

# 旋转光束气体热效应的仿真分析

孙运强<sup>1,2,3</sup> 刁锋杰<sup>1,2,3</sup> 陈洪斌<sup>1</sup> 刘顺发<sup>1</sup> 王继红<sup>1</sup> 许晓军<sup>2</sup> 陆启生<sup>2</sup>

<sup>1</sup>中国科学院光电技术研究所光束控制国家重点实验室, 四川 成都 610209  
<sup>2</sup>国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073  
<sup>3</sup>中国科学院研究生院, 北京 100049

**摘要** 激光非均匀加热效应严重影响着激光能量的远距离传输。对于矩形平顶光束, 在有轴向流存在的情况下, 采用光束旋转的方式, 借助商用的计算流体力学(CFD)软件 Fluent, 对激光在内通道中传输的气体热效应问题进行了仿真分析。仿真结果表明, 激光束在横截面内的旋转, 并不改变光场与气体耦合热效应到达稳态的时间。但是光束旋转效应使得光强非均匀分布带来的二阶像散项基本消失, 光程差中只包含沿光轴方向对称的离焦项和球差项。而离焦项是便于校正的, 因此光束旋转能够改善激光在内通道中的传输特性。

**关键词** 大气光学; 气体热效应; 非均匀光束; 管道轴向流; 旋转光束

**中图分类号** TN012 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.0402012

## Simulation and Analysis of Thermal Effect of Rotary Beam

Sun Yunqiang<sup>1,2,3</sup> Xi Fengjie<sup>1,2,3</sup> Chen Hongbin<sup>1</sup> Liu Shunfa<sup>1</sup>  
Wang Jihong<sup>1</sup> Xu Xiaojun<sup>2</sup> Lu Qisheng<sup>2</sup>

<sup>1</sup>National Key Laboratory of Beam Control, Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China  
<sup>2</sup>College of Opto-Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China  
<sup>3</sup>Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract** Heterogeneous heating of the laser beam is one of the most important effects on the beam propagating through the atmosphere. For the intensity distribution of the flat-topped rectangular beam, the rotary laser beam is adopted to weaken the thermal effects induced by the heterogeneous beam intensity distribution. Based on the computational fluid dynamics(CFD) software of Fluent, thermal effects of the beam in the line pipe with axial pipe flow are modeled. The results indicate that the second order astigmatism which is one of the greater components of optical path difference(OPD) induced by the heterogeneous beam intensity distribution is almost vanished because of the rotary laser beam, while the defocus and the spherical aberration which are the other greater components of the OPD are still exist. The effect of rotary laser beam does not affect the time of the thermal effects reaching the steady state. So the rotary beam effect can improve the beam propagating property.

**Key words** atmospheric optics; thermal effect; heterogeneous beam; axial pipe flow; rotary beam

**OCIS codes** 010.1290; 140.6810; 190.4870

## 1 引言

激光束在复杂的管道中传输时, 管道中的气体会吸收激光束能量, 引起管道中气体的温度升高, 导致其密度和折射率发生变化, 进而影响激光的远距

离传输, 降低激光到达远场的能量集中度<sup>[1~5]</sup>。为了消弱内通道中的气体热效应, 一般是在通道内注入低吸收系数的气体<sup>[6~9]</sup>。在激光光强分布均匀的情况下, 气体热效应引起的温度分布一般是轴对称

收稿日期: 2010-08-12; 收到修改稿日期: 2010-11-01

基金项目: 中国科学院重点实验室预研基金(A09k002)资助课题。

作者简介: 孙运强(1978—), 男, 博士研究生, 主要从事激光大气传输方面的研究。E-mail: sunyunqiang203@163.com

导师简介: 陈洪斌(1953—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事光学和光束控制技术等方面的研究。

E-mail: chbin@ioe.ac.cn

的,光程差以离焦项为主。而在激光光强分布非均匀的情况下,气体热效应引起的相差,除离焦项外,还包含其他高阶的相差,这给自适应光学校正带来一定的难度。对于非均匀光强分布的气体热效应问题,国外进行了相关的研究<sup>[10]</sup>,但由于特殊原因,具体细节报道得很少。为削弱激光光强非均匀分布带来的不利影响,国内采用激光光束旋转的方式。

为了对旋转光束与气体的耦合热效应机理做进一步的研究,本文对内通道中的旋转光束气体热效应进行了仿真分析。

## 2 理论基础

内通道中气体的热晕效应,本质上是光场与流场的耦合相互作用。由于气体对光场能量有一定的吸收,因此,光场充当了流场的附加能量源项。流场受到光场的非均匀加热,会产生不均匀的温度场,改变流场的折射率分布,从而影响激光束的进一步传输。

对于光场的传输,根据麦克斯韦方程组,在标量近似和近轴近似情况下,各向同性介质中的光传输方程可表示为

$$i2k \frac{\partial A}{\partial z} = \nabla_{\perp}^2 A + k^2 \left( \frac{n^2}{n_0^2} - 1 \right) A, \quad (1)$$

式中  $A$  为光波复振幅,  $z$  为光传输方向,  $k = 2\pi/\lambda$  为光波在真空中的波数,  $\lambda$  为光波长,  $n$  和  $n_0$  分别是有、无光场和流场耦合相互作用时的介质折射率。

较为严格的光传输计算一般采用菲涅耳衍射积分的方法,而非涅耳积分又可以表示为傅里叶变换及卷积两种形式。傅里叶变换算法主要适用于衍射距离较大的情况,而卷积形式的菲涅耳衍射积分算法,主要用于物光场的高频角谱分量较小以及衍射距离较短的情况。激光在内通道中进行光传输时,光场与流场耦合相互作用引起的相位畸变,主要是低频成分,而且光在内通道中的传输距离也较短。因此采用卷积形式的菲涅耳衍射积分算法,对内通道中的光传输进行计算。

光传输计算的菲涅耳衍射积分形式为

$$A(x, y) = \frac{\exp(ikz)}{i\lambda z} \exp\left[\frac{ik}{2z}(x^2 + y^2)\right] \times \int \int_{-\infty}^{\infty} \left\{ A_0(x_0, y_0) \exp\left[\frac{ik}{2z}(x_0^2 + y_0^2)\right] \right\} \times \exp\left[\frac{i2\pi}{\lambda z}(x_0 x + y_0 y)\right] dx_0 dy_0. \quad (2)$$

用卷积的方法对(2)式进行求解,其形式可表

示为

$$A(x, y) = \mathcal{F} \{ \mathcal{F}[A_0(x_0, y_0)] H_F(f_x + f_y) \}, \quad (3)$$

式中  $H_F(f_x + f_y)$  为菲涅耳衍射的传递函数,可表示为

$$H_F(f_x + f_y) = \exp\left\{ ikz \left[ 1 - \frac{\lambda^2}{2}(f_x^2 + f_y^2) \right] \right\}. \quad (4)$$

通过对光传输方程的计算,即可得到内通道中的光强分布,进而可以求解光场流场的能量耦合方程。对于内通道中的流场,气流速度一般较低,温度场的相对变化不大,可以作等压近似处理。在等压近似情况下,流场的能量控制微分方程可表示为

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla T - \epsilon \nabla^2 T = Q / (\rho_0 C_p), \quad (5)$$

式中  $T$  为气体的温度,  $\rho_0$  为气体的密度,  $C_p$  为气体的定压热容,  $\mathbf{v}$  为气体的速度矢量,  $\epsilon$  为气体的扩散率,  $Q$  为能量源项。对于光场和流场耦合相互作用时的热效应问题,能量方程中的源项可表示为两部分,即:  $Q = Q_0 + \alpha I$ 。其中  $Q_0$  是包含了气体粘性和重力作用而引入的能量源项,  $\alpha I$  为气体吸收光能而引入的源项,  $\alpha$  为气体吸收系数,  $I$  为光强。

从(5)式可以看出,气体温度场分布与激光光强分布密切相关,而目前的高功率激光器,光强分布往往很不均匀。为了得到较为均匀的温度场分布,采用光束旋转的方式进行校正。取初始的光强分布为一维平顶高斯光束,用高斯函数的形式进行展开<sup>[11]</sup>,展开式为

$$I(x, y) = I_0 \sum_{n=0}^N \frac{1}{n!} \left( \frac{y^2}{\omega_{0N}^2} \right)^n \exp\left(-\frac{y^2}{\omega_{0N}^2}\right), \quad (6)$$

式中  $\omega_{0N} = \omega_0 / \sqrt{N+1}$ ,  $N$  为展开的阶数,  $I_0$  为常数,  $\omega_0$  为光斑半径。

当光束在横截面内旋转时,根据坐标变换理论,沿光轴方向,光束旋转角度  $\theta$  后的光强分布可表示为

$$I(x, y) = I_0 \sum_{n=0}^N \frac{1}{n!} \left[ \frac{(-x \sin \theta + y \cos \theta)^2}{\omega_{0N}^2} \right]^n \times \exp\left[-\frac{(-x \sin \theta + y \cos \theta)^2}{\omega_{0N}^2}\right]. \quad (7)$$

旋转角度  $\theta$  是出光时间与旋转角速度的乘积,即:  $\theta = \omega t$ 。在对能量耦合方程进行离散求解时,假设离散时间间隔为  $\Delta t$ ,则第  $m$  个时间步对应的光束旋转角度为  $\theta_m = m\Delta\theta$ 。其中  $\Delta\theta = \omega\Delta t$  为每一离散时间步对应的光束旋转角度。将旋转后的光强分布代入流场能量方程,通过数值求解的方法,即可得到

$t = m\Delta t$  时刻流场的温度分布。在等压近似情况下，气体介质的折射率分布可由温度分布表示，即： $n = n_T T$ 。其中  $n_T$  为气体的温度折射率梯度。因此，得到第  $m$  个时间步的温度分布，即可对第  $m + 1$  时间步的光传输方程进行求解。

对流场控制方程，采用商用的计算流体力学 (CFD) 软件 Fluent 进行求解。对光传输方程，则以自编程序进行计算。通过用户自定义函数的形式，将气体吸收的光能作为能量源项，耦合到流场的能量方程中，从而实现光场与流场的耦合相互作用。具体的计算流程如图 1 所示。

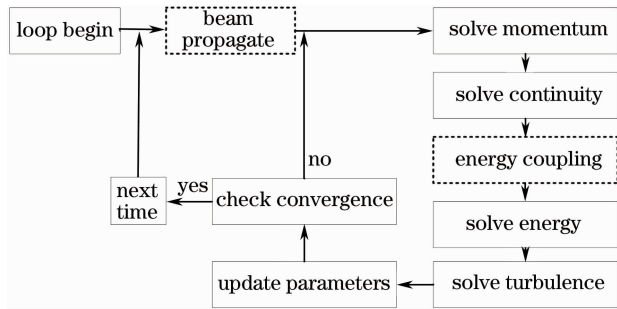
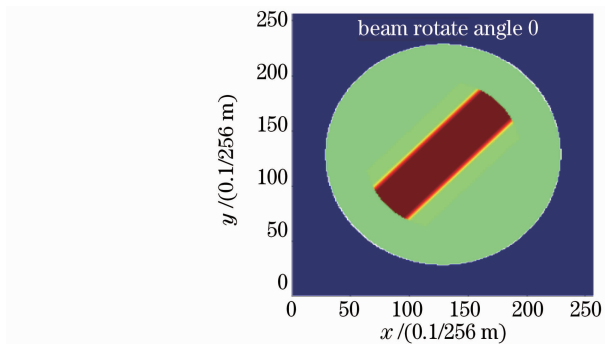


图 1 光场流场耦合相互作用流程图  
Fig. 1 Simulation model for the optics and fluid coupling



### 3 仿真计算及结果分析

针对较为简单的直圆型管道结构，在有轴向流存在的情况下，对管道内旋转光束的气体热效应进行了仿真。计算所采用的参数列于表 1。

表 1 管道结构及流场条件参数

Parameters	Value
Energy ( $al$ ) / (W/m <sup>3</sup> )	1000
Density $\rho$ / (kg/m <sup>3</sup> )	1.25
Capacity $C_p$ / [J/(kg · K)]	1000
Tube radius $r$ / m	0.05
Tube length $L$ / m	1
Velocity $v$ / (m/s)	1

计算所采用的光强分布为矩形平顶光束，具体表达式如(6)式所示，光强分布形式如图 2 所示。激光功率密度与气体吸收系数的乘积取为 1000 W/m<sup>3</sup>，矩形光束的长边长与管道直径之比为 1:1.5。

对于光场和流场耦合热效应问题，流场对光场的影响，主要体现在热效应引起的光程差 (OPD,  $D_{OP}$ ) 上。在管道出口处，气体热效应引起的 OPD

$$\text{可表示为: } D_{OP} = n_T \int_0^z T dz \approx \int_0^z T dz .$$

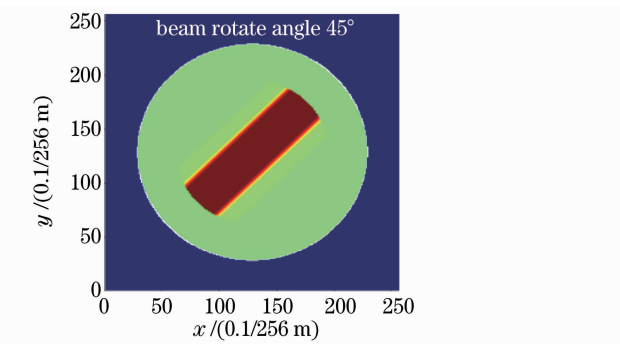


图 2 不同光束旋转角下矩形平顶光束的光强分布

Fig. 2 Beam intensity distribution of the flat-roofed rectangle with different beam rotary angles

对光场流场耦合方程进行数值计算时，取每一离散时间步所对应的光束旋转角度为恒定值  $\Delta\theta = \omega\Delta t = \pi/6$ ，不同的离散时间间隔对应的光束旋转角速度是不同的。在离散时间间隔取不同值的情况下，管道出口截面上，气体热效应引起的 OPD 的峰谷值 (PV) 随时间的变化情况如图 3 所示。

图 3 中的数据表明，在光束旋转角速度取不同值的情况下，流场温度分布达到稳态的时间基本保持不变。对于光场流场耦合热效应问题，流场温度分布到达稳态的时间与管道结构、气体速度、气体热传导系数有关。在管道结构与气体参数不变的情况下，光束旋转只会改变气体的径向温度分布，并不改

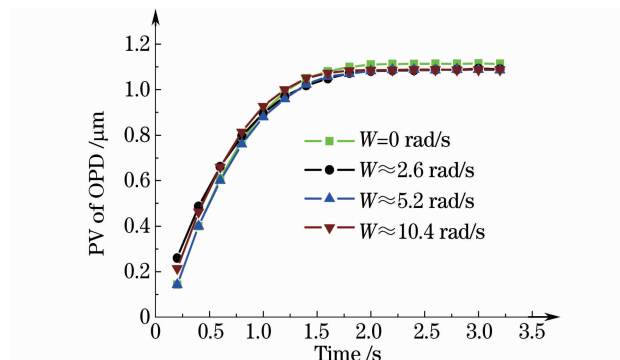


图 3 OPD 的 PV 值随时间的变化

Fig. 3 PV of OPD varied with the laser exposing time

变气体的热传导系数,因此流场温度分布达到稳态的时间基本保持不变。对于长度为 1 m 的管道,风速为 1 m/s 时,出光 1.5 s 后光场流场耦合热效应基本达到稳态。为了观察光束旋转对流场温度分布

的影响情况,对不同的光束旋转角速度,记录了稳态情况下管道出口处气体热效应所引起的 OPD 分布,结果如图 4 所示。

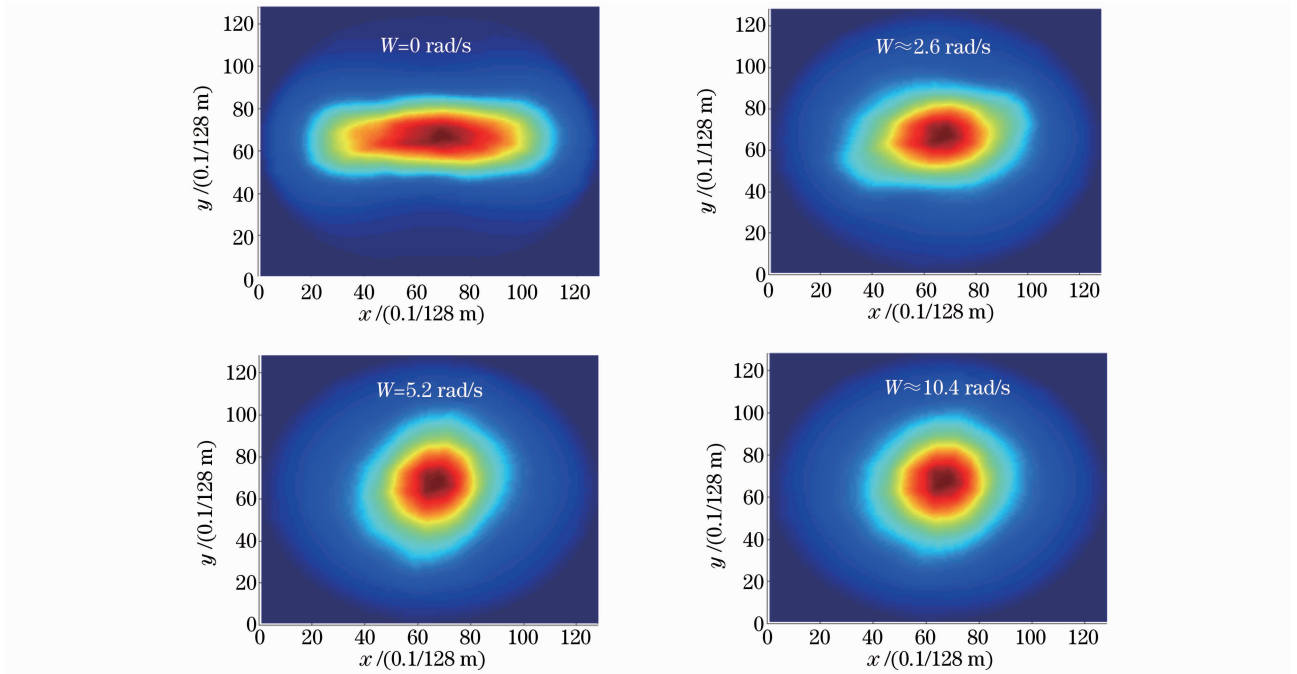


图 4 不同旋转角速度情况下对应的 OPD 分布  
Fig. 4 OPD of different beam rotating velocities

从图 4 可以看出,光束在内通道中传输时,在与传输方向垂直的横截面内的光束旋转效应,会使得光强非均匀分布引起的 OPD 分布发生变化。随着旋转角速度的增加,稳态情况下气体热效应引起的 OPD 趋向于轴对称分布。

为了更直观地反映光束旋转角速度对 OPD 分布的影响,对稳态情况下气体热效应引起的 OPD 进行了泽尼克多项式分解,并记录了不同旋转角速度对应 OPD 的前 15 阶泽尼克系数,结果如图 5 所示。

在对 OPD 进行泽尼克多项式分解时,泽尼克多项式是按文献[12]中的方式进行定义的。其中第 1 阶泽尼克系数对应的活塞项,第 5 阶泽尼克系数对应的是离焦项,第 8 阶泽尼克系数对应的是彗差项,第 13 阶泽尼克系数对应的是球差,而第 14 阶泽尼克系数对应的是二阶像散项。从图 5 的结果可以看出,对于一维平顶光束,不采取光束旋转时( $\omega=0$ ),气体热效应引起的 OPD 除含有离焦和球差外,还包括较大的二阶像散项。当采取光束旋转后( $\omega \neq 0$ ),OPD 中沿光轴方向对称的离焦项和球差项保持不变,光强不均匀分布带来的二阶像散项基本消失,而离焦项在实际工程中是便于校正的。

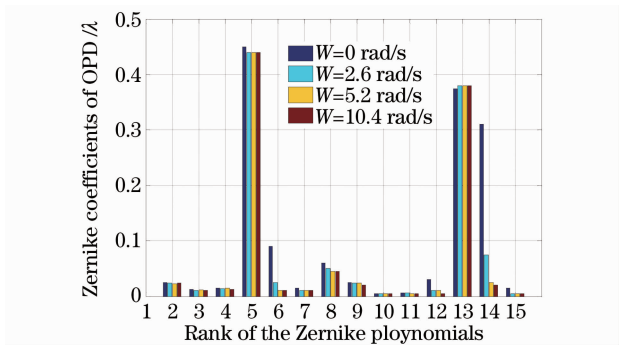


图 5 不同旋转角速度对应光程差的前 15 阶泽尼克系数  
Fig. 5 Zernike polynomials coefficients of the OPD of different beam rotating velocities

### 4 结 论

针对非均匀的光强分布,采用光束旋转的方式,对内通道中的气体热效应问题进行了分析。对光场与流场的耦合控制方程,借助商用的 CFD 软件 Fluent,通过用户自定义函数的形式,将气体吸收的光能以能量源项的形式耦合到流场能量方程中,从而实现光场与流场的耦合相互作用。在有轴向流存在的情况下,针对较为简单的直圆型管道结构,对管

道内旋转光束的气体热效应进行了仿真计算。结果表明,光束旋转角速度取不同值的情况下,流场温度分布达到稳态的时间基本不变。而采取光束旋转后,光强非均匀分布带来的二阶像散项基本消失,OPD中只包含沿光轴对称的离焦项和球差项。因此,当光强分布不均匀时,采取光束旋转的方式,在一定程度上可以削弱气体热效应引起的OPD的不均匀分布。

### 参 考 文 献

- 1 F. G. Gebhardt. Twenty-five years of thermal blooming—an overview[C]. *SPIE*, 1992, **1221**: 2~25
- 2 B. Johnson, C. A. Primmerman. Experimental observation of thermal-blooming phase-compensation instability[J]. *Opt. Lett.*, 1989, **14**(12): 639~641
- 3 D. C. Smith. High-power laser propagation: thermal blooming [C]. Proc. IEEE, 1977, **65**(12): 1679~1714
- 4 Liu Jian, Li Shumin, Jin Gang. Influence on beam propagation through Z-shape tube of blowing non-absorbing gas in[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2005, **17**(2): 164~168  
柳建, 李树民, 金钢. 沿Z型光传输管道轴向吹气对激光传输的影响[J]. *强激光与粒子束*, 2005, **17**(2): 164~168
- 5 Jin Gang, Liu Shunfa, Li Shumin *et al.*. Laser thermal effects in beam control system on the emitted laser quality[J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **A29**(10): 895~899  
金钢, 刘顺发, 李树民等. 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
- 6 C. McClellan. Optical effects of gas flow through an optical train: an experimental determination[J]. *Appl. Opt.*, 1979, **18**(23): 3984~3989
- 7 Robert E. Kelly. Thermal blooming in axial pipe flow: the effects of beam shape and thermal conditions at the pipe wall[J]. *Appl. Opt.*, 1980, **19**(18): 3037~3039
- 8 Gavrielides, Phillip Peterson. Time-dependent thermal blooming in axial pipe flow[J]. *Appl. Opt.*, 1983, **22**(21): 3359~3365
- 9 A. J. Laderman. Thermal blooming in axial pipe flow: comment [J]. *Appl. Opt.*, 1980, **19**(14): 2269~2271
- 10 Brain Edwards, Arthur Nitkowski. Comparison of cooperative adaptive optics reference performance for propagation with thermal blooming effects[C]. *SPIE*, 2004, **5552**: 85~92
- 11 Ji Xiaoling, Tao Xiangyang, Lü Baida. Influence of laser non-uniformity and thermal effects in an inner optical system on the far-field behavior [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(10): 1193~1197  
季小玲, 陶向阳, 吕百达. 激光非均匀性和内光路热效应对远场特性的影响[J]. *中国激光*, 2004, **31**(10): 1193~1197
- 12 Daniel Malacara. *Optical Shop Testing*[M]. New York: John Wiley & Sons, 1992. 465