

文章编号: 0253-2239(2010)11-3289-06

高功率激光系统鬼点空间坐标的快速定位算法

岑兆丰 李晓彤* 邓诗涛

(浙江大学现代光学仪器国家重点实验室, 浙江 杭州 310027)

摘要 提出了一种高功率激光系统中鬼点空间坐标的快速定位算法,用于在设计阶段分析系统中的多次反射与多级衍射鬼点,以避免对系统造成危害。算法采用二叉树表示的多叉树存储鬼光束数据,同时追迹第一近轴光线和实际主光线,依据第一近轴光线确定鬼点的 z 坐标 z_g ,将实际主光线与 $z=z_g$ 平面的交点作为实际鬼点位置。以倾斜透镜和含衍射元件的终端光学系统(FOA)为例预测了鬼点的空间坐标,经高密度实际光线追迹法验证,在所得鬼点平面相应位置确有光能聚集,表明鬼点空间坐标与实际鬼光束的密集区域相符。使用该方法在16 s内定位了含222面的激光系统的13124个鬼点。

关键词 几何光学;光线追迹;鬼点;杂散光;高功率激光系统

中图分类号 TH741.6; TN248

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS20103011.3289

A Quick Algorithm for Locating Ghost Coordinates in High-Power Laser Systems

Cen Zhaofeng Li Xiaotong Deng Shitao

(State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China)

Abstract A quick algorithm for locating the ghost coordinates in high-power laser systems is presented for analyzing multi-reflection and multi-order diffraction ghosts in design so as to avoid damaging the systems. The primary paraxial ray and chief ray are traced and saved in a multi-pork tree expressed as a binary tree at the same time, the z coordinate z_g of each ghost is determined by tracing the primary paraxial ray, and the intersection point of the chief ray and the plane $z=z_g$ is regarded as the position of the real ghost. Taking a tilt lens and the final optical assembly (FOA) with a diffraction optical component as examples, the space coordinates of some ghosts are predicted. Certified by high-density real ray tracing, optical energy is focused at the predictive position in corresponding ghost plane. The results show that the predicted ghost point is coincident with the area at which the real rays condense. The positions of 13124 ghosts in a laser system including 222 surfaces are found in 16 s using this algorithm.

Key words geometrical optics; ray tracing; ghosts; stray light; high-power laser system

1 引言

高功率激光系统在惯性约束聚变、强场物理等方面具有广泛应用,它含有透镜、窗口、放大器和空间滤波器等多种光学元件。高功率激光装置的终端系统还引入了衍射元件,用于光束的谐波分离、三倍频谐波取样测量以及聚焦打靶等物理过程^[1]。如美

国 LLNL 实验室的国家点火装置(NIF),在靶点之前、聚焦透镜之后应用了衍射光学元件^[2]。由于激光束具有很高的能量,光学表面的多次反射光和衍射元件的多级衍射光均会形成杂散光和鬼点。当光学零件附近有能量较大的鬼点存在时,零件会产生热变形从而影响激光的输出质量,当能量密度超过

收稿日期: 2009-12-27; 收到修改稿日期: 2010-03-20

基金项目: 国家自然科学基金(10875105,60977010)、国家 863 计划(2009AA12Z108)和航空科学基金(20090176001)资助课题。

作者简介: 岑兆丰(1957—),男,硕士,教授,主要从事光学系统设计与软件开发等方面的研究。

E-mail: cenzf@zju.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: lixt@zju.edu.cn

一定范围甚至可能损毁该零件。因此,鬼点是高功率激光装置的光学设计中需要重点考虑的问题,直接影响整个实验装置的规模、各光学器件间的空间间隔和各种透镜的形状^[3]。多级衍射与多次反射并存使鬼像分析非常复杂。

早期的鬼像分析方法是根据鬼光束的传播路径重建大量的新光学系统,重复计算多。2002年起引入二叉树数据结构分析杂散光^[4],目前已有近轴光线追迹法^[5]、实际光线追迹法^[6]和矩阵光学方法^[7,8]等多种分析方法提出,此后二叉树及其二叉树表示被引入多次反射和多级衍射杂散光分析^[9]。已有多篇文献讨论了多程放大系统和终端光学系统的杂散光,包括空间滤波器的鬼点分析^[8]、组件的鬼点分布规律^[10,11]和优化终端排布设计^[12]等。

然而,高功率激光系统中鬼点的快速定位仍是个有待解决的问题。近轴分析方法可以给出鬼点在沿光轴方向(z 方向)的位置,但不含鬼点的 x 和 y 坐标。随着反射次数和衍射级增大,很多鬼光束路径不再满足近轴条件,加之为了避开鬼点经常倾斜透镜^[13],使得鬼点的空间坐标更难预料。事实上此时并不存在一个会聚点,而是形成了杂散光密集区。采用实际光线追迹法可以看出这些密集区,但要确定一个最密集的位置还需要复杂的数据处理。

本文采用同时追迹第一近轴光和主光线的方法,支持以二叉树表示的多叉树结构,中间数据完整且消除了重复计算,实现了鬼点三维坐标的快速定位。算法同样适用于其他同轴或离轴的系统。

2 基于第一近轴光和主光线追迹的鬼点空间坐标快速定位方法

2.1 鬼点空间坐标快速定位的基本原理

图1表示激光系统中的一个聚焦透镜,包括一束平行于光轴的光通过该透镜时的透射光路和不超过3次反射的光路。虽然像差使实际光线不能会聚于一点,但可以把光线最密集处看成是鬼点。显然对于小相对孔径并且理论上无轴外光的高功率激光系统,鬼点必处于光路之中并位于光轴上。如果以光轴为 z 轴建立坐标系,只要追迹一条第一近轴光线(轴上物点发出通过入瞳边缘的接近轴光线公式计算的光线)即可确定鬼点的 z 坐标,而 x 和 y 坐标为0。追迹中建立第一近轴光线传播的光线树,包括正常光路和多次反射鬼光路,如果第一近轴光线由第 i 面向 $+z$ 方向出射后与光轴的交点在第 i 面和第 $i+1$ 面之间,则该交点是一个实的鬼点,否则为虚的鬼点;反之,如果第一近轴光线由第 i 面向 $-z$ 方向出射后与光轴的交点在第 i 面和第 $i-1$ 面之间,则为实的鬼点,否则为虚的鬼点。通过对光线树的遍历可自动判断是否形成鬼点及其位置。

当透镜倾斜时,透镜光轴相对于系统光轴发生旋转。图2(a)是将图1中所示的透镜绕其像方节点转 3° 的结果。以节点作为旋转中心使主光路聚焦点不变,但鬼点的垂轴坐标与图1不同。此时追迹第一近轴光线只能得到鬼点的 z 坐标,不能得到 x 和 y 坐标。

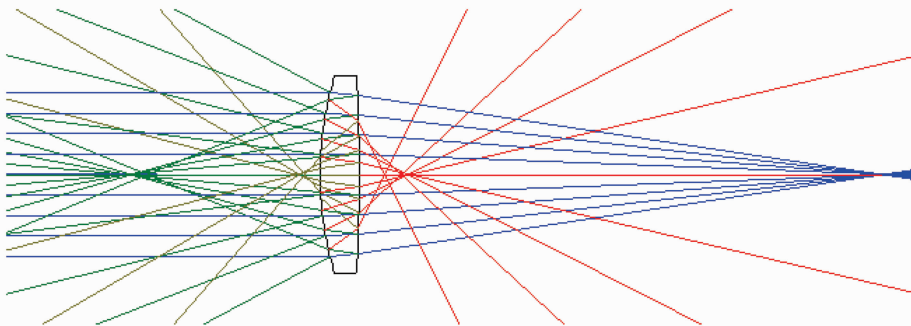


图1 轴上光经单透镜的传播路径

Fig. 1 Propagation paths of on-axis rays through a single lens

当不考虑光学系统的非对称像差时,主光线(通过孔阑中心的实际光线)是系统中传播的中心光线;当光学系统存在彗差等非对称像差时,在物空间以外的其他空间,原来关于主光线对称的各对光线虽不交于主光线上,但仍处于主光线附近。对于成像光学系统,所有成像光线在主光线与像面的交点附

近由于像差而形成弥散斑,通常离交点越近光线越密集,光能密度越高,故将该点作为实际像点。因此,在由第一近轴光线确定鬼点的 z 坐标 $z=z_g$ 后,可以用主光线和过 $z=z_g$ 平面的交点作为实际鬼点位置,如图2(b)所示, P 点即为透镜第2面1次反射光的主光线与其近轴像面的交点,即为实际鬼点。

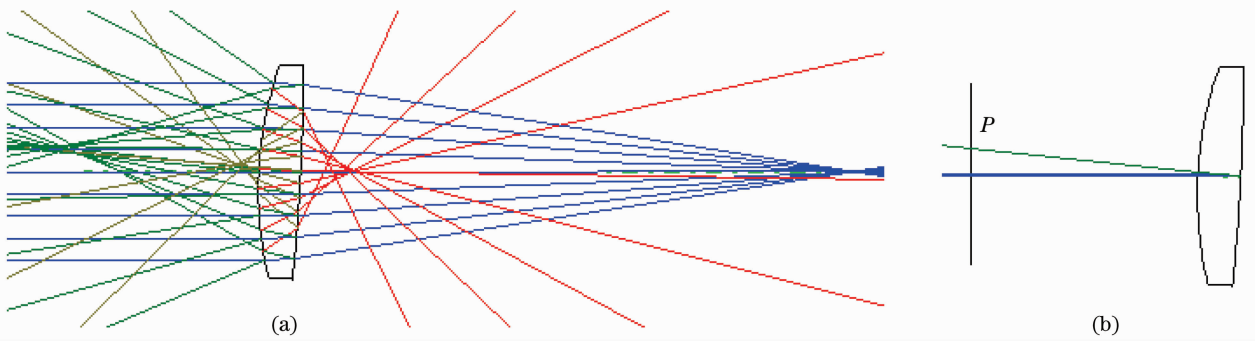


图 2 透镜倾斜时的光路(a)与鬼点定位(b)

Fig. 2 (a) Propagation paths of the rays through a tilt lens and (b) ghost allocation

2.2 描述鬼光束的数据结构

考虑到光学系统中可能有衍射面,光入射于衍射面时会产生多级透射与多级反射光,因此多叉树是描述鬼光束的合理数据结构^[9]。但系统中衍射面只有极少数,如果每个结点都设置多个子结点将浪费大量的内存,用左儿子右兄弟方法将其表示成二叉树可避免这个问题,每个结点只保留最左边的子结点(称左儿子),而将它右边的兄弟结点作为它的右儿子,则可将此多叉树用二叉树表示。这种方法便于寻找鬼点及其来源。二叉树中每一个结点是一个结构体:

```
struct RealAndParaNodetp { struct Ray Data; struc
RealAndParaNodetp * left, * right, * parent; };
```

其中结构体 RayData 内含光线数据,包括面号、第一近轴光线的物方截距 l 和倾斜角 u 、主光线与该面的交点坐标 (x, y, z) 和方向余弦 (a, b, c) 、反射次数、当前衍射级数、通过衍射面的次数和该光束携带的能量等,计算时能量要按反射率和透射率不断变化, left, right 和 parent 分别是指向左儿子、右儿子和父结点的指针变量。此时每个结点如果是父结点的左儿子,那么其父指针指向产生该鬼光线的入射光线;如果是父结点的右儿子,则需要向上回溯直至找到原多叉树中真正的父结点。

2.3 鬼点空间坐标快速定位算法

由第一近轴光线的追迹可确定每个结点的 l 和 u ^[14],其中 u 值是为了计算能量或能量密度的。当鬼光束孔径比当前光学表面的通光口径大时,部分鬼光束不能通过, u 值和能量将同时变化。

实际主光线当确定了初始值后,对于每个面有^[14]

$$n'A'_0 - nA_0 = pN, \quad (1)$$

式中 n 为该面物空间的折射率, n' 为该面像空间的折射率, A'_0 为出射光线的单位矢量, A_0 为入射光线的单

位矢量, N 为沿法线的单位矢量, $p = n' \cos I' - n \cos I$, I 和 I' 分别为入射角和折射角。

当光线经过衍射面时,应考虑附加光程的梯度 $\text{grad } \Delta S$, (1) 式变为

$$n'A'_0 - nA_0 = pN + \text{grad} \Delta S, \quad (2)$$

式中 ΔS 为衍射面在入射点处产生的附加光程,其表达式与衍射级和衍射面的类型有关。

利用以上公式,入射于系统中任一面的第一近轴光和主光线均可求出,并建立用二叉树表示的多叉树。建树时用入射光而不用出射光是为了方便,因为对于透射和反射同时存在的表面,一条入射光将产生两条出射光,衍射面的出射光更多。而一个面的入射光就是前一面的出射光。

树的一个结点表示入射于某光学表面的一束光,主光线与该面的交点为 (x_0, y_0, z_0) 。由第一近轴光追迹求出鬼点所在平面 $z = z_g$, 以主光线追迹求出 $A_0 = ai + bj + ck$, 将 $z = z_g$ 代入主光线方程

$$\frac{x - x_0}{a} = \frac{y - y_0}{b} = \frac{z - z_0}{c}, \quad (3)$$

得 $x = x_0 + a(z_g - z_0)/c$, $y = y_0 + b(z_g - z_0)/c$, $z = z_g$ 即为实际鬼点坐标。

3 实例分析

以图 2(a) 所示的倾斜聚焦透镜为例,入射光束直径 25 mm, 采用以上快速定位算法求出 1 次反射、2 次反射和 3 次反射鬼点的坐标,计算时先在透镜前 50 mm 处设一虚拟面作为 $z = 0$ 平面,得各次鬼点的坐标列于表 1 中。将这些坐标在图 3 中标出,由图可见与实际鬼光线密集位置相符。

在 $z = 19.18$ mm, $z = 64.18$ mm 和 $z = 46.42$ mm 处分别设置直径为 25 mm 的虚面,对入射平行光按 60×60 的密度均匀取样,给每条光线带上能量因子,同时在虚面上按 50×50 设置网格,采用光能叠加算

法计算各虚面上的相对光能分布并以灰级表示,叠加时均包含正常光路,结果如图4所示。可以看出存在光能密集的小区域,其位置与表1中的坐标相符。由图3可以看出,鬼点1为透镜第2面1次反射形成,又是所定位的3个鬼点中像差最小的一个,此处的相对光能密度最大,所以图4(a)中的入射光斑灰

级与鬼点处相比已经看不出了,而鬼点2为2次反射鬼点,且较大的像差降低了密集区的光能密度,所以图4(b)中可以看出正常光路的光斑,同理,图4(c)中可看出正常光路和1次反射鬼光束在鬼点3所在面形成的光斑。

表1 图2中倾斜聚焦透镜的反射鬼点坐标

Table 1 Coordinates of ghost reflected by the tilt focusing lens in Fig. 2

Ghost	Reflecting surfaces			Coordinates		
	1st	2nd	3rd	x /mm	y /mm	z /mm
1	2			0	3.59	19.18
2	2	1		0	0.11	64.18
3	2	1	2	0	0.97	46.42

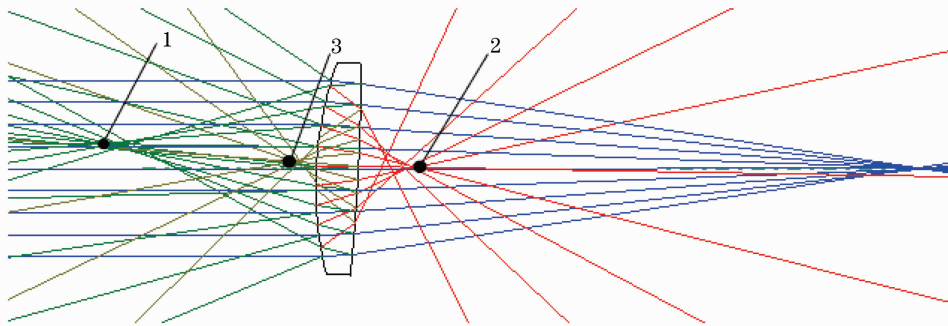


图3 利用快速定位算法获得的鬼点位置

Fig. 3 Ghost position obtained by the quick allocation algorithm

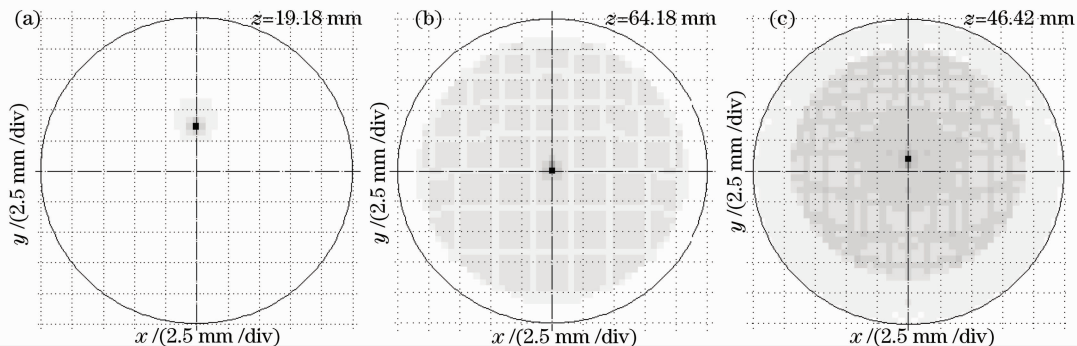


图4 各鬼点处垂轴平面内的光能密度分布

Fig. 4 Optical energy density at the vertical planes

再以含衍射元件的高功率激光器终端光学系统(FOA)为例,该系统采用楔形透镜将激光聚焦到靶场,以距离透镜第1面760 mm的窗口为 $z=0$ 面,透镜焦距近4 m,设入射光束口径 $400\text{ mm} \times 400\text{ mm}$,用衍射光学元件进行色分离,主光路是零级光,1级光用于三次谐波诊断取样,负的衍射级均是发散的,正2级、正3级光会形成鬼像。用快速定

位方法计算2级、3级衍射光和图中第4面(楔形透镜第2面)的一次反射光,得鬼点坐标列于表2中,相应的位置标于图5中。在这些位置设置直径为600 mm的虚面,用密集实际光线追迹法获得这些面上的相对光能分布如图6所示,由图可见光能聚集位置与计算相符。

表 2 终端光学系统部分鬼点坐标
Table 2 Some ghost coordinates in FOA

Ghost	Reflecting surface	Diffraction order	Coordinates		
			x /mm	y /mm	z /mm
1		2	0	-164.03	1327.79
2		3	0	-159.11	1161.7
3	4		0	4.09	184.1

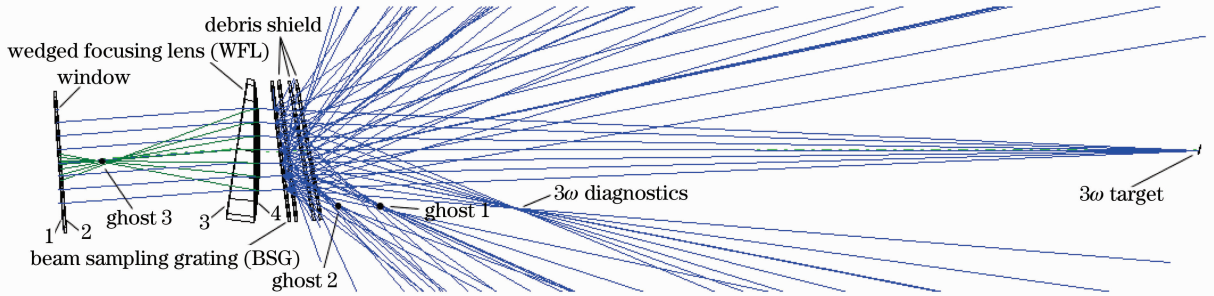


图 5 终端光学系统中的部分鬼点

Fig. 5 Some ghosts in FOA

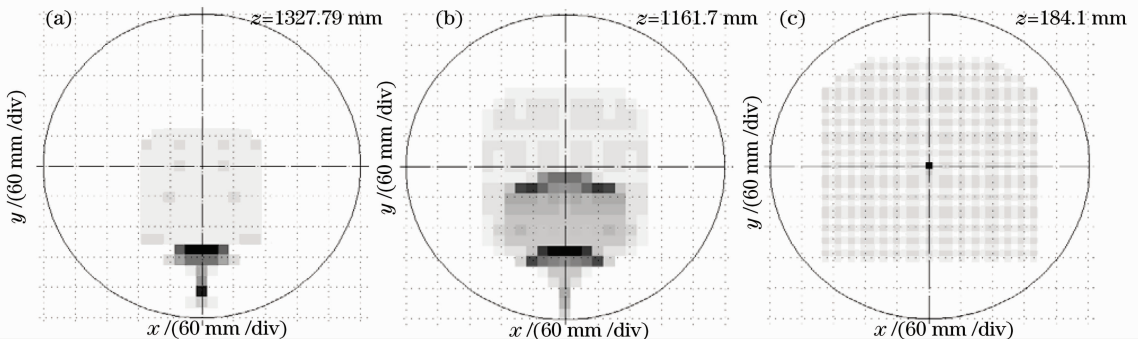


图 6 FOA 各鬼点处垂轴平面上的光能分布

Fig. 6 Optical energy densities at the various ghost points in the vertical planes of FOA

4 结 论

高功率激光系统通常是一种小相对孔径、理论上为零视场的系统,主光路经过精心设计,轴上像差很小,即使是多次反射杂散光光路,与其他光学系统相比相对孔径也不大,为了避开鬼像经常小角度倾斜透镜。本文提出了以第一近轴光路计算确定鬼点的沿轴位置,以实际主光线与此处垂轴平面的交点作为鬼点坐标的算法,用倾斜单透镜的验证表明具有足够的精度。为了兼顾衍射元件引起多级衍射鬼点的分析需要,用二叉树表示的多叉树保存所有鬼光束数据,避免了所有的重复计算,使需要的内存量最少。对终端光学系统的分析表明,即使对于像差很大的多级衍射鬼光路,用这种方法仍能快速找到鬼光束密集的区域。采用主频为 2.8 GHz 的计算机对一个含 222 个实际光学表面的激光多程放大系统捕捉了不超过 3 次反射的鬼点共 13124 个,仅耗

费机时 16 s。有了这种工具与方法,系统设计人员就可以在设计早期先确定鬼点位置,评估避鬼点方法的效果及其相关因素,如在保证主光路光束质量的前提下,透镜倾斜多少角度可避开鬼点,或在分析结果指导下对关键元件加以必要的防护。使用本软件对多程放大系统和终端光学系统的杂散光分析结果已提交给中国工程物理研究院激光聚变研究中心,双方正在长期合作的基础上探讨进一步的研究工作。同时,本文提出的鬼点快速定位算法也适用于需要进行杂散光分析的其他系统,包括成像系统,只是成像系统主要关心像面附近的鬼点,因此主要分析偶次反射鬼点。

参 考 文 献

- 1 Wang Chengcheng, Jia Huaiting, Xiang Yong *et al.*. Design of the high power third harmonic sampling beam diagnostics[J]. *Laser and Infrared*, 2006, 36(10): 977~980

- 王成程, 贾怀庭, 向 勇 等. 高强度三倍频激光束取样测量方案设计[J]. 激光与红外, 2006, **36**(10): 977~980
- 2 L. James, Jeffrey Rowe, Glenn Beer *et al.*. Ghost analysis visualization techniques for complex systems; examples from the NIF final optics assembly[C]. *SPIE*, 1999, **3492**: 306~320
- 3 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
- 4 Li Xiaotong, Cen Zhaofeng, He Zhiping *et al.*. Data structure of stray light analyzing in high power laser systems[J]. *Laser and Infrared*, 2002, **32**(5): 295~296, 299
李晓彤, 岑兆丰, 朱启华等. 大功率激光光学系统杂散光分析的数据结构[J]. 激光与红外, 2002, **32**(5): 295~296, 299
- 5 Deng Shitao, Li Xiaotong, Cen Zhaofeng *et al.*. Paraxial calculation and analysis of the ghost in technical integration line [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2004, **31**(178): 10~13
邓诗涛, 李晓彤, 岑兆丰等. 神光Ⅲ原型装置中鬼像的近轴计算与分析[J]. 光电工程, 2004, **31**(178): 10~13
- 6 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
- 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]. *Chinese 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 Li Liangyu, Wang Shifan, Li Yinzhu *et al.*. Ghosts analysis of the spatial filter in " SHENGUANG " facility [J]. *Chinese J. Lasers*, 2001, **28**(9): 826~828
李良钰, 王仕燧, 李银柱等. "神光"装置中空间滤波器的鬼点分析[J]. 中国激光, 2001, **28**(9): 826~828
- 9 Li Xiaotong, Cen Zhaofeng, Liu Haofei *et al.*. Paraxial analysis of stray light caused by multi-order diffraction and multi-reflection [C]. *SPIE*, 2005, **5627**: 20~24
- 10 Wang Fang, Zhang Qingquan, Zhu Qihua *et al.*. The analysis of ghost image in high power and multi-pass amplified systems[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(12): 1798~1802
王 方, 张清泉, 朱启华等. 高功率多程放大系统中鬼像的分析[J]. 光子学报, 2006, **35**(12): 1798~1802
- 11 Li Xiaotong, Cen Zhaofeng, Deng Shitao *et al.*. Ghost analysis of the terminal optical system in high power laser set[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, **37**(5): 839~842
李晓彤, 岑兆丰, 邓诗涛等. 高功率激光装置中终端光学系统的鬼像分析[J]. 红外与激光工程, 2008, **37**(5): 839~842
- 12 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): 1328~1332
乔战峰, 卢兴强, 赵东峰等. 神光Ⅱ升级装置终端光学组件的排布设计[J]. 中国激光, 2008, **35**(9): 1328~1332
- 13 Wang Fang, Zhu Qihua, Jiang Dongbin *et al.*. Optimization of optical design of the master amplifier in multi-pass off-axis amplification system[J]. *Acta Physica Sinica*, 2006, **55**(10): 5277~5282
王 方, 朱启华, 蒋东滨等. 多程放大系统主放大级光学优化设计[J]. 物理学报, 2006, **55**(10): 5277~5282
- 14 Li Xiaotong, Cen Zhaofeng. Geometrical Optics. Aberrations. Optical Design[M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2007
李晓彤, 岑兆丰. 几何光学. 像差. 光学设计[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2007