doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2022.08.016

小河道扑动水翼装置推水流动特性研究

华尔天[1]　陈万前[1]　汤守伟[1]　谢荣盛[1]　郭晓梅[2]　徐高欢[3]

(1. 浙江工业大学机械工程学院, 杭州 310023; 2. 先进水利装备浙江省工程研究中心, 杭州 310018;
3. 浙江水利水电学院机械与汽车工程学院, 杭州 310018)

摘要: 在扬程几乎为零的平原小河道中,传统水泵存在运行效率低、稳定性差、架设成本高等问题。为提升平原小河道的水动力条件,提出了利用扑动水翼推动小河道水体流动的方法。并由此建立了扑动水翼的计算模型,针对不同扑动频率以及不同来流速度对扑动水翼推水性能的影响进行了数值模拟研究。设计了扑动水翼推水性能试验平台,在循环流道内进行了试验验证。结果表明:扑动水翼装置的流量与其扑动频率成正比,扬程与扑动频率的平方成正比。在固定频率下,扑动水翼的尾涡随着流速的增加从混沌状态逐渐形成双列反卡门涡街,装置泵水效率逐渐增加,直至最佳效率点;流速继续增加,反卡门涡街转变为单列,效率迅速下降。此外,扑动水翼装置具有扬程低、流量大等优点,在平原河流推水上具有优势。

关键词: 扑动水翼; 水动力性能; 数值模拟; 试验验证

中图分类号: TH38　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2022)08-0154-09　　**OSID**:

Water Pushing Flow Characteristics of Flapping Hydrofoil Device in Small River

HUA Ertian[1]　CHEN Wanqian[1]　TANG Shouwei[1]　XIE Rongsheng[1]　GUO Xiaomei[2]　XU Gaohuan[3]

(1. *College of Mechanical Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou* 310023, *China*
2. *Zhejiang Engineering Research Center for Advanced Hydraulic Equipment, Hangzhou* 310018, *China*
3. *School of Mechanical and Automotive Engineering, Zhejiang University of Water Resources and Electric Power, Hangzhou* 310018, *China*)

Abstract: In the small plain river with almost zero head, the traditional water pumps are faced with a series of problems, such as low efficiency, poor stability and high erection cost. In order to improve the hydrodynamic conditions of small plain rivers, an innovative method of using flapping hydrofoil to promote the flow of water in small rivers was proposed. Based upon this, the calculation model of flapping hydrofoil was established, and the effects of different flapping frequencies and different incoming flow velocities on the hydrodynamic performance of flapping hydrofoil were numerically simulated. A test bench for the hydrodynamic performance of flapping hydrofoil was designed and verified in the circulating channel. The results showed that the flow of flapping hydrofoil device was directly proportional to its flutter frequency, and the head was directly proportional to the square of frequency. At a fixed frequency, the tail vortex of flapping hydrofoil gradually formed a double row anti-Karmen vortex street from the chaotic state with the increase of velocity, and the pumping efficiency of the device gradually increased to the optimal efficiency point. The flow velocity continued to increase, the anti-Karmen vortex street changed to a single row, and the efficiency decreased rapidly. In addition, the flapping hydrofoil device had the advantages of low head and large flow, and had unique advantages in pushing water in plain rivers.

Key words: flapping hydrofoil; hydrodynamic performance; numerical simulation; test verification

收稿日期: 2021-09-08　修回日期: 2021-10-14

基金项目: 国家自然科学基金项目(51976202、61772469)、浙江省省级重点研发计划项目(2021C03019)和浙江省农村水利水电资源配置与调控关键技术重点实验室开放基金项目(UZJWEU-RWM-20200304B)

作者简介: 华尔天(1963—),男,教授,博士生导师,主要从事机构设计、进化设计和概念设计研究,E-mail: het@zjut.edu.cn

0　引言

平原河网地区地势平缓、水体流速较小，水动力不足引发的水体污染对居民生活质量与身体健康造成了巨大的影响[1]。调水引流作为常用的治理措施之一，能够提升河网水动力，有效改善水环境质量[2-4]，但对分流能力小的支权的水动力状况帮助较小[5]。而且降低转速、增大叶轮直径虽然可以改善泵站在超低扬程下运行效率低、稳定性差[6-8]等问题，却依旧无法适应平原小河道扬程几乎为零的情况。文献[9-10]模拟鱼尾摆动形式研制的仿尾鳍式微型压电泵，具有结构简单、流量大、扬程低等优点，验证了鱼尾摆动形式对水体的推动作用。受此启发，本文提出利用扑动水翼进行水体推动的方法，以提升平原小河道的水动力条件。

扑动水翼是由鱼类游动方式简化而来的，具有阻力小、噪声低、效率高、机动性好等特点。自文献[11]提出扑动水翼可以作为一种新式螺旋桨以来，扑动水翼的推进性能成为了研究热点[12-15]，扑动水翼的应用范围也被不断扩展，比如利用串联水翼从非恒定场中获得推进力的波浪滑翔机[16-17]，以及利用水翼从波浪中获取能量的海洋能量采集装置等[18-19]。文献[20]对比了扑动、摆动以及纯俯仰 3 种运动形式，发现 3 种方式在合适的参数下均能在尾流中形成双列反卡门涡街；文献[21]则对不同运动参数下的扑动水翼进行了研究，分析了升沉以及俯仰之间的相位差、攻角的偏置以及运动方程中高次项对扑动水翼推进性能的影响；文献[22]研究了斯特劳哈尔数和最大攻角的变化对推力和流体力学效率的影响，确定了在一定的参数范围内能达成高效率与高推力的共存，并且试验中测得的效率峰值超过了 70%。文献[23]对常规正弦运动的 4 种组合方式进行了模拟分析，通过分析各形式下的尾流结构以及升阻系数，提出俯仰的相位比升沉超前 90°时推进效果最佳。文献[24]利用改变扑动水翼的运动形式的方法增加了扑动水翼的平均迎角，有效提升了扑动水翼在较大斯特劳哈尔数 St 时的推力以及效率。上述研究均表明在合适的运动参数下，扑动水翼能够从尾流的双列反卡门涡街获得强大的推进力，有着优异的水动力性能。

以上对扑动水翼的研究主要集中于扑动水翼的推进性能，关于扑动水翼对水体的推动效果的研究较少。为了研究扑动水翼的推水性能，本文利用 CFD 方法建立扑动水翼的二维计算模型，对不同频率以及不同来流速度情况下扑动水翼的推水性能进行模拟研究，并搭建扑动水翼试验装置对模拟结果进行验证。

1　运动模型

1.1　运动描述

水翼的研究分为柔性水翼以及刚性水翼两种，其中柔性水翼自由度较多，运动复杂，且其优势在较高扑动频率区域；而刚性水翼的运动更为简单、便于控制、成本低廉，有着更为实际的工程意义[25]，因此本文选择刚性水翼为研究对象。扑动水翼的运动由升沉与俯仰两种运动结合而成，根据文献[23]选择常规正弦运动，如图 1 所示。图中，A_{max} 表示扑动水翼的升沉幅值；θ_{max} 表示扑动水翼的俯仰幅值；T 表示运动周期。

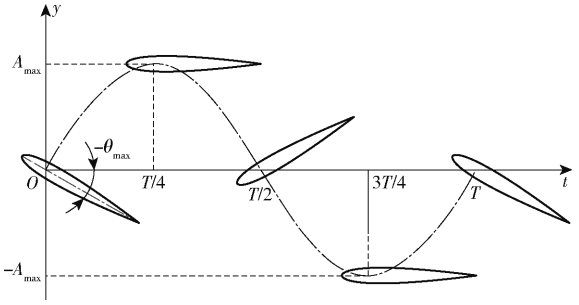

图 1　扑动水翼的扑动形式示意图

Fig. 1　Schematic of flapping form of hydrofoil

扑动水翼的基本运动方程为

$$\begin{cases} y(t) = A_{max}\sin(\omega t) \\ \theta(t) = \theta_{max}\sin(\omega t + \phi) \end{cases} \tag{1}$$

式中　$y(t)$——扑动水翼升沉位移，m

$\theta(t)$——扑动水翼俯仰位移，rad

ω——扑动角频率，rad/s

ϕ——升沉与俯仰运动的相位差，rad

对式(1)求导，得扑动水翼的速度方程为

$$\begin{cases} \dot{y}(t) = \omega A_{max}\cos(\omega t) \\ \dot{\theta}(t) = \omega\theta_{max}\cos(\omega t + \phi) \end{cases} \tag{2}$$

式中　$\dot{y}(t)$——扑动水翼升沉速度，m/s

$\dot{\theta}(t)$——扑动水翼俯仰角速度，rad/s

1.2　运动参数与力学模型

选用 NACA0012 作为扑动水翼的翼型，弦长 c 为 0.3 m，升沉幅值 A_{max} 为 $0.5c$，俯仰幅值 θ_{max} 为 $\pi/6$，扑动水翼的旋转中心与前缘距离 l 为 $0.2c$。对于扑动水翼的运动，定义斯特劳哈尔数 $St = 2fA_{max}/\overline{U}$，$\overline{U}$ 为流动稳定后出口流速的平均值，f 为扑动水翼的扑动频率。

在扑动水翼的研究中，瞬时推力系数 C_t 以及瞬时升力系数 C_y 是衡量扑动水翼水动力性能的关键参数，计算公式分别为

$$\begin{cases} C_t(t) = \dfrac{2F_t(t)}{\rho \overline{U}^2 cs} \\ C_y(t) = \dfrac{2F_y(t)}{\rho \overline{U}^2 cs} \end{cases} \tag{3}$$

式中 $F_t(t)$——水平方向瞬时推力,N

$F_y(t)$——竖直方向瞬时升力,N

ρ——流体密度,kg/m^3

s——翼型的展长,m

平均推力系数及平均升力系数定义为

$$\begin{cases} \overline{C}_t = \dfrac{1}{kT}\displaystyle\int_{(n-k)T}^{nT} C_t(t)\,\mathrm{d}t \\ \overline{C}_y = \dfrac{1}{kT}\displaystyle\int_{(n-k)T}^{nT} C_y(t)\,\mathrm{d}t \end{cases} \tag{4}$$

式中 n——计算总周期数

k——取值周期数,取 2

除此以外,为表征扑动水翼的推水性能,还需要计算扑动水翼装置的流量、扬程以及效率。

流量公式定义为

$$\overline{Q} = \overline{U}sb \tag{5}$$

式中 $\overline{Q}$——平均流量,m^3/s

b——流道宽度,取 0.8 m

平均扬程可由出入口的压力差换算获得,计算公式为

$$\overline{H} = \frac{\Delta\overline{p}}{\rho g} \tag{6}$$

式中 $\overline{H}$——平均扬程,m

$\Delta\overline{p}$——出入口压力差平均值,Pa

g——重力加速度,m/s^2

扑动水翼运动的平均输入功率计算公式为

$$\overline{P}_{\mathrm{in}} = \frac{1}{T}\left(\int_0^T F_y(t)\dot{y}(t)\,\mathrm{d}t + \int_0^T M(t)\dot{\theta}(t)\,\mathrm{d}t\right) \tag{7}$$

式中 $\overline{P}_{\mathrm{in}}$——扑动水翼运动的平均输入功率,W

$M(t)$——翼型绕转轴的瞬时扭矩,N·m

平均功率系数$\overline{C}_P$可以表示为

$$\overline{C}_P = \frac{2\overline{P}_{\mathrm{in}}}{\rho cs\overline{U}^3} \tag{8}$$

水力推进效率 η_{pr}则可以表示为

$$\eta_{\mathrm{pr}} = \frac{C_t}{C_P} \tag{9}$$

式中 C_P——瞬时功率系数

而流体获得的平均功率$\overline{P}_w$ 计算公式为

$$\overline{P}_w = \Delta\overline{p}\,\overline{Q} \tag{10}$$

由此,可得装置泵效率 η_{pu}计算公式为

$$\eta_{\mathrm{pu}} = \frac{\overline{P}_w}{\overline{P}_{\mathrm{in}}} \tag{11}$$

2 数值方法

2.1 控制方程与湍流模型

本文利用商业 CFD 软件 Fluent 进行数值计算,考虑黏性二维不可压缩流动的雷诺平均纳维-斯托克斯方程(RANS)和时均连续性方程,可知其运动控制方程为

$$\frac{\partial\overline{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (i = 1,2) \tag{12}$$

$$\frac{\partial\overline{u}_i}{\partial t} + \overline{u}_j\frac{\partial\overline{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial\overline{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}\left[(\upsilon+\upsilon_t)\left(\frac{\partial\overline{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial\overline{u}_j}{\partial x_i}\right)\right] \tag{13}$$

式中 $\overline{u}_i$、$\overline{u}_j$——i、j 方向流体运动平均速度,m/s

x_i、x_j——i、j 方向空间坐标,m

p——流体压强,Pa

υ——层流运动粘性系数,Pa·s

υ_t——湍流粘性系数,Pa·s

本文采用 Realizable $k-\varepsilon$ 湍流模型求解 N-S 方程的模型,相应方程参见文献[26]。

2.2 计算域与网格生成

计算域尺寸以及远场边界条件对计算结果的影响不可忽略,为使翼型后续流场能够充分发展,常取翼型后流域长为 20c,故本文中设置 x 方向总长为 8 m,并设置 x 正方向长度为 6 m,翼型旋转中心置于原点位置处。为了模拟河流推水时河道两岸对流场的影响,设置流道宽度为 0.8 m。计算域及初始时刻无俯仰角的网格划分如图 2 所示。

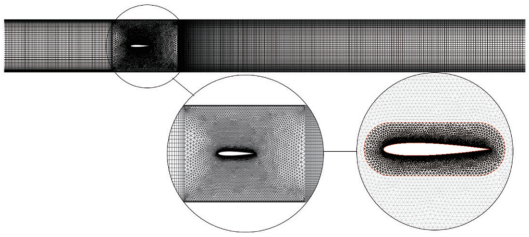

图 2 计算域及网格划分

Fig. 2 Computational domain and grid partition

由于扑动水翼需要进行起伏以及俯仰结合的运动,还需要结合动网格技术实现不同时刻的网格重构。为了提高计算效率,利用非结构化三角形网格划分以翼型起始位置为中心的长 1 m、宽 0.8 m 的长方形变形域,利用结构化网格划分其余计算域。为了更好地捕获翼型以及壁面的边界流场,在其周围划分边界层,第 1 层网格厚度为 0.000 1 m($y^+ < 2.71$)。此外,为保持翼型周围网格的质量,将翼型边界层及其向外数层网格单独分为一个固定域,该区域随翼型运动,不参与网格重构。

为验证网格数量的无关性，使用不同网格数量进行数值模拟计算。结果表明，在网格数量达到 8.3 万后，其对计算结果的影响可以忽略，因此为减少计算的时间，选择网格数为 82 994。

2.3　数值计算

本文基于 ANSYS Fluent 软件，结合 Realizable $k-\varepsilon$ 湍流模型以及动网格技术进行扑动水翼推水性能的数值研究。设置近翼型侧为压力入口，远翼型侧为压力出口，两侧壁面与翼型表面为无滑移壁面，3 个计算域的交界面设为 Interface，近壁计算采用增强壁面处理。

动网格模型采用弹性光顺法以及局部重构法。对于弹性光顺法，为不影响较远区域的网格，设定弹性系数为 0.8，为不影响边界处网格节点分布，设定边界点松弛因子为 0.000 6。对于局部重构法，设置最大网格扭曲率为 0.7 以及合适的最大最小网格长度标准。最后利用用户自定义指令（UDF）进行运动域运动形式的设定，得到不同时刻的动网格如图 3 所示。求解器设置中，选用 Coupled 算法耦合压力场与速度场，采用二阶迎风格式来离散时间。而步长设置应小于最小网格尺度与流场速度的比值，需要根据不同工况的计算情况进行调整。

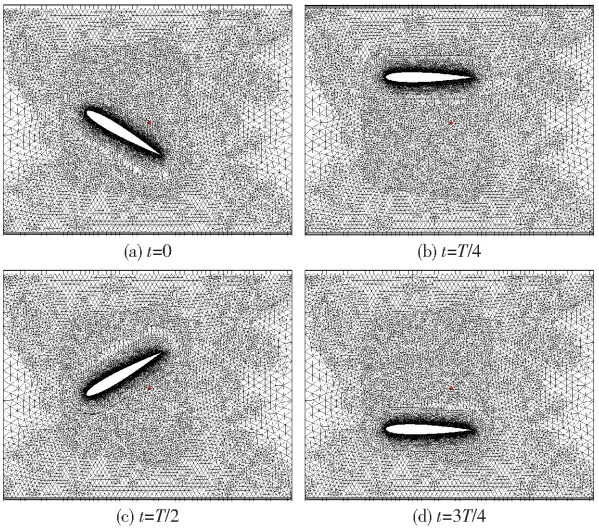

图 3　1 个周期内 4 个主要时刻的动网格更新

Fig. 3　Dynamic mesh updating at four main points in a cycle

2.4　方法验证

为验证数值计算方法的有效性，选取 NACA0012 翼型，在最大攻角相同的情况下，对 St 不同的多种工况进行计算，并与文献[21]的试验结果进行对比。基本参数设置与文献[21]相同，$U=0.4$ m/s，$\phi=\pi/2$，$c=A_{max}=0.1$ m，$\theta_{max}=\pi/12$，$Re=4\times10^4$，其中 U 表示计算域入口的流速。

将扑动水翼的平均推力系数随 St 变化的数值计算结果与文献[21]试验数据进行对比，结果如图 4 所示。

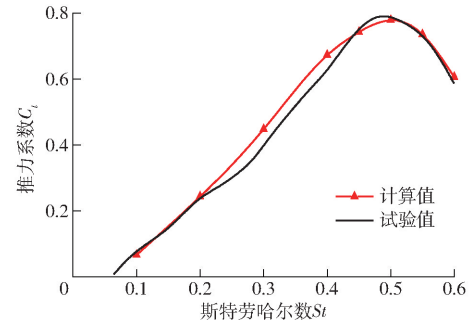

图 4　数值模拟结果与文献[21]试验数据的对比

Fig. 4　Comparison of numerical simulation results with experimental data in reference[21]

由图 4 可知，平均推力系数的计算值与试验值相符合，具有较好的一致性，本文使用的数值计算方法是正确有效的。

3　数值结果与分析

计算模型的各参数设置如下：弦长 c 为 0.3 m，扑动水翼的旋转中心与前缘距离 l 为 $0.2c$，起伏幅值 A_{max} 为 $0.5c$，俯仰幅值 θ_{max} 为 $\pi/6$，相位角 ϕ 为 $-\pi/2$，计算时展长 s 为 0.3 m。

3.1　扑动频率对扑动水翼装置水动力性能的影响

为了研究扑动频率对扑动水翼装置水动力性能的影响，本文设置扑动水翼摆动频率从 0.1 Hz 逐渐增加到 1 Hz，每 0.1 Hz 变化一次；此后每 0.5 Hz 增加一次，最高频率为 5 Hz。从其中选择较为典型的 4 组进行对比分析。

图 5 为不同扑动频率下扑动水翼的瞬时推力系数随时间变化的曲线。为了便于对比，将各自周期的无量纲时间的相对值作为横坐标。由图 5 可以看出，当扑动水翼从平衡位置开始向上扑动，瞬时推力系数先增大再减小，扑动至最大扑动幅值时瞬时推力系数到达谷点，随后扑动水翼开始反向扑动，瞬时推力系数再次开始增加，过平衡位置后迅速达到另一波峰。而且在一个运动周期内，瞬时推力系数总

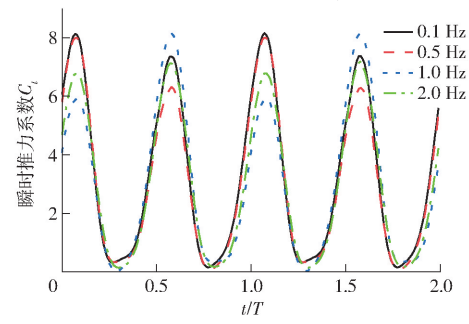

图 5　不同频率下扑动水翼的瞬时推力系数变化曲线

Fig. 5　Variation of instantaneous thrust coefficient of flapping hydrofoil at different frequencies

是大于零,即在扑动的全过程扑动水翼总是对水流起到推动作用。

图 6 为不同扑动频率下扑动水翼的瞬时升力系数随时间变化的曲线。由图 6 可以看出,瞬时升力系数曲线基本沿轴线对称分布,所有工况下的平均升力系数均接近零。对比图 5 以及图 6 可以发现,在瞬时推力系数的极大值处(扑动平衡位置)瞬时升力系数取极值,而在瞬时推力系数的极小值处(即最大扑动位置处)瞬时升力系数为零。

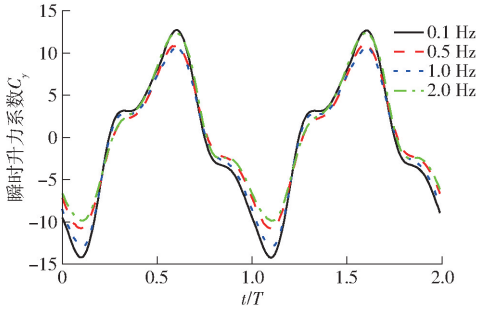

图 6 不同频率下扑动水翼的瞬时升力系数变化曲线

Fig. 6 Variation of instantaneous lift coefficient of flapping hydrofoil at different frequencies

为分析扑动水翼尾流的结构形态对其性能的影响,选择涡量在 z 方向分量 Ω_z 为特征量,并由此绘制各工况下的涡量等值线图,z 向涡量分量的计算公式为

$$\Omega_z = \frac{\partial u_y}{\partial x} - \frac{\partial u_x}{\partial y} \tag{14}$$

式中 u_x、u_y——x、y 方向的速度,m/s

图 7 为不同频率下各时刻的涡量等值线图。可以看出,扑动水翼在有限通道内进行扑动推水时,尾流中的反卡门涡街可能会发生偏移,被压缩侧受到的来自壁面的作用更为强烈,消散更为迅速,导致双列反卡门涡街两侧的旋涡强度差异较大。综合观察图 5 ~ 7 可以发现,瞬时推力系数与瞬时升力系数的大小与反卡门涡街的旋涡强度密切相关。以 f = 1 Hz 为例,该工况下的尾部射流偏向斜上方,导致反卡门涡街下方的旋涡强度明显强于上方旋涡。当翼型下扑时,下方强旋涡对翼型的作用远大于翼型上扑时上方弱旋涡对翼型的作用,导致翼型下扑时对水流的推动力明显强于上扑时的推动力,故图 5 中 f = 1 Hz 时瞬时推力系数曲线中每周期的第 2 个波峰远高于第 1 个波峰。此外,尾涡作用也是导致瞬时推力系数极大值偏离平衡位置的原因之一。

图 8 为扑动水翼装置的平均流量以及平均扬程随着扑动频率变化的曲线。从图 8 可以看出,扑动水翼装置的流量与其扑动频率基本成正比,而扬程与扑动频率的平方成正比。结合图 7 以及图 8 可以发现,在模拟过程中尾流的偏移并不会对流量以及扬程产生明显的影响,即尾涡的偏移虽然增大了推力的瞬时变化,但是对平均推力影响较小。

图 9 为扑动水翼装置的推进效率以及泵水效率

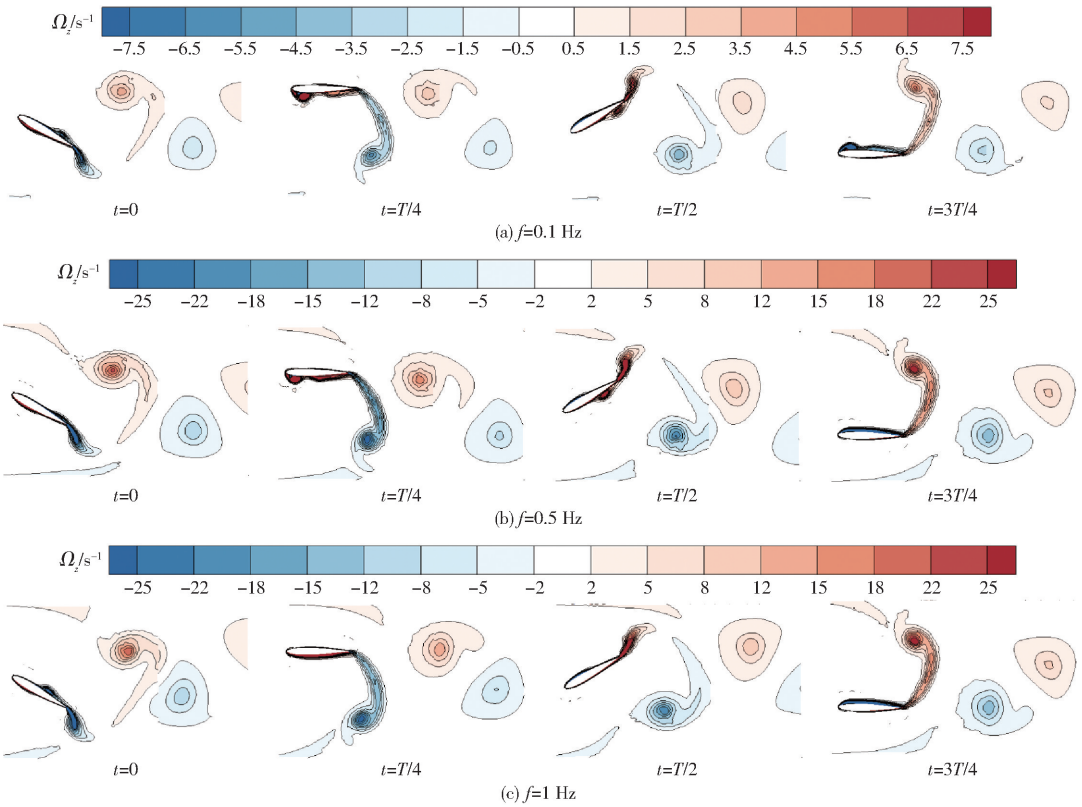

图 7 频率为 0.1、0.5、1 Hz 不同时刻的涡量等值线图

Fig. 7 Contour maps of vorticity at different frequencies of 0.1 Hz, 0.5 Hz and 1 Hz

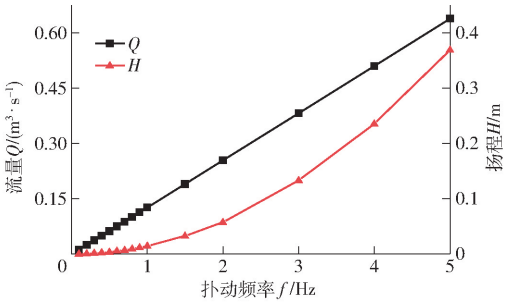

图 8　流量以及扬程随扑动频率的变化曲线

Fig. 8　Variation of flow rate and lift with flutter frequency

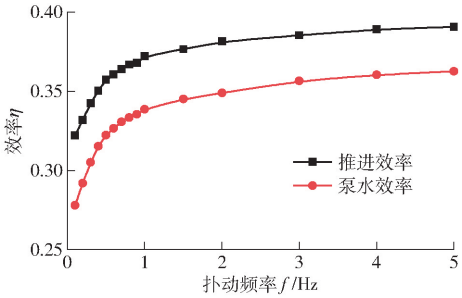

图 9　推进效率以及泵水效率随扑动频率的变化曲线

Fig. 9　Variation of propulsion efficiency and pump efficiency with flutter frequency

随扑动频率变化的曲线。可以看出，扑动水翼的推进效率与泵水效率随着扑动频率的增加不断增加，但是增加的速率随频率增加不断降低。对比相同频率下的推水效率与泵水效率可以发现，推水效率总是高于泵水效率，而且两者之间的差值随着频率的增加不断减小，这也许是由计算段的水力损失所占的比重随着扑动频率的增加有所降低导致的。

3.2　扑动水翼装置的推水特性

为了探究不同流量下扑动水翼装置的扬程以及泵水效率的变化规律，选取出入口流速为 0 ~ 1 m/s，每 0.1 m/s 变化一次进行模拟计算研究。计算过程中固定扑动频率为 1 Hz。图 10（图中 $Q_{0.7}$ 表示来流速度为 0.7 m/s 时的流量）给出的是以最大效率点流量为流量标度时，扑动水翼装置的扬程以及效率随着流量变化的曲线。

由图 10 可知，扑动水翼装置的扬程随着流量的增加不断减小，但在流量较小时有着明显的波动；而扑动水翼装置的泵水效率随着流量的增加先增大再减小。随着流量的增大，扑动水翼与水流之间的相对速度不断减小，翼型对水流的推动力越来越小，故装置的扬程随着流量的增加不断减小。除此之外，在最佳效率点时翼型在扑动过程中首次对水流起到了阻碍作用。此外，该装置具有超低的扬程，当流量为 0 即封闭计算域出入口时获得的平均扬程也仅有 0.024 m，在河流推水这种低扬程、大流量的应用场合具有优势。

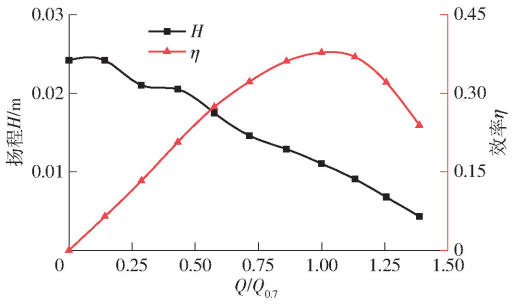

图 10　频率为 1 Hz 时，扬程与效率随流量的变化曲线

Fig. 10　Variation of lift and efficiency with flow rate when frequency was 1 Hz

图 11 为频率 1 Hz 时，不同流速下 3 种流场的涡量等值线图。可以发现：在低流速下，尾涡上下并列并且快速消散，这是因为新尾涡的生成过程会对已经形成的旧涡造成影响，甚至是直接破坏来不及流向下游的旧涡，尾涡的能量直接损失，能量使用效率低下。而随着流速的不断增加，每个周期中生成的两个旋涡逐渐分离，排列形成双列反卡门涡街，在涡街中心形成射流加速水流的流动，尾涡能量逐渐得到利用，装置效率不断增加。当流速超过最佳效率点后，尾涡中每个周期中生成的两个反方向旋涡远离的过程中，尾涡由双列反卡门涡街转变为单列反卡门涡街，相互作用减小，无法形成有效射流推动水流的流动，装置效率开始下降。

图 12 为扑动水翼在最佳效率点平衡位置的涡量等值线图，此时扑动水翼装置的尾迹呈现为如图所示的双列反卡门涡街形态。图 13 为扑动水翼在最佳效率点平衡位置的压力云图，综合观察图 12 和图 13 可以发现，尾涡在向后移动的过程中逐渐耗散，尾涡能量中的一部分被转化为压力势能，压力逐渐增加。此外观察其他工况下的涡量等值线图可知，扬程在 0.010 ~ 0.020 m 范围内时，装置尾迹均为相似的双列反卡门涡街，且具有较好的推水性能，能适应扬程波动较大的应用场合。

4　性能试验

为了验证扑动水翼装置的推水性能，设计了扑动水翼试验装置，如图 14 所示。伺服电机与减速箱提供装置运行所需的动力；曲柄滑块机构将旋转运动转化为直线运动，带动叶片进行升沉运动的同时，配合两组曲柄滑块机构之间的相位差实现叶片的俯仰运动，从而实现叶片的正弦扑动。

图 15 为扑动水翼装置实物图。试验装置架设在 4 m × 0.5 m × 0.7 m 的开放流道上方。通过声学多普勒流速仪测量流道出口处各点的流速，并利用高速摄像机进行流场的捕捉。其中声学多普勒流速仪的量程为 0 ~ 3 m/s，精度为 0.005 m/s，采样频率

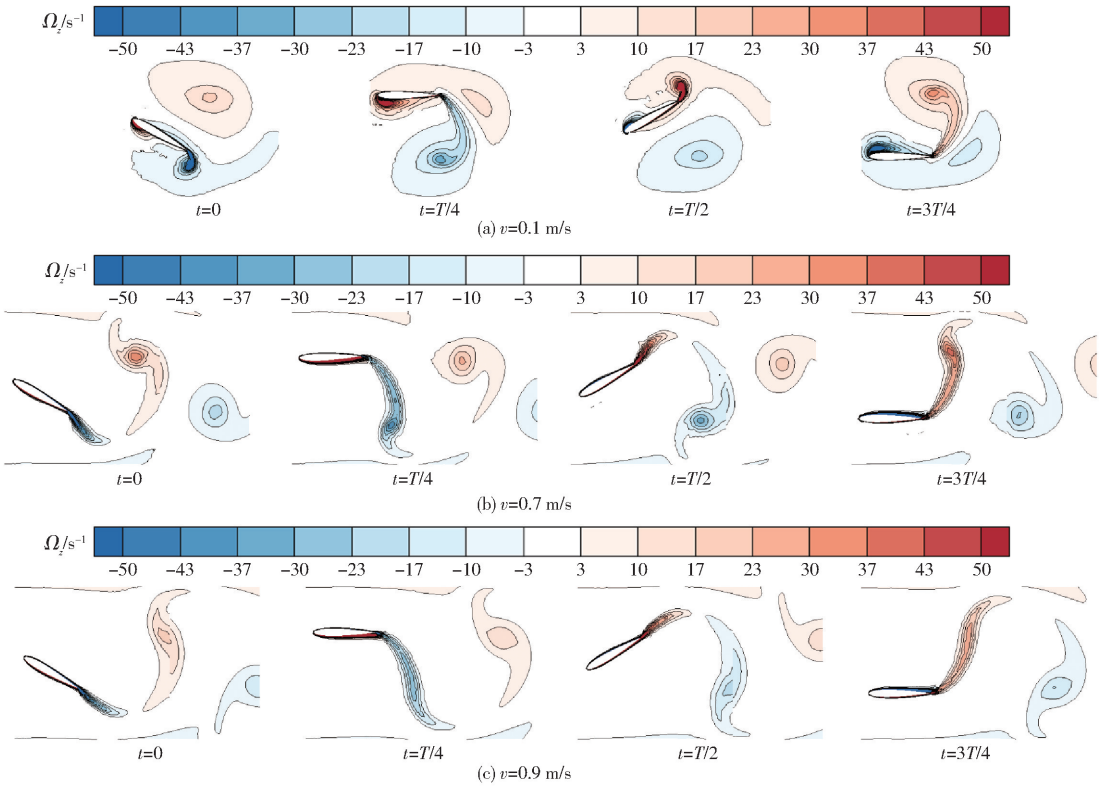

图 11 频率为 1 Hz、不同流速时不同时刻的涡量等值线图

Fig. 11 Vorticity contours at different time with frequency of 1 Hz and different flow velocities

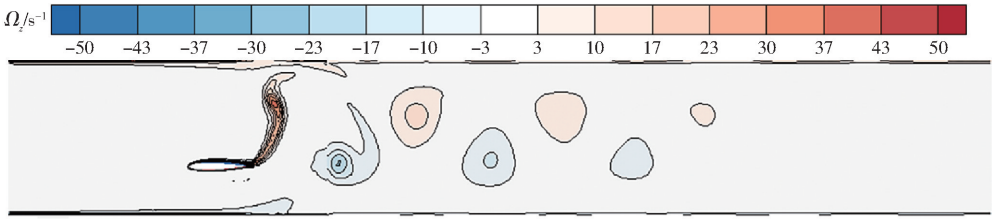

图 12 扑动水翼在最佳效率点平衡位置的涡量等值线图

Fig. 12 Vorticity contour map of flapping hydrofoil at equilibrium position of optimal efficiency point

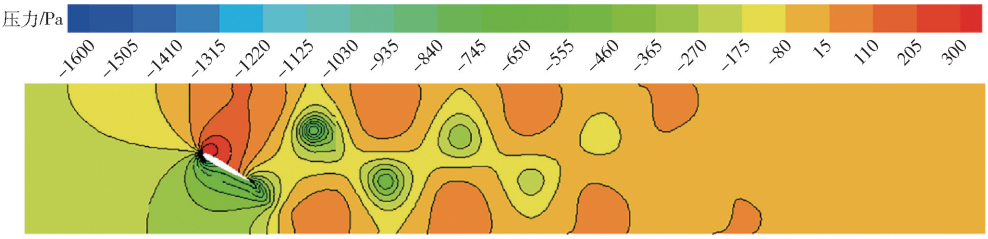

图 13 扑动水翼在最佳效率点平衡位置的压力云图

Fig. 13 Pressure contour of flapping hydrofoil at equilibrium position of optimal efficiency point

为 25 Hz;高速摄像机选用 Phantom VEO 340L,帧速为 100 f/s。

试验叶片展长为 0.3 m,试验频率为 0.1 ~ 1 Hz,每 0.1 Hz 变化一次。利用声学多普勒流速仪测量方形流道出口处均匀设置的 6 个测点上流速,单次测量不小于 12 个周期,多次测量取其平均值为测点流速。以 6 个测点的平均流速作为平面流速。将试验流速与仿真结果进行对比,如图 16 所示。频率为 1 Hz 时,试验流速为 0.264 m/s,总不确定度 u 为 0.020 1 m/s。

由图 16 可知,试验与模拟的结果整体趋势相同,装置的流量随着运动频率的增加而增大。但模拟结果明显高于试验结果,造成该差异的主要原因是试验为保证叶片运动顺利进行,在叶片两侧留有较大的空隙,导致试验过程中部分水体通过两侧缝隙从压力侧转移至吸力侧,大大降低了装置对水体的推动作用。此外,叶片固定块以及泄漏也会对结果造成一定影响。

利用高速摄像机拍摄试验流场结果如图 17 所示。由于油墨的扩散较快,每个时刻仅有一个尾涡存留,可以发现试验流场与仿真流场基本相同,从侧

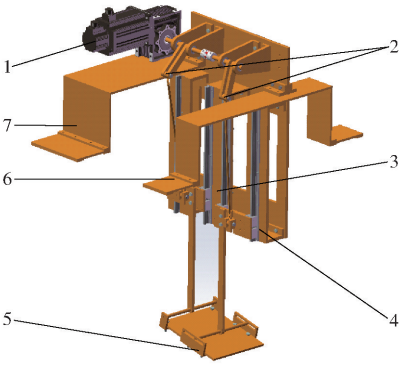

图 14　扑动水翼装置示意图

Fig. 14　Schematic of flapping hydrofoil device

1. 伺服电机与减速箱　2. 曲柄滑块机构　3. 导轨　4. 背板　5. 扑动叶片　6、7. 支架

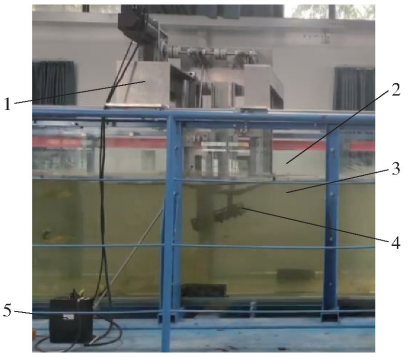

图 15　扑动水翼装置试验台

Fig. 15　Flapping hydrofoil device test bench

1. 扑动水翼装置　2. 水槽　3. 方形流道　4. 叶片　5. 伺服驱动器

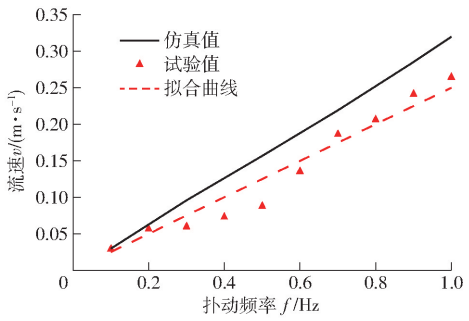

图 16　试验与仿真的流速对比

Fig. 16　Comparison of flow velocity between test and simulation

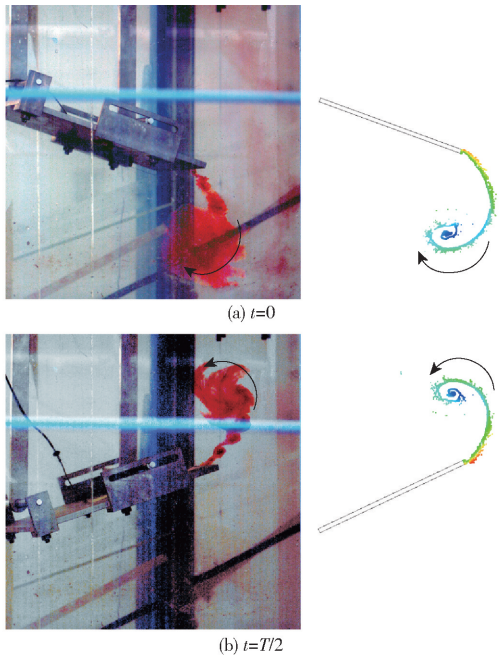

图 17　试验与仿真流场图

Fig. 17　Flow field diagrams of test and simulation

面印证了仿真结果的正确性。

5　结论

(1)扑动水翼装置的尾涡结构形态是性能影响的关键因素,当尾涡处于双列反卡门涡街时,推水性能较高。

(2)在不同频率下,扑动水翼装置的流量与扑动频率成正比,扬程与扑动频率的平方成正比。而装置的推进效率以及泵水效率均随着频率的增加而增大,但增加的速率不断降低。

(3)在固定的频率(1 Hz)下,扑动水翼装置的扬程随着频率的增加而减小,而效率随着流量的增加先增大后减小。

(4)扑动水翼装置具有超低的扬程,当频率为 1 Hz 时,该装置的最大平均扬程仅有 0.024 m;而且扬程在 0.010 ~ 0.020 m 范围内,该装置尾流均呈现双列反卡门涡街,具有较好的推水性能,在河流推水这种低扬程、大流量的应用场合具有优势。

参　考　文　献

[1] 贾海峰, 杨聪, 张玉虎, 等. 城镇河网水环境模拟及水质改善情景方案[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2013, 53(5): 665 - 672.
JIA Haifeng, YANG Cong, ZHANG Yuhu, et al. Simulations of a water quality improvement for urban river networks[J]. J. Tsinghua Univ. (Sci. & Tech.), 2013, 53(5): 665 - 672. (in Chinese)

[2] 潘泓哲, 李一平, 唐春燕, 等. 多目标优化下平原河网引调水改善水环境效果评估[J]. 湖泊科学, 2021, 33(4): 1138 - 1152.
PAN Hongzhe, LI Yiping, TANG Chunyan, et al. Evaluation of the effect of water diversion on improving water environment in plain river network under the multi-objective optimization[J]. J. Lake Sci., 2021, 33(4): 1138 - 1152. (in Chinese)

[3] 骆东玲, 陆培东, 喻国华. 东部平原城市水污染现状及河网结构对水污染影响[J]. 环境工程, 2011, 29(增刊 1): 59 - 62.
LUO Dongling, LU Peidong, YU Guohua. Study on the activity of the contaminative water and the impact on the water pollution of change in urban river-net in the east plain region of China[J]. Environmental Engineering, 2011, 29(Supp. 1): 59 - 62. (in Chinese)

[4] 田传冲, 魏婧, 黄冬菁. 基于水动力水质联合调控的温州市主城区平原河网引水规模研究[J]. 水电能源科学, 2019,

37(4): 44 - 47.
TIAN Chuanchong, WEI Jing, HUANG Dongjing. Study on the scale of water diversion of plain river network in the main urban area of Wenzhou City based on the hydrodynamic and water quality united-control model[J]. Water Resources and Power, 2019, 37(4): 44 - 47. (in Chinese)
[5] 于珊, 李一平, 程一鑫, 等. 调水引流工程对平原河网水动力调控的效果[J]. 湖泊科学, 2021, 33(2): 462 - 473.
YU Shan, LI Yiping, CHENG Yixin, et al. The impacts of water diversion on hydrodynamic regulation of plain river network [J]. J. Lake Sci., 2021, 33(2): 462 - 473. (in Chinese)
[6] 刘超. 轴流泵系统技术创新与发展分析[J]. 农业机械学报, 2015, 46(6): 49 - 59.
LIU Chao. Researches and developments of axial-flow pump system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(6): 49 - 59. (in Chinese)
[7] 郑源, 陈宇杰, 张睿, 等. 轴流泵失速工况下非定常流动特性研究[J]. 农业机械学报, 2017, 48(7): 127 - 135.
ZHENG Yuan, CHEN Yujie, ZHANG Rui, et al. Analysis on unsteady stall flow characteristics of axial-flow pump[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(7): 127 - 135. (in Chinese)
[8] 徐辉, 龚严, 曹春建, 等. 轴伸贯流泵站全过流系统启动三维过渡过程研究[J]. 农业机械学报, 2021, 52(4): 143 - 151.
XU Hui, GONG Yan, CAO Chunjian, et al. 3D start-up transition process of full flow system for shaft-extention tubular pump station[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(4): 143 - 151. (in Chinese)
[9] 胡笑奇, 方雅敏, 张蕊华, 等. 刚柔结构仿尾鳍压电双晶片无阀泵的试验研究[J]. 振动测试与诊断, 2015, 35(3): 476 - 480.
HU Xiaoqi, FANG Yamin, ZHANG Ruihua, et al. Experimental study of caudal-fin-like piezoelectric-bimorp valveless pump with flexible-rigid structure[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2015, 35(3): 476 - 480. (in Chinese)
[10] 张建辉, 胡笑奇, 赵淳生. 仿鱼摆动式无阀压电泵的新进展[J]. 振动测试与诊断, 2016, 36(1): 1 - 10.
ZHANG Jianhui, HU Xiaoqi, ZHAO Chunsheng. New development of valve-less piezoelectric pump imitating caudal-fin[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2016, 36(1): 1 - 10. (in Chinese)
[11] BIRNBAUM W. Der Schlagflügelpropeller und die kleinen Schfoilsungen elastisch befestigter Tragflügel[J]. Zeitschrift für Flugtechnik und Motorluftschiffahrt, 1924, 15: 128 - 134.
[12] 徐佩, 郭春雨, 王超, 等. 二维振荡翼型俯仰和升沉耦合运动的水动力性能分析[J]. 船舶力学, 2020, 24(3): 271 - 281.
XU Pei, GUO Chunyu, WANG Chao, et al. Hydrodynamic performance analysis of pitching and heaving coupling motion for two dimensional oscillating airfoil[J]. Journal of Ship Mechanics, 2020, 24(3): 271 - 281. (in Chinese)
[13] 冯亿坤, 苏玉民, 宿原原, 等. 仿鱼类游动模式下的摆动翼水动力性能研究[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2019, 47(3): 38 - 43.
FENG Yikun, SU Yumin, SU Yuanyuan, et al. Numerical simulation of hydrodynamic performance of flapping foil in fish-like swimming[J]. J. Huazhong Univ. of Sci. & Tech. (Natural Science Edition), 2019, 47(3): 38 - 43. (in Chinese)
[14] 郭春雨, 张佐天, 徐佩, 等. 改进型振荡水翼水动力试验及机理[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2019, 47(4): 88 - 93.
GUO Chunyu, ZHANG Zuotian, XU Pei, et al. Hydrodynamic experiment and mechanism of improved oscillating hydrofoil [J]. J. Huazhong Univ. of Sci. & Tech. (Natural Science Edition), 2019, 47(4): 88 - 93. (in Chinese)
[15] 孙光, 王勇, 谢玉东, 等. 尾缘襟翼振荡水翼的水动力特性[J]. 山东大学学报(工学版),2020, 50(6): 23 - 29.
SUN Guang, WANG Yong, XIE Yudong, et al. Hydrodynamic characteristics of oscillating hydrofoil with trailing edge[J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2020, 50(6): 23 - 29. (in Chinese)
[16] WANG P, TIAN X, LU W, et al. Dynamic modeling and simulations of the wave glider[J]. Applied Mathematical Modelling, 2018, 66: 77 - 96.
[17] 胡峰, 赵文涛, 黄琰, 等. 三维被动摆动水翼对波浪滑翔机推进动力的性能研究[J]. 机械工程学报, 2020, 56(8): 243 - 249.
HU Feng, ZHAO Wentao, HUANG Yan, et al. Study on propulsion performance of three-dimensional passive swinging hydrofoil on wave glider[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56(8): 243 - 249. (in Chinese)
[18] 徐建安, 孙洪雨. 被动式摆动水翼潮流能量获取技术试验研究[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2016, 37(2): 248 - 253.
XU Jian'an, SUN Hongyu. Experimental studies of passive oscillating hydrofoil for tidal current energy extracting[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2016, 37(2): 248 - 253. (in Chinese)
[19] CHEN Y, ZHAN J, WU J, et al. A fully-activated flapping foil in wind gust: energy harvesting performance investigation[J]. Ocean Engineering, 2017, 138: 112 - 122.
[20] ANDERSON J M, STREITLIEN K, BARRETT D S, et al. Oscillating foils of high propulsive efficiency[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1998, 360: 41 - 72.
[21] READ D A, HOVER F S, TRIANTAFYLLOU M S. Forces on oscillating foils for propulsion and maneuvering[J]. Journal of Fluids & Structures, 2003, 17(1): 163 - 183.
[22] SCHOUVEILER L, HOVER F S, TRIANTAFYLLOU M S. Performance of flapping foil propulsion[J]. Journal of Fluids & Structures, 2005, 20(7): 949 - 959.
[23] 杜晓旭, 张正栋. 四种扑动方式对水下扑翼推进性能影响数值分析[J]. 工程力学, 2018, 35(4): 249 - 256.
DU Xiaoxu, ZHANG Zhengdong. Numerical analysis of influence of four flapping modes on propulsion performance of underwater flapping foils[J]. Engineering Mechanics, 2018, 35(4): 249 - 256. (in Chinese)
[24] 刘焕兴, 苏玉民, 庞永杰. 非正弦摆动对水翼水动力性能的影响[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2016, 44(2): 15 - 20.
LIU Huanxing, SU Yumin, PANG Yongjie. Effects of the nonsinusoidal oscillating on the hydrodynamic performance of the hydrofoil[J]. J. Huazhong Univ. of Sci. & Tech. (Natural Science Edition), 2016, 44(2): 15 - 20. (in Chinese)
[25] 张铭钧, 刘晓白, 徐建安, 等. 海龟柔性前肢仿生推进研究[J]. 机器人, 2011, 33(2): 229 - 236.
ZHANG Mingjun, LIU Xiaobai, XU Jian'an, et al. Bionic research on turtle's flexible forelimb propulsion[J]. Robot, 2011, 33(2): 229 - 236. (in Chinese)
[26] 王福军. 计算流体动力学分析——CFD 软件原理与应用[M]. 北京:清华大学出版社, 2004:124 - 126.