

文章编号: 1001-4322(2002)04-0536-05

用哈特曼法研究自由旋涡气动窗口光束质量

刘天华, 姜宗福, 许晓军, 李文煜, 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: 利用 37 单元哈特曼波前传感器实验研究不同工作条件下不同时刻自由旋涡气动窗口对输出激光波前的影响, 将高速 CCD 所采集的畸变激光波前传送给高速波前处理机, 采用模式法对其进行波前重构, 进而计算出畸变波前的波像差峰谷值、波像差均方根和斯特列尔比值等相关光学参数随气动窗口工作条件不同的变化曲线。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, 特别是气动窗口工作在设计状态时, 其余低阶及高阶像差都比较小, 能够满足实际需要。哈特曼波前传感器能很好地用于自由旋涡气动窗口对激光波前影响的二维动态测量, 并能给出波前畸变的各项 Zernike 多项式的模式系数得到畸变波前, 直接为气动窗口与强激光发射系统的对接和波前校正提供数据。

关键词: 高能激光器; 自由旋涡气动窗口(FADW); 哈特曼-夏克波前传感器; 波前畸变; 波前重构; 光束质量; 斯特列尔比

中图分类号: TN 248; O 354 **文献标识码:** A

气动窗口能够有效地解决由于晶体窗口对光辐射所存在的不可避免的部分吸收作用所导致的激光器输出功率和输出激光光束质量进一步提高所面临的瓶颈问题(热问题), 而成为高能激光器大功率或超大功率应用方案中可选择的技术方案之一^[1-5]。显然, 气动窗口在保证密封作用的同时, 还需保证好的输出光束质量, 即应尽可能地减小气动窗口对输出的激光光束质量的影响, 这样的气动窗口才具有实际应用价值^[6]。自由旋涡气动窗口适于大口径激光器输出, 对输出激光光束质量的影响小, 而且操作简单, 目前应用最为广泛。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, 但输出激光的光波前总是会受到不同程度的影响^[4,7]。我们曾采用远场法^[7,8]和横向剪切干涉法^[9]实验测量研究了自由旋涡气动窗口对光束质量的影响, 并初步掌握了自由旋涡气动窗口对输出激光光束质量的影响机制。在 高能激光的远场应用中, 自由旋涡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, 激光经由气动窗口后要通过一套完整的自适应光学系统对输出激光的波前进行像差校正, 它需要重构畸变的波前。但远场法一般只能测量一些宏观光学特性, 无法给出其波前畸变的空间信息, 而剪切干涉法虽然能够得到畸变波前, 但由于其存在干涉条纹难以判读的缺点, 特别是在二维波前的重构上, 其精度和速度很难达到动态实时测量波前的要求。哈特曼-夏克法通过哈特曼-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, 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^[10]。

我们曾详细分析了哈特曼-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, 并利用我们现有的 37 单元哈特曼波前传感器初步尝试了自由旋涡气动窗口稳定工作状态下对输出激光波前影响的实验测量^[11]。在此基础上, 本文研究自由旋涡气动窗口在不同工作条件下对输出激光波前畸变影响的大小, 计算出波像差峰谷值、波像差均方根和斯特列尔比值等光束质量参数的变化情况, 同时对实验结果进行相关分析, 为未来自由旋涡气动窗口的自适应光学校正提供实验方法和参考。

1 实验测量原理

1.1 实验装置

图 1 为哈特曼-夏克法测量气动窗口对光波前及光束质量的影响实验装置图。实验采用波长为 0.6328 μm 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,

收稿日期: 2001-11-12; 修订日期: 2002-02-05

基金项目: 国防预研项目资助课题

作者简介: 刘天华(1974-), 男, 博士生; E-mail: liu_th@163.com.



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 30mm × 30mm 的自由旋涡气动窗口^[1], 面阵 CCD 探测器的采样频率为 419Hz。哈特曼波前传感器是一组按一定规律布局排列的微透镜阵列, 微透镜的孔径大小和焦距相同, 图 2 为实验所用的子孔径数为 37 单元的哈特曼波前传感器的子孔径布局图, 该传感器为一个呈六边形分布的微透镜阵列, 子孔径为方形^[11], 而有效通光孔径为 $\Phi 00$ 。

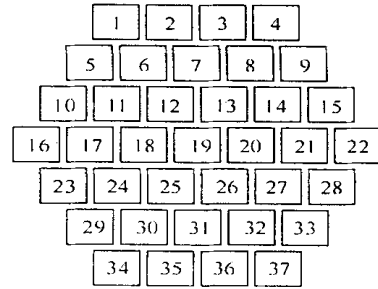
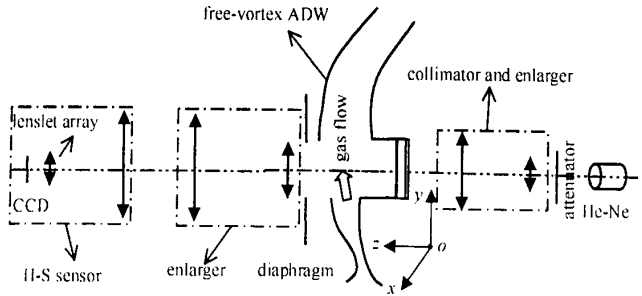


Fig. 1 Principle schematic of the experiment using Hartmann-Shack sensor Fig. 2 Subapertures location of the H-S sensor with 37 lenslets
图 1 哈特曼-夏克法测自由旋涡气动窗口波前畸变原理图 图 2 37 单元 H-S 传感器子孔径分布

1.2 实验方法^[11]

哈特曼传感器将被测畸变波前分割成像在 CCD 探测器上, 经过图象处理求得各个子孔径区域内的波前斜率 G_i (i 为子孔径序列), 采用一定的波前重构算法, 利用 G_i 的数据即可以计算得到被测波前。波前重构有多种算法, 本实验采用 Zernike 模式波前重构算法进行波前的重构, 该方法可以将被测波前的畸变分量分离(如倾斜, 离焦等), 有利于波前校正的实现。

在圆域上, Zernike 多项式波前重构算法将一个完整的全孔径畸变波前 $\Phi(x, y)$ 展开为不同的模式分量, 表示成一系列的正交多项式的线性组合

$$\Phi(x, y) = \sum_{k=1} a_k z_k(x, y) \tag{1}$$

式中: k 为波前 $\Phi(x, y)$ 的第 k 阶模式; a_k 是模式系数; $z_k(x, y)$ 为第 k 阶模式的 Zernike 多项式, 实际计算时, 波前的模式阶数不能取到无穷大为一个有限值 K , 我们的研究测量中取为 35, 这样可较好地解决波前重构时各模式之间的耦合和混淆影响, 以提高重构精度。由 (1) 式得到子孔径区域波前斜率向量 G 与波前传感器 Zernike 模式斜率响应矩阵 Z 和相应模式系数向量 A 的关系式

$$G = ZA \tag{2}$$

式中: G 为 $2N$ 行向量, Z 的维数为 $2N \times K$, N 为传感器的子孔径数。Zernike 模式斜率响应矩阵 Z 对于特定的哈特曼传感器来说是确定的, 因此由 (2) 式可知, 只要实验测得斜率向量 G 就可以求得波前的模式系数 A

$$A = Z^+ G \tag{3}$$

式中: Z^+ 为矩阵 Z 的伪逆矩阵。利用式 (1) 和 (3) 就可以重构得到被测畸变波前, 而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。

为了动态实时地研究气动窗口的波前畸变情况, 我们采用了高速图像采集和高速数字信号处理技术 (DSP)。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。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和重构波前实时保存。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(有关气动窗口激光波前的校正分析我们将另文给出)。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, 使气动窗口开始工作, 处于稳定状态时, 使主控计算机进入数据保存状态, 接着进行相关数据的计算和畸变波前的重构。

实验中为了减小质心探测误差提高探测精度, 可以通过调节每一个光点在传感器焦平面上的采样窗口区域尺寸的大小, 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我们设为 16×16 ,

CCD 背景探测阈值设为 21, 实验较为理想^[11]。

2 实验结果分析

2.1 对光束质量的影响

实验研究了自由旋涡气动窗口在不同供气总压下 ($p_0 = 0.4 \sim 1.3 \text{ MPa}$) 工作时对输出激光波前的畸变情况, 其密封压比与入口供气总压的关系同文献[7]。图 3 和图 4 分别给出了其中三种典型情况的重构波前及相

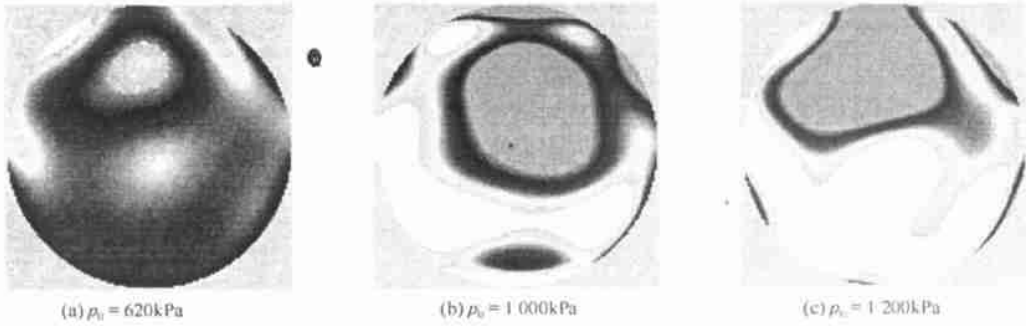


Fig 3 Reconstructed wavefront of He-Ne laser through the FADW

图 3 通过自由旋涡气动窗口 He-Ne 激光畸变波前

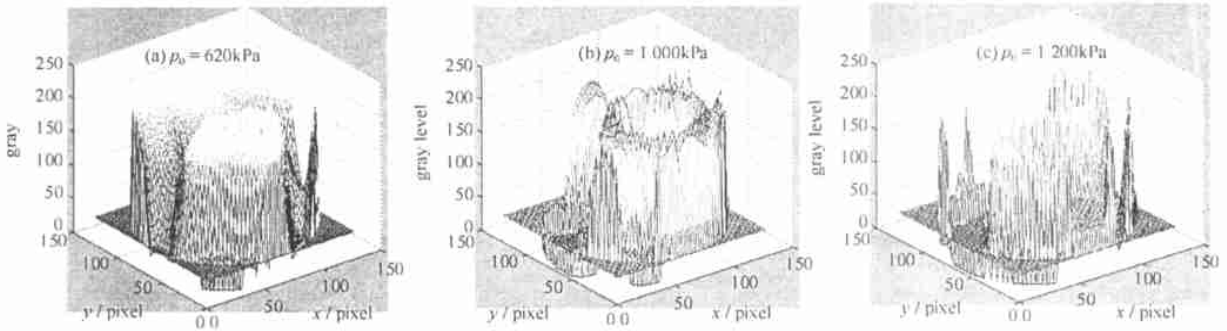


Fig 4 3D structure of the corresponding reconstructed wavefront of Fig 3

图 4 图 3 所示重构波面的三维结构

应波前的三维结构, 其中(a)为自由旋涡气动窗口的供气总压为 $p_0 = 620 \text{ kPa}$ 的情况; (b)为 $p_0 = 1 000 \text{ kPa}$; (c) $p_0 = 1 200 \text{ kPa}$ 。由图 3, 4 所重构的波前我们计算得到了以上三种典型工况下的光束质量参数因子的大小。波像差峰谷值 PV 依次为 $0.15(\lambda)$, $0.18(\lambda)$ 和 $0.20(\lambda)$, 其均方差 $\Delta(\Phi_{rms})$ 依次为 $0.108(\lambda)$, $0.04(\lambda)$ 和 $0.096(\lambda)$, 相应的斯特列尔比 R_s 分别为 0.64 , 0.93 和 0.7 。为了研究和分析气动窗口的光束质量随入口供气总压的变化关系和机理, 我们给出波像差峰谷值 PV, 均方差 $\Delta(\Phi_{rms})$ 以及斯特列尔比 R_s 随入口供气总压的变化关系曲线。图 5 为波像差峰谷值 PV 随自由旋涡气动窗口入口供气总压的变化曲线; 图 6 为均方差 $\Delta(\Phi_{rms})$ 的变化曲线; 图 7 为斯特列尔比 R_s 随入口供气总压的变化关系曲线。从这些结果看, 气动窗口工作在设计状态下时, 其对输出激光的影响最小, 此时光束质量也最好。由图 5 可知, 当气动窗口的入口总压小于设计值时, 其流场对激光波前所导致的局部畸变量较小, 此时波像差峰谷值也较小, 随着供气总压的增加, 波像差峰谷值也逐渐增大。但由图 6 和图 7 可以看出, 在理想设计入口供气总压下, 虽然峰谷值有所增大, 但其波像差的均方根值却比较小, 主要是因为气动窗口工作在设计状态下时, 其流场均匀性比其它状态时要好得多, 此时输出激光的斯特列尔比也最大。而在入口供气总压大于设计状态时, 在激光输出的光路上, 会产生较为复杂的流场结构, 比如强激波等, 这时气动窗口的流场会对输出激光的波前带来较大的影响, 大大降低输出激光的光束质量。从评价气动窗口光束质量的方法来看^[6], 自由旋涡气动窗口在一定的入口供气总压范围内, 其对输出激光光束质量的影响程度在应用上是可以接受的, 但是, 其供气总压 p_0 不在设计状态, 因此其密封压比却达不到要求, 也是不可取的。将图 7 和我们用横向剪切干涉法测量的结果^[9, 12]进行比较可以看出, 两者对斯特列尔比的计算有所差异, 主要是因为用剪切干涉法进行测量时, 我们只是在沿着气动窗口的气流方向进行的一维波前重构, 而这样的计算丢掉了较多实际有用的信息。

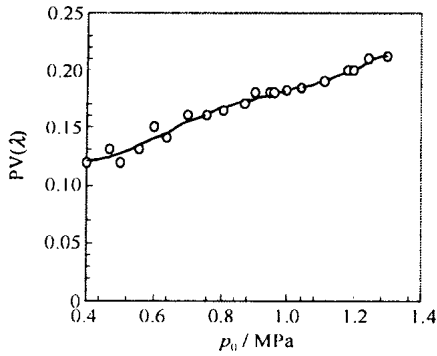


Fig 5 Curve of PV vs total pressure

图 5 波像差峰谷值随供气总压的变化曲线

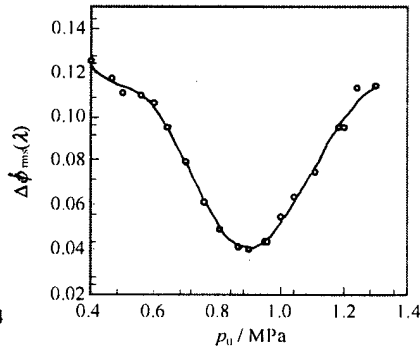


Fig 6 Curve of mms vs total pressure

图 6 波像差均方根随供气总压的变化曲线

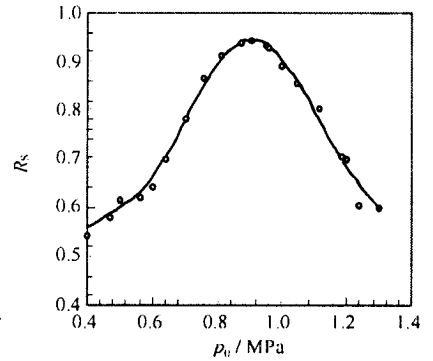


Fig 7 Curve of Rs vs total pressure

图 7 斯特列尔比随供气总压的变化曲线

2.2 对模式系数的影响

上述三种光束质量的描述参数只能为畸变波前的校正提供一个参考依据, 要设计提出波前校正单元的校正能力, 除了要求上述参数外, 还要求得畸变波前的各阶模式系数的大小。根据畸变波前的 Zernike 模式波前重构算法, 我们测量计算了气动窗口工作在不同供气总压下的 35 阶 Zernike 模式系数的大小及其变化。图 8 为三种典型供气总压下的模式系数的大小; 图 9 为几个对波前校正有直接意义的反映低阶像差的模式系数随供气总压的变化情况。

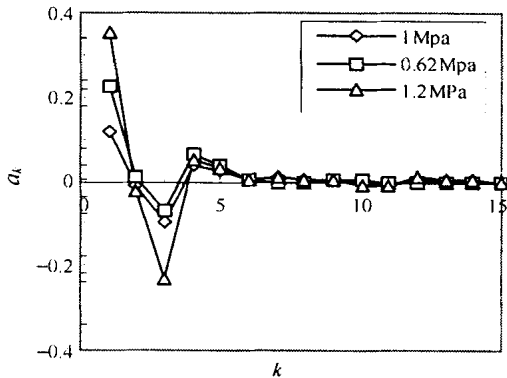


Fig 8 Coefficients of the Zernike polynomials under different total pressure

图 8 不同总压下 Zernike 多项式系数

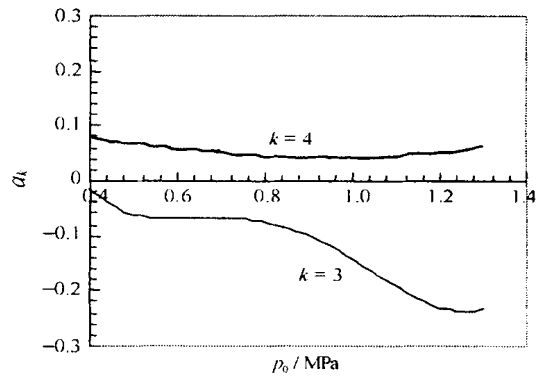


Fig 9 Curve of the level 3 and 4 coefficients of the Zernike polynomials vs total pressure

图 9 第 3, 4 阶 Zernike 系数随供气总压的变化曲线

由图 8 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), 同时还有一定程度的轴向离焦(主要由第 4 阶 Zernike 系数决定)和像散(第 5 阶 Zernike 系数), 其高阶像差一般都比较小。第 3, 4 阶影响较大, 主要体现在气动窗口射流方向上的光束偏转和轴向离焦, 与用其它方法所得到的结果相吻合^[7-9]。由图 9 还可以看出, 气动窗口对波面的倾斜影响随着供气总压的不同变化比较剧烈, 总压高时偏转较大, 而离焦则相对变化较小。

有关自由旋涡气动窗口射流的结构和对激光波前相位影响的理论计算和比较将另文给出。

3 结 论

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实验方法和参考依据, 本文采用哈特曼波前传感器对自由旋涡气动窗口工作在不同状态下对输出激光波前畸变的影响进行了详细的实验研究和分析。测量给出了气动窗口工作在不同入口供气总压下的相关光学参数。结果表明, 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和一定程度的离焦像差, 而其高阶像差一般都比较小, 实验数据较其它方法所得到的结果更精确。当气动窗口偏离设计状态工作时, 随着入口供气总压的升高, 其波面倾斜程度越来越大。哈特曼波前传感器能很好地用于自由旋涡气动窗口对激光波前影响的二维动态测量, 并能给出波前畸变的各项 Zernike 多项式的模式系数得到畸变波前, 直接为气动窗口与强激光发射系统的对接和波前校正提供数据。

参考文献

- [1] 刘天华, 姜宗福, 韦成华, 等. 自由旋气动窗口设计原理及其工作性能的初步实验研究[J]. 中国激光, 2000, **A27**(1): 23—27. (Liu T H, Jiang Z F, Wei C H, et al. Designing principle of the free-vortex aerodynamic window and experimental study on running properties. *Chinese Journal of Laser*, 2000, **A27**(1): 23—27)
- [2] Sonoda K, Ohira K, Nanba K, et al. Research of supersonic free-vortex aerodynamic windows[J]. *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers*, 1996, **62**(599): 2687—2694
- [3] Beherens H W, Shwartz J, Kulkarny V A. Beam quality of continuous and pulsed aerodynamic windows[A]. *Proceeding of SPIE-Laser Diagnostics*[C]. 1982, **34**: 16—32
- [4] 朱松林, 程祖海, 李再光. 引射式气动窗口的光束质量研究[J]. 强激光与粒子束, 1997, **9**(2): 161—165. (Zhu S L, Chen Z H, Li Z G. Optical quality of JADW. *High power laser and particle beams*, 1997, **9**(2): 161—165)
- [5] Knight C K, Singh P I. An axial flow aerodynamic window for large pressure ratios[R]. AIAA paper, 1980. 80—1435
- [6] 刘天华, 姜宗福, 刘泽金, 等. 高能激光器气动窗口光束质量的评价方法探讨[J]. 强激光与粒子束, 2002, **14**(2): 193—196. (Liu T H, Jiang Z F, Liu Z J. Method of evaluating optical quality of aerodynamic windows for high energy lasers. *High power laser and particle beams*, 2002, **14**(2): 193—196)
- [7] 刘天华, 李文煜, 姜宗福, 等. 用远场法研究自由旋气动窗口的光学特性[J]. 强激光与粒子束, 2001, **13**(1): 9—14. (Liu T H, Li W Y, Jiang Z F, et al. Study on the optical properties of free-vortex aerodynamic window using far-field method. *High power laser and particle beams*, 2001, **13**(1): 9—14)
- [8] 刘天华, 姜宗福, 李文煜, 等. 自由旋涡气动窗口的类透镜效应研究[J]. 中国激光, 2001, **A28**(12): (待出版) (Liu T H, Jiang Z F, Li W Y, et al. Study on the equivalent lens effects of the free-vortex aerodynamic window. *Chinese Journal of Laser*, 2001, **A28**(12): in press)
- [9] 陈付幸, 刘天华, 姜宗福, 等. 用剪切干涉法测气动窗口流场对光束质量的影响[J]. 强激光与粒子束, 2001, **13**(6): 670—674. (Chen F X, Liu T H, Jiang Z F, et al. Shearing Interferometric investigation on degradation of light beam quality causing by the aerodynamic window's flow field. *High power laser and particle beams*, 2001, **13**(6): 670—674)
- [10] 姜凌涛, 陈 笠, 饶学军, 等. 动态波前相位的高分辨率测量[J]. 光电工程, 1998, **25**(6): 20—23. (Jiang L T, Chen L, Rao X J, et al. High resolution measurement for dynamic wavefront phase. *Opto-Electronic Engineering*, 1998, **25**(6): 20—23)
- [11] Liu T H, Jiang Z F, Xu X J, et al. Preliminary study on the laser wavefront deformation induced by the free-vortex aerodynamic window for high energy lasers[J]. *Chinese J Laser*, 2002, **A29**(12): to be published
- [12] 刘天华, 陈付幸, 姜宗福, 等. 用LSI法测不同工作条件下自由旋气动窗口的光束质量[J]. 中国激光(增刊), 2001, **A28**(): 待出版. (Liu T H, Chen F X, Jiang Z F, et al. Optical quality measurement of the free-vortex aerodynamic window running under the different conditions using the LSI. *Chinese Journal of Laser*, 2001, **A28**(supplement): in press)

Study on the optical quality of the free-vortex aerodynamic window using Hartmann-Shack sensing

L U Tian-hua, J IANG Zong-fu, XU Xiao-jun, LI Wen-yu, LIU Ze-jin, ZHAO Yi-jun

(Institute of Directed Energy Technology, School of Science,

National University of Defense and Technology, Changsha 410073, China)

Abstract This paper studies the optical quality such as the peak value (PV) of wavefront error, rms and strehl ratio (R_s) of the free-vortex aerodynamic window (FADW) designed for the high energy lasers using the Hartmann-Shack sensing under different inlet total pressures experimentally. The results show that the effects on the output laser wavefront of the FADW are mainly the beam deflexion and the beam divergence, the other high-level wavefront errors are very low. And the FADW can meet our needs. The Hartmann-Shack sensing can be used to measure the 2-dimensional disturbed wavefront through the FADW dynamically and it can be used to launch and correct the high energy laser out of the FADW.

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