

文章编号:1000-8055(2011)11-2617-06

文氏效应在叶片根部马蹄涡控制中的应用

王建明, 刘 炜, 徐志晖, 艾延廷, 王成军

(沈阳航空航天大学 动力与能源工程学院

辽宁省数字化工艺仿真与试验技术重点实验室, 沈阳 110136)

摘 要: 为研究文氏管在叶片根部马蹄涡控制作用的应用, 针对简化了的叶片-平板结构在叶片上游平板上的某位置开狭缝, 在平板的另一侧构造一文氏管(文氏管的喉道位于狭缝处), 引射叶片根部的流体, 进而控制马蹄涡。数值模拟了不同狭缝位置的湍流流动; 结果表明了改变狭缝相对于叶片的位置能很好地控制马蹄涡, 甚至能完全消除叶片前马蹄涡。提出的方法可以利用外势流的能量而无需额外消耗能量, 为一种被动的控制手段, 有很大的实际应用前景。利用文氏效应的控制方法简单实用, 因此工程中采用该法是不错的一种选择。

关 键 词: 马蹄涡; 角区流动; 分离流动; 复杂流动; 文氏效应

中图分类号: V211

文献标志码: A

Study on the control of the wing-body juncture horseshoe vortex utilizing Venturi tube

WANG Jian-ming, LIU Wei, XU Zhi-hui, AI Yan-ting, WANG Cheng-jun

(Liaoning Key Laboratory of Digital Technology Simulation and Test Technique,

College of Power and Energy Engineering,

Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China)

Abstract: In order to study on the control of the wing-body juncture horseshoe vortex utilizing Venturi tube, a typical wing-body junction region was presented. In order to conduct the control of horseshoe vortex, a wing with a slot placed upstream in the flat plate and a Venturi tube mounted on the other side of the plate was established. Because of the Venturi principle, when the flow passed over the throat, the slot acted as a quality injector. Numerical simulation was conducted to investigate turbulent junction flow with different positions of the slot. The results show that the horseshoe vortex can be controlled well, and furthermore eliminated completely horseshoe vortex, through the modification of the slot position relative to the wing. The proposed method can utilize potential energy, and does not consume any additional power. Therefore, it is a kind of passive control method with a great practical application prospect. The approach of the control of junction flows based on Venturi principle presented in this paper is promising in the engineering application since it is very simple and applicable.

Key words: horseshoe vortex; junction flow; separated flow; complex flow; Venturi principle

收稿日期:2010-12-30; 修订日期:2011-06-23

基金项目:辽宁省自然科学基金(20102177)

作者简介:王建明(1975—),男,辽宁昌图人,副教授,博士,主要从事流动控制与流动测试研究. E-mail:jmwang75@163.com

固体表面与其上的突起物形成角区,其周围的流体运动为角区流动^[1-2]. 发动机压气机或涡轮部件叶片根部流动即为典型的角区流动,角区流场中存在复杂的马蹄涡系^[3-4]. 若只为研究马蹄涡结构及其控制,从方便研究的角度考虑,可以把叶片简化为不考虑弯度的翼型,翼型-平板组成最具典型性的结构,也是本文要研究的载体. 角区流动是具有代表性的三维边界层分离流动,其形成的必要前提为黏性作用和逆压梯度;流场中的旋涡结构具有复杂的演化机理^[5],研究此流动具有重要的理论意义^[6]. 角区的马蹄涡系按来流的雷诺数可有三种运动状态:定常马蹄涡系、振荡马蹄涡系及湍流状态^[7]. 流动显示和 PIV (particle image velocimetry) 测量揭示非定常马蹄涡系存在三种模态,即绕合模态、脱落-绕合模态及脱落-耗散模态^[8]. 在湍流状态下,主马蹄涡转动较快,并在平均位置附近随机振荡,对柱体和平面产生较强的剪切力^[9];二次流为角区湍流场的主要特征,各湍流参量分布特征都与这个二次流有关^[1-2];马蹄涡的头部会在柱体上游形成“肩膀”的现象^[10];主马蹄涡在发展过程中,靠近涡头的涡腿部分受到强拉伸,相互诱导,彼此靠近并向壁面运动^[11]. 可用小波分析方法来辨识角区湍流的分离涡结构及尺度,并且马蹄涡系运动在低雷诺数下所展示的物理过程在中等雷诺数或充分发展湍流的状态下仍然存在^[12].

通常马蹄涡系会引起流动噪声、发动机喘振、结构振动失稳、热损失增加和壁面淘蚀^[13]等不利影响,研究角区马蹄涡及其控制的方法具有重要的工程意义. 流动控制的本质是通过改变局部流动来控制流体动力的作用,为控制角区流动,人们采取了很多方法. 减小头部的钝度能够减小马蹄涡的强度^[14]. 叶形后掠,也能改善上游马蹄涡的强度^[15]. 叶片前增加类似三角翼的结构^[16]、整流片^[17]和边条^[18]亦能很好地削弱马蹄涡. 本文的作者也尝试过一种简单的不妨称为“前置倾斜棒”的方法来控制马蹄涡,实验显示了不错的控制效果^[19];该法和北京航空航天大学 Zhang 等^[20]、Wang 等^[21]附加小圆棒减小压差阻力具有相似之处.

最近,为控制压气机静子叶片前的马蹄涡,韩国 Kang 等^[22]提出利用平板上游的空腔结构减弱马蹄涡;Kang 等把叶片根部简化成了圆柱-平板结构,实验取得了不错的控制效果. 本文正是借鉴了 Kang 等^[22]的思想,在空腔的下部布置一个文

氏管,在喉道(最小截面)位于空腔处时,减小空腔尺度成一窄缝,形成的文氏管产生了质量引射的作用,有可能实现比空腔更好的控制效果;文氏管可以借用外势流,不需额外输入能量,仍然是一种被动的控制方法.

1 计算模型

叶片-平板结构的尺寸和坐标系如图 1 所示. 主流沿 X 轴方向,速度为 U_{ref} ,高为 0.2 m、弦长为 0.255 m、厚度 $T=0.06$ m 的 Rood 翼型(前端为长短轴比值为 3:2 的椭圆接 NACA0020 型尾部构成^[23])对称地布置在 X 轴的两侧,坐标系的原点位于叶片最上游母线与平板的交点;平板厚度为 0.01 m,平板上开 0.005 m 宽的狭缝,狭缝长 0.6 m,平板与狭缝采用倒角过渡的安排;在平板的下侧布置一文氏管,文氏管的喉道位于开槽的位置,文氏管的入口处截面与喉道截面的收缩比为 2,出口截面与入口截面面积相同也是喉道截面面积的 2 倍. 文氏管内,喉道截面处的流体由于速度提高,压力能转化为动能,压力必然下降,而叶片根部的压力由于叶片的滞止作用而升高^[22-23],平板上下两侧形成压差;经槽导通平板上下面后,文氏管能够起到引射叶片根部流体的作用. 槽上游边与叶片前缘距离为 b (图 1),数值试验中通过改变 b 的位置实现不同的流动控制工况,本文分别取 $b/T=1/3, 1/4$ 和 $1/6$. 文氏管对流向马蹄涡的影响在叶片最大厚度处的平面($X/T=3/4$)内进行讨论(图 1). 为方便,不妨称无文氏管的流动状态为基本流态,有文氏管的流动状态为控制流态.

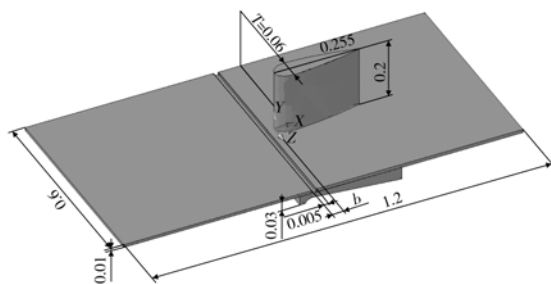


图1 模型尺寸(单位:m)

Fig. 1 Model's dimensions (unit:m)

图 2 是计算域的网格划分情况,壁面处采用边界层网格,第一层网格高 0.1 mm,沿高度网格增长率为 1.2,全部计算域的网格总数约 200 万. 计算时选用 FLUENT 提供的双方程剪切应力输运湍流模型(SST(shear stress transport) $k-\omega$;该

模型综合了 $k-\omega$ 在近壁区的优点和 $k-\epsilon$ 在远场计算的优点,同时增加了横向耗散导数项),采用分离隐式求解器对 Navier-Stokes 湍流时均运动方程进行求解,速度和压力的耦合采用 SIMPLE (semi-implicit method for pressure-linked equations) 算法处理,各参数的离散采用二阶精度的迎风格式. 压力修正方程、连续方程、动量方程、 k 和 ω 方程都实施亚松弛因子. 现实中,角区的主流与文氏管的来流一般是不同的,本文选择主流速度 $U_{\text{ref}}=30\text{ m/s}$,文氏管入口的速度为 10 m/s ,即速度比为 $1:3$,与角区主流速度相比,即在文氏管中来流流速较小的情况下,也能取得较好的控制效果. 主流和文氏管的计算域出口均选用压力出口边界,即为大气压. 定义涡量系数 $C_v = \frac{\Omega T}{U_{\text{ref}}}$, 其中 Ω 是涡量, T 是叶片厚度; 表面摩擦因

数 $C_f = \frac{\tau_w}{\frac{1}{2}\rho U_{\text{ref}}^2}$, τ_w 是壁面剪切应力, $U_{\text{ref}}=30\text{ m/s}$

时,以翼型厚度 T 为特征尺度的雷诺数为 1.2×10^5 ,以翼型中心距离平板前缘距离为特征尺度的雷诺数为 1.35×10^6 ,由 Devenport 和 Simpson^[23] 的研究可知,叶片根部流动为湍流流动状态. 相应的数值计算与实验结果的对比情况在下面的“结果与分析部分”给出.

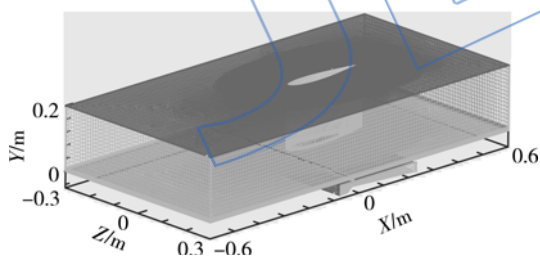


图 2 计算域网格

Fig. 2 Calculation domain's grids

2 结果与分析

图 3 是基本流态下叶片上游对称面内不同位置流向速度 U/U_{ref} 的数值计算与文献[23]实验结果的对比情况,数据是在半对数坐标系下绘制的. 数值模拟与实验结果虽有一定差别,但大体上比较吻合,在回流区的大尺度流动结构上趋势一致;这表明基于本文所绘制的网格和所选的湍流模型的数值模拟具有一定的可信性.

图 4 为叶片前对称面内的速度分布和流线分布,其中 V_m 表示速度矢量的大小. 基本流态时,

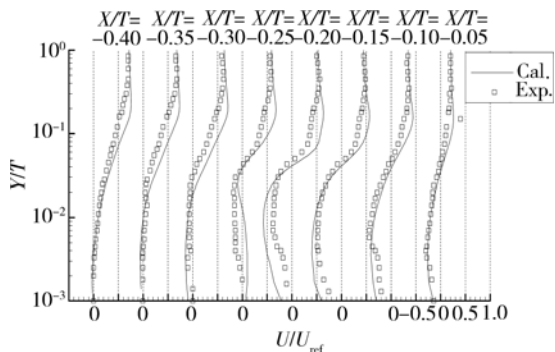


图 3 叶片上游对称面内 U/U_{ref} 的计算数据与实验数据^[23]对比

Fig. 3 Contrast of the U/U_{ref} between the calculation and the experiment from Devenport & Simpson^[23] at $Z=0$

计算结果与文献[23]的实验结果相吻合;平板与叶片附近的流速较低,由于平板表面的黏性和 $X/T=0$ 处叶片阻挡引起的逆压梯度导致边界层的三维分离;基本流态的分离点在 $X/T=-0.42$ 附近;湍流流态下存在两个主涡,两主涡中间是诱导出的二次涡(图 4(a)),这与 Baker^[24] 猜测的流动结构相一致. 在平板底部文氏管的质量引射作用下,窄槽上层平板附近的流速较基本流态增加,部分的分离边界层被文氏管吸除掉,流动趋于向平板表面附着的方向发展,分离点向叶片靠近(图 4(b)~(d)). 窄槽位置由 $b/T=1/3$ 变为 $b/T=1/4$ (图 4(b),(c)),马蹄涡的尺度变小;可喜地, $b/T=1/6$ 时马蹄涡几乎完全被消除, $b/T=1/6$ 是计算工况中控制效果最好的参数. $b/T=1/3, 1/4$ 和 $1/6$ 时,文氏管造成的狭缝处引射流量分别为文氏管入口流量的 5.42% , 5.25% 和 5.32% ,三种控制工况的引射流量比较接近. 文氏管之所以能够削弱马蹄涡是因为边界层内沿流向的流体质点动能得到提高(图 4(b)~(d)),于是流体质点所具有的平均流向动量增加了,这个过程连续不断的进行,使得边界层获得连续的能量供给,有能力来抵御表面摩擦和逆压梯度;因此,在较高逆压梯度下也可以不出现分离,即使出现了分离,吸气所引起气流的掺混作用将有助于分离的边界层再次附着.

图 5 是不同工况下叶片上游对称面内平板附近的涡量分布图,涡量分布较速度矢量分布更容易显示马蹄涡的空间尺度,不同工况下马蹄涡涡心的相对坐标用 X_v/T 和 Y_v/T 表示,相应的值列在表 1 中. 基本流态下,马蹄涡涡心位置为 $(-0.19, 0.04)$ (表 1),与文献[23]的结果吻合;

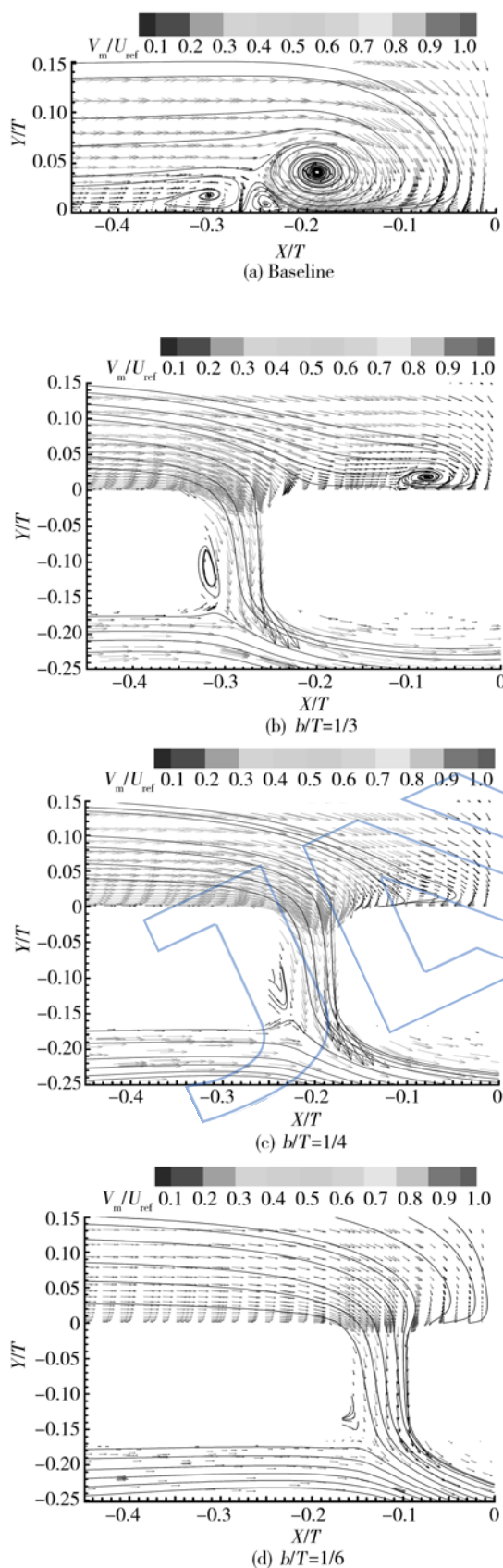


图4 叶片上游对称面速度矢量和流线图

Fig. 4 Velocity-magnitude vector and streamlines in the symmetry plane

马蹄涡的空间尺度最大,尤其流向尺度明显,马蹄涡涡心处 $C_v = -38$ (图 5(a)). 随着窄槽向叶片靠近,马蹄涡不但空间尺度减小,涡心处的涡量也明显减小(图 5(b)~(c)); $b/T=1/3$ 时涡心位置为 $(-0.08, 0.015)$, 相应的 $C_v = -22$; $b/T=1/4$ 时涡心位置为 $(-0.05, 0.01)$ (表 1), $C_v = -14$; $b/T=1/6$ 时,马蹄涡几乎全部被消除(图 5(d)),与图 4(d)速度矢量显示的结果一致. 所有工况下马蹄涡周围的涡量均小于上游边界层内湍涡(eddy)的涡量(图 5(a)~(d)).

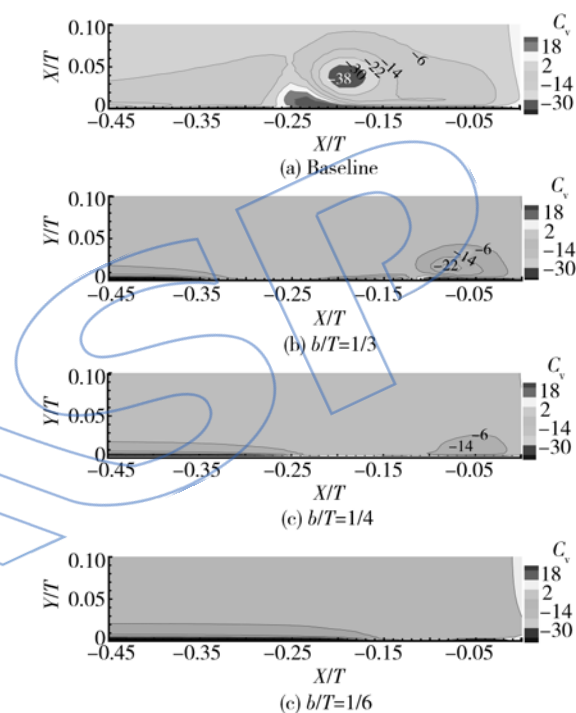


图5 对称面内的涡量系数图

Fig. 5 Vorticity coefficient in the symmetry plane

决定马蹄涡强弱的参数有涡量的分布和马蹄涡的空间尺度,单独的马蹄涡涡心处的涡量并不能表示马蹄涡强度,马蹄涡边界曲线的速度环量能够代表马蹄涡的强度,但确定马蹄涡的边界曲线比较困难. 马蹄涡在平板表面产生很强的剪切作用,该剪切作用综合了马蹄涡的涡量分布与马蹄涡的尺度,因此涡心下的壁面表面摩擦因数 C_f 能够反映马蹄涡的强度. 涡心下的 C_f 在外加文氏管的作用下,比基本流态下的 C_f 小很多(表 1); $b/T=1/4$ 时 C_f 仅是基本流态下的 53.8%; 因此,马蹄涡强度明显减小.

马蹄涡围绕叶片向下游发展会拖出两条长长的涡腿(vortex legs)^[6],在叶片两侧垂直流向的平面内表现为流向涡结构. $X/T=3/4$ 平面内马

蹄涡的流向涡量系数分布如图 6 所示. 6(a)是基本流态下 $X/T=3/4$ 平面内流向涡涡量系数分布,此时主马蹄涡的空间尺度已经较上游对称面内(图 5(a))有了明显的增大,Y 和 Z 向涡尺度均增加近 1 倍;仍能观察到二次涡等一些精细的流动结构;黏性的耗散作用加上空间尺度的增加使得马蹄涡涡心处的涡量(图 6(a))减小了很多. $b/T=1/3$ 时,上游的主马蹄涡涡心离平板和叶片更近(图 5(b)),沿流向向下游发展受到平板表面边界层的黏性耗散作用更强烈,在 $X/T=3/4$ 平面内被捕捉到的马蹄涡较基本流态更靠近叶片根部,涡量非常弱. 涡腿得到有效控制使得下游结构受到干扰或发生破坏的程度下降^[17].

表 1 涡心位置与涡心下的平板表面摩擦因数

Table 1 Position of vortex core and the corresponding skin friction coefficients on the plate

b/T	X_v/T	Y_v/T	C_f
Baseline	-0.19	0.04	0.0093
1/3	-0.08	0.015	0.008
1/4	-0.05	0.01	0.005
1/6			

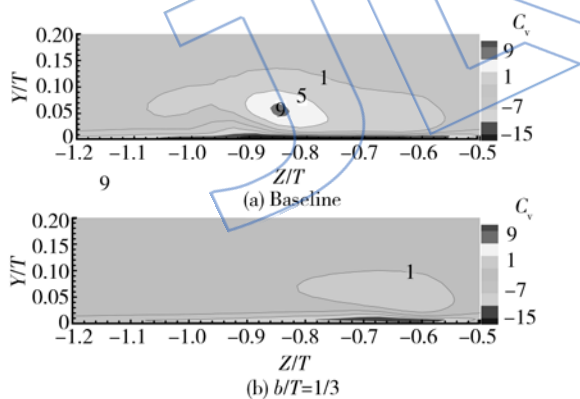


图 6 $X/T=3/4$ 平面内马蹄涡的流向涡量系数分布

Fig. 6 Stream-wise vorticity coefficient at $X/T=3/4$

3 结 论

本文在叶片-平板角区系统的平板上开槽,在平板的另一侧布置喉道,利用文氏效应去改善流动特性,消除马蹄涡系,采用数值模拟的手段,得到的主要结论如下:

1) 利用喉道的文氏效应能够改变叶片根部

流动的分离点位置,有效减小叶片根部马蹄涡的空间尺度,同时能够减小马蹄涡涡心的涡量,无论哪种开槽方式都能起到控制或部分控制马蹄涡的作用;

2) 在槽距离叶片为 $b/T=1/6$ 时,马蹄涡几乎被完全消除,此时的 b 是可选择的比较理想的控制参数;

3) 马蹄涡涡心下平板表面摩擦因数 C_f 能够反映马蹄涡的强度,即使不是最优控制工况(即 $b/T=1/6$), $b/T=1/4$ 时的 C_f 仅是基本流态 C_f 的 53.8%;

4) 马蹄涡绕叶片拖出的涡腿的空间尺度沿流向增加,文氏管作用下的流向涡在叶片最大厚度处的平面内几乎完全被耗散掉.

致谢:

作者感谢中航工业空气动力研究院李俊甫、张忠臣研究员和沈阳航空航天大学李广超老师在论文准备和修改中的帮助.

参考文献:

- [1] 康红文,范萌,魏中磊.两个角区湍流场及其尾迹的实验研究[J].力学学报,1996,28(4):385-391.
KANG Hongwen, FAN Meng, WEI Zhonglei. Experimental investigation of two turbulent wing-body junctions and wakes flow[J]. ACTA Mechanica Sinica, 1996, 28(4): 385-391. (in Chinese)
- [2] 康红文,范萌,魏中磊.角区湍流场的实验测量和数值模拟[J].水动力学研究与进展: A 辑,1997,12(1):63-71.
KANG Hongwen, FAN Meng, WEI Zhonglei. Measurements and numerical simulation of turbulent wing-body junction flow[J]. Journal of Hydrodynamics, 1997, 12(1): 63-71. (in Chinese)
- [3] 周逊,韩万金.涡轮矩形叶栅中的旋涡模型的进展回顾[J].航空动力学报,2001,16(3):198-204.
ZHOU Xun, HAN Wanjin. A review of vortex model development for rectangular turbine cascades[J]. Journal of Aerospace Power, 2001, 16(3): 198-204. (in Chinese)
- [4] 刘火星,陈矛章,蒋浩康.扩压叶栅角区马蹄涡的实验研究[J].工程热物理学报,2000,21(6):703-706.
LIU Huoxing, CHEN Maozhang, JIANG Haokang. Experimental study of horseshoe vortex in the corner region of a linear compressor cascade [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2000, 21(6): 703-706. (in Chinese)
- [5] Baker C J. The oscillation of horseshoe vortex system[J]. ASME Transactions Journal of Fluids Engineering, 1991, 113(4): 89-95.
- [6] Simpson R L. Junction flows[J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 2001, 33: 415-43.
- [7] Wei Q D, Chen G, Du X D. An experimental study on the structure of juncture flows [J]. Journal of Visualization,

- 2001, 3(4):341-348.
- [8] 张华, 吕志咏, 孙盛东. 应用 PIV 对角区非定常马蹄涡结构的实验研究[J]. 力学学报, 2008, 40(2):171-178.
ZHANG Hua, LÜ Zhiyong, SUN Shengdong. The experimental study on unsteady horseshoe vortex structure in juncture flow with PIV[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2008, 40(2):171-178. (in Chinese)
- [9] 张华庆, 魏庆鼎. 墩前角涡实验研究[J]. 水动力学研究与进展, 2003, 18(2):217-223.
ZHANG Huaqing, WEI Qingding. An experimental study on the vortices in the upstream region of a square cylinder [J]. Journal of Hydrodynamics, 2003, 18(2):217-223. (in Chinese)
- [10] 陈军. 马蹄涡结构的显示[J]. 流体力学实验与测量, 2003, 17(4):71-78.
CHEN Jun. Visualizations of horseshoe vortex structure [J]. Experiments and Measurements in Fluid Mechanics, 2003, 17(4):71-78. (in Chinese)
- [11] 郭辉, 彭艺, 李志勇, 等. 逆压梯度转捩边界层流动结构显示[J]. 实验流体力学, 2008, 22(2):68-73.
GUO Hui, PENG Yi, LI Zhiyong, et al. Visualization study on the flow structures in the transitional boundary layer under an adverse pressure gradient[J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2008, 22(2):68-73. (in Chinese)
- [12] 毕卫涛, 魏庆鼎. 小波方法检测角区湍流的流动结构[J]. 空气动力学学报, 2001, 19(4):414-419.
BI Weitao, WEI Qingding. Detection of structures in juncture turbulence by wavelet method[J]. ACTA Aerodynamica Sinica, 2001, 19(4):414-419. (in Chinese)
- [13] 赵威, 呼和敖德. 圆柱绕流局部冲刷机制的实验研究[J]. 力学学报, 2006, 38(5):577-585.
ZHAO Wei, HUHEAODE. Experimental investigation on the local scouring mechanism around a circular pier[J]. Chinese Journal of Theoretical and applied Mechanics, 2006, 38(5):577-585. (in Chinese)
- [14] Wei Q D, Wang J M, Chen G, et al. Modification of junction flows by altering the section shapes of the cylinders [J]. Journal of Visualization, 2008, 11(2):115-124.
- [15] 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)
- [16] Gupta A K. Hydrodynamic modification of the horseshoe vortex at a vertical pier junction with ground[J]. Physics of Fluids, 1987, 30(4):1213-1215.
- [17] Devenport W J, Simpson R L, Dewitz M B, et al. Effects of a leading-edge fillet on the flow past an appendage-body junction[J]. AIAA Journal, 1992, 30(9):2177-2183.
- [18] 张华, 吕志咏. 后掠翼身干扰区流动特性及改善措施研究[J]. 空气动力学学报, 2000, 18(4):467-472.
ZHANG Hua, LÜ Zhiyong. Flow characteristics and its melioration of swept wing/body interference [J]. ACTA Aerodynamica Sinica, 2000, 18(4):467-472. (in Chinese)
- [19] Wang J M, Bi W T, Wei Q D. Effects of an upstream inclined rod on the circular cylinder-flat plate junction flow [J]. Experiments in Fluids, 2009, 46(6):1093-1104.
- [20] Zhang P F, Wang J J, Lu S F, et al. Aerodynamic characteristics of a square cylinder with a rod in a staggered arrangement[J]. Experiments in Fluids, 2005, 38(4):494-502.
- [21] Wang J J, Zhang P F, Lu S F, et al. Drag reduction of a circular cylinder using an upstream rod[J]. Flow, Turbulence and Combustion, 2006, 76(1):83-101.
- [22] Kang K J, Kim T, Song S J. Strengths of horseshoe vortices around a circular cylinder with an upstream cavity[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2009, 23(7):1773-1778.
- [23] Devenport W J, Simpson R L. Time-dependent and time-averaged turbulence structure near the nose of a wing-body junction[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1990, 210(1):23-55.
- [24] Baker C J. The turbulent horseshoe vortex[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial, 1980, 6(1):9-23.