

文章编号 : 0253-2239(2002)05-0582-04

# 神光 II 高功率激光系统中鬼像的计算与分析

庄大奎 林尊琪 管小鹏 朱 俭 马伟新 刘凤翹 王德林

(高功率激光物理国家室验室, 上海 201800  
中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

摘要: 对神光 II 高功率像传递激光传输系统中可能产生的鬼像进行了计算与分析, 对系统中可能被鬼像损伤位置上的光学件作了重整安排。

关键词: 鬼像; 二次跟随性鬼像; 高功率激光系统

中图分类号: TN248.1 文献标识码: A

## 1 引 言

高功率激光传输系统中, 由于鬼像造成某些光学元件的损伤, 不仅影响光束的传输质量, 甚至可能破坏整个传输系统, 以致不得不更换元件来解决, 其代价昂贵。因此, 预防鬼像是高功率激光传输设计中必须重点考虑的因素之一。国内外对鬼像的处理也有相关报道<sup>[1, 2]</sup>。然而, 由于激光传输系统排布的不一性和复杂性, 在其鬼像的处理上也因情况而异, 各具特色。本文报道了一种采用全系统像传递条件下的鬼像处理技术。该系统由二种不同脉宽的两台振荡器, 经切换输出一倍衍射极限的空间高斯分布光束作为系统的脉冲源, 再经初级放大和特殊整形以后, 以某一物面作为基准面, 通过该系统中的多级空间滤波器, 逐级传递至一定的位置。该布局的优点在于各级空间滤波器之间都有一个实像面, 可维持原基准面的空间特性, 其衍射调制较小, 空间分布也较均匀, 并且有一定的空间或余地来避免由于传输系统中的光学件表面产生的鬼像所带来的负面影响。因此, 该方案相对安全系数较大, 可以放心地放置一些易被激光损伤的光学元件, 如倍频晶体等。然而, 由于系统过于庞大, 虽然均按像传递方式排布, 但毕竟涉及的光学件太多, 稍有不慎, 即可能因鬼像而造成损伤, 因此必须对每一个光学件进行检验。提高光束质量的主要措施为

1) 对每一个光学件进行光学检验, 其中包括对材料性能、冷加工、镀膜等工序的审核, 尽可能地降低因光学元件材料质量或冷加工缺陷等因素所造成的损耗。

2) 计算分析由于光学件表面对激光光束的一次或多次反射并经会聚或放大后产生的鬼像。虽然在一般情况下, 这类鬼像的强度较弱, 尚不足以引起对光学件的损伤, 但是, 在高功率高强度激光放大系统中, 尤其是在双程放大系统中, 则不能忽视。

3) 采取必要的特殊手段, 对有可能因鬼像造成损伤的局部区域或位置, 或有可能产生鬼像损伤的光学件, 重点加以关注。如双程主放大器中的片后反射镜, 其剩余反射率的镀膜要求应比一般光学件高出半个至一个数量级。

## 2 计算与分析

由于神光 II 高功率激光系统受场地条件限制, 排布十分紧凑, 密集度高, 其安置情况为: 由振荡级发出的光束经前三级放大后, 被分束为 8 个子束, 上下二层各 4 束, 呈双层立体布局。8 个子束再经几级放大以后被组合为南北二组, 每组各有 4 束, 被分别送入南北主放大器中。主放大采用双程放大技术, 8 束光经主放大器后再以向心压缩方式送入靶室。因此, 系统预留空间十分有限。如何避免鬼像造成的损伤, 需对该系统各级光学元件的排布作仔细地计算和分析, 工作量很大。采用矩阵光学法和几何光学法分别对系统进行了计算和比较之后, 我们选择了后者作为分析鬼像的依据。事实已证明, 二次曲线方程的几何光学法, 对避免该系统中的鬼像破坏起到了良好的预防和保证作用。

### 1) 传统矩阵光学方法

采用矩阵光学处理光线传输的一般表达式均可以由均匀介质中自由传输、平面折射、平面反射、焦距为  $f$  的薄透镜矩阵、球面反射、球面折射等矩阵

元组合而成。由于经计算后的矩阵所占篇幅过长，本文不予引入。需要指出的是，各矩阵元的推导过程中均采用近轴近似条件，即  $\theta \approx \sin\theta \approx \tan\theta$  (自由空间除外)，此外还需对劈形元件、斜放置式元件等作简化。因此，这些近似条件恰好是降低精度的来源，否则不仅需要取消近轴近似条件，而且还需对劈形元件等作特殊处理，则矩阵元的计算变得十分繁杂，失去其优越性。

2) 几何方式

由于激光传输系统中的各光学面均为轴对称面型设计，因此计算可以简化为二维几何分析，各面可以用二次曲线统一表示：

$$F(x, y) = ax^2 + bxy + cy^2 + dx + ey + f = 0, \quad (1)$$

其上任意一点  $p_0(x_0, y_0)$  处的法线方向向量为

$$\mathbf{n} = \left( \frac{\partial F}{\partial x}, \frac{\partial F}{\partial y} \right)_{(x_0, y_0)} = (2ax_0 + by_0 + d; 2cy_0 + bx_0 + e). \quad (2)$$

该点的法线方程为

$$\mathbf{p} = p_0 + t\mathbf{n}, \quad (3)$$

式中  $t$  为一实系数，过某一点  $p_0(x_0, y_0)$  的光线以直线方程表示为

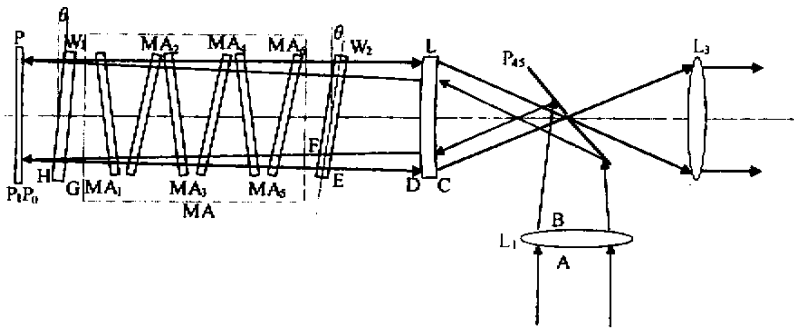


Fig.1 The optical scheme of the main amplifier system.  $L_1, L_2, L_3$ : lens; MA: main amplifier;  $W_1, W_2$ : windows;  $P_{45}$ : 45° folding mirror

为计算方便起见，用 A、B、C、D、E、F、G、H、 $P_0$ 、 $P_1$  分别表示各光学元件的表面。由于放大工作介质以布氏角对称补偿式放置，对光束走向影响很小，产生鬼像偏离也较大，因此在鬼像计算中可按空腔考虑。A、B、C、D 曲面的曲率半径分别记为  $R_A$ 、 $R_B$ 、 $R_C$  和  $R_D$ 。各元件的厚度分别以  $t_i (i=1, 2, 3, 4)$  表示。同样， $d_i (i=1, 2, 3, 4)$  分别表示各元件间距离，前后窗  $W_1$ 、 $W_2$  各面以 E、F、G、H 表示，其倾角分别记为  $T_E$ 、 $T_F$ 、 $T_G$ 、 $T_H$ 。入射光束与光轴的最大距离  $h$  定义为矢高，其光线标记为：I 表示光线

$$y = y_0 = k(x - x_0), \quad (4)$$

系数  $k$  表示其斜率，(3)式可求出入射角  $\theta_i$ ，并依据反射定律  $\theta_i = \theta_o$  以及折射定律  $n_i \sin\theta_i = n_o \sin\theta_o$ ，可求出出射角  $\theta_o$ 。对于任一光学表面，由于出射点和入射点相同，因此可得形如(2)式的出射光线表达式。

二次曲线几何表达式，公式十分简易，尤其在低阶的情况下(例如一阶或二阶)数值计算并不繁杂，还能保证其数值精度，因此，这是一种可行的方法。此外，由于它是对每一种光学元件的两个面分别计算，因而，光学元件的任何不一致性，如元件厚度、偏心、放置距离以及非对称性等均可分别作处理。现以主放大器的光学组件排布为例，说明采用该方法计算与分析的结果。如图 1 所示，经过数级放大后的激光束被由注入镜  $L_1$ 、输入镜  $L_2$  和 45°带小孔反射镜  $P_{45}$  组成的扩束系统转折进入主放大器中，主放大器由  $MA_1$  至  $MA_6$  6 块放大工作介质组成，每块以布氏角对称补偿式放置，两端各有一片密封窗。考虑到主放大器中四束光的引向及防止鬼像损伤，前窗  $W_1$  设计为劈角形并有约 2°的倾角，图中 P 表示片后反射镜，用于将激光光束反射回去进行双程放大，并由镜  $L_2$  和  $P_{45}$  镜的中心小孔和输出镜  $L_3$  组成空间滤波器，将双程放大后的光束送至靶场。

自右向左进入主放大器的走向；O 表示光线自左至右出主放大器的走向；T 表示透射光线；下脚标标志的符号表示光线经二次曲面发生反射的走向，例如， $I_{ET}$  表示入射光线经 E 面反射后又透过输入镜的走向，例如  $I_{BA}$  表示光线经 A 面折射进入注入镜 B 面反射，A 面反射，最后 B 面折射出注入镜。经过计算，我们完成了约 40 余种光束走向的鬼像落点，其中既有实像也有虚像(见表 1)。我们的原则是，凡实像的落点除偏出光学组件以外，均须落在光学件的空余位置上，光学件还须远离其焦点。表 1 列出了其中 10 种鬼像的落点位置值。

Table 1. The position of the ten kinds of ghost in the main amplifier

No.	name of the optical beam	the position of the ghost/mm
1	I <sub>D</sub>	1690.10
2	I <sub>DC</sub>	1748.26
3	I <sub>ET</sub>	12494.70
4	I <sub>B</sub>	1689.70
5	I <sub>BA</sub>	621.49
6	O <sub>D</sub>	run off the main amplifier
7	O <sub>CD</sub>	1403.20
8	O <sub>DECD</sub>	1166.90
9	O <sub>DET</sub>	-7.13
10	O <sub>CT</sub>	2248.10

上述处理是对于轴对称光学组件进行的,因此采用了二维几何分析。对于非轴对称光学组件,以上方法也可以适用,但需采用三维空间几何分析。事实上,任意有空间解析表达式  $F(x_1, x_2, x_3) = 0$  的曲面,其曲面上的某一点的法向矢量视情况可表示为向量外积的形式

$$\mathbf{n} = \frac{\partial F}{\partial x_i} \times \frac{\partial F}{\partial x_j} \quad (i \neq j);$$

空间直线表示为

$$\mathbf{P} = \mathbf{P}_0(r) + t\mathbf{D}(r),$$

$\mathbf{D}$  为直线的方向矢量,  $t$  为实系数,二条直线  $\mathbf{P}_1$ 、 $\mathbf{P}_2$  间的夹角  $\theta$  由  $\cos\theta = \frac{\mathbf{P}_1 \cdot \mathbf{P}_2}{|\mathbf{P}_1| |\mathbf{P}_2|}$  决定。于是完全类似以上二维分析,三维情形也能计算,但计算繁杂一些。

显然,该方法的优点在于能较方便地处理多次反射和折射,易于在计算机上实现光线路径模拟。由于未作理论上的近似,其计算误差仅受限于机器字长的截断误差以及系统函数。与矩阵光学方法相比较,已避免了近轴近似假设等带来的误差,因此,计算精度较高,有实际应用价值。事实上,该法也正是计算机图形学中用来精确处理光影效果的所谓光线跟踪算法,已获广泛应用。为进一步说明上述两种计算方法的区别,我们再以例说明:设注入镜参数:  $R_A = 2600$  mm,  $R_B = 15000$  mm,  $t_1 = 10$  mm, 玻璃折射率为 1.50636(1.053  $\mu\text{m}$  处),用光学矩阵法计算其焦距为 4376.15 mm。采用几何法,在近轴近似条件下(入射光线高度  $h = 0.1$  mm),忽略透镜厚度(设为 0.01 mm),求得的焦距为 4376.148 mm。与前者基本一致。但在非近轴近似条件下( $h = 50$  mm)而且不忽略透镜厚度的情形下,求得的焦距为 4371.09 mm,与前者差 5 mm。这仅是进行了两次的折射计算,若折射和反射的次数增加,则其差距将进一步扩大。表 2 为两种方法计算的结果。

Table 2. The comparative results of two calculated methods

	optical matrix method/mm	mathematical method/mm
I <sub>D</sub>	1710.4	1690.1
I <sub>BAB</sub>	823.3	502.8
O <sub>C</sub>	11908.9	9726
O <sub>CD</sub>	1442.2	1403.2

### 3 二次跟随鬼像分析及处理

当激光光束通过光学元件时,由于元件表面有剩余反射效应,入射光束除大部分透射以外,将有部份激光束在元件内部来回折返。每折返一次,除其中大部分透射以外,其余少部分再折返,造成多次往返。然而,以第一次折返后透射光束的剩余反射效应为最强,称之为二次跟随效应。其余多次来回折返光束,由于很弱,实用中可不予考虑。但二次跟随鬼像,由于受到再次放大,而且是小信号增益放大,其破坏性较强。尤其对于二大侧面近于平行的光学件,其二次跟随效应所产生的鬼像一般离主光束较近,在聚束情况下,更是靠近主光束。为避免片后镜 P、主放大器窗口  $W_1$ 、 $W_2$  等产生二次跟随鬼像(见图 1),我们具体采取了以下措施:

1) 主放大器前窗  $W_1$  及  $W_2$  的放置位置为,将它们的两大面之间夹角平分面与光轴垂直面之间有  $2^\circ$  的夹角。其中,窗口  $W_1$  为劈板状态,它的夹角为  $21'30''$ ,窗口  $W_2$  为平板状态。

2) 窗  $W_1$ 、 $W_2$  均镀 1.053  $\mu\text{m}$  增透膜。

3) 片后反射镜反射面镀 1.053  $\mu\text{m}$  高反膜,另一面镀 1.053  $\mu\text{m}$  增透膜。

计算表明,经上述处理后,可以消除它们的二次跟随鬼像或因镀增透膜而锐减,使之不致于在  $P_{45}$  镜面上产生损伤。然而,若放置位置有误或镀膜不当,则可能产生新的破坏点。

### 4 结果与讨论

由于高功率驱动系统庞大,元器件较多,计算结果不可能一一列举,除上述介绍主放大器系统情况以外,对各级放大器中的空间滤波器均进行了鬼像计算,经实验抽测,已证实鬼像落点与计算值相差无几。

现将第二级和第三级空间滤波器输入透镜鬼像落点计算结果列于表 3 中,特别对透镜装反的情况下鬼像的位置作了提示,提醒工作者最好避开这两

个位置,以免万一透镜装反而造成不必要的损伤。

本文对鬼像的处理限于二阶以下,并是在二维图像中进行的计算。这是假定光束在传输过程中是轴对称,如有非对称元件的放置,则需进行光学补偿,如主放大器之中的放大工作介质、起偏元件均作如此处理。事实上,完全轴对称仅是理想化模式,即使是轴对称元件,由于加工、装校等诸因素的影响或限制,均有可能偏离轴对称。为处理诸如二次跟随

性鬼像等特殊性问题,已有意识地将光学件加工为楔板状或将光学件离轴交错放置,试图将鬼像的落点偏离某区域。因此本文所述二维图像计算方法虽可以作一些处理,但有其局限性。三维图像的计算可给出鬼像的立体分布图。然而,二维图像计算方法相对比较简易直观。就目前情况而言,仍有其现实意义。事实已证明,由二维图像处理下的防止鬼像损伤的措施,已获得很大的成功。

Table 3. The calculated results of the ghost of the input mirror in the second and third spatial filter

No.	clear aperture $\phi/\text{mm}$	thickness $t_{sf}/\text{mm}$	focal length $f/\text{mm}$	radius		the position of the ghost		
				$R_1/\text{mm}$	$R_2/\text{mm}$	the altitude of the incident beam/mm	$L/\text{mm}$	
SF <sub>2</sub> (spatial filter 2)	20	3	617	357	-2500	5	246.30	
						10	246.23	
						15	246.11	
						20	245.95	
					2500	-357	5	111.20
							10	111.30
							15	111.48
							20	111.72
SF <sub>3</sub> (spatial filter 3)	60 (70)	7	1340.73	785.2	-5000	1	525.89	
						3	525.89	
						5	525.88	
						8	525.87	
						30	525.54	
					5000	-785.2	1	243.14
							3	243.14
							5	143.15
							8	243.18
							30	243.70

### 参 考 文 献

[1] English R E, Miller J I, Schweycn J. Ghost reflection analysis for the main laser of the national ignition facility. This paper was prepared for submittal to the Optical Society of America 1998 Summer Topical Meetings U. S. A. Lawrence Livermore National Lab. June 8 ~ 12, 1998. <http://www.llnl.gov>

[2] Hendrix J L, Schweycn J, Rowe J. Ghost analysis visualization techniques for complex systems: examples from the NIF final optical assembly. This paper was prepared for submittal to the Third Annual International Conference on Solid State Laser for Application to Inertial Confinement Fusion (ICF) U. S. A. Lawrence Livermore National Lab. June 7 ~ 12, 1998. <http://www.llnl.gov>

## Analysis and Calculation for the Ghost in SHENGUANG II High Power Laser System

Zhuang Dakui Lin Zunqi Guan Xiaopeng Zhu Jian Ma Weixin  
Liu Fengqiao Wang Delin

(National Laboratory on High Power Laser and Physics, Shanghai 201800  
Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800)

(Received 22 December 2000; revised 18 May 2001)

**Abstract:** It was calculated and analysed that the ghost was produced from image transmission in SHENGUANG II high power laser system. According to the calculated results the arrangement of optical elements which should be damaged by the ghost in the system was planned over.

**Key words:** ghost; twice following ghost; high power laser system