

改进灰色预测模糊 PID 控制策略

梁秀霞 牛菁洋*

(河北工业大学 控制科学与工程学院,天津 300130)

摘要 针对过程工业对气动调节阀的控制精度与稳定性有较高要求,而常规 PID 控制策略自适应性与实时性差,难以取得较好的控制效果的问题,根据 GM(1,1) 模型灰色作用量具有的动态特征来改进灰色预测模型,结合改进灰色预测控制与模糊 PID 控制的优点,提出了改进灰色预测模糊 PID 控制策略。仿真结果表明:改进控制策略明显优于常规 PID、模糊 PID、灰色预测模糊 PID 控制策略,使系统响应速度加快,超调量减小,且适用于不同的阀门定位系统。

关键词 气动调节阀;灰色作用量;灰色预测;模糊 PID 控制;阀门定位系统

中图分类号 TP273+.2 文献标识码 A 文章编号 1672-4321(2017)01-0087-05

Improved Grey Prediction Fuzzy PID Control Strategy

Liang Xiuxia Niu Jingyang

(College of Control Science and Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China)

Abstract For high demand to the control precision and stability of the pneumatic control valve in the process industry, with poor self-adaptability and real-time performance, the traditional PID control strategy is hard to achieve good control effect. The grey action based on the GM(1,1) have dynamic characteristics. Combining with the advantages of improved grey predictive control and fuzzy PID control, which put forward the improved grey prediction fuzzy PID control strategy. The simulation results show that this strategy possess better control performance compared with the traditional PID, fuzzy PID, grey prediction fuzzy PID control strategy, which response velocity improved and overshoot is decreased for applying to different valve positioning system.

Keywords pneumatic control valve; grey action; grey prediction; fuzzy PID control; valve positioning system

气动调节阀由于其结构特性而具备一些非线性特征,如滞后、死区等;由于调节阀工作环境时常发生变化(如:温度、压力、流体特性等),从而对象参数也随之改变,使系统具有不确定性,难以精确地建立阀门定位系统的数学模型;由于气动调节阀自身特性与工作环境的缘故,常规 PID 控制下系统稳定性较差^[1-3],而工业过程中又对调节阀的控制精度与系统稳定性都有较高的要求,因此,必须有效地提高阀门定位系统的自适应性与鲁棒性。

灰色预测能够预测系统的行为规律并制定相应的控制策略,在阀门定位系统中通过超前控制来抑制系统滞后性引起地阀门定位不准以及稳定性较差的问题^[4]。在灰色预测中,灰色作用量被用来反应数据变化关系,本文根据灰色作用量具有动态特性

这一特点,实现对灰色预测模型的改进,从而有效地提高预测精度;模糊控制有较强的容错能力,对于控制过程中数学模型的精确性要求不高,能很好地解决控制过程中的非线性、滞后性等问题^[5]。

本文在深入研究灰色预测理论和模糊算法控制基础上,把改进灰色预测模型与模糊 PID 控制相结合,提出了改进灰色预测模糊 PID 控制策略。

1 优化 GM(1,1) 模型

灰色作用量能表达数据之间的变化关系,且随着时间的推移不断变化,但常规 GM(1,1) 模型把外部扰动看作不变的,视灰色作用量为一个常数,这样虽然简化了模型,但与阀门定位系统的特性不相符合。本文将 GM(1,1) 模型中的灰色作用量改为动态

收稿日期 2016-08-19 * 通讯作者 牛菁洋 研究方向:智能检测和智能系统 E-mail: 460977417@qq.com

作者简介 梁秀霞(1972-)女 教授 博士 研究方向:智能检测与智能控制 E-mail: 460977417@qq.com

基金项目 河北省教育厅研究项目(zd2016071)

形式^[6-8]. 优化后的 GM(1, 1) 微分方程为:

$$x^{(0)}(k) + az^{(1)}(k) = b_1 + b_2k, \quad (1)$$

式中: a 为发展系数; $b_1 + b_2k$ 为改进后的灰色作用量.

阀门定位系统阀位输出时间序列:

$$X^{(0)} = [x^{(0)}(1) \ x^{(0)}(2) \ \dots \ x^{(0)}(n)]. \quad (2)$$

$X^{(0)}$ 的 AGO(累加生成) 序列为 $X^{(1)}$, $X^{(1)}$ 的紧邻均值生成序列为 $Z^{(1)}$:

$$Z^{(1)} = [z^{(1)}(1) \ z^{(1)}(2) \ \dots \ z^{(1)}(n)], \quad (3)$$

$$Z^{(1)} = 0.5x^{(1)}(k) + 0.5x^{(1)}(k-1), \quad (4)$$

$$k = 1 \ 2 \ \dots \ n.$$

改进后的参数列:

$$\hat{a} = (a \ b_1 \ b_2)^T, \quad (5)$$

$$Y = [x^{(0)}(2) \ x^{(0)}(3) \ \dots \ x^{(0)}(n)]^T, \quad (6)$$

$$B = \begin{bmatrix} -z^{(1)}(2) & 1 & 2 \\ -z^{(1)}(3) & 1 & 3 \\ \dots & \dots & \dots \\ -z^{(1)}(n) & 1 & n \end{bmatrix}. \quad (7)$$

对模型参数 $a \ b_1 \ b_2$ 进行辨识, 由最小二乘法可推出:

$$\hat{a} = (B^T B)^{-1} B^T Y, \quad (8)$$

公式(2)的白化方程:

$$\frac{dx^{(1)}}{dt} + ax^{(1)} = b_1 + b_2t, \quad (9)$$

白化方程的解:

$$x^{(1)}(t) = (x^{(0)}(1) - \frac{b_1}{a} - \frac{b_2}{a} + \frac{b_2}{a^2}) e^{-a(t-1)} + \frac{b_1}{a} + \frac{b_2}{a}t - \frac{b_2}{a^2}, \quad (10)$$

(10) 式离散化:

$$\hat{x}^{(1)}(k+1) = (x^{(0)}(1) - \frac{b_1}{a} - \frac{b_2}{a} + \frac{b_2}{a^2}) e^{-ak} + \frac{b_1}{a} - \frac{b_2}{a} + \frac{b_2}{a^2}. \quad (11)$$

将 $\hat{x}^{(1)}(k+1)$ 由 IAGO(累减生成) 新序列有:

$$\hat{x}^{(0)}(k+1) = \hat{x}^{(1)}(k+1) - \hat{x}^{(1)}(k) = (1 - e^a) (x^{(0)}(1) - \frac{b_1}{a} - \frac{b_2}{a} + \frac{b_2}{a^2}) e^{-ak}. \quad (12)$$

经递推法可得输出数据列 h 步预测值:

$$\hat{x}(k+h) = (1 - e^a) (x^{(0)}(1) - \frac{b_1}{a} - \frac{b_2}{a} + \frac{b_2}{a^2}) e^{-a(k+h-1)}. \quad (13)$$

经以上步骤即可获得灰色预测模型 GM(1, 1)

在 $k+h$ 时刻的输出预测值 $\hat{x}^{(0)}(k+h)$. 适当地选取数列长度 n 和预测步数 h , 对能否准确地预测系统变化起着重要的作用, 系统的惯性或滞后性越大则预测步数也越大.

2 改进灰色预测模糊 PID 控制策略

2.1 模糊 PID 控制器设计

模糊 PID 控制器以阀位误差 E 及阀位误差变化率 EC 作为输入量, 经模糊化、模糊规则下推理和解模糊后输出 PID 参数的修正量 $\Delta K_p, \Delta K_I, \Delta K_D$, 然后在线修正 PID 控制器中的 PID 参数 K_p, K_I, K_D , 根据不同时刻 E, EC 对 PID 参数进行整定, 这就是模糊自整定 PID 控制器^[9, 10].

2.2 模糊 PID 控制规则

输入量阀位误差 E 及阀位误差变化率 EC 的模糊论域为 $[-6 \ 6]$, 输出量 $\Delta K_p, \Delta K_I, \Delta K_D$ 的模糊论域为 $[-3 \ 3]$. 把上述输入变量和输出变量分为 7 个档次, 分别为负大 NB、负中 NM、负小 NS、零 Z、正小 PS、正中 PM、正大 PB; 模糊控制器输入量和输出量均为三角型隶属度函数.

模糊控制选取控制量的基本原则为: 误差小时以稳定系统、减小超调为主; 误差较大时以减小误差为主. 据此, 参数 K_p, K_I, K_D 的整定遵循以下原则.

(1) 当误差较大时, 为使系统的跟踪性能较好, 应适当选取较大的值 K_p , 同时为了避免微分过饱和, 选取较小的 K_D ; 为了限制系统有过大超调, 则需要减小积分作用, 甚至 K_I 可以取零.

(2) 当误差中等大小时, 为使系统具有较小的超调并具有一定的响应速度, K_p 取较小值; K_I 取值要适中, 过高过低都会影响系统稳定性; K_D 值应适当小一些且保持不变, 系统对 K_D 值变化很敏感.

(3) 当误差较小时, 将 K_p, K_I 值调到较大值来提高控制精度和减小静差; 考虑到系统在设定值附近可能出现震荡和系统抗干扰能力, 应适当选取 K_D 值, 可以在误差变化率较小时取值大一些, 误差变化率较大时取值小一些.

根据上述参数对系统的影响, 结合阀门定位控制的专家经验, 建立 $\Delta K_p, \Delta K_I, \Delta K_D$ 的模糊规则表, 如表 1 ~ 3.

模糊推理策略采用 Mamdani 推理方法, 解模糊化方法采用重心法, 由此取得 3 个精确量 $\Delta K_p, \Delta K_I, \Delta K_D$, PID 控制器的参数 K_p, K_I, K_D 的计算公式为:

$$\begin{cases} K_p = \Delta K_p \cdot \eta_1 + K_{p0} \\ K_I = \Delta K_I \cdot \eta_2 + K_{I0} \\ K_D = \Delta K_D \cdot \eta_3 + K_{D0} \end{cases} \quad (14)$$

K_{p0}, K_{I0}, K_{D0} 是模糊 PID 控制器参数的初始设定值, K_p, K_I, K_D 的调整因子为 η_1, η_2, η_3 , 通过模糊规则的结果进行查表与运算, 完成对 PID 参数的修正。

表 1 ΔK_p 模糊规则表
Tab. 1 ΔK_p fuzzy rule table

EC							
E	NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PB	PB	PM	PM	PS
NM	PB	PB	PB	PM	PM	PS	Z
NS	PM	PM	PM	PS	Z	Z	Z
Z	PS	PS	Z	Z	Z	NS	NS
PS	PS	PS	Z	Z	NS	NM	NM
PM	Z	Z	NS	NS	NM	NB	NM
PB	Z	Z	NS	NM	NB	NB	NB

表 2 ΔK_I 控制规则表
Tab. 2 ΔK_I fuzzy rule table

EC							
E	NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
NB	Z	PB	PB	PM	PM	PS	Z
NM	Z	PM	PM	PS	PS	PS	Z
NS	Z	PS	PM	Z	Z	Z	Z
Z	Z	Z	PS	NS	NS	Z	Z
PS	Z	Z	Z	NM	NM	Z	Z
PM	Z	NS	NS	NM	NM	NM	Z
PB	Z	NS	NM	NB	NB	NB	Z

表 3 ΔK_D 控制规则表
Tab. 3 ΔK_D fuzzy rule table

EC							
E	NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
NB	PB	PM	PS	PS	Z	PM	PB
NM	PS	PM	PS	PS	PM	PS	Z
NS	NS	NM	NS	Z	Z	PS	PS
Z	NM	NM	NS	Z	NM	PS	PM
PS	NM	NS	Z	Z	PS	PM	PM
PM	NS	NS	PS	PS	PS	PM	PS
PB	NS	Z	PS	PS	PM	PM	PB

2.3 改进灰色预测模糊 PID 控制

改进灰色预测模糊 PID 控制就是在模糊 PID 控制器的反馈回路中设置改进灰色预测模型, 阀门定位系统的复合控制器结构^[11] 如图 1 所示。

利用改进灰色预测模型当前时刻 k 之前的 n (数列长度) 个阀位采样数据, 由改进灰色模型进行处理得到 $(k+h)$ 时刻的预测值 $\hat{x}^{(0)}(k+h)$, 预测误差 $E(k) = r(k) - \hat{x}^{(0)}(k+h)$, 由预测误差取代当前时刻误差 $r(k) - x^{(0)}(k)$, 预测误差变化率为 $EC(k) = \frac{dE}{dt}$, 预测误差及其变化率作为输入进入控制器后,

模糊控制器将它们分为若干个模糊集合, 通过模糊化、模糊推理、解模糊等步骤实现参数的在线整定, 直至阀门定位系统稳定。因为利用了预测误差进行控制, 可以把这种控制看作“超前控制”。

改进灰色预测模糊 PID 控制策略综合了灰色预测理论和模糊控制算法的优点, 并根据灰色预测 GM(1, 1) 模型的灰色作用量具有动态特征改进灰色预测模型, 改进控制策略的实现步骤如下。

步骤 1 按 2.2 节设定模糊 PID 自整定控制器。

步骤 2 给出设定值 $r(k)$, 设定值与反馈值之差 $E(k)$ 及其变化率 $EC(k)$ 作为模糊 PID 控制器的输入。

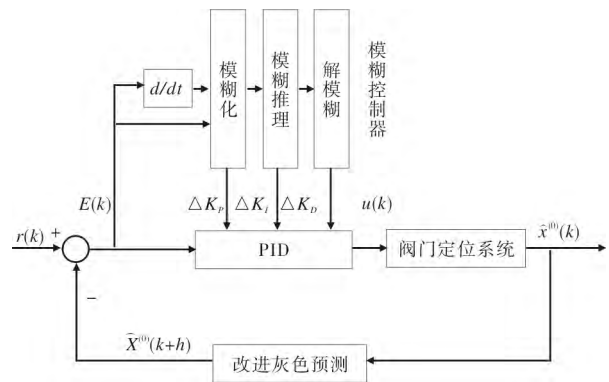


图 1 复合控制器结构

Fig. 1 Structure of composite controller

步骤 3 对 $E(k)$ 和 $EC(k)$ 模糊化, 在模糊规则下整定输出 PID 参数的修正量 $\Delta K_p, \Delta K_I, \Delta K_D$, 最后进行解模糊化运算。

步骤 4 计算 PID 控制器参数 K_p, K_I, K_D 的值, 公式(14)。

步骤 5 PID 控制器输出 $u(k)$, 对阀门定位系统进行控制, 系统输出 $x^{(0)}(k)$ 即为阀位变化量。

步骤 6 由 $x^{(0)}(k)$ 可得阀门定位系统阀位输出时间序列为 $X^{(0)}$, 经累加生成成为 $X^{(1)}, Z^{(1)}$ 为 $X^{(1)}$ 的紧邻均值生成序列, 公式(2)、(3)、(4)。

步骤 7 由最小二乘法对模型参数 a, b_1, b_2 进行辨识, 公式(5)、(6)、(7)、(8)。

步骤 8 求得 GM(1, 1) 的改进微分方程的白化方程解为 $x^{(1)}(t)$, 对其离散化得为 $\hat{x}^{(1)}(k+1)$, 公式(9)、(10)、(11)。

步骤 9 $\hat{x}^{(1)}(k+1)$ 由 IAGO(累减生成) 新序列 $\hat{x}^{(0)}(k+1)$, 经递推法可得输出数据列 h 步预测值 $\hat{x}^{(1)}(k+h)$, 公式(12)、(13)。

步骤 10 预测误差 $E(k) = r(k) - \hat{x}^{(0)}(k+h)$, 由预测误差取代当前时刻误差 $r(k) - x^{(0)}(k)$, 返回步骤 2。

3 仿真研究

3.1 阀门定位系统原理

阀门定位系统由信号处理部分、中央处理单元(复合算法)、电气转换部分、气动执行器和位置反馈装置构成,如图2。

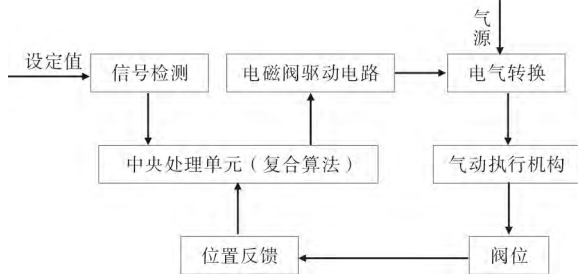


图2 阀门定位系统结构

Fig.2 Structure of valve positioning system

阀门设定信号通过信号检测单元转换为中央处理单元能够接收的数字信号,中央处理单元将阀门反馈信号与设定信号进行比较,判断比较结果是否一致,并通过电气转换单元转换为气压信号,调节气动执行机构工作,改变阀门输出。

阀门定位系统的特性通常可以用具有时滞性的一阶或二阶非周期环节来近似描述,为验证改进灰色预测模糊PID控制策略在不同的阀门定位系统中的控制效果,采用实验建模法分别建立一阶和二阶阀门定位系统^[12-44]。

其中一阶阀门定位系统为:

$$G(s) = \frac{1.003}{5.525s + 1} e^{-3.13s} \quad (15)$$

二阶阀门定位系统为:

$$G(s) = \frac{0.999}{13.51s^2 + 7.35s + 1} e^{-0.64s} \quad (15)$$

3.2 仿真结果

将改进灰色预测模糊PID控制策略应用于阀门定位系统中,通过Matlab/Simulink仿真平台验证该控制策略的控制效果,采用s函数编写改进灰色预测模块,灰色预测数列长度 $n = 5$, 预测步数 $h = 3$; 模糊PID控制器按照第2小节设置相应的隶属度函数与模糊控制规则,仿真结构如图3、4、5所示。

(1) 常规PID、模糊PID、灰色预测模糊PID和改进灰色预测模糊PID控制下的一阶系统阶跃响应如图6, PID控制器参数设定初值 $K_{P0} = 1.5$ 、 $K_{I0} = 0.25$ 、 $K_{D0} = 0.3$ 。

由一阶系统阶跃响应曲线图可得出4种控制策略的性能指标,如表4。

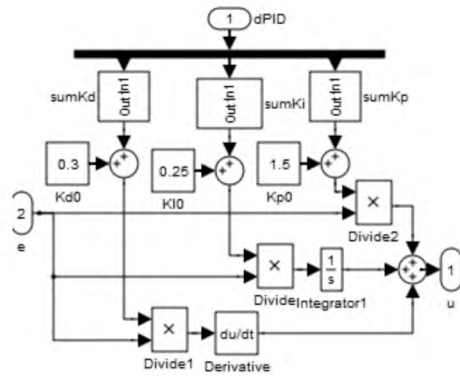


图3 PID模块

Fig.3 PID module

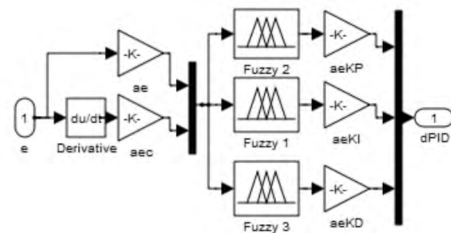


图4 模糊自整定PID模块

Fig.4 Fuzzy auto-tuning PID module

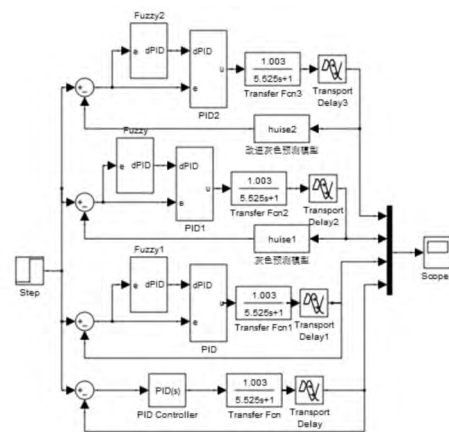


图5 改进灰色预测模糊PID控制原理

Fig.5 Principle diagram of improved grey prediction fuzzy PID control

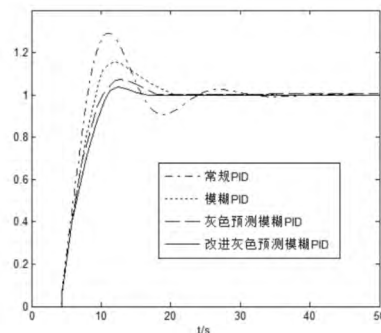


图6 一阶系统阶跃响应

Fig.6 Step response of first-order system

表 4 一阶系统性能指标

Tab. 4 Performance of first order system

控制策略	超调量 / %	调节时间 / s
常规 PID	29.3	32.23
模糊 PID	16.4	20.52
灰色预测模糊 PID	8.3	18.01
改进灰色预测模糊 PID	4.6	16.82

(2) 常规 PID、模糊 PID、灰色预测模糊 PID 和改进灰色预测模糊 PID 控制下的二阶系统阶跃响应如图 7 所示, PID 控制器参数设定初值 $K_{P0} = 3$ 、 $K_{I0} = 0.4$ 、 $K_{D0} = 0.3$ 。由二阶系统阶跃响应曲线图可得出 4 种控制策略的性能指标, 如表 5。

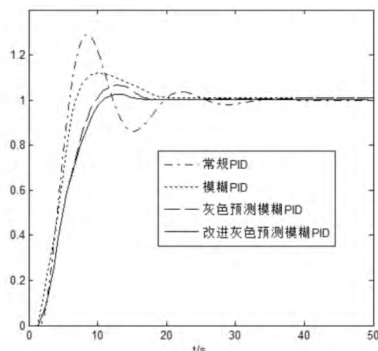


图 7 二阶系统阶跃响应

Fig. 7 Step response of second-order system

表 5 二阶系统性能指标

Tab. 5 Performance of second order system

控制策略	超调量 / %	调节时间 / s
常规 PID	28.9	33.36
模糊 PID	12.8	20.17
灰色预测模糊 PID	7.3	18.88
改进灰色预测模糊 PID	3.4	16.95

从仿真结果看出: ①常规 PID 不能因外界环境的变化在线调整参数, 故系统具有明显的持续震荡、最大的超调和最长的调节时间; ②模糊 PID 控制器具有在线整定参数能力, 对于系统超调与震荡都有一定的改善, 控制效果在 PID 控制基础上有所提高, 但该策略具有滞后特性, 不能及时消除误差, 系统还具有较大超调; ③灰色预测模糊 PID 控制中, 灰色预测模型对调节阀系统不确定部分进行粗略估计并进行一定补偿, 属于超前控制, 能有效改善系统滞后性, 系统每采样一次就建立一个新的模型, 增强系统自适应能力, 故该控制策略下系统稳定性增强, 调节时间缩短。④在灰色预测模糊 PID 控制的基础上, 将 GM(1, 1) 模型中的灰色作用量改为动态形式, 增强了灰色预测对系统的预测精度, 故而在改进灰色预测模糊 PID 控制下, 能进一步减少系统超调量与调节时间。

4 结语

本文提出了改进灰色预测模糊 PID 控制策略, 灰色预测具有“超前控制”特性, 能很好改善系统滞后性, 优化后的灰色预测模型则进一步提高灰色预测模型精度, 与模糊控制结合实现 PID 参数的在线整定。该策略具有极强的自适应性, 且控制精度高, 能快速稳定系统。将改进灰色预测模糊 PID 控制策略应用于二阶和二阶阀门定位系统中均能取得较好的控制效果, 证明该策略能适用于不同的阀门定位系统。

参 考 文 献

- [1] 杨伟清, 王化祥. 智能电气阀门定位器的参数自整定[J]. 电子测量技术, 2008, 31(1): 39-42.
- [2] Li F, Fan Y J, Zhao H T. The research of a piezoelectric valve positioner control algorithm[J]. Advanced Materials Research, 2014, 1030-1032: 1565-1569.
- [3] 刘金琨. 先进 PID 控制 MATLAB 仿真[M]. 北京: 北京电子工业出版社, 2004: 162-170.
- [4] 刘思峰, 党耀国, 方志耕. 灰色系统理论及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2004: 126-163.
- [5] 赵彦华. 模糊控制及非线性增益改进在中和控制过程中的应用[D]. 杭州: 浙江大学, 2004.
- [6] Akay D, Atak M. Grey prediction with rolling mechanism for electricity demand forecasting of Turkey[J]. Energy, 2007, 32(9): 1670-1675.
- [7] 徐华锋, 刘思峰, 方志耕. GM(1, 1) 模型灰色作用量的优化[J]. 数学的实践与认识, 2010, 02: 26-32.
- [8] 卢懿. 灰色预测模型的研究及其应用[D]. 杭州: 浙江理工大学, 2014.
- [9] Chen J, Shu J P, Li M, et al. Research on novel self-spinning high speed on/off valve based on fuzzy-logic parameter self-tuning PID controller[J]. Advanced Materials Research, 2012, 468-471: 1448-1452.
- [10] Zhou E T, Liao S H, Dan M U. Fuzzy-PID control in electro-hydraulic proportional valve system[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2010, 2: 1454-1457.
- [11] 陶永华. 新型 PID 控制及其应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 1998: 147-157.
- [12] Ahmed S, Huang B, Shah S L. Identification from step responses with transient initial conditions[J]. Journal of Process Control, 2008, 18(2): 121-130.
- [13] 邱亮. 基于阶跃辨识的 PID 自整定策略研究及其应用[D]. 上海: 上海交通大学, 2013.
- [14] 张二青. 气动执行器系统的故障诊断[D]. 杭州: 杭州电子科技大学, 2011.