

文章编号 : 0258-7025(2002)10-0895-05

激光热效应对光束控制系统发射 光束质量的影响

金 钢^{1,2}, 刘顺发¹, 李树民², 陈洪斌¹, 马佳光¹

(¹ 中国科学院光电技术研究所, 国家 863 计划光束控制重点实验室, 四川成都 610209)
(² 中国空气动力研究与发展中心计算空气动力学研究所, 四川绵阳 621000)

提要 采用数值计算方法分析了较高能量密度激光在光束控制系统内所产生的热效应对远场光斑质量和能量分布的影响。激光传输由近轴波方程描述, 采用像屏法和快速傅里叶变换技术求解。激光加热引起的气流扰动及气体介质密度变化采用完全的 Navier-Stokes 方程描述, 以便考虑各种不同因素的影响。Navier-Stokes 方程求解采用 LU-SGS 分解技术。数值计算结果表明, 在典型情况下, 热晕引起的附加热相位会明显增大发射激光的发散, 降低目标处激光能量集中度和远场光斑质量。这一方法还可扩展应用于其他气动光学问题研究。

关键词 激光传输, 热晕, 相屏法, 快速傅里叶变换, Navier-Stokes 方程, 湍流, 气动光学

中图分类号 TN 012 文献标识码 A

Laser Thermal Effects in Beam Control System on the Emitted Laser Quality

JIN Gang^{1,2}, LIU Shun-fa¹, LI Shu-min², CHEN Hong-bin¹, MA Jia-guang¹

(¹ Institute of Optics and Electronics, The Chinese Academy of Sciences,
Beam Control Key Laboratory of National 863 Program, Chengdu, Sichuan 610209)
(² China Aerodynamics Research & Development Center, Mianyang, Sichuan 621000)

Abstract The thermal effects, produced by the high-energy laser in a beam control system, are numerically analyzed in this paper. The effects on the laser density and beam facula quality at far-field are studied in particular. The propagation of laser is described by the paraxial wave equations, solved by the phase-screen technique and the FFT method. The thermal turbulence motion and the air density variation are governed by the complete Navier-Stokes equations, so that the variety factors could be in consideration. The Navier-Stokes equations are solved by using the LU-SGS factorization technique. The numerical results show that, with the additional initial thermal-phase at the emitter exit, the energy density and the quality of the laser beam at far field would be prominently degraded for the typical situations.

Key words laser propagation, thermal blooming, FFT, Navier-Stokes equations, turbulence, aero-optics, transmit-focus system

1 引 言

一系列理论和实验研究表明^[1~5], 当较高能量激光通过大气传输时, 其一小部分能量被空气中的特殊分子和气溶胶吸收, 使得传输路径上的空气被加热, 气体以声速膨胀, 密度降低以使压力趋于平衡, 从而导致传输路径上的气体介质的折射率下降, 产生一个负透镜效应, 使光束发散, 即所谓热晕现

象。当存在侧向风时, 下风空气密度降低, 下风的折射率减小, 会形成特有的弯向上风的新月型光束分布, 造成激光束的畸变、弯曲和发散, 降低激光光束的质量和激光能量的集中度。

本文采用数值分析计算方法, 研究了光束控制系统内高能激光传输热效应对远场光斑质量和能量分布的影响。激光束的传播由近轴波方程描述, 采

收稿日期 2001-07-24; 收到修改稿日期 2001-10-08

作者简介: 金钢(1958.5—)男, 博士, 中国科学院光电技术研究所研究员, 博士生导师, 主要从事激光传输变换、光电探测技术研究。E-mail: gjin@ioe.ac.cn

用像屏法和快速傅里叶变换技术求解,流场计算采用 LU 分解技术数值求解完全的 Navier-Stokes 方程。计算结果表明,在典型的工作条件和状态下,高能激光在光束控制系统内产生的热效应影响不容忽视,它会明显增加发射激光的发散角,降低远场目标处的激光能量集中度,而且其导致的激光束相位畸变在远场会被明显地“放大”。

2 激光传播方程

激光光束光场 E 由标量包络 ψ 描述

$$E = \psi(x, y, z, t) e^{i(\omega t - kz)} \quad (1)$$

其中

$$\psi = A e^{-\alpha_0 z/2} \quad (2)$$

缓变振幅近似下 A 满足近轴波方程

$$2ik \frac{\partial A}{\partial z} = \nabla_{\perp}^2 A + k^2 \left(\frac{n^2}{n_0^2} - 1 \right) A \quad (3)$$

其中

$$\nabla_{\perp}^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \quad (\text{直角坐标})$$

以上各式中, z 为沿光束路径的传播距离, α 为介质的消光系数, $k = 2\pi/\lambda$ 为在均匀介质中的波数, n_0 和 n 分别是未扰动折射率以及光作用后介质的折射率。

采用相屏法,方程(3)的解可写成真空波方程的解 A_{vac} 叠加一介质折射率扰动引起的相位变化,即

$$A = A_{\text{vac}} \exp(-ik\Delta z \delta \epsilon) \quad (4)$$

真空波方程为

$$2ik \frac{\partial A_{\text{vac}}}{\partial z} = \nabla_{\perp}^2 A_{\text{vac}} \quad (5)$$

将 A_{vac} 简记作 A , 展成二维傅里叶级数

$$A(x, y, z) = \sum_{l=-N_x/2}^{N_x/2-1} \sum_{m=-N_y/2}^{N_y/2-1} A_{lm}(z) \times \exp\left[\frac{i2\pi}{L}(lx + my)\right] \quad (6)$$

代入(5)式,并比较方程两边同幂次项系数,从而有

$$2ik \frac{\partial A_{lm}(z)}{\partial z} = \left[-\left(\frac{2\pi}{L}\right)^2 (l^2 + m^2) \right] A_{lm}(z) \quad (7)$$

其解为

$$A_{lm}^{n+1} = A_{lm}^n \exp\left[\frac{i}{2k} \left(\frac{2\pi}{L}\right)^2 (l^2 + m^2) \Delta z\right] \quad (8)$$

(4)式中,由 z_n 至 z_{n+1} 面,介质折射率扰动引起的相位变化为

$$\delta\varphi_B = -k\Delta z \delta\epsilon \quad (9)$$

其中

$$\delta\epsilon = \frac{1}{\Delta z} \int_{z_n}^{z_{n+1}} \left(\frac{n^2}{n_0^2} - 1 \right) dz \quad (10)$$

大气折射率与密度的关系为^[1]

$$n - 1 = \kappa\rho \quad (11)$$

因此,只要通过流体热运动方程求得气体介质密度变化即可确定激光传播光场分布。

3 流场控制方程

在直角坐标系下,无量纲守恒形式的 Navier-Stokes 方程为

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial E}{\partial x} + \frac{\partial F}{\partial y} + \frac{\partial G}{\partial z} = \frac{\partial E_V}{\partial x} + \frac{\partial F_V}{\partial y} + \frac{\partial G_V}{\partial z} + S \quad (12)$$

方程(12)包含质量方程、动量方程和能量方程,其各参量具体形式可由任何一本流体动力学教科书得到^[6]。Navier-Stokes 方程是描述流体运动的基本方程,可以反映包括湍流、化学反应等复杂流动的规律和特性。对于本文所处理的问题,方程(12)中的源项 S 可表示为

$$S_{\rho} = S_u = S_w = 0, S_v = \rho g, S_e = \alpha I + vg \quad (13)$$

下标 u, v, w 为直角坐标系 (x, y, z) 下对应的速度分量, ρ, e 分别为流体的密度和内能, g 为重力加速度, I 为激光光强, α 为气体介质对激光的吸收系数。

为求解方便,引入无量纲参数和坐标变换,将 Navier-Stokes 方程变换到一般坐标系 (ξ, η, ζ, τ) 下,变换后的方程形式为

$$\frac{\partial \hat{Q}}{\partial \tau} + \frac{\partial \hat{E}}{\partial \xi} + \frac{\partial \hat{F}}{\partial \eta} + \frac{\partial \hat{G}}{\partial \zeta} = \frac{\partial \hat{E}_V}{\partial \xi} + \frac{\partial \hat{F}_V}{\partial \eta} + \frac{\partial \hat{G}_V}{\partial \zeta} + S' \quad (14)$$

其中

$$\begin{aligned} \hat{Q} &= Q/J \\ \hat{E} &= (\xi Q + \xi_x E + \xi_y F + \xi_z G)/J \\ \hat{F} &= (\eta Q + \eta_x E + \eta_y F + \eta_z G)/J \\ \hat{G} &= (\zeta Q + \zeta_x E + \zeta_y F + \zeta_z G)/J \\ \hat{E}_V &= (\xi_x E_v + \xi_y F_v + \xi_z G_v)/J \\ \hat{F}_V &= (\eta_x E_v + \eta_y F_v + \eta_z G_v)/J \\ \hat{G}_V &= (\zeta_x E_v + \zeta_y F_v + \zeta_z G_v)/J \end{aligned} \quad (15)$$

J 为雅可比矩阵。

4 流场控制方程求解方法

采用隐式方法求解方程(14),得到一个非线性方程组,即

$$\begin{aligned} & \frac{V \cdot \partial Q}{\partial \tau} + \omega \left(\frac{\partial \hat{E}}{\partial \xi} + \frac{\partial \hat{F}}{\partial \eta} + \frac{\partial \hat{G}}{\partial \zeta} \right)^{(n+1)} + \\ & (1 - \omega) \left(\frac{\partial \hat{E}}{\partial \xi} + \frac{\partial \hat{F}}{\partial \eta} + \frac{\partial \hat{G}}{\partial \zeta} \right)^{(n)} = \\ & \left(\frac{\partial \hat{E}_v}{\partial \xi} + \frac{\partial \hat{F}_v}{\partial \eta} + \frac{\partial \hat{G}_v}{\partial \zeta} \right)^{(n)} + S' \end{aligned} \quad (16)$$

其中 $V = 1/K$ (即单位体积)

将(16)式沿时间方向展开,舍去高阶项,并令

$$\begin{aligned} \delta \hat{Q} &= \hat{Q}^{(n+1)} - \hat{Q}^{(n)}, \text{ 有} \\ \frac{V}{\Delta \tau} \delta Q + \omega \left[\frac{\partial}{\partial \xi} (A \delta Q) + \frac{\partial}{\partial \eta} (B \delta Q) + \frac{\partial}{\partial \zeta} (C \delta Q) \right] &= \\ \text{RHS} + S' \end{aligned} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} \text{RHS} &= - \left(\frac{\partial \hat{E}}{\partial \xi} + \frac{\partial \hat{F}}{\partial \eta} + \frac{\partial \hat{G}}{\partial \zeta} \right)^{(n)} + \\ & \left(\frac{\partial \hat{E}_v}{\partial \xi} + \frac{\partial \hat{F}_v}{\partial \eta} + \frac{\partial \hat{G}_v}{\partial \zeta} \right)^{(n)} \end{aligned} \quad (18)$$

其中 A, B, C 分别是三个方向的对流量对 Q 的雅可比矩阵, $\omega = 1$ 代表时间方向一阶精度, $\omega = 1/2$ 代表时间方向二阶精度。将方程(17)离散并整理后,可得

$$D_- \delta Q_- + D \delta Q + D_+ \delta Q_+ = \frac{1}{\omega} \text{RHS} \quad (19)$$

式中

$$D = \left[\frac{V}{\omega \Delta t} + \beta (r_A + r_B + r_C) \right] I \quad (20)$$

r_A, r_B, r_C 分别为系数矩阵 A, B, C 的谱半径。

对(19)式左端采用 LU 分解技术^[7],对 RHS 的计算,采用 Roe 平均并结合数值 Riemann 不变量和通量限制器的概念,构造了具有迎风性质的半离散格式。计算实践表明,LU 处理对 Navier-Stokes 方程求解可收到快速稳定收敛的效果,由于采用了对角化处理减少了大量的矩阵运算,使得计算效率大大提高。

5 计算结果及讨论

通过编程仿真计算了高能 CO_2 激光在光束控制传输通道上产生的热效应,以及由此导致的激光束相位改变引起的远场光斑变化情况。初始激光强度取高斯分布,其电场强度为

$$E = E_0 \exp \left(i \frac{kr^2}{2z_f} - \frac{r^2}{2a^2} \right) \quad (21)$$

各计算参数为:波长 $\lambda = 10.6 \mu\text{m}$,光束直径 $a = 0.1 \text{ m}$ 和 0.15 m ,焦距 $z_f = 10^6 \text{ m}$,激光初值功率 P

$= 5.0 \times 10^4 \text{ W}$ 和 $5.0 \times 10^5 \text{ W}$,气压 $p_0 = 1.01325 \times 10^5 \text{ Pa}$,空气吸收系数 $\alpha = 6.5 \times 10^{-5} \text{ m}^{-1}$,比热 $\gamma = 1.4$, $n_0 - 1 = 3.0 \times 10^{-4}$,计算了无风的情况,即 $v_0 = 0 \text{ m/s}$ 。考虑了在光束控制系统传输通道中的传播距离分别为 $z_i = 5 \text{ m}$ 和 $z_i = 10 \text{ m}$ 的情况。扩束后在光束控制系统以外至远场的传播假定大气湍流效应和热晕效应可忽略,即假定为自由空间传播。图 1 为光路示意图,数值实验分组如表 1 所示。

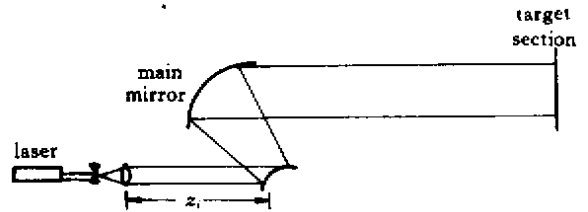


图 1 光路示意图

Fig.1 Sketch of optical path

表 1 数值实验分组

Table 1 Numerical tests

	T1a	T1b	T2a	T2b	T3
P / kW	50	50	500	500	500
a / m	0.1	0.1	0.1	0.1	0.15
z_i / m	5	10	5	10	5

图 2(a)(b)所示分别为 T1a 和 T1b 条件下发射光束在光束控制系统出口处 ($z = 0 \text{ m}$) 以及 $z = 1.0 \text{ km}$ 和 2.0 km 处的远场光强分布情况。无论在光束控制系统内的传输距离是 5 m 还是 10 m ,光斑内部细微结构均无明显变化,能量保持良好的高斯型分布,相对于出口处,在 2 km 距离上,85% 包围能量的光斑直径仅分别增大 1.08 倍和 1.14 倍,说明热效应影响不是很大。

图 2(c)所示为 T2a 条件下发射光束在不同距离上的光强分布情况。在 1 km 和 2 km 距离上,85% 包围能量的光斑直径分别增大了 1.48 倍和 1.88 倍。尽管在 $z = 0$ 处肉眼看不出光斑形状有什么变化,呈现良好的高斯型分布,但远场光斑内部却显现出新月形结构,反映出光束控制系统内部激光热效应产生的热对流所引起的相位畸变。对于 T2b 的情况(图 2(d)),光束控制系统内部激光热效应造成的光束发散和畸变愈加严重,在 1 km 和 2 km 距离

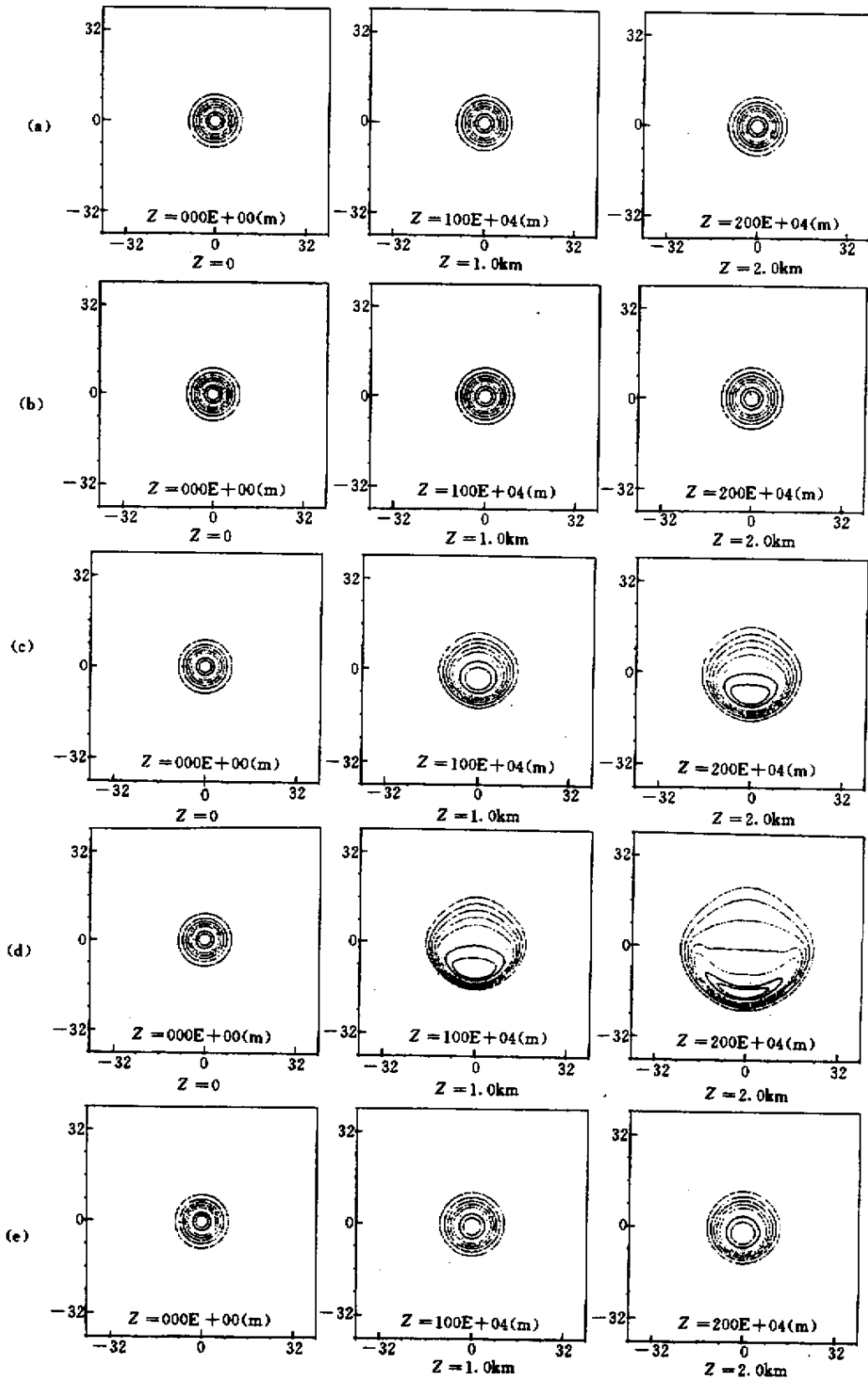


图 2 不同位置处 85% 环围能量光斑激光能量分布

Fig. 2 Iso-contour of laser intensity at different positions

(a) T1a ; (b) T1b ; (c) T2a ; (d) T2b ; (e) T3

上 85% 环围能量的光斑直径分别增大了 1.89 倍和 2.49 倍, 新月型光斑能量分布更加显著。

光束控制系统中的这种由于激光对气体介质加热所产生的热效应会使系统的实际光学筒长发生变化, 对系统的成像产生很大影响。例如在 T2b 情况下, 如果系统发射主镜为口径 1 m 的球面镜, 预期聚焦位置在 1 km 处, 通过简单计算可知, 由于上述激光热效应的影响, 实际聚焦位置将会移至约 1.8 km 处, 产生极大偏离, 也即激光热效应相当于使系统产生约 1 mm 的焦移。若聚焦位置更远, 偏离会更严重。

如果将光斑直径增大至 0.15 m (T3), 激光热效应影响明显降低。如图 2(d)(e) 所示, 激光波前畸变不是很突出, 光斑直径在 1 km 和 2 km 距离上分别只增加到了出口处的 1.18 倍和 1.39 倍。

从以上结果可以看出, 光束控制系统产生的热效应会严重影响激光束在大气中的传播。当激光强度足够高时, 热效应将给激光束带来不容忽视的附加加热相位。尽管在光学发射系统出口处此相位畸变显得微乎其微、难以辨别, 但其影响经激光长程传输后将明显突现出来。由于这一附加加热相位, 远场光斑质量和激光能量集中度会明显衰退。

6 结 语

本文采用数值计算分析方法研究了光束控制系统内高能激光细光束传播对其长程传播的影响。激光传播用近轴波方程描述, 采用像屏法和快速傅里叶变换技术求解。气体密度变化采用完全的 Navier-Stokes 方程计算, Navier-Stokes 方程求解采用了强隐

式方法和 LU 分解技术。本文采用的流场求解技术具有较高精度, 可以求解外界风速为零的情况, 并能够较好地处理多种复杂因素的影响, 包括热对流和湍流的影响等, 这是采用其他方法所难以解决的。数值实验结果表明, 在激光强度足够高的情况下, 光束控制系统产生的热效应可严重影响远场光斑。由于气体介质被加热后的热流运动, 将使发射激光束附加一个初始热位相, 从而使得远场的激光能量集中度大大降低, 且光斑形状可产生严重畸变。

值得指出的是本文方法具有一般性的特点, 因而易于应用到其他气动光学问题的处理。

参 考 文 献

- 1 J. W. Strohbehn, J. L. Walsh, P. B. Ulrich *et al.*. Laser Beam Propagation in the Atmosphere [M]. Berlin : Springer-Verlag, 1978
- 2 F. G. Gebhardt. Twenty-five years of thermal blooming : an overview [C]. *SPIE*, 1990, **1221** 2 ~ 25
- 3 T. J. Karr. Instabilities of atmospheric laser propagation [C]. *SPIE*, 1990, **1221** 26 ~ 57
- 4 Chen Dongquan, Li Youkuan, Xu Sishen *et al.*. Numerical simulation of thermal blooming in atmospheric laser propagation [J]. *High Power Laser and Particle Beams* (强激光与粒子束), 1993, **5**(2) 243 ~ 252 (in Chinese)
- 5 P. I. Shen, M. Andrepont. Thermal blooming of HEL in the non-flowing beam tube with various wall temperatures [C]. *SPIE*, 2000, **4034** 100 ~ 107
- 6 W. Y. Wu. Fluid Mechanics [M]. Beijing : Publisher of the Peking University, 1982 (in Chinese)
- 7 H. Rieger, A. Jameson. Solution of steady three-dimensional compressible Euler and Navier-Stokes equations by an implicit LU scheme [C]. AIAA-88-0619, 1981