

垂直面欠驱动自治水下机器人定深问题的自适应输出反馈控制

张利军¹, 齐雪², 赵杰梅³, 庞永杰⁴

(1. 西北工业大学航海学院, 陕西西安 710072; 2. 安徽科技学院理学院, 安徽凤阳 233100;

3. 哈尔滨工程大学自动化学院, 黑龙江哈尔滨 150001; 4. 哈尔滨工程大学水下机器人技术重点实验室, 黑龙江哈尔滨 150001)

摘要: 针对垂直面欠驱动自治水下机器人(AUV)定深控制问题, 本文仅使用可测量的深度和纵摇角信息, 基于反步法设计自适应输出反馈控制器. 为此首先设计观测器, 实现不可测纵摇角速度反馈; 再利用径向基神经网络对不确定水动力系数和纵荡、垂荡及纵摇角速度耦合产生的非线性结构进行补偿; 采用自适应策略对纵荡和垂荡速度形成的有界干扰进行抑制. 本文采用AUV一阶非完整模型, 不以线性化为目的, 放宽了纵摇角只能在小范围内变化的限制. 最后通过理论证明和仿真实验表明该方法能够实现AUV深度和姿态控制, 对未建模非线性动态和有界扰动具有很强的自适应性和鲁棒性.

关键词: 水下机器人; 径向基神经网络; 自适应输出反馈; 反步法

中图分类号: TP242.6 **文献标识码:** A

Depth-keeping control for autonomous underwater vehicle in vertical plane using adaptive output feedback controller

ZHANG Li-jun¹, QI Xue², ZHAO Jie-mei³, PANG Yong-jie⁴

(1. School of Marine Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an Shaanxi 710072, China;

2. School of Science, Anhui Science and Technology University, Fengyang Anhui 233100, China;

3. College of Automation, Harbin Engineering University, Harbin Heilongjiang 150001, China;

4. Underwater Vehicle Technology Key Laboratory, Harbin Engineering University, Harbin Heilongjiang 150001, China)

Abstract: To keep the depth of an autonomous underwater vehicle (AUV) in a vertical plane, we design an adaptive output feedback controller based on the backstepping technique, using the information of measurable depth and the pitch angle. To achieve this objective, an observer is built to implement the feedback of the immeasurable velocity of the pitch angle. A radial basis neural network is adopted to compensate the nonlinear effects produced by the uncertain hydrodynamic coefficients as well as the coupling velocities of surge, dive, and pitch angle. An adaptive strategy is used to inhibit the disturbance from the velocity of surge and dive. A first-order incomplete model of AUV is employed without linearization; this relaxes the restriction on the variation range of the pitch angle. Theoretical analysis and simulation experiment results show that the proposed method implements the control of depth and altitude of the AUV with high adaptability and strong robustness for the unordered nonlinear dynamics and bounded disturbances.

Key words: autonomous underwater vehicles; radial basis neural network; adaptive output feedback; backstepping

1 引言(Introduction)

对于自治水下机器人(autonomous underwater vehicle, AUV), 定深航行是一种常见的航行状态. 当AUV潜入深海后, 为了完成工作任务, 例如对失事潜艇进行救生, 就需要在距离海底一定高度时作定深运动, 使AUV保持一定的深度和方位不变, 以便对海底目标进行观测或做救生的其他准备工作. 定深航行在浮力基本平衡后, 当AUV具有一定纵荡速度时, 通过调节AUV的首摇角和纵摇角来实现^[1-7].

为了实现AUV定深控制, 首先需要建立AUV垂直面运动模型和动力学模型. 从AUV工作环境和自

身运动特征可知, 其精确的数学模型难以得到, 即使能够得到足够精确的数学模型, 该模型也往往过于复杂而不适合控制系统设计. 因此, 需要对模型进行必要的简化. 文献[2, 8]将垂荡运动速度视为一种模型不确定性, 考虑纯纵摇运动的一阶非完整模型. 该模型充分考虑了AUV垂荡及纵摇运动的非线性特性. 文献[4]假设纵荡速度为已知常数信号, 使用一个尾舵作为控制输入, 考虑了垂荡运动的影响, 研究由纵摇和垂荡运动组成的二自由度欠驱动AUV模型. 文献[9]只考虑垂荡方程和纵摇方程, 同时略去非线性项, 在纵摇角小角度及航速缓变的假设条件

下将系统分解为两个单输入单输出(single input single output, SISO)系统进行运动特性分析.

强非线性、水动力系数不确定性和外界扰动使得AUV定深控制成为一个复杂的非线性系统控制问题. PID控制器是目前工程上广泛应用的一种控制器^[10]. 但PID控制器用于可线性化系统中, 对AUV系统中的强非线性和不确定性很难适应. 文献[1, 4, 7-8]设计滑模控制器, 它具有降阶、解耦、响应速度快、鲁棒性强和实现简易等优点, 但该方法多用于全状态反馈系统, 而全状态反馈必然增加AUV的重量、成本和过多测量装置带来的测量误差和测量噪声. 另外, 滑模控制的抖振问题也将影响其在实际中的推广应用. 反步法是一种基于三角结构的非线性系统模型的控制设计方法, 它非常适合于刚体运动控制系统的研究, 目前已广泛用于船舶、机器人、电机、飞机和导弹控制等领域. 文献[11-12]研究了基于神经网络自适应反步法的控制策略. 文献[13]进一步将反步法与神经网络控制方法和非线性观测器相结合, 解决了一类具有不可测状态的不确定随机非线性严格反馈系统的输出反馈镇定问题. 文献[14]拓展文献[13]到时滞随机非线性输出反馈系统. 文献[15]把反步法应用到船舶航向非线性控制设计中, 并给出了与PID的比较研究结果. 文献[12, 16]研究了具有强非线性和不确定性的AUV控制系统的跟踪问题, 将反步法与自适应律相结合, 不以线性化为目标, 避免了抵消系统中有用的非线性部分, 增强了控制系统的跟踪性能.

鉴于本文讨论的AUV不配备垂直推进器, 而仅采用主推进器和水平舵进行深度控制, 故提出了基于反步法的自适应输出反馈定深控制设计策略, 即仅使用可测量的深度和纵摇角信息作为反馈变量, 这样可以减少AUV重量、降低制造成本、避免过多测量装置带来的测量误差和测量噪声. 基于文献[2, 8], 本文采用AUV一阶非完整模型, 此模型简洁又不失运动的完整性, 能充分刻画AUV在垂直面的运动特性. 模型中将垂荡运动速度视为干扰, 不以线性化为目标, 放宽了纵摇角只能在小范围内变化的限制. 为了实现不可测纵摇角速度反馈, 本文首先设计了观测器; 然后利用局部逼近的径向基神经网络对不确定水动力系数和纵荡、垂荡及纵摇角速度耦合产生的非线性结构进行补偿. 径向基神经网络是局部逼近网络, 具有学习速度快的优点(文献[17-19]). 这一点对于有时实性要求的AUV控制系统来说至关重要. 同时, 本文使用自适应策略来抑制纵荡和垂荡速度形成的有界干扰, 通过自适应学习使扰动补偿项能够逼近其真实值的上界. 最后通过Lyapunov稳定理论证明了闭环系统所有误差信号最终一致有界. 该控制方法打破了对纵摇角只能在小范围内变化的限制, 不需要精确的系统模型, 对于系统内部参数变化、不确定性以及外部干扰具有很

强的鲁棒性.

2 问题描述(Problem formulation)

在惯性坐标系中定义位置和姿态角矢量 $[x \ y \ z \ \phi \ \theta \ \psi]^T$, 其中: ϕ 表示横摇角, θ 表示纵摇角, ψ 表示首摇角. 在AUV载体坐标系中定义线速度和角速度矢量 $[u \ v \ w \ p \ q \ r]^T$, 其中: u, v 和 w 分别表示纵荡、横荡和垂荡速度, p, q 和 r 分别表示横摇、纵摇和首摇角速度. 假设AUV为刚体, 外形关于纵平面对称, 重心与载体坐标系原点重合, 忽略横摇对垂荡运动的影响, 可以假设 $p = 0, \phi = 0$. 基于文献[20], AUV水平面运动和垂直面运动解耦, 假设横荡速度 $v = 0$, 首摇角速度 $r = 0$, 纵荡速度 u 是个已知的常数, AUV尾部有一个螺旋桨用来产生前进推力, 两个方向舵用来控制首摇角和纵摇角, 针对此结构的AUV, 可以将垂荡运动速度 w 看成一个小扰动, 垂直面运动状态变量为深度 z 、纵摇角 θ 和纵摇角速度 q . AUV的垂直面运动方程可以表示为

$$\dot{z} = -u \sin \theta + w \cos \theta, \quad (1)$$

$$\dot{\theta} = q. \quad (2)$$

动力学方程可以表示为

$$I_{yy}\dot{q} = M_{\dot{q}}\dot{q} + M_{q|q}q|q| + M_{\dot{w}}\dot{w} + M_{qu}uq + \tau_d + M_{|w|q}|w|q + M_*u^2 + M_wuw + M_{|w|u}|w|u + M_{w|w}|w|w + M_{w|w|w}|w|w + M_{uu}u^2\delta_s, \quad (3)$$

其中: I_{yy} 为 y 轴转动惯量, δ_s 为尾舵偏转角度, $M_{(\cdot)}$ 为水动力系数, τ_d 代表外界干扰(包括海风、海浪和海浪产生的干扰力矩). 详见文献[20].

假设水动力系数 $M_{(\cdot)}$ 的标称值已知. 由于系统参数的标称值一般并不足够精确, 同时为了便于表述, 以 P, P_0 和 P_* 分别代表系统参数的实际值、标称值和摄动值, 可表示为

$$P = P_0 + P_*. \quad (4)$$

在实际应用中, 参数不确定值 P_* 总是有界的. 令

$$X = [z \ \theta \ q]^T, \quad B = [0 \ 0 \ M_{uu}u^2]^T,$$

$$M = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & I_{yy} - M_{\dot{q}0} \end{bmatrix}, \quad A = \begin{bmatrix} 0 & -u & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & M_{q0}u \end{bmatrix},$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}, \quad D = [d_z \ 0 \ f(X, \delta_s)]^T,$$

$$d_z = u(\theta - \sin \theta) + w \cos \theta, \quad (5)$$

$$f(X, \delta_s) = M_{q|q}q|q| + M_*u^2 + 2M_{w|w}|w|w + M_{|w|u}|w|u + M_wuw + \tau_d + M_{\dot{w}}\dot{w} + M_{|w|q}|w|q + M_{qu}uq + M_{uu}u^2\delta_s - (I_{yy} - M_{\dot{q}0})\dot{q}, \quad (6)$$

d_z 和 $f(X, \delta_s)$ 为未建模动态、外界干扰和参数不确

定性的影响, 且 d_z 和 $f(X, \delta_s)$ 有界.

假设 1 $|d_z| \leq D_z f_z,$ (7)

其中: f_z 为已知正定函数, D_z 为满足上述不等式的最小正数.

AUV 动态模型为

$$\begin{cases} M\dot{X} = AX + B\delta_s + D, \\ Y_{out} = CX, \end{cases} \quad (8)$$

Y_{out} 为系统可测量输出.

由于 M 可逆, 则系统可重新记为以下形式:

$$\begin{cases} \dot{X} = M^{-1}AX + M^{-1}B\delta_s + M^{-1}D, \\ Y_{out} = CX. \end{cases} \quad (9)$$

控制目标: 仅使用可测量的输出信息 z 和 θ 来设计 δ_s , 使得 AUV 停留在期望深度 z_d , 满足 $\dot{z}_d = 0$.

针对此控制目标, 需要进行以下 3 方面工作:

- 1) 选择径向基神经网络补偿 $f(X, \delta_s)$;
- 2) 设计观测器估计不可测状态;
- 3) 基于 Lyapunov 稳定理论, 采用 backstepping 设计自适应输出反馈控制器.

3 径向基神经网络(Radial basis neural network)

本文设计 3 个输入节点、 m 个隐层节点和一个输出节点的径向基神经网络. 采用高斯函数作为径向基函数, 输出层连接权矩阵用 W 表示, 在紧集 Ω 上, 未知非线性函数 $f(X, \delta_s)$ 可以由径向基神经网络补偿, 即

$$f(X, \delta_s) = W^T \sigma(Y_{out}, \delta_s) + \varepsilon(Y_{out}, \delta_s), \quad (10)$$

其中: $W \in \mathbb{R}^{m \times 1}$, $\sigma(Y_{out}, \delta_s) \in \mathbb{R}^{m \times 1}$ 为高斯函数, $\varepsilon(Y_{out}, \delta_s)$ 为神经网络重构误差, 满足 $\|\varepsilon\| < \varepsilon^*$, $\varepsilon^* > 0$.

4 观测器设计(Observer design)

假设矩阵对 $(M^{-1}AC)$ 能观, 对动态系统(9)设计观测器:

$$\begin{cases} \dot{\hat{X}} = M^{-1}A\hat{X} + M^{-1}B\delta_s + M^{-1}\bar{D} + G\tilde{Y}_{out}, \\ \hat{Y}_{out} = C\hat{X}, \end{cases} \quad (11)$$

其中:

$$\begin{aligned} \tilde{Y}_{out} &= Y_{out} - \hat{Y}_{out}, \\ G &= \begin{bmatrix} g_{11} & g_{12} \\ g_{21} & g_{22} \\ g_{31} & g_{32} \end{bmatrix} \end{aligned}$$

为观测器增益矩阵, $\bar{D} = [v_z \ 0 \ \hat{W}^T \sigma(Y_{out}, \delta_s)]^T$, v_z 和 $\hat{W}^T \sigma(Y_{out}, \delta_s)$ 分别用来补偿 d_z 和 $f(X, \delta_s)$, \hat{W} 是对 W 的估计.

令 $\tilde{X} = X - \hat{X}$ 为观测误差, 则

$$\begin{cases} \dot{\tilde{X}} = (M^{-1}A - GC)\tilde{X} + M^{-1}\bar{D}, \\ \tilde{Y}_{out} = C\tilde{X}, \end{cases} \quad (12)$$

其中

$$\bar{D} = D - \bar{D} = \begin{bmatrix} d_z - v_z \\ 0 \\ f(X, \delta_s) - \hat{W}^T \sigma(Y_{out}, \delta_s) \end{bmatrix}.$$

由于矩阵对 $(M^{-1}AC)$ 能观, 则存在正定对称矩阵

$$\bar{P} = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{13} \\ p_{12} & p_{22} & p_{23} \\ p_{13} & p_{23} & p_{33} \end{bmatrix}$$

和正定矩阵 Q , 满足 $\lambda_{\min}(Q) > \frac{11}{4}$, $\lambda_{\min}(Q)$ 代表矩阵 Q 的最小特征值, 设计观测器增益矩阵 G , 使得

$$\bar{P}(M^{-1}A - GC) + (M^{-1}A - GC)^T \bar{P} = -Q. \quad (13)$$

5 控制器设计(Controller design)

为了便于证明, 定义以下符号:

$$a_0 = (I_{yy}^0 - M_{\dot{q}_0})^{-1} M_{q_0} u, \quad (14)$$

$$b_0 = (I_{yy0} - M_{\dot{q}_0})^{-1} M_{uu0} u^2, \quad (15)$$

$$m_0 = (I_{yy0} - M_{\dot{q}_0})^{-1}. \quad (16)$$

下面, 对系统(9)采用反步法进行控制器设计.

Step 1 针对 z 子系统, 以 θ 为虚拟控制输入, 使得深度跟踪误差 $z - z_d$ 最终一致有界,

$$\dot{z} = -u\theta + d_z. \quad (17)$$

令 θ 为虚拟控制, 定义 $e_1 = z - z_d$, 选择虚拟控制输入为以下形式:

$$\theta = \Delta_1 = \frac{1}{u} (ke_1 + \dot{e}_1 + v_z), \quad (18)$$

其中 $k > 0$ 为控制器设计参数.

为了证明 e_1 和 \tilde{X} 组成的系统的稳定性, 选择 Lyapunov 函数为

$$V_1 = \frac{1}{2} e_1^2 + \tilde{X}^T \bar{P} \tilde{X}, \quad (19)$$

则

$$\begin{aligned} \dot{V}_1 &\leq -ke_1^2 - (\lambda_{\min}(Q) - 1) \|\tilde{X}\|^2 + \\ &(\|\bar{P}M^{-1}\|^2 + \frac{1}{4}) \|\bar{D}\|^2. \end{aligned} \quad (20)$$

Step 2 对于 z, θ 组成的子系统, 以 \hat{q} 为虚拟控制输入, 使深度跟踪误差 $z - z_d$ 和 $\theta - \Delta_1$ 最终一致有界.

$$\begin{cases} \dot{z} = -u\theta + d_z, \\ \dot{\theta} = \hat{q} + \tilde{q}. \end{cases} \quad (21)$$

令 \hat{q} 为虚拟控制, 定义 $e_2 = \theta - \Delta_1$, 选择虚拟控制输

入为以下形式:

$$\begin{aligned} \hat{q} = \Delta_2 = & ue_1 - e_2 - ke_2 - \left(\frac{k+1}{u}\right)^2 e_2 - \\ & (k+1)\theta + \frac{k+1}{u} v_z + \frac{\dot{v}_z}{u}. \end{aligned} \quad (22)$$

为了证明 e_1, e_2 和 \tilde{X} 组成的系统的稳定性, 选择Lyapunov函数为

$$V_2 = V_1 + \frac{1}{2} e_2^2, \quad (23)$$

则

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 \leq & -ke_1^2 - ke_2^2 - (\lambda_{\min}(Q) - \frac{5}{4}) \|\tilde{X}\|^2 + \\ & (\|\bar{P}M^{-1}\|^2 + \frac{1}{2}) \|\tilde{D}\|^2. \end{aligned} \quad (24)$$

Step 3 对于 z, θ, \hat{q} 组成的系统, 设计控制输入 δ_s , 使得深度跟踪误差 $z - z_d, \theta - \Delta_1$ 和 $\hat{q} - \Delta_2$ 最终一致有界.

$$\begin{aligned} \dot{z} = & -u\theta + d_z, \quad \dot{\theta} = \hat{q} + \tilde{q}, \\ \dot{\hat{q}} = & a_0\hat{q} + b_0\delta_s + g_{13}(z - \hat{z}) + \\ & g_{23}(\theta - \hat{\theta}) + m_0\hat{W}^T\sigma(Y_{out}, \delta_s). \end{aligned} \quad (25)$$

定义 $e_3 = \hat{q} - \Delta_2$, 选择控制器结构为以下形式:

$$\begin{aligned} \delta_s = & \frac{1}{b_0} \{-a_0\hat{q} - g_{13}(z - \hat{z}) - g_{23}(\theta - \hat{\theta}) - \\ & m_0\hat{W}^T\sigma(Y_{out}, \delta_s) + uv_z - (k+1)\hat{q} - \\ & (k+1)^2 e_3 + \frac{1}{u} \ddot{v}_z - u^2\theta - \\ & (1+k + \left(\frac{k+1}{u}\right)^2) e_3 - \\ & (1+k + \left(\frac{k+1}{u}\right)^2) ue_1 + \\ & (1+k + \left(\frac{k+1}{u}\right)^2) e_2 - \\ & (1+k + \left(\frac{k+1}{u}\right)^2) e_3 - e_2 - ke_3 + \frac{k+1}{u} \dot{v}_z\}, \end{aligned} \quad (26)$$

$$v_z = \hat{D}_z f_z \tanh \frac{M_z f_z}{m_z}, \quad (27)$$

$$\begin{aligned} M_z = & e_1 - \frac{k+1}{u} e_2 - ue_3 + 2p_{12}(\theta - \hat{\theta}) - \\ & (1+k + \left(\frac{k+1}{u}\right)^2) \frac{k+1}{u} e_3 + 2p_{11}(z - \hat{z}), \end{aligned} \quad (28)$$

$$\dot{\hat{D}}_z = \gamma_z [M_z f_z \tanh \frac{M_z f_z}{m_z} - a_z(\hat{D}_z - D_{z0})], \quad (29)$$

$$M_q = 2m_0(p_{13}(z - \hat{z}) + p_{23}(\theta - \hat{\theta})), \quad (30)$$

$$\dot{\hat{W}} = \gamma_q [M_q \sigma(Y_{out}, \delta_s) - a_q(\hat{W} - W_0)], \quad (31)$$

其中: $\gamma_z \in \mathbb{R}$, 且 $\gamma_z > 0, \gamma_q > 0, a_z > 0, a_q > 0, m_z > 0$. \hat{D}_z 是对 D_z 的估计值, D_{z0} 和 W_0 分别是 \hat{D}_z

和 \hat{W} 的初始值.

定理 1 考虑系统(9)和观测器动态方程(11), 基于Lyapunov稳定理论, 采用反步法设计自适应输出反馈控制器(18)(22)和(26)–(31), 则闭环系统中的误差信号一致最终有界.

证 为了证明闭环系统中所有误差信号的一致最终有界性, 选择Lyapunov函数为以下形式:

$$V_3 = V_2 + \frac{1}{2}(e_3^2 + \gamma_z^{-1} \tilde{D}_z^2 + \tilde{W}^T \gamma_q^{-1} \tilde{W}), \quad (32)$$

其中: $\tilde{D}_z = D_z - \hat{D}_z, \tilde{W} = W - \hat{W}$, 则

$$\begin{aligned} \dot{V}_3 \leq & -(k+1)e_1^2 - (k + \left(\frac{k+1}{u}\right)^2) e_2^2 - ke_3^2 - \\ & \frac{a_z}{2} \tilde{D}_z^2 - \frac{a_q}{2} \tilde{W}^T \tilde{W} + k_z m_z D_z + |M_q| \varepsilon^* - \\ & (\lambda_{\min}(Q) - \frac{11}{4}) \tilde{X}^T \tilde{X} + \frac{a_z}{2} (D_z - D_{z0})^2 + \\ & \frac{a_q}{2} \|W - W_0\|^2 + p_{13}^2 (d_z - v_z)^2 + \\ & m_0^2 p_{33}^2 (f(X, \delta_s) - \hat{W}^T \sigma(Y_{out}, \delta_s))^2, \end{aligned} \quad (33)$$

其中 k_z 为满足以下不等式的常数:

$$0 \leq |M_z| f_z - M_z f_z \tanh \left(\frac{M_z f_z}{m_z} \right) \leq k_z m_z, \quad (34)$$

则 $k_z = e^{-(k_z-1)}$. 令

$$\begin{aligned} \rho = & k_z m_z D_z + |M_q| \varepsilon^* + \frac{a_z}{2} (D_z - D_{z0})^2 + \\ & \frac{a_q}{2} \|W - W_0\|^2 + p_{13}^2 (d_z - v_z)^2 + \\ & m_0^2 p_{33}^2 (f(X, \delta_s) - \hat{W}^T \sigma(Y_{out}, \delta_s))^2, \end{aligned} \quad (35)$$

$$\Gamma = \begin{bmatrix} \frac{1}{2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{2} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2\gamma_z} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2\gamma_q} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \bar{P} \end{bmatrix},$$

$$\bar{X} = [e_1 \ e_2 \ e_3 \ \tilde{D}_z \ \tilde{W}^T \ \text{vec}(\tilde{X}^T)]^T.$$

设误差向量 \bar{X} 有界, 则存在一个正实数 r_1 , 满足

$$B_{r_1} = \{\bar{X} \mid \|\bar{X}\| \leq r_1\}, r_1 > 0, \quad (36)$$

且 $V_{\min} \leq V_3 \leq V_{\max}$, 其中:

$$V_{\min} = \lambda_{\min}(\Gamma) \|\bar{X}\|^2, \quad V_{\max} = \lambda_{\max}(\Gamma) \|\bar{X}\|^2,$$

$\lambda_{\min}(\Gamma)$ 和 $\lambda_{\max}(\Gamma)$ 分别为矩阵 Γ 的最小特征值和最大特征值. 令

$$\delta_1 = \sqrt{\frac{\rho}{k+1}}, \quad \delta_2 = \sqrt{\frac{\rho}{k + \left(\frac{k+1}{u}\right)^2}}, \quad \delta_3 = \sqrt{\frac{\rho}{k}},$$

$$\delta_4 = \sqrt{\frac{2\rho}{a_z}}, \delta_5 = \sqrt{\frac{2\rho}{a_q}}, \delta_6 = \sqrt{\frac{\rho}{\lambda_{\min}(Q) - \frac{11}{4}}},$$

$$r_2 = \max\{\delta_1, \delta_2, \delta_3, \delta_4, \delta_5, \delta_6\}. \quad (37)$$

假设 $r_2 < r_1$, $r_2 < \sqrt{\frac{\lambda_{\min}(\Gamma)}{\lambda_{\max}(\Gamma)}} r_1$, 则当 $r_2 \leq \|\bar{X}\| \leq r_1$ 时, $\dot{V}_3 \leq 0$. 因此, 取 $c_1 = \lambda_{\min}(\Gamma) \|r_1\|^2$, 则 $\Omega_{c_1} \subset B_{r_1}$, 其中 $\Omega_{c_1} = \{V_3 \leq c_1\}$; 取 $c_2 = \lambda_{\max}(\Gamma) \|r_2\|^2$, 则 $B_{r_2} \subset \Omega_{c_2}$, 其中 $\Omega_{c_2} = \{V_3 \leq c_2\}$, 且 $B_{r_2} = \{\bar{X} \mid \|\bar{X}\| \leq r_2\}$. 由式(37)知, $c_2 < c_1$. 证毕.

以上分析表明, 所有始于 Ω_{c_1} 的轨迹必将在有限时间内终于 Ω_{c_2} . 则最终的界为 $o = \sqrt{\frac{\lambda_{\max}(\Gamma)}{\lambda_{\min}(\Gamma)}} r_2$. 因此, 闭环系统中的误差信号 $e_1, e_2, e_3, \tilde{D}_z, \tilde{W}$ 和 \tilde{X} 一致最终有界.

进一步, 由式(32)可知, $\dot{V}_3 \leq -(k+1)e_1^2 + \rho$. 若 $e_1 > \sqrt{\frac{\rho}{k+1}}$, 则 $\dot{V}_3 \leq 0$. 由此看出: 通过调节控制器参数, 可使得深度跟踪误差 $e_1 = z - z_d$ 任意小.

6 仿真结果与分析(Simulation analysis)

为了验证控制器的控制性能和工程实用性, 本节基于微型AUV虚拟仿真平台, 针对期望深度的定深控制进行了仿真实验和分析. 微型AUV垂直面运动模型中的标称参数如下:

$$M_{\dot{q}0} = -0.9861, M_{q0} = -20.25, M_{|w|0} = 1,$$

$$M_{q|q|0} = 0.1210, M_{w|w|0} = 0.5391, M_{*0} = 1,$$

$$M_{\dot{w}0} = -0.8071, I_{yy0} = 98.4392, M_{w0} = 1,$$

$$M_{|w|q0} = -3.5909, M_{uu0} = -10.$$

AUV恒定纵荡速度 $u = 2 \text{ m/s}$, 期望深度 $z_d = 5 \text{ m}$, 初始值为 $z_0 = 0.1, \theta_0 = 0, q_0 = 0$.

观测器设计参数为 $G = \begin{bmatrix} 1 & -2 \\ 1 & 5 \\ 1 & 6 \end{bmatrix}$, 则矩阵

$M^{-1}A - GC$ 的特征值为 $-1, -2, -3$.

$$\bar{P} = \begin{bmatrix} -\frac{3}{5} & \frac{11}{10} & 1 \\ \frac{11}{10} & \frac{21}{10} & -\frac{3}{2} \\ 1 & -\frac{3}{2} & \frac{8}{5} \end{bmatrix}, Q = \begin{bmatrix} 3 & 0 & 0 \\ 0 & 3 & 0 \\ 0 & 0 & 3 \end{bmatrix}.$$

径向基神经网络参数: $m = 5, \gamma_q = 20, a_q = 0.5, W_0 = 2 \times \text{ones}(5, 1)$, 高斯函数为: $\sigma_i(x) = \exp(-|x - c_i|^2/b_i^2)$, $i = 1, \dots, 5$, 其中 c_i 为中心, b_i 为宽度. 初始中心向量为 $C_0 = 10 \times \text{ones}(5, 1)$, 初始宽度向量为 $B_0 = 2 \times \text{ones}(5, 1)$.

控制器参数为: $k = 1, m_z = 5, f_z = 1, \gamma_z = 10,$

$a_z = 0.1, D_{z0} = 10$.

图1为深度响应曲线, 图2为舵角响应曲线, 图3为纵摇角响应曲线. 图中分别使用了传统PID控制器和本文提出的自适应输出反馈控制器. PID控制器的参数分别为 $k_P = 7.5, k_I = 0.2, k_D = 0.05$. 由于PID控制器没有对模型中非线性部分和有界扰动进行补偿, 形成了较大的稳态误差. 图4为径向基神经网络响应曲线. 从仿真图可见, 适当选择径向基神经网络参数的初始值和自适应率, 可有效减小稳态误差. 所设计的控制器能实现定深和纵摇角控制, 稳态时深度和纵摇角曲线误差小, 控制器的舵角响应也很光滑, 深度曲线能够在较短的时间内到达并稳定在 z_d .

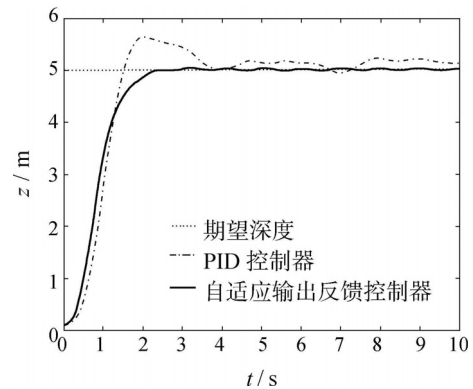


图 1 定深响应曲线

Fig. 1 Depth response curve

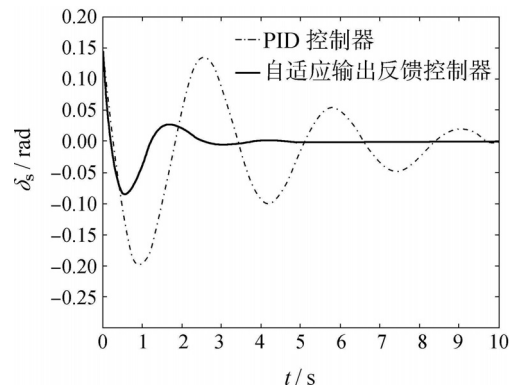


图 2 舵角响应曲线

Fig. 2 Rudder response curve

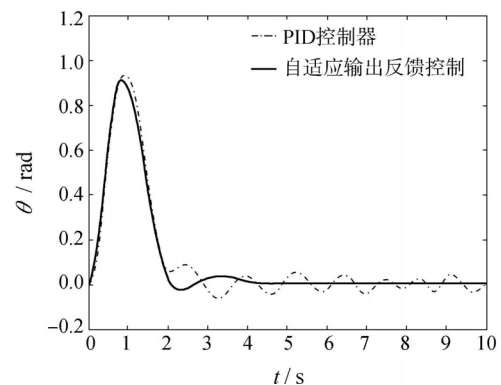


图 3 纵摇角响应曲线

Fig. 3 Pitch angle response curve

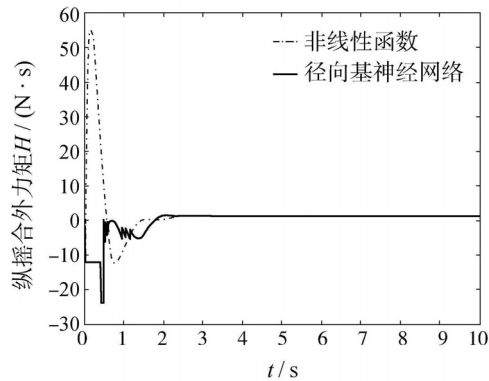


图4 径向基神经网络响应曲线

Fig. 4 Radial basis neural network response curve

7 结论(Conclusions)

针对AUV定深控制问题, 本文提出了自适应输出反馈控制设计. 由理论推导和仿真实验表明, 该控制器能有效补偿AUV垂荡运动模型的未知非线性动态部分和有界扰动, 从而减小纵摇角反馈控制的稳态误差与超调问题. 对于具有参数不确定性和未建模动态的AUV系统, 该控制器具有较强的鲁棒性.

参考文献(References):

- [1] BESSA W M, DUTRA M S, KREUZER E. Depth control of remotely operated underwater vehicles using an adaptive fuzzy sliding mode controller [J]. *Robust and Autonomous Systems*, 2008, 56 (8): 670 – 677.
- [2] LI J H, LEE P M. A neural network adaptive controller design for free-pitch-angle diving behavior of an autonomous underwater vehicle [J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 2005, 52 (2/3): 132 – 147.
- [3] YANG S, QI Q W, SHENG Y W, et al. Adaptive depth control for autonomous underwater vehicles based on feedforward neural networks [J]. *International Journal of Computer Science and Applications*, 2007, 4 (3): 107 – 118.
- [4] 毕凤阳. 欠驱动自主水下航行器的非线性鲁棒控制策略研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.
(BI Fengyang. *Research on nonlinear robust control strategies of underactuated autonomous underwater vehicle* [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010.)
- [5] NAIK M S, SINGH S N. State-dependent riccati equation-based robust dive plane control of AUV with control constraints [J]. *Ocean Engineering*, 2007, 34 (11/12): 1711 – 1723.
- [6] NAMBIAN P R, SINGH S N. Multi-variable adaptive backstepping control of submersibles using SDU decomposition [J]. *Ocean Engineering*, 2009, 36(2): 158 – 167.
- [7] 边信黔, 程相勤, 贾鹤鸣, 等. 基于迭代滑模增量反馈的欠驱动AUV地形跟踪控制 [J]. *控制与决策*, 2011, 26(2): 289 – 293.
(BIAN Xinqian, CHENG Xiangqin, JIA Heming, et al. A bottom-following controller for underactuated AUV based on iterative sliding and increment feedback [J]. *Control and Decision*, 2011, 26(2): 289 – 293.)
- [8] LEE P M, HONG S W, LIM Y K, et al. Discrete-time quasi-sliding mode control of an autonomous underwater vehicle [J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 1999, 24(3): 388 – 395.
- [9] 王正国, 许汉珍. 潜艇垂直面运动的解耦控制 [J]. *华中理工大学学报*, 2000, 28 (10): 49 – 51.

- (WANG Zhengguo, XU Hanzhen. Decoupling control of submarine in vertical-plane movement [J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology*, 2000, 28 (10): 49 – 51.)
- [10] 肖金鹏. 潜水器姿态与定深控制关键技术研究 [D]. 大连: 大连海事大学, 2009.
(XIAO Jinpeng. *The research for AUV deep-set and pitch control* [D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2009.)
- [11] 王敏. 非线性系统的自适应神经网络控制新方法研究 [D]. 青岛: 青岛大学, 2009.
(WANG Min. *A new approach of adaptive neural network control for nonlinear system* [D]. Qingdao: Qingdao University, 2009.)
- [12] 魏熙乐. 非线性系统自适应复合控制的研究 [D]. 天津: 天津大学, 2007.
(WEI Xile. *The research on adaptive composite control for nonlinear system* [D]. Tianjin: Tianjin University, 2007.)
- [13] 李靖. 几类非线性系统的自适应Backstepping神经网络控制 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2009.
(LI Jing. *Adaptive backstepping neural network control for several classes of nonlinear systems* [D]. Xi'an: Xi'an University of Electronic Science and Technology, 2009.)
- [14] 陈为胜. 非线性系统智能Backstepping控制与分析 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2007.
(CHEN Weisheng. *Intelligent backstepping control and analysis for nonlinear systems* [D]. Xi'an: Xi'an University of Electronic Science and Technology, 2007.)
- [15] 林永屹. 基于Backstepping的船舶航向非线性控制方法的研究 [D]. 大连: 大连海事大学, 2007.
(LIN Yongyi. *Study of ship course nonlinear control based on backstepping* [D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2007.)
- [16] LI J H, LEE P M. Design of an adaptive nonlinear controller for depth control of an autonomous underwater vehicle [J]. *Ocean Engineering*, 2005, 32 (17/18): 2165 – 2181.
- [17] HOVAKIMYAN N, NARDI F, CALISE A, et al. Adaptive output feedback control of uncertain nonlinear systems using single-hidden-layer neural networks [J]. *IEEE Transactions on Neural Networks*, 2002, 13(6): 1420 – 1431.
- [18] KUMAR R, GANGULI R, OMKAR S N. Rotorcraft parameter estimation using radial basis function neural network [J]. *Applied Mathematics and Computation*, 2010, 216 (2): 584 – 597.
- [19] 尹建川. 径向基函数神经网络及其在船舶运动控制中的应用研究 [D]. 大连: 大连海事大学, 2007.
(YIN Jianchuan. *Study on the radial basis function networks and its application to ship motion control* [D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2007.)
- [20] 蒋新松, 封锡盛, 王棣棠. 水下机器人 [M]. 辽宁: 辽宁科学技术出版社, 2002: 244 – 303.
(JIANG Xinsong, FENG Xisheng, WANG Litang. *Unmanned Underwater Vehicles* [M]. Liaoning: Liaoning Science and Technology Press, 2000: 244 – 303.)

作者简介:

张利军 (1973–), 男, 教授, 博士生导师, 目前研究方向为非线性系统控制技术, E-mail: zhanglj@hrbeu.edu.cn;

齐雪 (1981–), 女, 博士研究生, 目前研究方向为水下机器人控制技术, E-mail: qixuesnow@163.com;

赵杰梅 (1983–), 女, 博士研究生, 目前研究方向为离散非线性系统的控制设计, E-mail: zhaojiemei500@163.com;

庞永杰 (1973–), 男, 教授, 博士生导师, 目前研究方向为水下机器人设计与控制技术, E-mail: 550967791@qq.com.