

通用型模糊自寻优 PID 控制器在电导热油炉中的应用

徐锋¹ 楼平² 林海波¹

(1. 浙江台州职业技术学院 自动化研究所 浙江 台州 318000;

2. 浙江嘉兴职业技术学院 机电与汽车分院 浙江 嘉兴 314036)

摘要:电导热油炉一般采用常规 PID 控制,由于温控系统非线性、大滞后、时变性等特点,且受外界干扰因素较为复杂,其控制模型极难确定,导致 PID 参数值选择既复杂,又无法使调节速度、超调和静差等指标得到最佳匹配。在分析典型温度曲线与 PID 控制参数之间的内在关系的基础上,提出了一种根据模糊推理实现 PID 参数在线整定的通用型模糊自寻优 PID 控制器,较好地实现了不同工况下系统对响应速度、控制精度和静差的要求。通过对多种控制方法的 Matlab 仿真、分析并应用于模拟电加热导热油炉中的实验测量,验证了模糊自寻优 PID 控制器在调节时间、超调和静差等方面的优势,这种方法对温控系统有一定的普遍意义。

关键词:模糊自寻优; PID 控制; 模拟电加热; 导热油炉; 仿真与实验测量

中图分类号: TM571.6 文献标识码: A
DOI: 10.16146/j.cnki.rndlgc.2016.05.022

引言

电加热导热油炉将电加热器直接插入导热油中进行加热,利用循环泵强制导热油进行液相循环,将热量传递给用一个或多种用热设备,实现热量的连续传递。它与传统的蒸汽加热技术相比,具有高效、节能、环保等特点,广泛应用于石油、化工、纺织等行业。

目前,电加热导热油炉控制系统较常采用传统 PID 控制器,由于常规 PID 控制器的参数不具备在线调整的功能,当工况发生变化时原有控制参数可能无法满足控制要求。

导热油炉温控系统是一个大滞后、非线性的时变系统,对于这种含有大滞后、时变性系统,采用常规的 PID 控制时,系统存在较大的超调量和较长的调节时间,还可能引起系统的不稳定^[1];其主要原因在于 PID 参数很难适应现场环境条件的变化。

然而, PID 控制本身的优点也吸引着许多研究者,各种 PID 参数的在线自整定研究取得了较好的成就,但也存在一定的缺陷,如文献 [2~3] 提出的模式识别技术整定 PID 参数的方法对改善阻尼比和超调量有较好效果,但整定规则过于复杂,实际应用较为不便;文献 [4] 提出的一种基于给定增益裕度和相位裕度整定 PID 参数整定法,但它对于大滞后控制系统响应速度比较缓慢。近年来,人工智能控制理论得到飞速发展,特别是建立在模糊控制理论上的 PID 参数在线自寻优控制、模糊和 PID 复合型控制器等,在时滞性和时变性系统中得到广泛的应用并取得较好表现。

提出了一种基于模糊推理的 PID 参数自寻优控制法,通过 Matlab 仿真分析,并在实验室环境下用于模拟电加热导热油炉的控制,仿真和实验均表明了这种方法具有良好的动态和静态性能。

1 控制系统设计

1.1 控制系统的原理

模糊自寻优 PID 控制器温控系统的结构框图如图 1 所示。

该控制器由一个二维结构的模糊控制器和常规 PID 控制器构成。

图 1 中,虚线框内部分为模糊控制器, k_e 、 k_c 为控制器量化因子, ΔK_p 、 ΔK_I 和 ΔK_D 为 PID 参数修正量。

自寻优的设计思想是:根据 PID 控制器的参数 K_p 、 K_I 、 K_D 对输出响应的影响,总结出 PID 参数与偏差绝对值 $|e|$ 和偏差变化率绝对值 $|e_c|$ 之间的内在关系,由此确定模糊规则。控制器通过不断检测偏

收稿日期:2015-05-08; 修订日期:2015-06-10

基金项目:浙江省科技厅公益技术研究工业项目(2015C31132);浙江省自然科学基金项目(LY14E050001)

作者简介:徐锋(1963-),男,浙江诸暨人,台州职业技术学院副教授。

差 $|e|$ 和偏差变化率 $|e_c|$,由推理机根据模糊规则求出 PID 参数修正量 ΔK_p 、 ΔK_i 、 ΔK_d ,及时完成对 PID 参数进行在线修订,以满足不同 e 和 e_c 条件下对控制参数的要求^[5]。

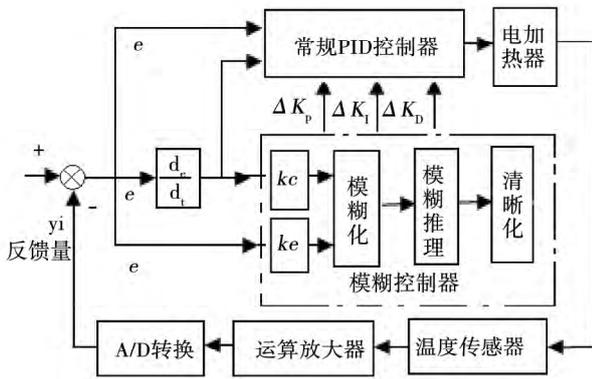


图 1 模糊自寻优 PID 控制器结构图

Fig. 1 Schematic drawing of the structure of a fuzzy optimization self - searching PID controller

根据上述描述 ,PID 参数增量 ΔK_p 、 ΔK_i 、 ΔK_d 与 $|E|$ 与 $|EC|$ 之间的二元模糊关系可表达为^[5]:

$$\Delta K_p = f_1(|E|, |EC|) \tag{1}$$

$$\Delta K_i = f_2(|E|, |EC|) \tag{2}$$

$$\Delta K_d = f_3(|E|, |EC|) \tag{3}$$

式(1) ~ 式(3)中: E 、 EC — e 、 e_c 的模糊映射。

在得出 PID 参数增量后 ,即可实时得到不同状态下的 K_p 、 K_i 、 K_d 参数:

$$K_p = K_{p0} + k_1 \Delta K_p \tag{4}$$

$$K_i = K_{i0} + k_2 \Delta K_i \tag{5}$$

$$K_d = K_{d0} + k_3 \Delta K_d \tag{6}$$

式(4) ~ 式(6)中: K_{p0} 、 K_{i0} 、 K_{d0} —PID 控制器的初始值; k_1 、 k_2 、 k_3 为比例因子。 ΔK_p 、 ΔK_i 、 ΔK_d —控制器输出的模糊量。

采用数字控制系统实现 PID 算法时 ,其离散的 PID 控制算式为^[6]:

$$U(n) = K_p e(n) + K_i \sum e(n) + K_d [e(n) - e(n-1)] \tag{7}$$

在实际应用中 ,常采用增量式 PID 算法:

$$\Delta u(k) = K_p [e(k) - e(k-1)] + K_i e(k) + K_d [e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)] \tag{8}$$

实际输出量为:

$$u(k) = u(k-1) + \Delta u(k) \tag{9}$$

增量算法只需计算 $e(k-1)$ 和 $e(k-2)$ 两个误差 ,这样既简化计算 ,同时也能消除偏差积累。

1.2 模糊规则

传统 PID 控制器的控制性能与 PID 参数之间的关系无法用数学语言加以精确描述 ,但可以用自然语言加以表述^[5] ,这为实现 PID 参数的模糊自寻优奠定了基础。

通过对典型 PID 控制曲线分析 ,结合自动控制系统快、稳、准的要求 ,可以比较容易总结出 PID 控制器的 K_p 、 K_i 、 K_d 参数与控制器偏差 $|e|$ 和偏差变化率 $|e_c|$ 之间的关系 ,这种关系的自然语言描述如下^[5,7]:

(1) 在控制开始阶段 ,即偏差 $|E|$ 较大时 ,无论偏差变化率 $|EC|$ 大小如何 ,为了使系统具有良好的响应速度 ,并避免开始时偏差的瞬间突变可能引起的微分饱和和系统出现较大的超调 ,取较大的 K_p 和较小的 K_d 、 K_i 值;

(2) 当 $|E|$ 和 $|EC|$ 为中等大小时 ,为使系统响应的超调减小 ,并保证系统的响应速度 ,取 K_p 、 K_d 的值的大小适中;

(3) 当 $|E|$ 较小时 ,为使系统具有良好的稳态性能 ,应增加 K_d 和 K_i 的值 ,同时为了避免系统在设定值附近振荡 ,并考虑系统的干扰性能 ,应适当地选取 K_d 的值 ,其原则是: 当 $|EC|$ 较小时 , K_d 可取的大些 ,通常取为中等大小; 当 $|EC|$ 较大时 , K_d 应取小些。

上述原则对 PID 参数的选择并不针对具体的对象 ,因此 ,按此方法确定的 PID 参数是具有普遍意义的 ,由此得出的模糊规则具有通用性。

模糊控制器输入/输出语言变量 (E 、 EC 和 ΔK_p 、 ΔK_i 和 ΔK_d) 一般取 3 ~ 9 个模糊子集。考虑到后续应用时的简单易行及控制规则的灵活性和细致性 ,本例选定模糊子集的数量为 7 个 ,并采用 NB , NM , NS , ZO , PS , PM , PB 表述 ,即: $E = EC = \{ NB , NM , NS , ZO , PS , PM , PB \}$ 和 $\Delta K_p = \Delta K_i = \Delta K_d = \{ NB , NM , NS , ZO , PS , PM , PB \}$ 。

根据参数 K_p 、 K_i 、 K_d 与偏差 $|E|$ 和偏差变化率 $|EC|$ 之间的关系和对 PID 性能的影响 ,得出的模糊控制规则如表 1 所示^[7]。

1.3 模糊推理与模糊判决

模糊推理是一种近似推理 ,比较常见的方法有扎德 (Zadeh) 法、马丹尼 (Mandani) 法、楚卡莫托 (Tsukamoto) 和鲍德温 (Baldwin) 法等多种方法^[8]。

表 1 模糊规则表
Tab.1 Table of fuzzy rules

E	$\Delta K_P, \Delta K_I, \Delta K_D$						
	EC = NB	EC = NM	EC = NS	EC = ZO	EC = PS	EC = PM	EC = PB
NB	PB/NB/NB	PB/NB/NB	PB/NB/NM	PB/NB/NM	PB/NB/NM	PB/NB/NB	PB/NB/NB
NM	PM/NM/ZO	PM/NM/ZO	PM/NS/NM	PS/NS/NM	ZO/NS/NM	ZO/NM/ZO	ZO/NM/ZO
NS	ZO/PM/ZO	ZO/PM/N	PM/NS/NM	NS/PS/NM	NM/PS/NS	NM/PM/NS	NM/PM/ZO
ZO	NS/PM/NS	NS/PM/NS	NS/PS/NS	ZO/ZO/NS	NS/PS/NS	NS/PM/NS	NS/PM/NS
PS	NM/PM/ZO	NM/PM/NS	NM/PS/NM	NS/PS/NM	ZO/PS/NS	ZO/PM/NS	ZO/PM/ZO
PM	ZO/NM/ZO	ZO/NM/ZO	ZO/NS/NM	PS/NS/NM	PM/NS/PS	PM/NM/ZO	PM/NM/ZO
PB	PB/NB/NB	PB/NB/NB	PB/NB/NM	PB/NB/NM	PB/NB/NM	PB/NB/NB	PB/NB/NB

本例选用马丹尼法。

二维结构模糊控制器的规则描述为 *if A_i and B_i the C_i* 或 $A_i \wedge B_i \rightarrow C_i$, 三元模糊关系如下^[6]:

$$R_i = A_i \wedge B_i \wedge C_i = (A_i \wedge B_i) \wedge C_i \quad (10)$$

在求取所有 $7 \times 7 = 49$ 条规则的模糊关系后, 可得到控制器总模糊关系 $R^{[7]}$:

$$R = R_1 \cup R_2 \cup R_3 \dots \cup R_{49} \quad (11)$$

控制器根据当前采样和计算得到的输入量 e 和 e_c 后, 经变换(量化和映射)到模糊论域中的 E 和 EC , 再根据合成推理原则, 得出控制器的输出如式(12)所示^[7]。

$$\Delta K_{ij} = (E_j \wedge EC_j) \circ R \quad (12)$$

式中“ \circ ”一模糊合成算子。

模糊推理的结果依然是一个模糊集合, 最终需要将其映射到论域的某个清晰值, 即需进行模糊判

决。常用的判决方法有面积重心(Centroid)法、面积平分(Bisector)法和最大隶属度(Maximum)法。

本例选用面积重心法, 计算如下^[5, 7]:

$$\Delta K_{(P, I, D)} = \frac{\sum U_i \cdot \mu(i)}{\sum \mu(i)} \quad (13)$$

式中: $\Delta K_{(P, I, D)}$ — $\Delta K_P, \Delta K_I, \Delta K_D$, U_i 为各输出模糊集中心值, $\mu(i)$ 是输出模糊集的隶属度。

上述通用型模糊控制器的语言变量的论域取值范围均为 $\{-6, -5, -4, -3, -2, -1, 0, +1, +2, +3, +4, +5, +6\}$ 。即 E, EC 和 $\Delta K_{(P, I, D)}$ 取值范围相同, 各模糊子集的隶属函数取三角形, 并在各自论域内采用不均匀分布, 相邻模糊集重叠处的隶属度取 $\beta = 0.5$ 。

表 2 为本例语言变量隶属度赋值表。表 2 中 E, EC 赋值相同, $\Delta K_P, \Delta K_I, \Delta K_D$ 赋值相同。

表 2 语言变量 $E(EC) / \Delta K_{(P, I, D)}$ 的赋值表 (μ_i)

Tab.2 Table of values (μ_i) assigned to the linguistic variables $E(EC) / \Delta K_{(P, I, D)}$

论域元素	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3	+4	+5	+6
NB	1.0/1.0	0.8/0.8	0.4/0.4	0.1/0.1	0.0/0.0	0.0/0.0	0.0/0.0	0.0/0.0	0.0/0.0	0.0/0.0	0.0/0.0	0.0/0.0	0.0/0.0
NM	0.2/0.2	0.7/0.7	1.0/1.0	0.7/0.7	0.2/0.2	0.0/0.0	0.0/0.0	0.0/0.0	0.0/0.0	0.0/0.0	0.0/0.0	0.0/0.0	0.0/0.0
NS	0.0/0.0	0.0/0.1	0.2/0.4	0.7/0.8	1.0/1.0	0.9/0.4	0.0/0.0	0.0/0.0	0.0/0.0	0.0/0.0	0.0/0.0	0.0/0.0	0.0/0.0
ZO	0.0/0.0	0.0/0.0	0.0/0.0	0.0/0.0	0.0/0.0	0.5/0.5	1.0/1.0	0.5/0.5	0.0/0.0	0.0/0.0	0.0/0.0	0.0/0.0	0.0/0.0
PS	0.0/0.0	0.0/0.0	0.0/0.0	0.0/0.0	0.0/0.0	0.0/0.0	0.0/0.0	0.9/0.4	1.0/1.0	0.7/0.8	0.2/0.4	0.0/0.1	0.0/0.0
PM	0.0/0.0	0.0/0.0	0.0/0.0	0.0/0.0	0.0/0.0	0.0/0.0	0.0/0.0	0.0/0.0	0.2/0.2	0.7/0.7	1.0/1.0	0.7/0.7	0.2/0.2
PB	0.0/0.0	0.0/0.0	0.0/0.0	0.0/0.0	0.0/0.0	0.0/0.0	0.0/0.0	0.0/0.0	0.0/0.0	0.1/0.1	0.4/0.4	0.8/0.8	1.0/1.0

2 仿真与实验

电加热系统具有自平衡能力, 一般可用二阶纯

滞后环节表示, 通过参数辨识又可用近似的一阶惯性滞后模型来描述, 其传递函数可表示为^[9]:

$$G(S) = \frac{K}{TS + 1} e^{-\tau s} \quad (14)$$

式中: K —开环增益; T —惯性时间常数; τ —纯滞后时间常数。

模拟电加热导热油炉的容积为 $260\text{ mm} \times 260\text{ mm} \times 105\text{ mm}$,加热器件功率 4.0 kW ,最高可输出温度为 $320\text{ }^\circ\text{C}$,要求稳态误差范围不大于 $\pm 1\text{ }^\circ\text{C}$,超调量不大于 25% [10] 。

模拟电加热导热油炉的模型参数通过飞升曲线测量法 ,用科恩—库恩 (Colin - Coon) 公式 [9] ,得出系统的放大系数为 $K = 1.12$,时间常数为 $T \approx 760\text{ s}$,滞后时间为 $\tau \approx 32\text{ s}$ 。

PID 参数的初始值选定为 $K_{P0} = 11$, $K_{I0} = 0.1$, $K_{D0} = 150$ 。

为增加模糊控制器控制灵敏度 ,设定 e 和 e_c 的基本论域分别为 $[-30, +30]$ 和 $[-15, +15]$,量化因子分别为 $k_e = 0.2$ 和 $k_c = 0.4$ 。输出量 Δk_p 、 Δk_i 和 Δk_d 的基本论域分别取 $[-3, +3]$ 、 $[-0.6, +0.6]$ 、 $[-5, +5]$,比例因子为 $k_1 = 0.5$ 、 $k_2 = 0.1$ 、 $k = 0.83$ 。

在 Matlab、Simulink 与模糊逻辑工具箱环境下构建仿真模型并进行仿真。

为了比较模糊自寻优 PID 控制器的效果 ,本例还对传统 PID 控制和基本模糊控制进行了仿真。

传统 PID 控制时的参数由 Ziegler - Nichols 经验公式确定为 $K_p = 28$, $K_i = 0.52$, $K_d = 420$ 。基本模糊控制采用文献 [11] 提供的控制策略。

当输入阶跃信号时 ,得到图 2 所示的阶跃响应曲线。

图 2 中 1、2、3 分别为模糊寻优 PID、传统 PID 和基本模糊控制响应曲线。

可以看出 ,模糊自寻优 PID 控制器的调节时间约为 $t = 480\text{ s}$,超调量约 $\delta\% = 20\%$,静差 $e_{ss} = 0$ 。

传统的 PID 控制出现的最超调约为 $\delta\% = 40\%$,静差 $e_{ss} = 0$,响应时间大于 $t = 500\text{ s}$ 。

基本模糊控制响应速度约 $t = 250\text{ s}$, $\delta\% = 0$,由于基本模糊控制在平衡点附近的控制盲区 ,因此存在一定的稳态误差。

由于非线性、大滞后和时变性以及受外界干扰因素较多 ,导热油炉控制系统的时间常数 T ,放大系数 K 和滞后时间 τ 都具有不确定性 ,确定的系统模型与实际往往难以精确匹配 ,仿真结果也只能大致

说明性能的优劣。

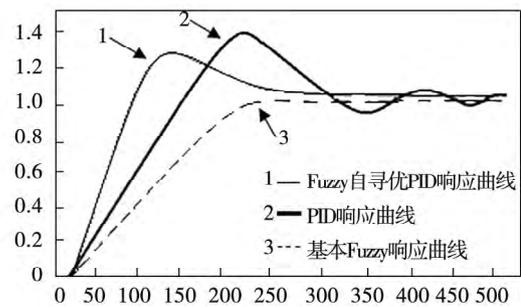


图 2 模糊自寻优 PID ,基本 PID ,基本模糊仿真曲线

Fig. 2 Fuzzy optimization self-searching PID , basic PID and basic fuzzy simulation curves

将上述方法应用于模拟电加热导热油炉的控制进行验证实验。

模糊自寻优 PID 控制器采用欧姆龙公司生产的 CVM1 系列 PLC 和专用模糊控制模块 C500 - FZ001 ,智能模块 C500 - FZ001 可装载 128 条控制法则 ,能实现 17 ms 快速应答。测温元件用能适应氧化性气氛 ,线性度好的 K 型热电偶 ,测量范围 $-200 \sim 1\ 200\text{ }^\circ\text{C}$,温度检测点设在出油口。加热电源采用智能开关电源模块 (SSR - EJK) 供电 ,它由随机型固态继电器 (SSR) 和智能移相触发模块 (EJK) 构成 [10] ,该装置在 $0 \sim 10\text{ V}$ 输入模拟信号下可调节 $0 \sim 380\text{ V}$ 电压 ,图 3 为模拟电加热导热油炉加热元件的驱动电路图 [10] 。

模糊自寻优 PID 控制器输出电压经转换后施加在智能移相固态触发器模块 (EJK) 的触发端上 ,便可连续调节加热器发热功率。

在实验室环境下进行实验测量 ,环境温度 $25\text{ }^\circ\text{C}$,设定温度为 $70\text{ }^\circ\text{C}$ 时。在电压波动不超过 $\pm 5\%$,负荷稳定的情况下 ,分别对模糊自寻优 PID 控制、传统 PID 控制和基本模糊控制进行实际测量 ,测量间隔定为 200 s 。测量得到的数据如表 3 所示。

测量数据与仿真结论基本相符 ,进一步证实了模糊自寻优 PID 控制器较传统的 PID 控制具有更快在响应速度和更小的超调量。综合模糊自寻优 PID 的动态和静态性能 ,均比基本模糊或 PID 控制有一定的优势。

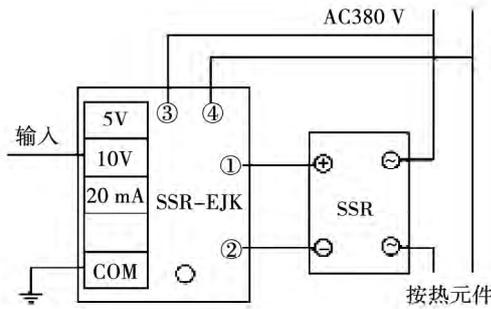


图 3 模拟电加热导热油炉驱动电路

Fig. 3 Driving circuit for simulating an electrically heated heat conduction oil heater

表 3 导热油炉温度测量数据表

Tab. 3 Table of the measurement data of the temperature inside the heat conduction oil heater

时间/s	模糊 PID 控制/°C	PID 控制/°C	基本模糊控制/°C
0	25.0	25.0	25.0
200	56.2	53.3	28.2
400	75.3	72.2	33.4
600	74.5	76.1	42.6
800	73.2	78.3	53.1
1 000	72.1	80.6	66.3
1 200	71.0	78.6	68.5
1 400	71.5	76.5	69.4
1 600	70.0	74.6	69.2
1 800	70.5	72.1	69.1
2 000	71.1	68.4	69.4
2 200	70.3	70.3	69.2
2 400	69.0	70.0	69.3
2 600	70.0	70.1	69.0

3 结 论

温控系统呈现出多变量、大滞后、时变性等特点,控制模型往往难以确定,采用传统 PID 控制时其参数不能始终适应变化工况的要求,无法兼顾调节速度与精度之间的矛盾。针对不同情况,利用模糊推理对 PID 参数进行在线自寻优,保留了 PID 控制的优点,避免了基本模糊控制的静态误差,提升了系统的鲁棒性。仿真和现场实验表明,模糊自寻优 PID 控制器在响应速度、超调和静差等方面都优于

传统的 PID 或基本模糊控制。这种方法对非线性、时滞系统具有较好的适应性。

参考文献:

[1] 陈书立. 纯滞后系统控制方法及其实验教学的研究 [D]. 河南: 郑州大学, 2009.
CHEN Shu-li. Study of the methods for controlling a pure lagging system and its experimental teaching [D]. Henan: Zhengzhou University, 2009.

[2] Bristol E. H. Pattern recognition. an alternative to parameter identification inadaptive control [J]. Automatica, 1977, 13, 197 - 202.

[3] Bristol E. H. The design of industrially useful adaptive controllers [J]. ISATransaction, 1983, 22(3), 17 - 25.

[4] W. K. HO, C. C. Hang, L. S. Cao. Tuning of PID controllers based on gain and phasemargin specifications [J]. Automatica, 1995, 31(3), 497 - 502.

[5] 郑向军, 徐 锋, 应一镇, 等. 基于模糊策略的 PID 控制器在恒温控制中的应用 [J]. 电气自动化, 2015, 37(5): 13 - 16.
ZHENG Xiang-jun, XU Feng, YING Yi-zhen, et al. Applications of PID controllers based on the fuzzy strategies in constant temperature control [J]. Electrical Automation, 2015, 37(5): 13 - 16.

[6] 徐 锋, 张嫣华. 数字控制系统的 PID 算法研究 [J]. 机床电器, 2008(6): 8 - 10, 19.
XU Feng, ZHANG Yan-hua. Research of the PID algorithms for digital control systems [J]. Machine Tool Electrical Equipment, 2008(6): 8 - 10, 19.

[7] 郑向军, 楼 平, 徐 锋. Fuzzy-PID 混合型控制器在远红外烘干炉中的应用 [J]. 应用科技, 2015 - 42(5): 38 - 41.
ZHENG Xiang-jun, LOU Ping, XU Feng. Applications of the fuzzy-PID hybrid type controllers in far infrared drying furnaces [J]. Applied Science and Technology, 2015 - 42(5): 38 - 41.

[8] 曾光奇, 胡均安, 王 东, 等. 模糊控制理论与工程应用 [M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2006.
ZENG Guang-qi, HU Jun-an, WANG Dong, et al. Fuzzy control theory and its engineering applications [M]. Wuhan: Central China University of Science and Technology press, 2006.

[9] 路桂明. 基于模糊 PID 控制的电锅炉温度控制系统的研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2007.
LU Gui-ming. Study of fuzzy PID control-based electrically-heated boiler temperature control systems [D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2007.

[10] 徐 锋, 郑向军, 杨彦青, 等. Fuzzy-PID 多模控制在金属热处理恒温炉中的应用 [J]. 电气自动化, 2014, 36(3): 13 - 16.
XU Feng, ZHENG Xiang-jun, YANG Yan-qing, et al. Applications of the fuzzy-PID multi-model control in the metal heat treatment constant temperature furnaces [J]. Electrical Automation, 2014, 36(3): 13 - 16.

[11] 范津齐. 基于模糊自整定 PID 算法的电锅炉温度控制 [D]. 沈阳: 沈阳理工大学, 2013.
FAN Jin-qi. Fuzzy self-tuning PID algorithm-based electrically-heated boiler temperature control [D]. Shenyang: Shenyang University of Science and Technology, 2013.

(刘 瑶 编辑)

practical production on the spot, it has been learned that the causes for the dust deposition mainly include the following five points: a low operation temperature of the circulating water, poor effectiveness of the soot blowing system, a big water content of fuel fed into the furnace, irrational structural design of the heating surface and a big resistance of the bag dust removal device. Three concrete solutions were proposed for these special purposes, involving respectively the following: operation optimization and adjustment, construction assistance adjustment and heat exchanger structure adjustment. The foregoing can offer guidance for proper applications of the flue gas waste heat recovery technology in bagasse-fired boilers and provide reference for flue gas waste heat recovery and reconstruction engineering projects of the same kind. **Key words:** bagasse-fired boiler, low temperature heating surface, dust deposition, cause analysis, solution

通用型模糊自寻优 PID 控制器在电导热油炉中的应用 = **Applications of a General-purpose Type Fuzzy Self-optimization-searching PID Controller in Electrically Heated Heat Conduction Oil Heaters** [刊, 汉] XU Feng, LIN Hai-bo (Automation Research Institute, Zhejiang Taizhou Vocational Technology College, Taizhou, China, Post Code: 318000), LOU Ping (School of Electromechanical and Automobile Engineering, Zhejiang Jiaxing Vocational Technology College, Jiaxing, China, Post Code: 314036) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2016, 31(5). - 141 ~ 145

The electrically heated heat conduction heaters usually adopt conventional PID control. Because of the temperature control systems featuring non-linear, big lagging and time-variation etc. and sophisticated factors interfered by the outside world, it is extremely difficult to determine the control model and the selection of the parameter values for the PID control is not only complex but also incapable of obtaining an optimum matching among the regulation speed, overshoot and static state difference etc. indexes. On the basis of the intrinsic relationship between the typical temperature curves and the PID control parameters being analyzed, a general-purpose type fuzzy self-optimization-searching PID controller was proposed, thus better meeting the requirements of the system for the response speed, control precision and static state difference under various operating conditions. Through a simulation of multiple control methods by using the software Matlab, an analysis and application in the experimental measurement in the electrically heated heat conduction heater simulated, it has been verified that the fuzzy self-optimization-searching PID controller has its cutting edge in terms of the regulation time, overshoot and static stage difference etc. The method under discussion is of a major significance to temperature control systems in a common sense. **Key words:** fuzzy optimization self-searching, PID control, simulation of an electrically heated heat conduction heater, simulation and experiment measurement