

文章编号: 1001-3806(2008)05-0460-05

## 复杂像散腔的 2 维失调灵敏度的矩阵表示

黄宇<sup>1</sup>, 冯国英<sup>1\*</sup>, 李玮<sup>1</sup>, 李刚<sup>1</sup>, 杨火木<sup>1</sup>, 周寿桓<sup>1,2</sup>

(1. 四川大学电子信息学院, 成都 610064 2 华北光电技术研究所, 北京 100015)

**摘要:** 为了分析激光谐振腔的一般复杂像散特性, 采用了  $8 \times 8$  失调增广矩阵和 MATLAB 的符号运算的方法, 推导出了复杂像散腔失调灵敏度的一般解析表达式。该表达式可涵盖具有多个光学元件的多种像散腔, 并可定量分析这些像散腔在  $x-O-z$  和  $y-O-z$  两个平面上的失调灵敏度。计算结果表明, 复杂像散腔的模场和失调灵敏度在  $x-O-z$  和  $y-O-z$  两个平面上均存在耦合。这一结果对复杂像散腔的设计与分析提供了很好的依据。

**关键词:** 激光光学; 失调; 复杂像散; 柱面镜腔

**中图分类号:** TN242 **文献标识码:** A

### Matrix expression for 2-D misalignment sensitivity of complex astigmatic resonator

HUANG Yu<sup>1</sup>, FENG Guoying<sup>1</sup>, LI Wei<sup>1</sup>, LI Gang<sup>1</sup>, YANG Huo-mu<sup>1</sup>, ZHOU Shou-huan<sup>1,2</sup>

(1. College of Electronics and Information Engineering Sichuan University, Chengdu 610064 China 2 North China Research Institute of Electro-Optics Beijing 100015, China)

**Abstract** In order to analyze the general astigmatism of laser resonator cavities, the general analytical formula of misalignment sensitivity for complex astigmatic resonator cavities with several optical components has been derived by adopting augmented  $8 \times 8$  misaligned matrix and symbol operation functions of MATLAB. This formula is applicable to the complex astigmatic cavity including several optical components with general astigmatic characteristics, and it can be used to analyze quantitatively the misalignment sensitivity of these resonator cavities in  $x-O-z$  plane and  $y-O-z$  plane. Calculation results indicate that mode distributions in the complex astigmatic cavity and the misalignment sensitivities of the complex astigmatic cavity have coupling in  $x-O-z$  plane and  $y-O-z$  plane. These results afford some references for the design and analysis of complex astigmatic cavities.

**Key words** laser optics; misalignment; general astigmatism; resonator with cylindrical mirrors

## 引 言

光学谐振腔的失调是客观存在的<sup>[1-2]</sup>。一方面, 腔镜不能被调节到绝对平行, 球面镜也不能被调节到理想共轴; 另一方面, 即使谐振腔能够被完全调准, 激光器在实际工作时也会因客观存在的机械、热等扰动而偏离校准位置。随着激光输出功率的增高, 腔镜的失调逐步增大<sup>[3]</sup>, LU 等人<sup>[4]</sup>认为, 腔镜的失调主要是由热辐射造成的。谐振腔的失调会引起谐振腔的模式发生畸变。在谐振腔的模式发生畸变时, 将引起模式耦合从而激发起高阶模振荡, 使激光束的发散角增大, 导致光束质量变坏。多纵模振荡还将使激光输出的频谱

加宽, 从而使相干长度变短, 这对某些应用是十分不利的。因此, 谐振腔的失调引起了诸多研究者的重视<sup>[5-9]</sup>。FOX 等人从谐振腔的衍射积分方程出发, 利用数值计算的方法, 对平行平面腔、球面腔的振幅、相位失调进行了细致的研究, 但在复杂像散的情况下, 衍射积分方程在  $x-O-z$  平面和  $y-O-z$  方向将不能再分离, 必须进行 2 维的面积分, 数值计算量大大增加, 并且通过数字计算结果不易看出特点和其变化规律; WEBER 和 LÜ 等人从矩阵光学<sup>[10]</sup>的角度出发, 用 1 维失调光学系统的增广矩阵, 对球面镜腔的失调线位移、失调角进行了研究, 进而引入高斯光束的失调灵敏度, 更加准确地反映单镜失调对光学系统的影响。在实际的高功率激光系统中, 为达到高光束质量、单纵模激光输出等目的, 激光介质采用板条形<sup>[11-12]</sup>、椭圆片形等, 除使用驻波腔外, 还使用了环形腔<sup>[13-14]</sup>, 故像散特性普遍存在, 再由于非均匀抽动和冷却等原因, 激光谐振腔可看作复杂像散腔。作者针对一般情况下的复杂像散腔<sup>[15-16]</sup>, 采用  $8 \times 8$  失调增广矩阵, 推导出复杂像散腔的失调线位移和失调角位移的解

基金项目: 固体激光技术国家级重点实验室基金资助项目(LF06005); 国家自然科学基金资助项目(10676023)

作者简介: 黄宇(1982-), 男, 硕士研究生, 主要从事固体激光技术研究。

\* 通讯联系人。E-mail: guoying\_feng@yahoo.com.cn

收稿日期: 2007-07-23 收到修改稿日期: 2008-01-04

析表达式。当复杂像散腔退化到简单像散腔或轴对称腔时, 所得出的解析表达式也回到了参考文献 [2] 和参考文献 [11] 中的 1 维结果。

### 1 描述复杂像散腔失调特性的增广矩阵

#### 1.1 复杂像散腔的一般描述

为不失一般性, 设复杂像散腔的构型如图 1 所示,

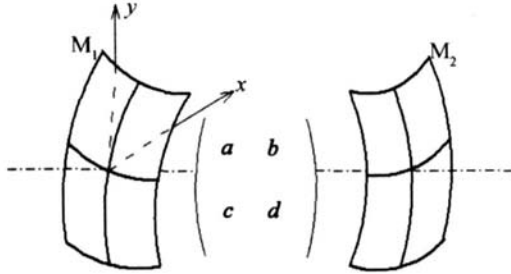


Fig 1 General astigmatic cavity

光轴沿 \$z\$ 方向。谐振腔镜 \$M\_1\$ 为双轴反射镜, 其曲率半径有两个主方向, 在这两个主方向上曲率半径分别为 \$R\_{1x}\$ 和 \$R\_{1y}\$, 设主方向沿 \$z\$ 轴的转角为 \$\theta\_1\$; 类似地, 设谐振腔镜 \$M\_2\$ 的主曲率半径分别为 \$R\_{2x}\$ 和 \$R\_{2y}\$, 主方向沿 \$z\$ 轴的转角为 \$\theta\_2\$。腔镜 \$M\_1\$ 和 \$M\_2\$ 分别可用 \$4 \times 4\$ 矩阵来表示:

$$\begin{bmatrix} E & O \\ r_1 & E \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} E & O \\ r_2 & E \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中, \$E\$ 表示 \$2 \times 2\$ 单位矩阵 \$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}\$, \$O\$ 表示 \$2 \times 2\$ 零矩

阵 \$\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}\$。\$r\_1\$ 和 \$r\_2\$ 表示矩阵的焦距项, 当两腔镜的主方向均与 \$x\$ 和 \$y\$ 方向重合时, 分别可表示为:

$$\begin{cases} r_1' = \begin{bmatrix} -2R_{1x} & 0 \\ 0 & -2R_{1y} \end{bmatrix} \\ r_2' = \begin{bmatrix} -2R_{2x} & 0 \\ 0 & -2R_{2y} \end{bmatrix} \end{cases} \quad (2)$$

若考虑转角 \$\theta\_1\$ 和 \$\theta\_2\$, 则可分别表示为:

$$\begin{cases} r_1 = \begin{bmatrix} \cos\theta_1 & -\sin\theta_1 \\ \sin\theta_1 & \cos\theta_1 \end{bmatrix} r_1' \begin{bmatrix} \cos\theta_1 & \sin\theta_1 \\ -\sin\theta_1 & \cos\theta_1 \end{bmatrix} \\ r_2 = \begin{bmatrix} \cos\theta_2 & -\sin\theta_2 \\ \sin\theta_2 & \cos\theta_2 \end{bmatrix} r_2' \begin{bmatrix} \cos\theta_2 & \sin\theta_2 \\ -\sin\theta_2 & \cos\theta_2 \end{bmatrix} \end{cases} \quad (3)$$

设谐振腔内包含的多个光学元器件, 当光束从左向右传输时, 复杂像散特性可用 \$4 \times 4\$ 的正向传输矩阵

$$\begin{bmatrix} d^T & b^T & O & O \\ c^T & a^T & O & O \\ O & O & E & O \\ O & O & O & E \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E & O & O & O \\ r_2 & E & O & O \\ O & O & E & O \\ O & O & O & E \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a & b & O & O \\ c & d & O & O \\ O & O & E & O \\ O & O & O & E \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E & O & O & O \\ r_1 & E & O & -2E_1 \\ O & O & E & O \\ O & O & O & E \end{bmatrix} \quad (8)$$

\$\begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix}\$ 来表示; 当光束从右向左传输时, 反向传输矩阵可表示为 \$\begin{bmatrix} d^T & b^T \\ c^T & a^T \end{bmatrix}\$。其中的 \$a, b, c, d\$ 分别为 \$2 \times 2\$

矩阵单元, 当各元件为简单像散时, 它们退化为对称矩阵; 当各元件旋转对称时, 它们可进一步退化为主对角元素相等的矩阵。综上所述, 以镜 \$M\_1\$ 为起点, 图 1 所示的一般像散腔往返一周的矩阵为:

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d^T & b^T \\ c^T & a^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E & O \\ r_2 & E \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E & O \\ r_1 & E \end{bmatrix} \quad (4)$$

#### 1.2 复杂像散腔失调特性的描述

在图 1 所示的系统中, 各个光学元件均可能存在或多或少的失调。通常情况下, 除限模光阑外, 谐振腔中的光学元件的横向尺寸远大于谐振模的横向尺寸; 另外, 通常是用准直光 (如 He-Ne 激光) 或平行光管精确调整各个光学元器件, 然后调整安装在精密调整架上的谐振腔镜, 使激光系统达到最佳输出。因此, 激光的失调经常是出现在谐振腔镜上。为此, 讨论腔镜 \$M\_1, M\_2\$ 失调对系统输出特性的影响。

1.2.1 腔镜 \$M\_1\$ 失调引起的线位移和角位移 设腔镜 \$M\_1\$ 的角失调量为:

$$E_1' = \begin{bmatrix} \varepsilon_{1x}' & 0 \\ 0 & \varepsilon_{1y}' \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中, \$\varepsilon\_{1x}', \varepsilon\_{1y}'\$ 分别为腔镜 \$M\_1\$ 在 \$y-O-z, x-O-z\$ 平面的微失调角。把腔镜 \$M\_1\$ 的失调增广矩阵写为一个 \$8 \times 8\$ 的矩阵:

$$\begin{bmatrix} E & O & O & O \\ r_1 & E & O & -2E_1' \\ O & O & E & O \\ O & O & O & E \end{bmatrix} \quad (6)$$

同时将腔镜 \$M\_2\$ 的正、反向传输矩阵同样扩展为 \$8 \times 8\$ 的矩阵:

$$\begin{bmatrix} E & O & O & O \\ r_2 & E & O & O \\ O & O & E & O \\ O & O & O & E \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} a & b & O & O \\ c & d & O & O \\ O & O & E & O \\ O & O & O & E \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} d^T & b^T & O & O \\ c^T & a^T & O & O \\ O & O & E & O \\ O & O & O & E \end{bmatrix} \quad (7)$$

以腔镜 \$M\_1\$ 为参考, 则往返一周的复杂像散腔失调增广矩阵为:

通过矩阵运算,可将上式写为:

$$\begin{bmatrix} A_{11} & B_{11} & E_{11} & F_{11} \\ C_{11} & D_{11} & G_{11} & H_{11} \\ O & O & E & O \\ O & O & O & E \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$\begin{bmatrix} 4G_2G_1 - 2G_2a - E & 2G_2b & O & -4G_2bE_1' \\ 4b^{-1}aG_2G_1 - 2b^{-1}G_1 - 2b^{-1}aG_2a & 2a^T G_2^T - E & O & -2(2a^T G_2^T - E)E_1 \\ O & O & E & O \\ O & O & O & E \end{bmatrix} \quad (10)$$

上式中引入了腔参量矩阵:

$$\begin{cases} G_1 = a + \frac{1}{2}br_1 \\ G_2 = d^T + \frac{1}{2}b^T r_2 \end{cases} \quad (11)$$

设该失调系统的本征光线矢量为  $\begin{bmatrix} R_{11} \\ \Theta_{11} \\ E \\ E \end{bmatrix}$ ,  $R_{11}$ 和  $\Theta_{11}$ 分别

代表由于腔镜  $M_1$  失调引起谐振模在腔镜  $M_1$  处的线位移矩阵和角位移矩阵。

由自再现原理有:

$$\begin{bmatrix} R_{11} \\ \Theta_{11} \\ E \\ E \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & B_{11} & E_{11} & F_{11} \\ C_{11} & D_{11} & G_{11} & H_{11} \\ 0 & 0 & E & 0 \\ 0 & 0 & 0 & E \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_{11} \\ \Theta_{11} \\ E \\ E \end{bmatrix} \quad (12)$$

通过符号运算化简可得:

$$\begin{cases} R_{11} = (G_2G_1 - E)^{-1}G_2bE_1' \\ \Theta_{11} = 2E_1' - (2b^{-1}G_1 - b^{-1}a - b^{-1}G_2^{-1})R_{11} \end{cases} \quad (13)$$

同理,通过符号运算化简可以求得由于腔镜  $M_1$  失调引起谐振模在腔镜  $M_2$  处的线位移矩阵  $R_{21}$ 和角位移矩阵  $\Theta_{21}$ :

$$\begin{cases} R_{21} = (G_1G_2 - E)^{-1}bE_1' \\ \Theta_{21} = (b^T)^{-1}G_1^{-1}bE_1' - [2(b^T)^{-1}G_2 - (b^T)^{-1}d^T - (b^T)^{-1}G_1^{-1}]R_{21} \end{cases} \quad (14)$$

1.2.2 腔镜  $M_2$  失调引起的线位移和角位移 设腔镜  $M_2$  的角失调量为:

$$E_2' = \begin{bmatrix} \varepsilon_{2x}' & 0 \\ 0 & \varepsilon_{2y}' \end{bmatrix} \quad (15)$$

式中,  $\varepsilon_{2x}'$ ,  $\varepsilon_{2y}'$  分别为腔镜  $M_2$  在  $y-O-z$   $x-O-z$  方向的微小失调角。计算可得由于腔镜  $M_2$  失调引起谐振模在腔镜  $M_1$  处的线位移矩阵  $R_{12}$ 和角位移矩阵  $\Theta_{12}$ 为:

$$\begin{cases} R_{12} = (G_2G_1 - E)^{-1}b^T E_2' \\ \Theta_{12} = b^{-1}G_2^{-1}b^T E_2' - (2b^{-1}G_1 - b^{-1}a - b^{-1}G_2^{-1})R_{12} \end{cases} \quad (16)$$

式中,  $\begin{bmatrix} E_{11} & F_{11} \\ G_{11} & H_{11} \end{bmatrix}$  称为失调矩阵元,表征了系统的失调

特性;  $\begin{bmatrix} A_{11} & B_{11} \\ C_{11} & D_{11} \end{bmatrix}$  是光腔往返一周的矩阵元。

利用 MATLAB 作符号运算,可将 (9) 式化简为:

$$\begin{bmatrix} 4G_2G_1 - 2G_2a - E & 2G_2b & O & -4G_2bE_1' \\ 4b^{-1}aG_2G_1 - 2b^{-1}G_1 - 2b^{-1}aG_2a & 2a^T G_2^T - E & O & -2(2a^T G_2^T - E)E_1 \\ O & O & E & O \\ O & O & O & E \end{bmatrix} \quad (10)$$

由于腔镜  $M_2$  失调引起谐振模在腔镜  $M_2$  处的线位移矩阵  $R_{22}$ 和角位移矩阵  $\Theta_{22}$ 为:

$$\begin{cases} R_{22} = (G_1G_2 - E)^{-1}G_1b^T E_2' \\ \Theta_{22} = 2E_2' - [2(b^T)^{-1}G_2 - (b^T)^{-1}d^T - (b^T)^{-1}G_1^{-1}]R_{22} \end{cases} \quad (17)$$

1.2.3 系统的失调灵敏度参量 设系统在腔镜  $M_1$ ,  $M_2$  处的等效光阑尺寸分别为  $W_1$ 和  $W_2$ 。定义腔镜  $M_1$  和  $M_2$  分别失调引起的系统在  $x$  方向和  $y$  方向的失调灵敏度参量分别为:

$$\begin{cases} V_{ix}^2 = \frac{1}{\varepsilon_{ix}'} \left[ \left( \frac{R_{li,xx}}{W_{lx}} \right)^2 + \left( \frac{R_{2i,xx}}{W_{2x}} \right)^2 \right], (i = 1, 2) \\ V_{iy}^2 = \frac{1}{\varepsilon_{iy}'} \left[ \left( \frac{R_{li,yy}}{W_{ly}} \right)^2 + \left( \frac{R_{2i,yy}}{W_{2y}} \right)^2 \right], (i = 1, 2) \end{cases} \quad (18)$$

则由于腔镜  $M_1$  和  $M_2$  失调,系统在  $x$  方向和  $y$  方向的总的失调灵敏度参量为:

$$\begin{cases} V_x^2 = \sum_{i=1,2} \frac{1}{\varepsilon_{ix}'} \left[ \left( \frac{R_{li,xx}}{W_{lx}} \right)^2 + \left( \frac{R_{2i,xx}}{W_{2x}} \right)^2 \right], (i = 1, 2) \\ V_y^2 = \sum_{i=1,2} \frac{1}{\varepsilon_{iy}'} \left[ \left( \frac{R_{li,yy}}{W_{ly}} \right)^2 + \left( \frac{R_{2i,yy}}{W_{2y}} \right)^2 \right], (i = 1, 2) \end{cases} \quad (19)$$

综合 (19) 式并引入耦合项可得复杂像散腔的 2 维失调灵敏度的矩阵表示为:

$$V^2 = R_{11} \cdot R_{11} \cdot \begin{bmatrix} 1/\varepsilon_{lx}'^2 W_{lx}'^2 & 0 \\ 0 & 1/\varepsilon_{ly}'^2 W_{ly}'^2 \end{bmatrix} + R_{21} \cdot R_{21} \cdot \begin{bmatrix} 1/\varepsilon_{1x}'^2 W_{2x}'^2 & 0 \\ 0 & 1/\varepsilon_{1y}'^2 W_{2y}'^2 \end{bmatrix} + R_{12} \cdot R_{12} \cdot \begin{bmatrix} 1/\varepsilon_{2x}'^2 W_{lx}'^2 & 0 \\ 0 & 1/\varepsilon_{2y}'^2 W_{ly}'^2 \end{bmatrix} + R_{22} \cdot R_{22} \cdot \begin{bmatrix} 1/\varepsilon_{2x}'^2 W_{2x}'^2 & 0 \\ 0 & 1/\varepsilon_{2y}'^2 W_{2y}'^2 \end{bmatrix} \quad (20)$$

式中,符号“ $\cdot$ ”表示矩阵点积。

## 2 数值计算例

设图 1 中的激光谐振腔为简单两镜腔,对比研究

3 种谐振腔型 (球面镜腔、简单像散柱面镜腔、复杂像散柱面镜腔) 的失调灵敏度参量。设腔镜  $M_1, M_2$  均为球面镜, 曲率半径分别为  $R_1 = 0.3\text{m}, R_2 = 0.25\text{m}$ , 腔长为  $0.2\text{m}$ , 则构成了球面镜腔 (I 型腔)。若设腔镜  $M_1, M_2$  均为柱面镜, 且柱面镜的母线相互平行或垂直, 令柱面曲率半径分别为  $R_1 = 0.3\text{m}, R_2 = 0.25\text{m}$ , 两镜母

线相互垂直, 腔长仍为  $0.2\text{m}$ , 则构成了简单像散柱面镜腔 (II 型腔)。在 II 型腔的基础上, 若两柱面镜母线成一任意角, 则变为复杂像散两镜腔 (III 型腔), 在本计算例中, 设  $M_1$  镜母线在  $x$  方向上,  $M_2$  镜的母线与  $x$  轴成  $30^\circ$ 。计算可得 3 种腔内的本征高斯光束分布, 如图 2 所示。

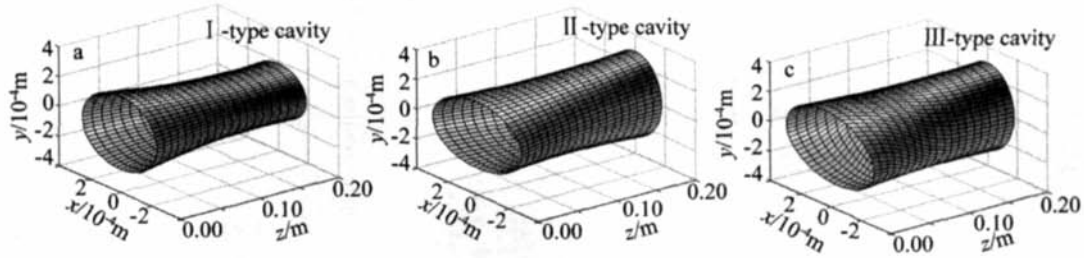


Fig 2 Profiles of Gaussian beams

由图 2a 可见, 激光束在球面镜腔中传输时, 光束轮廓沿  $z$  轴旋转对称。而图 2b 中则给出了简单像散高斯光束的传输特点: 光束在  $x$  方向和  $y$  方向的束腰位置、束腰大小和发散程度均不同。在图 2a 和图 2b 中, 光束的  $x$  方向和  $y$  方向是可以分离的。在图 2c 中, 则显示了复杂像散高斯光束的典型特征: 光束在传输过程中发生扭转, 这说明光束在腔内传输时, 光场在  $x$  方向和  $y$  方向存在耦合。

下面讨论 3 种腔的失调灵敏度参量。

在弱高斯光阑近似下, 计算可得腔型 I 的失调线位移矩阵为:

$$\begin{aligned} R_{11} &= \begin{bmatrix} -0.15\epsilon_{lx}' & 0 \\ 0 & -0.15\epsilon_{ly}' \end{bmatrix}, \\ R_{21} &= \begin{bmatrix} -0.25\epsilon_{lx}' & 0 \\ 0 & -0.25\epsilon_{ly}' \end{bmatrix}, \\ R_{12} &= \begin{bmatrix} -0.25\epsilon_{lx}' & 0 \\ 0 & -0.25\epsilon_{ly}' \end{bmatrix}, \\ R_{22} &= \begin{bmatrix} -0.0833\epsilon_{lx}' & 0 \\ 0 & -0.0833\epsilon_{ly}' \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (21)$$

该矩阵是对角矩阵, 且主对角元素相等, 这说明谐振腔在两个方向上是独立的, 且在  $x$  方向和  $y$  方向上的失调灵敏度相同。

计算可得腔型 II 的失调线位移矩阵为:

$$\begin{aligned} R_{11} &= \begin{bmatrix} -0.3\epsilon_{lx}' & 0 \\ 0 & -0.3\epsilon_{ly}' \end{bmatrix}, \\ R_{21} &= \begin{bmatrix} -0.3\epsilon_{lx}' & 0 \\ 0 & -0.5\epsilon_{ly}' \end{bmatrix}, \\ R_{12} &= \begin{bmatrix} -0.3\epsilon_{lx}' & 0 \\ 0 & -0.5\epsilon_{ly}' \end{bmatrix}, \end{aligned}$$

$$R_{22} = \begin{bmatrix} -0.1\epsilon_{lx}' & 0 \\ 0 & -0.5\epsilon_{ly}' \end{bmatrix} \quad (22)$$

该矩阵也是对角化的, 但主对角元素不同, 这说明谐振腔在两个方向上是独立的,  $x$  方向的失调灵敏度低于  $y$  方向的失调灵敏度。

计算可得腔型 III 的失调线位移矩阵为:

$$\begin{aligned} R_{11} &= \begin{bmatrix} -0.3\epsilon_{lx}' & 1.9216\epsilon_{ly}' \\ 1.9219\epsilon_{lx}' & -24.9170\epsilon_{ly}' \end{bmatrix}, \\ R_{21} &= \begin{bmatrix} -0.3\epsilon_{lx}' & 0.6405\epsilon_{ly}' \\ 1.9216\epsilon_{lx}' & -25.1170\epsilon_{ly}' \end{bmatrix}, \\ R_{12} &= \begin{bmatrix} -0.3\epsilon_{lx}' & 1.9216\epsilon_{ly}' \\ 0.6405\epsilon_{lx}' & -25.1170\epsilon_{ly}' \end{bmatrix}, \\ R_{22} &= \begin{bmatrix} -0.1\epsilon_{lx}' & 0.6405\epsilon_{ly}' \\ 0.6405\epsilon_{lx}' & -25.1170\epsilon_{ly}' \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (23)$$

该矩阵的对角元素不为 0 且不能被对角化, 这说明谐振腔在  $x$  方向和  $y$  方向上存在耦合。光腔在  $x$  方向的失调灵敏度低于  $y$  方向上的失调灵敏度。

对腔型 III 变化腔镜  $M_1$  的母线与  $x$  轴的夹角  $\theta_1$ , 计算可得  $x$  方向、 $y$  方向的相对失调灵敏度随腔镜  $M_2$  的母线与  $x$  轴夹角  $\theta_2$  变化曲线, 见图 3。图 3 中,  $V_x/V_0, V_y/V_0$  分别表示耦合时  $x, y$  方向的相对失调灵敏度,  $V_x'/V_0, V_y'/V_0$  为假定没有耦合时  $x, y$  方向的失调灵敏度。  $V_0 = \sqrt{(2\pi|b|)/\lambda}$  为稳定多元件对称共焦腔的失调灵敏度参量。

由图 3 可知, 在假定没有耦合时, 失调灵敏度始终为对称分布, 且随  $\theta_1$  增大,  $V_x'/V_0$  两端值逐渐减小,  $V_y'/V_0$  的峰值逐渐增大, 其数值仅由两镜的腔参量决定。耦合时,  $x-O-z$  平面和  $y-O-z$  平面模场相互影响。由图 3 可知, 当  $\theta_1$  与  $\theta_2$  成  $0^\circ$  和  $90^\circ$  时为简单像散情形, 模场之间没有相互影响, 其失调灵敏度与假定没有

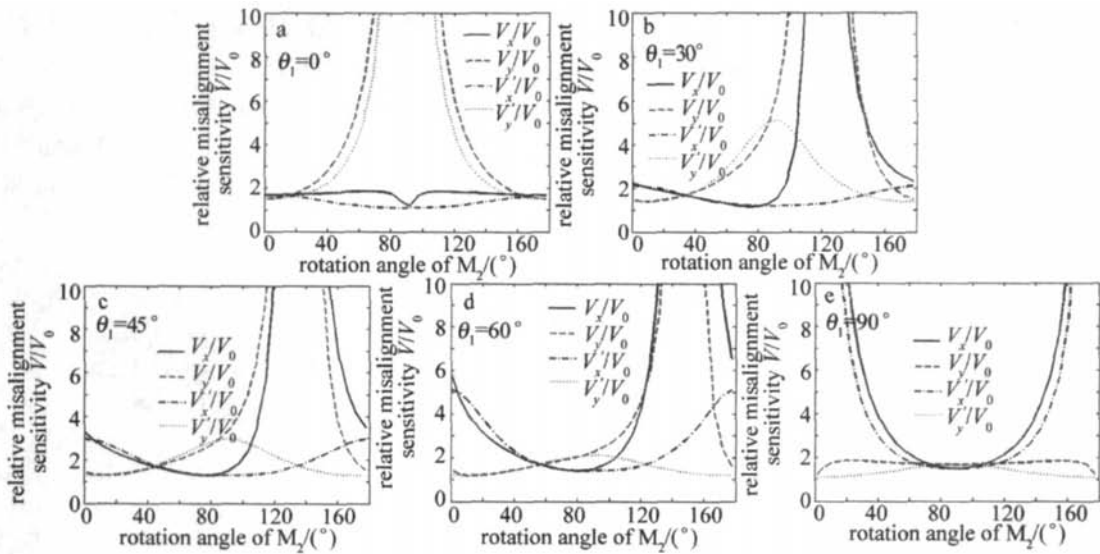


Fig 3 The misalignment sensitivities of the complex astigmatic cavity versus  $\theta_1$

耦合时的值相同。图 3b~图 3d中,腔镜  $M_1$  的母线与  $x$  轴的夹角  $\theta_1$  分别为  $0^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$  时,旋转  $\theta_2$ , 当两镜母线平行时,为界稳-稳定腔;当两镜母线不平时,为稳定-稳定腔,由于  $x-O-z$  平面和  $y-O-z$  平面存在耦合,失调灵敏度随角度发生变化。

### 3 结论

在复杂像散腔引入失调增广矩阵,推导出复杂像散腔的失调线位移、角位移的一般解析表达式,该表达式涵盖了轴对称腔、简单像散腔及复杂像散腔,腔内可含有多个具有一般像散特性的光学元件,该表达式还考虑到了谐振腔在  $x-O-z$  和  $y-O-z$  两个平面上可能存在耦合的情况,可定量分析激光谐振腔在  $x-O-z$  和  $y-O-z$  两个平面上的失调灵敏度。本文中的计算模拟结果表明,复杂像散腔的模式在  $x-O-z$  和  $y-O-z$  两个平面上存在耦合,复杂像散腔的失调灵敏度在  $x-O-z$  和  $y-O-z$  两个平面上也存在耦合,即  $x-O-z$  平面的腔参量会影响  $y-O-z$  平面的失调灵敏度,反之亦然。

### 参考文献

[1] ZHANG T R, LÜ B D. Matrix decomposition and equivalent transformation of misaligned optical systems [J]. *Laser Technology*, 2002, 26 (6): 428-431 (in Chinese).

[2] YIH Y, LÜ B D, ZHANG K. Analysis of cavity mirrors tilt in ring-down cavity [J]. *Laser Technology*, 2006, 30(1): 5-8 (in Chinese).

[3] WADE R C. Annular resonators for high power chemical lasers [J]. *SPE*, 1993, 1868: 334-366

[4] LIU Y, JIN Y Q, SANG F T. Measure and research of mirrors disalign-

ment for COIL resonator [J]. *High Power Laser and Particle Beams* 2003, 15(3): 221-224 (in Chinese).

- [5] WEIX Y, WU N L, LI Sh Q. Theoretical investigations on the mode adjustment of unstable-stable hybrid resonator [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics* 2006, 23(1): 37-41 (in Chinese).
- [6] LIU W G, LU Q Sh, LIU Z J. Misalignment characteristic analysis in beam-converting annular resonant cavity [J]. *Chinese Journal of Lasers* 2005, 32(6): 803-809 (in Chinese).
- [7] TEREPKA M. Quasi-real time alignment of a cylindrical resonator using a wavefront sensor [J]. *Proc SPIE*, 1992, 1625: 330-334
- [8] TILLEMANN M M, KOZHEK N A, COHEN R, *et al*. Coupling losses in multimode waveguides due to misalignment [J]. *IEEE Proceedings Optoelectronics* 2005, 152(3): 145-150
- [9] ZHAO D M, WANG Sh M. Misaligned fractional Fourier transforms and their optical implementation [J]. *Acta Physica Sinica* 2001, 50(10): 1935-1938 (in Chinese).
- [10] LÜ B D. *Laser optics* [M]. Chengdu: Sichuan University Press, 1992: 16-44 (in Chinese).
- [11] WANG N, LU Y T. Sensitivity to mirror tilt of off-axis hybrid resonator for innoslab [J]. *Chinese Journal of Lasers* 2005, 32(12): 1593-1598 (in Chinese).
- [12] SHI P, LID J. High power partially end-pumped slab laser with hybrid resonator [J]. *Acta Optica Sinica* 2004, 24(4): 491-494 (in Chinese).
- [13] LI Y D. Escape loss of multiple-pass ring resonator [J]. *Laser Journal* 1995, 15(5): 257-265 (in Chinese).
- [14] SHIH C C. Modeling of rear cone misalignment in the annular resonator [J]. *SPIE*, 1994, 2117: 128-135
- [15] LÜ B D, XU S, FENG G, *et al*. Astigmatic resonator analysis using an eigenray vector concept [J]. *Optik* 1992, 90(4): 158-162
- [16] LÜ B D, QIU Y, CAI B W. An augmented matrix for relatively misaligned optical systems [J]. *Laser Technology*, 1989, 13(3): 7-12 (in Chinese).