

文章编号: 0253-2239(2003)05-0632-04

高功率激光系统中近轴鬼像点的寻找^{*}

冯国英 陈建国 马再如

(四川大学电子信息学院, 成都 610064)

张小民 景 峰 朱启华

(中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 绵阳 621900)

摘要: 考虑了空间滤波小孔隔离鬼像点的作用后, 提出了寻找大型高功率激光装置中近轴鬼像点的矩阵光学方法, 并根据实际系统提出了判断鬼像点虚实的可行方法。所编制出的程序可用于寻找激光放大系统中的任意高阶鬼像点。

关键词: 几何光学; 鬼像点; 高功率激光系统; 矩阵光学

中图分类号: O436 文献标识码: A

1 引 言

在高功率激光装置中, 由于光学元件表面有剩余反射, 从这些表面反射的光线可能会在系统中的某些地方汇聚, 形成鬼像(ghost image)。在高功率激光系统中, 鬼像点的危险性在于: 尽管光学元件表面的反射率很低, 而且鬼像也可能是多次反射的结果, 但是由于系统本身功率很高, 因而在鬼像点处能量密度可达到非常高的量级。若处于这个位置的光学元件的损伤阈值低于这个能量密度, 则该光学元件将会发生光学破坏; 即使鬼像点处没有放置光学元件, 鬼像点处还可能因能量密度过高发生气体击穿, 影响光束的传输, 导致光束质量变坏。因此, 对鬼像点的位置和能量作定量分析对高功率激光系统设计是非常必要的, 它可为系统中光学元件的排布提供指导。但是, 鬼像点位置的判断是一个非常烦琐的问题, 因为在大型激光系统中, 光学元件数非常多, 每一个表面都可能存在透射、一次反射和多次反射, 可能发生鬼像点的反射面的组合情况有很多^[1~4], 文献[3]报道, 在有 340 个的反射表面的系统中, 仅仅是那些有潜在危险的一次反射鬼像点(也称为一阶鬼像点)就多达 57630 个, 而二次反射鬼像点(也称为二阶鬼像点, 其余的以此类推)和三次反射鬼像点则分别可达 13043590 个

和 2767690355 个。显然, 这是一个有实际应用背景的问题。值得研究的是, 是否在系统中真的有如此多的鬼像点, 是否所给出的鬼像点都是实聚焦点。在本文中, 我们充分考虑了高功率激光系统中的空间滤波器^[5]的滤波小孔的作用, 认为它可使系统中的鬼像点问题单元化, 并采用矩阵光学的方法, 使鬼像点问题进一步简化, 并给出了判断鬼像点虚实的方法, 实现了系统中各阶鬼像点的寻找。

2 空间滤波器的作用

众所周知, 空间滤波器有改善激光光束质量和起到像传递的作用, 空间滤波器中的滤波小孔直径非常小, 即使是在大型的空间滤波器中, 其直径也仅为毫米量级, 若反射光束非汇聚地经过这样的小孔, 则可通过的光波能量很小, 且通常光束的传播路径也较长, 从某种意义上讲, 滤波小孔起到了阻隔鬼像点大量形成的作用。当然, 也可能存在非常细的光束通过滤波小孔的情况, 但这属于“笔形光束”的范畴, 本文中暂不考虑。

由于滤波小孔有阻隔鬼像点形成的作用, 在研究庞大的高功率激光系统中的鬼像点时, 可以根据滤波小孔位置对系统进行分段, 于是系统被一对对的小孔划分为若干个区段。算得了每一个子区段内的鬼像点后, 就可以顺利地求得整个系统中鬼像点的情况了。子区段中鬼像点形成的光路可以总结归纳为图 1 中列举的几类构型, 这样, 鬼像点问题的分析大大地简化。图 1(a)所示的情况可用于研究激

^{*} 中国工程物理研究院与国家自然科学基金会(10176019)联合资助课题。

E-mail: fgyzl@yahoo.com.cn

收稿日期: 2002-04-01; 收到修改稿日期: 2002-06-10

光束入射到空间滤波器时所形成的鬼像点。由于滤波小孔阻隔鬼像点的作用,不再考虑处在滤波小孔右边的鬼像点,只需分析滤波小孔左边的鬼像点。图 1(b)则用于研究激光束从空间滤波器出射时的鬼像点,同样由于滤波小孔阻隔鬼像点的作用,不考

虑滤波小孔左边的鬼像点和向左传输的反射光束,只计算滤波小孔右边的鬼像点。当系统中有多个空间滤波器时,两相邻滤波器之间的情况如图 1(c)所示。两个透镜反射表面的各自反射及相互反射都要参与系统中鬼像点的形成。

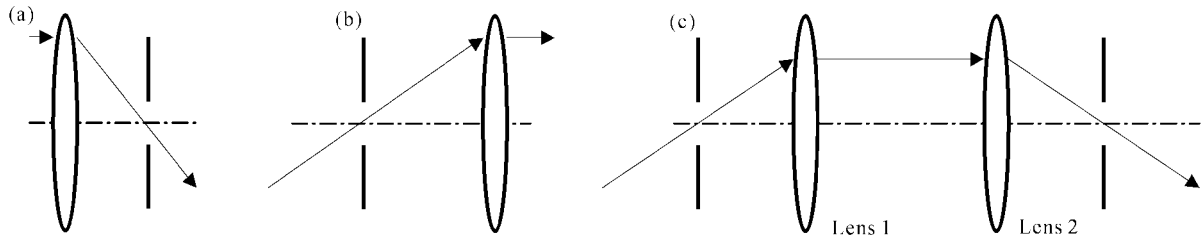


Fig. 1 Several configurations in laser system

3 鬼像点虚实的判据

常用的旋转对称光学系统对光线的作用可用矩阵 $\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix}$ 描述,光线用 $\begin{bmatrix} r \\ \theta \end{bmatrix}$ 来表示, r 为光线的离轴距离, θ 为光线与光轴的夹角。我们采用了如下的符号规则:1) 在光轴上方的光线的 r 为正,在下方为负;2) 若光线顺时针转一个锐角到光轴方向,该光线与光轴的夹角为正;若光线逆时针转一个锐角到光轴,则光线与光轴的夹角为负;3) 对于球面,顶点在球心的右面时曲率半径为正,顶点在球心的左面时曲率半径为负。

若光线由左向右传输遇到曲率半径为 R 的球面,折射率由 n_1 变为 n_2 ,设透射率为 T ,则传输矩阵

为 $T \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{n_2 - n_1}{n_2 R} & \frac{n_1}{n_2} \end{bmatrix}$;若光线由右向左传输时,则传

输矩阵为 $T \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{n_1 - n_2}{n_1 R} & \frac{n_2}{n_1} \end{bmatrix}$ 。当光线从左至右传输距

离 L 时,传输矩阵为 $\begin{bmatrix} 1 & L \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$;当光线从右至左传输

距离 L 时,传输矩阵为 $\begin{bmatrix} 1 & -L \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$ 。当光线从左至右

传输遇到反射率为 V_R ,曲率半径为 R 的反射表面时,传输矩阵为 $V_R \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 2/R & 1 \end{bmatrix}$;当光线从右至左传输

被反射时,传输矩阵为 $V_R \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -2/R & 1 \end{bmatrix}$ 。本文中,还

使用了负距离矩阵 $\begin{bmatrix} 1 & -L \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$ 。我们规定的正的传播

方向是固定的(向右为正),光线向右传输为正,向左传输为负。在光线向右传输时,要反算它传输 L 距离之前的位置和方向,就要用到负距离矩阵。在光线向左传输时,要计算它传输 L 距离后的位置和方向,也要用到负距离矩阵;而要反算它在传输 L 距离之前的位置和方向时,用的是正距离矩阵。因此,本文中的距离传输矩阵只与所考虑距离的正负有关,而与光线是正向或逆向没有关系,也与折射率是否为正或负以及其大小没有直接的关系。

在图 1(a)构型中,平行光 $\begin{bmatrix} r \\ \theta \end{bmatrix}$ (设 $\theta = 0$) 经过传

输矩阵为 $\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix}$ 的光学系统后变为 $\begin{bmatrix} r' \\ \theta' \end{bmatrix} =$

$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r \\ \theta \end{bmatrix}$,再经过一定的空间距离 L ,则该光线

经过的总的传输矩阵为 $\begin{bmatrix} A + CL & B + DL \\ C & D \end{bmatrix}$,如果

光线汇聚则应满足: $A + CL = 0$,即鬼像点位置 $L = -A/C$ 。若光线经过光学系统后是向右传输的,

则 $L > 0$ 才可能产生鬼像点,否则得到的是虚像点;若光线经过光学系统后是向左传输的,则 $L < 0$ 才能产

生鬼像点。上述情况可总结为:若 $(-1)^m \text{sgn } L > 0$,则鬼像点存在(其中 m 为反射次数,sgn 为符号函数)。在判断透镜向右反射可能出现的鬼像点时,应注意鬼像点位置是否在滤波小孔的左面,若是,则是鬼像点,若在其右面,可不考虑。

在图 1(b)构型中,点光束 $\begin{bmatrix} r \\ \theta \end{bmatrix}$ (设 $r = 0$) 经过传

输矩阵为 $\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix}$ 的光学系统后变为 $\begin{bmatrix} r' \\ \theta' \end{bmatrix} =$

$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r \\ \theta \end{bmatrix}$,若再经过一定的空间距离 L 后,则该

光束经过的总的传输矩阵为 $\begin{bmatrix} A+CL & B+DL \\ C & D \end{bmatrix}$,

如果光线汇聚则应满足: $B+DL = 0$,即鬼像点位置 $L = -B/D$ 。若光束经过光学系统后是向右传输的,则 $L > 0$ 才可能产生鬼像点,否则得到的是虚像点;若光束经过光学系统后是向左传输的,则 $L < 0$ 才能产生鬼像点。同样可总结为:若 $(-1)^m \text{sgn } L > 0$,则鬼像点存在(其中 m 为反射次数,sgn 为符号函数)。在判断透镜向右反射可能出现的鬼像点时,应注意鬼像点位置是否在滤波小孔的左面,若是,则是鬼像点,若在其左面,可不考虑。

图 1(c)的情况则稍复杂一些。在判断光线经透镜 1(即图中左边的那个透镜)向右透射时可能出现的鬼像点时,应注意鬼像点位置与透镜 1 的距离,若小于两透镜间的距离 d ,则可认为是一个鬼像点位置,若大于 d ,则要计算该光束透过另一个透镜即透镜 2 后在其右面的聚焦点位置,若小于透镜 2 到空间滤波小孔的距离,可视为鬼像点位置,若大于透镜 2 到空间滤波小孔的距离,可不予考虑。对透镜 2

向左反射的情况也可作类似处理。

4 实例计算

在图 1(a)构型中,设透镜的曲率半径分别为 -5 m 和 5 m ,两球面顶点间的距离为 0.03 m ,透镜折射率为 1.5 。利用我们编制的计算程序给出 10 阶以内的实际鬼像点的阶数和位置,如图 2(a)所示。从该图可以看到,对于对称型的透镜,鬼像点的位置并不是对称的,总体趋势是阶数越高,离透镜越近。在透镜左边的 5 个鬼像点中,从左往右数的第一、第二个鬼像点分别为一阶和三阶鬼像点;在透镜右边的 5 个鬼像点中,最右面的鬼像点是二阶鬼像点;图中其余的点是第三阶到第十阶鬼像点。在图 1(b)构型中,设透镜的参数保持不变,计算给出的 10 阶以内的实际鬼像点的阶数和位置如图 2(b)所示。透镜左边有 5 个鬼像点,最靠近空间滤波器滤波小孔的是一阶鬼像点,其次是三阶鬼像点;透镜右边也有 5 个鬼像点,最右面的是二阶鬼像点。不难看出,同样有鬼像点反射阶数越高越向透镜移动的趋势。

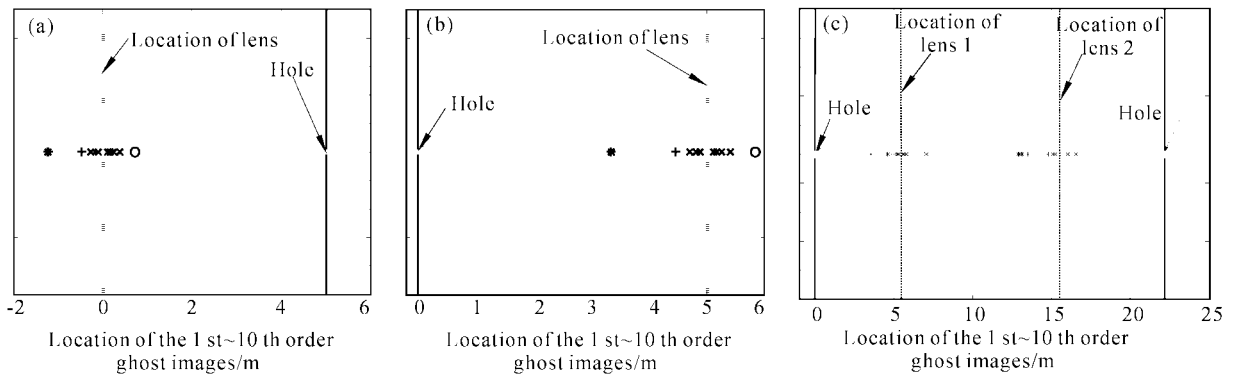


Fig. 2 Calculated orders and locations of ghost image

图 1(c)所示构型的鬼像点会更复杂一些,不仅要考虑在单个透镜内的多次反射,还要考虑光束在透镜间的表面的反射和透射。设透镜 1 的曲率半径分别为 -5 m 和 6 m ,两球面顶点间的距离为 0.03 m ,透镜折射率为 1.5 ,透镜 1 的左面距左边的滤波小孔 5.4504 m ;透镜 2 的曲率半径分别为 -5 m 和 10 m ,两球面顶点间的距离为 0.03 m ,透镜折射率为 1.5 ,透镜 2 的右面距右边的滤波小孔 6.6578 m ;两个透镜间的距离为 10 m 。在图 2(c)中,我们给出了 10 阶以内的鬼像点,共有 620 个。一阶鬼像点有两个,离左边的滤波小孔的距离分别为

3.53 m (最左面的鬼像点)和 13.49 m 。二阶鬼像点有四个,离左边的滤波小孔的距离分别为 6.37 m 、 6.92 m 、 7.02 m 和 16.44 mm 。其余的高阶鬼像点非常密集地分布在透镜附近。

结论 寻找高功率激光系统中的鬼像点问题是个非常繁琐的问题。由于系统中光学表面相当多,随着所考虑的鬼像点阶数的增加,可能产生的鬼像点数目相当庞大。我们在仔细分析滤波小孔的作用后认为:空间滤波器中的滤波小孔在起到改善激光光束质量的同时也起到了阻隔鬼像点大量形成的作用,

系统中的滤波小孔将系统分为一段段的子区段, 错综复杂的光学系统中鬼像点的求取可变为较为简单的子区段鬼像点的求取, 鬼像点问题将大大简化。我们采用矩阵光学方法, 实现了鬼像点的快速寻找。而判断系统中鬼像点是否真正存在, 对于系统光路排布非常重要。本文中给出了可以正确判断鬼像点虚实的必要条件: $(-1)^m \text{sgn } L > 0$ 。

参 考 文 献

- 1 Tan Jichun, Jing Feng, Zhu Qihua *et al.*. Stray light inside multi-pass laser cavity of the SG-III prototype module. *High Power Laser and Particle Beams* (强激光与粒子束), 2000, **12**(2):159~163 (in Chinese)
- 2 Li Liangyu, Wang Shifan, Li Yingzhu *et al.*. Ghosts analysis of the spatial filter in "SHENGUANG" facility. *Chinese J. Lasers* (中国激光), 2001, **A28**(9):826~828 (in Chinese)
- 3 Hendrix J L, Schweycen J, Rowe J *et al.*. Ghost analysis visualization techniques for complex systems examples from the NIF final optics assembly. *Proc. SPIE*, 1998, **3492**:306
- 4 Benard H, Mathicu G, Ferriou N *et al.*. Simulation and analysis of ghost images for the magajoule laser. *Proc. SPIE*, 1998, **3492**:321
- 5 He Wei, Chen Qinghao, Xu Renfang *et al.*. Image transfer based automatic laser alignment technique for laser-fusion facility. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1999, **19**(9):1279~1283 (in Chinese)

Locating the Near Axial Ghosts in the High Power Laser System

Feng Guoying Chen Jian'guo Ma Zairu

(Department of Optoelectronics, Sichuan University, Chengdu 610064)

Zhang Xiaoming Jing Feng Zhu Qihua

(Research Center of Laser Fusion, The Chinese Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900)

(Received 1 April 2002; revised 10 June 2002)

Abstract: After considering the fact that the holes contained in spatial filter may also serve to isolate the ghosts in different areas, a optical matrix method for locating the nearaxial ghosts in high power laser systems is proposed. Practical criterions of distinguish real and virtual ghosts are put forward. Program designed can be used to calculate arbitrary order ghosts of a laser amplifier system.

Key words: geometrical optics; ghost image; high power laser system; matrix optics

全国第 11 次光纤通信暨第 12 届集成光学学术会议征文通知 (第二轮)

本次会议由中国通信学会光通信委员会、中国电子学会通信学分会、中国光学学会纤维光学与集成光学专业委员会联合主办, 南京邮电学院、南京富士通信设备有限公司等单位承办。

本次会议将于 2003 年 10 月 8 日~10 日在南京举行。会议将邀请多位中国科学院院士、中国工程院院士以及国内著名的光通信专家和企业家到会作报告; 欢迎全国各高等院校、科研部门的科技人员投稿, 展示最新研究成果; 欢迎规划、设计、建设、运行维护部门的工程技术人员投稿, 交流实际工作中的宝贵经验; 欢迎相关企业、运营商到会介绍新产品、新业务。

一 会议征文范围

- | | |
|--------------|------------------|
| 1 网络与系统技术 | 4 光无源器件与集成光路 |
| 2 光纤与光缆 | 5 光纤传感 |
| 3 光有源器件与光电集成 | 6 光纤通信仪表、测量技术与其它 |

二 会议征文只接受电子文档, 征文具体范围、要求, 请看南京邮电学院校园网征文通知。

<http://www.njupt.edu.cn/pnjupt/org/Department6/lxzy/>

三 征文截稿日期: 2003 年 6 月 30 日。

四 通信地址: 江苏南京新模范马路 66 号

联系人: 南京邮电学院光信息技术系 张小英

邮政编码: 210003

电话/传真: (025)3492308

E-mail 地址: zhangxy@njupt.edu.cn

电话: (025)3492248

南京邮电学院科技处 黄金仙

全国第 11 次光纤通信
暨第 12 届集成光学学术会议筹备组
2003 年 3 月 5 日