

文章编号 1674-2915(2011)01-0066-06

# 高功率准分子激光主振荡功率放大系统 光学元件的稳定性

沈炎龙, 黄珂, 马连英, 郑国鑫, 王大辉

(西北核技术研究所, 激光与物质相互作用国家重点实验室, 陕西 西安 710024)

**摘要:** 为了分析高功率准分子激光主振荡功率放大(MOPA)系统中各光学元件稳定性对靶面光斑定位精度的影响, 建立了分析模型, 利用分析结果指导高稳定性镜架设计以满足系统实验需求。根据高功率准分子激光 MOPA 系统特点, 有效地简化了系统光路, 建立了系统光路模型; 按照系统打靶精度要求, 利用三维坐标变换和光线追迹法, 计算得到了系统单个光学元件稳定性对靶面光斑定位精度的影响规律; 最后, 对自行设计的镜架进行了稳定性测量。计算结果表明, 反射镜的旋转变化和透镜垂直光轴的平移变化是影响靶面光斑定位精度的主要因素, 且主放大光路中反射镜在  $X$  方向和  $Y$  方向上最大的变化范围分别不能超过  $0.8$  和  $1.6 \mu\text{rad}$ 。实际测量结果表明, 设计的镜架在  $X$  方向和  $Y$  方向最大的变化范围分别为  $0.6$  和  $0.81 \mu\text{rad}$ , 满足系统实验要求。

**关键词:** 准分子激光; 主振荡功率放大系统; 坐标变换; 光线追迹; 稳定性

**中图分类号:** TN248.2 **文献标识码:** A

## Optical element stability of high power excimer laser MOPA system

SHEN Yan-long, HUANG Ke, MA Lian-ying, ZHENG Guo-xin, WANG Da-hui

(State Key Laboratory of Laser Interaction with Matter,  
Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China)

**Abstract:** In order to analyze the impacts of stability of optical elements on the target positioning in a high power excimer laser Master Oscillator Power Amplification(MOPA) system, an analyzing model for the system was established and a mirror mount was also designed according to the analyzing results to meet the need for the system experiment. Firstly, in light of the unique feature of high power excimer laser MOPA system, the beam path was effectively simplified, and a three dimensional layout model to analyze the system was established. Then, in terms of the model and the requirements of target positioning precision of the system, the stability request of every optical element in this system was obtained by using the three dimensional coordi-

收稿日期:2010-08-16;修订日期:2010-10-24

基金项目:激光与物质相互作用国家重点实验室基金资助项目(No. SKL110904)

nate conversion and ray-tracing. Finally, the stability parameters of the mirror mount designed by ourselves were measured. The simulating results indicate that the rotations of mirrors and the drift of lens vertical to the optical axis are the chief factors affecting the target positioning precision. In addition, the rotations of mirrors in the main amplifiers round  $X$  and  $Y$  axes should be controlled less than  $0.8$  and  $1.6 \mu\text{rad}$ , respectively. The experimental results for the mirror mount designed point out that the rotations round  $X$  and  $Y$  axes are not more than  $0.6$  and  $0.81 \mu\text{rad}$ , respectively, which means that the tolerance of coordinate parameters of each optical element corresponding to the target positioning precision satisfies the requirement of the system.

**Key words:** excimer laser; Master Oscillator Power Amplification (MOPA) system; coordinate conversion; ray-tracing; stability

## 1 引言

准分子激光作为高功率激光器件不仅具有波长短、能量大等优点,还具有良好的光束均匀性和可重频运行特性<sup>[1~3]</sup>,这使得高功率准分子激光成为直接驱动惯性约束聚变靶物理和聚变能源关键技术研究的重要工具之一。对于高功率准分子激光主振荡功率放大(Master Oscillator Power Amplification, MOPA)系统,为了满足靶物理对激光脉宽和辐照均匀性的要求,系统采用了光学角多路和无阶梯诱导空间非相干(Echelon Free Induced Spatial Incoherence, EFISI)光束平滑技术<sup>[4]</sup>,使得光路结构复杂,最长光程达  $200 \text{ m}$ ,光学元件数量达上百个。由于光路中各光学元件不可避免地受到装校误差、地面传来的各种频率的振动、物理形变、空气对流以及热梯度的影响,这些因素将对多路激光聚焦产生很大影响<sup>[5]</sup>。因此,研究和分析各光学元件稳定性对靶面光斑定位精度的影响是高功率准分子 MOPA 系统总体分析中的一个必不可少的重要组成部分。Hammer D 用美国 NIF 装置推导出光学元件的运动对靶点光束定位的影响,并利用光线追迹得到了各光学元件对靶点定位精度误差的影响<sup>[6,7]</sup>;神光-III 装置也通过类似方法得到了各光学元件的稳定性对靶点定位精度的影响<sup>[8]</sup>。

高功率准分子 MOPA 系统主要用于开展平

面靶实验,系统要求光束聚焦精度  $\leq 30 \mu\text{m}$ 。通过理论计算可以推导出各光学元件的运动对靶面定位精度的影响,但理论计算中做的诸多假设,如不考虑透镜的厚度、不考虑不同材料的透镜引起的色散对靶面光斑的影响等,使得理论计算结果与实际的光学元件运动对靶面光斑定位影响相差较大,因此仅通过理论分析并不能完全反映实验需要,而通过光线追迹方法研究能够准确、直观和全面地分析和描述光路中各元件对靶面光斑定位精度的影响<sup>[9]</sup>。

本文通过对高功率准分子激光 MOPA 系统整体建模,分析了系统中各光学元件的参数变化对靶面光斑定位精度的影响,得到了在打靶精度要求下各元件参数的变化范围。利用得到的结果自行设计了镜架,并对镜架进行了稳定性分析。

## 2 高功率准分子激光 MOPA 系统光学元件稳定性的计算

现有角多路准分子激光 MOPA 系统采用严格的像传递,系统光路可严格等效为多个物像共轭结构的依次排列来进行简化。系统采用了  $4f$  成像结构、无限长显微成像结构和单透镜成像结构 3 种像传递方式,同时为了考虑反射镜变化对靶面的影响和简化计算,模型中的反射镜都采用了  $45^\circ$  放置,简化后的光路如图 1 所示。

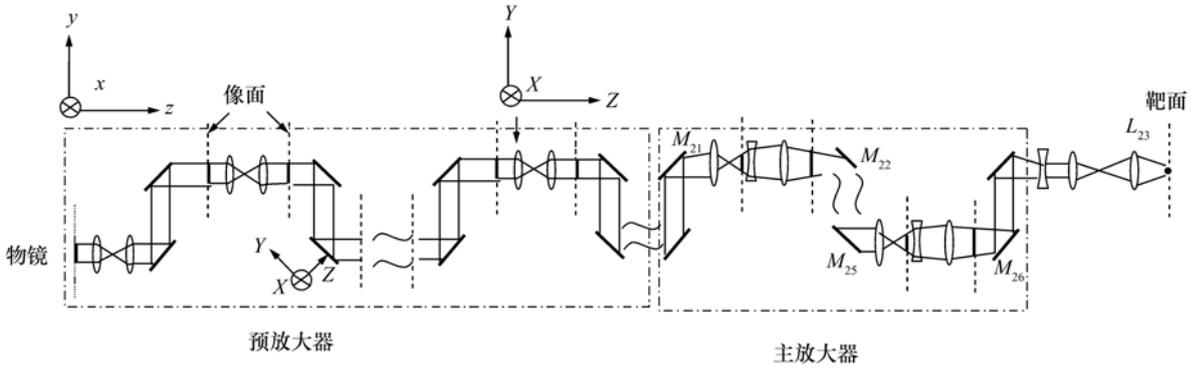


图1 角多路 MOPA 系统像传递光路结构示意图

Fig. 1 Schematic layout of angular multiplexing excimer laser MOPA system

光线追迹计算时模型采用了全局直角坐标系,即图 $(x, y, z)$ 坐标,而在考察每个光学元件时,它们都有各自独立的坐标系即图中 $(X, Y, Z)$ 坐标系,反射镜和透镜的坐标系也不尽相同。光学元件在其独立的坐标系下的平移和旋转变化并不能在计算时直接给出,所以在进行光线追迹时,需要通过光学元件自身坐标系和模型的坐标系变换来进行分析计算。这里举例分析了反射镜绕自身坐标  $Y$  轴变化时其全局坐标的变换情况。

假设反射镜绕其自身坐标  $Y$  轴转很小的角度  $\alpha$ , 旋转前镜面法线上单位长度上点  $P$  在全局坐标系  $(x, y, z)$  中坐标为  $(0, \sin\theta, \cos\theta)$ , 调节后,  $P$  点的坐标是  $(\sin\alpha, \cos\alpha\sin\alpha, \cos\alpha\cos\alpha) \approx (\alpha,$

$\sin\theta, \cos\theta)$ ,  $\theta$  是镜面法线在  $yz$  平面内的投影与  $z$  轴的夹角,在此为前面所述  $45^\circ$ , 而全局坐标系绕  $y$  轴旋转小角度  $\beta$  和绕  $z$  轴旋转小角度  $\gamma$  的坐标变换矩阵分别为:

$$\mathbf{R}_y = \begin{pmatrix} \cos\beta & 0 & \sin\beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\beta & 0 & \cos\beta \end{pmatrix}, \quad (1)$$

$$\mathbf{R}_z = \begin{pmatrix} \cos\gamma & \sin\gamma & 0 \\ -\sin\gamma & \cos\gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (2)$$

将式(1)和式(2)先后作用在调节前  $P$  点坐标,得到绕  $y, z$  轴旋转后的坐标值  $A'$ :

$$A' = \begin{pmatrix} \cos\beta & 0 & \sin\beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\beta & 0 & \cos\beta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos\gamma & \sin\gamma & 0 \\ -\sin\gamma & \cos\gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ \sin\theta \\ \cos\theta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\beta\sin\gamma\sin\theta + \sin\beta\cos\theta \\ \cos\gamma\sin\theta \\ -\sin\beta\sin\gamma\sin\theta + \cos\beta\cos\theta \end{pmatrix}. \quad (3)$$

由于  $\beta$  和  $\gamma$  很小,  $\beta\gamma = \beta$  (或  $\gamma$ ), 则:

$$A' = \begin{pmatrix} \gamma\sin\theta + \beta\cos\theta \\ \sin\theta \\ \cos\theta \end{pmatrix}. \quad (4)$$

从式(3)与  $P$  点在调节后新坐标系下坐标比较可以得出,当  $\gamma = \alpha\sin\theta, \beta = \alpha\cos\theta$ , 即反射镜绕全局坐标  $y$  轴旋转  $\beta = \alpha\cos\theta$ , 绕  $z$  轴旋转  $\gamma = \alpha\sin\theta$  时,效果与反射镜绕其独立坐标系绕  $Y$  轴旋转  $\alpha$  等同。分析中,每个光学元件有 6 个自由度,即沿  $X, Y, Z$  方向平移和绕  $X, Y, Z$  轴旋转。在模拟分析每个光学元件对靶面定位精度影响的时候,假定其他元件都处于理想位置,改变某个光学

元件的一个坐标参数,观察靶面光斑相对理想位置下的位置变化,前面提到高功率准分子激光 MOPA 系统的靶面是平面靶,所以只需考察靶面光斑在  $x$  和  $y$  向相对理想位置下光斑坐标的变化量。当靶面光斑在某个方向移动量为  $30 \mu\text{m}$  时,对应的单个元件的坐标参数变化量就是该单元件在该参数上的漂移上限<sup>[10]</sup>。

### 3 各单元件稳定性对靶面光斑的影响

依据上述计算模型,通过光线追迹模拟计算,得到各光学元件参数变化即光学元件在其独立坐

标轴方向的平移变化量  $dX, dY, dZ$  和绕  $X, Y, Z$  轴旋转  $\alpha, \beta, \gamma$  角度变化量与靶面光斑在各方向上的变化量之间的关系。理论和模拟计算发现,并不是每个维度的变化量都对靶面光斑有影响,表 1 给出了光学元件坐标变化对靶面光斑定位的影响情况。

在进一步模拟计算了靶面光斑在  $x$  和  $y$  方向移动  $30 \mu\text{m}$  情况下,对应各个光学元件各个参数的漂移上限,如表 2 所示。由于光路涉及的元件过多,这里只列出系统里对靶面光斑定位精度影响较大的主放大光路中的光学元件的漂移上限。

表 1 光学元件坐标变化对靶面的影响

Tab.1 Influence of changing coordinate of optical element on target plane

光学元件坐标变化	靶面 $x$ 方向定位精度	靶面 $y$ 方向定位精度
平移	$X$	有影响
	$Y$	无影响
	$Z$	有影响
旋转	$\alpha$	无影响
	$\beta$	有影响
	$\gamma$	无影响

表 2 靶面光斑在平面坐标轴方向移动  $30 \mu\text{m}$  对应的各光学元件参数变化量

Tab.2 Tolerance of coordinate parameters of each optical element corresponding to target beam displacement of  $30 \mu\text{m}$  around each axis

	$\Delta x = 30 \mu\text{m}$		$\Delta y = 30 \mu\text{m}$			
	$dX/\mu\text{m}$	$\beta/\mu\text{rad}$	$dY/\mu\text{m}$	$dZ/\mu\text{m}$	$\alpha/\mu\text{rad}$	$\beta/\mu\text{rad}$
$M_{21}$		2.4	300	136.4	1.2	
$CM_1$	100	4.4	300	88.2	2.2	
$M_{22}$		3.2	100	300	15.7	
$M_2$		300	300			
$L_{20}$	300	300	300		300	
$L_{21}$	300	300			300	
$M_{24}$		100	150	250	60	
$M_{25}$		1.6	300	90.9	0.8	300
$CM_2$	100	2.9	150	250	1.5	
$M_{26}$		1.9		63.8	0.96	300

The first letters “M”, “C”, “L” represent flat mirror, concave mirror and lens, respectively.

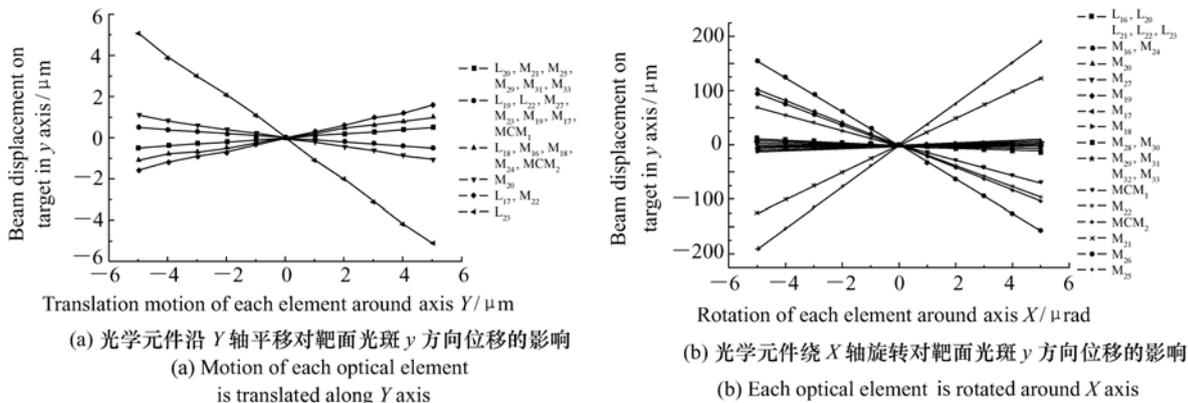


图 2 光学元件的运动量与靶面光斑位移关系曲线

Fig.2 Target beam displacement in  $y$  axis varies with motion of each optical element

为了更加直观地了解各光学元件坐标参数变化对靶面光斑定位精度的影响,需要给出各元件坐标参数变化与靶面光斑位移量的关系曲线。从表1中可以看出,每个光学元件共需要6张图来表示关系曲线图。这里列出主放大光路和靶室前解码部分的光学元件绕 $X$ 方向旋转和沿 $Y$ 方向平移情况下对靶面光斑在 $Y$ 方向位移量影响的关系曲线图,如图2所示。

从图2可以看出,透镜对靶面光斑位移的影响主要是平移而反射镜是旋转,且反射镜的旋转变化对靶面光斑位移影响要比透镜平移大得多;另外,从图2(a)中可以得到,除了靶前最后一个透镜 $L_{23}$ 的平移对靶面光斑影响较大外,其他元件的平移对靶面光斑位移影响要小得多,因此,应控制 $L_{23}$ 平移变化以减小其对靶面光斑定位影响;从图2(b)中可以看出,在旋转变化的过程中,最后两级主放大器前后反射镜 $M_{21}, M_{22}, M_{25}, M_{26}$ ,凹面反射镜 $MCM_1$ 和 $MCM_2$ 的旋转对靶面光斑位移影响很大,因此在误差指标分配时要严格控制这些光学元件的旋转变化的。

#### 4 稳定性测量实验与结果

从上面分析讨论的结果可以看出,反射镜的旋转变化的对靶面光斑定位精度影响较大,亦即系统打靶成功的关键取决于反射镜的稳定程度。系统 $30\ \mu\text{m}$ 的光束聚焦精度使得系统对反射镜稳

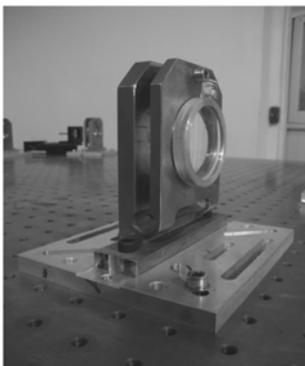


图3 反射镜镜架实物图

Fig.3 Real frame of mirror mount

定性要求很高。为此,利用有限元分析自行设计高稳定性反射镜镜架<sup>[11,12]</sup>,如图3所示。镜架采用一体化结构提高其稳定性,可实现水平方向和俯仰角度调节。

通过自行设计实验方案和分析软件,在实验室现有环境条件下对该镜架的稳定性进行了测量,得到结果如图4所示。实验结果表明, $X$ 向和 $Y$ 方向最大转角变化分别是 $0.6$ 和 $0.81\ \mu\text{rad}$ 。而从表2可以看出,主放大光路中对稳定性要求最高的反射镜转角 $X$ 向和 $Y$ 向分别不能超过 $0.8$ 和 $1.6\ \mu\text{rad}$ ,由实验结果和计算结果可知,所设计镜架满足系统实验稳定性需求。

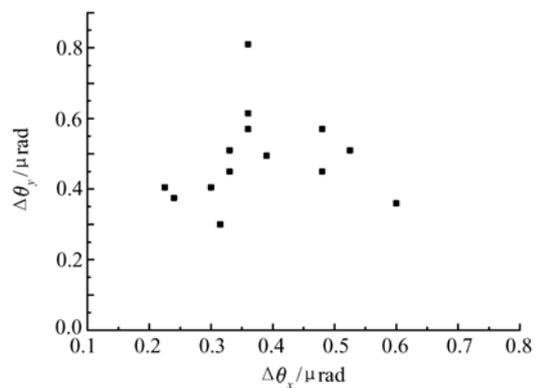


图4 光学镜架稳定性测量结果

Fig.4 Measurement results of stability of mirror mount

#### 5 结论

通过对高功率准分子激光MOPA系统整体建模,利用三维坐标变换和光线追迹,分析了系统中各光学元件的参数变化对靶面光斑定位精度的影响;得到了在打靶精度要求下各元件参数的变化范围,并计算得到靶面光斑位置与光学元件参数变化量的关系曲线。计算结果表明,反射镜的旋转和透镜的平移变化是影响系统稳定性的主要因素,且主放大光路中反射镜在 $X$ 方向和 $Y$ 方向最大的变化分别不能超过 $0.8$ 和 $1.6\ \mu\text{rad}$ 。利用这些结果自行设计镜架,并对镜架进行了稳定性测量,得到 $X$ 方向和 $Y$ 方向变化分别为 $0.6$ 和 $0.81\ \mu\text{rad}$ ,满足系统实验要求。

## 参考文献:

- [1] ROSOCHA L A, HANLON J A, MCLEOD J, *et al.*. Aurora multi-kilo-joule KrF laser system prototype for inertial confinement fusion[J]. *Fusion Technol.*, 1987, 11:497-531.
- [2] LIU J R, ZHAO X Q, YI A P, *et al.*. Experimental study on a long-pulse excimer laser system[J]. *SPIE*, 2005, 5627:242-246.
- [3] 赵学庆, 薛全喜, 郑国鑫, 等. 准分子激光前端光束形态控制技术研究[J]. 中国工程科学, 2009, 11(8):52-57.  
ZHAO X Q, XUE Q X, ZHENG G X, *et al.*. The shape control over the front-end of excimer laser beam[J]. *Eng. Sci.*, 2009, 11(8):52-57. (in Chinese)
- [4] 刘晶儒. 准分子激光技术及应用[M]. 1版. 北京:国防工业出版社, 2009:140-149.  
LIU J R. *Excimer laser Technology and Applications*[M]. 1st ed. Beijing: National Defense Industry Press, 2009:140-149. (in Chinese)
- [5] 傅学农, 陈晓娟, 吴文凯, 等. 大口径反射镜组件设计及稳定性研究[J]. 光学精密工程, 2008, 16(2):179-183.  
FU X N, CHEN X J, WU W K, *et al.*. Design of large aperture mirror support and its stability[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(2):179-183. (in Chinese)
- [6] HAMMER D, DYSON F, FORTSON N. Inertial Confinement Fusion(ICF) Review, JSR-96-300[R]. Washington: USDOE Office of Energy Research, 1996.
- [7] TRUMMER D J, FOLEY R J, SHAW G S. Stability of optical elements in the NIF target area building[C]. 3rd Annual International Conference on Solid State Lasers for Application to Inertial Confinement Fusion, Monlery, CA, June 7-12, 1998.
- [8] 师智全, 彭翰生, 粟敬钦. ICF 驱动器光束定位误差估计[J]. 强激光与粒子束, 2002, 14(2):275-278.  
SHI ZH Q, PENG H SH, SU J Q. Beam positioning error budget in ICF driver[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2002, 14(2):275-278. (in Chinese)
- [9] 师智全, 魏晓峰, 马驰, 等. 大型固体激光器光束定位稳定性分析[J]. 强激光与粒子束, 2000, 12(s1):167-170.  
SHI ZH Q, WEI X F, MA CH, *et al.*. Beam position stability analysis in the large solid state laser system[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2000, 12(s1):167-170. (in Chinese)
- [10] 朱启华, 张小民, 景峰. 多程放大系统总体光路的稳定性研究[J]. 强激光与粒子束, 1999, 11(6):653-657.  
ZHU Q H, ZHANG X M, JING F, *et al.*. Study of the layout stability of multi-pass amplification system[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 1999, 11(6):653-657. (in Chinese)
- [11] 冯斌, 周忆, 张军伟, 等. 大型精密镜架地面随机微振动响应分析[J]. 光学精密工程, 2007, 15(3):356-361.  
FENG B, ZHOU Y, ZHANG J W. Analysis on ground random vibration response of large-scale precision mirror mount[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(3):356-361. (in Chinese)
- [12] 谢娜, 周海, 张军伟, 等. 大型激光装置光学元件的稳定性设计[J]. 光学精密工程, 2009, 17(10):2411-2417.  
XIE N, ZHOU H, ZHANG J W, *et al.*. Stability of optical elements in large laser facilities[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(10):2411-2417. (in Chinese)

作者简介:沈炎龙(1983—),男,湖南岳阳人,硕士,研究实习员,主要从事高功率激光技术及应用方面的研究。

E-mail:yanlong@mail.ustc.edu.cn

黄珂(1979—),男,山东青岛人,硕士,助理研究员,主要从事激光技术及应用研究。

E-mail:xahk\_cs@126.com