

文章编号: 0258-7025(2010)05-1236-04

用 ZEMAX 完成复杂光学系统的鬼像分析

曹华保 卢兴强 范滇元

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

摘要 目前利用常见的一些光学 CAD 软件来完成复杂光学系统的鬼像规避设计工作还存在不足,需外部辅助程序的干预才能获得更直观的计算结果。用自编辅助程序处理 ZEMAX 执行结果,快速得到复杂光学系统的鬼像分布图的方法。该方法得到的计算结果正确,给出的鬼像分布图形象且直观,可读性好,对高功率激光装置的设计有重要帮助。

关键词 几何光学;鬼像规避;外部辅助程序;鬼像分布图

中图分类号 O 435.1 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/CJL20103705.1236

Ghost Analysis for Complex Optical Systems Based on ZEMAX

Cao Huabao Lu Xingqiang Fan Dianyuan

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

Abstract Accessorial program is actually indispensable to implement the avoidance of ghost image in complex optical systems because common optical CAD software could not accomplish ghost analysis alone. This paper proposes a method that uses programs designed to deal with the output of ZEMAX, so as to export ghost image layout conveniently. The executive results are accurate and the ghost image layouts of complex optical systems are visual and legible. This method could be applied to the high power laser systems design efficiently.

Key words geometrical optics; avoidance of ghost image; accessorial program; ghost image layout

1 引 言

高功率激光装置输出能量很高,所用光学元件表面的剩余反射不可避免,这些剩余反射光在元件参数设计不当的情况下,会在光路中的某些地方会聚形成鬼像,对光学元件造成破坏^[1]。因此规避鬼像是高功率激光装置设计的重要内容之一^[2~4]。复杂光学系统的鬼像规避设计是一项烦琐的工作,如在一个有 340 个反射表面的光学系统中,激光形成的 1 阶鬼像点有 5.7 万多个,2 阶和 3 阶鬼像分别达到了一千多万和 2.7 亿多个^[5]。准确得到所有这些鬼像点的位置分布和能量大小是完成鬼像规避设计工作的关键^[6]。在鬼像计算工作中,低阶鬼像可以用矩阵法^[7,8]完成,高阶鬼像数量巨大,只能借助

计算机的帮助来完成。在常见的光学设计软件 ZEMAX,ASAP 和 CODE V 中,ASAP 软件在鬼像分析工作中的应用在文献中已有报道^[9],ZEMAX 具备对复杂光学系统进行鬼像分析的能力,但还未见它在这方面应用的相关报道。

ZEMAX 和 ASAP 一样,可在非序列模式下采集大量的近轴光线数据对光学系统进行杂散光分析,以列表的形式生成鬼像计算数据。这些自动生成的数据不仅数量庞杂,而且不能直接反映出鬼像点在光路中的具体分布,因此需要编写辅助程序处理这些列表数据才能得到光学系统的具体鬼像分布图。本文给出了用自编辅助程序配合 ZEMAX 来对复杂光学系统进行鬼像分析的方法。通过验证说

收稿日期: 2009-07-13; **收到修改稿日期:** 2009-08-13

基金项目: 国家自然科学基金(60707019)资助课题。

作者简介: 曹华保(1984—),男,硕士研究生,主要从事脉冲放大和光束控制等方面的研究。

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

导师简介: 卢兴强(1973—),男,博士,副研究员,主要从事高功率激光放大器设计方面的研究。

E-mail: xingqianglu@siom.ac.cn

明利用 ZEMAX 也能轻松得到形象直观,且准确可靠的鬼像分布图。

2 鬼像分析的基本过程

利用 ZAMAX 的非序列模式对光学系统进行鬼像分析时,首先输入光学系统结构并设置近轴线光源,包括各光学表面曲率半径、折射率、线光源方

向余弦等。其次设置光学表面反射率和追迹的光线最小相对能量,该操作决定了鬼像最大阶数。最后开始追迹近轴光线,完成后将光线数据以 BRANCH 的形式保存到一个文本文件中。如在分析一个正负透镜组的 1,2 阶鬼像时,经过以上三步操作后用 ZEMAX 可得到图 1 所示的鬼像计算数据列表和近轴光线分裂图。

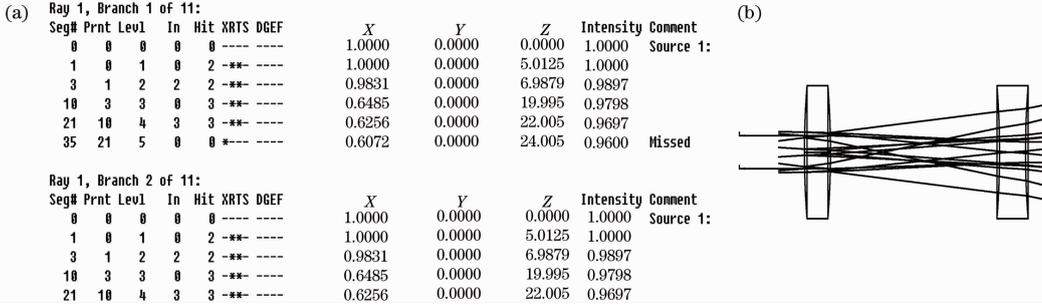


图 1 用 ZEMAX 直接得到的鬼像计算数据列表(a)和近轴光线分裂图(b)

Fig. 1 Data of stray lights (a) and layout of paraxial stray lights (b) produced by ZEMAX

图 1 中由 ZEMAX 直接给出的鬼像计算数据列表^[10],内容包含鬼像的形成来源、鬼像点 X,Y 和 Z 坐标以及鬼像点的能量等信息。在光学系统产生的鬼像数量巨大时,列表长度增加,对鬼像设计结果的统计难度也大幅增加;同样,图 1 给出的近轴光线分布图包含了所有传播光线的轨迹和会聚点,在鬼像数量巨大时绘出的图纷繁复杂,无法直接看出设计结果是否满足要求。可见,对复杂光学系统进行鬼像规避设计,直接根据 ZEMAX 给出的鬼像计算数据列表和鬼像光线分裂图很难直接判断该系统是否满足鬼像规避的要求。

得到直观的鬼像分布图是完成复杂光学系统鬼像规避设计的关键,本文利用 MATLAB 编写辅助程序读取 ZEMAX 直接给出的鬼像计算数据列表并进行处理,计算出近轴光线真实存在的会聚点,并把会聚点的坐标作为鬼像的位置保存到文本文件中,然后在 ZEMAX 环境下编写宏程序将鬼像插入系统,便能输出直观的鬼像分布图,如图 2 所示。

图 2 给出的是图 1 所述光学系统的鬼像分布图,其中小球为 1 阶鬼像分布,立方体为 2 阶鬼像。



图 2 正负透镜组鬼像分布。(a)普通模式;(b)阴影模式
Fig. 2 Ghost image distribution for a positive and negative lens group. (a) common model; (b) shaded model

对比图 2 和图 1,可以看到本文所编辅助程序有效地处理了 ZEMAX 生成的结果,能够提供清楚明了的鬼像分布图,设计者可根据该图轻易地判断是否存在危害光学系统的鬼像,完成复杂光学系统的鬼像规避设计。

3 辅助程序的编写方法

ZEMAX 鬼像分析辅助程序包括 MATLAB 程序和 ZEMAX 宏程序两部分。前者读入近轴光线数据并计算各阶鬼像分布坐标,后者将鬼像插入光学系统中,相对简单。

MATLAB 程序有三个功能,首先读取近轴光线数据^[11],其次求解各阶鬼像坐标,最后将鬼像信息保存到文本文件,该程序的重点是第二个功能单元。求解鬼像坐标的方程因不同对称性的光学系统而难易程度有所不同。对于面对称系统,只要计算一条近轴光线与对称面的交点即可;对于非对称光学系统,近轴光线并不一定相交,近轴光线距离最近处为会聚点位置,求解程序相对要复杂一些。判断光线会聚点是否为真实的鬼像需要一个判据,可以分两种情况说明。

图 3(a)是会聚点在非光线分支末端的光线片段上的情况,该光线片段被前后两个光学面所截。 Z_0 是光线片段与前光学表面的交点; Z_n 是光线片段与后光学表面的交点,此光线片段是一条线段; Z_g 是会聚点,如果该会聚点在光线片段之中,则为鬼像。使用如下判据判断该情况下的鬼像虚实:

$$\begin{cases} (Z_g - Z_b)(Z_g - Z_n) \leq 0, & \text{real ghost image} \\ \text{else,} & \text{virtual ghost image} \end{cases}$$

图 3(b)是会聚点在光线分支末端处的光线片段上的情况,从这里开始光线将不会入射到任何元件。 Z_b 是光线片段与前光学表面的交点,而 Z_n 并不是光线与光学面的交点,仅仅代表了末端光线的方向,此光学片段是一条射线。如果会聚点在射线上,则为鬼像。使用如下判据判断该情况下的鬼像虚实:

$$\begin{cases} (Z_g - Z_b)(Z_n - Z_b) \geq 0, & \text{real ghost image} \\ \text{else,} & \text{virtual ghost image} \end{cases}$$

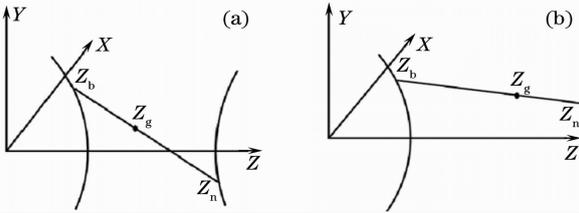


图 3 鬼像判据。(a) 非光线分支末端的情况;
(b) 光线分支末端的情况

Fig. 3 Criterion on ghost image. (a) not the end of the light branch; (b) the end of the light branch

图 4 是编写 MATLAB 辅助程序时用到的流程图。根据图 4 编写程序处理完 ZEMAX 直接生成的数据后,还需要用 ZEMAX 宏语言编写程序把鬼像作为一个半径为 r 的球形元件插入到坐标 $(0, Y, Z)$ 处,才能在 ZEMAX 中得到直观形象的鬼像分布图。该 ZEMAX 宏语言程序主体为

```

Insertobject (1), (1)
Setnsproperty 1, 1, 0, 0, "NSC_SPHE"
Setnsposition 1, 1, 2, Y
Setnsposition 1, 1, 3, Z
Setnsparameter 1, 1, 1, r
:
    
```

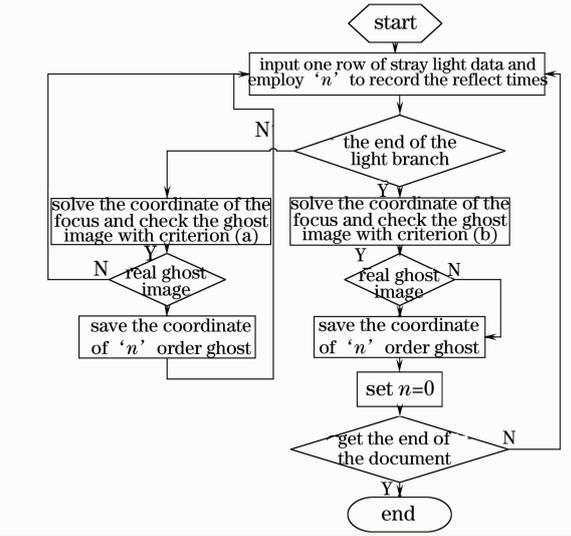
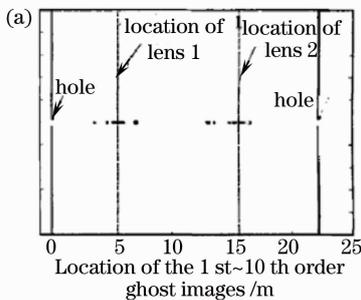


图 4 MATLAB 辅助程序流程图

Fig. 4 Flow diagram of the MATLAB accessory program

4 对计算结果的验证和应用

为了验证该方法的正确性,对文献[12]给出的空间滤波器系统进行了验证。图 5(a)是文献[12]中两相邻空间滤波器的鬼像分布,图 5(b)是用本文方法给出的鬼像分布,竖线处为透镜,黑点代表鬼像。经对比可知本文计算的鬼像分布与参考文献一致。

为进一步证明该方法的可靠性,对文献[13]报道的神光 II 8 路升级系统靶场终端光学组件设计结果进行验证,得到的 1~4 阶鬼像分布如图 6 所示。

图 6(a)为文献[13]给出的鬼像分布,图 6(b)为本文计算结果。为便于和文献[13]比较,只计算了靶镜左右各 1000 mm 范围内的鬼像,包含了所有可能危害这个系统的鬼像。图 6(a)和图 6(b)存在较大的差异,原因在于用 ZEMAX 自动进行鬼像分析只能把靶镜放置在一个特定位置进行,得到的是些非连续点,而图 6(a)是人工统计出的鬼像分布示意图,它综合考虑了靶镜的 ± 20 mm 行程,给出的是连续的鬼像分布区间。通过进一步对比两者的具

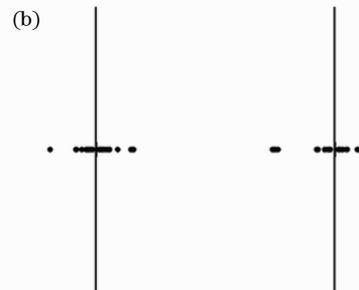


图 5 两相邻空间滤波器鬼像分布比较。(a)文献[12]给出的鬼像分布;(b)本文计算得到的鬼像分布

Fig. 5 Ghost image distribution for a spatial filter. (a) output in reference [12]; (b) output computed in this paper

体计算数据,发现图 6(b)虽然不能把靶镜行程综合考虑进去,但给出的是更为准确的鬼像分布图。

利用本文方法还可以得到神光 II 8 路升级系统

的靶场终端光学组件的 3 阶和 4 阶鬼像的单独分布,如图 7 所示。

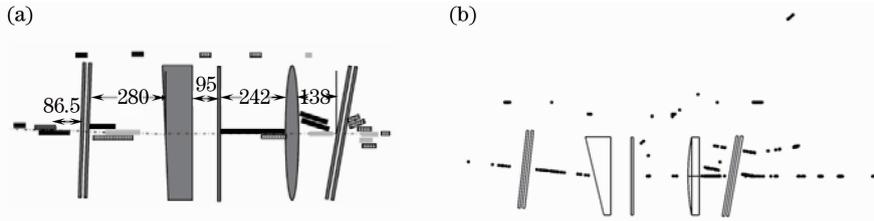


图 6 终端光学组件鬼像分布。(a)文献[13]给出的鬼像分布;(b)本文计算得到的鬼像分布

Fig. 6 Ghost image distribution for the final optics assembly. (a) output in reference [13]; (b) output computed in this paper

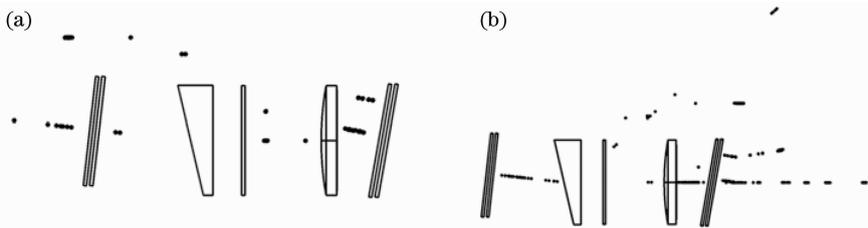


图 7 神光 II 升级系统的靶场终端光学组件。(a) 3 阶鬼像分布;(b) 4 阶鬼像分布

Fig. 7 Final optics assembly of SG-II upgrading laser. (a) the 3rd order ghosts; (b) the 4th order ghosts

5 结 论

给出了利用 MATLAB 编写辅助程序配合 ZEMAX 来快速得到复杂光学系统鬼像分布的方法。该方法经验证后能可靠分析任意阶鬼像的分布特性,在 ZEMAX 环境下也可以随意放大鬼像密集区,或者旋转系统以从各个角度观察鬼像分布。为复杂光学系统的鬼像规避设计带来很大便利,已在神光 II 升级系统的变焦空间滤波器设计中使用,为神光 II 升级系统的工程设计提供部分设计数据。

参 考 文 献

- 1 R. E. English, John L. Miller, John Schweyen. Ghost reflection analysis for the main laser of the national ignition facility[C]. *SPIE*, 1998, **3482**: 748~753
- 2 Wang Fang, Zhang Qingquan, Zhu Qihua *et al.*. The analysis of ghost image in high power and multipass 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
- 3 Liu Hongjie, Liu Lanqin, Su Jingqin *et al.*. Lens design based on ghost image and aberration analysis in high-power laser facility[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(5): 976~980
刘红婕,刘兰琴,粟敬钦等. 基于鬼像和像差分析的高功率激光装置透镜设计[J]. *光学学报*, 2008, **28**(5): 976~980
- 4 Zhuang Dakui, Lin Zunqi, 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
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
- 5 H. Benard, G. Mathieu, N. Ferriou *et al.*. Simulation and

- analysis of ghost images for the megajoule laser[C]. *SPIE*, 1999, **3492**: 321~327
- 6 Deng Shitao, Li Xiaotong, Ceng 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 Li Liangyu, Wang Shi, Li Yinzhu *et al.*. Ghost analysis of spatial filter in “Shenguang” facility[J]. *Chinese J. Lasers*, 2001, **A28**(9): 826~828
李良钰,王 仕,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, **A28**(9): 826~828
- 8 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 Journal*, 2003, **24**(2): 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, **24**(2): 55~58
- 9 J. L. Hendrix, J. Schweyen, J. Rowe *et al.*. Ghost analysis visualization techniques for complex systems: examples from the NIF final optics assembly[C]. *SPIE*, 1999, **3492**: 306~320
- 10 ZEMAX Manual, 2003. 241~315
- 11 Zheng Aqi, Cao Yi, Zhao Yang. 2004 MATLAB Practical Course[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2004. 291~298
郑阿奇,曹 弋,赵 阳. 2004 Matlab 实用教程[M]. 北京:电子工业出版社, 2004. 291~298
- 12 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
- 13 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