

基于改进内模的纸浆浓度控制

刘青震, 王文标, 汪思源, 王靖
(大连海事大学, 大连 116026)

摘要: **目的** 为改善纸浆浓度控制系统的大滞后性、非线性和时变性, 以提高纸浆浓度的控制性能。**方法** 针对纸浆浓度控制问题提出一种改进的内模控制, 该方法首先引进导引曲线将原来的目标控制改成过程控制, 解决系统快速性与超调之间的矛盾; 然后再引进被控对象的参考模型与给定滞后, 将导引输出与参考模型取偏差作为控制回路 A, 再将给定滞后与被控对象取偏差作为控制回路 B; 最后再基于内模控制的原理分别针对回路 A 与回路 B 设计内模控制器, 将二者控制器的输出取和作为总的控制器。**结果** 通过 Matlab 仿真软件搭建改进内模控制的纸浆浓度系统仿真平台, 并与传统控制进行对比, 仿真结果表明, 系统的响应速度、跟踪性能、鲁棒性和抗干扰特性均优于传统的控制方法。**结论** 通过仿真验证了改进内模控制在纸浆浓度控制系统上的有效性和可行性, 能够明显提高系统的综合性能指标。**关键词:** 纸浆浓度控制; 改进内模控制; Matlab 仿真
中图分类号: TB486; TS736+.3; TP273 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2020)11-0196-05
DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2020.11.028

Pulp Concentration Control Based on Improved Internal Mold

LIU Qing-zhen, WANG Wen-biao, WANG Si-yuan, WANG Jing
(Dalian Maritime University, Dalian 116026, China)

ABSTRACT: The work aims to improve the control performance of pulp concentration to overcome the large lag, non-linearity and time variability of pulp concentration control system. For the pulp concentration control problem, a modified internal model control was put forward. This method firstly introduced direct curve to change the original target control to process control, thus solving the contradiction between system speediness and overshoot. Then, the reference model of controlled object and given lag were introduced to take the deviation between guide output and reference model as control circuit A and the deviation between given lag and controlled object as control circuit B. Finally, based on the principle of internal model control, the internal model controllers were respectively designed for circuits A and B, and the sum of output from the two controllers was taken as the general controller. The pulp concentration system simulation platform with improved internal model control was built by Matlab simulation software and compared with the traditional control. The simulation results showed that the response speed, tracking performance, robustness and anti-interference characteristics of the system were better than the traditional control method. The effectiveness and feasibility of improved internal model control in pulp concentration control system are verified by simulation, and the comprehensive performance index of the system can be improved obviously.

KEY WORDS: pulp concentration control; improved internal model control; Matlab simulation

收稿日期: 2019-10-19

基金项目: 刘青震 (1995—), 男, 大连海事大学硕士生, 主攻先进智能控制、内模控制。

通信作者: 汪思源 (1963—), 男, 大连海事大学教授, 主要研究方向为工业过程控制。

对于造纸生产过程而言,纸浆浓度这一参数是很关键的,因此确保所产纸张品质的紧要环节就是能够稳定地控制纸浆浓度,即满足造纸工业过程自动化必须要做到精确又稳定地控制纸浆的浓度。在实际制浆过程中,纸浆浓度受浆料流速、调浓水压、浓度测量仪工艺安装位置、浆管布局、打浆度等多种因素影响^[1],这就导致了纸浆浓度在实际的工业控制中存在大滞后、时变、非线性的特性^[2],较难准确构造系统模型。

现阶段,由于 PID 控制算法具有算法成熟、便于实现的优势,因而工业现场普遍选取传统的 PID 控制算法来控制纸浆的浓度,然而此工业过程普遍存在大滞后、时变性、非线性等特性^[3],仅仅依靠 PID 算法对系统进行控制存在一定的局限性,往往难以获得高效的纸浆浓度控制效果。针对以上的局限性,文中提出一种改进的内模控制方法。

1 工艺分析和系统模型的建立

纸浆浓度控制系统主要由流量传感器、浓度传感器、控制器、送浆泵、调节阀等组成,见图 1。该生产过程以调浆箱中的纸浆浓度作为被控量,以调节阀作为被控对象。工艺流程:首先浆池中的纸浆经送浆泵输送到调浆箱中^[4-5],经过调浆箱中的浓度传感器检测出此刻的纸浆浓度然后反馈到控制器中与设定值进行比较,然后控制器再根据二者的差值对调节阀的开度进行控制,进而影响稀释水对调浆箱纸浆浓度大小的影响。该反馈控制结构见图 2。

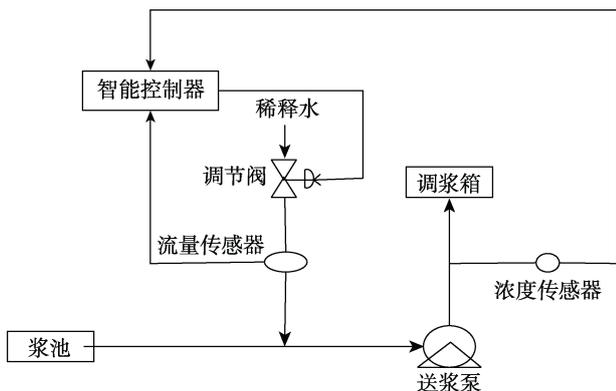


图 1 纸浆浓度控制系统
Fig.1 Pulp concentration control system

在实际的纸浆浓度工艺流程控制当中,被控对象 $G(s)$ 含有纸浆浓度的改动、阀位的特性改动、浓度变送器的改动这 3 个一阶惯性环节,从而 $G(s)$ 的传递函数为:

$$G(s) = \frac{k}{(T_1s+1)(T_2s+1)(T_3s+1)} \quad (1)$$

式中: T_1, T_2, T_3 分别为 3 个过程的动态特性的惯性时间常数; s 为拉氏变换因子。

由图 2 的反馈控制结构可以得到纸浆浓度控制系统中被控对象的传递函数为:

$$\frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{k}{(T_1s+1)(T_2s+1)(T_3s+1)} e^{-Ls} \quad (2)$$

式中: $Y(s)$ 为浓度检测值; $U(s)$ 为控制器输出; $D_1(s)$ 为负载扰动; $D_2(s)$ 为测量干扰; k 为过程增益; e^{-L} 为阀门和浓度检测传感器的延迟特性。由于在实际操作过程中, T_2 远大于 T_1 和 T_3 , 则式 (2) 可写为式 (3) 形式。

$$\frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{k}{(T_2s+1)} e^{-Ls} \quad (3)$$

2 传统内模控制及其改进内模控制

2.1 传统内模控制

图 3 中 $Q(s)$ 为内模控制器, $P(s)$ 为系统的被控对象, $M(s)$ 为系统的过程模型, $G_f(s)$ 为反馈所需的滤波器, $D(s)$ 为系统所受到的扰动。 $G_f(s)=1$ 的 IMC 系统称为 1 自由度 IMC, 否则称为 2 自由度 IMC, 这次选用 1 自由度 IMC^[4]。由图 3 可得, 传递函数为:

$$y = \frac{Q(s)P(s)G_f(s)}{1+Q(s)(P(s)-M(s))} R(s) + \frac{1-Q(s)P(s)}{1+Q(s)G_f(s)(P(s)-M(s))} D(s) \quad (4)$$

将 $G_f(s)=1$ 代入式 (4) 得:

$$\frac{1}{Ts+1} \quad (5)$$

由此图 3 转化为如图 4 的形式。

将图 4 的内模控制结构转换为单位负反馈结构传统的做法是将过程模型经过结构图化简并联到控制器 $Q(s)$ 上, 然后在通过等效变换将其转换为一个结构, 见图 5。

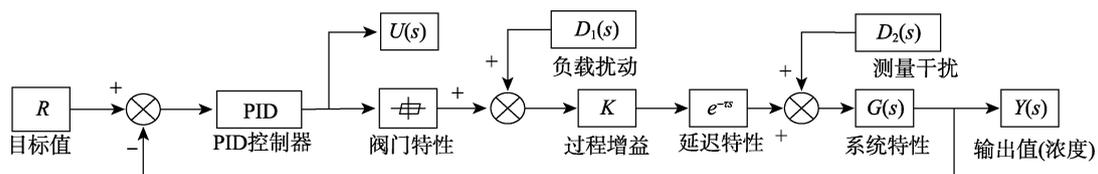


图 2 纸浆浓度反馈控制结构
Fig.2 Pulp concentration feedback control structure

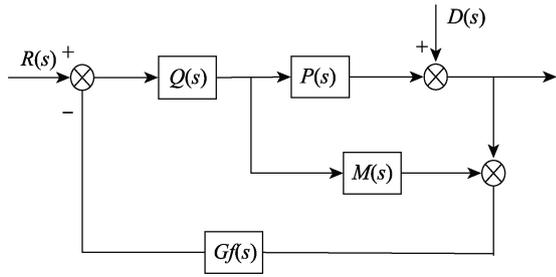


图3 内模结构控制

Fig.3 Internal model structure control

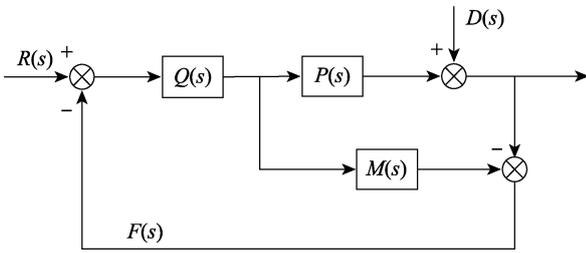


图4 转化后内模结构控制

Fig.4 Internal model structure control after transformation

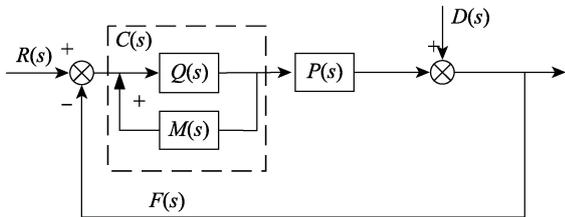


图5 等效内模控制

Fig.5 Equivalent internal model control

由图5可以得出： $C(s) = \frac{Q(s)}{1 - M(s)Q(s)}$ 。

内模控制器的构造原理如下所述。

1) 首先将系统模型 G_m 系统模型分解成 2 项： G_{m+} 和 G_{m-} [6-7]，其中 G_{m+} 作为全通滤波器的传递函数，使所有的频率 Ω ，都能够得到 $|G_{m+}(j\Omega)|=1$ 。换言之， G_{m-} 全部的时滞以及存在于右半平面零点的非最小相位环节均被 G_{m+} 所囊括。 G_{m-} 包含了 G_m 的最小相位环节。

2) 在进行内模控制器的构造时，为了满足系统的抗干扰性以及稳定性，应补充滤波器到最小相位环节的 G_{m-} [8]，因此这里定义 IMC 的控制器为：

$$Q(s) = G_m^{-1} * f \tag{6}$$

式(6)中，若使得 $Q(s)$ 合理，则低通滤波器表示为 f ， f 的通用结构见式(7)。

$$f = \frac{1}{(1 + \lambda s)^n} \tag{7}$$

式(7)中，内模控制器唯一的构造参数，即滤波器参数表示为 λ [9]。可以通过改变 λ 值来调整系统的跟踪性能与鲁棒性，得出单位负反馈的控制器为：

$$C(s) = \frac{Q(s)}{1 - M(s)Q(s)} = \frac{G_m^{-1}}{f^{-1} - G_{m+}} \tag{8}$$

2.2 改进内模控制

倘若控制传递函数是 $\frac{K}{Ts+1}e^{-Ls}$ 的系统，根据图1

所示结构，取被控对象的 $\frac{1}{Ts+1}$ 作为系统的导引过渡

过程，将被控对象的最小相位环节作为系统的参考模型，且系统给定滞后以非最小相位环节为依据，然后将导引过渡过程的输出与参考模型输出取偏差作为控制回路 A，再将给定滞后输出与被控对象输出取偏差作为控制回路 B，最后在基于内模控制的原理分别针对回路 A 与回路 B 设计内模控制器，将二者控制器的输出取和作为总的控制器。

2.2.1 改进内模结构控制原理

如图6所示，当系统被施加阶跃信号时，阶跃信号首先经过过渡过程被分为 2 部分，一部分与参考模型的输出求偏差为 e_1 ，另一部分作用于给定滞后与被控对象的输出求偏差为 e_2 。由于实际被控对象为大滞后系统，因此可知偏差 e_1 先于偏差 e_2 输出，控制器控制参考模型首先凭借偏差 e_1 ，使得参考模型先于实际被控对象达到稳态，同时为实际被控对象快速找到一个大约的控制量，当偏差 e_2 产生后，会对控制量产生微调，使得控制量达到实际被控对象所需的精确

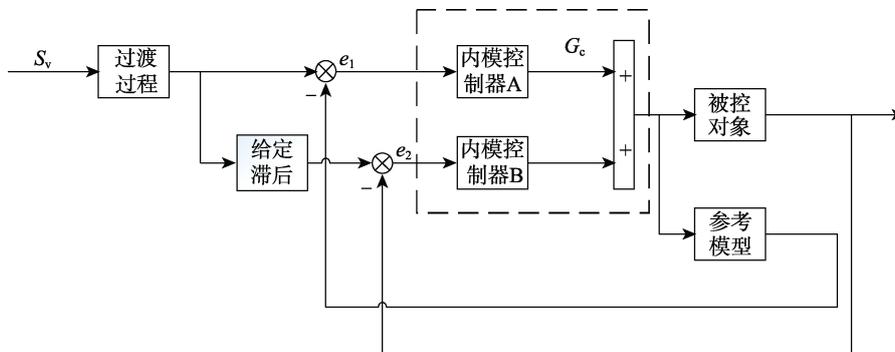


图6 改进内模控制结构

Fig.6 Improved internal model control structure

值。该结构的改进保证了对于大滞后系统的响应速度^[10—13]，同时还大大缩短了大滞后系统的调节时间，所以这一结构能够在根源层次解决大时滞给系统的控制带来的问题，提高了控制精度和控制品质。

当系统受到扰动时，以反向扰动为例，偏差 e_1 不变，偏差 e_2 变为正值，因此偏差 e_2 经过内模控制器 B 输出一个正值得控制量，导致总控制量增加，总控制量然后作用于参考模型，使得其输出增大，因此导致偏差 e_1 变为负值，经过 2 个控制器的求和就可以消除扰动对系统的影响。

3 改进内模控制器的设计

文中假设大滞后被控对象 $\frac{K}{Ts+1}e^{-Ls}$ (其中 L/T 0.5) 进而对此模型构建控制 2 条回路的内模控制器。首先是内模控制器 A 的设计，由被控对象可得 $G_+=0$ ， $G = \frac{K}{Ts+1}$ ，这里选取滤波器为 $f = \frac{1}{(\lambda s+1)^1}$ ，因此由式 (8) 可得内模控制器 A 为：

$$C_1(s) = \frac{G_-^{-1}}{f^{-1} - G_+} = \frac{Ts+1}{k(\lambda_1 s+1)} \quad (9)$$

其次，构建内模控制器 B，由被控对象可得 $G_+=e^{-Ls}$ ， $G_- = \frac{K}{Ts+1}$ ，这里还选取滤波器为 $f = \frac{1}{(\lambda s+1)^1}$ ，在设计内模控制器 B 之前，应先依据 Pade 近似把滞后近似为： $e^{-Ls} \approx \frac{1-Ls/2}{1+Ls/2}$ ，因此由式 (8) 能够构建出内模控制器 B 为：

$$C_2(s) = \frac{G_-^{-1}}{f^{-1} - G_+} = \frac{(Ts+1)(2+Ls)}{k(\lambda_2 s+1)(2+Ls) - k(2-Ls)} \quad (10)$$

4 仿真结果

为了验证文中提出的方法的可行性以及有效性^[14]，利用 Matlab 进行仿真实验，并且就控制的效果同传统的 PID 控制算法和内模控制算法进行比较。文中采用单文娟等^[4]的纸浆浓度控制过程的简化模型为：

$$G(s) = \frac{3}{2s+1} e^{-4s} \quad (11)$$

利用 Simulink 构造的仿真模块进行实验^[15—16]。取幅值为 10 个单位的阶跃信号作输入信号。系统的阶跃响应见图 7。3 种控制算法的参数选择：根据文献[4]选取 PID 参数， $K_p=0.07$ ， $K_i=0.03$ ， $K_d=0.08$ ；传统内模的滤波系数， $f=25$ ；改进内模控制的 2 个内模控制器的滤波系数， $f_1=0.2$ ， $f_2=1000$ 。

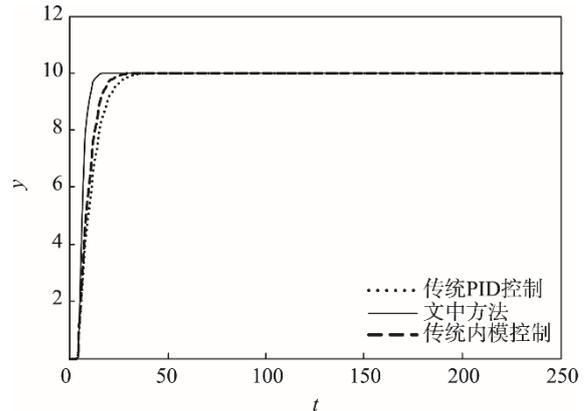


图 7 阶跃响应对比

Fig.7 Step response comparison

3 种控制算法的性能指标见表 1。根据表 1 可以看出，同传统的内模控制算法和 PID 控制算法相比，具有响应迅速，调节所需时间短，综合性能指标 ITAE 小的优势，因此，文中所提出的方法明显优于传统的控制方法。

表 1 3 种控制算法的性能指标
Tab.1 Performance indicators of the three

方法	上升时间/s	调节时间/s	超调量/%	ITAE 指标
传统 PID 控制	15	42	0	800
传统内模控制	11	40	0	573
文中方法	5	19	0	270

由于在实际工业造纸过程中，纸浆浓度控制回路存在很多干扰，因此为了验证算法的抗扰特性，在 100 s 时加入设定值 20% 的阶跃干扰，效果见图 8。

由图 8 可以看出，在给被控对象施加干扰时，三者算法均偏离设定值一段时间后又回到设定值，但文中的方法回复时间最短。由此可见，文中的方法较传统控制方法有较强的抗干扰特性。

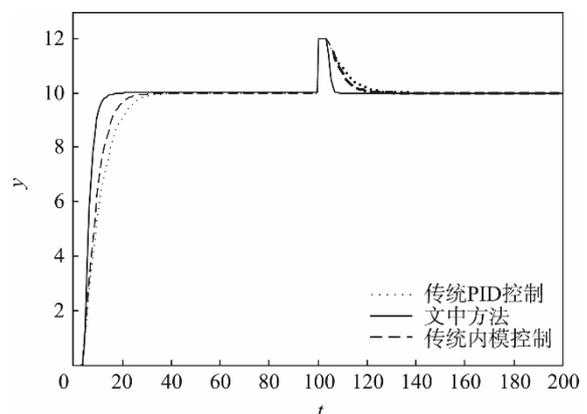


图 8 20% 干扰下阶跃响应对比

Fig.8 Comparison of step response under 20% interference

5 结语

针对控制纸浆浓度时存在的大滞后、非线性等特性,以构建控制纸浆浓度的系统模型作为基础,提出一种改进的内模控制算法,并选择了一个典型的纸浆浓度模型进行系统仿真实验。实验的结果表明,文中所提出的改进内模控制方法同2种传统的控制方法相比,在响应速度、调节时间、综合性能指标ITAE方面都具备优势,能够有效地改善纸浆浓度控制系统的性能,同时也对纸浆浓度控制具有一定的借鉴意义。

参考文献:

- [1] 郑飞, 汤兵勇. 基于改进量子粒子群算法的纸浆浓度控制系统[J]. 包装工程, 2019, 40(5): 196—201.
ZHENG Fei, TANG Bing-yong. Pulp Concentration Control System Based on Improved Quantum Particle Swarm Optimization Algorithm[J]. Packaging Engineering, 2019, 40(5): 196—201.
- [2] 胡亚南, 宁奎伟, 赵锦文. 基于变论域模糊PID的纸浆浓度控制系统研究[J]. 中国造纸, 2019, 38(1): 44—49.
HU Ya-nan, NING Kui-wei, ZHAO Jin-wen. Pulp Consistency Control System Based on Variable Universe Fuzzy PID[J]. China Pulp & Paper, 2019, 38(1): 44—49.
- [3] 陈银环. 基于BP神经网络PID的纸浆浓度自适应控制[J]. 包装工程, 2018, 39(1): 146—150.
CHEN Yin-huan. Adaptive Control of Pulp Concentration Based on BP Neural Network PID[J]. Packaging Engineering, 2018, 39(1): 146—150.
- [4] 单文娟, 汤伟, 王孟效. 神经网络分数阶PID控制器在纸浆浓度控制中的应用[J]. 中国造纸学报, 2016, 31(4): 44—48.
SHAN Wen-juan, TANG Wei, WANG Meng-xiao. Application of Fractional Order PID Controller Based on Neural Network to Pulp Consistency Control System[J]. Transactions of China Pulp and Paper, 2016, 31(4): 44—48.
- [5] 叶自清, 陈敏. 基于动态矩阵和单神经元PID的浆浓度控制[J]. 自动化与仪表, 2009, 24(8): 29—33.
YE Zi-qing, CHEN Min. Plasma Consistency Control Based on Dynamic Matrix and Single Neuron PID[J]. Automation & Instrumentation, 2009, 24(8): 29—33.
- [6] 徐金榜, 赵泓昊, 熊文羽, 等. 基于IMC原理的电子节气门控制策略[J]. 控制与决策, 2018, 33(12): 2277—2282.
XU Jin-bang, ZHAO Hong-hao, XIONG Wen-yu, et al. Electronic Throttle Control Strategy Based on IMC Principle[J]. Control and Decision, 2018, 33(12): 2277—2282.
- [7] COUTINHO D F, FU M Y, DE SOUZA C E. Input and Output Quantized Feedback Linear Systems[C]// IEEE Transactions on Automatic Control, 2010.
- [8] 肖强, 谢巍. 针对时滞系统的一般化内模控制方法[J]. 自动化学报, 2011, 37(4): 464—470.
XIAO Qiang, XIE Wei. A Generalized Internal Model Control for Time-delay Systems[J]. Acta Automatica Sinica, 2011, 37(4): 464—470.
- [9] 尹成强, 高洁, 孙群. 基于改进Smith预估控制结构的二自由度PID控制[J/OL]. 自动化学报: 1—9[2019-10-23]. <https://kns.cnki.net/KCMS/detail/11.2109.TP.20181113.1304.011.html>.
YIN Cheng-qiang, GAO Jie, SUN Qun, et al. Two Degree of Freedom PID Control Based on Modified Smith Predictor Control Structure[J/OL]. Acta Automatica Sinica: 1—9[2019-10-23]. <https://kns.cnki.net/KCMS/detail/11.2109.TP.20181113.1304.011.html>.
- [10] VU T N L, LEE M. Smith Predictor Based Fractional-order PI Control for Time-delay Processes[J]. Korean Journal of Chemical Engineering, 2014, 31(8): 1321—1329.
- [11] JIAO Xiao-hong, ZHANG Jiang-yan, SHEN Tie-long. An Adaptive Servo Control Strategy for Automotive Electronic Throttle and Experimental Validation[C]// IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014.
- [12] 王春阳, 辛瑞昊, 史红伟. 针对大滞后系统的滞后时间削弱自抗扰控制方法[J]. 吉林大学学报(工学版), 2017, 47(4): 1231—1237.
WANG Chun-yang, XIN Rui-hao, SHI Hong-wei. Decreasing Time-delay Auto-disturbance Rejection Control for Large Time-delay Systems[J]. Journal of Jilin University(Engineering and Technology Edition), 2017, 47(4): 1231—1237.
- [13] 刘汉忠, 俞鹏. 模糊PID自适应控制在微型齿轮泵恒流控制系统中的应用[J]. 流体机械, 2018, 46(12): 50—53.
LIU Han-zhong, YU Peng. Application of Fuzzy PID Adaptive Control in Constant Flow Control System of Miniature Gear Pump[J]. Fluid Machinery, 2018, 46(12): 50—53.
- [14] 马增辉, 刘长良, 开平安. 基于扰动补偿的大滞后系统的控制[J]. 信息与控制, 2013, 42(5): 570—576.
MA Zeng-hui, LIU Chang-liang, KAI Ping-an. Control of Dead-time Systems Based on Disturbance Compensation[J]. Information and Control, 2013, 42(5): 570—576.
- [15] 陈哲盼, 焦嵩鸣. 大滞后系统的专家-模糊PID控制器设计[J]. 计算机仿真, 2014, 31(11): 386—389.
CHEN Zhe-pan, JIAO Song-ming. Design of Expert-fuzzy PID Control Method for Large-lag System[J]. Computer Simulation, 2014, 31(11): 386—389.