



西安交通大学学报
Journal of Xi'an Jiaotong University
ISSN 0253-987X, CN 61-1069/T

《西安交通大学学报》网络首发论文

题目：采用干扰观测器的水下滑翔蛇形机器人纵倾运动控制
作者：陈恩志，常健，李斌，张国伟，刘春
收稿日期：2019-05-29
网络首发日期：2019-08-14
引用格式：陈恩志，常健，李斌，张国伟，刘春. 采用干扰观测器的水下滑翔蛇形机器人纵倾运动控制. 西安交通大学学报.
<http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20190814.1508.017.html>



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

DOI:

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 (underwater gliding snake-like robot, UGSR) 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问题, 避免了后者存在的控制器奇异问题, 并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。设计纵倾运动跟踪的反步控制器, 其中针对反步法中虚拟项引发的计算膨胀问题, 采用动态面方法来消除。基于Lyapunov稳定性理论设计的控制器, 保证了系统能够实现速度与位置信号量的全局一致稳定性。研究结果表明: 该方案相对传统反步法, 在响应时间与误差收敛速度都有一定程度提高, 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 文献标识码: A

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 (UGSR) has input constraints and unknown external disturbance when implementing gliding motion, 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 problem of the latter, and the nonlinear disturbance observer is used to effectively observe and compensate the external complex disturbance. The backstepping controller for designing pitching motion tracking, in which the computational expansion problem caused by the virtual item in the backstepping method is eliminated by the dynamic surface method. The controller designed based on 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 speed to some extent, and the nonlinear disturbance observer has a good performance for the observation of complex disturbances. The designed controller can effectively track the longitudinal motion of the robot under the unknown disturbance and has strong robustness.

Key Words: underwater gliding snake-like robot, pitch motion, disturbance observer, input constraints, backstepping control

认识、开发海洋作为目前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ROV、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。其长距离和强耐力的特性使其广泛应用,但在速度和机动性方面性能都较差。与此同时,随着水生生物仿生学^[1]的兴起,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。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鱼^[2]以及滑翔机器海豚^[3]的概念,并验证了它们的性能。在这基础上,Tang等在水陆两栖蛇形机器^[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]。它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其运动效率,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^[7]从水下滑翔鱼机械设计出发,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,进而实现其俯仰姿态的调节;Yu等^[8]在多连杆滑翔机器海豚的基础上,提出了闭环俯仰策略以使其在垂直平面中执行俯仰转弯。Kelasidi等^[9]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。由于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,目前有唐敬阁等^[10]提出的LQR控制器实现系统的稳定以及对期望轨迹的跟踪控制;张晓璐等^[11]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洛策略梯度的算法,实现了UGSR能适应复杂水环境并自动学习滑翔运动的功能。但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^[12]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有效性。Liang^[13]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,提出通过基于运动学模型的海流扰动观测器消除未知扰动的方法,仿真证明该控制器对AUV实现三维轨迹跟踪具有良好性能。

当UGSR处于垂直面纵倾运动时,由于其自身是一个强非线性欠驱动系统,受到其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到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。针对上述问题,首先对原有的三维滑翔运动模型进行简化,并针对原模型没有考虑外部扰动的问题进行了修正;后采用具有光滑特性的双曲正切函数和Nussbaum函数^[13]的性质来处理输入受限问题,并避免了可能存在的控制器奇异问题;此外将系统模型中的不确定项和外部扰动视为外界未知扰动,通过非线性观测器^[15]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。最后仿真结果表明,该控制器在满足UGSR垂直面简化模型的前提条件下,能较好的实现纵倾角的跟踪,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]基础上引入两个可变长度的单自由度关节,能实现整体净浮力的改变和产生对应的俯仰力矩。如图1所示,为UGSR的实体样机。它由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。两个伸缩关节位于图中编号为2,5的位置,剩余的位置编号代表俯仰偏航关节。同时在位置4处添加了一对平面机翼,用来提供升力,于此同时尾翼的加入将为游动提供平衡和姿态角调节的功能。

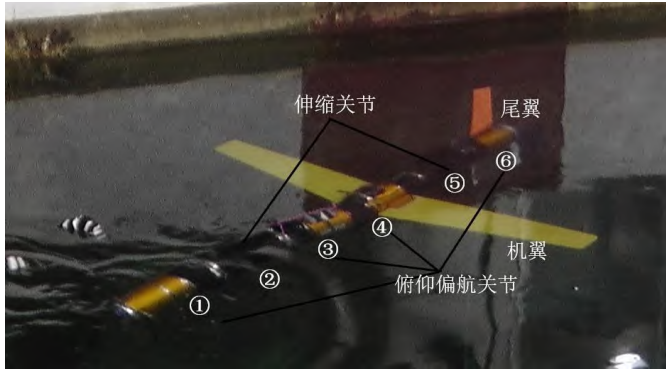


图 1 UGSR 实体样机

此外, UGSR配备了多种传感器, 并能够对外界环境信息及本体运动信息进行有效获取, 实现其稳定的运动。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, 故采用有线通信方式。表1为UGSR样机的关键结构参数。

表 1 UGSR 样机结构参数

符号	含义	数值
L/m	机体总长度	1.6
m_{sum}/kg	总质量 (包括固定质量块)	11.3
m_h/kg	固定质量块质量	0.03
$l_1, l_2/m$	初始伸缩关节和俯仰偏航关节长度	0.3, 0.2
$d_1, d_2/m$	伸缩关节和俯仰偏航关节直径	0.106, 0.073
$L_w, d_w/m$	机翼总长度和宽度	0.8, 0.1

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, 纵向动力学是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。

给定滑翔的参考路径, ξ_d 和 V_d 分别为指定滑翔角度和速度, 前者表示为 $\xi_d = \theta - \alpha$, 其中 θ 为俯仰角, α 为攻角, 后者为 $V_d = \sqrt{v_1^2 + v_3^2}$, v_1 和 v_3 分别为水平与垂直方向速度值。并定义惯性坐标为 (x', z') , x' 和 z' 分别代表期望路径的横向位置和纵向位置:

$$\begin{pmatrix} x' \\ z' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \xi_d & -\sin \xi_d \\ \sin \xi_d & \cos \xi_d \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ z \end{pmatrix} \quad (1)$$

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

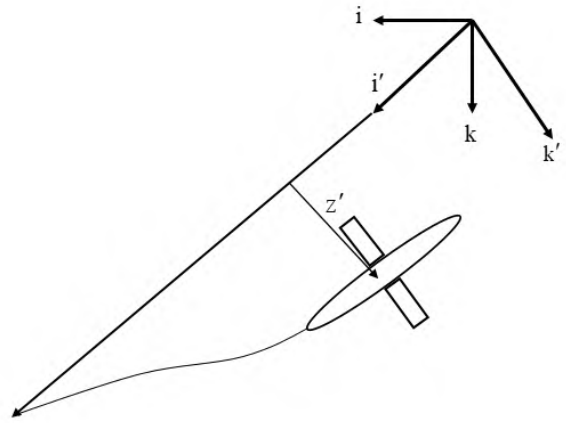


图 2 垂直平面滑翔示意图

z' 的动力学方程式可得

$$\dot{z}' = \sin \xi_d (v_1 \cos \theta + v_3 \sin \theta) + \cos \xi_d (-v_1 \sin \theta + v_3 \cos \theta) \quad (2)$$

在本文中, 我们仅考虑UGSR的滑翔运动, 伸缩关节的运动局限于伸缩轨道的设计, 也就是通过控制其伸缩的速度与长度, 从而控制其滑翔时相对速度以及相对位置。位于轴线上的固定质量的位置是固定不动的。考虑到伸缩关节在水压压力的作用下面临到的输入受限以及外部扰动的问题, 我们将先前所构建的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, 得到其垂直面的动力学方程组为

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

其中 r_{h0} 为水密度, $m_0 g$ 是净浮力, m_h 是固定块质量, m_1 和 m_2 分别表示头部两关节和尾部两关节的质量, 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值, 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 则分别对应前面两者的速度变化量, r_{hx} 为质心位置, r_{bx} 为浮心位置, d 为外界扰动。UGSR在水中受到的流体力主要包括阻力 D 、升力 L , 以及上述二者力所产生的力矩 M_{DL} 。

从等式可以清楚的看出, 其具有 2 个输入以及 6 个输出, 故 UGSR 系统属于欠驱动系统。同时 UGSR 的动力学模型有着较强的非线性, 为简化问题分析, 作下面几点假设和说明:

- 1) 固定在机体下方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值可以忽略不计, 即 J_2 为常数。
- 2) 考虑到UGSR速度的慢变特性, 忽略速度变化所带来的动态性能, 且其所受复合干扰未知且 d 是有界的, 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 $|\ddot{\theta}_d| \leq A$, A 为给定常量。
- 4) 将公式(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。

故原模型在本部分可以改写成

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

2 UGSR纵倾运动反步控制器设计

为了通过控制伸缩关节实现纵倾运动俯仰角跟踪, 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的在复杂环境下实现预期控制目标。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。整个系统的自

动控制系统结构如图 3 所示。

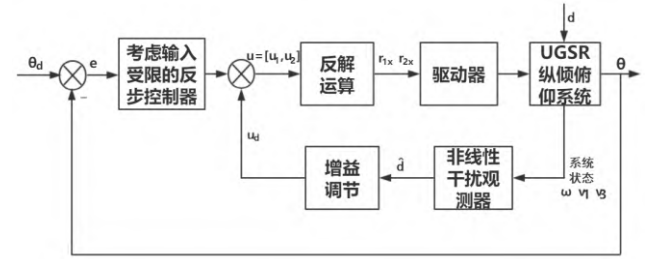


图3 UGSR垂直面纵倾运动控制器系统结构

2.1 非线性干扰观测器设计

为消除外界等不确定性扰动对系统的影响, 采用非线性扰动观测器方法^[15]。其设计步骤如下, 以式(4)的俯仰角状态方程出发, 参考非线性观测器设计原理。其中为方便非线性干扰观测器设计, 定义状态量 $x = [\theta, \omega]^T = [x_1, x_2]^T$, 则系统状态方程的向量表达式如下所示:

$$\dot{x} = f(x) + g(x)u_1 + q(x)d \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \text{其中 } q(x) &= [0, 1]^T, \quad g(x) = [0, -\frac{1}{J_2} g \cos \theta]^T, \quad f(x) \\ &= [x_2, \frac{1}{J_2} [(M_3 - M_1)v_1 v_3 - m_h r_{hx} g \sin \theta + M_{DL}]]^T. \end{aligned}$$

本文设计的观测器的形式如下所示:

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

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

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:

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

进一步可知

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

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 取值需综合考虑, 否则过大易造成抖动。选取观测器的Lyapunov 函数 $V_N = \frac{1}{2} \tilde{d}^2$, 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。构建其控制输入补偿值为 $u_d = \frac{-J_2}{g \cos \theta} \hat{d}$ 。

2.2 考虑输入受限的反步控制器设计

由于控制输入由伸缩关节实现, 其在水中易受到水压的影响, 产生控制输入饱和问题。由于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。并通过引入Nussbaum函数, 消除了前者在控制器设计中可能出现的控制器奇异值问题, 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。其中设定 $|u| \leq u_M$, u_M 为给定最大幅值。双曲正切函数对饱和函数的近似作用如下形式:

$$u = g(v) = u_M \tanh\left(\frac{v}{u_M}\right) \quad (9)$$

Nussbaum函数定义和引理如下所示:

定义1: 如果连续函数 $N(\xi): R \rightarrow R$ 满足如式 (10) 所具备的双边特性, 则称 $N(\xi)$ 为Nussbaum函数。

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

引理1^[17]: 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。如果 $\forall t \in [0, t_f)$, 则下述不等式成立

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

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

根据上面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。

第一步: 设UGSR的目标俯仰角为 θ_d , 实际俯仰角值 θ 的跟踪误差量为:

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

求取式 (12) 的时间导数, 并将数值代入, 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, 通过引入恰当的 α_1 来替代, 即

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

第二步: 定义UGSR的俯仰角速度误差为变量 z_2 , 并对其子系统进行设计:

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

其中, 为避免虚拟控制量在微分求取过程中产生的“计算膨胀”问题, 根据动态面方法理论, 将原虚拟控制量 α_1 进行一阶低通滤波, 其输出作为新的状态变量 σ_1 , 其表达式如下

$$\begin{cases} T \dot{\sigma}_1 + \sigma_1 = \alpha_1 \\ \sigma_1(0) = \alpha_1(0) \end{cases} \quad (16)$$

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

$$u_{1c} = N(\xi) \left(c_2 z_2 + \frac{1}{J_2} [(M_3 - M_1)v_1 v_3 - m_h r_{hx} g \sin \theta + M_{DL}] + d - \dot{\sigma}_1 \right) \quad (18)$$

$$N(\xi) = e^{\xi^2} \cos((\pi/2)\xi)$$

其中 c_2 为设计的常数, 其数值大于零。 ξ 为Nussbaum函数变量, 其参数自适应律可设计为

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

第三步: 对于垂直面纵倾运动中速度系统, 定义净浮力跟踪误差和导数分别为:

$$\begin{cases} \dot{z}_3 = u_2 - u_{2d} \\ \dot{\dot{z}}_3 = \dot{u}_2 - \dot{u}_{2d} \end{cases} \quad (20)$$

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 $\dot{u}_{2d} = 0$, 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。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, 通过设计适当的参数以及滤波器的相关参数, 可保证UGSR纵倾运动控制系统的一致最终稳定性。

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

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

其中 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值误差

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

结合式(23)与式(24), 得垂直面误差方程为:

$$\begin{cases} \dot{e}_x = v_1 - V \cos(\theta_e) \\ \dot{e}_z = v_3 - V \sin(\theta_e) \end{cases} \quad (25)$$

构造Lyapunov函数 V_e 为:

$$V_e = \frac{1}{2}(e_x^2 + e_z^2) \quad (26)$$

结合式(26)与子系统, 构造如下Lyapunov函数 V_1

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

式中, $e = \alpha_1 - \sigma_1$ 。并对整式关于时间求导, 得

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

其中 $\dot{V}_e = e_x(v_1 - V \cos(\theta_e)) + e_z(v_3 - V \sin(\theta_e))$, 定义虚拟误差 $\varepsilon = V \sin(\theta_e)$, 将 v_1, ε 当做虚拟控制量, 其控制律设为

$$\begin{cases} v_{1d} = V \cos(\theta_e) - k_1 \frac{e_x}{e} \\ \varepsilon_d = -v_3 - k_2 \frac{e_z}{e} \end{cases} \quad (29)$$

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

但 v_{1d}, ε_d 并不是真实存在的可控变量, 故定义其误差变量:

$$e_{v_1} = v_1 - v_{1d}, \quad e_\varepsilon = V \sin(\theta_e) - V \sin(\theta_{ed}) \quad (30)$$

故 \dot{V}_e 化简可得

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

令 $\beta_1 = \min\left\{c_1 - \frac{3}{16}, \frac{1}{T} - 4c_1^4 - c_1^2 - c_1 - 5\right\}$,

$c_1 > \frac{3}{16}, \frac{1}{T} > 4c_1^4 + c_1^2 + c_1 + 5$, 则有

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

对于子系统, 定义Lyapunov函数 V_2 :

$$V_2 = V_1 + \frac{1}{2} z_2^2 \quad (33)$$

依式(17) — (19) 可得

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

代入式(32), 式(34)可写为

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

其中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 $\beta_2 = \min\{\beta_1, c_2 - \frac{17}{4}\}$,

$c_2 > \frac{17}{4}$, $N = \frac{1}{4} \dot{\theta}_d^2 - \frac{(k_1 e_x^2 + k_2 e_z^2)}{e}$, 则上式可以转化为:

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

上式两边同乘 $e^{\beta_2 t}$, $t \in [0, t_f)$, 并对其在时间 t 内进行积分, 可得式(37)

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

式中 $C = N / \beta_2 + V_2(0)$ 。并根据引理1和上式可知, $N(\xi)$, $\xi(t)$, $V_2(t)$ 有界, 进而可得出 z_1, z_2 等在 $[0, t_f)$ 上均有界, 可取 $|z_2| \leq B$ 。并进一步依据假设3, 可令 $M = \frac{17}{4} B^2 + \frac{1}{4} A^2$, 则式(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

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

结合式(27)可得

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

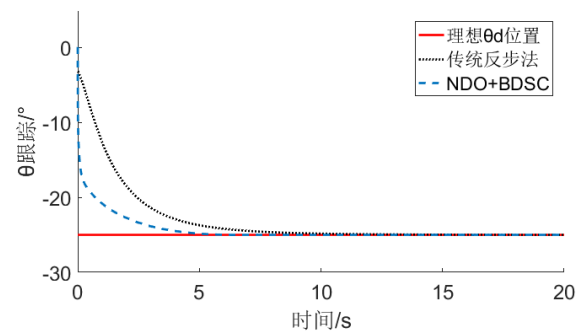
因此, 对任意的常数 $k > \sqrt{2M / \beta_1}$, 存在对于一指定时间 T_{z1} 后的时间内, 有 $|z_1| \leq k$ 。即UGSR的俯仰角跟踪误差 z_1 收敛于一紧集 $\Omega = \{z_1 \in R : |z_1| \leq k\}$ 。

由 M 和 β_1 的定义可知, 适当的反步控制器参数 c_1, c_2 和滤波器时间常数 T , 可使得 k 任意小, 即俯仰角跟踪误差也达到任意小, 实现UGSR纵倾运动的稳定跟踪。同时也保证了UGSR能较好的跟踪到预期纵倾路线中的位置量, 确保控制器的位置稳定性。

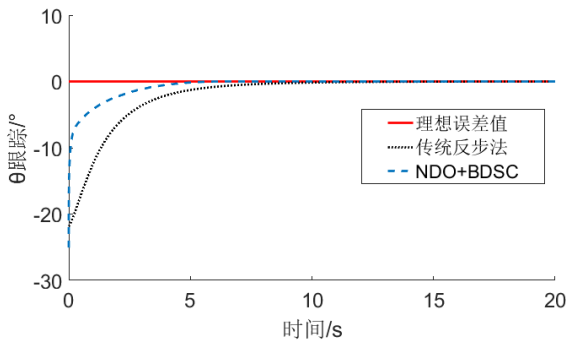
3 仿真分析

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。仿真中采用如下UGSR的配置参数验证所设计控制器的有效性: $m_1 = 1.3 \text{ kg}$, $m_2 = 1.3 \text{ kg}$, $m_h = 0.03 \text{ kg}$, $m_{\text{sum}} = 6.1 \text{ kg}$, $C_{D0} = 0.4561$, $C_{D0}^\alpha = 17.03$, $C_{L0} = 0.063$, $C_{L0}^\alpha = 18.68$, $C_{DL} = 0$, $C_{DL}^\alpha = -0.9238$, $M_1 = 6.1 \text{ kg}$, $M_3 = 12.2 \text{ kg}$, $J_2 = 1.0552 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$, $u_M = 4$, $c_1 = 0.5$, $c_2 = 10$, $c_3 = 1$, $T = 0.05$, $\xi(0) = -0.06\pi$, $p_1 = 1$, $p_2 = 0.5$ 。其中流体动力系数存在多种方法获得参数, 本文数据源于 Tang^[5] 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获得。

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 $\theta = 0^\circ$ 、 $\omega = 0$ 和 $V = 0.8 \text{ m/s}$ 。图4中(a)与(b)分别表示, 对定值纵倾角的UGSR跟踪效果曲线和误差曲线。其中黑色点虚线代表传统反步控制方法, 蓝色双划线代表我们所改进的新的反步控制器, 用NDO+BDSC表示。由图可知, 相比传统反步控制方法, 本文设计的控制器在同等参数配置下相比, 其跟踪效果与误差收敛速度都有一定的提升。



(a) 跟踪效果曲线



(b) 跟踪误差曲线

图4 UGSR纵倾运动定值俯仰角 θ 的响应和误差收敛

为验证我们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，我们选取采用时变信号和随机信号叠加的方法，形式为： $d = 4\sin t + S$ ，其中 S 为小于1的随机值。

图5、图6直观给出了UGSR俯仰角在传统反步方法和改进的NDO+BDSC作用下连续追踪变化俯仰角的输出响应和误差收敛情况，二者都能稳定实现俯仰角转换过程。相比之下，NDO+BDSC具有更快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。其中参考俯仰角 θ_d 变化曲线为 $25\sin(0.2\pi t + 0.2\pi)$ 。

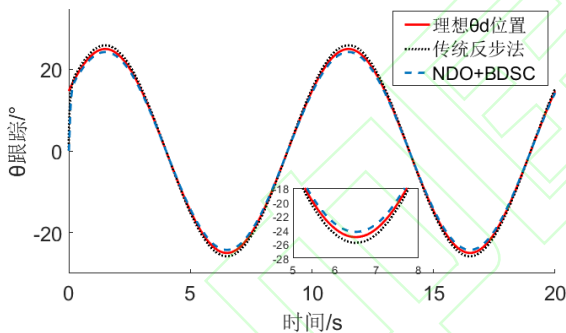


图5 UGSR纵倾运动连续变化俯仰角 θ 的响应

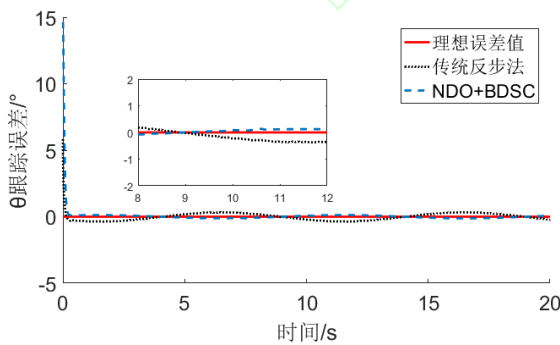


图6 UGSR纵倾运动连续变化俯仰角 θ 的收敛误差

图7表示外部干扰的实际值与观测值，并观察图片可知，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 $N(\xi)$ 和它的参数 ξ 曲线图。从图中可知，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。

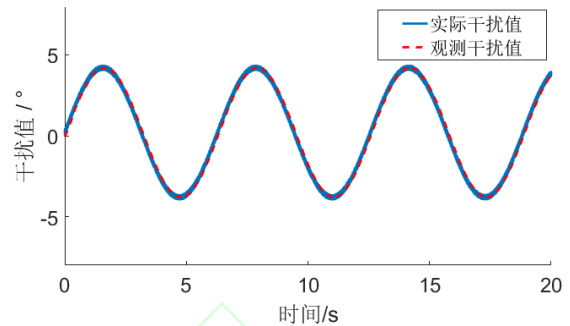


图7 UGSR纵倾运动连续变化俯仰角 θ 下的干扰观测值

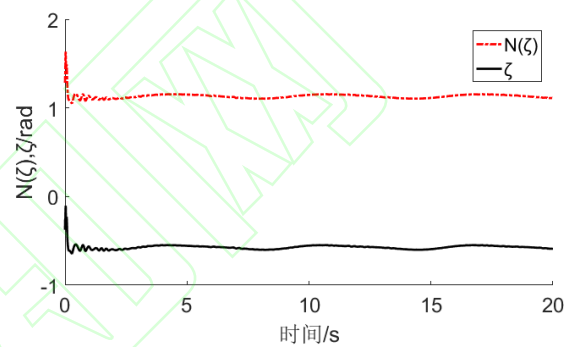


图8 Nussbaum函数 $N(\xi)$ 及其参数 ξ 曲线图

图9表示在连续纵倾运动下控制器在考虑输入受限情况下的，执行器的控制量 u_1 和 u_2 的变化曲线，其中黑色双划线代表控制输入幅值 u_M ，其数值取决于在样机开环实验中，受水压影响伸缩关节所能达到的最大值。观察可知，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围内，因此有效解决了水压所带来的输入受限问题。并且由于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的问题，对于系统的稳定起到了重要作用。

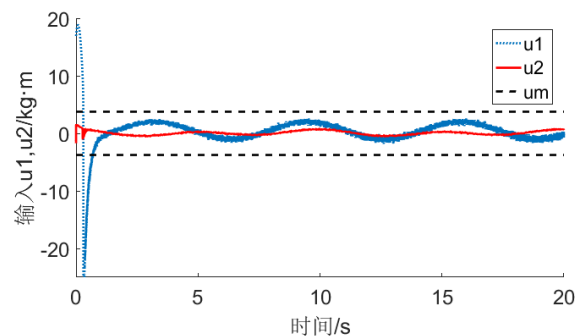


图9 UGSR纵倾运动下的执行器输入信号

4 结论

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问题。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形, 进行仿真实验与分析, 本文得出以下结论。

(1) 在UGSR的三维运动模型基础上进行垂直面分析得出相应运动学与动力学方程, 针对其强非线性进行相关简化, 改写后的方程组方便了后续控制器设计与稳定性证明等运算。

(2) 采用非线性干扰观测器对外部复合扰动进行有效观测并构建相应输入补偿项, 解决了UGSR受到外界未知扰动的问题, 同时结合反步法所设计的新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, 本文控制方案引入双曲正切函数进行近似化饱和函数处理该问题, 在此基础上, 结合Nussbaum函数避免了前者可能带来的控制器奇异问题。

(4) 通过给定UGSR的仿真参数值, 开展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, 且响应速度及效果优于原有方案。

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 with 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, PETERSEN 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)