

圆锥盘推板式水田侧深施肥双行排肥器设计与试验

王金峰 付佐栋 翁武雄 王震涛 王金武 杨东泽
(东北农业大学工程学院, 哈尔滨 150030)

摘要: 为提高水田侧深施肥排肥器稳定性与均匀性,增强肥量调节能力,保证水田侧深施肥作业效率与质量,结合黑龙江地区水田施肥农艺要求,设计了一种圆锥盘推板式双行排肥器。阐述了排肥器工作原理,构建了肥料不同阶段的力学模型,确定了圆锥转盘结构参数与临界转速;应用离散元软件 EDEM 仿真分析推板数量对肥料填充能力与排肥性能的影响规律,得出推板数量为 8 时,排肥器具有最佳排肥性能;采用全因子试验方法开展圆锥转盘转速为 15~45 r/min、排肥口开度为 5~25 mm 条件下排肥器排肥量和排肥性能的台架试验,试验结果表明,排肥量范围为 122~934 kg/hm²,与圆锥转盘转速和排肥口开度均具有较高的线性相关性,且与圆锥转盘转速相关性最高;双行排肥量一致性变异系数、总排肥量稳定性变异系数和排肥均匀性变异系数范围分别为 1.01%~3.88%、1.05%~3.81%、6.64%~15.79%,排肥器倾斜状态下双行排肥量一致性变异系数最大值为 6.17%,试验结果满足水田侧深施肥性能要求。

关键词: 推板式排肥器;水田;侧深施肥

中图分类号: S224.21 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2023)02-0053-10 **OSID:** 

Design and Experiment of Conical-disc Push Plate Double-row Fertilizer Apparatus for Side-deep Fertilization in Paddy Field

WANG Jinfeng FU Zuodong WENG Wuxiong WANG Zhentao WANG Jinwu YANG Dongze
(College of Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

Abstract: In order to improve the stability and uniformity of paddy field side deep fertilizing and discharging apparatus, enhance the ability of fertilizer regulation, and ensure the efficiency and quality of paddy field side deep fertilizing apparatus, a kind of conical-disc and push plate double-row fertilizer apparatus was designed according to the agronomic requirements of paddy field fertilizing in Heilongjiang Province. The working principle of the fertilizer apparatus was described, the mechanical models of different stages of fertilizer were constructed, and the structural parameters and critical speed were determined. The influence of the number of push plates on the fertilizer filling capacity and fertilizer discharge performance was simulated and analyzed by using the discrete element software EDEM. It was concluded that when the number of push plates was 8, the fertilizer discharge apparatus had the best fertilizer discharge performance. The full factor test method was used to carry out the bench test of the fertilizer discharge capacity and performance of the fertilizer apparatus under the condition that the rotating speed of the conical-disc ranged from 15 r/min to 45 r/min and the opening of the fertilizer discharge port ranged from 5 mm to 25 mm. The results showed that the range of fertilizer discharge was 122~934 kg/hm², which had a high linear correlation with the rotating speed of conical-disc and the opening of fertilizer discharge port, and had the highest correlation with the rotating speed of conical-disc. The variation coefficients of consistency of double row fertilizer discharge, stability of total fertilizer discharge and uniformity of fertilizer discharge ranged from 1.01% to 3.88%, 1.05% to 3.81% and 6.64% to 15.79%, respectively. The maximum variation coefficients of consistency of double row fertilizer discharge under the inclined state of fertilizer apparatus was 6.17%. The experimental results met the requirements of paddy field side deep fertilization performance. The research result may provide a

reference for the implementation of paddy field side deep fertilization technology and the design of disc fertilizer apparatus.

Key words: push plate fertilizer apparatus; paddy; side deep fertilization

0 引言

化肥是保障农作物丰产的重要生产资料,但过度施肥造成土壤酸化板结、施肥不均匀导致农作物吸收不充分等问题^[1]。相关研究表明,精准施用化肥能够提高肥料利用率、减轻环境污染。水田侧深施肥技术可将肥料定位、定量、均匀地施于秧苗侧3.0~5.0 cm,深4.0~5.0 cm处,是最高效和环保的一种施肥方式^[2],是实现节本增效和提高作业效率的重要方法,目前已被广泛应用^[3-4]。

排肥器是侧深施肥装置的核心部件,排肥性能直接影响施肥作业的质量。目前,国内外研究的排肥器形式主要有外槽轮式、螺旋式、圆盘式等。外槽轮式排肥器是最常见的施肥装置,已进行了大量研究,如祝清震等^[5]探究了外槽轮结构参数对直槽轮排肥器排肥均匀度的影响规律,通过正交试验得出了最佳组合参数;王金峰等^[6]和杨洲等^[7]将直槽式排肥轮改进为螺旋式排肥轮,分别探究了槽轮转速与螺旋升角等对排肥均匀性和排肥量的影响;DU等^[8]设计了一种交错排列式螺旋齿排肥轮,与直槽轮的对比试验表明交错排列式螺旋齿排肥轮提高了排肥均匀性与稳定性;SUGIRBAY等^[9]设计了一种新型外槽轮结构,改善了外槽轮低转速下排肥均匀性差的现象。螺旋式排肥器是一种利用螺旋体与肥料之间产生的相对运动输送肥料的装置,陈雄飞等^[10]设计了一种两级螺旋排肥装置,建立了排肥螺旋单圈排肥量数学模型,通过试验验证了排肥装置肥量施用的准确性与稳定性。圆盘式排肥器是一种通过在水平面内旋转的刮板带动肥料运动排出的强排装置,目前只有洋马公司生产的侧深施肥装置上采用这种排肥器,可通过更换不同孔径排肥盘与调节排肥盘转速控制施肥量,具有良好的均匀性,但其结构复杂,肥量调节繁琐,长时间作业时肥料易在较小的充肥区粘结,降低排肥性能^[11-12]。现阶段水田侧深施肥装置主要采用外槽轮式,但存在低转速下脉动性强和排肥量调节范围小等问题;螺旋式排肥器因工作特性导致对肥料作用力较大,应用于水田存在一定局限性;而圆盘式排肥器具有良好的排肥均匀性,因此,设计一种圆盘式排肥器,实现排肥均匀和肥量调节稳定,可对水田侧深施肥装置性能提升起到重要支撑作用。

为满足黑龙江寒地稻作区侧深施肥农艺要求,

提高水田复杂环境下排肥器的均匀性、稳定性及肥量调节能力,本文以侧深施肥专用肥为研究对象,在保证足够充肥空间的前提下设计一种充肥流畅、排肥平稳的圆锥盘推板式双行排肥器,阐述排肥器工作原理,对主要工作部件进行理论与仿真分析,通过台架试验探究圆锥转盘转速、排肥口开度与排肥量和排肥性能之间的关系,以期水田侧深施肥装置研究与技术推广提供参考。

1 排肥器结构与工作原理

圆锥盘推板式双行排肥器主要包括:导肥箱、扰肥杆、上壳体、圆锥转盘、下壳体、挡肥叶片、调节板、锁定螺母、托板、排肥管等结构。按排肥器实际工作过程可划分为充肥区、导肥区、排肥区及过渡区4个区域,为提高工作效率,排肥器对称设置两个排肥口,因此每个区域对应分为两部分。导肥箱设置在上壳体正上方以保证两侧肥料同步下落,将转盘设计为圆锥状,有利于肥料填充,增强肥料流动性,避免肥料成拱,同时利用扰肥杆对肥料进行扰动。排肥器分解图与4个功能区域如图1所示。

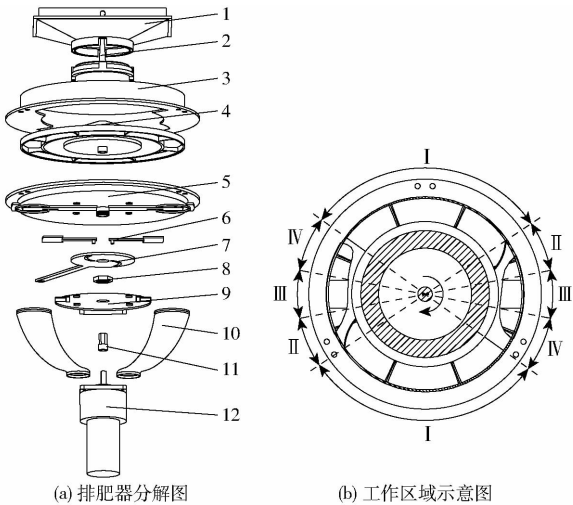


图1 排肥器结构与工作区域

Fig.1 Structure diagrams of fertilizer apparatus and working area partition

1. 导肥箱 2. 扰肥杆 3. 上壳体 4. 圆锥转盘 5. 下壳体 6. 挡肥叶片 7. 调节板 8. 锁定螺母 9. 托板 10. 排肥管 11. 传动杆 12. 电机 I. 充肥区 II. 导肥区 III. 排肥区 IV. 过渡区

圆锥盘推板式双行排肥器由电机驱动工作,肥料通过导肥箱沿顺时针旋转的圆锥转盘下滑至充肥区推板间隔内完成填充,在推板作用下进一步运动

至由上壳体弧形挡板遮挡的护肥区,于下壳体两个排肥区被推送到排肥管内,最后在外部气流作用下快速吹出完成作业。排肥量可通过转动调节板控制挡肥叶片伸出长度进而改变排肥口有效作业面积进行调节。

2 排肥器关键结构设计

2.1 圆锥转盘设计

圆锥盘推板式双行排肥器主要工作部件为圆锥转盘,其设计参数将直接影响排肥性能。圆锥转盘结构如图 2 所示。

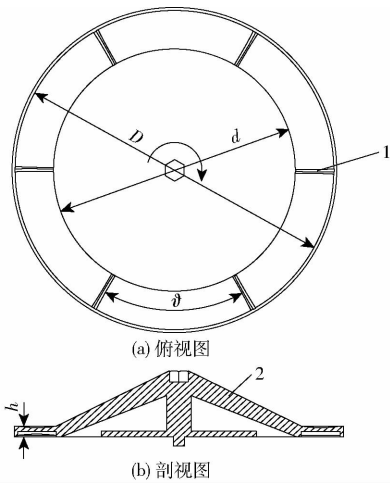


图 2 圆锥转盘结构参数示意图

Fig. 2 Structural parameter diagrams of conical-disc
1. 推板 2. 圆锥

2.1.1 排肥速率

排肥速率是排肥器设计的主要参考依据,其受肥料填充系数、排肥器结构尺寸、肥料物理特性等因素影响^[13]。为满足作业效果,需保证理论排肥速率的准确性。选取中化集团有限公司生产的水稻侧深施肥专用肥作为研究对象,测得肥料体积密度为 0.86 g/cm³,由于挡板较薄,忽略其所占体积,假设不考虑排肥时空气阻力作用,排肥速率计算式为

$$q = \frac{\pi(D^2 - d^2)h}{4} n \varphi \rho \quad (1)$$

式中 q ——排肥器排肥速率, g/min
 D ——圆锥转盘水平外径, m
 d ——圆锥转盘水平内径, m
 h ——圆锥转盘水平高度, m
 n ——圆锥转盘转速, r/min
 φ ——填充系数
 ρ ——缓释肥体积密度, g/m³

排肥器实际工作时,根据水田侧深施肥总施肥量 150 ~ 930 kg/hm² 的农艺要求,排肥速率为

$$q_n = \frac{6Q_0Lv}{Z} \quad (2)$$

式中 q_n ——农艺要求排肥速率, g/min
 Q_0 ——农艺要求水田侧深施肥量, kg/hm²
 L ——作业幅宽, m
 v ——施肥作业速度, m/s
 Z ——排肥器个数

农艺要求排肥速率与排肥器排肥速率相等,结合式(1)、(2)可得

$$Q_0 = \frac{\pi(D^2 - d^2)hn\varphi\rho Z}{24Lv} \quad (3)$$

侧深施肥排肥器通常搭载在 6 行高速插秧机上进行田间作业,常规作业速度为 1.0 ~ 1.6 m/s,作业幅宽为 1.8 m^[14-15]。插秧机机型、前进速度及肥料物理特性确定后,即 L 、 Z 、 v 、 ρ 一定,由式(3)可知,排肥量主要与 D 、 d 、 h 、 n 有关。其中转速是排肥器性能的重要影响因素,具有一定合理范围,因此在确定排肥器相关结构尺寸时,需同时兼顾圆锥转盘转速。综合考虑排肥器空间位置尺寸、肥料粒径与内外径差值从而提高肥量调节范围,确定圆锥转盘水平外径 D 为 208 mm,水平内径 d 为 158 mm,水平高度 h 为 7.5 mm。

2.1.2 圆锥转盘推板设计

推板具有扰动与推送肥料作用,可减轻肥料在圆锥转盘底部粘结堵塞现象,是排肥器主要工作部分。当每转排肥量和转速一定时,推板数量 N 不仅影响肥料在相邻推板之间的填充特性,同时决定着排肥器工作性能。

为保证排肥连续稳定,应使肥料填充流畅且任意时刻的推板推力能将肥料顺利排出。推板数量少,相邻推板间隔空间增大,肥料填充时相对移动距离增加,有利于肥料填充;同时排肥阶段肥料间流动性增强,降低了肥料与排肥器间作用力,减轻肥料破碎现象^[16]。但随着推板数量的减少,推板间隔两侧肥料运动状态差别增大,引起排肥稳定性、均匀性的变化。由于排肥器设计为双行供肥,因此设计推板数量为偶数以同步两个排肥口的排肥性能。推板任意时刻对排肥区肥料应存在肥料流向方向的分力,保证连续推送作用,即相邻两个推板夹角 $\theta \leq 90^\circ$,则推板数量 N 应满足

$$N \geq 4 \quad (4)$$

基于物料流动特性^[17],推板间隔至少满足物料颗粒等效直径的 6 倍从而达到流动物料运动条件,即

$$l_d > 6d_f \quad (5)$$

式中 l_d ——推板间隔内侧弧长, mm
 d_f ——肥料等效直径,取 3.4 mm

在满足上述条件下,减少推板数量能够提高推

板间隔内肥料流动性以及排肥连续性,因此初步设计圆锥转盘推板数量为6。

2.1.3 圆锥转盘转速

圆锥转盘转速是影响排肥器性能的主要因素之一,施肥量满足农艺要求条件下,合理的转速有利于提高排肥性能。肥料在圆锥转盘上运动过程中,相邻肥料之间存在的相互作用力 F_q 随时变化,但肥料颗粒尺寸相对较小,相邻肥料之间运动条件近似相同,对于单个颗粒所受相互作用力可近似抵消^[18],因此忽略 F_q 影响。假设肥料颗粒获得与转盘相同的角速度,不考虑空气阻力影响,肥料在圆锥转盘上任意时刻受力如图3所示。

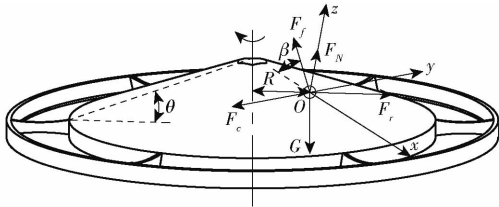


图3 肥料在圆锥转盘上的受力分析

Fig.3 Force analysis of fertilizer on conical-disc

肥料颗粒随圆锥转盘转动的同时沿锥面母线下滑,速度方向时刻改变。根据达朗贝尔原理,肥料颗粒受力方程为

$$\left\{\begin{array}{l} F_c - F_{fy} - F_{ay} = 0 \\ F_N = G\cos\theta - F_f\sin\theta \geq 0 \\ G\sin\theta + F_f\cos\theta - F_{fx} - F_{ax} = 0 \\ F_c = 2mv_r\omega\cos\theta \\ F_{fy} = F_f\sin\beta \\ F_{fx} = F_f\cos\beta \\ F_{ay} = ma_y \\ F_{ax} = ma_x \\ F_f = \mu F_N \\ G = mg \\ F_r = m\omega^2 R \\ \omega = \frac{\pi n}{30} \end{array}\right. \quad (6)$$

式中 m ——肥料颗粒质量,g
 F_c ——肥料颗粒科氏力,N
 F_N ——圆锥转盘对肥料颗粒支持力,N
 G ——肥料颗粒重力,N
 F_r ——肥料颗粒离心力,N
 F_f ——肥料颗粒摩擦力,N
 F_{fx} ——肥料颗粒 x 方向摩擦力,N
 F_{fy} ——肥料颗粒 y 方向摩擦力,N
 F_{ax} ——肥料颗粒 x 方向惯性力,N
 F_{ay} ——肥料颗粒 y 方向惯性力,N

v_r ——肥料颗粒沿 x 方向运动速度,m/s
 a_x ——肥料颗粒 x 方向加速度,m/s²
 a_y ——肥料颗粒 y 方向加速度,m/s²
 ω ——圆锥转盘角速度,rad/s
 θ ——圆锥转盘倾角,(°)
 β ——摩擦力与 x 轴夹角,(°)
 R ——肥料颗粒回转半径,m
 μ ——肥料颗粒与圆锥转盘的摩擦因数

当肥料颗粒在 x 轴正方向合力大于零时,具有沿 x 轴正方向的加速度,可增强肥料填充性能并减少填充时间^[19],即 $a_x > 0$,化简式(6),可得

$$n > \frac{30}{\pi} \sqrt{\frac{g \tan(\arctan(\mu \cos\beta) - \theta)}{R}} \quad (7)$$

肥料颗粒下滑填充过程中,应时刻与圆锥转盘接触,避免因转速过快造成肥料飞溅,即 $F_N \geq 0$,化简式(6)得

$$\omega \leq \sqrt{\frac{g \cot\theta}{R}} \leq \sqrt{\frac{g}{H}} \quad (8)$$

式中 H ——圆锥转盘高度,m

根据式(7)可知,满足 $a_x > 0$ 条件的最小转速与肥料颗粒和PLA塑料圆锥转盘之间的滚动摩擦因数 μ 、圆锥转盘倾角 θ 、摩擦力与 x 轴夹角 β 以及肥料颗粒在圆锥转盘上的回转半径有关。对于同一种肥料,转速临界值随着肥料颗粒回转半径的增大而减小,其范围由圆锥转盘倾角决定。由式(8)可知,圆锥转盘最大转速仅与高度 H 有关(圆锥转盘半径确定条件下,与圆锥转盘倾角 θ 视为同一变量)。相关研究表明,颗粒下落至锥面发生的涌动现象与下落高度和锥面倾角有关^[20],下落高度越高即相对圆锥转盘高度越低, H 过低肥料颗粒虽可以顺畅下落,但在撞击锥面动能损失后易在底部形成堆积,不利于肥料填充; H 过高导致肥料颗粒在圆锥转盘顶部卡滞堵塞,造成肥料破损的同时增加了肥料下滑时间。圆锥转盘倾角需大于肥料自然休止角^[21],根据前期试验所得肥料堆积角为 26.45° ,综合空间尺寸将圆锥转盘倾角 θ 设计为 28° ,此时圆锥转盘高度 H 为42 mm。将圆锥转盘高度 H 代入式(8)中,计算得 $\omega \leq 15.3$ rad/s,即圆锥转盘理论最大转速 n 为146 r/min。

为进一步研究圆锥转盘转速对排肥性能的影响,同时确定圆锥转盘最低转速,分别分析处于导肥阶段与排肥阶段肥料颗粒力学与运动学特性。首先对导肥区推板间隔肥料进行定性分析,如图4中区域b所示,在 y 轴方向上满足

$$F_{N2} - F_l - F_r = 0 \quad (9)$$

式中 F_l ——上层肥料颗粒的水平压力,N

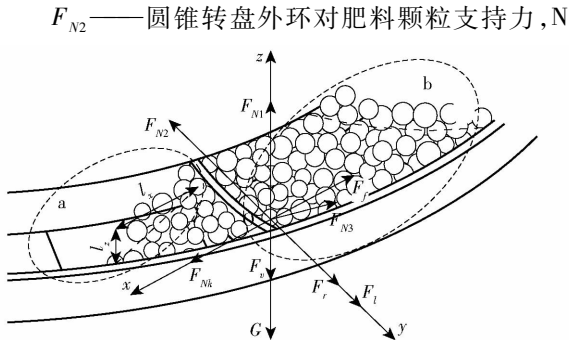


图 4 导肥、排肥过程肥料模型

Fig. 4 Fertilizer model of fertilizer guiding and discharging process

肥料在推板间隔内符合农业物料学中浅仓模型条件^[22],即

$$\begin{cases} K = \frac{F_l}{F_v} = \tan^2 \left(45^\circ - \frac{\varphi_i}{2} \right) \\ F_v = \gamma z_h \end{cases} \quad (10)$$

式中 K ——压力比

F_v ——上层肥料颗粒垂直压力, N

φ_i ——内摩擦角, ($^\circ$)

γ ——重度, kN/m^3

z_h ——肥料深度, m

结合式(9)、(10)可得

$$F_{N2} = \tan \left(45^\circ - \frac{\varphi_i}{2} \right) \gamma z_h + m \omega^2 R \quad (11)$$

由式(11)可知,圆锥转盘外环对肥料颗粒支持力与圆锥转盘转速呈正相关,正常作业时降低转速减小支持力,从而减小肥料受力、减轻圆锥转盘外侧肥料堆积现象,保证肥料颗粒在排肥区流畅下落。

如图 4 区域 a 所示,根据排肥连续性条件对该区域肥料进行运动学分析,确定圆锥转盘最慢转速。肥料离开排肥区时做平抛运动,在 xoz 平面内位移模型为

$$\begin{cases} l_x = v_k t \\ l_z = \frac{1}{2} g t^2 \\ v_k = \omega R \end{cases} \quad (12)$$

式中 l_x ——肥料颗粒横移距离, m

l_z ——肥料颗粒下落高度, m

v_k ——肥料颗粒速度, m/s

t ——肥料颗粒运动时间, s

为保证肥料连续排出,肥料颗粒下落单位颗粒直径长度时,横移距离应大于肥料单位直径长度与推板厚度(1 mm)之和的距离。将满足上述条件的各参数代入式(12),计算得 $\omega = 1.4 \text{ rad/s}$,即圆锥转盘最小转速 n 为 13 r/min。

由上述分析可知,圆锥转盘极限转速为 13 ~ 146 r/min,在此范围内降低工作转速有利于肥料流动,减轻肥料颗粒因碰撞挤压而产生的破碎现象。由式(3)可知,排肥器结构尺寸确定后,根据最大农艺施肥量要求及肥料填充系数,圆锥转盘转速达到 42 r/min 时,即可满足农艺要求的最大施肥量 $930 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 。由于施肥量随转速增加而增加,超过该转速时,施肥量超过农艺要求的最大施肥量,因此,确定圆锥转盘转速范围为 15 ~ 45 r/min。

2.2 挡肥叶片设计

按设计需求,挡肥叶片宽度与下壳体排肥口宽度应保持一致,宽度过小时,肥料颗粒以一定角速度经过排肥区会出现未及下落便被推送至过渡区的现象;宽度过大时,增加肥料颗粒在挡肥叶片上的运动时间,降低排肥稳定性,且间接减小了充肥区有效范围,影响肥料填充。图 5 为肥料在下壳体排肥口处运动分析简化图。

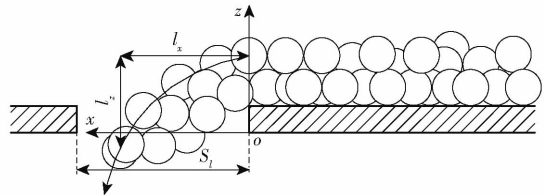


图 5 下壳体排肥口肥料运动分析

Fig. 5 Analysis of fertilizer movement at lower shell fertilizer outlet

排肥口宽度 S_l 取值由圆锥转盘最大转速决定,圆锥转盘以最大转速(45 r/min)工作时,根据运动学分析可得

$$\begin{cases} l_x = v_{\max} t \\ l_z = \frac{1}{2} g t^2 \end{cases} \quad (13)$$

式中 $v_{\max}$ ——理论最大速度, m/s

根据式(13)可得

$$l_x = v_{\max} \sqrt{\frac{2l_z}{g}} \quad (14)$$

为保证肥料颗粒能够正常排出,下壳体排肥口宽度 S_l 应大于肥料竖直方向下落圆锥转盘水平高度 h 与下壳厚度(3.5 mm)之和距离所需时间内,肥料以最大转速排出的水平位移 l_x ,将上述条件值代入式(14)可得 $l_x \approx 23.2 \text{ mm}$,综合考虑设计余量与下壳体排肥口宽度要求,将 S_l (即挡肥叶片宽度)设计为 25 mm。

2.3 排肥管设计

肥料在排肥区排出后沿排肥管滑落,利用最速降线性质设计排肥管纵向截面曲线可加速肥料下滑,缩短运动时间,最速降线参数方程为

$$\begin{cases} x=k(1-\cos\psi) \\ y=k(\psi-\sin\psi) \end{cases} \quad (15)$$

式中 k ——常数 ψ ——参变量

其中, k 是影响曲线曲率的主要参数, 根据排肥口与文丘里管入口横向相对尺寸, 确定最速曲线方程为

$$\begin{cases} x=36.5(1-\cos\psi) \\ y=36.5(\psi-\sin\psi) \end{cases} \quad (16)$$

3 离散元模型建立与仿真

为研究圆锥转盘上推板数量对圆锥盘推板式双行排肥器性能的影响规律, 确定最佳推板数量, 在理论分析基础上利用离散元软件 EDEM 2018 对设置有不同推板数量的圆锥转盘进行仿真分析。

3.1 排肥器模型建立

使用 Creo 5.0 软件建立圆锥盘推板式双行排肥器三维模型(比例 1:1), 删除肥箱及与肥料颗粒无接触部件简化仿真计算量, 其余模型以 .stl 格式导入 EDEM 软件中, 选用 merge 命令将圆锥转盘与扰肥立柱模型组合, 如图 6 所示。根据 3D 打印 PLA 材料属性设置排肥器模型属性参数^[12], 泊松比为 0.29, 剪切模量为 2.2×10^8 Pa, 密度为 $1\,110\text{ kg/m}^3$ 。

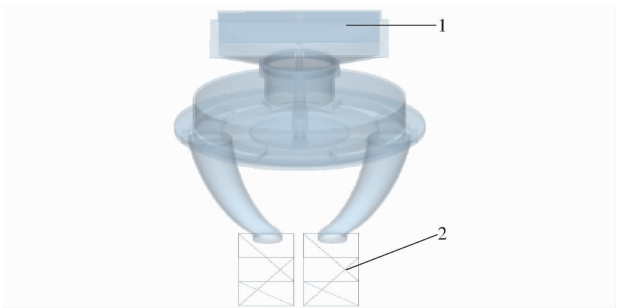


图 6 排肥器仿真模型

Fig. 6 Simulation model of fertilizer apparatus

1. 肥料生成几何体 2. 肥料收集盒

3.2 肥料模型建立与仿真参数设置

水稻侧深施肥专用肥料颗粒为类球状, 当肥料颗粒球形比大于 90% 时, 可直接选择单个球形模型进行模拟^[23], 根据前期试验与文献[14], 肥料等效直径满足正态分布规律, 肥料基本物理参数及相互接触参数如表 1 所示。

由于肥料颗粒、PLA 塑料表面无黏附作用, 接触模型均选用 Hertz - Mindlin 无滑动接触模型。为减少颗粒生成数量以节省仿真时间, 设置颗粒生成速度为 $18\,000$ 粒/s, 总生成量为 $12\,000$ 粒, 颗粒起始下落速度为 100 mm/s 。

3.3 虚拟仿真试验设计与评价方法

基于上述分析, 为确定最合适的推板数量, 根据

表 1 肥料颗粒模型物理特性及接触参数
Tab. 1 Physical characteristics and contact parameters of fertilizer particle model

参数	数值
肥料颗粒密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	1 320
肥料颗粒泊松比	0.21
肥料颗粒剪切模量/Pa	3.2×10^8
肥料颗粒等效半径/mm	1.7
肥料-肥料恢复系数	0.35
肥料-肥料静摩擦因数	0.26
肥料-肥料滚动摩擦因数	0.08
肥料- PLA 塑料恢复系数	0.42
肥料- PLA 塑料静摩擦因数	0.24
肥料- PLA 塑料滚动摩擦因数	0.06

前期仿真预试验结果, 在转速为 35 r/min 、排肥口开度为 25 mm 条件下, 开展推板数量对肥料填充特性定性分析与排肥性能定量分析的单因素影响试验, 推板数量分别设置为 4、6、8、10、12。肥料颗粒填充特性通过其在推板间隔内的动能衡量, 动能相差越大, 肥料填充越不均匀, 导致排肥性能降低。在 EDEM 模拟试验中, 为了准确表示不同推板数量对排肥性能的影响规律, 采用质量流量变异系数评价排肥性能^[24]。通过添加 Geometry Bin Group 输出每个节点的质量, 计算一段时间内所测得的肥料流量均匀性, 变异系数越大, 表明排肥器均匀性越差。

3.4 虚拟仿真过程与结果分析

在虚拟作业过程中, 设置固定时间步长为 $1.81 \times 10^{-6}\text{ s}$, 即 Rayleigh 时间步长的 20%, 总仿真时长 5.5 s , 每 0.01 s 保存一次仿真数据, 单元网格尺寸设置为颗粒平均半径的 3 倍。

3.4.1 不同推板数量对肥料填充特性的定性分析

利用 EDEM 软件后处理 Selection 模块中 Imported Geometry Bin Group 功能, 导入内径为 150 mm 、外径为 220 mm 、厚度为 9 mm 、圆心角为 100° 的 .stl 格式模型文件监测一侧充肥区肥料的动能分布情况, 添加 Clipping Planes 以便直观显示仿真结果。在排肥器达到稳定工作状态后, 截取不同推板数量的圆锥转盘任一推板转至距离导肥区相同位置时充肥区的动能分布图, 如图 7 所示。

由图 7 可知, 在圆锥转盘转速一定时, 推板数量对肥料填充特性有明显影响(图中蓝色、绿色、红色代表肥料颗粒动能依次增加)。当推板数量为 4 时, 单个推板间隔内临近排肥区一端肥料动能小于远端动能的现象明显, 且区域 I 内靠近推板处存在肥料填充空隙, 影响排肥性能; 推板数量从 4 增至 12 过程中, 单个推板间隔内肥料颗粒动能逐渐趋于一致, 表明肥料颗粒状态相对稳定, 分布逐渐均匀;

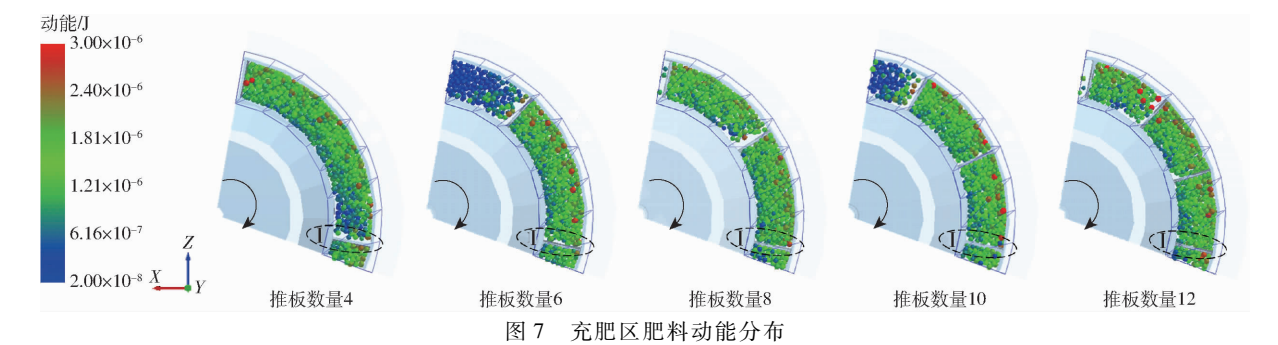


Fig. 7 Distributions of fertilizer kinetic energy in fertilizer filling area

当推板数量大于等于 8 时,区域 I 内肥料填充空隙消失,证明肥料具有较好的填充特性。分析产生上述结果原因:当推板数量较少时,推板间隔变大,肥料虽易填充,但肥料之间所传递的推板作用力降低,造成间隔两端肥料分布不均,与前述理论分析一致。

3.4.2 推板数量对排肥性能的定量分析

不同推板数量对肥料质量流量变异系数影响如图 8 所示,两个排肥口肥料质量流量变异系数随推板数量的增加均呈先减小后增大的变化规律,表明推板数量过少或过多均会降低排肥作业性能,在推板数量为 8 时同时取得最小值,且排肥口 1 与排肥口 2 变异系数差值最小,证明当推板数量为 8 时排肥器具有最佳工作性能。

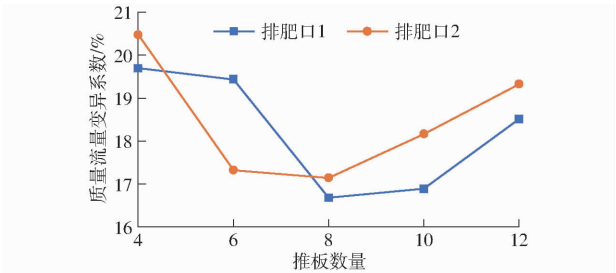


图 8 不同推板数量下排肥性能变化曲线

Fig. 8 Change curves of fertilizer discharge performance under different numbers of push plates

综合推板数量对肥料填充特性及质量流量变异系数影响规律,最终确定推板数量 8 作为圆锥转盘最佳结构参数。

4 圆锥盘推板式排肥器台架试验

4.1 试验条件

基于上述圆锥转盘参数优化结果,以中化集团有限公司生产的水稻侧深施肥专用肥为试验材料,于东北农业大学排种实验室,应用 JPS-12 型排种器性能检测试验台进行排肥器性能试验。排肥器整体结构由 3D 打印机加工成型,除施肥系统主要装置外,试验仪器有电子秤精度 0.01 g 和肥料收集毛刷,台架试验装置如图 9 所示。

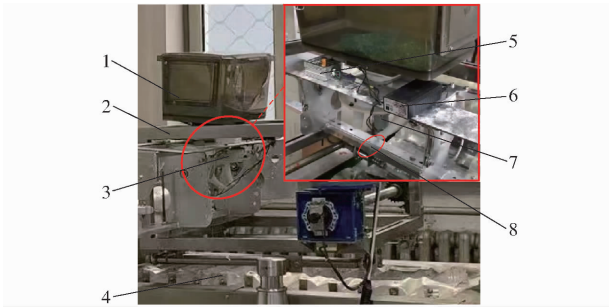


图 9 施肥系统台架试验装置

Fig. 9 Fertilization system bench test

1. 肥箱 2. 系统台架 3. 圆锥盘推板式双行排肥器 4. 肥料收集袋 5. 调速器 6. 锂电池 7. 直流电机 8. 肥料

4.2 试验指标与测定方法

施肥试验时,采用两因素试验方法,以圆锥转盘转速和排肥口开度为试验因素,因素水平如表 2 所示。以平均排肥量 y_1 、双行排肥量一致性变异系数 y_2 、总排肥量稳定性变异系数 y_3 、排肥均匀性变异系数 y_4 为试验指标,分别研究排肥量、排肥稳定性、均匀性变异系数与圆锥转盘转速、排肥口开度之间的线性关系。参照文献[25]进行各项性能试验与测定。排肥均匀性测定为动态试验,由于胶带加速到 1 m/s 需要一定时间,因此,试验时待胶带运行稳定后将间隔为 100 mm、长度为 4 000 mm 的肥料收集袋放置于传送带上,直至其完全通过排肥器下方时停止胶带转动,收集测量各间隔内肥料质量后仅将后 30 段间隔数据用于排肥均匀性变异系数的计算;其余性能试验单次测试时间为 10 s^[24],排出的肥料收集在一个收集袋中,并在电子秤上称量。

表 2 试验因素与水平

Tab. 2 Test factors and levels

水平	因素	
	转速 $x_1/(r \cdot \min^{-1})$	开度 x_2/mm
1	15	5
2	25	10
3	35	15
4	45	20
5		25

4.3 试验结果与分析

试验设计与收集计算后所得各指标如表 3 所示。

表 3 试验设计与结果					
Tab.3 Experimental design and results					
因素		指标			
$x_1/(r \cdot \min^{-1})$	x_2/mm	y_1/g	$y_2/\%$	$y_3/\%$	$y_4/\%$
15	5	36.56	3.03	2.67	15.79
	10	73.88	2.23	2.28	13.82
	15	118.55	1.03	2.19	9.92
	20	163.15	3.79	3.81	11.95
	25	176.15	2.31	3.52	9.73
25	5	55.98	1.34	2.32	13.27
	10	115.96	2.51	2.17	11.08
	15	184.77	2.61	1.78	8.53
	20	245.94	3.11	3.04	10.81
	25	277.42	1.82	2.85	7.45
35	5	66.24	2.01	2.15	10.36
	10	156.38	1.01	1.70	9.07
	15	235.87	2.49	1.36	7.86
	20	323.38	2.51	2.32	7.15
	25	367.91	2.73	2.37	6.64
45	5	72.57	3.88	3.07	11.95
	10	185.11	2.32	1.29	8.58
	15	284.29	1.42	1.05	7.37
	20	384.05	2.08	1.98	7.09
	25	448.27	2.20	2.01	6.97

4.3.1 排肥量相关性

对不同条件下排肥器单侧平均排肥量进行线性拟合,建立了排肥量 y_1 与圆锥转盘转速 x_1 、排肥口开度 x_2 的回归方程。分别计算不同条件下的决定系数 R^2 ,对相应线性关系进行分析,结果如表 4、5 所示,相应散点图如图 10、11 所示。

表 4 不同开度排肥量与转速回归方程及决定系数
Tab.4 Regression equation and determination coefficient between fertilizer discharge and rotating speed at different openings

开度/mm	回归方程	R^2
5	$y_1 = 1.5129x_1 + 15.7005$	0.9903
10	$y_1 = 3.7411x_1 + 20.5995$	0.9930
15	$y_1 = 5.4832x_1 + 41.3740$	0.9942
20	$y_1 = 6.1714x_1 + 76.2380$	0.9892
25	$y_1 = 9.1185x_1 + 41.1325$	0.9992

由表 4 与图 10 可知,排肥口处于不同开度排肥量与转速之间均呈良好的线性关系,排肥量随转速的增加而增加,转速与排肥量拟合的线性决定系数 R^2 随排肥口开度增加整体呈上升趋势,说明排肥量与转速的线性相关性增强,最小值为 0.989 2,最大

表 5 不同转速排肥量与开度回归方程及决定系数
Tab.5 Regression equation and determination coefficient between fertilizer discharge and opening at different speeds

转速/($r \cdot \min^{-1}$)	回归方程	R^2
15	$y_1 = 7.3690x_2 + 3.1230$	0.9763
25	$y_1 = 11.4572x_2 + 4.1560$	0.9866
35	$y_1 = 15.2668x_2 + 2.3540$	0.9888
45	$y_1 = 18.7268x_2 - 5.0440$	0.9936

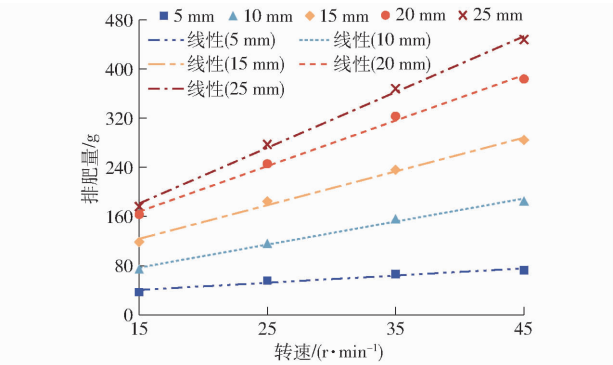


图 10 不同开度排肥量与转速关系曲线
Fig.10 Relationship curves between fertilizer discharge and rotational speed at different opening degrees

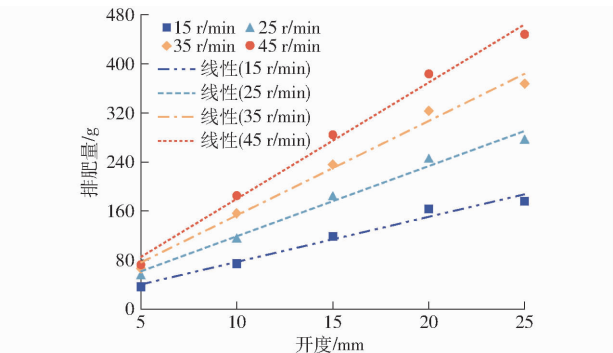


图 11 不同转速排肥量与开度关系曲线
Fig.11 Relationship curves between fertilizer discharge and opening at different rotational speeds

值为 0.999 2。因此,可通过调节圆锥转盘转速调节排肥量。图 10 显示在不同开度下,试验点在低转速时位于拟合曲线下,随着转速的增加沿拟合曲线向上移动最后下降,但浮动范围较小。分析原因为随着转速的增加,推板间隔内肥料的填充系数降低,导致排肥量变化。

由表 5 与图 11 可知,不同圆锥转盘转速下排肥量与排肥口开度均呈良好的线性关系,排肥量随开度的增加而增加,排肥口开度与排肥量拟合的线性决定系数 R^2 随转速的增加整体呈上升趋势,说明排肥量与排肥口开度的线性相关性增强,最小值为 0.976 3,最大值为 0.993 6,因此也可通过调节排肥口开度调节排肥量,但其决定系数普遍低于排肥量与转速之间的决定系数,说明通过调节转速可更精确调节肥量。图 11 显示在不同转速下,试验点均呈

现排肥口开度小时位于拟合曲线下方,随着开度的增加沿拟合曲线向上移动最后下降的趋势;在开度为 20 mm 时,试验点偏移量最大,结合上述排肥量与转速试验结果,分别如表 4 与图 10 所示, $x_2 = 20$ mm 时,决定系数 R^2 最小,且拟合曲线偏离开度为 25 mm 一侧,分析原因为随着排肥口开度的增加,挡肥叶片有效工作面积逐渐减小,上方流过的肥料颗粒塌陷现象逐渐增强^[26],导致肥料排出量多于理论值,直至排肥口处于完全工作状态。

综合排肥量试验结果,排肥器转速为 15 ~ 45 r/min,排肥口为 5 ~ 25 mm 调节范围内,排肥量范围为 122 ~ 934 kg/hm²,可满足机具常规作业速度 1.0 ~ 1.6 m/s 时农艺要求 150 ~ 930 kg/hm² 的施肥量。

4.3.2 排肥器性能参数

在 Design-Expert 6.0.10 软件中对排肥器性能试验结果进行多因素分析。

圆锥转盘转速和排肥口开度对双行排肥量一致性变异系数 y_2 影响不显著,结果如图 12 所示。由图 12 可知, y_{2max} 为 3.88%, y_{2min} 为 1.01%,最大值满足文献[25]中各行排肥量一致性变异系数小于等于 13% 的要求。

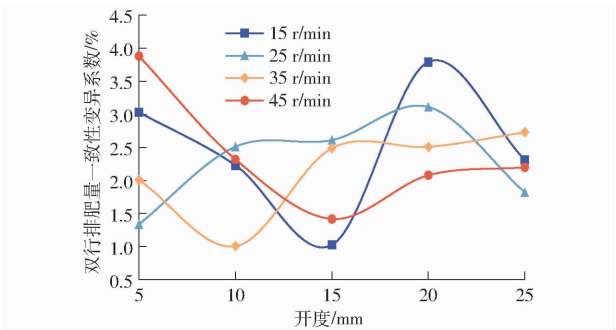


图 12 双行排肥量一致性变异系数变化曲线
Fig.12 Variation curves of variation coefficients of consistency of double row fertilizer discharge

由于水田作业环境复杂,排肥器无法始终保证水平作业状态,导致两个排肥口排肥量存在差异,因此进行排肥器在一定倾角下的双行排肥量一致性试验。根据水田搅浆平整地后高度差与东北地区常用插秧机轮距计算排肥器最大倾角为 2.39°,结合上述排肥量模型试验结果,开展满足常规水田施肥量、排肥器倾斜 3°条件下的排肥量试验,试验结果如表 6 所示。由表 6 可知,排肥器倾斜时双行排肥量一致性变异系数相比平时均有增加,转速为 25 r/min、开度为 15 mm 时双行一致性变异系数最大,为 6.17%,满足排肥质量要求。

对总排肥量稳定性变异系数 y_3 进行方差分析,结果表明圆锥转盘转速与排肥口开度对试验指标有

表 6 排肥器倾斜状态下双行排肥量一致性变异系数试验结果
Tab.6 Test results of variation coefficients of consistency of double row fertilizer discharge under inclined state of fertilizer apparatus

$x_1/(r \cdot \min^{-1})$	x_2/mm	$y_2/\%$
25	5	2.75
	15	6.17
	25	2.49
35	5	3.68
	15	4.84
	25	3.31

显著影响($P < 0.01$),曲线拟合得到转速和排肥口开度对总排肥量稳定性变异系数的回归方程为

$$y_3 = 2.9702 + 0.00961x_1 - 0.11345x_2 + 0.00755x_2^2 - 0.00297x_1x_2 \quad (17)$$

在试验范围内,基于 Design-Expert 6.0.10 软件中 Optimization 模块,获取总排肥量稳定性变异系数的最大值,即转速为 15 r/min、排肥口开度为 25 mm 时, y_{3max} 为 3.88%,与试验所得 3.52% 相差较小,满足文献[25]中总排肥量稳定性变异系数小于等于 7.8% 的要求。

对排肥均匀性变异系数 y_4 进行方差分析,结果表明圆锥转盘转速与排肥口开度对试验指标有显著影响($P < 0.01$),回归方程为

$$y_4 = 25.77367 - 0.51341x_1 - 0.85742x_2 + 0.005425x_1^2 + 0.014736x_2^2 + 0.00519x_1x_2 \quad (18)$$

在试验范围内,当转速为 15 r/min、排肥口开度为 5 mm 时, y_{4max} 为 15.76%,与试验所得 15.79% 相差较小,满足文献[25]中排肥均匀性变异系数小于等于 40% 的要求。

5 结论

(1) 针对黑龙江省寒地水田侧深施肥农艺要求,设计了一种圆锥盘推板式侧深施肥排肥器,对其工作原理进行阐述,建立了圆锥转盘单圈排肥量数学模型,分析确定了排肥器相关结构参数,通过运动学与力学模型建立得出圆锥转盘转速是影响排肥效果的关键因素,确定转速为 15 ~ 45 r/min。

(2) 通过离散元仿真技术探究推板数量对肥料填充特性与排肥性能的影响规律,结合理论分析确定推板数量为 8 时,具有最佳排肥性能。

(3) 台架试验结果表明,排肥量与圆锥转盘转速和排肥口开度均具有良好的线性关系,与圆锥转盘转速相关性更强,排肥量范围在 122 ~ 934 kg/hm² 之间;圆锥转盘转速和排肥口开度对总排肥量稳

定性变异系数与排肥均匀性变异系数有显著影响,对双行排肥量一致性变异系数影响不显著,变异系数最大值分别为3.81%、15.79%、3.88%,倾斜状态下双行排肥量一致性变异系数最大值为6.17%,满足水田侧深施肥排肥量与排肥性能要求。

参 考 文 献

- [1] 唐汉,王金武,徐常塑,等. 化肥减施增效关键技术研究进展分析[J]. 农业机械学报,2019,50(4):1-19.
TANG Han,WANG Jinwu,XU Changsu,et al. Research progress analysis on key technology of chemical fertilizer reduction and efficiency increase[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2019,50(4):1-19. (in Chinese)
- [2] 黄恒,姜恒鑫,刘光明,等. 侧深施氮对水稻产量及氮素吸收利用的影响[J]. 作物学报,2021,47(11):2232-2249.
HUANG Heng,JIANG Hengxin,LIU Guangming,et al. Effects of side deep placement of nitrogen on rice yield and nitrogen use efficiency[J]. Acta Agronomica Sinica,2021,47(11):2232-2249. (in Chinese)
- [3] 王晓丹,向镜,张玉屏,等. 水稻机插同步侧深施肥技术进展及应用[J]. 中国稻米,2020,26(5):53-57.
WANG Xiaodan,XIANG Jing,ZHANG Yuping,et al. Research advances and application of rice mechanized transplanting with side deep fertilization technology[J]. China Rice,2020,26(5):53-57. (in Chinese)
- [4] 陈雄飞,罗锡文,王在满,等. 水稻六播同步侧位深施肥技术试验研究[J]. 农业工程学报,2014,30(16):1-7.
CHEN Xiongfei,LUO Xiwen,WANG Zaiman,et al. Experiment of synchronous side deep fertilizing technique with rice hill-drop drilling[J]. Transactions of the CSAE,2014,30(16):1-7. (in Chinese)
- [5] 祝清震,武广伟,陈立平,等. 槽轮结构参数对直槽轮式排肥器排肥性能的影响[J]. 农业工程学报,2018,34(18):12-20.
ZHU Qingzhen,WU Guangwei,CHEN Liping,et al. Influences of structure parameters of straight flute wheel on fertilizing performance of fertilizer apparatus[J]. Transactions of the CSAE,2018,34(18):12-20. (in Chinese)
- [6] 王金峰,高观保,翁武雄,等. 水田侧深施肥装置关键部件设计与试验[J]. 农业机械学报,2018,49(6):92-104.
WANG Jinfeng,GAO Guanbao,WENG Wuxiong,et al. Design and experiment of key components of side deep fertilization device for paddy field[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2018,49(6):92-104. (in Chinese)
- [7] 杨洲,朱卿创,孙健峰,等. 基于 EDEM 和 3D 打印成型的外槽轮排肥器排肥性能研究[J]. 农机化研究,2018,40(5):175-180.
YANG Zhou,ZHU Qingchuang,SUN Jianfeng,et al. Study on the performance of fluted roller fertilizer distributor based on EDEM and 3D printing[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research,2018,40(5):175-180. (in Chinese)
- [8] DU J,YANG Q,XIA J,et al. Discrete element modeling and verification of an outer groove wheel fertilizer applicator with helical teeth[J]. Transactions of the ASABE,2020,63(3):659-665.
- [9] SUGIRBAY A M,ZHAO J,NUKESHEV S O,et al. Determination of pin-roller parameters and evaluation of the uniformity of granular fertilizer application metering devices in precision farming[J]. Computers and Electronics in Agriculture,2020,179:105835.
- [10] 陈雄飞,罗锡文,王在满,等. 两级螺旋排肥装置的设计与试验[J]. 农业工程学报,2015,31(3):10-16.
CHEN Xiongfei,LUO Xiwen,WANG Zaiman,et al. Design and experiment of fertilizer distribution apparatus with double-level screws[J]. Transactions of the CASE,2015,31(3):10-16. (in Chinese)
- [11] 王金峰,高观保,王金武,等. 叶片调节式水田侧深施肥装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2018,49(3):68-76.
WANG Jinfeng,GAO Guanbao,WANG Jinwu,et al. Design and test of adjustable blades side deep fertilizing device for paddy field[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2018,49(3):68-76. (in Chinese)
- [12] 邓文军. 水稻侧深施肥技术的试验与分析——以洋马 2FC-6 型侧深施肥机为例[J]. 现代农机,2019(6):40-42.
- [13] 刘洪男,李陶,赵何跃,等. 气送式集中排肥器螺旋排肥装置的改进与试验[J]. 中国农业大学学报,2021,26(8):150-161.
LIU Hongnan,LI Tao,ZHAO Heyue,et al. Design and experiment of screw-type feeding device of air-assisted centralized fertilizer application device[J]. Journal of China Agricultural University,2021,26(8):150-161. (in Chinese)
- [14] 王金峰,尚文虎,翁武雄,等. 圆盘顶出式水田侧深施肥装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2021,52(6):62-72.
WANG Jinfeng,SHANG Wenhui,WENG Wuxiong,et al. Design and experiment of disc ejection type paddy field side deep fertilization device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2021,52(6):62-72. (in Chinese)
- [15] 王密盛. 井关 PZ60 乘坐式高速水稻插秧机的结构、使用、保养及故障排除[J]. 农机使用与维修,2021(3):109-111.
- [16] 肖文立,廖宜涛,单伊尹,等. 油菜直播机四头螺旋双行排肥器设计与试验[J]. 农业机械学报,2021,52(11):68-77.
XIAO Wenli,LIAO Yitao,SHAN Yiyin,et al. Design and experiment of quad-screw double-row fertilizer apparatus for rape seeding machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2021,52(11):68-77. (in Chinese)
- [17] 洪致育,林良明. 连续运输机[M]. 北京:机械工业出版社,1981.
- [18] 杨诚,尚书旗,杨然兵,等. 锥体离心式排种装置理论研究[J]. 农机化研究,2015,37(6):63-66.
YANG Cheng,SHANG Shuqi,YANG Ranbing,et al. Theoretical study on the cone-centrifugal seed metering device[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research,2015,37(6):63-66. (in Chinese)
- [19] 王方艳,孙光全,张钦. 电控锥盘式蔬菜播种机设计与试验[J]. 农业机械学报,2021,52(4):70-79.
WANG Fangyan,SUN Guangquan,ZHANG Qin. Design and experiment of electric control cone type vegetable seeder[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2021,52(4):70-79. (in Chinese)

[29] 杨海波. 弹性与塑性力学简明教程[M]. 北京:清华大学出版社,2011.

[30] 蒙建国,王春光,谢胜仕,等. 马铃薯恢复系数测定试验分析[J]. 中国农业大学学报,2017,22(9):93-100.
MENG Jianguo, WANG Chunguang, XIE Shengshi, et al. Measurements test analysis of potato restitution coefficient[J]. Journal of China Agricultural University, 2017, 22(9): 93-100. (in Chinese)

[31] 王相友,张蒙,李学强,等. 辊式导流马铃薯定重装袋机设计与试验[J]. 农业机械学报,2021,52(6):159-168.
WANG Xinagyou, ZHANG Meng, LI Xueqiang, et al. Design and text of roller-guided potato fixed weight bagging machine [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(6): 159-168. (in Chinese)

[32] 蒙建国. 摆动分离筛薯土分离过程中马铃薯运动特性研究[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学,2016.
MENG Jianguo. Study of kinetic characteristic during potato and soil separation on the swing separation screen[D]. Huhhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2016. (in Chinese)

[33] 谢胜仕,王春光,邓伟刚. 马铃薯碰撞损伤试验与碰撞加速度特性分析[J]. 中国农业大学学报,2020,25(1):163-169.
XIE Shengshi, WANG Chunguang, DENG Weigang. Collision damage test and acceleration characteristic analysis of potato [J]. Journal of China Agricultural University, 2020, 25(1): 163-169. (in Chinese)

[34] 魏忠彩,李洪文,苏国梁,等. 缓冲筛式薯杂分离马铃薯收获机研制[J]. 农业工程学报,2019,35(8):1-11.
WEI Zhongcai, LI Hongwen, SU Guoliang, et al. Development of potato harvester with buffer type potato-impurity separation sieve[J]. Transactions of the CSAE,2019, 35(8): 1-11. (in Chinese)

[35] 中国农业机械化科学研究院. 农业机械设计手册[M]. 北京:中国农业技术出版社,2007.

[36] XU Rui, TAKEDA F, KREWER G, et al. Measure of mechanical impacts in commercial blueberry packing lines and potential damage to blueberry fruit[J]. Postharvest Biology & Technology, 2015, 110: 103-113.

[37] 孙术发,任春龙,李涛,等. 基于履带式底盘的改进型森林消防车通过性[J]. 农业工程学报,2018,34(17):61-67.
SUN Shufa, REN Chunlong, LI Tao, et al. Trafficability analysis of improved forest fire engine based on crawler chassis[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(17): 61-67. (in Chinese)

[38] 张拓. 小型山地履带底盘行驶性能仿真分析及试验研究[D]. 重庆:重庆理工大学,2019.
ZHANG Tuo. Design and simulation of small crawler chassis for mountain areas[D]. Chongqing: Chongqing University of Technology, 2019. (in Chinese)

[39] 吉旭,唐勇,林蜀云,等. 山地履带自走式辣椒收获机底盘动力学仿真与试验[J]. 中国农机化学报,2022,43(7):72-80.
JI Xu, TANG Yong, LIN Shuyun, et al. Dynamic simulation and test of the tracked chassis of the mountainous self-propelled pepper harvester[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2022, 43(7): 72-80. (in Chinese)

[40] 张兆国,王海翼,李彦彬,等. 多级分离缓冲马铃薯收获机设计与试验[J]. 农业机械学报,2021,52(2):96-109.
ZHANG Zhaoguo, WANG Haiyi, LI Yanbin, et al. Design and experiment of multi-stage separation buffer potato harvester [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(2): 96-109. (in Chinese)

[41] 魏忠彩,苏国梁,李学强,等. 基于离散元的马铃薯收获机波浪形筛面参数优化与试验[J]. 农业机械学报,2020, 51(10):109-122.
WEI Zhongcai, SU Guoliang, LI Xueqiang, et al. Parameter optimization and test of potato harvester wavy sieve based on EDEM[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(10): 109-122. (in Chinese)

(上接第 62 页)

[20] 任文涛,董滨,崔红光,等. 水稻种子与斜面碰撞后运动规律的试验[J]. 农业工程学报,2009,25(7):103-107.
REN Wentao, DONG Bin, CUI Hongguang, et al. Experiment on the motion characteristics of rice seeds after collision with different slopes[J]. Transactions of the CSAE,2009,25(7):103-107. (in Chinese)

[21] 刘彩玲,张福印,都鑫,等. 水平涡轮叶片式精量排肥器设计与试验[J]. 农业机械学报,2020,51(增刊1):165-174.
LIU Cailing, ZHANG Fuyin, DU Xin, et al. Design and experiment of precision fertilizer distribution mechanism with horizontal turbine blades[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51 (Supp. 1): 165-174. (in Chinese)

[22] 都鑫,刘彩玲,姜萌,等. 倾斜梯形孔式穴施肥排肥器设计与试验[J]. 农业机械学报,2021,52(9):43-53.
DU Xin, LIU Cailing, JIANG Meng, et al. Design and experiment of inclined trapezoidal hole fertilizer point-applied discharging device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2021,52(9):43-53. (in Chinese)

[23] LIU J S, GAO C Q, NIE Y J, et al. Numerical simulation of fertilizer shunt-plate with uniformity based on EDEM software[J]. Computers and Electronics in Agriculture,2020,178(10):105737.

[24] CHEN H, ZHENG J, LU S, et al. Design and experiment of vertical pneumatic fertilization system with spiral Geneva mechanism[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering,2021,14(4):10.

[25] NY/T 1003—2006 施肥机械质量评价技术规范[S]. 2006.

[26] ZHA Xiantao, ZHANG G, HAN Y, et al. Structural optimization and performance evaluation of blocking wheel-type screw fertilizer distributor[J]. Agriculture,2021,11(3):248.