

文章编号: 1001-3806(2004)05-0514-04

内光路热效应和像差对远场光束质量的影响

季小玲^{1,2}, 陶向阳^{1,3}, 吕百达^{1,3}

(1. 四川大学 激光物理与化学研究所, 成都 610064; 2. 四川师范大学 电子工程学院, 成都 610066; 3. 江西师范大学 物理与通信电子学院, 南昌 330027)

摘要: 选取桶中功率 PIB, Strehl 比, β 和像散参数 w_x/w_y 作为远场光束质量的评价标准, 用自编的四维仿真程序就内光路热效应和像差对光束质量的影响作了详细的数值计算和分析。研究表明, 离焦、像散和热效应都将导致远场光强分布出现畸变, 可聚焦能力降低, 光束质量变差。

关键词: 热效应; 强激光; 离焦和像散; 光束控制系统(内光路); 光束质量

中图分类号: TN012 文献标识码: A

The influence of thermal effects and aberrations in a beam control system on the beam quality in the far field

Ji Xiaoling^{1,2}, Tao Xiangyang^{1,3}, Lü Baida^{1,3}

(1. Institute of Physics and Chemistry, Sichuan University, Chengdu 610064, China; 2. College of Electronic Engineering, Sichuan Normal University, Chengdu 610066, China; 3. College of Physics & Communication Electronics, Jiangxi Normal University, Nanchang 330027, China)

Abstract: By using a four dimensional simulation code, a detailed numerical study of the influence of thermal effects and aberrations in a beam control system on the beam quality is made. The Strehl ratio, β , astigmatism parameters and power in the bucket (PIB) are chosen as criteria for characterizing the beam quality in the far field. It is shown that the defocus, astigmatism and thermal effects result in the distortion of intensity distribution and reduction of the focusability in the far field, thus degrade the beam quality.

Key words: thermal effect; high power laser; defocus and astigmatism; beam control system (inner optical system); beam quality

引 言

迄今, 对强激光的大气传输, 特别是大气湍流和热晕对激光传输的影响已作了许多理论和实验研究^[1-3]。对实际的强激光系统, 从激光器输出的光束一般还要经过光束控制系统(亦称内光路)扩束后再经大气传输。尽管激光在内光路中的传输距离(典型值为数米至数十米)与大气传输距离(典型值为数公里至数十公里)相比很短, 但高功率密度的细光束在控制系统中的热效应(热晕)对远场光束质量会产生很大影响, 对此仅有不多的研究结果报

道^[4,5]。作者采用桶中功率 PIB, Strehl 比, β 和像散参数评价远场光束质量, 用自编的四维光束传输程序, 就内光路中的热效应和像差(后者由激光器或光学元件加工误差等因素引起)对远场光束质量影响作了详细的研究。结果表明, 内光路的热效应和像差(离焦和像散)都使远场光强分布出现畸变, 中心光强减小, 可聚焦能力降低, 光束质量变差, 因此, 在实际工作中应当采取有效措施以减小内光路热效应和像差的影响。

1 理论模型

近轴近似下, 激光束的传输方程为^[2]:

$$2ik \frac{\partial E}{\partial z} = \nabla_{\perp}^2 E + k^2(n^2/n_0^2 - 1)E \quad (1)$$

式中, k 为波数, E 为慢变场振幅, n_0 为未扰动时的折射率, n 为折射率。

光强为:
$$I = |E|^2 \exp(-\alpha z) \quad (2)$$

基金项目: 国家高技术 863-802 资助项目(A823070)

作者简介: 季小玲(1963), 女, 教授, 博士研究生, 主要从事激光变换的研究。

E-mail: jixl100@163.com

收稿日期: 2002-11-07; 收到修改稿日期: 2003-11-24

α 为衰减系数。

等压近似下, 流体力学方程为:

$$\partial \rho / \partial t + v \cdot \nabla \rho = -(\gamma - 1) \alpha / c_s^2 \quad (3)$$

式中, $\gamma = c_p / c_v$, c_p , c_v 分别为比定压热容和比定容热容, ρ 为流体密度, v 为流体速度, c_s 为声速。像差造成的相位畸变可由 Zernike 多项式描述, 其相位因子为^[6]: $\psi(x, y) = \exp[-iC_j Z_j(x, y)]$ (4)

式中, $Z_j(x, y)$ 为 Zernike 多项式, C_j 为像差系数。

对于离焦和像散, Zernike 多项式可分别表示为:

$$Z_4 = \frac{x^2 + y^2}{2w_0^2}, \quad Z_5 = \frac{x^2 - y^2}{2w_0^2} \quad (5)$$

w_0 为光束孔径。

离焦和像散的高斯光束初始场分布分别为:

$$E_1 = E_0 \exp \left[i \frac{k(x^2 + y^2)}{2z_f} - \frac{x^2 + y^2}{2w_0^2} \right] \times \exp[-iC_4(x^2 + y^2)/2w_0^2] \quad (6)$$

$$E_2 = E_0 \exp \left[i \frac{k(x^2 + y^2)}{2z_f} - \frac{x^2 + y^2}{2w_0^2} \right] \times \exp[-iC_5(x^2 - y^2)/2w_0^2] \quad (7)$$

式中, 波数 $k = 2\pi/\lambda$ (λ 为波长), z_f 为聚焦光学系统的焦距。

针对所研究问题, 文中采用以下参数评价强激光远场光束质量。

(1) 桶中功率(PIB)^[7]

$$PIB = \int_0^a I(r, z_f) r dr \sqrt{\int_0^\infty I(r, z_f) r dr} \quad (8)$$

式中, $r = \sqrt{(x - \bar{x})^2 + (y - \bar{y})^2}$, a 为桶的半径。物理上, PIB 表征了光束的可聚焦能力。

(2) Strehl 比(S_r)

$$S_r = \frac{\text{实际光束峰值光强}}{\text{理想光束衍射极限峰值光强}} \quad (9)$$

(3) β 参数 $\beta = \sqrt{A_m/A_0}$ (10)

式中, A_m , A_0 分别表示当环围功率为 63% 时, 实际光束和理想光束所对应的面积^[8]。

(4) 像散参数 w_x/w_y

按二阶矩定义的束宽 w_x, w_y 为:

$$\begin{cases} w_x^2 = \frac{4 \iint (x - \bar{x})^2 |E(x, y)|^2 dx dy}{\iint |E(x, y)|^2 dx dy} \\ w_y^2 = \frac{4 \iint (y - \bar{y})^2 |E(x, y)|^2 dx dy}{\iint |E(x, y)|^2 dx dy} \end{cases} \quad (11)$$

式中, \bar{x} 和 \bar{y} 分别为按一阶矩定义的光束重心位置:

$$\begin{cases} \bar{x} = \frac{\iint x |E(x, y)|^2 dx dy}{\iint |E(x, y)|^2 dx dy} \\ \bar{y} = \frac{\iint y |E(x, y)|^2 dx dy}{\iint |E(x, y)|^2 dx dy} \end{cases} \quad (12)$$

2 数值计算及分析

本文中限于研究内光路热效应和像差问题, 激光束在内光路以外设为经真空传输至远场。计算参数为: $\gamma = 1.4$, $n_0 = 1.00035$, 大气密度(标准大气下) $\rho_0 = 1.302461 \text{ kg/m}^3$, $c_s = 340 \text{ m/s}$, $\lambda = 10.6 \mu\text{m}$, $\alpha = 6.5 \times 10^{-5} / \text{m}$, $w_0 = 5 \text{ cm}$, $z_f = 2 \times 10^3 \text{ m}$, 光束在内光路中传输的距离 $d < 10 \text{ m}$ 。图 1 至图 5 中光束发射功率均为 $P = 100 \text{ kW}$ 。文中计算 $v = 0$, 即无横向风时的瞬态解。

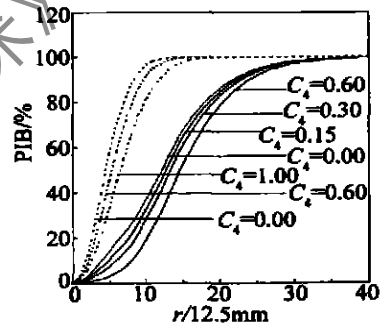


Fig. 1 PIB curves of a Gaussian beam with defocus for different values of C_4

图 1 为不同离焦系数 C_4 的离焦高斯光束的 PIB 曲线, 其中虚线对应于在真空传输时的 PIB 曲线。由图 1 可知, 在无热效应的情况下(见虚线), 离焦像差会影响远场光强分布, 即离焦使得光束的 PIB 减小, 且 C_4 越大, 光束的 PIB 越小, 光束可聚焦能力越低。与真空传输情况相比较, 内光路中的热效应使得光束的 PIB 下降(见实线), 且光束可聚焦能力随着 C_4 的增大而降低。图 2 为 $C_4 = 0$ 和 $C_4 = 0.6$ 的离焦高斯光束在远场, 即几何焦面上 ($z = 2 \times 10^3 \text{ m}$) 的光强分布。图 3 为 $C_4 = 0$ 和 $C_4 = 0.6$ 的离焦高斯光束在内光路出口处 ($z = 0$) 和远场的等光强线分布。表 1 中为离焦高斯光束远场光束质量参数的数值计算结果。图 2 和图 3 表明, 尽管在内光路出口处光强分布无明显变化, 仍呈现良好的高斯分布(见图 3), 但离焦和像散以及内光路的热效应对远场光强分布有很大的影响。与理想高斯光束 ($C_4 = 0$) 相比较, 离焦使得远场中心光强减小, 光强分布扩展。由表 1 可知: (1) 仅有热效应的情况下

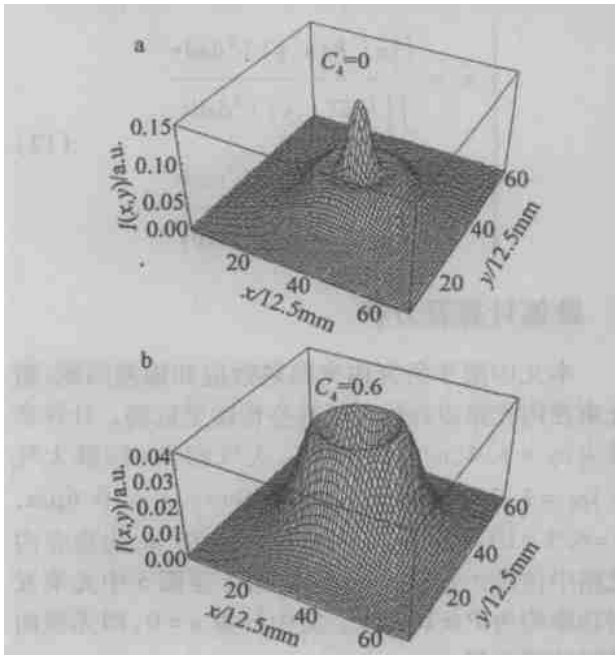


Fig. 2 Intensity distributions of a Gaussian beam with defocus in the far field

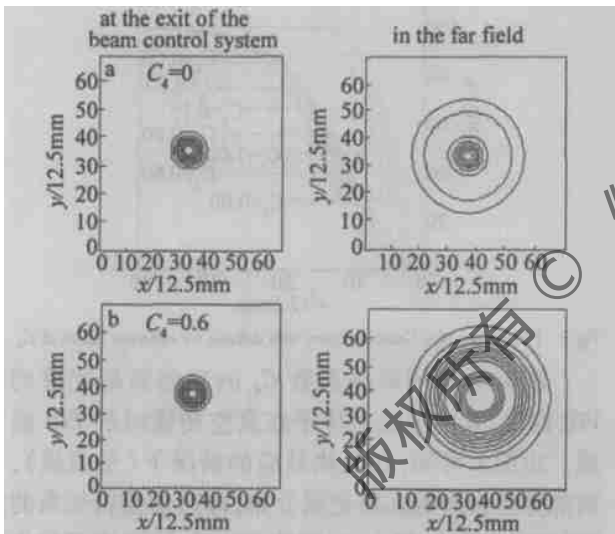


Fig. 3 Contour lines of a Gaussian beam with defocus at the exit of the beam control system and in the far field

Table 1 Numerical calculation results for a Gaussian beam with defocus

C_4	0	0.15	0.30	0.60
S_r	0.276	0.195	0.127	0.085
β	2.36	2.45	2.55	2.77

($C_4 = 0$), $S_r = 0.276$, $\beta = 2.36$, 实际光束光强峰值为理想高斯光束的 0.276 倍, 63% 环能量的光斑直径较理想高斯光束的增大了 2.36 倍, 即热效应的作用使得远场光强峰值下降很多, 光斑尺寸扩大很多; (2) 与仅有热效应的情况相比较, 离焦使得光束的 S_r 减小, β 值增大, 即光强峰值和光束可聚焦能力进一步降低, 且离焦系数越大, 光束质量越差。

图 4 为 $C_5 = 0$ 和 $C_5 = 0.4$ 的像散高斯光束在远场 $z = 2 \times 10^3 \text{ m}$ 处的光强分布。图 5 为 $C_5 = 0$ 和 $C_5 = 0.4$ 的像散高斯光束在内光路出口处 ($z = 0$) 和远场的等光强线分布。表 2 为像散高斯光束远场光

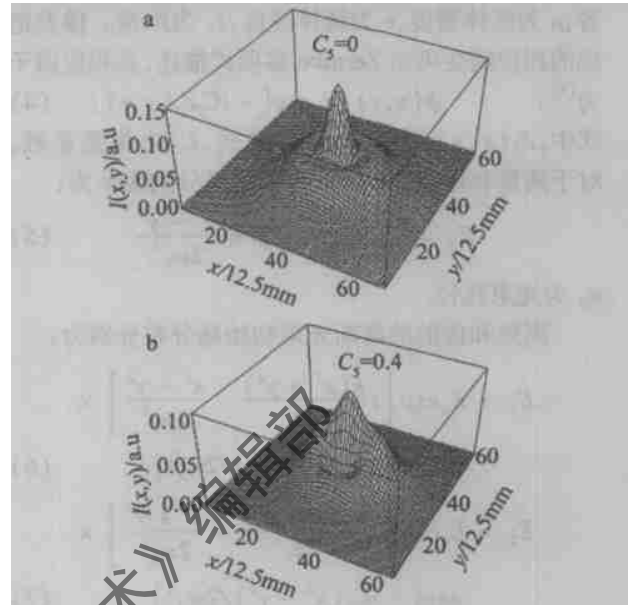


Fig. 4 Intensity distributions of a Gaussian beam with astigmatism in the far field

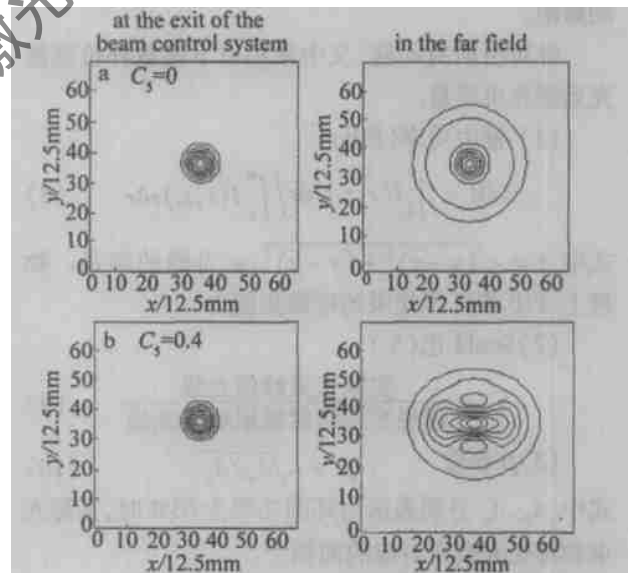


Fig. 5 Contour lines of a Gaussian beam with astigmatism at the exit of the beam control system and in the far field

Table 2 Numerical calculation results for a Gaussian beam with astigmatism

C_5	0	0.2	0.3	0.4
S_r	0.276	0.264	0.251	0.236
w_x / mm	252.14	265.45	272.65	279.80
w_y / mm	252.14	239.38	233.32	227.51
w_x / w_y	1.00	1.11	1.17	1.23

束质量参数的数值计算结果。离焦和 $v = 0$ 时内光路中的热效应不会导致光束像散(见图2和图3)。由图4和图5可知,理想高斯光束经内光路传输到远场也不会出现像散(见图4a和图5a),但像散高斯光束经内光路传输到远场为像散光束(见图4b和图5b)。表2的数值计算结果与图4和图5是一致的,与理想高斯光束($C_5 = 0$)相比较, S_r 减小, w_x , w_y 和 w_x/w_y 均增大。当无热效应时,像散会使 PIB 减

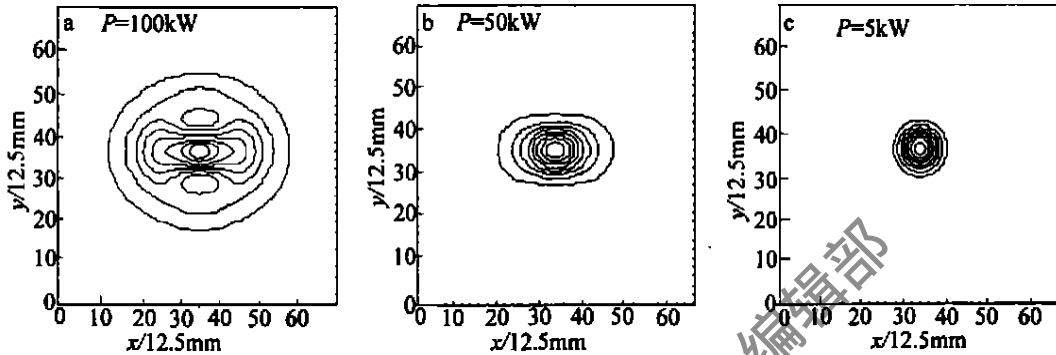


Fig. 6 Contour lines of a Gaussian beam with astigmatism for different P in the far field, $C_5 = 0.4$

降低,远场光束像散程度减轻,当 $P = 5\text{kW}$ 时(见图6c),远场光束已无像散。由图7可知,光束的 PIB 随着发射功率 P 的降低而增大,当 $P = 5\text{kW}$ 时,其 PIB 曲线已与真空传输时的 PIB 曲线重合。这是因为随着发射功率的减小,非线性热晕效应减弱。当 $P = 5\text{kW}$ 时,非线性热晕效应已可忽略,光束无像散,回到文献[9]中的结果。

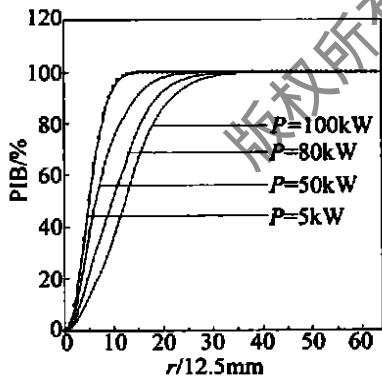


Fig. 7 PIB curves of a Gaussian beam with astigmatism for different P in the far field
 --- PIB curve of a Gaussian beam with astigmatism propagating in vacuum, $C_5 = 0.4$

3 结论

用 Zernike 多项式描述像差,编制了一套计算有像差时激光热晕的四维(x, y, z, t)程序。用桶中功率 PIB, Strehl 比, β 和像散参数 w_x/w_y 表征远场光束质量,研究了热效应和像差对远场光束质量的影响。

小,但像散高斯光束在几何焦面上是无像散的^[9]。本文中的研究表明,当内光路中有热效应存在时,像散高斯光束经内光路后再经真空传输到远场(几何焦面)仍为像散光束。其物理原因是由于热晕是一种非线性效应,它会反过来影响光强。为了说明这一问题,图6和图7分别给出了不同光束发射功率 P 下,像散高斯光束在远场的等光强线分布和 PIB 曲线。图6表明,随着光束发射功率 P 的

数值计算表明,离焦和像散像差都会使得远场峰值光强减小,光束可聚焦能力下降。由于光束控制系统中激光的功率密度很高,内光路中的热效应对远场光强分布会产生很大的影响,它使得远场光强峰值和光束可聚焦能力进一步降低,光束质量下降。离焦和无横向风时的热效应都不会导致光束像散,但对于像散高斯光束的非线性热效应要引起远场光束出现像散,且像散系数和光束发射功率越大,光束像散越厉害。本文中所得结论对高功率激光远程能量运输之类问题的研究有实际意义。

参 考 文 献

- [1] SMITH D C. High power laser propagation: thermal blooming [J]. Proc IEEE, 1977, 65 (12): 1679~ 1714.
- [2] FLECK J A, MORRIS J R, FEIT M D. Time dependent propagation of high energy laser beams through the atmosphere [J]. Appl Phys, 1976, 10: 129~ 160.
- [3] 陈栋泉, 李有宽, 徐锡申 *et al.* 激光大气传输中热晕的数值模拟 [J]. 强激光与粒子束, 1993, 5(2): 243~ 252.
- [4] 金 钢, 刘顺发, 李树民 *et al.* 激光热效应对光束控制系统发射光束质量的影响 [J]. 中国激光, 2002, A29(10): 895~ 899.
- [5] 刘顺发, 金 钢, 陈洪斌 *et al.* 激光热效应对光束控制系统发射光束质量的影响 [J]. 光电工程, 2001, 28(6): 14~ 16, 72.
- [6] BORN M, WOLF E. Principles of optics [M]. 7th ed, England: Cambridge University Press, 1999. 527~ 532.
- [7] SIEGMAN A E. How to(maybe) measure laser beam quality [J]. OSA TOPS, 1998, 17: 184~ 199.
- [8] GARAY A. Continuous wave deuterium fluoride laser beam diagnostic system [J]. SPIE, 1998, 888: 17~ 22.
- [9] 季小玲, 吕百达. 像散透镜对高斯光束的变换特性 [J]. 强激光与粒子束, 2000, 12(4): 397~ 400.