

文章编号: 0258-7025(2003)11-0989-04

寻找激光系统中离轴鬼点和鬼线的矩阵方法

冯国英¹, 陈建国¹, 曹冲¹, 张小民², 景峰², 朱启华²

(¹ 四川大学电子信息学院, 四川成都 610064; ² 中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川绵阳 621900)

摘要 在实际的高功率激光系统中, 当光学元件非共轴放置、光学元件有像散特性、光束倾斜入射时, 系统中会出现许多离轴的鬼点, 鬼点也可能变为鬼线。采用 4×4 光学矩阵, 给出了计算高功率激光装置中的任意 n 阶离轴鬼点或鬼线的方法, 还给出了判断鬼点或鬼线虚实的判据。

关键词 非线性光学; 鬼点和鬼线; 高功率激光系统; 离轴鬼点; 矩阵光学

中图分类号 O 435.1; O 437.5 **文献标识码** A

Matrix Method for Locating the Off-axial Ghost Points and Lines in High Power Laser System

FENG Guo-ying¹, CHEN Jian-guo¹, CAO Chong¹,
ZHANG Xiao-min², JING Feng², ZHU Qi-hua²

¹Department of Optoelectronics, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610064, China

²Research Center of Laser Fusion, The Chinese Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China

Abstract In a practical high power laser system, it may happen that all optical elements do not share the same axis, some optical components may show certain astigmatism, and laser beams may be deliberately arranged to incident at non-zero angles to the optical axis. In this work, using the 4×4 optical matrices, the method for locating the off-axial ghost points (or ghost lines) of various orders in high power laser system have been given. In addition, practical criterions of specifying real and virtual ghost points (or ghost lines) have been put forward.

Key words nonlinear optics; ghost point and ghost line; high power laser system; off-axial ghosts; matrix optics

1 引言

在大型高功率激光系统中, 鬼点是一个值得关注的问题^[1~4]。如果高功率激光系统中的光学元件处于鬼像点位置, 鬼点处的能量或功率超过元件的破坏阈值时, 将发生元件体损伤或面损伤, 还可能由此引发一系列光学元件的破坏, 造成巨大的损失。为保证系统安全运行, 应充分考虑系统中可能存在的鬼点。鬼点的位置、能量和形态与系统的光路排布有很大的关系。在激光系统中, 为了有效提取储存在激光增益介质中的储能, 常采用多程放大方案;

为了避免“笔形光束”造成的危害, 光学元件可能会采用非共轴的放置方式^[5]。在这类光学系统中, 光学元件可能倾斜放置, 从而具有像散特性; 某些光学元件还可能放在离轴的某个位置, 导致平行光束在系统中传输时可能与光轴成一夹角, 光束聚焦时焦点可能不在轴上。当激光系统中存在上述的部分或全部情况时, 鬼点将是一个非常复杂的问题。激光束经光学元件表面一次或多次剩余反射后, 可产生不在光轴上的汇聚点(称为离轴鬼点), 还可能产生一定长度的亮线(称为鬼线)。鬼点或鬼线产生时所

收稿日期: 2002-04-22; 收到修改稿日期: 2002-08-12

基金项目: 中国工程物理研究院与国家自然科学基金会(10176019)联合资助项目。

作者简介: 冯国英(1969—), 女, 四川大学电子信息学院教授, 博士。主要研究方向为高功率固体激光技术、线性和非线性光束传输与控制、光通讯等。E-mail: fgyzl@sohu.com

经过的剩余反射次数称为鬼点或鬼线的阶数。在对实际系统进行分析后,我们认识到空间滤波器的滤波小孔不仅有改善激光光束质量的作用,还有阻碍鬼点大量形成的作用。在寻找高功率激光系统中的鬼点时,可用空间滤波器的小孔作为分界点,将系统分为一段一段的单元,复杂系统的鬼点问题可分解为逐个求解每一段单元的鬼点问题。

本文利用矩阵光学方法推出了离轴鬼点或鬼线位置的计算公式,提出判断鬼点(或鬼线)虚实的判据,并将它们用于一般像散光学系统(包含旋转对称光学系统、简单像散光学系统)的讨论和分析。

2 基本原理

通常的轴对称光学系统对光线的作用可用 2×2 矩阵来描述,而对于具有像散特性的光学系统来

说,则需用 4×4 的矩阵 $\begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} =$

$\begin{pmatrix} A_1 & A_2 & B_1 & B_2 \\ A_3 & A_4 & B_3 & B_4 \\ C_1 & C_2 & D_1 & D_2 \\ C_3 & C_4 & D_3 & D_4 \end{pmatrix}$ 来描述^[6]。同时,光线的位置和

方向可用: $\begin{pmatrix} \bar{r} \\ \bar{\theta} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r_x \\ r_y \\ \theta_x \\ \theta_y \end{pmatrix}$ 来表示。其中, $\bar{r} = \begin{pmatrix} r_x \\ r_y \end{pmatrix}$ 表

示在垂直于光轴的横截面上的光线坐标, $\bar{\theta} = \begin{pmatrix} \theta_x \\ \theta_y \end{pmatrix}$ 表示光线与光轴的夹角在 x 和 y 方向的投影。

若光束由一组 x 和 y 相同的光线构成,则该光束为点光束;若光束由一组 θ_x 和 θ_y 相同的光线组成,则该光束为平行光束。

2.1 入射光束为平行光时的鬼点位置

若入射激光束为平行光,则描述该光束的 $\begin{pmatrix} \bar{r} \\ \bar{\theta} \end{pmatrix}$ 中的 $\bar{\theta}$ 为固定值。当光束在各光学表面反射、透射和在自由空间传输时,可用光学矩阵 $\begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix}$ 描述所经过的光学系统的作用。各光线经

光学系统传输变换后满足: $\begin{pmatrix} \bar{r}' \\ \bar{\theta}' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \bar{r} \\ \bar{\theta} \end{pmatrix}$ 。若被变换的光束再经过一空间距离 L ,所经过的总的光学系统可用矩阵表示为: $\begin{pmatrix} A' & B' \\ C' & D' \end{pmatrix} =$

$\begin{pmatrix} E & L \\ O & E \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A+LC & B+LD \\ C & D \end{pmatrix}$,各光线均

满足: $\begin{pmatrix} \bar{r}' \\ \bar{\theta}' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A' & B' \\ C' & D' \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \bar{r} \\ \bar{\theta} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A'\bar{r} + B'\bar{\theta} \\ C'\bar{r} + D'\bar{\theta} \end{pmatrix}$ 。若此时是光束的汇聚点,则各光线的 $\bar{r}' = A'\bar{r} + B'\bar{\theta}$ 应为一常数。由于入射光束为一平行光, \bar{r} 可取任意空间位置,由此可推得: $A' = A + LC = 0$,即

$$L = -AC^{-1} \quad (1)$$

当总的光学系统为旋转对称系统时,可以证明 L 是对称的,即: $L = \begin{pmatrix} L & 0 \\ 0 & L \end{pmatrix}$,光束在距光学系统最后一面 L 处有一汇聚点,汇聚点位置为

$$\begin{pmatrix} w_x \\ w_y \end{pmatrix} = B'\bar{\theta} = (B + LD)\bar{\theta} \quad (2)$$

当总的光学系统为简单像散系统且主轴分别在 x 和 y 方向时, L 可表示为: $L = \begin{pmatrix} L_x & 0 \\ 0 & L_y \end{pmatrix}$,光束在距光学系统最后一面 L_x 距离处有一沿 y 方向的汇聚线,汇聚线离光轴的距离为

$$w_x = (B_x + L_x D_x)\theta_x \quad (3)$$

在距光学系统最后一面 L_y 距离处有一沿 x 方向的汇聚线。汇聚线离光轴的距离为

$$w_y = (B_y + L_y D_y)\theta_y \quad (4)$$

当系统为一般像散系统时,由(1)式求得的 L 为一般形式: $L = \begin{pmatrix} L_x & L_{xy} \\ L_{xy} & L_y \end{pmatrix}$ 。可将 L 对角化为 $L' =$

$\begin{pmatrix} L_{x'} & 0 \\ 0 & L_{y'} \end{pmatrix}$,则光束在距光学系统最后一面 $L_{x'}$ 和 $L_{y'}$ 距离处分别有一汇聚线

$$\begin{aligned} L_1 &= (A + L_{x'}C)\bar{r} + (B + L_{x'}D)\bar{\theta} \\ L_2 &= (A + L_{y'}C)\bar{r} + (B + L_{y'}D)\bar{\theta} \end{aligned} \quad (5)$$

2.2 入射光束为聚焦光束时的鬼点位置

若入射光束为一聚焦光束,其中的每一条光线可用 $\begin{pmatrix} \bar{r} \\ \bar{\theta} \end{pmatrix}$ 表示,且 \bar{r} 为固定值。光线被光学矩阵

$\begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix}$ 变换后应满足: $\begin{pmatrix} \bar{r}' \\ \bar{\theta}' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \bar{r} \\ \bar{\theta} \end{pmatrix}$ 。若光线再传输一空间距离 L ,则所经过的总的光学系统

可表示为: $\begin{pmatrix} A' & B' \\ C' & D' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} E & L \\ O & E \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A+LC & B+LD \\ C & D \end{pmatrix}$,光线应满足: $\begin{pmatrix} \bar{r}' \\ \bar{\theta}' \end{pmatrix} =$

$\begin{pmatrix} A' & B' \\ C' & D' \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \bar{r} \\ \bar{\theta} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A'\bar{r} + B'\bar{\theta} \\ C'\bar{r} + D'\bar{\theta} \end{pmatrix}$ 。若此时是光束汇

聚成一点的位置,则 $\bar{r}' = A'\bar{r} + B'\bar{\theta}$ 应为一常数。此外,由于 $\bar{\theta}$ 可取任意空间位置,由此可推得: $B' = B + LD = 0$,即

$$L = -BD^{-1} \quad (6)$$

若光学系统为旋转对称系统,则 L 是对称的: $L = \begin{pmatrix} L_x & 0 \\ 0 & L_y \end{pmatrix}$, 光束在距光学系统最后一面 L 距离处有一汇聚点,其位置为

$$\begin{pmatrix} w_x \\ w_y \end{pmatrix} = A'\bar{r} = (A + LC)\bar{r} \quad (7)$$

若系统为简单像散系统且主轴分别在 x 和 y 方向上,则 $L = \begin{pmatrix} L_x & 0 \\ 0 & L_y \end{pmatrix}$, 光束在距光学系统最后一面 L_x 距离处有一沿 y 方向的汇聚线,汇聚线离光轴的距离为

$$w_x = (A_x + L_x C_x)r_x \quad (8)$$

光束在距光学系统最后一面 L_y 距离处有一沿 x 方向的汇聚线,汇聚线离光轴的距离为

$$w_y = (A_y + L_y C_y)r_y \quad (9)$$

若总的光学系统为一般像散系统,则由(6)式求得的 L 为一般形式: $L = \begin{pmatrix} L_x & L_{xy} \\ L_{xy} & L_y \end{pmatrix}$, 可将 L 对角化为 $L' = \begin{pmatrix} L_{x'} & 0 \\ 0 & L_{y'} \end{pmatrix}$, 光束在距光学系统最后一面 $L_{x'}$ 和 $L_{y'}$ 距离处分别有一汇聚线,两线离光轴的距离分别为

$$w_1 = (A + L_{x'}C)\bar{r} + (B + L_{x'}D)\bar{\theta}$$

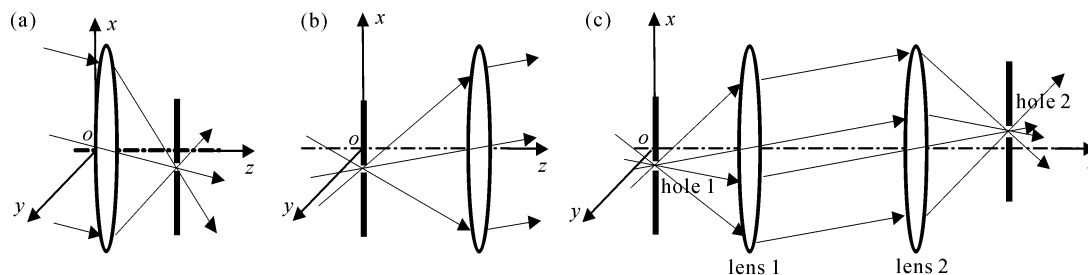


图 1 激光系统中的几种构型

Fig. 1 Several configurations in laser system

在图 1(b)构型中,聚焦光束入射到透镜上,聚焦点位置为离轴位置 $x = 0.005$ m, $y = -0.002$ m。设双凸透镜的曲率半径分别为 3 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,透镜左表面距小孔的距离为 4.6143 m。光束在透镜的两表面多次反射,产生 10 阶以内的鬼点有 10 个。

$$w_2 = (A + L_{y'}C)\bar{r} + (B + L_{y'}D)\bar{\theta} \quad (10)$$

2.3 判断鬼点虚实的判据

在判断鬼点是虚汇聚点还是实汇聚点时,可采用如下技巧:设初始激光光束是向右传输的,反射光束经过奇数次反射后变为向左传输光束,经过偶数次反射后变为向右传输光束。光束被反射后向左传输时,若要产生实的汇聚点, L 需取负值;光束被反射后向右传输时,若要产生实的汇聚点, L 需取正值。总结上面两种情况,鬼点的存在条件为

$$(-1)^m \text{sgn}(L) > 0 \quad (11)$$

式中, m 为反射次数, sgn 为符号函数。

3 具体计算实例

我们针对高功率激光系统中常用到的三种单元构型进行离轴鬼点的模拟计算。

对于图 1(a)这种构型,计算了倾斜角 $\theta_x = 0.03^\circ$, $\theta_y = -0.02^\circ$ 的平行光束形成的 10 个 10 阶以内的鬼点。计算时,假设双凸透镜两球面的曲率半径均为 5 m,两球面顶点间的距离为 0.03 m,透镜折射率为 1.5。表 1 列出了 10 阶以内的鬼点的空间位置及相应的阶数。表中的轴向距离是以透镜左表面顶点为起点进行计算的,向右为正方向。从表中可见,在所给出的构型下,奇数阶鬼点在透镜的左边,偶数阶鬼点在透镜的右边,随着阶数的增加,鬼点逐渐向透镜靠近,鬼点的离轴距离也逐渐变小。

各阶鬼点的空间位置及相应的阶数分别列于表 2。由表 2 的数据可以看出,在透镜的左边有第 1,3,5,7 和 9 阶鬼点各一个,在透镜的右边有第 2,4,6,8 和 10 阶鬼点各一个,随着反射次数的增加,鬼点有逐渐向透镜和光轴靠近的趋势。

表 1 计算所得鬼点的阶数及空间位置(图 1(a)构型)

Table 1 Calculated order numbers and locations of the ghost

Order number of the ghosts	z/m	x/m	y/m
1	-1.23	0.03763	-0.02509
2	0.72	0.02166	-0.01444
3	-0.47	0.01534	-0.01022
4	0.38	0.01198	-0.00799
5	-0.27	0.00993	-0.00662
6	0.24	0.00856	-0.00571
7	-0.17	0.00761	-0.00507
8	0.16	0.00692	-0.00461
9	-0.10	0.00642	-0.00428
10	0.11	0.00605	-0.00403

表 2 计算所得鬼点的阶数及空间位置(图 1(b)构型)

Table 2 Calculated order numbers and locations of the ghost

Order number of the ghosts	z/m	x/m	y/m
1	2.22	-0.00260	0.00104
2	5.39	-0.00084	0.00033
3	4.06	-0.00064	0.00026
4	5.00	-0.00043	0.00017
5	4.32	-0.00038	0.00015
6	4.86	-0.00030	0.00012
7	4.44	-0.00028	0.00011
8	4.78	-0.00024	0.00010
9	4.51	-0.00023	0.00009
10	4.72	-0.00020	0.00008

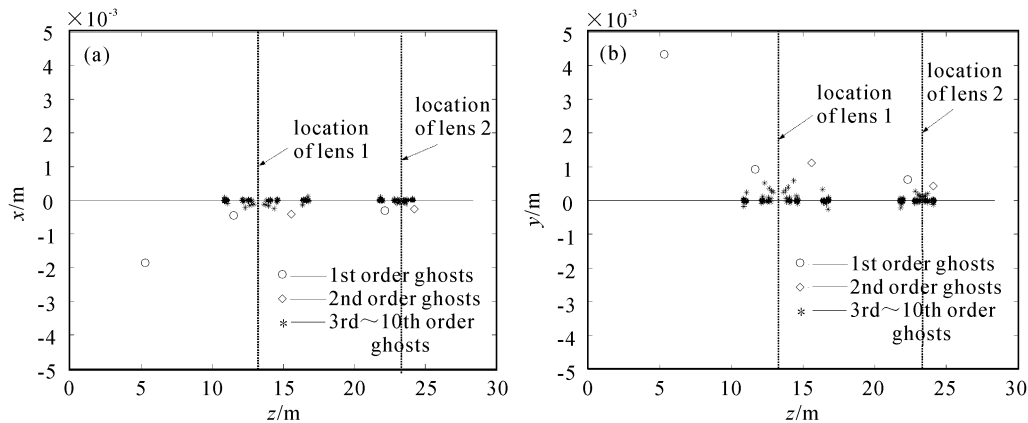


图 2 计算所得离轴鬼点在 xoz 平面上的投影(a)和在 yoz 平面上的投影(b)

Fig. 2 Calculated off-axis ghosts projected in xoz plane (a) and yoz plane (b)

图 1(c)构型代表激光系统中相邻两个空间滤波器间的情况, hole 1, hole 2 分别是前后空间滤波器中的滤波小孔。聚焦光束入射到透镜上,聚焦点位置为离轴位置 $x = 0.003$ m, $y = -0.007$ m。lens 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, lens 1 左表面距 hole 1 的距离为 4.6143 m。lens 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, lens 2 右表面距 hole 2 的距离为 4.6143 m。两个透镜间的距离为 10 m。激光光束在两个透镜的四个表面反射和透射,产生 10 阶以内的鬼点有 557 个。各阶鬼点均为空间分布,在 xoz 平面上的投影如图 2(a)所示,在 yoz 平面上的投影如图 2(b)所示。

参 考 文 献

1 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

2 H. Benard, G. Mathieu, N. Ferriou *et al.*. Simulation and analysis of ghost images for the magajoule laser [C]. *SPIE*, 1999, **3492**:321~327

3 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 (强激光与粒子束)*, 2000, **12**(2):159~163 (in Chinese)

4 Li Liangyu, Wang Shifan, Li Yingzhu *et al.*. Ghosts analysis of the spatial filter in "SHENGUANG" facility [J]. *Chinese J. Lasers (中国激光)*, 2001, **A28**(9):826~828 (in Chinese)

5 M. Hensian, P. Renard, J. Auerbach *et al.*. The use of beam propagation modeling of beamlet and Nova to ensure a "safe" national ignition facility laser system design [C]. *SPIE*, 1997, **3047**:84~95

6 Lü Baida. *Laser Optics-laser Beam Propagation and Beam Quality Control [M]*. Chengdu: Sichuan University Press, 1992. 16 (in Chinese)