

文章编号: 0253-2239(2005)05-585-4

# 高功率激光装置中鬼像的模拟-应用 实际光线追迹法\*

邓诗涛<sup>1</sup> 李晓彤<sup>1</sup> 岑兆丰<sup>1</sup> 朱启华<sup>2</sup> 王 方<sup>2</sup> 刘红婕<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> 浙江大学现代光学仪器国家重点实验室, 杭州 310027)  
(<sup>2</sup> 中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 绵阳 621900)

**摘要:** 高功率固体激光装置中正常光束的残余反射将形成能量较大的鬼点, 它们极易对元器件造成损害, 因此对一阶及多阶鬼点的位置作定量分析对高功率激光系统设计是非常必要的。采用将近轴分析与实际光线追迹相结合的分析方法, 对神光Ⅲ原型装置进行了一套完整的杂散光分析。首先在近轴条件下对系统中可能产生的一阶至多阶鬼点进行了全面的计算和定位, 列出其来源和鬼点较集中的区域, 如普克尔盒一个窗口的前表面附近鬼点能量比较集中, 然后通过大量的实际光线追迹对这些元件进行重点考察, 模拟其表面的能量分布, 为如何减小鬼点数目, 从而避免鬼点能量造成的损伤提供了详尽的数据参考。

**关键词:** 几何光学; 鬼点; 高功率激光装置; 实际光线追迹

中图分类号: O436 文献标识码: A

## Mitigating Damage of the Ghost in High Power Laser Facilities by Real-Ray Trace

Deng Shitao<sup>1</sup> Li Xiaotong<sup>1</sup> Cen Zhaofeng<sup>1</sup> Zhu Qihua<sup>2</sup> Wang Fang<sup>2</sup> Liu Hongjie<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> State Key Lab of Modern Optical Instrumentation, Zhejiang University, Hangzhou 310027)  
(<sup>2</sup> Research Center of Laser Fusion, The Chinese Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900)

**Abstract:** Ghost reflections are a major consideration in the optical design of the high-power laser facilities. A thorough ghost analysis has been carried out for the technical integration line (TIL), which is the full scale prototype for Shenguang-III laser facility (SG-III), with a method of combination of paraxial ray tracing and real ray tracing. This paper takes one of the "dangerous surfaces" as example, which is the front plane of a window in Pockels cell, simulating the energy distribution graph on it by numerous real-ray tracings. According to the shape of ghost energy graph and its corresponding optical structure, suggestions are made to effectively mitigate the damage on the studied optical surfaces.

**Key words:** geometrical optics; ghost image; high-power laser systems; real-ray trace

### 1 引 言

多程放大系统作为一种强激光系统, 在鬼像分析与处理方面具有特殊的要求。为了避免高能量密度的激光光斑对系统关键元件造成损伤, 有必要对系统中所有的有效鬼像进行全面分析, 包括确定它的位置、虚实、所携带的能量以及对关键元件的作用

等<sup>[1~3]</sup>。

在神光Ⅲ原型装置中, 鬼像点位置的判断是一个非常烦琐的问题。激光将在一个由 80 多个透镜、放大器片、镜面和窗口等元件组成的光学系统中来回多次传输, 并经过放大、转向等操作, 最终汇聚到目标靶场。在处理如此复杂的光学系统的同时, 还

\* 国家自然科学基金与中国工程物理研究院联合基金(10376034)资助课题。

作者简介: 邓诗涛(1979~), 男, 四川省双流县人, 硕士研究生, 主要从事光学设计及软件的开发。

E-mail: dengshitao@zju.edu.cn

收稿日期: 2004-03-26; 收到修改稿日期: 2004-10-27

要考虑偏心、倾斜、小孔列阵等特殊的元件结构与排布方式<sup>[4]</sup>。因而有必要采用针对性很强的分析方法和相对应的软件模块。

## 2 计算与分析

计算一个鬼像系统的杂光,通常采用的是近轴近似法<sup>[5,6]</sup>。近轴近似法使用几何光学近轴公式,其特点是简单、计算量小,但对于存在偏心、倾斜这样的系统就不够精确了,只适用于定性分析。对于系统中的实际激光束,我们提出了运用有限光线追迹法进行模拟的方法,其结果与运用高斯分析<sup>[7]</sup>得到的结果吻合。有限光线追迹法是将光束由有限根光线来表示,通过实际追迹这些光线的成像情况,来模拟鬼像的形成,追迹的光线越多,结果越逼近实际情况,但计算量也越大。

基于上述两种方法的优缺点,我们采用了一种混合式的计算方法,即先用近轴近似法作定性分析,找出能量最大的几个鬼点或鬼点相对集中的区域(鬼点族),再用实际光线追迹法模拟某些易损光学

表面上的能量分布,为如何改变这些位置上光学元件的排布方式提供了详尽直观的参考。

在我们编写的软件中,主要针对光学元件表面对激光光束的一次或多次残余反射并经会聚或放大所产生的鬼像进行分析<sup>[8]</sup>。实际光线追迹时,加入了一些特殊模块,能对偏心、倾斜、小孔列阵等元件或排布方式进行准确的模拟。假定每条光线都是能量的载体,在通过考察面时,记录下它所携带的能量,最终可得到待分析光学表面上的鬼像分布图,从而可以形象地了解到考察元件上最容易遭受损伤的部位,为系统实际安装前做好防范工作提供了理论上的指导。

## 3 神光Ⅲ原型装置分析实例

### 3.1 神光Ⅲ原型装置光路结构

这里,列出了神光Ⅲ原型装置中一束光所经过的光路系统(如图1所示),它由初始放大端产生激光注入系统,经过主放大级、空间滤波器,再由折返系统使光线四次通过主放大级,最后出射到靶区<sup>[9]</sup>。

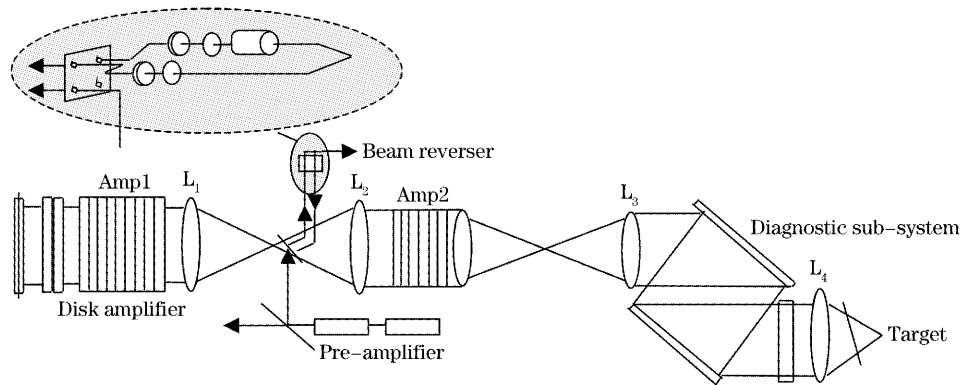


图1 神光Ⅲ原型装置光路结构简图

Fig. 1 Optical layout of TIL

### 3.2 计算结果

将该系统的结构参量输入到我们编制的高功率激光系统鬼像分析软件,首先运用近轴分析,找出鬼点较集中的区域。设置光学元件的残余反射率为0.5%,放大器件单片的放大效率为114%(尽管实际参量会与此有些偏差,但对于找出鬼点危害最大的位置及其原因是不会有影响的)。表1列出的是系统中产生的1至2阶若干个有代表性的鬼点,按鬼点到最近面距离排序。

数据表中有若干行,每行表示系统中产生的一个鬼点,它包括该鬼点的一些基本信息。例如,第一行数据表示某一距离13面1.725 mm的鬼点,反射面号RefS1,RefS2分别为14(透镜L<sub>1</sub>的前表面)和

13(腔内空间滤波器的小孔板),表示该鬼点是经由这些表面二次反射形成的,产生光线的会聚角为 $-1.111 \times 10^{-2}$  rad,光通量为 $7.578 \times 10^6$  J/cm<sup>2</sup>,在13面上的照度为 $6.566 \times 10^9$  Lux。这些数据结果都是相对入射能量设定为2 J的值。

在表1的若干反射面中,172面在系统中代表透镜L<sub>4</sub>的后表面,65面为折返系统中准直透镜的后表面,155面为助推放大器(Amp2)的入射窗的前表面,而94面为折返系统中会聚透镜的后表面。

由数据结果可以看到,大量的高能鬼点集中在13面附近,这个表面在实际系统中是空间滤波器上的小孔板,也是激光正常汇聚的位置,可见对鬼像而言,此处设置成小孔是非常必要的。

其他 1 至 2 阶高能鬼点较集中的表面有:16、17 面(主放大器靠近小孔板的窗口的前后两个表面), 77 面(普克尔斯盒中一个窗口的前表面), 97 面(折返系统中的一块旋转镜), 36 面(腔镜面)和 100 面(折返系统中一块汇聚透镜的后表面)。

表 1 神光Ⅲ原型装置中产生的 1 至 2 阶鬼点按它与光学表面的距离排序部分结果

Table 1 First to second order ghosts sorted by distance to the nearest surfaces in TIL

RefS1	RefS2	R/V	Near-Surf.	Distance /mm	$U$ /rad	Flux /( $J/cm^2$ )	Illum /Lux
14	13	R	13	1.725	$-1.111 \times 10^{-2}$	$7.578 \times 10^6$	$6.566 \times 10^9$
16	17	R	13	1.725	$1.112 \times 10^{-2}$	$6.852 \times 10^3$	$5.991 \times 10^6$
17	15	R	16	-2.559	$-1.106 \times 10^{-4}$	$1.618 \times 10^{-1}$	$6.427 \times 10^5$
100	172	R	17	-2.614	$-1.667 \times 10^{-4}$	$1.949 \times 10^3$	$3.269 \times 10^9$
65	16	R	77	2.759	$-1.721 \times 10^2$	$6.599 \times 10^4$	$9.314 \times 10^6$
65	17	R	77	2.839	$-1.714 \times 10^{-2}$	$1.096 \times 10^3$	$1.473 \times 10^5$
16	14	R	97	4.842	$-3.717 \times 10^{-3}$	4.597	$5.444 \times 10^3$
14	155	R	36	6.441	$1.329 \times 10^{-2}$	$1.259 \times 10^5$	$5.468 \times 10^6$
94	155	R	100	8.945	$-5.971 \times 10^{-2}$	$1.528 \times 10^4$	$1.716 \times 10^4$

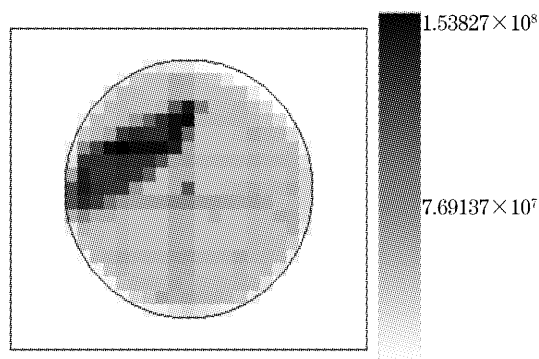


图 2 实际光线追迹得到的神光Ⅲ原型装置中 77 面上的鬼像能量分布

Fig. 2 The ghost energy distribution on the surface 77 in TIL by simulation of real-ray trace

从这个能量分布图上可以看到,77 面上的能量主要集中在该面的中心和左上区域,在设计安装时应尽量避开。再观察 77 面附近能量较大的鬼点,绝大多数都与 16 和 17 面的反射有关,它们是主放大

对于系统中产生的其它阶鬼点,可用同样的方法,找出它们的位置和能量大小。对一些能量较大的鬼点需进行重点考察。下面以 77 面为例,进行实际光线追迹,从而模拟出其表面的鬼光线能量分布情况(如图 2 所示)。

级前的窗口的前后两个表面。

### 3.3 结果分析

从以上数据结果可以看到,整个神光Ⅲ原型装置中,有几个表面附近产生了“鬼点族”,它们到邻近光学表面的距离都不超过 1 cm,并且,13 面、77 面、36 面和 100 面附近的鬼点能量较大,对这些表面形成了较大的威胁;进一步的实际光线追迹,模拟出这些表面上的鬼像能量分布图,再结合其实际的结构,可以给出相应的解决方案。例如,对于 77 面附近的鬼点,可采用将产生这些鬼点的关键表面作适当倾斜(倾斜方向要在保证不改变光路总体布局的前提下使高能鬼点区再往左上角移动,移出实际透镜所在的范围)或降低反射率的方法。比如将 16 面、17 面组成的窗口沿  $y$  轴分别倾斜  $0.2^\circ$  和  $0.5^\circ$ ,重新观察 77 面上的能量分布,结果如图 3 所示。

可见,随着 16 面窗口的倾斜角度的增大,77 面左上角的鬼像能量集中区域逐步向透镜边框移动,

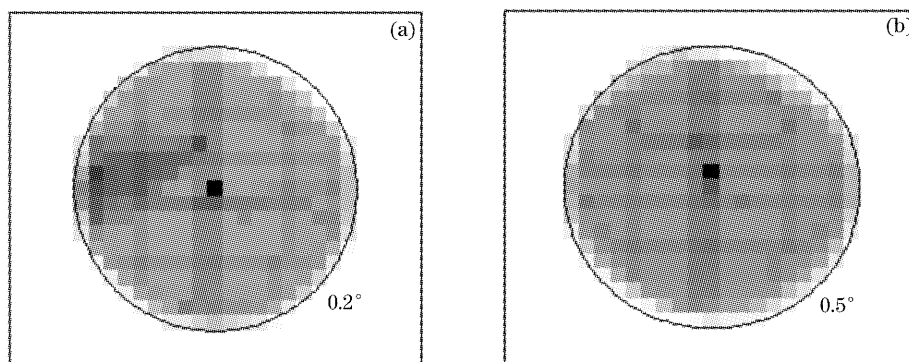


图 3 神光Ⅲ原型装置中 16 面窗口分别倾斜  $0.2^\circ$  和  $0.5^\circ$  后,77 面上的鬼像能量分布

Fig. 3 The ghost energy distribution on the surface 77 in TIL after tilting surface 16 by  $0.2^\circ$  and  $0.5^\circ$  respectively

最终移出透镜所在的空间范围,从而大大缓解了该元件可能遭受损伤的压力。

总之,对于鬼像较集中的区域,应根据鬼像分布的具体情况,结合实际的空间结构,并综合考虑成本因素,可以使易损元件有效地避开危害性较大的鬼点损伤。

## 4 结 论

本文编写的高功率激光系统鬼像分析软件的实用价值在于能快捷地揭示鬼点位置与光路参量变化之间的关联,第一次对神光Ⅲ原型装置这样复杂的高功率激光系统进行全面的鬼像分析;快速地找出了该系统中危害最大的前若干个鬼点位置,且在计算分析时,阶次较高(最高可分析6阶鬼像),搜索范围遍及整个系统;在鬼像比较集中或易损的几个元件附近,用实际光线追迹的方法,模拟出了这些面上的鬼像能量分布图,为这些部件的结构调整提出详尽的数据参考。结果经实践检验是非常吻合的。

### 参 考 文 献

- Hendrix J. L., Schweyen J., Rowe J. *et al.*. Ghost analysis visualization techniques for complex systems: examples from the NIF Final Optics Assembly[C]. *Proc. SPIE*, 1998, **3492**: 306~314
- Tan Jichun, Jing Feng, Zhu Qihua *et al.*. Stray light inside multi-pass laser cavity of the SG-Ⅲ prototype module[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2000, **12**(2): 159~163 (in Chinese)  
谭吉春,景峰,朱启华等.多通放大器腔内杂散光[J].*强激光与粒子束*, 2000, **12**(2): 159~163
- 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 (in Chinese)  
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
- Zhang X., Jing F., Shui Z. *et al.*. Preliminary design of technical integration line (TIL) for SG-Ⅲ laser facility[C]. *Proc. SPIE*, 1998, **3492**: 877~883
- Zhuang Dakui, Lin Zhunqi, Guan Xiaopeng *et al.*. Analysis and calculation for the ghost in SHENGUANG II high power laser system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(5): 582~585 (in Chinese)  
庄大奎,林尊琪,管小鹏等.神光Ⅱ高功率激光系统中鬼像的计算与分析[J].*光学学报*, 2002, **22**(5): 582~585
- Miller J., Edward R., Schweyen J. *et al.*. National ignition facility main laser stray light analysis and control[C]. *Proc. SPIE*, 1998, **3492**: 300~305
- Cen Z. F., Li X. T., He Z. P. *et al.*. Stray light analysis of basic model Gaussian beam[C]. *Proc. SPIE*, 2002, **4914**: 235~239
- 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): 295~297 (in Chinese)  
李晓彤,岑兆丰,何志平等.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): 295~297
- Jing F., Zhang X. M. *et al.*. Design optimization for main amplification stage of technical integration Line[C]. *Proc. SPIE*, 1998, **3492**: 328~333