

文章编号: 0258-7025(2003)04-0289-06

高能激光器自由旋涡气动窗口激光波前畸变的初步研究

刘天华, 姜宗福, 许晓军, 刘泽金, 赵伊君

(国防科学技术大学理学院定向能技术研究所, 湖南 长沙 410073)

摘要 分析了用哈特曼-夏克波前传感器研究高能激光器自由旋涡气动窗口对输出激光波前畸变的原理, 并利用 37 单元哈特曼波前传感器实验研究自由旋涡气动窗口对输出激光波前的影响。结果表明, 自由旋涡气动窗口对输出激光波前的影响主要是光束偏转和离焦, 而其他低阶及高阶像差都比较小。由于透射激光束的偏转是稳定的, 很容易由倾斜镜进行校正, 因此稳定工作状态下的自由旋涡气动窗口能够满足实验需求。

关键词 激光技术; 高能激光器; 哈特曼-夏克波前传感器; 自由旋涡气动窗口; 波前畸变; 波前重构; 斯特列尔比
中图分类号 TN 248; O 354 **文献标识码** A

Study on the Laser Wavefront Deformation Induced by the Free-vortex Aerodynamic Window for High Energy Lasers

LIU Tian-hua, JIANG Zong-fu, XU Xiao-jun, LIU Ze-jin, ZHAO Yi-jun

(Institute of Directed Energy Technology, School of Science,
National University of Defense and Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

Abstract This paper analyzes the principle of wavefront disturbed by the free-vortex aerodynamic window(FADW) designed for the high power laser measurement using the Hartmann-Shack (H-S) sensing, and measures the wavefront when the FADW is running steadily using the H-S sensor with 37-sub-apertures experimentally. The wavefront attained by CCD detectors is sent to the high speed DSP wavefront processing units. And then it reconstructs the disturbed wavefront using the method of Zernike mode, and calculates the relative optical parameters such as the peak value (PV) of wavefront error, RMS and STREHL ratio (R_s) and so on. The results shows that the effects on the output laser wavefront of the FADW are mainly the beam deflexion and the beam divergence, otherwise the else high-level wavefront errors are very low.

Key words laser technology; high energy laser; Hartmann-Shack sensor; free-vortex aerodynamic window (FADW); wavefront error; wavefront reconstruction; Strehl ratio

1 引 言

气动窗口能够有效地解决由于晶体窗口对光辐射不可避免的部分吸收作用所导致的激光器输出功率和光束质量进一步提高的瓶颈问题, 使得高能激光器大功率或超大功率应用成为可能。目前国内外所研究和广泛使用的气动窗口主要有横向自由旋涡式气动窗口^[1~3]和轴(纵)向引射式气动窗口^[4,5]两

种类型。自由旋涡气动窗口适于大口径激光器输出, 而且操作简单, 目前应用最为广泛^[1], 图 1 为自由旋涡气动窗口原理示意图, 总压为 P_0 的高压气体, 经由一个特殊设计的 Laval 喷管, 在激光输出的路径上产生一个具有与环境气压 P_{AMB} 和激光腔压 P_c 同时相匹配的“气幕”, 以防止外界大气进入低压激光腔内。

显然, 气动窗口除了代替晶体窗口起到密封作

收稿日期: 2001-12-11; 收到修改稿日期: 2002-03-14

作者简介: 刘天华(1974. 11—), 男, 河南人, 在读博士生, 主要从事激光器件及相关技术, 气动光学等领域的研究。E-mail: liu. th@263. net

用以外,还必须保证输出激光的光束质量,即应尽可能地减小气动窗口对输出激光光束质量的影响,从而保证强激光的正常输出,这样气动窗口才具有实际应用价值^[6]。而事实上,由于气动窗口的工作气体是非均匀分布高速流动的,虽然输出激光经过气动窗口的路径不长,但是输出激光的光波前总是会受到不同程度的影响的^[4,7]。因此,必须测量气动窗口对输出激光束的光波前的影响,并研究分析其影响机制,进一步优化设计气动窗口使其对光束质量的影响尽可能地小。由于哈特曼-夏克波前传感器空间采样率高、对环境要求低等特点,与高帧频成像器件相结合,并利用实时图像处理技术,可以实现高时空分辨率、长持续时间的动态波前测量,目前是自适应光学系统中应用最广泛的波前传感器^[8]。通过哈特曼-夏克波前传感器测量畸变波前每个单元区域内的波前斜率,由波前斜率进行波前重构。本文采用哈特曼-夏克法研究自由旋涡气动窗口对输出激光波前畸变的影响,由重构的波前进行相应的激光光束质量诊断,为未来自由旋涡气动窗口与自适应光学系统的对接提供参考和实验方法。

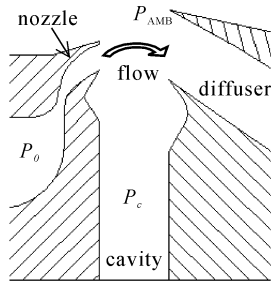


图1 自由旋涡气动窗口原理示意图
Fig.1 Principle sketch of the FADW

2 实验测量原理

2.1 哈特曼-夏克波前传感器原理

哈特曼-夏克波前传感器是一组按一定规律布局(如方形、环形等^[9])排列的微透镜阵列,微透镜的孔径大小和焦距相同,如图2所示。其中 D 为探测孔径, d 为微透镜直径, f 为微透镜焦距, ϕ 为待测畸变波前。具有 N 个微透镜的H-S传感器将待测畸变波前分割成 N 个子区域,每个子区域的波前分别成像在每个微透镜的焦平面上,然后通过高速面阵CCD器件或其他光电探测器阵列测量出各个子孔径焦平面上的光斑重心,从而求得各个光斑重心的相对偏转量 G_i (通常被称为波前斜率)。根据上述参数,并利用一定波前恢复算法,就可以求得待测畸

变波前。由所重构的畸变波前就可以算出畸变波前的相关光学性能参数,如波像差峰谷值、波像差均方根和斯特列尔比值等。

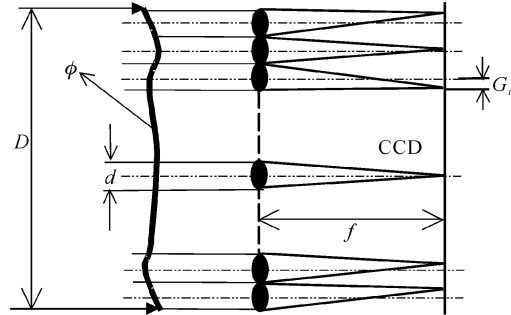


图2 哈特曼-夏克波前传感器工作原理图
Fig.2 Principle of the Hartmann-Shack wavefront sensor

哈特曼波前传感器波前复原最常用的算法主要有区域法和模式法。区域法主要是利用子孔径四周位置的测量数据计算中心点处的相位,由于该算法难以将畸变波前的倾斜分量和离焦分量分离,对波前校正极其不利。而模式复原算法主要有Zernike和K-L两种方法,它是将全孔径波前相位展开为不同的模式分量(如倾斜、离焦等),然后用全孔径内的测量数据来求解所有的模式系数即完成了波前重构^[10]。模式法可以将各模式像差分离,可以直接提供给像差校正器件,应用广泛。研究中采用Zernike模式波前复原算法进行波前重构。

2.2 Zernike 模式波前复原算法

一个完整的畸变激光波前 $\phi(x,y)$ 可以表示成一系列的正交多项式的线性组合,并把多项式的每一项称为一阶波前模式。在Zernike模式波前复原算法中,正交多项式就选用Zernike多项式,则圆域上的畸变波前可表示为

$$\phi(x,y) = \sum_{k=1}^{\infty} a_k \cdot z_k(x,y) \quad (1)$$

其中 k 为波前 $\phi(x,y)$ 的第 k 阶模式, a_k 为模式系数, $z_k(x,y)$ 为第 k 阶模式的Zernike多项式,可表示为

$$\begin{cases} z_{k\text{-even}} = \sqrt{2(n+1)}R_n^m(r)\cos(m\theta) & m \neq 0 \\ z_{k\text{-odd}} = \sqrt{2(n+1)}R_n^m(r)\sin(m\theta) & m \neq 0 \\ z_k = \sqrt{n+1}R_n^0(r) & m = 0 \end{cases} \quad (2)$$

其中 $R_n^m(r)$ 是极坐标为 (r,θ) 的圆域内的径向多项式,可表示为

$$R_n^m(r) = \sum_{s=0}^{(n-m)/2} \frac{(-1)^s (n-s)!}{s! [(n+m)/2 - s]! [(n-m)/2 - s]!} \cdot r^{(n-2s)} \quad (3)$$

每个多项式 $z_k(r, \theta)$ 的序号 k 按行增长, 对一个给定的径向级次 n 来说, 模式具有较低角频率 m 者在前。而对于两个具有同样 n 和 m 的多项式来说, 偶数 k 对应于含 $\cos(m\theta)$ 的模式, 而奇数 k 对应于 $\sin(m\theta)$ 的模式。而 Zernike 模式波前重构算法实质上是建立各个模式 Zernike 多项式的斜率矩阵, 求解各模式的模式系数 a_k , 进而由(1)式求得畸变波前 $\phi(x, y)$ ^[12,13]。

畸变波前通过微透镜阵列将各个子孔径上波前聚焦后, 其像点相对于微透镜的焦点的偏移量 $G(x, y)$ 代表着相对应子孔径的波前斜率, 由(1)式可得

$$\begin{cases} G(x, y)_x = \sum_{k=1}^{\infty} a_k \cdot \frac{\partial z_k(x, y)}{\partial x} \\ G(x, y)_y = \sum_{k=1}^{\infty} a_k \cdot \frac{\partial z_k(x, y)}{\partial y} \end{cases} \quad (4)$$

而由于 H-S 波前传感器探测到的是各子孔径内的平均斜率, 因此有

$$\begin{cases} G_i(x, y)_x = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{a_k}{s_i} \cdot \iint_{s_i} \frac{\partial z_k(x, y)}{\partial x} dx dy = \sum_{k=1}^{\infty} a_k \cdot z_{xk(i)} \\ G_i(x, y)_y = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{a_k}{s_i} \cdot \iint_{s_i} \frac{\partial z_k(x, y)}{\partial y} dx dy = \sum_{k=1}^{\infty} a_k \cdot z_{yk(i)} \end{cases} \quad (5)$$

其中 s_i 为第 i 个子孔径的归一化面积。而在波前重构的实际运算中, 一般 k 的取值是一个有限值 K , 因

此, 由(5)式可以得到矩阵表示式

$$\begin{bmatrix} G_{x(1)} \\ G_{y(1)} \\ G_{x(2)} \\ G_{y(2)} \\ \dots \\ G_{x(N)} \\ G_{y(N)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{x1(1)} & Z_{x2(1)} & \dots & Z_{xK(1)} \\ Z_{y1(1)} & Z_{y2(1)} & \dots & Z_{yK(1)} \\ Z_{x1(2)} & Z_{x2(2)} & \dots & Z_{xK(2)} \\ Z_{y1(2)} & Z_{y2(2)} & \dots & Z_{yK(2)} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ Z_{x1(N)} & Z_{x2(N)} & \dots & Z_{xK(N)} \\ Z_{y1(N)} & Z_{y2(N)} & \dots & Z_{yK(N)} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \dots \\ a_K \end{bmatrix} \quad (6)$$

其中 N 为 H-S 传感器的子孔径数。上式可记为

$$\mathbf{G} = \mathbf{Z} \cdot \mathbf{A} \quad (7)$$

显然, 上式中 \mathbf{G} 为 $2N$ 斜率向量, 传感器的 Zernike 模式斜率响应矩阵 \mathbf{Z} 的维数为 $2N \times K$ 。由(7)式得

$$\mathbf{A} = \mathbf{Z}^+ \cdot \mathbf{G} \quad (8)$$

其中 \mathbf{Z}^+ 为矩阵 \mathbf{Z} 的伪逆矩阵。由于实验时波前传感器的子孔径布局已定, 因此根据 Zernike 多项式就可以在实验前计算得到矩阵 \mathbf{Z} , 根据传感器所测的波前斜率向量 \mathbf{G} 就可以利用(8)计算得到模式系数向量 \mathbf{A} , 进而利用(1)式重构得到所测畸变波前 $\phi(x, y)$ 。

研究中取 $K=35$, 表 1 给出了本文所用到的 Zernike 模式序列。

表 1 Zernike 模式序列

Table 1 The order of Zernike polynomial

Radial degree n	Azimuthal frequency m							
	0	1	2	3	4	5	6	7
1		1,2						
2	3		4,5					
3		6,7		8,9				
4	10		11,12		13,14			
5		15,16		17,18		19,20		
6	21		22,23		24,25		26,27	
7		28,29		30,31		32,33		34,35

3 实验及结果分析

3.1 实验装置

利用现有的一套 37 单元室内自适应光学系统中的哈特曼-夏克波前传感器, 建立了一套自由旋涡气动窗口对输出激光的波前畸变测量系统, 如图 3。实验采用波长为 $0.6328 \mu\text{m}$ 的 He-Ne 激光器, 经过衰减后的 He-Ne 激光被扩束准直后穿过自由旋涡气动窗口的激光输出通道, 再经过一个光束整形光阑将经过气动窗口的方形光斑变为圆形光斑, 并对

其进行扩束以达到与哈特曼入射口径相匹配, 然后经由哈特曼微透镜阵列使 He-Ne 激光成像聚焦在高速面阵 CCD 探测器阵列上。实验采用口径为 $30 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$ 的自由旋涡气动窗口^[1]; 哈特曼波前传感器为一个呈六边形分布的 37 单元微透镜阵列, 子孔径为方形, 见图 4; 而高速面阵 CCD 探测器的采样频率为 419 Hz。

在高能激光的远场应用中, 自由气动窗口是高能激光器与自适应光学激光发射系统的接口, 因此需要动态实时地研究气动窗口的波前畸变情况, 才

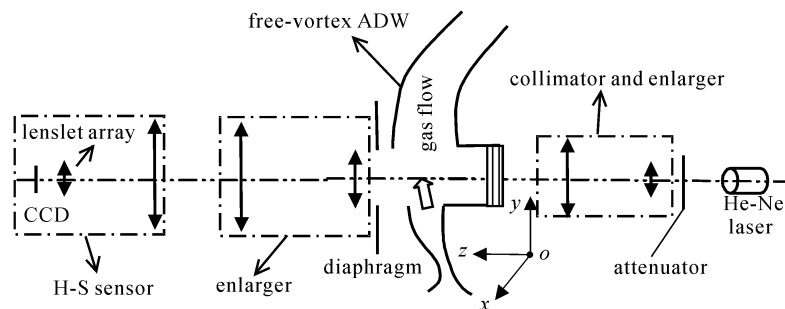


图 3 哈特曼-夏克法测自由旋涡气动窗口波前畸变原理图

Fig. 3 Principle schematic of the experiment using Hartmann-Shack sensor

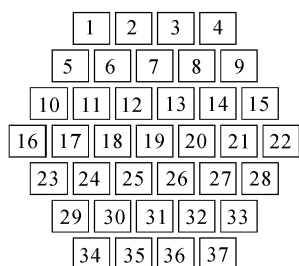


图 4 37 单元 H-S 传感器子孔径分布

Fig. 4 Sub-apertures location of the H-S sensor with 37 lenslets

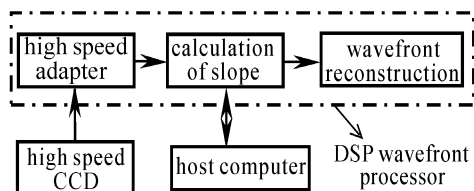


图 5 波前处理和控制系统

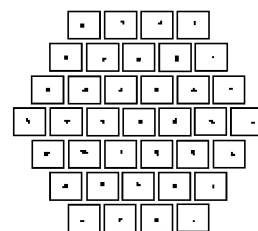
Fig. 5 Wavefront processing units and control system

能更好地使用和研制对激光波前影响较小的自由旋涡气动窗口。因此,要动态实时地测量气动窗口的激光波前畸变,必须要采用高速图像采集和高速数字信号处理技术(DSP),图 5 为本实验测量系统中的波前处理和控制系统框图。高速图像采集卡将面阵 CCD 探测器上的畸变波前图像输入 DSP 高速波前处理机,由斜率计算单元实时计算相应子孔径上的波前平均斜率,经由波前重构单元利用所得平均斜率即可重构畸变波前了。主控计算机协调控制 DSP 波前处理机的工作,同时可以将平均斜率、重构波前实时保存。当然,在气动窗口波前实验测量中,还可以利用主控计算机所保存的平均斜率数据,单独进行波前重构。另外,由波前重构单元所重构的畸变波前数据经过一定的控制运算,还可以送至波前校正单元,以完成自适应光学的补偿作用。

3.2 实验及典型结果分析

波前处理机的主控计算机负责管理波前处理机的相关操作和光学参数的保存,而自由旋涡气动窗口的控制和各种压力参数的测量则是由另外一台计算机来完成的。波前测量主控计算机将哈特曼传感器及波前处理机加电初始化,进入监控状态。实验时,使主控计算机进入数据保存状态,接着使气动窗口开始工作,进行相关数据的采集。实验中哈特曼波前传感器和气动窗口光轴的对准至关重要,但是调节十分困难,通过实验找出了相应的方法,从而能够保证测量精度。由于篇幅限制,本文只讨论自由旋涡气动窗口在理想设计入口总压下稳定工作时对输出激光波前的影响,给出几个反映激光波前畸变细节的光学特性参数,主要有波像差峰谷值、波像差均方根和斯特列尔比值。

图 6 为自由旋涡气动窗口稳定工作在设计状态(入口供气总压 $P_0 = 10 \text{ atm}^{[1]}$)时的哈特曼波前传感器所测的光斑图。由于所用的实验光学元器件也可能对探测 He-Ne 激光的波前带来一定的畸变影响,因此为了消除气动窗口以外因素对波前所带来的影响,可以将气动窗口工作时所测的畸变波前与气动窗口没有工作时所测的波前相减得到单纯气动窗口所导致的畸变波前。实验时,事先测得气动窗口没有开启时的激光波前斜率,计算得到其 Zernike

图 6 哈特曼传感器光斑图
Fig. 6 Beacon of H-S sensor

系数,然后测量气动窗口工作时的畸变波前的斜率,计算得到其 Zernike 系数,由于 Zernike 系数是线性的,直接将两者相应的 Zernike 系数相减即可得到单纯气动窗口所导致的畸变波前的各项 Zernike 系数,进而得到其畸变波前分布。图 7 即为单纯气动窗口所导致的畸变波前,其中(a)为二维分布,(b)为波前的三维结构,其 35 阶 Zernike 系数由表 2 给出。通过分析图 7 和表 2 的结果可知,自由旋涡气动窗口对输出激光的波前所带来的影响主要是波面倾斜(主要由第 2,3 阶 Zernike 系数决定),同时还有一程度的轴向离焦像差(主要有第 4 阶 Zernike 系数决定),与用其他方法所得到的结果相吻合^[7,14],而其高阶像差一般都比较小,只是还存在着一定程度的像散(第 5,6 阶 Zernike 系数决定)。其波像差峰谷值 $PV = 0.18(\lambda)$,均方差为 $\Delta\phi_{\max} = 0.04(\lambda)$ 。而利用重构的波前计算得到了自由旋涡气动窗口稳定地工作在设计状态时的斯特列尔比 $R_s \approx 0.93$,能够满足要求,但实验结果比用剪切干涉

法研究气动窗口时的值略小,主要是因为是在剪切干涉法进行测量时,只是在沿着气动窗口的气流方向进行的一维波前重构,而在垂直于气流的方向由于气动窗口侧壁防漏片有一定的影响,测量忽略了^[7,15]。另外,气动窗口没有工作在完全相同的两个状态,因为入口供气总压总会有些偏差。

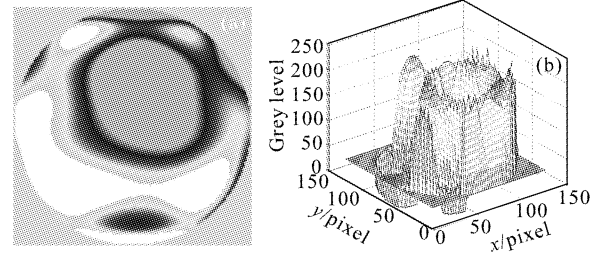


图 7 单纯气动窗口的重构波前

(a) 重构波前;(b) (a) 图的三维结构

Fig. 7 Reconstructed wavefront through the FADW

(a) reconstructed wavefront; (b) 3D structure of (a)

表 2 重构波前 35 阶 Zernike 模式系数

Table 2 Coefficients of Zernike polynomial of 35 terms for reconstructed wavefront

k	a_k	k	a_k	k	a_k	k	a_k	k	a_k
1	0.1202	8	0.0057	15	-0.0030	22	0.0001	29	-0.0001
2	-0.0116	9	0.0050	16	0.0006	23	-0.0001	30	0.0000
3	-0.1002	10	-0.0063	17	0.0002	24	0.0000	31	0.0000
4	0.0400	11	-0.0074	18	-0.0001	25	-0.0001	32	-0.0004
5	0.0210	12	0.0060	19	0.0000	26	-0.0012	33	-0.0001
6	0.0032	13	0.0011	20	0.0000	27	0.0001	34	0.0001
7	0.0087	14	0.0030	21	0.0002	28	0.0002	35	0.0000

4 精度分析

哈特曼-夏克法测量自由旋涡气动窗口的畸变波前及其相关光学性能参数的误差主要有传感器子孔径质心探测误差和模式法波前重构计算误差两部分。而哈特曼传感器探测误差主要有系统误差和随机误差两部分,其来源主要有 CCD 探测器的读出噪声,CCD 的离散像素采样误差及光子噪声等。当采样光斑尺寸 $\sigma_A > 0.5a$ (其中 a 为 CCD 像素尺寸) 时,质心探测误差均方根值 $\sigma_{\text{scr}} < 0.02\sigma_A$, 因此可以忽略 CCD 的离散采样误差,可表示为

$$\sigma_{\text{scr}}^2 = \frac{\sigma_A^2}{V} + \frac{\sigma_r^2}{V^2} ML \left(\frac{L^2 - 1}{12} + X_c^2 \right) \text{pixel}^2 \quad (9)$$

其中, M 和 L 为每一个光点在传感器焦平面上的采样窗口区域尺寸, V 为每一个窗口内的总光子数, σ_A^2/V 项代表光子噪声对探测质心精度的影响,而

(9) 式中的第二项则为 CCD 读出噪声对探测质心的探测精度的影响^[16]。另外,由于在 CCD 的输出信号中还含有少量的常数背景暗电平,其对质心探测误差的影响也不能忽视^[17]。为了减小质心探测误差,提高探测精度,可以通过调节 M 和 L 的大小,以及设置 CCD 背景探测阈值的方法来实现,实验中每个光点的像素采样值设为 16×16 , CCD 背景探测阈值为 21,实验较为理想。

而有关模式法重构波前的计算误差主要是因为传感器孔径数目和 Zernike 重构计算阶数的有限性所致。当采用模式法重构波前时,由于波前斜采样有限及 Zernike 多项式偏导函数不完全正交,计算时则会出现模式的耦合和混淆问题,当减少重构模式阶数时,模式混淆会降低,而重构阶数太小时,则会增加模式耦合的可能性,同时影响波前重构的精度;

而当提高重构模式的阶数时,模式耦合的影响会减小,重构精度会提高,但如果过大,则会导致模式的混淆产生,因此在模式法波前重构计算时,要根据探测器的子孔径数来合理选取重构模式阶数^[10]。文献曾经以 37 单元(与我们的哈特曼波前传感器子孔径数相同)自适应光学系统为原型进行了波前校正计算机仿真,选取 35 阶重构阶数获得了较为理想的计算结果^[18],因此,我们的实验中也选用 35 阶进行波前重构,保证了波前重构的精度。

5 结 论

由于气动窗口的工作气体是非均匀分布高速流动的,虽然输出激光经过气动窗口的路径不长,但是输出激光的光波前总是会受到不同程度的影响的。为了动态测量气动窗口光束质量,并为以后气动窗口与强激光发射系统对接提供参考依据,本文采用在自适应光学系统中应用最为广泛的哈特曼波前传感器对自由旋涡气动窗口的激光波前畸变进行了实验研究分析。分析了用哈特曼-夏克波前传感器研究高能激光器自由旋涡气动窗口对输出激光波前畸变的原理,并利用 37 单元哈特曼波前传感器实验研究自由旋涡气动窗口对输出激光波前的影响。采用模式法对其进行波前重构,进而计算给出畸变波前的相关光学参数。结果表明,自由旋涡气动窗口稳定工作时对输出激光波前有一定的影响,主要是光束偏转和离焦,由于透射激光束的偏转是稳定的,可以由倾斜镜进行校正;其波像差峰谷值 $PV = 0.18(\lambda)$,均方差为 $\Delta\phi_{\max} = 0.04(\lambda)$,斯特列尔比 R_s 为 0.93,能够满足要求。

参 考 文 献

- Liu Tianhua, Jiang Zongfu, Wei Chenghua *et al.*. Designing principle of the free-vortex aerodynamic window and experimental study on its running properties [J]. *Chinese J. Lasers* (中国激光), 2000, **A27**(1):23~27 (in Chinese)
- K. Sonoda, K. Ohira, K. Nanba *et al.*. Research of supersonic free-vortex aerodynamic windows [J]. *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers*, 1996, **62**(599):2687~2694
- H. W. Behrens, J. Shwartz, V. A. Kulkarny. Beam quality of continuous and pulsed aerodynamic windows [C]. *SPIE*, 1982, **343**:16~32
- Zhu Songlin, Cheng Zuhai, Li Zaiguang. The optical quality of jet injecting aerodynamic window [J]. *High Power Laser and Particle Beam* (强激光与粒子束), 1997, **9**(2):161~166 (in Chinese)
- C. K. Knight, P. I. Singh. An axial flow aero-window for large pressure ratios [C]. *AIAA Paper*, 1980, 80~1435
- Liu Tianhua, Jiang Zongfu, Liu Zejin *et al.*. Method of evaluating optical quality of aerodynamic windows for high energy lasers [J]. *High Power Laser and Particle Beam* (强激光与粒子束), 2002, **4**(2):193~196 (in Chinese)
- Liu Tianhua, Li Wenyu, Jiang Zongfu *et al.*. Study on the optical properties of free-vortex aerodynamic window using far-field method [J]. *High Power Laser and Particle Beam* (强激光与粒子束), 2001, **13**(1):9~14 (in Chinese)
- Jiang Lingtao, Chen Li, Rao Xuejun *et al.*. High resolution measurement for dynamic wavefront phase [J]. *Opto-Electronic Engineering* (光电工程), 1998, **25**(6):20~23 (in Chinese)
- Jing Tao, Xu Bing, Zhang Qiang *et al.*. Performance comparison of two configurations in Hartmann-Shack wavefront sensor [J]. *High Power Lasers and Particle Beam* (强激光与粒子束), 2000, **12**(3):289~292 (in Chinese)
- Zhou R Z. Adaptive Optics [M]. Beijing: National Defence Industrial Press, 1996 (in Chinese)
- R. J. Noll. Zernike polynomials and atmospheric turbulence [J]. *J. Opt. Soc. Am*, 1976, **66**(3):207~211
- Jiang Wenhan, Li Huagui. Hartmann-Shack wavefront sensing and wavefront control algorithm [C]. *SPIE*, 1990, **1271**:82~93
- Zhang Qiang, Jiang Wenhan, Xu Bing. Reconstruction of turbulent optical wavefront realized by Zernike polynomial [J]. *Opto-Electronic Engineering* (光电工程), 1998, **25**(6):15~19 (in Chinese)
- Liu Tianhua, Jiang Zongfu, Li Wenyu *et al.*. Study on the effect of similar lens effects of the free-vortex aerodynamic window [J]. *Chinese J. Lasers* (中国激光), 2002, **A29**(1):16~20 (in Chinese)
- Chen Fuxing, Liu Tianhua, Jiang Zongfu *et al.*. Shearing interferometric investigation on degradation of light beam quality by the aerodynamic window's flow field [J]. *High Power Lasers and Particle Beam* (强激光与粒子束), 2001, **13**(6):670~674 (in Chinese)
- Cao Genrui, Yu Xin. Accuracy analysis of a Hartmann-Shack wavefront sensor operated with a faint object [J]. *Opt. Eng.*, 1994, **33**(7):2331~2335
- Jiang Wenhan, Xian Hao, Shen Feng. Detecting error of Shack-Hartmann wavefront sensor [C]. *SPIE*, 1997, **3126**:534~544
- Wu Yi, Wang Yingjian. Simulation and error analysis for Hartmann wavefront sensing and deformable mirror wavefront recovery [J]. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1995, **15**(4):473~479 (in Chinese)