doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2025.07.029

玉米高速精量排种器轮式导种装置设计与试验

唐　汉[1]　王紫恒[1]　徐福东[1]　苑子昕[1]　朱贵煊[1]　王一甲[2]

(1.东北农业大学工程学院,哈尔滨 150030;2.东北农业大学水利与土木工程学院,哈尔滨 150030)

摘要:针对高速播种作业工况下种子运移不稳定的问题,本文提出了一种轮式导种装置,以玉米高速精量排种器作为载体,阐明了该导种装置工作原理,分析了该装置对排种器排种性能的影响机理。在此基础上开展了单因素试验,探究了轮式导种装置底座约束运移弧面圆心角、导种轮转速对排种性能的影响。基于高速摄像技术对不同结构与工况下玉米种子运动进行轨迹与速度分析。结果表明:约束运移弧面圆心角的增大提高了玉米种子投种稳定性,使投种速度更加稳定;采用两因素三水平正交试验得到轮式导种装置最佳工作参数为约束运移弧面圆心角 65°、导种轮转速 120 r/min,此时,合格指数为 98.35%,变异系数为 8.13%,重播率为 1.18%,漏播率为 0.47%。研究结果为机械式导种装置研发提供参考,同时为提高高速作业下排种质量机理探究提供借鉴。

关键词:玉米;排种器;导种装置;拨片轮式;高速精量

中图分类号:S223.2　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2025)07-0316-12　　**OSID**:

Design and Test of Wheel-type Seed Guide Device for High-speed Maize Precision Seed Metering Apparatus

TANG Han[1]　WANG Ziheng[1]　XU Fudong[1]　YUAN Zixin[1]　ZHU Guixuan[1]　WANG Yijia[2]

(1. *College of Engineering*, *Northeast Agricultural University*, *Harbin* 150030, *China*

2. *School of Water Conservancy and Civil Engineering*, *Northeast Agricultural University*, *Harbin* 150030, *China*)

Abstract: Aiming at the instability issue of seed transportation under high-speed seeding operations, a wheel-type seed guide device was proposed. Using a high-speed precision seed-metering device for maize as the test platform, the operational principle of this guide device was elucidated. Furthermore, the mechanism affecting seeding performance was systematically analyzed through kinematic modeling and discrete element simulations. In a single-factor test, the effects of the circle centre angle of the constrained transport arc surface at the base of the wheel-type seed guide device and the rotational speed of the seed guide wheel on the seed metering performance were investigated. High speed camera technology was used to analyze the trajectories and discharge velocity of maize seeds at various levels of factors. The findings demonstrated that an elevation in the circle centre angle of the constraint transport arc surface enhanced the stability of maize seed discharge, resulting in a more uniform discharge velocity. A multi-factor test was used to determine the optimum operating parameters of the wheel-type seed guide device. The optimal parameters were determined to be a circle centre angle of the constraint transport arc surface of 65° and the seed guide wheel rotational speed of 120 r/min. Multi-factor test results indicated that the qualified rate was 98.35%, the coefficient of variation was 8.13%, the multiple rate was 1.18%, and the miss rate was 0.47% under the optimal operating condition. This research can provide a reference for the investigation and development of the mechanical seed guide device, and also a reference for investigating the mechanism for improving high-speed seed metering performance.

Key words: maize; seed-metering device; seed guide device; paddle-wheel type; high-speed precision

收稿日期:2025-02-08　修回日期:2025-02-28

基金项目:国家自然科学基金项目(52475247、31901414)、黑龙江省重点研发计划项目(2022ZX05B02)和哈尔滨市制造业科技创新人才项目(2023HBRCCG005)

作者简介:唐汉(1991—),男,教授,博士生导师,主要从事智能农机装备及关键技术研究,E-mail:tanghan@neau.edu.cn

通信作者:王一甲(1995—),男,教授,博士生导师,主要从事农业生产运作管理研究,E-mail:yijiaw@neau.edu.cn

0　引言

玉米为中国主要粮食作物，在农业生产中占有重要地位[1-2]。随着耕地面积日益紧张，提高玉米单位面积产量是保障粮食安全的关键手段[3-4]。提高播种合格率即优化精量排种技术可以有效增加玉米单位面积产量[5]。当今世界主要采用气力式精量播种机进行播种作业，播种质量直接取决于排种器性能[6-7]。

在高速播种作业下经排种器排出后的种子运动姿态不稳定，易造成播种质量下降[8]。增设导种装置可以提高高速播种作业下种子投种后运移稳定性，依据导种方式可将导种装置分为利用重力作用的导种管投种（无约束）、气流辅助高速投种装置（半约束）和基于二次投种原理设计的机械式导种装置（全约束）[9]，采用正压气流辅助导种的半约束导种装置结构较为简单，可以有效提高导种稳定性但正压气流同时有可能造成种子在导种管内的碰撞增加，不合适的正压气流反而对导种过程产生负面影响。采用机械机构导种的全约束导种装置可以实现针对种子从脱离排种盘至田间的全过程约束，有效提高了合格指数，但机械导种装置需考虑机械装置对种子挤压或者碰撞，防止在运移过程中对种子造成损伤。一些学者对机械式导种装置开展了相关研究，试验结果表明机械式拨种轮可有效改善排种变异系数[10]。带式导种装置可对高速作业下种子施加有效约束，提高了导种过程稳定性[11]。因此，通过增设导种装置可以有效提高种子运移过程稳定性，改善播种性能。

高速摄像技术在排种器的研发过程中得到了广泛应用。ZHAO 等[12]针对新型高速精密排种装置性能展开研究，利用高速摄像技术捕捉种子位移坐标，计算得到种子排出速度，进而优化最佳投料速率。LI 等[13]利用高速摄像技术追踪种子在排种器腔体内运动轨迹，与仿真试验结果进行对比，验证了仿真结果。

为增加玉米种子运移过程中的稳定性，本文提出一种机械式导种与导种管导种结合的导种方式，设计轮式导种装置。基于高速摄像技术，分析轮式导种装置对导种过程的影响机理，探究投种轨迹对排种性能的影响，优化轮式导种装置的工作参数，以期提高轮式导种装置工作性能。

1　整机结构及工作原理

1.1　整机结构

电驱式气吸高速玉米精量排种器由前壳体、后壳体、清种刀、排种盘、轮式导种装置、导种管、传动轴、驱动电机等部件组成（图 1a）。清种刀安装于前壳体，前壳体包括入种口与轮式导种装置支撑轴的定位槽。排种盘与传动轴固装连接，可转动地安装于前后壳体中间，轮式导种装置包括轮式导种装置底座、导种轮、导种轮拨片，由后壳体和前壳体固定在排种盘种子掉落区域下方，导种管与前壳体固定安装，种子掉落进入导种区之后经过轮式导种装置的约束引导运移后进入投种区被投入导种管内。排种器工作区域划分如图 1b 所示，后壳体包含有负压腔和连接到风机的吸风管。两个直流无刷电机分别驱动排种盘和导种轮转动。

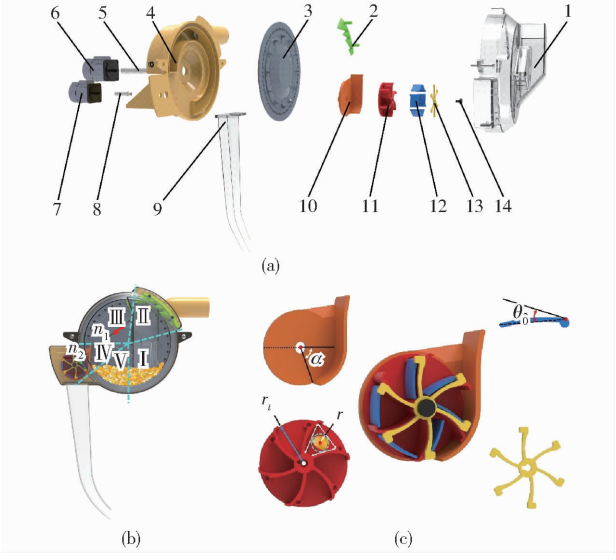


图 1　排种器结构爆炸视图、工作原理及区域划分

Fig. 1　Exploded view, working principle, and working area division of the seed metering apparatus

Ⅰ. 充种区　Ⅱ. 清种区　Ⅲ. 运种区　Ⅳ. 导种区　Ⅴ. 投种区

1. 前壳体　2. 清种刀　3. 排种盘　4. 后壳体　5. 排种盘驱动轴　6. 驱动电机 A　7. 驱动电机 B　8. 导种轮驱动轴　9. 导种管　10. 轮式导种装置底座　11. 导种轮　12. 导种轮拨片　13. 导种轮拨片固定盖　14. 轮式导种装置支撑轴

1.2　工作原理

风机开始工作后保证负压腔内有稳定负压，种子通过前壳体入种口进入种子填充区，驱动电机 A 驱动排种盘转动。在排种盘转动过程中，种群中玉米种子被排种盘型孔吸附。在种子被排种盘吸附转动过程中，会出现 2 个或 3 个种子被吸附在同一个型孔中，四级清种刀清除多余吸附的种子来确保每个型孔只吸附 1 粒种子，同时被清除的种子会落回种群[14]。在经过清种区后，随着种子离开负压区域，掉落进入轮式导种装置，驱动电机 B 驱动导种轮转动，经轮式导种装置约束运移至投出进入导种管，由导种管的引导作用运移至种沟，实现高速精量播种。

轮式导种装置主要由导种轮及轮式导种装置底座组成,如图 1c 所示。

轮式导种装置引导并约束从排种盘下落种子,统一种子投种轨迹。为确保种子在进入轮式导种装置时不产生过多碰撞,轮式导种装置底座入种口弧面设计应确保契合种子下落轨迹。

为了保证种子在导种轮轮槽内姿态变化不受限,采用试验种子类型(德美亚一号)的三轴尺寸中的最大值作为种子近似圆半径 r 为 6.34 mm。基于该近似圆半径来设计导种轮轮槽形状与尺寸以及导种轮半径 r_t 为 32 mm。为了避免拨片影响种子在导种轮轮槽内运动,根据导种轮轮槽形状,导种轮拨片弧面切线倾角 θ_0 取 30°。图中 α 为约束运移弧面圆心角,即为轮式导种装置底座弧面所占的角度,由水平方向起始,结束于约束弧面末端,该角度直观反映轮式导种装置底座约束运移弧面长度。

导种轮和排种盘合适的转速比可保证种子依次从排种盘掉落进导种轮轮槽中。传统齿轮不能单独调节导种轮和排种盘转速[15-16]。选择无刷直流电机作为排种器和轮式导种装置动力源,可以无极单独调节导种轮和排种盘转速同时让排种盘转速不受限于作业速度[17-18]。

排种盘转速 n_1 导种轮转速 n_2 关系为

$$\frac{n_1}{n_2}=\frac{B}{Z} \tag{1}$$

式中 n_1——排种盘转速,r/min

n_2——导种轮转速,r/min

B——导种轮轮槽数

Z——排种盘型孔数

在排种器工作时,通过驱动器控制两个电机转速比来确保种子依次有序地落入导种装置内。

2 导种过程分析

2.1 导种轨迹

种子运动过程如图 2 所示。种子进入轮式导种装置后会经过 3 个阶段:短距离心阶段(图 3a)、约束运移阶段(图 3b)、引导投种阶段(图 3c),种子在到达点 c 处后开始投种。

种子在点 a 处接触导种轮拨片开始短距离心运动,短距离心运动后到达点 b 与轮式导种装置底座约束运移弧面(文中统一简称为约束运移弧面)接触后结束。采用的玉米种子(德美亚一号)三轴尺寸为(12.35 ± 0.33) mm、(9.24 ± 0.42) mm、(4.70 ± 0.57) mm[19]。根据三轴尺寸设计导种轮厚度为 14 mm,近似于玉米种子三轴最大尺寸,在分析玉米在导种轮中运动过程时,忽略种子横向滑移。

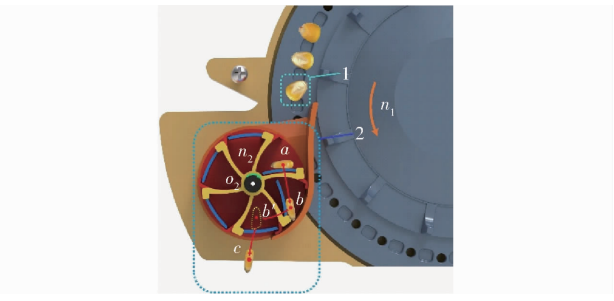
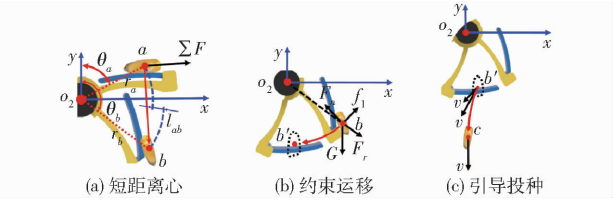


图 2 种子运动过程

Fig. 2 Seed movement process

1. 待掉落种子 2. 种子在轮式导种装置内运动过程



(a) 短距离心 (b) 约束运移 (c) 引导投种

图 3 导种轨迹

Fig. 3 Seed guiding trajectory

以导种轮圆心 O_2 为原点,水平方向为 x 轴,竖直方向为 y 轴建立坐标系,离心运动开始时种子处于点 a,结束于点 b。种子此时受到合力沿导种轮拨片弧面切线倾角方向,种子短距离心运动经过距离为 l_{ab}(图 3a)。

在种子短距离心运动中合外力 F 始终大于 0,由能量守恒定律可得,种子所受合外力做功为

$$\int_{r_a}^{r_b}\int_{\theta_a}^{\theta_b}\sum F\mathrm{d}r\mathrm{d}\theta=\frac{1}{2}m(v_b^2+r_b^2n_2^2-r_a^2n_2^2) \tag{2}$$

式中 v_b——点 b 处种子接触约束运移弧面时速度,m/s

r_a——点 a 处种子与圆心 O_2 距离,m

r_b——点 b 处种子与圆心 O_2 距离,m

θ_a——点 a 处种子中心与圆心 O_2 连线与水平方向夹角,(°)

θ_b——点 b 处种子中心与圆心 O_2 连线与水平方向夹角,(°)

m——种子质量,kg

由式(2)可知,过大的导种轮转速 ω_2 或过长的离心距离 l_{ab} 都会造成种子接触约束运移弧面时速度 v_b 过大,易造成弹跳,应保证离心距离 l_{ab} 尽量小。

种子在轮式导种装置内约束运移阶段如图 3b 所示。该阶段由点 b 开始至点 b' 结束。在约束运移阶段中,种子在导种轮拨片和约束运移弧面的共同作用下按照预先规划的轨迹平稳运移。

该阶段中,种子轨迹 bb' 为弧线,且种子处于匀速转动状态,因此种子所受合外力为 0,即

$$\sum F = F_r + F_n + f_1 + G = 0 \tag{3}$$

式中　F_r——种子受到的离心力，N

G——种子受到的重力，N

F_n——种子受到的支持力，N

f_1——种子受到的摩擦力，N

由式(3)可知，种子在约束运移阶段中将始终保持匀速圆周运动，直至点 b'进入下一阶段。

待投种子引导投种阶段如图 3c 所示。由点 b'开始沿约束运移弧面运动至点 c 结束。该阶段种子受到导种轮拨片作用，运动速度 v 逐渐向下偏转，当种子运动至点 c 时速度 v 方向向下，此时种子脱离轮式导种装置的约束，开始下抛运动。

根据上述对种子 3 个阶段可得，保证种子在临界投种时初速度方向尽量接近竖直向下至关重要[20]。

2.2　导种动力学分析

约束运移弧面长度会影响种子在约束运移阶段中的运动稳定性。当种子掉落至点 a 时与导种轮拨片接触后经过短距离心运动后在点 b 接触约束运移弧面，以点 a 处种子质心为原点，滑动平面切向为 x 轴，法向为 y 轴建立坐标系，对种子进行受力分析，如图 4 所示。

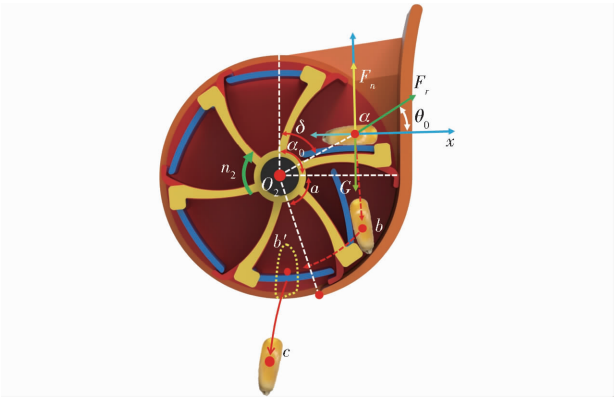


图 4　种子离心运动受力分析

Fig. 4　Force analysis of short-distance centrifugal motion of seeds

根据种子在点 a 处沿 x 轴方向合力 F_x 大于 0，可得

$$F_x = F_r\cos\theta_0 + G\sin(\delta + \theta_0 - 0.5\pi) \tag{4}$$

式中　θ_0——导种轮拨片切线倾角，(°)

δ——种子中心与圆心 O_2 连线与竖直方向的夹角，(°)

$$f_2 = \mu_2(G\cos(\delta + \theta_0 - 0.5\pi) - F_r\sin\theta_0) \tag{5}$$

式中　f_2——种子与导种轮间滑动摩擦力(方向沿 x 轴负方向)，N

μ_2——种子与导种拨片间滑动摩擦因数

联立式(4)、(5)可得

$$\delta > \arccos\left(\frac{r_a\omega_2^2}{g}\sin\left(\theta_0 + \arctan\frac{1}{\mu_2}\right)\right) + \arctan\mu_2 - \theta_0 \tag{6}$$

已知种子所在点 a 处半径 r_a 取 0.025 m，重力加速度 g 取 9.8 m/s^2，种子与导种轮拨片摩擦因数 μ_2 取 0.3[21-22]，当导种轮转速 n_2 取 120 r/min 时，由式(6)计算可得种子所处位置角度 δ 应大于 65°。

为确保待投种子在约束运移阶段中平稳运动，约束运移弧面圆心角所对应的角度 α 应满足

$$\alpha > \alpha_0 - \delta \tag{7}$$

式中　α_0——约束运移弧面的起始角，(°)

种子位置角 δ 为 65°，约束运移弧面起始角 α_0 为 90°，代入式(7)可得，约束运移弧面圆心角 α 应大于 25°，因此为了确保种子在约束运移阶段运动平稳，约束运移阶段的弧长应充足，约束运移弧面圆心角 α 应远大于 25°。

投种初速度方向会对投种轨迹分布产生影响[23]，在引导投种阶段中，当导种轮转动至导种轮圆心 O_2 与拨片盖板圆心 O_3 的连线 O_2f 与约束运移弧面边缘点 e 所夹弧线长度达到恰好通过待投种子最大尺寸为半径的圆时，此时种子处于临界投种状态，种子质心点 c 位于 O_2f 与 O_2e 角分线延长线上，此时种子的速度向下处于临界投种状态，以导种轮圆心 O_2 为原点，水平方向为 x 轴，竖直方向为 y 轴建立坐标系，对临界投种状态种子进行运动学分析，如图 5 所示。

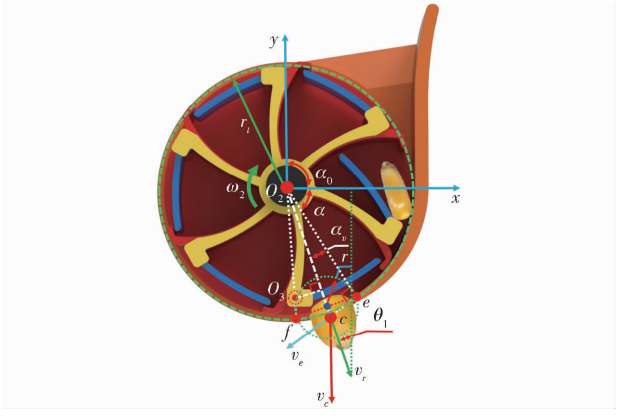


图 5　临界投种速度分析

Fig. 5　Analysis of critical seed discharge velocity

种子在投种点 c 处速度 v_c 为导种轮转动产生的线速度 v_e 与导种轮拨片产生的速度 v_r 矢量和，满足

$$\boldsymbol{v}_c = \boldsymbol{v}_e + \boldsymbol{v}_r \tag{8}$$

由式(8)得

$$\begin{cases} v_c = v_e\cos\alpha + v_r\cos\theta_1 \\ v_e\sin\alpha = v_r\sin\theta_1 \\ v_e = \omega_2 r \end{cases} \tag{9}$$

其中
$$\begin{cases} r = r_t \\ \theta_1 = 0.5\pi - \alpha - \alpha_v \end{cases} \tag{10}$$

式中 θ_1——v_r 与竖直方向夹角,(°)

α_v——$\angle fO_2e$ 的角分线与 O_2e 夹角,(°)

联立式(8)、(9)可得

$$v_a = \omega_2 r_t \left(\cos\alpha + \frac{\sin\alpha}{\tan(0.5\pi - \alpha - \alpha_v)} \right) \tag{11}$$

由式(11)可知,投种初速度 v_a 与约束运移弧面圆心角 α 及导种轮转速 n_2 密切相关,在前期预试验中,约束运移弧面圆心角 α 低于 50°时会造成投种时种子姿态不稳定,而约束运移弧面圆心角大于 70°时会导致种子过大的水平速度分量。投种初速度方向越接近竖直,种子在空中运动姿态越稳定[24]。因此,选取约束运移弧面圆心角 α 为 50°~70°,通过后续试验确定,其与投种轮转速 n_2 的最优组合。

3 轮式导种装置性能试验

3.1 试验环境

2024 年 1 月在黑龙江省哈尔滨市东北农业大学工程训练中心进行台架试验,如图 6 所示,试验装置为 BST-16 型计算机视觉排种器试验台(黑龙江省农业机械工程研究所)及高速摄像机(PCO company)。

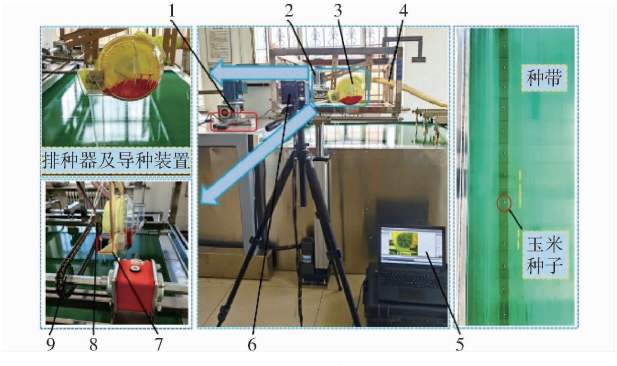


图 6 排种器台架试验

Fig. 6 Bench performance test of seed metering apparatus

1. 驱动器 2. 驱动电机 3. 玉米高速精量排种器 4. 负压风管 5. 计算机 6. 高速摄像机 7. 无刷直流电机 8. 链轮 9. 驱动电机齿轮

在接通负压气流使排种器开始吸附过程前,接通主轴电机电源,驱动导种装置电机通过计算机进行闭环控制,计算机上可以查看电机实时转速。根据式(1)计算后,在计算机上对驱动导种轮的电机进行转速控制,确保排种盘与导种轮的转速达到匹配关系后,接通负压气流,排种器开始工作。高速摄像机拍摄的图像通过信号线将图像传输给计算机。

3.2 单因素试验及高速摄像试验

单因素试验过程中,将约束运移弧面圆心角及导种轮转速作为试验因素,以合格指数、变异系数、漏播率、重播率为试验指标,探究试验因素对排种器排种性能的影响规律。

排种盘型孔数与排种器前进速度、排种盘转速、播种株距的关系满足

$$Z = \frac{60V}{n_1 L} \tag{12}$$

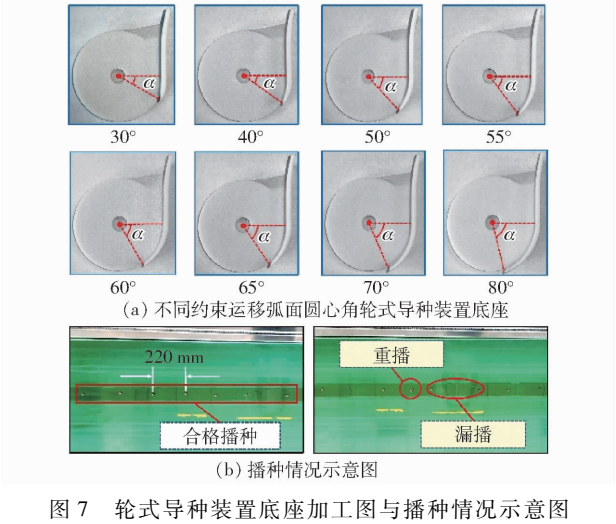
式中 V——排种器前进速度,km/h

L——理论播种株距,mm

参考东北地区农艺要求,设定理论播种株距为 220 mm,根据排种器结构设计以及高速播种作业农艺要求,将前进速度设为 12~16 km/h[25-26]。

由式(12)可知,排种盘转速 n_1 为 21.4~29.4 r/min。由式(1)可推,导种轮转速 n_2 为 100~140 r/min。

如图 7a 所示,加工了不同约束运移弧面圆心角的轮式导种装置底座进行试验。针对约束运移弧面圆心角、导种轮转速开展单因素试验。设定排种器工作负压为 4.5 kPa[27-28]。根据国际标准 ISO 7256/1,相邻两种子间距离大于 1.5 倍理论株距时,定义为漏播,株距小于 0.5 倍理论株距时,定义为重播[29],如图 7b 所示。每组试验结束后测量相邻 2 粒种子粒距,进行数据统计分析处理,每组试验重复 5 次,数据处理取平均值作为试验结果。



(a) 不同约束运移弧面圆心角轮式导种装置底座

(b) 播种情况示意图

图 7 轮式导种装置底座加工图与播种情况示意图

Fig. 7 Processing diagrams of wheel-type seed guide device base and sowing situation schematic

使用高速摄像机拍摄轮式导种装置工作过程,利用网格纸坐标计算临界投种速度及捕捉种子投种后运动轨迹,如图 8 所示。

以水平方向向左为 x 轴正方向,竖直方向向下作为 y 轴正方向,排种器投种口右侧边缘作为原点建立坐标系,网格纸上每个网格尺寸为 6.5 mm×

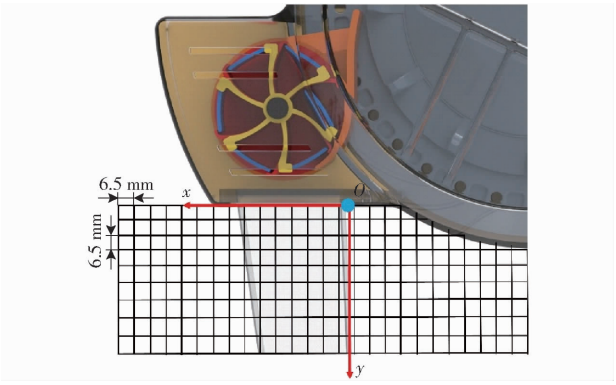


图 8　网格纸捕捉种子坐标示意图

Fig. 8　Capturing seed coordinates using grid paper

6.5 mm。每 10 ms 捕捉一次种子坐标，待排种器负压稳定及导种轮转速稳定后，轮式导种装置进入稳定工作状态后，使用高速摄像机随机捕捉连续 4 粒种子在空中运动坐标并绘制成位移轨迹曲线。为精确记录种子运动轨迹，将高速摄像机拍摄帧率设置为 1 000 f/s，图像采集区域为 512 mm × 512 mm，曝光时长为 900 μs。对不同试验指标组合工况下导种轨迹进行分析，同时计算其临界投种速度（即种子经轮式导种装置投出后进入到网格纸时的速度）。

3.3　多因素试验

在单因素试验基础上，保持排种器工作负压为 4.5 kPa，以导种轮转速及约束运移弧面圆心角为试验因素，合格指数、变异系数、重播率、漏播率为试验指标。设计了二因素三水平组合正交试验，以探究轮式导种装置最优结构与工况组合。试验因素编码表如表 1 所示，使用 Design-Expert 对测试结果进行处理与分析，综合评价轮式导种装置导种均匀性与稳定性。每组试验重复 5 次，其他参数保持不变。测量结果取处理后平均值。

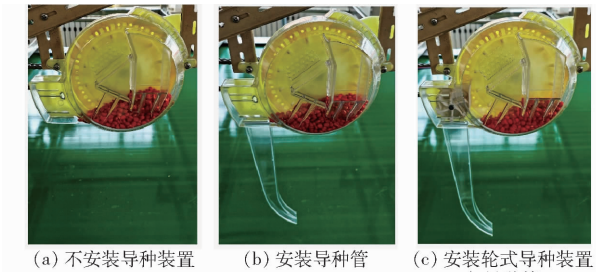
表 1　正交试验因素编码

Tab. 1　Test factors and coding

编码	因素	
	约束运移弧面圆心角/（°）	导种轮转速/（r·min^{-1}）
-1	60	110
0	65	120
1	70	130

3.4　性能对比试验

基于前期多因素试验得出了轮式导种装置最优结构与工况组合。为试验验证轮式导种装置对排种器工作性能的提升效果以及普适性，以玉米高速精量排种器为载体，以 3 种导种方式进行台架试验，如图 9 所示。根据多因素正交试验结果，约束运移弧面角度为 65°、导种轮转速为 120 r/min（等效排种器前进速度 14 km/h）时，轮式导种装置工作性能最优。在对比试验中，固定设置排种器工作负压为 4.5 kPa、轮式导种装置约束运移弧面圆心角为 65°，前进速度设置为 13、13.5、14、14.5、15 km/h 共 5 个水平，试验指标为合格指数、变异系数。每组试验重复 5 次，其他各项参数保持恒定，数据处理取平均值作为试验结果。



(a) 不安装导种装置　(b) 安装导种管　(c) 安装轮式导种装置与导种管

图 9　性能对比试验

Fig. 9　Comparative tests of seed metering performance

3.5　数据统计与处理

单因素试验和多因素试验选取合格指数、变异系数、重播率、漏播率为试验指标，试验指标计算公式为

$$\begin{cases} A = \dfrac{N_1}{N'} \times 100\% \\ D = \dfrac{N_2}{N'} \times 100\% \\ M = \dfrac{N_0}{N'} \times 100\% \\ C = \sqrt{\dfrac{\sum (L - \bar{x})^2}{(N' - 1)\bar{x}^2}} \times 100\% \end{cases} \tag{13}$$

式中　A——合格指数

C——变异系数

D——重播率

M——漏播率

N_1——单粒播种数

N_2——两粒及两粒以上播种数

N_0——空漏播种数

N'——样本穴距区间总数

L——理论播种粒距，mm

$\bar{x}$——样本粒距平均值，mm

种床带运行速度与排种器工作转速间转换关系为

$$n_1 = \frac{60\,000 V_Q}{ZL} \tag{14}$$

式中　V_Q——种床带反向运动速度，m/s

由式（1）、（14）可得，种床带运行速度与导种轮

工作转速间转换关系为

$$n_2 = \frac{6\,000 V_Q}{L} \tag{15}$$

试验重复 5 次,试验数据取平均值表示,通过 SPSS 26 统计软件进行统计分析,并运用 Origin 2021 软件对数据进行可视化处理。

4 结果与讨论

4.1 约束运移弧面圆心角单因素试验结果

当导种轮转速固定设置为 120 r/min 时,对运移弧面圆心角进行单因素试验,试验结果如图 10 所示。

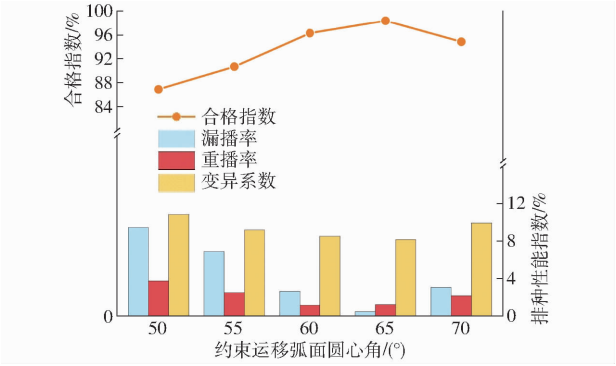


图 10 约束运移弧面圆心角对播种性能的影响

Fig. 10 Effect of circle centre angle of constrained transport arc surface on seed metering performance

每隔 10 ms 追踪 1 次种子坐标,在不同约束运移弧面圆心角的轮式导种装置内种子运动轨迹如图 11 所示。不同约束运移弧面圆心角下临界投种速度如表 2 所示。

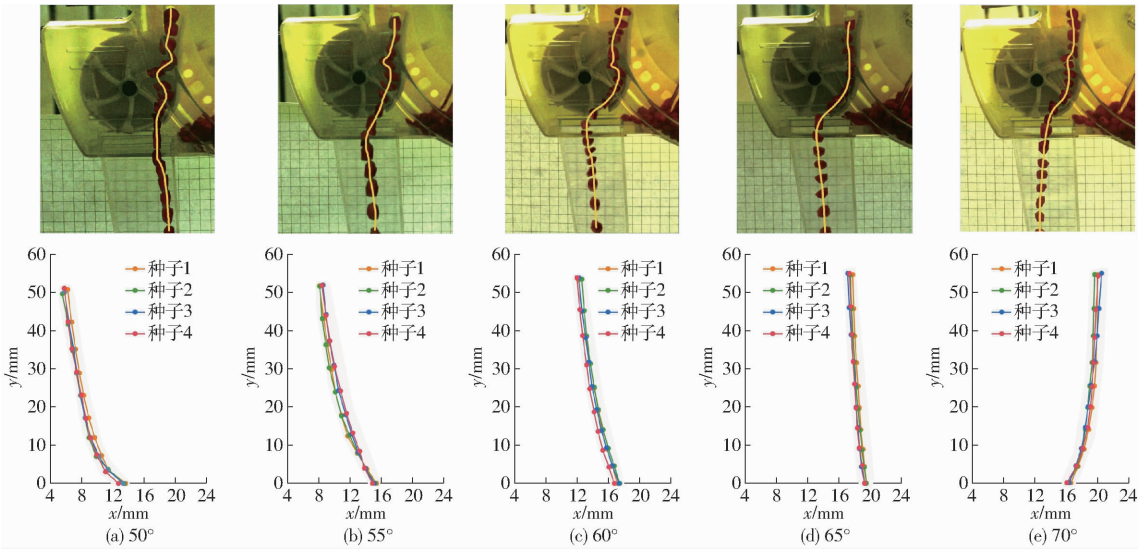


图 11 不同约束运移弧面圆心角下连续 4 粒种子被投出后的空中位移轨迹

Fig. 11 Seed guiding trajectories and seed discharge trajectories of four consecutive seeds at different circle centre angles of constrained transport arc surface

表 2 不同约束运移弧面圆心角下临界投种速度指标

Tab. 2 Critical seed discharge velocity indices at different circle center angles of constrained transport arc surface

约束运移弧面圆心角/(°)	临界投种速度/(m·s^{-1})	临界投种速度变异系数/%	临界投种速度 x 轴分量/(m·s^{-1})
50	0.413	14.74	-0.202
55	0.408	12.38	-0.137
60	0.401	8.29	-0.072
65	0.398	6.14	-0.003
70	0.394	5.97	0.113

由图 11 可得,当导种轮转速为 120 r/min、约束运移弧面圆心角为 50°时,种子被投出后在空中的运动轨迹偏离竖直方向较多,因为当约束运移弧面圆心角较小时,种子经历约束运移的距离较短,导致投种时种子姿态不稳定进而使得种子投种方向不稳定。由表 2 可得,当约束运移弧面圆心角为 50°时,临界投种速度的变异系数最大,为 14.74%,说明种子经历约束运移阶段较短导致种子投种时姿态不稳定所以排种质量较差。结合高速摄像观察可知,种子临界投种速度由导种轮拨片施加给种子的速度以及导种轮转速共同决定,当约束运移弧面圆心角较小时,会导致提前投种,在临界投种状态下导种轮拨片给予种子线速度方向与 x 轴正方向夹角较大,在导种轮拨片与导种轮线速度二者施加的速度共同作用下,约束运移弧面圆心角为 50°时临界投种速度 x 轴分速度最大,为 -0.202 m/s。投种方向与竖直向下方向偏差较大,这也是导致排种质量较低的原因。

由表 2 可知,随着约束运移弧面圆心角增大,种子经过的约束运移阶段距离增加,投种姿态更加稳定,临界投种速度变异系数逐渐降低,在 70°时到达最低值为 5.97%。然而,在 65°时排种质量更好,这

是因为当约束运移弧面圆心角增大到 65°时，临界投种速度方向最接近竖直，此时临界投种速度 x 轴分速度为 -0.003 m/s。同时种子在约束运移弧面圆心角为 65°时经过的约束运移阶段较长，所以在此时排种质量最佳。而当约束运移弧面增大到 70°时，临界投种速度状态下，导种轮线速度方向与 x 轴正方向夹角最小，此时导种轮线速度对临界投种速度方向的影响效果大于导种轮拨片，因此导致投种方向产生偏移，70°下临界投种速度 x 轴分速度为 0.113 m/s，这导致种子位移轨迹再次偏离竖直方向，排种质量开始下降。

4.2　导种轮转速单因素试验结果

当约束运移弧面圆心角固定设置为 60°时，导种轮转速单因素试验结果如图 12 所示。

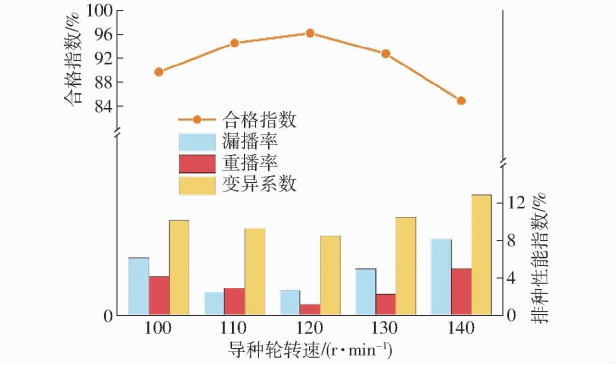


图 12　导种轮转速对播种性能的影响

Fig. 12　Effects of rotational speed of seed guide wheel on seed metering performance

每隔 10 ms 追踪 1 次种子坐标，种子在不同导种轮转速的轮式导种装置内运动轨迹如图 13 所示。

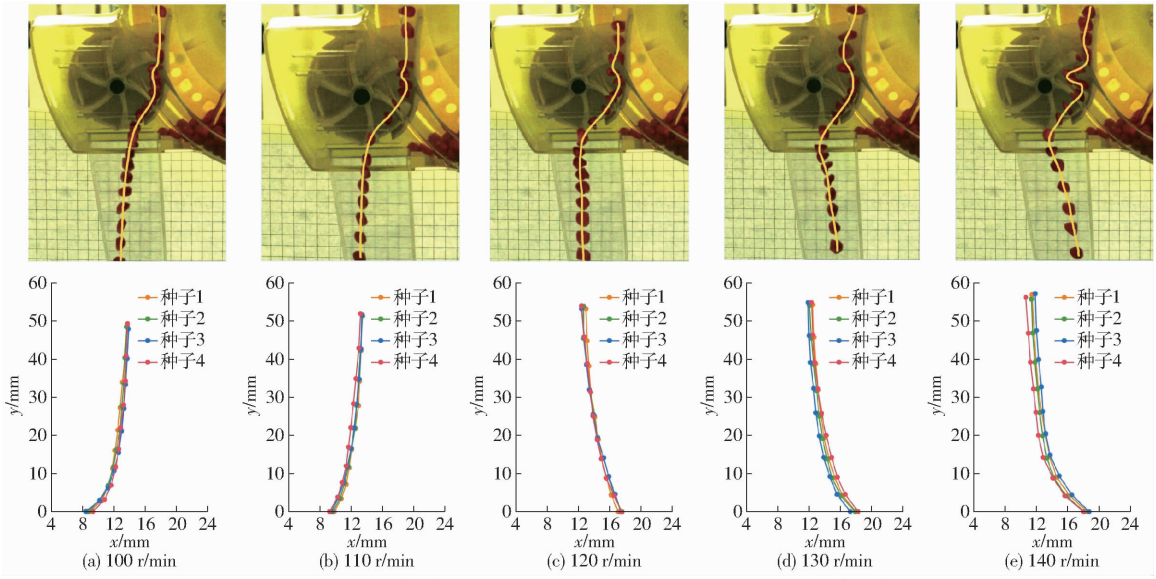


图 13　不同导种轮转速下的连续 4 粒种子被投出后的空中位移轨迹

Fig. 13　Seed guiding trajectories and seed discharge trajectories of four consecutive seeds at different seed guide wheel rotational speeds

不同导种轮转速下临界投种速度如表 3 所示。

表 3　不同导种轮转速下临界投种速度

Tab. 3　Critical seed discharge velocity indices at different rotational speeds of seed guide wheel

导种轮转速/(r·min⁻¹)	临界投种速度/(m·s⁻¹)	临界投种速度变异系数/%	临界投种速度 x 轴分量/(m·s⁻¹)
100	0.334	13.63	0.141
110	0.367	11.36	0.072
120	0.413	9.47	-0.064
130	0.435	12.48	-0.148
140	0.461	15.92	-0.267

由图 13 可得，当导种轮转速为 100 r/min，约束运移弧面圆心角为 60°时，种子经轮式导种装置投出后在空中的运动轨迹偏离竖直方向较多。这是因为低转速下，导种轮拨片对于临界投种速度的影响小于导种轮，此时临界投种速度方向由导种轮转速的线速度方向主导。由表 3 可得，当导种轮转速为 140 r/min 时，临界投种速度的变异系数最大，为 15.92%，说明随着转速增加，种子在轮式导种装置内碰撞增加，投种姿态不稳定，所以导致较高的临界投种速度变异系数。通过观察高速摄像可得，当转速为 100 r/min 时，导种轮转速对临界投种速度的方向影响占据主导地位，此时临界投种速度 x 轴分速度较大，为 0.141 m/s。同时由于导种轮拨片对种子施加的速度较小，临界投种速度变化也较大，临界投种速度变异系数为 13.63%，导致排种质量不佳。当导种轮转速逐渐增加，导种轮拨片对临界投种速度的影响逐渐增加，到达 120 r/min 后，导种轮拨片施加的速度对临界投种速度方向的影响占据主导地位，临界投种速度的 x 轴分速度方向发生改变，此时

临界投种速度 x 轴分量为 -0.064 m/s。

由表 3 可知,随着导种轮转速的逐渐增加,临界投种速度的变异系数呈先降低后急剧增加趋势,这是因为当导种轮转速增加到 120 r/min 时,临界投种速度最接近竖直方向。当 120 r/min 时,导种轮转速与导种轮拨片对种子施加的速度影响达到一个较好的效果,这也使得在 120 r/min 时,临界投种速度变异系数最低,排种质量最好。随着转速的增加,种子在轮式导种装置内的碰撞增加,临界投种状态下姿态逐渐不稳定,当导种轮转速增大到 140 r/min 时,种子在空中运动轨迹偏离竖直方向达到最高,为 -0.267 m/s,此时临界投种速度变异系数也达到最高,为 15.92%。原因为当导种轮转速上升时,种子在轮式导种装置内运动的碰撞增加,以不稳定的姿态被投出,导致排种质量下降。分析导种轮转速对种子导种过程的影响,不同转速下,导种轮拨片和导种轮转速线速度对种子临界投种速度影响的主次关系始终处于动态变化,为得到一个最优结构工况组合,还需进行多因素试验。

4.3 正交试验结果

根据单因素试验结果,开展两因素三水平正交试验,并进行极差分析,试验结果如表 4 所示,采用 α、n 表示因素编码。

表 4 工作参数正交试验结果

Tab.4 Orthogonal test results for operating parameters

编号	因素		合格指数/%	变异系数/%	重播率/%	漏播率/%
	约束运移弧面圆心角 α	导种轮转速 n				
1	-1	-1	94.62	9.32	2.87	2.51
2	-1	0	96.27	8.47	1.12	2.61
3	-1	1	92.82	10.48	2.24	4.94
4	0	-1	96.71	9.04	2.13	1.16
5	0	0	98.35	8.13	1.18	0.47
6	0	1	95.17	9.94	1.36	3.47
7	1	-1	92.49	10.35	3.79	3.72
8	1	0	94.84	9.92	2.12	3.04
9	1	1	90.37	11.29	3.78	5.85
合格指数	K_1		283.71		283.82	
	K_2		290.23		289.46	
	K_3		277.70		278.36	
	R		12.53		11.10	
	因素权重顺序 $n<\alpha$					
	最佳参数组合 α_2n_2					
变异系数	K_1		28.27		28.71	
	K_2		27.11		26.52	
	K_3		31.56		31.71	
	R		4.45		5.19	
	因素权重顺序 $\alpha<n$					
	最佳参数组合 α_2n_2					
重播率	K_1		6.23		8.79	
	K_2		4.67		4.42	
	K_3		9.69		7.38	
	R		5.02		4.37	
	因素权重顺序 $n<\alpha$					
	最佳参数组合 α_2n_2					
漏播率	K_1		10.06		7.39	
	K_2		5.10		6.12	
	K_3		12.61		14.26	
	R		7.51		8.14	
	因素权重顺序 $n<\alpha$					
	最佳参数组合 α_2n_2					

不同因素对合格指数、重播指数、漏播指数的影响由大到小为:导种轮转速 n、约束运移弧面圆心角 α,根据正交试验结果以及极差分析的结果,较高的合格指数组合为 α_2n_2,较低变异系数组合为 α_2n_2,较低重播指数组合为 α_2n_2,较低漏播指数组合为 α_2n_2。试验结果表明,气吸高速玉米精量排种器工作过程中,导种轮转速对排种性能的影响小于约束运移弧面圆心角。综上所述,确定导种装置较优组

合为 $\alpha_2 n_2$（约束运移弧面圆心角为 65°以及导种轮转速为 120 r/min），较优参数组合下合格指数为 98.35%，变异系数为 8.13%，重播率为 1.18%，漏播率为 0.47%。

4.4　性能对比试验

安装的轮式导种装置的约束运移弧面圆心角设置为 65°，对 3 种不同结构的排种器进行前进速度试验，试验结果如图 14 所示。

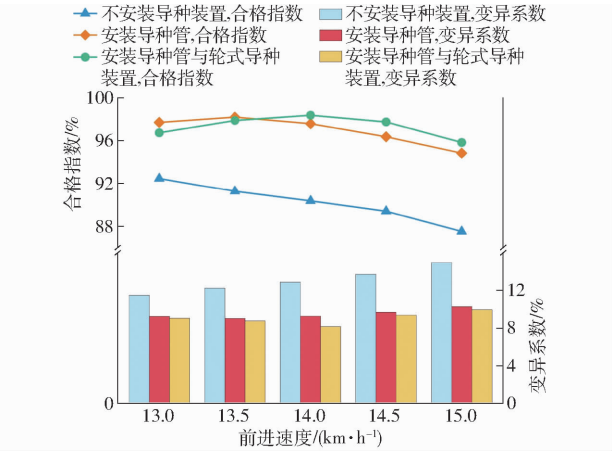


图 14　3 种不同结构下在不同前进速度下的工作指标对比

Fig. 14　Working performance of seed metering apparatus with three different seed guiding methods at various operating speeds

由图 14 可知，不安装导种装置的排种器在高速作业条件下，排种性能较差，随着作业速度增加，不安装导种装置排种器性能受到作业速度的影响较大，原因为种子由排种器排出时速度方向不稳定，在空中经过一段无约束飞行运动，导致种子落地时位置不稳定。同时随着作业速度提升，种子经排种器排出时速度方向变异系数逐渐增加，但由于没有导种装置约束，使得投出速度不稳定对种子空中运动状态不稳定的影响显著增加。而导种装置加入，可以对种子进行运动轨迹统一约束，明显改善由于排出速度不稳定而导致的排种质量下降。导种装置加入会显著的提高合格指数与降低变异系数，当作业速度大于 14 km/h 时，安装轮式导种装置的排种器在合格指数以及变异系数上皆优于安装导种管的排种器，可以得出轮式导种装置在高速作业条件下可以保证种子在导种阶段平稳运移，增设轮式导种装置可以改善种子进入导种管的稳定性，减少在导种管中的碰撞，提高排种性能。

5　结论

（1）当排种器工作负压为 4.5 kPa、轮式导种装置底座约束运移弧面圆心角为 65°时，导种轮工作转速为 110 ~ 130 r/min（等效排种器前进速度 13 ~ 15 km/h），播种合格指数大于 95.17%，满足高速播种作业要求。

（2）安装轮式导种装置的电驱式气吸高速玉米精量排种器在最佳工况下运行时，合格指数为 98.35%，变异系数为 8.13%，满足对播种质量要求。

参　考　文　献

[1] DI SALVO J I, LEE C, SALMERÓN M. Regional multi-environment analysis of corn productivity and yield stability as impacted by hybrid maturity[J]. Field Crops Research, 2021, 262: 108025.

[2] SAKSCHEWSKI B, VON BLOH W, HUBER V, et al. Feeding 10 billion people under climate change: how large is the production gap of current agricultural systems? [J]. Ecological Modelling, 2014, 288: 103 - 111.

[3] 李洪昌, 高芳, 赵湛, 等. 国内外精密排种器研究现状与发展趋势[J]. 中国农机化学报, 2014, 35(2): 12 - 16,56.
LI Hongchang, GAO Fang, ZHAO Zhan, et al. Research status and development trend of precision seed-metering devices at home and abroad[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2014, 35(2): 12 - 16,56. (in Chinese)

[4] 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 test of double-side cleaning mechanism for air-suction maize seed-metering device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(7): 29 - 39. (in Chinese)

[5] 廖宜涛, 李成良, 廖庆喜, 等. 播种机导种技术与装置研究进展分析[J]. 农业机械学报, 2020, 51(12): 1 - 14.
LIAO Yitao, LI Chengliang, LIAO Qingxi, et al. Research progress analysis of seed-guiding technology and devices for planters[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(12): 1 - 14. (in Chinese)

[6] 刘艳芬, 林静, 李宝筏, 等. 玉米播种机水平圆盘排种器型孔设计与试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33(8): 37 - 46.
LIU Yanfen, LIN Jing, LI Baofa, et al. Design and experiment of cell structure for horizontal disc seed-metering device of corn planter[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(8): 37 - 46. (in Chinese)

[7] 石林榕, 孙步功, 赵武云, 等. 弹性气吸嘴式玉米滚轮排种器排种性能参数优化与试验[J]. 农业机械学报, 2019, 50(10): 88 - 95,207.
SHI Linrong, SUN Bugong, ZHAO Wuyun, et al. Parameter optimization and experiment on seeding performance of elastic air-suction nozzle type corn roller seed-metering device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(10): 88 - 95,207. (in Chinese)

[8] 丁力, 杨丽, 刘守荣, 等. 辅助充种种盘玉米气吸式高速精量排种器设计[J]. 农业工程学报, 2018, 34(22): 1 - 11.
DING Li, YANG Li, LIU Shourong, et al. Design of air-suction high-speed precision seed-metering device with auxiliary filling

seed plate for corn[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(22): 1 - 11. (in Chinese)

[9] 刘瑞, 刘云强, 刘忠军, 等. 玉米高速精量播种机正压气流辅助吹送导种装置研究[J]. 农业机械学报, 2023, 54(7): 156 - 166.
LIU Rui, LIU Yunqiang, LIU Zhongjun, et al. Research on positive pressure airflow-assisted seed delivery device for high-speed precision corn planter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(7): 156 - 166. (in Chinese)

[10] 赵淑红, 陈君执, 王加一, 等. 精量播种机 V 型凹槽拨轮式导种部件设计与试验[J]. 农业机械学报, 2018, 49(6): 146 - 158.
ZHAO Shuhong, CHEN Junzhi, WANG Jiayi, et al. Design and experiment of V-groove dial wheel type seed-guiding device for precision planter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(6): 146 - 158. (in Chinese)

[11] 马成成, 衣淑娟, 陶桂香, 等. 带式玉米高速导种装置旋夹纳种机理分析与参数优化[J]. 农业机械学报, 2023, 54(7): 134 - 143.
MA Chengcheng, YI Shujuan, TAO Guixiang, et al. Mechanism analysis and parameter optimization of rotary clamping seed feeding for belt-type high-speed corn seed guiding device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(7): 134 - 143. (in Chinese)

[12] 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.

[13] LI C, CUI T, ZHANG D, et al. Design and experiment of a centrifugal filling and cleaning high-speed precision seed metering device for maize[J]. Journal of Cleaner Production, 2023, 426: 139083.

[14] 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 experiment of seed-cleaning mechanism for air-suction corn seed-metering device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(9): 47 - 56. (in Chinese)

[15] 刘春旭, 芦磊, 朱炫铭,等. 排种器智能集成电驱装置的研制[J]. 农机化研究, 2022, 44(11): 131 - 134.
LIU Chunxu, LU Lei, ZHU Xuanming, et al. Development of intelligent integrated electric drive device for seed-metering device[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2022, 44(11): 131 - 134. (in Chinese)

[16] 张兆睿. 大豆玉米带状复合播种机电驱排种控制系统设计与试验[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2024.
ZHANG Zhaorui. Design and experiment of electric drive seed metering control system for soybean-corn strip intercropping seeder[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2024. (in Chinese)

[17] 杨硕, 王秀, 高原源, 等. 支持转速现场标定的玉米精密排种器电驱控制系统研究[J]. 农业机械学报, 2020, 51(1): 47 - 55.
YANG Shuo, WANG Xiu, GAO Yuanyuan, et al. Research on electric drive control system of corn precision seed-metering device supporting on-site speed calibration[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(1): 47 - 55. (in Chinese)

[18] 张猛. 多目标电驱智能变量精密排种系统研究[D]. 淄博:山东理工大学, 2023.
ZHANG Meng. Research on multi-objective electric drive intelligent variable precision seed metering system[D]. Zibo: Shandong University of Technology, 2023. (in Chinese)

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

[20] 董建鑫, 高筱钧, 张仕林, 等. 玉米姿控驱导式排种器导向投种机构设计与试验[J]. 农业机械学报, 2023, 54(10): 25 - 34.
DONG Jianxin, GAO Xiaojun, ZHANG Shilin, et al. Design and experiment of attitude-controlled seed guiding mechanism for corn seed-metering device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(10): 25 - 34. (in Chinese)

[21] 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 dual-row staggered corn precision seed-metering device for dense planting[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(3): 53 - 63. (in Chinese)

[22] 张红梅, 张晨明, 李志杰, 等. 基于 EDEM - RecurDyn 的玉米指夹式排种器振动特性分析与优化[J]. 农业机械学报, 2023, 54(增刊 1): 36 - 46.
ZHANG Hongmei, ZHANG Chenming, LI Zhijie, et al. Vibration characteristics analysis and optimization of corn finger-pickup seed-metering device based on EDEM - RecurDyn[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(Supp. 1): 36 - 46. (in Chinese)

[23] ABDOLAHZARE Z, MEHDIZADEH S A. Real time laboratory and field monitoring of the effect of the operational parameters

on seed falling speed and trajectory of pneumatic planter[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2018, 145: 187 – 198.

[24] TANG H, GUAN T, XU F, et al. Test on adsorption posture and seeding performance of the high-speed precision dual-chamber maize metering device based on the seed characteristics[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2024, 216: 108471.

[25] 王淞, 衣淑娟, 赵斌, 等. 基于 FSMC – Kalman 的带式高速导种装置控制系统研究[J]. 农业机械学报, 2024, 55(12): 169 – 179,332.
WANG Song, YI Shujuan, ZHAO Bin, et al. Research on control system of belt-type high-speed seed-guiding device based on FSMC – Kalman[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(12): 169 – 179,332. (in Chinese)

[26] 杨薇, 方宪法, 李建东,等. 种腔自净型气吸式玉米小区精量排种器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2019, 50(6): 64 – 73.
YANG Wei, FANG Xianfa, LI Jiandong, et al. Design and experiment of self-cleaning seed cavity air-suction precision seed-metering device for corn breeding plot[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(6): 64 – 73. (in Chinese)

[27] 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 Li, YANG Li, WU Dehao, et al. Simulation and experiment of air-suction corn seed-metering device based on DEM – CFD coupling[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(11): 48 – 57. (in Chinese)

[28] 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 for air-suction corn seed-metering device based on DEM – CFD[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(5): 50 – 60. (in Chinese)

[29] 王梓名. 坡耕地玉米间歇同步充补鸭嘴式精量排种器设计与试验[D]. 哈尔滨:东北农业大学, 2022.
WANG Ziming. Design and experiment of intermittent synchronous filling duckbill precision seeding device for slope farmland corn[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2022. (in Chinese)