

海龟柔性前肢仿生推进研究

张铭钧¹, 刘晓白¹, 徐建安¹, 储定慧², 闫娜¹

(1. 哈尔滨工程大学机电工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001; 2. 中国舰船研究院, 北京 100192)

摘要: 为探讨水翼法推进方式, 进行了海龟柔性前肢仿生技术研究. 基于水翼法运动解析, 研究了海龟柔性水翼的弦向形变特征、反卡门涡街脱泻及斯特劳哈尔数等, 推算出水翼尾涡脱泻的斯特劳哈尔数位于 $0.2 \sim 0.45$ 之间, 雷诺数位于 $3 \times 10^2 \sim 3 \times 10^4$ 之间; 根据海龟水翼粘弹本构特性, 研制了半豁式仿生柔性水翼, 并对其进行柔性形变和组织模态分析. 通过水下仿生实验平台进行了半豁式柔性水翼和全豁式刚性水翼推进的直航、转艏性能对比实验, 实验结果显示, 虽然柔性水翼只有在较高 ω_1 值拍动时的推进效率才高于刚性水翼, 但其速度增长率却始终高于刚性水翼; 并且随着 ω_1 值的增大, 柔性水翼对于样机速度减振方面的作用一直存在且越来越明显. 实验研究结果为柔性水翼操纵与控制研究提供了技术基础.

关键词: 水翼法推进; 柔性形变; 模态分析

中图分类号: TP242.2

文献标识码: A

文章编号: 1002-0446(2011)-02-0229-08

Bionic Research on Turtle's Flexible Forelimb Propulsion

ZHANG Mingjun¹, LIU Xiaobai¹, XU Jian'an¹, CHU Dinghui², YAN Na¹

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China;

2. China Ship Research and Development Academy, Beijing 100192, China)

Abstract: In order to investigate the hydrofoil propulsion method, the bionic technology of the turtle's flexible forelimbs is studied. Based on the kinematical analysis of turtle hydrofoil, the chordwise deformation characteristics, the reverse Karman vortex street shedding, and the Strouhal number of flexible hydrofoil are studied, and then it is calculated that the Strouhal number is between 0.2 and 0.45, the Reynolds number is from 3×10^2 to 3×10^4 . According to the viscoelastic constitutive property of turtle hydrofoil, the half-iliac bionic flexible hydrofoil is developed, and its flexible deformation as well as tissue mode are analyzed. By use of the underwater bionic experimental sample, the direct navigation and yawing performance contrast tests of bionic sample with the half-iliac flexible hydrofoil and whole-iliac rigid hydrofoil are conducted respectively. The experiments' results show that, however the propulsion efficiency of flexible hydrofoil is higher than the rigid one only moving at the high value of ω_1 , the sample's acceleration when propelled by the flexible hydrofoil is higher than the rigid one all the time. And along with the increasing of ω_1 , the function of flexible hydrofoil to reduce the velocity vibration of bionic sample, always exists and becomes more and more obvious. These experiments' results provide significant technical foundation for the control and manipulation study of flexible hydrofoil in the future.

Keywords: hydrofoil propulsion; compliant deformation; modal analysis

1 引言 (Introduction)

仿生推进是当前水下推进技术研究领域的热点之一, 它为研制不同结构与功能的水下机器人提供了新思路. 有“活化石”之称的两栖爬行动物——海龟 (turtle), 在海洋中已经生活了 1 亿年, 其独特的前肢水翼法推进为水中生物主要推进方式之一, 具有灵活性高、噪声低、涡流利用率高、姿态控制独特等优点^[1], 将这种推进方式应用于小尺寸、低雷诺数下的微型水下航行体 (MAUV) 推进中, 为丰

富 MAUV 的驱动与控制方式, 提供了较好的技术基础.

海龟水翼法推进方式的独到之处在于各种运动的主动动力皆来源于翼状前肢的上下挥拍, 并不断改变其前缘的上翘与下沉姿态, 使水流产生反作用力推动身体波动运行. 这种推进方式从生物学角度融合了动物飞行和鱼类游动两种运动形式, 基本动作更接近于扑翼飞行, 故得名“水翼法”游动, 其流线型的运动执行器被称为“水翼”.

作者所在课题组以成年太平洋绿海龟为生物原型,通过活体追踪实验,研究了海龟水翼法推进机理,获取了运动周期关联参数^[2]。本文在此基础上,研究海龟柔性水翼运动的弦向形变、尾涡脱泻及斯特劳哈尔数等流体特征,研制一种半髂式仿生柔性水翼,并对其进行柔性形变和组织模态分析。通过水下实验样机平台进行了柔性水翼和刚性水翼的水下推进性能对比实验,以研究柔性水翼在增加推力及速度减振方面的特性和规律,为柔性水翼操纵与控制研究提供技术基础。

2 水翼推进机理解析 (Analysis on the hydrofoil propulsion principle)

2.1 水翼体构造

通过活体实验分析得知,海龟水翼呈桨状,投影更接近于镰刀型,其外侧各具 1 个钩爪,如图 1 所示。水翼由前缘骨质部分和后缘软组织部分组成,末端退化为角质翅型。前缘骨骼由肩胛骨和鸟喙骨驱动进行上下挥拍,后缘软组织在运动中处于随动状态调节来流方向。水翼骨骼构成如图 2 所示,分为大臂、前臂和掌腕 3 部分,其中大臂由粗壮的肱骨构成,前臂由尺骨、桡骨构成,掌腕由腕骨、掌骨和趾骨构成。海龟肱骨、桡骨较粗短(绿海龟约为 0.1 m)而趾骨细长,原因在于肱骨、桡骨灵活性退化而趾骨需要在展开时支撑角质翅纹斑鳞,形成具有足够击水面积的翅型水翼末端。此外,水翼弦向横切面沿来流方向具有类机翼的流线型,可减小流体涡流阻力。



图 1 海龟水翼法推进

Fig.1 Turtle hydrofoil propulsion

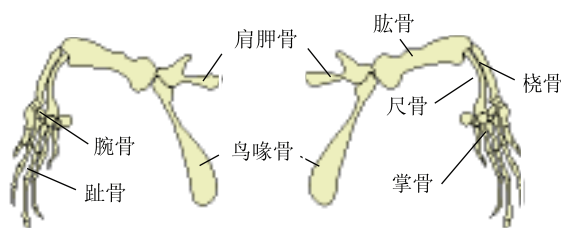


图 2 海龟水翼骨骼构成

Fig.2 The skeleton structure of turtle hydrofoil

2.2 驱动力产生

海龟水翼法游动与昆虫扑翼运动类似,采用非常流控制的周期性运动方式^[3],只是运动频率较低(小于 1 Hz)。每个水翼运动周期分为下拍、俯旋、上挥和仰旋 4 个阶段,其中下拍和上挥为推进作用阶段。鉴于活体实验中测得绿海龟水翼展弦比大于 3,本文弦向简化仿生水翼为近似 2 维平板,其运动受力如图 3 所示。

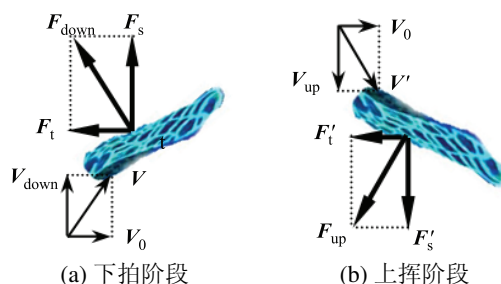


图 3 水翼运动受力图

Fig.3 The force diagram of hydrofoil motion

将仿生水翼置于水平流速为 V_0 的单向无黏非可压缩流场中,忽略水翼运动所引起的流场瞬态变化,水翼相对来流以负迎角进行下拍,如图 3(a) 所示。此时,流场相对于水翼将获得一个竖直向上的速度 V_{down} ($V_{down} > V_0$),并经与 V_0 矢量叠加得到水流相对水翼的矢量速度 V 。而 V 的方向表明此时水流与水翼之间迎角为正,其相对运动使得水翼所受水动力 F_{down} 垂直翼弦指向斜上方,并可正交分解为推力 F_t 和升力 F_s 。同理,可分析出水翼在上挥阶段受力如图 3(b) 所示。

通过上述分析可知,水翼在下拍和上挥阶段均可产生推力,但在产生推力的同时分别产生了升力和负升力。正、负升力的存在使得海龟产生了方向相反的垂向加速度,并且其大小取决于水翼弦向迎角分布。在海龟水平运动过程中,垂向运动是多余能耗,应尽可能减小,但进行升沉运动时,垂向力又是主驱动力。

实际上海龟采用的是复合形式推进,水翼在上下挥拍产生击水反作用力(阻力推进)的同时,也通过改变迎角来利用翼面上下压差进行升力推进,其弦向横切面具有类机翼的流线型,使得水翼本身可获得较大的升阻比。此外,海龟后肢有时也会通过小幅度划水产生基于阻力的推进。因这两种推进方式不是本文研究重点,在此暂不分析。

经过对水翼受力矢量分解并分析其产生原因可知,只需调节水翼下拍、上挥运动的频率、幅值和相位,即可改变水翼推力与升力大小,进而控制龟体

各种运行位姿。操纵左右两侧水翼同频同幅同相运动, 可为水翼法推进仿生载体提供纵向驱动力; 当两侧水翼差动运行时, 又可为仿生载体提供艏向转矩, 且转矩大小由差动程度决定。

海龟外体其他器官亦有所作为。后肢(亦称“蹼翼”)虽不直接参与推进, 但当海龟快速启动时, 蹼翼将做高频小幅摆动, 犹如双尾鳍般辅助推进; 当海龟巡航、转艏或升沉时, 蹼翼则呈滑翔舵控状态, 此时蹼翼受被动流体力, 运动速度决定粘阻力值, 偏置角度决定受力方向。海龟头部在升沉和转艏运动中会及时偏转从而改变龟体形态阻力, 调节被动流体力的作用面。由于水翼、蹼翼和头部均处壳外, 水翼驱动力与被动流体力相互作用可形成较大的艏向转矩, 同时, 海龟转艏较平时的形体阻力更小, 使水翼法推进在水动力综合作用下更显灵活、平稳。

2.3 柔性翼形变

鲍麟等在研究蜻蜓扑翼柔性变形时发现, 翼型弯曲变形的加速度是影响瞬时气动力大小的关键因素, 这也是昆虫利用拍翼方式和柔性变形效应来克服因尺寸小(低雷诺数)带来的气动障碍的原因^[4]。同理, 海洋生物为提高游动效率, 增强水动力性能, 也会在运动过程中相应地使执行器官弯曲变形, 以改善自身的斯特劳哈尔数, 并调节近场涡流形态。

本文作者经活体实验发现, 海龟水翼在拍动过程中也存在弯曲变形现象, 分为因肌肉收缩产生的主动变形和因流体作用产生的被动变形。主动变形是驱动水翼骨骼运动和翼面伸展的可控行为; 被动变形则由于后缘软组织的粘弹特性而产生, 根据皮肤角质化程度的不同而呈现非线性化形变, 引起水翼攻角变化, 调节水翼尾涡和旋转环流的形成。

本文对水翼变形进行分析得知, 其被动变形由运动状态决定, 与所处位姿无关, 分为弦向和展向两个方向变形。弦向形变是指水翼在弦向剖面上的弯曲程度, 展向形变则指水翼在翼展剖面上的弯曲程度, 其中弦向形变更为明显且为水翼尾涡和环流的主调节元。文[2]通过生物活体实验获取了海龟水翼周期性挥拍过程中的轮廓形变特征, 本文在此基础上将水翼沿弦向简化为悬臂梁, 提取水翼弦向形变示意, 如图4所示, 其变形幅度可见图4右下角。水翼在挥拍顶点时形变几乎为0, 平行于腹甲时形变最大, 挥拍至谷点时又有所恢复, 而这3个位置正是水翼挥拍速度的极限状态, 可以看出水翼弦向形变与其实时挥拍的速度变化趋势同步。

在活体实验中加入彩色粒子, 通过流场显示,

本文发现水翼柔性形变使得来流流经水翼后, 在其左右两侧交叉脱落一系列成对排列且对称面与来流相同的尾涡, 如图5所示。该尾涡在对称面上方为逆时针旋转涡, 下方为顺时针旋转涡, 即类似于“反卡门涡街”^[5], 而Heathcote等在研究柔性扑翼拍动过程中也发现了柔性翼尾涡中反卡门涡街的存在^[6], 这两点一正一侧说明水翼尾流中出现了反卡门涡街。反卡门涡街的出现使得来流对水翼产生了一个垂直于流动方向的周期性交变侧向力, 增强了柔性水翼的推力 F_t 。

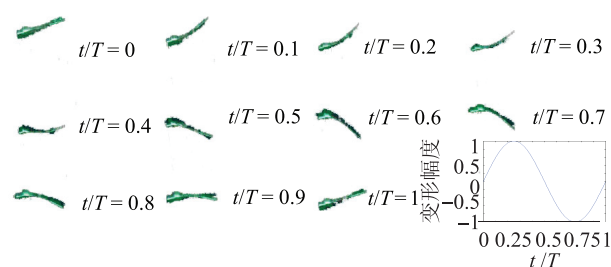


图4 海龟水翼弦向形变示意图

Fig.4 Sketch of turtle hydrofoil chordwise deformation



图5 反卡门涡街

Fig.5 The reverse Karman vortex street

反卡门涡街的每个单涡频率 f 与来流速度 v 成正比, 与形变后的水翼厚度 d 成反比, 即满足斯特劳哈尔数 St 的计算公式^[7]:

$$f = St(v/d) \quad (1)$$

由光学成像仪测出, 活体实验中的水翼单涡频率 f 约为6 Hz ~ 22 Hz, 来流速度 v 约1.2 m/s ~ 2.8 m/s(水族馆速度), 形变后水翼厚度 d 约0.042 m ~ 0.055 m。据此, 本文可推算出水翼拍动尾涡脱泻的 St 值位于0.2 ~ 0.45, 且在高频大幅拍动时, St 较大, 雷诺数位于 $3 \times 10^2 \sim 3 \times 10^4$ 之间($St \gg 1/Re$)。这与Triantafyllou等研究鱼尾摆动推进的 St 值^[8]和Taylor等研究扑翼飞行的 St 值基本吻合^[9], 因斯特劳哈尔数在表征非定常流场时起主导作用, 因此可说明水翼此时具有运动常态。由于水翼的粘弹本构特性与鲹科鱼尾和鸟类扑翼相近, 而这类生物的雷诺数多处于 $10^3 \sim 10^4$ 之间, 运动轨迹多为C型或8字型^[10], 均与水翼相似, 因此水翼拍动过程中所

产生的尾涡脱泻加速和时均推力增强机理相似, 这些分析结果为柔性水翼推进机理研究提供了重要参考.

3 仿生水翼模态分析 (Modal analysis on the bionic hydrofoil)

3.1 仿生水翼设计

柔性水翼与周围流体介质的密度比对推进效率有着重要影响^[11]. 结合海龟生理参数和水翼体构造特点, 本文设计了一种半髂式仿生柔性水翼, 如图 6 所示. 水翼前缘沿展向贯穿铝合金骨骼片, 其上下及后缘由柔性胶皮包裹, 使得水翼表层拥有较好的柔性, 后缘具有一定粘弹特性. 前缘骨骼片宽 15 mm, 厚 5 mm, 根部留孔与肩关节相连. 柔性水翼展长 435 mm, 弦长 116 mm, 最厚 45 mm, 质量 0.26 kg, 前缘弧度 0.94 rad, 后缘弧度 0.75 rad, 弦向截面呈前缘饱满、后缘渐薄的水滴型, 背部隆起, 腹部稍内凹.

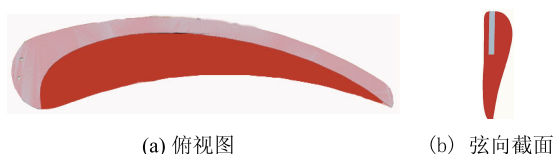


图 6 半髂式仿生柔性水翼

Fig.6 The flexible bionic hydrofoil with half skeleton supported

3.2 弦向形变分析

如 2.3 节所述, 水翼弯曲变形的加速度是影响瞬时流体力大小的关键因素, 本文基于仿生水翼建立其弦向形变模型, 获取水翼微元瞬时击水速度和弦向形变加速度, 为水翼推进水动力研究提供基础.

仿生柔性水翼在拍动过程中, 沿展长方向的变形非常微小, 柔性形变主要存在于弦向方向, 本文将着重研究仿生水翼的弦向形变. 建立水翼弦向形变模型, 如图 7 所示, 将翼根和前缘骨片作刚化处理, 后缘沿弦向和展向离散成剖面微元. 水翼在运动时因受水动力矩 M 而发生扭转, 各弦线在弦向剖面内发生形变.

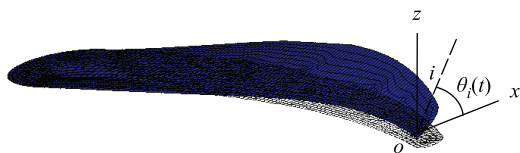


图 7 水翼弦向形变模型

Fig.7 The hydrofoil chordwise deformation model

由伯努利方程可知, 水翼所受水动力矩 M 与水

翼拍旋角速度成平方关系, 方向与拍旋角速度方向相反, 而水翼弦向形变幅度与水动力矩 M 成正比, 方向与 M 相同. 现以后缘任意点 i 为例, 将点 i 所在弦线和前缘的交点设为原点 o , 点 i 所在弦线平面投影为 x 轴, 沿水翼展长方向定为 y 轴, 经右手定则建立弦线形变坐标系 $o-xyz$. 定义点 i 和原点 o 之间连线为扭转边, 以扭转边与 x 轴所夹扭转角 $\theta_i(t)$ 来表示弦向形变, 其表达式为

$$\theta_i(t) = \theta_{\max} \sin(\omega_1 t + \pi) \quad (2)$$

式中, $\theta_{\max}$ 为此弦线上扭转角极限幅值, ω_1 为拍旋角速度, t 为拍动时间. 通过悬臂梁变形理论, 可得弦上各点扭转角沿弦向成抛物线分布, 即:

$$\theta_i(x, t) = \left(\frac{x}{c}\right)^2 \theta_i(t) = \left(\frac{x}{c}\right)^2 \theta_{\max} \sin(\omega_1 t + \pi) \quad (3)$$

式中, x 为 i 点的弦向位置, c 为水翼特征弦长. 扭转角的存在改变了水翼柔性微元的击水角度, 使得各微元发生相应的位旋变化, 从而调节尾涡和环流形成, 改善水动力性能, 增强柔性水翼推力.

为分析弦向形变与微元弦向位置的关联性, 以悬臂梁理论分析弦向形变相对特征弦长的变化特征, 引入弦向形变因子 δ_{co} , 构建水翼弦向形变方程:

$$x = \delta_{co} c \left(\frac{s}{s-1} z - \frac{1}{s-1} \right)^\varepsilon \sin(2\pi f t + \theta_i) \quad (4)$$

其中 $1 < s < \infty$, $x \geq 1/s$, $\varepsilon > 1$.

式中, δ_{co} 为与材料弹性模量有关的常数, s 表示前缘刚化边位置参数, z 为形变后的 i 点垂向位置, ε 为形变模阶系数.

ε 表征微元变形差异, ε 越大, 靠近前缘的胶皮变形越小, 后缘变形越大; s 表示前缘刚化边的位置, 值越大则柔性部分越靠近前缘. 本文所设计半髂式仿生水翼大部分弦长方向上约有 2/3 为后缘柔性部分, 即可取 $s = 3$ 代入式 (4), 得到本文柔性水翼弦向形变方程为

$$x = \delta_{co} c (2z - 1)^\varepsilon \sin(2\pi f t + \theta_i) \quad (5)$$

其中 $x \geq 1/3$.

对式 (6) 进行时间求导, 可以确定柔性水翼弦向形变的相对速度 v_z , 其表达式为

$$v_z = \frac{-x[2\pi f + \theta_{\max} \cos(\omega_1 t + \pi)\omega_1]}{2\delta_{co} c \varepsilon (2z - 1)^{\varepsilon-1}} \times \frac{\cos(2\pi f t + \theta_{\max} \sin(\omega_1 t + \pi))}{\sin^2(2\pi f t + \theta_{\max} \sin(\omega_1 t + \pi))} \quad (6)$$

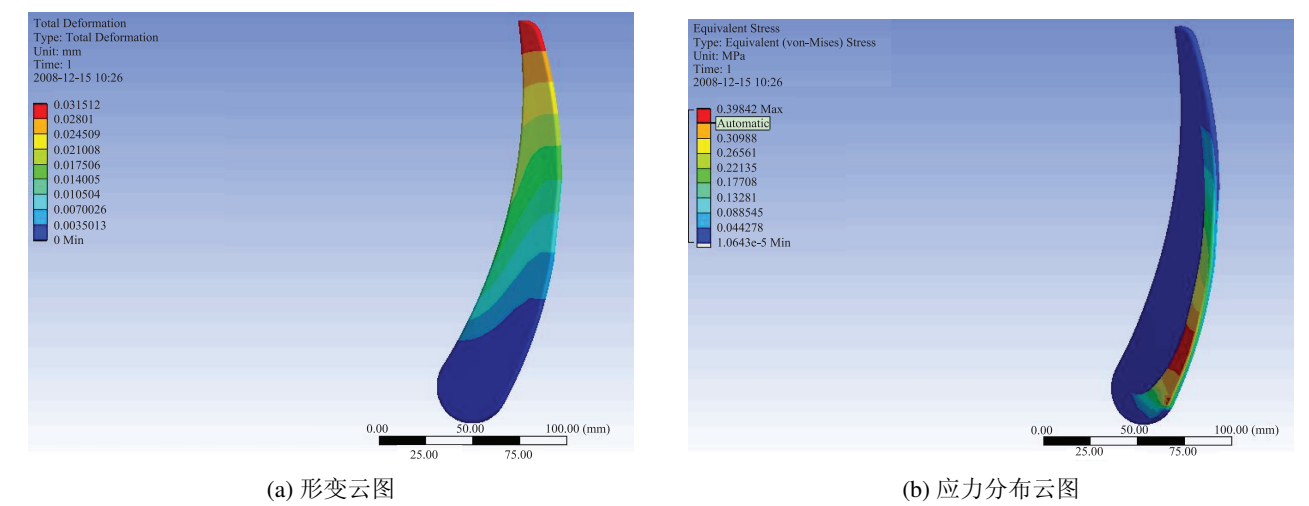


图 8 仿生水翼变形云图和应力分布云图

Fig.8 The deformation nephogram and stress distribution nephogram of bionic hydrofoil

对式 (6) 再进行时间求导, 可得到柔性水翼弦向形变的加速度; 将 v_z 与 ω_1 进行叠加, 可得出柔性微元变形时击水的瞬时速度. 这些可作为后续研究柔性水翼推进水动力的重要参数变量.

3.3 组织模态分析

为进一步优化水翼结构, 检测形变与受力分布情况, 本文在仿生柔性水翼基础上建立相似有限元模型, 通过水翼组织模态分析, 研究柔性形变特征.

在 ABAQUS 工程模拟仿真环境下, 进行仿生水翼运动的组织模态分析, 取铝合金骨骼片密度 ρ_1 为 $2.79 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$, 弹性模量 E_1 为 68 GPa, 泊松比 μ_1 为 0.35; 柔性胶皮密度 ρ_2 为 $1.3 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$, 弹性模量 E_2 为 $7.84 \times 10^{-3} \text{ GPa}$, 泊松比 μ_2 为 0.47. 为清晰显示仿生水翼的变形和应力分布, 选用模型拍动的最大动态参数, 即拍动角速度 3.1 rad/s, 拍动幅值 140° , 得到水翼形变云图和应力分布云图, 如图 8 所示.

图 8(a) 中, 仿生水翼形变由翼根至翼尖逐次展开, 翼根处刚性骨片所占比例较大且呈月牙形, 模型在翼根部保持约 1/4 面积的微形变, 并使得其后 3 个形变云层的分界线呈现内凹弧线形. 在水翼后半部分, 由于骨片与胶皮比例基本保持平衡, 云层分界线逐渐与水翼弦线重合, 并在翼尖附近达到形变最大值 4.13 cm. 图 8(b) 中, 水翼所受水动力完全靠前缘骨骼片传递给肩部, 应力分布主要集中在刚性骨片上, 且从根至尖逐层减小, 而后缘胶皮因其粘弹特性而较少承载应力. 翼根处因骨片面积较大且有安装孔分卸应力, 故应力压强并不大, 而在翼肋部即骨片急剧变窄处应力最为集中, 达到 39.8 MPa, 但仍远小于铝合金材料的屈服强度.

3.4 数值模态分析

水翼柔性形变大小直接影响其增强水翼推力的作用效果, 水翼末端形变量是水翼柔性作用的重要依据. 为研究仿生柔性水翼在不同运动状态下的形变特征, 本文结合水翼运动 3 种典型状态参数 (见表 1), 在 ABAQUS 仿真环境中, 进行了仿生水翼运动数值模态分析, 测得翼尖形变对比如图 9 所示.

表 1 海龟直航状态下水翼典型运动参数

Tab.1 The typical motion parameters of hydrofoil under the states of turtle direct navigation

运动参数	拍动角速度 ω_1	拍动范围	拍动幅值
海龟状态			
加速状态	3.05 rad/s	$-60^\circ \sim 80^\circ$	140°
匀速状态	2.09 rad/s	$-50^\circ \sim 70^\circ$	120°
减速状态	1.22 rad/s	$-45^\circ \sim 60^\circ$	105°

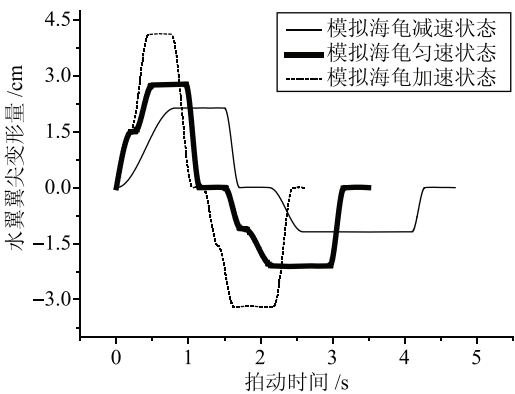


图 9 水翼尖形变对比图

Fig.9 The comparison diagram of hydrofoil-tip deformation

图 9 中, 3 种状态下水翼柔性形变均呈周期性变化, 形变量峰值和平均形变加速度均随着 ω_1 的增大而呈加速增长趋势. 减速状态时形变量峰值为

2.1 cm, 形变加速度为 2.61 cm/s^2 ; 匀速时形变峰值为 2.7 cm, 形变加速度为 5.55 cm/s^2 ; 加速时形变峰值为 4.1 cm, 形变加速度为 9.34 cm/s^2 . 形变加速度的增加使得柔性水翼获得了更多的流体推力, 也就促使海龟运动分出了加速、匀速和减速 3 个速度层次, 验证了 2.3 节提出的翼型弯曲变形加速度是影响流体动力大小的关键因素. 在匀速和加速状态时, 水翼形变量波峰、波谷前沿均由两段阶跃组成, 乃柔性水翼后缘的粘性形变与弹性形变响应间隔所致, 导致在形变过程中产生了拐点, 即形变加速度突变点, 使得水翼推力在此处急剧下降, 是引起海龟快速游动时速度振荡加剧的原因之一.

4 柔性水翼实验研究 (Experimental research on the flexible hydrofoil)

为了验证以上分析和仿真结果是否正确, 检验仿生水翼的实际推进效果, 本文基于自行研制的“Leonardo”号水下仿生实验样机 (如图 10 所示), 进行了半豁式柔性水翼和全豁式刚性水翼的水池推进对比实验研究.

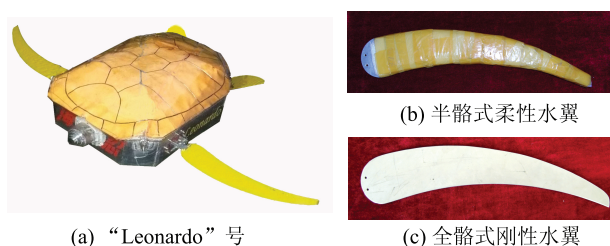


图 10 “Leonardo”号水下实验样机与仿生水翼

Fig.10 The underwater experimental sample “Leonardo” and bionic hydrofoils

4.1 直航实验研究

为研究柔性水翼对实验样机直航运动的影响, 进行了柔性水翼和刚性水翼同运动参数下的变拍旋角速度直航实验, ω_1 分别取 1.06 rad/s 、 1.68 rad/s 和 2.34 rad/s (对应于水翼低、中、高速拍动), 拍旋幅值为 120° , 位旋速度为 2.7 rad/s , 位旋幅值为 90° , 得到柔性水翼和刚性水翼推进的样机直航速度实验数据分别如图 11、图 12 所示.

图 11、12 中, 实验样机直航运动皆可分为加速和匀速两个阶段. 当水翼低速拍动时, 柔性水翼和刚性水翼的加速阶段耗时接近, 均在 10s 左右; 水翼中速拍动时, 两种水翼的加速耗时开始分化, 柔性翼约需 30s, 而刚性翼约需 35s; 水翼高速拍动时, 两种水翼的加速耗时差进一步拉大, 柔性翼约经历 40s, 而刚性翼则在样机启动 50s 后才能进入匀速运行阶段, 速度上升时间的缩短, 显示出柔性

水翼在提高运动系统响应速度上的优势. 柔性水翼推进下样机 3 种直航运动的平均加速度分别为 $6.67 \times 10^3 \text{ m/s}^2$ 、 $7.15 \times 10^3 \text{ m/s}^2$ 和 $8.68 \times 10^3 \text{ m/s}^2$, 与刚性水翼推进所产生的平均加速度 $6.89 \times 10^3 \text{ m/s}^2$ 、 $7.06 \times 10^3 \text{ m/s}^2$ 和 $8.42 \times 10^3 \text{ m/s}^2$ 相比, 分别提高 -3.2% 、 1.3% 和 3.1% , 表明柔性水翼在低速拍动时的推进效率低于刚性水翼, 而在中高速拍动时才高于刚性水翼. 在匀速运动阶段, 样机直航速度分化比较明显, 柔性水翼推进下样机的 3 种直航速度平均值分别为 0.10 m/s 、 0.25 m/s 和 0.35 m/s , 速度振荡幅度分别为 0.034 m/s 、 0.046 m/s 和 0.017 m/s ; 与刚性水翼推进的速度平均值 0.13 m/s 、 0.23 m/s 和 0.29 m/s , 速度振荡幅度 0.043 m/s 、 0.055 m/s 和 0.037 m/s 相比, 柔性水翼的推进速度分别增加 -15.4% 、 8.7% 和 20.1% , 而速度振荡幅值却分别减小 20.9% 、 16.4% 和 54.1% , 说明了柔性水翼的增推作用在水翼较快速拍动时才能体现, 而柔性水翼对于样机的速度减振作用则一直存在, 并呈现出波动增长趋势.

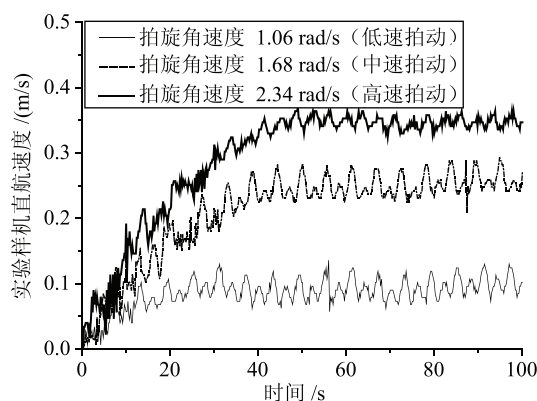


图 11 柔性水翼推进的样机直航速度实验数据

Fig.11 The experimental data of sample's direct navigation speed with flexible hydrofoil propulsion

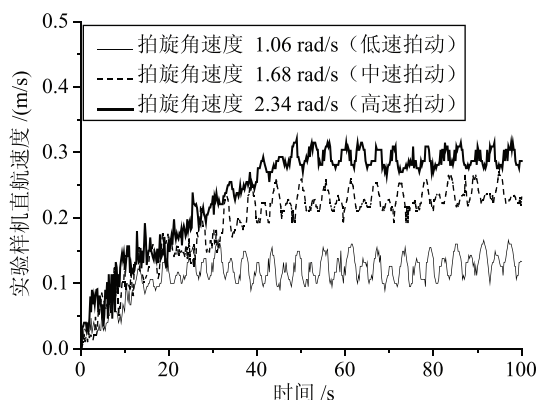


图 12 刚性水翼推进的样机直航速度实验数据

Fig.12 The experimental data of sample's direct navigation speed with rigid hydrofoil propulsion

为更加直观地描述柔性水翼与刚性水翼的推进特性, 将两种水翼推进下的样机直航速度进行拟合, 得到如图 13 所示的速度分布对比数据。

图 13 中, 柔性水翼推进的速度分布曲线呈 S 型, 刚性水翼推进的速度曲线呈 C 型, 两曲线在 $\omega_1 = 1.62 \text{ rad/s}$ 时交汇. 柔性水翼在 ω_1 低于 1.62 rad/s 时的推进效率低于刚性水翼, 但相对于 ω_1 的平均速度增长率却为 0.23 m/rad , 比刚性水翼的 0.16 m/rad 高 43.8% , 表明柔性水翼在低速拍动时虽然效率较低, 但其提高样机速度的能力却强于刚性水翼. 柔性水翼在 ω_1 高于 1.62 rad/s 时的推进效率高于刚性水翼, 平均速度增长率为 0.15 m/rad , 而刚性水翼此时为 0.09 m/rad , 柔性水翼比刚性水翼高 66.5% , 表明随着 ω_1 的增长, 柔性水翼在增加推力方面的作用愈加明显. 这是由于低速拍动时, 柔性翼形变加速度较低, 形变后的击水面积小于刚性水翼, 产生推力较小; 而随着 ω_1 的增大, 柔性翼的形变加速度增加, 产生的反卡门涡街作用在水翼上的交变侧向力越来越大, 快速提升了水翼推力. 柔性水翼的这种形变增推特性, 为其操纵与控制研究提供了依据。

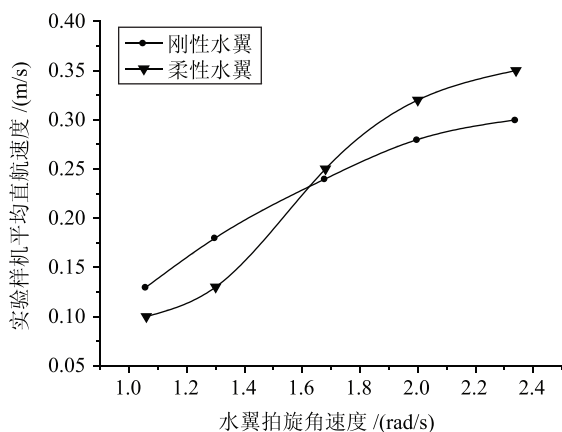


图 13 实验样机直航速度分布比较数据

Fig.13 The comparison data of speed distribution of experimental sample direct navigation

4.2 转艏实验研究

为研究柔性水翼对于实验样机转艏性能的影响, 进行了柔性水翼和刚性水翼的转艏运动对比实验. 实验中右侧水翼平放静止, 左侧水翼采用与直航实验相同的参数, 进行左翼单肢运动的差动右转艏实验, 得到柔性水翼和刚性水翼推进的样机原地右转艏角速度实验对比数据, 如图 14 所示。

图 14 中, 柔性水翼和刚性水翼推进的样机转艏角速度分布曲线皆大致呈 U 型, 并在 $\omega_1 = 1.58 \text{ rad/s}$ 处相交. 柔性水翼在 ω_1 低于 1.58 rad/s 时的转艏速度低于刚性水翼, 但相对于 ω_1 的平均速度增长率却为

$2.31^\circ/\text{rad}$, 比刚性水翼的增长率 $1.41^\circ/\text{rad}$ 高 63.8% ; 柔性水翼在 ω_1 高于 1.58 rad/s 时的转艏速度高于刚性水翼, 平均速度增长率为 $4.26^\circ/\text{rad}$, 比刚性水翼的 $3.68^\circ/\text{rad}$ 高 15.8% . 实验结果巩固论证了直航实验中所发现的, 柔性水翼的增推作用在水翼较快速拍动时才能体现, 而对于提高样机速度的能力却始终强于刚性水翼的结论. 但同时可以发现, 柔性水翼在转艏运动中高 ω_1 值时的增推能力却比低 ω_1 值时低 48% , 也比直航实验时低 50.7% , 这是由于实验样机的转艏半径较小, 约为样机 1 倍身长, 快速转艏导致附近流场涡流紊乱, 改变了水翼推进雷诺数, 并阻碍了反卡门涡街的正常生成, 减小了推力提升空间. 通过转艏实验及以上数据分析, 得到了柔性水翼与刚性水翼相比在增推方面的进一步相关特性, 为柔性水翼控制技术研究提供技术基础。

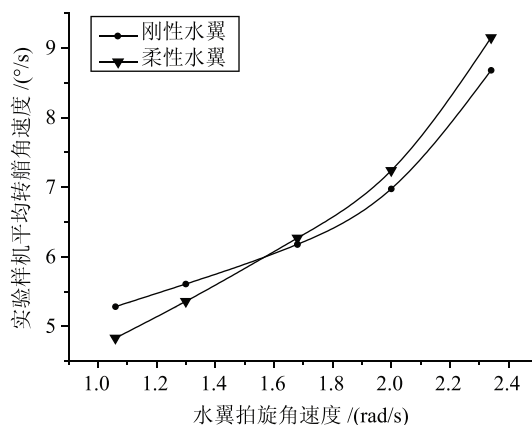


图 14 实验样机原地右转艏角速度分布比较数据

Fig.14 The comparison data of angular velocity distribution of experimental sample right yawing on the spot

5 结论 (Conclusion)

本文研究海龟柔性水翼仿生推进技术. 基于水翼法运动解析, 研究了海龟柔性水翼运动的形变特征、反卡门涡街及斯特劳哈尔数等流体特征, 推算出水翼尾涡脱泻的 St 值位于 $0.2 \sim 0.45$, 雷诺数位于 $3 \times 10^2 \sim 3 \times 10^4$. 根据水翼粘弹特性, 研制了一种半髁式仿生柔性水翼, 并对其进行了弦向形变、组织模态和数值模态等仿真实验, 得到柔性水翼微元形变加速度和瞬时击水速度. 基于水下实验样机进行了半髁式柔性水翼和全髁式刚性水翼推进的直航、转艏运动性能对比实验, 实验结果表明, 柔性水翼的增推作用只有在较快速拍动时才能体现, 但其速度增长率却始终高于刚性水翼, 并且随着 ω_1 值的增大, 柔性水翼在降低样机速度振荡方面的作用一直存在且越来越明显. 实验研究结果为柔性水翼操纵机理与控制技术研究提供了技术基础。

参考文献 (References)

- [1] Xu J A, Liu X B, Chu D H, et al. Analysis and experiment research of the turtle forelimb's hydrofoil propulsion method[C]//IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2009: 386-391.
- [2] Chu D H, Liu X B, Zhang M J. Research on turtle hydrofoil motion principle and bionics[C]//IEEE International Conference on Automation and Logistics. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2008: 2373-2378.
- [3] 余永亮, 童秉纲, 马晖扬. 昆虫拍翼方式的非定常流动物理再探讨[J]. 力学学报, 2005, 37(3): 257-265.
- Yu Y L, Tong B G, Ma H Y. Unsteady flow mechanisms revisited in insect flapping flight[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2005, 37(3): 257-265.
- [4] Bao L, Hu J S, Yu Y L, et al. Viscoelastic constitutive model related to deformation of insect wing under loading in flapping motion[J]. Applied Mathematics and Mechanics (English Edition), 2006, 27(6): 741-748.
- [5] Jones K D, Platzer M F. Numerical computation of flapping-wing propulsion and power extraction[C]//35th AIAA Aerospace Sciences Meeting. Reston, VA, USA: AIAA, 1997.
- [6] Heathcote S, Martin D, Gursul I. Flexible flapping wing propulsion at zero freestream velocity[C]//33rd AIAA Fluid Dynamics Conference and Exhibit. Reston, VA, USA: AIAA, 2003.
- [7] Alexander R M. Principles of animal locomotion[M]. New Jersey, USA: Princeton University Press, 2002.
- [8] Triantafyllou G S, Triantafyllou M S, Grosenbaugh M A. Optimal thrust development in oscillating foils with application to fish propulsion[J]. Journal of Fluids and Structures, 1993, 7(2): 205-224.
- [9] Taylor G K, Nudds R L, Thomas A L R. Flying and swimming animals cruise at a Strouhal number tuned for high power efficiency[J]. Nature, 2003, 425(6959): 707-711.
- [10] Yu Y L, Tong B G. A flow control mechanism in wing flapping with stroke asymmetry during insect forward flight[J]. Acta Mechanica Sinica, 2005, 21(3): 218-227.
- [11] Lu X Y, Liao Q. Dynamic responses of a two-dimensional flapping foil motion[J]. Physics of Fluids, 2006, 18(9): 098104.

作者简介:

张铭钧 (1963—), 男, 博士, 教授. 研究领域: 水下机器人技术, 机电系统测控技术.

刘晓白 (1981—), 男, 博士生. 研究领域: 水下机器人仿生推进技术.