

腔内倾斜扰动对正支共焦腔本征模式的影响

张翔^{1,2} 许冰¹ 柳建^{1,2}

(1 中国科学院光电技术研究所, 成都四川 610209)

(2 中国科学院研究生院, 北京 100080)

摘要 针对激光器出光过程中腔内像差扰动带来的光束质量下降问题, 分析了正支共焦腔内不同位置倾斜扰动对本征模式的影响, 采用数值迭代法计算了理想状态及腔内不同位置倾斜扰动状态下的本征模式、相位 Zernike 像差拟合系数。结果表明: 对大小给定的扰动, 相位相对敏感性从凸面镜到凹面镜逐渐增加, 且腔模倾斜像差增大的同时还将导致离焦、像散等阶像差的增大, 因此作腔内补偿时, 应使补偿平面尽可能靠近凹面镜。

关键词 光学谐振腔; 腔内扰动; 迭代法; 本征模式; Zernike 像差系数

中图分类号 TN241 **文献标识码** A

0 引言

激光器出光时腔内的各种扰动, 如增益密度不均匀^[1]、腔内振动、腔镜变形^[2] 和工作物质热效应^[3~5] 等都会影响腔模分布, 从而直接带来输出光束质量的下降。以上因素均可能带来腔内倾斜像差, 对于采用正支共焦非稳腔(以下简称非稳腔)结构的激光器而言, 目前实验研究发现腔内倾斜是影响输出光束质量的重要因素之一。当腔内存在较大倾斜像差扰动时, 不仅直接导致输出光束能量密度分布不均, 且伴随许多高阶像差的增大, 从而严重影响光束质量。腔内倾斜扰动对本征模的影响有人作过研究^[6], 但并未将波面像差拟合细分为各阶 Zernike 像差, 未说明低阶像差的增大对于高阶像差的影响。1981 年 D. anafi 实验研究发现当腔内倾斜扰动增大到一定量值时, 采用爬山法原理的腔内自适应像差校正是失败的^[7]。因此有必要研究腔内倾斜扰动对于本征模式的影响, 目前关于腔内不同位置倾斜扰动对光束强度、相位和各阶像差影响的研究报道尚较少。

本文针对非稳腔内不同位置倾斜扰动对腔内模式的影响进行了理论分析和数值仿真计算, 指出在腔内不同位置引入扰动时, 对本征模式和各阶像差的影响是不同的, 为研究腔内扰动对输出光束质量的影响提供了一种分析方法, 指出进行腔内像差补偿时应注意的问题。

1 腔内像差扰动基本理论

谐振腔内部扰动大致可分为两类: 与激励无关的线性相位扰动和与激励相关的非线性相位扰动。与激励有关的相位扰动包括增益饱和、谐振分散等效应。

现讨论与激励无关的线性相位扰动且只研究非激活开腔, 因为实践表明, 非激活腔模式可以作为存在增益介质时激光模式的良好近似。为简化分析, 假设本征模的波前相位畸变是由腔内相位扰动畸变累积效应引起, 并等于沿相应光线轨迹的光程差。设由相位非均匀性引起的光束单次传输的光程变化为 $\Delta\xi(x)$, 则由于腔内相位扰动带来的总的光程差可表示为^[8,9]

$$\Delta\xi_{\text{Total}}(x) = \sum_{l=0}^{\infty} \Delta\xi\left(\frac{x}{M^l}\right) \quad (1)$$

式中 x 是出射模波前相位的横坐标, M 为非稳腔放大率。

谐振腔内每一个相位面(包括腔内光学元件)上的相位扰动, 都可以展开成关于光轴横坐标的 Taylor 级数形式

$$\phi_j(x) = \sum_{k=1}^{\infty} \delta_{jk} x^k \quad (2)$$

下标 j 表示特殊的位相扰动平面, k 为扰动像差阶数。为简化分析, 在整个光学谐振腔内每隔一定距离就放置一个这样的相位扰动面, 如图 1。相位面从凸面镜开始计算, 对应于凸面镜平面 $j=0$, 对应于凹面镜平面 $j=N+1$ 。图 1 中腔内共有 N 个相位平面。对于光束单次传输, 通过有扰动非稳腔带来的

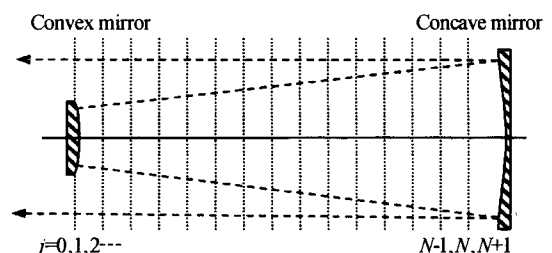


图 1 非均匀相位介质非稳腔内相位平面
Fig. 1 Positive-branch confocal unstable resonator with a segmented inhomogeneous phase medium

光程变化为^[8,9]

$$\Delta\xi(x) = L_T \sum_{j=0}^{N+1} \left\{ \sum_{k=1}^{\infty} \delta_{jk} x^k + \sum_{k=1}^{\infty} \delta_{jk} \frac{x^k}{M^k} \left[1 + (M-1) \frac{j}{N+1} \right]^k \right\} = L_T \sum_{j=0}^{N+1} \sum_{k=1}^{\infty} \delta_{jk} x^k \left\{ 1 + \frac{1}{M^k} \left[1 + (M-1) \frac{j}{N+1} \right]^k \right\} \quad (3)$$

将式(3)代入式(1)得到总的光程差为

$$\Delta\xi_{\text{Total}}(x) = L_T \sum_{j=0}^{N+1} \sum_{k=1}^{\infty} \delta_{jk} x^k \left\{ 1 + \frac{1}{M^k} \left[1 + (M-1) \frac{j}{N+1} \right]^k \right\} \sum_{l=0}^{\infty} \frac{1}{(M^k)^l} = L_T \sum_{j=0}^{N+1} \sum_{k=1}^{\infty} \delta_{jk} x^k \frac{M^k}{M^k - 1} \cdot \left\{ 1 + \frac{1}{M^k} \left[1 + (M-1) \frac{j}{N+1} \right]^k \right\} = L_T \sum_{j=0}^{N+1} \sum_{k=1}^{\infty} \delta_{jk} \bar{\alpha}_{jk} x^k \quad (4)$$

式(4)中 $\bar{\alpha}_{jk}$ 为相位扰动权重因子, 其值越大, $\Delta\xi$ 越大, 则对输出相位的影响越显著.

$$\bar{\alpha}_{jk} = \frac{1}{M^k - 1} \left\{ M^k + \left[1 + (M-1) \frac{j}{N+1} \right]^k \right\} \quad (5)$$

由于 $j/(N+1) = L_j/L_T$, L_j 为第 j 个相位面距凸面镜的距离, 式(4)可写为

$$\Delta\xi_{\text{Total}}(x) = L_T \sum_{j=0}^{N+1} \sum_{k=1}^{\infty} \delta_k(L_j) \bar{\alpha}_k(L_j) x^k \quad (6)$$

这里 $\delta_k(L_j) \equiv \delta_{jk}$, 且

$$\bar{\alpha}_k(L_j) = \frac{1}{M^k - 1} \left\{ M^k + \left[1 + (M-1) \frac{L_j}{L_T} \right]^k \right\} \quad (7)$$

注意到有

$$\bar{\alpha}_k(L_T) = 1 + \bar{\alpha}_k(0) \quad (8)$$

式(8)表明在凹面镜处的位相扰动权重因子大于在凸面镜处的扰动权重因子. 由式(7)可见, 给定的位相扰动(补偿)面越靠近凹面镜, 对耦合输出相位的影响越显著. 即对于大小给定的扰动, 相对敏感性从凸面镜到凹面镜是逐渐增加的; 因此, 为使腔内相位补偿更有效, 相位补偿面要尽量靠近凹面镜

或直接使用凹面镜作为补偿面. 为进一步说明腔内几阶主要像差的影响关系, 可以对存在扰动的非稳腔本征方程进行数值求解. 存在腔内倾斜扰动的非稳腔, 如图2, 从凸镜到凹镜光束单次传输满足积分

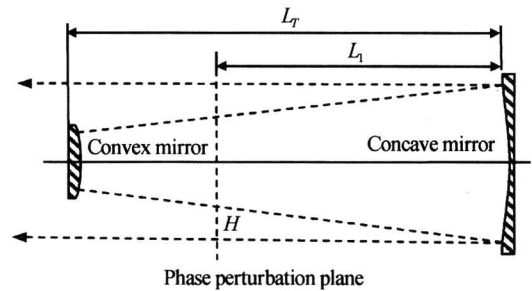


图2 加入腔内相位扰动面后的正支共焦腔

Fig. 2 Positive-branch confocal unstable resonator with an intracavity phase perturbation plane

方程式(9)^[10,11], M_x 和 M_y 是无扰动光腔分别在 x 和 y 子午面内的放大倍率, δ 为腔内倾斜扰动量, 施加于 x 方向. 采用数值迭代法^[12] 求解式(9).

$$\bar{y}u(x_2, y_2) = -\frac{i}{2\lambda L_T} e^{i2\delta L_T} \exp \left\{ -i \frac{\pi}{\lambda} \frac{2\delta M_x \left[1 - \frac{1}{M_x R_x} L_1 \right]}{M_x + 1} x_2 \right\} \iint_S u(x_1, y_1) \exp \left\{ -i \frac{\pi}{\lambda} \frac{2\delta M_x \left[1 - \frac{1}{M_x R_x} L_1 \right]}{M_x + 1} x_1 \right\} \cdot \exp \left\{ i \frac{\pi}{\lambda L_T} \left[\frac{(x_2 - M_x x_1)^2}{M_x + 1} + \frac{(y_2 - M_y y_1)^2}{M_y + 1} \right] \right\} dx_1 dy_1 \quad (9)$$

对于光束质量评价采用的指标有: 腔内本征模强度和相位分布、前 35 阶 Zernike 像差系数、远场光斑分布、Strehl 比(实际 PSF 峰值强度与衍射极限 PSF 峰值强度之比)、衍射极限倍数 β . 按式(9)分析出的光场空间分布反映的是一个综合效果, 但有时关心的是光场相位分布中的各阶像差所占的权重, 以便于分析光场相位分布中究竟哪些像差占最主要因素, 这就需要对波面进行像差拟合分解. 1979 年 Ronald Cubalchini 首次给出了模式法进行波前重构的原理及过程^[13]. Zernike 多项式是广泛应用的进行像差展开的函数, 在全孔径圆域内, Zernike 多项式波前重构算法将一个完整的全孔径畸变波前 $\phi(x, y)$ 展开为不同的模式分量, 表示成一系列正交多项式的线性组合

$$\phi(x, y) = \sum_{k=1}^{\infty} a_k z_k(x, y) \quad (10)$$

式中: k 表示波前 $\phi(x, y)$ 的第 k 阶模式; a_k 是模式系数; $z_k(x, y)$ 是第 k 阶模式的 Zernike 多项式. 前几项有明显的物理意义, 对 z_k 取 $k=3, 5$ 为例,

$$z_3 = \sqrt{3} [2(x^2 + y^2) - 1] \quad (\text{离焦})$$

$$z_5 = \sqrt{6} (x^2 - y^2) \quad (\text{低阶像散})$$

实际计算时, 波前的模式阶数不能取到无穷大, 而为一个有限值 K , 一般来讲取前 35 阶就可以较好地解决波前重构时各模式间的耦合和混淆影响, 重构准确度较高. 波前模式系数矩阵如下式表示

$$A = \Phi Z^+ \quad (11)$$

式中, A 为待求波前的模式系数矩阵, Φ 为计算出的接收面上波前相位, Z^+ 为 Zernike 模式波前重构矩

阵 Z 的伪逆矩阵. A 的前几项代表了特定的像差含义, 如第 1、2、3、4 项分别表示 x 方向倾斜、 y 方向倾斜、离焦、低阶像散. 这样就可以对相位分布中包含的各类像差信息进行细致的分析.

2 计算条件和结果

数值计算中, 有关参量取为: 非稳腔腔长 $L_T = 900$ mm, 凸镜半口径 $a = 3$ mm, 凸镜曲率半径 $R = 1800$ mm, 放大率 $M = 2$, $\lambda = 10.6 \mu\text{m}$, $N_c = \frac{Ma^2}{\lambda L} = 2$, $N_q = \frac{M^2 - 1}{2M} \frac{a^2}{\lambda L} = 0.75$, 在相位扰动面 H 处 (图 2) 引入大小为 0.1λ 的腔内倾斜像差, 计算无扰动时和扰动面 H 分别位于 $L_1 = 0, 300, 900$ mm 处时腔内本征模式 (凸镜处的强度和相位) 分布、波面的 Zernike 拟合像差和远场光斑分布.

3 结果分析及讨论

由图 3, 权重因子由凸镜到凹镜逐渐增大, 即对大小给定的相位扰动, 扰动面越靠近凹镜, 对耦合输出相位或光束质量的影响越显著. 在同一位置引入扰动, 随像差阶数 k 的增大, 权重因子呈减小趋势; 并且在同一位置引入等量扰动时, 随着非稳腔放大倍率 M 的增加, 权重因子逐渐减小. 图 4 计算了腔内无扰动、凸镜作为扰动面的 $L_1 = 900$ mm、腔内的一个位置 $L_1 = 600$ mm、凹镜作为扰动面的 $L_1 = 0$ 时的腔模强度分布 (分别对应图 4(a)、(b)、(c)、

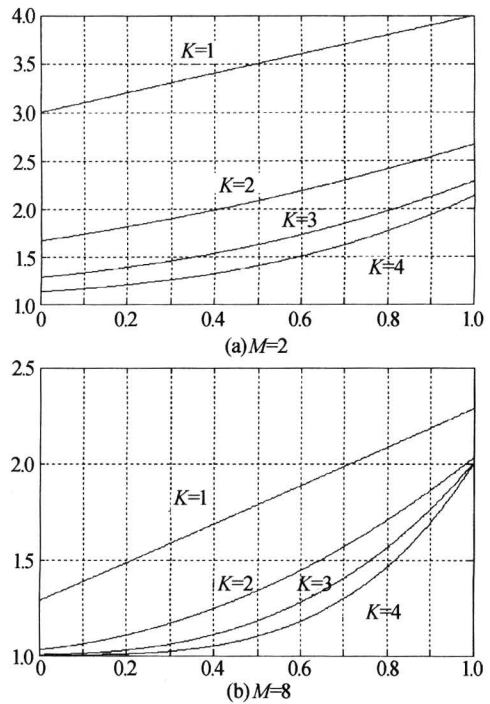


图 3 扰动权重因子与位置的关系
Fig. 3 Perturbation-weighting factor as a function of different intracavity place

(d)). 图 5、图 6、图 7 则分别为图 4 各情形分别对应的腔模相位分布、波前的 Zernike 像差拟合结果和远场分布.

由图 4 可见腔内无扰动时本征模强度为均匀分布. 但引入倾斜扰动后强度分布呈现不均匀性, 强度极大值不断向边缘漂移. 从图 5 可知, 这时的相位分布呈现向一个方向倾斜的趋势, 且越靠近凹镜, 倾斜趋势愈加明显.

由图 6 可知腔内倾斜扰动带来的效果首先是低

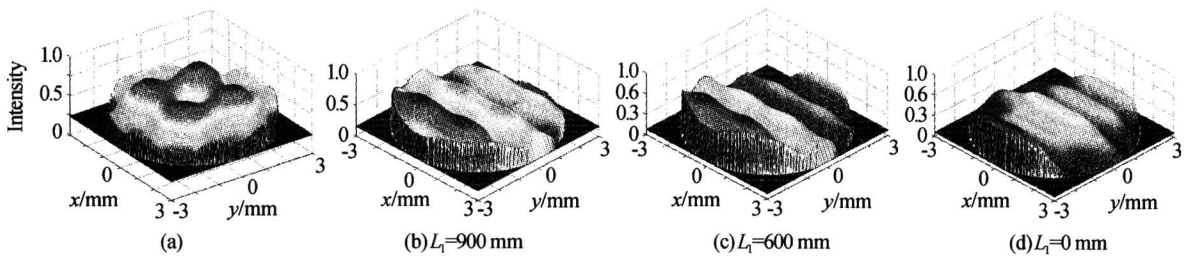


图 4 腔内凸镜处的强度模式分布
Fig. 4 The normalized intensity properties at the place of convex mirror

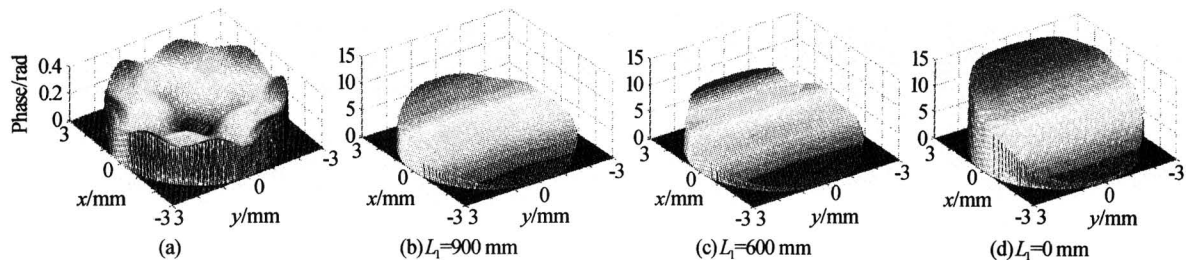


图 5 腔内凸镜处的相位模式分布
Fig. 5 The phase properties at the place of convex mirror

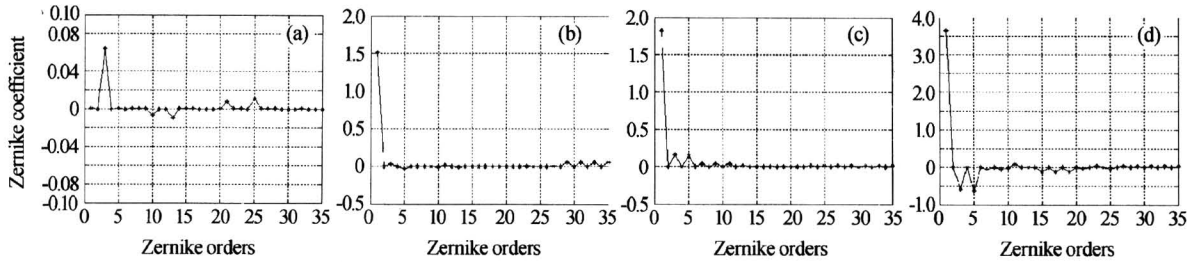


图 6 相位分布的 Zernike 像差拟合结果

Fig. 6 The Zernike coefficient fitting result of phase distribution

阶 Zernike 像差的增大(本例中为 Z_1 系数),且增大趋势远大于各高阶像差;图 6(a)腔内无倾斜扰动时,本征模式倾斜 Zernike 像差系数 Z_1 和 Z_2 接近于零,但随扰动面向凹镜位置的靠近, L_1 为 900 mm 时, Z_1 为 1.51; L_1 为 600 mm 时, Z_1 为 1.82; L_1 为 0 时, Z_1 达到 3.63. 变化十分显著. 其次是扰动面越靠近凹镜,在 Z_1 增大的同时,还引起高阶像差如离焦、像散的增加,图 6(b)中 Z_3 (离焦)为 0.03, Z_5 (低阶像散)为 -0.03,图 6(c)中 Z_3 为 0.16, Z_5 为 0.15,图 6(d)中 Z_3 为 -0.58, Z_5 为 -0.63,绝对值呈明显增大趋势. Zernike 像差中的倾斜像差还将使图 7 中的远场光斑发生位置偏移,高阶像差使远场光束质量变差.

4 结论

腔内倾斜扰动是影响输出光束质量的重要因素之一,当腔内存在较大倾斜扰动时,不仅直接导致输出光束能量密度分布不均,且波面的 Zernike 像差拟合结果表明倾斜像差增大同时还伴随一些高阶像差如离焦、低阶像散的增大,从而严重影响光束质量. 并且对非稳腔而言,在腔内不同位置引入扰动,对本征模式和各阶像差的影响是不同的,给定的相位扰动面越靠近凹面镜,对腔内本征模式的影响越显著. 即相对敏感性从凸面镜到凹面镜是逐渐增加的,腔内扰动的几何分析结果和本征模的数值求解结果都说明了这一点,因此应当使扰动面尽量远离凹面镜. 由于在倾斜像差减小同时波面中的高阶像差如离焦、低阶像散等也会减小,因此可以考虑采用单独光学器件对腔内的倾斜像差进行校正,校正平面要尽可能靠近凹面镜或直接使用凹面镜作为相位补偿面.

参考文献

- 1 庄琦,桑凤亭,周大正. 短波长化学激光. 北京:国防工业出版社,1997. 95~110
Zhuang Q, Sang F T, Zhou D Z. Shortwave chemical laser. Beijing: National Defence Industry Press, 1997. 95~110
- 2 库耕,程祖海,朱松林,等. 腔镜变形对平凹腔激光振荡

模式影响的数值研究. 强激光与粒子束,1997,9(3): 447~449

Ku G, Cheng Z H, Zhu S L, et al. High Power Laser and Particle Beams, 1997,9(3): 447~449

- 3 田来科,姚合宝,杨志勇,等. 热畸变对正分支非稳腔的影响及补偿. 光子学报,2002,31(6):754~757

Tian L K, Yao H B, Yang Z Y, et al. Acta Photonica Sinica, 2002,31(6):754~757

- 4 郑加安,赵圣之,王青圃,等. 晶体热效应对 LD 端面抽运固体激光器优化设计的影响. 光子学报,2001,30(6): 724~729

Zheng J A, Zhao S Z, Wang Q P, et al. Acta Photonica Sinica, 2001,30(6):724~729

- 5 侯学元,孙渝明,李宇飞,等. 双棒串接 Nd^{3+} : YAG 激光器. 光子学报,2001,30(6):757~760

Hou X Y, Sun Y M, Li Y F, et al. Acta Photonica Sinica, 2001,30(6):757~760

- 6 Sanderson R L, Streifer W. Laser resonators with tilted reflectors. Applied Optics, 1969,8(11):2241~2248

- 7 Anafi D, Spinhirne J M, Freeman R H, et al. Intracavity adaptive optics. 2: Tilt correction performance. Applied Optics, 1981,20(11): 1926~1932

- 8 Anan'ev Y A. Unstable resonators and their applications. Sov J Quantum Electronics, 1972,1(5): 565~586

- 9 Oughstun K E. Intracavity adaptive optic compensation of phase aberrations. II: Passive cavity study for a small resonator. JOSA, 1981,71(10): 1180~1192

- 10 Gerrand A, Burch J M. Introduction to matrix methods in optics. New York: Wiley Press, 1975. 89~128

- 11 Siegman A E. A canonical formulation for analyzing multi-element unstable resonators. IEEE J Quantum Electron, 1976,12(1): 35~39

- 12 Fox A G, Li T. Resonant modes in a master interferometer. Bell Syst Tech J, 1961,40(3): 453~488

- 13 Cubalchini R. Modal wave-front estimation from phase derivative measurements. J Opt Soc Am, 1979,69(7): 972~977

Influence in Eigenmode by Introducing Intracavity Tilt Perturbation

Zhang Xiang^{1,2}, Xu Bing¹, Liu Jian^{1,2}

1 Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Science, Chengdu 610209

2 Graduate School of Chinese Academy of Science, Beijing 100080

Received date: 2005-01-02

Abstract Intracavity perturbation will bring degrade of beam quality in high power laser. The result of influence in eigenmode by introducing intracavity tilt perturbation in different place of positive-branch confocal resonator was analyzed. At the same time, idea eigenmode, the mode of intracavity tilt perturbation in different place, Zernike aberration coefficient and the far field of beam were all analyzed by using numerical prony method. The results show that the sensibility is increased from convex mirror to concave mirror for a given aberration perturbation in different intracavity place. High order aberration such as defocus and astigmatism will also rise when tilt aberration increases in intracavity mode. So intracavity phase-corrected element used in unstable resonator should be near to concave mirror.

Keywords Resonator cavity; Intracavity perturbation; Prony method; Eigenmode; Zernike aberration coefficient



Zhang Xiang was born in Sept. , 1976. He received his B. S. degree in 2000 in optics technology and photoelectric engineering from Xi'an Institute of Technology and his Master's Degree in 2003 from the Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Science. In the same year, he began studying towards Ph. D. degree at the Institute of Optics and Electronics, CAS. His researches focus on adptive optics, laser and wave-front sensing.