

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.12.006

# 动定指勺夹持式玉米精量排种器优化设计与试验

王金武 唐 汉 关 睿 李 鑫 白海超 田立权

(东北农业大学工程学院, 哈尔滨 150030)

**摘要:** 为提高机械式玉米排种器作业质量与适播范围,设计了一种基于限位导引的动定指勺夹持式玉米精量排种器,阐述了排种器总体结构及工作原理,优化了关键部件指勺种盘和限位导引总成结构参数。以排种器工作转速和调控摆臂调节尺寸为试验因素,株间合格指数和变异系数为试验指标,进行了单因素试验分析各因素对性能指标的影响规律。试验结果表明,排种器对各等级尺寸玉米种子均具有良好的适应性。为研究排种器最佳工作参数,采用多因素二次正交旋转组合设计试验,建立了性能指标与试验参数间数学模型,运用 Design-Expert 6.0.10 软件对试验结果进行处理分析,对回归模型进行优化验证。试验结果表明,当工作转速为 30.5 r/min,调节尺寸为 12.0 mm 时,对圆形大粒玉米种子作业性能最优,其合格指数为 88.41%,变异系数为 12.32%,满足精量播种作业要求。

**关键词:** 玉米; 精量播种; 动定指勺; 限位导引

中图分类号: S223.2 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2017)12-0048-10

## Optimization Design and Experiment on Clamping Static and Dynamic Finger-spoon Maize Precision Seed Metering Device

WANG Jinwu TANG Han GUAN Rui LI Xin BAI Haichao TIAN Liqun

(College of Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

**Abstract:** A clamping static and dynamic finger-spoon maize precision seed metering device was designed based on limited guiding principle to improve the performance and adaptability of maize seed metering device and meet the requirements of precision planting. The overall structure and working principle of the seed metering device were illustrated and analyzed. The optimal design of structural parameters of key components was conducted, such as the finger-spoon plate and the limited guiding assembly. The single factor tests were carried out with rotational speed and adjustment dimension as the experiment factors. The average seeding qualified index and the seeding coefficient of variation were chosen for evaluating the seeding performance. The results showed that the clamping finger-spoon maize precision seed metering device had good adaptability to four different types of maize seeds. To improve the working performance of the metering device and obtain the best operation parameters, the quadratic general rotary unitized design was carried out. Based on experimental data, a mathematical model was built by using the Design-Expert 6.0.10 software, the experimental factors were optimized, and the best combination was achieved. Test results showed that as the rotational speed was 30.5 r/min, the adjustment dimension was 12.0 mm, and the seeding qualified index was 88.41%, the seeding coefficient of variation was 12.32%, which could meet the requirements of precision planting. The results can provide the guidance and direction for the design and development of high-speed precision mechanical seed-metering device.

**Key words:** maize; precision planting; static and dynamic finger-spoon; limited guiding

### 引言

玉米精量播种是根据农艺要求利用精密播种机

械将玉米种子精准定量地播入土壤预定位置的先进技术<sup>[1-2]</sup>,其重点是在保证播种密度前提下,实现粒距均匀和播深一致。精量排种器作为实现精密播种

收稿日期: 2017-03-27 修回日期: 2017-05-08

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划项目(2014BAD06B04)和国家自然科学基金项目(51675093)

作者简介: 王金武(1968—),男,教授,博士生导师,主要从事田间机械及机械可靠性研究, E-mail: jinwuw@163.com

技术的核心工作部件,是保证播种粒距均匀性的重要手段,也是国内外学者研究的重点与热点<sup>[3-5]</sup>。机械式排种器因具有结构简单、维修方便、造价低廉等特点得到广泛应用<sup>[6]</sup>。目前市场较常用的机械式排种器主要为勺盘(轮)式和指夹式两种,通过旋转舀取或平面摆动夹持的方式进行充种作业,已基本解决玉米单粒播种问题。

近些年,国内外学者对舀、夹式排种器进行了大量研究<sup>[7-13]</sup>,这些研究多以结构形式创新为主,提高了常规作业下舀、夹单粒率,但整体仍存在对玉米种子形状及尺寸要求严格,适播范围相对小,高速作业质量有待改善等问题,无法完全满足实际精量播种作业要求。

针对上述问题,为提高机械式玉米排种器作业质量与适播范围,设计一种基于限位导引原理的动定指勺夹持式玉米精量排种器,对其工作原理进行分析,优化关键部件指勺种盘和限位导引总成结构参数,采用单因素适应性试验、多因素优化试验及对比试验检验排种器作业性能,以期为玉米精量播种机具及其关键部件的创新设计提供技术参考及可行方案。

## 1 排种器结构与工作原理

### 1.1 主要结构

动定指勺夹持式玉米精量排种器主要由排种轴、指勺种盘(种盘端盖、定夹指勺、动夹指勺和微调弹簧)、限位导引总成(深沟槽凸轮盘壳体、调控摆臂、调节螺母和调控拉杆)、滚动滑轮、卸种滤板、清种毛刷和固装底壳等部件组成,其整体结构如图 1a 所示。其中指勺种盘和限位导引总成是排种器核心工作部件,其设计配置的合理性直接影响机具作业质量。指勺种盘主要由 18 套动定指勺系统(定夹指勺和动夹指勺)及微调弹簧安装于种盘端盖内组合而成,定夹指勺与种盘端盖固定装配,动夹指勺与微调弹簧配合安装于种盘端盖卡槽内。动夹指勺外侧配置滚动滑轮,保证指勺种盘整体在凸轮盘壳体深沟槽导轨内平稳柔顺运动,防止出现卡滞现象。配合调控摆臂进行复合限位导引,共同控制指勺系统开启空间,进行夹持充种以适应不同等级尺寸玉米种子的播种作业。动、定夹指勺皆由耐磨性尼龙材料制成,避免夹持时种子滑落及伤种问题。清种毛刷由猪鬃制成,可人为调整毛刷角度来控制清种程度。卸种滤板位于固装底壳正下方,以便清除播种作业后排种器内残余的种子。

### 1.2 工作原理

排种器工作过程主要分为夹持充种、运移清种、平稳导种和零速投种 4 个串联阶段,如图 1b 所示。

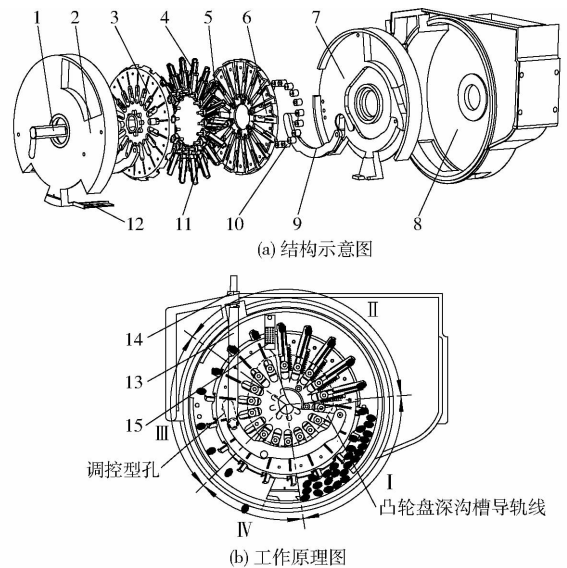


图 1 动定指勺夹持式玉米精量排种器结构图  
Fig. 1 Structure diagrams of clamping static and dynamic finger-spoon maize precision seed metering device

1. 排种轴 2,7. 深沟槽凸轮盘壳体 3,6. 种盘端盖 4. 定夹指勺 5. 动夹指勺 8. 固装底壳 9. 调控摆臂 10. 滚动滑轮 11. 微调弹簧 12. 卸种滤板 13. 调节螺母 14. 调控拉杆 15. 清种毛刷 I. 充种区 II. 清种区 III. 导种区 IV. 投种区

正常作业时,玉米种子由种箱填充至充种区内,通过固装底壳自身物料仿架空限位结构控制种子流动状态,保证充种区内种子数量动态平衡。通过调控摆臂调节凸轮盘壳体深沟槽充种区位置处导轨轨迹进行复合限位导引,控制指勺系统开启空间以保证各等级尺寸玉米种子的稳定夹持。机具行走轮通过链传动将动力传至排种轴,并带动指勺种盘整体进行旋转运动。定夹指勺自身固定不动仅随种盘进行圆周旋转,玉米种子在指勺种盘的旋转搅动下进行分种,动夹指勺在复合导轨和微调弹簧共同作用下沿种盘径向进行定时伸缩开闭,形成速度不等圆周种群层。当运动至充种区时动夹指勺开启,种子在自身重力、种群碰撞摩擦力及指勺支持力共同作用下进行夹持取种;当离开充种区时动夹指勺在弹簧力作用下柔性闭合并夹持多粒种子,完成充种过程。指勺系统夹持种子运移至清种区时,配合清种毛刷作用除去受力不均的多余种子,保证单粒夹持取种,完成清种过程。单粒种子被夹持进入导种区,动夹指勺平稳开启,完成导种环节。种子被运移至投种点抛送瞬间在自身重力和离心力作用下进行零速投送,完成投种过程。通过各环节共同作用提高机具播种质量与适播范围,实现精密播种作业。

## 2 排种器关键部件结构设计

### 2.1 指勺种盘

指勺种盘是排种器的关键执行部件,主要由种

盘(前后)端盖、动定指勺系统及微调弹簧等部件组成。如图2所示,定夹指勺均匀周向固装于种盘端盖上,且随指勺种盘进行旋转运动,动夹指勺布置于种盘端盖卡槽内,通过动夹指勺对微调弹簧进行定位压缩,实现动夹指勺随种盘旋转和沿种盘径向伸缩的复合运动,形成动、定指勺间开闭腔体对玉米种子稳定夹持。同时动夹指勺底部两侧对应配置滚动滑轮,以便于指勺种盘在凸轮盘壳体深沟槽导轨内平稳运动。

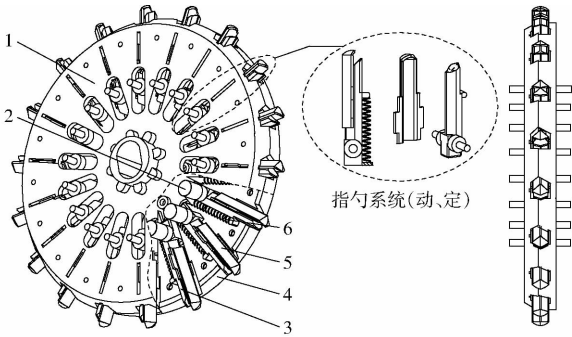


图2 指勺种盘结构图

Fig. 2 Structure diagram of finger-spoon plate

1. 种盘前端盖 2. 滚动滑轮 3. 动夹指勺 4. 种盘后端盖  
5. 定夹指勺 6. 微调弹簧

动定指勺系统直接与玉米种子接触夹持,其结构形状及尺寸参数的设计影响机具充种性能。由于不同玉米品种形状尺寸间差异性较大,使得常规排种器播种适应范围有限,因此本文对不同类型玉米种子的尺寸分布进行研究测定,优化设计动、定指勺结构参数,分析指勺平稳夹持临界条件,改善排种器充种质量及适应性能。

### 2.1.1 玉米种子尺寸分级

玉米种子几何尺寸是设计动、定指勺结构参数的主要依据,是影响指勺稳定精量夹持的重要因素。为提高排种器夹持取种适应范围,合理设计指勺结构参数,本文选取不同等级尺寸玉米种子进行研究。目前中国尚未建立玉米种子尺寸等级划分相关标准,结合玉米种植调研现状<sup>[14-15]</sup>,选取黑龙江地区种植范围较广且尺寸等级不同4种玉米品种作为供试种子。通过人工分级清选处理,按形状尺寸差异将供试种子分为扁形大粒、扁形小粒、圆形大粒和圆形小粒,如图3所示。

随机挑选各类型种子1000颗测定其几何尺

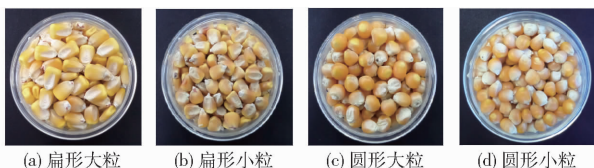


图3 玉米种子分级效果图

Fig. 3 Effect diagrams of maize seeds grading

寸,统计其均值和标准差,如表1所示。分析数据可知,4种类型供试种子尺寸集中分布于不同范围,具有较显著差异,但其三轴尺寸均呈中等偏态分布。在动、定指勺结构参数优化设计过程中,应保证指勺满足多种类型玉米种子夹持要求,提高排种器作业质量。

表1 玉米种子几何尺寸参数

Tab. 1 Geometric dimension parameters

类型	of maize seeds					
	长度		宽度		厚度	
	均值	标准差	均值	标准差	均值	标准差
扁形大粒	12.35	0.83	9.24	0.92	4.70	0.87
扁形小粒	10.67	0.75	6.40	0.81	4.01	0.91
圆形大粒	11.03	0.73	10.45	0.61	5.43	0.80
圆形小粒	7.29	0.81	6.31	0.69	3.52	0.78

### 2.1.2 动定指勺系统

在夹持充种过程中,指勺系统整体随指勺种盘进行圆周旋转运动,动夹指勺相对于定夹指勺进行径向伸缩运动,依靠其两者间形成空间腔体夹持种子。在动、定指勺设计过程中,应简化勺体内部结构,保证勺体弧面光滑过渡,各向夹持受力均匀平稳,减少指勺边缘对种子损伤。如图4所示,设计时将所夹持种子简化为椭球体,通过椭圆形截曲线进行旋转扫描切除优化得到指勺实体,其指勺凹曲面为椭圆形,同时动、定指勺凹曲面沿截曲线倾斜切线对称设计。本文以动夹指勺为例,对其参数进行设计分析,定夹指勺相关尺寸相同,其主要结构参数为指勺凹曲面切线倾斜角 $\alpha$ 、指勺夹持作用深度 $L$ 、指勺夹持作用宽度 $W$ 。

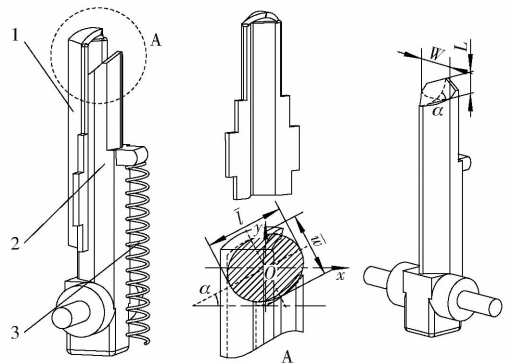


图4 动定指勺系统结构图

Fig. 4 Structure diagram of static and dynamic finger-spoon system

1. 定夹指勺 2. 动夹指勺 3. 微调弹簧

为提高指勺夹持充种质量与适应范围,结合各等级玉米种子几何尺寸分布,指勺基本参数应遵循的设计原则<sup>[16]</sup>为

$$\begin{cases} 1. 2\bar{l} \geq L \geq \bar{l} \sin \alpha \\ 1. 5\bar{w} \geq W \geq 1. 2\bar{t} \end{cases} \quad (1)$$

式中  $\bar{l}$ ——玉米种子平均长度, mm  
 $\bar{w}$ ——玉米种子平均宽度, mm  
 $\bar{t}$ ——玉米种子平均厚度, mm

动、定指勾凹曲面皆由椭圆形截曲线旋转扫描优化而成, 其椭圆长轴与水平成倾斜角, 以夹持中心 (近似为被夹持种子质心) 为坐标原点  $O$ , 建立直角坐标系  $xOy$ , 则指勾凹曲面倾斜截曲线方程为

$$\frac{4(x \cos \alpha + y \sin \alpha)^2}{l^2} + \frac{4(y \cos \alpha - x \sin \alpha)^2}{w^2} = 1 \quad (2)$$

为研究指勾系统夹持充种稳定性, 分析被夹持种子与系统间保持相对平衡且不被甩离的临界条件, 对充种过程指勾系统和种子的运动状态进行力学分析。如图 5 所示, 为根据指勾夹持种子实际运

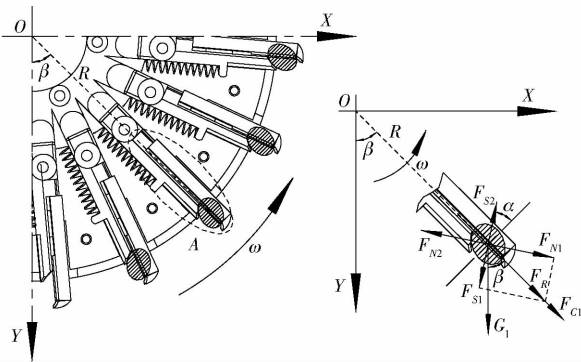


图 5 指勾夹持力学分析

Fig. 5 Analysis of clamped force by finger-spoon

动状态抽象的模型示意图, 以指勾种盘旋转中心为坐标原点  $O$ , 建立直角坐标系  $XOY$ 。选取伸缩夹持过程中动夹指勾进行受力分析, 动夹指勾主要受到微调弹簧弹力  $F_R$ 、被夹持种子反向支持力  $F_{N1}$ 、被夹持种子反向摩擦力  $F_{S1}$ 、定夹指勾滑道支持力  $F_{N3}$ 、定夹指勾滑道摩擦力  $F_{S3}$ 、指勾所受离心力  $F_{C1}$  和指勾自身重力  $G_1$  共同作用。根据达朗贝尔原理, 若保证动夹指勾平稳夹持, 则各平衡力系应满足

$$\begin{cases} F_{S1} \sin \alpha + F_{N1} \cos \alpha + F_{S3} = G_1 \cos \beta + F_{C1} + F_R \\ F_{S1} \cos \alpha + F_{N3} = F_{N1} \sin \alpha + G_1 \sin \beta \end{cases} \quad (3)$$

其中

$$\begin{cases} F_{S1} = \mu_1 F_{N1} \\ F_{S3} = \mu_2 F_{N3} \\ F_R = k \Delta x \\ F_{C1} = m_1 \omega^2 R_1 \\ G_1 = m_1 g \end{cases} \quad (4)$$

式中  $m_1$ ——动夹指勾质量, g  
 $g$ ——重力加速度,  $m/s^2$   
 $k$ ——微调弹簧刚度系数,  $N/mm$   
 $\Delta x$ ——微调弹簧伸缩变形量, mm

$\omega$ ——指勾种盘旋转角速度,  $rad/s$

$R_1$ ——动夹指勾旋转半径, mm, 近似为质心规则圆柱体

$\beta$ ——动夹指勾旋转圆周角, ( $^\circ$ )

$\mu_1$ ——动夹指勾与玉米种子间摩擦因数

$\mu_2$ ——动、定指勾间摩擦因数

在此基础上, 以玉米种子为研究对象进行力学分析, 种子主要受到动夹指勾夹持支持力  $F_{N1}$ 、动夹指勾夹持摩擦力  $F_{S1}$ 、定夹指勾夹持压力  $F_{N2}$ 、定夹指勾夹持摩擦力  $F_{S2}$ 、种子所受离心力  $F_{C2}$  和种子自身重力  $G_2$  共同作用。若保证种子被平稳夹持并进行圆周旋转运动, 则沿种子运动轨迹法线和切线方向应受力平衡, 其各力间应满足

$$\begin{cases} F_{N2} \cos \alpha + F_{S2} \sin \alpha - (F_{N1} \cos \alpha + F_{S1} \sin \alpha + G_2 \cos \beta) \geq F_{C2} \\ F_{N1} \sin \alpha + F_{S2} \cos \alpha = G_2 \sin \beta + F_{N2} \sin \alpha + F_{S1} \cos \alpha \end{cases} \quad (5)$$

其中

$$\begin{cases} F_{S2} = \mu_1 F_{N2} \\ F_{C2} = m_2 \omega^2 R_2 \\ F_R = \sqrt{F_{S1}^2 + F_{N1}^2} \\ G_2 = m_2 g \end{cases} \quad (6)$$

式中  $m_2$ ——玉米种子质量, g

$R_2$ ——玉米种子旋转半径, mm, 近似为质心规则椭球体

将式(3)~(6)合并整理简化可得

$$\alpha \leq \arctan \frac{\mu_1 \omega^2 R_2 + \mu_1 g \cos \beta - g \sin \beta}{\omega^2 R_2 + g \sin \beta + \mu_3 g \sin \beta} \quad (7)$$

由于排种器整体结构限制, 指勾种盘圆周直径不可过大, 设定种盘旋转半径 (即玉米种子旋转半径)  $R_2$  为 185.0 mm, 根据夹持充种角度要求可知动夹指勾旋转圆周角  $\beta \leq 90^\circ$ , 常规排种旋转角速度  $\omega \in (1.5, 5.3) rad/s$ , 各材料间摩擦因数恒定, 将上述参数代入式(7)中, 可得工况下所设计指勾凹曲面切线倾斜角  $\alpha$  应小于  $33.8^\circ$ , 以保证指勾平稳夹持作业。根据式(1)、(7)及玉米种子尺寸参数, 设计指勾凹曲面切线倾斜角  $\alpha$  为  $30^\circ$ , 指勾夹持作用深度  $L$  为 13.5 mm, 指勾夹持作用宽度  $W$  为 7.2 mm。

## 2.2 限位导引总成

### 2.2.1 限位导引原理

为精准平稳的控制指勾系统的开启与闭合, 有效串联各排种作业环节, 本文采用凸轮复合导引方式优化设计了限位导引总成。如图 6 所示, 限位导引总成主要由深沟槽凸轮盘壳体、调控摆臂、调节螺母和调控拉杆 (未标注) 等部件组成。实际作业时,

结合播种玉米种子形状尺寸要求,通过调控拉杆及型孔控制调控摆臂的位置,改变充种区位置处凸轮盘壳体深沟槽导轨轨迹,实现复合限位作用,进而调节指勺系统伸缩开闭行程空间。指勺种盘整体依靠外侧配置的滚动滑轮被约束于复合导轨内,限位导引总成固定不动,指勺种盘随排种轴进行旋转运动,通过微调弹簧和导引总成共同作用实现动夹指勺的径向伸缩夹持。

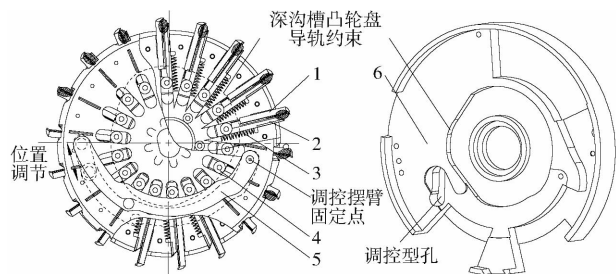


图6 限位导引总成复合约束示意图

Fig. 6 Schematic diagram of composite constraints by limited guiding assembly

1. 定夹指勺 2. 动夹指勺 3. 微调弹簧 4. 滚动滑轮 5. 调控摆臂 6. 深沟槽凸轮盘壳体

充种过程是排种器夹持运移的初始环节,也是最重要环节之一,合理稳定调节充种区域内指勺伸缩开启空间是提高整体作业质量的重要保证。指勺开启行程过大,易夹持多粒种子造成重播现象;指勺开启行程过小,易夹持不到种子造成漏播现象。因此在充种区域配置圆弧形调控摆臂,安装于凸轮盘壳体内,一端固定铰接于凸轮盘壳体,另一端通过调控型孔调节摆臂的作用尺寸及角度,实现指勺导轨的复合导引约束。根据玉米种子形状尺寸差异、指勺种盘及凸轮盘整体配置要求,设计调控摆臂调节尺寸范围为0~24 mm,即当调控摆臂调节尺寸为0 mm时,完全依靠凸轮盘壳体深沟槽导轨进行约束导引;当调控摆臂调节尺寸大于0 mm时,依靠复合导轨进行约束导引。调控摆臂调节尺寸范围直接影响排种器夹持充种性能,也是提高排种器作业质量和适播范围的重要因素,因此在后续台架试验阶段将对此因素开展试验研究。

### 2.2.2 凸轮盘导轨轮廓曲线

深沟槽凸轮盘壳体是限位导引总成的基础载体部件,其深沟槽导轨轮廓曲线直接准确适时的控制指勺系统开闭,应根据排种器各作业环节区域划分及指勺伸缩行程要求对导轨轮廓曲线进行设计。排种器各环节区域划分应遵循如下原则:尽量加大充种区域作业范围,保证充种性能稳定性与可靠性;使指勺系统缓慢过渡至清种区,保证有效清除受力不均的多余种子;使导种区快速过渡至投种区,防止指

勺连带作用,保证排种器有效零速投种。根据上述原则及充种区内种群具体位置,设计充种区角度为85°,清种区角度为120°,导种区角度为100°,投种区角度为55°。

在此基础上,对深沟槽导轨轮廓曲线进行优化设计,综合分析指勺种盘处于低中速运行状态,作业过程中指勺系统将产生柔性冲击,所设计的深沟槽凸轮盘属于“力锁合”凸轮机构<sup>[17]</sup>,所优化的导轨轮廓曲线为间歇式可升离凸轮曲线。采用反转法<sup>[18]</sup>对凸轮盘导轨轮廓曲线进行求解,如图7所示,滚子中心A点即为导轨凸轮曲线理论轮廓曲线。重点对充种区至清种区升程段、投种区至充种区升程段和清种区至导种区回程段进行设计,其方程为

$$\begin{cases} S_1 = h_1(1 - \delta) / \delta_1 & \left( \frac{1}{2}\pi \leq \delta \leq \frac{11}{18}\pi \right) \\ S_2 = h_2[1 - \delta / \delta_2 + \sin(2\pi\delta / \delta_2)] / (2\pi) & \left( \pi \leq \delta \leq \frac{43}{36}\pi \right) \\ S_3 = r_0[1 - \cos(\pi\delta / \delta_3)] / 2 & \left( \frac{55}{36}\pi \leq \delta \leq \frac{33}{18}\pi \right) \end{cases} \quad (8)$$

式中  $S_1$ ——充种区至清种区升程位移, mm  
 $S_2$ ——清种区至导种区回程位移, mm  
 $S_3$ ——投种区至充种区升程位移, mm  
 $\delta$ ——旋转相位角, (°)  
 $\delta_1$ ——充种区至清种区升程运动角, (°)

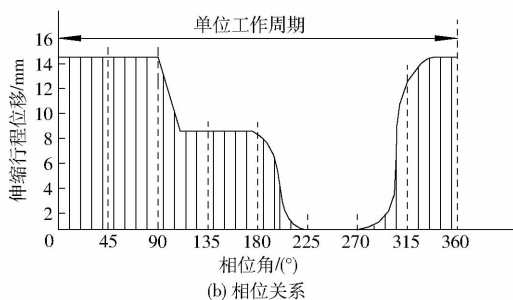
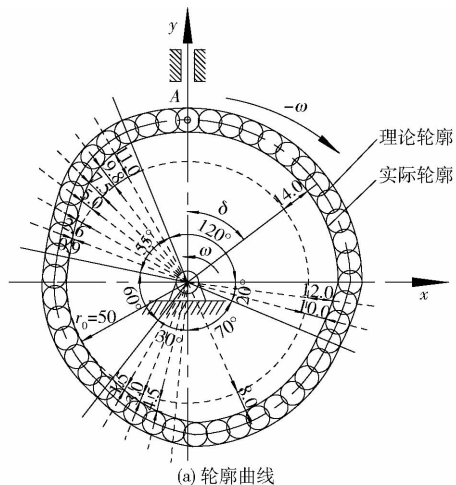


图7 深沟槽凸轮盘导轨轮廓曲线示意图

Fig. 7 Schematic diagrams of contour curve in groove cam

$\delta_2$ ——清种区至导种区回程运动角, ( $^\circ$ )

$\delta_3$ ——投种区至充种区升程运动角, ( $^\circ$ )

$h_1$ ——充种区远休行程, mm

$h_2$ ——清种区远休行程, mm

$r_0$ ——导轨轮廓曲线基圆半径, mm

根据指勾系统伸缩夹持空间及时间要求, 设定导种区至投种区轮廓曲线为基圆曲线, 其半径  $r_0$  为 50 mm, 充种区远休行程  $h_1$  为 8 mm, 清种区远休行程  $h_2$  为 14 mm, 充种区至清种区升程运动角  $\delta_1$  为  $20^\circ$ , 清种区至导种区回程运动角  $\delta_2$  为  $55^\circ$ , 投种区至充种区升程运动角  $\delta_3$  为  $35^\circ$ , 将上述代入式(8)中, 即可得到所优化设计深沟槽导轨轮廓曲线。

### 3 台架性能试验

#### 3.1 试验材料与条件

试验地点为东北农业大学排种性能实验室。试验材料为前期研究测定的 4 种等级尺寸玉米品种(扁形大粒、扁形小粒、圆形大粒和圆形小粒), 通过人工分级清选处理, 保证供试种子形状均匀、饱满无损伤及虫害, 测定各类型玉米种子千粒质量分别为: 扁形大粒 331.08 g、扁形小粒 281.12 g、圆形大粒 302.87 g、圆形小粒 275.23 g, 其平均几何尺寸参照表 1。

试验装置主要由动定指勾夹持式玉米精量排种器和 JPS-12 型排种器性能检测试验台(黑龙江省农业机械工程科学研究院研制)组成, 如图 8 所示。在试验过程中, 排种器固定安装于台架, 种床带相对于排种器反向运动, 模拟播种机具实际前进状态, 喷油泵将黏性油液喷于种床带上, 玉米种子从排种器落至涂有油层的种床带, 通过试验台图像采集处理系统进行实时检测并采集数据, 以准确测定各项排种性能指标<sup>[19-20]</sup>。

#### 3.2 试验因素与指标

根据前期理论分析、预试验研究及实际生产经

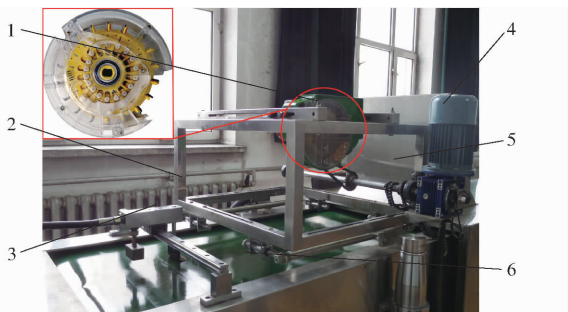


图 8 排种性能试验台

Fig. 8 Test bed of seeding performance experiments

1. 动定指勾夹持式玉米精量排种器
2. 安装台架
3. 喷油泵
4. 驱动电动机
5. 图像采集处理系统
6. 种床带

验可知, 在动定指勾夹持式玉米精量排种器结构参数确定的前提下, 影响机具排种质量与适播范围的主要因素为排种器工作转速和调控摆臂调节尺寸, 因此试验过程中将针对两因素开展单因素适应性试验和多因素优化试验相关研究, 并在工况下与其他排种器进行性能对比。通过调节性能检测试验台变频器控制排种器工作转速, 通过调节排种器调控拉杆控制调控摆臂调节尺寸, 以提高试验可操作性及准确性。

根据玉米播种作业农艺要求, 参考 GB/T 6973—2005《单粒(精密)播种机试验方法》和 JB/T 10293—2001《单粒(精密)播种机技术条件》, 选取玉米播种株间合格指数和变异系数为试验指标, 以评价排种器作业质量、适播范围及稳定性。其相关计算公式分别为

$$S = \frac{n_0}{N} \times 100\% \quad (9)$$

$$C = \sqrt{\frac{\sum (x - \bar{x})^2}{(n' - 1)\bar{x}^2}} \times 100\% \quad (10)$$

式中  $S$ ——株间合格指数, %  
 $C$ ——株间变异系数, %  
 $n_0$ ——单粒排种数, 颗  
 $N$ ——理论排种数, 颗  
 $n'$ ——样本穴距总数, 个  
 $x$ ——理论播种穴距, mm  
 $\bar{x}$ ——样本穴距平均值, mm

#### 3.3 试验内容与与方法

为检验排种器作业质量及对各等级尺寸种子的作业适应性与稳定性, 结合实际播种作业要求及各因素可控有效范围, 采用单因素试验, 研究在排种器工作转速 15 ~ 45 r/min 和调控摆臂调节尺寸 0 ~ 24 mm 工况下机具作业质量变化规律。

在此基础上, 选取圆形大粒玉米种子为作业对象, 采用二因素五水平二次旋转正交组合试验研究排种器最佳工作参数组合, 并在最佳工况下进行混合不分级种子性能对比试验, 设定试验因素编码如表 2 所示。在单因素及多因素试验过程中, 每组试验重复 5 次, 每次连续记录种床带上由排种器稳定工作时排出的 250 颗种子, 其他各项参数保持恒定, 数据处理取平均值作为试验结果。

#### 3.4 试验结果与分析

##### 3.4.1 单因素试验结果与分析

以排种器工作转速和调控摆臂调节尺寸为试验因素, 进行单因素适应性试验以分析各因素对性能评价指标的影响规律, 试验方案与结果如表 3 和

表2 试验因素编码

Tab.2 Coding of experimental factors

编码	试验因素	
	工作转速 $A/(r \cdot \min^{-1})$	调节尺寸 $B/\text{mm}$
1.414	45.0	24.0
1	40.6	20.5
0	30.0	12.0
-1	19.4	3.5
-1.414	15.0	0

表4所示。

由表3可知,调控摆臂调节尺寸为12 mm时,分别设定排种器在工作转速为15、20、25、30、35、40、45 r/min工况下进行作业(对应种床带反向运动速

度为3、4、5、6、7、8、9 km/h)。运用 Matlab 软件对试验数据进行处理,分析相应指标变化趋势可知,随工作转速增加,排种器对各等级尺寸种子排种指标均呈降低趋势(合格指数逐渐降低,变异系数逐渐增加)。排种器工作转速为15~45 r/min时,对圆形大粒种子排种性能最优,其合格指数大于84.21%,变异系数小于15.13%;对扁形小粒种子排种性能次之;对圆形小粒种子排种性能最差,其合格指数大于80.30%,变异系数小于21.67%。工作转速大于30 r/min时,对各等级尺寸种子排种指标降低趋势逐渐加大,主要由于夹持接触时间减小,导致指勾充种性能下降,但均可满足精量播种作业要求。

表3 各类型玉米种子在不同工作转速下试验结果

Tab.3 Experiment results of maize seeds with different types under different rotational speeds

工作转速/ ( $r \cdot \min^{-1}$ )	扁形大粒		扁形小粒		圆形大粒		圆形小粒	
	合格指数	变异系数	合格指数	变异系数	合格指数	变异系数	合格指数	变异系数
15	90.67	12.59	92.98	11.09	94.12	9.01	88.09	14.21
20	89.26	13.91	91.11	11.51	92.50	9.98	87.38	14.75
25	88.33	14.07	90.08	13.01	91.52	11.21	86.75	15.65
30	84.01	14.75	86.53	13.86	88.81	12.33	83.57	16.64
35	83.10	15.65	85.00	14.84	87.29	14.02	82.31	18.35
40	82.03	17.36	82.80	16.28	86.12	14.97	81.73	19.87
45	81.60	18.76	82.10	18.35	84.21	15.13	80.30	21.67

表4 各类型玉米种子在不同调节尺寸下试验结果

Tab.4 Experiment results of maize seeds with different types under different adjustment dimensions

调节尺寸/mm	扁形大粒		扁形小粒		圆形大粒		圆形小粒	
	合格指数	变异系数	合格指数	变异系数	合格指数	变异系数	合格指数	变异系数
0	81.78	16.26	86.12	15.94	85.04	14.99	83.09	17.91
4	82.32	15.90	88.02	15.80	86.12	14.05	85.12	17.11
8	83.67	15.08	87.13	13.09	87.31	13.86	84.34	15.02
12	84.01	14.75	86.53	13.86	88.81	12.33	83.57	16.64
16	86.99	16.92	84.96	16.52	90.12	15.08	82.64	18.18
20	85.21	18.04	83.20	18.81	87.02	16.97	81.62	20.31
24	84.59	20.67	81.69	19.95	85.56	17.24	80.01	22.03

由表4可知,工作转速为30 r/min时,分别设定排种器在调控摆臂调节尺寸为0、4、8、12、16、20、24 mm工况下进行作业。运用 Matlab 软件对试验数据进行处理,分析相应指标趋势可知,随调节尺寸增加,排种器对各等级尺寸种子排种指标均呈先增加后降低趋势(合格指数先增加后降低,变异系数先降低后增加)。调控摆臂调节尺寸为0~24 mm时,对圆形大粒种子排种性能最优,其合格指数大于85.04%,变异系数小于17.24%;对扁形大粒种子排种性能次之;对圆形小粒种子排种性能最差。调节尺寸为16 mm时,对圆形大粒种子合格指数最高为90.12%;调节尺寸为12 mm时,对圆形大粒种子变异系数最低为12.33%。

### 3.4.2 多因素试验结果与分析

通过单因素分析可知,在工况条件下排种器均可适应4种等级尺寸玉米种子的精密播种作业。在此基础上,选取排种性能较优的圆形大粒玉米种子为作业对象,进行二因素五水平二次旋转正交组合设计试验研究,对影响因素进行显著性分析,以期得到排种器最佳工作参数组合<sup>[21-22]</sup>,并在最佳工况下开展混合不分级种子性能对比试验。在试验过程中,由于人为控制调控摆臂调节尺寸,试验操作实际值与理论参数设计值存在一定误差,但其最大误差为1.7%,在可接受范围内,对排种器工作转速和调控摆臂调节尺寸两参数设计值进行结果分析,具体试验设计方案与测定结果如表5所示,其中 $x_1$ 为排

种器工作转速编码值,  $x_2$  为调控摆臂调节尺寸编码值。

表 5 试验方案与结果

Tab. 5 Results and design of tests

序号	试验因素		性能指标	
	工作转速	振动幅度	合格指数	变异系数
	$x_1$	$x_2$	S/%	C/%
1	-1	-1	88.98	12.51
2	1	-1	85.78	15.99
3	-1	1	90.79	15.15
4	1	1	86.50	16.23
5	-1.414	0	94.12	9.01
6	1.414	0	84.21	15.13
7	0	-1.414	85.04	14.99
8	0	1.414	85.56	17.24
9	0	0	88.81	12.33
10	0	0	89.02	13.11
11	0	0	87.23	13.96
12	0	0	88.38	12.79
13	0	0	89.18	11.91
14	0	0	87.48	13.90
15	0	0	90.39	12.20
16	0	0	90.98	11.28

通过 Design-Expert 6.0.10 软件对试验数据回归分析, 进行因素方差分析, 筛选出较为显著影响因素, 得到性能指标与因素编码值间回归方程。

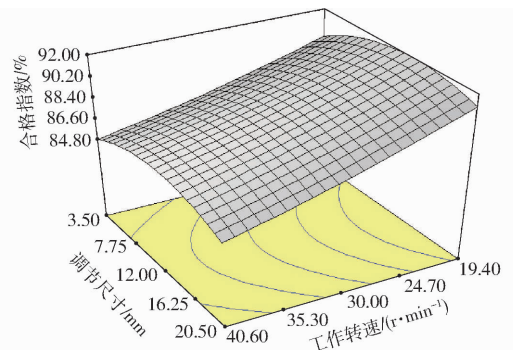
$$S = 88.93 - 2.69x_1 + 0.41x_2 + 0.31x_1^2 - 1.62x_2^2 - 0.27x_1x_2 \quad (11)$$

$$C = 12.69 + 1.65x_1 + 0.76x_2 - 0.088x_1^2 + 1.93x_2^2 - 0.6x_1x_2 \quad (12)$$

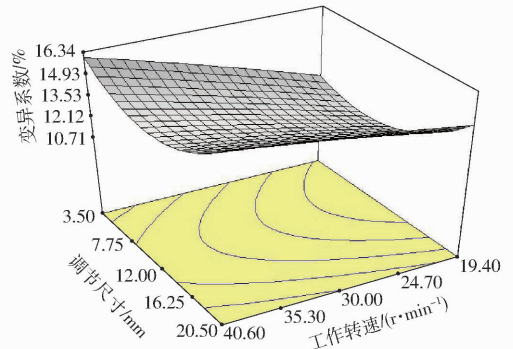
为直观地分析试验指标与因素间关系, 运用 Design-Expert 6.0.10 软件得到响应曲面, 如图 9 所示。

在作业评价指标满足精密播种要求前提下, 对各因素影响规律进行分析, 根据相关回归方程和响应曲面图等高线分布密度可知, 排种器工作转速和调控摆臂调节尺寸交互作用对合格指数和变异系数影响均较显著。由图 9a 可知, 工作转速一定时, 合格指数随调节尺寸增加而先增加后降低; 调节尺寸一定时, 合格指数随工作转速增加而降低; 工作转速变化时, 合格指数变化区间较大, 因此工作转速是影响合格指数的主要因素。由图 9b 可知, 工作转速一定时, 变异系数随调节尺寸增加而先降低后增加; 调节尺寸一定时, 变异系数随工作转速增加而增加。调节尺寸变化时, 变异系数变化区间较大, 因此调节尺寸是影响变异系数的主要因素。

为得到试验因素最佳工作组合, 对其进行优化设计, 建立参数化数学模型, 结合因素边界条件, 遵循高速精量播种作业(提高作业效率与质量)原则,



(a) 合格指数



(b) 变异系数

图 9 各因素对试验性能参数的响应曲面

Fig. 9 Response surfaces of factors to qualified index

采用多目标变量优化方法<sup>[23-24]</sup>, 对合格指数和变异系数的回归方程进行分析, 建立非线性规划参数模型为

$$\begin{cases} \max S \\ \min C \\ \text{s. t. } 15.0 \text{ r/min} \leq A \leq 45.0 \text{ r/min} \\ 0 \leq B \leq 24.0 \text{ mm} \\ 0 \leq S(A, B) \leq 1 \\ 0 \leq C(A, B) \leq 1 \end{cases} \quad (13)$$

基于 Design-Expert 6.0.10 软件中的多目标参数优化模块对数学模型进行分析求解, 可得当排种器工作转速为 30.5 r/min, 调控摆臂调节尺寸为 12.0 mm 时, 排种器对圆形大粒玉米种子排种质量与稳定性最优, 其合格指数为 88.90%, 变异系数为 12.74%。根据优化结果进行试验验证, 其合格指数为 88.41%, 变异系数为 12.32%, 与优化结果基本一致。

在单因素适应性试验和多因素优化试验基础上, 在最佳工作参数组合工况下开展不分级混合种子排种试验研究, 并选用美国 Precision Planting 公司生产的指夹式玉米排种器进行性能对比。保证 4 种等级尺寸玉米种子数量相同且混合均匀, 重复 5 次试验进行数据处理。试验结果表明, 当排种器工作转速为 30.5 r/min, 调控摆臂调节尺寸为 12.0 mm 时, 所设计的动定指勾夹持式玉米排种器



对混合种子的合格指数为 87.11%，变异系数为 12.01%；国外进口指夹式玉米排种器对混合种子的合格指数为 93.87%，变异系数为 14.78%。对比分析可知，动定指勾夹持式玉米排种器播种质量略低于国外进口指夹式玉米排种器，有待后续改进优化，但其适播范围与夹持稳定性相对较优，整体播种变异系数较低，可与目前国内玉米种子分级较少现状相适应，满足我国精量播种作业要求。

## 4 结论

(1) 设计了一种动定指勾夹持式玉米精量排种器，阐述了排种器总体结构及工作原理，对其关键部件指勾种盘和限位导引总成结构参数进行了优化设计，提高了排种质量与适播范围。

(2) 以 4 种等级尺寸玉米种子为作业对象，以

工作转速和调节尺寸为试验因素，株间合格指数和变异系数为试验指标，采用单因素试验研究各因素对性能指标影响规律。试验结果表明，排种器对各等级尺寸玉米种子均具有良好的适应性，可满足精量播种作业要求；随工作转速增加，对各等级尺寸种子排种指标呈降低趋势；随调节尺寸增加，对各等级尺寸种子排种指标呈先增加后降低趋势。

(3) 采用多因素二次正交旋转组合设计试验研究排种器最佳工作参数组合，建立排种性能指标与试验参数间数学模型，运用 Design-Expert 6.0.10 软件对试验结果进行分析，对回归数学模型进行优化验证。试验结果表明，当排种器工作转速为 30.5 r/min，调控摆臂调节尺寸为 12.0 mm 时，对圆形大粒玉米种子排种作业性能最优，其合格指数为 88.41%，变异系数为 12.32%。

## 参 考 文 献

- 杨丽, 颜丙新, 张东兴, 等. 玉米精密播种技术研究进展 [J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(11): 38-48. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20161106&flag=1&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20161106&flag=1&journal_id=jcsam). DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.11.006.  
YANG Li, YAN Bingxin, ZHANG Dongxing, et al. Research progress on precision planting technology of maize [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(11): 38-48. (in Chinese)
- YANG L, HE X T, CUI T, et al. Development of mechatronic driving system for seed meters equipped on conventional precision corn planter [J]. International Journal of Agriculture and Biological Engineering, 2015, 8(4): 1-9.
- 丛锦玲, 余佳佳, 曹秀英, 等. 油菜小麦兼用型气力式精量排种器 [J/OL]. 农业机械学报, 2014, 45(1): 46-52. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20140108&flag=1&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20140108&flag=1&journal_id=jcsam). DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2014.01.008.  
CONG Jinling, YU Jiajia, CAO Xiuying, et al. Design of dual-purpose pneumatic precision metering device for rape and wheat [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(1): 46-52. (in Chinese)
- 翟建波, 夏俊芳, 周勇. 气力式杂交稻精量穴直播排种器设计与试验 [J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(1): 75-82. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20160111&flag=1&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20160111&flag=1&journal_id=jcsam). DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.01.011.  
ZHAI Jianbo, XIA Junfang, ZHOU Yong. Design and experiment of pneumatic precision hill-drop drilling seed metering device for hybrid rice [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(1): 75-82. (in Chinese)
- 马旭, 谭永妍, 齐龙, 等. 水稻秧盘育秧精密播种流水线软硬秧盘自动叠放装置 [J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(3): 29-36. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20160305&flag=1&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20160305&flag=1&journal_id=jcsam). DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.03.005.  
MA Xu, TAN Yongxin, QI Long, et al. Automatic tray stacking device for hard and soft tray of rice precision seeding for nursing seedlings pipeline [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(3): 29-36. (in Chinese)
- 刘佳. 机械气力组合式精量排种器设计研究 [D]. 北京: 中国农业大学, 2015.  
LIU Jia. Design and research of the mechanical pneumatic combined precision seed metering device [D]. Beijing: China Agricultural University, 2015. (in Chinese)
- 李成华, 马成林, 于海业, 等. 倾斜圆盘勺式玉米精量排种器的试验研究 [J]. 农业机械学报, 1999, 30(2): 38-42.  
LI Chenghua, MA Chenglin, YU Haiye, et al. An experimental study on the precision metering device with declined scoop-type disc for maize [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 1999, 30(2): 38-42. (in Chinese)
- 王金武, 唐汉, 周文琪, 等. 指夹式精量玉米排种器改进设计与试验 [J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(9): 68-76. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20150910&flag=1&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20150910&flag=1&journal_id=jcsam). DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2015.09.010.  
WANG Jinwu, TANG Han, ZHOU Wenqi, et al. Improved design and experiment on pickup finger precision seed metering device [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(9): 68-76. (in Chinese)
- 王金武, 唐汉, 王奇, 等. 基于 EDEM 软件的指夹式精量排种器排种性能数值模拟与试验 [J]. 农业工程学报, 2015, 31(21): 43-50.  
WANG Jinwu, TANG Han, WANG Qi, et al. Numerical simulation and experiment on seeding performance of pickup finger precision seed-metering device on EDEM [J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(21): 43-50. (in Chinese)
- 王金武, 唐汉, 王金峰, 等. 指夹式玉米精量排种器导种投送转移机理分析与试验 [J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(1): 29-37, 46. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20170105&flag=1&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20170105&flag=1&journal_id=jcsam).

- DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2017.01.005.
- WANG Jinwu, TANG Han, WANG Jinfeng, et al. Analysis and experiment of guiding and dropping migratory mechanism on pickup finger precision seed metering device for corn [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(1): 29-37, 46. (in Chinese)
- 11 WANG J W, TANG H, WANG J F, et al. Optimization design and experiment on ripple surface type pickup finger of precision maize seed metering device [J]. International Journal of Agriculture and Biological Engineering, 2017, 10(1): 61-71.
- 12 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/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(5): 38-45. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20160506&flag=1&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20160506&flag=1&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.05.006.
- GENG Duanyang, LI Yuhuan, MENG Pengxiang, et al. Design and test on telescopic clip finger type of metering device [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(5): 38-45. (in Chinese)
- 13 Precision Planting LLC. Improve planter performance where it counts in the meter [EB/OL]. (2016-12-12) [2016-12-12]. <http://www.precisionplanting.com/#products/precisionmeter/>.
- 14 陈志, 郝付平, 王锋德, 等. 中国玉米收获技术与装备发展研究 [J/OL]. 农业机械学报, 2012, 43(12): 44-49, 117. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20121209&flag=1&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20121209&flag=1&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.12.009.
- CHEN Zhi, HAO Fuping, WANG Fengde, et al. Development of technology and equipment of corn harvester in China [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(12): 44-49, 117. (in Chinese)
- 15 刘佳, 崔涛, 张东兴, 等. 玉米种子分级处理对气力式精量排种器播种效果的影响 [J]. 农业工程学报, 2010, 26(9): 109-113.
- LIU Jia, CUI Tao, ZHANG Dongxing, et al. Effects of maize seed grading on sowing quality by pneumatic precision seed-metering device [J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(9): 109-113. (in Chinese)
- 16 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.
- 17 胡红, 李洪文, 王庆杰, 等. 玉米行间定点扎穴深施追肥机的设计与试验 [J]. 农业工程学报, 2016, 32(24): 26-35.
- HU Hong, LI Hongwen, WANG Qingjie, et al. Design and experiment of targeted hole-pricking and deep-application fertilizer applicator between corn rows [J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(24): 26-35. (in Chinese)
- 18 尹建军, 陈亚明, 张万杰. 打结器咬绳机构线接触凸轮设计与载荷分析 [J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(7): 224-231. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20160731&flag=1&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20160731&flag=1&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.07.031.
- YIN Jianjun, CHEN Yaming, ZHANG Wanjie. Line-contact cam design and load analysis of rope-biting mechanism of knotter [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(7): 224-231. (in Chinese)
- 19 曹成茂, 秦宽, 王安民, 等. 水稻直播机气吹辅助匀轮式排种器设计与试验 [J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(1): 66-72. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20150110&flag=1&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20150110&flag=1&journal_id=jcsam). DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2015.01.010.
- CAO Chengmao, QIN Kuan, WANG Anmin, et al. Design and experiment on rice hill seeder with air-blowing special hole and scoop-wheel [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(1): 66-72. (in Chinese)
- 20 曹秀英, 廖宜涛, 廖庆喜, 等. 油菜离心式精量集排器枝状阀式分流装置设计与试验 [J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(9): 77-84. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20150911&flag=1&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20150911&flag=1&journal_id=jcsam). DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2015.09.011.
- CAO Xiuying, LIAO Yitao, LIAO Qingxi, et al. Design and experiment on valve-branch distributor of centrifugal precision metering device for rapeseed [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(9): 77-84. (in Chinese)
- 21 王立军, 张传根, 丁振军. 玉米收获机清选筛体结构优化 [J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(9): 108-114. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20160916&flag=1&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20160916&flag=1&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.09.016.
- WANG Lijun, ZHANG Chuangen, DING Zhenjun. Structure optimization of cleaning screen for maize harvester [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(9): 108-114. (in Chinese)
- 22 王金武, 唐汉, 王金峰, 等. 1DSZ-350 型悬挂式水田单侧旋耕镇压修筑埂机的设计与试验 [J]. 农业工程学报, 2017, 33(1): 25-37.
- WANG Jinwu, TANG Han, WANG Jinfeng, et al. Design and experiment on 1DSZ-350 type hanging unilateral rotary tillage compacting ridger for paddy field [J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(1): 25-37. (in Chinese)
- 23 和贤桃, 郝永亮, 赵东岳, 等. 玉米精量排种器排种质量自动检测仪设计与试验 [J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(10): 19-27. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20161003&flag=1&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20161003&flag=1&journal_id=jcsam). DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.10.003.
- HE Xiantao, HAO Yongliang, ZHAO Dongyue, et al. Design and experiment of testing instrument for maize precision seed meter's performance detection [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(10): 19-27. (in Chinese)
- 24 张明华, 罗锡文, 王在满, 等. 水稻直播机组合型孔排种器设计与试验 [J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(9): 29-36. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20160905&flag=1&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20160905&flag=1&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.09.005.
- ZHANG Minghua, LUO Xiwen, WANG Zaiman, et al. Design and experiment of combined hole-type metering device of rice hill-drop drilling machine [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(9): 29-36. (in Chinese)