

高速播种机玉米姿控驱导式排种器设计与试验

董建鑫¹ 高筱钧¹ 张仕林¹ 刘 研¹ 陈旭辉¹ 黄玉祥^{1,2}

(1. 西北农林科技大学机械与工程学院, 陕西杨凌 712100; 2. 陕西省农业装备工程研究中心, 陕西杨凌 712100)

摘要: 针对机械式玉米排种器在播种机高速作业条件下排种精度下降且性能不稳定的问题,提出利用调姿齿与单元型孔对玉米种子充种姿态进行调控的技术思路,设计了一种姿控驱导式精量排种器,采用双侧种盘对置、单列排种结构布局,降低工作转速同时提高排种均匀性。完成了关键零部件的结构参数设计,分析了种子姿态调整原理,通过单因素试验与正交旋转组合试验获取排种器的最优参数组合,并开展排种性能对比试验。结果表明:调姿齿齿型为线型时,排种合格率提升效果最优,较无调姿齿可提升29.1个百分点;排种器的最优参数组合为:工作转速16.7 r/min,型孔外壁面倾角46.9°与型孔圆角半径4.5 mm,该条件下合格率、漏播率和重播率分别为91.6%、2.8%与5.6%;在作业速度8~14 km/h范围内,排种器的合格率均高于90%,漏播率均低于3%,重播率均低于8%,破损率均低于0.5%,粒距均匀性变异系数均低于19%,且排种效果优于无姿态调控排种器与匀轮式排种器,满足玉米精量播种的技术要求。

关键词: 机械式排种器; 高速; 玉米种子; 姿态调控

中图分类号: S223.2 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2022)11-0108-12 OSID: 

Design and Test of Maize Posture Control and Driving Precision Metering Device for High-speed Seeder

DONG Jianxin¹ GAO Xiaojun¹ ZHANG Shilin¹ LIU Yan¹ CHEN Xuhui¹ HUANG Yuxiang^{1,2}

(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)

Abstract: Aiming at the problem that the precision and performance of maize mechanical seed-metering device was decreased and unstable when it was at high-speed sowing of the seeder. The technical idea of adjusting and controlling maize seed filling posture by using posture adjustment teeth and unit hole was put forward. A precision metering device with posture control and driving was designed. It adopted the structural layout of double sided seed discs opposed and single row seeding, so as to reduce the rotation speed and improve the uniformity of seed-metering. The structural parameters of the key components were designed. The principle of seed posture adjustment was analyzed. Through single factor test and combination test, the optimal parameters of the seed-metering device was obtained. Subsequently, the seed-metering performance comparison test were carried out. The results showed that when the type of the posture adjustment teeth was linear, the effect of improving the qualified index was the best, which can be increased by 29.1 percentage points compared with that of no posture adjustment teeth. When the rotation speed was 16.7 r/min, the inclination angle of the hole outer wall was 46.9° and the fillet radius of the hole was 4.5 mm, the qualified index, missed index and multiple index were 91.6%, 2.8% and 5.6%, respectively. Within the range of operating speed of 8~14 km/h, the qualified index was over 90%, the miss index was below 3%, the multiples index was below 8%, the damage index was below 0.5%, and the variation coefficient of grain spacing uniformity was below 19%. Moreover, the seed-metering effect was better than that of no posture control seed-metering device and scoop type seed-metering device, which met the technical requirements of maize precision sowing.

Key words: mechanical seed-metering device; high-speed; maize seed; posture control

收稿日期: 2022-07-24 修回日期: 2022-08-23

基金项目: 国家自然科学基金项目(31971802)、国家重点研发计划项目(2021YFD2000404、2021YFD2000405)和陕西省重点产业创新链项目(2019ZDLNY02-03)

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@nwfau.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

0 引言

实现玉米精密播种技术的关键是确保排种器排种均匀、稳定^[1-2]。机械式排种器因结构简单、配套性好、制造和使用成本低等优点,在我国拥有广泛的应用前景^[3-5]。随着精密播种技术发展,田间高速作业能力已成为衡量播种机性能的重要指标^[6-8]。现阶段,玉米精密播种机作业速度不断提高,但由于受种子形状、尺寸差异等因素制约,机械式排种器高速作业时难以保持高质量排种效果^[9-10]。因此,提升机械式排种器的高速作业性能,对促进玉米精密播种技术与装备发展具有重要意义。

机械式排种器的工作过程一般可分为充种、清种、护种、投种 4 个阶段,为确保其工作性能可靠,学者对其结构与工作原理进行了大量研究^[11-14]。在提高充种效果方面,常采用增大种群扰动、施加机械振动等方式,破坏种层间相互制约的力链并提升种群流动性,从而降低种子进入充种口时的充填阻力^[15-17];为了提高清种效果,常利用清种毛刷、钢丝及刮种片等辅助部件,使多余种子在外力作用下脱落,或结合高速影像探明有效清种区域,优化护种板角度等方法^[18-20]。此外,相关学者还设计了双定种、导种槽等新型取种单元结构,对充种前种子的运动方式起到有效导向作用,引导种子进入型孔,从而提升大豆排种器的高速作业能力^[21-23]。然而,由于玉米种子充种时姿态各异,随着机械式排种器的转速提升,短时间内种子充入姿态难以有效匹配充种口形状,易造成漏充现象;且当多粒种子保持随机姿态充入型孔时,也容易将其堵塞,导致无法完成清种;上述问题是造成机械式排种器高速作业时排种精度下降的主要原因。

为此,本文设计一种姿控驱导式玉米精量排种器,利用调姿齿对种子的充前姿态进行调整,配合单元型孔控制种子的充入姿态,并采用双侧种盘对置、单列排种的结构布局,以确保高速作业时充、清种效果稳定,进而提升排种性能。根据种子的物理机械特性,完成排种器的关键零部件参数设计,分析种子姿态调整原理,开展台架性能试验,获取排种器最优参数组合,并验证其高速作业性能及姿态调控技术的有效性,以为机械式精量排种器研究提供参考。

1 排种器结构与工作原理

姿控驱导式精量排种器的结构爆炸图如图 1a 所示,主要包括前壳体、护种板、排种盘、裤型入种管、递种隔板、导种轮、后壳体、传动轴、投种口。

图 1b 为排种器装配图。其中,取种单元作为调

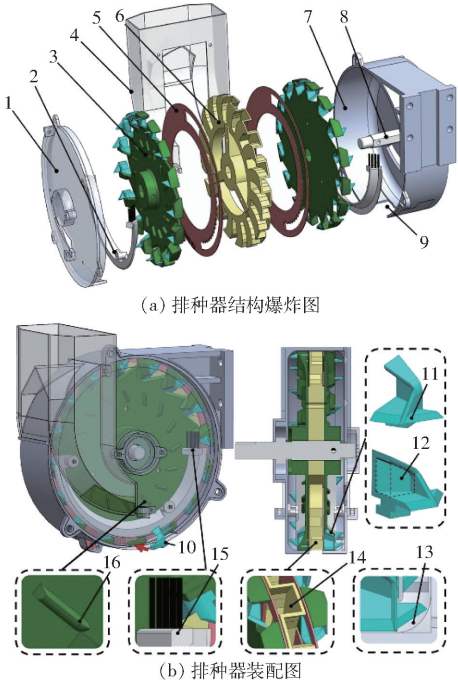


图 1 排种器结构示意图

Fig. 1 Structure diagrams of seed-metering device

1. 前壳体 2. 护种板 3. 排种盘 4. 裤型入种管 5. 递种隔板
6. 导种轮 7. 后壳体 8. 传动轴 9. 投种口 10. 取种单元
11. 调姿齿 12. 单元型孔 13. 调姿槽 14. 导种仓格 15. 毛刷
16. 扰种齿

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,调姿齿用于调整位于调姿槽底部种子的姿态;护种板与壳体壁面之间为调姿槽,槽底采用弧形曲面,使槽底的种子在侧向力作用下进入取种单元;导种轮上连续分布有导种仓格,由于承接两侧排种盘上取种单元投递的种子,相邻两个仓格侧面开口相反;毛刷位于护种板末端,防止取种单元与护种板夹碎清落的种子;排种盘内径处设有扰种齿,用于破坏种群的静止堆积状态,促使种子进入调姿槽内。

排种器工作原理如图 2 所示,共分为充种、清种、递种、导种和投种 5 个阶段,其中充种阶段包含种子的姿态调控过程。

种子从入种管进入排种器前、后两侧种室后,随扰种齿搅动进入调姿槽,由于调姿槽宽度的限制,槽底的马齿形与球锥形种子将保持竖立 1、侧立 2 或斜躺 3 共 3 种姿态,竖立姿态的种子受护种板边缘高度的限制,无法进入取种单元,因此需要利用调姿齿拨动其进行翻滚,以调整姿态,直至调整为斜躺或侧立姿态后,在侧向力作用下穿越护种板底部,进入取种单元内准备充种。此时,种子将保持平躺或侧立两种姿态,在递种隔板壁面摩擦力驱动下,控制其保持现有姿态充入单元型孔;取种单元携带种子运动至清种区后,多余种子受到约束力不足而随重力

下落,型孔内仅保留单粒种子;随后两侧取种单元内的种子投递至导种仓格内汇聚成同一列后,随重力与离心力运动至导种仓格底部,在投种区排出。

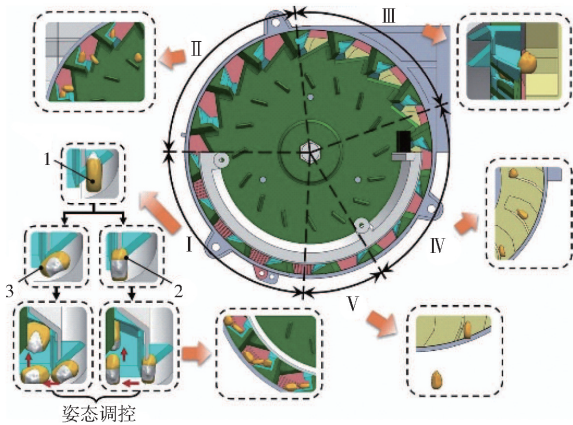


图2 排种器工作原理图

Fig. 2 Diagram of working principle

1. 竖立姿态 2. 侧立姿态 3. 斜躺姿态 I. 充种阶段 II. 清种阶段 III. 递种阶段 IV. 导种阶段 V. 投种阶段

2 关键零部件结构设计

2.1 种子形状特征及尺寸

种子的形状特征及尺寸是排种器关键零部件结构设计的重要依据^[24]。本文选用未经过分级处理的郑单 958 玉米种子作为研究对象,根据其外形轮廓特征将种子分为马齿形、球锥形与近球形 3 类,将每类种子各随机选取 100 粒,通过三维扫描的方法得到其外形轮廓,依次测量每颗种子的三轴尺寸并统计。以种子质心为原点,长度、宽度、厚度所在坐标轴分别为 z 轴、 y 轴、 x 轴,如图 3 所示。

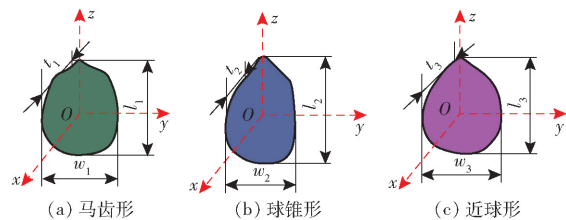


图3 玉米种子三轴尺寸

Fig. 3 Triaxial size of maize seeds

由于近球形种子尺寸差异较小,为便于后续结构参数设计,测量结果采用均径 s 表示,种子三轴尺寸测量结果见表 1 ($s = \sqrt[3]{l_3 w_3 t_3}$, l_3 、 w_3 、 t_3 分别为近球形种子长度、宽度和厚度)。

2.2 排种盘

排种盘直径决定取种单元的数量及分布,对整机性能至关重要。《农业机械设计手册》中,机械式排种器的种盘直径通常取 80 ~ 260 mm,不宜过大或过小^[25]。排种盘直径过小时,圆周可分布取种单元数量减少,排种器高速作业时转速提升,不利于排

表 1 玉米种子三轴尺寸测量结果

Tab. 1 Measurement results of triaxial size of maize seeds

类型	三轴尺寸	测量值
马齿形	长度 l_1 /mm	10. 77 ~ 13. 48
	宽度 w_1 /mm	7. 52 ~ 9. 98
	厚度 t_1 /mm	3. 82 ~ 6. 25
球锥形	长度 l_2 /mm	10. 97 ~ 14. 04
	宽度 w_2 /mm	5. 93 ~ 9. 46
	厚度 t_2 /mm	4. 32 ~ 8. 41
近球形	均径 s /mm	7. 64 ~ 9. 99

种均匀、稳定;排种盘直径过大时,取种单元数目可增多,有利于降低排种器的工作转速,提高排种稳定性,但直径过大也会相应提升制造成本、装配难度及作业功耗^[26-27]。故本文综合考虑后选取排种盘外径 d 为 230 mm,内径 d_0 为 150 mm,如图 4 所示。

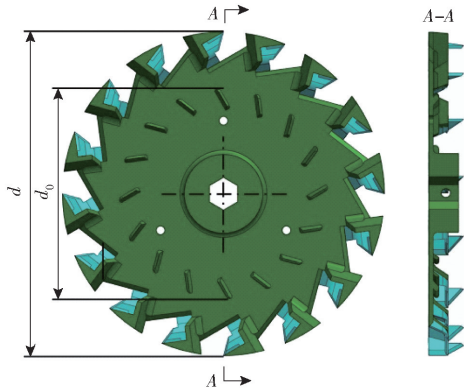


图4 排种盘装配示意图

Fig. 4 Structure diagram of seed-metering disc

2.3 调姿槽

调姿槽用于配合调姿齿调整种子的充前姿态。由于种群中马齿形与球锥形种子的形状、尺寸差异较大,并且数量较多。为实现上述两种形状种子的姿态调整,需要确定调姿槽的尺寸参数。首先应确保近球形种子在最大均径 s_{max} 下可以进入取种单元内,其次针对马齿形和球锥形种子的姿态进行分析,具体如下:

为准确调整种子的姿态,应初步限制长轴垂直于槽壁的种子(受限姿态 1 与受限姿态 2)落入槽内,调姿槽的宽度 r_1 应小于种子的最小长度 l_{min} (图 5a、5b);当落入槽内种子的长轴平行于槽壁时,种子可到达槽底呈竖立、斜躺或侧立姿态,由于护种板边缘高度 r_2 小于种子的最小长度 l_{min} ,保持竖立姿态(受限姿态 3 与受限姿态 4)的种子无法进入取种单元,所以需要对其进行姿态调整(图 5c、5d);为使调整后的种子以斜躺或侧立姿态进入取种单元,护种板边缘高 r_2 应大于种子的最大宽度 w_{max} 或种子的最大厚度 t_{max} (图 5e、5f)。因此,调姿槽的结构参数满足

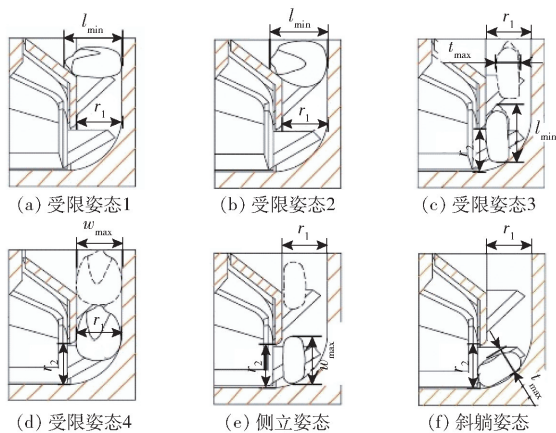


图 5 调姿槽结构参数示意图

Fig. 5 Diagrams of posture adjustment groove parameters

$$\begin{cases} \max(w_{\max}, t_{\max}, s_{\max}) \leq r_1 \leq l_{\min} \\ \max(w_{\max}, t_{\max}, s_{\max}) \leq r_2 \leq l_{\min} \\ l \in (l_1, l_2) \\ w \in (w_1, w_2) \\ t \in (t_1, t_2) \end{cases} \quad (1)$$

式中 l ——马齿形或球锥形种子长度, mm

w ——马齿形或球锥形种子宽度, mm

t ——马齿形或球锥形种子厚度, mm

由表 1 可知, $l_{\min}$ 、 $w_{\max}$ 、 $t_{\max}$ 与 $s_{\max}$ 的取值分别为 10.77、9.98、8.41、9.99 mm。根据式(1)确定 r_1 与 r_2 均取 10 mm。

为使种子调整姿态后能顺利通过护种板底端进入取种单元, 还需确定槽底截面圆弧半径的取值。以调姿槽宽度 r_1 为半径的圆 O_1 、以护种板边缘高 r_2 为半径的圆 O_2 , 均不与以槽底截面圆弧 r_0 为半径的圆 O_0 发生干涉, 即圆 O_1 与圆 O_2 下侧的公切线与圆 O_0 间存在长度为 Δr_0 的间隙, 如图 6 所示。其中, 圆心 O_1 、 O_2 分别为护种板截面末端倒角的起点与终点, 圆 O_1 与槽壁相切于点 a 、圆 O_2 与槽底相切于点 b , 圆 O_0 同时经过 a 、 b 两点, 圆心 O_0 位于线段 ab 的法向平分线上。

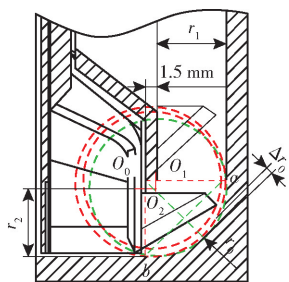


图 6 槽底圆弧截面参数示意图

Fig. 6 Diagram of groove bottom arc section parameters

因此, 圆 O_1 、圆 O_2 下侧公切线与圆 O_0 的间隙 Δr_0 应满足

$$\Delta r_0 \geq 0 \quad (2)$$

由图 6 中圆 O_1 、圆 O_2 与圆 O_0 的几何位置关系可得

$$\begin{cases} l_{ab} = \sqrt{(r_1 + 1.5)^2 + (r_2 + 1.5)^2} \\ \Delta r_0 = r_0 - \sqrt{r_0^2 - \left(\frac{l_{ab}}{2}\right)^2} - \left[r_1 - r_1 \sqrt{1 - \frac{l_{ab}^2}{4(r_1 + 1.5)^2}} \right] \end{cases} \quad (3)$$

式中 l_{ab} ——点 a 、 b 间距离, mm

将 r_1 与 r_2 取值代入式(3)后, 联立式(2)可得: $r_0 \geq 12.85$ mm。为使调姿槽内种子调整姿态后有足够侧向充填力进入取种单元, 槽底截面圆弧半径不宜过大, Δr_0 取值应接近于 0, 因此 r_0 取 12.85 mm。

种子完成姿态调整后的受力情况如图 7 所示。

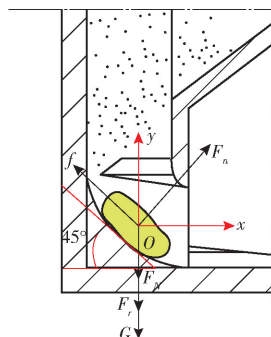


图 7 槽底种子受力分析

Fig. 7 Force analysis of seeds at bottom of groove

以种子质心为原点, 水平方向为 x 轴, 竖直方向为 y 轴建立坐标系, 种子在 x 轴方向的合力满足

$$\sum F_x = [(F_N + F_r + G) \cos 45^\circ - f] \cos 45^\circ \quad (4)$$

其中

$$\begin{cases} f = \mu F_N \\ G = mg \\ F_r = mr\omega^2 \end{cases} \quad (5)$$

$$F_N = (F_N + F_r + G) \cos 45^\circ \quad (6)$$

式中 F_N ——种子受到的上方种层压力, N

F_r ——种子受到的离心力, N

G ——种子受到的重力, N

f ——种子与排种器结构间摩擦力, N

μ ——种子与排种器间滑动摩擦因数

F_N ——种子受到的支持力, N

m ——种子质量, kg

g ——重力加速度, 取 9.8 m/s^2

r ——种子所在位置半径, m

ω ——排种器角速度, rad/s

联立式(4)~(6), 可得

$$\sum F_x = 0.5(1 - \mu)(F_N + mr\omega^2 + mg) \quad (7)$$

由式(7)可知, 种子受到 x 轴方向的合力, 与排种器角速度 ω 、上方种子的压力 F_N 呈正相关。因

此,排种器的角速度越高,种子进入取种单元时的侧向作用力越大,可以确保其高速作业时充种可靠。

2.4 取种单元

2.4.1 结构参数设计

取种单元的结构参数直接决定排种器的充、清种性能。取种单元主要结构参数包括调姿齿齿型,型孔宽度 W 、型孔壁面高度 H_1 、型孔高度 H_2 、型孔壁面长度 L_1 、型孔长度 L_2 、型孔圆角半径 R 、型孔外壁面倾角 γ 。型孔外壁面配合递种隔板驱动并引导种子进入单元型孔,当型孔外壁面长度过大时,取种单元的体积增大,圆周分布数量减少,不利于降低工作转速,当型孔外壁面长度过小时,调姿齿齿面面积受到限制,齿面面积过小不利于调整种子的姿态。因此,型孔外壁面长度应控制在 $l_{\min}$ 与 $l_{\max}$ 之间,取 13 mm,如图 8a 所示。

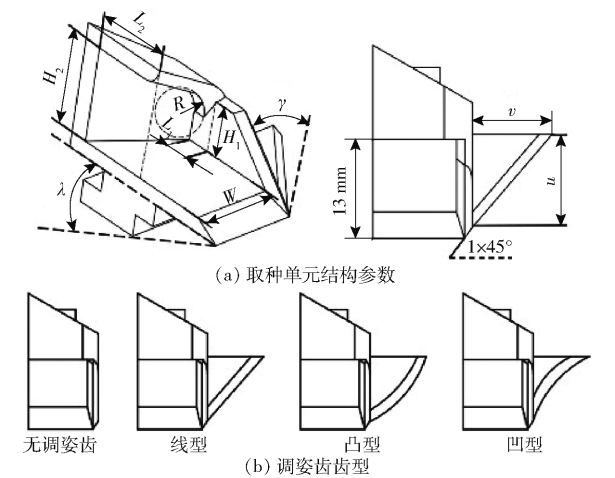


图 8 取种单元结构示意图

Fig.8 Structure diagrams of seed taking unit

调姿齿的齿型决定种子的姿态调整效果,进而也会影响排种器性能。为探究调姿齿不同齿型对排种性能的影响,分别设定线型、凸型、凹型调姿齿与无调姿齿 4 种情况进行试验,以确定最优齿型,如图 8b 所示。

取种单元的参数取值应依据充入种子的具体受控姿态而定,共分为以下 5 种:单粒种子保持平躺姿态充入型孔(图 9a);单粒种子保持侧立姿态充入型孔(图 9b);两粒平躺姿态的种子叠加充入型孔(图 9c);两粒侧立姿态种子叠加充入型孔(图 9d);单粒近球形种子任意姿态充入型孔(图 9e)。其中,

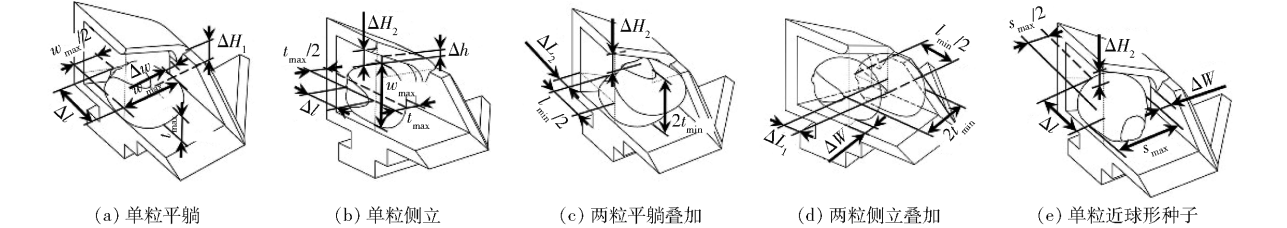


图 9 种子姿态控制情况

Fig.9 Conditions of seed posture control

前 4 种情况对应种子类型均为马齿形或球锥形。因此,取种单元结构参数满足

$$\begin{cases} W = \max(w_{\max}, 2t_{\min}, s_{\max}) + \Delta W & (0 < \Delta W < t_{\min}) \\ H_1 = t_{1\max} + \Delta H_1 < 2t_{\min} & (\Delta H_1 > 0) \\ H_2 = \max(w_{\max}, 2t_{\min}, s_{\max}) + \Delta H_2 & (0 < \Delta H_2 < t_{\min}) \\ L_1 = 0.5l_{\min} - \Delta L_1 & (0 < \Delta L_1 < 0.5l_{\min}) \\ L_2 = 0.5l_{\min} + \Delta L_2 & (0 < \Delta L_2 < 0.5l_{\min}) \\ \Delta h = (H_2 - H_1)(W - t_{\max})/W > 0 \\ \Delta l = (L_2 - L_1)(W - 0.5w_{\max})/W + L_1 > 0.5l_{\max} \end{cases}$$

(8)

式中 ΔW ——型孔宽度方向间距,mm
 ΔH_1 —— $t_{1\max}$ 与型孔壁面高度差,mm
 ΔH_2 ——型孔高度方向间距,mm
 ΔL_1 ——待清种子重心超出型孔长度,mm
 ΔL_2 ——长度方向间距,mm
 Δh ——种子与型孔顶部间距,mm
 Δl ——种子进入型孔部分的长度,mm

同时,为防止间隙处进入种子, ΔW 与 ΔH_2 均不超过 $t_{\min}$,为精准清除叠加充入型孔的待清种子, ΔH_1 应大于 0,型孔壁面高度 H_1 应小于 $2t_{\min}$, ΔL_1 和 ΔL_2 均小于 $0.5l_{\min}$,为避免种子被卡住, Δh 应大于 0,且型孔内的待投种子还需要受到足够的约束力, Δl 应大于 $0.5l_{\max}$ 。

根据表 1 中种子尺寸范围结合式(8)的限定条件,可以精准确定型孔宽度 W 、型孔壁面高度 H_1 、型孔高度 H_2 、型孔壁面长度 L_1 、型孔长度 L_2 分别取 11、7、13、3、9 mm。基于上述参数取值可进一步确定型孔圆角半径 R 与型孔外壁面倾角 γ 的最大值分别为 11.7 mm 与 51.8°。由于试验用种未经过分级处理,个体差异较大,为提高取种单元对种子的适应性,型孔圆角半径 R 与型孔外壁面倾角 γ 的取值依据具体试验优化结果。

2.4.2 种子姿态调整原理分析

调姿槽内的种子姿态各异,部分保持竖立姿态的马齿形和球锥形种子需要进行姿态调整。将种子的姿态调整过程分为 4 个阶段,分别为调姿阶段Ⅰ、滑跃阶段Ⅱ、下落阶段Ⅲ和侧入阶段Ⅳ,如图 10a 所示。不同阶段中种子受力情况如图 10b 所示。

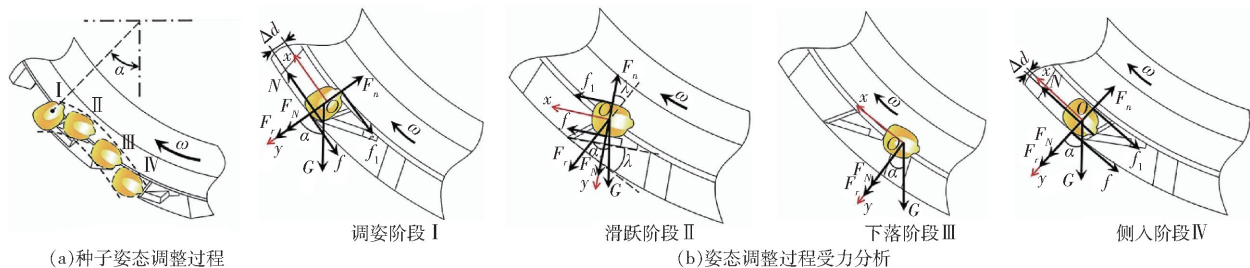


图 10 种子姿态调整过程分析

Fig. 10 Analysis of seeds posture adjustment

在调姿阶段 I 中,种子受力为调姿齿与种子间的接触力 N ,种子与种子间摩擦力 f_1 ,种子与排种器间摩擦力 f ,向种子质心处取矩可得

$$\sum M = N\Delta d + 0.5l(f_1 - f) \quad (9)$$

其中 $f_1 = \eta F_N$ (10)

式中 Δd ——种子与调姿齿接触点的质心距, mm

η ——种子与种子间滑动摩擦因数

种子在排种盘径向(y 轴向)与切线方向(x 轴向)的合力满足

$$\begin{cases} \sum F_y = F_r + F_N + G\cos\alpha - F_n = 0 \\ \sum F_x = N - f - f_1 - G\sin\alpha \geq 0 \end{cases} \quad (11)$$

式中 α ——种子所在位置处径向与垂向夹角, ($^\circ$)

当种子即将调整姿态时,调姿齿和种子的接触点与种子的质心距接近其 0.5 倍的长度,将 Δd 取 0.5 l 代入式(9)并与式(5)、(10)、(11)联立,得种子质心处的合力矩大于 0,因此种子将绕质心滚动,实现长轴翻转后压覆于调姿齿的上齿面。

在滑跃阶段 II 中,将种子与种子间摩擦力 f_1 、种子与排种器间摩擦力 f 向种子质心处取矩,种子质心处的合力矩及种子与调姿齿接触面法线方向(y 轴向)的合力与切线方向(x 轴向)的合力满足

$$\begin{cases} \sum F_y = F_r\cos\lambda + G\cos(\alpha - \lambda) + F_N - F_n = 0 \\ \sum F_x = F_r\sin\lambda + f + f_1 - G\sin(\alpha - \lambda) \leq 0 \\ \sum M = 0.5uf - 0.5wf_1 = 0 \end{cases} \quad (12)$$

式中 λ ——调姿齿倾斜角, ($^\circ$)

由式(12)可知,种子与种子间摩擦力 f_1 和种子与排种器间摩擦力 f 为一对大小相等、作用点关于质心对称的平行力,因此种子质心处合力矩为零。此时,种子将压覆于调姿齿的上齿面,并沿 x 轴的反方向相对调姿齿齿面进行滑动,直到越过调姿齿后进入下一阶段。

联立式(5)、(12)可得

$$\lambda \leq \arccos \frac{r\omega^2 + g\cos\alpha}{g\sin\alpha} \quad (13)$$

为确保滑跃阶段 II 顺利进行,调姿齿的倾斜角度不宜过大,否则对种子产生携带作用过大,种子无法及时回落槽底而影响充种效果。预试验中种子进入取种单元位置处径向与垂向夹角 α 最大为 65° ,且排种器转速低于 30 r/min 时,排种效果较优,代入式(13)计算可得,调姿齿倾斜角 λ 不超过 30.5° ;同时防止调姿槽内种子结拱而造成漏充,调姿齿应为调姿槽内种群施加扰动力,调姿齿倾斜角 λ 不宜过小,因此调姿齿倾斜角 λ 取 30° 。在调姿齿不与调姿槽底曲面发生干涉的前提下,可以确定其长度 u 与宽度 v 分别取 12 mm 和 10.5 mm。

在下落阶段 III 中,种子在排种盘径向(y 轴向)与切向(x 轴向)的合力,以及质心处合力矩满足

$$\begin{cases} \sum F_y = F_r + F_N + G\cos\alpha \\ \sum F_x = -G\sin\alpha \\ \sum M = 0 \end{cases} \quad (14)$$

由式(14)可知,种子在合外力的作用下,沿 x 轴反方向与 y 轴方向共同加速下落。

在侧入阶段 IV 中,种子的长轴贴覆槽底弧面,随调姿齿共同沿排种盘圆周运动,种子的 y 轴与 x 轴合力同样满足式(11),质心处合力矩满足

$$\sum M = N\Delta d + 0.5w(f_1 - f) \quad (15)$$

此时,摩擦力 f_1 和 f 为一对大小相等的平行力,并且调姿齿和种子的接触点与种子的质心距 Δd 接近于 0,将 Δd 取 0 代入式(15)中,可以判断种子质心处合力矩为 0。因此,该阶段种子将保持长轴平行于槽底的姿态,随排种盘转动,同时在侧向力的作用下进入取种单元内准备充种。

2.4.3 取种单元分布

排种器在满足充种、清种、递种、导种和投种 5 个工作阶段的需求下,应尽量增多取种单元的数量,以便降低工作转速并提高投种频率,适应高速作业工况^[25]。为确保顺利完成递种,种子所受离心力恒小于重力,因此取种单元数量满足

$$\begin{cases} 2k = \frac{10\,000v}{6zn} \\ n < \frac{30}{\pi} \sqrt{\frac{2g}{10^{-3}d}} = 88.2 \end{cases} \quad (16)$$

式中 k ——单个排种盘上取种单元的数量
 v ——播种机前进速度, km/h
 z ——玉米播种株距, 取 25 cm
 n ——排种器工作转速, r/min

为确保排种器的高速作业质量可靠, 其最高转速相对临界转速越小越好。因此, 设计排种器工作转速 n 低于 30 r/min, 作业速度 v 最高 14 km/h, 根据农艺要求选取玉米播种株距 z 为 25 cm, 代入式(16)得, 单个种盘上取种单元数量不少于 16 个。

相邻两个取种单元的间距为

$$m = \frac{\pi d}{k} - \frac{i}{\cos 30^\circ} \tag{17}$$

式中 i ——取种单元长度, 取 20.6 mm

为确保种子能够及时进入取种单元中, m 应大于 1.5 倍的种子最大长度 (21 mm)^[25]。上文中取种单元安装后外侧长度为 20.6 mm, 当 k 取 16, 代入式(17)可得 m 为 21.4 mm, 满足设计条件。

将 k 取 16 代入式(16)中计算可得, 排种器在作业速度 8、10、12、14 km/h 的条件下, 对应转速分别为 16.7、20.8、25、29.2 r/min。

2.5 递种隔板

递种隔板用于分隔导种轮与取种单元, 并与取种单元共同构建出完整的单元型孔空间。为防止排种器转速提升后, 个别未完成递种的种子停留于型孔与递种仓格之间, 运动至递种口末端受剪破碎, 因此将递种口末端继续延伸, 并设有锯齿结构用于清除该类种子。为合理确定递种口起始端位置, 需要对种子清种过程进行分析。当取种单元运动至清种起始角 φ 处, 以种子滑落方向为 x 轴、法向为 y 轴建立坐标系, 待清种子的受力情况如图 11a 所示。

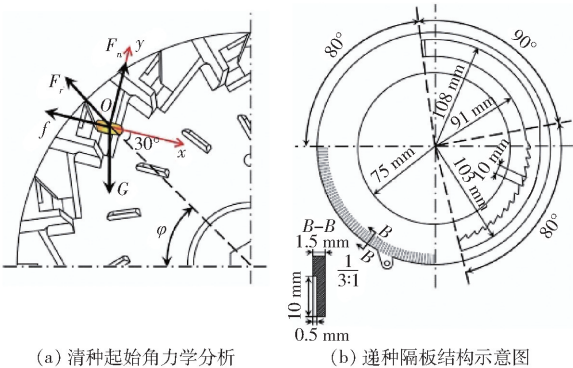


图 11 Seed transfer diaphragms

为使待清种子能够掉落, 种子在 x 轴向的合力应大于 0, 满足

$$\sum F_x = G \sqrt{1 + \mu^2} \sin(\varphi - 30^\circ - \arctan \mu) + \frac{\mu - \sqrt{3}}{2} F_r > 0 \tag{18}$$

当排种盘最大转速取 30 r/min 时, 即 ω 为 0.05 rad/s, d 为 230 mm, 前期试验测得 μ 为 0.3, 代入式(18)并与式(5)联立计算可得, 清种起始角 φ 大于 46.7°。因此, 为留出足够的清种区域, 递种口从水平方向 80° 夹角开始, 经过 90° 结束并继续向下延伸 80°, 如图 11b 所示。

3 性能优化试验

3.1 试验材料及装置

试验所用排种器为姿控驱导式玉米精量排种器, 其主要零部件均选用深圳市未来工厂科技有限公司生产的未来 8200pro 树脂, 采用光固化 3D 打印技术加工而成, 加工精度为 ± 0.2 mm。试验测试平台采用 JPS-12 型排种性能试验台, 并配合数据采集系统进行试验, 数据采集系统由高速摄像机 (i-SPEED3 型, 日本 Olympus 公司)、视频处理软件 (i-SPEED Suite 高速影像软件)、网格坐标面板和高光灯组成, 如图 12 所示。

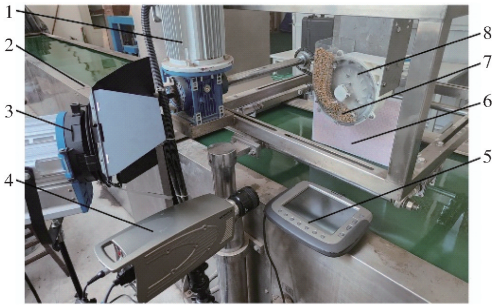


图 12 台架试验
Fig. 12 Bench-test

1. 驱动电机 2. JPS-12 型排种性能试验台 3. 高光灯 4. 高速摄像机 5. 影像控制器 6. 坐标面板 7. 种子 8. 排种器

试验选用未经过分级的郑单 958 玉米种子, 千粒质量 290.2 g, 含水率 10.36%, 休止角 22.33°。

3.2 试验设计及评价指标

3.2.1 试验设计

(1) 以调姿齿齿型为试验因素, 分别对线型、凸型、凹型调姿齿与无调姿齿 4 种情况开展单因素试验, 探究调姿齿齿型对排种性能试验指标的影响, 以确定调姿齿的最优齿型。

(2) 根据前期排种器性能预试验及理论分析, 分别确定影响排种器工作性能的因素取值范围: 型孔圆角半径 R 为 3.3 ~ 11.7 mm、型孔外壁面倾角 γ 为 18.2° ~ 51.8°、排种器工作转速 n 为 11.6 ~ 28.4 r/min。在调姿齿选取最优齿型的基础上, 为得到排种器的最优结构参数组合, 以型孔圆角半径 R 、型孔外壁面倾角 γ 和工作转速 n 为试验因素, 开展三因素五水平二次正交旋转回归组合试验, 试验编码如表 2 所示。

表 2 试验编码
Tab.2 Test coding

编码	因素		
	工作转速	型孔外壁面倾角	型孔圆角半径
	$X_1/(r \cdot \min^{-1})$	$X_2/(^{\circ})$	X_3/mm
1. 682	28. 4	51. 8	11. 7
1	25	45	10
0	20	35	7. 5
-1	15	25	5
-1. 682	11. 6	18. 2	3. 3

(3)在排种器最优参数组合的基础上,开展高速作业条件下的排种性能对比试验。在作业速度为 8、10、12、14 km/h 共 4 个梯度的条件下,分别测试姿控驱动式排种器、无种子姿态调控过程的排种器(姿控驱动式排种器双侧排种盘上均不安装护种板,且取种单元不添加调姿齿结构)与勺轮式排种器的排种性能并对比。

3.2.2 评价指标

根据玉米种植的农艺要求,试验设定播种株距为 25 cm,依据 GB/T 6973—2005《单粒(精密)播种机试验方法》,将排种稳定时连续排出的 251 粒种子记为一组试验,每组试验重复 3 次,运用数据采集系统分别对试验指标合格率 Y_1 、漏播率 Y_2 及重播率 Y_3 进行统计,并将每组试验指标的平均值作为最终结果。

3.3 试验结果及分析

3.3.1 调姿齿齿型单因素试验

设定排种器作业速度为 12 km/h,型孔外壁面倾角 γ 为 51.8°,型孔圆角半径 R 为 3.3 mm,进行不同调姿齿齿型的单因素试验,结果如表 3 所示。

表 3 不同调姿齿齿型试验结果

Tab.3 Results of different postures adjustment teeth			
%			
齿型	合格率	漏播率	重播率
线型	89. 6	2. 0	8. 4
凹型	87. 6	2. 8	9. 6
凸型	86. 4	3. 5	10. 1
无调姿齿	60. 5	32. 4	7. 1

由表 3 可知,有、无调姿齿结构对排种合格率具有显著影响,无调姿齿时排种漏播率达到 32.4%,说明未进行姿态调控的部分种子无法进入取种单元,随着调姿槽内种子的堆积结拱,反而抑制充种;有调姿齿时排种合格率均高于 86%,漏播率在 4% 以下,较无调姿齿结构时合格率最大可提升 29.1 个百分点,说明调姿齿对充种前的种子进行调姿,同时也能对调姿槽内种群施加扰动,可大幅提升充种效果。

调姿齿的不同齿型对充种效果的影响程度不

同,线型调姿齿的排种合格率最高,为 89.6%,其次是凹型和凸型。原因是种子进行姿态调整时首先与调姿齿齿面边缘接触,凹型边缘对种子携带作用较强,不利于种子及时进入取种单元;凸型边缘与调姿槽槽底弧面完全贴合,种子调姿时直接接触齿面,滚动力矩较小,调姿效果减弱;线型边缘在种子调姿时与种子底部线性接触,产生滚动力矩较大,种子易于调整姿态。因此,线型调姿齿对种子姿态调整效果最好,排种合格率提升效果最优。

3.3.2 二次正交旋转回归组合试验

基于上述单因素试验结果,在调姿齿齿型为线型的条件下,进行二次正交旋转回归组合试验,试验结果如表 4 所示。为进一步分析试验因素对试验指标的影响规律,应用 Design-Expert 8.0.6 对试验数据进行回归分析,显著性检验结果见表 5。

表 4 正交试验结果

Tab.4 Results of orthogonal test						
序号	因素			$Y_1/\%$	$Y_2/\%$	$Y_3/\%$
	$X_1/$	$X_2/$	$X_3/$			
	$(r \cdot \min^{-1})$	$(^{\circ})$	mm			
1	15	25	5	86. 3	4. 1	9. 6
2	25	25	5	87. 2	4. 4	8. 4
3	15	45	5	92. 4	2. 2	5. 4
4	25	45	5	91. 2	3. 6	5. 2
5	15	25	10	88. 3	5. 1	6. 6
6	25	25	10	86. 8	7. 2	6. 0
7	15	45	10	89. 6	2. 0	8. 4
8	25	45	10	88. 0	4. 0	8. 0
9	11. 6	35	7. 5	90. 8	2. 0	7. 2
10	28. 4	35	7. 5	88. 4	4. 4	7. 2
11	20	18. 2	7. 5	80. 8	8. 7	10. 5
12	20	51. 8	7. 5	90. 0	1. 6	8. 4
13	20	35	3. 3	89. 3	3. 2	7. 5
14	20	35	11. 7	89. 2	4. 7	6. 1
15	20	35	7. 5	88. 9	2. 7	8. 4
16	20	35	7. 5	88. 0	4. 1	7. 9
17	20	35	7. 5	88. 9	3. 2	7. 9
18	20	35	7. 5	88. 3	4. 1	7. 6
19	20	35	7. 5	87. 1	3. 8	9. 1
20	20	35	7. 5	88. 3	3. 1	8. 6
21	20	35	7. 5	87. 7	3. 1	9. 2
22	20	35	7. 5	88. 5	2. 9	8. 6
23	20	35	7. 5	89. 2	3. 5	7. 3

由表 5 可知,合格率、漏播率与重播率回归模型的显著性检验结果均为极显著($P \leq 0.01$),且失拟项均不显著($P > 0.05$),表明回归模型均具有较高的拟合程度。对于合格率回归模型, X_2 与 X_2^2 对模型的影响均为极显著, X_1 、 X_2X_3 与 X_1^2 对模型的影响均为显著,其余项对模型的影响均不显著;对于漏播率回归模型, X_2 与 X_2^2 对模型的影响均为极显著, X_1 与

表5 显著性分析

Tab. 5 Significance analysis

来源	合格率				漏播率				重播率			
	平方和	自由度	F	P	平方和	自由度	F	P	平方和	自由度	F	P
模型	93.94	9	12.37	<0.000 1 **	51.29	9	13.39	<0.000 1 **	32.39	9	8.13	0.000 5 **
X_1	4.05	1	4.80	0.047 3 *	7.08	1	16.64	0.001 3 *	0.42	1	0.95	0.346 8
X_2	57.70	1	68.42	<0.000 1 **	32.11	1	75.42	<0.000 1 **	3.72	1	8.42	0.012 4 *
X_3	1.53	1	1.81	0.201 3	3.12	1	7.32	0.018 0 *	0.28	1	0.63	0.440 9
X_1X_2	0.60	1	0.72	0.412 3	0.12	1	0.29	0.597 1	0.18	1	0.41	0.534 7
X_1X_3	0.98	1	1.16	0.300 7	0.72	1	1.69	0.216 0	0.02	1	0.045	0.834 9
X_2X_3	7.22	1	8.56	0.011 8 *	1.62	1	3.81	0.073 0	15.68	1	35.43	<0.000 1 **
X_1^2	5.49	1	6.51	0.024 1 *	0.10	1	0.24	0.629 3	4.08	1	9.23	0.009 5 **
X_2^2	12.79	1	15.16	0.001 8 **	5.88	1	13.82	0.002 6 **	1.32	1	2.99	0.107 4
X_3^2	3.42	1	4.06	0.065 2	0.54	1	1.27	0.280 7	6.68	1	15.09	0.001 9 **
失拟	7.51	5	3.48	0.057 7	3.43	5	2.60	0.110 6	2.30	5	1.07	0.443 2
残差	3.46	8			2.11	8			3.45	8		
总和	104.90	22			56.83	22			38.15	22		

注: ** 表示影响极显著($P\leq0.01$); * 表示影响显著($0.01 < P < 0.05$)。

X_3 对模型的影响均为显著,其余项对模型的影响均不显著;对于重播率回归模型, X_2X_3 、 X_1^2 与 X_3^2 对模型的影响均为极显著, X_2 对模型的影响为显著,其余项对模型的影响均不显著;各因素对试验指标影响的主次顺序均为:型孔外壁面倾角、工作转速、型孔圆角半径。依据各回归方程系数间无线性相关关系,建立各试验指标与试验因素之间的二次回归方程为

$$\begin{cases} Y_1 = 68.9 - 0.6X_1 + 1.2X_2 + 0.6X_3 - \\ \quad 0.04X_2X_3 + 0.02X_1^2 - 0.009X_2^2 \\ Y_2 = 12.9 - 0.006X_1 - 0.5X_2 - 0.1X_3 + 0.006X_2^2 \\ Y_3 = 18.3 + 0.6X_1 - 0.7X_2 - 0.5X_3 + \\ \quad 0.06X_2X_3 - 0.02X_1^2 - 0.1X_3^2 \end{cases} \quad (19)$$

为直观分析因素间交互作用对试验指标的影响规律,利用 Design-Expert 8.0.6 软件绘制出试验因素间有显著交互作用的响应曲面,如图 13 所示。

由图 13a 可知,型孔外壁面倾角与型孔圆角半径对排种合格率影响的交互作用显著,随着型孔外壁面倾角与型孔圆角半径的增大,排种合格率呈现出先增大后减小的变化趋势,当型孔外壁面倾角为 $43.4^{\circ} \sim 51.8^{\circ}$,型孔圆角半径为 $3.3 \sim 5.4$ mm 时,排种合格率较高;由图 13b 可知,型孔外壁面倾角与型孔圆角半径对排种重播率影响的交互作用极显著,随着型孔外壁面倾角与型孔圆角半径的增大,排种重播率呈现先减小后增大的趋势,同样当型孔外壁面倾角为 $43.4^{\circ} \sim 51.8^{\circ}$,型孔圆角半径为 $3.3 \sim 5.4$ mm 时,排种重播率较低。

根据上述变化趋势分析可知,随取种单元的类型

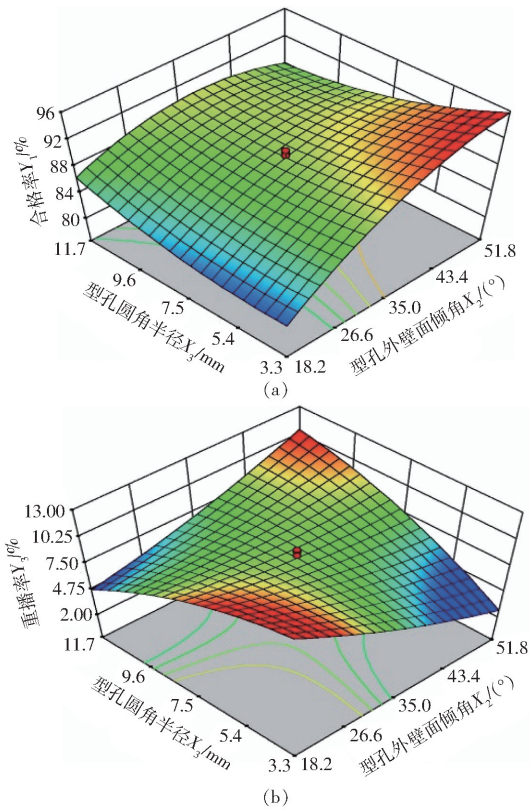


图 13 因素间交互作用对性能影响的响应曲面

Fig. 13 Response surfaces of interaction among factors on performance

孔外壁面倾角增大与型孔圆角半径的减小,种子进入取种单元时受到的阻碍作用减小,并且型孔开口面积增大,有利于种子充填,所以排种合格率上升。但是,当取种单元对种子的阻碍作用过小并且型孔开口过大时,容易导致两粒种子同时进入型孔内,不利于清种,从而造成排种重播率增大。

为得到该排种器在高速作业条件下的最优参数

组合,以排种合格率最大,漏播率与重播率最小为优化目标,并结合排种器高速 8 ~ 14 km/h 作业时的转速范围(16. 7 ~ 29. 2 r/min),对试验指标进行优化求解,目标函数与约束条件为

$$\begin{cases} \max Y_1(X_1,X_2,X_3) \\ \min Y_2(X_1,X_2,X_3) \\ \min Y_3(X_1,X_2,X_3) \\ \text{s. t.} \begin{cases} 16.7 \text{ r/min} \leq X_1 \leq 29.2 \text{ r/min} \\ 18.2^\circ \leq X_2 \leq 51.8^\circ \\ 3.3 \text{ mm} \leq X_3 \leq 11.7 \text{ mm} \end{cases} \end{cases} \quad (20)$$

求解可得,排种器在工作转速为 16. 7 r/min、型孔外壁面倾角为 46. 9°、型孔圆角半径为 4. 5 mm 的条件下,工作性能达到最优,此时排种合格率、漏播率和重播率分别为 92. 4%、2. 4% 和 5. 2%。

为进一步验证试验优化结果,排种器在最优参数条件下进行 3 次台架试验并对结果取平均值,此时排种合格率、漏播率和重播率分别达到 91. 6%、2. 8% 与 5. 6%,较试验预测结果误差较小,表明二次正交旋转回归组合试验优化结果具有较高准确性。

3.4 排种性能对比试验

基于上述正交试验的结果,姿控驱动式排种器在型孔外壁面倾角取 46. 9°、型孔圆角半径取 4. 5 mm 的条件下,与无种子姿态调控过程的该排种器和勺轮式排种器分别开展作业速度为 8、10、12、14 km/h 的排种性能对比试验。在上文试验方法的基础上,添加每组试验用种的破损率 Y_4 与株距均匀性变异系数 C 统计结果,综合评价该排种器的高速作业性能。

由表 6 可知,姿控驱动式排种器在作业速度为 8 ~ 14 km/h 的范围内,排种合格率均高于 90%,漏播率均低于 3%,重播率均低于 8%,破损率均低于 0. 5%,株距均匀性变异系数均低于 19%,满足玉米精量播种的技术要求;无姿态调控排种器在相同作业速度范围内,排种合格率均低于 87%,漏播率均高于 0. 7%,重播率均高于 12%,破损率均低于 0. 6%,株距均匀性变异系数均低于 23%;分析原因得,未对种子进行姿态调控的排种器中,种子充入型孔时姿态杂乱、难以匹配开口形状,导致充种效果不佳,同时出现双粒种子堵塞型孔的现象而无法有效清种,当速度由 8 km/h 提升至 14 km/h 时,原排种器较无姿态调控排种器的合格率差异由 4. 8% 上升至 11. 2%,重播率差异由 6. 8% 上升至 9. 5%,上述问题随速度提升而加剧,但采用种子姿态调控技术使其有效解决;相较勺轮式排种器,当作业速度为

8 km/h 时,姿控驱动式排种器的作业效果与勺轮式排种器差异较小,排种合格率提升 1. 3 个百分点,株距均匀性变异系数提升 3. 8 个百分点,但随作业速度提升差异逐渐增大,在速度 14 km/h 下排种合格率提升 9. 8 个百分点,株距均匀性变异系数提升 6. 6 个百分点,姿控驱动式排种器对高速的适应性更强。

表 6 台架性能对比试验结果
Tab. 6 Test results of bench performance comparison

类型	作业速度/ (km·h ⁻¹)	% 合格 漏播 重播 破损 变异				
		率	率	率	率	系数
姿控驱动式排种器	8	91. 6	2. 8	5. 6	0. 13	13. 5
	10	91. 2	2. 8	6. 0	0. 22	14. 3
	12	90. 4	2. 5	7. 1	0. 27	16. 7
	14	91. 4	1. 7	6. 9	0. 40	18. 8
无姿态调控排种器	8	86. 8	0. 8	12. 4	0. 29	15. 6
	10	84. 0	1. 2	14. 8	0. 33	17. 9
	12	82. 4	2. 4	15. 2	0. 46	20. 3
	14	80. 2	3. 4	16. 4	0. 51	22. 8
勺轮式排种器	8	90. 3	6. 7	3. 0	0. 16	17. 3
	10	88. 1	7. 1	4. 8	0. 25	19. 7
	12	84. 5	8. 7	6. 8	0. 33	22. 1
	14	81. 6	10. 3	8. 1	0. 41	25. 4

因此,姿控驱动式排种器高速作业时的排种精度及稳定性均优于无姿态调控的排种器与勺轮式排种器,证明采用种子姿态调控技术,可有效确保排种器高速作业时充、清种效果可靠,进而提升整体高速作业能力,同时也说明其对高速作业具备良好的适应性及稳定性。

4 结论

(1)为提升机械式排种器的高速作业性能,提出利用调姿齿与单元型孔调整并控制玉米种子充种姿态的技术思路,设计了一种姿控驱动式玉米精量排种器,并完成调姿槽、取种单元、递种隔板的结构参数设计。

(2)单因素试验结果表明,调姿齿齿型为线型时,对排种合格率的提升效果最优,较无调姿齿的情况下可提升 29. 1 个百分点;正交试验结果表明,排种器在工作转速为 16. 7 r/min,型孔外壁面倾角为 46. 9°与型孔圆角半径为 4. 5 mm 的条件下,性能达到最优,排种合格率、漏播率和重播率分别为 92. 4%、2. 4% 和 5. 2%,验证后得出排种合格率、漏播率和重播率分别为 91. 6%、2. 8% 与 5. 6%,表明正交试验优化结果具有较高准确性。

(3)排种性能对比试验结果表明,在作业速度

8 ~ 14 km/h 的范围内,姿控驱动式排种器的排种合格率均高于 90%,漏播率均低于 3%,重播率均低于 8%,破损率均低于 0.5%,株距均匀性变异系数均低于 19%,满足玉米精量播种的技术要求;姿控驱动式排种器的作业性能与精度均优于无姿态调控的排种器与匀轮式排种器,证明采用种子姿态调控技术能有效提升其高速作业能力,使其具备良好的高速适应性及稳定性。

参 考 文 献

[1] 杨丽, 颜丙新, 张东兴, 等. 玉米精密播种技术研究进展[J]. 农业机械学报, 2016, 47(11): 38-48.
YANG Li, YAN Bingxin, ZHANG Dongxing, et al. Research progress on precision planting technology of maize [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(11): 38-48. (in Chinese)

[2] YANG Li, YAN Bingxin, YU Yiming, et al. Global overview of research progress and development of precision maize planters [J]. International Journal of Agricultural & Biological Engineering, 2016, 9(1): 9-26.

[3] 耿端阳, 李玉环, 孟鹏祥, 等. 玉米伸缩指夹式排种器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2016, 47(5): 38-45.
GENG Duanyang, LI Yuhuan, MENG Pengxiang, et al. Design and test on telescopic clip finger type of metering device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(5): 38-45. (in Chinese)

[4] 唐汉. 波纹曲面指夹式玉米精量排种器设计及其机理研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2018.
TANG Han. Design and mechanism analysis of ripple surface pickup finger maize precision seed metering device[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2018. (in Chinese)

[5] 耿端阳, 张明源, 何珂, 等. 倾斜双圆环型孔圆盘式玉米排种器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2018, 49(1): 68-76.
GENG Duanyang, ZHANG Mingyuan, HE Ke, et al. Design and experiment of declined disc plate with double ring corn metering device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(1): 68-76. (in Chinese)

[6] YANG Li, HE Xiantao, CUI Tao, et al. Development of mechatronic driving system for seed meters equipped on conventional precision corn planter[J]. International Journal of Agricultural & Biological Engineering, 2015, 8(4): 1-9.

[7] GAO X, CUI T, ZHOU Z, et al. DEM study of particle motion in novel high-speed seed metering device[J]. Advcd Powder Technology, 2021, 32(5): 1438-1449.

[8] HAO Y, CUI T, BORA G, et al. Development of an instrument to measure planter seed meter performance[J]. Applied Engineering in Agriculture, 2017, 33(1): 31-40.

[9] 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)

[10] 王金武, 唐汉, 关睿, 等. 动定指勾夹持式玉米精量排种器优化设计与试验[J]. 农业机械学报, 2017, 48(12): 48-57.
WANG Jinwu, TANG Han, GUAN Rui, et al. Optimization design and experiment on clamping static and dynamic finger-spoon maize precision seed metering device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(12): 48-57. (in Chinese)

[11] VAN LOON J, KRUPNIK T J, LÓPEZ-GÓMEZ J A, et al. A standard methodology for evaluation of mechanical maize seed meters for smallholder farmers comparing devices from Latin America, Sub-Saharan Africa, and Asia[J]. Agronomy, 2020, 10(8): 1091.

[12] 王业成, 高云鹏, 台文硕, 等. 夹持式玉米精密排种器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2019, 50(9): 40-46.
WANG Yecheng, GAO Yunpeng, TAI Wenshuo, et al. Design and experiment of clamping maize precision seed-metering device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(9): 40-46. (in Chinese)

[13] WANG Jinwu, TANG Han, WANG Jinfeng, et al. Optimization design and experiment on ripple surface type pickup finger of precision maize seed metering device[J]. International Journal of Agricultural & Biological Engineering, 2017, 10(1): 61-71.

[14] 廖庆喜, 张朋玲, 廖宜涛, 等. 基于 EDEM 的离心式排种器排种性能数值模拟[J]. 农业机械学报, 2014, 45(2): 109-114.
LIAO Qingxi, ZHANG Pengling, LIAO Yitao, et al. Numerical simulation on seeding performance of centrifugal rape-seed metering device based on EDEM[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(2): 109-114. (in Chinese)

[15] JIA H, CHEN Y, ZHAO J, et al. Design and key parameter optimization of an agitated soybean seed metering device with horizontal seed filling[J]. International Journal of Agricultural & Biological Engineering, 2018, 11(2): 76-87.

[16] 都鑫, 刘彩玲, 姜萌, 等. 自扰动内充型孔轮式玉米精量排种器设计与试验[J]. 农业工程学报, 2019, 35(13): 23-34.
DU Xin, LIU Cailing, JIANG Meng, et al. Design and experiment of self-disturbance inner-filling cell wheel maize precision seed-metering device[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(13): 23-34. (in Chinese)

[17] 刘彩玲, 王超, 宋建农, 等. 振动供种型孔轮式非圆种子精密排种器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2018, 49(5): 108-115.
LIU Cailing, WANG Chao, SONG Jiannong, et al. Design and seed-filling test of cell-type precision seed-metering device with vibration technology[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(5): 108-115. (in Chinese)

[18] 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)
- [19] 臧英, 邢赫, 王在满, 等. 水稻气力式排种器挡种装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2015, 46(5): 33–38.
ZANG Ying, XING He, WANG Zaiman, et al. Design and experiment of shield device on rice pneumatic metering device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(5): 33–38. (in Chinese)
- [20] 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 device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(9): 47–56. (in Chinese)
- [21] SHEN H, ZHANG J, CHEN X, et al. Development of a guiding-groove precision metering device for high-speed planting of soybean[J]. Transactions of the ASABE, 2021, 64(3): 1113–1122.
- [22] XUE P, HAO Y, JIAO W, 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.
- [23] XUE P, XIA X, GAO P, 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.
- [24] LIU Hongxin, GUO Lifeng, FU Lulu, et al. Study on multi-size seed-metering device for vertical plate soybean precision planter[J]. International Journal of Agricultural & Biological Engineering, 2015, 8(1): 1–8.
- [25] 中国农业机械化科学研究院. 农业机械设计手册上[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2007.
- [26] 周勇, 胡梦杰, 夏俊芳, 等. 内充种组合型孔式播量可调棉花精量排种器设计与试验[J]. 农业工程学报, 2018, 34(18): 59–67.
ZHOU Yong, HU Mengjie, XIA Junfang, et al. Design and experiment of inside-filling adjustable precision seed-metering device with combined hole for cotton[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(18): 59–67. (in Chinese)
- [27] 胡梦杰, 夏俊芳, 郑侃, 等. 内充气力式棉花高速精量排种器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(8): 73–85.
HU Mengjie, XIA Junfang, ZHENG Kan, et al. Design and experiment of inside-filling pneumatic high speed precision seed-metering device for cotton[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(8): 73–85. (in Chinese)

(上接第 75 页)

- [18] 中国农业机械化科学研究院. 农业机械设计手册(上册)[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2007.
- [19] 蒯婕, 孙盈盈, 左青松, 等. 机械收获模式下直播冬油菜密度与行距的优化[J]. 作物学报, 2016, 42(6): 898–908.
KUAI Jie, SUN Yingying, ZUO Qingsong, et al. Optimization of plant density and row spacing for mechanical harvest in winter rapeseed (*Brassica napus* L.)[J]. Acta Agronomica Sinica, 2016, 42(6): 898–908. (in Chinese)
- [20] 罗锡文, 刘涛, 蒋恩臣, 等. 水稻精量穴直播排种轮的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2007, 23(3): 108–112.
LUO Xiwen, LIU Tao, JIANG Enchen, et al. Design and experiment of hill sowing wheel of precision rice direct-seeder[J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(3): 108–112. (in Chinese)
- [21] 李兆东, 王晴晴, 张亚兰, 等. 倾斜抛物线型孔轮式小麦供种装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2018, 49(5): 116–124.
LI Zhaodong, WANG Qingqing, ZHANG Yalan, et al. Design and experiment of inclined parabolic cell wheel in seed feeding device for wheat[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(5): 116–124. (in Chinese)
- [22] 马云海. 农业物科学[M]. 北京: 化学工业出版社, 2015: 100–101.
- [23] 张明华, 王在满, 罗锡文, 等. 组合型孔排种器双充种室结构对充种性能的影响[J]. 农业工程学报, 2018, 34(12): 8–15.
ZHANG Minghua, WANG Zaiman, LUO Xiwen, et al. Effect of double seed-filling chamber structure of combined type-hole metering device on filling properties[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(12): 8–15. (in Chinese)
- [24] 李兆东, 杨文超, 武尧尧, 等. 油菜气力盘式精量排种器槽齿辅助充种性能分析与试验[J]. 农业工程学报, 2020, 36(20): 57–66.
LI Zhaodong, YANG Wenchao, WU Yaoyao, et al. Performance analysis and experiments of seed filling assisted by groove-tooth of pneumatic disc precision metering device for rapeseed[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(20): 57–66. (in Chinese)
- [25] 石林榕, 孙伟, 赵武云, 等. 马铃薯种薯机械排种离散元仿真模型参数确定及验证[J]. 农业工程学报, 2018, 34(6): 35–42.
SHI Linrong, SUN Wei, ZHAO Wuyun, et al. Parameter determination and validation of discrete element model of seed potato mechanical seeding[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(6): 35–42. (in Chinese)
- [26] 于庆旭, 刘燕, 陈小兵, 等. 基于离散元的三七种子仿真参数标定与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(2): 123–132.
YU Qingxu, LIU Yan, CHEN Xiaobing, et al. Calibration and experiment of simulation parameters for *Panax notoginseng* seeds based on DEM[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(2): 123–132. (in Chinese)