

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2023.04.013

基于GA优化的模糊PID塑料挤出机温度控制系统设计

孟锦涛, 国海, 王磊, 张帝

(安徽科技学院电气与电子工程学院, 安徽蚌埠 233100)

摘要: 在塑料挤出机生产加工过程中,温度的响应速度和稳定性是影响塑料产品质量的关键因素。为解决塑料挤出机温度系统存在滞后性、高超调量和抗干扰能力低等问题,在传统比例-积分-微分(PID)控制方式和模糊PID控制方式的研究基础上,提出基于遗传算法优化的模糊PID塑料挤出机温度控制系统。新系统设计结合了塑料挤出机的主要结构功能和工艺参数,对塑料挤出机模糊PID控制系统参数进行优化,应用遗传算法对模糊控制器隶属函数进行动态优化,降低模糊规则的主观和盲目性。此外还利用MATLAB与Simulink环境进行仿真,通过3组控制方式的仿真波形曲线对比分析得出,基于遗传算法(GA)优化的模糊PID在控制效果方面优于模糊PID控制和传统PID控制,且其控制系统无超调、上升时间短、抗干扰能力强。因此基于GA优化的模糊PID塑料挤出机温度控制系统稳定性更强、温度控制精度更高,满足了塑料挤出机对温度控制精度的要求。

关键词: 遗传算法;稳定控制;温度精度;塑料挤出机;模糊比例-积分-微分

中图分类号: TQ320 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2023)04-0084-07

Design of Fuzzy PID Temperature Control System for Plastic Extruder based on GA Optimization

Meng Jintao, Guo Hai, Wang Lei, Zhang Di

(School of Electrical and Electronic Engineering, Anhui University of Science and Technology, Bengbu 233100, China)

Abstract : During the production and processing of plastic extruder, the response speed and stability of temperature are the key factors affecting the quality of plastic products. In order to solve the problems of hysteresis, high overshoot and low anti-interference ability of the plastic extruder temperature system, based on the research of traditional proportion integration differentiation (PID) control and fuzzy PID control, a fuzzy PID temperature control system for plastic extruder was proposed based on genetic algorithm optimization. The new system design combines the main structural functions and process parameters of the plastic extruder, The parameters of the fuzzy PID control system of the plastic extruder were optimized, and the membership function of the fuzzy controller was dynamically optimized by genetic algorithm to reduce the subjectivity and blindness of the fuzzy rules. In addition, MATLAB and Simulink were used for simulation. Through the comparative analysis of the simulation waveform curved of three groups of control modes, it was concluded that the fuzzy PID control based on genetic algorithm optimization was superior to the fuzzy PID control and traditional PID control in control effect, and its control system has no overshoot, short rise time and strong anti-interference ability. Therefore, the fuzzy-PID temperature control system of plastic extruder based on GA optimization has stronger stability and higher temperature control accuracy, which meets the requirements of plastic extruder for temperature control accuracy.

Keywords : genetic algorithm ; stability control ; temperature accuracy ; plastic extruder ; fuzzy proportion integration differentiation

作为发展中的制造业大国,我国各类塑料型材的需求量一直呈现出指数增长。随着中国制造向

中国创造的转变,“开源节流,增质提效”一度成为企业生产的加工理念。在这个过程中,塑料挤出机

基金项目: 安徽省自然科学基金项目(2208085MF169),安徽省教育厅自然基金重大项目(2022AH040234)

通信作者: 孟锦涛,硕士,研究方向为塑料挤出机过程控制

收稿日期: 2023-02-24

引用格式: 孟锦涛,国海,王磊,等.基于GA优化的模糊PID塑料挤出机温度控制系统设计[J].工程塑料应用,2023,51(4):84-90.

Meng Jintao, Guo Hai, Wang Lei, et al. Design of fuzzy PID temperature control system for plastic extruder based on GA optimization[J]. Engineering Plastics Application, 2023, 51(4): 84-90.

的温度控制精度也在不断优化进步。目前各塑料型材加工企业采用的塑料挤出机料筒温度控制基本上采用比例-积分-微分(PID)控制方式^[1]。由于PID控制方式下塑料挤出机易受到车间工况环境、设备结构和参数整定不佳等因素的干扰,难以满足精密挤出型产品品质要求,同时还会造成浪费。因此为了提高塑料型材产品的品质,国内一些学者^[2]通过模糊PID控制方式来提高塑料挤出机温度的精度和稳定性,这在一定程度上降低了温度控制系统的超调量和稳定性,提高了产品的品质。由于模糊规则的制定主要依据经验获得,没有办法保证每条规则达到最优。针对该种情况,笔者提出了基于遗传算法优化的模糊PID塑料挤出机温度控制系统设计,新系统设计从设备结构功能出发,通过遗传算法与模糊PID控制器结合来优化控制参数,减少温度波动变化误差^[3]。这样设计的塑料挤出机可以进一步提高塑料型材的品质,降低各类资源消耗,缩短塑料型材生成周期,进而让塑料型材加工企业在市场上更具有竞争力。此外,我国在近些年的崛起中,虽然各行业的经济得到快速的发展,但是轻视了环境问题,其中土壤、河流、大气、地下水等受到了严重污染。所以对于塑料挤出机温度的精准控制研究,一方面使得塑料型材加工企业提质增效,让企业在市场上更具竞争力,另一方面对环境保护有着重要意义。

1 塑料挤出机温控系统整体设计

1.1 塑料挤出机系统结构

塑料挤出机主体结构如图1所示,主要包括挤压系统模块、加热冷却模块和传动模块三个模块,其中挤压系统模块主要是通过设备中间转速的螺杆和机头建立一定压力,把熔体按照产品工艺要求挤出机头。传动模块主要是驱动螺杆按照一定转矩转动。加热冷却模块作为温控系统核心,主要包括通过加热器高温熔化塑料使之满足一定的黏流温度,冷却装置主要作用是保证熔融塑化过程所需温度,排除塑料型材过程余热,进而避免由高温导

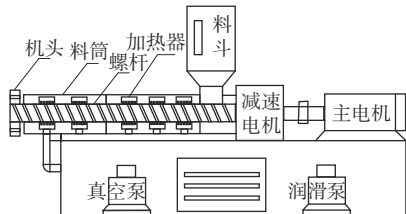


图1 塑料挤出机主体结构

致塑料型材表面产生气泡,进一步提高塑料型材品质。

1.2 塑料挤出机温控系统整体框图

塑料挤出机温控系统如图2所示,其组成包括PC计算机和下位机,其中PC计算机主要实现参数设置和人机交互等功能;下位机可编程逻辑控制器(PLC),主要实现数据的采集、程序控制等功能。

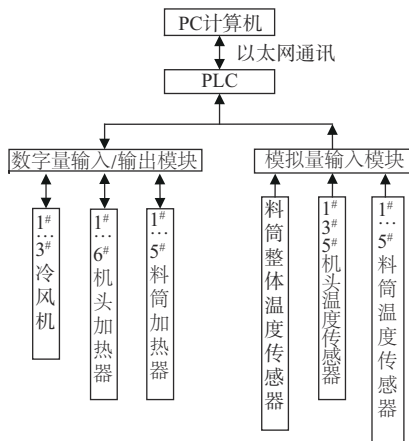


图2 塑料挤出机温控系统原理图

从图2可以看出,设备的温控系统是多区域、连续的。其工作方式是通过温度传感器热电偶来检测各模块的温度,并通过转换模拟量传给PLC,PLC再把模拟量转换成数字量。然后通过遗传算法(GA)优化的模糊PID算法对温度值进行设定处理,进一步得到控制量给PLC,再通过输出高低电平来控制继电器通断,进而实现对塑料挤出机料筒、机头和冷风机各模块的控制,从而实现对塑料挤出机温度系统的控制^[4-5]。

1.3 塑料挤出机温度工艺要求

在塑料型材成型过程中,温度的变化直接决定了产品品质,温度变化过高或者过低会导致产品塑化不足或塑化过度,进而影响产品应力和拉伸屈服强度。在型材挤出过程中,料筒各部分加热器和机械摩擦产生的温度都会导致料筒温度变化,这就要求温控系统满足如下一些工艺要求。

(1)温度控制精度:挤出机在生成过程中,温度的数值处于动态变化中,一般要求其波动范围为 $\pm 2^{\circ}\text{C}$ 。

(2)超调量:塑料挤出机的各个温区是互相挨着分布的,在加热阶段容易导致各个温区温度波动干扰,温度超调量过大会导致型材产品出现气泡和烧焦变色等问题。

2 塑料挤出机温控系统优化设计

2.1 塑料挤出机温度控制系统模型的建立

由于塑料挤出机的温度系统较为复杂,存在大量不确定因素影响温度变化,例如原材料温度、螺杆与原材料之间挤压应力、各温区的耦合、机头温度、剪切热等因素。所以塑料挤出机的温度系统的确切模型很难建立,只能通过参数辨识法来分析计算出塑料挤出机料筒温度控制系统的相应参数,进而得出传递函数模型。

对于塑料挤出机料筒温度变化曲线,采用一阶系统传递函数即可满足要求,通过一阶系统响应曲线法进行辨识,图3为挤塑机料筒加热过程料筒变化曲线,考虑一阶系统,传递函数 $G(s)$ 公式如式(1)。

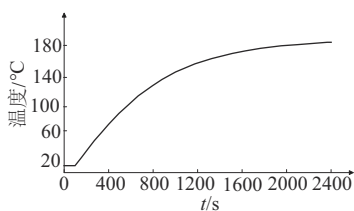


图3 料筒温度变化曲线图

$$G(s) = \frac{K}{T \cdot s + 1} e^{-\tau s} \quad (1)$$

式中: $G(s)$ ——系统传递函数;

K ——放大系数;

τ ——时滞;

s ——空间变量符号;

T ——时间常数。

计算得出三个参数即可建立塑料挤出机数学模型。

通过传递函数得出单位阶跃响应方程式,如公式(2):

$$y(s) = G(s)u(s) = \frac{K}{T \cdot s + 1} \frac{1}{s} e^{-\tau s} \quad (2)$$

式中: $y(s)$ ——输出量的拉普拉斯变换;

$u(s)$ ——输入量的拉普拉斯变换。

通过拉普拉斯反变换得出:

$$y(t) = \begin{cases} 16 & t < \tau \\ K(1 - e^{-\frac{t-\tau}{T}}) & t \geq \tau \end{cases} \quad (3)$$

式中: $y(t)$ ——输出量的拉普拉斯反变换。

将阶跃响应标准化后,放大系数 K 即为新的稳态值, $K = y(\infty)$ 。从响应上取两个采样点 (t_1, y_1) 和 (t_2, y_2) ,代入上式可得:

$$T = \frac{t_2 - t_1}{\ln \frac{K - y_1}{K - y_2}} \quad (4)$$

$$p = \frac{\ln \frac{K - y_1}{K}}{\ln \frac{K - y_2}{K}} \quad (5)$$

$$\tau = \frac{t_2 p - t_1}{p - 1} \quad (6)$$

式中: p ——换元变量,为了方便求解时滞参数 τ 。

通过计算分析得出塑料挤出机数学模型传递函数为公式(7)。

$$G(s) = \frac{18}{160s + 1} e^{-50s} \quad (7)$$

2.2 模糊PID控制算法

模糊PID控制算法在机械加工设备中是种常用的优化控制方法,相比较以往PID控制算法,模糊PID控制算法在实际工作中可以结合扰动因素影响来建立更加精准的模型^[6],进一步降低误差,提高设备生产效率和加工精度,对企业开源节流,提质增效有很大帮助。

(1)模糊PID控制器设计。

塑料挤出机温度模糊PID控制系统把采集的实际温度数据与设定的温度进行对比分析,计算出误差(e)和误差变化率(ec)作为模糊控制器输入量,经过模糊化、模糊推理和解模糊处理得到 $\Delta K_p, \Delta K_i$ 和 ΔK_d ,进而得到模糊PID参数^[7],即:

$$K_p = \ddot{K}_p + \Delta K_p \quad (8)$$

$$K_i = \ddot{K}_i + \Delta K_i \quad (9)$$

$$K_d = \ddot{K}_d + \Delta K_d \quad (10)$$

上述3个算式中, $\ddot{K}_p, \ddot{K}_i, \ddot{K}_d$ 是PID控制器的设定待整定的基础数值,算式中 $\Delta K_p, \Delta K_i, \Delta K_d$ 是 K_p, K_i, K_d 不断进行修正数值,完成对固定参数PID的模糊优化控制。塑料挤出机设有模糊PID控制器,结构如图4所示。

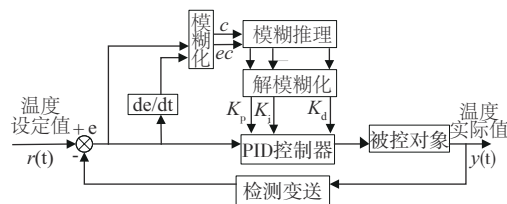


图4 模糊PID结构图

(2)输入输出量模糊分布。

模糊控制器作为控制系统的核心模块,第一步

需要定下模糊集合;第二步选择参数变量的论域;第三步需要将温度误差与其温度误差变化率设定为控制系统输入量,在线修正数值设定为输出变量,输入输出变量论域分别为 $[-6,6]$ 、 $[-3,3]$ 。同时为确保仿真的准确性,采取高斯函数同三角函数进行融合,利用重心法实现解模糊计算。

(3)模糊规则制定。

在模糊规则设计过程中,PID参数值通过 e 和 ec 来确定,用设计的模糊规则代表经验值,在温度控制系统中,通过不断检验温度误差和误差变化率的联系,依照模糊推理的三个参数值来进行PID参数

自整定^[8]。最后通过PID控制器进行参数值的在线修正,进而使得模糊PID温度控制系统获取最理想的控制效果。

通过结合大量温度实际测得数据,采取经验试凑方法不断进行测试获取理想的调整关系。建立模糊控制规则,将输入变量 e 和输出量 $\Delta K_p, \Delta K_i, \Delta K_d$ 的论域划分为7个模糊子集{NB(负大)、NM(负中)、NS(负小)、ZO(零)、PS(正小)、PM(正中)、PB(正大)};输入变量 ec 划分为7个模糊子集{NB(负大)、NM(负中)、NS(负小)、ZO(零)、PS(正小)、PM(正中)、PB(正大)}^[9],并制定模糊规则表见表1。

表1 模糊规则表($K_p/K_i/K_d$)

e	ec						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PB/PN/PS	PB/PN/PS	PM/NM/PB	PN/PN/NB	PS/NS/NB	ZO/ZO/NM	ZO/ZO/PS
NM	PB/PN/PS	PB/NB/PS	PM/NM/NB	PS/NS/NM	PS/NS/NB	ZO/ZO/PS	NS/ZO/PS
NS	PM/PN/ZO	PM/PN/PS	PM/PN/NM	PS/PN/NM	ZO/ZO/NS	PB/NS/PS	NB/NS/PS
ZO	PM/NM/ZO	PM/NS/ZO	PS/NS/NS	ZO/ZO/NS	NS/PN/NB	NM/PM/NS	NM/PM/NS
PS	PS/NM/ZO	PB/PN/NB	ZO/ZO/ZO	NS/PS/ZO	NS/PS/ZO	NM/PM/ZO	NM/PM/ZO
PM	PS/ZO/NB	PB/PN/NB	NS/PN/PS	NM/PN/PS	NM/PS/ZO	NM/PB/PS	NS/PS/PB
PB	ZO/ZO/PB	ZO/ZO/PM	NM/PS/NM	NM/PN/PM	NM/PN/PS	NB/PB/PS	NB/PB/PB

2.3 基于遗传算法优化的模糊PID控制器

GA是通过模拟自然界遗传机制和生物进化论形成的一种并行随机搜索最优化的方法^[10],其为一些复杂繁琐的解空间提供了一种接近最优解的有效方法,所以在工业加工过程中有着广泛应用。由于塑料挤出机温度模糊PID控制器的隶属度函数和模糊控制规则没有明确的依据,所以笔者通过遗传优化算法与塑料挤出机模糊PID控制器的隶属度函数和模糊规则进行在线迭代,最终得到理想的隶属度函数和模糊规则。

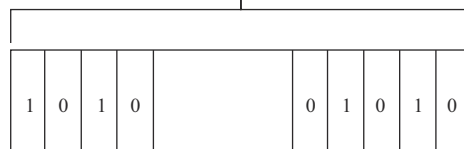
(1)二进制编码。

编码常用二进制和实数这两种方式来定义优化问题参数,在塑料挤出机的模糊PID控制器的参数优化中,采用二进制编码方法。已知塑料挤出机的模糊PID控制器的参数为 K_p, K_i, K_d ,每个参数有49种组合^[11],三个参数共计147种组合。

采用二进制编码,“000”~“111”分别代表十进制0~7这8个数,分别代表[NB(负大)、NM(负中)、NS(负小)、NZ(负零)、PZ(正零)、PS(正小)、PM(正中)、PB(正大)]八种规则^[12-13]。故每条染色体中包括PID三个参数,每条染色体共计441个基因。图5表示个体染色体二进制编码。

通过遗传算法全局寻找最优解,解码后如图6

1条“染色体”包括441个基因(0/1)



K_p, K_i, K_d 的模糊规则信息

图5 个体二进制编码

1	2	2	3	4	5	6
2	1	4	5	6	6	7
2	3	4	4	5	6	7
3	2	4	1	5	6	3
1	3	6	8	7	5	2
1	2	6	8	6	5	3
6	8	7	6	4	5	1

图6 解码规则

所示,表示PID三个参数中 K_d 的规则表,其中 K_p, K_i 与 K_d 类似。

将 K_p, K_i, K_d 的解码规则带入到塑料挤出机模糊PID控制器中,通过公式(8)、公式(9)、公式(10)计算得出PID控制器 K_p, K_i, K_d 的更新数值,当迭代运行结束后,保留最佳参数组合作为最优解。

(2)适应度函数。

在全局寻优的过程中,要采用适应度函数对个

体优劣程度进行评价,在这个过程中常采用积分性能指标 $J(\text{ITAE})$, $J(\text{ITAE})$ 可以更充分反映控制系统的稳定性和准确性,其计算公式见公式(11):

$$J(\text{ITAE}) = \int_0^{\infty} t |e(t)| dt \quad (11)$$

式中: t ——时间。

$J(\text{ITAE})$ 值越小,说明 t 越短,系统精度越高。

为了更好计算,将上述公式优化为公式(12):

$$f = \frac{1}{1 + J(\text{ITAE})} \quad (12)$$

式中: f ——适应度函数。

这样适应度越大,寻优效果越好,为了方便计算机计算,可将上述公式积分函数进行离散化处理,得出公式(13):

$$\Delta J = t |e(t)| \Delta T \quad (13)$$

式中: ΔT ——采样单位时间周期。

(3)基于GA的寻优步骤。

①初始化种群。设置种群数量为40,迭代次数40,交叉变异概率分别为0.9和0.1。计算种群的适应度的总值、均值和最值,保存到适应度函数矩阵^[14]。

②选择。利用轮盘赌的形式,对个体间进行适应度的比较,选择高适应度的个体,通过不断进行重复选取工作,适应度高的个体被选择的概率会变大^[15-16],个体被选中概率如公式(14)、公式(15):

$$P = \frac{f_i}{F} \quad (14)$$

$$F = \sum_{i=1}^m f_i \quad (15)$$

式中: f_i ——适应度值;

m ——种群个数;

P ——个体选中的概率;

F ——种群适应度总和。

③交叉。笔者采用多点交叉的方式,即在选择的几个染色体中,把其染色体初始和末尾段复制到子代对应的始末段中,删除父代中的基因段,按照顺序填入到子代。

④变异。变异是指种群个体的某点基因发生改变的过程。变异概率 $P_{\text{变异}}$ 大小决定着局部寻优的能力,一般在0.01~0.1之间。

3 仿真对比分析

遗传算法迭代次数是40,单个染色体基因数一共是441,初始种群数是40,交叉变异概率分别为0.9和0.1^[17],通过MATLAB进行仿真分析,输入信号

为单位为1的阶跃函数,得到如图7所示的适应度函数分布和图8所示的目标函数分布。

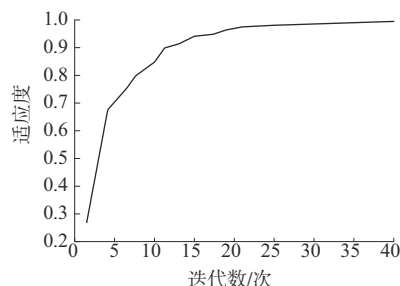


图7 适应度函数分布图

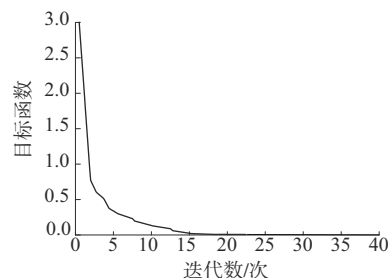


图8 目标函数分布图

由图8分析可得,目标函数值与迭代次数成反比,目标函数曲线随着迭代次数增加而下降,迭代数为17时曲线趋向0,即积分性能指标为0,此时控制效果较为理想。

为了验证遗传算法的精度优化和稳定性,对适应度函数进行个体解码,得到参数 K_p, K_i, K_d 的最优模糊控制规则表2,当优化效果较好时,该组参数为: $K_p=7.53, K_i=0.46, K_d=0.92$,并投入模糊PID控制器。

图9表示三组模式下塑料挤出机温度控制系统仿真模型,塑料挤出机温度控制系统仿真流程为:首选在初始状态 $t=0$ 时输入单位阶跃信号,采用 $K_p=7.53, K_i=0.46, K_d=0.92$ 为最理想PID参数,通过仿真得到三组控制方式仿真波形如图10所示。

通过图10波形仿真图从整体分析可得,3组控制方法(传统PID、模糊PID以及基于遗传算法模糊PID控制)中传统PID控制效果最差,基于遗传算法模糊PID控制效果最佳。

为了进一步分析塑料挤出机的温度系统性能,对上述三组控制方式分别从上升时间 t_p ,调节时间 t_s ,超调量 σ 三个方面进行对比分析,结果列于表3。

通过表3对比分析得出,基于遗传算法的模糊PID控制算法的上升时间最短、响应速度最快且无超调量,控制精度高。这显示遗传算法对模糊规则表的寻优效果是非常可观的,在模糊控制中可以提

表2 优化后的模糊规则表

e	ec						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	NM/PM/PS	PB/NM/PS	PM/NS/PM	PM/PS/NM	PB/NS/NB	ZO/ZO/NM	PM/ZO/PS
NM	PB/NM/PS	PB/NB/PS	PM/NS/NB	PS/NS/NM	PB/NS/NB	PM/ZO/PS	NS/ZO/PS
NS	ZO/PN/ZO	PM/PN/PS	PM/PN/NM	PS/PN/PM	PB/ZO/NS	PB/NS/PS	NB/NS/PS
ZO	PM/NS/ZO	PM/NS/ZO	PS/NS/NS	ZO/ZO/NS	NM/PN/NB	NM/PM/PS	NM/PM/NS
PS	PS/NM/ZO	PB/PN/ZO	ZO/ZO/ZO	NS/PS/ZO	NS/PS/ZO	NS/PM/ZO	NM/PM/ZO
PM	PS/ZO/NB	PB/PN/NB	NS/PN/PS	NM/PN/PS	NM/PS/ZO	NS/PB/PS	NS/PS/PB
PB	NM/ZO/PB	ZO/PS/PM	NM/PS/NM	NM/PS/PM	NS/PN/PS	NB/PB/PS	NS/PB/PB

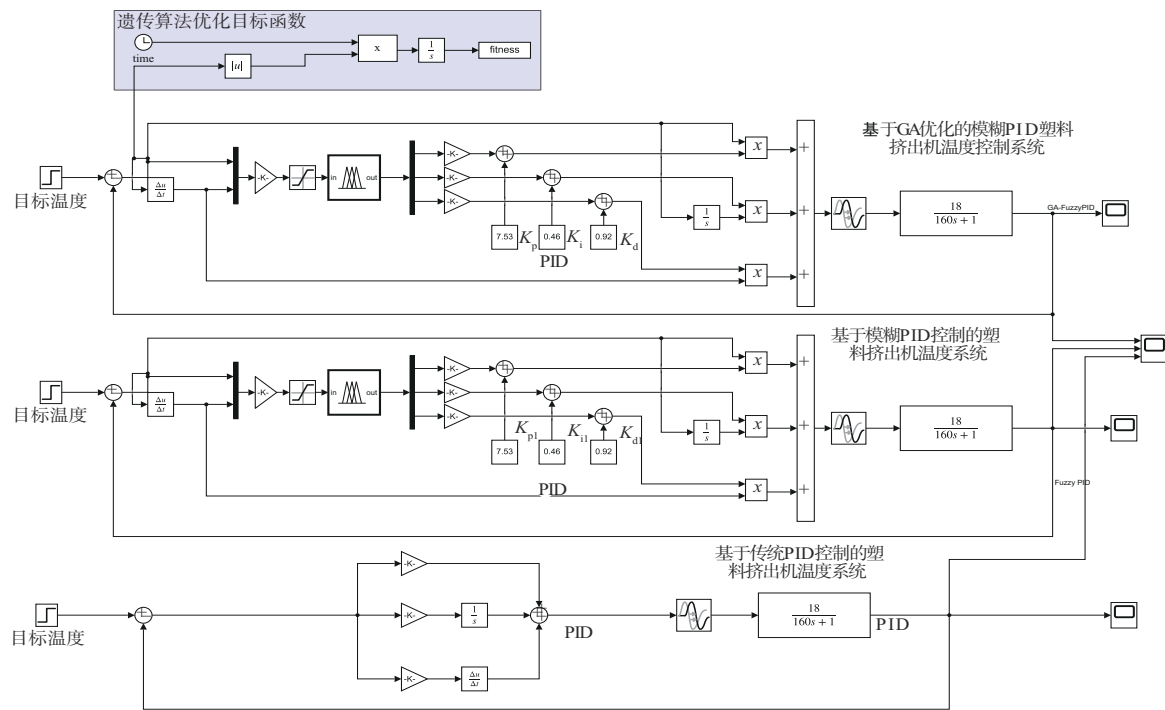


图9 塑料挤出机温度控制系统仿真模型

表3 性能指标对比表

控制方式	t_p/s	t_s/s	$\sigma/\%$
PID控制	0.58	1.02	8
模糊PID控制	0.51	0.82	1
基于GA模糊PID控制	0.48	0.66	0

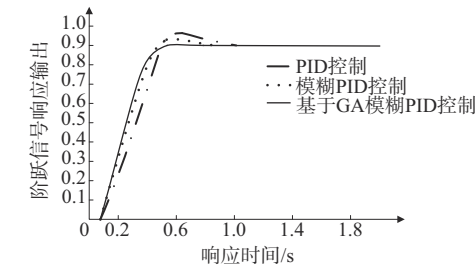


图10 真波形图

高系统性。

为了验证在扰动环境下三组控制方式下塑料挤出机的温度变化,在仿真1.8 s时加入扰动,仿真波形如图11所示,从波形分析得出,基于遗传算法

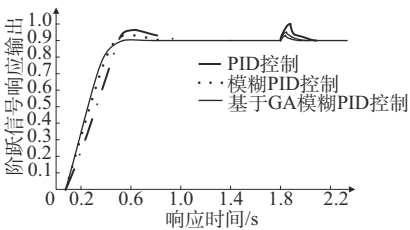


图11 扰动下仿真波形图

优化的模糊PID控制方式下抗干扰能力分别优于模糊PID与传统PID控制方式。

4 结论

针对基于GA优化的模糊PID塑料挤出机温度控制系统系统建模,通过传统固定参数PID控制、模糊PID控制以及基于遗传算法的模糊PID控制三组算法进行仿真建模分析和试验,结合变化曲线对比分析得出:基于遗传算法的模糊PID控制方式下的温度控制系统无超调量。同固定参数PID和模糊

PID控制系统相比,其响应时间更短,稳定性更强,温度控制精度更高。满足塑料挤出机温度控制精度要求。

参考文献

- [1] 徐斌,陈志强,陈燕飞,等.双螺杆挤出机在高比例溶剂POE脱挥及挤压造粒中的应用[J].中国塑料,2022,36(11):108-111.
Xu Bin, Chen Zhiqiang, Chen Yanfei, et al. Application of twin-screw extruder in high proportion solvent POE devolatilization and extrusion granulation[J]. China Plastics, 2022, 36(11):108-111.
- [2] 吴瑞明,冯浩然,傅阳,等.基于模糊PID控制的差动AGV稳定性控制研究[J].机床与液压,2022,50(6):55-60.
Wu Ruiming, Feng Haoran, Fu Yang, et al. Research on stability control of differential AGV based on fuzzy PID control[J]. Machine tool and Hydraulics, 2022, 50(6):55-60.
- [3] 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[J]. Machine Tool and Hydraulic, 2022, 50(16):125-130.
- [4] 徐秀英.模糊PID控制在塑料挤出机中的应用研究进展[J].合成树脂及塑料,2021,38(6):75-78.
Xu Xiuying. Research progress of application of fuzzy PID control in plastic extruder[J]. Synthetic resin and plastics, 2021, 38(6):75-78.
- [5] Lee G S, Hwang P I, Moon s. Reactive power control of hybrid multi-terminal HVDC systems considering the interaction between the AC network and multiple LCCs. [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2021, 36(5):4 562-4 574.
- [6] 彭章杰.基于Smith模糊PID的空气能热泵过程控制系统研究[D].武汉:武汉纺织大学.
Peng Zhangjie. Research on process control system of air energy heat pump based on Smith fuzzy PID[D]. Wuhan: Wuhan Textile University.
- [7] Masuma M, Nuru B, Zarifa J. Development of the principles of fuzzy rule-based system for hepatocellular carcinoma staging[J]. EUREKA: Physics and Engineering, 2021, 3:3-13.
- [8] Li Delong, Lu Yimin, Ge Xin. Fuzzy self-tuning PID control of MC3 LLC resonant LED drivers[J]. Journal of Power Electronics, 2021, 21(5):782-791.
- [9] 赵楚楚,王子微,丁冠华,等.基于模糊逻辑的改进自适应IMM跟踪算法[J].信号处理,2021,37(5):724-734.
Zhao Chuchu, Wang Ziwei, Ding Guanhua, et al. Improved adaptive IMM tracking algorithm based on fuzzy logic[J]. Signal Processing, 2021, 37(5):724-734.
- [10] Zhao J, Wu C, Yang G, et al. Kinematics analysis and workspace optimization for a 4-DOF 3T1R parallel manipulator[J]. Mechanism and Machine Theory, 2022, 167(2). DOI: 10.1016/j.mechmachtheory.2021.104484.
- [11] Fukuda A, Watanabe M. Pathogenic potential of human SLC12 A5 variants causing KCC2 dysfunction. [J]. Brain research, 2019, 1 710 (1):1-7.
- [12] Jongso A, Church L, Nchama V, et al. MultiDose priming regimens of PfSPZ vaccine: safety and efficacy against controlled human malaria infection in equatoguinean adults[J]. The American Journal of Tropical Medicine and Hygiene, 2022. DOI: 10.4269/ajtmh.21-0942.
- [13] Sakeah E, Bawah A A, Kuwolamo I, et al. How different incentives influence reported motivation and perceptions of performance in Ghanaian communitybased health planning and services zones[J]. BMC Research Notes, 2023, 16(1). DOI: 10.1186/s13104-023-06286-2.
- [14] 宫金良,王伟,张彦斐,等.基于农田环境的农业机器人协同作业策略[J].农业工程学报,2021,37(2):11-19.
Gong Jinliang, Wang Wei, Zhang Yanfei, et al. Cooperative operation strategy of agricultural machinery and population based on farmland environment[J]. Journal of Agricultural Engineering, 2021, 37(2):11-19.
- [15] Markus N, Marie K, Julie S, et al. Atherogenic lipidomics profile in healthy individuals with low cardiorespiratory fitness: The HUNT3 fitness study[J]. Atherosclerosis, 2022, 343:51-57.
- [16] 汪禹宏,张屹.基于适应度指导交配限制策略的重组算子与多目标优化研究[J].电子学报,2022,50(3):710-717.
Wang Yuhong, Zhang Yi. Research on recombination operator and multiobjective optimization based on fitness guidance mating restriction strategy[J]. Journal of Electronics, 2022, 50(3):710-717.
- [17] Xu Fei, Qin Zengshi, Ning Linpeng, et al. Research on computing offloading strategy based on Genetic Ant Colony fusion algorithm[J]. Simulation Modelling Practice and Theory, 2022, 118. DOI:10.1016/j.simpat.2022.102523.