

文章编号: 1673-3193(2024)06-0843-09

基于RBF神经网络PID的UUV轨迹跟踪控制

王景楠, 薛晨阳, 齐向东, 刘丹

(中北大学 仪器科学与动态测试教育部重点实验室, 山西 太原 030051)

摘要: 无人水下航行器(Unmanned Underwater Vehicle, UUV)在执行水下任务过程中需要沿预设路径稳定航行以保证专用设备正常工作, 其在环境复杂的深海中易受到多种来源的干扰。针对在复杂水域环境中UUV的路径跟踪问题, 本文将路径跟踪问题解耦为水平面航向控制和垂直面深度控制, 提出一种RBF神经网络优化的PID控制算法。首先建立了UUV水下运动学模型, 在传统PID控制器的基础上引入RBF神经网络结构, 给出RBF参数迭代公式对扰动进行补偿并实时优化PID参数。在Simulink中搭建了RBF神经网络PID仿真模型, 对无人水下航行器的轨迹跟踪控制进行了仿真, 水平面和垂直面上的误差对比仿真结果表明, 与传统PID控制算法相比, RBF神经网络PID控制器的超调量减小了15个百分点, 振荡幅值降低了10%, 克服未知扰动的能力更强。通过湖试试验验证了航迹跟踪控制器效果, 实验表明, UUV可在复杂水域实现较好的姿态控制效果及路径跟踪能力, 能够满足水下任务需求, 但在实际应用中应考虑UUV执行机构的时滞问题, 以提高控制器的适应性。

关键词: 无人水下航行器; 轨迹跟踪; 径向基函数神经网络; PID整定

中图分类号: TP13; TP183 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1673-3193.2024.06.013

引用格式: 王景楠, 薛晨阳, 齐向东, 等. 基于RBF神经网络PID的UUV轨迹跟踪控制[J]. 中北大学学报(自然科学版), 2024, 45(6): 843-851.

WANG Jinnan, XUE Chenyang, QI Xiangdong, et al. Research on UUV trajectory tracking control based on RBF neural network PID[J]. Journal of North University of China(Natural Science Edition), 2024, 45(6): 843-851.

Research on UUV Trajectory Tracking Control Based on RBF Neural Network PID

WANG Jinnan, XUE Chenyang, QI Xiangdong, LIU Dan

(Key Laboratory of Instrumentation Science and Dynamic Measurement(North University of China),
Ministry of Education, Taiyuan 030051, China)

Abstract: In the process of performing underwater tasks, unmanned underwater vehicle (UUV) need to sail stably along the preset path to ensure the normal operation of special equipment, but they are susceptible to interference from multiple sources in the deep sea with complex environment. In order to solve the path tracing problem of UUV in complex water environment, this paper decoupled the path tracing problem into horizontal plane heading control and vertical plane depth control, and proposed a PID control algorithm optimized by RBF neural network. Firstly, the underwater kinematics model of UUV was established, the RBF neural network structure was introduced on the basis of the traditional PID control-

收稿日期: 2024-01-08

基金项目: 山西省科技创新人才专项资助(202304051001030)

作者简介: 王景楠(1998-), 男, 硕士生, 主要从事水下无人潜航器自主控制的研究。

通信作者: 薛晨阳(1971-), 男, 教授, 博士, 主要从事海洋环境参量传感器与海洋观测仪器的研究。E-mail: xuechenyang@nuc.edu.cn。

ler, and the iterative formula of RBF parameters was given to compensate for the disturbance and optimize the PID parameters in real time. In order to simulate the trajectory tracking and controlling of UUV, the simulation model of RBF neural network PID was built in Simlink. By comparing the errors in the horizontal plane and the vertical plane, the simulation results show that compared with the traditional PID control algorithm, the overshoot of the RBF neural network PID controller is reduced by 15 percentage points, the oscillation amplitude is reduced by 10%, and the ability to overcome unknown disturbances is stronger. Finally, the lake test is designed to verify the effect of the tracking controller, and the experiments show that the UUV can achieve better attitude control effect and path tracking ability in complex waters, and meet the requirements of underwater tasks. However, the time lag of the UUV actuator should be considered in practical application to improve the adaptability of the controller.

Key words: UUV; trajectory tracking; radial basis function neural network; PID tuning

0 引言

无人水下航行器(UUV)轨迹跟踪控制方法涵盖了PID控制、模型预测控制、LQR控制等多种方法。郭小溪等^[1]提出了一种基于遗传算法整定的PID控制器,通过遗传算法优化PID的3个参数,采用惩罚参数抑制超调。Zhang等^[2]用动态定位线策略和自调模糊PID方法,对UUV的控制进行了研究,并采用自调模糊PID理论设计了UUV四自由度控制器。Wan等^[3]提出一种分数阶PID策略,它是传统整数阶PID控制器的一种更广义的形式,保持了其简单性,并利用了广义导数和积分控制动作。Mohamed等^[4-5]设计了两个独立的简单控制器,LQR控制器用于稳定车辆深度和侧倾/俯仰姿态,自整定PID控制器用于浪涌速度和偏航姿态的轨迹跟踪,将LQR/自适应PID控制架构相结合,以最小的计算工作量很好地处理了噪声和不确定性。Liu等^[6]设计了一种基于扰动观测器(DO)的可变积分PID控制器,控制器设计简单易行,控制参数选择方便,但收敛速度较慢,并且控制任务单一,不能快速跟踪复杂的期望轨迹。Barbalata等^[7-9]引入级联自适应动力学模型(AdaptDM)控制律来补偿环境扰动,控制器基于级联结构,架构的增益是根据控制器组件之间的交互来估计的。梅新华等^[10]利用反向传播(BP)神经网络来自主优化定深航行,但同样存在收敛速度较慢的问题。孙栋等^[11]提出一种基于准滑动模态的滑膜变结构,控制精度较高响应快但存在一定的抖振。本文针对水下复杂环境UUV的路径追踪问题,设计了一种RBF神经网络PID控制器,引入调节因子优化RBF的初始参数,通过

RBF的在线辨识得到梯度信息,根据梯度信息实时优化PID参数。最后通过Matlab进行仿真,并进行了湖试试验,仿真和试验结果表明,RBF神经网络PID控制器在姿态响应速度及航迹跟踪精度上均优于传统PID控制器,稳态性能更优。

1 UUV运动学模型的建立

1.1 坐标系的建立与转化

AUV的运动主要是在地球坐标系和载体坐标系下进行分析^[12-13]。首先建立大地坐标系,可以在空间任取一点为原点,用 E 表示, ξ 轴与地面保持水平,将 ξ 轴顺时针旋转 90° 则得到 η 轴,即 η 轴与 ξ 轴相互垂直,还有 ζ 轴垂直于另外两轴,由原点指向 ζ 轴为正方向即UUV纵向运动的正方向。载体坐标系的建立一般是将UUV自身的质心标记为原点 O , x 轴指向UUV头部, y 轴指向UUV右边, z 轴指向 xy 平面且垂直向下为正具体如图1所示。

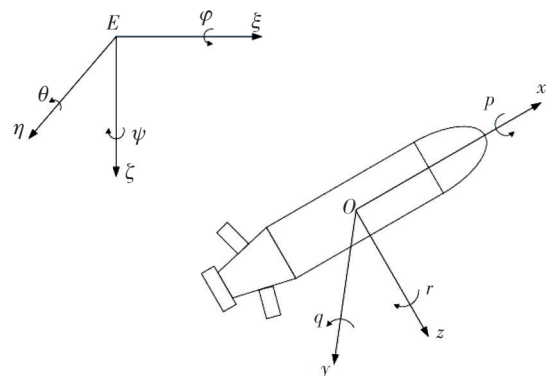


图1 大地坐标系与载体坐标系
Fig. 1 Geodetic and carrier coordinate

1.2 UUV数学模型的建立

UUV在水下的运动可分为自身的姿态运动

和大地坐标系的空间运动, 将 UUV 在运动坐标系下的线速度记为 u, v, w , 转换到大地坐标系下记

$$\begin{bmatrix} \xi \\ \eta \\ \zeta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \psi \cos \theta & \cos \psi \sin \theta \sin \varphi - \sin \psi \cos \varphi & \cos \psi \sin \theta \cos \varphi + \sin \psi \sin \varphi \\ \sin \psi \cos \theta & \sin \psi \sin \theta \sin \varphi + \cos \psi \cos \varphi & \sin \psi \sin \theta \cos \varphi - \cos \psi \sin \varphi \\ -\sin \theta & & \cos \theta \cos \varphi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}, \quad (1)$$

将 UUV 的本体质量记为 m ; x, y, z 分别为 UUV 的重心在 3 个坐标轴上的坐标; I_x, I_y, I_z 分别为 UUV 在 3 个坐标轴上的转动惯量; u, v, w 分别为 UUV 的速度在 3 个坐标轴上的分量; p, q 和 r 分别为 UUV 的角速度在 3 个坐标轴上的分量。以浮心作为运动坐标系的原点, 刚体六自由度空间运动方程为

$$\begin{cases} X = m [\dot{u} - vr + wq - x_G(q^2 + r^2) + y_G(pq - \dot{r}) + z_G(pr + \dot{q})], \\ Y = m [\dot{v} - wp + ur - y_G(r^2 + p^2) + y_G(qr - \dot{p}) + x_G(qp + \dot{r})], \\ Z = m [\dot{w} - uq + vp - z_G(p^2 + q^2) + x_G(rp - \dot{q}) + z_G(rq + \dot{p})], \\ K = I_x \dot{p} + (I_z - I_y)qr + m [y_G(\dot{w} + vp - uq) - z_G(\dot{v} + ur - wp)], \\ M = I_y \dot{q} + (I_x - I_z)rp + m [z_G(\dot{u} + wq - vr) - x_G(\dot{w} + vp - uq)], \\ N = I_z \dot{r} + (I_y - I_x)pq + m [x_G(\dot{v} + ur - wp) - y_G(\dot{u} + wq - vr)]. \end{cases} \quad (2)$$

1.3 水平面运动方程

由于水平面模型与 $O-xy$ 平面的运动、绕 Oz 轴的转动有关, 其中 $v_1 = [u \ v \ 0]^T$, $v_2 = [0 \ 0 \ r]^T$, 因此可得到水平面运动学方程

$$\begin{cases} \dot{\xi} = u \cos \psi - v \sin \psi, \\ \dot{\eta} = u \sin \psi + v \cos \psi, \\ \dot{\psi} = r, \end{cases} \quad (3)$$

式中: u, v, r 分别为 x, y, z 轴旋转的角速度; $\dot{\psi}$ 为转换到固定坐标系下角速度; $\dot{\xi}$ 和 $\dot{\eta}$ 分别为 u 和 v 转换到固定坐标系下线速度; ψ 为偏航角。

水平面动力学方程为

$$\begin{cases} (m - X_{\dot{u}})\dot{u} = (m - Y_{\dot{v}})vr + (X_u + X_{u|u}|u|)u + X, \\ (m - Y_{\dot{v}})\dot{v} = -(m - X_{\dot{u}})ur + (Y_v + Y_{v|v}|v|)v, \\ (I_z - N_{\dot{r}})\dot{r} = -(X_{\dot{u}} - Y_{\dot{v}})uw + (N_r + N_{r|r}|r|)r + N. \end{cases} \quad (4)$$

为 ξ, η, ζ , 三轴姿态角分别记为 φ, θ, ψ , 由固定坐标系转换为载体坐标系的转换公式为^[14-15]

1.4 垂直面运动方程

由于垂直面模型与在 $O-xz$ 平面的运动、绕 Oy 轴的转动有关, 其中 $v_1 = [u \ 0 \ w]^T$, $v_2 = [0 \ q \ 0]^T$, 因此, UUV 的垂直面运动学方程为

$$\begin{cases} \dot{\xi} = u \cos \theta - w \sin \theta, \\ \dot{\zeta} = -u \sin \theta + w \cos \theta, \\ \dot{\theta} = q, \end{cases} \quad (5)$$

式中: u, w, q 为绕 x 轴、 z 轴的线速度和绕 y 轴旋转的角速度; $\dot{\xi}, \dot{\zeta}$ 为转换到固定坐标系下的线速度和固定坐标系下的角速度; θ 为 UUV 本体运动过程中的俯仰角。

垂直面上的动力学方程为

$$\begin{cases} (m - X_{\dot{u}})\dot{u} = -(m - Z_{\dot{w}})uw + (X_u + X_{u|u}|u|)u - (W - B) \sin \theta + X, \\ (m - Z_{\dot{w}})\dot{w} = Z_q \dot{q} + (m - X_{\dot{u}})uw + (Z_w + Z_{w|w}|w|)w + (W - B) \cos \theta, \\ (I_y - M_{\dot{q}})\dot{q} = M_{\dot{w}}\dot{w} + (X_{\dot{u}} - Z_{\dot{w}})uw + (M_q + M_{q|q}|q|)q + Z_B B \sin \theta + M. \end{cases} \quad (6)$$

2 RBF 神经网络 PID 控制器设计

2.1 RBF 神经网络模型原理

径向基函数(RBF)神经网络是在 20 世纪 80 年代末提出的一种神经网络, 它是具有单隐层的三层前馈网络^[16]。它模拟了人脑中局部调整、相互覆盖接受域(或称感受域, Receptive Field)的神经网络结构, 是一种局部逼近网络。RBF 神经网络一般由三层结构所组成, 分别为输入层、隐含层和输出层^[17-19]。

RBF 神经网络结构每一层的作用各不相同。输入层起着将神经网络与外部信息连接起来的作用; 隐含层起着非线性变换的作用, 即将输入层变换到隐含层, 一般情况下维数较高; 输出层起着为激活信息提供响应的作用, 其一般是线性的。

本文研究的 RBF 神经网络是由 n 个输入、单隐层和 1 个输出构成的一种三层前馈网络^[19]。由于所

控制目标变量多、非线性的缺点导致常规的调节方式不能满足非线性拟合,而神经网络可以解决该问题,其不仅能够以各种精度满足非线性函数,而且能够辨别所控制的目标,获得简化的控制模型,因此,一般采用神经网络来进行优化,其中RBF神经网络结构对非线性函数有着不错的拟合效果,并且全局最优。在利用神经网络结构在线调整PID参数时,首先要得到相应的Jacobian矩阵。

RBF神经网络结构包含 n 个输入节点、 m 个隐含节点以及1个输出节点,其三层网络结构如图2所示。

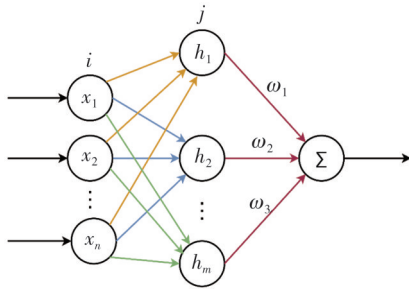


图2 RBF神经网络结构图

Fig.2 RBF neural network structure diagram

在图2的RBF神经网络结构中,网络的输入变量 $X=[x_1, x_2, \dots, x_n]^T$;网络径向基向量 $H=[h_1, h_2, \dots, h_m]^T$,其中, h_j 为径向基函数,用高斯函数表示为

$$h_j = \exp\left(-\frac{\|X - B_j\|^2}{2b_j^2}\right) \quad (j=1, 2, \dots, m), \quad (7)$$

式中: C_j 为网络中第 j 个节点的中心矢量, $C_j=[c_{j1}, c_{j2}, \dots, c_{jn}]^T$; b_j 为节点的基宽参数,其值大于零, $b_j=[b_1, b_2, \dots, b_m]^T$ 。

RBF神经网络线性组合的输出表示为

$$y_m(k) = \omega_1 h_1 + \omega_2 h_2 + \dots + \omega_m h_m. \quad (8)$$

RBF神经网络辨识器的性能指标函数为

$$J_k = 0.5 [y(k) - y_m(k)]^2. \quad (9)$$

为最大限度地减小RBF神经网络的预期结果和真实结果之间的偏差,给出以下迭代式:

输出权重公式为

$$\omega_j = \omega_j(k-1) + \eta_{\text{rbf}} [y(k) - y_m(k)] h_j + \alpha [\omega_j(k-1) - \omega_j(k-2)], \quad (10)$$

式中: η_{rbf} 为学习速率; α 为惯性系数。

节点基宽参数公式为

$$\Delta b_j = \eta_{\text{rbf}} [y(k) - y_m(k)] \omega_j h_j \frac{\|x - c_j\|^2}{b_j^3}, \quad (11)$$

$$b_j = b_j(k-1) + \eta_{\text{rbf}} \Delta b_j + \alpha [b_j(k-1) - b_j(k-2)]. \quad (12)$$

节点中心公式为

$$\Delta C_{ji} = [y(k) - y_m(k)] \omega_j \frac{x_j - C_{ji}}{b_j^2}, \quad (13)$$

$$C_{ji} = C_{ji}(k-1) + \eta_{\text{rbf}} \Delta C_{ji} + \alpha [C_j(k-1) - C_j(k-2)]. \quad (14)$$

Jacobian矩阵反映的是输出对输入的灵敏度信息,其公式为

$$\frac{\partial y(k)}{\partial u(k)} \approx \frac{\partial y_m(k)}{\partial u(k)} = \sum_{j=1}^m \frac{\partial \omega_j h_j}{\partial u(k)} = \sum_{j=1}^m \omega_j h_j \frac{C_{ji} - x_1}{b_j^2}. \quad (15)$$

2.2 RBF-PID控制器设计

本文采用的RBF神经网络结合了PID控制,并通过RBF神经网络对传统PID控制器进行在线调整参数,从而能够实现自适应调整PID控制器参数的要求。

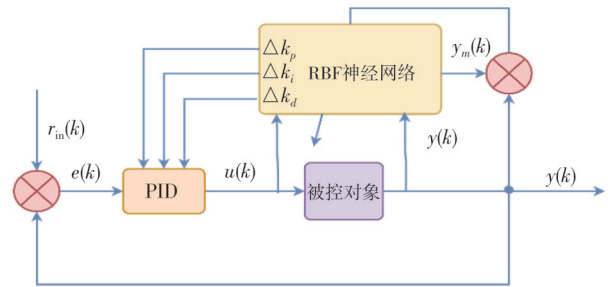


图3 RBF神经网络控制结构示意图

Fig.3 RBF neural network structure diagram

由图3可以看出,RBF神经网络控制器是由两个部分构成的,整个控制流程首先是通过PID控制器来搭建闭环系统,然后对所控制的对象进行直接调整参数,最后系统性能的优劣由RBF神经网络参数决定,即实时调整参数优化系统性能。RBF神经网络控制器通过和从系统误差进行比较,再对自身权重系数进行修正,然后对PID参数进行优化调整,输入到PID控制器,从而实现对系统PID控制器的在线调整,使网络系统性能得到提高。

图3中, $r_{in}(k)$ 为UUV输入系统的各变量,如俯仰角、速度等; $y_m(k)$ 为RBF神经网络控制器辨识后的输出功率; Δk_p 、 Δk_i 和 Δk_d 为RBF神经网络实时调整参数的增量。

一般情况下,RBF神经网络PID控制器采用的是增量式PID控制器,其控制误差为

$$e_k = r_{in}(k) - y(k) \tag{16}$$

PID 控制器控制输出为

$$u_k = k_p e(k) + k_i \sum_{j=0}^k e(j) + k_d [e(k) - e(k-1)] \tag{17}$$

RBF 神经网络增量式 PID 控制算法为

$$\Delta u(k) = k_p [e(k) - e(k-1)] + k_i e(k) + k_d [e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)] \tag{18}$$

系统 PID 的输入为

$$\begin{cases} x(1) = e(k) - e(k-1), \\ x(2) = e(k), \\ x(3) = e(k) - 2e(k-1) + e(k-2). \end{cases} \tag{19}$$

RBF 神经网络的性能指标函数为

$$E(k) = 0.5e(k)^2 \tag{20}$$

应用 RBF 神经网络对 PID 控制器的 3 个参数进行整定, 即 Δk_p 、 Δk_i 和 Δk_d 采用梯度下降法调整为

$$\begin{aligned} \Delta k_p = -\eta_p \frac{\partial E}{\partial k_p} = \eta_p \frac{\partial E}{\partial y} \frac{\partial y}{\partial u} \frac{\partial u}{\partial k_p} = \\ -\eta_p e(k) \frac{\partial y}{\partial u} x, \end{aligned} \tag{21}$$

$$\begin{aligned} \Delta k_i = -\eta_i \frac{\partial E}{\partial k_i} = \eta_i \frac{\partial E}{\partial y} \frac{\partial y}{\partial u} \frac{\partial u}{\partial k_i} = \\ -\eta_i e(k) \frac{\partial y}{\partial u} x, \end{aligned} \tag{22}$$

$$\begin{aligned} \Delta k_d = -\eta_d \frac{\partial E}{\partial k_d} = \eta_d \frac{\partial E}{\partial y} \frac{\partial y}{\partial u} \frac{\partial u}{\partial k_d} = \\ -\eta_d e(k) \frac{\partial y}{\partial u} x. \end{aligned} \tag{23}$$

每次迭代的新搜索方向与负梯度方向有关,

$\frac{\partial y}{\partial u}$ 由前文得到, 从而完成 Δk_p 、 Δk_i 和 Δk_d 在线调整。通过上述分析得出 RBF 神经网络对 PID 控制器进行整定的基本思想是采用一种基于自适应调节的方法, 对 PID 参数进行了实时、在线的调节, 从而对系统的特性进行最大程度的优化, 其算法的 PID 参数向量公式为

$$\begin{cases} k_p(k) = \Delta k_p(k) + k_p(k-1), \\ k_i(k) = \Delta k_i(k) + k_i(k-1), \\ k_d(k) = \Delta k_d(k) + k_d(k-1). \end{cases} \tag{24}$$

3 RBF 神经网络 PID 仿真

前文对 RBF 神经网络模型、算法和 RBF 神经网络 PID 控制器作了详细的分析, 下面将 RBF 神经网络运用到传统 PID 模型中。其具体思路如下: 首先对 UUV 航行路径进行设定, 即控制 x 、 y 、 z 轴方向的变化来实现航迹追踪, 同时 RBF 控制器根据扰动变化对参数进行在线优化, 达到稳定的效果。使用 Simulink 搭建系统仿真平台, 以 RS-762 型 UUV 数学模型为控制对象, 对传统 PID 控制器和改进后的 RBF 神经网络 PID 控制器的轨迹跟踪进行仿真。PID 参数初始设定为 $K_p=0.5$ 、 $K_i=0.02$ 、 $K_d=0.28$; PID 参数学习速率为 $K_{p,l}=0.5$ 、 $K_{i,l}=0.02$ 、 $K_{d,l}=0.28$; RBF 参数设置为学习速率 $l_r=0.1$ 、动量因子 $\beta=0.05$ 、采样周期 $t_s=0.01$ s, 水流扰动 $w=5 \sin(0.01t)$ 。

RBF 神经网络 PID 控制器的仿真模型结构如图 4 所示。

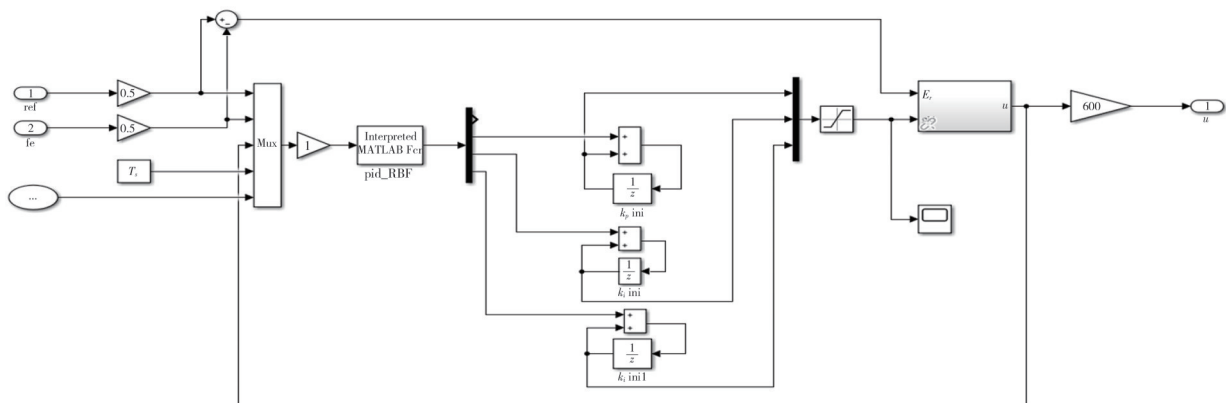


图 4 RBF 神经网络 PID 控制器仿真模型

Fig. 4 Simulation Model of RBF neural network PID controller

RBF 神经网络 PID 控制器仿真模型结构搭建完成后, 可以得出 k_p 、 k_i 和 k_d 的变化, 具体波形见图 5。由图 5 可以看出, 在加入扰动的情况下, 控

制器可以快速响应且 PID 参数可在 1 s 内收敛, 保证了控制效果的最优性。下面对比 RBF 神经网络 PID 和传统 PID 模型下跟踪设定路径时 x 、 y 和 z

方向位置的误差,结果如图6~8所示。

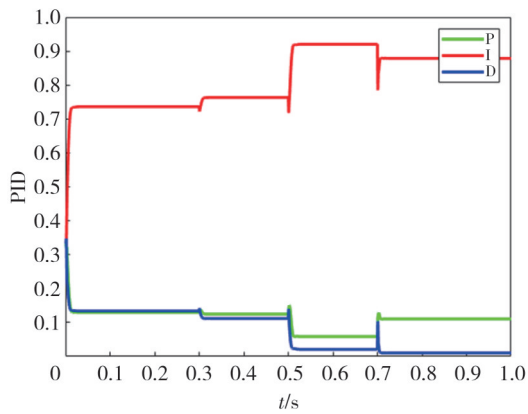
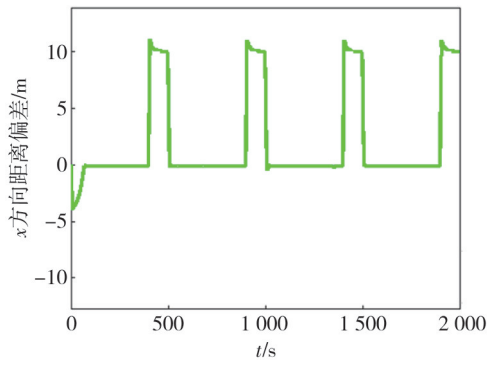
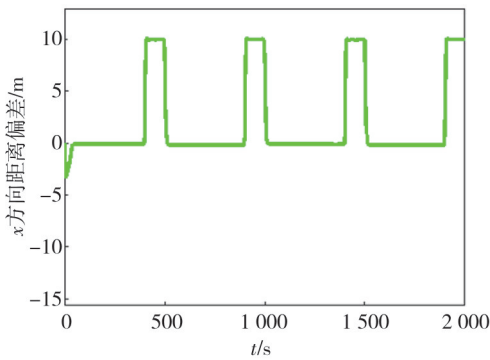


图5 PID参数变化

Fig. 5 PID parameter variation



(a) 传统PID



(b) RBF神经网络PID

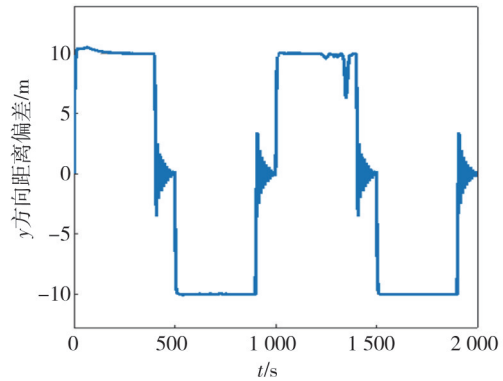
图6 x 方向上的位置误差

Fig. 6 Position error in the x direction

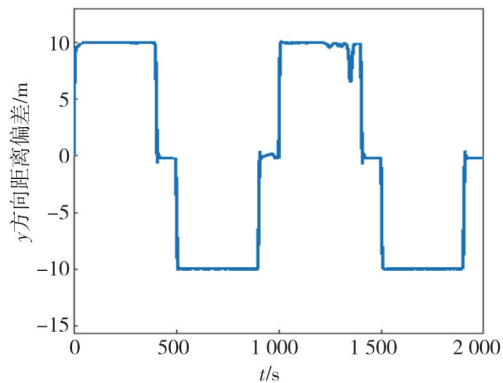
由图6可以看出,在 x 方向上,在阶跃输入下,RBF神经网络PID的误差范围为 $-3.34\sim 10.095$ m,而传统PID的误差范围为 $-3.33\sim 11.102$ m,拐点处超调量为20%,RBF神经网络PID的误差在拐点处的超调量仅为5%,超调减小约15个百分点,控制效果更优,响应曲线更加平滑。

图7给出了 y 方向上的位置误差,RBF神经网络PID的误差范围大致为 ± 10 m,振荡幅值为

0.5;PID的误差范围为 $-10.027\sim 10.515$ m,振荡幅值为2 m;RBF神经网络PID控制器在 y 方向上抖振小,系统鲁棒性强。



(a) 传统PID

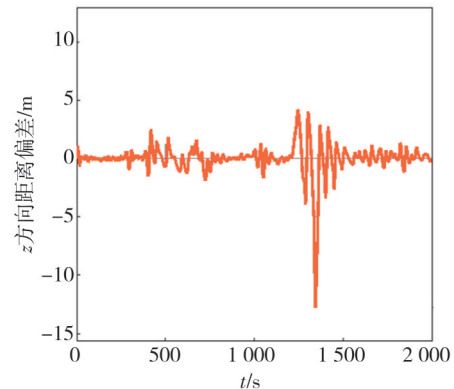


(b) RBF神经网络PID

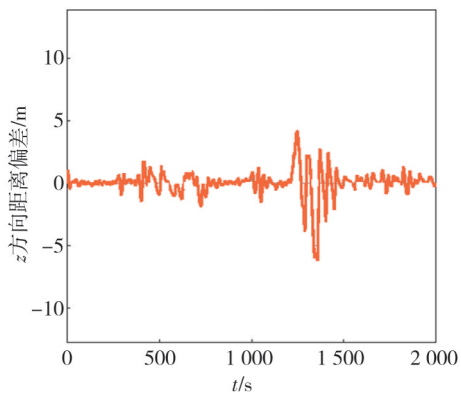
图7 y 方向上的位置误差

Fig. 7 Position error in the y direction

由图8可以看出,在 z 方向上,RBF神经网络PID的稳态误差范围为 $-3.613\sim 3.213$ m,传统PID的稳态误差范围为 $-6.401\sim 4.447$ m;在第1200 s处引入水流干扰时,传统PID的扰动为 $-12.48\sim 4.73$ m,RBF神经网络PID的扰动为 $-7.28\sim 4.61$ m。因此,RBF神经网络PID的抗扰能力更优,系统稳定性强。



(a) 传统PID



(b) RBF神经网络PID

图 8 z 方向上的位置误差

Fig. 8 Position error in z direction

综上所述与传统 PID 算法相比, RBF 神经网络 PID 控制器响应速度快、超调小、鲁棒性强, 控制能力更优。

4 湖试试验及结果分析

湖试在千岛湖进行, UUV 为 RS-762 型, 千岛湖水质清澈且湖底平坦, 水深范围为 5~60 m, 设计 UUV 的航速为 6 kn, 下潜深度为 15 m, 设置入水点经纬度坐标为 A, 出水返航点经纬度坐标为 B, 任务耗时 15 min。试验数据表如表 1 所示。

表 1 试验数据

Tab. 1 Test data

路径点	俯仰角/(°)	航向角/(°)	横滚角/(°)	经度/(°)	纬度/(°)	深度/m
A	15.97	175.98	0.29	118.375 028	29.181311	0.75
B	-4.27	171.69	0.01	118.375 182	29.177635	14.99
C	-4.5	81.85	0.74	118.375 945	29.158239	14.65
D	-3.34	-3.34	0.45	118.388 921	29.159312	14.68
E	-0.33	-101.20	0.70	118.389 535	29.178151	15.08

图 9 为 UUV 设定路径曲线, UUV 由起始点出发, 自主航行下潜至约 15 m 深的点 B, 依次经过点 C, D, E, 返回至点 B, 并上浮出水。

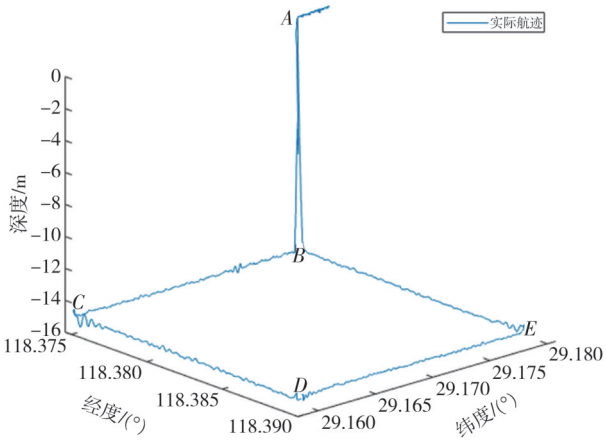


图 9 设定的路径曲线

Fig. 9 The set path curve

图 10 和图 11 分别为 UUV 航行过程中, 俯仰角、航向角和横滚角的设定值与实际值变化的曲线。

由图 10 和图 11 可以看出, UUV 的姿态控制精度良好、跟随响应速度快, 且航迹追踪能力较好, 在湖中水流扰动下, 转向时会产生一定深度上的波动, 但平均误差在 3° 以内, 可以达到实际工程应用的要求。

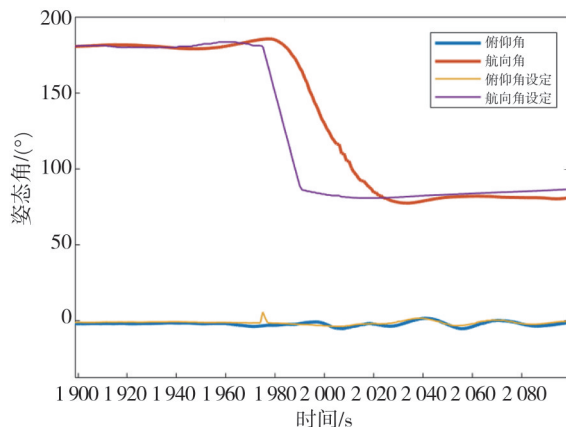


图 10 实际航行试验姿态 1

Fig. 10 Actual navigation test attitude 1

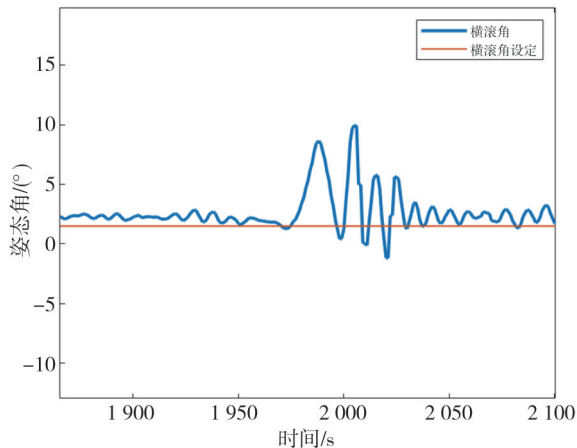


图 11 实际航行试验姿态 2

Fig. 11 Actual navigation test attitude 2

5 结 论

本文针对UUV航迹追踪问题提出了基于径向基函数(RBF)神经网络的PID控制算法,用于解决传统PID控制器参数调整的问题。首先,根据UUV运动学模型,给出了UUV的垂直面运动方程和水平面运动方程,接着采用RBF神经网络PID控制器对扰动下UUV的航迹跟踪进行仿真,结果表明,与传统PID控制算法相比,RBF神经网络PID控制算法响应速度快、超调小、系统振荡小,控制效果更优,能够更好地处理UUV路径跟踪中的非线性特性。同时,设计了湖上试验,结果表明,RBF神经网络PID控制器在复杂水域环境中拥有较好的姿态控制性能及航迹追踪效果,但在实际应用中,UUV执行机构可能存在时滞问题。因此,未来将研究输入存在时滞情况下的UUV姿态控制,以提高控制器的适用性。

参考文献:

- [1] 郭小溪,李刚,闫伟杰. 基于遗传算法整定PID的自主潜器深度控制[J]. 长春理工大学学报(自然科学版), 2010, 33(3): 37-39.
GUO Xiaoxi, LI Gang, Yan Weijie. PID controller based on GA for AUV depth control [J]. Journal of Changchun University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2010, 33(3): 37-39. (in Chinese)
- [2] ZHANG W, WANG H, BIAN X, et al. The application of self-tuning fuzzy PID control method to recovering AUV [C]//2012 Oceans, Hampton Roads, VA, USA, 2012: 1-5.
- [3] WAN J, HE B, WANG D, et al. Fractional-order pid motion control for auv using cloud-model-based quantum genetic algorithm [J]. IEEE Access, 2019 (7): 124828-124843.
- [4] MOHAMED S A, ABDELGELIL O K, ELHOUT O A, et al. Design of a highly-efficient embedded controller for AUV stabilization and trajectory tracking using minimal computational resources [C]//2021 3rd Novel Intelligent and Leading Emerging Sciences Conference (NILES), 2021: 155-160.
- [5] BAYUSARI A M, ALFARINO H, HIKMARIKA Z, et al. Position control system of autonomous underwater vehicle using PID controller [C]//2021 8th International Conference on Electrical Engineering, Computer Science and Informatics (EECSI), 2021: 139-143.
- [6] LIU H, LIU F W, SHI H J. Design of an AUV Heading attitude controller based on a disturbance observer [C]//2020 International Conference on Electrical Engineering and Control Technologies (CEECT), 2020: 1-5.
- [7] BARBALATA C, ISCAR E, JOHNSON-ROBERSON M. Experimental evaluation of depth controllers for a small-size AUV [C]//2018 IEEE/OES Autonomous Underwater Vehicle Workshop, 2018: 1-6.
- [8] WAN J, LIU W, DING X, et al. Fractional order pid motion control based on seeker optimization algorithm for AUV [C]//OCEANS 2018 MTS/IEEE, 2018: 1-4.
- [9] YU C, XIANG X, ZUO M, et al. Underwater cable tracking control of under-actuated AUV [C]//2016 IEEE/OES Autonomous Underwater Vehicles (AUV), 2016: 324-329.
- [10] 梅新华,周祥龙. 基于BP网络的双舵型AUV深度控制算法应用[J]. 水雷战与舰船防护, 2017, 25(3): 79-82.
MEI Xinhua, ZHOU Xianglong. Application of depth control algorithm for double-rudder type AUV based on BP network [J]. Mine Warfare & Ship Self-Defence, 2017, 25(3): 79-82. (in Chinese)
- [11] 孙栋,汤奇荣,李江,等. 基于滑模控制的欠驱动微型AUV轨迹跟踪控制[J]. 舰船科学技术, 2023, 45(24): 97-101.
SUN Dong, TANG Qirong, LI Jiang, et al. Trajectory tracking control of underactuated micro-AUV based on sliding mode control [J]. Ship Science and Technology, 2023, 45(24): 97-101. (in Chinese)
- [12] 綦志刚,李冰,苏毅,等. 水下航行器下潜时的深度控制仿真研究[J]. 舰船科学技术, 2023, 45(8): 90-96.
QI Zhigang, LI Bing, SU Yi, et al. Research on depth control of underwater robot and its simulation when diving [J]. Ship Science and Technology, 2023, 45(8): 90-96. (in Chinese)
- [13] 吴子明,杨柯,唐杨周,等. 基于反步滑模控制的欠驱动AUV定深运动研究[J]. 舰船科学技术, 2023, 45(1): 114-119.
WU Ziming, YANG Ke, TANG Yangzhou, et al. Research on underactuated AUV depth motion based on backstepping sliding mode control [J]. Ship Science and Technology, 2023, 45(1): 114-119. (in Chinese)
- [14] 陈增强,宋莞平,孙明玮,等. 自主式水下航行器自抗扰控制[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2021, 42(11): 1625-1631.

- CHEN Zengqiang, SONG Wanping, SUN Mingwei, et al. Active disturbance rejection control of autonomous underwater vehicles [J]. Journal of Harbin Engineering University, 2021, 42(11): 1625-1631. (in Chinese)
- [15] 张瀚文, 王俊雄. 基于自适应反步滑模的 AUV 推进器容错控制[J]. 水下无人系统学报, 2021, 29(4): 420-427.
- ZHANG Hanwen, WANG Junxiong. Fault-tolerant control of AUV thruster based on adaptive backstepping sliding mode [J]. Journal of Unmanned Undersea Systems, 2021, 29(4): 420-427. (in Chinese)
- [16] 杜度. 基于 RBF 神经网络参数自整定的 AUV 深度控制[J]. 水下无人系统学报, 2019, 27(3): 284-289.
- DU Du. Parameters self-tuning for depth control of AUV based on RBF neural network [J]. Journal of Unmanned Undersea Systems, 2019, 27(3): 284-289. (in Chinese)
- [17] 路继军, 马松龄, 贾昭. RSSI 融合 RBF 改善测距精度的研究[J]. 机床与液压, 2014, 42(5): 63-65.
- LU Jijun, MA Songling, JIA Zhao. Study on ranging accuracy improvement based on RSSI fusing RBF [J]. Machine Tool & Hydraulics, 2014, 42(5): 63-65. (in Chinese)
- [18] JIANG R Y. Using the integrated neural network of radial basis function (RBF) via optimization algorithms to estimate pile settlement range [J]. Journal of Intelligent & Fuzzy Systems, 2022, 43(5): 6683-6695.
- [19] 黄俊梅, 薛永平. 无模型控制器在风电变桨控制系统中的应用 [J]. 国外电子测量技术, 2017, 36(1): 104-107.
- HUANG Junmei, XUE Yongping. Application of model-free controller in wind power pitch control systems [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2017, 36(1): 104-107. (in Chinese)