

基于 CFD – DEM 的谷物联合收获机清选损失监测占比补偿方法研究

李 洋¹ 薛向磊^{2,3} 俞国红^{2,3} 方昱斌¹ 梁振伟⁴ 徐立章⁴

(1. 江苏理工学院机械工程学院, 常州 213001; 2. 浙江省农业科学院农业装备研究所, 杭州 310021;
3. 农业农村部东南丘陵山地农业装备重点实验室, 杭州 310021; 4. 江苏大学农业工程学院, 镇江 212013)

摘要: 为得到谷物收获过程中精确的清选损失信息, 不仅需要误差小、稳定性好的清选损失监测传感器硬件作为基础, 还需要明晰传感器监测值与实际清选损失量之间的数学关系, 本文基于课题组前期研发的清选损失监测传感器, 首先构建了水稻、小麦、油菜等典型作物的脱出混合物各成分颗粒模型, 并根据实际工况建立了多组清选装置三维流道模型, 通过 CFD – DEM 耦合方法开展了作物种类、喂入量、筛片开度、风机进风口面积等单因素及多因素仿真, 分析不同作业工况下清选损失监测值与实际值之间的关系及其变化规律, 并利用田间接料试验对仿真结果进行验证。研究表明, 作物种类、筛片开度、风机进风口面积等是影响清选损失监测占比的主要因素, 喂入量在一定范围内对占比影响不显著; 由耦合仿真得出的清选损失监测占比数值相较于实际田间试验值偏大, 偏大程度数值的标准差为 0.97%, 验证了仿真分析的有效性。结合仿真样本数据构建了多种典型非线性拟合模型, 通过对拟合结果进行对比分析并考虑实际工程应用, 选取二次多项式回归模型作为清选损失监测占比补偿模型 (R^2_{adj} 大于 0.991、RMSE 小于 0.216%)。最后将该模型与嵌入式系统相结合, 实现清选损失监测占比的在线补偿, 模型补偿值与实测值之间的差值不超过 1.08%。该研究有效提升了总清选损失计算的准确性和适应性, 减少了对人工接料盒试验的依赖, 同时可为收获作业参数智能化调控及整机性能评价提供有力支撑。

关键词: 联合收获机; 清选损失; 监测占比; 补偿模型; CFD – DEM

中图分类号: S225.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2026)11-0269-13 **OSID:** 

Compensation Method for Cleaning Loss Monitoring Proportion of Grain Combine Harvesters Based on CFD – DEM

LI Yang¹ XUE Xianglei^{2,3} YU Guohong^{2,3} FANG Yubin¹ LIANG Zhenwei⁴ XU Lizhang⁴

(1. School of Mechanical Engineering, Jiangsu University of Technology, Changzhou 213001, China
2. Institute of Agricultural Equipment, Zhejiang Academy of Agricultural Sciences, Hangzhou 310021, China
3. Key Laboratory of Agricultural Equipment for Hilly and Mountainous Areas in Southeastern China, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Hangzhou 310021, China
4. School of Agricultural Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: Aiming to achieve high-precision monitoring of cleaning loss during grain harvesting, it is essential not only to develop cleaning loss monitoring sensors with low error and high stability but also to establish an accurate mathematical mapping between the sensor readings and the actual cleaning loss. Focusing on a cleaning loss monitoring sensor previously developed and systematically investigated methods to improve monitoring accuracy, three-dimensional particle models representing components of the threshing mixture, such as grains, short straw, and impurities, were constructed for typical crops, including rice, wheat, and rapeseed, based on their physical and compositional characteristics. Multiple three-dimensional flow channel models of cleaning devices were then established according to actual operating conditions. Using a coupled CFD – DEM simulation approach, numerical simulations of gas-solid two-phase flow were conducted under both single-factor and multi-factor conditions, including crop

收稿日期: 2025 – 08 – 18 修回日期: 2026 – 01 – 10

基金项目: 国家自然科学基金项目(52475265)、江苏省高等学校自然科学研究面上项目(24KJD210002)和农业农村部东南丘陵山地农业装备重点实验室开放课题(KFKT2024004)

作者简介: 李洋(1993—),男,讲师,博士,主要从事收获机械信息感知与多参数控制研究,E-mail: liyangjsu@163.com

通信作者: 徐立章(1979—),男,研究员,博士,主要从事收获机械创新设计与智能化研究,E-mail: justxlz@ujs.edu.cn

type, feeding rate, sieve opening, and fan inlet area. The relationship and variation patterns between sensor readings and actual cleaning loss were analyzed in detail under different operating scenarios. Field catching tests were subsequently performed to validate the simulation results. The findings indicated that crop type, sieve opening, and fan inlet area were the primary factors influencing the proportion of cleaning loss detected by the sensor. In contrast, feeding rate had an insignificant effect within a certain range. The monitoring proportion values of cleaning loss obtained from the simulation were larger than that of the actual field test values, with a standard deviation of 0.97% in the extent of overestimation, which verified the effectiveness of the simulation analysis. Subsequently, several representative nonlinear fitting models were established based on the simulated sample data. Through comparative analysis of the fitting results and considering practical engineering applicability, a quadratic polynomial regression model was selected as the compensation model for cleaning loss monitoring ratio, achieving an adjusted R^2 greater than 0.991 and a root mean square error lower than 0.216%. Finally, the model was integrated with an embedded system to realize online compensation of the cleaning loss monitoring ratio, with the deviation between the compensated values and the measured values not exceeding 1.08%. This research significantly improved the accuracy and adaptability of cleaning loss monitoring, reduced reliance on manual catching box tests, and provided robust technical support for intelligent operational parameter control and comprehensive performance evaluation of combine harvesters.

Key words: combine harvester; cleaning loss; monitoring proportion; compensation model; CFD – DEM

0 引言

谷物联合收获机作业过程中的籽粒损失直接影响农户的经济效益,获取准确、实时的损失信息不仅可为驾驶员优化作业参数、保障作业质量提供重要依据,也便于农户及管理部门对各区域收获损失进行追踪统计,同时可为作业参数智能调控系统提供输出与反馈数据^[1]。籽粒收获损失主要包括割台损失、未脱损失、夹带损失、清选损失和漏粮损失,其中清选损失在总损失中的比例最高,约为60%以上^[2-3],因此研发相应的传感器以实现清选损失实时监测尤为必要。近年来,国外众多学者及农机企业持续开展相关研究与试验,欧美发达国家大型农机企业(如CLAAS、JOHN DEERE等)已在高端联合收获机中配套集成清选损失监测传感器^[4-5]。在此基础上,国外专家进行了更深入的研究以提升监测精度,例如BISCHOFF等^[6]设计了一种新型损失监测传感器结构,采用上下双层布置敏感元件,上层为X向阵列的多条PVDF压电薄膜、下层为Y向阵列,且各薄膜配有独立信号采集电路,该结构可有效解决多颗籽粒同时冲击所引发的信号混叠问题;AESART等^[7]通过在振动筛尾部布置气压导向槽与压力式传感器实现了对清选吹出损失的间接估算,并在筛尾安装了传统压电式传感器以统计筛落损失与少部分吹出损失,对上述数据进行融合可提高总清选损失的监测准确性;PFEIFFER等^[8]开发了籽粒收获损失监测校正系统,可根据实时采集的作物类型、风机转速及脱出物含水率等参数,动态修正传感器监测值与实际总损失之间的关系,从而提

高数据统计精度,ISERINGHAUSEN等^[9]进一步升级了传感器在线设置与显示系统,可快捷调节灵敏度及监测占比参数,从而更好适应不同作物及机型。

随着我国农业机械化与信息化水平的不断提升,国内学者对该领域的研究也取得了进展^[10-14]。

国内外学者已在传感器结构设计、信号处理电路优化及算法提升等方面开展了大量研究,显著提高了清选损失监测传感器的测量精度。然而,针对传感器监测值与实际清选损失值之间的比例系数研究仍显不足,具体表现在相关研究大都采用接料试验方法^[15-17],即通过在收获机尾部布设接料装置收集实际籽粒清选损失,并结合传感器输出值计算监测占比。尽管该方法具备一定的直观性与参考价值,但其需要进行大量变工况试验,如设置不同筛片开度等,试验过程费时费力,且受作物收获季节性限制较大,更重要的问题是单次试验工况参数难以保持绝对稳定,如喂入量变化、工作部件转速波动等,导致结果重复性较差,从而影响了监测值与实际损失间的精确映射关系。而该比例系数作为损失换算的关键参数,其准确性直接影响总清选损失量计算的可靠性。故只有精准掌握监测值占比换算关系,方可实现与真实损失较一致的监测结果,为作业参数优化及机具性能评估提供准确数据。

针对上述问题,本文依托课题组自主研发的清选损失监测传感器与智能化联合收获机硬件平台,同时在课题组已有气固两相流耦合仿真方法分析清选装置内部物料运动研究基础上^[18],拟进一步基于该仿真方法,围绕不同作物种类、喂入量、筛片倾角、进风口面积等变量,系统分析多种作业工况下清选

损失监测值与实际清选损失之间的比例变化规律,明确传感器监测占比与工况变化的耦合关系。在此基础上,构建适用于嵌入式系统的损失计算补偿模型,实现对监测结果的动态修正与精度优化,从而有效提升总清选损失数据获取准确性,为联合收获机智能损失监测系统的推广应用提供理论依据与技术支撑。

1 籽粒清选损失监测传感器结构与原理

1.1 清选损失监测传感器结构与安装位置

根据本课题组与江苏沃得农业机械股份有限公司联合研制的 4LZ-6A 型多功能履带式谷物联合收获机的结构与尺寸以及筛尾清选排出物的分布试验,设计和确定了清选损失监测传感器的结构及安装位置^[19-20],如图 1 所示。考虑到多通道信号处理电路的复杂性及成本因素,将传感器的敏感板设置为 3 块,相邻两块敏感板之间的间距为 1 mm,紧密排列为一体式,每块敏感板对应的信号处理电路相互独立,可提高传感器的量程。敏感板的材料为 304 不锈钢,厚度为 1 mm,采用具有较高接受灵敏度的 PZT-5 型压电陶瓷^[21]作为敏感元件,并粘贴于每块敏感板背面中心对称位置。传感器整体位于清选装置的后下方,安装在脱粒清选机架两侧挡板上,其中敏感板上的中心线与清选装置最高处之间的竖直距离 h_v 为 220 mm,与清选装置最尾端之间的水平距离 d_h 为 130 mm,传感器相较于水平面的额定安装夹角 α 为 40° ,为了方便检修及维护, α 调节为 $10^\circ \sim 70^\circ$ 。

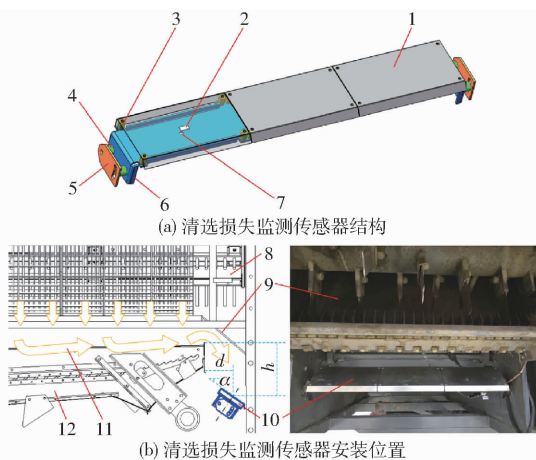


图 1 清选损失监测传感器结构及安装位置示意图

Fig. 1 Schematics of structure and installation position of cleaning loss monitoring sensor

1. 敏感板 2. 压电陶瓷 3. 纵向减振橡胶 4. 横向减振橡胶
5. 角度调节板 6. 安装底座 7. 布线孔 8. 脱粒装置 9. 碎草机下挡板
10. 清选损失监测传感器 11. 脱出混合物运动方向 12. 清选装置

1.2 清选损失监测传感器原理与性能

敏感板受到物料冲击力后发生形变,忽略折弯边和安装孔,假设压电陶瓷中心对称点为压电转换的有效质点,由压电陶瓷的安装位置可知该质点与敏感板的中心对称点重合。由于系统阻尼的存在,物料冲击敏感板时产生的应力波传递到该质点时会发生衰减,即该质点处的最大冲击力小于初始冲击位置处的最大冲击力。应力波在敏感板上的传递可等效于平面横波,横波上各质点的运动方向垂直于波的传播方向,即垂直于敏感板平面。

设物料初始冲击位置与压电转换质点间的最短直线距离为 $l_{\min}$,根据薄板中横波波速公式^[22],可得冲击力传递到压电转换质点的时间 t 为

$$t = l_{\min}/c = l_{\min} \sqrt{\frac{2(1+\nu_1)\rho_1}{E_1}} \quad (1)$$

式中 c ——薄板中横波波速, m/s

ρ_1 ——敏感板密度, kg/m^3

ν_1 ——敏感板泊松比

E_1 ——敏感板杨氏模量, Pa

在阻尼自由振动的情况下,传递路径上每一个质点的能量均在不断衰减,衰减冲击波的相邻振幅之比^[23]为 $\eta = e^{\zeta\omega_n T_d}$,其中 ζ 为系统阻尼比, ω_n 为无阻尼自由振动的固有角频率, T_d 为阻尼自由振动的周期。 η 与时间无关,任意两个相邻振幅之比均为 η 。由此可得出,初始位置处最大冲击力 F 与 n 次衰减振荡后的压电转换质点处最大冲击力 F_1 之比为 $\eta^n = e^{n\zeta\omega_n T_d}$,故有

$$F_1 = F \frac{1}{e^{n\zeta\omega_n T_d}} = \frac{F}{e^{n\zeta\omega_n T_d}} = \frac{F}{e^{n\zeta\omega_n}} \quad (2)$$

根据敏感板自由振动固有频率 ω_{ij} 计算公式求得式(2)中的 ω_n 为

$$\omega_n = 2\pi\omega_{ij} = 2\pi^3 \left(\frac{i^2}{a^2} + \frac{j^2}{b^2} \right) \sqrt{\frac{D}{\rho_1 h}} \quad (i, j = 1, 2, \dots) \quad (3)$$

式中 D ——敏感板抗弯强度, Pa

a ——敏感板长度, m

i ——沿长度方向形成的振动半波数

j ——沿宽度方向形成的振动半波数

b ——敏感板宽度, m

h ——敏感板厚度, m

根据弹性理论和 Hertz 碰撞理论^[24-25]求得式(2)中的 F 为

$$F = \left[\frac{16m_2^3 V^6 r}{9\pi^2 (n_1 + n_2)^2} \right]^{1/5} \quad (4)$$

其中

$$n_1 = \frac{1 - \nu_1^2}{\pi E_1} \quad n_2 = \frac{1 - \nu_2^2}{\pi E_2}$$

式中 m_2 ——冲击物的质量, kg

V ——冲击接触速度, m/s
 r ——冲击等效小球半径, m
 v_2 ——冲击物泊松比
 E_2 ——冲击物杨氏模量, Pa

再根据压电转换理论及压电陶瓷所接电荷放大器等效电路理论^[26],即可求得此时压电陶瓷的输出电荷量 Q 及电荷放大器的输出电压 U_0 为

$$\begin{cases} Q = F_1 d_{33} = \frac{F d_{33}}{e^{i\zeta\omega_n}} \\ U_0 = -\frac{Q}{C_f} = -\frac{F d_{33}}{e^{i\zeta\omega_n} C_f} \end{cases} \quad (5)$$

式中 d_{33} ——压电陶瓷的压电应变常数, C/N
 C_f ——电荷放大器的反馈电容, F

故综合式(1)~(5),即可初步计算出脱出混合物各成分冲击敏感板所产生压电信号的最大电压值、敏感板的振动频率等数据,为分辨和提取籽粒损失信号提供理论指导。

在上述清选损失监测传感器结构与原理基础上,设计并开发了由信号处理模块、数据分析模块及数据传输模块组成的 PCB 板(核心为 FPGA),所得籽粒损失数据可通过 2.4 GHz 无线收发器传输至计算机端损失监测软件,也可通过 CAN 总线收发器将监测结果集成至本课题组自主研制的联合收获机信息采集与控制系统中(图 2)。经多轮传感器本体性能测试(不结合损失监测占比模型),其用于水稻、小麦和油菜作物时的平均监测准确率大于 92.0%,且单通道损失监测模块的最大检测速率可达 370 粒/s 左右。

2 清选装置 CFD-DEM 仿真

2.1 单因素仿真试验设计

课题组前期已采用 CFD-DEM 耦合仿真方法分析了清选装置内部物料运动规律,相关成果见文

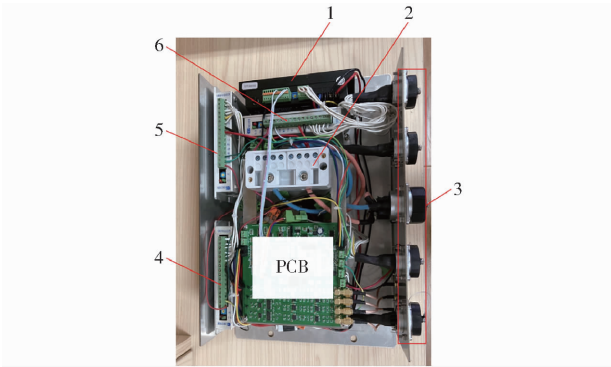


图 2 联合收获机信息采集与控制系统
Fig.2 Information acquisition and control system for combine harvesters

- 1.脱粒间隙调节电机驱动器 2.分线器 3.线缆集成航空插头
4.筛片开度调节电动推杆驱动器 5.进风口面积调节电动推杆驱动器 6.备用电动推杆驱动器

献[18],该耦合方法的基本思路是:通过 CFD 软件(本文采用 Fluent 2022)计算气相物质流场,通过 DEM 软件(本文采用 EDEM 2021)计算固相物质的运动及受力情况,二者在耦合接口下实时进行质量、动量和能量交换,实现双向气固两相流仿真。其优势在于,将固相物质颗粒的形状、尺寸、材料、摩擦因数等物理属性都考虑进来,能够更准确地分析出清选过程中气固两相物质间的相互作用。

根据 4LZ-6A 型联合收获机可收获的水稻/小麦及兼收的油菜等作物种类、喂入量变化及各工作参数调节范围,设计了单因素仿真试验,如表 1~3 所示,以详细探讨作物种类、喂入量、筛片开度、风机进风口面积等因素对清选损失监测占比的影响规律,其中喂入量由收获机前进速度进行调节,筛片开度(文中指两片相邻筛片间的最短距离)和风机进风口面积参数(文中指经挡板遮挡后的进风口面积占总面积的比例)^[19]由收获机信息采集与控制系统(图 2)进行调节。

表 1 喂入量单因素试验设置(24 mm 筛片开度、100% 风机进风口面积保持不变)
Tab.1 Single factor test setup of feed rate (24 mm screen opening and 100% airflow inlet area of fan remain unchanged)

收获作物种类	喂入量工况号(数值)						
	I (4.0)	II (4.4)	III (4.8)	IV (5.2)	V (5.6)	VI (6.0)	VII (6.4)
水稻	I (4.0)	II (4.4)	III (4.8)	IV (5.2)	V (5.6)	VI (6.0)	VII (6.4)
小麦	I (3.0)	II (3.3)	III (3.6)	IV (3.9)	V (4.2)	VI (4.5)	VII (4.8)
油菜	I (2.4)	II (2.6)	III (2.8)	IV (3.0)	V (3.2)	VI (3.4)	VII (3.6)

表 2 筛片开度单因素试验设置(最大喂入量、100% 风机进风口面积保持不变)
Tab.2 Single factor test setup of screen opening (maximum feed rate and 100% airflow inlet area of fan remain unchanged)

收获作物种类	筛片开度工况号(数值)						
	I (18)	II (20)	III (22)	IV (24)	V (26)	VI (28)	VII (30)
水稻	I (18)	II (20)	III (22)	IV (24)	V (26)	VI (28)	VII (30)
小麦	I (18)	II (20)	III (22)	IV (24)	V (26)	VI (28)	VII (30)
油菜	I (18)	II (20)	III (22)	IV (24)	V (26)	VI (28)	VII (30)

表 3 风机进风口面积单因素试验设置(最大喂入量、24 mm 筛片开度保持不变)

Tab.3 Single factor test setup of airflow inlet area of fan (maximum feed rate and 24 mm screen opening remain unchanged)

收获作物种类		风机进风口面积工况号(数值)						%
水稻	I (70)	II (75)	III (80)	IV (85)	V (90)	VI (95)	VII (100)	
小麦	I (70)	II (75)	III (80)	IV (85)	V (90)	VI (95)	VII (100)	
油菜	I (70)	II (75)	III (80)	IV (85)	V (90)	VI (95)	VII (100)	

2.2 流道模型建立与网格划分

按照单因素试验安排,在 Solidworks 2022 软件中建立耦合仿真所需的流道模型,其中:清选损失监测传感器的安装位置与实际相同,另外由于 3 块敏感板相互间距仅为 1 mm,故在流道模型中将其作为一块完整板;喂入量参数的变化不需要建立额外流道模型,在 EDEM 软件中的颗粒工厂内设置即可;收获水稻和小麦所用振动筛下筛为 22 mm × 22 mm 的编织筛,收获油菜的则为直径 10 mm 的冲孔筛。图 3 为 Solidworks 软件透明模式显示下(实际为密闭流道)的模型示意图,每个模型均包括离心式风机、鱼鳞筛、编织筛或冲孔筛、尾筛、抖动板、清选损失监测传感器等结构,模型总长度 2 125 mm、总宽度 790 mm、总高度 1 062 mm。

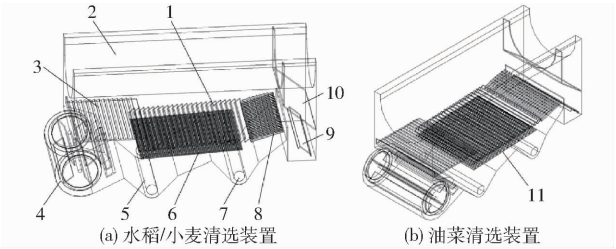


图 3 清选装置流道模型

Fig.3 Flow channel models of cleaning device

1. 鱼鳞筛 2. 脱粒滚筒位置 3. 抖动板 4. 离心式风机 5. 籽粒螺旋输送机位置 6. 编织筛 7. 杂余螺旋输送机位置 8. 尾筛 9. 清选损失监测传感器 10. 碎草机下挡板 11. 冲孔筛

采用 ANSYS Workbench 2021 软件中的 ICEM 模块划分网格,考虑到流道模型的体积较大及内部结构的复杂性,采用四面体非结构网格对其进行划分。由于仿真过程中风机叶轮需要做旋转运动、振动筛(包括鱼鳞筛、编织筛/冲孔筛、尾筛等)需要做曲柄滑块运动,因此采用多区域网格划分方法,将风机叶轮独立为一个区域、振动筛独立为一个区域;另外后续需要在 EDEM 软件中统计冲击到清选损失监测传感器的籽粒数量,将清选损失监测传感器也独立为一个区域。以图 3 的流道模型为例,将其分为 6 块区域,即叶轮区域、进风口 1 区域、进风口 2 区域、清选室区域、振动筛区域、清选损失监测传感器区域,同时在 ICEM 模块中设置了 2 个进风口和 3 个出风口。相邻网格区域之间的网格交界面设置为

Interface,分别对上述 6 块区域进行了网格划分,并对离心式风机叶轮、抖动板、鱼鳞筛、编织筛、尾筛等部位进行了面网格划分和局部加密处理,以提高网格质量和精度,最后将 6 块区域网格进行合并。合并完网格后,网格总数为 8 407 951 个,生成的网格模型如图 4 所示。采用同样的方法对其余流道模型分别进行网格划分,划分完成后的网格数量为 8 260 321 ~ 8 473 993 个。

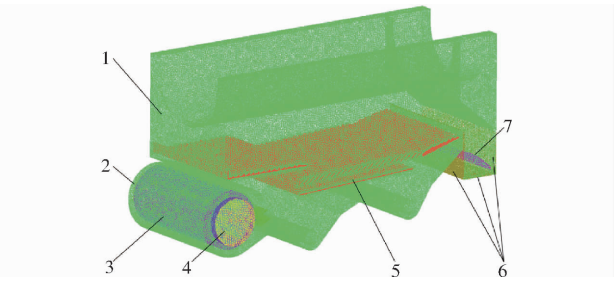


图 4 网格模型

Fig.4 Grid model

1. 清选室 2. 进风口 2 3. 叶轮 4. 进风口 1 5. 振动筛 6. 出风口 1/2/3 7. 清选损失监测传感器

2.3 耦合仿真参数设置

将网格文件导入 Fluent 软件中进行气相仿真参数设置。不考虑温度、湿度等环境的影响,忽略气体分子间的黏性力作用,采用标准 $k-\epsilon$ 湍流模型,求解方式设置为 Pressured-Based、Transient,设置工作压力为 1 个大气压,设置重力加速度方向为垂直于抖动板的方向,大小为 9.81 m/s^2 。模型的两个入口边界条件设置为速度入口,大小均为 $10 \text{ m/s}^{[27]}$, 3 个出口边界条件设置为压力出口,相对压力设置为 0 Pa。将离心式风机叶轮的网格区域设置为 MRF(多重参考系)模型区域,并设置旋转坐标轴和旋转方向,旋转速度设置为额定工况 $1\,520 \text{ r/min}$;将振动筛的网格区域设置为滑移网格,通过编写的网格运动 UDF(用户自定义函数,采用的振动公式如式(6)所示)实现其做等效曲柄滑块运动,振动频率为额定工况 7 Hz、垂向最大振幅为 18 mm。

$$\begin{cases} x(t_1) = r_1 \cos(2\pi f_1 t_1) + \sqrt{l_1^2 - (r_1 \sin(2\pi f_1 t_1))^2} \\ z(t_1) = r_1 \sin(2\pi f_1 t_1) \end{cases} \quad (6)$$

式中 $x(t_1)$ ——相对中心的纵向振幅分量,m
 $z(t_1)$ ——相对中心的垂向振幅分量,m

t_1 ——振动时间,s
 r_1 ——曲柄半径(垂向最大振幅一半),m
 l_1 ——连杆长度,m
 f ——振动频率,Hz

将同一网格文件导入 EDEM 软件中进行固相仿真参数设置。设置重力加速度方向为垂直于抖动板的方向,大小为 9.81 m/s^2 。风机转速、振动筛频率等运动参数设置与 Fluent 保持一致。按照田间试验采集的脱出混合物样本建立颗粒模型:基于定容积压缩法测定脱出物各组分的密度;随机分别选取 20 个各组分样本,采用高精度数字游标卡尺测量各组分三维几何尺寸,利用 TA-XT2i 型质构分析仪和拉压测试系统测量并计算各组分的泊松比和剪切模量等力学特性参数,各组分颗粒模型的三维尺寸和力学参数取 20 个样本的平均值。经过适当简化

后颗粒模型建模结果如图 5 所示,三维尺寸、密度和力学参数如表 4 所示,另外颗粒模型的接触参数由课题组已有研究及试验测得^[18],如表 5~7 所示。



图 5 不同脱出混合物成分颗粒模型(非真实比例)
Fig.5 Particle models of different threshed mixture components (non-real scale)

表 4 颗粒模型三维尺寸、密度和力学特性参数

Tab.4 Three-dimensional sizes, densities, and mechanical characteristic parameters of particle models					
作物种类	混合物成分	长×宽×厚/(mm×mm×mm)	密度/(kg·m ⁻³)	剪切模量/Pa	泊松比
水稻	籽粒	6.8×2.9×2.9	1 320	8.6×10 ⁷	0.3
	短茎秆	68.2×3.3×3.3	124	8.8×10 ⁶	0.4
	轻杂余	43.0×0.8×0.8	65	1.5×10 ⁶	0.4
小麦	籽粒	7.1×3.5×3.5	1 210	7.1×10 ⁷	0.3
	短茎秆	62.4×3.2×3.2	105	2.9×10 ⁶	0.4
	颖壳	8.2×4.6×2.5	48	8×10 ⁴	0.4
	轻杂余	32.7×1.2×1.2	60	1.2×10 ⁶	0.4
油菜	籽粒	1.6×1.6×1.6	960	2.8×10 ⁷	0.3
	短茎秆	65.2×3.4×3.4	165	1.1×10 ⁷	0.4
	角果壳	42.1×2.2×1.2	70	1.3×10 ⁶	0.5
	轻杂余	14.6×1.4×1.4	78	3.5×10 ⁶	0.5

表 5 水稻颗粒模型接触参数

Tab.5 Contact parameters of rice particle models									
接触参数	籽粒-籽粒	籽粒-短茎秆	籽粒-轻杂余	籽粒-筛/壁面	短茎秆-短茎秆	短茎秆-轻杂余	短茎秆-筛/壁面	轻杂余-轻杂余	轻杂余-筛/壁面
恢复系数	0.19	0.17	0.15	0.52	0.12	0.11	0.10	0.08	0.10
静摩擦因数	0.81	0.80	0.76	0.45	0.72	0.75	0.66	0.63	0.61
动摩擦因数	0.05	0.03	0.03	0.01	0.03	0.03	0.02	0.02	0.01

表 6 小麦颗粒模型接触参数

Tab.6 Contact parameters of wheat particle models													
接触参数	籽粒-籽粒	籽粒-短茎秆	籽粒-颖壳	籽粒-轻杂余	籽粒-筛/壁面	短茎秆-短茎秆	短茎秆-颖壳	短茎秆-轻杂余	短茎秆-筛/壁面	颖壳-颖壳	颖壳-轻杂余	颖壳-筛/壁面	轻杂余-轻杂余
恢复系数	0.22	0.20	0.17	0.17	0.60	0.14	0.13	0.13	0.11	0.09	0.09	0.11	0.09
静摩擦因数	0.75	0.74	0.70	0.70	0.41	0.66	0.69	0.69	0.61	0.58	0.58	0.56	0.58
动摩擦因数	0.04	0.03	0.03	0.03	0.01	0.03	0.03	0.03	0.02	0.02	0.02	0.01	0.02

表 7 油菜颗粒模型接触参数

Tab.7 Contact parameters of rape particle models													
接触参数	籽粒-籽粒	籽粒-短茎秆	籽粒-角果壳	籽粒-轻杂余	籽粒-筛/壁面	短茎秆-短茎秆	短茎秆-角果壳	短茎秆-轻杂余	短茎秆-筛/壁面	角果壳-角果壳	角果壳-轻杂余	角果壳-筛/壁面	轻杂余-轻杂余
恢复系数	0.21	0.19	0.17	0.17	0.55	0.13	0.12	0.12	0.11	0.09	0.09	0.10	0.08
静摩擦因数	0.69	0.68	0.72	0.65	0.41	0.68	0.71	0.71	0.63	0.66	0.65	0.61	0.60
动摩擦因数	0.04	0.02	0.02	0.02	0.01	0.03	0.03	0.03	0.02	0.02	0.02	0.01	0.02

接着,在 EDEM 软件中进行颗粒工厂设置。由于清选装置纵向方向上脱出混合物各成分的分布并不完全均匀^[28],故将颗粒工厂在清选装置纵向方向上设置为 3 块面区域(图 6),此 3 块区域位于同一水平面且紧贴脱粒装置空间最低位置处,距清选装置抖动板的垂直距离为 210 mm。根据多轮脱出物采集试验均值得出,水稻、小麦、油菜 3 种作物的初始喂入量与到达清选装置喂入量之比分别为 9:4、10:6、10:3.5,颗粒工厂中各脱出物成分质量比例如表 8 所示。再结合田间测得的各脱出物成分(颗粒模型)平均质量数值,以及仿真工况所需初始喂入量(其中不同颗粒工厂的脱出物喂入量由到达清选装置喂入量按照颗粒工厂面积之比进行分割),即可计算出不同颗粒工厂中各颗粒模型的生成速率。另外各颗粒工厂中颗粒模型的初始下落速度按照试验中的冲击速度垂直分量进行设置,分别将水稻、小麦、油菜脱出混合物下落速度设在 0.2~1.9 m/s、0.3~1.7 m/s、0.2~2.1 m/s 区间内,呈正态分布生成。

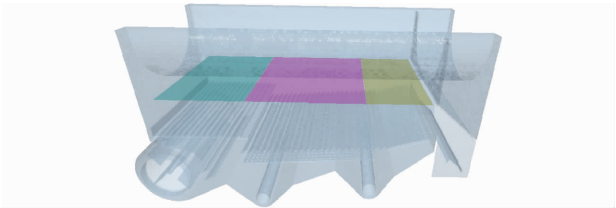


图 6 颗粒工厂设置示意图(绿、粉、黄表示的颗粒工厂面积之比为 33:43:24,相邻工厂间隔 1 mm)

Fig.6 Schematic of particle factory setting (factory areas of the green, pink, and yellow particles were in ratio of 33:43:24, with 1 mm spacing between adjacent factories)

表 8 颗粒工厂中各脱出物成分质量比例				
Tab.8 Mass proportions of each threshed-mixture component in particle factories				%
脱出物成分		绿色颗粒工厂	粉色颗粒工厂	黄色颗粒工厂
水稻	籽粒	81	64	49
	短茎秆	13	29	38
	轻杂余	6	7	13
小麦	籽粒	85	67	53
	短茎秆	9	17	32
	颖壳	2	5	4
	轻杂余	4	11	11
油菜	籽粒	73	59	45
	短茎秆	13	22	39
	角果壳	8	10	8
	轻杂余	6	9	8

最后通过耦合接口 UDF 将 Fluent 软件与 EDEM 软件建立连接,采用 Euler 模型进行气固两相流耦合仿真,耦合时间步长匹配为:Fluent 的计算时间步长设置为 0.000 015 s,EDEM 的计算时间步长设置为 0.000 000 3 s,共计算 200 000 步,仿真总时长为 3 s。

3 清选损失监测占比补偿方法

3.1 耦合仿真初步结果及网格无关性分析

图 7~9 为收获不同作物时清选装置在最大喂入量、24 mm 筛片开度、100% 风机进风口面积的工况下 CFD-DEM 耦合仿真结果。由图 7~9 可知:

(1)脱出混合物从颗粒工厂下落到鱼鳞筛的过程中(0~0.2 s),部分短茎秆、轻杂余等杂质受到离

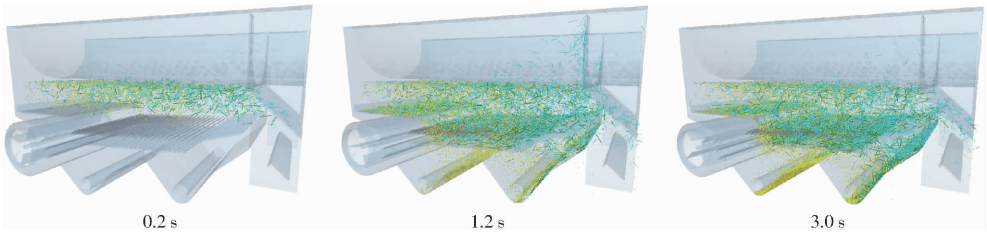


图 7 水稻清选装置仿真结果(黄色为籽粒、绿色为短茎秆、青色为轻杂余)

Fig.7 Simulation result of rice cleaning device (yellow—grain, green—short stem, cyan—light impurity)

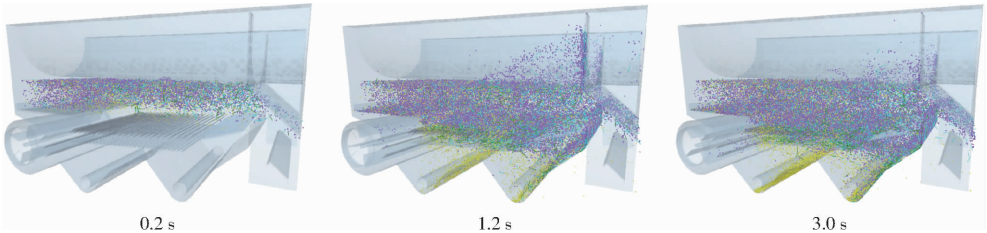


图 8 小麦清选装置仿真结果(黄色为籽粒、绿色为短茎秆、青色为轻杂余、紫色为颖壳)

Fig.8 Simulation result of wheat cleaning device (yellow—grain, green—short stem, cyan—light impurity, purple—glume)

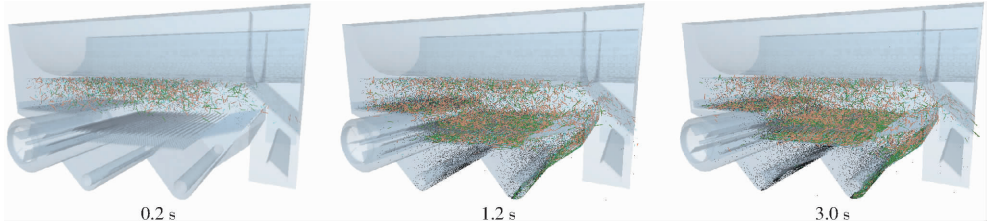


图 9 油菜清选装置仿真结果(黑色为籽粒、绿色为短茎秆、青色为轻杂余、橙色为角果壳)

Fig. 9 Simulation result of rape cleaning device (black—grain, green—short stem, cyan—light impurity, orange—silique shell)

心式风机多风道吹出气流的影响已经被排出清选装置外部,而籽粒后移程度最小,与短茎秆、轻杂余等杂质之间出现分层和扩散,此现象在 3 种不同作物中均存在。

(2)落入到鱼鳞筛的脱出混合物在振动筛和离心式风机多风道吹出气流的共同作用下,继续进行清选筛分过程。在 1.2 s 时,部分籽粒和极少数短茎秆、轻杂余等杂质已经透过振动筛下筛,到达籽粒输送器的位置,而大部分杂质和少部分籽粒则运动到清选装置出口被排出,部分未被排出机外的杂质和籽粒则透过尾筛进入杂余输送机。另外可以看出水稻轻杂余和小麦颖壳受到的气流吹托作用更明显,已经运动到脱粒装置上部凹板筛。脱出混合物中排到清选装置出口外的籽粒即形成了总清选损失,其中一部分冲击到清选损失监测传感器的籽粒即形成了监测损失。

(3)3.0 s 时,3 种脱出混合物中均已有许多籽粒到达籽粒输送器的位置,该位置处的短茎秆、轻杂余等杂质数量相比 1.2 s 时有少量增加,而杂余输送机中籽粒与杂质的混合物相比 1.2 s 时有较明显增加。鱼鳞筛上方和清选装置出口处的脱出混合物分布情况与 1.2 s 时差别较小,这表明在 1.2 s 到 3.0 s 时间段内,3 种脱出混合物的运动都达到了相对稳定的状态,因此将这一时间段作为研究清选损失传感器监测占比数据分析阶段。

此外,为进行网格无关性验证,对图 9 所述工况下的流道模型进行 3 次重复网格划分,划分过程中风机叶轮、鱼鳞筛等部位的加密处理程度不一,生成的网格数量分别为 8 416 443、9 548 875、11 352 658 个,进行仿真计算后在 EDEM 软件中统计得出 1.2~3.0 s 时间段内与清选损失监测传感器产生碰撞的籽粒数,结果分别为 653、655、646 个(水稻),447、452、459 个(小麦),1 773、1 768、1 779 个(油菜),最大标准差为 6.03 个(小麦),故得出网格划分质量或数量对本研究所关注的碰撞籽粒数量的影响可忽略不计。

3.2 清选损失监测占比仿真值和试验值计算

待表 1~3 中所有工况仿真过程完成后,在

EDEM 软件分析模块中创建一块颗粒数量统计区域(图 10),用于统计从清选装置尾部排出的所有籽粒颗粒模型的数量。在 EDEM 软件数据输出模块中,分别导出 1.2~3.0 s 时间段内与清选损失监测传感器产生碰撞的籽粒数和统计区域内的籽粒数,二者相除即得出清选损失监测占比仿真值。

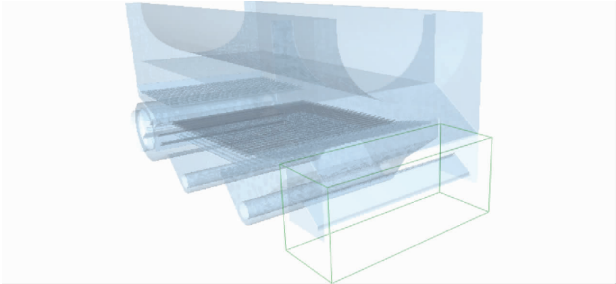


图 10 总清选损失数量统计区域(绿框)

Fig. 10 Statistical area of total cleaning loss (green box)

为探究由耦合仿真方法得出传感器监测占比数值的有效性,按照表 1~3 中的参数设置,于 2023 年 11 月 2~5 日在江苏省镇江市世业洲农场进行了水稻收获试验,2024 年 5 月 26~31 日在同一农场不同田块进行了小麦、油菜收获试验。清选混合物采集方法如图 11 所示,将一个尼龙网兜安装并覆盖在收获机秸秆粉碎机的出口处以隔离脱粒装置排出的混合物,在清选装置与脱粒装置出口处安装了一块挡板,使得清选混合物不经过粉碎机而直接排出,并用一块油布对其进行收集。单次试验时,在田间预留出 3 m 的缓冲区以使联合收获机各部件工况达到较稳定的设置值,共收获 10 m 作物,然后采用编织筛对清选混合物进行人工初筛,接着采用小型清选机对脱出混合物进行精细清选,最后称量得到实际



图 11 损失监测占比田间试验

Fig. 11 Field test on proportion of loss monitoring

损失的籽粒质量。结合清选损失监测传感器在此收获范围内的存储数据以及试验前测得的千粒质量即可得出监测值占实际值的百分比。单次试验重复 5 次,将 5 次试验所得百分比进行平均即得出最终的清选损失监测占比试验值。

3.3 清选损失监测占比单因素影响分析

将表 1~3 不同工况下的仿真值和试验值导入

Origin 2022 软件,并采用 Fitting 功能对仿真值数据点进行多项式拟合,生成相应的最优函数拟合曲线和多项式方程,本文选择最优拟合曲线的原则是在保证 R^2_{adj} 大于 0.95 的情况下选择函数次数较低,结果如图 12 所示。

由图 12 田间试验结果可以看出,同一工况下水稻、小麦、油菜作物的清选损失监测占比数值在重复

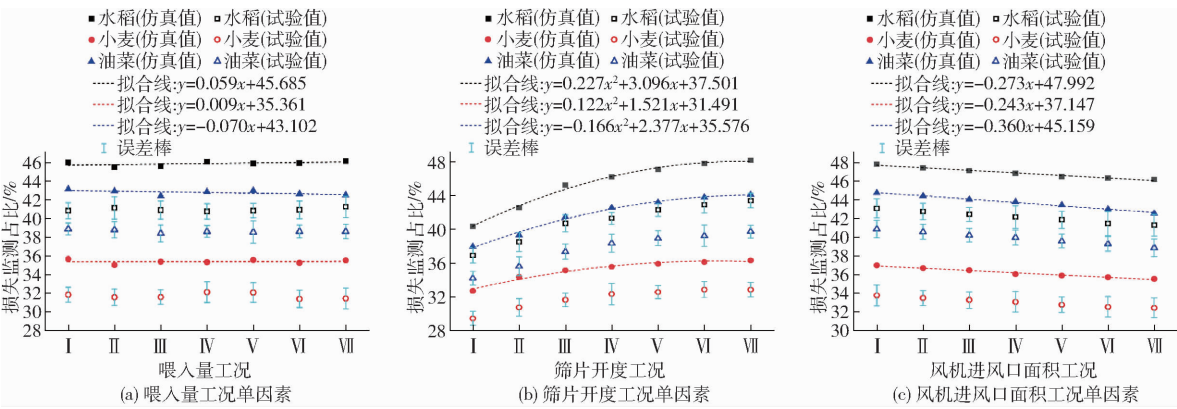


图 12 清选损失监测占比结果

Fig. 12 Results of cleaning loss monitoring proportion

试验中均存在较大的波动,误差棒(标准差)范围为 0.65%~1.28%,这表明仅依靠田间试验可能无法准确反映出清选损失监测占比数值随不同工况的变化规律。在图 12a 中,喂入量单因素变化时,水稻作物的损失监测占比试验值保持在 41.0%左右,仿真值保持在 45.9%左右,其最优拟合函数为直线,斜率绝对值小于 0.06(可近似为 0),类似的,小麦、油菜作物的最优拟合函数也为直线;同一喂入量工况下 3 种作物的仿真值相较于试验值均偏大,偏大程度为 10.0%~13.1%((各工况下仿真值-试验值)/试验值 $\times 100\%$)。在图 12b 中,筛片开度单因素增大时,水稻作物的损失监测占比试验值随之增大,仿真值同样随之增大,其最优拟合曲线为二次函数,小麦、油菜作物的最优拟合曲线也为二次函数;同一筛片开度工况下 3 种作物的仿真值相较于试验值均偏大,偏大程度为 9.4%~11.9%。在图 12c 中,风机进风口面积单因素增大时,水稻作物的损失监测占比试验值随之减小,仿真值同样随之减小,其最优拟合曲线为斜率不可忽略的一次函数,小麦、油菜作物同上;同一进风口面积工况下 3 种作物的仿真值相较于试验值均偏大,偏大程度为 9.0%~11.8%。综上,由 CFD-DEM 仿真方法得出清选损失监测占比数值相较于实际试验值偏大,偏大程度总平均值为 10.4%、标准差为 0.97%,该关系较稳定,因此一定程度上可用仿真值代表试验值,本文后续以偏大平均值 10.4%作为仿真值与试验值之间的换算关系。

此外,由图 12 仿真结果可以看出,3 种作物的清选损失监测占比数值随工况改变而发生变化的规律相似,即在喂入量工况下近似稳定不变、筛片开度工况下呈现二次函数型、进风口面积工况下呈现一次函数型。无论工况如何变化,水稻的清选损失监测占比仿真值始终最大,在 40.3%以上,小麦的清选损失监测占比仿真值较小,小于 36.9%,油菜的清选损失监测占比仿真值则位于水稻和小麦之间,这说明了作物种类对清选损失监测占比具有较显著影响,因此构建清选损失监测占比模型时需要独立考虑作物种类这一因素。

3.4 清选损失监测占比多因素影响分析

由上述分析可知,筛片开度和风机进风口面积的变化都对清选损失监测占比有较大的影响,喂入量的变化则对清选损失监测占比几乎无影响,而在本课题组研发的收获机多参数调控系统中,筛片开度和风机进风口面积在某些时刻会被同步调节而发生变化,同时喂入量在收获过程中也会发生波动,因此需要进一步研究三者的共同作用对清选损失监测占比的影响。

在表 1~3 的基础上对 3 种作物分别进行了三因素五水平正交仿真试验,损失监测占比结果由仿真结果经过偏大换算关系后得出,如表 9~11 所示。

采用 Minitab 2022 软件对表 9~11 中的数据进行极差分析,得出:3 种作物的损失监测占比影响因素显著水平由大到小排序均为:筛片开度、风机进风口面积、喂入量,且喂入量极差值(≤ 0.16)远小于

表 9 水稻正交仿真试验方案与结果

Tab.9 Orthogonal simulation test scheme and results of rice

序号	喂入量/ (kg·s ⁻¹)	筛片开度/ mm	风机进风 口面积/%	损失监测 占比/%
1	4.4	20	75	39.7
2	4.4	22	80	41.7
3	4.4	24	85	42.2
4	4.4	26	90	42.9
5	4.4	28	95	43.1
6	4.8	20	80	39.3
7	4.8	22	85	41.4
8	4.8	24	90	42.0
9	4.8	26	95	42.6
10	4.8	28	75	44.1
11	5.2	20	85	38.8
12	5.2	22	90	41.1
13	5.2	24	95	41.7
14	5.2	26	75	43.6
15	5.2	28	80	43.8
16	5.6	20	90	38.4
17	5.6	22	95	40.9
18	5.6	24	75	43.2
19	5.6	26	80	43.4
20	5.6	28	85	43.1
21	6.0	20	95	38.0
22	6.0	22	75	41.9
23	6.0	24	80	42.8
24	6.0	26	85	43.2
25	6.0	28	90	43.4

表 10 小麦正交仿真试验方案与结果

Tab.10 Orthogonal simulation test scheme and results of wheat

序号	喂入量/ (kg·s ⁻¹)	筛片开度/ mm	风机进风 口面积/%	损失监测 占比/%
1	3.3	20	75	31.2
2	3.3	22	80	32.2
3	3.3	24	85	32.1
4	3.3	26	90	32.6
5	3.3	28	95	31.8
6	3.6	20	80	30.8
7	3.6	22	85	32.0
8	3.6	24	90	31.7
9	3.6	26	95	32.4
10	3.6	28	75	33.6
11	3.9	20	85	30.5
12	3.9	22	90	31.9
13	3.9	24	95	31.3
14	3.9	26	75	33.3
15	3.9	28	80	33.2
16	4.2	20	90	30.1
17	4.2	22	95	31.7
18	4.2	24	75	33.0
19	4.2	26	80	33.1
20	4.2	28	85	32.7
21	4.5	20	95	29.8
22	4.5	22	75	32.4
23	4.5	24	80	32.5
24	4.5	26	85	32.8
25	4.5	28	90	32.3

表 11 油菜正交仿真试验方案与结果

Tab.11 Orthogonal simulation test scheme and results of rape

序号	喂入量/ (kg·s ⁻¹)	筛片开度/ mm	风机进风 口面积/%	损失监测 占比/%
1	2.6	20	75	37.3
2	2.6	22	80	38.4
3	2.6	24	85	38.9
4	2.6	26	90	39.4
5	2.6	28	95	39.7
6	2.8	20	80	36.8
7	2.8	22	85	38.1
8	2.8	24	90	38.7
9	2.8	26	95	39.1
10	2.8	28	75	40.9
11	3.0	20	85	36.4
12	3.0	22	90	37.8
13	3.0	24	95	38.3
14	3.0	26	75	40.4
15	3.0	28	80	40.5
16	3.2	20	90	36.0
17	3.2	22	95	37.5
18	3.2	24	75	39.8
19	3.2	26	80	39.9
20	3.2	28	85	40.2
21	3.4	20	95	35.6
22	3.4	22	75	38.6
23	3.4	24	80	39.3
24	3.4	26	85	39.6
25	3.4	28	90	40.0

另两个因素,故可认为在多因素共同作用下喂入量对损失监测占比几乎无影响,而筛片开度和风机进风口面积的极差值较大,它们对损失监测占比的影响不可忽略,此分析也验证了 3.2 节中单因素分析的准确性。另外,继续对喂入量、筛片开度和风机进风口面积进行方差分析,得出喂入量 P 值均在 0.99 左右,远大于 0.05,进一步说明喂入量对损失监测占比影响不显著,在构建损失监测占比模型时可忽略这一因素。

3.5 清选损失监测占比补偿模型构建

为构建完善的清选损失监测占比补偿模型,以筛片开度和风机进风口面积为影响因素,在前文所有仿真试验的基础上补充为二因素七水平全排列仿真试验(最大喂入量工况下),同样地,最终结果由各工况下仿真结果经过偏大换算关系后得出。对上述数据进行初步统计和散点分布分析发现,筛片开度、风机进风口面积与清选损失占比之间存在明显的非线性波动特征,因此本文选取 3 种典型非线性拟合模型作为候选模型进行对比分析。

(1) 多项式回归模型

$$z = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^{n-i} a_{ij} x^i y^j \quad (i+j \leq n)$$

(7)

式中 z ——清选损失监测占比数字量
 x ——筛片开度数字量
 y ——风机进风口面积数字量
 a_{ij} ——回归系数 n ——多项式阶数

考虑到仿真数据规模与工程应用需求,分别建立二次、三次多项式模型进行后续比较分析。在 Matlab 2021 软件中采用最小二乘法对模型系数进行求解,即将样本数据代入模型后写成矩阵形式: $z = \Phi a$,通过求解 $a = (\Phi^T \Phi)^{-1} \Phi^T z$,进而获得回归系数。其中, $a = [a_{00}, a_{10}, a_{01}, a_{20}, a_{11}, a_{02}, \dots]^T$; $\Phi = [\varphi(x_1, y_1), \varphi(x_2, y_2), \dots, \varphi(x_n, y_n)]^T$; $\varphi(x, y) = [1, x, y, x^2, xy, y^2, \dots, x^i y^j, \dots]$ 。

(2) 支持向量机模型 (Support vector machine, SVM)

$$z = \sum_{i=1}^N (\alpha_i - \alpha_i^*) K(x_i, x) + b_p \tag{8}$$

式中 x ——输入向量, $x = [x, y]^T$
 $K(\cdot)$ ——核函数
 α_i, α_i^* ——拉格朗日乘子
 b_p ——偏置项

选用径向基函数 (Radial basis function, RBF) 作为支持向量机的核函数,其能够在样本数量有限的情况下有效拟合复杂关系,表达式为: $K(x_i, x_j) = \exp(-\gamma \|x_i - x_j\|^2)$ 。采用网格搜索结合交叉验证的方法对支持向量机惩罚因子 C 、核函数参数 γ 、不敏感损失系数 ε 进行优化,参数搜索设置如下: $C \in [1, 10, 100]$ 、 $\gamma \in [0.01, 0.1, 1]$ 、 $\varepsilon \in [0.01, 0.05, 0.1]$,以 R^2_{adj} 最小为目标,选取最优参数组合用于支持向量机模型构建。

(3) 人工神经网络模型 (Artificial neural network, ANN)

结合本研究仿真数据特点构建前馈型人工神经网络模型,其具有较强的非线性逼近能力,能够较好拟合复杂输入-输出关系,网络结构为:输入层,2 个节点 (筛片开度、风机进风口面积);隐藏层,5 个节点 (采用经验公式并结合试验确定节点数 $N_h = \sqrt{N_{in} N_{out}} + k$,其中 k 为 1~10 之间的调节系数);输出层:1 个节点 (清选损失占比)。

采用反向传播 (Back-propagation, BP) 算法对该网络模型进行训练,定义均方根误差 (Root mean square error, RMSE) 作为损失函数,关键参数设置如下:初始学习率为 0.01~0.05;最大训练迭代次数为 1 000;误差目标为 10^{-2} ;权值初始化为随机小值。通过梯度下降法不断调整权值和阈值,直至误差收敛或达到最大迭代次数。

对上述建模结果进行总结比较,如表 12 所示。

表 12 典型模型拟合结果
Tab. 12 Typical model fitting results

模型	水稻		小麦		油菜	
	R^2_{adj}	RMSE/%	R^2_{adj}	RMSE/%	R^2_{adj}	RMSE/%
多项式回归 (二次)	0.993	0.216	0.991	0.135	0.998	0.103
多项式回归 (三次)	0.996	0.154	0.998	0.107	0.998	0.094
支持向量机	0.998	0.081	0.997	0.075	0.999	0.088
人工神经网络	0.999	0.056	0.998	0.058	0.999	0.062

可以看出,支持向量机和人工神经网络模型的 R^2_{adj} 值均大于多项式回归模型,且它们的 RMSE 值均小于多项式回归模型,表明此二者在拟合精度上占优,但存在模型结构复杂、参数可解释性差、不利于 FPGA 平台实时实现等缺点;多项式回归模型精度略低,但其 R^2_{adj} 值仍大于 0.990,同时 RMSE 值也较小,完全满足工程精度要求,而且在参数数量、计算复杂度和实现难度等方面具有显著优势;三次多项式回归模型的精度相较于二次提升有限,且参数数量与存储需求比二次多项式大。因此,本文最终选取综合性能最优的二次多项式回归模型作为清选损失监测占比补偿模型

$$z_1 = -0.0429x^2 - 0.0002y^2 + 0.00006xy + 2.5782x - 0.0076y + 7.5163 \tag{9}$$

$$z_2 = -0.0284x^2 - 0.0001y^2 + 0.00054xy + 1.6742x - 0.0525y + 13.2274 \tag{10}$$

$$z_3 = -0.0376x^2 - 0.0002y^2 + 0.00005xy + 2.2480x - 0.0860y + 12.7367 \tag{11}$$

式中 x ——筛片开度
 y ——风机进风口面积
 z_1 ——水稻清选损失监测占比
 z_2 ——小麦清选损失监测占比
 z_3 ——油菜清选损失监测占比

另外利用 Origin 2022 软件绘制出补偿模型映射曲面,如图 13 所示。

3.6 清选损失监测占比在线补偿实现

将占比补偿模型转化为面向硬件的并行计算结构,表达为: $z = a_0 + a_1x + a_2y + a_3xy + a_4x^2 + a_5y^2$,其中, x 和 y 为信息采集与控制系统实时采集的筛片开度、风机进风口面积 (数字量); z 为补偿后的清选损失占比 (数字量); $a_0 \sim a_5$ 为上文通过离线回归获得的多项式系数。多项式计算过程被分解为若干并行的乘法与加法运算单元,利用收获机信息采集与控制系统 (图 2) FPGA 芯片内部的 DSP 资源分别完成二次项和交叉项 (x^2 、 y^2 、 xy) 的计算,并结合各项对应预置系数进行加权运算。随后,通过加法树结构对各多项式分量及常数项 a_0 进行累加,得到最终的补偿输出结果。为满足实时处理需求,系统采用

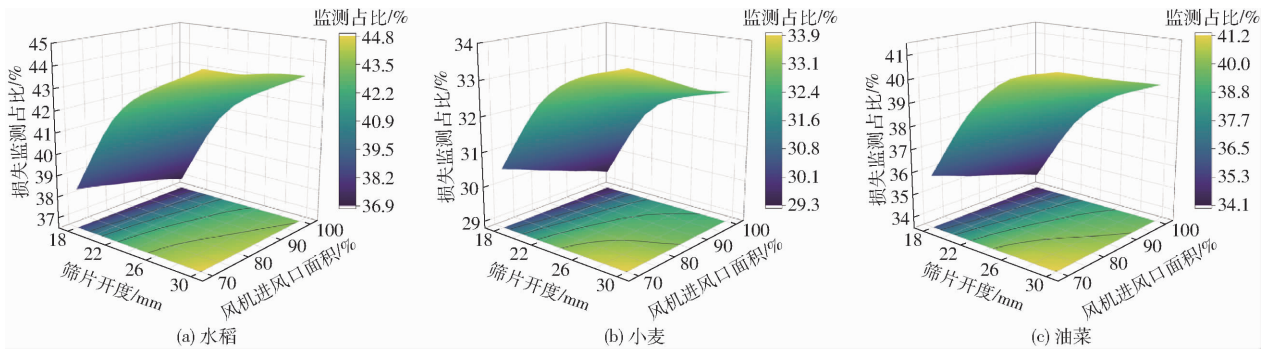


图 13 清选损失监测占比补偿模型映射曲面

Fig. 13 Mapping surfaces of proportional compensation model for cleaning loss monitoring

流水线设计方法,在关键运算节点插入寄存器,从而在保证运算稳定性的同时提高系统工作时钟频率。该结构使 FPGA 能够在每个时钟周期接收一组新的输入 x 和 y ,并在固定时延后连续输出对应的补偿结果 z ,经试验测得延迟小于 50 ns。另外,多项式补偿系数存储于 FPGA 片内寄存器中,并可通过外部控制接口进行在线更新,无需对 FPGA 进行重新综合或配置。最终计算得出补偿输出 z ,再结合当前时刻的清选损失监测传感器监测数据,即可得出精确的总清选损失值。

为进一步验证该在线补偿方法的准确性和适应性,于 2024 年 11 月—2025 年 10 月在江苏省镇江市世业洲农场进行了多轮水稻、小麦和油菜收获试验,试验步骤与 3.2 节相似,不同之处在于单次试验收获 25 m 作物,对监测占比补偿模型进行更长距离的试验验证。试验工况选取 3 个中间工况(22 mm 筛片开度与 80% 进风口面积、24 mm 筛片开度与 85% 进风口面积、26 mm 筛片开度与 90% 进风口面积),单次试验重复 5 次,结果如图 14 所示。

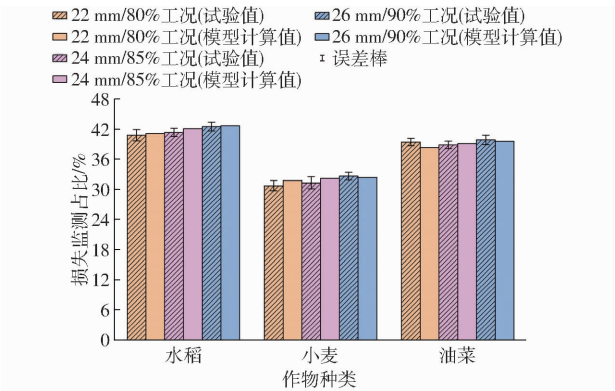


图 14 清选损失监测占比模型验证结果

Fig. 14 Verification results of monitoring proportion models for clearing loss

由图 14 可知,进行长距离收获时,小麦、油菜作物的清选损失监测占比数值在重复试验中也存在一定的波动,误差棒(标准差)范围在 0.73% ~ 1.22%。由模型得出的清选损失监测占比值较接近

于实际试验值,二者之间的最大差值为 1.08%,最小差值为 0.17%,故基于仿真建立清选损失监测补偿模型的方法可用来替代传统试验方法,该方法可避免田间试验工况波动影响以及收获季节性的影响,大幅节约时间和人力成本,实现对总清选损失值的动态修正与精度优化。

4 结论

(1) 针对谷物联合收获机清选损失监测比例换算系数准确性不足、传统接料盒试验方法存在受季节和作业参数波动影响大等问题,提出了一种基于 CFD-DEM 数值模拟的清选损失实时监测占比模型构建方法,通过对水稻、小麦和油菜等多种作物进行单因素及多因素全排列仿真,并结合田间实测结果进行比对与校正,发现作物种类、清选装置可调参数(如筛片开度、风机进风口面积等)是影响清选损失监测占比的主要因素,而喂入量波动对监测占比影响不显著。

(2) 由耦合仿真得出的清选损失监测占比数值与实际田间试验值呈正相关,仿真值相较于试验值偏大 10.4% 左右,偏大程度较稳定(标准差为 0.97%),验证了仿真分析的有效性;根据仿真数据建立了清选损失监测占比补偿模型,拟合精度高($R^2_{adj} > 0.991$);基于自主研发的信息采集与控制嵌入式系统实现清选损失数据的在线动态修正,再通过长距离的收获试验验证,得出模型值与试验值之间的差值在 0.17% ~ 1.08% 之间,进一步表明该建模方法具有较高的准确性和鲁棒性。

(3) 综上所述,基于 CFD-DEM 数值模拟的清选损失监测占比补偿方法可有效弥补传感器本体监测数据与总损失数据匹配模型不完善的短板,且后续研究工作可进一步拓展至夹带损失等其他损失类型的监测与建模,推动联合收获机籽粒损失监测向全程数字化、精细化方向发展,为高效低损的智能收获装备研发和推广提供数据支撑。

参 考 文 献

[1] LI Y, XU L, LI Y, et al. Modeling and control methods of a multi-parameter system for threshing and cleaning in grain combine harvesters[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2024, 225: 109251.

[2] ZUO Q, CAO S, YANG S, et al. Effects of nitrogen fertilizer and planting density on yield loss percentage of mechanical harvesting in rapeseed[J]. Acta Agron. Sin., 2014, 40(6): 1109-1116.

[3] 李伟. 基于无人机图像的智能稻麦联合收割机清选系统研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2019.
LI Wei. Research on the cleaning system of intelligent combine harvester based on unmanned aerial vehicle image[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2019. (in Chinese)

[4] CLAAS. LEXION series combine harvester[EB/OL]. [2025-11-15]. <https://www.claas.com/zh-cn/agricultural-machinery/combindes/lexion-8000>.

[5] JOHN DEERE. S series grain combine harvester[EB/OL]. [2025-11-15]. <https://www.deere.com/en/harvesting/s-series-combindes/>.

[6] BISCHOFF L, PHELAN J J, PFEIFFER D W. Particulate matter impact sensor; EP2977735[P]. 2018-02-14.

[7] AESAERT G, JONGMAN D W, MAHIEU T, et al. Cleaning loss sensor arrangement for combine harvester; US10820507[P]. 2020-11-03.

[8] PFEIFFER D W, BOLLIN D J, BISCHOFF L. Augmented crop loss sensing; US 10729065[P]. 2020-08-04.

[9] ISERINGHAUSEN M, BAUMGARTEN J, GAUSMANN M, et al. Combine harvester with driver assistance system; US20230397533[P]. 2023-12-14.

[10] 梁振伟, 李耀明, 赵湛, 等. 纵轴流联合收获机籽粒清选损失监测数学模型研究[J]. 农业机械学报, 2015, 46(1): 106-111.
LIANG Zhenwei, LI Yaoming, ZHAO Zhan, et al. Monitoring mathematical model of grain cleaning losses on longitudinal-axial flow combine harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(1): 106-111. (in Chinese)

[11] 王卓, 车东, 白晓平, 等. 玉米联合收获机清选损失监测装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2018, 49(12): 100-108.
WANG Zhuo, CHE Dong, BAI Xiaoping, et al. Improvement and experiment of cleaning loss rate monitoring device for corn combine harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(12): 100-108. (in Chinese)

[12] 聂鑫. 稻麦联合收割机收获损失在线检测软件系统的设计与实现[D]. 杭州: 浙江大学, 2021.
NIE Xin. Design and implementation of online detection software system for harvesting loss of rice and wheat combine harvester[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2021. (in Chinese)

[13] WU Y, LI X, MAO E, et al. Design and development of monitoring device for corn grain cleaning loss based on piezoelectric effect[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2020, 179(12): 105793.

[14] 杜岳峰, 张丽榕, 毛恩荣, 等. 基于 EMD 的联合收获机籽粒损失监测传感器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(增刊 1): 158-165.
DU Yuefeng, ZHANG Lirong, MAO Enrong, et al. Design and experiment of corn combine harvester grain loss monitoring sensor based on EMD[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(Supp. 1): 158-165. (in Chinese)

[15] 魏纯才. 油菜联合收获机清选损失监测方法与装置研[D]. 镇江: 江苏大学, 2018.
WEI Chuncai. Study on the monitoring method and device for cleaning loss of the rapeseed combine harvester[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2018. (in Chinese)

[16] XU L, WEI C, LIANG Z, et al. Development of rapeseed cleaning loss monitoring system and experiments in a combine harvester[J]. Biosystems Engineering, 2019, 178: 118-130.

[17] 唐小涵, 赵男, 郭榛, 等. 多参数可调式清选损失分布检测试验台设计与试验[J]. 农机化研究, 2022, 44(12): 148-155.
TANG Xiaohan, ZHAO Nan, GUO Zhen, et al. Design and test of multi parameter adjustable cleaning loss distribution detection test bench[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2022, 44(12): 148-155. (in Chinese)

[18] XU L, LI Y, CHAI X, et al. Numerical simulation of gas-solid two-phase flow to predict the cleaning performance of rice combine harvesters[J]. Biosystems Engineering, 2020, 190(4): 11-24.

[19] LI Y, XU L, LV L, et al. Study on modeling method of a multi-parameter control system for threshing and cleaning devices in the grain combine harvester[J]. Agriculture, 2022, 12(9): 1483.

[20] 仇解. 油菜籽粒清选损失自适应控制系统的设计与试验[D]. 镇江: 江苏大学, 2020.
QIU Jie. Development and experiment of adaptive control system for rapeseed seed cleaning loss[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2020. (in Chinese)

segmentation[C]// Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision, 2023: 6070 – 6079.

[20] YANG G, LEI J, ZHU Z, et al. AFPN: asymptotic feature pyramid network for object detection[C]//2023 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC), 2023: 2184 – 2189.

[21] JI W, HE G, XU B, et al. A new picking pattern of a flexible three-fingered end-effector for apple harvesting robot[J]. Agriculture, 2024, 14(1): 102.

[22] AN B, CHOI T, KIM U. Linkage integrated fin ray gripper capable of safe adaptive grasping for tomato harvesting[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2025, 232: 110118.

[23] LEE L Y, TERRILE S, NAM S, et al. Fin – A – Rays: expanding soft gripper compliance via discrete arrays of flexible structures[J]. Soft Robotics, 2026, 1(13): 121 – 135.

[24] SLUPSKA M, KUPRIANIUK S, STOPA R, et al. Finite element modeling of apple tissue mechanics: a comparative study of elastic and elastoplastic behavior across ripening stages[J]. Journal of Food Engineering, 2026, 402: 112696.

[25] ZHANG Z, ZHOU J, YI B, et al. A flexible swallowing gripper for harvesting apples and its grasping force sensing model[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2023, 204: 107489.

[26] 陈思宇. 苹果力学损伤特性研究及采收试验平台设计[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2022.
CHEN Siyu. Study on mechanical damage characteristics of apple and design of harvesting test platform [D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2022. (in Chinese)

[27] TOM T. Orchard apple maturity dataset [EB/OL]. (2025 – 07 – 10) [2026 – 01 – 03]. <https://doi.org/10.6084/m9.figshare.29533841.v1>.

(上接第 281 页)

[21] 雷霆, 陈刚, 何颖波, 等. 冲击载荷作用下 PZT-5 压电陶瓷的力电特性[J]. 高压物理学报, 2019, 33(5): 129 – 135.
LEI Ting, CHEN Gang, HE Yingbo, et al. Dynamic behavior of PZT – 5 piezoelectric ceramics under impact loading[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2019, 33(5): 129 – 135. (in Chinese)

[22] 王礼立. 应力波基础[M]. 北京: 国防工业出版社, 2005.

[23] 刘延柱, 陈立群, 陈文良. 振动力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2019.

[24] 孔祥安, 江晓禹, 金学松. 固体接触力学[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1999.

[25] 万丽荣, 陈博, 杨扬, 等. 单颗粒煤岩冲击放顶煤液压支架尾梁动态响应分析[J]. 煤炭学报, 2019, 44(9): 2905 – 2913.
WAN Lirong, CHEN Bo, YANG Yang, et al. Dynamic response of single coal-rock impacting tail beam of top coal caving hydraulic support[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(9): 2905 – 2913. (in Chinese)

[26] 程光明, 庞建志, 唐可洪, 等. 压电陶瓷发电能力测试系统的研制[J]. 吉林大学学报(工学版), 2007, 37(2): 367 – 371.
CHENG Guangming, PANG Jianzhi, TANG Kehong, et al. Development of measuring system for electricity generating capacity of piezoelectric ceramics[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2007, 37(2): 367 – 371. (in Chinese)

[27] XU L, HANSEN A C, LI Y, et al. Numerical and experimental analysis of airflow in a multi-duct cleaning system for a rice combine harvester[J]. Transactions of the ASABE, 2016, 59(5): 1101 – 1110.

[28] CHAI X, ZHOU Y, XU L, et al. Effect of guide strips on the distribution of threshed outputs and cleaning losses for a tangential-longitudinal flow rice combine harvester[J]. Biosystems Engineering, 2020, 198: 223 – 234.