角区三维漩涡流动的新分离结构

王雪娥 张 华 王 宏 付立群

(北京航空航天大学 航空科学与工程学院,北京 100191)

摘 要:分别用数值计算和PIV(Particle Image Velocimetry)实验方法研究角区层流边界层三维定常分离的流动结构,证实了角区确实存在有别于传统分离现象的附着鞍点结构,对称面上游的流线并非从壁面向上抬起从壁面分离,而是经由空间某个奇点向壁面附着.角区马蹄涡的传统分离鞍点结构和附着鞍点结构之间存在着一定的演化规律,影响参数包括模型头部钝度、边界层厚度和雷诺数.一定的边界层和雷诺数条件下随着模型头部钝度减小,角区马蹄涡将从传统的分离鞍点结构逐步过渡为附着鞍点结构;对一定的模型若雷诺数越大、边界层越厚则角区流动越趋向于传统的分离鞍点结构,反之则倾向于附着鞍点结构.

关 键 词:流场;分离;漩涡流动

中图分类号:V 211.3

文献标识码:A **文 章 编 号**:1001-5965(2010)12-1461-04

New 3-D separation structure in juncture flows

Wang Xuee Zhang Hua Wang Hong Fu Liqun

(School of Aeronautic Science and Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: A computational and particle image velocimetry(PIV) experimental study of three dimensional steady separation structure generated in juncture laminar flows was presented. It confirms the existence of outmost attachment saddle point structure of horseshoe vortex in juncture flows. The outmost streamline doesn't rise from the plate but attaches to the plate by passing through a space singular point. There also exists an evolvement rule of horseshoe vortex structure from outmost attachment saddle point structure to outmost separation saddle point structure. The evolvement is influenced by the blunt extent of the model, the boundary layer thickness and the Reynolds number. Under curtain boundary layer and the Reynolds number conditions, the horseshoe vortex will change from outmost separation saddle point structure to outmost attachment saddle point structure as the blunt extent of the model becomes smaller. For a same model, the horseshoe vortex will tend to be outmost separation saddle point structure as the boundary layer thickness and the Reynolds number increases, contrarily it will tend to be outmost separation saddle point structure.

Key words: flow fields; separation; vortex flow

角区流动广泛存在于航空、航天以及其他诸多空气动力学和流体力学应用领域,同时角区流动又包含了丰富而复杂的三维分离涡结构,因此引起研究者广泛的关注,角区最典型的流动结构就是来流边界层在突起物逆压梯度作用下分离而形成的空间马蹄涡系.传统的边界层分离观点认为,所谓的流动分离,从几何上看,近壁区的流线将从壁面抬起,从而离开物面进入流体空间并形成分离面,从物理上看,近壁区的涡量在足够的逆压梯度条件下涡线沿着壁面平行着被抬升,并将涡量输运至流体内部.文献[1]曾经用所谓"包络线分离模式"来描述三维分离,而文献[2]则用所

收稿日期:2009-10-17

基金项目:国家自然基金资助项目(10872022)

作者简介:王雪娥(1985—),女,山西吕梁人,硕士生,buaaxueer@126.com.

谓“极限流线分离模式”来描述三维分离，此外还有文献[3－4]提出的开/闭式分离等，尽管这几种分离模式之间存在一定差别，但都反映了人们对三维分离现象的基本认识：壁面极限流线汇合时将向上抬起而形成空间分离面. 然而文献[5－6]对圆柱/平板角区层流马蹄涡的数值模拟却表明，对称面上近壁面的流线并非是从壁面向上抬起，而是经由空间的一个奇点向壁面附着，即角区平板表面上游鞍点可能是一个附着鞍点，文献[4]等利用PIV(Particle Image Velocimetry)测试技术从定量的角度初步证实了圆柱角区对称面确实存在附着鞍点结构. 这些结果表明，角区壁面的极限流线渐近线并不一定代表分离线，而可能代表了附着线.

本文利用数值计算和PIV实验，进一步证实角区三维分离附着鞍点结构的存在性，并着重研究角区传统分离鞍点结构与附着鞍点结构之间的关系以及角区流动结构随模型参数和流动参数演化的规律.

1 数值计算条件

在给定的边界层和雷诺数条件下，固定模型宽度尺度，改变模型迎风面的形状，设计了方柱、纵轴、横轴比为1/2的椭圆柱、圆柱、3/2椭圆柱、2/1椭圆柱、4/1椭圆柱、三棱柱等7个头部形状逐渐从钝变尖的模型，研究模型头部形状对角区附着鞍点结构形成和演化的影响. 迎风面宽度均选取为80 mm不变，模型高度均为200 mm. 为保证角区流动为定常层流结构，雷诺数Re_D范围为230～2 500. 以圆柱为例，图1为模型简图，图中的马蹄涡结构即为传统的分离鞍点马蹄涡结构，图2为模型左视图.

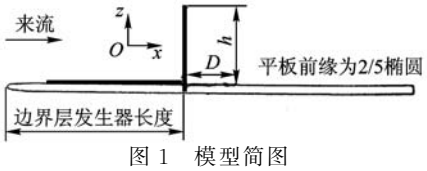


图1 模型简图

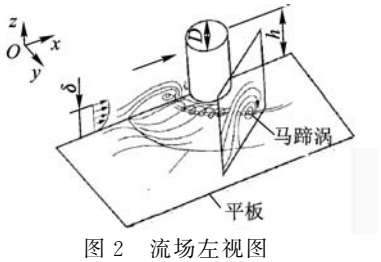


图2 流场左视图

为了提高数值计算速度，取模型中心沿来流速度方向为对称面，只计算其一半的区域. 为研究边界层厚度对马蹄涡结构的影响，模型上游平板长度分别取40，80，120，160，200，240 mm，利用Blasius层流边界层厚度计算公式(1)，获得不同的边界层厚度.

$$\delta=\frac{5.0x}{\sqrt{Re_x}} \tag{1}$$

利用Gambit软件进行建模，用Fluent和Tecplot进行数值迭代计算和结果分析，以圆柱为例，模型网格如图3所示，模型前缘最小网格大小为0.3 mm×0.4 mm×0.5 mm，为六面体网格.

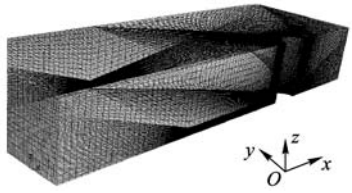


图3 圆柱/平板模型网格

用Gambit软件的边界层网格画法，厚度设置为40 mm，间距比例为1，圆柱上游对称面上网格结点最小间距为0.3 mm，根据平板边界层发生器长度不同，其网格数大致为1.5×10^6～1.8×10^6. 流场入口和出口均设置在距离平板前缘和后缘500 mm处. Fluent模型选取为隐式非耦合求解法，低雷诺数情况下，为定常流，流体为常温液态水，对于来流采用速度入口边界条件，给定来流的速度和静压力.

对于壁面采用无滑移边界条件，壁面速度为0. 对于出口，采用压力出口边界条件，出口压力等于来流静压力，出口速度采用上游速度外插获得. 根据判断迭代残差和流场出口压力系数变化来确定其收敛，迭代次数约为6 000～10 000次.

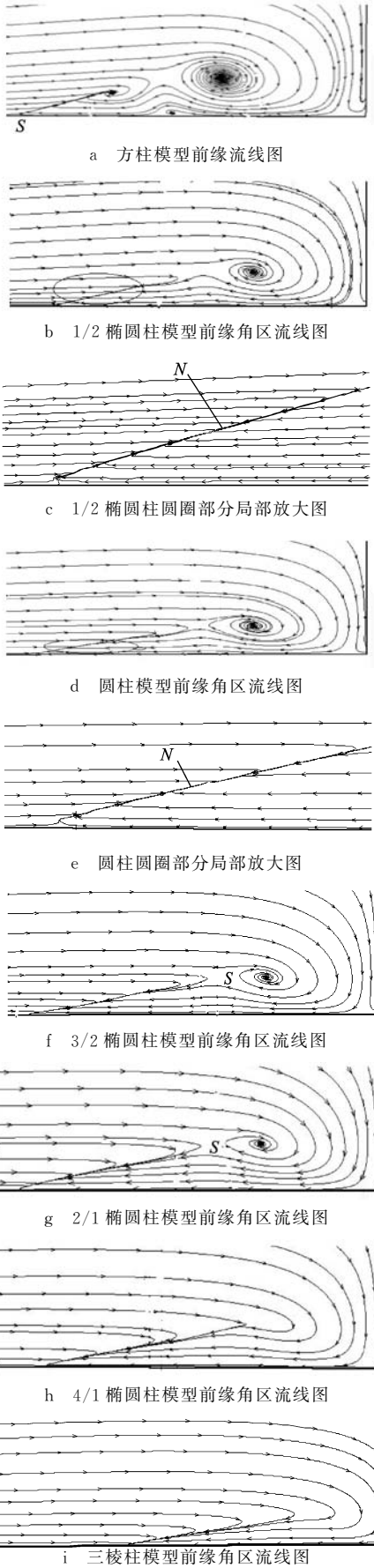
2 数值计算结果与分析

2.1 模型头部形状对马蹄涡结构的影响

图4给出了模型头部形状变化对对称面角区马蹄涡结构演化的影响规律. 所研究的7种模型分别为方柱、1/2椭圆柱、圆柱、3/2椭圆柱、2/1椭圆柱、4/1椭圆柱和三棱柱，7种模型头部形状逐渐从钝变到尖. 流动条件为：按模型宽度定义的雷诺数为500，平板长度为240 mm，边界层厚度约为224 mm.

可见图4方柱模型对应的就是经典的分离鞍点马蹄涡结构，图中点S即为最上游分离鞍点(在对称面可视为分离半鞍点). 随着模型头部逐步变尖、钝度变小，分离马蹄涡结构逐步由分离奇点结构过渡为附着奇点结构，即随着模型头部逐

步变尖、钝度变小,在上游对称面出现一个空间结点 N,该结点的下侧表现为从壁面分离而上侧则表现为向壁面附着的特征,随模型钝度减小该空间结点将逐步向下方平板处移动,直到结点 N 移至平板表面,从而形成了附着鞍点结构.虽然在两种分离结构的情况下平板表面最上游都表现为鞍点,但二者之间存在如下重要差别:①在对称面传统的分离鞍点结构表现为分离半鞍点,而附着鞍点结构则表现为附着半结点;②传统分离结构最上游漩涡涡面来自于壁面奇点出发的分离面,而新分离结构中最上游漩涡涡面则来自于空间鞍点.尽管这两种分离结构之间存在上述差别,但两种结构对应的平板表面摩擦力线是完全相同的,平板上游的摩擦力线都向某根渐近线收拢.图 5 是两种不同的分离结构对应的摩擦力线比较.模型为圆柱,显然在第 2 种情况下平板上的渐近收拢线是附着线而不是分离线,而这正是文献[5]理论分析所指出的第 2 类附着线.



a　方柱模型前缘流线图

b　1/2 椭圆柱模型前缘角区流线图

c　1/2 椭圆柱圆圈部分局部放大图

d　圆柱模型前缘角区流线图

e　圆柱圆圈部分局部放大图

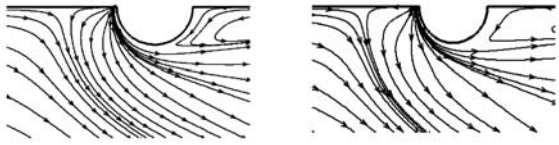
f　3/2 椭圆柱模型前缘角区流线图

g　2/1 椭圆柱模型前缘角区流线图

h　4/1 椭圆柱模型前缘角区流线图

i　三棱柱模型前缘角区流线图

图 4　7 种不同模型头部形状对应的对称面马蹄涡结构,$Re_D=500$



a　附着鞍点结构　　b　分离鞍点结构

图 5　表面摩擦力线比较

计算表明随着模型头部进一步变尖,角区上游的马蹄涡强度逐渐变弱,直至消失.相同雷诺数和其他流动条件下,角区上游表现为附着奇点结构的趋势越大.反之随着模型前缘钝度变大,角区上游附着奇点将沿着空间逐渐上移,从而出现分离奇点结构.

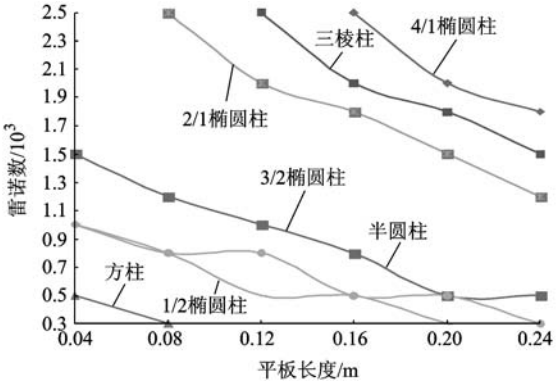
可见,角区上游的分离涡结构与模型的钝度有密切的依赖关系,模型钝度越小,马蹄涡的强度越弱,上游奇点越趋向于附着鞍点结构,反之若模型钝度越大,则马蹄涡越强,上游奇点越趋向于经典的分离鞍点结构.

2.2　边界层和雷诺数对奇点结构演化的影响

计算表明,边界层较薄时各模型均可能体现为附着奇点结构,随着平板加长边界层厚度增加,角区上游对称面的附着奇点将离开平板进入空间并逐渐上移,从而开始出现分离奇点结构,同时角区上游的马蹄涡逐渐变强.可见角区上游的分离结构和边界层厚度有一定的依赖关系,相同模型雷诺数和其他流动条件下,平板边界层越厚则角区上游奇点表现为分离结构的趋势越大.

随着雷诺数增加,对于所有模型,角区上游奇点有从附着鞍点结构向分离鞍点结构转化的趋势.

边界层和雷诺数对计算模型分离结构临界点的影响如图6所示.



曲线上侧为传统分离奇点结构,下侧为附着奇点结构.

图6 边界层和雷诺数对计算模型分离结构临界点的影响

3 计算结果的实验验证与讨论

本文利用PIV实验验证了数值计算的典型结果.实验在北航流体力学水洞实验室实施,二维PIV系统,数据分析采用MicroVec V2.3.8软件,后处理采用分析绘图软件Tecplot V10完成.图7是实验系统简图.该实验系统的基本参数为:附着鞍点:YAG双脉冲式激光器功率150 MJ,CCD相机分辨率1 600×1 200;拍摄区域100 mm×75 mm.

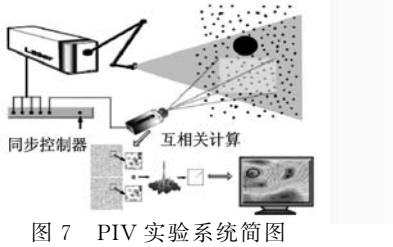
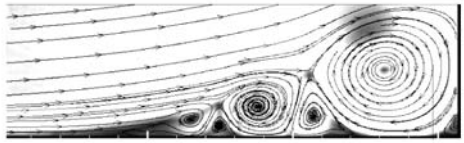


图7 PIV实验系统简图

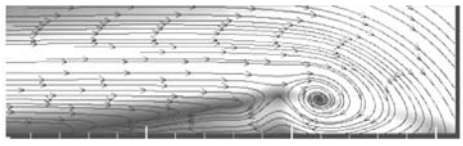
实验平板长1 000 mm,实验模型特征尺寸均为100 mm,自由来流速度为$V=0.020\,581$ m/s,以模型宽度定义的雷诺数约为2 000.在上述实验条件下对方柱、圆柱、5/2椭圆柱、三棱柱等4种模型与平板形成的角区对称面流动结构进行PIV实验测量,4种模型得到的PIV结果如图8所示.

文献[7]认为上游奇点形态取决于涡的横向拉伸效应,随着模型直径减小,以横向速度为标志的三维效应加大,在一定的模型直径和雷诺数下,上游将体现为附着鞍点,文献[5]引用了文献[6]数值模拟得到的新分离结构,并指出壁面极限流线的分离发射线和渐近收拢线,都有可能是附着线,并且将第2种结构称为第2种附着线,这都与本实验相符.

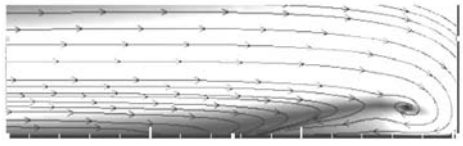
尽管PIV实验的条件与数值计算略有差别,但是仍然从实验的角度定性验证了数值计算得到的结论,即一定的边界层和雷诺数条件下随着模型头部钝度减小角区马蹄涡将从传统的分离鞍点结构逐步过渡为附着鞍点结构.



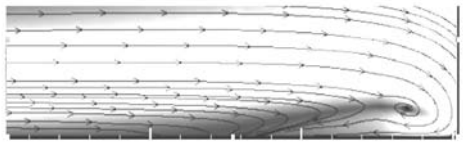
a 方柱模型,分离鞍点结构



b 圆柱模型,附着鞍点结构



c 5/2椭圆模型,附着鞍点结构



d 三棱柱模型,附着鞍点结构

图8 4种不同头部形状模型角区对称面流动结构PIV实验结果

4 结 论

通过本文数值研究和PIV实验验证,得到如下结论:①角区最上游的确可能存在有别于传统分离鞍点的附着鞍点结构,在一定的边界层和模型雷诺数条件下,模型的迎风面钝度越小、形状越尖,流动越容易出现附着鞍点结构,反之随着模型钝度加大,附着鞍点结构便逐渐向分离鞍点结构转化;②在模型迎风面形状固定的条件下,雷诺数越低、边界层厚度越薄,角区最上游越容易出现附着鞍点结构;反之随着雷诺数或边界层厚度的增加,这种附着鞍点结构便逐渐向分离鞍点结构转化;③角区体现为分离鞍点结构或是附着鞍点结构其本质在于模型对马蹄涡产生的三维横向拉伸效应,若角区局部流动的三维效应越强,漩涡的横向拉伸作用越大,则越容易体现为附着奇点结构,反之体现为分离奇点结构.

(下转第1479页)

[2] GJB/Z141 军用软件测试指南[S]
GJB/Z141 Military software testing guide[S](in Chinese)

[3] Fagan M E. Design and code inspections to reduce errors in program development [J]. IBM Systems Journal, 1976, 15(3):182－211

[4] Chan Kevin. An agent-based approach to computer assisted code inspections[C]//13 th Australian Software Engineering Conference(ASWEC'01). Canberra, Australia: IEEE, 2001: 147－152

[5] Jorge Rady de Almeida Jr, Joao Batista Camargo Jr, Bruno Abrantes basseto, et al. Best practices in code inspection for safety-critical software[J]. Software IEEE, 2003, 20(3): 56－63

[6] Les Hatton. Testing the value of checklists in code inspection [J]. Software IEEE, 2008, 25(4):82－88

[7] 胡璇,刘斌,陆民燕. 软件代码缺陷分类与应用[J]. 计算机工程,2008,35(2):30－33
Hu Xuan, Liu Bin, Lu Minyan. Classification of software code errors and its application[J]. Computer Engineering, 2008, 35(2):30－33(in Chinese)

[8] McMeekin David A, von Konsky Brian R, Robey Michael, et al. The significance of participant experience when evaluating software inspection techniques [C]//Software Engineering Conference. Gold Coast, Australia: IEEE, 2009:200－209

[9] Mantyla Mika V, Lassenius Casper. What types of defects are really discovered in code reviews? [J]. IEEE Transactions on Software Engineering, 2009, 35(3):430－448

[10] 曾福萍,钟德明,张虹. 一种软件代码审查方法的研究[C]//第 7 届国际可靠性、维修性、安全性学术会议. 北京:中国宇航学会,2007:1－6
Zeng Fuping, Zhong Deming, Zhang Hong. Study on software code inspection[C]//The Seventh International Conference on Reliability, Maintainability and Safefy. Beijing: Chinese Society of Astronautics, 2007:1－6(in Chinese)

[11] Goddard P L, Troy Raytheon. Software FMEA techniques [C]//Proceedings Annual Reliability and Maintainability Symposium 2000. Los Angeles, CA, USA: IEEE, 2000:118－123

(编　辑:娄　嘉)

(上接第 1464 页)

参考文献(References)

[1] 张涵信. 分离流与漩涡运动的结构与分析[M]. 北京 :国防工业出版社,2005:5－67
Zhang Hanxin. Journal of experiments in fluid mechanics [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2005:5－67 (in Chinese)

[2] Visbal M R. Structure of laminar juncture flows[J]. AIAA Journal, 1991, 29(8) :1273－1282

[3] Chen C L , Hung C M . Numerical study of juncture flows [J]. AIAA Journal, 1992, 30(7):1800－1807

[4] Hung C M, Chen C L, Sung C H, Computation of saddle point of attachment[J]. AIAA Journal, 1992, 30(6):1561－1569

[5] 张华,吕志咏. 应用 PIV 研究角区三维分离的附着奇点结构[J]. 空气动力学学报,2007,25(增刊):37－42
Zhang Hua, Lü Zhiyong. The investigation of attachment saddle point of 3-D separation in juncture flow by PIV[J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2007, 25(Supplement1):37－42 (in Chinese)

[6] Perry A E , Fairlie B D. Critical points in flow patterns[J]. Advances in Geophysics, 1974, 18:299－315

[7] Baker C J. The laminar horseshoe vortex[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1979, 95(2):347－367

[8] Khan M J. Dynamics of thejunction vortex[J]. AIAA Journal, 1995, 33(7) :113－122

[9] 张华,吕志咏. 后掠翼身交接区流动结构及参数影响研究[J],流体力学实验与测量,2000,14(2):16－20
Zhang Hua, Lü Zhiyong. Experimental investigation of vortex characteristics in swept wing/body junctions[J]. Experiments and Measurements in Fluid Mechanics, 2000, 14(2): 16－20(in Chinese)

[10] Maskell E C. Flow separation in three dimension[M]. London: Ministry of Supply, 1955:2655－2673

[11] Wang K C. Separation patterns of boundary layer over an inclined body of revolution[J]. AIAA Journal, 1972, 10(8): 1044－1050

[12] Wang K C. Separation of three-dimensional flow[R]. TR-76-54C, 1976:341－414

[13] Coon M D , Tobak M. Experimental study of saddle point of attachment in laminar juncture flow[J]. AIAA Journal, 1995, 33(12):2288－2292

(编　辑:李　晶)