

襟翼长度对翼型水动特性影响

李润杰¹, 李春^{1,2}, 李倩倩¹, 叶舟^{1,2}

(1. 上海理工大学 能源与动力工程学院, 上海 200093;

2. 上海市动力工程多相流动与传热重点实验室, 上海 200093)

摘要: 针对日益受到关注的潮流能水轮机中叶轮所用翼型水动力问题, 采用 CFD 数值模拟方法, 以 NACA0018 为基准翼型, 对比分析了带襟翼翼型和原始翼型的流场变化, 以及襟翼长度对翼型水动特性及表面静压力系数分布的影响。数值计算结果表明: 襟翼可以使翼型失速攻角延后, 且在达到失速攻角后可比原始翼型对应攻角时的升力系数有所提高; 在小攻角下, 襟翼对翼型压力分布影响较小, 襟翼长度为 $0.3c$ (c 为翼型弦长) 时, 压力系数改变最为明显; 当攻角接近失速攻角时, 襟翼长度为 $0.2c$ 时, 在所研究范围内, 翼型水动特性最优; 达到失速攻角后, 襟翼对翼型流场及静压系数分布影响较大, 翼型前缘吸力面低压区范围增大, 压力面高压区范围均匀分布, 且当襟翼长度为 $0.2c$ 时翼型水动特性最优, 其升力系数较原始翼型升力系数均有较大提升, 阻力系数变化不大。

关键词: 翼型; 襟翼; 襟翼长度; 水动特性; 潮流能水轮机

中图分类号: TV131.4

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2016)01-0158-05

Effect of flap length on water dynamic characteristics of airfoil

LI Runjie¹, LI Chun^{1,2}, LI Qianqian¹, YE Zhou^{1,2}

(1. School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;

2. Shanghai Key Laboratory of Multiphase Flow and Heat Transfer in Power Engineering, Shanghai 200093, China)

Abstract: Aimed at the problem of hydrodynamic for tidal current turbine, the paper used CFD numerical simulation method and took NACA0018 as reference airfoil to analyzed the change of flow field of original and wing airfoil, and the impact of flap length on dynamic characteristics and surface static pressure coefficient distribution of airfoil. Numerical results show that the flap airfoil stall angle of attack can be delayed, and after reaching the lift coefficient, the original wing stall angle corresponding to the angle of attack increased; the influence of flap on airfoil flap pressure distribution in a small angle of attack is less. When flap length is $0.3c$ (c the airfoil chord), the change of pressure coefficient is most evident; when the angle of attack approaches the smallest and flap length is $0.2c$, the airfoil optimal hydrodynamic characteristics is optimal; after reaching the stall angle of attack, the influence of flap on wing flow field and static pressure coefficient distribution is greater. The distribution of pressure area range of airfoil suction surface is uniform. When the length is $0.2c$ the hydrodynamic characteristics is optimal. The lift coefficient has greater increase than that of original airfoil, but the resistance coefficient changes little.

Key words: airfoil; flap; flap length; hydrodynamic characteristics; tidal current turbine

1 研究背景

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^[1]。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^[2]。潮汐能是指由潮汐现象所引起的水流动能, 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^[3]。

收稿日期: 2015-07-17; 修回日期: 2015-09-25

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

作者简介: 李润杰 (1990-), 男, 山东日照人, 硕士研究生, 从事陆海风力机翼型的数值计算研究。

通讯作者: 李春 (1963-), 男, 北京门头沟人, 博士生导师, 从事陆海风力机翼型的数值计算研究。

潮流能利用的主要形式为潮汐能发电,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^[4-6],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^[7],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。受空中和水动物通过拍打翅膀或尾翼控制涡流改善前行性能启发,基于仿生学提出了带有摆动小翼(又称襟翼)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。襟翼偏转增加了后缘的弯曲度,因此襟翼的实质就是通过改变翼型的弯曲度使流场发生改变,从而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^[8]。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^[9-10]。文献[1]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[11]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[12]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[13]仅对带襟翼的翼身组合体进行数值模拟,主要验证了文献[14]和[15]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^[1]。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 (图1)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,分析不同襟翼长度对NACA0018水动特性的影响。

2 计算方法

2.1 建立模型

选取NACA0018作为原始翼型,其几何结构示意图如图1(a)所示,其中 c 为翼型弦长, h 为翼型最大厚度。带襟翼翼型几何结构示意图如图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 $0.2c, 0.3c, 0.4c$;襟翼翼缝宽度 w 为 $0.2\% c$ 。

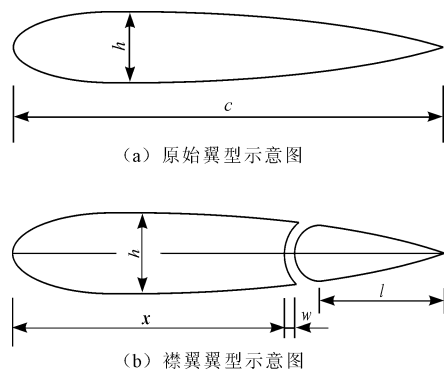


图1 翼型示意图

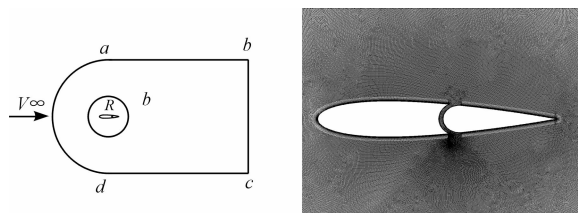
2.2 计算域划分及网格拓扑

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308330,翼型壁面处 y^+ 为 $0.9^{[16]}$,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^[17],海水来流速度取 $v_\infty = 2 \text{ m/s}$ 。流域中ab, ad以及dc设置为velocity-inlet, bc设置为pressure-outlet,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interior面。翼型近壁边界层网格如图2(b)所示。

2.3 计算精度验证

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。为验证本文所用模型的准确性,原始翼型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3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。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。



(a) 整体网格划分

(b) 局部网格划分

图2 计算流域划分及网格拓扑

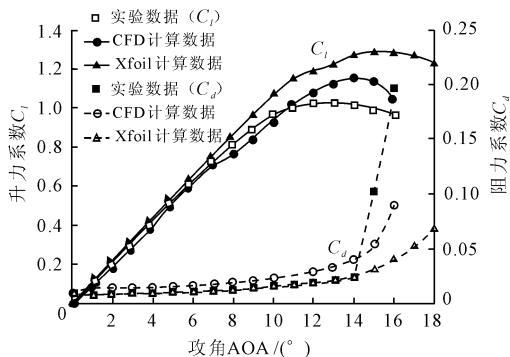


图3 升、阻力系数对比

3 计算结果分析

图4为NACA0018在流体为水和空气时的升、阻力系数,由图4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。

图5为攻角 $\alpha = 5^\circ$ 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。由图5可知,襟翼长度 $l = 0.2c$, $l = 0.3c$, $l = 0.4c$ 时,翼型流场与原始翼型基本相同,说明在低攻角下,襟翼长度对翼型流场影响不大。在3种襟翼长度下,翼型前缘吸力面低压区范围均大于原始翼型对应区域范围,当襟翼长度 $l = 0.3c$ 时,对应位置的低压区域范围

最大。对比带襟翼翼型与原始翼型表面静压系数可知,靠近翼型前缘处,压力面与吸力面压力系数差较大,且随 x/c 值增大压力系数差值逐渐减小。由于少量流体在翼缝处被迫从高压区流向低压区,高压、高动量流体将其能量传递给吸力面附近边界层,使得充分发展的边界层破碎,并重新形成新的边界层,使得在翼缝位置处出现了一个压力高峰,此压力高峰使得带襟翼翼型升力系数比原始翼型升力系数有所提高。3种带襟翼翼型压力系数较原始翼型均有所升高,而吸力面压力系数升高较明显,这在一定程度上说明了襟翼改变了翼型压力面与吸力面的压力系数分布,进一步验证了襟翼可以改善翼型的水动特性这一结论。在翼型前缘处襟翼对其流场及压力系数分布的影响程度大于尾缘。综上可知,在低攻角下,襟翼在一定程度上改变了翼型压力面和吸力面压力系数的分布,且襟翼长度 $l = 0.3c$ 时,压力系数及流场结构改变最为明显,翼型水动特性最优。

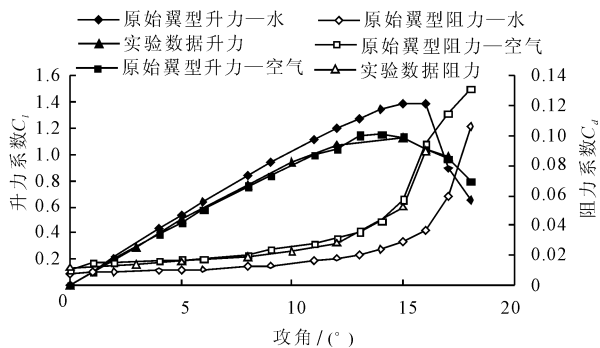


图4 翼型升力、阻力系数

图6为攻角 $\alpha = 10^\circ$ 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。由图6可知,带襟翼翼型压力面与吸力面压力区域范围较原始翼型对应区域大,且当襟翼长度 $l = 0.2c$ 时,翼型压力面高压区范围最大,高压区范围变化趋势为随着襟翼长度的增加而增大;随着襟翼长度增加,翼型尾缘涡范围逐渐减小,即当襟翼长度 $l = 0.2c$ 时,翼型尾缘范围最小,此时翼型水动特性最优。从翼型表面静压力系数分布图可知,靠近翼型前缘处,压力面与吸力面压力系数差较大,且随着 x/c 增大压力系数差值逐渐减小。3种带襟翼翼型压力系数较原始翼型均有所升高,升高幅度较图5中攻角 $\alpha = 5^\circ$ 时变大,且吸力面压力系数升高较明显,压力面变化幅度较小;襟翼对翼型前缘与尾缘压力系数影响较小,而对翼缝周围压力系数影响较大,其影响是导致带襟翼翼型升力系数较原始翼型升高的主要因素。

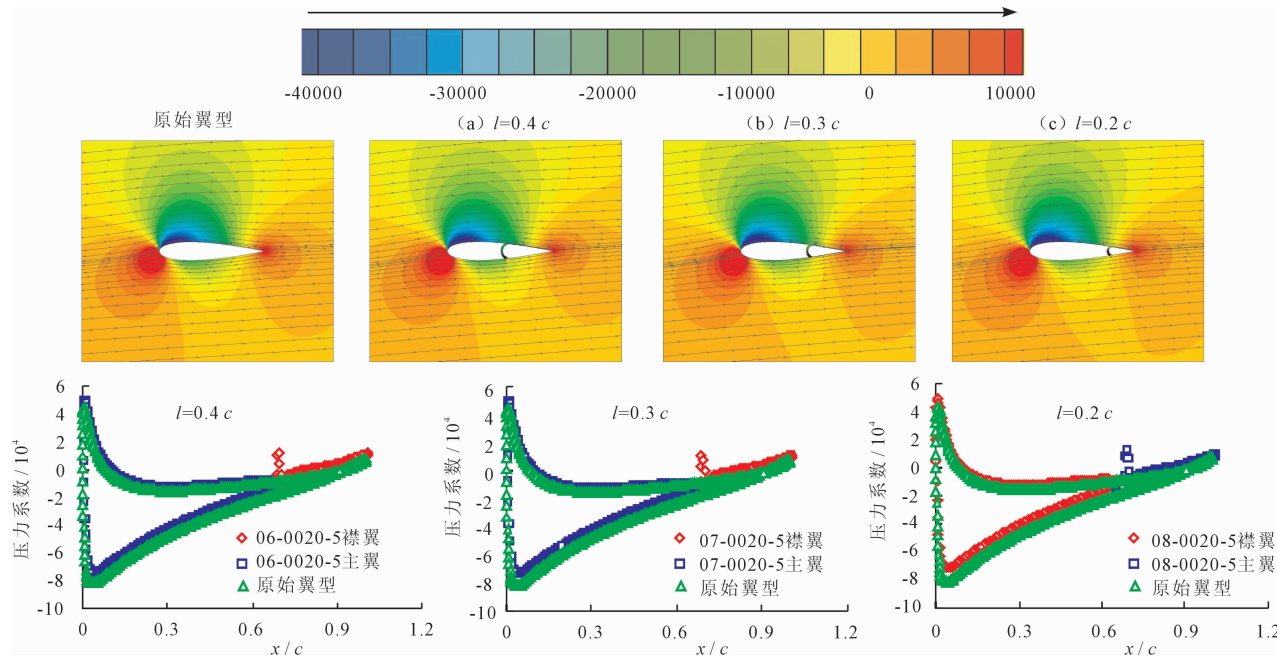


图 5 攻角 $\alpha = 5^\circ$ 翼型流场及压力系数分布图

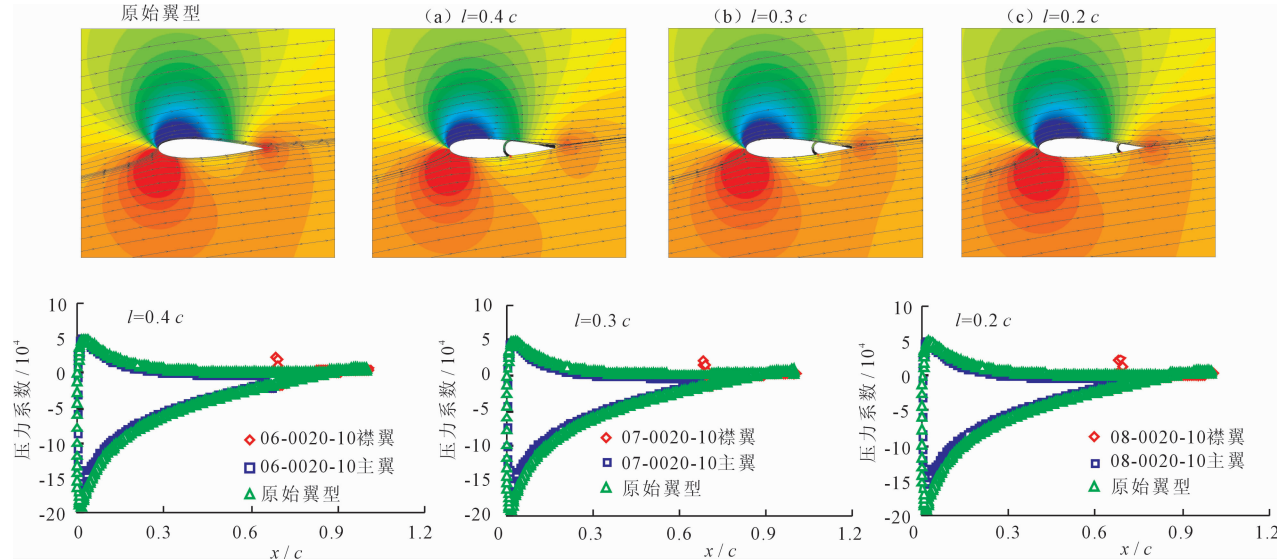


图 6 攻角 $\alpha = 10^\circ$ 翼型流场及压力系数分布图

图 7 为攻角 $\alpha = 17^\circ$ 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。由图中可知,原始翼型尾缘产生多个涡,涡起点靠近翼型前缘 $1/4$ 弦长处,且翼型压力面高压区集中在翼型前缘至 $1/4$ 弦长处,吸力面低压范围微小。而 3 种带襟翼翼型尾缘涡范围都较小,涡起点未超过翼型前缘 $2/3$ 弦长处,3 种带襟翼翼型压力面高压区范围均大于原始翼型对应范围,且高压区均匀作用在翼型压力面,吸力面低压区范围集中在翼型前缘处,且其范围均远大于原始翼型对应区域。其中,襟翼长度 $l = 0.2c$ 时,翼型尾缘涡范围最小,其气动特性达到

最佳。从翼型压力系数分布图可知,靠近翼型前缘处,压力面与吸力面压力系数差值较大,由前缘到尾缘压力系数差值逐渐减小。3 种带襟翼翼型压力系数较原始翼型有较大的提高,3 种翼型翼缝对应处均有压力高峰。从上面可知,在大攻角下,襟翼对翼型流场影响较小攻角时大,特别是在带襟翼翼型压力面及尾缘处影响最大。

4 结 论

本文基于 SST 湍流模型,计算不同襟翼长度对翼型气动特性的影响,计算结果表明:

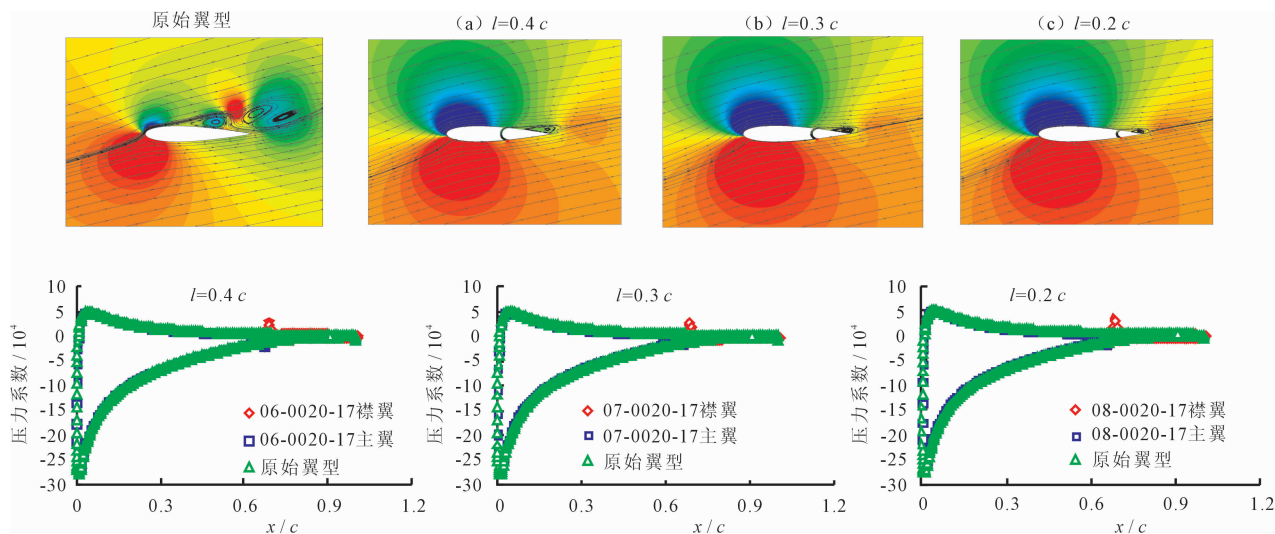


图7 攻角 $\alpha = 17^\circ$ 翼型流场及压力系数分布图

(1) 对比流域介质不同时, 可知介质为海水时可使翼型失速攻角延迟, 翼型在达到失速攻角后, 其升力系数较介质为空气时增大, 而阻力系数基本不变, 翼型性能有所提升。

(2) 在翼型达到失速攻角之前, 襟翼主要影响翼型吸力面低压区范围, 压力面影响较小, 翼型压力面及吸力面压力系数均有所升高; 当翼型达到失速攻角之后, 襟翼对翼型压力面和吸力面影响均较大, 带襟翼翼型前缘吸力面低压区较原始翼型对应区域范围变大, 其高压区均匀分布在翼型压力面。

(3) 襟翼长度不同时, 在小攻角下, 襟翼长度 $l = 0.3c$ 时, 翼型水动特性最优; 在大攻角下, 襟翼长度 $l = 0.2c$ 时, 翼型水动特性最优。

参考文献:

- [1] Xiao Qing, Liu Wendi, Incecik A. Flow control for VATT by fixed and oscillating flap[J]. Renewable Energy, 2013, 51(2):141-152.
- [2] Nicholls - Lee R F, Turnock S R, Boyd S W. Simulation based optimization of marine current turbine blades[C]//. 7th International Conference on Computer and IT Applications in the Maritime Industries (COMPIT08), Liege, Belgium, 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.
- [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.
- [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):417-422.

- [6] Coiro D P, Nicolosi F, De Marco A, et al. Dynamic behavior of novel vertical axis tidal current turbine: Numerical and experimental investigations[C]//. Proceeding of the 15th International Offshore and Polar Engineering Conference, Seoul, Korea, 2005. 6.
- [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.
- [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.
- [9] 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.
- [10] Werner - Spatz C, Heinze W, Horst P. Multidisciplinary conceptual design for aircraft with circulation control high-lift systems[J]. CEAS Aeronautical Journal, 2012, 3(2):145-164.
- [11] 谭广琨, 申功圻, 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(3):1-7.
- [12] 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.
- [13] 焦予秦, 范娟莉, 罗淦. 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.
- [14] 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):337-341.
- [15] Obayashi S, Guruswamy G P. Navier - Stokes computations for oscillating control surfaces[J]. Journal of aircraft, 1994, 31(3):631-636.
- [16] 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.
- [17] 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.