

DOI: 10.7652/xjtuxb202001023

采用干扰观测器的水下滑翔蛇形机器人 纵倾运动控制

陈恩志^{1,2,3}, 常健^{2,3}, 李斌^{2,3}, 张国伟^{2,3}, 刘春^{2,3}

(1. 东北大学信息科学与工程学院, 110819, 沈阳; 2. 中国科学院沈阳自动化研究所机器人学国家重点实验室, 110016, 沈阳; 3. 中国科学院机器人与智能制造创新研究院, 110169, 沈阳)

摘要: 针对水下滑翔蛇形机器人在实现滑翔运动时存在控制输入受限和外界未知干扰的问题, 提出了一种基于 Nussbaum 函数和非线性干扰观测器的反步控制策略。通过对欠驱动水下滑翔蛇形机器人的垂直面运动进行分析和有条件的简化, 得到了对应运动学及动力学方程组。采用 Nussbaum 函数与双曲正切函数相结合的方式处理系统控制输入饱和, 避免了双曲正切函数存在的控制器奇异值, 通过非线性干扰观测器实现对外界复合扰动的有效观测并进行补偿。设计了纵倾运动跟踪的反步控制器, 针对反步法中虚拟项引发的计算膨胀, 采用动态面方法来消除。基于 Lyapunov 稳定性理论设计了控制器, 保证系统能够实现速度与位置信号量的全局一致稳定性。研究表明: 所提方案相对传统反步法, 在响应时间与误差收敛速度方面都有一定程度提高, 且非线性干扰观测器对于复合扰动量观测性能良好; 所设计的控制器可以有效实现机器人在外界未知干扰下纵倾运动的稳定跟踪, 且具有较强的鲁棒性。

关键词: 水下滑翔蛇形机器人; 纵倾运动; 干扰观测器; 输入受限; 反步控制

中图分类号: TP242.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2020)01-0184-09

Control for Pitch Motion of Underwater Gliding Snake-Like Robot Based on Disturbance Observer

CHEN Enzhi^{1,2,3}, CHANG Jian^{2,3}, LI Bin^{2,3}, ZHANG Guowei^{2,3}, LIU Chun^{2,3}

(1. College of Information Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2. State Key Laboratory of Robotics, Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China; 3. Institutes for Robotics and Intelligent Manufacturing, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110169, China)

Abstract: Aiming at the problem that the underwater gliding snake-like robot has input constraints and unknown external disturbance during implementing gliding, the backstepping control method based on Nussbaum function and nonlinear disturbance observer is proposed to improve its pitching motion tracking performance. The vertical plane motion of the under-actuated underwater gliding snake-like robot is analyzed and conditionally simplified, and the corresponding kinematics and dynamic equations are obtained. Nussbaum function and hyperbolic tangent function are combined to deal with the problem of system control input saturations, which avoids the controller singularity of the latter, and the nonlinear disturbance observer is used to effectively observe and compensate the external complex disturbance. The backstepping controller is designed for pitching motion tracking, where the computational expansion caused by

收稿日期: 2019-05-29。 作者简介: 陈恩志(1995—),男,硕士生;常健(通信作者),男,副研究员。 基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2017YFB1300103);国家自然科学基金资助项目(61803365)。

网络出版时间: 2019-08-14

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20190814.1508.017.html>

the virtual item in the backstepping method is eliminated by the dynamic surface method. The controller designed following Lyapunov stability theory ensures that the system can achieve global uniform stability of velocity and position semaphore. The results show that compared with the traditional backstepping method, the proposed scheme can improve the response time and error convergence rate to some extent, and the nonlinear disturbance observer has a good performance for observation of complex disturbances. The designed controller can effectively track the longitudinal motion of the robot under the unknown disturbance with strong robustness.

Keywords: underwater gliding snake-like robot; pitch motion; disturbance observer; input constraints; backstepping control

认识与开发海洋是众多国家的一项重要计划,这些研究与开发离不开先进的技术手段和设备的支持,目前广泛应用的科学探测设备包括遥控无人潜水器、自主式水下机器人(AUV)等。这些机器人配备有先进传感器和执行器,对于了解水下生物多样性以及完成安装、操纵水下设备具有重要作用。水下滑翔机是水下机器人的一个重要组成部分,它通过可变浮力机制实现上浮下潜运动并使用机翼平面使机体方便地沿着垂直方向引导升潜运动。水下滑翔机的长距离和强耐力的特性使其应用广泛,但在速度和机动性方面的性能都较差。与此同时,随着水生生物仿生学正在兴起,研究人员注意到水中的鲸豚类、鱼类等水生生物具有极强的运动能力,并且在稳定性、机动性等方面都远超目前已有的水下航行器^[1]。受此启发,机器人专家开始尝试将水下滑翔机和仿生机器人进行集成,先后提出了滑翔机器人^[2]以及滑翔机器海豚^[3]的概念,并验证了它们的性能。在此基础上,Tang 等在水陆两栖蛇形机器人^[4]的基础上引入滑翔步态,创新地提出一种新型水下滑翔蛇形机器人的概念^[5-6]。新型水下滑翔蛇形机器人是蛇形机器人和水下滑翔机的组合,在保留蛇形机器人灵活性的基础上引入滑翔步态来提高运动效率,以此实现远距离作业。

目前,针对水下仿生机器人的控制研究主要包括水平面、垂直面以及三维轨迹跟踪等。Zhou 等从水下滑翔鱼的机械设计出发,提出了一种可调整位置配重块结构的方法,通过改变重心位置实现俯仰姿态的调节^[7]。Yu 等在多连杆滑翔机器海豚的基础上,提出了闭环俯仰策略使其在垂直平面中执行俯仰转弯^[8]。Kelasidi 等提出了一种基于视线引导法则与方向控制器相结合的方法,实现了水下蛇形机器人的三维轨迹跟踪问题^[9]。由于水下滑翔蛇形机器人(UGSR)处于初步开发阶段,因此针对该机器人展开的控制研究较少;唐敬阁等提出了 LQR

控制器来实现系统的稳定以及对期望轨迹的跟踪控制^[10];张晓璐等考虑到 UGSR 处于水环境下难以建模的问题,提出了一种基于循环神经网络蒙特卡罗策略梯度的算法,使 UGSR 能自适应复杂水环境并自动学习滑翔运动^[11]。但是,上述两种方法都没有考虑到控制输入受限以及外部未知干扰的问题,将 UGSR 默认工作的水环境设为理想状态,这与实际中伸缩关节的物理限制所导致的输入饱和与外部水流等产生的外部扰动有着较大差距。针对水下机器人实际应用中易出现的问题:杨海对水下滑翔机面临的输入饱和情况,提出了一种前馈控制算法,将输入受限转换成两点边界值进行计算,仿真验证了其控制器的有效性^[12];Liang 等针对欠驱动 AUV 在未知海流扰动影响下的三维轨迹跟踪问题,提出了通过基于运动学模型的海流扰动观测器来消除未知扰动的方法,仿真证明了该控制器对 AUV 实现三维轨迹跟踪具有良好性能^[13]。

当 UGSR 处于垂直面纵倾运动时,由于自身是一个强非线性欠驱动系统,受到运动时变性和不确定性的影响,故难以建立精确的 UGSR 模型,因此之前采用的线性 LQR 控制器^[10]易出现控制器性能下降的问题。此外,由于伸缩关节受到水压影响较大,在实际应用中会面临控制输入受限以及外部复杂的扰动的问题,这都给 UGSR 的控制器设计都带来难度。

鉴于上述问题,本文首先对原有的三维滑翔运动模型进行了简化,并针对原模型没有考虑外部扰动的问题进行了修正,然后采用具有光滑特性的双曲正切函数和 Nussbaum 函数^[14]来处理输入受限,避免了可能存在的控制器奇异值。此外,本文将系统模型中的不确定项和外部摄动视为外界未知扰动,通过非线性观测器^[15]来进行估计,并通过补偿来削弱其产生的影响。基于 Lyapunov 稳定性理论,在确保系统一致渐近稳定的前提下,设计了基于

反步法的UGSR垂直面纵倾运动控制器,并且引入动态面方法^[16]来解决反步法中存在的计算膨胀问题。仿真结果表明,本文设计的控制器在满足UGSR垂直面简化模型的前提条件下,能较好地实现纵倾角的跟踪,且具有较强的鲁棒性。

1 样机设计与模型简化

1.1 样机结构设计

在原有两栖蛇形机器人“探索者”^[4]的基础上引入两个可变长度的单自由度关节,以实现整体净浮力的改变和产生对应的俯仰力矩。图1为UGSR的实体样机,可以看出,样机由2个伸缩关节、4个俯仰偏航关节、一对固定平面翼和尾翼组成。2个伸缩关节位于图中编号为2和5的位置,剩余的位置编号代表俯仰偏航关节。在位置4处添加了一对平面机翼用来提供升力,可为游动提供平衡和姿态角调节的功能。

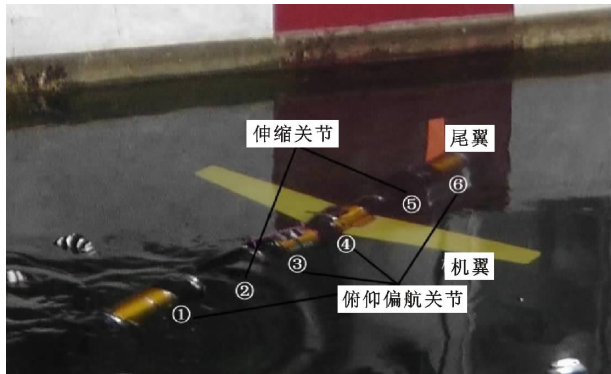


图1 UGSR 实体样机

UGSR 配备了多种传感器,能够对外界环境信息及本体运动信息进行有效获取,实现稳定的运动。固定在底面的绝对压力传感器提供深度数据,内部配备的姿态角传感器提供机体的姿态角度,机器人头部配置的摄像头为可视化提供了保证。目前,UGSR 可到达水下深度为 10 m,故采用有线通信。表 1 为 UGSR 样机的关键结构参数。

1.2 运动分析与模型简化

作用在UGSR上的外力和外力矩由本体质量、附加质量、水动力共同产生,从动量定理与动量矩定理出发建立起动力学模型。UGSR的滑翔运动发生在垂直平面,纵向动力学通过可伸缩的关节来进行控制,固定质量块用于稳定纵向平面中的滑翔机直线运动,因此可以忽略横向动力学,得到垂直面的动力学运动方程。

表1 UGSR 样机的关键结构参数

参数	数值
机体总长度 L/m	1.6
总质量(包括固定质量块) m_{sum}/kg	11.3
固定质量块质量 m_{h}/kg	0.03
初始伸缩关节长度 l_1/m	0.3
初始俯仰偏航关节长度 l_2/m	0.2
伸缩关节直径 d_1/m	0.106
俯仰偏航关节直径 d_2/m	0.073
机翼总长度 L_{w}/m	0.8
机翼总宽度 d_{w}/m	0.1

给定滑翔的参考路径, ξ_{d} 和 V_{d} 分别为指定的滑翔角度和速度。 $\xi_{\text{d}} = \theta - \alpha$, θ 为俯仰角, α 为攻角。 $V_{\text{d}} = \sqrt{v_1^2 + v_3^2}$, v_1 和 v_3 分别为水平与垂直方向的速度。定义体坐标为 (x', z') , x' 和 z' 分别代表期望路径的横向位置和纵向位置,体坐标 (x', z') 和惯性坐标 (x, z) 的关系为

$$\begin{bmatrix} x' \\ z' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \xi_{\text{d}} & -\sin \xi_{\text{d}} \\ \sin \xi_{\text{d}} & \cos \xi_{\text{d}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ z \end{bmatrix} \tag{1}$$

z' 在垂直平面滑翔路径的位置如图 2 所示,其中 i - o - k 为惯性坐标系, i' - o' - k' 为机体坐标系。

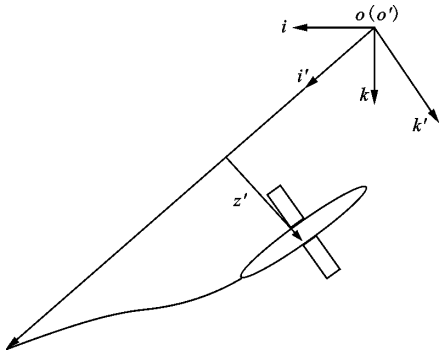


图2 垂直平面滑翔示意

z' 的动力学方程式为

$$\begin{aligned} \dot{z}' = & (v_1 \cos \theta + v_3 \sin \theta) \sin \xi_{\text{d}} + \\ & (-v_1 \sin \theta + v_3 \cos \theta) \cos \xi_{\text{d}} \end{aligned} \tag{2}$$

在本文中,仅考虑UGSR的滑翔运动。伸缩关节的运动局限于伸缩轨道的设计,通过控制伸缩的速度与长度来控制其滑翔时的相对速度和相对位置。位于轴线上的固定质量块的位置是固定不动的。考虑到伸缩关节在水压的作用下面临输入受限以及外部扰动的问题,将先前所构建的UGSR的三维滑翔运动模型^[6]进行垂直面运动分析并进一步完善,得到了垂直面的动力学方程组,即

$$\left. \begin{aligned}
 \dot{x} &= v_1 \cos \theta + v_3 \sin \theta; \dot{z} = -v_1 \sin \theta + v_3 \cos \theta \\
 \dot{\theta} &= \omega \\
 \dot{v}_1 &= \frac{1}{M_1} (-M_3 v_3 \omega + m_0 g \sin \theta + L \sin \alpha - D \cos \alpha) \\
 \dot{v}_3 &= \frac{1}{M_3} (M_1 v_1 \omega - m_0 g \sin \theta - L \cos \alpha - D \sin \alpha) \\
 \dot{\omega} &= \frac{1}{J_2} [(M_3 - M_1) v_1 v_3 - m_h r_{hx} g \sin \theta + M_{DL} - m_1 r_{1x} g \cos \theta - m_2 r_{2x} g \cos \theta + m r_{bx} g \cos \theta] + d \\
 \dot{r}_{1x} &= s_1; \dot{r}_{2x} = s_2 \\
 \dot{m}_0 &= -r_{h0} \pi r^2 (s_1 + s_2)
 \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中: r_{h0} 为水密度; $m_0 g$ 为净浮力; m_1 和 m_2 分别为头部两关节和尾部两关节的质量; m 为剩余两关节的质量; M_1 和 M_3 分别为机体自身质量与水动力附加质量的总和沿着轴向和垂向的两个分量; ω 为俯仰角加速度; J_2 为转动惯量; r_{1x} 和 r_{2x} 分别为图 1 中伸缩关节 2 和伸缩关节 5 的伸缩量; s_1 和 s_2 分别为伸缩关节 2 和伸缩关节 5 的速度变化量; r_{hx} 为质心位置; r_{bx} 为浮心位置; d 为外界扰动; D 为阻力; L 为升力; M_{DL} 为 D 和 L 所产生的力矩。UGSR 在水中受到的流体动力主要包括 D 、 L 和 M_{DL} 。

从式(3)可以清楚地看出,垂直面的动力学方程组具有 2 个输入和 6 个输出,故 UGSR 系统属于欠驱动系统。同时,由于 UGSR 的动力学模型具有较强的非线性。为简化问题分析,做下面几点假设和

说明:

(1) 固定在机体下方的质量块相对机体整体质量比较小,因此由伸缩关节的伸缩引起的惯性差可以忽略不计,即 J_2 为常数;

(2) 考虑到 UGSR 速度的慢变特性,可忽略速度变化所带来的动态性能,而且由于所受复合干扰未知且 d 有界,故可认为即 $d < S$, S 为给定最大干扰值;

(3) 俯仰角 $\theta \in (-\pi/2, \pi/2)$, 且参考俯仰角光滑有界,并具有有界导数 $|\ddot{\theta}| \leq A$, A 为给定常量;

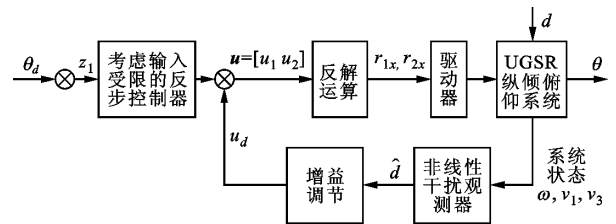
(4) 将式(3)中受到伸缩关节运动而改变的对应部分改写成 u_1 和 u_2 , 将其看成新的输入, 再进行反解, 以便计算。

基于以上假设和说明,原模型(式(3))可以改写成

$$\left. \begin{aligned}
 \dot{\theta} &= \omega \\
 \dot{v}_1 &= \frac{1}{M_1} (-M_3 v_3 \omega + u_2 g \sin \theta + L \sin \alpha - D \cos \alpha) \\
 \dot{v}_3 &= \frac{1}{M_3} (M_1 v_1 \omega - u_2 g \sin \theta - L \cos \alpha - D \sin \alpha) \\
 \dot{\omega} &= \frac{1}{J_2} [(M_3 - M_1) v_1 v_3 - m_h r_{hx} g \sin \theta - u_1 g \cos \theta + M_{DL}] + d \\
 u_1 &= m_1 r_{1x} + m_2 r_{2x} - m r_{bx}; \quad u_2 = -r_{h0} \pi r^2 (r_{1x} + r_{2x})
 \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

2 水下滑翔蛇形机器人纵倾运动反步控制器设计

在存在控制输入受限和未知外界干扰的情况下,单纯的反步控制器已经不能较好地实现预期控制目标,即通过控制伸缩关节来实现纵倾运动俯仰角的跟踪。通过引入非线性观测器,可以观测到外界干扰,并经增益调节得到消除干扰所需要的控制输入量,弥补了先前控制器对未知干扰的不足。与此同时,在反步控制器的设计过程中,考虑了系统存在的输入受限的情况,将双曲正切函数和 Nussbaum 函数相结合,限制了控制器输入的幅值。UGSR 垂直面纵倾运动控制器的系统结构如图 3 所示。



θ_d —目标俯仰角; z_1 —俯仰角误差; u —执行器控制量;

$\hat{d}$ —扰动估计值; u_d —控制输入补偿。

图 3 UGSR 垂直面纵倾运动控制器的系统结构

2.1 非线性干扰观测器设计

从式(4)的俯仰角状态方程出发,采用非线性扰动观测器^[15]来消除外界等不确定性扰动对系统的

影响。为方便非线性干扰观测器的设计,定义状态量 $\mathbf{x}=[\theta, \omega]^T=[x_1, x_2]^T$, 则系统状态方程的向量表达式为

$$\left. \begin{aligned} \dot{\mathbf{x}} &= \mathbf{f}(\mathbf{x}) + \mathbf{g}(\mathbf{x})u_1 + \mathbf{q}(\mathbf{x})d \\ \mathbf{q}(\mathbf{x}) &= [0, 1]^T \\ \mathbf{g}(\mathbf{x}) &= \left[0, -\frac{1}{J_2}g\cos\theta\right]^T \\ \mathbf{f}(\mathbf{x}) &= \left[x_2, \frac{1}{J_2}[(M_3 - M_1)v_1v_3 - m_h r_{hx}g\sin\theta + M_{DL}]\right]^T \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

本文设计的观测器的形式为

$$\left. \begin{aligned} \hat{d}_1 &= z + p(\mathbf{x}) \\ \dot{z} &= -\mathbf{L}(x_1, x_2)\mathbf{q}(\mathbf{x})z - \mathbf{L}(x_1, x_2)(\mathbf{f}(\mathbf{x}) + \mathbf{g}(\mathbf{x})u_1 + \mathbf{q}(\mathbf{x})p(\mathbf{x})) \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

式中 $p(\mathbf{x})=p_1x_1+p_2x_2$, p_1 和 p_2 均为常数, 且 $p_1 > 0, p_2 > 0, \mathbf{L}(x_1, x_2) = \frac{\partial p(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}} = [p_1, p_2]$ 。

定义观测器误差为 $\tilde{d}=d-\hat{d}$ 。由于一般情况下, 外部干扰项 d 的微分先验为未知状态, 为方便计算, 默认其相对于观测器的动态特性变化缓慢, 即 $\dot{d}=0$ 。考虑式(4)和误差公式定义, 可以得到观测器的误差动态方程为

$$\begin{aligned} \dot{\tilde{d}}_1 &= \dot{z} + \dot{p}(\mathbf{x}) = -\mathbf{L}(x_1, x_2)\mathbf{q}(\mathbf{x})z - \\ &\mathbf{L}(x_1, x_2)(\mathbf{f}(\mathbf{x}) + \mathbf{g}(\mathbf{x})u_1 + \mathbf{q}(\mathbf{x})p(\mathbf{x})) + \\ &\mathbf{L}(x_1, x_2)(\mathbf{f}(\mathbf{x}) + \mathbf{g}(\mathbf{x})u_1 + \mathbf{q}(\mathbf{x})d) = \\ &-\mathbf{L}(x_1, x_2)\mathbf{q}(\mathbf{x})(z + p(\mathbf{x})) - \mathbf{L}(x_1, x_2)(\mathbf{f}(\mathbf{x}) + \\ &\mathbf{g}(\mathbf{x})u_1) + \mathbf{L}(x_1, x_2)(\mathbf{f}(\mathbf{x}) + \mathbf{g}(\mathbf{x})u_1 + \mathbf{q}(\mathbf{x})d) = \\ &-\mathbf{L}(x_1, x_2)\mathbf{q}(\mathbf{x})\tilde{d} + \mathbf{L}(x_1, x_2)\mathbf{q}(\mathbf{x})d = \\ &\mathbf{L}(x_1, x_2)\mathbf{q}(\mathbf{x})\tilde{d} \end{aligned} \quad (7)$$

进一步可知

$$\dot{\tilde{d}} = \dot{d} - \dot{\hat{d}} = -\mathbf{L}(x_1, x_2)\mathbf{q}(\mathbf{x})\tilde{d} = -p_2\tilde{d} \quad (8)$$

式中: $\tilde{d}$ 为扰动观测误差; $\hat{d}$ 为扰动观测值; $\dot{\hat{d}}$ 为扰动观测估计值。取 $p_2 > 0$, 求解可得 $\tilde{d} = e^{-p_2 t} \tilde{d}(0)$ 。此时观测误差可实现呈指数收敛, 但对于 p_2 的取值需综合考虑, 如果过大易造成抖动。选取观测器的 Lyapunov 函数为 $V_N = \frac{1}{2}\tilde{d}^2$, 对等式两边求导可得 $\dot{V}_N = \tilde{d}\dot{\tilde{d}} = -p_2\tilde{d}^2 \leq 0$, 故该非线性观测器是稳定的。构建的控制输入补偿为 $u_d = \frac{-J_2}{g\cos\theta}\tilde{d}$ 。

2.2 考虑输入受限的反步控制器设计

控制输入由伸缩关节实现, 在水中易受到水压的影响, 产生控制输入饱和。饱和函数为一种非光

滑的函数, 但反步方法要求所有函数都是可微分状态。因此, 引入双曲正切函数这一平滑函数来近似饱和函数设计控制器。并且, 通过引入 Nussbaum 函数, 消除了双曲正切函数在控制器设计中可能出现的控制器奇异值, 同时避免了控制器对可能出现的未知增益需进行估计的问题。设定 $|\mathbf{u}| \leq u_M, u_M$ 为给定的最大幅值。双曲正切函数对饱和函数的近似作用的表达式为

$$|\mathbf{u}| = g(v) = u_M \tanh u_M \quad (9)$$

Nussbaum 函数的定义如下: 如果连续函数 $N(\xi): \mathbf{R} \rightarrow \mathbf{R}$ 满足双边特性

$$\left. \begin{aligned} \limsup_{s \rightarrow +\infty} \frac{1}{s} \int_0^s N(\xi) d\xi &= +\infty \\ \liminf_{s \rightarrow +\infty} \frac{1}{s} \int_0^s N(\xi) d\xi &= -\infty \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

则称 $N(\xi)$ 为 Nussbaum 函数。

Nussbaum 函数的引理^[17]如下。若有定义在 $[0, t_f]$ 上的光滑函数 $V(\cdot)$ 和 $\xi(\cdot)$, 其中 $V(t) \geq 0, \forall t \in [0, t_f]$, 并且 $N(\cdot)$ 为光滑 Nussbaum 函数, 则有不等式

$$\begin{aligned} V(t) &\leq b_0 + e^{-b_1 t} \int_0^t h[x(\tau)] N(\xi) \xi e^{b_1 \tau} d\tau + \\ &e^{-b_1 t} \int_0^t \xi e^{b_1 \tau} d\tau \end{aligned} \quad (11)$$

式中: b_0 和 b_1 均为常数; $h[x(\tau)]$ 为时变函数。根据引理, 可判定 $\xi(t), V(t)$ 和 $\int_0^t h[x(\tau)] N(\xi) \xi d\tau$ 在定义范围内必定有界。

根据非线性观测器输出作用在伸缩关节的控制增益, 改写系统状态方程。将输入 u_1 与 u_d 结合, 得到新的输入量 u_{1c} 。根据新状态方程, 在考虑控制输入受限的基础上利用反步法设计控制器, 并定义误差变量和虚拟项。利用反步法设计控制器的具体步骤如下。

第 1 步, 计算纵倾角 θ 的跟踪误差为

$$z_1 = \theta - \theta_d \quad (12)$$

求取式(12)的时间导数可得

$$\dot{z}_1 = \dot{\theta} - \dot{\theta}_d = \omega - \dot{\theta}_d \quad (13)$$

式中 ω 可被看成虚拟控制量。设虚拟控制量 α_1 为

$$\alpha_1 = -c_1 z_1 + \dot{\theta}_d \quad (14)$$

第 2 步, 定义 UGSR 的俯仰角速度误差为 z_2 , 并对子系统进行设计, 得到

$$z_2 = \omega - \alpha_1 \quad (15)$$

为避免虚拟控制量在微分求取过程中产生的计算膨胀, 根据动态面方法, 将原虚拟控制量 α_1 进行一阶

低通滤波,并将其输出作为新的状态变量 σ_1 ,表达式为

$$\left. \begin{aligned} T\dot{\sigma}_1 + \sigma_1 &= \alpha_1 \\ \sigma_1(0) &= \alpha_1(0) \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

改写式(15)并对其求导得

$$\begin{aligned} \dot{z}_2 = \dot{\omega} - \dot{\sigma}_1 &= \frac{1}{J_2}[(M_3 - M_1)v_1 v_3 + M_{DL} - \\ &m_h r_{hx} g \sin\theta] - \frac{g \cos\theta}{J_2} u_{1c} + d - \dot{\sigma}_1 \end{aligned} \quad (17)$$

设计 UGSR 俯仰角跟踪控制律为

$$\left. \begin{aligned} u_{1c} &= N(\xi) \left(c_2 z_2 + \frac{1}{J_2}[(M_3 - M_1)v_1 v_3 - \right. \\ &\left. m_h r_{hx} g \sin\theta + M_{DL}] + d - \dot{\sigma}_1 \right) \\ N(\xi) &= e^{\xi^2} \cos((\pi/2)\xi) \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

式中: c_2 为设计的大于 0 的常数; ξ 为 Nussbaum 函数变量,其参数自适应律可设计为

$$\begin{aligned} \dot{\xi} &= \left(c_2 z_2 + \frac{1}{J_2}[(M_3 - M_1)v_1 v_3 - \right. \\ &\left. m_h r_{hx} g \sin\theta + M_{DL}] + d - \dot{\sigma}_1 \right) z_2 \end{aligned} \quad (19)$$

第 3 步,对于垂直面纵倾运动中的速度系统,定义净浮力跟踪误差和导数分别为

$$\left. \begin{aligned} z_3 &= u_2 - u_{2d} \\ \dot{z}_3 &= \dot{u}_2 - \dot{u}_{2d} \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

选择虚拟控制量

$$\alpha_3 = c_3 z_3 + \dot{u}_{2d} \quad (21)$$

因为可忽略 u_{2d} 的动态性能的影响,故 $\dot{u}_{2d} = 0$,所以可得

$$u_{2c} = c_3 z_3 \quad (22)$$

式中 $c_3 \geq 0$ 即可保证子系统符合 Lyapunov 稳定性原理。由此可见,对于 $\dot{u}_2$ 的控制只需简单的比例调节控制就能确保纵倾运动时 UGSR 速度的稳定性。

2.3 控制器稳定性分析

针对 UGSR 垂直面纵倾运动数学模型,考虑到外部未知扰动和 1.2 节假设 3 成立的情况下,分别设计参数 ξ 的自适应律和非线性干扰观测器。在考虑输入受限的反步控制律的作用下,通过设计适当的控制器参数以及滤波器的相关参数,即可保证 UGSR 纵倾运动控制系统的一致最终稳定性。

为保证 UGSR 能实现稳定跟踪到纵倾运动中的期望位置,定义垂直面惯性坐标系下位置与姿态误差为

$$x_e = x - x_d; \quad z_e = z - z_d; \quad \theta_e = \theta - \theta_d \quad (23)$$

式中 x_d 、 z_d 、 θ_d 分别为期望横向位置、纵向位置以及

纵倾角度。为方便计算,进行坐标转换得到体坐标系下的位置误差为

$$\begin{bmatrix} e_x \\ e_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta \\ -\sin\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_e \\ z_e \end{bmatrix} \quad (24)$$

结合式(23)与式(24),得到垂直面误差方程为

$$\left. \begin{aligned} \dot{e}_x &= v_1 - V \cos\theta_e \\ \dot{e}_z &= v_3 - V \sin\theta_e \end{aligned} \right\} \quad (25)$$

构造 Lyapunov 函数 V_e 为

$$V_e = (e_x^2 + e_z^2)/2 \quad (26)$$

结合式(26)与子系统,构造 Lyapunov 函数 V_1 为

$$V_1 = \frac{1}{2} z_1^2 + \frac{1}{2} e^2 + V_e \quad (27)$$

式中 $e = \alpha_1 - \sigma_1$ 。对式(27)关于时间求导,得

$$\begin{aligned} \dot{V}_1 &= z_1 \dot{z}_1 + e \dot{e} + \dot{V}_e = z_1(z_2 + \sigma_1 - \dot{\theta}_d) + \\ &e(\sigma_1 - \alpha_1) + \dot{V}_e = z_1(z_2 + e - c_1 z_1) + \\ &e\left(-\frac{e}{T} + c_1 \dot{z}_1 - \ddot{\theta}_d\right) + \dot{V}_e = z_1 z_2 + e z_1 - c_1 z_1^2 - \\ &\frac{1}{T} e^2 + c_1 e(z_2 + e - c_1 z_1) - \ddot{\theta}_d e + \dot{V}_e \leq 4 z_2^2 + \\ &\frac{1}{16} z_1^2 + 4 e^2 + \frac{1}{16} z_1^2 - c_1 z_1^2 - \frac{1}{T} e^2 + c_1^2 e^2 + \frac{1}{4} z_2^2 + \\ &c_1 e^2 + 4 c_1^4 e^2 + \frac{1}{16} z_1^2 + e^2 + \frac{1}{4} \ddot{\theta}_d^2 + \dot{V}_e \leq \\ &\frac{17}{4} z_2^2 - \left(\frac{1}{T} - 4 c_1^4 - c_1^2 - c_1 - 5\right) e^2 + \frac{1}{4} \ddot{\theta}_d^2 - \\ &\left(c_1 - \frac{3}{16}\right) z_1^2 + \dot{V}_e \end{aligned} \quad (28)$$

式中 $\dot{V}_e = e_x(v_1 - V \cos\theta_e) + e_z(v_3 - V \sin\theta_e)$; T 为滤波器时间常数。定义虚拟误差 $\epsilon = V \sin\theta_e$,将 v_1 和 ϵ 当成虚拟控制量,设计控制律设为

$$\left. \begin{aligned} v_{1d} &= V \cos\theta_e - k_1 \frac{e_x}{e} \\ \epsilon_d &= -v_3 - k_2 \frac{e_z}{e} \end{aligned} \right\} \quad (29)$$

式中: k_1 和 k_2 为正常数; $e = \sqrt{1 + e_x^2 + e_z^2}$ 。

由于 v_{1d} 和 ϵ_d 并不是真实存在的可控变量,故定义其误差变量为

$$e_{v_1} = v_1 - v_{1d}; \quad e_\epsilon = \epsilon - \epsilon_d \quad (30)$$

由此,化简 $\dot{V}_e$ 可得

$$\dot{V}_e = -(k_1 e_x^2 + k_2 e_z^2)/e + e_{v_1} e_x + e_\epsilon e_z \quad (31)$$

令 $\beta_1 = \min\{c_1 - 3/16, T^{-1} - 4c_1^4 - c_1^2 - c_1 - 5\}$, $c_1 > 3/16, T^{-1} > 4c_1^4 + c_1^2 + c_1 + 5$,则有

$$\begin{aligned} \dot{V}_1 &\leq -\beta_1 V_1 + \frac{17}{4} z_2^2 + \frac{1}{4} \ddot{\theta}_d^2 - \frac{k_1 e_x^2 + k_2 e_z^2}{e} + \\ &e_{v_1} e_x + e_\epsilon e_z \end{aligned} \quad (32)$$

对于子系统,定义 Lyapunov 函数 V_2 为

$$V_2 = V_1 + z_2^2/2 \quad (33)$$

根据式(17)~(19)可得

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 &= \dot{V}_1 + z_2 \dot{z}_2 = \dot{V}_1 + z_2 \left(f_2(x) - \frac{g \cos \theta}{J_2} u_{1c} + \right. \\ &\quad \left. d - \dot{\sigma}_1 \right) = \dot{V}_1 + z_2 \left(f_2(x) - \frac{g \cos \theta}{J_2} N(\xi) (c_2 z_2 + \right. \\ &\quad \left. f_2(x) + d - \dot{\sigma}_1) + d - \dot{\sigma}_1 + c_2 z_2 \right) - c_2 z_2^2 = \dot{V}_1 + \\ &\quad \left(-\frac{g \cos \theta}{J_2} N(\xi) + 1 \right) \dot{\xi} - c_2 z_2^2 \end{aligned} \quad (34)$$

将式(32)代入式(34),可得

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 &\leq - \left(c_1 - \frac{3}{16} \right) z_1^2 - \left(c_2 - \frac{17}{4} \right) z_2^2 + \frac{1}{4} \ddot{\theta}_d^2 - \\ &\quad \left(\frac{1}{T} - 4c_1^4 - c_1^2 - c_1 - 5 \right) e^2 + \left(-\frac{g \cos \theta}{J_2} N(\xi) + \right. \\ &\quad \left. 1 \right) \dot{\xi} - \frac{k_1 e_x^2 + k_2 e_z^2}{e} + e_{v1} e_x + e_e e_z \end{aligned} \quad (35)$$

根据控制器对于纵倾运动的稳定性跟踪,可得 $e_{v1} = e_e = 0$ 。令 $\beta_2 = \min\{\beta_1, c_2 - 17/4\}$, $c_2 > 17/4$, $N = \ddot{\theta}_d^2/4 - (k_1 e_x^2 + k_2 e_z^2)/e$, 式(35)可以转化为

$$\dot{V}_2 \leq \left(-\frac{g \cos \theta}{J_2} N(\xi) + 1 \right) \dot{\xi} - \beta_2 V_2 + N \quad (36)$$

对式(36)两边同乘 $e^{\beta_2 t}$, $t \in [0, t_f]$, 并在时间 t 内进行积分,可得

$$V_2 \leq e^{-\beta_2 t} \int_0^t \left(-\frac{g \cos \theta}{J_2} N(\xi) + 1 \right) \dot{\xi} e^{\beta_2 \tau} d\tau + C \quad (37)$$

式中 $C = N/\beta_2 + V_2(0)$ 。根据 2.2 节的 Nussbaum 函数的引理和式(37)可知, $N(\xi)$ 、 $\xi(t)$ 、 $V_2(t)$ 有界, 进而可得出 z_1 和 z_2 等在 $[0, t_f]$ 上均有界, 可取 $|z_2| \leq B$ 。进一步依据 2.1 节的假设 3, 可令 $M = 17/4B^2 + A^2/4$, 由此, 式(32)可写成

$$\dot{V}_1 \leq -\beta_1 V_1 + M \quad (38)$$

对式(38)两边在 $[0, t_f]$ 上同乘 $e^{\beta_1 t}$, 积分可得

$$\dot{V}_1 \leq \left(V_1(0) - \frac{M}{\beta_1} \right) e^{-\beta_1 t} + \frac{M}{\beta_1} \quad (39)$$

结合式(27)可得

$$|z_1| \leq \sqrt{2 \left[V_1(0) - \frac{M}{\beta_1} \right] e^{-\beta_1 t} + \frac{2M}{\beta_1}} \quad (40)$$

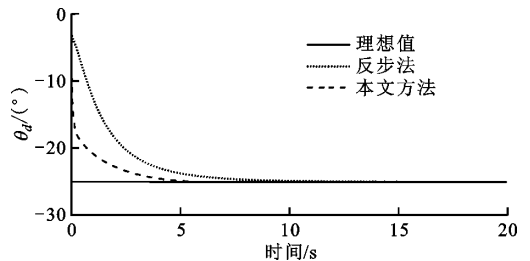
因此, 对任意的常数 $k > \sqrt{2M/\beta_1}$, 在指定时间 T_{z1} 后存在一般时间, 有 $|z_1| \leq k$, 即 UGSR 的俯仰角跟踪误差 z_1 收敛于一紧集 $\Omega = \{z_1 \in \mathbf{R}: |z_1| \leq k\}$ 。

由 M 和 β_1 的定义可知, 适当的反步控制器参数 c_1 、 c_2 和 T 可使得 k 任意小, 即俯仰角跟踪误差也达到任意小, 从而实现了 UGSR 纵倾运动的稳定跟踪。同时, UGSR 也能较好地跟踪到预期纵倾路线中的位置量, 确保了控制器的位置稳定性。

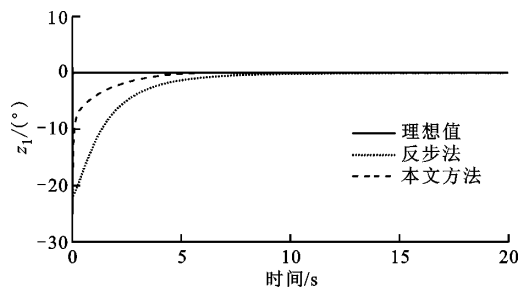
3 仿真分析

本文基于 Matlab/Simulink 软件, 进行了考虑输入受限情况下的反步控制器在复合扰动情况下垂直面纵倾运动的跟踪仿真。仿真中采用的 UGSR 配置参数如下: $m_1 = 1.3 \text{ kg}$, $m_2 = 1.3 \text{ kg}$, $m_h = 0.03 \text{ kg}$, $m_{\text{sum}} = 6.1 \text{ kg}$, $C_{D0} = 0.456 \text{ l}$, $C_{D0}^v = 17.03$, $C_{L0} = 0.063$, $C_{L0}^v = 18.68$, $C_{DL} = 0$, $C_{DL}^v = -0.923 \text{ 8}$, $M_1 = 6.1 \text{ kg}$, $M_3 = 12.2 \text{ kg}$, $J_2 = 1.055 \text{ 2 kg} \cdot \text{m}^2$, $u_M = 4 \text{ kg} \cdot \text{m}$, $c_1 = 0.5$, $c_2 = 10$, $c_3 = 1$, $T = 0.05 \text{ s}$, $\xi(0) = -0.06\pi$, $p_1 = 1$, $p_2 = 0.5$ 。流体动力系数存在多种获得方法, 本文数据源于 Tang 等通过模拟计算流体动力学在 $\theta \in (-\pi/2, \pi/2)$ 下 UGSR 的水动力学参数和攻击侧滑角的关系^[5]获得的结果。

首先验证反步控制器对于下潜定值参考俯仰角的追踪效果, 此时仿真中并没有考虑外部干扰。给定 $\theta_d = -25^\circ$, 系统的初始值为 $\theta = 0$ 、 $\omega = 0$ 和 $V_d = 0.8 \text{ m/s}$ 。图 4 是定值纵倾角的 UGSR 跟踪效果曲线和跟踪误差曲线, 可以看出, 相比传统的反步控制法, 本文设计的控制器在在同等参数配置下, 在跟踪效果与误差收敛速度方面都有一定的提升。



(a) 跟踪效果



(b) 跟踪误差

图4 UGSR 纵倾运动定值俯仰角的跟踪效果曲线和跟踪误差曲线

为验证本文所设计的控制器的非线性干扰观测器的性能, 并考虑实际水中可能产生的干扰形式, 采用时变信号和随机信号叠加作为干扰信号, 形式为 $d = 4 \sin t + S$, 其中 S 为小于 1 的随机值。

图 5 和图 6 给出了在传统的反步法和本文方法作用下的连续变化俯仰角的响应和跟踪误差,可以看出,二者都能稳定实现俯仰角转换过程,但相比之下,本文方法具有更短的响应时间以及更小的稳态误差,可实现角度平滑变化,控制性能良好。参考俯仰角 θ_d 的变化曲线为 $25\sin(0.2\pi t+0.2\pi)$ 。

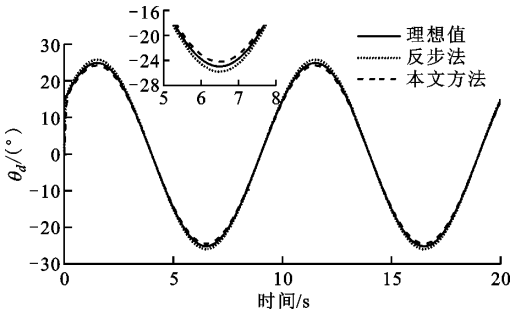


图 5 UGSR 纵倾运动连续变化俯仰角的响应

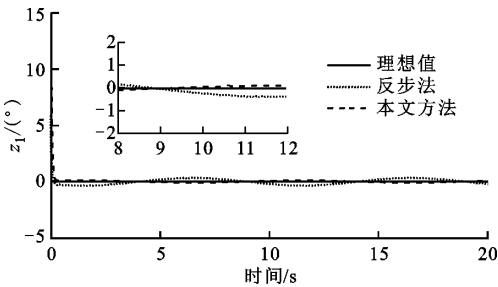


图 6 UGSR 纵倾运动连续变化俯仰角的跟踪误差

图 7 为外部干扰的实际值与观测值,可以看出,外部干扰的实际值与观测器所得出的观测值相近,观测器的效果良好,提高了系统的控制精度。图 8 为 Nussbaum 函数 $N(\xi)$ 和其参数 ξ 与时间的关系图,可以看出, Nussbaum 函数及其变量都趋向稳定,可证明系统误差及状态信号的有界。

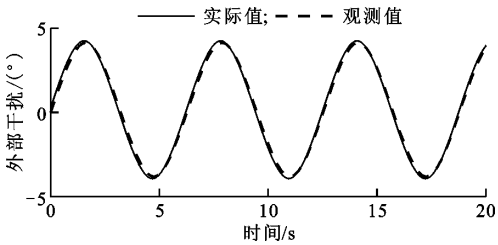


图 7 UGSR 纵倾运动连续变化俯仰角下外部干扰的实际值与观测值

图 9 表示在连续纵倾运动下,控制器在考虑输入受限情况时的执行器控制量 u_1 和 u_2 的变化曲线,其中 u_M 的数值取决于开环实验中伸缩关节的实验数据。由图 9 可以看出,由于采用双曲正切函数以及 Nussbaum 函数替代了原有的饱和函数,最终求解的控制输入量 u_1 和 u_2 均在给定的饱和值范

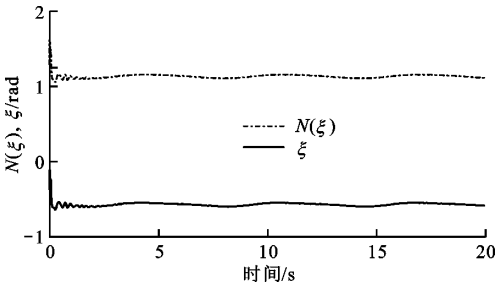


图 8 Nussbaum 函数 $N(\xi)$ 及其参数 ξ 与时间的关系

围内,因此有效解决了水压所带来的输入受限问题。与此同时, Nussbaum 函数的引入消除了单纯采用双曲正切函数时可能会引起的控制器控制奇异值,对于系统稳定起到了重要作用。

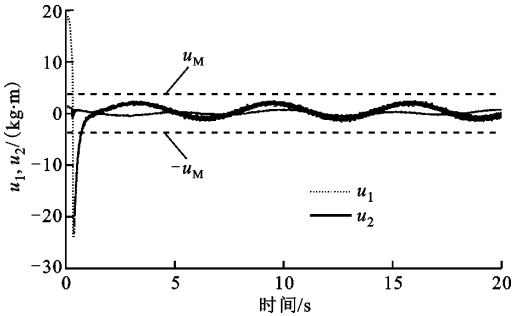


图 9 UGSR 纵倾运动下的执行器输入信号

4 结 论

本文研究了带有输入受限和外部扰动的水下滑翔蛇形机器人的纵倾运动跟踪控制。通过非线性干扰观测器和反步控制器的设计,在限制控制输入幅值的情况下,进行仿真实验与分析,得出以下结论。

(1)在 UGSR 的三维运动模型基础上进行了垂直面分析,得出了相应的运动学与动力学方程。针对强非线性进行了相关简化,得到改写后的方程组,方便了后续控制器设计与稳定性证明。

(2)采用非线性干扰观测器对外部复合扰动进行了有效观测并构建了相应输入补偿项,解决了 UGSR 受到外界未知扰动的问题。同时,结合反步法设计了新型反步控制器,不仅能够保证系统的速度与位置信号量的全局稳定性,还具有较强的鲁棒性,能较好地满足 UGSR 纵倾运动跟踪控制要求。

(3)考虑到 UGSR 伸缩关节在水中受水压易产生输入受限的情况,在控制方案中引入了双曲正切函数进行近似化饱和函数处理。在此基础上,结合 Nussbaum 函数避免了双曲正切函数可能带来的控制器奇异值。

(4)通过给定 UGSR 的仿真参数,开展了相关

仿真验证与实验。在外界复合扰动的作用下,得到了干扰观测值、系统状态量、控制器输入信号和控制器输出量等相关变量,验证了所设计的控制器的控制性能、响应速度及效果均优于原有方案。

参考文献:

- [1] WEN L, WEAVER J C, LAUDER G V. Biomimetic shark skin: design, fabrication and hydrodynamic function [J]. *Journal of Experimental Biology*, 2014, 217(10): 1656-1666.
- [2] ARALE S, PAWAR C, DESHMUKH A, et al. Design and manufacture of Bio-mimic robotic fish [C]//2016 IEEE First International Conference on Control, Measurement and Instrumentation (CMI). Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2016: 445-448.
- [3] WU Z X, YU J Z, YUAN J, et al. Mechatronic design and implementation of a novel gliding robotic dolphin [C]//2015 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO). Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2015: 267-272.
- [4] 郁树梅, 王明辉, 马书根, 等. 水陆两栖蛇形机器人的研制及其陆地和水下步态 [J]. *机械工程学报*, 2012, 48(9): 18-25.
YU Shumei, WANG Minghui, MA Shugen, et al. Development of an amphibious snake-like robot and its gaits on ground and in water [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2012, 48(9): 18-25.
- [5] TANG J G, LI B, LI Z Q, et al. A novel underwater snake-like robot with gliding gait [C]//2017 IEEE 7th Annual International Conference on CYBER Technology in Automation, Control, and Intelligent Systems (CYBER). Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2017: 1113-1118.
- [6] 唐敬阁, 李斌, 常健, 等. 水下滑翔蛇形机器人结构设计及动力学建模 [J]. *华中科技大学学报(自然科学版)*, 2018, 46(12): 89-94.
TANG Jingge, LI Bin, CHANG Jian, et al. Design and dynamic model of underwater gliding snake-like robot [J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2018, 46(12): 89-94.
- [7] ZHOU C. Study on the pitching and depth control of biomimetic robot fish [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2009, 34(9): 1215-1218.
- [8] YU J Z, SU Z S, WANG M, et al. Control of yaw and pitch maneuvers of a multilink dolphin robot [J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2012, 28(2): 318-329.
- [9] KELASIDI E, LILJEBACK P, PETTERSEN K Y, et al. Integral line-of-sight guidance for path following control of underwater snake robots: theory and experiments [J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2017, 33(3): 610-628.
- [10] 唐敬阁, 李斌, 常健, 等. 水下滑翔蛇形机器人滑翔运动建模与优化控制 [J]. *东南大学学报(自然科学版)*, 2019, 49(1): 94-100.
TANG Jingge, LI Bin, CHANG Jian, et al. Modeling and optimal control on gliding motion of underwater gliding snake-like robot [J]. *Journal of Southeast University (Natural Science Edition)*, 2019, 49(1): 94-100.
- [11] 张晓路, 李斌, 常健, 等. 水下滑翔蛇形机器人滑翔控制的强化学习方法 [J]. *机器人*, 2019, 41(3): 334-342.
ZHANG Xiaolu, LI Bin, CHANG Jian, et al. A reinforcement learning method for gliding control of underwater gliding snake-like robot [J]. *Robot*, 2019, 41(3): 334-342.
- [12] 杨海. 考虑输入受限的水下滑翔机前馈控制设计 [J]. *中国舰船研究*, 2014, 9(6): 87-91, 99.
YANG Hai. Feedforward control design for autonomous underwater gliders under input constraints [J]. *Chinese Journal of Ship Research*, 2014, 9(6): 87-91, 99.
- [13] LIANG X, QU X R, HOU Y H, et al. Three-dimensional trajectory tracking control of an underactuated autonomous underwater vehicle based on ocean current observer [J]. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 2018, 15(5): 172988141880681.
- [14] NUSSBAUM R D. Some remarks on a conjecture in parameter adaptive control [J]. *Systems & Control Letters*, 1983, 3(5): 243-246.
- [15] CHEN W H, BALLANCE D J, GAWTHROP P J, et al. A nonlinear disturbance observer for robotic manipulators [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2000, 47(4): 932-938.
- [16] SWAROOP D, HEDRICK J K, YIP P P, et al. Dynamic surface control for a class of nonlinear systems [J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2000, 45(10): 1893-1899.
- [17] WEN C Y, ZHOU J, LIU Z T, et al. Robust adaptive control of uncertain nonlinear systems in the presence of input saturation and external disturbance [J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2011, 56(7): 1672-1678.

(编辑 陶晴)