

玉米姿控驱导式排种器导向投种机构设计与试验

董建鑫¹ 高筱钧¹ 张仕林¹ 黄玉祥^{1,2} 张崇勤³ 史江涛⁴

(1. 西北农林科技大学机械与电子工程学院, 陕西杨凌 712100; 2. 陕西省农业装备工程研究中心, 陕西杨凌 712100;
3. 潍柴雷沃智慧农业科技股份有限公司, 潍坊 261000; 4. 西安亚澳农机股份有限公司, 西安 710300)

摘要: 针对玉米姿控驱导式排种器在高速工况下投种点位不一致,播种粒距均匀性不佳的问题,提出约束种子运动自由度并引导投种方向的方法,设计了一种新型导向投种机构,合理规划了待投种子的导种轨迹,进而确保投种点位及初速度恒定。完成了导向投种机构的结构参数设计与待投种子的动力学分析,明确了影响排种性能的关键参数及其取值范围,通过单因素与双因素试验获取了排种器的最优参数组合,并进行性能对比验证试验。结果表明,约束运移弧面圆心角取 35°时,投种点位较为集中;在作业速度 8 km/h、引导投种弧面半径 24.3 mm 时,排种性能达到最优,粒距合格指数、重播指数和变异系数分别为 91.5%、4.7% 和 13.6%;当作业速度由 8 km/h 提升至 14 km/h 时,较原排种器粒距变异系数的降幅由 0.1 个百分点增大至 2.7 个百分点,采用导向投种机构可有效提升原排种器的高速作业性能。

关键词: 玉米种子; 机械式排种器; 高速; 导向投种机构

中图分类号: S223.2 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2023)10-0025-10 **OSID:** 

Design and Test of Guiding Seed Throwing Mechanism for
Maize Posture Control and Driving Metering Device

DONG Jianxin¹ GAO Xiaojun¹ ZHANG Shilin¹ HUANG Yuxiang^{1,2} ZHANG Chongqin³ SHI Jiangtao⁴

(1. College of Mechanical and Electronic Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China

2. Shaanxi Engineering Research Center for Agricultural Equipment, Yangling, Shaanxi 712100, China

3. Weichai Lovol Intelligent Agricultural Technology Co., Ltd., Weifang 261000, China

4. Xi'an Yaao Agricultural Machinery Co., Ltd., Xi'an 710300, China)

Abstract: Aiming at the problem that inconsistent seed throwing points and poor uniformity of seed spacing of posture control and driving precision metering device under high-speed conditions. A method was proposed to constrain the freedom of seed motion and guide the direction of seed throwing, a type guiding seed throwing mechanism was designed. The guiding trajectory of the seeds was reasonably planned to be thrown, thereby ensuring that the seed throwing point and initial velocity were constant. The design of the structural parameters of the guiding seed throwing mechanism and dynamic analysis of the seed to be thrown were completed. The key parameters and their value ranges that affected seeding performance were determined. The optimal parameters combination was obtained by single factor and double factor experiments, and a working performance verification experiment was conducted. The results showed that when the central angle of the constrained migration arc was 35°, the seed throwing points were more concentrated. When the operating speed was 8 km/h and the radius of the guiding seed throwing arc was 24.3 mm, the seeding performance was at optimal level, the qualified index, multiple index, and coefficient of variation were 91.5%, 4.7%, and 13.6%, respectively. As the operating speed was increased from 8 km/h to 14 km/h, the decrease of variation coefficient was increased from 0.1 percentage points to 2.7 percentage points compared with that of the original seed metering device. Using the guiding seed throwing mechanism can effectively improve the high-speed seeding performance of

收稿日期: 2023-06-11 修回日期: 2023-07-18
基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFD2000404、2021YFD2000405)、国家自然科学基金项目(31971802)和陕西省重点研发计划项目(2023-YBNY-204)
作者简介: 董建鑫(1996—),男,博士生,主要从事现代农业装备研究,E-mail: dongjianxin@nwfu.edu.cn
通信作者: 黄玉祥(1979—),男,教授,博士生导师,主要从事土壤-机器系统研究,E-mail: hyx@nwsuaf.edu.cn

the original seed metering device.

Key words: maize seed; mechanical seed-metering device; high-speed; guiding seed throwing mechanism

0 引言

投种作为排种器的末端工作环节,对精量播种作业质量具有直接影响^[1-4]。近年来,随着规模化生产经营模式的发展,以及对作物单产水平的高度关注,需要播种机在密植条件下实现高速精播(作业速度高于8 km/h)^[5-7]。然而,随着机具作业速度的提高,机械式排种器的投种效果不断下降,种子易随投种点位变化而偏离理想投种轨迹,造成落点异位,播种均匀性不佳,甚至引发重、漏播现象,难以满足实际生产中的高速精播需求^[8-11]。因此,改善机械式排种器在高速工况下的投种效果对于促进我国播种作业高速精量化发展,具有重要意义。

研究人员围绕精量排种器的投种方面已开展相关研究,并取得良好的进展^[12-16]。刘宏新等^[17]利用高速影像与 EDEM 仿真分析了立式浅盆型排种器投种均匀性的影响因素,并确定了投种口尺寸范围;XING 等^[18]借助高速影像分析了水稻排种器不同工况下的投种轨迹,确定了其最优工作条件;XUE 等^[11,19]设计了一种双弧形投种点引导槽,有效防止种子与机构的摩擦碰撞对排种均匀性的影响;李玉环等^[20-21]设计了气吸式排种器直线推种机构,避免种子在导种管内碰撞异位,并提出直线推种+末端拨离的投种方法,解决了“横向飞种”问题对投种效果的影响。虽然上述方法为改善机械式排种器的投种效果提供了良好的借鉴,但由于对投种部件结构约束与待投种子的互作用关系认识不足,且忽视复杂外形籽粒导种过程中运动、受力与姿态等因素的影响,导致其投种效果具有一定的不稳定性,尤其在高速工况下投种轨迹分散现象明显,播种均匀性下降严重。

为此,本文提出约束种子运动自由度并引导投种方向的方法,设计一种新型导向投种机构,以改善玉米姿控驱导式排种器高速工况下的投种效果;通过分析导种过程中待投种子的运动与受力关系,确定导向投种机构的关键参数,并开展排种性能优化及验证试验,以期为提升机械式排种器的高速作业性能提供参考。

1 排种器结构与工作原理

为进一步改善前期研制的玉米姿控驱导式排种器在高速工况下的投种效果,提升排种粒距均匀

性^[22],基于原排种器的结构基础,设计一种新型的导向投种机构,从而实现可靠的高频、连续投种。增设导向投种机构的排种器包括前壳体、护种板、排种盘、递种隔板、导种轮、导种轨、传动轴与后壳体等主要零部件,其结构如图1所示。

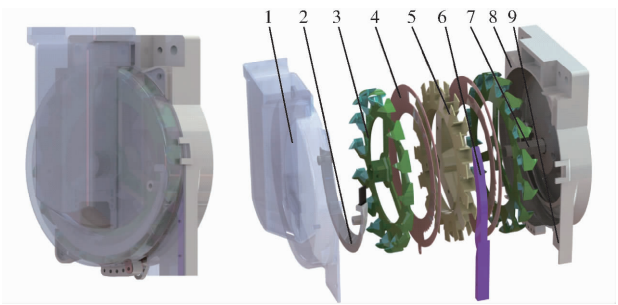


图1 排种器结构爆炸图

Fig.1 Explosion diagram of seed metering device structure

1.前壳体 2.护种板 3.排种盘 4.递种隔板 5.导种轮 6.导种轨 7.排种轴 8.后壳体 9.投种口

该排种器的主要工作部件为取种单元与导向投种机构。取种单元作为调控种子姿态并实现充、清种的关键部件,由调姿齿与单元型孔构成。在充种过程中,取种单元利用调姿齿调整调姿槽底部种子的充前姿态,将竖立姿态的种子一律调整至斜躺或侧立姿态,使其通过护种板底部进入取种单元内完成定向充种。之后,取种单元内多余种子随重力作用脱落,完成清种过程。

导向投种机构由导种轮与导种轨2个构件组成,主要用于完成排种器的导种与投种工作过程。当取种单元内的单粒种子到达递种区域后,侧向滑落至导种仓格内,完成递种过程;导种仓格内的种子随导种轮转动至一定角度后开始沿接触面滑动较短距离,之后压覆于导种轨的工作弧面上继续运动,随着约束运移弧面向引导投种弧面的过渡,其运动轨迹与速度均不断变化,直到与引导投种弧面圆心处于同一水平时,完成导种过程;此时,种子处于临界投种状态,投种的点位与初速度均确定,即将随重力开始竖直下抛,完成投种过程。排种器的工作原理如图2所示。

2 导种轨迹规划

合理规划导种轨迹是确保投种效果可靠的关键,也是导向投种机构设计的重要依据。待投种子的导种过程可划分为3个阶段,分别为待投种子的短距离离心阶段(对应轨迹a-b)、约束运移阶段(对

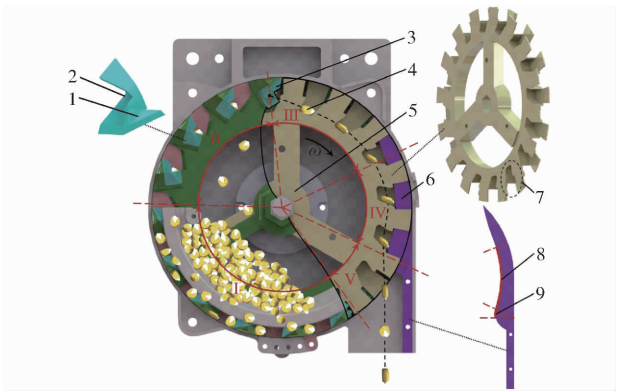


图 2 排种器工作原理图

Fig. 2 Seed metering device working principle diagram

1. 调姿齿 2. 单元型孔 3. 取种单元 4. 玉米种子 5. 导种轮
6. 导种轨 7. 导种仓格 8. 约束运移弧面 9. 引导投种弧面
I. 充种过程 II. 清种过程 III. 递种过程 IV. 导种过程
V. 投种过程

应轨迹 $b-b'$ 与引导投种阶段 (对应轨迹 $b'-c$), 种子到达点 c 处开始投种, 如图 3 所示。

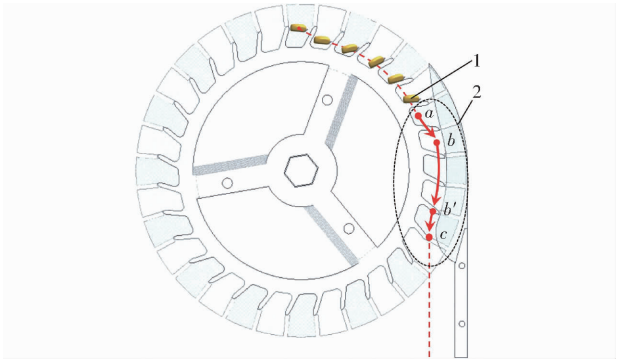


图 3 导种轨迹规划

Fig. 3 Seed guiding trajectory planning

1. 待投种子 2. 导种轨迹

短距离离心阶段为待投种子导种过程的起始阶段, 由点 a 处开始离心运动, 到达点 b 处与约束运移弧面接触后结束。以导种轮轴心为原点, 水平方向为 x 轴, 竖直方向为 y 轴建立坐标系, 离心运动中种子所处位置的半径记为 r , 角度记为 δ (位置处半径与竖直方向夹角), 离心运动起始位置半径记为 r_a , 角度记为 δ_a , 结束位置记为 r_b , 角度记为 δ_b , 种子所受合外力 $\sum F$ 方向沿接触面切向, 种子离心距离为 l_{ab} (图 4a)。

离心运动中种子合外力 $\sum F$ 始终大于 0, 由能量守恒定律可得, 种子所受合外力做功为

$$\int_{r_a}^{r_b} \int_{\delta_a}^{\delta_b} \sum F dr d\delta = \frac{1}{2} m (v_i^2 + r_b^2 \omega^2 - r_a^2 \omega^2) \quad (1)$$

- 式中 v_i ——点 b 处种子接触导种轨时速度, m/s
 m ——种子质量, kg
 ω ——导种轮转动角速度, rad/s

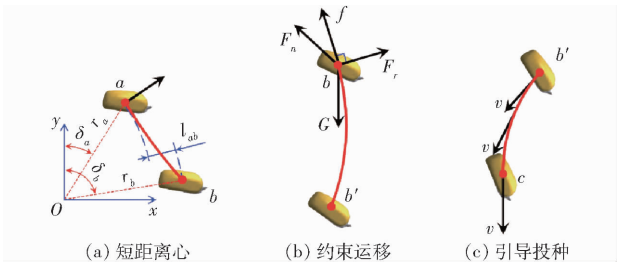


图 4 导种轨迹分析

Fig. 4 Analysis of seed guiding trajectory

由式(1)可知, 短距离离心阶段中种子接触导种轨时的速度 v_i 与离心距离 l_{ab} 及导种轮转动角速度 ω 呈正相关。当种子的离心距离 l_{ab} 或导种轮的角速度 ω 越大时, 种子接触导种轨时的速度 v_i 越大。为防止种子与导种轨接触时碰撞并产生弹跳作用, 影响接下来约束运移阶段中种子的运动平稳性, 应保证离心距离 l_{ab} 尽可能较小。

待投种子的约束运移阶段为导种过程中的过渡阶段, 由点 b 开始沿弧线轨迹运动至点 b' 处结束。该阶段中种子运动自由度受到约束, 驱使其按照预先规划的运移轨迹平稳运动, 从而确保引导投种阶段顺利进行 (图 4b)。

由于该阶段对应轨迹 $b-b'$ 为弧线, 且导种轮工作时匀速运转, 可以判断种子受到合外力为 0, 即

$$\sum F = F_r + F_n + f + G = 0 \quad (2)$$

- 式中 F_r ——种子受到离心力, N
 G ——种子受到重力, N
 F_n ——种子受到支持力, N
 f ——种子受到摩擦力, N

由式(2)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' 处进入下一阶段。

待投种子的引导投种阶段为导种过程的末尾阶段, 由点 b' 开始沿反向弧线轨迹运动至点 c 处结束。该阶段中由于种子受到反向弧线轨迹的引导作用, 运动速度 v 开始逐渐沿引导投种弧面的切线方向偏转, 当种子运动至点 c 时速度 v 的方向竖直向下, 此时脱离导向投种机构的束缚, 沿竖直方向开始下抛运动 (图 4c)。

综上所述, 当待投种子按预先规划的导种轨迹完成运移后, 投种初速度竖直向下 (作用点与方向均确定)。因此推断, 玉米姿控驱导式排种器增设导向投种机构后, 种子的投种点位与初速度基本恒定, 种子投出后的下落轨迹唯一, 呈竖直直线。

3 导向投种机构设计与分析

3.1 结构参数设计

导向投种机构的结构参数取值对排种器的投种

效果具有直接影响,其主要由导种轮与导种轨两部分结构参数共同构成,如图 5 所示。

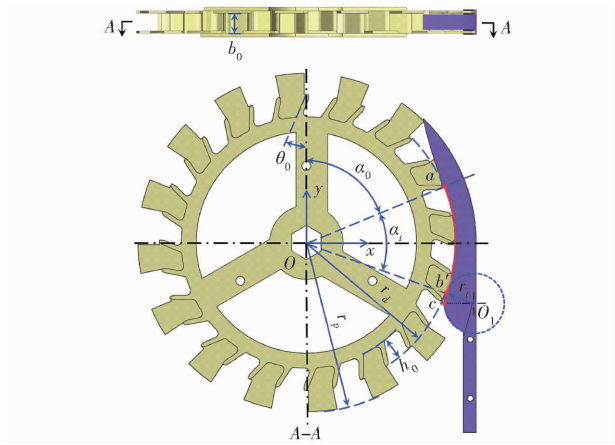


图 5 导向投种机构结构参数示意图

Fig.5 Structure parameters diagram of guiding seed throwing mechanism

导种轨由约束运移弧面与引导投种弧面衔接而成,固定安装于前、后壳体间与导种轮共同工作。其中,约束运移弧面配合导种仓格对待投种子的运动自由度施加约束,迫使其按照预先规划的运移轨迹平稳运动,从而确保引导投种阶段顺利进行;导种仓格内容种空间伴随自身转动与引导投种弧面的延伸,逐渐转化为楔形,用于稳定投种点处种子的姿态,从而确保种子能够顺利投出。为提供充足的递种区域,使种子及时完成递种,避免与导种轨结构发生干涉,约束运移弧面起始角 α_0 取 75° 。

导种轮边缘交错分布有开口方向相反的导种仓格。根据第 2 节分析,应尽量缩短种子的离心距离 l_{ab} ;此外,还需保障导种仓格内恰好能够完全容纳种子,使种子具有充足的姿态调整空间。因此导种仓格的高度 h_0 、厚度 b_0 均不宜过大,但也不能低于种子的最大长度 $l_{\max}$ (测得为 14.1 mm)^[22];已知导种轮半径 r_p 为 115 mm ,为满足上述条件,导种仓格半径 r_d 取 100 mm ,导种仓格高度 h_0 与厚度 b_0 均取 15 mm 。同时,导种仓格倾角 θ_0 越大,楔形容种空间的楔角越小,投种姿态越稳定,有利于顺利投种;在确保排种器的递种过程不受影响时,导种仓格倾角 θ_0 应取最大值。取种单元的斜线框区域为递种口,在导种仓格的隔断不干涉递种过程前提下,导种仓格倾角 θ_0 最大值为 27° ,如图 6 所示。

导种轨工作弧面的轴向投影曲线方程即为曲线段 ac 在坐标系中的平面方程,由圆弧段 ab' 与圆弧段 $b'c$ 组成。图 5 中,以导种轮轴心为原点 O ,水平方向为 x 轴,竖直方向为 y 轴建立坐标系,即可求得圆弧段 ab' 的方程为

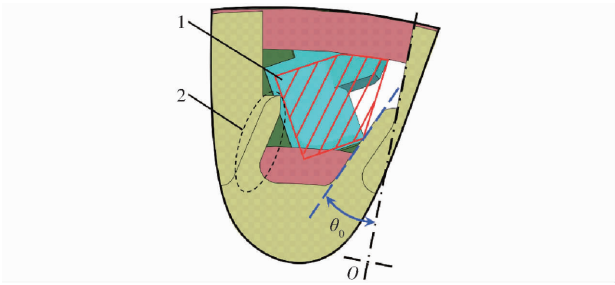


图 6 导种仓格

Fig.6 Seed guiding chamber

1. 递种口 2. 隔断

$$x^2 + y^2 = r_d^2$$
$$(x \in (0, r_d); y \in (r_d \cos(\alpha_0 + \alpha_i), r_d \cos \alpha_0)) \quad (3)$$

圆弧段 $b'c$ 的方程为

$$[x - (r_d + r_t) \sin(\alpha_0 + \alpha_i)]^2 + [y - (r_d + r_t) \cos(\alpha_0 + \alpha_i)]^2 = r_t^2$$
$$(x \in (0, (r_d + r_t) \sin(\alpha_0 + \alpha_i)); y \in ((r_d + r_t) \cos(\alpha_0 + \alpha_i), r_d \cos(\alpha_0 + \alpha_i))) \quad (4)$$

由式(3)、(4)可知,约束运移弧面圆心角 α_i 与引导投种弧面半径 r_t 决定了待投种子的导种轨迹,对投种效果具有直接影响,其取值根据下文分析及试验确定。

3.2 约束运移弧面圆心角

约束运移弧面圆心角影响种子在约束运移阶段中运动的稳定性。当种子到达点 a 处具有离心运动趋势,经过短距离离心运动后在点 b 接触导种轨,以点 a 处种子质心为原点,滑动平面的切向为 x 轴,法向为 y 轴建立坐标系,对种子进行受力分析,如图 7 所示。

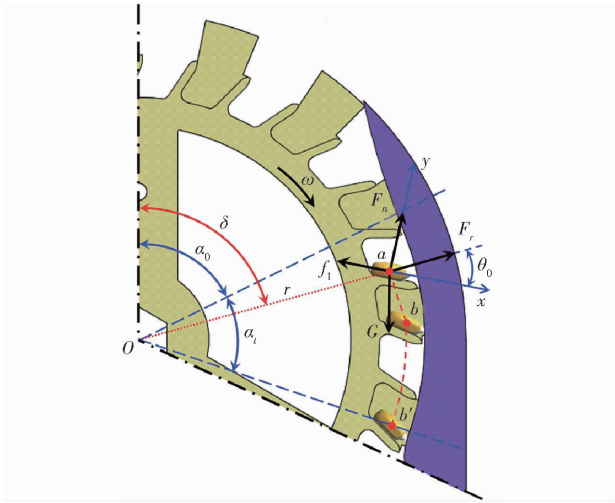


图 7 种子离心运动受力分析

Fig.7 Force analysis of seed centrifugal motion

根据种子在点 a 处沿 x 轴向合力大于 0 ,可得

$$F_x = F_r \cos \theta_0 + G \sin(\delta + \theta_0 - 0.5\pi) - f_1 > 0 \quad (5)$$

其中 $f_1 = \mu(G \cos(\delta + \theta_0 - 0.5\pi) - F_r \sin \theta_0)$ (6)

式中 f_1 ——种子与导种轮间滑动摩擦力, N

μ ——种子与排种器间滑动摩擦因数

联立式(5)、(6),解得

$$\delta > \arccos \left(\frac{r\omega^2}{g} \sin \left(\theta_0 + \arctan \frac{1}{\mu} \right) \right) + \arctan \mu - \theta_0 \quad (7)$$

已知种子所在点 a 位置处半径 r 取 0.09 m ,重力加速度 g 取 9.8 m/s^2 ,种子与排种器摩擦因数 μ 为 0.3 ,导种仓格倾角 θ_0 取 27° ,当排种盘角速度 ω 取 $0 \sim 3.06\text{ rad/s}$ 时(对应作业速度 $0 \sim 14\text{ km/h}$),由式(7)计算可得:种子所在位置处角度 δ 大于 79.7° 。

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 α_i 应满足

$$\alpha_i > \delta - \alpha_0 \quad (8)$$

式(8)中,种子位置角 δ 取 79.7° ,约束运移弧面起始角 α_0 取 75° ,代入式(8)计算可得,约束运移弧面圆心角 α_i 大于 4.7° ,当种子经过递种区域后,需至少转过 4.7° 后开始短距离心阶段。因此,为确保保持投种子在约束运移阶段中运动平稳,应保障约束运移阶段的轨迹弧长充足,约束运移弧面圆心角 α_i 不宜过小,应远大于 4.7° 。

3.3 投种初速度

投种初速度易对投种轨迹的分布范围产生影响。在引导投种阶段中,种子到达点 c 时质心与引导投种弧面的圆心 o_1 位于同一水平,此时种子处于临界投种状态,投种初速度竖直向下,即将开始竖直下抛运动。以导种轮轴心为原点 o ,水平方向为 x 轴,竖直方向为 y 轴建立坐标系,对种子的临界投种状态进行运动分析,如图 8 所示。

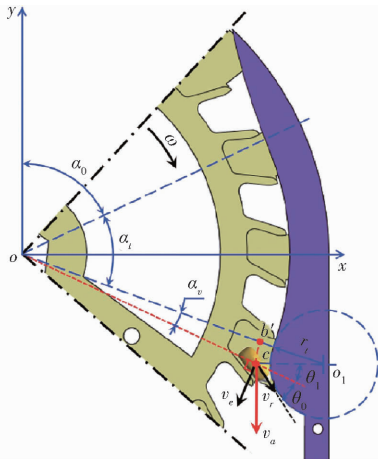


图 8 临界投种速度分析

Fig.8 Analysis of critical seed throwing velocity

种子在投种点 c 处的绝对速度 v_a 为牵连速度 v_e 与相对速度 v_r 的矢量和,满足

$$\mathbf{v}_a = \mathbf{v}_e + \mathbf{v}_r \quad (9)$$

由式(9)得

$$\begin{cases} v_a = v_e \cos \theta_1 + v_r \sin(\theta_0 + \theta_1) \\ v_e \sin \theta_1 = v_r \cos(\theta_0 + \theta_1) \end{cases} \quad (10)$$

其中

$$\begin{cases} r = r_d \\ v_e = r_d \omega \\ \theta_1 = \alpha_v + \alpha_0 + \alpha_i - 0.5\pi \end{cases} \quad (11)$$

式中 θ_1 ——种子绝对速度与牵连速度夹角, $(^\circ)$

α_v ——线段 ob' 与线段 oc 间夹角, $(^\circ)$

联立式(10)、(11)可得

$$v_a = r_d \omega (\sin(\alpha_0 + \alpha_i + \alpha_v) + \cos(\alpha_0 + \alpha_i) \cot(\theta_0 + \alpha_0 + \alpha_i + \alpha_v)) \quad (12)$$

由式(12)可知,投种初速度 v_a 与约束运移弧面圆心角 α_i 呈正相关,当约束运移弧面圆心角 α_i 取值越大时,投种初速度 v_a 越大,反之越小。预试验中,约束运移弧面圆心角 α_i 低于 30° 时,存在延迟投种现象,投种轨迹易波动,高于 45° 时,投种存在水平速度,易偏离竖直方向。分析原因可知,约束运移弧面圆心角 α_i 较小时,投种点位较高且投种初速度较小,由于投种时楔形容种空间的楔角过大,投种姿态稳定性不足,个别不能及时投出的种子,投种轨迹产生波动;约束运移弧面圆心角 α_i 过大时,投种点位较低,由于导种轨迹曲线的曲率过大,种子易脱离结构引导作用,投出后速度较大且存在水平分量,同样也会造成投种轨迹偏离竖直方向。因此,结合导向投种机构与排种盘结构尺寸,选取约束运移弧面圆心角 α_i 的范围在 $30^\circ \sim 45^\circ$ 之间,其最优取值通过后续试验确定。

3.4 引导投种弧面半径

引导投种阶段中种子能否顺利在投种点 c 处投出,取决于引导投种弧面半径。当种子在点 c 前或点 c 后投出时,均会导致投种初速度偏离竖直方向,造成投种轨迹分散现象。种子在点 b' 与引导投种弧面接触后,导种仓格内容种空间逐渐转化为楔形,种子的姿态在结构摩擦作用下渐渐调整,与楔形空间适应。由点 c 处楔形容种空间形状可以判断,种子的投种姿态大致可分为竖立、横躺与平躺,共 3 种姿态;当种子以竖立姿态投出时,种子经过点 c 后,机构的开口尺寸 c_1 应大于种子厚度 t 的水平投影长度;同理,当种子以横躺姿态投出时,种子经过点 c 后,机构开口尺寸 c_1 应大于 0.5 倍种宽 $(0.5w)$ 的水平投影长度;当种子以平躺姿态投出时,种子经过点 c 后,机构开口尺寸 c_1 应大于 0.5 倍种长 $(0.5l)$ 的水平投影长度,如图 9 所示。

由种子的实际尺寸分布范围可知,种身的欠约束部分长度 $(t, 0.5w \text{ 或 } 0.5l)$ 在水平方向的投影范围较为接近。为确保种子能够顺利投出,防止种子经过点 c 后受到过度的引导作用,偏离竖直方

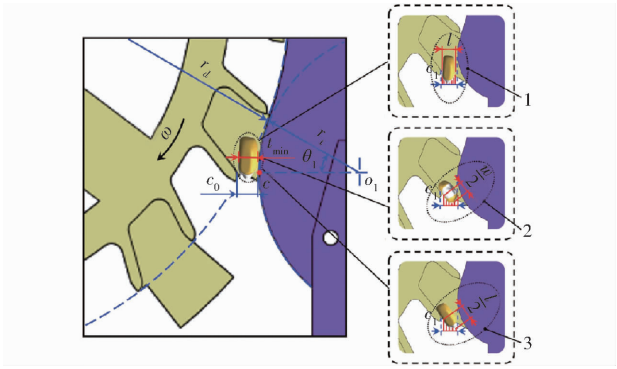


图 9 投种姿态分析

Fig. 9 Seed throwing posture analysis

1. 竖立姿态 2. 横躺姿态 3. 平躺姿态

向,机构开口尺寸 c_1 应大于上述投影长度,引导投种弧面半径 r_t 不宜过小。同时,为防止个别呈竖立姿态的小尺寸种子到达投种点 c 之前投出,投种点 c 处机构间隙 c_0 不宜过大,应小于种子最小厚度 $t_{\min}$,即

$$c_0 = (r_d + r_t) \sin(\alpha_0 + \alpha_t) - r_t + \sqrt{r_d^2 - (r_t + r_d)^2 \cos^2(\alpha_0 + \alpha_t)} \leq t_{\min} \quad (13)$$

由式(13)可得

$$r_t < \sqrt{\frac{r_d^2}{4} + \frac{(2t_{\min}r_d - t_{\min}^2)(1 + \sin(\alpha_0 + \alpha_t))}{4(1 - \sin(\alpha_0 + \alpha_t))}} - \frac{t_{\min} + r_d}{2} \quad (14)$$

已知导种轮半径 r_d 为 100 mm,种子最小厚度 $t_{\min}$ 为 3.82 mm^[22],若约束运移弧面圆心角 α_t 的取值由 30°增大至 45°时,代入式(14)中计算可得,引导投种弧面半径 r_t 由 63.39 mm 缩小至 19.56 mm,由此可见在不同的约束运移弧面圆心角 α_t 取值下,引导投种弧面半径 r_t 的取值范围不同,两者呈负相关。因此,为提高导向投种机构对玉米种子个体结构差异的适应性,确定引导投种弧面半径 r_t 最优值,应根据约束运移弧面圆心角 α_t 的取值开展试验优化。

4 性能优化试验

4.1 试验材料与测试装置

试验所用排种器为增设导向投种机构的玉米姿控驱动式排种器,其主要零部件加工材料选用铝合金 6061,通过 CNC 三轴数控加工中心制造,精度为 ± 0.01 mm;试验用种为未经过清选与分级的郑单 958 玉米种子,千粒质量 290.2 g,含水率 10.36%;采用自主搭建试验台架配合数据采集系统开展排种器性能优化试验。其中,排种器试验台架由驱动电机(转速:0~90 r/min)、传动装置(链轮、链条、传动轴)、导种管与输送带(带速:0~14 km/h,表面粘贴

双面胶带用于固定落种)构成;数据采集系统由高速摄像机(i-SPEED-3 型,日本 Olympus 公司)、运动追踪软件(Tracker)、坐标面板和高光灯组成,如图 10 所示。

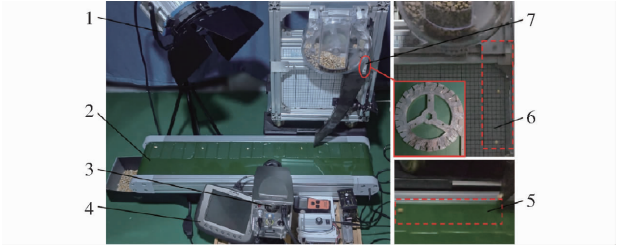


图 10 试验台架

Fig. 10 Test bench

1. 高光灯 2. 输送带 3. 高速摄像机 4. 影像控制器 5. 投种检测区 6. 落种检测区 7. 导向投种机构

4.2 试验设计与评价指标

4.2.1 试验设计

(1)结合理论分析与前期预试验,根据均分试验设计方法,分别在约束运移弧面圆心角 α_t 取值为 30°、35°、40°与 45°条件下开展单因素试验,同时利用高速摄影与运动分析技术探究约束运移弧面圆心角 α_t 对投种点位空间分布范围的影响规律,并确定约束运移弧面圆心角 α_t 的最优值。

(2)在试验(1)的基础上,对影响排种器高速工况下排种性能的关键因素引导投种弧面半径 r_t 与机具作业速度开展双因素试验^[23-25]。机具作业速度 X_1 设定 4 个水平:8、10、12、14 km/h,引导投种弧面半径 X_2 设定 4 个水平:10、20、30、40 mm,探究各因素对排种器高速工况下排种性能的影响规律,并对试验结果进行多元线性回归分析,建立回归方程,获取导向投种机构的最优参数组合。

(3)基于试验(1)、(2),对采用导向投种机构的姿控驱动式排种器与原排种器进行台架高速作业性能对比验证试验。试验设定作业速度分别为 8、10、12、14 km/h,在相同作业速度条件下对 2 种排种器的工作性能进行测试与对比,综合评价导向投种机构的提升作用。

4.2.2 评价指标

根据玉米精量播种农艺要求设定试验中播种粒距为 25 cm,依据 NY/T 503—2015《单粒(精密)播种机作业质量》,运用数据采集系统分别对试验指标粒距合格指数 Y_1 、粒距重播指数 Y_2 与合格粒距变异系数 Y_3 进行统计,251 粒稳定排出种子为一组试验,每组试验重复 3 次,以各指标的平均值作为试验结果。

4.3 试验结果及分析

4.3.1 单因素试验

在排种器作业速度取 14 km/h,引导投种弧面

半径取 19 mm 的条件下,开展不同约束运移弧面圆心角 α_i 的单因素试验。同时,利用高速摄像机录制不同试验因素水平下的投种过程,将视频文件导入 Tracker 软件,图像长度单位设置为 mm,标定图像与实际尺寸,以投种口中心为坐标原点 o ,建立 xoy 正平面坐标系与 zoy 侧面坐标系,采集连续投出 100 粒种子在投种口处的横坐标值记为投种点位的水平偏量,第 i 粒种子的正面水平偏量记为 x_i ,侧面水平偏量记为 z_i ,根据不同试验因素水平下投种点位水平偏量的分布情况,探明试验因素对投种点位空间分布范围的影响规律,如图 11 所示。

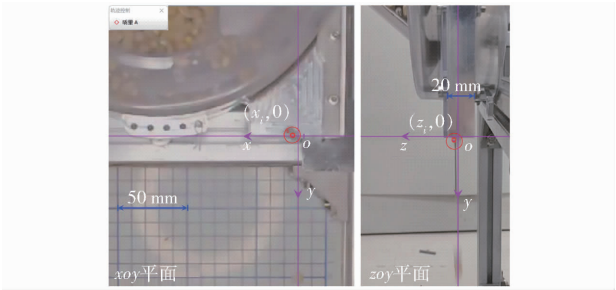


图 11 投种点位水平偏量测定

Fig. 11 Measurement of seed points horizontal deviation

试验结果如表 1 所示,约束运移弧面圆心角对排种粒距合格指数、粒距重播指数与粒距变异系数均具有显著影响;随着约束运移弧面圆心角取值的增大,排种合格指数呈先增高后降低的变化趋势,重播指数与合格粒距变异系数与之相反;当约束运移弧面圆心角为 35° 时,排种合格指数达到最大值 91.5%,重播指数与合格粒距变异系数均达到最小值 5.1% 与 16.5%,此时排种性能较好。

表 1 单因素试验结果

Tab. 1 Results of single factors test %

约束运移弧面圆心角 $\alpha_i/(^\circ)$	合格指数	重播指数	变异系数
30	90.7	5.6	16.9
35	91.5	5.1	16.5
40	90.1	5.8	17.1
45	89.7	6.0	17.6

随着约束运移弧面圆心角取值的增大,种子到达投种口处点位的正面水平偏量的分布范围呈先缩小后扩大的变化趋势,当约束运移弧面圆心角为 35° 时,正面水平偏量的标准差达到最小值 4.73 mm (图 12a);侧面水平偏量的分布范围整体变化较小,与正面水平偏量的分布范围的变化趋势基本一致,其标准差在约束运移弧面圆心角为 35° 时达到最小值 2.16 mm (图 12b)。通过研究投种过程的高速影像发现,当约束运移弧面圆心角取值较大或较小时,均会导致投种轨迹正面与侧面的波动范围扩大,投

种轨迹更加分散,与上文理论分析一致。因此,约束运移弧面圆心角不宜过大或过小,当其取值为 35° 时,投种点位较为集中,排种粒距均匀性较好。

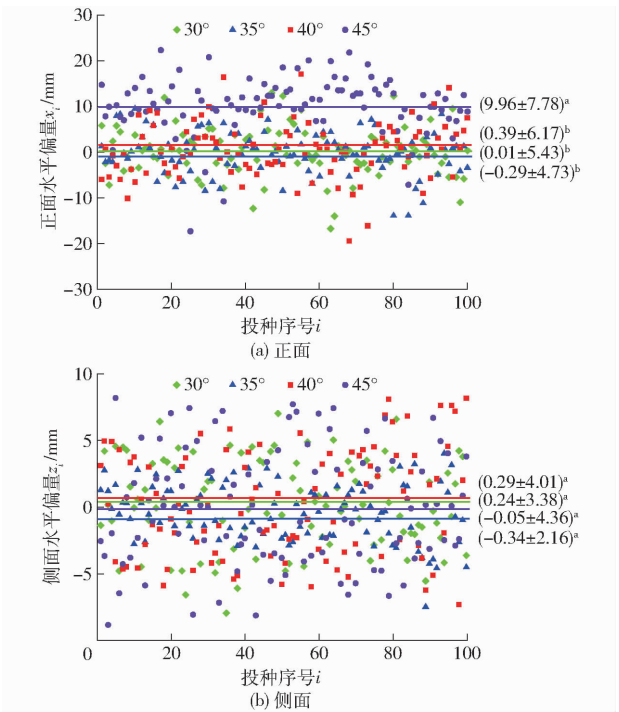


图 12 投种点位水平偏量分布范围

Fig. 12 Distribution of seed points horizontal deviation

4.3.2 双因素试验

基于上述单因素试验结果,在约束运移弧面圆心角为 35° 的条件下开展双因素试验,并对试验结果中各因素水平间差异进行显著性分析,如表 2 所示(平均值 $\pm$ 标准差)。

表 2 双因素试验结果

Tab. 2 Results of double factors test %

$X_1/$ ($\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$)	$X_2/$ mm	Y_1	Y_2	Y_3
8	10	(89.4 $\pm$ 0.8) ^{bA}	(5.6 $\pm$ 0.4) ^{bA}	(15.8 $\pm$ 0.7) ^{bA}
8	20	(90.3 $\pm$ 0.6) ^{abB}	(4.7 $\pm$ 0.6) ^{aA}	(13.6 $\pm$ 0.9) ^{aA}
8	30	(91.6 $\pm$ 0.7) ^{aA}	(3.9 $\pm$ 0.2) ^{aA}	(13.1 $\pm$ 0.6) ^{aA}
8	40	(89.4 $\pm$ 0.8) ^{bB}	(6.1 $\pm$ 0.5) ^{bA}	(16.6 $\pm$ 0.7) ^{bA}
10	10	(90.5 $\pm$ 0.6) ^{bA}	(6.0 $\pm$ 0.4) ^{abAB}	(16.8 $\pm$ 0.6) ^{bA}
10	20	(91.7 $\pm$ 0.6) ^{aA}	(5.9 $\pm$ 0.5) ^{abB}	(14.1 $\pm$ 0.6) ^{aA}
10	30	(91.9 $\pm$ 0.6) ^{aA}	(5.6 $\pm$ 0.7) ^{aB}	(14.9 $\pm$ 0.8) ^{aB}
10	40	(88.8 $\pm$ 0.4) ^{cB}	(6.7 $\pm$ 0.2) ^{bAB}	(17.7 $\pm$ 0.5) ^{bAB}
12	10	(90.7 $\pm$ 0.5) ^{aA}	(6.5 $\pm$ 0.6) ^{bAB}	(16.9 $\pm$ 0.5) ^{bA}
12	20	(91.6 $\pm$ 0.7) ^{aA}	(5.9 $\pm$ 0.2) ^{abB}	(15.6 $\pm$ 0.4) ^{aB}
12	30	(91.7 $\pm$ 0.6) ^{aA}	(4.9 $\pm$ 1.0) ^{aAB}	(15.8 $\pm$ 0.4) ^{aBC}
12	40	(90.9 $\pm$ 0.5) ^{aA}	(6.9 $\pm$ 0.6) ^{bAB}	(18.1 $\pm$ 0.5) ^{cB}
14	10	(90.0 $\pm$ 0.8) ^{bA}	(6.8 $\pm$ 0.8) ^{bB}	(18.6 $\pm$ 0.6) ^{bB}
14	20	(91.9 $\pm$ 0.6) ^{aA}	(5.5 $\pm$ 0.5) ^{aAB}	(16.5 $\pm$ 0.6) ^{aB}
14	30	(91.6 $\pm$ 0.4) ^{aA}	(5.7 $\pm$ 0.5) ^{aB}	(16.3 $\pm$ 0.8) ^{aC}
14	40	(89.7 $\pm$ 0.6) ^{bB}	(7.4 $\pm$ 0.2) ^{bB}	(18.8 $\pm$ 0.7) ^{bB}

注:不同小写字母表示相同 X_1 水平下不同 X_2 水平的指标之间差异显著 ($p < 0.05$);不同大写字母表示相同 X_2 水平下不同 X_1 水平的指标之间差异显著 ($p < 0.05$)。

由表 2 可知,作业速度与引导投种弧面半径对合格指数的影响均不显著;当作业速度确定时,合格指数随着引导投种弧面半径的增大呈略微增大后减小的趋势,当其处于 20 mm 或 30 mm 时取得最大值;当引导投种弧面半径确定时,合格指数随着作业速度的提升整体相对平稳;说明该排种器的合格指数受作业速度与引导投种弧面半径的影响较小。作业速度对重播指数的影响显著,引导投种弧面半径对重播指数的影响不显著;当作业速度确定时,重播指数随着引导投种弧面半径的增大呈略微减小后增大的趋势,在弧面半径为 20 mm 或 30 mm 时取最小值;当引导投种弧面半径确定时,重播指数随作业速度的上升呈先增大后平稳的趋势,但当引导投种弧面半径取 20 mm 或 30 mm 时,重播指数相对其它取值时较低。作业速度与引导投种弧面半径对粒距变异系数的影响均显著;当作业速度确定时,变异系数随着引导投种弧面半径的增大呈现出先减小后增大的趋势,在其为 20 mm 或 30 mm 时达到最小值;当引导投种弧面半径确定时,变异系数随着作业速度的提升呈现出上升趋势,但引导投种弧面半径取 20 mm 或 30 mm 时,变异系数相对其它取值时较低。

综上所述,当引导投种弧面半径在 20 ~ 30 mm 之间时,排种器的工作性能保持在较优水平,更加适宜高速作业。原因在于玉米种子的尺寸差异大且形状不规则,种子投放时的外形、尺寸及姿态存在差异性;当引导投种弧面半径过小时,由于种子约束运移阶段结束后具有惯性,不能及时接触引导投种弧面,部分种子直接到达投种点未经引导投出;当引导投种弧面半径过大时,投种点处开口间隙较大,部分小尺寸种子到达投种点前提前投出。上述因素均会造成投种轨迹分散的现象,影响排种器高速工况下的排种性能。

利用 Design-Expert 8.0.6 软件对表 2 中试验结果进行多元线性回归分析,可得试验因素作业速度 X_1 、引导投种弧面半径 X_2 及其交互作用对试验指标粒距合格指数 Y_1 、粒距重播指数 Y_2 与粒距变异系数 Y_3 影响的显著性,如表 3 所示。

表 3 试验因素对指标影响的显著性系数 p

Tab.3 Impact of experimental factors on indicators

来源	Y_1	Y_2	Y_3
模型	0.003 4 **	0.001 7 **	<0.000 1 **
X_1	0.094 9	0.004 1 **	<0.000 1 **
X_2	0.444 5	0.281 2	0.020 3 *
X_1X_2	0.872 2	0.808 2	0.601 7
X_1^2	0.121 3	0.174 1	0.708 3
X_2^2	0.000 2 **	0.000 3 **	<0.000 1 **

注: ** 表示 0.01 水平下影响显著; * 表示 0.05 水平下影响显著。

由表 3 可知,排种器作业速度对粒距合格指数的影响不显著,对粒距重播指数与粒距变异系数的影响均达到极显著,引导投种弧面半径仅对粒距变异系数的影响显著,且试验因素间的交互作用对各试验指标均无显著影响。根据分析结果可得试验指标与因素间的多元回归方程

$$\begin{cases} Y_1 = 78.3 + 1.5X_1 + 0.4X_2 + 0.001X_1X_2 - 0.1X_1^2 - 0.008X_2^2 \\ Y_2 = 2 + 1.1X_1 - 0.3X_2 + 0.001X_1X_2 - 0.04X_1^2 + 0.006X_2^2 \\ Y_3 = 15 + 0.7X_1 - 0.6X_2 - 0.002X_1X_2 - 0.009X_1^2 + 0.01X_2^2 \end{cases}$$

(15)

为寻求该排种器在高速工况下的最优工作性能,以粒距合格指数最大、粒距重播指数与粒距变异系数最小为优化目标,对试验指标优化求解得到排种器在作业速度为 8 km/h、引导投种弧面半径为 24.3 mm 时,粒距合格指数、重播指数和变异系数分别达到 91.1%、4.4% 和 13.3%。

4.3.3 性能对比验证试验

基于上述试验结果,在引导投种弧面半径为 24.3 mm 的条件下,添加排种破损率作为试验指标,进行不同作业速度 8、10、12、14 km/h 的排种器性能测试,并与原排种器(无导向投种机构)的作业性能对比,结果如表 4 所示。

表 4 性能对比验证试验结果

Tab.4 Results of performance comparison verification

%					
投种方式	作业速度/ (km·h ⁻¹)	合格 指数	重播 指数	粒距变异 系数	破损 率
导向投种机构	8	91.5	4.7	13.6	0.11
	10	91.3	5.3	14.1	0.24
	12	92.1	5.9	15.4	0.29
	14	91.9	5.7	16.1	0.34
原排种器	8	91.6	5.6	13.5	0.13
	10	91.2	6	14.3	0.22
	12	90.4	7.1	16.7	0.27
	14	91.4	6.9	18.8	0.40

由表 4 可知,增设导向投种机构的玉米姿控驱导式排种器,在作业速度 8 ~ 14 km/h 范围内,排种合格指数均大于等于 91.3%,重播指数均小于等于 5.9%,破损率均小于等于 0.34%,粒距变异系数均小于等于 16.1%,满足精量播种技术要求。其中,当作业速度为 8 km/h 时,排种合格指数为 91.5%,重播指数为 4.7%,粒距变异系数为 13.6%,与上文试验优化结果几乎一致。因此,可以确定导向投种机构的最优结构参数分别为约束运移弧面圆心角取 35°,引导投种弧面半径取 24.3 mm。

与原排种器性能对比分析可知,导向投种机构对排种器的整体工作性能具有提升作用,其中对投

种效果的提升最为明显。增设导向投种机构的排种器粒距变异系数较原排种器降低,且随着作业速度的提升降低效果更加明显。当作业速度由 8 km/h 提升至 14 km/h 后,变异系数的降幅由 0.1 个百分点上升至 2.7 个百分点,说明采用导向投种机构为导种过程中种子运动施加了约束与引导作用,确保了投种点位的一致性,并缩小了由待投种子姿态、外形及尺寸等因素造成的投种轨迹差异,有效改善了原排种器在高速工况下的投种效果。

5 结论

(1) 针对玉米姿控驱动式排种器高速工况下投种点位不一致,排种粒距均匀性不佳的问题,提出约束种子运动自由度并引导投种方向的方法,设计了一种导向投种机构,通过合理规划待投种子的导种轨迹,分析待投种子的运动与受力情况,确定了导向投种机构的关键结构参数及其取值范围。

(2) 单因素试验表明,当约束运移弧面圆心角取值为 35° 时,投种点位较为集中,排种粒距均匀性较好;双因素试验表明,当排种器在作业速度为 8 km/h、引导投种弧面半径为 24.3 mm 时,排种性能达到最优;经验证得,最优条件下排种粒距合格指数、重播指数和变异系数分别为 91.5%、4.7% 和 13.6%,与优化结果基本一致。

(3) 性能对比验证试验表明,增设导向投种机构的姿控驱动式排种器在作业速度 8 ~ 14 km/h 范围内,排种合格指数均大于等于 91.3%,重播指数均小于等于 5.9%,破损率均小于等于 0.34%,粒距变异系数均小于等于 16.1%;且随着作业速度上升,导向投种机构对排种均匀性提升效果更加明显,当作业速度由 8 km/h 上升至 14 km/h 时,较原排种器粒距变异系数降幅由 0.1 个百分点增大至 2.7 个百分点,采用导向投种机构可有效提升原排种器的高速作业性能。

参 考 文 献

- [1] 邢赫,臧英,曹晓曼,等.水稻气力式排种器投种轨迹试验与分析[J].农业工程学报,2015,31(12):23-30.
XING He, ZANG Ying, CAO Xiaoman, et al. Experiment and analysis of dropping trajectory on rice pneumatic metering device[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(12): 23-30. (in Chinese)
- [2] 王云霞,张文毅,严伟,等.气流辅助高速投种精量播种机压种装置设计与试验[J].农业机械学报,2020,51(10):69-76.
WANG Yunxia, ZHANG Wenyi, YAN Wei, et al. Design and experiment of seed pressing device for precision seeder based on air flow assisted seed delivery[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(10): 69-76. (in Chinese)
- [3] 陈学庚,钟陆明.气吸式排种器带式导种装置的设计与试验[J].农业工程学报,2012,28(22):8-15.
CHEN Xuegeng, ZHONG Luming. Design and test on belt-type seed delivery of air-suction metering device[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(22): 8-15. (in Chinese)
- [4] XING He, WANG Zaiman, LUO Xiwen, et al. Design of an active seed throwing and cleaning unit for pneumatic rice seed metering device[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2018, 11(2): 62-69.
- [5] 李玉环,杨丽,张东兴,等.豆类作物一器双行气吸式高速精量排种器设计与试验[J].农业机械学报,2019,50(7):61-73.
LI Yuhuan, YANG Li, ZHANG Dongxing, et al. Design and experiment of pneumatic precision seed-metering device with single seed-metering plate for double-row[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(7): 61-73. (in Chinese)
- [6] 高筱钧,徐杨,张东兴,等.气送式高速玉米精量排种器设计与试验[J].农业工程学报,2019,35(23):9-20.
GAO Xiaojun, XU Yang, ZHANG Dongxing, et al. Design and experiment of air-assisted high speed precision maize seed metering device[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(23): 9-20. (in Chinese)
- [7] GAO Xiaojun, CUI Tao, ZHOU Zongyan, et al. DEM study of particle motion in novel high-speed seed metering device[J]. Advanced Powder Technology, 2021, 32(5): 1438-1449.
- [8] 王奇,朱龙图,李名伟,等.指夹式玉米免耕精密播种机振动特性及对排种性能的影响[J].农业工程学报,2019,35(9):9-18.
WANG Qi, ZHU Longtu, LI Mingwei, et al. Vibration characteristics of corn no-tillage finger-type precision planter and its effect on seeding performance[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(9): 9-18. (in Chinese)
- [9] 眭晋.大豆种子与土壤的碰撞过程试验研究与仿真分析[D].长春:吉林大学,2016.
SUI Jin. Research on experiment and simulation analysis of soybean collision with soil[D]. Changchun: Jilin University, 2016. (in Chinese)
- [10] 颜辉.组合内窝孔玉米精量排种器优化设计新方法研究[D].长春:吉林大学,2012.
YAN Hui. A new kind of method for the optimized design of combination inner-cell corn precision seed metering device[D]. Changchun: Jilin University, 2012. (in Chinese)
- [11] XUE Pan, HAO Yujun, JIAO Wan, et al. Design and test of a double-curved guiding groove for a high-speed precision seed-metering device[J]. Transactions of the ASABE, 2020, 63(5): 1349-1360.

- [12] 康建明, 向阳, 张春艳, 等. 气吸滚筒式花生穴播器投种性能分析与试验[J]. 农业工程学报, 2022, 38(14): 1–11. KANG Jianming, XIANG Yang, ZHANG Chunyan, et al. Analysis and experiments of the seed feeding performance of air-suction roller dibbler for peanuts[J]. Transactions of the CSAE, 2022, 38(14): 1–11. (in Chinese)
- [13] 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 on V-groove dialing round type guiding-seed device [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(6): 146–158. (in Chinese)
- [14] 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 of seed guiding technology and device of planter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(12): 1–14. (in Chinese)
- [15] 刘立晶, 杨慧. 基于 Geomagic Design 软件的导种管三维逆向工程设计[J]. 农业工程学报, 2015, 31(11): 40–45. LIU Lijing, YANG Hui. 3D reverse engineering design on seed tube based on Geomagic Design software[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(11): 40–45. (in Chinese)
- [16] TANG Han, XU Changsu, WANG Ziming, et al. Optimized design, monitoring system development and experiment for a long-belt finger-clip precision corn seed metering device[J]. Frontiers in Plant Science, 2022, 13: 814747.
- [17] 刘宏新, 徐晓萌, 刘俊孝, 等. 利用高速摄像及仿真分析立式浅盆型排种器工作特性[J]. 农业工程学报, 2016, 32(2): 13–19. LIU Hongxin, XU Xiaomeng, LIU Junxiao, et al. Working characteristics of vertical shallow-basin type seed-metering device based on high-speed photography and virtual simulation [J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(2): 13–19. (in Chinese)
- [18] XING He, WANG Zaiman, LUO Xiwen, et al. Mechanism modeling and experimental analysis of seed throwing with rice pneumatic seed metering device with adjustable seeding rate[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2020, 178: 105697.
- [19] XUE Pan, XIA Xuyu, GAO Pengyang, et al. Double-setting seed-metering device for precision planting of soybean at high speeds[J]. Transactions of the ASABE, 2019, 62(1): 187–196.
- [20] 李玉环, 杨丽, 张东兴, 等. 气吸式玉米高速精量排种器直线投种过程分析与试验[J]. 农业工程学报, 2020, 36(9): 26–35. LI Yuhuan, YANG Li, ZHANG Dongxing, et al. Analysis and test of linear seeding process of maize high speed precision metering device with air suction[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(9): 26–35. (in Chinese)
- [21] 李玉环, 杨丽, 张东兴, 等. 气吸式玉米高速精量排种器投种性能分析与结构优化[J]. 农业工程学报, 2022, 38(8): 1–11. LI Yuhuan, YANG Li, ZHANG Dongxing, et al. Performance analysis and structure optimization of the maize precision metering device with air suction at high-speed condition[J]. Transactions of the CSAE, 2022, 38(8): 1–11. (in Chinese)
- [22] 董建鑫, 高筱钧, 张仕林, 等. 高速播种机玉米姿控驱导式排种器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(11): 108–119. DONG Jianxin, GAO Xiaojun, ZHANG Shilin, et al. Design and test of maize posture control and driving precision metering device for high-speed seeder [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(11): 108–119. (in Chinese)
- [23] 郝建军, 秦家辉, 杨淑华, 等. 勺夹式花生小区单粒精量播种单体设计与试验[J]. 农业工程学报, 2023, 39(3): 33–41. HAO Jianjun, QIN Jiahui, YANG Shuhua, et al. Design and experiments of a precision sowing unit with the spoon clip for single peanut seed planting in plot[J]. Transactions of the CSAE, 2023, 39(3): 33–41. (in Chinese)
- [24] 贾洪雷, 陈玉龙, 赵佳乐, 等. 气吸机械复合式大豆精量排种器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2018, 49(4): 75–86, 139. 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, 139. (in Chinese)
- [25] 丁力, 杨丽, 张东兴, 等. 气吸式排种器卸种机构设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(1): 37–46. DING Li, YANG Li, ZHANG Dongxing, et al. Design and test of unloading mechanism of air-suction seed metering device [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(1): 37–46. (in Chinese)