

# 退火炉温度模糊 PI 控制器的设计与仿真

刘建新, 李颖, 李平

(长沙理工大学 电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410015)

**摘要:**在退火炉控制系统中, 常规的 PID 控制器及传统的模糊控制器难以达到理想的温度控制效果, 针对常规 PID 控制器或者模糊控制器在控制具有非线性、纯滞后、时变特点的退火炉温度时存在的缺点, 文中提出一种结合模糊控制器和 PI 控制器优点的模糊-PI 退火炉温度控制策略。文中对该模糊-PI 控制器进行详细的设计, 并用 Matlab/Simulink 软件对算法进行建模仿真, 结果表明该控制器动态响应快、超调小、稳态精度高、鲁棒性好。模糊-PI 控制器具有良好的控制性能, 非常适合参数时变的大滞后退火炉控制系统。

**关键词:**退火炉; 模糊控制; 模糊 PI 控制; 仿真

**中图分类号:** TP39

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1673-629X(2012)11-0190-03

## Design and Simulation of Temperature Fuzzy-PI Controller of Annealing Stove

LIU Jian-xin, LI Xiao-ying, LI Ping

(School of Electrical and Information Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410015, China)

**Abstract:** In the system of annealing stove, it is difficult for general PID controller and traditional fuzzy controller to control the controlled object. Aimed at the disadvantages of the conventional PID controller and fuzzy controller in temperature control of the annealing stove with the characteristics of nonlinear, pure delaying and parameter time varying, a fuzzy-PI control strategy combined with the advantages of the fuzzy control and PI control was proposed. The fuzzy-PI controller was designed in detail and the modeling and simulation was done using Matlab/Simulink software. The simulation results show that the proposed fuzzy-PI controller has fast dynamic response, small overshoot, high steady accuracy and good robustness. The fuzzy-PI controller has good control performance, is well suited for the annealing stove control system with parameter time varying and large time-delay.

**Key words:** annealing stove; fuzzy control; fuzzy-PI control; simulation

### 0 引言

炼钢生产过程中的关键生产工艺是退火, 而退火的关键是退火炉温度的控制。退火分为升温、保温和降温三个阶段, 升温一般以近于直线地将温度加到 500 ~ 1000℃ 不等, 时间一般为 4 ~ 8 小时; 保温阶段需恒温, 时间依装料不同而不同, 一般升温 and 保温时间为 12 小时左右; 而降温为自然降温。降稳无需温度控制, 升温 and 保温采取温度控制以保证退火质量<sup>[1]</sup>。对于此过程控制, 很显然, 运用现代控制理论是很困难的<sup>[2]</sup>, 目前大多采用 PID 控制器和模糊控制器, 传统的 PID 控制存在参数不易整定、抗干扰能力不强等缺点, 难以克服超调量大、过渡时间长、控制精度低的缺

点<sup>[3]</sup>; 而模糊控制能把人的经验转化为控制策略, 不需要被控对象的数学模型<sup>[4]</sup>, 对时变、惯性、非线性和难以获得精确的控制模型的被控对象有比较好的控制效果, 但模糊控制器相当于 PD 控制, 缺少积分环节, 在平衡点出现盲区, 从而造成控制上的死区和控制作用不连续<sup>[5]</sup>, 因此本身无法消除稳态误差, 难以获得较高的控制精度, 稳态性能不能令人满意<sup>[6]</sup>。模糊 PI 控制器相比线性 PI 控制, 有更好的控制性能与系统稳定<sup>[7]</sup>, 可以补偿非线性系统的间隙、死区和饱和效果<sup>[8]</sup>, 比单个的模糊控制器具有更高的稳态精度, 比经典的 PID 控制器具有更好的动态特性。

### 1 控制策略

退火炉燃烧过程具有对象特性的多变性的特点, 影响炉温的因素很多, 如钢材的规格、钢材的重量等, 所以退火炉控制系统是一个非线性时变、有噪声干扰、

收稿日期: 2012-03-09; 修回日期: 2012-06-12

基金项目: 湖南省教育科研项目 (11C0042)

作者简介: 刘建新 (1971-), 男, 湖南南县人, 讲师, 研究方向为自动控制。

有纯滞后的系统。对于退火炉的数学模型,可以用简单的传递函数粗略描述<sup>[9]</sup>:

$$G(S)=\frac{15e^{-0.8s}}{2s+1}$$

1.1 模糊-PI 控制方案

传统的 PID 控制需要建立在被控对象精确的数学模型上,而模糊控制器本身难以消除稳态误差,因此控制精度不高,模糊控制将误差信号转化为论域上的整数:

$$|n| = \text{int}(|ke| + 0.5)$$

其中  $k$  为炉温误差量化因子,  $e$  为炉温某一时刻的输入的误差。即  $n$  等于  $ke$  的四舍五入取整,符号与  $e$  相同。如果进入稳态,即处于平衡点,  $n=0$ ,并不对应  $e=0$ ,因为  $0 = \text{int}(|ke| = 0.5)$  可以推出:

$$|ke| < 0.5 \quad |e| < 0.5/k$$

设误差的实际变化范围为  $\{-a, a\}$ ,误差的模糊论域为  $\{-n_j, -n_j-1, \dots, -1, 0, 1, \dots, n_j-1, n_j\}$ ,则量化因子  $k=n/a$ ,所以有:

$$|e| < 0.5a/n_j$$

式中  $a$  为炉温偏差的最大值,  $n_j$  一般取  $5 \sim 7$ ,若  $n_j=7$ ,则  $|e| < 0.5a/7 = 7a\%$ ,即只要  $|e|$  小于最大偏差的百分之七,模糊控制器就认为误差为零。因此,模糊控制对  $7a\%$  的炉温稳态误差无法消除。

综上所述,传统的 PID 控制和模糊控制很难达到理想的控制效果,炉温控制采用模糊-PI 控制策略。

模糊-PI 控制器的原理图如图 1 所示<sup>[10]</sup>,取阈值为 30 即当偏差小于 30 时,信号传输到 PI 控制器,以获得良好的稳态性能;当偏差大于 30 时,信号传输到模糊控制器,以获得良好的瞬态性能。

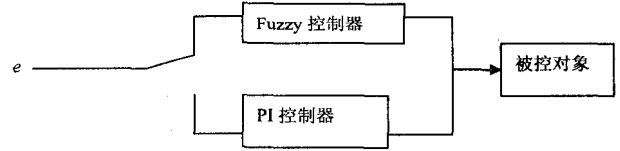


图 1 Fuzzy-PI 控制器原理图

1.2 Fuzzy-PI 控制器设计

1.2.1 模糊控制部分设计

(1)输入、输出变量的模糊化。

模糊控部分采用目前广泛使用的二维模糊控制,模糊变量为:

$e$  ---- 温度偏差

$\Delta e$  ---- 温差变化率

$u$  ---- 晶闸管的  $\alpha$  角

偏差  $e$  的论域为  $[-600, 600]$ ,可用模糊语言量表示为:负大(NL)、负中(NM)、负小(NS)、零(ZERO)、正小(PS)、正中(PM)、正大(PL)。

$\Delta e$  论域为  $[-60, 60]$ ,可用模糊语言量表示为:

负大(NL)、负中(NM)、负小(NS)、零(ZERO)、正小(PS)、正中(PM)、正大(PL)。

输出  $u$  的论域为  $[0, 180]$ ,可用模糊语言量表示为:负大(NL)、负中(NM)、负小(NS)、零(ZERO)、正小(PS)、正中(PM)、正大(PL)。

(2)模糊规则。

模糊控制规则总结了人的思维与模糊推理的基础上获得,模糊控制规则表 1 所示。

表 1 模糊控制规则表

$\Delta e \backslash e$	NL	NM	NS	ZERO	PS	PM	PL
NL	PL	PL	PM	PM	PS	ZERO	ZERO
NM	PL	PL	PM	PM	PS	ZERO	ZERO
NS	PL	PL	PM	PS	ZERO	NM	NM
ZERO	PL	PL	PM	ZERO	NM	NL	NL
PS	PM	PM	ZERO	NS	NM	NL	NL
PM	PM	ZERO	NS	NM	NM	NL	NL
PL	ZERO	ZERO	NS	NM	NM	NL	NL

(3)输出模糊变量的清晰化。

采用 centroid 清晰化方法,即对输出模糊变量的结果求取重心,如论域  $U = \{u_1, u_2, \dots, u_n\}$ ,  $A(u_j)$  为隶属函数,把重心作为精确值  $Z_0$  的方法,求取公式<sup>[11]</sup>:

$$Z_0 = \frac{\sum_{i=1}^n u_i A(u_i)}{\sum_{i=1}^n A(u_i)}$$

1.2.2 控制器 PI 部分

PI 控制部分,仿真调试取  $K_i = 8$ ,  $K_p = 0.5$  可以得到比较满意的控制效果。

2 MATLAB 仿真

用 Matlab 中的 S-FUNCTION 实现阈值分支控制:  $e > 15$  时,信号传到模糊控制;  $e \leq 15$  时,信号传到 PI 控制。期望输出取 500, 3 秒时扰动取 3 的情况下,在 Fuzzy Logic Toolbox 和 Simulink 窗口仿真<sup>[12]</sup>,输出曲线如图 2 所示。

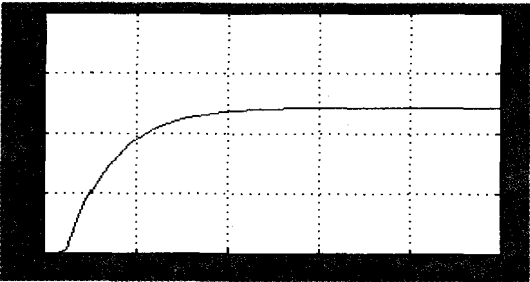


图 2 输出曲线

改变参数将传递函数变为  $G(S) = 15/(1.5s + 1)$ , 输出曲线如图 3 所示。可以看出:系统依旧具有比较好的瞬态性能和稳态性能,鲁棒性好,具有良好的抗干扰性能。

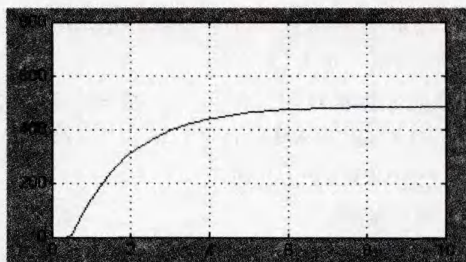


图3 改变参数后输出曲线

在传统的PID控制下,输出曲线如图4所示。

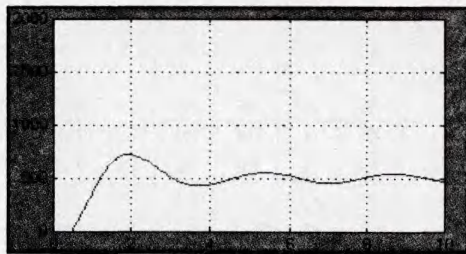


图4 PID控制输出曲线

在传统的模糊控制下,输出曲线如图5所示。

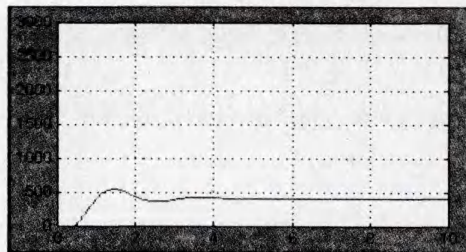


图5 模糊控制输出曲线

输出曲线比较发现:模糊-PI控制比较PID控制,超调量从38%下降到零,过渡时间从大于10秒下降到6秒,瞬态性能良好;模糊-PI控制比较传统的模糊控制,稳态误差下降到1%以内,控制精度高。

### 3 结束语

1)从仿真输出曲线可以看出:比较PID控制和模糊控制,系统具有良好的瞬态性能和稳态性能。

2)在扰动为3的情况下,系统的稳态误差几乎为零,系统具有良好的抗干扰性能。

3)系统具有对参数的不敏感性,鲁棒性好。

### 参考文献:

- [1] 张惠荣,王国贞. 马钢退火炉温度的模糊控制[J]. 机械设计与制造,2009(1):1-3.
- [2] Wu Zhiqiao. The application of fuzzy control theory to oil-fueled annealing furnace[J]. Fuzzy Set and System,1990,36(1):145-156.
- [3] 强明辉. 模糊PID控制器算法在泡沫玻璃窑炉温度控制中的应用[J]. 工业仪表与自动化装置,2010(5):87-89.
- [4] 黎惠成. 一种基于模糊控制的温度控制系统设计[J]. 计算机技术与发展,2009,19(12):236-239.
- [5] 贺勇,罗隆福. 基于P-Fuzzy-PI的煤气加热炉控制系统[J]. 长沙电力学院学报(自然科学版),2004,19(4):76-79.
- [6] 陈志旺. 模糊控制在退火炉温度控制中的应用[J]. 信息技术,2002(8):34-35.
- [7] Patela A V, Mohanb B M. Analytical structures and analysis of simplest fuzzy PI controller[J]. Automatic,2002,38(6):981-993.
- [8] Teeter J T. A novel fuzzy friction compensation of a DC motor control system[J]. IEEE Trans. on Ind. Electron.,1996,43(1):113-120.
- [9] 熊均泉. 基于MATLAB退火炉温度模糊PID控制的仿真研究[J]. 中国仪器仪表,2005(5):80-82.
- [10] 石辛民. 模糊控制及MATLAB仿真[M]. 北京:清华大学出版社,2008.
- [11] 李少远. 智能控制[M]. 北京:机械工业出版社,2005.
- [12] 薛定宇. 控制系统计算机辅助设计[M]. 北京:清华大学出版社,1998.
- [10] 石辛民. 模糊控制及MATLAB仿真[M]. 清华大学出版社,2008.
- [11] 李少远. 智能控制[M]. 机械工业出版社,2005.
- [12] 薛定宇. 控制系统计算机辅助设计[M]. 清华大学出版社,1998.

(上接第189页)

- 术,1998(1):9-15.
- [2] 唐原广,邵淑平. SZF波浪浮标接收机与上位机串行通信实现[J]. 微计算机信息,2008(8):74-76.
- [3] 郭爱煌,李广宇,陈志雄. 基于GPRS的无线数据传输嵌入式系统设计[J]. 计算机工程,2009,35(18):260-262.
- [4] 周国顺,姚玉斌. 基于CDMA模块实时无线数据传输的设计[J]. 微计算机信息,2009,25(5-2):5-6.
- [5] Chitre V A, Daigle J N. Performance of IP-based Services over GPRS[J]. IEEE Trans. on Computer,2003,52(6):727-741.
- [6] 宏电. DSC开发帮助文档V2.4[M]. 深圳:宏电,2011.
- [7] 孙鑫,余安萍. VC++深入详解[M]. 北京:电子工业出版社,2006:162-311.
- [8] 龚建伟,熊光明. Visual C++/TurboC 串口通信编程实践[M]. 北京:电子工业出版社,2004:20-31.
- [9] 侯俊杰. 深入浅出MFC[M]. 武汉:华中科技大学出版社,2001:337-408.
- [10] 宏电. H7710产品手册[M]. 深圳:宏电,2011.
- [11] Marsden R F, Juzsko B A. An Eigenvector Method for the Calculation of Directional Spectra from Heave, Pitch and Roll Buoy Data[J]. J. Phys. Oceangr,1987,17:2157-2167.
- [12] Huang Minchi, Chen Jiayuan. Wave direction analysis from data buoys[J]. J. Ocean Engineering,1998,25(8):621-637.