

仿生机器鱼水动力学与机构动力学耦合建模研究

白发刚^{1,2,3}, 薛钢^{1,2,3,4}, 黄健堃^{2,3,4}, 刘延俊^{1,2,3,4}

(1. 山东大学海洋研究院, 266237, 山东青岛; 2. 山东大学高效洁净机械制造教育部重点实验室, 250061, 济南;
3. 山东大学机械工程国家级实验教学示范中心, 250061, 济南; 4. 山东大学机械工程学院, 250061, 济南)

摘要: 针对多关节仿生机器鱼自主游动过程的复杂动力学建模问题, 利用中枢模式发生器产生机器鱼的关节驱动信号, 采用细长体理论和 Newton-Euler 法建立了机器鱼水动力学和机构动力学耦合模型。将机器鱼物理模型的尾部关节角摆动规律作为动力学模型的运动输入, 对比了数值仿真结果与物理模型实验结果, 验证了耦合动力学模型的准确性。分析了机器鱼尾部关节间相位差、摆动角频率和摆动幅值对机器鱼游动性能的影响。结果表明: 摆动角频率和最大摆动幅度在一定范围内与平均游速近似成正比, 与头部稳定性成反比; 相较于平均游速, 头部稳定性对关节间相位差的变化更加敏感, 较大的尾部关节间相位差能够获得更好的游动稳定性。相关结论可为进一步研究仿生机器鱼复杂轨迹跟踪问题提供前提和理论基础。

关键词: 仿生机器鱼; 耦合建模; Newton-Euler 法; 水动力学

中图分类号: TP24 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202209006 **文章编号:** 0253-987X(2022)09-0046-11



OSID 码

Coupling Modeling of Hydrodynamics and Mechanism Dynamics of Bionic Robot Fish

BAI Fagang^{1,2,3}, XUE Gang^{1,2,3,4}, HUANG Jiankun^{2,3,4}, LIU Yanjun^{1,2,3,4}

(1. Institute of Marine Science and Technology, Shandong University, Qingdao, Shandong 266237, China; 2. Key Laboratory of High-Efficiency and Clean Mechanical Manufacture of Ministry of Education, Shandong University, Jinan 250061, China;
3. National Demonstration Center for Experimental Mechanical Engineering Education, Shandong University, Jinan 250061, China; 4. School of Mechanical Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China)

Abstract: For the complex dynamics modeling of the autonomous swimming process of the multi-joint bionic robot fish, the joint driving signals of the robot fish are generated by the central pattern generator, and the coupling model of the hydrodynamics and mechanism dynamics of the robot fish is established by using the slender body theory and Newton-Euler method. The tail joint angle swing of the robot fish physical model is taken as the motion input of the dynamics model, and the accuracy of the coupled dynamics model is verified by comparing the numerical simulation results with the physical model experiment results. Furthermore, the effects of the phase difference between the tail joints, the swinging angular frequency and the swinging amplitude on the swimming performance of the robot fish are analyzed. The results show that the swinging angular frequency and the maximum swinging amplitude are approximately proportional to the average swimming speed and inversely proportional to the head stability in a certain range. Compared with the average swimming speed, the head stability is more sensitive to the change of

收稿日期: 2022-04-27。 作者简介: 白发刚(1998—), 男, 硕士生; 刘延俊(通信作者), 男, 教授, 博士生导师。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52001186); 山东省自然科学基金资助项目(ZR2020QE292)。

网络出版时间: 2022-06-13

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20220610.1841.004.html>

the phase difference, and the larger the phase difference can obtain better swimming stability. These conclusions lay a foundation and theoretical basis for further study on the complex trajectory tracking of the bionic robotic fish.

Keywords: bionic robot fish; coupling modelling; newton-Euler method; hydrodynamic

随着海洋智能装备技术的不断进步,人类对海洋的探索活动不断朝着精细化方向发展,所聚焦的空间尺度越来越小,对水下装备性能的要求越来越高。相比于传统的自主式水下航行器,仿生机器鱼能够在有限空间内连续躲避障碍物,具有更高的机动性和自主运动能力,在水下机器人领域备受青睐。

近十余年来,国内外学者研制了不同种类、不同驱动方式的仿生机器鱼样机^[1-3],而由电机驱动的串联多关节身体/尾鳍推进模式(body and/or caudal fin, BCF)机器鱼因其结构简单、负载能力强、动作精度高,且具备高效、高速、高机动性等特点,一直是研究的热点^[4]。

受生物节律运动启发的中枢模式发生器(central pattern generator, CPG)已被广泛应用于生成多自由度机器人周期性运动信号^[5-6],在此基础上,袁俊^[7]、杨越麒^[8]采用 Newton-Euler 法对 BCF 式多关节机器鱼进行了动力学分析,其中,水动力学分析采用细长体理论^[9]和莫里森(Morison)方程,利用一种改进的霍普夫(Hopf)振荡器 CPG 模型^[10]驱动各个关节摆动,获得了游动速度和位置曲线;汪明^[11]采用 Lagrange 法进行了动力学建模,在水动力学分析中考虑了前缘吸力对鱼体的影响,利用 Ijspeert 振荡器 CPG 模型^[12]产生关节驱动信号,建立了基于 CPG 信号控制的机器鱼动力学模型;Kim 等^[13-14]提出了基于 Kane 方法的机器鱼动力学建模方法,并通过仿真分析得到了不同鱼类游动模型的位置输出信息。上述研究作为分析仿生机器鱼游动时的动力学问题提供了一定的理论基础。然而,考虑 BCF 式串联多关节机器鱼游动过程受力的时变性、非线性,构建精确的水动力学和机构动力学耦合模型,一直是仿生机器鱼理论研究的难题。

本文利用 CPG 模型产生仿生机器鱼关节角驱动信号,基于细长体理论,考虑附加质量力效应,求解鱼体的流体阻力,利用 Newton-Euler 法求解机构动力学模型,建立了机器鱼的水动力学和机构动力学耦合模型。通过机器鱼物理样机的水动力学测量实验,验证了动力学模型的准确性;采用数值计算方法仿真分析了机器鱼的运动特征参数对其游动性能的影响。

1 仿生机器鱼坐标系与 CPG 模型

1.1 坐标系与变量定义

根据机器人多刚体系统动力学建模理论^[15],建立仿生机器鱼运动学与动力学分析用到的坐标系系统,如图 1 所示。定义世界坐标系 $C_w(o_w x_w y_w z_w)$,该坐标系与大地固连,原点 o_w 设定在机器鱼运动的起始位置,平面 $o_w x_w y_w$ 与水平面平行, $o_w z_w$ 轴平行于重力方向。定义机体坐标系 $C_b(o_b x_b y_b z_b)$,原点 o_b 位于鱼体头部浮心, $o_b x_b$ 轴指向头部前端方向, $o_b z_b$ 轴平行于头部浮心与质心的连线。定义关节坐标系,其原点位于鱼体尾部关节点 $J_i (i=0, 1, 2)$ 处, $o_i x_i$ 轴沿两相邻关节点连线方向, $o_i z_i$ 轴指向鱼体腹部向下。为了方便描述机器鱼受到的时变水动力,参考文献[8]的水动力学分析方法引入速度坐标系 $C_v(o_v x_v y_v z_v)$, $o_v x_v$ 轴沿头部速度方向,由机体坐标系 C_b 绕 $o_b y_b$ 轴旋转攻角 α 、再绕 $o_b z_b$ 轴旋转侧滑角 β 可获得 $o_v x_v$ 轴。所有坐标系均符合右手定则,沿 x 、 y 、 z 轴的单位向量分别用 e_1 、 e_2 、 e_3 表示。

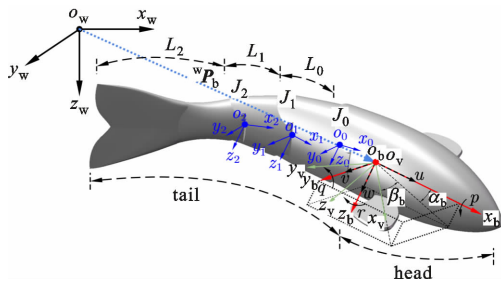


图1 仿生机器鱼坐标系

Fig. 1 The coordinate system of bionic robot fish

定义仿生机器鱼头部的质量为 m_b , 尾部两相邻关节点连线的连杆 L_i 的长度为 l_i , 质量为 m_i , θ_i 表示关节间夹角, $r_i (i \neq 0)$ 表示坐标系 C_{i-1} 指向坐标系 C_i 的矢量(在关节坐标系 C_{i-1} 下表达)。定义 r_{bm} 、 r_{bt} 、 r_{bpl} 和 r_{bpr} 分别为浮心到质心、浮心到尾部起始点、浮心到左侧胸鳍力作用点、浮心到右侧胸鳍力作用点的矢量(在机体坐标系 C_b 下表达)。利用世界坐标系 C_w 到机器鱼浮心的矢量 ${}^w P_b = (x, y, z)^T$ 表示机器鱼的位置, 利用欧拉角 ${}^w A_b = (\phi, \theta, \psi)^T$ 表示机器鱼的姿态, 利用 $V_b = (u, v, w)^T$ 和 $\Omega_b = (p,$

$q, r)^T$ 分别表示机器鱼在机体坐标系 C_b 中的平移线速度和旋转角速度。

根据以上定义法则,由关节坐标系 C_0 到机体坐标系 C_b 以及由关节坐标系 C_{i-1} 到 C_i 的转换矩阵分别为

$${}^b\mathbf{R}_0 = \begin{bmatrix} c_{\theta_0} & s_{\theta_0} & 0 \\ -s_{\theta_0} & c_{\theta_0} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, {}^i\mathbf{R}_{i-1} = \begin{bmatrix} c_{\theta_i} & s_{\theta_i} & 0 \\ -s_{\theta_i} & c_{\theta_i} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

由速度坐标系 C_v 到机体坐标系 C_b 的转换矩阵为

$${}^b\mathbf{R}_v = \begin{bmatrix} c_\alpha c_\beta & -c_\alpha s_\beta & -s_\alpha \\ s_\beta & c_\beta & 0 \\ s_\alpha c_\beta & -s_\alpha s_\beta & c_\alpha \end{bmatrix} \quad (2)$$

由机体坐标系 C_b 到世界坐标系 C_w 的线速度转换矩阵 ${}^w\mathbf{R}_b$ 和角速度转换矩阵 ${}^w\mathbf{T}_b$ 分别为

$${}^w\mathbf{R}_b = \begin{bmatrix} c_\psi c_\theta & c_\psi s_\theta s_\phi - s_\psi c_\phi & c_\psi s_\theta c_\phi + s_\psi s_\phi \\ s_\psi c_\theta & s_\psi s_\theta s_\phi + c_\psi c_\phi & s_\psi s_\theta c_\phi - c_\psi s_\phi \\ -s_\theta & c_\theta s_\phi & c_\theta c_\phi \end{bmatrix} \quad (3)$$

$${}^w\mathbf{T}_b = \begin{bmatrix} 1 & t_\theta s_\phi & t_\theta c_\phi \\ 0 & c_\phi & -s_\phi \\ 0 & s_\phi/c_\theta & c_\phi/c_\theta \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中: c_* 表示 $\cos(*)$; s_* 表示 $\sin(*)$; t_* 表示 $\tan(*)$ 。

1.2 仿生 CPG 模型

目前,常用的产生机器鱼关节摆动信号的方法主要有鱼体波拟合法^[16-17]和基于 CPG 模型的方法。生物研究表明,脊椎动物可通过生物 CPG 在没有中枢神经参与的情况下产生节律信号。受此启发,CPG 模型可以通过神经元振荡器之间的相互作用产生节律信号,以控制机器鱼的运动^[18]。本文选用引入相位因子和偏转因子的基于 Hopf 振荡器的 CPG 模型^[19-20],该模型由多个神经元振荡器组成,数学描述如下

$$\begin{cases} \dot{x}_i = -\omega_i(y_i - b_i) + x_i[r_i^2 - x_i^2 - (y_i - b_i)^2] + \\ h_1[x_{i-1}\cos\varphi_i + (y_{i-1} - b_{i-1})\sin\varphi_i] \\ \dot{y}_i = \omega_i x_i + (y_i - b_i)[r_i^2 - x_i^2 - (y_i - b_i)^2] + \\ h_2[x_{i+1}\sin\varphi_i + (y_{i+1} - b_{i+1})\cos\varphi_i] \\ \dot{z}_i = c_i y_i \end{cases} \quad (5)$$

式中: i 表示机器鱼关节个数; x_i 和 y_i 表示第 i 振荡器的状态变量; ω_i 和 r_i 分别代表第 i 关节的角频率和幅值; φ_i 表示相邻神经元振荡器之间的相位差(关节间相位差); b_i 表示第 i 振荡器的偏置; h_1 和

h_2 为耦合系数; z_i 表示第 i 振荡器的输出,即 θ_i ; c_i 为输出放大系数。通过合理地调节 CPG 模型参数可以获得机器鱼不同运动模式的关节角信息 θ_i ,进而获得角速度 $\dot{\theta}_i$ 和角加速度 $\ddot{\theta}_i$,从而实现机器鱼的多模态运动控制。

2 耦合动力学模型

2.1 运动状态参量分析

仿生机器鱼浮心在世界坐标系下的速度更新公式为

$$\begin{bmatrix} \mathbf{V}_b \\ \mathbf{\Omega}_b \end{bmatrix} = \int \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{V}}_b \\ \dot{\mathbf{\Omega}}_b \end{bmatrix} dt \quad (6)$$

$$\begin{bmatrix} {}^w\mathbf{V}_b \\ {}^w\mathbf{\Omega}_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} {}^w\mathbf{R}_b & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & {}^w\mathbf{T}_b \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{V}_b \\ \mathbf{\Omega}_b \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中: $\dot{\mathbf{V}}_b$ 和 $\dot{\mathbf{\Omega}}_b$ 表示头部浮心加速度在机体坐标系 C_b 下的表达。进一步,可获得机器鱼浮心位置和姿态更新公式为

$$\begin{bmatrix} {}^w\mathbf{P}_b \\ {}^w\mathbf{A}_b \end{bmatrix} = \int \begin{bmatrix} {}^w\mathbf{V}_b \\ {}^w\mathbf{\Omega}_b \end{bmatrix} dt \quad (8)$$

根据文献[7-8],尾部关节 J_i 的速度和加速度在关节坐标系 C_i 下可表示为

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} \mathbf{V}_{j_i} \\ \mathbf{\Omega}_{j_i} \end{bmatrix} = {}^i\mathbf{H}_{i-1} \begin{bmatrix} \mathbf{V}_{j_{i-1}} \\ \mathbf{\Omega}_{j_{i-1}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ \dot{\theta}_i \mathbf{e}_3 \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{V}}_{j_i} \\ \dot{\mathbf{\Omega}}_{j_i} \end{bmatrix} = {}^i\mathbf{H}_{i-1} \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{V}}_{j_{i-1}} \\ \dot{\mathbf{\Omega}}_{j_{i-1}} \end{bmatrix} + \boldsymbol{\zeta}_i + \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ \ddot{\theta}_i \mathbf{e}_3 \end{bmatrix} \end{cases} \quad (9)$$

$$\text{其中 } {}^i\mathbf{H}_{i-1} = \begin{bmatrix} {}^i\mathbf{R}_{i-1} & -{}^i\mathbf{R}_{i-1}\hat{\mathbf{r}}_i \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & {}^i\mathbf{R}_{i-1} \end{bmatrix},$$

$$\boldsymbol{\zeta}_i = \begin{bmatrix} [{}^i\mathbf{R}_{i-1}(\mathbf{V}_{j_{i-1}} - \hat{\mathbf{r}}_i \mathbf{\Omega}_{j_{i-1}})] \times \dot{\theta}_i \mathbf{e}_3 \\ ({}^i\mathbf{R}_{i-1} \mathbf{\Omega}_{j_{i-1}}) \times \dot{\theta}_i \mathbf{e}_3 \end{bmatrix}$$

$$\text{当 } i=0 \text{ 时, } {}^0\mathbf{H}_b = \begin{bmatrix} {}^0\mathbf{R}_b & -{}^0\mathbf{R}_b\hat{\mathbf{r}}_{bt} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & {}^0\mathbf{R}_b \end{bmatrix},$$

$$\boldsymbol{\zeta}_0 = \begin{bmatrix} [{}^0\mathbf{R}_b(\mathbf{V}_b - \hat{\mathbf{r}}_{bt} \mathbf{\Omega}_b)] \times \dot{\theta}_0 \mathbf{e}_3 \\ ({}^0\mathbf{R}_b \mathbf{\Omega}_b) \times \dot{\theta}_0 \mathbf{e}_3 \end{bmatrix}$$

因此,给定 $\mathbf{V}_b$ 和 $\mathbf{\Omega}_b$ 以及关节转动状态 $\{(\theta_i, \dot{\theta}_i, \ddot{\theta}_i) | i=0, 1, 2\}$, 即可通过式(9)计算各连杆的速度和加速度。

2.2 鱼体外力分析

2.2.1 重力和浮力

仿生机器鱼在游动过程中,尾部各个关节重心与浮心重合,所受的重力和浮力平衡,可以忽略其对机器鱼运动的影响,而机器鱼头部的重心和浮心不重合,所受的重力和浮力在坐标系 C_b 下表示为

$$\begin{cases} \mathbf{F}_{\text{grav}} = m_b \mathbf{g} \cdot {}^b\mathbf{R}_w \mathbf{e}_3, \mathbf{F}_{\text{buoy}} = -m_b \mathbf{g} \cdot {}^b\mathbf{R}_w \mathbf{e}_3 \\ \mathbf{T}_{\text{grav}} = \mathbf{r}_{\text{bm}} \times \mathbf{F}_{\text{grav}}, \mathbf{T}_{\text{buoy}} = \mathbf{0}_{3 \times 3} \end{cases} \quad (10)$$

式中: $\mathbf{F}_{\text{grav}}$ 、 $\mathbf{F}_{\text{buoy}}$ 和 $\mathbf{T}_{\text{grav}}$ 、 $\mathbf{T}_{\text{buoy}}$ 分别表示机器鱼头部受的重力、浮力和重力矩、浮力矩。

2.2.2 头部流体阻力

准稳态升阻力模型^[21]可描述仿生机器鱼头部流体阻力,定义头部的攻角 α 和侧滑角 β 分别为

$$\alpha = \arctan \frac{w}{u} \quad (11)$$

$$\beta = \arcsin \frac{v}{|\mathbf{V}_b|} \quad (12)$$

头部所受的流体阻力由速度坐标系 C_v 转化到机体坐标系 C_b 下可以表示为

$$\begin{cases} \mathbf{F}_{\text{hydro}} = {}^b\mathbf{R}_v \cdot \frac{1}{2} \rho S_b |\mathbf{V}_b|^2 \begin{bmatrix} -C_{b,d}(\alpha) \\ C_{b,sf}(\beta) \\ -C_{b,l}(\alpha) \end{bmatrix} \\ \mathbf{T}_{\text{hydro}} = {}^b\mathbf{R}_v \cdot \frac{1}{2} \rho S_b |\mathbf{V}_b|^2 \begin{bmatrix} C_{b,\tau x}(\beta) \\ C_{b,\tau y}(\alpha) \\ C_{b,\tau z}(\beta) \end{bmatrix} + \mathbf{K}_b \boldsymbol{\Omega}_b \end{cases} \quad (13)$$

其中: $\mathbf{F}_{\text{hydro}}$ 和 $\mathbf{T}_{\text{hydro}}$ 表示机器鱼头部受到的流体阻力; ρ 为流体密度; S_b 为头部的有效面积; $C_{b,d}$ 、 $C_{b,sf}$ 、 $C_{b,l}$ 分别为与攻角 α 和 β 相关的阻力系数、侧滑力系数、升力系数; $C_{b,\tau x}$ 、 $C_{b,\tau y}$ 、 $C_{b,\tau z}$ 分别为各个坐标轴方向上的力矩系数; $\mathbf{K}_b$ 表示转动阻尼项的系数矩阵。

2.2.3 胸鳍力

仿生机器鱼胸鳍受到的水动力是其实现三维运动的主要外力,胸鳍质心处的速度为

$$\mathbf{V}_p = \mathbf{V}_b + \hat{\boldsymbol{\Omega}}_b \mathbf{r}_{bp} \quad (14)$$

式中: $\mathbf{r}_{bp}$ 表示头部浮心到胸鳍质心的矢量。定义胸鳍绕机体坐标系 y 轴顺时针旋转的角度 θ_p 为正,则胸鳍攻角为

$$\alpha_p = \gamma + \theta_p \quad (15)$$

式中: $\gamma = \arctan(V_{pz}/V_{px})$ 。忽略胸鳍侧滑力的影响,则胸鳍的升阻力和力矩可表示为

$$\begin{bmatrix} f_{p,\text{drag}} \\ f_{p,\text{lift}} \\ \tau_p \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \rho (V_{px}^2 + V_{pz}^2) S_p \begin{bmatrix} C_{p,d}(\alpha_p) \\ C_{p,l}(\alpha_p) \\ C_{p,\tau}(\alpha_p) \end{bmatrix} \quad (16)$$

式中: $f_{p,\text{drag}}$ 、 $f_{p,\text{lift}}$ 、 τ_p 分别表示胸鳍受到的阻力、升力和阻力矩; S_p 表示胸鳍的面积; $C_{p,d}$ 、 $C_{p,l}$ 、 $C_{p,\tau}$ 分别表示与胸鳍攻角相关的阻力系数、升力系数和力矩系数。

将胸鳍升力与阻力转换到坐标系 C_b 下可表

示为

$$\mathbf{F}_p = \begin{bmatrix} -f_{p,\text{drag}} \cos \gamma + f_{p,\text{lift}} \sin \gamma \\ 0 \\ -f_{p,\text{drag}} \sin \gamma - f_{p,\text{lift}} \cos \gamma \end{bmatrix}, \mathbf{T}_p = \begin{bmatrix} 0 \\ \tau_p \\ 0 \end{bmatrix} \quad (17)$$

进一步,考虑左右胸鳍并将胸鳍力平移到浮心,可以表示为

$$\begin{cases} \mathbf{F}_{\text{pect}} = \mathbf{F}_{\text{pl}} + \mathbf{F}_{\text{pr}} \\ \mathbf{T}_{\text{pect}} = \mathbf{T}_{\text{pl}} + \mathbf{T}_{\text{pr}} + \hat{\mathbf{r}}_{\text{bpl}} \mathbf{F}_{\text{pl}} + \hat{\mathbf{r}}_{\text{bpr}} \mathbf{F}_{\text{pr}} \end{cases} \quad (18)$$

式中: $\mathbf{F}_{\text{pect}}$ 和 $\mathbf{T}_{\text{pect}}$ 即为左右胸鳍对机器鱼头部的合力和力矩在坐标系 C_b 下的表达。

2.2.4 尾部流体阻力

对于多关节尾部,连杆 L_i 受到的黏滞阻力在关节坐标系 C_i 下表示为

$$\begin{cases} \mathbf{F}_{\text{vis}_i} = \begin{bmatrix} c_{fx} | \mathbf{V}_{j_i,x} | \mathbf{V}_{j_i,x} \\ c_{fy} | \mathbf{V}_{j_i,y} | \mathbf{V}_{j_i,y} \\ c_{fz} | \mathbf{V}_{j_i,z} | \mathbf{V}_{j_i,z} \end{bmatrix} \\ \mathbf{T}_{\text{vis}_i} = \begin{bmatrix} c_{\tau x} | \mathbf{V}_{j_i,x} | \mathbf{V}_{j_i,x} \\ c_{\tau y} | \mathbf{V}_{j_i,y} | \mathbf{V}_{j_i,y} \\ c_{\tau z} | \mathbf{V}_{j_i,z} | \mathbf{V}_{j_i,z} \end{bmatrix} \end{cases} \quad (19)$$

式中: $\mathbf{F}_{\text{vis}_i}$ 和 $\mathbf{T}_{\text{vis}_i}$ 表示机器鱼尾部连杆 L_i 受的黏滞阻力和阻力矩; c_{fx} 、 c_{fy} 、 c_{fz} 和 $c_{\tau x}$ 、 $c_{\tau y}$ 、 $c_{\tau z}$ 分别为黏滞阻力和力矩系数。

对于尾部 L_0 和 L_1 连杆,其受到的黏滞阻力即为流体阻力 $\mathbf{F}_{h_i}$ 和力矩 $\mathbf{T}_{h_i}$,即 $\mathbf{F}_{h_i} = \mathbf{F}_{\text{vis}_i}$ 、 $\mathbf{T}_{h_i} = \mathbf{T}_{\text{vis}_i}$; 由于尾部 L_2 连杆上固连有尾鳍,因此连杆 L_2 受的流体阻力在坐标系 C_2 下表示为

$$\begin{cases} \mathbf{F}_{h_2} = \mathbf{F}_{\text{vis}_2} + \mathbf{F}_{\text{cf}} \\ \mathbf{T}_{h_2} = \mathbf{T}_{\text{vis}_2} + \mathbf{T}_{\text{cf}} + l_{\text{cf}} \hat{\mathbf{e}}_1 \mathbf{F}_{\text{cf}} \end{cases} \quad (20)$$

式中: l_{cf} 表示从关节 J_2 到连杆 L_2 的尾鳍升力中心的长度; $\mathbf{F}_{\text{cf}}$ 和 $\mathbf{T}_{\text{cf}}$ 表示尾鳍水动力在坐标系 C_2 下的表达。

尾鳍受力分析如图2所示,计算尾鳍受力点的速度

$$\mathbf{V}_{\text{cf}} = \mathbf{V}_{j_2} + \hat{\boldsymbol{\Omega}}_{j_2} l_{\text{cf}} \mathbf{e}_1 \quad (21)$$

则尾鳍升阻力和力矩可以表示为

$$\begin{bmatrix} D \\ L \\ \tau_{\text{cf}} \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \rho (V_{\text{cf}x}^2 + V_{\text{cf}y}^2) S_{\text{cf}} \begin{bmatrix} C_{\text{cf},d}(\alpha_{\text{cf}}) \\ C_{\text{cf},l}(\alpha_{\text{cf}}) \\ C_{\text{cf},\tau}(\alpha_{\text{cf}}) \end{bmatrix} \quad (22)$$

式中: D 、 L 、 τ_{cf} 分别为尾鳍受到的阻力、升力和力矩; S_{cf} 表示尾鳍的有效面积; $C_{\text{cf},d}$ 、 $C_{\text{cf},l}$ 、 $C_{\text{cf},\tau}$ 分别为与尾鳍攻角 α_{cf} 有关的阻力系数、升力系数、力矩系数。

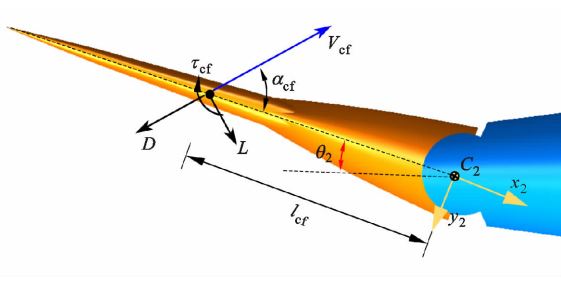


图2 尾鳍受力分析

Fig. 2 Force analysis of caudal fin

将尾鳍受力转换到坐标系 C_2 下得

$$\mathbf{F}_{cf} = \begin{bmatrix} -D\cos\alpha_{cf} + L\sin\alpha_{cf} \\ D\sin\alpha_{cf} + L\cos\alpha_{cf} \\ 0 \end{bmatrix}, \mathbf{T}_{cf} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \tau_{cf} \end{bmatrix} \quad (23)$$

2.3 Newton-Euler 方程

根据 Newton-Euler 法, 连杆 L_i (质心) 受到的力和力矩可表示为

$$\begin{bmatrix} \mathbf{F}_i \\ \mathbf{T}_i \end{bmatrix} - {}^i\mathbf{K}_{i+1} \begin{bmatrix} \mathbf{F}_{i+1} \\ \mathbf{T}_{i+1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{F}_{h_i} \\ \mathbf{T}_{h_i} \end{bmatrix} = \Phi_i \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{V}}_{j_i} \\ \dot{\mathbf{\Omega}}_{j_i} \end{bmatrix} + \beta_i \quad (24)$$

其中

$$\begin{aligned} {}^i\mathbf{K}_{i+1} &= \begin{bmatrix} {}^i\mathbf{R}_{i+1} & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ \hat{\mathbf{r}}_i {}^i\mathbf{R}_{i+1} & {}^i\mathbf{R}_{i+1} \end{bmatrix} \\ \Phi_i &= \begin{bmatrix} \mathbf{M}_i & -\mathbf{M}_i l_{c_i} \hat{\mathbf{e}}_1 \\ \mathbf{M}_i l_{c_i} \hat{\mathbf{e}}_1^T & \Lambda_i \end{bmatrix} \\ \beta_i &= \begin{bmatrix} \mathbf{M}_i \hat{\mathbf{\Omega}}_{j_i} \mathbf{V}_{j_i} + \mathbf{M}_i \hat{\mathbf{\Omega}}_{j_i} (\hat{\mathbf{\Omega}}_{j_i} l_{c_i} \hat{\mathbf{e}}_1) \\ \hat{\mathbf{\Omega}}_{j_i} (\Lambda_i \hat{\mathbf{\Omega}}_{j_i}) + \mathbf{M}_i l_{c_i} \hat{\mathbf{e}}_1 (\hat{\mathbf{\Omega}}_{j_i} \mathbf{V}_{j_i}) \end{bmatrix} \end{aligned}$$

式中: Φ_i 表示考虑机器鱼尾部关节附加质量和附加转动惯量的惯性矩阵; β_i 表示尾部连杆的哥式力和向心力; l_{c_i} 表示关节点 J_i 到连杆 L_i 质心的长度; $\mathbf{F}_i$ 和 $\mathbf{T}_i$ 为关节点 J_i 对连杆 L_i 的作用力和力矩, 所有关节间作用力均在自身关节坐标系 C_i 下表达。

联合式(9)和式(24), 将尾部连杆间的相互作用力由最后一杆 L_2 开始反向迭代, 加速度和速度向前迭代, 可求得连杆 L_0 对头部的作用力在 C_0 下表示为

$$\begin{bmatrix} \mathbf{F}_0 \\ \mathbf{T}_0 \end{bmatrix} = \Gamma \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{V}}_b \\ \dot{\mathbf{\Omega}}_b \end{bmatrix} + \gamma \quad (25)$$

其中

$$\begin{aligned} \Gamma &= \sum_{i=0}^2 {}^0\mathbf{K}_i \Phi_i {}^i\mathbf{H}_b \\ \gamma &= \sum_{i=0}^2 {}^0\mathbf{K}_i \Phi_i \sum_{j=0}^i {}^i\mathbf{H}_j \left[\zeta_j + \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ \ddot{\theta}_j \mathbf{e}_3 \end{bmatrix} \right] + \\ &\quad \sum_{i=0}^2 {}^0\mathbf{K}_i \left[\beta_i - \begin{bmatrix} \mathbf{F}_{h_i} \\ \mathbf{T}_{h_i} \end{bmatrix} \right] \end{aligned}$$

将尾部第一关节的力平移到浮心, 则尾部对头部的作用力为

$$\begin{bmatrix} \mathbf{F}_{tail} \\ \mathbf{T}_{tail} \end{bmatrix} = \tilde{\Gamma} \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{V}}_b \\ \dot{\mathbf{\Omega}}_b \end{bmatrix} + \tilde{\gamma} \quad (26)$$

其中

$$\begin{aligned} \tilde{\Gamma} &= \begin{bmatrix} -{}^0\mathbf{R}_b^T & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ -\hat{\mathbf{r}}_{bt} {}^0\mathbf{R}_b^T & -{}^0\mathbf{R}_b^T \end{bmatrix} \Gamma \\ \tilde{\gamma} &= \begin{bmatrix} -{}^0\mathbf{R}_b^T & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ -\hat{\mathbf{r}}_{bt} {}^0\mathbf{R}_b^T & -{}^0\mathbf{R}_b^T \end{bmatrix} \gamma \end{aligned}$$

进一步, 以机器鱼头部为研究对象, 列写 Newton-Euler 方程

$$\mathbf{F} = \mathbf{H}\dot{\mathbf{U}} + \mathbf{N} \quad (27)$$

其中 $\mathbf{F} = \begin{bmatrix} \mathbf{F}_{extb} \\ \mathbf{T}_{extb} \end{bmatrix}$ 表示头部受的合外力, 可表示为

$$\mathbf{F}_{extb} = \mathbf{F}_{grav} + \mathbf{F}_{buoy} + \mathbf{F}_{hydro} + \mathbf{F}_{pect} + \mathbf{F}_{tail}, \mathbf{T}_{extb} = \mathbf{T}_{grav} + \mathbf{T}_{buoy} + \mathbf{T}_{hydro} + \mathbf{T}_{pect} + \mathbf{T}_{tail}, \dot{\mathbf{U}} = \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{V}}_b \\ \dot{\mathbf{\Omega}}_b \end{bmatrix}; \mathbf{H} =$$

$\begin{bmatrix} \mathbf{M}_s & -\mathbf{M}_s \hat{\mathbf{r}}_{bm} \\ \mathbf{M}_s \hat{\mathbf{r}}_{bm} & \Lambda_s \end{bmatrix}$ 表示考虑了机器鱼头部附加质量和附加转动惯量的惯性矩阵; $\mathbf{N} = \begin{bmatrix} \mathbf{M}_s \hat{\mathbf{\Omega}}_b \mathbf{V}_b + \mathbf{M}_s \hat{\mathbf{\Omega}}_b (\hat{\mathbf{\Omega}}_b \mathbf{r}_{bm}) \\ \hat{\mathbf{\Omega}}_b (\Lambda_s \hat{\mathbf{\Omega}}_b) + \mathbf{M}_s \hat{\mathbf{r}}_{bm} (\hat{\mathbf{\Omega}}_b \mathbf{V}_b) \end{bmatrix}$ 表示头部的哥式力和向心力。

进一步, 联立式(26)和式(27)可得机器鱼的动力学方程

$$\dot{\mathbf{U}} = (\mathbf{I} - \mathbf{H}^{-1} \tilde{\Gamma})^{-1} \cdot [-\mathbf{H}^{-1} \mathbf{N} + \mathbf{H}^{-1} (\tilde{\mathbf{F}} + \tilde{\gamma})] \quad (28)$$

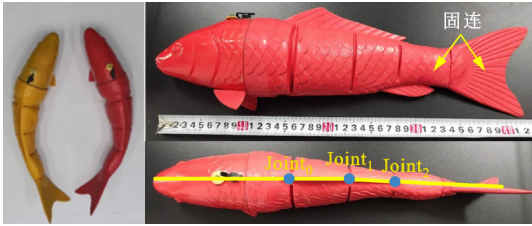
式中: $\tilde{\mathbf{F}}$ 表示除了尾部力以外的其他外力。通过式(5)给定关节转动状态 $(\theta_i, \dot{\theta}_i, \ddot{\theta}_i)$, 进一步, 给定胸鳍转角, 通过计算式(28)可以求得机器鱼浮心的加速度 $\dot{\mathbf{V}}_b$ 和角加速度 $\dot{\mathbf{\Omega}}_b$ 在机体坐标系 C_b 下的表达, 进而通过式(6)~(8)可获得机器鱼在世界坐标系 C_w 下的实时位置和姿态。

3 仿生机器鱼水动力实验与仿真分析

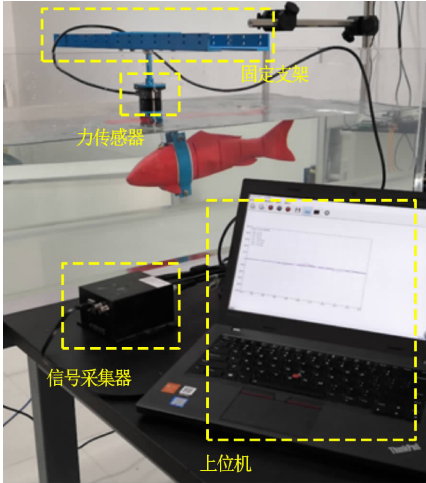
3.1 水动力实验

为了验证动力学模型中水动力分析的准确性, 采用如图 3(a) 所示的深圳乐智机器人有限公司机器鱼产品和图 3(b) 所示的水动力测试平台获得机器鱼尾部摆动产生的水动力。

该机器鱼物理样机能够设置不同速度等级, 在不同速度等级下, 尾部摆动频率相同 (2 Hz), 最大摆动幅度不同。实验中利用六维力传感器对低、中、



(a)多关节仿生机器鱼



(b)水动力观测设备

图 3 实验设备

Fig. 3 Experimental equipment

高 3 个速度等级(固定头部测得的尾部最大摆动幅度分别为 25° 、 32° 、 40°)条件下尾部产生的水动力进行测量,每个速度等级下测量 6 组数据,并进行降噪处理和统计学分析。采用摄像机拍摄不同速度等级下尾部的摆动图像,利用三连杆近似拟合柔性尾部的中线,获得三关节尾部的摆动规律,图 4 给出了低速摆动时一个周期内的尾部运动时序图。通过调整 CPG 模型参数,可以得到与之匹配的机器鱼物理样机的关节角 $\theta_i(t)$ 变化规律,图 5 所示为低速摆动时 CPG 模型输出的机器鱼各个关节控制信号。

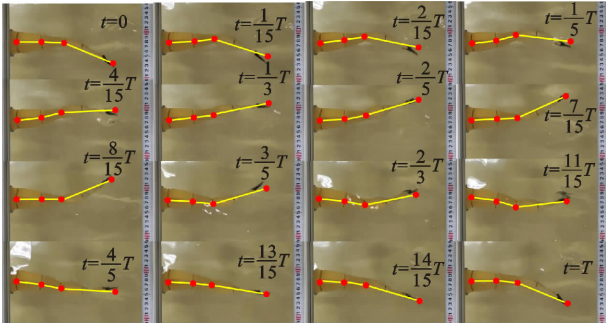


图 4 低速摆动时一个周期内的尾部运动时序图

Fig. 4 Time sequence diagram of tail swing in one period during low speed swing

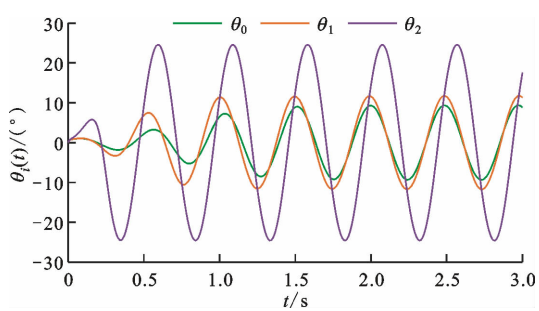


图 5 低速摆动时仿生机器鱼各个关节 CPG 控制信号

Fig. 5 CPG control signals of each joint of bionic robot fish during low speed swing

3.2 实验结果与仿真结果对比

表 1 给出了仿生机器鱼的水动力学和机构动力学耦合模型仿真过程中各个体段的物理参数,其中,质量矩阵 $\mathbf{M}$ 和转动惯量 $\mathbf{A}$ 均为考虑了附加质量效应的值(头部和尾部关节分别等效为规则的椭球和圆柱形来考虑)。同时,为了考虑机器鱼受到的时变非线性水动力,本文分析鱼体各部分的水动力用到的水动力系数,通过 CFD 仿真^[22-23]分析获得。

将物理样机的关节角变化规律 $\theta_i(t)$ 输入至本文所建立的动力学模型,设置仿真模型的机器鱼尾部尺寸与实验模型尺寸一致,求取 3 个速度等级下

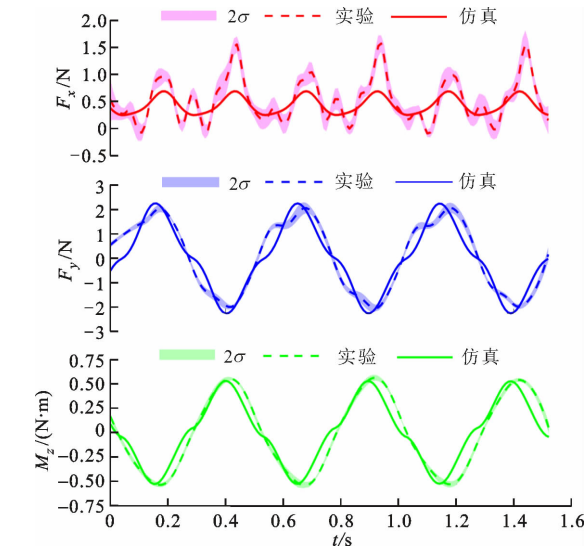
尾部水动力的合力 $\sum_{i=0}^2 {}^b \mathbf{R}_i \mathbf{F}_{h_i}$ 沿 $o_b x_b$ 和 $o_b y_b$ 轴的分量(即推进力 F_x 和侧向力 F_y)以及合力矩 $\sum_{i=0}^2 {}^b \mathbf{R}_i \mathbf{T}_{h_i}$ 绕 $o_b z_b$ 轴的分量,对比本文所建立的动力学模型仿真结果与实验测量值,如图 5 所示。

图 6 给出了机器鱼尾部水动力时历曲线,从图 6 可以看出,在不同速度等级下,推进力 F_x 恒为正值,侧向力 F_y 在 0 附近周期性波动。仿真获得的侧向力和绕 $o_b z_b$ 轴的水动力矩结果与实验测量值具有较高的吻合性,但是推进力的实验测量值大于仿真结果。计算平均推进力发现,低速摆动下实验测量值为 0.529 1 N,仿真结果为 0.433 76 N,偏差近 18%,其他速度等级条件下也存在相似结果。造成该现象的原因可能为本文所建立的耦合动力学模型中未考虑尾涡作用的影响,而机器鱼样机在实际游动过程中产生具有射流效应的推力型反卡门涡街,对尾鳍的推力有增强作用^[24-25]。随着机器鱼的游动,尾涡逆游动方向逐渐消散,但是本实验中机器鱼在原位摆动,尾涡不断在尾鳍末端积累,进一步放大了尾涡作用,使推进力的实验测量值大于仿真计算值。仿真获得的推进力时历曲线与实验获得的推进

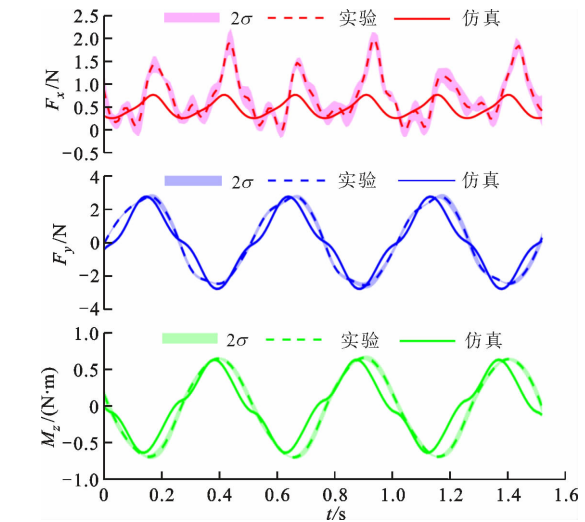
表 1 仿生机器鱼物理参数
Table 1 Physical parameters of robot fish

机器鱼头部		机器鱼尾部 L_0, L_1		机器鱼尾部 L_2	
关节参数	数值	关节参数	数值	关节参数	数值
m_b/kg	1.758	$m_0, m_1/\text{kg}$	0.351, 0.252	m_2/kg	0.203
$\mathbf{M}_s/\text{kg}$	$3.24\mathbf{I}_{3\times 3}$	$\mathbf{M}_0, \mathbf{M}_1/\text{kg}$	$0.69\mathbf{I}_{3\times 3}, 0.59\mathbf{I}_{3\times 3}$	$\mathbf{M}_2/\text{kg}$	$0.59\mathbf{I}_{3\times 3}$
$\mathbf{J}_b/(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$	$[0.001\ 9; 0.042\ 2; 0.012\ 3]\mathbf{I}_{3\times 3}$	$J_{0z}/(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$	0.003 12	$J_{2z}/(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$	0.000 152
$\mathbf{A}_s/(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$	$[0.002\ 8; 0.048\ 6; 0.018\ 7]\mathbf{I}_{3\times 3}$	$J_{1z}/(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$	0.002 41	$\Lambda_{2z}/(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$	0.009 92
$S_b, S_p/\text{m}^2$	0.006 72, 0.005 486	$\Lambda_{0z}/(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$	0.000 603	l_2/m	0.13
$\mathbf{r}_{bm}/\text{m}$	$[0; 0; 0.01]$	$\Lambda_{1z}/(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$	0.000 503	l_{c_2}/m	0.06
$\mathbf{r}_{bt}/\text{m}$	$[-0.16; 0; 0]$	$l_0, l_1/\text{m}$	0.062	l_{cl}/m	0.08
$\mathbf{r}_{bpl}, \mathbf{r}_{bpr}/\text{m}$	$[0.040\ 7; \pm 0.05; 0.02]$	$l_{c_0}, l_{c_1}/\text{m}$	0.048	S_{cl}/m^2	0.006 5

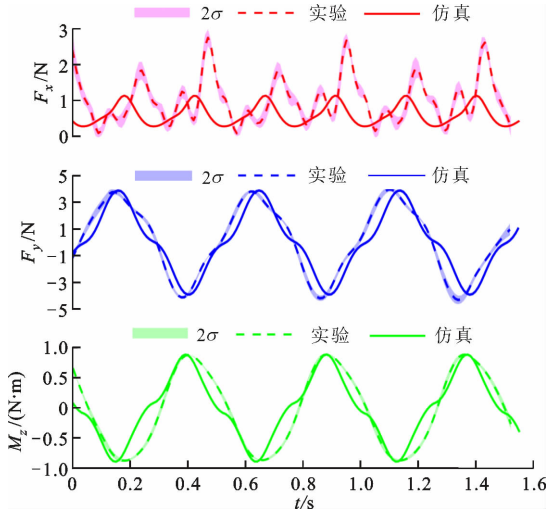
力时历曲线具有相似的变化规律,通过仿真和实验分析,验证了动力学模型的有效性和水动力学分析的准确性。



(a)低速摆动下尾部水动力



(b)中速摆动下尾部水动力



(c)高速摆动下尾部水动力

图 6 机器鱼尾部水动力时历曲线

Fig. 6 Hydrodynamic time history curve of fish tail

3.3 耦合动力学仿真

为了进一步分析本文所建立的仿生机器鱼的空间动力学模型并测试其有效性,利用 Matlab 进行动力学仿真。给定一组 CPG 模型参数: $r_1=1, r_2=1.3, r_3=5.6; \varphi_1=\varphi_3=30^\circ, \varphi_2=90^\circ, h_1=1, h_2=2; c_i=6$ 。当胸鳍摆角为 0° 时,通过调整机器鱼尾部摆动角频率 ω_i 和偏置 b_i ,可以改变 CPG 模型输出的关节摆角信号 $\theta_i(t)$,进而实现机器鱼在平面内的任意游动;若给定胸鳍转角,机器鱼可以实现三维空间内运动。

图 7 给出了仿生机器鱼的平面直游时的运动学参数时历曲线。图 7(a)表明机器鱼直游时仅有沿 $o_w x_w$ 轴方向的位移 x ;图 7(c)表明直游时沿 $o_w x_w$ 轴方向的速度 u 由 0 增大至稳定值,其他方向的速度均值均为 0。图 7(b)和图 7(d)显示机器鱼直游时

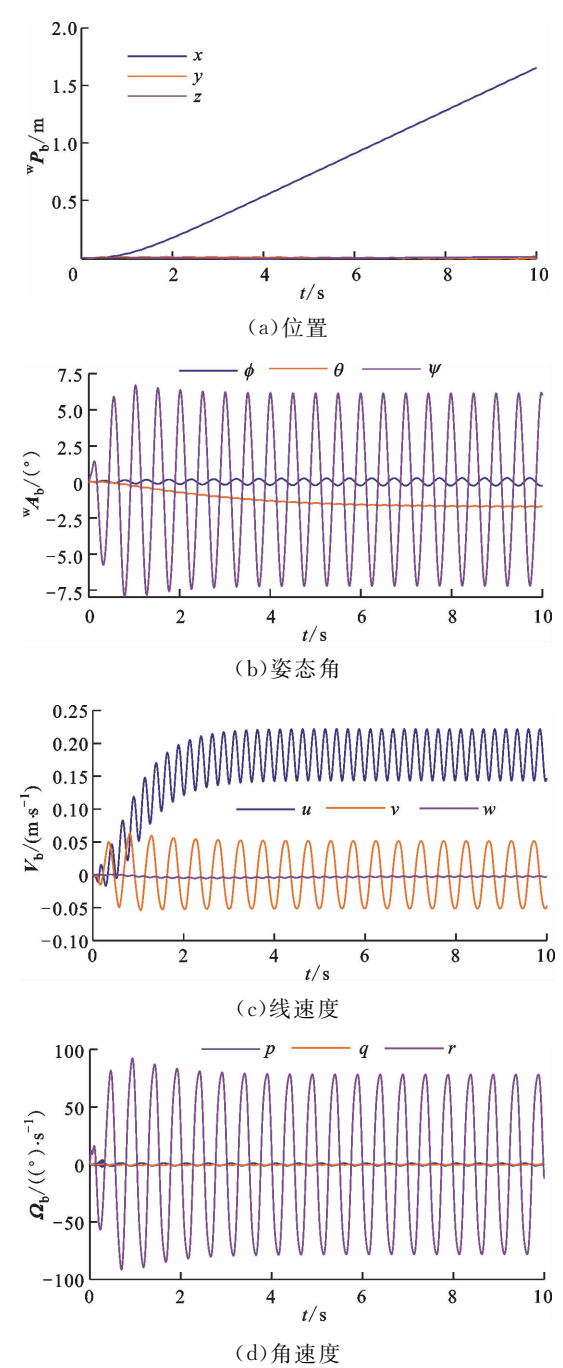


图 7 仿生机器鱼平面直游运动状态时历曲线
Fig. 7 Bionic robot fish straight motion curve in plane

仅有绕 $o_w z_w$ 轴的偏航角 ψ 和角速度 r ,其他方向的角度和角速度也维持在 0 附近。图 8(a)为仿生机器鱼的平面转向游动的位移时历曲线,图 8(b)为仿生机器鱼的三维空间圆周游动的位移时历曲线。以上仿真结果完全符合预期分析和机器鱼的实际运动特征,需要指出的是,由于头部的转蹯运动,仿生机器鱼游动过程的速度、位移等时历曲线并非光滑曲线,而是呈现出一定的波动性。

以上 3.2 节中实验测量的水动力与相同参数下

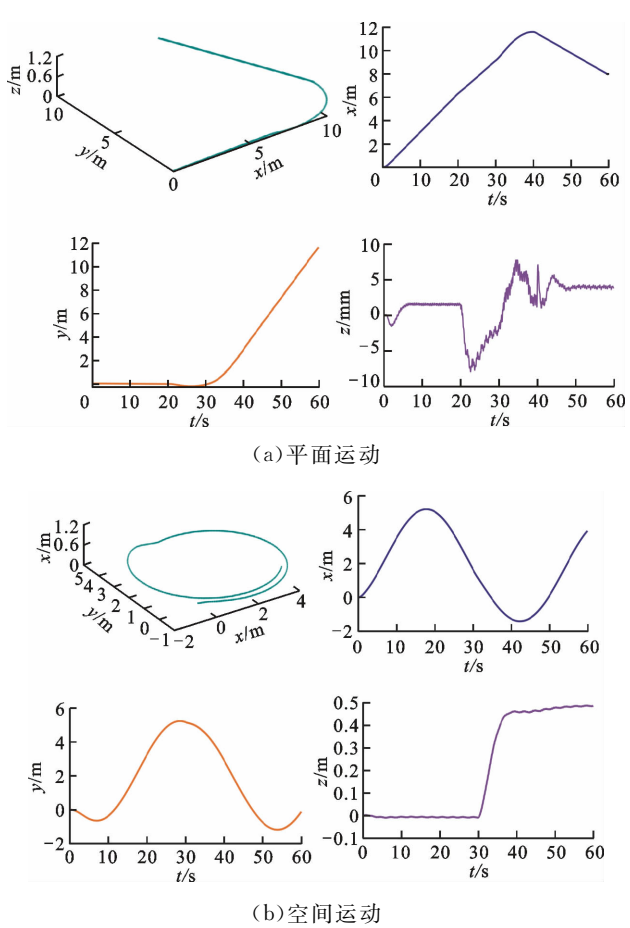


图 8 仿生机器鱼游动位移时历曲线
Fig. 8 Swimming displacement diagram of bionic robot fish

的仿真数据在结果上体现出了较好的一致性,同时,基于 Newton-Euler 法推导建立的机器鱼空间耦合动力学模型在本节中能够实现预期仿真运动效果,在一定程度上体现了建立模型的合理性和有效性。

进一步,定义了稳定向前游速和头部稳定性两个评价仿生机器鱼游动性能的指标。用速度时均值衡量稳定向前游速,定义如下

$$u = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} \| \mathbf{v}_b(\tau) \| d\tau \quad (29)$$

机器鱼直游时,头部的偏航摆动呈现周期性,用偏航角摆幅 δ 来衡量游动稳定性(δ 与稳定性成反比),定义如下

$$\delta = \frac{1}{2} [\max_{\tau \in [t, t+T]} \psi(t) - \min_{\tau \in [t, t+T]} \psi(t)] \quad (30)$$

根据所建立的耦合动力学模型,分析机器鱼运动的 3 个特征参数(CPG 模型输入)的影响,即关节间相位差 φ_i 、摆动角频率 ω 和最大摆动幅度 A 对机器鱼的平均游动速度 u 和头部稳定性 δ 的影响,仿真分析结果如图 9 所示。

从图 9(a)和 9(b)可以看出,以 $\varphi = 30^\circ$ 和 $\varphi =$

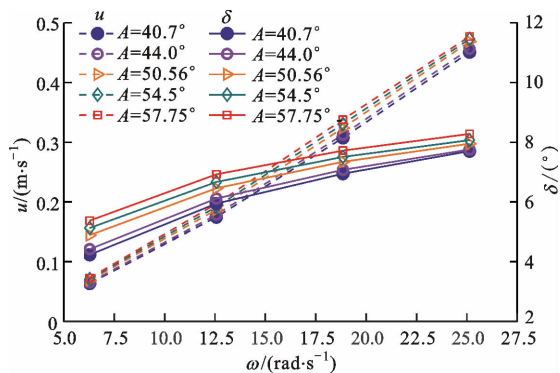
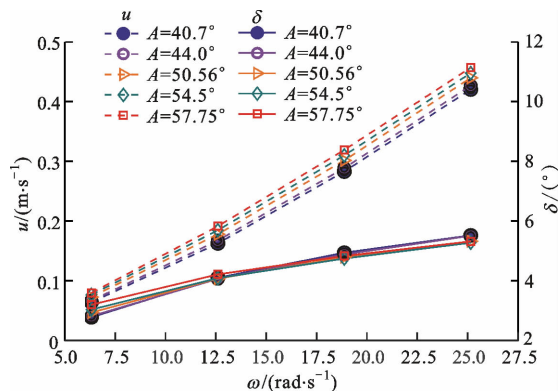
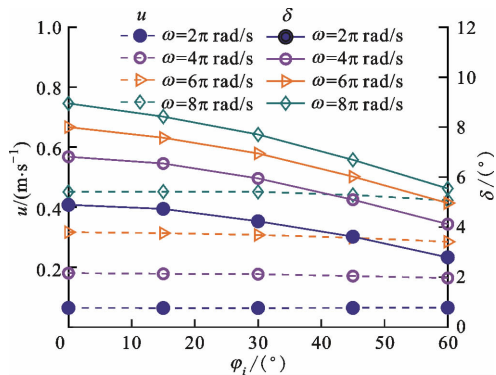
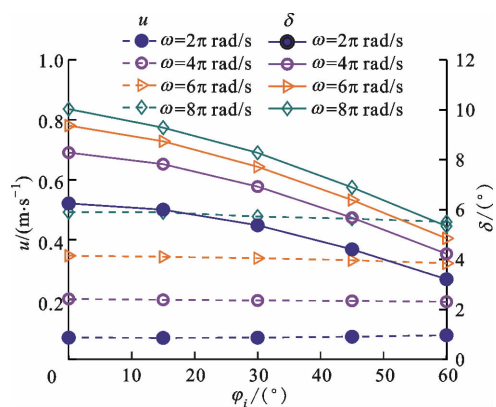
(a) $\varphi=30^\circ$ 时不同 ω 和 A 的游动性能(b) $\varphi=60^\circ$ 时不同 ω 和 A 的游动性能(c) $A=40.7^\circ$ 时不同 ω 和 φ 的游动性能(d) $A=57.75^\circ$ 时不同 ω 和 φ 的游动性能

图9 稳态向前游速和头部稳定性

Fig. 9 Steady forward speed and head stability

60° 为例,在合理的摆动频率和幅度范围内,关节间相位差一致时,摆动角频率 ω 和最大摆动幅度 A 与 u 和 β 近似成线性关系,随着 ω 和 A 增大, β 和 u 均增大。因此,增大尾部摆动频率和摆动幅度,能够获得更大的平均游动速度,但是也会降低仿生机器鱼的游动稳定性。

此外,从图 9(c) 和 9(d) 可以看出,在角频率 ω 一定的情况下,相比于稳定游速 u ,关节间相位差 φ 对于稳定性 β 的影响更加明显,较大的 φ 会带来更好的稳定性;然而,随着 φ 增大,平均游速 u 有逐渐减小的趋势,但是变化幅度较小。因此,设计仿生机器鱼的 CPG 模型参数时,在满足平均游速对尾部摆动频率和最大摆动幅度要求的前提下,应选择较大的关节间相位差,以获得更好的游动稳定性。

4 结 论

本文基于细长体理论计算了三关节仿生机器鱼游动的水动力,采用 Newton-Euler 法建立了机器鱼空间游动的机构动力学模型,并分析了各运动特征参数对机器鱼游动性能的影响,主要结论如下:

(1) 利用机器鱼物理样机和水动力测量设备开展实验,并通过 Matlab 进行机器鱼运动仿真,验证了所提出的机器鱼游动过程的耦合动力学模型的合理性和有效性;

(2) 在相同关节间相位差条件下,摆动角频率和最大摆动幅度与平均游速近似成正比,与头部稳定性成反比,较大的摆动频率和摆动幅度会使得平均游动速度增加,但也会降低机器鱼的游动稳定性;

(3) 在相同角频率条件下,相比于稳定游速,头部稳定性对关节间相位差的变化更加敏感,较大的关节间相位差能够获得更好的稳定性,在设置机器鱼的 CPG 模型参数时,应尽量选择较大的关节间相位差。

通过本文研究,建立了精确的仿生机器鱼二维、三维多模态游动耦合动力学模型,为进一步研究仿生机器鱼复杂轨迹跟踪问题提供了前提和理论基础。目前作者正着力于高机动性机器鱼物理样机的开发研制,计划在未来进行机器鱼空间机动性实验研究,进一步对本文建立的模型进行验证,同时,探究近水面尾部击水面积、攻角等参数对机器鱼游动性能的影响。

参考文献:

[1] ZHOU Yangfan, WU Yingnian, ZHOU Chao, et al.

- Moving target tracking control of a biomimetic robotic fish [C]//2020 Chinese Automation Congress (CAC). Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2020: 3961-3965.
- [2] WEN Li, REN Ziyu, DI SANTO V, et al. Understanding fish linear acceleration using an undulatory biorobotic model with soft fluidic elastomer actuated morphing median fins [J]. *Soft Robotics*, 2018, 5(4): 375-388.
- [3] XIE Fengran, ZUO Qiyang, CHEN Qinglong, et al. Designs of the biomimetic robotic fishes performing body and/or caudal fin (BCF) swimming locomotion; a review [J]. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 2021, 102(1): 13.
- [4] 王安忆, 刘贵杰, 王新宝, 等. 身体/尾鳍推进模式仿生机器鱼研究的进展与分析 [J]. *机械工程学报*, 2016, 52(17): 137-146.
- WANG Anyi, LIU Guijie, WANG Xinbao, et al. Development and analysis of body and/or caudal fin biomimetic robot fish [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2016, 52(17): 137-146.
- [5] YU Junzhi, TAN Min, CHEN Jian, et al. A survey on CPG-inspired control models and system implementation [J]. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, 2014, 25(3): 441-456.
- [6] WANG Zhelong, GAO Qin, ZHAO Hongyu. CPG-inspired locomotion control for a snake robot basing on nonlinear oscillators [J]. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 2017, 85(2): 209-227.
- [7] 袁俊. 仿生机器鱼游动与滑翔运动的建模与控制研究 [D]. 北京: 中国科学院大学, 2017.
- [8] 杨越麒. 面向仿生机器鱼的容错控制方法研究 [D]. 北京: 中国科学院大学, 2019.
- [9] ADAMS M C, SEARS W R. Slender-body theory: review and extension [J]. *Journal of the Aeronautical Sciences*, 1953, 20(2): 85-98.
- [10] YU Junzhi, WU Zhengxing, WANG Ming, et al. CPG network optimization for a biomimetic robotic fish via PSO [J]. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, 2016, 27(9): 1962-1968.
- [11] 汪明. 基于CPG的仿生机器鱼运动建模与控制 [D]. 北京: 中国科学院自动化研究所, 2010.
- [12] IJSPEERT A J, CRESPI A, RYCZKO D, et al. From swimming to walking with a salamander robot driven by a spinal cord model [J]. *Science*, 2007, 315(5817): 1416-1420.
- [13] KIM E J, YOUM Y. Design and dynamic analysis of fish robot; PoTuna [C]//Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2004: 4887-4892.
- [14] KIM E, YOUM Y. Simulation study of fish swimming modes for aquatic robot system [C]//Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2005: 3330-3335.
- [15] CORKE P. 机器人学、机器视觉与控制: MATLAB算法基础 [M]. 刘荣, 译. 北京: 电子工业出版社, 2016.
- [16] YU Junzhi, WANG Long, TAN Min. A framework for biomimetic robot fish's design and its realization [C]//Proceedings of the 2005 American Control Conference. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2005: 1593-1598.
- [17] XUE Gang, LIU Yanjun, SI Weiwei, et al. Evolution rule and hydrodynamic effect of fluid field around fish-like model from starting to cruising [J]. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, 2020, 14(1): 580-592.
- [18] 吴正兴, 喻俊志, 谭民. 两类仿鲹科机器鱼倒游运动控制方法的对比研究 [J]. *自动化学报*, 2013, 39(12): 2032-2042.
- WU Zhengxing, YU Junzhi, TAN Min. Comparison of two methods to implement backward swimming for a carangiform robotic fish [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2013, 39(12): 2032-2042.
- [19] WU Zhengxing, YU Junzhi, TAN Min, et al. Kinematic comparison of forward and backward swimming and maneuvering in a self-propelled sub-carangiform robotic fish [J]. *Journal of Bionic Engineering*, 2014, 11(2): 199-212.
- [20] YANG Yueqi, WANG Jian, WU Zhengxing, et al. Fault-tolerant control of a CPG: governed robotic fish [J]. *Engineering*, 2018, 4(6): 861-868.
- [21] YUAN Jun, WU Zhengxing, YU Junzhi, et al. Sliding mode observer-based heading control for a gliding robotic dolphin [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2017, 64(8): 6815-6824.
- [22] DONG Huijie, WU Zhengxing, TAN Min, et al. Hydrodynamic analysis and verification of an innovative whale shark-like underwater glider [J]. *Journal of Bionic Engineering*, 2020, 17(1): 123-133.
- [23] WU Zhengxing, YU Junzhi, YUAN Jun, et al. Analysis and verification of a miniature dolphin-like underwater glider [J]. *Industrial Robot*, 2016, 43(6): 628-635.
- [24] 崔祚, 姜洪洲, 何景峰, 等. BCF 仿生鱼游动机理的研究进展及关键技术分析 [J]. *机械工程学报*, 2015,

51(16): 177-184, 195.

CUI Zuo, JIANG Hongzhou, HE Jingfeng, et al. Research development and key techniques of BCF robotic fish in locomotion mechanism [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(16): 177-184, 195.

[25] 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]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2016, 44(2): 15-20.

(编辑 武红江 杜秀杰)