流体微团作用与流动结构变化试验分析

徐凯池1,张佳琪2

(1.中国航发沈阳发动机研究所,沈阳110015;2.大连理工大学机械工程学院,辽宁大连116024)

摘要:为了分析湍流流动中流体微团所受作用与流动结构变化之间的关系,在槽道湍流边界层中通过粒子图像测速(PIV)技术,拍摄流向-展向平面流场,采用本征正交分解方法提取湍流流动中不同尺度的含能结构。采用矢量象限组合分析方法,将流场中流体微团所受作用分为肿胀作用、弯曲作用和旋转作用。结果表明:流动结构变化机理与这3种作用相关;肿胀型条带间流体微团受到的主要作用是弯曲作用,在弯曲作用下直条带会弯曲,弯曲条带在肿胀作用下汇聚成肿胀型条带;随着流动结构尺度减小,旋转作用逐渐增大。

关键词:湍流流动结构;粒子图像测速;本征正交分解;航空发动机 中图分类号: V211.76 **文献标识码:**A **doi**:10.13477/j.cnki.aeroengine.2020.02.013

Test Analysis of Fluid Micelle Action and Flow Structure Change

XU Kai-chi¹, ZHANG Jia-qi²

(1. AECC Shenyang Engine Research Institute, Shengyang 110015, China; 2. School of Mechanical Engineering, Dalian Unversity of

Technology, Dalian Liaoning 116024, China)

Abstract: In order to study the relationship between the action of fluid micelle and the change of flow structure in turbulent flow, the flow-to-spread plane flow field was captured by Particle Image Velocimetry (PIV) technique in the turbulent boundary layer of the channel. Energy-bearing structures at different scales in turbulent flow were extracted by means of proper orthogonal decomposition. By means of vector quadrant combined analysis, the actions of fluid micelle in the flow field were divided into swelling, bending and rotation. The results show that the mechanism of flow structure change is related to these three actions. The main action of the fluid micelle between the swelling bands is bending. The straight band bends under the action of bending, and the bending band converges into a swelling band under the action of swelling. As the scale of the flow structure decreases, the rotation gradually increases.

Key words: turbulent flow structure; Particle Image Velocimetry; proper orthogonal decomposition; aeroengine

0 引言

湍流流动广泛存在于航空航天、船舶、能源、动 力、化工等领域^[1-3]。在航空发动机的燃烧室中通常为 湍流流动,其中已燃气体与未燃气体的掺混、燃烧与 激波之间的相互作用以及湍流流动对化学反应的作 用等对航空发动机性能有重要影响。拟序结构是湍流 流动中最重要的结构,对湍流流动的维持、演化和发 展起着重要作用。研究湍流流动可以为发动机结构设 计提供理论基础,并为提高发动机性能提供有益参 考。由于湍流中拟序结构在时间和空间尺度上的跨度 以及运动特性十分复杂,一直是领域内的研究难点和 热点。拟序结构主要包括条带结构和准流向涡、发卡 涡/发卡涡包和超大尺度运动3大类^[4-5]。其中高、低 速条带结构的演化对湍流边界层摩阻和传热率等物 理性质有重要影响,开展相关研究可以对湍流进行有 效控制。

近年来,随着粒子图像测速(Particle Image Velocimetry, PIV)技术的迅猛发展,丰富的流场信息 使研究者对湍流拟序结构的运动学特征和动力学过 程有了更深刻的认识。顾大鹏等响通过 PIV 技术对双

收稿日期:2019-10-02 **基金项目**:航空动力基础研究项目资助 作者简介:徐凯池(1990),男,硕士,工程师,主要从事航空发动机六性与适航研究工作,E-mail:chifei09124@163.com。

引用格式:徐凯池,张佳琪.流体微团作用与流动结构变化试验分析[J].航空发动机,2020,46(2):71-74. XU Kaichi,ZHANG Jiaqi. Test analysis of fluid micelle action and flow structure change[J]. Aeroengine, 2020,46(2):71-74.

旋流燃烧室冷态流场进行测量,为进一步利用多级旋 流器实现燃烧室内稳定燃烧、降低排放提供了依据; 张欣等『利用 PIV 对双级旋流器燃烧室湍流流场进行 测量,并得到旋流器几何参数对流场速度分布的影 响:赵鹏等¹⁸利用 PIV 获得新型扩压器的内流场特征, 为先进扩压器的结构优化提供了试验依据。进一步对 湍流中拟序结构进行研究可以为湍流流场控制提供 理论依据。Kline 等¹⁹采用氢气泡流动显示技术观察到 湍流边界层近壁区存在拟序运动,发现高、低速条带 结构和湍流猝发现象,在试验中,近壁区高、低速条带 结构沿流向移动并被拉长,在展向上交替排列呈现周 期性变化;Asai 等¹⁰⁰通过平板试验人工构造了弯曲模 式条带和肿胀模式条带,对条带失稳过程进行研 究:Bai 等凹研究了条带结构变化与湍流减阻之间的 关系:Skote 等^[12]基于条带不稳定性构建模型,通过数 值模拟方法研究了湍流边界层中马蹄涡的产生机理; 王双峰等四对圆柱尾迹影响下的湍流低速条带进行 了试验研究;Smith¹¹⁴得到在湍流中条带结构展向平均 间距约为100壁面单位。研究条带结构的变形有助于 理解其失稳机理以及对壁面摩擦阻力的影响。通过数 值方法构建条带或通过特定试验装置人工构造弯曲 条带和肿胀条带,与工业工程实际流场中的条带结构 有一定区别,同时,条带结构变化机理与流体微团所 受作用之间的关系仍有待进一步研究。

本文利用 PIV 系统对槽道湍流流向 – 展向平面 内的条带结构进行试验测量,采用本征正交分解方法 提取和分离不同尺度的含能结构,采用流场中速度矢 量组合象限分析方法研究了流体微团所受作用与条 带结构变化之间的关系。

1 试验系统

PIV 测试系统如图 1 所示。图中 x、y、z 分别为流 动的流向、法向和展向。该系统主要包括:双 YAG 激 光器、激光器电源、导光臂、片光透镜组、同步触发器、 CCD 跨帧相机和计算机等,测量误差小于 2%。试验在

低速水槽中进行,所用示踪 粒子是空心玻璃珠,平均公 称直径为 20 μm,在水槽 中均匀布撒,粒子密度与 水的密度接近,对流场有 ^{Computed} 较好的跟随性。用激光片



光照亮观测区域,用 CCD 跨帧相机拍摄并记录流场 示踪粒子散射光信息。激光脉冲能量为 300 mJ,波长 为 532 nm,相机分辨率为 2048 × 2048 像素,试验拍摄 区域为 100 mm × 100 mm,流场空间分辨率为 0.05 mm,粒子图像测速采集频率为 7.4 Hz。试验拍摄流场 通过自适应相关算法计算得到速度矢量场,查询窗口 为 32 × 32,重叠区为 50%。水槽中自由来流速度为 0.1 m/s,壁面摩擦速度为 5.2 mm/s。通过对测量系统 进行误差分析得知速度误差小于 1.3%。

2 不同尺度流动结构分离

在近壁湍流中条带结构包括弯曲型和肿胀型。弯 曲条带表现为条带结构沿流向周期性弯曲振荡,肿胀 型条带表现为条带沿流向自身的膨胀和收缩。由于湍 流流动结构具有多尺度特性,将不同尺度结构分离可 以进一步研究其结构特性。Lumley¹¹⁵将本征正交分解 方法引入湍流研究中,在随机流动的样本中找出1组 能够最优捕获流动能量的基函数,将基函数按照其所 含能量大小降序排列,低阶模态占有最多的能量,随 着模态增加,其含能依次降低。随着试验技术的快速 发展,由最开始的单点测量发展到2维平面测量以及 3 维立体测量。海量的数据给湍流场的研究提供大量 信息,同时也给直接 POD 方法计算带来挑战。流场测 量点数据的增多,使得空间相关矩阵维数巨大,求解 较为困难。在此基础上,Sirovich¹¹⁶对直接 POD 方法进 行改进,提出快照 POD 方法。该方法大大降低了相关 矩阵的维数,在处理复杂、精细流场时得以推广应用。 该方法将流动中每个瞬时场视为随机过程的1次独 立实现,通过分解,得到空间模态和时间系数。本征正 交分解方法可以将不同含能结构与物理尺度相关联, 在湍流流动中广泛应用[17-19]。本文利用该方法将流动 中不同尺度的流动结构分离。假设流动中1个快照所 含速度信息为u(X, t),将N个快照排列在1个矩阵 U中,其中X为空间点信息,t为时间序列。对矩阵U求得自相关矩阵A为

$$\boldsymbol{A} = \boldsymbol{U}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{U} \tag{1}$$

式中:U^T为矩阵U的转置。

对自相关矩阵 A 求特征值和特征向量

$$\boldsymbol{A}\boldsymbol{b}_i = \boldsymbol{\lambda}_i \boldsymbol{b}_i \tag{2}$$

式中:λ_i为特征值;**b**_i为对应的特征向量。 将特征向量标准化可以得到 POD 的模态

$$\boldsymbol{C}_{i} = \frac{\boldsymbol{U}\boldsymbol{b}_{i}}{||\boldsymbol{U}\boldsymbol{b}_{i}||}, i = 1, 2, \cdots, N$$
(3)

徐凯池等:流体微团作用与流动结构变化试验分析

式中: C_i 为第i阶模态;N为样本数。

得到不同尺度流动模态结构后,可以对模态场中 流体微团速度分量进行象限分析^[19-20]。定义(u'>0,w'>0)为第1象限,(u'<0,w'>0)为第2象限,(u'<0,w'<0)为第3象限,(u'>0,w'<0)为第4象限,并分别记为 Q_1 、 Q_2 、 Q_3 、 Q_4 ,其中u'为流向脉动速度,w'为展向脉动 速度。在流体微团中,如果流体的速度矢量为 Q_1 和 Q_4 组合或 Q_2 和 Q_3 组合,则该矢量组合为肿胀分布, 表现为促进条带结构肿胀发展。如果两侧速度矢量为 Q_1 和 Q_2 组合,或 Q_3 和 Q_4 组合,则该矢量组合为弯曲 分布,表现为促进条带弯曲发展。除了肿胀分布和弯

曲分布之外,如果两侧速 度矢量为 Q_1 和 Q_3 组合或 Q_2 和 Q_4 组合,则该矢量组 合为旋转分布,表现为促 进条带结构的旋转。上述 组合方式如图2所示。



3 结果分析

本征正交分解得到的 前100阶模态能量的分数 变化如图3所示。从图中 可见,低阶模态中流动结 构含能较高,对湍动能贡



献相对较大;随着模态数增加,模态含能迅速减小,对 湍动能贡献较小。

本征正交分解得到的模态 1、7 和 15,分别用来 代表流动中的中大尺度结构,如图 4 所示。从图 4(a) 中可见,模态 1 流动结构尺度最大,条带结构呈现长 直条状。条带结构中流体微团的速度矢量组合分布符 合肿胀型分布,如图中白色椭圆所示。模态 1 中条带

结构较为稳定,所含能量 " 占湍动能百分比最大,约 100 为 6%。同时,注意到条带 80 间流体微团的速度矢量组 (100 合分布模式为弯曲型分 40 布,如图中黑色椭圆所示。 20 在这种分布模式下,流体 0 微团受到剪切作用。由于





肿胀条带自身沿流向存在发散或收敛的变化,导致条带间流体微团的剪切作用沿流向分布不均匀,使条带将会发生弯曲。

从图 4(b)中可见,条带结构流向尺度大幅减小, 同时条带数量显著增加,该模态中结构含能占湍动能 百分比约为 2.2%。在不同条带之间流体微团的速度 矢量组合分布中,弯曲型组合分布显著增加,如图中 黑色椭圆所示。由于条带流向尺度显著减小,弯曲作 用增加,条带结构将出现碰撞、破碎和融合等多种变 化。当符号相同的条带碰撞时,该处流体微团的矢量 分布模式与肿胀型条带中心处矢量分布模式相同,可 能诱使碰撞的条带发生汇聚,形成新的较大的肿胀型 条带。当符号不相同的条带碰撞时,该处流体微团会 出现较强的剪切作用, 使条带沿展向倾斜并发生弯 曲,可能转变为弯曲型条带。

随着模态数增加,模态中结构尺度进一步减小。 从图 4(c)中可见,模态 15 含能约为 1.2%,出现了结 构比较完整的法向涡漩结构,如图中黑色圆圈所示。 该涡漩结构处的流体微团矢量组合分布为旋转分布, 该结构在近壁面区域中流动尺度较小,相比于肿胀型 或弯曲型条带,所含能量也较低。因此,在湍流流动的 流向 – 展向平面内,肿胀型条带和弯曲型条带对湍动 能的贡献占主要地位。

4 结论

通过粒子图像测速系统测试了流向 - 展向平面 内的流场,并采用本征正交分解方法将流动中不同尺 度的结构进行分离。利用速度矢量象限组合分析方 法,分析了流体微团受力与流动结构变化之间的关 系,得到以下结论:

(1)湍流流动中存在沿展向排列的高、低速条带 结构。肿胀型条带结构含能高,对湍动能贡献大,是流 动中的主要结构;随着模态数增加,条带结构变弯曲, 含能降低。

(2)流体微团之间的作用包括肿胀作用、弯曲作 用和旋转作用。肿胀作用主要存在于条带结构中心位 置处;弯曲作用主要存在于不同条带结构之间;旋转 作用主要存在于小尺度流动结构中。

(3)肿胀型条带在弯曲作用下直条带会弯曲,弯曲条带在肿胀作用下汇聚成肿胀型条带。随着流动结构尺度减小,旋转作用逐渐增大。

参考文献:

[1] 孟岚, 部冶. 火灾流场中湍流、燃烧和浮力的相互作用[J]. 哈尔滨工 程大学学报, 2002, 23(2): 111-117.

MENG Lan, GAO Ye. Turbulence and combustion models used in simulating compartmental fire with buoyancy effect[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2002, 23(2):111–117. (in Chinese)

- [2] 李松阳,邵兴晨. 浮力修正湍流模型在航空发动机火灾模拟中的应用[J]. 航空发动机,2017,43(1): 58-65.
 LI Songyang,SHAO Xingchen. Application on buoyancy corrected turbulent model in nacelle fire modeling [J]. Aeroengine,2017,43(1): 58-65. (in Chinese)
- [3] 李经警,张勃,张纳如,等. 基于大涡模拟的圆转矩喷管尾喷流强化 掺混机理研究[J]. 航空发动机, 2018, 44(2): 27-34.
 LI Jingjing,ZHANG Bo,ZHANG Naru, et al. Investigation on mixing enhancement mechanism of tail jet flow of circle-rectangular transition nozzle based on large eddy simulation [J]. Aeroengine, 2018, 44(2): 27-34. (in Chinese)
- [4] Smits A J, McKeon B J, Marusic I. High-Reynolds number wall turbulence [J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 2011, (43): 353-375.
- [5] Adrian R J. Hairpin vortex organization in wall turbulence [J]. Physics of Fluids, 2007, 19(4):041301.
- [6] 顾大鹏,胡文成,窦义涛.基于 PIV 技术对双旋流燃烧室冷态流场的 测量[J]. 航空发动机, 2019, 45(5): 87-92.
 GU Dapeng,HU Wencheng,DOU Yitao. Measurements of two-stage swirler combustor cold flow field based on PIV technology [J]. Aeroengine,2019,45(5):87-92. (in Chinese)

 [7] 张欣,刘勇,党新宪,等.单头部双级旋流器燃烧室流场 PIV 测量[J]. 工程热物理学报,2009,30(7):1253-1256.
 ZHAGN Xin,LIU Yong,DANG Xinxian, et al. Experimental study on flow field of single-head combustor with dual-stage swirler by PIV[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2009, 30(7): 1253-1256. (in Chinese)

[8] 赵鹏,张玉光,张宝华. PIV 技术在三通道扩压器试验中的应用[J]. 航空发动机,2018,44(3):76-80.

ZHAO Peng,ZHANG Yuguang,ZHAGN Baohua.The application of PIV technology in three channels diffuser experiment [J]. Aeroengine, 2018,44(3):76-80. (in Chinese)

- [9] Kline S, Reynolds W, Schraub F. The structure of turbulent boundary layers[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1967, 30(4):741–773.
- [10] Asai M, Minagawa M, Nishioka M. The instability and breakdown of a near-wall low-speed streak [J]. Journal of Fluid Mechanics, 2002,455:289-314.
- [11] Bai H L,Zhou Y,Zhang W G, et al. Streamwise vortices and velocity streaks in a locally drag-reduced turbulent boundary layer [J]. Flow Turbulence Combust, 2018, 100; 391–416.
- [12] Skote M, Haritonidis J H, Henningson D S. Varicose instabilities in turbulent boundary layer[J]. Physics of Fluids, 2002, 14:2309-2323.
- [13] 王双峰,王晋军,展京霞. 圆柱尾迹影响下近壁湍流低速条带的特征[J]. 流体力学实验与测量, 2003,17(3):45-48.
 WANG Shuangfeng, WANG Jinjun, ZHAN Jingxia. Characteristics of low-speed streaks in near-wall turbulence as disturbed by cylinder wakes [J]. Experiments and Measurements in Fluid Mechanics, 2003,17(3):45-48. (in Chinese)
- [14] Smith C R, Metzler S P. The characteristics of low-speed streaks in the near-wall region of a turbulent boundary layer[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1983, 129:27–54.
- [15] Lumley J L. The structure of inhomogeneous turbulent flows [J]. Atmospheric Turbulence and Radio Wave Propagation, 1967 (1): 166-178.
- [16] Sirovich L. Turbulence and the dynamics of coherent structures. Part I: Coherent structures [J]. Quarterly of Applied Mathematics, 1987,45:561–571.
- [17] Uruba V. Energy and entropy in turbulence decompositions [J]. Entropy, 2019, 21(2): 124.
- [18] Tumuklu O, Levin D, Theofilis V. Modal analysis with proper orthogonal decomposition of hypersonic separated flows over a double wedge[J]. Physical Review Fluids, 2019, 4(3): 033403.
- [19] Mendez M A, Raiola M, Masullo A, et al. POD-based background removal for particle image velocimetry [J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2017, 80:181–192.
- [20] Liu Z, Adrian R J, Hanratty T J. Large-scale modes of turbulent channel flow:transport and structure [J]. Journal of Fluid Mechanics, 2001,448:53-80.

(编辑:刘 亮)