

模块化仿生波动推进器设计与控制研究

夏明海¹ 朱群为¹ 殷谦² 罗自荣¹ 卢钟岳¹ 蒋涛¹

(1. 国防科技大学智能科学学院, 长沙 410073; 2. 长沙理工大学能源与动力工程学院, 长沙 410076)

摘要: 仿生波动推进方式具有机动性好、适应性强、环境友好等优势,在水下机器人应用中具有广阔前景。为提高仿生波动鳍推进速度、减小质量与体积、提高可靠性,提出了一种基于凸轮驱动的模块化仿生波动推进器,基于自抗扰控制方法实现仿生波动鳍的频率连续精确控制。针对波动鳍仿生构型进行设计,对正弦波发生机构进行理论计算与运动仿真,推导了凸轮机构瞬效率公式,平均效率最高可达83.6%。以波动鳍输出频率为控制目标,建立了波动鳍控制模型。理论推导与流体仿真结果表明,在定常频率下波动鳍内部特性与外部负载均呈非线性时变效应。设计了线性自抗扰波频控制器,基于STM32单片机搭建了波动鳍测控实验系统。实验结果表明,在低频与高频下波动鳍均能准确跟踪期望频率,响应曲线平缓连续且无超调,稳态波动误差小于2.3%。当频率为3 Hz时,自抗扰控制器与PID控制器输出波动误差分别为6.3%和2.1%,自抗扰控制精度提高66.7%。研究表明,该模块化仿生波动推进器控制精度高、集成度好,可任意数量配置到仿生水下机器人上,具有较好的应用价值。

关键词: 波动鳍; 凸轮机构; 自抗扰控制; 水下推进器; 仿生机器人

中图分类号: TP242; TH122 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2024)11-0513-10

OSID:



Design and Control of Modular Bionic Undulating Fin Propeller

XIA Minghai¹ ZHU Qunwei¹ YIN Qian² LUO Zirong¹ LU Zhongyue¹ JIANG Tao¹

(1. College of Intelligence Science and Technology, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China

2. College of Energy and Power Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410076, China)

Abstract: The bionic undulating propulsion method has the advantages of good manoeuvrability, strong adaptability, and environmental compatibility, which shows broad prospects in the application of underwater robots. To enhance the propulsion speed, reduce the weight and volume, and improve the reliability of the bionic undulating fin, a modular bionic undulating propeller based on cam mechanism was proposed. Active disturbance rejection control (ADRC) method was used to achieve the continuous accurate control of wave frequency. The structure of the undulating fin was designed. The mathematical model of the sinusoidal wave generating mechanism was established. The instantaneous efficiency formula of the cam mechanism was derived, resulting in an average efficiency of 83.6%. The motion simulation was carried out and the result proved the feasibility and the correctness of the cam parameters calculation. Taking the output frequency as the control target, the control model of the undulating fin was established. The theoretical derivation and computational fluid dynamics simulation analysis showed that both the internal characteristics and the external loads of the undulating fin suffered from nonlinear time-varying effects at constant frequency. To overcome the negative effect of internal and external disturbances, the linear active disturbance rejection controller was designed for frequency control. Based on STM32 single chip microcomputer, the experimental measurement and control system of the undulating fin was realized. The experimental results showed that the undulating fin could accurately track the expected frequency at both low and high frequencies. The response curve was smooth and continuous without overshoot, and the steady-state fluctuation error was less than 2.3%. When the frequency was 3 Hz, the output fluctuation errors of the active disturbance rejection controller and the proportion integration differentiation controller were 6.3% and 2.1%, respectively, and the control accuracy was improved by 66.7%. The research

收稿日期: 2024-05-21 修回日期: 2024-07-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(52075537, 52105289)和湖南省自然科学基金项目(2023JJ40048)

作者简介: 夏明海(1995—),男,博士生,主要从事智能无人系统平台与动力研究, E-mail: xiaminghai@nudt.edu.cn

通信作者: 罗自荣(1974—),男,教授,博士生导师,主要从事智能无人系统平台与动力和微纳机器人研究, E-mail: luozirong@nudt.edu.cn

results showed that the modular biomimetic undulating fin propeller had satisfactory control precision and good integration. As it can be configured to biomimetic underwater vehicles in any numbers, the modular undulating fin had good application value.

Key words: undulating fin; cam mechanism; active disturbance rejection control; underwater propeller; bionic robot

0 引言

随着智能装备与无人系统发展,水下机器人越来越多运用在海洋、水利、农业等领域。相比于传统的螺旋桨驱动方式,仿生水下机器人模仿鱼类、海龟、水母等水生生物的运动方式,相应集成了仿生鱼鳍^[1-4]、仿生足^[5-6]、仿生喷射^[7]等新型驱动机构,具有机动性高、噪声低、环境扰动小、生物相容等突出优势,在海洋资源探索^[8]、水下侦察与搜救^[9]、环境监测与数据采集^[10]等方面具有广泛的应用前景。

在生物演化中,尼罗河魔鬼、蝠鲼等鱼类依靠长背鳍或带状胸鳍进行推进。鱼鳍波动运动形成前后传递的行波,从而与流体作用产生前后推进力,具有极强的机动性。为模拟波动推进方式,文献[2,11]研发了通过腹部长鳍推进的仿生机器鱼,通过调节并列排布的 15 个关节相位差调节鳍面波形以及波动传递方向。KIM 等^[12]采用基于形状记忆合金的人工肌肉驱动双侧薄膜生成波动运动,最大速度为 0.25 倍体长/s。SFAKIOTAKIS 等^[13]开发了并列舵机驱动双鳍推进的水下机器人,使用闭环控制实现其平面直行和转向。WANG 等^[14]设计了一种双侧胸鳍驱动的水下作业机器人,可实现航向和深度闭环控制。王扬威等^[15-16]提出一种环形长鳍驱动的水下机器人,采用中枢模式发生器控制波动鳍波形,可实现直游和转向等运动模式。此外,部分学者使用双侧长鳍作为水陆一体推进部件,针对波动鳍的陆地行走机理进行了相关研究^[17-19]。

目前,仿生波动鳍主要有分布驱动与集中驱动两种实现方案。分布驱动为每个摆动关节配置 1 个驱动源,通过协调各关节角度形成期望波形。上述研究均采用这种驱动方式,虽可控参数多,但电机数量众多、控制复杂、集成困难。集中驱动通过 1 个电机带动公共长轴连续旋转,通过正弦发生机构自动形成波形,具有驱动少、体积小、质量轻、控制方便等优势。徐海军等^[20]使用液压传动作为波动鳍驱动方式,通过改变液压系统流量和阀控制参数来调整鳍运动参数。LIU 等^[21-22]设计了一种齿轮-曲柄摇杆机构的波动推进测试平台,通过一个电机带动多根鳍条形成方向、频率可调的波形,对比全驱动和欠驱动下波动鳍推进效率。陈健^[23]采用曲柄摇杆机

构设计了仿生波动鳍推进装置,并基于该装置提出了一种多波动鳍水下航行器结构。

对于仿生水下机器人,集中驱动的波动鳍结构在体积与质量、密封难度、能源效率等方面具有优势。为提高仿生波动鳍集成度、减小质量与体积,本文设计一种模块化仿生波动推进器,推导和仿真分析波动鳍运动过程中的内部特性和负载特性,采用线性自抗扰控制器实现波动鳍频率连续精确控制。通过实验验证波动鳍结构设计与控制器设计的有效性。

1 仿生波动推进器设计

1.1 设计方案

现有研究中,集中驱动方案一般采用曲柄摇杆机构或曲柄连杆机构^[22,24]。这类机构由于固有的急回特性,导致生成的波形并非对称。而凸轮结构紧凑、无急回特性,适合作为正弦发生器。因此,本文设计了一种盘型凸轮-摆动从动件结构模块化仿生波动鳍,整体设计方案如图 1a 所示。5 个并列的凸轮-摆杆机构等间距布置于凸轮轴上,摆杆通过夹持单元、挠性鳍条与柔性蹼相连。驱动电机通过左侧的联轴器与凸轮轴相连,将凸轮连续旋转转换为鳍条往复摆动,相邻鳍条具有 90°相位差,使得柔性蹼面整体形成一个完整的正弦波形。摆动电机通过

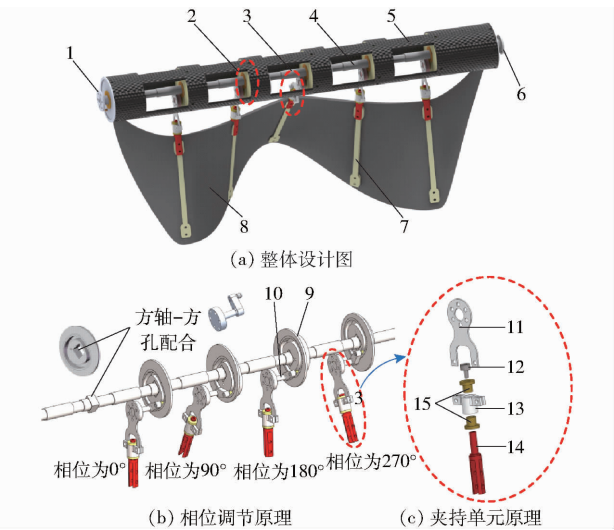


图 1 模块化仿生波动鳍设计方案

Fig. 1 Design scheme of modular undulating fin propeller
1. 波动联轴器 2. 凸轮-摆杆单元 3. 夹持单元 4. 凸轮轴 5. 套筒 6. 摆动联轴器 7. 鳍条 8. 柔性蹼 9. 凸轮 10. 摆杆 11. 摆盘 12. 螺钉 13. 套子 14. 夹头 15. 轴承

右侧联轴器与套筒相连,驱动波动鳍整体偏转。

相位机械调节原理如图 1b 所示。凸轮轴与凸轮通过方轴-方孔配合连接,凸轮方孔有 4 个安装面,按顺序依次与凸轮轴配合,即可实现相邻凸轮 90°相位差。5 组凸轮单元在中部负责主动驱动变形,首尾两端的固定夹持点可实现被动摆动变形,同样可以提供一定的推进力。夹持单元原理如图 1c 所示,摆盘为弹簧钢材质,能够在一定范围被动弯曲,适应流体阻力变化。夹头通过滑动轴承与套子铰接,从而可绕摆盘旋转。因此在鳍面变形时,鳍条能够随鳍面切线方向自适应变化,提高波形完整性。这种结构同时提供 1 个主动驱动自由度和 2 个被动旋转自由度,相比刚性连接具有良好的适应性。

1.2 凸轮设计与运动分析

凸轮机构机械原理如图 2a 所示。摆杆为曲轴形状,一端通过滚子嵌入凸轮槽内,另一端与夹持单元相连。当凸轮轴驱动凸轮连续旋转时,摆杆驱动夹持单元做往复摆动运动。轴承座与套筒连接,正常工作时,外侧套筒和轴承座固定。凸轮轴与套筒通过轴承 A 铰接,摆杆与套筒通过轴承 B 铰接。因此,凸轮轴与套筒旋转分别对应实现波动鳍波动运动与整体倾转运动。

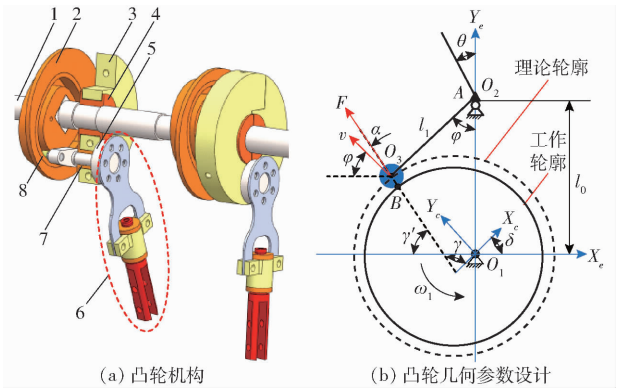


图 2 凸轮机构设计原理图

Fig.2 Principle of cam mechanism

1. 凸轮轴 2. 凸轮 3. 轴承座 4. 轴承 A 5. 摆杆 6. 夹持单元 7. 轴承 B 8. 滚子

采用坐标变换法计算凸轮理论轮廓,数学模型如图 2b 所示。设凸轮回转中心为点 O_1 ,摆杆回转中心为点 O_2 ,滚子回转中心为点 O_3 ,其中点 O_3 动态运动。以凸轮中心为原点,建立全局坐标系 $O_1X_eY_e$ 和凸轮局部坐标系 $O_1X_cY_c$ 。凸轮与摆杆中心距为 l_0 ,摆杆与滚子中心距为 l_1 。

凸轮旋转角速度设为 ω_1 ,经过时间 t 后转过角度 δ 为 $\omega_1 t$ 。设摆杆与 O_1Y_e 轴形成的角度分别为 φ, θ 。摆杆内夹角为 $\angle AO_2O_3$,由摇杆几何形状确定。当期望输出角度 θ 按照正弦规律变化时,有关

系式

$$\begin{cases} \theta = \theta_m \sin(\omega_1 t) \\ \varphi = \varphi_0 - \theta \end{cases} \quad (1)$$

式中 θ_m ——输出角度幅值,rad

φ_0 ——摆杆初始位置角,rad

因此,滚子中心点 O_3 位置在全局坐标系 $O_1X_eY_e$ 中表示为

$$\begin{cases} {}^e x_0 = -l_1 \sin\varphi \\ {}^e y_0 = l_0 - l_1 \cos\varphi \end{cases} \quad (2)$$

动坐标系 $O_1X_cY_c$ 同步旋转 δ 。因此,滚子中心点 O_3 在 $O_1X_cY_c$ 坐标系中表示为

$$\begin{bmatrix} {}^c x_0 \\ {}^c y_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\delta & \sin\delta \\ -\sin\delta & \cos\delta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}^e x_0 \\ {}^e y_0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

点 O_3 在凸轮坐标系 $O_1X_cY_c$ 中的轨迹即为凸轮理论轮廓曲线。结合式(1)~(3)得到凸轮理论轮廓曲线方程为

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\delta & \sin\delta \\ -\sin\delta & \cos\delta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -l_1 \sin(\varphi_0 - \theta_m \sin\delta) \\ l_0 - l_1 \cos(\varphi_0 - \theta_m \sin\delta) \end{bmatrix} \quad (4)$$

设 γ 为理论轮廓线上某点处法线与 O_1X_e 轴的夹角,滚子半径为 r 。由几何关系得凸轮凹槽内外工作轮廓方程为

$$\begin{cases} x_2 = x_1 \pm r \cos\gamma \\ y_2 = y_1 \pm r \sin\gamma \end{cases} \quad (5)$$

式中,当取正号时为外轮廓曲线,取负号时为内轮廓曲线。 γ 求解式为

$$\begin{cases} \sin\gamma = \frac{dx_1}{d\delta} / \sqrt{\left(\frac{dx_1}{d\delta}\right)^2 + \left(\frac{dy_1}{d\delta}\right)^2} \\ \cos\gamma = -\frac{dy_1}{d\delta} / \sqrt{\left(\frac{dx_1}{d\delta}\right)^2 + \left(\frac{dy_1}{d\delta}\right)^2} \end{cases} \quad (6)$$

尺寸约束为凸轮轴轴径为 10 mm,方轴边长为 12 mm,套筒外径为 60 mm。凸轮机构参数分别选取 l_0 为 18 mm, l_1 为 11 mm, θ_m 为 20°, φ_0 为 60°, r 为 3 mm。根据式(4)计算得到凸轮理论轮廓曲线,工作轮廓曲线由理论轮廓向内和向外等距 r 获取。

针对所设计的凸轮驱动仿生波动鳍,使用 Solidworks Motion 软件进行仿真。将驱动施加在凸轮轴上,给定转速 60 r/min,输出 5 个摆杆角度,结果如图 3 所示。结果显示,摆杆角度输出为标准正弦曲线,周期为 1 s,幅值约为 20°。后面摆杆依次滞后前一摆杆 90°相位,摆杆 5 输出角与摆杆 1 完全重合。仿真结果与设计参数相符,验证了波动鳍结构设计 with 凸轮几何参数计算正确性。

1.3 凸轮效率

针对凸轮传动压力角与瞬时效率进行校核计

由图 5 可看出,压力角随时间呈周期性变化,最大值 $\alpha_{\max}$ 为 27.3° 。摆动推杆凸轮一般取许用压力角 $[\alpha]$ 为 $30^\circ \sim 45^\circ$, $\alpha_{\max} < [\alpha]$ 。因此,本文设计的凸轮机构压力角在较小范围,具有较好的传力特性。

瞬时效率 η 在摆杆换向的附近较低,且变化率较快,这是因为此时 ζ 非常小,力的作用线接近凸轮中心,理想驱动力矩瞬时值为 0。当 $\phi_1 = 0^\circ$ (纯滚动) 时,最大效率 $\eta_{\max}$ 为 92.1%, 平均效率 $\bar{\eta}$ 为 83.6%; 当 $\phi_1 = \arctan(0.02)$ 时,最大效率和平均效率分别为 84.8% 和 71.5%。因此,凸轮效率在合理范围。从提高效率角度,应保证滚子与凸轮间润滑,减少相对滑动。

1.4 波动鳍负载特性

针对波动鳍典型推进模式进行计算流体力学仿真 (Computational fluid dynamics, CFD)。仿真模型如图 6 所示,使用 Fluent 软件中的动网格技术定义波动鳍面网格变形运动,使用瞬态计算输出波动鳍在不同频率下的流体动力与力矩。

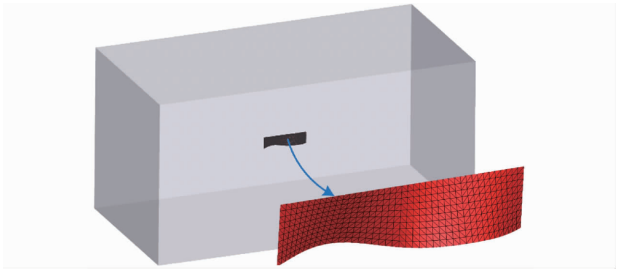


图 6 波动鳍流体仿真模型

Fig. 6 Fluid simulation model of undulating fin

当波动频率为 1 Hz 时,波动鳍产生的三维力与力矩随时间变化曲线如图 7 所示。可以发现:波动鳍波动运动过程中主要产生沿前后方向的推力 F_x 和垂直于基线的升力 F_y ,侧向力 F_z 的周期性均值近似为 0。波动鳍主要产生沿 z 轴的俯仰力矩 M_z ,滚转力矩 M_x 和偏航力矩 M_y 均值近似为 0。侧向力 F_z 、滚转力矩 M_x 和偏航力矩 M_y 的变化频率与波动频率相同,推力 F_x 、升力 F_y 和俯仰力矩 M_z 的变化则呈倍频效应。

对于波动鳍的控制来说,这种定常频率下产生的非定常输出力与力矩反过来会成为施加在波动鳍上的时变负载。显然,这种变化的负载对波动鳍控制不利。

图 8a 为不同频率下推力随时间变化曲线,随着波动频率增大,波动鳍推力均值、变化幅值均呈非线性增长趋势。忽略启动过程的影响,稳态过程中波动鳍推进力数学模型可表示为

$$F_T = \text{sign}(f) C_T (\lambda f - V_x)^2 + K_T (\lambda f - V_x)^2 \sin(4\pi f t) \quad (21)$$

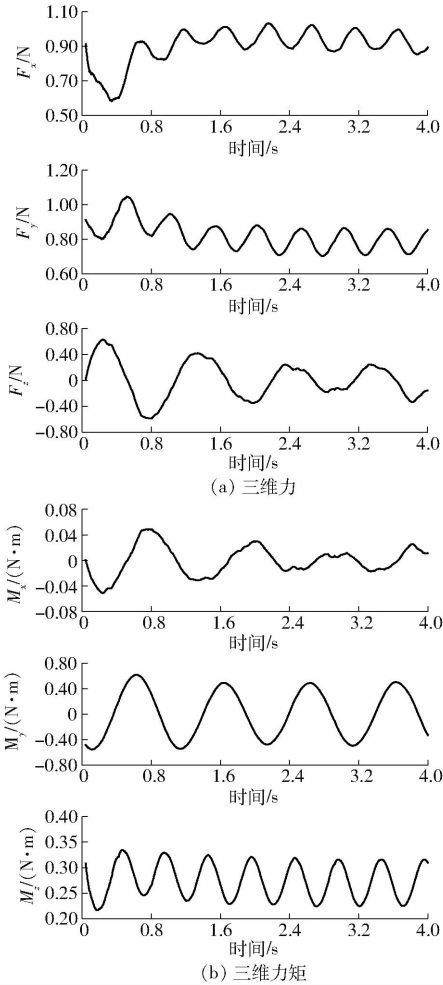


图 7 波动鳍三维力与力矩 CFD 仿真结果

Fig. 7 CFD simulation results of force and moment of undulating fin

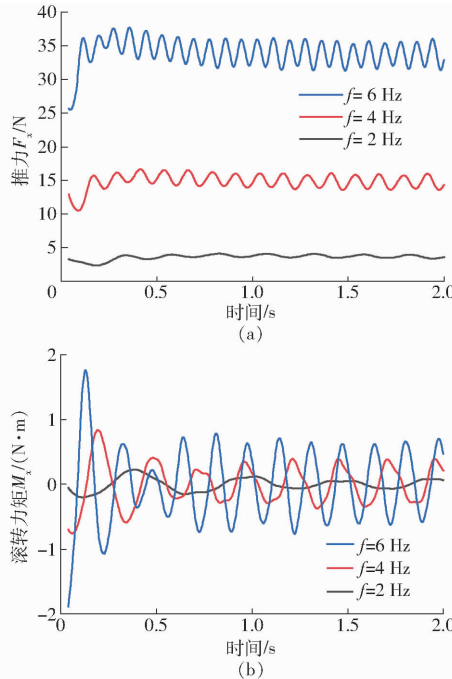


图 8 不同频率下波动鳍推力仿真结果

Fig. 8 Simulated force and moment of undulating fin at different frequencies

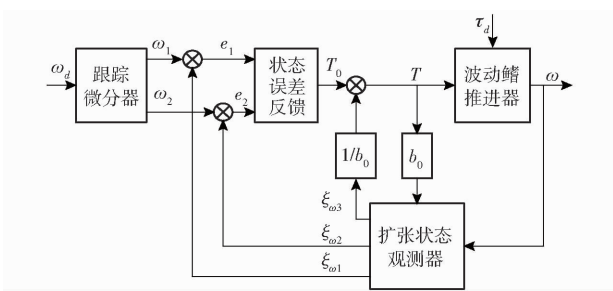


图 10 波动鳍自抗扰控制器设计

Fig. 10 Active disturbance rejection controller of undulating fin

电机,因此使用电机转速作为输入与输出。当电机转速为 60 r/min 时,对应频率 f 为 1 Hz。

对图 9 所示的系统模型采用线性自抗扰控制算法进行设计与实验,算法为:

(1) 跟踪微分器

跟踪微分器 (Tracking differentiator, TD) 的作用是对系统参考输入安排过渡过程,能够从不连续或携带随机噪声的信号中提取光滑的连续信号和微分信号,故也称为 TD 滤波器。跟踪微分器离散形式算法为

$$\begin{cases} \omega_1(k+1) = \omega_1(k) + h\omega_2(k) \\ \omega_2(k+1) = \omega_2(k) + hfst(\omega_1(k) - \omega(k), \omega_2(k), r_0, h_0) \end{cases} \quad (30)$$

式中 h ——采样步长

r_0 ——跟踪速度系数

h_0 ——fst() 函数步长

fst()——最速控制综合函数

其算法为

$$\begin{cases} d = rh \\ d_0 = rh^2 \\ y = x_1 + hx_2 \\ a_0 = \sqrt{d^2 + 8r|y|} \\ a = \begin{cases} x_2 + \frac{a_0 - d}{2}\text{sign}(y) & (|y| > d_0) \\ x_2 + y/h & (|y| \leq d_0) \end{cases} \\ fst(x_1, x_2, r, h) = \begin{cases} -r\text{sign}(a) & (|a| > d) \\ -ra/d & (|a| \leq d) \end{cases} \end{cases} \quad (31)$$

(2) 扩张状态观测器

扩张状态观测器将总扰动扩张成系统的一个新状态变量,利用系统输入、输出重构出系统原有状态与扰动状态值。式(24)除系统负载和干扰输入之外,还包括系统未建模动态、复杂非线性因素和时变因素等,将这些因素全部视为“总扰动”,并视为第 3 个状态变量,原系统变成线性系统

$$\begin{cases} e(k) = \xi_{\omega_1}(k) - \omega(k) \\ \xi_{\omega_1}(k+1) = \xi_{\omega_1}(k) + h(\xi_{\omega_2}(k) - \beta_{01}e(k)) \\ \xi_{\omega_2}(k+1) = \xi_{\omega_2}(k) + h(\xi_{\omega_3}(k) - \beta_{02}e(k) + b_0u(k)) \\ \xi_{\omega_3}(k+1) = \xi_{\omega_3}(k) - h\beta_{03}e(k) \\ \beta_{01} = 3\omega_0 \\ \beta_{02} = 3\omega_0^2 \\ \beta_{03} = 3\omega_0^3 \end{cases} \quad (32)$$

式中 $\omega(k)$ ——角速度测量值,rad/s

$\xi_{\omega_1}(k)$ 、 $\xi_{\omega_2}(k)$ 、 $\xi_{\omega_3}(k)$ ——角速度、角加速度、总扰动观测值

$e(k)$ ——观测误差,rad/s

$u(k)$ ——控制输入

b_0 ——补偿因子

β_{01} 、 β_{02} 、 β_{03} ——可调参数

ω_0 ——观测器带宽^[29]

(3) 状态误差反馈

基于速度与加速度的观测值,计算状态误差,使用线性组合控制率进行状态误差组合

$$\begin{cases} e_1(k) = \omega_1(k) - \xi_{\omega_1}(k) \\ e_2(k) = \omega_2(k) - \xi_{\omega_2}(k) \\ u_0(k) = k_p e_1(k) + k_d e_2(k) \\ k_p = \omega_c^2 \\ k_d = 2\omega_c \end{cases} \quad (33)$$

式中 k_p ——比例系数

k_d ——微分系数

ω_c ——控制带宽

通过状态扩张观测器,原系统中表示扰动的状态变量 ω_3 被观测值 ξ_{ω_3} 跟踪,通过对扰动值进行补偿,达到主动抗扰效果。最后系统控制量为

$$u(k) = u_0(k) - \xi_{\omega_3}(k)/b_0 \quad (34)$$

3 实验

3.1 实验平台

根据设计方案进行加工制造,模块化仿生波动鳍实物如图 11 所示。基于该模块化波动鳍,可迅速构建单鳍、双鳍或多鳍推进的仿生水下机器人。

波动鳍通过 STM32 单片机进行控制,控制指令由上位机下发,人机界面如图 12 所示。选用大疆 M3508 型减速电机,极限扭矩 4.5 N·m,额定功率 240 W。控制器采集电机转速和电流信息,根据设计的自抗扰控制算法进行实时闭环控制。控制输出通过 CAN 总线下发到电机驱动器,通过调整电流控



图 11 模块化仿生波动鳍实物样机

Fig. 11 Prototype of modular undulating fin propeller

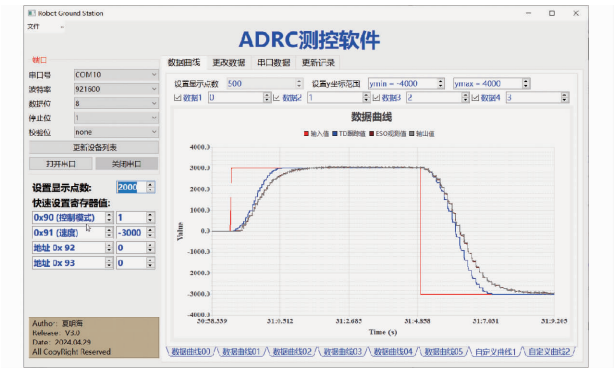


图 12 仿生波动鳍测控软件界面

Fig. 12 Control software for bionic undulating fin propeller

制电机频率稳定输出。上位机与单片机为双向通信,其功能包括状态显示、电机数据曲线显示、在线调参、指令下发等。

3.2 实验结果

通过上位机软件可进行参数调整和 ADRC/PID 控制模式切换。针对自抗扰控制器,首先单独确定跟踪微分器参数,固定 h_0 为控制步长若干倍,较大的 r_0 对应更快的跟踪。状态扩张观测器中,较小的 b_0 可实现更强的扰动补偿作用,因此需从大往小调整,之后尽可能选大的观测器带宽 ω_0 。最后从小往大调整控制带宽 ω_c ,直到响应时间合适、稳态误差为 0、且不发生抖震。如果控制效果不满意则需重新选择 ω_0 和 b_0 。最终确定 1 组合适参数为: $\omega_c = 6$, $r_0 = 5\,000$, $h_0 = 0.05$, $\omega_0 = 10$, $b_0 = 10$ 。

PID 控制器中的微分项对噪声较敏感,因此采用 PI 控制。首先给定较小的积分项 K_I ,逐渐调大比例项 K_P ,直到电机接近震荡,之后选择适中的 K_P ,逐步调大 K_I ,直到超调适中、稳态误差接近零。记录 3 Hz 阶跃输入下不同 PID 参数的响应曲线,记录结果见表 1。可以看出,随着 K_I 增大,响应更快但超调增大,较大的 K_P 调节速度更快。根据结果选择一组合适的 PID 参数为: $K_P = 2.0$, $K_I = 0.1$, $K_D = 0$ 。

给定波动频率 ± 3 Hz (转速 ± 180 r/min),波动鳍在 ADRC 和 PID 控制器下的响应曲线如图 13 所示。结果表明:自抗扰控制器对输入信号进行了过

表 1 不同 PID 参数阶跃响应性能比较
Tab.1 Step response results of PID controller indifferent parameters

K_P	K_I	K_D	响应时间/s	误差/%	超调量/%
1.0	0.10	0	0.62	6.5	12.6
1.5	0.05	0	0.84	6.9	0
1.5	0.10	0	0.48	8.9	10.4
1.5	0.20	0	0.20	6.3	24.8
2.0	0.05	0	1.50	6.3	0
2.0	0.10	0	0.37	6.8	5.2
2.0	0.20	0	0.33	6.25	19.1

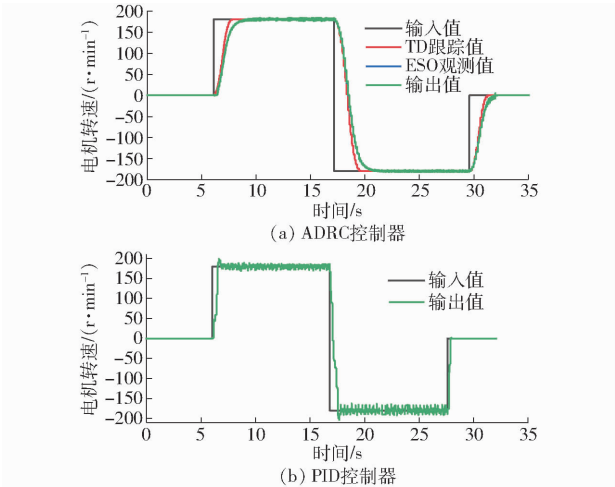


图 13 波频控制实验结果

Fig. 13 Frequency control experiment results

渡,虽响应速度相比 PID 控制有所下降,但输出信号平稳光滑,且无超调。自抗扰控制器表现出更好的抗扰效果,稳态输出过程抖动更小、误差更小。表 1 中 PID 控制器稳态波动范围最小为 6.3%,自抗扰控制稳态精度为 2.1%,相比 PID 控制器提高 66.7%。状态扩张观测器的观测值与实际输出曲线基本重合,说明观测器效果良好。

不同频率测试波动鳍控制结果如图 14 所示。可以看出,对低频与高频波动运动,自抗扰控制器均能取得良好的控制效果。过渡过程随输入频率自适应变化,并不随频率增大而减慢,过渡时间约为

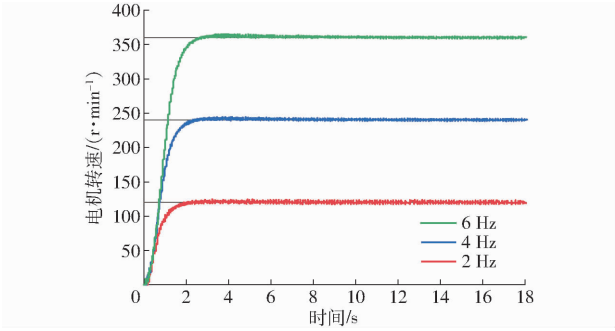


图 14 不同频率下波动鳍自抗扰控制实验结果
Fig. 14 Experiment results of ADRC control at different frequencies

2.2 s。输出曲线无超调,3 组频率下稳态波动范围均小于 2.3%。

4 结论

(1)设计了模块化仿生波动鳍结构,基于坐标变换法对凸轮轮廓曲线进行了理论推导。仿真结果证明,波动鳍能够输出标准的正弦波形,验证了结构设计 with 参数计算的正确性。计算结果表明,凸轮机构最大压力角为 27.3°,平均效率可达 83.6%,具有较好的力学特性。

(2)建立了波动鳍控制模型,理论分析与流体

仿真结果表明,在定常波动频率下,波动鳍内部特性与外部负载均呈时变、非线性效应。且随着频率增加,内外扰动的幅值与变化周期也越大。波动鳍平均推进力与相对波速平方成正比,波动鳍能够达到的最大速度与波动频率成正比。

(3)设计了波动鳍的线性自抗扰定频控制器。实验结果表明,自抗扰控制器能够获得光滑、连续、稳定的输出曲线。相比于 PID 控制器,自抗扰控制的稳态误差从 6.3%降低到 2.1%,控制精度提高 66.7%。在不同频率下,自抗扰控制均能获得良好的控制效果,过渡时间小于 2.2 s,稳态波动范围小于 2.3%。

参 考 文 献

- [1] ZHANG T, HU Q, LI S, et al. A CPG-based framework for flexible locomotion control and propulsion performance evaluation of underwater undulating fin platform[J]. Ocean Engineering, 2023, 288: 116118.
- [2] UDDIN M I, GARCIA G A, CURET O M. Force scaling and efficiency of elongated median fin propulsion[J]. Bioinspiration & Biomimetics, 2022, 17: 046004.
- [3] 李宗刚, 夏文卿, 葛立明, 等. 仿生机器鱼胸/尾鳍协同推进闭环深度控制[J]. 机器人, 2020, 42(1): 110 – 119.
LI Zonggang, XIA Wenqing, GE Liming, et al. Closed loop depth control of biomimetic robotic fish cooperatively driven by pectoral fin and caudal fin[J]. Robot, 2020, 42(1): 110 – 119. (in Chinese)
- [4] 周盼, 姚建涛, 朱坤明, 等. 基于 Cosserat 理论的仿生鱼骨连续型机器人静力学分析[J]. 农业机械学报, 2023, 54(10): 432 – 440.
ZHOU Pan, YAO Jiantao, ZHU Kunming, et al. Statics analysis of bioinspired fishbone continuum robot based on Cosserat theory[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(10): 432 – 440. (in Chinese)
- [5] BAINES R, PATIBALLA S K, BOOTH J, et al. Multi-environment robotic transitions through adaptive morphogenesis[J]. Nature, 2022, 610(7931): 283 – 289.
- [6] KIM T, SONG Y W, SONG S, et al. Underwater walking mechanism of underwater amphibious robot using hinged multi-modal paddle[J]. International Journal of Control Automation and Systems, 2020, 19: 1691 – 1702.
- [7] SHI L, ZHANG Z, LI Z, et al. Design, implementation and control of an amphibious spherical robot[J]. Journal of Bionic Engineering, 2022, 19: 1736 – 1757.
- [8] YOUSSEF S, SOLIMAN M, SALEH M, et al. Underwater soft robotics: a review of bioinspiration in design, actuation, modeling, and control[J]. Micromachines, 2022, 13: 110.
- [9] WANG R, WANG S, WANG Y, et al. Development and motion control of biomimetic underwater robots: a survey[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2022, 52(2): 833 – 844.
- [10] 赵留平, 李环, 王鹏. 水下无人系统智能化关键技术发展现状[J]. 无人系统技术, 2020, 3(6): 12 – 24.
ZHAO Liuping, LI Huan, WANG Peng. Development of key technologies for intelligent unmanned underwater system[J]. Unmanned Systems Technology, 2020, 3(6): 12 – 24. (in Chinese)
- [11] LIU H, CURET O M. Swimming performance of a bio-inspired robotic vessel with undulating fin propulsion[J]. Bioinspiration & Biomimetics, 2018, 13: 056006.
- [12] KIM H, HEO J, CHOI I, et al. Shape memory alloy-driven undulatory locomotion of a soft biomimetic ray robot[J]. Bioinspiration & Biomimetics, 2021, 16: 66006.
- [13] SFAKIOTAKIS M, GLIVA R, MOUNTOUFARIS M. Steering-plane motion control for an underwater robot with a pair of undulatory fin propulsors[C]//2016 24th Mediterranean Conference on Control and Automation, 2016: 496 – 503.
- [14] WANG Y, WANG R, WANG S, et al. Underwater bioinspired propulsion: from inspection to manipulation[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2020, 67: 7629 – 7638.
- [15] 王扬威, 闫勇程, 刘凯, 等. 基于 CPG 的仿生环形长鳍波动推进器运动控制[J]. 机器人, 2016, 38(6): 746 – 753.
WANG Yangwei, YAN Yongcheng, LIU Kai, et al. Motion control of a bionic circular long-fin undulating propeller based on CPG[J]. Robot, 2016, 38(6): 746 – 753. (in Chinese)
- [16] 王扬威, 闫勇程, 刘凯, 等. 仿生机器鱼研制与游动性能实验研究[J]. 浙江大学学报(工学版), 2017, 51(1): 106 – 112.
WANG Yangwei, YAN Yongcheng, LIU Kai, et al. Development and swimming experimental research on bionic stingray robot [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2017, 51(1): 106 – 112. (in Chinese)
- [17] XIA M, WANG H, YIN Q, et al. Design and mechanics of a composite wave-driven soft robotic fin for biomimetic amphibious

robot[J]. Journal of Bionic Engineering, 2023, 20(3): 934–952.

[18] 李亚鑫, 杜亮, 王宇, 等. 波动鳍水陆两栖机器人的设计与运动性能评估[J]. 机械设计与研究, 2023, 39(3): 58–64.
LI Yaxin, DU Liang, WANG Yu, et al. Design and motion performance evaluation of an undulating fins propelled amphibious robot[J]. Machine Design and Research, 2023, 39(3): 58–64. (in Chinese)

[19] YIN S, HU Q, ZENG Y, et al. Kinetic analysis and design of a bio-inspired amphibious robot with two undulatory fins[C]// 2021 IEEE International Conference on Real-time Computing and Robotics (RCAR). IEEE, 2021: 1368–1373.

[20] 徐海军, 潘存云, 谢海斌, 等. 水下仿生推进器阀控液压摆动关节建模与动态特性分析[J]. 国防科技大学学报, 2010, 32(6): 116–121.
XU Haijun, PAN Cunyun, XIE Haibin, et al. Modeling and dynamic characteristics analysis of the valve-controlled hydraulic swaying cylinder in bionic underwater thruster[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2010, 32(6): 116–121. (in Chinese)

[21] LIU H, CURET O M. Propulsive performance of an under-actuated robotic ribbon fin[J]. Bioinspiration & Biomimetics, 2017, 12: 036015.

[22] LIU H, TAYLOR B, CURET O M. Fin ray stiffness and fin morphology control ribbon-fin-based propulsion[J]. Soft Robotics, 2017, 4(2): 103–116.

[23] 陈健. 多波动鳍仿生水下航行器创新设计与分析研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2019.
CHEN Jian. Innovation design and analysis of bionic underwater vehicle propelled by multiple undulatory fins[D]. Changsha: Hunan University, 2019. (in Chinese)

[24] LIU F, LEE K, YANG C. Hydrodynamics of an undulating fin for a wave-like locomotion system design[J]. IEEE–ASME Transactions on Mechatronics, 2012, 17(3): 554–562.

[25] 韩京清. 自抗扰控制技术——估计补偿不确定因素的控制技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008.

[26] 李慧, 刘星桥, 李景. 异步电动机调速系统自适应辨识的 CMAC–ADRC 算法[J]. 农业机械学报, 2015, 46(3): 358–365.
LI Hui, LIU Xingqiao, LI Jing. CMAC–ADRC algorithm based on adaptive parameter identification for asynchronous motor speed control system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(3): 358–365. (in Chinese)

[27] 朱立成, 赵智宇, 韩振浩, 等. 基于自抗扰控制的双重转向运动控制系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2023, 54(增刊1): 391–401.
ZHU Licheng, ZHAO Zhiyu, HAN Zhenhao, et al. Design and experiment of dual-steering control system based on active disturbance rejection control[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(Supp. 1): 391–401. (in Chinese)

[28] 王会明, 张扬, 王雪闯. 移动机器人的线性自抗扰控制设计与实验验证[J]. 控制理论与应用, 2022, 39(7): 1289–1296.
WANG Huiming, ZHANG Yang, WANG Xuechuang. Design and implementation of linear active disturbance rejection control for mobile robots[J]. Control Theory and Technology, 2022, 39(7): 1289–1296. (in Chinese)

[29] 朱斌. 自抗扰控制入门[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2017.

(上接第 401 页)

[29] 张树誉, 孙威, 王鹏新. 条件植被温度指数干旱监测指标的等级划分[J]. 干旱区研究, 2010, 27(4): 600–606.
ZHANG Shuyu, SUN Wei, WANG Pengxin. Classification of drought grades based on vegetation temperature condition index [J]. Arid Zone Research, 2010, 27(4): 600–606. (in Chinese)

[30] 王强, 张廷斌, 易桂花, 等. 横断山区 2004—2014 年植被 NPP 时空变化及其驱动因子[J]. 生态学报, 2017, 37(9): 3084–3095.
WANG Qiang, ZHANG Tingbin, YI Guihua, et al. Tempo-spatial variations and driving factors analysis of net primary productivity in the Hengduan mountain area from 2004 to 2014[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(9): 3084–3095. (in Chinese)

[31] 闫祥祥. 使用 ARIMA 模型预测公园绿地面积[J]. 计算机科学, 2020, 47(增刊2): 531–534, 556.
YAN Xiangxiang. Using ARIMA model to predict green area of park[J]. Computer Science, 2020, 47(Supp. 2): 531–534, 556. (in Chinese)