

文章编号: 1006-2467(2022)07-0944-09

DOI: 10.16183/j.cnki.jsjtu.2021.375

基于预设性能制导律的欠驱动 AUV 海底地形 鲁棒时滞跟踪控制

李锦江, 向先波, 刘 传, 杨少龙

(华中科技大学 船舶与海洋工程学院, 武汉 430074)

摘 要: 针对自主水下机器人(AUV)面向海底起伏地形跟踪的实际应用需求, 设计了基于预设性能制导律的鲁棒时滞跟踪控制器, 实现执行机构时滞下的 AUV 起伏地形跟踪, 同时可提升其航行安全性能. 首先, 基于航行安全性能函数对地形跟踪误差进行转换, 结合时变视线制导角在运动学层面设计了预设性能制导律, 为 AUV 动力层提供参考状态输入. 其次, 为处理执行机构时滞问题并降低精确建模需求, 结合径向基函数(RBF)神经网络设计了鲁棒时滞动力学控制器. 最后, 采用李雅普诺夫理论证明了基于预设性能制导律的鲁棒时滞跟踪控制系统闭环稳定性. 仿真结果表明: 所设计的控制器可实现 AUV 起伏地形鲁棒跟踪, 且瞬态跟踪误差时刻处于预设性能范围之内, 可提升 AUV 在跟踪海底起伏地形时的航行安全性能.

关键词: 自主水下机器人; 海底地形跟踪; 预设性能制导; 执行机构时滞; 鲁棒控制

中图分类号: U 675.91

文献标志码: A

Robust Seabed Terrain Following Control of Underactuated AUV with Prescribed Performance Guidance Law Under Time Delay of Actuator

LI Jinjiang, XIANG Xianbo, LIU Chuan, YANG Shaolong

(School of Naval Architecture and Ocean Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: To address the uneven seabed following control problem under the time delay constraint of the actuator for the autonomous underwater vehicle (AUV), a robust time-delay controller with prescribed performance guidance law is proposed in this paper, which can improve the safety of the AUV during navigation. First, the seabed following error conversion is firstly performed based on a navigational safety barrier function. Then, by integrating the time-varying line-of-sight guidance angle, the prescribed performance guidance law is designed at the kinematics level to provide reference state input for the AUV. After that, to tackle the time delay problem of actuators and reduce demand for accurate modeling, a robust time-delay dynamic controller is designed using the radial basis function (RBF) neural network. Finally, based on the Lyapunov theory, the stability of the closed-loop system is proved. The simulation results illustrate that the designed controller can achieve uneven seabed following control. Moreover, the following errors are always confined to the preset limits, which can also enhance the safety performance of the AUV when following the uneven terrain of the seabed.

收稿日期: 2021-09-26

基金项目: 国家自然科学基金(52071153, 5213000376)

作者简介: 李锦江(1997-), 男, 福建省泉州市人, 硕士生, 从事海洋航行器运动控制研究.

通信作者: 向先波, 男, 教授, 博士生导师; E-mail: xbxian@hust.edu.cn.

Key words: autonomous underwater vehicle (AUV); seabed terrain following; prescribed performance guidance; time delay of actuator; robust control

近年来,由于自主水下机器人(AUV)在水文测量、水下探测巡检作业等方面的优势,其在商业和科研方面的应用愈发广泛^[1].为成功完成指定任务,路径跟踪运动控制是不可或缺的一个环节,因此相关研究倍受国内外学者关注.针对外界时变扰动影响下的控制问题,Do 等^[2]基于反步法和投影算法设计了一个鲁棒控制器实现全局渐近稳定,并利用模型船开展了实验验证.Wang 等^[3]设计了模糊未知观测器对扰动进行在线观测补偿.考虑未精确建模及参数摄动问题,余亚磊等^[4]通过坐标变换对模型进行转化,随后利用反步自适应算法对不确定项进行补偿.此外,文献^[5]中所采用的模糊逼近方法也可有效处理这一问题.考虑到实际物理条件限制,执行器所产生的控制输入是受限的,因而输入饱和问题也是一个需要解决的问题.常见的一种方法是设计辅助动力系统^[6]进行处理,此外还可采用平滑饱和函数^[7]、边界李雅普诺夫函数^[8]和饱和滤波器^[9]等策略.

上述文献中,执行机构所固有的时滞特性并未被考虑在内,而且,瞬态过程的性能如超调量等并未被考虑在内,但这对于水下探测作业尤其是近海底起伏地形作业是尤为重要的.为采集相关水文数据,水下机器人往往需要贴近海底航行.安全领域模型方法^[10]是保障安全航行的一种有效手段,文献^[11-12]通过引入模糊理论和八叉树方法建立了多种用于 AUV 安全航行的领域模型.徐国华等^[13-14]基于专家系统设计了 AUV 模糊自救系统和主动应急自救机制.上述方案往往嵌入在应急系统而非控制系统的,因此若是在控制层也设计具有安全约束特性的控制器,可实现双重航行安全保障,可进一步提高航行安全性.

面向海底起伏地形跟踪作业需求,航行安全约束需在全过程得到保障,如控制器响应过慢或超调过大均有可能对 AUV 安全性带来问题,因而需要寻求一种有效的解决方案以实现对控制系统瞬态性能的安全约束.传统的控制器设计仅能保障系统的稳态性能,有限时间^[15]和固定时间控制^[16]可对收敛时间起到约束,但是超调量仍难以约束.针对这一问题,Bechlioulis 等^[17]于 2008 年提出预设性能控制技术,随后在水下机器人中得到了成功的应用^[18].此外,Dai 等^[19]和 Zheng^[20]在预设性能路径跟踪方

面也开展了相关工作,但多是针对水平面的,且未考虑系统执行机构时滞特性.为此,本文针对带有时滞特性的 AUV 深度面路径跟踪控制问题,提出了一种基于预设性能技术的控制器设计方法.与现有文献相比,本文主要贡献如下:

(1) 面向 AUV 海底起伏地形跟踪任务的需求,本文中结合预设性能与时变视线角制导技术,设计了一种预设性能制导律,在确保系统误差收敛的同时还兼顾了瞬态跟踪性能,有利于提升 AUV 在海底起伏地形跟踪控制的航行安全.

(2) 针对执行器由于物理性能约束所固有的时滞特性,本文基于径向基函数(RBF)神经网络和时滞动力学模型方程设计了一种鲁棒时滞控制器,避免了未考虑时滞特性导致实艇算法移植稳定性下降的问题,使其更符合航行控制需求.

1 控制对象模型建立

欠驱动 AUV 在深度面的简化运动学模型如下所示:

$$\left. \begin{aligned} \dot{x} &= u \cos \theta + w \sin \theta \\ \dot{z} &= -u \sin \theta + w \cos \theta \\ \dot{\theta} &= q \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: x, z 分别为定义在惯性坐标系 $\{I\}$ 上的深度面前向和垂向位置; u, w 分别为随体坐标系 $\{B\}$ 上的前向、垂向速度; θ 为 AUV 纵倾角; q 为俯仰角速度.如图 1 所示,本文的控制目标旨在使得 AUV 在执行海底地形跟踪探测任务时,可跟踪至由环境感知信息所规划得出的深度面期望目标轨迹 $\mathbf{P}_d(s)$ 上, s 为路径参数,同时全过程中跟踪误差一直处于预先设定的界限内.本文中在路径上定义一虚拟点 $\mathbf{P} = [x_p(s) \ z_p(s)]^T$ 用以引导 AUV 向目标趋近.以虚拟点为原点,进一步可定义 Serret-Frenet 坐标系 $\{SF\}$,其 x 轴方向虚拟点合速度方向平行, z 轴方向由右手螺旋规则确定.随后, AUV 与虚拟点在 Serret-Frenet 坐标系的跟踪误差可定义为

$$\left. \begin{aligned} e_x &= (x - x_p) \cos v_p - (z - z_p) \sin v_p \\ e_z &= (x - x_p) \sin v_p + (z - z_p) \cos v_p \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中: v_p 为虚拟点的潜伏角.进一步,其运动误差动态可作如下表达:

$$\left. \begin{aligned} \dot{e}_x &= U_w \cos v_e - U_p - \kappa U_p e_z \\ \dot{e}_z &= -U_w \sin v_e + \kappa U_p e_x \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

速率 $e^{-\xi_{*i}t}$ 向预设终值 $\rho_{*i\infty}$ 收敛的函数, ρ_{*i0} 规定了初始误差界限, $\rho_{*i\infty}$ 确定了稳态阶段可允许的最大静差, ξ_{*i} 决定了收敛速度。

注 2 显然性能函数会从初值 ρ_{*i0} 以指数速度趋近于 $\rho_{*i\infty}$, 这一收敛速度也是系统误差收敛速度的下界, $\rho_{*i\infty}$ 是系统误差在稳态阶段的上界, 适当选取这一参数使得其小于目标路径与海底的深度差, 可对航行安全起到保障作用。此外, 为确保预设性能界限不被违背, ρ_{*i0} 的选取必须确保 $\rho_{*i0} > |e_i(0)|$ 。鉴于参数 ρ_{*i0} 、 $\rho_{*i\infty}$ 、 ξ_{*i} 可根据期望性能约束进行预先设置, 因而可通过选取合适的 ρ_{*i0} 使 $\rho_{*i0} > |e_i(0)|$ 得以满足。

为后续预设性能控制技术实施, 引入如下预设性能函数^[22]:

$$z_i = p(e_i) \frac{e_i}{e_{i,u}} + (1 - p(e_i)) \frac{e_i}{e_{i,l}} \quad (7)$$

式中: $i = x, z$; e_i 为原始系统误差变量; $p(e_i)$ 为随误差切换的变量, 其定义为 $p(e_i) = \begin{cases} 1, & e_i > 0 \\ 0, & e_i \leq 0 \end{cases}$ 。

基于预设性能函数可将原始路径跟踪系统的误差方程重构为如下新系统:

$$\dot{z}_i = \left(\frac{p(e_i)}{e_{i,u}} + \frac{1 - p(e_i)}{e_{i,l}} \right) \dot{e}_i - \left[\frac{p(e_i)\dot{e}_{i,u}}{e_{i,u}^2} + \frac{(1 - p(e_i))\dot{e}_{i,l}}{e_{i,l}^2} \right] e_i \quad (8)$$

式中: $i = x, z$ 。为便于后续表达, 记 $\lambda_i = \frac{p(e_i)}{e_{i,u}} + \frac{1 - p(e_i)}{e_{i,l}}$, 同时记方程中已知项为 $f_i = - \left[\frac{p(e_i)\dot{e}_{i,u}}{e_{i,u}^2} + \frac{(1 - p(e_i))\dot{e}_{i,l}}{e_{i,l}^2} \right] e_i$, 则系统可重新作如下简化表达:

$$\dot{z}_i = \lambda_i \dot{e}_i + f_i \quad (9)$$

注 3 为简化控制器设计, 使其结构更为简捷, 便于实艇移植验证, 本文中令 $e_{x,u} = e_{x,l} = e_{z,u} = e_{z,l} = e_{\lim} = (\rho_0 - \rho_\infty)e^{-\xi t} + \rho_\infty$ 。由于这是由控制工程师预设的性能界限, 通过调整参数 ρ_{*i0} 、 $\rho_{*i\infty}$ 、 ξ_{*i} 即可实现这一要求。

在这一转换系统的基础之上, 可设计虚拟速度律和制导律, 为 AUV 路径跟踪控制提供参考输入, 引导 AUV 趋近于目标路径。定义时变视线制导角为 $v_{TLOS} = \arctan \frac{z_z}{k_e U_W}$, 其中 k_e 为待整定参数。选择第 1 个李雅普诺夫函数如下:

$$V_1 = \frac{1}{2} z_x^2 + \frac{1}{2} z_z^2 + \frac{1}{2} (v_e - v_{TLOS})^2 \quad (10)$$

求导可得:

$$\begin{aligned} \dot{V}_1 = & z_x [\lambda_x (U_W \cos v_e - U_P - \kappa U_{Pe_z}) + f_x] + \\ & z_z [\lambda_z (-U_W \sin v_e + \kappa U_{Pe_x}) + f_z] + \\ & (v_e - v_{TLOS}) (\dot{v}_e - \dot{v}_{TLOS}) \end{aligned} \quad (11)$$

同时, 注意到:

$$-z_x \kappa U_{Pe_z} = -\lambda_x e_x \kappa U_{Pe_z} \quad (12)$$

$$z_z \kappa U_{Pe_x} = \lambda_z e_z \kappa U_{Pe_x} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} z_x f_x = & -z_x \left[\frac{p(e_x)\dot{e}_{x,u}}{e_{x,u}^2} + \frac{(1 - p(e_x))\dot{e}_{x,l}}{e_{x,l}^2} \right] e_x = \\ & \frac{\xi(\rho_0 - \rho_\infty)e^{-\xi t}}{(\rho_0 - \rho_\infty)e^{-\xi t} + \rho_\infty} z_x^2 < \xi z_x^2 \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} z_z f_z = & -z_z \left[\frac{p(e_z)\dot{e}_{z,u}}{e_{z,u}^2} + \frac{(1 - p(e_z))\dot{e}_{z,l}}{e_{z,l}^2} \right] e_z = \\ & \frac{\xi(\rho_0 - \rho_\infty)e^{-\xi t}}{(\rho_0 - \rho_\infty)e^{-\xi t} + \rho_\infty} z_z^2 < \xi z_z^2 \end{aligned} \quad (15)$$

将式(11)代入式(12)~(15), 可化为

$$\begin{aligned} \dot{V}_1 < & z_x \lambda_x (U_W \cos v_e - U_P) - z_z \lambda_z U_W \sin v_e + \\ & (v_e - v_{TLOS}) (\dot{v}_e - \dot{v}_{TLOS}) + \xi z_x^2 + \xi z_z^2 \end{aligned} \quad (16)$$

根据上式, 可设计运动学控制律如下:

$$U_P = k_1 z_x + U_W \cos v_e \quad (17)$$

$$\begin{aligned} \dot{v}_e = & \dot{v}_{TLOS} + \frac{\sin v_e - \sin v_{TLOS}}{v_e - v_{TLOS}} z_z \lambda_z U_W - \\ & k_2 (v_e - v_{TLOS}) \end{aligned} \quad (18)$$

式中: k_1 和 k_2 为待整定控制参数。

考虑到:

$$\dot{v}_e = \dot{v} - \dot{v}_p = \dot{\theta} - \dot{\alpha} - \dot{v}_p = q - \dot{\alpha} - \kappa U_P \quad (19)$$

进一步可得所跟踪虚拟点的俯仰角速度为

$$\begin{aligned} q_d = & \dot{v}_{TLOS} + \frac{\sin v_e - \sin v_{TLOS}}{v_e - v_{TLOS}} z_z \lambda_z U_W - \\ & k_2 (v_e - v_{TLOS}) + \dot{\alpha} + \kappa U_P \end{aligned} \quad (20)$$

注 4 若所设计的制导律是连续且非奇异的, 则控制过程中 AUV 不会因参考俯仰角速度跳变而造成控制性能振荡。证明如下:

式(18)中仅考虑 $v_e - v_{TLOS}$ 这一分母项, 确实会在 $v_e \rightarrow v_{TLOS}$ 出现奇异现象, 但是由于在控制器设计中引入了 $\sin v_e - \sin v_{TLOS}$ 这一分子项可以避免这一问题, 此时,

$$\begin{aligned} \frac{\sin v_e - \sin v_{TLOS}}{v_e - v_{TLOS}} = & \\ \frac{2 \sin \frac{v_e - v_{TLOS}}{2}}{\frac{v_e - v_{TLOS}}{2}} \cos \frac{v_e + v_{TLOS}}{2} \end{aligned} \quad (21)$$

由等价无穷小可知

$$\lim_{v_e \rightarrow v_{TLOS}} \frac{\sin v_e - \sin v_{TLOS}}{v_e - v_{TLOS}} = \cos v_e$$

进而避免了奇异现象, 确保了制导律的连续性和非

奇异性。

2.2 动力学设计

运动学层面给出了参考的俯仰角,若水下机器人姿态角可与参考角实时匹配,则会逐渐向目标路径收敛,且收敛过程中的误差时刻处于预设的上下界内。为实现这一目标,下一步将在动力学层面设计相应的控制律。定义俯仰角跟踪误差为 $q_e = q - q_d$,选择第2个李雅普诺夫函数:

$$V_2 = \frac{1}{2} q_e^2 \quad (22)$$

对其求导可得:

$$\dot{V}_2 = q_e(\dot{q} - \dot{q}_d) \quad (23)$$

结合其时滞动力学模型的特性,利用线性化反馈技术可设计如下动力学控制器:

$$\delta_{sc0} = \frac{1}{g_q}(-k_3 q_e + \lambda_\delta \ddot{q} - \lambda_\delta \dot{f}_q - f_q + \dot{q}_d) \quad (24)$$

式中: k_3 为一待设定正常数。值得一提的是,在实际控制过程中,尤其是小型水下机器人所搭载的传感器往往是有限的,且感知精度难以得到保障。因此 \ddot{q} 是一不可测量的变量,无法用于控制器设计。此外,受制于现有水动力理论的技术水平,精确的模型往往难以建立。建模过程通常需要历经水池、模型试验,耗费大量人力物力,因而期望控制器可以降低对精确建模的需求。基于以上考虑,本文采用 RBF 神经网络对线性化反馈控制律中的难以测定的项进行逼近,其数学表达如下:

$$\omega^* \mathbf{g} + \bar{\omega} = \lambda_\delta \ddot{q} - \lambda_\delta \dot{f}_q - f_q \quad (25)$$

式中: ω^* 为理想权值; \mathbf{g} 为有界高斯基; $\bar{\omega}$ 为有界逼近误差。记其最优估计权值为 $\hat{\omega}$, 定义估计误差为 $\tilde{\omega} = \hat{\omega} - \omega^*$ 。鲁棒神经网络控制器可设计如下:

$$\delta_{sc} = \frac{1}{g_q}(-k_3 q_e + \dot{q}_d + \tau_{rob} + \tau_{NN}) \quad (26)$$

式中: $\tau_{NN} = -\hat{\omega}^T \mathbf{g}$, 其自适应律 $\dot{\hat{\omega}} = k_4^{-1} q_e \mathbf{g}$ (k_4 为控制参数)。由于神经网络逼近误差 $\tilde{\omega}$ 是有界的,因而一定存在一未知正常数 E_M 满足 $|\tilde{\omega}| \leq E_M$ 。基于这一结论,定义上界自适应估计值为 \hat{E} , 误差变量 $\tilde{E} = \hat{E} - E_M$, 可设计鲁棒项 $\tau_{rob} = -\hat{E} \text{sgn}(q_e)$, 其自适应律 $\dot{\hat{E}} = |q_e|/k_5$ (k_5 为控制参数)。

2.3 稳定性分析

定理 在假设1条件下,水下自主机器人系统式(4)在所设计虚拟点速度律式(17)、预设性能制导律式(18)和考虑时滞的鲁棒神经网络控制器式(26)作用下,通过适当选取参数可实现深度面路径跟踪

需求,路径跟踪位姿误差渐近稳定收敛,并且深度和前向误差时刻处于预设性能界限内。

证明 选取最终的李雅普诺夫预选函数为

$$V = \frac{1}{2} z_x^2 + \frac{1}{2} z_z^2 + \frac{1}{2} (v_e - v_{TLOS})^2 + \frac{1}{2} q_e^2 + \frac{1}{2} \tilde{\omega}^T k_4 \tilde{\omega} + \frac{1}{2} k_5 \tilde{E}^2 \quad (27)$$

对其求导可得:

$$\begin{aligned} \dot{V}_1 &< z_x \lambda_x (U_W \cos v_e - U_P) - z_z \lambda_z U_W \sin v_e + \\ &\quad (v_e - v_{TLOS})(\dot{v}_e - \dot{v}_{TLOS}) + \xi z_x^2 + \xi z_z^2 + \\ &\quad q_e (g_q \delta_{sc} - \lambda_\delta \ddot{q} + \lambda_\delta \dot{f}_q + f_q - \dot{q}_d) + \\ &\quad \tilde{\omega}^T k_4 \dot{\tilde{\omega}} + k_5 \tilde{E} \dot{\tilde{E}} \end{aligned} \quad (28)$$

代入所设计的制导律及控制律可得:

$$\begin{aligned} \dot{V} &< -(k_1 - \xi) z_x^2 - \left(\frac{\lambda_z U_W}{\sqrt{z_z^2 + k_e^2 U_W^2}} - \xi \right) z_z^2 - \\ &\quad k_2 (v_e - v_{TLOS})^2 - k_3 q_e^2 + \\ &\quad q_e (\omega^{*T} \mathbf{g} + \bar{\omega} - \hat{\omega}^T \mathbf{g} - \hat{E} \text{sgn}(q_e)) + \\ &\quad \tilde{\omega}^T k_4 \dot{\tilde{\omega}} + k_5 (\hat{E} - E_M) \dot{\tilde{E}} < \\ &\quad -(k_1 - \xi) z_x^2 - \left(\frac{\lambda_z U_W}{\sqrt{z_z^2 + k_e^2 U_W^2}} - \xi \right) z_z^2 - \\ &\quad k_2 (v_e - v_{TLOS})^2 - k_3 q_e^2 + \\ &\quad \tilde{\omega}^T (k_4 \dot{\tilde{\omega}} - q_e \mathbf{g}) + \hat{E} (-|q_e| + k_5 \dot{\tilde{E}}) + \\ &\quad q_e \bar{\omega} - k_5 E_M \dot{\tilde{E}} \end{aligned} \quad (29)$$

代入所设计自适应律可得:

$$\begin{aligned} \dot{V} &< -(k_1 - \xi) z_x^2 - \left(\frac{\lambda_z U_W}{\sqrt{z_z^2 + k_e^2 U_W^2}} - \xi \right) z_z^2 - \\ &\quad k_2 (v_e - v_{TLOS})^2 - k_3 q_e^2 \end{aligned} \quad (30)$$

注5 若要确保系统稳定,参数选取需要满足 $k_1 > \xi, k_2 > 0, k_3 > 0$ 。此外还需制导系数 $0 < k_e < \frac{\lambda_z}{\xi}$, 以确保 $\frac{\lambda_z U_W}{\sqrt{z_z^2 + k_e^2 U_W^2}} > \xi$, 将不等式两边做变换可得 $k_e^2 < \frac{\lambda_z^2 U_W^2 - z_z^2 \xi^2}{\xi^2 U_W^2}$, 显然 $z_z^2 \xi^2$ 是正的,进而得到 $k_e < \lambda_z / \xi$ 。

显然,若控制参数选取满足注5所述要求,可得 $\dot{V} < 0$, 即系统误差将渐近收敛于0,闭环系统的稳定性得以保证。

注6 从工程实践角度,考虑到机器人执行任务时由水面开始下潜,初始纵倾角 $\theta(0)$ 接近 0° , 且此时下潜态势尚未形成,攻角 $\alpha(0)$ 可近似为 0° 。同时,恰当选取参数 k_e 可使 $v_{TLOS}(0)$ 很小,通过选取合适的目标路径虚拟点初始位置,可使得 $v_e(0) - v_{TLOS}(0) = 0$ 。因此,若系统初始误差处于 $\Omega =$

$\left\{ (z_x, z_z) \left| \frac{1}{2} z_x^2 + \frac{1}{2} z_z^2 \leq \frac{1}{2} \right. \right\}$ 集合范围内,由 $\dot{V}_1 < 0, V_1(t) < V_1(0), \forall t > 0$, 可知 $|z_x| < 1, |z_z| < 1$ 成立,表明系统瞬态误差时刻处于预设界限内。

3 仿真研究

为验证本文中所提出控制算法的有效性,利用 REMUS 自主水下机器人作为研究对象开展仿真试验,其模型参数如表 1 所示。仿真中施加时变海流干扰,其对应的数学表达式为 $\tau_{dq} = 0.005d, d = 1 + 0.1 \sin 0.25t$ 。

表 1 仿真对象水动力模型参数表
Tab.1 Hydrodynamic model parameter of the AUV in simulation

参数	取值
m/kg	30.48
W/N	299
B/N	306
$I_{yy}/(\text{N} \cdot \text{kg} \cdot \text{m}^2)$	3.45
x_g/m	0
z_g/m	0.019 6
$M_{\dot{q}}/(\text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{rad}^{-1})$	-4.88
$M_{\dot{w}}/(\text{kg} \cdot \text{m})$	-1.93
$M_{w w }/\text{kg}$	3.18
$M_{q q }/(\text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{rad}^{-2})$	-188
$M_{uq}/(\text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{rad}^{-1})$	-2
M_{uv}/kg	24
$M_{uu\delta}/(\text{kg} \cdot \text{rad}^{-1})$	-6.15
$z_{\dot{w}}/\text{kg}$	-35.5
$z_{w w }/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-1})$	-131
$z_{q q }/(\text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{rad}^{-2})$	-0.632
$z_{uv}/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-1})$	-28.6
$z_{uq}/(\text{kg} \cdot \text{rad}^{-1})$	-5.22
$\lambda_{\delta}/\text{s}$	1.2

仿真过程中令机器人跟踪一深度面变深路径,用以模拟水下机器人起伏地形航行。同时为更好地测试所提控制器性能,令机器人从两个不同初始位姿出发,形成两个仿真案例,对应初始状态分别为:案例 1 $[x(0) \ z(0) \ \theta(0)]^T = [-10 \text{ m} \ 12 \text{ m} \ 0^\circ]^T$,案例 2 $[x(0) \ z(0) \ \theta(0)]^T = [-10 \text{ m} \ 28 \text{ m} \ 0^\circ]^T$ 。机器人速度的初始状态为 $[u(0) \ w(0) \ q(0)]^T = [1.5 \text{ m/s} \ 0 \text{ m/s} \ 0 \text{ m/s}]^T$,稳定航行前向速度为

1.5 m/s。同时,考虑到为保证舵的响应和对执行机构的保护,工程实践中一般将水下机器人舵角限幅在 30° 以内,因此本仿真将实际执行器机构饱和限幅为 30° 。控制器设计参数选取为 $k_1 = 1, k_2 = 1, k_3 = 0.5, k_4 = 0.005, k_5 = 2, k_e = 1.5$ 。预设性能参数为 $\rho_0 = 12.5, \rho_\infty = 1.25, \xi = 0.1$ 。

仿真结果如图 3~8 所示。同时,为更好地评价所设计控制器的表现,本文中采用下式计算控制性能指标:

$$\left. \begin{aligned} \text{MAE}_x &= \frac{1}{t_\infty - t_0} \int_{t_0}^{t_\infty} |e_x| dt \\ \text{MAE}_z &= \frac{1}{t_\infty - t_0} \int_{t_0}^{t_\infty} |e_z| dt \\ \text{MIA} &= \frac{1}{t_\infty - t_0} \int_{t_0}^{t_\infty} |\delta_s(t)| dt \\ \text{MTV} &= \frac{1}{t_\infty - t_0} \int_{t_0}^{t_\infty} |\delta_s(t) - \delta_s(t-1)| dt \end{aligned} \right\} \quad (31)$$

式中: t_0 和 t_∞ 分别为开始和结束时间; MAE_x 为前向通道的平均绝对误差; MAE_z 为垂向通道的平均绝对误差,用以衡量控制器的响应能力; MIA 为平均积分绝对值,可用于测量控制输入所带来的消耗; MTV 为平均变化绝对值,可用于评价控制舵角的平滑性。

由图 3 可以看出,所设计的控制器会趋使水下机器人迅速向目标路径收敛,且即使在不同初始状态一样可起到作用。各自由度的具体误差曲线在图 4 中给出,可见误差时刻处于所限定的性能区域内,进一步证实了预设性能策略的有效性。此外,由图 4 和表 2 可以看出,得益于预设性能控制技术对收敛速度下界的约束,可以实现误差的快速收敛。图 5 刻画了系统的潜伏角误差跟踪曲线,显然水下机器人经过短暂调整后潜伏角跟踪误差会趋近于 0° 。由图 6 和图 7 可以看出,由于执行机构的时滞迟特性,真实舵角需要延迟几个周期才可达到所给控制指令,但即使是在这种情况下,所设计的时滞控制器仍可保证路径跟踪控制的效果。此外,结合表 2 中的 MIA 及 MTV 指标可以看出,除了初期的误差较大时控制舵角会有较大波动外,其总体的能量较小、信号较为平滑。图 8 给出了速度时历曲线,在前期收敛过程由于水下机器人姿态有较大变化,相应垂向速度和俯仰速度略有波动,但在抵达路径后速度仅跟随周期性路径而平稳变化。

由式(30)计算得到的性能参数如表 2 所示。表中 $t_{is}(i = x, z)$ 为到达时间,即系统误差收敛至小于 0.1 m 的时间,用于表征误差收敛的快速性。

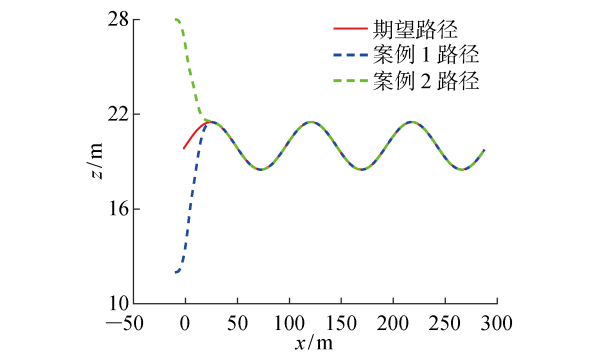


图 3 深度面路径跟踪效果图

Fig. 3 Path following results of different cases

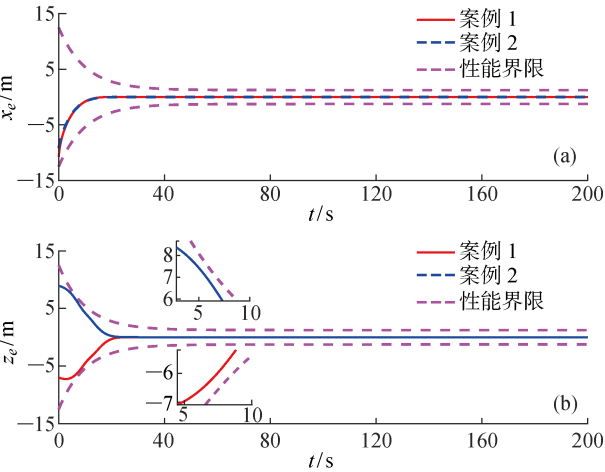


图 4 系统状态误差及预设性能界限图

Fig. 4 Path following errors and prescribed performance limits of different cases

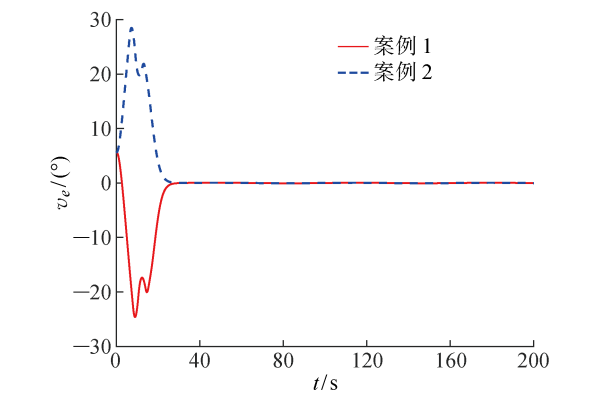


图 5 潜伏角跟踪误差曲线

Fig. 5 Elevation angle tracking error of AUV

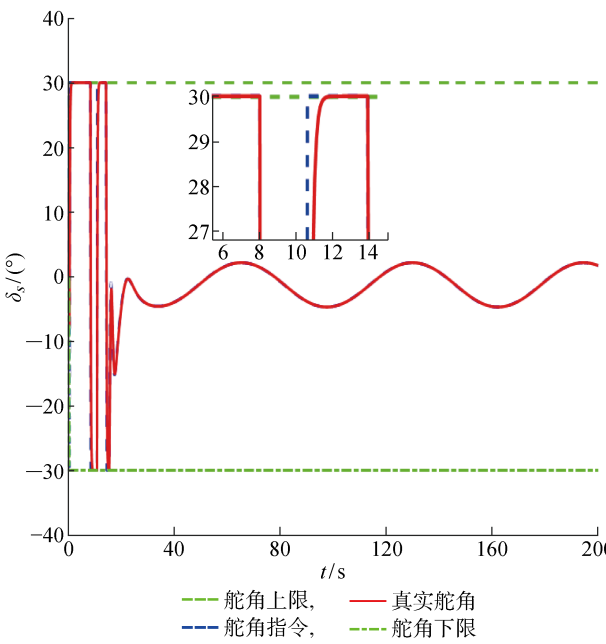


图 6 案例 1 控制舵角指令及真实舵角

Fig. 6 Control command and actual rudder of AUV in Case 1

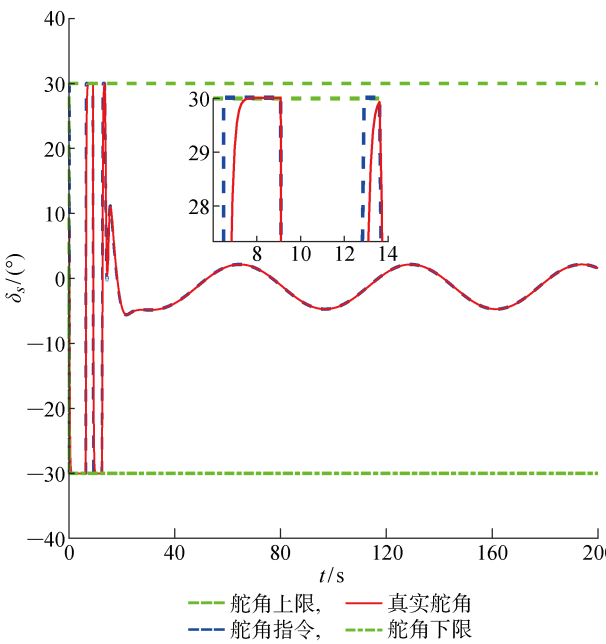


图 7 案例 2 控制舵角指令及真实舵角

Fig. 7 Control command and actual rudder of AUV in Case 2

表 2 控制性能指标

Tab. 2 Control performance indices

初始状态	t_{xs}/s	t_{zs}/s	MAE_x/m	MAE_z/m	$MIA/(^{\circ})$	$MTV/(^{\circ})$
$(-10\text{ m}, 12\text{ m}, 0^{\circ})^T$	15.1	22.1	0.191 2	0.191 2	0.079 0	0.003 1
$(-10\text{ m}, 12\text{ m}, 0^{\circ})^T$	16.1	22.0	0.194 3	0.194 5	0.076 2	0.003 0

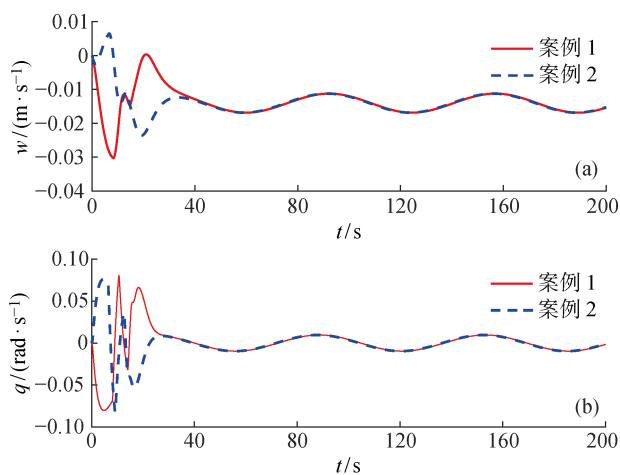


图 8 系统速度曲线图

Fig. 8 Velocity curves of AUV

4 结语

考虑执行器固有时滞特性,为实现水下机器人近海底起伏地形航行作业过程中的路径跟踪,本研究引入预设性能控制技术以确保前向跟踪及垂向跟踪精度可时刻处于设定范围内.在运动学阶段设计了虚拟点速度律以及预设制导律用以引导机器人在兼顾瞬态性能的前提下趋向目标路径.随后,为确保水下机器人可达到参考输入姿态角,在动力学阶段基于 RBF 神经网络及自适应技术设计了鲁棒时滞动力学控制器,达到期望的路径跟踪性能.最后,通过李雅普诺夫稳定性理论证明了闭环系统中信号的有界性.仿真结果进一步证实了所设计控制器可确保水下机器人完成起伏地形下的路径跟踪任务,同时跟踪误差时刻处于预设性能范围之内,有利于提高航行安全性能.

参考文献:

[1] 于曹阳,向先波,张嘉磊,等.基于反步法的欠驱动水下机器人鲁棒定深控制[J].*华中科技大学学报(自然科学版)*,2017,45(10):117-121.
YU Caoyang, XIANG Xianbo, ZHANG Jialei, *et al.* Robust depth control of under-actuated underwater vehicles based on backstepping[J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2017, 45(10): 117-121.

[2] DO K D, PAN J. Robust path-following of underactuated ships: Theory and experiments on a model ship[J]. *Ocean Engineering*, 2006, 33(10): 1354-1372.

[3] WANG N, SUN Z, YIN J, *et al.* Fuzzy unknown observer-based robust adaptive path following control

of underactuated surface vehicles subject to multiple unknowns[J]. *Ocean Engineering*, 2019, 176(3): 57-64.

[4] 余亚磊,苏荣彬,冯旭,等.基于速变 LOS 的无人船反步自适应路径跟踪控制[J].*中国舰船研究*,2019,14(3):163-171.
YU Yalei, SU Rongbin, FENG Xu, *et al.* Tracking control of backstepping adaptive path of unmanned surface vessels based on surge-varying LOS[J]. *Chinese Journal of Ship Research*, 2019, 14(3): 163-171.

[5] YU C, XIANG X, WILSON P A, *et al.* Guidance-error-based robust fuzzy adaptive control for bottom following of a flight-style AUV with saturated actuator dynamics[J]. *IEEE Transactions on Cybernetic*, 2020, 50(5): 1887-1899.

[6] ZHENG Z, FEROSKHAN M. Path following of a surface vessel with prescribed performance in the presence of input saturation and external disturbances[J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2017, 22(6): 2564-2575.

[7] WEN C, ZHOU J, LIU Z. Robust adaptive control of uncertain nonlinear systems[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2002, 56(7): 1672-1678.

[8] JIN X. Fault tolerant finite-time leader-follower formation control for autonomous surface vessels with LOS range and angle constraints[J]. *Automatica*, 2016, 68(1): 228-236.

[9] SHOJAEI K. Neural adaptive robust control of underactuated marine surface vehicles with input saturation[J]. *Applied Ocean Research*, 2015, 53(10): 267-278.

[10] THIEME C A, UTNE I B. Safety performance monitoring of autonomous marine systems[J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2017, 159(3): 264-275.

[11] SUH J, KIM B, YI K. Design and evaluation of a driving mode decision algorithm for automated driving vehicle on a motorway[J]. *IFAC-PapersOnLine*, 2016, 49(11): 115-120.

[12] HEGDE J, HENRIKSEN E H, UTNE I B, *et al.* Development of safety envelopes and subsea traffic rules for autonomous remotely operated vehicles[J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2019, 60: 145-158.

[13] 徐国华,段国强,童剑,等.智能水下机器人自救模糊专家系统研究[J].*中国造船*,2004,45(12):271-275.
XU Guohua, DUAN Guoqiang, TONG Jian, *et al.*

- Fuzzy expert system of AUV self rescue[J]. **Ship-building of China**, 2004, 45(12): 271-275.
- [14] 陈柱, 徐国华, 王冠学, 等. AUV 主动应急自救机制与策略[J]. **中国舰船研究**, 2018, 13(6): 120-127.
- CHEN Zhu, XU Guohua, WANG Guanxue, *et al.* AUV emergency self-rescue mechanism and strategy [J]. **Chinese Journal of Ship Research**, 2018, 13(6): 120-127.
- [15] QIN H, CHEN H, SUN Y, *et al.* Distributed finite-time fault-tolerant containment control for multiple ocean bottom flying node systems with error constraints[J]. **Ocean Engineering**, 2019, 189: 106341.
- [16] ZHAO L, YU J, LIN C, *et al.* Distributed adaptive fixed-time consensus tracking for second-order multi-agent systems using modified terminal sliding mode [J]. **Applied Mathematics and Computation**, 2017, 312: 23-35.
- [17] BECHLIOULIS C P, ROVITHAKIS G A. Robust adaptive control of feedback linearizable MIMO nonlinear systems with prescribed performance[J]. **IEEE Transactions on Automatic Control**, 2008, 53(9): 2090-2099.
- [18] CHEN L, CUI R, YANG C, *et al.* Adaptive neural network control of underactuated surface vessels with guaranteed transient performance: Theory and experimental results[J]. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, 2020, 67(5): 4024-4035.
- [19] DAI S, HE S, WANG M, *et al.* Adaptive neural control of underactuated surface vessels with prescribed performance guarantees[J]. **IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems**, 2018, 30(12): 3686-3698.
- [20] ZHENG Z. Moving path following control for a surface vessel with error constraint [J]. **Automatica**, 2020, 118: 109040.
- [21] 于曹阳. 基于模糊逼近补偿法的 AUV 位形切换饱和跟踪控制研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2018.
- YU Caoyang. On fuzzy-approximator-compensator-based saturated tracking control of autonomous underwater vehicles with configuration switching[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2018.
- [22] LI X, LUO X, WANG J, *et al.* Finite-time consensus of nonlinear multi-agent system with prescribed performance[J]. **Nonlinear Dynamic**, 2018, 91(4): 2397-2409.

(本文编辑:王一凡)