

DOI:10.19651/j.cnki.emt.1802342

基于模糊神经网络PID算法的液位控制系统研究*

程宗政 施一萍 张金立 吕晨悦 钱楠 张翔

(上海工程技术大学电子电气工程学院 上海 201700)

摘要: 在工业生产中,液位控制系统得到了广泛应用,但是对于这种大滞后、非线性的复杂控制系统,传统的PID控制方法存在着参数整定困难,控制效果不理想的缺陷。在对传统的PID算法、模糊控制算法和神经网络算法研究的基础上,提出了一种将模糊神经网络PID算法应用到液位控制系统中去的解决方案,并采用MATLAB对液位对象控制进行仿真实验,同时采用A3000型水箱实验平台对仿真实验结果进行验证。研究结果表明,基于模糊神经网络的PID算法的液位控制系统在调整时间和超调量上都优于传统的PID算法,控制效果和抗干扰能力更强,克服了传统PID算法的不足。

关键词: MATLAB;模糊神经网络控制;PID算法;液位控制系统

中图分类号: TP273;TN081 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510

Research of liquid level control system based on fuzzy neural network PID algorithm

Cheng Zongzheng Shi Yiping Zhang Jinli Lv Chenyue Qian Nan Zhang Xiang

(College of Electrical & Electronic Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai, 201600, China)

Abstract: In industrial production, liquid level control system has been widely used, but for this complex control system with large delay and non-linearity, the traditional PID control method has the drawbacks of difficult parameter tuning and unsatisfactory control effect. Based on the research of traditional PID algorithm, fuzzy control algorithm and neural network algorithm, this paper puts forward a solution of applying fuzzy neural network PID algorithm to liquid level control system. Matlab is used to simulate the control of liquid level object, and A3000 water tank experimental platform is used to verify the simulation results. The results show that the liquid level control system based on the PID algorithm of the fuzzy neural network is superior to the traditional PID algorithm in adjusting time and overshoot, and has better control effect and anti-interference ability, which overcomes the shortcomings of the traditional PID algorithm.

Keywords: MATLAB; fuzzy neural network control; PID algorithm; liquid level control system

0 引言

在复杂的工业控制过程中,液位是一个很重要的控制变量。对液位控制的效果在很大程度上决定了工业生产过程中的效率、安全情况以及资源利用率等等。一系列复杂工业过程都需要对液位进行高精度的控制,如发电厂蒸汽锅炉的液位控制,化工原料反应罐的液位控制。除了在工业生产上的应用之外,液位控制在环境治理上也发挥可很大的作用。通过检测江河水位来调整水坝吞吐量,以避免水位过高给人民群众带来生命财产安全。液位控制系统给我们的生产生活带来了很大的进步,它使得我们的工

业生产更加的安全高效,节约了成本和时间。

PID控制算法作为传统的工业控制算法被广泛应用,在液位控制系统中PID控制器也一度成为应用最广泛的控制器。PID控制器是根据系统设定值和实际测量值的差值,通过比例、积分和微分来实现控制。对于系统结构和生产过程比较简单的工业过程而言具有较好的控制效果。但是现代工业中存在越来越多的非线性、大时滞的情况,而且对于系统的控制精度要求越来越高,传统PID算法难以达到其控制要求。本文将传统PID算法结合模糊理论和神经网络模型,形成了模糊神经网络PID算法来对液位系统进行控制。

收稿日期:2018-11-23

* 基金项目:上海工程技术大学研究生科创项目(18KY0227)资助

模糊神经网络 PID 算法依据人的先验知识和学习能力,不需要掌握系统的精确数学模型就能对系统进行控制。改算法是根据系统的实时运行状态来调整 PID 参数,有很好的抗干扰能力。模糊神经网络 PID 算法结合了模糊控制技术^[1-5]和神经网络控制技术^[6-8]的优点,能对复杂的工业生产过程进行精确控制。

1 液位控制系统概述

1.1 A3000 型水箱液位控制系统

本文以 A3000 型的水箱实验平台^[9]作为研究对象,其实验对象系统主要包括大型储水箱、对流换热系统、有机玻璃水箱(3 个)、加热锅炉和纯滞后盘管实验装置。供水系统分成两路构成:一路由进口动力水泵、电动调节阀、电磁流量计、手动切换阀构成;另一路由变频器、进口动力水泵、涡轮流量计、手动切换阀组成。A3000 型水箱实验平台液位控制示意图如图 1 所示,依据工业液位控制的需求给定液位高度,控制器根据给定的高度发出控制指令给电磁调节阀,阀门开始闭合调节,液位传感器同步开始测量实时液位值与设定值的差值反馈给控制器,形成闭环控制。

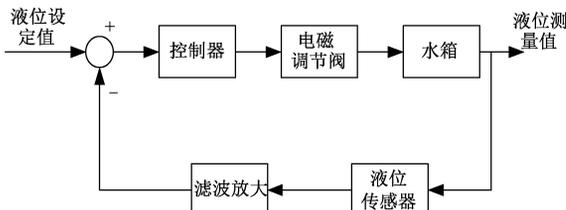


图 1 A3000 液位控制示意图

1.2 水箱数学模型建立

在工业生产中,液位控制系统是一种具有大滞后、强耦合的非线性系统,它存在管道、温度和水箱压力等不确定的外界因素^[3]。本文采用二阶惯性滞后的双容水箱作为控制对象。

双容水箱的液位控制系统结构如图 2 所示。根据单位时间内水箱中水的流入量和流出量的差值应等于水箱中剩余水量的变化率的静态平衡关系以及液体阻力的定义可得上水箱的传递函数为:

$$\frac{H_1(s)}{Q_1(s)} = \frac{R_1}{R_1 S_1 s + 1} \quad (1)$$

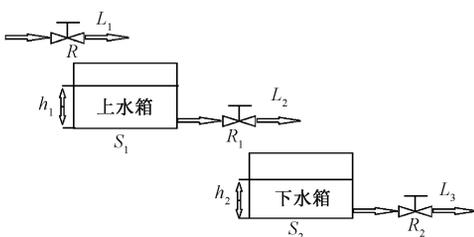


图 2 双容水箱液位控制结构

根据推导原理可以推出下水箱得传递函数为:

$$\frac{H_2(s)}{Q_2(s)} = \frac{R_2}{R_2 S_2 s + 1} \quad (2)$$

根据上下水箱的模型表达式,可以推导出双容水箱的数学模型,在此基础上加入水箱的时滞因素最终确定传递函数为:

$$G(s) = \frac{H_2(s)}{Q_1(s)} = \frac{K}{(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)} e^{-\tau s} \quad (3)$$

其中时间常数 T_1 和 T_2 表示 SR_1 和 SR_2 表; τ 表示纯滞后时间; K 表示静态增益。

2 基于模糊神经网络 PID 控制器设计

模糊神经网络是模糊控制同神经网络结合的产物,它集合了模糊控制与神经网络的优点,既能利用有限的模糊规则信息进行模糊逻辑推理,还有对非线性系统很好的逼近能力,在解决非线性、大时滞的问题上有很好的效果。模糊神经网络 PID 控制器^[10-12]是由模糊神经网络和传统 PID 算法两部分构成。即采用常规的 PID 对控制对象进行闭环控制,由模糊神经网络对 PID 的 3 个参数进行在线调整,从而实现 PID 控制参数的自适应控制。模糊神经网络 PID 控制系统原理图如图 3 所示。

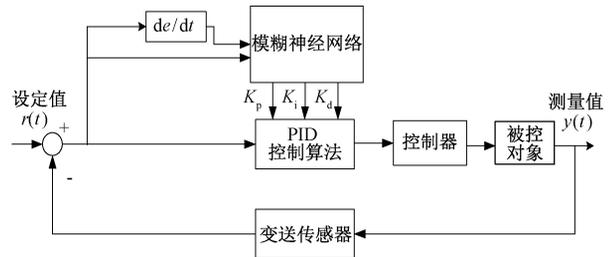


图 3 模糊神经网络 PID 控制系统原理

2.1 PID 控制算法

PID 控制算法是现代工业中应用最为广泛的一种控制方式,由比例、积分、微分 3 个环节组成。PID 控制器是由比例、积分、微分 3 个环节组成的,它是通过反馈的实际测量值和设定值的差值来进行闭环控制。其输出信号的数学表达式为:

$$u(t) = K_p \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (4)$$

增量式 PID 算法是传统 PID 算法中的一种形式,是对控制量的增量进行控制的一种算法。它是将当前控制量和上一时刻的控制量做差值,以差值作为新的控制量,是一种递推算法,其控制率的数学表达式如下:

$$\Delta u[n] = u[n] - u[n-1] \quad (5)$$

$$\Delta u[n] = K_p \{ e[n] - e[n-1] \} + K_i e[n] + K_d \{ e[n] - 2e[n-1] + e[n-2] \} \quad (6)$$

其中 $K_i = K_p \frac{T}{T_i}$ 为积分系数, $K_d = K_p \frac{T}{T_d}$ 为微分系

数, T 为采样周期。

2.2 控制器模糊逻辑设计

模糊神经网络控制系统将液位实际测量值 $y(t)$ 和设定值 $r(t)$ 的差值 e 以及差值变化率 ec 作为系统的输入变量, 将 PID 控制器的三个指标比例系数 K_p 、积分系数 K_i 、微分系数 K_d 作为输出。取这五个语言变量的模糊子集为 {NB(负大)、NM(负中)、NS(负小)、ZE(零)、PS(正小)、PM(正中)、PB(正大)}, 量化为 7 个等级。其中误差 E 和误差变化率 EC 的论域取 $\{-6, -5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6\}$, PID 三个参数 K_p 、 K_i 和 K_d 的论域取为 $\{-0.6, -0.4, -0.2, 0, 0.2, 0.4, 0.6\}$ ^[11-12]。本文的神经元激活函数采用高斯函数。

模糊控制会根据系统的输入与输出关系建立一个由 49 条模糊条件语句构成的模糊规则库。此模糊神经网络系统具有 2 个输入变量, 3 个输出变量, 因此模糊规则可表示为:

IF $e_1 = A_1$ and $ec_1 = A_2$ THEN $K_p = B_1$ and $K_i = B_2$ and $K_d = B_3$

根据相关的先验知识和实际操作经验总结出 PID 3 个参数 K_p 、 K_i 和 K_d 对该液位系统输出的影响制定了模糊规则如表 1~3 所示。

表 1 K_p 模糊控制规则

ec	e	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
PB	ZO	NS	NS	NM	NM	NB	NB	NB
PM	ZO	ZO	NS	NM	NM	NM	NB	NB
PS	PS	PS	ZO	NS	NS	NM	NM	NM
ZO	PM	PS	PS	ZO	NS	NM	NM	NM
NS	PM	PM	PM	PS	ZO	NS	NM	NM
NM	PB	PB	PM	PM	PS	ZO	ZO	ZO
NB	PB	PB	PM	PM	PS	PS	ZO	ZO

表 2 K_i 模糊控制规则

ec	e	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
PB	ZO	ZO	PS	PM	PB	PB	PB	PB
PM	ZO	ZO	PS	PM	PM	PB	PB	PB
PS	NS	NS	ZO	PS	PS	PM	PM	PM
ZO	NM	NS	NS	ZO	PS	PS	PM	PM
NS	NM	NM	NS	NS	ZO	PS	PS	PS
NM	NB	NB	NM	NM	NS	ZO	ZO	ZO
NB	NB	NB	NB	NM	NM	ZO	ZO	ZO

2.3 模糊 Mamdani 神经网络结构及算法

模糊 Mamdani 神经网络模型^[13-14]如图 4 所示, 是一个 5 层的前馈网络, 液位控制系统的测量误差 e 以及误差变

表 3 K_d 模糊控制规则

ec	e	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
PB	PS	ZO	ZO	ZO	ZO	PB	PB	PB
PM	NM	NS	NS	NS	ZO	PS	PS	PS
PS	NB	NM	NS	NS	ZO	PS	PS	PS
ZO	NB	NM	NM	NS	ZO	PS	PS	PS
NS	ZO	PS	PS	PS	ZO	PS	PS	PS
NS	ZO	PS	PM	PS	ZO	PS	PS	PS
NS	NB	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PM
NM	NS	NS	NS	NS	ZO	NS	PM	PM
NB	PS	PS	ZO	ZO	ZO	PB	PB	PB

化率 ec 作为模糊神经网络的输入神经元, PID 控制器的 3 个指标比例系数 K_p 、积分系数 K_i 、微分系数 K_d 作为输出神经元。它由输入层、隶属度函数生成层、推理层、归一化层和输出层组成。本文仅对归一化层到输出层的权值进行调整, 其他连接层权值都设为 1。

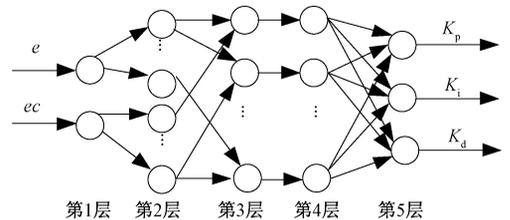


图 4 基于 Mamdani 模型的模糊神经网络

Mamdani 模糊神经网络结构一般分为 5 层^[15], 各层的输入输出关系如下:

第 1 层为输入层, 将输入向量的各个分量与该层节点相匹配, 它的作用是将输入向量 x_i 的各个分量传输到下一层, 由于本文的输入为误差和误差变化率, 因此该层的节点数为 2。

输入输出为:

$$In_i^{(1)} = x_i; Out_{ij}^{(1)} = x_{ij} = x_i$$

第 2 层为隶属度函数层, 该层是模糊神经网络的第 1 个隐层, 其中每个节点都表示一个语言变量值。该层的作用主要是计算输入向量 x_i 的各个分量相对于各个语言变量值模糊集合的隶属度函数。根据前面的内容可知 e 和 ec 被分为 7 个语言变量, 因此该层节点数为 14。该层的隶属度函数一般选用高斯函数。

隶属度函数为:

$$h_j = \exp\left(-\frac{|x_i - c_{ij}|^2}{\sigma_{ij}^2}\right)$$

输入输出为:

$$In_{ij}^{(2)} = Out_{ij}^{(1)}; Out_{ij}^{(2)} = \exp\left(-\frac{(x_i - c_{ij})^2}{\sigma_{ij}^2}\right) = A_j^i(x_i)$$

其中, c_{ij} 、 σ_{ij} 分别为第 i 个输入变量的第 j 个模糊集合

的隶属度函数的中心和宽度; x_i 为第 i 个输入变量。

第 3 层为模糊推理层,该层是模糊神经网络的第 2 个隐层,其中每个节点都表示已知模糊规则库中的一条模糊规则。该层主要用来确定模糊规则的匹配情况,并计算出各个模糊规则的适应度,由模糊规则数可知该层节点数为 49。

输入输出为:

$$In_i^{(3)} = Out_{ij}^{(2)}; Out_i^{(3)} = A_1^{i_1}(x_1) \times A_2^{i_2}(x_2)$$

其中, $i_1 = \{1, 2, \dots, 7\}; i_2 = \{1, 2, \dots, 7\}; l = 1, 2, \dots, 49$ 。

第 4 层为归一化层,该层的节点数与第三层相同,该层的作用是实现归一化运算。

输入输出为:

$$In_i^{(4)} = Out_i^{(3)}; Out_i^{(4)} = Out_i^{(3)} / \sum_{i=1}^{49} Out_i^{(3)}$$

其中, $l = 1, 2, \dots, 49$ 。

第 5 层为输出层,该层的作用是进行清晰化运算。

输入输出为:

$$In_i^{(5)} = Out_i^{(4)}; Out_k^{(5)} = \sum_{j=1}^m \omega_{ij} Out_i^{(4)} = y_k$$

输出结果为:

$$K_p = Out_1^{(5)}, K_i = Out_2^{(5)}, K_d = Out_3^{(5)}$$

其中, $k = 1, 2, 3$ 。

确定模糊神经网络结构之后,根据已知的模糊规则可以将输入量对应的语言变量确定,同时还要确定第二层中激励函数的参数以及第 5 层中的权值。

令性能指标函数为:

$$E = \frac{1}{2} (rin(k) - yout(k))^2 \quad (7)$$

其中, $rin(k)$ 和 $yout(k)$ 表示系统的液位设定值和当前值。

网络权值的学习算法如下:

$$\omega_j(k) = \omega_j(k-1) + \eta(yout(k) - y_{49}(k))h_j + \alpha(\omega_j(k-1) - \omega_j(k-2)) \quad (8)$$

式中: $j = 1, 2, \dots, 49; \eta$ 为学习速率。

确定权值的算法之后,利用误差反传算法计算隶属度函数节点中心和基函数宽度的调整变化量,再利用梯度寻优算法来调整中心和基函数宽度。

$$\Delta\sigma = (yout(k) - y_{49}(k))\omega_j h_j \frac{|X - C_j|^2}{\sigma_j^3} \quad (9)$$

$$\sigma_j(k) = \sigma_j(k-1) + \eta\Delta\sigma_j + \alpha(\sigma_j(k-1) - \sigma_j(k-2)) \quad (10)$$

$$\Delta c_{ji} = (yout(k) - y_{49}(k))\omega_j \frac{x_j - c_{ji}}{\sigma_j^2} \quad (11)$$

$$c_{ji}(k) = c_{ji}(k-1) + \eta\Delta c_{ji} + \alpha(c_{ji}(k-1) - c_{ji}(k-2)) \quad (12)$$

根据已知的神经网络结构和模糊逻辑算法得到模糊神经网络算法流程如图 5 所示。

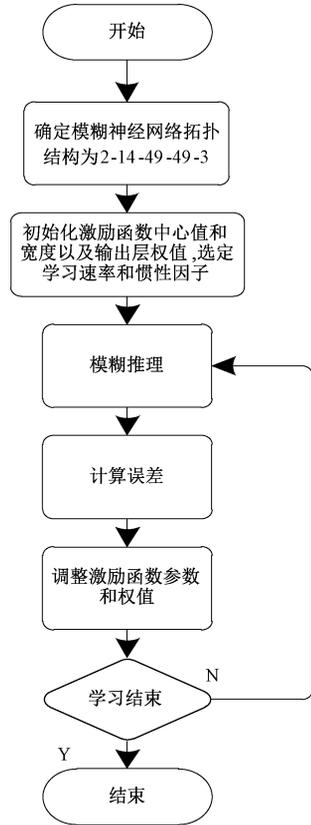


图 5 模糊神经网络算法流程

3 仿真与实验设计

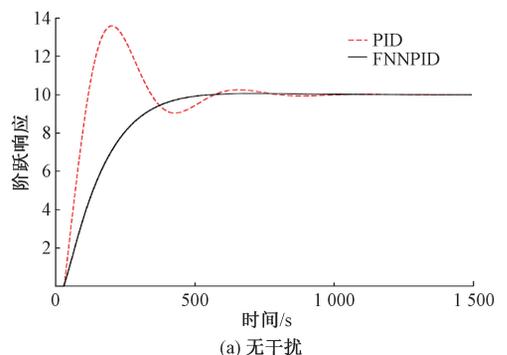
3.1 MATLAB 仿真实验

为了能够更加直观地了解模糊神经网络算法的优越性,本文将结合建立的双容水箱数学模型,先在 MATLAB 中编写 m 文件程序进行仿真实验^[16-17]。将液位的误差以及误差变化率作为系统的输入变量,对输入变量都取 7 个模糊子集,则确定最终的神经网络结构为 2-14-49-49-3。

根据上文建立的双容水箱的传递函数模型:

$$G(s) = \frac{K}{(T_1s + 1)(T_2s + 1)} e^{-\tau s} \quad (13)$$

取 $K = 2, T_1 = 50\ 000, T_2 = 500, \tau = 30$ 。网络学习速率和动量因子分别取为 $\eta = 0.2$ 和 $\alpha = 0.02$, 仿真结果如图 6 所示。



(a) 无干扰

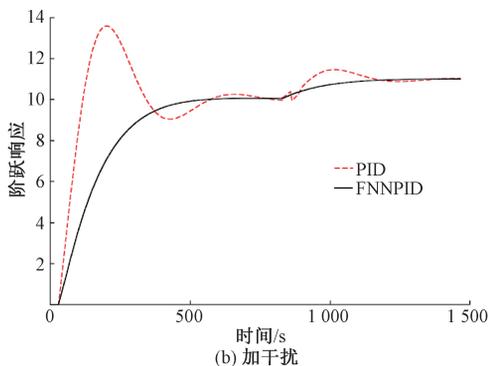


图6 阶跃响应曲线对比

如图6(a)所示,分别采用PID算法和模糊神经网络PID算法对系统进行控制。采用传统PID算法控制的阶跃响应曲线具有大约40%的超调量,且调整时间为1000s;采用模糊神经网络算法控制的曲线没有超调量,且调整时间为750s,相比传统PID算法在超调和调整时间上都具有很大的优势。图6(b)为在800s处加上一个大小为1的阶跃干扰信号的控制曲线。从图6可以看出模糊神经网络对于干扰具有更好的调节能力,具有更强的鲁棒性和抗干扰能力,并且系统具有很好的适应性。

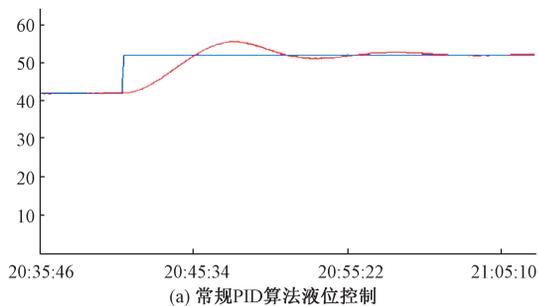
3.2 水箱控制实验设计

本文已经通过计算机对模糊神经网络PID算法和传统PID算法进行了仿真实验比较。为了进一步对仿真结果进行验证,借助A3000过程控制实验平台设计了具体实验方案^[15,18]。利用实验平台中的JX-300X型DCS控制系统自带的SCKey组态软件构建了双容水箱实验装置监控系统,运行Advan Trol监控软件可对A3000实验装置中各个变量进行监控。MATLAB和监控软件Advan Trol之间利用OPC通讯技术进行数据传输。实验时,由JX-300X OPC将数据读取到MATLAB中,应用已编好的程序,对获得的数据进行实时处理然后再传输给OPC,即用控制量对水箱输出进行控制。

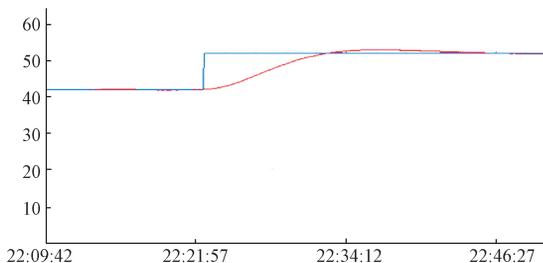
本文所涉及的控制算法包括两个部分:1)传统PID算法,它是根据液位的误差来进行控制;2)模糊神经网络PID算法,它是模糊理论和神经网络模型来对PID参数进行在线调整,以达到最优控制。

分别用传统PID算法和模糊神经网络PID算法对液位系统进行测试,两者的控制效果如图7(a)和(b)所示。

由图7可以看出,液位调节过程中采用传统PID算法的液位调整时间约为1500s,超调量约为30%,而采用模糊神经网络PID算法的液位调整时间仅为1200s并且几乎没有超调。通过以上的试验曲线可以得出结论:水箱实验效果同仿真结果相似,模糊神经网络PID算法的超调量更小,调整时间更短,可以更好的满足液位控制系统在控制精度和动态性能等方面的要求,相比传统的PID算法具有



(a) 常规PID算法液位控制



(b) 模糊神经网络PID算法液位控制

图7 水箱液位控制实验效果

较为明显的优越性。

4 结 论

本文提出一种将模糊理论和神经网络模型结合运用到液位系统的PID控制中的解决方案,采用基于模糊神经网络PID算法的液位控制系统能够综合模糊控制和神经网络控制的优点,不但使模糊控制具有自学习能力,而且赋予神经网络推理归纳能力。从仿真实验结果和水箱实验图可以看出模糊神经网络PID算法在超调量和调整时间上相比传统PID算法具有很大优势,在面对干扰时具有较强的鲁棒性和抗干扰能力,并且系统具有很好的自适应能力,控制效果更佳。模糊神经网络PID算法在液位控制系统中的应用研究对于智能控制算法在解决复杂工业控制系统中控制效果不佳、参数整定困难的问题,对于工业控制系统向自动化和智能化方向发展都有重要的意义。

参考文献

- [1] 崔玉国, 刘尔春, 杨依领, 等. 基于改进PID的压电微定位平台反馈控制[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(6): 215-223.
- [2] 沈佳焯, 吴雷. 基于磁链优化模糊控制的电动汽车驱动[J]. 电子测量技术, 2018, 41(11): 68-72.
- [3] 贾云辉, 邱杨, 谢富华, 等. 基于模糊控制的智能火灾报警系统[J]. 国外电子测量技术, 2017, 36(11): 94-98.
- [4] 翟园林, 王建立, 孟浩然, 等. 基于模糊PID控制的望远镜伺服控制系统[J]. 电子测量技术, 2012, 35(3): 11-15.
- [5] 胡娟, 王振聿, 王福忠. 基于模糊神经网络的重介质悬

- 浮液的密度和液位的控制[J]. 中国煤炭, 2012, 38(2):88-91.
- [6] 付光杰, 潘海龙. 基于神经网络观测器的 PMSM 无传感器矢量控制[J]. 国外电子测量技术, 2018, 37(5): 98-101.
- [7] 王振雷. 模糊神经网络理论及其在复杂系统中的应用研究[D]. 沈阳:东北大学, 2002.
- [8] 韩敏, 孙燕楠. 多输入模糊神经网络及其应用[J]. 系统工程与电子技术, 2003, 25(10):1249-1252,1291.
- [9] 盛立, 周东华, 高明. 双容水箱系统的故障检测虚拟仿真实验平台设计[J]. 实验技术与管理, 2017, 34(10): 98-101,116.
- [10] 白国振, 俞洁皓. 基于改进模糊神经网络的 PID 参数自整定[J]. 计算机应用研究, 2016, 33(11):3358-3363,3368.
- [11] 李斌, 雷渊超, 吴今培. 模糊控制与模糊神经网络研究的现状及展望[J]. 食品科学技术学报, 1995(1): 30-34.
- [12] 高润泉, 杨志成, 王宏, 等. 模糊神经网络控制在二阶液位控制中的应用[J]. 化工自动化及仪表, 2008, 35(2):75-77.
- [13] 张佩. 模糊神经网络控制器的研究[D]. 上海:上海理工大学, 2008.
- [14] 李明伟, 陈守雄. 模糊液位控制器的设计与 MATLAB 仿真[J]. 自动化技术与应用, 2006, 25(6):25-26,29.
- [15] 田民乐, 刘少民. 一种新型的模糊神经网络及其应用[J]. 模糊系统与数学, 1998(4):56-61.
- [16] 王士同. 模糊系统、模糊神经网络及应用程序设计[M]. 上海:上海科学技术文献出版社, 1998.
- [17] 刘金琨. 先进 PID 控制 MATLAB 仿真[M]. 北京:电子工业出版社, 2013: 76-77.
- [18] 张明. 基于模糊神经网络 PID 的三容水箱液位控制系统研究[D]. 阜新:辽宁工程技术大学, 2011.

作者简介

程宗政, 硕士研究生, 主要研究方向为复杂工业过程的自动控制。

E-mail:502684515@qq.com

施一萍(通信作者), 副教授, 硕士生导师, 主要研究方向为智能控制和软件工程。

E-mail:syp@sues.edu.cn