

付锦,段宏兵,韩明兴,等.基于NSGA-II与AHP气吸式微型薯排种器排种过程仿真优化与试验[J].华中农业大学学报,2025,44(1):288-298.DOI:10.13300/j.cnki.hnlkxb.2025.01.031

## 基于NSGA-II与AHP气吸式微型薯排种器排种过程仿真优化与试验

付锦<sup>1</sup>,段宏兵<sup>1,2,3</sup>,韩明兴<sup>1</sup>,蔡兴奎<sup>2</sup>,董汝宁<sup>1</sup>

1. 华中农业大学工学院,武汉 430070; 2. 农业农村部马铃薯生物学与生物技术重点实验室,武汉 430070;  
3. 农业农村部长江中下游农业装备重点实验室,武汉 430070

**摘要** 针对现有气吸式微型薯排种器作业时所需负压高、功耗大、漏播严重等问题,依据微型薯的曲率半径,设计环槽型排种盘,增加微型薯贴附排种盘的有效接触面积,从而提高合格指数。运用EDEM与Fluent软件构建气吸式微型薯排种器耦合仿真模型,并以运行参数(真空度、排种盘转速)、结构参数(吸孔直径、吸孔数)为影响因素,以合格指数、漏播指数、重播指数、功率消耗为性能指标设计二次回归正交旋转组合试验。通过耦合仿真获得各影响因素对排种器性能指标的影响结果集,对结果集采用非支配排序算法(NSGA-II)进行多目标求解,获取Pareto最优解集;通过层次分析法(AHP)对最优解集进行权重分配后,得到最优的排种器结构与运行参数。结果显示:最优参数值为负压值-5 060 Pa、排种盘转速35 r/min、吸孔数10个、吸孔直径10 mm时,排种器的合格指数为94.18%,漏播指数为3.14%,重播指数为2.68%,功率消耗为11.2 kW。台架试验结果显示:台架试验结果与仿真优化后结果基本保持一致,相对误差为0.97%。

**关键词** 微型马铃薯;排种器;耦合仿真;多目标优化;层次分析法

**中图分类号** S223.2 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2025)01-0288-11

马铃薯是一种粮食与蔬菜兼用的作物。目前我国马铃薯种植面积与总产量均位居世界前列,但单位面积产量与世界平均水平仍有差距,且机械化程度低<sup>[1-2]</sup>。马铃薯的产量和品质与种薯质量密切相关,脱毒微型马铃薯(以下简称“微型薯”)作为生产优质商品种薯的重要方式,能够解决种薯质量低下的问题。现阶段微型薯播种机大都是对传统链勺式排种器的种勺结构尺寸进行变动,存在重播指数过大、微型薯机械损伤大等问题<sup>[3]</sup>。气吸式排种器具有不伤种、对种子外形要求不严等优点而被广泛运用<sup>[4-6]</sup>。因此,研制一种适合于微型薯播种的气吸式排种器已成为迫切需要。

近年来,随着EDEM与Fluent耦合仿真技术在工业、农业等领域的快速发展,为许多实际工程问题提供了解决方法<sup>[7-9]</sup>。国外学者主要将DEM-CFD耦合方法应用于工业流化床<sup>[10]</sup>、皮带分选机<sup>[11]</sup>与旋风分离器<sup>[12]</sup>等研究。国内学者将DEM-CFD耦合仿

真技术运用到气吸式排种器研究较多,丁力等<sup>[13]</sup>应用DEM-CFD耦合方法提取气吸式玉米排种器充种区、清种区、携种区、投种区的流场压强以验证所设计的排种器结构的合理性。史嵩等<sup>[14]</sup>将压力梯度算法引入排种器气固两相的分析中,解决了因充种效果不佳导致排种质量较低的问题。王国伟等<sup>[15]</sup>基于Magicsem型排种器进行结构优化,采用耦合仿真方式探究了不同种层高度对排种器充种效果的影响。上述研究采用耦合仿真方法对农业机械排种器进行优化改进时,未综合考虑排种器工作过程中排种性能、工作效率、功率消耗等问题。

多目标优化算法与层次分析法的发展,为解决具有多个相互关联的多目标优化问题提供了新的思路。李翔宇等<sup>[16]</sup>为了提高农业用车底盘的稳定性与效率,运用层次分析法确定了柔性底盘在姿态切换过程中各试验指标的权重,通过遗传算法进行最优值求解,获得各参数间的配合关系。姜一啸等<sup>[17]</sup>基

收稿日期:2024-01-15

基金项目:国家马铃薯现代农业产业技术体系项目(CARS-09-P08);湖北省农机装备补短板核心技术应用攻关项目(HBSNYT202215);湖北省现代农业产业技术体系项目(HBHZD-ZB-2020-005-08)

付锦,E-mail:1446703645@qq.com

通信作者:段宏兵,E-mail:duanhb@mail.hzau.edu.cn

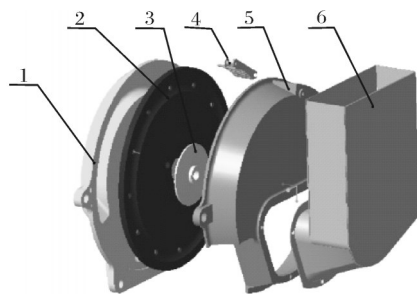
于 Tent 混沌映射的编码与融合层次分析法的贪婪解码来动态调整染色体组成,对 NSGA-II 算法进行改进,解决了以设备能耗、刀具磨损和切削液消耗为碳排放来源以及以能耗和人工费用为加工成本的多目标柔性作业车间低碳调度问题。王宗辉等<sup>[18]</sup>以倾转旋翼悬倾斜前飞和高速巡航飞行行为优化目标,采用 NSGA-II 算法进行优化求解,结果表明相同工况下,相较于原参考倾转旋翼模型,悬停效率从 71.78% 提升到 75.34%,巡航效率从 62.93% 提高到 71.32%。

本研究设计了一种环槽型排种盘,运用耦合仿真方法对排种器工作过程进行仿真分析;通过设计二次旋转正交组合试验获得各影响因素对试验指标的结果集,并综合考虑排种器的合格指数、漏播指数、重播指数、工作效率、功率消耗等排种器性能指标,采用 NSGA-II 与层次分析法结合的方法对上述具有相互关联的试验指标进行多目标最优化求解,以此获得最优的排种器结构与运行参数,为现有气吸式微型薯排种器作业时所需负压高、功耗大、漏播严重等问题的完善设计提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 排种器结构及工作过程

气吸式微型薯排种器结构由真空气室、排种盘、排种盘固定板、清种板、种室与种箱等零部件组成如图 1 所示。

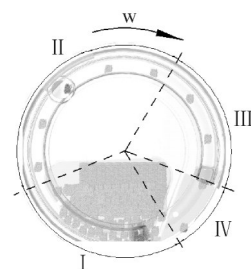


1. 真空气室 Vacuum chamber; 2. 排种盘 Seed plate; 3. 排种盘固定板 Seed tray fixing plate; 4. 刮种板 Seed scraper; 5. 种室 Seed room; 6. 种箱 Seed box.

图 1 气吸式微型薯排种器结构爆炸图

Fig.1 Exploded view of the structure of air suction micro potato seed metering

排种器工作过程主要分为充种、清种、携种与投种等 4 个阶段(图 2)。微型薯通过进种口下落至排种器底部与带有环形凹槽的排种盘接触。当进气口通过负压气流,排种盘在排种传动轴的带动下转动,位



I: 充种区 Seed filling area; II: 清种区 Seed clearing area; III: 携种区 Seed holding area; IV: 投种区 Seed dispensing area.

图 2 排种器工作区域划分

Fig.2 Dividing the working area of the seed metering

于排种盘另一侧的微型薯因负压作用下吸附在型孔上,随着排种盘一起转动。多余的微型薯被清种板清除回落至排种器底部,而稳定吸附的微型薯随着排种盘转动至投种区,此时负压气流消失,种子在重力与离心力的作用下脱离吸孔,完成排种过程。

### 1.2 排种盘的设计

依据微型薯种子尺寸设计的环形凹槽形状的排种盘能够增加微型薯与排种盘的接触面积,从而保持微型薯与型孔之间的气密性,以降低充种过程中的真空度。直孔型与环槽型排种盘的结构分别如图 3 和图 4 所示。传统的直孔型排种盘厚度  $L_1$  为 2 mm,本研究设计的环槽型排种盘是基于笔者所在课题组前期对湖北地区广泛种植的“华薯 1 号”等微型薯的物料特性的测量<sup>[19]</sup>,微型薯的平均宽度为 14~18 mm,平均曲率半径为 16 mm。依据文献[20]可知,吸孔直径  $B=(0.64\sim0.66)b$ 。结合排种盘的厚度  $L$ 、吸孔深度  $H$  与环槽半径  $R$  的几何关系,综合考虑得  $H=2$  mm、 $L=8$  mm、 $R=15$  mm、 $B=9\sim12$  mm,排种盘直径为 310 mm,吸种孔圆心所在基圆的直径为 275 mm。

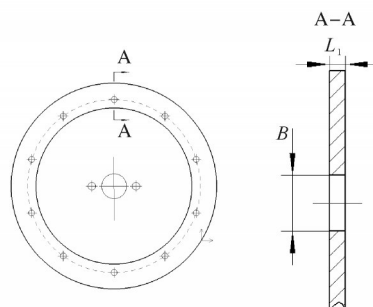


图 3 直孔型排种盘

Fig.3 Straight hole type seed disc

### 1.3 排种器仿真模型建立及方法

1) 微型薯颗粒 bonding 模型建立。排种器工作过程中会因微型薯吸附于吸孔上而导致装置内部的

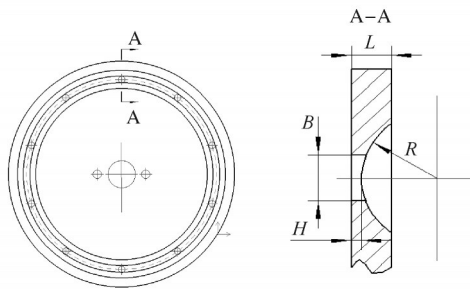
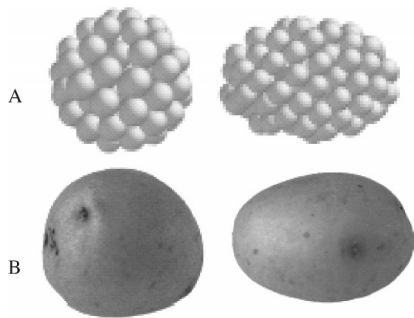


图 4 环槽型排种盘

Fig.4 Circular fluted seed discs

流场发生改变,且种子处于重力场,颗粒场与气流场相互交织的复杂环境中<sup>[21-23]</sup>,而气固双向耦合仿真要求颗粒体积小于流体网格的体积,故在 EDEM 中采用 bonding 模型进行微型薯模型的建立,即用多个小球通过 bonding 粘结键的形式形成实际的微型薯模型。微型薯种依据外形可大致分成类球形与椭球形,仿真颗粒采用湖北地区种植较为广泛的“华薯 1 号”微型薯,可分为类球形与椭球形,如图 5 所示。



A:微型薯颗粒粘结模型 Micro potato pellet bonding mod;B:微型薯实物 Micro potato in kindel.

图 5 微型薯种子模型图

Fig.5 Micro potato seed model

2)排种器几何模型简化。为了减少计算量,将排种器模型简化为真空气室、排种盘、清种刮板与种子室 4 个部分。在 CREO 中进行重新装配后导出 stp 格式,导入到 EDEM 中。同时将简化后的模型在 ICEM-CFD 软件中进行流体网格的划分。运用滑移网格方法将排种盘中吸孔区域设定为动区域,模拟排种盘的旋转运动,其他部分为静止区域(图 6)。

3)仿真参数确定。依据排种器加工所用材料,排种盘为钢板,其余用 ABS 材料进行 3D 打印。结合前期微型薯物料特性测定参数,可得到离散元仿真参数(表 1)。在 Fluent 设置时间步长为  $3\times 10^{-4}$  s,耦合仿真要求 Fluent 时间步长为 EDEM 的整数倍。综合考虑设置 EDEM 时间步长为  $1\times 10^{-5}$  s,Fluent 时

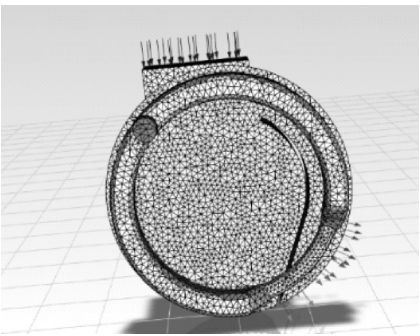


图 6 排种器网格划分模型

Fig.6 Seed metering mesh model

表 1 离散元仿真参数

Table 1 Discrete element simulation parameters

参数 Parameters	微型薯 Micro potato	ABS	钢板 Steel
泊松比 Poisson's ratio	0.330	0.394	0.300
剪切模量/Pa Shear modulus	$7.5\times 10^6$	$3.189\times 10^8$	$7\times 10^{10}$
密度/(kg/m <sup>3</sup> ) Density	1 068	1 180	7 800
碰撞恢复系数(与微型薯) Crash recovery factor	0.449	0.482	0.710
静摩擦因数(与微型薯) Static friction factor	0.434	0.493	0.445
动摩擦因数(与微型薯) Dynamic friction factor	0.010	0.120	0.269

间步长为 30 000 步即仿真时间为 9 s,且 EDEM 与 Fluent 每隔 0.05 s 保存 1 次数据。

1.4 排种器工作过程模拟

在 EDEM 与 Fluent 设置相同的转动速度与转动方向后进行耦合仿真模拟。经过前期试验,采用与实际试验相同的微型薯数量(300 粒左右)且依据 GB/T 6973—2005《单粒(精密)播种机械试验方法》,耦合仿真时长大约需 960 h。通过对相同条件的 3 次完整试验耦合仿真结果分析,在微型薯数量为 150 粒时,完整仿真的合格指数与简化后计算结果的合格指数误差为 1.9%,漏播指数误差为 2.1%。简化后的仿真时间显示为 80 h。为了缩短仿真时间,在 EDEM 中设置颗粒生成总数为 150 粒,其中椭球形与类球状微型薯各 75 粒。仿真计算完成后,运用 EDEM 后处理模块在排种区域创建 geometry bin 监测器,来统计排种性能指标的情况(图 7)。

1.5 耦合仿真试验设计与试验指标选取

本研究设计的气吸式微型薯排种器主要是通过设计排种盘的结构从而使微型薯种子更好地吸附于吸孔中。排种器的排种性能与真空度、排种盘转速、吸孔直径以及吸孔数有关<sup>[24]</sup>,为探究各因素对排种

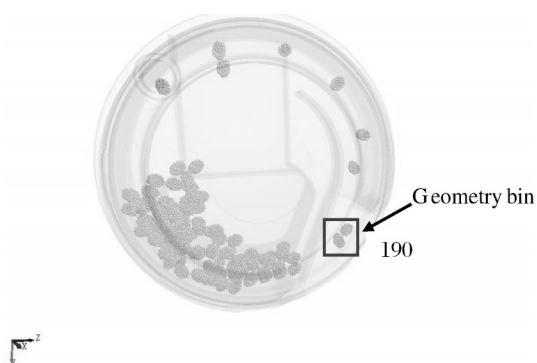


图7 排种器耦合仿真过程

Fig.7 Simulation process of seed metering coupling

性能的影响,开展单因素试验。在此基础上,考虑到各因素之间存在交互作用,进行二次正交旋转试验,将合格指数、漏播指数、重播指数、功率消耗、工

作效率作为试验指标,以此来考虑排种器的综合性能。

## 2 结果与分析

### 2.1 耦合仿真试验

1)不同真空度对排种性能的影响。在Fluent中分别设置-3 000、-4 000、-5 000、-6 000 Pa的负压初始值,而排种盘的转速为20 r/min,吸孔数为12个,吸孔直径为10 mm时,进行单因素耦合仿真试验。每组试验重复3次,试验结果取平均值,如图8A所示。结果表明,随着负压绝对值的不断增加,合格指数与重播指数随之增加,而漏播指数不断下降,而负压值为-3 000 Pa时排种器的合格指数极低,综合考虑选取负压值在-6 000~-4 000 Pa。

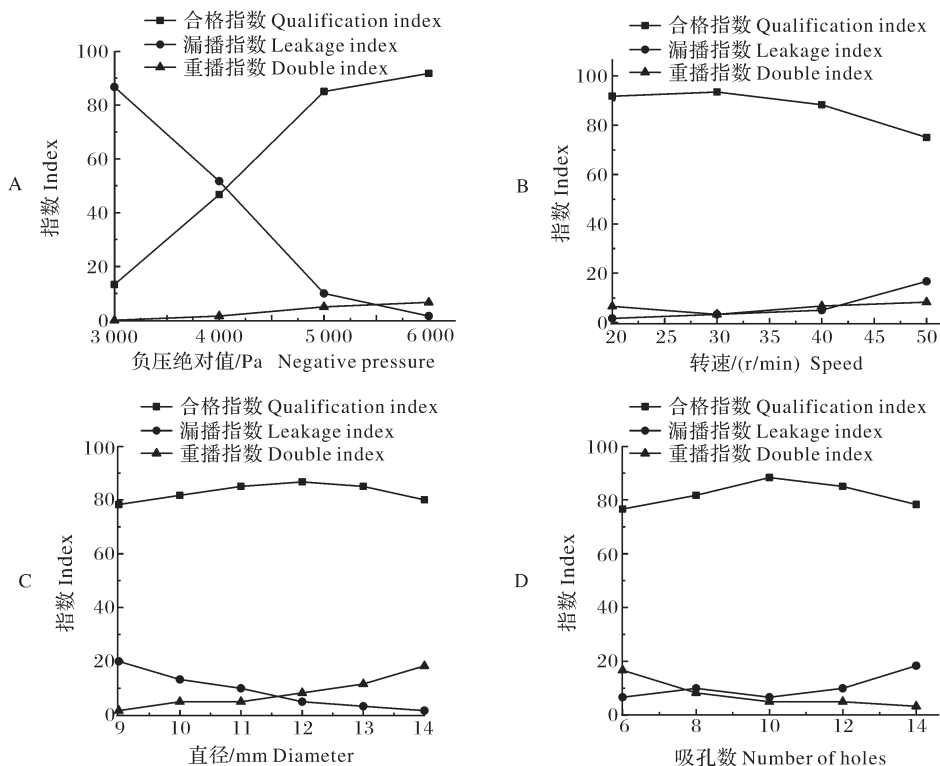


图8 不同影响因素对排种性能的影响

Fig.8 Effect of different factors on seed metering performance

2)不同转速对排种性能的影响。排种盘的转速与播种机的作业速度、微型薯的种植株距、吸孔数量密切相关。具体关系如下:

$$n_p = \frac{60v_m}{sz} \quad (1)$$

式(1)中, $n_p$ 为排种盘转速,r/min; $v_m$ 为播种机作业速度,m/s; $s$ 为株距,m; $z$ 为排种盘型孔数。

依据微型薯种植农艺要求,微型薯种植株距 $s=0.16$  m,播种机田间前进速度选取平均速度,为

$v_m=3.6$  km/h,吸孔数取9~14个时,此时种薯播量在5 700~5 800粒/667 m<sup>2</sup>,由此计算得到排种盘的转速在20~50 r/min。为探究不同转速对排种性能的影响,分别在Fluent与EDEM中设置排种盘转速20、30、40、50 r/min,其他因素为负压-5 000 Pa、吸孔直径为10 mm、吸孔数为12个,进行单因素仿真试验。每组试验重复3次,结果取平均值,如图8B所示。结果表明,随着排种盘转速的增加,合格指数

呈现先上升后下降的趋势,漏播指数呈现上升的趋势而重播指数呈现先下降后上升的趋势,综合考虑合格指数与重播指数,排种盘的转速取25~45 r/min。

3)不同吸孔直径对排种性能的影响。运用CREO软件绘制吸孔直径分别为9、10、11、12、13、14 mm的排种盘模型,并分别进行装配,在负压为-5 000 Pa、排种盘转速为20 r/min、吸孔数为12个时进行单因素仿真试验,每组试验重复3次,结果取平均值,如图8C所示。结果表明,随着吸孔直径的增加合格指数呈现先上升后下降的趋势,而漏播指数与重播指数分别呈持续下降与不断上升的趋势,产生此现象的原因是因为随着吸孔直径的增加,吸孔与微型薯的有效接触面积增加更易被吸附,当吸孔直径过大则导致吸孔两侧压差减小,从而重播指数增加。

4)不同吸孔数对排种性能的影响。在保持负压为-5 000 Pa、排种盘转速为20 r/min、吸孔直径为10 mm不变时,分别选取吸孔数量为6、8、10、12、14的排种盘,重新绘制装配与划分网格后进行单因素仿真试验。每组试验重复3次,结果取平均值,如图8D所示。结果表明,随着吸孔数量的增加,合格指数呈先上升后下降的趋势,重播指数呈现下降的趋势而漏播指数总体呈现上升的趋势,其原因为在一定负压情况下,吸孔数量越多导致真空气室与排种盘所形成的区域气密性越差,导致吸孔内外两侧的负压绝对值越小从而影响排种性能。

## 2.2 二次正交旋转组合试验

为了获得最佳的结构与运行参数组合,以真空度 $X_1$ 、排种盘转速 $X_2$ 、吸孔直径 $X_3$ 、吸孔数 $X_4$ 为试验因素,以合格指数 $Y_1$ 、漏播指数 $Y_2$ 、重播指数 $Y_3$ 、功率消耗 $Y_4$ 、工作效率 $Y_5$ 为试验指标,进行二次正交旋转组合试验。需要明确的是功率消耗 $Y_4$ 可在EDEM与Fluent中分别通过后处理数据导出排种盘转动产生的功率以及负压入口持续通入稳定负压气流的功率,两者相加即为总的功率消耗 $Y_4$ 。据此进行四因素五水平的二次正交旋转组合试验,试验因素编码与试验方案如表2和表3所示。

运用Design expert13.0软件对上述结果进行方差分析,结果如表4和表5所示。根据试验分析结

表2 二次正交旋转组合试验因素编码

Table 2 Experimental factor code				
编码 Code	负压/Pa Negative pressure	排种盘转速/ (r/min) Seed plate speed	吸孔直径/mm Suction hole diameters	吸孔数 Number of suction holes
-2	-4 000	25	9.00	6
-1	-4 500	30	9.75	8
0	-5 000	35	10.50	10
1	-5 500	40	11.25	12
2	-6 000	45	12.00	14

表3 二次正交旋转组合试验方案与结果

Table 3 Pilot programme and test results								
序号 No.	因素 Factors				试验指标 Experiment index			
	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$Y_1$	$Y_2$	$Y_3$	$Y_4$
1	-1	-1	-1	-1	81.5	6.7	11.8	7.80
2	1	-1	-1	-1	82.1	2.6	15.3	11.92
3	-11	1	-1	-1	84.2	9.6	6.2	10.94
4	1	1	-1	-1	85.7	5.8	8.5	16.41
5	-11	-11	1	-1	80.7	3.8	15.5	7.84
6	1	-11	1	-1	85.1	2.3	12.6	11.88
7	-11	1	1	-1	86.3	8.7	5.0	12.96
8	1	1	1	-1	87.4	3.2	9.4	16.39
9	-1	-1	-1	1	83.9	7.6	8.5	7.78
10	1	-1	-1	1	87.1	6.5	6.4	10.11
11	-1	1	-1	1	83.3	13.8	2.9	10.12
12	1	1	-1	1	88.1	5.2	6.7	16.34
13	-1	-1	1	1	84.7	9.2	6.1	7.76
14	1	-1	1	1	87.2	2.7	10.1	10.90
15	-1	1	1	1	86.5	11.2	2.3	12.92
16	1	1	1	1	84.8	7.3	7.9	16.43
17	-2	0	0	0	80.3	12.3	7.4	9.64
18	2	0	0	0	86.3	2.7	11	14.52
19	0	-2	0	0	80.7	6.7	12.6	8.68
20	0	2	0	0	85.3	10.5	4.2	16.16
21	0	0	-2	0	80.7	9.0	10.3	7.90
22	0	0	2	0	87.5	3.5	9.0	11.58
23	0	0	0	-2	81.3	8.3	10.4	12.11
24	0	0	0	2	85.9	8.3	5.8	12.12
25	0	0	0	0	95.3	3.5	1.2	9.78
26	0	0	0	0	95.6	3.1	1.3	10.07
27	0	0	0	0	95.4	4.0	0.6	10.08
28	0	0	0	0	93.6	4.1	2.3	10.78
29	0	0	0	0	94.9	2.1	3.0	10.11
30	0	0	0	0	96.2	2.1	1.7	10.98

果,剔除不显著项后对试验数据进行多元回归拟合,建立试验指标与试验因素之间的回归模型,回归方程为:

$$Y_1 = -944.5375 + 0.111617X_1 + 8.951X_2 + 95.6333X_3 + 16.8854X_4 - 0.09X_2X_4 - 0.0011X_1^2 - 0.11225X_2^2 - 4.5X_3^2 - 0.664063X_4^2 \quad (2)$$

表 4 合格指数与漏播指数方差分析

Table 4 Analysis of variance of qualification index and leakage index

方差来源 Source of variance	合格指数 Qualification index				漏播指数 Leakage index			
	平方和 Square sum	自由度 Degrees of freedom	<i>F</i>	<i>P</i>	平方和 Square sum	自由度 Degrees of freedom	<i>F</i>	<i>P</i>
模型 Model	677.540	18	16.150	<0.001**	284.850	18	24.770	<0.001 0**
<i>X</i> <sub>1</sub>	33.610	1	14.420	0.003**	122.400	1	36.910	<0.001 0**
<i>X</i> <sub>2</sub>	22.430	1	9.620	0.010*	40.040	1	12.070	0.005 2**
<i>X</i> <sub>3</sub>	17.340	1	7.440	0.019*	17.340	1	5.230	0.043 0*
<i>X</i> <sub>4</sub>	19.800	1	8.500	0.014*	18.030	1	5.440	0.039 8*
<i>X</i> <sub>1</sub> <i>X</i> <sub>2</sub>	1.560	1	0.671	0.430	4.620	1	1.390	0.262 7
<i>X</i> <sub>1</sub> <i>X</i> <sub>3</sub>	0.903	1	0.387	0.546	0.002 5	1	0.001	0.978 6
<i>X</i> <sub>1</sub> <i>X</i> <sub>4</sub>	0.090	1	0.039	0.848	1.690	1	0.509	0.490 2
<i>X</i> <sub>2</sub> <i>X</i> <sub>3</sub>	0.023	1	0.001	0.924	0.123	1	0.037	0.851 1
<i>X</i> <sub>2</sub> <i>X</i> <sub>4</sub>	12.960	1	5.560	0.038*	0.010	1	0.003	0.957 2
<i>X</i> <sub>3</sub> <i>X</i> <sub>4</sub>	1.690	1	0.725	0.413	1.000	1	0.302	0.593 9
<i>X</i> <sub>1</sub> <sup>2</sup>	204.610	1	87.810	0.009**	23.050	1	6.950	0.023 2*
<i>X</i> <sub>2</sub> <sup>2</sup>	216.000	1	92.700	0.003**	38.950	1	11.740	0.005 7**
<i>X</i> <sub>3</sub> <sup>2</sup>	175.740	1	75.420	0.009**	10.010	1	3.020	0.110 2
<i>X</i> <sub>4</sub> <sup>2</sup>	193.530	1	83.050	0.008	34.200	1	10.310	0.008 3**
<i>X</i> <sub>1</sub> <i>X</i> <sub>2</sub> <i>X</i> <sub>3</sub>	6.250	1	2.680	0.129	2.100	1	0.634	0.442 8
<i>X</i> <sub>1</sub> <i>X</i> <sub>2</sub> <i>X</i> <sub>4</sub>	0.003	1	0.001	0.975	0.090	1	0.027	0.872 1
<i>X</i> <sub>1</sub> <i>X</i> <sub>3</sub> <i>X</i> <sub>4</sub>	7.02	1	3.010	0.110 4	0.16	1	0.048 2	0.830 2
<i>X</i> <sub>2</sub> <i>X</i> <sub>3</sub> <i>X</i> <sub>4</sub>	0.422 5	1	0.181 3	0.678 5	0.25	1	0.075 4	0.788 7
残差 Residual	25.63	11			36.48	11		
失拟 Loss	21.78	6	4.710	0.055	32.53	6	6.85	0.086 0
误差 Error	3.85	5			3.95	5		
总和 Sum	703.17	29			321.33	29		

$$Y_2=187.90595-0.03773X_1-2.8366X_2-1.133X_3-4.71845X_4+0.0033X_1^2+0.00442X_2^2+0.25759X_4^2 \tag{3}$$

$$Y_3=784.2625-0.08233X_1-7.5975X_2-71.944X_3-11.823X_4+0.0034X_1X_2+0.0925X_2X_4+0.00725X_1^2+0.0646X_2^2+3.42593X_3^2+0.3849X_4^2 \tag{4}$$

$$Y_4=6.92042-0.0162X_1-1.188X_2+0.7233X_3-2.5846X_4+0.002X_1^2+0.0231X_2^2+0.1253X_4^2 \tag{5}$$

2.3 基于NSGA-Ⅱ算法的排种器性能优化

1)优化结果。除合格指数、漏播指数、重播指数、功率消耗外,排种器的工作效率也是衡量排种器性能的重要因素。本研究定义工作效率 $Y_5=X_2$ ,即排种器的工作效率与排种盘转速呈正相关关系。为使得排种器综合性能评价达到最优,有如下关系:

$$\begin{cases} \max Y_1 \\ \min Y_2 \\ \min Y_4 \\ \max Y_5 \\ Y_3=1-Y_1-Y_2 \\ -2\leq X_1、X_2、X_3、X_4\leq 2 \end{cases} \tag{6}$$

运用NSGA-Ⅱ算法进行多目标优化求解,初始种群设置为50,迭代步数为200,优化求解得到的最优的Pareto最优解集如图9所示。

在以上多目标优化求解的解集中,选择各试验指标稳定后的解。依据GB/T 6973—2005《单粒(精密)播种机械试验方法》,整理可知,在满足合格指数大于90%、漏播指数小于5%、重播指数小于5%的情况下,此时负压值为-5 175~-4 900 Pa,排种盘转速为31.2~36.4 r/min,吸孔直径为9.8~11.2 mm,吸孔数为10个。

2)层次分析法对多目标优化结果的选择。层次

表 5 重播指数与功率消耗方差分析结果  
Table 5 Results of analysis of variance of double index and power consumption

方差来源 Source of variance	重播指数 Double index				功率消耗 Power consumption			
	平方和 Square sum	自由度 Degrees of freedom	<i>F</i>	<i>P</i>	平方和 Square sum	自由度 Degrees of freedom	<i>F</i>	<i>P</i>
模型 Model	495.010	18	14.180	0.001**	217.470	18	17.140	<0.001**
<i>X</i> <sub>1</sub>	27.740	1	14.300	0.003**	73.570	1	104.380	<0.001**
<i>X</i> <sub>2</sub>	122.400	1	63.120	<0.001**	110.420	1	156.660	<0.001**
<i>X</i> <sub>3</sub>	11.370	1	6.580	0.026*	7.060	1	10.020	0.009**
<i>X</i> <sub>4</sub>	75.620	1	38.990	0.001**	0.589	1	0.836	0.380
<i>X</i> <sub>1</sub> <i>X</i> <sub>2</sub>	11.560	1	5.960	0.033*	1.560	1	2.220	0.165
<i>X</i> <sub>1</sub> <i>X</i> <sub>3</sub>	0.810	1	0.418	0.531	1.010	1	1.430	0.256
<i>X</i> <sub>1</sub> <i>X</i> <sub>4</sub>	1.000	1	0.516	0.488	0.216	1	0.307	0.591
<i>X</i> <sub>2</sub> <i>X</i> <sub>3</sub>	0.250	1	0.129	0.726	1.060	1	1.510	0.246
<i>X</i> <sub>2</sub> <i>X</i> <sub>4</sub>	13.690	1	7.060	0.022*	0.250	1	0.355	0.564
<i>X</i> <sub>3</sub> <i>X</i> <sub>4</sub>	0.090	1	0.046	0.833	0.172	1	0.244	0.631
<i>X</i> <sub>1</sub> <sup>2</sup>	90.310	1	46.570	<0.001**	6.240	1	8.860	0.013*
<i>X</i> <sub>2</sub> <sup>2</sup>	71.500	1	36.870	<0.001**	8.670	1	12.290	0.005**
<i>X</i> <sub>3</sub> <sup>2</sup>	101.860	1	52.520	0.008**	0.319	1	0.453	0.515
<i>X</i> <sub>4</sub> <sup>2</sup>	65.010	1	33.520	0.001**	6.470	1	9.190	0.011*
<i>X</i> <sub>1</sub> <i>X</i> <sub>2</sub> <i>X</i> <sub>3</sub>	1.100	1	0.569	0.467	1.880	1	2.660	0.131
<i>X</i> <sub>1</sub> <i>X</i> <sub>2</sub> <i>X</i> <sub>4</sub>	0.123	1	0.063	0.806	0.774	1	1.100	0.317
<i>X</i> <sub>1</sub> <i>X</i> <sub>3</sub> <i>X</i> <sub>4</sub>	9.300	1	4.800	0.051	0.003	1	0.004	0.949
<i>X</i> <sub>2</sub> <i>X</i> <sub>3</sub> <i>X</i> <sub>4</sub>	0.023	1	0.012	0.916	0.001	1	0.001	0.972
残差 Residual	21.330	11			7.750	11		
失拟 Loss	17.660	6	4.010	0.074	6.650	6	5.040	0.068
误差 Difference	3.670	5			1.100	5		
总和 Sum	516	29			225.220	29		

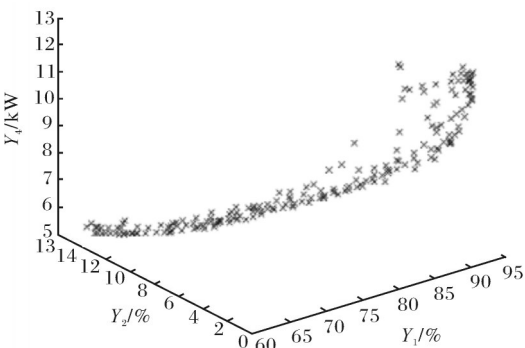


图 9 Pareto 最优解集  
Fig.9 Pareto optimal solution set

分析模型作为层次分析法的首要步骤,能够将涉及的因素进行分类,处于最上层的一般是问题的预定目标,通常只有 1 个元素。下层为评价指标,一般为影响目标层的各个因素,层次分析模型如图 10 所示。

九级标度法是层次分析法中常用的判定两因素间重要程度的方法。该方法核心为若因素*i*相对于因素*j*同等重要,则规定因素*i*相对于因素*j*的标度为 1。因素*i*相对于因素*j*的重要性越高,因素*i*对因素*j*的标度值越高,最高标度值为 9。此外,因素*i*对因素*j*的标度值与因素*j*对因素*i*的标度值互为倒数。据此标准,可以构建如表 6 所示判断矩阵。

运用 SPSS 软件对上述构建的判断矩阵进行一致性检验,计算结果如表 7 所示。计算一致性指标 CR 值越小,则说明判断矩阵一致性越好,一般情况下 CR 值小于 0.1 则可满足一致性检验。由表 7 可知,5 阶判断矩阵的 CI 值为 0.098,5 阶矩阵所对应的 RI 值为 1.12(1~7 各阶矩阵对应的 RI 值分别为 0、0、0.52、0.89、1.12、1.26、1.36),CR 为 CI 与 RI 的比值,即 CR=0.087<0.1,说明一致性检验通过,计算所得

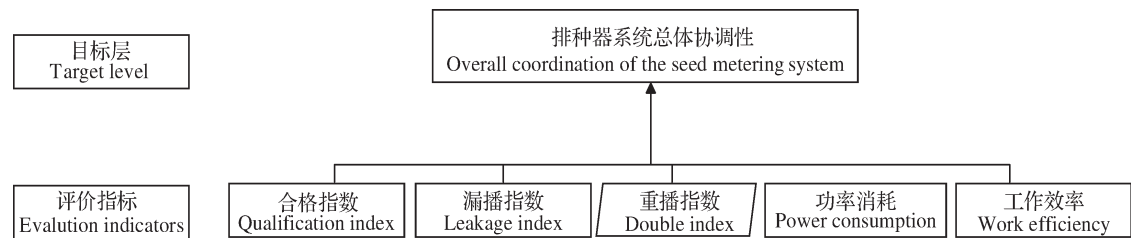


图 10 排种器层次分析模型  
Fig.10 AHP analysis model for seed metering

表 6 判断矩阵

Table 6 Judgement matrix

项目 Item	合格指数 Qualification index	漏播指数 Leakage index	重播指数 Double index	功率消耗 Power consumption	工作效率 Work efficiency
合格指数 Qualification index	1	5	5	3	3
漏播指数 Leakage index	1/5	1	5	3	3
重播指数 Double index	1/5	1/5	1	1/3	1/3
功率消耗 Power consumption	1/3	1/3	3	1	1
工作效率 Work efficiency	1/3	1/3	3	1	1

表 7 层次分析结果

Table 7 AHP analysis results

项目 Item	特征向量 Eigenvector	权重值/% Weighted value	最大特征值 Maximum eigenvalue	CI 值 CI value
合格指数 Qualification index	2.226	44.524	5.931	0.098
漏播指数 Leakage index	1.257	25.130		
重播指数 Double index	0.265	5.294		
功率消耗 Power consumption	0.625	12.526		
工作效率 Work efficiency	0.626	12.526		

的权重具有一致性。满足一致性检验后,在 SPSS 中可以得到各个考察要素层对目标层的权重关系(表 7),根据各权重关系对 Pareto 最优解集进行排序,可以得出在负压为 $-5\ 060\ \text{Pa}$ 、排种盘转速为 $35\ \text{r/min}$ 、吸孔直径为 $10\ \text{mm}$ 、吸孔数为 $10$ 个时,此时排种器的合格指数为 $93.27\%$ 、漏播指数为 $2.8\%$ 、重播指数为 $3.93\%$ 、功率消耗为 $10.8\ \text{kW}$ 。

3)仿真与台架试验对比。为了验证耦合仿真试验多目标优化的结果,按照最优的结构参数试制排种器样机,并在华中农业大学工程训练中心搭建了排种器性能检测台架(图 11)。在最优的运行参数下进行验证试验,运用转速仪校准好排种轴的转速为 $35\ \text{r/min}$ 以及 U 型压差计与风量测试仪校准负压风机出口负压为 $-5\ 060\ \text{Pa}$ ,使用型号为 YP9830 的功率分析仪进行负压风机与三相异步电机功率的测量。试验结束后通过高性能计算机视频回放统计试

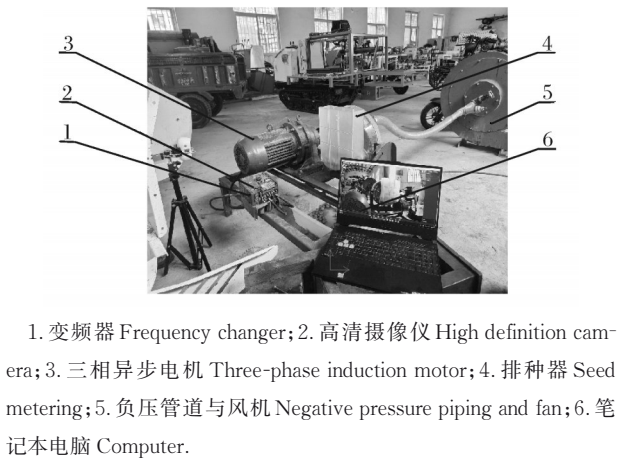


图 11 排种器性能台架试验

Fig.11 Seed metering performance bench test

验数据,进行 5 次重复验证试验,试验结果取平均值。台架试验结果显示,排种器的合格指数为

94.18%、漏播指数为3.14%、重播指数为2.68%、功率消耗为11.2 kW(表8)。台架试验结果与仿真优化后的结果基本保持一致,合格指数的相对误差为0.97%。产生误差的原因可能是因为台架试验中因链条传动有轻微的振动,台架试验结果相较于仿真结果合格指数略高,重播指数略低。

表8 仿真优化与台架试验结果

Table 8 Comparison of simulation optimization results with bench test results

项目 Item	合格指数/% Qualification index	漏播指数/% Leakage index	重播指数/% Double index	功率消耗/ kW Power consumption
仿真优化 Simulation optimization	93.27	2.80	3.93	10.8
台架试验 Bench test	94.18	3.14	2.68	11.2

### 3 讨 论

针对现有气吸式微型薯排种器存在的漏播严重、功率消耗大等问题,本研究设计了一种环槽型排种盘结构。通过建立微型薯颗粒的bonding模型与划分排种器流体网格,构建了DEM-CFD排种器气固耦合仿真体系,并阐述了耦合仿真简化的合理性。通过单因素试验与二次回归正交旋转试验获取了各影响因素与合格指数、漏播指数、重播指数、功率消耗、工作效率之间的结果集。运用NSGA-II算法进行多目标优化获得Pareto最优解集,并用层次分析法对各试验指标进行权重分配后进行结果筛选,从而确定最佳的排种器结构与运行参数。

利用台架试验对仿真优化结果进行验证,结果表明,当负压值为-5 060 Pa、排种盘转速为35 r/min、吸孔直径为10 mm、吸孔数量为10个时,排种器性能达到最优即合格指数为94.18%、漏播指数为3.14%、重播指数为2.68%、功率消耗为11.2 kW。

台架试验结果与仿真优化试验结果基本一致,合格指数相对误差为0.97%。表明运用NSGA-II算法与层次分析法对排种器进行参数优化能够高效、准确地获取最优的参数组合,且能够考虑到排种器的综合性能,为后续其他排种器结构的优化设计提供一定的参考性。后续研究可对微型薯进行破碎参数标定,通过气固耦合仿真形式探究微型薯损伤情况,从而使得结构设计更加完善。

### 参考文献 References

- [1] 王虎存,赵武云,孙伟,等.马铃薯机械化收获技术与装备研究进展[J].农业工程学报,2023,39(14):1-22.WANG H C, ZHAO W Y, SUN W, et al. Research progress on the technology and equipment for potato mechanized harvesting[J]. Transactions of the CSAE, 2023, 39(14): 1-22 (in Chinese with English abstract).
- [2] 白丽,陈曦,孙洁,等.产业融合视角下中国马铃薯加工业发展问题研究[J].农业工程学报,2019,35(8):316-323.BAI L, CHEN X, SUN J, et al. Development of potato processing industry in China from perspective of industrial integration[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(8): 316-323 (in Chinese with English abstract).
- [3] 庞泽,田国奎,王海艳,等.我国马铃薯产业发展现状及展望[J].中国瓜菜,2023,36(7):148-154.PANG Z, TIAN G K, WANG H Y, et al. Present situation and prospect of potato industry in China[J]. China cucurbits and vegetables, 2023, 36(7): 148-154 (in Chinese with English abstract).
- [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.ZHANG M H, JIANG Y C, HE S Y, et al. Design and experiment of the air suction wheel precision seed metering device for vegetables[J]. Transactions of the CSAE, 2023, 39(7): 98-109 (in Chinese with English abstract).
- [5] 李骅,马云龙,於海明,等.群组吸孔气吸式芹菜排种器设计与试验[J].农业机械学报,2023,54(3):87-95.LI H, MA Y L, YU H M, et al. Design and experiment of group air-suction type celery seed metering device[J]. Transactions of the CSAM, 2023, 54(3): 87-95 (in Chinese with English abstract).
- [6] 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.LIU R, LIU Z J, LIU L J, et al. Design and experiment of corn high speed air suction seed metering device with disturbance assisted seed-filling[J]. Transactions of the CSAM, 2022, 53(9): 50-59 (in Chinese with English abstract).
- [7] 谢东波,张春岭,吴晓庆,等.扰种齿辅助气吸式大蒜排种器设计与试验[J].农业机械学报,2022,53(2):47-57.XIE D B, ZHANG C L, WU X Q, et al. Design and test of garlic seed placer with seed disturbing tooth assisted air suction[J]. Transactions of the CSAM, 2022, 53(2): 47-57 (in Chinese with English abstract).
- [8] 李玉环,杨丽,张东兴,等.气吸式玉米精量排种器双侧清种装置设计与试验[J].农业机械学报,2021,52(7):29-39.LI Y H, YANG L, ZHANG D X, et al. Design and test of double-side cleaning mechanism for air-suction maize seed-metering device[J]. Transactions of the CSAM, 2021, 52(7): 29-39 (in Chinese with English abstract).

- [9] 吕金庆, 朱明芳, 竹筱歆, 等. 气吸式马铃薯播种机一体式风机优化设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(3): 80-90. LÜ J Q, ZHU M F, ZHU X X, et al. Optimal design and experiment of integrated fan of air suction potato planter[J]. Transactions of the CSAM, 2022, 53(3): 80-90 (in Chinese with English abstract).
- [10] BAUER A, MAIER G, REITH-BRAUN M, et al. Benchmarking a DEM-CFD model of an optical belt sorter by experimental comparison[J]. Chemie ingenieur technik, 2023, 95(1/2): 256-265.
- [11] NAPOLITANO E S, DI RENZO A, DI MAIO F P. Coarse-grain DEM-CFD modelling of dense particle flow in gas-solid cyclone[J/OL]. Separation and purification technology, 2022, 287: 120591 [2024-01-15]. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2022.120591>.
- [12] TAKABATAKE K, SAKAI M. Flexible discretization technique for DEM-CFD simulations including thin walls[J]. Advanced powder technology, 2020, 31(5): 1825-1837.
- [13] 丁力, 杨丽, 武德浩, 等. 基于DEM-CFD耦合的玉米气吸式排种器仿真与试验[J]. 农业机械学报, 2018, 49(11): 48-57. DING L, YANG L, WU D H, et al. Simulation and experiment of corn air suction seed metering device based on DEM-CFD coupling method[J]. Transactions of the CSAM, 2018, 49(11): 48-57 (in Chinese with English abstract).
- [14] 史嵩, 刘虎, 位国建, 等. 基于DEM-CFD的驱动辅助充种气吸式排种器优化与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(5): 54-66. SHI S, LIU H, WEI G J, et al. Optimization and experiment of pneumatic seed metering device with guided assistant filling based on EDEM-CFD[J]. Transactions of the CSAM, 2020, 51(5): 54-66 (in Chinese with English abstract).
- [15] 王国伟, 夏晓蒙, 朱庆辉, 等. 基于DEM-CFD耦合的辅助充种气吸式大豆高速精密排种器设计与试验[J]. 吉林大学学报(工学版), 2022, 52(5): 1208-1221. WANG G W, XIA X M, ZHU Q H, et al. Design and experiment of soybean high-speed precision vacuum seed metering with auxiliary filling structure based on DEM-CFD[J]. Journal of Jilin University (engineering and technology edition), 2022, 52(5): 1208-1221 (in Chinese with English abstract).
- [16] 李靖宁, 郭康权, 陈文强, 等. 农用车柔性底盘姿态切换参数对切换精度与时间的影响及其优化[J]. 农业工程学报, 2019, 35(5): 51-61. LI Y N, GUO K Q, CHEN W Q, et al. Effects of attitude switching parameters on switching precision and time of flexible chassis of agricultural vehicles and its optimization[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(5): 51-61 (in Chinese with English abstract).
- [17] 姜一啸, 吉卫喜, 何鑫, 等. 基于改进非支配排序遗传算法的多目标柔性作业车间低碳调度[J]. 中国机械工程, 2022, 33(21): 2564-2577. JIANG Y X, JI W X, HE X, et al. Low-carbon scheduling of multi-objective flexible job-shop based on improved NSGA-II[J]. China mechanical engineering, 2022, 33(21): 2564-2577 (in Chinese with English abstract).
- [18] 王宗辉, 杨云军, 赵弘睿, 等. 多飞行状态倾转旋翼气动优化设计[J]. 航空学报, 2024, 45(9): 197-208. WANG Z H, YANG Y J, ZHAO H R, et al. Aerodynamic optimization design of tiltrotor under multiple flight conditions[J]. Acta aeronautica et astronautica sinica, 2024, 45(9): 197-208 (in Chinese with English abstract).
- [19] 余参参. 气吸式微型马铃薯排种器的设计与试验研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2020. YU C C. Design and experimental study of air-suction miniature potato seed metering device[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2020 (in Chinese with English abstract).
- [20] 中国农业机械化科学研究院. 农业机械设计手册[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2008. China Agricultural Machinery Science and Research Institute. Design manual of agricultural machinery [M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2008 (in Chinese).
- [21] 陈海涛, 王洪飞, 王业成, 等. 三叶式自动清换种大豆育种气吸排种器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(12): 75-85. CHEN H T, WANG H F, WANG Y C, et al. Design and experiment of three-leaf type air-suction seed meter with automatic clear and replace seeds features for soybean plot test[J]. Transactions of the CSAM, 2020, 51(12): 75-85 (in Chinese with English abstract).
- [22] 韩丹丹, 何彬, 周毅, 等. 气吸式密植精量排种器的设计与试验[J]. 华中农业大学学报, 2023, 42(1): 237-247. HAN D D, HE B, ZHOU Y, et al. Design and experiment of air suction type dense planting precision seed metering device[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2023, 42(1): 237-247 (in Chinese with English abstract).
- [23] 丁力, 杨丽, 张东兴, 等. 基于DEM-CFD的玉米气吸式排种器种盘设计与试验[J]. 农业机械学报, 2019, 50(5): 50-60. DING L, YANG L, ZHANG D X, et al. Design and experiment of seed plate of corn air suction seed metering device based on DEM-CFD[J]. Transactions of the CSAM, 2019, 50(5): 50-60 (in Chinese with English abstract).
- [24] 李成华, 高玉芝, 张本华. 气吹式倾斜圆盘排种器排种性能试验[J]. 农业机械学报, 2008, 39(10): 90-94. LI C H, GAO Y Z, ZHANG B H. Experiment on dispensing performance of air-sweeping inclined plate seed-metering device[J]. Transactions of the CSAM, 2008, 39(10): 90-94 (in Chinese with English abstract).

## Simulation optimization and experiment of seed sowing process using air-suction micro potato seeder based on NSGA-Ⅱ and AHP

FU Jin<sup>1</sup>, DUAN Hongbing<sup>1,2,3</sup>, HAN Mingxing<sup>1</sup>, CAI Xingkui<sup>2</sup>, DOGN Runing<sup>1</sup>

1.College of Engineering, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China;

2.Key Laboratory of Potato Biology and Biotechnology, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Wuhan 430070, China;

3.Key Laboratory of Agricultural Equipment in the Mid-Lower Reaches of the Yangtze River, Ministry of Agriculture and Rural Development, Wuhan 430070, China

**Abstract** A ring groove-type disk of seeder was designed based on the radius of curvature of the micro potato seeds to solve the problems of the operation of existing air-suction micro potato seeder requiring high negative pressure, high power consumption and serious leakage. The effective contact area of the micro potato seed adhering to the disk was increased to improve the qualification index of the air-suction micro potato seeder. A coupled simulation model of an air-suction micro potato seeder was constructed with EDEM and Fluent software. A quadratic regression orthogonal rotation combination experiment was designed with operating parameters including the vacuum degree, rotation speed of seeder disk and structural parameters including the diameter of suction hole, number of suction holes of the seeder as influencing factors, and the qualification index, leakage index, reseeding index, and power consumption as indexes of performance. The result set of the impact of various influencing factors on the indexes of performance of the seeder was obtained through coupling simulation. The non-dominated sorting algorithm (NSGA-Ⅱ) for multi-objective optimization of the result set was used to obtain optimal solution set of Pareto. The optimal structure parameters and operating parameters of seeder were obtained after assigning weights to the optimal solution set using analytic hierarchy process (AHP). The results showed that the optimal parameters were negative pressure value of  $-5\ 060\ \text{Pa}$ , rotation speed of seeder disk of  $35\ \text{r/min}$ , number of suction holes of 10, and diameter of suction hole of  $10\ \text{mm}$ , with the qualification index of the seeder of  $94.18\%$ , the leakage index of  $3.14\%$ , the reseeding index of  $2.68\%$ , and the power consumption of  $11.2\ \text{kW}$ . The results of bench test showed that the simulation results optimized were basically consistent with the bench test, with a relative error of  $0.97\%$ . It is indicated that the combination of multi-objective optimization algorithm and hierarchical analysis process for weight allocation is reasonable and feasible for the performance optimization of air-suction micro potato seeder.

**Keywords** micro potato; seeder; coupling simulation; multi-objective optimization; hierarchical analysis

(责任编辑:陆文昌)