

文章编号: 1001-3806(2003)06-0514-03

光束控制系统中热效应的数值模拟*

陶向阳^{1,2} 季小玲¹ 吕百达^{1,2}(¹四川大学激光物理与化学研究所,成都,610064) (²江西师范大学物理与通信电子学院,南昌,330027)

摘要: 编制了四维仿真程序,用以研究光束控制系统中的热效应对强激光传输的影响。作为数值模拟例,用 Strehl 比、可聚焦能力(即 86.5% 包围功率半径)、像散参数和光束重心偏移表征远场光束质量,研究了初始场分布为高斯和平顶分布的光束通过光束控制系统传输时热效应对远场光束质量的影响。结果表明,远场光束质量与初始场的空间分布有关,且随发射功率增大而变差。

关键词: 热效应;光束控制系统;强激光;远场光束质量

中图分类号: O435; TN012 **文献标识码:** A

Numerical simulation of the thermal effect in a beam control system

Tao Xiangyang^{1,2}, Ji Xiaoling¹, Lü Baida^{1,2}(¹ Institute of Physics and Chemistry, Sichuan University, Chengdu, 610064)(² College of Physics & Communication Electronics, Jiangxi Normal University, Nanchang, 330027)

Abstract: A four-dimension simulation code is developed, which enables us to study the thermal effect of high-power lasers propagating through a beam control system. As illustrated examples, the thermal effects of high-power lasers with initial Gaussian and flat-topped profiles in passage through the beam control system on the beam quality in the far field characterized by the Strehl ratio, the focussability (i. e., radius of the encircled 86.5% power), astigmatism parameter and shift of the beam gravity are studied. It is shown that the beam quality in the far field depends on the initial field distribution, and is degraded with increasing emissive power.

Key words: thermal effect; beam control system; high-power laser; beam quality in the far field

引言

强激光在大气中传输时,由于大气中的分子和粒子会吸收激光而被加热膨胀,密度减小,从而导致局部折射率减小。对于初始场分布为高斯或类高斯分布的激光束,因轴上光强最高,局部折射率最小。按折射定律,中心区域的光将向周围折射率大的区域折射而发散,产生热散焦,形成负透镜。这种因强激光和大气的非线性作用产生激光束的波前畸变和光束扩展的热效应称为热晕。热晕现象会造成光束发生畸变、扭曲、发散,而影响光束质量,导致强激光传输的不稳定性,并且限制了到达靶面的最大功率。对强激光大气传输的热晕问题已做了许多的理论和实验研究工作^[1~5]。对实际的强激光系统,尽管激

光在光束控制系统内的传输距离很短,但高功率密度的细光束在光束控制系统传输的热效应(热晕)会对远场光束质量产生很大的影响,对此仅有为数不多的研究结果发表^[6,7]。笔者编制了四维强激光传输的仿真程序,对初始分布分别为高斯型和平顶高斯型的光束通过光束控制系统后热效应的影响作了比较。采用 Strehl 比,86.5% 包围功率半径,像散参数和重心偏移等参数评价远场光束质量,研究结果表明,远场光束质量与初始场分布有关,且当发射功率增大到一定程度以后,平顶高斯光束的远场光束质量优于高斯光束。

1 理论模型

在近轴近似下光束传输方程为^[4]:

$$2ik \frac{\partial A}{\partial z} = \nabla^2 A + k^2 \left(\frac{n^2}{n_0^2} - 1 \right) A \quad (1)$$

式中, $k = 2\pi/\lambda$ 为波数, λ 为波长, A 为慢变场振幅, n_0 为未扰动时的折射率, n 为折射率。光强可由 $I = |A|^2 \exp(-z)$ 给定, γ 为衰减系数。

* 江西省自然科学基金及国家高技术 863-802 资助项目。

作者简介:陶向阳,男,1965 年 5 月出生。博士研究生,教授。现从事激光传输与变换的研究。

收稿日期:2003-03-21;收到修改稿日期:2003-05-26

等压近似下,流体力学方程为:

$$\frac{\partial}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla = - \frac{(\gamma - 1)}{c_s^2} I \quad (2)$$

式中, ρ 为流体密度, \mathbf{v} 为流体速度, c_s 为声速, $\gamma = c_p/c_v$, c_p, c_v 分别为比定压热容和质量定容热容。

初始场设为高斯分布:

$$A = A_0 \exp \left[i \frac{k(x^2 + y^2)}{2z_f} - \frac{x^2 + y^2}{2a^2} \right] \quad (3)$$

式中, z_f 为聚焦光学系统的焦距, a 为光束等效半径, A_0 为常数。

对(1)式、(2)式进行无量纲化处理后可得:

$$2i \frac{\partial \tilde{A}}{\partial} = \frac{1}{N_F} \nabla^2 \tilde{A} + 2N_d \tilde{A} \quad (4)$$

$$\frac{\partial \tilde{}}{\partial} + \frac{\mathbf{v}}{c_s} \cdot \nabla \tilde{=} = - / \tilde{A} / ^2 \exp(- N) \quad (5)$$

式中, $x = a \tilde{x}, y = a \tilde{y}, z = z_f \tilde{z}, \tilde{=} = tc_s / a, N_F = ka^2 / z_f$ 是菲涅耳数。 $|A|^2 = \frac{P}{a^2} |\tilde{A}|^2, N = z_f$ 是吸收参数, $\tilde{=} = (\rho_0 / \rho) [1 - (\gamma - 1) a^2 / (2z_f P)]$, P 为发射功率, $\rho = \rho_0 + \rho_1$, ρ_0 为未扰动时的流体密度, $N_d = kz_f \mathbf{x} \cdot (\mathbf{n}_0 - 1) \{ [1 - (\gamma - 1) a^2 P] / [2c_s^3 a^2] \}$ 为扭曲参数^[5]。

采用相屏法对传输方程进行处理,当

$n \rightarrow n+1$ 时, (4) 式的形式解为:

$$\tilde{A}^{n+1} = \exp \left\{ - i \left[\frac{1}{N_F} \nabla^2 + N_d \tilde{=} \right] \right\} \tilde{A}^n \quad (6)$$

在二级近似下,上式成为:

$$\tilde{A}^{n+1} = \exp \left\{ - \frac{i}{4N_F} (\nabla^2) \right\} \mathbf{x} \exp \left\{ - i N_d \tilde{=} \right\} \exp \left\{ - \frac{i}{4N_F} (\nabla^2) \tilde{A}^n \right\} \quad (7)$$

该式表明:从 $n \rightarrow n+1$ 的求解可分为 3 步:第 1 步为传输 $z/2$ 的自由空间衍射;第 2 步为介质的折射率变化对激光场的相位影响;第 3 步仍为传输 $z/2$ 的自由空间衍射。

用 Mathematica 编制了一套可计算热效应对激光传输影响的四维 (x, y, z, t) 程序。该程序的主要特点是:(1)对激光大气传输采用相屏法进行研究,其中衍射问题的采用 FFT 处理;(2)对流体学方程的处理采用差分法,为了提高计算精度,在用差分法处理大气密度扰动方程时还对位移量采用了加权平均,由于采用了 Mathematica 的相应的函数,使得计算精度较高、计算速度快、程序形式简洁;(3)既能模拟强激光瞬态传输又可对强激光稳态传输作数值模拟;(4)在实际计算模拟中,可采用多种光束模型对

强激光在内光路和后续大气长程传输进行计算模拟。

为了定量地评价强激光远场光束质量,本文中采用的参数有^[8]:

(1) Strehl 比

$$S_r = \frac{\text{实际光束远场峰值光强}}{\text{理想光束衍射极限远场峰值光强}} \quad (8)$$

(2) 86.5% 环围功率半径 $R_{86.5\%}$, 由下式定义:

$$\int_0^{R_{86.5\%}} I(r) dr = 86.5\% \int_0^\infty I(r) dr \quad (9)$$

(3) 光斑重心位置

$$\bar{x} = \frac{\int \int x I(x, y, z) dx dy}{\int \int I(x, y, z) dx dy} \quad (10)$$

$$\bar{y} = \frac{\int \int y I(x, y, z) dx dy}{\int \int I(x, y, z) dx dy} \quad (11)$$

(4) 像散参数 w_x, w_y , 其中:

$$w_x^2 = \frac{\int \int (x - \bar{x})^2 I(x, y, z) dx dy}{\int \int I(x, y, z) dx dy} \quad (12)$$

$$w_y^2 = \frac{\int \int (y - \bar{y})^2 I(x, y, z) dx dy}{\int \int I(x, y, z) dx dy} \quad (13)$$

2 数值计算结果和分析

为了比较光束控制系统中的热效应对不同空间分布强激光的影响,计算中仅考虑了光束控制系统内激光与大气相互作用,激光在光束控制系统外的传输假定在真空中进行。对初始场为高斯和平顶高斯分布的激光束进行了研究,入射高斯光束的场分布由(3)式给定,入射平顶高斯光束场分布为^[9]:

$$A = A_0 \exp \left[i \frac{k(x^2 + y^2)}{2z_f} - \frac{(N+1)(x^2 + y^2)}{b^2} \right] \times \prod_{n=0}^N \exp \left[- \frac{(N+1)(x^2 + y^2)}{b^2} \right] \quad (14)$$

式中, A_0 为一常数, N 为平顶高斯光束的阶数,文中取 $N=6$, b 为平顶高斯光束的束宽。为便于比较热晕对两种光束传输的影响, a, b 的取值原则是在发射功率相同的情况下,保持两种入射光束 86.5% 环围功率对应的束宽相等。

计算参数为: $\lambda = 1.06 \mu\text{m}, \rho = 1.2 \times 10^{-5} \text{m}^{-1}, a = 0.05 \text{m}, \gamma = c_p/c_v = 1.4$, 大气密度(标准大气下)

$\rho_0 = 1.302461 \text{kg/m}^3$, $c_s = 340 \text{m/s}$, $v_x = 0.5 \text{m/s}$, $v_y = 0$, $z_f = 5 \text{km}$ 。光束在光束控制系统中传输的距离 z_i 取为 10m , z_o 为光束在光束控制系统外传输的距离, 取为 5km 。

图 1 是初始场分布为高斯型的光束初始光强分布(见图 1a); 光束控制系统出口处光强分布图(见图 1b)及经真空传输后在焦面处光强分布图(见

图 1c)。计算参数为 $P = 3 \times 10^5 \text{W}$ 。由图 1 可见, 尽管光束经光束控制系统到出口处, 光强分布仍为良好的高斯型, 但经真空中传输至远场处, 则明显看出光斑发生畸变, 出现了月牙形, 并有光束扩展现象。这说明, 虽然强激光在光束控制系统中的传输距离很短(10m), 但由于热效应, 也会对强激光的远场分布带来很大的影响。

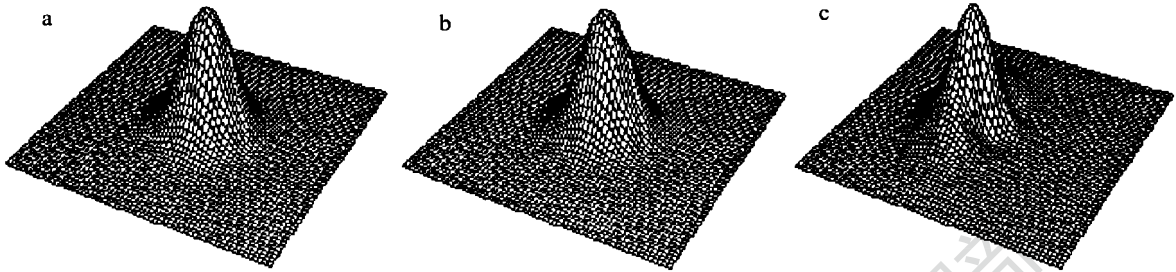


Fig. 1 a—initial intensity distribution of a Gaussian beam b—intensity distribution at the exit of the beam control system c—intensity distribution at the focal plane

Table 1 Numerical calculation results

initial field	$P/10^5 \text{W}$	S_r	$R_{86.5\%}/\text{mm}$	\bar{x}/mm	w_x/mm	w_y/mm	w_y/w_x
Gaussian profile	0.1	0.998	20.3	-0.698	23.9	24.0	1.004
	2	0.677	28.9	-14.0	28.6	43.1	1.507
	2.5	0.545	33.7	-17.5	30.9	50.9	1.647
	4	0.235	49.2	-27.9	39.4	75.7	1.921
flattened Gaussian profile	0.1	0.992	29.4	-1.76	28.9	29.1	1.007
	2	0.950	31.7	-7.05	29.2	32.5	1.113
	2.5	0.925	33.3	-8.81	29.4	34.4	1.170
	4	0.822	39.7	-14.1	30.2	41.7	1.381

图 2 给出了发射功率为 $4 \times 10^5 \text{W}$ 时, 初始场分布为高斯和平顶高斯分布的光束, 在光束控制系统出

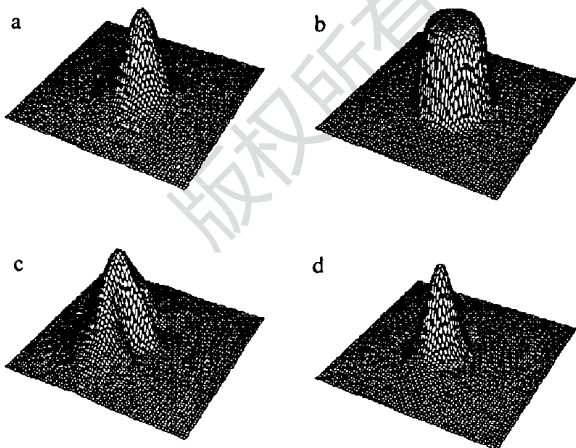


Fig. 2 a—intensity distribution of a Gaussian beam at the exit of the beam control system b—intensity distribution of a flattened Gaussian beam at the exit of the beam control system c—intensity distribution of a Gaussian beam at the focal plane d—intensity distribution of a flattened Gaussian beam at the focal plane

口处和焦面处的光强分布的三维图。表 1 是评价远场光束质量的参数随发射功率变化的数值计算结果。由表 1 可知, Strehl 比随发射功率的增大而减小, 远场 86.5% 环围功率半径 $R_{86.5\%}$ 、重心偏移的绝对值 $|\bar{x}|$ 和像散参数 (w_y/w_x 值) 随发射功率的加大而增大。由于计算中考虑的横向风均为 x 方向, 所以对于表 1 中的各种情况均有 $\bar{y} = 0$ 。表示重心位置的参量 \bar{x} 的值均为负值, 表示光斑重心发生了偏移, 且偏移方向与风向相反。数值计算结果还表明, 当热效应可忽略时, 高斯光束和平顶高斯光束对应的焦面处 86.5% 环围功率半径 $R_{86.5\%}$ 分别为 19.91mm 和 29.3mm 。说明在这种情况下, 高斯光束的聚焦特性要优于平顶高斯光束。但当发射功率大于 $2.5 \times 10^5 \text{W}$, 考虑光束控制系统的热效应后, 平顶高斯光束的 Strehl 比要优于高斯光束, 平顶高斯光束的功率集中度比高斯光束高; 从 w_y/w_x 的值来看, 当功率达到 $2 \times 10^5 \text{W}$ 时, 高斯

(下转第 596 页)

训练样本数, 为一预先设定的小正数。训练结束时, 神经网络内的权值上, 实际已分布存储了传感器的非线性补偿及线性化信息。

2 计算机仿真及结果

用程序模拟前向神经网络模型及(2)式所描述的传感器模型, 对作者提出的方法进行仿真验证。

作者采用的是二维 C202 型位置灵敏传感器, 样本数据每隔 1mm 等间隔选取 6×6 个数据点。神经网络采用 2-14-2 结构, 即输入端将 2 个输入端的信息传递到隐层, 隐层由 14 个双曲正切激活函数的神经元构成, 而输出层由 2 个线性激活函数的神经元构成。用上述样本数据对神经网络进行训练, 动量因子 0.9、学习率 0.7, 经过 20000 迭代计算, 误差平方和为 0.000104。若要求更高的精度, 可以增加训练次数, 但要注意用样本数据之外的测试数据对训练后的神经网络进行测试, 避免因训练过度而影响网络的推广性。

从图 4a 可以看出, 在用神经网络补偿前 PSD 传感器输出受制造工艺的影响, 并且呈明显的非线性, 由此引起的误差在测量时是不容忽视的。由图 4b 可以看出, 经神经网络补偿后, 当测量范围较宽时, 在神经网络的输出端也能得到一个期望的线性输出信号。经测试数据检验, 即上述方法训练后的神经网络有很好的推广能力, 即使将不属于样本数据的

待测坐标值作为传感器的输入, 在神经网络的输出端也能得到一个合适的输出, 如图 4c 所示。

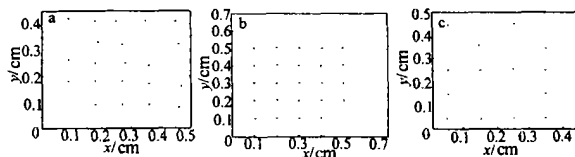


Fig. 4 a—sensor's output b—neural network output c—neural network output

3 结论

PSD 作为一种高准确度、高灵敏度位置传感器, 如何克服非线性带来的影响, 是测量领域关心的问题, 作者所提出的神经网络 BP 算法则弥补了 PSD 的非线性的不足, 从而提高了 PSD 的利用价值。

参考文献

- [1] Wang W J, Itene J, Busch V. IEEE Transactions on Electron Devices, 1989, 36(11): 475 ~ 480.
- [2] 史锦珊. 光电子学及其应用. 北京: 机械工业出版社, 1991: 483 ~ 485.
- [3] 袁红星, 王志兴, 贺安之. 仪器仪表学报, 1999, 20(3): 271 ~ 274.
- [4] Noriega J R, Wang H. IEEE Transactions Neural Networks, 1998, 9(1): 27 ~ 34.
- [5] 侯祥林, 陈长征, 虞和济 *et al.* 东北大学学报(自然科学版), 1999, 20(4): 447 ~ 450.
- [6] 王旭, 王宏, 王文辉. 人工神经网络原理与应用. 沈阳: 东北大学出版社, 2000: 51 ~ 54.

(上接第 516 页)

光束在远场的像散已比平顶高斯光束严重了。

3 小结

编制了强激光大气传输的四维仿真程序, 并对初始场分布为高斯和平顶高斯的光束在光束控制系统内传输的热效应作了数值模拟。计算结果表明, 尽管强激光在光束控制系统内的传输距离很短, 但由于传输通道中的热效应影响, 随发射功率的加大评价远场光束质量的参数 Strehl 比减小, $R_{86.5\%}$ 和 w_y/w_x 增大, 这意味着远场功率集中度下降, 像散变得严重, 光束质量变差。远场光束质量与发射光束初始场分布有关。当发射功率增加到一定值(本文中计算例为 $P = 2.5 \times 10^5 \text{W}$)后, 平顶高斯光束的远场光束质量要优于高斯光束。

作者曾就仿真程序有关问题与中科院光电所金钢研究员和刘顺发博士进行了有益的讨论, 特此致谢!

参考文献

- [1] Smith D C. Proc IEEE, 1977, 65(12): 1679 ~ 1714.
- [2] Gebhardt F G. SPIE, 1990, 1221: 2 ~ 25.
- [3] Karr T J. SPIE, 1990, 1221: 26 ~ 57.
- [4] Fleck J A, Morris J R, Feit M D. Appl Phys, 1976, 10: 129 ~ 160.
- [5] 陈栋泉, 李有宽, 徐锡申 *et al.* 强激光与粒子束, 1993, 5(2): 243 ~ 252.
- [6] 金钢, 刘顺发, 李树民 *et al.* 中国激光, 2002, A29(10): 895 ~ 899.
- [7] 刘顺发, 金钢, 陈洪斌 *et al.* 光电工程, 2001, 28(6): 14 ~ 16, 72.
- [8] 吕百达. 强激光的传输与控制. 北京: 国防工业出版社, 1999: 65 ~ 68.
- [9] Lü B D, Luo S R, Zhang B. J Mod Opt, 1999, 46(12): 1753 ~ 1762.