

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2024.02.013

基于模糊解耦策略的小型注塑机料筒温度F-PI复合控制器

张绍坤¹, 沈加明², 傅挺², 胡燕海¹

(1. 宁波大学机械工程与力学学院, 浙江宁波 315211; 2. 宁波华美达机械制造有限公司, 浙江宁波 315803)

摘要: 在塑料产品的生产过程中, 注塑机料筒温度的响应速度和稳定性对最终塑料产品的质量具有重要影响。为了提高小型注塑机料筒温度的控制精度, 针对料筒具有的惯性大、非线性、大滞后、强耦合等温度特性, 在模糊控制不能满足控制要求的背景下, 提出了基于相邻加热段之间温差的模糊解耦策略, 通过利用相邻加热段之间的温差信息, 建立模糊解耦控制器, 对各段料筒之间的温度耦合进行解耦控制。实验结果表明, 该控制方法效果良好, 达到目标温度所用时间为1 092 s, 最大超调量只有3%, 但稳态性能较差。为解决稳态性能较差的问题, 在模糊解耦的基础上建立F-PI复合控制器, 通过引入积分环节消除系统在稳态下的偏差。在Matlab/Simulink环境下进行仿真并在注塑机上进行验证, 结果表明, F-PI复合控制方法不仅具有良好的动态响应, 还具有更高的稳态精度, 稳态偏差仅为 ± 1 °C。因此基于模糊解耦策略的F-PI复合控制方法不仅能对料筒的温度耦合进行解耦控制, 还有效提高了系统的稳定性和控制精度, 具有良好的鲁棒性。

关键词: 注塑机; 料筒温度控制; 模糊解耦; F-PI复合控制器; 稳态性能

中图分类号: TQ320.5+2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2024)02-0082-05

F-PI composite controller for barrel temperature of small injection molding machine based on fuzzy decoupling strategy

ZHANG Shaokun¹, SHEN Jiaming², FU Ting², HU Yanhai¹

(1. College of Mechanical Engineering and Mechanics, Ningbo University, Ningbo 315211, China;

2. Ningbo Hwamda Machinery Manufacturing Co., Ltd., Ningbo 315803, China)

Abstract : In the production process of plastic products, the response speed and stability of the barrel temperature of the injection molding machine have an important impact on the quality of the final plastic products. In order to improve the control accuracy of the barrel temperature of a small injection molding machine, for the temperature characteristics of the barrel such as large inertia, nonlinearity, large hysteresis, strong coupling, etc., in the background of the fuzzy control can not meet the control requirements, a fuzzy decoupling strategy based on the temperature difference between neighboring heating segments was proposed, and a fuzzy decoupling controller was established to decouple the temperature coupling between various segments of the barrel through the use of the information on the temperature difference between neighboring heating segments. The experimental results show that the control method works well, the time taken to reach the target temperature is 1 092 seconds, and the maximum overshoot is only 3%, but the steady-state performance is poor. In order to solve the problem of poor steady-state performance, the F-PI composite controller was established on the basis of fuzzy decoupling, and the deviation of the system in steady state was eliminated by introducing the integral link. The simulation was carried out in Matlab/Simulink environment and verified on the injection molding machine. The results show that the F-PI composite control method not only has a good dynamic response, but also has a higher steady state accuracy, and the steady state deviation is only ± 1 °C. Therefore, the F-PI composite control method based on the fuzzy decoupling strategy can not only decouple and control the temperature coupling of the barrel, but also effectively improve the stability and control accuracy of the system, and makes the system has good robustness.

Keywords : injection molding machine ; barrel temperature control ; fuzzy decoupling ; F-PI composite controller ; steady-state performance

通信作者: 胡燕海, 教授, 博士, 主要研究方向为光机电一体化、制造业信息化

收稿日期: 2023-12-22

引用格式: 张绍坤, 沈加明, 傅挺, 等. 基于模糊解耦策略的小型注塑机料筒温度F-PI复合控制器[J]. 工程塑料应用, 2024, 52(2): 82-86.

ZHANG Shaokun, SHEN Jiaming, FU Ting, et al. F-PI composite controller for barrel temperature of small injection molding machine based on fuzzy decoupling strategy[J]. Engineering Plastics Application, 2024, 52(2): 82-86.

小型注塑机因其体积小、操作简单,在国内外有着非常广泛的应用。小型注塑机料筒内部包含有3个加热段:加料段、压缩段、均化段。由于不同加热段控制温度不同,相邻加热段存在温差,造成热量传递以及温度场耦合。目前,大多数注塑机生产厂家的料筒温度控制采用传统的PID控制方法^[1],虽然能达到一定的控制效果,但不能满足市场发展的高精度控制要求。有学者提出模糊控制与PID控制相结合的方法^[2-4]、基于启发式优化算法的PID参数整定方法^[5-6],有效改善了注塑机料筒温度的控制效果,但没有解决料筒不同加热区之间温度场的耦合作用。文献[7]提出的神经网络解耦控制方法在理论上可行,但是由于计算量过大,并不适用于一般的嵌入式工程中。

针对料筒各加热段之间温度场的耦合现象,笔者在分析料筒温度特性和模糊控制特点的基础上,提出模糊解耦控制策略,在此基础上进一步地提出F-PI复合控制与模糊解耦控制器相结合的方法对料筒温度进行控制。

1 料筒温度特性分析

为满足注塑工艺要求,料筒要分段控制,小型机一般为3段,每个加热段包含1或2个加热区,其结构如图1所示。每个加热区由单独的固态继电器(SSR)对加热线圈进行通断控制,从而实现调节温度的目的,温度信号由螺孔处安装的热电偶采样,经过放大滤波输送给主机,再由主机内部A/D转换将数据传输给CPU进行计算得到SSR的通断时间比^[8]。

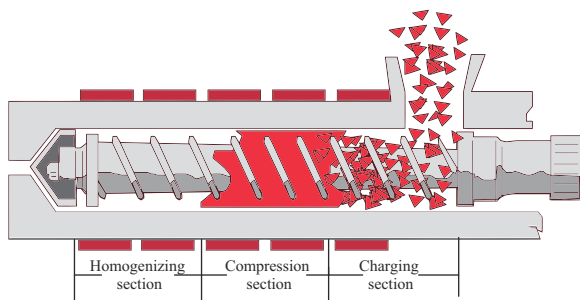


图1 注塑机料筒结构示意图

Fig. 1 Structure of injection molding machine barrel

选用料筒压缩段和均化段中相邻的3个加热区进行实验,通过在生产现场以50%的全功率输入,对每个加热区分次单独施加阶跃电压信号,记录其余两段加热区的变化,得到温度响应曲线如图2所示。

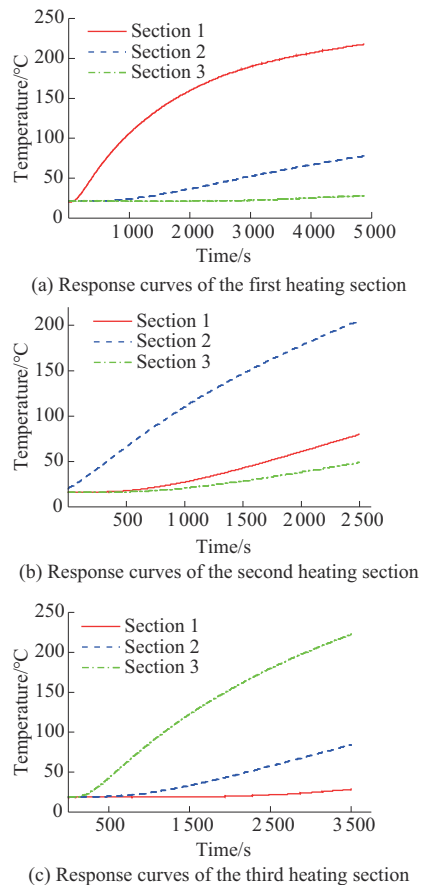


图2 阶跃电压信号下各加热区温度响应曲线

Fig. 2 Temperature response curves of each heating section under step voltage signal

分析图2可知,相邻的加热区之间的温度存在着较大的耦合,而分离的加热区之间温度场的耦合较小,可以忽略不计。在实际生产中,往往忽视了相邻加热区之间温度的耦合对于控制精度的影响,使得温度曲线的超调量增大、过渡时间增长。

注塑机料筒温度控制系统是一个大容积滞后加纯滞后的对象。其动态参数随着筒温变化,而在设定的工作温区附近,动态特性近似呈线性。为了方便控制,通常将其视为线性系统,模型可描述为式(1)。

$$T_a \frac{dY}{dt} + Y = K_0 [U(t)]^2 (t - \tau) \quad (1)$$

式中: Y 为料筒温度; t 为加热时间; T_a 为惯性时间常数; K_0 为放大系数; $U(t)$ 为控制电压; τ 为纯滞后时间。

若控制器输出控制量为 $p(t)$, 而 $p(t)$ 和 $[U(t)]^2$ 成正比关系, 即 $Kp(t) = K_0 [[U(t)]^2]$, 则对式(1)进行拉氏变换, 可得式(2)。

$$T_a s Y(s) + Y(s) = KP(s) e^{-\tau s} \quad (2)$$

式中: $P(s)$ 为经过拉氏变换之后控制器的输出控制量; s 为复变量; K 为比列系数。

将式(2)变换为传递函数形式,则料筒温度控制模型即为一阶惯性纯滞后系统^[9],其传递函数方程见式(3)。

$$G(s) = \frac{Y(s)}{P(s)} = \frac{Ke^{-\tau s}}{T_a s + 1} \quad (3)$$

式中: $G(s)$ 为系统传递函数。

2 料筒温度控制策略

2.1 模糊控制

根据讨论的注塑机料筒温度控制系统模型,以料筒中单独的一段加热区作为控制对象,选取设定温度与实际温度之间的差值 e 和温差的变化率 e_c 作为输入变量 x 的两个分量,构建两输入单输出的模糊控制器。输入和输出变量均划分为7个模糊子集(NB, NM, NS, ZE, PS, PM, PB),分别代表负大、负中、负小、零、正小、正中和正大七个等级,量化等级为 $\{-3, -2, -1, 0, 1, 2, 3\}$,隶属度函数均选择三角形,模糊推理采用 Mamdani 推理法进行计算,清晰化过程采用面积中心法^[10]。根据实际操作经验和控制常识,经过多次调整后得到相应的模糊规则,见表1。

表1 模糊推理规则表

Tab. 1 List of fuzzy inference rules

e	e_c						
	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NB	0	0	0	0	0	0	0
NM	0	0	0	0	0	0	0
NS	0	0	0	0	1	1	1
ZE	0	0	0	0	1	2	2
PS	0	0	0	1	2	2	2
PM	0	1	2	2	2	2	3
PB	0	1	2	3	3	3	3

采用两点法对料筒压缩段第1个加热区模型进行参数辨识^[11],经计算得到其参数 $K=5$, $T=1\ 706$, $\tau=105$,在 Matlab 软件中对其进行仿真,设定目标温度为 $240\ ^\circ\text{C}$,得到其温度曲线图,如图3所示。

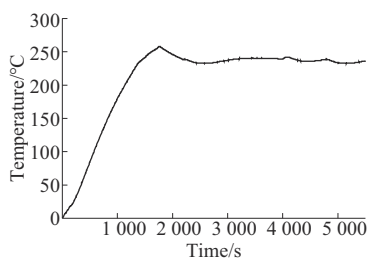


图3 采用模糊控制的温度曲线

Fig. 3 Temperature curve with fuzzy control

由图3可知,当仿真时间到 $1\ 750\ \text{s}$ 时,最大超调量为 $258\ ^\circ\text{C}$,且加热至设定温度所用时间较长,稳态性能较差。因此,模糊控制器虽然具有一定的解耦能力,但对于料筒温度控制区间的强耦合特性来说显然不够。

2.2 模糊解耦控制策略

模糊解耦的目的是消除相邻加热段对当前控制段温度的耦合^[12]。笔者采取以下策略来消除相邻段之间温度的耦合。

以料筒压缩段和均化段中相邻的两个加热区为例,首先对每一个加热区设计一个二维 Mamdani 型模糊控制器,得到其输出 Q_i 。相邻段加热区(第 $i-1$ 区)对当前控制区(第 i 区)的影响作为模糊补偿项,通过设计模糊解耦控制器,得到其模糊补偿项 Q_{ii-1} ,则当前控制段的总控制量 Q 见式(4)。

$$Q = Q_i + Q_{ii-1} \quad (4)$$

模糊解耦控制器的具体设计步骤如下。

设第 $i-1$ 区和第 i 区的实际温度分别为 T'_{i-1} 和 T'_i ,目标温度分别为 T_{i-1} 和 T_i ,则可得式(5)和式(6)。

$$l_{i,i-1} = (T_{i-1} - T_i) - (T'_{i-1} - T'_i) \quad (5)$$

式中: $l_{i,i-1}$ 为第 $i-1$ 段加热区的偏差 e_{i-1} 与第 i 段加热区的偏差 e_i 之差。

$$e_{i,i-1} = T'_i - T'_{i-1} \quad (6)$$

式中: $e_{i,i-1}$ 为第 i 段加热区和第 $i-1$ 段加热区的实际温度之差。

模糊解耦控制器的输入变量分别为 $l_{i,i-1}$ 和 $e_{i,i-1}$,输出变量是模糊补偿项 Q_{ii-1} 。 $l_{i,i-1}$ 大于零代表第 $i-1$ 段加热区的温度偏差比第 i 段加热区的温度偏差大,则第 $i-1$ 段加热区的PWM输出中占空比更大,固态继电器通电时间更长。 $e_{i,i-1}$ 为正表示第 i 段加热区实际温度比第 $i-1$ 段加热区实际温度高,热量便会从温度较高处流向较低处。因此, $l_{i,i-1}$ 和 $e_{i,i-1}$ 越大,则第 i 段加热区所需要的模糊补偿越大,反之则越小。

输入和输出变量的模糊子集均取为 $\{\text{NB}, \text{NM}, \text{NS}, \text{ZE}, \text{PS}, \text{PM}, \text{PB}\}$,其模糊论域为 $[-3, 3]$,隶属函数选择三角形^[13]。结合仿真实验和工程技术人员的操作经验,总结出49条模糊规则如下:

1. If ($l_{i,i-1}$ is NB) and ($e_{i,i-1}$ is NB) then (Q_{ii-1} is NB)

2. If ($l_{i,i-1}$ is NB) and ($e_{i,i-1}$ is NM) then (Q_{ii-1} is NB)

3. If ($l_{i,i-1}$ is NB) and ($e_{i,i-1}$ is NS) then ($Q_{i,i-1}$ is NB)

4. If ($l_{i,i-1}$ is NB) and ($e_{i,i-1}$ is ZE) then ($Q_{i,i-1}$ is NB)

...

49. If ($l_{i,i-1}$ is PB) and ($e_{i,i-1}$ is PB) then ($Q_{i,i-1}$ is PB)

将该控制方法应用于料筒中压缩段的一个加热区,目标温度为200℃,其控制效果如图4所示。

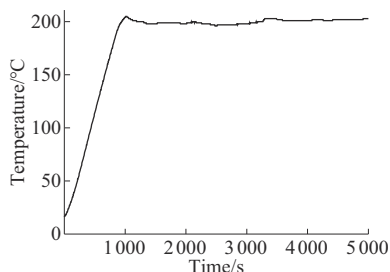


图4 应用模糊解耦控制方法的温度曲线

Fig. 4 Temperature curve with application of fuzzy decoupling control method

分析图4可知,模糊解耦控制方法效果良好,最大超调量为3%,加热至目标温度所用时间为1 092 s,但存在稳态误差。究其原因,模糊解耦控制算法的控制效果十分依赖模糊规则的制定,当模糊规则制定之后,其抵抗外界干扰的能力较弱,不能实现无差的高精度控制。

2.3 F-PI复合控制

二维模糊控制器的输入变量 x 通常有两个分量:偏差和偏差变化率,相当于有了PID控制器中的比例和微分两个环节,缺少积分环节^[14]。

积分控制的作用是消除静差,模糊控制所缺少的是积分环节,积分控制的动态响应较慢,与比例环节结合构建PI控制器可提高响应速度。为了弥补模糊控制器在平衡点附近的盲区缺陷,结合模糊解耦控制策略,将PI控制器与模糊控制器联合构成F-PI复合控制器,其原理图如图5所示。

在输入信号 e 之后设置一个带阈值的模态转换

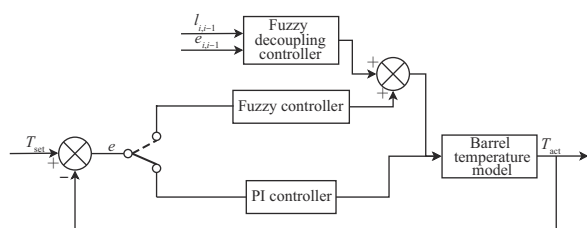


图5 F-PI复合控制器原理图

Fig. 5 Schematic diagram of F-PI composite controller

模块,当 e 大于阈值时,信号传输到模糊控制器,以获得良好的瞬态性能。当 e 小于等于阈值时,信号传输到PI控制器,以获得良好的稳态性能。至此,注塑机料筒加热过程的策略为:当加热段的实际温度(T_{act})低于设定温度(T_{set})30℃以上时,采用100%全功率加热;当 $T_{set}-30 < T_{act} < T_{set}-3$ 时,采用模糊控制方法加热;其他情况下采用PI控制方法加热。

3 仿真实验及其验证

3.1 基于F-PI复合控制的仿真研究

选取靠近落料口的最后一个加热段(第 i 段)进行仿真,与其相隔的加热段(第 $i-2$ 段)对其产生的影响已通过当前控制段相邻的加热段(第 $i-1$ 段)的温度耦合间接反映到当前控制段的温度变化中,即只考虑前一加热段对当前温度控制段的影响,忽略与当前加热段相隔的加热段的影响^[15-17]。设定最后两个加热段的目标温度分别为220℃和200℃,将上述控制策略在Matlab平台上进行仿真,如图6所示。

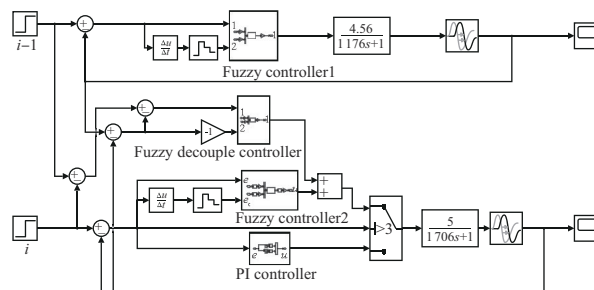


图6 温度控制系统仿真结构

Fig. 6 Simulation structure of temperature control system

分别对两段加热区输入值为220和200的阶跃信号,设定其仿真时间为1 000 s,最后一段加热区的温度响应曲线如图7所示。

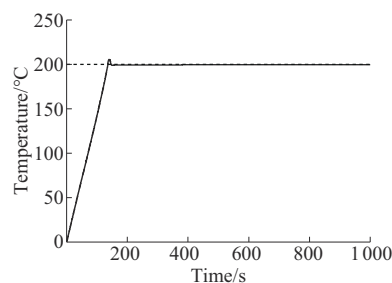


图7 应用F-PI复合控制方法的温度曲线

Fig. 7 Temperature curve with application of F-PI composite control method

由图7分析可知,温度曲线波动极小,稳态误差小于1℃,该系统的稳态性能相比单一的模糊解耦控制有很大的改善。

3.2 实验结果验证

为验证F-PI复合控制在注塑机上的控制效果,在注塑机料筒上选择相邻两段加热区进行温度控制实验,系统采样周期为5 s,输出周期为12 s,分别设定其目标温度为220 °C和200 °C,得到注塑机料筒温度控制曲线如图8所示。

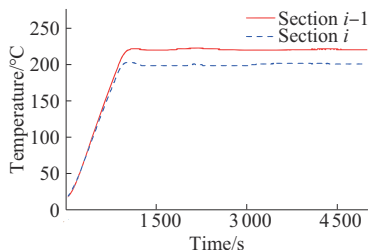


图8 温度控制曲线

Fig. 8 Temperature control curve

分析图8实验数据可知,在初始温度为19 °C的条件下,第*i*-1段达到目标温度所用时间为1 029 s,第*i*段所用时间为945 s,两条温度响应曲线的最大超调量均为3 °C,稳态误差都在±1 °C以内,能够满足控制要求。故结合模糊解耦策略,采用F-PI复合控制不仅能消除料筒相邻加热区之间的温度场耦合,还具有更好的稳态性能,也提升了系统的鲁棒性。

4 结论

(1)针对注塑机料筒不同加热区域间温度场耦合特性,根据相邻加热区的温度信息与温度场耦合规律提出了一种模糊解耦策略,设计了模糊解耦控制器,其输出量作为当前控制段的模糊补偿量。实验表明,该方法解决了料筒相邻加热段之间的耦合问题,提升了系统的瞬态性能,但有较大的稳态误差。

(2)提出了一种F-PI复合控制的注塑机料筒温度控制方法,实验结果表明,该方法不仅具有良好的瞬态性能,稳态精度也较高,几乎没有静差。在实际应用中,F-PI复合控制为生产效率和产品质量的提高提供了有效手段。

参考文献

- [1] 吕燕,赖旭芝,蔡葵.基于鲁棒PID控制器的注射机料筒温度控制系统[J].塑料科技,2020,48(2):93-97.
LYU Yan, LAI Xuzhi, CAI Kui. A temperature control system for injection molding machine barrel based on robust PID controller[J]. Plastics Science and Technology, 2020, 48(2):93-97.
- [2] 王德志.基于模糊PID的注塑机料筒熔料温度自动控制[J].合成树脂及塑料,2019,36(4):70-72.
WANG Dezhi. Automatic control of melt temperature in injection

- molding machine based on fuzzy PID[J]. China Synthetic Resin and Plastics, 2019, 36(4):70-72.
- [3] 曹华,李伟.注塑机料筒温度控制方法研究[J].制造业自动化,2022,44(9):112-115.
CAO Hua, LI Wei. Study on temperature control method of injection molding machine[J]. Manufacturing Automation, 2022, 44(9): 112-115.
- [4] 付饶.注塑机料筒温度调控和计算机仿真研究[J].工程塑料应用,2020,48(1):72-75.
FU Rao. Research on temperature control and computer simulation of injection molding machine barrel[J]. Engineering Plastics Application, 2020, 48(1):72-75.
- [5] 周冬冬,陈明霞,赵金迪.基于混合粒子群算法优化橡胶挤出机Smith-模糊PID温度控制系统[J].机床与液压,2022,50(16):125-130.
ZHOU Dongdong, CHEN Mingxia, ZHAO Jindi. Optimization of smith-fuzzy PID temperature control system for rubber extruder based on hybrid particle swarm optimization algorithm[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2022, 50(16):125-130.
- [6] 张少芳,李献军,王月春.基于PSO-BP-PID神经网络的注塑机料筒温度预测算法研究[J].合成树脂及塑料,2022,39(1):60-64.
ZHANG Shaofang, LI Xianjun, WANG Yuechun. Temperature prediction algorithms of injection molding machine barrel based on PSO-BP-PID neural network[J]. China Synthetic Resin and Plastics, 2022, 39(1):60-64.
- [7] 胡亚南,张洪兴,丰会萍.基于模糊神经网络的注塑机料筒温度控制策略[J].塑料,2019,48(4):91-95.
HU Yanan, ZHANG Hongxing, FENG Huiping. Temperature control strategy of injection molding machine barrel based on fuzzy neural network[J]. Plastics, 2019, 48(4):91-95.
- [8] 毕宏伟,陈明华.节能减排在注塑机上的应用[J].塑料,2013,42(4):49-51.
BI Hongwei, CHEN Minghua. Conserving energy and reducing emissions technology used in injection moulding machine[J]. Plastics, 2013, 42(4):49-51.
- [9] 陶西孟,罗亮,刘知贵.基于分段PID的注塑机料筒温度控制算法研究与仿真[J].塑料,2015,44(3):68-70.
TAO Ximeng, LUO Liang, LIU Zhigui. Control algorithm study and simulation of temperature for injection molding machine based on piecewise PID[J]. Plastics, 2015, 44(3):68-70.
- [10] 隋鹏昊.基于模糊策略的注塑机非线性高精度保压控制[D].上海:上海交通大学,2019.
SUI Penghao. Nonlinear high precision pressure holding control of an injection molding machine based on fuzzy strategy[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2019.
- [11] 邱亮.基于阶跃辨识的PID自整定算法研究及其应用[D].上海:上海交通大学,2013.

(下转第108页)