doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2025.07.031

斜体式螺旋排肥系统设计与试验

丁　力　徐宇飞　豆宇飞　刘家威　于畅畅　李　赫
（河南农业大学机电工程学院，郑州 450002）

摘要：针对传统变量施肥系统存在起步阶段化肥颗粒输送时间长，产生施肥空白区进而影响施肥量精度的问题，设计了斜体式螺旋排肥系统，包括斜体螺旋排肥器、步进电机、驱动器、人机交互屏、单片机、编码器测速模块、矩阵光线传感器等；理论分析了颗粒运移受力过程，采用 EDEM 模拟了排肥均匀性及肥料颗粒在加速排肥和未加速排肥条件下的运动过程，得出所设计排肥器排肥连续均匀，无断点排肥现象。同时加速排肥条件下化肥颗粒排出速度由 0.017 m/s 提高至 0.162 m/s，垂直方向上的分速度由 0.005 m/s 提高至 0.057 m/s，化肥可快速运移排出，避免了排肥器与排肥管接口部位的阻挡，提高了排肥稳定性。进行了台架试验，结果表明加速排肥条件下的滞后距离随着作业速度增大而增大，未加速排肥的滞后距离与作业速度无明显关系；加速排肥条件下存在实际排肥量超过理论排肥量现象，但仍低于未加速排肥所导致的排肥波动量。进行了田间试验，结果显示未加速排肥时的平均施肥滞后距离为 1.06 m，施肥精度 77.6%；加速排肥条件下，平均施肥滞后距离为 0.40 m，施肥精度提高至 96.5%。排肥系统可以明显缩短施肥滞后距离，提高施肥精度。

关键词：变量施肥；EDEM；螺旋排肥器；颗粒肥
中图分类号：S225.3　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1000-1298(2025)07-0339-10　　**OSID**：

Design and Experiment of Inclined Spiral Fertilizer Applicator and Fertilizer System

DING Li　XU Yufei　DOU Yufei　LIU Jiawei　YU Changchang　LI He
(*College of Mechanical and Electrical Engineering*, *Henan Agricultural University*, *Zhengzhou* 450002, *China*)

Abstract: In view of the long transportation time of chemical fertilizer particles during the fertilizer discharge operation of the spiral fertilizer discharger, which led to the problem that the lag distance of fertilization in the initial stage of fertilization operation affected the accuracy of fertilization amount, an inclined spiral fertilizer discharger was designed, and the movement time of chemical fertilizer in the fertilizer discharger through the accelerate fertilizer fertilizer measure of the fertilizer discharger was reduced, and the lag distance of fertilization to improve the accuracy of fertilization was shortened. EDEM was used to simulate the movement of fertilizer particles in the fertilizer discharger under the conditions of accelerate fertilizer and unfilled fertilizer. Under the condition that the oblique angle of the fertilizer discharger and the maximum speed was 191.74 r/min, the full speed of the fertilizer particles was increased from 0.017 m/s to 0.162 m/s, and the vertical velocity was increased from 0.005 m/s to 0.057 m/s, which increased the speed of the fertilizer particles leaving the fertilizer discharger and shortened the transportation time of fertilizer particles by 3.199 s. The bench test was carried out. The test results showed that pre-filling fertilizer could significantly shorten the lag distance of fertilization, but the lag distance under pre-filling fertilizer was increased with the increase of operation speed. The lag distance of unprefilled fertilizer was increased with the increase of fertilizer application rate, but it had no obvious relationship with the operation speed. The amount of fertilizer applied under the condition of accelerate fertilizer was higher than that without accelerate fertilizer, which increased the accuracy of

收稿日期：2024-03-11　修回日期：2024-04-24
基金项目：国家重点研发计划项目(2022YFD2300904)、财政部和农业农村部：国家现代农业产业技术体系项目(CARS-04)和河南省科技攻关项目(252102111171)
作者简介：丁力(1989—)，男，副教授，博士，主要从事智能农业装备技术研究，E-mail：604295294@qq.com
通信作者：李赫(1972—)，男，教授，博士，主要从事智能农业装备技术研究，E-mail：chungbuk@163.com

fertilization, but there was an overshoot of fertilizer application, which can be solved by further optimization. The field experiment was carried out by modifying the seeder. The field experiment results showed that the average lag distance of fertilization was 1.06 m when the pre-filling fertilizer was not pre-filled, and the average lag distance of pre-filling fertilizer was 0.40 m, which was shortened by 0.66 m. The precision of fertilization control was improved from 77.6% to 96.5%.

Key words: variable fertilization; EDEM; spiral fertilizer system; granular fertilizer

0 引言

精量施肥技术是实施精准农业的核心内容,对实现农业现代化具有重大意义[1-2]。排肥器作为精准施肥作业的关键部件,其作业性能是实现精准农业的保证[3-5]。而螺旋排肥器凭借对颗粒化肥、干燥粉状化肥优异的施肥作业性能及较大的排肥量,近年来吸引大量学者对螺旋排肥器进行研究[6-12]。

以上针对螺旋排肥器的研究主要集中在施肥性能、排肥均匀性提升方面,而针对螺旋排肥器在施肥作业开始时化肥颗粒并未完全充满排肥器腔体,使得作业起步阶段无化肥施放,造成施肥位置滞后、产生施肥空白区、导致部分地块未施上化肥使总施肥量减少等问题则鲜有研究。为此,针对螺旋排肥器腔体长、化肥颗粒运输时间长导致的施肥滞后距离增大和总施肥量不足的问题,本文设计一种斜体式螺旋器及其排肥控制系统,通过机具启动时加速排肥功能来减少化肥在排肥器中的运动时间,提高化肥颗粒离开排肥口时的初速度,缩短施肥滞后距离,提高施肥机具的施肥精度。

1 排肥系统设计

1.1 系统总体设计与工作原理

斜体式螺旋排肥系统主要由斜体螺旋排肥器、步进电机、单片机、驱动器、编码器等组成,系统构成如图 1 所示。机具启动时斜体螺旋排肥器在控制系统作用下减少化肥在排肥器中的运动时间,提高化肥颗粒离开排肥口时的初速度,缩短施肥滞后距离,提高施肥精度。

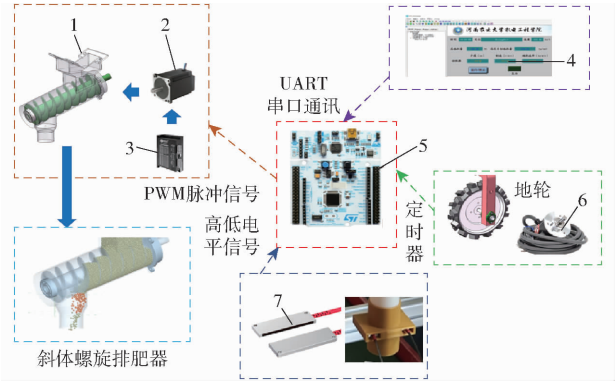


图 1 斜体式螺旋排肥系统

Fig. 1 System of inclined spiral fertilizer discharger

1. 斜体螺旋排肥器 2. 步进电机 3. 驱动器 4. 人机交互屏 5. 单片机 6. 编码器测速模块 7. 矩阵光线传感器

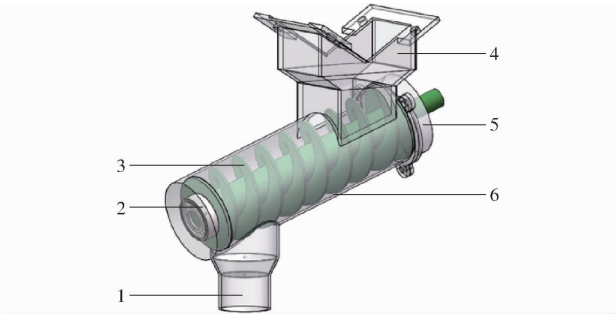


图 2 斜体螺旋排肥器结构示意图

Fig. 2 Structure diagram of inclined spiral fertilizer discharger

1. 排肥口 2. 滚动轴承 3. 排肥轴 4. 充肥口 5. 端盖 6. 排肥器壳体

1.2 排肥器结构设计

斜体螺旋排肥器主要由排肥口、排肥轴、滚动轴承和排肥管等组成,结构如图 2 所示。

参照 GB/T 35487—2017《变量施肥播种机控制系统》所规定的排肥量 375 kg/hm^2,确定排肥螺旋参数,考虑到螺距增大,填充率减小[13],本研究螺旋排肥器基本结构参数为:螺旋内径 $d=30$ mm,外径 $D=60$ mm,螺距 $S=50$ mm,螺牙深度 $h=15$ mm,螺牙平均厚度 $b=2$ mm。查阅《运输机械设计选用手册》获得排肥器转速公式为

$$n_{max} \leqslant \frac{C}{\sqrt{D}} \tag{1}$$

式中 n_{max}——螺旋排肥器临界转速,r/min

C——物料综合系数,参考《运输机械设计选用手册》取 50

计算得该排肥器最高转速为 191.74 r/min。

螺旋排肥器排肥时,肥料颗粒在重力作用下进入充肥口,填充螺旋排肥轴和排肥管间的空隙,电机驱动螺旋排肥轴转动,在螺旋片和螺旋管内壁的共同作用下,推动肥料颗粒沿螺旋轴向运动,肥料至排肥口时在重力和螺旋推动力的作用下排出。

根据螺旋输送机构的工作原理,螺旋排肥器的排肥量关系式为

$$q = [\pi(D^2 - d^2)S/4 - bhL_p]\rho\varphi \tag{2}$$

其中　$L_p = \sqrt{[\pi(D+d)/2]^2 + S^2}$

式中　q——单圈排肥量，g

L_p——螺牙平均长度，mm

ρ——肥料密度，g/mm^3

φ——填充系数

$$Q = qnt \tag{3}$$

式中　Q——总排肥量，g

t——时间，s

n——排肥器转速，r/min

参照国际标准 ISO 7119—1981《松散物料连续搬运设备螺旋输送机驱动功率设计规则》中计算公式来计算螺旋排肥器轴所需功率[14]，即

$$N = \frac{Q_1(\lambda L_1 \pm H)}{367} + \frac{DL_1}{20} \tag{4}$$

式中　N——排肥器轴电机功率，kW

Q_1——排肥器单位时间排肥量，t/h

L_1——排肥器水平投影距离，m

λ——运行阻力系数

H——排肥器垂直投影高度，m，由于本文排肥器由上至下运输化肥，故取值为负

查阅文献[15－16]得知，随着排肥器倾斜角度 θ 加大，排肥器的填充系数 φ 减小，单圈排肥量减小。由于排肥量减小可通过调节排肥轴电机转速进行弥补，因此本文排肥器主要考虑在排肥器长度不变的情况下，增大排肥器的倾角 θ，进而增大排肥器垂直投影高度 H，并增大化肥颗粒脱离排肥器时的速度，缩短施肥滞后距离，使肥料更迅速落至地面。借鉴前期初步试验以及市面排肥器尺寸及播种机安装空间布局，综合选用倾角 $\theta = 20°$，此时 $\varphi = 0.4$，$q = 75.5$ g。

1.3　加速排肥作业流程

常规变量施肥机起步阶段施肥存在长度为 L_2 的滞后距离，计算公式为

$$L_2 = (t_1 + t_2 + t_3)v_1 \tag{5}$$

式中　t_1——化肥在排肥器中运输时间，s

t_2——化肥在排肥管中运动时间，s

t_3——化肥排出落到地面的时间，s

v_1——施肥机作业速度，m/s

由于 t_2、t_3 由排肥器安装高度与排肥管造型决定，而本文是通过加入加速排肥措施来缩短 t_1，因此 t_2、t_3 改变不属于本文讨论范围。

加速排肥作业整体运动过程为：当变量播种施肥机设定单位面积施肥量开始进行施肥后，通过安装在地轮位置的测速编码器获取机具前进的信号，排肥器驱动电机立刻以允许最高转速 191.74 r/min 进行充肥作业，迅速将化肥运输至排肥口；当化肥从排肥口落下，被矩阵光纤传感器检测到，则停止加速排肥作业，转为正常变量施肥作业，其作业流程如图 3 所示。

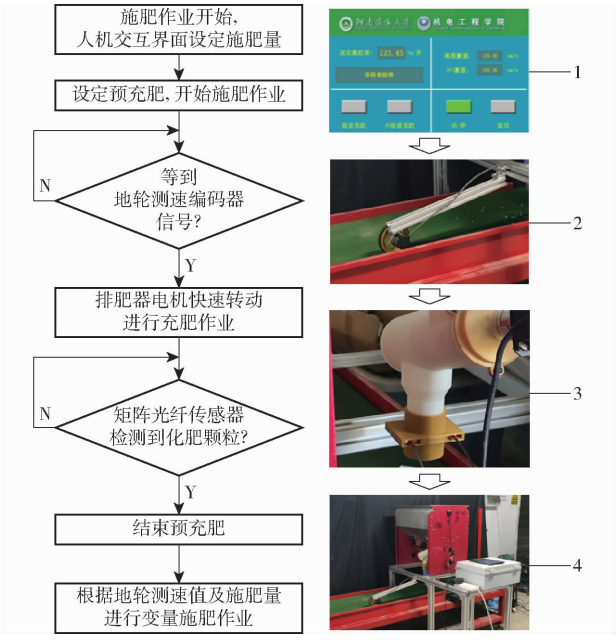


图 3　加速排肥作业流程图

Fig. 3　Accelerate fertilizer operation process

1. 人机交互界面　2. 测速编码器　3. 矩阵光纤传感器　4. 施肥试验台架

2　化肥颗粒运动分析

2.1　加速排肥条件下化肥颗粒运动分析

由于化肥本身的自重和摩擦力的共同影响，导致物料不能随螺旋叶片旋转，而螺旋叶片、化肥自重对化肥的共同影响导致其形成了一种沿轴线运动的复合运动，即具有圆周速度 v_T 和轴线方向速度 v_Z，其合成速度为 v，v_0 为螺旋叶片上与化肥颗粒接触点的线速度，速度分解如图 4 所示。

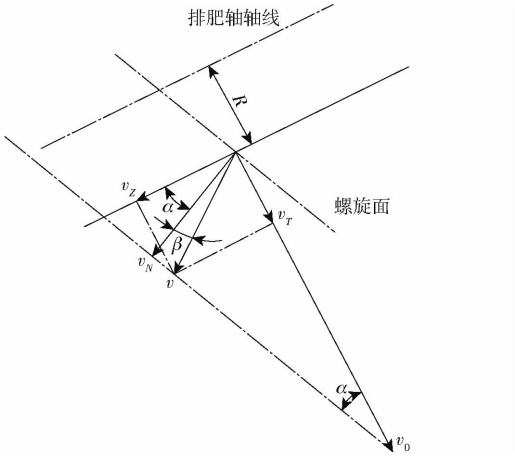


图 4　化肥颗粒运动速度分解图

Fig. 4　Decomposition diagram of fertilizer particle motion

查阅文献[17]，化肥圆周速度 v_T、沿轴线方向

速度 v_Z 及合成速度 v 为

$$v_T = \frac{Sn}{60}\frac{\frac{S}{2\pi R}+\mu}{\left(\frac{S}{2\pi R}\right)^2+1} \tag{6}$$

$$v_Z = \frac{Sn}{60}\frac{1-\mu\frac{S}{2\pi R}}{\left(\frac{S}{2\pi R}\right)^2+1} \tag{7}$$

$$v = \frac{2\pi Rn}{60}\frac{\sin\alpha}{\cos\beta} \tag{8}$$

其中 $\alpha = \arctan\left(\frac{S}{\pi D}\right) = 14.86°$ $\beta = \arctan\mu$

式中 μ——化肥与排肥管间滑动摩擦因数，取 0.18[18]

R——物料颗粒与轴线距离，m

α——螺旋面升角，(°)

β——物料颗粒外摩擦当量角，为 10.2°

将各个数值代入式(6)～(8)，求得化肥颗粒在排肥轴最高转速下离开排肥口时的化肥颗粒合成速度 $v = 0.157$ m/s。由于本文目的主要在于通过缩短第 1 粒化肥落至地面时间，减少施肥滞后距离，因此不考虑圆周速度 v_T，只考虑第 1 颗化肥颗粒沿轴线方向速度 v_Z 的垂直分速度 v_{Zy}。速度分解如图 5 所示。

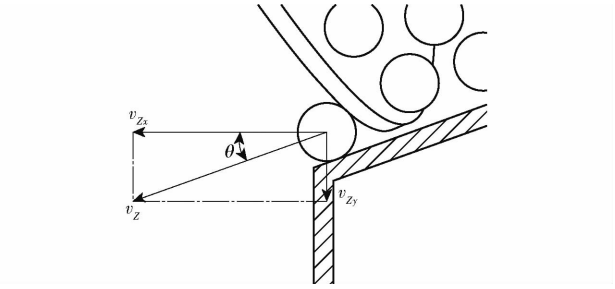


图 5 化肥颗粒被排出时轴向速度分解图

Fig. 5 Decomposition diagram of axial velocity when fertilizer particles were discharged

由公式(7)得到化肥沿轴线方向速度 $v_Z = 0.142$ m/s。通过分解速度 v_Z 求得在垂直方向上分速度 $v_{Zy} = 0.0049$ m/s。

排肥器施肥初始状态如图 6 所示，此时化肥颗粒所需排肥器运输距离 $L_3 = 40$ mm。进行加速排肥时，排肥轴按照最高转速 $n_{max} = 191.74$ r/min 旋转时，化肥颗粒被运输至排肥口所需时间设为 t_1。求得 $t_1 = \frac{L_3}{Sn_{max}}60 = 0.25$ s。

2.2 未加速排肥条件下化肥颗粒运输时间

未加速排肥条件下，排肥器转速是单片机通过地轮测速编码器获取机具起步后的速度，并结合施肥量 375 kg/hm^2 进行调节，可推导机具速度与排肥器转速关系为

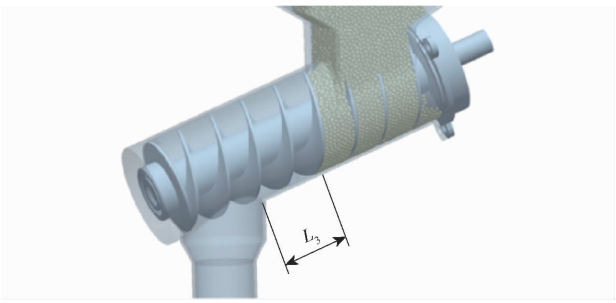


图 6 排出化肥所需运输距离示意图

Fig. 6 Transport distance required to discharge fertilizer

$$n = \frac{25\,000\times 60l}{666.7q}v_0 \tag{9}$$

式中 l——施肥机幅宽，0.4 m

设拖拉机牵引播种机由静止开始进行作业，到达正常作业速度 6 km/h，即作业速度 $v_0 = 1.67$ m/s 时所需时间为 T_2。经过实机测试，本文田间试验使用的约翰迪尔 604 型拖拉机挂载播种施肥一体机时的加速度为 $a_0 = 0.8$ m/s^2，可求得 $T_2 = 2.09$ s。

因不考虑化肥颗粒在排肥器中的圆周运动，将化肥的运动简单视为轴方向运动。按照公式(7)、(9)计算，施肥作业速度 $v_0 = 1.67$ m/s 时排肥轴转速 $n_1 = 20$ r/min。此时颗粒轴向速度 $v_1 = 0.015$ m/s，由公式(8)求得未加速排肥时化肥颗粒合成速度 $v = 0.0163$ m/s。

由公式(7)得知颗粒沿轴向方向速度与排肥器转速呈线性关系，在不考虑圆周运动情况下，可将颗粒视作沿轴向的加速直线运动，由此得到化肥颗粒受排肥器作用获得的轴向加速度 a_1 为

$$a_1 = \frac{v_1}{T_2} \tag{10}$$

排肥轴转速由 0 静止增加至 6 km/h 施肥作业时的转速 20 r/min 用时为 $T_2 = 2.09$ s，则排肥轴转速的加速度 $a_2 = \frac{20}{2.09\times 60} = 0.159$ rad/s^2。

在 T_2 时间内，排肥轴转动圈数 $n_2 = \frac{1}{2}a_2t_2^2 = 0.347$ r，推动化肥颗粒沿轴向前进距离为 $n_2S = 0.347\times 50 = 17.35$ mm。由于 $L_3 = 40$ mm，则剩余的 22.65 mm 运输距离，排肥器以转速 $n_1 = 20$ r/min 推动化肥排出，剩余用时 $T_3 = 1.359$ s。

则在未加入加速排肥阶段时，化肥颗粒运至排肥口排出所需时间为 $t_1 = T_2 + T_3 = 3.449$ s。因此，前文加速排肥时 $t_1 = 0.25$ s，未加入加速排肥时 $t_1 = 3.449$ s，两者相减可以得到通过加速排肥化肥在排肥器中的输送时间减少 $\Delta t_1 = 3.199$ s。

3　排肥过程 EDEM 仿真

利用 EDEM 离散元研究松散物料在运输过程中的复杂运动和受力[19-22]。

3.1　EDEM 仿真参数

查阅文献[18]，仿真模型的相关参数设定见表 1。

表 1　EDEM 参数设置

Tab.1　EDEM parameter settings

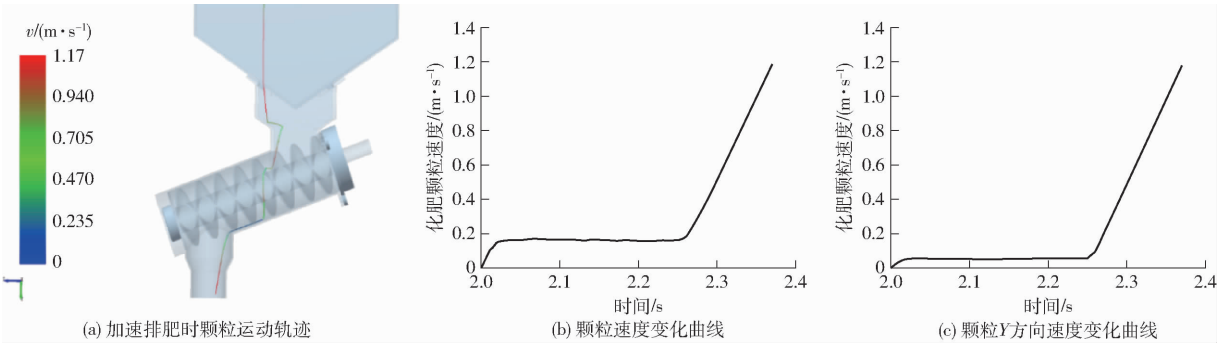
项目	参数	数值
肥料颗粒	泊松比	0.25
	剪切模量/Pa	1.0×10^{7}
	密度/(kg·m^{-3})	1 861
排肥轴及壳体	泊松比	0.394
	剪切模量/Pa	3.18×10^{8}
	密度/(kg·m^{-3})	1 240
颗粒-颗粒	恢复系数	0.11
	静摩擦因数	0.3
	滚动摩擦因数	0.1
颗粒-排肥轴及壳体	恢复系数	0.41
	静摩擦因数	0.32
	滚动摩擦因数	0.18

试验采用史丹利复合肥，颗粒建模采用 2 mm 纯球体，排肥器为 3D 打印制作，材料为 PLA 塑料，肥料颗粒为干燥无结块颗粒。肥料颗粒与肥料颗粒，肥料颗粒与排肥轴、壳体之间均采用 Hertz-Mindlin(no-slip)模型。

3.2　化肥颗粒排出速度分析

利用 EDEM 离散元仿真软件对排肥器进行加速排肥与未加速排肥条件下的排肥仿真，获取两种条件下化肥颗粒排出速度。首先进行加速排肥条件下排肥仿真，设置仿真计算时间步长 0.01 s，仿真时间为 5 s。在 EDEM 颗粒工厂中，肥料颗粒设置为动态生成，总质量为 1 kg，在 2 s 内生成完毕，排肥轴在 2 s 开始旋转，直至第 1 粒化肥从排肥口排出。仿真网格为 2 倍的颗粒半径。仿真试验设定排肥轴充肥时转速为理论最高转速 191.74 r/min。

以垂直地面向下为 Y 方向，为避免干扰，仿真结束后，追踪第 1 颗下落的化肥颗粒总速度及 Y 方向速度，剔除 0～2 s 内生成颗粒时间内颗粒的速度，得到 2 s 开始至颗粒脱离排肥口进行自由落体区间内的速度，颗粒速度变化曲线如图 7 所示。



(a) 加速排肥时颗粒运动轨迹　(b) 颗粒速度变化曲线　(c) 颗粒Y方向速度变化曲线

图 7　加速排肥时化肥颗粒运动轨迹与速度变化曲线

Fig.7　Trajectory and velocity changes of fertilizer particles during accelerated fertilizer discharge

由仿真数据看出，在 2～2.255 s 区间内，肥料颗粒在螺旋排肥轴作用下运动，此时化肥颗粒因颗粒间摩擦、颗粒与排肥器间摩擦使得化肥颗粒速度产生波动。化肥颗粒以 $v=0.162$ m/s 从排肥口排出，此时其垂直方向分速度 $v_y=0.057$ m/s，并以自由落体下落。化肥颗粒从静止直至第 1 粒化肥排出用时 0.255 s，同时从曲线可以看出，排肥过程平稳运移。

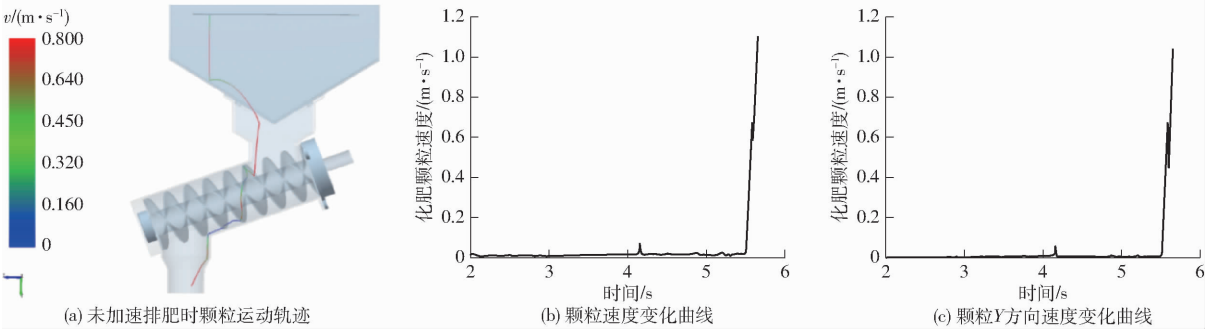
未加速排肥条件下排肥仿真与加速排肥不同，转速随作业速度变化。模拟拖拉机由速度从 0 增加至 6 km/h，加速度 $a=0.8$ m/s^2，则达到作业速度用时 2.09 s。排肥器单圈排肥量 $q=75.5$ g，参照国标 GB/T 35487—2017《变量施肥播种机控制系统》所规定的排肥量 375 kg/hm^2，在机具以 6 km/h 速度作业时的最高转速 $n_{max}=20$ r/min，得排肥轴在起步阶段转速加速度为 $a=0.159$ r/s^2，即排肥器在前 2.09 s 以加速度为 $a=0.159$ rad/s^2 加速转动至稳定 $n_{max}=20$ r/min，直至将第 1 粒化肥颗粒排出。得到第 1 粒下落化肥颗粒速度变化曲线如图 8 所示。

观察图 8b、8c 可以看到，在排肥器运输颗粒阶段，颗粒速度偶有波动，这是由于化肥颗粒在运输过程中被排肥器挤压造成的弹跳产生。颗粒在自由落体过程中出现速度突然下降，这是因为其初始速度过小，颗粒沿着排肥管道下落撞击到排肥管所致，颗粒肥排出初段会发生断点波动现象。

由仿真数据得到，在排肥器保持 20 r/min 转速时，颗粒排出时速度 $v=0.017$ m/s，其垂直方向速度为 $v_y=0.007$ m/s，化肥颗粒从静止直至第 1 粒化肥排出用时 3.505 s。

3.3　化肥颗粒群排出速度分析

在 3.2 节与 3.3 节仿真基础上，利用 EDEM 后



(a) 未加速排肥时颗粒运动轨迹 (b) 颗粒速度变化曲线 (c) 颗粒Y方向速度变化曲线

图 8 未加速排肥时颗粒运动轨迹与速度变化曲线

Fig. 8 Change of fertilizer particle velocity and movement trajectory when fertilizer was not prefilled

处理功能,在排肥口相同位置设置颗粒速度传感器,分别检测加速排肥与未加速排肥条件下排出的化肥颗粒群的速度信息,如图 9 所示。

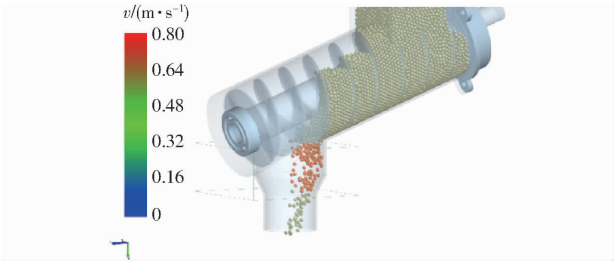


图 9 速度传感器检测的化肥颗粒群速度

Fig. 9 Setting speed sensor to detect fertilizer group velocity

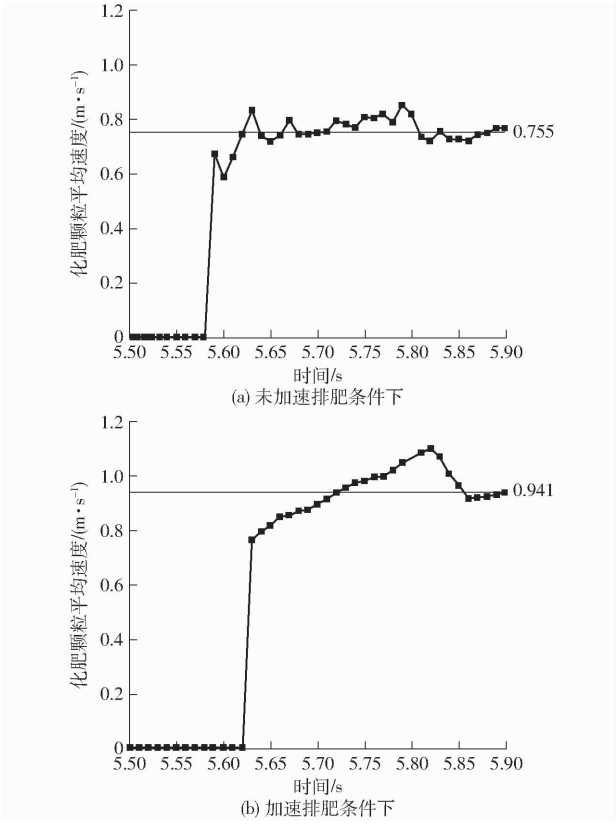
剔除生成化肥颗粒所需时间,仅提取化肥排出前后时间 0.4 s 内通过颗粒速度传感器的化肥颗粒平均速度,如图 10 所示。

未加速排肥条件下化肥颗粒群排出排肥器时平均速度为 0.755 m/s,如图 10a 所示,加速排肥为 0.941 m/s,如图 10b 所示。加速排肥条件下化肥颗粒被排肥器排出时的速度明显大于未加速排肥。

3.4 加速排肥条件下排肥均匀性仿真

为验证加速排肥条件下排肥器排肥是否均匀,进行排肥均匀性仿真。仿真设置作业速度为 6 km/h,作业幅宽 0.4 m,排肥量设置为 375 kg/hm^2。加速排肥条件下排肥器转速为 191.74 r/min,加速排肥结束后转速设置为 20 r/min。试验在 2 m 范围内均匀设置 20 个化肥收集腔,统计加速排肥开始及结束后 2 m 范围内排肥量变化,如图 11 所示。单个化肥收集腔理论收集肥量应为 15 g。

得到排肥量变化如图 12 所示。由图 12 发现:化肥收集腔 1 ~ 5 收集肥量变化大,变异系数为 0.43,分析原因是由于加速排肥阶段排肥器转速快,单位时间内排肥量大导致;化肥收集腔 6 ~ 20 收集的是加速排肥结束正常作业时排肥器排出的化肥,排肥量变异系数为 0.14,单个化肥收集腔收集肥量平均值为 14.35 g,与理论值误差为 4.3% 。



(a) 未加速排肥条件下

(b) 加速排肥条件下

图 10 不同条件下化肥颗粒群脱离排肥器速度变化曲线

Fig. 10 Speed of fertilizer group leaving fertilizer discharger under different conditions

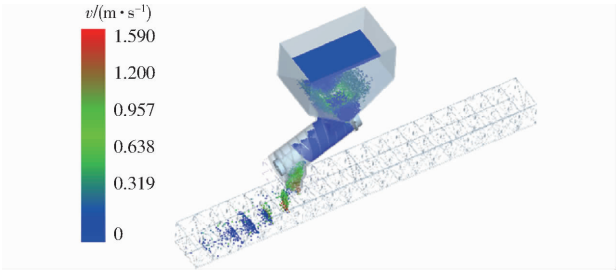


图 11 加速排肥条件下排肥均匀性仿真

Fig. 11 Simulation of fertilizer uniformity under pre-filling condition

3.5 仿真结论

(1)加速排肥可明显缩短化肥运输时间,化肥颗粒运输时间由未加速排肥状态下用时 3.505 s 缩

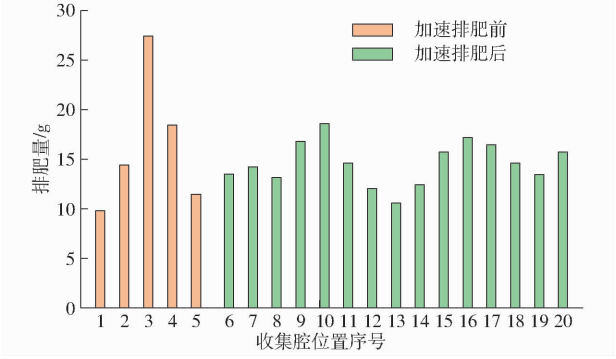


图 12　2 m 范围内排肥量变化

Fig. 12　Change of fertilizer discharge in range of 2 m

短至 0.255 s。

(2)第 1 粒化肥颗粒排出速度由未加速排肥时的 0.017 m/s 提高至加速排肥时的 0.162 m/s,垂直方向上的分速度由 0.005 m/s 提高至 0.057 m/s。排肥口处化肥颗粒群平均速度由未加速排肥时的 0.761 m/s 提高至加速排肥条件下的 0.989 m/s。加速排肥可明显提高化肥颗粒排出时的速度,促使化肥颗粒快速无遮挡排出,避免了排肥器与排肥管接口部位的阻挡,提高了排肥均匀性。

4　台架试验

为验证不同作业速度、不同单位面积施肥量情况下加速排肥与未加速排肥两者施肥滞后距离及施肥精准度相关信息,进行了台架试验。

4.1　台架搭建

搭建试验台如图 13 所示,主要包括化肥箱、E6B2 - CWZ1X 型编码器测速轮、3D 打印制作的斜体螺旋排肥器、FT - 30S 型矩阵对射光纤传感器、传送带用 86 步进电机、排肥器用 57 步进电机、ATFC070 串口屏等,台架整体使用欧标 40 * 40 L 型铝型材搭建。

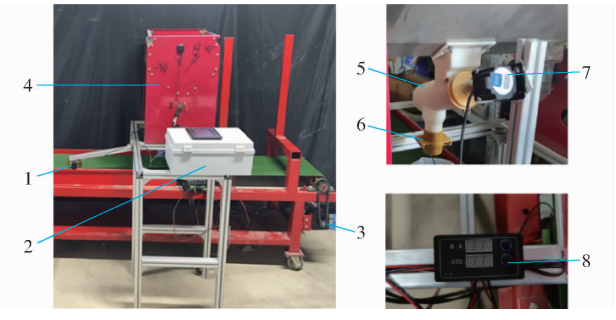
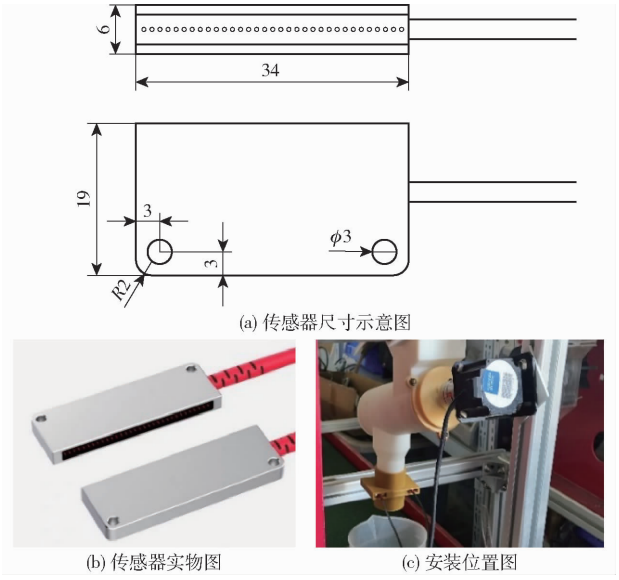


图 13　试验台架

Fig. 13　Test bed

1. 编码器测速轮　2. 控制箱　3. 传送带电机　4. 化肥箱　5. 斜体螺旋排肥器　6. 矩阵光纤传感器　7. 排肥器电机　8. 传送带电机调速器

FT - 30S 型矩阵对射光纤传感器,结构及安装位置如图 14 所示。其工作原理为矩阵光纤传感器的发射端用于向外部发射平行光信号,矩阵光纤传感器的接收端则用于接收光信号,当两者中间有物体遮挡时,则会发送高(低)电平信号,可用于判断是否有化肥颗粒从中经过。



(a) 传感器尺寸示意图

(b) 传感器实物图　　(c) 安装位置图

图 14　FT - 30S 型矩阵对射光纤传感器

Fig. 14　FT - 30S matrix optical fiber sensor

4.2　试验方法

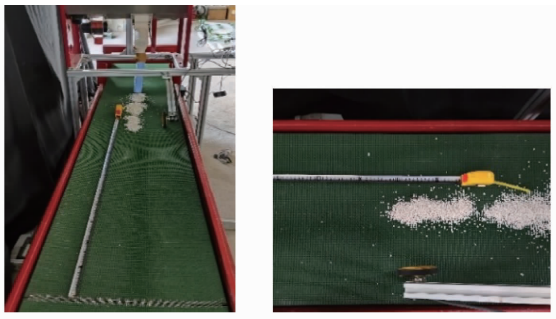
台架试验设置施肥量为 375 kg/hm^2,作业幅宽设定为 0.4 m,统计作业距离 6 m 内加速排肥与未加速排肥两者的施肥滞后距离及排肥量信息。本次试验作业速度设为 1、2、3 km/h 3 个梯度,每个梯度重复 3 次试验,依次测量排肥量及施肥滞后距离信息,如图 15 所示,由于化肥颗粒易弹跳分散,测量获得的滞后距离统一取整。

4.3　试验结果

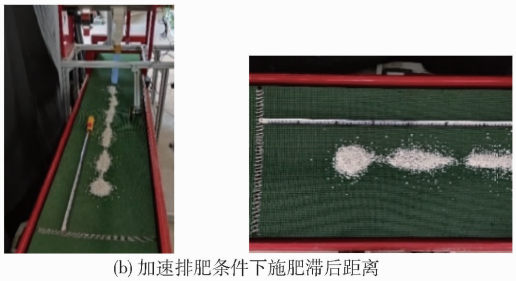
通过台架试验,得到了加速排肥与未加速排肥两种作业模式在施肥量为 375 kg/hm^2、作业幅宽 0.4 m、作业距离 6 m 内的排肥量信息,如图 16 所示;在上述试验条件下,6 m 内理论排肥量为 89.9 g,据此得到两者施肥准确度对比,如图 17 所示。

由试验结果可以看出,通过加速排肥可以明显增大排肥量,排肥均匀性大幅提高。随着速度增加,排肥量组内差异性降低,但加速排肥条件下存在实际排肥量超过理论排肥量现象,经过多次重复试验并进行观察,分析原因可能为:实际排肥过程中因加速排肥作业排肥器转速大,使得部分化肥颗粒因惯性而排出;加速排肥结束时螺旋叶面沿排肥轴周向旋转角度难以控制,使得存在于排肥器腔体中的化肥从螺旋叶面与排肥口的间隙中落下。即便如此加速排肥仍低于未加速排肥所导致的排肥波动量。

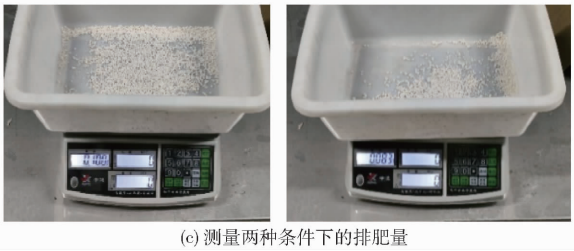
通过台架试验同时测得了不同作业速度条件下加速排肥与未加速排肥起步阶段的施肥滞后距离,



(a) 未加速排肥条件下施肥滞后距离



(b) 加速排肥条件下施肥滞后距离



(c) 测量两种条件下的排肥量

图 15 加速排肥与未加速排肥滞后距离及排肥量测量

Fig. 15 Measurement of lag distance and fertilizer amount between accelerate fertilizer and non-accelerate fertilizer

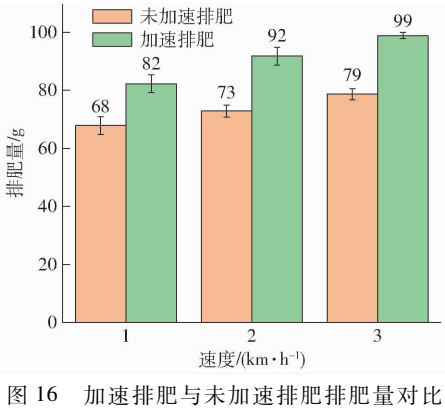


图 16 加速排肥与未加速排肥排肥量对比

Fig. 16 Comparison of amount of fertilizer between accelerate fertilizer and non-accelerate fertilizer

如图 18 所示。

加速排肥条件下,施肥滞后距离随着作业速度的提高而增大,但整体仍小于未加速排肥。分析结果认为加速排肥阶段排肥器转速与单位面积施肥量无关,由于加速排肥阶段排肥器转速固定,所以充肥时化肥运输时间固定,因此随着作业速度的提高,单位时间内施肥机具前进距离增大,造成加速排肥条件下施肥滞后距离逐渐增大。

在单位面积施肥量确定条件下,未加速排肥的施肥滞后距离与作业速度无明显关系。因为无论作业速度如何变化,在单位面积施肥量固定情况下,施肥机具作业一定距离内排肥器转动的圈数是一定的,这就使得未加速排肥条件下的施肥滞后距离与作业速度无关。

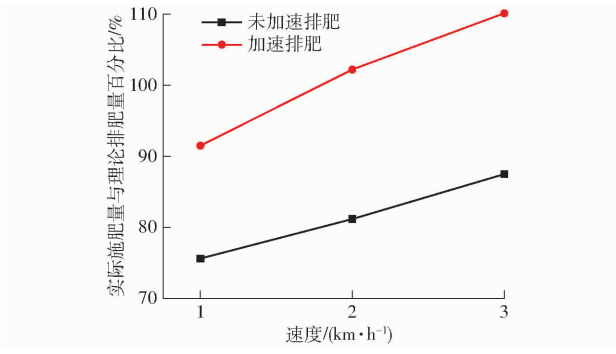


图 17 加速排肥与未加速排肥实际排肥量与理论排肥量百分比变化曲线

Fig. 17 Ratio of actual fertilizer discharge to theoretical fertilizer discharge between accelerate fertilizer and non-accelerate fertilizer

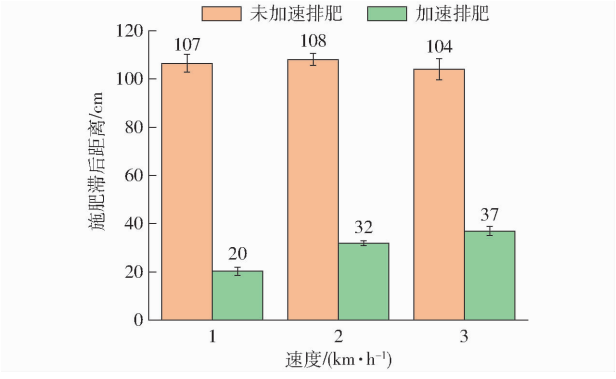


图 18 加速排肥与未加速排肥施肥滞后距离对比

Fig. 18 Comparison of fertilization lag distance between accelerate fertilizer and non-accelerate fertilizer

为探究未加速排肥条件下的施肥滞后距离是否与单位面积施肥量相关,进一步进行试验。通过设定 375、450、525 kg/hm^2 3 个施肥量梯度及 1、2、3 km/h 不同作业速度条件,对未加速排肥条件下的施肥滞后距离进行多次试验。试验结果如图 19 所示。

通过进一步试验可以发现,相同施肥量条件下的施肥滞后距离与作业速度的改变无明显变化关系,与上文结论一致。但随着设定施肥量的增加,未加速排肥条件下的施肥滞后距离逐渐缩短,且速度越高,滞后距离组内差异性越小,因为在施肥量提高情况下,施肥机具作业一定距离内排肥器转动的圈数增大,做到了更快排肥,使得施肥滞后距离缩短。

5 田间试验

2023 年 7 月 28 日,在河南农业大学试验田进

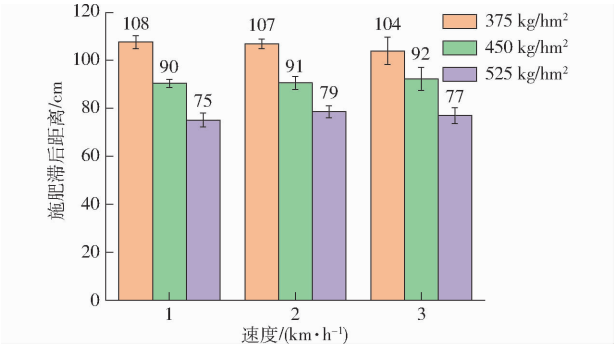
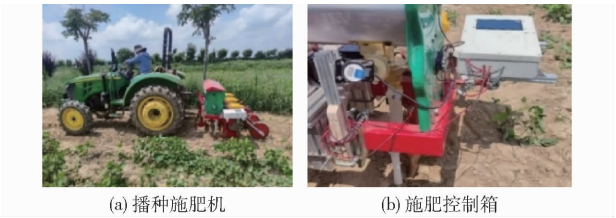


图 19　未加速排肥时不同施肥量及作业速度下施肥滞后距离

Fig. 19　Lag distance of fertilization under different fertilization amounts and operation speeds without pre-filling fertilizer

行了田间试验，试验机具采用河南农业大学和河南农有王农业装备科技股份有限公司研制的播种施肥一体机，对其进行改造，加装斜体螺旋排肥器排肥系统，如图 20 所示。



(a) 播种施肥机　　(b) 施肥控制箱

图 20　田间试验

Fig. 20　Field test

5.1　试验设置

通过测量在加速排肥和未加速排肥两种条件下的施肥滞后距离及排肥量信息，对比验证加速排肥对缩短施肥滞后距离及机具整体排肥量的影响。施肥精度按照 GB/T 35487—2017《变量施肥播种机控制系统》中《5.2.5.3.2 肥量精度控制方法》中公式计算，即

$$\delta = \frac{G_1 - G_2}{G_2} \times 100\% \tag{11}$$

其中

$$G_2 = L_4 A / 1\,000 \tag{12}$$

式中　G_1——实际肥料下料质量，kg

G_2——理论肥料下料质量，kg

L_4——施肥量预设下料量，kg

A——作业面积，hm^2

设定施肥量为 375 kg/hm^2，试验选取尺寸为 2 m×10 m 的空地，则理论排肥量为 750 g。施肥机由约翰迪尔 604 型拖拉机牵引，在地块外以初速为零进场，按照 3 km/h 的行驶速度进行施肥作业。

5.2　试验结果及分析

通过多次试验，得到加速排肥与未加速排肥施肥滞后距离信息，如表 2 所示。

表 2　加速排肥与不加速排肥施肥滞后距离对比

Tab. 2　Comparison of lag distance between accelerate fertilizer and non-accelerate fertilizer fertilization　m

试验序号	未加速排肥施肥滞后距离	加速排肥滞后距离	滞后距离差值
1	1.12	0.37	0.75
2	1.05	0.39	0.66
3	1.02	0.44	0.58

由表 2 试验数据得出，加速排肥条件下的施肥滞后距离较未加速排肥条件下平均缩短了 0.66 m。

同时测量得到两者排肥量如表 3 所示。结果显示，在起步阶段 10 m 范围内未加速排肥排肥量为 579、586、581 g，平均 582 g，平均施肥控制精度 77.6%；加速排肥则为 722、719、731 g，平均为 724 g，平均施肥精度 96.5%，更接近理论肥量 750 g，使变量施肥作业整体的精度得到了提高。

表 3　加速排肥与不加速排肥施肥量对比

Tab. 3　Comparison of fertilization amount between accelerate fertilizer and non-accelerate fertilizer

试验序号	理论排肥量/g	未加速排肥		加速排肥	
		排肥量/g	施肥精度/%	排肥量/g	施肥精度/%
1	750	579	77.2	722	96.3
2	750	586	77.9	719	95.9
3	750	581	77.5	731	97.5

田间试验发现加速排肥条件下施肥量并未超过理论施肥量，分析原因为田间试验条件地轮滑移和齿轮间隙导致编码器测速精度不如台架试验，使排肥器整体转速下降，避免了下肥量过量现象；同时，由于田间试验所用排肥管长度大于台架试验所用排肥管长度，化肥在排肥管中运动时间 t_2 增大，使田间试验的施肥滞后距离较台架试验稍有增加；此外，田间作业时依靠拖拉机牵引，拖拉机速度存在波动，地轮测速编码器测得速度可能小于 3 km/h，使排肥量降低。

6　结论

(1)针对螺旋排肥器起步阶段存在因化肥输送距离长，造成施肥位置滞后问题，通过设计斜体螺旋排肥器及其排肥控制系统，缩短了施肥滞后距离。EDEM 仿真试验显示，排肥连续均匀，无断点排肥现象，同时化肥颗粒排出时的速度由 0.017 m/s 提高至 0.162 m/s，垂直方向上的分速度由 0.005 m/s 提高至 0.057 m/s。化肥可快速运移排出。

(2)进行了加速排肥和未加速排肥条件下的台架试验。结果表明加速排肥可以明显缩短施肥滞后

距离,但随着作业速度增大,加速排肥滞后距离也将增大;未加速排肥的滞后距离与作业速度无明显关系;加速排肥条件下存在实际排肥量超过理论排肥量现象,但仍低于未加速排肥所导致的排肥波动量。

(3)进行了加速排肥与未加速排肥条件下施肥滞后距离和施肥精度田间试验。田间试验数据显示,在施肥作业起步阶段 10 m 范围内,未加速排肥作业时,施肥机的平均施肥滞后距离为 1.06 m,平均排肥量 582 g,施肥精度 77.6%;加速排肥条件下,施肥机的平均施肥滞后距离为 0.40 m,平均缩短 0.66 m,平均排肥量 724 g,施肥精度提高至 96.5%,更加接近理论排肥量 750 g。加速排肥可以明显缩短施肥滞后距离,提高施肥精度。

参 考 文 献

[1] COLACO A F, MOLIN J P. Variable rate fertilization in citrus: a long term study[J]. Precision Agriculture, 2017, 18(2): 169 - 191.

[2] 任灵杰,田敏,李江全,等. 我国变量施肥技术的研究现状与发展分析[J]. 农机化研究,2023,45(10):10 - 15, 23.
REN Lingjie, TIAN Min, LI Jiangquan, et al. Research status and development analysis of variable fertilization technology in China[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2023, 45(10): 10 - 15, 23. (in Chinese)

[3] 余洪锋,丁永前,刘海涛,等. 小田块变量施肥系统优化设计与应用[J]. 农业工程学报,2018,34(3):35 - 41.
YU Hongfeng, DING Yongqian, LIU Haitao, et al. Optimization design and application of variable rate fertilization system for small-scaled fields[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(3): 35 - 41. (in Chinese)

[4] 张宏图,解恒燕,贾辰钰. 有机肥施肥机排肥器的研究现状及发展趋势[J]. 农机化研究,2022,44(8):262 - 268.
ZHANG Hongtu, XIE Hengyan, JIA Chenyu. Present status and development trend of the fertilizer apparatus in organic manure applicator[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2022, 44(8): 262 - 268. (in Chinese)

[5] 马旭,赵旭,刘赛赛,等. 水稻高速插秧机固体颗粒肥料变量施肥装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2023,54(9):99 - 110.
MA Xu, ZHAO Xu, LIU Saisai, et al. Design and experiment of solid particle fertilizer variable rate fertilization device for high-speed rice transplanter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(9): 99 - 110. (in Chinese)

[6] 朱惠斌,吴宪,白丽珍,等. 免耕播种机无轴螺旋排肥输肥装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2023,54(增刊 1):125 - 134.
ZHU Huibin, WU Xian, BAI Lizhen, et al. Design and experiment of shaftless spirals fertilizer discharging and fertilizer delivery device of no-tillage planters[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(Supp. 1): 125 - 134. (in Chinese)

[7] 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)

[8] 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 opening spiral precision control fertilizer apparatus[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(7): 167 - 174. (in Chinese)

[9] 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 Jiaxing, 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)

[10] 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]. 河南农业大学学报,2023,57(6):1026 - 1034.
LI Xin, JIANG Xinbo, JI Xinxin, et al. Optimization design and experiments of double-spiral fertilizer discharge device based on genetic algorithm[J]. Journal of Henan Agricultural University, 2023, 57(6): 1026 - 1034. (in Chinese)

[11] 刘洪男,李陶,赵何跃,等. 气送式集中排肥器螺旋排肥装置的改进与试验[J]. 中国农业大学学报,2021,26(8):150 - 161.
LIU Hongnan, LI Tao, ZHAO Heyue, et al. Design and experiment of screw-type feeding device of air-assisted centralized fertilizer application device[J]. Journal of China Agricultural University, 2021, 26(8): 150 - 161. (in Chinese)

[12] 刘晓东,丁幼春,舒彩霞,等. 螺旋锥体离心式排肥器扰动防堵机理分析与试验[J]. 农业机械学报,2020,51(12):44 - 54.
LIU Xiaodong, DING Youchun, SHU Caixia, et al. Mechanism analysis and test of disturbance and blockage prevention of spiral cone centrifugal fertilizer apparatus[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(12): 44 - 54. (in Chinese)

[13] 胡勇克,戴莉莉,皮亚南. 螺旋输送器的原理与设计[J]. 南昌大学学报(工科版),2000,22(4):29 - 33,91.
HU Yongke, DAI Lili, PI Ya'nan. Theories and calculation of the auger-type conveyer[J]. Journal of Nanchang University (Engineering & Technology), 2000, 22(4): 29 - 33, 91. (in Chinese)

(下转第 373 页)

derivative for speed control of nonlinear hybrid electric vehicles[J]. Journal of Computational and Nonlinear Dynamics, 2016, 11(6): 061013.

[11] QÜ B, QI J. Research on speed control algorithm of stepper motor with fuzzy PID optimization based on genetic algorithm[C]// 2023 IEEE 11th Joint International Information Technology and Artificial Intelligence Conference (ITAIC). IEEE, 2023, 11: 682 - 686.

[12] LIU X, SHAN Z, YANG F, et al. Research on key problems of synchronous control of hydraulic system based on particle swarm fuzzy PID[C]//2023 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA). IEEE, 2023: 1732 - 1737.

[13] ZHOU C, XÜ F, CHENG D. A multi-objective optimization method for hydraulically interconnected suspension system[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, 2024, 238(5): 1234 - 1248.

[14] WANG Z, HU S. Research on fuzzy PID control of forearm of tunnel steel arch mounting machine[J]. Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing, 2019, 1187(3): 032072.

[15] JIA X, WANG X, XIE X, et al. Research on speed-sensorless induction motor control system based on AMESim - Simulink simulation[C]// Proceedings of 2012 UKACC International Conference on Control. IEEE, 2012: 375 - 380.

(上接第 348 页)

[14] ISO 7119:1981. Continuous mechanical handling equipment for loose bulk materials-screw conveyors- design rules for drive power[S]. 1981.

[15] 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)

[16] 向冬枝,徐余伟. 螺旋输送机设计参数的选择和确定[J]. 水泥技术,2010(1):29 - 33.
XIANG Dongzhi, XU Yuwei. Design parameter selection of spiral conveyer[J]. Cement Technology, 2010(1): 29 - 33. (in Chinese)

[17] 郑欣欣. 倾斜式螺旋输送机输送性能及螺旋体有限元仿真研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨理工大学,2021.
ZHENG Xinxin. Research on the conveying performance of inclined screw conveyor and finite element analysis of screw body [D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2021. (in Chinese)

[18] 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]. 吉林大学学报(工学版),2023,53(10):3026 - 3037.
DUN Guoqiang, LIU Wenhui, WU Xingpeng, et al. Simulation optimization and experiment of screw extrusion precision fertilizer ejector[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2023, 53(10): 3026 - 3037. (in Chinese)

[19] 王金峰,付佐栋,翁武雄,等. 圆锥盘推板式水田侧深施肥双行排肥器设计与试验[J]. 农业机械学报,2023,54(2):53 - 62,106.
WANG Jinfeng, FU Zuodong, WENG Wuxiong, et al. Design and experiment of conical-disc push plate double-row fertilizer apparatus for side-deep fertilization in paddy field[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(2): 53 - 62, 106. (in Chinese)

[20] 廖庆喜,陈勇,张青松,等. 油菜侧深穴施肥装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2023,54(2):41 - 52.
LIAO Qingxi, CHEN Yong, ZHANG Qingsong, et al. Design and experiment of side deep hole fertilization device for rapeseed [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(2): 41 - 52. (in Chinese)

[21] 贾洪雷,谭贺文,温翔宇,等. 气力集排式精量配混施肥装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2022,53(增刊 2):109 - 119.
JIA Honglei, TAN Hewen, WEN Xiangyu, et al. Design and experiment of pneumatic aggregate and discharge precision fertilizer mixing device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(Supp. 2): 109 - 119. (in Chinese)

[22] ZENG S, TAN Y, WANG Y, et al. Structural design and parameter determination for fluted-roller fertilizer applicator[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2020, 13(2): 101 - 110.