doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2023.08.014

扑翼型仿生泵水装置设计与实验

华尔天[1,2]　罗海涛[1]　谢荣盛[1,3]　陈万前[1]　汤守伟[1]　苏忠鑫[1]

（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：针对平原河网地区细小枝杈河道存在的水动力不足问题，设计了一种扑翼型仿生泵水装置，以满足极低扬程工况下，大流量、高效率的输水需求。以金枪鱼尾鳍和矩形平板为基础建立了扑翼模型，利用有限体积法（FVM）和重叠网格技术对不同特征弦长和轮廓的扑翼开展三维数值模拟，并对比进行了尾鳍与矩形扑翼的泵水实验，结果表明：随着扑翼特征弦长的增大，周期内平均推力系数有所提升，但其泵水效率略微下降；而在相同面积约束下，具有尾鳍特征轮廓的扑翼相对于矩形扑翼提升了装置的泵水流量与效率，实验扑动频率为 0.7 Hz 时，尾鳍扑翼流场稳定平均流速为 28.44 cm/s，较矩形扑翼的 25.13 cm/s 提升 13.6%。

关键词：扑动水翼；水动力性能；超低扬程；数值模拟；实验验证

中图分类号：TH38　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1000-1298(2023)08-0155-08　　**OSID**：

Design and Test of Flapping Hydrofoil Bionic Water Pumping Device

HUA Ertian[1,2]　LUO Haitao[1]　XIE Rongsheng[1,3]　CHEN Wanqian[1]　TANG Shouwei[1]　SU Zhongxin[1]

(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: Aiming at the problem of insufficient hydrodynamic force in the small branching river in the plain river network, a flapping-wing bionic water pumping device was designed, by controlling flapping wings to complete the two degree of freedom coupling motion of heave and pitch, the water in the closed channel was mechanically pressurized, achieving one-way pumping of water, to meet the demand for large flow and high efficiency water transmission under very low head conditions. A flapping-wing model was established based on the tuna tail fin and rectangular flat plate. The finite volume method (FVM) and overlapping grid technology were used to carry out three-dimensional numerical simulation of flapping hydrofoil with different characteristic chord lengths and contours, and the pump water test of tail fin and rectangular flapping hydrofoil was compared. The results showed that with the increase of the characteristic chord length of the flapping hydrofoil, the average thrust coefficient in the cycle was increased, corresponding to an increase in the vortex strength of the wake region vortex ring. However, its pumping efficiency was slightly decreased. Under the same area constraint, the flapping hydrofoil with the characteristic profile of the tail fin improved the pumping flow and efficiency of the device compared with the rectangular flapping hydrofoil. When the test flapping frequency was 0.7 Hz, the stable average flow rate of the tail fin flapping hydrofoil flow field was 28.44 cm/s, which was 13.6% higher than 25.13 cm/s of the rectangular flapping hydrofoil.

Key words: flapping hydrofoil; hydrodynamic performance; ultra-low head; numerical simulation; test verification

收稿日期：2023-01-17　修回日期：2023-04-28

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

文献[1-2]模拟鱼尾运动研制了仿生泵水装置,在低扬程工况下,保持较高效率的大流量泵水效果,可用于提升河网水动力,修复水体自净能力[3],从而改善平原小河道因地势低平导致的水质恶化问题[4-5]。传统泵闸联合调度的活水方式[6-7],主要应用于河流主干道,不仅投资巨大,且改变了河流自然结构,会对水质带来一定负面影响[8],作为核心元件的叶片泵[9-10]在扬程低于 1 m 时,稳定性差,泵水效率不足 30%[11]。因此针对呈现毛细血管状分布的小河道而言,仿生泵水装置具有优势。

鱼类的身体结构和运动方式,能保持低功耗、高效率的推进,这一优势已经在医疗保障、海洋装备、军事勘测等诸多领域取得较好的应用[12-15]。随着研究深入,对于扑翼高效运动机理[16]也得到更多的阐述。文献[17]通过 DPIV 可视化流场发现扑翼的高推力效率往往伴随着前缘涡的形成,与尾缘涡相互作用产生反卡门涡街。随后,众多学者[18-20]对扑翼频率、振幅、攻角、相位差等运动参数进行了多工况设计,实验结果表明,优化组合参数后峰值推进效率超过 70%。文献[21]在关于仿生翼几何参数的研究中指出,椭球翼表面的涡系结构饱满且距离翼型表面最近,其推进性能最好。扑翼的推进效率与其后方形成的涡系结构密切相关,而涡系结构一定程度上取决于扑翼的前缘特征,文献[22]以 NACA0006 翼型尾部作为基础,混合不同翼型的前缘部分,进行对比数值计算,通过流场分析得到,混合翼型相较于基础翼型有更为强力的反卡门涡脱落,使得其在增大推力的同时,提高了推进效率,进而提升扑翼的推进性能。关于采用类似金枪鱼鱼尾结构的数值研究[23]指出月牙形尾鳍扑动过程中产生的推力较小,但是效率较高,其主要原因是分叉尾鳍诱导的尾涡涡量更小,使其能量损失小于其他扑翼模型。目前针对扑翼几何参数的研究主要集中在二维形状对于扑翼推进性能的影响,而关于扑翼三维几何参数对其泵水性能影响的研究尚未见报道。

针对平原河网因地形导致的水动力不足、传统泵站在超低扬程工况下效率低的问题,本文设计一种扑翼型仿生泵水装置。通过优化尾鳍扑翼模型,加强其做功能力,从而提升装置泵水流量与效率。

1 仿生泵水装置结构与运动模型

1.1 装置结构与工作原理

扑翼型仿生泵水装置主要由伺服电机、减速箱、双曲柄、导轨、矩形流道、扑翼等组成,其结构如图 1 所示,电机驱动双曲柄连杆机构带动扑翼做深沉俯仰的二自由度耦合运动,结合矩形流道,防止水体的交错紊动,最终实现扑翼对水体单向、持续的推流。

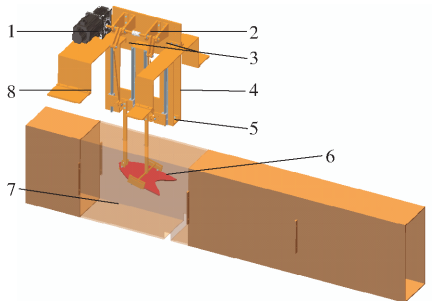


图 1 扑翼型仿生泵水装置整体结构示意图

Fig. 1 Schematic of flapping hydrofoil bionic water pumping device

1. 伺服电机与减速箱 2. 联轴器 3. 双曲柄 4. 背板 5. 导轨滑块结构 6. 扑翼 7. 矩形流道 8. 支撑架

1.2 运动参数

金枪鱼作为控制身体和尾鳍(Body and/or caudal fin, BCF)运动模式的代表,通过尾部产生喷射的涡流提供推力,在巡航时能保持较高的推进效率。其运动方式可以看作是尾鳍升沉和俯仰运动的耦合,由此建立的扑翼运动轨迹如图 2 所示。

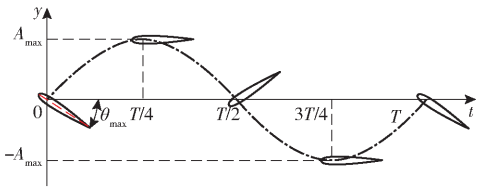


图 2 扑翼运动轨迹示意图

Fig. 2 Flapping hydrofoil motion diagram

图中,A_{max} 为扑翼的升沉幅值,θ_{max} 为扑翼的俯仰幅值,T 为运动周期。

由简谐扑动定义扑翼的运动方程为

$$\begin{cases} y(t) = A_{max}\sin(2\pi ft) \\ \theta(t) = \theta_{max}\sin(2\pi ft + \phi) \end{cases} \tag{1}$$

式中 $y(t)$——扑翼升沉位移,m

$\theta(t)$——扑翼俯仰位移,rad

f——耦合运动频率,Hz

ϕ——升沉与俯仰运动相位差,取 $-\pi/2$

对式(1)求导,可得扑翼升沉速度和俯仰角速度分别为

$$\begin{cases} V(t) = 2\pi fA_{max}\cos(2\pi f) \\ \omega(t) = 2\pi f\theta_{max}\cos(2\pi ft + \phi) \end{cases} \tag{2}$$

式中 $V(t)$——扑翼升沉速度,m/s

$\omega(t)$——扑翼俯仰角速度,rad/s

1.3 水动力性能参数

由扑翼瞬时推力与力矩可得平均输入功率 $\overline{P}$ 计算公式为

$$\overline{P}=\int_0^T F_x(t)V(t)\,\mathrm{d}t+\int_0^T M(t)\omega(t)\,\mathrm{d}t \quad (3)$$

式中　$F_x(t)$——扑翼产生的瞬时推力，N

$M(t)$——扑翼产生的瞬时力矩，N·m

对推力和升力进行无量纲处理得到的推力系数 $C_x(t)$ 和升力系数 $C_y(t)$ 一直以来都被认作是评定扑翼推进性能的重要指标，其计算公式为

$$\begin{cases} C_x(t)=\dfrac{2F_x(t)}{\rho U^2 S} \\ C_y(t)=\dfrac{2F_y(t)}{\rho U^2 S} \end{cases} \quad (4)$$

式中　ρ——水的密度，kg/m^3

$F_y(t)$——扑翼产生的瞬时升力，N

S——扑翼投影面积，m^2

U——流场稳定后，流道出口断面流速，m/s

为进一步研究扑翼泵水性能，需要引入流量、扬程、泵水效率等水动力性能参数，其计算公式分别为

$$Q=US_0 \quad (5)$$

式中　Q——平均流量，m^3/s

S_0——流道出口断面面积，m^2

通过流道进出口的静压差计算得到扑翼泵水的扬程为

$$H=\frac{|\overline{P}_2-\overline{P}_1|}{\rho g} \quad (6)$$

式中　$\overline{P}_2$——流道出口平均压力，Pa

$\overline{P}_1$——流道进口平均压力，Pa

g——重力加速度，m^2/s

因此可以得到扑翼的泵水效率计算公式为

$$\eta=\frac{|\overline{P}_2-\overline{P}_1|Q}{\overline{P}} \quad (7)$$

1.4　扑翼建模

选用文献[24]数值研究的仿金枪鱼尾鳍中具有较高推进效率的形状，建立扑翼模型，其前缘与尾缘轮廓公式为

$$\begin{cases} x_1=-137.5|z|^3+21.748|z|^2+0.0467 \\ x_2=43.162|z|^3+1.7219|z|^2+0.636|z| \end{cases} \quad (-0.1<z<0.1) \quad (8)$$

根据尾鳍曲线公式，得到 M2 扑翼外形轮廓线，如图 3 所示，特征弦长 L_c 为 0.09 m，三维建模时，拉伸厚度 10 mm。

为了便于后续研究，以模型 M2 为例，保留其特征轮廓，通过改变 ΔC 大小（即改变特征弦长）的方式构造不同投影面积的扑翼模型 C0、C1、C2，其中 C2 扑翼投影面积与尺寸为 350 mm×300 mm×10 mm 的矩形平板扑翼相同，扑翼的具体参数如表 1 所示。

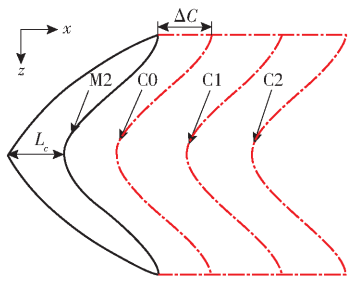


图 3　扑翼外形参数

Fig. 3　Flapping wing shape parameters

表 1　扑翼模型参数

Tab. 1　Flapping wing model parameters

扑翼型号	M2	C0	C1	C2
ΔC/m	0	0.06	0.16	0.26

2　数值方法

2.1　流体域及网格划分

图 4 为扑翼泵水示意图，流道结构四周封闭，消除了自由液面对本文数值计算的影响，考虑壁面效应，流体域尺寸设置为 0.4 m×0.6 m×3 m，模拟扑翼的实际工况；为规避初始阶段的回流对数值计算造成影响，设置扑翼俯仰轴距离流道进口为 0.5 m。

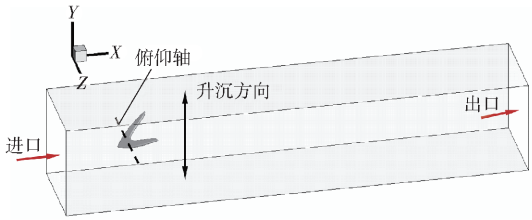


图 4　扑翼泵水示意图

Fig. 4　Schematic of flapping wing pump

为降低离散误差，减少单元数量，背景域（即流体域）采用 Mesh 软件生成的六面体网格，如图 5 所示，前景域中扑翼周围采用更精细化的非结构化网格，并划分 15 层边界层，根据流场特性，设置第 1 层网格高度为 0.12 mm，满足 $y^+<1$，增长率 1.2。

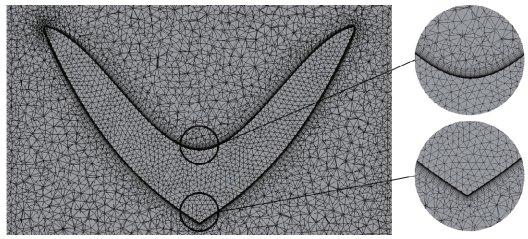


图 5　前景域网格划分

Fig. 5　Mesh division of foreground domain

为验证网格数量的无关性，采用不同网格数量进行数值模拟计算。结果表明，在网格数量接近 3.0×10^6 后，其对计算结果的影响可以忽略，因此为节省计算资源，选择网格数为 2.853×10^6。

2.2 计算设置

本文基于 ANASYS Fluent 软件进行数值研究，考虑在低雷诺数、剪切流中需要更高的精度，故采用 SST $k-\omega$ 湍流模型[25]；并搭载嵌套网格技术规避传统动网格出现的负体积问题。设置翼面与流道侧面的边界条件为 wall，给定 overset 边界条件传递流场信息以耦合分离的背景域和前景域，各区域网格独立，降低网格拓扑难度。通过用户自定义函数(UDF)实现扑翼相对运动，并选用 Coupled 算法耦合压力场与速度场求解雷诺平均 N－S 控制方程[26]，动量方程采用二阶迎风格式离散，计算迭代步长设置为 0.005 s。

2.3 数值验证

为验证本文数值计算方法的有效性，选取文献[27]的三维月牙形尾鳍模型进行数值模拟，设置给定速度入口、压力出口，$U=0.25$ m/s，$f=0.5$ Hz，$\theta=25°$，$\phi=-\pi/2$，$A_{max}=0.1$ m 均与实验相同。将扑动尾鳍一个周期内的推力系数 C_x 与文献[27]实验数据进行对比，结果如图 6 所示，可以看出模拟结果与文献实验数据变化趋势吻合度较高，可以认为本文的数值计算方法有效。

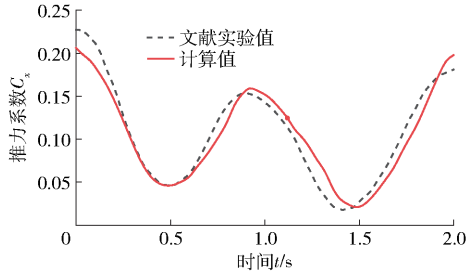


图 6 数值模拟结果与文献[27]实验数据对比

Fig. 6 Comparison of numerical simulation results with experimental data in reference [27]

3 结果与分析

3.1 扑翼泵水装置综合特性曲线

为探明扑翼泵水装置的水力特性，以 M2 扑翼模型为例，扑动频率 f 为 1 Hz，将进口速度 0.4 m/s 作为流量标度(Q_d)，依次计算 $0.25Q_d$ 到 $2Q_d$ 范围内的 8 个工况点，数值研究扑翼泵水效率、流量、扬程三者之间的关系，计算得到综合特性曲线，如图 7 所示。

观察图 7 可以发现，扑翼泵水装置的综合特性曲线与传统轴流泵有着相似的变化趋势，随着流量增大，效率呈现先增大后减小的趋势，而扬程随着流量的增大逐渐减小，这是因为，随着流速的增加，扑翼与来流之间的相对速度不断减小，对于水体的推力逐渐减少，因此扬程在不断降低。此外，扑翼泵水

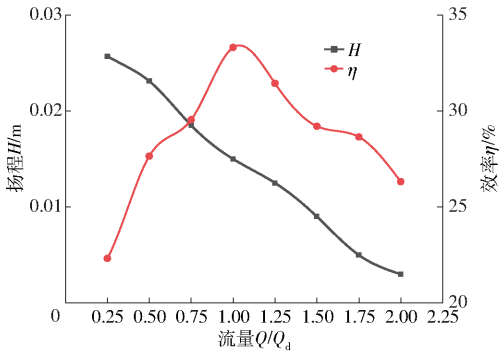


图 7 频率为 1 Hz 时扑翼泵水装置的综合特性曲线

Fig. 7 Comprehensive characteristic curves of flapping wing pump hydrodynamic device when frequency was 1 Hz

的扬程范围为 0～0.03 m，装置仍能保持较高效率，可以看出，以扑动水翼为机械扰动基础的泵水装置满足小河道低扬程输水需求。

3.2 特征弦长数值结果分析

根据前文参数设置，进行 M2、C0、C1 不同特征弦长扑翼的数值模拟。考虑扑翼弦长参数的变化，升沉幅值对推进性能影响较为明显，故合理选取 A_{max} 为 0.06、0.08、0.10、0.12 m 的 4 个工况。计算模型的其他参数设置如下：扑动频率 f 为 1 Hz，俯仰幅值 θ_{max} 为 $\pi/6$。

因流量与扑翼的平均推力系数 C_{xm} 有较好的正向关系，将 3 组不同 L_c 长度的扑翼一个周期内平均推力系数与效率变化进行比较，结果如图 8、9 所示。

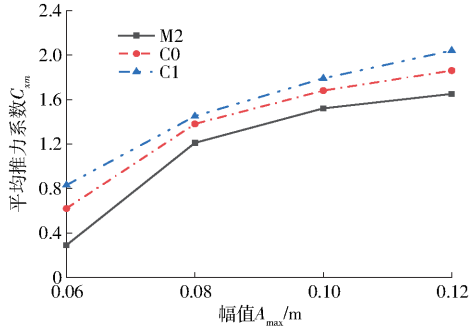


图 8 3 组扑翼平均推力系数变化曲线

Fig. 8 Variation curves of average thrust coefficient of three groups of flapping wings

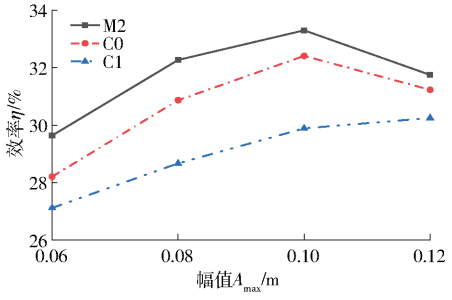


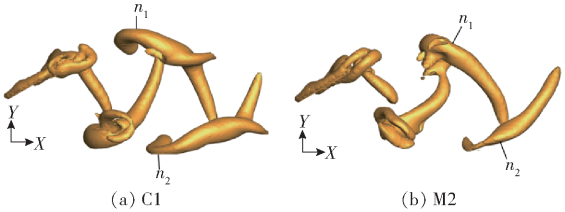
图 9 3 组扑翼泵水效率变化曲线

Fig. 9 Variation curves of water efficiency of three groups of flapping wings

图 8 为 3 组扑翼平均推力系数变化曲线，结果表明，随着特征弦长的增大，扑翼的平均推力系数呈明显上升趋势，扑动幅值为 0.06 m 时，C1 的平均推力系数为 0.83，明显高于 M2 扑翼的 0.29，因此 C1 扑翼有着较好的推进性能。此外，当扑动幅值增大到一定程度时，其变化趋势逐渐减缓，说明特征弦长对于装置水动力性能影响占据主导因素，而幅值作用存在一定阈值。

图 9 为 3 组扑翼泵水效率变化曲线，由于 L_c 的增加，扑翼对水体的侧向扰动更大，导致输入功率的增加，使得其趋势与平均推力系数变化曲线完全相反，对应效率极值点 M2 最高，C0 次之，C1 最小，另外，随着幅值的增大，M2 与 C0 扑翼的效率呈现先增加后下降趋势，而 C1 并未达到效率极值点，是因为扑翼最高效率点对应的幅值随着特征弦长的增大逐渐右移。

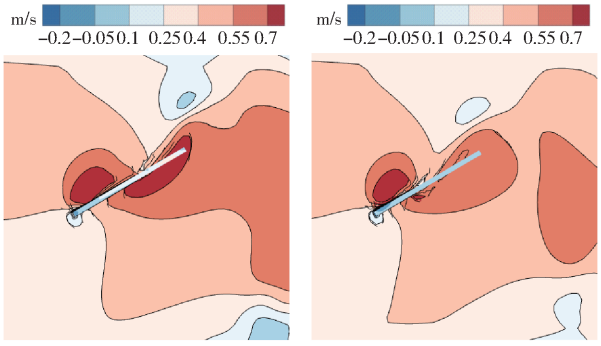
为了明确不同特征弦长扑翼尾部流场的变化，以 Q 准则[28]识别 M2 与 C1 尾迹区涡系结构，并提取扑翼在 $t = T/2$ 时刻展向对称截面上的速度云图，分别如图 10、11 所示。



(a) C1　　(b) M2

图 10　扑翼尾迹区涡系结构

Fig. 10　Vortex structure in flapping wing wake region



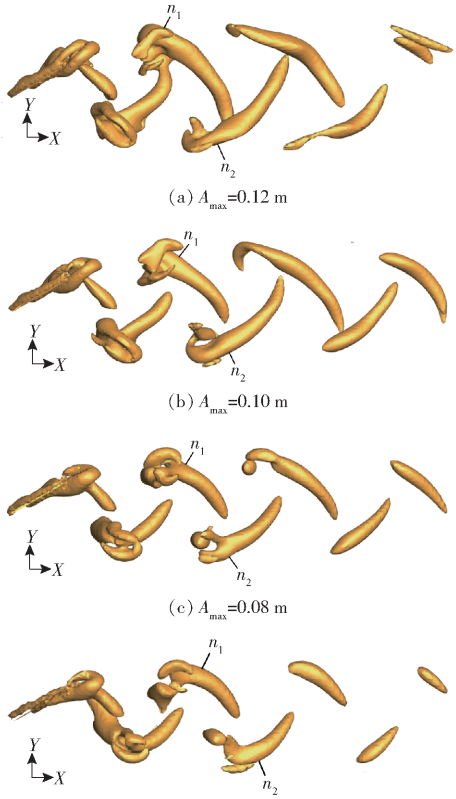
(a) C1　　(b) M2

图 11　对称面瞬时速度局部放大图

Fig. 11　Partial enlarged views of flapping wing spanwise symmetrical plane instantaneous velocity

图 10 中 n_1、n_2 为涡环法向，各级涡环将在 n_1、n_2 方向诱导流场速度，C1 涡环法向与输水方向之间夹角更大，流向分量更少，但对比两组扑翼尾迹区涡环可以发现，C1 涡环整体饱满，体积较大，即同级涡环涡强大于 M2，其翼面中心线诱导速度依然较大。如图 11 所示，C1 翼面中心线流速达到 0.7 m/s，高于 M2，在尾迹区形成更强烈的射流，因此判断随着形状参数 L_c 的增加，泵水流量会有进一步的提升。

为进一步分析不同扑动幅值对涡系结构的影响，以 Q 准则提取 M2 扑翼各扑动幅值尾迹区的涡系结构，如图 12 所示。扑翼尾迹区均呈现上下交错排列的涡环结构，对比图 10 可知，随着幅值的改变，涡环法向仍保持较好的一致性，这说明 L_c 参数对于流场速度诱导的影响占据主导，而幅值仅对各级涡环涡强产生影响，观察发现 4 组扑翼涡环沿着顺流方向涡环完整性逐渐破坏且体积均逐渐减小，即涡强逐渐减小，当扑动幅值为 0.12 m 时，靠近扑翼尾部的涡环最为饱满，体积最大，此时涡环涡强最大，但在第 3 对便失去了环状特性，而幅值为 0.06 m 时，由于扑动距离较小，涡环的产生没有得到充分的诱导，各级涡环的涡强最小，扑翼做功能力和能量转换较弱，因此泵水性能降低。



(a) A_{max}=0.12 m

(b) A_{max}=0.10 m

(c) A_{max}=0.08 m

(d) A_{max}=0.06 m

图 12　不同幅值的尾迹区涡系结构

Fig. 12　Vortex structure in flapping wing wake region

3.3　特征轮廓数值结果分析

根据前文参数设置，取 C2 尾鳍扑翼以及有着相同面积的矩形平板扑翼对比进行数值计算，设置给定静压入口、静压出口边界条件，扑动频率由 0.1 Hz 变化至 4 Hz，俯仰幅值 θ 为 $\pi/6$，升沉幅值 A_{max} 为 0.15 m。监测出口断面流速，至其稳定后，进行计算，结果如图 13、14 所示。

图 13 为 C2 与矩形扑翼的流量、扬程变化曲线，可以看出扑翼的流量与频率成正比，扬程则与频率

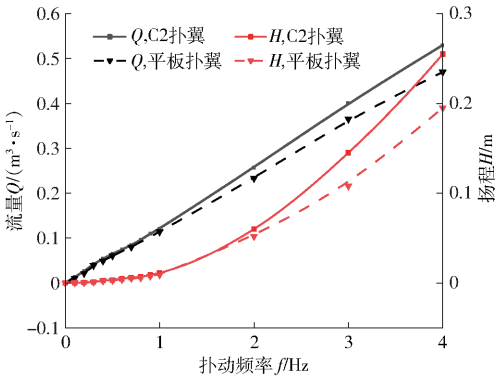


图 13 C2 与矩形扑翼的流量、扬程变化曲线

Fig. 13 Variation curves of flow and lift of C2 and rectangular flapping wing

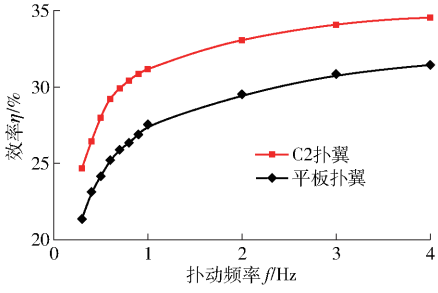


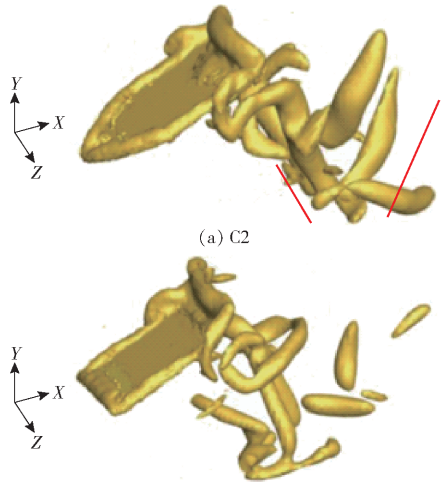
图 14 C2 与矩形扑翼的效率变化曲线

Fig. 14 Efficiency variation curves of C2 and rectangular flapping wing

的平方成正比,但不同轮廓特征的扑翼,水动力性能有着明显的差距,扑动频率仅为 1 Hz 下,C2 扑翼的流量为 0.120 4 m^3/s,相对于矩形扑翼的 0.113 9 m^3/s 提升 5.4%,扬程由 0.009 m 增至 0.011 3 m,相对提升 20.3%。

图 14 为 C2 与矩形扑翼的效率变化曲线,可以看出两种形状扑翼的效率与频率的变化规律大致相同,随着频率的增加,效率增加的趋势逐渐减缓,且不论何种频率工况下,C2 的泵水效率都略微大于矩形扑翼。综合对比分析,具有前缘形状以及尾部分叉结构的 C2 扑翼水动力性能优于矩形扑翼。

为了明确不同特征轮廓扑翼尾迹区涡系结构的变化,以 Q 准则提取了同一时刻 C2 与矩形平板两组扑翼尾迹区涡系结构。如图 15 所示,由于特征弦长引起的跨度变大,主涡的强度大于前缘诱导产生的涡,使得两组扑翼尾迹难以生成完整的涡环结构,能量损耗严重,对应扑翼效率由 M2 至 C2 逐渐降低。但是从涡的强度来看,C2 扑翼前缘与尾缘的涡强明显大于矩形扑翼,且集中在中部,从排列来看 C2 扑翼尾部涡环保持相对完整,如图 15a 中红线所示,依然有发展成双列反卡门涡街的趋势,这也使得 C2 扑翼能够产生更大的推力,提升输水流量,保证较高的泵水效率,进一步拓宽仿生泵水装置的高效区间。



(a) C2

(b) 矩形平板扑翼

图 15 不同扑翼的涡系结构

Fig. 15 Vortex structures of different flapping wings

4 实验验证

为验证不同几何参数扑翼的数值计算准确性,根据前文参数加工装置实物,在浙江水利水电学院水工大厅的循环水槽进行实验验证,如图 16 所示,装置架设在 0.35 m×0.7 m×3.5 m 的矩形流道上,实验时,为避免自由液面影响,循环水槽的水漫过流道。在流道进、出口打孔引压,外接到高精度单晶硅压差传感器上,量程 300 Pa,最小刻度 0.2 Pa,测量进出口的压差,并重复 4 次实验,取平均值,采用多普勒流速测量仪,监测出口断面流速,测量精度为 0.005 m/s,采样频率为 50 Hz,对出口断面 4 个点进行测量,并取平均值以保证数据的准确性,并通过电测法测量输入功率。所有的数据监测,都需要在扑翼运动 60 个周期后,确保流场稳定。

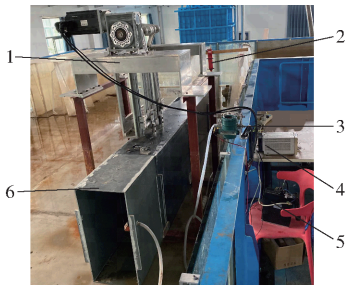


图 16 扑动水翼装置实验台

Fig. 16 Flapping hydrofoil device test bench

1. 扑动水翼装置 2. 多普勒流速测量仪 3. 单晶硅压差计 4. 变压器 5. 伺服驱动器 6. 矩形流道

实验综合误差包括系统误差和随机误差,其计算公式为

$$E_\eta = \pm\sqrt{E_{\eta\cdot S}^2 + E_{\eta\cdot R}^2} \tag{9}$$

其中

$$E_{\eta\cdot S} = \pm\sqrt{E_{Q\cdot S}^2 + E_{H\cdot S}^2 + E_{P\cdot S}^2} \tag{10}$$

$$E_{\eta\cdot R} = \pm\sqrt{E_{Q\cdot R}^2 + E_{H\cdot R}^2 + E_{P\cdot R}^2} \tag{11}$$

式中　$E_{Q\cdot S}$、$E_{H\cdot S}$、$E_{P\cdot S}$——测速仪、压差传感器、功率仪的系统误差

$E_{Q\cdot R}$、$E_{H\cdot R}$、$E_{P\cdot R}$——测速仪、压差传感器、功率仪的随机误差

系统误差具体参数如表 2 所示。

表 2　系统误差参数

Tab. 2　System error parameters

项目	设备	型号	系统误差/%
流量	流速仪	WIM－@ ADV	±1
扬程	压差传感器	3051	±0.2
功率	功率仪	VC6412D	±0.25

通过模型实验数据，采用概率统计方法统计总随机误差，最终计算得到实验的总不确定度 E_η 为 ±1.61%。

实验取 C2 与矩形平板扑翼进行对比，扑翼实物如图 17 所示。扑动频率为 0.1 ~ 0.7 Hz，每 0.1 Hz 变化一次。图 18 为两组扑翼实验流速及与 C2 仿真计算值的对比。



(a) 矩形平板　　(b) C2

图 17　扑翼实物图

Fig. 17　Physical pictures of flapping wing

由图 18 可以看出，实验结果与数值计算结果的变化趋势基本吻合，实验流速略微偏低的原因是流道加工装配存在漏洞，引起额外的能量损失。由图 18 可知，实验频率为 0.7 Hz 时，C2 扑翼的流速已经达到 28.44 cm/s，相对于矩形扑翼的 25.13 cm/s 提升 13.6%，这也说明在相同作用面积的约束下，具有前缘形状且分叉尾鳍式扑翼能够有效提升泵水性能。

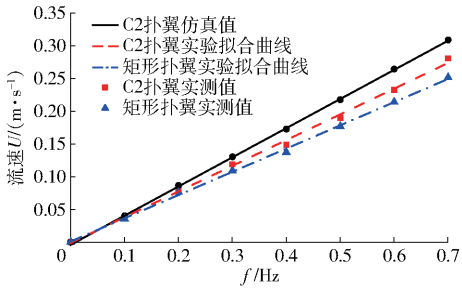


图 18　仿真与实验流速对比

Fig. 18　Comparison of simulation and test flow rates

5　结论

(1)设计了一种适用于平原细小枝杈河道大流量输水的扑翼型仿生泵水装置，有效提高了水体推进速度，增大了泵水流量，从而解决传统轴流泵站在超低扬程工况下效率低的问题。

(2)通过对不同几何参数扑翼的数值计算，可以明确特征弦长的增大，扑翼尾迹区涡环的涡强增大，对应周期内的平均推力系数也随之增加，能有效提升装置的流量，但是其涡环法向与流向夹角增大，导致其诱导速度分量减小，降低了扑翼的泵水效率。

(3)特征弦长对涡环法向的影响占据主导作用，而幅值仅影响同级涡环涡强；特征弦长增大，导致其效率极值点所对应的幅值增大。

(4)尾鳍(C2)和矩形扑翼对比泵水实验结果表明，仿鱼尾扑翼前缘特征在扑翼表面早期诱导并分离出较强的漩涡，尾缘部分能较好地保持涡环的完整性，显著提升其泵水性能；实验频率为 0.7 Hz 时，出口断面流速提升 13.6%，满足平原枝杈河道低扬程、大流量、高效率泵水的设计理念。

参　考　文　献

[1] 华尔天，陈万前，汤守伟，等. 小河道扑动水翼装置推水流动特性研究[J]. 农业机械学报，2022，53(8)：154－162.
HUA Ertian, CHEN Wanqian, TANG Shouwei, et al. Water pushing flow characteristics of flapping hydrofoil device in small river[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(8): 154－162. (in Chinese)

[2] 华尔天，汤守伟，陈万前，等. 摆动水翼的摆动方式对水体推进影响分析[J]. 水力发电学报，2022，41(4)：93－103.
HUA Ertian, TANG Shouwei, CHEN Wanqian, et al. Analysis on influence of swinging modes of swing hydrofoil on water propulsion[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2022, 41(4): 93－103. (in Chinese)

[3] 许益新，李一平，罗育池，等. 引水改善平原感潮河网水质效果评估[J]. 水资源保护，2019，35(6)：124－130.
XU Yixin, LI Yipin, LUO Yuchi, et al. Effect evaluation of water diversion to water quality improve in plain river network[J]. Water Resources Protection, 2019, 35(6): 124－130. (in Chinese)

[4] 廖炜，李璐，杨伟，等. 城镇化过程中的流域面源污染时空变化[J]. 长江流域资源与环境，2018，27(8)：1776－1783.
LIAO Wei, LI Lu, YANG Wei, et al. Spatio-temporal change of non-point source pollution loads in the process of urbanization [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2018, 27(8): 1776－1783. (in Chinese)

[5] 尚钊仪，张亚洲，戴晶晶，等. 昆山主城及周边区域活水畅流改善水环境方案研究[J]. 水资源保护，2017，33(6)：125－132.
SHANG Zhaoyi, ZHANG Yazhou, DAI Jingjing, et al. Study on water environment improvement scheme by living water flow in Kunshan main city and its surrounding areas[J]. Water Resources Protection, 2017, 33(6): 125－132. (in Chinese)

[6] 闫毓，袁赛瑜，唐洪武，等. 上海蕴南水利控制片河网水动力再造[J]. 河海大学学报(自然科学版)，2021，49(4)：329－334.
YAN Yu, YUAN Saiyu, TANG Hongwu, et al. Hydrodynamic reconstruction of Wennan river network in Shanghai City[J].

Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2021, 49(4): 329 - 334. (in Chinese)
[7] 潘小保,范子武,柳杨,等. 闸泵堰联合调度下水质改善试验研究[J]. 水利规划与设计,2020(3):125 - 129.
PANG Xiaobao, FAN Ziwu, LIU Yang, et al. Experimental study on water quality improvement under joint dispatch of sluice pump and weir[J]. Water Resources Planning and Design, 2020(3): 125 - 129. (in Chinese)
[8] 王海森,冯岚,李百炼,等. 基于 MIKE 11 的河网区域小型闸坝调控的水质响应模拟研究[J]. 环境科学学报,2022,42(8):314 - 324.
WANG Haisen, FENG Lan, LI Bailian, et al. Water quality response to regulation of small floodgates in river network region of Wuxi based on MIKE 11 model[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2022, 42(8): 314 - 324. (in Chinese)
[9] 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)
[10] 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)
[11] 谢丽华,王福军,何成连,等. 15 度斜式轴流泵装置水动力特性实验研究[J]. 水利学报,2019,50(7):798 - 805.
XIE Lihua, WANG Fujun, HE Chenglian, et al. Experimental investigation on hydrodynamic characteristics of a 15 degree slanted axial-flow pump system[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2019, 50(7): 798 - 805. (in Chinese)
[12] 胡笑奇,张建辉,夏齐霄,等. 柔性尾长对尾鳍式压电泵的影响[J]. 机械工程学报,2012,48(8):167 - 173.
HU Xiaoqi, ZANG Jianhui, XIA Qixiao, et al. Influence from length of flexible caudal-fin for caudal-fin-type piezoelectric pump[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(8): 167 - 173. (in Chinese)
[13] 孙秀军,王雷,桑宏强. "黑珍珠"波浪滑翔器南海台风观测应用[J]. 水下无人系统学报,2019,27(5):562 - 569.
SUN Xiujun, WANG Lei, SANG Hongqiang. Application of wave glider "black pearl" to typhoon observation in South China Sea[J]. Journal of Unmannde Undersea Systems, 2019, 27(5): 562 - 569. (in Chinese)
[14] 陈维山,夏丹,刘军考,等. 尾鳍运动行为对仿鱼机器人稳态游动性能的影响[J]. 机械工程学报,2011,47(3):1 - 7.
CHEN Weishan, XIA Dan, LIU Junkao, et al. Effect of kinematic behavior of caudal fin on fishlike robot propulsion during steady swimming[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(3): 1 - 7. (in Chinese)
[15] 徐建安,孙洪雨. 被动式摆动扑翼潮流能量获取技术实验研究[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)
[16] 严惠云,张浩磊,刘小民. 一种仿生鱼体自主游动的水动力学特性分析[J]. 西安交通大学学报,2016,50(2):138 - 144.
YAN Huiyun, ZHANG Haolei, LIU Xiaomin. Numerical analysis of hydrodynamics characteristics for autonomous swimming of bionic tunas[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2016, 50(2): 138 - 144. (in Chinese)
[17] 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.
[18] HOVER F S, HAUGSDAL ∅, TRIANTAFYLLOU M S. Effect of angle of attack profiles in flapping foil propulsion[J]. Journal of Fluids and Structures, 2004, 19(1): 37 - 47.
[19] SCHOUVEILER L, HOVER F S, TRIANTAFYLLOU M S. Performance of flapping foil propulsion[J]. Journal of Fluids and Structures, 2005, 20(7): 949 - 959.
[20] MACKOWSKI A W, WILLIAMSON C H K. Direct measurement of thrust and efficiency of an airfoil undergoing pure pitching[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2015, 765: 524 - 543.
[21] 陈刚,苑宗敬,张鸿志,等. 几何参数对三维仿生运动翼推进性能的影响研究[J]. 西安交通大学学报,2017,51(9):131 - 137.
CHEN Gang, YUAN Zongjing, ZHANG Hongzhi, et al. Influence of geometric parameters on the propulsion performance of three-dimensional bionic motion wings[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2017, 51(9): 131 - 137. (in Chinese)
[22] 曹永辉,朝黎明,丁浩,等. 混合翼型对扑翼推进性能影响分析[J]. 上海交通大学学报,2016,50(8):1228 - 1232.
CAO Yonghui, CHAO Liming, DING Hao, et al. Propulsive performance of complex flapping foils[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2016, 50(8): 1228 - 1232. (in Chinese)
[23] HANG X, ZHANG L, HE X. Numerical study of the thunniform mode of fish swimming with different Reynolds number and caudal fin shape[J]. Computers & Fluids, 2012, 68: 54 - 70.
[24] IONG Z, LIU X. Numerical investigation on evolutionary characteristics of the leading-edge vortex induced by flapping caudal fin[J]. Physics of Fluids, 2019, 31(12): 125117.
[25] 任芸,刘厚林,舒敏骅,等. 考虑旋转和曲率影响的 SST $k-\omega$ 湍流模型改进[J]. 农业机械学报,2012,43(11):123 - 128.
REN Yun, LIU Houlin, SHU Minhua, et al. Improvement of SST $k-\omega$ turbulence model and numerical simulation in centrifugal pump[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(11): 123 - 128. (in Chinese)
[26] POMIN H, WAGNER S. Navier - Stokes analysis of helicopter rotor aerodynamics in hover and forward flight[J]. Journal of Aircraft, 2002, 39(5): 813 - 821.
[27] 苏玉民,张曦,杨亮. 摆动尾鳍水动力性能的试验和数值研究[J]. 海洋工程,2012,30(3):150 - 158.
SU Yumin, ZHANG Xi, YANG Liang. Experimental and numerical study on hydrodynamic performance of a flapping caudal fin[J]. The Ocean Engineering, 2012, 30(3): 150 - 158. (in Chinese)
[28] 赵斌娟,谢昀彤,廖文言,等. 第二代涡识别方法在混流泵内部流场中的适用性分析[J]. 机械工程学报,2020,56(14):216 - 223.
ZHAO Binjuan, XIE Yuntong, LIAO Wenyan, et al. Adaptability analysis of second generation vortex recognition method in internal flow field of mixed-flow pumps[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56(14): 216 - 223. (in Chinese)