doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.10.053

水面矢量推进器仿生设计与试验

张仲志　吕建刚　宋　彬　高　飞
(军械工程学院车辆与电气工程系, 石家庄 050003)

摘要: 以蛇怪蜥蜴为仿生对象,基于蛇怪蜥蜴股骨旋转带动两脚踏水的高速运动行为,设计了水面仿生矢量推进器,增加了驱动力输出维数,实现了可控的托举力、推进力和转矩输出。结合 RNG $k-\varepsilon$ 湍流方程和 PISO 算法,构建推进器的流体动力学模型,获得了叶片径向和轴向的最优设计形状,推导了驱动力与叶片长度和宽度的数学函数。最后,搭建矢量推进器试验系统,验证了数值计算模型的正确性;进行两栖车辆样机试验,矢量推进器驱动车体实现了 10.6°仰角状态的滑水航行,为水面装置减阻提速提供了一种新思路。

关键词: 矢量推进器; 仿生结构; 力学性能; 试验
中图分类号: U664.3; Q811.6　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2016)10-0405-08

Bionic Design and Experiment of Water-surface Vector Propeller

Zhang Zhongzhi　Lü Jian'gang　Song Bin　Gao Fei
(*Department of Vehicle and Electrical Engineering*, *Ordnance Engineering College*, *Shijiazhuang* 050003, *China*)

Abstract: To evade predators, basilisk lizards can run across water surface with rolling pelvic to drive foot movement. Based on the mechanism of high-speed air-water interface movement, bionic water-surface vector propeller was designed according to bionic object basilisk lizards. With providing lift, thrust and moment, dimension of driving force was increased. For controlling the output of driving force, the influence of structure parameters on mechanical property was analyzed. Combined with standard $k-\varepsilon$ turbulence function and PISO algorithm, fluid dynamics model of bionic propeller was established to calculate the mechanical properties of vector propeller with different parameters. By analyzing the changes of mechanical characteristic curve with time, it was found that three-dimensional driving forces presented periodical variation. And the frequencies of driving forces were four times as much as those of rotation velocity. From comparison of the three-dimensional mechanical properties, the optimal axis-shape and diameter-shape of blade were obtained. Meanwhile, the functions between driving force and length and width of blade were derived with data fitting. By analyzing the distribution of impeller pressure and water volume, solid - liquid mutual action of impeller rotating at water-surface was presented. Finally, the experiment system of vector propeller was set up and the computed force was consistent with experiment result in general, therefore it was validated that the numerical calculation model was correct. In hydroplaning state on the surface of water, the resistance of high speed boat can be reduced and the top speed can reach 80 km/h. For transforming navigation state, a new amphibious vehicle with a pair of vector propellers mounted in the rear part was presented. Hydroplaning state of amphibious vehicle with pitch angle of 10.6° was realized, and the design provided a new thought for reducing resistance and improving velocity for water-surface device.

Key words: vector propeller; bionic structure; mechanical property; experiment

收稿日期: 2016-02-02　修回日期: 2016-03-07
基金项目: 国家部委项目(NHA15063)
作者简介: 张仲志(1989—),男,博士生,主要从事水面装置减阻提速研究,E-mail: shanshizhi@126.com
通信作者: 吕建刚(1964—),男,教授,博士生导师,主要从事车辆机电液控制及自动化研究,E-mail: lvjiangang1@sina.com

引言

水面是一个高柔性的面,可退让受到的任何作用力[1]。能够生活在水面的生物体中,质量小于 1 g 的依靠表面张力在水面运动,大多数质量大于 1 g 的则利用自身的浮力在水面做排水运动[2-3]。在做水面排水运动时,受到的兴波阻力与速度的 6 次方呈正比,形成了“兴波阻力墙”[4]。生物体速度一般较慢,如鸭子、麝鼠和老鼠[5-8],单纯提高推进力,速度增加并不显著。

但是,在质量大于 1 g 的动物中,蛇怪蜥蜴和北美鬣鳞蜥能够利用脚部冲击水面的反作用力,支撑身体质量而在水面快速运动[9]。这 2 种动物能够依靠踩踏水面和向后划腿,获取托举力和推进力,分别支撑质量和推动前进,同时产生一个转矩,维持身体平衡,保持向前运动的姿态[4,10-11]。

传统的水面装置推进方式为螺旋桨推进和喷水推进,以一维的推进力输出为主[12]。而蛇怪蜥蜴和北美鬣鳞蜥能够踏水获得托举力、推进力和平衡转矩,驱动力输出维数更多,且在同质量等级的动物中,水面运动速度更快[13-16]。因此,本文基于蛇怪蜥蜴的水面高速运动行为,设计水面仿生矢量推进器,提供三维驱动力,提高水面装置的运动速度。为了对推进器进行优化和控制,建立水面仿生矢量推进器的流体动力学模型,针对核心部件——叶片,获取其径向和轴向的最优设计形状,分析其长度、宽度与驱动力输出的数学函数。搭建推进器试验系统,验证数值计算模型的正确性,并进一步将推进器应用于两栖车辆,试验分析三维驱动力对两栖车辆航态和航速的影响。

1 水面仿生矢量推进器结构设计

蛇怪蜥蜴生活在南美洲的丛林之中,其大腿股骨围绕骨盆转动,然后带动两后腿交替踩踏水面,能够高速运动躲避敌害。蛇怪蜥蜴踩踏水面可分为下踏、后划和回收 3 个阶段。一只 87.7 g 蛇怪蜥蜴的一个踩踏周期如图 1 所示,图 1a 为下踏阶段,脚掌平行于水面,然后迅速向下踏水;图 1b 显示脚部向下冲击水面后,脚掌旋转并向后划动;图 1c 为腿部回收阶段,快速向上移出水面准备再开始下一次踩踏。图 2 给出了运动过程中,蛇怪蜥蜴膝盖、脚踝和脚掌的轨迹。

蛇怪蜥蜴脚掌踩踏水面,通过固液作用为身体提供托举力、推进力和平衡转矩。一只 1 g 的蛇怪蜥蜴能够产生最大 225% 体重的托举力脉冲,一只 200 g 的蛇怪蜥蜴能够产生最大 111% 体重的托举力脉冲[13]。GLASHEEN 等[13]通过试验,给出了蛇怪蜥蜴下踏阶段脚掌托举力和推进力的表达式

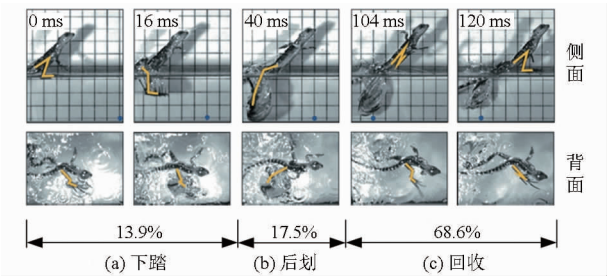


图 1 蛇怪蜥蜴踏水阶段划分图[12]

Fig. 1 Kinematic phases of a stride for basilisk lizard

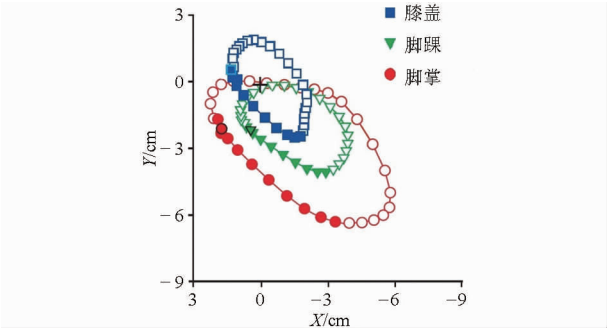


图 2 蛇怪蜥蜴关节的运动轨迹

Fig. 2 Joints movement tracks of basilisk lizard

$$D_l(t) = C_D^*(0.5S\rho_w u^2 + S\rho_w g h(t))\sin\chi \quad (1)$$

$$D_t(t) = C_D^*(0.5S\rho_w u^2 + S\rho_w g h(t))\cos\chi \quad (2)$$

式中 $D_l(t)$、$D_t(t)$——脚掌下划阶段 t 时刻的托举力和推进力

C_D^*——脚掌模型系数

S——脚掌面积 ρ_w——水的密度

u——脚掌速度 g——重力加速度

$h(t)$——脚掌与液面的水下距离

χ——t 时刻驱动力与液面的夹角

模拟蛇怪蜥蜴的踏水高速运动机理,设计了水面仿生矢量推进器,如图 3 所示。推进器由轮毂、轮辐和叶片组成。轮毂与驱动轴固连,轮辐将动力传递至叶片,叶片与液体相互作用提供托举力、推进力和转矩,对应蛇怪蜥蜴脚掌与水面的固液作用。推进器围绕轮轴进行旋转运动,模仿了蛇怪蜥蜴股骨在骨盆处的转动,如图 3 所示,θ_1 为推进器轮辐相对水面的转角,θ_2 为蛇怪蜥蜴盆骨处转角。

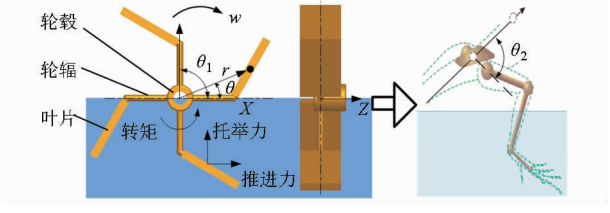


图 3 水面仿生矢量推进器结构图

Fig. 3 Schematic of bionic water-surface vector propeller

叶片上任意一点距离中心点的距离为 r，该点和中心点的连线与 X 轴之间夹角为 θ（顺时针为正），推进器顺时针旋转，转速为 w。当 $0° < \theta < 45°$ 时，该点竖直速度 $|v_y|$ 大于水平速度 $|v_x|$，即入水时叶片以竖直向下运动为主；$45° \leqslant \theta < 135°$ 时，$|v_x| \geqslant |v_y|$，叶片以水平运动为主；$135° \leqslant \theta < 180°$ 时，$|v_x| \leqslant |v_y|$，出水时以竖直向上运动为主，与蛇怪蜥蜴踏水各阶段的脚掌运动趋势相对应，如图 2 所示。

随年龄、外部环境等的变化，蛇怪蜥蜴对踏水运动进行着调整控制。一只 90 g 左右的蛇怪蜥蜴冲击水面的过程占整个运动周期的 12.6% ~ 22.6%[6]，其他部分为后划和回收运动，在相对早期的年龄阶段，蛇怪蜥蜴体重较小，拥有更强的后腿运动控制能力。

三维驱动力的输出控制是矢量推进器应用于水面装置的前提。因此，本文针对矢量推进器的核心部件——叶片，获取其径向和轴向的最优设计形状，分析其长度、宽度与驱动力输出的数学函数，并进一步开展推进器的性能试验和应用试验分析。

2　数值计算模型

建立水面仿生矢量推进器的流体动力学模型，针对叶片的轴向形状、径向形状、长度 a 和宽度 b 进行数值计算，相关结构参数如图 4 所示。轴向形状指沿 Z 轴方向的形状，即叶片宽度对应的形状；径向形状指叶片长度对应的形状。叶片的轴向和径向形状分别采用平板型、半圆型和三角型设计，如图 4 所示。

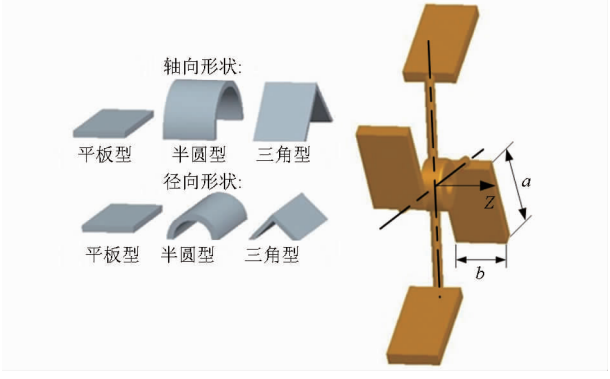


图 4　结构参数示意图

Fig. 4　Schematic of structure parameters

运动过程中，推进器周围流体为非定常湍流，计算采用 RNG $k-\varepsilon$ 模型[17-19]。相关连续方程、动量方程、湍动能 k 和湍流耗散率 ε 方程可表示为：

连续方程为

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \tag{3}$$

式中　ρ——流体密度　　t——时间

x_i——方向标量（$i = 1,2,3$），x_1、x_2、x_3 分别对应 X、Y、Z 方向

u_i——速度分量时均值（$i = 1,2,3$），u_1、u_2、u_3 分别对应 X、Y、Z 方向

动量方程为

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j}\right) + S_i \tag{4}$$

式中　x_j——方向标量（$j = 1,2,3$）

u_j——速度分量时均值（$j = 1,2,3$）

p——压力时均值　　μ——动力粘度

S_i——广义源项（$i = 1,2,3$），S_1、S_2、S_3 分别对应 X、Y、Z 方向

$k-\varepsilon$ 方程为

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\alpha_k \mu_{eff} \frac{\partial k}{\partial x_j}\right) + G_k + \rho\varepsilon \tag{5}$$

$$\frac{\partial(\rho\varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho\varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\alpha_\varepsilon \mu_{eff} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j}\right) + \frac{C_{1\varepsilon}^*}{k} G_k - C_{2\varepsilon}\rho \frac{\varepsilon^2}{k} \tag{6}$$

式中　μ_{eff}——等效粘度

G_k——湍动能产生项

α_k、α_ε、$C_{1\varepsilon}^*$、$C_{2\varepsilon}$——模型系数

忽略轮辐、轮毂与液体的固液作用，建立推进器的三维模型，流体计算域采用局部加密和定向比例放大的方式划分网格，增强迭代收敛性，如图 5 所示。流场上侧为空气，下侧为水，推进器轮轴位于水平面。

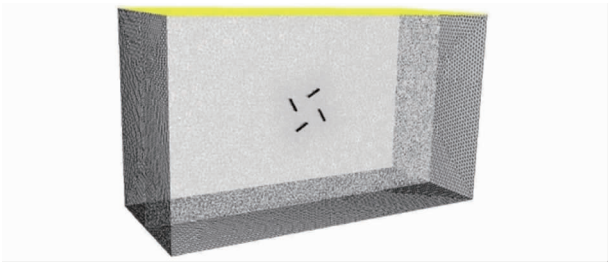


图 5　推进器三维模型

Fig. 5　3D model of vector propeller

3　数值计算结果

叶片是推进器的核心部件，其形状、长度、宽度等结构参数直接影响着推进器的力学性能。因此，本文从叶片轴向形状、径向形状、长度和宽度 4 个方面进行数值计算和数据拟合，获取结构参数对力学性能的影响规律及相应的数学函数。基本参数：推进器顺时针旋转，叶片与轮辐固定角 θ_2 为 60°，轮辐长度 l 为 0.16 m，叶片长度 a 为 0.15 m，叶片宽度 b 为 0.08 m，转速 w 为 60 r/min。

3.1 叶片轴向形状

进行平板型、三角型和半圆型 3 种轴向叶片形状的推进器力学性能分析，驱动力随时间的变化曲线如图 6 所示。

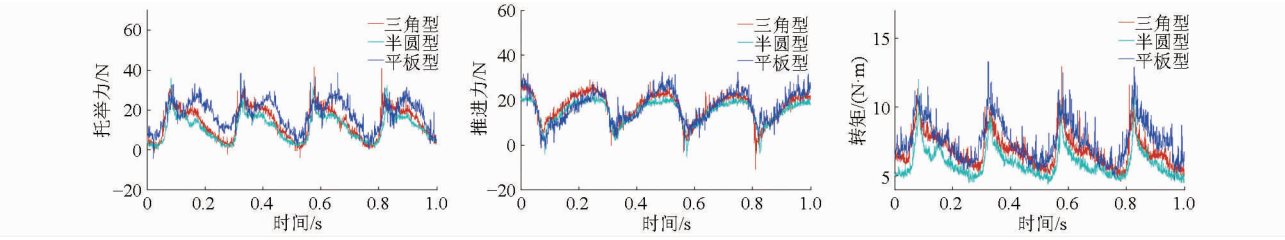


图 6 不同轴向叶片形状的推进器力学特性曲线

Fig. 6 Force characteristic curves of propeller with different axis-shape blades

由图 6 可得：采用平板型、三角型和半圆型叶片的推进器驱动力变化周期相同。当 $w = 60$ r/min 时，驱动力周期为 0.25 s，频率为 4 Hz，是转速的 4 倍。在 $t = 0.25n + 0.08s\ (n = 0, 1, 2, 3)$ 时，叶片砰击水面，托举力与转矩同时出现波峰，而此时推进力为波谷，相位角相差 180°。托举力和转矩在峰值处出现作用力脉冲，而推进力在峰值处平滑过渡。

以驱动力对时间的均值作为特征值，进行力学性能对比分析，力学性能随叶片轴向形状的变化曲线如图 7 所示。叶片轴向形状采用平板型驱动力最大，托举力、推进力、转矩分别为 17.12 N、17.59 N、7.49 N·m；采用半圆型驱动力最小，托举力、推进力、转矩分别为 11.33 N、14.43 N、5.82 N·m，所以最优叶片轴向形状为平板型。原因是三角型和半圆型轴向形状的叶片存在前侧边缘，起到了导流缓冲作用，因此驱动力数值较小，叶片表面压力分布如图 8 所示，叶片边缘压力较高，部分区域大于 3 000 Pa，位于运动方向后侧的中心压力较低。

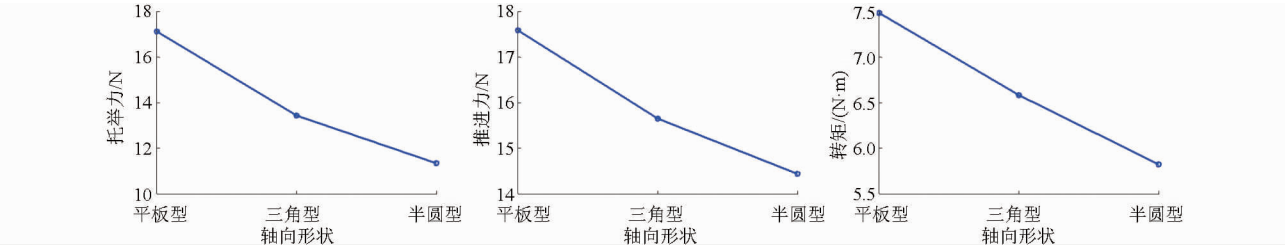


图 7 力学性能随叶片轴向形状的变化曲线

Fig. 7 Changing curves of mechanical properties with axis-shape of blade

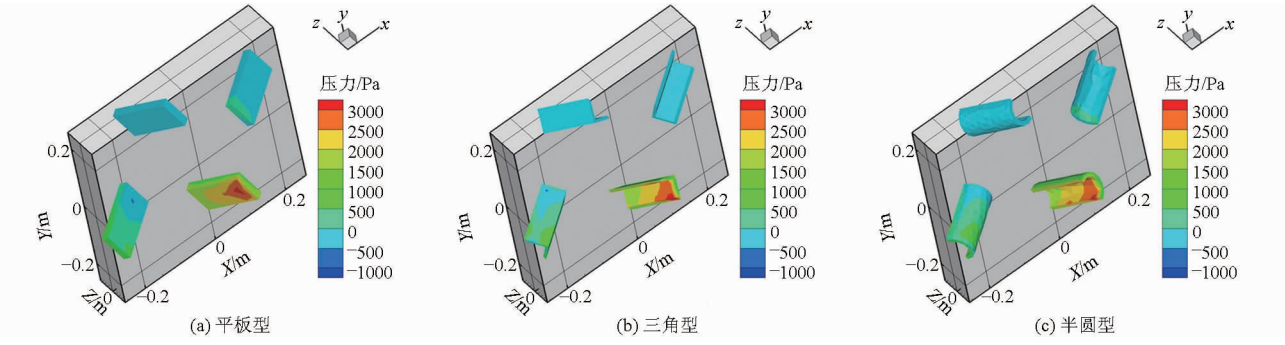


图 8 叶片压力随轴向形状的变化

Fig. 8 Changes of pressure with axis-shape of blade

3.2 叶片径向形状

进行平板型、三角型和半圆型 3 种径向叶片形状的推进器力学性能分析，驱动力随时间的变化曲线如图 9 所示，力学性能的变化曲线如图 10 所示。

由图 10 可得：叶片径向形状采用平板型托举力为 17.12 N，三角型为 5.35 N，半圆型为 −1.24 N，平板型最大，三角型较小，方向均竖直向上，半圆型为负值，方向竖直向下，因此以上浮为主时宜选用平板型，以下潜为主时宜选用半圆型；采用平板型推进力为 17.59 N，三角型为 15.72 N，半圆型为 15.49 N，因此以推进为主时宜选用平板型；采用平板型转矩为 7.49 N·m，三角型为 7.44 N·m，半圆型为 7.69 N·m，因此当水面装置前侧抬起，获取大攻角，以排水至滑水的航态转变为主时，宜选用半圆型。

三角型和半圆型叶片将液体带出了水面，液体

从上侧叶片内流出需要一定的时间，带出的液体对叶片存在向下和向后的反作用力，减小了托举力和推进力，推进器转动的水面气液两相分布如图 11 所示。三角型和半圆型叶片对固液相互作用有一定的缓冲作用，因此三角型和半圆型的托举力与转矩峰值时间滞后，如图 9 所示。

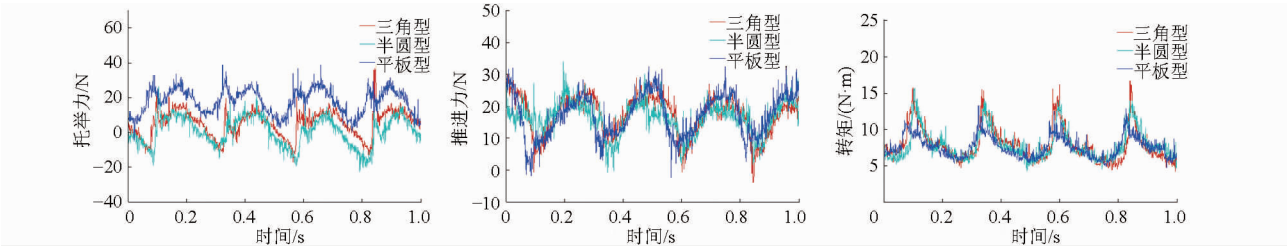


图 9　不同径向叶片形状的推进器力学特性曲线

Fig. 9　Force characteristic curves of propeller with different diameter-shape blades

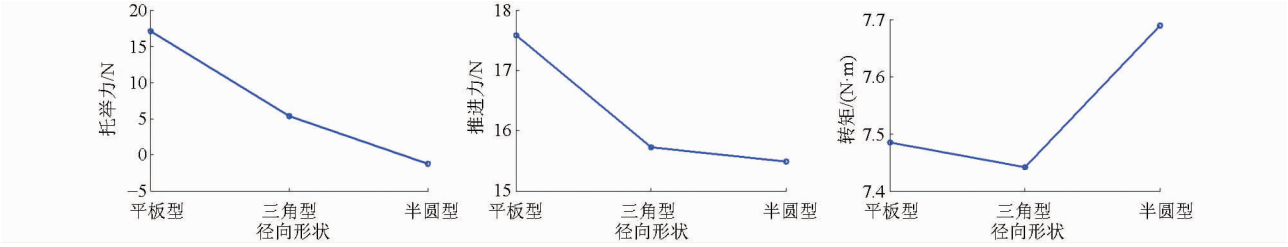


图 10　力学性能随叶片径向形状的变化曲线

Fig. 10　Changing curves of mechanical properties with diameter-shape of blade

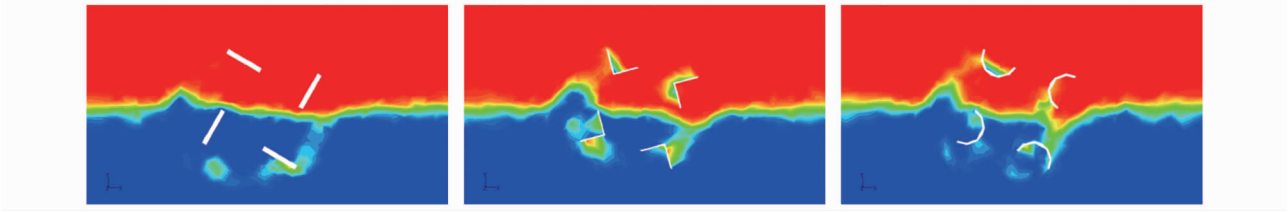


图 11　不同径向形状叶片的推进器转动两相图

Fig. 11　Water volume color contours of propeller rotation with different diameter-shape blades

3.3　叶片长度及宽度

叶片长度 a 从 0.10 m 至 0.20 m 增加，相应的力学性能数据点 (a_i, F_i)，$i=0,1,\cdots,10$，如图 12 所示。

结合数据点，采用最小二乘法进行曲线拟合，由物理意义得曲线过原点。由目标函数 $\min I=\sum_{i=0}^{10}(F_i-f(a_i))^2$，得到：

托举力　$F_l=109.02a$

推进力　$F_t=4\,681.35a^3-1\,088.20a^2+172.55a$

转矩　$F_m=2\,993.93a^3-618.50a^2+73.95a$

叶片长度从径向外侧增加，同转速下，径向外侧转速相对内侧速度更快，固液作用更剧烈，叶片外侧压力更大，所以推进力和转矩增长速度提高。而托举力与叶片的砰击过程相关，与推进力和转矩的变化趋势不同。浸入水中叶片固液作用强度如图 13 中右下角位置的叶片压力所示，当 $a=0.1$ m 时，叶片径向外侧压力达到 2 500 Pa；当 $a=0.15$ m 时，叶片外侧压力小部分达到 3 000 Pa；当 $a=0.2$ m 时，叶片外侧压力大部分超过 3 000 Pa，外侧压力随长度的增加而增加。

叶片宽度 b 从 0.03 m 至 0.10 m 增加，相应的力学性能数据点 (b_i, F_i)，$i=0,1,\cdots,8$，如图 14 所

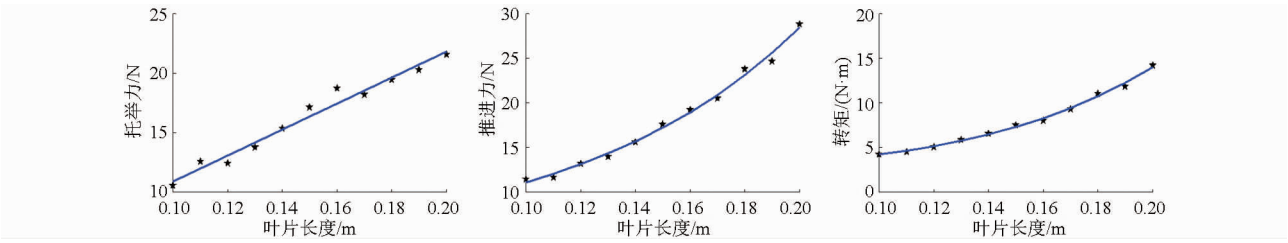


图 12　力学性能随叶片长度的变化曲线

Fig. 12　Changes of mechanical properties with length of blade

示。在叶片宽度 $b=0.03$ m 时三维驱动力最小,托举力为 6.58 N,推进力为 8.46 N,转矩为 3.15 N·m;在 $b=0.1$ m 时三维驱动力最大,托举力为 22.38 N,推进力为 22.87 N,转矩为 9.76 N·m。

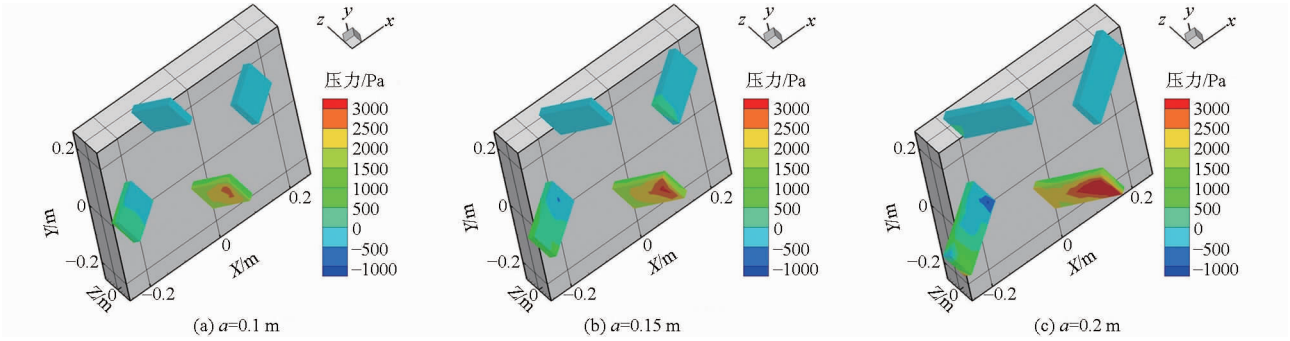


图 13 不同长度叶片压力分布

Fig. 13 Pressure distributions under different lengths of blade

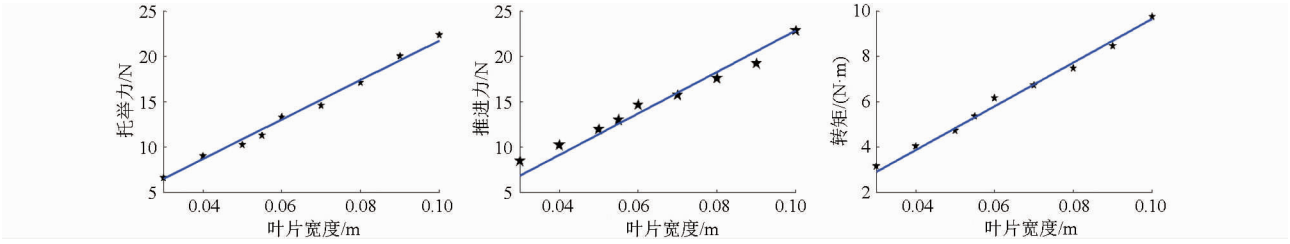


图 14 力学性能随叶片宽度的变化曲线

Fig. 14 Changing curves of mechanical properties with width of blade

结合数据点,采用最小二乘法进行曲线拟合,由物理意义得曲线过原点。由目标函数 $\min I=\sum_{i=0}^{8}(F_i-f(b_i))^2$,得到:

托举力 $F_l=217.49b$

推进力 $F_t=228.74b$

转矩 $F_m=96.65b$

三维驱动力与叶片宽度呈线性关系,原因为压力梯度沿轴向宽度变化较小,梯度变化主要在径向上,如图 13 所示。

4 试验验证

4.1 推进器力学特性试验

为获得水面仿生矢量推进器的力学特性,验证本文所用数值计算模型的正确性,搭建了推进器试验系统。试验系统由推进器支架、水平导轨及传感器模块、竖直导轨及传感器模块、矢量推进器、水槽和采集设备 6 部分组成,如图 15 所示。

试验中所用推进器的主要结构参数如下:叶片轴向及径向形状为平板型,叶片与轮辐固定角 $\theta_2=60°$,轮辐长度 $l=0.16$ m,叶片长度 $a=0.15$ m,叶片宽度 $b=0.055$ m。叶轮轴定位在水平面上,叶轮转速 $w=60$ r/min,托举力和推进力试验数据与数值计算数据对比如图 16 所示。

在 $w=60$ r/min 时,推进器托举力试验平均值为 9.16 N,推进力试验平均值为 15.18 N;托举力数值计算平均值为 11.32 N,推进力数值计算平均值为 12.99 N。试验曲线与数值计算曲线周期均为 0.25 s,频率为 4 Hz,托举力与推进力的峰值相位相差 180°,与数值计算结果相同。托举力试验值较数值计算值小 19.08%,推进力试验值较数值计算值大 14.42%。试验数据与数值计算结果误差在合理范围内,验证了数值计算模型的正确性。



图 15 试验系统

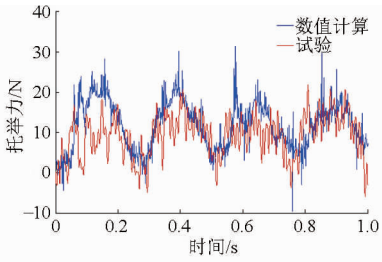
Fig. 15 Test system

1. 推进器支架 2. 水平导轨 3. 矢量推进器 4. 水槽 5. 竖直导轨 6. 采集设备

试验数据与数值计算数据存在偏差的原因为:数值计算仅考虑叶片与流体相互作用,忽略了轮毂和轮辐的影响;数值计算中叶片模型为刚体,试验中叶片为 0.001 m 厚不锈钢板,固液作用过程中存在柔性形变。

4.2 两栖车辆试验

测试推进器的力学特性,将推进器应用于两栖



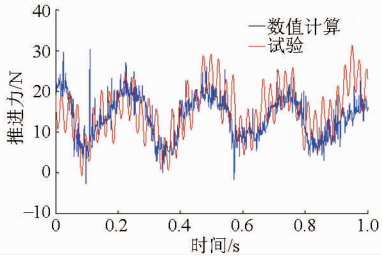
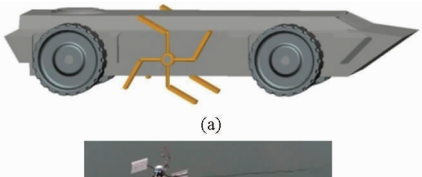


图 16　试验与数值计算数据对比

Fig. 16　Data comparison of experiment and numerical calculation

车辆。小长宽比、肥线型体的两栖车辆在水面排水航行，速度限制在 15 km/h 以下。高速艇能够在水面滑水航行，减小了阻力，最高速度可达 80 km/h[20-22]，改变车体航态是两栖车辆减阻提速的可行方案[4,23]。矢量推进器能够提供三维驱动力，有助于模仿高速艇改变两栖车辆航态。新型两栖车辆由轮式车辆和一对矢量推进器组成，推进器轮轴位于车体中后部，如图 17 所示。


(a)


(b)

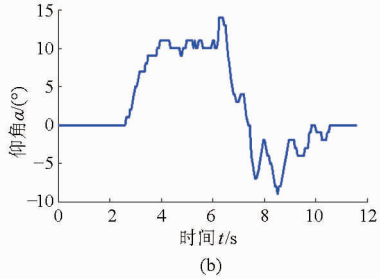
图 17　两栖车辆结构图

Fig. 17　Structure diagrams of amphibious vehicle

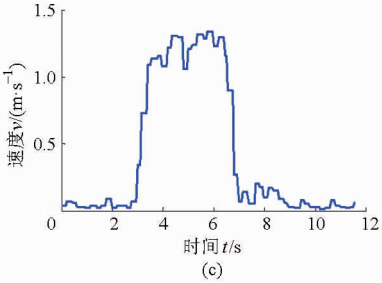
进行两栖车辆样机试验，实现了由排水至滑水的航态转变，如图 18a 所示。车体尺寸为 0.7 m × 0.31 m × 0.08 m，推进器轮轴到车尾距离为 0.135 m，推进器轮毂直径为 0.04 m，轮辐长度为 0.03 m，叶片长度为 0.06 m，宽度为 0.051 m。综合运用陀螺仪和加速度计获取车体的仰角，运用 NEO-6M 型 GPS 模块获取车体的运动速度。车体保持直线行驶，试验数据如图 18b 和图 18c 所示。

由数据曲线可得：仰角 α 初始值为 0°、速度 v 初始值为 0.02 m/s，车体从 2.59 s 开始加速，在 3.9 s 时仰角提高至 11°，速度提高至 1.16 m/s，车体进入滑水航态。3.9 ~ 6.38 s 车体滑水稳态航行，平均速度为 1.24 m/s，平均仰角为 10.6°。在 6.38 s 主动去除动力，速度经过 0.62 s 迅速下降至 0.07 m/s，仰角迅速减小并振荡，经过 5 个波谷后稳定在 0°，车体静止。综上，矢量推进器能够提供推进力，驱动两栖车辆前进；能够提供转矩，实现两栖车辆航态由排水向滑水转变。


(a)



(b)



(c)

图 18　两栖车辆滑水航态

Fig. 18　Hydroplaning state of amphibious vehicle

5　结论

（1）水面仿生矢量推进器能够提供托举力、推进力和转矩三维驱动力，获得了驱动力的力学特性，其中频率是转速的 4 倍。

（2）构建推进器的流体动力学模型，获得了叶片径向和轴向的最优设计形状，推导出了驱动力与叶片长度和宽度的数学函数。通过压力和两相分布，分析了物理参量影响固液作用过程的机理。

（3）通过矢量推进器试验，验证了数值计算模型的正确性。新型推进器改变了两栖车辆航态，实现了两栖车辆样机 10.6°仰角和 1.24 m/s 速度下的车体滑水航行，为水面装置减阻提速提供了一种新思路。

参 考 文 献

1 HSIEH S T, LAUDER G V. Running on water: three-dimensional force generation by basilisk lizards[J]. PNAS, 2004, 101(48):16784 - 16788.

2 KELLER J B. Surface tension force on a partly submerged body[J]. Physics of Fluid, 1998, 10(11):3009 - 3010.

3 HU D L, CHAN B, BUSH J W M. The hydrodynamics of water strider locomotion[J]. Nature, 2003, 424:663 - 666.

4 白向华,吕建刚,郭劭琰,等. 基于蛇怪蜥蜴踏水机理的仿生叶轮负载性能分析[J]. 华中科技大学学报,2015,43(2):76 - 80.
BAI Xianghua, LÜ Jian'gang, GUO Shaoyan, et al. Performance analysis of bionic impeller under different loads based on mechanism of basilisk lizard treading water[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology, 2015, 43(2):76 - 80. (in Chinese)

5 GLASHEEN J, MCMAHON T. A hydrodynamic model of locomotion in the basilisk lizard[J]. Nature, 1996, 38:340 - 342.

6 PRANGE H D, SCHMIDT N K. The metabolic cost of swimming in ducks[J]. Journal of Experimental Biology,1970,53(3):763 - 777.

7 FISH F E. Aerobic energetics of surface swimming in the muskrat *Ondatra zibethicus*[J]. Physiological Zoology, 1982,55(2):180 - 189.

8 FISH F E, BAUDINETTE R V. Energetics of locomotion by the Australian water rat (*Hydromys chrysogaster*): a comparison of swimming and running in a semi-aquatic mammal[J]. Journal of Experimental Biology,1999,202(4):353 - 363.

9 GLENNA T C, TYSON L H, ANDREW A B. Western and clark's grebes use novel strategies for running on water[J]. The Journal of Experimental Biology,2015,218(8):1235 - 1243.

10 HSIEH S T. Biomechanics of locomotion at the air-water interface[D]. Cambridge:Harvard University:2005.

11 GLASHEEN J, MCMAHON T. Vertical water entry of disks at low Froude number[J]. Physics of Fluid,1996, 8(8):2078 - 2083.

12 勒栓宝,沈洋,王东,等. 基于数值试验及实船试航的喷水推进器改型设计[J]. 船舶力学,2015,19(11):1312 - 1317.
JIN Shuanbao, SHEN Yang, WANG Dong, et al. Remodel design of waterjet with CFD and its sea trial[J]. Journal of Ship Mechanics, 2015,19(11):1312 - 1317. (in Chinese)

13 GLASHEEN J, MCMAHON T. Size-dependence of water-running ability in basilisk lizard[J]. Journal of Experimental Biology, 1996, 99(12):2611 - 2618.

14 BUSH J W M, HU D L. Walking on water: biolocomotion at the interface[J]. Annual Review of Fluid Mechanics,2006,38:339 - 369.

15 MARSHALL N J, DIEBEL C. 'Deep-sea spiders' that walk through the water[J]. Journal of Experimental Biology,1995, 198(6):1371 - 1379.

16 HSIEH S T. Three-dimensional hindlimb kinematics of water running in the plumed basilisk lizard (*Basiliscus plumifrons*)[J]. Journal of Experimental Biology, 2003, 206(23):4363 - 4377.

17 郭涛,张立翔. 混流式水轮机尾水管近壁湍流特性和流场结构研究[J]. 农业机械学报,2014,45(9):112 - 118.
GUO Tao, ZHANG Lixiang. Numerical study of swirling flow fields in francis turbine under small opening condition[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014,45(9):112 - 118. (in Chinese)

18 YAKHOT V, ORSZAG S A. Renormalization group analysis of turbulence: basic theory[J]. Journal of Scientific Computing, 1986,1(1):3 - 11.

19 王福军. 流体机械旋转湍流计算模型研究进展[J]. 农业机械学报,2016,47(2):1 - 14.
WANG Fujun. Research progress of computational model for rotating turbulent flow in fluid machinery[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016,47(2):1 - 14. (in Chinese)

20 符妃. 半滑行状态游艇艇型优化研究[D]. 广州:华南理工大学,2014.
FU Fei. Research on the optimizing hull form of semi-planing yacht[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2014. (in Chinese)

21 NAGAI T, YOSHIDA Y. Estimation of resistance, trim and draft of planing craft[J]. Ship Technology Research, 1993, 40(3): 133 - 137.

22 CHENG X. Study of planning hydrodynamics using strips of transversely variable pressure[J]. Journal of Ship Research, 1994, 38(1):30 - 41.

23 李莉,王宪成,韩树,等. 两栖装甲车辆兴波阻力的计算及流场分析[J]. 兵工学报,2010,31(8):1102 - 1105.
LI Li, WANG Xiancheng, HAN Shu, et al. Calculation of wave-making resistance and analysis of flow field for amphibious armored vehicle[J]. Acta Armamentarii, 2010, 31(8):1102 - 1105. (in Chinese)