

## 气动光学效应对激光扩束系统的影响

任晓塙<sup>1,2,3</sup>, 王继红<sup>1,2</sup>, 任戈<sup>1,2,3</sup>, 翟嘉<sup>2</sup>, 谭玉凤<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院光束控制重点实验室, 四川 成都 610209;  
2. 中国科学院光电技术研究所, 四川 成都 610209; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** 激光系统往往需要应对复杂的环境气流, 同时由于激光扩束系统口径增大, 其晶体窗口难以实现, 环境气流更容易进入系统内部, 从而影响光束质量。针对环境气流对激光扩束系统带来的气动光学效应问题, 借助流体力学软件 FLUENT 对系统内部流场进行 CFD 求解, 得到不同风力等级和进风角度下流场的各种参数分布, 再通过 Gladstone-Dale 关系将流场密度场映射为折射率场, 运用变折射率流场的光线追迹法, 得到光束在该非均匀流场中的传输路径; 最后结合数值分析方法, 计算得到湍流场所带来的光学像差。结果表明, 环境气流会给主次镜和反射镜周围引入较多涡流, 因此不能忽略其光学效应, 从而提出了一种增加扩束系统镜筒长度的方法来降低这一影响。镜筒加长 0.5 m 之后, 扩束系统内部的涡流团可以避免光束传输的主要路径, 其出口处波像差的 RMS 值从最初的 0.317  $\mu\text{m}$  下降到 0.078  $\mu\text{m}$  左右。研究证明了避免环境气流带来的气动光学效应的必要性, 同时为扩束系统的流控和结构设计提供了参考数据和思路。

**关键词:** 气动光学; 扩束系统; 数值模拟; 光线追迹

**中图分类号:** TN24 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201948.S106001

## Influence of aero-optic effect on laser beam expanding system

Ren Xiaoli<sup>1,2,3</sup>, Wang Jihong<sup>1,2</sup>, Ren Ge<sup>1,2,3</sup>, Zhai Jia<sup>2</sup>, Tan Yufeng<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Optical Engineering, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China;  
2. Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China;  
3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** Laser systems often cope with complex ambient air flow. As the size of the laser beam expanding system increases, its crystal window is difficult to achieve. Then the ambient air flow can easily enter the system, thus it affects the beam quality. CFD was used to solve the problem of aero-optical effects caused by ambient air flow. With the aid of fluid mechanics software FLUENT CFD model, the internal flow field of the laser beam expander was simulated. Various parameters of the internal flow field of the system were obtained under different inlet angles. Through the Gladstone-Dale relationship, the refractive index could be calculated from the flow density field. Using the ray tracing method, the beam transmission path could be got in the non-uniform refractive index flow field. Finally, the optical aberration caused by turbulence was calculated by numerical analysis. The results show that the ambient airflow will introduce more vortices to the flow field of the primary mirror, the secondary

收稿日期: 2018-11-01; 修订日期: 2018-12-14

作者简介: 任晓塙(1983-), 女, 博士生, 主要从事光束控制技术等方面的研究。Email: rx1200306@126.com

导师简介: 王继红(1966-), 女, 研究员, 主要从事光束控制技术等方面的研究。Email: wangjihong19@sina.com

mirror and the deflecting mirror. The influence of the optical effect cannot be ignored, which must be considered in the overall design. Therefore, a method to increase the length of the mirror tube of the beam expanding system was proposed to reduce this effect. After the length of the mirror tube was lengthened by 0.5 m, the eddy current in the beam expanding system can avoid the main path of beam propagation. Meanwhile, the RMS can be reduced from the 0.317  $\mu\text{m}$  to about 0.078  $\mu\text{m}$ . The study proves the necessity of avoiding the aero-optical effect caused by ambient airflow. And it provides reference data and ideas for the optical and structural design of the beam expanding system.

**Key words:** aero-optic; beam expanding system; numerical simulation; ray tracing

## 0 引言

激光系统在目标测距、干扰以及激光通信等领域应用广泛,具有反应速度快,抗干扰能力强等特点,近年来正在朝大结构的方向发展,由此带来了许多新的问题。其中晶体窗口由于材料和加工制造的特殊性,难以运用在米级激光系统中。因此,当激光系统所处的环境风速较大时,由于扩束系统口径较大,外界气流的速度和流量会给系统内部引入复杂流场,导致流场密度变化,改变了光线传输路径,产生偏折或相位变化,从而引起目标图像偏移、抖动、模糊等现象。这些现象就是气动光学效应。为了降低扩束系统内的气动光学效应,必须研究系统内部流场受外界扰动情况,从而对扩束系统内的流场进行合理的控制。

已有较多的文献研究了流场中的涡流、边界层、剪切层等复杂的流场结构对激光系统内的气动光学效应,从流场的角度提出了高速流场气动光学效应的评价方法,并进行实际应用<sup>[1-5]</sup>。流场仿真结合光线追迹方法广泛地应用于气动光学领域,如激光器的内系统,机载激光装置的转塔、凹窗和凸台等等<sup>[6-8]</sup>;对激光发射通道进行流场仿真,在此基础上分析折射率变化引起的光程差,可以验证其流场控制方法的有效性<sup>[9-12]</sup>;美国研究了 SOFIA 机载望远镜所处的凹腔涡流,并分析了望远镜处于不同大气层时光学质量的变化<sup>[13]</sup>。但对于激光扩束系统的气动光学研究还鲜有报道。文中针对米级激光系统的扩束机构,首先利用有限元仿真,研究了环境气流对系统内部造成的涡流,及其对应的流场密度;接着将流场密度映射到折射率场;然后采用光线追迹法计

算了光在折射率场中传输引起的波像差;最后基于上述方法,计算了不同镜筒长度对应的波像差值。

## 1 理论分析

### 1.1 流场对光传输的影响

流场密度的不均匀性会改变经过流场光线的轨迹,使光线的传输路线发生偏折,并会带来附加相位差,造成波像差。对经过流场的光线进行气动光学效应计算,首先需要研究流场中的折射率分布。通常情况下,流场的折射率并不能直接获得,而是需要通过气流密度来计算。流场的密度可以通过计算流体力学(Computational Fluid Dynamics, CFD)技术来获得。

洛伦兹-洛伦茨公式给出了折射率与流场密度的以下关系:

$$\left[ \frac{n^2-1}{n^2+1} \right] \frac{1}{\rho} = \frac{2}{3} K_{GD} \quad (1)$$

式中: $\rho$ 为流体密度; $n$ 为流体的折射率; $K_{GD}$ 为气体的一种特性,是一个比例因子,也称 Gladstone-Dale 常数,数值与波长有关,在红外波段,标准空气的 G-D 系数是波长的弱函数:

$$K_{GD} = 2.23 \times 10^{-4} \left( 1 + \frac{7.52 \times 10^{-3}}{\lambda^2} \right) \quad (2)$$

式中: $\lambda$ 为入射光波长( $\mu\text{m}$ ); $K_{GD}$ 单位为  $\text{m}^3/\text{kg}$ 。

对公式(1)作近似处理后建立流场密度与折射率之间的关系:

$$n = 1 + K_{GD} \cdot \rho \quad (3)$$

光学扰动通常用光束的光程差(Optical Path Difference, OPD)变化来表述。光束在介质中的光程差定义为:

$$\Delta L_s = L_{s1} - L_{s2} = \int_a^b [(n(s_1) - n(s_2))] ds \quad (4)$$

式中： $s$  为沿光线的距离； $n$  为  $s$  的函数； $a$ 、 $b$  为光线上的两个距离，是积分区间。

光波波面经光学系统后的变形情况可以用波像差来评价。由于波像差是实际波面与理想波面之间的光程差，因此可以用计算光程差的方法来计算波像差。平面上的波像差  $W(x, y)$  可以表示为：

$$W(x, y) = \Delta L_s(x, y) \quad (5)$$

式中： $\Delta L_s(x, y)$  即为平面上的光程差。

在扩束系统这种圆形孔径内，波像差函数可以用一组 Zernike 多项式来表示：

$$W(x, y) = \sum_{i=0}^n c_i Z_i(x, y) \quad (6)$$

式中： $c_i$  为 Zernike 多项式系数； $Z_i(x, y)$  为多项式直角坐标形式。

### 1.2 光线追迹方法

CFD 计算网格把流场分成很多小单元，光线以一定方向入射，逐个穿过这些小单元，在每个小单元计算光程差，叠加后即得到光线穿过流场后的总光程差。光线追迹的过程，就是确定光线通过流场后的方向和位置。可用折射定律计算光线通过每一个网格的路径，在光线折变处，由 Snell 折射定律得到关系式：

$$\begin{cases} \Delta X = d \tan \theta_2 \\ n_2 \sin \theta_1 = n_1 \sin \theta_2 \end{cases} \quad (7)$$

式中： $X$  表示光线平移量； $d$  为流场网格大小； $\theta_1$  为入射角度； $\theta_2$  为折射角度； $n_1$  为入射处介质的折射率； $n_2$  为折射处介质的折射率。

## 2 模型设置

为了研究气动光学效应对激光扩束系统的影响，必须先模拟系统内外无晶体窗口或气帘阻隔时，外界环境气流对扩束系统内流场的影响。文中以某米级激光系统扩束机构为例，采用 ANSYS 软件下的 CFD 计算模块 FLUENT 进行仿真。图 1 是其简化扩束系统示意图，采用的结构为典型的卡塞格林反射系统。图中蓝色为镜筒壁，壁面上红色区域为扩束系统主动流控进气口，用以控制各光学镜壁面流场，流速为 0.5 m/s。出口无窗口，因此环境气流可直接进入系统内部(绿色箭头所示)，引起流场扰动。文中采用扩大区域法模拟外界空气向系统内的扩散。为了既保证计算精度，又节约计算资源，通过多次计算，

可以在扩束系统外部添加一个 10 m×10 m×10 m 的延伸域。经过实体建模以及划分网格后得到三维扩束系统仿真模型如图 2 所示。

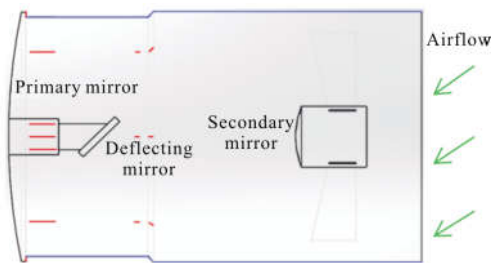


图 1 扩束系统示意图

Fig.1 Schematic diagram of the expander system

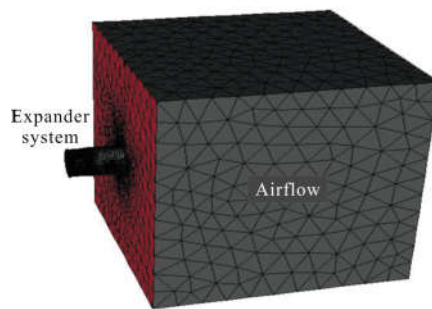


图 2 扩束系统仿真模型

Fig.2 Simulation model of the expander system

空气动力学用马赫数来衡量气体的可压缩性。马赫数定义为流体速度与当地声速的比值。文中以三级风力等级为例，风速较小，约为 4 m/s，因此马赫数远小于 0.1，流体可认为是不可压的。由于光场变化是由于气流的折射率变化引起的，而折射率又同密度有关，因此流体可视为是理想气体。图 2 中，设置扩束系统出口为环境气流进气口，计算三级风力以不同角度入射的情况。出口采用压力出口条件，压差为 0 Pa。文中所研究激光系统的工作时间是 10 s，为了模拟实际工况下扩束系统内部流场的变化，采用瞬态求解器计算 10 s 时的数据。

## 3 仿真和分析

### 3.1 环境气流进风角度对流场的影响

根据上述仿真模型，设置外界三级风力条件下，分析进风角度不同时流场的变化情况。结果发现，当进风角度为 0° 时，在细光束的传输区域有一直径

0.65 m 的大涡(见图 3(a)),造成了流场的大部分密度脉动,从而导致光学传输的相位脉动。当进风方向跟扩束系统轴线有角度偏差时(30°、45°和 60°),大涡流不稳定而产生较小尺度的涡流。随着进风角度的增大,最大风速由 1.73 m/s 下降到 0.94 m/s,湍流能由大尺度向小尺度一级级耗散。图 3(b)中,主次镜附近都出现多个涡流,直径在 0.45 m 左右。而在图 3(d)中,大涡流逐步串级成多个小尺度涡流,包括主次镜、反射镜、进气口附近都出现了较小尺度涡流,最小直径为 0.1 m 左右。在光学系统中,大涡对波像差的影响可以通过自适应光学设计来矫正,而小涡的影响不易纠正,会严重影响波像差,所以要尽量避免流场中小涡的出现<sup>[14]</sup>。基于以上原因,可以从扩束系统结构设计方面进行研究。

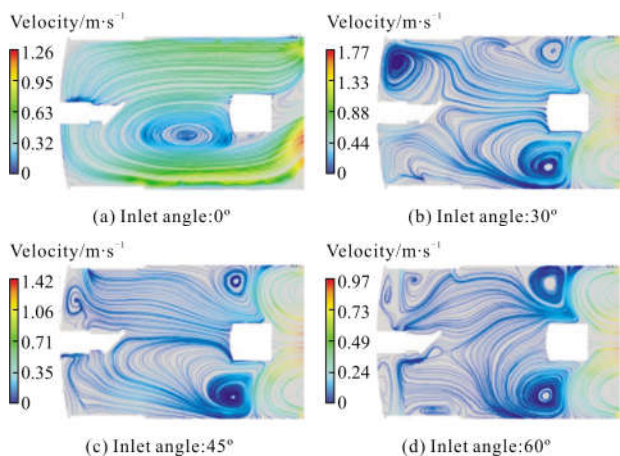


图 3 风力等级三级,流场流迹线图

Fig.3 Wind scale: force 3, flow path diagram

文中从增加扩束系统镜筒长度方面来降低环境气流对内部流场的冲击。通过对比镜筒加长 0.2、0.3、0.5 m 前后的流迹线图(见图 4),可以看出随着镜筒加长,流场中的涡流数量明显减少,尺度逐渐增大。镜筒加长 0.5 m 时的流场以大尺度涡结构为主,涡流直径 0.8 m。主镜镜面处无涡流,次镜附近的涡流移到了镜筒加长的区域。从而得知,选取合理的镜筒长度,可以减小外界风对系统内流场的冲击,同时将湍流区域绕开光束传输的主要路径。

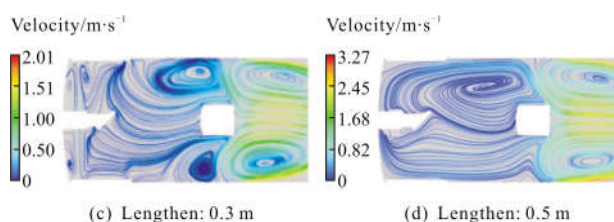
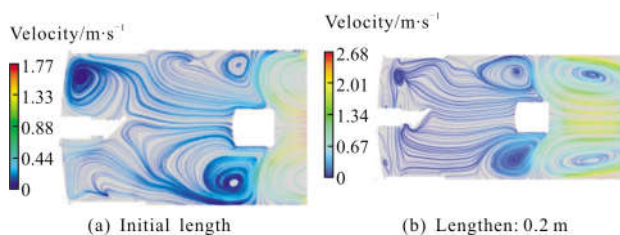


图 4 风力等级三级,进风角度 30°,流场流迹线图

Fig.4 Wind scale: force 3, inlet angle: 30°, flow path diagram

### 3.2 环境气流对波像差的影响

以上内容仅从流场的角度分析环境气流对扩束系统内部流场的影响,该节内容分析了流场参数对扩束系统出口处波像差的影响。首先利用前文所述 CFD 仿真得到了流场的密度场;其次根据公式(3)的 G-D 关系得到流场的折射率分布;然后采用 Snell 折射定律(公式(7))进行光线追迹,由公式(4)计算得到光程差;最后算出扩束系统出口波像差的峰谷值(PV)和均方根值(RMS)。图 5 显示的是镜筒加长 0.5 m 前后出口处波像差的 PV 值和 RMS 值。未加长镜筒时,波像差的 PV 值和 RMS 处于较大的数量级,RMS 均保持在 0.31 μm 左右。而镜筒长度增加 0.5 m 后,当进风角度为 0°时,RMS 下降到 0.103 μm,其他进风角度所引起的 RMS 也下降到 0.07 μm 左右。这是由于随镜筒长度增加,外界气流带来的湍流远离了主镜和次镜所组成的主光束传输通道,所以此区域的折射率变化减小。分析结果说明了增加扩束系统镜筒长度确实能在一定程度上改善波像差。

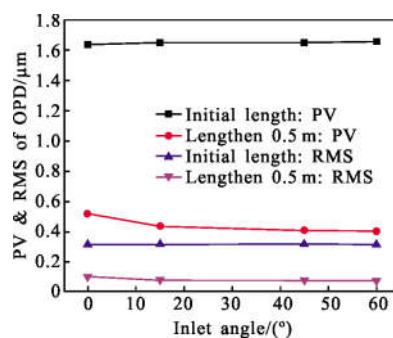


图 5 扩束系统出口处波像差的 PV 值和 RMS 值

Fig.5 PV & RMS of OPD in the outlet of the beam expander system

根据公式(6),采用 37 阶泽尼克多项式分解扩束系统出口处由于湍流引起的波像差,来分析比较镜筒长度增加对波像差的改善情况。其中,一阶泽尼克系数为活塞项,二、三阶系数为倾斜项,五阶系数为离焦项,八、九阶系数为彗差项,十三阶系数为球差

项,而十四阶系数为二阶像散项。从图 6 可以看出,环境风带来的湍流导致各阶像差均很严重,其中一阶像差最严重,第四项(像散)和第九项(彗差)达到  $2\lambda$  以上。但镜筒加长 0.5 m 后,所有像差都控制到了  $0.35\lambda$  以下,像差得到改善。

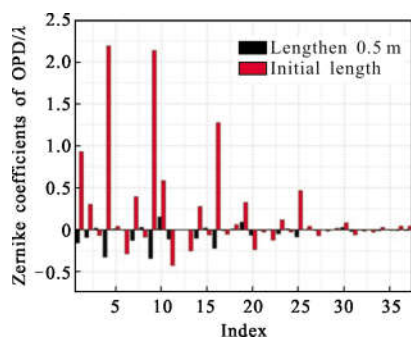


图 6 扩束系统出口处波像差的泽尼克系数

Fig.6 Zernike coefficients of OPD in the outlet of the beam expander system

## 4 结论

针对环境气流给激光扩束系统带来的气动光学效应问题,文中通过有限元仿真方法,研究了环境气流给系统内部引入的湍流场,讨论了风力大小,进风角度对光线传输的影响。并采用增加镜筒长度的方法来减小这一问题。分析结果表明,即使外界空气流动为较小的三级风,对于出口无任何隔离措施的扩束系统来说,都会产生较大的湍流,从而影响光束质量。比较分析镜筒长度增加前后的数据可以发现,镜筒长度增加 0.5 m 后,其波像差 RMS 可以从最初的  $0.317\ \mu\text{m}$  下降到  $0.078\ \mu\text{m}$  左右。证明了采用镜筒加长的措施可以在一定程度上降低环境风造成的气动光学效应。下一步的目标将针对不同口径扩束系统和更大风力等级,研究具体的镜筒长度和流控措施,以降低环境气流产生的气动光学效应,保证光束质量。

## 参考文献:

[1] Li Bo, Liu Hong. Aero-optical evaluation method for high speed flow [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2011, 38(5): 21–29. (in Chinese)  
 [2] Wang Kan, Wang Meng. Aerooptics of subsonic turbulent

boundary layers[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2012, 696: 122–151. (in Chinese)  
 [3] Ren Wei, Liu Hong. Effects of compressibility and knudsen number on the aero optics in hypersonic flow fields [J]. *J Shanghai Jiaotong Univ*, 2016, 21(3): 270–279. (in Chinese)  
 [4] Jiang Qianwen, Xin Yu, Zhou Zhichao, et al. Aero-optical effect of Laguerre-Gaussian vortex beams through a small-scale flow field [J]. *Modern Physics*, 2017, 7(6): 273–281. (in Chinese)  
 [5] Feng Dinghua, Pan Sha, Wang Wenlong, et al. Simulation and analysis of ray tracing in discretionary gradient refraction index medium [J]. *Computer Simulation*, 2010, 27(2): 135–139. (in Chinese)  
 [6] Li Guichun. *Aero-Optics* [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2007. (in Chinese)  
 [7] George W Sutton. *Aero-optical foundations and applications* [J]. *AIAA Journal*, 1985, 23(10): 1525–1537.  
 [8] Eric J Jumper, Edward J Fitzgerald. Recent advances in aero-optics [J]. *Progress in Aerospace Sciences*, 2001, 37: 299–339.  
 [9] Chen Wentao, Gao Yunguo, Shao Shuai, et al. Dustproof method for large-diameter and wide-bandlaser emission pipe [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44 (10): 2918–2925. (in Chinese)  
 [10] Zhao Yan, Wang Tao, Xu Dong, et al. CFD grids based transmission model of the rays propagating through the hypersonic flow field [J]. *Acta Armam*, 2008, 29(3): 282–286. (in Chinese)  
 [11] Huang Zhanhua, Cheng Hongfei, Cai Huaiyu, et al. A study on universal ray tracing algorithm in the medium of variable refractive index [J]. *Acta Optic Sin*, 2005, 25(5): 589–592. (in Chinese)  
 [12] Stanislav Gordeyev, Eric Jumper. Fluid dynamics and aero-optics of turrets [J]. *Progress in Aerospace Sciences*, 2010, 46: 388–400.  
 [13] Christian Engfer, Enrico Pfüller, Manuel Wiedemann, et al. Evaluation of the aero-optical properties of the SOFIA cavity by means of computational fluid dynamics and a super-fast diagnostic camera[C]//SPIE, 2012, 8444: 1–12.  
 [14] Ge Xiaolu, Huang Yinbo, Fan Chengyu. The effect of turbulence on laser propagating in atmosphere and compensation of adaptive optics[J]. *J Atmosph Environ Opt*, 2006, 1(1): 27–32.