

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2023.04.005

基于模糊神经网络 PID 的无人艇 航向控制器研究

王伟, 王勇, 周晨光, 张晔, 寿康力, 朱国栋

(合肥工业大学 机械工程学院, 安徽 合肥 230009)

摘要:针对常规比例、积分和微分(proportional integral derivative, PID)控制器在无人艇航向控制系统中表现出的稳定性差、控制精度低等问题,文章提出一种将模糊控制与反向传播(back propagation, BP)神经网络相结合的控制算法;在 MATLAB 中对比较常规 PID 控制器、模糊 PID 控制器与模糊神经网络 PID 控制器在给定期望航向角下的航向控制性能,仿真结果表明模糊神经网络 PID 控制器对无人艇的航向控制性能最佳;在搭建的实验平台上对不同航向控制器下无人艇的航行轨迹和航向角进行比较,实验结果进一步验证了模糊神经网络 PID 航向控制算法的优越性。

关键词:无人艇;航向控制;模糊控制;反向传播(BP)神经网络;比例、积分和微分(PID)

中图分类号:TP273 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-5060(2023)04-0458-05

Research on unmanned surface vehicle heading controller based on fuzzy neural network PID

WANG Wei, WANG Yong, ZHOU Chenguang, ZHANG Ye, SHOU Kangli, ZHU Guodong
(School of Mechanical Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: In order to solve the problems of poor stability and low control precision of conventional proportional integral derivative (PID) controller in unmanned surface vehicle heading control system, a control algorithm combining fuzzy control and back propagation (BP) neural network was proposed. The heading control performance of conventional PID controller, fuzzy PID controller and fuzzy neural network PID controller was compared under the given expected heading angle based on MATLAB. The simulation results show that the fuzzy neural network PID controller has the best heading control performance in unmanned surface vehicle. The above simulation results were further verified by comparing the trajectory and heading angle of unmanned surface vehicle under different heading controllers on the experimental platform.

Key words: unmanned surface vehicle; heading control; fuzzy control; back propagation (BP) neural network; proportional integral derivative (PID)

0 引 言

科技发展使无人艇在军事和民用领域的应用日益广泛^[1]。航向控制器的设计是无人艇实现完

全自主航行和智能控制的核心,经典比例、积分和微分(proportional integral derivative, PID)控制器在早期船舶航向控制中应用广泛,但经典 PID 控制器在抗干扰能力、稳定性及精度等方面难以

收稿日期:2021-07-13;修回日期:2021-08-06

基金项目:安徽省科技重大专项资助项目(JZ2021AKKZ0042);安徽高校协同创新资助项目(GXXT-2019-031)

作者简介:王伟(1998—),男,安徽六安人,合肥工业大学硕士生;

王勇(1969—),男,安徽无为,博士,合肥工业大学副教授,硕士生导师,通信作者, E-mail: ywang9868@163.com.

满足日益复杂的军用和民用任务要求^[2]。

近年来,国内外研究学者对无人艇的航向控制进行了大量研究,并取得了一定的成果。文献[3]将扩展的卡尔曼滤波法应用在级联结构形式的模块化非线性航向控制系统中;文献[4]通过建立 PID 航向控制算法的 K_P 、 K_I 、 K_D 初始值计算模型,实现了对模糊自整定 PID 航向控制算法的优化;文献[5]采用机理建模的方法建立了无人艇三自由度运动模型,针对无人艇的航向控制问题设计了鲁棒 PID 滑模控制器;文献[6]采用基于局部控制网络的非线性自动驾驶技术来解决无人艇的控制问题。上述研究多数偏重于理论分析,而面向实际应用的无人艇控制方法与可靠性研究仍不充分。

本文将模糊控制的非线性控制作用和神经网络的自学习、自适应特点结合起来,设计一种模糊神经网络 PID 控制器,以提高无人艇的航向控制精度,并通过仿真及实验对设计的控制器进行验证。

1 无人艇的数学模型

航向控制器设计的关键是建立准确的无人艇实际运动模型。考虑到无人艇的大惯性、大时滞特点,将其运动模型简化为二阶野本传递函数模型^[7],即

$$G(s) = \frac{K'}{(T_0s + 1)s} \quad (1)$$

其中: K' 为回转性指数; T_0 为应舵指数。

无人艇用舵机来控制船舶转向,进而改变航向^[8]。一般将舵机系统看作一个一阶惯性过程^[9],传递函数为:

$$\frac{\delta}{\delta_E} = \frac{1}{T_Es + 1} \quad (2)$$

其中: δ 为实际舵角; δ_E 为目标舵角; T_E 为舵机时间常数。

2 模糊神经网络 PID 控制器

2.1 模糊神经网络 PID 控制器原理

本文所设计的模糊神经网络 PID 控制器原理如图 1 所示,主要由 3 个部分^[10]组成:

(1) 传统 PID 控制器。对被控对象进行在线闭环控制。

(2) 模糊处理模块。针对系统的状态变量做模糊化和归一化处理,具有鲁棒性和非线性控制作用。

(3) 神经网络模块。神经网络具有自学习能力,可以对输入数据样本集进行学习分类以在线调整隶属函数。

控制器特点是将神经网络的自学习能力应用于模糊算法中,使得模糊算法的各步骤如模糊化变量、模糊推理及清晰化变量融于神经网络的各层,从而实时调整网络权值和隶属函数,最后输出 PID 控制器的最优参数。

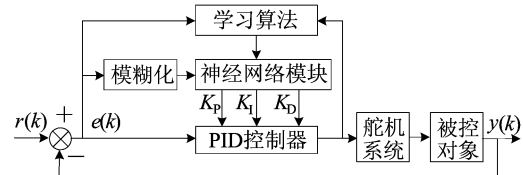


图 1 模糊神经网络 PID 控制器原理图

2.2 PID 控制器

本文采用增量式 PID 控制算法,即

$$u(k) = u(k-1) + K_P[e(k) - e(k-1)] + K_I e(k) + K_D[e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)] \quad (3)$$

其中: $u(k)$ 、 $u(k-1)$ 分别为第 k 次、第 $k-1$ 次采样周期的输出值; $e(k)$ 、 $e(k-1)$ 分别为第 k 次、第 $k-1$ 次采样周期的输入偏差; K_P 、 K_I 、 K_D 分别为比例、积分、微分系数。

2.3 模糊神经网络 PID 结构

根据无人艇航向控制器的实时性要求,本文设计的模糊神经网络分为 5 层,结构如图 2 所示。

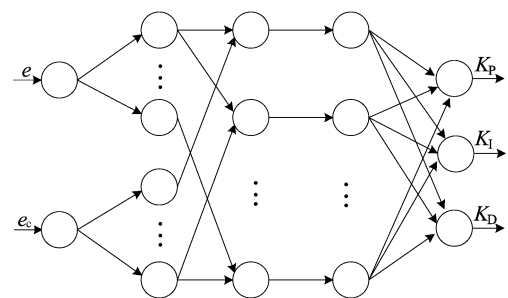


图 2 模糊神经网络结构

各层的具体算法步骤^[11]如下:

(1) 确定输入层。该层节点数 $N_1 = 2$,取航向角的偏差值 e 和偏差变化率 e_c 作为输入变量,输出为:

$$O_i^{(1)} = I_i^{(1)} \quad (4)$$

其中: $I_i^{(1)}$ 、 $O_i^{(1)}$ 分别为第 1 层第 i 个节点的输入和输出, $i=1,2$ 。

(2) 计算隶属函数。将输入变量的模糊论域都设置为 $[-6, 6]$, 并分割为 7 个模糊集合, 分别为 NB、NM、NS、ZO、PS、PM、PB, 因此该层节点数 $N_2=14$, 选用高斯函数作为隶属函数, 输出为:

$$O_{ij}^{(2)} = \exp\left[-\frac{(O_i^{(1)} - c_{ij})^2}{\sigma_{ij}^2}\right] \quad (5)$$

其中: $O_{ij}^{(2)}$ 为第 2 层相应节点的输出; c_{ij} 、 σ_{ij} ($i=1, 2$; $j=1, 2, \dots, 14$) 分别为第 i 个输入变量的第 j 个隶属函数的中心值和宽度。

(3) 确定模糊规则。该层的节点数 $N_3=49$, 每个节点对应一条模糊规则, 则每条规则的适应度为:

$$O_l^{(3)} = \mu_1^i \mu_2^j \quad (6)$$

其中: $O_l^{(3)}$ ($l=1, 2, \dots, 49$) 为第 3 层相应节点的输出; μ_1^i ($i_1=1, 2, \dots, 7$) 和 μ_2^j ($i_2=1, 2, \dots, 7$) 为对应的隶属函数。

(4) 归一化计算。第 4 层节点数 N_4 同样为 49 个, 目的是实现归一化, 即

$$O_l^{(4)} = \frac{O_l^{(3)}}{\sum_{l=1}^{49} O_l^{(3)}} \quad (7)$$

其中, $O_l^{(4)}$ 为第 4 层相应节点的输出。

(5) 确定输出层。输出层共有 3 个输出量, 分别表示 PID 控制器的比例、积分、微分系数, 即

$$O_k^{(5)} = \sum_{l=1}^{49} \omega_{kl} O_l^{(4)} \quad (8)$$

其中: $O_k^{(5)}$ ($k=1, 2, 3$) 为第 5 层相应节点的输出; ω_{kl} ($k=1, 2, 3$) 为第 4 层与第 5 层之间的连接权值。

由上可知, 可以调整的参数有连接权值 ω_{kl} 、隶属函数的中心值 c_{ij} 和宽度 σ_{ij} 。本文采用反向传播(back propagation, BP)神经网络训练给定的学习样本, 设置最大迭代次数为 5 000 次, 期望误差为 0.005, 以此来优化 ω_{kl} 、 c_{ij} 和 σ_{ij} 。

3 系统仿真及结果分析

在 MATLAB 软件中根据上述设计流程, 搭建无人艇航向控制系统的 Simulink 仿真模型。为了更直观地体现出模糊神经网络 PID 航向控制器的优点, 将常规 PID、模糊 PID 与模糊神经网络 PID 置于同一仿真系统中。

所设计的无人艇传递函数和舵机传递函数分别为 $0.57/(2.37s^2+s)$ 和 $1/(3s+1)$; 采用试凑法调节 PID 控制器 3 个参数的初始值 K_P 、 K_I 、 K_D 分别为 0.940 0、0.003 3、2.610 0; 根据仿真系统

输入与输出范围及设置的模糊论域^[12], 取模糊系统的量化因子 $k_e=0.330$ 、 $k_c=0.004$, 比例因子 $k_{K_P}=0.300$ 0、 $k_{K_I}=0.002$ 5、 $k_{K_D}=10.000$ 0。控制系统的输入量为航向角的设定值, 仿真取航向角为 15° , 输出为所控制无人艇的输出航向角, 仿真结果如图 3 所示。

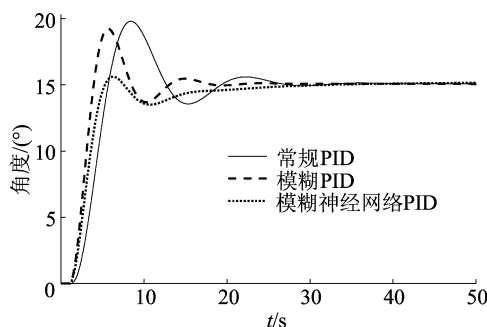


图 3 仿真结果对比

根据上述仿真实验结果计算 3 种不同控制方式的时域性能指标, 结果见表 1 所列。表 1 中调节时间上下浮动幅度为 5%。

表 1 仿真结果分析

控制方法	超调量/%	上升时间/s	调节时间/s
常规 PID	31.9	2.91	16.67
模糊 PID	28.2	1.98	10.74
模糊神经网络 PID	4.1	2.88	13.33

从图 3 和表 1 可以看出, 模糊神经网络 PID 方法对航向角的控制性能最好, 超调量有较大幅度的减少, 上升时间和调节时间也有了不同程度的改善。

在实际设计中, 考虑到无人艇的传递函数是通过艇长、艇宽、排水量、方形系数、尾舵面积、艇速和吃水深度等参数确定的, 而这些参数在测量取值过程中难免会存在误差, 从而导致真实的被控无人艇的传递函数与仿真系统的传递函数并不完全一致。为了验证本文设计的模糊神经网络 PID 航向控制器相较于常规 PID 仍具有较好的控制能力和稳定性, 在仿真系统中使传递函数在一定范围内变动, 所得到的航向角响应曲线如图 4、图 5 所示。

从图 4、图 5 可以看出, 即使由于无人艇自身参数误差导致传递函数发生小范围改变, 本文设计的模糊神经网络 PID 控制器同样具有较好的控制效果。

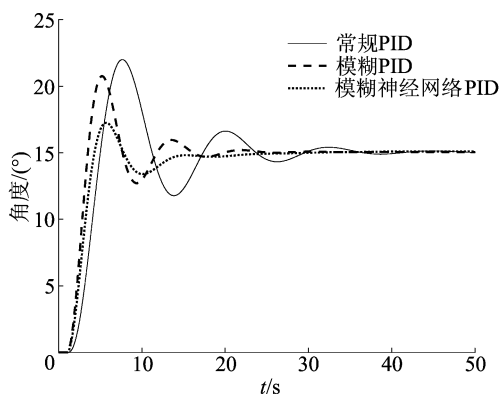


图 4 无人艇传递函数为 $0.8/(2.81s^2+s)$ 航向器控制效果对比

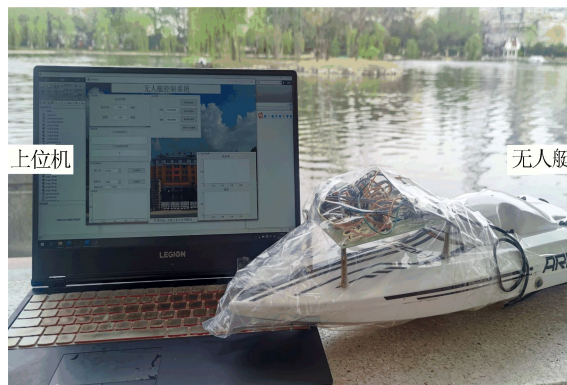


图 6 水面无人艇模型及上位机

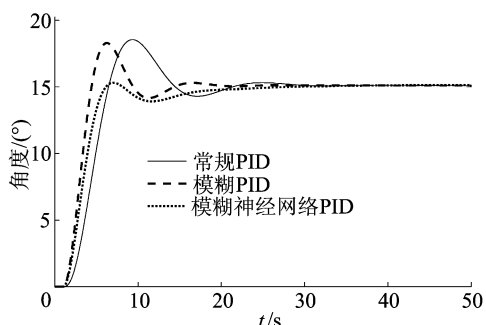


图 5 无人艇传递函数为 $0.45/(2.25s^2+s)$ 航向器控制效果对比

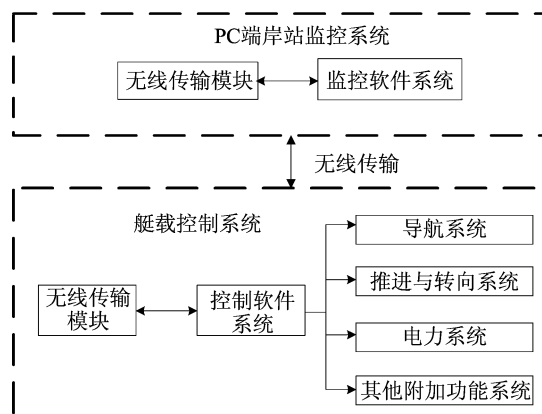


图 7 无人艇控制系统总体框图

4 实验验证

为了验证模糊神经网络 PID 航向控制算法的优越性,在合肥工业大学斛兵塘进行无人艇水面实验。水面无人艇模型及上位机实验平台如图 6 所示。

无人艇控制系统由 PC 端的岸站监控系统和艇载控制系统 2 个部分组成,总体结构框图如图 7 所示。实验过程中为证明所设计无人艇的实用性,同时进行斛兵塘水域水质的监测。

无人艇下水实验时,通过上位机设置的起始点与目标点自动规划出一条避障路径并生成沿途路径点,无人艇分别在常规 PID 航向控制算法和模糊神经网络 PID 航向控制算法下按序沿着路径点进行自主航行。到达目标点后,对下位机在航行过程中发送的数据包进行解析,得到速度、航向角及 TDS 值等参数,在上位机中对这些参数进行可视化处理,结果如图 8 所示。



图 8 无人艇自主航行测试结果

从图 8 可以看出无人艇的航行运动规律及区域水质分布规律。

为了更直观地对比 2 个不同航向控制算法的差异性,将航行过程中下位机发送的位置及航向角进行数据处理和曲线拟合,得到无人艇航行轨迹和航向角的对比结果,如图 9 所示。

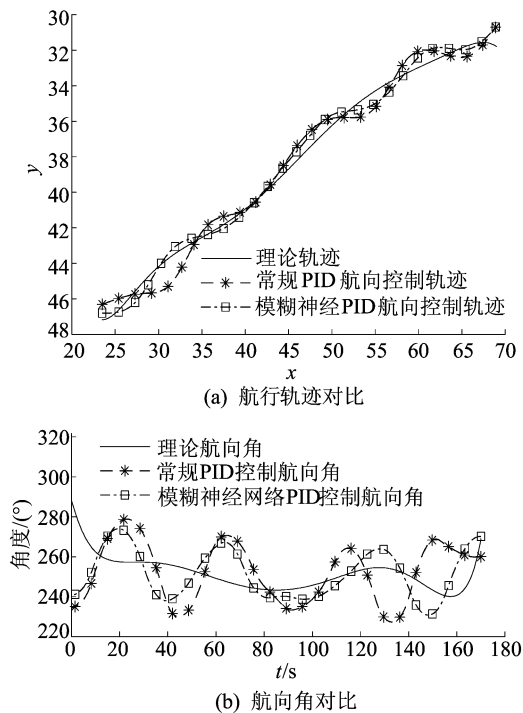


图 9 控制效果对比

由图 9a 可知,基于模糊神经网络 PID 控制算法的航行轨迹更接近于理论轨迹;由图 9b 可知,基于常规 PID 控制算法的航向角相较于理论值的标准差为 17.594,而基于模糊神经网络 PID 控制算法的航向角相较于理论值的标准差为 12.499。因此,本文提出的模糊神经网络 PID 控制器与常规 PID 控制器相比误差更小,对航向角的变化反应更为迅速,提高了无人艇的航向控制精度。

5 结 论

本文面向无人艇航向控制方法和实用性进行研究,提出了模糊神经网络 PID 控制算法,通过

仿真与实验得到如下结论:

(1) 与常规 PID 控制器和模糊 PID 控制器相比,模糊神经网络 PID 控制器在超调量及调节时间等性能指标上有不同程度的改善与提升。

(2) 模糊神经网络 PID 控制器对传递函数的微小变动仍有较好的控制效果。

(3) 在无人艇实际应用中,模糊神经网络 PID 控制器反应迅速,控制精度高。

[参 考 文 献]

- [1] 廖煜雷,张铭钧,董早鹏,等. 无人艇运动控制方法的回顾与展望[J]. 中国造船,2014,55(4):206-216.
- [2] 马振霞. 船舶操纵控制虚拟现实仿真的研究[D]. 大连:大连海事大学,2013.
- [3] KUROWSKI M, HAGHANI A, KOSCHORREK P, et al. Navigation and control of unmanned surface vehicles[J]. AT-Automatisierungstechnik,2015,63(5):355-367.
- [4] 梅强,李丽娜,陈国权,等. 模糊自整定 PID 航向控制算法优化及其性能评判[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版),2015,38(8):1055-1059.
- [5] 郑烈心. 水面无人艇建模与运动控制系统设计[D]. 广州:华南理工大学,2016.
- [6] SARDA E I, QU H, BERTASKA I R, et al. Station-keeping control of an unmanned surface vehicle exposed to current and wind disturbances[J]. Ocean Engineering,2016,127:305-324.
- [7] 赵东明,柳欣,周浩. 水面无人艇模糊神经网络航向控制器设计[J]. 华中师范大学学报(自然科学版),2018,52(3):329-332,346.
- [8] 赵英序,朱景伟,边涛,等. 基于 PMSM 的双螺旋桨 USV 推进系统建模与仿真[J]. 大连海事大学学报,2018,44(1):17-24,30.
- [9] 税洋,尉建利,闫杰. 基于模型参考自适应控制的舵机加载系统研究[J]. 西北工业大学学报,2018,36(2):246-251.
- [10] 王华强,石亚娟,王健波. 神经网络模糊 PID 在水轮机调速系统中的应用[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版),2012,35(9):1187-1191.
- [11] 乔俊飞,周红标. 基于自组织模糊神经网络的出水总磷预测[J]. 控制理论与应用,2017,34(2):224-232.
- [12] 李国勇,杨丽娟. 神经·模糊·预测控制及其 MATLAB 实现[M]. 北京:电子工业出版社,2018.

(责任编辑 胡亚敏)