

HTF58X2 注塑机螺杆筒温度的模糊 PID 控制^①

徐 锋^{②*} 杨彦青* 楼 平**

(* 台州职业技术学院自动化研究所 台州 318000)

(** 嘉兴职业技术学院机电与汽车分院 嘉兴 314036)

摘 要 分析了 HTF58X2 注塑机螺杆筒温控系统的特点与要求。考虑到传统 PID 控制器中的螺杆筒温控系统因具有非线性、纯滞后、时变性而难以取得满意的温控效果,提出了一种基于模糊策略的 PID 参数在线整定的自适应控制器。该控制器根据现场输入的温度偏差和偏差变化率,通过模糊推理对 PID 控制器参数进行在线调整,以适应不同工况下 PID 参数的最佳匹配。Matlab/Simulink 仿真和实验测试的结果表明,模糊-PID 控制器与固定参数的 PID 控制器相比,在调节速度、超调量和自适应能力等方面具有一定的优势。

关键词 注塑机, 螺杆筒温控系统, 常规 PID 控制器, 模糊控制器, 仿真与实验

0 引言

注塑是把热塑性物体加热熔融后并将其压入模具中进行成型的一种加工技术,它能生产出复杂造型的塑料制品。HTF58X2 为海天公司生产的高速、精密注塑机,主要用于对重复精度要求高的家电、汽车结构件、电子元件外壳等的生产。

注塑机螺杆筒(料筒)是热塑性物料熔融的场所,温度过高会使物料发生分解变质,温度过低则使物料塑化不良,流动性变差,影响产品成型。因此,螺杆筒温度是注塑过程中十分重要的过程参数,是注塑机控制的难点之一。目前,螺杆筒温度控制主要采用常规的比例-积分-微分(PID)控制方式。由于对象的非线性、强耦合、大滞后和时变特性,采用常规 PID 控制时,不但参数选择困难,且超调量大、调节时间长,还容易出现振荡,难以满足注塑机精密成型的要求^[1]。模糊控制(fuzzy controller)具有不依赖数学模型、响应速度快、鲁棒性强等特点,能较好地适应非线性、强耦合、时变和时滞系统。但单纯模

糊控制器控制比较粗糙,在稳定点处存在控制盲处,且无法消除静态误差等缺点^[2]。本研究提出了一种基于模糊推理的变系数的 PID 控制算法,这种方法不依赖控制模型,能根据不同工况下对控制的要求,实时修整 PID 参数^[3]。仿真和试验测量验证了这种方法对非线性、大滞后工业对象的有效性。

1 螺杆筒温控系统特性

注塑机螺杆筒由加热料筒、加热器(电阻圈)、K 型热电偶(0℃ ~ 400℃)、温度变送器和温控器等组成。沿螺杆筒纵向一般分为 3-8 个加热段,由于对各段温度要求不同,系统要求沿螺杆筒方向采用分段加热方式。

对螺杆筒温控系统的一般要求是:各段控制精度 ≤ ±5℃,超调量 ≤ 15%,调节时间满足工艺要求,系统适应环境能力要强,控制算法简单并具有一定的通用性^[4]。

图 1 为 HTF58X2 螺杆筒的结构示意图。

① 浙江省科技厅公益技术研究工业(2015C31132)资助项目。

② 男,1963 年生,副教授;研究方向:人工智能,太阳能 MPPT 等;联系人,E-mail: xf630205@sina.com
(收稿日期:2016-09-21)

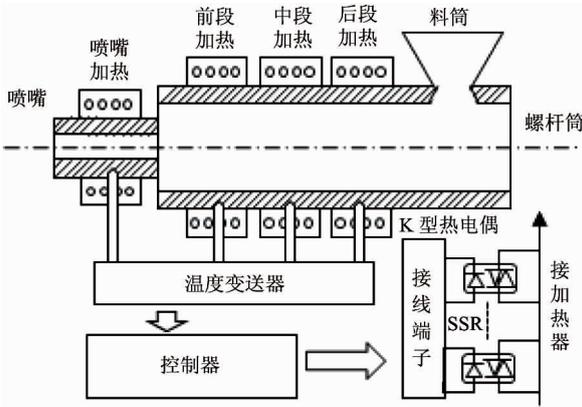


图1 HTF58X2 螺杆筒结构示意图

HTF58X2 螺杆筒电阻加热圈共 4 段,每段均放置 K 型热电偶进行温度检测,它又是一个多输入/多输出系统。根据工艺要求,越靠近喷嘴温度要求越高,根据材料及加工工艺的特点,相邻加热段的温差一般在 $5^{\circ}\text{C} \sim 10^{\circ}\text{C}$ [1]。

螺杆筒每段温度不但与本段加热功率有关,也与相邻段的温度有关,塑性材料的物理性质、周围环境、电源波动等因素也影响温度变化。因此,温度特性极其复杂,很难建立精确的数学模型。通过降阶处理并忽略相互耦合影响,各加热段的数学模型一般可以用带纯滞后的一阶惯性环节加以描述 [1]:

$$G(s) = \frac{K_i(t)}{1 + T_i(t) \cdot s} \exp[-\tau_i(t)s] \quad (1)$$

式中, $K_i(t)$ 为时变的比例系数, $T_i(t)$ 为时变的时间常数, $\tau_i(t)$ 为时变的滞后时间常数。

传统 PID 的控制性能取决于比例系数 (K_p)、积分系数 (K_i) 及微分系数 (K_d)。由于螺杆筒温控系统特性的复杂性,很难用精确的数学语言描述 $K_i(t)$ 、 $T_i(t)$ 和 $\tau_i(t)$ 的变化规律 [5]。为获得良好的控制效果,当模型参数变化时 PID 参数也应随之改变,由于常规 PID 控制器不具备这种自适应能力。因此,要获得优良的动态性能和静态性能是有困难的。

2 螺杆温度控制算法

2.1 模糊-PID 控制原理

传统的 PID 控制器对于模型确定的线性系统具有良好的控制效果。但对于螺杆筒这类时变的非线性

性系统,其控制效果往往不尽如意,原因是 PID 参数无法适应外部变化的条件 [6]。同时, PID 参数的选择也十分麻烦。

常用的二维结构模糊控制器是以偏差 (e) 和偏差变化率 (de/dt) 为输入,与传统的 PID 控制相比,在响应速度、超调量、鲁棒性等方面有明显优势。但由于缺少积分环节,因此存在稳定误差,且在稳定值上有一定的振荡。

本研究基于 PID 控制器与模糊控制器各自的优点,提出了如图 2 所示的模糊-PID 控制器结构。

图 2 中,模糊控制器为单变量二维结构,输入量为温差 e 和温差变化率 de/dt ,输出量为 PID 控制器参数的增量,即 Δk_p 、 Δk_i 和 Δk_d 。

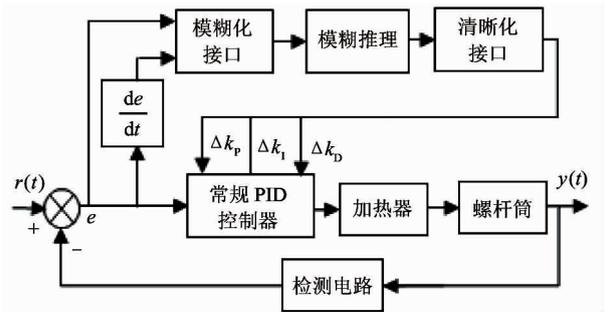


图2 模糊-PID 控制器结构图

实现一步模糊控制算法的过程描述如下:模糊控制器以温差 e 及其变化率 de/dt 输入量,经量化和模糊化处理映射到模糊集 E 和 EC 中,再由合成规则进行模糊决策得到输出量 ΔK_p 、 ΔK_i 和 ΔK_d 。

PID 控制器 K_p 、 K_i 、 K_d 参数计算如下:

$$K_p = K_{p0} + \Delta k_p = K_{p0} + k_p \Delta K_p \quad (2)$$

$$K_i = K_{i0} + \Delta k_i = K_{i0} + k_i \Delta K_i \quad (3)$$

$$K_d = K_{d0} + \Delta k_d = K_{d0} + k_d \Delta K_d \quad (4)$$

式(2)~(4)中, k_p 、 k_i 、 k_d 分别为模糊控制器的比例因子; K_{p0} 、 K_{i0} 、 K_{d0} 为 PID 控制器的初始值 [7]。实际应用时, PID 初始参数 K_{p0} 、 K_{i0} 、 K_{d0} 可用齐格勒-尼柯尔斯 (Ziegler-Nichols) 经验公确定。

由于标准的 PID 算法涉及历史偏差积累值 $\sum e(k)$,容易产生较大的积累误差。故采用增量式 PID 算法:

$$\Delta u(k) = K_p [e(k) - e(k-1)] + K_i e(k)$$

$$+ K_D [e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)] \quad (5)$$

式(5)中, k 为采用序号 ($k=0, 1, 2, \dots$), $\Delta u(k)$ 为第 k 次采样的输出增量, $e(k)$ 表示第 k 次采样的输入误差。

PID 算法在 k 采样时刻的实际输出量为

$$u(k) = u(k-1) + \Delta u(k) \quad (6)$$

可见, 增量算法只需计算 $e(k-1)$ 和 $e(k-2)$ 两个误差, 这样既简化计算, 同时也能消除偏差积累。

2.2 模糊控制器的设计

模糊控制器设计主要包括模糊规则制订、模糊推理方法及输入/输出隶属函数选取等内容。

本例的模糊规则采用文献[7]提出的通用型语

言规则, 具体见表1所示。

输入、输出语言变量 $E, EC, \Delta K_P, \Delta K_I, \Delta K_D$ 均分割为相同的7个模糊子集, 即 $E, EC, \Delta K_P, \Delta K_I, \Delta K_D = \{NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB\}$ 。

各语言变量 $E, EC, \Delta K_P, \Delta K_I, \Delta K_D$ 的论域均取 $[-4 \sim +4]$, 并将它们离散为相同的9档, 即 $E, EC, \Delta K_P, \Delta K_I, \Delta K_D: \{-4, -3, -2, -1, 0, +1, +2, +3, +4\}$ 。

综合考虑隶属函数形状、论域上相邻子集重叠交叉程度对控制的影响以及计算的方便, 各语言变量模糊子集的隶属函数均采用三角形, 且均匀分布在各自论域中, 相邻子集在重叠交叉处的隶属度取 $0.5^{[7]}$ 。

表1 模糊规则表

E	$\Delta K_P, \Delta K_I, \Delta K_D$						
	$EC = NB$	$EC = NM$	$EC = NS$	$EC = ZO$	$EC = PS$	$EC = PM$	$EC = PB$
NB	PB/NB/NB	PB/NB/NB	PB/NB/NM	PB/NB/NM	PB/NB/NM	PB/NB/NB	PB/NB/NB
NM	PM/NM/ZO	PM/NM/ZO	PM/NS/NM	PS/NS/NM	ZO/NS/NM	ZO/NM/ZO	ZO/NM/ZO
NS	ZO/PM/ZO	ZO/PM/N	PM/NS/NM	NS/PS/NM	NM/PS/NS	NM/PM/NS	NM/PM/ZO
ZO	NS/PM/NS	NS/PM/NS	NS/PS/NS	ZO/ZO/NS	NS/PS/NS	NS/PM/NS	NS/PM/NS
PS	NM/PM/ZO	NM/PM/NS	NM/PS/NM	NS/PS/NM	ZO/PS/NS	ZO/PM/NS	ZO/PM/ZO
PM	ZO/NM/ZO	ZO/NM/ZO	ZO/NS/NM	PS/NS/NM	PM/NS/PS	PM/NM/ZO	PM/NM/ZO
PB	PB/NB/NB	PB/NB/NB	PB/NB/NM	PB/NB/NM	PB/NB/NM	PB/NB/NB	PB/NB/NB

表2为各模糊子集隶属度赋值表。

模糊推理使用马丹尼(Mamdani)法, 每条法则均可得到一个模糊关系 R_i , 式为

$$R_i = A_i \wedge B_i \wedge C_i = (A_i \wedge B_i) \wedge C_i \quad (7)$$

式中“ \wedge ”表示“合取”运算。

对各关系进行合成即可得到总的模糊关系 R , 式为

$$R = R_1 \cup R_2 \cup R_3 \dots \cup R_{49} \quad (8)$$

式中“ \cup ”表示对模糊蕴涵关系 R_i 进行“并”运算。

根据合成推理的原则, 若模糊控制器当前输入为 E_i 和 EC_j , 则模糊控制器的输出为

$$\Delta K_{ij} = (E_i \times EC_j) \circ R \quad (9)$$

式中“ \times ”为模糊直积运算, “ \circ ”为模糊合成运算。

模糊判决采用面积重心法, 其计算方法如下:

$$\Delta K_{(P,I,D)} = \sum_{j=1}^n u_j A(u_j) / \sum_{j=1}^n A(u_j) \quad (10)$$

再由式(2)~式(4)得出PID控制器 K_P, K_I 和 K_D 并最终由式(5)和(6)得到控制量。

3 算法仿真分析

用 Matlab/Simulink 和 Fuzzy 工具箱建立模糊-PID 控制器仿真模型如图3所示^[7-9]。

仿真选用的模型为一阶大滞后惯性环节, 模型参数选为 $K=1.0, T=50, \tau=30^{[6]}$ 。各语言变量的模糊论域分别为 $E: [-3, +3], EC: [-3, +3], \Delta K_P: [-0.3, +0.3], \Delta K_I: [-0.06, +0.06], \Delta K_D: [-3, +3]$; 初始值分别取 $K_{P0}=1.5, K_{I0}=0.008, K_{D0}=5.2$ 。

表 2 $E/EC/\Delta K_{(P,I,D)}$ 隶属度赋值表

	-4	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3	+4
NB	0/0/0	0/0/0	0/0/0	0/0/0	0/0/0	0/0/0	0.1/0.1/0.1	0.7/0.7/0.7	1/1/1
NM	0/0/0	0/0/0	0/0/0	0/0/0	0/0/0	0.5/0.5/0.5	1/1/1	0.5/0.5/0.5	0/0/0
NS	0/0/0	0/0/0	0/0/0	0/0/0	0.5/0.5/0.5	1/1/1	0.5/0.5/0.5	0/0/0	0/0/0
ZO	0/0/0	0/0/0	0/0/0	0.5/0.5/0.5	1/1/1	0.5/0.5/0.5	0/0/0	0/0/0	0/0/0
PS	0/0/0	0/0/0	0.5/0.5/0.5	1/1/1	0.5/0.5/0.5	0/0/0	0/0/0	0/0/0	0/0/0
PM	0/0/0	0.5/0.5/0.5	1/1/1	0.5/0.5/0.5	0.1/0.1/0.1	0/0/0	0/0/0	0/0/0	0/0/0
PB	1/1/1	0.7/0.7/0.7	0.1/0.1/0.1	0/0/0	0/0/0	0/0/0	0/0/0	0/0/0	0/0/0

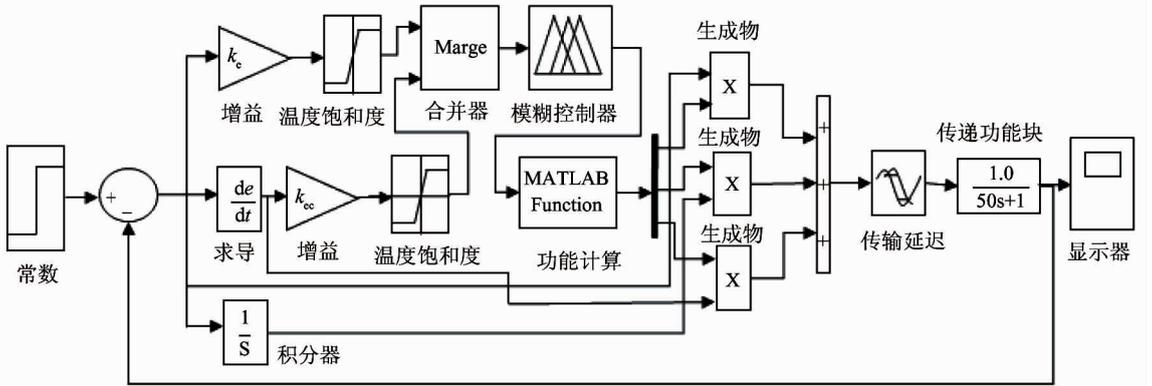


图 3 模糊-PID 控制器仿真模型

图 4(a) 为仿真得到的曲线。为了比较与常规 PID 控制方法性能的优劣, 图中还给出了常规 PID 控制器的仿真曲线(该曲线的前部控制量打到最大值, 在温度为 185°C 时进入 PID 控制状态)。仿真采用的 PID 控制参数为 $K_p = 8, K_i = 0.1, K_d = 6$ 。

可以得出, 模糊-PID 控制器响应速度最快(约 150s), 输出稳定, 无明显超调。常规 PID 控制器稳定性良好, 但调节时间长(约 400s), 超调量最大达 30°C 。可见, 模糊-PID 控制器在响应速度、超调

量方面明显优于常规 PID 控制和基本模糊控制器。

为了比较检验模糊-PID 控制器的适应能力, 在模糊-PID 控制器模糊规则和 PID 参数不变的情况下, 仅当控制模型参数发生变化时, 模糊-PID 控制器和常规 PID 控制器的仿真曲线图 4(b) 所示。可见, 模糊-PID 控制响应曲线的变化程度较小, 而常规 PID 控制器在响应时间、超调量等均有明显变化, 进一步验证了模糊-PID 控制器具有较强的鲁棒性和自适应能力^[7]。

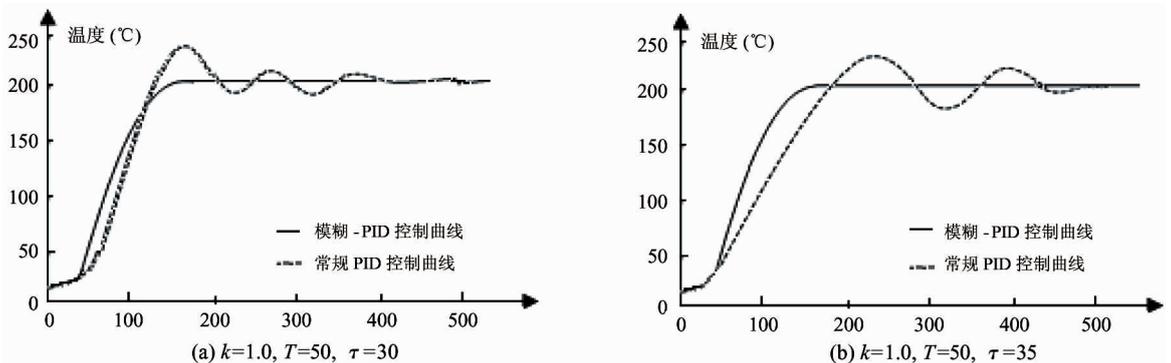


图 4 不同控制方法与参数时的仿真曲线

4 实验测试与分析

上述模糊-PID 控制器应用于 HTF58X2 型注塑机的实验测试。HTF58X2 型注塑机螺杆筒喷嘴、前段、中段和后段加热器功率分别为 200W、2200W、1100W 和 1600W。K 型热电偶将检测到的信号经变送器放大为 1V ~ 5V 的电压信号,检测电路分辨率为 0.25。考虑到螺杆筒时间常数较大,温度变化缓慢,系统温度采样周期定为 5s。

加热器用固态继电器(SSR)为控制器件,由于模糊-PID 控制器的输出的控制量 u 为连续量,而 SSR 只能用于通断。因此,需采用脉宽调制(PWM)技术将控制量 u 换算周期内 SSR 的通/断比后再施加到 SSR 上^[10]。

各段模糊-PID 控制器的参数初始值、比例因子的取值如表 3 所示。

表 3 模糊-PID 控制器参数

加热段	K_{r0}	K_{i0}	K_{D0}	k_p	k_i	k_d
喷嘴	3.5	0.5	4.0	1.25	0.125	1.5
前段	6.0	0.2	8.0	1.5	0.05	2.0
中段	5.0	0.5	6.0	1.25	0.125	1.5
后段	4.0	0.4	4.0	1	0.1	1.0

各段温度设定分别为后段喷嘴 250℃、前段 215℃、中段 175℃、后段 135℃。

实验结果如图 5 所示。曲线 1 为后段温升曲线、2 为中段温升曲线、3 为前段温升曲线、4 为喷嘴温升曲线。

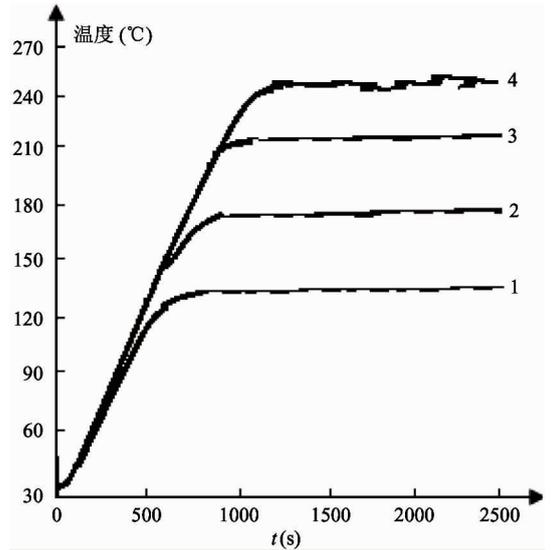


图 5 各加热段的温升曲线

表 4 为中段加热器温度测量值。

当相邻段温度设定值差值不超过 45℃时,各加热段温度的调节时间均在 1500s 内,超调量 $\delta = 0$,控制精度 $\leq \pm 3^\circ\text{C}$ 。可见,系统的动态性能和静态性能还是令人满意的。

表 4 中段加热器温度测量值(°C/s)

时间	50	150	250	350	450	550	650	750	850	950	1050	1150	1250	1500	2000
温度	36.5	50.4	78.6	93.5	118.2	137.8	147.9	165.3	170.2	173.8	176.4	177.3	175.3	175.5	170.6

5 结论

目前,大多数国产注塑机螺杆筒温度控制系统采用的常规数字式 PID 温控仪,控制性能并不理想,稳态误差一般在 $\pm 5^\circ\text{C}$,调节时间在几分钟到几十分钟不等,存在一定的超调量^[11]。由于螺杆筒温度控制系统是一个非线性、大惯性、纯滞后、相邻段强耦合的多变量的时变系统^[12],PID 参数的选择既复杂又难以适应参数变化的要求,导致控制效果不够理想。

模糊控制器根据工况的变化在线修正 PID 控制器参数,不但算法简单、性能稳定、适应性强,同时也避免了常规 PID 控制器在参数选择及参数适应性方面的困惑从仿真及实际测试的结果可以看出,模糊-PID 控制器在注塑机螺杆筒温控系统中具有较为明显的优势。

参考文献

- [1] 李闯. 注塑机控制系统改造设计及料筒温度控制算法的研究:[硕士学位论文]. 沈阳:东北大学自动化研

- 究所,2006. 1-6
- [2] Visioli A. Tuning of PID controllers with fuzzy logic. *IEE Proc-Control Theory*, 2001,148(1):30-35
- [3] 金天,王玉宝,丛丽等. 基于模糊逻辑的自适应强跟踪 UKF 定位滤波算法. 高技术通讯, 2012, 22(4):348-354
- [4] 钟汉如. 注塑机控制系统. 北京:化学工业出版社, 2003. 12
- [5] 徐锋,楼平,林海波. 通用型模糊自寻优 PID 控制器在电导热油油炉中的应用. 热能动力工程, 2016, 31(5):141-145
- [6] 周锡恩,罗飞,邓晓燕等. 模糊自适应 PID 控制在注塑机料筒温度控制中的应用. 自动化技术与应用, 2012,31(10):21-25
- [7] 徐锋,楼平,林海波. 基于模糊策略的液压系统油自适应 PID 控制. 高技术通讯, 2016,26(1):30-36
- [8] 刘金琨. 先进 PID 控制 MATLAB 仿真. 北京:电子工业出版社, 2007. 05
- [9] 曾璐. 基于模糊变系数 PID 算法的注塑机料筒小试控制. 热处理技术与装备, 2011,32(5):53-57
- [10] Rickey Dubay, Rodney Lakhann. A temperature-dependent adaptive controller. Part I: Controller Methodology and open-loop testing. *Polymer Engineering and Science*, 2004,44(10):1925-1933
- [11] 王兆东. 注塑机料筒温控方案设计与仿真比较研究: [硕士学位论文]. 大连:大连理工大学电子与信息工程学院, 2005. 31-32
- [12] 吕常智,范迪. 基于时间最优的注塑机料筒温度控制方法. 仪器仪表学报, 2008,29(3):633-637

Fuzzy-PID control of the screw barrel temperature of a HTF58X2 injection molding machine

Xu Feng*, Yang Yanqing*, Lou Ping**

(* Institute of Automation, Taizhou Vocational and Technical College, Taizhou 318000)

(** Electrical and Automotive Branch, Jiaxing Vocational and Technical College, Jiaxing 314036)

Abstract

The characteristics and requirements of a HTF58X2 injection molding machine's screw barrel temperature control system were analyzed. Considering that traditional PID controllers' screw barrel temperature control system is difficult to obtain the satisfactory temperature control because of its features of non-linearity, pure lag and time variation, an adaptive controller using the online adjustment of PID parameters based on the fuzzy strategy was proposed. The controller can realize the on-line adjustment of its parameters by fuzzy reasoning according to the iste input temperature deviation and the variance rate of the deviation to adapt itself to the best matching of PID parameters under different working conditions. The results of the Matlab/Simulink simulation and experiment show that the fuzzy-PID controller has certain advantages in the aspects of adjusting speed, overshoot and adaptive ability in comparison with the fixed parameter PID controller.

Key words: injection molding machine, screw barrel temperature control system, conventional PID controller, fuzzy controller, simulation and experiment.