

地效翼空气动力风洞试验

贾 青, 杨 韡, 杨志刚

(同济大学 上海地面交通工具风洞中心, 上海 201804)

摘要: 为深入研究地面效应机理及地面附近粘性流动对地效翼空气动力的影响, 在同济大学上海地面交通工具风洞中心的空气动力-气动声学风洞内对地效翼模型进行了风洞吹风试验。风洞试验中利用移动带路面模拟系统模拟了机翼和地面的相对运动; 通过改变地效翼展长、装配端板, 研究了地效翼的三维效应和端板对空气动力的影响; 分析了地效翼的失速特性及其影响因素。通过地效翼风洞试验研究揭示了地面效应机理及移动地面模拟的重要性, 并深入分析了地效翼空气动力特性, 为地效飞行器空气动力设计和研究提供了参考。

关键词: 地面效应; 空气动力; 粘性效应; 展弦比; 失速; 风洞试验

中图分类号: U467.1

文献标志码: A

Wind Tunnel Test Studies of Wing in Ground Effect Aerodynamics

JIA Qing, YANG Wei, YANG Zhigang

(Shanghai Automotive Wind Tunnel Center, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: Deep study on ground effect mechanism and aerodynamic characteristics of wing in ground effect was carried out based on wind tunnel test in Aerodynamics/Aero-acoustic Wind Tunnel of Shanghai Automotive Wind Tunnel Center of Tongji University. Relative motion between wing and ground in cruising was simulated by the moving belt system; span dominated ground effect was systematically investigated by changing span or taking account the endplates; stall characteristics of wing in ground effect was also discussed for different flight height and span. In the study, mechanism of ground effect was further revealed, importance of moving ground simulation was disclosed and aerodynamics of wing in ground effect was comprehensively analyzed through the experimental studies, which provide important reference for aerodynamic design and research of wind in ground (WIG) craft.

Key words: ground effect; aerodynamics; viscous effect; aspect ratio; stall; wind tunnel test

当飞行器接近地面或水面飞行时, 升力增大, 阻力减小, 升阻比急剧升高, 这种现象称为地面效应。地效飞行器正是一种利用地面效应提高升阻比的高速运载工具。早在 20 世纪 60 年代, 前苏联就开始进行地效飞行器的研究和设计工作, 并取得丰硕的成果。近年来, 地效飞行器引起世界多个国家的重视, 纷纷开展研究工作^[1]。

对地面效应及其空气动力特性的研究手段一般有: 理论方法、风洞试验、实艇实验和数值模拟。其中, 风洞实验和数值模拟是现今地面效应研究中最主要的两个手段。近些年来, 随着计算机技术和数值模拟技术的发展, 研究者应用数值计算的方法对地效翼的定常和非定常空气动力特性做了许多研究工作。刘沛清等^[2-3]通过数值模拟的方法对地效飞行器整机的气动性能和分离流动进行了深入分析; Mahon 等^[4]对绕地效翼流动及其尾迹进行了数值研究; Yang 等^[5-6]通过数值方法对地效飞行器特有的动力增升系统进行了系统研究; Lee 等^[7]通过数值方法研究了地效翼气动布局对空气动力特性的影响。这些研究作为地面效应研究和地效飞行器的开发提供了大量有价值的信息, 但同时也受到数值计算自身缺陷的限制, 数值计算结果的准确性和可信度在计算流体力学发展过程中一直备受关注。在实验研究方面: Kang 等^[8]对自由液面下地效翼尾迹区内流动进行了实验研究; Zhang^[9-10]和 Ahmed^[11-12]在风洞内对地效翼的空气动力和流场进行了测量, 并做了系统分析。风洞试验研究是地面效应机理及地效翼空气动力特性研究的重要组成部分。然而, 目前对地面效应的研究大多采用数值模拟的手段。这是因为: 一方面, 数值模拟效率高, 并且可以满足流动的

相似准则;另一方面,多数风洞不具备移动地面模拟系统,风洞试验周期长、成本高.鉴于此,本文对地面效应进行了更深入的实验研究,以丰富地面效应实验研究内容,并进一步通过实验手段揭示地面效应机理.

风洞试验在同济大学上海地面交通工具风洞中心的空气动力-气动声学风洞内进行.该风洞为3/4开口式回流风洞,具备移动路面模拟系统.该风洞为1:1全尺寸风洞,全尺寸风洞试验能够有效避免模型风洞试验中相似准则难以满足的缺点,能最大程度地模拟真实工况.本研究首先对地效翼和支架进行了设计;然后利用数值模拟方法对试验设置进行了分析;最后对地效翼进行了风洞吹风试验,研究了三维地效翼的空气动力特性.

1 试验模型及设置

风洞试验地效翼翼型选用NACA0012,根据移动带的尺寸选定弦长,并选取了2个不同的展弦比(A_R),分别为: $A_R=2$ 、 $A_R=2.5$,同时设计了端板.移动带宽1100 mm,地效翼弦长 $c=400$ mm.模型以 $A_R=2$ 的地效翼为基础,在两侧增加展长及端板.模型如图1所示.

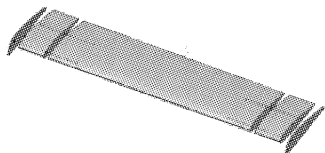


图1 风洞试验地效翼模型

Fig.1 Wing model in wind tunnel test

风洞试验风速 $v=50\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,基于弦长的雷诺数 $Re=1.4\times 10^6$.风洞试验中地效翼的安置如图2所示.

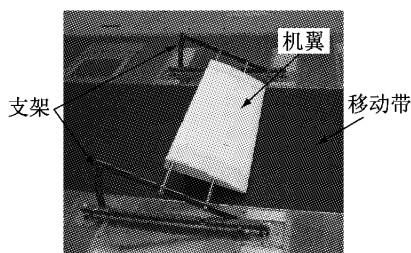


图2 风洞试验地效翼模型安置

Fig.2 Setup of wing model in wind tunnel test

风洞试验以地效翼的空气动力测量为目的,模型通过设计的支架固定在天平上,上海地面交通工具风洞中心的六分量气动天平可测量平均气动阻

力、侧力、升力及滚动、俯仰和横摆力矩.其中升力测量精度达到0.007%,可以充分满足本文试验要求.试验中通过支架和天平调节地效翼的飞行高度和攻角.攻角变化范围为 $6^\circ\sim 25^\circ$,间隔为 1° .以弦长 c 为参考值得到地效翼量纲一高度 h/c 为:0.05,0.1,0.5和1.0.其中,高度 h 为地效翼后缘到地面的距离.

2 试验设置分析

在有支架和移动带路面模拟系统环境下进行地面效应风洞实验研究存在两个问题:

(1) 在地效翼的实际飞行过程中整个地面和地效翼存在相对运动,数值计算中整个地面可以设置为移动地面来满足相对运动准则,而风洞试验中仅移动带部分与地效翼存在相对运动,这与实际情况有差别;

(2) 支架与地效翼一起固定在天平上,试验中测得的空气动力为支架和地效翼的合力,支架与地效翼之间的连接杆对绕机翼流动会产生干扰,对试验结果产生影响.

本文首先将通过数值模拟的方法对试验设置中存在的以上两个问题进行分析.

3 数值计算

数值模拟中模型尺寸参考风洞试验中的模型,其中取 $A_R=2.5$,无端板工况.整个计算域采用六面体结构网格,地效翼表面设置了15层边界层网格,第一层为1 mm,增长率为1.2,总网格数约为1000万.根据模型的对称性,选择半模型作为研究对象.地效翼高度 $h/c=0.1$.求解定常不可压N-S(Navier-Stokes)方程,湍流模型选用可实现化的 $k-\epsilon$ 模型(Realizable $k-\epsilon$ 模型)^[13].Realizable $k-\epsilon$ 模型可以很好地预测地效翼表面压力及尾迹区内流动^[14-15].动量、湍动能和耗散率的离散化采用二阶迎风差分格式,压力-速度耦合使用simple算法求解.边界条件:入口采用速度入口: $v=50\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,出口采用压力出口,侧面及顶部采用对称边界条件(图3).

计算分别模拟了两种工况,一种为较真实的路面状况;另一种为风洞试验中的试验工况,即采用移动带模拟路面状况,将地面分为两个区域:移动带区域(Belt)和地面区域(Ground).

首先,采用一般的数值模拟方法,将整个地面(Belt,Ground)设置为移动地面,模拟真实路况进行

计算,此组结果标记为 CFD-base;然后,模拟风洞试验工况,在数值计算中,仅将 Belt 区域设置为移动地面来模拟风洞试验中的移动带运动,而 Ground 区域设置为固定地面,此组结果标记为 WT-base. 通过这两组数据的对比,研究基于移动带系统的地效翼空气动力特性,研究是否具有可靠性和可行性. 图 4 给出了以上两种工况下,通过数值模拟得出的空气动力对比图. 图中, C_L 为升力系数, C_D 为阻力系数.

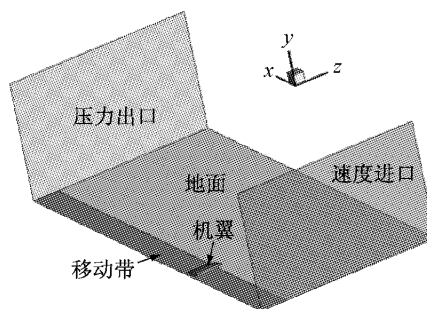


图3 数值计算域和边界条件

Fig.3 Computational domain and boundary condition

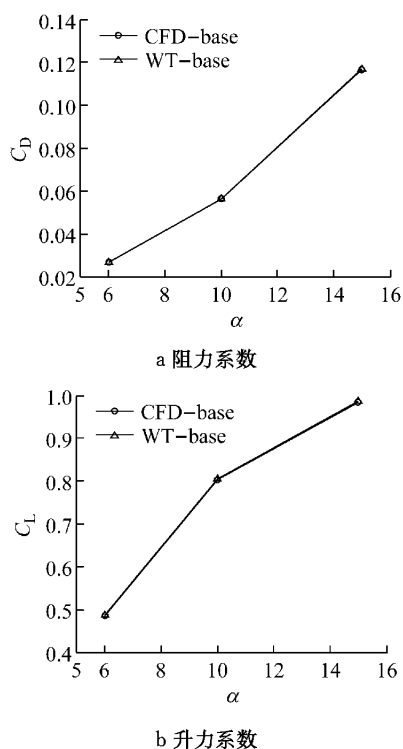


图4 移动带系统对地效翼空气动力的影响

Fig.4 Effect of moving belt on aerodynamics

由图 4 看到,在数值模拟中引入移动带系统后,地效翼的空气动力变化不大,误差在 1% 以内. 接着给出两种工况下,不同 x 方向站位处的速度 V_x 分布云图,如图 5—6 所示. 其中 x 方向站位参考点为机翼后缘.

由图 6 可见,当地面分为移动带和固定地面两个不同区域时,在固定地面部分生成有一定厚度的边界层,造成地面附近速度较低,而比较图 5 和图 6 看到,移动带区域的速度分布情况与全移动地面状况下的结果相同. 流场内截面的总压分布云图,如图 7 和图 8 所示:

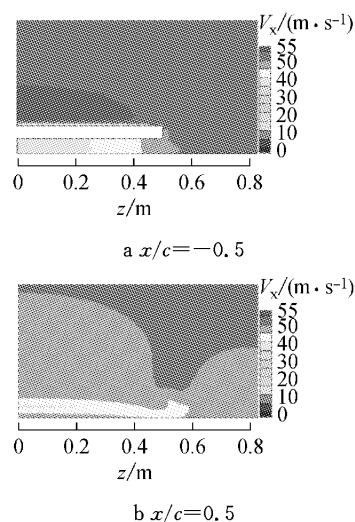


图5 V_x 速度分布, CFD-base

Fig.5 Velocity distribution of V_x , CFD-base

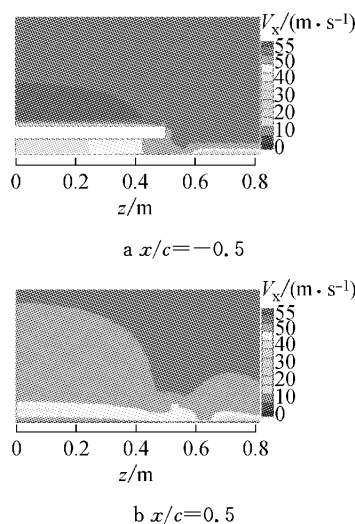


图6 V_x 速度分布, WT-base

Fig.6 Velocity distribution of V_x , WT-base

比较图 7、图 8 可见,在试验工况下,地效翼处于移动带区域内,绕地效翼附近流动未受地面边界层影响,翼尖涡的发展及其位置与全移动地面工况相同.

通过以上分析得到结论,移动带系统可以准确模拟无支架情况下地效翼的实际飞行状态,在具有移动带系统的风洞内对此情况下的地效翼进行空气动力实验研究是可行和可靠的.

接着在试验工况数值模拟中加入支架结构,考虑在移动带路面模拟系统中,支架对地效翼周围流场的干扰程度. 其中带支架的数值模拟结果标记为 WT. 截面的速度分布如图 9 所示.

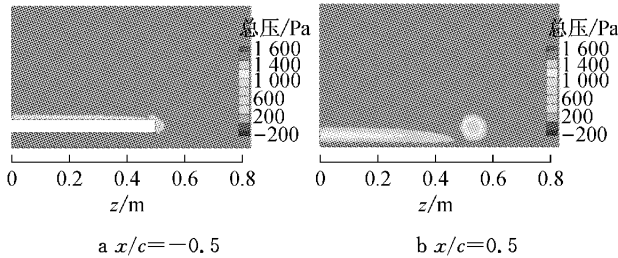


图 7 总压分布, CFD-base

Fig. 7 Total pressure distribution, CFD-base

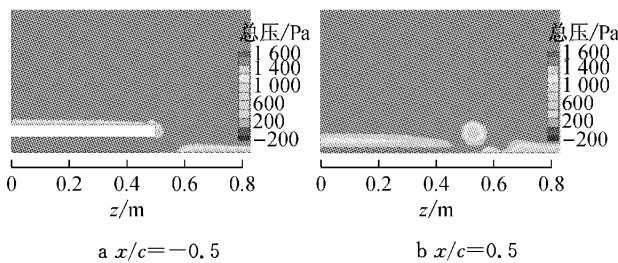


图 8 总压分布, WT-base

Fig. 8 Total pressure distribution, WT-base

支架距离翼尖 $0.5c$, 对地效翼空气动力的影响很小, 误差约在 2% 以内. 对比图 6 和图 9 可以看到, 支架对流场产生了显著的干扰, 特别是支架附近的流动变得十分复杂. 支架与机翼之间的连杆使翼尖附近流动发生变化, 以至于对翼尖涡的生成及其发展产生了一定的影响, 但翼尖涡的位置变化不大.

综上所述可见: 移动带路面模拟系统可以准确地模拟地面效应; 支架及连杆对绕地效翼流场有一定的影响, 但对空气动力影响不大. 在地效翼空气动力

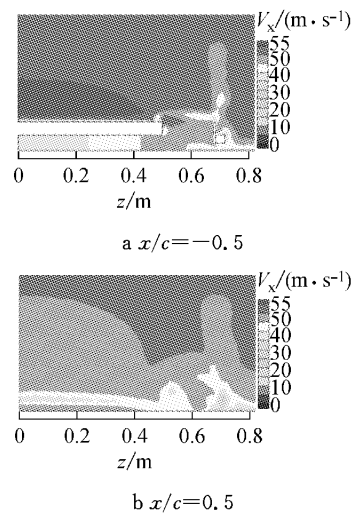


图 9 V_x 速度分布, WT

Fig. 9 V_x distribution, WT

力风洞试验研究中首先测量地效翼和支架受到的总空气动力, 然后测量支架所受空气动力, 最后根据式 (1) 得到地效翼在不同高度及不同攻角下的空气动力.

$$F_w = F_t - F_{ch} \quad (1)$$

式中: F_w 为地效翼所受空气动力; F_t 为试验中测量所得地效翼和支架的总空气动力; F_{ch} 为试验中仅有支架时所测得空气动力.

4 试验结果及分析

4.1 地效翼三维地面效应^[16-18]

与在自由空间相比, 在地面效应下机翼具有较大的三维效率, 即有效展长增加^[19]. 不同展弦比及带端板地效翼在 $h/c=0.1$ 的空气动力如图 10 所示. 图中 l_{ep} 为端板长度.

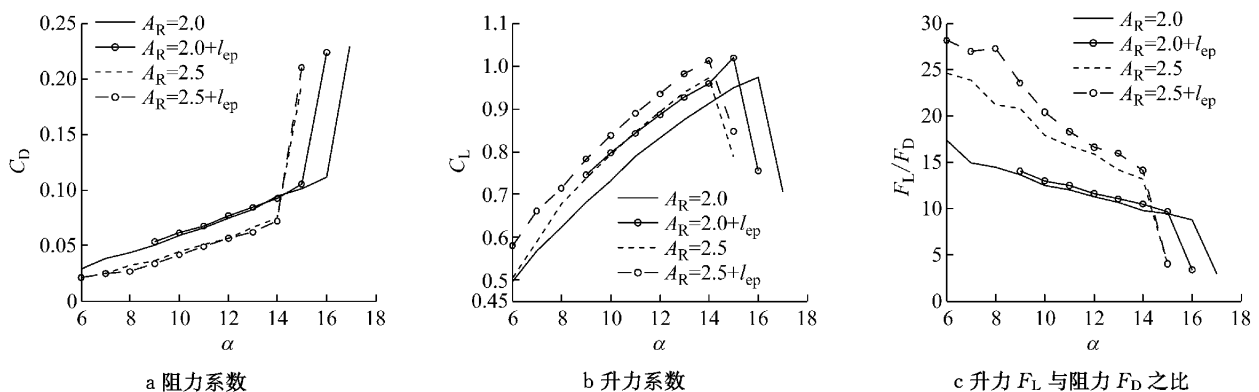


图 10 地效翼三维效应, $h/c=0.1$

Fig. 10 Aerodynamics of wing in ground effect, $h/c=0.1$

展弦比增加, 地效翼阻力系数减小; 展弦比 $A_R=2.0$ 的地效翼安装端板后阻力略有增加, 而展弦比

$A_R=2.5$ 的地效翼安装端板后阻力减小. 这说明端板一方面增加了地效翼的形状阻力, 另一方面通过抑制下翼面展向流动减小了地效翼的诱导阻力. 由于端板的存在而增加的形状阻力对于小展弦比地效翼来说占较大比例, 因此总阻力增大, 而对于较大展弦比地效翼来说诱导阻力的减小比重较大, 因此总阻力减小.

展弦比增加, 地效翼升力系数增大, 安装端板后升力进一步增大. 同时还可以发现展弦比 $A_R=2.0$ 的地效翼安装端板后产生的升力与展弦比 $A_R=2.5$ 的地效翼的升力几乎相同. 端板可以有效地增强地面效应, 提高地效翼的有效展弦比.

从地效翼的升阻比对比情况看, 地效翼的三维效应是地面效应中的重要组成部分, 端板在地效区内可以进一步提高地效翼的空气动力效率. 端板在地效飞行器设计中是不可缺少的重要空气动力部件. 在上述分析中可以很清晰地发现端板可以增强地效翼的地面效应, 并可以减小地效翼的诱导阻力, 从而提高地效翼及地效飞行器的空气动力效率. 迄今为止, 几乎所有的地效飞行器都配备有端板. 然而, 在地效翼的飞行高度较高、地面效应较弱的情况下, 端板已经不能改善地效翼空气动力特性, 反而可能使地效翼阻力升高、升阻比下降, 如图 11 给出了 $h/c=1$ 工况下地效翼空气动力特性图:

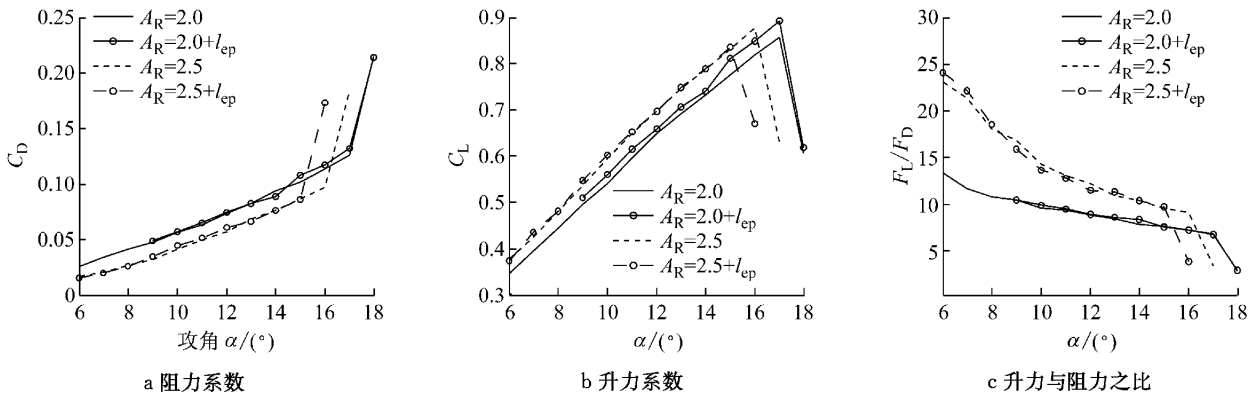


图 11 地效翼三维效应, $h/c=1.0$

Fig. 11 Aerodynamics of wing in ground effect, $h/c=1.0$

因此, 端板的有效使用空间仅限于地面效应较强的区域内, 而在较高的飞行高度下或自由空间, 端板不利于改善地效翼的空气动力特性.

4.2 地效翼失速特性

地面效应的存在不仅影响地效翼的空气动力特性和流场结构, 也使地效翼的失速特性发生了变化^[20]. 展弦比 $A_R=2.5$ 并安装有端板的地效翼的失速攻角 α_{stall} 随高度的变化如图 12 所示.

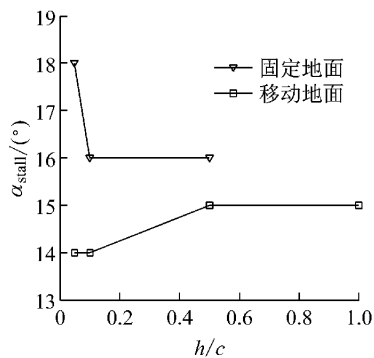


图 12 失速攻角的变化, $A_R=2.5$

Fig. 12 Variation of stall angle, $A_R=2.5$

在地面效应下, 下翼面压力增大, 上翼面后缘压力梯度升高, 机翼易于失速; 随着飞行高度的增加, 地效翼失速攻角也增大. 然而, 当考虑固定地面的粘性效应时失速攻角变化规律正好相反. 在固定地面状况下, 地面边界层发生分离并产生分离泡, 流动被诱导顺利流过机翼前缘流向后缘, 上翼面压力梯度较小, 机翼不容易失速; 随着飞行高度的增加, 地面边界层分离情况减弱, 地面附近边界层分离泡对地效翼绕流的影响也在减弱, 上翼面压力梯度升高, 机翼易于失速. 因此, 随着飞行高度的增大, 固定地面下地效翼的失速攻角逐渐减小. 地效翼的展弦比对失速也有影响. 随着展弦比的增大, 地效翼失速攻角减小; 端板在增强地面效应的同时, 也使地效翼更易于失速.

5 结论

本文首先采用数值仿真的方法, 针对试验工况对地效翼展开风洞试验的可行性及数据的可靠性进行了分析, 进而通过风洞试验研究了三维地效翼的

空气动力特性,主要结论有:

(1)移动带系统可以准确模拟无支架情况下地效翼的实际飞行状态,在具有移动带系统的风洞内对此情况下的地效翼进行空气动力实验研究是可行和可靠的。

(2)支架及连杆对绕地效翼流场有一定的影响,但对空气动力影响不大.可以近似通过两次测量,除去支架干扰得到地效翼的空气动力。

(3)在地面效应下,展弦比增加,地效翼的气动效率增加,而且增加率比自由空间大,三维机翼在地面效应下更有效.合理地设计和应用端板可以增加地效翼的有效展弦比,提高地效翼在地效区内的气动效率。

(4)地面效应在增强机翼下翼面压力效应的同时,也增加了上翼面的压力梯度,机翼易于失速.地面效应越强,机翼越容易失速.地效翼的飞行高度降低,失速攻角减小;具有大展弦比或安装有端板的地效翼易于失速。

参考文献:

- [1] Rozhdestvensky K V. Wing-in-ground effect vehicles [J]. Progress in Aerospace Science, 2006, 42(3): 211.
- [2] 屈秋林, 刘沛清. 地效飞行器地面巡航气动性能数值模拟及分析[J]. 航空学报, 2006, 27(1): 16.
QU Qiulin, LIU Peiqing. Numerical simulation and analysis of aerodynamics of WIG craft in cruise over ground [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2006, 27(1): 16.
- [3] 屈秋林, 刘沛清, 秦绪国. 地效飞行器大迎角近地面飞行分离流动数值研究[J]. 航空学报, 2007, 28(1): 72.
QU Qiulin, LIU Peiqing, QIN Xuguo. Numerical research on separated flow around a WIG craft in flight close to ground at high incidence angle [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2007, 28(1): 72.
- [4] Mahon S, Zhang X. Computational analysis of pressure and wake characteristics of an aerofoil in ground effect [J]. Journal of Fluids Engineering, 2005, 127(2): 290.
- [5] Yang W, Yang Z G. Schemed power-augmented flow for wing-in-ground effect craft in cruise [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2011, 24(2): 119.
- [6] Yang Z G, Yang W. Complex flow for wing-in-ground effect craft with power augmented ram engine in cruise [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2010, 23(1): 1.
- [7] Lee J, Han C S, Bae C H. Influence of wing configurations on aerodynamic characteristics of wings in ground effect [J]. Journal of Aircraft, 2010, 47(3): 1030.
- [8] Kang D W, Zhao L L. PIV measurements of the near-wake flow of an airfoil above a free surface [J]. Journal of Hydrodynamics, 2007, 19(4): 482.
- [9] Zerihan J, Zhang X. Aerodynamics of a single element wing in ground effect [J]. Journal of Aircraft, 2000, 37(6): 1058.
- [10] Zhang X, Zerihan J. Off-surface aerodynamic measurements of a wing in ground effect [J]. Journal of Aircraft, 2003, 40(4): 716.
- [11] Ahmed M R, Takasaki T, Kohama Y. Aerodynamics of a NACA4412 airfoil in ground effect [J]. AIAA Journal, 2007, 45(1): 37.
- [12] Ahmed M R, Sharma S D. An investigation on the aerodynamics of a symmetrical airfoil in ground effect [J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2005, 29(6): 633.
- [13] Shih T H, Liou W W, Shabbir A, et al. A new $k-\epsilon$ eddy viscosity model for high reynolds number turbulent flows [J]. Computers & Fluids, 1995, 24(3): 227.
- [14] Mahon S, Zhang X. Computational analysis of a inverted double element airfoil in ground effect [J]. ASME Journal of Fluids Engineering, 2006, 128(6): 1172.
- [15] Yang Z G, Yang W, Jia Q. Ground viscous effect on 2D flow of wing in ground proximity [J]. Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics. 2010, 4(4): 521.
- [16] Firooz A, Gadami M. Turbulence flow for NACA 4412 in unbounded flow and ground effect with different turbulence models and two ground conditions: fixed and moving ground conditions [C/CD]//Proceedings of the International Conference on Boundary and Interior Layers (BAIL 2006), Göttingen: [s. n.], 2006.
- [17] Marshall D W, Newman S J, Williams C B. Boundary layer effects on a wing in ground-effect [J]. Aircraft Engineering and Aerospace Technology, 2010, 82(2): 99.
- [18] Yang W, YANG Zhigang. Aerodynamic investigation of a 2D wing and flows in ground effect [J]. Chinese Journal of Computational Physics, 2009, 26(2): 231.
- [19] 杨韡, 杨志刚. 三维地效翼展向效应数值模拟 [J]. 计算机辅助工程, 2008, 17(3): 13.
YANG Wei, YANG Zhigang. Numerical simulation on span-dominated ground effect of 3D wing in ground effect [J]. Computer Aided Engineering, 2008, 17(3): 13.
- [20] 应成炯, 杨韡, 杨志刚. 地面效应下机翼失速数值模拟 [J]. 飞行力学, 2010, 28(5): 9.
YING Chengjiong, YANG Wei, YANG Zhigang. Numerical simulation on stall of wing in ground effect [J]. Flight Dynamics, 2010, 28(5): 9.