

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2021.11

基于参数自整定PID的水下滑翔机航向控制方法

陈弈搏¹, 张润锋¹, 杨绍琼^{1,2,3}, 张连洪^{1,2,3}, 魏鹏¹

(1. 天津大学机械工程学院 机构理论与装备设计教育部重点实验室, 天津 300350;

2. 天津大学青岛海洋技术研究院, 山东 青岛 266237;

3. 青岛海洋科学与技术试点国家实验室 海洋观测与探测联合实验室, 山东 青岛 266237)

摘要: 水下滑翔机航向控制的精度对海洋目标探测具有重要意义。现有的水下滑翔机航向控制技术以比例-积分-微分(proportional-integral-derivative, PID)为主。为保证水下滑翔机按照预期轨迹运动, PID控制器参数需要反复设定和调整, 很难达到快速准确的控制效果。针对该问题, 提出了一种基于径向基函数(radial basis function, RBF)神经网络的参数自整定PID航向控制方法。首先建立水下滑翔机水平面内运动模型, 然后构建了RBF神经网络结构, 并通过梯度下降法给出了神经网络参数以及PID参数的迭代公式。仿真结果表明, 该方法相较于常规PID控制方法能在较短的时间内收敛, 控制系统精度较高, 同时控制器参数能够快速自整定。为今后的水下滑翔机航向控制器提供了设计参考。

关键词: 水下滑翔机; 航向控制; 自整定PID; 径向基神经网络

中图分类号:

文献标志码: A

文章编号: 1000-582X(2022)08-026-08

A steering control method of underwater glider based on parameter self-tuning PID

CHEN Yibo¹, ZHANG Runfeng¹, YANG Shaoqiong^{1,2,3}, ZHANG Lianhong^{1,2,3}, WEI Peng¹

(1. Key Laboratory of Mechanism Theory and Equipment Design of Ministry of Education,
School of Mechanical Engineering, Tianjin University, Tianjin 300350, P. R. China;

2. Qingdao Institute for Ocean Engineering, Tianjin University, Qingdao, Shandong 266237, P. R. China;

3. The Joint Laboratory of Ocean Observing and Detection, Pilot National Laboratory for
Marine Science and Technology, Qingdao, Shandong 266237, P. R. China)

Abstract: The accuracy of steering control of an underwater glider is very important for ocean target detection. Current steering control of the underwater glider (UG) mainly uses proportional-integral-derivative (PID) controller. However, to ensure that the underwater glider moves in accordance, PID

收稿日期: 2020-10-14 **网络出版日期:** 2021-04-30

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2016YFC0301101); 国家自然科学基金青年科学基金资助项目(11902219); 天津市自然科学基金资助项目(18JCJQJC46400)。

Supported by National Key R&D Program of China (2016YFC0301101), National Natural Science Foundation of China (11902219) and Natural Science Foundation of Tianjin City (18JCJQJC46400).

作者简介: 陈弈搏(1995—), 男, 天津大学硕士研究生, 主要从事水下滑翔机航向控制研究, (E-mail) 272638939@qq.com。

通信作者: 杨绍琼, 男, 天津大学副教授, 主要从事自主水下航行器水动力学外形设计及减阻技术、深海智能装备组网技术、高速水下航行器技术等方面的研究, (E-mail) shaoqiong@tju.edu.cn。

controller parameters need to be repeatedly set and adjusted, which makes it difficult to meet the requirements for fast and accurate control. To solve the problem, a parametric self-tuning PID control method based on the radial basis function (RBF) neural network was proposed. Firstly, the dynamic model of the underwater glider in the horizontal plane was established. Then, the RBF neural network structure was constructed, and the iterative formulas of neural network parameters and PID parameters were given by the gradient descent method. Simulation results show that compared with the conventional PID controller, this controller has shorter setting time, higher precision, and the parameters of the controller can be quickly self-tuned. It provides a reference for the design of the underwater glider steering controller in the future.

Keywords: underwater glider (UG); steering control; self-tuning PID; radial basis function (RBF)

水下滑翔机作为一种新型的水下移动观测平台,其具有功耗低、航程长、续航时间长及隐蔽性高的特点,可进行长时序、大范围的海洋观探测,是建设“透明海洋”工程的有效工具之一^[1-4]。在无人值守的情况下提高水下滑翔机长时序观探测任务的能力是研究人员现阶段面临的主要挑战之一^[5]。水下滑翔机动力学模型的非线性特点与海洋环境的复杂多变,导致其较难按照预设航向进行运动。因此,设计一种鲁棒的航向控制策略对于水下滑翔机的轨迹精准控制具有重要意义。

在水下滑翔机航向控制研究方面,PID(proportional-integral-derivative)控制器是现阶段水下滑翔机航向控制中应用最广泛的方法^[6]。PID是基于线性控制的控制器,而水下滑翔机的运动具有非线性、时变等特点,PID控制有时无法满足快速准确的要求。Elmokadem等^[7]采用滑模控制(sliding-mode control, SMC)进行了水下轨迹跟踪控制研究,并进行了仿真实验。滑模控制具有较好的鲁棒性,具有快速响应、对参数和扰动不敏感等特点,适合水下滑翔机控制,然而抖振现象为其显著缺点。Tchilian等^[8]将水下滑翔机的非线性模型线性化后,实现了基于线性二次型调节器(linear quadratic regulator, LQR)的控制,并将该控制策略应用于水下滑翔机路径跟踪控制上,但该方法在非正常运动控制上难以实现;Lyu等^[9]提出了一种基于神经网络的水下滑翔机的平衡参数的计算方法,并将其应用于水下滑翔机航向控制上,研究结果表明其具有良好的非线性处理和强大的自学习能力,但反向误差传播神经网络收敛时间过长,实际应用效果不理想。

为了解决控制器参数设定过程中可能存在反复调整以及参数非最优的情况,笔者利用径向基函数(radial basis function, RBF)神经网络可以快速逼近任意非线性函数的性质^[10],首先设计了神经网络的识别函数,然后利用梯度下降法对PID控制器参数进行自整定,使控制器参数能够快速调整,同时保证了控制器的性能,确保了水下滑翔机可在较短时间内调整到预定航向。

1 水下滑翔机动力学建模

水下滑翔机由自身的浮力变化提供驱动力,通过内部的姿态调节单元来改变自身姿态,并通过机翼实现滑翔运动^[11]。天津大学“海燕-II”水下滑翔机由壳体单元、浮力调节单元、姿态调节单元、通讯单元和传感器单元等组成。为了方便分析,将整个水下滑翔机系统简化为航行器主体、俯仰调节重块、横滚调节重块和浮力调节重块构成的模型。根据动量和动量矩定理,可推导出其六自由度动力学模型^[12],利用动力学模型分析其在水平面内的运动。

建立图 1 所示的水下滑翔机的大地坐标系 $E-xyz$,体坐标系 $B-xyz$ 。在体坐标系下,定义水下滑翔机速度 $\mathbf{v}=(u, v, w)^T$,角速度坐标 $\mathbf{w}=(p, q, r)^T$;在大地坐标系下,定义水下滑翔机位置为 $\mathbf{O}=(x, y, z)^T$,姿态坐标为 $\mathbf{\Omega}=(\varphi, \theta, \psi)^T$ 。由于只研究水下滑翔机的航向控制相关问题,下面仅列出水下滑翔机水平面内横向运动的数学模型。运动模型各参数赋值如表 1 所示。

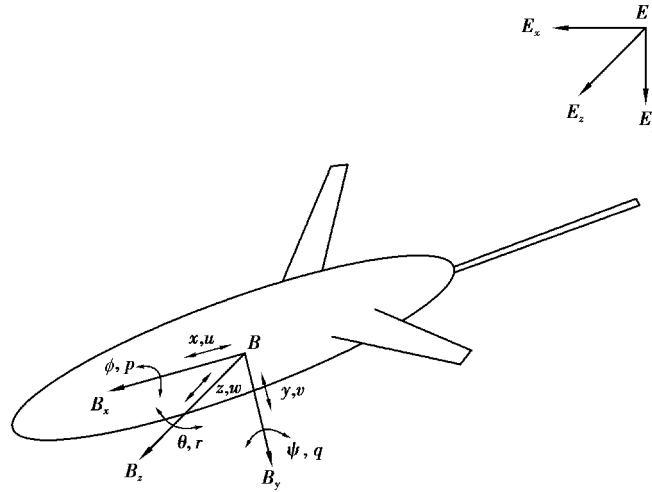


图 1 水下滑翔机坐标系示意图

Fig. 1 Underwater glider coordinate system

水下滑翔机水平面内动力学方程为

$$\begin{cases} (m + \lambda_{33}) \dot{w} - \lambda_{33} \dot{q} + m y_G \dot{p} - muq = \frac{1}{2} \rho V^2 A_D \cdot (C_z^\beta \beta + C_z^q q' + C_z^\delta \delta_v), \\ (J_{B_x} + \lambda_{44}) \dot{p} + m y_G (\dot{w} - uq) + G y_G \sin \phi = \\ m_t g e_r [(1 - \cos \phi \sin \phi - \sin \phi \cos \phi)] + \frac{1}{2} \rho V^2 A_D L (T_x^\beta \beta + T_x^q q' + T_x^p p' + T_x^\delta \delta_v), \\ (J_{B_y} + \lambda_{55}) \dot{q} + \lambda_{35} \dot{w} = \frac{1}{2} \rho V^2 A_D L \cdot (T_y^\beta \beta + T_y^q q' + T_y^p p' + T_x^\delta \delta_v). \end{cases} \quad (1)$$

运动学方程为

$$\begin{cases} V = \sqrt{u^2 + w^2}, \\ \dot{X} = u \cos \psi + w \sin \psi \cos \phi, \\ \dot{Z} = -u \sin \psi + w \cos \psi \cos \phi, \\ \dot{\phi} = p, \\ \dot{\psi} = q \cos \phi, \\ \beta = \tan^{-1} \left(\frac{w}{V} \right). \end{cases} \quad (2)$$

表 1 “海燕-Ⅱ”动力学模型各参数列表

Table 1 Parameters of the dynamic model of “Petrel-Ⅱ”

水下滑翔机总质量 m/kg	水动力附加静矩 $\lambda_{35}/(\text{kg} \cdot \text{m}^2)$	水动力附加惯矩 $\lambda_{44}/(\text{kg} \cdot \text{m}^2)$	水动力附加惯矩 $\lambda_{55}/(\text{kg} \cdot \text{m}^2)$	海水密度 $\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$		
69	19.35	0	21.83	1 021.5		
横向力系数 C_z^β	横向力系数 C_z^q	横向力系数 C_z^p	横向力系数 $C_z^{\delta_v}$			
1.6	-0.17	0	-0.58			
沿 X 轴方向转动 惯量 $J_{B_x}/(\text{kg} \cdot \text{m}^2)$	沿 y 轴方向转动 惯量 $J_{B_y}/(\text{kg} \cdot \text{m}^2)$	质心相对于浮心 位置 y_G/m	滚转电池包 质量 m_t/kg	电池包 偏心距 e_r/m	水动力特征 面积 A_D/m^2	水下滑翔机 总长度 L/m
0.54	19.75	0.06	18	0.018	0.038	2.17

续表 1

横倾黏性 水动力矩系数 T_x^p	横倾黏性 水动力矩系数 T_x^q	横倾黏性 水动力矩系数 T_x^r	偏航黏性 水动力矩系数 T_y^p	偏航黏性 水动力矩系数 T_y^q	偏航黏性 水动力矩系数 T_y^r
0	0	-0.2	0.29	-0.35	0

2 RBF-PID 控制器

2.1 RBF 神经网络原理

RBF 神经网络于 1988 年提出^[13]。相比其他类型神经网络,RBF 网络由于具有良好的泛化能力,网络结构简单和能够避免不必要的计算而备受关注。由于 RBF 神经网络具有逼近任意非线性函数的能力,所以被广泛应用于非线性控制领域^[14]。RBF 神经网络是一个包含输入层、隐含层和输出层的前馈网络。采用多输入单输出的神经网络,其网络结构如图 2 所示。从系统的动力学模型可知,水下滑翔机具有非线性特性,因此,将 RBF 神经网络和 PID 控制器相结合,设计了水下滑翔机 RBF-PID 航向控制器。

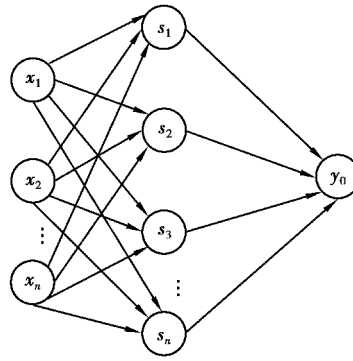


图 2 径向基函数神经网络结构图

Fig. 2 Radial basis function neural network structure diagram

RBF 神经网络结构模型的第 1 层为输入层, $\mathbf{x} = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T$ 为输入向量。第 2 层为隐含层,是由径向基函数构成的神经元激活函数,具有 m 个节点隐含层向量为 $\mathbf{s} = [s_1, s_2, \dots, s_m]^T$,其中

$$s_j = \exp\left(-\frac{\|\mathbf{x} - \mathbf{c}_j\|^2}{2b_j^2}\right), \quad (j = 1, 2, \dots, m), \quad (3)$$

式中: \mathbf{c}_j 为第 j 个节点的中心矢量, $\mathbf{c}_j = [c_{j1}, c_{j2}, \dots, c_{ji}, \dots, c_{jn}]^T, (i = 1, 2, \dots, n)$; b_j 为隐含层第 j 个神经元高斯基函数的宽度。

RBF 网络权值为

$$\mathbf{w} = [\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_m]^T. \quad (4)$$

RBF 网络输出为

$$y(k) = \mathbf{w}^T \mathbf{h} = \omega_1 h_1 + \omega_2 h_2 + \dots + \omega_m h_m. \quad (5)$$

网络逼近性能指标为

$$J = \frac{1}{2} [y(k) - y_0(k)]^2. \quad (6)$$

利用梯度下降法迭代输出权值、节点中心值和节点基宽参数:

$$\omega_j(k) = \eta [y(k) - y_0(k)] s_j + \alpha [\omega_j(k-1) - \omega_j(k-2)] + \omega_j(k-1), \quad (7)$$

$$b_j(k) = \eta [y(k) - y_0(k)] \omega_j s_j \frac{\|\mathbf{x} - \mathbf{c}_j\|^2}{b_j^3} + \alpha [b_j(k-1) - b_j(k-2)] + b_j(k-1), \quad (8)$$

$$c_{ji}(k) = \eta [y(k) - y_0(k)] \omega_j \frac{x_j - c_{ji}}{b_j^2} + \alpha [c_{ji}(k-1) - c_{ji}(k-2)] + c_{ji}(k-1). \quad (9)$$

式中: η 为学习效率; α 为动量因子。

2.2 控制器设计

水下滑翔机航向控制的目的是使其跟踪期望轨迹, 即航向跟踪误差在有限时间内收敛。采用的控制系统结构如图 3 所示。

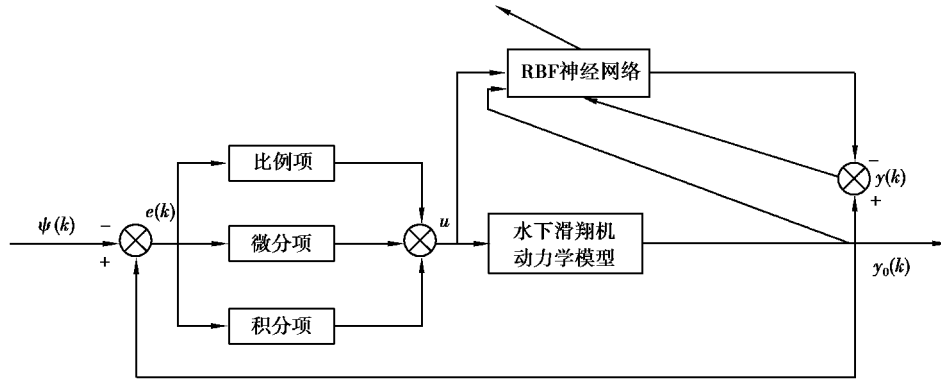


图 3 控制系统结构图

Fig. 3 Structure diagram of control system

令航向角误差为

$$e(k) = \psi(k) - y_0(k), \quad (10)$$

式中: $\psi(k)$ 为期望航向角; $y_0(k)$ 为实际航向角。

为保证水下滑翔机按预期路径运动, 要尽量保证航向角误差为 0。选取神经网络整定目标为

$$J(k) = \frac{1}{2} e(k)^2, \quad (11)$$

PID 控制器的输出 $u(k)$ 为

$$u(k) = u(k-1) + k_p(k)(e(k) - e(k-1)) + k_i(k)e(k) + k_d(k)(e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)), \quad (12)$$

式中 k_p, k_i, k_d 的值采用梯度下降法求取, 即

$$k_p(k) = \eta \frac{\partial y}{\partial [u(k) - u(k-1)]} \cdot e(k) [e(k) - e(k-1)] + k_p(k-1), \quad (13)$$

$$k_i(k) = \eta \frac{\partial y}{\partial [u(k) - u(k-1)]} \cdot e(k)^2 + k_i(k-1), \quad (14)$$

$$k_d(k) = \eta \frac{\partial y}{\partial [u(k) - u(k-1)]} \cdot e(k) \cdot [e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)] + k_d(k-1), \quad (15)$$

式中 $\frac{\partial y(k)}{\partial [u(k) - u(k-1)]}$ 为被控对象的 Jacobian 信息 (即对象的输出对控制输入变化的灵敏度信息):

$$\frac{\partial y(k)}{\partial [u(k) - u(k-1)]} \approx \frac{\partial y_0(k)}{\partial [u(k) - u(k-1)]} = \sum_{j=1}^m \tau_j h_j \frac{c_{ji} - x_1}{b_j^2}, (x_1 = u(k) - u(k-1)). \quad (16)$$

对于给定的期望航向角 $\psi(k)$, 被控对象 (即水下滑翔机动力学模型) 的输出为 $y_0(k)$, RBF 神经网络的输出为 $y(k)$, 根据两者的差值利用公式 (7)(8)(9) 更新 $\tau_j(k), b_j(k), c_{ji}(k)$, 将它们带入公式 (16) 可得到被控对象 Jacobian 信息阵, 再将所得结果代入公式 (13)(14) 和 (15) 中更新 k_p, k_i, k_d , 从而使 PID 控制器产生新的控制量 u , 该控制量对应的水下滑翔机内部电池包的滚转角度使其产生新的实际航向角。

3 数值仿真

为验证所提出的基于 RBF 神经网络参数自整定的控制算法的有效性, 在 MATLAB 中进行仿真, 并引入 PID 算法进行对比。仿真开始设置期望航向角为 30° 。对比试验中 PID 控制器参数由仿真试验得到, 参数

设置为: $k_P=0.7, k_I=1.3, k_D=0.7$; RBF-PID 参数初值 $k_{P0}=0.1, k_{I0}=0.1, k_{D0}=0.1$ 。海浪干扰 $D(t)=\sin(0.01 t)$ 。学习效率 $\eta=0.5$, 动量因子 $\alpha=0.05$ 。输入权值、节点中心值和节点基宽初值均设置为 0。

图 4 为方波信号时航向 RBF-PID 控制器参数自整定曲线,可以看出,在航向变化时,RBF-PID 控制器能快速完成对参数的调整,达到期望的控制效果。对于方波信号航向控制曲线(图 5),当航向剧烈变化时,PID 控制会出现较大的超调量,而 RBF-PID 控制航向变化较为平缓,且收敛速度较快;图 6 为两种控制方法的误差曲线,可以看出,采用 RBF-PID 算法仿真的航向角误差相对较小,且收敛时间较短。表 2 为仿真实验中两种控制方法的指标对比。可以看出,所提算法在方波信号输入下,均方误差下降了 1.67%。

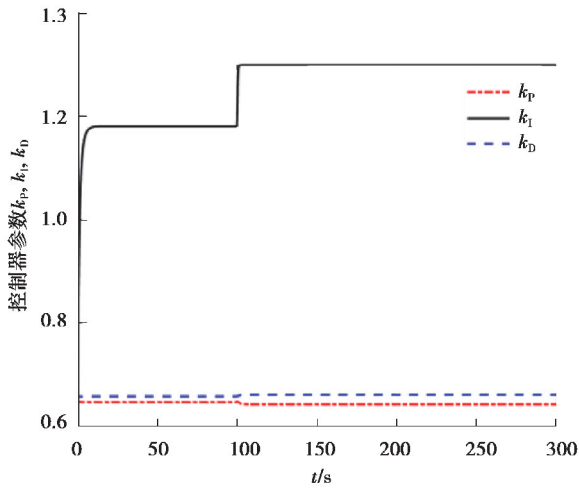


图 4 方波信号时控制器参数自整定曲线

Fig. 4 Self-tuning curves of controller parameters at square signal

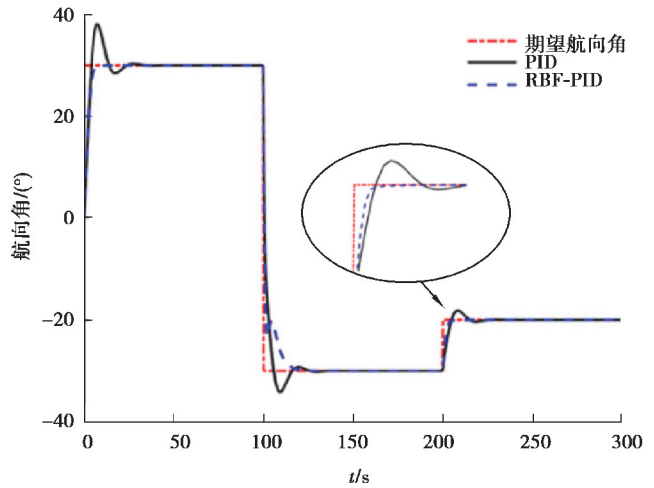


图 5 方波信号航向控制曲线

Fig. 5 Heading control curves of square signal

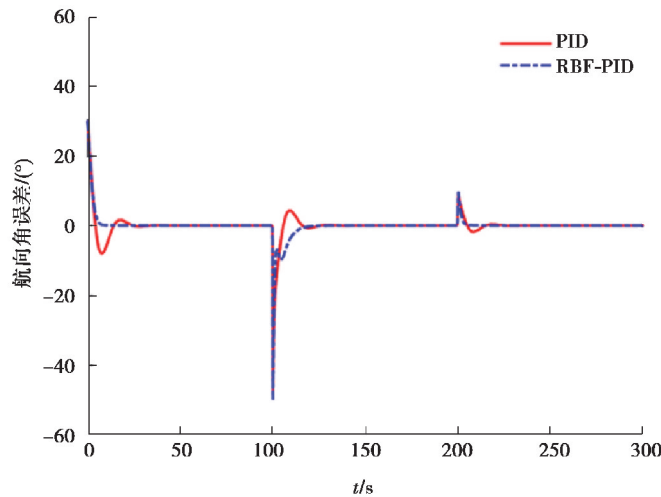


图 6 方波信号航向控制误差曲线

Fig. 6 Heading control error curves of square signal

表 2 方波信号航向控制中 PID 与 RBF-PID 指标对比

Table 2 Comparison of PID and RBF-PID indexes in heading control of square signal

控制算法	平均误差	均方误差	稳态误差
PID	3.132 1	9.012 6	0
RBF-PID	2.795 5	8.861 8	0

为验证所提 RBF-PID 算法对时变航向的跟踪性能,在仿真中控制器的输入采用正弦信号。图 7 为正弦信号输入时 RBF-PID 航向控制器参数自整定曲线,可以看出,控制器的参数同样可以实现快速整定。图 8 为正弦信号输入时 RBF-PID 航向控制器控制曲线,控制器误差曲线如图 9 所示。从图中可以看出,随着时间的增加,两种方法皆可实现航向跟踪,但开始时 PID 控制出现较大超调量,收敛时间约为 13 s,而 RBF-PID 控制超调量较小且收敛时间约为 8 s,同时航向跟踪效果好,曲线较为平滑。表 3 为仿真实验中两种控制方法的指标对比。可以看出,所提算法在正弦信号输入下,最大超调量下降了 5.28°,稳态误差下降了 10%,收敛时间缩短了 38%。

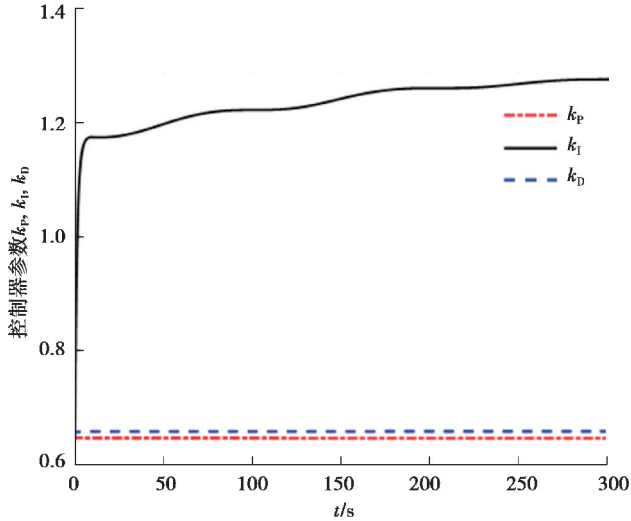


图 7 正弦信号时控制器参数自整定曲线

Fig. 7 Self-tuning curves of controller parameters at sinusoidal signal

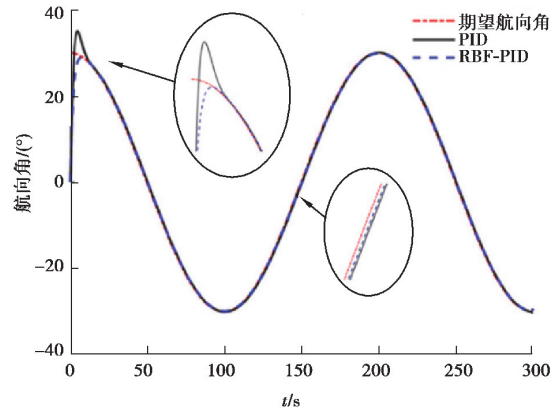


图 8 正弦信号航向控制曲线

Fig. 8 Heading control curves of sinusoidal signal

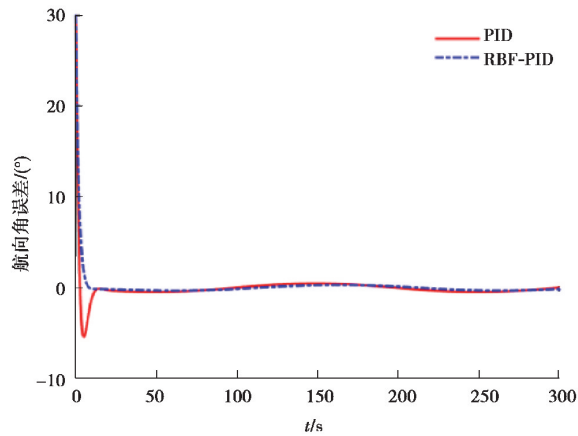


图 9 方波信号航向控制误差曲线

Fig. 9 Heading control error curves of sinusoidal signal

表 3 方波信号航向控制中 PID 与 RBF-PID 指标对比

Table 3 Comparison of PID and RBF-PID indexes in heading control of sinusoidal signal

控制算法	最大超调量/(°)	收敛时间/s	稳态误差
PID	5.41	13	0.30
RBF-PID	0.13	8	0.27

4 结 语

针对水下滑翔机传统 PID 控制方法无法实现快速精确调整航向的问题,提出了一种 RBF-PID 的航向控制方法。由仿真实验结果可知,所提方法与传统 PID 控制相比具有更好的动态性能,即能够更快地实现航向跟踪,而且可实现参数快速自整定,减少了工作量。具体地,与 PID 控制方法相比较,设计的 RBF-PID 航向控制在方波信号输入下,均方误差下降了 1.67%;正弦信号输入下,稳态误差下降了 10%,收敛时间缩短了 38%。笔者主要工作是针对水下滑翔机二维平面内运动进行了航向控制器设计及仿真,研究结果表明 RBF-PID 控制器鲁棒性强,控制精度较高,在水下滑翔机航向控制中具有很好的应用前景。同时由于实际海洋环境的不确定性较多,仿真实验很难完全地模拟真实海洋环境,为了进一步验证所设计控制器的性能,未来会进行海上试验验证。

参考文献:

- [1] 沈新蕊,王延辉,杨绍琼,等.水下滑翔机技术发展现状与展望[J].水下无人系统学报,2018,26(2):89-106.
Shen X R, Wang Y H, Yang S Q, et al. Development of underwater gliders: an overview and prospect[J]. Journal of Unmanned Undersea Systems, 2018, 26(2): 89-106. (in Chinese)
- [2] Wang Y H, Yang S Q. Glider[M]. Encyclopedia of Ocean Engineering, 2019.
- [3] 邓非,尹洪东,段梦兰.基于 AUV 的航迹追踪自适应 UKF 算法[J].重庆大学学报,2019,42(1):98-109.
Deng F, Yin H D, Duan M L. Adaptive UKF algorithm based on AUV tracking[J]. Journal of Chongqing University, 2019, 42(1): 98-109. (in Chinese)
- [4] 温浩然,魏纳新,刘飞.水下滑翔机的研究现状与面临的挑战[J].船舶工程,2015,37(1):1-6.
Wen H R, Wei N X, Liu F. Research of current situation and future challenges of underwater glider[J]. Ship Engineering, 2015, 37(1): 1-6. (in Chinese)
- [5] An L, Li Y, Jiang Y Q, et al. Soft-switching proximate time optimal heading control for underactuated autonomous underwater vehicle[J]. IEEE Access, 2019, 7: 143233-143249.
- [6] Ullah B, Ovinis M, Baharom M B, et al. Underwater gliders control strategies: a review[C]//2015 10th Asian Control Conference (ASCC). May 31 - June 3, 2015, Kota Kinabalu, Malaysia. IEEE, 2015: 1-6.
- [7] Elmokadem T, Zribi M, Youcef-Toumi K. Terminal sliding mode control for the trajectory tracking of underactuated Autonomous Underwater Vehicles[J]. Ocean Engineering, 2017, 129: 613-625.
- [8] Tchilian R, Rafikova E, Gafurov S A, et al. Optimal control of an underwater glider vehicle[J]. Procedia Engineering, 2017, 176: 732-740.
- [9] Lyu K D. Underwater glider motion control based on neural network[J]. Journal of Applied Science & Process Engineering, 2019, 6(2): 355-361.
- [10] Kohl N, Miiikkulainen R. Evolving neural networks for strategic decision-making problems[J]. Neural Networks, 2009, 22(3): 326-337.
- [11] Zhang R F, Yang S Q, Wang Y H, et al. Regional Ocean Current Field Construction based on an Empirical Bayesian Kriging Algorithm using Multiple Underwater Gliders[J]. Journal of Coastal Research, 2020, 99(sp1): 41.
- [12] 刘方.混合驱动水下滑翔机系统设计与运动行为研究[D].天津:天津大学,2014.
Liu F. System design and motion behaviors analysis of the hybrid underwater glider[D]. Tianjin: Tianjin University, 2014. (in Chinese)
- [13] Broomhead D, Lowe D. Multivariable functional interpolation and adapttive networks[J]. Complex Systems, 1988, 2: 321-355.
- [14] 李绍铭,刘寅虎.基于改进型 RBF 神经网络多变量系统的 PID 控制[J].重庆大学学报(自然科学版),2007,30(2): 53-57.
Li S M, Liu Y H. PID control for multivariable system based on ameliorative RBF neural networks[J]. Journal of Chongqing University (Natural Science Edition), 2007, 30(2): 53-57. (in Chinese)