

# 水田侧深施肥装置关键部件设计与试验

王金峰 高观保 翁武雄 王金武 闫东伟 陈博闻

(东北农业大学工程学院, 哈尔滨 150030)

**摘要:** 针对水田侧深施肥装置施肥均匀性低、作业性能不稳定、输肥管路堵塞等问题,结合水田侧深施肥的农艺特点,对水田侧深施肥装置关键部件排肥器和气力输送系统进行设计与分析,通过运动学和动力学的方法得出排肥轮转速越大越有利于提高施肥均匀性,计算得出排肥轮转速的最大理论值为 150 r/min,并设计了适宜输送颗粒肥的气力输送系统。采用二次正交旋转组合设计试验,以排肥轮转速、插秧机前进速度、风机风速为影响因素,以施肥均匀性施肥量均值和施肥均匀性变异系数为响应指标,利用 JPS-12 型排种器检测试验台对施肥装置的排肥性能进行台架试验,运用 Design-Expert 软件对试验数据进行方差分析和响应面分析,得到影响因素与响应指标之间的数学模型,并对数学模型进行优化及验证。试验结果表明:在排肥轮转速 21.96 r/min、前进速度 0.93 m/s、风机风速 22.93 m/s 条件下,施肥装置的施肥均匀性变异系数为 28.25%,且满足黑龙江省寒地稻作区侧深施肥最小施肥量 150 kg/hm<sup>2</sup> 的农艺要求。

**关键词:** 水田; 侧深施肥; 排肥器; 气力输送系统; 试验

**中图分类号:** S224.21      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-1298(2018)06-0092-13

## Design and Experiment of Key Components of Side Deep Fertilization Device for Paddy Field

WANG Jinfeng GAO Guanbao WENG Wuxiong WANG Jinwu YAN Dongwei CHEN Bowen  
(College of Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

**Abstract:** Rice is one of the major food crops in China, and fertilization is an important operation links in the process of rice production, the traditional way of fertilizing rice is sprinkling the granular fertilizer on the soil surface by mechanical or manpower. This method has the problems of unreasonable fertilization, such as many operation steps, uncertain fertilization amount and uneven distribution, which directly affects the rice yield. The side deep fertilization technology for paddy field is mechanically transplanting granular fertilizer (base fertilizer and tillering fertilizer) quantitatively to the rice's side position with a certain depth, which can reduce nitrogen fertilizer amount by 20% ~ 30% and availably decrease pollution of freshwater resources compared with the traditional fertilization operation. It is a cultivation technique with high output, stable yield and low cost. As a core carrier for application of side depth fertilization technology, the side-depth fertilization device for paddy field has such problems as low uniform fertilization, poor stability of the device and blockage of fertilizer transmission pipelines. In view of the above problems, combined with the agronomic characteristics of side deep fertilization in the paddy field, the key components (fertilizer feeder and pneumatic conveying system) of the side-depth fertilization device for paddy field were designed and analyzed. Through kinematics and dynamics analyses, it was concluded that the bigger the rotation speed of the fertilizer wheel was, the better the uniformity of fertilizer application was. It was calculated that the theoretical limit value of the rotation speed of fertilizer wheel in the corner of the fertilizer wrap was 150 r/min, and a pneumatic conveying system suitable for transporting granular fertilizer was designed. The quadratic regression orthogonal rotation combined design was used for the experiment, and the rotation speed of the fertilizer wheel, the forward speed of the device and the wind speed of the fan were taken as the influential factors. The

收稿日期: 2017-12-15    修回日期: 2018-01-21

**基金项目:** 黑龙江省普通本科高等学校青年创新人才培养计划项目 (UNPYSCT-2016129)

**作者简介:** 王金峰 (1981—), 男, 教授, 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: jinwuw@163.com

fertilization average and coefficient of variation of fertilization uniformity were measured and analyzed for fertilization device through performance detection of JPS-12 type discharging seed test bench. Through the analysis of variance and response surface analysis by Design-Expert software, the mathematical model between influencing factors and response indexes was obtained, and the mathematical model was optimized and validated. The results showed that the coefficient of variation of fertilization uniformity was 28.25% under the condition that the rotation speed of the fertilizer wheel was 21.96 r/min, the advancing speed of implement was 0.93 m/s and the wind speed of fan was 22.93 m/s, which could meet the minimum fertilization rate of 150 kg/hm<sup>2</sup> at the side deep fertilization of paddy field in cold region in Heilongjiang Province. The research provided a reference for the research and development of the side depth fertilization device for paddy field.

**Key words:** paddy field; side deep fertilization; fertilizer apparatus; pneumatic conveying system; test

## 0 引言

水稻是中国主要的粮食作物之一,施肥是水稻生产过程中一个重要作业环节,传统的施肥方式是通过人工或撒肥机将颗粒肥施在土壤表层,这种施肥方式存在施肥量不稳定、营养分布不均匀等问题,导致水稻秧苗吸肥量不一致,直接影响水稻产量,而且插秧排水使肥料养分流失污染水资源<sup>[1-2]</sup>。水田侧深施肥技术是一次性将基肥和分蘖肥准确、定量地施在水稻秧苗根系的侧深位置,在保证单位面积产量的情况下,氮肥使用量相对减少 20%~30%,有效提高肥料利用率,降低对水资源的污染<sup>[3-6]</sup>。

水田侧深施肥装置是水田侧深施肥技术应用的核心载体。以日本为代表的水稻移栽机械化栽培体系,机械插秧和侧深施肥已实现了系列化和标准化,侧深施肥装置普遍采用机械结构排肥和气力输肥的方式进行施肥。气力输肥系统基本采用正压风送式,能够满足对颗粒肥的输送。在排肥结构设计上,井关、东洋、久保田等公司生产的侧深施肥装置主要采用直槽轮式排肥器,与传统施肥方式相比,肥效利用率明显提高,但直槽轮排肥时存在脉动现象,影响施肥装置施肥均匀性;洋马等公司生产的侧深施肥装置在采用更换不同孔径排肥盘和齿轮的同时,调节齿轮转速实现施肥量的调节,施肥稳定性和施肥均匀性能够达到国家标准的要求,但其结构复杂,安装精度高,配件易磨损,维修困难<sup>[7-9]</sup>。随着侧深施肥技术的出现和应用,国内一些科研机构也开展了相关研究,并取得了一定成果。黑龙江省水田机械化研究所研制了 2ZTF-6 型水稻侧深施肥装置,通过驱动连杆带动排肥轮摆动,在插秧的同时实现间隙摆动施肥,但未解决输肥管路堵塞的问题<sup>[10]</sup>;陈长海等<sup>[11]</sup>设计了水稻插秧机螺旋输送式侧深施肥装置,可将颗粒肥强施于泥浆中,但其结构复杂,且必须与拖板式插秧机配套使用才能完成施肥;左兴健等<sup>[12]</sup>设计了风送式水稻侧深精准施肥装置,采用

电动机驱动排肥、风送输肥的原理,通过全球定位系统数据计算得到车体行进速度,根据车速变化实时调整施肥量,但其稳定性与可靠性还有待进一步检测。由此可见,国内对水田侧深施肥装置的研究还处于模仿与探索阶段,对水田侧深施肥装置关键部件的理论分析较少,影响了水田侧深施肥技术在中国水稻产区的推广和应用。

针对我国现阶段水田侧深施肥装置存在的技术问题,本文设计一种水田侧深施肥装置,通过在高速插秧机上添加连接部件,实现与不同品牌和型号的插秧机配套使用。该装置采用电动机驱动排肥、气力输肥的原理,通过对关键部件排肥器和气力输送系统的设计与分析,确定影响施肥装置排肥性能的各项参数。通过台架试验对施肥装置的排肥性能进行优化与验证,达到定量供肥和均匀排肥的目的。

## 1 水田侧深施肥的农艺要求

水田侧深施肥装置与高速插秧机配套,在水稻机械插秧的同时,一次性将基肥和分蘖肥准确、定量地施在距离水稻秧苗根系一侧 3~5 cm 和深度 5 cm 处的侧深位置。为了适应黑龙江省寒地稻作区不同水稻品种、不同株距和不同作业时期的施肥量需求,要求水田侧深施肥装置施肥量的调节范围为 150~930 kg/hm<sup>2</sup>,插秧机前进速度为 0.7~1.3 m/s<sup>[1,4]</sup>。

## 2 施肥装置结构与工作原理

水田侧深施肥装置结构如图 1 所示,主要包括肥箱、电动机、离合器、排肥器、传动轴、支撑架和气力输送系统。气力输送系统整体固定于支撑架,与 3 个排肥器下端相通,排肥器上端通过螺栓固接于支撑架,肥箱由 3 个相通的子肥箱组成,每个子肥箱下端分别与对应的排肥器上端通过螺栓固接,离合器安装于支撑架,用于连接传动轴和排肥器,传动轴将 3 组排肥器和离合器串联在一起,电动机固定于支撑架一侧,与传动轴一端连接,支撑架通过螺栓或

其他连接固件与不同品牌、不同型号插秧机配套使用。

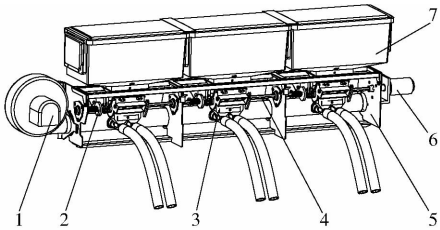


图 1 水田侧深施肥装置结构简图  
Fig.1 Structure diagram of deep side fertilizing device in paddy fields

1. 气力输送系统 2. 离合器 3. 排肥器 4. 传动轴 5. 支撑架  
6. 电动机 7. 肥箱

水田侧深施肥装置采用电动机驱动排肥、气力输肥的工作原理。作业时,将施肥装置安装于高速插秧机,开启电动机带动传动轴转动,接合离合器,传动轴带动排肥器进行排肥,通过控制电动机的转速实现施肥量的调节,排肥器排出的颗粒肥在气力输送系统产生的气流和自身重力的双重作用下完成施肥。

3 关键部件分析与设计

排肥器与气力输送系统作为水田侧深施肥装置的两个关键部件,其各项参数将直接影响施肥装置的排肥性能,因此,本文通过理论分析的方法对关键部件排肥器与气力输送系统进行设计与分析。

3.1 排肥器

3.1.1 结构及工作原理

排肥器结构如图 2 所示。主要包括毛刷、上壳体、下壳体、排肥轮、限位板、锁紧扣、清肥挡板和离合器从动套筒。排肥器为双行排肥结构,上壳体与支撑架通过螺栓固接,在上壳体前端安装有可调节毛刷,下壳体与上壳体通过锁紧扣扣合在一起,下壳体与气力输送系统管路相通,下壳体后端设有清肥口,清肥口处安装有清肥挡板,并由自锁手柄控制其开合,排肥轮通过花键与离合器从动套筒固套在一起,在限位板和下壳体共同作用下限制排肥轮轴向移动。作业时,先将锁紧扣和清肥挡板处于闭合状态,然后接合离合器,传动轴带动排肥轮转动进行排肥,排肥完成后,断开离合器,排肥轮与传动轴随之分离,停止排肥,依次打开清肥挡板和锁紧扣,将排肥器上壳体与下壳体分离,对施肥装置进行清肥,完成作业。

3.1.2 基本结构参数

由于直槽式排肥轮具有结构简单、制作成本低等特点,国内现有排肥器大多采用直槽式排肥轮,但

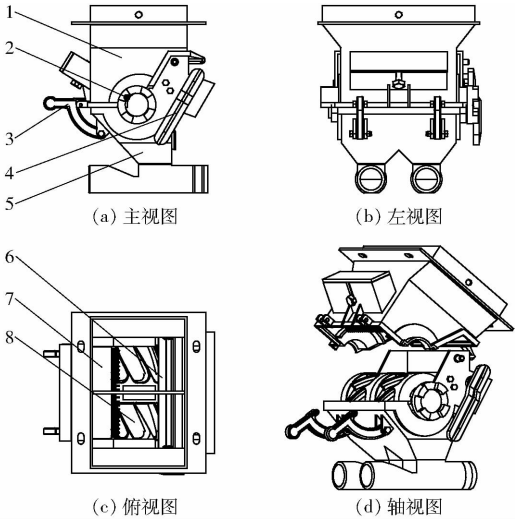


图 2 排肥器结构简图  
Fig.2 Structure diagrams of fertilizer feeder

1. 上壳体 2. 离合器从动套筒 3. 锁紧扣 4. 清肥挡板 5. 下壳体 6. 限位板 7. 毛刷 8. 排肥轮

直槽式排肥轮工作时,排肥轮转到凹槽处排出的肥量较多,齿脊处排出的肥量较少,颗粒肥呈明显的脉动现象,排肥均匀性较差<sup>[13-14]</sup>。为了克服以上问题,本文将直槽式排肥轮改进为螺旋式排肥轮,沿均布在圆柱面的若干螺旋线开设环型浅槽,排肥轮中心设主轴孔,从而保证颗粒肥在排肥口处不是整槽排下,而是随着排肥轮的转动,顺着凹槽的旋转方向不间断连续排出。应用 3D 打印机打印成型的排肥轮如图 3 所示。



图 3 排肥轮实物图  
Fig.3 Physical picture of fertilizer wheel

排肥轮的外径、槽数和转速是影响施肥量的重要因素。当施肥量一定时,排肥轮直径过大,转速和有效工作长度需要相应减小,施肥均匀性随之降低,同时还会导致排肥器结构尺寸变大,增加整机质量;排肥轮直径过小,其上均布的槽数就会相应减小,为满足一定的施肥量调节范围,就必须提高排肥轮的转速,当排肥轮转速过大时,不仅会增加颗粒肥的磨损率,夹带颗粒肥回转的现象严重,而且排肥轮转经充肥区的时间变短,凹槽内的颗粒肥充满系数随之降低,影响施肥稳定性<sup>[13-15]</sup>。因此,根据水田侧深施肥的农艺要求,结合装置结构,设计排肥轮的外径为 60 mm,槽数为 8 个,有效工作长度为 35 mm。

为保证排肥轮排肥的连续性,相邻 2 个凹槽所

在螺旋线至少保证首尾相交,即在前一个凹槽末端排完肥的同时,保证下一个凹槽的前端已经开始排肥。在排肥轮的外缘半径、槽数和有效工作长度已知的情况下,螺旋角的取值范围应为

$$\arctan \frac{P_0}{L_0} \leq \alpha \leq \frac{\pi}{2} \tag{1}$$

其中  $P_0 = 2\pi R/Z$   
式中  $\alpha$ ——凹槽螺旋角, (°)  
 $P_0$ ——凹槽节距, mm  
 $L_0$ ——凹槽有效工作长度, mm  
 $Z$ ——凹槽槽数  
 $R$ ——排肥轮外缘半径, mm

螺旋角的大小影响颗粒肥运动的轴向速度和周向速度。随着螺旋角的增大,颗粒肥的轴向速度会先增大后减小,周向速度会逐渐增大,当周向速度大于轴向速度时有利于颗粒肥从凹槽中顺利排出;但随着螺旋角的增大,凹槽夹带颗粒肥回转的现象随之愈加明显<sup>[14-16]</sup>。在保证排肥轮不间断排肥的基础上,排肥轮凹槽的螺旋角应越小越好。将排肥轮的外缘半径、槽数和有效工作长度代入式(1)得到凹槽螺旋角最小取值为 33.95°,对其进行圆整,排肥轮凹槽螺旋角设计为 34°。

3.1.3 理论供肥模型

排肥轮凹槽段截面如图 4 所示,凹槽段截面为“L”型轮廓,由一条法向线段、一条切向线段和一段圆心角为 90°的圆弧组成,圆弧的半径  $r$  大于颗粒肥半径。则单个“L”型充肥凹槽的填充截面积  $S_0$  为球冠面积  $S_1$ 、直角梯形面积  $S_2$ 、球冠面积  $S_3$ 、三角形面积  $S_4$ 、扇形面积  $S_5$  之和,即

$$S_0 = S_1 + S_2 + S_3 + S_4 + S_5 \tag{2}$$

其中

$$S_1 = \frac{\phi - \psi}{360^\circ} \pi R^2 - \frac{1}{2} R^2 \sin(\phi - \psi)$$
$$S_2 = \frac{1}{2} r (R \sin \psi - r + q)$$
$$S_3 = \frac{\psi}{360^\circ} \pi R^2 - \frac{1}{2} R^2 \sin \psi$$
$$S_4 = \frac{1}{2} p R \sin \psi$$
$$S_5 = \frac{1}{4} \pi r^2$$

式中  $\phi, \psi$ ——圆心角, (°)  
 $q$ ——切向线段长度, mm  
 $p$ ——法向线段长度, mm

由外槽轮式排肥器的工作过程可知,当排肥轮转动时,进入凹槽内的颗粒肥在排肥轮槽齿的强制推动下经排肥口排出,称为强制层;处于排肥轮外缘厚度为  $C_0$  的一层颗粒肥受到其他颗粒肥和槽齿凸

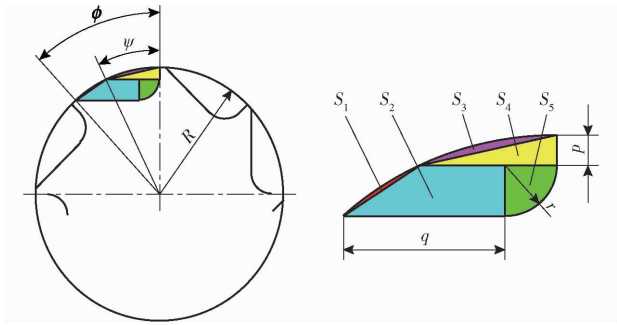


图 4 排肥轮填充区域示意图

Fig. 4 Schematic diagrams of fertilizer wheel fill area

尖部位的间断性挤压作用后,在排肥轮外缘与毛刷之间以相对较低的速度被排出,称为带动层<sup>[17]</sup>。则排肥轮每转的排肥量为

$$q_0 = q_1 + q_2 \tag{3}$$

其中  $q_1 = \lambda \sigma L_0 Z S_0$   $q_2 = 2\pi \sigma R L_0 C_n$   
式中  $\lambda$ ——凹槽内颗粒肥充满系数  
 $\sigma$ ——颗粒肥容重, kg/m<sup>3</sup>  
 $C_n$ ——带动层特性系数

3.1.4 排肥器工作过程分析

如图 5 所示,排肥器的工作过程包括充肥、护肥和排肥 3 个阶段,对应的圆心角分别为  $\theta_1$ 、 $\theta_2$ 、 $\theta_3$ 。本文主要对充肥和排肥 2 个阶段进行理论分析,探究排肥器结构与运行参数对装置施肥性能的影响规律。

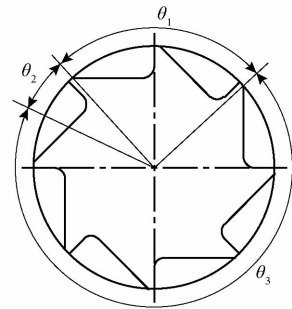


图 5 排肥器 3 个阶段示意图

Fig. 5 Diagram of three stages of fertilizer feeder

3.1.4.1 充肥阶段

充肥阶段主要发生在充肥区,充肥区对应的圆心角为  $\theta_1$ ,称为充肥包角。肥料进入凹槽的时间是影响充肥性能的主要因素之一,当其他参数一定时,随着排肥轮转速的增大,凹槽转经充肥包角的时间变短,即充肥的时间会相应减小,导致凹槽内颗粒肥的充满系数降低,影响施肥稳定性<sup>[18-20]</sup>。因此,需要对充肥阶段进行理论分析,探究排肥器充肥包角与排肥轮转速的关系。

取一单粒颗粒肥  $M$  为研究对象,假设  $M$  只沿排肥轮外缘做相对滑动,在研究最初时刻获得与排肥轮外缘相同的线速度。本文选取排肥轮建立动参考

系  $Ox'y'z'$ , 排肥器壳体建立定参考系  $Oxyz$ , 对  $M$  进入凹槽之前的一般位置进行受力分析, 如图 6 所示。 $M$  受力有重力  $G$ 、滑动摩擦力  $f$ 、排肥轮外缘对  $M$  的支撑力  $N_1$ 、牵连惯性力  $F_e$  以及科氏力  $F_c$ 。其动力学方程为

$$\mathbf{F}_M = \mathbf{G} + \mathbf{F}_e + \mathbf{F}_c + \mathbf{N}_1 + \mathbf{f} \quad (4)$$

其中  $\mathbf{F}_c = 2m\omega v_r$   $\mathbf{f} = \mu N_1$   $\mathbf{F}_e = m\omega_0^2 R'$

式中  $R'$ —— $M$  质心所在半径, m

$\omega$ ——排肥轮角速度, rad/s

$\mu$ —— $M$  与排肥轮之间的摩擦因数

$\omega_0$ —— $M$  沿排肥轮外缘的相对角速度, rad/s

$v_r$ —— $M$  沿排肥轮外缘相对速度, m/s

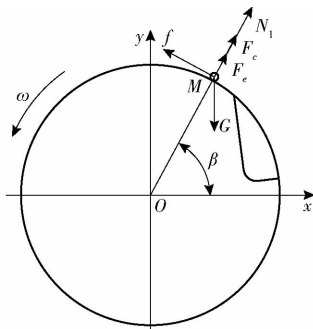


图 6 颗粒肥进入凹槽之前受力分析

Fig. 6 Force analysis of granular fertilizer before entering groove

在其他颗粒肥及排肥轮外缘的作用下,  $M$  运动的角速度  $\omega_0$  很小, 此处牵连惯性力  $F_e$  的大小可忽略不计。在  $M$  相对运动轨迹的切线方向和法线方向建立力学平衡方程式

$$ma_{rr} = \mu N_1 - G \cos \beta \quad (5)$$

$$ma_{rn} = G \sin \beta - 2m\omega v_r - N_1 \quad (6)$$

式中  $\beta$ —— $M$  质心所在半径与水平方向夹角, ( $^\circ$ )

$a_{rr}$ ——切向加速度,  $\text{m/s}^2$

$a_{rn}$ ——法向加速度,  $\text{m/s}^2$

假设  $M$  只沿排肥轮外缘做相对滑动运动, 因此,  $a_{rn} = 0$ ,  $a_{rr} = dv_r/dt = d^2s_r/dt^2$ 。联立式 (5)、(6) 得到  $t$  时刻  $M$  沿排肥轮外缘运动的相对速度为

$$v_r = e^{-2\mu\omega t} \left[ \omega R' + \frac{g(\mu \sin \beta - \cos \beta)(e^{2\mu\omega t} - 1)}{2\mu\omega} \right] \quad (7)$$

凹槽正常充肥情况下,  $M$  的绝对速度  $v_a$ 、排肥轮外缘切向速度  $v_e$ 、 $M$  沿排肥轮外缘相对速度  $v_r$  三者方向共线, 且  $v_e$  大于  $v_r$ ,  $v_a$  方向与  $v_e$  相同, 则  $v_a$ 、 $v_e$  和  $v_r$  三者的关系为

$$v_a = v_e - v_r \quad (8)$$

$M$  沿着排肥轮外缘以相对速度  $v_r$  滑动, 一旦遇到凹槽就会落入槽中。假设  $t_1$  时刻,  $M$  在  $M_1$  位置开始落入凹槽, 忽略其他颗粒肥对  $M$  的影响,  $M$  将

与排肥轮短暂分离, 在自身重力的作用下, 做初速度为  $v_a$  的抛物线运动; 排肥轮旋转一定角度后,  $t_2$  时刻,  $M$  落入槽中, 完成充肥过程, 其运动过程如图 7

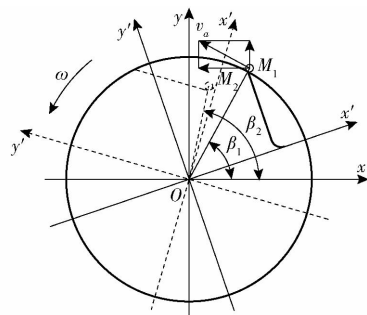


图 7 颗粒肥进入凹槽的过程分析

Fig. 7 Process analysis of granular fertilizer into groove

所示。为得到  $\theta_1$  内凹槽完成充肥过程时排肥轮转速的可调范围, 本文分析  $M$  在参考系  $Oxyz$  第一象限时, 从  $M_1$  位置落入到凹槽最低处  $M_2$  位置的运动规律。沿  $x$ 、 $y$  轴建立其运动学方程式

$$-v_a \cos \beta_1 \Delta t + \frac{1}{2} g (\Delta t)^2 = R_1 \sin \beta_1 - R_2 \sin \beta_2 \quad (9)$$

$$v_a \sin \beta_1 \Delta t = R_1 \cos \beta_1 - R_2 \cos \beta_2 \quad (10)$$

其中  $\beta_2 = \theta_0 + \Delta\theta + \delta$   $R_2 = R - p - r + e'$

$$R_1 = R + e' \quad \beta_1 = \theta_0 + \phi \quad \Delta t = \frac{\Delta\theta\pi}{180^\circ\omega} = \frac{\Delta\theta}{6n}$$

式中  $e'$ —— $M$  的半径, m

$n$ ——排肥轮转速, r/min

$R_1$ —— $t_1$  时刻  $M$  质心所在半径, m

$R_2$ —— $t_2$  时刻  $M$  质心所在半径, m

$\Delta\theta$ —— $\Delta t$  时间内排肥轮旋转角度, ( $^\circ$ )

$\theta_0$ —— $t_1$  时刻  $x'$  轴与  $x$  轴的夹角, ( $^\circ$ )

$\delta$ —— $t_2$  时刻  $M$  质心所在半径与  $x'$  轴的夹角, ( $^\circ$ )

$\beta_1$ —— $t_1$  时刻  $M$  质心所在半径与  $x$  轴的夹角, ( $^\circ$ )

$\beta_2$ —— $t_2$  时刻  $M$  质心所在半径与  $x$  轴的夹角, ( $^\circ$ )

$\phi$ ——截面弧线对应的圆心角, ( $^\circ$ )

联立式 (9)、(10) 可得

$$n^2 [R + e' - (R - p - r + e') \cos(\Delta\theta + \delta - \phi)] = 450g \left( \frac{\Delta\theta}{180^\circ} \right)^2 \sin(\theta_0 + \phi) \quad (11)$$

由式 (11) 可知, 排肥轮转过的角度  $\Delta\theta$  与排肥轮转速  $n$ 、排肥轮的外缘半径  $R$ 、截面法线长度  $p$ 、截面圆弧半径  $r$ 、截面弧线对应的圆心角  $\phi$  及初始转角  $\theta_0$  有关。为求得排肥轮转速的最大调节范围, 令  $\theta_0 = 0^\circ$ , 即凹槽前段进入充肥区的瞬间, 设定其他参数分别为:  $R = 30 \text{ mm}$ ,  $e' = 2 \text{ mm}$ ,  $p = 5 \text{ mm}$ ,  $r = 3 \text{ mm}$ ,  $\phi = 42.5^\circ$ ,  $\delta = 2.5^\circ$ , 应用 Matlab 软件绘制转角随排

肥轮转速的变化曲线,如图 8 所示。

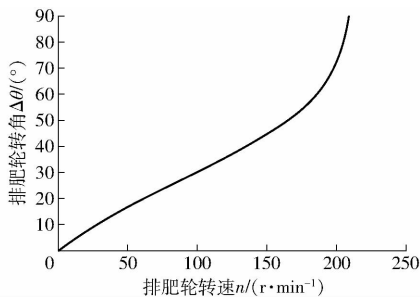


图 8 排肥轮转角随转速的变化曲线

Fig. 8 Changing curve of rotation angle with rotation speed of fertilizer wheel

由图 8 可知,随着排肥轮转速的增大,排肥轮转角逐渐增大。根据假设,排肥轮转角须小于充肥包角的一半,对排肥轮转角  $0^{\circ}$  至  $45^{\circ}$  对应的曲线段进行拟合,得到排肥轮转速影响排肥轮转角的方程为

$$\Delta\theta = 0.2878n + 1.4627 \quad (12)$$

当转角  $\Delta\theta$  达到最大值  $45^{\circ}$  时,由式(12)可得,排肥轮转速为 150 r/min,即排肥轮转速的最大理论值。

3.1.4.2 排肥阶段

当凹槽完成充肥,经过毛刷作用后,进入排肥阶段,排肥区对应的圆心角为  $\theta_3$ ,称为排肥包角。由于凹槽有一定的螺旋角,柔性毛刷与排肥轮外缘相贴合,在理想状况下,当凹槽前段进入排肥包角后,排肥轮每转过一定角度,凹槽内就会有相应质量的颗粒肥在自身重力及离心力作用下排出。并且,在前一个凹槽末端颗粒肥排尽的同时,下一个凹槽前端的颗粒肥已经开始排出,颗粒肥不间断从凹槽内排出,无脉冲现象。由于凹槽为“L”型轮廓,其按照圆柱螺旋线生成包络曲面,轮廓切向线段部分也随着圆柱螺旋线的旋转方向形成一个包络曲面,称为切向线段曲面;同理,轮廓法向线段部分形成的包络曲面称为法向线段曲面。当排肥轮转动时,存在部分颗粒肥沿着切向线段曲面斜向滑落,即颗粒肥在轴线方向提前产生位移,导致在后一个凹槽前端尚未排肥的情况下,前一个凹槽末端的颗粒肥已经提前排出,形成无肥区,从而使一个排肥周期出现断肥,排肥均匀性随之降低。针对上述问题,本文对排肥过程进行动力学分析,寻找影响颗粒肥在凹槽内轴向滑移的变化规律。

取一单粒颗粒肥  $M'$  为研究对象,假设  $M'$  在凹槽末端的最低位置,并且相对排肥轮静止不动,选取排肥轮建立动参考系  $Ox'y'z'$ , $M'$  所在位置转经护肥包角时受力情况如图 9 所示。 $M'$  受力有重力  $G$ 、静摩擦力  $F$ 、切向线段曲面对  $M'$  的支撑力  $N_2$ 、法向线段曲面对  $M'$  的支撑力  $N_3$ 、牵连惯性力  $F_e$ 。 $M'$  未产

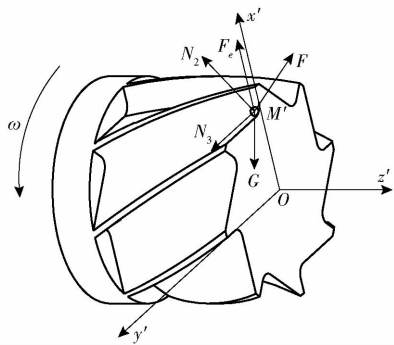


图 9 颗粒肥滑落之前的受力分析

Fig. 9 Force analysis before slipping of granular fertilizer

生相对位移,科氏力为零。其动力学方程为

$$G + F_e + F + N_2 + N_3 = 0 \quad (13)$$

$M'$  开始滑动瞬间, $M'$  沿切向线段曲面有相对运动的趋势, $M'$  与法向线段曲面不再接触,即支撑力  $N_3$  为零,此时  $M'$  的受力情况如图 10 所示。假设  $M'$  受到的静摩擦力方向与其即将运动形成的相对运动轨迹切线方向相同,静摩擦力方向与其在面  $x'oz'$  投影的夹角称为夹角  $\gamma$ 。显然,当夹角  $\gamma$  越大, $M'$  的相对运动轨迹越接近  $y'$  轴方向,沿  $z'$  轴的滑移量越小,反之,沿  $z'$  轴的滑移量越大。因此,需要通过理论分析,探究影响夹角  $\gamma$  大小的因素,得到夹角  $\gamma$  的变化规律。将式(13)分别在  $x'$ 、 $y'$ 、 $z'$  轴上投影,得到方程式

$$-G\cos\varphi + F_e + F\cos\gamma\sin\alpha + N_2\cos\alpha = 0 \quad (14)$$

$$G\sin\varphi - F\sin\gamma = 0 \quad (15)$$

$$F\cos\gamma\cos\alpha - N_2\sin\alpha = 0 \quad (16)$$

其中

$$F_e = mR_2\omega^2$$

式中  $\varphi$ —— $x'$  轴与  $x$  轴夹角, ( $^{\circ}$ )

由式(14)~(16)联立可得

$$\tan\gamma \left[ g\cos\varphi - \frac{\pi^2 n^2 (R - p - r + e')}{900} \right] = g\sin\varphi (\sin\alpha + \cos\alpha \cot\alpha) \quad (17)$$

由式(17)可知,夹角  $\gamma$  的大小与排肥轮转速  $n$ 、螺旋角  $\alpha$ 、颗粒肥开始滑动的初始角度  $\varphi$ 、排肥轮的

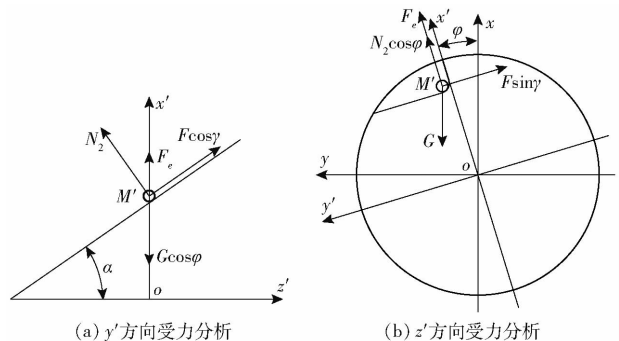


图 10 颗粒肥滑动瞬间的受力分析

Fig. 10 Force analysis at moment of slipping of granular fertilizer

外缘半径  $R$ 、截面法线长度  $p$  及截面圆弧半径  $r$  有关。设定其他参数分别为:  $R = 30\text{ mm}$ ,  $e' = 2\text{ mm}$ ,  $p = 5\text{ mm}$ ,  $r = 3\text{ mm}$ ,  $\varphi = 45^\circ$ ,  $\alpha = 34^\circ$ , 应用 Matlab 软件绘制夹角  $\gamma$  随排肥轮转速  $n$  的变化曲线, 如图 11 所示。

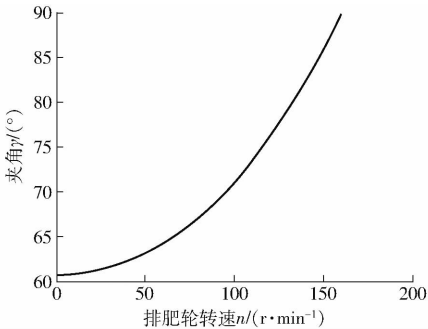


图 11 夹角随排肥轮转速的变化曲线

Fig. 11 Changing curve of inclusion angle with rotation speed of fertilizer wheel

由图 11 可知, 夹角  $\gamma$  随着排肥轮转速的增大逐渐增大。排肥轮转速为  $0 \sim 50\text{ r/min}$  时, 夹角  $\gamma$  变化平缓, 排肥轮转速对夹角  $\gamma$  影响较小; 当排肥轮转速大于  $50\text{ r/min}$  时, 夹角  $\gamma$  变化较快, 排肥轮转速对夹角  $\gamma$  影响较大。由此可见, 适当增大排肥轮转速有助于进一步提高施肥装置的施肥均匀性。

通过对排肥器充肥和排肥两个阶段的理论分析, 得到排肥器结构及运动参数影响转角  $\Delta\theta$  和夹角  $\gamma$  的数学模型, 为进一步提高螺旋式槽轮排肥器的施肥性能提供了理论参考。

3.2 气力输送系统

在水田作业环境中, 根据颗粒肥重力或传统机械结构进行排肥的方式效果不佳, 颗粒肥易潮解, 粘附在施肥管内壁, 其流动性降低甚至堵塞施肥管<sup>[10-12]</sup>。为解决上述问题, 施肥装置采用开放式气力输肥原理进行辅助施肥。

3.2.1 气力输送系统结构与工作原理

气力输送系统结构如图 12 所示, 主要包括风机、主风管、三通管、输肥管、密封圈、密封盖、密封垫、风速调节开关, 其中三通管又包括进风口圆筒段、收缩段、喉部、进肥口和出风口圆筒段。风机挂接于支撑架左侧板, 通过密封垫与主风管始端相通, 并由锁紧扣控制其开合, 主风管穿过支撑架中间立板, 末端由密封盖扣合, 并固接于支撑架右侧板, 6 支三通管的进风口圆筒段通过密封圈分别与主风管插配在一起, 三通管的出风口圆筒段与输肥管进行装配。

系统工作时, 风机产生具有一定风速的压缩气体流经主风管进入 6 支三通管的进风口圆筒段, 紧接着进入三通管的收缩段, 由于三通管的上端进肥

口与排肥器形成较好的密封空间, 气流不会由三通管的进肥口排出, 而是进入出风口圆筒段, 同时由进肥口落入三通管的颗粒肥与气体混合一同进入输肥管, 颗粒肥在气流和自身重力的双重作用下沿着管道方向落入施肥靴已划出的沟槽内。

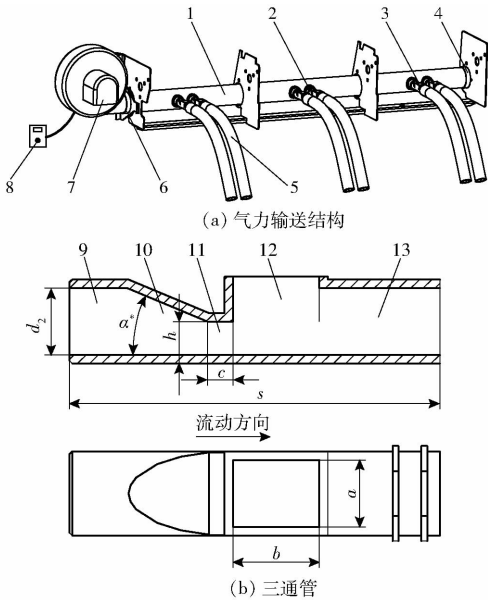


图 12 气力输送系统结构简图

Fig. 12 Structure diagrams of pneumatic conveying system

1. 主风管 2. 密封圈 3. 三通管 4. 密封盖 5. 输肥管 6. 密封垫 7. 风机 8. 风速调节开关 9. 进风口圆筒段 10. 收缩段 11. 喉部 12. 进肥口 13. 出风口圆筒段

3.2.2 气力输送系统主要设计参数

气力输送系统的主要设计参数包括输送率、混合浓度比、输送气流速度、输送风量、风机的选型和输送管路内径<sup>[21-22]</sup>。

水田侧深施肥装置需要与高速插秧机配套, 以六行高速插秧机为例, 假设其作业速度为  $0.7 \sim 1.3\text{ m/s}$ , 作业幅宽为  $1.8\text{ m}$ , 则作业效率为  $0.45 \sim 0.84\text{ hm}^2/\text{h}$ , 按最大作业效率  $0.84\text{ hm}^2/\text{h}$ 、黑龙江省稻作区常规侧深施肥施肥量  $450\text{ kg}/\text{hm}^2$  计算, 可知水田侧深施肥装置的肥料输送率  $W$  为  $378\text{ kg}/\text{h}$ 。

混合浓度比是气力输送系统的一个重要参数, 计算式为

μ' = G\_s / G\_0 (18)

- 式中 μ'——混合浓度比  
G\_s——输送肥料的质量流量, kg/h  
G\_0——气体质量流量, kg/h

在相同的输送率情况下, 混合浓度比越大, 越有利于提高输送能力, 相应管径和单位功率消耗越小。随着混合浓度比的增大, 输肥管易产生堵塞, 系统压力损失增加, 需要风机提供较高的风压。因此, 应根据肥料的物理性质、输送方式以及输送条件等情况,

选定或调整合适的混合浓度比。由于水田侧深施肥装置气源压力较低,输送率较小,混合浓度比 $\mu'$ 取 $1.2^{[21-22]}$ 。

输送气流速度 $v'$ 计算式为

$$v' = Kv_L \quad (19)$$

式中  $v_L$ ——颗粒肥的悬浮速度, m/s

$K$ ——速度系数(一般为1.5~2.5,与混合浓度比和管道复杂性有关)

输送气流速度越大则颗粒肥在输肥管内分布越均匀,肥料输送越顺利,但功率消耗会随之增大,增加颗粒肥破损,降低颗粒肥的缓释效应,增加成本;输送气流速度越低,颗粒肥就会越接近下半部管壁,当输送气流速度低于颗粒肥的沉降速度时,会产生颗粒肥沉积甚至阻塞管路的问题,影响颗粒肥的正常输送<sup>[21-22]</sup>。因此,需要设置一个适宜输送颗粒肥的最佳输送气流速度。通过悬浮试验,实测得到悬浮速度 $v_L$ 为8.27 m/s。由于水田侧深施肥装置所用颗粒肥密度较大,风送输肥管道采用标准的钢丝骨架塑料软管,输肥管在使用过程中呈高低起伏的弯曲状态以及施肥装置工作环境湿度较大,因此选取较高速度系数, $K$ 为2<sup>[21-22]</sup>。由式(19)得出输送气流速度 $v'$ 为16.54 m/s。

输送风量 $Q$ 计算式为

$$Q = \frac{W}{\mu'\rho} \quad (20)$$

式中  $\rho$ ——空气容重,取1.2 kg/m<sup>3</sup>

由式(20)得出输送风量 $Q$ 理论值为263 m<sup>3</sup>/h,因为输送系统不可避免存在一定的漏风量,一般应增加10%左右的裕量<sup>[21]</sup>,因此要求风机输送风量 $Q'$ 至少满足290 m<sup>3</sup>/h。

根据输送风量、输送气流速度及工作条件,本文研究的水田侧深施肥装置选用工作电压为12 V、功率为72 W的可调速离心风机,为3个排肥器提供输送风量。

输送管路内径应按空气消耗量和输送物料特点来确定,当输送风量及输送气流速度确定时,管路内径计算式为

$$d = \sqrt{\frac{4Q'}{3600\pi v'}} \quad (21)$$

水田侧深施肥装置风送输肥管路主要包括主风管、三通管和输肥管。风机产生的风先进入主风管,输送风量为 $Q_1$ ,输送气速为 $v'_1$ ,管径为 $d_1$ ,横截面面积为 $A_1$ ;由于主风管的一端为封闭状态,主风管的气流进入6支三通管,气流开始与颗粒肥混合,输送风量为 $Q_2$ ,输送速度为 $v'_2$ ,管径为 $d_2$ ,横截面面积为 $A_2$ ;气流与颗粒肥混合后进入输肥管,输送风量

为 $Q_3$ ,输送速度为 $v'_3$ ,管径为 $d_3$ ,横截面面积为 $A_3$ 。按照装配关系可知: $d_1 > d_3 > d_2$ ,其中主风管需要与风机出风口孔径配合,取 $d_1$ 为70 mm。假设输送过程中总风量保持不变,由输送风量关系 $Q' = 6v'_2A_2 = 6v'_3A_3$ 可得, $v'_2 > v'_3$ ,当 $v'_3 = v'$ 时,由式(21)可得 $d_3 = 32.15$  mm,为保证能够正常输送肥料,要求 $v'_3 > v'$ ,因此选择内径为32 mm的标准钢丝骨架塑料软管,则需要与输肥管插配的三通管外径为32 mm,内径 $d_2$ 为24 mm。

为尽量避免气力输送系统出现气体泄漏,依据经典文丘里效应对三通管进行设计。由于管径变小,进入收缩段的气流速度逐渐增大,经过喉部后,在进肥口附近会形成一定负压,从而保证进肥口无气体泄漏,其结构如图12所示。为保证最大排肥量时,颗粒肥能够顺利通过三通管进入输肥管,设计进肥口 $a$ 为24 mm, $b$ 为30 mm,收缩段的收缩角 $\alpha^*$ 为21°,喉部高度 $h$ 为16.5 mm,喉部长度 $c$ 为16.5 mm,整体长度 $s$ 为128 mm<sup>[23-26]</sup>。

## 4 试验优化与分析

依据NY/T 1003—2006《施肥机械质量评价技术规范》,运用试验设计与分析的方法对水田侧深施肥装置的施肥稳定性和施肥均匀性进行研究。采用单因素试验的方法分别测得排肥轮转速、前进速度、风机风速的适宜取值范围,通过二次正交旋转组合试验分析影响因素分别与施肥均匀性的施肥量均值和施肥均匀性的变异系数之间关系。

### 4.1 试验材料与方法

试验地点为东北农业大学排种性能实验室,时间为2017年7月,环境温度25℃,环境湿度35%,试验材料为黑龙江省稻作区侧深施肥专用肥,其粒径2~5 mm,容重 $1.33 \times 10^3$  kg/m<sup>3</sup>,含水率17.8%,自然休止角32.2°。

依据NY/T 1003—2006《施肥机械质量评价技术规范》,施肥稳定性测定为静态试验,不考虑插秧机前进速度,分析水田侧深施肥装置不同排肥轮转速下相同时间内排肥量的变化规律;施肥均匀性测定为动态试验,沿机具前进方向按100 mm长度连续等分不少于30段的距离,分别收集落在各小段内的颗粒肥并称量其质量。施肥稳定性和施肥均匀性由施肥量的均值、标准差和变异系数衡量。

均值 $\bar{X}$ 为

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^m X_i}{m} \quad (22)$$

标准差 $S$ 为

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m (X_i - \bar{X})^2}{m - 1}}$$

(23)

变异系数  $V$  为

$$V = \frac{S}{\bar{X}} \times 100\%$$

(24)

式中  $X_i$ ——测定施肥稳定性时表示相同时间内排出颗粒肥的质量;测定施肥均匀性时表示每小段内落入的颗粒肥质量,g  
 $m$ ——测定次数

试验装置主要由颗粒肥收集器、水田侧深施肥装置和 JPS-12 型排种性能检测试验台组成,如图 13 所示。试验时,将自制每小段长度为 100 mm、总长度为 4 000 mm 的肥料收集器放置在传送带上,用于施肥均匀性测定时收集施肥装置下落的颗粒肥,利用无级调速器控制风机转速,风速仪测量风机排风口风速,然后通过调节 JPS-12 型排种试验台电动机变频器频率,控制传送带(颗粒肥收集器)相对于水田侧深施肥装置反向运动,模拟水田侧深施肥装置前进速度。



图 13 水田侧深施肥装置试验台

Fig. 13 Test bed of adjustable blades deep-side fertilizing device

1. 水田侧深施肥装置 2. JPS-12 型排种性能检测试验台
3. 颗粒肥收集器

4.2 试验结果与分析

4.2.1 施肥稳定性

施肥稳定性测定时,肥箱为满肥状态,肥量低于肥箱容积 1/4 时停止试验。用电子天平称量排肥轮转速分别为 10、20、30、40、50、60、70、80 r/min 时施肥装置 10 s 内排出的颗粒肥质量,重复 5 次,由式(22)~(24)计算施肥稳定性排肥量均值  $y_1$  和施肥稳定性变异系数  $y_2$ 。试验结果如表 1 所示。

应用 Design-Expert 软件对表 1 试验结果进行方差分析,表明排肥轮转速对施肥稳定性施肥量均值和施肥稳定性变异系数的模型显著,拟合得到排肥轮转速影响施肥稳定性施肥量均值和施肥稳定性变异系数的回归方程分别为

$$y_1 = 16.88 + 1.74x_1$$

(25)

$$y_2 = 8.48 - 0.27x_1 + 2.25 \times 10^{-3}x_1^2$$

(26)

表 1 不同排肥轮转速下的施肥稳定性性能

Tab. 1 Measurement of fertilization stability at different rows of fertilizer wheel speed

| 排肥轮转速<br>$x_1/(r \cdot \min^{-1})$ | 施肥稳定性施肥量<br>均值 $y_1/g$ | 施肥稳定性变异<br>系数 $y_2/\%$ |
|------------------------------------|------------------------|------------------------|
| 10                                 | 33.73                  | 6.07                   |
| 20                                 | 49.40                  | 4.46                   |
| 30                                 | 71.24                  | 2.18                   |
| 40                                 | 87.77                  | 0.74                   |
| 50                                 | 105.44                 | 1.03                   |
| 60                                 | 121.58                 | 0.90                   |
| 70                                 | 139.22                 | 1.53                   |
| 80                                 | 154.87                 | 1.07                   |

由式(25)、(26)可知,在一定范围内,如果想要得到较小的施肥稳定性施肥量均值,需要通过降低排肥轮的转速来实现,但施肥稳定性变异系数会随着排肥轮转速的降低而增大。为达到最小施肥量为 150 kg/hm<sup>2</sup> 的农艺要求,假设插秧机行走速度为 1 m/s,则排肥轮转速为 16.15 r/min,施肥稳定性变异系数为 4.71%,满足 NY/T 1003—2006《施肥机械质量评价技术规范》中施肥稳定性变异系数小于 7.8% 的要求,说明该施肥装置的施肥稳定性较好。

4.2.2 施肥均匀性

通过分析排肥轮转速、前进速度、风机风速分别影响施肥均匀性施肥量均值和施肥均匀性变异系数的预试验,得到各因素合理的变化范围:排肥轮转速为 20~80 r/min,前进速度为 0.7~1.3 m/s,风机风速为 20~32 m/s,在此基础上采用二次正交旋转组合设计进行试验分析,试验因素编码如表 2 所示。

表 2 试验因素编码

Tab. 2 Coding of experimental factors

| 编码     | 因素                                 |                                |                                |
|--------|------------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
|        | 排肥轮转速<br>$x_1/(r \cdot \min^{-1})$ | 前进速度<br>$x_2/(m \cdot s^{-1})$ | 风机风速<br>$x_3/(m \cdot s^{-1})$ |
| 1.682  | 80                                 | 1.3                            | 32                             |
| 1      | 68                                 | 1.2                            | 30                             |
| 0      | 50                                 | 1.0                            | 26                             |
| -1     | 32                                 | 0.8                            | 22                             |
| -1.682 | 20                                 | 0.7                            | 20                             |

根据二次正交旋转组合设计进行 23 组试验,分别收集落在各小段内的颗粒肥并称量其质量,由式(22)~(24)计算施肥均匀性施肥量均值  $y_3$  和施肥均匀性变异系数  $y_4$ 。试验方案与结果见表 3。

(1) 施肥均匀性施肥量均值

通过对试验数据的分析,施肥均匀性施肥量均值  $y_3$  方差分析如表 4 所示。由表 4 可知, $x_1$ 、 $x_2$ 、 $x_3$ 、 $x_1x_2$ 、 $x_1^2$ 、 $x_2^2$  为有效模型项,拟合得到各因素影响施肥均匀性施肥量均值  $y_3$  的回归方程为

表 3 试验方案与结果

Tab.3 Schemes and results of experiment

| 序号 | 因素                                           |                                            |                                            | 性能指标           |          |
|----|----------------------------------------------|--------------------------------------------|--------------------------------------------|----------------|----------|
|    | $x_1/$<br>( $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ ) | $x_2/$<br>( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) | $x_3/$<br>( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) | $y_3/\text{g}$ | $y_4/\%$ |
| 1  | 32                                           | 0.8                                        | 22                                         | 0.80           | 20.91    |
| 2  | 68                                           | 0.8                                        | 22                                         | 1.61           | 18.38    |
| 3  | 32                                           | 1.2                                        | 22                                         | 0.57           | 28.92    |
| 4  | 68                                           | 1.2                                        | 22                                         | 1.08           | 25.77    |
| 5  | 32                                           | 0.8                                        | 30                                         | 0.77           | 21.99    |
| 6  | 68                                           | 0.8                                        | 30                                         | 1.59           | 13.96    |
| 7  | 32                                           | 1.2                                        | 30                                         | 0.56           | 33.08    |
| 8  | 68                                           | 1.2                                        | 30                                         | 1.10           | 23.72    |
| 9  | 20                                           | 1.0                                        | 26                                         | 0.37           | 33.83    |
| 10 | 80                                           | 1.0                                        | 26                                         | 1.46           | 21.24    |
| 11 | 50                                           | 0.7                                        | 26                                         | 1.40           | 15.62    |
| 12 | 50                                           | 1.3                                        | 26                                         | 0.82           | 27.48    |
| 13 | 50                                           | 1.0                                        | 20                                         | 1.03           | 23.36    |
| 14 | 50                                           | 1.0                                        | 32                                         | 0.98           | 21.41    |
| 15 | 50                                           | 1.0                                        | 26                                         | 0.99           | 21.77    |
| 16 | 50                                           | 1.0                                        | 26                                         | 1.01           | 21.80    |
| 17 | 50                                           | 1.0                                        | 26                                         | 1.01           | 20.34    |
| 18 | 50                                           | 1.0                                        | 26                                         | 1.03           | 19.01    |
| 19 | 50                                           | 1.0                                        | 26                                         | 0.99           | 19.56    |
| 20 | 50                                           | 1.0                                        | 26                                         | 1.00           | 21.02    |
| 21 | 50                                           | 1.0                                        | 26                                         | 0.99           | 17.83    |
| 22 | 50                                           | 1.0                                        | 26                                         | 1.00           | 19.01    |
| 23 | 50                                           | 1.0                                        | 26                                         | 1.02           | 17.88    |

表 4 施肥均匀性施肥量均值方差分析

Tab.4 Variance analysis on mean value of fertilization of fertilization uniformity

| 变异来源     | 平方和                 | 自由度 | 均方                  | $F$                 | $P$         |
|----------|---------------------|-----|---------------------|---------------------|-------------|
| 模型       | 2.00                | 9   | 0.22                | 1 039.29            | <0.000 1 ** |
| $x_1$    | 1.49                | 1   | 1.49                | 6 952.18            | <0.000 1 ** |
| $x_2$    | 0.43                | 1   | 0.43                | 2 023.84            | <0.000 1 ** |
| $x_3$    | $1.28\times10^{-3}$ | 1   | $1.28\times10^{-3}$ | 5.96                | 0.029 6 *   |
| $x_1x_2$ | 0.040               | 1   | 0.040               | 187.32              | <0.000 1 ** |
| $x_1x_3$ | $3.55\times10^{-4}$ | 1   | $3.55\times10^{-4}$ | 1.66                | 0.220 5     |
| $x_2x_3$ | $4.10\times10^{-4}$ | 1   | $4.10\times10^{-4}$ | 1.92                | 0.189 7     |
| $x_1^2$  | 0.016               | 1   | 0.016               | 73.24               | <0.000 1 ** |
| $x_2^2$  | 0.023               | 1   | 0.023               | 106.31              | <0.000 1 ** |
| $x_3^2$  | $7.21\times10^{-7}$ | 1   | $7.21\times10^{-7}$ | $3.37\times10^{-3}$ | 0.954 6     |
| 残差       | $2.79\times10^{-3}$ | 13  | $2.14\times10^{-4}$ |                     |             |
| 失拟差      | $1.15\times10^{-3}$ | 5   | $2.30\times10^{-4}$ | 1.12                | 0.420 8     |
| 纯误差      | $1.64\times10^{-3}$ | 8   | $2.05\times10^{-4}$ |                     |             |
| 总和       | 2.01                | 22  |                     |                     |             |

注：\*\*表示极显著 ( $P<0.01$ )；\*表示显著 ( $0.01\leq P\leq0.05$ )。下同。

$$y_3=0.978+0.050\,7x_1-2.27x_2-2.71\times10^{-3}x_3-0.022\,3x_1x_2-9.88\times10^{-5}x_1^2+1.19x_2^2\quad(27)$$

根据回归方程(27),利用 Design-Expert 软件绘

制出排肥轮转速、前进速度对施肥均匀性施肥量均值的响应曲面图,如图 14 所示。

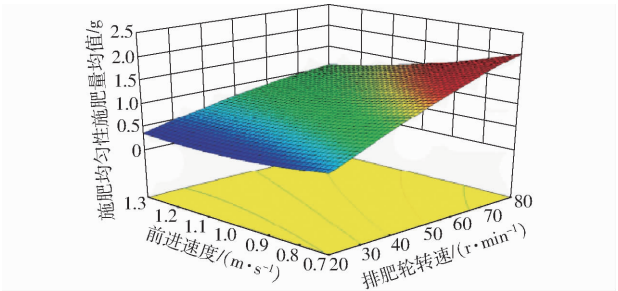


图 14 施肥均匀性施肥量均值的双因素响应曲面

Fig.14 Two-factor response surface for average fertilization amount of fertilization uniformity

由图 14 可知,当风机风速处于零水平 ( $x_3=26\text{ m/s}$ )时,施肥均匀性施肥量均值随着排肥轮转速增大而增大,随着前进速度的增大而减小。排肥轮每转一个周期的排肥量为定值,当前进速度不变时,随着排肥轮转速的增大,单位时间内排肥轮的旋转次数增加,排肥量增大,施肥均匀性施肥量均值相应增大;当前进速度一定时,单位时间内排肥轮排出的肥量为定值,随着前进速度的增大,下落到每段收集盒的肥量相应减少,即施肥均匀性施肥量均值减小。各因素对施肥均匀性施肥量均值影响的贡献率由大到小依次为:前进速度、排肥轮转速、风机风速。

(2)施肥均匀性变异系数

通过对试验数据的分析,施肥均匀性变异系数  $y_4$  的方差分析如表 5 所示。由表 5 可知,  $x_1$ 、 $x_2$ 、 $x_1x_3$ 、 $x_1^2$  为有效模型项,拟合得到各因素影响施肥均匀性变异系数  $y_4$  的回归方程为

$$y_4=26.359-0.914x_1+23.476x_2-2.80\times10^{-3}x_1x_3+8.01\times10^{-3}x_1^2\quad(28)$$

表 5 施肥均匀性变异系数方差分析

Tab.5 Variance analysis of coefficient of variation of fertilize uniformity

| 变异来源     | 平方和    | 自由度 | 均方     | $F$    | $P$         |
|----------|--------|-----|--------|--------|-------------|
| 模型       | 522.09 | 9   | 58.01  | 26.68  | <0.000 1 ** |
| $x_1$    | 149.89 | 1   | 149.89 | 68.94  | <0.000 1 ** |
| $x_2$    | 239.49 | 1   | 239.49 | 110.15 | <0.000 1 ** |
| $x_3$    | 0.90   | 1   | 0.90   | 0.41   | 0.531 4     |
| $x_1x_2$ | 0.11   | 1   | 0.11   | 0.051  | 0.824 4     |
| $x_1x_3$ | 14.34  | 1   | 14.34  | 6.60   | 0.023 4 *   |
| $x_2x_3$ | 2.49   | 1   | 2.49   | 1.15   | 0.303 7     |
| $x_1^2$  | 103.87 | 1   | 103.87 | 47.78  | <0.000 1 ** |
| $x_2^2$  | 3.09   | 1   | 3.09   | 1.42   | 0.254 2     |
| $x_3^2$  | 8.61   | 1   | 8.61   | 3.96   | 0.068 0     |
| 残差       | 28.26  | 13  | 2.17   |        |             |
| 失拟差      | 9.72   | 5   | 1.94   | 0.84   | 0.557 8     |
| 纯误差      | 18.54  | 8   | 2.32   |        |             |
| 总和       | 550.35 | 22  |        |        |             |

根据回归方程(28),利用 Design-Expert 软件绘制出排肥轮转速、风机风速对施肥均匀性变异系数的响应曲面图,如图 15 所示。

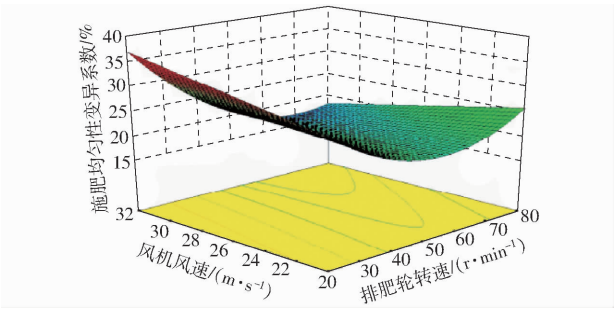


图 15 施肥均匀性变异系数的双因素响应曲面  
Fig. 15 Two-factor response surface of coefficient of variation of fertilization uniformity

由图 15 可知,当前进速度处于零水平( $x_2 = 1.0\text{ m/s}$ )时,风机风速较低,施肥均匀性变异系数随着排肥轮转速的增大先减小后增大,风机风速较高,施肥均匀性变异系数随着排肥轮转速的增大而减小;排肥轮转速较低,施肥均匀性变异系数随着风机风速的增大基本不变,排肥轮转速较高,施肥均匀性变异系数随着风机风速的增大逐渐减小。固体颗粒在水平管中的运动状态,随着输送气流速度的变化而改变,输送气流速度越大则固体颗粒在输料管内越接近均匀分布,输送气流速度逐渐减小时,颗粒则越靠近底部管壁而且分布越密。当输送气流速度小于某一值时,部分固体颗粒便沉落于底部管壁,颗粒一边滑动,一边被推着向前移动,当输送气流速度进一步减小时,则沉落的物料层反复作不稳定的移动,最后完全停滞不动,造成堵塞<sup>[25]</sup>。三通管整体处于水平状态,三通管内的颗粒肥主要借助气流的作用进入输肥管,然后在气流和自身重力的双重作用下完成施肥作业。因此,风机风速较大时,随着排肥轮转速的增大,脉冲现象逐渐减弱,施肥均匀性变异系数逐渐降低,但随着排肥轮转速的增大,排肥量也随之增大,当排肥量增大到一定值时,较小的风机风速已不满足输送气流速度,由于颗粒肥大小不一,形状各异,部分颗粒肥出现离析和分级现象,不能及时输送,导致施肥均匀性变异系数增大。各因素对施肥均匀性变异系数影响的贡献率由大到小依次为:排肥轮转速、前进速度、风机风速。

4.2.3 参数优化与验证

通过对试验数据分析,随着排肥轮转速的减小及前进速度的增大,施肥均匀性施肥量均值减小,施肥均匀性变异系数增大。根据农艺要求,水田侧深施肥装置施肥量的调节范围为 150~930 kg/hm<sup>2</sup>,施肥均匀性变异系数越小越好,且不大于 NY/T

1003—2006《施肥机械质量评价技术规范》中规定的 40%。因此,需对该施肥装置施肥量为 150 kg/hm<sup>2</sup>时的各项作业参数进行优化求解,得到相应的施肥均匀性变异系数。其约束函数为

$$\text{s. t. } \begin{cases} 20\text{ r/min} \leq x_1 \leq 80\text{ r/min} \\ 0.7\text{ m/s} \leq x_2 \leq 1.3\text{ m/s} \\ 20\text{ m/s} \leq x_3 \leq 32\text{ m/s} \\ 0.45\text{ g} \leq y_3(x_1, x_2, x_3) \leq 1.35\text{ g} \\ 0 \leq y_4(x_1, x_2, x_3) \leq 40\% \end{cases} \quad (29)$$

根据约束函数,利用 Design-Expert 软件对回归方程式(27)、(28)进行优化求解,得到在施肥均匀性施肥量均值目标值为 0.45 g 情况下,影响施肥均匀性变异系数的多组优化参数组合,如图 16 所示阴影区域。选取其中施肥均匀性变异系数最低的参数组合作为最优,即排肥轮转速 21.96 r/min、前进速度 0.93 m/s、风机风速 22.93 m/s,此时施肥均匀性变异系数为 28.25%。

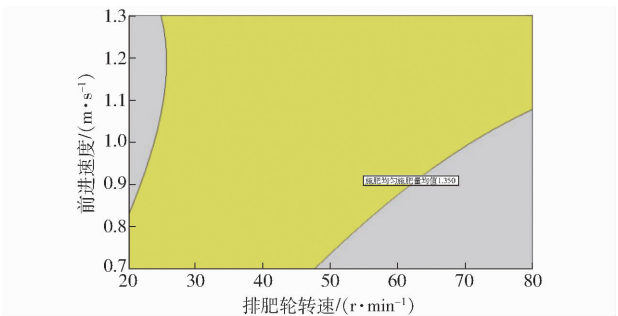


图 16 参数优化分析图  
Fig. 16 Analysis plot of parameter optimization

根据优化分析得到的最优参数组合,于 2017 年 8 月 16 日在东北农业大学排种性能实验室进行台架试验验证,验证结果见表 6。

表 6 优化条件下各评价指标实测值  
Tab.6 Measured value of evaluation indices under optimal condition

| 项目     | 施肥均匀性施肥量<br>均值/g | 施肥均匀性变异<br>系数/% |
|--------|------------------|-----------------|
| 试验平均值  | 0.43             | 29.27           |
| 优化值    | 0.45             | 28.25           |
| 相对误差/% | 4.44             | 3.61            |

通过分析表 6 验证结果可知,试验值与理论优化值相对误差均控制在 4.44% 以内,验证结果与优化结果基本一致,误差在可接受的范围内,说明软件优化参数具有准确性与可行性,该施肥装置的施肥性能满足农艺要求。

5 结论

(1)建立了颗粒肥运动学和动力学模型,通过

对排肥器充肥阶段的运动学分析和排肥器排肥阶段的动力学分析,得出排肥轮转速越大越有利于提高施肥均匀性,求得充肥包角内排肥轮转速的最大理论值为 150 r/min。根据颗粒肥的输送条件,设计了适宜输送颗粒肥的气力输送系统。

(2)采用二次正交旋转组合试验获得排肥轮转速、前进速度和风机风速分别对施肥均匀性施肥量均值和施肥均匀性变异系数的影响规律,得到各因素对施肥均匀性施肥量均值影响贡献率由大到小依次为:前进速度、排肥轮转速、风机风速;对施肥均匀性变异系数影响贡献

率由大到小依次为:排肥轮转速、前进速度、风机风速。

(3)为得到水田侧深施肥装置在施肥量 150 ~ 930 kg/hm<sup>2</sup>调节范围内的施肥均匀性变异系数,采用多目标优化分析建立优化模型,得到施肥均匀性施肥量均值目标值为 0.45 g/时最优参数组合为:排肥轮转速 21.96 r/min、插秧机前进速度 0.93 m/s、风机风速 22.93 m/s,此时施肥均匀性变异系数为 28.25%。并通过台架试验验证,试验值与理论优化值相对误差均控制在 4.44% 以内,说明软件优化参数具有准确性与可行性。

## 参 考 文 献

- 1 马昕,杨艳明,刘智蕾,等.机械侧深施控释掺混肥提高寒地水稻的产量和效益[J].植物营养与肥料学报,2017,23(4):1095-1103.  
MA Xin, YANG Yanming, LIU Zhilei, et al. Yield increasing effect of mechanical topdressing of polymer-coated urea mixed with compound fertilizer in cold area rice[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2017, 23(4):1095-1103. (in Chinese)
- 2 SHENG Z, SHO S, SHOHEI R, et al. Effect of infiltration rate on nitrogen dynamics in paddy soil after high-load nitrogen application containing <sup>15</sup>N tracer [J]. Ecological Engineering, 2011, 37(5): 685-692.
- 3 PENG X L, YANG Y M, YU C L, et al. Crop management for increasing rice yield and nitrogen use efficiency in northeast China [J]. Agronomy Journal, 2015, 107(5): 1682-1690.
- 4 潘圣刚,莫钊文,罗锡文,等.机械同步深施肥对水稻群体质量及产量的影响[J].华中农业大学学报,2013,32(2):1-5.  
PAN Shenggang, MO Zhaowen, LUO Xiwen, et al. Effects of deeply mechanized fertilizer application on the quality and grain yield of direct seedling rice[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2013, 32(2):1-5. (in Chinese)
- 5 SHOJI S, DELGADO J, MOSIER A, et al. Use of controlled release fertilizers and nitrification inhibitors to increase nitrogen use efficiency and to conserve air and water quality[J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2001, 32(7-8): 1051-1070.
- 6 BAUTISTA U, KOIKE M, SUMINISTRADO D C. PM-power and machinery: mechanical deep placement of nitrogen in wetland rice[J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 2001, 78(4):333-346.
- 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 Wenying. The paddy field mechanization state in Japan and China[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2002, 24(3):23-25. (in Chinese)
- 8 王玉顺,郭俊旺,聂永芳,等.外槽轮排种器性能检测及分析[J].山西农业大学学报,2004,17(3):256-258.  
WANG Yushun, GUO Junwang, NIE Yongfang, et al. Detecting and analyzing on performance of external force feed[J]. Journal of Shanxi Agricultural University, 2004, 17(3):256-258. (in Chinese)
- 9 陈雄飞,罗锡文,王在满,等.水稻穴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)
- 10 位国建,荐世春,崔荣江,等.水稻机插秧同步侧深施肥技术分析及试验[J].农机化研究,2017,39(9):190-194.  
WEI Guojian, JIAN Shichun, CUI Rongjiang, et al. Analysis and experiment of mechanical transplanting rice sync with the side deep fertilizing technology[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2017, 39(9):190-194. (in Chinese)
- 11 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.  
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. (in Chinese)
- 12 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)
- 13 刘忠军,张晋国.斜槽轮式排种器工作长度的对比试验[J].农机化研究,2009,31(4):137-138.  
LIU Zhongjun, ZHANG Jinguo. Skewed slot wheeled seeding mechanism working length comparative trial research[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2009, 31(4): 137-138. (in Chinese)
- 14 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)
- 15 刘春波,臧英,罗锡文,等.水稻直播机螺旋槽轮排种器设计与试验[J].沈阳农业大学学报,2016,47(6):734-739.  
LIU Chunbo, ZANG Ying, LUO Xiwen, et al. Design and experiment of spiral grooved wheel for rice direct seeding machine[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2016, 47(6):734-739. (in Chinese)
- 16 田立权,王金武,唐汉,等.螺旋槽式水稻穴直播排种器设计与性能试验[J/OL].农业机械学报,2016,47(5):46-52. http:

- // www. j-csam. org/jcsam/ch/reader/view\_abstract. aspx? file\_no = 20160507&flag = 1. DOI:10. 6041/j. issn. 1000-1298. 2016. 05. 007.
- TIAN Liquan, WANG Jinwu, TANG Han, et al. Design and performance experiment of helix grooved rice seeding device [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(5):46-52. (in Chinese)
- 17 潘世强,赵亚祥,金亮,等. 2BFJ-6 型变量施肥机外槽轮式排肥器的设计与试验研究[J]. 中国农机化学报,2016,37(1):40-42.
- PAN Shiqiang, ZHAO Yaxiang, JIN Liang, et al. Design and experiment research of external grooved wheel fertilizer apparatus of 2BFJ-6 type variable rate fertilizer applicator [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2016, 37(1):40-42. (in Chinese)
- 18 王永梅,杨宛章,王希贵. 螺旋槽轮式排种器的研究[J]. 新疆农业大学学报,2006,29(1):67-70.
- WANG Yongmei, YANG Wanzhang, WANG Xigui. Study on row sowing device with spiral sheave [J]. Journal of Xinjiang Agricultural University, 2006, 29(1):67-70. (in Chinese)
- 19 周海波,梁秋艳,魏天路,等. 双级振动精密排种器外槽轮式定量供种装置设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2016,47(增刊):57-61. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=2016s009&flag=1](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=2016s009&flag=1). DOI:10. 6041/j. issn. 1000-1298. 2016. S0. 009.
- ZHOU Haibo, LIANG Qiuyan, WEI Tianlu, et al. Design and experiment of quantitative seed supply device with fluted roller used for double vibrating precision seed meter [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(Supp.):57-61. (in Chinese)
- 20 张涛,刘飞,刘月琴,等. 离散元模拟外槽轮排肥器排量分析 [J]. 农机化研究,2015,37(9):198-201.
- ZHANG Tao, LIU Fei, LIU Yueqin, et al. Discrete element simulation of outer groove wheel type fertilizer discharging device capacity analysis [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2015, 37(9):198-201. (in Chinese)
- 21 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)
- 22 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/OL]. 农业机械学报,2013,44(4):113-117,136. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20130420&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20130420&journal_id=jcsam). DOI:10. 6041/j. issn. 1000-1298. 2013. 04. 020.
- HAN Qibiao, HUANG Xingfa, LIU Honglu, et al. Comparative analysis on fertilization performance of six venturi injectors [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(4):113-117,136. (in Chinese)
- 23 佟飞虎. 文丘里管、文丘里喷嘴流量计的参数化设计[D]. 沈阳:东北大学,2007.
- TONG Feihu. The parametric design of venturi tube and venturi nozzle flowmeter [D]. Shenyang: Northeastern University, 2007. (in Chinese)
- 24 刘凯,陆海峰,郭晓镭,等. 文丘里管结构对高浓度煤粉流动特征及压差特性的影响[J]. 化工学报,2015,66(5):1656-1666.
- LIU Kai, LU Haifeng, GUO Xiaolei, et al. Influence of venturi structures on flow characteristic and pressure drop of gas-coal mixture [J]. Journal of Chemical Industry and Engineering, 2015, 66(5):1656-1666. (in Chinese)
- 25 KIM Y J, KIM H J, RYU K H, et al. Fertiliser application performance of a variable-rate pneumatic granular applicator for rice production [J]. Biosystems Engineering, 2008, 100(4):498-510.
- 26 齐兴源,周志艳,杨程,等. 稻田气力式变量施肥机关键部件的设计与试验[J]. 农业工程学报,2016,32(6):20-26.
- QI Xingyuan, ZHOU Zhiyan, YANG Cheng, et al. Design and experiment of key parts of pneumatic variable-rate fertilizer applicator for rice production [J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(6):20-26. (in Chinese)
- 27 马征,李耀明,徐立章. 农业工程领域颗粒运动研究综述[J/OL]. 农业机械学报,2013,44(2):22-29. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20130205&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20130205&journal_id=jcsam). DOI:10. 6041/j. issn. 1000-1298. 2013. 02. 005.
- MA Zheng, LI Yaoming, XU Lizhang. Summarize of particle movements research in agricultural engineering realm [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(2):22-29. (in Chinese)
- 28 施印炎,陈满,汪小昂,等. 稻麦精准变量施肥机排肥性能分析与试验[J/OL]. 农业机械学报,2017,48(7):97-103. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20170712&flag=1](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20170712&flag=1). DOI:10. 6041/j. issn. 1000-1298. 2017. 07. 012.
- SHI Yinyan, CHEN Man, WANG Xiaochan, et al. Analysis and experiment of fertilizing performance for precision fertilizer applicator in rice and wheat fields [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(7):97-103. (in Chinese)
- 29 王金武,唐汉,王金峰,等. 指夹式玉米精量排种器导种投送运移机理分析与试验[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 feed metering device for corn [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(1):29-37,46. (in Chinese)