

一种非稳腔调腔干涉条纹的建模与仿真*

刘文广, 邱伟成

(国防科技大学 光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要:非稳腔的计算机辅助准直技术对于保证高能激光器运行参数的稳定性具有非常重要的作用。文章从理论上阐明了非稳腔调腔干涉条纹形成的物理机理,建立了正支共焦非稳腔内多光束干涉的物理模型,引入失调元件的增广矩阵来描述腔镜失调引起的椭圆高斯光束传输效应、高斯光束中心的偏移效应和附加的相位倾斜效应。使用高斯光束传输的 ABCD 矩阵计算了调腔光束在腔内多次往返后的高斯光束复参数,将多次往返的高斯光束进行相干叠加,获得了非稳腔不同失调角情况下的调腔干涉条纹图样,定量计算了不同失调角情况下调腔干涉条纹间距的偏移量,并与实验结果进行了对比分析。结果表明在实验误差允许的前提下,仿真得到的干涉条纹图样与实验获得的干涉条纹图样具有一致性,从而证实了理论模型的正确性。理论模型的成功建立使谐振腔的失调量与干涉条纹的形态变化精确对应起来,从而可以为非稳腔计算机辅助调节的闭环控制研究提供理论指导。

关键词:正支共焦非稳腔; ABCD 矩阵; 增广矩阵; 干涉条纹; 失调腔

中图分类号: TN248.1 文献标志码: A 文章编号: 1001-2486(2012)01-0004-05

A physical model and simulation of the interference fringes for the alignment of unstable resonator

LIU Wenguang, QIU Weicheng

(College of Opto-electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: The physical model of multiple beams interference fringes was established for unstable resonator alignment, and the characteristics of interference fringes with different misalignment angles were calculated by a homemade software, in which augmented matrices of misaligned optical systems was applied to compute the decentration and tilt of Gaussian beams. The ABCD law was applied to calculate the multi-pass propagation of Gaussian beam q parameter. Furthermore, the interference fringe for unstable resonator alignment was calculated by adding the complex electrical field of multiple Gaussian beams. The calculated interference fringe was found to fit well with the experimental results, which shows that the physical model is correct. Therefore, this model can quantitatively explain the relation between the characteristics of interference fringes and the misalignment of the resonator, and then can be a theoretical guidance for compute-aided automatic alignment of the resonators.

Key words: lasers; confocal unstable resonators; alignment; augmented matrix; interference

激光谐振腔是激光器中实现激光能量提取和输出的关键器件,谐振腔的准直与否将直接影响激光器的输出光束质量和输出功率的稳定性,因此激光器在安装或运行时都要进行谐振腔腔镜的装调,使腔镜位置达到设计要求,才能实现预定的输出指标。目前高能激光实际工程应用中都需要通过人眼观察调腔干涉条纹的对称性来判断腔镜是否准直,然而由于人眼观察的主观性,无法定量判别干涉条纹的对称性,因此不同操作人员对干涉条纹是否对称的判断具有主观不确定性,这将导致调腔精度和可重复性降低。此外环境振动和

空气扰动会使干涉条纹出现图像模糊、吞吐现象,这就使人眼观察判断的准确性和重复性进一步降低^[1],传统的人工调腔方式不仅耗时长、调腔精度受限,而且需要专业的调腔人员。鉴于此,国内外科研工作者提出了各种利用现代电子技术进行谐振腔辅助装调的技术方案。如, Geninger^[2]等使用四象限探测器来探测腔镜的失调量;胡亚红^[3]等通过 CCD 探测光斑的偏移量来进行非稳腔的自动准直;张翔^[4]等使用哈特曼波前传感器测量调腔光的相位变化来探测失调量;刘文广等先后提出了采用自准直反馈光路进行调腔信号光

* 收稿日期: 2011-09-06

基金项目: 国家部委资助项目

作者简介: 刘文广(1978-),男,内蒙正镶白旗人,副教授,博士,硕士生导师, E-mail: lwg998@yahoo.cn

相位探测和腔镜失调量计算的方法^[1],以及采用数字图像处理技术进行调腔干涉条纹对称性判别的方法^[5];尹新华^[6]等以焦斑能量最大化为优化目标,使用 SPDG 算法对非稳腔腔镜进行了闭环控制实验。

然而以上各种方法中均缺乏对非稳腔调腔干涉条纹形成机理的深入分析,缺乏一个物理模型来定量分析所探测到的光斑形貌或条纹形貌的变化特点与腔镜失调量的关系,正是这一原因使得谐振腔调节的自动闭环控制难以得到良好的效果。本文将从理论上阐明非稳腔调腔干涉条纹形成的物理机理,建立正支共焦非稳腔内多光束干涉的物理模型,定量计算谐振腔的失调量与干涉条纹形态变化的关系,并与实验结果进行对比分析,以证明所建立物理模型的正确性。

1 非稳腔调腔干涉条纹形成机理的物理模型

1.1 调腔干涉条纹的形成机理分析

非稳腔的准直调节光路如图 1 所示。非稳腔调腔干涉条纹形成的物理机理如下:由 He-Ne 激光器发出的高斯光束作为导引光首先通过凹面镜上的小孔注入腔内,经凸面镜反射后,到达凹面镜上并反射,此时完成一次往返,光束的横截面放大大约 M 倍(M 为非稳腔的放大倍数);一次往返完成后,由凹面镜反射的光束再次传输到凸面镜,反射后再传输到达凹面镜,光束经凹面镜再次反射后完成第二次往返。如此经过多次往返直至光束扩展超过刮刀镜的中空孔阑,光束横截面超过刮刀镜中空孔阑的部分被反射输出腔外(这束光被称为一次耦合输出光),而没超出的部分又一次通过刮刀镜中空孔阑到达凸面镜,反射后再到达凹面镜,经凹面镜反射后又一次到达刮刀镜上,光束横截面超过刮刀镜中空孔阑的部分输出腔外(这束光被称为二次耦合输出光)。另一部分继续重复前述的物理过程,分别形成三次、四次等多次耦合输出光。由于导引光是持续存在的,当导引光的第 t 时刻发出的光束进入腔内、多次往返形成第 N 次耦合输出光到达观察屏上时,还存在导引光的第 $t + \Delta t$ 时刻发出的光束经若干次往返形成的第 $N - 1$ 次耦合输出光到达观察屏上,等等。由于导引光是相干长度很长、输出稳定的单横模 He-Ne 激光,因此到达观察屏上的、不同时刻发出的光束形成的不同次耦合输出光可以视为相干叠加处理,所形成的干涉条纹就是导引光经腔内多次往返形成的多光束干涉现象。

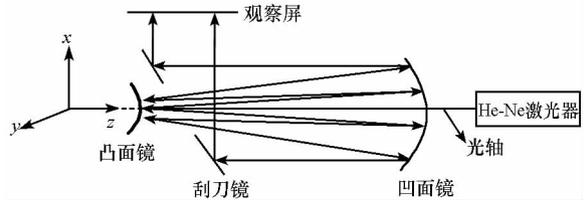


图 1 现有非稳腔调腔光路图
Fig. 1 Optical system of the unstable resonators

1.2 腔镜失调引起的椭圆高斯光束传播

腔镜失调时,高斯光束在横截面的 x 、 y 两个垂直方向上,具有不同几何尺寸,圆形高斯光束经过失调光学系统传播后会变成椭圆高斯光束^[7]。椭圆高斯光束在 x 、 y 方向上分别具有与圆形高斯光束同样的表达式,其在两个方向上的光斑半径 $w_{x,y}(z)$ 、等相位面曲率半径 $R_{x,y}(z)$ 与圆形高斯光束具有相同的变化规律,或者说 $q_{x,y}(z)$ 同样满足高斯光束传播的 ABCD 定律^[8]。唯一不同的是,在 x 、 y 两个方向上腰斑 w_{ox} 、 w_{oy} 的空间位置并不重合($z_{ox} \neq z_{oy}$), w_{ox} 与 w_{oy} 也不一定相等,从而使得椭圆高斯光束在上述两个方向上具有不同的发散角及不同于圆形高斯光束的附加相移。

为简单,考虑一种较为简单的情况,即调腔光路中凸面镜在俯仰方向的失调角为 α (如图 2 所示),而凹面镜不失调。此时凸面镜为像散元件,谐振腔在 yo z 和 xo z 平面内具有不同的变换矩阵。在 yo z 和 xo z 平面上的透镜的实际焦距将不再是名义上的焦距 f ,而分别是 $f/\cos\alpha$ 和 $\cos\alpha/f$ ^[8]。因此,凸面反射镜在 yo z 平面和 xo z 平面内的变换矩阵分别是

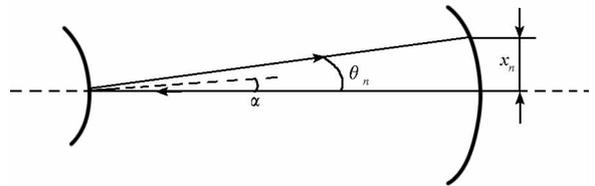


图 2 凸面镜失调角为 α 时引起的光斑中心位移和附加相位倾斜
Fig. 2 Shift of beam center and phase tilt due to misalignment of convex mirror

$$R_{ex} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/f\cos\alpha & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$R_{ey} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\cos\alpha/f & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

对于凸面反射镜有 $f = R_2/2$ 。凹面镜不失调,则凹面反射镜在 xo z 平面上和 yo z 平面上的反射矩阵均为

$$R_c = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -2/R_1 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

在 xoz 和 $yozy$ 平面内高斯光束经过腔长 L 的自由空间传输矩阵为

$$P_x = P_y = \begin{bmatrix} 1 & L \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

于是得到高斯光束在谐振腔中 xoz 平面内的一周往返矩阵为 $T_x = R_c P_x R_{ex} P_x$; $yozy$ 平面的一周往返矩阵为 $T_y = R_{cy} P_y R_{ey} P_y$ 。高斯光束在非稳腔内往返一次的 q 参数为

$$q_1 = \frac{Aq_0 + B}{Cq_0 + D} \quad (5)$$

利用高斯光束 q 参数传输的 ABCD 公式反复迭代计算,可以得到在谐振腔内往返 n 次在 xoz 平面和 $yozy$ 平面上的 q 参数 q_{nx} 、 q_{ny} ,进而可根据 q 参数求出相应的高斯光束等相位面曲率半径 R_{xn} 、 R_{yn} 和光斑半径 w_{xn} 、 w_{yn} 。

1.3 腔镜失调引起的高斯光束中心偏移和附加相位倾斜

凸面镜失调除了使高斯光束变为椭圆高斯光束外,还会使每次往返后的高斯光束中心相对凹面镜中心产生线位移,同时使相位分布相对凹面镜的参考平面发生倾斜(如图 2 所示)。使用失调元件的增广矩阵^[9]来计算高斯光束失调线位移 x_n 和失调角位移 θ_n 。失调凸面镜的增广矩阵为

$$R_{zc} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ -2/R_2 & 1 & 0 & -2\alpha \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

凹面镜的增广矩阵为

$$R_{zc} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ -2/R_1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

经过腔长 L 的自由传输增广矩阵为

$$P_z = \begin{bmatrix} 1 & L & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

经由凹面镜中心小孔入射的高斯光束中心光线矢量为 $U_0 = [0 \ 0 \ 1 \ 1]^T$,高斯光束中心光线在非稳腔内往返一周的光线矢量为 $U_1 = R_{zc} P_z R_{zc} P_z U_0$,往返 n 次为 $U_n = R_{zc} P_z R_{zc} P_z U_{n-1}$,则往返 n 次后高斯光束光斑中心偏移量为 $x_n = U_n(1)$,中心光线倾斜角为 $x_n = U_n(2)$,中心光线倾斜引起的高斯光束相位倾斜因子为

$$\varphi(x) = e^{-ikx \sin \theta_n} \quad (9)$$

则经过 n 次往返后的高斯光束复振幅可以表达为

$$\begin{aligned} \bar{E}_n(x, y) &= \sqrt{\frac{w_0^2}{w_{xn} w_{yn}}} e^{-\Gamma \frac{(x-x_n)^2}{w_{xn}^2} + \frac{y^2}{w_{yn}^2}} e^{-ik \Gamma \frac{(x-x_n)^2}{R_{nx}} + \frac{y^2}{R_{ny}}} e^{-ikx \sin \theta_n} \end{aligned} \quad (10)$$

高斯光束在正支共焦非稳腔内往返传输时,光束不断扩大。当到达刮刀镜上的高斯光束光斑半径大于刮刀镜中空孔阑半径时,一部分高斯光束经刮刀镜反射输出,将所有可经刮刀镜输出的高斯光束相干叠加即得到到达凹面镜上高斯光束的干涉场复振幅为

$$\bar{E}_i = \sum_{i=n}^m \bar{E}_i(x, y) \quad (11)$$

其中 n 代表腔内往返的高斯光束在刮刀镜上的光斑半径第一次大于刮刀镜内孔阑半径时对应的往返次数, m 理论上可以取无穷大,但考虑到多次往返后光强的衰减已经较大,一般取 $m = n + 5$ 即可, m 取更大的值时所得计算结果不会有显著的差别。如果观察屏沿光轴方向与凹面镜的距离为 z_L ,则根据高斯光束传输的简单关系可以由凹面镜上的复振幅分布 $\bar{E}_i(x, y, 0)$ 推出观察屏上的复振幅分布 $\bar{E}_i(x, y, z_L)$,从而得到观察屏上的多光束干涉条纹的强度分布:

$$I = \left[\sum_{i=n}^m \bar{E}_i(x, y) \right] \left[\sum_{i=n}^m \bar{E}_i(x, y) \right]^* \quad (12)$$

2 非稳腔调腔干涉条纹仿真结果与实验结果的对比分析

2.1 仿真结果与试验结果的干涉条纹形态的定性比较

所模拟的正支共焦非稳腔参数为:腔长 $L = 1\text{m}$,凹面反射镜曲率半径 $R_1 = 3\text{m}$,凸面反射镜曲率半径 $R_2 = -1\text{m}$,凹面镜中心小孔直径 1mm ,刮刀镜中心孔阑在观察屏上的投影为直径 11.3mm 的圆形。所用 He-Ne 激光器为单横模激光器,输出镜上为高斯光束腰斑,腰斑直径 0.2mm ,He-Ne 激光器的输出镜距离凹面镜 1m 。使用 MATLAB 软件编程计算了凸面镜俯仰方向的失调角 α 变化时,观察屏上的干涉条纹图样变化情况,如图 3 所示。

图 4 给出了不同失调角下的调腔干涉条纹图样的实验结果,其中 $\alpha = 0 \mu\text{rad}$ 的图样是人眼认为比较理想的调腔结果,谐振腔处于“准直”状态,在此基础上利用精密电控镜架使凸面镜俯仰

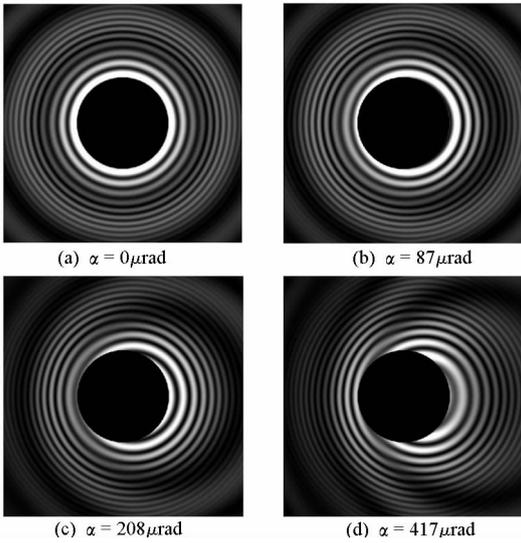


图 3 不同失调角情况下非稳腔调腔干涉条纹仿真结果

Fig. 3 The calculated interference fringes of different misalignment angle with different till angle

方向产生不同的失调角,利用 CCD 摄像机拍摄对应的调腔干涉条纹图像。将仿真结果与相应的实验结果进行对比,可以发现二者具有以下共同的特征:

- (1) 干涉条纹的亮度从中心往四周逐渐降低。
- (2) 干涉条纹的间距从里向外逐渐变小。干涉亮条纹的宽度,从里向外逐渐变细。
- (3) 失调情况下,调腔干涉条纹不再关于中心对称,而产生了偏移。并且一侧干涉条纹间距较小,另一侧干涉条纹间距较大。

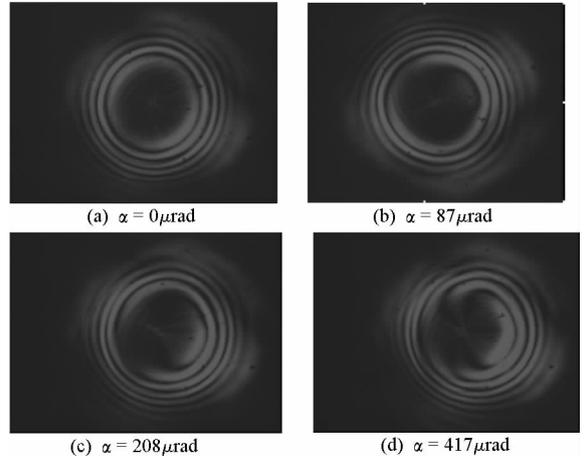


图 4 不同失调角情况下非稳腔调腔干涉条纹实验结果

Fig. 4 The experimental interference fringes of different misalignment angle with different till angle

(4) 失调情况下,中心光弧偏向干涉条纹间距较大的一侧。

(5) 随着凸面镜失调角度的增加,调腔干涉条纹图像的变形程度加剧。失调角度与调腔干涉条纹图像的变形程度成正相关关系。当凸面镜失调角度增大时,调腔干涉条纹的圆环出现了严重的截断。

2.2 仿真结果与试验结果的干涉条纹间距的定量比较

使用干涉条纹处理软件对仿真和实验所得干涉条纹图分别进行了骨架提取与条纹间距计算,结果如表 1 所示。

表 1 实验图像和仿真图像的条纹间距对比(单位:像素)

Tab. 1 Decentration of the interference fringes between experimental result and simulation result

		失调角 $\alpha = 0$				失调角 $\alpha = 87 \mu\text{rad}$				失调角 $\alpha = 208 \mu\text{rad}$			
实验结果	左侧	*	*	17	18	*	16	16	*	*	30	*	16
	右侧	*	*	16	17	*	15	17	*	*	32	*	20
仿真结果	左侧	22	28	28	32	18	21	24	19	20	23	27	
	右侧	22	28	28	32	23	24	26	21	23	27	31	

注: 30 * 表示由于条纹提取不完全,条纹间距为相邻两条纹间距之和。* 表示条纹未提取。

分析表 1 可知,尽管计算结果在趋势上与实验结果有一致性,但从定量上比较条纹间距又有差别。主要原因:一是实验结果的条纹间距与 CCD 像素有关,而仿真计算结果的条纹间距与生成图像时数据点的采样频率有关。二是实验中不可避免地存在振动、环境气流影响,同时所加工的腔镜与理想球面镜相比有一定的偏差,因此实验所得条纹有畸变。

3 结论

虽然由于实验和理论模拟的采样点不一致引起了实验干涉条纹与仿真干涉条纹左右条纹间距数值有一定偏差,但两者所显示的失调角与条纹形貌变化规律的关系具有共同点,从而可以证明本文所建非稳腔调腔干涉条纹形成机制的物理模型是正确的。

通过表 1 可知,在相同腔镜失调角情况下,各级条纹间距的偏差变化并不相同。条纹间距的偏差并不与失调角成简单的正比关系。通过建立正确的物理模型可以计算不同失调角与条纹间距偏差量之间准确的函数关系,从而在实验中只需对调控干涉条纹进行图像处理、计算条纹间距偏差,根据函数关系就可以得出对应的谐振腔失调角度,从而可以将失调角反馈给计算机控制系统,实现高精度的闭环控制。因此本文模型的建立可以为实现非稳腔的高精度闭环控制提供理论指导。

参考文献 (References)

- [1] 刘文广,张文静,刘泽金,等. 采用自准直反馈光路的非稳腔自动调控系统及调控方法及应用:中国, ZL 2007 1 0035292. 2[P]. 2007-09-17.
LIU Wenguang, ZHANG Wenjing, LIU Zejin, et al. The alignment method of unstable resonator with self-collimated optical path and its applications: Chinese, ZL 2007 1 0035292. 2[P]. 2007-09-17. (In Chinese)
- [2] Geninger C E. Auto-alignment of high energy laser: United States, US6606339B1[P]. 1996-08-12.
- [3] 胡亚红,邓年茂,何俊华,等. 激光谐振腔自动稳定调节的一种方法[J]. 光子学报, 2001, 30(7):56-60.
HU Yahong, DENG Nianmao, HE Junhua, et al. A method for the automated alignment of laser resonator [J]. Acta Photonic Sinica, 2001, 30(7):56-60. (In Chinese)
- [4] Zhang X, Xu B, Wang W. Tilt correction for intracavity mirror of laser with an unstable resonator[C]// Proc. SPIE, 2005:135-146.
- [5] 刘文广,陈星,靳冬欢,等. 激光谐振腔的辅助装调设备、调腔系统及其调控方法:中国, ZL 2009 1 0227057. 4[P]. 2009-11-09.
LIU Wenguang, CHEN Xing, JIN Donghuan, et al. The alignment apparatus, system and method for laser resonator: Chinese, ZL 2009 1 0227057. 4 [P]. 2009-11-09. (In Chinese)
- [6] 尹新华,梁永辉,谢文科,等. 正支共焦非稳腔的自动准直调整实验研究[J]. 光学与光电技术, 2009, 10(1):236-240
YIN Xinhua, LIANG Yonghui, XIE Wenke, et al. The experiment study of automated alignment for confocal unstable resonator[J]. Optics and Opt-electrics Thecnology, 2009, 10(1):236-240. (in Chinese)
- [7] 刘木林,吴正茂,夏光琼. 高斯光束斜入射非平行法布里—珀罗干涉仪后的透射光强分布[J]. 光学学报, 2005, 25(4):22-25.
LIU Mulin, WU Zhengmao, XIA Guangqiong. Transmitting characteristics of a gaussian beam striking obliquely on a nonparallel fabry-pérot interferometer[J]. Acta Optica Sinica, 2005, 25(4):22-25. (in Chinese)
- [8] 吕百达. 激光光学[M]. 成都:四川大学出版社, 1986.
LV Baida. Laser optics[M]. Chengdu: Sichuan University Press, 1986. (in Chinese)
- [9] 卢亚雄,吕百达. 矩阵光学[M]. 大连:大连理工大学出版社, 1989.
LU Yaxiong, LV Baida. Matires optics[M]. Dalian: Dalian University Press, 1989. (in Chinese)
- [10] 高曾辉,吕百达. 非傍轴矢量高斯光束的圆屏衍射[J]. 物理学报, 2005, 54(11):126-128
GAO Zenghui, LV Baida. Propagation of vectorial off-axis Gaussian beams beyond the paraxial approximation[J]. Acta Physica Sinica, 2005, 54(11):126-128. (in Chinese)