

文章编号:1000-8055(2012)07-1479-05

旋涡发生器对叶片根部马蹄涡的影响

王建明¹, 刘 炜^{1,2}, 祝 魁¹, 艾延廷¹, 唐继涛²

(1. 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;

2. 中国人民解放军 94921 部队, 福建 晋江 362200)

摘 要: 针对简化了的叶片-平板结构, 在叶片上游平板上的某位置布置旋涡发生器影响马蹄涡. 数值模拟了不同高度旋涡发生器作用下的角区湍流流动. 结果表明: 任何一种旋涡发生器都能不同程度地削弱马蹄涡系, 高度为 2 mm 的旋涡发生器能使这种削弱作用达到最大; 另外, 随着高度的增加, 叶片两侧的涡腿有向叶片聚拢的趋势. 提出的方法无需额外消耗能量, 为一种被动的控制手段, 有很大的实际应用前景. 布置旋涡发生器的控制方法简单实用, 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; 旋涡发生器

中图分类号: V211

文献标志码: A

Effects of vortex generator application on the wing-body juncture horseshoe vortex

WANG Jian-ming¹, LIU Wei^{1,2}, ZHU Kui¹, AI Yan-ting¹, TANG Ji-tao²(1. Liaoning Key Laboratory of Digital Techniques Simulation and Test Technology,
College of Power and Energy Engineering, Shenyang Aerospace University,

Shenyang 110136, China;

2. The Chinese People's Liberation Army of 94921 Troops, Jinjiang Fujian 362200, China)

Abstract: A typical wing-body junction region was presented. In order to modify the horseshoe vortex, the vortex generator was placed upstream of the wing on the flat plate. Numerical simulation was conducted to investigate the effects of the vortex generator's heights on the turbulent junction flow. The results show that any vortex generator can weak the horseshoe vortex. The modification is best with 2 mm of the vortex generator's height. The vortex legs congregate round the wing with the increasing of the heights. The proposed method is a kind of passive control method. The modification of junction flows with vortex generator application presented is promising since it is very simple and applicable.

Key words: horseshoe vortex; junction flow; separated flow; complex flow;
vortex generator

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, 可以简化叶片为不考虑弯度的翼型, 翼型-平板组成最具典型

收稿日期: 2011-08-15

网络出版地址: http://www.cnki.net/kcms/detail/11.2297.V.20120801.1438.201207.1479_006.html

基金项目: 航空科学基金(2011ZA54002)

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

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];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^[10].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^[11].

通常马蹄涡系会引起流动噪声、发动机结构振动失稳、热损失增加和壁面淘蚀^[12]等不利影响,研究角区马蹄涡及削弱它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^[13].叶形后掠,也能改善上游马蹄涡的强度^[14].叶片前增加类似三角翼的结构^[15]和整流片^[16]亦能很好的削弱马蹄涡.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^[17];该法和北京航空航天大学 Zhang 等^[18]、Wang 等^[19]附加小圆棒减小压差阻力具有相似之处.为控制压气机静子叶片前的马蹄涡,韩国 Kang 等^[20]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.

北京航空航天大学张华等^[21]在翼型前附加一很小的边条,拥有特定后掠角的边条能够很好地降低角区的逆压梯度,减弱马蹄涡.边条削弱马蹄涡利用的应该是边条翼向下游拖出的旋涡引起角区边界层内外动量交换的加剧,本文尝试利用旋涡发生器来产生旋涡,增强此动量交换的强度,结果也显示了不错的控制效果.

1 计算模型

叶片-平板结构如图 1(a)所示.来流 U_{ref} 沿 X 轴方向,高度为 0.2 m,弦长为 0.255 m,厚度 $T=0.06$ m 的 Rood 翼型叶片(前端为长短轴比值为 3:2 的椭圆接 NACA0020 型尾部构成^[22])被对称地布置在 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;在上游与叶片前缘距离为 0.03 m 处放置 5 对长为 0.03 m 的叶片式旋涡发生器,旋涡发生器是由一排小片组成,它们与平板垂直,与 X 轴成 5° 倾斜角(图 1(b)),安装成正负倾斜相间的形式,当气流流过竖立在平板上的小片时,由于小片相当于有迎角的平板,小片两侧有压强差.气流从压强高处绕过小片流向低处,同时还沿流向运动,因此其合成运动为螺旋形的旋涡运动.数值试验中通过改变旋涡发生器的高度 b 实现不同的流动控制工况,本文分别取 $b=1,2,3$ mm.旋涡发生器对流向马蹄涡的影响在平面 $X/T=3/4$ 内进行讨论.为方便,不妨称无旋涡发生器的流动状态为基本流态,有旋涡发生器的流动状态为控制流态.

图 2 是计算域的网格划分情况,靠近壁面处采用边界层网格,第一层网格高为 0.05 mm,沿高

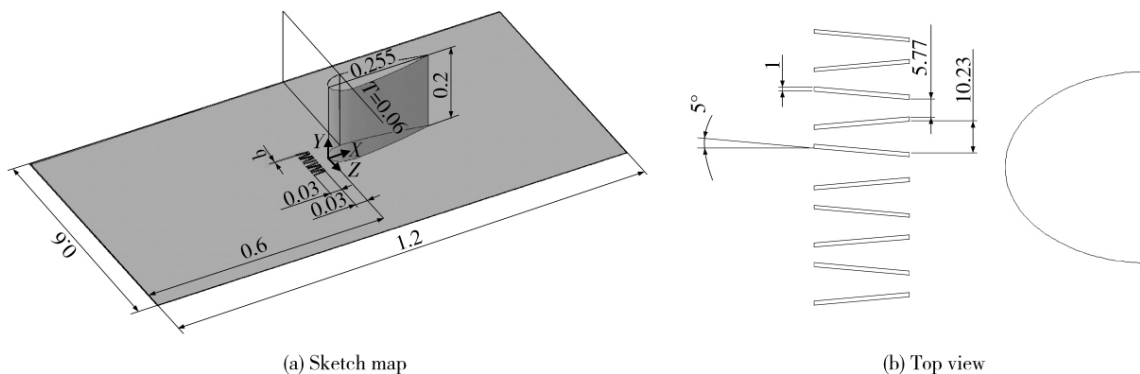


图 1 模型尺寸(单位:m)

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

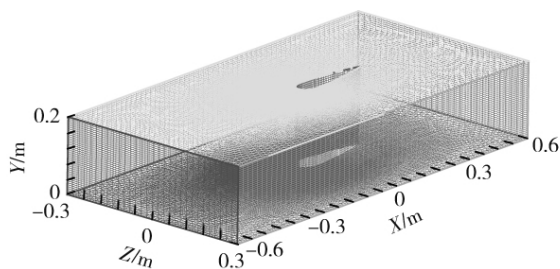


图 2 计算域网格

Fig. 2 Calculation domain's grids

度网格增长率为 1.1,全部网格总数约为 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. 计算域入口的速度为 $U_{\text{ref}}=30\text{ m/s}$,出口选用压力出口边界(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;表面摩擦系数 $C_f = \tau_w / 2\rho U_{\text{ref}}^2$, τ_w 是壁面剪切应力,采用 SST $k-\omega$ 湍流模型的“near-wall model approach”方法得到壁面剪切应力 τ_w ; 马蹄涡涡心的坐标用 X_v 和 Y_v 表示. $U_{\text{ref}}=30\text{ m/s}$ 时,以叶片厚度 T 为特征尺度的雷诺数为 1.2×10^5 ,叶片中心距离平板前缘的距离为特征尺度的雷诺数为 1.35×10^6 ,由文献[22]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“结果与分析”部分给出.

2 结果与分析

图 3 为基本流态时叶片前对称面内的速度矢量和流线分布,其中 V_m 表示速度矢量的大小. 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;湍流流态下存在两个主涡,两主涡中间是诱导出的二次涡,这与 Baker^[23] 猜测的流动结构相一致.

图 4 是基本流态叶片上游对称面内不同位置的流向速度 U/U_{ref} 的数值计算结果与文献[22]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

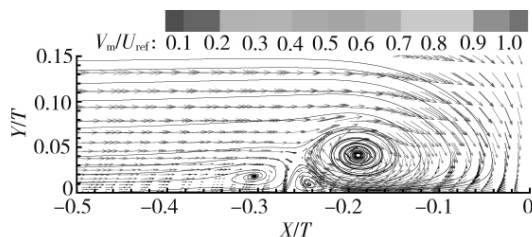


图 3 $Z/T=0$ 平面内基本流态速度矢量和流线图

Fig. 3 Velocity and streamlines at $Z/T=0$

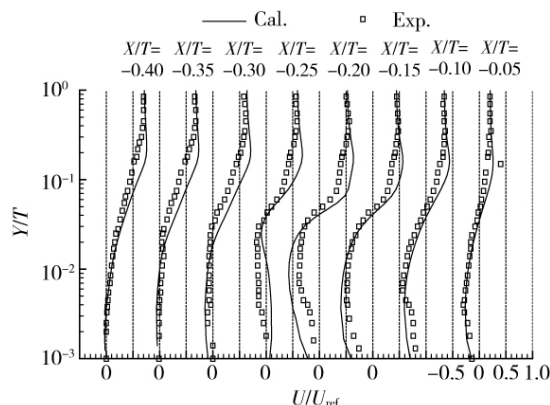


图 4 $Z/T=0$ 平面内基本流态 U/U_{ref} 的计算数据与实验数据^[22]对比

Fig. 4 Contrast of the U/U_{ref} between the calculation and the experiment^[22] at $Z/T=0$

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.

涡量比速度矢量更容易显示马蹄涡的空间分布,图 5 是不同工况下叶片上游对称面内的涡量分布图. 旋涡发生器即影响了马蹄涡的位置也影响了其强度,主马蹄涡涡心位置被列于表 1 中. 基本流态时,涡心位置为 $(-0.190, 0.040)$,主马蹄涡涡心处 $C_v = -38$ (图 5(a)). 在旋涡发生器作用下,主马蹄涡向上游移动,但涡心涡量明显减小(图 5(b)~图 5(d)); $b/T=1/60$ 时,涡心位置为 $(-0.225, 0.040)$,相应的 $C_v = -30$; $b/T=1/30$ 时,涡心位置为 $(-0.240, 0.045)$, $C_v = -22$; $b/T=1/20$ 时,涡心位置为 $(-0.250, 0.050)$, $C_v = -22$. 马蹄涡对平板表面会产生很强的剪切作用,该作用综合了马蹄涡的涡量分布与涡的尺度,因此涡心下的壁面剪切力系数 C_f 可被用来表示马蹄涡的强度. 随 b/T 的增加,相应的 C_f 都有一定程度的减小,其中 b/T 为 $1/30$ 和 $1/20$ 时 C_f 相差不多,对应的值不到基本流态的一半(表 1),马蹄涡被有效削弱. 为既能很好削弱马蹄涡又不过分增强扰动, $b/T=1/30$ 是比较好的控制参数.

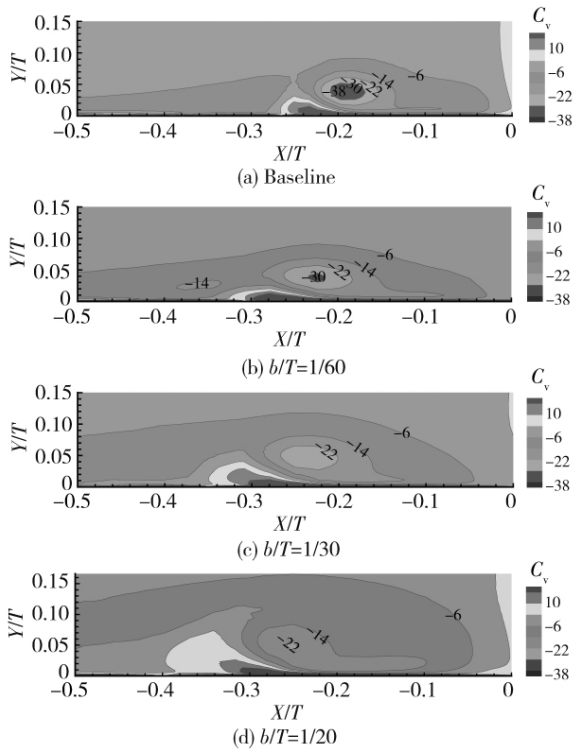


图 5 $Z/T=0$ 平面内的涡量系数图
Fig. 5 Vorticity coefficient at $Z/T=0$

表 1 涡心位置与涡心下的平板表面摩擦系数

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	-0.190	0.040	0.009 3
1/60	-0.225	0.040	0.006 5
1/30	-0.240	0.045	0.004 5
1/20	-0.250	0.050	0.004 0

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.图 6(a)是基本流态下 $X/T=3/4$ 平面内流向涡量系数分布,此时主马蹄涡的空间尺度已经较上游对称面内有明显的增大(图 5(a));二次涡等一些精细的流动结构已经不易被捕捉到;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减小了很多.上游旋涡发生器的作用使流向涡向叶片聚拢,旋涡发生器越高聚拢程度越高(图 6(b)~图 6(d)),相应地涡腿影响范围会缩小,从而使下游结构受到干扰或发生破坏的程度下降^[16]. $b/T=1/20$ 时,流向涡涡心涡量有增加的趋势(图 6(d)), $b/T=1/30$ 是比较好的控制参数(图 6(c)).

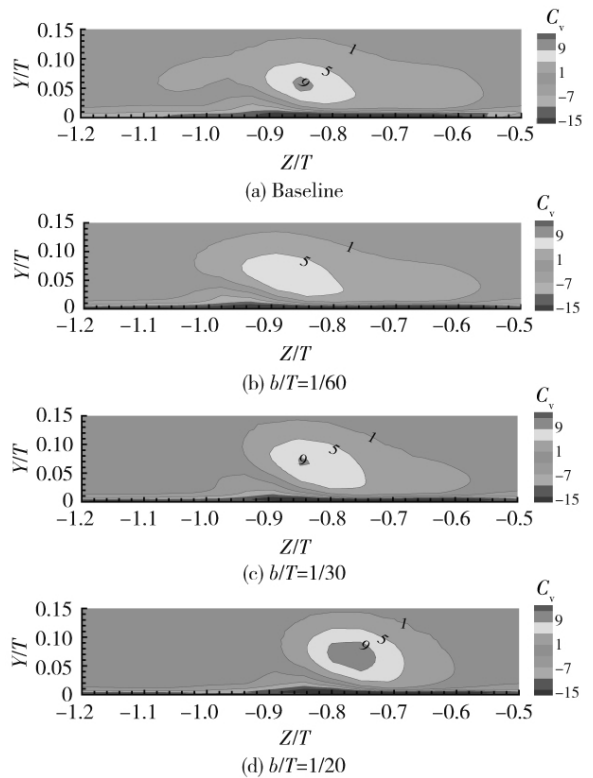


图 6 $X/T=3/4$ 平面内马蹄涡的流向涡量系数分布
Fig. 6 Stream-wise vorticity coefficient at $X/T=3/4$

马蹄涡的产生是边界层三维分离的表现,其物理机制是角区逆压梯度的作用^[21].通过旋涡发生器的作用,边界层外的沿流向具有较高动能的流体质点被裹入边界层中;于是,层内流体质点所具有的平均流向的动量增加了.这个过程不断地进行,边界层中流体获得连续的能量供给,有能力来抵御表面摩擦和逆压梯度,减弱了分离的强度.旋涡发生器的高度控制在一定范围内才能使上述过程更好地进行, $b/T=1/30$ 就是适合的较好的参数.

3 结 论

在叶片-平板角区系统的叶片上游的平板上对称地布置旋涡发生器削弱马蹄涡系,采用数值模拟的手段,得到的主要结论如下:

- 1) 文中涉及的不同高度的旋涡发生器都能削弱叶片根部马蹄涡涡心的涡量.
- 2) 主马蹄涡涡心下壁面剪切力系数 C_f 适合被用来描绘马蹄涡的强度,旋涡发生器高度为 2 mm 时的 C_f 不到基本流态的一半,此高度是较佳的控制参数.
- 3) 随旋涡发生器高度增加,叶片两侧的马蹄涡涡腿有向叶片聚拢的趋势.

致谢:

作者感谢中国航空工业空气动力研究院李俊莆、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: A, 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,陈懋章,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]. Journal of Fluids Engineering, 1991, 113(4): 89-95.
- [6] Simpson R L. Junction flows[J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 2001, 33(1): 415-43.
- [7] Wei Q D, Chen G, Du X D. An experimental study on the structure of juncture flows [J]. J. Visual-Japan, 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] 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)
- [11] 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)
- [12] 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, HUHE Aode. 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)
- [13] Wei Q D, Wang J M, Chen G, et al. Modification of junction flows by altering the section shapes of the cylinders [J]. J. Visual-Japan, 2008, 11(2): 115-124.
- [14] 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)
- [15] Gupta A K. Hydrodynamic modification of the horseshoe vortex at a vertical pier junction with ground [J]. Phys. Fluids, 1987, 30(4): 1213-1215.
- [16] 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 J., 1992, 30(9): 2177-2183.
- [17] Wang J M, Bi W T, Wei Q D. Effects of an inclined rod on circular cylinder-plate junction Flow [J]. Exp. Fluids, 2009, 46(6): 1093-1104.
- [18] 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]. Exp. Fluids, 2005, 38(4): 494-502.
- [19] Wang J J, Zhang P F, LU S F, et al. Drag reduction of a circular cylinder using an upstream rod [J]. Flow Turbul. Combust., 2006, 76(1): 83-101.
- [20] Kang K J, Kim T, Song S J. Strengths of horseshoe vortices around a circular cylinder with an upstream cavity [J]. J. Mech. Sci. Technol., 2009, 23(7): 1773-1778.
- [21] 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)
- [22] Devenport W J, Simpson R L. Time-dependent and time-averaged turbulence structure near the nose of a wing-body junction [J]. J. Fluid Mech., 1990, 210(1): 23-55.
- [23] Baker C J. The turbulent horseshoe vortex [J]. J. Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1980, 6(1/2): 9-23.