

文章编号: 0258-7025(2001)09-0802-07

气动介质光学不均匀性的研究及测量

许晓军 陆启生 姜宗福 陈金宝 刘泽金 刘天华

(国防科技大学理学院 长沙 410073)

摘要 通过对高速气流对光束波前扰动的分析,指出气动光学不均匀性可分为大尺度有序扰动和小尺度随机扰动。对于大尺度扰动,扰动波前可以利用波前传感器测量,而小尺度随机扰动,相干系数是一个较好的评价标准。横向剪切干涉仪(LSI)可以实现对两种扰动的同时测量。在此基础上利用 LSI 对自由旋气动窗口(FADW)的流场对光场的扰动进行了测量,得到了扰动光场的有序扰动的一维波前分布和随机扰动的各种尺度的分布,分析了不均匀尺度的产生原因。

关键词 气动光学,相干系数,剪切干涉,不均匀尺度,气动窗口

中图分类号 TN 24;O 354 **文献标识码** A

Study and Measurement of Aero-optics Inhomogeneity

XU Xiao-jun LU Qi-sheng JIANG Zhong-fu CHEN Jin-bao LIU Ze-jin LIU Tian-hua

(Institute of Science, National University of Defense Technology, Changsha 410073)

Abstract From the analysis on wavefront aberration caused by high-speed airflow, it was found that aero-optics inhomogeneity is consisted of large-scale ordered and small-scale random inhomogeneity. With wavefront sensor, the large-scale aberration can be reconstructed. For the small-scale aberration, the coherent index is a better standard for measurement. However, the Lateral Shear Interferometer (LSI) can realize the two kinds of measurements. Therefore, the inhomogeneity of Free Vortex Dynamic Window (FVDW) was investigated by LSI, the one dimension wavefront aberration in output window was reconstructed and the random inhomogeneous scale distribution was given. Also, the main cause of inhomogeneity was discussed.

Key words aero-optics, coherent index, shear interferometer, inhomogeneous scale, air dynamic window

高功率和良好的光束质量是强激光技术发展的两大目标。而光束质量即空间相干性和发散角直接影响激光能量在远距离上传输的可能性。典型的大功率激光器如气动激光器(GDL)和连续波化学激光器(CWCL)的运转,光束必须直接通过大体积的激活介质和超音速流体^[1,2],因而输出激光的光束质量很大程度上取决于介质的光学均匀性,即取决于激光器的气动性能。另外,作为大功率激光器输出窗口的晶体材料随着激光功率的增高越来越对强激光的发展产生了限制。一是由于晶体窗口的吸收作用,使窗口产生热聚焦、热畸变,严重影响光束质量;二是当激光功率密度大于晶体窗口的破坏阈值时使激光器无法工作。目前最具有发展潜力的激光窗口是利用气体动力学原理研制的气动窗口^[3,4,5]。气

动窗口的窗口物质为位于输出激光大气窗口上的气体,具有能量吸收极小,击穿功率阈值很高,热沉积小等优点。然而由于气动窗口中超音速流场的存在,使窗口上的流场密度变化较大,从而引起较大的波前畸变,影响输出激光的光束质量。

本文从光束质量评价入手,对介质的不均匀尺度对光束质量的影响进行分别研究讨论,指出利用横向剪切干涉仪(LSI)可以同时测量大尺度扰动的波前分布和小尺度扰动的不均匀性分布。在此基础上,利用 LSI 对自由旋气动窗口(FADW)^[3,5]的光学不均匀性进行了测量分析,得到了 FADW 影响光学不均匀性的主要原因及流场分布。

1 研究光学不均匀性的方法

光束通过介质传输时,介质对光束的影响可分

为振幅的影响即吸收和相位的影响即波前扰动, 而对影响的评价标准就是光束质量。在不同的应用背景和测量限制下, 已经对光束质量给出了多种定义^[6-8,9-12]。由于气动器件中存在高速流场, 一是使光路上的流场密度变化较大, 引起折射率场的起伏, 从而引起大尺度的有序波前畸变; 二是剪切层引起的湍流, 引起波前的小尺度随机扰动, 影响输出激光的光束质量。这两种扰动的同时存在对于光束质量的评价和测量提出了新的要求。因而, 我们就气动介质的光学不均匀性对光束质量的影响选择一种切实可行的评价标准和测量方法。

对于大尺度的有序波前畸变, 最精确的测量即给出近场光场的相位分布, 这可以由波前传感器来实现。常用的波前传感器有哈特曼波前传感器(HWS)和LSI。而通过重构的波前可以直接计算出Strehl比, M^2 因子, 远场发散角或衍射极限倍数, 相对焦斑尺寸, 环围能量比, 相对光斑半径 β 等光束质量的评价因子。

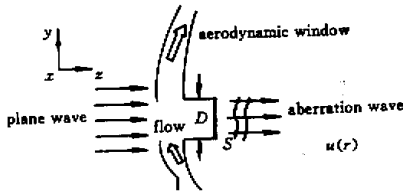


图1 气动窗口对光场的扰动

Fig.1 Aberration wave by aerodynamic windows

假定一平行光通过有序不均匀介质后(如图1), 在输出孔径 S 后的扰动光场为

$$u(\vec{r}, t) = A(\vec{r}, t) \exp[ik\varphi(\vec{r}, t)] \quad (1)$$

其中 $A(\vec{r}, t)$ 为振幅, $\varphi(\vec{r}, t)$ 为光波前, k 为波矢。忽略吸收作用, 有序扰动的Strehl比定义为

$$St = \max_{|\vec{r}'|} \left\{ \frac{1}{s^2} \left| \int_S e^{ik\varphi(\vec{r})} e^{-\frac{i k \vec{r} \cdot \vec{r}'}{s}} d\vec{r}' \right|^2 \right\} = \max_{|\vec{r}'|} \left\{ \frac{I(\vec{r}')}{I_0} \right\} \quad (2)$$

而对于小尺度随机扰动, 由于扰动波前的高空间频率和湍流的随机性, 很难对扰动波前进行直接测量。因而对小尺度扰动一般利用介质不均匀尺度进行研究。G. W. Sutton^[1]和V. L. Moshkov^[2]对激活介质的不均匀尺度利用湍流积分尺度 Λ 进行区分。研究表明^[1,2], 气动条件与激活介质的不均匀尺度有如下关系: 大尺度不均匀性一般由激光腔

内的激波、边界层和混合层层流等引起; 而GDL的喷管相互作用, CWCL的燃料喷入, 电激励激光器的阴极板的分割等产生的湍流都会引起小尺度不均匀性。对于有序扰动, 一般 $\Lambda \sim D$; 而对于随机介质 $\Lambda \sim (D\lambda)^{1/2}$, 其中 D 为光束直径, λ 为激光波长。因而 Λ 即为介质扰动尺度的衡量。两种扰动引起的Strehl比在小扰动条件下^[7]均可近似为

$$St \approx \exp(-k^2 \Delta\varphi_{\text{rms}}^2) \quad (3)$$

式中 $\Delta\varphi_{\text{rms}}$ 为扰动波前的均方根值。

波前扰动尺度可以用相干系数衡量, 定义相干系数 $\gamma^{[12]}$ 为

$$\gamma(\vec{r}, t) = \frac{\langle u(\vec{r}, t) u^*(\vec{r} + \vec{s}, t) \rangle}{\sqrt{|u(\vec{r}, t)|^2 \cdot |u(\vec{r} + \vec{s}, t)|^2}} \quad (4)$$

其中 $\langle \rangle$ 表示对随机场的统计平均, 则相干半径 \vec{r} 满足 $|\gamma(\vec{r}, t)| = e^{-1}$ 。

如果同样略去振幅的扰动, 考虑一个确定方向上的相干系数得

$$\gamma(s) = \langle e^{ik\varphi(r)} \cdot e^{-ik\varphi(r+s)} \rangle = \langle e^{ik[\varphi(r) - \varphi(r+s)]} \rangle \quad (5)$$

将介质层分为若干薄层, 则波前的扰动应该是各层介质独立扰动的和。由中心极限定理知 $\varphi(r)$ 应当满足高斯分布, 则 $\varphi(r) - \varphi(r+s)$ 为0均值的高斯变量, 并且由(5)式可知, $\gamma(s)$ 为 $\varphi(r) - \varphi(r+s)$ 的特征函数, 有

$$\gamma(s) = \exp \left\{ -\frac{k^2}{2} \langle [\varphi(r) - \varphi(r+s)]^2 \rangle \right\} = \exp \left[-\frac{k^2}{2} D_\varphi(s) \right] \quad (6)$$

$$D_\varphi(s) = \langle [\varphi(r) - \varphi(r+s)]^2 \rangle \quad (7)$$

其中, $D_\varphi(s)$ 正是扰动波前的空间结构函数。另外由随机场理论可知

$$D_\varphi(\infty) = 2R_\varphi(0) = 2\Delta\varphi_{\text{rms}}^2 \quad (8)$$

$R_\varphi(\cdot)$ 为随机场波前的相关函数。结合(3), (6), (8)式, 可推出

$$St = \gamma(\infty) \quad (9)$$

可以看出, 相干系数 $\gamma(s)$ 记录了以 s 为衡量尺度的扰动波前的空间结构信息, 即波前结构函数。并且从(6)式的表达中可以看出 $\gamma(s)$ 与波前的剪切存在一定的关系, (4)式的定义也同样说明, $\gamma(s)$ 是光场 $u(\vec{r})$ 与 $u(\vec{r})$ 在 \vec{s} 方向移动 $|s|$ 后的光场 $u(\vec{r} + \vec{s})$ 的干涉统计平均结果。因而, 相干系数 $\gamma(s)$ 可以利用LSI进行测量。而剪切干涉的条纹对比度即为相干系数^[13]

$$\gamma(s) = 1 - I_{\min} / \bar{I} = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} \quad (13)$$

其中, \bar{I} 为干涉图的平均强度, I_{\max} , I_{\min} 分别为明暗纹强度。

综上所述,大尺度有序扰动的一阶扰动即波前倾斜会导致远场光斑的漂移,Strehl 比不变,剪切干涉条纹产生平移,条纹对比度 $\gamma(s)$ 不变。高阶(> 1)有序不均匀扰动导致远场衍射中心级光强降低,次级光强增加,Strehl 比减小,剪切干涉条纹发生弯曲,对于 $s < \Delta$, 则 $\gamma(s)$ 不变,而这是 LSI 的一般测量要求,即 $s \ll D$ 。故有序不均匀性一般不影响剪切干涉的条纹对比度, $\gamma(s) = 1$ 。而对于小尺度随机扰动,则会引起远场光强中心强度降低,即 Strehl 比减小。并且由于随机扰动的尺度一般小于剪切量 $\Delta < s$, 则 LSI 的干涉条纹对比度下降,即 $\gamma(s)$ 减小。且由结构函数的性质可知,条纹的对比度随着剪切量 s 的增大而减小。当剪切量等于 0 时,相干系数取最大值 1; 当剪切量趋于无穷时,相干系数趋于 Strehl 比。因而,利用 LSI 对气动介质的不均匀性进行研究,一是可以重构出有序波前扰动,得出光路

上气流折射率的大尺度分布,从而了解气流中的激波、膨胀波、压缩波等的存在情况;二是可以测得随机波前扰动的尺度分布情况,由此得出流体中湍流等小尺度扰动的分布。

2 FADW 的光学不均匀性测量

Parmetier 和 Greenberg^[4] 讨论了三种斜激波、膨胀波或联合机制的超音速气动窗口的光学性能。对有序介质扰动的研究表明,当密封压力比(外环境压力与腔压之比)为 10 时,对于 10 cm 孔径和 10 μm 波长的激光,Strehl 比下降 0.05。而对于 DF 激光输出,则 Strehl 比会下降 0.35。造成有序扰动的主要原因是这些气动窗口是利用 Laval 喷管在激光出射路径上形成斜激波、膨胀波或二者之联合,使波系两侧的压力分别与腔压和环境压力匹配。而波系的存在造成了流场密度的起伏,从而引起较大的光束畸变。并且波系的存在还限制了通过气动窗口的工作气体的动量改变量,使其质流量比较大,限制了密封压力比的进一步提高。

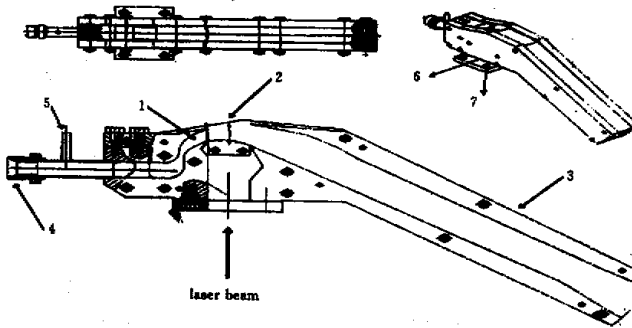


图 2 FADW 的设计结构简图

1: 喷管; 2: 输出窗口; 3: 扩散器; 4: 工作气体入口; 5: 入口压力传感器; 6: 密封压力传感器; 7: 阀门

Fig. 2 Structure design of FADW

1: nozzle; 2: output window; 3: diffuser; 4: gas; 5: pressure sensor; 6: pressure sensor; 7: valve

由于斜激波、膨胀波或联合机制的气动窗口存在着这些问题,因此对 FADW 进行了深入的研究。根据气体动力学原理可知,工作在自由旋状态下的气动窗口就不会有波系的产生,而且还能最大限度地增加喷管射流的动量改变量,降低气动窗口工作气体的消耗^[14,15]。图 2 给出了一套为万瓦级 CO₂ 激光器配套的 30 mm × 30 mm 口径的 FADW^[5] 模型结构图。图中 1 即为二维非对称超音速喷管,通

过改变入口工作气体的总压 P_0 , 可以实现自由旋工作状态。该气动窗口的设计工作总压为 8 atm $< P_0 < 10$ atm。在 $P_0 = 9$ atm 时,喷管出射流为自由旋流体。当工作在理想的设计状态 $P_0 = 9$ atm 时,密封压比可达到最大值 28,能够与激光器的工作很好匹配,此时喷管出口形成自由旋流体,激光出射路径上没有任何波系的产生。而在 $P_0 < 8$ atm 或 $P_0 > 10$ atm 时,由于在喷管出口有复杂波系的

生成,会产生较大的光束畸变,因此一般气动窗口工作在设计状态。

2.1 测量方案

由于气动窗口工作在自由旋流状态时,激光出射路径上没有波系的存在,因而流场介质对光束的有序不均匀扰动不大。对比斜激波、膨胀波或联合机制的气动窗口的输出光束的质量,可以看出,直接利用 $10.6\ \mu\text{m}$ 的 CO_2 激光测量 Strehl 比或光束质量因子 β 是不可取的,因为对于长波长激光测量值改变很小,而应该利用短波长激光如 He-Ne ($0.6328\ \mu\text{m}$) 或半导体激光器 ($0.65\ \mu\text{m}$) 来测量。而利用 LSI 可以同时实现对有序和随机不均匀扰动的测量。测量原理如图 1 所示,利用平面波通过运转的 FADW,然后对扰动光场进行剪切干涉测量。图 3 给出了测量装置图, FADW 置于图中流场的位置。试验测量的 FADW 的窗口形状为一正方形,尺寸为 $30\ \text{mm} \times 30\ \text{mm}$,位于 xy 平面,光传输在 z 方向,流场为 y 方向。测量激光采用 $0.65\ \mu\text{m}$ 半导体激光器,剪切干涉仪采用 Mach-Zender 横向剪切干涉仪,试验中剪切量与流场在同一方向。试验采用折叠光路,让光两次通过流场介质,一是可以增强扰动,二是便于在同一光学平台上实现光路。但缺点是反射镜放置不当,容易导致入射光线和反射光线不经过同一介质位置,给测量带来误差。解决的方法是在气动窗口未工作的条件下,利用叉丝校正,另外尽量使反射镜接近测量窗口。试验时利用 CCD 探测器对剪切干涉条纹进行实时记录,记录条件为 $320 \times 240\ \text{pixel}$, $25\ \text{fps}$ 。气动窗口所占像素约为 $x(240) \times y(240)$ 。考虑到不均匀尺度,剪切量选取了 $s = 2\ \text{mm}$ 和 $s = 0.5\ \text{mm}$ 两种情况。

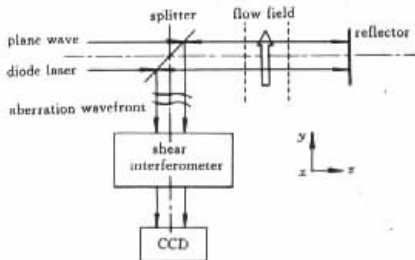


图3 测量装置图

Fig.3 Setup of measurement

2.2 测量结果

图 4,5 为同一气动窗口在总压 $P_0 = 9\ \text{atm}$ 的

自由旋流条件下,剪切量分别为 $s = 2\ \text{mm}$ 和 $s = 0.5\ \text{mm}$,同一次测量光场扰动前后的剪切干涉图样。由于测量数据量较大,图中只给出了光场扰动前后典型的几帧干涉图。图 6 给出了气动窗口启动瞬间的干涉图。可以看出,气动窗口启动瞬间,由于气流尚未平衡,窗口上随机不均匀性很大,大大减弱了光场的相干性。另外,气流的高速变化,导致 CCD 上记录的是平均效果,因而剪切干涉同样基本无条纹。当气动窗口稳定工作时,干涉图样基本不变,即气动窗口稳定工作时,窗口上的气流基本稳定,即气流的有序不均匀分布保持不变。因而在进一步处理时,可选取稳定工作时的一帧或几帧进行平均。另外从测量结果来看,剪切量 $s = 0.5\ \text{mm}$ 的干涉图样的条纹对比度和能观察到的条纹数明显好于 $s = 2\ \text{mm}$ 的剪切干涉图样。



图4 0.0, 1.2, 3.6 s时刻 $s = 2\ \text{mm}$ 剪切干涉图形

Fig.4 Shear interference patterns with $s = 2\ \text{mm}$ in 0 s, 1.2 s, 3.6 s

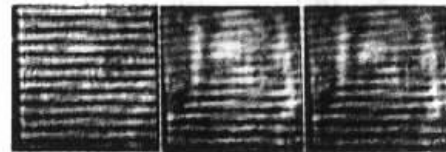


图5 0.0, 1.4, 2.32 s时刻 $s = 0.5\ \text{mm}$ 剪切干涉图形

Fig.5 Shear interference patterns with $s = 0.5\ \text{mm}$ in 0 s, 1.4 s, 2.32 s

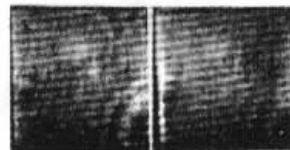


图6 $s = 0.5\ \text{mm}$, $2\ \text{mm}$ 气动窗口启动瞬间的剪切干涉图样

Fig.6 Shear interference patterns with $s = 0.5\ \text{mm}$ and $2\ \text{mm}$ in FADW beginning

2.3 有序扰动分析

由自由旋气动窗口的喷管设计可知,窗口上的流场关于 y 轴对称。如果不考虑窗口上两侧壁对流场的作用,则流场对光波的扰动仅为 y 的函数。从图 4、5 的干涉图样可以看出气动窗口的中心区域 ($70 \text{ pixel} < x < 170 \text{ pixel}$) 的波前扰动主要在流场方向, x 方向波前扰动不大,即 $\varphi(r) = \varphi(y)$,则可以由条纹的变化来重构波前。图 7 给出了波前扰动前后中心区域 $s = 0.5 \text{ mm}$ 的剪切干涉条纹的变化。

可以看出,气动窗口在稳定运转情况下条纹位

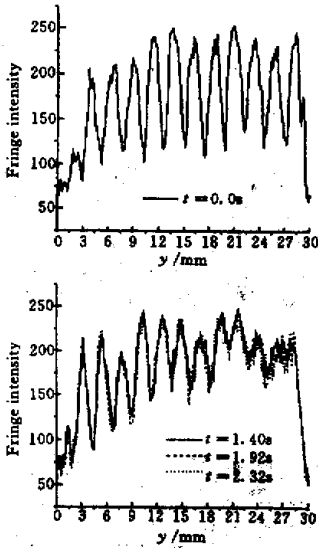


图 7 气动窗口工作前后的条纹变化

Fig. 7 Fringe intensity before and after aerodynamic window operation

置比较稳定,在条纹对比度大的区域尤为明显。而在流场下游,条纹对比度下降,条纹位置有些波动。利用数值滤波对测得的条纹进行平滑处理,在通过对气流稳定状态不同时刻的条纹极值位置的平均和标准条纹的极值位置,可以得到如图 8 的标准条纹极值位置的波前差分。

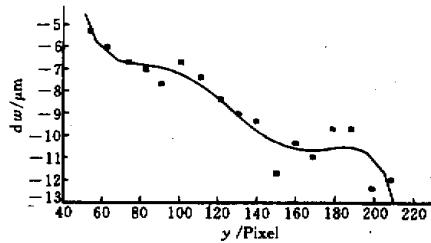


图 8 标准条纹极值位置的波前差分
Fig. 8 Difference of the wavefront

利用常规波前重构方法,图 9 重构了两次通过气动窗口的扰动的波前分布 ($0 \text{ mm} < y < 19 \text{ mm}$)。表 1 给出了 FADW 对光束质量的影响的三次测量结果,并给出了光束质量与波长的关系。

可以看出, FADW 在自由旋工作状态下,有序不均匀扰动的稳定性比较好,三次测量值基本相同。FADW 对波前扰动的成分主要是波前的倾斜,波前倾斜达 0.28 mrad 。另外从除去波前倾斜的残余波前畸变的均方差为 $0.136 \mu\text{m}$,对于 $10.6 \mu\text{m}$ 波长的激光可知相位方差 $\langle \Phi^2 \rangle = 0.0065$,即该自由旋气动窗口的运转会使输出的 CO_2 激光的 Strehl 比下降 0.0065 。如果将该气动窗口装配在 DF 激光器中,

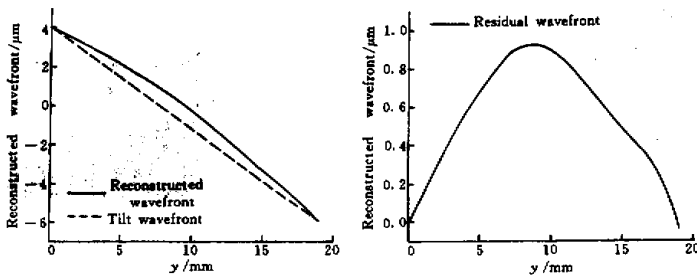


图 9 扰动光场的重构波前

Fig. 9 Reconstructed wavefront of aberration beam

表 1 FADW 对光束质量的影响比较

Table 1 Beam quality FADW operation

Test #	$\Delta\phi_{rms}/\mu\text{m}$	Tilt/mrad	$\lambda/\mu\text{m}$	$\langle\phi^2\rangle$	Strehl ratio	β
1	0.136	0.28	0.65	1.7265	0.178	2.7
			3.8	0.0505	0.951	1.05
			10.6	0.0065	0.994	1.0065
2	0.140	0.29	0.65	1.8295	0.160	2.8
			3.8	0.0535	0.948	1.05
			10.6	0.0068	0.993	1.0068
3	0.132	0.28	0.65	1.6264	0.197	2.6
			3.8	0.0476	0.954	1.05
			10.6	0.0061	0.994	1.0061
Average	0.136	0.28	0.65	1.7265	0.178	2.7
			3.8	0.0505	0.951	1.05
			10.6	0.0065	0.994	1.0065

则气动窗口会使输出的 DF 激光的 Strehl 比下降 0.05。与斜激波、膨胀波或联合机制的气动窗口比较而言,自由旋气动窗口对通过光束的光束质量的影响的确比较小。而对于引起的波前倾斜,可以容易通过光稳消除。

由于条纹的对比度在 $3\text{ mm} < y < 19\text{ mm}$ 上比较高,以上的处理,仅仅利用了 $3\text{ mm} < y < 19\text{ mm}$ 上的条纹进行了波前重构。

2.4 随机扰动分析

由于自由旋气动窗口工作在超音速状态,窗口上流体的雷诺数很大,必然有湍流存在。自由旋流体是在假定流体内部无粘性,忽略摩擦作用的条件下得到的,与实际流体在湍流分析情况下有一定的差别。由于流体的粘性,超音速流体不同速度层上的剪切作用,会在窗口上形成随机不均匀扰动。另外,窗口两侧的固壁也形成边界层流,引起随机扰动。

LSI 的一般测量要求 $s \ll D$, 故有序不均匀性

一般不影响剪切干涉的条纹对比度, $\gamma(s) = 1$ 。在本试验条件下,存在的湍流的不均匀尺度 $\Lambda \sim 0.14\text{ mm} \ll D$ 。测量选取的 s 值为 2 mm 和 0.5 mm ,测得的剪切干涉图如图 4、5 所示,三次测量的干涉图样基本相同。

从图 4 和图 5 的直观图像可以看出,在窗口气流的下游存在小尺度的不均匀性。图 10 (a) 给出了在气流方向上,窗口中心 10 个像素上的条纹平均强度。条纹的数据表明,条纹对比度随流场的方向逐渐下降,但 $s = 0.5\text{ mm}$ 的条纹对比度明显比 $s = 2\text{ mm}$ 的对比度好,主要原因是较小的 s 可以测量波前的较小尺度不均匀扰动,而大 s 平均了较小尺度的不均匀扰动。对于 $s = 2.0\text{ mm}$ 的情形, $y > 90$ pixel 以后的条纹基本不易分辨;而对于 $s = 0.5\text{ mm}$ 的情形, $y > 170$ pixel 以后的条纹基本不易分辨。满足这一条件的 x 的区域约为 $50\text{ pixel} < x < 190\text{ pixel}$ 。另外,在 $x < 50\text{ pixel}$, $x > 190\text{ pixel}$, $y > 140\text{ pixel}$ 的区域条纹的对比度很小,如图 10 (b)。

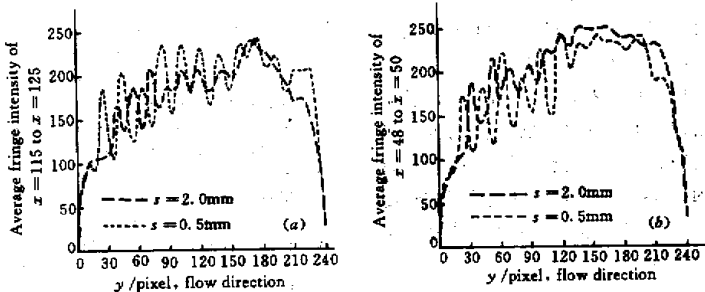


图 10 条纹对比度

Fig. 10 Contrast of fringe

通过以上的分析,可以基本将气动窗口按随机不均匀尺度的单位为 mm。 匀尺度划分如表 2。表中 x, y 的单位为 pixel, 不均匀

表 2 气动窗口的随机不均匀尺度分布情况

Table 2 Distribution of random inhomogeneous scales of FADW

X \ Y	0~50 pixel	50~190 pixel	190~240 pixel
0~90 pixel	$\Delta > 2.0$ mm	$\Delta > 2.0$ mm	$\Delta > 2.0$ mm
90~140 pixel	$0.5 \text{ mm} < \Delta < 2.0$ mm	$0.5 \text{ mm} < \Delta < 2.0$ mm	$0.5 \text{ mm} < \Delta < 2.0$ mm
140~170 pixel	$\Delta < 0.5$ mm	$0.5 \text{ mm} < \Delta < 2.0$ mm	$\Delta < 0.5$ mm
170~240 pixel	$\Delta < 0.5$ mm	$\Delta < 0.5$ mm	$\Delta < 0.5$ mm

通过分析表 2 的测量结果发现,在气动窗口的两侧壁 ($x < 50$ pixel, $x > 190$ pixel) 存在两块不均匀尺度 $\Delta < 0.5$ mm 的区域,由气动动力学的分析可知,这主要是由于气体的粘性 with 窗口两侧壁相互作用产生的边界层流引起,而流场尾部 ($y > 170$ pixel) 的 $\Delta < 0.5$ mm 的不均匀尺度区域主要是自由旋流和扩散器相互作用引起。气动窗口的中心区域主要是自由旋流引起的大尺度有序不均匀,而 $0.5 \text{ mm} < \Delta < 2.0$ mm 尺度的随机不均匀性主要由湍流引起。因而如果激光输出在 (50~190 pixel) \times (0~170 pixel) 的区域,则可以避开较强的随机不均匀性。

3 结 论

高能激光的发展对气动技术提出了更高的要求,而高速气流对流体中光束的质量产生了一定的影响。通过对高速气流对光场的影响分析,可以将扰动分为由激波等引起的折射率大尺度起伏而导致的大尺度有序波前畸变,和湍流等引起的小尺度随机波前扰动。这对常规的波前扰动和光束质量的测量方法提出了新的课题。本文通过对于同时存在的两种扰动分析,提出可以通过 LSI 测量和重构大尺度有序波前扰动,并且不同剪切量的条纹对比度即相干系测量各种尺度的波前扰动的分布。在此基础上利用 LSI 对 FADW 的流场对光场的扰动进行了测量,得到了输出窗口上的一维有序波前扰动和扰动光场的随机不均匀尺度的分布,与基于斜激波、膨胀波或联合机制的气动窗口进行了比较,并分析了不均匀尺度的产生原因。

参 考 文 献

1 G. W. Sutton. Influence of the turbulent pulsation of the

optical active medium on the light beam. *AIAA J.*, 1969, 7(9):1737~1743

- 2 V. L. Moshkov. Spatial and temporal scales of active medium inhomogeneous in high power gas lasers. R. Kossowaky *et al.* (eds.), *High power lasers-Science and Engineering*, Netherlands, Kluwer Academic Publishers, 1996. 47~82
- 3 R. N. Guile. Investigation of a free-vortex ADW. *AIAA Paper*, 1975. 75~122
- 4 E. M. Parmetier, R. A. Greenberg. Supersonic flow ADW for High-power-laser. *AIAA J.*, 1973, 11(7):943~949
- 5 Liu Tianhua, Jiang Zongfu, Wei Chenghua *et al.*. Design principle of free-vortex aerodynamic window and an experimental study on its running properties. *Chinese J. Lasers* (中国激光), 2000, A27(1):23~27 (in Chinese)
- 6 Y. A. Ananyev. Optical resonators and the problem of laser radiation divergence. Moscow: Nauka, 1979
- 7 M. Born, E. Wolf. *Principles of Optics*, 5th Edition, Pergamon Press, 1975. 463~465
- 8 R. D. Quinell. Limitations on the use of root-mean-square (rms) phase to describe beam quality characteristics. *SPIE*, 1981, 293:12~19
- 9 J. W. Glessner, P. D. Tannen, R. F. Walter *et al.*. Review of oscillator performance for electric lasers. *Proc. Conf. SPIE*, 1990, 1224:51~53
- 10 Du Xiangwan. Factors for evaluating beam quality of a real high power laser on the target surface in far field. *Chinese J. Lasers* (中国激光), 1997, A24(4):327~332 (in Chinese)
- 11 Liu Zejin, Lu Qisheng, Zhao Yijun. Study of evaluating beam quality of high energy lasers with unstable resonators. *Chinese J. Lasers* (中国激光), 1998, A25(3):193~196 (in Chinese)
- 12 V. I. Klyatskin. *Stochastic equations and waves in the randomly inhomogeneous media*. Moscow: Nauka, 1980
- 13 S. I. Kromin, V. V. Lyubimov, V. N. Shekhtman. Measurement of the scattered component of a light wave. *Sov. J. Quantum Electron.*, 1986, 16(5):629~631
- 14 R. N. Guile, W. E. Hilding. Investigation of a free-vortex aerodynamic window. *AIAA Paper*, 1975, 75:122
- 15 W. Masuda, M. Yuasa. Experiment study of a free-vortex aerodynamic window. *J. de Physique*, 1980, C9: 423~429