

离心甩肥式种肥精准穴施装置设计与试验

闫小丽^{1,2} 史海杰¹ 赵昕昱¹ 李泽宇¹ 刘正道^{1,2} 黄玉祥^{1,2}

(1. 西北农林科技大学机械与电子工程学院, 陕西杨凌 712100;
2. 农业农村部保护性耕作(黄河流域)机械化科研基地, 陕西杨凌 712100)

摘要: 玉米种肥穴施是提高肥料利用率的有效途径,针对高速作业时穴施肥装置成穴性差、施肥量不稳定等问题,提出了离心甩肥式玉米穴施肥方法,并设计了穴施肥装置。分析了影响穴施肥装置成穴性能的主要因素,确定了排肥匀转速、每穴施肥量对成穴性能的影响规律;以排肥匀转速、推肥段角度、引流板形状、每穴施肥量为试验因素,以肥料初始速度、肥团初始长度、穴径长轴长度为评价指标,采用离散元仿真方法进行了单因素试验,确定了推肥段角度为120°,引流板形状为正弦曲线。台架试验结果表明,播种机作业速度3~12 km/h时,肥料穴径长轴长度20.8~23.6 mm,成穴性良好;设计了玉米播种同步穴施肥控制算法,以STM32F103C8T6为核心完成了控制系统硬件和软件的设计,实时检测计算并控制种肥相对位置。田间试验表明,在作业速度1.5~9.0 km/h、施肥量3~6 g/株条件下,肥料平均穴径长轴长度为49.7~102.3 mm,变异系数为0.58%~4.39%,种肥平均间距为35.7~42.3 mm,合格率达92%以上。

关键词: 玉米; 穴施肥装置; 离心甩肥式; 离散元仿真; 种肥同步

中图分类号: S224.2 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2026)19-0203-12 OSID: 

Design and Experiment of Centrifugal Ejection-type Device for Placement of Starter Fertilizer in Planting Holes

Yan Xiaoli^{1,2} Shi Haijie¹ Zhao Xinyu¹ Li Zeyu¹ Liu Zhengdao^{1,2} Huang Yuxiang^{1,2}

(1. College of Mechanical and Electronic Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China
2. Scientific Research Base for Conservation Tillage Mechanization (Yellow River Basin), Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: Aiming to address issues such as poor hill-forming performance and unstable fertilizer application rates in high-speed operations, a centrifugal swing-type corn hill-drop fertilization method was proposed, and a corresponding hill-drop fertilization device was designed. The main factors affecting the hill-forming performance of the device were analyzed, and the influence patterns of the rotational speed of the fertilizer discharge scoop and the fertilizer application rate per hill on hill-forming performance were determined. Single-factor experiments were conducted by using the discrete element simulation method, with the rotational speed of the fertilizer discharge scoop, scoop head angle, shape and size of the deflector plate, and fertilizer application rate per hill as test factors, and the initial velocity of the fertilizer, initial length of the fertilizer cluster, and long axis of the fertilizer hill diameter as evaluation indicators. The results determined that the scoop head angle should be 120°, and the deflector plate shape should be sinusoidal. Bench tests showed that when the planter operating speed ranged from 3 km/h to 12 km/h, the long axis of the fertilizer hill diameter ranged from 20.8 mm to 23.6 mm, indicating good hill-forming performance. A control algorithm for synchronizing corn sowing and hill-drop fertilization was designed, with the STM32F103C8T6 as the core, completing the hardware and software design of the control system. This system detected, calculated, and controlled the relative position of seeds and

收稿日期: 2026-03-10 修回日期: 2026-04-29
基金项目: 国家重点研发计划项目(2025YFD1700700)、咸阳市重大科技创新专项(L2025-ZDKJ-ZDGG-RGZN-004)和国家自然科学基金项目(32101629)
作者简介: 闫小丽(1969—),女,副教授,主要从事现代农业装备与技术研究,E-mail: yxl9212@nwsuaf.edu.cn
通信作者: 刘正道(1992—),男,讲师,博士,主要从事现代农业装备与技术研究,E-mail: liuzd@nwafu.edu.cn

fertilizers in real time, ensuring precise matching. Field experiments demonstrated that at operating speeds of 1.5 km/h to 9.0 km/h and fertilizer application rates of 3 g/plant to 6 g/plant, the average long axis of the fertilizer hill diameter ranged from 49.7 mm to 102.3 mm, with a coefficient of variation of 0.58% to 4.39%, and the average spacing between seeds and fertilizers ranged from 35.7 mm to 42.3 mm, meeting the operational requirements for precise corn hill-drop fertilization.

Key words: corn; hole application fertilization device; centrifugal ejection; discrete element method simulation; fertilizer and seed application synchronization

0 引言

施肥是农作物提高产量的重要手段,是稳产、增产的重要影响因素^[1-3]。我国玉米施肥以播种同步条施肥为主,存在株间肥料利用率较低等问题^[4-6]。肥料穴施技术可以实现定点定量施肥^[7-9],针对单株作物供应单穴肥料,可显著提高肥料利用率、降低化肥施用量^[10-12]。施肥装置是穴施肥技术应用的核心载体^[13-15],是穴施肥技术的关键^[16-17]。

我国玉米施肥以颗粒肥为主,相关学者围绕颗粒穴施肥开展了大量研究,其中肥料的精准分配和快速投送是穴施肥装置的核心^[18-22],根据工作原理可分为2种:一是基于开关机构的周期性阻断——释放机制,通过控制肥料的堆储与投放过程,实现肥料的间歇性投送。如胡红等^[23]设计的回转挡肥块、王紫玉等^[24]开发的回转挡片以及张俊雄等^[25]研制的翻板开合机构,均通过物理阻隔方式实现肥料的间歇排出;二是基于回转式排肥盘的定量取肥——定点投送机制,通过回转机构从肥箱中精准取出肥料,并将其携运至预设投肥点后完成定点释放,从而实现取肥与投肥过程的时空分离。如袁文胜等^[26]设计的匀轮式穴施肥排肥器,通过匀轮回转实现定量取肥与定点投送;李树伟^[27]提出的电驱式外槽轮穴施肥排肥器,采用电控驱动外槽轮实现肥量调节与间歇排肥;都鑫等^[28]开发的倾斜梯形孔式穴施肥排肥器,利用梯形孔结构实现肥料定量充填与定向释放;刘正道等^[29]研制的腔盘回转式穴施肥装置,通过腔盘回转实现肥料的成穴投送。上述研究主要通过回转或间歇开关机构实现单穴肥料的分配,分配过程肥料主要受重力和惯性力作用,由于回转或开合机构运动线速度较小,肥料受惯性力较小,充肥和投肥速度较慢,适用作业速度一般在6 km/h以内,当作业速度增大时,单穴施肥量的稳定性和成穴性无法满足作业要求。

为此,针对现有玉米穴施肥装置高速条件下施肥量不稳定、成穴性差等问题,提出离心甩肥式穴施肥排肥方法,通过高速旋转的排肥勺增加肥料的聚集性及排出的初速度,进而提高成穴性能。本文拟通过理论计算、仿真分析、台架试验等方法,明确关

键部件的结构和工作参数,以期提高装置在高速条件下成穴性能,为玉米种肥穴施装置设计提供参考。

1 结构和工作原理

离心甩肥式种肥精准穴施装置主要由穴施肥排肥器、外槽轮排肥器、精量排种器、开沟器、口肥箱、种箱、镇压轮、限深轮等组成,结构如图1所示。

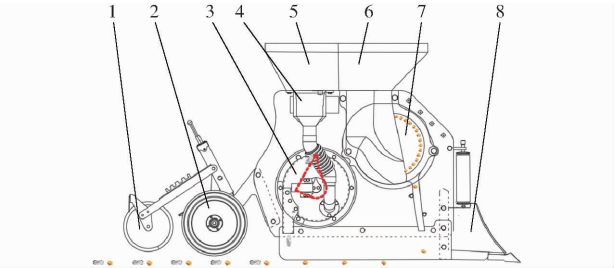


图1 离心甩肥式种肥精准穴施装置结构图
Fig.1 Structure drawing of precision hole application device for seed and fertilizer with centrifugal fertilizer spreading type

1. 镇压轮 2. 限深轮 3. 穴施肥排肥器 4. 外槽轮排肥器 5. 口肥箱 6. 种箱 7. 精量排种器 8. 开沟器

离心甩肥式种肥精准穴施装置通过平行四杆仿形机构安装在播种机机架上,穴施肥排肥器安装在精量排种器后边,投种口和投肥口保持固定间距,穴施肥排肥器、精量排种器和外槽轮排肥器均通过电机驱动。作业时,开沟器在土壤中开出种沟,精量排种器按设定株距将玉米种子均匀排入种沟;口肥箱中肥料由外槽轮式排肥器排出,经过穴施肥排肥器后,呈团状排入种沟;监控系统实时监测落种和落肥信息,计算并控制种子和肥料相对位置,确保种子和肥料位置的一一对应,实现口肥精准穴施。

穴施肥排肥器主要由壳体、盖板、排肥勺等组成,其中排肥勺为排肥装置的关键零部件,排肥勺工作面分为推肥段和引流段两部分,壳体上设有进肥口和排肥口,与盖板组成一个密闭空间,排肥装置整体结构及排肥示意图如图2所示。

穴施肥排肥器稳定工作时,由外槽轮式排肥器下落的颗粒肥经进肥口落入由壳体和盖板组成的腔体内,堆积在腔体底端的充肥区Ⅰ;排肥勺在驱动装置的带动下匀速转动,经过充肥区时将充肥区内所

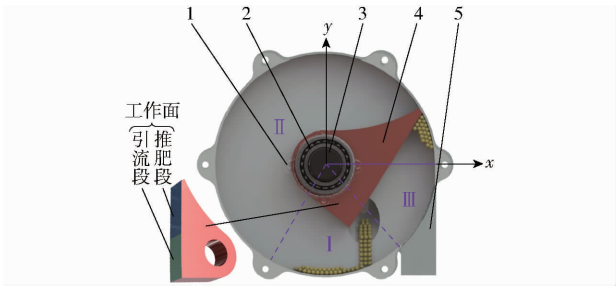


图 2 排肥装置结构及排肥示意图

Fig. 2 Structure diagram of fertilizer dispenser
1. 盖板 2. 轴承 3. 轴 4. 排肥勺 5. 壳体

有颗粒肥料带出,在离心力的作用下肥料呈团状聚集在壳体内壁并随勺转动;肥团经携肥区Ⅱ,到达投肥区Ⅲ,在重力和离心力作用下,沿排肥口内壁以较高初速度迅速排出,完成一次施肥。当排肥装置转速较低时,肥团受重力作用,在到达投肥区前脱离壳体内壁,以较低速度流入排肥口,完成一次施肥。

2 穴施肥排肥器结构设计

2.1 排肥临界条件计算

穴施肥排肥器排肥勺是带动团状肥料运动的直接载体,其结构直接影响排肥过程肥料的聚集性以及壳体内运动轨迹及排出时肥团的速度方向,进而影响肥料在土壤中的分布长度。根据播种单体整体尺寸,穴施排肥器直径为 160 ~ 300 mm^[18,25],本文排肥勺直径选为 200 mm。

排肥勺工作面分为推肥段和引流段,推肥段在充肥区和携肥区带动肥团沿壳体内壁转动,稳定工作状态时在排肥区排出肥团;引流段在排肥装置加减速过程中引导过早脱离壳体内壁的肥料进入排肥口。

肥团在推肥段脱离排肥器的条件为

$$mg \leq \frac{m \pi^2 n^2 r_f}{900} \tag{1}$$

式中 g ——重力加速度,取 9.81m/s^2
 m ——肥团质量,kg
 n ——排肥勺转速,r/min
 r_f ——壳体内半径,m

经计算可得肥团在推肥段脱离排肥勺的条件为 n 大于 95 r/min,即当 n 大于 95 r/min 时,排肥装置依靠排肥勺推肥段带动肥团绕壳体中心转动,肥料在排肥区靠重力及离心力脱离排肥勺,呈团状施入土壤。当 n 小于 95 r/min 时,依靠推肥段带动肥团在充肥区和携肥区沿壳体内壁运动,由引流段将肥料引入排肥区或肥料自行运动到排肥区排出。

为进一步明确 n 小于 95 r/min 时的排肥状态及对应的排肥勺转速范围,建立如图 2 所示坐标系,为

确保解析符合实际情况,需增加边界条件:肥团横纵坐标平方和小于等于 0.01。表达式为

$$\begin{cases} y_1 = y_2 \\ x^2 + y_1^2 \leq 0.01 \end{cases} \tag{2}$$

式中 x ——肥团横坐标
 y_1 ——肥团纵坐标
 y_2 ——排肥勺工作面对应纵坐标

将等式整理代入 Matlab 后,可得如图 3 所示解析曲线,分析曲线可将排肥勺转速 n 小于 95 r/min 时的排肥状态分为 3 种:当 $0 < n \leq 4.5$ r/min 时,肥团在到达排肥口前脱离壳体内壁,紧贴排肥勺工作面流入排肥口;当 $4.5 \text{ r/min} < n < 76 \text{ r/min}$ 时,肥团在到达排肥口前脱离排肥勺,在下落过程中再次与排肥勺碰撞;当 $76 \text{ r/min} \leq n \leq 95 \text{ r/min}$ 时,肥团在到达排肥口前脱离排肥勺,在惯性作用下进入排肥口,且脱离后与排肥勺无碰撞。不同转速时肥料排出方式如图 4 所示。

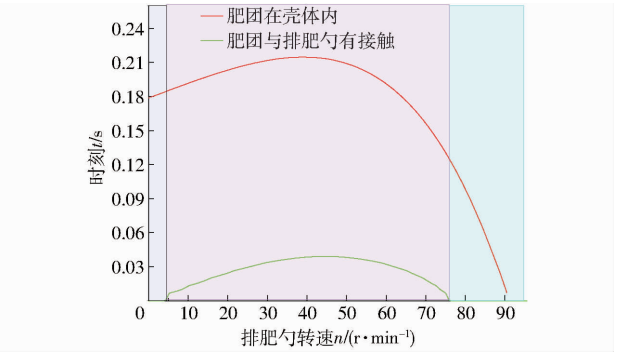


图 3 肥团运动状况解析曲率

Fig. 3 Analysis of fertilizer cluster movement status

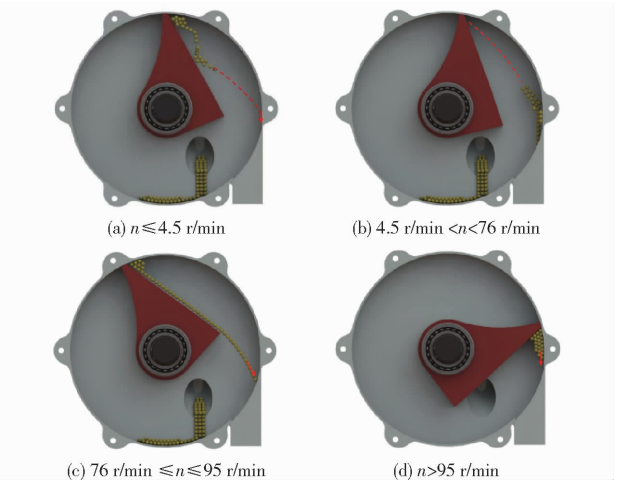


图 4 肥料排出方式示意图

Fig. 4 Schematics of fertilizer discharge method

2.2 排肥勺推肥段设计

排肥器正常工作时,肥团通过排肥勺推肥段排出,推肥段形状结构直接影响肥团的排出性能。在排肥区,当肥团速度方向为竖直向下时肥料开始排

出,肥料排出的运动过程决定肥团初速度方向、大小及肥团长度。

肥料脱离壳体时初始速度计算式为

$$v_d = \frac{5\pi v r_f}{9L_z}$$

(3)

式中 v ——播种机速度,km/h
 v_d ——肥料脱离初始速度,m/s
 L_z ——株距,m

在株距 L_z 确定的情况下,肥料排出的速度只与播种机速度 v 及肥料到壳体中心的距离 r_f 有关。由于肥团聚集在推肥段,在径向有一定厚度,在排出时靠近壳体最外围肥料与内侧肥料有一定速度差,进而影响肥料的成穴性。

排肥勺工作面推肥段与壳体切线的角度 θ 影响肥料的聚集状态,进而影响肥料排出时的运动状态。开始排肥的临界时刻之前,肥料以团状聚集在推肥段,紧贴壳体内壁在排肥勺带动下做匀速圆周运动,肥团受力如图 5 所示,受力方程为

$$\begin{cases} \frac{\mu m r_f \pi^2 n^2}{900} + N(\mu \sin \alpha_4 - \cos \alpha_4) - \\ \quad mg(\mu \sin \alpha_3 + \cos \alpha_3) = 0 \\ \alpha_4 = \alpha_1 + \alpha_2 \\ \theta = \frac{\pi}{2} + \alpha_1 \end{cases}$$

(4)

式中 N ——推肥段对肥团的支持力,N
 μ ——肥团与壳体间的摩擦因数
 α_1 ——推肥段顶端与工作面的夹角,(°)
 α_2 ——推肥段顶端与离心力的夹角,(°)
 α_3 ——摩擦力反方向与重力的夹角,(°)
 α_4 ——摩擦力反方向与支持力 N 的夹角,(°)

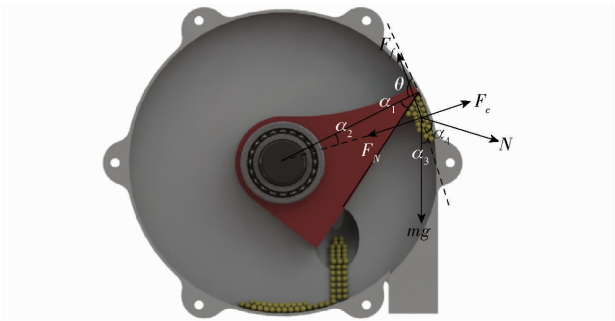


图 5 肥团受力分析图
Fig. 5 Force analysis diagram of fertilizer cluster

由式(4)可知,当排肥勺转速不变时随着排肥勺的转动 α_3 随之变小,由于 α_4 不变, N 的大小随之变化。

肥团的聚集状态与颗粒间的摩擦因数、休止角及受力的方向和大小有关,受力越大,方向越聚

合,肥团聚集的越紧密,越靠近壳体,则肥团外围和内围的速度差越小,沿壳体的长度越长。因此,推肥段对肥团作用力 N 的大小和方向对肥料排出时的速度差和初始长度存在影响; N 的方向受角 α_1 、 α_2 的影响,其中 α_1 的大小受角 θ 的影响, α_2 为推肥段顶端与离心力的夹角,受肥团体积及堆积形状的影响; N 的大小同时受肥团所受离心力 F_c 大小及肥团所受重力大小影响;肥团所受离心力大小随着肥团质量和转速的增大而增大,肥团所受的重力随肥团质量的增大而增大。因此,排肥勺转速、肥团质量即每穴施肥量以及角度 θ 都对肥团的聚集形态以及肥料投出时的速度差、速度大小、肥团初始长度有影响。

2.3 引流段设计

排肥装置在加减速时排肥勺转速较低,肥团需经过引流段才能顺利排出,为保证肥料顺利排出且成穴性能良好,需对引流段进行设计和分析。肥料在排肥勺工作面受力分析及速度分解如图 6 所示,其中 F_s 为排肥勺工作面对肥料的摩擦力, θ_1 为肥团在推肥段滑落临界位置时重力与摩擦力反方向的夹角, θ_2 为肥料脱离引流段时速度方向与重力方向夹角。引流段的曲线形状影响肥料在引流段上所受摩擦力及肥料的运动轨迹,最终对肥料排出时的速度方向和大小产生影响。为避免肥料与排肥勺工作面碰撞造成动能损失,须保证引流段起始端切线方向与推肥段保持同向。以曲线方程坐标原点为起点,为快速确定引流段的曲线方程,取凹曲线、直线、凸曲线 3 种形状的曲线对引流段形状进行仿真定性分析。在定性分析后确定凸曲线排肥效果更佳的基础上,选择 3 种常见的凸曲线参数方程,分别为幂函数、指数函数、正弦函数进行进一步分析确定,最终确定正弦函数曲线排肥效果最好。为进一步确定正弦曲线参数,对其参数方程的两个系数 b 和 c 进行仿真确定,选取最佳参数。

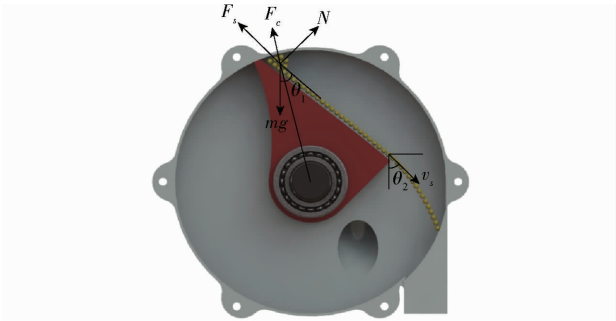


图 6 肥料在排肥勺工作面受力分析及速度分解
Fig. 6 Force analysis and velocity decomposition of fertilizer on working face of fertilizer spoon

肥料离开排肥勺时的速度 v_s 的大小和方向会直

接影响肥团是否能够排出以及排出的成穴性能。此时肥料水平方向的速度为 $v_s \sin \theta_2$ ，水平速度过大，会使肥料撞击在壳体内壁的冲击更大，破坏肥料成穴性，造成排出时水平速度较大，水平速度过小则会导致肥料不能排出壳体。随着转速 n 的升高， θ_1 减小，肥料下落时的高度增大，初始动能和势能增高，肥料下落时摩擦力减小，脱离引流段时速度 v_s 增大， θ_2 减小，肥团竖直方向速度增大，肥团更容易排出，因此引流段的设计保证排肥勺转速在最低时肥料能正常排出，且排肥性能良好即可。

引流段过长会在转动过程中扰动肥料颗粒，影响肥团在壳体内的聚集性，进而影响排肥的成穴性。肥料在落入进肥管后，在重力作用下沿进肥管下部内壁滚落，故肥料占据位置主要集中于进肥管下半部。当每穴施肥量不变时，排肥勺转速越高，肥料流经进肥管落入肥盘的流量越大。取每穴最大施肥量 6 g，对应排肥勺转速为 800 r/min，最大流量为 80 g/s，此时肥料占进肥口面积的比 p' 为

$$p' = \frac{m_l}{\pi a_1 a_2 \rho \sqrt{2gH_l}}$$

(5)

式中 H_l ——进肥下落距离，取 0.2 m
 m_l ——进肥流量，g/s
 ρ ——肥料体积密度，取 984.6 kg/m³
 a_1 ——进肥口短轴长度，取 0.03 m
 a_2 ——进肥口长轴长度，取 0.042 m

代入数据后计算可知 $p' < 0.5$ ，因此，可确定引流段最远端距离回转中心为 61 mm。

3 仿真试验

3.1 离散元仿真模型

玉米播种口肥主要为速效肥，以大颗粒尿素为研究对象，查阅资料得尿素颗粒的平均三轴尺寸为 3.83 mm×3.62 mm×3.45 mm，等效直径为 3.63 mm，球形率为 95%，颗粒密度为 1 575 kg/m³，体积密度为 984.6 kg/m³；肥料颗粒休止角为 30.4°^[27]。当肥料颗粒的球形率大于 90% 时，颗粒模型可定义为球形单元，在离散元软件中建立颗粒模型，肥料颗粒之间的表面液桥力、静电力及颗粒破碎问题不考虑，选用 Hertz-Mindlin 无滑动接触模型，物料参数如表 1 所示，接触参数^[27-29]见表 2。利用重力使颗粒在肥料箱中自由下落，初始颗粒速度设定为 0.5 m/s，颗粒总数不限。

3.2 推肥段对排肥性能影响试验

为分析排肥段各因素对排肥性能的影响，分别开展每穴施肥量、排肥勺转速和推肥段角度单因素

表 1 物料参数
Tab.1 Material parameters

物料类型	泊松比	剪切模量/Pa	密度/(kg·m ⁻³)
肥料颗粒	0.250	2.86×10^7	1 575
ABS 塑料	0.394	8.96×10^8	1 180
钢	0.300	7.90×10^{10}	7 865

表 2 接触参数
Tab.2 Contact parameters

物料类型	恢复系数	静摩擦因数	滚动摩擦因数
肥料-钢	0.59	0.395	0.01
肥料-肥料	0.31	0.370	0.12
肥料-ABS 塑料	0.45	0.250	0.19

试验。以每穴施肥量、排肥勺转速为试验因素，以肥料排出率为评价指标进行单因素试验。在上述两组单因素试验的基础上，以推肥段角度为试验因素，进行单因素试验。每穴施肥量设置为 3、4、5、6 g，对应供肥速率为 2 400、3 200、4 000、4 800 g/min，排肥勺转速和推肥段角度分别固定为 800 r/min 和 70°；排肥勺转速设置为 100~800 r/min，每穴施肥量和推肥段角度分别固定为 6 g 和 70°；推肥段角度设置为 10°~170°，排肥勺转速和每穴施肥量分别固定为 800 r/min 和 6 g。

每穴肥料排出率是评价穴施肥排肥装置性能的重要指标，在排肥口统计每次排出肥料颗粒总质量，由于排肥勺转动第 1 圈时，肥料堆积时间不足，且第 2 圈以后，会受到上一次肥料余量的影响。因此本文取第 2 组肥料排出率作为上述 3 组单因素试验的评价指标。肥料排出率的计算公式为

$$p = \frac{\sum_{i=1}^3 m_i}{3m_1} \times 100\%$$

(6)

式中 m_i ——每穴实际排肥量，g
 m_1 ——目标施肥量，g
 p ——肥料排出率，%

肥料由排肥口排出到抵达达沟过程中，不考虑肥团水平速度及肥料弹跳的条件下，肥料下落过程如图 7 所示，穴径长轴的计算式为

$$l = \frac{v}{g} \left[v_1 - v_0 - (v_1^2 + 2gH_0)^{\frac{1}{2}} + (v_0^2 + 2gH_0 + 2gl_0)^{\frac{1}{2}} \right]$$

(7)

式中 H_0 ——肥团下端到肥沟距离，m
 l_0 ——肥团初始长度，m
 l ——穴径长轴长度，m
 v_0 ——肥团排出时最小速度，m/s
 v_1 ——肥团排出时最大速度，m/s

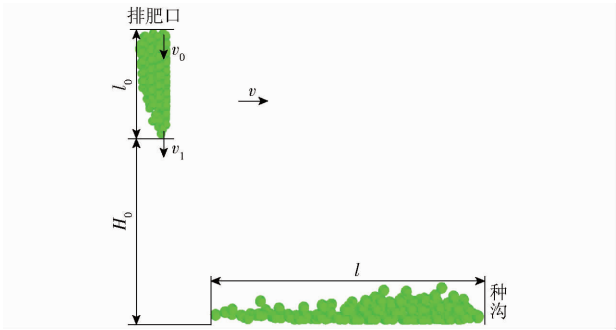


图 7 肥料下落过程

Fig. 7 Fertilizer falling process

穴径长轴长度 l 与肥团竖直方向最大初速度 v_1 、最小初速度 v_0 、肥团初始长度 l_0 及下落高度 H_0 有关,当排肥器以正常工作速度作业时,肥团竖直方向最大初速度 v_1 、最小初速度 v_0 的差异不大,为更直观计算肥团成穴性,取竖直方向平均初速度 v_z 作为评价指标,则此时穴径长轴长度计算式为

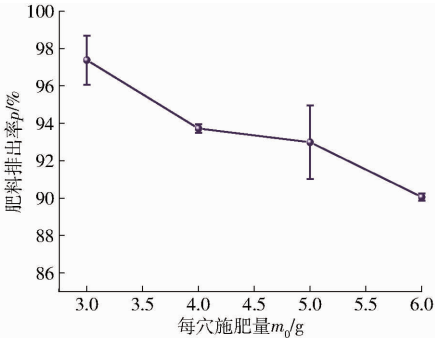
$$l = \frac{v}{g} [(v_z^2 + 2gH_0 + 2gl_0)^{\frac{1}{2}} - (v_z^2 + 2gH_0)^{\frac{1}{2}}] \quad (8)$$

当考虑肥团的水平速度及其弹跳效应时,水平速度越大,肥团在排肥管内与管壁的碰撞越剧烈,弹跳行为也越显著。由此导致动量损失加剧,整体速度衰减更为明显;同时,肥团在运动过程中被进一步拉长,形成更长的肥团形态。最终,当肥团落入种沟后,其扩散程度也随之增大,影响施肥的分布均匀性及成穴性。

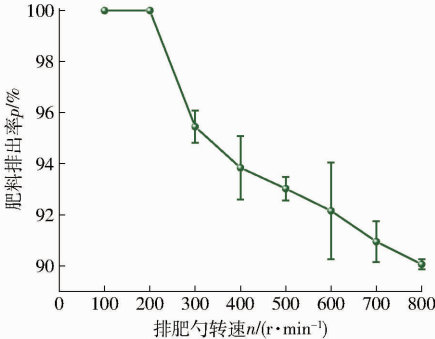
肥团竖直方向平均初速度 v_z 、肥团初始长度 l_0 、水平方向平均速度 v' 都对穴施肥的成穴性有很大影响,因此,通过 EDEM 后处理界面中 Selection Group 功能在排肥器出肥口添加一个 Grid Bin Group,输出肥团竖直方向平均初速度 v_z 、水平方向平均速度 v' ,通过 ruler 工具测量肥团初始长度 l_0 。

由图 8 可知,每穴施肥量越大,肥料排出率越低,在目标施肥量范围内,当每穴施肥量为 6 g 时,肥料最难排出,对推肥段角度的要求最高。随着排肥匀转速的增高,肥料排出率逐渐降低,因此,在目标转速范围内,排肥匀转速为 800 r/min 时对推肥段角度要求最高。排肥勺角度在 $10^\circ \sim 70^\circ$ 范围内时,肥料排出率低于 100%,不能满足完全排肥的需求,不必考虑其它性能。排肥勺推肥段角度在 $80^\circ \sim 150^\circ$ 范围内时,其仿真效果如图 9 所示。

分析图 9 中肥团的排出效果可知:当推肥段角度为 80° 、 90° 时,肥料的水平速度较高,当角度为 150° 时,肥团的水平速度又有所提升。在排肥勺转速为 800 r/min,每穴施肥量为 6 g 的条件下,排肥勺取不同推肥段角度时,肥团竖直方向速度 v_z 、水平方向速度 v' 、肥团初始长度 l_0 的具体仿真结果如图 10



(a) 每穴施肥量对排肥性能的影响



(b) 排肥匀转速对排肥性能的影响

图 8 仿真试验结果

Fig. 8 Simulation test results

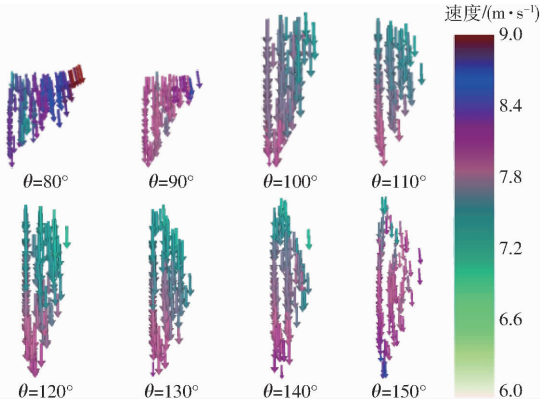


图 9 不同推肥段角度下排肥效果图

Fig. 9 Fertilizer discharge patterns at different angles of fertilizer-pushing section

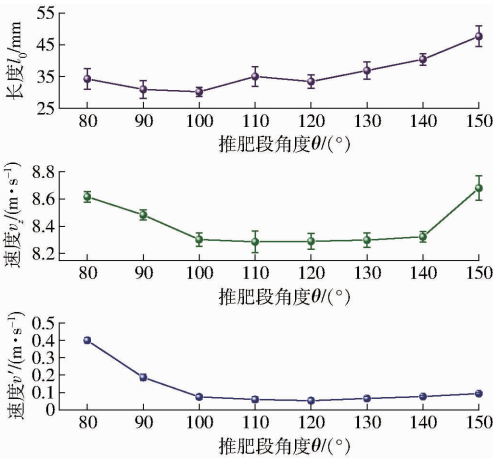


图 10 推肥段角度仿真结果

Fig. 10 Simulation results of spoon head angle

所示。

肥团水平速度在 $80^{\circ} \sim 120^{\circ}$ 范围内逐渐递减,在 $120^{\circ} \sim 150^{\circ}$ 范围内逐渐增加,在排肥匀推肥段角度为 120° 时水平速度 v' 最小;肥团竖直速度在 $80^{\circ} \sim 110^{\circ}$ 范围内逐渐递减,在 $110^{\circ} \sim 150^{\circ}$ 范围内逐渐增加,在排肥匀推肥段角度为 110° 时竖直速度 v_z 最小;肥团初始长度在 $80^{\circ} \sim 100^{\circ}$ 范围内逐渐递减,在 $100^{\circ} \sim 150^{\circ}$ 范围内整体呈逐渐增加趋势;综合数据分析,为使肥团水平速度 v' 、初始长度 l_0 尽可能小,竖直速度 v_z 尽可能大,当推肥段角度为 120° ,肥料脱离排肥装置时竖直方向速度 v_z 稳定,水平方向速度 v' 最小,肥团初始长度 l_0 较短,因此将排肥匀推肥段角度确定为 120° 。

3.3 引流段形状对排肥性能影响试验

为确定引流板结构对排肥性能的影响,保证肥料可以完全排出,且成穴性良好,以引流板形状为试验因素,以排肥用时、肥团竖直方向平均初速度 v_z 、水平方向平均速度 v' 为评价指标进行定性单因素试验。在确定引流段形状的基础上,以关键参数为试验因素进行单因素试验。为确保最难作业条件下排肥性能,试验条件定为每穴施肥量 6 g,排肥匀转速 1 r/min。

为确定引流段结构及其关键参数,首先选取凹曲线、直线和凸曲线 3 种引流段形状进行对比;在确定最佳形状后,进一步比较幂函数、指数函数和正弦函数 3 种曲线形式。随后,以正弦曲线系数 c 和 b 为试验因素,其中 c 分别取 3、6、9、12、15, b 分别取 30、40、50、60、70,以确定引流段的最优曲线参数。

不同引流段形状对排肥性能影响如表 3 所示,在转速为 1 r/min,施肥量为 6 g 时,凹曲线引流段形状肥料完全排出用时较长,且波动较大;直线和凸曲线用时较短且波动较小;直线型排肥速度最低,为 2.07 m/s;凹曲线水平方向速度最大,为 0.305 m/s,凸曲线水平速度较小,为 0.228 m/s;3 种结构方案中,凸曲线的排肥用时较短、波动最小,排肥速度最高,水平速度最小,因此确定引流段结构为凸曲线。

表 3 不同形状引流段仿真结果

Tab.3 Simulation results of diversion sections with different shapes			
指标	凹曲线	直线	凸曲线
排肥用时/s	1.18 ± 0.049	0.69 ± 0.029	0.87 ± 0.014
水平速度/(m·s ⁻¹)	0.305 ± 0.003	0.234 ± 0.017	0.228 ± 0.001
竖直速度/(m·s ⁻¹)	2.08 ± 0.007	2.07 ± 0.003	2.14 ± 0.002

注:表中数据表达形式为“平均值 ± 标准差”。下同。

不同引流段函数类型对排肥性能影响如表 4 所

示,正弦函数形状的引流段,在转速为 1 r/min 的工作条件下排肥用时最短,为 0.75 s,肥料竖直速度最高,为 2.03 m/s,水平速度最低,为 0.156 m/s;幂函数及指数函数形状的引流段排肥用时都高于 0.8 s,肥料竖直速度都小于 2.0 m/s,水平速度都大于 0.2 m/s。因此确定引流段函数为正弦函数,其曲线参数方程为

$$\begin{cases} x_c = bt \\ y_c = csint \end{cases} \tag{9}$$

式中 t ——排肥用时,s

表 4 不同函数引流段仿真结果

Tab.4 Simulation results of diversion sections with different functions

指标	幂函数	正弦函数	指数函数
排肥用时/s	0.81 ± 0.060	0.75 ± 0.025	0.82 ± 0.072
水平速度/(m·s ⁻¹)	0.203 ± 0.003	0.156 ± 0.033	0.201 ± 0.007
竖直速度/(m·s ⁻¹)	1.96 ± 0.004	2.03 ± 0.007	1.96 ± 0.005

不同曲线系数对排肥性能影响如图 11 所示,在 $c = 3$ 时排肥用时最短(0.76 s), $c = 12$ 时最长(0.85 s);肥料竖直速度在 $c = 9$ 时最小(1.94 m/s), $c = 15$ 时最大(2.12 m/s),呈先降后升趋势;肥料水平速度随系数 c 增大持续增加, $c = 3$ 时最小(0.161 m/s), $c = 15$ 时最高(0.424 m/s)。综合用时少、竖直速度较高和水平速度较低,选择 $c = 6$ 。

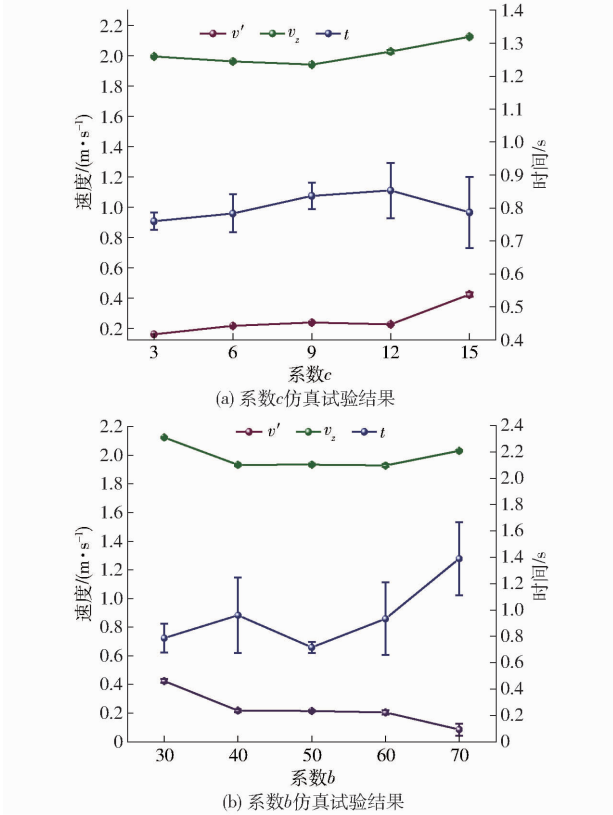


图 11 不同系数下的仿真试验结果

Fig. 11 Simulation test results under different coefficients

分析图 11b 可知当系数 b 在 30 ~ 70 范围内时,肥料水平速度随 b 增加而降低;排肥用时在 $b = 50$ 时最短(0.72 s), $b = 70$ 时最长(1.39 s);肥料竖直速度在 $b = 30$ 时最大(2.12 m/s), $b = 60$ 时最小(1.93 m/s)。基于用时短、竖直速度误差小和水平速度低,选择 $b = 50$ 。

最终确定引流板形状为正弦曲线,其参数方程为

$$\begin{cases} x_c = 50t \\ y_c = 6\sin t \end{cases} \quad (10)$$

综合理论分析及仿真结果,离心甩肥式穴施肥排肥器壳体直径为 200 mm,排肥口沿壳体竖直切线方向,推肥段与壳体切线夹角为 120°,排肥勺引流段曲线为系数 $b = 50$ 、 $c = 6$ 的正弦曲线,其坐标起点、终点与回转中心距离为 61 mm。

4 种肥同步控制系统设计

4.1 玉米播种同步穴施肥控制算法

玉米播种同步穴施肥控制算法模型如图 12 所示,排种管与排肥管距离为 L_w ,外槽轮转速为 n_l ,排种器转速为 n_z ,排肥口到种沟距离为 h ,落种落肥时间统一以系统时间定义,即设定开机时刻为 0。挡光片扫过传感器时控制系统记录时刻 t_{j0} ,肥团以一定初速度从排肥口到达种沟所需时间为 t_0 ,肥团到达种沟的时刻为 t_f ,落种传感器检测到种子下落到种沟的时刻为 t_z ,此时种肥间距为 l_{zf} ,其计算式为

$$l_{zf} = \left| t_z - t_0 - t_{j0} + \frac{18L_w \bmod L_z}{5v} \right| \frac{v}{3.6} \bmod L_z \quad (11)$$

其中
$$t_0 = \frac{1}{g} \left[\left(\frac{25\pi^2 v^2 r_f^2}{81L_z^2} + 2gh \right)^{\frac{1}{2}} - \frac{5\pi v r_f}{9L_z} \right] \quad (12)$$

式中 mod——取余数函数

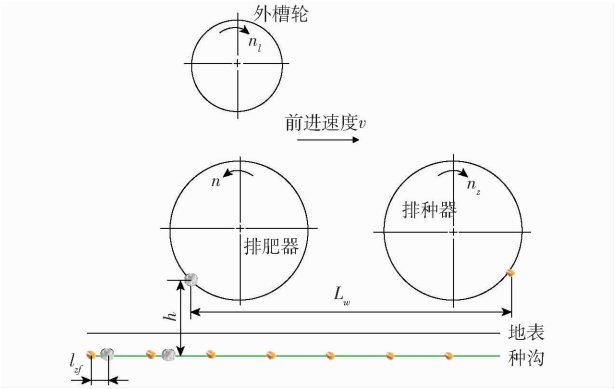


图 12 玉米播种同步穴施肥控制算法模型
Fig. 12 Control algorithm model of simultaneous hole fertilization for corn seeding

在种肥同步控制过程中,电机转速的调整量对施肥定位精度具有关键影响。转速变化过大会导致

排肥过程不稳定,出现漏施或重施现象;尤其当转速变化所引起的种肥间距偏差接近或等于理论株距时,将对间距调控作用产生抵消,导致调速失效。因此,为实现种肥相对位置的精确控制,需对电机转速调整量进行定量分析与系统设计,以保障其与株距之间的协调关系。

转速变化量的限制主要基于两点:一是调速过程中需要快速调整种肥间距,使其达到 30 ~ 50 mm 的标准范围;二是进入该范围后,需保持一定时间以便系统确认状态稳定,当前设定为连续 3 株合格即视为稳定。由于系统未必恰好在整数位置进入合格区间,故连续 4 株的调整行程应限制在施肥区间内。

加速调速时每株改变距离 Δl_a 为

$$\Delta l_a = nL_z \left(\frac{1}{n} - \frac{1}{n + \Delta n} \right) \quad (13)$$

式中 Δn ——转速调整量, r/min

减速调速时每株改变距离 Δl_s 为

$$\Delta l_s = nL_z \left(\frac{1}{n - \Delta n} - \frac{1}{n} \right) \quad (14)$$

结合上述转速变化范围的限制,在实际调速过程中应遵循以下约束条件

$$\begin{cases} 4\Delta l_a \leq 0.02 \text{ m} \\ 4\Delta l_s \leq 0.02 \text{ m} \end{cases} \quad (15)$$

取株距为 250 mm,代入式(14)后解得转速调整量 $\Delta n \leq 0.0196n$,由于变化量越大,种肥间距调整越快,因此选择转速变化量 $\Delta n = 0.0196n$ 。

4.2 控制系统软硬件设计

种肥同步控制系统以 STM32F103C8T6 单片机为核心,整体结构如图 13 所示。系统主要由信号采集模块(红外传感器、编码器)、执行模块(电机)、控制模块(STM32 主控单元)、人机交互模块(触摸屏、按键、报警装置)和电源模块组成。

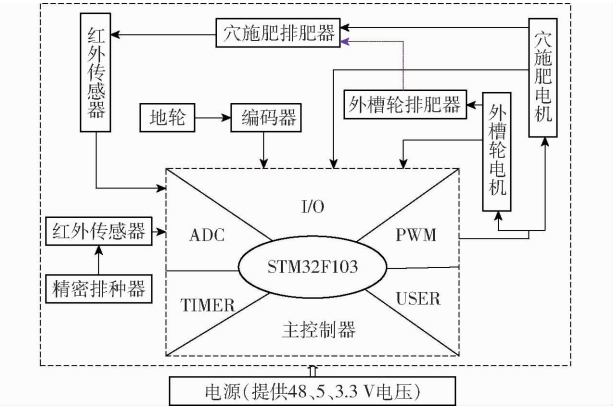


图 13 种肥同步控制系统原理图
Fig. 13 Schematic of synchronous control system for planting and fertilization

当播种机以基本稳定的速度前进时,落种与落

肥检测装置会实时采集种肥下落信号,并传输至控制系统。系统依据当前播种机前进速度,实时计算种肥间距,并与设定标准值进行比较。若长期出现偏差,则短期内对施肥伺服电机转速进行调节,待间距恢复稳定后,转速随即回调至原设定值。

同步穴施肥控制系统软件流程如图 14 所示。系统启动后,首先进行初始化并设置定时器,操作人员输入每穴施肥量及株距等参数,随后进入运行判断环节:若未收到开始指令,系统持续等待;若确认开始,则实时检测播种机前进速度,并启动播种施肥电机。运行过程中,系统通过红外传感器实时监测种肥下落状态,当检测到有种肥下落时,立即判断当前种肥间隔是否在设定范围。若间隔不符合标准,系统随即进入闭环调节阶段,向伺服电机发送脉冲信号,动态调节排肥电机转速,进而修正施肥位置,使种肥间距恢复至目标范围。调整后,系统将返回检测环节,继续监测下落状态与间隔,形成持续的反馈控制回路,若在运行中出现异常,系统触发报警。当种肥间距稳定处于符合要求状态时,系统保持实时监测种肥相对距离与作业速度,直至作业结束。

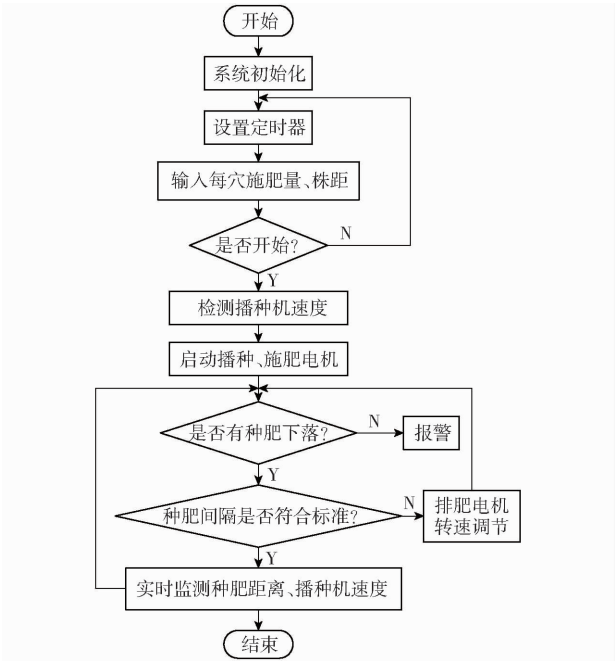


图 14 控制系统软件流程图

Fig. 14 Software flowchart of control system

5 验证试验

5.1 台架试验

基于前文参数优化结果,为验证排肥器排肥性能,开展在最大施肥量、不同作业速度下肥料颗粒排出情况的穴施肥排肥器工作性能试验。由前述分析可知,排肥匀转速越高、每穴施肥量越大肥料越难排出排肥器,为验证正常工作状态下排肥

器的排肥性能,在不同转速条件下取最大施肥量 6 g 进行排肥器性能台架验证试验。试验过程用高速摄像机拍摄肥料下落过程,高速摄像机为“千眼狼 S 系列”,保存时间长 2 s,帧率 200 f/s,分辨率 1 280 像素×1 024 像素,曝光时间 100 ns,试验装置如图 15 所示。

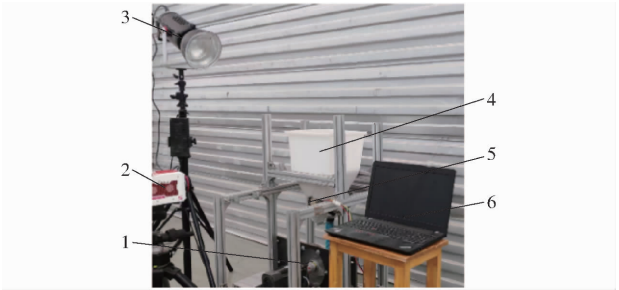


图 15 台架试验

Fig. 15 Bench test

1. 穴施肥排肥器 2. 高速摄像机 3. 补光灯 4. 肥箱 5. 匀速排肥器 6. 计算机

试验分别选取肥团首次从排肥口排出的时刻 t_1 (图 16a)、肥团完全排出出肥口的时刻 t_2 (图 16b) 以及肥团再次从排肥口排出的时刻 t_3 (图 16c),则 t_1 和 t_2 的时间间隔即为排肥时间, t_2 和 t_3 的时间间隔即为排肥间隔时间,则台架试验的穴施肥理论穴径长轴长度计算公式为

$$l = \frac{1\,000L_z(t_2 - t_1)}{t_3 - t_1} \tag{16}$$

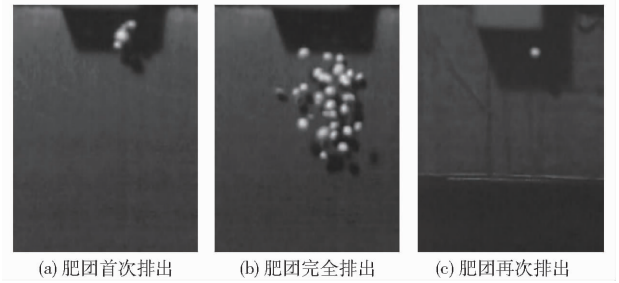


图 16 不同时刻出肥口肥料分布

Fig. 16 Distribution of fertilizers at different times engraved on fertilizer outlet

取株距 $L_z = 0.25$ m,则穴径长轴长度 l 如表 5 所示。分析表中数据可知,在正常工作速度范围内,穴施肥排肥器的排肥性能稳定,受播种机作业速度影响较小,肥料穴径长轴长度整体稳定在 20 ~ 24 mm 范围内,最大为 23.6 mm,成穴性好,符合设计要求。

5.2 田间试验

2026 年 1 月在陕西省咸阳市杨陵区杨凌科丰农业装备有限公司试验田 (34. 27°N, 108. 08°E) 开展田间试验。试验设置施肥量单因素试验 (作业速度 6 km/h, 施肥量 3、4、5、6 g/株) 和作业速度单因素试验 (施肥量 6 g/株, 作业速度 1. 5、3. 0、4. 5、

表 5 台架试验结果
Tab.5 Results of bench test

作业速度/ ($\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$)	落肥时长/ s	落肥周期/ s	落肥时长 占比/%	穴径长轴 长度 l/mm
3	0.028 3	0.300	9.43	23.6
6	0.013 3	0.150	8.89	22.2
9	0.008 3	0.100	8.33	20.8
12	0.006 7	0.075	8.93	22.3

6.0、7.5、9.0 km/h), 设定系统目标种肥间距为 30 ~ 50 mm, 理论中值为 40 mm。以肥料穴径长轴长度和种肥间距为评价指标, 每组试验重复 3 次, 每次试验随机选取 30 个穴点测定, 取平均值。为便于取样和测量, 拆除播种机覆土镇压装置, 试验过程及穴施肥效果如图 17 所示。



图 17 田间试验过程及穴施肥效果
Fig.17 Field experiment process and effect of hole fertilization

施肥量和作业速度对排肥性能的影响如表 6、7 所示。施肥量 3 ~ 6 g/株时, 肥料平均穴径长轴长度 59.3 ~ 80.6 mm, 变异系数 0.58% ~ 3.77%, 随施肥量增加, 穴径长轴长度逐渐增大; 作业速度 1.5 ~ 9.0 km/h 时, 平均穴径长轴长度为 49.7 ~ 102.3 mm, 变异系数为 0.58% ~ 4.39%, 随作业速度升高, 穴径长轴长度逐渐增大, 变异系数整体呈上升趋势, 作业速度为 9.0 km/h 时变异系数最大, 但仍小于 5%, 表明排肥稳定性良好。

施肥量为 3 ~ 6 g/株时, 种肥平均间距为 39.0 ~ 46.0 mm, 平均值为 41.75 mm, 变异系数 1.78% ~ 11.91%, 合格率为 93.33% ~ 96.67%, 随施肥量增大, 种肥间距稳定性变差。作业速度 1.5 ~ 9.0 km/h 时, 种肥平均间距为 35.7 ~ 42.3 mm, 平均值为 40.33 mm, 变化幅度为 6.6 mm, 变异系数为 6.45% ~ 14.22%, 合格率为 92.22% ~ 97.78%。总体而言,

在控制系统开启并稳定工作时, 实测种肥间距平均值为 (40.9 ± 2.7) mm, 与理论中值的绝对偏差为 0.9 mm, 平均绝对误差为 2.2 mm, 控制系统可满足设计目标。

表 6 不同施肥量对排肥性能的影响
Tab.6 Influence of different fertilizer application rates on fertilizer discharge performance

施肥量/ ($\text{g}\cdot\text{株}^{-1}$)	穴径长轴长度		种肥间距		合格 率/%
	平均值/ mm	变异系 数/%	平均值/ mm	变异系 数/%	
3	59.3	1.59	40.7	5.05	95.56
4	65.0	3.77	46.0	1.78	93.33
5	72.3	1.72	39.0	7.55	94.44
6	80.6	0.58	41.3	11.91	96.67

表 7 不同作业速度对排肥性能的影响
Tab.7 Influence of different homework speeds on fertilizer discharge performance

作业速度/ ($\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$)	穴径长轴长度		种肥间距		合格 率/%
	平均值/ mm	变异系 数/%	平均值/ mm	变异系 数/%	
1.5	49.7	2.51	35.7	9.25	93.33
3.0	63.6	3.92	42.0	12.75	94.44
4.5	73.3	1.70	38.7	6.45	97.78
6.0	80.6	0.58	41.3	11.91	96.67
7.5	91.3	2.87	42.0	11.66	95.56
9.0	102.3	4.39	42.3	14.22	92.22

6 结论

(1) 设计了离心甩肥式种肥精准穴施装置, 确定了排肥器关键结构参数: 壳体直径为 200 mm, 排肥口沿壳体竖直切线方向, 推肥段与壳体切线夹角为 120° , 排肥勺引流段曲线为系数 $b = 50$ 、 $c = 6$ 的正弦曲线, 其坐标起点、终点与回转中心距离为 61 mm。台架试验表明, 播种机作业速度 3 ~ 12 km/h 时, 肥料穴径长轴长度 20.8 ~ 23.6 mm, 成穴性良好。

(2) 通过分析前进速度、排种器与排肥器间距、株距等对落种落肥位置的影响, 得到种肥相对位置计算方法, 并设计了玉米播种同步穴施肥控制算法; 搭建了基于 STM32F103C8T6 的控制系统, 并完成系统软硬件设计。

(3) 田间试验表明, 在作业速度 1.5 ~ 9.0 km/h、施肥量 3 ~ 6 g/株条件下, 穴施肥平均穴径长轴长度为 49.7 ~ 102.3 mm, 变异系数为 0.58% ~ 4.39%, 排肥稳定性良好; 种肥平均间距为 35.7 ~ 42.3 mm, 合格率为 92% 以上。

参 考 文 献

[1] 李坤,袁文胜,张文毅,等. 玉米施肥技术与施肥机械的研究现状及趋势[J]. 农机化研究, 2017, 39(1): 264 - 268.

- Li Kun, Yuan Wensheng, Zhang Wenyi, et al. Research status and development trend of corn fertilizing technology and fertilizing machine[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2017, 39(1): 264–268. (in Chinese)
- [2] 陈印军,王琦琪,向雁. 我国玉米生产地位、优势与自给率分析[J]. 中国农业资源与区划, 2019, 40(1): 7–16.
Chen Yinjun, Wang Qiqi, Xiang Yan. Analysis on the status, superiority and self-sufficiency ratio of maize in China[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2019, 40(1): 7–16. (in Chinese)
- [3] 李少昆,赵久然,董树亭,等. 中国玉米栽培研究进展与展望[J]. 中国农业科学, 2017, 50(11): 1941–1959.
Li Shaokun, Zhao Jiuran, Dong Shuting, et al. Advances and prospects of maize cultivation in China[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2017, 50(11): 1941–1959. (in Chinese)
- [4] 曹玉贤,胡仁,黄飞,等. 一次性根区穴施控释尿素提高玉米产量和氮肥利用率[J]. 植物营养与肥料学报, 2025, 31(7): 1455–1466.
Cao Yuxian, Hu Ren, Huang Fei, et al. One-time root-zone application of controlled-release area increases maize yield and nitrogen use efficiency[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2025, 31(7): 1455–1466. (in Chinese)
- [5] 张福锁,王激清,张卫峰,等. 中国主要粮食作物肥料利用率现状与提高途径[J]. 土壤学报, 2008, 45(5): 915–924.
Zhang Fusuo, Wang Jiqing, Zhang Weifeng, et al. Nutrient use efficiencies of major cereal crops in China and measures for improvement[J]. Acta Pedologica Sinica, 2008, 45(5): 915–924. (in Chinese)
- [6] 朱兆良,金继运. 保障我国粮食安全的肥料问题[J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(2): 259–273.
Zhu Zhaoliang, Jin Jiyun. Fertilizer use and food security in China[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2013, 19(2): 259–273. (in Chinese)
- [7] 袁谋青. 自走式车载肥料穴施机关键部件作业技术研究[D]. 广州:华南农业大学 2021.
Yuan Mouqing. Research on operation technology of key components of self-propelled vehicle-mounted fertilizer hole applicator [D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2021. (in Chinese)
- [8] 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]. 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]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(11): 97–103. (in Chinese)
- [9] Adugyamf R, Agyinbirikorang S, Tindjina I, et al. Minimizing nutrient leaching from maize production systems in Northern Ghana with one-time application of multi-nutrient fertilizer briquettes[J]. Science of the Total Environment, 2019, 694: 133667.
- [10] 杨杰,李厂,古冬冬,等. 夏玉米穴施肥作业机械设计与试验-基于新能源技术[J]. 农机化研究, 2022, 44(4): 86–90.
Yang Jie, Li Chang, Gu Dongdong, et al. Design and experiment of fixed hole fertilization mechanism for summer maize-based on new energy technology[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2022, 44(4): 86–90. (in Chinese)
- [11] 吴然然,张刘扬,钱梵梵,等. 玉米穴施肥装置的设计与仿真[J]. 安徽农业大学学报, 2017, 44(5): 941–946.
Wu Ranran, Zhang Liuyang, Qian Fanfan, et al. Design and simulation of cave-fertilizer apparatus for maize[J]. Journal of Anhui Agricultural University, 2017, 44(5): 941–946. (in Chinese)
- [12] 古冬冬,关阳,张征,等. 基于新能源技术的夏玉米穴施肥作业电控设计与试验[J]. 中国农机化学报, 2022, 43(5): 121–126.
Gu Dongdong, Guan Yang, Zhang Zheng, et al. Electrical control design and experiment of summer corn point fertilization based on new energy technology[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2022, 43(5): 121–126. (in Chinese)
- [13] 李沐桐,温翔宇,周福君. 中耕作物精准穴施肥控制机构工作参数优化与试验[J]. 农业机械学报, 2016, 47(9): 37–43.
Li Mutong, Wen Xiangyu, Zhou Fujun. Working parameters optimization and experiment of precision hole fertilization control mechanism for intertilled crop[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(9): 37–43. (in Chinese)
- [14] 古冬冬,张征,杨杰,等. 扎穴施肥单体仿真分析与试验[J]. 中国农机化学报, 2024, 45(2): 55–61.
Gu Dongdong, Zhang Zheng, Yang Jie, et al. Simulation analysis and test of piercing fertilization monomer[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2024, 45(2): 55–61. (in Chinese)
- [15] 刘正道,王庆杰,李洪文,等. 耦合 CFD–DEM 的气力式种肥穴施装置投肥路径分析与试验[J]. 农业工程学报, 2019, 35(21): 18–25.
Liu Zhengdao, Wang Qingjie, Li Hongwen, et al. Fertilizer injecting route analysis and test for air-blowing seed-fertilizer hole-applicator via CFD–DEM coupling[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(21): 18–25. (in Chinese)
- [16] 李贵蓉,苏欣彤,周鑫,等. 气力辅助式种穴施肥装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2024, 55(12): 191–200.
Li Guirong, Su Xintong, Zhou Xin, et al. Design and experiment of pneumatic assisted hole fertilization targeting seed position device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(12): 191–200. (in Chinese)
- [17] 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)

- [18] 陶芸,谢方平,肖名涛. 偏心弹射式排肥器设计与仿真试验[J]. 中国农机化学报, 2020, 41(11): 26–32.
Tao Yun, Xie Fangping, Xiao Mingtao. Design and simulation test of eccentric ejection fertilizer discharger[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2020, 41(11): 26–32. (in Chinese)
- [19] 陈勇. 油菜机械直播穴施肥装置设计与试验[D]. 武汉:华中农业大学, 2022.
Chen Yong. Design and experiment of mechanical direct seeding hole fertilization device for rapeseed[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2022. (in Chinese)
- [20] 丁力,徐宇飞,豆宇飞,等. 斜体式螺旋排肥系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2025, 56(7): 339–348, 373.
Ding Li, Xu Yufei, Dou Yufei, et al. Design and experiment of inclined spiral fertilizer applicator and fertilizer system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(7): 339–348, 373. (in Chinese)
- [21] 梅博胜,付卫强,颜丙新,等. 基于气流辅助的颗粒肥流量光电检测系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2026, 57(10): 88–98.
Mei Bosheng, Fu Weiqiang, Yan Bingxin, et al. Design and experiment on photoelectric detection system for flow rate of granular fertilizer based on airflow assistance[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2026, 57(10): 88–98. (in Chinese)
- [22] 奚小波,杜恒通,陈治国,等. 基于 CFD-DEM 耦合的大豆玉米复合种植深松气力深施肥装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2026, 57(10): 77–87.
Xi Xiaobo, Du Hengtong, Chen Zhiguo, et al. Design and experiment of subsoiling pneumatic deep fertilization device for soybean-corn intercropping based on CFD-DEM coupling[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2026, 57(10): 77–87. (in Chinese)
- [23] 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 applicator between corn rows[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(24): 26–35. (in Chinese)
- [24] 王紫玉,梁春英,王洪超,等. 玉米变量穴施肥试验台的设计与试验[J]. 农机化研究, 2020, 42(4): 166–169.
Wang Ziyu, Liang Chunying, Wang Hongchao, et al. Design and experiment of corn variable hole fertilizer test bed[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2020, 42(4): 166–169. (in Chinese)
- [25] 张俊雄,刘华猛,高金,等. 玉米分层正位穴施肥精播机 SPH 仿真与试验[J]. 农业机械学报, 2018, 49(9): 66–72.
Zhang Junxiong, Liu Huameng, Gao Jin, et al. Simulation and test of corn layer alignment position hole fertilization seeder based on SPH[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(9): 66–72. (in Chinese)
- [26] 袁文胜,李坤,金诚谦,等. 穴施肥排肥器设计与试验[J]. 农机化研究, 2018, 40(1): 145–149, 165.
Yuan Wensheng, Li Kun, Jin Chengqian, et al. Design and experiment of hole fertilization fertilizer discharger[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2018, 40(1): 145–149, 165. (in Chinese)
- [27] 李树伟. 水稻精量穴直播机电驱式侧深穴施肥装置设计与试验[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2018.
Li Shuwei. Design and experiment of electrical drive side deep hill-drop fertilization device for precision rice hill-direct-seeding machine[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2018. (in Chinese)
- [28] 都鑫,刘彩玲,姜萌,等. 倾斜梯形孔穴施肥排肥器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(9): 43–53.
Du Xin, Liu Cailing, Jiang Meng, et al. Design and experiment of inclined trapezoidal hole fertilizer point-applied discharging device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(9): 43–53. (in Chinese)
- [29] 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]. 农业机械学报, 2018, 49(10): 137–144.
Liu Zhengdao, Wang Qingjie, Liu Chungge, et al. Design and experiment of precision hole-fertilizing apparatus with notched plate[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(10): 137–144. (in Chinese)