

非平面环形腔的光轴失谐分析

冯滔 张雪洁 张燕 刘芳 任志远 朱健强

(中国科学院上海光学精密机械研究所高功率激光物理联合实验室, 上海 201800)

摘要 为了分析光轴在单块晶体加工过程中镜面失谐的自洽特征,建立了非平面环形腔镜面倾斜的数学模型,利用增广的光线矩阵讨论了光轴变动。结论显示:当存在距离误差时,不会影响光轴闭合;当输入输出耦合面设计成曲面时,能实现光轴自洽闭合;当它为平面时,静态分析表明,如果两个对称全反面的失谐角度满足特定关系,能再次实现光轴的闭合。如果失谐角度不满足对应关系,对称失谐和减小失谐量能减小耦合点偏离距离。动态分析过程则给出了一个更加合理的分析加工公差方法,同时为实验的调光过程提供了理论指导。

关键词 激光光学;非平面环形腔;光线矩阵;光轴失谐;自洽特征

中图分类号 O435 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/CJL201340.0402006

Analysis of Optical-Axis Perturbation in Non-Planar Ring Oscillator

Feng Tao Zhang Xuejie Zhang Yan Liu Fang Ren Zhiyuan Zhu Jianqiang

(Joint Laboratory on High Power Laser and Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

Abstract In order to analyze the self-consistence characteristics of optical-axis perturbation due to the manufacturing error of monolithic crystal, mathematical model for the mirror tilt of the non-planar ring cavity has been developed and optical-axis perturbation is discussed by utilizing the augmented ray matrix formulation. The results show that: self-consistence of the optical-axis is not sensitive to distance deviation and it can be realized by designing the input-output coupling mirror to be a curved surface. Static analysis indicates that the optical-axis is still self-consistent for the plane input-output coupling mirror when the angles of two symmetric totally reflective planes satisfy the certain relationship. Besides, if the certain condition of the angles cannot be satisfied, steps to reduce the deviation of coupling point position are considered from aspects of making manufacturing error symmetrical and decreasing error. At last, dynamic analysis provides a much more reasonable method to explore the manufacturing tolerance, offering a theoretical guide for the experiment.

Key words laser optics; non-planar ring oscillator; ray matrix; optical-axis perturbation; self-consistence characteristics

OCIS codes 120.5700; 140.3560; 140.3580; 200.1130

1 引言

利用单块非平面环形腔设计而成的激光器既具有单向环形腔优良的单模特性,也具有单块腔极好的稳定性^[1~3]。这种方法经由 Kane 等^[4]首次提出之后,取得了极大的发展。北京理工大学采用激光二极管(LD)抽运的单块非平面环形腔 Nd:YAG 激

光器,获得了 1.876 W 的 1064 nm 单频激光输出,对应的光光转换效率为 53.4%^[5]。在理论分析上,已有文献利用琼斯矩阵的方法分析了腔的各个结构参数的选择^[6]、强度噪声的抑制^[7]以及偏振膜系的选择^[8]。

环形激光谐振腔不论是平面腔还是非平面腔,

收稿日期: 2012-10-23; **收到修改稿日期:** 2013-01-02

作者简介: 冯滔(1987—),男,博士研究生,主要从事全固态激光技术和单纵模激光等方面的研究。

E-mail: fengtao1987@siom.ac.cn

导师简介: 朱健强(1964—),男,研究员,博士生导师,主要从事激光驱动器的总体光学设计、结构设计、相关检测技术和测控技术等方面的研究。E-mail: jqzhu@mail.shcnc.ac.cn

所有谐振腔都需要通过各个反射镜保证起振激光在环形谐振腔内自洽运行,维持腔内稳定的光场,产生的激光应当能够形成一个闭合回路,理想情况是闭环光路与设计光路一致,但实际情况却并非如此。总有一些误差原因使实际闭环光路背离了理想光路,对于单块非平面环形腔来说,误差原因主要是谐振腔腔体的机械加工误差,即加工的各个反射面与设计值产生了偏离。这种偏离导致谐振腔内部闭环光路发生变动,又称为腔变动,从而使实际光路背离理想光路,甚至不能实现闭合。Zang 等^[9]将腔结构失谐等效成入射角度和入射位置发生变化,分析了在不同腔结构参数、失谐相同的情况下的容差范围,为腔结构的参数选择提供了一个很好的思路。腔结构参数确定之后的加工过程会面临不同的失谐情况,这些失谐决定激光能否正常起振或者更好地起振,所以需要分析加工误差的允许范围。为此,本文利用激光物理原理和矩阵光学方法,建立非平面环

形腔光路变动的数学模型,分别分析了距离、角度加工误差对光轴自洽特征的影响,同时从静态、动态以及对称性、变化性等方面分析如何降低光轴闭合的难度,甚至实现完全闭合。

2 分析方法

如图 1(a)所示,这是常用的非平面环形谐振腔(NPRO)结构,包含入射角 α 、非平面角 β 、距离 \overline{AE} 、 \overline{CE} 。为了分析方便,将 A 、 B 、 C 、 D 4 个反射点所在的 4 个面等效成 P_1 、 P_2 、 P_3 、 P_4 4 面反射镜[图 1(b)]。该结构实现单向传输的原因有三点:1) 施加磁场后,激光晶体兼作为法拉第旋光器;2) 3 个全内反射面(P_2 、 P_3 、 P_4)既是环形激光谐振腔反射镜,也是相位补偿波片;3) 前表面镀特殊偏振膜后,既是输入输出耦合面,同时兼做部分偏振器。所以这就决定了 P_2 、 P_3 、 P_4 为三个平面反射镜,而 P_1 可以是平面也可以是曲面反射镜。

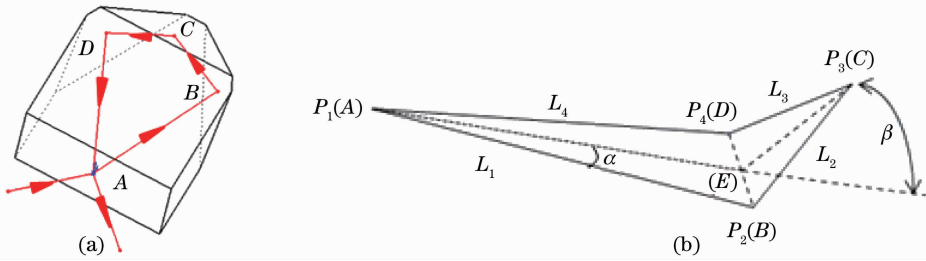


图 1 (a) NPRO 典型结构;(b)等效四镜环形腔光路图

Fig. 1 (a) Monolithic non-planar ring cavity; (b) four-equal-sided non-planar ring cavity

由于加工过程造成的反射镜失谐等原因,让光路传播产生了变动,失谐一方面意味着加工存在误差,另一方面也可以等效成腔结构参数的变化,不管如何理解这种失谐,都会导致两个结果:实际光路闭合或者不能实现闭合。

采用增广矩阵的方法来计算谐振腔中光路的变动,为了分析腔内光轴的失谐,必须找到一个包含失谐变量的矩阵。Siegman 等^[10,11]都介绍了包含光学元件失谐的增广矩阵表达形式。对本文讨论的谐振腔进行分析,为了同时处理 x 和 y 两个方向上的失谐,在此应用一个 6×6 的光路变换矩阵^[10~13]

x 和 y 轴的距离,统称这些量为光轴的平移; r'_{ix} 、 r'_{iy} 和 r'_{ox} 、 r'_{oy} 分别表示入射光和出射光与 x 和 y 平面组成的夹角,这些量称之为光轴的倾斜; A_x 、 B_x 、 C_x 、 D_x 表示光矩阵在子午面上的元素, A_y 、 B_y 、 C_y 、 D_y 表示光矩阵在弧矢面上的元素, ϵ_x 、 ϵ_y 表示由光学器件引起的失谐量。对于同一片反射镜,存在 $\epsilon_x = 2 \tan \theta_x$ 、 $\epsilon_y = 2 \tan \theta_y$, θ_x 、 θ_y 分别表示该片镜子在子午面和弧矢面方向的失谐角。在此,通常认为反射镜的失谐是引起光路变动的主要原因。对于任意一个反射镜 P_i , 由于其失谐而造成光路变动的矩阵可以表示为

$$\mathbf{M}(R_i, \Phi_i) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{2}{R_i \cos \Phi_i} & 1 & 2\theta_{ix} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{2 \cos \Phi_i}{R_i} & 1 & 2\theta_{iy} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} r_{ox} \\ r'_{ox} \\ 1 \\ r_{oy} \\ r'_{oy} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_x & B_x & 0 & 0 & 0 & 0 \\ C_x & D_x & \epsilon_x & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & A_y & B_y & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_y & D_y & \epsilon_y \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_{ix} \\ r'_{ix} \\ 1 \\ r_{iy} \\ r'_{iy} \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中 r_{ix} 、 r_{iy} 和 r_{ox} 、 r_{oy} 分别为入射光和出射光光轴距

式中 R_i 表示反射镜 P_i 的曲率半径, Φ_i 表示入射光在第 i 面反射镜上的入射角, 而 θ_{xi} 和 θ_{yi} 表示 P_i 在子午面和弧矢面上的失谐角度。

可以认为, 晶体介质内部是均匀的, 则光线在腔内传播距离 L_i 后的光矩阵表示为^[11-13]

$$\mathbf{M}(L_i) = \begin{bmatrix} 1 & L_i & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & L_i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (3)$$

因为整个环路是非平面, 所以逐个镜面的反射使得原坐标系的主轴随着共有向量发生了旋转, 如图 2 所示, 为此, 必须引入一个旋转矩阵。具体形式为^[10]

$$\mathbf{M}(\theta_i) = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & 0 & 0 & -\sin \theta_i & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta_i & 0 & 0 & -\sin \theta_i & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ \sin \theta_i & 0 & 0 & \cos \theta_i & 0 & 0 \\ 0 & \sin \theta_i & 0 & 0 & \cos \theta_i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

式中 θ_i 表示随着光路的传输, 在 P_i 处产生的坐标轴旋转角度。

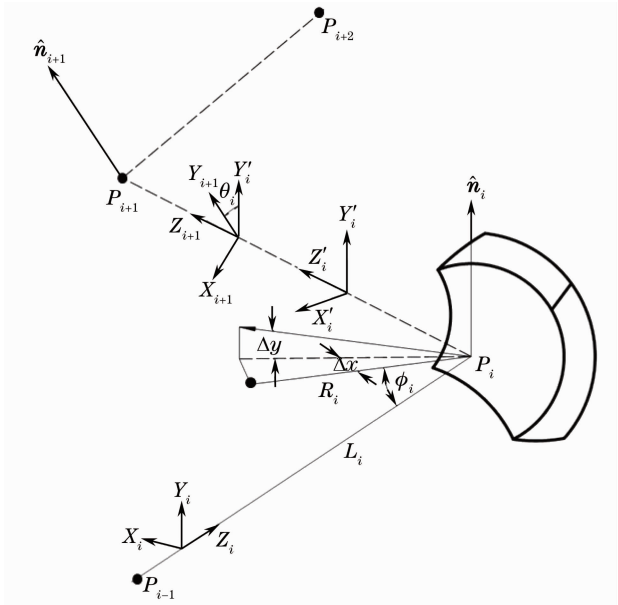


图 2 谐振腔中由于镜面反射带来的坐标系变化

Fig. 2 Frame changes caused by mirror reflection in cavity

在环形谐振腔中, 各个器件可以按照光线传输方向展开, 等效成一个光学器件周期序列^[14,15], 即光线传输一周后, 最终的光矩阵为各个光学器件的

光矩阵按一定顺序的乘积

$$\mathbf{M} = \prod \mathbf{M}_i. \quad (5)$$

通过图 2 可以看出, 每一个光器件由 3 个光路变换矩阵构成, 包含 4 个参数: 晶体内部自由空间传播距离 L_i , 反射镜的曲率半径 R_i , 入射角 Φ_i 和坐标轴旋转角 θ_i 。那么 \mathbf{M}_i 可表示为

$$\mathbf{M}_i = \mathbf{M}(\theta_i) \cdot \mathbf{M}(R_i, \Phi_i) \cdot \mathbf{M}(L_i). \quad (6)$$

理论上环形谐振腔的光轴为一个自洽的回路, 光轴位置的变换矩阵特征向量对应的特征值为 1。如果光路传输一周后的起、止点位置参数一致, 则应当有下面的不变式

$$\begin{pmatrix} r_x \\ r'_x \\ 1 \\ r_y \\ r'_y \\ 1 \end{pmatrix} = \mathbf{M} \begin{pmatrix} r_x \\ r'_x \\ 1 \\ r_y \\ r'_y \\ 1 \end{pmatrix}, \quad (7)$$

推导(7)式可以得出^[14,16]

$$\begin{pmatrix} M_{11} - 1 & M_{12} & M_{14} & M_{15} \\ M_{21} & M_{22} - 1 & M_{24} & M_{25} \\ M_{41} & M_{42} & M_{44} - 1 & M_{45} \\ M_{55} & M_{52} & M_{54} & M_{55} - 1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} r_x \\ r'_x \\ r_y \\ r'_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} M_{13} + M_{16} \\ M_{23} + M_{26} \\ M_{43} + M_{46} \\ M_{53} + M_{56} \end{pmatrix}. \quad (8)$$

当满足自洽条件时, 由失谐导致的光轴位置 (r_x, r'_x) 和 (r_y, r'_y) 都可以由(8)式求解。而当光轴不满足自洽条件时, 即光路在腔内传输一周后, 不能形成一个闭合的环路, 如果已知起始点光轴位置 (r_{ix}, r'_{ix}) 和 (r_{iy}, r'_{iy}) , 则可通过(1)式得到返回点位置 (r_{ox}, r'_{ox}) 和 (r_{oy}, r'_{oy}) 。

定义理想起始点的坐标为 $(0, 0)$, 若光路不闭合, 可以只关注返回点与起始点偏离的程度, 而对于闭合光路, 则考虑观察点偏离理想位置的程度, 所以定义一个偏离参数

$$L_{Di} = \sqrt{r_{ox}^2 + r_{oy}^2}, \quad (9)$$

以 i 点为研究参考点, 经过一个环路后, 如果光路闭合, 则表示实际位置与理想位置的偏离; 若光路不闭合, 则表示返回点与起始点的偏离距离。

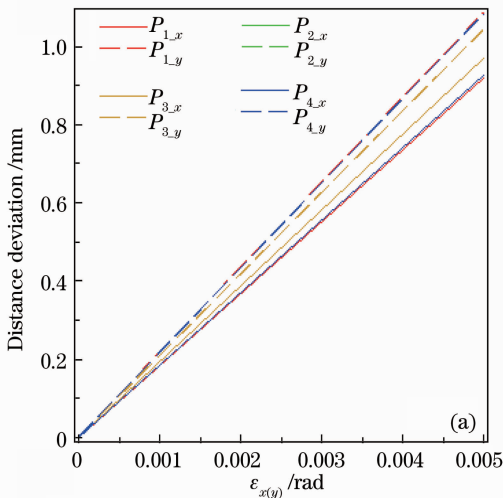
为了研究当光路闭合时镜片失谐对环路的影响, 在此引入一个无量纲的灵敏度函数

3.2 角度误差

3.2.1 P_1 面为曲面

当 P_1 存在一定的曲率半径 R 时,利用(8)式进行计算,可知光轴在这种情况下满足自洽条件。以 A 点作为观察点,需要分析的谐振腔中存在 4 个可能的失谐面: P_1 、 P_2 、 P_3 、 P_4 。

图 5(a) 表示当曲率半径 $R = 200$ mm,且 4 个面 x 、 y 方向存在失谐时,观察点 A 的位置与设计位置之间的偏离距离(彩图请见网络电子版)。可以看出,不管是哪个面存在失谐,因为失谐而导致的偏离距离 y 方向都大于 x 方向(虚线表示的是各个面 y 方向失谐导致的距离偏离,实线则是各个面 x 方向失谐导致的距离偏离)。观察图中的虚线,也就是每个面 y 方向失谐导致的位置偏离曲线,可以看出, P_1 、 P_2 、 P_4 面的失谐对 A 点偏离距离的影响要略大于 P_3 面



失谐的影响,不过区别有限,基本可以认为 4 个面失谐的影响相同。图 5(b) 表示当曲率半径 R 为变量,且 4 个面 x 、 y 方向失谐时, A 点位置偏离灵敏度与 P_1 面曲率半径的关系。可以看出,不管是哪个平面失谐,随着曲率半径的增大,灵敏度都呈线性增大。除此之外,各个面 y 方向失谐对灵敏度的影响都要大于 x 方向的失谐,这个特点与图 5(a) 的分析具有一致的结论。随着 P_1 面曲率半径的增大, A 点位置偏离灵敏度线性增大,导致的直接后果就是如果加大曲率半径,则在失谐参数相同的情况下,偏离距离会相应增大。当 $R = 200$ mm, P_1 面 y 方向存在 0.001 rad 的失谐角度时,偏离距离约为 0.217 mm,其他条件不变,而 R 增大到 1000 mm 时,经过计算,偏离距离增大到约 1.085 mm。因此在选择 P_1 面曲率半径时,不能太大,否则会加剧位置偏离的变化。

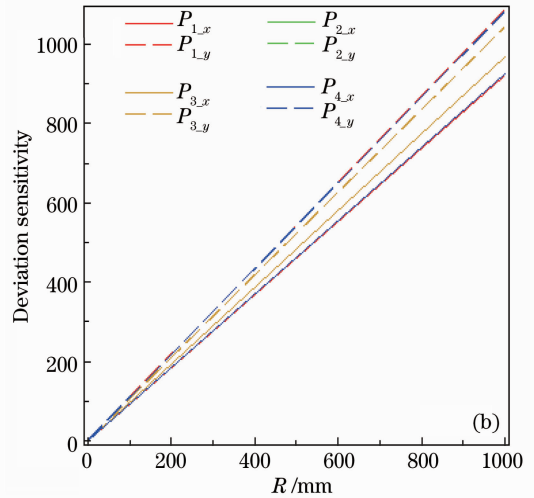


图 5 (a) A 点偏离距离与失谐角度的变化曲线; (b) A 点偏离灵敏度与 P_1 面曲率半径的变化曲线

Fig. 5 (a) Distance deviation of point A versus perturbation; (b) deviation sensitivity of point A versus R of P_1

3.2.2 P_1 面为平面

在 P_1 面为平面,且 4 个初始结构参数保持不变的情况下,通过对(8)式的求解可以知道无解,即不满足自洽条件,不能实现光轴的闭合。在这种情况下,需要分析通过改变什么条件,能实现光路的闭合;当确定不能实现闭合时,又有哪些因素可以降低闭合难度。考虑到在实际的加工过程中,采用如图 6 所示的自准直方法将 P_1 、 P_3 和底面进行相对定位,基本能够保证这 3 个面的相对精度,所以在后面的分析中,认为光路变动主要来源于平面镜 P_2 和 P_4 与底面和 P_3 面两个方向的加工误差。由于晶体在激光起振的过程中会产生面型变化,所以下面从静态和动态两个方面分析 P_1 面为平面的情况,这样也有利于给出一个合适的晶体加工容差。

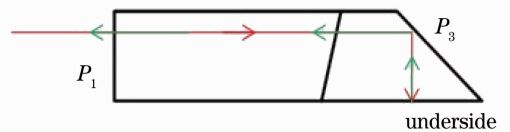


图 6 P_1 、 P_3 面和底面的自准直定位

Fig. 6 Autocollimation positioning among P_1 , P_3 and underside

只考虑晶体加工,不考虑实际激光抽运起振过程所作的分析,称之为静态分析。改变结构参数,同时维持光路的对称性不变,基于上图的加工定位方法,知道 4 个结构参数中的非平面角 β 为定值,通过改变 \overline{AE} 、 \overline{CE} 、 α 3 个参数分析角度变化情况。

在 P_2 面、 P_4 面对称失谐且失谐角度满足特定关系的情况下,能再次实现光路的闭合。由图 7 的 3

幅图可以看出,不管哪个参数发生变化, P_2 面与底面的夹角随着与 P_3 面夹角的变化而变化,并且变化趋势相反,假如检测发现 P_2 面与底面的夹角大于设计值,则可以修正 P_2 面与 P_3 面的夹角,使之小于设计值,且变化值大小基本相同,作用等效于改变了腔

的结构参数。同时可以从图中看出, \overline{CE} 参数变化的灵敏度最高, α 参数变化的灵敏度最低,这样可以根据检测结果合理调整结构参数,如果角度加工误差较大,则可以视作改变参数 \overline{CE} ,如果误差较小,视作改变参数 α 。

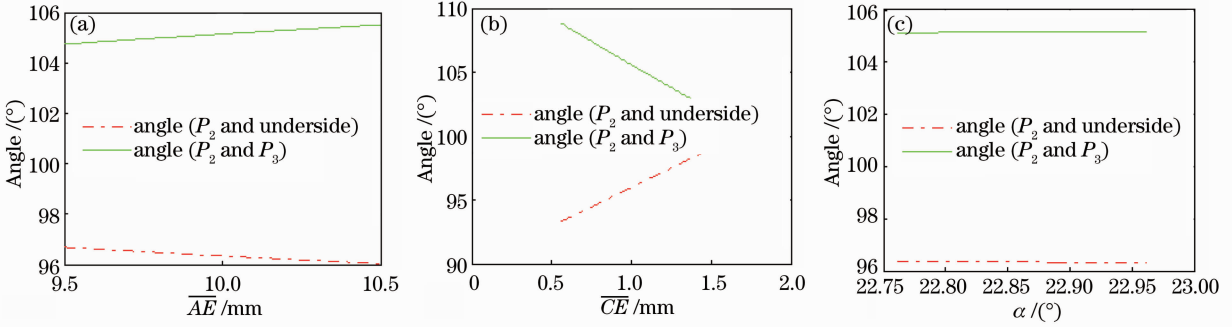


图 7 (a) \overline{AE} 变化引起的角度变化曲线; (b) \overline{CE} 变化引起的角度变化曲线; (c) α 变化引起的角度变化曲线

Fig. 7 (a) Angle versus \overline{AE} ; (b) angle versus \overline{CE} ; (c) angle versus α

上面的模型能实现光路的闭合,但是要求较高,除了要求 P_2 、 P_4 面对称,还需要角度满足特定关系,可是在实际加工过程中,很难保证角度之间的关系,也就是说光路不能闭合。接下来从对称性和变化性两个方面来进一步找到降低闭合难度的因素。

应的角度失谐为变量时(图中分别表示为 $\Delta\theta_u$ 、 $\Delta\theta_{P_3}$),激光在腔内循环多次后A点偏离距离的变化曲线。从曲线可以看出,当 P_4 面角度失谐跟 P_2 面角度失谐相同时,A点的偏离距离最小,也就是说, P_2 和 P_4 面对称失谐有利于降低光路闭合难度。

所谓对称性是指 P_2 和 P_4 面对称失谐能否有利于降低光路闭合难度。图8(a)、(b)分别表示的是 P_2 面与底面和 P_3 面失谐不变(0.00002 rad), P_4 面相

变化性则是指在满足 P_2 、 P_4 面失谐对称的情况下,失谐角度变化对A点偏离距离的影响。图9(a)表示 P_2 、 P_4 面与底面对称失谐,随着失谐角度的变化

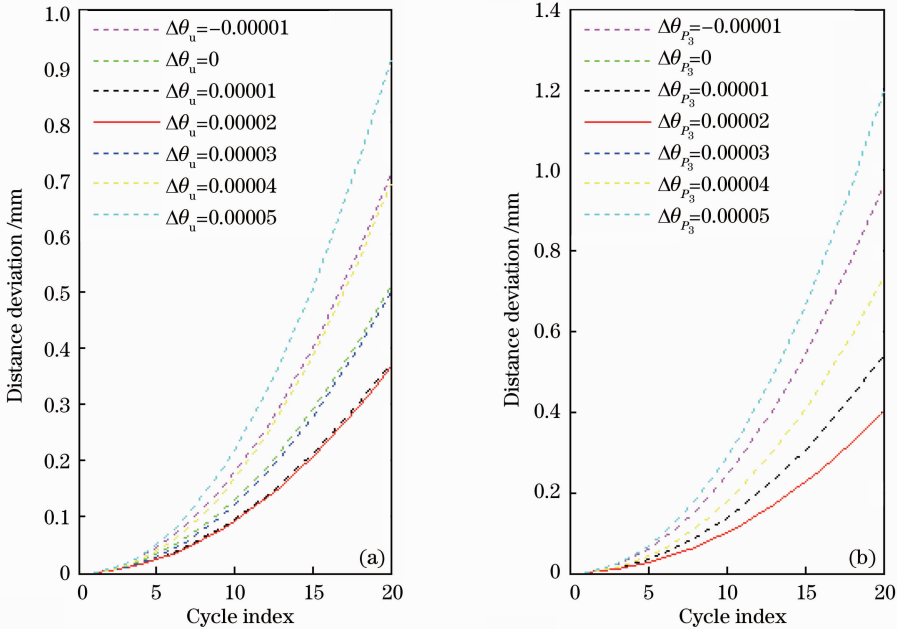


图 8 A点偏离距离随循环次数的变化曲线。(a) P_2 面与底面失谐不变, P_4 面失谐变化($\Delta\theta_u$); (b) P_2 面与 P_3 面失谐不变, P_4 面失谐变化($\Delta\theta_{P_3}$)

Fig. 8 Distance deviation of point A versus cycle index when (a) perturbation between P_2 and underside is fixed, while perturbation of P_3 varies ($\Delta\theta_u$); (b) perturbation between P_2 and P_3 is fixed, while perturbation of P_3 varies ($\Delta\theta_{P_3}$)

(图中表示为 $\Delta\varphi_u$)，激光在腔内循环多次后 A 点偏离距离的变化曲线。可以看出，随着失谐角度的增大，偏离距离也逐渐增大，也就是说，为了控制偏离距离，要尽可能减小失谐角度。图 9(b) 显示的是 P_2 、 P_4 面与 P_3 面对称失谐的情况，随着失谐角度的变化(图

中表示为 $\Delta\varphi_{P_3}$)，激光在腔内循环多次后 A 点偏离距离的变化曲线。趋势与图 9(a) 中图相同。而且通过比较可知，在失谐角度相同的情况下，与底面失谐和与 P_3 面失谐对偏离距离的影响基本一致。

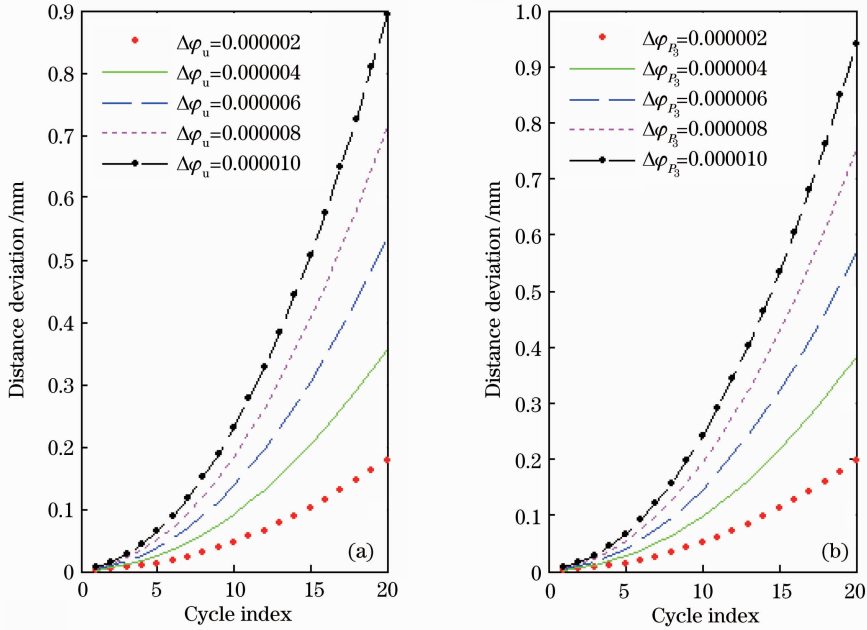


图 9 A 点偏离距离随循环次数变化曲线。(a) P_2 (P_4) 面与底面失谐变化 ($\Delta\varphi_u$)；(b) P_2 (P_4) 面与 P_3 面失谐变化 ($\Delta\varphi_{P_3}$)

Fig. 9 Distance deviation of point A versus cycle index. (a) Perturbation between P_2 (P_4) and underside varies ($\Delta\varphi_u$); (b) perturbation between P_2 (P_4) and P_3 varies ($\Delta\varphi_{P_3}$)

文献[7]中得出当取合适的结构参数时，腔结构具有很大的校准容差，而上面的分析却认为在一般情况下， P_1 面为平面就基本不能实现光轴的自闭合，原因在于，文献[7]的目的是为了选择合适的结构参数，所以在分析过程中各个结构参数都为变量，然后通过光线追迹的方式确定在相同变化量(入射点位置或者入射角度)情况下，哪一组参数有利于实现光路闭合，即在一定的区域内，有尽可能多的腔内光线进行传输。利用光线追迹可以观察到，即便是在最好的结构参数下，只要存在角度误差，就很难找到一个闭合的光轴。而本文的目的是分析在确定的结构参数情况下，为实现光轴闭合，找到影响较大的失谐因素，进行控制，而且这里的自闭合指的是光轴的绝对封闭。所以两者的目的不同，分析的方法也不一样，结论不能直接进行比较。

考虑实际激光抽运起振过程中对 P_1 面的影响所做的分析，叫做动态分析。在实际的抽运过程中，由于热效应的影响，会导致 P_1 面产生面型变化。前面的分析表明， P_1 面为曲面时，光轴能实现自闭合，

但是闭合点的位置跟曲率半径有关。当功率大小一定的抽运光注入晶体的位置确定以后， P_1 面产生形变后的曲率半径、由抽运光斑决定的 A 点偏离距离(若抽运光斑束腰半径为 ω_p ，则允许的偏离距离为 $2\omega_p$) 等参数就基本可以确定。假定热效应引起的曲率半径由无穷变成 $R = 200$ mm，则 A 点偏离距离与失谐角度的关系如图 10(a) 所示，若取 $\omega_p = 0.2$ mm，则可以判断出允许的失谐角度为 0.0012 rad(约为 $4'$)。图 10(b) 表明，A 点偏离理想点的距离随着曲率半径的减小而减小，在抽运光由小变大的过程中， P_1 面由最初的平面变为起振过程中的曲面，且曲率半径逐渐减小，也就是说，A 点逐渐向设计原点靠近。这个动态过程同时显示了一个动态的抽运光调整过程：抽运光注入晶体最初的位置应该偏离中心点，以便能在该处形成闭合回路，随着抽运功率的增加，抽运光的位置也需要逐渐向中心点调整，来实现光路闭合点与增益区域的持续重叠。当抽运功率稳定之后，抽运位置也应该稳定下来，这样才能实现输出功率的最大化。

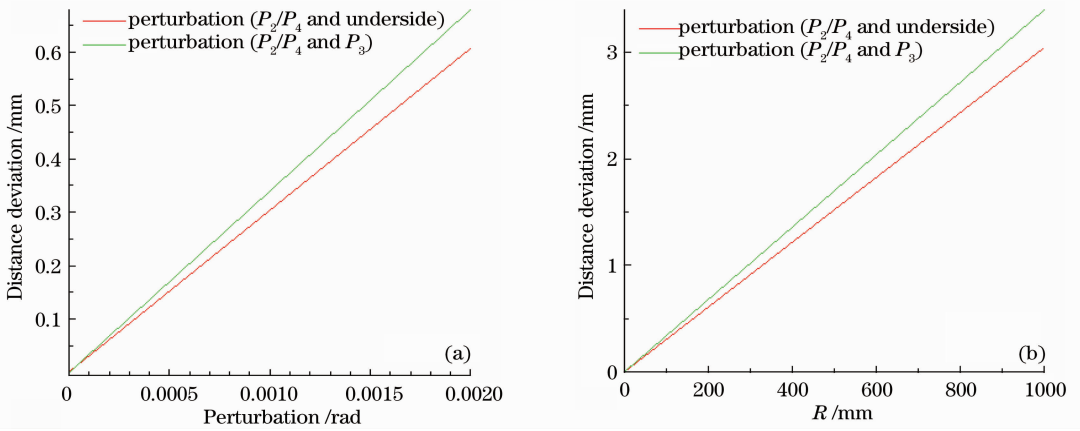


图 10 (a) A 点偏离距离随 $P_2(P_4)$ 面角度失谐变化曲线; (b) A 点偏离距离随 P_1 面曲率半径变化曲线

Fig. 10 (a) Distance deviation of point A versus perturbation of $P_2(P_4)$; (b) distance deviation of point A versus R of P_1

4 结 论

非平面环形腔结构由于加工过程中的误差,会导致镜面失谐而影响腔的自洽特征,甚至不能实现光轴的闭合。分析表明,光轴闭合对距离误差并不敏感,并且如果输入输出耦合面设计成带有一定曲率半径的曲面,也可以实现任何情况下的自洽,从而大大降低加工要求;如果输入输出耦合面为平面,情况则比较复杂。

由于实际的腔结构镜面具有尺寸要求,虽然 P_1 面设计成曲面总能实现自洽,但是尺寸要求限制了实际自洽特征偏离理想值的范围,通过分析可知,降低各个面 y 方向失谐以及合适的 P_1 面曲率半径能降低实际值与理想值的偏离范围。

当 P_1 面设计成平面时,可以简化成只有 P_2, P_4 两个面的失谐。从静态分析考虑,如果 P_2 面、 P_4 面对称失谐且失谐角度满足一定关系,也就是将失谐等效成结构参数的改变,能再次实现光路的闭合。当失谐角度不满足对应关系,则不能实现光路的闭合,不过从对称性和变化性两个方面考虑,通过使 P_2 和 P_4 面对称失谐,同时失谐角度尽可能小,可以减小 A 点相对于理想值的偏离距离。考虑实际使用过程的动态分析表明,动态过程中光轴会实现自闭合,加工容差可由起振光与抽运光的交叠范围给出,同时也为实验的调光过程提供了一个理论指导。

参 考 文 献

- 1 臧二军, 曹建平, 李成阳. 半非平面单块固体环形激光器研究 [J]. 现代测量与实验室管理, 2004, (1): 19~22
- 2 Zhu Ren, Zhou Jun, Liu Jiqiao *et al.*. Solid state tunable single-frequency laser based on non-planar ring oscillator [J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(11): 1102011
- 朱 韧, 周 军, 刘继桥等. 可调谐单频非平面环形腔固体激光器 [J]. 中国激光, 2011, **38**(11): 1102011

- 3 Lu Yuanfu, Zong Nan, Bo Yong *et al.*. LD pumped monolithic non-planar ring resonator tunable single frequency lasers [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(s1): s100311
- 鲁远甫, 宗楠, 薄勇等. 激光二极管抽运的单块非平面环形腔可调谐单频激光器 [J]. 光学学报, 2011, **31**(s1): s100311
- 4 T. J. Kane, R. L. Byer, B. K. Zhou. Monolithic, unidirectional single-mode Nd:YAG ring laser [J]. *Opt. Lett.*, 1985, **10**(2): 65~67
- 5 Gao Chunqing, Gao Mingwei, Lin Zhifeng *et al.*. LD pumped monolithic non-planar ring resonator single frequency lasers [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(7): 1704~1709
- 高春清, 高明伟, 林志锋等. LD 抽运单块非平面环形腔单频激光器 [J]. 中国激光, 2009, **36**(7): 1704~1709
- 6 Alan C. Nilsson, Eric K. Gustafson, Robert L. Byer. Eigenpolarization theory of monolithic nonplanar ring oscillators [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1989, **25**(4): 767~790
- 7 Liang Xu, Wang Yunxiang, Qiu Qi *et al.*. Intensity noise properties and suppression of nonplanar ring oscillator [J]. *Chinese J. Lasers*, 2012, **39**(12): 1202006
- 梁旭, 王云祥, 邱琪等. 非平面环形腔激光器的强度噪声及其抑制 [J]. 中国激光, 2012, **39**(12): 1202006
- 8 Sun Wenfeng, Yang Suhui, Li Lei *et al.*. Study on optimum output coupling of unidirectional non-planar ring laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(s): 471~473
- 孙文峰, 杨苏辉, 李磊等. 单向非平面环形腔单频激光器输出耦合面偏振膜的研究 [J]. 中国激光, 2004, **31**(s): 471~473
- 9 Er Jun Zang, Jianping Cao, Mingchen Zhong *et al.*. Relaxed alignment tolerance of monolithic ring lasers [J]. *Appl. Opt.*, 2002, **41**(33): 7012~7017
- 10 Anthony E. Siegman. *Lasers* [M]. Mill Valley: University Science Books, 1986. Chapter 15
- 11 A. Gerrard, J. M. Burch. *Introduction to Matrix Methods in Optics* [M]. Surrey: Gersham Press, 1975. 97~178
- 12 Alan H. Paxton, William P. Latham, Jr.. Unstable resonators with 90° beam rotation [J]. *Appl. Opt.*, 1986, **25**(17): 2939~2946
- 13 Alan H. Paxton, William H. Latham, Jr.. Ray matrix method for the analysis of optical resonators with image rotation [C]. *SPIE*, 1985, **554**: 159~163
- 14 J. Yuan, X. W. Long, L. M. Liang *et al.*. Nonplanar ring resonator modes; generalized Gaussian beams [J]. *Appl. Opt.*, 2007, **46**(15): 2980~2989
- 15 Wang Qingpu, Zhang Xingyu, Liu Zejin *et al.*. *Principles of Laser* [M]. Ji'nan: Shandong University Press, 2003. 100~141
- 王青圃, 张行愚, 刘泽金等. 激光原理 [M]. 济南: 山东大学出版社, 2003. 100~141
- 16 Jie Yuan, Xingwu Long. Optical-axis perturbation in nonplanar ring resonators [J]. *Opt. Commun.*, 2008, **281**(5): 1204~1210