DOI:10.13652/j.spjx.1003.5788.2024.80363

基于鲸鱼算法的BP-PID大米抛光机组控制系统优化

黄金良 周 劲 喻 伟

（武汉轻工大学电气与电子工程学院,湖北 武汉 430048）

摘要:[**目的**]解决当前大米抛光机组内部流量稳定性差、单机效率低、抛光质量差等问题。[**方法**]改进传统抛光机,明确其控制参数并建立大米抛光机组的数学模型。建立机组的整体通信系统,实时采集机组工作参数,引入品质分析仪实时检测机组抛光质量指标,构建数据库存储相关数据,并参与优化机组加工参数。使用BP神经网络训练传统机组PID控制器的参数,并引入鲸鱼算法(WOA)对BP神经网络进行优化,实现对大米抛光机组的快速精准控制。[**结果**]与传统PID控制机组相比,经WAO算法优化后的BP-PID控制的机组整体增碎率减少了2%,调控时间减少了30%,室温下,温升下降了2 ℃。[**结论**]该控制系统能够有效完成机组加工参数的调节,具有良好的控制效果。

关键词:大米抛光机组;品质分析仪;WOA;BP神经网络;PID控制

Optimization of the control system of BP-PID rice polishing unit based on WAO algorithm

HUANG Jinliang ZHOU Jin YU Wei

（*School of Electrical and Electronic Engineering*, *Wuhan Polytechnic University*, *Wuhan*, *Hubei* 430048, *China*）

Abstract: [**Objective**] Address the current issues of poor internal flow stability, low single-machine efficiency, and subpar polishing quality in rice polishing units. [**Methods**] Firstly, the traditional polishing machine was improved, its control parameters were clarified, and the mathematical model of the rice polishing unit was established. Then, the overall communication system of the unit was established, the working parameters of the unit were collected in real time, and the rice quality analyzer was introduced to detect the polishing quality indicators of the unit in real time. Built a database to store relevant data and participated in the optimization of the processing parameters of the unit. Finally, the parameters of the PID controller of the traditional unit were trained by the BP neural network, and the whale algorithm (WOA) was introduced to optimize the BP neural network to achieve fast and accurate control of the rice polishing unit. [**Results**] Compared with the traditional PID control unit, the overall fragmentation rate of the BP-PID controlled unit optimized by the WAO algorithm was reduced by about 2%, the control time was reduced by about 30%, and the temperature rise decreased by about 2 ℃ at room temperature. [**Conclusion**] The control system can effectively complete the adjustment of the processing parameters of the unit and has a good control effect.

Keywords: rice polishing unit; quality analyzer; WOA; BP neural network; PID control

全球50%以上的人口以稻米为主要食物来源,与中国同处亚洲的国家,有更大比例的人口以稻米为主要口粮[1]。当前,中国制造业处于转型升级和提质增效关键期,推动智能制造装备全面推广落地,智能制造技术全面进入传统产业[2]。稻谷加工业也开始向智能制造的方向发展[3]。在稻谷加工三大工序中,现有的大米抛光机组存在的主要问题为智能化水平低和加工质量差。王旺平等[4]设计的基于单片机的抛光机模糊控制系统,是以单机抛光压力和湿度为主要控制参数,已应用到日处理100 t的抛光机上,实现了抛光机的数字化,但其涉及的控制参

基金项目:湖北省重点研发计划项目(编号:2023BBB110)

通信作者:周劲(1974—),男,武汉轻工大学副教授,硕士。E-mail:zhoujin@whpu.edu.cn

收稿日期:2024-04-19 **改回日期:**2024-07-15

数少、精度低,且单机间缺乏信息交流。目前常用的多机轻抛工艺的机组存在流量难以平衡,产生单机效率低,抛光光洁度和增碎率矛盾的问题[5]。

研究拟提出一种基于鲸鱼算法(WAO)优化BP-PID控制的大米抛光机组控制系统,并将"强拉风低温抛光、多机轻抛"工艺进行智能化改造,通过调控出料门开度、着水率和主轴转速,最终实现大米抛光机组内部的流量平衡,从而最大程度上解决机组抛光光洁度和增碎率矛盾的问题[6]。机组控制系统通过WOA优化BP神经网络的初始权值和阈值,来提高网络性能和避免局部最优的情况,从而快速找到抛光单机PID参数的最优组合,最后使用Matlab软件进行仿真验证,并通过实验验证优化后的控制系统的优越性,为大米抛光设备控制系统的改进提供依据。

1　大米抛光机组系统总体方案

1.1　抛光机改进

现有的抛光机组通常由多台同型号的抛光机组成,加工参数依赖于人工调节,由于抛光机高功耗,企业为节约成本,抛光工序常在夜间运行,受限于工人数量和夜间工作的原因,工人往往降低机组流量和调大出料门开度使机组平稳工作。但这种方式放弃了对抛光压力、着水率等加工参数的控制,易导致含糠粉率高、增碎率和功耗增加的问题。抛光机组控制系统优化主要围绕数据的采集和对抛光压力、着水量等加工参数的智能调控[7]。机组采用多机轻抛和强拉风低温抛光的工艺,使用国产湿式摩擦抛光技术的抛光单机,使用4台双辊抛光机和2台单辊抛光机两两一道,共3道组成抛光机组,通过多机协同技术实现机组智能控制。其加工流程如图1所示。

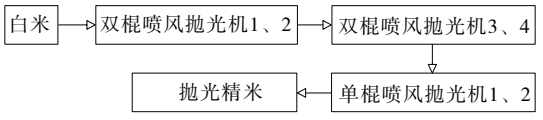
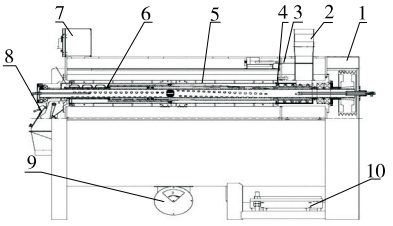


图1　大米抛光机组加工流程图

Figure 1　Rice polishing unit processing flow chart

对抛光单机进行改进,如图2所示。在出料口新增步进电机控制料门开度来调控流量和抛光压力,安装温度传感器T1,在排糠机构处新增温度传感器T2,抛光室内安装湿度传感器H1和压力传感器P1,在喷风口处安装压力传感器P2,增加对雾化着水系统的调控,全程监测并实时调控抛光过程中的大米温升情况和着水率。

改进后的抛光机组预设单台抛光机的抛光比例为4.0∶3.5∶1.5(可根据稻谷品种调整)。机组总体目标为单机实际抛光比例达到预设比例,以首道的双辊抛光机的



1. 机架　2. 进料口　3. 进料门　4. 着水系统　5. 抛光室　6. 柔性抛光轴　7. 控制柜　8. 出料门　9. 排糠系统　10. 主电机

图2　大米抛光机改进结构图

Figure 2　Rice polishing machine to improve the structure drawing

实际工况为参照,后续两道据此动态调整加工参数,从而实现机组内部流量的平衡和抛光质量的提升[8]。系统可实时调控各台单机的主轴转速、风压、白米流量、着水量等加工参数。在稳定工况运行一段时间后,通过品质分析仪对产品进行实时检测,上传白米抛光品质信息,保存至数据库为后续数据分析奠定基础。

抛光机组内的每台单机的输入模拟量为温度参数(T_1、T_2)、湿度参数(H_1)和压力参数(P_1、P_2),控制系统主要通过控制主电机转速V_1、出料门开度d_1和雾化着水系统阀门开度d_2来实时调整抛光机加工参数,通过温度、压力传感器来监测抛光过程中的温升和抛光压力变化。为有效解决控制系统精准控制机组的加工参数,结合抛光机特性和系统复杂程度,选择简化后的一阶线性时不变的三相异步电动机的线性化传递函数如式(1)所示。

$$G(s)=\frac{K_m}{T_sS+1}, \tag{1}$$

式中:

K_m——增益系数;

S——电机转差率;

$G(s)$——传递函数;

T_s——时间常数。

1.2　抛光机组控制系统设计

1.2.1　机组通信系统结构　智能抛光机组控制系统由6台智能抛光机和1台品质分析仪组成设备层,由数据缓存工作站和上位机PC组成控制层,智能抛光机控制器使用西门子S7-200Smart(ST40),数据缓存工作站控制器使用西门子S7-1200(1215C),品质分析仪与PLC之间采用MODBUS RTU通信协议,品质分析仪通过图像识别技术实时检测机组抛光质量效果并通过MODBUS TCP通信协议上传数据至上位机PC,检测指标见表1。数据缓存工作站对智能抛光机实时读工作数据,通过MODBUS TCP通信协议与上位机PC通信,并根据通信结果对智能抛光机实时写数据,在机组内部起数据缓存作用。在上

位机 PC 中建立智能抛光机组数据库，存储并分析生产环节中的技术经济指标和加工参数，结合抛光质量数据，迭代至最优加工参数方案经数据缓存工作站写入至智能抛光机执行。

表 1　品质分析仪检测指标

Table 1　Quality analyzer test indicators

寄存器地址	数据名称	单位	取值范围
0×0000	光洁度	%	0~10 000
0×0001	碎米率	%	0~10 000
0×0002	透明度	%	0~10 000
0×0003	白度	%	0~10 000
0×0020	检测状态标志位	无	0. 正在检测；1. 结束检测

智能抛光机、数据缓存工作站、品质分析仪、上位机 PC 和 MODBUS RTU/TCP 组成通信网络，构成抛光机组控制系统，工作人员可通过上位机 PC 通信程序，实现远程控制机组，其机组控制系统框图如图 3 所示。

1.2.2　数据库调用流程　抛光机 PLC 控制器可将加工参数上传并显示至触摸屏供现场人员监控，大米品质分析仪实时检测机组抛光质量并提供数据，数据缓存工作站汇总机组数据后，上位机实时读取数据工作站数据，分析实时抛光质量数据和设备运行参数，若超出预期则调用算法调控运行参数并存储优化后的运行参数，若符合预期则直接存储数据，实现数据库的更新和加工参数的迭代优化。

数据库优化加工参数优化流程如图 4 所示，控制系统初始化时，数据库下发由专家经验总结的加工参数至抛光机组，机组运行后，数据缓存工作站实时获取并上传湿度、抛光压力和主轴转速及此工作参数下的大米抛光质量数据，当抛光质量和加工参数超出规定范围时，调用算法优化 PID 参数，下发并保存优化后的参数，若抛光质量数据符合预期则直接保存机组工作参数及对应的抛光质量数据。

2　WOA 优化的 BP-PID 控制

2.1　传统 PID 控制

现有的抛光机控制系统常用的 PID 控制由比例、积分、微分 3 部分组成[9−10]，其结构如图 5 所示。

PID 控制根据参考值 $r(t)$ 和实际输出值 $y(t)$ 之间的偏差 $e(t)$ 来计算控制量 $u(t)$ 并作用于被控对象，从而调节被控系统的响应达到参考值。控制规律为：

$$u(t)=K_{\mathrm{p}}\left[e(t)+\frac{1}{T_{\mathrm{i}}}\int_0^t e(t)\mathrm{d}t+T_{\mathrm{d}}\frac{\mathrm{d}e(t)}{\mathrm{d}t}\right]。\tag{2}$$

经拉普拉斯变换后传递函数为：

$$G(s)=K_{\mathrm{p}}\left(1+\frac{1}{T_{\mathrm{i}}S}+T_{\mathrm{d}}S\right),\tag{3}$$

式中

K_{p}——比例系数；

T_{i}——积分时间常数；

T_{d}——微分时间常数；

s——复频率变量。

传统 PID 控制器存在参数难以在线调整、鲁棒性差等缺点，特别是当被控系统发生变化时，参数设置时间长且不能保证参数最优[11]，无法满足大米抛光机组控制系统的要求。

2.2　基于 BP 神经网络优化的 PID 控制

BP 神经网络具有强大的学习和映射能力，可通过数据训练过程学习并模拟输入和输出之间的复杂关系。在优化 PID 控制器过程中，通过不断调整网络权重快速寻找最优的 PID 参数组合。其控制流程如图 6 所示。

在 BP 神经网络中，输入数据经正向传播由隐含层至输出层产生输出结果，若不符合预期，将误差反向传播由

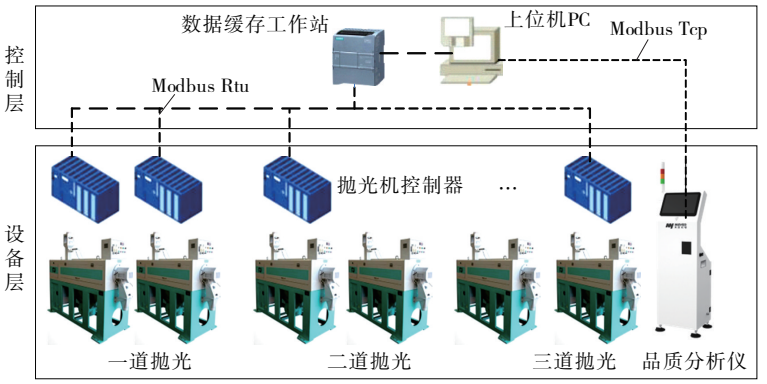


图 3　系统控制框图

Figure 3　System control block diagram

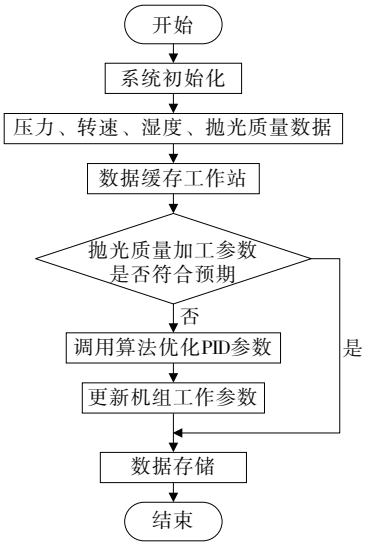


图4　数据查询与优化流程图

Figure 4　Data query and optimization flowchart

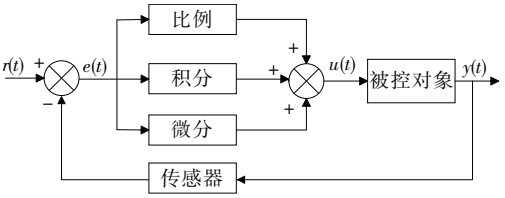


图5　PID结构图

Figure 5　PID structure diagram

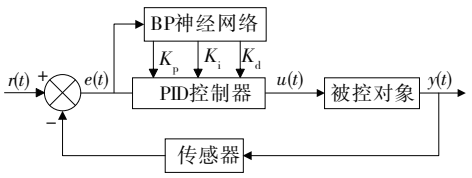


图6　BP神经网络PID控制结构图

Figure 6　BP neural network PID control structure diagram

隐含层至输入层,调整网络权重后,使误差梯度下降,通过一定次数的数据训练后,得到最优参数[12]。在BP-PID控制器中,将K_p、T_i、T_d 3个节点作为输出层,输入层为采集到的单台抛光机工作参数:温度T_2、湿度H_1、压力P_1、主电机转速V_1、出料门开度d_1 5个节点。

BP神经网络的性能与其网络结构中的隐含层节点数有关[13],通常使用经验公式得到隐含层节点数的大致范围,再通过试错法找到最优节点数,试验采取5个输入层、5个隐含层、3个输出层的网络结构。BP神经网络结构如图7所示。

输入层的输入、输出为:

$$O_j^{(1)}=x(j), \tag{4}$$

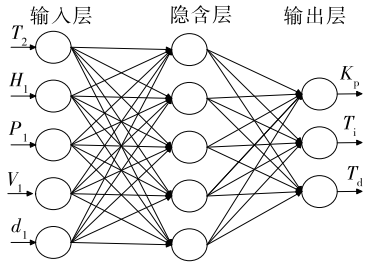


图7　BP神经网络结构图

Figure 7　BP neural network structure diagram

式中:

j——输入变量个数,1,2,…,5。

隐含层的输入、输出为:

$$net_i^{(2)}(k)=\sum_{j=0}^{M} w_{ij}^{(2)} O_j^{(1)}, \tag{5}$$

$$O_i^{(2)}(k)=f\left[net_i^2(k)\right], \tag{6}$$

式中:

i——隐含层神经元个数,1,2,…,5;

$w_{ij}^{(2)}$——隐含层第i和第j个神经元间的加权系数。

结合控制系统的特性,选择非线性、连续可微的正负对称的Sigmoid函数作为隐含层的激活函数:

$$f(x)=\frac{e^x-e^{-x}}{e^x+e^{-x}}。 \tag{7}$$

输出层的输入、输出为:

$$net_l^{(3)}(k)=\sum_{i=0}^{M} w_{li}^{(3)} O_i^{(2)}(k), \tag{8}$$

$$O_l^{(3)}(k)=g\left[net_l^3(k)\right], \tag{9}$$

式中:

$w_{li}^{(3)}$——输出层神经元间的加权系数(l=1,2,3)。

输出层节点分别表示比例、积分和微分系数。由于PID系数不能为负,选择非负的Sigmoid函数为输出层的激活函数:

$$g(x)=\frac{e^x}{e^x+e^{-x}}。 \tag{10}$$

选择对误差敏感,梯度计算较为简单的均方误差作为性能指标函数:

$$E(k)=\frac{1}{2}\left[r(k)-y(k)\right]^2。 \tag{11}$$

按$E(k)$对加权系数的负梯度方向搜索调整,并附加惯性因子使搜索快速收敛,在线调整隐含层和输出层加权系数,实现PID控制参数的自适应调整。

2.3　基于WOA优化BP-PID控制

WOA是一种模拟座头鲸特有的搜索方法和围捕机制的群体智能优化算法,具有收敛速度快、全局搜索能力强等优点被广泛应用于多个领域[14]。其主要包括3个阶

段：① 在搜索猎物阶段，算法模拟鲸鱼觅食的自然行为，不断扩展搜索范围，发现更多的潜在解；② 在包围猎物阶段，算法根据种群的适应度值，选择最优个体进行局部搜索，不断逼近最优解；③ 算法采用螺旋更新机制在接近最优解的区域精确搜索[15]。假设 n 维解空间中鲸鱼的位置为：

$$X=(x_1,x_2,x_3,\cdots,x_n)。\tag{12}$$

使用的位置更新式为：

$$X_i^{t+1}=\left|X_{\text{best}}^t-X_i^t\right|\cdot e^{bl}\cdot\cos(2\pi l)+X_{\text{best}}^t,\tag{13}$$

$$X_i^{t+1}=X_{\text{rand}}^t-A\left|C\cdot X_{\text{rand}}^t-X_i^t\right|,\tag{14}$$

$$A=2ar_1-a,\tag{15}$$

$$C=2r_2,\tag{16}$$

$$a=2-2t/t_{\max},\tag{17}$$

式中：

b——螺旋形状系数（控制螺旋紧密程度或展开的速率）；

l——[−1,1]内的随机数；

X_{best}^t、X_i^t、X_i^{t+1}——t、$t+1$ 时刻鲸鱼最优个体和鲸鱼个体位置；

X_{rand}^t——t 时刻随机个体位置；

A、C——系数向量和距离向量（鲸鱼根据 A 的值执行包围或搜索猎物操作）；

a——收敛因子；

r_1、r_2——[0,1]内的随机数；

t、$t_{\max}$——迭代次数和最大迭代次数。

在算法中，每个鲸鱼个体随机选择包围或驱赶猎物，两种行为的概率 p 为 50%，算法根据 p 的值选择式（13）或式（14）为位置更新公式[16]。

针对 BP 神经网络优化 PID 控制存在的学习速度慢和易陷入局部最优解等问题，引入 WAO，利用其收敛速度快、全局搜索能力强的优点，对 BP-PID 控制进行优化，提升其性能。基于 WOA 优化 BP-PID 控制通过参数较少的 WOA 来优化 BP 的性能，加快 PID 控制得到最佳参数的过程。控制流程如图 8 所示。

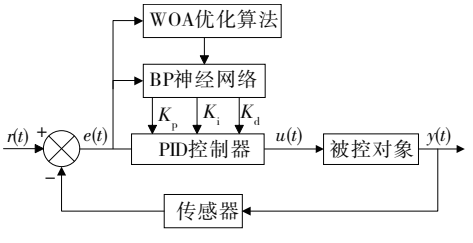


图 8　WOA 优化 BP 神经网络 PID 控制结构图

Figure 8　WOA optimized BP neural network PID control structure diagram

在 WAO 优化 BP 神经网络 PID 控制系统中，WAO 将 BP 神经网络的初始化权值和阈值转化为鲸鱼的空间位置向量，算法的适应度函数为 BP 神经网络的性能指标函数，然后计算种群内个体的适应度值来寻找最优个体位置并更新参数 a、A、C、p、l。通过判断 A 是否＞1，p 是否＞0.5 选择相应的位置更新公式，并重复至最大迭代次数后得到 BP 神经网络的初始最优权值和阈值，将其传递给 BP 神经网络。WOA 优化 BP 神经网络部分的算法流程如图 9 所示。

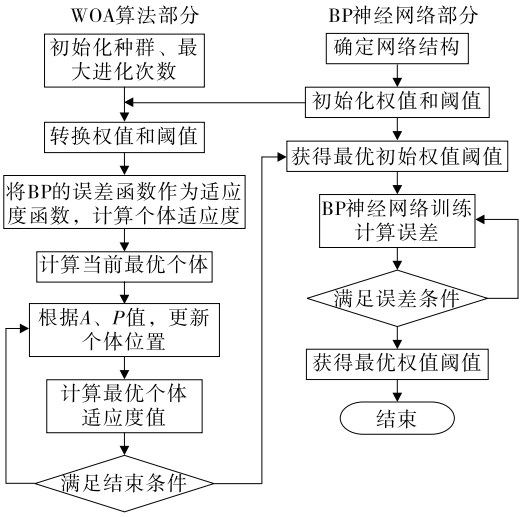


图 9　WAO-BP 算法流程图

Figure 9　WAO-BP algorithm flow chart

3　仿真结果与验证

为验证 WAO-BP-PID 优化后的控制系统在抛光机组上的控制效果，基于 Matlab R2022b 软件进行常规 PID 控制、BP-PID 控制和 WOA-BP-PID 控制的 3 种仿真，采样周期 5 ms，仿真时间 25 s。阶跃响应仿真结果如图 10 所示，瞬态性能指标见表 2。

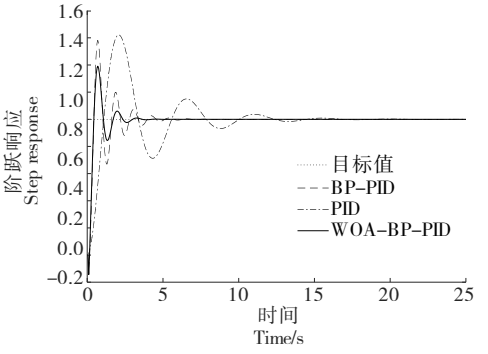


图 10　阶跃响应仿真结果

Figure 10　Step response simulation results

表2　瞬态性能指标

Table 2　Transient performance metrics

控制方法	上升时间/s	峰值时间/s	调节时间/s	最大超调量/%
PID	1.05	2.13	14.75	62.85
BP-PID	0.45	0.70	6.40	56.44
WOA-BP-PID	0.40	0.56	3.30	37.64

由图10可知,WOA-BP-PID算法最先到达目标值,且整体快速稳定,对比BP-PID算法,两者上升时间无明显区别,但前者在超调量和振幅上优势明显,对比PID算法,WOA-BP-PID算法的上升时间、峰值时间、调节时间和超调量拥有明显的优势,表明WOA-BP-PID算法提升了系统的整体性能。

由表2可知,WOA-BP-PID算法的4种瞬态性能指标均优于其他两种算法,对比PID算法调节时间减少近78%,最大超调量减少近40%,系统整体具有良好的响应速度和稳定性。

4　对比试验

为检验该优化控制系统在生产环境中的控制速度和控制稳定性,使用PID控制的抛光机组与WOA-BP-PID算法控制的抛光机组进行对比试验,并通过读取PLC获得的试验数据。选择经碾米的籼稻为加工品种,主要测试机组每道抛光的增碎率与PID机组整体的增碎率以及机组整体温升情况,结果如图11和图12所示。由图11可知,经WOA-BP-PID算法优化后的大米抛光机组的3道抛光的增碎率稳定时间小于PID控制的,且稳定后的增碎率较低。从每道抛光来看,改进后的大米抛光机组第2道抛光增碎率比第1道抛光减少了3%,第3道抛光增碎率比第2道抛光减少了2%,抛光机组整体的增碎率比PID控制的减少了2%,达到稳定增碎率的时间减少了30%。

由图12可知,改进后的机组控制系统抛光过程中的温升幅度下降约2 ℃,温升稳定时间减少。因此,从两种机组的大米抛光增碎率稳定试验结果可以看出,基于WOA-BP-PID算法优化后的抛光机组整体性能优于PID算法控制的,能够同时保证系统的响应速度和稳定性,满足在生产线应用的需求。

5　结论

针对现有的大米抛光机组流量不均衡和抛光质量差等问题,提出了一种基于鲸鱼算法优化BP-PID的控制系统,结合多机轻抛和强拉风低温抛光技术,实现了对大米抛光机组的智能化控制。结果表明,改进后的抛光机组在关键指标增碎率和温升上明显优于传统抛光机组,且

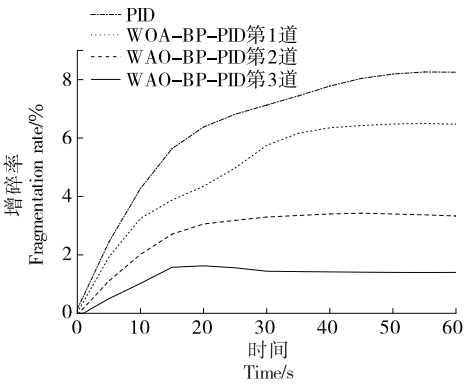


图11　增碎率变化图

Figure 11　Graph of the change in fragmentation rate

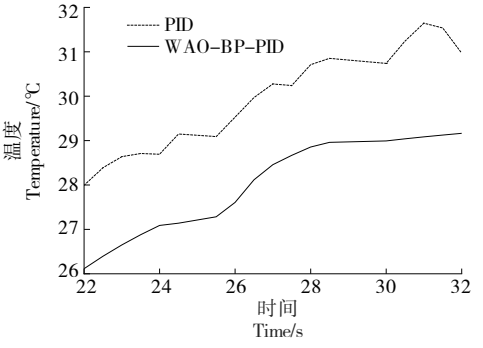


图12　机组温升变化图

Figure 12　Diagram of the temperature rise of the unit

大幅减少了控制系统的调控时间,实现了对机组内部的流量平衡,系统拥有良好的鲁棒性。后续可将该智能抛光机组和砻碾工段智能机组接入生产线智能管理系统,进一步提高稻谷加工生产线的智能化水平。

参考文献

[1] 石少龙. 中国大米安全风险分析[J]. 中国稻米, 2020, 26(1): 6-10.
SHI S L. China rice security risk analysis[J]. China Rice, 2020, 26(1): 6-10.

[2] 刘建丽, 李娇. 智能制造: 概念演化、体系解构与高质量发展[J]. 改革, 2024(2): 75-88.
LIU J L, LI J. Intelligent manufacturing: concept evolution, system deconstruction and high-quality development[J]. Reform, 2024(2): 75-88.

[3] SOMESWARARAO C, MAHATO S, NAMGIAL L, et al. Performance analysis of a novel cyclone-type pneumatic rice polisher[J]. Biosystems Engineering, 2017, 153: 1-11.

[4] 王旺平, 张永林. 大米抛光机智能控制系统的研究与实现[J]. 粮食与饲料工业, 2005(11): 3-4.
WANG W P, ZHANG Y L. Research and implementation of

intelligent control system of rice polishing machine[J]. Grain and Feed Industry, 2005(11): 3-4.

[5] 颜俊, 胡治湘, 罗红武, 等. 提高大米抛光机抛光光洁度降低碎米率的方法研究[J]. 粮食与饲料工业, 2020(3): 1-3, 6.
YAN J, HU Z X, LUO H W, et al. Research on the method of improving the polishing finish of rice polishing machine and reducing the broken rice rate[J]. Grain and Feed Industry, 2020 (3): 1-3, 6.

[6] 曹峰, 陈伟, 黄海军, 等. 实时流量智能控制大米抛光机的研发[J]. 粮食与食品工业, 2019, 26(5): 62-64.
CAO F, CHEN W, HUANG H J, et al. Research of rice polishing machine with real-time flow intelligent control[J]. Grain and Food Industry, 2019, 26(5): 62-64.

[7] 周劲, 刘爽, 苗青. 基于工业物联网技术的稻谷加工系统研究[J]. 食品与机械, 2023, 39(7): 93-98.
ZHOU J, LIU S, MIAO Q. Research on paddy processing system based on industrial internet of things[J]. Food & Machinery, 2023, 39(7): 93-98.

[8] 李强, 周劲, 张永林, 等. 基于PSO的BP-PID碾米机组控制系统优化[J]. 食品与机械, 2020, 36(11): 91-96.
LI Q, ZHOU J, ZHANG Y L, et al. Control system of rice whitening unit based on BP-PID controller optimized by PSO algorithm[J]. Food & Machinery, 2020, 36(11): 91-96.

[9] 李锦洋, 关翔予, 孔晓光, 等. 基于PSO算法优化模糊PID控制器的灵巧手抓取控制研究[J]. 工业仪表与自动化装置, 2024(2): 75-79.
LI J Y, GUAN X Y, KOMG X G, et al. Research on grasping control of smart hand optimization using fuzzy PID controller based on PSO algorithm[J]. Industrial Instrumentation and Automation Devices, 2024(2): 75-79.

[10] SINGH B, VERMA B, SHARMA S, et al. Indirect response-based tuning of PID controller with adjustable robustness[J]. Transactions of the Institute of Measurement and Control, 2023, 45(16): 3 049-3 056.

[11] 司明, 胡灿, 邬伯藩, 等. PID控制与性能评价仿真实验系统设计[J]. 实验室研究与探索, 2023, 42(12): 100-105, 209.
SI M, HU C, WU B F, et al. Design of PID control and performance evaluation simulation experiment system[J]. Laboratory Research and Exploration, 2023, 42(12): 100-105, 209.

[12] 朱凤磊, 张立新, 胡雪, 等. 基于蝙蝠优化BP-PID算法的精准施肥控制系统研究[J]. 农业机械学报, 2023, 54(S1): 135-143, 171.
ZHU F L, ZHANG L X, HU X, et al. Precision fertilizer application control system based on BA optimization BP-PID algorithm[J]. Transactions of the CSAM, 2023, 54(S1): 135-143, 171.

[13] 王毅红, 张建雄, 兰官奇, 等. 压制生土砖强度的人工神经网络预测模型[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2020, 48 (7): 115-121.
WANG Y H, ZHANG J X, LAN G Q, et al. Artificial neural network prediction model for suppressing the strength of raw earth bricks[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2020, 48(7): 115-121.

[14] 蒋利炜, 何可人, 陈航. 基于PSO改进BP算法的直流电子负载PID控制仿真[J]. 计算机仿真, 2024, 41(1): 306-310.
JIANG L W, HE K R, CHEN H. Simulation of PID control DC electronic load based on PSO improved BP algorithm[J]. Computer Simulation, 2024, 41(1): 306-310.

[15] TIAN Y S, YUE X F, ZHU J. Coarse-fine registration of point cloud based on new improved whale optimization algorithm and iterative closest point algorithm[J]. Symmetry, 2023, 15 (12): 2 128.

[16] 袁科, 许素安, 富雅琼, 等. 基于WOSA-BP的车辆动态称重算法研究[J]. 传感技术学报, 2024, 37(1): 50-57.
YUAN K, XU S A, FU Y Q, et al. Research on weigh-in-motion algorithm of vehicle based on WOSA-BP[J]. Journal of Sensing Technology, 2024, 37(1): 50-57.