



# 基于模糊 PID 控制的船闸闸门同步控制器 设计与仿真<sup>\*</sup>

万海霞, 马慧卿

(中交水运规划设计院有限公司, 北京 100007)

**摘要:** 船闸是航道上的通航建筑物, 其通过能力制约着航道的运输量, 对控制系统进行技术改进是提升船舶过闸效率最行之有效的方法之一。模糊控制是通过建立规则库, 并结合大量的实践及专家经验确定隶属度函数而建立的非精确调节模型。将模糊 PID 控制应用于双侧闸门变速跟随控制, 利用开度仪的信号反馈扰动液压系统流量, 从而调节闸门开启速度, 形成闭环控制, 并经仿真及现场功能测试。结果表明, 该系统保障了控制系统的稳定性、可靠性、自适应性, 闸门同步运行良好, 船舶过闸稳定性及效率有明显改善。

**关键词:** 船闸; 自动控制系统; 可编程逻辑控制器; 模糊 PID 控制器

中图分类号: U 641.3<sup>+</sup>3

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2023)04-0174-06

## Design and simulation of synchronous controller of ship lock gate based on fuzzy-PID control

WAN Haixia, MA Huiqing

(CCCC Water Transportation Consultants Co., Ltd., Beijing 100007, China)

**Abstract:** Ship lock is an important navigation structure in the channel. The capacity of the ship lock restricts the transportation capacity of the channel. Technical improvement of the control system is one of the most effective methods to improve the efficiency of the ship lock. Fuzzy control is an imprecise regulation model established by establishing a rule base and combining a large number of practices and expert experience to determine the membership function. In this paper, fuzzy-PID control is applied to the dual-side gate variable speed follow-up control. The feedback of the opening instrument is used to disturb the flow of the hydraulic system, so as to adjust the opening speed of the gate and form a closed loop control. The simulation and field function tests are carried out. The results show that the system ensures the stability, reliability and adaptability of the control system, the gate operates well synchronously, and the stability and efficiency of ship passing the lock are improved significantly.

**Keywords:** ship lock; automatic control system; PLC; fuzzy-PID controller

国内船闸控制系统已普遍采用可编程逻辑控制器(PLC)为控制系统核心器件, 但双侧闸门同步性能较差。通过对江苏、山东、广西等地船闸实际调研, 国内船闸闸门运行的双侧同步通常采用等待位同步关门, 而全程同步控制不予考虑。即使采用比例-积分-微分(PID)控制, 一旦控制

器参数确定, 在运行几年之后, 随着机械设备的磨损和液压设备油压变化, 很难保证双侧闸门同步运行。如能采取一种带有自适应性的双侧闸门同步运行的控制方式, 将大幅提高船闸控制系统性能。

以 PLC 改善船闸双侧闸门控制稳定性和同步

收稿日期: 2022-10-25

<sup>\*</sup>基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFB1600400)

作者简介: 万海霞(1977—), 女, 硕士, 高级工程师, 从事港口、船闸 IT 技术及自动化、智慧化应用研究。

性为目的的相关研究有:廖君<sup>[1]</sup>通过分析影响船闸 PLC 可靠性的因素并提出一些针对性的保护措施,但对整体运行效率的提高意义不明显。王宁<sup>[2]</sup>综述国内船闸关于闸门同步所采用的技术,主要为双门双环 PID 运算同步控制程序、单门全程 PID 动态同步控制程序和减速位等待同步控制程序 3 种,但都不具备自适应性。张建平等<sup>[3]</sup>提出一种将模糊控制应用于船闸闸门同步控制的方法。这是首次有文章提出将模糊控制理论应用于船闸控制系统,缺点是控制器实现的前期效果较差,规则库精确化的周期较长。蒋纯谷<sup>[4]</sup>讨论了将模糊 PID 应用于 PLC 中的一种实现方法。虽然并未针对船闸系统,但可以将其基本应用理论扩展至船闸闸门同步控制。李敏捷<sup>[5]</sup>通过分析转向架分离装置平台升降机构的液压系统位置同步控制系统,其在船闸闸门变速同步实现比较有借鉴意义。综上所述,模糊 PID 在其他领域的变速控制或同步性控制已经有一些成功应用的案例,但尚未有将模糊 PID 自适应性的控制器引入到船闸控制的尝试。模糊 PID 的船闸闸门同步控制器的设计与探索对提高船闸控制系统性能具有很好的实践意义。

## 1 闸门控制原理及研究内容

### 1.1 闸门调速控制原理

电比例泵及比例流量控制阀是实现闸门和阀门速度调节的关键设备。电液比例变量柱塞泵可通过控制输入电信号的大小(0~10 V),实现对系统流量的直接控制。同时,电比例泵还具有液压反馈系统,当系统工作压力超过设定的压力值时,泵会自动减小输出流量,减少能源消耗,保证系统工作安全稳定。所以,通过 PLC 控制系统调节输出的模拟量电信号即可控制闸门运动速度。

### 1.2 研究内容

本文主要研究将模糊 PID 控制应用于双侧闸门变速跟随控制。利用开度仪的信号反馈扰动液压系统流量,从而调节闸门开启速度,形成闭环控制。利用模糊 PID 的闸门变速同步分为 3 步实

现:1)通过 PLC 对主动门慢→快→慢的速度给定;2)普通 PID 跟随的设置,使从动门与主动门速度保持一致;3)在 PID 跟随中加入模糊控制策略,实现 PID 模块的自适应性。

## 2 闸门同步模糊 PID 控制器设计与仿真

### 2.1 模糊 PID 控制设计

模糊 PID 是将模糊控制理论与 PID 控制器相结合,根据偏差  $e$  和偏差率  $e_c$  输出  $K_p$ 、 $K_i$ 、 $K_d$  3 个参数,使 PID 参数具有实时自适应性,也就是在船闸液压系统或闸门机械性能改变后,同步控制系统仍能保持较高运行精度<sup>[6]</sup>。本文 PID 模糊控制系统的控制策略如图 1 所示。

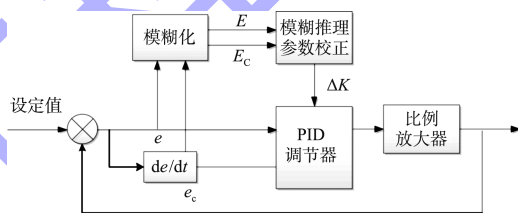


图1 模糊PID基本结构

#### 2.1.1 确定输入、输出变量及其模糊状态

设定船闸两侧闸门开度差值为  $e$ , 设定  $e_c$  为  $e$  的一阶导数, 即  $e_c = de/dt$ ;  $E$  和  $E_c$  分别为  $e$  和  $e_c$  模糊化后的模糊量;  $U$  为模糊控制量,  $u$  为  $U$  去模糊化后的精确量;  $\Delta K_p$ 、 $\Delta K_i$ 、 $\Delta K_d$  为待调参数。

$e$  和  $e_c$  将输入的工程量转化到相应的模糊论域  $[-6, 6]$ 。考虑船闸闸门合拢过程的运行时间为 2.5~3.0 min, 且双侧闸门的同步精度要求为厘米级, 控制品质要求中等, 变量模糊态分为 7 档, 分别为: 负大(NB)、负中(NM)、负小(NS)、零(ZO)、正小(PS)、正中(PM)、正大(PB)。根据以往工程经验, 设定  $\Delta K_p$  的基本论域为  $[-6, 6]$ ,  $\Delta K_i$  的基本论域为  $[-0.6, 0.6]$ ,  $\Delta K_d$  的基本论域为  $[-3, 3]$ <sup>[7]</sup>。

#### 2.1.2 定义隶属函数

常用的有三角形、正态分布、高斯、S 型隶属函数等。由于三角形隶属函数计算较简单、性能较好, 本文选用三角形隶属函数, 公式为:

$$L_A = \begin{cases} 0 & (x \leq x_1) \\ (x-x_1)/(x_2-x_1) & (x_1 < x \leq x_2) \\ (x_3-x)/(x_3-x_2) & (x_2 < x \leq x_3) \\ 0 & (x_3 < x) \end{cases} \quad (1)$$

公式中定义集合  $A$  为某一论域  $U$  上的任意子集。论域  $U'$  中的某一元素  $u'$  是否属于子集  $A$  是客观存在的, 可以用 1 和 0 表示, 1 表示  $u'$  在子集  $A$  中, 0 表示  $u'$  不在子集  $A$  中。因为子集  $A$  为模糊子集,  $u'$  是否属于  $A$  则有不分明性, 需要一个特征函数描述这种概率的大小, 即用  $[0,1]$  区间上的函数代替 0 和 1 两个数值。这个概率称为隶属度, 这个特征函数称为隶属函数。

### 2.1.3 建立规则库

规则库是模糊控制器的最核心部分。通常, 模糊控制的规则库是专家知识的总结, 从实践中提炼和归纳。模糊 PID 中,  $\Delta K_p$ 、 $\Delta K_i$ 、 $\Delta K_d$  的作用与在普通 PID 中近似, 专家经验得到的模糊输入量  $E$  和  $E_c$  与输出量  $\Delta K_p$ 、 $\Delta K_i$ 、 $\Delta K_d$  的规则库见表 1。

表 1  $\Delta K_p$ 、 $\Delta K_i$ 、 $\Delta K_d$  的规则库

输出量	$e$	$e_c$						
		NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
$\Delta K_p$	NB	PB	PB	PM	PM	PS	ZO	ZO
	NM	PB	PB	PM	PS	PS	ZO	NS
	NS	PM	PM	PM	PS	ZO	NS	NS
	ZO	PM	PM	PS	ZO	NS	NM	NM
	PS	PS	PS	ZO	NS	NS	NM	NM
	PM	PS	ZO	NS	NM	NM	NM	NB
	PB	ZO	ZO	NM	NM	NM	NB	NB
$\Delta K_i$	NB	NB	NB	NM	NM	NS	ZO	ZO
	NM	NB	NB	NM	NS	NS	ZO	ZO
	NS	NB	NM	NS	NS	ZO	PS	PS
	ZO	NM	NM	NS	ZO	PS	PM	PM
	PS	NM	NS	ZO	PS	PS	PM	PB
	PM	ZO	ZO	PS	PS	PM	PB	PB
	PB	ZO	ZO	PS	PM	PM	PB	PB
$\Delta K_d$	NB	PS	NS	NB	NB	NB	NM	PS
	NM	PS	NS	NB	NM	NM	NS	ZO
	NS	ZO	NS	NM	NM	NS	NS	ZO
	ZO	ZO	NS	NS	NS	NS	NS	ZO
	PS	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO
	PM	PB	NS	PS	PS	PS	PS	PB
	PB	PB	PM	PM	PM	PS	PS	PB

### 2.1.4 输出变量去模糊化

经过模糊推理, 由推理机得到一个模糊集, 这个模糊集并不能用于对象控制, 需要对模糊集进行模糊判决才能得到精确值。这个模糊判决的过程又称为去模糊化, 目前常用的方法是最大隶属度法、中位数法和加权平均法(重心法)。本文选用最大隶属度法, 具体方法是其输出精确值由模糊子集上的隶属度最大的元素直接决定。如果有两个及两个以上最大隶属度元素  $\Delta K(i)$ , 则取这些值的平均数最为输出精确值, 公式为:

$$\Delta K_p(k) = \frac{1}{L} \sum_i^L \Delta K(i) \quad (2)$$

$$\Delta K_i(k) = \frac{1}{M} \sum_i^M \Delta K(i) \quad (3)$$

$$\Delta K_d(k) = \frac{1}{N} \sum_i^N \Delta K(i) \quad (4)$$

式中:  $\Delta K_p(k)$ 、 $\Delta K_i(k)$ 、 $\Delta K_d(k)$  分别为  $\Delta K_p$ 、 $\Delta K_i$ 、 $\Delta K_d$  的最大隶属函数的某一个输出, 将所有最大输出求平均数。

### 2.2 模糊 PID 仿真

为了验证模糊 PID 在双侧闸门跟随时时的调节性能, 本文利用 Matlab 软件对模糊 PID 电路进行仿真。

1) 建立模糊编辑器。在 Matlab 中调用一个模糊控制器, 并按照要求添加 2 个输入量  $e$  和  $e_c$ , 以及 3 个输出量分别为  $\Delta K_p$ 、 $\Delta K_i$ 、 $\Delta K_d$ , 并为所有输入输出量选择三角形隶属函数。如图 2 所示。

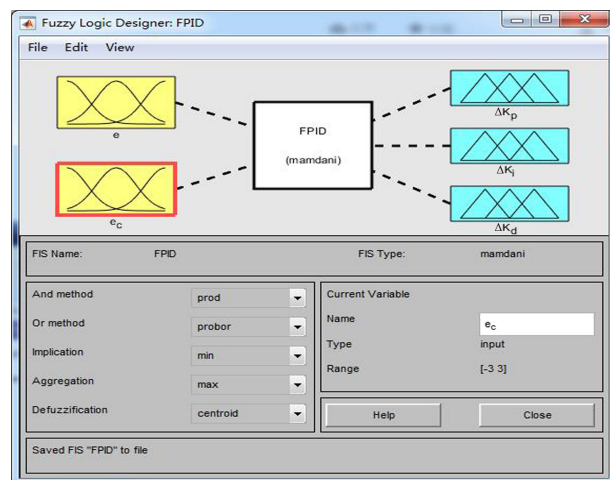


图 2 Mamdani 型模糊控制器

2) 编辑规则库。根据表1,将所有49条关于输入量 $e$ 、 $e_c$ 和输出量 $\Delta K_p$ 、 $\Delta K_i$ 、 $\Delta K_d$ 的规则逐条输入规则编辑器。去模糊化采用最大隶属度的方法。

3) 参数变量的三维曲线。输出量 $\Delta K_i$ 在不同 $e$ 、 $e_c$ 时输出值在规则库的作用下显示出的表面特征,图中输出值较高时呈浅色,输出值较低时呈深色。

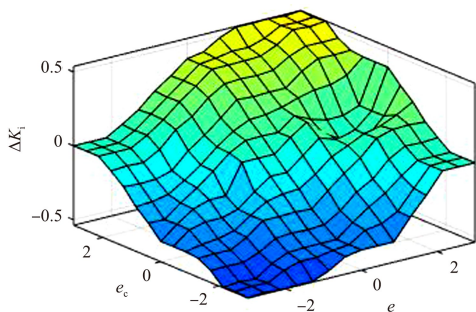


图3 输出量三维曲线

4) 闸门PID模糊控制器的Matlab/Simulink仿真。闸门控制系统过程中要经过比例泵的电液比例阀和液压缸负载,这2个环节都具有零初始条件下的线性响应。

利用Matlab中的Simulink库,首先置入一个模糊控制器,在其参数设定窗口选用之前定义好的FPID的模糊控制器。按传递函数搭建仿真电路,仿真结果见图4。

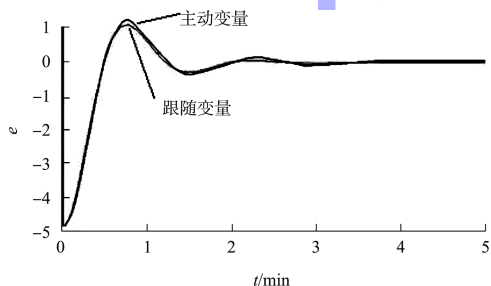


图4 仿真曲线对比

仿真结果表明:在选取合理参数的前提下,模糊PID可以获得较好的稳定特性。模糊PID比

普通PID响应更快、超调量小,尤其能够适应参数的变化。

### 3 基于模糊控制算法的PLC双侧闸门同步控制

船闸对闸门的控制要求主要分为2个方面:

1)慢→快→慢的变速运行;2)两侧闸门必须同步运行。慢→快→慢变速可以通过PLC的AO模块控制比例阀的流量,从而达到调节闸门运行速度的目的,而双侧闸门同步运行,通过PID调节实现。

#### 3.1 闸门变速运行程序

以0~10V电比例泵的闸门开启为例,闸门启动时以PLC每毫秒累计的方法使输出电流平稳增加至4V,泵低速启动。当开度值达到10%时,再用每毫秒递增的方法在5s内使电流增加到8V,泵开始已进入高速运行。当开度达到90%,输出电流再次减至4V,泵在接近开终位前降到一个较小的速度值,停止。

#### 3.2 PID跟随程序

在上述主动闸门速度设定完成后,从动闸门通过PID调节跟随主动闸门开闭,以保证双侧闸门同时开到位。通常,将带有CPU侧的闸门作为主动门,另一侧闸门作为从动门。根据主动门的当前开度,应用PID算法控制跟随门的运行速度。以Schneider unity pro软件为例,编程中需要调用图5中的PID控制器,并为控制器正确连接参数及输入、输出量。其中PV为从动门的开度值,SP为主动门的开度值,TR\_I为主动门以在系统中设定好慢→快→慢阶梯变化固定运行的主值,OUT为从动门经过PID调节后得到的跟随值。通过PID模块不断的测量、比较、执行过程,将从动门的实际开度与主动门开度相比较,用偏差纠正系统的响应,从而调节比例放大器的输出值,以调节控制双侧闸门同步。



在PBD中的表示形式:

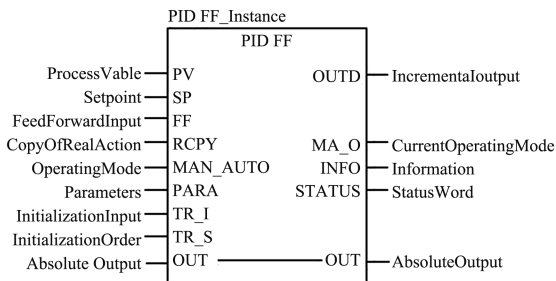


图5 PID 管脚功能

### 3.3 模糊控制算法的 PLC 实现程序

利用 PID 参数的变量查询表, 利用软件实现双侧闸门同步的模糊 PID 控制。模糊 PID 的控制流程与普通 PID 类似, 只是增加了模糊化和去模糊化的过程。其程序设计流程见图 6。

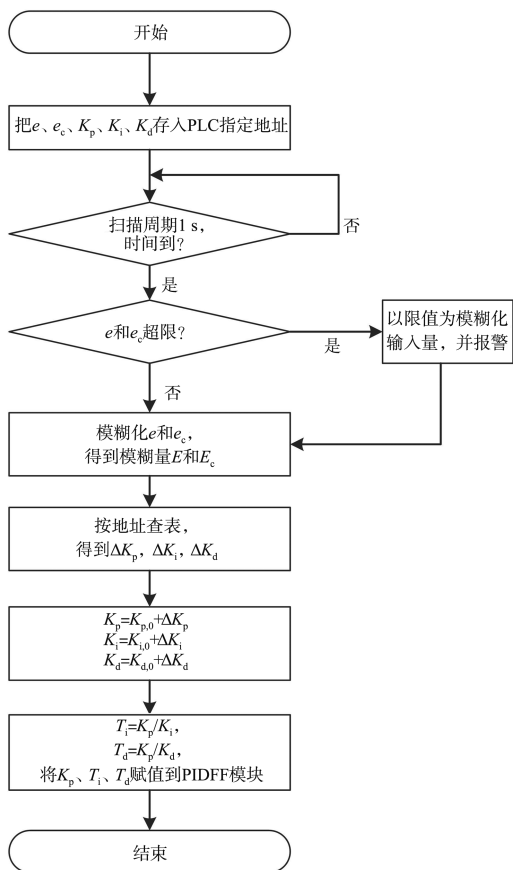


图6 模糊 PID 程序流程

具体实现程序以  $\Delta K_p$  为例, 将表 1 转换成表 2。

表 2  $\Delta K_p$  的模糊规则转换

$m$	$n$	$E$	$E_c$	$i$						
				1	2	3	4	5	6	7
1	1	NB	NB	0	0	0	0	0	0	1
1	2	NB	NM	0	0	0	0	0	0	1
1	3	NB	NS	0	0	0	0	0	1	0
1	4	NB	ZO	0	0	0	0	0	1	0
1	5	NB	PS	0	0	0	0	1	0	0
1	6	NB	PM	0	0	0	1	0	0	0
1	7	NB	PB	0	0	0	1	0	0	0
2	1	NM	NB	0	0	0	0	0	0	1
2	2	NM	NM	0	0	0	0	0	0	1
2	3	NM	NS	0	0	0	0	0	1	0
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
7	6	PB	PM	1	0	0	0	0	0	0
7	7	PB	PB	1	0	0	0	0	0	0

将  $m$ 、 $n$ 、 $i$  的值组成矩阵  $R$ , 其中  $m$ 、 $n$ 、 $i$  的取值范围是 1~7 的自然数, 对应  $E$ 、 $E_c$  和  $\Delta K_p$  的模糊集 7 个分档, 即 {NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB}。将矩阵  $R$  称为  $E$ 、 $E_c$  和  $\Delta K_p$  的模糊关系矩阵。同理, 分别得到关于  $\Delta K_i$ 、 $\Delta K_d$  的模糊关系矩阵。

### 4 闸门同步运行效果测试

在船闸投入运行前需要进行联合调试。第 1 步进行关键设备闸门和阀门的运行同步性测试。闸门同步运行效果经过时间测试, 同步良好, 闸门同步时间测试见表 3, 左右闸门时间开度曲线见图 7。

表 3 闸阀门同步时间测试

闸阀门	过程	时间/s	
		左侧闸门	右侧闸门
上游闸门	开闸门	280	280
	关闸门	275	275
上游阀门	开阀门	330	332
	自落阀门	177	180
	强落阀门	90	90
下游闸门	开闸门	280	280
	关闸门	275	275
下游阀门	开阀门	330	332
	自落阀门	177	180
	强落阀门	90	90

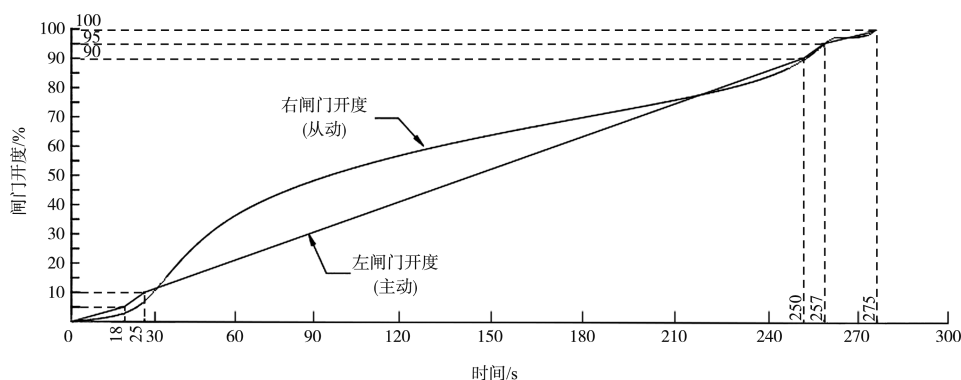


图7 左右闸门时间开度曲线

通过分析闸门控制的功能与方式,将模糊控制PID控制器运用到船闸双侧闸门同步运行的控制中,实现了自适应模糊控制器在船闸双侧闸门同步的应用。并通过仿真和现场试验验证可行性。

经过测试结果表明,闸门全程运行时符合控制工艺设计要求,闸门合拢左右同步性良好、鲁棒性好。

## 5 结论

1) 本文通过对模糊控制策略和模糊控制算法的研究,以合理的硬件设计结合软件程序,实现了自适应模糊控制器在船闸双侧闸门同步的应用,并通过仿真和现场试验,验证其可行性。

2) 本文所述模糊控制器的自适应性良好,解决了以往船闸闸门随着使用年限增加同步性变差的普遍现象。由于船闸双侧闸门运行过程需要经过比例放大器、比例阀、电比例泵、液压缸多道环境,且闸门本身又会受到水流、底边摩擦力等外力,所以其运动精度在运行一两年之后发生改变的情况比较普遍。这时普通控制系统就需要重新测定参数,耗费人力,停航维修则严重影响经济效益。

3) 模糊PID通过隶属函数列出变量控制规则,不依赖精确的数学模型,而是通过建立规则库,利用隶属度函数确定输出值。在工程实践中,有利于通过更短的周期建立起成熟的控制器,结合PID自身反映速度快、灵敏性高的特性,使整个系统具有稳定性高的优点。

## 参考文献:

- [1] 廖君. 蜀山船闸自动化控制系统可靠性设计[J]. 中小企业管理与科技(下旬刊), 2015(2): 214-216.
- [2] 王宁. 浅述闸阀门开度处理和变速同步控制方法[C] // 中国航海学会. 中国航海学会船闸专业委员会 2007 年年会论文集. 北京: 中国航海学会, 2007: 30-39.
- [3] 张建平, 刘增元, 李丹锋. 基于模糊控制船闸闸门同步的设计[J]. 制造业自动化, 2014, 36(12): 138-139, 146.
- [4] 蒋纯谷. 模糊PID在PLC中的应用方法研究[J]. 机械制造与自动化, 2011, 40(3): 179-181.
- [5] 李敏捷. 基于PID算法的电液比例同步控制系统的研究及应用[D]. 重庆: 重庆大学, 2014.
- [6] 刘利. 基于DSP的电机位置伺服控制系统的研究[D]. 厦门: 厦门理工学院, 2018.
- [7] 覃彦之. pH过程模糊PID控制的研究[J]. 数字技术与应用, 2011(8): 50, 52.

(本文编辑 王璁)

欢迎投稿 欢迎订阅