

· 经验交流 ·

# 模糊 PID 在加热炉温度控制系统中的应用

李 川

(重庆钢铁集团电子有限责任公司 系统部, 重庆 400080)

**摘要:**重庆钢铁(集团)有限责任公司型钢厂棒材原加热炉温度控制系统采用的是传统 PD 调节控制方式,同时该加热炉一直处于高负荷生产状况,加热炉及控制设备大部分老化严重,无法生产出具有市场竞争力的产品。2006 年 5 月加热炉改造工程中在温度控制系统中引入了模糊控制技术,开发设计了加热炉温度模糊控制系统,有效地克服了传统单一 PD 控制炉温波动大的缺点,使控制系统具有反应速度快、稳定性好等优点。

**关键词:**加热炉;模糊控制;稳定性;自整定

**中图分类号:** TF068; TP273 **文献标志码:** B **文章编号:** 1000-7059(2009)03-0056-03

## Application of fuzzy PD in control system of heating furnace

L I Chuan

(System Department of Electronic Co., Ltd., Chongqing Iron & Steel Group, Chongqing 400080, China)

**Abstract:** In temperature control system of heating furnace in Shape Steel Plant of Chongqing Iron and Steel Co., Ltd., traditional PD regulation control was used before. At the same time, the heating furnace was operated in high load condition continuously, and heating furnace and its control equipment were serious aging, so that products with market competitive power can not be produced. In heating furnace reformation engineering in May of 2006, fuzzy control technology was introduced into temperature control system. Fuzzy temperature control system for heating furnace was designed. Big temperature fluctuations problem in traditional PD control system has been effectively overcome. The control system has fast response, good stability and so on advantages.

**Key words:** heating furnace; fuzzy control; stability; self-setting

### 0 引言

由于加热炉是一个具有大惯性、大滞后、非线性的时变系统,炉内热工状态非常复杂,有热辐射、热传导、热对流,加上工艺参数的频繁波动,给建立加热炉数学模型造成了很大困难,所以仅使用常规 PD 控制系统,很难较好地实现加热炉的最佳温度控制。20 世纪 70 年代发展起来的智能控制理论,使控制理论发展到一个新的高度,专家系统、模糊控制、神经元控制等智能控制技术日渐成熟,特别是模糊控制,进入 90 年代以后发展迅速。模糊控制与传统控制相比具有如下特点:(1)无需知道被控对象的数学模型;(2)易于对不确定

系统或非线性系统进行控制;(3)对被控对象的参数变化有较强的鲁棒性;(4)对外界的干扰有较强的抑制能力。

鉴于此,重庆钢铁集团电子有限责任公司系统部在重庆钢铁(集团)有限责任公司型钢厂加热炉控制系统升级改造过程中引入模糊控制技术,实现模糊控制技术与传统的单一 PD 控制技术的完美结合,达到了精确的控制要求。

### 1 系统组成

根据重钢公司型钢厂加热炉改造工程的生产工艺流程特点和生产设备的电气联锁关系,整个生产过程划分为以下控制部分:加热炉温度系统、

收稿日期:2008-11-26;修改稿收到日期:2009-03-12

作者简介:李川(1979-),男,重庆人,助理工程师,主要从事工业自动化控制系统集成工作。

加热炉炉膛压力系统、风机系统,在此只介绍加热炉温度控制系统。温度控制系统的主要作用是对加热炉各加热段的温度进行控制,其控制方式为通过调节进入炉内燃烧气体的量来调节炉内温度。控制系统的硬件配置采用 PLC,通过 PLC 对参与联锁和控制的生产设备进行集中控制。系统采用西门子的 S7-300 系列 PLC 以及图尔克远程数据采集模块,上位机采用研华工控机,应用西门子 Step 7 编写控制程序,利用 WinCC 6.0 进行操作画面的编辑,通过 Profibus-DP 网建立上位机与 S7-300 主站、图尔克远程采集站的通信,系统结构如图 1 所示。

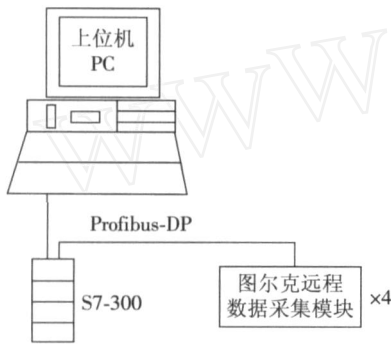


图 1 控制系统硬件配置

Fig. 1 Control system hardware disposition

### 2 模糊控制

模糊控制系统有三个基本组成部分:模糊化、模糊决策、精确化计算。其工作过程可以简单地描述为:首先将信息模糊化,然后经过模糊推理规则得到模糊控制输出,再将模糊指令进行精确化计算最终输出控制值<sup>[1]</sup>。我们根据生产实际情况,对 PD 参数进行了模糊自整定设计、程序设计和模糊控制规则表的建立。

#### 2.1 PD 参数模糊自整定设计

为了满足重钢公司型钢厂加热炉温度控制系统在不同误差  $e(t)$  和误差变化率  $ec(t)$  对 PD 参数自整定的要求,利用模糊控制规则对 PD 参数进行了在线修正,参数模糊自整定 PD 控制器的设计原理如图 2 所示。

#### 2.2 模糊控制程序设计

根据系统要求,用于 PD 参数自整定的模糊控制器为二输入三输出结构,以系统的炉膛温度误差  $e(t)$  和温度误差变化率  $ec(t)$  为输入语言变量,以 PD 参数修正值  $K_p, T_i$  和  $T_d$  为输出语言变量。PD 参数修正值的计算程序流程如图 3 所示。

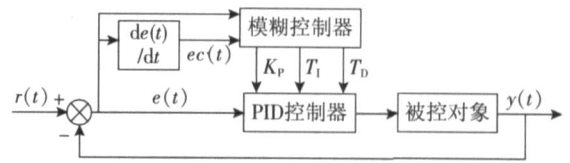


图 2 PD 模糊控制系统原理图

Fig. 2 PD fuzzy control system schematic diagram  
 $r(t)$ —被控参数设定值;  $y(t)$ —被控参数实际值;  
 $e(t)$ —偏差;  $ec(t)$ —偏差变化率;  $K_p, T_i, T_d$ —模糊控制  
 器比例、积分、微分修正值

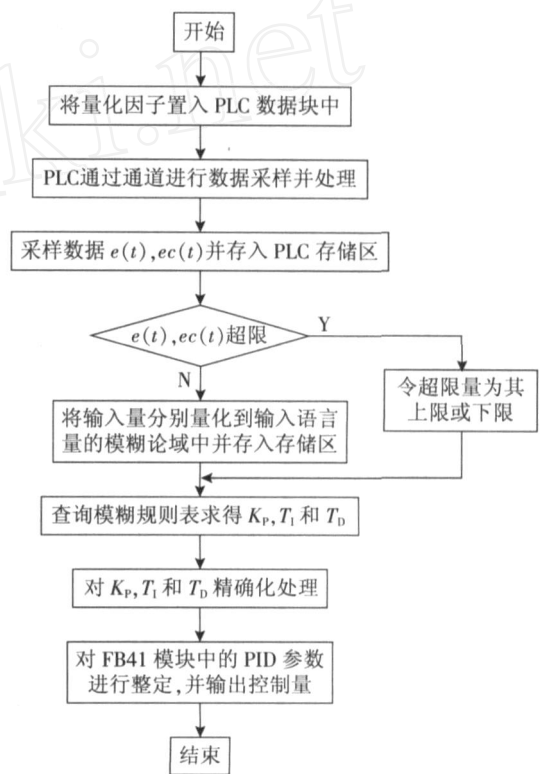


图 3 程序流程图

Fig. 3 Program flow diagram

#### 2.3 建立模糊控制规则表

PD 参数的模糊自整定是找出 PD 三个参数与误差  $e(t)$  和误差变化率  $ec(t)$  之间的模糊关系,在运行中通过不断地监测  $e(t)$  和  $ec(t)$ ,再根据模糊控制原理对三个参数进行在线修改以满足在不同  $e(t)$  和  $ec(t)$  时对控制参数的不同要求,从而使被控对象具有良好的动、静态性能。

根据对已有控制系统设计经验的总结,可以得出 PD 控制器参数  $K_p, T_i$  和  $T_d$  的自整定规律为<sup>[2]</sup>:

当  $|e(t)|$  较大时,应选较大的  $K_p$  和较小的  $T_d$  (使系统的响应速度加快),同时  $T_i = 0$  (避免系统超调过大)。

当  $|e(t)|$  中等时, 应选较小的  $K_p$  (使系统响应具有一定速度的同时又不会出现大的超调) 和适当的  $T_d$  和  $T_i$  (要注意  $T_d$  对系统响应的影响)。

当  $|e(t)|$  较小时, 应选较大的  $T_i$  和  $T_d$  (使系统有良好的稳定性),  $K_p$  的取值要适当, 以免造成系统在平衡点附近出现明显振荡。

根据以上规则分析, 考虑到加热炉温度偏差范围不大及精度要求不高的特点, 将偏差变量、偏差变化率及 PD 参数修正量的论域均定为 7 个等级  $\{-3, -2, -1, 0, 1, 2, 3\}$ , 将偏差变量、偏差变化率及 PD 参数修正量的模糊语言值均分为 7 挡, 即为  $\{NB, NM, NS, ZE, PS, PM, PB\}$ 。偏差变量、偏差变化率及 PD 参数修正量模糊子集的隶属函数的形状均选为三角形。

根据模糊自整定规律和对 PD 参数修正量论域界的划分等级, 同时借鉴常规模糊控制器设计经验确定模糊控制器  $K_p$  模糊控制规则表<sup>[3]</sup>如表 1 所示。 $T_i$  和  $T_D$  模糊控制规则表同理可得。

表 1  $K_p$  的模糊控制规则表

Table 1  $K_p$  improving rules of fuzzy control

EC	E						
	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PM	PM	PS	ZE	ZE
NM	PB	PM	PM	PS	PS	ZE	NS
NS	PM	PM	PS	PS	ZE	NS	NS
ZE	PM	PM	PS	ZE	NS	NM	NM
PS	PM	PS	ZE	NS	NM	NM	NB
PB	PS	ZE	NS	NM	NM	NM	NB
PM	ZE	ZE	NS	NM	NM	NB	NB

### 2.4 求模糊控制表

由模糊逻辑推理法可知, 对于  $n$  条模糊控制规则可以得到  $n$  个输入输出关系矩阵  $R_1, R_2, \dots, R_N$ , 从而可得该模糊控制系统总的模糊关系矩阵为

$$R_N = \bigvee_{ij} (E_i \times EC_j) \times K_{PN}$$

式中,  $i = j = 1, 2, \dots, 7; N = 1, 2, \dots, 49$ 。

对于任何系统误差  $E$  和误差变化率  $EC$ , 其对应的模糊控制器输出  $K_p$  为

$$K_p = (E \times EC) \circ R_N \quad (2)$$

$$E = [E_1 \ E_2 \ \dots \ E_7]^T$$

$$EC = [EC_1 \ EC_2 \ \dots \ EC_7]^T$$

$$R_N = [R_1 \ R_2 \ \dots \ R_{49}]^T$$

对每一对  $E, EC$  分别求出  $K_p$  并整理成模糊查询表, 见表 2。 $T_i, T_D$  模糊控制表同理可得。

表 2  $K_p$  控制查询表

Table 2  $K_p$  control search table

EC	E						
	-3	-2	-1	0	1	2	3
-3	3	3	2	1	1	0	0
-2	3	2	2	1	1	0	-1
-1	2	2	1	1	0	-1	-1
0	2	2	1	0	-1	-2	-2
1	2	1	0	-1	-2	-2	-3
2	1	0	-1	-2	-2	-2	-3
3	0	0	-1	-2	-2	-3	-3

定义  $K_p, K_i, k_d$  参数修正算式为:

$$\begin{cases} K_p = K_{p0} + K_p \\ T_i = T_{i0} + T_i \\ T_d = T_{d0} + T_D \end{cases} \quad (3)$$

式中,  $K_{p0}, T_{i0}, T_{d0}$ , 为 PD 参数初始值;  $K_p, K_i, K_p$  为参数修正值。

模糊自整定 PD 控制器三个输出参数的模糊控制表是事先通过经验离线计算得出, 作为子程序在控制程序中随时调用。在实时控制时在某个采样周期会得到  $e(t)$  和  $ec(t)$  的值, 先将它们转换成离散量之后, 查询相应的模糊控制规则表分别得出 PD 参数修正值的离散量, 再将这离散量通过计算精确化处理, 从而得到该周期 PD 参数的修正值  $K_p, T_i, T_D$ , 最后通过式 (3) 得到该周期 PD 控制的三个控制参数。

### 3 实际应用

2006 年 8 月该系统在重钢型钢厂棒材加热炉温度控制系统投产以后, 运行正常, 控制效果良好。图 4 为在离线方式绘制的模拟曲线及在模糊 PD 方式时采集的实际温度控制曲线。

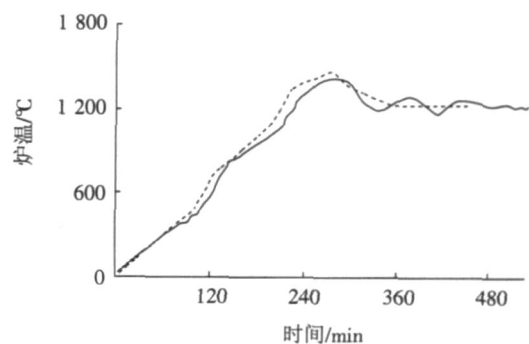


图 4 钢坯实际温度与模型温度比较

Fig. 4 Comparison of actual temperature and model simulation results  
— 模拟温度; — 实际温度

(下转第 62 页)

图 4 中,当步进梁上升条件满足且在 AB 段上升时执行此程序,PLC 扫描时间上升脉冲沿是指每 32 ms 触发一次。为避免对步进机械产生冲击,比例阀放大板的给定输出从 0 加到 5 800 mV 约需 0.4 s,通过计算得出斜坡值  $a$  约为 450 mV。当给定不小于 5 800 mV 后步进梁以 5 800 mV 的速度给定匀速运动,直至到达 B 点。实际应用中,通过改变步进梁比例阀的给定值和斜坡值调节步进梁运动速度,实现步进梁对板坯的轻拿轻放功能。

#### 4 结束语

自 2002 年投产以来,2 号加热炉运行至今基

本稳定,未出现大的问题,步进梁自动运行情况良好,故障率小于 2%。经过实践证明,步进梁比例阀控制系统设计合理、稳定性强、故障率低,能满足生产的需要。

#### 参考文献:

- [1] 陈晓岚,胡晓波.用 PLC 实现步进梁的速度控制[J].电气应用,2006,25(6):33-35.  
CHEN Xiao-lan, HU Xiao-bo. The velocity of the beam controlled by PLC[J]. Electrical Applications, 2006, 25(6): 33-35. [编辑:魏方]

(上接第 51 页)

人们认为选用 VC 方式或 DTC 方式的交流变频调速系统较为合理。特别是势能型负载的设备,须具备“励磁预置”功能,在选用交流调速系统时,必须选用 VC 方式或 DTC 方式的交流变频调速系统。如 AB 公司的 Power Flex 700、西门子公司的 6AS70 及 ABB 公司的 ACS800 等系统。

最后是风机、水泵类设备的电力拖动调速系统的选择,这类设备对调速系统的精度要求不高,其主要是基于节能的考虑,故我们认为这类设备

的调速拖动仅选用  $U/f=C$  的正弦脉宽调制 (SPWM) 控制方式的变频器即可。若需参与流量闭环调节,即可选用电压空间矢量 (SVPWM) 控制方式的变频器。

#### 4 结语

在无缝钢管生产线或类似生产线,特别是这类生产线的改造工程中的电力拖动调速系统的选择决策上,宜从经济、实用、维护方便、备件易购的角度出发,对性价比进行充分论证,作出对本企业最有利的判断和选择。 [编辑:沈黎颖]

(上接第 58 页)

从图 4 可以看出系统在达到温度平衡点时,加热炉温度非常平稳。通过这次对原有加热炉控制系统的升级改造,有效解决了温度滞后及受环境因素影响造成的系统反应慢、波动大等问题。

#### 4 结论

以西门子 S7-300 PLC 为核心的加热炉温度控制系统,实现对 PD 控制参数的自整定,既保留了 PLC 控制系统的可靠性和灵活性等特点,又提高了控制系统的智能化程度,确保了模糊 PD 温度控制系统在加热炉温度控制系统中达到良好效

果。

#### 参考文献:

- [1] 韦魏.智能控制技术[M].北京:机械工业出版社,2001.  
[2] 刘普寅.模糊理论及应用[M].长沙:国防科技大学出版社,1998.  
[3] 周荣富.模糊-PD 复合控制在燃烧控制系统中的应用[J].自动化信息,2006,57(1):75-79.  
ZHOU Rong-fu. Application of fuzzy-PD complex control in combustion control system[J]. Automation Information, 2006, 57(1): 75-79. [编辑:魏方]

### 首矿大石河铁矿选矿 7 号布料小车远程控制试运行

为最大限度保护粉尘区岗位职工身体健康,给职工创造一个健康的工作环境,首钢大石河铁矿积极推进小车布料岗位远程控制项目。从 2007 年 11 月开始,他们与计控室合作,以破碎 7 号布料小车为试点开展小车远程手动控制改造试验。试验采用摄像头获取现场信息的方式,代替岗位现场监视,并通过电气改造将小车控制系统复制到远端,从而使岗位远离粉尘区。在改造过程中,有关技术人员攻关创新,解决了封闭滑线供电中断造成小车失控、8 号料斗满仓和 6 号皮带机头堵料以及自动运行等一系列问题,试验取得了初步成功,达到了操作岗位人员迁移到碎矿集中操作室进行远程操作的条件,不仅使岗位人员远离了粉尘现场,同时也为另外两辆小车改造提供了经验。该项目于 2008 年 4 月 14 日完成初步试验,进入试运行阶段。  
(首钢矿业公司 党委宣传部 齐瑞普,乔玉良)