doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2025.07.007

独立电驱清选的高湿小麦脱粒机设计与试验

刘　策[1,2]　张浩天[1]　朱俊文[1]　王　伟[3]　张春岭[1,2]　陈黎卿[1,2]

(1.安徽农业大学工学院, 合肥 230036; 2.智能绿色农业装备安徽省联合共建学科重点实验室, 合肥 230036;
3.贵州省旱粮研究所, 贵阳 550025)

摘要: 针对以贵州为代表的丘陵山区小麦收获时含水率高,传统小麦脱粒机因动力不足难以有效实现高湿小麦清选分离的难题,本文提出一种独立电驱清选技术,以降低高湿小麦分段式收获清选含杂率与损失率。结合清选系统工作原理与空气动力学理论,开展籽粒运动过程分析,确定小麦清选性能关键影响因素。融合计算流体力学和离散元法(CFD-DEM)构建清选系统的流固耦合数值仿真模型,以含杂率、损失率为评价指标,探究导流管道倾斜角、吸杂管道横截面积与吸杂口负压对清选性能的影响规律。采用非支配排序遗传算法(NSGA-Ⅱ)开展关键参数匹配优化设计,当导流管道倾斜角为 24.008 8°、吸杂管道横截面积为 179.806 2 cm^2、吸杂口负压为 873.631 6 Pa 时,清选系统含杂率与损失率分别为 0.92% 和 0.96%。试制样机并开展试验验证,结果表明,清选含杂率与损失率分别为 1.21% 和 0.82%,对比传统小麦脱粒机,损失率基本保持不变,含杂率降低 35.98%。研究成果可为丘陵山区高湿小麦清选系统装备研发提供理论与技术支撑。

关键词: 小麦脱粒机; 清选系统; CFD-DEM; NSGA-Ⅱ; 优化设计

中图分类号: S226.1　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2025)07-0082-12　　**OSID**:

Design and Test of Isolated-motor-driven Cleaning System for High Moisture Wheat Thresher

LIU Ce[1,2]　ZHANG Haotian[1]　ZHU Junwen[1]　WANG Wei[3]　ZHANG Chunling[1,2]　CHEN Liqing[1,2]

(1. *College of Engineering*, *Anhui Agricultural University*, *Hefei* 230036, *China*
2. *Anhui Provincial Key Laboratory of Intelligent Green Agricultural Equipment*, *Hefei* 230036, *China*
3. *Guizhou Drought Grain Sorghum Research Institute*, *Guiyang* 550025, *China*)

Abstract: Aiming at the high moisture content wheat harvested in hilly and mountainous areas represented by Guizhou, the traditional wheat thresher can not effectively realize the cleaning separation of high moisture wheat due to insufficient power. A isolated-motor-driven cleaning technology was proposed to reduce the impurity rate and loss rate for high moisture wheat cleaning in segmented harvesting. According to the working principle of the cleaning system and aerodynamic theory, the grain movement process was analyzed and the key factors influencing the wheat cleaning performance were identified. A numerical simulation model with fluid-solid coupling was constructed by integrating computational fluid dynamics and discrete element method (CFD-DEM). Taking the impurity rate and loss rate as the evaluation indexes, the influence of the tilting angle of guide tube, cross-sectional area of suction tube and negative pressure at the suction port on the cleaning performance was investigated. The non-dominated sorting genetic algorithm (NSGA-Ⅱ) was used to perform the optimization design of key parameters matching. When the tilting angle of guide pipe was 24.008 8°, the cross-sectional area of suction pipe was 179.806 2 cm^2, and the negative pressure at the suction port was 873.631 6 Pa, the impurity rate and loss rate of the cleaning system were 0.92% and 0.96%, respectively. Prototype trial manufacture and experimental verification was carried out, the results showed that the cleaning impurity rate and loss rate were 1.21% and 0.82%, respectively. Compared with the traditional wheat thresher, the impurity rate was reduced by 35.98% with the loss ratio remaining no large change. The research

收稿日期: 2025-05-09　修回日期: 2025-05-23

基金项目: 安徽省高等学校科学研究项目(2024AH050467)和财政部和农业农村部:国家现代农业产业技术体系项目(CARS-03-44)

作者简介: 刘策(1991—),男,讲师,博士,主要从事智能农机装备、结构振动与噪声控制研究,E-mail: liuce@ahau.edu.cn

通信作者: 陈黎卿(1979—),男,教授,博士生导师,主要从事智能农机装备研究,E-mail: lqchen@ahau.edu.cn

results can provide theoretical and technical support for the research and development of high moisture wheat cleaning equipment of hilly and mountainous areas.

Key words: wheat thresher; cleaning system; CFD－DEM; NSGA－Ⅱ; optimal design

0　引言

丘陵山区农田面积约占全国耕地总面积的 1/3，是当前我国推进农业现代化的主要阵地[1]。受地形地貌及农业机械化水平的限制，以贵州为代表的丘陵山区小麦仍以分段式收获为主[2-3]。由于贵州山区小麦收获季节阴雨不断，成熟小麦雨后如不抢收、脱粒、晾晒，将会发黑发霉、滋生霉菌，威胁粮食安全。然而，现有的小麦脱粒机进行高湿小麦清选作业时，存在含杂率高、损失率大的问题，严重制约丘陵山区小麦收获机械化的发展进程[4-6]。因此，研制适用于贵州等丘陵山区的高湿小麦脱粒机，对于提高丘陵山区小麦脱粒机清选性能，推动提升丘陵山区收获机械化水平具有重要意义。

为了提高作物收获的清选性能，国内外学者开展了大量研究。文献[7－8]主要是针对大田收获清选系统的优化设计，极大地提升了大型联合收获机的清选性能。近年来，为加快推进我国丘陵山区农业收获机械装备高质量发展进程，文献[9－11]从结构与工作参数匹配设计等方面对微型联合收获机清选系统进行优化设计，对提升丘陵山区小型脱粒机清选系统性能具有重要的指导意义。

针对我国丘陵山区宜机条件差、农户购买力有限等问题，文献[12－13]弥补了丘陵山区小型脱粒机的空白，但并未根本上解决高湿小麦清选问题，分析其主要原因在于现有的小型脱粒机清选动力大都借助皮带和带轮通过脱粒滚筒轴进行传递，受脱粒滚筒转速的限制，清选性能难以得到保证。

为此，本文提出一种独立电驱清选技术，通过改变高湿小麦脱粒机清选作业模式，解决高湿小麦清选含杂率高的问题，基于理论分析与 CFD－DEM 耦合数值仿真探究影响清选性能的关键因素及规律，采用非支配排序遗传算法(NSGA－Ⅱ)开展参数匹配优化设计，以期为提升高湿小麦脱粒清选性能提供理论指导，加快推动我国丘陵山区收获机械化发展进程。

1　整机结构与工作原理

为了提升丘陵山区高湿小麦脱粒机的清选性能，设计一种独立电驱清选的高湿小麦脱粒机，主要由脱粒系统、传动系统、清选系统和机架等部分组成，其中，脱粒系统主要包括纹杆式脱粒滚筒、凹板筛和顶盖等；传动系统包括电机、皮带轮传动机构等；清选系统包括脱出物导流管道、吸杂管道、吸杂风机等。为了提升对高湿小麦的清选能力，在机架侧边增设电控系统，实现对吸杂风机独立供电和转速控制，整机结构如图 1 所示。

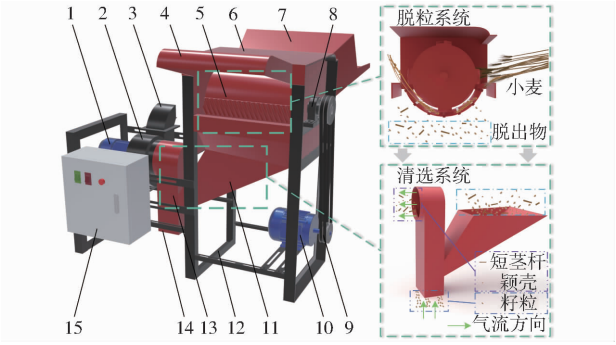


图 1　整机结构与工作原理图

Fig. 1　Structure and working principle of wheat threshing machine

1. 三相电机　2. 吸杂风机　3. 排杂口　4. 排草口　5. 脱粒滚筒　6. 顶盖　7. 喂入口　8. 轴承座　9. 皮带轮　10. 单相电机　11. 导流管道　12. 机架　13. 吸杂管道　14. 出粮口　15. 电控系统

脱粒清选时，小麦由喂入口进入，在重力作用下，通过斜置导流槽进入脱粒分离系统，在高速旋转的脱粒元件的击打、揉搓作用下脱粒并与秸秆分离，秸秆沿着脱粒滚筒切向运动从排草口排出，由籽粒、短茎秆及颖壳等组成的脱出物从凹板筛筛孔中穿过，进入清选系统。由于籽粒和杂余的空气动力学特性的差异，在吸杂风机和自身重力的作用下，短茎秆与颖壳等杂余受气流裹挟，顺着吸杂管道向上迁移至排杂口排出，籽粒则沿着导流管道下落从出粮口排出，实现籽粒与杂余分离[14]。

2　关键部件结构设计

2.1　吸杂管道内籽粒运动分析

脱出物运动轨迹变化直接影响清选系统性能。脱出物在清选系统中的运动过程主要分为 2 个阶段：导流管道内的混合段和吸杂管道内的分离段。在分离段，脱出物受气流的作用实现运动方向的改变，其运动过程较为复杂，以籽粒为例，对此阶段运动进行受力分析，如图 2 所示，由牛顿第二定律可得

$$\begin{cases} m\dfrac{\mathrm{d}v_w}{\mathrm{d}t} = G + F_r + F_L \\ I\dfrac{\mathrm{d}\omega}{\mathrm{d}t} = T \end{cases} \tag{1}$$

式中 m——籽粒质量,kg

v_w——籽粒运动速度,m/s

G——籽粒重力,N

F_r——气流对籽粒的拖曳力,N

F_L——籽粒旋转时产生的升力,N

I——籽粒转动惯量,kg·m^2

ω——籽粒旋转角速度,rad/s

T——气流作用于籽粒外力矩,N·m

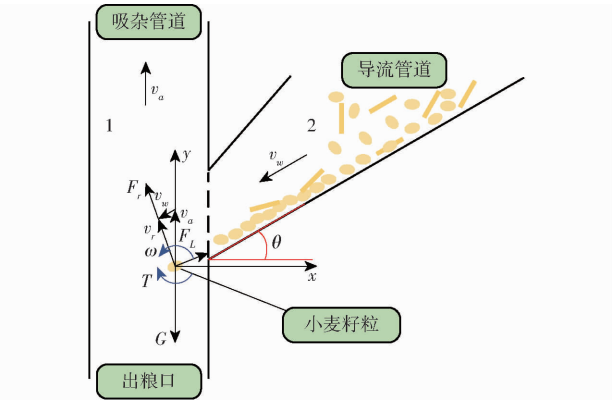


图2 籽粒分离段受力分析

Fig. 2 Stress analysis of grain separation section

1. 分离段 2. 混合段

籽粒在分离段受到气流拖曳力[15]为

$$F_r = \frac{C_d \rho A_w v_r^2}{2} \tag{2}$$

其中

$$v_r = \frac{2v_a \sin\theta \pm \sqrt{4v_a^2 \sin^2\theta - 4(v_a^2 - v_w^2)}}{2} \tag{3}$$

式中 C_d——曳力系数

ρ——空气密度,kg/m^3

A_w——籽粒投影面积,m^2

v_r——气流与籽粒的相对速度,m/s

θ——导流管道倾斜角,(°)

v_a——气流速度,m/s

假设籽粒为椭圆体,且自身绕短轴旋转,则产生的升力为

$$F_L = \frac{C_L \rho \pi a \omega v_r b^2}{2} \tag{4}$$

式中 C_L——升力系数

a——籽粒椭圆投影面短半轴长度,mm

b——籽粒椭圆投影面长半轴长度,mm

根据清选系统性能要求,为避免籽粒受气流裹挟至排杂口排出,造成损失,籽粒在垂直方向的受力应满足

$$mg > F_r \cos\theta + F_L \sin\theta \tag{5}$$

式中 g——重力加速度,m/s^2

结合式(2)~(4)可知,影响籽粒运动轨迹的主要因素是气流速度、籽粒运动速度和导流管道倾斜角。而气流速度主要与吸杂风机转速和吸杂管道横截面积有关。籽粒运动速度主要与籽粒进入导流管道初速度、导流管道长度和倾斜角有关,为此需要对吸杂管道和导流管道结构参数进一步分析。

2.2 结构参数设计

2.2.1 吸杂管道横截面积

吸杂管道横截面积可通过气流流量和气流速度确定,其关系式为

$$A = \frac{Q}{v_0} \tag{6}$$

式中 A——吸杂管道横截面积,m^2

Q——吸杂管道内气流流量,m^3/s

v_0——出粮口处气流速度,m/s

吸杂管道所需气流流量由脱出物杂余质量比例等因素决定[16],计算公式为

$$Q = \frac{\beta q}{\eta \rho} \tag{7}$$

式中 q——清选系统喂入量,kg/s

β——杂余占总喂入量比例,小麦为 10%~15%

η——含杂气流混合浓度比,取 0.25

小麦脱粒机清选系统喂入量取 q=0.3 kg/s,代入式(7)得 Q=0.14 m^3/s。

考虑到脱出物之间悬浮速度(表 1)的差异性[17],为避免籽粒被误吸排出以及杂余分离不完全的情况,出粮口处气流速度应分布于籽粒与杂余悬浮速度之间,故吸杂管道横截面积为 148~215 cm^2。

表 1 小麦脱出物悬浮速度

Tab. 1 Suspension velocity of wheat exudates

物料	悬浮速度/(m·s^{-1})
小麦籽粒	9.7~11.4
短茎秆	5.0~6.0
颖壳等轻杂余	0.6~5.0

2.2.2 导流管道倾斜角

导流管道倾斜角直接影响籽粒与杂余分离效率和滑落顺畅性。倾角过大时,脱出物进入分离段运动速度变大,气流对杂余的拖曳力在垂直方向的分量减小导致分离效果差;若倾角过小,脱出物下落不顺畅,容易造成堆积阻塞。因此,对混合段籽粒进行受力分析,忽略碰撞与空气阻力的影响,如图 3 所示,根据受力平衡可得

$$\begin{cases} mg\sin\theta = f_w \\ mg\cos\theta = N \\ f_w = \mu_w N \end{cases} \tag{8}$$

式中 f_w——籽粒所受摩擦力,N

N——籽粒所受支持力,N

μ_w——籽粒与管壁摩擦因数，取 0.35

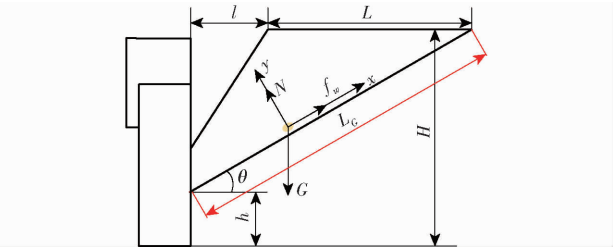


图 3　籽粒混合段受力分析

Fig. 3　Stress analysis of grain mixing section

在满足籽粒能从导流管道滑落进入吸杂管道的情况下，计算得 $\theta_{\min}=19.29°$。

结合设备结构的空间布局，导流管道倾斜角和长度还需满足关系

$$\begin{cases}\theta=\arctan\dfrac{H-h}{L+l}\\ L_G=\dfrac{H-h}{\sin\theta}\end{cases}\tag{9}$$

式中　H——清选系统喂入口到出粮口垂直距离，m

h——导流管道出口到出粮口垂直距离，m

L——清选系统喂入口长度，m

l——清选系统喂入口与吸杂管道间距，m

L_G——导流管道长度，m

根据丘陵山区小麦脱粒机实际工作环境，取 $H=0.4$ m、$L=0.38$ m、$h=0.1$ m，此时导流管道长度由导流管道倾斜角确定，考虑整机装配时配合问题，清选系统喂入口与吸杂管道间距 $l\geqslant 0.1$ m，计算得 $\theta_{\max}=39.09°$。因此，导流管道倾斜角为 19.29°～39.09°。

2.3　吸杂风机参数确定

吸杂风机需满足清选作业所需气流流量和压力的要求，吸杂风机全压为

$$P=P_d+\Delta P\tag{10}$$

其中

$$P_d=\frac{\rho v_a^2}{2}\tag{11}$$

式中　P——吸杂风机全压，Pa

P_d——吸杂管道内动压，Pa

ΔP——吸杂管道内总压降，Pa

在满足籽粒与杂余充分分离的条件下，取 $v_a=9.5$ m/s，计算得 $P_d=54.15$ Pa。

吸杂管道内的压降主要由气流动能损耗、局部扩张损失、颗粒附加损失等组成[18]，可得

$$\Delta P=\Delta P_a+\Delta P_b+\Delta P_c\tag{12}$$

其中

$$\Delta P_a=\frac{\lambda H\rho v_a^2}{2D_h}+\frac{\psi\rho v_a^2}{2}\tag{13}$$

$$D_h=\frac{2WL_a}{W+L_a}\tag{14}$$

式中　ΔP_a——吸杂管道内静压，克服空气在管道内流动的阻力，Pa

ΔP_b——局部压力损失，Pa

ΔP_c——籽粒附加损失，Pa

λ——气流摩擦因数，取 0.25

D_h——水力直径，m

ψ——风机进出口对气流的阻力系数，取 0.6

W——吸杂管道宽度，m

L_a——吸杂管道长度，m

为了形成更均匀的层流气流场，将吸杂管道设计为扁平结构（长宽比为 1∶2）[19]，结合 2.2.1 节，可得 $D_h\in[0.115,0.138]$ m。

当 $D_h=0.115$ m 时，代入式(13)计算得 $\Delta P_{a\max}=79.57$ Pa。

由伯努利方程可知局部结构扩张引起的压力损失以及颗粒附加阻力引起的压力损失为

$$\begin{cases}\Delta P_b=\dfrac{\xi\rho v_a^2}{2}\\ \Delta P_c=\dfrac{\mu_w\delta\rho v_a^2 H}{D_h}\end{cases}\tag{15}$$

其中

$$\delta=\frac{G_w}{G_a}\tag{16}$$

式中　ξ——管道对气流的阻力系数，取 1

δ——质量负载比

G_w——小麦籽粒处理量，kg/s

G_a——空气质量流量，kg/s

结合式(7)，计算得 $\delta=1.42$，由式(15)计算得 $\Delta P_b=54.15$ Pa，$\Delta P_c=187.22$ Pa，故根据式(10)得全压 $P=375.09$ Pa。

为确保清选系统可靠运行，在理论计算环节还需增加 20% 风压余量，故吸杂风机功率计算公式为

$$n=\frac{1.2QP}{1\,000\eta_p\eta_m}\tag{17}$$

式中　n——风机功率，kW

η_p——全压效率，取 0.6

η_m——机械效率，风机与电机直连，取 0.95

计算得 $n=0.11$ kW，故选择功率为 0.37 kW 的离心吸杂风机。

3　数值仿真

小麦清选是一个非线性、强耦合的复杂两相流作用过程，传统的力学分析难以对清选环节进行准确解释，CFD－DEM 耦合仿真为研究小麦脱出物清选过程运动特性提供一种行之有效的方法[20]，通过融合 Fluent 与 EDEM 构建小麦清选系统耦合动力学仿真模型，分析吸杂管道横截面积、导流管道倾斜

角和吸杂口负压对清选性能的影响规律,为清选系统参数匹配设计提供理论依据。

3.1 EDEM－FLUENT 耦合建模

3.1.1 仿真模型

小麦脱出物主要包括小麦籽粒、短茎秆和颖壳等,考虑颖壳等轻杂余的含量较少,为了提高计算效率,故不对颖壳进行仿真计算。以“济麦 22”品种小麦为例,含水率为 20.4% ~23.2%,选取 10 粒饱满、无破损籽粒和 10 个短茎秆,利用游标卡尺(精度 0.02 mm)分别测量其几何尺寸,如表 2 所示。利用 Solidworks 建立脱出物三维模型,以 step 格式导入 EDEM 中,采用五球填充法构建籽粒离散元模型,基于 FLUENT 中 UDF 文件导出短茎秆网格中心坐标定位到 EDEM 中,并生成颗粒构建短茎秆离散元模型[21],如图 4 所示。

表 2 小麦脱出物尺寸参数

Tab.2 Wheat exudates dimension parameters mm

参数	数值	取值
籽粒长度	5.86 ~6.38	6.22
籽粒宽度	2.88 ~3.08	3.00
籽粒高度	2.94 ~3.22	3.08
短茎秆长度	37.12 ~56.08	48.66
短茎秆外径	3.12 ~3.64	3.42
短茎秆壁厚	0.54 ~0.66	0.60

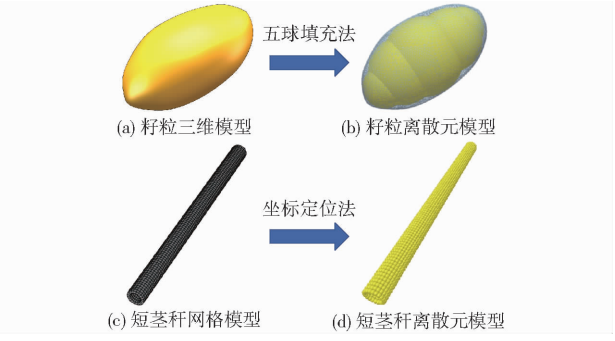


图 4 小麦脱出物离散元模型

Fig.4 Wheat extrusions discrete element models

为了提高计算效率,在 Solidworks 中对清选装置结构简化建模,以 step 格式导入到 EDEM 中,并在出粮口下方设置集粮盒,如图 5a 所示。在 ANSYS 中的 SpaceClaim 模块中导入清选装置的三维模型并进行流体域体积抽取,然后在 Meshing 中对流体域进行网格划分和局部加密,如图 5b 所示。

3.1.2 仿真参数设置

基于 EDEM 软件和 FLUENT 软件进行耦合计算。EDEM 模拟小麦脱出物的运动过程,选择 Hertz－Mindlin(no slip)模型来描述脱出物之间、脱出物与清选装置间的接触行为与力学响应,根据前期取样测量质量百分比设置颗粒工厂生成数量,如表 3 所示。根据高湿小麦特性与测量结果[22],设置各物料物理参数与物料间的力学特性,如表 4、5 所示。设置 Rayleigh 时间步长为 19.23%,即 1×10^{-6} s。

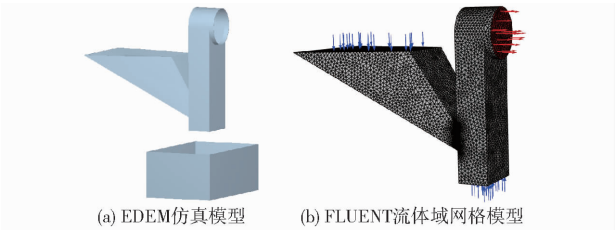


图 5 清选装置仿真模型

Fig.5 Cleaning device simulation model

表 3 小麦脱出物生成数量

Tab.3 Numbers of wheat exudates produced

物料	质量百分比/%	EDEM 生成数量
小麦籽粒	96.9	5 872
短茎秆	3.1	138

表 4 物料参数

Tab.4 Material parameters

物料	泊松比	剪切模量/MPa	密度/(kg·m^{-3})
籽粒	0.29	689	1 350
短茎秆	0.40	5.52	215
钢板	0.30	7×10^{4}	7 800

表 5 物料接触参数

Tab.5 Material contact parameters

接触形式	碰撞恢复系数	静摩擦因数	动摩擦因数
籽粒-籽粒	0.20	0.18	0.043
籽粒-短茎秆	0.26	0.34	0.020
籽粒-钢板	0.48	0.35	0.050
短茎秆-短茎秆	0.28	0.38	0.010
短茎秆-钢板	0.68	0.32	0.012

Fluent 模拟气流运动,吸杂管道内的气流属于不可压缩流体,低速流动,马赫数小于 0.3,选择 Pressure－Based Slover 求解,采用 Pressure－Velocity Coupling 中的 Coupled 算法,在用户定义函数(UDF)中编译 CFD－DEM 的耦合接口文件,选择 Lagrangian 耦合模型,流体相时间步长为离散相时间步长整数倍,设置为 1×10^{-3} s,总时间步数为4 000,即仿真时间为 4 s,其他仿真计算设定如表 6 所示。

表 6 仿真计算设置

Tab.6 Simulation calculation setting

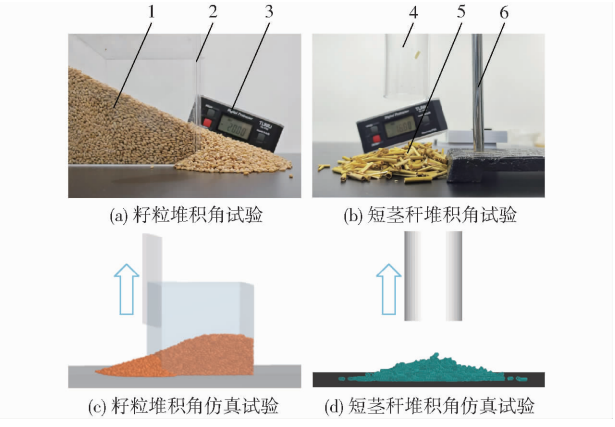
计算条件	设置
模型类型	Standard $k-\varepsilon$
近壁面处理	标准壁面函数
材料	空气
单元格区域条件	流体
入口	压力入口
出口	压力出口
脱出物入口水力直径/mm	312.2

3.2　模型验证

为了保证仿真分析结果的可靠性，分别采用堆积角试验与风速测定试验验证离散元模型与流体仿真模型的有效性。

3.2.1　堆积角试验

采用倾斜法和提筒法分别测量小麦籽粒与短茎秆的静态堆积角[23]，使用透明方盒（20 cm × 20 cm × 20 cm）装满籽粒，拉开闸门让籽粒由一侧自然滑落，待籽粒静止后使用数显角度仪（精度 0.01°）测量静态堆积角，如图 6a 所示，将圆筒（直径 5 cm）固定在可移动的铁架上，将适量短茎秆切为 10 mm 小段，置于圆筒内，匀速提升圆筒，短茎秆自然堆积，使用角度仪贴合其外围轮廓测量静态堆积角，如图 6b 所示。同时，在 EDEM 中建立籽粒与短茎秆堆积角仿真模型，如图 6c 与图 6d 所示，通过 Matlab 提取轮廓曲线并拟合获取堆积角[24]，重复上述试验，试验结果如表 7 所示。



(a) 籽粒堆积角试验　(b) 短茎秆堆积角试验

(c) 籽粒堆积角仿真试验　(d) 短茎秆堆积角仿真试验

图 6　小麦脱出物堆积角试验

Fig. 6　Wheat exudates stacking angle tests

1. 小麦籽粒　2. 透明方盒　3. 数显角度仪　4. 亚克力圆筒　5. 短茎秆　6. 可移动铁架

表 7　仿真与实际堆积角试验结果

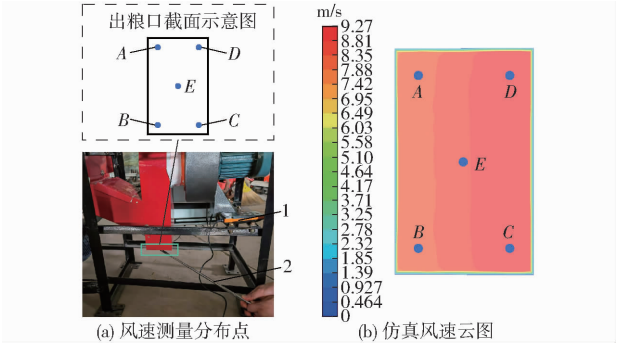
Tab. 7　Comparison results of simulation and actual stacking angle

物料	仿真堆积角/(°)	实际堆积角/(°)	平均相对误差/%
籽粒	20.38	19.39	4.68
	21.44	20.00	
	21.02	20.66	
短茎秆	17.77	16.80	6.13
	16.27	15.49	
	17.34	16.13	

由表 7 可知，籽粒堆积角试验实际结果与仿真结果平均相对误差为 4.68%，短茎秆堆积角试验平均相对误差为 6.13%，验证了所建立的小麦籽粒与短茎秆离散元模型可用于清选系统流固耦合仿真试验。

3.2.2　风速测定试验

为了验证 CFD 仿真结果的可靠性，在无脱出物条件下，使用德图 testo425 型热线式风速计（分辨率 0.01 m/s）对出粮口截面进行风速测定[25]，出粮口截面测点分布如图 7a 所示，重复 3 次求平均值，相同条件下的仿真结果如图 7b 所示。



(a) 风速测量分布点　(b) 仿真风速云图

图 7　出粮口截面风速测定试验

Fig. 7　Grain outlet cross-section air velocity measurement test

1. 热线风速计　2. 探针

由表 8 可以看出，试验与仿真相对误差为 7.93% ~ 9.35%，在可接受范围内，表明仿真结果具有可靠性。

表 8　仿真与实际风速对比试验结果

Tab. 8　Comparison results of simulation and actual air velocity

序号	风速/(m·s^{-1})				
	点 A	点 B	点 C	点 D	点 E
1	7.29	7.35	8.05	8.13	7.63
2	7.21	7.29	8.08	8.01	7.73
3	7.22	7.26	8.17	8.01	7.71
平均值	7.24	7.30	8.10	8.05	7.69
仿真结果	7.88	7.88	8.81	8.81	8.35
相对误差/%	8.86	7.93	8.79	9.35	8.62

3.3　评价指标

为了量化小麦脱粒机清选性能，以含杂率与损失率为评价指标，计算公式为[26]

$$Z_z = \frac{m_0 - m_1}{m_0} \times 100\% \tag{18}$$

$$Z_s = \frac{m_2 - m_1}{m_2} \times 100\% \tag{19}$$

式中　Z_z——含杂率，%

Z_s——损失率，%

m_0——出粮口物料总质量，g

m_1——出粮口籽粒总质量，g

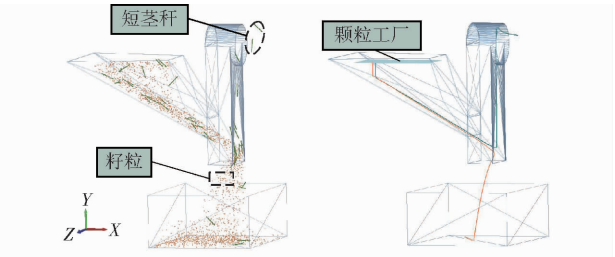
m_2——喂入口籽粒总质量，g

通过 EDEM 后处理中 Grid Bin Group 模块计算

落入集粮盒内籽粒和短茎秆的质量,在清选装置的吸杂口处利用 Total Mass Sensor 模块统计被排出的籽粒和短茎秆的质量,从而计算含杂率与损失率。

3.4 仿真结果与分析

联合 Fluent 与 EDEM 进行耦合仿真计算,仿真过程如图 8 所示,开展单因素仿真试验,探究导流管道倾斜角、吸杂管道横截面积和吸杂口负压对小麦脱粒机清选性能的影响规律。



(a) 物料运动 (b) 颗粒轨迹

图 8 仿真过程

Fig. 8 Simulation process

3.4.1 导流管道倾斜角影响

为了探究导流管道不同倾斜角对清选性能的影响,以吸杂管道横截面积 170 cm^2,吸杂口负压 800 Pa 为条件,选取导流管道倾斜角为 21°、24°、27°、30°、33°、36°进行仿真试验,试验结果如图 9 所示。

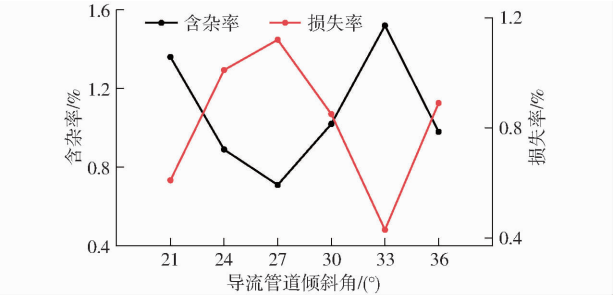


图 9 导流管倾角对清选性能的影响

Fig. 9 Effect of conduit inclination on cleaning performances

由图 9 可知,随着导流管道倾斜角的增大,含杂率先减小后增大再减小,损失率则相反,先增大后减小再增大,均呈现出一个波动的状态。在低角度时,受摩擦力的影响,小麦脱出物积聚并缓慢迁移至吸杂管道,对负压气流产生抑制作用,导致含杂率较大,损失率偏低;当角度不断增大,小麦脱出物迁移变快,积聚变少,含杂率降低,损失率升高;随着角度增大到一定程度后,小麦脱出物快速迁移至吸杂管道并大量碰撞管道壁面,造成出粮口处气流速度降低,导致含杂率升高,损失率降低;在大角度时,小麦脱出物在下落过程中易发生碰撞,迫使籽粒与茎秆进入吸杂管道高速气流区,导致含杂率降低,损失率升高。综合考虑含杂率与损失率要求,当导流管道倾斜角为 24°~30°时,小麦脱粒机清选性能较好。

3.4.2 吸杂管道横截面积影响

取导流管道倾斜角为 27°,以吸杂口负压 800 Pa 为条件,对吸杂管道横截面积为 150、160、170、180、190 cm^2 5 个水平开展仿真试验,以探究吸杂管道不同横截面积对清选性能的影响规律,试验结果如图 10 所示。

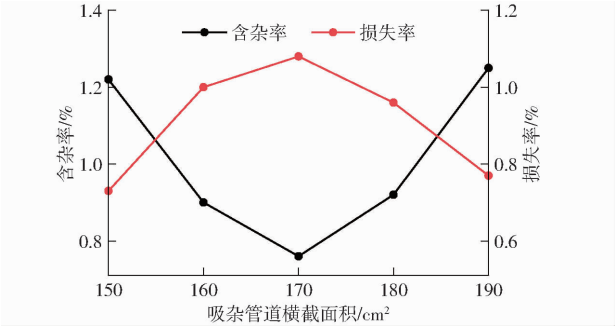


图 10 吸杂管道横截面积对清选性能的影响

Fig. 10 Effect of suction pipe horizontal area on cleaning performances

由图 10 可以看出,含杂率随横截面积的增大先减小后增大,损失率随横截面积的增大先增大后减小。原因在于随着吸杂管道横截面积的增大,吸杂管道内小麦脱出物的数量逐渐减少,对吸杂管道内部气流的抑制作用减小,从而导致含杂率降低以及损失率上升。同时因为吸杂口的负压不变,吸杂管道横截面积的增加势必引起悬浮气流速度的减小,气流对小麦脱出物的作用力变小,导致含杂率增大,损失率也随之降低。因此,当吸杂管道横截面积为 160~180 cm^2时,小麦脱粒机清选性能较好。

3.4.3 吸杂口负压影响

为了探究不同负压对清选性能的影响,取导流管道倾斜角为 27°,吸杂管道横截面积为 170 cm^2,开展负压分别为 600、700、800、900、1 000 Pa 下的仿真试验,试验结果如图 11 所示。

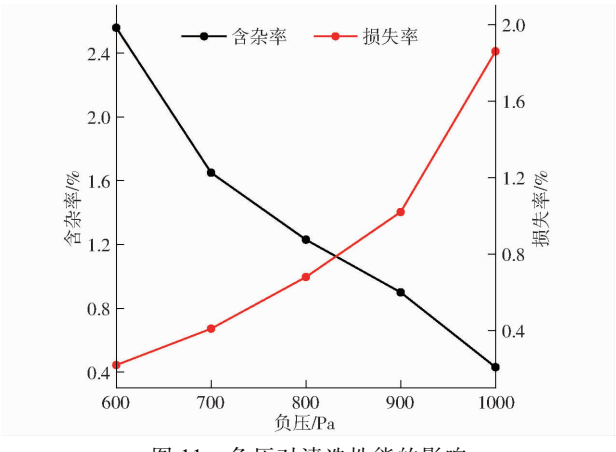


图 11 负压对清选性能的影响

Fig. 11 Effect of negative pressure on cleaning performances

由图 11 可知,随着负压的增大,含杂率逐渐降

低，损失率逐渐升高。一开始负压较小时，吸杂管道内部的风速偏小，部分杂余与短茎秆分离不充分，随着籽粒一同从出粮口排出，导致含杂率偏高，随着负压的增大，吸杂口的风速不断提升，吸杂管道内部悬浮气流速度逐渐大于籽粒与茎秆的悬浮速度，大部分茎秆被有效分离，含杂率降低，少部分籽粒也随之被一同吸出管道外，导致损失率偏高。

3.5　正交试验

3.5.1　试验方案与结果

为了进一步探究各因素对小麦脱粒机清选性能的影响规律，以导流管道倾斜角 A、吸杂管道横截面积 B、吸杂口负压 C 为试验因素，以含杂率 Y_1 和损失率 Y_2 为评价指标，根据 Box－Behnken 试验原理设计三因素三水平二次回归正交旋转组合试验。根据单因素的仿真试验结果，设置试验因素编码，如表 9 所示，试验方案与结果如表 10 所示，表中 A、B、C 为编码。

表 9　试验因素编码

Tab. 9　Test factors coding

编码	因素		
	导流管道倾斜角/(°)	吸杂管道横截面积/cm²	负压/Pa
－1	24	160	800
0	27	170	850
1	30	180	900

表 10　试验方案与结果

Tab. 10　Test scheme and results

编号	因素			Y_1/%	Y_2/%
	A	B	C		
1	1	－1	0	1.36	0.68
2	－1	－1	0	1.25	0.78
3	0	0	0	0.88	1.12
4	1	0	1	0.90	1.00
5	1	1	0	1.45	0.57
6	－1	0	1	0.78	1.08
7	0	0	0	0.94	0.99
8	0	0	0	0.86	1.14
9	1	0	－1	1.92	0.68
10	0	－1	1	0.71	1.12
11	－1	0	－1	1.81	0.78
12	0	0	0	0.92	1.03
13	0	1	－1	1.83	0.72
14	0	1	1	0.80	1.05
15	0	0	0	0.83	1.09
16	－1	1	0	1.33	0.65
17	0	－1	－1	1.71	0.80

3.5.2　回归模型建立与方差分析

利用 Design-Expert 对上述结果开展多元回归拟合分析，结果如表 11 和表 12 所示，建立各因素与评价指标间的回归方程为

$$Y_1 = 0.886 + 0.057\,5A + 0.047\,5B - 0.51C + 0.002\,5AB + 0.002\,5AC - 0.007\,5BC + 0.275\,8A^2 + 0.185\,8B^2 + 0.190\,8C^2 \quad (20)$$

$$Y_2 = 1.07 - 0.045A - 0.043\,8B + 0.1538\,C + 0.005AB + 0.005AC + 0.012\,5BC - 0.215\,8A^2 - 0.188\,3B^2 + 0.026\,7C^2 \quad (21)$$

表 11　含杂率方差分析结果

Tab. 11　Result of analysis variance for impurity rate

来源	平方和	自由度	F	P
模型	2.81	9	267.83	<0.001 **
A	0.026 5	1	22.66	0.002 1 **
B	0.018 1	1	15.47	0.005 7 **
C	2.08	1	1 782.82	<0.001 **
AB	0	1	0.021 4	0.887 8
AC	0	1	0.021 4	0.887 8
BC	0.000 2	1	0.192 8	0.673 8
A^2	0.320 2	1	274.31	<0.001 **
B^2	0.145 3	1	124.47	<0.001 **
C^2	0.153 2	1	131.26	<0.001 **
残差	0.008 2	7		
失拟	0.000 3	3	0.042 1	0.986 9
误差	0.007 9	4		
合计	2.82	16		

注：** 表示极显著（$P<0.01$），下同。

表 12　损失率方差分析结果

Tab. 12　Result of analysis variance for loss rate

来源	平方和	自由度	F	P
模型	0.585 7	9	25.53	0.000 2 **
A	0.016 2	1	6.35	0.039 8 *
B	0.015 3	1	6.01	0.044 1 *
C	0.189 1	1	74.18	<0.001 **
AB	0.000 1	1	0.039 2	0.848 6
AC	0.000 1	1	0.039 2	0.848 6
BC	0.000 6	1	0.245 2	0.635 7
A^2	0.196 0	1	76.88	<0.001 **
B^2	0.149 2	1	58.53	0.000 1 **
C^2	0.003 0	1	1.18	0.313 0
残差	0.017 8	7		
失拟	0.002 1	3	0.180 2	0.904 6
误差	0.015 7	4		
合计	0.603 6	16		

注：* 表示显著（$0.01 \leqslant P<0.05$）。

结果表明，含杂率与损失率的回归模型都极显著（$P<0.001$），失拟项均不显著（$P>0.05$），模型拟合程度高，A、B、C、A^2、B^2、C^2 对 Y_1 影响极显著，C、A^2、B^2 对 Y_2 影响极显著，A、B 对 Y_1、Y_2 影响均显著（$P<0.05$），一次项对 Y_1、Y_2 影响显著性由大到小均为负压、导流管道倾斜角、吸杂管道横截面积。

3.5.3　交互作用分析

为探究各因素交互作用分别对含杂率和损失率的影响，借助 Design-Expert 构建响应面模型，如图 12、13 所示。

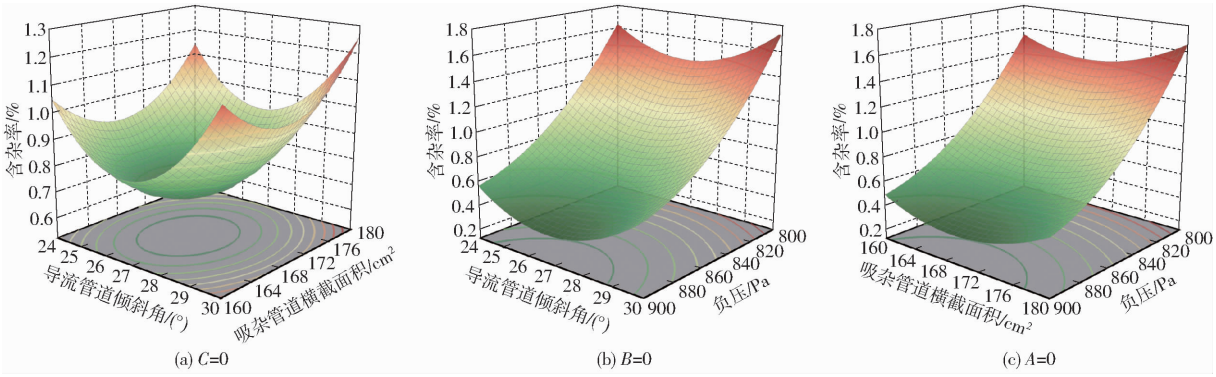


图 12 各因素交互作用对含杂率的影响

Fig. 12 Effect of interaction of factors on impurity rate

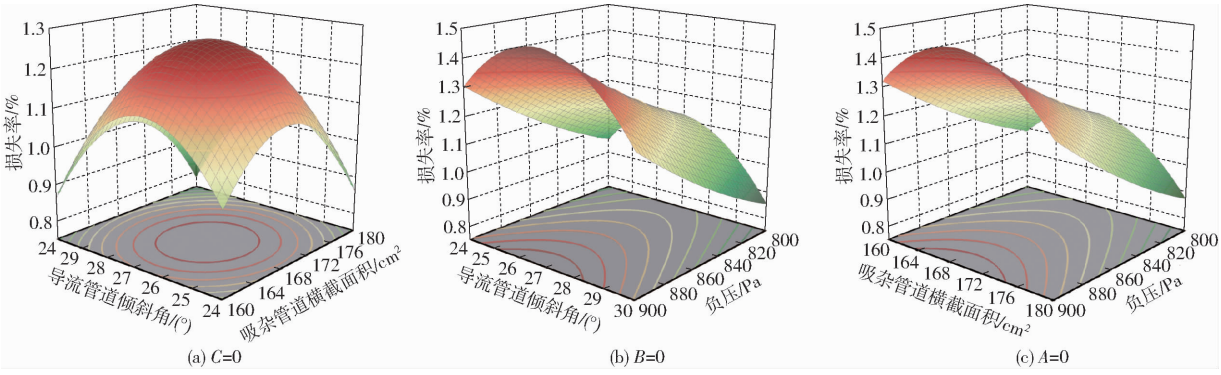


图 13 各因素交互作用对损失率的影响

Fig. 13 Effect of interaction of factors on loss rate

由图 12a 可知,导流管道倾斜角和吸杂管道横截面积中任意一个因素不变的情况下,含杂率均随着另一因素的增加呈现先降低后增高的变化规律。导流管道倾斜角增加,脱出物克服摩擦的能力增强,迁移变快,对气流的抑制作用减弱,含杂率降低。随着导流管道倾斜角的进一步增加,脱出物碰撞吸杂管道壁面,增加在吸杂管道内的滞留时间,抑制气流运动,含杂率升高。吸杂管道横截面积增加,单位时间排出的籽粒数量增加,吸杂管道内部气流所受抑制作用减小,含杂率降低,同时因为负压不变,横截面积的增加导致气流速度减小,含杂率增大。由图 12b 和图 12c 可知,含杂率随负压的增加而快速下降,且因负压变化导致的含杂率波动程度远大于导流管道倾斜角和吸杂管道横截面积变化带来的波动,符合上述显著性影响程度次序。

由图 13a 可知,当导流管道倾斜角一定时,吸杂管道横截面积增加,脱出物受到气流的作用力增强,损失率增加,随着吸杂管道横截面积继续增加,吸杂管道内的空气流量不变,气流速度减小,损失率降低;当吸杂管道横截面积一定时,导流管道倾斜角增加,脱出物迁移变快,吸杂管道内的脱出物数量减少,气流所受抑制作用减弱,损失率增加,随着导流管道倾斜角继续增加,脱出物在导流管道上碰撞的概率升高,滞留时间延长,气流所受抑制作用增强,损失率降低。由图 13b 和图 13c 可知,损失率随负压的增加而快速上升。

3.5.4 基于 NSGA-Ⅱ算法的参数匹配优化设计

为了获取小麦脱粒机最优清选性能下的参数组合,采用 NSGA-Ⅱ算法开展多目标优化设计,其优化流程如图 14 所示。

NSGA-Ⅱ作为一种基于 Pareto 最优概念的遗传算法,通过快速非支配排序和精英策略选择的分层优化机制来确保全局最优,避免算法过早收敛导致局部最优,同时引入拥挤度计算、随机交叉和变异操作来维持种群的多样性,增强种群探索能力[27-28]。首先,基于已构建的响应面回归模型,构建多目标优化数学模型

$$\begin{cases} \text{Min } Y_1(A,B,C) \\ \text{Min } Y_2(A,B,C) \\ \text{s.t.} \begin{cases} -1 \leqslant A \leqslant 1 \\ -1 \leqslant B \leqslant 1 \\ -1 \leqslant C \leqslant 1 \end{cases} \end{cases} \tag{22}$$

设置 NSGA-Ⅱ种群规模为 100,交叉比例为 0.8,变异比例为 0.2,最大进化次数取 200,在 Matlab 中进化计算后得到 Pareto 最优前沿解,如图 15 所示。

综合考虑清选性能,选取靠近中间的第 29 组解

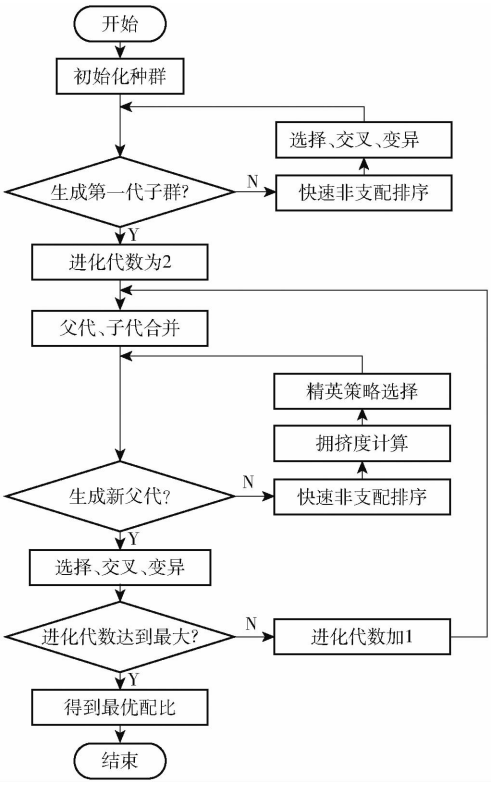


图 14　NSGA－Ⅱ优化流程

Fig. 14　Optimizing process of NSGA－Ⅱ

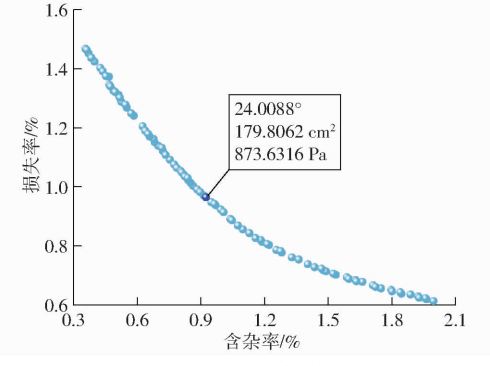


图 15　Pareto 最优前沿解

Fig. 15　Pareto optimal frontier solution

作为最优参数组合，所对应的参数为：导流管道倾斜角 24.008 8°、吸杂管道横截面积179.806 2 cm^2、吸杂口负压 873.631 6 Pa，此时含杂率为 0.92%，损失率为 0.96%。考虑实际加工能力，对参数圆整，取导流管道倾斜角为 24°，吸杂管道横截面积为 180 cm^2，吸杂口负压为 874 Pa。

4　试验验证

为了验证所设计独立电驱的高湿小麦脱粒机在实际应用中的清选效果，根据上述结构参数优化设计结果试制样机，以含杂率和损失率为评价指标，开展小麦清选试验。

4.1　试验材料与方法

试验于 2024 年 11 月在安徽农业大学机电工程园开展，如图 16 所示，通过对常规小麦喷水，静置晾晒至含水率为 22% 左右，将其喂入自主研制的独立电驱的高湿小麦脱粒机获取高湿小麦脱出物，参照 GB/T 5982—2017《脱粒机试验方法》，通过调节离心风机转速，采用标智 GM520 型数字压差仪（量程 ±35 kPa，精度 ±0.3% FSO）确定吸杂口处负压，待样机运行稳定后将比例混合的小麦脱出物从喂入口放入，清选完成后收集集粮盒内以及排杂口排出的小麦脱出物，使用电子秤（精度 0.01 g）对集粮盒内籽粒和杂余以及损失籽粒进行称量。



图 16　样机试验

Fig. 16　Prototype test

4.2　试验结果与分析

4.2.1　验证试验

根据工作参数优化设计结果，在负压为 873 Pa 时开展验证试验，试验结果如表 13 所示，试验得到的平均含杂率与损失率分别为 1.21% 和 0.82%，该结果与优化结果基本接近，符合小麦脱粒机清选要求。样机试验含杂率与损失率较优化结果分别高 0.29 个百分点以及降低 0.14 个百分点，主要原因在于受小麦脱粒机加工气密性的约束，因此气流速度有所衰减。

表 13　验证试验结果

Tab. 13　Result of validation test　%

序号	含杂率	损失率
1	1.26	0.79
2	1.14	0.86
3	1.23	0.81
均值	1.21	0.82

4.2.2　对比试验

为了验证所设计的独立电驱的高湿小麦脱粒机的优越性，以同等数量的高湿小麦脱出物，采用相同的试验方法，对脱粒清选同轴式的传统小麦脱粒机进行清选试验，两者清选效果如图 17 所示。

可以看出，与传统小麦脱粒机相比，所设计的独



(a) 传统同轴式 (b) 独立电驱

图 17 清选效果对比

Fig. 17 Result of comparative test

立电驱的小麦脱粒机清选含杂量明显减少。传统小麦脱粒机含杂率为 1.89%,损失率为 0.62%,独立电驱的高湿小麦脱粒机含杂率比传统小麦脱粒机降低 35.98%,损失率虽高出 0.2 个百分点,但仍小于 1%,验证了所设计的独立电驱的高湿小麦脱粒机具有更好的清选性能。

5 结论

(1)设计了一种独立电驱的高湿小麦脱粒机清选系统,理论分析建立了影响清选性能的关键影响参数:导流管道倾斜角、吸杂管道横截面积与吸杂口负压。

(2)建立了清选系统 CFD - DEM 耦合数值仿真模型,探究了导流管道倾斜角、吸杂管道横截面积、吸杂口负压以及各因素交互作用对含杂率与损失率的影响规律,采用 NSGA - Ⅱ 算法开展参数匹配优化设计,结果表明:当导流管道倾斜角为 24.008 8°、吸杂管道横截面积为 179.806 2 cm^2、吸杂口负压为 873.631 6 Pa 时,含杂率与损失率分别为 0.92% 和 0.96%。

(3)样机试验结果与仿真分析结果基本吻合,相较于传统小麦脱粒机,清选含杂率降低 35.98%,验证了所设计的独立电驱的高湿小麦脱粒机的有效性与优越性。

参 考 文 献

[1] 孙景彬, 刘志杰, 杨福增, 等. 丘陵山地农业装备与坡地作业关键技术研究综述[J]. 农业机械学报, 2023, 54(5): 1 - 18.
SUN Jingbin, LIU Zhijie, YANG Fuzeng, et al. Research review of agricultural equipment and slope operation key technologies in hilly and mountains region[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(5): 1 - 18. (in Chinese)

[2] 李季, 韦龙琴. 丘陵山地地区农机化发展存在的问题与方法概述[J]. 农业开发与装备, 2024(5): 36 - 38.
LI Ji, WEI Longqin. Overview of problems and methods of agricultural mechanization development in hilly and mountainous areas[J]. Agricultural Development & Equipments, 2024(5): 36 - 38. (in Chinese)

[3] 林嘉豪, 杨敏丽, 张小军, 等. 丘陵山区小麦/玉米收获机械选型评价研究[J]. 农业机械学报, 2022, 53(增刊 1): 150 - 157.
LIN Jiahao, YANG Minli, ZHANG Xiaojun, et al. Evaluation of wheat and corn harvester selection in hilly and mountainous areas[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(Supp. 1): 150 - 157. (in Chinese)

[4] 周丕东, 刘春波, 张佩. 贵州山地农业机械化发展现状及对策建议[J]. 中国农机化学报, 2020, 41(7): 231 - 236.
ZHOU Pidong, LIU Chunbo, ZHANG Pei. Present situation and countermeasures of agricultural mechanization in mountainous areas of Guizhou Province[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2020, 41(7): 231 - 236. (in Chinese)

[5] 沈宇峰, 吴明亮, 官春云, 等. 小型联合收获机清选装置研究现状及发展对策[J]. 农机化研究, 2016, 38(10): 263 - 268.
SHEN Yufeng, WU Mingliang, GUAN Chunyun, et al. Research status and development countermeasures of small combined harvester cleaning device[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2016, 38(10): 263 - 268. (in Chinese)

[6] 赵榜齐, 冉飞. 对丘陵山区小麦机械化收获减损的思考和建议[J]. 中国农机装备, 2023(9): 89 - 91.
ZHAO Bangqi, RAN Fei. Reflections and suggestions on loss reduction in mechanized wheat harvesting in hilly mountainous areas[J]. China Agricultural Machinery Equipment, 2023(9): 89 - 91. (in Chinese)

[7] 徐立章, 于丽娟, 李耀明, 等. 双出风口多风道离心风机内部流场数值模拟[J]. 农业机械学报, 2014, 45(10): 78 - 86.
XU Lizhang, YU Lijuan, LI Yaoming, et al. Numerical simulation of the internal flow field of a dual outlet multiduct centrifugal fan[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(10): 78 - 86. (in Chinese)

[8] LIU W, ZENG S, CHEN X. Design and experiment of spiral step cleaning device for ratooning rice based on CFD - DEM coupling[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2024, 224: 109207.

[9] 刘正怀, 郑一平, 王志明, 等. 微型稻麦联合收获机气流式清选装置研究[J]. 农业机械学报, 2015, 46(7): 102 - 108.
LIU Zhenghuai, ZHENG Yiping, WANG Zhiming, et al. Design on air-flowing cleaning unit of micro rice-wheat combine harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(7): 102 - 108. (in Chinese)

[10] 周学建, 袁华杰, 闫卫红, 等. 联合收获机吸杂口偏置型旋风分离清选装置试验[J]. 农业机械学报, 2014, 45(8): 80 - 85, 159.
ZHOU Xuejian, YUAN Huajie, YAN Weihong, et al. Combined harvester suction port offset cyclone separation and sorting device tests[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(8): 80 - 85, 159. (in Chinese)

[11] WAN X, YUAN J, LIAO Q, et al. Computational fluid dynamics analysis of the airflow field inside a cyclone of a combine harvester with adjustable blocks[J]. Biosystems Engineering, 2023, 230: 205 - 218.

[12] 陈文辉, 张中锋, 汪振荣, 等. 5TZ - 900 型振动筛清选脱粒机设计与试验[J]. 中国农机化学报, 2024, 45(7): 104 - 113.
CHEN Wenhui, ZHANG Zhongfeng, WANG Zhenrong, et al. Design and test of 5TZ - 900 vibrating screen cleaning threshing machine[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2024, 45(7): 104 - 113. (in Chinese)

[13] 张风科. 丘陵山区油菜场地脱粒机设计与试验[D]. 武汉: 华中农业大学, 2024.

ZHANG Fengke. Design and experiment of rapeseed thresher in hilly and mountainous area[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2024. (in Chinese)

[14] 金鑫, 杜新武, 甘帮兴, 等. 小型联合收获机旋风分离系统清选性能试验[J]. 农业机械学报, 2016, 47(5): 99 - 105.
JIN Xin, DU Xinwu, GAN Bangxing, et al. Cleaning performance experiment of cyclone separating system in miniature combine harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(5): 99 - 105. (in Chinese)

[15] HE S, QIAN C, JIANG Y, et al. Design and optimization of the seed feeding device with DEM - CFD coupling approach for rice and wheat[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2024, 219: 108814.

[16] 黄颖石, 张卫国, 冯松科, 等. 基于 EDEM - Fluent 的荞麦旋风分离清选装置研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2023, 51(10): 128 - 140.
HUANG Yingshi, ZHANG Weiguo, FENG Songke, et al. Buckwheat cyclone separation and cleaning device based on EDEM - Fluent[J]. Journal of Northwest A&F University(Nat. Sci. Ed.), 2023, 51(10): 128 - 140. (in Chinese)

[17] 王万章, 吴淑江, 李从鹏, 等. 小麦育种单穗电动脱粒机设计与试验[J]. 河南农业大学学报, 2024, 58(2): 259 - 268.
WANG Wanzhang, WU Shujiang, LI Congpeng, et al. Design and experiment of single ear electric thresher for wheat breeding[J]. Journal of Henan Agricultural University, 2024, 58(2): 259 - 268. (in Chinese)

[18] 迟媛, 李蒙福, 杨月斌, 等. 禽蛋壳膜旋风式气流清选装置研究[J]. 农业机械学报, 2019, 50(8): 339 - 350.
CHI Yuan, LI Mengfu, YANG Yuebin, et al. Cyclone device collecting eggshell membranes and eggshells separately from eggshells mixture[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(8): 339 - 350. (in Chinese)

[19] 孙一坚, 沈恒根. 工业通风[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.

[20] 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: 11 - 24.

[21] 崔涛, 荆茂盛, 张东兴, 等. 玉米果穗离散元模型构建与脱粒仿真验证[J]. 农业工程学报, 2023, 39(24): 33 - 46.
CUI Tao, JING Maosheng, ZHANG Dongxing, et al. Construction of the discrete element model for maize ears and verification of threshing simulation[J]. Transactions of the CSAE, 2023, 39(24): 33 - 46. (in Chinese)

[22] 王万章, 刘婉茹, 袁玲合, 等. 基于 EDEM 的收获期小麦植株离散元参数标定[J]. 河南农业大学学报, 2021, 55(1): 64 - 72.
WANG Wanzhang, LIU Wanru, YUAN Linghe, et al. Calibration of discrete element parameters of wheat plants at harvest period based on EDEM[J]. Journal of Henan Agricultural University, 2021, 55(1): 64 - 72. (in Chinese)

[23] 张宏建, 陈修波, 李宏立, 等. 控释肥颗粒群仿真接触参数标定与试验[J]. 农业机械学报, 2024, 55(6): 80 - 90.
ZHANG Hongjian, CHEN Xiubo, LI Hongli, et al. Simulated contact parameters calibration and experiment of controlled-release fertilizer particles[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(6): 80 - 90. (in Chinese)

[24] 张兆国, 徐红伟, 薛浩田, 等. 三七茎秆离散元参数标定与试验[J]. 农业机械学报, 2023, 54(11): 61 - 70, 91.
ZHANG Zhaoguo, XU Hongwei, XUE Haotian, et al. Calibration and experiment of discrete element parameters of panax notoginseng stem[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(11): 61 - 70, 91. (in Chinese)

[25] 陈松. 基于 CFD - DEM 小麦收获机清选仿真与关键参数优化[D]. 济南: 济南大学, 2021.
CHEN Song. Cleaning simulation and key parameters optimization of wheat harvester based on CFD - DEM[D]. Jinan: University of Jinan, 2021. (in Chinese)

[26] LIANG Z, LI Y, JOSSE D, et al. Development and testing of a multi-duct cleaning device for tangential-longitudinal flow rice combine harvesters[J]. Biosystems Engineering, 2019, 182: 95 - 106.

[27] PAN X, JIANG Y, LI H, et al. Design, optimization, and analysis of a new sprinkler with intermittent water-dispersing needle: integration of RF - NSGA II algorithm and CFD simulation[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2024, 222: 109011.

[28] 吕进, 彭毅, 关小雅, 等. 基于 NSGA - II 和响应面法的交错内肋微通道热沉的多目标优化[J]. 工程热物理学报, 2025, 46(2): 627 - 637.
LÜ Jin, PENG Yi, GUAN Xiaoya, et al. Multi-objective optimization of staggered ribbed microchannel heat sinks based on NSGA - II and response surface methodology[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2025, 46(2): 627 - 637. (in Chinese)