

文章编号: 0253-2239(2008)03-0516-06

一种非稳腔计算机辅助装调方法的数值模拟

张文静 刘文广 刘泽金

(国防科技大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要 谐振腔的自动准直技术是高功率激光器工程实践中的关键技术之一。针对这一问题, 对非稳腔的计算机辅助装调方法进行了研究, 并对该过程进行了数值模拟。在失调参量和像差系数小范围内线性近似的前提下, 获取到一系列表征系统失调的像差值之后, 通过求解线性方程组来计算系统的失调量。根据求解结果对失调系统进行修正。数值模拟结果表明单结构参量失调可以很快求出, 多结构参量失调情况通过几次迭代求解后也能得到比较理想的结果。目前已经可以确定多个同时存在的失调量(包含倾斜和偏心)。倾斜量的求解范围约为 $10 \sim 10^4 \mu\text{rad}$, 偏心量的求解范围约为 $10^{-2} \sim 1 \text{ mm}$ 。这种辅助装调方法能够有效地指导谐振腔的精装调过程, 为今后实际的激光器谐振腔系统的自动调节提供了一种方法。

关键词 激光器; 非稳腔; 计算机辅助装调; 光学检测; 数值计算

中图分类号 TN815 **文献标识码** A

Numerical Simulation for Computer-Aided Precise Alignment of Unstable Resonator

Zhang Wenjing Zhang Liu Wenguang Liu Zejin

(College of Optoelectric Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

Abstract The automatic alignment of resonator is one of the critical techniques in high-power laser technology. The method of computer-aided alignment of unstable resonator is presented and its numerical simulation results are given. The relation between mirror misalignments and its phase aberration coefficients is regarded as linear to some extent, especially under the condition of small misalignments. After getting a series of aberrations representing a misaligned system, we get the data of each misalignment by solving linear equations. Then the misaligned resonator is modified according to these results. The whole process is simulated numerically. Presently, multi-misalignments including both tilt and decentration can be calculated in this way. The numerical analysis shows that it is easy to figure out a single misalignment. Complex misaligned condition needs iteration. Tilt misalignments that can be figured out is $10 \sim 10^4 \mu\text{rad}$ and the decentration range is $10^{-2} \sim 1 \text{ mm}$. This method can be used to guide resonator's alignment effectively and provide another way for laser resonator's automatic alignment in practical use.

Key words lasers; unstable resonator; computer-aided alignment; optical test and measurement; numerical calculation

1 引 言

非稳腔具有大的模体积, 良好的横模鉴别能力, 近衍射极限的输出光束质量, 因此非稳腔常被选做高功率激光器的腔型。激光谐振腔是否准确校调将

影响激光器输出功率和光束质量。传统的调腔方法很大程度上取决于工作人员的经验 and 感官判断, 限制了调节的准确性和调腔效率。1969 年 W. F. Krupke 等在研究 CO_2 激光器正支共焦腔输出光束

收稿日期: 2007-06-04; 收到修改稿日期: 2007-12-27

基金项目: 国家 863 计划和国防预研基金资助课题。

作者简介: 张文静(1982. 8), 女, 山东济宁人, 硕士研究生, 主要从事激光谐振腔调整方面的研究。

E-mail: zwj222111@163.com

导师简介: 刘泽金(1963-), 男, 山东无棣人, 教授, 博士生导师, 主要从事高能激光技术方面的研究。

E-mail: zejinliu@vip.sina.com

特性时,在近场放置一个热像仪探测光强,再单独用远场能量探测装置来检测远场光强分布^[1]。这种方法虽可以直观地看到光束近场、远场光强分布,但缺点在于不能直观反映光束相位特征,且不能将反映出的综合效果细分为各阶光学像差,对光腔调整指导意义并不明显。1981年 D. Anafi 等在研究 CO₂ 激光器正支共焦腔内像差的自适应光学校正时在腔内耦合输出镜附近放置了一个光束分束器来探测腔内强度模式,优点在于可以直接反映腔内光强模式,但由于本身像差可能直接影响耦合输出腔模,甚至产生高阶模式,且这类器件一般不耐强光照射,因而不能置于高能激光器中进行探测^[2]。国内外已经对谐振腔的失调特性进行了许多理论和实验研究。其中对正支非稳腔的研究居多。在腔镜失调对输出光束质量的影响方面,国内已经做了大量的研究,指出了一些光束质量参量与谐振腔失调的关系,为谐振腔的校调提供了理论基础^[3~7]。在目前的高功率激光器非稳腔的调节中一般采用 He-Ne 激光器通过凹面镜上的小孔向谐振腔内注入细光束,通过观察输出光斑的干涉条纹或位置偏移来判断谐振腔是否准直,反复调节直到获得一个比较圆的干涉图样。这种方法依赖经验的成分比较多,需要反复调节,因此效率较低,而且不能定量判断光束的像差信息,精度不高^[8]。

近年来,光学系统的计算机辅助调节技术发展迅速。它是基于系统的敏感系数矩阵和最小二乘法来确定光学系统失调量的。在光学成像系统领域,特别是离轴三反射镜光学系统较多地研究和运用了该技术,并取得了良好的效果^[9]。激光器领域,1990年 Rocewell 公司利用此项技术对一个环孔形激光器进行了装调,其模拟和实验结果的数据都表明了计算机辅助调腔方法的可行性^[10]。本文以典型非稳腔为例,通过构建自准直反馈光路,将计算机辅助调节技术应用于光学谐振腔,可准确快速地确定腔镜的位置偏差。本文对谐振腔的腔镜失调量计算进行了数值模拟,结果表明采用自准直反馈光路谐振腔自动调节技术是可行的,对实现复杂激光谐振腔的快速准确调节也具有很好的应用前景。

2 基本原理

在数学上来说,像差应该是系统结构参量的函数。这里的“像差”可以广义地理解为光学系统的各种评价指标,可以是某种几何像差,可以是波像差,也可以是泽尼克系数或赛德尔系数等。用 F_j ($j = 1, 2, \dots, m$) 表示像差,各元件结构参量用 x_i ($i = 1, 2, \dots, n$) 来表示,则二者之间的函数关系表示为^[11]

$$F = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n),$$

这是一个非常复杂的非线性方程,无法用显式表示。对于不同的光学系统,形式是不一样的。一般地,像差的种类很多,用 F_j ($j = 1, 2, \dots, m$) 来表示 m 种像差中的第 j 种像差,那么像差和结构参量之间的函数关系可表示成如下的方程组:

$$\begin{bmatrix} F_1 \\ \vdots \\ F_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_1(x_1, \dots, x_n) \\ \vdots \\ f_m(x_1, \dots, x_n) \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中 $f_j(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$, $j = 1, 2, \dots, m$ 代表像差与镜面位置之间的函数关系。必须要找出函数 f_1, f_2, \dots, f_m 的具体形式,才能完成对 x_i ($i = 1, 2, \dots, n$) 的求解。但是这个函数关系十分复杂,这种情况下,可以把函数表示成自变量 x 的幂级数,根据需要确定相应幂次,然后通过数值计算方法,求出若干抽样点的函数值,列出足够多的方程式,求出幂级数的系数,这样函数的幂级数形式即可确定。在系统失调量较小的情况下可以选择幂级数的一次项。此时 $F = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$ 可以近似的表示成

$$F_j = F_{0j} + \frac{\partial f}{\partial x_1}(x_1 - x_{01}) + \dots + \frac{\partial f}{\partial x_n}(x_n - x_{0n}),$$

式中 F_{0j} 为系统设计结果中残留的像差值, $(x_{01} \dots x_{0n})$ 为理想系统每个镜面位置的结构参量, F_j 为系统当前第 j 种像差测量值, $\left(\frac{\partial f}{\partial x_1} \dots \frac{\partial f}{\partial x_n}\right)$ 为像差对各个位置参量的一阶偏微分。

用像差函数值相对各个结构参量的差商 $\left(\frac{\partial f}{\partial x_1} \dots \frac{\partial f}{\partial x_n}\right)$ 近似代替这些微商 $\left(\frac{\partial f}{\partial x_1} \dots \frac{\partial f}{\partial x_n}\right)$, 可以得到像差与位置结构参量的近似线性方程组

$$\begin{bmatrix} F_1 \\ \vdots \\ F_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{01} \\ \vdots \\ F_{0m} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} \Delta x_1 + \dots + \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \Delta x_n \\ \vdots \\ \frac{\partial f_m}{\partial x_1} \Delta x_1 + \dots + \frac{\partial f_m}{\partial x_n} \Delta x_n \end{bmatrix},$$

设

$$\Delta \mathbf{X} = \begin{bmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} x_{01} \\ \vdots \\ x_{0n} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{A} = \begin{bmatrix} \frac{\delta f_1}{\delta x_1} & \dots & \frac{\delta f_1}{\delta x_n} \\ \vdots & & \vdots \\ \frac{\delta f_m}{\delta x_1} & \dots & \frac{\delta f_m}{\delta x_n} \end{bmatrix}, \quad \Delta \mathbf{F} = \begin{bmatrix} F_1 \\ \vdots \\ F_m \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} F_{01} \\ \vdots \\ F_{0m} \end{bmatrix},$$

用矩阵表示,则(1)式可以写为

$$\mathbf{A}\Delta \mathbf{X} = \Delta \mathbf{F}, \tag{2}$$

这就是本文的数学模型。

$\Delta \mathbf{X} = \mathbf{X} - \mathbf{X}_0$ 为系统中各镜面需要调整的变化量,即需要求解的失调量。

$\Delta \mathbf{F} = \mathbf{F} - \mathbf{F}_0$ 为系统评价指标的实测值和设计值之差,即像差随失调量的变化量。本文中评价指标选取的是泽尼克系数,因此文中向量 $\Delta \mathbf{F}$ 中的元素代表了泽尼克系数的变化。

(2)式中 \mathbf{A} 为灵敏度矩阵,可根据系统的设计数据,通过光学设计软件^[12]算出。矩阵中每一元素反映某种像差相对于结构参量变化的敏感程度。

一般情况下 $\mathbf{A}\Delta \mathbf{X}$ 不会严格等于 $\Delta \mathbf{F}$,为此定义一个评价函数 $\phi(\Delta \mathbf{X})$,令像差残量为 $\Phi = (\mathbf{A}\Delta \mathbf{X}) - \Delta \mathbf{F}$,则评价函数为 $\phi(\Delta \mathbf{X}) = \Phi^T \Phi$,那么可以设想,求解结果越接近真实值,评价函数越小。这样就转化为求解 $\phi(\Delta \mathbf{X}) = \Phi^T \Phi$ 的极小值 $\min \|\mathbf{A}\Delta \mathbf{X} - \Delta \mathbf{F}\|_2$ 。根据多元函数极值理论和矩阵运算求导规则,线性方程组为

$$(\mathbf{A}^T \mathbf{A})\Delta \mathbf{X} = \mathbf{A}^T \Delta \mathbf{F}, \tag{3}$$

称为最小二乘问题 $\min \|\mathbf{A}\Delta \mathbf{X} - \Delta \mathbf{F}\|_2$ 法方程组。只要 $(\mathbf{A}^T \mathbf{A})$ 可逆,或 \mathbf{A} 为列满秩矩阵 [$\text{rank}(\mathbf{A}) = n$] 时,方程就有唯一解 $\Delta \mathbf{X} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \Delta \mathbf{F}$ 。

当 $\text{rank}(\mathbf{A}) < n$,即 \mathbf{A} 不是列满秩矩阵时,通过 Moore-Penrose 广义逆来求解。矩阵理论中定义,对矩阵 $\mathbf{A}_{m \times n}$,若存在有 $n \times m$ 矩阵 \mathbf{G} 满足 $\mathbf{AGA} = \mathbf{A}$, $\mathbf{GAG} = \mathbf{G}$, $(\mathbf{AG})^H = \mathbf{AG}$, $(\mathbf{GA})^H = \mathbf{GA}$,则 \mathbf{G} 称为 \mathbf{A} 的 Moore-Penrose 广义逆,记为 \mathbf{A}^+ 。那么 $\hat{x} = \mathbf{A}^+ b$ 是最小二乘问题 $\min \|\mathbf{A}x - b\|_2$ 的极小范数最小二乘解,即它同时满足 $\|\mathbf{A}\hat{x} - b\|_2 = \min \|\mathbf{A}x - b\|_2$ 和 $\|\hat{x}\|_2 = \min \|x\|_2$ 。

同理,本文中, $\text{rank}(\mathbf{A}) < n$ 时,最小二乘问题 $\min \|\mathbf{A}\Delta \mathbf{X} - \Delta \mathbf{F}\|_2$ 的极小范数最小二乘解为

$$\Delta \mathbf{X} = \mathbf{A}^+ \Delta \mathbf{F}. \tag{4}$$

由于自变量比较多,像差之间存在着一定的相关性,容易使矩阵 \mathbf{A} 的条件数很大,矩阵 $\mathbf{A}^T \mathbf{A}$ 接近奇异,因而求出的解 $\Delta \mathbf{X}$ 很大,用它来修改系统往往不能保证评价函数的下降。为了使最小二乘法更好的应用,对所解向量 $\Delta \mathbf{X}$ 应加以限制,于是提出了阻尼的

方法,即通常所说的阻尼最小二乘法。

把法方程组变为 $(\mathbf{A}^T \mathbf{A} + P\mathbf{I})\Delta \mathbf{X} = \mathbf{A}^T \Delta \mathbf{F}$,就是求 $\phi(\Delta \mathbf{X})$ 在超球面 $\Delta \mathbf{X}^T \Delta \mathbf{X} = r^2$ 上的极小点。那么有

$$\Delta \mathbf{X} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A} + P\mathbf{I})^{-1} \mathbf{A}^T \Delta \mathbf{F}. \tag{5}$$

式中 P 称为阻尼因子,作用是限制解的范围。 P 选择太大,则 $\Delta \mathbf{X}$ 过小, P 太小,阻尼因子作用不大,当 $P = 0$ 时,蜕变为最小二乘法。文中的 P 取 10^{-5} 。

3 计算机辅助装调过程

3.1 系统结构

图1是非稳腔计算机辅助装调系统结构图。干涉仪出射的平行光由输出耦合镜 S 进入非稳腔,光线由凹面镜 M_1 反射至凸面镜 M_2 ,再经 M_2 反射至 M_3 , M_3 是一个小平面对,其作用是构成一种自准直系统,使入射光原路返回进入干涉仪,作为测量光束,由于干涉仪中的标准平面反射的光束作为参考光束,通过对这两束光产生的干涉图进行处理得到系统的像差。

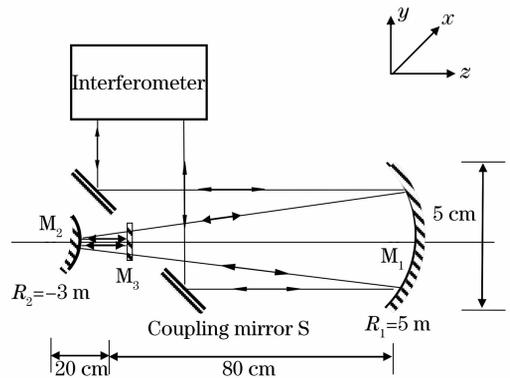


图1 非稳腔计算机辅助装调系统的结构图

Fig.1 Optical schematic diagram of the computer-aided unstable resonator alignment system

3.2 失调参量的定义

输出耦合镜 S 为中心具有椭圆形孔的镜片,此椭圆形孔在 xz 面上的投影为圆形。为了使在调整的过程中变量尽可能的少,固定 M_1 不动,假定该装置可引起系统失调的结构参量为:

$$x_1: M_2 \text{ 绕 } x \text{ 轴倾斜量 } T_{2,x};$$

- x_2 : M_2 绕 y 轴倾斜量 T_{2y} ;
 - $x_3 - x_5$: M_2 在 x, y, z 3 个方向上的偏移量 D_{2x}, D_{2y}, D_{2z} ;
 - x_6 : M_3 绕 x 轴倾斜量 T_{3x} ;
 - x_7 : M_3 绕 y 轴倾斜量 T_{3y} ;
 - x_8 : S 绕 x 轴倾斜量 T_{sx} ;
 - x_9 : S 绕 y 轴倾斜量 T_{sy} 。
- 共 9 个要计算的失调结构参量, $n=9$ 。

3.3 灵敏度矩阵的生成

灵敏度矩阵是用差商 $\left(\frac{\delta f}{\delta x_i}\right)$ 代替微商 $\left(\frac{\partial f}{\partial x_i}\right)$ 得到的, 利用光学设计软件, 令系统的某个结构参量改变一个微小增量 δx , 输出光束的泽尼克系数就会发生 δf 的改变, 则该改变量对这个结构参量的变化灵敏度为 $\delta f / \delta x$ 。重复这个过程, 可求出如下的灵敏度矩阵 **A**:

$$A = \begin{bmatrix} 1.2180 \times 10^{-3} & 1.2180 \times 10^{-3} & 6.0000 \times 10^{-6} & 6.0000 \times 10^{-6} & -9.0922 \times 10^{-2} & -1.5000 \times 10^{-5} & -1.5000 \times 10^{-5} & 0 & 0 \\ 0 & -1.9040 \times 10^3 & 3.6363 \times 10^1 & 0 & 0 & 0 & 9.5198 \times 10^2 & 0 & -1.1219 \times 10^3 \\ 1.9040 \times 10^3 & 0 & 0 & 3.6363 \times 10^1 & 0 & -9.5198 \times 10^2 & 0 & 1.5867 \times 10^3 & -1.3846 \times 10^{-1} \\ 1.2180 \times 10^{-3} & 1.2180 \times 10^{-3} & 6.0000 \times 10^{-6} & 6.0000 \times 10^{-6} & -9.0921 \times 10^{-2} & -1.5000 \times 10^{-5} & -1.5000 \times 10^{-5} & 0 & 0 \\ -3.1290 \times 10^{-3} & 3.1290 \times 10^{-3} & 1.1000 \times 10^{-5} & -1.1000 \times 10^{-5} & 0 & -6.8000 \times 10^{-5} & 6.8000 \times 10^{-5} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2.1726 \times 10^{-2} & -4.1500 \times 10^{-4} & 0 & 0 & 0 & -6.8970 \times 10^{-3} & 0 & 4.5960 \times 10^{-3} \\ -2.1726 \times 10^{-2} & 0 & 0 & -4.1500 \times 10^{-4} & 0 & 6.8970 \times 10^{-3} & 0 & -6.5000 \times 10^{-3} & 1.0000 \times 10^{-6} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1.0000 \times 10^{-6} & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

3.4 ΔF 的获取

系统在理想位置处时各阶泽尼克系数有初始值 F_0 , 在失调状态下得到的 F 值减去 F_0 , 即可得到 ΔF 。这样线性方程组 $A\Delta X = \Delta F$ 就被建立起来。

3.5 数值方法和计算结果

因为矩阵 **A** 各个元素之间的数量级差别很大, 并且是不满秩的奇异矩阵, 因而使得方程组的条件很坏, 在求解时需要针对这些特点选取合适的方法求解这个线性方程组。显然, 我们无法求出其精确解, 只能求其最小二乘解。失调量比较少的情况是比较容易求解的, 通过一步求解就可以把失调量求解出来。对于多失调量的情况可以通过多次迭代求解。具体求解方法如图 2 所示。

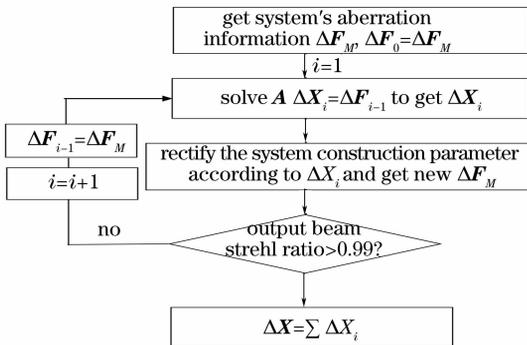


图 2 迭代解法流程框图

Fig. 2 Flow chart of the iteration algorithm

根据多失调量的求解方法, 对不同的失调情况进行了计算, 结果见表 1。

表 1 M_2 在 x 方向倾斜 $100 \mu\text{rad}$, y 方向倾斜 $200 \mu\text{rad}$ 时的求解结果

Table 1 Numerical simulation results when $T_{2x} = 100 \mu\text{rad}$, $T_{2y} = 200 \mu\text{rad}$ are set in advance

	Δx_1	Δx_2	$\sum \Delta X_i$	Real misalignment
$T_{2x} / \mu\text{rad}$	90.0	8.9	98.9	100
$T_{2y} / \mu\text{rad}$	184.8	14.0	198.8	200

表 1 给出了系统有两个倾斜量, $T_{2x} = 100 \mu\text{rad}$, $T_{2y} = 200 \mu\text{rad}$ 时迭代求解的结果。

表 2 给出了有 3 个倾斜量 $T_{2y} = 100 \mu\text{rad}$, $T_{3x} = 200 \mu\text{rad}$, $T_{sx} = 200 \mu\text{rad}$ 和 1 个 y 方向偏心量 $D_{2y} = 0.1 \text{ mm}$ 时的迭代求解结果。

表 2 M_2 绕 y 轴倾斜 $100 \mu\text{rad}$, y 方向偏心 $100 \mu\text{m}$, M_3 和输出耦合镜 S 绕 x 轴都倾斜 $200 \mu\text{rad}$ 时的迭代求解结果

Table 2 Numerical simulation results when $T_{2y} = 100 \mu\text{rad}$, $D_{2y} = 100 \mu\text{m}$, $T_{3x} = 200 \mu\text{rad}$, $T_{sx} = 200 \mu\text{rad}$ are set in advance

	Δx_1	Δx_2	$\sum \Delta X_i$	Real misalignment
$T_{2y} / \mu\text{rad}$	92.3	7.2	99.5	100
$D_{2y} / \mu\text{m}$	0	0	0	100
$T_{3x} / \mu\text{rad}$	0	0	0	200
$T_{sx} / \mu\text{rad}$	109.6	18.5	128.1	200

图 3(a) 给出了有 3 个倾斜量 $T_{2y} = 100 \mu\text{rad}$, $T_{3x} = 200 \mu\text{rad}$, $T_{sx} = 200 \mu\text{rad}$ 和一个偏心量 $D_{2y} = 100 \mu\text{m}$ 时的干涉图和斯特列尔比。图 3(b) 给出了系统按照表 2 中的求解结果调整后产生的干涉图和斯特列尔比。由图 3 可以看出, 输出光束的斯特列尔比

有明显提高。斯特列尔比是有像差时的点衍射图形中最大亮度与无像差时最大亮度之比。其值越大,则光束质量越高^[13]。表 2、表 3 和图 3 说明了在多失调量同时准确求解较困难的情况下,可通过其他结构参量进行补偿。按照计算出的结果修改系统同样可以得到比较好的输出光束质量。

表 4 给出了 M_2 同时在三个方向偏移 1 mm 时的迭代计算结果。

表 5 给出了系统同时存在 3 个倾斜量、两个偏心量时的迭代求解情况, $T_{2x}=150 \mu\text{rad}$, $T_{3y}=150 \mu\text{rad}$, $T_{5y}=150 \mu\text{rad}$, $D_{2x}=0.05 \text{ mm}$, $D_{2z}=0.05 \text{ mm}$ 。

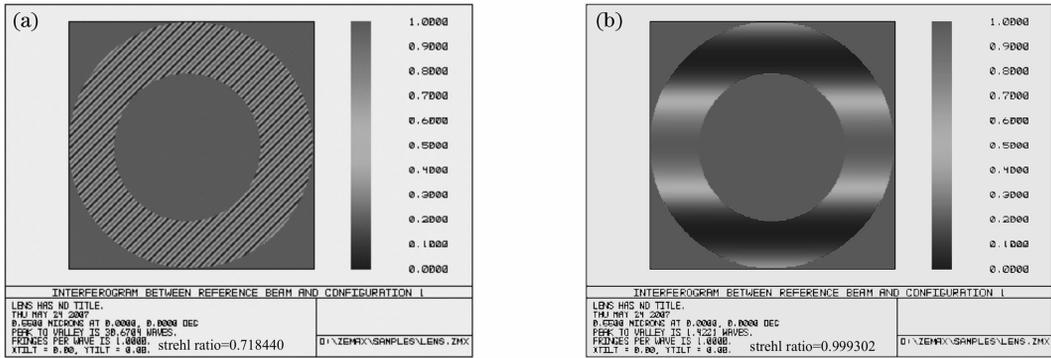


图 3 调整前(a)、后(b)输出光束干涉图

Fig. 3 Output beam interferogram of pre-aligned (a) and post-aligned (b) system

表 4 M_2 在 x, y, z 三个方向分别有 1 mm, 1 mm, 1 mm 的偏移的迭代求解结果

Table 4 Numerical simulation results when $D_{2x}=1 \text{ mm}$, $D_{2y}=1 \text{ mm}$, $D_{2z}=1 \text{ mm}$ are set in advance

	ΔX_1	ΔX_2	ΔX_3	ΔX_4	ΔX_5	$\sum \Delta X_i$	Real misalignment
$D_{2x}/\mu\text{m}$	589.8	274.2	30.7	59.2	31.3	985.2	1000
$D_{2y}/\mu\text{m}$	1530.7	-292.6	-183.9	23.1	-39.6	1037.7	1000
$D_{2z}/\mu\text{m}$	988.9	8	-0.5	1.4	1.7	999.5	1000

表 5 M_2 绕 x 轴倾斜 $150 \mu\text{rad}$, x 方向偏心 $50 \mu\text{m}$, z 方向离焦 $50 \mu\text{m}$, M_3 y 轴倾斜 $150 \mu\text{rad}$, s 绕 y 轴倾斜 $150 \mu\text{rad}$ 的迭代求解结果

Table 5 Numerical simulation results with iteration algorithm when $T_{2x}=150 \mu\text{rad}$, $T_{3y}=150 \mu\text{rad}$, $T_{5y}=150 \mu\text{rad}$, $D_{2x}=50 \mu\text{rad}$, $D_{2z}=50 \mu\text{rad}$ are set in advance

	ΔX_1	ΔX_2	ΔX_3	$\sum \Delta X_i$	Real misalignment
$T_{2x}/\mu\text{rad}$	110.5	35.1	3.1	148.7	150
$D_{2x}/\mu\text{m}$	0	0	49.3	49.3	50
$D_{2z}/\mu\text{m}$	49.9	0.1	0	50.0	50
$T_{3y}/\mu\text{rad}$	121.6	4.2	36.8	162.7	150
$T_{5y}/\mu\text{rad}$	136.3	0.5	19.5	156.4	150

4 结 论

由于系统的变化参量较多,很可能出现相关的现象,灵敏度矩阵接近奇异,使方程组的条件变坏。计算结果的准确度随失调量数量、失调程度、计算方法

表 3 系统变化前后泽尼克系数
Table 3 Zernike polynomial coefficients of pre-aligned and post-aligned system

Zernike coefficients	Pre-aligned system	Post-aligned system
z_1	0.0000	0.0000
z_2	-10.9096	-0.0571
z_3	10.9096	-0.7365
z_4	0.0000	0.0000
z_5	0.0000	0.0000
z_6	0.0000	0.0000
z_7	0.0001	0.0000
z_8	0.0000	0.0000
z_9	0.0000	0.0000

的不同会有所变化。但是在失调量较小的精调范围内,影响并不大。而且从模拟结果可以看出,失调量经一次或多次迭代计算后可以求解出来,即使部分不能完全求解的情况通过其他参量的补偿得到的结果,

仍然可以使系统调整到比较理想的状态。这说明本文提出的非稳腔的计算机辅助装调方法是可行的。随着研究的深入和完善,该方法将大大提高调腔效率,实现谐振腔的自动调节。

参 考 文 献

- 1 W. F. Krupke, W. R. Sooy. Properties of an unstable confocal resonator CO₂ laser system[J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1969, **QE-5**(12): 575~586
- 2 D. Anafi, J. M. Spinhirne, R. H. Freeman *et al.*. Intracavity adaptive optics. 2: Tilt correction performance[J]. *Appl. Opt.*, 1981, **20**(11): 1926~1932
- 3 Zhang Xiang, Xu Bing, Yang Wei. Influence on output mode by introducing intracavity mirror tilt perturbation [J]. *Chin. J. Lasers*, 2006, **33**(3): 303~310
张翔,许冰,杨伟. 腔镜倾斜扰动对正支共焦腔输出光束模式的影响[J]. *中国激光*, 2006, **33**(3): 303~310
- 4 Zhang Xiang, Xu Bing, Yang Wei. The experimental study of adjustment method for a confocal unstable resonator based on Hartmann-Shack wavefront sensor[J]. *Optical Technique*, 2007, **32**(3): 398~402
张翔,许冰,杨伟. 基于 H-S 波前传感器的正支共焦腔调腔方法的研究[J]. *光学技术*, 2007, **32**(3): 398~402
- 5 Du Shaojun, Lu Qisheng, Shu Bohong *et al.*. Laser mode changing with deformation of resonator mirrors under irradiation [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2007, **19**(1): 53~57
杜少军,陆启生,舒柏宏等. 激光辐照下非稳腔镜变形对激光模式的影响[J]. *强激光与粒子束*, 2007, **19**(1): 53~57
- 6 Zhang Xiang, Yang Wei, Hu Shijie *et al.*. Effect of intracavity perturbation on mode properties and tilt aberration correction for unstable resonators[J]. *Chin. J. Lasers*, 2006, **33**(10): 1365~1370
张翔,杨伟,胡诗杰等. 扰动对非稳腔模式的影响和腔内倾斜像差校正[J]. *中国激光*, 2006, **33**(10): 1365~1370
- 7 Huang Jianfeng, Shi Xiangchun. Numerical stimulation for reverse wave suppressor in unstable ring resonator[J]. *Chin. J. Lasers*, 2007, **34**(3): 370~373
黄剑峰,施翔春. 环形非稳腔倒向波抑制镜抑制效果的数值模拟[J]. *中国激光*, 2007, **34**(3): 370~373
- 8 Guo Jianzeng, Ren Xiaoming. A small-mirror method for aligning a confocal positive branch unstale resonator [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 1997, **9**(2): 313~316
郭建增,任晓明. 小镜法准直正支共焦非稳腔[J]. *强激光与粒子束*, 1997, **9**(2): 313~316
- 9 Zhang Bin, Han Changyuan. Study on optimization of computer-aided alignment of a three-mirror off-axis aspherical optical system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(1): 54~58
张斌,韩昌元. 离轴非球面三反射光学系统装调中计算机优化方法的研究[J]. *光学学报*, 2001, **21**(1): 54~58
- 10 R. Hudyma, L. C. Eigler. Computer-aided alignment of a grazing incidence ring resonator for a visible wavelength free electron laser[C]. *Proc. SPIE*, 1990, **1354**: 523~532
- 11 Li Lin, An Liansheng. *Theory and Application of Computer Aided Optical Design* [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2002. 88~89
李林,安连生. *计算机辅助光学设计的理论与应用*[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002. 88~89
- 12 Zemax. *Optical Design Program User's Guide* [M]. 2003
- 13 Hou Jing, Jiang Wenhan, Ling Ning. Ultimate curves of aberration and Strehl ratio[J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(9): 1065~1067
侯静,姜文汉,凌宁. 像差与斯特列耳比的极限曲线[J]. *光学学报*, 2001, **21**(9): 1065~1067