

仿生推进水翼协同技术

张铭钧, 刘晓白, 郭绍波, 徐建安, 闫 娜

(哈尔滨工程大学机电工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘 要: 研究基于水翼法推进的海龟水翼协同运动机理及其尾涡结构, 发现水翼双旋协同运动可使水翼尾涡产生一条连续的聚集涡带, 而双翼协同则可消除水翼尾涡聚集干扰和涡环脱泻频率跳跃现象. 研究水翼法推进实验样机的水翼协同运动控制系统, 提出水翼双旋协同分段式控制方法和双翼协同角速度在线调节方法, 进行了样机水池实验. 实验结果表明, 分段式控制方法使协同值为 0.5 和 1 的水翼双旋协同运动分别比交替运动提高了 0.45 倍和 0.82 倍的样机直航速度, 1.01 倍和 2.49 倍的直航推进效率; 角速度在线调节方法使两翼达到 95.2% 的运动重合度的同时, 还使双翼协同推进相比于非协同推进时增加了 43.6% 的样机纵向推力.

关键词: 仿生推进; 水翼法; 协同运动; 控制方法

中图分类号: TP242.3

文献标识码: A

文章编号: 1002-0446(2011)-05-0519-09

Cooperative Motion Technology of Bionic Propulsion Hydrofoils

ZHANG Mingjun, LIU Xiaobai, GUO Shaobo, XU Jian'an, YAN Na

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

Abstract: The cooperative motion principle and trailing vortex structure of sea turtle hydrofoils are studied while turtle is adopting the hydrofoil propulsion method. A continuous aggregated vortex rope in hydrofoil trailing vortex will be caused by the cooperative motion of hydrofoils' stroke spin and azimuth spin, the aggregated vortex interference of hydrofoils' trailing vortex and the jumping phenomena of vortex rings shedding frequency can be eliminated by the cooperative motion of left and right hydrofoils. The control system of hydrofoil propulsion experimental prototype is developed for the hydrofoils cooperation motion. The subsection control method of hydrofoils' two spin cooperative motion and the angular velocity on-line adjustment method of double hydrofoils cooperative motion are proposed. And the pool experiments of experimental prototype are conducted. Results show that, under the subsection control, straight-line navigation speed of the hydrofoils' two spin cooperative motion with cooperation value 0.5 and 1 can be increased 0.45 times and 0.82 times respectively, while navigation efficiency is increased 1.01 times and 2.49 times, comparing with the two spin alternative motion. And the angular velocity on-line adjustment method not only makes the motion coincidence degree of double hydrofoils comes to 95.2%, but also boosts 43.6% longitudinal thrust for the prototype when double hydrofoils doing cooperative motion rather than non-cooperative motion.

Keywords: bionic propulsion; hydrofoil propulsion method; cooperation motion; control method

1 引言 (Introduction)

海龟通过四肢协同运动实现水中运动及姿态转换, 其翼状前肢(水翼)的上下挥拍可同时产生推力和升力, 蹼状后肢(蹼翼)可起到辅助推进和转向舵功能^[1]. 这种以前肢进行类鸟扑翼飞行, 后肢控制流体作用面的水翼法游动生物在巡游时尾涡脱泻的 St 值 (Strouhal 数) 多集中于 0.2 ~ 0.45 之间, Re 数 (Reynolds 数) 多控制在 $3 \times 10^2 \sim 3 \times 10^4$ 之间^[2], 涡流控制参数变化较小^[3]. 这些都与 Taylor 等^[4] “飞行和游动生物拍动推进在高效巡游时

St 值集中于一个狭窄区域”的推论和 Triantafyllou 等^[5] “水中生物拍动翼的 St 值保持在 0.2 ~ 0.4 范围内才能发挥最佳推进效率”的结论相吻合. 这说明海龟水翼法游动符合生物高效推进的特点, 属于一种运动效率较高的水下推进方式.

海龟水翼法游动拥有较高推进效率的原因主要体现在 3 个方面: 一是钙化龟甲盾和四肢斑鳞本身的低粘特性^[6]; 二是粘弹性水翼在拍动过程中变加速弯曲变形以优化流场动力布局^[7]; 三是水翼挥拍时的双旋协同和双翼协同运动导致尾迹流场涡

结构发生变化,形成双排涡对模态,有助于增强推力^[8].前2个因素属于生物体固有属性和条件反射微调范畴,第3个因素则属于大脑控制下的主动调节,对于推进效率的影响最大,也是仿生推进研究的重点之一,国内外学者在这方面开展了相关工作.在多尾鳍协同推进研究方面,Yin等在研究鱼群游动过程中的固流耦合作用时发现,鱼群中相邻尾鳍的并行同相摆动有助于节省游动能耗,而反向摆动有助于增强推力^[9];在双胸鳍协同推进研究方面,Techet等在进行有限展长刚性胸鳍实验研究时也发现,在一定的 St 值范围内两胸鳍协同运动的推进效率可达70%以上并可获得较大的推力系数^[10].这些相关研究表明,推进肢体的协同运动对于提高水中生物推进效率、增强纵向推力具有重要意义,也反映出研究水翼协同运动规律是提高仿生水翼推进效率的重要基础.

本文研究仿海龟水翼协同运动机理及其尾涡形态特征,针对水翼协同运动特点研制实验样机的水翼协同运动控制系统,提出双旋分段式控制方法和双翼角速度在线调节方法,进行水翼协同推进的样机水池实验研究,对本文的分析结论及所提方法的有效性进行了验证.

2 水翼协同运动机理分析 (Mechanism analysis of the hydrofoils cooperative motion)

2.1 水翼双旋协同运动

本文在海龟水翼运动轨迹研究^[1]基础上进行动作分解,对比分析拍旋、位旋的交替运动(以下简称“双旋交替”)和协同运动(以下简称“双旋协同”)时水翼轨迹特征,研究其与尾涡形态结构的关系.

每个水翼运动周期可分为拍旋(上挥、下拍)和位旋(俯旋、仰旋)2个运动阶段,双旋进行交替运动时水翼运动轨迹在海龟龟体矢状面上的投影如图1(a)所示,运动周期 T_0 可表示如下:

$$T_0 = t_u + t_d + t_s + t_p \quad (1)$$

式中, t_u 、 t_d 、 t_s 、 t_p 分别为水翼上挥、下拍、俯旋和仰旋的过程时间,且 $t_u > t_s$, $t_d > t_p$, $t_s = t_p$ (即俯旋与仰旋对称).

分析图1(a),当双旋交替运动时, t_u 、 t_d 、 t_s 、 t_p 互不相交;进行逆向分析,一旦 t_u 、 t_d 与 t_s 、 t_p 有交集,则认为此时水翼进行双旋协同运动.

水翼双旋协同运动时, t_u 、 t_d 与 t_s 、 t_p 的交集最大为 t_s 、 t_p 本身,最小可为空集.若交集为 t_s 、 t_p 本

身,说明此时位旋时间完全包含于拍旋之中,即 $t_p/n_1 \leq t_u$ 且 $(1 - 1/n_1)t_p \leq t_d$,式中 $1/n_1$ 为仰旋时间包含于上挥时间中的比例, $n_1 > 1$.若交集为空,则说明此时水翼进行双旋交替运动,由此可将水翼双旋交替运动看作协同运动的一个特例.本文引出一个表示位旋时间被包含程度的无量纲可变参数 i 来描述水翼双旋协同情况,并称之为“双旋协同值”.设位旋时间完全被包含时的双旋协同值 i 为1,而双旋交替运动时的 i 值为0,其余情况则按位旋时间被包含程度的不同,取 i 值为0~1之间.经活体实验发现^[1],海龟游动过程中水翼拍动一般都是采用双旋协同运动模式,只是 i 值略有不同,其运动轨迹在龟体矢状面上的投影可描述为图1(b).

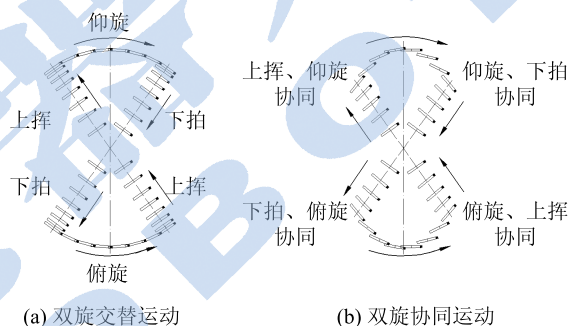


图1 水翼双旋交替与协同运动轨迹投影

Fig.1 The trajectories projection of hydrofoils' two spin alternative motion and cooperative motion

对比分析图1(a)、图1(b),水翼双旋协同运动与双旋交替运动相比,其轨迹明显变窄,“8”字型四角由尖变圆,且运动周期也由式(1)中的 T_0 逐步减小为式(2)中的 T_i :

$$T_i = t_u + t_d + t'_s + t'_p \quad (2)$$

式中, $t'_s = t_s(1 - 1/n_1 - 1/n_2)$, $t'_p = t_p(1 - 1/n_1 - 1/n_2)$, $1/n_2$ 为仰旋包含于下拍中的比例, $1/n_1 + 1/n_2 = i$, $n_2 > 1$.

T_i 的变化将直接导致水翼所产生纵向推力的改变.由式(2)可见,随着 i 值增加,位旋独立运动时间逐步减少(拍动频率 f 变相增加),由于位旋并不产生推力(此时水翼升力推进机制中的纵向分量微乎其微)^[2],因此增加 i 值有助于提高水翼纵向推力的占空比.此外,随着 i 值增加,水翼运动幅度减小,运动平稳性增强,有助于减小海龟肱骨的瞬间受力,降低肌肉无氧呼吸的能量损耗.

水翼纵向推力的变化是由水翼尾涡形态结构变化所引起的,这也是水翼法推进利用尾流和环量获取水动力的特点之一^[11],因此研究海龟水翼双旋协同运动对于水翼尾涡形态结构的影响至关重要.经

活体实验^[1]笔者发现,水翼在拍旋过程中速度和迎角基本保持不变,根据 Kelvin 定理分析,此时水翼表面速度环量也应几乎不变.而位旋运动因是绕肩轴旋转且击水面积微小,可忽略其纵向速度环量.基于这种分析,再根据涡流不生不灭定理^[12],水翼表面涡环速度环量之和的任何变化都会引起尾流区环量之和大小相等、方向相反的变化,即水翼在拍旋过程中其后缘会脱泻出一系列涡量相近的反向涡环.综合以上分析,本文可将海龟水翼周期性拍动时产生的尾流涡环在流场中描述为一条由无数连续聚集涡形成的反卡门涡街,同时又因位旋运动存在纵向速度环量为零的俯旋、仰旋阶段而使得这条涡街表现为断裂涡带的形式,Ansari 等通过 DPIV 实验证明,按“8”字型轨迹挥拍的生物扑翼在不可压缩流场中确实可产生这种由反卡门涡街形成的断裂涡带^[13].联系生物原型的水翼法游动,当水翼双旋交替运动时,此涡带的断裂处将进一步扩散,并且涡通量减小,如图 2(a) 所示;而水翼双旋协同运动时,因缩短了位旋独立运动时间,拍旋产生的连续涡环使得涡带断裂处逐渐缝合,并在 i 值达到 1 时形成一条波动状连续涡带,如图 2(b) 所示,这一点已经在 Borazjani 等通过数值实验发现鲹科鱼尾的平动/旋转(拍旋/位旋)协同运动可产生连续的行波状尾涡涡带时^[14]得以验证.

而本文上述这一推论又恰好可由文 [2] 中海龟水翼尾涡中出现离散反卡门涡街的实验结果得到印证,也与陈维山等研究鲹科鱼尾摆动产生波状连续(断裂)涡带和正弦轨迹射流的结论不谋而合^[15].

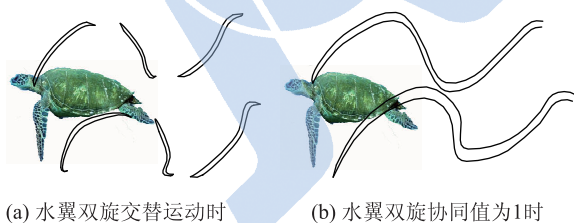


图 2 水翼尾涡形态分布示意图

Fig.2 Sketch maps of hydrofoils' trailing vortex structure

水翼尾涡连续涡带的形成正是双旋协同运动能够增强水翼纵向推力的重要原因.连续涡带相比于断裂涡带,其涡环密度和强度均有所增强,也就表现为水动力作用的时间和强度均大幅提高;同时,连续涡带一定程度上也限制了涡带断裂处的涡环展向扩散,避免翼尖诱导涡和尾涡间可能出现的诱导干扰作用,减少尾涡紊流的粘性阻力损耗^[13].两者相加,使得双旋协同运动相比于交替运动获得更多

的涡对射流升力,水翼推进效率更高^[15].陆夕云等在研究二维拍动翼流场结构过程中也发现了这种沉浮/俯仰运动翼的射流增升机制,并成功应用于水下拍翼机器人的试验中^[7].不过这种分析结果是否可靠,还有待下文进行的实验验证.

2.2 双水翼间协同运动

一般情况下,水中生物的双胸鳍推进相比于单尾鳍推进,除了可平衡尾鳍 C 型摆动时的侧向力和转舵力矩来增强本体稳定性外,还可改变尾涡脱泻形态,形成双排涡对模态以成倍增加纵向推力^[8].然而, Yin 等在不可压缩流体中进行柔性形变体之间互相作用实验时却又得到这样的结果^[9]:相同几何参数的柔性体以不同模式运动时,可能产生聚集涡干扰和涡环脱泻频率跳跃现象,使得尾涡涡带产生重叠和断裂,阻碍推力增加.

作者通过研究 Dong 等进行的鱼体间固流耦合作用实验^[8]发现,这种干扰效应同样存在于具有相似本构特性的生物器官运动中.水中生物具有相近物理参数的相邻运动器官之间也会产生类似的涡态干扰现象,而海龟双翼间的协同运动正是消除这种干扰、保证双翼推进优势得以发挥至关重要的修正行为,如: Licht 等通过 DPIV 实验证明了扑翼 AUV 四翼间的涡带重叠现象以及翼间协同具有消除这种干扰的作用^[10,16].除少数转舵运动外,海龟罕有单翼独立或双翼无序前进的时候,较难进行活体实验以标定海龟双翼协同的提效空间.然而通过分析图 2 中的尾涡形态,在反卡门涡街各涡控参数基本保持不变的情况下,可以判定海龟双翼间的无序拍动必然导致左右翼尾涡带的错相叠加或强弱突变,除产生涡间诱导干扰削弱彼此强度外,还使得电体产生不必要的横摇和艏摇动作,增加尾涡紊流粘性阻力.这一推论可以从以下实验中得到验证, Kato 等曾发现一只独臂绿海龟只能在水中进行转舵洄游,在安装了人造鳍后相同能耗下也只达到同龄个体 $1/4 \sim 1/3$ 的巡航速度,两翼涡间诱导干扰十分严重^[17],这说明双翼协同推进确实能够消除尾涡干扰,提高海龟运动效率.汪明等在研究鲹科鱼类 CPG(中枢模式发生器)控制下的胸鳍推进时也发现,左右胸鳍协同运动可以有效限制胸鳍尾涡分离,平衡艏向交变侧力,并利用鱼体波方程可确定各关节之间耦合关系^[18].

3 水翼协同运动控制系统 (Hydrofoils cooperative motion control system)

作者基于海龟水翼法游动机理,研制了一种仿

生水翼法推进实验样机，如图 3 所示，包括各自 2 套独立的水翼运动单元和蹼翼运动单元，以分别模拟海龟前后肢运动；流线型仿生龟甲盾和柔性水翼，以减小粘性阻力、增强涡控能力。文 [2]、[19] 对此有较为详尽的介绍，本文不作过多描述，以下将主要进行该样机四肢协同运动控制系统的研制。

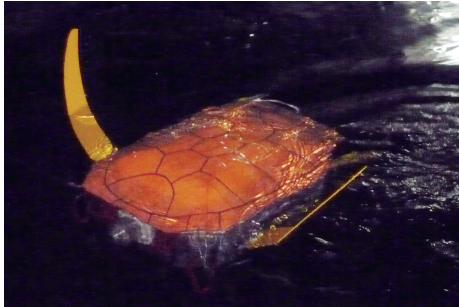


图 3 仿生水翼法推进实验样机

Fig.3 Experimental prototype of bionic hydrofoil propulsion method

为研究水翼协同运动对于仿生推进的效果，本文针对水翼协同运动特点，设计了基于 DSP（数字信号处理器）的水翼单元控制器和蹼翼单元控制器，进行各单翼内双旋协同运动控制；以 DSP 作为主控芯片构建样机主控制器平台，进行四肢翼间协同运动控制。这种同芯同步双层控制结构，既保证各控制器之间接口畅通、协议统一，又符合模块化设计思想，增强系统互换性和扩展性。主控制器和下层

子控制器间利用 CAN 总线进行数据交换，控制系统结构框图如图 4 所示。

图 4 中，第 I 级属于组织级，作为系统命令分配模块负责与陆基 PC 通讯及信息采集；第 II 级属于协调执行级，负责接收第 I 级的控制指令及反馈当前各肢状态量信息。主控制器接收陆基给定的水翼协同指令，进行行为分解后将二级指令发送给水翼子控制器，子控制器进而提取各旋运动参数，再发送 DAC（数字/模拟转换）信号控制各翼拍旋、位旋伺服电机运动。蹼翼控制流程与水翼类似，只是蹼翼采用步进电机，蹼翼子控制器改为发送 PWM（脉宽调制）信号，并省去了向其反馈蹼翼运动角度的环节。

此外，针对水翼法特有的运动复位要求，本文设计了基于霍尔传感器的电机复位模块。在指定的水翼运动初始位置和极限位置分别设置霍尔传感器，当水翼运动到此处时即向子控制器提供高中断级停止或反向运动命令，提供限位保护的同时确定出水翼启动位置。

4 水翼协同控制方法 (Hydrofoils cooperative motion control method)

在对本文第 2 节水翼协同运动特点分析的基础上，结合第 3 节研制的样机控制系统，本文提出了针对水翼双旋协同和双翼协同运动的 2 种控制方

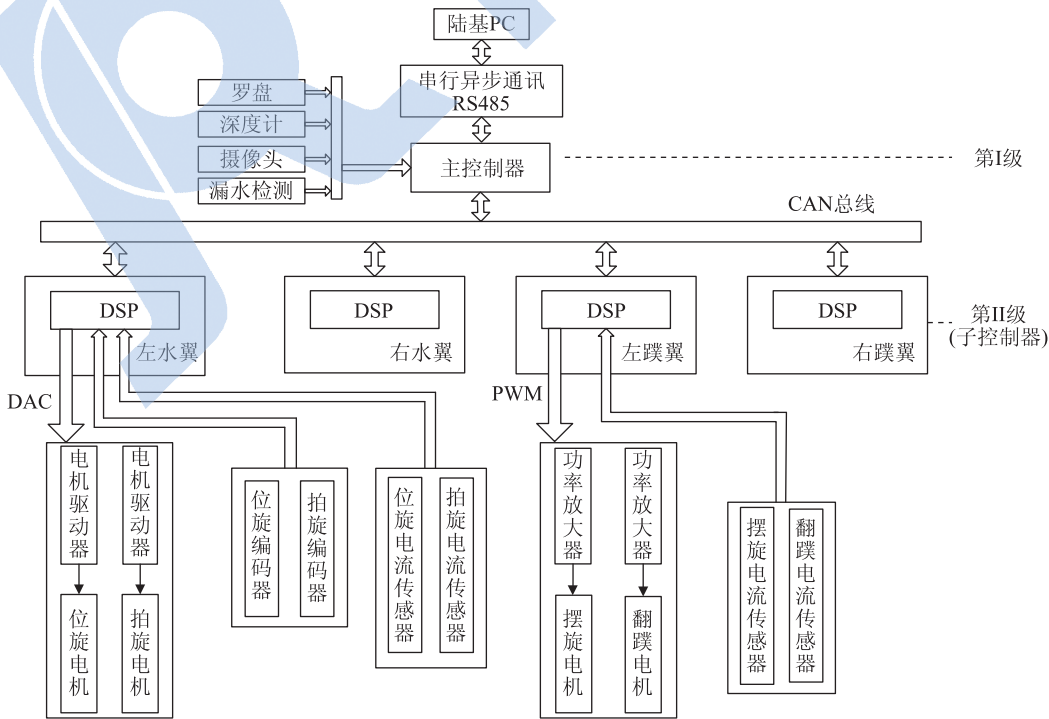


图 4 样机控制系统结构框图

Fig.4 Structure of the prototype's control system

法, 以满足水翼协同运动时的特殊控制要求。

4.1 双旋协同控制方法研究

水翼双旋协同运动虽属于单肢内协同, 但涉及到两旋 4 个协同运动阶段和 4 个独立运动阶段 (参见图 1), 单一的控制模式很难满足所有阶段的控制要求。以拍旋与位旋中的仰旋协同为例, 整个过程包含 3 个阶段, 即: 上挥-仰旋协同阶段、仰旋独立运动阶段和仰旋-下拍协同阶段, 若整个过程中两旋均采用单一的位置或速度闭环控制, 虽控制难度相对较小, 但不能同时满足各阶段的控制需求。因为在上挥-仰旋协同阶段和仰旋-下拍协同阶段需要较高的位置控制精度, 而在仰旋独立运动阶段则需要较高的速度控制精度。并且, 作为该过程的前后过渡阶段, 水翼上挥独立运动阶段和下拍独立运动阶段采用速度闭环控制也比位置闭环控制更有利于尾涡涡带的连续性和水翼表面受力的均匀性^[10]。因此, 针对这种单周期内反复多变的控制要求, 本文提出了一种双旋协同运动分段式控制方法以满足不同阶段的不同要求, 其原理框图如图 5 所示。

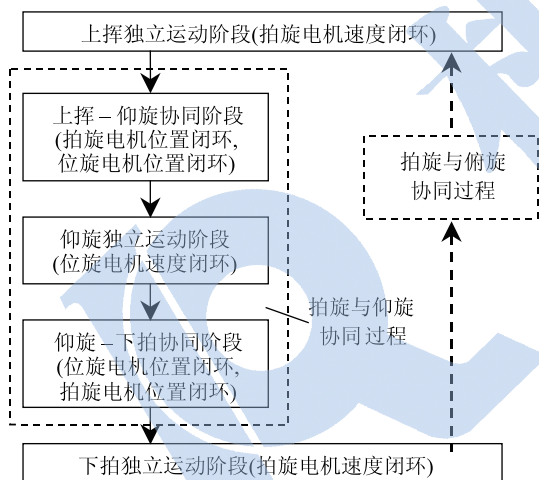


图 5 水翼双旋协同运动分段式控制方法原理框图

Fig.5 Principle of subsection control method of hydrofoils' two spin cooperative motion

为提高水翼拍动效率, 本文在拍旋独立运动阶段均采用速度闭环控制, 当运动进入拍旋与仰旋协同过程后则采用双旋协同分段式控制方法, 以满足 3 个阶段的不同控制要求, 保证“8”字型四角的轨迹特征。本文预先根据双旋协同值 i , 计算出拍旋、位旋分别在协同过程 3 个阶段的起止相位, 并以 Δt 为采样周期, 将 3 个阶段所经历的总时间进行 n 等分, 相应地计算出每等分内拍、位旋所需的相位值。待水翼运动进入其中的 2 个协同运动阶段时, 两旋将分别按照对应相位值进行独立的位置闭环控制。

3 个阶段中的仰旋独立运动阶段情况稍有不同,

位置控制精度要求相对较低, 并且根据 2.1 节分析, 该阶段存在 $t'_p=0$ (即 i 值为 1) 的情况, 位置闭环控制可能导致水翼运动间断。因此本文在此阶段又将位旋电机调整为速度闭环控制模式, 通过将每个 Δt 内的仰旋速度与预设平均速度比较, 控制仰旋速度, 使其匀速平稳运行。

如上所述, 3 个阶段共经历 n 个 Δt , 若每个阶段分别占用 $k, l-k, n-l$ 个 Δt , 用位置关系描述三者的运动特征, 本文双旋协同分段式控制方法可表示为

$$\begin{bmatrix} \sum_{j=1}^k \omega_{uj} \\ \sum_{j=1}^k \omega_{pj} \\ \sum_{j=1}^l \omega_{pj} \\ \sum_{j=1}^n \omega_{pj} \\ \sum_{j=1}^k \omega_{uj} + \sum_{j=l+1}^n \omega_{dj} \end{bmatrix} \Delta t = \begin{bmatrix} \omega'_u j & 0 \\ \omega'_p j & 0 \\ \omega_{pk}(j-k) & \alpha_{pk} \\ \omega_{pl}(j-l) & \alpha_{pl} \\ \omega'_d(j-l) & \alpha_{umax} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta t & 1 \end{bmatrix}^T \quad (3)$$

式中, ω_{uj} 、 ω_{pj} 、 ω_{dj} 分别对应第 j 个 Δt 内水翼上挥、仰旋、下拍角速度, ω'_u 、 ω'_p 为该阶段水翼上挥、仰旋的目标角速度; ω_{pk} 为第 2 阶段的仰旋目标角速度, α_{pk} 为仰旋独立运动开始时的相位; ω_{pl} 、 ω'_d 为第 3 阶段仰旋和下拍的目标角速度, α_{pl} 为该阶段开始时的仰旋相位值, α_{umax} 为水翼上挥的极限相位值。

式 (3) 从广义上表达了拍旋与仰旋协同过程中双旋的位置关系内涵, 根据不同 i 值和速度要求来调节各 ω 及其所占 Δt 数, 进行水翼双旋协同控制。

4.2 双翼协同控制方法研究

双翼协同运动同时涉及 2 套水翼运动单元, 机构及驱动元件本身的制造、安装误差及运动磨损等必然会影响左右水翼同步性, 影响其协同运动。为保证双翼有序协同推进, 防止出现 2.2 节中分析的双翼无序运动产生尾涡涡带错相叠加和聚集涡干扰现象, 本文提出一种角速度在线调节方法, 以减少这种相位差积累, 实现双翼同步运行。

角速度在线调节方法将两翼拍旋、位旋进行分别协同调节, 以双翼拍旋协同为例, 其实现过程如

下: 首先利用第 3 节中提到的霍尔传感器调整两翼至运动初始位置并设此时两翼相位差为 0, 左右水翼同时启动后经过第 1 个采样周期 Δt 检测到两翼转角相位差为 $\Delta\alpha_1 = \alpha_{L1} - \alpha_{R1}$ (α_{L1} 、 α_{R1} 分别为第 1 个 Δt 结束时左、右翼拍旋相位角). 那么, 在第 2 个 Δt 内两翼间需增加一个角速度差 $\Delta\omega_1$ 以产生补偿相位角 $-\Delta\alpha_1$, 使两翼恢复同步运动, 即 $\Delta\omega_1 \times \Delta t = \Delta\alpha_1$. 将此 $\Delta\omega_1$ 平均分配到两翼上, 第 2 个 Δt 结束后左右水翼相位角应满足下式:

$$\alpha_{L1} + (\omega_{L1} - \frac{\Delta\omega_1}{2})\Delta t = \alpha_{R1} + (\omega_{R1} + \frac{\Delta\omega_1}{2})\Delta t \quad (4)$$

式中, ω_{L1} 、 ω_{R1} 分别为第 1 个 Δt 结束时左、右翼的拍旋角速度. 依此类推, 将这种调节过程一直延续至第 m 个 Δt 结束时, 则第 $m+1$ 个 Δt 结束后的两翼相位角应满足以下等式:

$$\begin{cases} \alpha_{Lm} + (\omega_{Lm} - \frac{\Delta\omega_m}{2})\Delta t = \alpha_{Rm} + (\omega_{Rm} + \frac{\Delta\omega_m}{2})\Delta t \\ \Delta\omega_m \times \Delta t = \Delta\alpha_m \end{cases} \quad (5)$$

式中, α_{Lm} 、 α_{Rm} 、 ω_{Lm} 、 ω_{Rm} 分别为第 m 个 Δt 结束时的左、右翼拍旋相位角和角速度, $\Delta\omega_m$ 为第 $m+1$ 个 Δt 内需增加的两翼角速度差, $\Delta\alpha_m$ 为第 m 个 Δt 结束时左右翼的转角相位差.

通过样机所用电机的电压与转速之间输入-输出特性关系, 将以上这种速度调节关系映射到电机电压控制量上, 可直接求出第 $m+1$ 个 Δt 内的两翼拍旋电机电压输入关系如式 (6) 所示, 以此作为调节两翼协同运动时电机电压控制量的依据.

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} U_{L(m+1)} \\ U_{R(m+1)} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} U_{Lm} \\ U_{Rm} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\Delta U_{Lm} \\ +\Delta U_{Rm} \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} U_{Lm} \\ U_{Rm} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{U_{L(m-1)} - U_{Lm}}{\omega_{Lm} - \omega_{L(m-1)}} \\ \frac{U_{Rm} - U_{R(m-1)}}{\omega_{Rm} - \omega_{R(m-1)}} \end{bmatrix} \\ &\quad \begin{bmatrix} \frac{1}{2\Delta t} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha_{Lm} - \alpha_{Rm} \\ \omega_{Lm} - \omega_{Rm} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (6)$$

式中, U_{Lm} 、 U_{Rm} 分别为第 m 个 Δt 内的控制电压, ΔU_{Lm} 、 ΔU_{Rm} 分别为两翼在第 $m+1$ 个 Δt 内各自需增加的拍旋调节电压.

双翼位旋协同运动的调节原理与拍旋相同, 不再赘述. 为防止水中缠绕、机构卡死等故障引起的水翼电机过载, 本文在电机驱动电路中设置门限电路, 取门限电流值 $I_H = 0.8I_{\max}$, 其中 $I_{\max}$ 为保护电路中熔断器的熔断电流. 当图 4 中电流传感器检测

到两翼电机的 $I_m < I_H$ 时, 系统将按照上述方法此消彼长地平衡左右翼电机转速; 而一旦检测到任意电机的 $I_m > I_H$ 时, 系统将只进行降压调速, 即原先平均分摊到两翼电机上的 ΔU_m 全部由超前相位电机进行降压减速调节, 直至两翼同步运行.

5 水翼协同运动实验 (Experiments of hydrofoils cooperative motion)

为研究水翼协同运动对水翼法仿生推进效率的影响, 验证第 2 节中对水翼尾涡涡带分析的结论以及第 4 节中提出的水翼协同运动控制方法的有效性, 本文分别进行了水翼双旋协同和双翼协同推进的实验样机水池实验. 实验水池为 $110\text{ m} \times 15\text{ m} \times 5\text{ m}$ 标准室内无流无压环境, 利用自行研制的水下拉绳测速系统实现样机实时速度测量^[19]. 为准确测试水翼协同运动效果, 在以下直航实验中均将样机蹼翼设置为静止导流状态, 减少前后涡流干扰.

5.1 双旋协同推进实验

为研究水翼双旋协同推进对仿生水翼法运动效率的影响, 本文根据海龟水族馆内直线巡航游动时的水翼运动参数^[1], 统一取样机左右水翼拍旋角速度 1.68 rad/s , 拍旋幅度 120° , 位旋角速度 1.96 rad/s , 位旋幅度 100° , 改变水翼双旋协同值 i , 进行样机直航速度对比实验研究, 得到实验数据如图 6 所示.

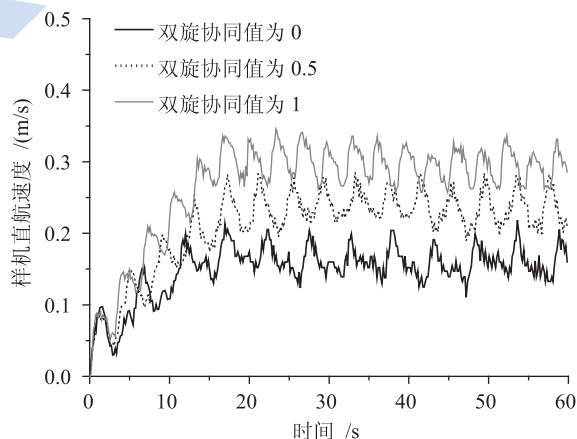


图 6 水翼双旋协同值变化下样机直航速度实验数据
Fig.6 Experimental data of prototype's straight-line navigation speed with variable hydrofoils' two spin cooperation values

从图 6 可以看出, 3 种不同 i 值下水翼双旋协同运动推进的样机直航过程基本相似, 均呈现加速和匀速 2 个阶段, 各阶段实验数据如表 1 所示.

表 1 中, 加速阶段 3 种 i 值下的样机平均加速度分别为 0.0162 m/s^2 、 0.0141 m/s^2 和 0.0178 m/s^2 , 并未随协同值的不同而明显变化. 本文分析认为, 这是由于随着 i 值增加, 拍旋起、止端击水角度也相

应减小,使得此时水翼尾涡涡带宽度(即聚集涡环强度)减小,抵消了因双旋协同而带来的连续击水受力优势.匀速阶段,样机平均速度分别为 0.163 m/s、0.247 m/s 和 0.297 m/s, i 值为 0.5 和 1 时的水翼双旋协同推进速度分别是交替推进时样机速度的 1.45 和 1.82 倍,验证了 2.1 节中水翼双旋协同运动可缝合尾涡涡带,增强水翼纵向推力的分析结果,同时也测试出 i 值为 0.5 和 1 时双旋协同运动的实际提效空间,并与 Dewar 等提出的机器人收敛后的稳态游速随拍翼频率增大而增大的实验结论相吻合^[20].匀速阶段的样机速度振荡幅值分别为 0.108 m/s、0.096 m/s 和 0.088 m/s,随 i 值增大而逐步减小,验证了双旋协同运动限制水翼尾涡涡带断裂处涡环展开扩散,增强运动平稳性的作用.三种 i 值下样机平均速度差值均保持在 0.06 m/s 以上,速度分化明显,且速度振荡逐步减小,也从侧面验证了 4.1 节中双旋协同分段式控制方法的控制效果.

表 1 双旋协同推进下样机直航实验数据表
Tab.1 The experimental datasheet of the prototype's straight-line navigation propelled by hydrofoils' two spin cooperative motion

双旋协同值 i	平均加速度 $/(m/s^2)$	平均速度 $/(m/s)$	增速倍数	速度振荡 $/(m/s)$
0	0.0162	0.163	1	0.108
0.5	0.0141	0.237	1.45	0.096
1	0.0178	0.297	1.82	0.088

为进一步研究水翼双旋协同运动对于增强水翼法推进效率的影响,探讨 i 值与样机直航速度之间的增长规律,在上述实验基础上,分别取 i 值为 0.25 和 0.75,加做 2 组直航实验,得到了如图 7 所示的实验样机速度分布数据.

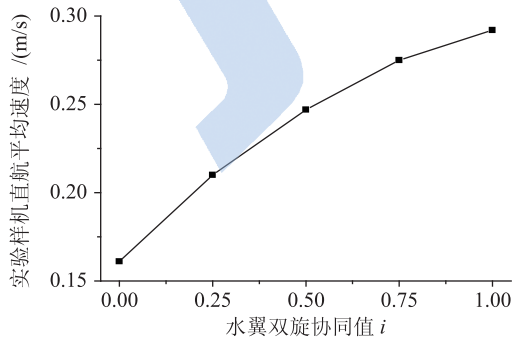


图 7 水翼双旋协同值变化下样机直航速度分布数据

Fig.7 Distribution data of the prototype's straight-line navigation speed with variable hydrofoils' two spin cooperative values

从图 7 可以看出,样机平均直航速度分布呈凸抛物线型,增长斜率呈减小趋势,相对于 i 值的增

长加速度由 0.196 m/s 逐步降到 0.148 m/s,再降至 0.12 m/s,并最终达到 0.068 m/s.本文分析认为,这是由于样机前进阻力随速度的增加而呈几何增长所致.实验结果直观地描述了 i 值与样机速度之间的近似同比增长关系,验证了 2.1 节中分析的 i 值越大水翼推进效率越高的分析结论.

事实上,生物推进效率测试仍是仿生学研究的瓶颈之一, Schultz 等提出的 Froude 效率模型仅仅适用于生物体稳态运动的情况且需要不断地进行动态修正^[21],笔者目前也难以提出较为准确的水翼运动效率计算模型.但是在利用图 4 中的电量监控系统^[19]和文 [19] 中的水下拉绳测速系统测得水翼电量消耗情况及样机平均纵向推力时发现,不同 i 值下样机匀速阶段的水翼功率消耗近似线性增长,而纵向推力则与之呈二次曲线增长趋势^[8].若将此实验数据迭代入 Froude 效率模型,见式 (7),则发现在本文实验条件下稳定阶段的样机直航推进效率与 i 值呈近似二次曲线增长关系,其中 i 值为 0.5 和 1 时的双旋协同推进效率分别是交替推进效率的 2.01 和 3.49 倍,具体实验数据如表 2 所示,这也与陈维山等提出的仿生机器人推进效率 η 是其拍动翼频率 f 的增函数的结论相一致^[15].

$$\eta = \bar{F}_T u^* / (\bar{F}_T u^* + \bar{P}_L) \quad (7)$$

式中, $\bar{F}_T$ 为平均纵向推力; u^* 为样机收敛后的稳态游速,且 $\bar{F}_T \propto \rho(u^*)^2/2$, ρ 为流体密度; $\bar{P}_L$ 为样机非纵向运动所消耗的功率^[22].

表 2 水翼双旋协同值变化下样机直航运动效率实验数据表
Tab.2 Experimental datasheet of the prototype's straight-line navigation efficiency with variable hydrofoils' two spin cooperative values

双旋协同值 i	平均速度 $/(m/s)$	平均推力 $/N$	功率消耗 $/W$	推进效率
0.00	0.163	20.36	32.6	10.18%
0.25	0.211	24.26	34.1	15.01%
0.50	0.237	30.68	35.5	20.48%
0.75	0.272	37.12	36.8	27.44%
1.00	0.297	46.10	38.5	35.56%

5.2 双翼协同推进实验

为研究双翼协同推进对仿生水翼法运动效率的影响,并检验角速度在线调节方法在双翼协同运动控制中的实际效果,本文在 5.1 节实验的基础上,固定 i 值,分别进行双翼协同角速度在线调节对比实验和双翼协同控制前后的实验样机直航对比实验.

双翼协同角速度在线调节对比实验中统一取水翼双旋协同值 i 为 0.25, 水翼拍旋幅度为 120° , 拍旋角速度为 1.68 rad/s , 位旋幅度为 100° , 位旋角速度为 1.96 rad/s , 得到双翼协同控制前后的拍旋角速度分布数据(取值理由同 5.1 节双旋协同实验), 如图 8 所示.

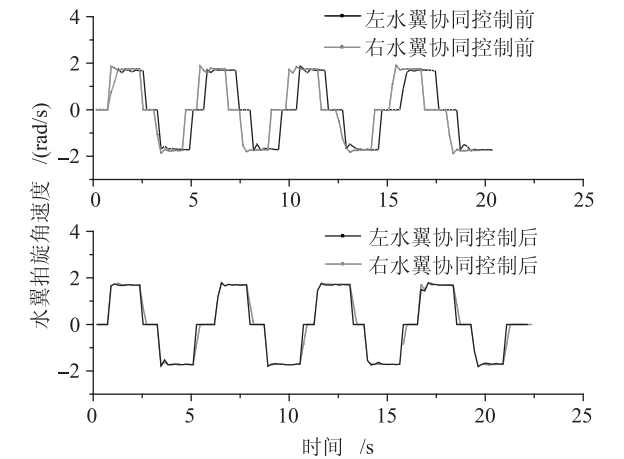


图 8 双翼协同控制前后两水翼拍旋角速度分布数据
Fig.8 Angular velocity distribution data of double hydrofoils' stroke spin before and after the double hydrofoils cooperation motion control

从图 8 可以看出, 未进行双翼协同控制前, 两翼同时启动后左翼有滞后于右翼的运动趋势, 在经历 4 个拍动周期后已滞后右翼约 0.25 个运动周期. 而进行双翼协同控制之后, 左右翼在 4 个周期内的运动重合度(即角速度曲线重合概率, 取重合偏差 $\pm 2\%$ 计算)为 95.2%, 且未出现明显滞后现象. 说明本文的角速度在线调节方法可有效消除两翼相位差积累误差, 基本实现两翼同步运动. 左右两翼速度最大超调量分别从协同前的 0.199 rad/s 和 0.223 rad/s 降至协同后的 0.122 rad/s 和 0.139 rad/s , 平均运动周期从调节前的 5.87 s 和 6.13 s 延长至调节后的 6.15 s , 说明角速度在线调节方法既有收敛速度振荡的积极作用, 但亦有延长水翼运动周期的消极作用. 此外, 在实验中发现双翼协同前后的功耗相当, 说明角速度在线调节方法未对两翼运动效率产生较大影响.

为研究基于角速度在线调节方法的双翼协同推进对提高仿生水翼法推进效率的影响, 本文取如上相同实验数据, 进行左右水翼协同推进前后的实验样机直航运动对比实验, 得到速度对比数据, 见图 9, 并经差分后得到加速度分布数据, 见图 10.

从图 9 可以看出, 双翼未进行协同推进时, 样机速度曲线波动严重(最大可达 0.098 m/s)且呈驼峰型, 如 5 s 时速度为 0.055 m/s , 在 30 s 左右攀升到

最大值 0.202 m/s , 而接近 60 s 时又跌至 0.074 m/s , 并无明显的稳定阶段. 而采用双翼协同推进之后, 样机速度变得相对平滑稳定, 虽速度波动仍然存在, 但已分化出明显的加速和匀速运动阶段, 如在前 20 s 样机速度呈现阶梯状上升趋势, 则在 30 s 后速度基本稳定在 $0.184\text{ m/s} \sim 0.255\text{ m/s}$ 之间. 两组实验的各阶段具体数据如表 3 所示.

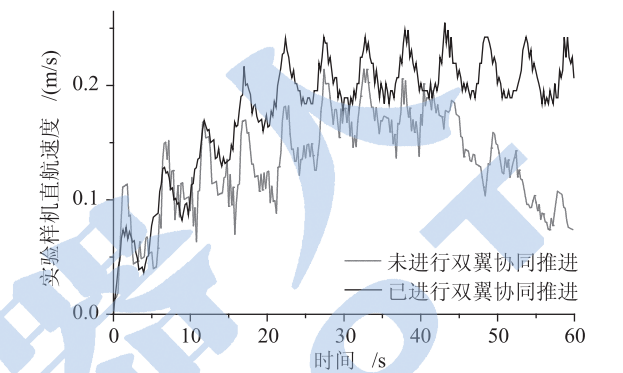


图 9 双翼协同推进前后样机直航速度实验数据
Fig.9 Experimental data of prototype's direct navigation speed before and after the double hydrofoils cooperation motion

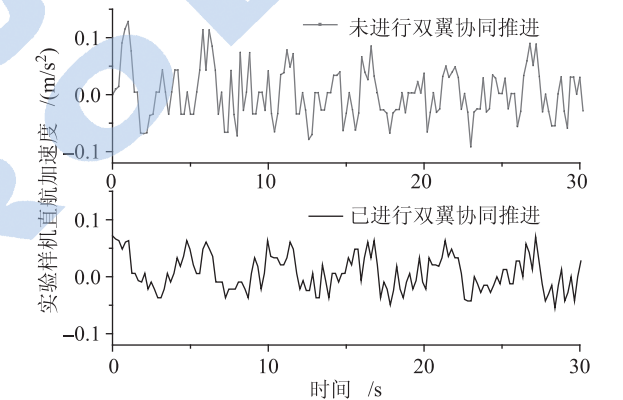


图 10 双翼协同推进前后样机直航加速度实验数据
Fig.10 Experimental data of prototype's direct navigation acceleration before and after the double hydrofoils cooperation motion

表 3 双翼协同推进前后的样机直航实验数据表
Tab. 3 Experimental datasheet of prototype's direct navigation before and after the double hydrofoils cooperation motion

是否协同	加速耗时	平均加速度 /(m/s ²)	加速度振荡 /(m/s ²)	是否匀速	平均速度 /(m/s)
否	27s	0.00629	0.292	是	0.132
是	21s	0.00903	0.121	否	0.211

表 3 中, 双翼未协同运动时样机在前 27 s 处于速度上升阶段; 但随着两翼相位差的积累, 在 35 s 之后直航速度急剧衰减, 最终在 60 s 时降至 0.0739 m/s , 且整个运动过程只获得了 0.132 m/s 的平均速度. 出现这种情况, 是由于未协同时两翼相

位差不断积累使得左右翼受力不均, 导致样机发生艏向偏转所致。而双翼协同运动之后, 两翼运动几乎同步, 基本消除了样机艏向振荡。在经历 21 s 加速之后, 样机进入较稳定的匀速运动阶段, 并获得相对较大的直航平均速度 (0.211 m/s), 验证了 2.2 节中的双翼协同推进可消除水翼尾涡干扰, 提高推进效率 (两种方式下电量功耗相当) 的分析结果。

图 10 中, 双翼未协同时样机平均加速度为 0.00629 m/s^2 , 加速度振荡幅值 0.292 m/s^2 ; 协同后平均加速度为 0.00903 m/s^2 , 振荡幅值 0.121 m/s^2 , 双翼协同推进相比于非协同推进增加了 43.6% 的纵向推力, 同时受力波动幅度减小了 58.5%, 验证了 2.2 节中双翼协同推进可防止水翼尾涡聚集涡干扰和涡环脱泄跳频现象, 增加水翼纵向推力、减少受力振荡的分析结果。

6 结论 (Conclusion)

本文研究水翼尾流中离散涡环的变化情况, 分析了水翼协同运动的水动力特性, 得出水翼双旋协同可缩小尾涡涡带断裂、增强水翼纵向推力和双翼协同可减小聚集涡干扰、提高水翼推进效率的分析结论。针对水翼协同运动特点研制了实验样机水翼协同运动控制系统, 提出水翼双旋协同分段式控制方法和双翼协同角速度在线调节方法, 进行了水翼协同推进的实验样机水池实验。实验结果表明, 双旋协同值为 0.5、1 的水翼双旋协同运动分别比交替运动提高了 0.45 倍、0.82 倍的样机直航运动速度和 1.01 倍、2.49 倍的直航推进效率, 验证了分段式控制方法的有效性; 前述水翼双旋协同可缩小尾涡涡带断裂的分析结果; 角速度在线调节方法不但使左右水翼达到 95.2% 的运动重合度, 还使双翼协同推进比非协同推进增加了 43.6% 的样机纵向推力和减小了 58.5% 的推力波动, 表明了该控制方法的有效性, 也验证了前述双翼协同运动防止水翼涡态干扰、增强运动平稳性的分析结果。本文的研究结果为水翼协同运动控制策略及水翼法推进姿态转换研究提供了理论和技术基础。

参考文献 (References)

- [1] Zhang M J, Liu X B, Chu D H, et al. The principle of turtle motion and bio-mechanism of its four limbs research[C]//Pacific-Asia Workshop on Computational Intelligence and Industrial Application. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2008: 573-578.
- [2] 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 M J, Liu X B, Xu J A, et al. The bionic research of turtle's flexible forelimb propulsion[J]. Robot, 2011, 33(2): 229-236.
- [3] 文力, 范哲, 王田苗, 等. 仿生振动翼推进器模糊控制实验研究[J]. 机器人, 2010, 32(3): 306-313.
Wen L, Fan Z, Wang T M, et al. Fuzzy control of biomimetic propulsion using flapping foil[J]. Robot, 2010, 32(3): 306-313.
- [4] 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.
- [5] Triantafyllou M S, Hover F S, Techet A H, et al. Review of hydrodynamic scaling laws in aquatic locomotion and fishlike swimming[J]. Applied Mechanics Reviews, 2005, 58(1-6): 226-236.
- [6] Kawamura Y, Shimoya J, Yoshida E, et al. Design and development of amphibious robot with fin actuators[J]. International Journal of Offshore and Polar Engineering, 2010, 20(3): 175-180.
- [7] 陆夕云, 杨基明, 尹协振, 等. 飞行和游动的生物运动力学和仿生技术研究[J]. 中国科学技术大学学报, 2007, 37(10): 1159-1163.
Lu X Y, Yang J M, Yin X Z, et al. Some studies on biofluid-dynamics of flight and swimming animals and biomimetic technology[J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2007, 37(10): 1159-1163.
- [8] Dong G J, Lu X Y. Characteristics of flow over traveling wavy foils in a side-by-side arrangement[J]. Physics of Fluids, 2007, 19(5): 057107-11.
- [9] Jia L B, Li F, Yin X Z, et al. Coupling modes between two flapping filaments[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2007, 581: 199-220.
- [10] Techet A H. Propulsive performance of biologically inspired flapping foils at high Reynolds numbers[J]. The Journal of Experimental Biology, 2008, 211: 274-279.
- [11] Lauder G V, Drucker E G. Morphology and experimental hydrodynamics of fish fin control surface[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2004, 29(3): 556-571.
- [12] 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.
- [13] Ansari S A, Phillips N, Stabler G, et al. Experimental investigation of some aspects of insect-like flapping flight aerodynamics for application to micro air vehicles[J]. Experiments in Fluids, 2009, 46(5): 777-798.
- [14] Borazjani I, Sotiropoulos F. Numerical investigation of the hydrodynamics of carangiform swimming in the transitional and inertial flow regimes[J]. The Journal of Experimental Biology, 2008, 211: 1541-1558.
- [15] 陈维山, 夏丹, 刘军考, 等. 实现预定游速的仿鱼机器人最佳效率运动规划[J]. 机械工程学报, 2010, 46(17): 22-28.
Chen W S, Xia D, Liu J K, et al. Motion planning on optimum efficiency of fishlike robot achieving prescribed swimming velocity[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(17): 22-28.
- [16] Licht S, Polidoro V, Flores M, et al. Design and projected performance of a flapping foil AUV[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2004, 29(3): 786-794.
- [17] Isobe Y, Kato N, Suzuk H, et al. Motion analysis of sea turtle with prosthetic flippers[C]//Proceedings of the International Offshore and Polar Engineering Conference. Cupertino, CA, USA: International Society of Offshore and Polar Engineers, 2010: 335-342.

构交互的柔顺性, 保证了操作过程的稳定和安全; 另一方面, 基于交互作用强度的引导速率动态调节, 可以在操作初期模型不准确情况下减缓交互作用的强度, 并在模型准确的情况下加速操作过程. 在配置 6 维腕力/力矩传感器的 6 自由度辅助机械臂样机上的自主开门实验结果, 表明了所提方法的有效性, 提高了机械臂对未知受限机构操作的交互适应性和操作效率.

参考文献 (References)

- [1] Quigley M, Batra S, Gould S, et al. High-accuracy 3D sensing for mobile manipulation: Improving object detection and door opening[C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2009: 2816-2822.
- [2] Liu G J, Ahmad S, Ren L. Hybrid control of door-opening by modular re-configurable robots[C]//IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2009: 954-959.
- [3] Shimada M, Asakura T. Interactive manipulator interface with task planner[C]//IEEE IECON 22nd International Conference on Industrial Electronics, Control, and Instrumentation. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 1996: 481-486.
- [4] Ojdanic D, Graser A. A fast motion planning for a 7DOF rehabilitation robot[C]//IEEE 10th International Conference on Rehabilitation Robotics. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2007: 171-178.
- [5] Pujas A, Dauchez P, Pierrot F. Hybrid position/force control: Task description and control scheme determination for a real implementation[C]//IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 1993: 481-486.
- [6] Petrovskaya A, Ng. A Y. Probabilistic mobile manipulation in dynamic environments, with application to opening doors[C]//International Joint Conference on Artificial Intelligence. New York, NJ, USA: ACM, 2007: 2178-2184.
- [7] Schmid A J, Gorges N, Goger D, et al. Opening a door with a humanoid robot using multi-sensory tactile feedback[C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2008: 285-291.
- [8] Lutscher E, Lawitzky M, Cheng G, et al. A control strategy for operating unknown constrained mechanisms[C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2010: 819-824.
- [9] Hogan N. Impedance control: An approach to manipulation, Part I-III[J]//ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, 1985, 107(1): 1-25.
- [10] Whitney D E. Force feedback control of manipulator fine motions[J]//ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, 1977, 99(2): 91-97.
- [11] Chen W D, Sun Y X, Huang Y T. A collision detection system for an assistive robotic manipulator[J]. Communications in Computer and Information Science, 2010, 97(1): 117-123.

作者简介:

孙逸翔 (1986-), 男, 硕士生. 研究领域: 服务机器人.

陈卫东 (1968-), 男, 博士, 教授, 博士生导师. 研究领域: 智能机器人, 多机器人系统.

(上接第 527 页)

- [18] 汪明, 喻俊志, 谭民. 胸鳍推进型机器鱼的 CPG 控制及实现 [J]. 机器人, 2010, 32(2): 248-255.
Wang M, Yu J Z, Tan M. Central pattern generator based control and implementation for a pectoral-fin propelled robotic fish[J]. Robot, 2010, 32(2): 248-255.
- [19] Zhang M J, Liu X B, Xu J A, et al. Bionic hydrofoil propulsion experiments research[C]//International Conference on Mechatronics and Automation. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2010: 231-236.
- [20] Dewar H, Graham J B. Studies of tropical tuna swimming performance in a large water tunnel- III. Kinematics[J]. Journal of Experimental Biology, 1994, 192: 45-59.
- [21] Schultz W W, Webb P W. Power requirements of swimming: Do new methods resolve old questions[J]. Integrative and Comparative Biology, 2002, 42: 1018-1025.
- [22] Deng J, Shao X M, Yu Z S. Hydrodynamic studies on two traveling wavy foils in tandem arrangement[J]. Physics of Fluids, 2007, 19(11): 113104-10.

作者简介:

张铭钧 (1963-), 男, 博士, 教授. 研究领域: 水下机器人技术, 智能控制技术, 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.