

基于 SSAPSO – PID 的白胡椒熟化温度控制系统设计与试验

俞国燕¹ 张嘉伟^{1,2} 张园^{2,3} 韦丽娇^{2,4} 赵振华^{2,5} 沈德战^{2,5}

(1. 广东海洋大学机械工程学院, 湛江 524091; 2. 中国热带农业科学院农业机械研究所, 湛江 524091;
3. 广东省农业类颗粒体精量排控工程技术研究中心, 湛江 524000;
4. 湛江市类颗粒体动力学及精准精量排控重点实验室, 湛江 524091;
5. 农业农村部热带作物农业装备重点实验室, 湛江 524091)

摘要: 为解决白胡椒初加工生产线熟化环节长时间无法维持恒温控制、过度依赖人工辅助控温等问题, 设计了基于 PID 的白胡椒初加工生产线熟化温度控制系统。利用 STM32 和触摸屏控制蒸汽发生器和电调节阀, PT100 温度传感器实时监测温度并反馈至系统, 通过控制算法调节蒸汽流量以确保稳定控制。采用开环阶跃响应法建立并拟合了熟化机内温度与时间的数学模型, 通过 Simulink 仿真试验对比了 Ziegler – Nichols 整定法、临界比例度法、衰减曲线法以及基于麻雀搜索算法的粒子群优化自整定法 (SSAPSO) 性能。最终确定 PID 最佳控制参数为比例系数 $K_p = 0.8759$, 积分系数 $K_i = 0.02$, 微分系数 $K_d = 4.3255$ 。系统试验结果表明, 在 8 min 的熟化过程中, 每隔 1 min 采集当前熟化温度, 由于熟化机与空气直接对流换热, 其温度稳定在 $(99 \pm 1.5)^\circ\text{C}$ 范围内, 熟化温度平均相对误差小于 1.2%、变异系数小于 1.3%, 基本实现了熟化过程中自动化精准高效控温的目的。

关键词: 白胡椒初加工生产线; 熟化温度; 粒子群优化算法; 麻雀搜索算法; PID 控制

中图分类号: S573 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2025)05-0589-08

OSID:



Design and Test of Temperature Control System for White Pepper Curing Based on SSAPSO – PID

YU Guoyan¹ ZHANG Jiawei^{1,2} ZHANG Yuan^{2,3} WEI Lijiao^{2,4} ZHAO Zhenhua^{2,5} SHEN Dezhan^{2,5}

(1. School of Mechanical Engineering, Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524091, China
2. Agricultural Machinery Research Institute, Chinese Academy of Tropical Agricultural Sciences, Zhanjiang 524091, China
3. Guangdong Engineering Technology Research Center of Precision Emission Control for Agricultural Particulates, Zhanjiang 524000, China
4. Zhanjiang Key Laboratory of Dynamics and Precision Emission Control for Particulates, Zhanjiang 524091, China
5. Key Laboratory of Agricultural Equipment for Tropical Crops, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Zhanjiang 524091, China)

Abstract: Aiming to address the challenges of prolonged inability to maintain constant temperature control and excessive reliance on manual assistance in the curing phase of white pepper primary processing production lines, a proportion integration differentiation (PID)-based control system was developed to control the curing temperature of the white pepper during processing. It is a high demand to maintain the constant curing temperature. Specifically, too high curing temperature can lead to the internal physicochemical properties of the destruction, whereas, too low curing temperature can lead to curing not complete, which makes the peeling rate decreased. The control system with an ST Microelectronics 32-bit Microcontroller (STM32) and a touchscreen was utilized to control the start/stop of the steam generator and the opening of the electric regulating valve. A temperature sensor was installed at the outlet of the curing machine, and a PT100 temperature sensor was employed to collect the curing temperature in real-time. Subsequently, the collected data was fed back to the STM32 microcontroller. The PID closed-loop control algorithm was applied to calculate the actuator, adjusting parameters appropriately to ensure stable control of the curing temperature by modulating the steam flow.

收稿日期: 2024 – 04 – 18 修回日期: 2024 – 05 – 17

基金项目: 海南省重点研发计划项目 (ZDYF2022XDNY136)、湛江市科技计划项目 (2022A01032)、湛江市科技平台项目 (2022A105) 和中央级公益性科研院所基本科研业务费专项 (1630132023005)

作者简介: 俞国燕 (1970—), 女, 教授, 博士, 主要从事智能设计与制造和现代化渔业装备研究, E-mail: yugy@gdou.edu.cn

通信作者: 张园 (1984—), 男, 副研究员, 主要从事热带农业工程与控制技术研究, E-mail: 418727981@qq.com

A systematic analysis of the convective heat exchange process between white pepper and steam at temperature was conducted. A theoretical model of heat transfer was established by using the step response curve method, and the data curve was processed ($R^2 = 0.969$) to derive the control model for the temperature inside the curing machine over time. Simulation analysis was performed by using the Simulink platform to determine the optimal parameters for PID control. Response curves from four PID parameter tuning methods, including the Ziegler–Nichols method, the decay curve method, the critical proportional method, and the sparrow search algorithm-based particle swarm optimization method (SSAPSO), were compared. Ultimately, it was found that the SSAPSO-based method yielded the best control effect in terms of dynamic performance indicators with PID parameters (proportional coefficient $K_p = 0.8759$, integral coefficient $K_i = 0.02$, and differential coefficient $K_d = 4.3255$). The response time of the PID controller obtained by the SSAPSO-based method was approximately 40 s with an overshoot of about 2.5%. Systematic experimental studies demonstrated that throughout the entire 8 minutes curing process, the current curing temperature was sampled every minute. Due to direct convective heat exchange between the curing machine and the air, the temperature remained stable within the range of $(99 \pm 1.5)^\circ\text{C}$. The average relative error of the curing temperature was less than 1.2%, and the coefficient of variation was less than 1.3%, thereby achieving automated, precise, and efficient temperature control during the curing process.

Key words: white pepper primary processing line; curing temperature; particle swarm optimization algorithm; sparrow search algorithm; PID control

0 引言

白胡椒初加工生产线主要由脱粒、熟化、脱皮、烘干四大工序组成,其中熟化环节的精准控温直接影响白胡椒成品的脱皮率以及白度,这两项关键指标对白胡椒品质具有决定性意义^[1-2]。精准控温的实现取决于生产线稳态运行时蒸汽流量的精确调控,具体表现为:在脱粒工序段保持物料喂入量均匀稳定的前提下,通过动态调节蒸汽通入量,同步实现蒸汽温度稳定性与机体水分均匀性的双重控制目标。若通入蒸汽量较少,其温度低于标准温度范围,则会导致熟化不彻底,进而使得脱皮率下降、白度不够;若通入蒸汽量较大,其温度高于标准温度范围,白胡椒则严重丧失表皮保护作用、内部理化性质被破坏,呈褐色状。

目前国内广泛采用的温度控制方法主要依赖人工干预,即根据操作人员的工作经验来调整蒸汽阀门开度和喂料量,以达到对温度控制的目的^[3-6]。

许多国际学者对工程领域的恒温控制进行了广泛的研究^[7-9]。PRASANTH等^[10]研究了一种结合模型预测控制器(MPC)和改进果蝇优化算法(IAFOA)的火力发电厂过热蒸汽温度控制方法。通过模拟预测控制和优化算法的结合,实现了对过热蒸汽温度的精确控制,提高了火力发电厂的稳定性。DAI等^[11]提出了一种基于主动干扰抑制控制(ADRC)的双回热锅炉再热蒸汽温度控制方案。通过分析系统非线性和频域内平均温度偏差(MDT)控制结构的解耦能力,设计了控制策略,并通过仿真试验验证了其优越性,成功应用于实际RST系统,

提高了温度控制质量。

目前熟化机可以快速、高效地熟化白胡椒鲜果表层的果皮和果胶,采用机械化方式替代传统水泡腐烂法,可以缩短生产周期,提高产品品质,降低用水量,避免水体污染,能够较好满足个体农户或小型加工户在白胡椒加工过程中的熟化需求。但由于生产线自动化程度低,熟化机温控系统不能实现高效准确的恒温控制,使得通入的蒸汽需要长时间才能达到开环平衡,致使工艺温度参数持续偏离设定值范围,对白胡椒品质造成了不可逆的损害。故此本文基于机理-数据双驱动建模方法,通过开环阶跃响应试验与两点法辨析建立熟化温控基本模型。其次,考虑到基于公式整定的传统PID控制器难以符合高精度熟化工艺温控的要求,提出SSAPSO-PID复合控制器架构:即采用改进麻雀优化粒子群算法(SSAPSO)实现PID参数全局寻优。

1 熟化机温控系统总体设计

1.1 熟化机总体结构及熟化温度控制原理

熟化机温控系统主要由蒸汽发生器、蒸汽管道、电动比例调节阀、熟化机以及主控黑匣组成。如图1所示,在预热工作开始前,农户于人机交互界面输入设定标准温度值后,由蒸汽发生器产生的0.3 MPa蒸汽经减压阀通入熟化滚筒,在待机状态下预热约10 min后,机体内温度将稳定处于标准温度范围内,随后开启初加工生产线其余各工序设备。

熟化机温控系统设计流程如图2所示。以STM32单片机为主控制器,PT100温度传感器为数



图1 白胡椒初加工生产线熟化环节设备

Fig. 1 Curing stage equipment for white pepper primary processing production line

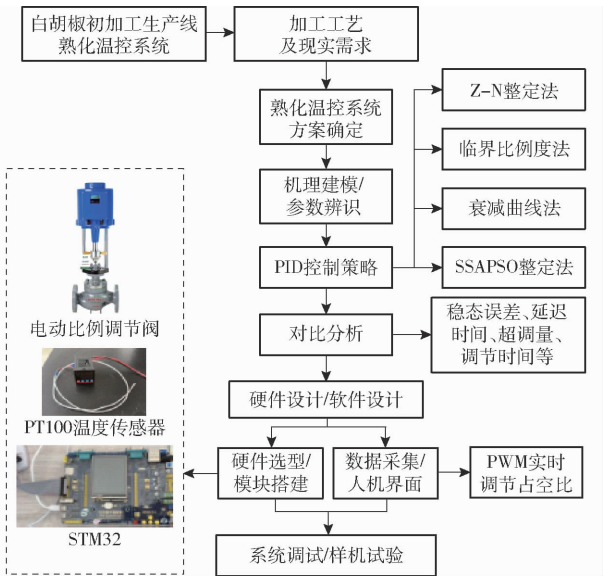


图2 熟化机温控系统设计流程图

Fig. 2 Design flowchart of temperature control system for curing machine

据采集设备,主控实时接收PT100所采集的熟化机出入料口物料温度均值,经控制算法计算并进行数模转换后,将及时反馈到电动比例调节阀。电动比例调节阀根据反馈信号调节通入滚筒内蒸汽的流量,从而实现对物料温度的稳定控制。

1.2 电动比例调节阀选型

电动比例调节阀是一种采用电动执行器控制流体流量的调节装置。利用电动执行器中的电动机将电能转化为机械能,从而准确地调整阀门开度、改变截面面积,实现对流体流量的精确控制。

在实际生产过程中,蒸汽压力为0.3 MPa。熟化机实际产能约为50 kg/h,熟化时间约为8 min,熟化温度约为100℃。白胡椒粒初始温度为室温(25℃),经熟化后温度需达100℃左右,因此,所需的蒸汽量应满足

$$G_d = \frac{GC(T_2 - T_1)}{I - G_w T_2}$$

(1)

式中 G_d ——蒸汽总量,kg/h
 G ——熟化机产能,kg/h
 C ——花椒粒比热容,取1.569 kJ/(kg·K)
 T_1 ——白胡椒初始温度,℃
 T_2 ——白胡椒熟化后温度,℃
 I ——蒸汽热容量,取2.679 MJ/kg
 G_w ——水比热容,取4.186 kJ/(kg·K)

经计算,熟化机蒸汽流量约为2.9 kg/h,因此调节阀流量为1~10 kg/h,选用ZT-ZDLP型电动调节阀,关键参数如表1所示。该调节阀阀芯耐高温,耐腐蚀性,具有较好的韧性以及冷热疲劳性能,同时还具备精度高、性能稳定等优点。

表1 ZT-ZDLP型调节阀参数

Tab. 1 ZT-ZDLP valve parameters

参数	数值
工作温度/℃	-40~250
输入信号/mA	4~20
输出信号/mA	4~20
压力/MPa	1.6

1.3 主控制器选型

主控制器接收温度传感器的数据,并通过PID算法对数据进行处理,进而将结果转化为PWM波输出,以控制电动比例调节阀的开度。这要求主控制器具备足够的计算能力,能够处理大量的数据输入和输出。同时,在确保准确性的前提下,计算速度也需考虑。鉴于工程造价的限制,最终选择STM32F103单片机作为主控制器。

STM32F103单片机还具备低功耗特性,能够在保证高性能的同时,有效降低能耗;还包括丰富的外设接口和强大的扩展性,使其能够与其他设备和传感器进行无缝集成。此外,STM32F103单片机还具备稳定可靠的工作特性和成熟的开发生态系统,为控制系统的设计和开发提供了可靠支持。

2 SSAPSO-PID 温控系统设计与仿真分析

2.1 PID 控制原理

PID因其具有算法简单、鲁棒性好和可靠性高等特点,广泛应用于工程控制中^[12-15]。为实现白胡椒初加工生产时熟化温度的稳定控制,本研究采用闭环PID控制算法对熟化过程进行热管理,实现工艺温度在允许误差范围内对设定值的精准跟踪。PID控制原理如图3所示。图中 $x(t)$ 为熟化温度设定值,℃; $y(t)$ 为白胡椒物料实际温度,℃; $e(t)$ 为误差,℃。

在熟化温度控制系统中,将从温度传感器检测到的实时温度 $y(t)$ 与目标温度 $x(t)$ 做差得的误差

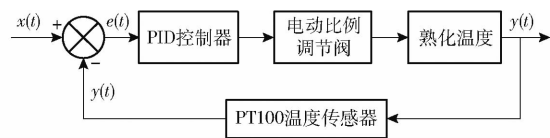


图3 PID控制原理图

Fig. 3 PID control schematic

$e(t)$ 输入控制器,通过电动比例调节阀的开度来反映此时的控制效果,直至将误差逼近于0,进而使得熟化温度达到设定值范围内。PID控制算法公式为

$$P(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (2)$$

式中 K_p ——比例系数
 K_i ——积分系数
 K_d ——微分系数

2.2 熟化温度数学模型建立

熟化过程中,白胡椒鲜果与蒸汽对流换热。熟化机预热完毕后,其内部温度由于室温白胡椒果的加入,从100℃骤减至40℃左右,随后缓慢升温,约120 s后于标准温度范围内振荡,确定模型为一阶关系式。熟化机在饱和蒸汽通入的作用下,其内部温度逐渐回升。此过程的热量积累通过物理热力学公式进行计算,即

$$Q = \lambda I \frac{dT}{dt} \quad (3)$$

式中 Q ——饱和蒸汽产生的热量,MJ
 λ ——白胡椒表面导热系数,W/(m·K)
 T ——白胡椒温度,℃
 t ——传热时间,s

白胡椒鲜果在熟化滚筒内螺旋输送器的作用下螺旋前进,由于熟化机前后进出料孔与室温换热,为了减少误差积累的影响,在方程中引入热能损失项,以考虑饱和蒸汽以热传导的方式损失热量所产生的热能计算误差

$$\lambda I \frac{dT}{dt} + \Delta T_1 = \lambda \Delta Q + \Delta T_0 \quad (4)$$

式中 ΔT_1 ——熟化机内温度变化量,℃
 ΔT_0 ——熟化机外温度变化量,℃
 ΔQ ——热能损失量,MJ

对式(4)进行拉普拉斯变换,得

$$(\lambda I s + 1) T(s) = \lambda Q(s) \quad (5)$$

式中 s ——拉普拉斯变换中的复数变量

对式(5)进行等式变换,其传递函数为

$$G(s) = \frac{\Delta T(s)}{\Delta Q(s)} = \frac{K}{R s + 1} \quad (6)$$

式中 $\Delta T(s)$ ——最终胡椒的熟化温度变化量,℃
 $\Delta Q(s)$ ——熟化机内通入蒸汽热量变化量,J

K ——系统增益
 R ——系统时间常数

白胡椒鲜果的熟化过程是其与饱和蒸汽充分接触融合的过程,实际加热升温是一个渐变的量,会产生输出过程到响应过程的延迟,需要一定时间过渡。考虑到延迟时间 τ 给热传递过程带来滞后效果,因此最终的熟化温度控制模型修正为^[16]

$$G(s) = \frac{K}{R s + 1} e^{-\tau s} \quad (7)$$

2.3 控制对象辨析与获取

处于室温的白胡椒鲜果进入预热完毕后的熟化滚筒内,随着饱和蒸汽的不断通入,致使其内部缓慢回温,进而以开环阶跃响应实验获取系统阀门开度与熟化温度相关数据,利用两点法建模获得模型参数。鉴于电动比例调节阀的直行程范围,确认30%开度为最高频率的工作状态,通过STM32输出PWM波形控制占空比,使阀门开度为30%,每隔10 s采集一次熟化机出入料口白胡椒温度均值,将获得的近似开环阶跃响应的完整输入输出数据导入Matlab中的Curve Fitting模块^[17],为避免特殊异常点对实际控制的影响,对曲线进行平滑拟合处理($R^2 = 0.969$),获得开环阶跃响应曲线,如图4所示。采用两点法计算模型参数值,选取曲线上两个点 $y(t_1)$ 和 $y(t_2)$,使其满足表达式

$$\begin{cases} y(t_1) = 0.39347(y(\infty) - y(0)) + y(0) \\ y(t_2) = 0.62312(y(\infty) - y(0)) + y(0) \end{cases} \quad (8)$$

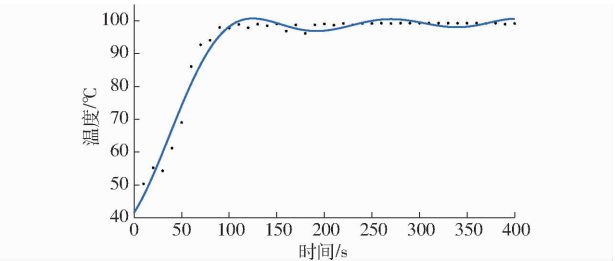


图4 开环阶跃响应曲线

Fig. 4 Open loop step response curve

在曲线上找到对应点 $y(t_1)$ 和 $y(t_2)$,根据图4可知 $y(\infty) = 100^\circ\text{C}$, $y(0) = 40^\circ\text{C}$,输入增量幅值 $\Delta u = 30$,可求得对应 $t_1 = 36\text{ s}$, $t_2 = 55\text{ s}$ 。

基于关系式

$$\begin{cases} K = \frac{y(\infty) - y(0)}{\Delta u} = 2 \\ R = 2(t_2 - t_1) = 38 \\ \tau = |2t_1 - t_2| = 17 \end{cases} \quad (9)$$

推导出控制模型的参数值,将上述参数代入式(7),最终得到熟化温控模型为

$$G(s) = \frac{2}{38 s + 1} e^{-17 s} \quad (10)$$

2.4 PID 参数整定

PID 控制参数对控制系统效果具有很大影响, 优良的控制参数能将熟化温度快速且平稳地逼近设定值, 使白胡椒鲜果成品能达到较好的品质^[18]。通过调整比例系数 K_p 、积分系数 K_i 、微分系数 K_d 调控电动比例调节阀阀门开度。

2.4.1 SSAPSO 自整定法

粒子群优化算法^[19-21]源自对鸟群捕食行为的深入观察与仿真, 是一种富有启发性的优化算法。其基本理念在于将待解决问题的解空间抽象为一个粒子群体, 每个粒子都代表着一个潜在解。PSO 通过模拟每个粒子在解空间中的移动, 并根据个体经验和群体协作信息不断调整其位置和速度, 以期逐步收敛于最优解附近, 因实现简单、收敛速度快、对参数敏感度较低等优点, 适用于多种优化问题的求解。特别是在连续优化问题和温度控制系统参数寻优等领域, PSO 都展现出了显著的优越性。

虽 PSO 优化算法的初始参数较少, 但是其对算法的寻优结果有很大的影响。针对不同的工程难点, 应采用较为适宜的参数。

(1) 惯性权重 ω

惯性权重的取值反映其对速度的影响。惯性权重直接体现了算法的全局搜索能力和局部搜索能力。由于算法置于后期时, 粒子处于最优解附近, 应增强其局部搜索能力, 适当减弱全局搜索能力, 才会使得算法迭代到全局最优解。因此, 故本文选取 $\omega = 0.9 - \frac{0.7}{I_{\max}}$ 作为惯性权重, 其中 $I_{\max}$ 为最大迭代次数。

(2) 学习因子 C_1 、 C_2

学习因子又称加速常数, 反映了 PSO 中自我对话和社会交流的信息共享机制。 C_1 和 C_2 分别表示自身经验和社会经验对粒子更新的影响程度。当 C_1 较大时, 粒子更倾向于在自身极值点附近进行深入探索, 从而增强了局部寻优能力; 而当 C_2 较大时, 粒子更快地朝向全局最优解逼近, 从而增强了全局寻优能力。故本文将学习因子 C_1 、 C_2 设置为算法常用值 2。

(3) 种群规模 N 和最大迭代次数 $I_{\max}$

种群规模即粒子总数。粒子越多, 算法的寻优能力通常越强, 但相应的运算速度就会变慢。本文设置种群规模为 300。最大迭代次数用于判断算法是否满足终止条件。 $I_{\max}$ 越大, 算法得出最优解的概率通常越高, 但过大的迭代次数会导致运算资源的浪费, 故本文设置最大迭代次数为 50。

(4) 速度范围与位置范围

若粒子速度过大, 步长跨越度高, 可能导致其错过全局最优解, 从而导致长时间无法收敛到最优解。相反, 速度过小则会降低算法的搜索速度, 影响收敛速度。因此本文设置速度范围为 $[-1, 1]$ 。位置范围是指解的取值范围, 根据具体问题的不同, 需要进行适当的设置, 以确保算法能够在合理的范围内搜索最优解。本文设置位置范围为 $K_p \in [0.01, 1.5]$ 、 $K_i \in [0.01, 0.1]$ 、 $K_d \in [1, 10]$ 。

但由于 PSO 具有易陷入局部最优解和大范围搜索时精度不高的天然弱势, 常常致使 PSO 得出的解为局部最优解。因此引入麻雀搜索算法 (Sparrow search algorithm, SSA) 对 PSO 进行调和^[22-24]。

麻雀搜索算法分为发现者、聚集者和侦察者^[25-26]。发现者的职责是寻觅食物资源并引领聚集者局部搜索食物, 侦察者负责监测群体内外的环境。

SSAPSO 算法的核心思想是: 在每一次迭代过程中, 两套算法进行自我进化以及二者对比择优, 从中选出最佳解作为本次迭代的落点。随后基于此落点更迭, 使算法向全局最优解的方向不断演进。算法在前期能最大程度找到最优解附近, 减小迭代时间、增强搜索效率。其流程如图 5 所示。

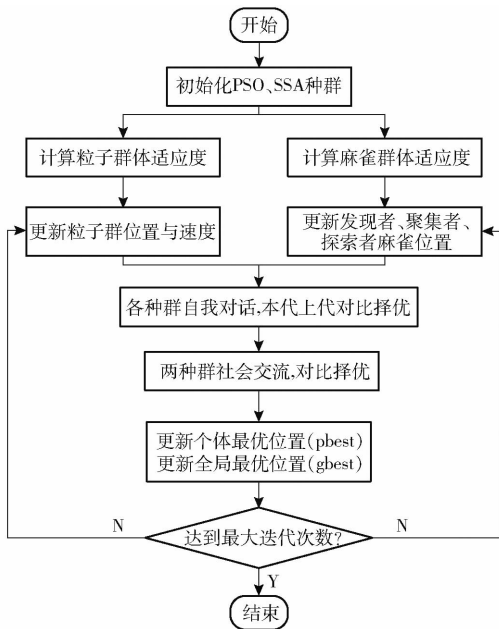


图 5 SSAPSO 算法流程图

Fig. 5 Flowchart of SSAPSO algorithm

经 50 次迭代后, 其最佳个体适应度如图 6 所示。 K_p 、 K_i 、 K_d 优化曲线如图 7 所示, 比例系数 $K_p = 0.8759$, 积分系数 $K_i = 0.02$, 微分系数 $K_d = 4.3255$ 。

将上述各参数代入到控制模型中, 其熟化温度曲线如图 8 所示。

由图 8 可知, SSAPSO 自整定法的超调量约为 2.5%, 调节时间约为 90 s, 响应时间约为 40 s, 基本

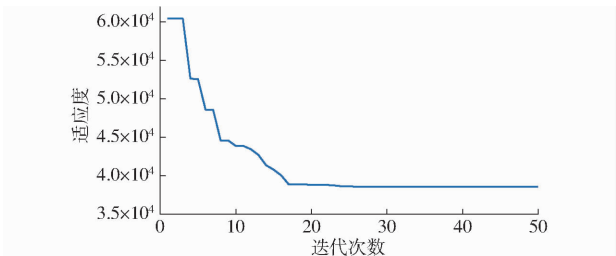


图 6 最佳个体适应度变化曲线

Fig. 6 Best individual fitness variation curve

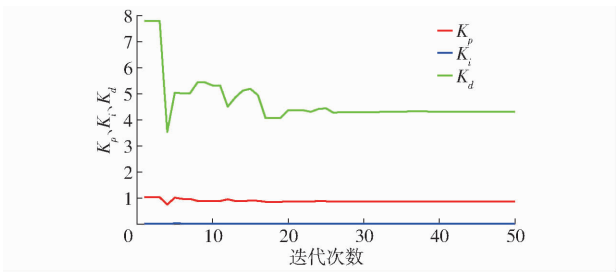


图 7 参数优化曲线

Fig. 7 Parameter optimization curves

符合白胡椒初加工熟化温度工艺要求。

2.4.2 整定方法对比

相继采用 Ziegler – Nichols 整定法、临界比例度法、衰减曲线法以及 SSAPSO 自整定法对 PID 参数进行整定。为了直观对比以上 4 种方法,将 Matlab 中的 Simulink 模块和 m 函数相结合,如图 9

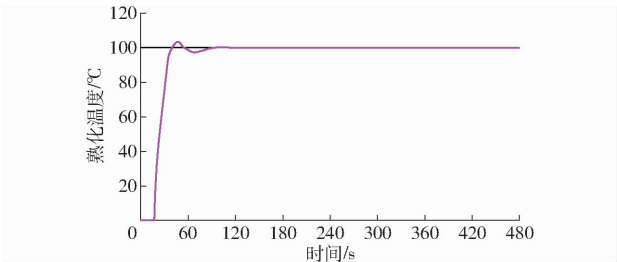


图 8 SSAPSO 自整定法熟化温度曲线

Fig. 8 Curing temperature curve of SSAPSO self-tuning method

所示,将设定温度 100℃ 为输入信号,通过观察最终示波器的曲线走向,选择白胡椒鲜果在熟化滚筒内的 8 min 中,动态和静态性能最佳的曲线图。如图 10 所示,比较 Ziegler – Nichols 整定法、临界比例度法、衰减曲线法、SSAPSO 自整定法的超调量、调节时间、稳态误差等性能指标,最终选择 SSAPSO 自整定法得到的 PID 参数,其响应时间约为 40 s,超调量约为 2.5%。相较于其他整定方法,SSAPSO 自整定法具有明显的性能优势,能够将熟化温度快速且平稳地控制在设定范围内,使得白胡椒鲜果的熟化效果达到最好。因此本文设计的 PID 熟化温度控制系统参数设定为 $K_p = 0.8759$, $K_i = 0.02$, $K_d = 4.3255$ 。

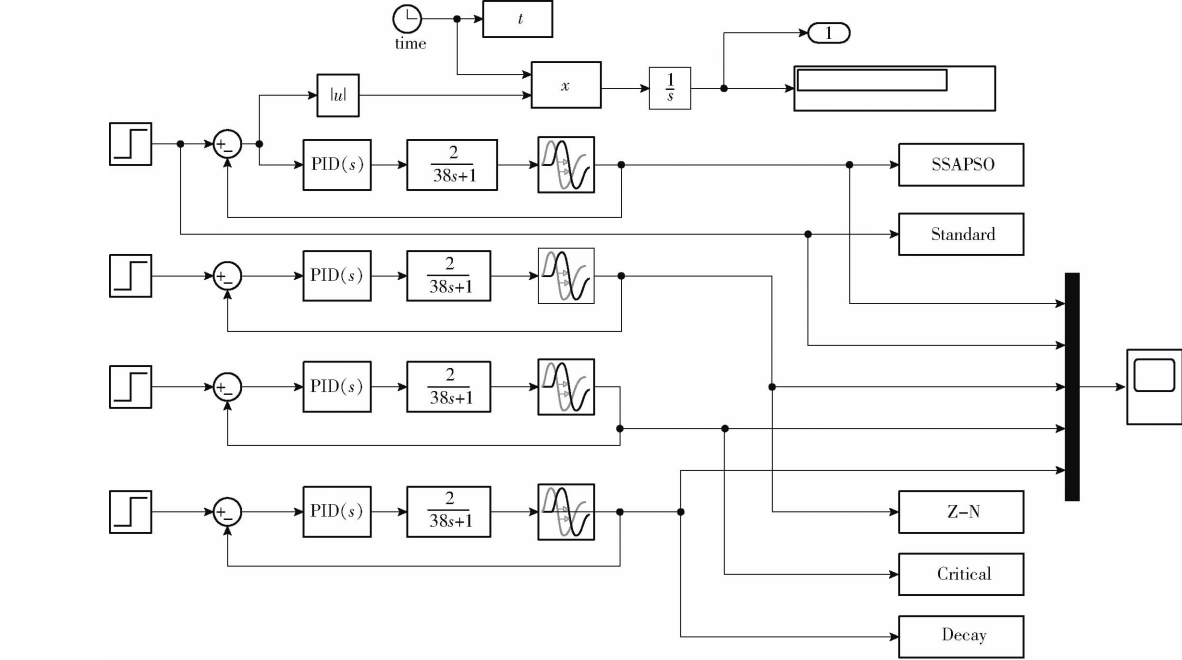


图 9 Simulink 仿真模型

Fig. 9 Simulink simulation model

3 样机试验

为验证熟化温度控制系统的实际工作效率和交互界面的稳定输出性能,对白胡椒初加工生产线进行整机测试试验。试验于 2023 年 8 月在海南

文昌鼎星胡椒加工厂进行。图 11 为白胡椒初加工生产线。

为检验 PID 熟化温控系统的稳定性,选取熟化温度为 100℃,将 40 kg 白胡椒鲜果分成 4 组,依次进入熟化滚筒内,设置熟化时间为 8 min,每隔 1 min

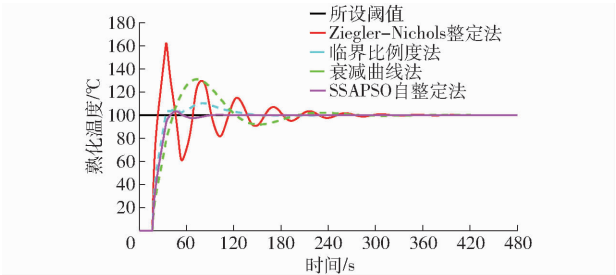


图 10 参数整定方法响应曲线

Fig. 10 Response curves of parameter tuning method



图 11 白胡椒初加工生产线

Fig. 11 White pepper primary processing line

记录一次出料口物料温度数据。计算熟化温度平均相对误差 δ 和变异系数 C_v 。

试验结果如图 12、表 2 所示，当熟化机设置标准温度为 100°C 时，由于熟化机直接与外部室温空气对流换热，造成干扰。故此所测得数据均比仿真数据低，温度基本控制在 $(99 \pm 1.5)^{\circ}\text{C}$ ，其平均相对误差小于 1.2%，变异系数小于 1.3%，熟化温度控制效果稳定。

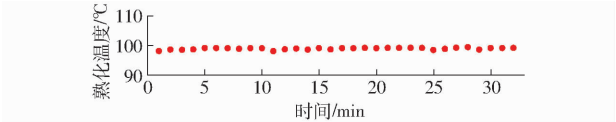


图 12 熟化温度试验散点图

Fig. 12 Scatter plot of ripening temperature test

表 2 平均相对误差和变异系数试验结果

Tab.2 Experimental results of mean relative error and coefficient of variation

时间/min	平均相对误差	变异系数	%
8	1.11	1.24	
16	1.10	1.23	
24	0.74	0.79	
32	0.85	0.97	

4 结论

(1)提出了一种针对白胡椒初加工生产线的熟化温控系统,旨在解决长时间难以维持恒温控制的问题,实现熟化过程的精确高效控制。选择适用的温度传感器、主控模块和电动比例调节阀等关键元件。通过机理建模和两点法建模,辨析得到电动比例调节阀与熟化温度之间的数学模型。

(2)通过仿真对比 4 种自整定方法,最终确定采用 SSAPSO 自整定法。经过优化调试后发现,该控制器的响应时间约为 40 s,超调量约为 2.5%,基本满足白胡椒熟化温度的要求。

(3)熟化环节样机试验结果表明,由于熟化机两端开口,两端与室温空气直接对流换热,系统的实际性能比仿真结果略低,但控制效果大抵一致,其干扰可忽略。相较于以往的开环控制方法,本系统不仅使白胡椒鲜果长时间保持在标准温度范围之内,大大改善温度控制的动态和静态性能,同时也提高了初加工成品的质量。

参 考 文 献

[1] 段宙位,陈婷,洪一平,等. 白胡椒机械加工工艺优化及品质评价[J]. 食品科技,2022,47(7):59-64.
DUAN Zhouwei, CHEN Ting, HONG Yiping, et al. Optimization of mechanical peeling process and quality evaluation of white pepper[J]. Food Science and Technology, 2022,47(7):59-64. (in Chinese)

[2] 李鑫,丁云爽,张超华,等. 机械脱皮白胡椒的品质评价及风味分析[J]. 现代食品科技,2023,39(7):268-279.
LI Xin, DING Yunshuang, ZHANG Chaohua, et al. Quality assessment and flavor analysis of mechanically decorticated white pepper[J]. Modern Food Science and Technology, 2023,39(7):268-279. (in Chinese)

[3] 贺刚,蔡晓华,白阳,等. 基于模糊 PID 的犊牛代乳粉奶液温度控制系统设计与试验[J]. 农业机械学报,2022,53(3):266-276.
HE Gang, CAI Xiaohua, BAI Yang, et al. Design and test of temperature control system of calf milk replacer solution based on fuzzy PID[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022,53(3):266-276. (in Chinese)

[4] 朱德兰,阮汉铨,吴普特,等. 水肥一体机肥液电导率远程模糊 PID 控制策略[J]. 农业机械学报,2022,53(1):186-191.
ZHU Delan, RUAN Hancheng, WU Pute, et al. Strategy on remote fuzzy PID control for fertilizer liquid conductivity of water fertilizer integrated machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022,53(1):186-191. (in Chinese)

[5] 陈星. 基于模糊神经网络 PID 控制的花茶烘焙温控系统设计[J]. 食品与机械,2020,36(9):131-137.
CHEN Xing. Design of tea baking temperature control system based on fuzzy neural network PID control[J]. Food and Machinery, 2020,36(9):131-137. (in Chinese)

[6] 杜沐青. 基于预估模糊 PID 的恒温箱温度控制系统优化设计[D]. 长沙:中南林业科技大学,2022.
DU Muqing. Optimized design of thermostat temperature controller based on predictive control and fuzzy PID control[D]. Changsha: Central South Forestry University of Science and Technology, 2022. (in Chinese)

[7] YANG R, LIU Y, YU Y, et al. Hybrid improved particle swarm optimization-cuckoo search optimized fuzzy PID controller for

micro gas turbine[J]. Energy Reports, 2021, 7: 5446 – 5454.

[8] GÜREL A E, CEYLAN İ. Thermodynamic analysis of PID temperature-controlled heat pump system[J]. Case Studies in Thermal Engineering, 2014, 2: 42 – 49.

[9] TAYSOM B S, SORENSEN C D, HEDENGREN J D. A comparison of model predictive control and PID temperature control in friction stir welding[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2017, 29: 232 – 241.

[10] PRASANTH S, NARAYANAN S, SIVAKUMARAN N, et al. The control of superheated steam temperature in power plants using model predictive controller[J]. Computers and Electrical Engineering, 2024, 115: 109109.

[11] DAI C, XUE Y, WU Z, et al. Active disturbance rejection control for the reheated steam temperature of a double-reheat boiler [J]. Journal of Process Control, 2023, 130: 103078.

[12] 张中卫,杨彦奇,杨海坤. 基于自适应模糊 PID 的输液温度控制系统研究[J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 2023, 42(3):137 – 145.

ZHANG Zhongwei, YANG Yanqi, YANG Haikun. Study on infusion temperature control system based on adaptive fuzzy PID [J]. Journal of Henan Polytechnic University (Natural Science), 2023,42(3):137 – 145. (in Chinese)

[13] 刘金琨. 先进 PID 控制 MATLAB 仿真[M]. 北京:电子工业出版社, 2016.

[14] 孙文峰,刘海洋,王润涛,等. 基于神经网络整定的 PID 控制变量施药系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(12):55 – 64,94.

SUN Wenfeng, LIU Haiyang, WANG Runtao, et al. Design and experiment of PID control variable application system based on neural network tuning[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020,51(12):55 – 64,94. (in Chinese)

[15] 郝文彬,冯天玉,黄世明,等. 基于模糊 PID 控制的烘干房温度控制设计[J]. 中国农机化学报, 2021, 42(12):101 – 106.

HAO Wenbin, FENG Tianyu, HUANG Shiming, et al. Temperature control design of drying room based on fuzzy PID control [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2021,42(12):101 – 106. (in Chinese)

[16] 刘晓伟. 基于先进 PID 控制的电加热炉系统[D]. 杭州:杭州电子科技大学, 2021.

LIU Xiaowei. Electric heating furnace system based on advanced PID control [D]. Hangzhou: Hangzhou University of Electronic Science and Technology, 2021. (in Chinese)

[17] 马超. 基于 OPC 的 PCS7 主蒸汽温度模糊自适应 PID 控制系统的设计与实现[D]. 太原:山西大学, 2020.

MA Chao. The design and implementation of PCS7 main steam temperature fuzzy adaptive PID control system based on OPC [D]. Taiyuan: Shanxi University, 2020. (in Chinese)

[18] 于畅畅,李洪文,何进,等. 基于 PID 算法的高频间歇供肥系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(11):45 – 53,63.

YU Changchang, LI Hongwen, HE Jin, et al. Design and experiment of high-frequency intermittent fertilizer supply system based on PID algorithm[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020,51(11):45 – 53,63. (in Chinese)

[19] 曹振乾,印江,张津华,等. 基于改进粒子群优化的主蒸汽温度模糊串级控制[J]. 控制工程, 2022, 29(4):699 – 706.

CAO Zhenqian, YIN Jiang, ZHANG Jinhua, et al. Fuzzy cascade control of main steam temperature based on improved particle swarm optimization[J]. Control Engineering of China, 2022,29(4):699 – 706. (in Chinese)

[20] 赵景波,王众,廖鹏浩. 基于粒子群优化算法的蒸汽温度控制研究[J]. 制造业自动化, 2020, 42(6):107 – 111.

ZHAO Jingbo, WANG Zhong, LIAO Penghao. Research on steam temperature control based on particle swarm optimization algorithm[J]. Manufacturing Automation, 2020,42(6):107 – 111. (in Chinese)

[21] 高程程. 基于粒子群模糊 PID 的真空退火炉温控系统研究[D]. 大连:大连海洋大学, 2023.

GAO Chengcheng. Research on temperature control system of vacuum annealing furnace based on particle swarm fuzzy PID [D]. Dalian: Dalian Ocean University, 2023. (in Chinese)

[22] 高兵,郑雅,秦静,等. 基于麻雀搜索算法和改进粒子群优化算法的网络入侵检测算法[J]. 计算机应用, 2022, 42(4):1201 – 1206.

GAO Bing, ZHENG Ya, QIN Jing, et al. Network intrusion detection algorithm based on sparrow search algorithm and improved particle swarm optimization algorithm[J]. Journal of Computer Applications, 2022,42(4):1201 – 1206. (in Chinese)

[23] 周浩豪,茅大钧,李玉珍. 基于 SSAPSO – LightGBM 的火电厂引风机故障预警方法[J]. 热能动力工程, 2023, 38(2):153 – 160.

ZHOU Haohao, MAO Dajun, LI Yuzhen. Fault early warning method for induced draft fan in thermal power plant based on improved SSAPSO – LightGBM[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2023,38(2):153 – 160. (in Chinese)

[24] 黄训爱,杨光永,樊康生,等. 基于改进粒子群算法的 PID 控制参数优化[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2024(2):89 – 92,98.

HUANG Xunai, YANG Guangyong, FAN Kangsheng, et al. Optimization of PID control parameters based on improved particle swarm algorithm[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2024(2):89 – 92,98. (in Chinese)

[25] 付华,刘昊. 多策略融合的改进麻雀搜索算法及其应用[J]. 控制与决策, 2022, 37(1):87 – 96.

FU Hua, LIU Hao. Improved sparrow search algorithm with multi-strategy integration and its application[J]. Control and Decision, 2022,37(1):87 – 96. (in Chinese)

[26] WANG K, LI K, DU F, et al. Research on prediction model of coal spontaneous combustion temperature based on SSA – CNN [J]. Energy, 2024, 290: 130158.