

文章编号: 0258-7025(2002)Supplement-0339-04

用 LSI 法测不同工作条件下自由旋气动窗口的光束质量

刘天华 陈付幸 姜宗福 赵伊君 刘泽金

(国防科学技术大学理学院定向能技术研究所, 长沙 410073)

提要 采用横向剪切干涉法(LSI)测量大口径自由旋涡气动窗口所引起输出激光束的波前畸变,并由重构的畸变波前计算光束质量评价因子斯特列尔比的大小。实验测量了自由旋涡气动窗口工作在不同供气总压下的光束质量,同时测量了气动窗口光束质量随时间的变化情况,并给出相应分析。

关键词 高能激光器, 横向剪切干涉法, 自由旋涡气动窗口, 光束质量, 斯特列尔比

中图分类号 TN248; O354 **文献标识码** A

Optical Quality Measurement of the Free-vortex Aerodynamic Window Running Under the Different Conditions Using the LSI

LIU Tian-hua CHEN Fu-xing JIANG Zong-fu ZHAO Yi-jun LIU Ze-jin

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

Abstract Distorted wavefront of the free-vortex aerodynamic windows (FADW) is measured using the method of the lateral shearing interferometry (LSI). And the optical quality factor, i. e., STREHL ratio, is calculated from the reconstructed wavefront. This paper measures the optical quality degradation introduced by the supersonic free-vortex jet of FADW running under the different conditions first. And then it measures the variety of the optical quality with the running time.

Key words high power lasers, lateral shearing interferometry, free-vortex aerodynamic windows, optical quality, STREHL ratio

1 引言

高能气动/化学激光器腔压一般比环境大气压强要低许多,而晶体输出镜可以将其隔离,同时尽可能地减小其对输出激光光束质量的影响。然而,当高能激光器长时间工作或激光功率特别高时,激光器晶体输出窗口就会产生热畸变甚至炸裂,从而较大地影响激光束光束质量或使激光器无法工作。为了解决此问题,人们利用气体对电磁辐射的选择吸收作用,提出了气体动力学激光器输出窗口(即气动窗口)的解决方案^[1]。依据不同的气动工作原理,先后提出了膨胀波式、斜激波式、膨胀波-斜激波联合式^[1,2]、自由旋涡式^[3-5]等横向式气动窗口,以及引射式^[6,7]等纵向式气动窗口。对于纵向式气动窗口,虽然通过辅以抽真空方式可以达到较高的

密封压比,但其对光束质量的影响比较大,而且目前也只适用于小口径聚焦输出^[7]。而且由于抽真空装置的存在,对激光器向小型化和便携式方向发展无疑也是不利的。而对于超音速斜激波式、膨胀波式及其联合机制的气动窗口来说,由于激波或膨胀波系的存在,使气动窗口的流场密度变化极度不均,从而造成较大的光束畸变。而自由旋涡气动窗口,由于其超音速喷管出射端面上压力分布,分别与腔压和外界环境压强相等,因此在理想的设计状态下,其射流流场内不会有复杂波系的产生,从而较好地保证输出激光的光束质量。而且也适用于大口径激光的输出^[5]。

然而,由于自由旋涡气动窗口的工作射流是超音速流场,因此在实际工作中难免会偏离其设计状态,这时在激光输出的光路上,也难免会有激波或膨

胀波系的存在。此时虽然波系的强度远没有其他横向式气动窗口大,但也会对输出激光的光束质量带来一定的影响。采用远场法测量了自由旋涡气动窗口的一些光学特性,比如光束的偏转抖动、发散等^[8];同时还运用远场法测量研究了自由旋涡气动窗口的类透镜效应,并首次给出了产生类透镜效应的产生机理分析,指出自由旋涡气动窗口的喷管设计和类透镜效应的关系^[9]。通过文献^[8,9]的研究分析可知,用远场法研究气动窗口的光学特性,具有操作性好、直观性强等优点,但是对于气动窗口输出激光光束质量的测量存在精度不高的缺点,而且对光波前的结构分布测量难以实现。而剪切干涉是一种自比较差分干涉,不需要原始参考波前,因此剪切干涉法对测量环境要求不高,对声学振动等不敏感;同时采用各种剪切干涉图波前恢复方法^[10],可以恢复经过气动窗口后的激光畸变波前结构,了解气动窗口流场所导致的光束波前畸变的细节,以优化设计气动窗口;通过所重构的畸变波前,可以计算研究各种光束质量评价因子,以了解气动窗口对激光光束质量的影响程度。利用这一特点我们提出用横向剪切干涉仪测量自由旋涡气动窗口流场对光束质量

的影响,并解决了干涉条纹难以判读的难点^[11]。本文采用横向剪切干涉仪和斯特列尔比光束质量因子进行测量研究自由旋涡气动窗口工作在不同供气总压时,其工作射流流场对输出激光光束质量的影响;同时研究在同一供气总压下,经过自由旋涡气动窗口后的输出激光光束质量随时间的变化情况。

2 实验测量原理

2.1 实验装置

图1为横向剪切干涉法测量自由旋涡气动窗口光束质量实验装置图,其中剪切干涉仪为马赫-曾德尔横向剪切干涉仪,探测激光器波长为 $0.65\ \mu\text{m}$,自由旋涡气动窗口的设计口径为 $30\ \text{mm} \times 30\ \text{mm}$,设气流方向为直角体系的 y 向,而剪切方向也是 y 方向。从气动窗口反射回来的激光束经由会聚透镜后为球面波前,进入剪切干涉仪后使其分成两束,并将其错位发生剪切干涉。干涉图由成像系统成像在CCD像元面上,再由图像采集卡输出至计算机。再通过图像处理和波前重构算法可恢复经由气动窗口后的激光束波前结构,并计算光束质量因子。

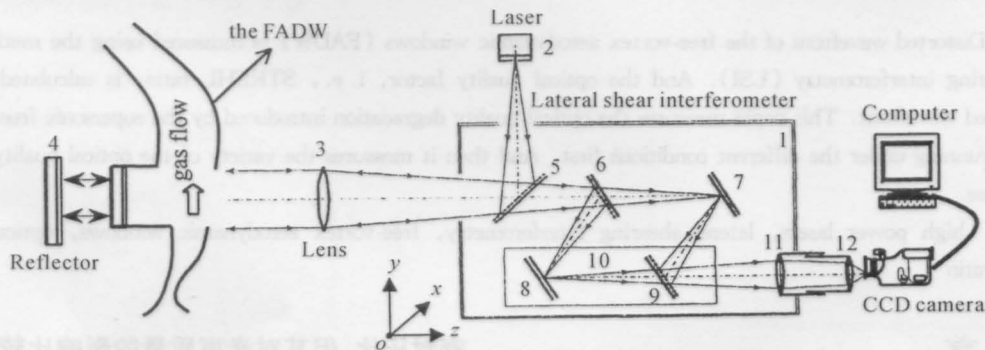


图1 横向剪切干涉法测量自由旋涡气动窗口的光束质量原理图

Fig. 1 Principle sketch of the lateral shear interferometric experiment

2.2 图像处理及波前重构方法

与普通的干涉法不同,横向剪切干涉不需要原始参考波面,它是将被测畸变波面通过各种方法将其分成两个波面,再采用一定的技术将两者错位叠加,使其发生自比较干涉^[10]。虽然横向剪切干涉对声学振动不敏感,对测量环境要求不高,但是,横向剪切干涉条纹所反映的是波前变化的梯度,而不是象普通干涉那样直接反映被测畸变波面的形状和结构,因此这一特性给波前重构带来了一定的困难。同时,对于测量来说,要想实现较高精度测量,干涉条纹的细化定位处理也至关重要。我们根据自由旋

涡气动窗口的工作特点和一定的图像处理方法,很好地解决了这两个问题^[11]。

虽然实验测得的剪切干涉条纹图的信噪比一般比较低,但通过一定的图像处理技术,实现了条纹处理细化的自动化。首先采用直方图均化和维纳滤波技术进行高频降噪处理。然后利用极值法,并结合文献^[12]所提出的处理方法,沿垂直于条纹方向,找出一行像素值的所有局部极小值和极大值,即得到这一行上所有明暗条纹的中心位置,然后扫描垂直于条纹的所有行,就可以确定明暗条纹的中心位置,得到整幅干涉条纹图的细化条纹图。根据细化后的

条纹图,采用线性插值方法就可得到波前恢复所需的每个参考点处的相对干涉级次。

利用上述处理方法得到细化后的剪切干涉条纹图后,就可以利用各自波前重构算法进行波前重构了。而事实上,我们在气动窗口的设计阶段,主要是研究气动窗口工作时其射波所带来的光束畸变的大小和分布,进一步优化设计气动窗口来减小其对光束质量的影响。因此没必要求解光波前的绝对值,而测量气动窗口工作和没有工作时的波前影响的差值才是有意义的,实际上等价于探测激光的波面为平面波时的情况。实验时,设气动窗口没有工作时的光波前为 $w(x, y)$, 工作时的实际畸变光波前为 $w'(x, y)$, 根据上面的分析,我们所要求的是气动窗口对波前的影响值,

$$w''(x, y) = w'(x, y) - w(x, y) \quad (1)$$

通过引入等厚干涉载波技术,将气动窗口工作和没有工作时的剪切干涉图进行比较,导出波前影响的差分方程^[11],

$$\Delta w''(x, y_i) = (\delta'_{y_i} - \delta_{y_i})\lambda \quad (2)$$

其中 λ 为剪切干涉探测激光器波长, δ_{y_i} 和 δ'_{y_i} 分别为不同条件下参考点 (x, y_i) 相对干涉级次的变化, $\Delta w'(x, y_i)$ 为,

$$\begin{aligned} w''(x, y_i + s) - w''(x, y_i) = \\ [w'(x, y_i + s) - w(x, y_i)] - \\ [w'(x, y_i) - w(x, y_i)] = \\ \Delta w'(x, y_i) - \Delta w(x, y_i) \end{aligned} \quad (3)$$

由(3)式可知, $\Delta w''(x, y_i)$ 实际上就是气动窗口工作和没有工作时波前差分(影响)的差分,因此,根据干涉条纹图求出 δ_{y_i} 和 δ'_{y_i} 后,可用单幅干涉图波前恢复算法对(2)式进行恢复计算,求出 $w'(x, y)$ 的值。

在强激光的远场应用和自适应光学应用中,光束质量因子斯特列尔比 S_r 用得较为广泛,本文采用此值描述分析气动窗口的光束质量问题。在小像差近似条件下,光束质量因子斯特列尔比(S_r)可表示为^[13]

$$S_r \approx \exp(-\langle \varphi^2 \rangle) \approx \frac{1 + \cos(1.75\langle \varphi^2 \rangle^{1/2})}{2} - \frac{\sin(1.75\langle \varphi^2 \rangle^{1/2})}{2} \quad (4)$$

其中 $\varphi = kw(x, y)$ 。根据剪切干涉波前恢复的离散特性,可由下式离散求解 $\langle \varphi^2 \rangle$,

$$\begin{cases} \langle \varphi^2 \rangle = \iint [\varphi(x, y) - \bar{\varphi}]^2 dx dy / \iint dx dy, \\ \bar{\varphi} = \iint \varphi(x, y) dx dy / \iint dx dy \end{cases} \quad (5)$$

3 实验结果及分析

由于自由旋涡气动窗口的射流流场在 x 坐标轴方向是一致的,气动窗口工作在理想设计状态下时,流场结构沿着 x 方向相同。因此本文为了实验方便和剪切干涉仪的条件限制,只进行沿气流方向(y 方向)的一维波前恢复计算,而光束质量斯特列尔比也是一维情况下计算得到的。实验以不同的剪切量多次测量了在不同供气总压下气动窗口对波前的影响,并计算得到了斯特列尔比。图 2 为气动窗口工作在设计状态下($p_0 = 10$ atm)的干涉图,其中图 2(a)为气动窗口没有工作时的剪切干涉图,图 2(b)为稳定工作时的剪切干涉图。

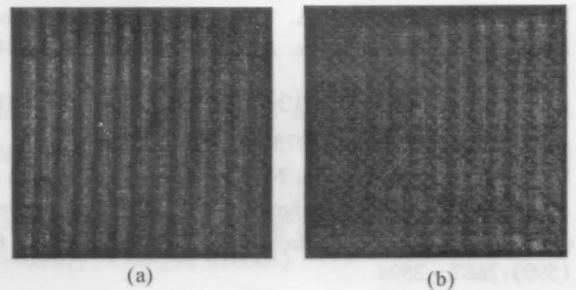


图 2 气动窗口典型剪切干涉图

Fig.2 Typical lateral shearing interferogram

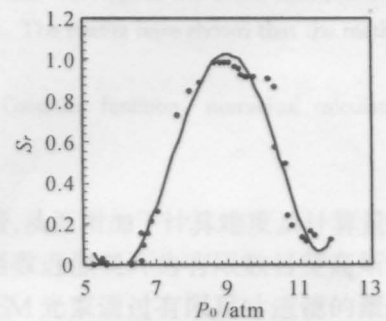


图 3 S_r 随入口供气总压的变化曲线

Fig.3 STREHL ratio with P_0

图 3 计算给出了自由旋涡气动窗口光束质量因子斯特列尔比随总压的变化曲线。图 4 为气动窗口工作在 $P_0 = 10$ atm 时的斯特列尔比随时间的变化曲线。图 2~图 4 测量时的剪切量均为 1.5 mm。从图中可知,自由旋涡气动窗口工作在设计状态下时,对输出激光的光束质量的影响也最小,斯特列尔比达到 0.98,能较好地满足万瓦级 CO_2 激光器光腔的要求,而且工作持续稳定。而当偏离其设计状态时,特别是偏离较远时,气动窗口对光束质量会带来较大的影响。

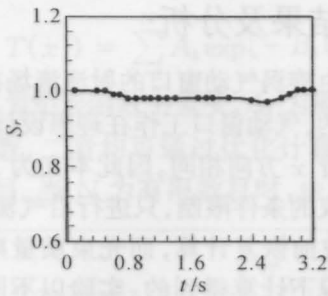


图4 S_r 随时间的变化曲线
Fig.4 STREHL ratio with time

参 考 文 献

- 1 G. F. Hausmann. Aerodynamic window for gas dynamic laser. US-PAT 3 617 928, 1971
- 2 E. M. Parmetier, R. A. Greenberg. Supersonic flow ADW for high power lasers. *AIAA J.*, 1973, **11**(7):943~949
- 3 R. N. Guile. Investigation of a free-vortex aerodynamic windows. *AIAA Paper*, 1975, 75~122
- 4 S. Keisuke, O. Katsuhide, N. Kazumi *et al.*. Research of supersonic free-vortex aerodynamic windows. *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers*, 1996, **62** (599):2687~2694
- 5 Liu Tianhua, Jiang Zongfu, Wei Chenghua *et al.*. Designing principle of the free-vortex aerodynamic window and experimental study on running properties. *Chinese J. Lasers* (中国激光), 2000, **A27**(1):23~27 (in Chinese)
- 6 C. K. Knight, P. I. Singh. An axial flow aerowindow for large pressure ratios. *AIAA Paper*, 1980, 80~1435
- 7 Zhu Songlin, Cheng Zuhai, Ku Geng *et al.*. Sealed properties and optical quality of jet injecting aerodynamic window. *Chinese J. Lasers* (中国激光), 1997, **A24**(2): 113~117(in Chinese)
- 8 Liu Tianhua, Li Wenyu, Jiang Zongfu *et al.*. Study on the optical properties of free-vortex aerodynamic window using far-field method. *High Power Laser and Particle Beam* (强激光与粒子束), 2001, **13**(1):9~14 (in Chinese)
- 9 Liu Tianhua, Jiang Zongfu, Li Wenyu *et al.*. Study on the equivalent lens effects of free-vortex aerodynamic window. *Chinese J. Lasers* (中国激光), 2001, **A29**(1):16~20 (in Chinese)
- 10 Xu Deyan. *Shearing Interferometers and Their Applications*. Beijing: China Machine Press, 1987 (in Chinese)
- 11 Chen Fuxing, Liu Tianhua, Jiang Zongfu *et al.*. Shearing interferometric investigation on degradation of light beam quality causing by the aerodynamic window's flow field. *High power lasers and Particle beam* (强激光与粒子束), 2001, **13**(6):670~674(in Chinese)
- 12 Fu Shiyu, Wang Mingji, Wang Yunshan *et al.*. A new method of processing speckle image using the technique of computer image processing. *Appl. Opt.*, (应用光学), 1996, **16**(2):71~72 (in Chinese)
- 13 R. D. Quinell. Linitation on the Root-Square Phase to describe beam quality characteristics. *Proc. SPIE*, 1981, **293**:12~19

