

文章编号: 0253-2239(2008)05-0976-05

# 基于鬼像和像差分析的高功率激光装置透镜设计

刘红婕 刘兰琴 粟敬钦 胡东霞 周 维 赵军普 王文义 莫 磊  
蒋新颖 蒋学军 张 昆 朱启华 於海武 景 峰  
(中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900)

**摘要** 为了设计能够满足高功率固体激光装置需求的空间滤波器透镜,采用矩阵光学方法,分析光束经过单透镜传输时剩余反射形成各阶鬼像的过程,得到鬼像位置与透镜曲率半径的关系式。该关系式表明,透镜的曲率半径设计可以控制鬼像所在的区域。根据高功率激光装置光路排布的特点简化鬼像分析,利用自行开发的鬼像追迹软件分析了主放大级鬼像分布特点。通过改变透镜的曲率半径和倾斜透镜这两种方式,基于鬼像规避和像差最小化两种原则,最终确定主放大级透镜曲率半径的最优选择为 1:3 弯月型,凸面朝向光学元件集中的方向。该方法可普遍应用于指导高通量复杂光学系统的透镜设计。

**关键词** 几何光学; 透镜设计; 鬼像; 像差; 多程放大; 高功率固体激光装置

中图分类号 O435 文献标识码 A

## Lens Design Based on Ghost Image and Aberration Analysis in High-Power Laser Facility

Liu Hongjie Liu Lanqin Su Jingqin Hu Dongxia Zhou Wei Zhao Junpu Wang Wenyi  
Mo Lei Jiang Xinying Jiang Xuejun Zhang Kun Zhu Qihua Yu Haiwu Jing Feng  
(Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China)

**Abstract** By the method of matrix optics, the formation process of ghost images from the residual reflection when beam passes through a single lens is analyzed and the relation between the localities of the ghost images and the curvature radius of the lens is achieved. From the relation, the localities of the ghost images can be determined by designing the curvature radius of the lens. The ghost images analysis is simplified considering the distribution characteristics of the beam path in high-power laser facility, based on which the distribution of the ghost images in the main amplification section is analyzed by the special software. By changing the curvature radius or tilting the lens, with the principles of avoiding the ghost images and minimizing the aberration, the curvature radius of the lens used in the main amplification section is selected as 1:3 with a shape of crescent and convexity in the direction of more concentrated optics. The method proposed can also be applied to the lens design in high-flux complicated optics system.

**Key words** geometrical optics; lens design; ghost image; optical aberration; multi-pass amplification; high-power solid-state laser facility

### 1 引 言

新一代的高功率激光驱动装置都采用离轴多程放大构型,具有代表性的是美国 Lawrence Livermore 国家实验室(LLNL)的点火装置(NIF)<sup>[1]</sup>,采用主放大级四程放大和助推级二程放大的构型。由于高功率激光装置中传输光束的能量非常高,输出为千焦耳

量级。只要 0.1% 的剩余反射都可能有几个焦耳的能量,经过传输聚焦而形成鬼像,破坏其附近的光学元件,或是击穿空气致使能量被等离子体散射或吸收,影响光束质量<sup>[2~6]</sup>。而实际上光学元件的增透膜还达不到这个要求。对离轴多程放大构型的激光装置来说,由于光束多次通过光学元件和放大器,鬼

收稿日期: 2007-08-30; 收到修改稿日期: 2008-01-05

基金项目: 国防科技重点实验室基金资助项目。

作者简介: 刘红婕(1978-),女,助理研究员,硕士,主要从事高功率激光技术方面的研究。

E-mail: hongjie3713@163.com

像个数和能量都会大大增多,鬼像分析要比单程激光装置复杂得多。规避鬼像需要选择合理的透镜参量以及倾斜透镜一定的角度<sup>[7,8]</sup>,而这些又对系统像差有影响,并且离轴的结构也会增大系统的固有像差。而为了满足物理实验需要,高功率固体激光驱动装置对光束控制提出无旁瓣小焦斑进洞的物理目标,要求基频光远场焦斑质量非常好<sup>[9,10]</sup>。系统的固有像差是影响输出光束远场焦斑主要因素之一<sup>[11~13]</sup>。因此考虑鬼像和像差两种因素,设计光学元件的曲率半径对降低系统的固有像差,提高远场光束质量是非常有意义的。

本文以国内正在建造的最大的高功率激光装置为例,通过像差分析和鬼像分析,以降低系统的固有像差为目标,设计了其主放大级透镜的曲率半径。该设计方法具有普遍适用性,可用于高通量复杂光学系统中透镜的设计。

## 2 鬼像的形成机理

单透镜示意鬼像的形成过程,如图 1。

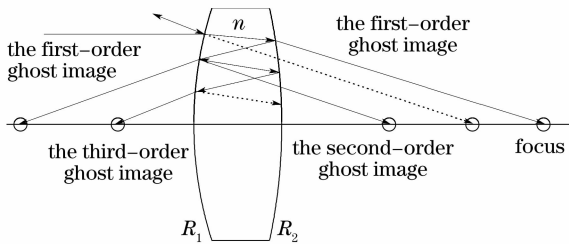


图 1 单透镜鬼像形成过程示意图

Fig. 1 Ghost image formation by single lens

$R_1$  面折射、 $R_2$  面反射和  $R_1$  面折射,相当于透镜+凹(凸、平)面镜+透镜的组合。由矩阵光学可以得到一阶实鬼像的焦距  $f_1$  :

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{n-1}{R_1} & n \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ \frac{2}{R_2} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ \frac{1-n}{nR_1} & \frac{1}{n} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ \frac{2n}{R_2} - \frac{2(n-1)}{R_1} & 1 \end{pmatrix}, \quad (1)$$

$$-\frac{1}{f_1} = \frac{2n}{R_2} - \frac{2(n-1)}{R_1}, \quad (2)$$

同样图 1 中二阶鬼像和三阶鬼像的焦距  $f_2, f_3$  分别为:

$$-\frac{1}{f_2} = \frac{3n-1}{R_2} - \frac{3n-1}{R_1}, \quad (3)$$

$$-\frac{1}{f_3} = \frac{4n}{R_2} - \frac{4n-2}{R_1}. \quad (4)$$

曲率半径符号规定:与光束传输方向相同为正,与光束传输方向相反为负。

从图 1 可以看出,对单透镜来说,奇阶次实鬼像在入射光一侧,偶阶次实鬼像在出射光一侧,若是相反,则为虚鬼像;没有增益介质时,鬼像阶次越高能量越低,像差较大,峰值功率会远低于低阶鬼像;对单透镜来说,鬼像阶次越高距透镜越近,对多个透镜的组合这个结论并不成立。分析(2)式、(3)式、(4)式,透镜的鬼像分布与两曲面的曲率半径密切相关,根据系统的特点设计透镜的曲率半径,可以控制鬼像到对光束传输影响较小的区域。

多个透镜的鬼像形成过程与单透镜类似,由于透镜间距是不可忽略的,并且剩余反射面的个数也大大增加,得到解析结果非常不容易。利用鬼像形成机理编制的 Ghost 追迹软件,可以数值分析各种复杂光路的鬼像分布。

## 3 光路原理及鬼像分析的简化

高功率激光装置主要有前端、预放、主放、靶场、测量、能源及其它辅助系统组成,其中主放光路占整个光路的绝大部分,是高功率固体激光装置最关键的组成部分。如图 2 为国内正在建造的最大的高功率激光装置主放光路排布的方块图,整个主放光路又可以分为主放大级、助推级和反转器三部分,中间由空间滤波器(腔内空间滤波器 CSF 和传输空间滤波器 TSF)连接。光束从 CSF 注入,经过主放大器 main amp. 一次放大后传输到腔镜 CM。由 CM 反射经 main amp. 二次放大,通过 CSF 到助推放大器 booster amp. 一次放大,继续传输到 TSF。在 TSF 小孔板 PA2 后由反射镜导出到反转器,经过反转器各元件后再注入 TSF。经过 booster amp. 二次放大后,通过 CSF 到主放大级两次放大,再经过 booster amp. 第三次放大后由 TSF 输出,整个装置采取主放大级四程加助推级三程的放大构型,最终输出能量达到 7500 J/3 ns。

对于光学元件排布密集的放大器侧,光路中可以允许能量较低不会对光学元件造成危害的鬼像存在。即使不在光学元件上聚焦,能量较高的鬼光束传输到光学元件位置时也可能已经超出光学元件的损伤阈值,需要采取一定的措施,在形成破坏性鬼光束之前将其规避到光路外。而光学元件很少的空间滤波器侧,则给鬼像留有足够的空间。根据光路的这个特点,在设计透镜时主要考虑尽量降低放大器侧鬼像的个数,而对空间滤波器侧的限制较少。

由于空间滤波器的小孔板阻隔绝大部分鬼光束的继续传输,将整个激光光路以小孔为间隔分为七个部分,对每个部分进行鬼像分析,大大简化了装置的鬼像分析。对可能通过空间滤波器小孔继续传输的鬼光束可以通过倾斜透镜的方式将其规避到主光路外,由于这种鬼光束传输距离非常长,只需要一个很小的角度。

图2中主放大级主要由透镜L1,片状放大器,晶体大开关,偏振片和反射镜CM组成,其中片状

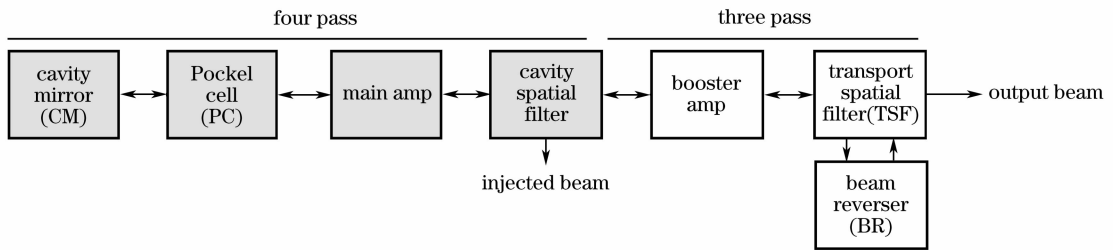


图2 高功率激光装置主放光路排布方块图

Fig. 2 Block diagram of main laser subassemblies in high-power laser facility

#### 4 鬼像分析和透镜设计

透镜曲率半径改变会改变像差,倾斜透镜也会引入像差,协调改变透镜曲率半径的像差和规避鬼像倾斜透镜引入的像差,优化到两者引入的像差最小,是降低全系统固有像差的关键。

尽量减少放大器侧鬼像的个数需透镜的两曲率半径符号相同,且凸面朝向放大器。透镜材料折射率一般约为1.5,这个折射率下曲率半径为1:3的弯月透镜在放大器侧的一阶鬼像焦距接近于无穷大。

以该高功率激光装置的主放大级透镜L1为例做鬼像分析和透镜设计。L1焦距为12000 mm,设计几何尺寸为:440 mm×440 mm×50 mm,曲率半径参量如表1。除了必须分析透镜最小像差、最小倾斜两种极端情况外,还选择了两曲率半径取1:2弯月和1:4弯月的情况进行鬼像和像差分析。利用Ghost软件分析了这几种类型透镜的鬼像分布情况,分析结果如图3。图3中显示了能量大于1 mJ、二阶以下、透镜曲率半径为最小像差、1:2弯月、1:3弯月和1:4弯月时的鬼像分布,分别对应于图中△、○、◇和□标识点。图中的表格还给出了这几种曲率半径下鬼像的能量和具体分布位置。其中★和\*标识的鬼像是处在光学元件附近或是表面上,对光学元件存在威胁的鬼像。★标识的鬼像是四种类型透镜都不可避免的二次鬼像,位置基本相同,能量较小,约几个mJ,如果不直接聚焦在光学元件表面上

放大器是由窗口和以布儒斯特角倾斜放置的钹玻璃组成。光路中除了透镜外都是平板元件,为了尽可能的减少鬼像的个数,除了钹玻璃和偏振片为必须倾斜放置外,其它透射元件一般也都倾斜小角度放置。由于光路很长(十几米到几十米),倾斜的角度不需要太大,这样就只需考虑透镜面剩余反射和反射镜对鬼像形成的作用,进一步简化了主放大级光路的鬼像分析。

就不会对光束传输造成任何影响。\*标识的鬼像能量较大,几十甚至几百个J,聚焦在光学元件附近都可能会造成光学元件损伤,在空气中还可能引起等离子体溅射,影响传输光束的光学质量,因此必须通过倾斜透镜将其规避出光路。1:2弯月和1:3弯月类型的透镜没有此类鬼像。

表1 几种类型透镜的曲率半径参量

Table 1 Parameters of curvature radius for different types of lens

Radius of Curvature	Minimum Aberration	1:2 Meniscus	1:3 Meniscus	1:4 Meniscus
$R_1$ /mm	7056.09	3057.65	4083.11	4566.99
$R_2$ /mm	-43944.16	6115.30	12373.06	18267.96

Ghost软件能直接给出鬼光束传输路径和纵向位置,但无法给出横向位置。商用软件Zemax可以给出鬼像的横向位置,但分析过程非常繁琐,并且需要清楚剩余反射光形成鬼像的路径。两种方法同时使用,先利用Ghost软件得到鬼像的纵向位置和剩余反射光束的传输路径,再利用Zemax进一步分析可能存在有危害的鬼像,以及规避鬼像需要透镜倾斜的角度。同时Zemax分析的结果还验证了Ghost分析结果的准确性。

利用Zemax可以得到曲率半径为最小像差和1:4弯月的透镜需要分别倾斜 $1.5^\circ$ 和 $0.45^\circ$ 时才能将鬼像规避到主光路外。

针对上面鬼像分析的几种透镜类型进行像差分

析。如图 4 示,分别为正入射时最小像差、1:2 弯月、1:3 弯月和 1:4 弯月类型透镜的波像差分布图,以及规避鬼像状态时最小像差透镜倾斜 1.5° 和 1:4 弯月透镜倾斜 0.45° 的波像差分布图。通过比较可以看出,尽管最小像差透镜在正入射时引入的像差最小,但由于规避鬼像所需倾斜的角度较大,使用状态下

的像差非常大;同样,需要倾斜 0.45° 的 1:4 弯月透镜的结果也是如此;1:2 弯月和 1:3 弯月型透镜基本不需要倾斜,但 1:2 弯月透镜的像差比较大。综合比较可知,1:3 弯月型透镜在主放大级规避鬼像所需要的状态下是像差最小的,因此我们选择 1:3 弯月形透镜作为主放大级 L1 透镜的类型。

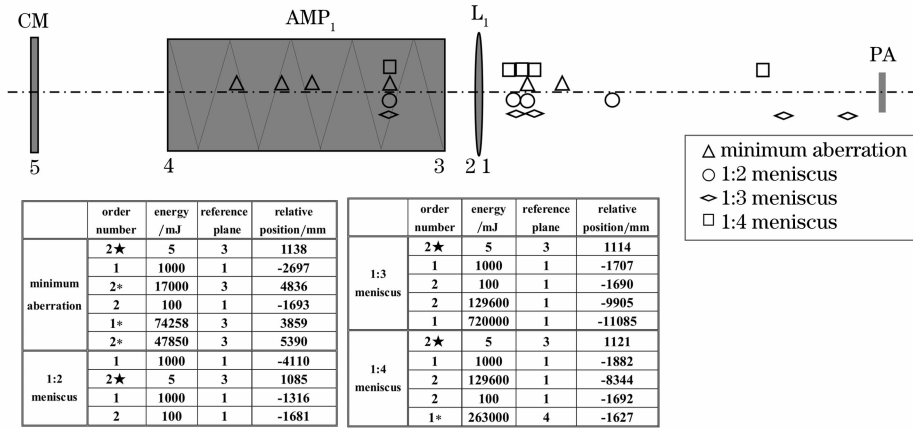


图 3 不同类型透镜时主放大级的鬼像分布

Fig. 3 Ghost image distribution in the master amplifier for different types of lens

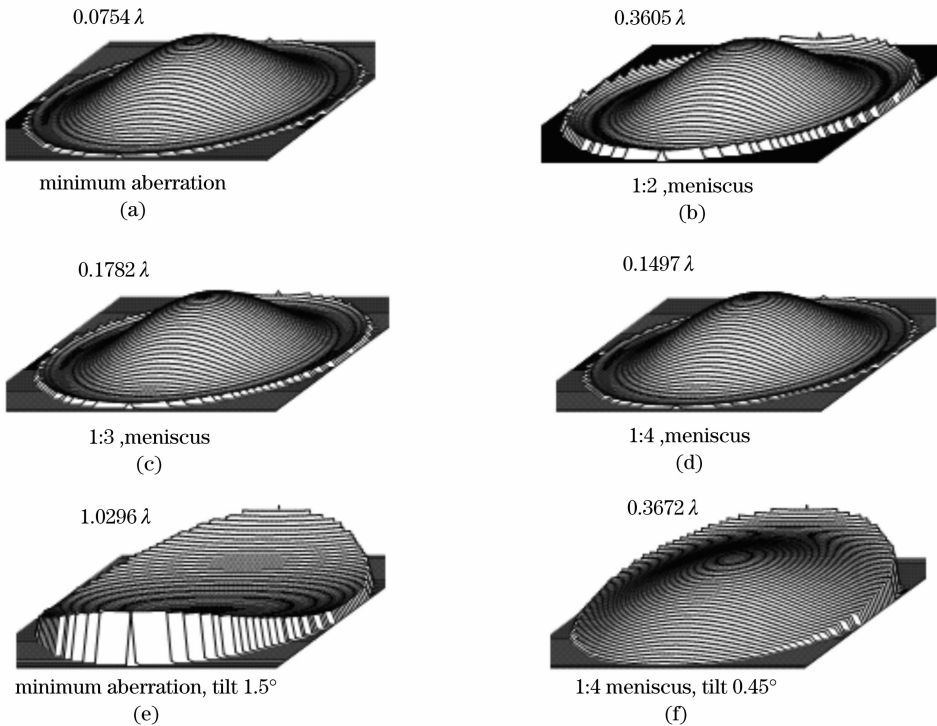


图 4 不同类型透镜在各种状态时波像差分布

Fig. 4 Wave aberration distribution of different types of lens on the conditions of tilt or non-tilt

由图 3 可以看出,1:3 弯月透镜在放大器内存在一个二阶鬼像,虽然能量非常低,但如果刚好聚焦在放大器片上,仍具有一定的威胁。为了确保光学元

件的安全,用 Zemax 追迹了这个鬼像在放大器中的确切位置,如图 5。由图 5 可以看出,鬼像刚好位于两个放大器片之间,在放大器片上的功率密度远远

低于光学元件的损伤阈值,并且还有一定的移动空间(前后约 200 mm)。

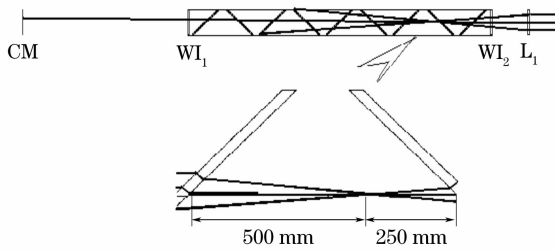


图 5 Zemax 追迹 1:3 弯月型透镜在放大器中的鬼像位置

Fig. 5 Position of the ghost image in amplifier from 1:3 meniscus lens with Zemax tracing

## 5 结 论

对国内大型高功率固体激光装置,采取倾斜平板元件的方法降低形成鬼像的剩余反射面个数,从而大大减少了鬼像的个数。并以主放大级透镜为例,结合鬼像形成机理,分析了不同类型透镜的鬼像分布以及规避鬼像所需倾斜透镜的角度,并对各种类型透镜做了像差分析。最终通过协调规避鬼像和像差的关系,确定了该装置主放大级透镜应选择为 1:3 弯月型透镜。该方法可以用于指导高通量复杂光学系统的透镜设计。

## 参 考 文 献

- 1 W. J. Hogan, J. A. Paisner. Progress in the title I design of the National Ignition Facility[R]. UCRL-JC-123560, 1996
- 2 Li Yinzhu, Li Liangyu, Dai Yaping *et al.*. Ghost reflection analysis for the high power laser system[J]. *Chin. J. Lasers*, 2001, **A28**(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, **A28**(8): 677~680
- 3 Deng Shitao, Li Xiaotong, Cen Zhaofeng *et al.*. Mitigating damage of the ghost in high power laser facilities by real-ray trace [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(5): 585~588

- 邓诗涛,李晓彤,岑兆丰等. 高功率激光装置中鬼像的模拟应用实际光线追迹法[J]. *光学学报*, 2005, **25**(5): 585~588
- 4 Feng Guoying, Chen Jianguo, Ma Zairu *et al.*. Locating the near axial ghosts in the high power laser system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(5): 632~635  
冯国英,陈建国,马再如等. 高功率激光系统中近轴鬼像点的寻找[J]. *光学学报*, 2003, **23**(5): 632~635
- 5 Ma Zairu, Liu Wenbing, Feng Guoying *et al.*. The position formulations of the low-order ghost images in the high power laser system[J]. *Laser J.*, 2003, **23**(4): 55~58  
马再如,刘文兵,冯国英等. 高功率激光系统的低阶鬼点位置公式[J]. *激光杂志*, 2003, **23**(4): 55~58
- 6 Wang Fang, Zhu Qihua, Zhang Qingquan *et al.*. The relations between the first-order ghost image and the focal length in the high power laser facility[J]. *Laser Technology*, 2005, **29**(3): 334~336  
王方,朱启华,张清泉等. 高功率激光装置中透镜一阶鬼点形成规律分析[J]. *激光技术*, 2005, **29**(3): 334~336
- 7 Feng Guoying, Chen Jianguo, Cao Chong *et al.*. Matrix method for locating the off-axial ghost points and lines in high power laser system[J]. *Chin. J. Lasers*, 2003, **30**(11): 989~992  
冯国英,陈建国,曹冲等. 寻找激光系统中离轴鬼点和鬼线的矩阵方法[J]. *中国激光*, 2003, **30**(11): 989~992
- 8 R. E. English, J. L. Miller, J. Schweyrn. Ghost reflection analysis for the main laser of NIF[R]. UCRL-LC-129757, 1998
- 9 Du Xiangwan. Factors for evaluating beam quality of a real high power laser on the target surface in far field[J]. *Chin. J. Lasers*, 1997, **A24**(4): 327~332  
杜祥琬. 实际强激光远场靶面上光束质量的评价因素[J]. *中国激光*, 1997, **A24**(4): 327~332
- 10 T. S. Perry, B. H. wilde. NIF system-design requirements for nuclear-weapons physics experiment [R]. UCRL-ID-120738, 1995
- 11 W. H. William, J. M. Auerbach, M. A. Henesian *et al.*. Modeling characterization of the National Ignition Facility focal spot[C]. *Proc. SPIE*, 1998, **3264**: 94~104
- 12 Liu Hongjie, Jing Feng, Hu Dongxia *et al.*. Numerical analysis of  $1\omega$  far-field in high power laser system[J]. *Chin. J. Lasers*, 2006, **33**(Suppl.): 272~275  
刘红婕,景峰,胡东霞等. 高功率激光装置基频光远场的模拟分析[J]. *中国激光*, 2006, **33**(增刊): 272~275
- 13 Liu Hongjie, Jing Feng, Zuo Yanlei *et al.*. Relation between wavefront power spectral density and wings of focal spot[J]. *Chin. J. Lasers*, 2006, **33**(4): 504~508  
刘红婕,景峰,左言磊等. 激光波前功率谱密度与焦斑旁瓣的关系[J]. *中国激光*, 2006, **33**(4): 504~508