次反射后形成的鬼像极易偏离预定位置<sup>[3]</sup>。特别是神光Ⅱ的升级装置,空间布局有限,元件排布密集,预留空间较少,对于鬼像的分布和变化很敏感。因此,准确掌握鬼像点的分布情况和变化范围,预防鬼像引起的损伤,是保证神光Ⅱ升级装置安全高效运行的重要前提<sup>[5]</sup>。

综上所述,鬼像点的研究不仅要掌握鬼像点的分布范围和特点,更需要考虑实际加工安装误差引起的透镜鬼像点分布位置的变化,确定鬼像分布的敏感性。本文在已有透镜鬼像分布的研究基础上,进一步考虑单个球面透镜在实际加工、安装中存在的透镜参数误差(曲率半径和中心厚度误差)以及中心误差等主要误差对鬼像点分布位置的敏感性和变化趋势。

## 2 理论基础

已有的研究证明用矩阵光学的方法分析鬼像不仅可以简化分析过程,其线性的特点更易直观地反映鬼像的分布趋势<sup>[6,7]</sup>。根据矩阵光学的原理,光线经过透镜发生一次折射-反射传输后可以表示为

$$\begin{bmatrix} Y_j \\ \alpha_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & d_{j-1}/n_{j-1} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ (n_j - n_{j-1})/r_j & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} Y_{j-1} \\ \alpha_{j-1} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中 $Y_j, Y_{j-1}$ 表示光线垂直光轴的矢高, $\alpha_j, \alpha_{j-1}$ 表示光线与主光轴的夹角, $n_j, n_{j-1}$ 表示两种介质的折射率, $r_j$ 表示第 $j$ 个表面的曲率半径, $d$ 表示透镜的厚度。用 $r_1, r_2$ 表示单透镜两个曲面的曲率半径,依次按照光线通过每个光学表面的顺序对(1)式反复迭代,即可推导出不同阶数的鬼像点在光轴上的聚焦位置公式,用 $f_i = f(r_1, r_2, d)$  ( $i = 1, 2, \dots$ 表示鬼像的阶数)来表示,由于各公式形式复杂,文中就不具体列出鬼像点的聚焦公式。由于高功率激光装置中常用的大口径长焦距透镜都满足 $r_1, r_2 \gg d$ ,对公式 $f_i = f(r_1, r_2, d)$ 进行深入分析,省略 $d$ 后化简,

$f_i = f(r_1, r_2, d)$ 可近似表示为

$$\begin{aligned} \frac{1}{f_i} &= \frac{n(i+1)}{r_2} - \frac{n(i+1)-2}{r_1}, \quad (i \text{ is odd}) \\ \frac{1}{f_i} &= \frac{1-n(i+1)}{r_2} - \frac{1-n(i+1)}{r_1}. \quad (i \text{ is even}) \end{aligned} \quad (2)$$

这与薄透镜的焦点公式

$$\frac{1}{f} = (n-1)\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right), \quad (3)$$

有相似的形式,表明透镜各阶鬼像点可以等效为不同的薄透镜焦点公式。从(2)式可以清晰地看出单透镜鬼像点的聚焦位置 $f_i$ 的变化趋势,与两个曲面的曲率半径成正比,在数值上随着鬼像阶数 $i$ 的增加线性递减,即高阶鬼像点更靠近透镜表面。

但是实际加工、安装中,透镜存在着不可避免的误差,会影响其鬼像点的分布位置。为了更加准确地描述透镜加工、安装误差对鬼像的敏感性,从没有简化的公式 $f_i = f(r_1, r_2, d)$ 出发,考虑加工中存在的参数误差 $\Delta r_1, \Delta r_2, \Delta d$ 的影响。由于 $\Delta r_1, \Delta r_2 \ll r_1, r_2$ ,而从(2)式可知在取值范围内 $f_i$ 随透镜参数 $r_1, r_2, d$ 近似成线性关系,且连续可导,因此分别用 $r_1, r_2, d$ 的偏微分函数近似表示由 $\Delta r_1, \Delta r_2, \Delta d$ 引起的鬼像的偏移量( $r_1, r_2, d$ 均为定值):

$$\begin{cases} \Delta f_i(\Delta r_1) = [\partial f_i(r_1, r_2, d)/\partial r_1] \Delta r_1, \\ \Delta f_i(\Delta r_2) = [\partial f_i(r_1, r_2, d)/\partial r_2] \Delta r_2, \\ \Delta f_i(\Delta d) = [\partial f_i(r_1, r_2, d)/\partial d] \Delta d. \end{cases} \quad (4)$$

则综合考虑透镜参数误差 $\Delta r_1, \Delta r_2, \Delta d$ 引起的鬼像点的偏移量的全微分方程可表示为

$$\Delta f_i(r_1, r_2, d) = \left[ \frac{\partial f_i(r_1, r_2, d)}{\partial r_1} \right] \Delta r_1 + \left[ \frac{\partial f_i(r_1, r_2, d)}{\partial r_2} \right] \Delta r_2 + \left[ \frac{\partial f_i(r_1, r_2, d)}{\partial d} \right] \Delta d. \quad (5)$$

此外,加工、安装中还存在另一类与鬼像点密切相关的误差——中心误差,包括偏心误差和对心误差,如图1所示。中心误差改变了系统的参考光轴,造成实际光线的斜入射,需要在原有鬼像分析的基础上引入坐标旋转变换<sup>[8]</sup>,分析时以第一个面的主光轴为基准,对第二个面进行坐标的平移旋转变换再进行多次反射-折射,计算过程较复杂。最后,求得光线斜入射时的鬼像点位置,再次投影到图1所示的原参考光轴上,才是实际上鬼像点的位置,用 $(f', H)$ 表示, $f'$ 表示在参考光轴上的位置, $H$ 表示垂直于参考光轴的矢高。即中心误差不仅使鬼像点产生轴向的偏移,还会引起鬼像点在垂直主光轴方向的偏离 $H$ 。

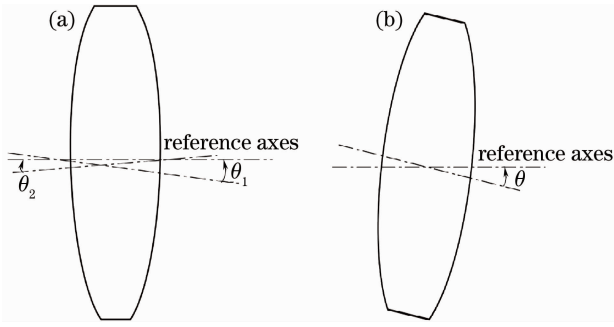


图1 透镜的中心误差。(a)对心误差,(b)偏心误差

Fig.1 Central errors in lens. (a) centric error, (b) eccentric error

### 3 数值计算分析

图2为理想情况下神光II升级装置靶场终端光学组件中的鬼像分布图。主激光束经过多次放大后通过图2的聚焦透镜会聚于真空靶室,由于靶场空

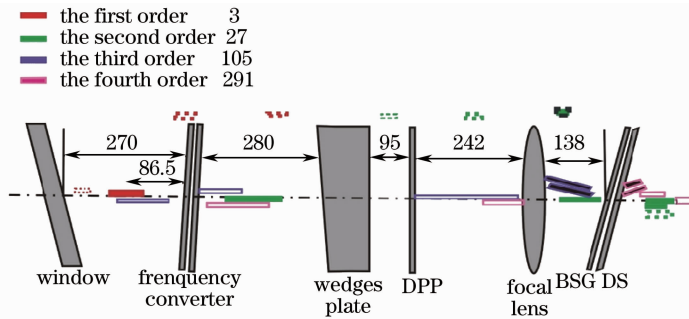


图2 神光II升级装置的终端光学组件排布及鬼像的分布

Fig.2 Ghost images distributions of final optical assembly in SG II

表1 各种透镜及其参数

Table 1 Three types of lenses and parameters

$f=1900$ mm, $d=50$ mm	Convex lens	Meniscus lens	Plano-convex
Curvature radius $r_1$ /mm	2466	673	950
Curvature radius $r_2$ /mm	-1534.9	2251	$\infty$

按照加工、安装误差对鬼像的影响分为两类讨论:一类是加工误差引起的透镜曲率半径和中心厚度误差 $\Delta r_1, \Delta r_2, \Delta d$ 对鬼像产生的轴向偏移;另一类是加工安装中透镜的中心偏差 $\theta$ 引起的鬼像点的离轴偏移。

#### 3.1 鬼像点的轴向偏移量

##### 3.1.1 各参数误差引起的偏移量

引起鬼像点轴向偏移的主要误差为曲率半径误差 $\Delta r$ (也叫面形误差,加工中用光圈数 $N$ 表示,可

间尺寸的限制,以及考虑到聚焦后的功率密度,聚焦透镜的焦距不可能设计得太长,这导致其低阶鬼像具备的能量密度更高,终端光学组件对鬼像的要求更高<sup>[5]</sup>。

由图2可知,鬼像点的位置分布复杂多变,而且涉及多个变量及其高次项,表达式形式复杂,很难用解析的方法描述。按照以往高功率激光装置中对鬼像的分析经验来看,最大需要考虑到4阶鬼像点的分布情况<sup>[3]</sup>,因此,用数值计算的方法分别分析由(4)式所描述的透镜参数误差对鬼像点的敏感性。其中透镜参数以神光II升级装置中终端光学组件的聚焦透镜参数(焦距 $f=1900$  mm,口径 $D=380$  mm,中心厚度 $d=50$  mm)为例。由于同一焦距的不同类型透镜,曲率半径的变化很大,透镜的鬼像点位置也截然不同。为了简化分析过程,根据(3)式透镜焦距公式,将透镜按照常用类型分为:双凸透镜、弯月透镜和平凸透镜3类,其详细参数如表1所列。

以互相换算)和中心厚度误差 $\Delta d$ <sup>[9]</sup>。参照光学设计中零件加工误差的最大值,高功率激光装置中使用的大口径长焦距透镜的相对曲率半径误差为 $\Delta r/r=0.005\%$ <sup>[10]</sup>,则对于聚焦透镜的绝对误差 $\Delta r < \pm 0.5$  mm;中心厚度误差也满足 $\Delta d < 0.5$  mm。考虑到大曲率半径透镜加工精度较低的实际情况,数值计算中将误差范围扩大一倍,分别计算 $\Delta r_{1,2}, \Delta d \leq \pm 1$  mm时,不同透镜1~4阶鬼像的偏离量 $\Delta f_i(\Delta r_1), \Delta f_i(\Delta r_2)$ 和 $\Delta f_i(\Delta d)$ 与加工误差 $\Delta r_1, \Delta r_2, \Delta d$ 的关系,如图3~5所示。

从图3~5可以看出,在相同高度的纵坐标下,随着鬼像点阶数 $i$ 的增加,鬼像的偏移量逐级增大(弯月形透镜除外);且曲率半径误差和中心厚度误差对鬼像的影响趋势是相反的:曲率半径误差的增加使鬼像点远离透镜表面而中心厚度误差的增加却使鬼像更靠近透镜表面。此外,不同透镜类型对 $\Delta r_1, \Delta r_2$ 和 $\Delta d$ 的敏感度不同,图3所示的双凸透镜

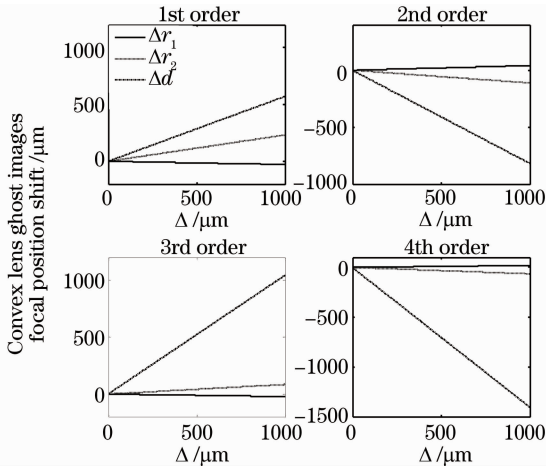


图 3 双凸透镜 1~4 阶鬼像点聚焦位置偏移量  
Fig. 3 1st~4th order ghost images focal position shifts of convex lens

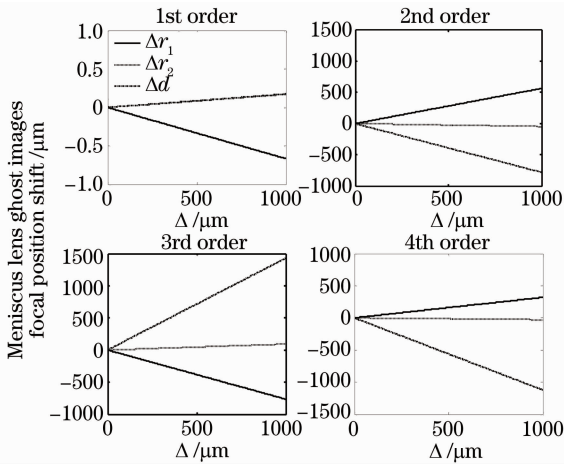


图 4 弯月透镜 1~4 阶鬼像点聚焦位置偏移量  
Fig. 4 1st~4th order ghost images focal position shifts of meniscus lens

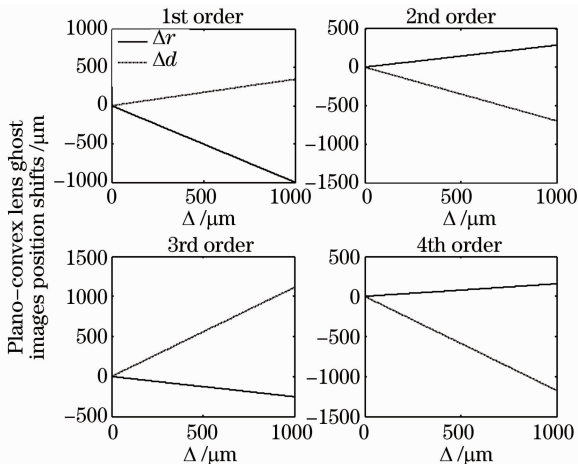


图 5 平凸透镜 1~4 阶鬼像点聚焦位置偏移量  
Fig. 5 1st~4th order ghost images focal position shifts of plano-convex lens

对中心厚度较敏感；图 4 所示弯月透镜对三项误差都敏感，且变化范围很大，特别是一阶鬼像点对误差很敏感；图 5 所示的平凸透镜对曲率半径和中心厚度误差都较敏感，其中对中心厚度的敏感性更大。除了弯月透镜一阶鬼像的偏移量很大(50 mm 左右)，其他情况鬼像点的最大偏移量在 1 mm(图中为 1000 μm)左右，相对较小。对于弯月透镜一阶鬼像点的偏移量，在设计和使用中应特别引起注意。

3.1.2 轴上偏移量的综合分析

实际中加工误差引起的鬼像偏移量是多种误差产生的综合结果，如(5)式所示。取上述计算中平凸透镜的一组数据为例，数值地考察透镜参数误差引起的鬼像点偏移量的大小，其中透镜参数偏差取中等程度值： $\Delta r = \pm 0.5 \text{ mm}$ ， $\Delta d = \pm 0.1 \text{ mm}$  鬼像点的理想位置和误差引起的偏移量如表 2 所示。

表 2 平凸透镜在  $\Delta r = \pm 0.5 \text{ mm}$ ， $\Delta d = \pm 0.1 \text{ mm}$  时 1~4 阶鬼像的具体位置和偏移量

Table 2 1st~4th order ghost images focal position and position shifts when plano-convex lens errors are  $\Delta r = \pm 0.5 \text{ mm}$ ， $\Delta d = \pm 0.1 \text{ mm}$

Plano-convex lens	1st order /mm	2nd order /mm	3rd order /mm	4th order /mm
$f_i(r_1, r_2, d)$	-939.8936	250.5972	-205.6394	113.4319
$\Delta f_i(\Delta r_1)$	$\pm 0.5001$	$\pm 0.1429$	$\pm 0.1259$	$\pm 0.0785$
$\Delta f_i(\Delta d)$	$\pm 0.1727$	$\pm 0.3478$	$\pm 0.5558$	$\pm 0.5859$
Total shifts	$\pm 0.6728$	$\pm 0.4907$	$\pm 0.6817$	$\pm 0.6644$

从表 2 中可以看出，透镜鬼像点的最大偏移量为  $\pm 0.6817 \text{ mm}$ ，则偏移区间为 1 mm 左右，对于高功率激光装置而言，并不明显，可以忽略。但是对于像图 2 所示的终端光学组件这样元件空间排布较紧密的系统来说，这样的偏移量会影响聚焦透镜的调焦范围<sup>[5]</sup>，因此设计中应该考虑并控制加工精度。

3.2 鬼像点的离轴偏移

由于中心误差的种类较多，且各自的分析方法相对独立，因此数值计算只针对图 1(a)所示的最复杂的情况进行，图 1(b)所示的情况计算过程与图 1(a)类似，只是坐标旋转变换的次数较少，因此影响也比图 1(a)所示的情况小。两个曲面相对于参考光轴的中心误差分别为  $\theta_1, \theta_2$ ，按照表 1 所列的三种透镜分别独立计算当误差满足  $0 \leq \theta_1, \theta_2 \leq 1^\circ$  时，鬼像点相对于参考光轴的分布位置( $f', H$ )，具体关系如图 6~8 所示。

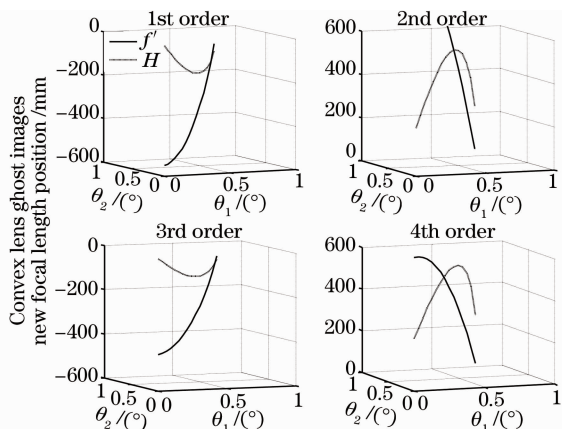


图6 双凸透镜在中心误差为  $0 \leq \theta_1, \theta_2 \leq 1^\circ$  范围内的 1~4 阶鬼像位置

Fig. 6 Ghost images focal position of 1th~4th order for convex lens when the central errors under  $(0, 1^\circ)$

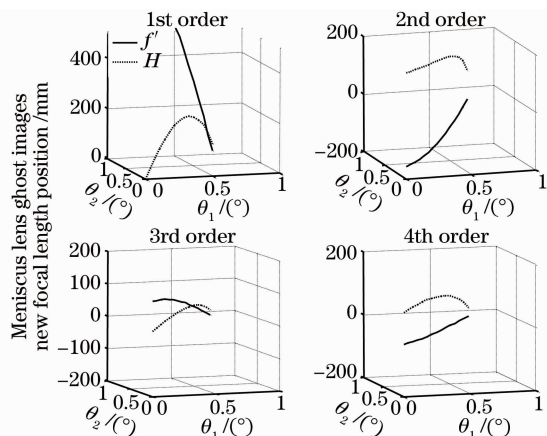


图7 弯月透镜中心误差在  $0 \leq \theta_1, \theta_2 \leq 1^\circ$  范围内的 1~4 阶鬼像位置

Fig. 7 Ghost images focal position of 1th~4th order for meniscus lens when the central errors under  $(0, 1^\circ)$

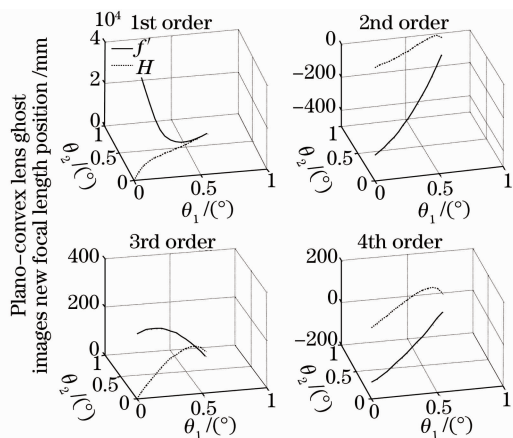


图8 平凸透镜中心误差在  $0 \leq \theta_1, \theta_2 \leq 1^\circ$  范围内的 1~4 阶鬼像位置

Fig. 8 Ghost images focal position of 1th~4th order for plano-convex lens when the central errors under  $(0, 1^\circ)$

从图6~8中可以看出,中心误差对各种透镜的影响大小和变化趋势都不同。 $\theta=0$ 是透镜不存在中心误差时鬼像点的位置,随着中心误差的增加,鬼像不仅偏离参考光轴,产生垂直于光轴的矢高,而且在参考光轴的方向上也产生了较大的偏移,导致鬼像点更靠近透镜表面。随着中心误差的增大,偏移量迅速增大,最大的偏移量超过100 mm,这表明鬼像对透镜的中心误差很敏感。

此外,安装调试中还存在着另一种中心误差,使透镜的主光轴偏离参考光轴,引起鬼像离轴偏移。由于这种误差不影响透镜两个曲面的同轴性,只相当于平移了透镜的主光轴,计算分析过程不需要进行坐标的旋转变换,因而鬼像的偏移量也较小,文中不做进一步详细的计算分析。

## 4 结 论

通过对实际加工、安装误差对单透镜鬼像点的分布位置的敏感性的数值分析得出

1)单透镜曲率半径和中心厚度误差对鬼像点不敏感,偏移量在1 mm左右。但是对于元件排布精度要求较高的系统,设计中应综合考虑多种误差产生的累积效应,控制加工精度,避免产生不必要的损失。

2)单透镜加工、安装中产生的中心误差对鬼像点的位置很敏感。中心误差不仅改变了鬼像点的轴上位置,还引起鬼像点的离轴偏移,极有可能造成系统的意外损伤。因此,在高功率激光驱动器的设计中,应精确控制透镜的加工、安装的中心误差,减少不必要的损伤。

此外,透镜在安装中还存在其他的空间位置误差,也会影响鬼像点的实际分布范围;并且,鬼像点的破坏性除了与反射次数有关,还与鬼像点所在位置的能量密度密切相关;考虑实际中多次反射的光束在空间传输中可能产生干涉衍射等情况,会对鬼像点的能量进行重新分配。诸如此类的问题还需要进一步的分析,才能更有效地控制系统中的鬼像。

致谢 感谢祝沛、陈卫华在光学设计和加工方面给予的帮助。

## 参 考 文 献

- 1 H. Benard, G. Mathieu, N. Ferriou *et al.*. Simulation and analysis of ghost images for the mega joule laser[C]. *SPIE*, 1999, **3492**: 321~327
- 2 Li Yinzhu, Li Liangyu, Dai Yaping *et al.*. Ghost reflection

- analysis for the high power laser system[J]. *Chinese J. Lasers*, 2001, **28**(8): 677~680
- 李银柱, 李良钰, 戴亚平等. 高功率激光装置中的鬼点反射分析[J]. *中国激光*, 2001, **28**(8): 677~680
- 3 J. L. Hendrix, J. Schweyen, J. Rowe *et al.*. Ghost analysis visualization techniques for complex systems examples from the NIF final optics assembly[C]. *SPIE*, 1999, **3492**: 306~320
- 4 R. Edward, John, L. Miller *et al.*. Ghost reflection analysis for the main laser of the national ignition facility[C]. *SPIE*, 1998, **3428**: 748~753
- 5 Qiao Zhanfeng, Lu Xingqiang, Zhao Dongfeng *et al.*. Arrangement design of the final optics assembly for the SG-II upgrading laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(9): 1328~1331
- 乔战峰, 卢兴强, 赵东峰等. 神光升级装置终端光学组件的排布设计[J]. *中国激光*, 2008, **35**(9): 1328~1331
- 6 Liu Hongjie, Liu Lanqin, Su Jinqin *et al.*. Lens design based on ghost image and aberration analysis in high power laser facility [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(5): 976~980
- 刘红婕, 刘兰琴, 粟敬钦等. 基于鬼像和像差分析的高功率激光装置透镜设计[J]. *光学学报*, 2008, **28**(5): 976~980
- 7 Richard Dittion. *Modern Geometrical Optics*[M]. Zhan Hanjing Transl. Hunan: Hunan University Press, 2004. 112~117
- 理查德·迪特恩. *现代几何光学*[M]. 詹涵菁译. 长沙: 湖南大学出版社, 2004. 112~117
- 8 R. Jimthelanky. *Lens Design Fundamental*[M]. Liang Weisheng Transl. Beijing: China Machine Press, 1985. 8~10
- 金斯莱克. *透镜设计基础*[M]. 梁伟声译. 北京: 机械工业出版社, 1985. 8~10
- 9 Lin Youbao. *Introductions to Optical Design* [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1960. 178~181
- 林友苞. *光学设计导论*[M]. 北京: 国防工业出版社, 1960. 178~181
- 10 Li Shixian, Zheng Yuenian. *Manual of Optical Design* [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1980. 100~128
- 李士贤, 郑乐年. *光学设计手册*[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1980. 100~128