

DOI: 10.13718/j.cnki.xdzk.2026.07.019

刘海洋, 何辉波, 李华英, 等. 基于 XGBoost 算法的气吸式玉米精密排种器设计 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2026, 48(7): 235-247.

基于 XGBoost 算法的气吸式玉米精密排种器设计

刘海洋, 何辉波, 李华英, 彭星宇, 蒋帅, 朱由雕

西南大学 工程技术学院, 重庆 400715

摘要: 针对气吸式玉米精密排种器在高速作业条件下的充种稳定性问题, 设计了一种基于矩形凹槽、倾斜凸台型孔与曲线型搅种凹槽相结合的新型锥台式种盘结构。采用离散元仿真方法 (Discrete Element Method, DEM) 分析种群分布、种子吸附稳定性以及充种性能, 并通过台架试验验证了设计的有效性。结果表明: 该种盘在优化种子吸附姿态、降低重吸率和漏吸率方面具有显著优势。采用 XGBoost 机器学习模型, 基于试验数据构建充种质量预测模型, 实现对充种合格率、重吸率和漏吸率的精准预测, 并优化播种参数。最终确定最佳作业参数为作业速度 10 km/h, 负压 -5 kPa, 在该条件下, 充种合格率达到 92.8%, 重吸率降至 2.6%, 漏吸率降至 4.6%, 该结果可为高精度、高速气吸式玉米排种器的优化设计提供理论支持和技术参考。

关键词: 玉米; 气吸式排种器; 离散元仿真; XGBoost 预测模型

中图分类号: S223.2; TP181

文献标识码: A

文章编号: 1673-9868(2026)07-0235-13

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Design of an air-suction precision maize metering device based on the XGBoost algorithm

Liu Haiyang, He Huibo, Li Huaying,
Peng Xingyu, Jiang Shuai, Zhu Youdiao

College of Engineering and Technology, Southwest University, Chongqing 400715, China

Abstract: To address the issue of seed filling stability in high-speed air-suction precision maize seed metering devices, this study proposes a novel cone-shaped seed metering plate incorporating rectangular grooves, inclined boss-shaped holes, and curved seed agitation grooves. The discrete element method (DEM) simulation was employed to analyze seed population distribution, adsorption stability, and filling performance, and bench tests were conducted to validate the design's effectiveness. The results indicated that the proposed seed metering plate significantly optimized seed adsorption posture while reducing the multiple-seeding rate and miss-seeding rate. Furthermore, an XGBoost machine learning model was introduced to develop a predictive model for seed filling quality based on experimental data, enabling accurate

收稿日期: 2025-05-13

基金项目: 教育部产学合作协同育人项目(4322400254); 重庆市技术创新与应用发展专项面上项目(cstc2020jsx-mxsmX0192)。

作者简介: 刘海洋, 硕士研究生, 主要从事农业机械装备设计与理论研究。

通信作者: 何辉波, 副教授, 硕士研究生导师。

prediction of the qualified-seeding rate, multiple-seeding rate, and miss-seeding rate while optimizing seeding parameters. The optimal operating parameters were determined to be a working speed of 10 km/h and a negative pressure of -5 kPa, under which the qualified-seeding rate reached 92.8%, the multiple-seeding rate decreased to 2.6%, and the miss-seeding rate dropped to 4.6%. This study provides theoretical support and technical reference for the optimization of high-precision and high-speed air-suction maize seed metering devices.

Key words: maize; air-suction seed-metering device; discrete element method simulation; XGBoost prediction model

玉米是我国三大粮食作物之一,不仅食用价值高,饲用价值也高,是畜牧业和养殖业主要饲料来源^[1]。根据国家统计局数据^[2],2024 年全国玉米产量 2.95 亿 t,同比增加 0.06 亿 t,增长 2.08%,占粮食产量比重达 41.7%,为粮食连年丰收作出了突出贡献。播种质量直接影响作物的生长均匀性和最终产量^[3]。近年来,高速精密播种技术在农业生产中得到广泛应用。高速精密播种的核心工作部件是排种器,其排种性能直接影响播种质量^[4]。其中,气吸式排种器因其单粒播种精度高、适应性强、损伤率低等特点,在玉米播种领域占据重要地位^[5-8]。

目前,针对气吸式排种器的优化研究主要集中于种盘结构改进和负压参数调控,以提升充种性能。Han 等^[9]设计了一种内部填充吹气式播种装置,通过气流扰动提高充种均匀性。Tang 等^[10]研究了玉米种子尺寸对排种器吸附姿态的影响,并提出优化型孔设计以提升充种质量。Du 等^[11]设计了一种利用内部气压工作的排种装置,采用流体动力学仿真方法进行研究,以检查孔结构对流体动力学和耦合力的影响。部分学者采用离散元仿真方法(Discrete Element Method, DEM)模拟种子运动状态,以优化种盘结构^[12-14]。

然而,已有研究主要依赖试验优化和数值仿真,这些方法存在试验周期长、参数空间覆盖不足、难以实时响应复杂环境变化等局限,缺乏基于数据驱动的智能预测方法,难以准确、快速地获取最优播种参数。近年来,机器学习方法在农业智能化领域逐渐展现出优越性能。其中,XGBoost 算法模型因其在处理小样本、高维度数据时表现优秀,已在作物病虫害识别、土地管理、作物生长监测和产量预测等方面得到广泛应用^[15-18]。因此,将 XGBoost 引入排种器排种性能建模,有望突破传统建模手段对数据结构的依赖,提升模型预测的准确性与泛化能力。

基于此,本文设计了一种辅助充种锥台气吸式玉米精密排种器,提出一种“矩形凹槽+倾斜凸台型孔+曲线型搅种凹槽”结构以优化种群扰动,增强种子吸附稳定性,降低重吸率和漏吸率,提升充种合格率。首次采用 XGBoost 机器学习算法,结合台架试验数据并扩展数据集,构建多目标回归模型,用于预测不同播种参数条件下的充种合格率、重吸率和漏吸率,并寻找最优播种参数组合。

1 玉米种子物理特性

1.1 玉米种子三轴尺寸测量

本文选用“郑单 958”玉米种子作为试验用种,对种子的三轴尺寸进行测量,随机选取 500 粒种子测量长度 L 、宽度 W 、厚度 T ,并将玉米种子按照长宽比分为扁形和类圆形,测量结果如表 1 所示。

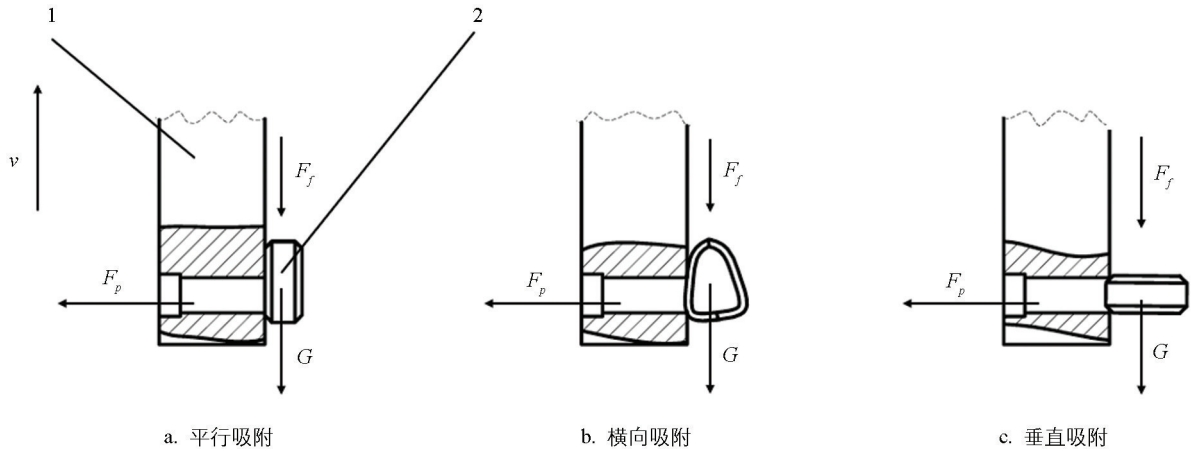
表 1 玉米种子三轴尺寸测量结果

统计值	扁形			类圆形			总体		
	L	W	T	L	W	T	L	W	T
最大值	12.80	10.30	7.10	12.50	10.70	9.80	12.80	10.70	9.80
最小值	8.20	6.40	3.60	8.10	7.80	5.60	8.10	6.40	3.60
平均值	11.50	8.60	5.30	10.20	9.10	7.20	11.10	8.80	6.05
标准差	0.98	0.79	0.72	0.81	0.69	0.87	1.08	0.81	0.93

1.2 玉米种子吸附姿态分析

玉米种子吸附姿态对排种器的排种性能具有显著影响^[19]。由于玉米种子的球形度低,与型孔配合时稳定性差,在气吸式排种器充种过程中玉米种子主要受到种群内摩擦力 F_f 和型孔吸附力 F_p 的影响,因此存

在 3 种吸附姿态。如图 1 所示, 第 1 种为平行吸附, 型孔与种子接触面积最大, 吸附力稳定, 单粒吸附效果最佳; 第 2 种为横向吸附, 吸附面积减少, 容易在高速运转时导致种子脱落或跳种现象; 第 3 种为垂直吸附, 吸附面积最小, 气流难以提供足够的吸附力, 容易导致种子发生跳动或损伤。在种盘保持恒定作业速度且玉米种子被平行吸附的情况下, 吸附最稳定^[20]。



1. 种盘; 2. 玉米种子。注: v 为型孔线速度(km/h); F_p 为型孔吸附力(N); F_f 为种群内摩擦力(N); G 为重力(N)。

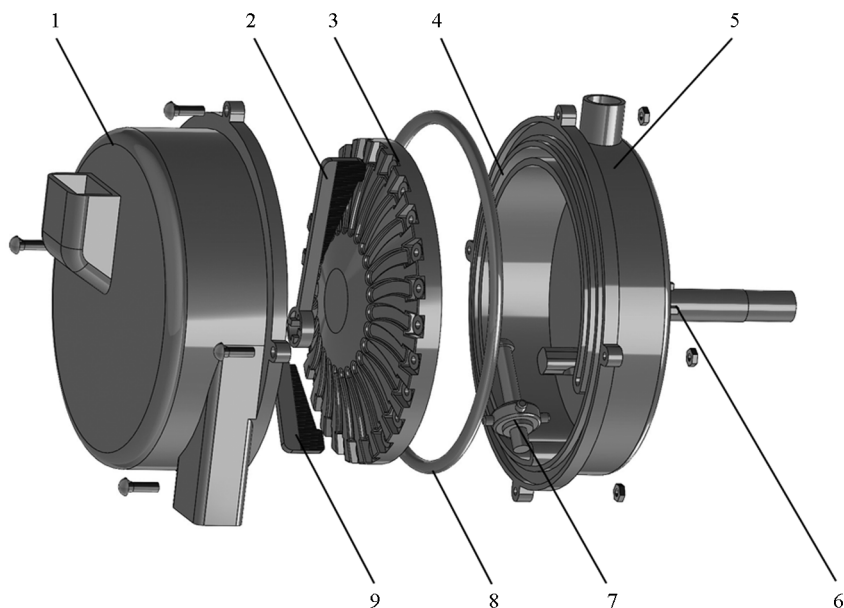
图 1 玉米种子吸附状态示意图

传统型孔设计易导致横向或垂直吸附, 使吸附面积减少、吸附力不稳定, 增加种子脱落和漏播的风险。为此, 本文设计矩形凹槽倾斜凸台式型孔, 通过矩形凹槽和倾斜凸台的限位作用, 引导种子宽面朝向种盘, 促使其平行吸附。这种结构不仅增大吸附面积, 提高吸附力的稳定性, 还能有效减少多粒吸附和种子滑落的情况, 显著降低重吸率和漏吸率, 优化充种效果。

2 排种器结构设计与工作原理

2.1 排种器结构和工作原理

辅助充种锥台气吸式玉米精密排种器的整体结构如图 2 所示, 主要由前壳体、清种毛刷、锥台式种盘、后壳体、气室、传动轴、卸种滚轮、橡胶密封圈、挡板毛刷等部件组成。



1. 前壳体; 2. 清种毛刷; 3. 锥台式种盘; 4. 后壳体; 5. 气室; 6. 传动轴; 7. 卸种滚轮; 8. 橡胶密封圈; 9. 挡板毛刷。

图 2 排种器结构示意图

如图 3 所示,气吸式玉米排种器种盘在工作过程中主要分为 4 个区域:充种区域 I、清种区域 II、携种区域 III、卸种区域 IV。

该排种器在高速作业时,负压风机提供气流,工作负压进入由排种器后壳体、气室和种盘组成的负压腔室,使种子被吸附在种盘表面。通过矩形凹槽和倾斜凸台的限位作用,使种子优先平行吸附,并减少型孔处出现一孔多吸的情况。清种毛刷进一步移除多余种子,提高单粒吸附率。当种子进入卸种区域时,负压气流被阻断,种子在重力和卸种滚轮作用下脱离种盘,实现精确播种。

2.2 种盘结构设计

2.2.1 型孔与种盘

增大种盘直径可增加型孔数量,提升吸种性能,但会降低线速度,同时需扩大排种机构和气室,增加风机功率消耗。在气流量固定的情况下,型孔过大或过多会降低负压,吸附力不足;型孔过小则作用面积减少,同样影响吸附效果。型孔直径与线速度的计算公式如下:

$$\begin{cases} d_x = (0.64 \sim 0.66)\bar{W} \\ v = \frac{3n_p K Z}{50} \end{cases} \quad (1)$$

式中: d_x 为型孔直径(mm); $\bar{W}$ 为玉米种子平均宽度(mm); v 为线速度(km/h); n_p 为种盘转速(r/min); K 为株距(m); Z 为型孔数量(个)。

计算出型孔直径 d_x 的范围为 4~5.5 mm,因此本文选取型孔直径 d_x 为 5 mm,数量为 26 个。现有的种盘直径 d_p 一般为 140~260 mm,因此本文选取种盘直径 d_p 为 200 mm,厚度 t 为 15 mm。

2.2.2 倾斜凸台

合理的凸台结构是玉米种子实现平行吸附的基础。倾斜凸台上表面高度 h 应不大于玉米种子最大厚度 $T_{\max}$ 的一半,过大的上表面高度会使种子在被型孔吸附的过程中发生滑落。 r_1 是凸台表面到种子平面最小的长度,该长度必须大于种子最小厚度 $T_{\min}$ 的一半,保证种子能够被充分支撑。 r_2 是凸台表面到种子平面最大的长度, r_2 的值不能超过种子最小宽度 $W_{\min}$ 的 1.5 倍,以保证种子不会在充种时滑动或与型孔发生重叠。同时需要控制凸台的尺寸,避免凸台过大导致种子吸附不稳定,确保种子在吸附和充种过程中不会超出合理的吸附面积。为满足玉米种子能够平稳吸附在种盘上,倾斜凸台的尺寸应该满足:

$$\begin{cases} h \leq \frac{T_{\max}}{2} \\ r_1 = \frac{2r - d_x}{2\cos \alpha} \geq \frac{T_{\min}}{2} \\ r_2 = \frac{2r + d_x}{2\cos \alpha} \leq 1.5W_{\min} \\ L_{\max} \leq \frac{2r}{\cos \alpha} \leq 2W_{\min} \end{cases} \quad (2)$$

式中: r 为倾斜凸台底圆半径(mm),范围为 5~6 mm; α 为倾斜凸台表面与种盘切向夹角,范围为 $0^\circ \sim 20^\circ$; $L_{\max}$ 为种子最大长度(mm)。计算出倾斜凸台上表面高度 $h < 4.9$ mm,因此本文取 $h = 2.5$ mm,

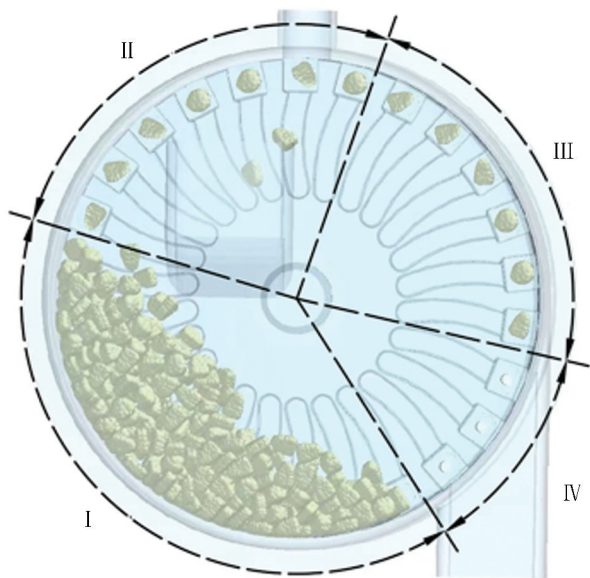


图 3 种盘工作区域划分示意图

$r=6\text{ mm}$, $\alpha=10^\circ$ 。

2.2.3 矩形凹槽和搅种凹槽

通过矩形凹槽与搅种凹槽协同作用, 优化种子吸附与充种均匀性。凹槽长宽根据玉米种子的尺寸设定, 确保仅能容纳单粒种子, 通过尺寸匹配和物理限位, 引导种子以平行姿态进入型孔, 防止多粒吸附, 提高吸附稳定性并降低重吸率。因此, 矩形凹槽的尺寸应该满足:

$$\begin{cases} L_{\max} \leq L_1 \leq 2L_{\min} \\ L_{\max} \leq W_2 \leq 2L_{\min} \\ 0.8W_{\max} \leq H_3 \leq 1.6W_{\min} \end{cases} \quad (3)$$

由表 1 可以确定玉米种子的相关尺寸参数, 因此可以确定矩形凹槽长 L_1 的范围为 12.8~16.2 mm, 矩形凹槽宽 W_2 的范围为 12.8~16.2 mm, 矩形凹槽深 H_3 的范围为 8.56~10.24 mm。为避免因尺寸问题造成的干涉, 经 SolidWorks 软件验证分析后, 取 L_1 、 W_2 为 14 mm, H_3 为 9 mm。

搅种凹槽的宽度 W_3 参考玉米种子的平均宽度 $\overline{W}=8.8\text{ mm}$, 取 9 mm。为提高种群的扰动, 搅种凹槽深度 H_4 参考玉米种子平均厚度 $\overline{T}=6.05\text{ mm}$ 的一半, 取 3 mm, 基圆半径 $r_3=70\text{ mm}$ 。

整个种盘结构如图 4 所示, 本文采用以上数据进行研究。

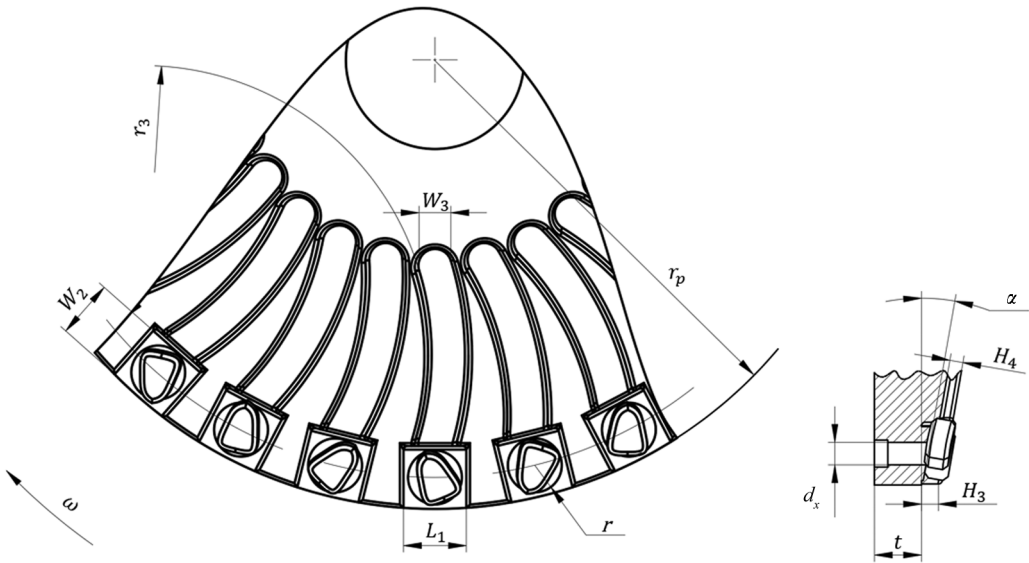


图 4 种盘结构示意图

3 充种性能仿真分析

3.1 仿真参数设置

通过离散元仿真分析(EDDEM 软件), 研究所设计的种盘结构对种群扰动、种子吸附稳定性以及充种性能的影响, 为优化种盘设计提供理论依据。相关参数设置如表 2、表 3 所示^[21-22]。仿真试验采用 Hertz-Mindlin 无滑动接触模型, 基于玉米种子的物理特性和种盘运动参数, 设置作业速度为 14 km/h(角速度为 3.62 rad/s), 仿真颗粒数量为 300 粒, 时间步长为 $1\times 10^{-6}\text{ s}$ 。

表 2 物理特性

项目	泊松比	剪切模量/Pa	密度/(g·cm ⁻³)
玉米种子	0.4	1.37×10^8	1.197
种盘	0.5	1.77×10^8	1.180

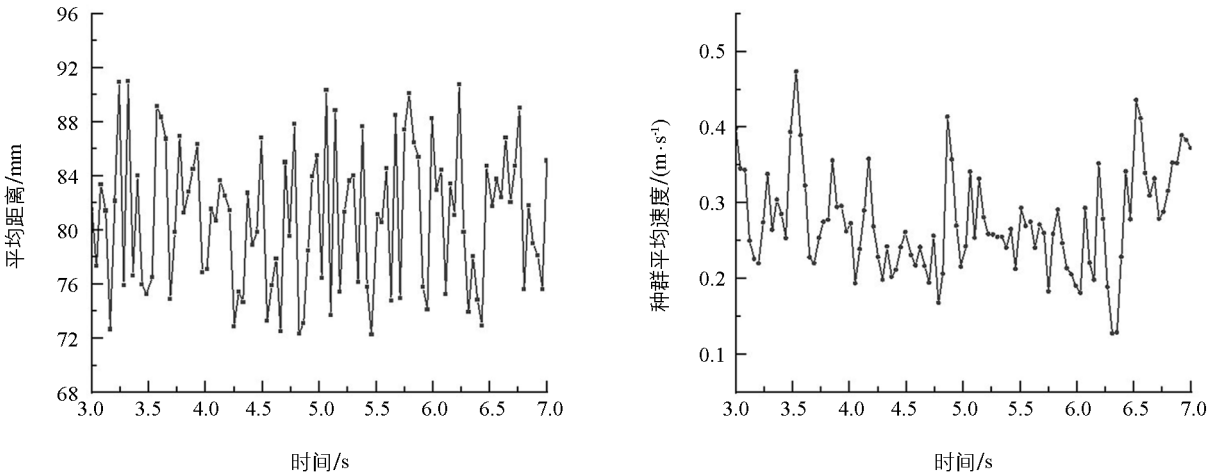
表 3 碰撞参数

项目	弹性恢复系数	滑动摩擦系数	滚动摩擦系数
玉米种子与玉米种子	0.182	0.431	0.078 2
玉米种子与种盘	0.621	0.459	0.093 1

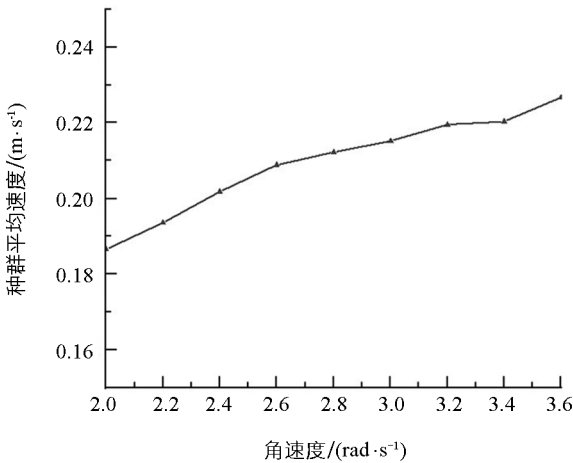
3.2 仿真结果分析

种盘的扰动作用能够分散种群，减少种子密集度和摩擦力，提高种子流动性，从而降低漏吸率并增加型孔吸附成功率，提升排种效率。较强的扰动能扩大种子在种盘表面的分布范围，形成更大的充种角，并通过不规则运动提高种子进入型孔的概率，增强充种精度和稳定性。因此，种盘对于种群的扰动性能直接影响种盘的充种性能^[23-24]。

仿真结果如图 5 所示，由于种盘的瞬时平均作业速度较大，随着时间的推移，种群在进行不规则运动，矩形凹槽和搅种凹槽协同作用可显著增强种群扰动，提高种子进入型孔的概率，从而优化充种精度和稳定性。种群离散度较高，平均吸附成功率提升，能有效降低漏吸和重吸现象。



a. 种群距种盘平均距离随时间的变化情况 b. 种群平均速度随时间的波动情况



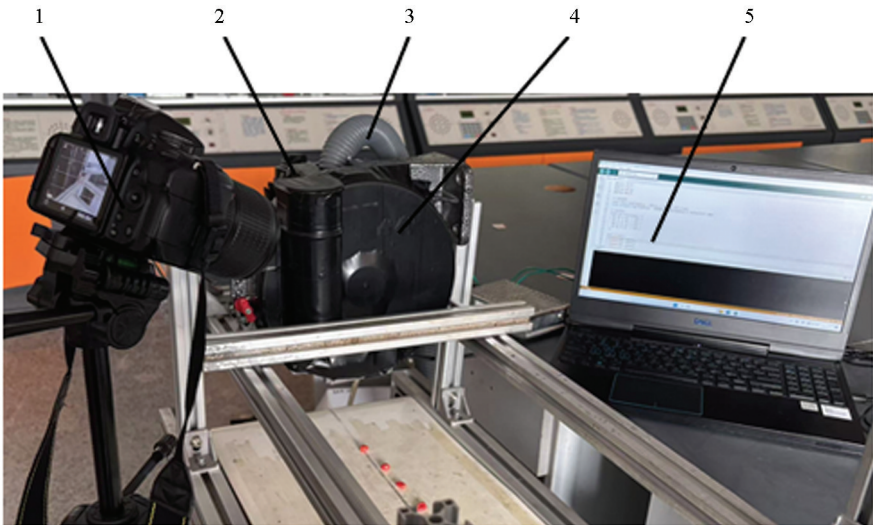
c. 角速度对种群平均速度的影响

图 5 仿真结果示意图

4 台架试验与分析

4.1 试验装置

为了验证种盘结构对种群扰动及充种性能的影响,并进一步优化排种参数,本文基于仿真结果,开展台架试验,分析作业速度、负压对充种合格率、重吸率和漏吸率的影响。试验材料为“郑单 958”玉米种子。排种装置试验台如图 6 所示,主要包括排种器、驱动电机、气吸管道、摄像机、计算机。



1. 摄像机; 2. 驱动电机; 3. 气吸管道; 4. 排种器; 5. 计算机。

图 6 排种器装置试验台

4.2 试验结果

根据《单粒(精密)播种机试验方法》(GB/T 6973—2005)设计台架试验,每组试验统计 250 粒种子,重复 3 次,取平均值为试验结果。采用二次回归正交组合试验方法,选取种盘作业速度、工作负压为试验因素,开展工作参数对充种性能影响的试验,并进行方差分析,以验证数据的显著性。试验因素水平与回归正交试验结果分别如表 4、表 5 所示。

表 4 试验因素水平

水平	试验因素	
	作业速度 $X_1/(km \cdot h^{-1})$	负压 X_2/kPa
−1.414	7.17	−3.59
−1	8.00	−4.00
0	10.00	−5.00
1	12.00	−6.00
1.414	12.83	−6.41

表 5 回归正交试验设计与结果

试验号	试验因素		充种合格率	重吸率	漏吸率
	作业速度 X_1	负压 X_2	$Y_1/\%$	$Y_2/\%$	$Y_3/\%$
1	0	0	93.5	2.3	4.2
2	1	−1	90.7	2.1	7.2
3	0	−1.414	89.8	2.0	8.2

续表 5

试验号	试验因素		充种合格率	重吸率	漏吸率
	作业速度 X_1	负压 X_2	$Y_1/\%$	$Y_2/\%$	$Y_3/\%$
4	1.414	0	91.7	2.2	6.1
5	0	0	93.3	2.3	4.4
6	0	0	93.1	2.6	4.3
7	-1	1	92.3	4.2	3.5
8	0	0	93.2	2.3	4.5
9	0	0	93.3	2.5	4.2
10	1	1	91.3	3.6	5.1
11	-1	-1	90.9	2.6	6.5
12	-1.414	0	92.0	3.8	4.2
13	0	1.414	91.5	4.7	3.8

利用 Design-Expert 13.0 软件对试验结果进行回归分析,确定各因素的影响。表 6 为充种合格率 Y_1 、重吸率 Y_2 和漏吸率 Y_3 回归模型的方差分析。

表 6 充种合格率、重吸率和漏吸率回归模型的方差分析

方差来源	充种合格率 Y_1				重吸率 Y_2				漏吸率 Y_3			
	平方和	自由度	F	p	平方和	自由度	F	p	平方和	自由度	F	p
模型	16.720 0	5	124.12	<0.000 1**	9.250 0	5	40.67	<0.000 1**	24.900 0	5	142.76	<0.000 1**
X_1	0.329 8	1	12.24	0.010 0*	1.410 0	1	31.07	0.000 8**	3.110 0	1	89.10	<0.000 1**
X_2	2.420 0	1	89.97	<0.000 1**	5.980 0	1	131.49	<0.000 1**	16.020 0	1	459.29	<0.000 1**
X_1X_2	0.160 0	1	5.94	0.045 0*	0.002 5	1	0.05	0.821 4	0.202 5	1	5.80	0.046 8*
X_1^2	3.430 0	1	127.39	<0.000 1**	0.575 0	1	12.64	0.009 3**	1.200 0	1	34.34	0.000 6**
X_2^2	11.800 0	1	437.94	<0.000 1**	1.490 0	1	32.70	0.000 7**	4.910 0	1	140.68	<0.000 1**
残差	0.188 6	7			0.318 5	7			0.244 2	7		
失拟	0.100 6	3	1.52	0.337 6	0.238 5	3	3.98	0.107 9	0.176 2	3	3.46	0.131 1
误差	0.088 0	4			0.080 0	4			0.068 0	4		
总和	16.910 0	12			9.570 0	12			25.150 0	12		

注: *、** 分别表示在 5%、1% 水平上差异具有统计学意义。下同。

由表 6 可知,充种合格率 Y_1 、重吸率 Y_2 和漏吸率 Y_3 的回归模型拟合度均为极显著($p<0.01$),且回归方程失拟项不显著($p>0.05$),模型与实际情况拟合较好。

对于充种合格率, X_1 、 X_1X_2 项为显著,其余项均为极显著;对于重吸率, X_1X_2 项为不显著,其余项均为极显著;对于漏吸率, X_1X_2 项为显著,其余项均为极显著。去除不显著的因素后进行多元拟合,建立评价指标和试验因素的二次回归方程为:

$$\begin{cases} Y_1 = 93.28 - 0.203X_1 + 0.550\ 5X_2 - 0.2X_1X_2 - 0.702\ 5X_1^2 - 1.3X_2^2 \\ Y_2 = 2.4 - 0.420\ 3X_1 + 0.864\ 8X_2 + 0.287\ 5X_1^2 + 0.462\ 5X_2^2 \\ Y_3 = 4.32 + 0.623\ 4X_1 - 1.42X_2 + 0.225X_1X_2 + 0.415X_1^2 + 0.84X_2^2 \end{cases} \quad (4)$$

由图 7 可知,排种器工作性能是作业速度和负压共同作用的结果。通过优化作业速度和负压的匹配关系,可以在不同作业条件下展现出高效稳定的排种性能。

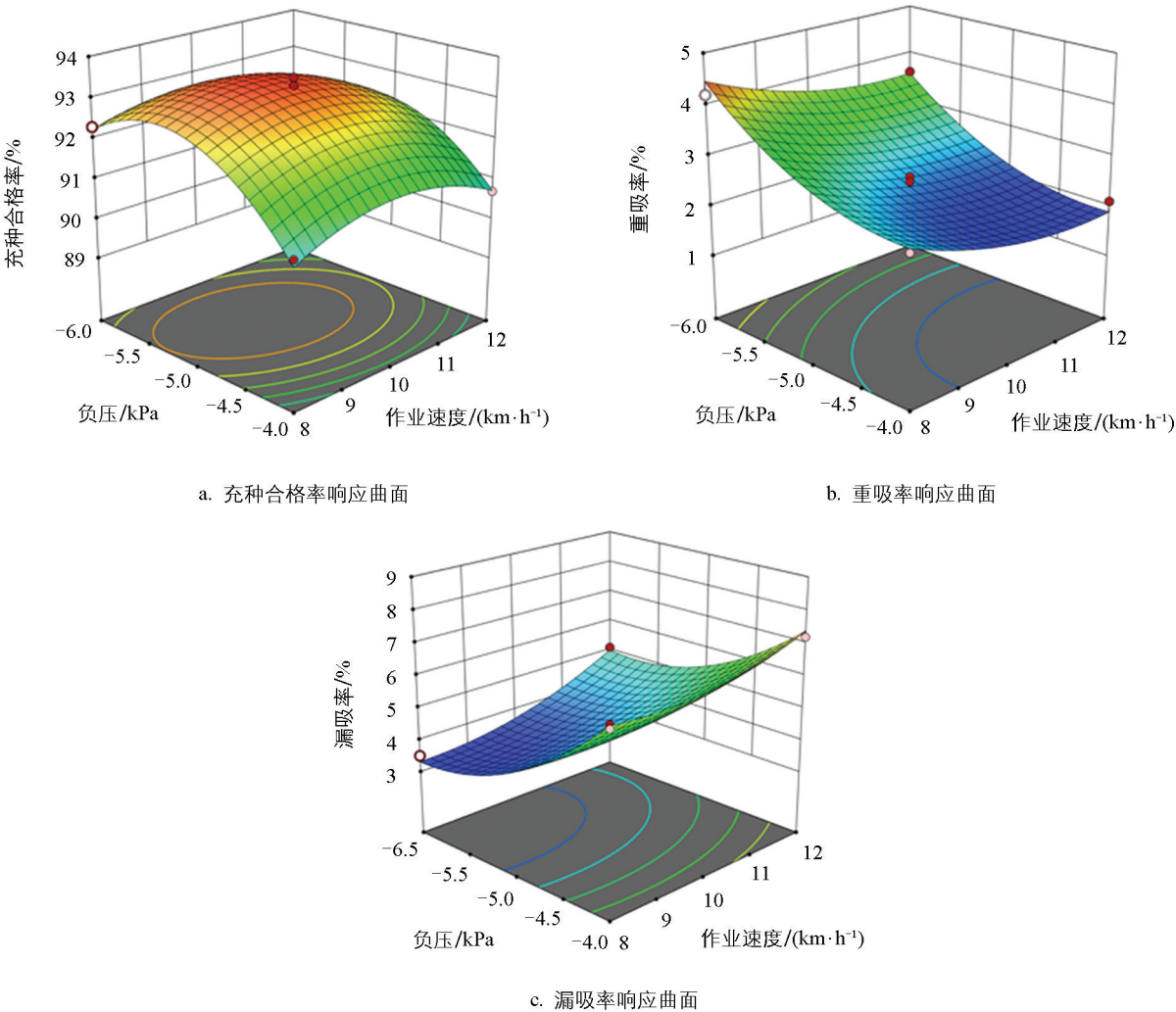


图 7 交互作用对排种性能的响应曲面

5 XGBoost 预测模型

表格数据是最常见的数据类型,已在众多领域得到实际应用。过去 10 年中,传统的机器学习方法,如梯度提升决策树,仍然在表格数据建模中占据主导地位,并显示出优于深度学习的性能。目前,树集成算法被认为是解决实际表格数据问题的推荐方法^[25]。

为了进一步优化播种参数,提高排种器的适应性和预测精度,本文采用 XGBoost 机器学习模型,选取作业速度与负压为特征输入变量,根据其在方差分析中的显著性水平($p < 0.01$),表明两因素对播种性能具有显著影响,符合建模要求。为进一步提高模型的泛化能力与预测精度,本文在正交试验基础上,通过更细化的作业速度与负压水平组合设计,开展了进一步的台架试验,从而覆盖更广泛且密集的参数空间,增强模型在不同播种条件下的预测能力,确保模型训练数据的真实性与代表性。

基于台架试验数据并扩展数据集构建多目标回归模型,设定 80% 为训练集,20% 为测试集,采用种盘作业速度和负压作为输入变量,充种合格率、重吸率和漏吸率为目标变量,以预测充种合格率、重吸率和漏吸率结果,并寻找最优工作参数组合。

5.1 XGBoost 算法原理

XGBoost 在每次迭代时,拟合目标变量的残差,并通过加权累加修正误差使得最终预测值更加精确。其优化目标函数如下:

$$\begin{cases} L = \sum_{i=1}^n \ell(y_i, \hat{y}_i) + \sum_{t=1}^T \Omega(f_t) \\ \ell(y, \hat{y}) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \\ \Omega(f_t) = \gamma T + \frac{1}{2} \lambda \sum_j w_j^2 \end{cases} \quad (5)$$

式中: $\ell(y_i, \hat{y}_i)$ 为损失函数, 本文采用均方误差(MSE); $\Omega(f_t)$ 为模型的正则化项, 控制树的复杂度, 防止过拟合; γ 为叶节点正则化系数, 控制树的叶子节点数量; λ 为 L2 正则化项; w_j 为叶节点的权重。

模型采用前向分布提升(Boosting)策略, 每棵树对前一轮预测误差进行修正, 其决策树增长过程的最优分裂依据如下:

$$Gain = \frac{1}{2} \left[\frac{G_L^2}{H_L + \lambda} + \frac{G_R^2}{H_R + \lambda} - \frac{(G_L + G_R)^2}{H_L + H_R + \lambda} \right] - \gamma \quad (6)$$

式中: G_L 和 G_R 分别为分裂后生成的左、右子节点中, 所有样本的一阶导数的累加值; H_L 和 H_R 分别为分裂后生成的左、右子节点中, 所有样本的二阶导数的累加值。

5.2 模型训练与结果分析

本文使用 XGBRegressor 进行训练, 并采用网格搜索(Grid Search)结合交叉验证(Cross-Validation)进行超参数优化, 最终选取最优超参数组合如下: 学习率为 0.1(控制每棵树对最终模型的贡献, 避免过拟合); 最大树深度为 5(限制单棵树的复杂度, 提高模型的泛化能力); 树的数量为 200(影响模型的复杂度, 过多的树可能导致过拟合)。

预测模型在测试集上的表现如下: 均方误差为 0.213 1, 均方根误差为 0.461 7, 决定系数 R^2 为 0.916 2。结果表明模型的预测误差较小, 可以解释 91.62% 的数据方差, 预测性能较好。根据模型预测结果, 最优播种参数为: 作业速度 10 km/h, 负压 -5 kPa, 得到充种合格率为 92.13%, 重吸率为 4.15%, 漏吸率为 3.71%。经试验验证, 排种器充种合格率为 92.8%, 重吸率为 2.6%, 漏吸率为 4.6%, 误差在合理范围内, 进一步证实了该方法的有效性。

由图 8 可知, 大部分残差集中在 0 附近, 模型整体上没有严重的系统性偏差, 预测值与真实值接近, 模型误差较小, 预测较稳定。误差的分布近似正态分布, 说明模型的误差符合随机分布的假设, 表明模型较为可靠, 且 3 个指标的预测值基本与实际值吻合, 模型具有较好的泛化能力。

预测模型在测试集上的 R^2 为 0.916 2, 说明拟合程度较高, 但仍存在一定误差。误差主要来源于以下几点: 一是试验数据量有限, 仅基于台架试验条件采集; 二是输入特征仅包含作业速度与负压, 未考虑种子密度、湿度等环境变量; 三是部分测量指标存在人为识别误差。后续研究可引入更多种子物理性质、排种器机构特征以及外部环境参数, 并结合传感器实时数据采集, 实现多维度建模, 从而进一步提高模型精度与适应性。

5.3 SHAP 分析

进一步采用 SHAP(SHapley Additive exPlanations)方法对模型进行解释, 结果如图 9、图 10 所示。负压的 SHAP 值高于作业速度, 表明其对模型输出的影响更为关键, 尤其在漏吸率预测中, 负压的贡献占比超过 60%, 因此在播种参数调控中应优先考虑气流稳定性。

由图 9 可知, 适当提高作业速度(种盘转速)有助于提高充种合格率, 但需要平衡重吸率与漏吸率的影响; 适当提升负压可以提高充种合格率, 但过大的负压可能影响其他性能指标。由图 10 可知, 漏吸率对模型的影响最大, 当漏吸率较高时, SHAP 值通常为负, 说明漏吸率较高会降低充种合格率, 这表明优化种子排种性能时, 首先应该关注减少漏吸, 其次减少重吸, 最后通过调整负压和作业速度来优化。

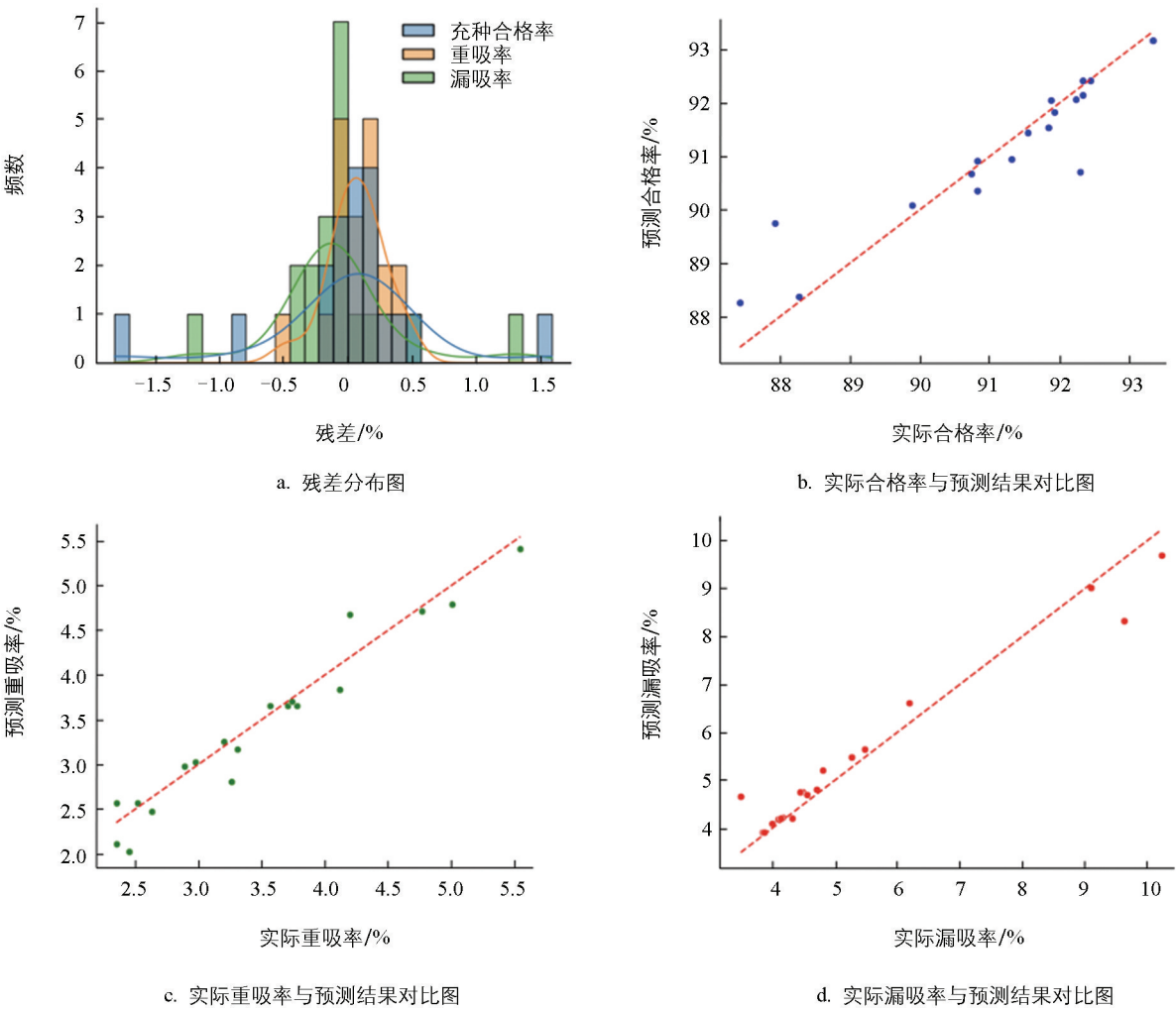


图 8 XGBoost 预测结果

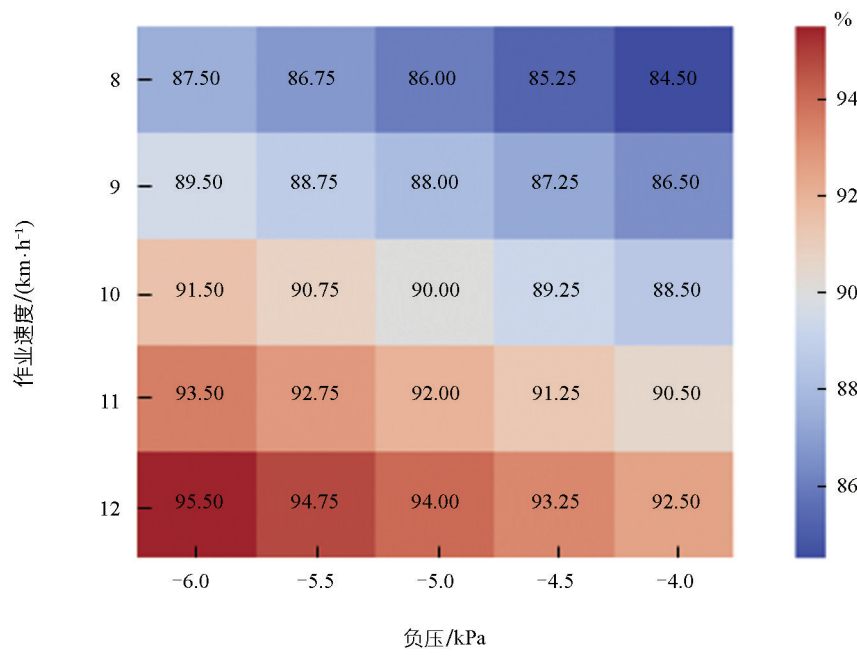


图 9 充种合格率热力图

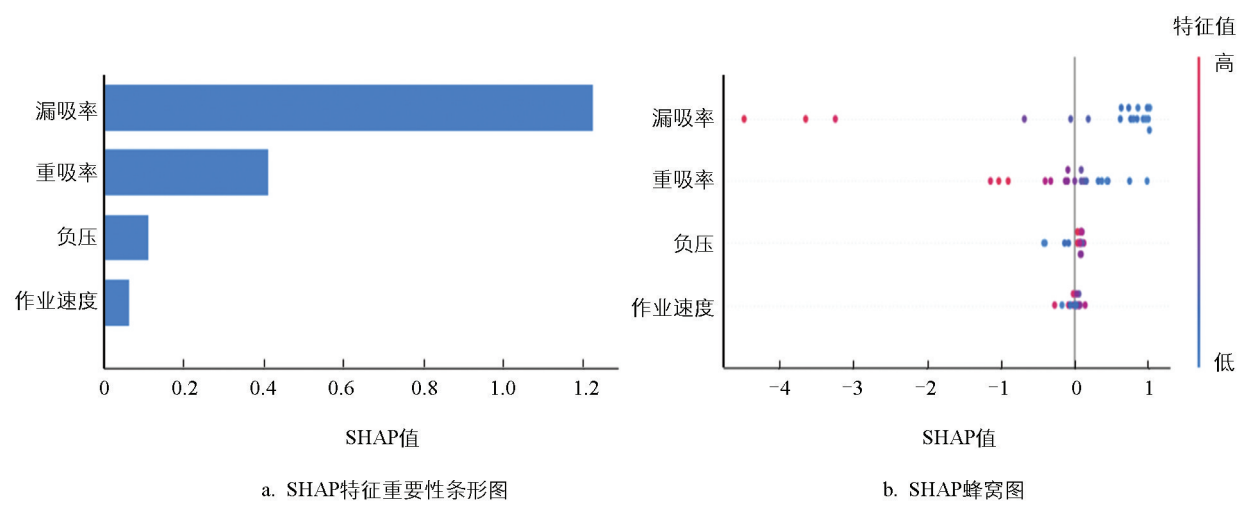


图 10 不同特征对充种合格率的影响

6 结论

针对气吸式玉米精密排种器在高速作业条件下的充种稳定性问题，创新性地提出了一种优化的锥台式种盘结构，并结合离散元仿真、台架试验及机器学习方法对其性能进行了系统研究。主要结论如下：

- 1) 矩形凹槽、倾斜凸台型孔与曲线型搅种凹槽的协同作用能够有效增加种子扰动，优化吸附姿态，减少一孔多吸现象，提高种子吸附稳定性，从而降低重吸率和漏吸率。
- 2) 离散元仿真结果表明，新型种盘能有效提高种群离散度，扩大充种角，使种子在种盘表面分布更加均匀，减少漏吸现象，并提升单粒种子吸附成功率。
- 3) 基于台架试验数据，构建了 XGBoost 回归预测模型，对充种质量进行预测，模型决定系数 R^2 达到 0.916 2，预测误差较小，预测最佳参数组合为作业速度 10 km/h，负压－5 kPa，经试验验证在该条件下，充种合格率达到 92.8%，进一步验证了机器学习方法应用于农业机械优化设计的可行性。

本文提出的种盘结构及数据驱动的播种参数优化方法，可为高速精量播种排种器的设计和智能化调控提供理论依据与工程实践指导，对于提升气吸式排种器的播种精度和适应性具有重要的参考价值。

参考文献：

[1] 何凯威. 宽幅玉米播种机气送式供种模块设计与试验 [D]. 武汉：华中农业大学，2025.

[2] 国家统计局. 中国统计年鉴 2025 [M]. 北京：中国统计出版社，2025.

[3] He X T, Zhang D X, Yang L, et al. Design and experiment of a GPS-based turn compensation system for improving the seeding uniformity of maize planter [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2021, 187: 106250.

[4] 张明华, 姜有聪, 何思禹, 等. 蔬菜气吸轮式精量排种器设计与试验 [J]. 农业工程学报, 2023, 39(7): 98-109.

[5] Gao X J, Xie G F, Li J, et al. Design and validation of a centrifugal variable-diameter pneumatic high-speed precision seed-metering device for maize [J]. Biosystems Engineering, 2023, 227: 161-181.

[6] Xing H, Wang Z M, Luo X W, et al. Mechanism modeling and experimental analysis of seed throwing with rice pneumatic seed metering device with adjustable seeding rate [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2020, 178: 105697.

[7] Jabir Ibrahim E, Liao Q X, Wang L, et al. Design and experiment of multi-row pneumatic precision metering device for rapeseed [J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2018, 11(5): 116-123.

[8] Li B H, Ahmad R, Qi X D, et al. Design evaluation and performance analysis of a double-row pneumatic precision metering device for brassica chinensis [J]. Sustainability, 2021, 13(3): 1374.

[9] Han D D, Zhang D X, Jing H R, et al. DEM-CFD coupling simulation and optimization of an inside-filling air-blowing

maize precision seed-metering device [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2018, 150: 426-438.

[10] Tang H, Guan T Y, Xu F D, et al. Test on adsorption posture and seeding performance of the high-speed precision dual-chamber maize metering device based on the seed characteristics [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2024, 216: 108471.

[11] Du X, Liu C L. Design and testing of the filling-plate of inner-filling positive pressure high-speed seed-metering device for maize [J]. Biosystems Engineering, 2023, 228: 1-17.

[12] 丁力, 杨丽, 刘守荣, 等. 辅助充种种盘玉米气吸式高速精量排种器设计 [J]. 农业工程学报, 2018, 34(22): 1-11.

[13] 陈玉龙, 刘泽琪, 韩杰, 等. 气吸式排种器扁平种子吸附姿态调节机构设计与试验 [J]. 农业工程学报, 2022, 38(23): 1-11.

[14] 刘瑞, 刘忠军, 刘立晶, 等. 玉米扰动辅助充种高速气吸式排种器设计与试验 [J]. 农业机械学报, 2022, 53(9): 50-59.

[15] Li Y C, Zeng H W, Zhang M, et al. A county-level soybean yield prediction framework coupled with XGBoost and multidimensional feature engineering [J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2023, 118: 103269.

[16] Wang R J, Tuerxun N, Zheng J H. Improved estimation of SPAD values in walnut leaves by combining spectral, texture, and structural information from UAV-based multispectral image [J]. Scientia Horticulturae, 2024, 328: 112940.

[17] Zhang J J, Cheng T, Guo W, et al. Leaf area index estimation model for UAV image hyperspectral data based on wavelength variable selection and machine learning methods [J]. Plant Methods, 2021, 17(1): 49.

[18] Jiang P A, Zhou X L, Liu T L, et al. Prediction dynamics in cotton aphid using unmanned aerial vehicle multispectral images and vegetation indices [J]. IEEE Access, 2023, 11: 5908-5918.

[19] 丁力, 杨丽, 张东兴, 等. 气吸式玉米排种器吸附姿态对投种性能的影响分析 [J]. 农业机械学报, 2021, 52(7): 40-50.

[20] Tang H, Xu F D, Xu C S, et al. The influence of a seed drop tube of the inside-filling air-blowing precision seed-metering device on seeding quality [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2023, 204: 107555.

[21] 王云霞, 梁志杰, 张东兴, 等. 基于离散元的玉米种子颗粒模型种间接触参数标定 [J]. 农业工程学报, 2016, 32(22): 36-42.

[22] Gao X J, Cui T, Zhou Z Y, et al. DEM study of particle motion in novel high-speed seed metering device [J]. Advanced Powder Technology, 2021, 32(5): 1438-1449.

[23] 李姗姗, 廖庆喜, 王都, 等. 油菜气力滚花滚筒式精量集排器充种性能仿真分析与试验 [J]. 华中农业大学学报, 2017, 36(5): 99-107.

[24] 张涛, 刘飞, 赵满全, 等. 基于离散元的排种器排种室内玉米种群运动规律 [J]. 农业工程学报, 2016, 32(22): 27-35.

[25] Prokhorenkova L, Gusev G, Vorobev A, et al. CatBoost: unbiased boosting with categorical features [C] //Proceedings of the 32nd International Conference on Neural Information Processing Systems (NIPS'18), December 3-8, 2018, Montréal, Canada. Curran Associates Inc., 2018: 6639-6649.

责任编辑 柳剑