

不同类型偏差对激光聚焦系统聚焦性能的影响

吴鹏飞

西安理工大学自动化与信息工程学院, 陕西 西安 710048

摘要 基于光学设计软件 ZEMAX, 通过 Monte Carlo 光线追迹法, 对比研究了采用三种设计方式的二次反射聚焦系统在不同类型角度偏差下的聚焦性能参数的变化。结果表明: 任何微小的角度偏差都会导致聚焦性能急剧下降和聚焦位置大幅偏离。聚焦系统存在角度偏差时, 不同设计方式的聚焦系统会形成不同形状的点火区域, 这将导致激光推力器产生完全不同的飞行的轨迹和姿态。

关键词 测量; 激光推进; 激光聚焦系统; 二次反射; 聚焦性能; ZEMAX

中图分类号 TN249 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP54.091204

Influences of Different Aberrations on Focusing Performance of Laser Focusing System

Wu Pengfei

School of Automation and Information Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China

Abstract Based on optical design software ZEMAX and the Monte Carlo ray tracing method, a comparative study of three design methods of double-reflection focusing system under different angle aberrations are undertaken. And focusing performance parameters on the focusing plane are analyzed. The results show that any slight angle aberrations can lead to intense deterioration of the focusing performance and large deviation of the focusing location. When there is the angle aberration of the focusing system, different shapes of ignition areas appear for different design methods, which give rise to different flight trajectories and attitudes for the laser thrusters.

Key words measurement; laser propulsion; laser focusing system; double reflection; focusing performance; ZEMAX

OCIS codes 120.4640; 080.2740

1 引言

激光推进是将远距离传输来的激光束通过聚焦系统在喷管内部实现聚焦并击穿工质, 形成爆轰波进行推进^[1-2]。影响激光推力器性能的参数主要有喷管构型^[3]、聚焦系统特征、激光功率/波长特征^[4]、工质特性^[5]等。其中, 聚焦系统作为激光推力器重要部件, 其聚焦特性影响着激光推力器的推进性能, 因此聚焦系统的设计具有重要意义。反射式的聚焦方式使得金属反射面不仅能长时间工作在高功率激光辐照下, 并且不存在球差^[6-7]。常见的激光推力器模型, 如塞式推力器^[8]、抛物形推力器^[9]、ASLPE^[10-11]、LITA^[12]等, 均采用了反射式聚焦系统。推力器在飞行过程中不免会受到各种因素的扰动, 导致聚焦系统聚焦性能下降, 进而直接导致激光聚焦功率密度下降及点火位置和区域偏离, 影响推力器飞行轨迹与姿态。Feikema等^[13]用光线追踪法, 研究了塞式推力器的反射式聚焦系统由于激光束中心轴与光学系统主轴不重合带来的散焦影响, 结果显示: 偏离角度小于 5° 时, 激光辐射仍能形成明显点火线, 但是散焦减弱了喷管上点火处激光辐射强

收稿日期: 2017-04-26; **收到修改稿日期:** 2017-06-08

基金项目: 陕西省工业攻关资助项目(2016GY-086)、陕西省教育厅专项科研计划(16JK1566)、西安理工大学科技创新计划(2016CX041)

作者简介: 吴鹏飞(1980—), 男, 博士, 讲师, 主要从事信息光学、光学系统设计方面的研究。

E-mail: wupengfei@xaut.edu.cn

度。Ageichik 等^[8]通过建立激光辐射密度分布方程,分析了 ASLPE 的聚焦系统镜面安装误差、镜面加工误差等对聚焦性能的影响。该结果显示:微小的偏差便会造成巨大的光束聚焦位置偏离;实验中还观察到 2 cm 左右的光束偏移。文献[14-15]中通过编写光线追踪法程序,研究了入射激光束的光轴与推力器主轴偏离对聚焦性能影响,结果表明:光轴相对于主轴的偏离会导致点火区域减小,推力器性能显著降低,当偏离角度超过一定值时,激光束甚至不能击穿空气。文献[16]针对抛物形喷管通过光线追踪法研究了自聚焦方式下入射激光光轴与喷管模型主轴偏离对聚焦性能的影响。该结果显示:偏离角度的存在导致散光,从而极大地减小聚焦激光的能量密度;激光能量越大,偏离角的影响越显著。

国内外不同的推力器模型采用了不同的二次反射设计方式^[17],但不同的聚焦系统设计方式是否会导致不同的聚焦性能有待深入研究。本文在建立的聚焦系统坐标系下,基于光学软件 ZEMAX,采用抛物面-双曲面、平面-抛物面、抛物面-平面三种设计方式建立了三组反射面模型。在此基础上,对比研究了三种设计方式的二次反射聚焦系统当激光束出射角度和聚焦系统角度存在偏差时的聚焦性能。

2 二次反射聚焦系统构型

二次反射聚焦系统的剖面构型如图 1 所示,两个反射面分别为 M1 与 M2,实际的聚焦系统可由 M1 和 M2 绕 z 轴(与激光束中心轴同轴)旋转一圈得到。激光束自左向右入射,经过 M1 和 M2 的两次反射之后聚焦在喷管内。 r_0 为激光束半径, F 为激光束的聚焦焦点, F 所在的垂直于 z 的平面即为焦平面。根据反射面母线几何参数的不同,可分为抛物面-双曲面、平面-抛物面、抛物面-平面三种设计方式。记 α 为聚焦方向,表征激光束聚焦后相对于激光入射方向的方向特征; β 为聚焦夹角,表征激光束聚焦过程中的收缩变窄程度; r_f 为聚焦环半径。

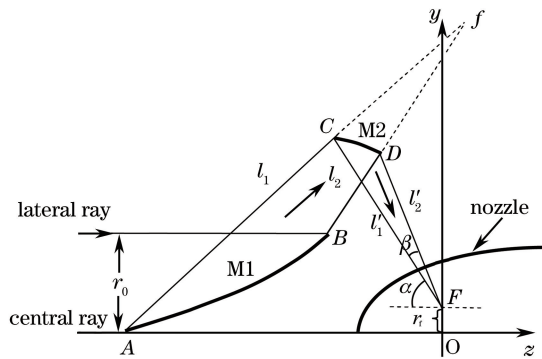


图 1 二次反射聚焦系统构型示意图

Fig. 1 Schematic structure of the double-reflection focusing system

3 ZEMAX 中的物理模型

3.1 激光光源模型和蒙特卡罗光线追迹法

实际的激光束功率密度分布非常复杂,在此将其等效为基模高斯光束。在极坐标系中,垂直于 z 轴的平面上的激光功率密度分布可定义为

$$I(r, z, t) = I_0(z, t) \exp\left[-\frac{2r^2}{r_0^2(z)}\right], \quad (1)$$

式中 r 代表了径向距光束中心的距离, I_0 为光束横截面上的中央最大功率密度, $r_0(z)$ 为高斯光束半径,其物理意义为光束横截面上功率密度下降为中央功率密度的 $1/e^2$ 时的 r 值,如图 2 所示。

高斯光束在均匀介质中传播时光束半径 $r_0(z)$ 随坐标 z 按双曲线规律向外扩展,即

$$r_0(z) = r_0 \sqrt{1 + (z/z_0)^2}, \quad (2)$$

式中 r_0 为 $z=0$ 时高斯光束的最小束腰半径, z_0 为瑞利长度,其定义为

$$z_0 = \frac{\pi \omega_0^2}{\lambda}, \quad (3)$$

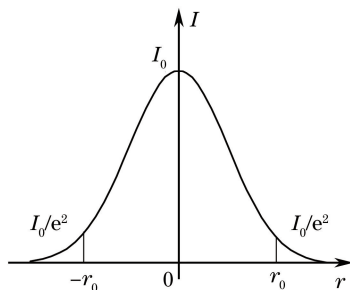


图2 激光束强度的高斯分布示意图

Fig. 2 Schematic of the Gaussian distribution of the laser beam intensity

其中 λ 为激光波长, 选取波长为 $10.6 \mu\text{m}$ 的 CO_2 激光; 若 $r_0 = 25 \text{ mm}$, 瑞利长度约为 185.23 m 。在近场情况下, $r_0(z)$ 可认为是恒定的, 等于 r_0 ; 若激光光源功率为 P , 则 $I_0 = 2P/(\pi r_0^2)$ 。

ZEMAX 软件中采用蒙特卡罗 (Monte Carlo, MC) 法来模拟光线追踪, 这是一种随机模拟方法。基本原理是: 光源由大量独立的光线组成, 如果光线的数量为 N , 每条光线携带的激光功率为 P/N , 光线的出射位置和方向由相应的概率模型确定^[15]。从第一条发射出的光线开始, 追踪每一条光线直到它被发射面发射或者离开聚焦系统, 再追踪下一条光线。

根据高斯光源的光强分布特性, 光线沿极角 φ 方向上出射的概率模型为

$$\varphi = 1/(2\pi), \quad (4)$$

在半径为 r 处的出射概率模型可由(1)式归一化得到, 为

$$r = \frac{2}{\pi r_0^2} \exp\left(-\frac{2r^2}{r_0^2}\right), \quad (5)$$

φ 与 r 相互独立, 因此, 光线在任意位置 r_i, φ_i 处的出射概率 $p(r_i, \varphi_i)$ 为

$$p(r_i, \varphi_i) = \frac{1}{\pi^2 r_0^2} \exp\left(-\frac{2r_i^2}{r_0^2}\right). \quad (6)$$

焦平面上功率密度分布的计算方法是把焦平面划分成大量的矩形网格单元, 把各网格单元内所有接收到的光线的功率相加除以网格单元的面积。

3.2 表征聚焦性能的参数和偏差说明

定义 I_{max} 和 R_{RMS} 作为衡量聚焦系统的聚焦性能的参数, 其中, I_{max} 为焦平面上的峰值功率密度, 可表征聚焦后的激光功率密度能否达到空气击穿阈值 ($1 \times 10^7 \text{ W/cm}^2$); R_{RMS} 为聚焦区域半径, 表示为

$$R_{\text{RMS}} = \sqrt{\sum_{i=1}^j R_i^2 / j}, \quad (7)$$

式中 j 为焦平面所接收到的经过二次反射的光线数目, R_i 为焦平面上第 i 条光线距焦点 F 的距离, R_{RMS} 表征了经过聚焦后的光斑偏离聚焦位置和离散的程度。由以上定义可知, I_{max} 越大, R_{RMS} 越小, 系统的聚焦性能越好。

不考虑反射面的加工和安装误差, 影响聚焦性能的偏差主要来自两个方面: 激光束的出射偏差和聚焦系统自身的加工偏差, 两类偏差又分别包括了角度和平移偏差。本文重点研究激光束的出射角度偏差和平移偏差。如图3所示, 激光束出射角度偏差 $\Delta\theta_L$ 表示光束在光源位置的传播方向与理想传输方向 (z 轴正向) 存在的夹角, d_L 表示聚焦系统顶点到光源的距离; $\Delta\theta_T$ 表示聚焦系统绕其顶点旋转后的角度偏差。

3.3 反射面模型

抛物面-双曲面、平面-抛物面、抛物面-平面的聚焦系统设计方式分别简称为设计方式 A、B 和 C。以激光束半径 $r_0 = 25 \text{ mm}$ 为条件, 设计聚焦特征参数为 $\alpha = 35^\circ$ 、 $r_i = 0$ 、 $\beta \approx 4^\circ$ 的三组反射面母线参数, 并在光学软件 ZEMAX 中建立了如表1所示的三组反射面模型。三组反射面的模型如图4中所示, 所示光线为蓝色 (数量 100) 且是随机生成的。

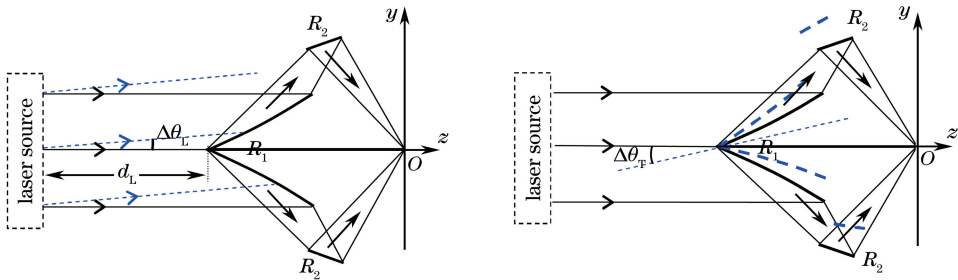


图3 影响聚焦性能的偏差示意图。(a) 激光束出射角度偏差；(b) 聚焦系统偏差

Fig. 3 Schematic of the aberrations that impact on focusing performance. (a) Angle aberrations of laser emitting; (b) aberrations of focusing system

表1 三组反射面母线参数

Table 1 Generatrix parameters of the three groups of reflectors

mm

Design method	Reflector	Models in ZEMAX	Generatrix expression	Starting point	Ending point
A	Paraboloid	Odd asphere	$(y-550)^2 = -500(z-350)$	$(-255, 0)$	$(-201.3, 25)$
	Hyperboloid	Inputted IGS	$\sqrt{(z-225)^2 + (y-550)^2} - \sqrt{z^2 - y^2} = 404.26$	$(-138.4, 102.5)$	$(-169.6, 97.9)$
B	Plane	Plane	$y = z + 180$	$(-180, 0)$	$(-162.3, 25)$
	Paraboloid	Inputted IGS	$z^2 = -580(y-145)$	$(-180, 89.1)$	$(-162.3, 99.6)$
C	Paraboloid	Odd asphere	$(y-270)^2 = -500(z+18)$	$(-163.8, 0)$	$(-138.1, 25)$
	Plane	Cylinder pipe	$y-135 = 0.53(z+143)$	$(-156.9, 89.8)$	$(-139.6, 98.9)$

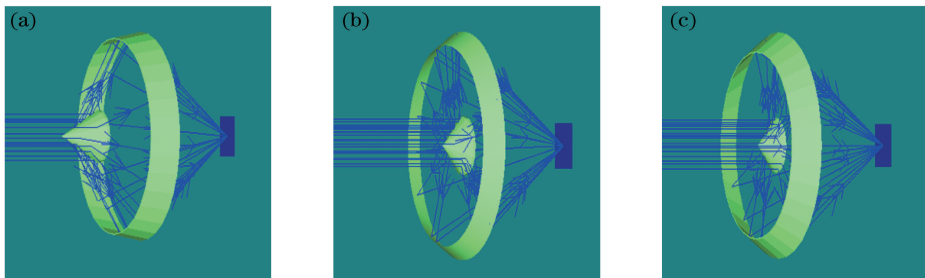


图4 ZEMAX中的三组反射面渲染模型。(a)设计方式A；(b)设计方式B；(c)设计方式C

Fig. 4 Shading models in ZEMAX of the three groups of reflectors. (a) Design method A; (b) design method B; (c) design method C

4 激光束出射角度偏差对聚焦性能的影响

设定采用波长为 $10.6 \mu\text{m}$ 的脉冲 CO_2 激光作为激光推进, 激光峰值功率为 3 MW , 激光束随机光线数目 $N = 10^5$ 。焦平面类型设置为吸收模式, 面积随焦平面上的光斑范围而定, 保证每平方毫米内有 25×25 个接收单元。在真实系统中, 焦平面上的功率密度分布是连续的, 而 MC 光线追迹法所得到的功率密度分布是离散的, 不便于观察和分析, 因此对计算结果采用了 5 阶的平滑处理。

4.1 聚焦性能参数的变化

图 5 为 $d_L = 1.0 \text{ mm}$ 、 $\Delta\theta_L = 0^\circ \sim 2.5^\circ$ 时, 三种设计方式对应的 I_{max} 与 R_{RMS} 随着激光束出射角度偏差 $\Delta\theta_L$ 的增大而变化的趋势, 每隔 0.5° 计算一次。可见, 随着偏差角度的增大, 三种设计方式下的 I_{max} 均呈现级数下降趋势, 下降幅度由大至小的设计方式依次为 C、A、B; $\Delta\theta_L = 0$ 时, 三种聚焦方式下的 I_{max} 均在 $1.51 \times 10^9 \text{ W/cm}^2$ 左右; θ_L 仅为 0.5° 时, I_{max} 均下降至 10^8 W/cm^2 左右, 可见激光束出射角度偏差对 I_{max} 影响之巨大; $\Delta\theta_L = 2.5^\circ$ 时, I_{max} 均下降至空气击穿阈值以下。随着偏差角度的增大, R_{RMS} 均呈现线性增大的趋势, 设计方式 B 中增大的趋势最缓, 其余依次为 A、C; $\Delta\theta_L = 0$ 时, 三种设计方式 A、B、C 对应的 R_{RMS} 均位于 0 附

近,大小分别为 28,14,0.13 μm ,说明了聚焦系统对光束的会聚效果很理想; $\Delta\theta_L=0.5^\circ$ 时,设计方式 A、B、C 对应的 R_{RMS} 已分别达到 1.5,1.3,1.8 mm,光斑偏离聚焦位置明显。仿真结果同时说明, $\Delta\theta_L=3^\circ$ 时焦平面已经不能接收到经过二次反射后的光线, I_{max} 此时为 0。

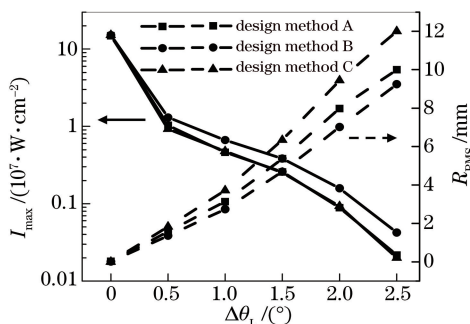


图 5 焦平面峰值激光功率密度与聚焦区域半径随出射角度偏差的变化

Fig. 5 Maximum laser power density and focusing region radius on the focusing plane along with the emitting angle aberration

4.2 焦平面功率密度分布特征

在焦平面上,定义功率密度大于 0 形成的区域为聚焦光斑,功率密度大于 $1 \times 10^7 \text{ W/cm}^2$ 形成的区域为点火区域。图 6 为 $d_L=1.0 \text{ m}$ 、激光束出射角度偏差 $\Delta\theta_L$ 存在时,焦平面上的相对功率密度(功率密度同 $1 \times 10^7 \text{ W/cm}^2$ 的比值)分布。可以看出: $\Delta\theta_L=0$ 即无偏差时,三种设计方式下,点火区域均形成半径约为 0.4 mm 的圆,圆心均位于焦点;相对功率密度在圆心处最大,并向周围逐渐减小。 $\Delta\theta_L=0.5^\circ$ 时,点火区均形成一个沿 y 轴正向偏离焦点约 2 mm 的圆形环带,圆形环带直径由大至小的设计方式为 C、A、B,其中设计

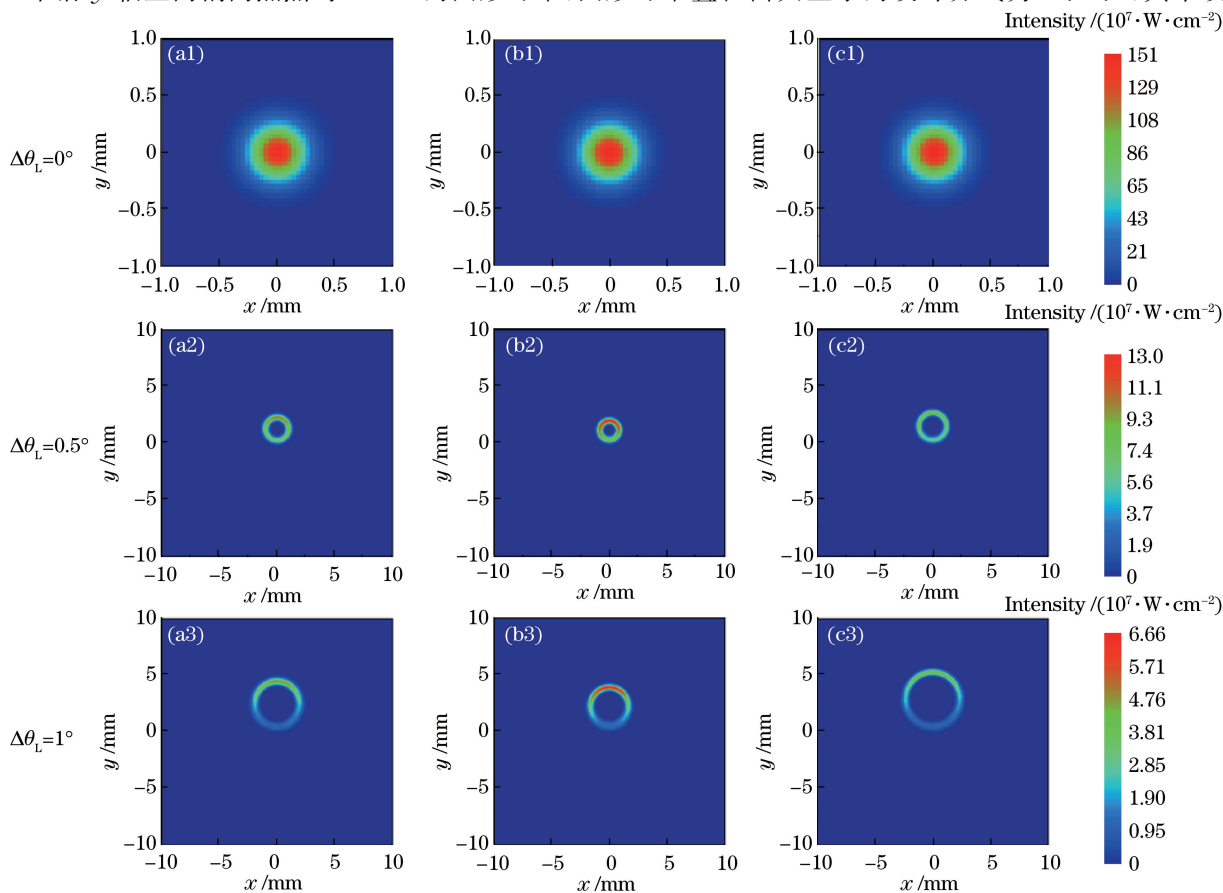


图 6 焦平面上相对功率密度分布随出射角度偏差的变化。(a1)~(a3)设计方式 A;(b1)~(b3)设计方式 B;(c1)~(c3)设计方式 C

Fig. 6 Relative power density on the focusing plane along with the emitting angle aberration.

(a1)-(a3) Design method A; (b1)-(b3) design method B; (c1)-(c3) design method C

方式 C 的圆形环带直径约为 2.5 mm;功率密度分布均呈现出左右对称,由上至下逐渐减弱,环带的中间区域高而向内侧与外侧逐渐减小的趋势;相对功率密度峰值由大至小依次的设计方式为 B、A、C。 $\Delta\theta_L=1^\circ$ 时,聚焦光斑范围相比于 $\Delta\theta_L=0.5^\circ$ 时的聚焦光斑范围扩大了一倍左右,由此可以看出聚焦光斑的范围由大至小的设计方式依次为 C、A、B;功率密度分布特征与 $\Delta\theta_L=0.5^\circ$ 时大致相同,环带上半部分的功率密度要明显高于下半部分,此时,设计方式 A、B、C 对应的相对功率密度峰值已分别下降为 4.63,6.66,4.78。

4.3 光源距离对聚焦性能的影响

图 7 为 $\Delta\theta_L=1^\circ$ 、 $d_L=0\sim 2.5$ m 时,三种设计方式对应的 I_{\max} 与 R_{RMS} 随聚焦系统到光源的距离 d_L 的增大而变化的趋势。可见,随着 d_L 的增大, I_{\max} 均呈现先小幅度增加之后迅速下降的趋势。在 $d_L=1.5\sim 2.5$ m 时,三种设计方式对应的 I_{\max} 相差不大,且下降的趋势基本相同,三种设计方式在 2.5 m 处均下降到了空气击穿阈值以下。 R_{RMS} 随着 d_L 增加均呈现先小幅减小后逐渐增大的趋势,且增大的幅度逐渐减小。设计方式 B 对应的 R_{RMS} 要明显小于其他两种。

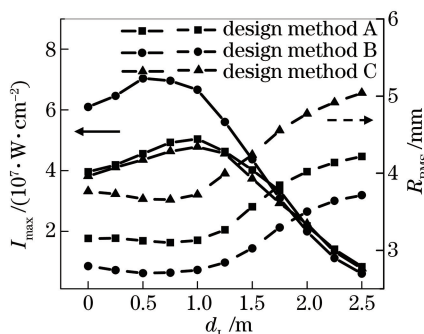


图 7 焦平面上激光功率密度与聚焦区域半径随光源距离的变化($\Delta\theta_L=1^\circ$)

Fig. 7 Laser power density and focusing region radius on the focusing plane along with the distance of laser source ($\Delta\theta_L=1^\circ$)

由上述结果可知,激光束存在一定出射角度偏差时,对于三种设计方式,聚焦系统到光源的距离在一定范围内均不会对系统的聚焦性能造成显著影响,但如果超出某一范围就会导致聚焦性能的迅速下降。

5 聚焦系统角度偏差对聚焦性能的影响

5.1 聚焦性能参数的变化

图 8 为 I_{\max} 和 R_{RMS} 随聚焦系统角度偏差 $\Delta\theta_T$ 的增大而变化的趋势。可见,三种设计方式对应的 I_{\max} 均随着 $\Delta\theta_T$ 的增大而大幅减小,但减小的趋势各不相同。设计方式 A 中, I_{\max} 随 $\Delta\theta_T$ 的增大呈现急剧下降的趋势; $\Delta\theta_T=1^\circ$, I_{\max} 下降到 2.94×10^8 W/cm²,相比于无偏差时下降为原来的 1/4; $\Delta\theta_T=5^\circ$, I_{\max} 已下降到空气击穿阈值以下,为 7.9×10^6 W/cm²。设计方式 B 中, I_{\max} 随 $\Delta\theta_T$ 的增大而减少; $\Delta\theta_T=1^\circ$,迅速下降至 7.44×10^7 W/cm²,相比于无偏差时下降至不足原来的 1/10; $\Delta\theta_T=1^\circ\sim 6^\circ$, I_{\max} 下降趋势变缓; $\Delta\theta_T=6^\circ\sim 9^\circ$,

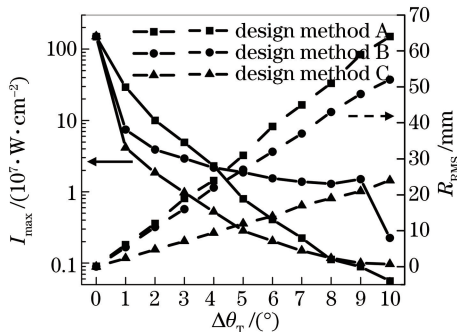


图 8 焦平面峰值激光功率密度和聚焦区域半径随聚焦系统角度偏差的变化

Fig. 8 Maximum laser power density and focusing region radius on the focusing plane along with the angle aberration of focusing system

I_{\max} 基本恒定;最后在 $\Delta\theta_T=10^\circ$ 时又迅速下降到空气击穿阈值以下, I_{\max} 为 2.2×10^6 W/cm²。设计方式 C 中, I_{\max} 随着 $\Delta\theta_T$ 的增大, 下降趋势逐渐变缓, 但下降幅度为三种设计方式中最大; $\Delta\theta_T=1^\circ$, I_{\max} 下降到 4.16×10^7 W/cm², 远小于其他两种; $\Delta\theta_T=3^\circ$, I_{\max} 已下降到 9.7×10^6 W/cm², 低于空气击穿阈值。三种设计方式对应的 R_{RMS} 均随着 $\Delta\theta_T$ 的增大呈现线性增大的趋势, 增大趋势的斜率由大至小的设计方式依次为 A、B、C。

5.2 焦平面功率密度分布特征

图 9 为聚焦系统角度偏差 $\Delta\theta_T$ 存在时焦平面上的相对功率密度分布, 可以看出, 三种设计方式下形成的聚焦光斑和点火区域的形状各不相同。 $\Delta\theta_T=1^\circ$ 时, 设计方式 A 中的聚焦光斑范围最小, 因此功率密度明显高于其他两种。设计方式 A 中, 点火区域沿 y 轴正向偏离焦点约 6 mm, 中间高功率密度区形成半径约为 0.5 mm 的圆形, 在圆形区域左右两端上侧各形成一个的环带区域, 环带区域的功率密度明显低于中间的圆形区域; 设计方式 B 中, 点火区域形成沿 y 轴正向偏离焦点约 5 mm 的环带, 聚焦光斑的左右两端较宽, 功率密度分布呈现上低下高; 设计方式 C 中, 点火区域同样为一环带, 环带中心位于焦点附近, 功率密度分布呈现上高下低。 $\Delta\theta_T=2^\circ$ 时, 设计方式 A 中点火区域已偏离聚焦位置约 12 mm, 形状与 $\Delta\theta_T=1^\circ$ 时的类似, 但范围均已扩大很多; 设计方式 B 中, 点火区域形成了两个分别向左右倾斜的椭圆形环带, 两环带底部相交, 且此处功率密度最高; 设计方式 C 中, 点火区域仍为一中心在焦点附近的环带, 但范围扩大大约一倍, 功率密度的分布特征与 $\Delta\theta_T=1^\circ$ 时的类似。 $\Delta\theta_T=3^\circ$ 时, 三种设计方式下的相对功率密度都在不断下降; 设计方式 A 中, 聚焦光斑已分离为两个对称的椭圆形环带并分别向左上和右上方扩散, 环带底部各形成一个圆状的高功率密度点火区域; 设计方式 B 中, 两个椭圆形环带范围在不断扩大, 环带上部的功率密度在不断下降, 但两个环带相交位置的功率密度的下降却并不显著, 这与图 8 中设计方式 B 对应的 I_{\max} 在 $\Delta\theta_T=3^\circ$ 之后下降缓慢相对应; 设计方式 C 中已不能形成点火区域, 聚焦光斑仍然为一圆心在焦点附近的环带。

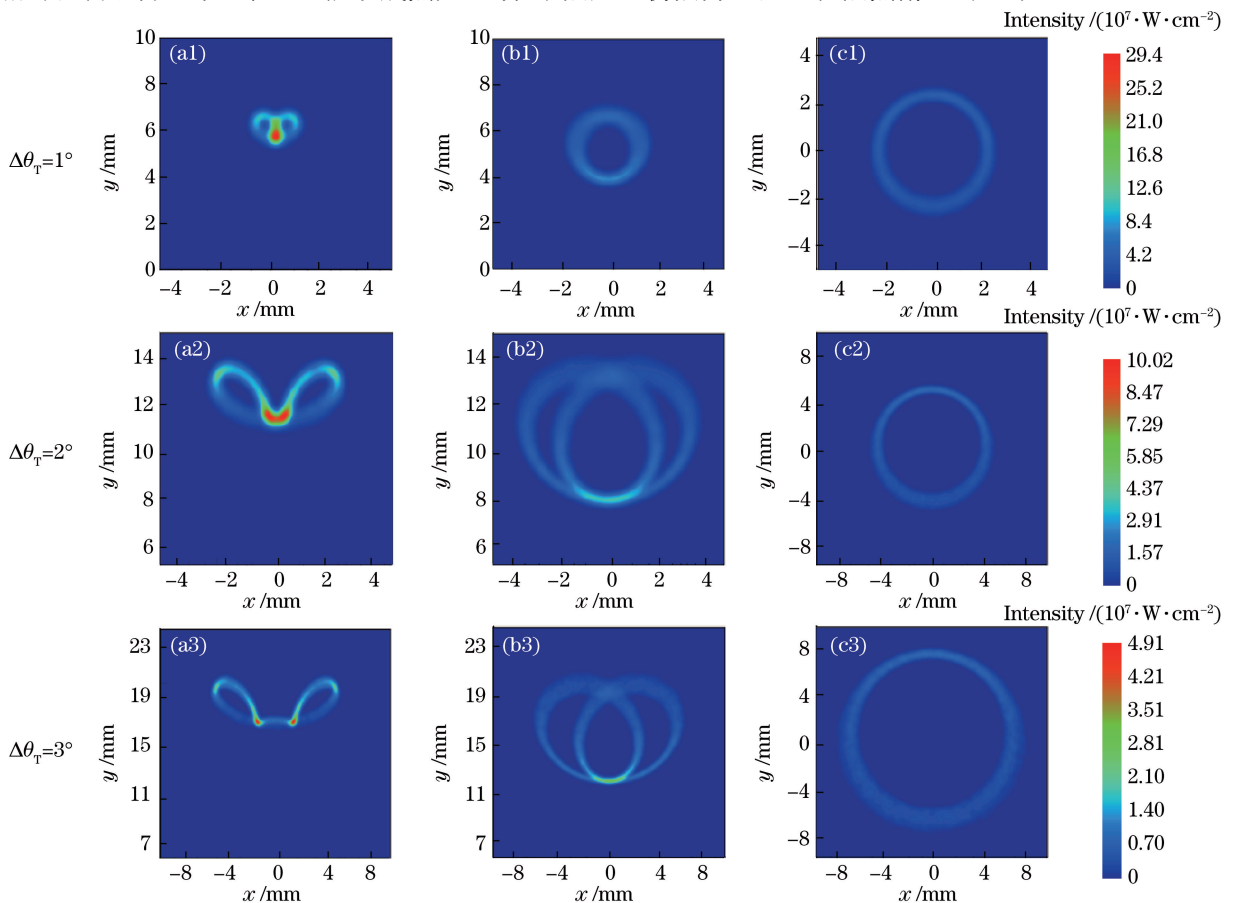


图 9 焦平面上相对功率密度分布随出射角度偏差的变化。(a1)~(a3)设计方式 A; (b1)~(b3)设计方式 B; (c1)~(c3)设计方式 C

Fig. 9 Relative power density on the focusing plane along with the angle aberration of focusing system.

(a1)-(a3) Design method A; (b1)-(b3) design method B; (c1)-(c3) design method C

从以上聚焦性能参数与焦平面功率密度分布特征可见,随着聚焦系统角度偏差的增大,三种设计方式对应的聚焦性能均呈现大幅度下降趋势,但下降趋势各不相同,且点火区域的形状与位置也互有差异。值得注意的是,设计方式 A、B 中点火区域均远离焦点,这样的点火位置将加重推力器的失衡,也就是进一步增大 $\Delta\theta_T$;而设计方式 C 中的点火区域始终为中心在焦点的圆环,点火区域对称,利于推力器的稳定。

6 结 论

对于三种设计方式的二次反射聚焦系统,任何微小的角度偏差都将会导致聚焦性能的急剧下降和聚焦位置的大幅偏离。因此,设计方式对聚焦系统的性能影响并不明显,但值得引起注意的是,聚焦系统存在角度偏差时会形成不同形状的点火区域,这将导致激光推力器产生完全不同的飞行的轨迹和姿态。而对于激光束出射角度偏差而言,三种设计方式对应的聚焦性能参数下降趋势相似,并且点火区域均呈现圆环状并不断扩大,直至变为圆弧状然后消失。因此,如果在激光推力器设计中仅考虑激光束出射角度偏差,就需要更多地考虑推力器的总体构形设计要求。当激光聚焦方向为 35° 、聚焦夹角为 4° 、聚焦环半径为 0、光源距离为 1.0 m 时,激光束出射角度偏差不宜超过 2° ,此时聚焦系统到光源的距离在一定范围内均不会对系统的聚焦性能造成显著影响。

下一步研究中,将采用理论模型结合实验模型测试的方式对聚焦系统性能进行进一步验证。在理论方面,将推导建立误差参量与聚焦系统几何参数之间的数学关系,尝试在简化条件下得到他们之间的解析关系,力求理论分析结果与本文软件模拟结果吻合。在此基础上进行聚焦系统实验模型的加工和光束聚焦性能的实验验证。

参 考 文 献

- [1] Shi Lei, Zhao Shanghong, Chu Xingchun, *et al.* Experimental and numerical study of air-breathing mode propulsion by solid Nd:glass nanosecond pulse laser[J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(1): 100-104.
石磊, 赵尚弘, 楚兴春, 等. 大气呼吸模式纳秒脉冲固体钕玻璃激光推进实验与数值分析[J]. 中国激光, 2010, 37(1): 100-104.
- [2] Ye Jifei, Hong Yanji, Li Nanlei. Experimental study on thrust performance of carbon doped liquid working substance processed by laser ablation[J]. Chinese J Lasers, 2017, 44(2): 0202001.
叶继飞, 洪延姬, 李南雷. 激光烧蚀碳掺杂液态工质推力性能实验研究[J]. 中国激光, 2017, 44(2): 0202001.
- [3] Hong Y, Song J, Cui C, *et al.* Numerical study of energy conversion process in air-breathing laser propulsion[J]. Applied Physics A, 2011, 105(1): 189-196.
- [4] Wang Chenglin, Zhang Yan, Wang Kunpeng. Effect of impulse coupling coefficient on impulse vector of laser irradiating space debris[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(12): 121404.
王成林, 张艳, 王鲲鹏. 冲量耦合系数对激光辐照空间碎片冲量矢量的影响[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(12): 121404.
- [5] Sheng Deren, Shi Xiangkun, Chen Jianhong, *et al.* Research progress of laser propulsion with liquid propellants[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(5): 050002.
盛德仁, 史香锬, 陈坚红, 等. 液体靶材激光推进研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(5): 050002.
- [6] Yang Yang. Appraisal of several CO₂ laser beam focusing method[J]. Laser Journal, 1999, 20(2): 29-32.
杨扬. CO₂ 激光束几种聚焦方案的比较[J]. 激光杂志, 1999, 20(2): 29-32.
- [7] Bohn W L. Laser lightcraft performance[C]. SPIE, 2000, 3885: 48-53.
- [8] Myrabo L N, Libeau M A, Meloney E D, *et al.* Pulsed laser propulsion performance of 11 cm parabolic bell engines within the atmosphere[C]. SPIE, 2004, 5448: 450-464.
- [9] Davis E W, Mead F B, Jr. Review of laser lightcraft propulsion system[J]. AIP Conference Proceedings, 2008, 997(1): 283-294.
- [10] Ageichik A A, Egorov M S, Rezunkov Y A, *et al.* Experimental study on thrust characteristics of airspace laser propulsion engine[J]. AIP Conference Proceedings, 2004, 702(1): 49-60.
- [11] Rezunkov A A, Safronov A L, Ageichik A A, *et al.* Performance characteristics of laser propulsion engine operating

- both in CW and in repetitively-pulsed modes[J]. AIP Conference Proceedings, 2006, 830(1): 3-13.
- [12] Sasoh A, Yu X, Ohtani T, *et al.* In-tube laser propulsion; performance and application prospects[J]. AIP Conference Proceedings, 2003, 702(1): 61-67.
- [13] Feikema D. Analysis of the laser propelled lightcraft vehicle[C]. 31st Plasmadynamics and Lasers Conference, 2000: 2348.
- [14] Cui Cunyan, Hong Yanji, He Guoqiang, *et al.* Influence of linear nozzle structure on impulse coupling coefficient of laser thruster[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2006, 18(2): 193-196.
崔村燕, 洪延姬, 何国强, 等. 线性喷管构形对激光推力器冲量耦合系数的影响[J]. 强激光与粒子束, 2006, 18(2): 193-196.
- [15] Cui Cunyan, Hong Yanji, Wang Jun, *et al.* Influence of focusing system structure on propulsion performance of laser thruster[J]. Chinese J Lasers, 2006, 33(6): 739-742.
崔村燕, 洪延姬, 王 军, 等. 聚光系统构形对激光推力器推进性能的影响[J]. 中国激光, 2006, 33(6): 739-742.
- [16] Shi Hongbin, Cheng Zhaogu, Jiang Jinbo, *et al.* Study on misalignment of parabolic mirror in lightcraft vehicle[C]. SPIE, 2000, 4065: 371-378.
- [17] Cheng Fuqiang, Dou Zhiguo, Xiao Longsheng, *et al.* Design and simulation of the twice reflecting laser focusing system based on ZEMAX[J]. Optical Technique, 2016(5): 403-407.
程富强, 窦志国, 肖龙生, 等. 基于 ZEMAX 的二次反射式激光聚焦系统设计与模拟[J]. 光学技术, 2016(5): 403-407.
- [18] Freniere E R. Numerical experiments in modeling diffraction phenomena with Monte Carlo ray tracing [C]. SPIE, 2006, 6289: 1-12.