

免耕播种机无轴螺旋排肥输肥装置设计与试验

朱惠斌 吴 宪 白丽珍 王明鹏 雷丰朗 方 圆

(昆明理工大学现代农业工程学院, 昆明 650500)

摘要: 针对西南地区坡度较大、免耕地表秸秆及根茬等造成耕地平整度较差,驱动式破茬防堵免耕播种机作业时机具整体产生振动较大,导致排肥器排肥及导肥管导肥作业性能差的问题,基于螺旋输送原理,设计了一种柔性无轴螺旋排肥输肥装置。通过对肥料的螺旋输送以及物料临界输送速度分析,得出螺旋叶片最佳充肥尺寸以及转速范围。采用 EDEM 仿真进行二次回归正交旋转试验和响应曲面法分析无轴螺旋排肥输肥装置最佳工作参数:螺旋叶片内半径 3 mm、螺旋叶片外半径 12.8 mm、螺旋叶片转速 319 r/min 以及螺旋间距 24.5 mm。田间测试结果表明,在地表平整度平均值以及地表坡度分别为 8.9 cm、16.1°时,无轴螺旋排肥输肥装置在作业速度 1.5 m/s 时,排肥精度误差、均匀性变异系数分别为 1.87%、2.52%,满足国家施肥标准,播肥符合当地农艺要求。所设计的无轴螺旋排肥输肥装置满足免耕播种施肥要求,可为在地表平整度较差时排肥和振动较大条件下排肥器以及导肥管的设计与改进提供参考。

关键词: 施肥;螺旋排肥;EDEM;驱动式破茬防堵;免耕

中图分类号: S223.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2023)S1-0125-10

Design and Experiment of Shaftless Spirals Fertilizer Discharging and Fertilizer Delivery Device of No-tillage Planters

ZHU Huibin WU Xian BAI Lizhen WANG Mingpeng LEI Fenglang FANG Yuan

(Faculty of Modern Agricultural Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China)

Abstract: Aiming at the operation of driven stubble breaking and blocking no-tillage planter in Southwest China, due to poor flatness caused by the large slope, no-tillage surface straw and stubble, stubble breaking and blocking operation of the machine produced vibration as a whole, which resulted in poor performance of the fertilizer discharger and fertilizer guide tube, based on the principle of spiral conveying, a shaftless spiral fertilizer discharging and fertilizer conveying device was designed. Through the calculation of shaftless spiral conveying volume per unit time, the factors affecting the device discharge volume were analyzed. According to agronomic requirements, the amount of fertilizer required per unit time was calculated. And through the critical conveying speed and flow characteristics of material, the working parameters of shaftless spiral fertilizer conveying and fertilizer transfer device range were determined. Then the optimal size of the spiral blade fertilizer filling as well as the range of rotational speeds was obtained. The quadratic regression orthogonal rotation test was carried out by using EDEM simulation, and the response surface method was used to analyze the working parameters of the shaftless spiral fertilizer discharge and transfer device. Then the optimal parameters were obtained as follows: the shaftless radius was 3 mm, the radius of the spiral outer axis was 12.8 mm, the rotational speed of the blade was 319 r/min, and the rotational pitch of the spiral was 24.5 mm. Based on data above, the device was manufactured and its field performance was tested. The results showed that when the average value of the surface flatness was 8.9 cm and the slope of the surface was 16.1°, the fertilizer discharge performance of the shaftless spiral fertilizer transfer device was better than that of the external grooved wheel fertilizer discharger, and the error of fertilizer application accuracy and the coefficient of variation of uniformity were 1.87% and 2.52%, respectively, under the operating speed of 1.5 m/s. At

收稿日期: 2023-06-15 修回日期: 2023-08-01

基金项目: 国家自然科学基金项目(52265033、51865022)

作者简介: 朱惠斌(1974—),男,教授,博士,主要从事丘陵山区保护性耕作技术研究,E-mail: hbzhu113@163.com

通信作者: 白丽珍(1975—),女,高级实验师,主要从事智能农业装备测控技术研究,E-mail: lzhbai@163.com

0.5 m/s and 1 m/s operation speed, the fertilizer application precision error and uniformity coefficient of variation all met the national fertilizer application standard. The designed shaftless spiral fertilizer discharging and conveying device met the requirements of no-tillage sowing and fertilizer application, and it can provide reference for the design and improvement of fertilizer discharging device and fertilizer conduit under the conditions of poor surface flatness and long-distance fertilizer conveying.

Key words: fertilizer application; spiral discharging; EDEM; driven stubble breaking anti-clogging; no-tillage

0 引言

施肥是农业生产中重要一环^[1],是决定作物产量的关键^[2],因此施肥的均匀性是农业生产中的重中之重。西南地区多为坡地,且秸秆覆盖量较大^[3],驱动式破茬防堵免耕播种机工作时^[4],由于坡度较大^[5]以及免耕地表秸秆、根茬等造成的平整度较差,破茬刀切割秸秆、土壤以及根土复合时机具整体产生振动较大,严重影响排肥器排肥均匀性以及肥料在排肥管中的运动轨迹^[6],造成排肥播肥均匀性和一致性较差,导致作物产量下降^[7],因此,研制适合于西南地区驱动式破茬防堵免耕播种机的排肥输肥装置具有重要意义。

目前,排肥器一般分为机械式与气力式^[8],气力式排肥其结构复杂、成本较高,西南地区多为丘陵山地,适用小型机械^[9],且免耕播种时灰尘较大,容易堵塞吸气口,因此气力式排肥器不适用于西南地区免耕播肥。机械式分为外槽轮式和螺旋式,外槽轮式结构简单、成本低,但排肥均匀性较差^[10]。螺旋式排肥器输送性较强,排肥流量稳定,均匀性一致性较好^[11]。杨文武等^[12]研究发现螺旋排肥口的瞬态排肥量呈周期脉动变化,导致排肥均匀性较差,针对排肥口的长度以及角度进行设计,提高了螺旋排肥的均匀性。顿国强等^[13]通过改变螺旋输送排肥口的排肥结构,采用倾斜排肥口设计,提高了螺旋排肥的均匀性;在传统螺旋排肥器基础上又提出一种螺旋挤压式精量排肥器^[14],通过螺旋输送的强排特性将肥料挤压到收束装置,由重力作用完成排肥,提高了螺旋排肥均匀性。位国建等^[15]研究发现,水田机械施肥开沟器末端容易出现肥料被浸湿,导致肥料粘结在开沟器出口处,出现架空以及堵塞开沟器的情况,开口器底部设计安装立式螺旋强制排肥装置,解决架空以及堵塞导致排肥困难的问题。肖文立等^[16]针对外槽轮排肥均匀性差的问题,设计了一种四头螺旋双行排肥器,提高了排肥均匀性。刘晓东等^[17]针对现有的直播排肥器排肥均匀差等问题,设计一种螺旋扰动锥体离心式排肥器,通过螺旋叶片搅动使肥料产生离心力,在重力的作用下使肥料经弧形锥体圆盘均匀排出。薛忠等^[18]通过 EDEM

离散元软件分析出影响螺旋排肥量的主次因素依次为转速、螺距和螺旋叶片直径。李鑫等^[19]基于遗传算法对螺旋双轮排肥器进行优化设计,解决了螺旋排肥器排肥量波动的问题。ZHENG 等^[20]针对螺旋排肥回流现象,提出一种交错式螺旋排肥器,解决了肥料回流问题,提高了螺旋排肥均匀性。上述研究均对螺旋排肥器进行优化设计,提高了排肥均匀性,但未对振动以及坡度较大时,排肥装置排肥性能差以及肥料在排肥管的流动性差的情况进行分析研究。

针对上述问题,本文基于螺旋输送原理,利用其输送性强的特点,设计一种集排肥输肥于一体的柔性无轴螺旋排肥输肥装置,可同时完成排肥导肥工作,提高施肥均匀性。通过单位时间农艺要求施肥量,设计无轴螺旋输送装置的螺旋尺寸;对无轴螺旋叶片输肥进行力学分析;并建立 EDEM 仿真模型,进行二次回归正交旋转组合试验确定无轴螺旋排肥输肥装置的最优参数组合;据此试制装置并进行田间试验,以验证排肥输肥装置工作的可靠性。

1 整体结构与工作原理

1.1 整体结构

无轴螺旋排肥输肥装置如图 1 所示,主要由拨齿、拨齿传动轴、肥箱、无轴螺旋叶片转动轴、无轴螺旋叶片、毛刷、输肥管、开沟器、无轴螺旋叶片固定轴、弹性橡胶带等组成。输肥管一端固定于肥箱,另

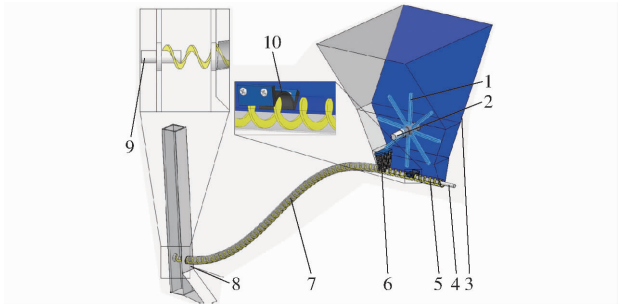


图 1 无轴螺旋排肥输肥装置结构示意图

Fig. 1 Schematic of structure of shaftless spirals fertilizer discharging and fertilizer delivery device

1. 拨齿 2. 拨齿传动轴 3. 肥箱 4. 无轴螺旋叶片转动轴 5. 无轴螺旋叶片 6. 毛刷 7. 输肥管 8. 开沟器 9. 无轴螺旋叶片固定轴 10. 弹性橡胶带

一端固定于开沟器;无轴螺旋叶片前段置于肥箱中,中间段置于输肥管中,末端置于开沟器空腔中,两侧分别连接无轴螺旋叶片转动轴和无轴螺旋叶片固定轴;毛刷置于肥箱连接输肥管一侧;弹性橡胶带固定于肥箱两侧,同轴于无轴螺旋叶片,置于毛刷与肥箱另一侧平面的中间位置;拨齿置于肥箱空间内部。

1.2 工作原理

无轴螺旋排肥输肥装置工作过程分为充肥阶段、清肥阶段、输肥阶段以及投肥阶段。工作时,由动力驱动无轴螺旋叶片转动轴与拨齿传动轴,分别带动无轴螺旋叶片与拨齿进行旋转,弹性橡胶带约束无轴螺旋叶片保证轴心位置不发生偏离,无轴螺旋叶片将进入螺旋间距的肥料不断进行旋转,从充肥区输送移动至清肥区,经过毛刷时,将螺旋间距中多余的肥料梳刷掉,与此同时,拨齿逆时针旋转,将肥箱中的肥料进行扰动,防止由于空间过于狭窄造成肥料架空,影响充肥。当肥料经过毛刷后,进入输肥阶段,由无轴螺旋叶片推动肥料在输肥管中移动,由于肥料被输肥管约束在较小的空间范围内,肥料按照轨迹进行运动,直至到开沟器空腔中。肥料在进入开沟器空腔中时,由于肥料失去了输肥管的约束,只受重力,因此肥料脱离无轴螺旋叶片,做抛物运动,直至落到地面。

该装置与传统机械式排肥器相比,不受地形坡度与振动影响,输肥管可在一定程度上自由摆放;当排肥输肥时,无轴螺旋叶片与输肥管可最大程度限

制肥料运动轨迹,使肥料按照设定轨迹进行输送,同时,抛肥高度极小,进而提高施肥的均匀性。

1.3 传动系统

无轴螺旋排肥输肥装置可以由地轮或直流电机等驱动,工作时,由 2 个动力分别驱动无轴螺旋叶片与拨齿。动力与无轴螺旋叶片转动轴连接,由于无轴螺旋叶片转动轴与螺旋叶片同轴固定,因此带动无轴螺旋叶片转动轴转动时,无轴螺旋叶片随之一起旋转,在无轴螺旋叶片末端与无轴螺旋叶片固定轴连接,使螺旋叶片在旋转时,轴向不发生位移。另一动力与拨齿传动轴连接,带动拨齿进行旋转。

2 关键部件设计

2.1 无轴螺旋叶片结构与参数设计

肥料在充肥时,其充肥姿态以及排列状态都会直接影响充肥性能。肥料在导肥管中运动时,导肥管的形状、尺寸会直接影响肥料的运动轨迹,因此,排肥装置以及导肥装置的设计是重中之重。

由于肥料球度较高,其滚动性与流动性较好,因此基于螺旋输送原理,设计一种无轴螺旋排肥输肥装置。利用其旋转推送原理以及无轴螺旋的柔韧性,实现对肥料的排肥以及约束导肥。无轴螺旋叶片结构示意图如图 2 所示。为有效提升充肥及输肥能力,依据单位时间农艺要求施肥量、物料流动特性以及物料临界转速对螺旋外径、螺旋叶片内半径、螺旋间距和螺旋叶片转速进行设计。

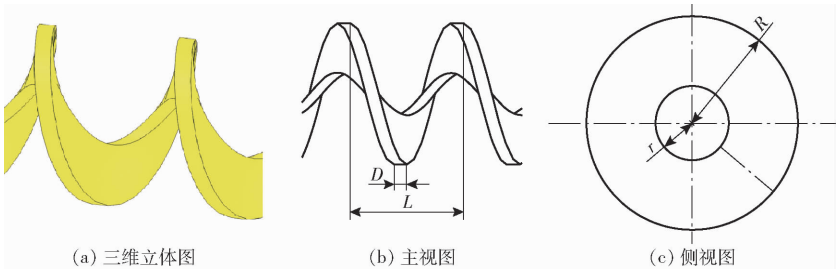


图 2 无轴螺旋叶片结构示意图

Fig. 2 Schematic of structure of shaftless spiral blade

为确定其排肥输肥最佳工作参数,对单位时间内无轴螺旋输送量进行分析,单位时间内输送量 Q 公式^[21]为

$$Q = \frac{\pi L (2R)^2 - 4D (R - r) L_p}{4} n \rho \varphi \tag{1}$$

式中 L ——螺旋间距,mm
 D ——螺旋叶片厚度,mm
 R ——螺旋叶片外半径,mm
 r ——螺旋叶片内半径,mm
 L_p ——无轴螺旋叶片一段螺距叶片长度,mm
 n ——无轴螺旋叶片转速,r/min

ρ ——肥料密度, g/cm^3
 φ ——填充系数

由式(1)可知,单位时间内输送量 Q 与 L 、 D 、 R 、 r 、 L_p 、 n 、 ρ 及 φ 有关,为确定各参数,先对其单位时间内输送量进行分析,根据农艺要求,每秒所需排肥量为^[11]

$$q = \frac{Z E v_b}{10} \tag{2}$$

式中 q ——每秒所需的极限排肥量,g
 Z ——每公顷施肥量, kg/hm^2
 E ——作业行宽,m

v_b ——作业前进速度, m/s

根据文献[4]可知,西南地区免耕播种机作业速度 v_b 为 1.5 m/s 即可满足大部分播种机作业要求,作业行距 E 一般为 0.6 m,根据肥料使用说明每公顷施肥量 Z 为 525 kg/hm²,通过式(2)可得出每秒排肥量为 47.25 g。

为满足无轴螺旋排肥装置能够与大部分开沟施肥部件进行安装,因此无轴螺旋叶片最大外径为 30 mm。避免肥料出现堵塞流动不畅的情况,根据物料流动特性,肥料流动空间尺寸至少为肥料颗粒的 3~6 倍^[22],即螺旋输送直径至少为 3 颗及以上肥料的均布直径之和,其公式为

$$2R > 3d \quad (3)$$

式中 d ——肥料平均直径, mm

试验肥料采用史丹利复合肥料,其平均半径为 1.64 mm、密度为 1.86 g/cm³,肥料填充系数 φ 为 0.7^[23]。为保证肥料流动性较好,选用 6 倍肥料平均直径,因此选用螺旋叶片最小外径为 19.68 mm。同理,为使螺旋叶片内径部分尽量使肥料不流动,即螺旋叶片内径小于 3 颗肥料的均布直径之和,因此直径为 3.28~9.84 mm。

螺旋输送单位时间内输送量还与转速有关,需对无轴螺旋输送转速进行分析。由于螺旋排肥会根据周期转动而造成输送物料的脉动现象,因此为解决脉动现象对排肥均匀性的影响,使无轴螺旋叶片在单位时间内尽可能地提高转速,以此减小脉动周期,进而提高排肥均匀性。物料输送临界转速公式为^[24]

$$n_{\max} = \frac{\beta}{\sqrt{2R}} \quad (4)$$

式中 β ——物料综合系数,取 50

$n_{\max}$ ——无轴螺旋叶片最大转速

将螺旋叶片外径 19.68~30 mm 代入式(4)可知,其转速为 288.7~356.4 r/min。为保证螺旋叶片强度以及柔韧性,选用螺旋叶片厚度 D 为 2 mm。将已知参数代入式(1)可得到螺旋间距为 8.7~25 mm。

2.2 输肥管曲率分析

肥料在肥箱充肥后,由无轴螺旋叶片带动进入输肥管中,在输肥管中做滑动或滚动运动,输肥管大小以及材质影响肥料的运动轨迹以及运动方式。由于需要对肥料进行约束运动,因此输肥管与无轴螺旋叶片需紧密贴合,为方便其安装,其内半径相对螺旋叶片大 1 mm,采用内壁平滑柔性与耐磨性较好的 PVC 钢丝软管。

输肥管空间摆放形状以及曲率影响其与无轴螺

旋叶片之间的摩擦力,进而影响无轴螺旋叶片工作时扭矩。为保证无轴螺旋叶片能够正常工作,对输肥管曲率进行分析。输肥管在弯曲时,无轴螺旋叶片与输肥管接触力点为 3 个,即弯曲两侧的支点以及圆弧中间顶点。受力示意图如图 3 所示。

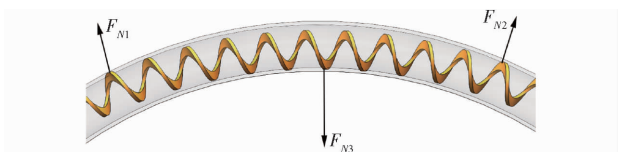


图 3 无轴螺旋叶片与输肥管接触力示意图

Fig. 3 Schematic of shaftless spiral blade structure and contact force with fertilizer delivery tube

由于螺旋叶片截面为矩形,为方便计算,按照截面积相同的长方体进行计算,其弯曲所受的力^[25-26]为

$$F_z = \frac{48wE_e I}{l_z^3} \quad (5)$$

其中

$$w = \frac{2l_z}{\pi} - \frac{\sqrt{2}l_z}{\pi} \quad (6)$$

$$I = \frac{D(R-r)^3}{12} \quad (7)$$

式中 F_z ——弯曲螺旋叶片的力, N

w ——挠度, mm

E_e ——弹性模量, Pa

I ——截面惯性矩, mm⁴

l_z ——两支点间距, mm

由于无轴螺旋叶片弯曲的力由输肥管产生,因此无轴螺旋叶片与输肥管的径向摩擦力为

$$F_f = 2\mu F_z \quad (8)$$

式中 F_f ——无轴螺旋叶片与输肥管的摩擦力, N

μ ——摩擦因数

由于无轴螺旋叶片采用 65Mn 钢加工,因此其特性与矩形截面弹簧相似,所承受最大扭矩为^[27-28]

$$T_{\max} = \frac{0.6\sigma_b D(R-r)^2}{6K'} \quad (9)$$

其中

$$K' = \frac{3C-1}{3C-3} = \frac{3\frac{D_1}{R-r}-1}{3\frac{D_1}{R-r}-3} \quad (10)$$

式中 $T_{\max}$ ——无轴螺旋叶片不出现塑性变形允许的最大扭矩, N·m

σ_b ——抗拉强度, Pa

K' ——曲度系数

C ——旋绕比

D_1 ——螺旋叶片中径, mm

无轴螺旋叶片正常工作条件为

$$T_{\max} > 2\mu F_z N_1 \quad (11)$$

式中 N_1 ——无轴螺旋叶片总的弯曲数量

为满足输肥管安装长度,中小型播种机导肥管长度一般为 1 m ^[29],因此输肥管长度为 1 m 。为计算输肥管可弯圆弧数量以及半径,将输肥管长度等分,对其进行 90° 圆弧弯曲。已知 65 Mn 钢弹性模量为 $1.97 \times 10^{11}\text{ Pa}$,测得摩擦因数 μ 为 0.3,根据式(5)~(11)推导可知,输肥管最多可弯曲 2 个半径为 31.8 cm 的 90° 圆弧。

3 仿真试验

为探究无轴螺旋叶片最佳排肥输肥工作条件,对螺旋间距、螺旋叶片外半径、螺旋叶片内半径以及螺旋叶片转速进行仿真试验,以确定其最优参数。

3.1 仿真模型建立

将 SolidWorks 建立的模型导入 EDEM 中,在 EDEM 软件中建立肥料模型,以肥料平均半径 1.64 mm 倍数建立模型,为探究最佳充肥排肥性能以及降低仿真软件计算量,仿真时无轴螺旋叶片与输肥管进行水平排肥输肥,肥料颗粒为球形,输肥管长度缩短 $1/2$,即 500 mm 。参照文献[23]与摩擦角法^[30]测定肥料、65Mn 钢以及 PVC 钢丝软管本征参数以及相互间的接触参数,如表 1 所示。

表 1 离散元仿真模型参数

Tab. 1 EDEM simulation model parameters

项目	参数	数值
肥料	泊松比	0.25
	剪切模量/Pa	1.0×10^7
	密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	1 216
65Mn 钢	泊松比	0.3
	剪切模量/Pa	8×10^{10}
	密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	7 800
PVC 钢丝管	泊松比	0.39
	剪切模量/Pa	3.2×10^8
	密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	1 160
肥料-肥料	恢复系数	0.11
	静摩擦因数	0.30
	动摩擦因数	0.10
肥料-PVC 钢丝管	恢复系数	0.56
	静摩擦因数	0.39
	动摩擦因数	0.02
65Mn 钢-肥料	恢复系数	0.4
	静摩擦因数	0.3
	动摩擦因数	0.01
65Mn 钢-PVC 钢丝管	恢复系数	0.5
	静摩擦因数	0.3
	动摩擦因数	0.2

为保证试验的准确性,肥料尺寸以正态分布生

成,颗粒工厂 0.5 s 内,生成质量为 0.5 kg 肥料。为方便对试验结果的处理,在无轴螺旋排肥输肥装置出口处添加肥料流量监测模块。 0.5 s 后无轴螺旋叶片以及拨齿开始转动。由于拨齿仅扰动肥料防止造成空穴,其转速为 10 r/min ,根据试验方案完成对无轴螺旋叶片转速参数设置,总仿真过程为 8 s 。仿真模型如图 4 所示。

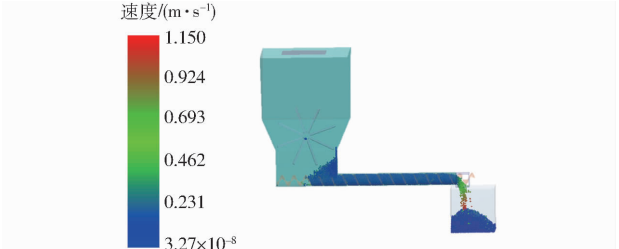


图 4 无轴螺旋排肥输肥装置仿真模型

Fig. 4 Simulation model of shaftless spiral fertilizer discharge and fertilizer delivery device

3.2 试验因素与试验指标

由前文理论分析可知,无轴螺旋排肥输肥装置排肥质量与螺旋间距、螺旋叶片外半径、螺旋叶片内半径以及螺旋叶片转速有关,为探究排肥输肥最佳工作参数,对 4 种影响因素进行仿真试验分析。螺旋叶片外半径、螺旋叶片内半径、螺旋叶片转速以及螺旋间距分别采用前文分析的 $9.84 \sim 15\text{ mm}$ 、 $1.64 \sim 4.92\text{ mm}$ 、 $288.7 \sim 356.4\text{ r/min}$ 以及 $8.7 \sim 25\text{ mm}$ 。

无轴螺旋排肥输肥装置仿真出肥后,在监测处截取 3 s 排肥量测量平均值,试验指标采用平均排肥质量。

3.3 二次回归正交旋转组合试验

3.3.1 试验结果分析与回归模型建立

对影响因素进行四因素五水平的二次回归旋转正交组合试验 ($1/2$ 实施),试验因素与编码如表 2 所示,试验方案及结果如表 3 所示。

表 2 试验因素与编码

Tab. 2 Experimental factors and codes

编码	因素			
	螺旋叶片 内半径	螺旋叶片 外半径	螺旋叶片 转速 X_3 / ($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)	螺旋间距 X_4 /mm
	X_1 /mm	X_2 /mm		
1. 682	4. 92	15. 00	356. 40	25. 00
1	4. 26	13. 95	342. 67	21. 70
0	3. 28	12. 42	322. 55	16. 85
- 1	2. 30	10. 89	302. 43	12. 00
- 1. 682	1. 64	9. 84	288. 70	8. 70

采用 Design-Expert 软件对试验结果进行分析,方差分析见表 4,将不显著因素剔除得到排肥质量 Y_1 为

表3 试验方案及结果

Tab.3 Experimental program and results

试验 序号	螺旋叶片 内半径	螺旋叶片 外半径	螺旋叶片 转速 X_3 /	螺旋间距 X_4 /	排肥质量 Y_1 /g
	X_1 /mm	X_2 /mm	($r \cdot \min^{-1}$)	mm	
1	4.26	13.95	342.67	21.70	69.787 8
2	4.26	13.95	302.43	12.00	31.597 0
3	4.26	10.89	342.67	12.00	24.124 3
4	4.26	10.89	302.43	21.70	38.682 5
5	2.30	13.95	342.67	12.00	35.155 7
6	2.30	13.95	302.43	21.70	60.414 3
7	2.30	10.89	342.67	21.70	41.590 3
8	2.30	10.89	302.43	12.00	19.625 4
9	4.90	12.42	322.55	16.85	42.400 9
10	1.64	12.42	322.55	16.85	39.935 0
11	3.28	15.00	322.55	16.85	58.366 5
12	3.28	9.84	322.55	16.85	25.926 8
13	3.28	12.42	356.40	16.85	45.354 4
14	3.28	12.42	288.70	16.85	36.981 5
15	3.28	12.42	322.55	25.00	57.411 1
16	3.28	12.42	322.55	8.70	10.895 6
17	3.28	12.42	322.55	16.85	40.708 2
18	3.28	12.42	322.55	16.85	40.931 9
19	3.28	12.42	322.55	16.85	41.736 9
20	3.28	12.42	322.55	16.85	40.377 7
21	3.28	12.42	322.55	16.85	41.454 4
22	3.28	12.42	322.55	16.85	39.897 1
23	3.28	12.42	322.55	16.85	40.262 4

表4 方差分析

Tab.4 Variance analysis

方差来源	平方和	自由度	均方	F	P
模型	3 795.04	14	271.07	205.14	<0.000 1
X_1	0.003 9	1	0.003 9	0.002 9	0.958 1
X_2	1.92	1	1.92	1.46	0.262 1
X_3	0.125 2	1	0.125 2	0.094 8	0.766 1
X_4	8.12	1	8.12	6.14	0.038 2
X_1X_2	0.161 6	1	0.161 6	0.122 3	0.735 6
X_1X_3	3.24	1	3.24	2.45	0.156
X_1X_4	0.000 2	1	0.000 2	0.000 1	0.991
X_2X_3	0.000 8	1	0.000 8	0.000 6	0.980 7
X_2X_4	2.79	1	2.79	2.11	0.184 1
X_3X_4	0.1523	1	0.1523	0.115 3	0.742 9
X_1^2	1.97	1	1.97	1.49	0.256 8
X_2^2	7.66	1	7.66	5.8	0.042 7
X_3^2	1.99	1	1.99	1.51	0.254 8
X_4^2	68.74	1	68.74	52.02	<0.000 1
残差	10.57	8	1.32		
失拟项	6.09	2	3.05	4.08	0.076 1
误差	4.48	6	0.746 6		
总和	3 805.62	22			

注:0.01≤P<0.05 为显著;P<0.01 为极显著。

$$Y_1 = 46.965\,8 + 1.53x_1 + 9.404\,7x_2 + 2.371\,36x_3 + 9.787\,86x_4 + 3.2x_1x_3 + 0.344\,9x_1^2 + 0.689\,6x_2^2 + 0.305x_3^2 - 3.873\,9x_4^2$$

(12)

式中 x_1 、 x_2 、 x_3 、 x_4 ——因素编码值

3.3.2 响应面分析

采用 Design-Expert 软件得到交互因素对排肥质量影响的响应曲面,如图 5 所示。

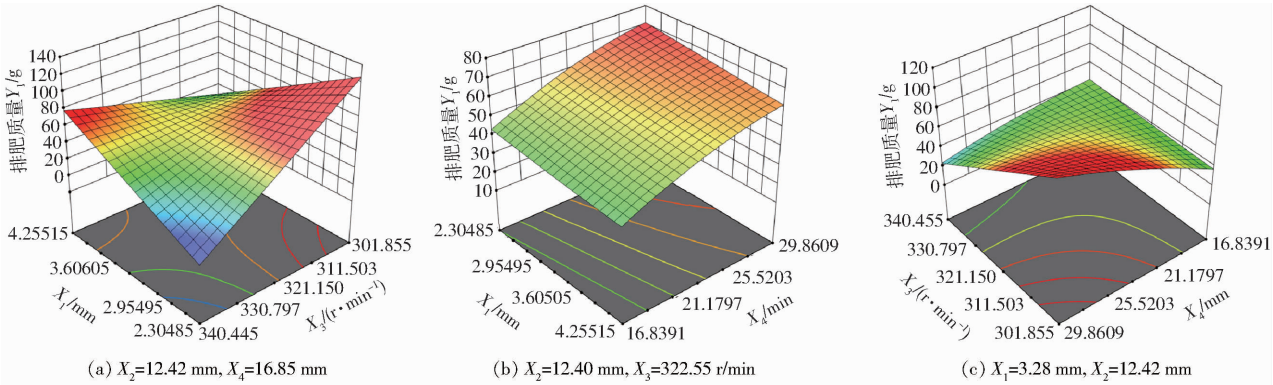


图5 交互因素作用对排肥质量的影响

Fig.5 Effect of interacting factors on quality of fertilizer discharge

如图 5a 所示,在螺旋叶片内半径较大时,排肥质量随着螺旋叶片转速的降低而升高,但随着螺旋叶片内半径的降低排肥质量又逐渐降低;产生这一现象的原因在于螺旋叶片内半径较小且转速较高,其转速超过了肥料充入螺旋间距的最佳转速,随着螺旋叶片转速降低,肥料接近充肥速度的最佳点,导致排肥质量升高;而随着螺旋叶片内半径的增大,排肥质量逐渐下降,导致这一现象的原因可能是因为无轴部分空隙变大,导致肥料在无轴空隙流动性增

加,进而导致排肥质量下降;而在螺旋叶片转速较高时,随着无轴部分空隙的增加,排肥质量逐渐升高,这是由于随着无轴部分空隙的增大,使充肥空隙增加,逐渐抵消转速过高导致充肥困难的现象。

如图 5b 所示,在螺旋叶片内半径较大时,随螺旋间距的增大,排肥质量逐渐升高,导致这一现象的原因是随着螺旋间距的增大,充肥空隙逐渐增大,充入螺旋间距的肥料逐渐增多;但随着螺旋叶片内半径的减小,排肥质量继续缓慢增加,导致这一现象的

原因是螺旋叶片内半径的减小导致肥料在无轴空隙部分流动性降低,减小了肥料在螺距间的流动,进而使排肥量质量升高,这与图 5a 中的情况相似。

如图 5c 所示,在螺旋叶片转速较低时,随着螺旋间距的减小,排肥质量逐渐降低,这是由于螺旋间距减小,充肥空间降低,导致充肥量减少,进而导致排肥质量降低,这与图 5b 中情况相似;在螺旋间距较大时,随着螺旋叶片转速增加,排肥量逐渐降低,这与图 5a 中的转速过高导致充肥量下降情况相似。

对目标函数进行优化求解,约束条件为

$$\begin{cases} Y_1(X_1, X_2, X_3, X_4) = 47.25 \text{ g} \\ \text{s. t.} \begin{cases} 1.64 \text{ mm} \leq X_1 \leq 4.92 \text{ mm} \\ 9.84 \text{ mm} \leq X_2 \leq 15 \text{ mm} \\ 288.7 \text{ r/min} \leq X_3 \leq 356.4 \text{ r/min} \\ 8.7 \text{ mm} \leq X_4 \leq 25 \text{ mm} \end{cases} \end{cases} \quad (13)$$

优化以质量最接近单位时间内排肥质量 47.25 g 为目的,得到最优参数组合为:螺旋叶片内半径 3 mm、螺旋叶片外半径 12.8 mm、螺旋叶片转速 319 r/min 以及螺旋间距 24.5 mm,在此条件下,排肥质量为 47.3 g。根据最优参数进行验证试验,得到排肥质量为 47.1 g,与预测值相对误差为 0.42%,试验值与预测值基本一致,结果可作为样机试制参数依据。

4 田间试验

4.1 试验条件与设备

试验于 2023 年 7 月 26 日在昆明理工大学保护性耕作试验田(24°50′56″N,102°51′49″E)进行。试验田长 50 m,宽 20 m,整体坡度为 16.1°,0~15 cm 土层的平均土壤含水率为 21.94%,平均土壤容重为 1.24 g/cm³,平均土壤坚实度为 1 210 kPa,地表不平整度平均值为 8.9 cm。试验日平均气温为 23℃,无降雨,最大风速 1.5 m/s,平均风速 0.85 m/s。

根据最优参数组合试制无轴螺旋排肥输肥装置。试验采用史丹利复合肥作为试验对象,试验配套装置采用正反转动力式切茬防堵免耕播种机与外槽轮式排肥器,配套动力为东方红 500 型拖拉机,排肥驱动装置动力为力川伺服电机。

4.2 试验方法与评价指标

将无轴螺旋排肥输肥装置安装在免耕播种机机架上,在空地通过拖拉机三点悬挂将试验装置抬起,由于西南地区耕地坡度集中于 5°~25°(宜耕坡度小于等于 25°)^[31],因此三点悬挂提升装置角度分别设置为 5°、15°、25°,以模拟机具在田间工作时坡度。使拖拉机输出轴转动,以达到振动效果,此时使

排肥装置进行排肥,按作业 50 m 排肥量进行计算,期间随机取 6 段排肥量测算均匀性变异系数,试验重复 3 次,评价指标根据 NY/T 1003—2006《施肥机械质量评价技术规范》要求,以排肥精度误差和均匀性变异系数为试验指标,均匀性变异系数计算公式^[32]为

$$V = \frac{S}{\bar{x}} \times 100\% \quad (14)$$

其中

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (15)$$

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}} \quad (16)$$

式中 x_i ——每段各次肥料质量,g
 $\bar{x}$ ——总肥料质量的平均值,g
 S ——各次肥料质量一致性的标准差,g
 V ——各次肥料质量一致性的变异系数
 n ——测定段数

排肥精度误差为

$$\gamma = \frac{|m_s - m_t|}{m_t} \times 100\% \quad (17)$$

式中 γ ——排肥精度误差,%
 m_s ——实际排肥量,g
 m_t ——理论排肥量,g

为测试装置的排肥输肥性能,对其进行田间对比试验,将外槽轮式排肥器与无轴螺旋排肥输肥装置安装在免耕播种机机架上,由拖拉机带动作业,以前进速度 1.5 m/s 进行播肥,作业面积为 0.02 hm²(坡度为 16.1°),作业距离平均分为 6 段,测量每段剩余肥量,以测算均匀性变异系数,试验重复 3 次,试验以排肥精度误差和均匀性变异系数为指标。

为测试无轴螺旋排肥输肥装置在不同作业速度下施肥性能,分别在 0.5、1、1.5 m/s 条件下进行作业,作业面积为 0.02 hm²,作业距离平均分为 6 段,测量每段剩余肥量,测试以施肥精度误差和均匀性变异系数为指标,如图 6 所示。

4.3 试验结果与分析

空地排肥对比结果如表 5 所示。由表 5 可知,在空地上外槽轮式排肥器随着工作角度增加平均施肥精度误差、均匀性变异系数增大,无轴螺旋排肥输肥装置随着工作角度增加平均施肥精度误差和均匀性变异系数基本不变,且无轴螺旋排肥输肥装置平均施肥精度误差和均匀性变异系数均小于外槽轮式排肥器,均匀性变异系数均小于 13.0%,满足国家标准要求。

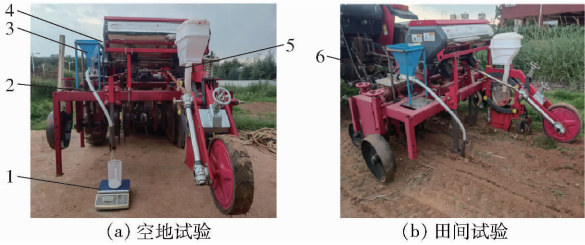


图 6 田间试验

Fig. 6 Field trials

1. 电子秤 2. 导肥管 3. 无轴螺旋排肥输肥装置 4. 伺服电机控制器 5. 外槽轮式排肥器 6. 伺服电机

表 5 空地试验结果

Tab.5 Results of open field trials

排肥器	角度/ (°)	排肥精度 误差/%	均匀性变异 系数/%
外槽轮式排肥器	5	4. 01	7. 01
		4. 67	4. 61
		4. 10	5. 35
	15	3. 20	7. 90
		4. 30	5. 30
		4. 80	8. 10
		3. 90	11. 00
	25	8. 00	10. 90
		5. 10	10. 70
无轴螺旋排肥输肥装置	5	2. 48	1. 41
		1. 69	1. 79
		1. 83	1. 31
	15	2. 97	1. 39
		3. 78	1. 89
		3. 05	2. 14
		2. 66	2. 08
	25	3. 16	2. 11
		2. 72	2. 05

田间对比播肥试验效果如图 7 所示,结果如表 6 所示。外槽轮式排肥器与无轴螺旋排肥输肥装置排肥平均施肥精度误差、均匀性变异系数分别为 3. 67%、11. 7% 和 1. 87%、2. 52%,对比试验数据,外槽轮式排肥器均匀性变异系数其中一组高于国家标准,无轴螺旋排肥输肥装置均匀性变异系数低于国家标准,且施肥精度误差、均匀性变异系数远小于外槽轮式排肥器。因此,无轴螺旋排肥输肥装置排肥施肥性能优于外槽轮式排肥器。

无轴螺旋排肥输肥装置不同作业速度下试验结果如表 7 所示。由表 7 可知,不同作业速度施肥精度误差、均匀性变异系数略有不同,但均匀性变异系数均低于国家标准,符合施肥要求。

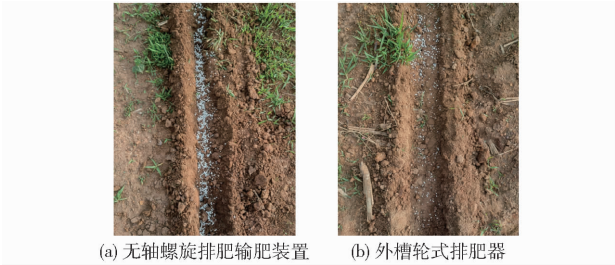


图 7 播肥效果对比

Fig. 7 Comparison of fertilizer sowing effects

表 6 田间试验结果

Tab. 6 Results of field trials %

排肥器	施肥精度误差	均匀性变异系数
外槽轮式排肥器	3. 67	13. 10
	4. 10	11. 47
	3. 48	11. 20
无轴螺旋排肥输肥装置	1. 16	3. 00
	2. 16	2. 70
	2. 28	1. 88

表 7 不同作业速度下无轴螺旋排肥输肥装置试验结果

Tab. 7 Experimental results of shaftless spiral fertilizer discharging and fertilizer delivering device at different operating speeds

作业速度/(m·s ⁻¹)	排肥精度误差/%	均匀性变异系数/%
0. 5	2. 93	4. 05
1. 0	2. 43	3. 19
1. 5	1. 87	2. 52

5 结论

(1)基于螺旋输送原理,设计了一种无轴螺旋叶片,完成尺寸参数设计,并对其进行物料输送特性分析,得出较优工作参数范围。对无轴螺旋叶片与输肥管进行力学分析得出极限工作尺寸。

(2)通过 EDEM 仿真试验,根据二次回归正交旋转组合试验及曲面响应分析法,得到无轴螺旋叶片最佳工作参数为:螺旋叶片内半径 3 mm、螺旋叶片外半径 12. 8 mm、螺旋叶片转速 319 r/min 以及螺旋间距 24. 5 mm。

(3)田间试验结果表明,无轴螺旋排肥输肥装置排肥精度误差、均匀性变异系数均小于外槽轮式排肥器;其在作业速度 1. 5 m/s 时作业效果最佳,排肥精度误差、均匀性变异系数分别为 1. 87%、2. 52%,满足国家施肥标准;在 0. 5、1 m/s 时排肥精度误差、均匀性变异系数分别为 2. 93%、4. 05% 和 2. 43%、3. 19%,满足国家施肥标准。

参 考 文 献

[1] 胡红,李洪文,王庆杰,等. 玉米行间定点扎穴深施追肥机的设计与试验[J]. 农业工程学报,2016,32(24):26-35.

- HU Hong, LI Hongwen, WANG Qingjie, et al. Design and experiment of targeted hole-pricking and deep-application fertilizer [J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(24): 26–35. (in Chinese)
- [2] 兰志龙, MUHAMMAD N K, TANVEER A S, 等. 25 年长期定位不同施肥措施对关中壤土水力学性质的影响[J]. 农业工程学报, 2018, 34(24): 100–106.
- LAN Zhilong, MUHAMMAD N K, TANVEER A S, et al. Effects of 25-year located different fertilization measures on soil hydraulic properties of loess soil in Guanzhong area[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(24): 100–106. (in Chinese)
- [3] 朱惠斌, 钱诚, 白丽珍, 等. 正反转动力式玉米切茬防堵装置设计与试验[J]. 农业工程学报, 2022, 38(1): 1–11.
- ZHU Huibin, QIAN Cheng, BAI Lizhen, et al. Design and experiments of active anti-blocking device with forward-reverse rotation[J]. Transactions of the CSAE, 2022, 38(1): 1–11. (in Chinese)
- [4] ZHU H B, WU X, QIAN C, et al. Design and experimental study of a bi-directional rotating stubble-cutting no-tillage planter [J]. Agriculture-Basel, 2022, 12(10): 1637.
- [5] LI C, CHEN L D, LIU D F, WEI J Q. The hidden risk in China's cropland conversion from the perspective of slope[J]. CATENA, 2021, 206: 105536.
- [6] 陈玉龙, 韩杰, 兰玉彬, 等. 精密排种器组合式导种管设计与试验[J]. 农业工程学报, 2022, 38(24): 14–24.
- CHEN Yulong, HAN Jie, LAN Yubin, et al. Design and experiment of the combined seed guiding tube for precision metering device[J]. Transactions of the CSAE, 2022, 38(24): 14–24. (in Chinese)
- [7] 王金峰, 刘源峰, 翁武雄, 等. 滑槽回转式水田侧深施肥装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(10): 76–85.
- WANG Jinfeng, LIU Yuanfeng, WENG Wuxiong, et al. Design and experiment of chute rotary side deep fertilizing device in paddy field[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(10): 76–85. (in Chinese)
- [8] 杨庆璐, 王庆杰, 李洪文, 等. 气力集排式排肥系统结构优化与试验[J]. 农业工程学报, 2020, 36(13): 1–10.
- YANG Qinglu, WANG Qingjie, LI Hongwen, et al. Structural optimization and experiment of pneumatic centralized fertilizer system[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(13): 1–10. (in Chinese)
- [9] ZHU H B, QIAN C, GUO Z H, et al. Design of the real-time detection system based on LabVIEW for no-till seeder working performance[J]. Int. J. Agric. & Biol. Eng., 2021, 14(5): 100–106.
- [10] 刘彩玲, 张福印, 都鑫, 等. 水平涡轮叶片式精量排肥器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(增刊 1): 165–174.
- LIU Cailing, ZHANG Fuyin, DU Xin, et al. Design and experiment of precision fertilizer distribution mechanism with horizontal turbine blades[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(Suppl. 1): 165–174. (in Chinese)
- [11] 雷小龙, 李蒙良, 张黎骅, 等. 颗粒化肥水平气送式螺旋组合可定量供肥装置设计与试验[J]. 农业工程学报, 2018, 34(19): 9–18.
- LEI Xiaolong, LI Mengliang, ZHANG Lihua, et al. Design and experiment of horizontal pneumatic screw combination adjustable quantitative fertilizer feeding device for granular fertilizer[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(19): 9–18. (in Chinese)
- [12] 杨文武, 方龙羽, 罗锡文, 等. 螺旋排肥器排肥口参数对排肥性能影响的试验研究[J]. 农业工程学报, 2020, 36(17): 1–8.
- YANG Wenwu, FANG Longyu, LUO Xiwen, et al. Experimental study of the effects of discharge port parameters on the fertilizing performance for fertilizer distribution apparatus with screw[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(17): 1–8. (in Chinese)
- [13] 顿国强, 吴星澎, 纪欣鑫, 等. 斜口螺旋精控排肥器优化设计与试验[J]. 农业机械学报, 2023, 54(7): 167–174.
- DUN Guoqiang, WU Xingpeng, JI Xinxin, et al. Optimization design and experiment of oblique spiral precise control fertilizer apparatus[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(7): 167–174. (in Chinese)
- [14] 顿国强, 刘文辉, 吴星澎, 等. 螺旋挤压式精量排肥器的仿真优化设计及试验[J/OL]. 吉林大学学报(工学版): 1–10 [2023–08–29]. <https://doi.org/10.13229/j.cnki.jdxbgxb20211332>.
- DUN Guoqiang, LI Wenhui, WU Xingpeng, et al. Simulation optimization design and experiment of screw extrusion precision fertilizer ejector[J/OL]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition): 1–10 [2023–08–29]. <https://doi.org/10.13229/j.cnki.jdxbgxb20211332>. (in Chinese)
- [15] 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(Suppl. 1): 154–164. (in Chinese)
- [16] 肖文立, 廖宜涛, 单伊尹, 等. 油菜直播机四头螺旋双行排肥器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(11): 68–77.
- XIAO Wenli, LIAO Yitao, SHAN Yiyin, et al. Design and experiment of quad-screw double-row fertilizer apparatus for rape seeding machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(11): 68–77. (in Chinese)
- [17] 刘晓东, 丁幼春, 舒彩霞, 等. 螺旋扰动锥体离心式排肥器设计与试验[J]. 农业工程学报, 2020, 36(2): 40–49.
- LIU Xiaodong, DING Youchun, SHU Caixia, et al. Design and experiment of spiral disturbance cone centrifugal fertilizer apparatus[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(2): 40–49. (in Chinese)
- [18] 薛忠, 赵亮, 王凤花, 等. 基于离散元法的螺旋式排肥器性能模拟试验[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2019, 45(5): 548–553.

- XUE Zhong, ZHAO Liang, WANG Fenghua, et al. Performance simulation test of the spiral fertilizer distributor based on discrete element method[J]. Journal of Hunan Agricultural University (Natural Sciences), 2019, 45(5): 548–553. (in Chinese)
- [19] 李鑫,姜新波,纪欣鑫,等. 基于遗传算法的螺旋双轮排肥器优化设计与试验[J/OL]. 河南农业大学学报:1–12[2023–08–29]. <https://doi.org/10.16445/j.cnki.1000-2340.20230619.001>.
LI Xin, JIANG Xinbo, JI Xinxin, et al. Optimization design and experiments of double-spiral fertilizer discharge device based on genetic algorithm[J/OL]. Journal of Henan Agricultural University:1–12[2023–08–29]. <https://doi.org/10.16445/j.cnki.1000-2340.20230619.001>. (in Chinese)
- [20] ZHENG W Q, ZHANG L P, ZHANG L X, et al. Reflux problem analysis and structure optimization of the spiral grooved-wheel fertilizer apparatus[J]. Int. J. Simul. Model, 2020, 3(19): 422–433.
- [21] 陈雄飞,罗锡文,王在满,等. 两级螺旋排肥装置的设计与试验[J]. 农业工程学报,2015,31(3):10–16.
CHEN Xiongfei, LUO Xiwen, WANG Zaiman, et al. Design and experiment of fertilizer distribution apparatus with double-level screws[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(3):10–16. (in Chinese)
- [22] 洪致育,林良明. 连续运输机[M]. 北京:机械工业出版社,1981
- [23] 顿国强,刘文辉,杜佳兴,等. 弧槽双螺旋式排肥器优化设计与试验[J]. 农业机械学报,2022,53(10):118–125,174.
DUN Guoqiang, LIU Wenhui, DU Jiaying, et al. Optimal design and experiment of arc-groove double-spiral fertilizer discharge device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(10): 118–125,174. (in Chinese)
- [24] 《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,2004.
- [25] 张涛然,晁晓洁,郭丽红,等. 材料力学[M]. 重庆:重庆大学出版社,2018.
- [26] 束德林. 工程材料力学性能[M]. 3版. 北京:机械工业出版社,2016.
- [27] 常新宇,张瑞君,王绍中,等. 矩形截面扭转弹簧扭矩的预置扭矩检测法[J]. 理化检验(物理分册),2019,55(11):753–754.
CHANG Xinyu, ZHANG Ruijun, WANG Shaozhong, et al. Preset torque detection method of torque of torsional spring with rectangular cross section[J]. PTCA, 2019, 55(11): 753–754. (in Chinese)
- [28] 张英会,刘辉航,王德成. 弹簧手册[M]. 北京:机械工业出版社,2008.
- [29] 雷小龙,廖宜涛,张闻宇,等. 油麦兼用气送式集排器输种管道气固两相流仿真与试验[J]. 农业机械学报,2017, 48(3):57–68.
LEI Xiaolong, LIAO Yitao, ZHANG Wenyu, et al. Simulation and experiment of gas-solid flow in seed conveying tube for rapeseed and wheat[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(3): 57–68. (in Chinese)
- [30] TOURLONIAS M, BUENO M A, FASSI G, et al. Influence of friction angle between carbon single fibres and tows: experimental analysis and analytical model[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2019,124: 105478.
- [31] 董秀茹,王迪,刘强. 非耕农用地耕种功能恢复适宜性评价模型构建[J]. 农业工程学报,2023,39(12):226–235.
DONG Xiuru, WANG Di, LIU Qiang. Construction of the suitability evaluation model for the cultivated function recovery of non-grain cultivated land[J]. Transactions of the CSAE, 2023,39(12):226–235. (in Chinese)
- [32] 施肥机械质量评价技术规范:NY/T 1003—2006[S]. 北京:中国农业出版社,2006.

(上接第 124 页)

- [18] 高国华,王凯,孙晓娜. 嫁接机钢针顶起穴盘苗过程 EDEM 模拟验证及参数优化[J]. 农业工程学报,2017, 33(21): 29–35.
GAO Guohua, WANG Kai, SUN Xiaona. Verification for EDEM simulation of process of jacking tray-seedling by steel needle in grafting machine and parameter optimization[J]. Transactions of the CSAE, 2017,33(21):29–35. (in Chinese)
- [19] 崔永杰,卫咏哲,丁辛亭,等. 基于圆柱凸轮的株距可调式取苗末端执行器设计与试验[J]. 农业机械学报,2022, 53(1): 104–114,122.
CUI Yongjie, WEI Yongzhe, DING Xingting, et al. Design and experiment of adjustable spacing end-effector based on cylindrical cam[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(1): 104–114, 122. (in Chinese)
- [20] 冯世杰. 基于活动苗盘的油菜钵苗取苗系统及钵体破损机理研究[D]. 长沙:湖南农业大学,2020.
FEN Shijie. Study on pick-up system and pot body damage mechanism of rape pot seedling based on movable tray[D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2020. (in Chinese)
- [21] 孙其诚,王光谦. 静态堆积颗粒中的力链分布[J]. 物理学报,2008, 57(8): 4667–4674.
SUN Qicheng, WANG Guangqian. Force distribution in static granular matter in two dimensions[J]. Acta Phys. Sin., 2008, 57(8): 4667–4674. (in Chinese)
- [22] 文永双. 蔬菜穴盘苗自动移栽关键技术研究[D]. 北京:中国农业大学,2021.
WEN Yongshuang. Research on key technology of automatic transplanting for vegetable plug seedlings[D]. Beijing: China Agricultural University, 2021. (in Chinese)