doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2026.18.021

气吸式小麦精量排种器多侧清种机构设计与试验

王佰伟[1,2]　陈金成[1,2]　何玉泽[1,2]　李亚鑫[2,3]　方子恒[2,3]　纪　超[1,2]

(1.新疆农垦科学院机械装备研究所, 石河子 832000; 2.农业农村部西北农业装备重点实验室, 石河子 832000;
3.石河子大学机械电气工程学院, 石河子 832003)

摘要: 针对目前小麦精量种植模式下机械式精量播种机在较高速(7 km/h)作业时,清种装置过清和漏清造成排种性能低的问题,本文优化设计了一种气吸式小麦精量排种器多侧清种机构,由内外侧、中部双侧鱼鳍状清种齿顶组成,通过多侧清种齿与籽粒团簇之间的机械碰撞,打破籽粒受力平衡,根除漏清现象,基于排种过程籽粒动力学分析和 DEM-CFD 耦合仿真,确定多侧清种机构关键结构参数,得出排种盘转速、中部双侧鱼鳍状清种齿顶距排种盘表面高度、清种齿齿顶锥角为影响清种性能的主要因素。采用最优性准则 D-optimal 设计方法进行仿真试验,得到最优参数组合:排种盘转速 69.837 r/min、中部双侧鱼鳍状清种齿顶距排种盘表面高度 6.125 mm、齿顶锥角 4.48°时,合格率、漏播率、重播率分别为 96.94%、2.34%、0.72%。选用"新冬 52 号"小麦籽粒进行台架验证试验,合格率、漏播率、重播率为 94.8%、1.8%、3.4%;排种器田间试验结果表明,前进速度为 7 km/h 时,平均合格率 91.19%,漏播率 2.86%,排量一致性和稳定性符合行业指标,满足小麦精量种植要求。

关键词: 小麦; 精量排种器; 清种机构

中图分类号: S126　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2026)18-0246-12　　**OSID**:

Design and Experiment of Multi-side Seed-clearing Mechanism for Air-suction Precision Multi-grain Wheat Seed Metering Device

Wang Baiwei[1,2]　Chen Jincheng[1,2]　He Yuze[1,2]　Li Yaxin[2,3]　Fang Ziheng[2,3]　Ji Chao[1,2]

(1. *Institute of Mechanical Equipment*, *Xinjiang Academy of Agricultural Reclamation*, *Shihezi* 832000, *China*
2. *Key Laboratory of Northwest Agricultural Equipment*, *Ministry of Agriculture and Rural Affairs*, *Shihezi* 832000, *China*
3. *College of Mechanical and Electrical Engineering*, *Shihezi University*, *Shihezi* 832003, *China*)

Abstract: Aiming to address the problem of reduced seeding performance in mechanical precision wheat seeders at relatively high operating speeds (7 km/h) due to over-clearing and missing-clearing by the seed-clearing device, a multi-side seed-clearing mechanism for an air-suction wheat precision seed metering device was optimized and designed. The mechanism consisted of inner-side, outer-side, and middle double-side fish-fin shaped seed-clearing teeth. Through mechanical collisions between the multi-side clearing teeth and seed clusters, the force balance of the grains was disrupted, effectively eliminating missing-clearing phenomena. Based on dynamic analysis of seed motion during the seeding process and DEM-CFD coupled simulation, the key structural parameters of the multi-side seed-clearing mechanism were identified. The main factors influencing seed-clearing performance were determined to be the seeding disc rotational speed, the installation height of the middle double-side fish-fin shaped seed-clearing teeth from the seeding disc surface, and the apex taper angle of the seed-clearing teeth. Simulation experiments were conducted using the D-optimal optimality criterion, yielding the optimal parameter combination: seeding disc rotational speed of 69.837 r/min, apex height of the middle double-side fish-fin shaped seed-clearing teeth of 6.125 mm from the seeding disc surface, and apex taper angle

收稿日期: 2026-03-11　修回日期: 2026-04-21

基金项目: 兵团重点领域科技攻关项目(2025AB036)、"天山英才"培养计划-青年科技拔尖人才项目(2022TSYCCX0123)和新疆农垦科学院院级科研项目(2025YJQN02)

作者简介: 王佰伟(1997—),男,助理研究员,主要从事播种机械化设计及智能农业装备研究,E-mail: 13359500372@163.com

通信作者: 纪超(1986—),男,研究员,博士,主要从事智能播种机械化及智能农业装备研究,E-mail: jicobear@163.com

of 4.48°. Under these conditions, the qualified rate, missing seeding rate, and reseeding rate were 96.94%, 2.34%, and 0.72%, respectively. Bench validation tests were performed using "Xindong 52" wheat seeds, resulting in a qualified rate of 94.8%, missing seeding rate of 1.8%, and reseeding rate of 3.4%. Field performance tests of the seed metering device at a forward speed of 7 km/h showed an average qualified rate of 91.19%, a missing seeding rate of 2.86%, with seeding quantity consistency and stability conforming to industry standards, thereby satisfying the requirements for precision wheat planting.

Key words: wheat; precision multi-grain seed metering device; seed-clearing mechanism

0　引言

小麦作为世界第一大口粮作物，环境适应能力强，广泛种植于世界各地[1]。中国是全球小麦主产国，播种模式以条播为主[2-4]，该种植模式用种量偏大、禾苗空间分布不均匀，导致禾苗群体光照不均匀，水肥利用效率偏低。研究表明[5-7]，精量播种不仅能保证播深和株距均匀度，对小麦出苗时间、分蘖及产量产生显著有益的影响，还能大幅降低用种成本。精量排种器是实现精量播种的关键，气吸式精量排种器利用气流负压充种，具有适用性强、作业速度高、排种精度高等优势，但存在重播率较高、一孔多吸现象，清种机构可将多余籽粒清除，但小麦籽粒球形率低、休止角大、带有腹沟，造成充种和清种难度提升，清种会出现过清和漏清问题，普通清种装置只进行上下侧清种作业，但在清种过程并不能完全清除籽粒重播的情况，故清种机构清种效果直接关系到排种性能，是排种器关键部件，也是提升排种质量的关键[8-9]。

目前在排种器上应用较多的清种机构有毛刷式[10]、曲线形清种机构[11]、弹性插板式[12]、杠杆式等[13]。李玉环等[14]设计了气吸式玉米精量排种器双侧清种装置，在高速情况下，有效降低了漏清率。邢赫等[15]设计了一种用于水稻气力式排种器垂直于排种盘平面的清种装置，有效改善稻种重吸附现象，使播种精度大幅提升。祁兵等[16]设计了周向清种装置，应用于低速作业状态下，提高了播种合格率。言育谦等[17]设计了蔬菜气吸式排种四级清种机构，在转速升高情况下，有效降低了漏清率，将合格率提升 6.45 个百分点。王云霞等[18]运用离散元法(EDEM)分析交错勾齿式小麦精量排种器转速和充种区域夹角对充种性能的影响规律。杨丽等[19]借助离散元法分析设计离心式高速玉米精量排种器的关键部件参数。计算流体力学(CFD)与离散元等其他分析方法结合使用，广泛运用于气吸式排种器设计研究中。Jotautienė 等[20]通过 EDEM 分析了小麦籽粒在相应轨道的运动轨迹及受力情况。Yasir 等[21]通过 ANSYS－CFX 耦合对气吸式小麦精量排种器不同参数下流场分布进行模拟，得出最优参数组合。丁力等[22]通过 DEM－CFD 耦合建立气吸式玉米排种器仿真模型，分析籽种受力与运动规律。李雪等[23]采用 DEM－CFD 耦合仿真对小麦气吸式排种器刮种过程进行仿真分析，验证了凹凸型曲线刮种效果较好。

针对现有 3 孔 1 组型孔盘气吸式小麦精量排种器在高速作业条件下易出现籽粒团簇、清种率偏低的问题，本文提出一种适用于高速工况的多侧清种机构。从充种、清种机理开展理论分析，分析影响清种性能的关键参数，并开展试验研究，以期获得最佳参数组合，为气吸式小麦精量排种器清种机构设计提供参考。

1　气吸式小麦精量排种器结构与工作原理

气吸式小麦精量排种器主要由气室壳体、种室壳体、多侧清种机构、挡种毛刷、排种盘、气室密封圈、卸种滚轮、驱动风机、轴系部件组成，如图 1 所示。

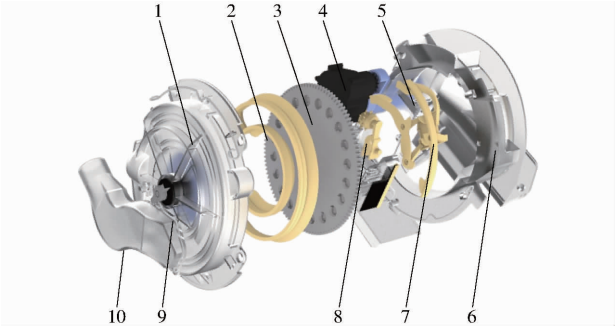


图 1　精量排种器结构示意图

Fig. 1　Schematic of structure of precision seed metering device

1. 气室壳体　2. 气室密封圈　3. 排种盘　4. 驱动风机　5. 挡种毛刷　6. 种室壳体　7. 多侧清种机构　8. 卸种滚轮　9. 轴系部件　10. 负压口

排种器工作区域可以划分为充种区、过渡区、清种区、运种区以及投种区。排种盘均匀分布 20 组型孔，每 3 个型孔为 1 组。种室壳体与排种盘左侧形成充种室；气室壳体、气室密封圈与排种盘右侧共同构成密闭负压腔。该负压腔通过气室壳体上的接

口,与配套驱动风机相连,由风机抽取腔内空气产生负压,负压作用于排种盘型孔,随电机驱动的排种盘绕轴系部件做匀速圆周运动,当型孔左侧经过充种室,充种室内籽粒在气室负压作用下吸附于排种盘上,此时处于充种阶段。由于籽粒物理特性差异,型孔呈现多粒吸附状态,随后,籽粒随排种盘匀速回转,经过渡区输送至清种区,型孔吸附的多粒籽粒与清种机构外侧清种齿、中部双侧鱼鳍状清种齿以及内侧清种齿通过机械接触、碰撞,使籽粒移位,吸附力不强的劣势籽粒掉落至充种区,优势籽粒则稳定吸附在排种盘上,经过清种区后,型孔携带 3 粒籽粒稳定经过运种区,进入投种区,随着气室负压消失,籽粒在重力以及离心力作用下沿型孔分布圆切线方向排出,卸种滚轮能进一步阻绝气压,辅助籽粒下落,同时也能防止潜在的杂质堵孔。排种器工作原理如图 2 所示。

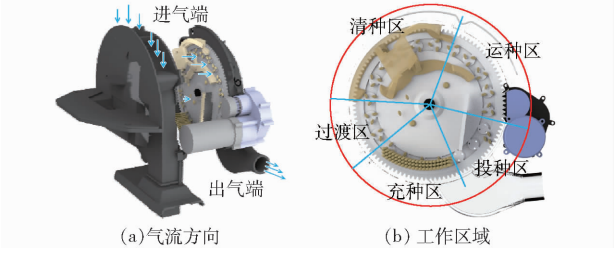


图 2 排种器工作原理

Fig. 2 Operating principle of seed metering device

2 排种器多侧清种机构设计

2.1 多侧清种机构结构方案

多侧清种机构如图 3 所示,主要由 3 侧清种齿组成,包括外侧清种齿、中部双侧鱼鳍状清种齿以及内侧清种齿。参照文献[11,17],采用 4 级渐进式清种方案,随着受到清种齿机械干涉作用力逐级递增,稳定、高效地剥离因机械夹带吸附于排种盘上的团簇籽粒。上部护种板可起到防回落与导流作用,中部双侧鱼鳍状清种齿清种效果由清种齿锥角与齿顶高度决定,通过清种齿直接与籽粒的物理接触,破坏多余籽粒(包括劣势籽粒与被动夹带籽粒)受力平衡,使其从型孔中脱落。

2.2 内外清种齿齿形参数设计

清种齿几何齿形形状及参数决定清种作业效果,对于内外侧清种板,选定常见的 4 级清种齿,沿排种盘转动方向呈渐进式分布,由于型孔位置是固定直径且均匀分布,为使 4 级清种齿在排种盘转动时,与型孔表面距离呈渐进式缩小,从而对多余种子施加平稳递增的推挤力并避免刚性损伤,选取椭圆曲线作为清种齿顶端的理论包络轮廓。椭圆极径变化具有良好的非连续平滑过渡特性,能够较好地契

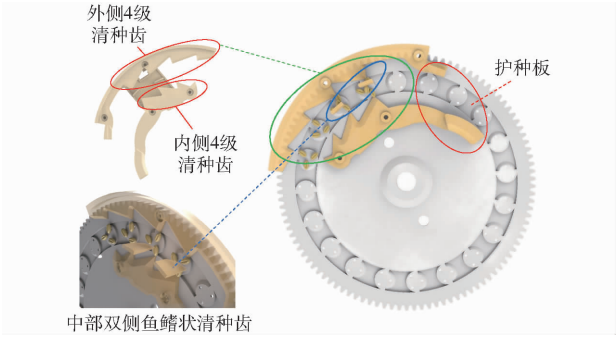


图 3 多侧清种机构

Fig. 3 Multi-side seed cleaning mechanism

合清种时先缓后急的作业需求;同时,采用椭圆参数方程构建轮廓,可通过单一特征参数(偏心率 e)直观、精确地控制清种齿整体渐进梯度。以排种盘旋转中心为原点 O,建立二维平面直角坐标系 xOy。其中,设经过原点 O 的水平中心线为 x 轴,垂直中心线为 y 轴。内外侧齿形方程设计如图 4 所示。图中 $A_i(i=1\sim4)$ 为外侧各级清种齿顶;B_i 为外侧各级清种齿底;C_i 为内侧各级清种齿顶;D_i 为内侧各级清种齿底;ω 为角速度。

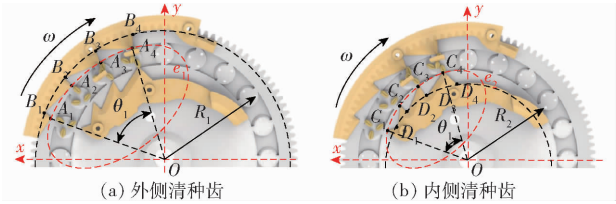


图 4 内外侧清种齿形参数设计

Fig. 4 Geometrical parameter design of inner and outer seed-clearing teeth

内外侧清种齿形曲线求解过程如下:

4 级清种齿顶对应排种盘上连续相邻分布的 4 组型孔,Z 为型孔组数,即有效清种范围角 θ_1 为

$$\theta_1=\frac{2\pi}{Z}(4-1)=54^\circ \tag{1}$$

内外侧首末 2 级清种齿顶与圆心点 O 距离计算式为

$$\begin{cases}\begin{cases}l_{OA_1}=R_1+\dfrac{3}{2}D\\ l_{OA_4}=R_1+\dfrac{1}{2}D\end{cases} & (\text{外侧})\\ \begin{cases}l_{OC_1}=R_2-\dfrac{3}{2}D\\ l_{OC_4}=R_2-\dfrac{1}{2}D\end{cases} & (\text{内侧})\end{cases} \tag{2}$$

式中 R_1——外侧型孔半径,mm

R_2——内侧型孔半径,mm

D——小麦籽粒颗粒等效直径,mm

基于清种齿顶 1、4 级 2 点构建椭圆参数方程

$$\begin{cases}\dfrac{x^2\left[\left(R_1+\dfrac{1}{2}D\right)^2-\left(R_1+\dfrac{3}{2}D\right)^2\cos^2\theta_1\right]}{\left(R_1+\dfrac{3}{2}D\right)^2\left(R_1+\dfrac{1}{2}D\right)^2\sin^2\theta_1}+\dfrac{y^2}{\left(R_1+\dfrac{1}{2}D\right)^2}=1 & (\text{外侧})\\ \dfrac{x^2\left[\left(R_2-\dfrac{1}{2}D\right)^2-\left(R_2-\dfrac{3}{2}D\right)^2\cos^2\theta_1\right]}{\left(R_2-\dfrac{3}{2}D\right)^2\left(R_2-\dfrac{1}{2}D\right)^2\sin^2\theta_1}+\dfrac{y^2}{\left(R_2-\dfrac{1}{2}D\right)^2}=1 & (\text{内侧})\end{cases} \tag{3}$$

表征内外侧齿形特征的椭圆偏心率为

$$\begin{cases}e_1=\sqrt{1-\dfrac{\left(R_1+\dfrac{1}{2}D\right)^2-\left(R_1+\dfrac{3}{2}D\right)^2\cos^2\theta_1}{\left(R_1+\dfrac{1}{2}D\right)^2\sin^2\theta_1}} & (\text{外侧})\\ e_2=\sqrt{1-\dfrac{\left(R_2-\dfrac{3}{2}D\right)^2-\left(R_2-\dfrac{1}{2}D\right)^2\cos^2\theta_1}{\left(R_2-\dfrac{1}{2}D\right)^2\sin^2\theta_1}} & (\text{内侧})\end{cases} \tag{4}$$

式中　e_1、e_2——内、外侧清种齿形椭圆偏心率

综合上下文已知参数，代入式(3)、(4)得到描述内外侧清种齿的轮廓参数方程为

$$\begin{cases}\dfrac{x^2}{4\,111.45}+\dfrac{y^2}{5\,437.17}=1 & (\text{外侧})\\ \dfrac{x^2}{2\,530.10}+\dfrac{y^2}{3\,725.45}=1 & (\text{内侧})\\ e_1=0.2449\\ e_2=0.4498\end{cases} \tag{5}$$

排种盘顺时针转动，为确保籽粒顺利落入种室，多侧清种机构按照排种盘旋转方向安装在种室左上方，安装位置不同决定过渡区大小，且清种回落籽粒不可影响正常吸附籽粒，即清种点 A_1 与清种点 A_2 应有充足的水平投影距离 L_3，需保证投影距离不小于 2 倍籽粒等效直径 D(小麦籽粒等效直径 4.26 mm)，如图 5 所示。计算式为

$$\begin{cases}L_1=L_{OA_1}\cos\theta_2\\ L_2=L_{OA_2}\cos\left(\theta_2+\dfrac{2\pi}{Z}\right)\\ L_3=L_1-L_2\geqslant 2D\end{cases} \tag{6}$$

式中　L_1——第 1 清种齿与排种盘圆心水平投影距离，mm

L_2——第 2 清种齿距与排种盘圆心水平投影距离，mm

θ_2——第 1 清种齿与 x 轴夹角，(°)

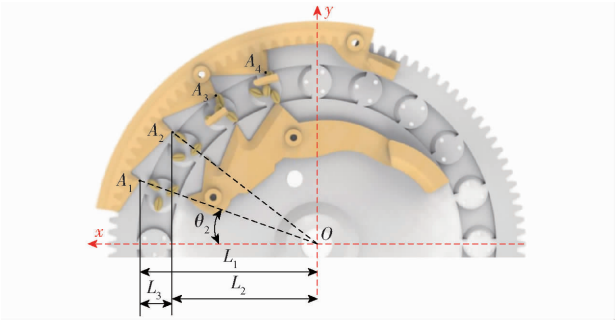


图 5　清种机构安装位置示意图

Fig. 5　Schematic of installation position of seed-clearing mechanism

求解方程组(6)，得出清种机构安装位置角 θ_2 解集为连续区间[10°,20°]。为保证有最大吸附时间和籽粒稳定吸附，选择在该连续区间内最大安装角 20°。

根据所构建的内外侧清种齿轮廓参数方程，将内外侧 4 级齿顶角度坐标转换到直角坐标中，代入式(5)，最终得到内外侧齿形坐标分布图，如图 6 所示。

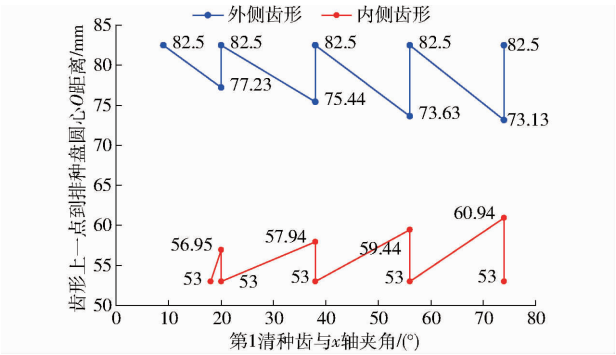


图 6　内外侧齿形坐标分布

Fig. 6　Distribution of inner and outer tooth profile coordinates

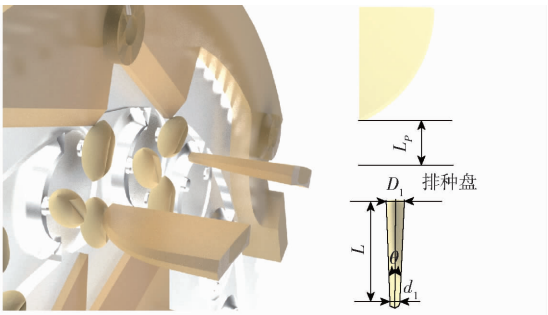
2.3　中部双侧鱼鳍状清种齿参数设计

负压吸附过程，型孔内除主吸附籽粒外，常因籽粒间机械互锁与静摩擦力形成团簇吸附。为解决此问题，设计中部双侧清种装置如图 7 所示。清种原理与内外侧原理相同，通过机械接触实现清种，双侧鱼鳍状清种齿前后交错排布，清种效果主要由鱼鳍锥角 θ 和清种齿离排种盘间隙 L_P 决定。

L_P 作用是避开主籽粒，精确打击额外夹带的籽粒(团簇籽粒)，小麦籽粒平均厚度为 H，主吸附籽粒嵌入型孔深度为 h。为保证清种齿不伤及主籽粒，且能有效接触到外层多余籽粒，L_P 须满足

$$H-h<L_P<2H-h \tag{7}$$

中部双侧清种齿采用鱼鳍状结构，清种能力与鱼鳍锥角密切相关。为避免锥角参数仅凭经验选取，根据鱼鳍结构尺寸建立几何约束关系。设鱼鳍



(a) 齿形局部放大图 (b) 锥角

图 7 中部双侧鱼鳍状清种齿形示意图

Fig. 7 Schematics of middle double-side fish-fin shaped seed-clearing tooth profile

根部最大宽度为 D_1,尖端最小宽度为 d_1,锥形段有效长度为 L,则鱼鳍锥角 θ 满足

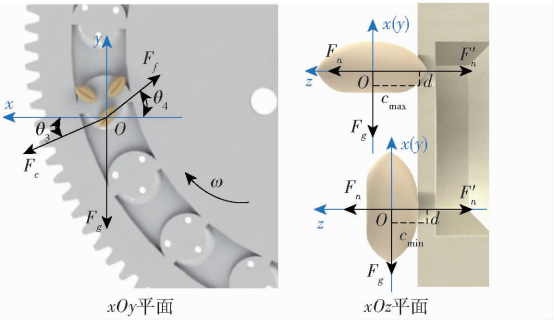
$$2\arctan\frac{D_{1\min}-d_{1\max}}{2L_{\max}}<\theta<2\arctan\frac{D_{1\max}-d_{1\min}}{2L_{\min}} \tag{8}$$

3 工作过程分析

3.1 充种过程

充种过程是排种器工作的初始环节,主要目标是确保“不漏”。但为保证较高充种率,负压通常设定在较高水平,使得吸孔极易吸附多粒籽粒,或造成籽粒吸附姿态不稳定。这种现象是清种作业存在的根本原因,清种过程本质上是对重吸籽粒进行清种,达到目标籽粒要求。

在充种阶段,小麦籽粒从静止状态转变为随排种盘作匀速圆周运动。在忽略振动与摩擦等干扰力的理想条件下,基于刚体动力学分析,型孔负压产生的吸附力(或提供的静摩擦力)足以平衡籽粒所受的合外力(如重力、惯性离心力等),籽粒被捕获。以稳定吸附单个籽粒为研究对象,以籽粒质心为原点,建立空间坐标系 xyz(图 8),左侧 xOy 平面,设横向为 x 轴,纵向为 y 轴,描述籽粒受到的离心力、摩擦力等。右侧 xOz 平面,设横向为 z 轴,竖向为 x 轴,描述籽粒受到的负压吸力、支持力等。单个小麦籽粒受力分析如图 8 所示。



xOy平面 xOz平面

图 8 充种阶段籽粒受力

Fig. 8 Force analysis of seed during seed-filling stage

籽粒进入稳定吸附的运种阶段,籽粒和排种盘之间相对静止,故籽粒摩擦力需大于其他合外力。此时力学模型为

$$\begin{cases}F'_n=F_n\\F_g=F_f\sin\theta_4-F_c\sin\theta_3\\F_c\cos\theta_3=F_f\cos\theta_4\\F_f=\mu F_n\\P=\dfrac{F_n}{S}\\S=\pi d^2\\\mu=(6\sim10)\tan\psi\\F_g c=F_n d\end{cases} \tag{9}$$

式中 F_g——籽粒所受重力,N

F_f——籽粒所受摩擦力,N

F_c——籽粒所受离心力,N

F_n——排种盘对籽粒的支持力,N

F'_n——气室对籽粒的负压吸力,N

θ_3——F_c 与 x 轴夹角,(°)

θ_4——F_f 与 x 轴夹角,(°)

c——籽粒质心到型孔中心距离,m

P——型孔两侧气压差,Pa

S——型孔截面积,m^2

d——型孔半径,m

μ——籽粒与排种盘摩擦因数

ψ——小麦籽粒自然休止角,取 1.12°

求解式(9)得稳定吸种时有

$$\begin{cases}F_f\geqslant\dfrac{F_g}{\sin\theta_3-\cos\theta_3\tan\theta_3}\\P=\dfrac{F_g}{\mu S(\sin\theta_3-\cos\theta_3\tan\theta_3)}\end{cases} \tag{10}$$

籽粒静摩擦力由排种盘-籽粒间摩擦因数和负压吸力共同决定。摩擦因数近似恒定时,增大吸力可提高摩擦力与输送稳定性;但吸力过大易造成同一吸孔多粒吸附。由于籽粒圆度低、形状多呈纺锤体且吸附姿态多变,气力式排种器作业中重吸附现象较为常见,基于吸附稳定性差异,将吸附状态最佳的目标粒定义为优势籽粒,将处于亚稳态的重吸粒定义为劣势籽粒。

代入已知数值计算得 P 为 1 871.79 ~ 3 244.82 Pa。基于上述分析,考虑到排种器实际工作时由于密封圈磨损造成的密封性能下降以及外界环境的影响,实际负压需求范围更大,将实际压力 P_f 范围扩大并取整,为 1.6 ~ 3.4 kPa。

3.2 清种过程

进入清种阶段后,通过清种机构的 4 级清种齿及中部双侧鱼鳍状清种齿将多余籽粒清除,优势籽

粒更稳定被吸附于型孔，达到清种目的。

由于多侧清种齿的作用原理一致，因此以外侧清种齿为例，对接触外侧清种齿的小麦籽粒进行力学分析，以稳定吸附外侧籽粒为研究对象，以籽粒的质心为原点，建立空间坐标系 xyz，左侧 xOy 平面，x 轴与清种齿短齿线平行，y 轴与齿形长齿线平行，坐标系方向如图 9 所示，建立此刻小麦籽粒力学模型为

$$\begin{cases} F_g\sin\theta_6 + F_e\cos\theta_5 - F_c - F_{Nx} = 0 \\ F_{Ny} + F_g\cos\theta_6 + F_e\sin\theta_5 - F_f = 0 \\ F_x - F_{Nz} = 0 \\ F_x d - F_{Nm} c = 0 \\ F_{Nm} = \sqrt{F_{Nx}^2 + F_{Ny}^2} \\ F_x = PS \\ K_1 = \dfrac{S_1}{S} \\ K_2 = \dfrac{S_2}{S} \end{cases} \tag{11}$$

式中　F_x——吸附力，N

F_e——4 级清种齿对籽粒施加的力，N

F_{Nx}、F_{Ny}、F_{Nz}、F_{Nm}——排种盘对籽粒各方向的支撑力分力，N

θ_5、θ_6——作用力间夹角，(°)

S_1、S_2——籽粒所遮盖型孔面积，mm^2

K_1、K_2——S_1、S_2与整个型孔面积 S 比值

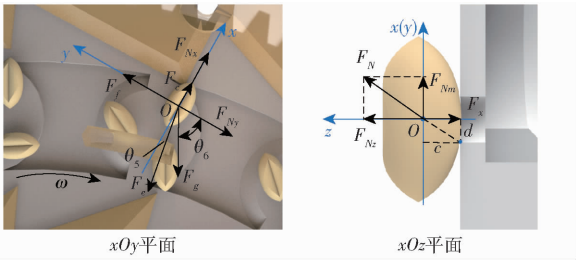


图 9　籽粒受外侧清种齿作用力

Fig. 9　Force exerted on seed by outer seed-clearing tooth

由式(11)可看出，当劣势籽粒吸附面积 S_1 最大时，随着清种齿与其接触碰撞，F_N、S_1 等均发生变化，劣势籽粒吸附面积逐渐减小，K_1减小，受到的 F_x 减小，直至掉落；反之，优势籽粒 K_2增大时，F_x增大，直至稳定吸附于型孔上。种盘角速度 ω 改变籽粒所受离心力和碰撞作用时间，进而影响吸附力 F_x及外力平衡状态，直接决定劣势籽粒是否被剔除以及优势籽粒是否稳定吸附，故清种质量与种盘转速呈显著相关性。在其他条件不变情况下，此时清种工序完成。

以中部双侧鱼鳍状清种齿的 1 个鱼鳍为例，进行局部受力分析，分析结果如图 10 所示。

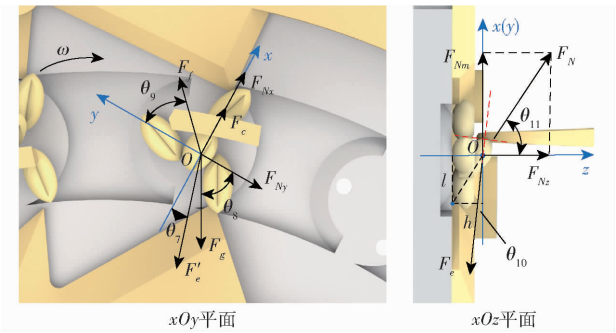


图 10　籽粒受中部双侧鱼鳍状清种齿作用力

Fig. 10　Force exerted on seed by middle double-side fish-fin-shaped seed-clearing tooth

以团簇上方籽粒为研究对象，以籽粒质心为原点，建立空间坐标系 xyz，左侧 xOy 平面，x 轴与清种齿短齿线平行，y 轴与齿形长齿线平行，坐标系方向如图 10 所示，此时小麦籽粒力学模型为

$$\begin{cases} F_g\sin\theta_8 + F'_e\cos\theta_7 - F_c - F_{Nx} \geqslant 0 \\ F_{Ny} + F_g\cos\theta_8 + F_N\sin\theta_7 - F_f\sin\theta_9 \geqslant 0 \\ F'_e\cos\theta_{10} - F_N\sin\theta_{11} \geqslant 0 \\ F_{Nm} h - F_{Nz} l \geqslant 0 \\ F_{Nm} = \sqrt{F_{Nx}^2 + F_{Ny}^2} \\ F_N = \sqrt{F_{Nz}^2 + F_{Nm}^2} \end{cases} \tag{12}$$

式中　F'_e——鱼鳍状清种齿对籽粒的作用力，N

$\theta_7 \sim \theta_{11}$——作用力间夹角，(°)

F_N——支撑力，N

从分析结果看，中部双侧鱼鳍状清种齿锥角与高度对清种效果具有显著影响：锥角改变导致清种过程籽粒径向分量($F'_e\cos\theta$)与轴向分量($F'_e\sin\theta$)发生改变，其中锥角大可提高径向作用力，利于克服吸附籽粒所受的离心力F_c和支撑力F_N，实现快速剔除；锥角小则增强轴向挤压力，有助于破坏机械互锁并减小摩擦力F_f，便于附加籽粒脱离。鱼鳍离排种盘高度 L_P对籽粒清除也具有显著影响：位置较高，无法清除互锁籽粒，位置较低，影响优势籽粒吸附。即可通过优化锥角与高度参数，在满足受力条件的同时，实现高效清除 1 ~ 2 粒附加籽粒，并维持优势籽粒稳定。

4　气吸式小麦精量排种器多侧清种机构仿真试验

为减少仿真计算成本，对复杂排种器模型进行简化，将种室、气室、排种盘、清种装置关键结构参数保留。于 ICEM 中绘制排种器内部流场模型网格，以“新冬 52 号”小麦为模型，进行籽粒外形三维建模，为满足流固耦合仿真中颗粒体积小于接触面网格体积要求，在 EDEM 中将模型离散元化，即以球

形小颗粒对三维模型内部进行填充,小颗粒之间通过 Bonding 键粘结,得到仿真所需小麦籽粒的 BPM(Bonded particle model)模型。

参照文献[24 - 27],参数设置如表 1 所示。

表 1 仿真参数设置

Tab. 1 Setting of simulation parameters

项目	参数	数值/形式
小麦籽粒	泊松比	0.29
	剪切模量/Pa	5.05×10^{8}
	密度/(kg·m^{-3})	1 350
装置(光敏树脂)	泊松比	0.28
	剪切模量/Pa	8.27×10^{8}
	密度/(kg·m^{-3})	1 140
接触面	小麦籽粒间恢复系数	0.60
	小麦籽粒间静摩擦因数	0.45
	小麦籽粒间动摩擦因数	0.05
	小麦装置间恢复系数	0.60
	小麦装置间静摩擦因数	0.64
	小麦装置间动摩擦因数	0.20
气相	介质	空气
	密度/(kg·m^{-3})	1.225
	粘度/(Pa·s)	1.79×10^{-5}
	重力加速度/(m·s^{-2})	9.81

4.1 CFD - DEM 耦合仿真

将关键部件模型导入 EDEM 软件,建立籽粒模型,设置排种盘转速,仿真时间步长 1.5 s,构建试验组以及分压型孔流场网格,将流场网格模型导入 Fluent 软件,选择 $k-\varepsilon$ 湍流模型,流场入口压力 -3.4 kPa,出口压力 0 kPa,仿真模型如图 11 所示,将内部流场区域网格划分为外部大气压流场网格、型孔动流场网格、气室内部流场网格 3 部分,每个部分互相接触的面定义为 Interface,负压入口定义为 Inlet,外部流场出口定义为 Outlet,其余部分设置为 Wall,得到耦合仿真气相网格;将相同坐标系的排种器模型导入 EDEM 软件,依据表 1 设定参数得到耦合仿真固相部分。由于在气固耦合分析中气流与颗粒间存在相互作用,采用欧拉双向耦合接口。EDEM 中颗粒相互作用基于 Hertz - Mindlin 接触模型。

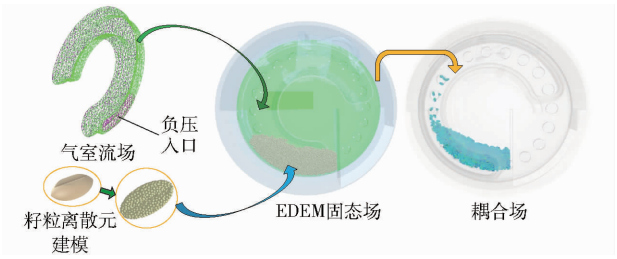


图 11 仿真模型

Fig. 11 Simulation models

4.2 清种机构仿真试验

4.2.1 单因素试验

清种机构核心目的是“剔除多余种子”。如清种强度过大,会将本该保留的单粒种子也打掉,产生“过清”,导致空穴。在农业生产中,过清(漏播)对产量的负面影响通常大于漏清(重播)。因此,单因素试验主要测试各因素对过清率的影响,利用过清率的急剧恶化点标定清种强度“上限边界”,从而确定多因素试验安全水平范围。合格率为主指标,漏清率为清种不足,过清率为清种过度。

以合格率和过清率为指标,分别对影响清种齿清种性能的因素排种盘转速、中部双侧鱼鳍状清种齿顶距排种盘表面高度、中部双侧鱼鳍状清种齿锥角,进行仿真预试验,单因素试验每组试验 3 次,取平均值,各指标计算式为

$$\begin{cases} Z_1=\dfrac{i_1}{Z'}\times100\% \\ Z_2=\dfrac{i_2}{Z'}\times100\% \\ Z_1+Z_2+Z_3=100\% \end{cases} \tag{13}$$

式中 Z_1——合格率 Z_2——过清率

Z_3——漏清率 i_1——合格组数

i_2——过清组数

Z'——籽粒团簇重吸组数,取 200 组

由图 12 可看出,随着中部双侧鱼鳍状清种齿锥角增加,清种作用逐渐增强。当锥角过小时,清种齿较为平直,清种能力较弱,主要表现为漏清率偏高;随着锥角增大,合格率逐渐升高;但当锥角过大时,清种力度过剩导致部分合格单粒被剔除,过清率显著增加,合格率随之下降。综合考虑高合格率与低过清率要求,选定锥角为 2° ~ 6°。结合设计目标对作业速度的要求,随着排种盘转速增大,种盘吸附籽粒与清种齿之间的碰撞作用力及线速度同步增加,清种状态由“清种不足”向“清种过度”转变。因此,合格率呈先增大后减小趋势(低转速下漏清率较高,高转速下过清率急剧上升)。为兼顾作业效率并避免过清失效,选定排种盘转速为 62.5 ~ 72.5 r/min。随着中部双侧鱼鳍状清种齿顶距排种盘表面高度增加,清种齿对籽粒的机械干扰和剔除能力逐渐减弱。当高度较小时,清种干涉过强,导致过清率偏高;随着高度增加,过清现象缓解,合格率达到峰值;若高度继续增加,清种能力明显不足,导致漏清率快速上升,合格率再次降低。综合过清与漏清的临界变化区间,选定高度为 4 ~ 8 mm。

4.2.2 多因素试验

通过单因素试验排除了“严重过清”的极端参

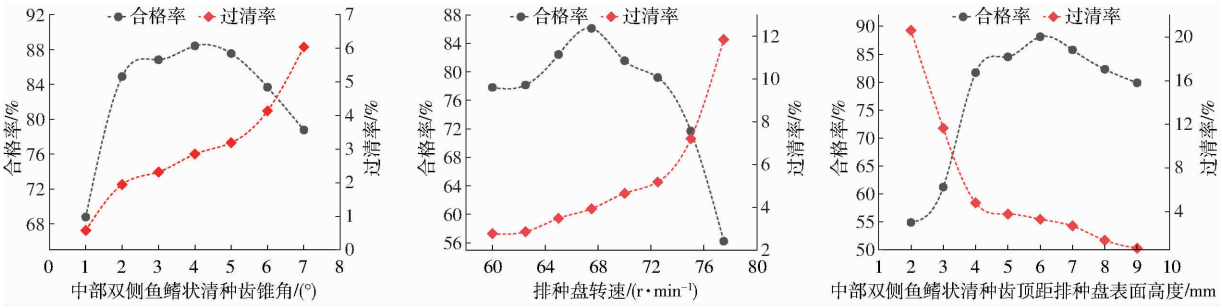


图 12　单因素试验

Fig. 12　Single-factor experiment

数范围后，多因素试验主要以“在优势范围内，最大限度地提升合格率并降低漏清率”为目的进行试验。采用最优性准则 D－optimal 设计方法，进行团簇重播现象清种，以排种盘转速 X_1、中部双侧鱼鳍状清种齿顶距排种盘表面高度 X_2、清种齿齿顶锥角 X_3作为试验因素，合格率 Y_1、漏清率 Y_2作为评价指标，设计 20 组试验，试验因素编码如表 2 所示，试验设计和结果如表 3 所示。

表 2　试验因素编码

Tab. 2　Experimental factors and coding

编码	因素		
	X_1/(r·min^{-1})	X_2/mm	X_3/(°)
2	72.5	8	6
1	70.0	7	5
0	67.5	6	4
－1	65.0	5	3
－2	62.5	4	2

表 3　试验设计与结果

Tab. 3　Experimental design and results

试验	因素			响应指标	
序号	X_1/(r·min^{-1})	X_2/mm	X_3/(°)	Y_1/%	Y_2/%
1	72.5	7	2	84.12	10.11
2	72.5	6	6	80.97	7.77
3	65.0	5	2	81.11	16.55
4	65.0	5	5	86.22	13.22
5	67.5	6	4	92.12	7.31
6	70.0	8	5	87.82	7.87
7	62.5	8	3	77.21	22.15
8	72.5	4	6	81.22	11.40
9	67.5	6	6	88.57	9.11
10	67.5	6	4	89.68	7.21
11	62.5	4	4	78.12	20.16
12	72.5	4	3	80.28	10.26
13	67.5	8	2	87.51	14.31
14	67.5	6	4	90.95	7.21
15	65.0	5	2	81.11	18.12
16	67.5	4	6	87.21	13.24
17	62.5	7	6	81.12	17.66
18	70.0	8	5	86.87	7.58
19	62.5	6	3	78.05	19.54
20	67.5	6	4	90.75	7.13

方差分析结果如表 4 所示，由表 4 可知 Y_1、Y_2标准二次回归模型 F 值分别为 49.51、138.56，p 值小于 0.000 1，模型决定系数 R^2 = 0.978 1、0.992 0 > 0.9，表明基于响应面的预测值与真实值间一致性很强，拟合精度较好，响应面模型可用于 Y_1、Y_2、后续预测和优化设计。排除不显著项，得出影响因子对合格率 Y_1、漏清率 Y_2的回归方程为

$$\begin{cases} Y_1 = -1\,553 + 44.54X_1 + 7.28X_2 + 22.22X_3 - \\ \qquad 0.203X_1X_3 - 0.392X_2X_3 - 0.31X_1^2 - \\ \qquad 0.51X_2^2 - 0.632X_3^2 \quad (R^2 = 0.978\,1) \\ Y_2 = 914.6 - 23.31X_1 - 7.79X_2 - 11.985X_3 + \\ \qquad 0.081X_1X_3 + 0.156X_1^2 + 0.714X_2^2 + \\ \qquad 0.769X_3^2 \quad (R^2 = 0.992\,0) \end{cases} \tag{14}$$

为寻得中部双侧鱼鳍状清种齿最优工作状态下各因素参数组合，以合格率 Y_1最大、漏清率 Y_2最小为最终优化目标，边界条件方程为

$$\begin{cases} \max Y_1 \\ \min Y_2 \\ \text{s.t.} \begin{cases} 62.5\ \text{r/min} \leqslant X_1 \leqslant 72.5\ \text{r/min} \\ 4\ \text{mm} \leqslant X_2 \leqslant 8\ \text{mm} \\ 2° \leqslant X_3 \leqslant 6° \end{cases} \end{cases} \tag{15}$$

对 2 个参数进行优化，采用取值范围为 0～1 的合意度函数评价优化结果，使用合意度函数获得最优解：排种盘转速 69.837 r/min、中部双侧鱼鳍状清种齿顶距排种盘表面高度 6.125 mm、齿顶锥角 4.48°，此时具有最优清种性能，对籽粒团簇清种合格率达 90.11%、过清率 2.48%、漏清率 7.41%。若基数换算为组合型孔组数旋转总数，合格率、漏播率、重播率分别为 96.94%、2.34%、0.72%。出于实际应用型考虑，取排种盘转速 70 r/min、中部双侧鱼鳍状清种齿顶距排种盘表面高度 6 mm、齿顶锥角 4.5°，根据优化试验结果，所设计的清种机构过清率低于漏清率，证明结构参数设计合理，能达到正常使用要求。

表 4 方差分析

Tab. 4 Analysis of variance

方差来源	合格率				漏清率			
	平方和	自由度	F	p	平方和	自由度	F	p
模型	419.69	9	49.51	<0.000 1 **	479.44	9	138.56	<0.000 1 **
X_1	41.94	1	44.53	<0.000 1 **	292.67	1	761.26	<0.000 1 **
X_2	7.90	1	8.38	0.016 0 *	3.99	1	10.37	0.009 2 **
X_3	13.43	1	14.26	0.003 6 **	25.43	1	66.14	<0.000 1 **
X_1X_2	0.060 2	1	0.063 9	0.805 6	0.041 8	1	0.108 8	0.748 3
X_1X_3	20.92	1	22.21	0.000 8 **	3.32	1	8.63	0.014 8 *
X_2X_3	9.82	1	10.43	0.009 0 **	0.721 8	1	1.88	0.200 6
X_1^2	197.42	1	209.60	<0.000 1 **	50.22	1	130.64	<0.000 1 **
X_2^2	14.01	1	14.88	0.003 2 **	27.98	1	72.79	<0.000 1 **
X_3^2	21.66	1	23.00	0.000 7 **	32.07	1	83.43	<0.000 1 **
残差	9.42	10			3.84	10		
失拟	5.97	5	1.73	0.281 1	2.55	5	1.98	0.236 0
误差	3.45	5			1.29	5		
总和	429.11	19			483.29	19		

注：* 表示影响显著（$0.01 \leqslant p < 0.05$），** 表示影响极显著（$p < 0.01$）。

4.2.3 最佳效果验证

对上述仿真最优结果进行 DEM－CFD 气固耦合仿真验证，设置 EDEM 固相流排种盘转速与 Fluent 气相流型孔动流场转速大小相等，方向相同。由于 EDEM 计算的时间步长远长于 Fluent 计算时步长，设定 EDEM 时间步长为 5×10^{-6} s，Fluent 时间步长为 5×10^{-4} s，时间步数共 3 000 步，仿真运行总时间 1.5 s。输入相应最佳参数，气吸排种器在设定参数条件下工作过程仿真结果如图 13 所示，籽粒在排种器充种和清种阶段各取 1 次。图 13 中，颗粒颜色按照生成的时间分层，便于观察排种盘所吸附籽粒位于排种器充种区内位置。

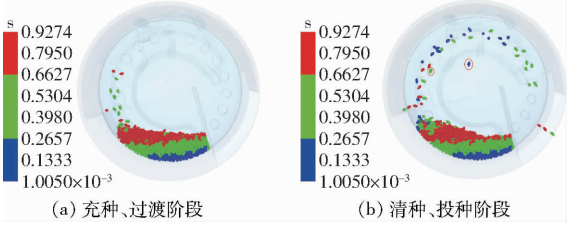


图 13 耦合仿真过程

Fig. 13 Macroscopic process of coupled simulation

从耦合仿真总体过程来看，清种装置工作性能良好，能较好地去除多余颗粒，达到较好的排种性能；在 1.005×10^{-3} ~ 0.927 4 s 生成全部颗粒，在 0 s 时充种完成；0 ~ 0.3 s 进入运种阶段，“重吸”现象发生，出现一孔多粒情况；在 0.3 ~ 0.84 s 时，进入清种阶段，颗粒开始碰触清种机构，清种机构对颗粒流的干预，破坏了重吸现象；0.84 ~ 1 s 进入投种阶段，负压消失，籽粒在重力作用下落入投种管。可以清晰看出良好的清种效果，符合高性能排种系统的动态要求。

5 台架试验

5.1 试验材料与设备

试验材料为“新冬 52 号”小麦籽粒，采用 JSP－12 型排种器性能试验台架，如图 14 所示。电控小型风机提供负压，通过特定程序使所设定负压保持相对稳定；小麦排种器采用低位投种，使 3 粒籽粒集中成穴；试验台架用于模拟播种机与地面相对运动；负压检测装置能实时精准读取排种器气室内部负压。清种机构采用 3D 打印技术制造，材料为光敏树脂，中部双侧鱼鳍状清种齿前后交错排布，距离排种盘表面高度可调，如图 14 所示。

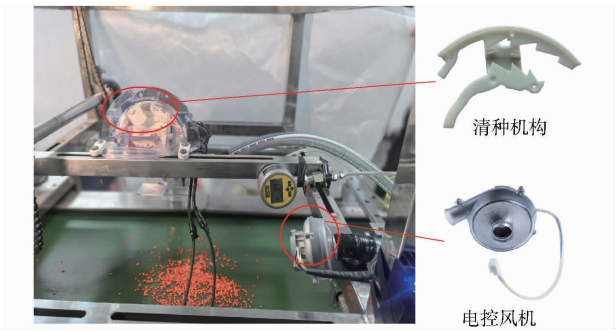


图 14 JSP－12 型排种器性能试验台架

Fig. 14 Test stand

由于本试验主要考察清种机构性能，其他相关变量暂且不予考虑。根据前期预试验得到的初步试验数据，中部双侧鱼鳍状清种齿顶距排种盘表面高度 h_q 调节范围为 4 ~ 8 mm；清种齿锥角设计范围为 2° ~ 6°；为迎合匹配播种机运行速度 7 km/h，排种盘转速调节范围为 62.5 ~ 72.5 r/min。评价指标参照

NY/T 996—2006《小麦精少量播种机作业质量》，使用高速摄像机从排种器种室窥视口观察清种区域工作情况，仅记录发生重吸现象型孔的试验数据：若吸附籽粒由多粒（$n>3$）变为恰好吸附 3 粒籽粒（$n=3$），记为合格；若吸附籽粒由多粒（$n>3$）清为空穴（$n<3$），记为过清；若未能有效清种（$n>3$），记为漏清。

5.2　验证性试验

基于得到的最优参数组合进行验证试验，试验结果如表 5 所示。结果表明，5 次重复试验中平均合格率达 94.8%，平均漏播率达 1.8%，平均重播率达 3.4%，各项指标均优于 NY/T 996—2006《小麦精少量播种机作业质量》规定的合格率 80% 与漏播率 6% 限值，验证了参数组合的有效性与稳定性。

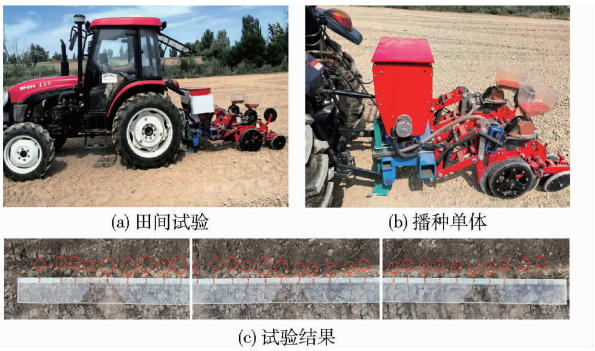
表 5　验证试验结果

Tab. 5　Validation experiment result　%

试验序号	合格率	漏播率	重播率
1	94.0	4.0	2.0
2	97.0	0.8	2.2
3	92.5	2.0	5.5
4	96.0	1.5	2.5
5	94.5	0.7	4.8
均值	94.8	1.8	3.4

6　田间播种性能试验

选择新疆农垦科学院试验田进行田间播种试验，试验地前期进行耕翻平整作业，含水率适中，天气良好。选用“新冬 52 号”小麦籽粒，负压给定 3.4 kPa，实际负压与作业负压误差为 ±0.2 kPa，播种机具前进速度 7 km/h，实际作业速度与设定作业速度误差为 ±0.5 km/h，搭建的小麦精量播种装置及播种效果如图 15 所示。



(a) 田间试验　(b) 播种单体

(c) 试验结果

图 15　田间试验

Fig. 15　Field experiment

对排种器播种性能进行综合性田间试验，样本量为播种穴数。选定穴距为 10 cm，作业行数为 2。采用五点取样法对籽粒进行采样，每个采样点测定 1 m 内穴间距及穴内播种合格率，重复测量 3 次并求取平均值，计算播种总排量稳定性变异系数、各行排量一致性变异系数、漏播率、平均合格率，结果如表 6 所示。

表 6　田间试验结果

Tab. 6　Field experiment result　%

参数	合格指标	试验值
总排量稳定性变异系数	≤5	4.56
各行排量一致性变异系数	≤10	7.48
漏播率	≤6	2.86
平均合格率	≥80	91.19

由表 6 可知，在田间试验中，由于排种器工作时受到机器的颠簸震动等，导致田间试验合格率（91.19%）略低于台架试验，单组仿形减振机构对田间随机振动有明显的降低效果，进行播种作业时，可根据土壤状态和工作要求提高仿形部件减振性能，从而提高播种合格率。

7　结论

（1）根据小麦精量播种的农艺要求，设计了一种气吸式小麦精量排种器多侧清种机构，重点对清种机构充种与清种工作过程进行理论分析，在充种阶段，籽粒仅受负压产生的吸附力作用，结合理论计算与实际工况，确定排种器正常工作时型孔所需的压强范围为 1.6 ~ 3.4 kPa。在清种过程，清种质量主要受 3 个关键参数影响，即排种盘转速、中部双侧鱼鳍状清种齿锥角以及中部双侧鱼鳍状清种齿顶距排种盘表面高度。

（2）单因素数值模拟仿真试验结果表明，影响清种效果较优范围：中部双侧鱼鳍状清种齿锥角为 2° ~ 6°，排种盘转速为 62.5 ~ 72.5 r/min，中部双侧鱼鳍状清种齿顶距排种盘表面高度为 4 ~ 8 mm。采用 D - optimal 设计多因素仿真试验，得到最优组合排种盘转速 69.837 r/min、中部双侧鱼鳍状清种齿顶距排种盘表面高度 6.125 mm、中部双侧鱼鳍状清种齿锥角 4.48° 时合格率、漏播率、重播率分别为 96.94%、2.34%、0.72%。清种效果明显，符合高性能排种系统的动态要求。

（3）排种器台架试验结果表明，合格率为 94.8%，重播率为 3.4%，漏播率为 1.8%。田间试验结果表明，平均合格率 91.19%，漏播率 2.86%。排量一致性和稳定性符合行业指标，表明本文所设计的精量排种器满足小麦精量播种实际作业需求。

参 考 文 献

[1] 刘录祥. 我国小麦产业科技创新发展现状与展望[J]. 寒旱农业科学,2024,3(6):491 – 494.
Liu Luxiang. Current status and prospects of technological innovation and development in China's wheat industry[J]. Journal of Cold and Arid Agricultural Sciences, 2024, 3(6): 491 – 494. (in Chinese)

[2] 李圣军. 2022/2023 年度全球小麦市场回顾及 2023/2024 年度展望[J]. 中国粮食经济,2023(8):65 – 69.
Li Shengjun. Review of the global wheat market in 2022/2023 and outlook for 2023/2024[J]. China Grain Economy, 2023(8): 65 – 69. (in Chinese)

[3] 韩笑,石吕,薛亚光,等. 宽窄行种植下不同秸秆还田和耕作方式对小麦强根壮秆效应的影响[J]. 核农学报,2025,39(10):2265 – 2276.
Han Xiao, Shi Lyu, Xue Yaguang, et al. Effects of different straw returning and tillage methods on strong root and robust stem formation of wheat under wide-narrow row planting[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2025, 39(10): 2265 – 2276. (in Chinese)

[4] 胡新宇,张徐彬,韦还和,等. 不同穴播苗数对小麦产量及其形成特征的影响[J]. 江苏农业科学,2023,51(12):95 – 99.

[5] Nyaupane S, Poudel M R, Panthi B, et al. Drought stress effect, tolerance, and management in wheat-areview[J]. Cogent Food & Agriculture, 2024, 10(1): 2296094.

[6] Xi X, Gu C, Shi Y, et al. Design and experiment of no-tube seeder for wheat sowing[J]. Soil and Tillage Research, 2020, 204: 104724.

[7] 贾洪雷,陈玉龙,赵佳乐,等. 气吸机械复合式大豆精密排种器设计与试验[J]. 农业机械学报,2018,49(4): 75 – 86.
Jia Honglei, Chen Yulong, Zhao Jiale, et al. Design and experiment of pneumatic-mechanical combined precision metering device for soybean[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(4): 75 – 86. (in Chinese)

[8] 张建超,孙远泽,郁志宏,等. 往复辊式巨菌草精量排种器设计与试验[J]. 农业机械学报,2025,56(12):235 – 246.
Zhang Jianchao, Sun Yuanze, Yu Zhihong, et al. Design and experiment of reciprocating roller precision seed stem metering for giant Juncao[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(12): 235 – 246. (in Chinese)

[9] 郑智旗,巨晓腾,赵鹏飞,等. 螺旋引导调姿促充式小麦精量排种器设计与试验[J]. 农业机械学报,2025,56(9):117 – 128.
Zheng Zhiqi, Ju Xiaoteng, Zhao Pengfei, et al. Design and experiment of screw-guided posture-adjusting and filling-promoting precision seed metering device for wheat[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(9): 117 – 128. (in Chinese)

[10] 李玉环,赵烁,杨丽,等. 独立分充式大豆双排毛刷高速精量排种器设计与试验[J]. 农业机械学报,2024,55(6):101 – 110.
Li Yuhuan, Zhao Shuo, Yang Li, et al. Design and test of high-speed precision seeder of independent fractionated soybean double-row brush[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(6): 101 – 110. (in Chinese)

[11] 丁力,杨丽,张东兴,等. 气吸式玉米排种器清种机构参数化设计与试验[J]. 农业机械学报,2019,50(9):47 – 56.
Ding Li, Yang Li, Zhang Dongxing, et al. Parametric design and test of seed cleaning mechanism of air-suction maize seed-metering derice[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(9): 47 – 56. (in Chinese)

[12] 张波屏. 现代种植机械工程[M]. 北京:机械工业出版社,1997.

[13] 张波屏. 播种机械设计原理[M]. 北京:机械工业出版社,1982.

[14] 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 Yuhuan, Yang Li, Zhang Dongxing, et al. Design and experiment of double-sided cleaning device for air-suction corn precision seed meter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(7): 29 – 39. (in Chinese)

[15] 邢赫,臧英,王在满,等. 水稻气力式排种器分层充种室设计与试验[J]. 农业工程学报,2015,31(4):42 – 48.
Xing He, Zang Ying, Wang Zaiman, et al. Design and experiment of layered seed-filling chamber for rice pneumatic seed meter[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(4): 42 – 48. (in Chinese)

[16] 祁兵,张东兴,刘全威,等. 集排式精量排种器清种装置设计与性能试验[J]. 农业工程学报,2015,31(1):20 – 27.
Qi Bing, Zhang Dongxing, Liu Quanwei, et al. Design and performance test of cleaning device for centralized precision seed meter[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(1): 20 – 27. (in Chinese)

[17] 言育谦,刘立晶,刘云强,等. 蔬菜气吸式排种器四级清种机构设计与试验[J]. 农业机械学报,2023,54(增刊 1):57 – 65.
Yan Yuqian, Liu Lijing, Liu Yunqiang, et al. Design and test of four-stage seed cleaning mechanism for air-suction vegetables seed-metering device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(S1): 57 – 65. (in Chinese)

[18] 王云霞,黄苏同,张文毅,等. 交错勾齿式小麦精量排种器设计与试验[J]. 农业机械学报,2024,55(7):142 – 153,167.
Wang Yunxia, Huang Sutong, Zhang Wenyi, et al. Design and experiment of wheat precision seed metering device with staggered hook-tooth[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(7): 142 – 153,167. (in Chinese)

[19] 杨丽,李治民,张东兴,等. 离心式高速玉米精量排种器 T 形槽型孔设计与试验[J]. 农业工程学报,2024,40(7):50 – 60.
Yang Li, Li Zhimin, Zhang Dongxing, et al. Design and experiment of T-shaped groove hole for centrifugal high-speed corn precision seed meter[J]. Transactions of the CSAE, 2024, 40(7): 50 – 60. (in Chinese)

[20] Jotautienė E, Karayel D, Bivainis V. Development and validation of a DEM-based measurement method for analyzing seed

motion dynamics in helicoidal seed tubes[J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2025,108: 103168.
[21] Yasir S H, Liao Qingxi. Simulation of negative pressure behavior using different shapes and positions of pressure inlet and seed hole diameters using ANSYS - CFX to optimize the structure of a pneumatic metering device designed for wheat[J]. Agricultural Engineering International: CIGR Journal, 2014, 16(4): 122 - 134.
[22] 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 Li, Yang Li, Zhang Dongxing, et al. Design and experiment of seed plate of corn air suction seed metering device based on DEM - CFD[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(5): 50 - 60. (in Chinese)
[23] 李雪,李星会,杨诚,等.小麦小区气吸式排种器刮种机构设计与试验[J].农机化研究,2026,48(5):27 - 34.
Li Xue, Li Xinghui, Yang Cheng, et al. Design and experiment of seed-scraping mechanism for air-suction seed meter in wheat plots[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2026, 48(5): 27 - 34. (in Chinese)
[24] 魏松,丁幼春,董万静,等.穴粒数可调气吸式棉花精量排种器设计与试验[J].农业机械学报,2026,57(2):32 - 45.
Wei Song, Ding Youchun, Dong Wanjing, et al. Design and experiment of precision pneumatic seed metering device with adjustable seeds per hole for cotton[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2026, 57(2): 32 - 45. (in Chinese)
[25] Lei X, Liao Y, Liao Q. Simulation of seed motion in seed feeding device with DEM - CFD coupling approach for rapeseed and wheat[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2016, 131: 29 - 39.
[26] 李骅,高吉枫,王永健,等.基于 DEM - MBD 耦合的链勺式大蒜精量排种器设计与试验[J].农业机械学报,2024,55(12):147 - 159.
Li Hua, Gao Jifeng, Wang Yongjian, et al. Design and test of chain-spoon type precision seed-metering device for garlic based on DEM - MBD coupling[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(12): 147 - 159. (in Chinese)
[27] He S, Qian C, Jiang Y, et al. Design and optimization of the seed feeding device with DEM - CFD coupling approach for rice and wheat[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2024, 219: 108814.

(上接第 173 页)

[19] Wan Q, Zhang Z, Jiang L, et al. Image anomaly detection and prediction scheme based on SSA optimized ResNet50 - BiGRU model[PP/OL]. V3. arXiv(2024 - 09 - 14)[2025 - 03 - 03]. https://arXiv.org/abs/2406.13987.
[20] Zang Z, Zhang Y, Ruan S, et al. An AM - CNN - BiGRU network with spatiotemporal feature fusion for industrial robot predictive maintenance[J]. Scientific Reports, 2025,15(1):44961.
[21] Raksarikon W. Nutrient-Deficiency-Symptoms-in-Rice[DS/OL]. (2021 - 02 - 08)[2022 - 04 - 22]. https://www.kaggle.com/datasets/guy007/nutrientdeficiencysymptomsinrice.
[22] Qin X, Zhang Z, Huang C, et al. U^2 - Net: going deeper with nested U-structure for salient object detection[J]. Pattern Recognition, 2020,106:107404.
[23] Wang J, Wu Q J, Pourpanah F. An attentive-based generative model for medical image synthesis[J]. International Journal of Machine Learning and Cybernetics, 2023,14(11):3897 - 3910.
[24] He K, Zhang X, Ren S, et al. Deep residual learning for image recognition[C]// Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2016: 770 - 778.
[25] Woo S, Park J, Lee J, et al. CBAM: convolutional block attention module[C]// Proceedings of the European Conference on Computer Vision (ECCV), 2018: 3 - 19.
[26] Lee H, Kim H, Nam H. SRM: a style-based recalibration module for convolutional neural networks[C]// Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV), 2019: 1854 - 1862.
[27] Cho K, Van Merriënboer B, Gulcehre C, et al. Learning phrase representations using RNN encoder-decoder for statistical machine translation[PP/OL]. V3. arXiv (2014 - 01 - 01)[2025 - 03 - 10]. https://arxiv.org/pdf/1406.1078.
[28] Simonyan K, Zisserman A. Very deep convolutional networks for large-scale image recognition[PP/OL]. V6. arXiv (2014 - 01 - 01)[2025 - 03 - 03]. https://arxiv.org/pdf/1409.1556.
[29] Chen J, Kao S, He H, et al. Run, don't walk: chasing higher FLOPS for faster neural networks[C]// Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2023: 12021 - 12031.
[30] Tan M, Le Q V. Efficientnetv2: smaller models and faster training[PP/OL]. V3. arXiv (2021 - 06 - 23)[2025 - 03 - 03]. https://arxiv.org/pdf/2104.00298.
[31] Tu Z, Talebi H, Zhang H, et al. Maxvit: multi-axis vision transformer[C]// Computer Vision-ECCV 2022. Cham: Springer Nature Switzerland, 2022: 459 - 479.
[32] Mehta S, Rastegari M. Separable self-attention for mobile vision transformers[PP/OL]. V1. arXiv(2022 - 01 - 01)[2025 - 03 - 03]. https://arxiv.org/pdf/2206.02680.
[33] Chen H, Wang Y, Guo J, et al. VanillaNet: the power of minimalism in deep learning[J]. Advances in Neural Information Processing Systems, 2023,36:7050 - 7064.