

基于工业物联网技术的稻谷加工系统研究

Research on paddy processing system based on industrial internet of things

周 劲 刘 爽 苗 青

ZHOU Jin LIU Shuang MIAO Qing

(武汉轻工大学电气与电子工程学院, 湖北 武汉 430048)

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

摘要:目的:解决稻谷加工系统缺乏设备间信息交流和协调控制导致的大米产出质量不稳定问题。方法:基于工业物联网技术构建了稻谷加工系统 5 层架构,针对架构中网络层、决策层、控制层等层级存在的技术难题分别提出了基于机器视觉的无线传感器网络模型、基于差分进化算法的模糊自整定控制模型和砻谷机胶辊同步控制方法等相应层级难题的解决方法,并对系统的软硬件进行设计,对砻碾工段进行了实际改造,选用早籼稻谷进行了加工试验。结果:相比于传统加工,改进后的稻谷加工系统出糙率提升约 1%,整精米率提升约 1%,生产能耗降低约 15%。结论:设计的基于物联网技术的稻谷加工系统对提高稻谷加工等流程加工系统的智能化改造具有借鉴意义。

关键词:物联网;稻谷加工;传感器网络;智能控制

Abstract: Objective: To solve the problem of unstable rice output quality caused by the lack of information exchange and coordinated control between equipment in the rice processing system. **Methods:** Based on the industrial internet of things technology, a five-layer architecture of the rice processing system was constructed, and the solutions to the technical problems existing in the network layer, decision layer and control layer of the architecture were proposed for the corresponding layer problems such as the wireless sensor network model based on machine vision, the fuzzy self-tuning control model based on differential evolutionary algorithm and the rubber roller synchronization control method of the huller. The hardware and software of the system were designed, the actual transformation of the hulling and milling section was carried out, and then early indica rice grains were selected for processing tests. **Results:** Compared with the traditional processing, the improved rice

processing system increased the browning rate about 1%, the whole fine rice rate by about 1%, and the production energy consumption is reduced about 15%. **Conclusion:** The researched rice processing system based on IOT technology has implications for improving the intelligent transformation of process processing systems such as rice processing.

Keywords: internet of things; paddy processing; sensor network; intelligent control

稻谷是中国种植面积最大、总产量最多的大宗粮食作物,在中国粮食生产中具有举足轻重的地位^[1]。稻谷加工成大米需经过筛分、砻谷、谷糙分离、碾米、抛光、色选、分级、打包等工序。其中,“砻谷→谷糙分离→碾米→抛光”作为稻谷加工的核心工段(砻碾工段),相关加工设备产生能耗占产线总能耗的 80% 以上,所产生的大米增碎占总体的 90% 以上^[2]。过高的能耗及增碎主要由砻碾工段设备对米粒的过度加工导致。此外,过度加工会导致谷物中膳食纤维与 B 族维生素的大量损失,降低大米的营养价值^[3]。中国于 2019 年 5 月 1 日起施行大米加工新国标(GB/T 1354—2018),该标准呈现两大技术特征:适度加工、机器检测。2021 年,党中央、国务院高度重视优质粮食工程建设,以“六大提升行动”(第 4 项为粮食机械装备提升行动)为重点深入推进该项目。

近年来,随着先进控制、大数据分析、5G 通讯等新兴科技的发展,国内外相继开展了基于多学科交叉技术的稻谷加工系统智能化研究^[4]。Rosales 等^[5]开发了便携式碾米系统,满足了偏远地方的稻谷加工需求,且碎米率仅为 10% 左右。瑞士 Buhler 公司生产的大型装备主要在信息交互和数据库建立方面有较大改进^[6]。中国在加工智能化方面也有相应探索,包括武汉中机星粮食机械研发的 CFN2525 F1 碾米机,湖北永祥生产的 CM8000X2 抛光机,武汉天拓伟业的 AC-PH03 砻谷机,均配备有工业控制器,实现了高度自动化。然而,传统稻谷加工行业中主要采用砻谷机和多机轻碾技术的碾米机组作为加工

基金项目:湖北省揭榜制粮食科技计划项目(编号:鄂粮函[2022]21 号,鄂粮函[2021]18 号)

作者简介:周劲(1974—),男,武汉轻工大学副教授。

E-mail: googletimes@qq.com

收稿日期:2022-11-25 **改回日期:**2023-04-29

设备集群,其控制系统中需要对机组内各环节的加工数据进行检测反馈、参数调控以及数据存储,现阶段使用的机组系统常因缺乏信息交流和协调控制,易引起加工系统内部碾磨力度不均或过碾等问题,导致整个机组生产的成品大米质量差异较大,不适用于大规模的标准化生产^[7]。

“物联网”(Internet of things)的概念早在 1999 年就被提出,它是通过射频识别系统或类似的信息传感器技术将一切事物与互联网连接起来,实现智能识别和管理^[8]。将物联网融入工业生产过程,可以实现复杂的数据交换,改善传统复杂的加工制造流程,从而有效提高工作效率^[9]。目前国内外学者对工业生产中的物联网技术进行了多方面的深入研究,通过对工业物联网智能设备数据的收集、交换及处理实现了对生产环境更深入的感知与理解,并构建出多种精密的系统来提高工业生产质量,在生产工艺优化、生产设备监控、环境及能源管理等方面均取得很多突破性的应用进展^[10-12]。

基于上述背景,研究针对当前稻谷加工系统中存在的信息交互和协调控制问题,拟设计一种基于工业物联网技术的稻谷加工系统,以期对稻谷加工等流程工业加工系统的智能化改造提供新思路。

1 系统总体设计

1.1 加工工艺

受地域及稻谷品种等因素影响,稻谷的加工工艺稍有不同。现代稻谷加工通常包括原粮清理、砻谷、碾米、白米整理四大工段,加工流程如图 1 所示。清理阶段主要通过去石机、风机等设备对初始稻谷中含有的杂质进行清理;砻谷阶段主要通过砻谷机、谷糙分离等设备实现对稻谷颖壳的去除及稻壳、糙米及混合物的分离;碾米阶段一般通过多道碾米机对砻谷后的糙米进行碾白处理;白米整理是稻谷加工的最后阶段,其根据出产大米的精制程度有所不同,一般包括抛光、分级及色选等工序。

在信息化技术融合稻谷加工行业的进程中,稻谷加工工艺一直朝着低破碎、低能耗的方向发展。因此引入工业物联网技术构建的稻谷加工系统,旨在打通各工段间的“信息壁垒”,破解核心工段调控难题,进而提高加工过程的整精米率,同时降低加工能耗,实现稻谷加工系统的动态优化。

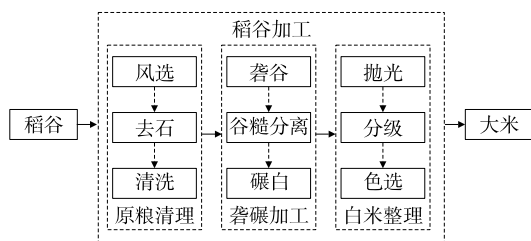


图 1 稻谷加工工艺流程

Figure 1 Process of paddy processing technology

1.2 系统架构

基于工业物联网技术的系统通常建立在特定的架构上,包括具有特殊功能的不同层次和元素^[13-14]。为实现稻谷加工系统的动态优化控制,将系统架构分为 5 个层级,包括感知层、网络层、决策层、控制层和应用层,如图 2 所示。

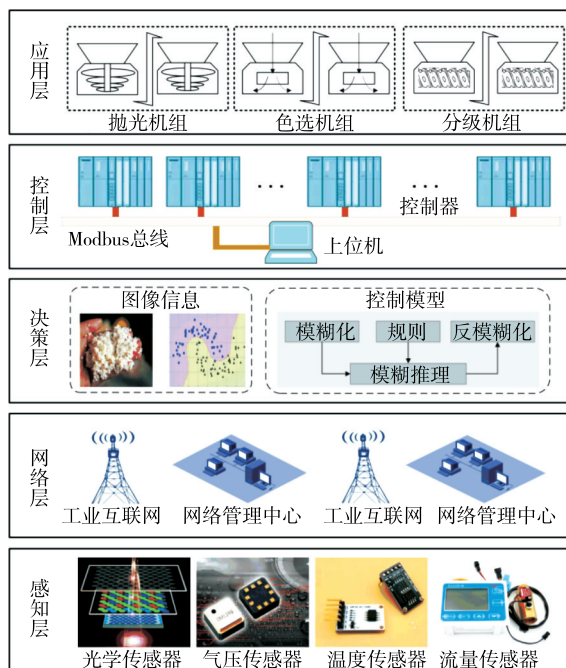


图 2 稻谷加工系统物联网架构

Figure 2 IoT architecture for paddy processing systems

其中,感知层主要涉及各机组运行参数传感器、出口口图像采集传感器等,将收集的环境数据进行预处理转化为与其他层级更易兼容的数字数据,获取大米加工后呈现出的物理特性,为工艺参数分析提供数据支撑;网络层主要采用工业物联网,通过部署网络环境,包括通信网络及通信协议的应用,使其满足复杂作业环境中的配置灵活性、网络节点的功耗、时延及故障自修复能力、设备间交互性等工程技术的进一步要求,从而实现感知层多元数据信息到云端服务器的传递功能,保证多设备多系统的管理及协同工作稳定性;决策层执行数据抽象与数据处理工作,将云端积累的数据进行高度抽象,整合多数据源核定数据格式并聚合数据,判断业务需求与所获数据的相关性进行分析与处理。稻谷加工系统中的决策层主要工作可概括为根据传输得到的机组控制器输入数据、被控量检测数据以及大米图片数据进行控制模型建立;控制层面面向工程应用场景,是数据处理与工程应用的桥梁,主要工作为将决策层的数据分析结果结合工程实际需求实现结果的控制参数化并进行多层控制参数的传输以实现决策应用。应用层又可以理解为工程层,涵盖所有加工机械及感知设备,层级中的物理设计保证各类

数据的产生与所获参数数据的充分利用以实现加工装备的正常高效运行。通过制定各层级之间统一的通信协议与平台,实现物联网中各类设备之间的高速信息沟通与交换。

2 关键层级设计及技术研究

2.1 基于无线传感器网络模型的网络层设计

研究提出一种基于机器视觉的无线传感器网络模型,采用图像识别技术分析大米的碾磨程度,再结合传感器网络实现远程检测功能,如图3所示。

稻谷加工系统的主要工作流程由数据采集环节开始,各传感器节点作为无线传感网络末梢配置摄像头采集碾磨大米图片, n 个节点以自组织方式构成网络并通过多跳等方式传送至汇聚节点,汇聚节点对收集的图片信息进行必要处理后进入数据传输环节;原始的图片信息经由无线传感器、防火墙和工业以太网传输路径传送至上位机进行数据分析及处理环节工作;选用大米白度作为图像识别对象,由于大米白度具有随糠层去除程度升高而增加的特性^[15],同品种大米的白度与碾磨精度为正相关关系^[16-17]。因此,以白度图像识别结果作为大米碾磨程度指标进行反馈调节^[18-19]。上位机的图像识别技术主要采用支持向量机的方法对大米白度进行多分类。首先,通过图像切割和特征提取完成采集图像数据的预处理,再将预处理后图像进行颜色矩特征提取组成数据集,将其按一定的比例划分为训练样本和测试样本,选择一些结果图像作为模型测试。将提取的特征参数作为支持向量机输入对图像进行分类识别,采用高斯核函数,将低维度数据映射到高维度,实现特征较少的模型多分类。而后将图像识别输出值送至灰箱模型进行分析计算。系统工作至反馈控制环节为止,反馈控制环节是将数据处理中搭建的模型输出及相关数据送至 PLC 控制器中最终

实现对稻谷加工设备的控制。稻谷加工系统中各工序的反馈调节具有同种逻辑,以碾米工序为例,将大米白度图像识别结果传输至 PLC 中作为碾米环节碾磨实际精度指标输入,PLC 将该指标上传至上位机决策层算法模型中进行分析处理,处理后的算法模型输出,即碾米机相关加工参数值被传送至 PLC 中,执行相应加工程序,实现对碾米机的反馈控制调节。

2.2 基于差分进化算法模糊自整定控制模型的决策层设计

研究提出的基于差分进化算法的模糊自整定控制模型主要涉及到砻谷机、碾米机和抛光机,如图4所示。首先,定义设备模型的输入 $x=[x_1, x_2, \dots, x_n]^T$ 和输出变量 $y=[y_1, y_2, \dots, y_n]^T$ 。输入变量主要包括砻谷机胶辊转速、碾米机转速、抛光机转速、风门开度、流量阀门开度等,输出变量主要包括爆腰率、过碾率、碎米率、漂白度等。然后进行模糊自整定,主要包括参数的模糊化、制定模糊规则,进行模糊推理,最后对输出进行反模糊化。根据经验选择合适的隶属函数与初始模糊规则,针对初始模糊规则的定义存在缺乏准确性和完整性的问题,提出了一种在线自整定的模糊规则优化方法,通过迭代的方式进行不断修正,如式(1)所示。

$$\Delta R_i(k) = C\mu_i(k-1)e_y(k) = C\mu_i(k-1)[r_i(k-1) - y(k)], \quad (1)$$

式中:

$\Delta R_i(k)$ ——输入修正偏差值;

$\mu_i(k-1)$ ——第 i 条规则的激活度;

$e_y(k)$ ——理论输出与实际输出偏差值;

$r_i(k-1)$ —— $k-1$ 时刻的设定值;

$y(k)$ —— k 时刻的实际输出值;

C ——归一化常数。

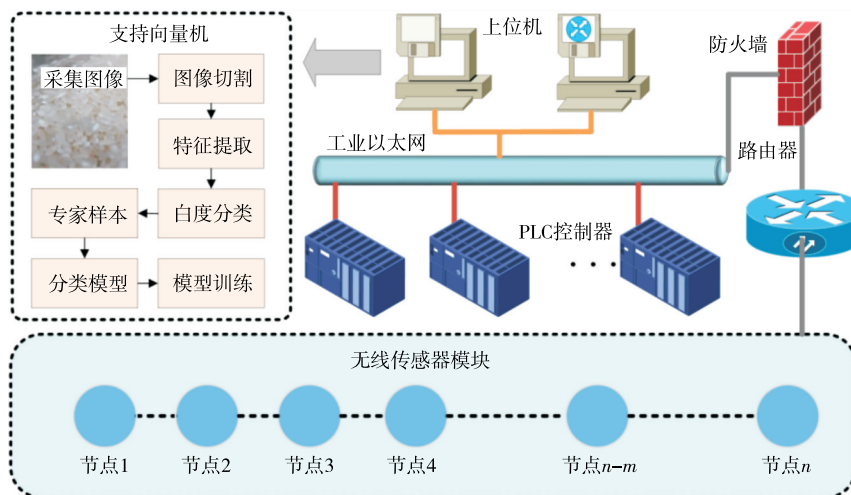


图3 基于机器视觉的无线传感器网络模型

Figure 3 Wireless sensor network model based on machine vision

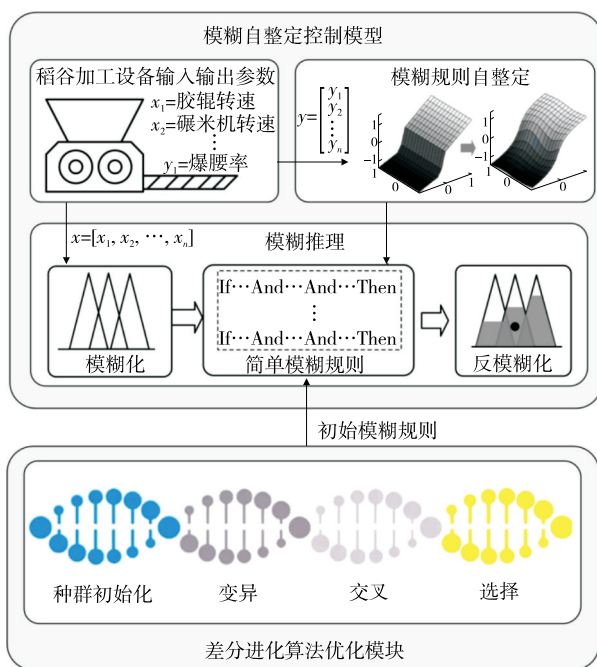


图 4 基于差分进化算法的模糊自整定控制模型

Figure 4 Fuzzy self-tuning control model based on differential evolution algorithm

考虑到该方法较依赖初始规则以及迭代方向,采用差分进化算法对其进一步优化,首先进行种群参数初始化,包括种群规模、变异算子、交叉算子等,而后种群个体根据适应度函数值为参数寻出最优解,无最优解则执行变异与交叉操作产生新种群,为新种群计算适应度值继续选择最优下一代,重复迭代上述寻优步骤直至选出最优解,为模糊自整定模型在全局范围内寻找一个较准确的起始迭代位置。

2.3 基于砉谷机胶辊同步控制的控制层设计

目前的稻谷加工生产中砉谷环节的主要加工设备为胶辊类砉谷机,稻谷流入线速度不同的两快慢胶辊间,由两胶辊相向运动对处于辊间的稻谷产生搓撕效应从而脱去颖壳。在中国,传动装置主要采用单皮带联动或双皮带与齿轮变速箱结合的方式进行控制与调速,该方式存在结构复杂、故障率高、调控精度低等缺陷。张士雄等^[20]提出了一种双变频驱动的全自动胶辊砉谷机,其快慢两胶辊使用两组独立的变频电机和变频器分别驱动,简化了砉谷机整体结构,大大提高了系统内控制参数的调控精度。此外,目前现场加工系统中有关数据的通信方式主要为串口通信,该方式普及率高,成本低,但通信速度相对较低,电缆过多时易出现通信不稳定问题。相比于串口通信,Profinet 工业以太网通信方式在实时性、周期性及稳定性方面均有更为出色的表现。同时,砉谷作业中存在由于胶辊工作损耗导致快辊与慢辊之间线速差波动过大进而影响脱壳工艺效果的问题。基于上述背景,

为保持砉谷作业时辊间线速差相对稳定,提出了一种基于总线模式的胶辊同步控制方法,胶辊工作电机控制的系统结构图如图 5 所示。选择集成 PN 接口的编码器安装于驱动电机上(图 5 中以编码器电机尾部安装方式为例),驱动电机配置编码器进行精确感知,运作数据通过 Profinet 工业以太网以实时通讯方式传送至 PLC 控制器中,所获数据作为反馈控制输入由 PLC 控制器进行分析,处理后得到修正的两快慢胶辊速度并下达命令,使用双变频器分别驱动两胶辊电机执行命令,最终实现两胶辊的同步动态优化调整。电机控制框图如图 6 所示。

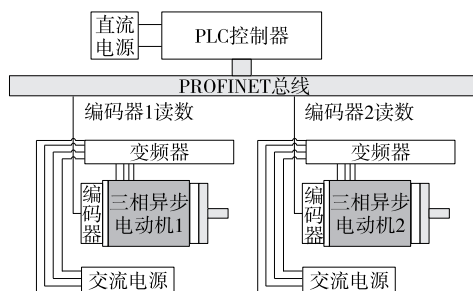


图 5 胶辊电机控制系统结构图

Figure 5 Structure of the rubber roller motor control system

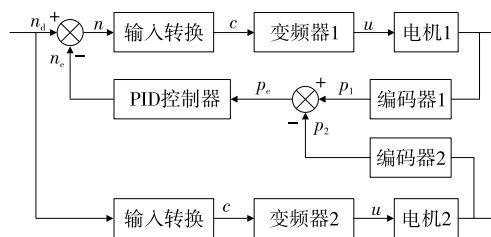


图 6 胶辊电机控制框图

Figure 6 Block diagram of rubber roller motor control

开环控制方面主要是通过设定电机 1 和电机 2 的期望转速 n_{d1} 、 n_{d2} , 计算控制信号生成量,再由电机驱动器输出电压信号控制电机按照 n_d 转动。反馈回路主要是通过计算编码器 1 和编码器 2 读到的电机位置 p_1 和 p_2 转动位置的偏差值 p_e ,再结合 PID 控制器计算电机转速增量 n_e ,最后和 n_d 合成修正的转速 n_1 、 n_2 ,形成闭环控制。

2.4 基于核心装备智能化改造的感知层及应用层设计

稻谷加工的主要加工设备有砉谷机、谷糙机、碾米机及抛光机,分别对应稻谷加工的各加工环节。应用层针对与感知层数据采集及其他层级数据处理与控制技术深度融合的加工过程优化需求进行设计。根据砉谷机、谷糙机、碾米机、抛光机的工作原理,从伺服控制和闭环控制两个方面对传统设备进行智能化改造。主要改造内容可分为改造控制元素、植入感知层传感系统、构建工艺检测下料(出料)通道、架设工业互联网物理通道四方面。其中,控制元素主要为机械结构控制(如风门、压砉、淌

板、筛的倾角、水量等)和工作参数控制(如流量、振动频率、转速等);植入感知层各类传感器组成的传感系统,例如安装光电编码器检测系统内电机转速;安装温度、压力传感器对碾米机、砻谷机等主要加工设备加工室内温度及压力进行采集;安装流量秤采集进料料斗及出料粮仓的谷物流速等等,传感系统的主要功能是实现了对设备显著性影响参数(转速、振动频率、倾角、风速、风压、流量、辊压、线速度/线速度差、辊径、位置、砑压、电流、角度、扭力、水量等)的检测;基于图像采集原理,搭建下料(出料)通道的物理检测平台,对每台加工设备的出料口米粒品质进行连续、实时在线检测;在生产车间内架设通信线缆,构建各生产节点、机械控制系统、传感系统、工艺检测系统之间的通信物理链路。

3 平台软硬件设计与实现

3.1 网络层通讯设计

网络层中传感器主要选用适用于低中速常规工业场景的工业相机进行原始图像数据的获取,为了实现图像在无线传感器网络环境中的高效传输,采集的图像经由微处理器进行图像压缩。在图像传输方面,拟选用国产的2.4G模块作为无线通讯模块。为了保证无线传感器网络能够应用于工业物联网,每个节点运行6LoWPAN协议并在微型操作系统中运行。每个节点作为系统的终端设备运行,而另一个节点作为边界路由器运行,接收数据并通过以太网总线方式传输至上位机,供决策层控制模型的实时修正。

3.2 控制层设备通讯设计

控制层中的下位机控制器采用西门子S7-1200 PLC控制器,上位机主要通过总线将控制指令发送至PLC控制器,同时基于WINCC软件实现状态检测和人机交互。上位机与下位机之间的通讯方式采用工业以太网总线,其灵活的拓扑和媒介可以实现复杂环境的布线,且具备的高实时性能够满足稻谷加工控制需求。

3.3 附加用户层设计

为了应对生产中特殊情况下稻谷加工过程的正常运行,例如工作人员缺岗、疫情期间难以聚集加工等情况,通过5G技术建立加工参数与远端设备的连接,实现加工过程的实时远程监控,确保稻谷加工的正常运转。一旦出现故障,操作者可通过远端设备进行急停操作,并根据经验进行简单故障诊断。

3.4 应用效果

为测试该系统在实际生产中的应用情况,对某传统稻谷加工工厂砻谷及碾米工序进行改造并进行加工试验。首先对生产现场实施物理改造,铺设工业物联网物理通道,各工序植入传感系统,工序后端出料处安装检测装备。中控室处于一层配备上位机、监控屏与控制柜进行相应通讯网络、控制指令、运行状态显示等网络设计经

由铺设总线线路连接负一层生产车间各装备,实现应用层远程读取现场加工信息及控制指令的远程下达。

选用早籼稻谷进行加工试验,试验稻谷含水量为14%,按加工稻谷重量分为5组进行加工,对比改进前后砻谷工序出糙率,其结果如图7所示;加工整精米率前后对比见图8,系统加工能耗率对比结果如图9所示。

由图7~图9可知,改进后的砻谷工段出糙率、产出整精米率与改进前对比明显增加,加工能耗与改进前相比出现明显降低,以加工10 t稻谷为例,其出糙率由74.93%提升至76.12%,整精米率由54.36%提升至55.32%,同时加工能耗率由82.96%降至72.35%,表明在保证出糙率及整精米率提高的同时,能耗也有显著降低。通过多组加工结果对比可知,改进后的稻谷加工系统出糙率较传统加工提升约1%,整精米率提升约1%,同时生产能耗降低约10.5%,整体加工效果良好,且具有相对良好的稳定性。

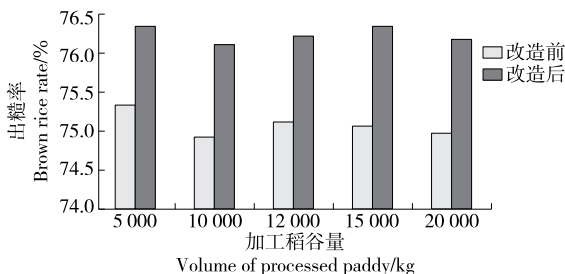


图7 加工出糙率变化

Figure 7 Comparison of processed brown rice rate

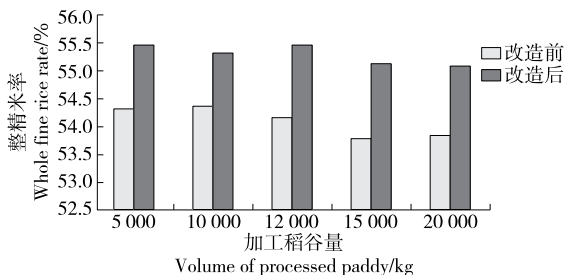


图8 加工整精米率变化

Figure 8 Comparison of processed whole fine rice rate

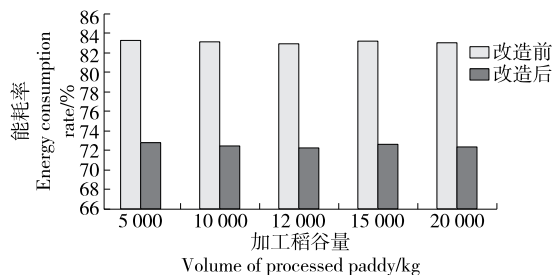


图9 加工能耗率变化

Figure 9 Comparison of processed energy consumption rate

4 结束语

针对现有的稻谷加工系统缺乏设备间信息交流和协调控制的问题,提出了一种基于工业物联网技术的稻谷加工系统架构,主要创新在于:① 在网络层中,针对目前大米白度检测技术和安装环境受限的问题,搭建基于机器视觉的无线传感器网络检测模型,实现大米白度的远程实时检测;② 在决策层中,针对由于稻谷设备控制变量繁多导致的控制模型难以建立的问题,提出了一种基于进化算法和智能控制算法构建灰箱模型,实现控制对象的准确表征和持续优化;③ 在控制层中,针对目前稻谷机胶辊控制同步性缺失问题,提出一种基于总线模式的控制方法。稻谷加工生产中除研究中重点关注的砻碾工段外,抛光加工也是影响产出大米质量的关键工段,后续将从抛光加工的着水及压力智能调节方面进行研究,进一步提高稻谷加工生产线的智能化水平。

参考文献

- [1] 胡文忠. 当前我国稻谷市场供需形势与价格走势[J]. 中国粮食经济, 2021(4): 60-62.
HU W Z. Current supply and demand situation and price trend in China's rice market[J]. China Grain Economy, 2021(4): 60-62.
- [2] 胡纪东. 湖北省稻谷加工粮食损失现状调查与评估[D]. 武汉: 武汉轻工大学, 2018: 8-20.
HU J D. Investigation and estimate on the status of rice processing loss in Hubei province[D]. Wuhan: Wuhan Polytechnic University, 2018: 8-20.
- [3] 陈思思, 樊琦. 我国稻谷过度加工造成营养物质损失浪费的研究[J]. 粮食与油脂, 2020, 33(7): 10-13.
CHEN S S, FAN Q. Research on nutrient loss and waste during rice over processing in China[J]. Cereals & Oils, 2020, 33(7): 10-13.
- [4] ADEDEJI K A, RAJI N A, OYETUNJI E O, et al. Design and fabrication of a motorized rice hulling machine [J]. Journal of Engineering Research, 2020, 11(1): 1-10.
- [5] ROSALES M M, CORONEL G M C, LORILLA J K P, et al. Cloud-based Portable Rice Milling Machine using Internet of Things[C]// 2022 2nd International Conference on Intelligent Technologies (CONIT). Hubli: IEEE, 2022: 1-7.
- [6] SAIRI S A M, MUSTAFFHA S. Comparative study of three rice brands' quality through measuring broken rice percentage using sortex A ColorVision (Buhler) optical sorters[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2020, 515(1): 012017.
- [7] 蒋志荣, 刘华旺, 贾雳, 等. 水稻加工智能工厂浅述[J]. 粮食加工, 2019, 44(1): 35-37.
JIANG Z R, LIU H W, JIA L, et al. Brief introduction to intelligent rice processing plant[J]. Grain Processing, 2019, 44(1): 35-37.
- [8] 郝运. 智能物联网技术及应用的最新趋势[J]. 科技创新与应用, 2022, 12(26): 153-156.
HAO Y. New trend in the development of smart internet of things technologies and applications [J]. Technology Innovation and Application, 2022, 12(26): 153-156.
- [9] WEYRICH M, EBERT C. Reference architectures for the internet of things[J]. IEEE Software, 2015, 33(1): 112-116.
- [10] LIU R, WANG J F. Internet of things: Application and prospect[J]. MATEC Web of Conferences, 2017, 100: 02034.
- [11] CUI L, YANG S, CHEN F, et al. A survey on application of machine learning for internet of things[J]. International Journal of Machine Learning and Cybernetics, 2018, 9(8): 1 399-1 417.
- [12] 和征, 李彦妮, 杨小红. 制造企业工业物联网的发展与智能制造转型分析: 基于三一重工的案例研究[J]. 制造技术与机床, 2022(7): 69-74.
HE Z, LI Y N, YANG X H. Analysis on the development of industrial internet of things and the transformation of intelligent manufacturing enterprises: Based on the case study of sany group [J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2022(7): 69-74.
- [13] LATIF S, DRISS M, BOULILA W, et al. Deep learning for the industrial internet of things (IIoT): A comprehensive survey of techniques, implementation frameworks, potential applications, and future directions[J]. Sensors, 2021, 21(22): 7 518.
- [14] BOYES H, HALLAQ B, CUNNINGHAM J, et al. The industrial internet of things (IIoT): An analysis framework[J]. Computers in Industry, 2018, 101: 1-12.
- [15] 吴建永, 刘成梅, 刘伟, 等. 大米加工精度检测方法研究进展[J]. 食品工业科技, 2015, 36(18): 395-399.
WU J Y, LIU C M, LIU W, et al. Research progress in methods for detecting milling degree of rice[J]. Science and Technology of Food Industry, 2015, 36(18): 395-399.
- [16] SALEH M I, MEULLENET J F. Effect of moisture content at harvest and degree of milling (based on surface lipid content) on the texture properties of cooked long-grain rice [J]. Cereal Chemistry, 2007, 84(2): 119-124.
- [17] REN H B, QI S M, ZHANG L H, et al. Variations in the appearance quality of brown rice during the four stages of milling [J]. Journal of Cereal Science, 2021, 102: 103344.
- [18] PERDON A A, SIEBENMORGEN T J, MAUROMOUSTAKOS A, et al. Degree of milling effects on rice pasting properties[J]. Cereal Chemistry, 2001, 78(2): 205-209.
- [19] RODRIGUEZ-ARZUAGA M, CHO S, BILLIRIS M A, et al. Impacts of degree of milling on the appearance and aroma characteristics of raw rice[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2016, 96(9): 3 017-3 022.
- [20] 张士雄, 阮竞兰, 武照云, 等. 基于双电机驱动全自动气压胶辊砻谷机的研制与控制系统设计[J]. 粮食与饲料工业, 2015 (11): 5-7.
ZHANG S X, RUAN J L, WU Z Y, et al. The development and control system design of dual motor-based automatic pneumatic rubber brick husker[J]. Cereal & Feed Industry, 2015(11): 5-7.