

柱面镜旋转对整形光束远场焦斑的影响

李卿*, 刘现魁, 任晓明, 郭俊杰, 郭建增

中国船舶重工集团公司第七一八研究所, 河北 邯郸 056027

摘要 基于惠更斯-菲涅耳衍射理论进行数值计算,发现柱面望远镜整形系统的柱面镜旋转失调不仅会导致平行光束远场焦斑旋转倾斜,还会导致其在倾斜方向上出现拉长、离焦现象,该像差来源于柱面镜旋转导致的像散与离焦的叠加,上述结果说明远场焦斑的离焦也可以出现在旋转失调的柱面镜整形系统中。此外,定量给出包含激光中心波长、整形光束尺寸、柱面镜间距、放大率的归一化相位系数与远场焦斑形态的相关关系,该系数可以用于评判柱面整形系统对柱面镜旋转失调的敏感度。最后搭建了相应的实验装置进行验证,实验结果与计算结果较好地吻合。

关键词 光束整形; 柱面镜; 母线旋转; 远场焦斑

中图分类号 O436

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202047.1105001

Effect of Cylindrical Mirror Rotation on the Far-Field Spot of a Shaping Beam

Li Qing*, Liu Xiankui, Ren Xiaoming, Guo Junjie, Guo Jianzeng

The 718th Research Institute of China Shipbuilding Industry Corporation, Handan, Hebei 056027, China

Abstract In numerical and experimental analyses, we studied the effect of misaligning the cylindrical mirror rotation in shaping system on the far-field spot and beam quality of the laser during beam shaping based on Huygens-Fresnel diffraction theory. Increasing the rotation angle not only rotated and tilted the far-field spot of the shaping beam, but also elongated and defocused the spot. This aberration derives from the superposition of astigmatism and defocusing caused by rotating the cylindrical mirror. The results show that misaligned rotation also defocuses the shaping system with cylindrical mirror. We then quantitatively analyzed the correlation among the normalized phase coefficient and focal spot, in which the normalized phase coefficient is related with the center wavelength of the laser, size of the shaping beam, distance of the cylindrical mirrors and magnification factor. From the correlation coefficient, we can evaluate the sensitivity of the shaping system to the cylinder-mirror rotation disorder. Finally, we verified our calculated results using a corresponding experimental device. The experimental results agreed well with the calculated results.

Key words beam shaping; cylindrical mirror; generatrix rotation; far-field focal spot

OCIS codes 070.7345; 140.3300; 220.1010

1 引言

在激光应用如材料加工、激光核聚变、光电对抗等诸多领域中,光束质量是评价激光系统性能的重要指标,研究远场焦斑是评价光束质量以及认识、诊断激光系统失调状态的关键途径之一,因此受到国内外学者的广泛关注^[1-15]。柱面镜广泛应用于激光系统的激光谐振腔与光束整形系统中^[3-14]。激光器诸如气流化学激光(如 DF/HF 激光^[5-7]、氧碘激

光^[8]、CO₂ 激光^[9])、板条固体激光^[10]常采用共焦非稳定光腔以及离轴混合非稳定光腔(离轴双柱面镜光腔),其输出光束是平面波,输出光斑一般是具有较大长宽比的矩形状(椭圆)光斑^[5-10],需要通过柱面望远镜系统整形为正方形(圆形)光斑。柱面望远镜整形系统是气流化学激光器与板条固体激光器上广泛使用的光束整形系统^[9]。柱面镜光腔以及整形系统中的柱面镜失调尤其是旋转失调如何影响输出激光的远场焦斑、光束质量,一直以来得到国内外学

收稿日期: 2020-05-07; 修回日期: 2020-06-01; 录用日期: 2020-06-23

基金项目: 国家 863 计划(51326010201)

* E-mail: moyi6969@163.com

者的持续关注。早在 1969 年, Arnaud 等^[11] 理论分析得到高斯光束经过旋转失调的柱透镜组后转换为广义像散光束, 且其焦斑发生旋转倾斜, 并通过实验进行了验证。1998 年, Blows 等^[12] 理论上推导并分析了双柱面镜腔中柱面镜旋转对腔模空间传播模式的影响。2008 年, Paegmann 等^[8] 将折叠离轴混合非稳定光腔用于 10 kW 氧碘激光输出, 并在理论与实验上研究了柱面镜腔镜失调对远场焦斑的影响。2013 年, Kochkina 等^[13] 建立 3D 光学系统模型, 研究了旋转柱透镜产生的广义像散光束在三维空间中的传播模式, 高斯光束的焦斑旋转倾斜后的计算结果与实验结果吻合得很好。2014 年, 肖龙胜^[14] 基于射频板条 CO₂ 激光器通过数值计算与实验观察发现柱面镜旋转失调会导致整形光束近场光斑发生旋转倾斜。2019 年, Wu 等^[15] 通过研究过量噪声系数解释了离轴正支混合非稳定腔中柱面镜失调对远场焦斑、输出功率的影响。

然而柱面镜望远镜整形系统中柱面镜旋转失调对共焦非稳腔输出矩形状平面波(平行光束)远场焦斑、光束质量的影响尚未得到广泛研究。这对认识、诊断激光系统的失调状态, 继而提升激光系统的光束质量具有重要意义。本文基于惠更斯-菲涅耳衍射理论进行数值计算, 发现柱面镜整形系统中的柱面镜旋转失调不仅会导致平行光束远场焦斑的旋转倾斜, 而且会导致其出现倾斜方向上的拉长、离焦, 该像差来源于柱面镜旋转导致的像散与离焦的叠加, 并且在实验上确认了该现象。上述结果说明远场焦斑的离焦也可以出现在旋转失调的柱面镜整形系统中, 研究远场焦斑劣化特征有助于认识、诊断激光系统失调来源与形态。

2 基本原理(实验与仿真)

2.1 柱面镜组用于光束整形原理

望远镜式共焦柱面镜整形系统可以由两块柱面镜组成, 一束平行光首先经过焦距为 f_1 的 X (或 Y) 方向柱面镜后传输, 传输距离为 L , 用于 X (或 Y) 方向的 M 倍扩(或缩)束, 同时 Y (或 X) 方向不变, 然后到达焦距为 f_2 的 X (或 Y) 方向柱面镜, 用于准直输出。上述光路如图 1 示意图所述, 上述参数满足

$$f_2 - f_1 = L, \quad (1)$$

$$\frac{f_2}{f_1} = M. \quad (2)$$

2.2 参数的选取及光路计算原理

基于平面波角谱的衍射理论利用快速傅里叶变

换进行计算^[16-17]。在计算中, 如图 1 所示, 入射光束是矩形状平面波, 长是 44.8 mm, 宽是 32 mm, 长宽比是 1.4, 入射光束中心波长是 633 nm。根据(1)式和(2)式, 选择焦距 f_1 为 1385 mm 的凸面柱面镜, 焦距 f_2 为 1939 mm 的凹面柱面镜, 两块柱面镜的焦距比为 1.4, 之间的传输距离 L 为 554 mm, 整形光束经过焦距 F 为 1500 mm 的圆透镜聚焦得到其远场焦斑。平行平面波首先经过 X 方向的凸柱面反射镜, 因该柱面镜母线的旋转角度为 α , 故光场相位发生变化, 得到的复振幅光场可表示为

$$U_1(x, y, 0) = U_0(x, y, 0) \cdot \exp\left\{ik \frac{[x \cos(\alpha\pi/180) + y \sin(\alpha\pi/180)]^2}{2f_1}\right\}, \quad (3)$$

式中: $k = 2\pi/\lambda$ 为波数, λ 是激光光束的中心波长; $U_0(x, y, 0)$ 是入射光振幅分布; i 是虚数因子; x 与 y 是空间位置坐标。然后基于角谱衍射理论利用快速傅里叶变换计算得到传播距离 L 后的复振幅光场, 表达式为

$$U_2(x, y, L) = \int_{-\infty}^{+\infty} A(u, v, L) \exp[i2\pi(ux + vy)] du dv, \quad (4)$$

$$A(u, v, L) = A(u, v, 0) \cdot \exp\left[ikL \sqrt{1 - (\lambda u)^2 - (\lambda v)^2}\right], \quad (5)$$

$$A(u, v, 0) = \int_{-\infty}^{+\infty} U_1(x, y, 0) \exp[-i2\pi(ux + vy)] dx dy, \quad (6)$$

式中: u 与 v 是空间频率坐标。最后该光束经过 X 方向的凹柱面镜准直输出, 输出复振幅光场可表示为

$$U_3(x, y, L) = U_2(x, y, L) \cdot \exp[-ik(x)^2/(2f_2)]. \quad (7)$$

输出光束经过焦距 F 的圆透镜聚焦后得到其焦斑形态, 即整形光束的远场焦斑 $I(x_0, y_0)$ 的表达式为

$$I(x_0, y_0) = \left(\frac{1}{\lambda F}\right)^2 \cdot \left| \int_{-\infty}^{+\infty} U_3(x, y, L) \exp\left[-ik \frac{(x_0 x + y_0 y)}{F}\right] dx dy \right|^2, \quad (8)$$

式中: x_0 与 y_0 是经过焦距为 F 的圆透镜聚焦后的空间位置坐标。

在实验中, 入射光是源自于菲索型激光干涉仪

中中心波长为 633 nm、口径为 180 mm 的平行光源,该光束经过长为 44.8 mm、宽为 32 mm 的光阑得到如图 1(a)所示矩形光斑。实验光路与计算过程完全一致,该矩形平行光束($d_Y/d_X=1.4$, d_Y 为 Y 方向尺寸, d_X 为 X 方向尺寸)首先经过焦距为 f (即 f_1) 的 X 方向的凸柱面镜($f=1385$ mm),然后经过 $0.4f$ (即 L) 长度的自由传播后到达焦距为

$1.4f$ (即 f_2) 的凹柱面镜进行 X 方向准直输出,两块柱面镜均镀有该波段的介质反射膜,入射角度为 15° 。如图 1(a)所示,为了减小像差,在 X 方向进行扩束,在 Y 方向输出,输出光斑可以被整形为正方形。该准直光束经过镀有该波段增透膜的口径为 60 mm、焦距 F 为 1500 mm 的圆透镜进行聚焦,通过 CCD 检测其焦斑形态,如图 1(b)所示。

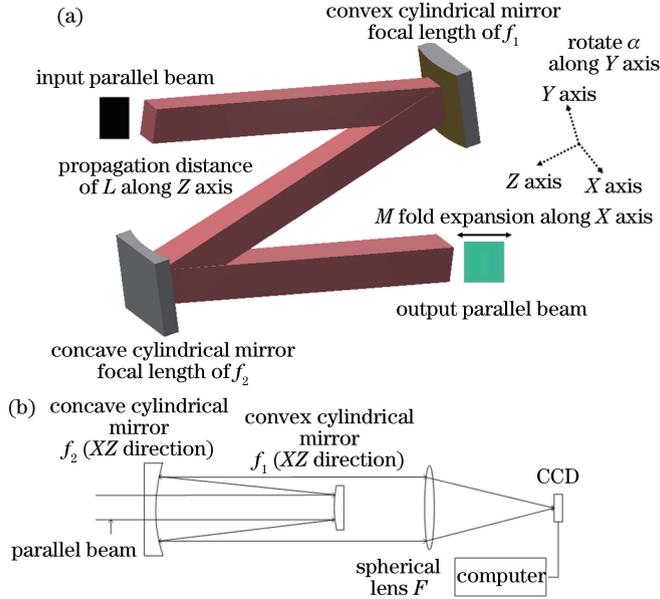


图 1 沿 X 方向整形扩束的柱面镜组示意图。(a)矩形光束依次经过凸面柱面镜(沿 Y 轴旋转失调 α 角度)、凹面柱面镜后整形为正方形光束;(b) XZ 方向上整形光束经圆透镜聚焦至电荷耦合器件(CCD)中

Fig. 1 Diagram of cylindrical mirrors for beam shaping along X direction. (a) Rectangular light beam passes through the convex cylindrical mirror with rotation misalignment angle α along Y axis and the concave cylindrical mirror successively to form a square light beam in XYZ direction; (b) shaping beam focusing into the charge coupled device (CCD) by the circular lens in XZ direction

3 分析与讨论

图 2 是整形光束远场焦斑的计算结果,如图 2(a)~(f)给出 X 方向凸柱面反射镜母线旋转 $0^\circ, 0.06^\circ, 0.09^\circ, 0.12^\circ, 0.15^\circ, 0.18^\circ$ 时对应的远场焦斑形态。如图 2(a)所示,凸柱面镜不旋转时,焦斑形态处于理想状态,理想光斑带有旁瓣,符合截断平行光束的远场特征^[9, 17]。此外,因为近场光斑在 X 方向尺寸相比于 Y 方向尺寸更小,所以其 X 方向衍射效应更强烈,远场焦斑在 X 方向的旁瓣更多。当柱面镜旋转 0.06° 以及 0.09° 时,远场焦斑旋转,并在倾斜方向上不断拉长,如图 2(b)和图 2(c)所示,该结果与文献[11, 13]中报道的高斯光束经过旋转柱透镜后的焦斑旋转倾斜特征是一致的。此外,可以看出平行光束焦斑旋转的同时还伴随着旁瓣增多以及旁瓣旋转,主极大光斑能量占比下降。当柱面

镜进一步旋转至 $0.12^\circ, 0.15^\circ, 0.18^\circ$ 时,远场焦斑除了发生旋转外,其在倾斜方向上出现离焦,如图 2(d)~(f)所示,上述焦斑形态变化均可反映柱面镜旋转对像差的影响。当 X 方向整形的凸柱面镜存在 α 角度的旋转失调时,相位影响可见(3)式中的 $\exp\left\{ik \frac{[x \cos(\alpha\pi/180) + y \sin(\alpha\pi/180)]^2}{2f_1}\right\}$ 。当凸柱面不存在旋转失调时,其相位影响变为 $\exp\left(ik \frac{x^2}{2f_1}\right)$ [(3)式中 $\alpha=0$],故来自于柱面镜旋转失调导致的像差等价于两者比值,即 $\exp\left\{ik \frac{[x \cos(\alpha\pi/180) + y \sin(\alpha\pi/180)]^2}{2f_1}\right\} / \exp\left(ik \frac{x^2}{2f_1}\right)$ 。将该式展开整理可得 $\exp\left\{ik \left[\frac{\sin^2(\alpha\pi/180)(y^2 - x^2)}{2f_1} + \frac{\sin(2\alpha\pi/180)xy}{2f_1} \right]\right\}$,

其中 $y^2 - x^2$ 项表征 0° 像散与离焦的叠加 ($-2x^2 + y^2 + x^2$)^[18], x, y 项表征 45° 像散。在柱面镜小角度 ($\sin \alpha \sim \alpha$) 旋转过程中, 因为 45° 像散的乘积因子(正

比于 2α) 大于 0° 像散与离焦叠加的乘积因子(正比于 α^2), 所以远场焦斑中先出现 45° 像散后出现离焦, 这一结论与图 2 中远场焦斑的分析结果是吻合的。

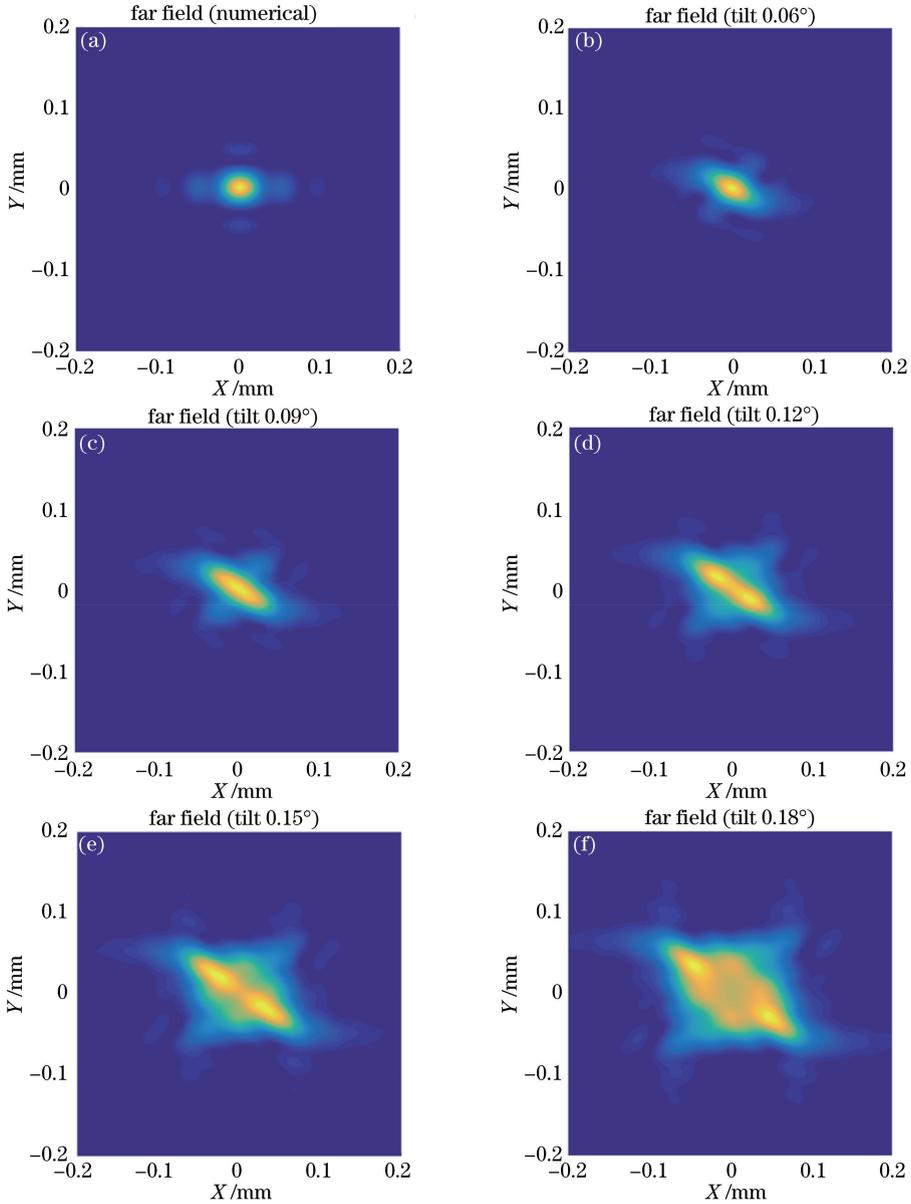


图 2 凸柱面镜旋转不同角度时整形光束远场焦斑的计算结果。(a) 0° ; (b) 0.06° ; (c) 0.09° ; (d) 0.12° ; (e) 0.15° ; (f) 0.18°

Fig. 2 Numerical results of the far-field focal spot of shaping beam when the convex cylindrical mirror rotates different angles. (a) 0° ; (b) 0.06° ; (c) 0.09° ; (d) 0.12° ; (e) 0.15° ; (f) 0.18°

图 3 是整形光束远场焦斑的实验结果, 如图 3(a)~(f) 分别是 X 方向凸柱面镜旋转 $0^\circ, 0.06^\circ, 0.09^\circ, 0.12^\circ, 0.15^\circ, 0.18^\circ$ 时对应远场焦斑形态。实验结果中焦斑形态变化与计算结果较为一致, 随着母线从 0° 旋转至 0.18° , 整形光束的远场焦斑特征依次经历图 3(a) 所示的理想状态、图 3(b) 所示的焦斑旋转、图 3(c) 所示的焦斑旋转并拉长、图 3(d)~(f) 所示的焦斑拉长并出现离焦, 过程中

焦斑的主极大光斑能量占比不断降低, 直至主极大光斑消失。该实验结果印证了像差来源于像散与离焦叠加的结论。除了柱面镜旋转带来的像差外, 因为柱面反射镜面型不理想以及光学调试误差等都会带来额外像差, 所以对比实验结果和计算结果发现, 实验结果中随着旋转角度增大, 可以观察到的远场焦斑的旁瓣较多。

图 2 以及图 3 给出了凸柱面镜旋转不同角度时

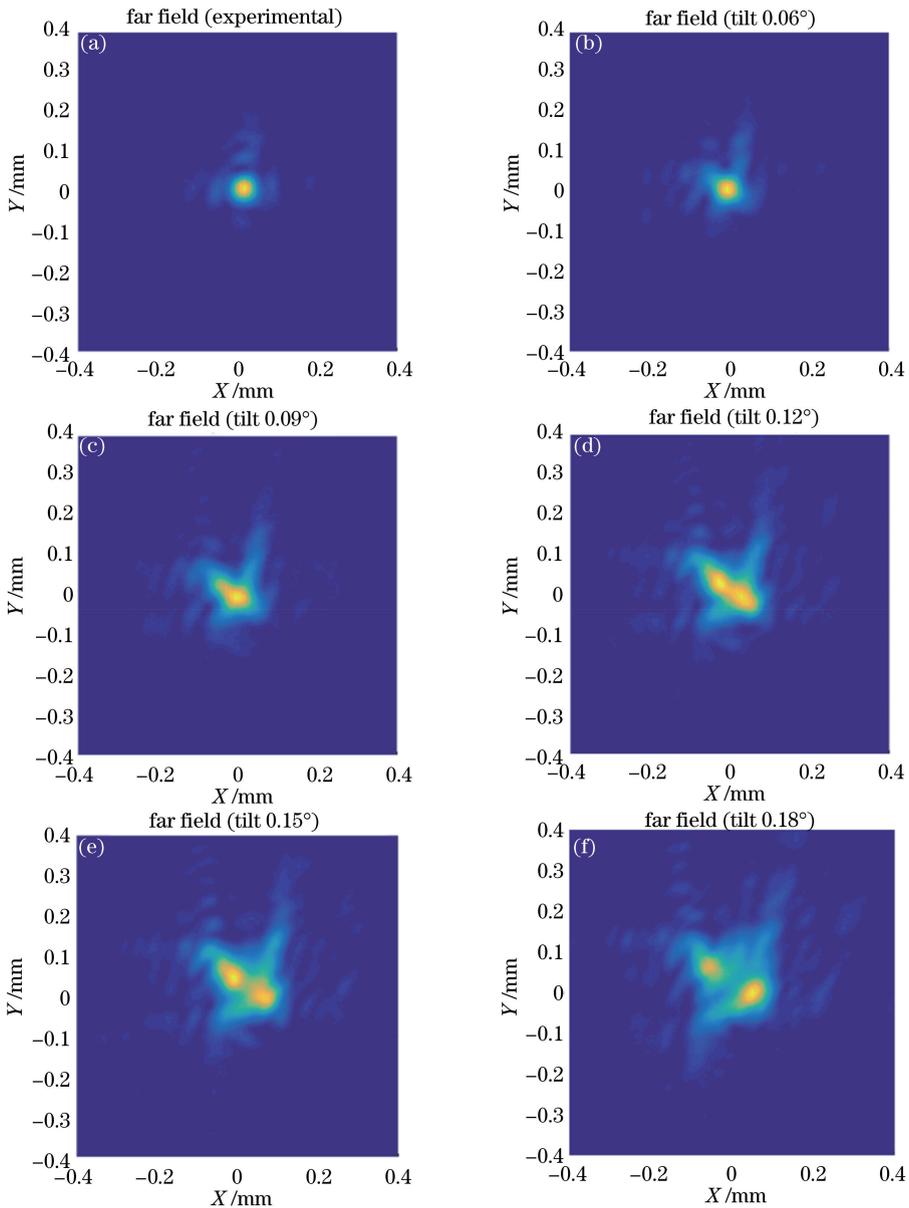


图 3 当凸柱面镜旋转不同角度时整形光束远场焦斑的实验结果。(a) 0°; (b) 0.06°; (c) 0.09°; (d) 0.12°; (e) 0.15°; (f) 0.18°

Fig. 3 Experimental results of the far-field focal spot of shaping beam when the convex cylindrical mirror rotates different angles. (a) 0°; (b) 0.06°; (c) 0.09°; (d) 0.12°; (e) 0.15°; (f) 0.18°

整形光束远场焦斑的计算与实验结果。为研究旋转角度固定时,激光束中心波长 λ 、整形光束中待整形尺寸 X 、柱面镜焦距 f_1 对远场焦斑形态的影响,引入了包含激光中心波长、光斑尺寸、柱面镜间距、放大率的归一化相位系数。由(3)式可以看到,柱面镜旋转对整形光束的影响来自于相位变换系数,整理可得 $(M-1)(\cos \alpha + M \sin \alpha)^2 X^2 / (L\lambda)$,其中对于柱面望远镜整形系统,共焦状态下有 $f_1 = L / (M-1)$ 。考虑到旋转失调角度一般较小, $M \sin \alpha$ 可以忽略不计,当旋转角度 α 固定后定义 $(M-1)X^2 / (L\lambda)$ 为柱面镜旋转后的归一化相位系数,该系数与整形光束中待整形尺寸的平方以及放大率成正比,与柱

面镜间距、激光束的中心波长成反比。图 4 给出不同归一化相位系数下,远场焦斑刚出现离焦时的阈值旋转角度的计算结果,该阈值角度是指主极大光斑从有到无对应的旋转角度,该角度取三位有效数字。图 4 说明了当焦斑形态刚出现离焦时,不同归一化相位系数对柱面镜旋转角度的敏感程度。随着归一化相位系数由小变大,焦斑形态变化对柱面镜旋转越来越敏感,如固定光斑尺寸为 32 mm,柱面镜焦距为 1385 mm,光束中心波长为 7393 nm 时对应的归一化相位系数为 100,刚出现离焦对应的旋转角度约为 1°,当中心波长为 739 nm 时对应的归一化相位系数为 1000,刚出现离焦对应的旋转角度

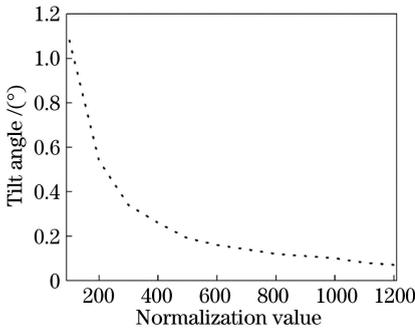


图 4 远场焦斑出现离焦时对应的阈值旋转角度随不同归一化相位系数变化的计算结果

Fig. 4 Numerical results of the change of tilt angles (threshold) with different normalized phase coefficients when defocus occurs in far field focal spot

约为 0.1° 。随着光束中心波长的增大,柱面镜旋转对焦斑形态变化的影响减弱,该趋势同样对更小的光斑尺寸与放大率以及更大的柱面镜间距成立。

针对中红外波段如 3800 nm ,以 DF 气流化学激光的典型输出波段^[5-7]为例来研究柱面镜旋转对整形光束的光束质量的影响(固定激光光束尺寸为 32 mm 、柱面镜焦距为 1385 mm 不变,其归一化相位系数约为 194)。图 5 显示的是随着柱面镜旋转角度增大,远场焦斑中主极大光斑能量占比的计算结果。需要注意的是在计算过程中设定桶中区域范围固定不变,从而保证结果可比性。当旋转角度为 0° 时,主极大光斑能量占比是理想结果,约 83.7% ;当旋转角度小于 0.1° ,主极大光斑能量占比缓慢下降并维持在 80% 以上;当旋转角度大于 0.1° 小于 0.5° ,随着角度增大,主极大光斑能量占比不断下降,并降至约 43% ;当旋转角度大于 0.5° ,主极大光斑消失并出现离焦。为了更广泛地给出柱面镜不同旋转角度下光束质量的变化,给出相应的基于桶中功率比(PIB)的 β 因子^[19],其定义为:理想桶中功率比与实际桶中功率比的比值,此处的 β 因子只能体现柱面镜旋转对光学系统的影响,不考虑其他像差对光束质量的影响。当旋转角度小于 0.1° 时,基于桶中功率比 β 因子小于 1.05。随着旋转角度的增大, β 因子升至 2,对应归一化相位系数为 194;当旋转失调角度小于 0.1° 时,旋转失调对光束质量劣化的影响几乎可以忽略不计。上述计算结果表明,存在一个合适的旋转失调角,可以使得柱面镜旋转失调对光束质量劣化的影响忽略不计,且该旋转失调角会随着归一化相位系数的变小而变大。

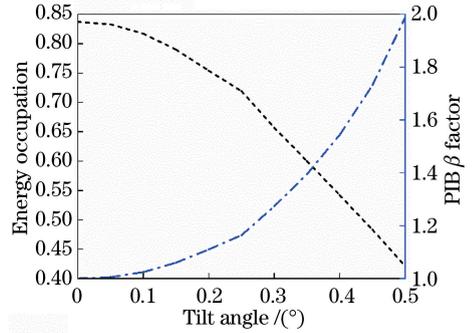


图 5 固定归一化相位系数为 194 时,不同柱面镜旋转角度下主极大光斑能量占比及其 β 因子的变化情况

Fig. 5 Main lobe energy ratio and the β factor with different rotation angle of the cylindrical mirror for a fixed normalized phase coefficient of 194

4 结 论

计算与实验研究了柱面望远镜整形系统中柱面镜旋转失调对平行光束远场焦斑与光束质量的影响,发现随着旋转失调角度的增大,远场焦斑不仅会旋转倾斜,而且会在倾斜方向上出现拉长、离焦,该像差来源于柱面镜旋转导致的像散与离焦的叠加,该研究结果有助于认识、诊断激光系统失调的来源与状态。此外,定量给出影响远场焦斑形态变化的归一化相位系数,该归一化相位系数可以用于评判柱面望远镜整形系统对柱面镜旋转失调的敏感度,归一化相位系数越小则可以容纳的旋转失调角度越大。

参 考 文 献

- [1] Liu Z J, Zhou P, Xu X J. Study on universal standard for evaluating high energy beam quality[J]. Chinese Journal of Lasers, 2009, 36(4): 773-778. 刘泽金, 周朴, 许晓军. 高能激光光束质量通用评价标准的探讨[J]. 中国激光, 2009, 36(4): 773-778.
- [2] Gao W, Wang Y P, Li B. Study on characterization and diagnosis of high-power laser beam quality[J]. Infrared and Laser Engineering, 2003, 32(1): 61-64. 高卫, 王云萍, 李斌. 强激光光束质量评价和测量方法研究[J]. 红外与激光工程, 2003, 32(1): 61-64.
- [3] Guo J Z, Liu T G, Wang Z H, et al. Method for lower order aberration correction based on beam shaping[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2012, 24(8): 1797-1800. 郭建增, 刘铁根, 王振华, 等. 基于整形光路的低阶像差校正方法[J]. 强激光与粒子束, 2012, 24(8): 1797-1800.
- [4] Chen J J, Zhao W X, Gao X M, et al. Optical

- multipass cell based on two cylindrical mirrors for high sensitivity detection of methane[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(9): 0930003.
- 陈家金, 赵卫雄, 高晓明, 等. 基于柱面镜光学多通池的 CH₄ 高灵敏度探测[J]. *光学学报*, 2015, 35(9): 0930003.
- [5] Wang J, Guo J Z, Yan F X, et al. Analysis of output spectrum in nitrogen diluted continuous wave DF laser[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, 47(12): 46-50.
- 王杰, 郭建增, 颜飞雪, 等. 氮稀释剂连续波 DF 激光器输出光谱分析[J]. *光子学报*, 2018, 47(12): 46-50.
- [6] Huang C, Huang K, Yi A P, et al. A mid-infrared pulsed HF chemical laser with 100 Hz repetition rate [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(2): 0201002.
- 黄超, 黄珂, 易爱平, 等. 100 Hz 重复频率脉冲中红外 HF 化学激光器[J]. *中国激光*, 2019, 46(2): 0201002.
- [7] Niu Z F, Guo J Z, Ren X M, et al. Numerical simulation of large aspect ratio rectangle resonators [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2011, 23(7): 1721-1725.
- 牛志峰, 郭建增, 任晓明, 等. 大长宽比矩形有源非稳腔模式的数值模拟[J]. *强激光与粒子束*, 2011, 23(7): 1721-1725.
- [8] Pargmann C, Hall T, Duschek F, et al. Hybrid resonator in a double-pass configuration for a chemical oxygen iodine laser [J]. *Applied Optics*, 2008, 47(35): 6644-6649.
- [9] Xiao L S, Qin Y X, Wang Z, et al. Shaped beam of a 2 kW radio frequency slab CO₂ laser with misaligned spatial filter[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(10): 1026012.
- 肖龙胜, 秦应雄, 王振, 等. 空间滤波器失调对 2 kW 射频板条 CO₂ 激光器输出光束的影响[J]. *光学学报*, 2016, 36(10): 1026012.
- [10] Kuba K, Yamamoto T, Yagi S. Improvement of slab-laser beam divergence by using an off-axis unstable-stable resonator [J]. *Optics Letters*, 1990, 15(2): 121-123.
- [11] Arnaud J A, Kogelnik H. Gaussian light beams with general astigmatism [J]. *Applied Optics*, 1969, 8(8): 1687-1693.
- [12] Blows J L, Forbes G W. Mode characteristics of twisted resonators composed of two cylindrical mirrors[J]. *Optics Express*, 1998, 2(5): 184-190.
- [13] Kochkina E, Wanner G, Schmelzer D, et al. Modeling of the general astigmatic Gaussian beam and its propagation through 3D optical systems[J]. *Applied Optics*, 2013, 52(24): 6030-6040.
- [14] Xiao L S. Researches on the beam shaping characteristics of the 2 kW RF slab CO₂ laser [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2014: 98-101.
- 肖龙胜. 2 kW 射频板条 CO₂ 激光器光束整形研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2014: 98-101.
- [15] Wu C, Li G, Xiong Z J. Excess noise of the misaligned off-axis confocal unstable resonators [J]. *Optik*, 2019, 194: 163046.
- [16] Sziklas E. A, Siegman A. E. Mode calculation in unstable resonators with flowing saturable gain. 2: fast Fourier transform method [J]. *Applied Optics*, 1975, 14(8): 1874-1889.
- [17] Goodman J W. Introduction to Fourier optics [M]. New York: McGraw-Hill Companies, 1968.
- [18] Wyant J C, Creath K. Basic wavefront aberration theory for optical metrology [M]. New York: Academic Press, 1992: 12-35.
- [19] Liu L, Wang C, Wang W T, et al. Evaluation on laser beam quality and its application on high power slab laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(s1): s114006.
- 刘磊, 王超, 王文涛, 等. 光束质量评价及其在高功率板条激光器中的应用[J]. *光学学报*, 2013, 33(s1): s114006.