DOI: 10.7511/jslx201705008

摆动方式对水翼输入功率的影响

李伟忠， 王文全*， 闫 妍

(昆明理工大学 建筑工程学院 工程力学系，昆明 650500)

摘 要：利用投影浸入边界法，研究了不同主动摆动方式对水翼输入功率的影响。计算模型采用二维NACA0012翼型，雷诺数 Re=800。最大摆角 $\theta_0=75°$，摆动频率 f 的变化范围为 0.1 Hz～0.2 Hz，非正弦摆动参数 β 的变化范围为 1～3。首先，研究摆动频率 f 和非正弦摆动参数 β 对平均输入功率的影响，研究发现，平均输入功率随着 f 和 β 值的增加而增加，但当 $f>0.16$ Hz，$\beta>2.5$ 时，平均输入功率急剧增加。其次，在摆动频率 $f=0.16$ Hz 时，研究不同非正弦摆动参数 β 下力矩系数、输入功率系数以及升阻力系数随时间的变化规律，研究发现，随着 β 值的增加，峰值输入功率也逐渐增加，而且 β 值影响峰值输入功率出现的位置。最后，研究不同 β 值下，变化的尾流发展对输入功率的影响，认为水翼上下表面产生的后缘涡与升阻力有关系，水翼上表面的负涡对水翼摆动产生阻力，而下表面的负涡对水翼摆动产生升力，从而对水翼摆动的输入功率产生影响。

关键词：水翼；主动摆动；投影浸入边界法；输入功率；尾流发展

中图分类号：O35 **文献标志码**：A **文章编号**：1007-4708(2017)05-0586-05

1 引 言

流体蕴含的丰富流动能给人类提供了可再生且洁净的资源。受水生动物的启发得到了一种通过水翼的摇摆运动来获取流动能的新方法，具有可高速转动、节能环保、高效率和低噪音等优势[1]，与传统的涡轮机的水翼相比更容易制造。最初是将水翼放置于不稳定的潮流之中来获取流动能，如利用波浪的推力来获取能量[2]，McKinney 等[3]提出了通过机翼的拍动来提取流动能的概念。根据摆动系统自由度不同分为主动系统、半主动系统和被动系统[4,5]。能效提取与水翼旋转轴、水翼形状、阻尼、摆动频率、振幅和摆动攻角有关。Kinsey 等[6]研究了主动系统在不同频率和摆角下水翼以正弦曲线变化时的能量获取效率，获得的能效高达35%，也通过实验[7]进行了验证。此外，研究还指出了水翼摆动得到的能效与其后的尾迹稳定性的关系[8]。Zhu 等[9,10]研究了半主动水翼摆动系统的能量获取性能，同时也对水翼被动摆动系统进行了实验。Young 等[11]研究中水翼被动摇摆运动得到的能量效率高达 41%。

近年来，很多人对提高获取能量效率的方法进行了探究。Wu 等[12]发现将水翼放置在壁面附近可提高能量的获取效率，通过观察水生鱼类、鸟类动物不对称拍动鳍片和翅膀进行游动和飞行，在研究中得出水翼在线性摇摆运动可获得较大的推力和效率[13]，提出了采用非正弦形式振荡运动来提高系统的能量获取效率。Ashraf 等[14]的研究中指出，采用倾斜角以非正弦变化的运动获得的能量可增加 15%。Lu 等[15]研究了不同非正弦运动形式对能量获取的影响，得到了能提高能量获取效率的非正弦形式的俯仰运动和升降运动的组合形式。Xie 等[16]在数值模拟研究中指出，要得到较高的能量效率，应该采用相对较高的摆动频率和俯仰振幅。但这些文献只注重研究净输出功率的变化规律，并没有详细研究不同主动摆动方式对输入功率的影响。为此，本文采用浸入边界法处理流动边界问题[17-18]，利用有限差分法对 Navier-Stokes 方程进行离散，并采用投影分步法进行时间推进，研究了不同主动摆动方式对水翼输入功率的影响。

2 问题描述和数值方法

2.1 研究对象描述

考虑如图 1 所示的二维 NACA0012 的翼型水翼，水翼弦长 $a=1.0$，枢轴点位于弦长线的中心点，距离前缘的距离 $b=0.3$，上游的特征速度用 U 表示，用 θ_0 表示最大摆角，本文只考虑翼型水翼绕

收稿日期：2016-06-29；**修改稿收到日期**：2016-11-15.
基金项目：国家自然科学基金(51479085，11262008)；霍英东青年基金(141120)资助项目.
作者简介：王文全*(1977-)，男，博士，教授，博士生导师 (E-mail：wwqquan@126.com).

http://www.cjcm.net

枢轴点 O' 的旋转摆动，摆角变化规律由式(1)控制，可表示为

$$\theta=\begin{cases}\theta_0\sin(\beta\omega t) & (0\leqslant t\leqslant\dfrac{\pi}{2\beta\omega})\\ \theta_0 & (\dfrac{\pi}{2\beta\omega}<t\leqslant\dfrac{\pi}{2\omega}\left(2-\dfrac{1}{\beta}\right))\\ \theta_0\sin[\beta\omega t+\pi(1-\beta)] & (\dfrac{\pi}{2\omega}\left(2-\dfrac{1}{\beta}\right)<t\leqslant\dfrac{\pi}{2\omega}\left(2+\dfrac{1}{\beta}\right))\\ -\theta_0 & (\dfrac{\pi}{2\omega}\left(2+\dfrac{1}{\beta}\right)<t\leqslant\dfrac{\pi}{2\omega}\left(4-\dfrac{1}{\beta}\right))\\ \theta_0\sin[\beta\omega t+2\pi(1-\beta)] & (\dfrac{\pi}{2\omega}\left(4-\dfrac{1}{\beta}\right)<t\leqslant\dfrac{2\pi}{\omega})\end{cases}\tag{1}$$

式中 圆频率 $\omega=2\pi f$，f 为运动频率，$\beta=1.0$ 时摆角以正弦曲线变化，当 β 值从 1.0 逐渐增加时，转角变化从正弦曲线变为方波曲线，如图 2 所示。

2.2　数值方法

数值计算采用笛卡尔网格下的投影浸入边界法，单位面积内网格点数为 60×60，使用有限差分法对不可压缩流体的 Navier-Stokes 方程进行离散，微分形式无量纲化的动量和连续性控制方程为

$$\frac{\partial\boldsymbol{u}}{\partial t}+\boldsymbol{u}\cdot\nabla\boldsymbol{u}=-\nabla p+\mu\nabla^2\boldsymbol{u}+\boldsymbol{f}\tag{2}$$

$$\nabla\cdot\boldsymbol{u}=0\tag{3}$$

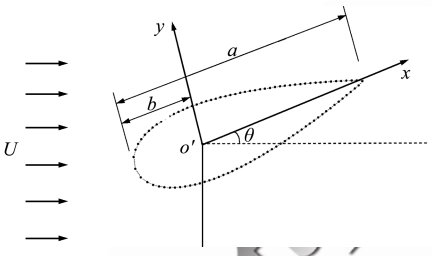


图 1　水翼主动摆动示意图

Fig. 1　Diagrammatic sketch of initiative flapping hydrofoil

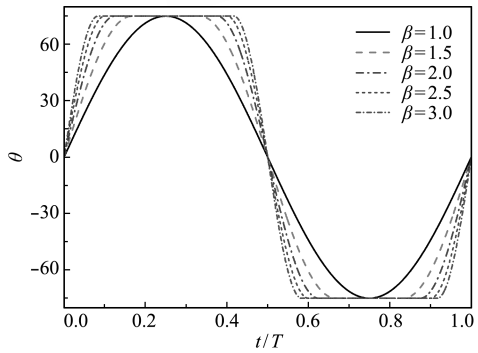


图 2　一个周期内不同 β 值下瞬时转角变化($\theta_0=75°$)

Fig. 2　Angle against time in a period under different β

式中 $\boldsymbol{u}$ 为速度矢量，t 为时间，p 为压强，$\boldsymbol{f}$ 为无量纲化力源项，μ 为流体的动力学黏性系数。

对流项和扩散项的离散化分别采用混合差分法和中心差分法，时间推进采用分步投影法。压强 Possion 方程边界条件的处理可参考文献[19]，采用开源函数库 UMFPACK 对离散后的代数方程组进行快速求解。力源项的数值计算方法可参考文献[20]。

水翼的瞬时输入功率 $P(t)=M(t)\omega(t)$，其中 $M(t)$ 为水翼受到的转矩，$\omega(t)$ 为水翼的角速度。无量纲力矩系数和输入功率系数和平均输入功率系数的定义如下：

$$C_M=\frac{M}{1/2\,\rho U^2 ba^2},\quad C_P=\frac{P}{1/2\,\rho U^3 ba}$$

$$C_{P\Lambda}=\frac{1}{TU}\int_0^T C_M\omega(t)\,\mathrm{d}t\tag{4}$$

式中 a 为水翼弦长，b 为枢轴点到水翼前缘的长度，T 为水翼摆动的周期，ρ 为流体密度，U 为进口速度。雷诺数 $\mathrm{Re}=\rho U a/\mu=800$。

3　结果与讨论

3.1　水翼摆动对输入功率的影响

图 3 给出了不同频率值和不同 β 值下平均输入功率系数的变化曲线。可以看出，输入功率随着 β 值增大而增大，$\beta<2.5$ 时增长幅度较小，当 $\beta>2.5$ 时输入功率随着频率值变化急剧变化，特别是 $f>0.16$ Hz 时输入功率变得很大，不利于净功率输出。认为水翼非正弦摆动的参数 $f\leqslant0.16$ Hz，$\beta\leqslant2.5$ 时，不会显著增加平均输入功率。

图 4 分别给出了一个周期内不同 β 值下力矩系数和输入功率系数随时间的变化。可以看出，输入功率系数变化规律与力矩系数变化规律相似。首先，随着 β 值的增加，峰值力矩系数和输入功率系数都逐渐增加。其次，对比图 2 和图 4(b)可以看出，在最大摆角 $\theta=75°$ 处出现两个峰值输入功

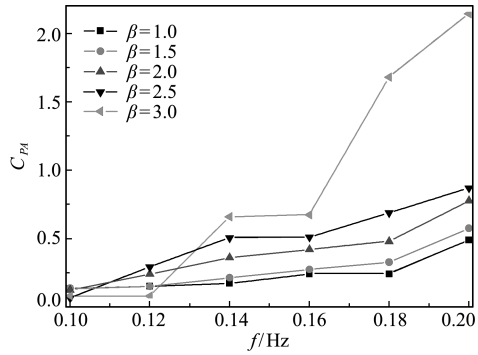


图 3　平均输入功率系数随频率 f 和摆动参数 β 的变化

Fig. 3　Averaged input-power coefficient against parameter f and β

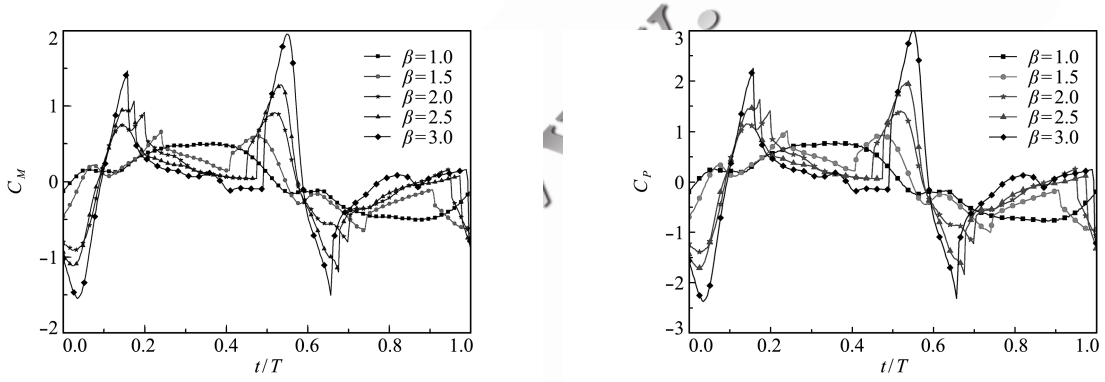
www.cjcn.net

率，水翼刚摆至 $\theta=75°$时首次出现峰值输入功率，然后输入功率先减小后增大，出现第二个峰值输入功率，最后输入功率快速减小，在水翼失速的后阶段基本保持不变且输入功率值很小。再者，不同 β 值下，峰值输入功率出现的时刻略有差异，β 值越大，第一个峰值输入功率越后出现，而第二个峰值输入功率越先出现。同时，图 4(a)的力矩系数可为水翼在不同位置启动需要的初始启动力矩提供参考。

图 5 给出了 $\theta_0=75°$和 $f=0.16$ Hz 时一个周期内的升阻力系数变化曲线。可以看出，从 $\beta=1.0\sim2.0$ 时，升力不断增大，阻力变化不大。$\beta=2.0\sim2.5$ 时，阻力增大，升力反而减小。同时也可以看出，$\beta=1.5$ 和 $\beta=2.5$ 时的升力变化与 $\beta=1.0$时的升力变化规律基本一致，说明非正弦摆动下 β 值应该控制在 2.5 以下。此外，随着 β 值增大，升力和力矩峰值出现得越早，因为 β 越大，水翼摆动速率越大，相比低摆动速率失速也出现得更早，失速效应持续的时间就越长，而失速效应对提高升力值有所帮助。但 $\beta=3.0$时，升阻力变化很大，从图 4(b)可以看出，需要的平均输入功率很大，表明为提高水翼俯仰摆动的升力，失速效应产生的时间应控制在一定范围内。

3.2 水翼摆动尾流变化对输入功率的影响

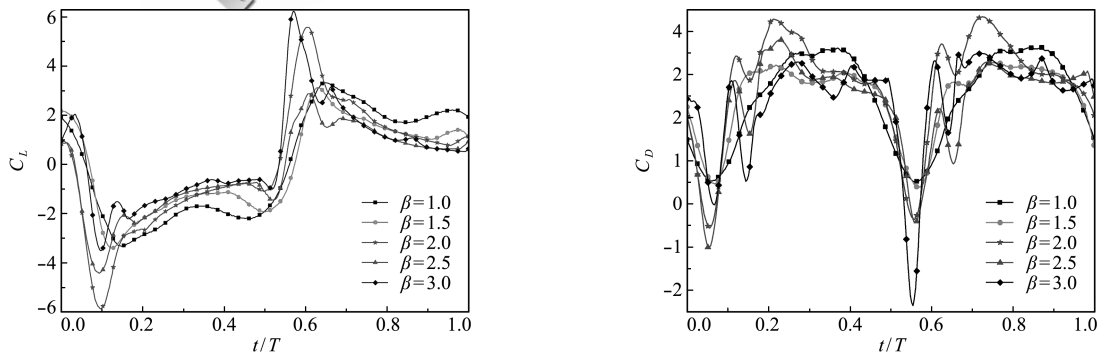
图 6(a)给出了如图 5 所示升阻力系数显著变化阶段，即 $t=0T\sim0.2T$ 间涡量值为 $-15\sim15$ 的 5 个瞬态等值线，显示了不同 β 值下涡脱落随时间的变化；图 6(b)给出了相应的压强等值线。首先，可以看出，β 越大，水翼摆动的速率越快，产生的失速效应时间越早，持续的时间也越长。其次，在 $t=0$ 时水翼上表面都有正的前缘涡生成，由于 β 值越大摆动速率越快，前缘涡脱离的时间也越早；随着 β 值增大，水翼上下表面有负的后缘涡生成，β 值越大负涡越明显，水翼上表面的负涡产生阻力，阻碍水翼摆动，而下表面的负涡产生升力，推动水翼摆动。可以看出，$\beta=2.0\sim3.0$ 时，水翼下表面产生的负涡变化不大；而 $\beta=2.0$ 时，上表面产生的负涡最小，产生的阻力最小。所以 $\beta=2.0$ 时对水翼的摆动推力最大，需要输入功率较小，对净功率输出有利。



(a) 扭矩系数　　(b) 输入功率系数

图 4 一个周期内不同 β 值下的力矩和输入功率系数变化($\theta_0=75°$, $f=0.16$ Hz)

Fig. 4 Moment and input-power coefficient against time under different β in a period



(a) 升力系数　　(b) 阻力系数

图 5 一个周期内不同 β 值下的升阻力系数变化($\theta_0=75°$, $f=0.16$ Hz)

Fig. 5 Lift and drag coefficient against time under different β in a period

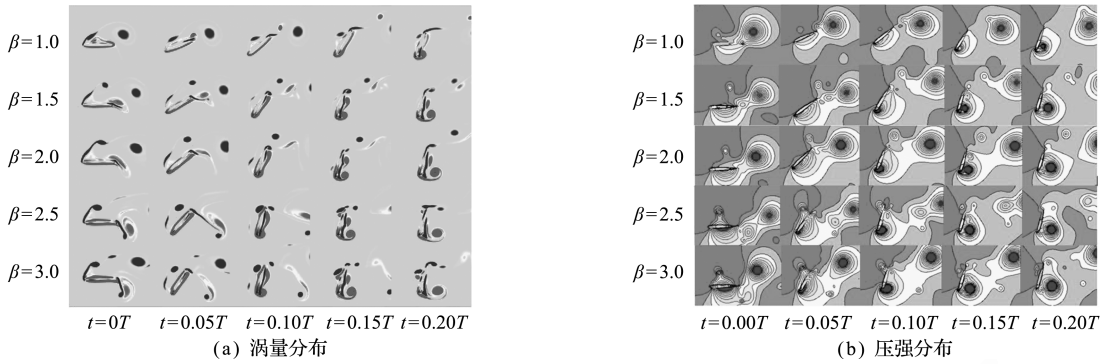


图 6　不同 β 值下 $t=0T$ 和 $t=0.2T$ 间五个瞬时的涡量和压强分布($\theta_0=75°$，$f=0.16$ Hz)

Fig. 6　Vortex topology and pressure contours of five instants around hydrofoil between $t=0T$ and $t=0.2T$ under different β

4　结　论

本文利用投影浸入边界法，研究了 $\theta_0=75°$，摆动频率 f 为 0.1 Hz～0.2 Hz，非正弦摆动参数 β 为 1～3 情况下，水翼主动摆动方式对输入功率的影响。

研究发现，平均输入功率随着频率值和 β 值的增加而增加，但当 $f>0.16$ Hz，$\beta>2.5$ 时，平均输入功率急剧增加。随着 β 值的增加，峰值输入功率也逐渐增加，但 β 值对峰值输入功率出现的位置有一定的影响。

其次，研究水翼的主动非正弦摆动，$f<0.16$ Hz，β 值从 1.0 增加到 2.0 时升力增大，输入功率增长幅度不大；β 值从 2.0 增加到 2.5 时，升力减小而阻力增加；当 $\beta>2.5$ 时，输入功率随着频率值变化急剧变化，特别是 $f>0.16$ Hz 时，输入功率变得很大。β 值越大摆动速率越大，失速效应出现较早，持续的时间较长，在 1.0～2.0 范围内，β 值增大产生的失速效应能增大升力值，输入功率较小。因此，水翼主动非正弦摆动的频率值 f 不宜大于 0.16 Hz，β 值不宜大于 2.5。

最后，研究了不同 β 值下尾流发展对输入功率的影响，随着 β 值增大，水翼上下表面产生负的后缘涡，β 值越大负涡越明显，水翼上表面的负涡产生阻力，阻碍水翼摆动，而下表面的负涡产生升力，推动水翼摆动，$\beta=2.0$ 时对水翼摆动产生的推力最大，需要的输入功率较小，对功率输出有利。

参考文献(References)：

[1] Shao X M, Pan D Y. Hydrodynamics of a flapping foil in the wake of a D-section cylinder [J]. *Journal of Hydrodynamics, Ser B*, 2011, **23**(4): 422-430.

[2] Wu T Y. Extraction of flow energy by a wing oscillating in waves[J]. *Water Waves*, 1971: 66-78.

[3] Mckinney W, Delauriert J. Wingmill: an oscillating-wing windmill [J]. *Journal of Energy*, 1981, **5**(2): 109-115.

[4] Xiao Q, Zhu Q. A review on flow energy harvesters based on flapping foils [J]. *Journal of Fluids and Structures*, 2014, **46**: 174-191.

[5] Young J, Lai J C S, Platzer M F. A review of progress and challenges in flapping foil power generation [J]. *Progress in Aerospace Sciences*, 2014, **67**: 2-28.

[6] Kinsey T, Dumas G. Parametric study of an oscillating airfoil in a power extraction regim [J]. *AIAA Journal*, 2008, **46**(6): 1318-1330.

[7] Kinsey T, Dumas G, Lalande G, et al. Prototype testing of a hydrokinetic turbine based on oscillating hydrofoils [J]. *Renewable Energy*, 2011, **36**(6): 1710-1718.

[8] Zhu Q, Peng Z. Mode coupling and flow energy harvesting by a flapping foil [J]. *Physics of Fluids*, 2009, **21**(3): 033601.

[9] Peng Z, Zhu Q. Energy harvesting through flow-induced oscillations of a foil [J]. *Physics of Fluids*, 2009, **21**(12): 123602.

[10] Zhu Q. Energy harvesting by a purely passive flapping foil from shear flows [J]. *Journal of Fluids and Structures*, 2012, **34**: 157-169.

[11] Young J, Ashraf M A, Lai J C S, et al. Numerical simulation of fully passive flapping foil power generation [J]. *AIAA Journal*, 2013, **51**(11): 2727-2739.

[12] Wu J, Qiu Y L, Shu C, et al. Pitching-motion-activated flapping foil near solid walls for power extraction: a numerical investigation [J]. *Physics of Fluids*, 2014, **26**(8): 083601.

[13] Izraelevitz J S, Triantafyllou M S. Adding in-line motion and model-based optimization offers exceptional force control authority in flapping foils [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2014, **742**: 5-34.

http://www.cjcm.net

[14] Ashraf M A, Young J, Lai J C S, et al. Nume-rical analysis of an oscillating-wing wind and hydro-power generator [J]. *AIAA Journal*, 2011, **49**(7): 1374-1386.

[15] Lu K, Xie Y, Zhang D. Nonsinusoidal motion effects on energy extraction performance of a flapping foil [J]. *Renewable Energy*, 2014, **64**: 283-293.

[16] Xie Y, Lu K, Zhang D. Investigation on energy extraction performance of an oscillating foil with modified flapping motion [J]. *Renewable Energy*, 2014, **63**: 550-557.

[17] 郝栋伟,王文全.超弹性柔性结构与流体耦合运动的浸入边界法研究[J].工程力学,2013,**30**(11):36-41. (HAO Dong-wei, WANG Wen-quan. Numerical investigation of interaction between a flexible hyper-elastic structure and fluid using immersed boundary method [J]. *Engineering Mechanics*, 2013, **30**(11): 36-41. (in Chinese)

[18] 郝栋伟,张立翔,王文全.流固耦合S-型自主游动柔性鱼运动特性分析[J].工程力学,2015,**32**(5):13-18. (HAO Dong-wei, ZHANG Li-xiang, WANG Wen-quan. Swimming patterns of an S-type self-propelled flexible fish in fluid-structure interaction [J]. *Engineering Mechanics*, 2015, **32**(5): 13-18. (in Chinese)

[19] 梁 林.基于投影浸入边界法的刚体-流体相互作用研究[D].昆明理工大学,2013. (LIANG Lin. Research on the Rigid-Fluid Interaction Using Project Immersed Boundary Method [D]. Kunming University of Science and Technology, 2013. (in Chinese))

[20] Ren W W, Shu C, Wu J, et al. Boundary condition-enforced immersed boundary method for thermal flow problems with Dirichlet temperature condition and its applications [J]. *Computers & Fluids*, 2012, **57**: 40-51.

Effects of different flapping ways on input power of a hydrofoil

LI Wei-zhong, WANG Wen-quan*, YAN Yan

(Department of Engineering Mechanics, Faculty of Civil Engineering and Architecture, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China)

Abstract: A projected immersed boundary method is used to simulate a flapping foil, which is a two-dimensional NACA0012 hydrofoil with Reynolds number Re=800. The influence of the input power in different flapping ways is studied. The maximum pendulum angle θ_0 is 75°, the frequency f is from 0.1 Hz to 0.2 Hz and the non-sinusoidal pendulum parameter is from one to three. The results show that, firstly, the averaged input-power coefficient increases with parameters f and β, however, it undergoes a rapid ascent when $f>0.16$ Hz, $\beta>2.5$. Secondly, the maximum input-power coefficient also increases with β at $f=0.16$ Hz, moreover, the location of maximum input-power coefficient is related to β. Finally, lift force and drag force are connected with trailing edge vortex. Specifically, the negative vortex on the top surface produces resistance, and the negative vortex on the bottom surface induces lift force, which affects the input power of the flapping hydrofoil.

Key words: hydrofoil; flapping; projected immersed boundary method; input power; wake evolution

http://www.cjcm.net

引用本文/Cite this paper:

李伟忠,王文全,闫 妍.摆动方式对水翼输入功率的影响[J].计算力学学报,2017,**34**(5):586-590.

LI Wei-zhong, WANG Wen-quan, YAN Yan. Effects of different flapping ways on input power of a hydrofoil [J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2017, **34**(5): 586-590.