

## 翼缝宽度对翼型气动特性的影响

李润杰 李春 李倩倩 叶舟

(上海理工大学 能源与动力工程学院 上海 200093)

**摘要:** 针对翼型失速问题,采用CFD(流体动力计算软件)数值模拟方法,以NACA0018为基准翼型,分析了不同翼缝宽度对翼型压力云图及流场等值线分布的影响。计算结果表明:当翼型处于小攻角时,翼缝宽度对翼型吸力面影响较小,对压力面高压区范围影响较大;当翼型处于大攻角时,翼缝的存在改变了翼型流场结构,减少了翼型尾缘处发展涡的数量,且缩小了涡的范围;在大攻角下,翼缝对翼型压力面高压区和吸力面低压区范围影响较大;对比三种不同翼缝宽度对翼型压力云图及流线等值线图可知,翼缝宽度 $w=0.1\%c$ 时,翼型气动性能最佳。

**关键词:** 翼型;襟翼;翼缝宽度;气动特性  
中图分类号: TV136+.1 文献标识码: A  
DOI: 10.16146/j.cnki.rndlge.2016.07.019

### 引言

近年来,因工业和科技的快速发展,全球对能源需求日益增大,使得可再生能源再次成为世界各国关注的焦点<sup>[1]</sup>;潮汐能对气候影响的不敏感性,以及其在时间与空间的可预测性,使得潮汐能在各种海洋可再生能源中具有极大的优越性<sup>[2]</sup>;潮汐能是指由潮汐现象所引起的海水流动能,每天周期性的改变其大小和方向。仅我国沿海,潮汐能理论平均功率就高达13.9万MW<sup>[3]</sup>。

潮流能利用的主要形式为潮流能发电,垂直轴水轮机能适应多方向往复潮流,自启动性能好,备受国内外学者的关注<sup>[4~6]</sup>,而潮流水轮机叶片所用翼型为水轮机能量捕获的关键所在;流体动力学理论与实验研究均表明,失速是翼型效率降低的主要因素<sup>[7]</sup>,失速的出现主要是由于叶片旋转到大攻角位置时的流动分离。为此许多学者提出了大量旨在消除或推迟流动分离从而延迟失速的方法。受空中和

水中动物通过拍打翅膀或尾翼控制涡流改善前行性能的启发,基于仿生学提出了带有摆动小翼的开槽叶片设计方法,并对其进行了研究。襟翼又分固定襟翼和摆动襟翼,固定襟翼的概念源于在低雷诺数下获得高升力的应用。

在二维模型计算情况下,襟翼偏转增加了后缘的弯曲度,襟翼的运动是翼型流场发生变化的主要因素,因此襟翼主要是通过改变翼型的弯曲度使流场发生改变,达到控制流场的作用。研究表明:在某些情况下襟翼的偏转降低了翼型的失速攻角,襟翼的偏转,将会改变升力和阻力<sup>[8]</sup>;采用固定襟翼控制气流流动的思想是由Page和Glauert于1920年提出<sup>[9~10]</sup>,其目的是在相对较低的速度下获得较高的升力;Weyl对分离式襟翼的早期研究做出过重大贡献<sup>[11]</sup>,采用实验证明了襟翼表面涡不是一个有序的流动;1927年,Fowler发明了以其名字命名的富勒襟翼,在NASA(美国国家航空航天局)风洞中进行的测试实验<sup>[12]</sup>,实验证明:采用富勒襟翼机翼的升力系数可提高85%~95%,个别大面积富勒襟翼的升力系数可提高110%~140%<sup>[13]</sup>;自此,出现了各种结构的分离式襟翼,如简单襟翼、容克式襟翼和古奇襟翼等<sup>[14~15]</sup>。

文献[16]研究了应用与垂直轴潮汐能发电机叶片的固定襟翼和摆动襟翼对输出功率的影响,分析了襟翼的摆动对风力机流场的影响,得出襟翼能够增加叶轮的功率系数、大攻角下可延迟失速的结论;文献[17]通过实验方法验证了襟翼具有改变翼型周围主涡的发展和变化的作用,粒子成像实验清晰地展示了襟翼的摆动对改变翼型周围涡发展的情况;文献[18]基于S-A湍流模型针对多段翼型的非定常流动实验研究表明,缝翼压力面具有一定的

收稿日期: 2015-08-21; 修订日期: 2015-11-16

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(E51176129);上海市育委员会科研创新(重点)基金资助项目(13ZZ120);教育部高等学校博士学科点专项科研基金(博导类)资助项目(201231200110008)

作者简介: 李润杰(1990-),男,山东日照人,上海理工大学硕士研究生。

涡量变化,前缘缝翼、襟翼与尾迹涡干扰在一起,形成升力的周期性变化;文献[19]仅对带襟翼的翼身组合体进行数值模拟,主要验证了文献[20~21]压力曲线的区别是源于网格数的不同。通过以上可知,学者多数采用襟翼翼型进行不同攻角实验模拟,得出压力分布图和翼型上的分离流,但并未说明造成这种现象的原因和结论。

通过在叶片尾缘布置襟翼,少量流体被迫通过襟翼翼缝从高压区域流向低压区域,高压、高动量流体将其能量传递给叶片上表面附近边界层,使得充分发展的边界层破碎,并重新形成新的边界层。这种方法可以有效降低边界层附近湍流度,并推迟边界层在尾缘处的脱离,从而减少升力损失<sup>[16]</sup>。由上可知,襟翼对流场的作用相对于基准翼型是流动扰流的几何尺寸改变,因此对于由襟翼组成的流动,襟翼长度  $l$  和宽度  $x$  如图 1 所示自然成为襟翼结构的重要参数。本文采用数值模拟研究不同襟翼长度  $l$  时的水动性能及所对应的流场结构,分析不同翼缝宽度对 NACA0018 水动特性的影响。

### 1 计算方法

#### 1.1 建立模型

选取 NACA0018 作为基准翼型,其几何结构如图 1(a) 所示,其中  $c$  为翼型弦长,  $h$  为翼型最大厚度。襟翼翼型几何结构如图 1(b) 所示,  $x$  为主翼长度,  $l$  为襟翼长度,  $w$  为襟翼翼缝宽度。本文襟翼长度  $l$  选取为  $0.3c$ ; 襟翼翼缝宽度  $w$  分别为  $0.1\%c$ ,  $0.15\%c$ ,  $0.2\%c$ 。

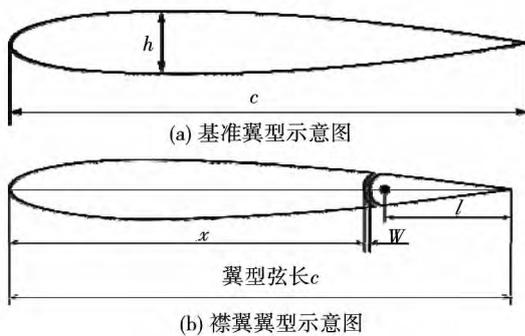


图 1 翼型示意图

Fig. 1 Schematic diagram of an airfoil profile

#### 1.2 计算域划分及网格拓扑

图 2(a) 为叶片计算流域,采用二维结构网格与

非结构网格,在翼型近壁面处使用边界层网格,半径为  $R = 1.2c$  圆形区域内网格采用非结构网格,并对其进行网格加密处理,外部流场采用结构网格。整个流域网格总数为 308 330,翼型壁面处  $y^+$  为  $0.9^{[22]}$ ,满足黏性流体计算时对壁面网格的要求。根据流域中水的密度  $\rho = 998.2 \text{ kg/m}^3$ ,动力粘度  $\mu = 1.003 \times 10^{-3} \text{ N} \cdot \text{s/m}^2$ 。依据山东半岛周边海域潮流场分布<sup>[23]</sup>,海水来流速度取  $v_\infty = 2 \text{ m/s}$ 。流域中 ab、ad 以及 dc 设置为速度入口, bc 设置为压力出口,翼型壁面设置为无滑移壁面,近壁面流域与外流域交界面设置为不动的内界面。翼型近壁边界层网格如图 2(b) 所示。

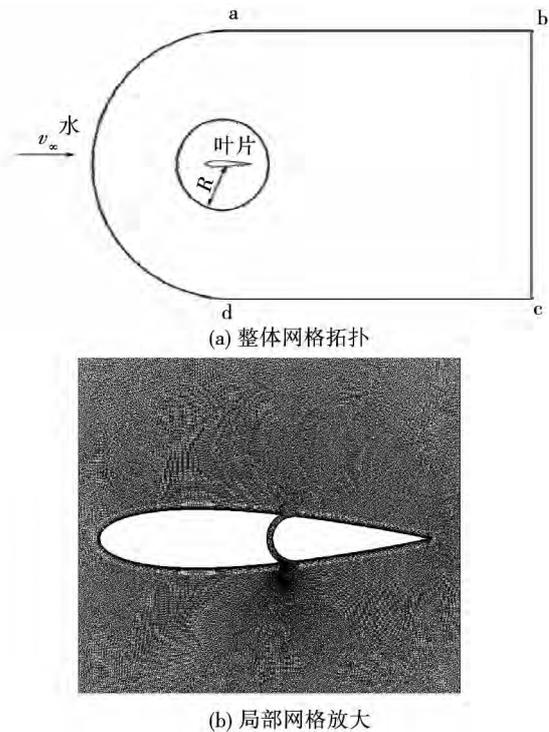


图 2 计算流域划分及网格拓扑

Fig. 2 Division of the computational domain and grid topology

#### 1.3 计算精度验证

CFD 数值计算模型选用剪切应力输运模型,简称 SST  $k - \omega$  模型,为二方程湍流模型,模型通过求解输运方程获得湍流运动粘度。XFOIL 是亚音速翼型分析和设计软件,在风力机专用翼型设计方面也有广泛应用。为验证本文所用模型的准确性,采用较精准的翼型气动实验数据与计算结果对比。翼型 NACA0018 的 CFD 数值计算结果与 XFOIL 计算结果和实验结果对比如图 3 所示,在图中可知 CFD 数值

计算的升力系数比 XFOil 计算的升力系数与实验结果吻合度更好,两种方法计算出的阻力系数与实验结果基本相同,误差不大。XFOil 计算结果与实验数据在翼型失速前的小攻角范围内有很好的-致性,在失速后的大攻角范围内,其计算精度要低于 CFD 计算结果。翼型失速攻角之前,CFD 计算出的升、阻力系数与实验结果基本相等,在翼型失速攻角以后,升、阻力系数与实验结果存在一定误差,但是其变化趋势一致,较好的证明了本文所用方法的有效性。

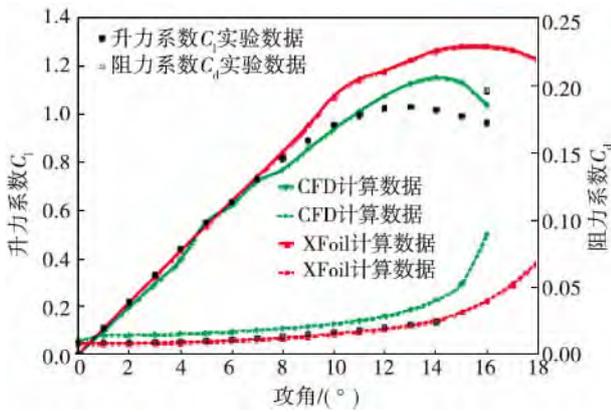


图 3 升、阻力系数对比

Fig. 3 Contrast of the lift and drag coefficient

## 2 计算结果分析

NACA0018 在流体为水和空气时的升、阻力系数如图 4 所示,由图可知,流域介质为水和空气时对翼型升力系数变化趋势的影响基本一致,但在翼型失速攻角之前,介质为水时的翼型升、阻力系数与介质为空气时所得到的升、阻力系数基本一致,当翼型达到失速攻角之后,介质为水时翼型在各攻角下升力系数大于对应的介质为空气时翼型升力系数,其阻力系数要小于流体为空气时的阻力系数,且流体为水时失速攻角较流体为空气时的失速攻角延后。因此可得出:介质为水时可使翼型失速攻角延迟,较介质为空气时翼型性能有所提升。

攻角  $\alpha = 5^\circ$  时,翼型压力云图、流线等值线分布图及翼型表面静压力分布图如图 5 所示,由图可知,翼缝宽度  $w$  为  $0.1\%c$ 、 $0.15\%c$  和  $0.2\%c$  时,翼型与基准翼型流场基本相同,说明在低攻角下,翼缝宽度对流场影响不大。在三种翼缝宽度下,翼型尾缘高压区范围均大于基准翼型对应区域范围,当  $w =$

$0.1\%c$  时,翼型尾缘高压区范围最大, $w = 0.2\%c$  时,翼型尾缘高压区范围与基准翼型对应区域范围基本相同。从翼型表面静压力分布图可知,翼型前缘处,压力面与吸力面的表面静压力差值较大,且随  $x/c$  增大表面静压力差值逐渐减小。由于少量流体在翼缝处被迫从高压区流向低压区,这部分流体将其较高的能量传递给吸力面附近的边界层,使得充分发展的边界层破碎,重新形成新的边界层,使得在翼缝位置  $x/c = 0.7$  附近处形成一个压力高峰,此压力高峰在翼型表面静压力图中可明显观察到,这种现象使得翼型升力系数比基准翼型有所提高,且吸力面表面静压力升高较明显,这在一定程度上说明了襟翼改变了翼型压力的分布。综上可知,在低攻角下,襟翼改变了翼型表面静压力分布图,翼缝宽度为  $w = 0.1\%c$  时,翼型水动特性最佳。

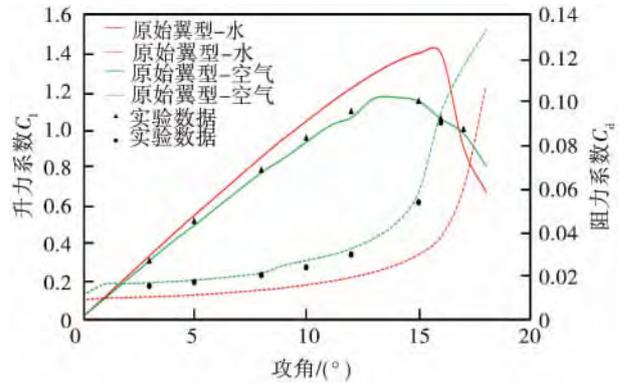


图 4 翼型升阻力系数

Fig. 4 Airfoil lift and drag coefficient

翼型攻角  $\alpha = 10^\circ$ ,三种翼缝宽度下,翼型压力云图、流线等值线分布图如图 6 所示,翼型前缘压力面高压区范围基本不变,襟翼附近压力面高压区范围变化较明显,其变化规律为:随翼缝宽度的增加,翼型压力面高压区范围逐渐减小。翼缝宽度  $w = 0.2\%c$  时,翼型尾缘出现涡。三种翼缝宽度下,翼型前缘吸力面低压区范围基本相同,翼缝宽度对翼型低压区范围影响较小。显然,翼缝宽度的增大对翼型尾缘流场结构的影响也越来越大,以至于影响了翼型的水动特性。从翼型表面静压力分布图可知,翼型前缘处上表面与下表面表面静压力差值较大,随着  $x/c$  值得增大静压力差值逐渐减小。在  $x/c = 0.7$  附近出现压力高峰,当  $x/c < 0.3$  时,翼型吸力面静压力值较基准翼型的静压力值有所提升。

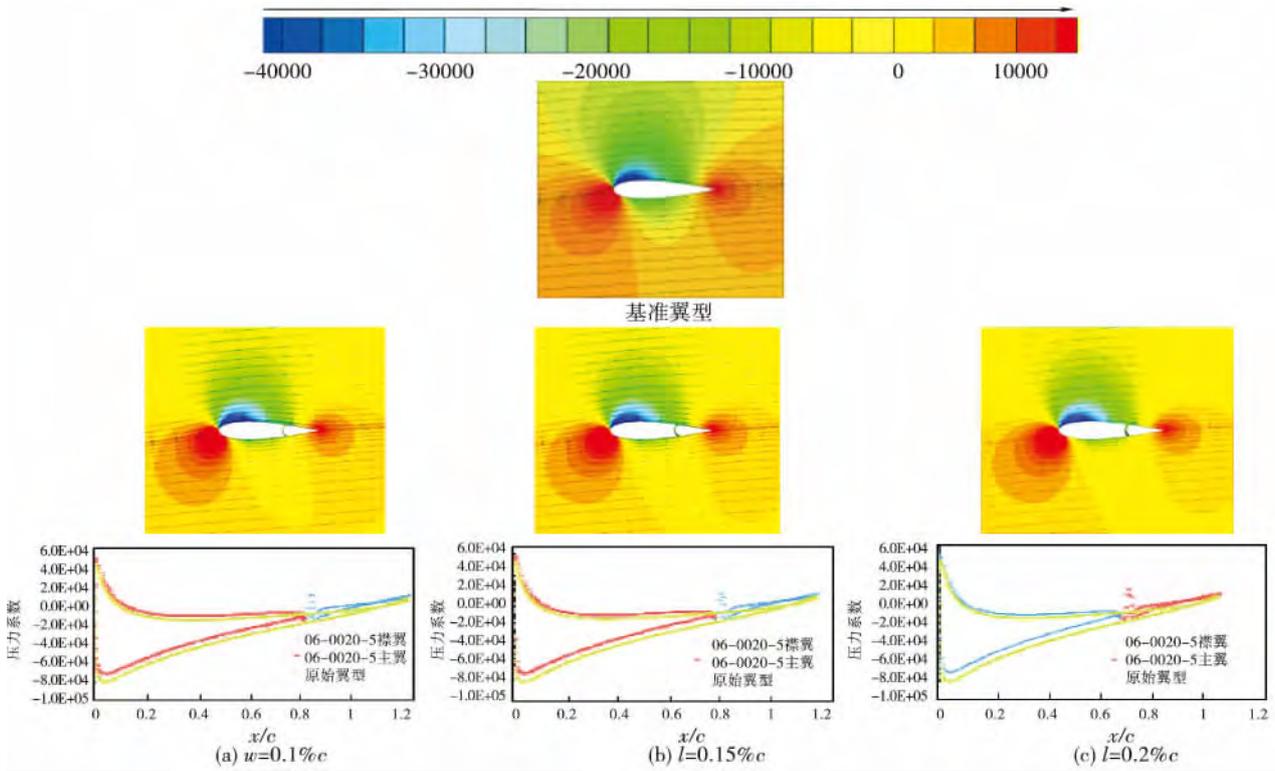


图 5 攻角  $\alpha = 5^\circ$  不同翼缝宽度时翼型流场及压力分布图

Fig. 5 Chart showing the airfoil flow field and pressure distribution at various widths of the clearance between the wing and flap when the attack angle equals to 5 degrees

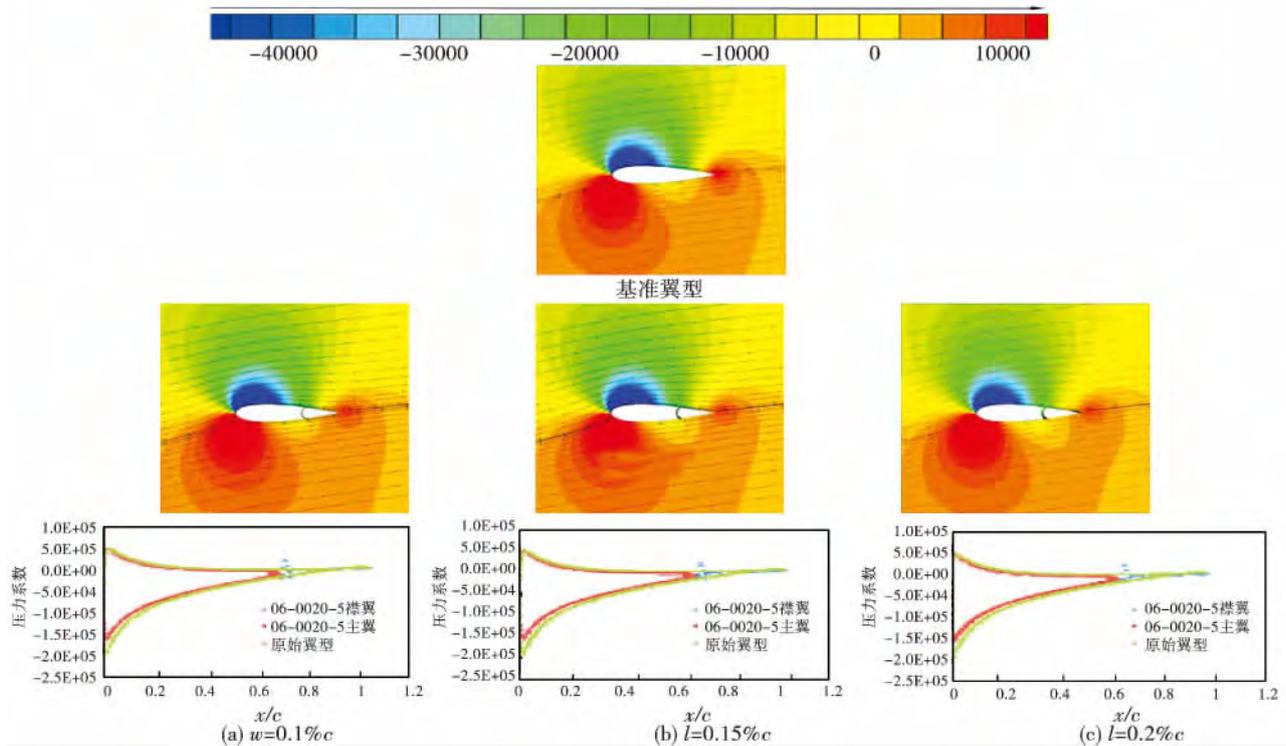


图 6 攻角  $\alpha = 10^\circ$  不同翼缝宽度时翼型流场及压力分布图

Fig. 6 Chart showing the airfoil flow field and pressure distribution at various widths of the clearance between the wing and flap when the attack angle equals to 10 degrees

图 7 所示翼型所处攻角  $\alpha = 15^\circ$ , 从压力云图及流线等值线可以明显看出, 基准翼型尾缘出现多个涡, 涡起点靠近翼型吸力面前缘  $1/4$  弦长处, 且翼型压力面高压区范围集中在翼型前缘  $0 < x/c < 0.3$  处, 吸力面低压区范围微小。而三种不同翼缝宽度下翼型尾缘涡范围很小, 且翼型压力面范围较均匀的分布在  $0 < x/c < 0.7$  处。显然, 翼缝的存在明显

的减少了翼型尾缘涡的数量和范围, 对翼型流场结构产生较大的影响, 使得在大攻角下翼型气动性能有了较大的提高。从表面静压力图可知, 翼缝的存在对静压力分布的影响并不明显。综上可知, 大攻角时, 翼缝宽度对翼型流场影响较小, 攻角小时大, 特别是在翼型压力面高压区及尾缘处最大,  $w = 0.1\% c$  时, 翼型气动特性最佳。

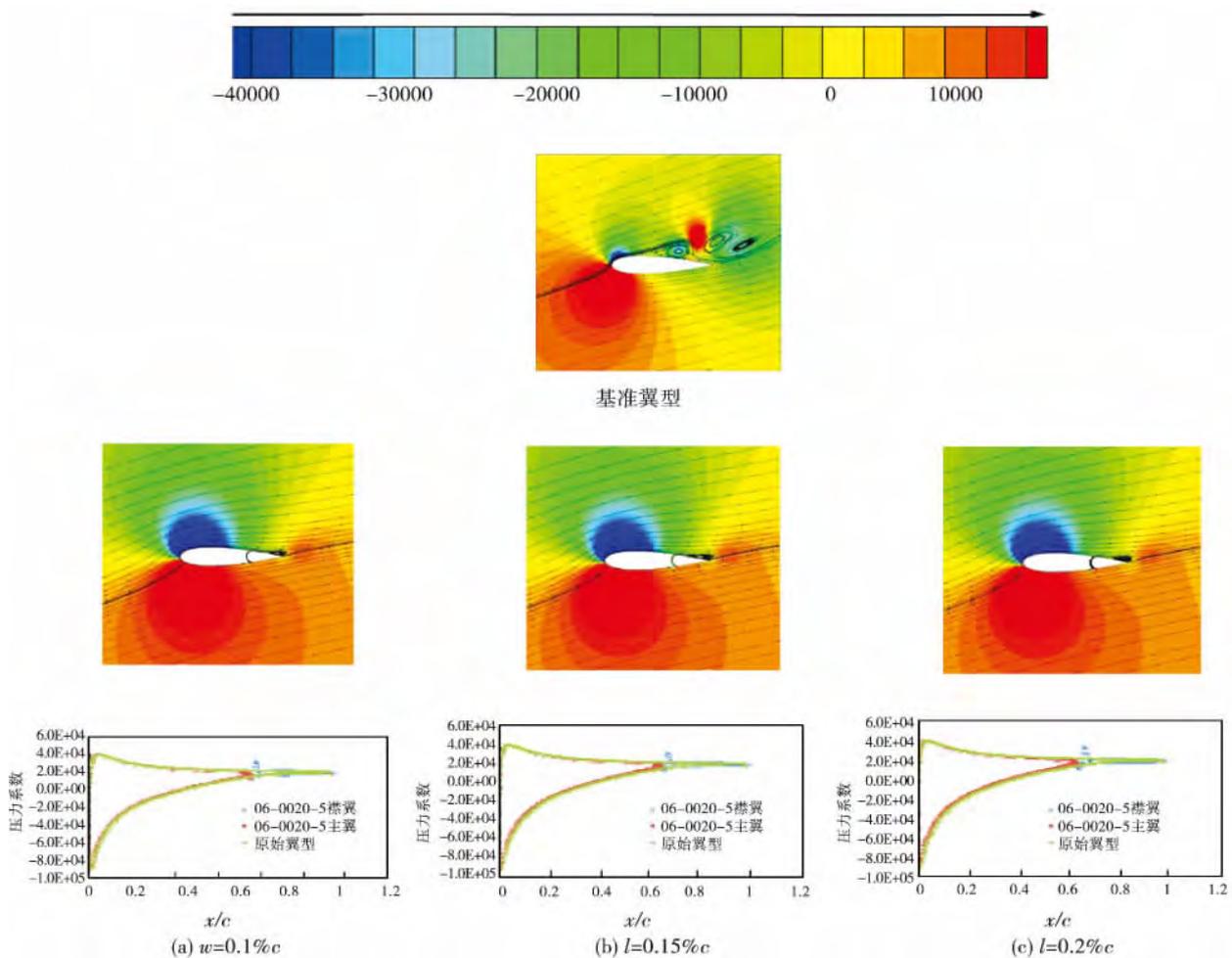


图 7 攻角  $\alpha = 15^\circ$  不同翼缝宽度时翼型流场及压力分布图

Fig. 7 Chart showing the airfoil flow field and pressure distribution at various widths of the clearance between the wing and flap when the attack angle equals to 15 degrees

### 3 结 论

本文基于 SST  $k - \omega$  湍流模型, 计算不同翼缝宽度对翼型气动特性的影响, 数值计算结果表明:

(1) 当翼型处于小攻角时, 翼缝宽度主要影响翼型尾缘压力面高压区范围大小, 对低压区范围影响较小; 当翼型处于大攻角时, 翼缝可减少翼型尾缘

涡的数量, 并且缩小了尾缘涡范围, 对压力面高压区与吸力面低压区范围影响较大;

(2) 当翼缝宽度  $w = 0.1\% c$  时, 翼型气动特性最优。翼缝的存在改变了翼型压力面与吸力面的静压力, 静压力均有所升高, 翼型  $x/c = 0.7$  附近, 翼型表面出现压力高峰, 这是翼型气动特性升高的主要因素。

## 参考文献:

- [1] Xiao Q ,Liu W ,Incecik A. Flow control for VATT by fixed and oscillating flap [J]. *Renewable Energy* 2013 51(2): 141 - 152.
- [2] Nicholls-Lee RF ,Turnock SR ,Boyd SW. Simulation based optimization of marine current turbine blades [J]. 7th International Conference on Computer and IT Applications in the Maritime Industries( COMPIT'08) ,Liege ,Belgium; Apr. 21 -23 2008.
- [3] 赵广,郭嘉楠,刘艳等. 竖轴潮流能水轮机实验台设计及水动力性能测试[J]. *太阳能学报* 2013 34(7): 1271 - 1279.  
ZHAO Guang ,GUO Jia-nan ,LIU Yan ,et al. Design and testing of the hydrodynamic performance of a vertical tide energy water turbine test rig [J]. *Acta Energetica Sinica* 2013 34(7): 1271 - 1279.
- [4] 马舜,李伟,刘宏伟等. 水平轴潮流能发电系统能量捕获机构研究[J]. *机械工程学报* 2010 46(18): 150 - 156.  
MA Shun ,LI Wei ,LIU Hong-wei ,et al. Reserch of the energy capturing mechanism in a horizontal tide energy power generation system [J]. *Journal of Mechanical Engineering* 2010 46(18): 150 - 156.
- [5] 汪鲁兵,张亮,曾念东. 一种竖轴潮流发电水轮机性能优化方法的初步研究[J]. *哈尔滨工程大学学报* 2004 25(4): 417 - 421.  
WANG Lu-bing ,ZHANG Liang ,ZENG Nian-dong. Preliminary study of a method for optimizing the performance of a vertical tidal current power generation water turbine [J]. *Journal of Harbin Engineering University* 2004 25(4): 417 - 421.
- [6] Coiro D P ,Nicolosi F ,De Marco A ,et al. Dynamic behavior of novel vertical axis tidal current turbine: Numerical and exeperimental investigations [C]. *Proceedings of the 15th International Offshore and Polar Engineering Confence* Seoul 2005: 1098 - 6189.
- [7] 叶正寅,解亚军,武洁. 模型振动对翼型流场和气动性能的影响[J]. *工程力学* 2009 26(4): 240 - 245.  
YE Zheng-yin ,XIE Ya-jun ,WU Jie. Effect of the vibration of a model on the flow field and aerodynamic performance of an airfoil profile [J]. *Engineering Mechanics* 2009 26(4): 240 - 245.
- [8] 徐璋,王茜,皇甫凯林等. 襟翼对垂直轴风力机性能影响的数值模拟[J]. *动力工程学报* 2011 31(9): 715 - 719.  
XU Zhang ,WANG Qian ,HUANGFU Kai-lin ,et al. Numerical simulation of the inflence of the flap on the performance of a vertical wind turbine [J]. *Journal of Power Engineering* ,2011 , 31(9): 715 - 719.
- [9] Page H. The handley page wing [J]. *Aeronautical Journal* 1921: 263 - 89.
- [10] Glauert H. The handley page slotted wing [J]. *ARC ,R & M* ,1922 (834) .
- [11] Weyl A R. High-lift devices and tailless aeroplanes [J]. *Aircraft Engineering and Aerospace Technology* ,1945 ,17(10): 292 - 297.
- [12] Fowler H D. Variable lift [J]. *Western Flying* ,1931: 31 - 33.
- [13] Weick F E ,Platt R C. Wind-tunnel tests of the Fowler variable-area wing [M]. *National Advisory Committee for Aeronautics* ,1932.
- [14] Van Dam C P. The aerodynamic design of multi-element high-lift systems for transport airplanes [J]. *Progress in Aerospace Sciences* 2002 38(2): 101 - 144.
- [15] Reckzeh D. Aerodynamic design of the high-lift-wing for a mega liner aircraft [J]. *Aerospace Science and Technology* 2003 7: 107 - 119.
- [16] Xiao Q ,Liu W ,Incecik A. Flow control for VATT by fixed and oscillating flap [J]. *Renewable Energy* 2013 51: 141 - 152.
- [17] 谭广琨,申功妍,苏文翰. 大迎角下两段式翼型后翼作俯仰拍动的实验研究[J]. *实验流体力学* 2007 21(03): 1 - 7.  
TAN Guang-kun ,SHEN Gong-xin ,SU Wen-han. Experimental investigation of the pitching flapping of the flap of a dual-section airfoil profile at a high attack angle [J]. *Journal of Experiments in Fluid Mechanics* 2007 21(03): 1 - 7.
- [18] 李孝伟,乔志德. 多段翼型大迎角下主翼、襟翼上的分离流及缝道流动[J]. *航空学报* ,1999 20(1): 55 - 57.  
LI Xiao-wei ,QIAO Zhi-de. Separation flow of a main wing and flap with a multi-sectional airfoil profile at a large attack angle and flow in the slot passage [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica* ,1999 20(1): 55 - 57.
- [19] 焦予秦,范娟莉,罗淞. 多段翼型流动非定常性计算研究[J]. *科学技术与工程* 2011 11(13): 2994 - 2998.  
JIAO Yu-qin ,FAN Juan-li ,LUO Song. Study of the calculation of the unsteady properties of the flow in a multi-sectional airfoil profile [J]. *Science ,Technology and Engineering* ,2011 , 11(13): 2994 - 2998.
- [20] 李向群,安亦然,陈耀松. 带副翼的翼身组合体的数值模拟[J]. *空气动力学学报* 2004 22(3): 37 - 341.  
LI Xiang-qun ,AN Yi-ran ,CHEN Yao-song. Numerical simulation of a wing-body combination with an aileron [J]. *Acta Aerodynamica Sinica* 2004 22(3): 37 - 341.
- [21] Obayashi S ,Guruswamy G P. Navier-Stokes computations for oscillating control surfaces [J]. *Journal of Aircraft* ,1994 31(3): 631 - 636.
- [22] 崔鹏. 基于CFD/CSD的机翼气动弹性计算研究[D]. 南京: 南京航空航天大学 2011.  
CUI Peng. Study of the calculation of the aerodynamic elasticity of a wing based on the software CFD/CSD [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics 2011.
- [23] 高飞,李广雪,乔璐璐. 山东半岛近海潮汐及潮汐、潮流能的数值评估[J]. *中国海洋大学学报* 2012 42(12): 91 - 96.  
GAO Fei ,LI Guang-xue ,QIAO Lu-lu. Numerical evaluation of the tide ,tide energy and tidal current energy on the offshore of Shandong peninsula [J]. *Journal of China Oceanology University* , 2012 42(12): 91 - 96.

(刘瑶 编辑)

翼缝宽度对翼型气动特性的影响 = **Influence of the Flap Slot Width on the Hydrodynamic Characteristics of an Airfoil** [刊 汉] LI Run-jie , LI Chun , LI Qian-qian , YE Zhou ( College of Energy Source and Power Engineering , Shanghai University of Science and Technology , Shanghai , China , Post Code: 200093 ) , LI Chun , YE Zhou ( Shanghai City Key Laboratory on Multi-phase Flow and Heat Transfer in Power Engineering , Shanghai , China , Post Code: 200093 ) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2016 , 31( 7 ) . - 117 ~ 122

In the light of the problem of the stall of an airfoil , the CFD numerical simulation method was employed. With the airfoil NACA0018 serving as the reference airfoil , the influence of the flap slot width on the distribution of the pressure and flow field contours was analyzed. The calculation results show that when the airfoil has a small attack angle , the flap slot width exerts a relatively small influence on the suction side of the airfoil while exercise a relatively big influence on the high pressure zone in the pressure side of the airfoil. When airfoil has a big attack angle , the presence of the flap slot will change the configuration of the flow field formed by the airfoil , thus reducing the number of vortexes evolved in the wake and narrowing the range of the vortexes. At a large attack angle , the flap slot will exert a relatively big influence on the range of the high pressure zone on the pressure surface and the low pressure zone on the suction surface. It has been known by comparing the influence of the three kinds of flap slot width on the pressure and streamline contours of the airfoil that when the flap slot width  $w = 0.1\% c$  , the hydrodynamic performance of the airfoil will be optimal. **Key words:** airfoil , flap , flap slot width , hydrodynamic characteristics

漂浮式风力机 Spar 平台结构动力响应分析 = **Analysis on the Dynamical Response of the Structure of the Spar Platform for Floating Wind Turbines** [刊 汉] YE Zhou , WU Zhong-wang , ZHAN Pei , LI Chun ( College of Energy and Power Engineering , University of Shanghai for Science and Technology , Shanghai , China , Post Code: 200093 ) , YE Zhou , LI Chun ( Shanghai City Key Laboratory on Multi-phase Flow and Heat Transfer in Power Engineering , Shanghai , China , Post Code: 200093 ) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2016 , 31( 7 ) . - 123 ~ 129

By using the finite element method , based on Von-Mises failure theory , with the damping and inertial load of the structure of the platform being taken into consideration , the Ansys finite element software and the open source program software FAST were used respectively to study the dynamic response and structural stress of the platform. It has been found that a helical side plate has no conspicuous influence on the self-vibration frequency of the spar platform and the additionally installed helical side plate can effectively decrease the movement response along the vertical and horizontal vibration direction , however , achieve no obvious improvement in the horizontal vibration direction. The helical side plate will block the ocean current and increase the flow resistance. In addition , the structural stress of the platform will somewhat increase and the maximum shear stress will be approximately half of the maximum equivalent shear stress , which is critical for securing the safe and stable operation of the platform , however , the structure of the platform is still safe. **Key words:** floating wind turbine , Spar platform , structural optimization , strength , dynamic response