

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.01.006

# 马铃薯微型种薯种植机双侧位深施肥装置设计与试验

刘文政<sup>1,2</sup> 何进<sup>1,2</sup> 李洪文<sup>1,2</sup> 魏忠彩<sup>1,2</sup> 张振国<sup>1,2</sup> 李学强<sup>2,3</sup>

(1. 中国农业大学工学院, 北京 100083; 2. 山东省马铃薯生产装备智能化工程技术研究中心, 德州 253600;

3. 山东希成农业机械科技有限公司, 德州 253600)

**摘要:** 基于前期设计的马铃薯微型种薯(简称“微型薯”)播种机,结合微型薯种植农艺特点,设计了一种单行薯双侧位深施肥装置,并对其关键部件排肥器和施肥开沟器进行分析。采用运动学理论分析了颗粒肥料在排肥器内的运动特性,并通过离散元仿真模拟研究了不同螺距下排肥器排肥情况,以确定较佳的螺距;采用力学理论对施肥开沟器进行分析,明确开沟圆盘等设计参数。机具静态试验表明,排肥器间的排肥均匀性变异系数为2.29%,排肥器排肥稳定性较好;田间试验结果表明,肥料与种薯间的平均横向间距为51.2 mm,平均纵向间距为63.5 mm,施肥装置的整体施肥作业性能满足农艺要求。

**关键词:** 马铃薯; 种植机; 排肥器; 开沟器; 性能试验

中图分类号: S223.93 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2020)01-0056-10

OSID: 

## Design and Experiment of Double-side Deep Fertilizing Device for Potato Micro-seed Planter

LIU Wenzheng<sup>1,2</sup> HE Jin<sup>1,2</sup> LI Hongwen<sup>1,2</sup> WEI Zhongcai<sup>1,2</sup> ZHANG Zhenguo<sup>1,2</sup> LI Xueqiang<sup>2,3</sup>

(1. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China

2. Shandong Provincial Intelligent Engineering and Technology Research Center for Potato Production Equipment, Dezhou 253600, China

3. Shandong Xicheng Agricultural Machinery Science and Technology Co., Ltd., Dezhou 253600, China)

**Abstract:** Aiming at promoting the research of mechanical fertilization in potato micro-seed planting, and enhancing the development level of potato industry in China, a kind of fertilizing device corresponding to the former designed potato micro-seed planter was developed. The fertilizing device mainly consisted of a fertilizer box, four fertilizer feeders, eight fertilizer guiding tubes and eight fertilizing openers. Combining with kinematic analysis and discrete element simulation, the whole structure of fertilizer feeder was designed and key parameters were confirmed. The length of spiral blade at single-rotation was 120 mm, the outer diameter and pitch of spiral blade was 56 mm and 45 mm, respectively. The whole structure of fertilizing opener was designed, and parameters of the key parts such as ditching discs and tension spring were determined by theoretic analysis. For ditching discs, the diameter was 350 mm, the angle between ditching discs at the place of cluster point was 60°, and the angle between ditching discs was 10°. As indicated in the static experiment of machine, the CV of uniformity of fertilizer discharge was 2.29%. Results showed that fertilizer feeders had good stability for fertilizer discharge. Furthermore, in order to test the performance of the whole fertilizing device, field experiment was conducted. Results showed that the mean horizontal and vertical spacing between fertilizer and potato seeds were 51.2 mm and 63.5 mm, respectively, which can be confirmed that the overall fertilization performance of the fertilizing device met the agronomic requirements.

**Key words:** potato; seeder; fertilizing device; opener; performance experiment

收稿日期: 2019-08-14 修回日期: 2019-09-10

基金项目: 山东省泰山产业领军人才工程高效生态农业创新项目(LJNY201615)和教育部创新团队发展计划项目(IRT13039)

作者简介: 刘文政(1991—),男,博士生,主要从事现代农业装备与计算机测控技术研究,E-mail: caulwzheng@126.com

通信作者: 何进(1979—),男,教授,博士生导师,主要从事现代农业装备与计算机测控技术研究,E-mail: hejin@cau.edu.cn

## 0 引言

马铃薯微型种薯(简称“微型薯”)采用马铃薯脱毒快速繁殖技术培育而成,种薯种植可提升马铃薯的品质和产量<sup>[1-2]</sup>;同时,机械化种植微型薯可降低劳动强度、减少作业成本、提升生产效率等。因此,以微型薯为种薯且采用机械化种植方式对促进我国马铃薯产业的发展意义重大<sup>[3-4]</sup>。目前,国内普遍应用的播种机主要以切块薯为播种对象,不适宜微型薯的机械化种植作业。我国以微型薯为播种对象的种植机械尚处于起步阶段,已有的研究主要集中在播种方面<sup>[5-7]</sup>,而关于微型薯机械化施肥方面的研究较少。微型薯机械化种植、同时播施肥料作为基肥,可提升土壤养分,促进微型薯植株生长发育,提升作物品质和产量<sup>[8-9]</sup>。

目前,国内已开展的相关研究主要围绕传统切块薯机械化施肥问题。吕金庆等<sup>[10]</sup>为解决传统马铃薯播种机采用外槽轮式施肥装置存在的施肥量不足、施肥不均等问题,研制出螺旋推进式施肥装置,提升了播种机的施肥质量;杨然兵等<sup>[11]</sup>针对国内马铃薯种植机普遍存在的肥料定位不精确问题,结合马铃薯种植农艺特点,提出了分层施肥技术,设计出深度可调式分层施肥开沟器;孙伟等<sup>[12]</sup>针对西北黄土高原旱作区普遍采用的抗旱种植模式,设计了马铃薯施肥播种起垄全膜覆盖种行覆土一体机,该机除具备开沟、播种、覆土、起垄、覆膜等功能外,还具备施肥功能。

通过在内蒙古、陕西等地区调研发现,种薯育种公司或农户对于具备施肥功能的微型薯种植机的需求较为迫切。因此,开展微型薯机械化施肥方面的研究很有必要。本文基于前期设计的微型薯播种机<sup>[13]</sup>,借鉴传统切块薯机械化施肥方面的研究,并结合微型薯种植农艺特点,设计一种单行薯双侧位深施肥装置。通过理论分析和仿真模拟,设计螺旋式排肥器和施肥开沟器等施肥装置关键部件,并开展机具静态性能试验和田间试验。

## 1 微型薯种植特点与施肥农艺要求

### 1.1 种植特点

微型薯采用垄作种植方式,一般可分为单垄单行或单垄双行两类种植模式<sup>[14]</sup>。本设计采用单垄单行种植模式,其中,起垄高度不低于200 mm,播种深度为100~200 mm,株距为80~200 mm,行距为800~900 mm。

### 1.2 施肥农艺要求

我国现有马铃薯播种机种肥播施以侧位分施为

主<sup>[11]</sup>,对于微型薯播种而言,借鉴传统马铃薯种肥播施方式。对于单垄单行种植模式而言,为确保微型薯后期拥有充足的肥力保障其生长,其播施方式为将肥料施于单行薯种两侧,即采用双侧位深施肥的方式,肥料与薯种的相对位置关系主要由横向间距 $l_h$ 和纵向间距 $l_v$ 来控制(图1)。根据农艺要求,一般取 $l_h$ 为30~60 mm, $l_v$ 为50~80 mm。

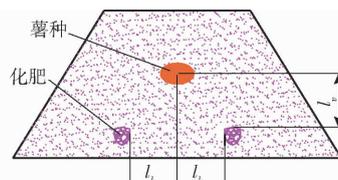


图1 微型种薯双侧位深施肥示意图

Fig. 1 Diagram of double sides of deep fertilization for potato micro-seed

## 2 整机结构与工作原理

### 2.1 整机结构

马铃薯微型种薯种植机是在前期设计的播种机<sup>[13]</sup>基础上增设施肥装置,除具备开沟、施肥、播种、覆土、起垄等功能外,增加了施肥功能。其中,施肥装置由4个施肥单体和种肥分施一体箱组成(图2);每个施肥单体包括1个螺旋式排肥器、2根导肥管和2个施肥开沟器,种肥分施一体箱则是在箱体内添加隔板将箱体分为储种箱和储肥箱;4个施肥单体分别与种肥分施一体箱的储肥箱排肥口相联接。此外,每个施肥单体对应施肥装置其中1个播种单体,且施肥开沟器分别布置于播种单体两侧。

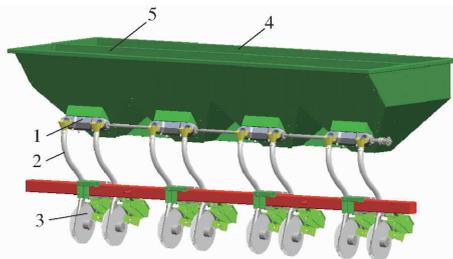


图2 施肥装置结构示意图

Fig. 2 Structure sketch of fertilizing device

1.螺旋式排肥器 2.导肥管 3.施肥开沟器 4.储种箱 5.储肥箱

### 2.2 工作原理

施肥作业过程可分为3个阶段:充肥、分肥和排肥。地轮通过链传动系统带动排肥器,肥箱内的肥料由于重力作用以及自身流动性充入排肥器,实现充肥;排肥器中的螺旋装置将充入的肥料输送分配至每个排肥口,完成分肥;输送至排肥口的肥料从排肥口排出落入导肥管,并沿着导肥管落入施肥开沟器所开的肥沟内,完成整个排肥过程。

### 3 螺旋输送式排肥器设计

#### 3.1 排肥器整体结构

排肥器(图3a)主要包括上护腔、下护腔、螺旋装置、接肥盒等。其中,螺旋装置由轴和螺旋叶片组成(图3b)。上/下护腔为外观尺寸相同的护肥腔体(图3c、3d),上护腔中间部位开有矩形入肥口;上/下护腔通过螺栓螺母贴合在一起,并将螺旋装置包裹其中而形成肥腔,且肥腔两端部形成两个出肥口,为肥料深施于单垄单行薯种的两侧做准备。排肥器安装于肥箱的下端,入肥口与肥箱排肥口相联通;地轮通过链传动系统将动力传递至轴,并带动轴转动,轴上安装有左右对称的两组螺旋叶片(左螺旋叶片、右螺旋叶片),其螺距、高度相等而螺旋方向相反。随着轴的转动,肥箱内的肥料充入肥腔内,旋转的螺旋装置将肥料分别推送至两侧的出肥口处。

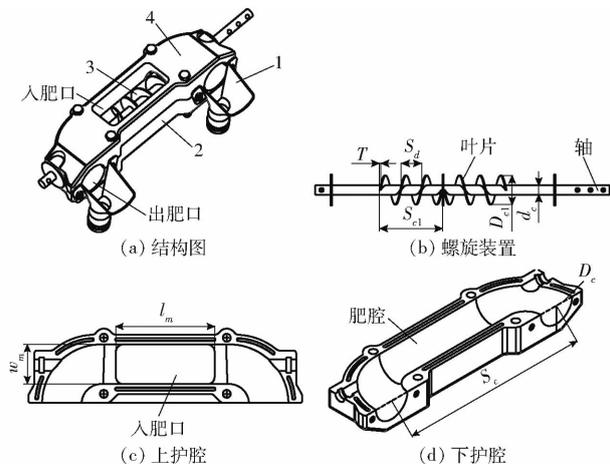


图3 排肥器结构图

Fig. 3 Structure diagrams of fertilizing device

1. 接肥盒 2. 下护腔 3. 螺旋装置 4. 上护腔

根据微型薯单垄单行种植农艺要求,肥料施于单垄单行薯种的两侧,且考虑到微型薯需肥量较大( $750 \sim 900 \text{ kg/hm}^2$ ),采用传统的槽轮式排肥器不能满足需求,故借鉴螺旋输送机设计一种排肥稳定且排肥量大的螺旋输送式排肥器。依据前期播种机整机设计结构参数<sup>[13]</sup>并参照《运输机械设计选用手册》<sup>[15]</sup>,为确保肥料从肥箱顺利充入肥腔内,设计的排肥器矩形入肥口长度 $l_m$ 为160 mm,宽度 $w_m$ 为65 mm;根据肥箱箱体结构并保证足够的充肥量,设计的排肥器两圆形出肥口之间的距离 $S_c$ 为340 mm,直径 $D_c$ 为65 mm,则肥腔直径为65 mm。螺旋叶片是排肥器的关键部件,一般有实体螺旋面式、带式、齿式等多种形式,考虑到肥料为吸湿性小、不易结块的颗粒,故螺旋叶片选用螺旋推力大、排肥效率高的实体螺旋面式。为确保螺旋装置具有足够的强度和

刚度,螺旋叶片和轴均采用农业机械中常用的Q235钢制材料,螺旋叶片厚度 $T$ 设计为2.0 mm,轴直径 $d_c$ 设计为18 mm。通过文献<sup>[16-17]</sup>及分析发现,螺旋装置的输肥和分肥效果受单旋向(左旋/右旋)螺旋叶片长度 $S_{c1}$ 、螺旋外缘直径 $D_{c1}$ 、螺距 $S_d$ 等因素的影响,以上关键参数将根据后续分析确定。

#### 3.2 运动学分析

肥料从肥箱充入排肥器后,螺旋面与肥料接触并对肥料产生直接作用,即利用螺旋面的摩擦力来克服肥料自身重力,实现肥料的输送和投放。因此,肥料在螺旋装置上的运动规律对肥料的输送和投放均有重要影响,需对其运动特性进行分析。

排肥器在输送肥料的过程中,因肥料颗粒的运动受螺旋叶片转动的影响,颗粒的运动并非是单纯的沿轴线做直线运动,而是沿轴线和圆周旋转方向的复合运动,并朝着靠近出肥口处的方向移动。选取右旋螺旋叶片上距轴线 $r$ 处的肥料颗粒 $O$ 为研究对象,如图4a所示。其中, $\alpha$ 为肥料颗粒 $O$ 在螺旋叶片上距轴线 $r$ 点处的螺旋升角,即过该点的法线与轴线的夹角<sup>[10]</sup>,存在关系式

$$\tan \alpha = \frac{S_d}{2\pi r} \quad (1)$$

由于肥料颗粒与螺旋叶片之间存在摩擦,则颗粒受到的螺旋叶片合力 $F_h$ 方向沿着法线方向偏移一定角度 $\beta$ ,该角是由肥料颗粒对螺旋叶片间的摩擦角 $\varphi$ 及叶片表面粗糙程度共同决定的<sup>[16]</sup>。本文不考虑螺旋叶片粗糙程度对 $\beta$ 角的影响,则 $\beta \approx \varphi$ 。

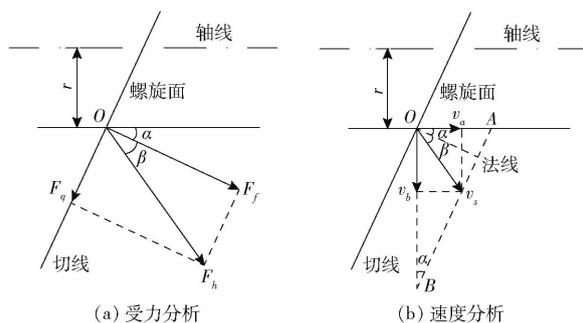


图4 肥料颗粒运动分析

Fig. 4 Kinematic analysis of fertilizer particle

肥料颗粒 $O$ 受螺旋叶片合力 $F_h$ (可分解为颗粒 $O$ 所受到的螺旋叶片沿切向和法向方向的分力 $F_q$ 、 $F_f$ )作用下,在肥腔内做沿着轴线和圆周旋转方向的复合运动(图4b),其中轴线和圆周旋转方向的速度分别为 $v_a$ 、 $v_b$ ,其合速度为 $v_s$ 。其中, $v_{OB}$ 为肥料颗粒 $O$ 在螺旋叶片上距螺旋轴轴线 $r$ 点处的圆周线速度,则

$$v_{OB} = \frac{2\pi r n_z}{60} \quad (2)$$

式中  $n_z$ ——螺旋装置转速

由图 4b 并结合文献[16]得

$$v_s \cos\beta = v_{OB} \sin\alpha \quad (3)$$

联立式(2)、(3)得

$$v_s = \frac{2\pi n_z \sin\alpha}{60 \cos\beta} \quad (4)$$

则轴向和圆周旋转方向速度  $v_a$ 、 $v_b$  为

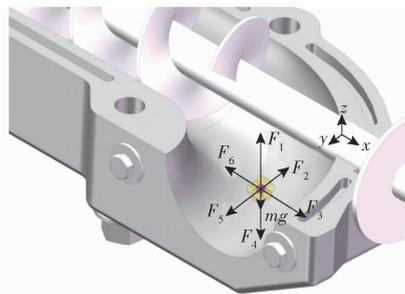
$$\begin{cases} v_a = v_s \cos(\alpha + \beta) = \frac{2\pi n_z \sin\alpha \cos(\alpha + \beta)}{60 \cos\beta} \\ v_b = v_s \sin(\alpha + \beta) = \frac{2\pi n_z \sin\alpha \sin(\alpha + \beta)}{60 \cos\beta} \end{cases} \quad (5)$$

设肥料颗粒与螺旋叶片间的摩擦因数为  $\mu$ , 由分析可知  $\mu = \tan\beta$ , 联立式(4)、(5)得

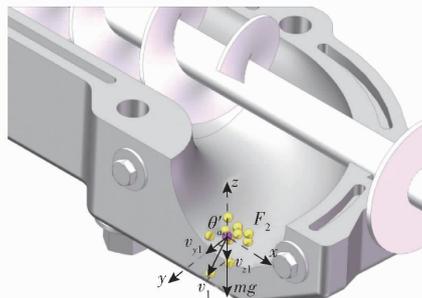
$$\begin{cases} v_a = \frac{n_z S_d \left(1 - \frac{\mu S_d}{2\pi r}\right)}{60 \left[1 + \left(\frac{S_d}{2\pi r}\right)^2\right]} \\ v_b = \frac{n_z S_d \left(\mu + \frac{S_d}{2\pi r}\right)}{60 \left[1 + \left(\frac{S_d}{2\pi r}\right)^2\right]} \end{cases} \quad (6)$$

由式(6)可知,影响肥料颗粒运动特性的主要因素有螺旋叶片螺距  $S_d$ 、肥料颗粒与螺旋叶片间的摩擦因数  $\mu$ 、螺旋装置转速  $n_z$  和颗粒肥料在螺旋叶片上距轴线距离  $r$  等;其中,  $r$  受螺旋外缘直径  $D_c$  和轴直径  $d_c$  的限制,即  $d_c/2 < r < D_c/2$ 。根据文献[18-19],取肥料颗粒与螺旋叶片间的摩擦因数  $\mu$  为 0.4。基于前期肥腔结构设计及文献[20],螺旋外缘直径与肥腔的间隙应满足相关设计要求,设定螺旋外缘直径  $D_{c1}$  为 56 mm。由上可得,螺旋装置在一定的转速下,螺距对肥料颗粒的轴向速度和圆周旋转方向的速度均产生显著影响,为获取尽可能大轴向速度的同时圆周旋转速度尽量小,应选取合适的螺距  $S_d$ 。

肥料颗粒在螺旋装置搅动输送作用下运动至输送机末端,此时肥料从螺旋装置上脱离,自螺旋装置末端至排肥口之间有一定距离  $S_p$  ( $S_c = 2S_{c1} + 2S_p$ ),肥料在  $S_p$  距离段的运动处于排肥阶段。选其中一粒肥料  $O'$  为研究对象(图 5),肥料  $O'$  由于自身脱离螺旋装置瞬间具有一定初速度  $v_0$ ,将沿着肥腔继续向前(逐渐靠近排肥口)作减速运动。在接近排肥口处,因肥料颗粒间一直保持动态接触的状态,螺旋叶片将推力通过相接触的颗粒传递至靠近排肥口处的肥料  $O'$ ;在肥料的推挤作用下,因肥料颗粒间的流动特性,肥料  $O'$  最终从肥腔内经过排肥口掉落至导肥管内。肥料在排肥阶段将经历趋近排肥口的减速运动和运动至排肥口处的掉落运动两个过程。



(a)第一过程受力分析



(b)第二过程运动分析

图 5 排肥阶段分析

Fig. 5 Analysis of fertilizer distributing stage

以肥料  $O'$  为研究对象,取  $x$  轴与螺旋轴轴线平行,其方向向右; $y$  轴与出肥口横截面相垂直,且朝着出肥口向外; $z$  轴竖直向上。对排肥阶段的第一运动过程进行分析(图 5a),为便于观察和区分,肥料  $O'$  设置为红色,与其相接触的其他肥料颗粒颜色设置为黄色且为透明体,则

$$\sum_{i=1}^n F_i + mg = ma \quad (7)$$

式中  $F_i$ ——其他肥料颗粒对肥料  $O'$  的作用力, N  
 $m$ ——肥料  $O'$  的质量, kg  
 $g$ ——重力加速度  
 $a$ ——肥料  $O'$  的加速度,  $m/s^2$

其中,  $a$  为方向和大小随时间  $t$  变化的变量加速度,由分析知

$$\int_0^t \int_0^t a dt^2 = S_p \quad (8)$$

联立式(7)、(8)得

$$\int_0^t \int_0^t \left( \frac{\sum_{i=1}^n F_i}{m} + g \right) dt^2 = S_p \quad (9)$$

由式(9)可知,  $S_p$  越大,肥料颗粒受到相互间作用力的时间越长,进而增加排肥过程中出现不稳定现象的几率,因此,应尽量减小  $S_p$ 。尽量减小  $S_p$  即是尽量增大螺旋叶片长度  $S_{c1}$ ,使得肥料在脱离螺旋装置时离出肥口尽量近。根据肥腔结构,最终设定  $S_{c1} = 120$  mm,则  $S_p = 50$  mm。

对排肥阶段的第二过程进行分析(图 5b)。此时,肥料  $O'$  已从排肥口排出,肥料颗粒趋于离散状

态,假设肥料  $O'$  不与其他肥料颗粒相接触,则其只受重力,做初速度为  $v_1$  斜向下 ( $v_1$  速度方向与  $y$  轴夹角为  $\theta'$ ) 的斜抛运动。不考虑空气阻力对肥料  $O'$  的影响,则经历时间  $t_1$  (肥料  $O'$  未与导肥管等接触),肥料  $O'$  沿  $y$  轴正方向和  $z$  轴负方向的速度  $v_{y1}$ 、 $v_{z1}$  为

$$\begin{cases} v_{y1} = v_1 \cos\theta \\ v_{z1} = v_1 \sin\theta + gt_1 \end{cases} \quad (10)$$

综上,肥料颗粒运动特性受螺旋装置及肥腔的共同影响,通过运动学分析确定单旋向(左旋/右旋)螺旋叶片长度  $S_{c1} = 120$  mm、螺旋外缘直径  $D_{c1} = 56$  mm,而螺距的选取需开展进一步的研究。

### 3.3 离散元仿真分析

由上述分析可知,螺旋叶片螺距  $S_d$  显著影响肥料颗粒运动特性。为选取合适的螺距  $S_d$  以使肥料颗粒在排肥器内具有尽可能大轴向速度的同时圆周旋转速度尽量小,采用离散元仿真分析方法,对排肥器开展排肥仿真试验。

因肥料颗粒表面及颗粒与排肥器之间无粘附力,选用 Hertz - Mindlin 无滑动接触力学模型,相关离散元仿真参数如表 1 所示<sup>[18]</sup>。

表 1 离散元仿真参数

Tab. 1 Parameters of discrete element simulation

参数	肥料	螺旋装置	护肥腔
泊松比	0.25	0.28	0.41
剪切模量/Pa	$1.0 \times 10^7$	$8.1 \times 10^{10}$	$2.18 \times 10^9$
密度/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	1861	7135	1160
参数	肥料颗粒间	肥料-螺旋装置/肥箱	肥料-护肥腔
恢复系数	0.3	0.5	0.5
静摩擦因数	0.6	0.4	0.6
滚动摩擦因数	0.30	0.05	0.15

简化排肥器 SolidWorks 三维模型,仅保留上护腔、下护腔、螺旋装置和肥箱等,将其另存为 .stp 格式并分别导入 EDEM 软件中,同时根据表 1 设定仿真参数;其中,根据设计经验及前期分析,螺旋叶片螺距  $S_d$  取值范围为 20 ~ 50 mm。为进一步探究较合理的螺距  $S_d$ ,分别取螺距  $S_d$  为 20、25、30、35、40、45、50 mm 以开展排肥器离散元仿真试验。根据文献[21-22],设置肥料颗粒为平均直径 3.56 mm 的球形颗粒,且肥料颗粒由一个单元球颗粒构成,单元球半径限制在 0.8 ~ 1.2 倍的初始半径之间;为缩短仿真运行时间,将瑞利时步设置为 30%,网格尺寸取 5 倍最小球形颗粒单元尺寸,每 0.1 s 保存一次数据。仿真过程中,在肥箱正上端创建颗粒工厂,生成的肥料颗粒以 2 m/s 的速度下落并随机落入肥箱以及与肥箱相联通的排肥器肥腔内,仿真运行时间设定为 10 s;待颗粒生成完毕后,将此时仿真文件导出,并设定初始仿真时间为 0 s。以导出的文件为基础,设置螺旋装置转速为 40 r/min<sup>[10]</sup>,仿真运行时间为 10 s,对不同螺距下的排肥器进行离散元模拟仿真,图 6 是各螺距下对应第 8 秒时的排肥器排肥仿真情况。根据肥料颗粒在排肥器内的运行速度大小,图中采用红、绿、蓝对不同速度肥料颗粒进行区分,其中红色表示速度较大的颗粒,绿色表示中速颗粒,蓝色表示静止或接近静止的低速颗粒。

排肥器内肥料沿轴向和圆周方向的平均速度是体现排肥器排肥性能的重要指标,考虑到单个排肥器内肥料朝着两侧排肥口处做反方向轴向运动,选取第 8 秒时排肥器肥腔右半部分内的肥料颗粒为研究对象,通过 EDEM 软件后处理模块,可得不同螺距下排肥器内肥料沿轴向和圆周方向的平均速度,如表 2 所示。随着螺距的增加,排肥器内肥料沿轴线方向的平均速度逐渐增大,圆周方向的平均速度

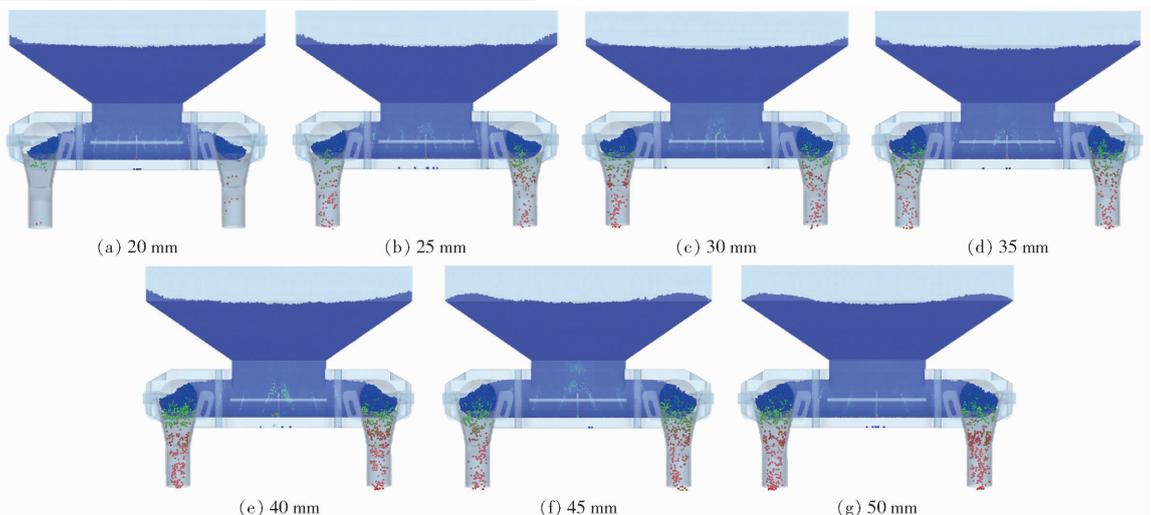


图 6 不同螺距下排肥器排肥情况

Fig. 6 Fertilizer distributing situation of fertilizer device in different pitches

表 2 第 8 秒时不同螺距排肥器中肥料颗粒运动速度

Tab. 2 Fertilizer distributing situation of fertilizer device in different pitches at 8 s

螺距 $S_d$ /mm	轴向速度/( $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$ )	圆周速度/( $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$ )
20	7.32	1.95
25	9.03	3.59
30	10.91	6.71
35	12.97	6.49
40	13.87	7.21
45	15.53	6.03
50	18.01	8.10

(螺距为 35、45 mm 时除外)也呈逐渐增加的趋势。结合图 6,螺距  $S_d$  为 20 mm 时,因螺距较小,此时肥料运动至排肥口处的量较少,表明在螺距较小的情况下,排肥器的输肥能力较弱。当螺距  $S_d$  大于或等于

35 mm 时,排肥器的输肥能力有显著的提升,排肥器内的肥料沿轴向的平均速度超过 12 mm/s,而圆周方向平均速度增长较为缓慢,尤其对于  $S_d = 45$  mm,肥料沿圆周方向的平均速度均低于螺距为 50、40、35、30 mm 的排肥器。综合以上分析,本文选取螺旋面螺距  $S_d = 45$  mm,使排肥器具备较好的输肥、排肥效果。

## 4 施肥开沟器设计

### 4.1 整体结构

施肥开沟器为施肥装置的关键部件,用于开置肥沟并将肥料导落至肥沟内。基于前期研究,设计一种通过性好、不易缠草且牵引阻力小的圆盘式施肥开沟器,主要包括固定架、连接架、拉簧、开沟圆盘、施肥管、刮土板(内、外侧)等(图 7)。

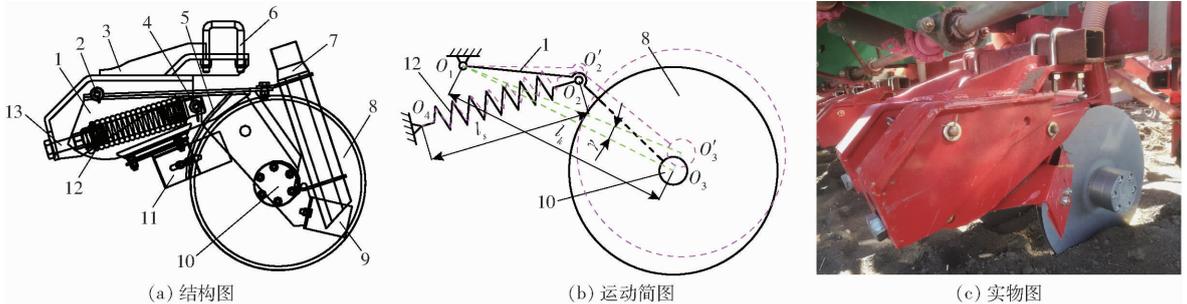


图 7 施肥开沟器

Fig. 7 Fertilizing opener

1. 连接架 2. 销轴 I 3. 固定架 4. 销轴 II 5. 圆盘护板 6. U 型螺栓 7. 施肥管 8. 开沟圆盘 9. 内刮土板 10. 圆盘支撑轴 11. 外刮土板 12. 拉簧 13. 拉簧螺栓

固定架通过 U 型螺栓安装在施肥装置的下端;连接架前端与固定架通过销轴 I 铰接,其后端下侧通过圆盘支撑轴以一定夹角对称安装两开沟圆盘。因开沟圆盘属于与土壤直接接触的工作部件,对其耐磨性和强度均提出较高要求,根据机械设计手册<sup>[23]</sup>确定其材质为 NM550 耐磨钢。施肥管固定安装在连接架的后端且处于两开沟圆盘之间。为避免开沟圆盘在开沟过程中粘土,在开沟圆盘内外侧分别安装刮土板,且内刮土板 V 型凹面与施肥管出肥口呈半包围状态,以确保排出的肥料顺利排落至肥沟内;刮土板材料选用 65 Mn 钢以保证其强度和韧性。为避免开沟圆盘前端上侧有杂物穿入圆盘之间造成圆盘堵塞,在对应部位设置圆盘护板且固定安装于连接架。为保障开沟圆盘在开沟过程中具备过载保护功能,在固定架和连接架之间装连有拉簧;其中,拉簧的一端( $O_4$ )采用拉簧螺栓固定安装在固定架上,另一端( $O_2$ )则通过销轴 II 与连接架铰接,其材质选用弹簧常用的 65 Mn 钢。当开沟圆盘在工作过程中遭受较大冲击力时,安装架带动开沟圆盘等组件以

销轴 I 为圆心( $O_1$ )向上转动(图 7b),即圆盘绕着点  $O_1$  以线段  $O_1O_3$  逆时针旋转  $\gamma$  角。

### 4.2 开沟圆盘设计

两开沟圆盘以一定夹角  $\delta$  对称安装在圆盘支撑轴上,其刃口相交于一点  $P$ ,点  $P$  即为双开沟圆盘的聚点;此外,圆盘中心  $O_3$  与聚点  $P$  连线  $O_3P$ 、圆盘中心  $O_3$  与圆盘底部端点  $F$  连线  $O_3F$  间所构成的夹角  $\theta$  为聚点位置夹角(图 8)<sup>[24]</sup>,聚点  $P$  位置一般用聚点位置夹角  $\theta$  来表示<sup>[25]</sup>。作业过程中,聚点应处于地表以上位置,若聚点位置较低,土壤或秸秆杂草等易涌入两开沟圆盘与圆盘支撑轴之间的空当部位且不易疏散,造成开沟圆盘堵塞,进而导致圆盘支撑轴的磨损;若聚点位置过高( $\theta < 90^\circ$ ),在圆盘夹角  $\delta$  不变的情况下,两圆盘与沟底的接触点间距离越大,所开肥沟沟宽则越大,肥沟底部凸起越大,施肥效果变差<sup>[26]</sup>。因此,聚点位置对施肥装置的工作性能具有显著影响,一般情况下,聚点位置夹角  $\theta$  取值范围为  $55^\circ \sim 75^\circ$ 。因考虑开沟圆盘所开肥沟底部位于种沟沟底下方,为保证开沟深度,设定聚点位置夹角  $\theta$  为  $60^\circ$ 。

根据农业机械设计手册,可得双圆盘开沟装置所开肥沟宽度  $b$  为

$$b = D_a (1 - \cos\delta) \sin \frac{\theta}{2} \quad (11)$$

式中  $D_a$ ——圆盘直径, mm

由式(11)可知,开沟宽度受圆盘直径、圆盘夹角以及聚点位置的共同影响,随着圆盘直径、圆盘夹角以及聚点位置夹角的增大,开沟宽度也逐渐增加,肥沟底部凸起变大。

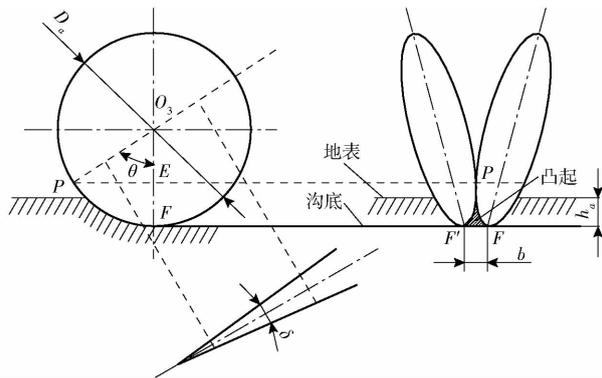


图8 双开沟圆盘结构示意图

Fig. 8 Structure sketch of double ditching-disc

开沟装置在工作过程中,圆盘开沟部件对土壤的作用较为复杂,从实际情况来看,可将其分为滚切土壤和侧移推土<sup>[27]</sup>。根据力学理论,开沟圆盘与土壤之间的力可从3方面分析<sup>[28]</sup>:圆盘正压力  $F_p$ 、圆盘刃口处切削力  $F_c$ 和圆盘剪切力  $F_s$ 。由以上分析,土壤对圆盘的应力包括压应力  $\sigma$ 、切应力  $q$ 和剪应力  $\tau$ (图9)。

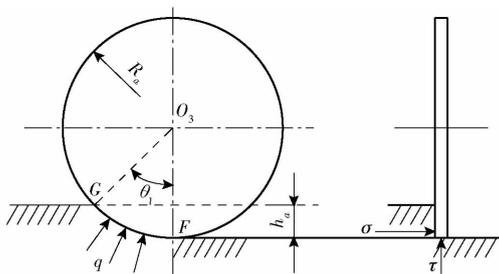


图9 开沟圆盘受力示意图

Fig. 9 Force diagram of ditching-disc

由此可得,圆盘正压力  $F_p$ 、圆盘刃口处切削力  $F_c$ 和圆盘剪切力  $F_s$ 存在关系式

$$\begin{cases} F_p = \iint_{S_a} \sigma dS_a \\ F_c = \int_{l_a} q dl_a \\ F_s = \iint_{S_a} \tau dS_a \end{cases} \quad (12)$$

其中

$$\begin{cases} S_a = R_a^2 \arccos \frac{R_a - h_a}{R_a} - (R_a^2 - R_a h_a) \sqrt{2R_a h_a - h_a^2} \\ l_a = R_a \theta_1 = R_a \arccos \frac{R_a - h_a}{R_a} \end{cases} \quad (13)$$

式中  $S_a$ ——开沟圆盘与土壤间接触面积

$l_a$ ——开沟圆盘与地表接触点  $G$ 和沟底接触点  $F$ 间刃部弧长

$R_a$ ——圆盘半径

$\theta_1$ ——圆盘中心  $O_3$ 与点  $G$ 连线  $O_3G$ 和圆盘中心  $O_3$ 与圆盘底部端点  $F$ 连线  $O_3F$ 间所构成的夹角,且  $\theta_1 < \theta$

$h_a$ ——圆盘开沟深度

根据式(12)、(13),在  $h_a$ 一定的情况下,圆盘正压力  $F_p$ 、圆盘刃口处切削力  $F_c$ 和圆盘剪切力  $F_s$ 均随圆盘直径  $D_a$ 的增加而增大。此外,在  $h_a$ 和圆盘直径  $D_a$ 一定的情况下,当圆盘夹角  $\delta$ 不断增加,开沟圆盘与土壤间的接触面积将变大,进而导致开沟阻力增大。

综上,开沟圆盘直径  $D_a$ 、圆盘夹角  $\theta$ 和聚点位置夹角  $\delta$ 对肥沟的形态、回土量和土壤扰动情况均有直接影响,参照农业机械设计手册<sup>[25]</sup>以及实际生产经验,设定开沟圆盘直径  $D_a = 350$  mm,圆盘夹角  $\theta = 10^\circ$ ;此时,由式(11)可得双圆盘开沟装置所开肥沟宽度  $b = 15.3$  mm。

## 5 试验

排肥均匀性和作业性能稳定性是施肥装置两个主要的性能指标,其中排肥均匀性通过机具静态性能试验来测定<sup>[29]</sup>,作业性能稳定性则通过田间试验进行测试<sup>[11]</sup>。

### 5.1 机具静态性能试验

选用河南省美岛之星作物高端营养科技发展有限公司生产的聚天门冬硼酸复合肥(Mn + Zn质量分数大于等于10%)作为试验用肥,肥料为颗粒状,密度为1 002.3 g/L,自然休止角为32°。

试验时,拖拉机将挂接的马铃薯微型种薯播种机抬起一定高度,使地轮轮缘与地面相脱离,整机呈水平状态;同时,肥箱内倒入适量肥料,转动地轮,使肥料完全充入排肥器内。之后,转动地轮21圈,因播种机分4个播种单元,对应安装4个排肥器(分别标记为I、II、III、IV),接取每个排肥器所排出的肥料,分别测量其质量,重复5次求平均值<sup>[30]</sup>,测量结果如表3所示。

排肥器间排肥均匀性可用排肥变异系数来表示,其计算式为<sup>[31]</sup>

$$C_V = \frac{S_b}{m_p} \times 100\% \quad (14)$$

表 3 排肥量测定结果

Tab.3 Test result of fertilizing amount g

试验 序号	质量			
	排肥器 I	排肥器 II	排肥器 III	排肥器 IV
1	3 382	3 586	3 542	3 518
2	3 368	3 524	3 486	3 406
3	3 374	3 568	3 552	3 470
4	3 406	3 644	3 454	3 424
5	3 352	3 658	3 476	3 452
均值	3 376	3 596	3 502	3 454

其中

$$\begin{cases} S_b = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (m_i - \bar{m}_p)^2} \\ \bar{m}_p = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n m_i \end{cases} \quad (15)$$

式中  $S_b$ ——标准差 $\bar{m}_p$ ——4 个排肥器在 5 次排肥试验中的平均排肥质量, g $n$ ——排肥器个数,  $n=4$  $m_i$ ——第  $i$  个排肥器在 5 次排肥试验中的平均排肥质量, g

结合表 3 和式 (14)、(15) 可得, 排肥均匀性标准差  $S_b = 79.58$  g, 变异系数为 2.29%。由此表明, 排肥器排肥稳定性较好, 满足相关技术要求<sup>[32]</sup>。

## 5.2 田间试验

为测试施肥装置作业性能稳定性, 2019 年 5 月在内蒙古自治区牙克石市乌尔其汗煤田镇育种基地开展田间试验。试验地长约 1 200 m, 宽约 1 000 m; 土壤类型为黑壤土, 含水率约 17%, 地表温度为 7℃ 左右; 试验前进行旋耕整地作业, 地表平整疏松, 满足机械化播种施肥要求; 装配有施肥装置的微型种薯播种机以三点悬挂方式悬挂于拖拉机上, 选用东方红 LX1304 型轮式拖拉机, 标定功率为 95.6 kW, 机具前进速度为 5 km/h; 种薯品种选用早大白马铃薯微型种薯, 肥料与前述试验用肥相同。试验仪器主要有地表温度测试仪(量程 -50 ~ 70℃)、量程 0 ~ 15 m 钢卷尺、刨土铲等。田间试验如图 10 所示。

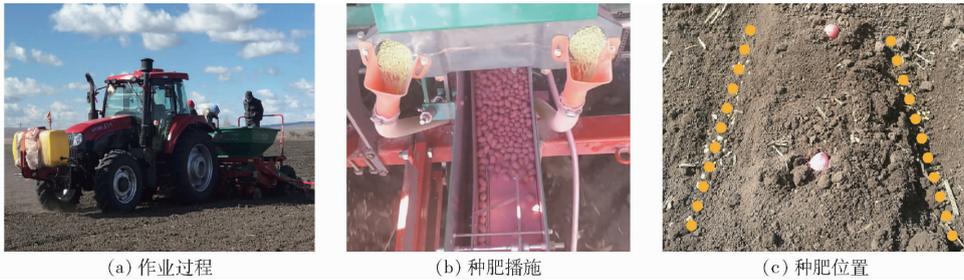


图 10 田间作业性能试验

Fig.10 Performance experiment in field

试验指标及方法参照行业标准<sup>[33-34]</sup>, 主要测试指标为种薯横向和纵向间距。机具作业后, 随机选取 5 个测量段; 在每个测量段处用刨土铲横向切开土层, 测定截面处每个种薯与肥料之间在水平方向和垂直方向的最小距离, 每个测量段连续测定 20 个点, 共计 100 个点, 记录并计算均值。通过测定得, 在水平方向种肥平均横向间距为 51.2 mm, 在垂直方向种肥平均纵向间距为 63.5 mm。根据农艺要求, 肥料与种薯的横向间距为 30 ~ 60 mm, 纵向间距为 50 ~ 80 mm, 由田间作业性能试验结果可知, 该施肥装置施肥作业性能满足农艺要求。此外, 机具作业过程中, 施肥装置中开沟圆盘等开沟部件的开沟性能较好且未出现缠草或堵塞现象。

## 6 结论

(1) 根据微型薯种植农艺特点, 设计了单行薯

双侧位深施肥装置, 并对排肥器、开沟器等关键部件的结构参数进行了理论分析和计算。

(2) 对排肥器的整体结构进行设计, 结合肥料在排肥器内的运动学分析和离散元仿真模拟, 确定螺旋装置的单旋向(左旋/右旋)螺旋叶片长度为 120 mm, 螺旋外缘直径为 56 mm, 螺距为 45 mm。

(3) 对施肥开沟器整体结构进行设计, 对开沟圆盘等关键部件进行了理论分析, 确定了开沟圆盘的关键参数为: 直径为 350 mm、聚点位置夹角为 60°、圆盘夹角为 10°。

(4) 开展机具静态性能试验和田间试验, 机具静态性能试验表明, 排肥均匀性变异系数为 2.29%, 说明排肥器排肥稳定性较好; 田间试验结果表明, 肥料与种薯间平均横向间距为 51.2 mm, 平均纵向间距为 63.5 mm, 说明施肥装置的整体施肥作业性能满足要求。

## 参 考 文 献

[1] SALIMI K, AFSHARI R T, HOSSEINI M B, et al. Effects of gibberellic acid and carbon disulphide on sprouting of potato

- minitubers[J]. *Scientia Horticulturae*, 2010, 124(1): 14-18.
- [2] SOLTANI M, KAFI M, NEZAMI A, et al. Effects of silicon application at nano and micro scales on the growth and nutrient uptake of potato minitubers (*Solanum tuberosum* var. Agria) in greenhouse conditions[J]. *BioNanoScience*, 2018, 8(1): 218-228.
- [3] 刘文政,何进,李洪文,等. 基于离散元的微型马铃薯仿真参数标定[J/OL]. *农业机械学报*, 2018, 49(5): 125-135, 149. LIU Wenzheng, HE Jin, LI Hongwen, et al. Calibration of simulation parameters for potato minituber based on EDEM[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2018, 49(5): 125-135, 149. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20180514&flag=1](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20180514&flag=1). DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2018.05.014. (in Chinese)
- [4] 刘文政,何进,李洪文,等. 马铃薯微型种薯振动排序播种装置播种性能优化[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(7): 1-11. LIU Wenzheng, HE Jin, LI Hongwen, et al. Seeding performance optimization on vibration-arranging type seeding device for potato micro-seed[J]. *Transactions of the CSAE*, 2019, 35(7): 1-11. (in Chinese)
- [5] NIU K, FANG X F, LIU Y C, et al. Optimized design and performance evaluation of an electric cup-chain potato metering device[J]. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 2017, 10(2): 36-43.
- [6] 赖庆辉,马文鹏,苏微,等. 气吸圆盘式微型薯排种器设计与试验[J/OL]. *农业机械学报*, 2016, 47(12): 30-37. LAI Qinghui, MA Wenpeng, SU Wei, et al. Design and experiment of pneumatic disc seed-metering device for mini-tuber[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(12): 30-37. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20161205&flag=1&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20161205&flag=1&journal_id=jcsam). DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.12.005. (in Chinese)
- [7] 吕金庆,衣淑娟,陶桂香,等. 马铃薯气力精量播种机设计与试验[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(10): 16-24. LÜ Jinqing, YI Shujuan, TAO Guixiang, et al. Design and experiment of precision air-suction type planter for potato[J]. *Transactions of the CSAE*, 2018, 34(10): 16-24. (in Chinese)
- [8] ZHANG W, LIU X, WANG Q, et al. Effects of potassium fertilization on potato starch physicochemical properties [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2018, 117: 467-472.
- [9] 刘飞,诸葛玉平,陈增明,等. 控释肥对马铃薯产量、氮素利用率及经济效益的影响[J]. *中国农学通报*, 2011, 27(12): 215-219. LIU Fei, ZHUGE Yuping, CHEN Zengming, et al. Effects of controlled-release fertilizer on potato yield, nitrogen use efficiency and economic benefit[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2011, 27(12): 215-219. (in Chinese)
- [10] 吕金庆,王泽明,孙雪松,等. 马铃薯螺旋推进式排肥器研究与试验[J]. *农机化研究*, 2015, 37(6): 194-196. LÜ Jinqing, WANG Zeming, SUN Xuesong, et al. Design and experimental study of feed screw potato planter propulsion[J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2015, 37(6): 194-196. (in Chinese)
- [11] 杨然兵,杨红光,连政国,等. 马铃薯种植机分层施肥开沟器设计与试验[J/OL]. *农业机械学报*, 2018, 49(11): 111-120. YANG Ranbing, YANG Hongguang, LIAN Zhengguo, et al. Design and experiment of separated layer fertilization furrow opener for potato planter[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2018, 49(11): 111-120. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20181112&flag=1&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20181112&flag=1&journal_id=jcsam). DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2018.11.012. (in Chinese)
- [12] 孙伟,刘小龙,张华,等. 马铃薯施肥播种起垄全膜覆盖种行覆土一体机设计[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(20): 14-22. SUN Wei, LIU Xiaolong, ZHANG Hua, et al. Design of potato casingsoil planter in all-in-one machine combined with fertilizing, sowing, ridging, complete film mulching and planting line covering[J]. *Transactions of the CSAE*, 2017, 33(20): 14-22. (in Chinese)
- [13] 刘文政,何进,李洪文,等. 基于振动排序的马铃薯微型种薯播种机设计与试验[J/OL]. *农业机械学报*, 2019, 50(8): 70-80, 116. LIU Wenzheng, HE Jin, LI Hongwen, et al. Design and experiment of vibration-arranging based seeder for potato micro-seed [J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2019, 50(8): 70-80, 116. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20190808&flag=1](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20190808&flag=1). DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2019.08.008. (in Chinese)
- [14] 毛琼. 脱毒微型马铃薯播种机关键部件的设计与试验研究[D]. 武汉:华中农业大学, 2013.
- [15] 《运输机械设计选用手册》编辑委员会. 运输机械设计选用手册[M]. 北京:化学工业出版社, 1999.
- [16] 张东海. 螺旋输送机的优化研究[D]. 大连:大连理工大学, 2006.
- [17] 程韦武,庞莲香,蓝同平. 螺旋输送机设计[J]. *现代制造技术与装备*, 2018(4): 8-10. CHENG Weiwu, PANG Lianxiang, LAN Tongping. Design of screw conveyor[J]. *Modern Manufacturing Technology and Equipment*, 2018(4): 8-10. (in Chinese)
- [18] 刘正道,王庆杰,刘春鸽,等. 腔盘式精量穴施肥装置设计与试验[J/OL]. *农业机械学报*, 2018, 49(10): 137-144, 355. LIU Zhengdao, WANG Qingjie, LIU Chungge, et al. Design and experiment of precision hole-fertilizing apparatus with notched plate[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2018, 49(10): 137-144, 355. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20181015&flag=1&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20181015&flag=1&journal_id=jcsam). DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2018.10.015. (in Chinese)

- [19] 刘彩玲,黎艳妮,宋建农,等. 基于 EDEM 的离心甩盘撒肥器性能分析与试验[J]. 农业工程学报,2017,33(14):32-39.  
LIU Cailing, LI Yanni, SONG Jiannong, et al. Performance analysis and experiment on fertilizer spreader with centrifugal swing disk based on EDEM[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(14): 32-39. (in Chinese)
- [20] 宋诚生,董玉德,李延峰,等. 螺旋输送机螺旋轴的设计和寿命预测方法的研究[J]. 中国机械工程,2003,14(12):66-69,6.  
SONG Chengsheng, DONG Yude, LI Yanfeng, et al. Screw axis's design and life forecast of screw conveyer[J]. China Mechanical Engineering, 2003, 14(12): 66-69, 6. (in Chinese)
- [21] 杨庆璐,李子涵,李洪文,等. 基于 CFD-DEM 耦合的集排式分肥装置颗粒运动数值分析[J/OL]. 农业机械学报,2019,50(8):81-89.  
YANG Qinglu, LI Zihan, LI Hongwen, et al. Numerical analysis of particle motion in pneumatic centralized fertilizer distribution device based on CFD-DEM[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(8): 81-89. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20190809&flag=1](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20190809&flag=1). DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2019.08.009. (in Chinese)
- [22] 刘正道,王庆杰,李洪文,等. 腔盘式穴施肥装置柔性护肥机构设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2018,49(11):97-103.  
LIU Zhengdao, WANG Qingjie, LI Hongwen, et al. Design of flexible fertilizer protection mechanism for hole-fertilizing apparatus with notched plate[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(11): 97-103. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20181111&flag=1&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20181111&flag=1&journal_id=jcsam). DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2018.11.011. (in Chinese)
- [23] 成大先. 机械设计手册[M]. 北京:化学工业出版社,2002.
- [24] 王超,刘从京,李洪文,等. 非对称式大小圆盘开沟装置设计与试验[J]. 农业工程学报,2018,34(18):28-36.  
WANG Chao, LIU Congjing, LI Hongwen, et al. Design and experiment of asymmetric large-small double discs ditching device[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(18): 28-36. (in Chinese)
- [25] 中国农业机械化科学研究院. 农业机械设计手册:上册[M]. 北京:中国农业科学技术出版社,2007.
- [26] 禹栋栋. 免耕播种机双圆盘开沟器结构参数对作业性能影响研究[D]. 哈尔滨:东北农业大学,2017.
- [27] 张守勤,马旭,左春桢,等. 圆盘开沟部件的受力及计算机模拟[J]. 农业工程学报,1995,11(4):52-56.  
ZHANG Shouqin, MA Xu, ZUO Chuncheng, et al. Forces acting on disk colter and computer simulation[J]. Transactions of the CSAE, 1995, 11(4): 52-56. (in Chinese)
- [28] 张守勤,左春桢,马成林. 圆盘开沟器受力模型的研究[J]. 农业机械学报,1998,29(增刊):67-71.  
ZHANG Shouqin, ZUO Chuncheng, MA Chenglin. The study on the model of disc coulter force[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 1998, 29(Supp.): 67-71. (in Chinese)
- [29] 吕金庆,孙贺,兑瀚,等. 锥形撒肥圆盘中肥料颗粒运动模型优化与试验[J/OL]. 农业机械学报,2018,49(6):85-91,111.  
LÜ Jinqing, SUN He, DUI Han, et al. Optimization and experiment of fertilizer particle motion model in conical spreading disk[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(6): 85-91, 111. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20180610&flag=1&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20180610&flag=1&journal_id=jcsam). DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2018.06.010. (in Chinese)
- [30] GB/T 9478—2005 谷物条播机 试验方法[S]. 2005.
- [31] 吕金庆,尚琴琴,杨颖,等. 锥盘式撒肥装置的性能分析与试验[J]. 农业工程学报,2016,32(11):16-24.  
LÜ Jinqing, SHANG Qinqin, YANG Ying, et al. Performance analysis and experiment on granular fertilizer spreader with cone disc[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(11): 16-24. (in Chinese)
- [32] GB/T 25417—2010 马铃薯种植机 技术条件[S]. 2010.
- [33] NY/T 1415—2007 马铃薯种植机质量评价技术规范[S]. 2007.
- [34] NY/T 990—2006 马铃薯种植机械 作业质量[S]. 2006.