

文章编号 :1000-582X(2007)10-0060-05

高温熔体粘度测试仪的温度控制技术

苏玉刚¹ 李玉刚¹ 胡 涛² 孙 跃¹

(1. 重庆大学 自动化学院, 重庆 400030 2. 长安汽车集团公司 军品研究中心, 重庆 400023)

摘 要 :介绍了高温熔体粘度测试仪的组成和功能。分析了高温熔体粘度测试仪温度控制系统的特点。为了提高加热速度和温度控制精度,提出了阈值控制策略与自适应模糊 PID 控制相结合的控制算法。在高温炉当前温度值与设定温度值偏差较大时,为了保护系统和提高加热速度,运用阈值控制策略对系统进行控制,在高温炉当前温度值与设定温度值偏差较小时,运用自适应模糊 PID 控制,以保证控制精度。仿真研究和试验测试证明,该控制算法在保证控制精度的基础上,能很好地提高系统的动态性能。

关键词 粘度测试仪 ;温度控制 ;阈值控制 ;自适应模糊 PID

中图分类号 :TP273

文献标志码 :A

近年来随着工业的发展,在冶金领域里对熔体粘度测试仪的要求越来越高,测试方式也得到了不断的发展。为了提高粘度测试仪的加热速度和粘度测试精度,笔者研制了一种智能型的高温熔体粘度测试仪。

高温熔体粘度和温度有着很大的关系,在不同温度下粘度数据差别很大。温度的准确性直接影响着测试的精度。这就对温度的控制提出了很高的要求。而加热炉属于大滞后、大惯性的非线性系统,同时加热所用的硅钼棒又不能承受大电流的冲击,并且其电阻值会随着温度的升高产生变化,这些因素增加了温度控制的难度。针对加热系统的特点,为了提高加热速度和控制精度,笔者提出了一种阈值控制策略和自适应模糊 PID 控制相结合的控制算法。

1 系统组成和工作原理

笔者研制的高温熔体粘度计如图 1 所示。

该智能型熔体粘度测试仪由计算机、控制柜、升降装置、测杆、光电传感装置、高温炉组成。上位计算机采用 RS-485 串行通信接口与控制柜中的下层控制

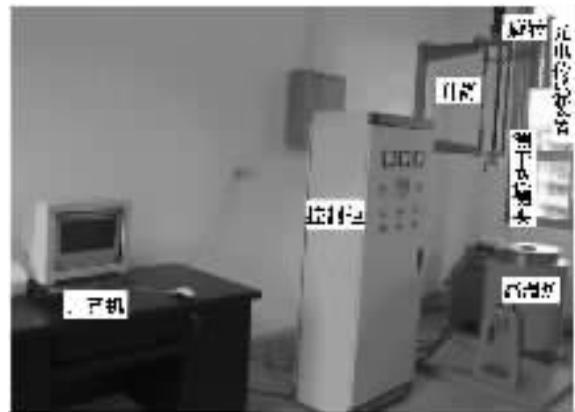


图 1 高温熔体粘度仪装置图

器通信,通过双向晶闸管的移相控制实现温度的调节。加热体采用硅钼棒。

在测试中,待测体置于坩埚放在高温炉内加热到测试温度。测杆及测头在定速控制电机的驱动下以一定的转速匀速旋转,在坩埚与测头之间的径向距离上,液体内部出现速度梯度,于是在液体中便产生了内摩擦,内摩擦作用在旋转的内柱体上产生一个切应力,测量此切应力便可测试出液体的粘度。而作用在内柱体

收稿日期 2007-06-14

基金项目 重庆市科委计划基金资助项目(#CSTC 2005BB6171)

作者简介 苏玉刚(1962-)男,重庆大学副教授,博士,主要从事电力电子技术及应用,计算机测控技术研究,
(E-mail)su7558@qq.com。

上的切应力传递给弹性钢丝,使钢丝受到扭力而产生一个扭转角 ϕ 。显然扭转角与液体粘度成正比。而扭转角由上下光电传感器和连接在钢丝上的上下指针测试系统测出,然后通过式(1)计算出粘度:

$$\eta = K \times \phi, \quad (1)$$

式中 K 为粘度系数,可以用特定方法确定 K 的数值。

扭转角信号由光电传感装置获得,通过通信板传递给计算机。温度的反馈信号由热电偶获得,通过串口 RS-485 传递给计算机。

该测试仪器提供了两种 K 值的标定方式:落球法和标准油法。可以自动控制测杆的升降,能够精确地进行定温粘度测试和变温粘度测试。

2 控制算法设计

提高温度控制的准确性,特别是改善温度的动态性能,提高测试效率,对高温熔体粘度测试仪至关重要。对于温度控制已经有许多比较成熟的研究成果^[1-6],这些算法用于高温炉温度控制都存在一定的不足之处。

经过对高温熔体粘度测试仪加热系统的分析,得出如下一些特性:

1)加热炉是具有大滞后、大惯性特点的非线性系统。

2)该系统采用硅钼棒加热。硅钼棒的电阻率随着温度升高而快速增大,不能承受电流骤变,所能承受的最大电流值随温度升高而增大。

在综合考虑以上系统特点和借鉴已有研究成果的基础上,笔者提出了一种阈值控制策略和自适应模糊 PID 控制相结合的控制算法。在低温时为了提高加热速度,避免因电流过大而损坏硅钼棒系统使用阈值控制。炉温接近设定值时,如果仍使用大电流加热会产生较大超调,很难达到稳定,因此在炉温距离设定值尚有一段距离时,系统提前自动切换到自适应模糊 PID 控制。两种控制算法的切换由以下函数控制。

$$s = f(\theta_0, \theta), \quad (2)$$

其中 θ_0 是设定温度值, θ 是当前温度值。当温度的差值在 $60\text{ }^\circ\text{C}$ 以内进入自适应模糊 PID 控制。

2.1 阈值控制策略

阈值控制策略是由控制器根据加热时间和反馈的温度值设定加热时双向晶闸管的开度值,以达到在低温时系统以最大电流快速加热。设定的加热开度可由下列方程确定。

$$D = f(\theta_0, \theta_1, \theta, t), \quad (3)$$

其中 D 为双向晶闸管开度,用相对于全导通的百分比表示, θ_1 是初始炉温, $^\circ\text{C}$, t 是加热时间,min。

根据硅钼棒特性和实验,可以得到当初始炉温小于 $400\text{ }^\circ\text{C}$ 且当前炉温大于 $400\text{ }^\circ\text{C}$ 时,加热炉温度和双向晶闸管开度的关系如表 1 所示。

表 1 加热炉温度和双向晶闸管开度的关系

$\theta/^\circ\text{C}$	$D/\%$
$400 < \theta \leq 500$	44
$500 < \theta \leq 700$	45
$700 < \theta \leq 800$	47
$800 < \theta \leq 900$	48
$900 < \theta \leq 1\ 100$	50
$1\ 100 < \theta \leq 1\ 200$	53
$1\ 200 < \theta \leq 1\ 300$	55
$1\ 300 < \theta \leq 1\ 400$	57
$1\ 400 < \theta \leq 1\ 500$	61

其它情况下阈值控制规则如下:

$$1) \text{ 当 } \theta_1 < 150\text{ }^\circ\text{C}, \begin{cases} D = 20\% + \frac{t}{15} \times 4\% & t < 90, \\ D = 44\% & t > 90. \end{cases}$$

$$2) \text{ 当 } 150\text{ }^\circ\text{C} < \theta_1 < 300\text{ }^\circ\text{C}, \begin{cases} D = 23\% + \frac{t}{10} \times 4\% & t < 50, \\ D = 43\% & t > 50. \end{cases}$$

$$3) \text{ 当 } 300\text{ }^\circ\text{C} < \theta_1 < 400\text{ }^\circ\text{C}, \begin{cases} D = 25\% + \frac{t}{5} \times 4\% & t < 20, \\ D = 41\% & t > 20. \end{cases}$$

$$4) \text{ 当 } \theta_1 > 400\text{ }^\circ\text{C} \text{ 时, } D = 25\% + \frac{t}{2} \times 3\%; D \text{ 增加至}$$

40%后,按表 1 设定 D 。

2.2 自适应模糊 PID 控制

2.2.1 控制器的结构

高温熔体粘度测试仪温度控制系统的自适应模糊 PID 控制系统结构如图 2 所示,它由一个标准 PID 控制器和一个模糊自适应机构组成,模糊自适应机构根据输入信号(即偏差 e 和 ec)的大小、方向以及变化趋势等特征,通过模糊推理做出相应决策,在线调整 PID 参数 K_p 、 K_i 、 K_d 以满足不同时刻对参数的不同要求,使被控对象有良好的动、静态性能,达到满意的控制效果^[6]。

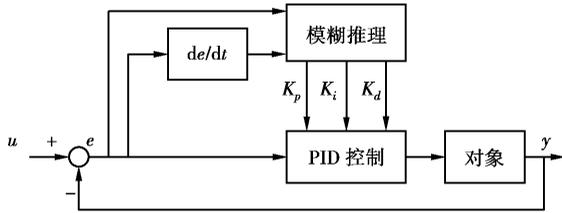


图2 自适应模糊PID结构图

其控制器可看成为参数增量式PID控制器,在初始化PID控制器参数的基础上,叠加自适应模糊控制器对PID参数在线调整,即

$$\left. \begin{aligned} K_p &= K_{p0} + \Delta K_p, \\ K_i &= K_{i0} + \Delta K_i, \\ K_d &= K_{d0} + \Delta K_d. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

$$\left. \begin{aligned} \Delta K_p &= K_1 * \{e, ec\}_p, \\ \Delta K_i &= K_2 * \{e, ec\}_i, \\ \Delta K_d &= K_3 * \{e, ec\}_d \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

由此可看出PID参数自整定过程关键是找出PID 3个参数与e和ec之间的模糊关系。PID 3个参数与e和ec之间的模糊关系可通过综合考虑PID 3个参数对系统的稳定性、响应速度、超调量和稳态精度等各方面的影响规则^[7]及e和ec当前状态得到。

2.2.2 自适应模糊控制器的设计

当|e|小于一定值时系统由自适应模糊PID控制,除此之外系统按阈值控制策略控制。自适应模糊PID是在PID算法的基础上,通过计算当前系统误差e和误差变化率ec,利用模糊规则进行模糊推理,查询模糊矩阵表进行参数调整。系统误差|e|取值范围对系统有较大的影响。取值过小系统会产生超调,延长调节时间。取值过大过早进入自适应模糊PID控制使加热速度降低,也会延长加热时间。根据系统特点和多次仿真、试验最后确定|e|为60,|ec|取值为15。

1)变量模糊化。一般而言,模糊量取值5~9个。模糊量的数量过少,则控制较为粗糙;模糊量的数量过多,计算过于复杂。故模糊量数量的取值只要满足要求就行。

根据系统对精确度的要求和系统的特点,将系统误差e和误差率ec的模糊语言E和EC都分为7个语言变量等级,输出变量ΔK_p、ΔK_i和ΔK_d的模糊语言变量用K'_p、K'_i和K'_d表示,K'_p、K'_i和K'_d也都分为7个语言变量等级:

$E, EC, K'_p, K'_i, K'_d = \{NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB\}$, NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB 分别代表模糊语言负

大,负中,负小,零,正小,正中,正大。

定义它们的模糊论域为

$$E = EC = \{-3, -2, -1, 0, 1, 2, 3\},$$

$$K'_p = K'_i = K'_d = \{-3, -2, -1, 0, 1, 2, 3\}.$$

为了提高系统响应的精度,隶属度函数均采用高斯型隶属度函数,并将中心分辨率设定高些。隶属度函数输出μ(x)与输入x的关系如图3所示。

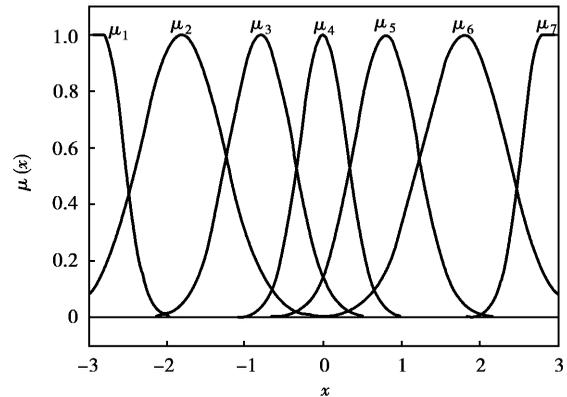


图3 模糊变量的隶属度函数

2)量化因子和比例因子的确定。语言变量的论域不仅和模糊子集设定与分布等因素有关,而且还涉及到系统比例因子的选择,并对控制器的动、静态性能有较大的影响。根据误差e和误差变化率ec的基本论域为[-3, 3],将误差和误差变化率的变化范围量化到[-3, 3]作为控制器的两个输入,因此可大致计算出输入量化因子K_e、K_{ec}:

$$K_e = \frac{3}{|e_{\max}|} = \frac{3}{60}, K_{ec} = \frac{3}{|ec_{\max}|} = \frac{3}{15}.$$

而对于输出的比例因子K₁、K₂、K₃(分别对应K'_p、K'_i、K'_d)与模糊控制器实际输出的ΔK_p、ΔK_i、ΔK_d最大值的乘积应不大于最优PID对应的3个参数,为确保最终PID参数均为正可得出:

$$\begin{cases} \Delta K_p \in [-K_{p0}, K_{p0}], \\ \Delta K_i \in [-K_{i0}, K_{i0}], \\ \Delta K_d \in [-K_{d0}, K_{d0}]. \end{cases}$$

则可得出比例因子取值:

$$K_1 \approx \frac{K_{p0}}{\{\{e, ec\}_p\}_{\max}}, K_2 \approx \frac{K_{i0}}{\{\{e, ec\}_i\}_{\max}}, K_3 \approx \frac{K_{d0}}{\{\{e, ec\}_d\}_{\max}}.$$

则K₁、K₂、K₃参数值的大致取值范围:

$$\left. \begin{aligned} K_1 &\approx K_{p0}/3, \\ K_2 &\approx K_{i0}/3, \\ K_3 &\approx K_{d0}/3. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

量化因子 K_e 、 K_{ec} 和比例因子 K_1 、 K_2 、 K_3 对控制系统的动、静态性能有较大的影响,上述对量化因子和比例因子的计算也只是确定其大致取值范围,还需要根据具体的仿真进一步确定其值。

3)控制规则的确定。自适应模糊控制器的核心是总结专家知识和实际经验,建立合适的模糊规则表。根据 PID 参数对系统动静态性能的影响和多次实验总结,可得出如表 2 所示的控制规则表。

表 2 模糊规则表

K'_p K'_i, K'_d	EC							
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB	
NB	PB NB PS	PB NB PS	PM NM NB PM	NM NM PS NS NB	PS NS NB	ZO ZO NM	NS ZO NM	
NM	PB NB PS	PB NB NS	PM NM NM	PS NS PS	PS NS PS	ZO ZO ZO	NS ZO NS	
NS	PB NB ZO	PM NM ZO	PM NS ZO	PS NS PS	PS ZO ZO	NS PS NS	NS PS ZO	
E	ZO	PS NM PM	ZO NM PB	ZO NS PB	ZO ZO PB	NS PS PS	NM PM NS	NM PM NS
PS	PS NM PB	PS NS PB	ZO ZO PB	NS PS PM	NS PS ZO	NM PM Z	NM PM ZO	
PM	PB ZO PM	PS ZO PM	NS PS PS	NS PM PS	NM PM PS	NM PB PS	NB PB PB	
PB	PB ZO PS	PS ZO PS	NS PS PS	NS PM ZO	NM PM PS	NB PB PS	NB PB PB	

4)自适应模糊 PID 控制器精确化输出。在高温炉温度控制中,根据表 2 所示的控制规则,按照 E. H. Mamdani 极大极小合成运算的推理方法,采用加权平均法进行模糊判决,经反复调试可以得到模糊控制表。为了提高运算速度,该过程在离线状态下进行。

控制。

精确化计算是把语言表达的模糊量回到精确的数值,也就是根据输出模糊子集的隶属度计算输出的确定值。计算机根据采样和论域变换得来的以论域元素形式表现的 E 和 EC ,由控制表的第 i 行和第 j 列找到对应的同样以论域元素形式表现的控制量 K_p 、 K_i 、 K_d ,再将它们乘以其相应的比例因子,就得出 K_p 、 K_i 、 K_d 的修正值,代入式(4)得出调整后的 PID 值。

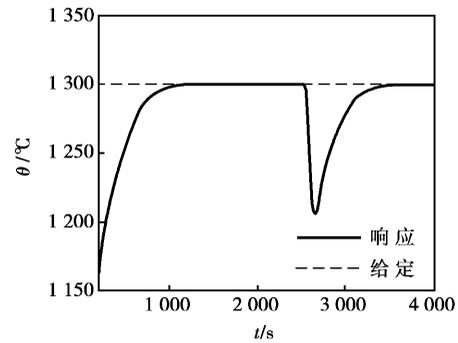


图 4 温度响应仿真曲线

2.2.3 自适应模糊控制器系统仿真

2.3 实时控制效果

通过对系统建模分析得到系统的近似模型为 $\frac{2.4e^{-50s}}{5.4s^2 + 150s + 1}$,设定系统在距离设定温度值还有 60 °C 时进入自适应 PID 控制。

将该控制算法用于系统实时控制,取得了很好的控制效果。图 5 是在系统从 1 010 ~ 1 300 °C 稳定一段时间后加入冷的装有未熔待测样品的坩埚后,温度控制的实时测试曲线。从图中可以看出阈值控制策略和自适应模糊 PID 相结合的温度控制算法提高了系统的加热速度,实现了对系统的无静差控制。

经计算可得出初始化 PID 参数: $K_{p0} = 0.7$, $K_{i0} = 0.003$, $K_{d0} = 7$,根据前面自适应模糊控制器的设计,取输入量化因子 $K_e = 1/20$, $K_{ec} = 1/5$,输出比例因子初值由式(6)可大致确定, $K_1 = 0.7/3$, $K_2 = 0.003/3$, $K_3 = 7/3$,再根据仿真进行调整最后的输出量化因子为 $K_1 = 0.1$, $K_2 = 0.0003$, $K_3 = 1$ 。根据前面设计的模糊控制器的隶速度函数和控制规则进行 MATLAB 仿真,给定为 1 300 °C 阶跃,当系统达到稳定后,又在 2 500 s 时加入了一个幅值为 100 °C 向下的阶跃,模拟向高温炉中加入冷坩埚的实际效果,结果如图 4 所示。从系统的调节曲线可以看出实现了系统对扰动的无超调

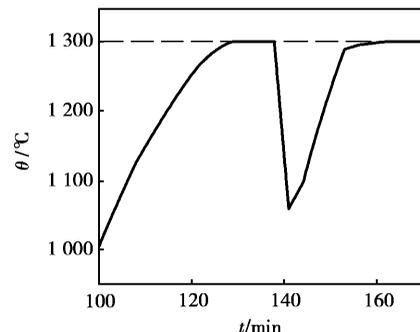


图 5 温度响应实时测试曲线

3 结束语

阈值控制策略可以根据系统特点,按照特定规则对控制对象进行控制,可以很好地增强系统的动态性能。自适应模糊PID控制结合了模糊控制与PID控制的优点,比PID控制有更快的动态性能,更小的超调,比模糊控制具有更高的稳态精度。考虑到高温熔体粘度测试仪温度控制系统具有大滞后、大惯性、非线性和电阻丝不能承受电流突变的特点,笔者将阈值控制策略与自适应模糊PID控制相结合的控制算法用于该温度控制系统,取得了很好的控制效果。从仿真和系统实际运用情况来看,阈值控制策略与自适应模糊PID控制相结合的控制算法,满足了系统的动态和静态性能要求。所设计的控制算法对大滞后、大惯性系统的控制具有一定的参考价值。

参考文献:

- [1] 王福永. 纯滞后系统内模控制器的设计与仿真研究[J]. 苏州大学学报:工科版, 2003, 23(1): 49-52.
- [2] 赵曜. 内模控制发展综述[J]. 信息与控制, 2000, 29(6): 526-531.
- [3] 代林, 高迪驹. 基于模糊控制系统的自整定PID参数控制器的设计[J]. 工业控制与应用, 2005, 24(5): 26-29.
- [4] 韩瑞珍, 陈国定, 杨马英. 基于模糊推理的自整定PID控制器[J]. 控制器基础自动化, 2002, 9(2): 38-40.
- [5] 廖芳芳, 肖建. 基于BP神经网络PID参数自整定的研究[J]. 系统仿真学报, 2005, 17(7): 1711-1713.
- [6] 陶永华. 新型PID控制及其应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002.
- [7] 苏玉刚, 张邦礼. 仿人智能模糊控制及其仿真分析[J]. 重庆大学学报:自然科学版, 2002, 25(4): 55-60.

Temperature Control of High Temperature Melt Viscosity Test Instrument

SU Yu-gang¹, LI Yu-gang¹, HU Tao², SUN Yue¹

(1. College of Automation, Chongqing University, Chongqing 400030, China;

2. Military Research Center of Changan Auto Co, Chongqing 400023, China)

Abstract :The construction and function of high temperature melt viscosity test instrument are introduced in this paper. And the character of temperature control system is given. In order to improve dynamic and static performance of the temperature control system, a new method is proposed which combines threshold control with adaptive fuzzy PID control. While the current temperature of the heating furnace is much lower than the given temperature, threshold control works in order to protect system and improve dynamic performance. When the current temperature is close to the given value, adaptive fuzzy PID control works to improve static performance. At last, simulation and experiment results validate the proposed control method.

Key words : viscosity test instrument ; temperature control ; threshold control ; adaptive fuzzy PID control

(编辑 李胜春)