

doi:10.3969/j.issn.2095-0411.2020.03.011

基于 PID 的电加热锅炉控制算法研究

束云豪^{1,2}, 王政伟¹

(1. 常州大学 石油工程学院, 江苏 常州 213164; 2. 国家电网常州供电公司, 江苏 常州 213000)

摘要:传统电热锅炉温度控制具有非线性、时变性、大滞后等问题,控制精度不高。对常规 PID、模糊 PID 和模糊内模 PID 这 3 种算法在电加热锅炉中的控制效果进行对比分析,利用 MATLAB 的 Simulink 建立仿真模型得到仿真结果,并在 AE2000 锅炉温控实验装置中实现,验证仿真结果的可信性。研究表明:相较于模糊 PID 算法(超调值 0.7 °C,余差 0 °C,稳定时间 40 min),模糊内模 PID 控制算法(超调值 0 °C,余差 0 °C,稳定时间 30 min)的调节时间更短、超调更小、能够更为快速的响应,且系统的鲁棒性更强,具有良好的抗干扰能力,系统精度、稳定性均较高。

关键词:模糊控制;PID 控制;电加热锅炉

中图分类号:TK 8

文献标志码:A

文章编号:2095-0411(2020)03-0079-07

Research on PID Control Algorithm of Electric Heating Boiler

SHU Yunhao^{1,2}, WANG Zhengwei¹

(1.School of Petroleum Engineering, Changzhou University, Changzhou 213164, China; 2.State Grid Corporation of China Changzhou Branch Operation, Changzhou 213000, China)

Abstract: The temperature control of the traditional electric boiler has nonlinear, time-varying, large hysteresis and other problems, and the control precision is not high. In this paper, the control effects of conventional PID, fuzzy PID and fuzzy intimal PID in electric heating boiler are compared and analyzed. The simulation results are obtained by using MATLAB Simulink to obtain simulation results, and realized in AE2000 boiler temperature control experimental device. The credibility of the simulation results are verified. The research shows that compared with the fuzzy PID algorithm (overshooting value 0.7 °C, residual error 0 °C, stabilization time 40 min), the adjustment of fuzzy intimal PID control algorithm (overshoot value 0 °C, residual error 0 °C, stabilization time 30 min), the time is shorter, the overshoot is smaller, the response is faster, and the system is more robust, having good anti-interference ability, higher system accuracy and stability.

Key words: fuzzy control; PID control; electrically heated boiler

收稿日期:2019-11-26。

作者简介:束云豪(1994—),男,江苏常州人,硕士生。通信联系人:王政伟(1961—),E-mail:wangzhw@cczu.edu.cn

引用本文:束云豪,王政伟.基于 PID 的电加热锅炉控制算法研究[J].常州大学学报(自然科学版),2020,32(3):79-

近年来,计算机技术不断更新迭代且不断渗透到工业过程中。工业生产领域具有复杂性,可引入传统的 PID 控制算法与智能控制法,形成先进的控制算法提高系统的可行性。过程控制中涉及到诸多参数,而温度控制则是其中最为主要的参数。在过程控制中能否保证温度控制的质量关乎整个生产成本、效率、产品质量,如果不能合理控制,不仅会浪费能源,同时还有可能引发严重的安全事故。

关于模糊控制算法,国内外学者进行了大量的研究,取得了丰硕的研究成果。关于模糊控制算法的研究主要集中为:①模糊控制算法的研究,如:1965 年 Zedeh 最先提出模糊控制的概念,但是仅限于数学领域^[1]。②模糊控制算法应用的研究,如:1974 年 Mmadnai 在蒸汽机中最先使用了模糊控制算法,自此控制领域广泛使用模糊控制^[2];1985 年 AT & T 公司最先设计出模糊逻辑芯片,将模糊控制算法真正应用于硬件之中^[3];胡新新(2019)结合医院办公区电锅炉改造项目,对模糊 PID 算法的性能进行分析,研究发现 PID 控制和模糊控制算法结合使用能够提高控制的稳定性和精确度^[4]。③模糊控制改进算法的研究,如:谷洋洋和李来春(2015)利用 MATLAB 仿真对分类遗传控制算法、BP 神经网络控制算法和模糊自适应控制算法的性能进行对比分析^[5];刘华和刘敏层(2018)利用 Simulink 构建了模糊 PID 模型,对模糊 PID 算法与常规 PID 算法的性能进行了对比分析,发现模糊 PID 算法那的稳定性更高、速度更快,效果更理想^[6]。由现有研究成果可以看出,模糊控制算法能够稳定控制过程、提高工业生产效率、降低关键变量波动幅度等作用,实现更符合装置约束边界要求的工业生产,优化目标值。

虽然模糊控制算法的理论较为丰富,但是针对电加热锅炉控制的研究较少,也并未在电加热控制领域得到广泛应用。相较于其他工业控制系统,电加热锅炉温度受各种干扰因素影响,会出现阶惯性加纯滞后,温度控制难度更大,因此有必要深入探讨。本文对模糊 PID 和模糊内模 PID 这两种算法进行对比,通过 Simulink 进行仿真,并利用 PLC 在 AE2000 锅炉温控实验装置中实现,验证两种控制算法的性能。

1 模糊 PID 和模糊内模 PID 控制理论

1.1 模糊 PID 控制理论

模糊 PID 计算机控制即模糊控制法,属于智能控制领域,融合了模糊逻辑推理、模糊语言变量、模糊集合论等理论^[7]。其以二维模式选择输入、输出变量,符合模糊控制系统的要求,通用性强。

输入 e 和 e_c 分别用于表示语言变量选择偏差、偏差变化;用 ΔK_p 表示输出语言变量比例系数; ΔT_i 用于表示积分时间增量; ΔT_d 用于表示微分时间增量。

定义: e 和 e_c 的隶属度函数为高斯函数,定义 ΔK_p 为三角形,隶属度函数如图 1 至图 5 所示。

结合控制规则表可求出实际控制电加热锅炉的温度:如误差较大,则应以消除误差为选择控制变量的切入点;相反如果误差较小,则应该以预防超调作为选择控制量的依据。

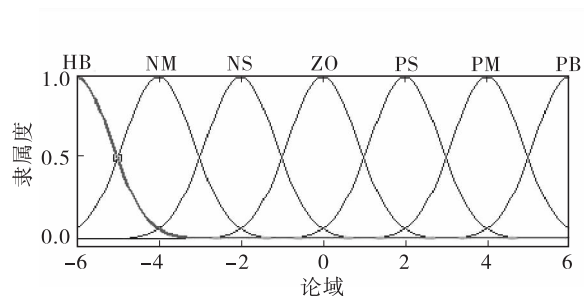


图 1 偏差 e 的隶属函数

Fig.1 Membership function of deviation

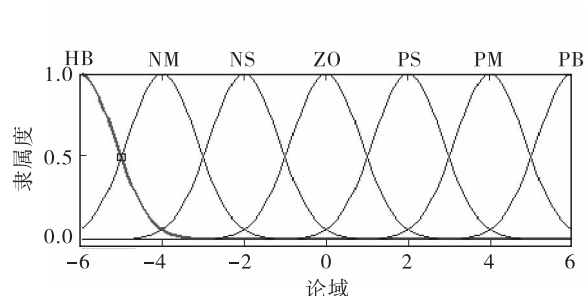
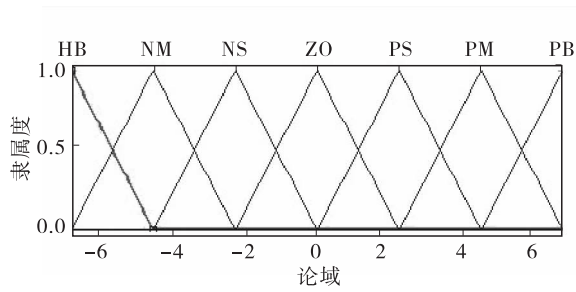
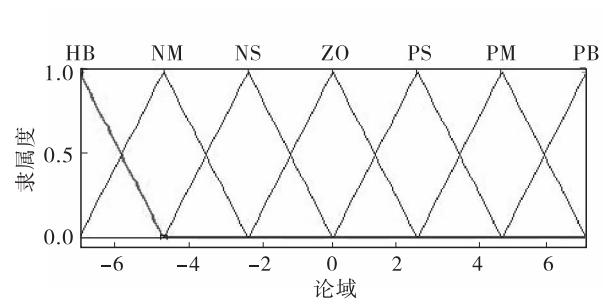


图 2 e_c 的隶属函数

Fig.2 e_c function of deviation

图3 ΔK_p 的隶属函数Fig.3 ΔK_p function of deviation图4 ΔT_i 的隶属函数Fig.4 ΔT_i function of deviation

1.2 模糊内模 PID 控制理论

Morari(1982)等最先提出内模控制,其设计步骤如下:首先,设计稳定的理想控制器,即忽视系统约束、误差、鲁棒性等约束条件。其次,增加相位较小的滤波器以满足系统鲁棒性、稳定性的要求,并对系统的参数结构进行调整,以使滤波器的鲁棒性、动态品质得到保证^[8]。

分解过程模型 $\hat{G}_p(s)$ 如下所示

$$\hat{G}_p(s) = \hat{G}_{p^+}(s) \hat{G}_{p^-}(s) \quad (1)$$

式中: $\hat{G}_{p^-}(s)$ 是相对稳定的部分,具有最小相位特征,不含滞后性。 $\hat{G}_{p^+}(s)$ 包含过程模型中所有右半平面、时滞的零点。

将滤波器加在相位最小的 $\hat{G}_{p^-}(s)$ 上面,提高系统的鲁棒性与稳定性。内模控制器如下所示:

$$G_{IMC}(s) = \hat{G}_{p^-}^{-1}(s) \times f(s) \quad (2)$$

$$f(s) = \frac{1}{(1 + T_f s)^n} \quad (3)$$

式中: T_f 基于系统中采用动态经验建模法进行阶跃实验,系统增加 T_f 后,其响应速度会变慢,相反的如果系统的该值变小,则说明系统的响应速度较快。 n 是低通滤波器阶次;是 $f(s)$ 低通滤波器。

内模控制器结构的原理如图6所示。内模控制器的结构原理为

$$G_c(s) = \frac{G_{IMC}(s)}{1 - G_{IMC}(s) G_p(s)} \quad (4)$$

将式(4)代入式(2),可得

$$G_c(s) = \frac{G_{p^-}(s) - 1 \cdot f(s)}{1 - G_{p^-}(s) - 1 \cdot f(s) G_p(s)} = \frac{G_{p^-}(s) - 1 \cdot f(s)}{1 - G_{p^+}(s) \cdot f(s)} \quad (5)$$

如果锅炉的采样周期较长,则其闭环调节系统可用一阶滞后环节表示,可得如下模型

$$G_p(s) = \frac{K}{1 + T_s s} e^{-\theta s} \quad (6)$$

式中: θ 用于表示纯滞后时间; T_s 是一个常数,用于表示系统的惯性时间常数; K 是一个常数,用于表示系统的总放大倍数。

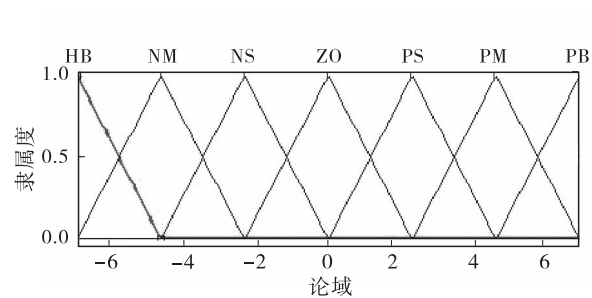
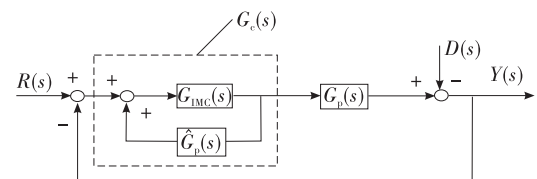
图5 ΔT_d 的隶属函数Fig.5 ΔT_d membership function

图6 内模控制器结构的原理图

Fig.6 Schematic diagram of internal model controller structure

结合试验锅炉夹套温度的结果,用曲线表示其特性计算出其特性参数,并用数学模型表示被控制对象。台劳公式逼近纯滞后环节 $e^{-\theta s}$ 可得

$$e^{-\theta s} = \frac{e^{-\frac{\theta s}{2}}}{e^{\frac{\theta s}{2}}} \approx \frac{1 - \frac{\theta}{2}s}{1 + \frac{\theta}{2}s} \quad (7)$$

因此

$$G_p(s) = \frac{K}{1 + T_s} \frac{1 - \frac{\theta}{2}s}{1 + \frac{\theta}{2}s} \quad (8)$$

$$G_p(s) = \frac{K}{(1 + T_s) \left(1 + \frac{\theta}{2}s\right)} \quad (9)$$

$$f(s) = \frac{1}{1 + T_i s} \quad (10)$$

在式(5)中分别代入式(8)至式(10),可得

$$G_c(s) = \frac{(1 + T_s) \left(1 + \frac{\theta}{2}s\right)}{K \left(\frac{\theta}{2} + T_i\right) s} \quad (11)$$

分析等效内模控制器,如式(11)所示可知此类 PID 控制器属于内模结构,通过合理确定系统的 T_i 值,就可显著提高系统的抗干扰性、鲁棒性,具体可用如下公式计算出其 PID 参数。

$$K_p = \frac{T + \frac{\theta}{2}}{K \left(\frac{\theta}{2} + T_i\right)} \quad (12)$$

$$T_i = \frac{\theta}{2} + T \quad (13)$$

$$T_d = \frac{T\theta}{2 \left(T + \frac{\theta}{2}\right)} \quad (14)$$

1.3 设计模糊内模控制器

1.3.1 确定语言变量

分别将 e, e_c 与 $\Delta T_i, T_i$ 作为输入、输出语言变量,结合下述公式确定滤波器时间常数^[9]

$$T_i = T_i^* + \Delta T_i \quad (15)$$

1.3.2 定义模糊集

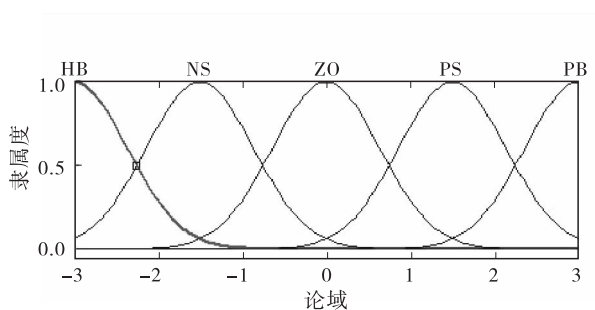
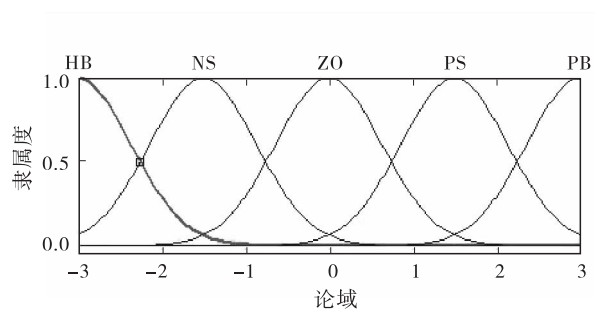
以 $\{NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB\}$ 表示滤波器时间增量、偏差变化、偏差的模糊集合,其中:NB(负大),NM(负中),NS(负小),ZO(零),PS(正小),PM(正中),PB(正大)。 e, e_c 和 ΔT_i 的论域取为 $\{-3 \quad -2 \quad -1 \quad 0 \quad 1 \quad 2 \quad 3\}$ 。

1.3.3 选择隶属函数

分别确定高斯型、三角形的隶属函数为输入、输出语言变量的函数,隶属度函数如图 7 至图 9 所示。

1.3.4 ΔT_i 模糊控制规则

按照控制规则整定 ΔT_i :如闭环系统的该值越小,则说明其输出值响应速度越快,输出值能够较及时的跟踪设定值;相反如果该值较大,则说明系统具有较好的鲁棒性。

图7 e 的隶属函数Fig.7 e function of deviation图8 e_c 的隶属函数Fig.8 e_c function of deviation

2 仿真建模验证

2.1 电热锅炉控制的过程建模

同构动态经验建模法确定模型的参数。先对调压模块进行手动设置,设置其电加热功率为15%,锅炉夹套经过一段时间后,其温度趋于稳定,可给出阶跃值5%,获取新的夹套温度值,之后可计算出其阶跃响应曲线,确定可动态描述控制锅炉夹套温度的传递函数。

通过分析该指数形式的曲线形成用一阶惯性加纯滞后环节,如下

$$G_p(s) = \frac{K}{Ts + 1} e^{-\tau s} \quad (16)$$

采用4点法对式中的参数进行确定, K , T 和 τ 可用下述函数说明^[10]:

$$y(t) = \begin{cases} 0 & t < \tau \\ y_{\infty} \left[1 - \exp\left(-\frac{t-\tau}{T}\right) \right] & t \geq \tau \end{cases} \quad (17)$$

式中 y_{∞} 为阶跃响应稳态值。

用下式表示 K

$$K = \frac{y_{\infty} - y_0}{\Delta u} \quad (18)$$

在阶跃响应曲线上取 A, B, C, D 4点,对应的以 t_1, t_2, t_3, t_4 (从小到大的顺序)为横坐标,它们的纵坐标为 $y(t_1) = 0.33y_{\infty}$, $y(t_2) = 0.39y_{\infty}$, $y(t_3) = 0.632y_{\infty}$, $y(t_4) = 0.7y_{\infty}$ 。

代入公式(18)中计算得:

$$T_1 = 2(t_3 - t_2)$$

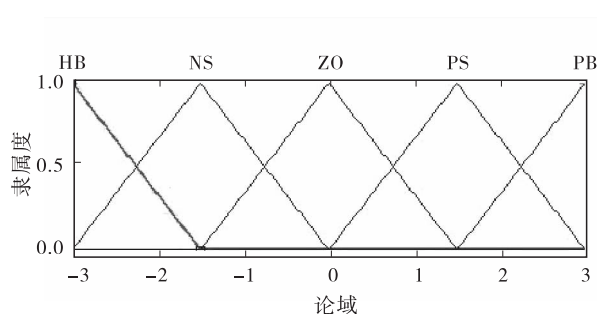
$$\tau_1 = 2t_2 - t_3$$

$$T_2 = 1.24(t_4 - t_1)$$

$$\tau_2 = 0.5(3t_1 - t_4)$$

若 T_1, T_2 以及 τ_1, τ_2 取值相差不大,可计算出 T 和 τ (分别表示系统的惯性时间常数、滞后时间常数)。

$$T = \frac{T_1 + T_2}{2} \quad (19)$$

图9 滤波器时间常数增量 ΔT_r 的隶属函数Fig.9 Membership function of ΔT_r filter time constant increment

$$\tau = \frac{\tau_1 + \tau_2}{2} \quad (20)$$

通过上述实验方法计算出平均值,得到模型参数: $K=1.14$, $T=780$, $\tau=295$ 。一般以 τ/T 作为衡量纯滞后大小的参考值。该值表示纯滞后时间、过程滞后时间的比值。如果该值小于 0.3,说明生产过程存在一般纯滞后过程,无需使用特殊控制法,采用常规控制法完全可解决。相反如果该值达到 0.3 以上,说明其属于大纯滞后过程,必须使用特殊的高级控制算法。经过计算,本实验锅炉夹套温度控制中的 τ/T 值为 0.38,大于 0.3,说明该过程属于大纯滞后^[11]。

2.2 两种控制算法的 SIMULINK 仿真

利用 Simulink 构建的模型将仿真时间设置为 1 万 s,采用 ode5 固定步长算法作为计算方法,以 1 作为固定步长。模糊内模 PID 中经多次仿真, $K_e=0.5$ (误差量化因子), $K_{ec}=0.03$, $K\Delta T_f=40$, $T_f=450$ 上述分别表示误差变化量化因子、滤波时间增量因子、滤波时间初值。对应的在模糊 PID 上述各值分别为 0.5, 0.01, 0.002, 0.6, 0.8, 初始比例系数值 $K_{p0}=1$, $T_{i0}=833$, $T_{d0}=150$ ^[12]。

常规 PID 仿真 PID 参数采用 Ziegler-Nichols 闭环临界比例度法进行整定,即:

$$K_p = 1.2 \times \frac{T}{K \times \theta} = 2.78$$

$$T_i = 2.2\theta = 649$$

$$T_d = 0.5\theta = 147.5$$

利用 Simulink 对不同控制方式进行仿真,可得到不同算法的控制效果如图 10 和图 11 所示。

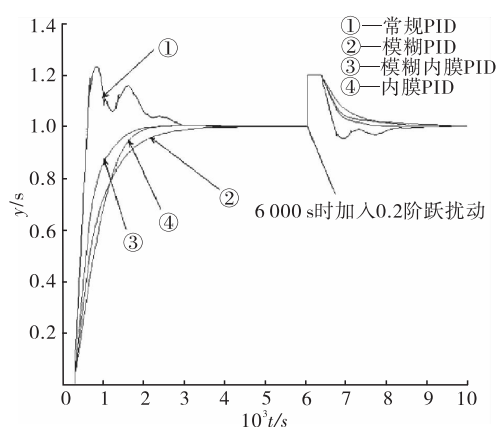


图 10 对比几种控制方式

Fig.10 Several control modes

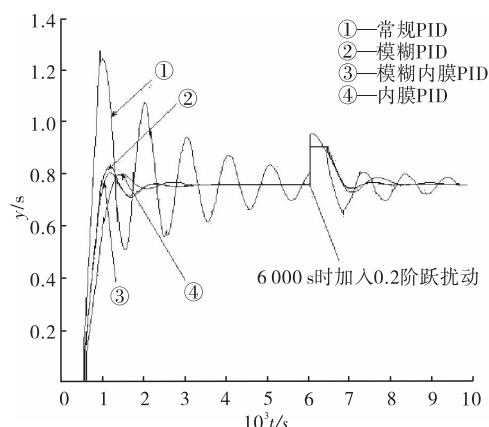


图 11 几种控制方式在模型失配(15%误差)的情况

Fig.11 Several control modes in the case of model mismatch (15% error)

如图 10 所示,相较于常规 PID 控制,模糊内模 PID、模糊 PID 和内模 PID 这 3 种算法都呈现出显著的优越性。其中,模糊内模 PID 的控制品质最好,稳定性更强,所需的调整时间更短。如图 11 所示,常规 PID 控制在模型失配(15%误差)时,系统出现振荡现象,无法稳定系统。从控制效果方面来看,其他 3 种控制方式较优,鲁棒性较优。在模型失配的情况下,模糊内模 PID 控制的超调最低、调节时间都较短,系统的动态品质较优,能够有效克服干扰、滞后等问题^[13]。

3 模糊PID控制与模糊内模PID控制的比较

为了验证常规PID、模糊内模PID和模糊PID控制这3种算法的性能,利用SIEMNESS7在PLC上分别实现上述算法,并在AE2000锅炉温控系统中实现。通过实验,

在常规PID算法下,锅炉夹套温度超调值是 2.7°C ,余差是 25°C ,稳定时间为90 min。在模糊内模PID算法下,锅炉夹套温度超调值是 0°C ,余差是 0°C ,稳定时间为30 min。在模糊PID算法下,锅炉夹套温度超调值是 0.7°C ,余差是 0°C ,稳定时间为40 min。最终,得到3种PID算法的控制效果见表1。

由上述实验结果不难看出,模糊PID控制和模糊内模PID控制算法的性能都优于常规PID控制,偏差更小。3种算法中,模糊内模PID算法的性能最好,其兼具内模控制和PID控制优势,不存在滞后问题,鲁棒性更好,精度更高,且适应性强、使用灵活,稳态精度和动态响应的效果更为显著。

4 结论

利用MATLAB仿真软件建立仿真模型,对比了模糊PID、模糊内模PID和常规PID这3种算法在模型失配及匹配的情况下的控制效果。研究表明:相较于常规PID系统,模糊PID和模糊内模PID算法的调节时间更短、超调更小、响应速度更快,且系统的鲁棒性更强,抗干扰性能更优,系统精度、稳定性均较高。这3种算法中,模糊内模PID同时具备两种模型的优点,不仅具有鲁棒性强、精确度高的特点,同时其调整参数较少,能够有效解决滞后的问题,能够实现灵活的控制,显著提高系统的稳态精度与动态品质,其控制效果良好。

参考文献:

- [1]ZEDEH L A. Fuzzy sets[J]. Information and Con-Trol, 1965,3(5):33-37.
- [2]OHAMAN M, JOHNASSEN S, ARZEN K E. Implementation aspect of the PLC standard IEC1131-3[J]. Control Engineering Practice, 1998, 6(8): 547-555.
- [3]王树青.先进控制技术及应用[M].北京:化学工业出版社,2001.
- [4]胡新新.改进PID结构的电锅炉温度控制系统研究[J].中国设备工程,2018(13):81-83.
- [5]谷洋洋,李来春,张绍娟.基于智能PID控制的燃气锅炉燃烧控制系统研究[J].热能动力工程,2015,30(3):413-417, 494-495.
- [6]刘华,刘敏层.基于模糊PID在锅炉温度控制系统的仿真研究[J].自动化与仪表,2018,33(4):20-25.
- [7]刘炽义,赵国,王子晓.永磁直线电动机的内模PID控制和抗干扰能力分析[J].微特电机,2016,44(8):86-88,98.
- [8]钱明辉,谭海龙,金鑫,梁军.基于MFAC-PID的核电站蒸汽发生器水位控制[J].华东理工大学学报(自然科学版), 2015,41(1):72-76,124.
- [9]GARCIA C E, MORARI M. Internal model control-1. Unifying review and some new results[J]. Ind Eng Chem Process Des Dev, 1982, 21(2):308-323.
- [10]丁虎,张健沛.PID参数整定新方法在锅炉蒸汽压力系统中的应用[J].哈尔滨工业大学学报,2010,42(1):163-168.
- [11]王岁平.基于PID算法的锅炉温度控制研究[J].自动化应用,2019(5):35-36,47.
- [12]韩海宁.蚁群算法在平台锅炉PID参数优化中的应用[J].化工管理,2019(9):148-149.
- [13]刘华,刘敏层.基于模糊PID在锅炉温度控制系统的仿真研究[J].自动化与仪表,2018,33(4):20-25.

(责任编辑:殷丽莉)