

控制与决策

Control and Decision

基于全驱系统方法的AUV鲁棒自适应轨迹跟踪控制

王鹏, 钱承, 张柳柳, 华长春

引用本文:

王鹏, 钱承, 张柳柳, 等. 基于全驱系统方法的AUV鲁棒自适应轨迹跟踪控制[J]. *控制与决策*, 2025, 40(1): 285–291.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2024.0440>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[航天器输入受限的鲁棒自适应姿态跟踪控制](#)

Robust adaptive attitude tracking control of spacecraft with constrained inputs

控制与决策. 2021, 36(9): 2297–2304 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0013>

[线控转向系统的自适应高阶滑模控制](#)

Adaptive higher-order sliding mode control for SbW system

控制与决策. 2021, 36(6): 1529–1536 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1526>

[输出误差约束下四旋翼无人机预定性能反步控制](#)

Prescribed performance backstepping control for quadrotor UAV with output error constraint

控制与决策. 2021, 36(5): 1059–1068 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1249>

[带有输出约束的柔性关节机械臂预设性能自适应控制](#)

Prescribed performance adaptive control of flexible-joint manipulators with output constraints

控制与决策. 2021, 36(2): 387–394 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0974>

[一类非线性大系统分散自适应预设性能有限时间跟踪控制](#)

Decentralized adaptive prescribed performance finite-time tracking control for a class of large-scale nonlinear systems

控制与决策. 2020, 35(12): 3045–3052 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0623>

基于全驱系统方法的AUV鲁棒自适应轨迹跟踪控制

王鹏¹, 钱承^{1†}, 张柳柳^{1,2}, 华长春¹

(1. 燕山大学 电气工程学院, 河北 秦皇岛 066004;

2. 燕山大学 河北省智能康复及神经调控重点实验室, 河北 秦皇岛 066004)

摘要: 针对存在执行器故障、外界干扰和模型不确定的自主式水下潜航器系统 (autonomous underwater vehicle, AUV), 提出基于全驱系统 (fully actuated system, FAS) 方法的鲁棒自适应轨迹跟踪误差受限控制策略, 使 AUV 能够渐近跟踪目标信号。首先, 将跟踪误差相关的归一化函数和障碍函数与时变尺度函数相结合, 提出误差受限全驱系统方法; 其次, 将径向基函数神经网络 (radial basis function neural networks, RBFNNs) 与误差受限全驱系统方法相结合处理系统中的不确定模型; 进一步, 设计自适应补偿机制处理执行器故障; 再次基于 Lyapunov 稳定性理论证明轨迹跟踪误差渐近收敛于零; 最后, 通过仿真结果验证所设计的鲁棒自适应轨迹跟踪误差受限控制器的有效性。

关键词: 全驱系统方法; 鲁棒控制; 自适应控制; 神经网络; 轨迹跟踪控制

中图分类号: TP273

文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2024.0440

引用格式: 王鹏, 钱承, 张柳柳, 等. 基于全驱系统方法的 AUV 鲁棒自适应轨迹跟踪控制 [J]. 控制与决策, 2025, 40(1): 285-291.

Robust adaptive trajectory tracking control of AUV based on the fully actuated system approach

WANG Peng¹, QIAN Cheng^{1†}, ZHANG Liu-liu^{1,2}, HUA Chang-chun¹

(1. School of Electrical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China; 2. Key Lab of Intelligent Rehabilitation and Neuromodulation of Hebei Province, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

Abstract: For autonomous underwater vehicle (AUV) systems with actuator failures, external disturbances and model uncertainties, a robust adaptive trajectory tracking error constrained control strategy based on the fully actuated system (FAS) approach is proposed to enable an AUV to asymptotically track target signals. First, the error constrained fully actuated system method is proposed by combining the tracking error-related normalization function and the barrier function with the time-varying scale function. Then, radial basis function neural networks (RBFNNs) are combined with the error-constrained fully actuated system method to deal with the uncertainty model in the system. Further, an adaptive compensation mechanism is designed to deal with actuator faults. It is proved that the trajectory tracking error asymptotically converges to zero based on the Lyapunov stability theory. Finally, the simulation result verifies the effectiveness of the designed robust adaptive trajectory tracking error constrained controller.

Keywords: fully actuated system approach; robust control; adaptive control; neural networks; trajectory tracking control

0 引言

自主式水下潜航器 (autonomous underwater vehicle, AUV) 具有活动范围大、机动性好、安全、智能化等优点, 广泛应用于军事、水下资源勘探、水下搜索等领域^[1-3]。高精度轨迹跟踪是 AUV 的基本功能, 但

执行这一任务并不容易。当处于不可预测的复杂水下环境时, AUV 动力学模型的高度非线性和交叉耦合导致动态模型不确定等问题, 给控制器设计带来了巨大的挑战。另外, 由于长时间执行水下任务, AUV 经常会遇到因为供电电压降低或控制系统电路腐蚀

收稿日期: 2024-04-18; 录用日期: 2024-08-13.

基金项目: 河北省拔尖人才项目 (HY2024050021); 河北省创新能力提升计划项目 (22567619H); 河北省教育厅在读研究生创新能力培养资助项目 (CXZZSS2023042).

责任编辑: 闫敬.

[†]通讯作者. E-mail: chengqianysu@163.com.

等原因导致的执行器部分失效的情况,使得系统实现目标轨迹跟踪控制变得更加困难.因此,提高AUV在执行高精度跟踪任务时的抗干扰能力和容错能力尤为重要.

目前,AUV的容错控制研究大多采用主动容错控制方法.Guo等^[4]使用滑模容错控制器,该控制器根据推进器故障情况调整其输出,实现了快速有效的容错控制.由于水下环境存在着未知不可预测的复杂影响,Chen等^[5]基于神经网络(neural networks, NNs)方法提出了一种含有饱和因子的神经网络权值调整方法,该方法不仅实现了AUV容错控制,同时克服了动态模型的不确定性给系统建模和控制带来的影响.但是,在实际工程中,不仅需要解决AUV系统的模型不确定和执行器故障问题,还需要提高执行高精度轨迹跟踪任务时的跟踪精度和稳定性.

输出误差受限方法为机器人系统的高精度控制问题提供了很好的解决方案^[5-8].基于此方法设计的控制器可以约束误差的边界,从而实现更快的跟踪误差收敛速度和更高的跟踪精度.为了确保规定的跟踪精度,Chen等^[5]使用预定性能函数来限制跟踪误差,设计转换误差使AUV系统能在更为宽松的收敛条件下实现输出误差受限控制.基于自适应NNs方法和输出的通用障碍函数,Dong等^[6]解决了一类无人水面船只在模型不确定性、输出受限和输入量化的情况下的轨迹跟踪控制问题,实现跟踪误差渐近收敛于零.此外,Hu等^[7]引入模糊逻辑系统来处理系统中未知的非线性函数,并提出一种固定时间性能函数,可以实现跟踪误差在固定时间内收敛到原点的邻域,最终渐近收敛到零.然而,以上研究采用一阶状态空间方法,需要通过复杂的状态增广和降阶处理将被研究系统模型转化为一阶状态空间模型,增加了系统控制器设计的难度,而且提高系统轨迹跟踪精度和鲁棒性的能力有限.

近年来,Duan等^[9-11]提出的高阶系统方法(high-order system approaches, HSA)因其在解决二阶或高阶非线性系统方面的有效性而引起了广泛的关注.这种方法的优势在于能够直接求解控制变量,简化了控制律的设计过程,提供了更多的设计自由度,允许对系统控制器进行参数化设计,不仅提高了控制设计的直观性和灵活性,而且增强了控制器对系统非线性和不确定性的适应能力,有助于克服在一阶系统框架下设计控制器的局限性^[12-15].针对六自由度航天器系统,Zhao等^[12]利用扩展观测器来估计整体扰

动,实现对位置和姿态的跟踪控制;Zhang等^[13]研究了离散时间高阶全驱系统的输出跟踪问题及其在空气轴承航天器模拟器控制中的应用;Zhang等^[14]研究了网络节点与传感器、网络节点与执行器之间存在通信延迟的高阶全驱网络多智能体系统的协同控制问题;Peng等^[15]设计了一种复合控制器,实现了多变量控制与航空发动机执行器受限的解耦控制.

综上,将AUV系统的状态空间模型转化为全驱自主式水下潜航器系统(fully actuated autonomous underwater vehicle, FAAUV)模型,设计基于全驱系统方法的自适应容错轨迹跟踪误差受限控制策略,使AUV能够渐近跟踪目标信号,具有重要的现实意义.本文基于全驱系统方法将归一化函数和障碍函数与时变尺度函数相结合,提出误差受限全驱系统方法.利用NNs方法和自适应补偿机制,不仅能够逼近AUV系统运行过程中存在的不确定模型和外部复杂干扰,而且能够补偿执行器故障造成的输入能量衰减,最终实现AUV系统自适应容错渐近轨迹跟踪误差受限控制.

1 传统自主式水下潜航器系统模型

假设AUV是质量为常数的刚体,构建基于惯性参考系的六自由度动力学与运动学模型,表达式如下:

$$\begin{cases} \dot{\eta} = J(\eta)\mu, \\ M\dot{\mu} + C(\mu)\mu + D(\mu) + G(\eta) = F_a(\tau) + \tau_d. \end{cases} \quad (1)$$

其中: $\eta = [x_p, y_p, z_p, \varphi, \theta, \psi]^T$ 表示AUV的位置和姿态,各个元素对应于前后、左右、上下、横滚、俯仰和偏航; $\mu = [u, v, \omega, p, q, r]^T$ 表示线速度和角速度向量; $M \in R^{6 \times 6}$ 是一个对称正定的惯性矩阵,包括附加质量矩阵; $C(\mu) = C_0 + C_d \in R^{6 \times 6}$ 是科氏力和向心力矩阵, $G(\eta) = G_0 + G_d \in R^6$ 是恢复力向量, $D(\mu) \in R^6$ 是阻尼矩阵, M, C_0, G_0 是标称项, $C_d, G_d, D(\mu)$ 是不确定项; $F_a(\tau) \in R^6$ 是系统实际控制输入(执行器输出), $\tau_d = [\tau_{d1}, \tau_{d2}, \dots, \tau_{d6}]^T \in R^6$ 是外部时变干扰的向量;此外,

$$J(\eta) = \begin{bmatrix} J_{11} & J_{12} & J_{13} & 0 & 0 & 0 \\ J_{21} & J_{22} & J_{23} & 0 & 0 & 0 \\ J_{31} & J_{32} & J_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & J_{45} & J_{46} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & J_{55} & J_{56} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & J_{65} & J_{66} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

描述大地坐标系和本体坐标系的关系,这里

$$\begin{aligned}
J_{11} &= \cos \psi \cos \theta, \\
J_{12} &= \cos \psi \sin \phi \sin \theta - \cos \phi \sin \psi, \\
J_{13} &= \cos \psi \cos \phi \sin \theta + \sin \phi \sin \psi, \\
J_{21} &= \sin \psi \cos \theta, \\
J_{22} &= \sin \psi \sin \phi \sin \theta + \cos \phi \cos \psi, \\
J_{23} &= \cos \psi \sin \phi \sin \theta - \sin \phi \cos \psi, \\
J_{31} &= -\sin \theta, \quad J_{32} = \cos \theta \sin \phi, \\
J_{33} &= \cos \theta \cos \phi, \\
J_{45} &= \tan \theta \sin \phi, \quad J_{46} = \tan \theta \cos \phi, \\
J_{55} &= \cos \phi, \quad J_{56} = -\sin \phi, \\
J_{65} &= \sin \phi / \cos \theta, \quad J_{66} = \cos \phi / \cos \theta.
\end{aligned}$$

由于AUV在执行任务的过程中可能出现执行器意外故障,在模型中考虑实际控制输入 $F_a(\tau) = [F_{a1}(\tau_1), F_{a2}(\tau_2), \dots, F_{a6}(\tau_6)]^T$ 与控制力矩向量 $\tau = [\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_6]^T$ 不相同的情况,即

$$F_a(\tau) = m\tau + b. \quad (3)$$

其中: $m = \text{diag}([m_1, m_2, \dots, m_6])$ 是对角矩阵, $0 < m_i \leq 1$ 为第*i*个控制舵面的控制效能; $b = [b_1, b_2, \dots, b_6]^T$, b_i 为未知有界的时变偏置误差.此外,针对AUV系统,有以下假设:

假设1 期望轨迹 η_r 及其*n*阶导数是已知、有界并且连续的.

假设2 滚转角 φ 、俯仰角 θ 和偏航角 ψ 都限制在区间 $(-90^\circ, 90^\circ)$ 内.

假设3 外部时变扰动向量 τ_d 的范数 $\|\tau_d\|$ 是有界的.

2 基于误差受限函数的FAS模型

本节根据状态空间方法表示的传统AUV系统模型,推导得出基于跟踪误差受限函数的FAS模型.根据系统变换 $\eta = z$ 和 $\mu = J^{-1}(z)\dot{z}$,自主式水下潜航器系统的状态空间模型转化为全驱系统模型:

$$\ddot{z} = f(z^{(0\sim 1)}) + g(z^{(0\sim 1)})\tau + \Delta(z^{(0\sim 1)}) + \tau_\mu. \quad (4)$$

其中

$$\begin{aligned}
f(z^{(0\sim 1)}) &= \\
&-J(z)[J^{-1}(z)\dot{z} + M^{-1}(C_0(\dot{z})\dot{z} + G_0(z))] \in R^6, \\
g(z^{(0\sim 1)}) &= J(z)M^{-1}m, \\
\tau_\mu &= J(z)M^{-1}(\tau_d + b), \\
\Delta(z^{(0\sim 1)}) &= -J(z)M^{-1}(C_d(\dot{z})\dot{z} + D(\dot{z}) + G_d(z)).
\end{aligned}$$

从模型(4)可以看出, $f(z^{(0\sim 1)}) \in R^6$ 是充分光

滑的向量函数, $g(z^{(0\sim 1)}) \in R^{6 \times 6}$ 是未知控制矩阵函数, $\Delta(z^{(0\sim 1)}) \in R^6$ 是需要被估计的复杂不确定动态模型.在实际工程中,由于外部时变干扰 τ_{di} 和执行器时变偏置误差 b_i 总是有界的,FAS集总干扰 τ_μ 存在上界 $\bar{\tau}_\mu \geq \|\tau_\mu\|$.定义跟踪误差为 $e_i = z_i - \eta_{ri}$, $i = 1, 2, \dots, 6$,其中 $\eta_r = [\eta_{r1}, \eta_{r2}, \dots, \eta_{r6}]^T$ 为AUV的目标姿态参考信号.为了使AUV能够渐近跟踪参考目标信号 $\eta_r \in R^6$,引入下面的跟踪误差受限函数:

$$s_i(t) = \frac{\delta_i(t)}{1 - \delta_i^2(t)}. \quad (5)$$

其中: $\delta_i(t) = \alpha_i(t)\Upsilon_i(e_i)$, $i = 1, 2, \dots, 6$. $\alpha_i(t)$ 是定义在 $[0, \infty)$ 上的单调递增函数,其初始值 $\alpha_i(0) = 1$; $\Upsilon_i(e_i) = \frac{e_i}{\sqrt{e_i^2 + \varrho_i}}$ 是误差变换函数, ϱ_i ($i = 1, 2, \dots, 6$)是任意正常数.

对跟踪误差受限函数(5)进行求导,可得

$$\dot{s}_i(t) = \frac{1 + \delta_i(t)^2}{(1 - \delta_i(t)^2)^2} \dot{\delta}_i(t) = \mu_{1i} + \mu_{2i}\dot{e}_i. \quad (6)$$

其中

$$\begin{aligned}
\mu_{1i} &= \frac{(1 + \delta_i(t)^2)\dot{\alpha}_i\Upsilon_i}{(1 - \delta_i(t)^2)^2}, \\
\mu_{2i} &= \frac{(1 + \delta_i(t)^2)\alpha_i\varrho_i}{(1 - \delta_i(t)^2)^2(e_i^2 + \varrho_i)^{3/2}}.
\end{aligned}$$

结合AUV高阶系统模型(4)和跟踪误差受限函数(5),基于跟踪误差受限函数的FAS模型可以表示为

$$\begin{aligned}
\ddot{s} &= \dot{\mu}_1 + \dot{\mu}_2\dot{e} + \mu_2\ddot{e} = \\
&\dot{\mu}_1 + \dot{\mu}_2\dot{e} + \mu_2(f(z^{(0\sim 1)}) + \Delta(z^{(0\sim 1)}) + \\
&g(z^{(0\sim 1)})\tau + \tau_\mu - \ddot{\eta}_r).
\end{aligned} \quad (7)$$

其中

$$\begin{aligned}
s &= [s_1, s_2, \dots, s_6]^T, \\
\dot{\mu}_1 &= [\dot{\mu}_{11}, \dot{\mu}_{12}, \dots, \dot{\mu}_{16}]^T, \\
\mu_2 &= \text{diag}([\mu_{21}, \mu_{22}, \dots, \mu_{26}]), \\
\dot{\mu}_2 &= \text{diag}([\dot{\mu}_{21}, \dot{\mu}_{22}, \dots, \dot{\mu}_{26}]).
\end{aligned}$$

3 控制器设计

在本节中,利用误差受限函数的FAS模型,提出一种基于全驱系统方法的自适应容错控制器来实现AUV渐近跟踪目标信号的控制目标.

首先,定义新的变量 ν ,有

$$\nu = \frac{1}{\mu_2}(A_{0\sim 1}s^{(0\sim 1)} + \dot{\mu}_1 + \dot{\mu}_2\dot{e}) + f(z^{(0\sim 1)}) - \ddot{\eta}_r + \nu^*. \quad (8)$$

其中: $A_{0\sim 1} = [A_0, A_1]$, $A_i \in R^{6 \times 6}$, $i = 1, 2$; ν^* 是需要

在下面的过程中被设计的变量.

将式(8)代入(7),可得闭环系统模型

$$\ddot{s} + A_{0\sim 1}s^{(0\sim 1)} = F. \quad (9)$$

其中

$$F = \mu_2(\Delta(z^{(0\sim 1)}) + g(z^{(0\sim 1)})\tau + \tau_\mu + \nu - \nu^*).$$

将式(9)写为状态空间的表达形式

$$\dot{S} = \Phi(A_{0\sim 1})S + [0_{6 \times 1}, F_{6 \times 1}]^T. \quad (10)$$

其中: $S = [s, \dot{s}]^T$; $\Phi(A_{0\sim 1}) = [0_{6 \times 6}, I_{6 \times 6}; -A_0, -A_1]$ 是赫尔维茨矩阵, $I_{6 \times 6} \in R^{6 \times 6}$ 是单位矩阵.

选择 Lyapunov 函数 $V_1 = S^T P S$, 并对其求导, 可得

$$\dot{V}_1 = \dot{S}^T P S + S^T P \dot{S} \leq -\xi S^T P S + 2S^T P_L F, \quad (11)$$

其中 ξ 为任意正常数. 定义 AUV 系统运行时的不确定动态模型为 $\Delta(z^{(0\sim 1)}) = W^T \Lambda(z^{(0\sim 1)}) + \rho(z^{(0\sim 1)})$, $W \in R^{l \times 6}$ 是 RBF 神经网络的权值矩阵, 其节点为 l . 进而, 式(11)转化为

$$\dot{V}_1 \leq -\xi V_1 + 2S^T P_L \mu_2 (W^T \Lambda(z^{(0\sim 1)}) + \rho(z^{(0\sim 1)}) + g(z^{(0\sim 1)})\tau + \tau_\mu + \nu - \nu^*). \quad (12)$$

基于不等式 $|b| - \frac{b^2}{\sqrt{b^2 + \varepsilon^2(t)}} < \varepsilon(t)$, 可得

$$2S^T P_L \mu_2 (\rho(z^{(0\sim 1)}) + \tau_\mu) \leq 2\varepsilon_0 \Psi + \frac{2\Psi S^T P_L \mu_2 \mu_2^T P_L^T S}{\sqrt{(S^T P_L \mu_2 \mu_2^T P_L^T S) + \varepsilon_0^2}}. \quad (13)$$

其中: $\Psi = \bar{\rho} + \bar{\tau}_\mu$, 逼近误差向量 ρ 的上界为 $\bar{\rho} \geq \|\rho\|$; ε_0 为在区间 $[0, +\infty)$ 内满足 $\lim_{t \rightarrow \infty} \int_{t_0}^t \varepsilon_0(t_1) dt_1 \leq \bar{\varepsilon}_0$ 的衰减函数, $\bar{\varepsilon}_0$ 为正常数.

将式(13)代入(12)得

$$\begin{aligned} \dot{V}_1 \leq & -\xi V_1 + 2S^T P_L \mu_2 (W^T \Lambda(z^{(0\sim 1)}) + \\ & g(z^{(0\sim 1)})\tau + \nu - \nu^*) + 2\varepsilon_0 \Psi + \\ & \frac{2\Psi S^T P_L \mu_2 \mu_2^T P_L^T S}{\sqrt{(S^T P_L \mu_2 \mu_2^T P_L^T S) + \varepsilon_0^2}}. \end{aligned} \quad (14)$$

为了使 AUV 系统渐近稳定收敛, 设计中间变量 ν^* 和控制向量 τ 分别为

$$\nu^* = \hat{W}^T \Lambda(z^{(0\sim 1)}) - \frac{\hat{\Psi} \mu_2^T P_L^T S}{\sqrt{(S^T P_L \mu_2 \mu_2^T P_L^T S) + \varepsilon_0^2}}, \quad (15)$$

$$\tau = \frac{-\hat{\Theta}^2 \mu_2^T \nu \nu^T P_L^T S}{\sqrt{(\hat{\Theta}^2 S^T P_L \mu_2 \nu \nu^T \mu_2^T P_L^T S) + \varepsilon_0^2}}. \quad (16)$$

其中: $\hat{\Psi} = \Psi - \tilde{\Psi}$ 是 $\Psi = \bar{\rho} + \bar{\tau}_\mu$ 的自适应估计量, $\hat{\Psi}$ 是

估计误差; $\hat{\Theta} = \Theta - \tilde{\Theta}$ 是 $\Theta = \frac{1}{g}$ 的自适应估计量, $\hat{\Theta}$ 是估计误差, \underline{g} 是 $\|g(z^{(0\sim 1)})\|$ 的下界.

根据式(12)和(16)可以得出

$$\begin{aligned} 2S^T P_L \mu_2 g(z^{(0\sim 1)})\tau = \\ - \frac{2\|g(z^{(0\sim 1)})\|(\hat{\Theta} S^T P_L \mu_2 \nu)^2}{\sqrt{(\hat{\Theta} S^T P_L \mu_2 \nu)^2 + \varepsilon_0^2}} \leq \\ 2\underline{g}\varepsilon_0 - 2\underline{g}\hat{\Theta} S^T P_L \mu_2 \nu. \end{aligned} \quad (17)$$

进而, 可得

$$\begin{aligned} \dot{V}_1 \leq & -\xi V_1 + 2S^T P_L \tilde{W}^T \Delta(z^{(0\sim 1)}) + 2\underline{g}\varepsilon_0 + \\ & 2\varepsilon_0 \Psi - 2\underline{g}\hat{\Theta} S^T P_L \mu_2 \nu + 2S^T P_L \mu_2 \nu + \\ & \frac{2\tilde{\Psi} S^T P_L \mu_2 \mu_2^T P_L^T S^{(0\sim 1)}}{\sqrt{(S^T P_L \mu_2 \mu_2^T P_L^T S) + \varepsilon_0^2}}. \end{aligned} \quad (18)$$

设计自适应率 $\hat{\Psi}$ 、 $\hat{\Theta}$ 和 \hat{W} 分别为

$$\dot{\hat{\Psi}} = \frac{2S^T P_L \mu_2 \mu_2^T P_L^T S}{\sqrt{(S^T P_L \mu_2 \mu_2^T P_L^T S) + \varepsilon_0^2}} - 2\varepsilon_0 \hat{\Psi}, \quad (19)$$

$$\dot{\hat{\Theta}} = 2S^T P_L \mu_2 \nu - 2\varepsilon_1 \hat{\Theta}, \quad (20)$$

$$\dot{\hat{W}}_i = 2\Gamma_i \mu_2 \Lambda(z^{(0\sim 1)}) S^T P_{L_i} - 2\varepsilon_2 \Gamma_i \hat{W}_i. \quad (21)$$

其中: $\Gamma_i (i = 1, 2, \dots, 6)$ 为对称正定矩阵; $P_L = [P_{L1}, P_{L2}, \dots, P_{L6}] \in R^{12 \times 6}$, $P_{L_i} \in R^{12}$, $i = 1, 2, \dots, 6$; ε_1 与 ε_2 是与 ε_0 具有同样性质的衰减函数.

为了分析整个自适应控制器, 使用 Lyapunov 函数

$$V = V_1 + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^6 \tilde{W}_i^T \Gamma_i^{-1} \tilde{W}_i + \frac{1}{2} g \tilde{\Theta}^2 + \frac{1}{2} \tilde{\Psi}^2, \quad (22)$$

其中 $\tilde{W}_i = W_i - \hat{W}_i \in R^l (i = 1, 2, \dots, 6)$ 是第 i 个逼近权值误差向量.

最终, 将式(16)、(19)、(20)和(21)代入(18)可得

$$\begin{aligned} \dot{V} \leq & -\xi V_1 + 2\varepsilon_0 (\underline{g} + \Psi) + \varepsilon_0 \Psi^2 + \\ & \varepsilon_1 \theta^2 + \varepsilon_2 \sum_{i=1}^6 W_i^T W_i. \end{aligned} \quad (23)$$

对式(23)在区间 $[t_0, t]$ 上求积分, 可得

$$V(t) \leq$$

$$V(t_0) + 2\left(\underline{g} + \Psi + \frac{1}{2}\Psi^2\right) \int_{t_0}^t \varepsilon_0(t_1) dt_1 +$$

$$\theta^2 \int_{t_0}^t \varepsilon_1(t_1) dt_1 + \sum_{i=1}^6 W_i^T W_i \int_{t_0}^t \varepsilon_2(t_1) dt_1 \leq$$

$$V(t_0) + 2\left(\underline{g} + \Psi + \frac{1}{2}\Psi^2\right) \bar{\varepsilon}_0 +$$

$$\theta^2 \bar{\varepsilon}_1 + \sum_{i=1}^6 W_i^T W_i \bar{\varepsilon}_2 =$$

$$V(t_0) + \bar{\omega} \kappa = \psi. \quad (24)$$

其中

$$\bar{\omega} = \max\{\bar{\varepsilon}_0, \bar{\varepsilon}_1, \bar{\varepsilon}_2\},$$

$$\kappa = 2(\underline{g} + \Psi) + \Psi^2 + \theta^2 + \sum_{i=1}^6 W_i^T W_i.$$

由式(24)可知, $s, \dot{s}, \tilde{\theta}, \tilde{\Psi}, \tilde{W}_i (i = 1, 2, \dots, 6)$ 均有界. 此外, 基于Barbalat引理, 可得

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \int_{t_0}^t S^T(t_1) P S(t_1) dt_1 \leq V(t_0) + \bar{\omega} \kappa. \quad (25)$$

进而

$$\lim_{t \rightarrow \infty} s(t) = 0. \quad (26)$$

综上, AUV系统实现渐近跟踪.

注1 在实际的水下AUV控制场景中, 本文提出的算法提供了选择 ε_i 为 e^{-ct} 的灵活性, 其中 c 表示正常数. 当时间 t 趋于无穷时, 相应的 ε_i 减小直至趋近于零. 因此, 输出跟踪误差渐近收敛到零, 有效地削减了模型不确定性、外部干扰和执行器故障带来的影响. 算法示意图如图1所示.

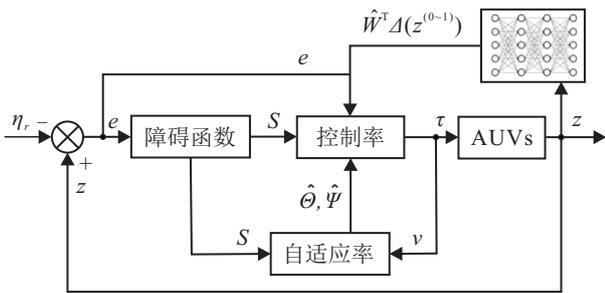


图1 自适应神经网络控制算法

4 仿真实验

4.1 参数设置

为验证本文算法的有效性, 假设目标的运动轨迹为

$$\eta_r = [\sin(0.1t) + 1, \cos(0.1t) + 1, 0.2t + 1, 0, 0, 0]^T.$$

关于AUV的具体参数如表1所示.

表1 模型参数

参数	数值	单位
质量	51	kg
中心半径	[0.37, 0.24, 0.15]	m
重心坐标	[0, 0, 0.15]	m
浮力中心坐标	[0, 0, -0.12]	m
体积	0.49	kg · m ⁻³
重力加速度	9.8	m · s ⁻²
水密度	1000	m ³

假设AUV在水下的初始相对位置、相对姿态、

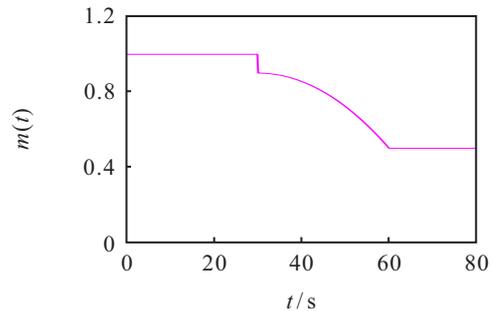
相对速度、相对角速度分别为 $\eta(0) = [-0.3, -0.2, 0.1, -0.1, 0.2, 0.2]^T$ 和 $\mu(0) = [0.1, 0.1, 0.1, 0.1, 0.1, 0.1]^T$. 算法采用隐藏层包含 5×6 节点的RBF神经网络, 其高斯函数 $\epsilon_i (i = 1, 2, \dots, 6)$ 的宽度设置为1, 感受域中心 $\kappa_i \in R^j$ 分布在 $[-8, 8]$ 范围内. 最初, 权重矩阵中的初始值设置为 $\hat{W}_i(0) = 1$. 利用这些配置, 建立RBF神经网络的体系结构, 并对其参数进行初始化. 根据AUV在水下执行高精度跟踪任务的需要, 时变尺度函数选择为

$$\alpha_1 = \frac{20}{17e^{-0.25t} + 3}, \alpha_2 = \frac{20}{17e^{-0.3t} + 3},$$

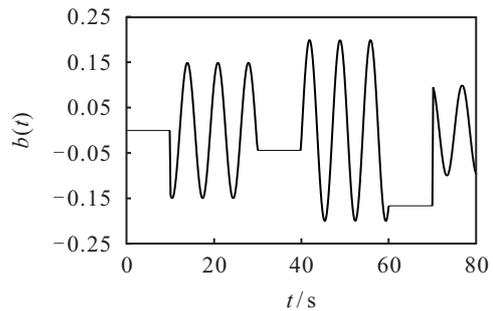
$$\alpha_3 = \frac{20}{17e^{-0.4t} + 3}, \alpha_4 = \frac{20}{17e^{-0.6t} + 3},$$

$$\alpha_5 = \frac{20}{17e^{-0.4t} + 3}, \alpha_6 = \frac{20}{17e^{-0.6t} + 3}.$$

此外, 选择控制参数矩阵 $A = [10I_{6 \times 6} \quad 5I_{6 \times 6}]$, 参数 $\xi = 1$, 将闭环系统的极点配置到复频域左半平面. 为了验证本文提出的控制算法在补偿和抵抗未知流体动力、建模误差、执行器故障和参数扰动时的可靠性, 假设AUV遇到如图2所示的故障.



(a) 舵面控制效能



(b) 时变偏差误差

图2 执行器故障

4.2 仿真结果

将所提出的控制策略应用于AUV系统, 其仿真结果如图3和图4所示. 图3描述了相对位置的响应, 蓝色实线为目标运动轨迹, 红色虚线为执行器状态运行出现故障时AUV自适应渐近跟踪目标轨迹. 可见, 基于误差受限全驱系统方法设计的控制器能够

使得AUV高精度渐近跟踪动态目标. 图4显示了位置和姿态的跟踪误差响应,特别是在期望的误差约束下. 观察到,AUV的位置和姿态误差保持在约束范围内,满足了控制器设计的跟踪性能要求,保证了AUV在任务执行过程中的可靠性. 总体而言,基于所提出的自适应轨迹跟踪误差约束控制器的仿真结果,验证了所设计的控制器能够有效地约束无人潜航器的跟踪误差,同时保证瞬态和稳态跟踪性能.

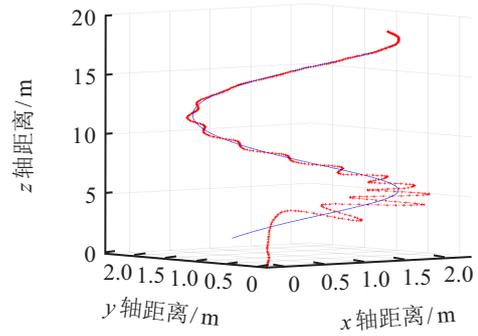


图3 目标跟踪轨迹

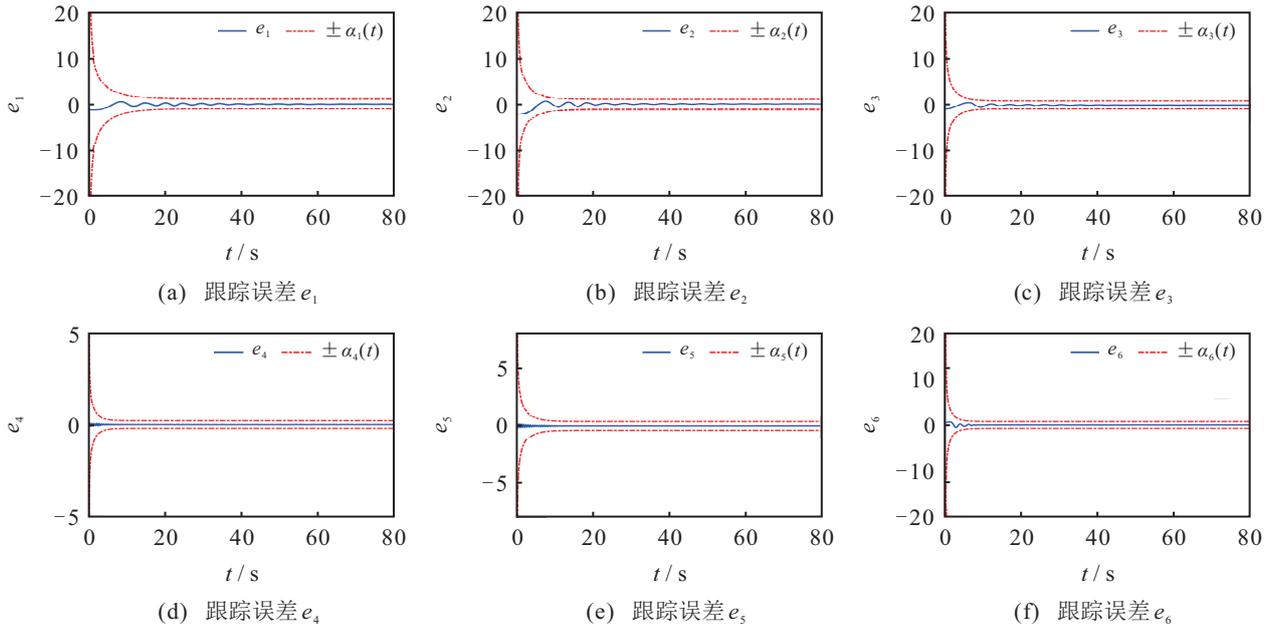


图4 跟踪误差受限响应

5 结论

本文基于FAS方法设计了考虑执行器失效的鲁棒自适应容错轨迹跟踪控制方案,解决了水下机器人在执行高精度目标轨迹跟踪任务时执行器出现失效故障的工程问题. 首先,将AUV系统状态空间模型转化为全驱系统模型,然后,采用误差受限的方法使得跟踪误差约束在一定范围内,满足AUV执行高精度目标跟踪任务的要求. 仿真结果显示,上述控制策略可以严格保证跟踪误差受限,使AUV能够渐近跟踪动态目标轨迹,表明所提出的控制方案具有实际的工程应用价值.

参考文献(References)

- [1] Zhang J X, Liu M Q, Zhang S L, et al. A path planning approach for multi-AUV systems with concurrent stationary node access and adaptive sampling[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2024, 9(3): 2343-2350.
- [2] Yan J, Zhang L, Yang X, et al. Communication-aware

motion planning of AUV in obstacle-dense environment: A binocular vision-based deep learning method[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2023, 24(12): 14927-14943.

- [3] 闫敬, 徐龙, 曹文强, 等. 基于深度强化学习的多潜航器编队控制算法设计[J]. 控制与决策, 2023, 38(5): 1457-1463.
(Yan J, Xu L, Cao W Q, et al. Design of formation control algorithm for multiple autonomous underwater vehicles based on deep reinforcement learning[J]. Control and Decision, 2023, 38(5): 1457-1463.)
- [4] Guo B, Chen Y. Adaptive fast sliding mode fault tolerant control integrated with disturbance observer for spacecraft attitude stabilization system[J]. ISA Transactions, 2019, 94: 1-9.
- [5] Chen G J, Dong J X. Approximate optimal adaptive prescribed performance fault-tolerant control for autonomous underwater vehicle based on self-organizing neural networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2024, 73(7): 9776-9785.

- [6] Dong S L, Liu K X, Liu M Q, et al. Adaptive neural network-quantized tracking control of uncertain unmanned surface vehicles with output constraints[J]. IEEE Transactions on Intelligent Vehicles, 2024, 9(2): 3293-3304.
- [7] Hu X Y, Li Y X, Tong S C, et al. Event-triggered adaptive fuzzy asymptotic tracking control of nonlinear pure-feedback systems with prescribed performance[J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2023, 53(4): 2380-2390.
- [8] Xin C, Li Y X, Ahn C K. Adaptive neural asymptotic tracking of uncertain non-strict feedback systems with full-state constraints via command filtered technique[J]. IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems, 2023, 34(10): 8102-8107.
- [9] Duan G R. High-order fully actuated system approaches: Part II. Generalized strict-feedback systems[J]. International Journal of Solids and Structures, 2021, 52(3): 437-454.
- [10] Duan G R. High-order fully actuated system approaches: Part III. Robust control and high-order backstepping[J]. International Journal of Solids and Structures, 2021, 52(5): 952-971.
- [11] Li P, Duan G R. High-order fully actuated control approaches of flexible servo systems based on singular perturbation theory[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2023, 28(6): 3386-3397.
- [12] Zhao Q, Duan G R. Fully actuated system approach for 6DOF spacecraft control based on extended state observer[J]. Journal of Systems Science and Complexity, 2022, 35(2): 604-622.
- [13] Zhang D W, Liu G P, Cao L. Predictive control of discrete-time high-order fully actuated systems with application to air-bearing spacecraft simulator[J]. Journal of the Franklin Institute, 2023, 360(8): 5910-5927.
- [14] Zhang D W, Liu G P, Cao L. Proportional integral predictive control of high-order fully actuated networked multiagent systems with communication delays[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2023, 53(2): 801-812.
- [15] Peng K, Wang H X, Zhang H S, et al. Multivariable decoupling control of civil turbofan engines based on fully actuated system approach[J]. Journal of Systems Science and Complexity, 2023, 36(3): 947-959.

作者简介

王鹏(1997—), 男, 硕士生, 主要研究方向为非线性系统控制、全驱系统方法, E-mail: wp202211@163.com;

钱承(1991—), 男, 讲师, 博士, 主要研究方向为机电系统建模与高性能控制, E-mail: chengqianysu@163.com;

张柳柳(1989—), 女, 副教授, 博士, 主要研究方向为非线性系统控制、网络化关联系统控制, E-mail: liuliuyisu@163.com;

华长春(1979—), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为非线性动力系统的控制及应用、网络化控制系统的分析与综合, E-mail: cch@ysu.edu.cn.