

基于模糊 PID 的包装机热封切刀温度控制

温玉春¹, 刘祺君²

(1. 内蒙古机电职业技术学院, 呼和浩特 010070; 2. 大连广弘科技有限公司, 大连 116021)

摘要: **目的** 为了提高包装机热合装置压合袋口的封口质量, 采用模糊自适应 PID 控制方法对热合机热合装置的温度进行精确控制。**方法** 针对食品包装塑料薄膜热封的温度控制, 基于模糊自适应 PID 控制算法设计一种自动包装机热封温度控制系统。采用变论域模糊 PID 实现控制参数自整定和控制规则的自调整, 并将其与传统 PID 控制进行对比。**结果** 模糊 PID 控制方法较传统 PID 控制方法能更稳定地控制加热温度, 有效提高了温度控制的响应速度和控制精度。**结论** 该系统在热合装置中能够精确、快速地控制温度, 具有应用价值。

关键词: 热合装置; 温度控制; 模糊自适应 PID; 参数自整定

中图分类号: TB486⁺.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2017)03-0109-05

Temperature Control of Heat-sealing Cutter of Packaging Machines Based on Fuzzy PID

WEN Yu-chun¹, LIU Qi-jun²

(1. Inner Mongolia Technical College of Mechanics and Electrics, Hohhot 010070, China;

2. Dalian Guanghong Technology Co., Ltd., Dalian 116021, China)

ABSTRACT: The work aims to precisely control the temperature of the heat-sealing device of the heat-sealing machine used for sealing the plastic film bags in fuzzy adaptive PID control method, so as to improve the sealing quality of heat-sealing device for packaging machines. With respect to the control of heat-sealing temperature of packaging plastic film, a type of automatic heat-sealing temperature control system was designed based on fuzzy adaptive PID control algorithm. The self-tuning of control parameters and the self-adjusting of control rules were realized by using variable universe fuzzy PID. The control results were compared with those of traditional PID. The fuzzy PID control method could control the heating temperature in a more stable way than the traditional PID control and it improved effectively the response speed and precision of temperature control. The system can accurately and quickly control the heat-sealing temperature, and it has the application value.

KEY WORDS: heat-sealing device; temperature control; fuzzy adaptive PID; parameter self-tuning

自动包装机是将具有热塑特性的复合膜经过加热软化制成包装容器, 在包装机上自动完成制袋成型、填充物料、封合剪切等一系列动作的自动包装机械^[1-3], 其中热合封口装置的温度对包装袋的封口质量和包装速度具有重要影响。通过控制热合封口温度, 不仅可以稳定控制包装袋的长度和宽度等参数, 而且可以控制封口的固化时间, 从而提高包装袋的外观程度以及包装稳定性。

自动包装机热封温度的控制即对热封切刀温度

的控制。在以往的热封切刀温度控制中, 通常采用传统 PID 控制, PID 控制是一种采样控制, 通过对偏差值进行采样再对控制量进行控制, 该控制方法具有结构简单、不需要建立精确的数学模型等优点, 在工业控制中得到了广泛应用。传统 PID 控制需提前确定 3 个参数, 而包装机热封温控系统又具有升/降温单向性、大惯性、大滞后、非线性等特性, 很难得到其精确的数学模型^[4-5], 致使传统的 PID 控制方法控制效果不理想。模糊 PID 控制具有不需要建立精

收稿日期: 2016-10-20

作者简介: 温玉春 (1980—), 女, 硕士, 内蒙古机电职业技术学院讲师, 主要研究方向为机电一体化及电气控制系统设计。

确数学模型,能够避免系统不确定性对控制性能的影响等优点,能够自适应地对控制参数进行调整^[6-10]。模糊控制可在不需要了解被控系统精确数学模型的前提下,只需将模糊控制规则存入控制系统知识库,便可实现系统参数的在线调整。控制系统根据实际反馈情况,通过自适应学习,调整相关系数的学习速率,进而实现 PID 参数的在线调整^[11-12]。文中提出一种基于模糊自适应 PID 的自动包装机热封温度控制系统,并论述自动包装机热封温度控制的实现过程,通过仿真和试验来验证所述包装机械热封温度控制方法的有效性。

1 PID 控制函数

1.1 传统 PID 控制函数

为比较模糊 PID 和传统 PID 的控制效果,将热封合装置的温度控制系统采用 PID 控制规律的数学表达式可描述为:

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

式中: $u(t)$ 为控制器输出; $e(t)$ 为温度误差; K_p 为模拟 PID 控制器的比例系数; t_i 和 t_d 分别为积分时间和微分时间。若要实现模拟 PID 控制,首先须将其离散化,即数字 PID 控制,可采用后差分来代替微分,可得:

$$\begin{cases} \int_0^t e(t) dt \approx T_0 \sum_{i=0}^n e(i) \\ \frac{de(t)}{dt} \approx \frac{e_n - e_{n-1}}{T_0} \end{cases} \quad (2)$$

由式(1)和式(2)可得数字 PID 控制算式为:

$$U_n = K_p \left[e_n + \frac{T_0}{t_i} \sum_{i=1}^n e_i + \frac{t_d}{T_0} (e_n - e_{n-1}) \right] \quad (3)$$

式中: n 为采样序号; e_n 为采样数值; U_n 为控制输出。

在控制过程中,普遍采用数字 PID 控制的增量形式,即:

$$\Delta U_n = K_p (e_n - e_{n-1}) + K_i e_n + K_d (e_n - 2e_{n-1} + e_{n-2}) \quad (4)$$

式中: K_d 为微分系数; K_i 为积分系数。上述数字 PID 控制技术比较成熟、结构相对灵活、控制效果比较理想,但是需要对其 3 个参数(K_p , K_d , K_i)进行预先整定,考虑到温度本身的变化十分缓慢,不利于参数调整和系统调试。综上所述,为实现 PID 参数的在线整定和优化,文中基于模糊自适应 PID 控制算法,设计一种温度控制系统,并将该系统应用于自动包装机中,以实现相关参数的预整定及在线学习。

1.2 模糊自适应 PID 控制器的设计

模糊控制不需要建立精确的数学模型,能够避免系统的不确定性对控制性能的影响^[13-14]。变论域自适应模糊 PID 控制结构见图 1,其中 PWM 为脉冲宽度调制。模糊控制器为实际温度与给定值间偏差 e 和误差变化 e_c 的 PID 增益调整控制器^[15];通过 e 和 e_c 的变化,改变输出变量的伸缩因子 α_c , α_{ec} 和 β_{pid} ,即通过对量化因子 K_e , K_{ec} , 和比例因子 $L_{K(m)}$ (m 为 p, i, d) 的调整,实现输入输出论域的伸缩变化。

模糊控制器的输入量为温度误差 e , 温度误差变化为 e_c , 输出控制量为 ΔK_p , ΔK_i , ΔK_d , 其归一化论域均设为 $[-1, +1]$, 根据温度的动态范围 $[e_{\min}, e_{\max}]$, $[e_{c\min}, e_{c\max}]$, $[\Delta K_{m\min}, \Delta K_{m\max}]$ (m 为 p, i, d), 选择和确定量化因子 K_e , K_{ec} , 以及比例因子 $L_{K(m)}$ 。论域的变换表达式为:

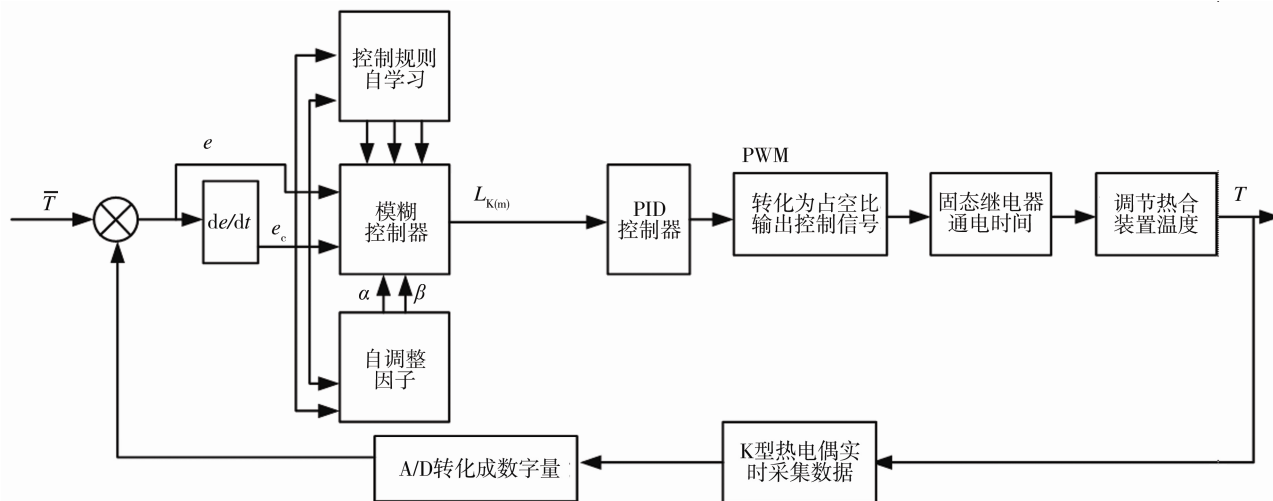


图1 自适应模糊PID控制结构
Fig.1 Structure of a fuzzy adaptive PID controller

$$\begin{cases} E = K_e(e - \frac{e_{\max} - e_{\min}}{2}), K_e = \frac{2}{e_{\max} - e_{\min}} \\ E = K_{ec}(e_c - \frac{e_{c\max} - e_{c\min}}{2}), K_{ec} = \frac{2}{e_{c\max} - e_{c\min}} \\ \Delta K_m = L_{K(m)}(\Delta k_m - \frac{\Delta K_{m\max} - \Delta K_{m\min}}{2}) \\ L_{K(m)} = \frac{2}{\Delta K_{m\max} - \Delta K_{m\min}} \end{cases} \quad (5)$$

根据 Mamdani 的最小最大推理方法, 采用加权平均解模糊化的模糊控制输出为:

$$\Delta K_m = \frac{C_i \sum \mu_{C_i}(\Delta K_{mi})}{\sum \mu_{C_i}(\Delta K_{mi})} \quad (6)$$

式中: C_i 为输入模糊子集; μ_{C_i} 为隶属度函数。

设定 PID 控制参数调整量为:

$$\begin{aligned} K_p &= K_{p0} + \Delta K_p \\ K_i &= K_{i0} + \Delta K_i \\ K_d &= K_{d0} + \Delta K_d \end{aligned} \quad (7)$$

系统实际控制输出为:

$$T(k) = K_p e(k) + K_i \sum_{i=1}^k e(i) + K_d e_c(k) \quad (8)$$

误差 e , 误差变化 e_c 和控制量 ΔK_p , ΔK_i , ΔK_d 采用一样的模糊子集, 隶属度函数采用对称、均匀分布的三角形形式。根据 PID 中参数调整经验和误差逼近原理, 建立 ΔK_p , ΔK_i , ΔK_d 控制规则, 此处以 ΔK_p 为例, 见表 1。误差 e , 误差变化 e_c 的模糊子集为 {NB, NS, ZE, PS, PB}; 伸缩因子 α_e , α_{ec} 和 β_{pid} 的模糊子集为: {B, M, S, VS}, {VB, B, M, S, VS}。

表 1 ΔK_p 模糊控制规则
Tab.1 Fuzzy control rule of ΔK_p

e	e_c					
	NS	NB	NZ	PS	PZ	PB
NS	NS	NS	NB	NB	NB	ZO
NB	NS	NS	NS	NS	ZO	PS
ZO	NS	NB	ZO	ZO	PS	PB
PB	NS	ZO	PB	PB	PB	PB
PS	ZO	PB	PB	PS	PB	PB

输入论域的伸缩因子为:

$$\alpha(e) = \left(\frac{\|e\|}{E} \right)^\tau \quad (9)$$

式中: τ 为常数, $0 < \tau < 1$ 。

系统伸缩程度的大小:

$$\beta(t) = K_1 \sum_{i=1}^n p_i \int_0^t e_i(\tau) d\tau + \beta(0) \quad (10)$$

式中: K_1 为比例常数; p_i 为隶属值; 初值 $\beta(0)$ 通常根据实际情况来调整, 一般取 $\beta(0)=1$ 。可知模糊控

制的输出为:

$$T(x/\beta) = \beta \sum_{l=1}^h \prod_{j=1}^n A_{jl} \left(\frac{x_j}{\alpha(x_i)} \right) y_l \quad (11)$$

式中: A_{jl} 为隶属函数; $\alpha(x_i)$ 为误差 x_i 对应的伸缩因子; y_l 为未经过伸缩因子处理的输出。

在模糊 PID 控制中引入变论域, 通过变论域自适应调整, 对模糊 PID 控制器的参数进行适当调整, 从而可以克服传统模糊 PID 控制自适应能力弱的缺点。

2 热封切刀温度控制系统设计及实现

食品包装机热封切刀温度控制系统主要由 PLC、固态继电器、热电偶、以及触摸屏等构成, 其硬件结构见图 2。选择西门子 PLC CPU 226 为控制器核心, 采用 EM 231 为模拟量采集模块, 该模块带有多路热电偶输入通道, 能够快速地将电压信号转化为数字量信号。选用欧姆龙 E52-CA15A 温度传感器, 该传感器使用方便, 测量精度高。该控制系统中上位机选用威纶 MT8150iE 系列触摸屏。通过该触摸屏可实现包装速度、切刀目标温度等参数的输入, 并实时对包装机目前的生产状态, 包括设备运行状态、生产实时流程状态以及生产线报警信息进行显示。

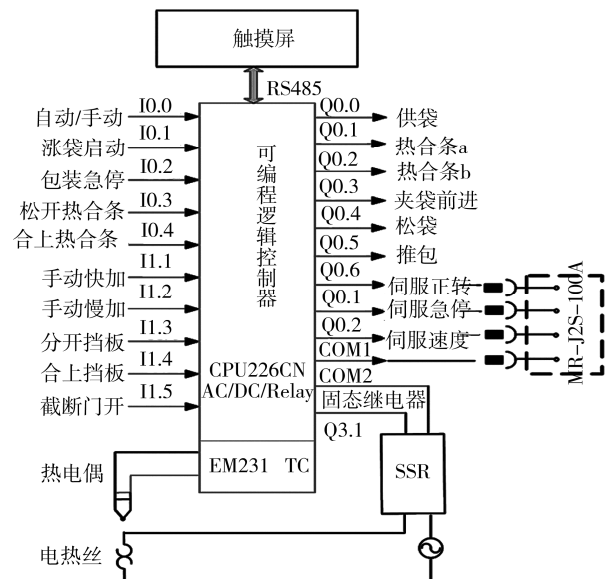


图 2 系统硬件结构

Fig.2 Structure of system hardware

热封切刀温控系统在工作时, K 型热电偶对铜条中的温度进行实时采集, 并将其转换成电压信号, 再经过 EM231 热电偶输入通道将电压信号转化成数字量, 将数字量传送到 PLC 中, 并与目标温度值进行比较, 比较后得到 2 个温度之差即偏差 e 以及变化率 e_c , 然后将两者送入模糊 PID 控制器, 通过模糊推理可以得到最终的参数增量 ΔK_p , ΔK_i , ΔK_d , 再利用式(5)计算得到 K_p , K_i , K_d 的值, 然后进行 PID

运算。将得到的输出量转化为占空比,确定固态继电器的开通时间和关断时间,调节电热丝的有效加工功率,进而实现包装机热封切刀的温度控制。

3 仿真实验系统构成

为了验证文中所设计的基于模糊自适应 PID 的自动包装机热封切刀温度控制方法的有效性,利用 Matlab

软件中的 Simulink 工具箱和模糊逻辑工具箱,对文中所设计的自适应模糊 PID 温度控制器进行仿真分析,其模糊自适应 PID 仿真模型见图 3。由文献[7]中切刀温

度传递函数,选取切刀温度数学模型为 $G(s) = \frac{\Delta T(s)}{\Delta U(s)} =$

$\frac{0.5}{1+50s}e^{-5s}$, 其中 s 为拉普拉斯变换中的复变量。

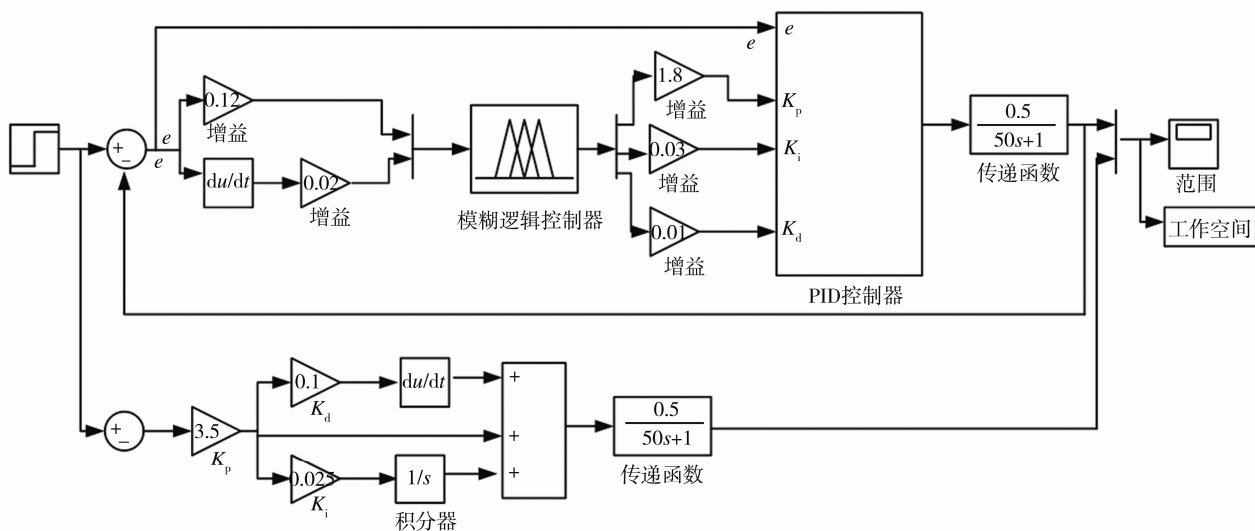


图 3 模糊自适应 PID 仿真模型
Fig.3 Fuzzy adaptive PID simulation model

4 仿真实验与切刀温度实测结果

4.1 仿真实验结果

传统 PID 控制和模糊 PID 控制时阶跃响应曲线见图 4。由仿真结果可知,模糊 PID 控制时振荡和超调量都很小,传统 PID 算法需要 56 s 才能趋于稳定,而模糊 PID 控制时算法调节时间为 28 s,传统 PID 超调量为 25%,而模糊 PID 控制时的超调量仅为 1.8%,由此可以看出模糊 PID 控制明显优于传统 PID 控制。

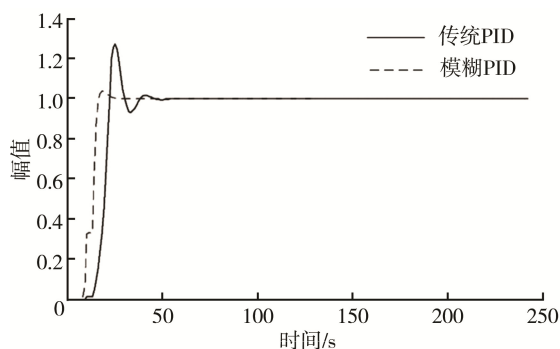


图 4 传统 PID 和模糊 PID 控制的仿真曲线
Fig.4 Traditional PID and fuzzy PID simulation curve

4.2 实测切刀温度变化

以瑞普华 ZP-480 枕式自动食品包装机为测试对

象,选择 Pt100 温度传感器,分辨率为 0.01,设定目标温度为 200 °C,当采用模糊 PID 控制系统温度到达 200 °C 时,每隔 5 s 通过触摸屏采集 1 个温度数据,将采集的温度数据用折线绘制出来,见图 5。当热封切刀切割时,由于受到空气对流以及切刀表面温度散热的影响,其切刀温度出现小范围振荡,误差范围在 -1.5 ~ +1.5 °C 之间,该温度误差完全满足设计要求。

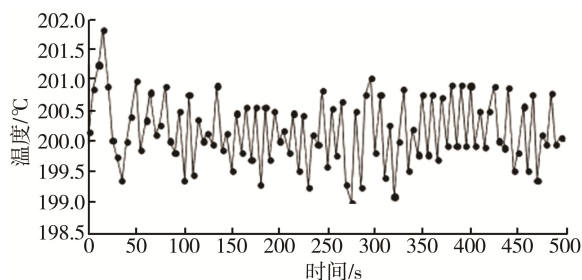


图 5 温度控制实验结果
Fig.5 Experimental results of temperature control

5 结语

针对包装热合装置的温控系统存在实时性差和时间滞后等问题,提出了一种基于模糊 PID 的温度控制方法。采用变论域模糊 PID 实现控制参数自整定和控制规则的自调整,并将其与传统 PID 控制进

行了对比。模糊 PID 控制方法较传统 PID 控制能更稳定地控制加热温度, 有效提高了温度控制的响应速度和控制精度。将该系统应用于热合装置温度控制中, 能够实现包装材料的高速封合和温度的高精度控制。

参考文献:

- [1] 李霞. 制袋机温度控制系统研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2005.
LI Xia. The Research of Temperature Control System for Bag-making Machine[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2005.
- [2] 罗海波. PID 控制器设计与仿真研究[J]. 计算机仿真, 2012, 29(2): 345—348.
LUO Hai-bo. Design and Simulation on PID Controller[J]. Computer Simulation, 2012, 29(2): 345—348.
- [3] 杨祖彬, 曾莉红. 基于食品安全的我国食品包装机械技术发展路径探讨[J]. 包装工程, 2011, 32(13): 117—121.
YANG Zu-bin, ZENG Li-hong. Discussion on Technical Development Path of China's Food Packaging Machine Based on Food Safety[J]. Packaging Engineering, 2011, 32(13): 117—121.
- [4] 刘伟, 李虹, 李瑞琴, 等. 现代包装机械设计质量综合评价体系研究[J]. 包装工程, 2015, 36(21): 75—79.
LIU Yi, LI Hong, LI Rui-qin, et al. Comprehensive Evaluation System for the Design Quality of Modern Packaging Machinery[J]. Packaging Engineering, 2015, 36(21): 75—79.
- [5] 翟阳, 曹亦轩, 肖永松. 热封切制袋机中多通道温控系统的设计[J]. 包装工程, 2013, 34(17): 68—71.
ZHAI Yang, CAO Yi-xuan, XIAO Yong-song. Design of Multi-channel Temperature Control System for Heat Sealing and Cutting Bag Machine[J]. Packaging Engineering, 2013, 34(17): 68—71.
- [6] 李泉, 宁芳青, 杨鹏, 等. 基于模糊 PID 的焦炉温度及优化控制[J]. 工业控制计算机, 2015, 28(9): 65—66.
LI Quan, NING Fang-qing, YANG Peng, et al. Research on Coke Oven Temperature System Based on GA Fuzzy PID Algorithm[J]. Industrial Control Computer, 2015, 28(9): 65—66.
- [7] 薛雷, 孙以泽, 李培兴, 等. 基于模糊 PID 的裤袜包装机热封切刀温度控制的研究[J]. 包装工程, 2013, 34(3): 16—20.
XUE Lei, SUN Yi-ze, LI Pei-xing, et al. Research on Temperature Control of Heat-sealing Cutting Knife of Pantyhose Packaging Machine Based on Fuzzy-PID[J]. Packaging Engineering, 2013, 34(3): 16—20.
- [8] 宋乐鹏, 刘斌, 陈红芬, 等. 基于 Bang-Bang 模糊自适应 PID 的干燥窑温度控制[J]. 计算机与应用化学, 2012, 29(7): 881—884.
SONG Le-peng, LIU Bin, CHEN Hong-fen, et al. Approach to Controlling the Temperature of Drying Kiln Using Bang-Bang Adaptive Fuzzy PID Controller[J]. Computer and Applied Chemistry, 2012, 29(7): 881—884.
- [9] DU C H, CHEN S K, LIANG X M. Application of Fuzzy Theory in Temperature Control System of Thermoforming Machine[J]. Procedia Engineering, 2011(15): 639—643.
- [10] 张俊, 李明. 基于 PLC 的模糊控制器在定量包装秤中的应用[J]. 制造业自动化, 2014, 36(5): 110—112.
ZHANG Jun, LI Ming. Application of Quantitative Packaging Machine based on PLC Fuzzy Controller[J]. Manufacturing Automation, 2014, 36(5): 110—112.
- [11] DENG J Q. The Smith-PID Control of Three-tank-system Based on Fuzzy Theory[J]. Journal of Computers, 2011, 6(3): 514—522.
- [12] 吴渊. 基于模糊 PID 的循环水温度控制系统研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2013.
WU Yuan. The Circulating Water Temperature Control System Based on Fuzzy PID[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2013.
- [13] MANUEL G, ETIENNE V. Temperature Regulation and Tracking in a MIMO System with a Mobile Heat Source by LQG Control with a Low Order Model[J]. Control Engineering Practice, 2013, 21(3): 333—349.
- [14] HAN L, ZHANG Z Y. The Application of Immune Genetic Algorithm in Main Steam Temperature of PID Control of BP Network[J]. Physics Procedia, 2012, 24(1): 80—86.
- [15] 赵金, 刘洋. 基于模糊推理的专家自整定 PID 控制器[J]. 华中科技大学, 2010, 38(6): 5—7.
ZHAO Jin, LIU Yang. Fuzzy Reasoning-based Expert Self-Tuning PID Controller[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology, 2010, 38(6): 5—7.