

木塑复合材料挤出机料筒温度的控制方法

唐文秀¹, 刘凯伟¹, 孙丽萍¹, 王海刚²

(1. 东北林业大学机电工程学院, 黑龙江哈尔滨 150040; 2. 东北林业大学材料科学与工程学院, 黑龙江哈尔滨 150040)

摘要: 利用模糊推理对比例-积分-微分控制器(PID控制)参数进行在线调整,再用粒子群(PSO)优化算法对模糊PID控制器的惯性权重系数进行自适应调整,并对量化因子及控制器参数进行优化后用于木塑复合材料(WPC)挤出机料筒温度控制。结果表明: PSO优化模糊PID控制器,可加快料筒升温速度,减小超调量,缩短调节时间,增强抗干扰能力,有效改善料筒温度的控制效果,生产的WPC板材拉伸强度及生产效率明显提高。

关键词: 木塑复合材料; 挤出机; 料筒温度; 粒子群优化; 模糊PID; 性能

中图分类号: TB332

文献标识码: B

文章编号: 1001-8654(2017)04-0043-04

Barrel Temperature Control of Extruders for Making Wood Plastic Composites

TANG Wen-xiu¹, LIU Kai-wei¹, SUN Li-ping¹, WANG Hai-gang²

(1. College of mechanical and electrical engineering, Northeast Forestry University, Harbin 150040, Heilongjiang, China;

2. Material Science and Engineering College, Northeast Forestry University, Harbin 150040, Heilongjiang, China)

Abstracts: Parameters of a proportion-integral-derivative (PID) controller were adjusted online with fuzzy inference and a particle swarm optimization (PSO) algorithm were applied to the fuzzy PID controller to adjust the inertia weight coefficient and optimize quantitative factors and controller parameters. Then the fuzzy PID controller, optimized by the PSO algorithm, was applied to the barrel temperature control of the extruders for wood-plastic composites (WPC). Results showed that the optimized fuzzy PID controller could increase heating rate, reduce overshoot, shorten adjustment time, enhance anti-jamming capability and effectively improve control effects of the barrel temperature. Tensile strength and production efficiency of the WPC panels were improved significantly.

Key words: wood-plastic composites; extruder; barrel temperature; particle swarm optimization; fuzzy PID; performance

木塑复合材料(Wood Plastic Composites, WPC)的成型方式包括:挤出成型、热压成型和注射成型,其中挤出成型在工业生产中应用最广,双螺杆挤出机是最常用的挤出设备。

WPC挤出工艺中,挤出机料筒温度的控制精度是影响板材塑化效果和结构的关键因素之一^[1]。如以聚氯乙烯树脂(PVC)为基体的WPC,其料筒二段温度设定值为170℃。挤出过程中,若料筒温度过高,则WPC拉伸强度差;反之,则板材松散、不成型^[2]。现行生产中常采用模糊比例(proportion)-积分(integral)-微分(derivative)控制(PID控制),但料筒温度调整时间长,温度波动大,控制效果有

收稿日期: 2016-10-28; 修改日期: 2017-05-27

基金项目: 国家“十二五”科技支撑计划课题“木塑复合材料挤出制造关键技术研究示范”(2012BAD32B04)。

作者简介: 唐文秀(1964—),女,东北林业大学机电工程学院教授。

限^[3-5], 影响到 WPC 产品的质量与产量。

鉴此, 笔者利用粒子群优化算法 (Particle Swarm Optimization, PSO) 收敛速度快的优点, 采用自适应的调整机制对惯性权重进行调整, 对模糊 PID 控制器的偏差和偏差变化率的量化因子及控制参数进行优化后, 用于料筒温度控制, 以期提升其控制精度, 提高 WPC 质量和生产效率。

1 PSO 优化模糊 PID 料筒温度控制器设计

1.1 模糊 PID 控制

料筒温度 PID 控制原理, 如式 (1) 所示。

$$u(k) = K_p e(k) + K_I \sum_{i=0}^k e(i) + K_D e(k) \quad (k=1, 2, 3, 4, \dots) \quad (1)$$

式中: K_p —PID 控制器的比例系数; K_I —PID 控制器的积分系数; K_D —PID 控制器的微分系数; $e(k)$ —第 k 个采样时刻料筒的实际温度与设定温度值的偏差; $ec(k)$ —第 k 个采样时刻料筒温度的偏差变化率; $u(k)$ —第 k 个采样时刻的输出^[6]。

料筒温度的模糊 PID 控制以 $e(k)$ 和 $ec(k)$ 为输入量, ΔK_p 、 ΔK_I 和 ΔK_D 为输出量^[7]。

由 WPC 挤出机料筒的温度控制要求可知:

① e 和 ec 的基本论域分别为: $[-20\text{ }^{\circ}\text{C}, 20\text{ }^{\circ}\text{C}]$ 和 $[-5\text{ }^{\circ}\text{C}, 5\text{ }^{\circ}\text{C}]$ 。

② 采用模糊语言变量 NB、NM、NS、ZO、PS、PM 和 PB 描述输入量和输出量的模糊控制论域, 并编写经模糊化处理的输入量 E 、 EC 和输出量 U 的隶属度函数。

③ E 和 EC 的量化论域为:

$$\{-6, -5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6\}.$$

④ ΔK_p 、 ΔK_I 和 ΔK_D 的量化论域为:

$$\{-3, -2, -1, 0, 1, 2, 3\}.$$

⑤ 偏差和偏差变化率的量化因子分别为:

$$K_e=0.3, K_{ec}=0.6.$$

1.2 PSO 优化模糊 PID 控制

假设群体为以一定速度在 D 维搜索空间内飞行的 N 个粒子, 粒子在 t 时刻的空间坐标和飞行速度分别为 $X_i(t)$ 和 $V_i(t)$; 迭代时粒子通过跟踪个体和种群位置的最优极值来更新位置和速度^[8-10]。

为改善局部搜索和全局搜索间的平衡, 提高收敛精度和速度, 引入线性惯性权重系数 ω 调整机制

的 PSO 算法, ω 自适应调整公式如下:

$$\omega = \omega_{\max} - \frac{Iter * (\omega_{\max} - \omega_{\min})}{IterMax} \quad (2)$$

式中: $\omega_{\max}$ 和 $\omega_{\min}$ —惯性权重系数最大和最小值; $IterMax$ —最大迭代次数; $Iter$ —当前迭代次数。

依据 WPC 挤出机料筒温度特点, 确定模糊控制规则。利用模糊理论构建 K_p 、 K_I 、 K_D 、 $E(k)$ 和 $EC(k)$ 间的函数关系, 并根据不同采样时刻得到的 $E(k)$ 和 $EC(k)$ 在线调整模糊 PID 控制器参数, 方法如式 (3):

$$\begin{cases} K_p = K_{p0} + \{ |E|, |EC| \} K_p = K_{p0} + \Delta K_p \\ K_I = K_{i0} + \{ |E|, |EC| \} K_I = K_{i0} + \Delta K_i \\ K_D = K_{d0} + \{ |E|, |EC| \} K_D = K_{d0} + \Delta K_d \end{cases} \quad (3)$$

式中: K_{p0} 、 K_{i0} 和 K_{d0} —初始参数; ΔK_p 、 ΔK_I 和 ΔK_D —经模糊推理得到的参数调整值。

K_e 、 K_{ec} 及 PID 控制器的参数 K_p 、 K_I 和 K_D 对料筒温度控制器的控制效果有很大影响。采用 PSO 算法优化 K_e 、 K_{ec} 、 K_p 、 K_I 和 K_D , 可克服不确定因子增多、经验调整困难等不足, 进而得到一组最优参数, 获得较好的动态特性。PSO 优化模糊 PID 挤出机料筒温度控制器系统结构, 如图 1 所示。

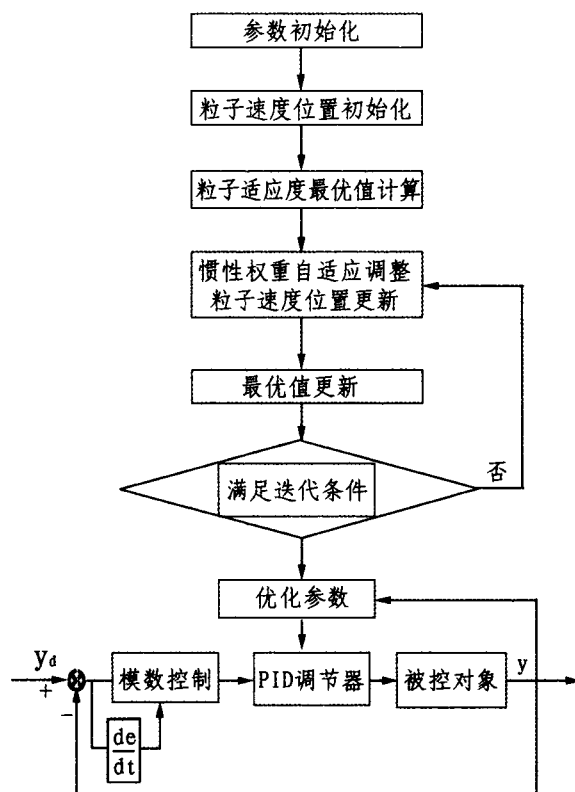


图1 PSO 算法的模糊 PID 控制结构图

Fig.1 Fuzzy PID control structure of PSO algorithm

对参数进行设置, 粒子群数为 30, 维数 $D=5$, 最大迭代 $IterMax$ 设为 100 步, 个体认知学习率 c_1 和群体学习率 c_2 均设为 2, $\omega_{\max}$ 为 0.9, $\omega_{\min}$ 为 0.4, ω 值根据公式 (2) 计算, 初始化种群的位置和速度。

料筒温度控制系统的相关参数经 PSO 算法优化后, 控制系统传递函数为:

$$G(s) = \frac{18e^{-40s}}{1900s + 1} \quad (4)$$

式中: G —料筒温度系统传递函数, 动态变量;
 s —时间; e —为自然常数。

2 PSO 优化模糊 PID 料筒温度控制器应用

2.1 试验材料

杨木粉 (100 目), PVC, 硬脂酸, 改性剂 (5% NaOH 溶液、铁酸脂、异氰酸脂), 石蜡, 硬脂酸锌, 铅酸稳定剂, 染色剂棕色颜料。均外购。

2.2 试验设备

SJSZ65 平行双螺杆挤出机, 高速混合机, SIEMENS S7200 可编程逻辑控制器 (PLC), Windows Control Center 组态控制软件, 万能拉力实验仪等。

2.3 试验方法

试验在东北林业大学生物质材料实验室的 WPC 挤出生产平台上进行。

1) 挤出机料筒温度控制, 采用如下三种方案:

① PID 控制: 以料筒实际温度和设定温度的偏差量为输入, 通过线性组合构成控制量, 驱动执行机构控制加热量和加热时间;

② 模糊 PID 控制: 以料筒温度和设定温度的偏差量和偏差量变化率为输入, 通过模糊化处理, 生成在线调整控制参数 ΔK_p 、 ΔK_I 和 ΔK_D ;

③ PSO 优化模糊 PID 控制: 设置种群规模、最大迭代次数、学习因子、速度的最大值等参数, 计算粒子的适应度值后进行迭代, 对量化因子和比例因子五个量进行优化。

根据上述构建的控制规则, 在 PLC 编程软件中输入相应数据块, 并采集温度、压力、螺杆转速等数据; 上位机采用组态控制软件, 采用异步传输串口通讯实现与下位机 PLC 的通讯, 实时接收、监测、调节温度等参数, 从而实现挤出机温度系统的准确控制。

2) WPC 的制备

综合考虑 WPC 板材的强度、吸水率及成本等因素, 确定了 WPC 样品配方 (表 1)。

表 1 WPC 样品配方

Tab.1 Formula of WPC samples /kg							
木粉	PVC	硬脂酸锌	硬脂酸	石蜡	改性剂	铅酸稳定剂	染色剂
150	100	3	0.5	0.5	0.3	0.1	少量

① 物料混合。

取杨木粉先进行干燥处理, 用 NaOH 溶液浸泡后 48 h 后, 水洗烘干。加入改性剂, 在 90 ℃、2000 r/min 转速条件下充分混合 10 min;

再将处理后的木粉和 PVC 及硬脂酸、硬脂酸锌、石蜡、铅酸稳定剂、染色剂等助剂在 90 ℃、1 500 r/min 条件下充分混合 30 min。

② 将充分混合的原料通过挤出机造粒。

木粉含水率控制在 1% 以下, 设定: 温度 160 ℃、压力 12.5 MPa、螺杆转速 18 r/min。

③ 挤出成型。

螺杆旋转时会与物料间产生剪切热, 转速过快, 物料易烧焦; 转速慢, 则挤出板材松散不成型。

依据前期研究经验, 并综合考虑物料成分、螺杆直径、螺杆长度与直径比等因素, 设定: 温度 170 ℃、压力 10 MPa、螺杆转速约 8.8 r/min。

2.4 性能评价

1) 料筒温度控制效果

在料筒上安装温度传感器, 采集料筒温度数据后, 返回到 PLC, 得到料筒温度随时间的变化曲线, 对比料筒温度的响应速度及抑制扰动能力。

2) 生产效率

测量挤出机 1 h 内挤出 WPC 板材的长度。

3) 产品性能

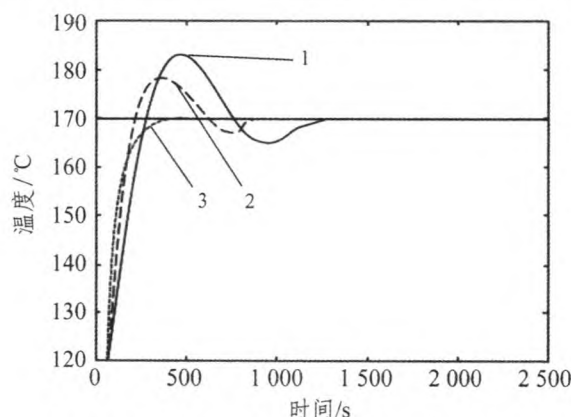
依据 GB/T 1447-2005 《纤维增强塑料拉伸性能试验方法》, 测试三种控制方案下, 所产 WPC 板材的拉伸强度, 每种方案重复 5 次, 取平均值。

2.5 结果讨论

1) 料筒温度控制效果

在 PID、模糊 PID 及 PSO 优化模糊 PID 三种控制方案下, 料筒温度-时间曲线如图 2 所示。

由图 2 可知, PID 控制系统存在较大振荡, 很难快速实现稳定; 模糊 PID 控制系统虽在抑制振荡、



控制方案: 1—PID; 2—模糊PID; 3—PSO优化模糊PID

图 2 不同控制方案下的温度曲线

Fig.2 Temperature curves under different control scheme

超调等方面具有一定优势,但系统存在较大静差;而 PSO 优化模糊 PID 控制系统过渡时间、超调量优势明显,达到设定温度所需时间短,系统响应较快,跟随性能好。当料筒实际温度超出设定值时,可快速调节,且整个控制过程稳定。

实际生产中常出现温度波动,影响挤出板材的质量及生产效率。为了对比三种控制方法的抗扰动能力,加入了不同温度幅值扰动,测试结果如表 2 所示。

表 2 不同控制方法下的抗干扰能力

Tab.2 Comparison of anti-interference ability under different control methods

控制方案	温度扰动幅值			
	6 °C		12 °C	
	最大温度波动/°C	平抑扰动时间/s	最大温度波动/°C	平抑扰动时间/s
PID	5	250	10	310
模糊 PID	4	200	8	250
PSO 优化模糊 PID	2	130	3	180

由表 2 可知,相比 PID 和模糊 PID 控制,PSO 优化的模糊 PID 控制温度波动更小,平抑扰动所需时间更短,抗扰动能力更强。

2) WPC 生产效率及性能

采用三种控制方案制备 WPC 板材的生产效率与拉伸强度检测结果,列于表 3。

与 PID 和模糊 PID 控制相比,采用 PSO 优化的模糊 PID 控制,在生产效率上分别提高 15.9%和 36.4%,且板材的拉伸强度得到良好改善。

表 3 不同控制方法下 WPC 板材的生产效率与性能

Tab.3 Comparison of production efficiency and performance of WPC under different control methods

控制方案	生产效率		拉伸强度 /MPa
	挤出长度/(m·h ⁻¹)	产量/(kg·h ⁻¹)	
PID	82	234.86	19.8
模糊 PID	96	276.39	20.5
PSO 优化模糊 PID	113	320.46	22.2

3 结论

1) PSO 优化模糊 PID 控制,克服了 PID 和模糊 PID 控制存在的容易振荡、超调大、跟随能力差等不足,具有稳定性好、超调量小、跟随能力强、过渡时间短、抗扰动能力强、精度高等优点,料筒输出温度能快速逼近设定值,可有效避免在生产中,因温度控制滞后等因素导致的 WPC 板材断面、烧焦的问题。

2)采用 PSO 优化模糊 PID 料筒温度控制方案的木塑挤出机,WPC 的拉伸强度及生产效率亦有提高。

参考文献:

- [1] 张娟, 宁莉萍, 王燕高, 等. 玻璃纤维改性木塑复合材料的研究现状[J]. 化工新型材料, 2015, 43(8): 13-15.
- [2] 郭丹, 赵星, 黄科, 等. 电子束辐射对农作物秸秆粉/聚乙烯木塑复合材料结构与性能的影响[J]. 高分子材料科学与工程, 2016, 32(6): 63-67.
- [3] Shah B L, Matuana L M, Heiden P A. Novel coupling agents for PVC/wood: flour composites[J]. Journal of Vinyl and Additive Technology, 2005, 11(4): 160-165.
- [4] 张醒, 张德虎, 刘莹莹. 基于分数阶模糊 PID 控制的水轮机调节系统[J]. 排灌机械工程学报, 2016, 34(6): 504-510.
- [5] Long Z Q, Xu Y B, Liu C. Fuzzy control algorithm based on variable universe of discourse and its expansion: Contraction factors[J]. Journal of Convergence Information Technology, 2012, 7(19): 570-577.
- [6] Kosari A, Jahanshahi H, Razavi S A. An optimal fuzzy PID control approach for docking maneuver of two spacecraft: Orientational motion[J]. Engineering Science and Technology, an International Journal, 2017, 20(1): 293-309.
- [7] Kumar V, Rana K P S. Nonlinear adaptive fractional order fuzzy PID control of a 2-link planar rigid manipulator with payload[J]. Journal of the Franklin Institute, 2017, 354(2): 993-1022.
- [8] 王永骥, 刘莎, 刘磊, 等. 基于粒子群优化算法的气动参数在线辨识方法[J]. 华中科技大学学报: 自然科学版, 2016, 44(3): 116-120.
- [9] 王东风, 孟丽. 粒子群优化算法的性能分析和参数选择[J]. 自动化学报, 2016, 42(10): 1552-1561.
- [10] 王皓, 欧阳海滨, 高立群. 一种改进的全局粒子群优化算法[J]. 控制与决策, 2016, 31(7): 1161-1168.

(责任编辑 向琴、劳万里)