

文章编号: 0258-7025(2004)08-0943-04

低速湍流中的气动光学效应实验研究

姜宗福, 习锋杰, 侯 静, 李文煜

(国防科技大学理学院, 湖南 长沙 410073)

摘要 应用二维哈特曼(Hartmann)波前测量系统,对光束在二维低速热射流传输中的气动光学效应进行了测量。应用模式法,通过孔径斜率进行了波前重构,结果表明热射流使波前产生较强的随机畸变。同时通过对子孔径波前斜率的时间变化测量结果进行了相关函数计算,计算显示出互相关函数随空间相对位置表现出一定规律的变化,由此分析了热射流场中涡结构的运流速度、涡结构尺度等湍流中重要的特性。这些初步测量和分析结果表明通过哈特曼波前测量法既可研究光束在湍流场中引起的波前变化规律,同时还可以应用于湍流场流场参数的间接分析。

关键词 湍流理论;气动光学;热射流;哈特曼波前传感器;光学畸变

中图分类号 TN 247;O 358 **文献标识码** A

Aero-Optical Effects Measurements in a Low Velocity Turbulent Jet

JIANG Zong-fu, XI Feng-jie, HOU Jing, LI Wen-yu

(College of Science, National University of Defence Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

Abstract A two-dimensional Hartmann wavefront sensor is used to measure the aero-optical effects when the optical beam passes through a low velocity heat turbulent jet. The wavefronts are reconstructed by the results of the measured wavefront gradient, and the wavefront aberration is obviously shown. The correlation function is obtained from angular beam-jitter measurements, and the convection velocity and turbulence scale size of the flowing turbulence jet are calculated. These results show that the Hartmann wavefront sensor is not only used to measure the aero-optical effects in turbulent medium, but also utilized to perform non-intrusive studies of fluid flows.

Key words turbulence theory; aero-optic; turbulent jet; Hartmann wavefront sensor; optical aberration

1 引 言

气动光学是研究光束与气流介质相互作用规律的学科。随着高能激光技术、机载激光、光学制导等技术的发展及应用,人们对光束与复杂流场相互作用规律的研究更加深入^[1]。气动光学的研究对象从低速湍流、亚音速到超音速剪切湍流层和湍流附面层;研究方法从上世纪 80 年代以前的统计方法^[2]到目前的统计方法与动态实时测量相结合的研究方法^[3]。近年来 Fitzgerald 等应用哈特曼原理发展一种小孔径光束测量技术对低速和亚音速流场中的气动光学效应进行了一系列的研究^[3~6]。小孔径光束技术大大提高了测量光束波前畸变的时间频率(时

间采样频率可达 10 kHz 以上),但只能实现在空间有限的几个点采样^[6]。这使得对光束在湍流场传播的气动光学效应研究受到一定的限制。本文采用具有 37 单元微透镜阵列的哈特曼波前测量系统,对一束通过低速热射流场的准直激光束进行波前畸变的实时测量,并通过子孔径测量斜率的时空变化进行了相关函数等统计分析,给出流场的一些定量的结果。

2 实验原理及装置

当一准直的平行光束通过折射率变化的流场时,光线会发生偏转(波前产生畸变)。波前畸变一

收稿日期:2003-04-16;收到修改稿日期:2003-06-26

作者简介:姜宗福(1963—),男,国防科技大学理学院教授,博导,主要从事高能气动和化学激光器技术、气动光学方面的研究。E-mail:jiangzongfu28@163.com

方面会影响光学系统的性能,另一方面利用波前畸变与流场特性的关系,实现对流场的测量,如流场的光学层析法等^[7]。本文采用哈特曼波前传感器测量低速热射流湍流场对光束的影响。热射流场产生装置如图 1 所示,它由气流入口、蜂窝器、加热器、过滤网和喷嘴等组成。气流由轴流风扇产生,蜂窝器和阻尼网的作用主要是使喷嘴入口处的气流尽量均匀。加热器加热气流使射流与环境有温度差,实验中射流与环境温度差约为 $\Delta T \approx 50^\circ\text{C}$ 。喷嘴作用是产生一定速度的射流,实验中产生的中心线平均风速约为 7.2 m/s。

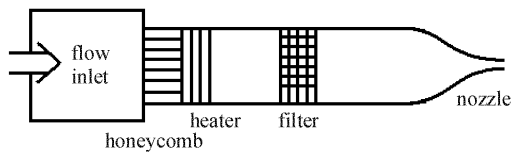


图 1 热射流装置示意图

(二维喷嘴的入口尺寸为

30.72 cm×20.48 cm,出口尺寸为 30.72 cm×1.28 cm)

Fig. 1 Schematic of the heat-jet facility

(two-dimension nozzle has a entry portal with size of 30.72 cm×20.48 cm and a exit portal with size of 30.72 cm×1.28 cm)

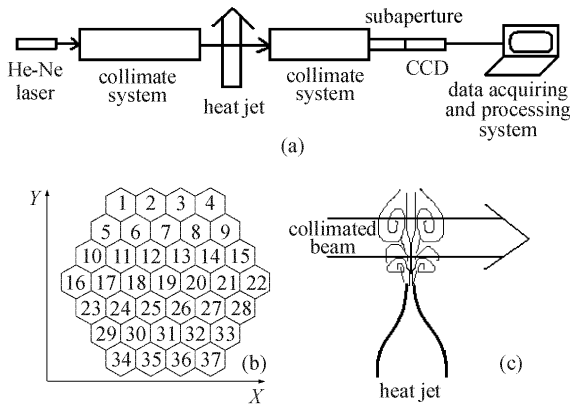


图 2 (a) 哈特曼波前测量系统示意图;

(b) 微透镜子孔径分布图;(c) 光束与射流布局图

Fig. 2 (a) Hartmann wavefront measuring system;

(b) Subapertures distributing map;

(c) The layout of beam and jet

哈特曼波前测量系统如图 2(a) 所示,氦氖激光经扩束镜准直后产生约 $\phi 100\text{ mm}$ 的平行光束,平行光束经流场介质后,再经光束收缩系统进入由 37 单元子孔径组成的微透镜系统(如图 2(b)所示),经 CCD 进行数据采集和处理,获得波前斜率等波前的时空变化信息。实验中气流流动方向与平行光束垂直(如图 2(c)所示)。哈特曼子孔径水平方向(x

轴)与流场流动方向平行。由于喷嘴出口气流温度高于环境温度,自由射流中产生密度的空间分布不均匀,从而引起折射率不均匀分布。通过哈特曼波前测量系统获得波前畸变的时空分布,以及湍流场的一些流场特性。

3 实验结果及分析

根据哈特曼波前测量原理,实验中根据每一个微透镜成像的光斑,计算出对应像的重心所在像素坐标值(当光束未受扰动时重心坐标为(0,0))。根据哈特曼系统中焦点参数 k 可得波前斜率参数,同时也可重构出相对应的光束波前分布。图 3 给出了沿流场方向相邻的 6 个子孔径测得的斜率随时间的变化规律,其中(a)~(f)是编号分别为 10,11,12,13,14,15 子孔径上的 x 方向斜率 θ_x 随时间的变化,(a')~(f')是编号分别为 10,11,12,13,14,15 子孔径上的 y 方向斜率 θ_y 的时间变化规律。从图 3 可看出在湍流介质中光束倾斜的时间变化呈现为随机性,它反映了湍流的随机性。根据 37 个子孔径上的波前倾斜计算出 Zernike 多项式系数重构波前畸变,图 4(a)~(d)分别为重构的第一到第四帧波前。从图 4 可见上半部分波前畸变变化较大,下半部分变化较小,这是由于流场温度场上半部分温度高,密度即折射率变化大,对光波前影响较大;而流场温度场下半部分温度低,密度即折射率变化小,对光波前影响较小。

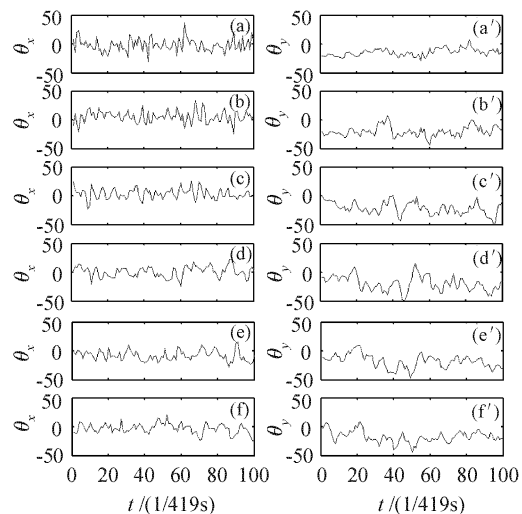


图 3 沿流场方向 6 个子孔径上 x, y 方向的偏转角时间序列

Fig. 3 x, y deviation angle time series at 6 subapertures along the flow direction

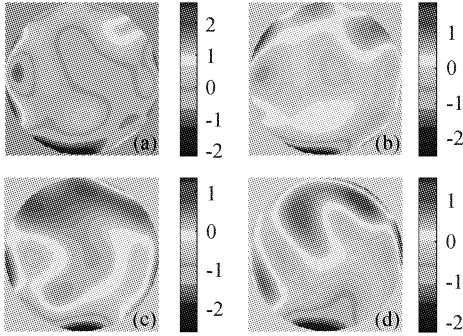


图 4 模式法重构的前四帧波前畸变

Fig. 4 Front four frames wavefront aberration reconstructed by mode means

根据湍流理论, 尽管湍流中流体的运动总是随机的, 但由于流动的连续性, 在某一小范围内, 流动是相关的, 即旋涡。在旋涡内流动参数是相当相关的; 间距大于旋涡的尺度(相关尺度)即旋涡以外的点, 流动参数将是不相关的。旋涡内间距越小的点, 相关性越高。另一方面由于旋涡产生于非均匀运动的流体中, 并且趋向随平均流运动, 旋涡的这种运动称为运流^[8](Convection Velocity)。若采用 Taylor 冻结流假设^[9], 可近似地认为运流速度 U_c 为常数。若在流场方向上放置两个间距为 ξ_1 的固定采样点, 设在某一时刻, 某一旋涡通过上游的采样点, 再过一个时刻 $\tau_1 = \xi_1/U_c$, 它将通过下游的采样点。如果计算这两采样点的相关函数

$$R(\xi_1, \tau) = \int f(\vec{r}_1, t) f(\vec{r}_2, t + \tau) dt \quad (1)$$

这里 $|\vec{r}_2 - \vec{r}_1| = \xi_1$ 。当 $\tau = \tau_1$ 时 $f(\vec{r}_1, t)$ 和 $f(\vec{r}_2, t + \tau)$ 恰好代表同一旋涡在 \vec{r}_1 和 \vec{r}_2 处的采样, 这时相关函数值取最大。对实验中测量的波前倾斜量进行了相关函数的计算。计算中取沿流场方向的 4 个子孔径(它们的编号为 13, 12, 11, 10), 它们相对子孔径 14 的中心间距分别为 $\xi_i = |x_{14} - x_i| = 15 \times (14 - i) \text{ mm} (i = 13, 12, 11, 10)$ 。图 5 给出了倾斜量 θ_y 的相关函数

$$R_{\theta_y}(\xi, \tau) = \sum_{n=1}^N \theta_y(x_i, n\Delta t) \theta_y(x_j, n\Delta t + \tau) \quad (2)$$

随 τ 的变化规律。从图 5 可见不同子孔径之间的相关函数都有个最大值, 随着子孔径距离增大, 相关函数的最大值向后延。最大值对应的 τ_{\max} 与对应的 ξ 进行拟合, 如图 6 所示。从图 6 可拟合出旋涡的运流速度 $U_c = 4.4 \text{ m/s}$ 。哈特曼子孔径直径为 15 mm, 所测得斜率是子孔径上的空间平均, 拟合出的运流速度 U_c 是流场中大涡结构的运流速度。根据大涡结构

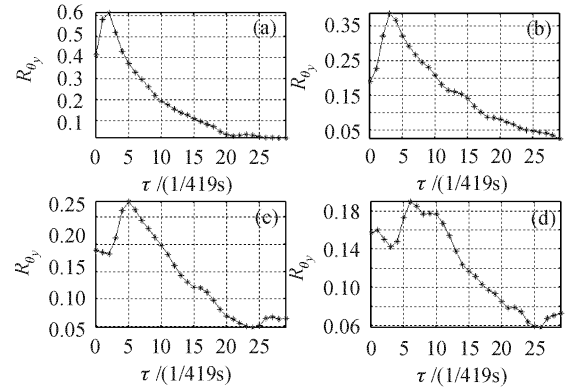


图 5 (a), (b), (c), (d) 分别为子孔径 14 与 13, 12, 11, 10 之间的相关函数

Fig. 5 (a), (b), (c), (d) shows the cross-correlation function of θ_y between subaperture 14 and 13, 12, 11, 10, respectively

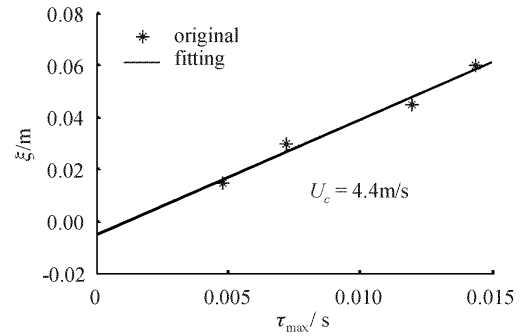


图 6 拟合出来的运流速度

Fig. 6 Fitted convection velocity of the flow

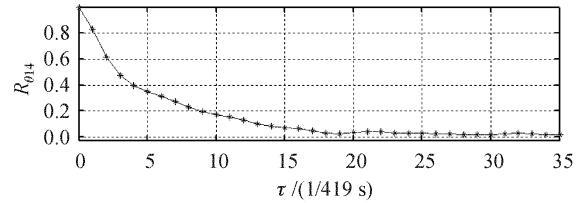


图 7 14 号子孔径的自相关

Fig. 7 Self-correlation function of 14th subaperture

的运流速度还可估算湍流的大涡尺度 l 。由于大涡结构以运流速度在流动, 一个子孔径上的自相关函数将随时间间隔的增大从最大值降到最小, 当自相关函数降到某一设定值时, 就认为该流结构已流过此子孔径。从而可以估计大涡结构沿流场方向的尺寸为 l

$$l = U_c \tau_{\min} \quad (3)$$

式中 τ_{\min} 对应于相关函数降至某一较小值时的时间间隔值。例如根据子孔径 14 的自相关函数(如图 7 所示)的变化, 估算得 $l \approx 4.2 \text{ cm}$ 。

4 结 论

应用哈特曼波前测量系统,对光束在二维低速热射流传输中的波前变化进行了测量。实验结果表明热射流使波前产生较强的随机畸变。对于孔径上波前斜率的时间变化测量结果进行相关函数计算显示了互相关函数 $R(\xi, \tau)$ 随空间相对位置 ξ_i , 表现出了一定的有规律的变化趋势,由此可以分析热射流场中大涡结构的运流速度、大涡结构尺度等湍流中重要的特性。这些初步测量和分析结果表明通过哈特曼波前测量法既可研究光束在湍流场中引起的波前变化规律,同时还可以应用于湍流场流场参数的间接分析。这些方法对研究气动激光、化学激光、内光路中的流场分析以及流场对光束质量影响的研究有一定的应用价值。这里应该指出的是由于目前采用的哈特曼波前测量系统的时间和空间分辨率还不够高,特别是时间采样频率只有 419 Hz,限制了应用哈特曼原理对湍流场波前畸变的测量及对流场结构的分析,特别是对较高速流场中波前畸变测量的应用。

参 考 文 献

- 1 Jiang Zongfu, Li Wenyu. Aero-optics in high power laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **A29**(Suppl.):305~307
姜宗福,李文煜. 高能激光中的气动光学现象研究[J]. *中国激光*, 2002, **A29**(增刊):305~307
- 2 G. W. Sutton. Aero-optical foundations and applications [J]. *AIAA Journal*, 1985, **23**(10):1525~1537
- 3 E. J. Jumper, E. J. Fitzgerald. Recent advances in aero-optics [J]. *Progress in Aerospace Sciences*, 2001, **37**:299~339
- 4 E. J. Jumper, R. J. Hugo. Quantification of aero-optical phase distortion using the small-aperture beam technique [J]. *AIAA Journal*, 1995, **33**(11):2151~2157
- 5 R. J. Hugo, E. J. Jumper. Experimental measurement of a time-varying optical path difference by the small-aperture beam technique [J]. *Appl. Opt.*, 1996, **35**(22):4436~4447
- 6 E. J. Fitzgerald, E. J. Jumper. Scaling aero-optic aberrations produced by high-subsonic-mach shear layers [J]. *AIAA Journal*, 2002, **40**(7):1373~1381
- 7 L. McMackin, R. J. Hugo, R. E. Pierson *et al.*. High speed optical tomography system for imaging dynamic transparent media [J]. *Optics Express*, 1997, **1**(11):302~311
- 8 Dai Chang-hui *et al.*. Fluid Flow Measurement [M]. Beijing: Aeronautics Industry Press, 1992. 101
戴昌晖等编. 流体流动测量[M]. 北京:航空工业出版社, 1992. 101
- 9 J. O. Hinze. Turbulence [M]. 2nd ed.. New York: McGraw-Hill Classic Textbook Reissue, 1975. 420

借鉴国际办刊模式 打造光学名牌期刊 光学期刊联合编辑部举行“特约编辑”聘用仪式

7月2日下午,《光学学报》、《中国激光》和《中国光学快报》联合编辑部的“特约编辑”聘用仪式在中国科学院上海光学精密机械研究所举行,李儒新副所长为首批11位国内知名光学专家颁发了聘书。

“特约编辑”的概念源自国际通用的 Topic Editor。光学期刊联合编辑部引进这一国际办刊模式,旨在借助中国科学院上海光学精密机械研究所和国内名牌科研院所雄厚的学术力量,通过对稿件审稿质量的评审,严格把握来稿的学术质量,更好地打造这三本国内光学界的名牌期刊。

首批受聘的11位特约编辑为周常河研究员、胡企铨研究员、胡丽丽研究员、范正修研究员、方祖捷研究员、张正泉研究员、朱小磊研究员、陈卫标研究员、曾和平教授、刘树田教授、吴亚明教授。我们衷心希望更多的专家加入进来,为培育我国光学界的名牌期刊作贡献。

聘用仪式上,各位专家学者就如何提高期刊学术质量,培养审稿人,培养作者群,提高作者的写作水平以及期刊如何进入SCI等令人关注的问题进行了深入的探讨。

光学期刊联合编辑部

2004年8月