

编者按:在新一代科技革命与产业革命的驱动下,食品科技与食品工业正经历前所未有的变革与挑战。食品装备技术作为连接农业、制造业与消费终端的枢纽,它的创新与产业升级不仅是保障食品安全,提升产品品质与生产效率,降低能耗的关键,更是推动行业智能化转型的核心动力与重要保障。然而,目前我国食品装备关键技术和装备薄弱,限制了行业的发展。随着 AI、大数据、物联网等技术的开发与应用,食品装备智能化将为食品制造高质量发展注入新动能。本刊现开设“食品装备”特约专栏,连续刊载相关文章。

(本刊主编:中国工程院院士陈坚教授。客座编辑:江苏大学食品与生物工程学院徐斌教授。)

谷物加工设备智能化发展与实践

张恒达, 李生龙, 张成林, 朱晓月*, 崔晨昊, 范仲亚

(布勒(无锡)商业有限公司 江苏无锡 214142)

摘要 本文综述谷物加工设备智能化的发展历程及其具体应用实践。谷物加工的智能化发展历程历经数据连通、生产监控、数据反馈调节和自我优化调节 4 个重要阶段。每个阶段都标志着技术的重大进步和对应用的深远影响。数据连通阶段,实现工厂内设备自动化和生产数据的采集,初步提升了生产效率和管理透明化。生产监控阶段,通过对生产过程采集的数据进行深度分析,形成数据驱动的优化和改进建议,更好地提升生产效率及产品质量。数据反馈调节阶段,基于数据分析决策,指导设备自动调节,实现重要功能的闭环控制,降低人工干预,显著提高生产效率,保证产品品质。自我优化调节阶段,集成人工智能和机器学习算法,实现设备的自主决策和优化控制,真正达到智能化水平。当前,谷物加工智能化在前 3 个阶段均有良好实践,如数据连通阶段的自动化连续卸船机和智能研磨系统;生产监控阶段的故障停机分析和温度及振动管理等;数据反馈调节阶段的面粉粉色闭环控制和麸皮含粉闭环控制等,均在行业内带来较大影响。未来,随着谷物加工设备技术的不断创新,人工智能、大数据、物联网等技术将会持续发展和实践,谷物加工智能化将迎来更加广阔的发展前景。

关键词 智能化; 谷物加工; 传感器; 数据驱动; 反馈调节; 生产效率; 资源优化

文章编号 1009-7848(2025)01-0001-11 **DOI:** 10.16429/j.1009-7848.2025.01.001

随着工业 4.0 的发展,互联网、大数据、云计算、人工智能、区块链等技术的创新加速,日益融入 to 经济社会发展的各个领域^[1-2]。全球主要国家和地区纷纷进行战略部署,推进数字化转型。我国也不断鼓励智能制造技术在食品或农业领域的应用。深度融合新一代信息技术与先进制造技术,提高制造业的自动化和智能化水平^[3-5]。

谷物为人类的主要食物来源之一,全球约有一半以上的人口以稻米、小麦和玉米为主要能量来源。谷物加工产业是农产品加工的基石,是食品工业的支柱和人类的生命产业,其技术的进步直接关系粮食供应的稳定和安全。

目前,国内外在谷物加工智能化方面的研究已积累大量的经验和 to 技术,并取得突破性进展。如美国 ADM 面粉厂采用先进的在线监测和计算机

编程技术,实现面粉生产的高度自动化^[6]。布勒公司推出的智能面粉厂,在保证面粉品质的同时,优化资源利用,显著提高了生产效率,减少人工依赖,降低生产成本,被认为是谷物加工智能化发展的一个里程碑^[7]。目前,仍有许多企业在技术和设备上存在差异,导致生产效率低,原料和能源利用不充分以及产品品质不稳定。这些差异也是谷物行业亟待解决的难题^[8]。

智能化作为谷物加工领域的重要发展趋势,正逐步改变传统的生产方式和管理模式,为谷物加工带来前所未有的机遇。本文探讨谷物加工设备智能化发展的最新进展及其应用实践,以期为行业未来的发展提供一些参考和借鉴。

1 谷物加工智能化发展历程

谷物加工设备为谷物加工的重要支撑,其发展从根本上驱动谷物加工技术的进步。谷物加工

收稿日期: 2025-01-14

第一作者: 张恒达,男,硕士,高级工程师

通信作者: 朱晓月 E-mail: arena.zhu@buhlergroup.com

始于史前时期,先、后经历了石器阶段、自然动力机械阶段、蒸汽动力机械阶段^[9-11]。进入20世纪,电力和机械自动化技术的发展,使加工设备更高效和智能,奠定了智能化基础^[12]。

回顾谷物加工业的智能化发展旅程,其发展包括数据连通、生产监控、数据反馈调节和自我优化调节4个重要阶段,每个阶段都对装备和技术有新的要求,标志着技术的重大进步和对应用的深远影响。

1.1 数据连通阶段

在数据连通阶段,工厂开始从传统的生产模式向数字化方向转变。该阶段的主要目标是实现工厂内设备的自动化和生产数据的采集。自动化设备、传感器和网络设施以及数据采集系统是实现该阶段的基础。通过各种传感器对生产过程中的关键数据,如温度、压力、湿度等参数的数据化,形成完整的生产数据集^[13-14]。通过网络连接将各类生产设备与中央控制系统进行互联,实现实时数据传输,增加了加工生产的透明化,有效提高了生产效率和产品质量^[15]。另外,建立生产数据的历史记录数据库,保存生产参数,可以用于追溯分析,为生产优化提供数据支持。

该阶段作为智能化的基础阶段,也存在一定局限性。虽然大部分设备实现了初步自动化,但是复杂的生产仍需人工干预。数据采集和分析虽已初见成效,但还未能实现深度利用和高级分析,未能充分挖掘数据潜力。此外,不同设备和系统之间的集成度不高,存在信息孤岛,数据共享和协同作用不足。

1.2 生产监控阶段

生产监控阶段是智能加工发展过程中至关重要的一环。该阶段的主要目标是实现数据驱动的生产优化和全面监控。高精度的传感器以及更先进的数据分析工具是实现该阶段的基础。工厂不仅停留在数据的采集和存储层面,而且通过查看每台设备和工艺的关键性能指标,利用算法分析性能趋势,形成数据看板,识别出需要调整的参数,并就能源使用、维护计划、排产计划以及如何优化机器性能提出建议,在提高资源利用、生产效率和产品质量的同时,降低对于技术人员的经验依赖^[16-17]。例如,故障和停机分析可以帮助工厂识

别、记录并分析生产过程中的故障和停机事件,并基于分析结果,提出预防性维护建议,减少故障和停机时间,保障生产效率等^[18]。能源管理系统,通过密切关注加工过程中各环节的能源消耗,识别能耗热点,给出改进建议,优化能源利用^[19]。

虽然该阶段在数据的综合利用上有很大的进步,可以实现生产优化和高效管理,但是数据仅用于决策支持,仍需人工干预设备进行调整。另外,由于决策高度依赖数据分析和算法模型,还需要工厂配备高精度的传感器,以及专业的数据管理工具。

1.3 数据反馈调节阶段

数据反馈调节阶段是实现智能加工的一个重要里程碑。该阶段的主要目标是降低人工干预,基于数据分析决策,指导设备自动调节,实现重要功能的闭环控制。自动调节功能的硬件设备、高精度的传感器以及能够实时响应数据变化的智能控制系统是实现该阶段的基础^[20-21]。通过工业以太网的百兆级现场总线技术,使高精度传感器采集的产品和设备运行数据,在不同的控制和执行单元之间快速传递及交互,基于数据分析后的模型,建立反馈调节机制,指导设备进行自动调节,形成闭环控制。

该阶段的反馈调节可分为前馈调节和后馈调节,通常情况下2种调节结合使用。前馈调节是一种预先控制的方法,通过过程模型对历史数据进行分析,预测当前参数条件对指标的影响,实时反馈给控制系统,给出参数调整指令,减少对产品指标的影响^[22];后馈调节则是一种基于反馈机制的控制方式,通过分析给定运行参数条件下的实际指标和期望值之间的偏差,实时反馈给控制系统,进行参数调整,从而使输出指标达到期望值^[23]。

该阶段高水平的自动化和智能化带来较高的生产效率和资源利用率,以及更为稳定的产品品质,是迈向完全智能化生产的重要一步。

1.4 自我优化调节阶段

自我优化调节阶段是智能加工发展的更高水平,将人工干预降到更低。该阶段的主要目标是实现工厂的完全自主运行。就像无人驾驶汽车一样,只用输入目的地,系统自动规划出最优路线和驾驶指令,准时、安全地抵达目的地^[24]。先进的人工

智能和机器学习,高精度在线传感器以及高度自动调节的设备是实现该阶段的基础。通过部署多种传感器和综合传感系统,并采取先进的分布式控制系统,实现全线数据采集和控制^[25]。运用大数据和人工智能等技术,对采集的数据进行复杂的分析和建模,提供决策支持和优化方案^[26]。生产人员仅需设置生产的目标产品指标以及原料特性和运行条件等信息,系统将自动规划最优的加工参数,同时通过人工智能技术,根据加工中产品特征数据和天气环境条件等信息,不断调整加工参数,以最具成本效益的方式加工出所需指标的产品^[27]。

此阶段产线的整体运行效率和原料利用效率均达到最高水平,同时复杂逻辑算法下的参数优化决策保障了产线生产出的产品即目标产品,所设即所得。标志着智能制造发展的巅峰,是未来智能加工的理想形态。

2 谷物加工智能化的实践

随着智能化技术逐步在谷物加工领域的深入应用,智能化的发展和实践已成为提高生产效率和产品质量的关键因素。目前,谷物加工智能化在数据连接阶段、生产监控阶段以及数据反馈调节阶段均取得良好实践,在资源利用、品质改善和能源消耗等方面带来较大优化。

2.1 数据连接阶段应用实践

数据采集和自动化作为数据连接阶段的重要特点,当前在谷物行业上的应用已相当普遍。如着水控制单元^[28]、近红外在线品质分析仪^[29]、在线粒度分析仪^[30]、在线计量和喂料^[31]以及自动化控制系统^[32]等,极大提高了操作便捷性以及生产可追溯。自动化连续式卸船机和智能研磨系统作为单机设备智能化的代表,在当前谷物运输和粉碎领域处于最先进水平,给整个行业设定了单机智能化的新标杆。

2.1.1 自动化连续式卸船机 自动化连续式卸船机通过全自动的控制系统以及先进的结构设计,使整个卸船过程更加高效、安全及环保。

设备以激光扫描技术对船舶进行扫描,生成高精度 3D 点云数据模型,结合关联滤波算法和数字孪生技术,去除工作振动和船舶浮动干扰数据,有效区分船舱、货物和舱口,实现对象剥离,实时监测并数字化表达船舶位置、货物状态、设备运行状态及环境条件等信息。3D 数字孪生效果图如图 1 所示。动态卸船过程中,因船体上浮数据变化,故设备通过差分定位系统,将卸船机各机构的系统定位融合进码头的大坐标内。再通过数采算法对扫描仪采集的点云数据进行分析,精准定位卸船机作业点位的空间坐标,自动规划最优路径,调



图 1 自动化连续式卸船机 3D 数字孪生效果图

Fig.1 Automatic continuous ship unloader digital twin schematic diagram

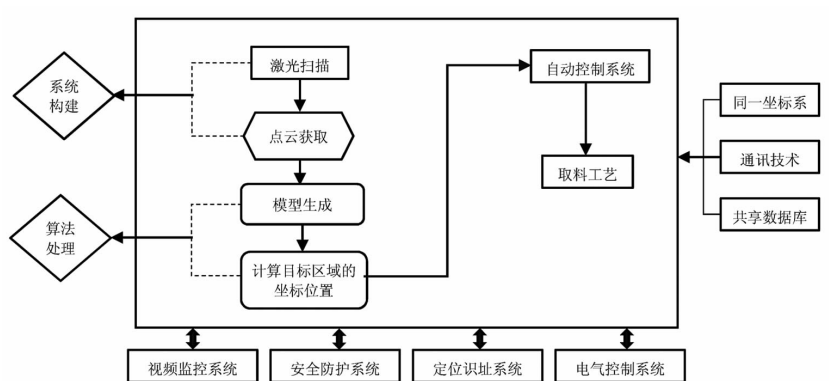


图2 自动化连续式卸船机管控系统

Fig.2 Automatic continuous ship unloader control system

整悬臂位置,降低中断率,实现最佳卸船效率,节省码头泊位时间和费用。设备配备全方位视频 AI 监控系统,包括卸船作业视角、作业区人员及车辆安全监控视角,以及行走轨道和人员设备安全监控的大车行走视角。操作人员可根据需要自由切换视角,提高了操作和人员安全性。自动化连续式卸船机管控系统示意图如图 2 所示。

全自动控制系统极大增加了操作灵活性和便捷性,操作人员可通过远程中控室、本地司机室触屏和码头移动端等方式监控和操作卸船机。自动化辅助功能显著提高了操作人员效率。以 1 200 t/h 的卸船产能为例,相比传统抓斗卸船机,人员可减少 85%。

2.1.2 智能研磨系统 智能研磨系统不同于传统的磨粉机,集成设计显著减少了建筑成本和安装时间,提高了研磨性能,并增加了操作便利性。

集成驱动系统由标准电机和定制化变速箱组

成,驱动 2 根磨辊和差速器,直连传动节省能耗 10%。取消传统的电机悬挂,使安装更灵活,结合特殊设计的直接提料装置,最多可节省 1 层楼(图 3)。集成电柜和电源母线,使现场机械和电器安装速度相对于传统磨粉机提高 3 倍。进料模块包括不对称进料口和物料分配螺旋,在产品分布控制监测的传感器控制下,确保物料均匀分布在研磨区域。磨辊的预张紧装置确保磨辊间隙精确,保证稳定研磨效果,提高研磨性能。系统集成的 Web 服务器允许从智能手机、平板电脑和个人电脑监控和操作研磨系统,实现便捷和灵活操作。

此外,运行状态由传感器实时监测。温度传感器监测电机、变速箱、控制柜以及磨辊和轴承温度,压力传感器监测压缩空气气压,料位传感器监测研磨区域及出口料斗,双面传感器连续测量辊组研磨压力。控制系统根据这些数据实时调整研磨机运行参数,降低产品波动,确保最佳运行。

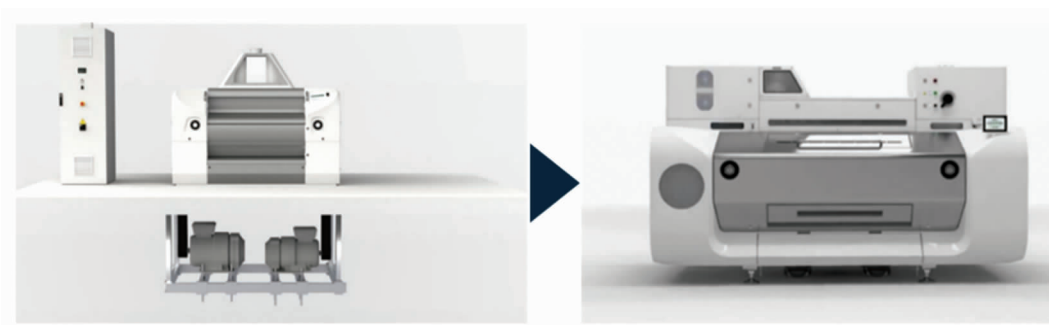


图3 传统磨粉机(左)和智能研磨系统(右)

Fig.3 Traditional roller mill (left) and intelligent grinding system (right)

2.2 生产监控阶段应用实践

数据驱动决策优化作为生产监控阶段的重要特点,在谷物加工行业中的应用不断深化,如整体设备效率分析系统^[33]、质量管理体系^[34]、产量管理系统等数字服务。通过数据的高效利用,帮助企业在竞争激烈的市场中保持领先地位。以下以故障停机分析、温度和振动管理为例,阐述如何利用数据赋能生产。

2.2.1 故障停机分析 在高度自动化的制粉生产环境中,故障停机分析系统作为智能工厂的核心组成部分,通过深度整合中控系统(DCS/SCADA)的实时监控数据、可编程逻辑控制器(PLC)的详细状态信息,以及生产线各环节的传感器数据,构建一套全面、精准的故障预测与诊断体系^[35]。

在数据采集阶段,系统通过传感器网络实时捕捉温度波动、压力变化和振动异常等信号,并与 PLC 深度集成,直接获取设备控制逻辑的执行状

态及持续时间(如正常运行、空载、等料、故障等)、输入输出信号变化、故障代码等,为故障停机分析提供详实的数据基础。在数据处理阶段,系统利用自回归积分滑动平均模型(ARIMA)等时间序列分析技术深度剖析历史停机事件,揭示故障周期性和趋势。结合随机森林、长短期记忆网络(LSTM)等机器学习算法,识别故障前特征,实现早期预警和精准定位,提升预测准确性和鲁棒性。同时,通过关联规则挖掘和故障树分析,利用 Apriori 算法发现不同故障间的隐藏联系,支持故障排查和根源分析,为维修人员提供清晰的故障解决路径^[36]。在决策支持阶段,系统通过交互式仪表盘和自动生成的故障分析报告,为管理层提供包含故障时间、地点、类型和原因等在内的生产监控和故障诊断信息。提供维修建议和预防措施,支持科学维修计划和预防性维护策略。谷物生产中通过工段状态判定关键故障示意图,如图 4 所示。

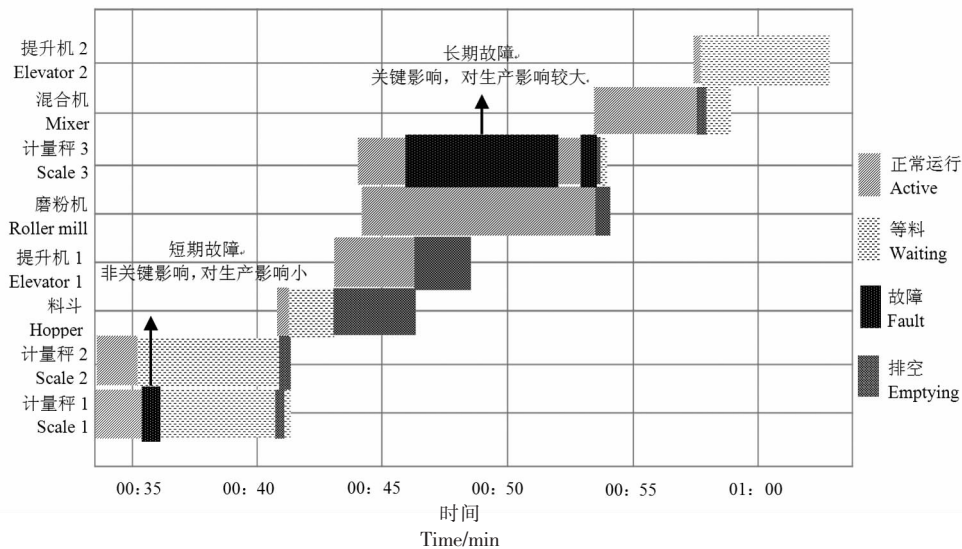


图 4 谷物生产中通过工段状态判定关键故障示意图

Fig.4 Critical faults determined by section status in grain production schematic diagram

故障停机分析的应用不仅提高了生产线的稳定性和效率,还显著降低了维护成本和运营风险,为企业的智能化升级和可持续发展奠定了坚实的基础^[37]。

2.2.2 温度和振动管理 在谷物加工的磨粉工段,温度异常升高和振动异常增大会影响产品品质、增加能耗并破坏系统稳定性^[38-39]。降低这些异常情况,可以帮助企业实现降耗,稳定产品品质及

优化运营成本。磨辊温度和振动管理系统(Temperature and vibration management system, TVM)依托内置的无线传感器,精准捕获磨辊内部的温度与振动数据,并通过低功耗广域网技术(如 LoRa)实现数据的无线传输至数据处理中心或云端,为生产监控与优化提供实时、全面的数据集^[40]。

系统核心功能包括过温报警、温度不平衡识别与调整,以及研磨工艺优化与能耗降低(效果示

意图见图5)。过温报警功能预设温度阈值,如磨辊温度超出此限,数据处理中心自动触发报警,确保及时干预,防止生产中断或设备损坏。温度不平衡识别与调整功能利用分布式多点传感器精确检测磨辊表面温度分布不均,如因面粉缠绕等引起的局部过热现象,及时发现并解决局部过热安全隐患,指导工厂调整设备配置,确保研磨过程的稳定性和产品质量的一致性。研磨工艺优化与能耗降低功能通过综合分析历史和实时数据,结合不同配方需求,优化磨粉机运行参数,降低能耗,实现成本控制与环境保护的双重目标。

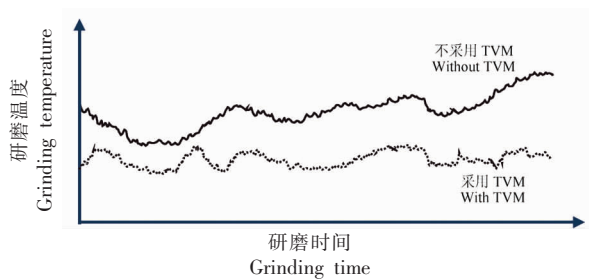


图5 磨辊系统温度和振动管理系统效果示意图

Fig.5 Roller temperature and vibration management effect diagram

2.3 数据反馈调节阶段应用实践

基于指标的闭环控制作为数据反馈调节阶段的重要特点,当前在谷物加工中已取得较多应用。比如,面粉加工行业的电子粉师智能测控系统,成功实现了小麦蛋白、面粉灰分以及剥刮率的闭环控制,提高原料利用率,优化成本,提高高端产品得率,从而显著提升企业的经济效益^[41]。

保障产品品质稳定和优化产品得率为影响工厂收益的两个重要方面,一直是行业关注的重点。下面以面粉加工中的粉色和麸皮含粉的闭环控制为例,阐述数据反馈调节如何助力企业提质增效。

2.3.1 粉色闭环控制

粉色作为面粉加工精度的重要指标之一,直接关系面粉感官品质,通常受原粮、工艺、添加剂等诸多因素影响^[42-43]。为保证面粉粉色满足指标要求,通常的方法是取样至实验室进行检测,然后反馈给生产技术人员,指导不同粉管进行搭配。这种方法不仅增加了实验室的测量,而且数据反馈效率较慢,导致调节滞后于生产。

粉色闭环控制位于制粉工段中,由在线粉色和麸星检测仪、控制系统、自动调节装置组成。粉色和麸星在线检测仪通过 CMOS 光电传感器,对绞龙后的面粉进行实时图像采集,采用 CIE 1976 均匀色空间(L^* , a^* , b^*)^[44]分析面粉的颜色变化。当数据超出阈值,控制系统根据终产品指标指导调节装置进行粉管调节,从而保障产品品质稳定。相对于传统的实验室检测,极大地降低了人员工作量并提高数据反馈效率。

此外,此系统还通过融合图像模式识别和统计分析,实现对制粉过程中破筛情况的精准监测和预警。根据特定检测范围内的麸星斑点计数遵循泊松分布的规律,对 CMOS 光电传感器采集到的图片,利用图像模式识别算法自动检测和分类斑点,特别聚焦 $80\ \mu\text{m}$ 以上的棕色和黑色麸星斑点。随后,系统采用多元线性回归模型,综合考虑斑点数量、平均粒径、色泽等因素,解析斑点分布与破筛的关联。为提高预警的准确性,系统引入傅里叶变换频谱分析技术,对斑点分布图像进行频谱分析,揭示破筛特征在频域上的变化。基于以上数据,系统构建破筛预警模型,设定预警阈值。在实际运行中,系统实时计算破筛特征值,一旦超出阈值即触发预警,通知操作人员干预,如调整生产参数或停机检查,确保稳定生产和产品质量。

2.3.2 麸皮含粉闭环控制

麸皮是小麦加工的主要副产品,其出率直接影响企业的经济效益。由于受到原料、水分含量、加工工艺、设备调节和运行状态等影响,加工后的麸皮中仍残留一定量的面粉^[45-47]。降低麸皮含粉是提高出粉率的重要保证,对面粉厂的经济效益有直接影响^[48-49]。面粉厂通常依据麸皮出率和实验室检测的灰分结果来调整工艺参数,控制麸皮含粉量^[50]。

麸皮含粉闭环控制由在线近红外检测仪、控制系统、变频打麸机组成。由于粗麸和细麸中含粉的状态不同,因此采取的控制方式也不同。首先,通过打麸机后的麸皮收集绞龙上的在线近红外检测仪对流经的麸皮进行实时淀粉含量检测。淀粉中 C-H、O-H 键会在特定的近红外光波段发生特征吸收,被样品吸收后的光被光谱检测器接收,生成对应的近红外吸收光谱图^[51]。通过多元校正或主成分分析等方法对光谱图进行分析,确定光谱

中各波长吸收的相对强度与样品中淀粉含量之间的关系,通过预先设定的计算模型,实现麸皮淀粉含量的实时检测。当麸皮淀粉含量超出阈值时,针对粗麸,控制系统改变打麸机变频器的频率,提高打麸机的转速,从而提高拍打力度,使面粉与麸皮分离,降低麸皮含粉率。针对细麸,当超过阈值时,系统会根据算法判断是否启动2台打麸机串联工作,增加面粉回收效率,从而提高企业的经济效益。

3 总结及展望

谷物加工的智能化不仅是装备技术的革新,更是生产过程的智慧升级。随着技术的迅猛发展,智能制造已成为全球关注的重点。智能化技术在谷物加工中的应用提升了生产效率和产品质量,并为企业降本增效提供了可能。本文阐述了谷物加工智能化涵盖数据连通、生产监控、数据反馈调节和自我优化调节4个阶段,并通过实际案例详细阐述各阶段的应用实例,如自动化卸船机、故障停机分析和麸皮含粉闭环控制等。这些应用在谷物加工行业产生深远影响,并为行业智能化的持续发展夯实基础。然而,仍存在优化空间,特别是在设备集成度和数据深度利用等方面。

未来,随着科技的不断进步,数字化和智能化将成为谷物加工设备的关键趋势。应加强谷物设备的持续升级,如单机设备的自优化能力,提高运行效率和稳定性,减少人工干预,降低能耗和成本^[52]。持续发展和结合物联网、人工智能、大数据等智能技术,实现设备的远程监控,优化生产过程,并实现智能化决策。同时,随着低碳、绿色和清洁能源的高速发展,着力推进谷物加工新技术的创新突破,为企业提质增效、节能降耗和减少碳排放提供全面支撑。智能技术的进步将推动谷物加工行业向高效、环保和安全的方向发展,促进全球粮食安全和可持续发展。

参 考 文 献

- [1] 徐江荣. 数字时代的标准化—技术、标准、产业的互融互促[J]. 中国标准化, 2022(22): 6–8.
XU J R. Standardization in the digital age – the integration and promotion of technologies, standards and industries[J]. China Standardization, 2022(22): 6–8.
- [2] HASSOUN A, JAGTAP S, TROLLMAN H, et al. Food processing 4.0: Current and future developments spurred by the fourth industrial revolution[J]. Food Control, 2023, 145: 109507.
- [3] 习近平在中共中央政治局第三十四次集体学习时强调把握数字经济发展趋势和规律推动我国数字经济健康发展[J]. 信息技术与信息化, 2021(11): 1.
Xi Jinping emphasized the importance of grasping the trends and regularities of digital economy development to promote the healthy development of China's digital economy during the 34th collective study session of the political bureau of the communist party of China central committee [J]. Information Technology and Informatization, 2021(11): 1.
- [4] 董凯. “十四五”智能制造发展规划解读及趋势研判[J]. 中国工业和信息化, 2022(1): 24–29.
DONG K. Interpretation and trend judgment of the ‘14th Five-Year Plan’ intelligent manufacturing development plan[J]. World Manufacturing Technology and Equipment Market, 2022(1): 24–29.
- [5] 胡楠. 中国食品装备2025发展战略导论[C]//第二十一届中国国际食品添加剂和配料展览会暨第二十七届全国食品添加剂生产应用技术展示会(FIC2017)论文集. 上海: 中国食品添加剂和配料协会, 2017: 13–21.
HU N. Introduction to the Development Strategy of China Food Equipment 2025 [C]// Proceedings of the 21st China International Food Additives and Ingredients Exhibition and the 27th National Food Additives Production and Application Technology Exhibition (FIC2017). Shanghai: China Food Additives and Ingredients Association, 2017: 13–21.
- [6] 邓遵义, 王中营. 面粉加工厂在线检测技术浅析[J]. 粮食加工, 2019, 44(5): 8–10.
DENG Z Y, WANG Z Y. Analysis of online detection technology in flour processing plant[J]. Grain Processing, 2019, 44(5): 8–10.
- [7] 连吉. 布勒“智能工厂 Smart Mill 1.0 项目”荣获中瑞商业大奖[J]. 现代面粉工业, 2021, 35(6): 44–45.
LIAN J. Buhler's ‘Smart Mill 1.0 Project’ won the China Switzerland business award[J]. Modern Flour Industry, 2021, 35(6): 44–45.
- [8] DING H H, TIAN J W, YU W. The application of

- artificial intelligence and big data in the food industry[J]. *Foods*, 2023, 12(24): 4511.
- [9] 何红中. 中国古代杰作研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2010.
HE H Z. Research on ancient Chinese masterpieces [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2010.
- [10] 许臻. 中国古代水能利用研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2009.
XU Z. Research on water energy utilization in ancient China[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2009.
- [11] 章德平. 中国粮食加工机械的发展简史研究[J]. *农业与技术*, 2021, 41(22): 171-173.
ZHANG D P. Research on the development history of grain processing machinery in China[J]. *Agriculture and Technology*, 2021, 41(22): 171-173.
- [12] 谭建新. 电力电气自动化元件技术在机械制造中的运用[J]. *数字化用户*, 2023, 29(2): 193-195.
TAN J X. Application of power electrical automation component technology in machinery manufacturing[J]. *Digital User*, 2023, 29(2): 193-195.
- [13] WU W F, CUI H W, HAN F, et al. Digital monitoring of grain conditions in large-scale bulk storage facilities based on spatiotemporal distributions of grain temperature[J]. *Biosystems Engineering*, 2021 (210): 247-260.
- [14] LUTZ E, CORADI P C. Applications of new technologies for monitoring and predicting grains quality stored: Sensors, Internet of Things, and artificial intelligence[J]. *Measurement*, 2022(188): 110609.
- [15] 韦婵良. 机械加工车间数字化制造描述模型及总体框架[J]. *数字化用户*, 2024(32): 53-54.
WEI C L. Digital manufacturing description model and general framework for machining workshop [J]. *Digital User*, 2024(32): 53-54.
- [16] 李泽, 赵世浪. 物联网技术在烟草机械设备中的应用分析[J]. *中国设备工程*, 2024(20): 247-249.
LI Z, ZHAO S L. Application analysis of internet of things technology in tobacco machinery equipment[J]. *China Equipment Engineering*, 2024(20): 247-249.
- [17] 段慧龙. 智能控制技术在食品机械中的应用探讨[J]. *现代食品*, 2024, 30(3): 102-104.
DUAN H L. Application discussion of intelligent control technology in food machinery [J]. *Modern Food*, 2024, 30(3): 102-104.
- [18] 贺秀丽, 闫海舟. 食品机械中智能控制技术应用研究[J]. *现代食品*, 2023, 29(8): 95-97.
HE X L, YAN H Z. Application research of intelligent control technology in food machinery[J]. *Modern Food*, 2023, 29(8): 95-97.
- [19] 王伟生, 郑小真, 刘楠幡, 等. 基于互联网的面粉厂能源管理系统设计与实现[J]. *粮食加工*, 2017, 42(5): 4-7.
WANG W S, ZHENG X Z, LIU N B, et al. Design and implementation of energy management system for flour mill based on Internet[J]. *Food Processing*, 2017, 42(5): 4-7.
- [20] 赖世椿, 詹育生, 刘子立, 等. 小麦加工工艺关键点及在线检测技术应用探索[J]. *粮食加工*, 2023, 48(6): 13-18.
LAI S C, ZHAN Y S, LIU Z L, et al. Research on key points of wheat processing technology and application of online detection technology [J]. *Grain Processing*, 2023, 48(6): 13-18.
- [21] FANG X R, FENG W, CHEN Y F, et al. Sensing-communication-computing-control closed-loop optimization for coordinated UAV-Robot systems[C]. Sydney: 2023 28th Asia Pacific Conference on Communications (APCC), 2023.
- [22] 李永. 前馈控制系统在给料称重系统中的应用[J]. *科技风*, 2009(15): 92.
LI Y. Application of feedforward control system in feeding weighing system[J]. *Science and Technology Wind*, 2009(15): 92.
- [23] 陈晨, 尚群立, 陈艳宇. 基于调节阀流量特性曲线的前馈控制系统设计[J]. *高技术通讯*, 2021, 31(11): 1219-1227.
CHEN C, SHANG Q L, CHEN Y Y. Design of feedforward control system based on flow characteristic curve of regulating valve[J]. *High Technology Communication*, 2021, 31(11): 1219-1227.
- [24] 王浩宇, 左志强, 邓宇翔, 等. 无人驾驶车辆运动控制综述[J]. *控制理论与应用*, 2024, 41(9): 1507-1522.
WANG H Y, ZUO Z Q, DENG Y X, et al. Review on motion control of unmanned vehicle[J]. *Control Theory and Applications*, 2024, 41(9): 1507-1522.
- [25] 肖红想. 制造企业智能化生产管理的优化研究[J]. *品牌研究*, 2024(6): 47-49.
XIAO H X. Research on optimization of intelligent production management in manufacturing enterprises [J]. *Brand Research*, 2024(6): 47-49.

- [26] 宋森. 浅谈数字驱动端到端的全过程智能化生产[J]. 中国设备工程, 2024(2): 38-44.
SONG S. Discussion on end-to-end intelligent production of digital drive[J]. China Equipment Engineering, 2024(2): 38-44.
- [27] 李强. 智能化无人工厂的发展及其对制造业的影响[J]. 中国战略新兴产业, 2024(11): 54-56.
LI Q. Development of intelligent unmanned factory and its impact on manufacturing[J]. China Strategic Emerging Industries, 2024(11): 54-56.
- [28] 陈礼. 面粉厂小麦水分调节设备的变化[J]. 粮油科学与工程, 2024, 38(3): 1-3.
CHEN L. Change of wheat moisture regulation equipment in flour mill[J]. Grain and Oil Science and Engineering, 2024, 38(3): 1-3.
- [29] LIN L, HE Y, XIAO Z T, et al. Rapid-detection sensor for rice grain moisture based on NIR spectroscopy[J]. Applied Sciences, 2019, 9(8): 1654.
- [30] PANI A K, MOHANT H K. Online monitoring and control of particle size in the grinding process using least square support vector regression and resilient back propagation neural network[J]. ISA Transactions, 2015(56): 206-221.
- [31] 陈树人. 谷物联合收割机测产信息智能获取技术与试验研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2005.
CHEN S R. Research on intelligent acquisition technology and experiment of grain combine harvester yield information[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2005.
- [32] 高春能, 徐晓杨. 基于RFID的小麦加工企业内部物流技术[J]. 粮食与饲料工业, 2015(10): 7-10.
GAO C N, XU X Y. Internal logistics technology of wheat processing enterprises based on RFID[J]. Grain and Feed Industry, 2015(10): 7-10.
- [33] PRODUO G, SILVA D M D, OLIVEIRA H M D. Application of the OEE tool as a proposed increase in productivity in grain drying systems[J]. Gestão & Produção, 2020, 27(4): 4969.
- [34] LAUX C M, MOSHER G A, HURBURGH C R. Application of quality management systems to grain handling: An inventory management case study[J]. Applied Engineering in Agriculture, 2015, 31(2): 313-321.
- [35] 康喜, 黄海宇, 卜静非, 等. 基于大数据分析的机动设备早期故障智能诊断技术研究与应用[J]. 工业加热, 2024, 53(3): 79-84.
KANG X, HUANG H Y, BU J F, et al. Research and application of intelligent diagnosis technology for early fault of mobile equipment based on big data analysis[J]. Industrial Heating, 2012, 53(3): 79-84.
- [36] 赵俊杰, 杨如意, 赵博石, 等. 基于逻辑故障树和专家知识库的智能发电故障诊断与报警[J]. 能源科技, 2021, 19(3): 42-46.
ZHAO J J, YANG R Y, ZHAO B S, et al. Fault diagnosis and alarm of intelligent power generation based on logical fault tree and expert knowledge base[J]. Energy Science and Technology, 2021, 19(3): 42-46.
- [37] SHAHIN M, CHEN F F, HOSSEINZADEH A, et al. Using machine learning and deep learning algorithms for downtime minimization in manufacturing systems: An early failure detection diagnostic service[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2023, 128(9/10): 3857-3883.
- [38] 王娜, 赵俊凯, 李孟红. 磨粉机磨辊及其力学特性研究进展[J]. 粮食加工, 2018, 43(1): 55-58.
WANG N, ZHAO J K, LI M H. Research progress of roller mill and its mechanical properties[J]. Grain Processing, 2018, 43(1): 55-58.
- [39] 陈小刚, 芦伟, 赵峰, 等. 辊式磨粉机对小麦制粉研磨稳定性的影响[J]. 粮食加工, 2023, 48(5): 23-25.
CHEN X G, LU W, ZHAO F, et al. Effect of roller mill on stability of wheat milling[J]. Grain Processing, 2023, 48(5): 23-25.
- [40] 周强. 基于温度/振动检测的智能点检系统设计与应用研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2019.
ZHOU Q. Design and application research of intelligent spot inspection system based on temperature/vibration detection[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2019.
- [41] 张恒达, 范中亚, 李生龙. 中国面粉加工业智能化发展研究[J]. 现代面粉工业, 2021, 35(1): 4-7.
ZHANG H D, FAN Z Y, LING S L. Research on intelligent development of flour processing industry in China[J]. Modern Flour Industry, 2021, 35(1): 4-7.
- [42] 王震. 浅谈影响面粉加工精度的因素[J]. 粮食加工, 2007, 32(1): 25-27.
WANG Z. Discussion on factors affecting flour processing precision[J]. Grain Processing, 2007, 32(1): 25-27.

- [43] 蒋衍恩. 加工精度测定仪在面粉行业的应用[J]. 现代面粉工业, 2013, 27(2): 20-21.
JIANG Y E. Application of processing precision tester in flour industry[J]. Modern Flour Industry, 2013, 27(2): 20-21.
- [44] 国家标准化管理委员会. 色度学第4部分: CIE 1976 $L^* a^* b^*$ 颜色空间: GB/T 20147.4-2023[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016: 1-5.
National Health and Family Planning Commission. Colorimetry Part 4: CIE 1976 $L^* a^* b^*$ colour space: GB/T 20147.4-2023 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2016: 1-5.
- [45] 屠洁. 小麦品质对出粉率的影响[J]. 面粉通讯, 2006(2): 33-35.
TU J. Effect of wheat quality on flour yield[J]. Flour Communication, 2006(2): 33-35.
- [46] LUPU M I, PADUREANU V, CANJA C M. The effect of moisture content on grinding process of wheat and maize single kernel[C]//Iasi, Romania: IV International Conference on Modern Technologies in Industrial Engineering, 2016.
- [47] 唐黎标. 小麦出粉率影响因素的探讨[J]. 现代面粉工业, 2017, 31(4): 13-15.
TANG L B. Discussion on influencing factors of wheat flour yield[J]. Modern Flour Industry, 2017, 31(4): 13-15.
- [48] 张建涛. 影响小麦出粉率的因素探讨[J]. 现代面粉工业, 2010, 24(5): 11-12.
ZHANG J T. Discussion on the factors affecting the wheat flour yield[J]. Modern Flour Industry, 2010, 24(5): 11-12.
- [49] 申建芳. 浅议小麦制粉中麸皮含粉状态及处理[J]. 西部粮油科技, 2002, 27(2): 5-6.
SHEN J F. Discussion on the status and treatment of bran starch in wheat flour production[J]. Western Cereals and Oils Science and Technology, 2002, 27(2): 5-6.
- [50] 隋继斌. 浅议好粉出粉率降低的原因[J]. 现代面粉工业, 2006(3): 29-30.
SUI J B. Discussion on the reasons of lower yield of good flour[J]. Modern Flour Industry, 2006(3): 29-30.
- [51] WU Z S, OUYANG G Q, SHI X Y, et al. Absorption and quantitative characteristics of C-H bond and O-H bond of NIR[J]. Optics & Spectroscopy, 2014, 117(5): 703-709.
- [52] 黄景科. 技术改造助力生产升级加工设备技改的实用指南[J]. 工程技术与管理, 2024, 8(4): 148-150.
HUANG J K. Practical guide for technical transformation to help production upgrading and processing equipment technical transformation [J]. Engineering Technology and Management, 2024, 8(4): 148-150.

The Development and Practice of the Intelligent Technology in Grain Processing Equipment

ZHANG Hengda, LI Shenglong, ZHANG Chenglin, ZHU Xiaoyue*, CUI Chenhao, FAN Zhongya
(Buhler (Wuxi) Commercial Co. Ltd, Wuxi 214142, Jiangsu)

Abstract This article reviews the development journey of intelligent grain processing equipment and introduces the specific application practice of intelligence in grain processing equipment. The intelligent development of grain processing has gone through four important stages: Connect, monitor, assist, and self-optimize. Each stage marks a significant advancement in technology and a profound impact on applications. In the connect stage, the automation of the equipment in the factory and the collection of production data were achieved, which initially improved the production efficiency and management transparency. In the monitor stage, data-driven optimization and optimization suggestions are generated through the data in-depth analysis in the production process, which help to better improve production efficiency and product quality. In the assist stage, based on data analysis and decision-making, it guides the automatic adjustment of equipment, achieve the closed-loop control for important functions, which reduces manual intervention, significantly improves production efficiency and ensures product quality. In the self-optimize stage, AI technology and machine learning algorithms are integrated to achieve the decision-making and optimal control of the equipment automatically, which reflect the intelligence is truly reached. At present, there are good practices in the first three stages of intelligent development of grain processing, such as automatic continuous ship unloader and intelligent grinding system in the data connection stage. Production monitoring stage of the error and downtime analysis system, temperature and vibration management sys-

tem, etc. The color loop control and bran starch loop control in the data feedback adjustment stage have brought great influence in the industry. In the future, with the continuous innovation of grain processing equipment technology, AI, big data, IoT and other technologies will continue to develop and practice and grain processing intelligence will usher in a broader development prospect.

Keywords intelligence; grain processing; sensor; data driven; feedback adjustment; produce efficiency; resource optimization