doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2025.07.003

气力斜盘式小麦宽苗带匀播排种器设计与试验

赵鹏飞[1]　邓　敏[1]　王孟盛[1]　王择一[1]　陀金阳[1]　刘正道[1,2]　黄玉祥[1,2]　闫小丽[1,2]

(1.西北农林科技大学机械与电子工程学院,陕西杨凌 712100;
2.农业农村部保护性耕作(黄河流域)机械化科研基地,陕西杨凌 712100)

摘要:小麦宽苗带匀播是提高小麦单产的有效途径,针对现有小麦排种器用于宽苗带播种存在种子均匀性差、苗带宽度不够等问题,设计了一种气力斜盘式小麦宽苗带匀播排种器。建立了充种、携种和投种过程中小麦种子动力学模型,明确了影响排种性能的主要因素。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。仿真试验结果表明,当型孔直径为 1.91 mm、型孔类型为柱型孔、负压抽气口直径为 32.18 mm 和排种盘倾斜角为 20°时,型孔内流速和型孔两侧压强差处于利于排种状态,种群扰动效果较好;通过台架试验确定了最佳工作参数组合为工作转速 30 r/min、吸种负压 4 500 Pa,其各行排量一致性变异系数(RCV)、总排量一致性变异系数(TCV)、排种均匀性变异系数(SUV)分别为 2.04%、1.45%、9.87%,满足小麦宽苗带精量播种要求。研究结果可为小麦宽苗带匀播排种器的设计与应用提供技术支撑。

关键词:小麦;宽苗带;排种器;气力斜盘式;CFD-DEM;参数优化

中图分类号:S223.2　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2025)07-0038-10　　**OSID**:

Design and Experiment of Pneumatic Swash Plate Wheat Wide-seedling-belt Uniform Sowing Device

ZHAO Pengfei[1]　DENG Min[1]　WANG Mengsheng[1]　WANG Zeyi[1]　TUO Jinyang[1]
LIU Zhengdao[1,2]　HUANG Yuxiang[1,2]　YAN Xiaoli[1,2]

(1. *College of Mechanical and Electronic Engineering*, *Northwest A&F University*, *Yangling*, *Shaanxi* 712100, *China*
2. *Scientific Research Base for Conservation Tillage Mechanization* (*Yellow River Basin*), *Ministry of Agriculture and Rural Affairs*, *Yangling*, *Shaanxi* 712100, *China*)

Abstract: Wide-seedling-belt uniform sowing is an effective approach to improve wheat yield per unit area. To addresses the issues of poor uniformity and insufficient seedling belt width in existing wheat seeders for wide-seedling-belt, a pneumatic swash plate wheat wide-seedling-belt uniform sowing device was designed. Through theoretical analysis, a mechanical model of the seeding plate during the filling, carrying, and throwing processes was developed, which helped to identify and resolve the key factors influencing the performance of the seed metering device. Simulation tests and bench tests were conducted to determine the optimal structural and working parameters of the seed metering device. The results of the CFD simulation tests indicated that under the optimal structural parameters, specifically a hole diameter of 1.91 mm, a cylindrical hole type, and a negative-pressure suction port diameter of 32.18 mm, the flow velocity within the holes and the pressure difference across the holes were in an optimal state for seeding. The CFD-DEM coupling simulation tests further revealed that when the tilt angle of the seeding plate was set at 20°, the device exhibited an excellent population disturbance effect and minimal seed migration resistance. Furthermore, the bench tests determined that the optimal combination of working parameters was a rotational speed of 30 r/min and a suction negative pressure of 4 500 Pa. Under these conditions, the row consistency variation coefficient (RCV), total consistency variation coefficient (TCV), and sowing uniformity variation coefficient (SUV) of each row were 2.04%, 1.45%, and 9.87%, respectively. These values met the requirements for wheat wide-seedling-belt uniform sowing.

收稿日期:2025-05-10　修回日期:2025-05-22

基金项目:陕西省重点研发计划项目(2024PT-ZCK-52)

作者简介:赵鹏飞(1995—),男,博士生,主要从事现代农业装备与技术研究,E-mail:2022060440@nwafu.edu.cn

通信作者:黄玉祥(1979—),男,教授,博士生导师,主要从事现代农业装备与技术研究,E-mail:hyx@nwsuaf.edu.cn

The findings can provide technical support for the design and application of wheat wide-seedling-belt uniform seeders.

Key words: wheat; wide-seedling-belt; seed metering device; pneumatic swash plate type; CFD – DEM; parameter optimization

0　引言

目前小麦播种方法主要以传统密集条播为主，种子呈线性紧密排列，易产生局部扎堆现象，影响小麦群体发育，限制单产提升[1-3]。为优化小麦种子在田间分布情况，提高单产，相关学者提出了宽苗带精量匀播技术，该技术通过扩大播种宽度、增大行距、提高播种均匀性等方式，优化种群分布，理论和实践证明其具有较好的增产效果[4-5]。

精量排种器是播种机的核心部件，也是实现宽苗带播种的关键，按工作原理可分为机械式和气力式两种[6]。目前机械式排种器研究主要包括槽轮或窝眼结构优化，以减少排种脉动，提高排种均匀性[7-10]。气力式排种器在避免机械式排种器结构问题的同时，以适用性强和可靠性高的优点得到了广泛关注，小麦气力式排种器主要包括垂直圆盘式和滚筒式两种[11-12]。垂直圆盘式排种器可实现单行精量排种，主要用于小麦小区播种[13]；滚筒式排种器种子依靠自身重力和气力辅助作用吸附在窝眼内部，可实现多行精量排种，但受窝眼结构、气室非线性变化等影响，排种均匀性仍有待提高[14]。

针对上述问题，基于小麦宽苗带播种技术要求，本文提出一种气力斜盘式小麦宽苗带匀播排种器设计方案，拟通过理论分析构建排种盘充种、携种和投种过程中的力学模型，采用仿真试验对排种器关键结构参数、作业参数进行优化，以台架试验进一步确定实际最优工况。

1　结构与工作原理

1.1　农艺要求

小麦传统密集条播为等行距 150 ~ 180 mm，苗带宽度为 30 ~ 50 mm，播种后小麦种子易扎堆，种群分布不合理，影响小麦生长发育。小麦宽苗带匀播技术可以有效避免上述问题，将行距扩大到 200 ~ 260 mm，苗带宽度扩大到 80 ~ 120 mm[15-16]。WANG 等[17]研究表明，小麦宽幅播种能够利用作物生长的边缘优势，具有明显的增产效果。通过调研陕西省关中地区小麦种植模式，确定小麦宽苗带匀播农艺要求如图 1 所示。

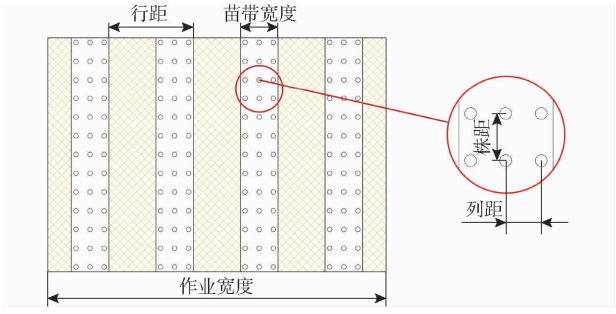

图 1　农艺要求示意图

Fig. 1　Schematic of agronomic requirements

1.2　结构和工作原理

气力斜盘式小麦宽苗带匀播排种器结构如图 2 所示，主要由前壳体、种箱、排种盘、排种轴、后壳体等组成。其中，后壳体设有供空气流通的导管，并与排种盘间形成密封气室；排种轴与排种盘相连，通过电机驱动；排种盘相对于竖直平面有一定的倾角，且布有 3 排均匀分布的型孔；前壳体上布置 3 个相邻的出种口，连接投种管，出种口与排种盘上 3 排型孔对应。

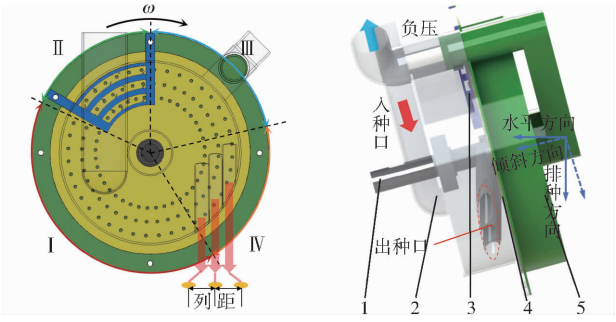

图 2　气力斜盘式小麦宽苗带匀播排种器结构示意图

Fig. 2　Structure diagram of wheat wide seedling belt pneumatic swash plate seed metering device

1. 排种轴　2. 前壳体　3. 清种装置　4. 排种盘　5. 后壳体

Ⅰ. 充种区　Ⅱ. 清种区　Ⅲ. 携种区　Ⅳ. 投种区

气力斜盘式小麦宽苗带匀播排种器工作原理如下：种子由种箱连续进入充种室内部并形成堆积，带有一定倾角且有多排型孔的排种盘开始旋转，风机产生的负压气流通过抽气管进入气室负压区；气室内部通过隔板将负压区域与常压区域隔开，随着排种盘的旋转，多排型孔进入充种区域并在负压气流和种群挤压的共同作用下逐一吸附离散的小麦种子；种子在负压气流的作用下随排种盘同步转动，经过清种区域时，型孔上多余的种子被清种装置清除，随后抵达投种区域；负压气流被隔板隔断，种子在自重的作用下逐一脱离种盘，分别进入对应的投种管，最终在种床内呈 3 排均匀分布（总宽度 8 ~ 12 cm）。

1.3 关键结构设计

1.3.1 排种盘设计

排种盘是排种器的核心工作部件,其结构和参数决定了种子在排种过程中的受力、气室负压等,主要参数包括排种盘直径、型孔尺寸、型孔分布圆直径及倾斜角等。排种过程充种所用时间为[18]

$$t=\frac{30\theta}{\pi n} \tag{1}$$

式中 t——充种时间,s

θ——充种区域角度,rad

n——排种盘转速,r/min

由式(1)可知,充种时间仅与充种区域弧度和转速有关。当排种盘转速一定时,种子经过充种区域的时间越长,种子与型孔的接触时间也越长,充种效果则越好,而充种区域弧度与排种盘直径成正比。排种盘直径直接影响排种器整体尺寸结构,过大的排种盘直径会使气室内部流场的体积增大,导致风机工作负载增大。综合考虑本研究排种盘多排型孔设计需求及小麦种子流动性等因素,选取排种盘直径(排种盘正向放置时边缘直径)为 200 mm。

排种盘型孔直径与种子被吸附所需负压有关[19],型孔直径应与种子尺寸匹配,以西农 585(河南金粒种业有限公司)小麦种子为例,型孔直径经验公式为

$$D=(0.64\sim0.66)W \tag{2}$$

式中 D——型孔直径,mm

W——种子平均宽度,mm

测得宽度为 2.70 ~ 3.20 mm,计算得型孔直径为 1.70 ~ 2.10 mm。

排种器型孔数量直接影响播量,当播种机前进速度和播种行距一定时,型孔数量越少,转速越快,型孔与种子接触时间越短,充种效果降低。型孔数量越多,充种持续时间变长,可提高充种效果,但相邻型孔间气流扰乱,降低单个型孔负压吸力,出现漏播现象,型孔数量 N 计算公式为

$$N=\frac{6\,000Qv_c(1-\varepsilon)F}{3qn} \tag{3}$$

式中 Q——播种量,kg/hm^2

v_c——播种机作业速度,m/s

ε——地轮滑移率,%

F——播种行距,取 0.28 m

q——小麦种子千粒质量,取 48.96 g

设置播种机作业速度为 1.11 m/s,工作转速为 35 r/min,地轮滑移率取 0.07,计算取整后排种盘单排型孔数量为 40,各排型孔分布圆半径计算公式为

$$R_x=\frac{10^3v_x}{\omega}\quad(x=1,2,3) \tag{4}$$

式中 v_x——各排型孔处线速度,m/s

ω——排种盘角速度,rad/s

R_x——型孔处分布圆半径,m

型孔位置与排种盘边缘距离一般为 15 ~ 20 mm。型孔分布圆内直径越大,充种过程种子在种箱中位置越靠下,克服种群阻力所做的功就越多,所需吸种负压越大,因此选择 3 排型孔分布圆半径分别为 $R_1=65$ mm,$R_2=75$ mm,$R_3=85$ mm。

1.3.2 气室设计

排种器气室内部各个位置真空度需保持一致,即每一个型孔处的吸力应相等[20]。根据气体流动原理,气室内部气体流速越快,气室内负压越低[21-22]。综合考虑排种器的结构和工作原理,气室结构如图 3 所示,气室类型为马蹄形,A 处为负压入口,B 处为负压区域,C 处为常压区域,R_a 为内封闭圆环半径,R_b 为气室外环半径,排种区域的负压由隔板隔开。为增大气室负压区域的体积,取无压区域角度 $\theta=45°$,参考排种盘直径和型孔分布圆直径,取 $R_a=55$ mm,$R_b=110$ mm。

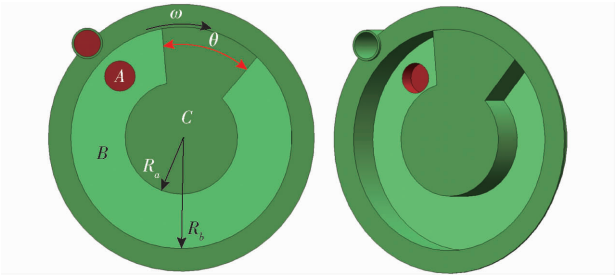

图 3 气室结构图

Fig. 3 Air chamber structure diagram

2 排种过程动力学分析

2.1 充种环节力学分析

充种环节决定型孔抓取种子能力,直接影响排种合格指数。在充种过程中,小麦种子主要受到负压吸力、自身重力、其他种子和排种盘间的挤压力、摩擦力及离心力作用,种子被吸附在型孔上的受力分析如图 4 所示。

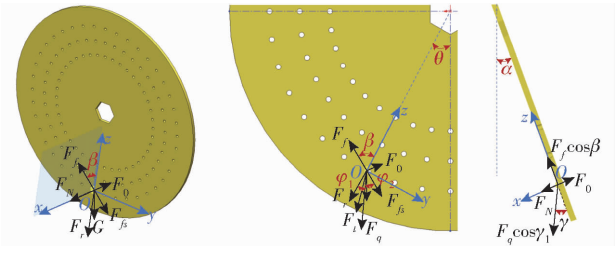

图 4 充种过程受力分析

Fig. 4 Force analysis of seed-filling process

根据种子吸附姿态,得出充种阶段型孔有效吸附种子边界条件为[23]

$$(F_q\cos\gamma-\lambda F_N\cos\beta)C=\left(P_0\frac{\pi d^2}{4}-F_q\cos\gamma\sin\theta-F_N\right)\frac{d}{2} \tag{5}$$

式中　F_q——竖直方向合外力和种子间摩擦阻力的合力，N

F_N——排种盘对种子的支持力，N

P_0——型孔负压吸力，N

C——小麦种子平均宽度，mm

d——型孔直径，mm

λ——种子与排种盘之间的摩擦因数

β——排种盘对种子的摩擦力与 Z 轴夹角，(°)

γ——F_q与平面夹角，(°)

田间工作过程中受振动冲击等因素的影响，因此需要引入排种器运行可靠性系数 K_1（取 1.6 ~ 2.0）和充种可靠性系数 K_2（取 1.8 ~ 2.0）[24]，整理可得吸种临界负压为

$$P_0=\frac{8K_1K_2}{\pi D^3}\left[\left(C\cos\theta+\frac{D}{2}\sin\theta\right)\cos\gamma\cdot\sqrt{G^2+\frac{G^2v^4}{g^2R_x^2}+2\frac{G^2v^2}{gR_x}\cos\varphi_1+F_{fs}^2+2F_{fs}\sqrt{G^2+\frac{G^2v^4}{g^2R_x^2}+2\frac{G^2v^2}{gR_x}\cos\varphi_1\cos\varphi_2}}+F_N\left(\frac{D}{2}-C\lambda\cos\beta\right)\right] \tag{6}$$

式中　G——种子重力，N

λ_s——种子与种子之间的动摩擦因数

F_{fs}——种子间摩擦阻力，N

v——种子速度，m/s

g——重力加速度，m/s^2

ζ——小麦种子的自然休止角，(°)

α——排种盘倾斜角度，(°)

φ_1——惯性离心力与重力夹角，即种子所处角度，(°)

φ_2——竖直方向合外力与种子间摩擦阻力夹角，(°)

由式(6)可知，当 $\cos\gamma$、$\cos\varphi_1$ 和 $\cos\varphi_2$ 取最大值且 $\cos\beta$ 取最小值，即 γ、φ_1 和 φ_2 为 0°，β 为 90°时，临界负压最大，种子位于排种盘正下方。在排种盘转速一定的情况下，型孔分度圆直径越大，种子的线速度越大，型孔吸附单粒种子的时间越短，所需负压越大。在工作参数一定的前提下，吸附种子所需临界负压和排种盘倾斜角相关。当 $\alpha=0°$，充种所需要的临界负压最小，当 $\alpha=90°$时，充种所需要临界负压最大。受斜面支持力和种群挤压影响，排种盘倾斜角过小，受种群重力作用，种子运移阻力大幅增加，被吸附种子有脱离型孔的倾向；排种盘倾角过大，盘面对种群扰动不足，种群平均动能过低，充种性能降低。因此，在充种区域，吸附种子所需临界负压与排种盘倾斜角、型孔直径、小麦种子物理特性及排种器工作参数有关。

2.2　携种环节力学分析

被吸附的种子摆脱种群进入携种区域后，种子在负压吸附作用下随排种盘转动，种子仅受重力、负压吸附力和排种盘支持力作用，受力分析如图 5 所示。

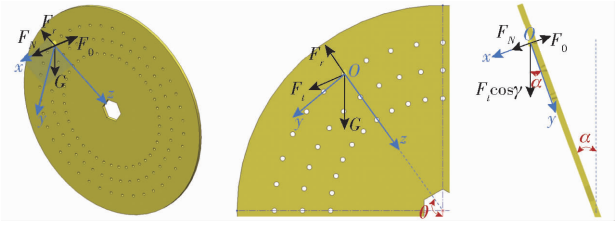

图 5　携种阶段受力分析

Fig. 5　Force analysis of seed-carrying process

根据受力分析建立种子在携种区受力方程

$$F_t=\sqrt{G^2+F_r^2-2GF_r\cos\varphi_1} \tag{7}$$

式中　F_t——竖直方向合外力，N

F_r——惯性离心力，N

若种子顺利通过携种区域，则须满足边界条件

$$(F_0-F_N-F_t\cos\gamma\sin\alpha)D=2F_tC\cos\gamma\cos\alpha \tag{8}$$

式中　F_0——型孔负压吸附力，N

引入运行可靠性系数 K_1 和吸种可靠性系数 K_2 后得到

$$P_0=\frac{8K_1K_2}{\pi D^3}\left[\frac{D}{2}F_N+\left(\frac{D}{2}\sin a+C\cos a\right)\cos\gamma\sqrt{G^2+\frac{G^2v^4}{g^2R_x^2}+2\frac{G^2v^2}{gR_x}\cos\theta}\right] \tag{9}$$

由式(9)可知，种子在携种区的临界负压与种子物理特性、排种盘倾斜角、排种盘转速、型孔分布圆直径等因素有关。当 $\cos\gamma=-1$ 且 $\cos\theta=-1$ 时，种子位于排种盘最上方，G 与 F_r在竖直方向上共线，种子在携种区临界负压值达到最小。在携种区域内种子到达最高点之前，$\cos\theta$ 大于 0 且不断增大，$\cos\gamma$ 逐渐减小，即 $\theta=180°$时临界负压达到最小值；$\theta=270°$时临界负压达到最大值，因此投种区域设计在 $\theta=270°$之后的位置。

2.3　投种环节力学分析

在投种环节，气室内负压气流被隔板阻断，气室对种子的负压吸力消失，此时种子仅受重力作用。当排种盘角速度为 ω 时，种子进入导种管的瞬时速度为 $v=\omega R_x$，方向沿转动的切线方向，脱离排种型孔做初速度为 ωR_x的匀加速直线运动。其位移方程为

$$S = \omega R_x \cos\theta + \frac{g t_1^2}{2} \tag{10}$$

式中 S——种子竖直方向下落位移,mm

t_1——种子下落时间,s

综上可知,排种盘转速和型孔分布圆直径是影响投种环节的重要因素。

3 仿真试验

3.1 仿真模型建立

采用 Fluent 软件对型孔内流速与型孔两侧压强差进行分析,以探究最优的结构参数,并以 Fluent 和 EDEM 耦合仿真试验探究种群平均动能和种子移动阻力的影响[25-26]。流体求解模型采用 RNG $k-\varepsilon$ 模型,选取 SIMPLE 算法求解,计算时间步长设置为 0.001 s,步数为 6 000,每个时间步最大迭代次数为 50。

在 EDEM 导入排种器模型后将建立的种子模型填充入排种器,如图 6a 所示;对排种器内部流体域简化后进行网格划分,如图 6b 所示,小麦种子与排种器间力学参数如表 1 所示[27]。

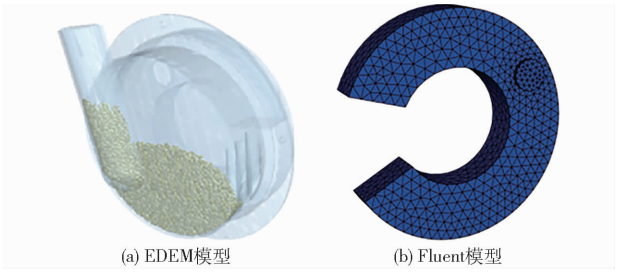

图 6 仿真模型

Fig. 6 Simulation models

表 1 仿真参数

Tab. 1 Simulation parameters

类型	参数	数值
种子	颗粒密度/(kg·m^{-3})	1 050
	颗粒三轴尺寸/(mm×mm×mm)	7.00×3.20×3.20
	颗粒泊松比	0.42
	颗粒剪切模量/Pa	5.01×10^8
不锈钢	材料密度/(kg·m^{-3})	7 900
	材料泊松比	0.30
	材料剪切模量/Pa	7.9×10^8
树脂	材料密度/(kg·m^{-3})	1 060
	材料泊松比	0.39
	材料剪切模量/Pa	8.96×10^8
颗粒与材料间接触	颗粒与不锈钢静摩擦因数	0.50
	颗粒与不锈钢恢复系数	0.50
	颗粒与不锈钢动摩擦因数	0.01
	颗粒与树脂静摩擦因数	0.75
	颗粒与树脂恢复系数	0.30
	颗粒与树脂动摩擦因数	0.01

3.2 排种盘结构对流场分布影响研究

3.2.1 试验设计

为分析排种器结构对流场流场分布的影响,选取型孔直径、型孔类型、抽气口直径为试验因素,以型孔内平均流速(Y_1)和型孔两侧压强差(Y_2)为试验指标,进行三因素三水平正交试验。其中,型孔直径为 1.8 ~ 2.0 mm,型孔类型分别为锥型孔、柱型孔、柱-锥型孔(图 7)。抽气口面积应该与型孔总面积相近,根据型孔直径梯度,计算出负压抽气口直径梯度为 20、30、40 mm。试验因素编码如表 2 所示。

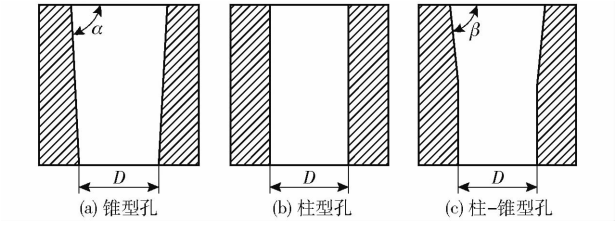

图 7 型孔类型

Fig. 7 Hole types

表 2 正交试验因素编码

Tab. 2 Orthogonal experimental factors codes

编码	因素		
	型孔直径/mm	型孔类型	抽气口直径/mm
-1	1.8	锥型孔	20
0	1.9	柱型孔	30
1	2.0	柱-锥型孔	40

3.2.2 试验结果与分析

试验结果如表 3 所示,A、B、C 为因素编码值。利用 Design-Expert 软件对试验数据进行方差分析,结果如表 4 所示。

表 3 结构优化试验方案及结果

Tab. 3 Plan and results from structural optimization experiment

序号	因素			Y_1/(m·s^{-1})	Y_2/Pa
	A	B	C		
1	-1	-1	0	62.68	2 670.00
2	1	-1	0	61.70	2 859.50
3	-1	1	0	66.47	2 617.80
4	1	1	0	61.90	2 700.40
5	-1	0	-1	63.75	2 602.40
6	1	0	-1	61.30	2 683.70
7	-1	0	1	64.85	2 442.20
8	1	0	1	66.30	2 634.20
9	0	-1	-1	62.59	2 814.60
10	0	1	-1	63.37	2 620.90
11	0	-1	1	64.48	2 640.20
12	0	1	1	66.88	2 631.20
13	0	0	0	65.85	2 805.90
14	0	0	0	66.52	2 798.50
15	0	0	0	65.95	2 805.20
16	0	0	0	65.32	2 799.30
17	0	0	0	66.25	2 806.40

表 4　方差分析结果

Tab. 4　Results of analysis of variance

方差来源	Y_1		Y_2	
	F	P	F	P
模型	12.00	<0.01 **	460.29	<0.01 **
A	10.58	0.02 *	793.35	<0.01 **
B	12.67	<0.01 **	457.12	<0.01 **
C	32.61	<0.01 **	372.66	<0.01 **
AB	6.36	0.04 *	60.96	<0.01 **
AC	7.50	0.03 *	65.37	<0.01 **
BC	1.29	0.29	181.97	<0.01 **
A^2	19.57	<0.01 **	705.50	<0.01 **
B^2	13.09	<0.01 **	0.57	0.48
C^2	1.28	0.30	1 377.28	<0.01 **
失拟项	4.45	0.09	6.11	0.06

注：** 表示极显著（$P<0.01$）；* 表示显著（$0.01\leqslant P<0.05$）。

由表 4 可知，回归模型 P 小于 0.01，模型拟合度极显著。B、C、A^2、B^2 对型孔内流速 Y_1 影响极显著；A、AB、AC 对型孔内流速 Y_1 影响显著；BC 和 C^2 对型孔内流速 Y_1 无显著影响。除平方项 B^2 对型孔两侧压强差 Y_2 无显著影响外，其他因素及交互项对型孔两侧压强差 Y_2 均有极显著影响，剔除影响不显著的交互项和平方项后，回归方程为

$$Y_1 = 65.89 - 0.82A + 0.90B + 1.44C - 0.90AB + 0.98AC - 1.54A^2 - 1.26B^2 \quad (11)$$

$$Y_2 = 2\,803.06 + 68.17A - 51.75B - 46.73C - 26.73AB + 27.68AC + 46.17BC - 88.62A^2 - 123.82C^2 \quad (12)$$

3.2.3　响应面分析与参数优化

型孔内流速的响应曲面如图 8 所示，当型孔类型一定时（图 8a），型孔内流速随型孔直径的增大呈先增大后减小的趋势。型孔类型间差异显著，柱型孔与柱-锥型孔具有更高的流速，分析认为气流进入柱型孔或柱-锥型孔后，流动方向相对单一，与型孔壁面夹角较小，气流受阻碍较小，能量损失相对较小，可以保持较高流速。而气流在锥型孔内流动时，气流与型孔壁面夹角变化较大，气流受到阻碍较大，能量损失相对较大，从而导致型孔流速降低。当抽气口直径一定时（图 8b），型孔内流速随型孔直径的增大呈先增大后减小趋势。但不同抽气口直径差异较小，型孔直径是影响流速的主要因素，型孔直径偏大会导致气流扩散，在流量一定的情况下，过流面积增大，流速降低。此外，型孔直径增大时，气流与型孔壁面摩擦面积增大，且在型孔内流动路径变长，气流能量损失增加，使流速降低。

型孔两侧压强差响应曲面如图 9 所示，当型孔类型一定时（图 9a），压强差随型孔直径的增大呈先增大后减小趋势；锥型孔时压强差最大，分析认为柱型孔与柱-锥型孔气流相对平稳，气流流线较为规则，而锥型孔容易产生气流紊乱和涡流，导致能量损失增大，从而使型孔两侧压强差增大。当抽气口直径一定时（图 9b），压强差随型孔直径的增大呈先增大后减小趋势，这与伯努利原理相关，流速小则压强较大，所以型孔吸气侧的压强相对较高，与另一侧的压强差就会减小。抽气口直径较小，气流通过型孔时阻力较大，能量损失较大，使吸气侧压强更低，从而增大型孔两侧的压强差；而较大直径的抽气口气流通过相对顺畅，能量损失较小，吸气侧压强相对较高，压强差也就较小。当负压抽气口直径一定时（图 9c），压强差随型孔类型的变化呈现不同的现象，在锥型孔时压强差最大，也是因锥型孔易产生气流紊乱和涡流，使排种盘两侧压强差增大。根据实际工作条件及模型分析结果，在指定的边界条件下，对所建立的回归模型进行多因子优化，设定优化约束条件为

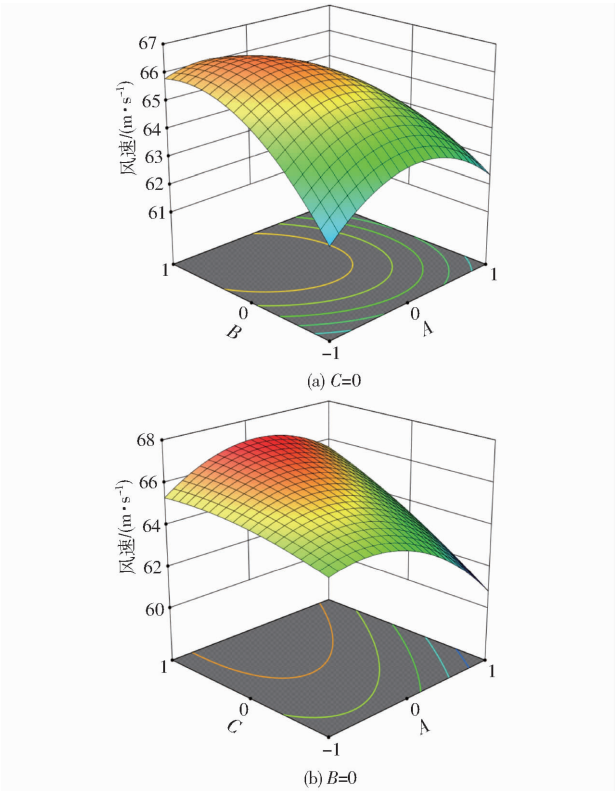

图 8　因素交互作用对型孔内流速的影响

Fig. 8　Surface drawings of interaction effect on velocity

$$\begin{cases} \max\ Y_1(A,B,C) \\ \max\ Y_2(A,B,C) \\ \text{s.t.} \begin{cases} -1\leqslant A\leqslant 1 \\ -1\leqslant B\leqslant 1 \\ -1\leqslant C\leqslant 1 \end{cases} \end{cases} \quad (13)$$

采用 Design-Expert 软件中的 Optimization 模块进行参数优化求解，最优工作条件为型孔直径 1.91 mm、型孔类型为柱型孔、抽气口直径为

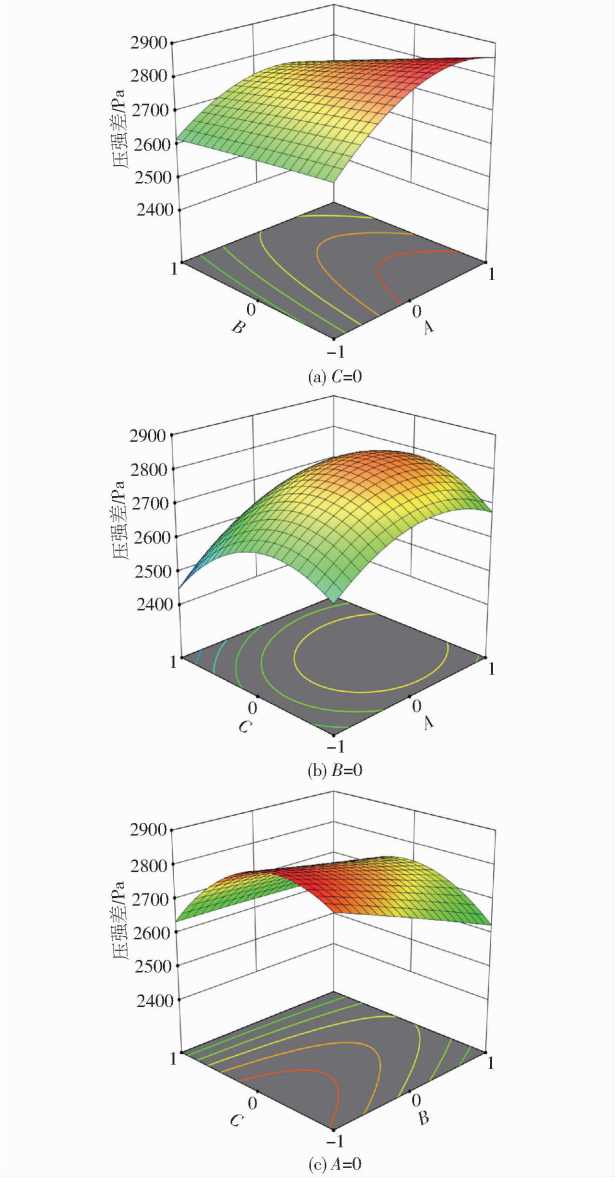

图 9 交互因素对型孔两侧压强差的影响

Fig. 9 Surface drawing of interaction effect on pressure differentials

32.18 mm,最优条件下型孔内流速和型孔两侧压强差分别为 66.33 m/s 和 2 785.89 Pa。

3.3 不同倾斜角对排种性能影响研究

3.3.1 试验设计

通过 Fluent 仿真确定排种盘最优结构后,仍需明确不同倾斜角对排种器作业性能的影响规律,以种群平均动能和运移阻力变化为评价指标,选取 10°、20°和 30° 3 种不同倾斜角的排种盘进行仿真试验,设置排种盘工作转速为 35 r/min,总仿真时间为 6 s。仿真结束后进入后处理界面,利用 Grid Bin Group 功能,挑选排种器稳定工作时间段输出对应的试验数据。

3.3.2 试验结果与分析

不同倾斜角排种盘种群平均速度与时间关系曲线如图 10 所示,倾斜角对种群扰动存在显著影响,种群平均速度由大到小分别为 10°、20°、30°,即排种盘倾斜角越大,排种盘对种子支持力在竖直方向的分力越大,凭借支持力种子能够完成类圆周运动,种群平均速度越大,与理论分析结果越一致。

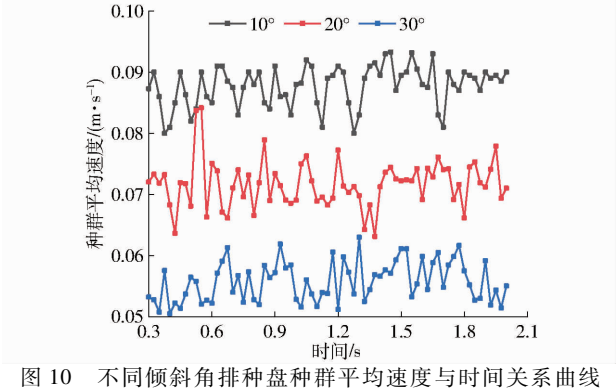

图 10 不同倾斜角排种盘种群平均速度与时间关系曲线

Fig. 10 Relationship curve between average speed and time of seeds

选取种子经过充种区域的稳定工作区间进行运移阻力研究,记种子模型在第 3.3 秒开始进入充种区域,并在第 4.1 秒离开种群进入携种区域,排种盘在旋转过程中模型与种子颗粒之间的运移阻力如图 11 所示。

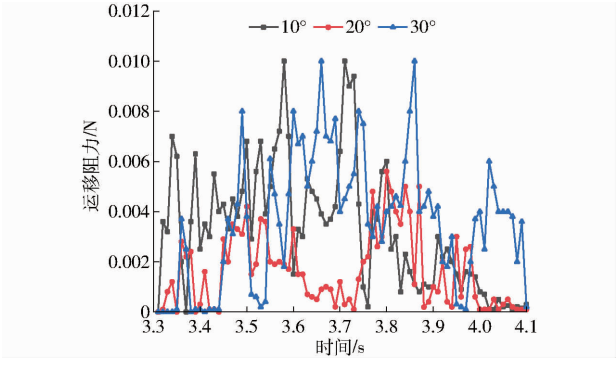

图 11 不同倾斜角排种盘种子运移阻力与时间关系曲线

Fig. 11 Relation curves of seed migration resistance and time of different tapers seed tray

由图 11 可知,种子在倾斜角 20°排种盘中受到的运移阻力相对较小,波动相对平缓,而种子在倾斜角 10°和 30°排种盘中受到运移阻力波动较大,其中倾斜角 10°、20°和 30°排种盘中受到运移阻力平均值分别为 0.003、0.002、0.004 N,方差分别为 0.003、0.001、0.003 N^2,与图中曲线变化趋势一致。结合排种机理分析和种群扰动仿真分析可知,倾斜角 10°排种盘倾斜角过小,排种器近似于垂直圆盘式排种器,被吸附的种子需要突破种群重力束缚的影响,因此运移阻力较大;倾斜角 30°排种盘近似于

水平滚筒式，对种群扰动性较差，被吸附的种子需要抵抗种群惰性力的影响，运移阻力也相对较大；而倾斜角 20°排种盘对种群扰动性较好，种群重力沿斜面向下的分力较大而垂直斜面阻碍种子运移的分力相对较小，因此倾斜角 20°排种盘中种子受到运移阻力较小。因此确定气力斜盘式小麦宽苗带匀播排种器排种盘最佳倾斜角为 20°。

4　台架试验

4.1　试验方法

为验证仿真试验结果的可靠性，进行了台架试验。试验台架如图 12 所示，主要由排种器、电机、风机和管道等组成。其中排种器由树脂材料 3D 打印并固定于竖直型材上，在台架一侧安装驱动电机，通过联轴器与排种器相连，试验台架油带工作速度为 0.5 ~ 5.0 m/s，风机负压为 0 ~ 50 000 Pa。

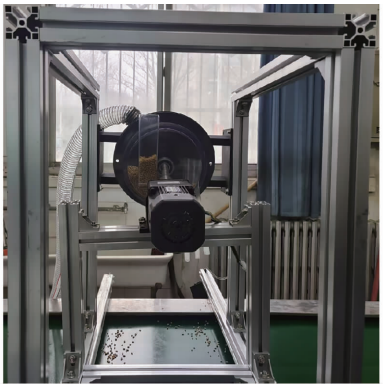

图 12　试验台架

Fig. 12　Experiment bench

选取吸种负压为 4 000 ~ 5 000 Pa，工作转速为 30 ~ 40 r/min，以各行排量一致性变异系数（RCV）、总排量一致性变异系数（TCV）、排种均匀性变异系数（SUV）为指标，进行二因素三水平正交试验，试验因素水平如表 5 所示。

表 5　因素水平

Tab. 5　Factors and levels

水平	因素	
	转速/(r·min^{-1})	负压/Pa
1	30	4 000
2	35	4 500
3	40	5 000

气力斜盘式小麦宽苗带匀播排种器可排种 3 行，从左至右编号为 1、2、3，其中 1 号落种口对应内侧型孔，2 号落种口对应中间型孔，3 号落种口对应外侧型孔。试验过程用容器收集并称量每行 1 min 内排出种子质量，试验重复 5 次，排量一致性变异系数计算公式为

$$K_a=\frac{\sqrt{\dfrac{\sum_{i=1}^{l}\left(\dfrac{1}{n}\sum_{j=1}^{n}m_{ij}-\dfrac{1}{l}\sum_{i=1}^{l}p_i\right)^2}{l-1}}}{p}\times 100\% \tag{14}$$

式中　p_i——第 i 行第 n 次排种量测量均值，g

n——试验次数，次

m_{ij}——第 i 行第 j 次排种量，g

p——3 行排种量平均值，g

l——排种列数，列

K_a——排量一致性变异系数，%

将排种器 1 min 内排出的种子总量进行称量，试验重复 5 次，3 排总排量稳定性变异系数公式为

$$K_b=\frac{\sqrt{\dfrac{\sum_{j=1}^{n}\left(\sum_{i=1}^{l}m_{ij}-\dfrac{1}{n}p_j\right)^2}{n-1}}}{p_t}\times 100\% \tag{15}$$

式中　p_j——第 j 行排种总量，g

p_t——排种总量平均值，g

K_b——3 排总排量稳定性变异系数，%

将传送带速度调节至 1.11 m/s，根据排种器实际工作转速计算出理论粒距，工作一段时间至稳定工作后，统计各行 200 mm 内排出种子粒数，重复 5 次，3 排排种均匀性变异系数计算公式为

$$K_c=\frac{1}{l}\sum_{i=1}^{l}\frac{\sqrt{\dfrac{\sum_{j=1}^{n}(N_{ij}-\overline{N}_l)^2}{n-1}}}{N_l}\times 100\% \tag{16}$$

式中　N_{ij}——第 i 行第 j 次检测长度内种子数，粒

N_l——第 i 行第 j 次检测长度内种子数平均值，粒

K_c——排种均匀性变异系数，%

4.2　结果与分析

试验结果和极差分析分别如表 6、7 所示。

表 6　试验结果

Tab. 6　Orthogonal experiment

序号	因素				RCV/	TCV/	SUV/
	X_1	X_2	$(X_1\times X_2)_1$	$(X_1\times X_2)_2$	%	%	%
1	1	1	1	1	2.24	1.36	10.88
2	1	2	2	2	2.04	1.48	9.87
3	1	3	3	3	2.45	1.54	11.48
4	2	1	2	3	2.49	1.51	12.85
5	2	2	3	1	2.18	1.56	11.96
6	2	3	1	2	2.59	1.57	11.48
7	3	1	3	2	3.32	1.66	14.97
8	3	2	1	3	2.92	1.54	12.78
9	3	3	2	1	3.57	1.55	12.85

表 7 极差分析结果

Tab. 7 Range analysis result

评价指标		X_1	X_2	$(X_1 \times X_2)_1$	$(X_1 \times X_2)_2$
RCV	k_1	2.24	2.68	2.58	2.66
	k_2	2.42	2.39	3.38	2.65
	k_3	3.27	2.86	2.65	2.62
	R	1.03	0.19	0.80	0.04
TCV	k_1	1.46	1.51	1.49	1.49
	k_2	1.55	1.53	1.51	1.56
	k_3	1.58	1.55	1.59	1.53
	R	0.12	0.04	0.10	0.07
SUV	k_1	10.74	12.91	11.71	11.90
	k_2	12.10	11.54	11.86	12.11
	k_3	13.54	11.93	12.80	12.37
	R	2.80	1.37	1.09	0.47

由表 6、7 可知,当工作转速为 30 r/min、吸种负压为 4 500 Pa 时,RCV 和 SUV 均较优;当工作转速为 30 r/min、吸种负压为 4 000 Pa 时,TCV 最低,考虑到 TCV 在试验过程中变化不大,均低于 2%,确定该排种器最佳工作参数组合为工作转速 30 r/min、吸种负压 4 500 Pa,此时 UCV、TCV、SUV 分别为 2.04%、1.45%、9.87%。

气力斜盘式匀播排种器通过斜盘旋转产生的离心力与负压吸附力协同作用,使得种子在斜盘表面受力更加均衡,该部分理论与郑娟等[27]的研究结果相似,研究发现锥形排种盘锥度对小麦种群离散度影响程度不同,排种盘倾斜角为 45°可兼顾种群扰动性好和被吸附种子运移阻力小的优势;负压吸附则保证种子在转移过程中稳定吸附,减少因振动或气流波动造成的种子脱落或位移偏差。而气力斜盘式结构通过气固两相流调控,对种子适应性更强,可显著降低因种子特性变化导致的排量波动,如 FENG 等[28]利用负压吸附作用提高了排种器作业性能。

5 结论

(1)确定了气力斜盘式小麦宽苗带匀播排种器的结构参数与工作原理,通过理论分析探讨了排种器充种、携种、投种环节的受力情况,明确了影响排种器作业质量的关键参数为临界负压、排种盘倾斜角、型孔直径、小麦种子特性、工作参数等。

(2)针对排种器结构参数(型孔类型、型孔直径、负压抽气口直径、排种盘倾斜角)分别进行了仿真模拟试验,试验结果表明,排种盘型孔类型为柱型孔、型孔直径 1.91 mm、抽气口直径 32.18 mm 时,型孔内流速和型孔两侧压强差最优;倾斜角 20°时排种盘种群扰动和种子运移阻力较优。

(3)针对排种器工作参数(工作转速、吸种负压)进行了正交台架试验,正交试验结果表明,当工作转速 30 r/min、吸种负压 4 500 Pa 时,各行排量一致性变异系数、总排量稳定性变异系数、排种均匀性变异系数分别为 2.04%、1.45%、9.87%,能满足小麦宽苗带匀播要求。

参 考 文 献

[1] 于慧玲,阚茗溪,徐哲莉,等. 匀播和条播小麦产量及干物质积累对春季灌水量的响应[J]. 作物学报,2023,49(10):2833-2844.
YU Huiling, KAN Mingxi, XU Zheli, et al. Yield and dry matter accumulation of wheat in response to spring irrigation water in uniform sowing and strip sowing[J]. Acta Agronomica Sinica, 2023, 49(10): 2833-2844. (in Chinese)

[2] 李锥. 播种方式和种植密度对冬小麦群体构建及产量的影响[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2022.
LI Zhui. Effects of sowing pattern and planting density on population construction and yield of winter wheat[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2022. (in Chinese)

[3] ZHAO P, GAO X, JU X, et al. Optimization of the front-mounted fertilizer pipe strip rotary tillage device by modeling the wide-seedbed characteristics and power consumption[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2024, 227: 109624.

[4] TAO Z Q, WANG D M, MA S K, et al. Light interception and radiation use efficiency response to tridimensional uniform sowing in winter wheat[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2018, 17(3): 566-578.

[5] 何勋,张景风,张润,等. 小麦宽苗带种沟镇压播种装置研制[J]. 农业工程学报,2023,39(18):18-29.
HE Xun, ZHANG Jingfeng, ZHANG Run, et al. Development of the seed-ditch compaction device for wide-boundary sowing wheat[J]. Transactions of the CSAE, 2023, 39(18): 18-29. (in Chinese)

[6] ZHAO P, GAO X, 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.

[7] XU H, LIU W, LIU H, et al. Design and performance test of a combined and adjustable precise rice seed metering device[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2025, 18(1): 101-114.

[8] SUN X, NIU L, CAI M, et al. Particle motion analysis and performance investigation of a fertilizer discharge device with helical staggered groove wheel[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2023, 213: 108241.

[9] 刘彩玲,魏丹,都鑫,等. 宽苗带勾型窝眼轮式小麦精量排种器设计与试验[J]. 农业机械学报,2019,50(1):75-84.
LIU Cailing, WEI Dan, DU Xin, et al. Design and test of wide seedling strip wheat precision hook-hole type seed-metering

device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(1): 75 – 84. (in Chinese)

[10] GAO X, ZHAO P, LI J, et al. Design and experiment of quantitative seed feeding wheel of air-assisted high-speed precision seed metering device[J]. Agriculture-Basel, 2022, 12(11): 1951.

[11] 罗海峰,刘光辉,吴明亮,等. 外凸扰种仿形型孔气吸式水稻芽种精量排种器设计与试验[J]. 农业机械学报,2025, 56(3): 227 – 239.
LUO Haifeng, LIU Guanghui, WU Mingliang, et al. Design and experiments of precision seed metering device for rice bud seed with protruding disturbing species[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(3): 227 – 239. (in Chinese)

[12] LI H, LING L, WEN C K, et al. Structural optimization method of rice precision direct Seed-metering device based on multi-index orthogonal experimental[J]. Frontiers in Plant Science, 2023, 14:1183624.

[13] 王韦韦,宋岚洲,石文兵,等.气吸双行错置式玉米密植精量排种器设计与试验[J]. 农业机械学报,2024,55(3): 53 – 63.
WANG Weiwei, SONG Lanzhou, Shi Wenbing, et al. Design and experiment of air-suction double-row staggered precision seed metering device for maize dense planting[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(3): 53 – 63. (in Chinese)

[14] 于佳杨. 气吸滚筒式小麦精密排种器设计与试验研究[D]. 昆明:昆明理工大学,2018.
YU Jiayang. The design and experimental research on the air-suction roller precision seed-metering device of wheat[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2018. (in Chinese)

[15] NOOR H, SUN M, LIN W, et al. Effect of different sowing methods on water use efficiency and grain yield of wheat in the Loess Plateau, China: 4[J]. Water, 2022, 14(4): 577.

[16] 赵鹏飞,巨晓腾,杨鹏琨,等. 肥管前置式小麦宽苗带旋耕施肥播种机设计与试验[J]. 农业工程学报,2024,40(20):12 – 21.
ZHAO Pengfei, JU Xiaoteng, YANG Pengkun, et al. Design and experiment of fertilizer pipe front-mounted wheat wide seedling belt rotary tillage fertilization planter[J]. Transactions of the CSAE, 2024, 40(20): 12 – 21. (in Chinese)

[17] WANG Z, KHAN S, SUN M, et al. Optimizing the wheat seeding rate for wide-space sowing to improve yield and water and nitrogen utilization[J]. International Journal of Plant Production, 2021, 15(4): 553 – 562.

[18] 赖虹宇. 气力锥盘式小麦宽苗带精量排种器设计与试验[D]. 武汉:华中农业大学,2023.
LAI Hongyu. Design and experiment on pneumatic cone disk type wide seedling strip wheat precision metering device[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2023. (in Chinese)

[19] 史嵩,刘虎,位国建,等. 基于 DEM – CFD 的驱导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 Song, LIU Hu, WEI Jianguo, et al. Optimization and experiment of pneumatic seed metering device with guided assistant filling based on EDEM – CFD[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(5): 54 – 66. (in Chinese)

[20] 张博文. 气吸圆盘式哈密瓜精量排种器设计与试验[D]. 昆明:昆明理工大学,2023.
ZHANG Bowen. Design and experimental of air-absorbing disc type Hami melon precision seed discharger[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2023. (in Chinese)

[21] DU X, LIU C. 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.

[22] 廖宜涛,齐天翔,廖庆喜,等. 气力式油菜精量联合直播机振动特性及对排种性能影响[J]. 吉林大学学报(工学版), 2022,52(5): 1184 – 1196.
LIAO Yitao, QI Tianxiang, LIAO Qingxi, et al. Vibration characteristics of pneumatic combined precision rapeseed seeder and its effect on seeding performance[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2022, 52(5): 1184 – 1196. (in Chinese)

[23] WANG J, QI X, XU C, et al. Design evaluation and performance analysis of the inside-filling air-assisted high-speed precision maize seed-metering device[J]. Sustainability, 2021, 13(10): 5483.

[24] XU J, SUN S, HE Z, et al. Design and optimisation of seed-metering plate of air-suction vegetable seed-metering device based on DEM – CFD[J]. Biosystems Engineering, 2023, 230: 277 – 300.

[25] ZHAO Z, LYU Y, LYU J, et al. The influence of a seeding plate of the air-suction minituber precision seed-metering device on seeding quality[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2024, 227: 109680.

[26] LIU R, LIU Z, ZHAO J, et al. Optimization and experiment of a disturbance-assisted seed filling high-speed vacuum seed-metering device based on DEM – CFD[J]. Agriculture-Basel, 2022, 12(9): 1304.

[27] 郑娟,赖虹宇,李甜,等. 小麦宽苗带气吸式精量排种器设计与试验[J]. 农业机械学报,2024,55(增刊 1): 165 – 176, 335.
ZHENG Juan, LAI Hongyu, LI Tian, et al. Design and test of precision seed metering device for wheat wide seedling belt with air suction[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(Supp. 1): 165 – 176, 335. (in Chinese)

[28] FENG Y, ZHAO X, LI J, et al. Parameter optimization and experiment of the negative pressure precision seed-metering device for wheat[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2024, 17(1): 154 – 162.