热水锅炉供暖系统温度的模糊自整定控制

李战明　于宗宝
(兰州理工大学 电气工程与信息工程学院,甘肃 兰州　730050)

摘　要: 目的:针对热水锅炉供暖系统中,温度的测量与反馈存在严重的滞后问题和锅炉控制系统的大惯性、非线性等特点,提出了一种控制算法,使得系统性能得到改善。方法:采用模糊自整定 PID 控制算法和 PID 控制算法对锅炉在 MATLAB 下的仿真模型进行控制,并对它们的控制结果进行比较。结果:系统采用模糊自整定控制算法后,系统动态性能得到改善,超调量减小,抗干扰能力增强。结论:模糊自整定 PID 算法能提高热水锅炉供暖系统的供热效率,具有很高的应用价值。

关键词: 热水锅炉　供暖系统　模糊自整定 PID　MATLAB
[中图分类号] TP273.4　**[文献标志码]** A　**[文章编号]** 1000-3886(2011)04-0016-03

Heating System Temperature Control of Hot Water Boiler with Fuzzy Self-tuning Control

Li Zhanming　Yu Zongbao
(*College of Electrical and Information Engineering*, *Lanzhou University of Technology*, *Lanzhou Gansu* 730050, China)

Abstract: Objective Aiming at serious time-lag issues occurs in temperature measurement and feedback, and large inertia and nonlinear characteristics of hot water boiler control system, a control algorithm is proposed to improve the system performance. **Methods** The simulation model of the boiler under MATLAB is controlled with Fuzzy self-tuning PID control algorithm and PID control algorithm and their control results are compared. **Results** The system dynamic performance is improved after the system using fuzzy self-tuning control algorithm, namely, the overshoot decreases and anti-jamming capability enhances. **Conclusion** Fuzzy self-tuning PID algorithm which can improve heating efficiency of the heating hot water boiler heating system is of higher application value.

Keywords: Hot water boiler　Heating system　Fuzzy self-tuning PID　MATLAB

0　引　言

由于锅炉燃烧系统是一个具有多变量、强耦合、强干扰的复杂过程系统,常规的 PID 控制很难相互兼顾使得炉膛负压、鼓引风量、炉排速度等目标达到相对稳定。模糊控制同传统控制的不同在于它不依赖于被控对象的数学模型,而是在总结经验操作的基础上实现自动控制的一种手段,它根据人工控制规则组织控制决策表,然后由该表决定控制量的大小[1]。PID 控制器结构简单,明确,能满足大量工业过程的控制要求,特别是其强鲁棒性能较好适应过程工况的大范围变动。但 PID 本质是线性控制,而模糊控制具有智能性,属于非线性领域,因此,将模糊控制与 PID 结合将具备两者的优点[2]。

1　模糊自整定 PID 系统设计

1.1　模糊自整定结构设计

本设计中所用模糊自整定 PID 控制算法,通过对西门子公司的 S7-300PLC 处理器编程来实现,采集误差信号和误差变化量信号,同时将其模糊化到语言变量的论域,采用离线计算的方法将模糊规则制成模糊查询表,通过在线方式查询模糊控制量输出[3-5],实现 PID 参数 k_P、k_I 和 k_D 的在线自整定,不仅保持了常规 PID 控制系统原理简单、使用方便、控制精度高等优点,而且具有模糊控制的灵活性、鲁棒性较强、适应性强等优点。控制系统结构如图 1 所示:

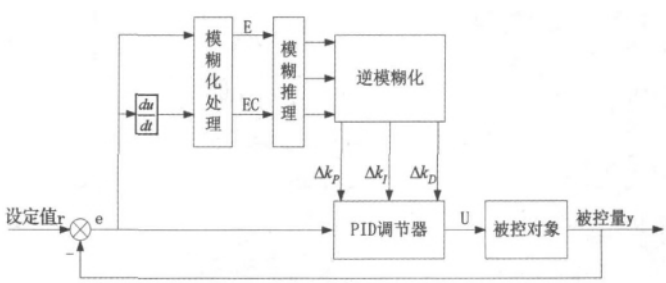

图 1　模糊自整定系统结构图

1.2　模糊自整定 PID 控制器设计

根据热水锅炉被控对象—温度的特性,用一阶带滞后来表示被控对象,仿真对象的传递函数为[6]

$$G(s) = \frac{1.25e^{-10s}}{120s+1} \tag{1}$$

根据不同的室外温度,用控制器维持出水温度,控制器不允许有偏移且需有较好的适应性。模糊自整定控制器由图 2 所示的三个部件组成。

1.2.1　模糊设计

控制器的输入为误差和误差的变化率。$T(k)$ 为设定的出水温度,$t(k)$ 为实际的出水温度。

误差

$$e(k) = T(k) - t(k) \tag{2}$$

误差变化率

$$ec(k) = \frac{e(k) - e(k-1)}{T} \tag{3}$$

收稿日期: 2011-03-16

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

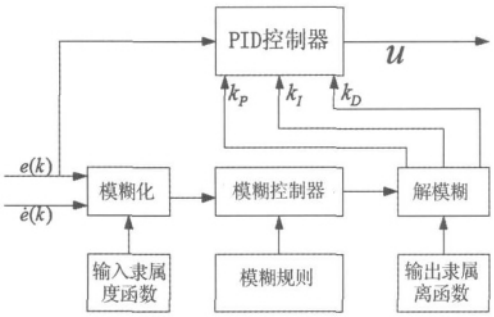

图 2　FS-PID 控制器结构

误差 $e(k)$ 和误差变化率 $ec(k)$ 的基本论域为 $[-3,+3]$，单位为℃和℃/s。误差量化因子 $k_e=1$，误差变化率量化因子 $k_{ec}=1$。变量模糊论域 $\{e(k),ec(k)\}=\{-3,-2,-1,0,1,2,3\}$，每个变量由 NB，NM，NS，ZO，PS，PM，PB7 个模糊子集组成。输入隶属度函数 NB 选用 Z 型函数，PB 选用 S 型函数，NM、NS、ZO、PS、PM 选用对称三角形，如图 3 所示：

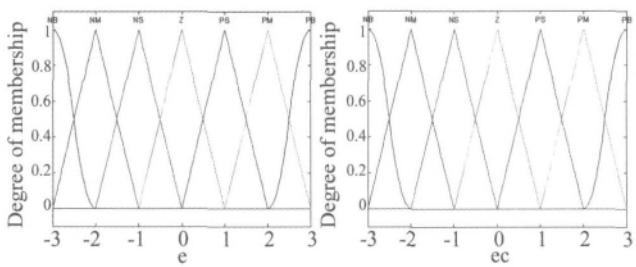

图 3　$e(k)$、$ec(k)$ 隶属度函数

1.2.2　模糊控制规则设计

根据系统在受控过程中，对应不同的 $e(k)$ 和 $ec(k)$，将 PID 参数 k_P、k_I、k_D 的整定原则归纳如下[7]：

规则 1：当 $|e(k)|$ 较大时，为使系统具有较好的跟踪性能，应取较大的 k_P 与较小的 k_D，同时为避免系统响应出现较大的超调，应对积分作用加以限制，通常取 $k_I=0$。

规则 2：当 $|e(k)|$ 处于中等大小时，为使系统响应具有较小的超调，应需要较小的 k_P，在这种情况下，k_D 的取值对系统响应的影响较大，k_I 的取值要适中。通常的经验是 $|e(k)|$ 较大时，k_D 的取值也较大。

规则 3：当 $|e(k)|$ 较小时，为使系统具有较好的稳定性能，同时为避免系统在设定值附近出现振荡，k_P、k_I 的取值均应大些。由此得到参数 k_P、k_I 和 k_D 的控制规则，如表 1 所示：

表 1　k_P、k_I 和 k_D 模糊控制规则

模糊控制规则表							
ec(k)	e(k)						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PB/NB/PS	PB/NB/PS	PM/NB/ZO	PM/NM/ZO	PS/NM/ZO	PS/ZO/PB	ZO/ZO/PB
NM	PB/NB/NS	PB/NB/NS	PM/NM/NS	PM/NM/NS	PS/NS/ZO	ZO/ZO/PS	ZO/ZO/PM
NS	PM/NM/NB	PM/NM/NB	PM/NS/NM	PS/NS/NS	ZO/ZO/ZO	NS/PS/PS	NM/PS/PM
ZO	PM/NM/NB	PS/NS/NM	PS/NS/NM	ZO/ZO/NS	NS/PS/ZO	NM/PS/PS	NM/PM/PM
PS	PS/NS/NB	PS/NS/NM	ZO/ZO/NS	NS/PS/NS	NS/PS/ZO	NM/PM/PS	NM/PM/PS
PM	ZO/ZO/NM	ZO/ZO/NS	NS/PS/NS	NM/PM/NS	NM/PM/ZO	NM/PB/PS	NB/PB/PS
PB	ZO/ZO/PS	NS/ZO/ZO	NS/PS/ZO	NM/PM/ZO	NM/PB/ZO	NB/PB/PB	NB/PB/PB

模糊推理过程，先前的规则和含义适合系统最小操作，如方程(4)所示

$$u=\min(\mu_A(e(k)),\mu_B(\dot{e}(k)))=\mu_c(u) \tag{4}$$

1.2.3　解模糊设计

解模糊是一个将模糊控制规则库中的模糊参数转换成一个清晰控制信号的过程。模糊输出为 k_P、k_I 和 k_D，其中 k_P 的论域为 $\{-3,3\}$，k_I 的论域为 $\{-0.1,0.1\}$，k_D 的论域为 $\{-0.8,0.8\}$ 这里将语言输出变量划分为 7 个模糊子集：NB，NM，NS，ZO，PS，PM，PB。隶属度函数选用对称三角形，如图 4 所示。

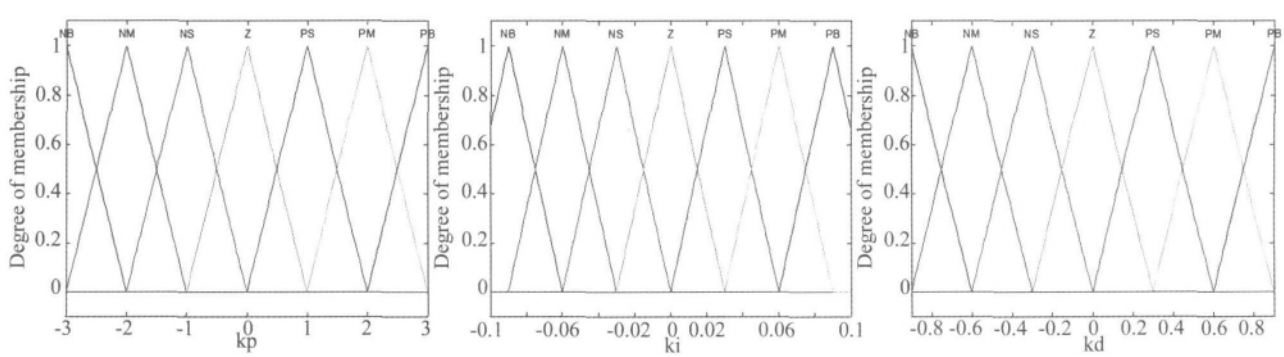

图 4　k_P、k_I、k_D 隶属度函数

解模糊判决方法采用重心法，由此输出 u_0

$$u_0=\frac{\sum_{j=1}^{n}\mu_j\times u_j}{\sum_{j=1}^{n}\mu_j}\times K \tag{5}$$

μ_j 是激活模糊规则所对应的隶属度，μ_j 是激活模糊规则对应的重心值。K 是输出信号增益。输出值如式(6)所示

$$K_P=K_{P0}+\{e(k),ec(k)\}_P \quad K_I=K_{I0}+\{e(k),ec(k)\}_I$$

$$K_D=K_{D0}+\{e(k),ec(k)\}_D \tag{6}$$

$\{e(k),ec(k)\}_P$，$\{e(k),ec(k)\}_I$ 和 $\{e(k),ec(k)\}_D$，是模糊推理的结果。K_{P0}，K_{I0} 和 K_{D0} 为 PID 控制器的初值。

1.3　模糊自整定 PID 给定值选取

供水温度给定值的选择采用唐山市房产经营管理锅炉供暖技术服务处与唐山市建筑设计院合作完成并通过鉴定的《热水供暖实际热媒运行参数的确定》[8] 课题成果，推导出的实用的运

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

行调节公式

$$t_g = t_n + 1/2(t'_g + t'_h - 2t'_n)\left[nq(t_n - t_w)/(t'_n - t'_w)\right]^{1/(1+B)} + nq/2G(t'_g - t'_h)\left[(t_n - t_w)/(t'_n - t'_w)\right] \quad (7)$$

$$t_h = t_n + 1/2(t'_g + t'_h - 2t'_n)\left[nq(t_n - t_w)/(t'_n - t'_w)\right] - nq/2G(t'_g - t'_h)\left[(t_n - t_w)/(t'_n - t'_w)\right] \quad (8)$$

式中

t_g、t_h—任意室外日均温度下的供、回水温度(℃);

t'_g、t'_h—设计供、回水温度(℃);

t_n—实际运行的实际室内日均温度(℃);

t'_n—室内设计温度(℃);

t_w—任意室外日均温度(℃);

t'_w—室外设计温度(℃);

B—散热器的散热指数;

n—热负荷修正系数。为建筑物在设计工况下的实际热负荷与设计热负荷之比。反映了热负荷在设计上的偏差。计算如下

$$n = \left[t_g + t_h - 2t_n\right)^{1+B}(t'_n - t'_w)\right] / \left[(t'_g + t'_h - 2t'_n)^{1+B}(t_n - t_w)\right] \quad (9)$$

q—为运行工况与设计工况下的建筑物热指标比。可取 $q=1$。

G—相对流量。为运行中实际流量 G 与设计流量 G ` 之比。计算如下

$$G = \left[t_g + t_h - 2t_n\right)^{1+B}(t'_g - t'_h)\right] / \left[(t'_g + t'_h - 2t'_n)^{1+B}(t_g - t_h)\right] \quad (10)$$

将不同的室外温度带入上式进行计算并列表,得到《热媒运行调节参数对照表》。由此,我们可以在对照表中查到此时段需要的实际供水温度,作为控制器的给定量,进行调节,来消除或削弱热传输带来的时滞。

表 2 热媒运行调节参数对照表

室外温度	供水温度	回水温度	室外温度	供水温度	回水温度
9			-2	76	51
8			-3	78	53
7			-4	80	55
6			-5	81	56
5	64	39	-6	83	58
4	65	40	-7	85	60
3	67	42	-8	86	61
2	69	44	-9	88	63
1	71	46	-10	90	65
0	72	47	-11	90	65
-1	74	49	-13	90	65

2 模糊自整定 PID 仿真

2.1 仿真控制系统结构

系统仿真程序由 MATLAB 自带的 M 语言编写,输入输出论域,变量的模糊子集,隶属度函数的选取如图 3、图 4 所示。模糊控制规则,模糊推理,去模糊化按照上述设计步骤设定。采样时间为 2 s,仿真时间为 1000 个采样点,为测试控制器的鲁棒性,在第 300 个采样时间是加入一个幅值为 100 的脉冲扰动。系统初始值为 $K_{P0}=6$,$K_{I0}=0.4$,$K_{D0}=1$。

2.2 仿真模型分析

对于热水锅炉供暖系统出水温度采用模糊自整定 PID 控制系统后系统的超调、抗干扰性做如下分析。与 PID 控制系统进行

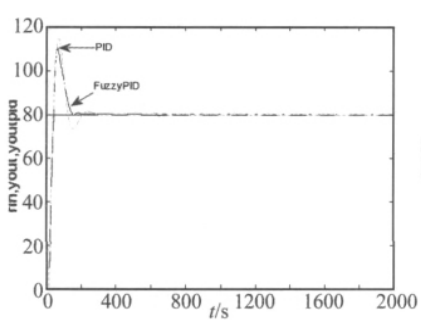

图 5 仿真输出

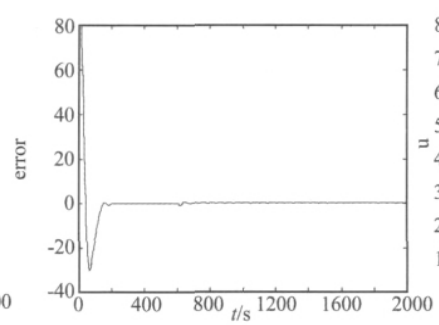

图 6 系统误差响应

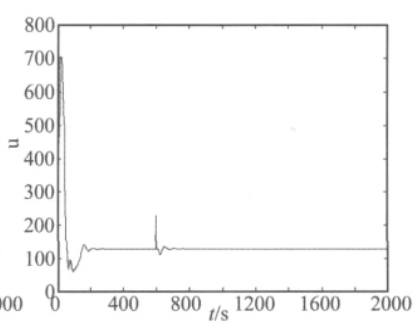

图 7 控制器输出

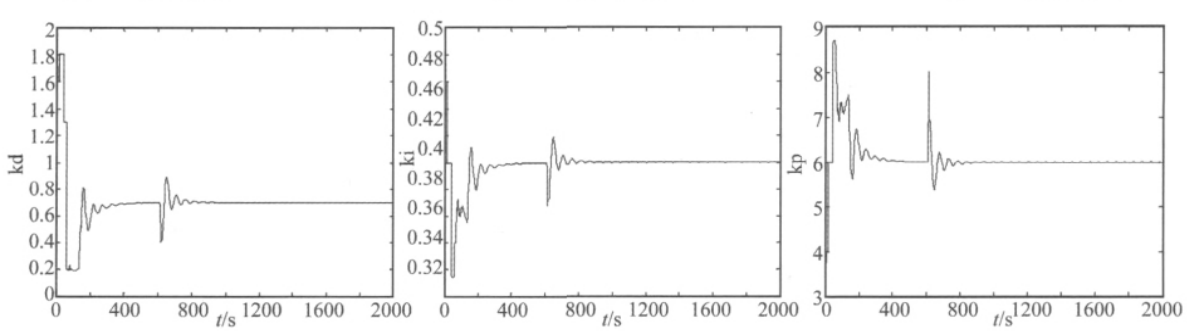

图 8 控制参数 k_P、k_I、k_D 自整定调整

(下转第 21 页)

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

的输出，作为实际配水（气）量的给定值。此数值存储于设定的数据块中，以备读取。

3.3 调节阀控制编程算法

由前述程序中，我们得出配水（气）量的给定值及实际水流量的采样值，便可对调节阀进行控制。S7 的功能块中有不同类型的 PID 调节功能块，我们采用 FC41 功能块，不同的流段配置不同的背景数据块。由于 FC41 功能块的给定、反馈与输出值都是用 0.0～1.0 之间的实数表示，因此，需要将给定与反馈转换为 0.0～1.0 的数据，即执行：给定值（或反馈值）×100/25，然后将结果传送到 FC41 的 PV－IN 和 SP－INT 端。同样将功能块调节输出的 0.0～1.0 的数据转换为模拟输出，即执行：LMN×27648/100，然后将结果取整传送给 PQW 即可。PID 的初始化可以通过在 OB100 中调用一次，将参数 COM－RST 置位，当然也可在别的地方初始化它，关键的是要控制 COM－RST，PID 的调用可以在 OB35 中完成，一般设置时间为 200ms，PID 的调整可以通过 STEP7 的 PID 调整界面，通过选择不同的 PID 背景数据块，调整不同回路的 PID 参数。对于流量调节的 PID 通常采用 PI 设置，经验值为：$P=40\sim100\%$，$T=6\sim60$ s。

由于现场工况复杂，很多情况下，PID 调节参数调整很困难并且常常造成调节阀频繁动作。影响使用寿命。所以，在配水（气）精度、响应速度要求不高的场合也可以以另一种方式代替 PID 功能块工作，即在编制程序的 OB35 中，对控制调节阀开度的 PLC 模拟输出端口数据循环进行增减操作，每一次增减操作后检测采样的流量值是否达到给定值，然后确定下一循环周期是否继续增减操作，同时设置误差范围，在不影响配水（气）效果的情况下，可以保证配水（气）的稳定。这种方式控制调整较为简单方便，对外部供水条件要求也不高，但循环操作周期时间需要设置大一点，以保证不出现大的震荡。

3.4 工控计算机人机界面

作为工程师站的工控机安装了操作系统 WindowsXP、数据处理相关的办公软件 Office2003、SIMENSE 组态软件 WinCCV6.0。WinCCV6.0 对计算机系统软件有着特殊要求，需要安装 Internet Explorer6.0、Microsoft SQL Server 2000、Microsoft Message Queuing V5.0，并且必须安装系统补丁程序 KB319740。其他基本组态及动作程序的编制和以前版本类似。本体统中组态软件 WinCC 与 PLC S7－300 之间的通讯采用工业以太网连接，所以 WinCC 通道使用 SIMATIC S7 Protocol Suite 的通道单元“TCP/IP”与 PLC 建立通讯联系，并且 IP 地址设置在同一网段。定义 WinCC 组态画面 I/O 显示域的过程变量与 PLC 的 DB 数据块中二冷水配水（气）流量、温度、压力采样值以及配水（气）给定计算参数等数据一一对应。根据用户要求编制数据采集与管理、流程监控、各类报表的生成与输出、存储历史数据、画面显示、故障诊断与报警处理等工作的人机界面和功能，在此不作具体说明。

4 结束语

二冷水配水（气）自动控制系统是通过长期设计实践形成的较成熟自动化控制成果，本系统集成了 PLC 逻辑控制、数据处理、实数运算、PID 调节、现场总线及网络通讯、工业计算机组态监控设计等多方面电气自动化控制与管理手段，形成一套完整的自动控制设计思维方式，对今后的设计工作有一定的借鉴作用。本系统可根据不同类型连铸机二冷配水（气）工况作相应的调整修改，可用于新的连铸机整机设计系统中。实际应用效果表明，系统达到了设计目的，很好地满足了工艺要求。

参 考 文 献

[1] 崔坚，李佳. 西门子工业网络通信指南［M］. 北京：机械工业出版社，2004.
[2] 张前林，秦生财. PLC 在连铸机中的应用［J］. 电气自动化，2002，24（1）：69－70.
[3] 薛鹏，朱立，王毅. 合金钢连铸机二冷水配水的 PID 控制［J］. 设备管理与维修，2008（5）.
[4] 李希胜，林颖，韩传基，等. 矩形坯连铸机二冷自动配水系统［J］. 矿冶，2005（2）：79－81.

【作者简介】 顾锋，（1969－），男，本科，工程师，从事自动化系统设计及数控技术工作。

（上接第 18 页）

比较。当模型参数不变，设定 80℃ 作为给定温度，仿真输入结果曲线如图 5 所示。很明显，PID 控制的振荡要比模糊自整定 PID 控制的大。这会使得供暖系统不稳定。

供热环境、控制对象的变化将使得系统参数发生改变，采用模糊自整定 PID 控制方法可以使控制参数自动适应系统参数的变化。其仿真中系统误差，控制量的变化以及控制参数的变化如图 6，图 7，图 8 所示。显然，模糊自整定 PID 控制系统的超调量和抗干扰能力都要比 PID 控制系统的好。

3 结束语

仿真结果表明，模糊自整定 PID 控制系统能很好的克服由大惯性系统的时变和振荡。当出现扰动时，系统表现出很强的抗干扰能力和较好的自适应能力。因此，该算法提高了热水锅炉供暖系统的供热效率，节省了能量，有很高的应用价值。

参 考 文 献

[1] 姚若玉. 基于模糊控制理论的锅炉燃烧系统控制［D］. 西安：西安建筑科技大学，2003：3.
[2] 吕剑虹，陈来九. 模糊 PID 控制器及在汽温控制系统中的应用研究［J］. 中国电机工程学报，1995（1）：16.
[3] 何春晗，任开春，苏丹. 模糊控制器的设计与阈值误差的选取［J］. 工业控制计算机，2009，22（10）：40－41.
[4] TAKAGIT，SUGENO M. Fuzzy Identification of Systems and Its Applications to Modeling and Control［J］. IEEE TransSMC PB：Cybernetics，1997（5）：884－889.
[5] 佟亮，赵肖宇，黄操军，索丽敏. 模糊 PID 控制在锅炉燃烧系统中的应用［J］. 信息技术，2009（6）：55－57.
[6] 张秀滢，刘强. 热水锅炉温度控制的模糊 PID 参数自整定方法［J］. 中小企业管理与科技，2010（9）：324－325.
[7] 杨咏梅，陈宁. 基于 MATLAB 的模糊自整定 PID 参数控制器的设计与仿真［J］. 微计算机信息，2005（24）：61－63.
[8] 赵世雷.《热水供暖实际热媒运行参数的确定》成果应用［J］. 经济技术协作信息，2002（9）：45.

【作者简介】 李战明（1962－），男，硕士学位。教授，博士研究生导师，主要研究方向是智能控制与智能信息处理等。 于宗宝（1982－），男，硕士研究生，主要研究方向是智能控制及其算法。

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net