

文章编号: 0258-7025(2001)08-0709-05

非稳腔准直和失调影响的计算机仿真

傅 雷¹ 史红民² 张玲香² 陆耀东² 辛建国¹

(¹ 北京理工大学光电工程系 北京 100081; ² 北京光电技术研究所 北京 100010)

提要 介绍了正支共焦腔准直和非工作状态失调的计算机仿真。利用这种仿真对失调影响光束稳定性进行了初步诊断, 仿真与实验取得了一致的结果, 且灵活和直观。

关键词 计算机仿真, 非稳腔, 稳定性

中图分类号 TN 815; TP 391.9 **文献标识码** A

Simulation of the Alignment and Misalignment of an Unstable Resonator

FU Lei¹ SHI Hong-min² ZHANG Ling-xiang² LU Yao-dong² XIN Jian-guo¹

¹Beijing Institute of Technology, Beijing 100081

²Beijing Institute of Opto-Electronic Technology, Beijing 100010

Abstract The simulation on alignment and misalignment of a positive branch confocal resonator is described in the paper. The stability of laser beam influenced by the misalignment are elementally diagnosed by the aid of this simulation. The results of the simulation is accordant with the experiment and that the former is of better flexibility and intuition.

Key words computer simulation, unstable resonator, stability

1 引 言

高能激光器的准直程度直接影响到激光器的正常工作和光束质量, 同时激光器工作时由于机械振动和热变形引起的各腔镜失调对输出光的影响也不同^[1]。作为一种辅助手段, 利用计算机仿真来研究这些问题可以提高效率, 而且灵活和直观。本文介绍了一种光线追迹方法, 仿真了正支共焦腔中将一准直 He-Ne 激光束通过凹面镜光轴上的小孔注入腔中形成多次振荡后, 通过 45°角放置的耦合输出镜输出一均匀照明的准直同心圆环和各腔镜的微失调对准直 He-Ne 光的影响。

准直或导引 He-Ne 激光束与高能激光在同一腔中振荡, 受到几乎同样的因素影响, 因此准直 He-Ne 激光受影响的行为也必将反映腔内高能激光受到的影响。根据仿真准直 He-Ne 激光束受各腔镜不同失调的影响, 对连续波氧碘化学激光器(CW-COIL)激光束的不稳定性进行了诊断, 取得了光束不同漂移、光斑变化与相应的腔镜失调关系。结合实验, 分析

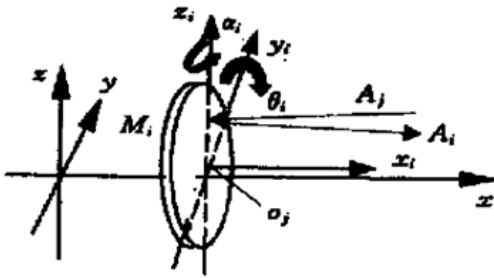
了激光器工作时腔镜失调的主要情况及流体工作物对光束漂移的影响。诊断结果为激光器的改进提供了参考依据。

2 计算机仿真

2.1 算法建立

考虑到准直 He-Ne 激光束通过凹面镜光轴上的小孔注入腔中形成多次振荡后, 再由输出镜耦合输出同心圆环的准直方式, 除了光束注入小孔时的衍射外在腔中的行为完全可由几何光学近似。因此, 利用光线追迹原理就可以仿真 He-Ne 激光在腔内外的传播过程。

考虑腔镜的失调情况, 首先取两种坐标系, 静坐标系和动坐标系, 或系统坐标系 x, y, z , 及在腔镜 M_i 上随腔镜一起微转的坐标系 x_i, y_i, z_i , 如图 1。 $x_i y_i z_i$ 系的原点在 x, y, z 中的坐标为 $o_i = (a_i, b_i, c_i)$ 。设腔镜 M_i 在坐标系 $x_i y_i z_i$ 中的球心坐标为 (r_i, b_i, c_i) , 随腔镜一起微转后的新坐标系为 x'_i, y'_i, z'_i 。考虑微扰情况下坐标系旋转变换矩阵为

图 1 腔镜 M_i 对光线的反射Fig. 1 Schematic diagram of resonator mirror M_i reflecting beams

$$\text{Rot}_i = \begin{pmatrix} 1 & \alpha_i & \theta_i \\ \alpha_i & 1 & 0 \\ -\theta_i & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

其中 α_i, θ_i 分别为腔镜 M_i 绕腔镜上坐标轴 z_i 和 y_i 微转的角度, 则此时腔镜 M_i 的球心在原 x_i, y_i, z_i 中 (忽略二阶以上小量) 为

$$\begin{pmatrix} O_{xi} \\ O_{yi} \\ O_{zi} \end{pmatrix} = \text{Rot}_i \begin{pmatrix} r_i \\ b_i \\ c_i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -r_i + b_i \alpha_i - c_i \theta_i \\ -r_i \alpha_i - b_i \\ r_i \theta_i - c_i \end{pmatrix} \quad (2)$$

考虑腔镜的平移微扰, 对应的球心在 xyz 系中的值为

$$\begin{pmatrix} O_{xi} \\ O_{yi} \\ O_{zi} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} O_{xi} + a_i + \Delta a_i \\ O_{yi} + b_i + \Delta b_i \\ O_{zi} + c_i + \Delta c_i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -r_i + b_i \alpha_i - c_i \theta_i + a_i + \Delta a_i \\ -r_i \alpha_i + \Delta b_i \\ r_i \theta_i + \Delta c_i \end{pmatrix} \quad (3)$$

其中 $\Delta a_i, \Delta b_i, \Delta c_i$ 为腔镜 M_i 分别沿 x, y, z 方向的失调线位移量。则镜面 M_i 方程为

$$(x - o_{xi})^2 + (y - o_{yi})^2 + (z - o_{zi})^2 = r_i^2 \quad (4)$$

入射光线 A_j 的方程为

$$\frac{x - x_j}{A_{jx}} = \frac{y - y_j}{A_{jy}} = \frac{z - z_j}{A_{jz}} \quad (5)$$

令 $q_1 = x - o_{xi}, q_2 = y - o_{yi}, q_3 = z - o_{zi}, m_1 = x_j - o_{xi}, n_1 = y_j - o_{yi}, l_1 = z_j - o_{zi}$

$$i, j = 1, 2; i \neq j \quad (6)$$

其中 A_{jx}, A_{jy}, A_{jz} 是入射光线 A_j 的方向余弦。化简 (4), (5) 式可得

$$q_k^2 + B_k q_k + C_k = 0 \quad k = 1, 2, 3 \quad (7)$$

其中

$$B_1 = 2[A_{jx}(n_i A_{jy} + l_i A_{jz}) - m_i(A_{jy}^2 + A_{jz}^2)]$$

$$C_1 = m_i^2(A_{jy}^2 + A_{jz}^2) - 2m_i A_{jx}(n_i A_{jy} + l_i A_{jz}) + A_{jx}^2(n_i^2 + l_i^2 - r_i^2)$$

$$B_2 = 2[A_{jy}(m_i A_{jx} + l_i A_{jz}) - n_i(A_{jx}^2 + A_{jz}^2)]$$

$$C_2 = n_i^2(A_{jx}^2 + A_{jz}^2) - 2n_i A_{jy}(m_i A_{jx} + l_i A_{jz}) + A_{jy}^2(m_i^2 + l_i^2 - r_i^2)$$

$$B_3 = 2[A_{jz}(n_i A_{jy} + m_i A_{jx}) - l_i(A_{jx}^2 + A_{jy}^2)]$$

$$C_3 = l_i^2(A_{jx}^2 + A_{jy}^2) - 2l_i A_{jz}(n_i A_{jy} + m_i A_{jx}) + A_{jz}^2(m_i^2 + n_i^2 - r_i^2) \quad (8)$$

利用 (6), (8) 式, 解方程 (7) 就可以求出入射光线与镜 i 的交点 x, y, z 。

求反射光线, 镜上任意点处的法线矢量为 $N_i = (N_x N_y N_z) = (q_1 q_2 q_3)/r_i$ 则腔镜 M_i 的反射作用矩阵为

$$R_i = \begin{pmatrix} 1 - 2N_x^2 & -N_x N_y & -N_x N_z \\ -N_x N_y & 1 - 2N_y^2 & -N_y N_z \\ -N_x N_z & -N_y N_z & 1 - 2N_z^2 \end{pmatrix} \quad (9)$$

入射光线方向余弦 $A_j = (A_{jx} A_{jy} A_{jz})^T$ 在腔镜 M_i 上的反射遵守反射定理, 则反射光 $A_i = (A_{ix} A_{iy} A_{iz})^T$ 为

$$A_i = R_i A_j = \frac{1}{r_i} \cdot$$

$$\begin{pmatrix} A_{jx}(r_i^2 - 2q_1^2) - 2A_{jy}q_1q_2 - 2A_{jz}q_1q_3 \\ -2A_{jx}q_1q_2 + A_{jy}(r_i^2 - 2q_2^2) - 2A_{jz}q_2q_3 \\ -2A_{jx}q_1q_3 - 2A_{jy}q_2q_3 + A_{jz}(r_i^2 - 2q_3^2) \end{pmatrix} \quad (10)$$

考虑微扰下计算光线与输出镜的交点, 并判断光线是否穿过输出镜中心的椭圆小孔。为了简便起见, 先将入射光 A_i 化为随输出镜微扰的坐标系 x_o, y_o, z_o 中的形式

$$\begin{pmatrix} A_{xi} \\ A_{yi} \\ A_{zi} \end{pmatrix} = \text{Rot}_o^{-1} A_i = \begin{pmatrix} A_{ix} + A_{iy} \alpha_o - A_{iz} \theta_o \\ -A_{ix} \alpha_o + A_{iy} \\ A_{ix} \theta_o + A_{iz} \end{pmatrix} \quad (11)$$

入射光线的初始点坐标 (x_i, y_i, z_i) 微扰前在 $x_o y_o z_o$ 系中的值为 $x_{io} = x_i - a_o, y_{io} = y_i - b_o, z_{io} = z_i - c_o$ 。其中 (a_o, b_o, c_o) 是 x_o, y_o, z_o 系的坐标原点在 x, y, z 系中的值, 微扰后则为

$$\begin{pmatrix} x_{io}' \\ y_{io}' \\ z_{io}' \end{pmatrix} = \text{Rot}_o^{-1} \begin{pmatrix} x_{io} \\ y_{io} \\ z_{io} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_{i2} + y_{i2} \alpha_o - z_{i2} \theta_o \\ -x_{i2} \alpha_o + y_{i2} \\ x_{i2} \theta_o + z_{i2} \end{pmatrix} \quad (12)$$

输出镜在镜上坐标系 x_o, y_o, z_o 中的方程为

$$x_o' + y_o' = 0 \quad (13)$$

则入射光线与输出镜的交点在该系中的值为

$$\begin{pmatrix} x_o' \\ y_o' \\ z_o' \end{pmatrix} = \frac{1}{(A_{x_o} + A_{y_o})} \begin{pmatrix} x_{i_o}' A_{i_o} - y_{i_o}' A_{x_o} \\ (A_{x_o} + A_{y_o}) y_{i_o}' - A_{y_o} (x_{i_o}' + y_{i_o}') \\ - x_{i_o}' (A_{x_o} + A_{y_o}) \end{pmatrix} \quad (14)$$

利用这些交点值就可以判断光线是否通过输出镜上椭圆小孔, 即该椭圆小孔在镜上坐标系的 $y_o z_o$ 平面中的投影半径为 r_o , 则当这些交点满足 $y_o'^2 + z_o'^2 \leq r_o^2$ 时, 光线能穿过小孔。否则光线被镜面反射(或在镜背面时中断), 类似前面方法, 在 x, y, z 系中反射光为

$$A_o = \begin{pmatrix} A_{\alpha} \\ A_{\sigma} \\ A_{\alpha} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2A_{ix} \alpha_o - A_{iy} + A_{iz} \theta_o \\ -A_{ix} + A_{iy} \alpha_o + A_{iz} \theta_o \\ A_{ix} \alpha_o + A_{iy} \theta_o + A_{iz} \end{pmatrix} \quad (15)$$

交点为

$$\begin{pmatrix} x_o \\ y_o \\ z_o \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_o' - \alpha_o y_o' + \theta_o z_o' + a_o \\ \alpha_o x_o' + y_o' + b_o \\ -\theta_o x_o' + z_o' + c_o \end{pmatrix} \quad (16)$$

输出光线及 Y 远处的光斑为

$$\begin{aligned} K &= \frac{Y - y_o}{A_{\sigma}} \\ X &= KA_{\alpha} + x_o \\ Z &= KA_{\alpha} + z_o \end{aligned} \quad (17)$$

至此, (6) ~ (10) 式构成球面镜对入射光的反射计算模块, (11) ~ (17) 式则构成输出镜输出光束的计算模块, 限于篇幅略去激光器系统和绘图模块内容。

2.2 仿真程序流程

仿真程序主要由上述四个模块组成, 利用 VC 编程光线计算其流程图如图 2。其中光线的初始化就是将通过凹镜中心 1 mm 小孔的激光束按小孔衍射处理, 形成一个由衍射产生的发散光束, 取半径 0.005~ 0.5 mm 间 1 万条光线计算。图 3 就是对腔长 $L = 3100$ mm, 腔镜 $R_1 = -6800$ mm 和 $R_2 = 13000$ mm 的正支共焦腔准直时的仿真结果(为了简明起见, 只显示了其中 4 条光线在腔内外的行为), 当系统共轴时输出一均匀光环, 这跟实际情况完全符合。

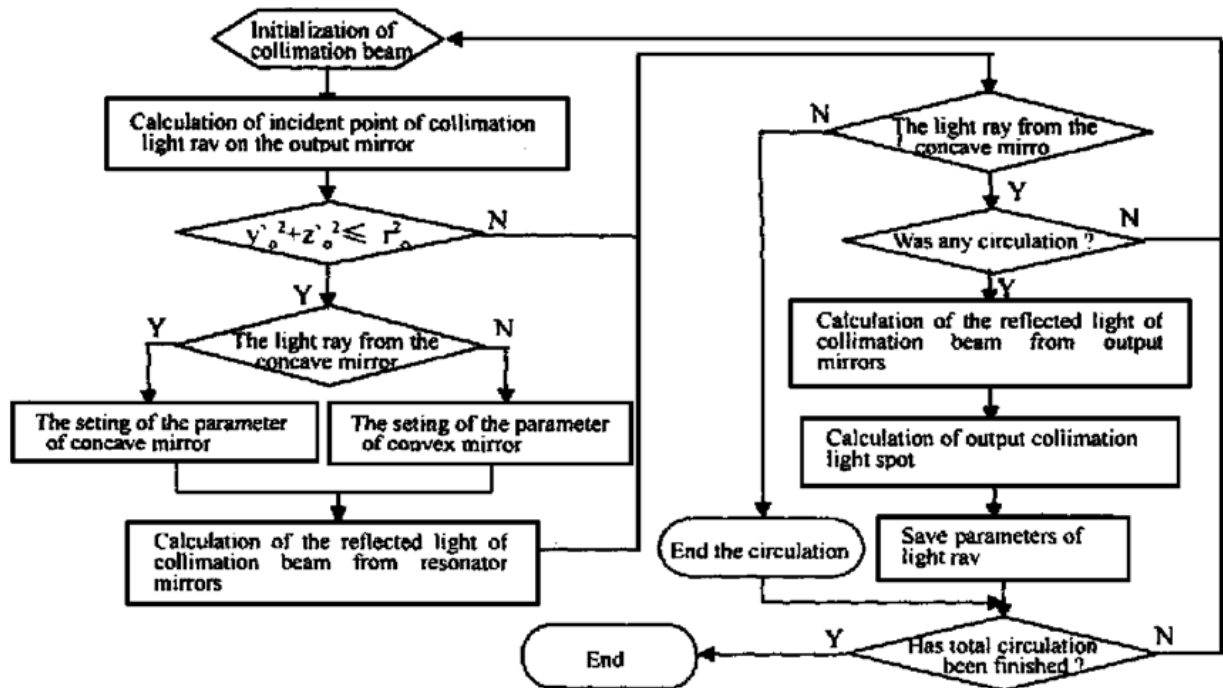


图 2 仿真计算流程图

Fig. 2 Flow chart for calculating beams in simulation

通过适当改变还可对会聚光束法准直正支共焦非稳腔^[2]等进行仿真, 从而可通过计算机仿真来研究各种谐振腔的准直问题, 既可靠又具有多种灵活性、方便和高效。

3 谐振腔失调与光束漂移

针对某连续波氧碘激光器工作时输出光束的漂移, 仿真了激光器非工作状态下腔镜失调的影响, 得

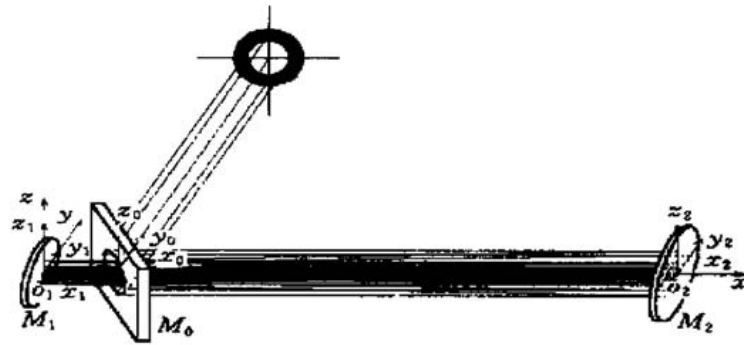


图 3 正支共焦非稳腔准直仿真图

Fig. 3 Result of simulation of aligning positive branch confocal unstable resonator

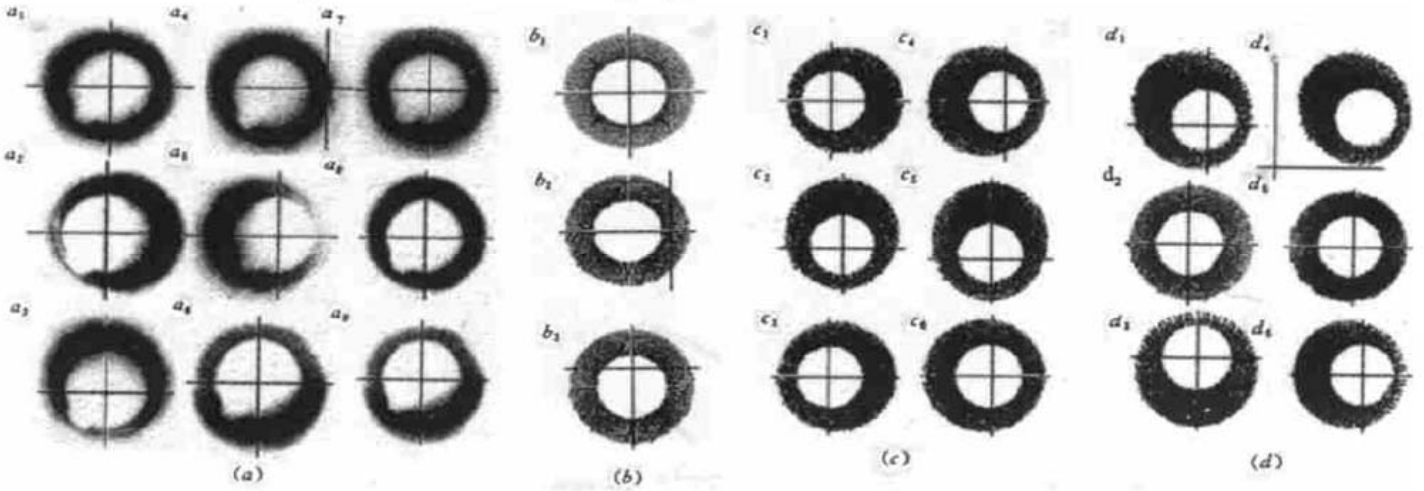


图 4 准直光斑的实验与仿真

(a) 实验结果; (b), (c) 仅一腔镜失调时的仿真结果; (d) 几个腔镜失调时的仿真结果

Fig. 4 Guiding beam intensity in experiment and simulation

(a) Experimental results; (b), (c) The effects of one mirror misalignment of the resonator mirrors;

(d) The results of simulation in misalignment of a few resonator mirrors

出了定性和定量的结果。图 4 为腔镜多种失调情况下输出准直光斑变化的实验与仿真结果。

图 4 (a) 是实测失调时的输出准直光斑变化: a_1 为无失调时的光斑图; a_2, a_3 分别为凸镜绕 z_1 轴和 y_1 轴有微失调角时的图; a_4 为输出镜绕 z_1 轴有微失调角时的图; a_5, a_6 为凹镜分别绕 z_2, y_2 轴有微失调角时的图; a_7 为凸镜有振动时的图; a_8 为在谐振腔光路中沿 y 方向用电吹风正中吹气流时的图; a_9 则为 y 方向偏上吹气流时的图。

图 4 (b), (c) 和 (d) 是仿真结果: 其中 b_1 为无失调时的仿真准直光斑, b_2, b_3 为输出镜分别绕 z_0, y_0 轴有 4 mrad 失调角时的图; c_1, c_2 为凸镜分别绕 z_1, y_1 轴有 - 0.4 mrad 失调角时的图, c_3, c_6 分别为凸镜和凹镜沿 y 轴方向仅 2 mm 失调线位移后的光斑, c_4, c_5 为凹镜分别绕 z_2, y_2 轴有 - 0.4 mrad 失调角时的图; d_1 为凸镜和凹镜同时分别绕 z_1 轴有 0.5 mrad

和绕 y_2 轴有 0.4 mrad 微失调角时的图, d_2 为凸镜、凹镜分别绕 z_1 轴和绕 z_2 轴有 0.4 mrad 失调角后的图, d_3 为凸镜和凹镜同时沿 z 轴方向仅有 10 mm 失调线位移后的图, d_4 为凸镜绕 z_1 轴 0.5 mrad 和凹镜绕 y_2 轴 0.4 mrad 微失调角, 而输出镜同时绕 z_0 轴和绕 y_0 轴 - 10 mrad 失调角后的图, d_5 为凸镜绕 z_1 轴 0.4 mrad 失调角, 而凹镜沿 y 轴方向 - 4 mm 失调线位移后的图。 d_6 为凸镜和凹镜同时沿 v 轴方向仅有 - 10 mm 失调线位移后的图。

对应的定量分析如表 1, 仿真中凸镜和凹镜绕 z_i 轴和 y_i 轴的失调角分别为 α_i, θ_i , 沿 y, z 方向的失调线位移为 $\Delta y, \Delta z$, 输出光束 3 m 处的漂移量 Δs (光斑重心相对无失调时的偏移量) 和偏移角 $\Delta \phi = (\Delta s - \Delta s_0) / Y$ (Δs_0 为出口处漂移量, Y 为输出光斑的距离)。

表 1 腔镜失调引起的激光束角漂移量 $\Delta\varphi$, 位置漂移量 Δs , 其中 α_i, θ_i 为角失调量(mrad), $\Delta y, \Delta z$ 为失调线位移(mm)Table 1 Angle drifts of laser beam $\Delta\varphi$, position drifts Δs as functions of the misaligning variables α_i, θ_i (mrad), $\Delta y, \Delta z$ (mm)

Emulational number	Output mirror M_0	Resonator mirror M_1	Resonator mirror M_2	$\Delta\varphi$ /mrad	Δs /mm
b_2	$\alpha_i = 4$			7.99934	23.9975
b_3	$\theta_i = 4$			3.99955	12.0817
c_1		$\alpha_i = -0.4$		0.57364	12.8874
c_2		$\theta_i = -0.4$		0.57410	12.825
c_3		$\Delta y = 2$		0.42462	10.0443
c_4			$\alpha_i = -0.4$	1.09884	13.5522
c_5			$\theta_i = -0.4$	1.09816	13.5944
c_6			$\Delta y = 2$	0.42773	6.1241
d_1		$\alpha_i = 0.5$	$\theta_i = 0.4$	1.28029	18.2342
d_2		$\alpha_i = 0.4$	$\alpha_i = 0.4$	0.53025	0.5187
d_3		$\Delta z = 10$	$\Delta z = 10$	0.00472	17.9552
d_4	$\alpha_i = -10, \theta_i = -10$	$\alpha_i = 0.5$	$\theta_i = 0.4$	22.20150	61.5723
d_5		$\alpha_i = 0.4$	$\Delta y = -4$	0.27204	3.3686
d_6		$\Delta y = -10$	$\Delta y = -10$	0.00474	17.8756

从仿真与实验可得出如下结论:

1) 据表 1 中 $c_1 \sim c_6$, 腔镜 1(凸镜) 的失调影响比腔镜 2(凹镜) 的影响相对要小些;

2) 由 $c_1 \sim c_6$, 腔镜的角失调比平移失调影响大;

3) 由 $c_1 \sim c_6$, 两腔镜的角失调与平移失调造成输出的准直光斑形变类似, 因此很难根据光斑的形变来判断哪个腔镜在动, 是作何种运动; 但在此时, 近场输出的环形光斑的环心几乎不变(见图 4 的 $a_1 \sim a_3, a_5 \sim a_9, c_1 \sim c_6$);

4) 图 4 中 a_4 和 b_2, b_3 输出镜的偏转造成的是光斑的整体漂移, 光斑形状几乎不变, 因此可根据其变形情况来判断斜镜是否发生了微偏转;

5) 图 4 中 a_7 实验表明, 在激光器工作时腔镜上下振动或绕 y 轴微偏转可能性比较大, 而绕 z 轴微偏转或沿 y 方向平动现象未观察到。

6) 图 4 中 a_8, a_9 实验表明, 激光器工作时, 腔内不定的超音速流场在光束截面上的不均匀性对激光的漂移有较大影响^[3];

7) 仿真空腔时腔镜失调对准直光斑的影响, 并与激光器工作时准直光斑的变化情况相比较, 一定程度上可获得不定的超音速流场对光束漂移的影响。

4 结束语

本文成功地仿真了高能激光器的准直和失调影响, 其结果为 COIL 激光器稳定性的诊断提供了一定的依据。通过选择适当的参数和模块组合, 还可以很方便地仿真多种类型的准直, 研究激光器的失调情况。

利用计算机仿真技术来研究高能激光器的准直和失调影响等具有很强的直观性和灵活性, 有定量和定性的结果, 不受条件的限制, 作为一种辅助手段可提高功效, 因而具有重要的意义。

参 考 文 献

- 1 Fu Lei, Xing Jianguo, Shi Hongmin *et al.*. Optical path-splitting 2-D shearing interferometer system for deformation study of high power laser resonator mirrors. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2000, **20**(12): 1667~ 1674
- 2 Guo Jianzeng, Yan Huizhi, Li Huiying *et al.*. A new method for aligning a positive-branch co-focal unstable resonator precisely. *High Power Laser and Particle Beams* (强激光与粒子束), 1992, **4**(3): 392~ 396
- 3 Alan H. Paxton, William P. Latham, Jr.. Unstable resonators with 90° beam rotation. *Appl. Opt.*, 1986, **25**(17): 2939~ 2946