

张海东, 郑安琪, 于 淇, 等. 番茄育苗排种器流场仿真分析与优化[J]. 沈阳农业大学学报, 2026, 57(2): 000-000.

ZHANG H D, ZHENG A Q, YU Q, et al. Simulation analysis and optimization of flow field in metering mechanism for tomato seedling raising[J].

Journal of Shenyang Agricultural University, 2026, 57(2): 000-000.

番茄育苗排种器流场仿真分析与优化

张海东, 郑安琪, 于 淇, 刘家鹏, 杨文彩

(云南农业大学 机电工程学院, 昆明 650201)

摘要: [目的] 番茄育苗是番茄生产中的关键环节之一, 其中番茄种子因形状不规则且重量较轻, 使得高性能育苗成为产业的难点问题。借助仿真试验和台架试验确定番茄育苗排种器最优结构参数和工作参数, 期望为番茄丰产提供关键技术支撑。[方法] 首先通过单因素试验, 确定了负压气室直径、扇叶叶片厚度、扇叶叶片个数 3 个因素对吸管入口负压的影响规律; 然后通过正交试验对排种器结构参数进行优化设计, 得到最优结构参数组合; 最后将优化方案 3D 打印成实物装至试验台架上进行台架试验, 进一步验证结构参数优化后排种器的性能, 并通过正交试验得到最优工作参数。[结果] 仿真验证试验表明, 扇叶叶片个数为 9、负压气室直径为 66 mm、扇叶叶片厚度为 2.1 mm 时, 吸管入口负压为 143.32 Pa, 响应面法预测结果与 CFD 数值模拟的误差为 2.19%; 台架验证试验结果表明, 扇叶转速 $1\ 500\ \text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ 时, 型孔入口负压值为 137.79 Pa, 型孔负压台架试验和数值模拟试验的结果误差为 4.01%。[结论] 工作参数优化试验结果表明, 最佳工作参数组合为滚筒转速 $8.5\ \text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ 、扇叶转速 $2\ 400\ \text{r}\cdot\text{min}^{-1}$, 其排种合格率、重吸率、漏吸率分别为 93.92%、5.66% 和 0.42%, 满足番茄育苗排种要求。

关键词: 番茄育苗; 气吸式; 轴流; CFD; 参数优化

中图分类号: S223.2

文献标志码: A

文章编号: 1000-1700(2026)02-0000-00

Simulation Analysis and Optimization of Flow Field in Metering mechanism for Tomato Seedling Raising

ZHANG Haidong, ZHENG Anqi, YU Qi, LIU Jiapeng, YANG Wencai

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China)

Abstract: [Objective] Seedling raising is a critical step in tomato production. However, the irregular shape and light weight of tomato seeds make high-performance seedling raising a difficulty in the industry. This study aims to identify the optimal structural and operational parameters of metering mechanism of a tomato seedling raising seeder through simulation and bench tests, with the expectation of providing key technical support for high tomato yields. [Methods] First, single-factor experiments were conducted to determine the influence of three factors—negative pressure air chamber diameter, fan blade thickness, and number of fan blades—on the negative pressure at the suction tube inlet. Then, an orthogonal experimental design was used to optimize the structural parameters of the metering mechanism of the seeder, and the optimal structural parameters combination was obtained. Finally, the optimized design was 3D-printed into a physical prototype and installed on a test bench for bench trials. These trials further verified the performance of the metering mechanism after structural optimization, and an orthogonal experiment was carried out to determine the optimal operational parameters. [Results] The simulation validation test showed that with 9 fan blades, a negative pressure chamber diameter of 66 mm, and a fan blade thickness of 2.1 mm, the negative pressure at the suction tube inlet reached 143.32 Pa. The error between the response surface methodology prediction and the CFD numerical simulation was 2.19%. Bench validation test results

收稿日期(Received): 2025-09-24

修回日期(Revised): 2025-12-25

接受日期(Accepted): 2026-01-08

基金项目: 云南省重大科技专项(202102AE090042-06, 2018ZC001-4)

第一作者: 张海东(1974-), 男, 博士, 副教授, 从事农业装备设计制造、农产品品质无损检测研究, E-mail: zhd_74@126.com

indicated that the negative pressure at the orifice inlet was 137.79 Pa, at a fan speed of $1\ 500\ \text{r}\cdot\text{min}^{-1}$, the error is 4.01% between the bench test results and the numerical simulation results for orifice negative pressure. **[Conclusion]**The operational parameter optimization experiment demonstrated that the optimal parameter combination is a roller speed of $8.5\ \text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ and a fan speed of $2\ 400\ \text{r}\cdot\text{min}^{-1}$. Under these conditions, the qualified seeding rate, multiple suction rate, and missed seeding rate are 93.92%, 5.66%, and 0.42%, respectively, meeting the requirements for tomato seedling raising seeding.

Key words: tomato seedling raising; air-suction type; axial-flow; CFD; parameter optimization

番茄是全球种植面积最广的蔬菜,其育苗环节的精准性直接影响后续的产量与品质^[1-2]。随着农业机械化水平的提升,精量播种技术已成为降低生产成本、提高作业效率的关键突破口^[3]。现有排种技术主要分为机械式和气力式两大类^[4]。传统机械式排种器容易出现漏播、重播及种子损伤等问题^[5],难以满足番茄种子粒径小、形状不规则的特点与育苗的农艺要求。气吸式排种技术因具有吸附稳定、伤种率低等优势,在小粒径种子精密播种中得到广泛应用^[6]。

近年来,国内外学者针对气吸式排种器展开了一系列卓有成效的研究,形成了较为系统的研究成果。梅玉茹等设计的气吸滚筒式排种器通过优化吸孔直径和负压,实现了番茄种子单粒率 93.1%、漏播率 3.7%、重播率 3.2% 的性能^[7]。闫泽禹等^[8]设计了一种具有漏播检测及补种功能的番茄穴盘自动播种装置,经试验,播种成功率达到 97.9%,漏播率降低 6.7%,生产效率提高 $12.6\ \text{盘}\cdot\text{h}^{-1}$ 。赵鹏飞等^[9]设计的气力斜盘式小麦宽苗带匀播排种器借助仿真试验和台架试验,确定了排种器的最优结构和工作参数。潘婷等^[10]通过正交试验对气室结构参数进行优化设计,得到最佳参数组合,经台架试验验证,合格率提升 7.6%,重播率降低 4.8%,漏播率降低 2.8%。廖宜涛等^[11]设计的正负气压组合管针式西洋参集排器通过对工作参数组合进行仿真试验,得到排种轴转速、正压和负压的最佳工作参数范围。然而,现有研究仍存一些不足,部分研究仅采用仿真试验或台架试验中的一种方法,未能将两者有机结合,导致研究结果的可靠性和实用性受到影响。

对气吸排种器吸种性能进行优化是提高排种器工作性能的重要途径之一^[12]。尽管实物加工与台架试验是研究排种器吸种性能的有效手段,但其应用仍受到试验条件与成本的制约,导致相关研究面临诸多挑战。本研究采用仿真试验与台架试验相结合的方法,充分发挥仿真试验的高效性和台架试验的可靠,实现对排种器关键结构参数和关键工作参数的优化和验证。本研究通过仿真试验,对排种器的负压气室直径、扇叶叶片厚度、扇叶叶片个数进行优化,以提高排种器的吸管入口负压,并结合仿真试验和台架试验,综合考虑排种器的合格率、重吸率、漏吸率,进一步确定实际最优工况。

1 排种器结构与工作原理

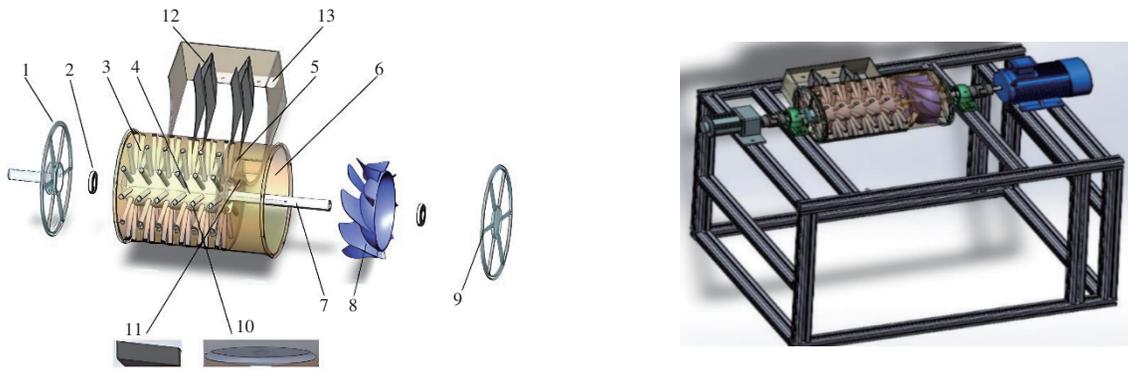
番茄育苗排种器为负压吸种滚筒循环式排种器,其结构包括滚筒挡圈、轴承、滚筒、隔板、扇叶气室、种箱、传动轴、扇叶、扇叶挡圈等零部件(图 1)。该双轴传动排种系统结构包括负压生成单元和排种执行单元:负压生成单元由调速电机通过联轴器驱动扇叶传动轴,带动扇叶旋转将气体沿轴向从右侧排出,在左侧负压气室形成负压以确保滚筒吸管入口产生吸附力;排种执行单元则由感应减速电机经联轴器驱动排种滚筒(与滚筒挡圈通过螺钉固定)旋转,种箱底部设有刮种板。工作时,调速电机启动使扇叶旋转产生负压,排种滚筒通过吸管从种箱吸附种子,随后感应减速电机驱动滚筒旋转,当吸种孔携带种子转至最低位置时,种箱底部刮种板将种子刮落完成排种^[13]。

2 排种器仿真试验方法

2.1 物理模型及网格划分

本研究以探究气室内部气流场分布状态及吸孔处负压对播种效果的影响为出发点,基于排种器初始结构参数,使用 SolidWorks 软件对排种器进行三维建模(图 2a),在 SpaceClaim 平台中对几何模型进行简化,保留影响流场特性的主体结构特征,包括滚筒曲面、扇叶导流面及吸管通道(图 2b),同时对螺栓安装孔、倒角等非流动敏感特征进行拓扑简化以降低网格复杂度。

根据 MRF(Multiple Reference Frame, 多重参考系)法,仿真模型主要分为两区域(图 3a):静止域 I 和旋转



a. 排种器零件图
Parts of seed metering device

b. 排种器装配图
Assembly of the seed metering device

1.排种滚筒挡板;2.轴承;3.排种滚筒;4.负压气室;5.气室挡板;6.扇叶气室;7.传动轴;8.扇叶;9.扇叶挡板;10.种帽;11.刮种挡板;12.种箱隔板;13.种箱
1.Seed metering roller baffle; 2.Bearing; 3.Seed metering roller; 4.Negative pressure chamber; 5.Chamber baffle; 6.Fan plenum; 7.Drive shaft; 8.Fan blade; 9.Fan baffle; 10.Seed cap; 11.Seed scraper baffle; 12.Seed box partition; 13.Seed box

图1 番茄育苗排种器结构图

Figure 1 Structural diagram of metering mechanism of tomato seedling raising device

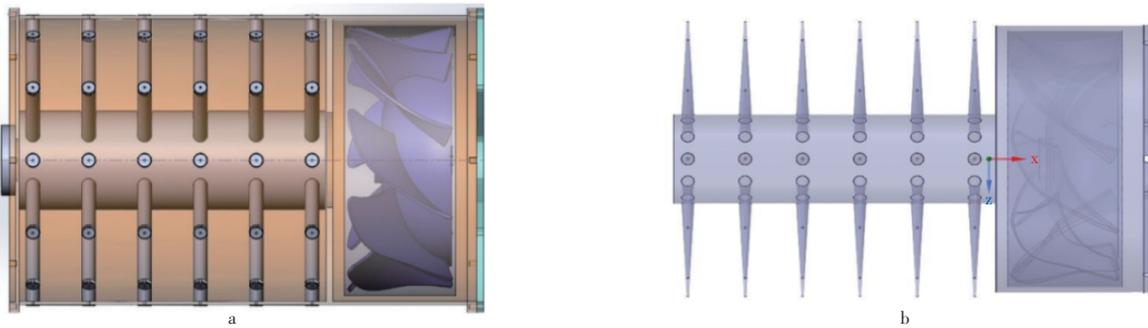


图2 排种器流场仿真模型

Figure 2 Seed metering device flow field simulation model

域 II^[14],其中滚筒区域为静止域,扇叶区域为旋转域,模型计算域如图 3b。由于其流动为定常流动,本研究通过使用共享拓扑技术,确保接触区域界面处网格节点连续分布,从而有效提升后续计算的数值收敛性与计算精度。

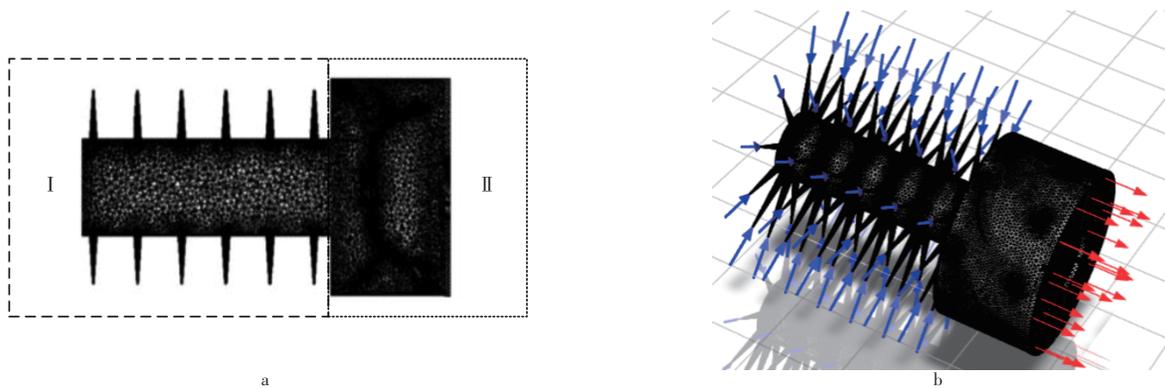


图3 排种器模型计算域示意图

Figure 3 Schematic diagram of the computational domain for the seed metering device model

采用混合网格划分策略:设置全局基础网格尺寸 3.33 mm,针对气流梯度显著的扇叶壁面、吸管边缘等关键区域实施局部加密;在吸管结构收缩段、扇叶表面及滚筒内壁等剪切层发展区域构建多层边界层网格,基于

y+理论通过壁面函数法计算首层网格高度为0.02 mm、膨胀比1.2,确保近壁面无量纲距离y+<2以满足黏性底层解析需求,生成非结构化四面体网格。

2.2 网格独立性检查

为确保数值模拟结果的准确性,需进行网格独立性检查,以消除网格尺寸对计算精度的影响^[15],在相同条件下,选择5个不同的网格节点进行计算,范围从1.77×10⁶~6.68×10⁶(表1)。在网格生成过程中,保证正交质量和偏斜度在默认范围内。为保证计算的准确性,在模型中加入边界层^[16]。以型孔入口负压差值低于0.5%为收敛标准,最终采用的网格总节点数约为6.68×10⁶。

2.3 边界条件设置及求解

为了对排种器内部气流特性进行分析,本次数值仿真设定流体介质为不可压缩气体(马赫数Ma<0.3),基于实验室前期完成的仿真试验分析以及模型的几何复杂度与旋转流场特性,k-ε湍流模型使用Realizable k-ε Model,结合增强壁面处理法^[17]。设置求解参数为:(1)压力入口边界条件,初始化表压为0 Pa;(2)1 500 r·min⁻¹初始角速度;(3)选SIMPLEC压力-速度耦合算法;(4)使用混合初始化实现流场变量空间分布的物理合理性预置;(5)设定收敛标准残差值低于1×10⁻³,最大迭代步数设置为3 000步^[18-19]。

3 结果与分析

3.1 仿真试验结果分析

3.1.1 单因素试验 根据前期研究基础,选负压气室直径X₁、扇叶叶片厚度X₂、扇叶叶片个数X₃为影响因素,以吸孔处的平均负压值为评价指标进行单因素试验,以确定各因素的取值范围。改变其中一项结构参数,固定其他结构参数进行数值模拟试验。试验参数选值如表2。

表2 单因素试验选值

Table 2 Selection of values for the single-factor experiment

编号 Number	X ₁ /mm	X ₂ /mm	X ₃
1	30	1	5
2	50	2	7
3	70	3	9
4	90	4	11
5	110	5	13

3.1.1.1 负压气室直径对流场的影响 在扇叶叶片厚度为2.5 mm,扇叶叶片个数为7的条件下,设置负压气室直径分别为30, 50, 70, 90, 110 mm进行单因素试验,以探究负压气室直径对吸管入口负压的影响。由图4可知,负压气室直径对吸管入口负压的影响呈现先升后降的非线性趋势。由图5可知,当直径由30 mm扩展至70 mm时,气室直径较小时,气室内的空间有限,扇叶产生的负压难以在气室内充分扩散和稳定,导致吸管入口处的负压较低。随着气室直径的增大,气室内的空间增加,扇叶产生的负压能够在气室内更好地扩散和稳定,从而提高吸管入口处的负压。

而当直径超过70 mm时,随着气室直径的增大,过大的空间导致气流轴向凝聚力减弱,降低能量利用效率,还引发负压波动,且过大的气室直径导致气流扩散区域显著增加,部分气流在腔体内形成无效循环,降低了有效负压生成效率,最终表现为负压值的显著回落。因此初步确定负压气室直径范围为50~90 mm。

表1 网格独立性检查

Table 1 Grid independence check

网格节点 Mesh nodes	差值/% Difference
1.77×10 ⁶	/
2.48×10 ⁶	5.65
4.07×10 ⁶	10.89
5.59×10 ⁶	22.26
6.68×10 ⁶	0.37

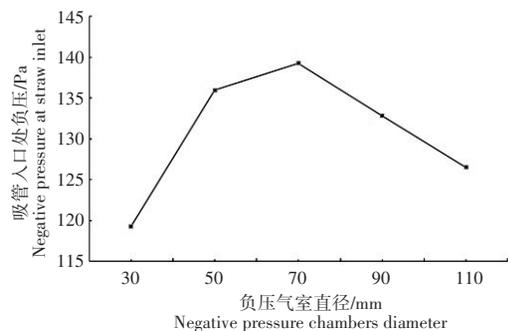


图4 不同负压气室直径下吸管入口处的负压

Figure 4 The negative pressure at the suction nozzle inlet for vacuum chambers of various diameters

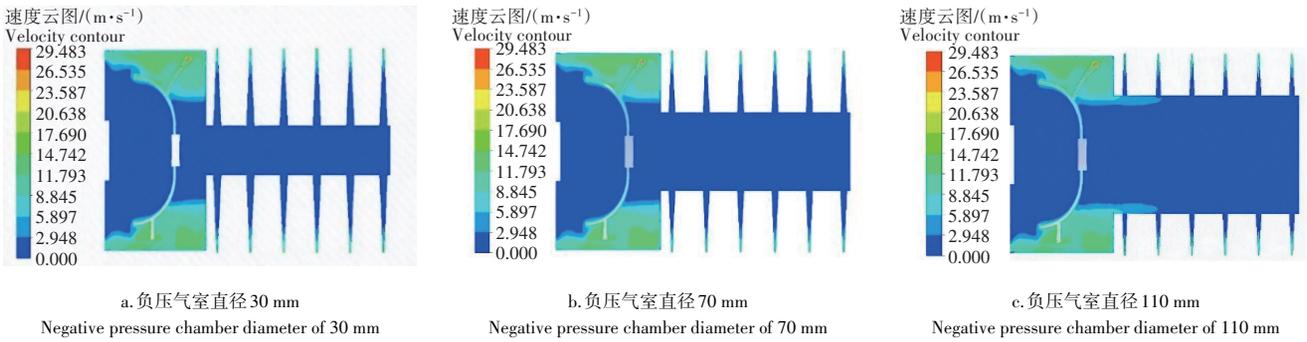


图5 不同负压气室直径下的气流速度云图

Figure 5 Contour plot of airflow velocity for various negative pressure chamber diameters

3.1.1.2 叶片厚度对流场的影响 在负压气室直径为 60 mm,扇叶叶片个数为7的条件下,设置扇叶叶片厚度分别为1,2,3,4,5 mm进行单因素试验,以探究扇叶叶片厚度对吸管入口负压的影响。由图6和图7可知,叶片厚度的改变表现出双阶段特性:厚度从1 mm增至2 mm时,气流在叶片表面的流动稳定性增强,速度分布梯度更为均匀,逆压梯度的幅值减小,延缓了边界层分离的发生,使得边界层分离点沿流向显著后移。分离点后移直接增加了层流边界层在叶片表面的覆盖范围,而层流边界层较低的动量交换强度可有效降低摩擦阻力。气流在叶片表面的流动特性发生显著优化,这一变化直接促进了流速分布的均匀性提升,同时扩大了高速气流区域的覆盖面积。但当厚度超过2 mm增至5 mm时,增厚的叶型使得尾缘区域压力差增大,诱发高强度涡旋脱落,紊流强度显著提升,显著降低近壁面气流速度,使得压力系数升高,直接削弱了叶片通过伯努利效应产生驱动气流的能力,导致负压生成效率下降。

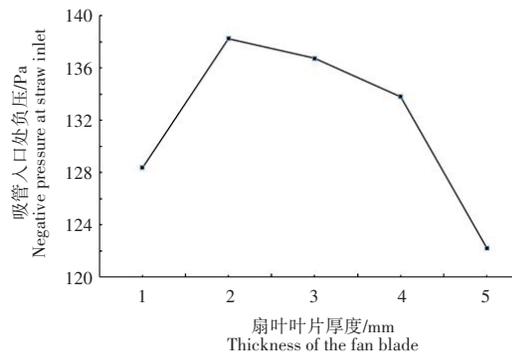


图6 不同扇叶叶片厚度下吸管入口处的负压

Figure 6 Negative pressure at the nozzle inlet under different impeller blade thicknesses

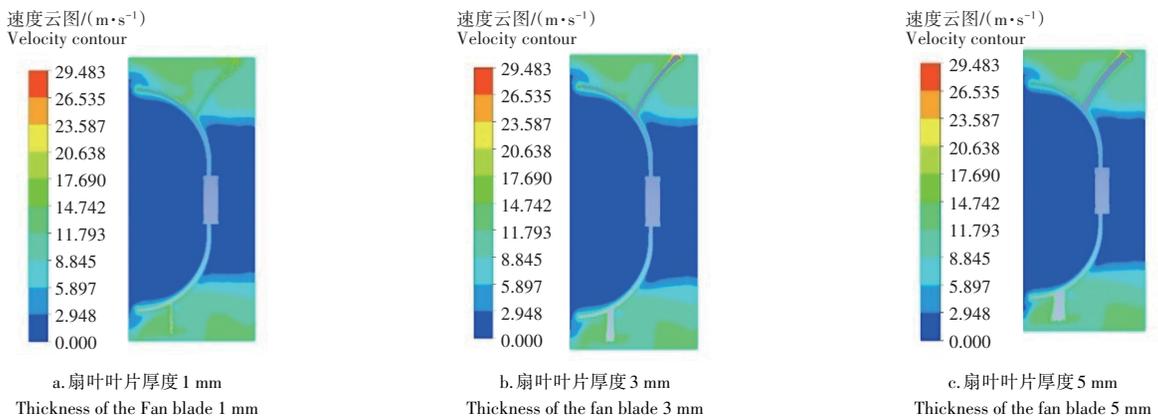


图7 不同扇叶叶片厚度下的气流速度云图

Figure 7 Contour plot of airflow velocity with different impeller blade thicknesses

3.1.1.3 叶片数量对流场的影响 在负压气室直径为60 mm,扇叶叶片厚度为2.5 mm的条件下,设置扇叶叶片数量分别为5,7,9,11,13 mm进行单因素试验,以探究扇叶叶片数量对吸管入口负压的影响。由图8图9可知,当叶片从5片增至9片时,通过合理缩小相邻叶片间距,增强了气流导向的协同作用,叶片对气流的约束作用显著增强,流线偏离叶片型线的程度降低,形成稳定的气流导向协同机制,为负压强化奠定基础。基于伯努利方

程的能量转换原理,导向一致的气流在叶片前缘因流道收缩而加速,动压增大直接导致静压显著降低。

然而当叶片数量超过9片增至13片时,过度密集的叶片排列大幅缩减了气流通道的有效截面积,在叶片间隙处产生显著的气流阻滞效应,同时多叶片造成的能量损耗增加,最终削弱了风扇负压生成能力。

3.1.2 响应面正交试验 本研究采用响应曲面法中的Box-Behnken Design(BBD)法对各设计变量进行分析,研究它们对试验指标的影响^[20-22]。根据上述单因素试验结果,确定试验因素的范围为 X_1 (负压气室直径):50~90 mm; X_2 (扇叶叶片厚度):1~3 mm; X_3 (扇叶叶片个数):6~12。选择吸管入口处的负压为响应值 Y 。根据选择范围,确定如表3所示的因素和水平表。根据设计方案依次对各个模型进行仿真模拟分析,结果如表4。

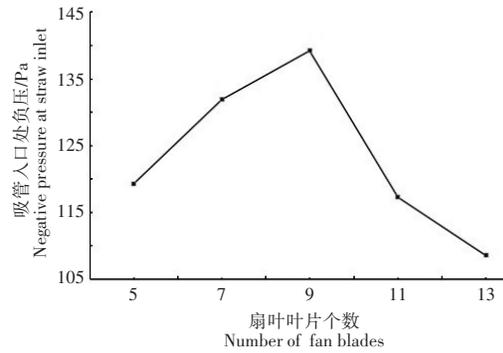


图8 不同扇叶叶片个数下吸管入口处的负压
Figure 8 Negative pressure at the nozzle inlet with different numbers of impeller blades

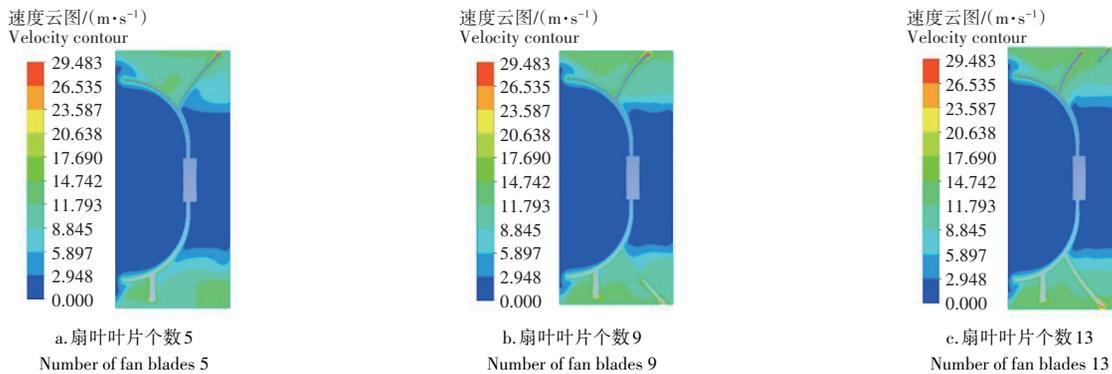


图9 不同扇叶叶片个数下的气流速度云图

Figure 9 Contour plot of airflow velocity with different numbers of impeller blades

表3 正交试验因素水平编码

Table 3 Coding table of factor and levels for orthogonal experiment

水平 Level	X_1 /mm	X_2 /mm	X_3
-1	50	1	6
0	70	2	9
1	90	3	12

表4 正交试验方案及结果

Table 4 Orthogonal experimental design and results

序号 Serial number	X_1 /mm	X_2 /mm	X_3	Y /Pa
1	70	2	9	139.25
2	70	2	9	139.56
3	50	2	12	120.75
4	90	2	12	115.81
5	50	3	9	128.57
6	50	1	9	127.64
7	90	3	9	125.18
8	70	2	9	140.79
9	70	3	6	125.92
10	90	2	6	124.62
11	70	3	12	115.88
12	90	1	9	122.46
13	70	1	6	119.12
14	70	2	9	138.27
15	70	2	9	140.21
16	50	2	6	127.67
17	70	1	12	114.34

基于试验数据,以各影响因素的水平值为自变量,吸管入口负压均值 Y 为响应值,进行回归分析,建立了反映其内在关系的数学模型,即:

$$Y = 139.62 - 2.07X_1 + 1.50X_2 - 3.82X_3 + 0.4475X_1X_2 - 0.4725X_1X_3 - 1.32X_2X_3 - 5.13X_1^2 - 8.53X_2^2 - 12.28X_3^2 \quad (1)$$

方差分析如表 5。由表 5 可知,方差分析中的模型 $P < 0.01$,影响极显著,该试验设计可靠;从负压气室直径、扇叶叶片厚度、扇叶叶片个数的 P 值可以判断:负压气室直径 X_1 、扇叶叶片厚度 X_2 、扇叶叶片个数 X_3 对吸管入口负压的影响极显著。此外,可以看出 X_1^2 、 X_2^2 、 X_3^2 回归项的 $P < 0.01$,影响极显著;回归项 X_1X_2 、 X_1X_3 的 $P > 0.05$,影响不显著。回归项 X_2X_3 的 $P < 0.05$,影响显著。剔除不显著因素的回归项后,吸管入口负压的回归模型可表示为:

$$Y = 139.62 - 2.07X_1 + 1.50X_2 - 3.82X_3 - 1.32X_2X_3 - 5.13X_1^2 - 8.53X_2^2 - 12.28X_3^2 \quad (2)$$

表5 回归方程方差分析
Table 5 Analysis of variance for regression equation

来源 Source	平方和 Sum of squares	自由度 Freedom	均方 Mean square	F	P
模型 Model	134.79	9	148.27	157.85	<0.000 1**
X_1	34.28	1	34.28	36.49	0.000 5**
X_2	17.97	1	17.97	19.13	0.003 3**
X_3	116.66	1	116.66	124.20	<0.000 1**
X_1X_2	0.801 0	1	0.801 0	0.852 8	0.386 5
X_1X_3	0.893 0	1	0.893 0	0.950 7	0.362 0
X_2X_3	6.92	1	6.92	7.36	0.030 0*
X_1^2	110.72	1	110.72	117.88	<0.000 1**
X_2^2	306.04	1	306.04	325.82	<0.000 1**
X_3^2	634.48	1	634.48	675.49	<0.000 1**
残差 Residual	6.57	7	0.939 3		
总和 Total	1 340.96	16			

注:“**”表明该项极显著 ($P < 0.01$);“*”表明该项显著 ($P < 0.05$)。

Note: “**” means that the term is extremely significant ($P < 0.01$), “*” means that the term is significant ($P < 0.05$).

通过回归系数的检验得知,影响吸管入口负压的因素主次顺序依次为扇叶叶片个数、负压气室直径、扇叶叶片厚度。

绘制响应面如图 10,根据响应面图分析各因素对响应值的影响以及交互作用影响。图 10a 为扇叶个数为 9 个时,负压气室直径和扇叶叶片厚度对吸管入口负压交互作用的等高线图,扇叶叶片厚度一定时,随着负压气室直径的增加,吸管入口负压先上升后下降。负压气室直径一定时,随着扇叶叶片厚度的增加,吸管入口负压值同样先上升后下降。图 10b 为扇叶叶片厚度为 2 mm 时,负压气室直径和扇叶叶片个数对吸管入口负压交互作用的等高线图,负压气室直径一定时,随着扇叶叶片个数的增加,吸管入口负压先上升后下降。扇叶叶片个数一定时,随着负压气室直径的增加,吸管入口负压值同样先上升后下降。图 10c 为负压气室直径为 70 mm 时,扇叶叶片厚度和扇叶叶片个数对吸管入口负压交互作用的等高线图,扇叶叶片厚度一定时,随着扇叶叶片个数的增加,吸管入口负压先上升后下降。扇叶叶片个数一定时,随着扇叶叶片厚度的增加,吸管入口负压值

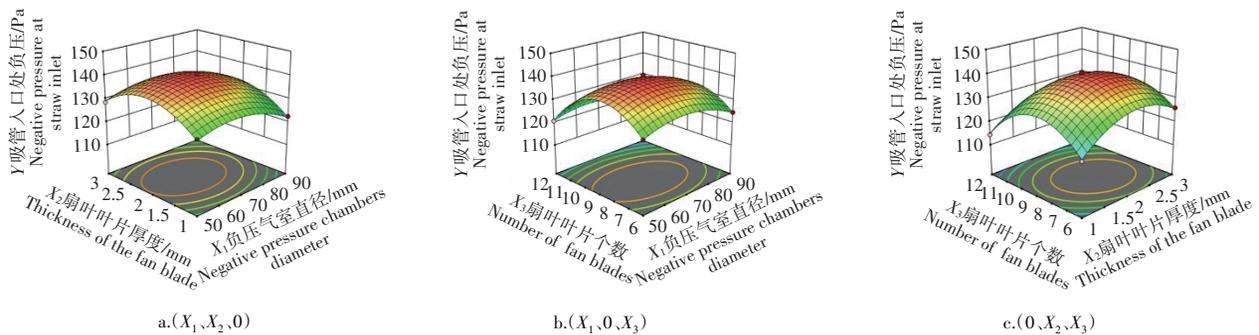


图10 试验因素对响应值Y的响应面

Figure 10 Response surface of the experimental factor to response Y

同样先上升后下降。

鉴于上述分析,为获取排种器的最佳结构参数,本研究采用多目标优化中的主目标函数法,以负压气室直径 X_1 、扇叶叶片厚度 X_2 、扇叶叶片个数 X_3 为优化变量,以吸管入口负压的加权平均值 Y 为性能指标。基于响应面分析结果与回归方程,建立数学模型进行优化求解:

$$\begin{cases} \max Y \\ \text{s.t.} \begin{cases} 50 \leq X_1 \leq 90 \\ 1 \leq X_2 \leq 3 \\ 6 \leq X_3 \leq 12 \end{cases} \end{cases} \quad (3)$$

3.1.3 仿真试验验证 为了验证响应曲面法预测的排种器关键结构参数组合的可靠性,基于响应曲面法获得的最优参数组合 ($X_1=66 \text{ mm}$, $X_2=2.1 \text{ mm}$, $X_3=9$) 进行三维流场重构与稳态仿真计算,仿真结果如图 11。由图 11 可知,模型截面的压强参数呈现明显梯度变化,其数值区间分布在 $-157.763 \sim 44.319 \text{ Pa}$ 。模型截面的气流速度参数为 $0 \sim 29.483 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。可以看出,经过结构及相关参数优化后的吸管入口处不仅形成了更显著的负压梯度,同时实现了气流速度的有效增强,这表明经过优化后的结构设计在改善气流参数方面有显著效果。使用 CFD-Post 中的表面积分计算功能计算出通过响应曲面优化后的吸管入口在扇叶转速 $1\ 500 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 时的负压为 143.32 Pa ,则响应面法与 CFD 法的误差为 2.19% ,误差值较小。

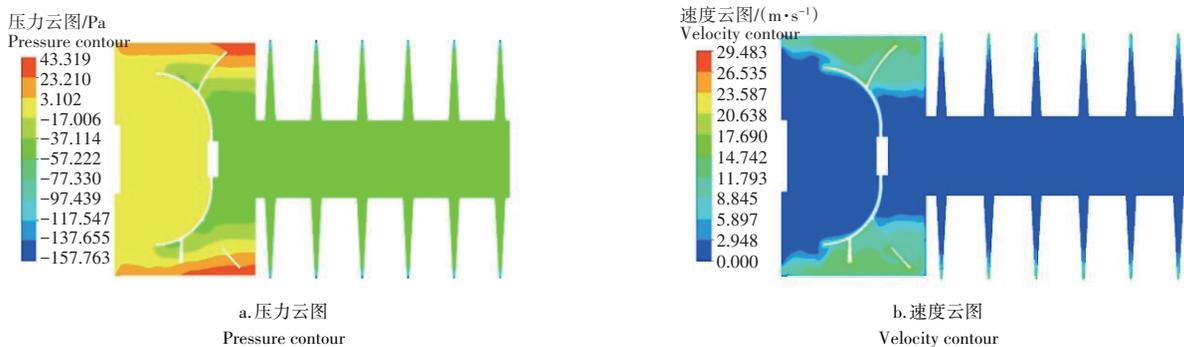
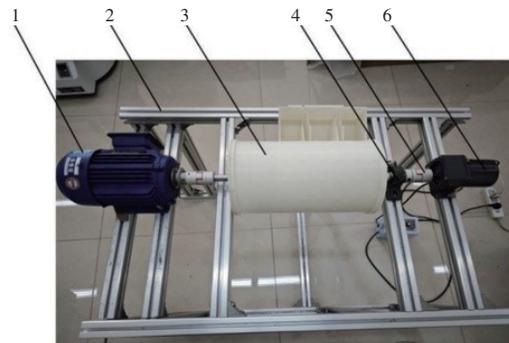


图 11 最优参数流场仿真模拟结果

Figure 11 Flow field simulation results at the optimal parameters

3.2 台架试验结果与分析

3.2.1 台架试验验证 采用 3D 打印技术将优化后的扇叶和滚筒结构打印后装至试验台架上(图 12),试验时将机器运行吸种功能,待运行稳定后,使用手持差压计(GM505)对排种器吸管入口负压进行测量。由 GM505 压力表测得型孔入口压力值为 -137.79 Pa ,而数值模拟的结果为 143.32 Pa 。则数值模拟试验结果与台架试验结果的误差为 4.01% ,由于 3D 打印精度限制,以及搭建台架时存在安装误差,所以可认为数值模拟试验结果准确可靠。



1. 普斯调速电机; 2. 台架; 3. 番茄育苗排种器; 4. 座轴承; 5. 联轴器; 6. 感应减速电机
1. PUS speed regulation motor; 2. Test bench; 3. Metering mechanism for tomato seedling raising; 4. Bearing seat; 5. Coupling; 6. Induction reduction motor

图 12 番茄育苗排种器试验台架

Figure 12 Test bench for metering mechanism of tomato seedling raising seeding machine

选取番茄种子品种为中蔬 4 号,该品种番茄种子千粒重为 3.07 g ,作为番茄育苗排种器台架试验的试验对象。对番茄种子进行杂质剔除预处理,随后将标准番茄种子注入种箱中。试验参考《温室蔬菜穴盘精密播种机技术条件》(NY/T1823—2009)选取合格率、重吸率和漏吸率作为评价番茄育苗播种流水线播种性能的指标^[23],其表达式为:

$$Q(\%) = \frac{n_1}{N} \times 100, R(\%) = \frac{n_2}{N} \times 100, L(\%) = \frac{n_3}{N} \times 100 \quad (4)$$

式中: Q 为试验中的合格率; R 为试验中的重吸率; L 为试验中的漏吸率; n_1 为试验中的单粒数; n_2 为试验中的多粒数; n_3 为试验中的漏吸数; N 为试验的种子总数, 本试验取 $N=360$ 。

验证台架试验数据见表 6, 在扇叶 $1\ 500\ \text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ 时初始排种器播种平均播种合格率为 75.22%, 平均重播率为 4.41%, 平均漏播率为 20.37%^[24]; 优化后排种器播种平均播种合格率为 90.52%, 平均重播率为 1.33%, 平均漏播率为 8.15%, 相对于初始排种器的播种合格率提升 15.30%, 平均重播率降低 3.08%, 漏播率降低 12.22%。从对比播种效果数据可以得出, 优化后的排种器性能更好。

表 6 播种效果试验结果

Table 6 Sowing performance test results

指标 Index	初始排种器 Initial seed metering device		优化后排种器 Optimized seed metering device	
	均值/%	标准差	均值/%	标准差
	Mean value	Standard deviation	Mean value	Standard deviation
合格率 Pass rate	75.22	1.19	90.52	1.28
重播率 Re-seeding rate	4.41	0.87	1.33	1.31
漏播率 Missseeding rate	20.37	0.54	8.15	0.39

3.2.2 工作参数优化试验 基于番茄育苗排种器流场仿真与物理结构特性分析研究证实: 影响排种器作业性能的核心因素主要有结构参数与工作参数两大类型。排种器的主要结构参数在上一节已经完成优化, 现对工作参数进行研究, 探究优化后排种器的最优工作参数, 探究工作参数对排种器作业性能的影响。

选取排种滚筒转速 A 为 $5\sim 12\ \text{r}\cdot\text{min}^{-1}$, 扇叶转速 B 为 $1\ 500\sim 2\ 400\ \text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ 。以合格率、重吸率和漏吸率为指标, 进行二因素三水平正交试验, 试验因素水平如表 7。

表 7 因素水平

Table 7 Factor and level

水平 Level	因素 Factor	
	$A/(\text{r}\cdot\text{min}^{-1})$	$B/(\text{r}\cdot\text{min}^{-1})$
1	5	1 500
2	8.5	1 950
3	12	2 400

由表 8 和表 9 可知, 滚筒转速对合格率和漏吸率的影响最为显著, 而扇叶转速对重吸率的影响较为显著。滚筒转速为 $8.5\ \text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ 、扇叶转速为 $1\ 950\ \text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ 时 (A2B2), 合格率、重吸率和漏吸率较为均衡。当滚筒转速为 $8.5\ \text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ 、扇叶转速为 $2\ 400\ \text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ 时 (A2B3), 合格率最高且漏吸率最低, 多粒率虽高于 A2B2, 但仍处于较低水平。综合考虑确定该排种器的最佳工作参数为滚筒转速 $8.5\ \text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ 、扇叶转速 $2\ 400\ \text{r}\cdot\text{min}^{-1}$, 此时合格率、重吸率、漏吸率分别为 93.92%、5.66% 和 0.42%。

表 8 试验结果

Table 8 Test results

序号 Serial number	A	B	$(A\times B)_1$	$(A\times B)_2$	$Q/\%$	$R/\%$	$L/\%$
1	1	1	1	1	83.32	4.52	12.16
2	1	2	2	2	87.81	5.30	6.89
3	1	3	3	3	84.31	9.65	6.04
4	2	1	2	3	90.37	1.36	8.27
5	2	2	3	1	91.53	3.96	4.51
6	2	3	1	2	93.92	5.66	0.42
7	3	1	3	2	84.11	3.73	12.16
8	3	2	1	3	84.59	5.07	10.34
9	3	3	2	1	81.88	8.29	9.83

表9 极差分析结果
Table 9 Results of range analysis

评价指标 Evaluation metrics		A	B	(A×B) ₁	(A×B) ₂
Q	k ₁	85.15	85.93	87.28	85.58
	k ₂	91.94	87.98	86.69	88.61
	k ₃	83.53	86.70	86.65	86.42
	R	8.41	2.04	0.63	3.04
R	k ₁	6.49	3.20	5.08	5.59
	k ₂	3.66	4.78	4.98	4.90
	k ₃	5.70	7.87	5.78	5.36
	R	2.83	4.66	0.80	0.69
L	k ₁	8.36	10.86	7.64	8.83
	k ₂	4.40	7.25	8.33	6.49
	k ₃	10.78	5.43	7.57	8.22
	R	6.38	5.43	0.76	2.34

注:极差R越大,说明该因素的水平改变对试验结果的影响越大。

Note: The larger the range R is, the greater the influence of the factor's level change on the experimental results.

4 讨论与结论

本研究通过CFD模拟与试验验证,显著提升了番茄排种器的性能。对影响吸管入口负压的3个因素进行正交优化试验,得出影响吸管入口负压的主次因素从大到小为扇叶叶片个数、负压气室直径、扇叶叶片厚度。响应曲面法获得最优参数组合为X₁=66 mm、X₂=2.1 mm、X₃=9。优化后的吸管入口负压较初始方案提升123.66%,达到143.32 Pa。这一关键参数的提升直接转化为优异的作业效果:在相同条件下,播种合格率从75.22%提升至90.52%;经工作参数优化(滚筒转速8.5 r·min⁻¹,扇叶转速2400 r·min⁻¹)后,合格率进一步提升至93.92%,同时重播率与漏播率显著降低。与依赖外部复杂气源的高性能方案相比,本研究通过优化一体式轴流气吸排种器,在结构大幅简化的同时实现了同等顶尖性能。这表明优化内部气动结构是提升轻量化排种器效能的有效途径。

本研究采用的CFD仿真、响应面法与台架试验相结合的技术路径,被证明高度可靠。响应面模型与CFD模拟误差为2.19%,数值模拟试验结果与台架试验结果的误差为4.01%,均处于工程可接受的合理范围。这种仿真优化-试验验证的闭环方法,能显著缩短研发周期,降低试错成本,为同类精密播种部件的设计提供了高效、可靠的分析范式。

参考文献:

[1] 汪李平,杨静,祝菊红,等.长江流域塑料大棚番茄栽培技术(1)[J].长江蔬菜,2025(2):15-18.
WANG L P,YANG J,ZHU J H,et al.Cultivation techniques of tomatoes in greenhouse in Yangtze River Basin(1)[J].Journal of Changjiang Vegetables,2025(2):15-18.

[2] 蔡静.气吸式穴盘育苗播种机自动控制系统的研究与设计[D].石河子:石河子大学,2013.
CAI J.Research and design on automatic air control system of tray seedling[D].Shihezi:Shihezi University,2013.

[3] 张宇乾,于淇,胡志诚,等.基于响应面法和CFD的轴流气吸式排种器优化设计[J].中国农机化学报,2024,45(8):14-19.
ZHANG Y Q,YU Q,HU Z C,et al.Optimization design of axial-flow suction seeder based on response surface methodology and CFD[J].Journal of Chinese Agricultural Mechanization,2024,45(8):14-19.

[4] ZHAO P F,GAO X J,SU Y,et al.Investigation of seeding performance of a novel high-speed precision seed metering device based on numerical simulation and high-speed camera[J].Computers and Electronics in Agriculture,2024,217:108563.

[5] 李金凤.小粒径蔬菜种子气吸式精密排种器的设计与试验研究[D].泰安:山东农业大学,2019.
LI J F.Design and experimental research of small-size vegetable seeds air suction precision seeder [D].Taian:Shandong Agricultural University,2019.

[6] 曾山,文智强,刘伟健,等.气吸式小粒蔬菜种子精量穴播排种器优化设计与试验[J].华南农业大学学报,2021,42(6):52-59.
ZENG S,WEN Z Q,LIU W J,et al.Optimal design and experiment of air-suction precision hole sowing seed metering device for small-grain vegetable seed[J].Journal of South China Agricultural University,2021,42(6):52-59.

[7] 梅玉茹,谢方平,王修善,等.番茄气吸滚筒式排种器的优化设计与试验[J].湖南农业大学学报(自然科学版),2022,48(6):730-736.
MEI Y R,XIE F P,WANG X S,et al.Optimization design and experiment of tomato pneumatic roller type seed-metering de-

- vice[J].Journal of Hunan Agricultural University (Natural Sciences),2022,48(6): 730-736.
- [8] 闫泽禹.番茄穴盘自动播种装置与漏播检测系统设计及关键技术研究[D].杨凌:西北农林科技大学,2023.
YAN Z Y.Design and key technology research of tomato plug tray automatic and miss seeding detection system[D].Yangling: Northwest A & F University,2023.
- [9] 赵鹏飞,邓敏,王孟盛,等.气力斜盘式小麦宽苗带匀播排种器设计与试验[J].农业机械学报,2025,56(7):38-47.
ZHAO P F,DENG M,WANG M S,et al.Design and experiment of pneumatic swash plate wheat wide-seedling-belt uniform sowing device[J].Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2025,56(7):38-47.
- [10] 潘婷,何瑞银,李毅念,等.水稻秧播种机气室流场仿真分析与优化[J/OL].南京农业大学学报,1-20[2025-08-27].https://link.cnki.net/urlid/32.1148.S.20250529.1435.002.
PAN T,HE R Y,LI Y N,et al.Simulation and optimization of the air chamber for nursery rice seeder[J/OL].Journal of Nanjing Agricultural University,1-20[2025-08-27].https://link.cnki.net/urlid/32.1148.S.20250529.1435.002.
- [11] 廖宜涛,郑娟,廖庆喜,等.正负气压组合管针式西洋参集排器设计与试验[J].农业机械学报,2019,50(3):46-57.
LIAO Y T,ZHENG J,LIAO Q X,et al.Design and experiment of positive and negative pressure combined tube-needle centralized seeding device for American ginseng[J].Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2019,50(3): 46-57.
- [12] 曹阳,周悦,张亚男,等.气吸滚筒式穴盘育苗生产线的研制与试验[J].农机化研究,2025,47(10):130-137.
CAO Y,ZHOU Y,ZHANG Y N,et al.Design and test of a vacuum-cylinder type tray seedling production line[J].Journal of Agricultural Mechanization Research,2025,47(10):130-137.
- [13] 张红欣,张宇乾,韩晨,等.吸管滚筒式茄子排种器的设计与试验[J].农机化研究,2025,47(7):166-170.
ZHANG H X,ZHANG Y Q,HAN C,et al.Design and experiment of straw roller type eggplant seed metering device[J].Journal of Agricultural Mechanization Research,2025,47(7):166-170.
- [14] 姬晓羽,黄博,肖敏,等.机械絮凝池组合式搅拌器在污水处理中的应用[J].山西建筑,2024,50(23):142-145.
JI X Y,HUANG B,XIAO M,et al.Application of combined agitator in mechanical flocculation tank on wastewater treatment [J].Shanxi Architecture,2024,50(23):142-145.
- [15] 董敏,夏晨亮,李想.组合桨搅拌槽内部流场及混合时间数值模拟[J].排灌机械工程学报,2019,37(1):43-48.
DONG M,XIA C L,LI X.Numerical simulation of internal flow field and mixing time in stirred tank with combined paddles [J].Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering,2019,37(1):43-48.
- [16] LI W,JI L L,SHI W D,et al.Numerical investigation of internal flow characteristics in a mixed-flow pump with eccentric impeller[J].Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering,2020,42(9):458.
- [17] 池丹丹,杜雄,赵晓顺,等.基于计算机仿真的气吸式谷子精量排种器设计[J].江苏农业科学,2018,46(11):183-187.
CHI D D,DU X,ZHAO X S,et al.Design of pneumatic millet precision seed-metering device based on simulation[J].Jiangsu Agricultural Sciences,2018,46(11):183-187.
- [18] LEE J,LEE H,PARK H,et al.Design optimization of a vane type pre-swirl nozzle[J].Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics,2021,15(1):164-179.
- [19] 刘海,廖宜涛,王磊,等.小白菜正负气压组合式精量排种器设计与试验[J].农业机械学报,2022,53(10):54-65.
LIU H,LIAO Y T,WANG L,et al.Design and experiment of positive and negative pressure combination precision metering device for pakchoi[J].Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2022,53(10):54-65.
- [20] 姚敏,李毅念,杜世伟,等.基于杂交水稻种子下落撞击特性的裂颖籽粒识别方法研究[J].南京农业大学学报,2019,42(5):946-955.
YAO M,LI Y N,DU S W,et al.Research on recognition method of hybrid crack-glume rice seeds based on falling impact characteristics[J].Journal of Nanjing Agricultural University,2019,42(5):946-955.
- [21] ZHAO B J,HOU D H,CHEN H L,et al.Optimization design of a double-channel pump by means of orthogonal test,CFD, and experimental analysis[J].Advances in Mechanical Engineering,2014,6:545216.
- [22] LIU Y,PAN W X,LONG Z W.Optimization of air supply parameters for stratum ventilation based on proper orthogonal decomposition[J].Sustainable Cities and Society,2021,75:103291.
- [23] 中华人民共和国农业部.温室蔬菜穴盘精密播种机技术条件:NY/T 1823—2009[S].北京:中国农业出版社,2010.
Ministry of Agriculture of the People's Republic of China.Specifications for hole disk type precise seeder of greenhouse vegetable:NY/T 1823—2009[S].Beijing:China Agriculture Press,2010.
- [24] 张海东,于淇,张宇乾,等.基于RSM和CFD的轴流气吸滚筒式排种器型孔负压优化[J].沈阳农业大学学报,2025,56(3):116-125.
ZHANG H D,YU Q,ZHANG Y Q,et al.Optimization of negative pressure in mold hole of axial flow air suction seed metering drum based on RSM and CFD[J].Journal of Shenyang Agricultural University,2025,56(3):116-125.