

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2022.10.008

滑槽回转式水田侧深施肥装置设计与试验

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

摘要: 针对现有施肥机械出现的堆积堵塞、肥量调节困难以及施肥均匀性差的问题,设计了一种易于调节肥量、挡板推肥防堵塞的侧深施肥装置,阐述了该装置工作原理,参考水田侧深施肥农艺要求和插秧机空间结构,确定了施肥装置基本结构参数;对侧深施肥装置工作过程进行理论分析,确定了影响装置施肥性能的工作参数主要为排肥圆盘转速和肥槽高度;利用 EDEM 离散元仿真软件建立滑槽回转式施肥装置仿真模型,探究了排肥圆盘转速和肥槽高度对施肥装置充肥和排肥效果的影响,确定了排肥圆盘的最佳工作转速为 10 ~ 50 r/min;为验证施肥性能,通过台架试验对滑槽回转式水田侧深施肥装置进行试验研究,获得了排肥圆盘转速、肥槽高度对施肥稳定性影响规律和排肥圆盘转速、插秧机速度对施肥均匀性影响规律,各指标均满足国家施肥作业机械标准;通过与常见施肥结构装置进行对比,证明滑槽回转式水田侧深施肥装置在一定程度上提高了施肥均匀性。

关键词: 侧深施肥; 排肥装置; 水田; 滑槽回转式

中图分类号: S224.21 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2022)10-0076-10 OSID: 

Design and Experiment of Chute Rotary Side Deep Fertilizing Device in Paddy Field

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

Abstract: Fertilizer is the key factor for increasing rice yield, and solves accumulation blockage, difficulty in regulating fertilizer amount and poor uniformity of fertilization in the existing fertilization machinery, and a side deep fertilizing device which was easy to adjust the amount of fertilizer and prevent blockage was designed, referring to the agronomic requirements of side deep fertilization in paddy field and structure of transplanter, and the basic structural parameters of the device were determined. Through theoretical analysis, the working process of the device was explored, with simulation software, the effects of fertilizer discharge disc speed and fertilizer tank height on fertilizer filling and discharging were investigated, the optimum operating speed range of fertilizer discharge disc was 10 ~ 50 r/min. Through bench test, the effects of fertilizer discharge disc speed and fertilizer tank height on fertilization stability and the effects of fertilizer discharge disc speed and transplanter speed on fertilization uniformity were obtained, the fertilization results met the national standards, and the fertilization uniformity was improved to a certain extent compared with the fertilization machinery on the market. With field test operation, the operation effect met the agronomic requirements. The research designed a kind of fertilizing device which was easy to regulate the fertilizer amount, anti-blocking device with uniform fertilization, provided a reference for the operation of the side deep fertilizing device for paddy field.

Key words: side deep fertilization; fertilizer discharging device; paddy field; chute rotary

收稿日期: 2021-11-01 修回日期: 2022-01-17
基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFD2000605-2)、财政部和农业农村部:国家现代农业产业技术体系岗位科学家项目(CARS-01-44)和黑龙江省现代农业产业技术协同创新体系岗位专家项目
作者简介: 王金峰(1981—),男,教授,博士生导师,主要从事田间机械研究,E-mail: jinfeng_w@126.com
通信作者: 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: jinwu@163.com

0 引言

水稻丰产离不开科学的施肥方式,利用人工或机械等将肥料颗粒抛撒在土壤表面的传统施肥方式存在劳动强度大、施肥量不均、植株养分吸收不一致的问题,导致水稻产量下降,同时肥料随水田排水而流失降低了肥料利用率,造成环境污染^[1-2]。侧深施肥技术是将水稻生长所需肥料匀实地施入相应的水稻幼苗根系位置,减少作业次数,提高水稻产量和肥料利用效率,同时减少水体污染^[3-6]。

侧深施肥装置作为侧深施肥作业的专用机械,国外经过多年的发展已经开展较大规模的应用。日本多数企业的侧深施肥机主要采用直槽轮排肥装置,该结构制造简单、安装方便、可直接通过转速来调节肥量。部分企业采用圆盘式排肥器,通过更换肥料盘对施肥量进行调整,操作相对繁琐,施肥较为稳定均匀。国内在 20 世纪 80 年代从日本引进了水田机械,经过多年的研发,水稻生产机械化提升显著,目前与之配套的侧深施肥机械在市场上仍以进口或仿制成熟的国外产品为主^[7-9],国内相关科研机构也开始进行相关研究并取得了一定的成果。位国建等^[10]研制了水田机械式强制排肥装置,通过螺旋输送器进行强制排肥,相比于槽轮作为核心结构的装置肥料不易堵塞;王金武等^[11]研制了一款水稻精量穴直播机电驱式侧深穴施肥装置,采用穴施的方式进行施肥,避免了肥料过量使用,对水田环境的不利影响降低;王金峰等^[12]研制的圆盘顶出式水田侧深施肥装置,采用凸轮机构将肥料强制顶出,该装置提高了施肥均匀性,减少了肥料雍堵现象。虽然国内侧深施肥机械研究已经取得一定进展,但仍存在难以排出潮解或粉末状肥料、易堵塞、施肥均匀性低、施肥量调节困难等问题。

针对上述问题,本文采用滑槽引导进行推肥的工作结构,通过调节螺母调节肥槽高度来改变施肥量,对排肥装置关键部件进行设计和分析,确定各项参数,通过仿真试验分析肥料运动过程,并对装置进行台架和田间试验验证施肥性能,以期解决肥料堵塞、肥量调节困难及施肥均匀性差等问题,为水田施肥作业提供新的方案。

1 侧深施肥装置结构与工作原理

在实际作业中,侧深施肥与插秧作业同步进行,可减少作业次数,因此施肥装置通常安装于插秧机之上,由肥箱、滑槽回转式排肥器、驱动电机、支架、风力输送系统组成,肥箱固定在支架上方,配套的供肥箱由 3 个相通的子肥箱组成,3 个驱动电机并列

安装在支架上,排肥器与肥箱下接口连接,支架通过螺栓可与不同品牌的插秧机固接配套使用,如图 1 所示。

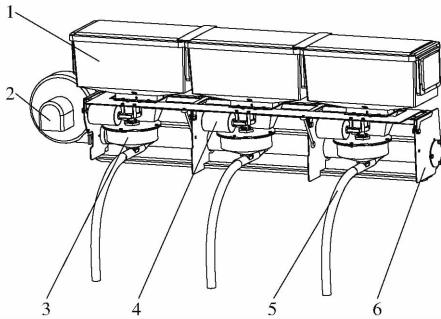


图 1 侧深施肥装置示意图

Fig. 1 Diagram of side deep fertilizing device

1. 肥箱 2. 风力输送系统 3. 滑槽回转式排肥器 4. 驱动电机
5. 输肥管 6. 支架

本文的侧深施肥装置工作原理为电机驱动使其回转,在滑槽引导下将肥料推离肥槽,并通过重力和气流进行输送,需要调节施肥量时,旋转壳体上方的调节螺母将底板升高改变肥槽高度来完成调肥,无需对装置进行拆卸,提高了工作效率,且无论何种状态的肥料均会被推出,不会在排肥器中堆积影响后续施肥。

2 侧深施肥装置排肥组件设计

2.1 排肥装置基本结构与工作原理

该装置主要由上接口、上壳体、排肥圆盘、传动轴、毛刷、前后挡板、肥量调节轴、调节螺母、底板、下壳体等组成,如图 2 所示。

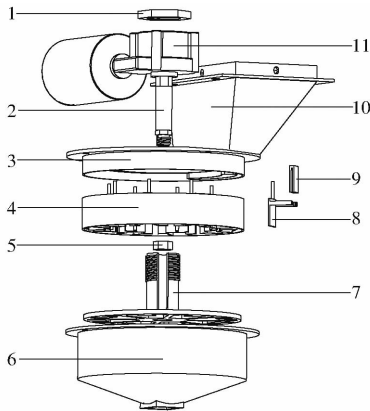


图 2 排肥装置分解图

Fig. 2 Diagram of dismantling fertilizer device

1. 调节螺母 2. 传动轴 3. 上壳体 4. 排肥圆盘 5. 锁紧螺母
6. 下壳体 7. 底板 8. 前挡板 9. 后挡板 10. 上壳体 11. 电机

由图 2 可知,其中调肥结构由肥量调节轴、调节螺母、底板组成。该装置通过螺栓安装于肥箱的下方,上接口安装在肥箱下方的支架上,与上壳体固

接,驱动电机安装在支架上,与传动轴连接,排肥圆盘通过固定螺母固定在传动轴上,推肥装置与排肥圆盘的插槽配合均插在圆盘一周,上下壳体通过螺栓锁紧,开设在下壳体底部的落肥口连接文丘里管和风送系统。

田间作业时,调节施肥量完毕后装入肥料颗粒,肥箱内的肥料从下方开口处落入排肥圆盘中,之后电机启动同时带动排肥器的排肥圆盘旋转,排肥圆盘上的排肥装置与上壳体的弧形滑槽接触并沿着滑槽运动,肥料被推出肥槽并在重力的作用下落入下方的三通管中,通过气力输送系统将肥料排出,已经完成推肥的推肥装置继续沿滑槽运动,在滑槽的引导下回到原位置,同时在上一个推肥装置完成排肥的瞬间下一个推肥装置会紧接着开始工作,保证了施肥的均匀性。

2.2 排肥装置主要参数设计

目前市场上常见的槽轮式排肥器由于存在槽脊结构,作业时排肥均匀性低,脉动现象严重,潮湿的肥料粉末黏附在凹槽上使其失去排肥功能导致堵塞^[13-14]。为解决以上问题设计了一种通过滑槽引导推肥装置强制排肥的侧深施肥装置,避免了肥料黏附在肥槽内,各推肥装置连续作业,保证排肥的连续性和均匀性。对其结构参数进行设计保证其排肥性能。

本文侧深施肥装置主要应用于北方寒地稻作区,为了适应黑龙江省不同的水稻品种和种植条件,施肥量需在 150~930 kg/hm² 范围内可调^[12],因此,施肥量是设计排肥器的关键指标。当施肥量确定时,排肥盘直径越小,则可容纳的肥槽越少,为了满足最大施肥量,须增大肥槽深度或者排肥圆盘转速,由于肥料颗粒从上方的落肥口落入,因此过高的转速和过深的肥槽会使得肥槽未被充满就已经离开充肥区,使得充满系数过低,导致单位时间内肥料下落量变化过大,加剧实际施肥量与理论施肥量的差距,降低施肥均匀性和稳定性。排肥圆盘直径过大同样会使肥槽处线速度过大缩短充肥时间,引起上述问题。由于侧深施肥装置安装在肥箱下方,安装空间有限,排肥圆盘最大直径应小于 200 mm,侧深施肥装置整体直径应小于 230 mm,整体高度小于 70 mm,可安放肥槽 6~10 个。

上壳体顶盖的滑槽是引导推肥槽推肥的重要部件,如图 3 所示,为了使肥料被推出时保持均匀稳定,因此将滑槽的轨迹设计为阿基米德螺旋线,其关系式为

$$R(\theta) = A + B(\theta)$$

(1)

式中 θ ——排肥角, (°)

A——极径, mm
B——阿基米德螺旋线系数, mm/(°)

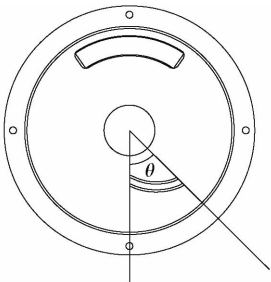


图 3 上壳体结构图
Fig. 3 Diagram of upper shell structure

侧深施肥装置的单转排肥量决定了其理论总施肥量,并以此为依据计算实际施肥量。排肥装置与肥箱通过接口连接,肥槽内肥料根据排出方式不同分为两部分,被推肥装置推出的部分称为主动层,主动层上方因摩擦力被带出肥槽的小部分肥料称为被动层^[12,15]。排肥器单转排肥量 q_m 为肥槽主动层排肥量 q_1 和被动层排肥量 q_2 的总和,即

$$q_m = q_1 + q_2$$

(2)

其中
$$q_1 = \frac{\sigma \rho z h_1 S}{1\,000} \quad q_2 = \frac{\lambda \sigma \rho z h_2 S}{1\,000}$$

式中 σ ——肥槽相对应肥料的填充系数
 ρ ——肥料颗粒密度, g/cm³
 z ——肥槽个数 h_1 ——肥槽高度, mm
 λ ——肥料颗粒被动层特性系数
 h_2 ——被动层高度, mm
 S ——单个肥槽充肥横截面积, mm²

由于上壳体落肥口处装有毛刷,可将槽外多余肥料去除,因此被动层排肥量 q_2 可忽略不计。肥槽截面由 2 条竖直线段和 2 段圆弧组成,推肥装置后挡板负责推出肥料,为了使肥料颗粒单位时间的下落量保持稳定,因此后挡板的截面设计与下肥口参数相同的圆弧状,使相同时间间隔内被推出的肥料体积相同,保证施肥的稳定性和均匀性,肥槽的水平截面如图 4 所示,单个肥槽充肥横截面积 S 为弓形面积 S_1 、矩形面积 S_2 、弧冠上方面积 S_3 、 S_4 之和,即

$$S = S_1 + S_2 + S_3 + S_4$$

(3)

弓形面与弧冠面可组成一个宽度为 a 的矩形(面积 S_5),最终计算式为

$$S = S_2 + S_5 = al$$

(4)

式中 a ——肥槽宽度, mm
 l ——肥槽工作长度, mm

总施肥量是设计排肥装置参数的重要依据,每公顷田间作业总施肥量 q 计算公式为

$$q = \frac{nt_m z_n q_m}{1\,000}$$

(5)

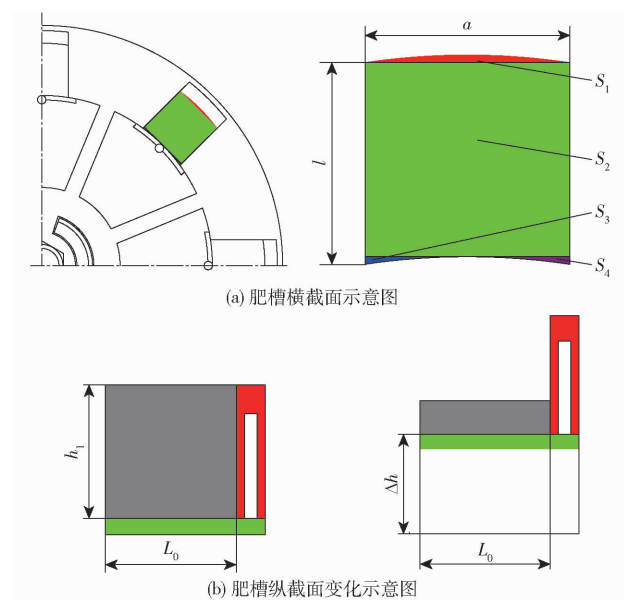


图 4 肥槽结构示意图

Fig. 4 Diagram of fertilizer tank structure

式中 n ——排肥圆盘转速, r/min

t_m ——每公顷作业时间, min

z_n ——作业行数

已知作业幅宽为 1.8 m, 每公顷作业时间为

$$t_m = \frac{10\,000}{1.8v \times 60} \quad (6)$$

式中 v ——插秧机速度, m/s

将式(4)~(6)合并得到每转排肥量与总施肥量的关系式为

$$q = \frac{nz_n q_m}{10.8v} \quad (7)$$

由式(7)可知, 每公顷施肥量受插秧机前进速度 v 、排肥圆盘转速 n 和每转排肥量 q_m 的影响。插秧机前进速度在作业过程中需配合插秧难以更改, 排肥圆盘转速为保证施肥指标调节范围有限。为了满足施肥要求, 同时使底板刚度达到要求, 避免其变形影响施肥性能, 将厚度确定为 5 mm, 为保证充足的肥量调节范围, 排肥圆盘剩余高度均设定为肥槽高度, 最大值为 25 mm。

2.3 排肥装置工作过程分析

2.3.1 充肥阶段

肥箱中肥料集中在上接口处, 依靠自重落入肥槽中, 肥料颗粒在充肥过程相对速度过高, 颗粒会涌向肥槽一侧对充肥产生不利影响, 因此对影响其相对速度的因素进行分析。任意选取肥料颗粒 i , 在充肥阶段由于肥料还未充满肥槽, 因此忽略颗粒之间的相互作用, 以上接口建立定参考系 oxy , 以伴随圆盘转动的肥料颗粒建立参考系 $OXYZ$, 肥料颗粒充肥阶段受力分析如图 5 所示。

在 t 时刻肥料颗粒 i 的受力为重力 G 、圆盘底面

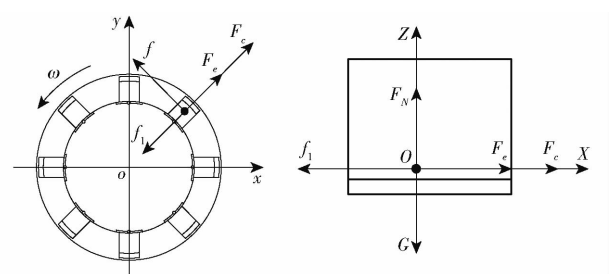


图 5 充肥阶段肥料颗粒受力分析

Fig. 5 Force analysis of fertilizer particles in filling stage

支撑力 F_N 、牵连惯性力 F_e 、科氏力 F_c 和滑动摩擦力 f_1 , 肥料颗粒 i 在充肥状态下的受力关系式为

$$\mathbf{F}_M = \mathbf{G} + \mathbf{F}_N + \mathbf{F}_e + \mathbf{F}_c + \mathbf{f}_1 \quad (8)$$

其中

$$F_e = m\omega_i^2 r_i \quad F_c = 2m\omega\omega_i$$

式中 $\mathbf{F}_M$ ——肥料颗粒所受合力, N

m ——单个肥料颗粒质量, kg

ω_i ——肥料颗粒与排肥圆盘的相对角速度, rad/s

r_i ——肥料颗粒质心半径, m

ω ——排肥圆盘角速度, rad/s

v_i ——肥料颗粒与排肥圆盘的相对速度, m/s

依据颗粒受力情况建立法向和切向力学平衡方程, 进一步推导得肥料颗粒相对运动的法向加速度 a_n 和切向加速度 a_τ 计算式为

$$\begin{cases} a_n = \frac{f_1 - 2m\omega v_i - m\omega_i^2 r}{m} \\ a_\tau = \frac{\mu F_N}{m} \end{cases} \quad (9)$$

式中 μ ——肥料颗粒与排肥圆盘的摩擦因数

当排肥装置正常工作时, t 时刻肥料在下落过程中只有向下的初始速度, 因此肥料颗粒只在落入肥槽的初始阶段沿切向做相对滑动, 即

$$\begin{cases} a_n = 0 \\ a_\tau = \frac{dv}{dt} = \frac{d^2 s}{dt^2} \end{cases} \quad (10)$$

式中 s ——肥料相对滑动距离

求解可得 t 时刻肥料颗粒与排肥圆盘的相对速度 v_i 为

$$v_i = e^{-2\mu\omega t} \left[\omega r + \frac{g(1 - e^{2\mu\omega t})}{2\omega} \right] \quad (11)$$

式中 r ——排肥盘半径

由式(11)可知, 肥料颗粒充肥效果与排肥圆盘角速度 ω 、排肥圆盘外缘肥料的质心半径即排肥圆盘半径 r 有关。为使肥料颗粒在法向运动状态不发生改变即 $a_n = 0$, 应尽量减少排肥圆盘半径, 最终排肥圆盘半径 r 确定为 90 mm。后续继续对排肥圆盘转速进行分析。

2.3.2 排肥阶段

随着圆盘转动,肥料从充肥区经过护肥区到达排肥区。在上壳体滑槽的引导下,前后挡板同时向前运动,将肥料颗粒匀速推出,如图 6 所示,主体部分为后挡板推出的肥料,另有小部分肥料由于其他外力作用、震动等原因自行滑落至输肥管中。由于推肥部件设有前挡板,因此在后挡板推动肥料之前肥料颗粒无法从肥槽中脱离,且由于推肥方向为排肥圆盘中心,因此肥料在离心力的作用下会更加难以从肥槽中滑落,肥槽内肥料颗粒完全由后挡板推出,肥料无法随意流动,达到施肥稳定的目的。

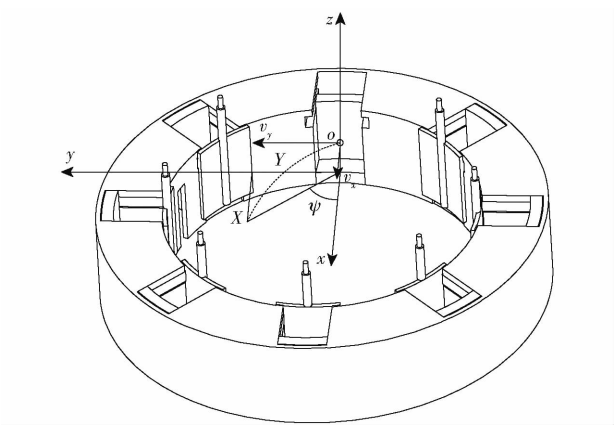


图 6 排肥阶段肥料颗粒运动分析

Fig. 6 Movement analysis of fertilizer particles in discharging stage

肥料颗粒在装置内部的运动状态对施肥均匀性影响较大,因此对被后挡板推出的肥料进行运动分析。任取转动肥槽中的单一肥料颗粒为动参考系 $oxyz$,肥料在离开肥槽后,其 x 轴方向分速度 v_x 与后挡板的推动速度相等,其 y 轴方向分速度 v_y 与圆盘转动速度相等,竖直方向为自由落体运动,肥料在装置内做平抛运动,忽略空气阻力影响,各方向分速度为

$$v_x = \frac{6nl}{\theta} \tag{12}$$

$$v_y = \frac{\pi(r-l)n}{30} \tag{13}$$

由于肥料颗粒 Y 轴方向存在分速度,其运动轨迹与下壳体指向圆心方向存在偏移角 ψ ,关系式为

$$\psi = \arctan \frac{Y}{X} = \arctan \frac{v_y}{v_x} = \arctan \frac{\pi\theta(r-l)}{180^\circ l} \tag{14}$$

由式(14)可知,肥料颗粒从脱离肥槽到落在下壳体结束所发生的偏移程度与排肥角 θ 、排肥圆盘半径 r 、肥槽工作长度 l 有关。在排肥圆盘半径 r 一定时,排肥角 θ 越大,肥槽工作长度 l 越大,偏移程度越高,肥料落入文丘里管时间间隔延长,导致施肥均匀性不佳,若二者过小,肥料会在短时间内聚集在

下壳体落肥口处,造成排肥器堵塞。综上所述,施肥性能受肥槽行程和排肥角影响较大。

2.4 作业过程仿真

为验证装置的施肥性能,模拟颗粒的运动,运用 EDEM 软件对排肥装置的工作过程进行仿真分析^[16]。通过分析排肥装置的充肥过程、护肥过程和排肥过程的各项性能参数,初步确定排肥圆盘的转速范围。

将 creo 软件设计的几何模型以 . stl 格式导入 EDEM 软件中,查阅文献[17],确定了侧深施肥装置和肥料颗粒的各项参数如表 1 所示。

表 1 仿真材料相关参数
Tab. 1 Simulation materials related parameters

材料	参数	数值
肥料	泊松比	0. 21
	剪切模量/GPa	0. 32
	密度/(g·cm ⁻³)	1. 32
PLA 塑料	泊松比	0. 29
	剪切模量/GPa	0. 22
	密度/(g·cm ⁻³)	1. 11
肥料-肥料	恢复系数	0. 35
	静摩擦因数	0. 26
	滑动摩擦因数	0. 08
肥料-PLA 塑料	恢复系数	0. 42
	静摩擦因数	0. 24
	滑动摩擦因数	0. 06

2.4.1 充肥过程仿真

配套的肥箱下肥口尺寸确定,排肥圆盘半径、肥槽工作高度已知,的情况下,充肥角越大,充肥时间越长,肥料填充效果更好,因此确定充肥角 θ_1 为 93.5° ,如图 7 所示。

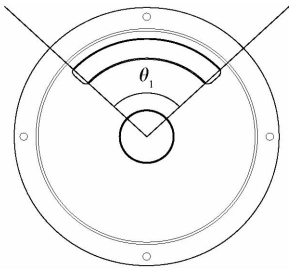


图 7 排肥口示意图

Fig. 7 Diagram of fertilizer outlet

排肥装置的充肥性能对施肥效果有密切影响,若肥槽未能充满,则在后续的排肥过程中实际排肥总量低于理论排肥总量,且由于肥槽内存在空隙,单位时间的肥料排出量不同,降低施肥均匀性。设置肥槽深度为最大值 25 mm,此时肥料所需填充的空间最大,圆盘转速分别设为 10、20、30、40、50 r/min,肥料颗粒全部生成之后圆盘开始充肥,应用 EDEM

的后处理 Selection 模块功能,通过 Grid Bin Group 计算肥槽内肥料填充的质量来判断肥料颗粒的填充情况。侧深施肥装置充肥仿真过程如图 8 所示。

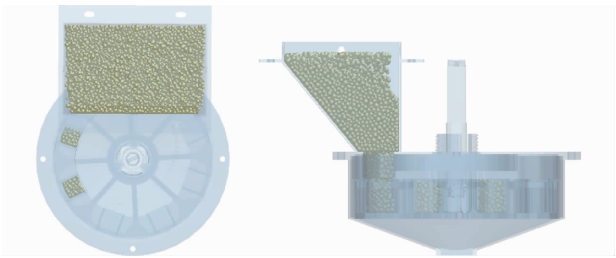


图 8 EDEM 充肥仿真图

Fig. 8 Diagram of EDEM filling simulation

图 8 为施肥装置肥料的充肥效果,在排肥圆盘转速为 10 ~ 50 r/min 时,其肥料充肥效果较好,单个肥槽理论储存肥量约为 6 g,实际仿真过程中的单个肥槽的充肥质量能够达到理论充肥量,根据仿真结果可知,排肥装置能够达到理论施肥量的要求,能够保证施肥稳定性。当排肥圆盘转速大于 50 r/min 时,由于惯性的作用,肥槽内填充的肥料整体向肥槽一侧涌动,肥槽内部颗粒群上方出现较大倾斜,在后续推肥过程中,单位时间内下肥量不一致,降低施肥均匀性,因此应将排肥器转速控制在 10 ~ 50 r/min。

2.4.2 排肥过程仿真

从肥料颗粒被推出肥槽到进入文丘里管的运动状态较为复杂,为检验施肥装置的排肥效果,应用 EDEM 模型进行排肥仿真试验,圆盘转速设为 10 ~ 60 r/min,进行施肥装置排肥性能检验,对不同工作参数下的仿真结果进行分析,排肥过程仿真如图 9 所示。

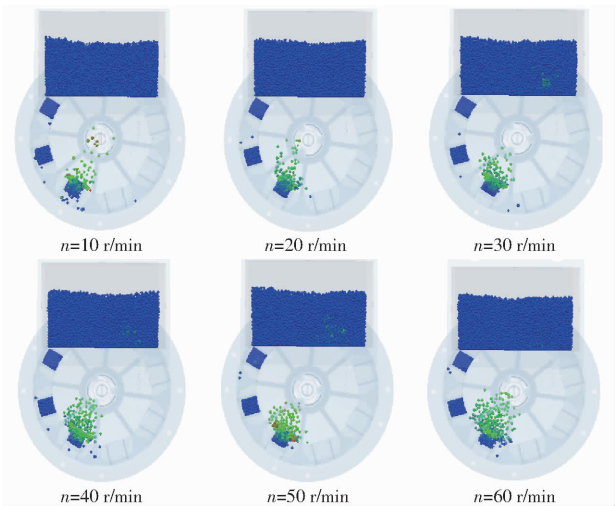


图 9 EDEM 排肥仿真图

Fig. 9 Diagram of EDEM discharging simulation

在所有预设转速的仿真中,对肥料颗粒在排肥装置内部的运动情况进行追踪,当圆盘转速处于 10 ~ 30 r/min 时,肥料颗粒在落肥口处的速度集中

在 0.383 ~ 0.450 m/s 之间,肥料颗粒在离开肥槽后沿下壳体滚动落入文丘里管中,此时全部肥料均为正常运动情况。当圆盘转速处于 40 ~ 50 r/min 时,肥料颗粒速度集中在 0.418 ~ 0.584 m/s 之间,除正常运动状态之外还会出现少部分肥料在下落过程中与下壳体落肥口发生碰撞的情况,此情况易造成肥料包衣破损,使肥料颗粒失去肥效^[18]。当圆盘转速大于 50 r/min 时,发生肥料碰撞的情况显著增加,排肥效果差,因此其工作转速应控制在 10 ~ 50 r/min。

3 风力式输送系统

3.1 结构及工作原理

为模拟田间作业情况,选用下方为传送带的排种试验台为台架,试验所用的肥料为粒径 2 ~ 5 mm 的侧深施肥专用肥料。若单纯使用机械结构或依靠肥料自身重力排肥,肥料流动性差,黏附在管路内壁上,施肥效果不佳。因此,本文采用一种辅助肥料输送系统,该系统主要由风机、调速开关、风送管、文丘里管、输肥管组成。在作业时,风机输出具有一定速度的压缩空气,通过风送管进入三通管的收缩段,加压后与排出的肥料颗粒混合,经输肥管吹送至水田秧苗一侧的指定位置^[19-20]。

3.2 输肥管路系统选型

文丘里管作为输肥管路系统的关键部件,对输肥效果有较大影响,由收缩段、混合段和输送段组成。以常见插秧机为例,其作业速度为 1 ~ 1.6 m/s,作业幅宽为 1.8 m^[21-22],黑龙江省水稻产区的常规侧深施肥量为 150 ~ 930 kg/hm²,本装置应用于黑龙江稻作区,水稻种植的给定施肥量范围在同一种植区域相对稳定,施肥量范围内对应的风送输肥系统结构及工作参数已存在较多研究^[23-26],且有成型产品投入使用,因此不需重新对参数进行设计,本文采用水田较为常用的久保田 2FH-1.8A 型侧深施肥机所配套的输送管路系统。

4 试验优化与分析

对本文的侧深施肥装置的施肥均匀性和施肥稳定性进行试验研究,在东北农业大学排种性能实验室进行试验,试验结果依据农业农村部发布施肥机械相关文件进行分析,两项性能指标均由施肥量均值、标准差和变异系数进行计算。

4.1 试验材料与方法

试验时,将侧深施肥装置安装于台架上,将自制的肥料收集带置于传送带上收集下落肥料,试验台可通过变频器控制传送带的速度模拟插秧机的田间作业,试验台如图 10 所示。



图 10 侧深施肥模拟试验台

Fig. 10 Test bench of side deep fertilizing simulation

施肥稳定性为静态试验,将肥料收集袋置于输肥管口,测定相同时间间隔内的排肥质量,每次测定时间为 30 s,重复试验 5 次。施肥均匀性为动态试验,试验时,肥料排出后落在总长度为 5 000 mm、每小段长度为 100 mm 的肥料收集带上,分别收集小段内的肥料并称量,收集的小段数量不少于 30 段。

试验结束后,将带内肥料依次编号,用精度 0.01 g 天平称量并记录,计算施肥量均值、标准差和变异系数。

4.2 施肥稳定性试验

水田施肥的作业速度不同,与其配合的施肥装置转速不同,同时针对不同地区及水稻品种的施肥量要求不同,需对肥槽高度进行调节。因此选取排肥圆盘转速和肥槽高度为试验因素测定该装置不同转速下施肥稳定性。肥槽有效高度确定为 25 mm,排肥圆盘转速设置为 10、20、30、40、50 r/min,结果如表 2 所示。

表 2 不同圆盘转速下施肥稳定性试验结果

Tab. 2 Experimental results of fertilization stability at different disc rotational speeds

排肥圆盘转速 $x_1 / (\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$	施肥稳定性施肥量 均值 y_1 / g	施肥稳定性变异 系数 $y_2 / \%$
10	236. 81	4. 36
20	481. 60	1. 99
30	733. 29	1. 41
40	978. 33	2. 28
50	1 218. 18	2. 30

利用 Design-Expert 6.0 软件的方差分析功能对施肥稳定性的试验结果进行分析,结果显示排肥圆盘转速对施肥稳定性施肥量均值影响显著,施肥稳定性变异系数影响不显著,但其呈先减小后增大的趋势,拟合得到回归方程分别为

$$y_1 = 24. 59x_1 - 8. 20 \tag{15}$$

$$y_2 = 4. 45 \times 10^{-3}x_2^2 - 0. 31x_2 + 6. 73 \tag{16}$$

滑槽回转式侧深施肥装置调节肥槽高度为 5、10、15、20、25 mm,将排肥圆盘转速确定为 50 r/min

进行台架试验,计算得出施肥稳定性施肥量均值和变异系数,结果如表 3 所示。

表 3 不同肥槽高度下施肥稳定性试验结果

Tab. 3 Experimental results of fertilization stability at different fertilizer tank heights

肥槽高度 x_2 / mm	施肥稳定性施肥量 均值 y_3 / g	施肥稳定性变异 系数 $y_4 / \%$
5	245. 31	4. 13
10	457. 49	3. 37
15	694. 31	2. 81
20	939. 94	2. 39
25	1 207. 28	2. 10

试验得出的结果进行同上处理,结果显示,肥槽高度对以上两项指标的变异系数模型影响显著,拟合得出相应的回归方程分别为

$$y_3 = 0. 34x_2^2 + 37. 92x_2 + 46. 51 \tag{17}$$

$$y_4 = 0. 31x_2^2 - 1. 01x_2 + 2. 81 \tag{18}$$

滑槽回转式水田侧深施肥装置施肥稳定性试验结果表明,风机风速处于稳定值时,当排肥圆盘转速增加或肥槽高度增加时,施肥稳定性施肥量均值均呈线性增加,但二者对施肥稳定性变异系数的影响不同。随着转速增加总体上施肥稳定性变异系数呈先减小后增大的趋势。随着肥槽高度增加,施肥稳定性施肥量变异系数减小。以黑龙江省稻作区常规施肥量 450 kg/hm² 为例,当插秧机以速度 1.6 m/s 作业时,其转速为 50 r/min,则肥槽高度调整为 13 mm 即可满足作业要求。

根据 NY/T 1003—2006《施肥机械质量评价技术规范》的要求,施肥稳定性变异系数应小于等于 7.8%,试验结果表明该装置在工作参数范围内达到规定要求。

4.3 施肥均匀性试验与分析

检测滑槽式水田侧深施肥装置施肥均匀性系数时,分析排肥圆盘转速对施肥均匀性施肥量均值和变异系数的影响,设定肥槽高度为 25 mm,插秧机前进速度为 1.6 m/s,转速取值同上,试验结果如表 4 所示。

表 4 不同圆盘转速下施肥均匀性试验结果

Tab. 4 Experimental results of fertilization uniformity at different disc rotational speeds

排肥圆盘转速 $x_3 / (\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$	施肥均匀性施肥量 均值 y_5 / g	施肥均匀性变异系 数 $y_6 / \%$
10	0. 49	12. 80
20	1. 02	9. 50
30	1. 50	7. 95
40	2. 01	7. 53
50	2. 55	6. 61

根据表 4 中数据进行方差分析,分析表明排肥圆盘转速对施肥均匀性施肥量均值和变异系数影响显著,拟合回归方程为

$$y_5 = 0.05x_3 - 0.019 \tag{19}$$

$$y_6 = 4.21x_3^2 - 0.4x_3 + 16.13 \tag{20}$$

施肥装置的施肥均匀性试验结果表明,随着排肥圆盘转速的增加,施肥均匀性施肥量均值增加,施肥均匀性变异系数减小。

设肥槽高度为 25 mm,排肥圆盘转速为 50 r/min,设定插秧机速度分别为 1.2、1.3、1.4、1.5、1.6 m/s,进行施肥均匀性试验,结果如表 5 所示。

表 5 不同插秧机速度下施肥均匀性试验结果
Tab.5 Experimental results of fertilization uniformity at different transplanter speeds

插秧机前进速度 $x_4/(m \cdot s^{-1})$	施肥均匀性施肥量 均值 y_7/g	施肥均匀性变异系数 $y_8/\%$
1.2	2.93	10.92
1.3	2.89	7.27
1.4	2.70	15.19
1.5	2.52	8.73
1.6	2.27	11.01

进行方差分析,插秧机速度对施肥均匀性施肥量均值影响显著,但是对施肥均匀性变异系数模型不显著,拟合回归方程为

$$y_7 = -1.69x_4 + 5.03 \tag{21}$$

通过对侧深施肥装置进行试验分析发现,在满足农艺要求的范围内,装置的施肥稳定性和施肥均匀性满足行业标准要求。该装置与目前常用的槽轮式水田侧深施肥装置相比,整体上施肥效果优于槽轮式水田侧深施肥装置^[17,27],符合《施肥机械质量评价技术规范》中施肥量稳定性变异系数小于等于 7.8%,施肥均匀性变异系数小于等于 40% 的规定。各试验结果表明排肥量略小于理论施肥量,原因是排肥圆盘与上壳体仍留有较大空间,当排肥圆盘转动时上层小部分肥料会脱离肥槽滞留在排肥圆盘顶端无法被挡板推出,针对此问题可相应增加阻肥结构避免肥料从肥槽中甩出。

4.4 田间试验验证

为验证该装置是否符合侧深施肥的农艺要求,在阿城区试验基地进行侧深施肥田间试验对装置的作业性能进行检测。作业效果如图 11 所示,参考中华人民共和国农业部 NY/T 1003—2006《施肥机械质量评价技术规范》的要求对施肥位置尺寸和施肥量偏差进行测定。

肥料施入位置准确性显著影响水稻后续生长,设定标准侧位距离 30 ~ 50 mm,正位距离 50 ~ 80 mm

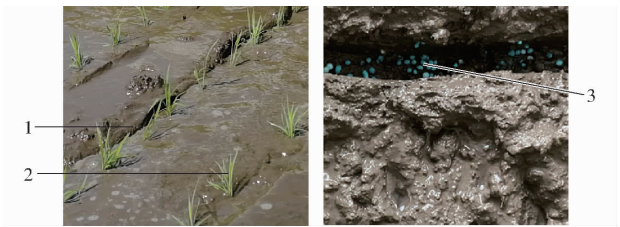


图 11 田间试验作业效果图

Fig.11 Diagram of field test operation

1. 侧深施肥区 2. 秧苗 3. 侧深施肥区内所施肥料颗粒

为合格施肥位置,确定测定行数为 6 行,取正对秧苗一侧 100 mm × 100 mm × 100 mm 体积的土壤作为测量范围,单行每隔相同距离取 1 点,共取 5 点,测量该点范围内正、侧位施肥距离最小值和最大值,施肥位置尺寸测定计算式为

$$H = \frac{\sum_{j=1}^K H_j}{K} \tag{22}$$

$$\gamma = \frac{K_h}{K} \times 100\% \tag{23}$$

式中 H ——平均施肥距离,mm
 H_j ——第 j 点的施肥距离,mm
 K ——测定点数
 γ ——施肥距离合格率,%
 K_h ——施肥距离合格点数

根据田间试验测量结果,侧位施肥距离平均值最小值为 34 mm、最大值为 47 mm,合格率分别为 90%、93.33%。正位施肥距离平均值最小值为 51 mm、最大值为 80 mm。合格率为 83.33%、93.33%,符合《施肥机械质量评价技术规范》正、侧位施肥合格率大于等于 80% 要求。

施肥量偏差能够反映单位作业面积实际施肥量与给定施肥量差值,按黑龙江稻作区常规施肥量 450 kg/hm² 设置给定施肥量,排肥轮转速 50 r/min,肥槽高度 13 mm,插秧机速度 1.6 m/s,测定 10 次,其计算式为

$$\gamma_\xi = \frac{\left| \frac{10\,000(W_e - W_h)}{S_e} - W \right|}{K} \times 100\% \tag{24}$$

式中 γ_ξ ——施肥量偏差,%
 W_e ——初始肥料质量,kg
 W_h ——剩余肥料质量,kg
 S_e ——施肥作业面积,m²
 W ——指定施肥量,kg/hm²

施肥量测量结果为 422.49 ~ 440.39 kg/hm²,施肥量偏差控制在 2.14% ~ 6.11%,可用于施肥作业。

5 结 论

(1)设计了一种易于调肥的侧深施肥装置,能够将肥料颗粒强制排出,从而避免潮解的肥料堵塞排肥器,提高施肥效率。适用于水田施肥作业。

(2)计算了排肥器的理论排肥量,对施肥装置的工作过程进行了分析,确定了施肥装置的结构尺寸。同时对该工作参数下施肥装置的充肥过程和排肥过程进行了虚拟仿真试验,仿真结果表明,施肥装

置在 10 ~ 50 r/min 时的充排肥效果较好,无架空、堵塞现象。

(3)通过 JPS12 型排种性能检测试验台对侧深施肥装置进行研究,获得了排肥圆盘转速、肥槽高度对施肥稳定性影响规律以及排肥圆盘转速、插秧机速度对施肥均匀性影响规律,滑槽回转式水田侧深施肥装置两项主要指标满足规范要求。田间试验表明,该装置基本符合水田侧深施肥的农艺要求。

参 考 文 献

[1] 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)

[2] 吴文革,季雅岚,许有尊,等. 新型控释肥机插侧深施对江淮中稻产量及氮肥利用率的影响[J]. 中国稻米,2021,27(5): 59 – 63.
WU Wen'ge, JI Yalan, XU Youzun, et al. Effects of deep application of new controlled release fertilizer machine on yield and nitrogen use efficiency of middle rice in Jianghuai[J]. China Rice, 2021,27(5): 59 – 63. (in Chinese)

[3] 赵婷婷,赵坤,李鹏,等. 水稻侧深施肥技术应用与发展[J]. 现代化农业,2021(3):25 – 27.

[4] MIN Ju,SUN Haijun,WANG Yuan,et al. Mechanical side-deep fertilization mitigates ammonia volatilization and nitrogen runoff and increases profitability in rice production independent of fertilizer type and split ratio[J]. Journal of Cleaner Production, 2021,316:128370.

[5] ZHU C, XIANG J, ZHANG Y, et al. Mechanized transplanting with side deep fertilization increases yield and nitrogen use efficiency of rice in Eastern China[J]. Scientific Reports, 2019, 9(1):5653.

[6] ZHONG X, ZHOU X, FEI J, et al. Reducing ammonia volatilization and increasing nitrogen use efficiency in machine-transplanted rice with side-deep fertilization in a double-cropping rice system in Southern China[J]. Agriculture Ecosystems & Environment, 2021, 306(Supp.):107183.

[7] 鲍秉启,安龙哲,胡文英. 我国和日本等国水田机械发展概况[J]. 农机化研究,2002,24(3):23 – 25.
BAO Bingqi, AN Longze, HU Fengying. The paddy field mechanization state in Japan China[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research,2002,24(3): 23 – 25. (in Chinese)

[8] 左兴健,武广伟,付卫强,等. 风送式水稻侧深精准施肥装置的设计与试验[J]. 农业工程学报,2016,32(3):14 – 21.
ZUO Xingjian, WU Guangwei, FU Weiqiang, et al. Design and experiment on air-blast rice side deep precision fertilization device[J]. Transactions of the CSAE,2016,32(3):14 – 21. (in Chinese)

[9] 陈长海,许春林,毕春辉,等. 水稻插秧机侧深施肥技术及装置的研究[J]. 黑龙江八一农垦大学学报,2012,24(6):10 – 12,25.
CHEN Changhai, XU Chunlin, BI Chunhui, et al. Researching of rice transplanter deep side fertilizing technology and device [J]. Journal of Heilongjiang Bayi Agricultural University, 2012,24(6):10 – 12,25. (in Chinese)

[10] 位国建,祁兵,焦伟,等. 水田机械式强制排肥装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2020,51(增刊1):154 – 164.
WEI Guojian, QI Bing, JIAO Wei, et al. Design and experiment of mechanical forced fertilizing device for paddy field[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2020,51(Supp. 1):154 – 164. (in Chinese)

[11] 王金武,李树伟,张翌,等. 水稻精量穴直播机电驱式侧深穴施肥系统设计与试验[J]. 农业工程学报,2018,34(8):43 – 54.
WANG Jinwu, LI Shuwei, ZHANG Zhao, et al. Design and experiment of electrical drive side deep hill-drop fertilization system for precision rice hill-direct-seeding machine[J]. Transactions of the CSAE, 2018,34(8):43 – 54. (in Chinese)

[12] 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)

[13] 顿国强,高志勇,郭艳玲,等. 圆弧齿轮排肥器圆弧结构参数仿真试验及优化[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2020,46(5):625 – 636.
DUN Guoqiang, GAO Zhiyong, GUO Yanling, et al. Simulation test and optimization for structural parameters of circular arc gear discharging fertilizer apparatus[J]. Journal of Zhejiang University (Agric. & Life Sci.), 2020,46(5):625 – 636. (in Chinese)

[14] 周韦. 基于散粒体动力学的水田侧深施肥装置的分析方法和试验[D]. 哈尔滨:东北农业大学,2015.
ZHOU Wei, The experiment and analysis of paddy field deep fertilizing device based on discrete element method[D]. Harbin:

- Northeast Agricultural University, 2015. (in Chinese)
- [15] 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)
- [16] 张季琴,刘刚,胡号,等.双变量螺旋外槽轮排肥器控制序列对排肥性能的影响[J].农业机械学报,2020,51(增刊1):137-144.
ZHANG Jiqin, LIU Gang, HU Hao, et al. Influence of control sequence of spiral fluted roller fertilizer distributor on fertilization performance[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(Sup. 1):137-144. (in Chinese)
- [17] 高观保.风送式水稻侧深施肥装置关键部件设计与试验[D].哈尔滨:东北农业大学,2019.
GAO Guanbao. Design and experiment of key parts of side-depth fertilizer device with pneumatic conveying for paddy[D]. Harbin:Northeast Agricultural University, 2019. (in Chinese)
- [18] 王兴刚,吕少瑜,冯晨,等.包膜型多功能缓/控释肥料的研究现状及进展[J].高分子通报,2016(7):9-22.
WANG Xinggang, LÜ Shaoyu, FENG Chen, et al. Research status and progress of coated multifunctional slow/controlled release fertilizer[J]. Polymer Bulletin, 2016(7):9-22. (in Chinese)
- [19] 韩启彪,黄兴法,刘洪禄,等.6种文丘里施肥器吸肥性能比较分析[J].农业机械学报,2013,44(4):113-117,136.
HAN Qibiao, HUANG Xingfa, LIU Honglu, et al. Comparative analysis on fertilization performance of six Venturi injectors[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(4):113-117,136. (in Chinese)
- [20] 刘德柱,周勇,张国忠,等.再生稻气送式双侧施肥装置的设计与试验研究[J].中国农业科技导报,2021,23(6):77-85.
LIU Dezhu, ZHOU Yong, ZHANG Guozhong, et al. Design and experiment of pneumatic double-side fertilizer devices for ratoon rice[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2021, 23(6):77-85. (in Chinese)
- [21] 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.
- [22] 李泽华,马旭,李秀昊,等.水稻栽植机械化技术研究进展[J].农业机械学报,2018,49(5):1-20.
LI Zehua, MA Xu, LI Xiuhao, et al. Research progress of rice transplanting mechanization[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(5):1-20. (in Chinese)
- [23] 胡克吉.气力输送系统文丘里供料器的研究[D].青岛:青岛科技大学,2013.
HU Keji. The research on Venturi feeder in pneumatic conveying system[D]. Qingdao: Qingdao University of Science & Technology, 2013. (in Chinese)
- [24] 李立伟,武广伟,付卫强,等.水田风送施肥参数检测试验台设计与试验[J].农业机械学报,2020,51(增刊1):186-194.
LI Liwei, WU Guangwei, FU Weiqiang, et al. Design and verification of test bed for testing parameters of wind assisted fertilization in paddy field[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(Sup. 1):186-194. (in Chinese)
- [25] 温翔宇,贾洪雷,张胜伟,等.基于 EDEM-Fluent 耦合的颗粒肥料悬浮速度测定试验[J].农业机械学报,2020,51(3):69-77.
WEN Xiangyu, JIA Honglei, ZHANG Shengwei, et al. Test of suspension velocity of granular fertilizer based on EDEM-Fluent coupling[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(3):69-77. (in Chinese)
- [26] 李立伟,孟志军,王晓鸥,等.气送式水稻施肥机输肥装置气固两相流仿真分析[J].农业机械学报,2018,49(增刊):171-180.
LI Liwei, MENG Zhijun, WANG Xiaou, et al. Simulation analysis of gas-solid two phase flow in pneumatic conveying fertilizer feeder of rice fertilizer applicator[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(Sup.):171-180. (in Chinese)
- [27] 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)