

吹膜机的模糊自整定 PID 温度控制系统的设计及应用^①

方永锋^{②*} 方昱斌^{**}

(* 贵州工程应用技术学院机械工程学院 毕节 551700)

(** 上海大学机电工程与自动化学院 上海 200072)

摘 要 根据吹膜机温度控制系统的大滞后、非线性等特点,将常规 PID 控制和模糊控制相结合,设计了一种模糊自整定 PID 温度控制系统,该系统通过模糊控制规则实现 PID 控制器的参数的在线调整,以获得 PID 温度控制的更佳控制效果。建立了 Simulink 仿真模型,并对吹膜机温度控制系统的简化模型进行了仿真和分析。仿真结果表明:模糊自整定 PID 控制器有更小的超调量和更快的调节时间,使系统具有更好的控制性能。

关键词 模糊自整定, PID 控制器, 温度控制, 仿真

0 引 言

塑料薄膜因具有轻便、耐性好等优点而得到广泛应用。生产塑料薄膜的机器是吹膜机,温度控制贯穿塑料薄膜的整个生产过程,高质量的产品与温度控制系统的精确性和有效性密不可分。加工过程中的工作温度的波动会影响到薄膜的厚度、匀称性等,所以对于其温度控制至关重要。加热温度的稳定可控是高质量产品的必要条件。这样的加热系统时变性强,要求随时跟踪设定的目标温度,需要一个高质量的智能温度控制系统。

常规的比例积分微分(PID)控制由于其结构简单、易于实现,至今在吹膜机温度控制系统中仍有着广泛的应用。而对于吹膜机加热系统这种大滞后、非线性、时变的系统,常规 PID 由于采用线性定常参数的组合方式,难于协调快速响应和稳态特性之间的矛盾,系统参数时变导致其鲁棒性,因而 PID 的应用也不是特别理想^[1]。针对一些大滞后、非线性的温度控制系统,国内学者做出了很多研究。但是关于吹膜机工作系统的温度控制方案的专门研究基本

没有。因此,本文针对吹膜机的温度控制系统,将模糊控制和 PID 控制相结合,设计了一种模糊自整定 PID 控制器,根据设定的模糊规则进行模糊推理,实现 PID 参数的在线自整定,改善常规 PID 对于响应速度和稳态特性之间难以协调的状况,从而达到系统性能的最优化^[2],提升高质量产品的出产率,为企业增加经济效益。

1 模糊自整定 PID 控制器结构

标准的 PID 控制器数学模型为

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (1)$$

式中 $e(t)$ 、 $u(t)$ 分别为 PID 控制器的输入和输出,其控制作用由误差 e 的比例、积分、微分三项之和给出^[3]。

模糊控制器通常是由输入和输出变量的模糊化界面知识库的模糊推理解模糊界面处理等组成,其基本控制原理图框图如图 1 所示,其中 e 为温度误差, u 是控制信号各部分的作用如下^[4]:

(1) 模糊化界面:用于将模糊控制器真实的确

① 贵州工程应用技术学院高层次人才(院科合字 G2013007 号,院科合字 G2015003 号),贵州省自然科学基金(黔科合 J 字[2014]2001)和贵州省普通高等学煤化工过程装备与控制创新人才团队(黔教合人才团队字[2014]73)资助项目。
② 男,1975 年生,博士,副教授;研究方向:系统与结构可靠性的研究与设计;联系人,E-mail: fangyf_9707@126.com
(收稿日期:2016-11-01)

定输入量转化为模糊矢量。

(2) 知识库:由数据库和规则库两部分构成。数据库用于在规则推理中向推理机提供数据,规则库则是在规则推理中向推理机提供控制规则,常用 if, else, then 等关系词表示关系。

(3) 解模糊界面:用于将推理结果反模糊化的界面。

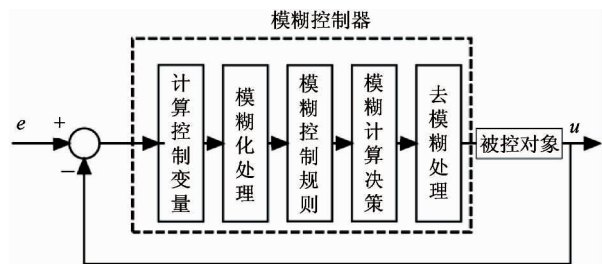


图1 模糊控制的基本原理框图

模糊自整定 PID 控制器由模糊控制和 PID 控制相结合,其设计思想是:为了克服常规 PID 控制器难于协调响应速度和稳态特性之间的矛盾,改变常规 PID 控制器参数不能调节的弊端,采用模糊控制去在线整定 PID 控制器的参数,达到 PID 控制器参数在每一次控制输出时的最优化,以期取得更好的控制效果^[5],其控制原理图如图 2 所示^[6]。

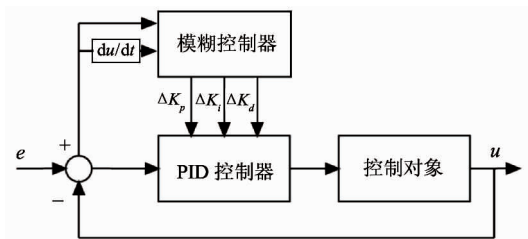


图2 模糊自整定 PID 控制器的结构框图

2 模糊自整定 PID 控制器的设计

2.1 输入输出参数的确定

模糊自整定 PID 控制器实质是在控制器内部对于 PID 控制器参数的实时整定,同常规 PID 控制器一样,输入为吹膜机设定温度 T_0 和实测温度 T_i 的误差 e , 输出为对被控机构的控制信号 u ^[7]。在控制器内部,对于模糊控制器部分,其输入参数为设定温度 T_0 和实测温度 T_i 的误差 e 和误差变化率 ec , 输出为 PID 控制器的参数调整量 $\Delta K_p, \Delta K_i, \Delta K_d$ 。

2.2 系统模型及模糊论域的确定

吹膜机加热系统是一个具有热容量的对象,温度会随时间逐渐变化,并且具有一定的滞后。一般情况下,可将其视为一个一阶惯性环节和一个滞后环节组成的控制对象,传递函数表示为

$$G(s) = \frac{k}{T_s + 1} \times e^{-\tau s} \quad (2)$$

式中 k 为对象的静态增益, T 为对象的时间常数, τ 为对象的纯滞后时间。

在本文中,温度控制模型数学参数取 $k = 1.05$, $T = 364$, $\tau = 90$, 则控制对象的数学模型为

$$G(s) = \frac{1.05}{364s + 1} \times e^{-90s} \quad (3)$$

本文利用临界比例法进行 PID 控制器参数的整定步骤如下:仅加入比例调节,不断增加放大系数 K , 使调节系统的被调参数作等幅振荡时,即达到稳定了边界,测量出比例放大系数 K_m 或临界比例度 P_m 以及振荡周期 T_m , 然后,按经验数据求出初始参数,求得的 PID 参数值分别为: $K_p = 1.5$, $K_i = 0.009$, $K_d = 40$ ^[8]。估算 PID 控制器的参数调整量的变化范围 $\Delta K_p: [-0.3, 0.3]$, $\Delta K_i: [-0.006, 0.006]$, $\Delta K_d: [-15, 15]$ 。

吹膜机的工作温度根据所用原料不同会有一定差异,一般的加热温度范围为 $180^\circ\text{C} \sim 230^\circ\text{C}$ 。估算吹膜机加热温度误差的变化范围为 $E: [-30^\circ\text{C}, 30^\circ\text{C}]$, 温度误差变化率为 $EC: [-0.3^\circ\text{C/s}, 0.3^\circ\text{C/s}]$ 。

误差 E 和误差变化率 EC 以及 PID 控制器参数调整量 $\Delta K_p, \Delta K_i, \Delta K_d$ 的模糊子集都为 {负大, 负中, 负小, 零, 正小, 正中, 正大}, 并简记为 {NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB}。并将它们都量化为 7 个等级分别为:

$$E = \{e\} = \{-6, -5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6\};$$

$$EC = \{ec\} = \{-6, -5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6\};$$

$$\Delta K_p = \{-6, -5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6\};$$

$$\Delta K_i = \{-6, -5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6\};$$

$\Delta K_d = \{-6, -5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6\}$ 。

考虑到论域的覆盖程度和灵敏度及鲁棒性,以及三角形隶属度函数具有计算精度高、形式简单、计算效率高等优点,各变量均选用三角型隶属度函数,如图 3 所示^[9]。

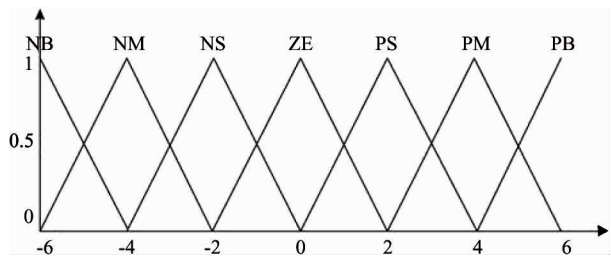


图 3 三角型隶属度函数图

2.3 确定模糊控制规则

在常规的 PID 控制中,比例系数 K_p 的作用是加快系统的响应速度,提高调节精度;积分系数 K_i 的作用是消除系统的稳态误差;微分系数 K_d 的作用是改善系统的动态特性,抑制偏差向任何方向的变化^[2]。

模糊控制规则表一般是基于工程人员对于被控对象的长期工程经验,考虑到系统的稳定性、超调量及响应速度等因素而建立的关系表。具体到本文当中的吹膜机温度控制系统,用 $e(k)$ 、 $e(k - 1)$ 和 $e(k - 2)$ 分别表示系统在本时刻、前一个时刻和前两个时刻的采样误差值, $\Delta e(k) = e(k) - e(k - 1)$ 、 $\Delta e(k - 1) = e(k - 1) - e(k - 2)$ 分别表示系统在本时刻和前一个采样时刻的误差变化率。本文所设计的模糊规则表依据的准则有如下 7 条^[10] (其中符号 $\uparrow$ 表示增大,符号 $\downarrow$ 表示减小,符号 $\leftrightarrow$ 表示不变):

- (1) $|e(k)| < 1$, 引入积分,可以减小稳态误差。
- (2) $e(k)\Delta e(k) > 0$ 且 $|e(k)| > 3$, 此时误差较大,且沿着绝对值增加的方向变化,应采取较强的控制 $K_p \uparrow, K_i \leftrightarrow, K_d \leftrightarrow$ 。
- (3) $e(k)\Delta e(k) > 0$ 且 $|e(k)| < 3$, 此时误差沿着绝对值增加的方向变化,但误差较小,应采取较弱的控制 $K_p \downarrow, K_i \leftrightarrow, K_d \leftrightarrow$ 。
- (4) $e(k)\Delta e(k) < 0$ 且 $e(k)\Delta e(k - 1) > 0$ 或

$e(k) = 0$, 此时误差沿着绝对值减小的方向变化或者没有误差,保持输出不变 $K_p \leftrightarrow, K_i \leftrightarrow, K_d \leftrightarrow$ 。

- (5) $e(k)\Delta e(k) < 0$ 且 $e(k)\Delta e(k - 1) < 0$, 且 $e(k) > 3$, 此时误差处于极值,且误差较大,采用较强控制 $K_p \uparrow, K_i \downarrow, K_d \downarrow$ 。
- (6) $e(k)\Delta e(k) < 0$ 且 $e(k)\Delta e(k - 1) < 0$, 且 $e(k) < 3$, 此时误差处于极值,但误差较大,采用较弱控制 $K_p \downarrow, K_i \downarrow, K_d \downarrow$ 。
- (7) $|e(k)| > 5$, 此时误差很大,按照原有参数继续调整。

同时,模糊控制规则表在仿真试验后也进行了一些修改和调整,使得仿真效果最佳。如表 1 ~ 表 3 所示,为 PID 控制器三个参数调整量 ΔK_p 、 ΔK_i 、 ΔK_d 的模糊控制规则表 (ΔK_p 是比例系数的调整量, ΔK_i 是积分系数的调整量, ΔK_d 是微分系数的调整量)。

表 1 ΔK_p 的模糊规则表

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

表 2 ΔK_i 的模糊规则表

E	EC						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PM	NB	NB	NB	NB	NB	PM
NM	PS	NM	NM	NM	NM	NM	PS
NS	PS	NM	NM	NM	ZM	NM	PS
ZO	ZO	NS	NS	NS	NS	NS	ZO
PS	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO
PM	PB	PS	PS	PS	PS	PS	PB
PB	PB	ZM	PM	PM	PM	PM	PM

表 3 ΔK_d 的模糊规则表

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

2.4 模糊推理及解模糊

在模糊控制中,模糊推理是模糊决策的前提,也是形成模糊控制规则的理论依据。

应用 if、then、else 等关键字将模糊控制矩阵表示为如下 49 条关系表示:

- (1) If(e is NB) and (ec is NB) then (ΔK_p is PB) (ΔK_i is PM) (ΔK_d is PS);
- (2) If(e is NB) and (ec is NM) then (ΔK_p is NB) (ΔK_i is NB) (ΔK_d is PS);
- (3) If(e is NB) and (ec is NS) then (ΔK_p is NB) (ΔK_i is NB) (ΔK_d is PB);
- ⋮
- (49) If(e is NB) and (ec is PB) then (ΔK_p is ZO) (ΔK_i is PM) (ΔK_d is ZO);

从模糊规则表中确定出 PID 控制器的各个参数调整量,按照下式计算当前参数值:

$$\begin{cases} K_p = K_{p0} + \Delta K_p \\ K_i = K_{i0} + \Delta K_i \\ K_d = K_{d0} + \Delta K_d \end{cases} \quad (4)$$

其中, ΔK_{p0} 是比例系数的参数初始值, ΔK_{i0} 是积分系数的参数初始值, ΔK_{d0} 是微分系数的参数初始值。

本文的解模糊方法选择了重心法,即在论域上将隶属度函数曲线与横坐标围成区域的面积平分为两部分的横坐标,作为系统的确切响应。

3 常规 PID 控制器与模糊 PID 控制器的仿真与结果分析

3.1 建立 Simulink 仿真模型

Simulink 是 Matlab 最重要的组件之一,它提供一个动态系统建模、仿真和综合分析的集成环境。在该环境中,无需大量书写程序,而只需要通过简单直观的鼠标操作,就可构造出复杂的系统。

将上文得到的常规 PID 控制器的参数取为模糊自整定 PID 控制器的初始参数,即 $K_{p0} = 1.5$, $K_{i0} = 0.009$, $K_{d0} = 40$ 。在 Simulink 环境中,在 Simulink 环境下的控制系统仿真模型如图 4 所示。

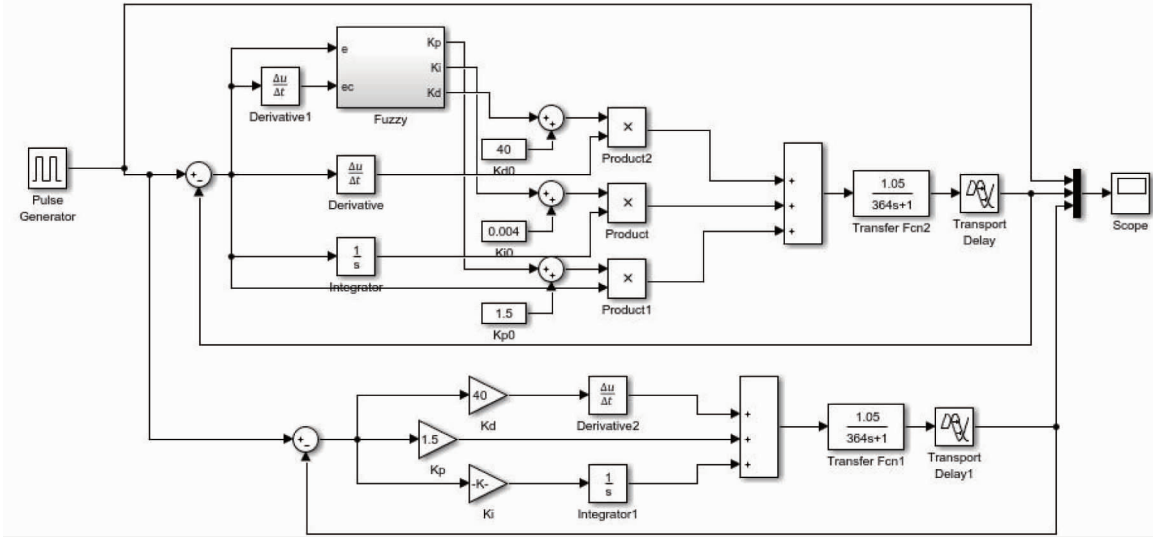


图 4 控制系统仿真图

3.2 仿真结果及分析

为了验证模糊自整定 PID 控制算法的性能,对于本文所建立的吹膜机温度控制系统,将从两个方面进行仿真实验:

(1)对系统的追踪性能进行仿真实验。

吹膜机温度模糊自整定 PID 控制系统的追踪仿真曲线如图 5 所示,可以看出,模糊自整定 PID 控制系统有效地抑制了超调,基本实现了无静差跟踪,控制效果明显优于常规 PID 控制系统。

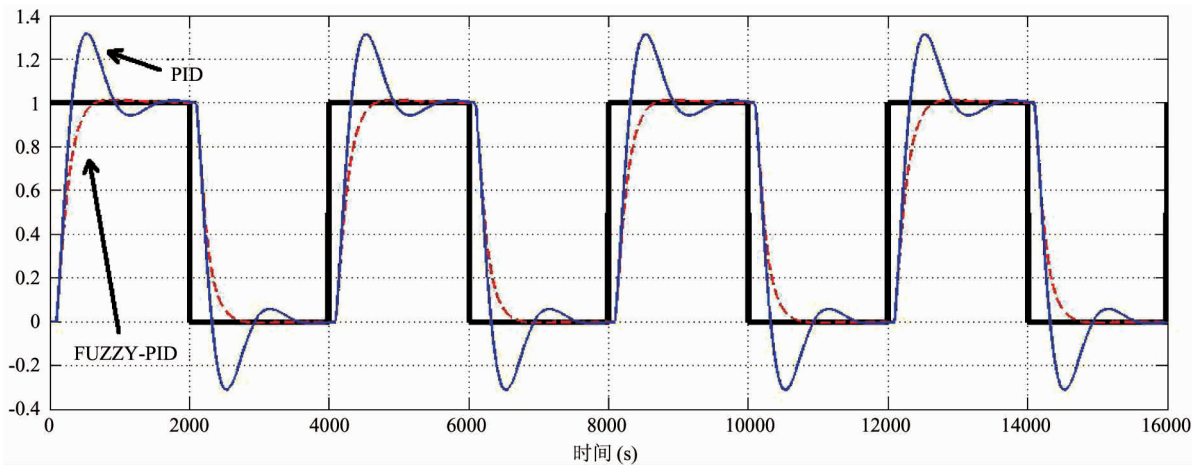


图 5 控制系统的追踪曲线对比

(2)对系统响应速度和抗干扰性进行仿真。

针对仿真系统,设定目标温度为 192℃,在 4000s 时突变为 208℃,仿真曲线如图 6 所示。仿真

结果表面:模糊自整定 PID 控制系统较常规 PID 控制系统具有更快的响应速度,超调量更小,抗干扰性强、鲁棒性好。

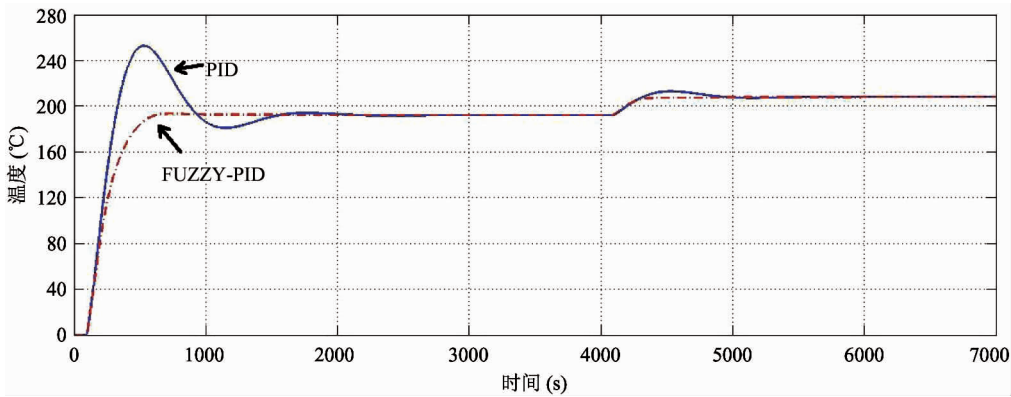


图 6 系统响应及抗干扰响应曲线

4 结 论

仿真对比分析表明,模糊自整定 PID 控制结合了常规PID控制和模糊控制两者的优点,具有应用

灵活,实用方便等特点,较常规 PID 控制有着更短的响应时间和更小的超调量,拥有更好的自适应能力,对于吹膜机的温度控制系统的静态、动态性能,都具有明显提升和改善。将其应用于吹膜机温度控制系统,具有现实可行性。

参考文献

- [1] Sahu B K, Pati T K, Nayak J R, et al. A novel hybrid LUS-TLBO optimized fuzzy-PID controller for load frequency control of multi-source power system. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2016, 7 (4): 58-69
- [2] 高峰,王媛,李艳等. 固着磨料双面研磨压力模糊自整定 PID 控制方法研究. *中国机械工程*, 2015, 26(2): 162-166
- [3] 屠毅,林贵平. 大型飞机座舱温度控制系统仿真. *航空学报*, 2011, 32(1): 49-57
- [4] Nassour J, Hénaff P, Benouezdou F, et al. Multi-layered multi-pattern CPG for adaptive locomotion of humanoid robots. *Biological Cybernetics*, 2014, 108(3): 291-303
- [5] 夏浩,李柳柳. 基于内模法的 PID 控制器自整定算法. *计算机应用*, 2015, 35(9): 2492-2496
- [6] 郑孝常,施伟锋,张威等. 船舶发电机组容错的 State-Flow 模糊 PID 控制研究. *高技术通讯*, 2015, 25(3): 364-368
- [7] Karthik A P D, Supriyanka J. Design of self-tuning PID controller using fuzzy logic for level process. *International Journal of Engineering Sciences & Research Technology*, 2014, 3(6): 106-112
- [8] Ohnishi Y, Yamamoto T, Omatsu S. A Design of self-tuning PID control systems based on pole-assignment method. *Ieej Transactions on Electronics Information & Systems*, 2003, 123(5): 962-969
- [9] 吴振顺,姚建均,岳东海. 模糊自整定 PID 控制器的设计及其应用. *哈尔滨工业大学学报*, 2004, 36(11): 1578-1580
- [10] 孙仁云,李治. 汽车电子感应制动模糊自整定 PID 参数控制. *西南交通大学学报*, 2010, 45(3): 378-383

Design and application of a fuzzy self-tuning PID temperature control system of inflation film manufacturing machines

Fang Yongfeng^{*}, Fang Yubin^{**}

(^{*} School of Mechanical Engineering, Guizhou University of Science Engineering, Bijie 551700)

(^{**} School of Mechatronic Engineering and Automation, Shanghai University, Shanghai 200072)

Abstract

According to the large lag, nonlinear characteristics of the temperature control system of an inflation film manufacturing machine, a fuzzy self-tuning PID temperature control system was designed by using the combination of convention PID and fuzzy control. The system uses the fuzzy control rule to achieve the online parameter adjustment and the optimal effect of PID temperature control. The simulink simulation model for the control system was established, and the simulation analysis for the simplified model of the temperature control system was conducted. The results of simulation show that such a fuzzy self-tuning PID controller has the advantages of both small overmodulation and short response time, which make the system has the better control performance.

Key words: fuzzy self-tuning, PID controller, temperature control, simulation