

机械转镜隔离器的光束位置复原特性研究

周 烽 邓锡铭

(中国科学院上海光学精密机械研究所)

胡 绍 衣

(国嘉光电有限公司)

提 要

本文给出了运动光束位置复原的分析方法, 对用于高功率激光核聚变实验装置的高速机械转镜隔离器的光束复原特性作了详细的讨论, 并得到了光束复原应满足的条件。

关键词: 机械转镜隔离器; 光束位置复原。

一、引 言

为了隔离高功率激光核聚变实验装置中放大的自发辐射(ASE), 我们设计了高速机械转镜隔离器。转镜隔离器将静态的入射光束转换成运动光束, 运动光束扫过放在透镜焦点处的小孔, 然后将经过小孔的运动光束复原到静态位置^[1]。由于激光主脉冲与转镜之间有一定的同步误差, 使得激光主脉冲到达转镜反射面时, 入射光束与转镜镜面法线间的夹角不再保持恒定, 反射后光束的传播方向, 由转镜的空间位置决定。对瞄准精度很高的激光打靶来说, 激光束在传输过程中与原光轴方向的任何角偏都是不允许的。因此必须使经转镜后的光束复原, 把通过透镜焦点处滤波小孔的扫描光束恢复成静态光束, 隔离器最终输出的光束方向, 保持不变, 而与转镜转动无关。

本文用矩阵描述多次反射系统, 建立起光束位置复原的分析理论, 详细讨论了我们所采用光路的复原特性。

二、理 论 分 析

光束复原特性的分析是设计转镜光路的基础。为此我们首先建立运动光束的复原判据。

若用单位矢量 A 、 A' 和 N 分别代表入射光线、出射光线和反射镜的镜面法线, 矢量形式的反射定律可写成^[2]

$$A' = A - 2N(A \cdot N), \quad (1)$$

上式亦可写成矩阵形式

$$A' = RA, \quad (2)$$

式中 R 为三阶方式, 可以看成是物、像坐标的基底转换矩阵,

收稿日期: 1987年9月4日

$$R = \begin{bmatrix} 1-2N_x^2 & -2N_yN_x & -2N_zN_x \\ -2N_xN_y & 1-2N_y^2 & -2N_zN_y \\ -2N_xN_z & -2N_yN_z & 1-2N_z^2 \end{bmatrix} \quad (3)$$

对于多次反射,有

$$A'_n = R_n A, \quad (4)$$

式中 R_n 为综合作用矩阵

$$R_n = R^{(n)} \cdot R^{(n-1)} \dots R^{(i)} \dots R^{(2)} \cdot R^{(1)} \quad (5)$$

$R^{(i)}$ 为第 i 次反射时的作用矩阵。

(2)式和(4)式给出了反射镜静止时,单次或多次反射的表达式。下面讨论反射镜转动时,反射光线所遵循的规律。

设与固定系统相联系的定坐标为 xyz , 与运动系统相联系并随之一一起转动的动坐标为 $x_0y_0z_0$, 设 Q 和 Q^{-1} 分别代表由定坐标到动坐标的坐标转换矩阵和逆矩阵, 由于两个直角坐标之间的坐标转换矩阵是正交的, Q 和 Q^{-1} 互为转置逆阵,

$$Q^{-1} = Q^T. \quad (6)$$

设 A_s 和 A'_s 分别代表在定坐标 xyz 中的入射矢量和出射矢量, A_0 和 A'_0 为动坐标中与之共轭的矢量, 则

$$A'_0 = R_n A_0, \quad (7)$$

$$A' = Q^{-1} A'_0, \quad (8)$$

$$A_0 = Q A_s. \quad (9)$$

由(7), (8)和(9)式, 得

$$A'_s = Q^{-1} R_n Q A_s, \quad (10)$$

(10)式中, R_n 在动坐标中取值, 相对转动是静止的, 转动的影响是通过 Q^{-1} 和 Q 体现的。由于 A_s 与转动无关, 若出射光线 A'_s 复原, 则此时的综合作用矩阵 $R'_n = Q^{-1} R_n Q$ 的任一元素都与转动无关, 这就是光束复原需满足的条件。

图1为我们实验中所采用的转镜隔离器简化后的等效光路示意图。转镜绕转轴 P 匀速转动, 平面反射镜 M_2 、 M_3 固定, M_1 、 M_4 为转镜反射面, 且互相平行。入射的激光束假定为平面波, 经转镜反射面 M_1 反射, 由固定的平面镜 M_2 、 M_3 引导, 再经转镜另一反射面 M_4 反射后输出。

光从 M_1 传播到 M_4 所需的时间可以忽略不计。光束复原分析表明对图2所示的光路, 输出光束复原。同步精度引起的入射光线与 M_1 法线夹角的变化, 只造成输出光线与原光轴间的微小平移, 而不会引入角偏。

假定所有的镜面法线都在 $x-y$ 平面内(见图2), 与转镜相联系的动坐标 $x_0y_0z_0$ 在转动之前与定坐标 xyz 重合, 转轴 P 与 $z(z_0)$ 重合, 坐标转换矩阵 Q 为

$$Q = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (11)$$

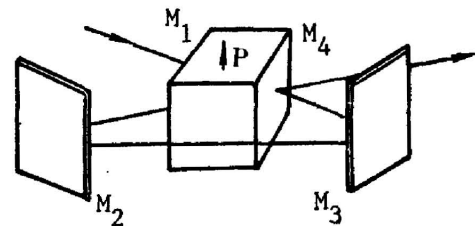


Fig. 1 Optical schematic diagram of the isolator. M_1 , M_4 is rotating mirror, and M_2 , M_3 stable

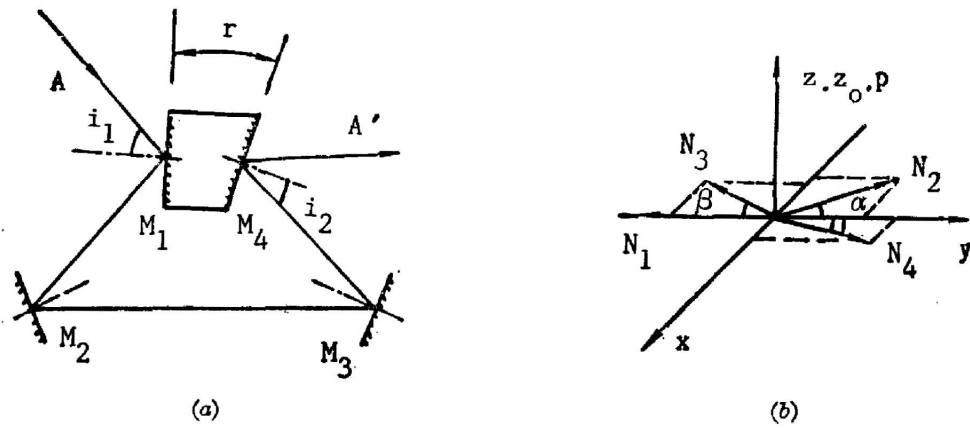


Fig. 2 (a) the normal lines and (b) coordinate system

各镜面法线矢量与对应的作用矩阵为

$$N_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ -1 \\ 0 \end{bmatrix}, R^{(1)} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (12)$$

$$N_2 = \begin{bmatrix} -\sin \alpha \\ \cos \alpha \\ 0 \end{bmatrix}, R^{(2)} = \begin{bmatrix} \cos 2\alpha & \sin 2\alpha & 0 \\ \sin 2\alpha & -\cos 2\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (13)$$

$$N_3 = \begin{bmatrix} -\sin \beta \\ -\cos \beta \\ 0 \end{bmatrix}, R^{(3)} = \begin{bmatrix} \cos 2\beta & -\sin 2\beta & 0 \\ -\sin 2\beta & -\cos 2\beta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (14)$$

$$N_4 = \begin{bmatrix} \sin \gamma \\ \cos \gamma \\ 0 \end{bmatrix}, R^{(4)} = \begin{bmatrix} \cos 2\gamma & \sin 2\gamma & 0 \\ \sin 2\gamma & -\cos 2\gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (15)$$

综合作用矩阵 R'_4 为

$$R'_4 = Q^{-1}R^{(4)}QR^{(3)}R^{(2)}Q^{-1}R^{(1)}Q,$$

把(11)~(15)式代入,得

$$R'_4 = \begin{bmatrix} \cos(2\alpha+2\beta+2\gamma) & -\sin(2\alpha+2\beta+2\gamma) & 0 \\ \sin(2\alpha+2\beta+2\gamma) & \cos(2\alpha+2\beta+2\gamma) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (16)$$

(16)式中 R'_4 的各元素都是常数,与表征转镜转动的量 θ 无关,这说明出射光束为出射方向保持不变的静态光束。令 $\alpha = \beta = i/2$, $\gamma = 0$, (16)式化简为

$$R'_4 = \begin{bmatrix} \cos 2i & -\sin 2i & 0 \\ \sin 2i & \cos 2i & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (17)$$

这就是我们所采用光路的综合作用矩阵,对绕 z 轴的转动是能复原的。

设入射光线亦在 $x-y$ 平面,在定坐标中入射角为 i ,即入射矢量对应的列矩阵为

$$A = [\sin i, \cos i, 0]^T. \quad (18)$$

将(17), (18)式代入(10)式, 得出射矢量 A' 为

$$A' = [-\sin \dot{i}, \cos \dot{i}, 0]^T. \quad (19)$$

用几何作图法可直接验证(19)式。

由安装不当, 造成固定平面镜倾斜, 如 N_2 与 $x-y$ 平面有一小的夹角 ϕ , 则可推得如下所示的综合作用矩阵:

$$R_4 = \begin{bmatrix} \sin^2 \phi \cos(4\theta + \dot{i}) + \cos^2 \phi \cos 2\dot{i} & \sin^2 \phi \sin(4\theta + \dot{i}) - \cos^2 \phi \sin 2\dot{i} \\ \sin^2 \phi \sin(4\theta + \dot{i}) + \cos^2 \phi \sin 2\dot{i} & -\sin^2 \phi \cos(4\theta + \dot{i}) + \cos^2 \phi \cos 2\dot{i} \\ -\sin 2\phi \sin\left(2\theta - \frac{\dot{i}}{2}\right) & \sin 2\phi \cos\left(2\theta - \frac{\dot{i}}{2}\right) \\ & \sin 2\phi \sin\left(2\theta + \frac{3}{2}\dot{i}\right) \\ & -\sin 2\phi \cos\left(2\theta + \frac{3}{2}\dot{i}\right) \\ & \cos 2\phi \end{bmatrix}. \quad (20)$$

对(18)式所示的入射光线, 在与原复原光束方向垂直的 $\xi-\eta$ 平面上, 出射光线与该平面的交点轨迹方程为

$$\xi^4 \cos^2 2\phi + 4\eta^4 \cos^4 \phi + 4\xi^2 \eta^2 \cos 2\phi \cos^2 \phi + 4\eta^2 \cos^4 \phi - \xi^2 \sin^2 2\phi = 0. \quad (21)$$

其图形见图 3(a)。

同样, 对转镜 M_1 、 M_4 的法线 N_1 、 N_4 与 $x-y$ 平面成一小夹角 δ 的情况, 出射光线与 $\xi-\eta$ 平面的交点轨迹形状见图 3(b)。

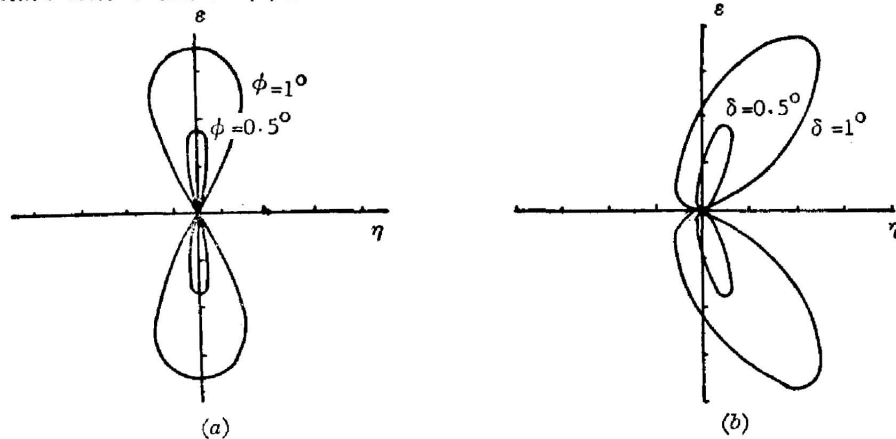


Fig. 3 Non-rstoration of the output beam caused by (a) the normal line N_2 ; (b) the normal line N_1 , N_4 is not on the $x-y$ face

三、结 构

以上的分析表明, 对图 2 所示的光路, 所有镜面法线都必须在与转轴 P 相互垂直的 $x-y$ 平面内, 这是光束复原的条件。在这种条件下, 转镜两反射面的夹角 γ , 以及固定的双面镜 M_2 、 M_3 所形成的转镜二次入射角 \dot{i}_2 , 都不影响复原; 综合矩阵实际上给出了输出光线相对入射光线在 $x-y$ 平面内转过 $2(\alpha + \beta + \gamma)$ 角的变换。

进一步的问题是能否找到一种具有三维复原特性的光路, 这样就能大大降低对转镜加工双面镜安装和电机运动精度的要求。这种光路实质上为角锥棱镜或斜方棱镜的变体, 但如何在工程上实现, 有待于进一步的研究。

我们在几何光学基础上发展的运动光束复原的分析方法, 不但对转镜隔离器, 而且对高能或高功率激光系统的高速扫描转镜^[3]和扭动光束激光放大器^[4]等有关光束复原的设计, 也具有指导意义。

参 考 文 献

- [1] 周烽, 胡绍衣等;《光学学报》, 1988, **8**, No. 8 (Aug), 722~726。
- [2] A. И. 杜德罗夫斯基;《光学仪器理论》, (科学出版社, 北京, 1958年), 16。
- [3] 胡绍衣;《激光》, 1980, **7**, No. 12 (Dec), 27~31。
- [4] 邓锡铭, 李成富等;《中国激光》, 1983, **10**, No. 5 (May), 274~276。

Investigation of optical restoration characteristics of mechanical rotating mirror isolator

ZHOU FENG AND DENG XIMING

(*Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica*)

HU SHAOYI

(*CITIC-JIADING Optoelectronics Corporation Ltd.*)

(Received 4 September 1987)

Abstract

An analytical method for the restoration study of a moving optical beam is developed in this paper. The optical restoration characteristics of the high-speed mechanical rotating mirror isolator for high power laser-fusion system is discussed, and its restoration conditions are obtained.

Key words: Mechanical rotating mirror isolator; optical restoration.