

谢方平, 宋熙, 刘大为, 等. 偏心无轴螺旋式水稻精量穴施排肥装置的设计与试验[J]. 沈阳农业大学学报, 2025, 56(5):000-000.

XIE F P, SONG X, LIU D W, et al. Design and test of eccentric shaftless spiral rice precision spreading fertilizer device[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2025, 56(5):000-000.

# 偏心无轴螺旋式水稻精量穴施排肥装置的设计与试验

谢方平<sup>1,2</sup>, 宋熙<sup>1</sup>, 刘大为<sup>1,2</sup>, 郑鹏<sup>1</sup>, 刘敏章<sup>1,2</sup>, 王修善<sup>1,2</sup>

(1. 湖南农业大学机电工程学院, 长沙 410128; 2. 智能农机装备湖南省重点实验室, 长沙 410128)

**摘要:** [目的]针对现有施肥机械难以实现水稻定点精量施肥的问题, 创新设计了一种偏心无轴螺旋式精量施肥装置, 以满足水稻基肥精量撒施的需求。[方法]根据水稻施肥农艺要求, 通过理论分析确定了影响施肥效果的关键因素以及装置关键部件螺旋排肥器的主要结构参数取值范围。以螺杆半径、偏心距、螺距为关键试验因素, 通过离散元仿真进行多因素试验分析, 以施肥装置的排肥稳定性变异系数及排肥范围合格率作为试验评价指标进行穴施肥装置的设计与试验。[结果]得到最优参数组合为螺杆半径 6 mm、偏心距 3.4 mm、螺距 58 mm。最后, 搭建了穴施肥装置试验台架, 开发了基于 STM32 单片机的穴施肥控制系统, 并根据最优参数组合进行台架试验, 台架试验中, 穴施肥装置的平均施肥量为 2.54 g, 平均排肥稳定性变异系数为 8.355%, 平均排肥范围合格率为 95.174%; 田间试验中, 穴施肥装置的平均施肥量为 2.63 g, 平均排肥稳定性变异系数为 8.18%, 平均排肥范围合格率为 93.1%。[结论]施肥量均在水稻穴施肥所需范围内, 试验结果与仿真试验基本一致, 验证了台架试验和田间试验的可靠性。施肥效果满足南方水稻种植农艺要求, 亦可为其他作物的肥料定点定量施放研究提供借鉴参考。

**关键词:** 水稻; 穴施肥; 偏心无轴螺旋; 排肥器; 离散元仿真

中图分类号: S224.2

文献标识码: A

文章编号: 1000-1700(2025)05-0000-00

## Design and Test of Eccentric Shaftless Spiral Metering Mechanism for Rice Precision Hill Fertilization

XIE Fangping<sup>1,2</sup>, SONG Xi<sup>1</sup>, LIU Dawei<sup>1,2</sup>, ZHENG Peng<sup>1</sup>, LIU Minzhang<sup>1,2</sup>, WANG Xiushan<sup>1,2</sup>

(1. College of Electrical and Mechanical Engineering, Hunan Agricultural University, Changsha 410128; 2. Hunan Provincial Key Laboratory of Intelligent Agricultural Machinery and Equipment, Changsha 410128)

**Abstract:** [Objective] In view of the difficulty of existing fertilizer application machinery to realize rice fixed-point precision fertilizer application, this study innovatively designs an eccentric shaftless screw precision fertilizer application device to meet the needs of rice basal fertilizer precision spreading. [Methods] According to the agronomic requirements of rice fertilizer application, the key factors affecting the fertilizer application effect and the range of values of the main structural parameters of the screw fertilizer metering mechanism, the key component of the device, were determined through theoretical analysis. The screw radius, eccentricity, and pitch were taken as the key experimental factors, and multi-factor experimental analyses were carried out using discrete meta-simulation, with the coefficient of variation of the metering stability of the fertilizer applicator and the qualification rate of the fertilizer metering range taken as the evaluation indexes in the experiments to identify the optimal parameter combination for the design and testing of the hill fertilization device. [Results] The obtained optimal parameters combination is screw radius of 6 mm, eccentricity of 3.4 mm, and pitch of 58 mm. finally, the test rig of the hill fertilizer application device was constructed, and the hill fertilizer application control system based on STM32 microcontroller was developed, and the bench test was carried out according to the optimal parameters combination. In the bench test, the hill fertilization device achieved an average fertilizer application rate of 2.54 g, with an average

收稿日期: 2024-05-07 修回日期: 2025-08-10

基金项目: 湖南省重点研发计划项目 (2021NK2022)

第一作者: 谢方平 (1970-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事农业机械性能试验与创新设计, E-mail: hunanxie2002@163.com

通信作者: 刘大为 (1983-), 男, 博士, 教授, 主要从事农业机械结构创新设计与试验研究, E-mail: liudawei8361@163.com

coefficient of variation of fertilizer discharge stability of 8.355% and an average qualification rate of the discharge range of 95.174%. In the field test, the average fertilizer application rate was 2.63 g, the average coefficient of variation of discharge stability was 8.18%, and the average qualification rate of the discharge range was 93.1%. **[Conclusion]** The fertilizer application amounts are all within the required range of rice hole fertilization, and the test results are basically consistent with the simulation test, which verifies the reliability of the bench test and field test. The fertilizer application effect meets the agronomic requirements of rice cultivation in the south, and it can also provide reference for the research on the fixed-point and quantitative application of fertilizers in other crops.

**Key words:** rice; hole-applied fertilizer; eccentric shaftless auger; fertilizer discharger; discrete element simulation

水稻作为全球半数以上人口的主食作物,其生产稳定性直接关系到粮食安全与农业可持续发展<sup>[1-2]</sup>。传统水稻种植中,化肥施用多依赖经验性粗放管理,普遍存在施肥过量、养分利用率低等问题。据统计,我国水稻氮肥利用率不足 40%,过量施肥不仅造成资源浪费,还加剧了土壤酸化、水体富营养化等环境问题<sup>[3-4]</sup>。随着农业现代化进程加速,如何实现精准、高效的养管理成为水稻生产提质增效的关键突破口<sup>[5]</sup>。近年来,智能农机装备与农业信息技术快速发展,为精准施肥提供了技术基础。精量施肥装置作为变量施肥技术的核心载体,可通过传感器实时感知作物需肥特征与田间环境参数,结合智能算法动态调控施肥量与位置,实现“按需供给”。然而,现有装置在复杂稻田环境下的适应性、施肥精度及智能化水平仍存在不足,亟需结合农艺需求与工程技术创新优化<sup>[6-8]</sup>。

在各类作物的精量施肥方面已有不少研究,李贵蓉等<sup>[9]</sup>设计了一种气力辅助式对种穴施肥装置。依据检测的落种信号,气力辅助式间歇排肥装置将从外槽轮式排肥器排出的连续肥料转化为间歇肥团,并施用在距种子一定距离处。然而,气力输送对颗粒流动性要求较高,缺乏对残肥黏附问题的有效解决方案。廖庆喜等<sup>[10]</sup>提出了一种油菜侧深穴施肥工艺方案,研制了一种机械式穴施肥装置,但动态密封性不足导致肥料泄漏率较大。刘正道等<sup>[11]</sup>提出了基于行星轮系的自动对种方法,在确保种距和肥距相等的前提下实时调节排种盘和排肥盘相位差,实现了播种作业过程中种肥相对位置的实时调控。但未考虑高速作业下机械振动的累积效应,导致排肥稳定性随作业时长下降。DU 等<sup>[12]</sup>研究设计了一种高速穴施肥装置的关键部件,并进行了数值计算模拟。分析了作业速度、排肥高度和排肥质量对肥料颗粒分布长度的影响,但未进行田间试验,实际工况适应性不确定。姬长英等<sup>[13]</sup>利用单螺杆泵结构对于液体运输的稳定性来进行液态肥料的条施,但未能对其进行专门的结构参数研究。王金武等<sup>[14]</sup>设计并试验了一种水稻精量穴直播机电驱式侧深穴施肥装置,采用电驱外槽轮排肥器和全方位仿形系统,但施肥量控制能力有限,外槽轮结构泄漏率高。汤攀等<sup>[15]</sup>对比例施肥泵进行了机构参数优化,验证了泵体施肥可以具备良好性能。从上述研究中可知,当前,精量施肥技术在旱地作物(如蔬菜、玉米)种植中已取得显著进展,但未涉及颗粒肥料的施放设计。然而,针对水稻的对点或对穴施肥研究仍较为薄弱。且现有穴施肥装置在作业中面临许多挑战,如颗粒肥料在潮湿环境下的稳定连续输送易受振动与泥浆干扰,导致排肥断续或堵塞;施肥后残肥黏附机构内部,加剧腐蚀且清理困难,影响设备复用性等等,因此,解决颗粒肥料稳定连续输送、变量撒施以及输送过程中的堵塞、黏附、清洗不便等问题还有待进一步研究。

本研究针对水稻的穴施肥问题提出了一种新的施肥结构使用,借鉴工业用抽取式的单螺杆泵的工作原理<sup>[16]</sup>,设计了一种施放式的偏心无轴螺旋式施肥装置以实现水稻的精量穴施肥。与传统有轴螺旋相比,设计取消了中心驱动轴,避免肥料颗粒因中心轴结构导致的缠绕、卡滞问题,减少堵塞风险。该装置不仅能完成对水稻基肥的精量穴施,亦可通过对结构的调整或更改驱动参数,实现对不同类型的颗粒肥料以及不同作物的变量施肥,对于膏体状和液体状的肥料施用也有一定指导意义。

## 1 装置结构与工作原理

### 1.1 装置结构

施肥装置整体结构如图 1a,主要由肥料箱、施肥电机、施肥螺杆、螺旋导管、聚肥管、导肥管等部件组成。施肥螺杆与螺旋导管组成螺杆—导管系统,是核心关键部件<sup>[17]</sup>(图 1b)。施肥螺杆为单头螺旋的偏心无轴螺杆,其任意截面等大,截面的中心位于螺杆的螺旋线上,与螺杆的轴心线偏离一个偏心距,螺杆由该截面旋转且轴向拉伸而形成。螺旋导管内表面为双螺纹结构,其任意截面为一直槽口,两端是半径与螺杆截面半径相等的半圆,中间

是长为4倍偏心距的直线段,导管由该直槽口绕轴旋转且沿轴向拉伸形成,其拉伸长度与螺杆相等。

排肥时,肥料从肥料箱的顶部投入,并合上肥料箱盖。肥料随后在箱体的底部聚拢,通过螺旋导管上端的直槽入口进入螺旋导管的导管上腔室。安装在施肥箱体内部固定架上的施肥电机,驱动与万向节联轴器联接的施肥螺杆在螺旋导管内进行运动。其中,万向节联轴器的联接能使螺杆灵活地进行复合运动并搅动肥料,使得进入直槽入口的肥料通过导管螺旋往下运输排放。这样肥料被分批输送至导管底部的直槽出口,经聚肥管聚拢后,通过导肥管排出。



1. 肥料箱;2. 施肥电机;3. 搅肥管;4. 聚肥管;5. 电机固定架;6. 万向节;7. 施肥螺杆;8. 螺旋导管;9. 导肥管;10. 直槽入口;11. 导管外壳;12. 导管上腔室;13. 导管下腔室;  
14. 螺杆联接段;15. 螺杆凸肩;16. 螺杆工作段;17. 直槽出口  
1. Fertilizer box; 2. Control motor; 3. Fertilizer stirring tube; 4. Fertilizer gathering port; 5. Motor fixing bracket; 6. Universal joint; 7. Fertilizer screw; 8. Spiral conduit; 9. Fertilizer guide; 10. Straight groove inlet; 11. Catheter housing; 12. Catheter upper chamber; 13. Catheter lower chamber; 14. Screw coupling section; 15. Screw shoulder; 16. Screw working section; 17. Straight groove outlet

图1 水稻穴施肥装置

Figure 1 Fertilizer hole application device for rice

## 1.2 工作原理

本穴施肥装置基于偏心无轴螺旋结构,通过螺杆—导管系统的协同运动实现肥料精准控制输送。核心工作单元由单头螺旋的偏心螺杆与双螺纹螺旋导管构成,两者配合形成动态密封腔室。静态工况下,导管螺旋空腔被分隔为上下两个独立腔室,导管上腔室通过重力与搅肥管辅助完成肥料填充,下腔室处于闭合状态,确保无泄漏。

动态排肥阶段,螺杆在电机驱动下执行复合运动:绕自身轴线逆时针自转的同时,沿导管轴线顺时针公转。该运动模式使螺杆螺旋面与导管内螺纹产生周期性相位切换,驱动上腔室肥料沿螺旋轨迹轴向推进,同时下腔室同步完成动态密封与排肥口开启。通过精确控制电机启停时序,实现上下腔室交替充填—排放的闭环作业,形成间歇性精准排肥。这种结构和工作方式既保障肥料连续输送,又通过几何约束抑制颗粒回渗,满足成穴施肥的稳定性与空间集中度需求。

## 2 关键部件结构设计与分析

由于水稻品种与土壤肥力差异,基肥提供水稻全生育期养分总需求的40%~60%氮、80%~100%磷及50%~60%钾,以满足分蘖前根系发育与植株形态建成的营养需求<sup>[18-19]</sup>。若选用氮磷钾配比为18:12:10的复合肥,则基肥总需肥量为450~750 kg·hm<sup>-2</sup>,根据湖南省《HNZ148-2017早稻全程机械化生产技术规程》,常规稻机插秧种植密度为30~39万茔·hm<sup>-2</sup>,以34.5万茔·hm<sup>-2</sup>为例,单茔基肥施用量约为1.3~2.2 g,实际作业中需根据土壤墒情调整至1.5~3.5 g。根据该排肥范围要求,对关键部件的结构进行设计与分析。

### 2.1 螺杆—导管系统的设计与分析

为确保排肥过程稳定顺畅并降低肥料颗粒破碎风险,对螺杆正面(即肥料填充区域的正对面)的凸肩段实施局部切割处理;并在切割后的凸肩段正下方的工作段,沿肥料输送路径实施360°竖直旋转切割,使得切割面

与螺旋结构精确匹配,从而形成连续均匀的肥料输送腔。切割后螺杆的工作段任一横截面均为等大截圆,单次排肥工作的肥料填充纵向长度 $L$ 是螺距 $T$ 的一半(图2)。

螺旋角指的是螺旋线与轴线之间的夹角,可根据 $O_1$ 到 $O_2$ 的轴向路径与圆周路径比值的反正切函数得到施肥螺杆的螺旋角度;同时可知截面上被切割部分所在扇形的圆心角大小:

$$\begin{cases} \alpha = \arctan\left(\frac{T}{2\pi r}\right) \\ \theta = 2\arccos\left(\frac{d}{r}\right) \end{cases} \quad (1)$$

将肥料颗粒视作理想球形,为确保输送过程中既能保持流动连续性又避免漏肥<sup>[20]</sup>,根据螺杆切割段与导管螺旋空腔的配合特性,切割线距螺杆圆心的距离 $d$ 与肥料颗粒最小直径 $D_{\min}$ 需满足:

$$r - d < D_{\min} \quad (2)$$

式中: $D_{\min}$ 视作肥料颗粒群中颗粒的最小直径(mm)。此处 $d$ 依据最小肥料粒径大小,合理取值1.5 mm。

排肥工作时,施肥螺杆执行复合运动<sup>[21]</sup>。横截面视角下,螺杆绕圆心 $O$ 以角速度 $\omega$ 逆时针自转的同时,沿螺旋导管中心轴线以 $\omega'$ 的速度顺时针公转,螺杆运动的自转和公转角速度等大反向,表现为从直槽口起始端向终端直线位移。当螺杆抵达直槽口终端时,公转位移完成,此时自转角度为 $180^\circ$ ,单次排肥周期结束。在下次排肥中,螺杆沿原路径自转与公转返回初始端,如此反复以完成多次排肥,螺杆—导管系统截面如图3。

在实际排肥过程中,视作球形的肥料颗粒之间存在空隙,其肥料颗粒的实际填充体积显著低于理论腔室容积,其占比定义为填充效率 $\varphi$ <sup>[22]</sup>。为确定 $\varphi$ 值,采用固定容器测量法,选用内径50 mm、高度100 mm的标准圆柱形容器,通过自然堆积法填装肥料颗粒,刮平后称量总质量。填充效率的关系式为:

$$\varphi(\%) = \frac{m_t}{\rho V_c} \times 100 \quad (3)$$

式中: $m_t$ 为容积内肥料颗粒实测质量(g); $\rho$ 为颗粒密度( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ); $V_c$ 为容器容积( $\text{cm}^3$ );经5次试验测定,可得填充效率平均值约为32.08%。

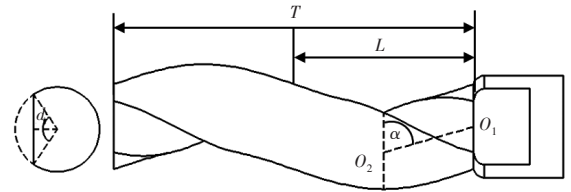
导管空腔的横截面积由螺旋导管横截面积减去施肥螺杆横截面积得到,单次施肥占用的体积为空腔横截面积与肥料纵向填充长度之积。基于此,在理论情况下,视作球形且有间隙的固体肥料颗粒的单次填充、排出质量 $m$ 可表征为:

$$m = \rho \left( 8er + \frac{\theta\pi r^2}{360} - d\sqrt{r^2 - d^2} \right) L\rho \quad (4)$$

式中: $m$ 为单次排肥的肥料颗粒总质量(g)。

## 2.2 充肥与排肥过程的分析

2.2.1 充肥过程分析 为确保施肥量的稳定及肥料的高填充效率,在充肥阶段应使肥料颗粒充分填满上端腔

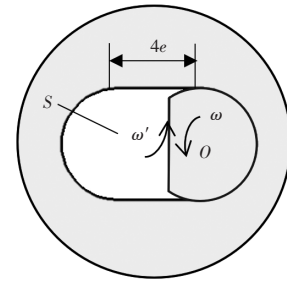


$\alpha$ 为施肥螺杆与螺旋导管的螺旋角度( $^\circ$ ); $O_1$ 为与直槽入口齐平处的螺杆截面圆心; $O_2$ 为距离直槽入口纵向下 $L/2$ 长度处螺杆截面圆心; $\theta$ 为螺杆横截面等大截圆的圆心角( $^\circ$ ); $r$ 为施肥螺杆横截面半径(mm); $d$ 为切割线距螺杆圆心的距离(mm); $T$ 为导管的导程长度(mm); $L$ 为单次排肥工作的纵向长度(mm)

$\alpha$  denotes the helix angle ( $^\circ$ ) of the fertilization screw and the spiral conduit;  $O_1$  and  $O_2$  represent the centers of the screw cross-sections at the straight slot inlet and at half the vertical stroke length ( $L/2$ ) downstream, respectively;  $\theta$  is the central angle ( $^\circ$ ) of the screw's congruent circular cross-section;  $r$  indicates the radius (mm) of the screw cross-section;  $d$  defines the distance (mm) from the cutting line to the screw center;  $T$  corresponds to the lead length (mm) of the conduit; and  $L$  specifies the vertical stroke length (mm) per fertilization cycle

图2 螺杆切割示意图

Figure 2 Screw cutting schematic



$S$ 为螺杆空腔横截面积( $\text{mm}^2$ ); $4e$ 为直槽口直线段长度(mm); $O$ 为螺杆横截面截圆圆心; $\omega$ 为螺杆自转角速度( $\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$ ); $\omega'$ 为螺杆公转角速度( $\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$ )

$S$  denotes the cross-sectional area ( $\text{mm}^2$ ) of the screw cavity;  $4e$  represents the linear segment length (mm) of the straight slot;  $O$  is the center of the screw's circular cross-section;  $\omega$  defines the screw's self-rotation angular velocity ( $\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$ ); and  $\omega'$  corresponds to the screw's orbital revolution angular velocity ( $\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$ )

图3 螺杆-导管系统截面

Figure 3 Screw-Catheter system cross section



室,从而保证每次排肥都有稳定的施肥量。而充肥与排肥同时进行的作业模式下,上端腔室入口有效面积随排肥进程呈动态递增。然而,受肥料颗粒大小不均影响,该填充过程存在显著随机性,为规避偶然因素干扰并确保理论模型的普适性,仅对直槽入口面积达到最大时进行颗粒填充分析。基于此需求,需明确颗粒在排肥间隔时间内完全充满上端空腔所需的参数条件。首先需确定等距穴施肥下相关参数设定的关系,穴施肥情况如图4。

建立基于机具行进速度、施肥工作间隔时间与电机转速的动态耦合关系为:

$$H = v_0 \left( t_0 + \frac{1}{2\omega} \right) \quad (5)$$

式中: $H$ 为穴施肥理论间隔距离(mm); $v_0$ 为机具行进速度(即台架试验中传送带行进速度)( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ); $t_0$ 为施肥工作间隔时间(s)。

在湖南部分稻区,高肥力地或抗倒伏品种(如“晶两优华占”)株距可放宽至180~220 mm;土壤有机质 $\geq 30 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 田块宜200~250 mm。为便于统计与计算,本研究取225 mm为理论穴距。小型水田机多配25马力,常速0.5~0.8  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,综合农艺与作业稳定性,设定行进速度(传送带速度)为0.6  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,以避免过速导致的穴距过大与施肥离散加剧。电机转速设定为240  $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ (即4  $\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$ ),在保证电机扭矩稳定的同时避免碎粒,利于成穴。螺杆单次工作0.125 s,工作间隔时间 $t_0$ 为0.25 s。

施肥间隔期间,螺杆停转,颗粒在重力与内壁摩擦作用下充满上腔。螺杆的前序搅动削弱了颗粒间静摩擦,使初期以动摩擦为主。为确保滑移,腔室倾角 $\alpha$ 应大于静摩擦角。忽略颗粒间动态碰撞时,颗粒与内壁法向力由重力分力主导,依据牛顿第二定律可得充填加速度。为使充填稳定,导程长度不得超过间隔期肥料可充分充填的长度,即为:

$$\begin{cases} \tan \alpha > \mu_s \\ h = \frac{1}{2} a_1 t_0^2 \geq L \\ a_1 = g \sin \alpha - \mu_k g \cos \alpha \end{cases} \quad (6)$$

式中: $\mu_s$ 为颗粒与导管内壁面间的静摩擦系数; $\mu_k$ 是颗粒与导管内壁面间的动摩擦系数( $^\circ$ ); $h$ 为施肥工作间隔时间内肥料所能充分填充的理论长度(mm); $a_1$ 为肥料颗粒加速度( $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ ); $g$ 为重力加速度,取9.8  $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ 。

由上述分析可知,为满足穴施肥充分充肥的要求,得到 $\alpha > 28.4^\circ$ , $h = 114 \text{ mm}$ ,即当 $T \leq 228 \text{ mm}$ 时,能保证颗粒充肥具有高填充效率和稳定性。

在螺杆—导管系统中,偏心距 $e$ 对装置动力学特性与充填效率具有双重约束。当偏心距过大时,螺杆运动产生的离心力分量呈非线性增长,导致机具机械振动幅值显著增大,直接影响排肥稳定性;偏心距过小时,螺旋导管上端腔室入口有效面积缩减,致使肥料颗粒的充分充填时长超过排肥间隔时间,造成充肥不充分。综合考虑,确定偏心距 $e$ 的合理取值范围为2~4 mm。

螺杆的力学性能与结构参数直接影响装置可靠性及施肥精度。基于第四强度理论对ABS塑料材质螺杆进行多应力耦合强度校核,其组合应力需满足:

$$\sigma_{\text{m}} = \sqrt{\sigma_t^2 + 3\tau^2} \leq [\sigma] \quad (7)$$

式中: $\sigma_{\text{m}}$ 为组合应力(MPa); $[\sigma]$ 为螺杆的许用应力(MPa); $\sigma_t$ 为螺杆的弯曲拉应力(MPa); $\tau$ 为螺杆的扭转剪切应力(MPa)。

螺杆在复合运动时承受复合载荷,主要受弯曲拉应力和扭转剪应力作用,其中弯曲拉应力 $\sigma_t$ 偏心运动引起的弯矩产生,扭转剪应力 $\tau$ 由电机驱动扭矩产生:

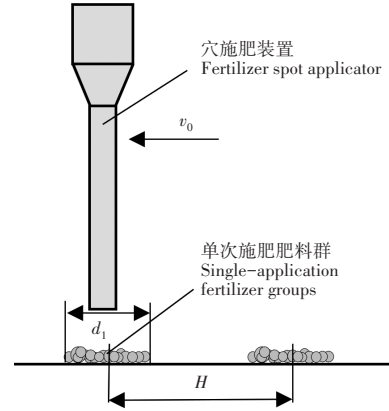


图4 穴施肥示意图

Figure 4 Schematic diagram of hole application of fertilizer

$$\begin{cases} \sigma_t = \frac{M}{W} = \frac{4P\eta T}{\omega e \pi r^3} \\ \tau = \frac{T_q}{W_p} = \frac{2P\eta}{\omega \pi r^3} \end{cases} \quad (8)$$

式中: $M$ 为弯矩( $\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$ ); $W$ 为截面模量( $\text{m}^3$ ); $T_q$ 为扭矩( $\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$ ); $W_p$ 为极截面模量( $\text{m}^3$ )。  $P$ 为施肥电机功率,此电机功率为 30 W; $\eta$ 为效率系数,根据工业应用中单螺杆泵的常见效率范围,效率系数一般在 0.7~0.9,此处取值 0.85。  $T$ 取 78 mm, $e$ 取 2 mm,此时获得组合应力的理论最大值。在 ABS 塑料性能中,抗拉强度约为 45 MPa<sup>[23-24]</sup>,剪切强度是抗拉强度的 0.6 倍,为 27 MPa,其中安全系数定为 3,得到许用应力大小为 15 MPa。

当  $r=4$  mm 时,组合应力为 18.9 MPa 超过许用值,存在断裂风险; $r=5$  mm 时,组合应力 10.1 MPa 小于许用应力,满足强度要求。由此确定螺杆半径理论取值下限为 5 mm。

通过上述螺杆强度分析,结合偏心距  $e$  取值范围、螺旋角限制  $\alpha \leq 53.3^\circ$ 、颗粒填充效率分析得到的  $T \leq 228$  mm 以及农艺需求单苑施肥量 1.5~3.5 g,最终确定半径  $r$  的取值范围在 5~7 mm;螺距  $T$  在 50~70 mm。

**2.2.2 排肥过程分析** 在排肥过程中,肥料颗粒主要受到导管内壁动摩擦力  $F_f$ 、肥料所受重力  $G$ 、螺杆旋转带来的离心力  $F_c$  和螺杆推动力  $F_s$  作用,受力分析如图 5。

在排肥过程中螺杆开始运动时,肥料颗粒受到垂直于公转轴线的离心力、电机扭矩转化为方向与颗粒输送方向一致的螺杆推动力,以及相对于导管壁的瞬时运动方向相反的、主要由重力法向分量和离心力法向分量提供的摩擦力。同充肥时一样,忽略对整体运动影响较小的颗粒间作用力。根据牛顿第二定律,得到排肥阶段动力学方程为:

$$ma_2 = mgs\sin\alpha + m\omega^2 e\cos\alpha - \mu_k(mg\cos\alpha + m\omega^2 es\sin\alpha) + \frac{2\pi P\eta}{T\omega} \quad (9)$$

式中: $a_2$ 为排肥阶段颗粒整体加速度( $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$ )。

充肥与排肥过程呈现同步等时特性。基于下腔室内肥料颗粒的空间分布特征,理论纵向穴距由理想状态下肥料颗粒从腔室最高位与最低位下落的时间差决定。理论纵向穴距为:

$$d_1 = v_0 \left( \sqrt{\frac{T}{a_2}} + \frac{1}{2\omega} \right) \quad (10)$$

式中: $d_1$ 为排肥纵向穴距(mm)。

由关系式(10)可知,肥料颗粒落下的长度与电机控制下施肥螺杆的转速正相关。结合关于偏心距  $e$ 、半径  $r$ 、螺距  $T$  的参数范围内,得到理想条件下  $94 \text{ mm} \leq d_1 \leq 125 \text{ mm}$ ,考虑到肥料施肥过程中产生碰撞造成穴距拉长,结合实际农艺需求,将肥料颗粒在 150 mm 纵向范围内的落点分布作为评价成穴效果的核心指标,定义为排肥范围合格率。

### 3 施肥机构仿真试验与分析

#### 3.1 仿真参数的标定

试验选取干燥的 18:12:10 氮磷钾综合型复合肥为研究对象,针对肥料颗粒的有关仿真参数进行测量与标定。随机选取 1 000 粒肥料,对肥料粒径大小进行测量统计,在此范围内求取平均值,由于肥料颗粒大小不均匀,故选取长轴尺寸作为肥料颗粒的径长,得到平均直径为 4.06 mm。称量得到肥料颗粒的千粒重为 48.7 g,以获得平均颗粒质量,得到密度为  $1.39 \times 10^3 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 。为提升离散元仿真的颗粒级配真实性,基于 1 000 个肥料样本的粒径实测数据设定仿真的颗粒生成比例。粒径大小为 4.06 mm 视作中心值(公差  $\pm 2.5\%$ ),肥料颗粒比例

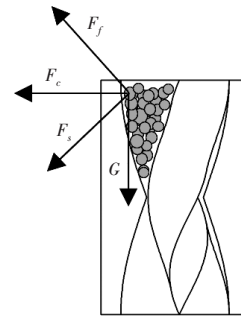


图5 排肥过程的肥料颗粒受力分析

Figure 5 Force analysis of fertilizer particles in the process of fertilizer discharge

视作 1,按 0.05 mm 为梯度划分粒径区间,构建多尺度颗粒生成体系。分布情况如表 1。

表1 仿真颗粒大小生成比例设置  
Table 1 Simulation particle size generation ratio settings

|                 |     |      |     |      |     |      |      |      |      |      |     |      |     |      |     |      |     |
|-----------------|-----|------|-----|------|-----|------|------|------|------|------|-----|------|-----|------|-----|------|-----|
| 大小 Scale        | 0.6 | 0.65 | 0.7 | 0.75 | 0.8 | 0.85 | 0.9  | 0.95 | 1    | 1.05 | 1.1 | 1.15 | 1.2 | 1.25 | 1.3 | 1.35 | 1.4 |
| 数量 Number       | 3   | 17   | 29  | 47   | 62  | 83   | 105  | 189  | 161  | 95   | 69  | 55   | 38  | 22   | 13  | 9    | 3   |
| 比例 Proportion/% | 0.3 | 1.7  | 2.9 | 4.7  | 6.2 | 8.3  | 10.5 | 18.9 | 16.1 | 9.5  | 6.9 | 5.5  | 3.8 | 2.2  | 1.3 | 0.9  | 0.3 |

对肥料颗粒与 ABS 材质的接触力学参数进行系统标定,基于文献<sup>[9,25-29]</sup>的基础数据与试验方法,采用分体圆桶法、倾斜滑动法和动态碰撞试验,分别测定颗粒间及颗粒与管壁的静/动摩擦系数、碰撞恢复系数等关键接触参数;并在仿真中设置同等环境,对参数进行曲线拟合,得到仿真参数且验证;最终进行了肥料堆积角的验证试验,结果符合要求<sup>[29]</sup>,确保离散元模型的有效、精准和可靠。得到具体仿真参数设置如表 2。

表2 仿真参数设置  
Table 2 Simulation parameters setting

| 项目 Items                                                  | 参数 Parameters                         | 值 Values             |
|-----------------------------------------------------------|---------------------------------------|----------------------|
| 肥料颗粒<br>Granular fertilizer                               | 泊松比 Poisson's ratio                   | 0.25                 |
|                                                           | 剪切模量 Shear modulus/Pa                 | 3.48×10 <sup>7</sup> |
|                                                           | 密度 Density/(kg·m <sup>-3</sup> )      | 1 390                |
|                                                           | 直径 Diameter/mm                        | 4.06                 |
| 施肥机构<br>Fertiliser institutions                           | 泊松比 Poisson's ratio                   | 0.394                |
|                                                           | 剪切模量 Shear modulus/Pa                 | 8.9×10 <sup>8</sup>  |
|                                                           | 密度 Density/(kg·m <sup>-3</sup> )      | 1 060                |
| 肥料颗粒-肥料颗粒<br>Granular fertilizer- Granular fertilizer     | 碰撞恢复系数 Collision recovery coefficient | 0.2                  |
|                                                           | 静摩擦系数 Static friction coefficient     | 0.38                 |
|                                                           | 动摩擦系数 Dynamic friction coefficient    | 0.1                  |
| 肥料颗粒-施肥机构<br>Granular fertilizer- Fertiliser institutions | 碰撞恢复系数 Collision recovery coefficient | 0.506                |
|                                                           | 静摩擦系数 Static friction coefficient     | 0.54                 |
|                                                           | 动摩擦系数 Dynamic friction coefficient    | 0.117                |

3.2 仿真模型构建与运动

施肥机构中的螺杆—导管系统对排肥效果至关重要,系统中螺旋导管结构会因螺杆参数的变化而相应调整,从而极大地影响施肥性能。为使试验条件更理想,通过构建施肥机构的模型,应用 EDEM 离散元仿真软件进行多因素试验,分析各结构参数对排肥性能的影响,获得施肥机构的最佳结构参数<sup>[30-31]</sup>。

离散元仿真中难以精确构建动态加速度函数,故将螺杆复合运动等效分解为轴向位移与角位移的线性叠加,进行简化处理,得到螺杆移动的平均线速度为:

$$v_1 = 8e\omega \tag{11}$$

式中: $v_1$ 为螺杆横截面下直线运动的平均速度(m·s<sup>-1</sup>)。

为提高仿真效率,将不影响仿真效果的部件去除,建立简版施肥装置三维模型,以 1:1 的比例导入 EDEM 软件中。初始时螺杆置于导管内部的直槽口的端头,与导管螺旋相配合(图 6)。

离散元仿真采用 Rayleigh 临界步长的 15% 为固定步长、0.01 s 为采样间隔;自顶置瞬态颗粒工厂在 0.1 s 内匀速生成 3 kg 肥料。落下 0.9 s 后,于 1 s 时螺杆复合运动。横截面视角下,螺杆沿直槽轴向作公转式直线位移并同步逆时针自转;抵达槽端且完成 180°自转历时 0.125 s,为 1 周期。间隔 0.25 s 后沿原路径逆向复位,自转不中断;循环 5 次至 2.875 s 停止运动,至 4 s 颗粒接

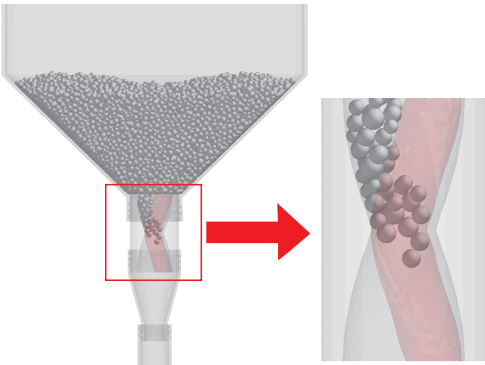


图6 仿真中肥料在腔体内运动示意图  
Figure 6 Schematic of fertilizer movement in the cavity in the simulation

近静平衡,仿真结束。

为体现颗粒与土体相互作用,在施肥机构下方布置长条 Box 并赋予沙土参数<sup>[32]</sup>,替代土壤建模以降低计算量、提升落点分布可视化与纵向成穴评估效率。排肥性能以两指标衡量:排肥稳定性变异系数  $Y_1$  与排肥范围合格率  $Y_2$ 。 $Y_1$  在 EDEM 后处理 Setup Selections 中于出料口下方建立方形 Grid Bin Group 包络落肥区域,记录每次质量;每组 5 次、重复 3 组,按《施肥机械质量评价技术规范 NY/T1003-2006》求变异系数。 $Y_2$  在目标处设 Grid Bin Group 统计 150 mm 区段内质量,查看该次施肥总量的占比。仿真场景中(图 7),肥料以  $0.6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  匀速落入机具底部前方 50 mm 处的移动长条 Box。

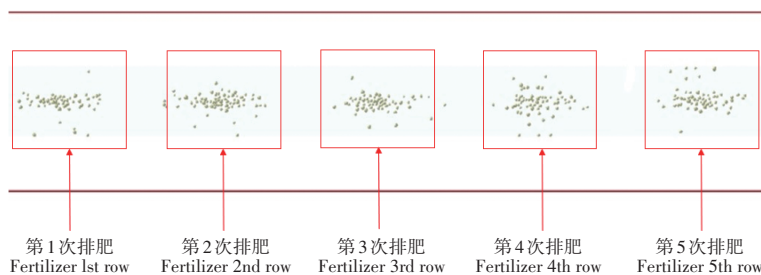


图7 穴施肥仿真情况示意图

Figure 7 Schematic diagram of the simulation situation of hole fertilization

在分别计算上述两项评价指标的具体情况的同时,也要考量施肥效果的综合评分,将两项指标结果各按占 50% 的占比进行加权评价,称为穴施肥效果综合评价指标  $Y$ 。

$$Y = 0.5(1 - Y_1) + 0.5Y_2 \quad (12)$$

### 3.3 多因素仿真试验与结果分析

3.3.1 试验设计 采用 Box-Behnken Design (BBD) 响应面优化分析法,利用离散元仿真针对影响排肥性能的螺杆半径(5~7 mm)、偏心距(2~4 mm)、螺距(50~70 mm) 3 个核心结构参数(表 3)。构建三因素三水平二次回归正交组合试验模型。通过多因素试验设计,每组试验以 5 次排肥周期为 1 组,重复 3 次并取平均值,系统探究参数交互作用对排肥稳定性变异系数与合格率的影响规律,结合二次回归方程与多目标优化求解,分析结构参数与施肥性能的关系。

3.3.2 结果与分析 仿真结果方差分析根据三因素三水平正交旋转组合试验方案,共进行 17 组试验,试验方案及结果如表 4。通过 Design-Expert 软件对仿真试验结果所得数据进行分析,得到排肥稳定性变异系数  $Y_1$  与排肥范围合格率  $Y_2$  的回归方程,并对其显著性进行检验。

首先,对排肥稳定性变异系数  $Y_1$  的二次回归模型进行方差分析和显著性检验,结果如表 5。得到其的二次回归模型为:

$$Y_1 = 9.14 - 3.44A - 4.65B + 1.82C + 1.44AB + 0.407AC - 0.1002BC + 4.85A^2 + 1.52B^2 + 2.49C^2 \quad (13)$$

分析可知,二次回归模型  $P < 0.001$  极显著,失拟项  $P > 0.05$  失拟不显著,说明该拟合模型能正确反映各因素与误差之间的关系,可以较好地试验结果进行预测,  $A$ 、 $B$ 、 $C$ 、 $AB$ 、 $A^2$ 、 $B^2$  和  $C^2$  项显著,根据模型回归系数大小可知,各因素对排肥稳定性变异系数的影响由大到小依次为偏心距、半径、螺距。

表3 试验因素水平

Table 3 Factors and levels in experiments

| 水平<br>Levels | 螺杆半径 $r/\text{mm}$<br>Screw radius | 偏心距 $e/\text{mm}$<br>Offset distance | 螺距 $T/\text{mm}$<br>Pitch of spiral |
|--------------|------------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------------|
| -1           | 5                                  | 2                                    | 50                                  |
| 0            | 6                                  | 3                                    | 60                                  |
| +1           | 7                                  | 4                                    | 70                                  |

表4 Box-Behnken 试验设计与结果

Table 4 Box-Behnken design arrangement and the experimental data

| 试验号<br>Test No. | $A$ | $B$ | $C$ | $Y_1$ | $Y_2$ | $Y$    |
|-----------------|-----|-----|-----|-------|-------|--------|
| 1               | -1  | -1  | 0   | 24.77 | 92.07 | 83.65  |
| 2               | 1   | -1  | 0   | 15.52 | 86.51 | 85.495 |
| 3               | -1  | 1   | 0   | 12.71 | 89.13 | 88.21  |
| 4               | 1   | 1   | 0   | 9.06  | 85.60 | 88.27  |
| 5               | 1   | 0   | -1  | 18.55 | 92.01 | 86.73  |
| 6               | 0   | 0   | 1   | 10.61 | 85.50 | 87.445 |
| 7               | -1  | 0   | -1  | 21.53 | 88.87 | 83.67  |
| 8               | 1   | 0   | 1   | 15.22 | 85.96 | 85.37  |
| 9               | 0   | -1  | -1  | 15.96 | 91.52 | 87.78  |
| 10              | 0   | 1   | -1  | 6.83  | 88.76 | 90.965 |
| 11              | 0   | -1  | 1   | 19.67 | 89.31 | 84.82  |
| 12              | 0   | 1   | 1   | 10.14 | 87.38 | 88.62  |
| 13              | 0   | 0   | 0   | 10.52 | 95.60 | 92.54  |
| 14              | 0   | 0   | 0   | 9.89  | 94.73 | 92.42  |
| 15              | 0   | 0   | 0   | 8.37  | 93.76 | 92.695 |
| 16              | 0   | 0   | 0   | 9.40  | 94.22 | 92.41  |
| 17              | 0   | 0   | 0   | 7.52  | 95.78 | 94.13  |

注:  $A$ 、 $B$ 、 $C$  分别为施肥螺杆的直径、偏心距、螺距编码值。下同。

Note:  $A$ ,  $B$ ,  $C$  are the diameter, offset distance, and pitch code values of the fertilization screw, respectively. The same below.



表5 排肥稳定性变系数回归方差分析

Table 5 Analysis of variance of variance coefficient of fertilizer metering stability

| 来源<br>Source   | 平方和<br>Sum of squares | 自由度<br>Degree of freedom | 均方<br>Mean square | F       | P           |
|----------------|-----------------------|--------------------------|-------------------|---------|-------------|
| 模型 Modle       | 446.88                | 9                        | 49.65             | 57.48   | < 0.000 1** |
| A              | 92.26                 | 1                        | 92.26             | 106.81  | < 0.000 1** |
| B              | 172.86                | 1                        | 172.86            | 200.12  | < 0.000 1** |
| C              | 26.62                 | 1                        | 26.62             | 30.82   | 0.000 9**   |
| AB             | 7.84                  | 1                        | 7.84              | 9.07    | 0.019 6*    |
| AC             | 0.662 5               | 1                        | 0.662 5           | 0.767   | 0.410 2     |
| BC             | 0.040 2               | 1                        | 0.040 2           | 0.046 5 | 0.835 4     |
| A <sup>2</sup> | 99.12                 | 1                        | 99.12             | 114.75  | < 0.000 1** |
| B <sup>2</sup> | 9.72                  | 1                        | 9.72              | 11.25   | 0.012 2*    |
| C <sup>2</sup> | 26.04                 | 1                        | 26.04             | 30.14   | 0.000 9**   |
| 残差 Residual    | 6.05                  | 7                        | 0.863 8           |         |             |
| 失拟 Misfit      | 0.273 6               | 3                        | 0.091 2           | 0.063 2 | 0.976 6     |
| 纯误差 Pure error | 5.77                  | 4                        | 1.44              |         |             |
| 总和 Total sum   | 452.93                | 16                       |                   |         |             |

注:  $P < 0.01$  为高度显著影响(\*\*);  $0.01 \leq P < 0.05$  为显著影响(\*);  $P > 0.05$  表示不显著。下同。  
Note:  $P < 0.01$  means highly significant effect(\*\*);  $0.01 < P < 0.05$  means significant effect(\*);  $P > 0.05$  means not significant. The same below.

由回归模型方差分析可知,半径、偏心距的交互项 AB 对排肥稳定性变系数有着显著影响,通过 Design-Expert 对试验数据进行处理,得到响应面曲面图(图 8)。

对排肥范围合格率  $Y_2$  进行方差分析,结果如表 6。得到的二次回归模型为:

$$Y_2 = 94.82 - 2.31A - 1.07B - 0.7821C + 0.5051AB + 0.8996AC + 0.207BC - 4.07A^2 - 2.67B_2 - 2.91C^2 \quad (14)$$

分析可知,二次回归模型  $P < 0.001$  极显著,失拟项  $P > 0.05$  失拟不显著,说明该拟合模型能正确反映各因素与误差之间的关系,可以较好地对试验结果进行预测, A、B、C、AC、A<sup>2</sup>、B<sup>2</sup> 和 C<sup>2</sup> 项显著,其余项不显著。根据模型回归系数大小可知,各因素对排肥范围合格率的影响由大到小依次为半径、偏心距、螺距。

由回归模型方差分析可知,半径与螺距的交互项 AC 对排肥范围合格率有着显著影响,通过 Design-Expert 对试验数据进行处理,得到响应面曲面图(图 9)。

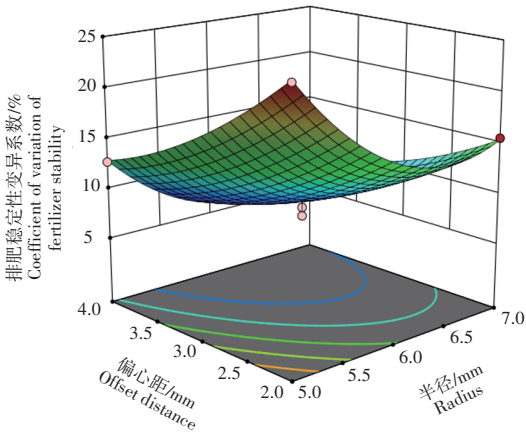


图8 排肥稳定性变系数响应曲面  
Figure 8 Response surface of coefficient of variation of fertilizer stability

表6 排肥范围合格率回归方差分析

Table 6 Analysis of variance of variance coefficient of fertilizer metering uniformity

| 来源<br>Source   | 平方和<br>Sum of squares | 自由度<br>Degree of freedom | 均方<br>Mean square | F       | P           |
|----------------|-----------------------|--------------------------|-------------------|---------|-------------|
| 模型 Modle       | 202.87                | 9                        | 22.54             | 49.04   | < 0.000 1** |
| A              | 42.83                 | 1                        | 42.83             | 93.17   | < 0.000 1** |
| B              | 9.12                  | 1                        | 9.12              | 19.83   | 0.003**     |
| C              | 4.89                  | 1                        | 4.89              | 10.64   | 0.013 8*    |
| AB             | 1.02                  | 1                        | 1.02              | 2.22    | 0.179 9     |
| AC             | 3.24                  | 1                        | 3.24              | 7.04    | 0.032 8*    |
| BC             | 0.171 4               | 1                        | 0.171 4           | 0.372 8 | 0.560 8     |
| A <sup>2</sup> | 61.53                 | 1                        | 61.53             | 133.85  | < 0.000 1** |
| B <sup>2</sup> | 29.97                 | 1                        | 29.97             | 65.20   | < 0.000 1** |
| C <sup>2</sup> | 35.67                 | 1                        | 35.67             | 77.59   | < 0.000 1** |
| 残差 Residual    | 3.22                  | 7                        | 0.459 7           |         |             |
| 失拟 Misfit      | 0.206 9               | 3                        | 0.069             | 0.091 6 | 0.960 8     |
| 纯误差 Pure error | 3.01                  | 4                        | 0.752 7           |         |             |
| 总和 Total sum   | 206.09                | 16                       |                   |         |             |

为得到穴施肥装置的最优工作参数组合,确保排肥稳定性变系数、排肥范围合格率符合穴施肥作业要求,以螺杆半径、偏心距和螺距为变量,以提高排肥范围合格率和降低排肥稳定性变系数为目标,对各参数进行多目标优化求解,得到优化解的数学模型为:

$$\begin{cases} Y_{\max} \\ 5 \leq a \leq 7 \\ 2 \leq b \leq 4 \\ 50 \leq c \leq 70 \end{cases} \quad (15)$$

通过 Design-Expert 的约束和优化求解功能,确定水稻精量穴施肥机的最佳工作参数为螺杆半径 6 mm、偏心距 3.4 mm 和螺距 58 mm,此时,穴施肥效果综合评价指标  $Y$  达到最大值 93.36%,排肥稳定性变系数  $Y_1$  约为 7.267%,排肥范围合格率  $Y_2$  约为 93.99%。

## 4 排肥性能验证试验

### 4.1 精量穴施肥控制方法

在穴施肥装置的精量控制调节系统以 220 V 的开关电源为主供电,将其转换为 12 V 直流电(10 A)为电机驱动模块和 STM32 单片机系统供电,控制系统硬件连接情况如图 10。启动设备后,首先通过 OLED 显示屏设置施肥作业的关键参数,包括机具的行进速度、水稻株距和电机转速。根据参数系统自动计算施肥的时间间隔,反馈到内部控制逻辑中,控制施肥螺杆运动。设备运行时,STM32 单片机通过内置在电机中的两齿感应齿确保施肥螺杆工作的精度,使螺杆转圈数始终为半圈的整数倍,通过调整电机启停时序,实现穴施肥。当系统检测到螺杆卡住时,感应齿反馈的信号会触发单片机的维护逻辑,此时会自动提高电机转速,以较大的扭矩反转运行尝试排除堵塞问题。若堵塞成功解除,电机恢复到正常转速,施肥作业会继续进行(图 11)。也可进入“维护”操作模式,以测试电机转动状态或清理导管内残留物。

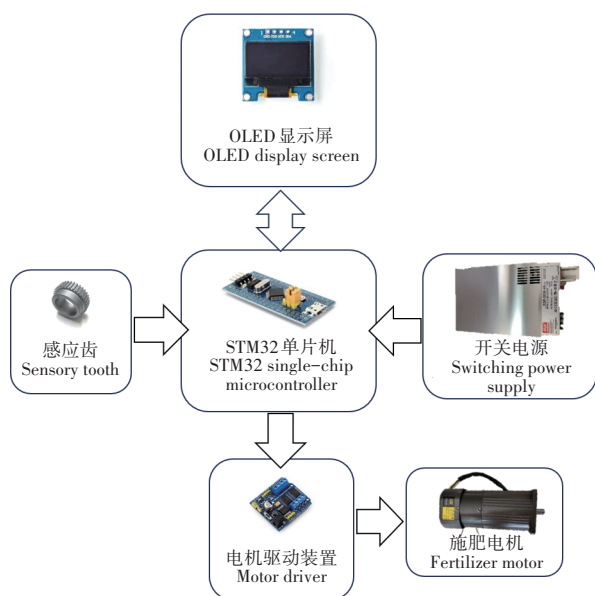


图10 控制系统硬件组成图

Figure 10 Diagram of control system hardware composition

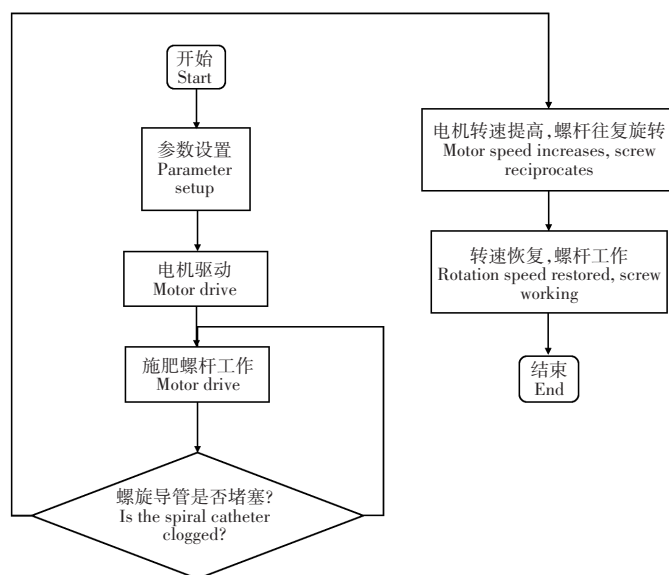


图11 控制系统流程图

Figure 11 Flowchart of control system

### 4.2 台架试验

试验时间为 2024 年 11 月 24 日。利用湖南农业大学的 JPS-12 排种器性能检测试验台,验证最优参数下的

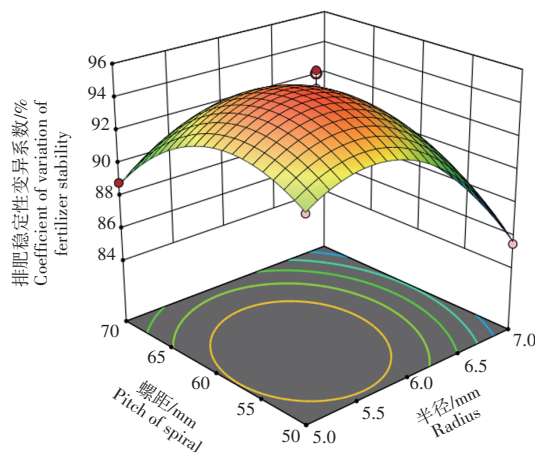


图9 排肥范围合格率响应曲面

Figure 9 Response surface of fertilizer discharge range conformity

穴施肥效果。试验台架包括装置固定架、施肥装置、传送带、电控柜等。将施肥装置组装固定在试验台架上,台架试验主要相关试验参数如表 7。在台架试验中,使用优化求解确定的施肥机构在参数组合( $r=6\text{ mm}$ , $e=3.4\text{ mm}$ , $T=58\text{ mm}$ )进行试验,台架搭建如图 12。启动传送带,让穴施肥装置施下的肥料落在铺在传送带的沙土上,导肥管管口距沙土约 50 mm,试验情况如图 13。本试验共进行 3 组重复试验,每组试验施肥 5 次。采用电子天平(精度 0.01 g)测定每次施肥的纵向 150 mm 范围内施肥量和总施肥量,计算施肥稳定性变异系数与排肥范围合格率,具体数据记录如表 8。

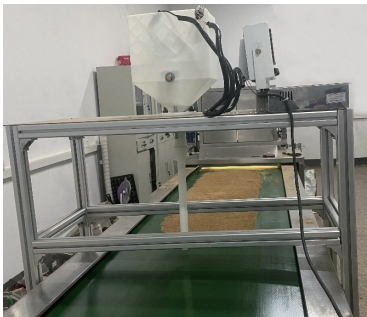


图12 台架试验图

Figure 12 Diagram of the Bench test

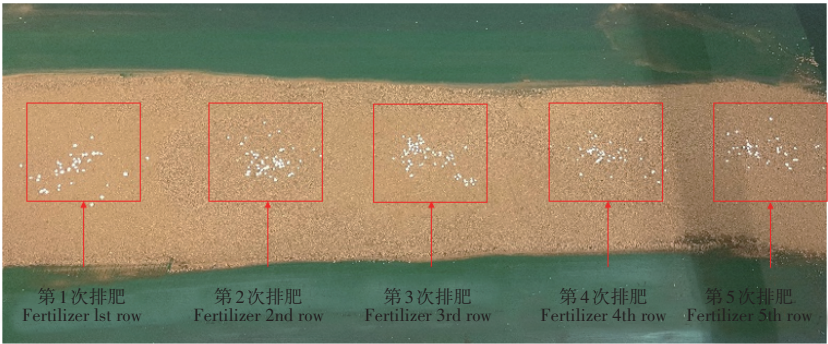


图13 台架试验施肥成穴情况示意图

Figure 13 Schematic diagram of fertilization hole formation in the bench test

表8 台架试验结果  
Table 8 Bench test results

| 试验组数<br>Number of tests | 平均实际施肥量/g<br>Actual fertilizer application | 施肥量误差/%<br>Fertilizer application error | 平均施肥稳定性系数/%<br>Coefficient of variation of fertilizer metering stability | 平均范围合格率/%<br>Coefficient of variation of fertilizer metering uniformity |
|-------------------------|--------------------------------------------|-----------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|
| 1                       | 2.64                                       | 6.02                                    | 7.670                                                                    | 95.640                                                                  |
| 2                       | 2.41                                       | 3.21                                    | 10.330                                                                   | 94.520                                                                  |
| 3                       | 2.58                                       | 3.61                                    | 8.420                                                                    | 95.340                                                                  |
| 平均值 Average value       | 2.54                                       | 4.28                                    | 8.355                                                                    | 95.174                                                                  |

台架试验结果表明,优化参数组合下,装置平均施肥量为 2.54 g,与理论预测值 2.61 g 的绝对误差率均值为 2.57%(波动范围 1.15 % ~ 7.66 %),验证了施肥量控制的精准性。参照《GB/T20865—2007 免耕施肥播种机》标准,排肥稳定性变异系数均值为 8.355%,满足施肥稳定性要求(变异系数 $\leq 10\%$ )。此外,肥料颗粒在 150 mm 纵向范围内的落点分布合格率达 95.174 %,有效实现了集中排放,为田间试验及实际应用提供了可靠的实践依据。

4.3 沙土模拟田间试验验证

为验证施肥装置移动作业性能,设计基于沙土介质的试验,与仿真、台架试验条件一致。于地面铺设抗撕裂彩条布吸收机械振动,上层覆盖 3 ~ 5 cm 厚的沙土,采用双层缓冲减少颗粒弹跳(图 14)。将施肥装置搭载于拖拉机后置支架,以恒速 2.2 km·h<sup>-1</sup>(约 0.6 m·s<sup>-1</sup>)直线行进,排肥时间间隔(0.25 s)与电机转速(240 r·min<sup>-1</sup>)等参数严格保持台架试验设定值,导肥管管口距离沙面同样约 50 mm。

每次施肥后,单独采集每次排肥处 150 mm 长度范围内包含肥料颗粒的沙土样本和该次排肥范围之外的样本。通过孔径 2 mm 网筛实现沙肥分离,再擦拭掉粘上的沙土,采用电子天平(精度 0.01 g)测定每次施肥的纵向 150 mm 范围内施肥量和总施肥量,计算施肥稳定性变异系数与排肥范围合格率。试验情况如图 15。

试验共进行 3 组重复试验,每组试验施肥 5 次,数据记录见表 9。田间试验结果表明,优化参数组合在复杂工况下,3 组试验的平均施肥量为 2.63 g,与理论值的绝对误差仅为 0.02 g,验证了装置对施肥量控制的精准性。





图14 田间试验图

Figure 14 Diagram of the field test

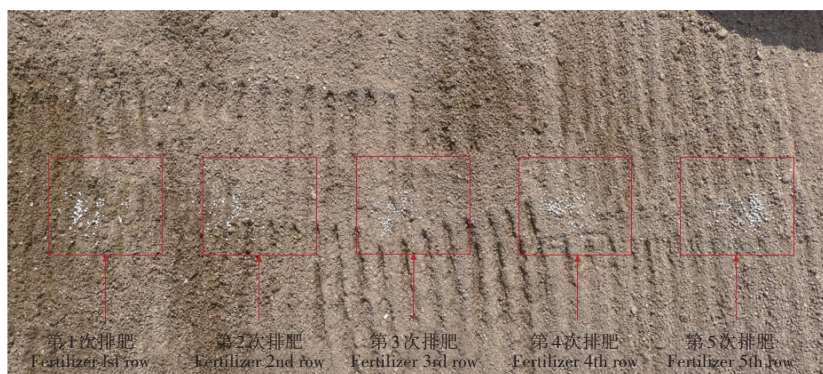


图15 田间试验施肥成穴情况示意图

Figure 15 Schematic diagram of fertilization hole formation in the field test

同时,穴施肥装置在田间作业中平均施肥稳定性变异系数为8.18%,施肥过程稳定可靠。肥料颗粒在150 mm纵向范围内的落点分布合格率达93.1%,表明装置仍有良好的集中排放性能。试验结果与台架试验及仿真预测高度吻合,且满足水稻精量穴施肥的农艺规范。

表9 田间试验结果

Table 9 Bench test results

| 试验组数<br>Number of tests | 平均实际施肥量/g<br>Actual fertilizer application | 平均施肥稳定性系数/%<br>Coefficient of variation of fertilizer<br>metering stability | 平均范围合格率/%<br>Coefficient of variation of fertilizer metering uniformity |
|-------------------------|--------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|
| 1                       | 2.72                                       | 9.53                                                                        | 92.45                                                                   |
| 2                       | 2.52                                       | 8.11                                                                        | 94.52                                                                   |
| 3                       | 2.66                                       | 6.90                                                                        | 92.34                                                                   |
| 平均值 Average value       | 2.63                                       | 8.18                                                                        | 93.1                                                                    |

## 5 讨论与结论

针对水稻穴施肥的农艺需求,设计了一种偏心无轴螺旋式精量穴施肥装置,对其关键结构进行详细分析验证其理论可行性。同时,为实现精准穴施肥,基于STM32单片机设计了相应的施肥控制系统,实现施肥动作的精准时序控制。通过 EDEM 显著揭示结构参数对变异系数与施肥精准性的影响规律,进行了多因素试验,结合响应面方法优化参数。本研究量化了螺杆半径、偏心距与螺距对排肥量、稳定性与集中度的影响,并最终确定了最佳组合(螺杆直径6 mm、偏心距3.4 mm、螺距58 mm)。台架与田间结果与模拟结果高度一致,验证了模型的可靠性与结构方案的合理性。相比于采用线性送料或传统螺旋轮的施肥装置,本系统通过设计后的偏心螺旋结构生成精准的成股颗粒输出,有效抑制堵塞并提升了变异系数控制能力,施肥稳定性优于常见的施肥机构在10%左右的施肥表现。

综上所述,本研究提出的偏心无轴螺旋式精量穴施肥装置,在结构设计、仿真分析与控制系统进行了集成设计与分析。在台架试验中平均施肥量约2.54 g、变异系数8.36%、合格率达95.17%;田间试验进一步验证平均施肥量2.63 g、变异系数8.18%、合格率约93.1%;所有结果均满足1.5~3.5 g施肥范围且稳定性良好。仿真与试验高度一致,表明所优化的关键结构参数组合确实可实现稳定、高精度的穴施肥。总的来看,该装置能有效满足水稻精准穴施肥需求,具备研究应用前景。未来应结合自适应控制算法、设计拓展动态补偿能力的智能施肥系统来适应更复杂的工况。



## 参考文献:

- [1] 钟 钰,巴雪真,陈萌山.新时代国家粮食安全的理论构建与治理进路[J].中国农村经济,2024(2):2-19.  
ZHONG Y,BA X Z,CHEN M S,et al.Theoretical construction and governance approaches for national food security in the new era[J].Chinese Rural Economy,2024(2):2-19.
- [2] 赵敏娟,石 锐.“双碳”目标下农业绿色发展的内涵、挑战及路径选择[J].社会科学辑刊,2024(2):162-171,239,241.  
ZHAO M J,SHI R.Connotation,challenges and path selection of agricultural green development under the "dual carbon" goal[J].Social Science Journal,2024(2):162-171,239,241.
- [3] 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 L J,TIAN M,LI J Q,et al.Research status and development analysis of variable rate fertilization technology in China[J].Journal of Agricultural Mechanization Research,2023,45(10):10-15,23.
- [4] 袁 旭,张家安,常飞杨,等.我国肥料施用现状及化肥减量研究进展[J].农业与技术,2022,42(18):20-23.  
YUAN X,ZHANG J A,CHANG F Y,et al.Current status of fertilizer application and research progress in chemical fertilizer reduction in China[J].Agriculture and Technology,2022,42(18):20-23.
- [5] 胡春胜,张玉铭,秦树平,等.华北平原农田生态系统氮素过程及其环境效应研究[J].中国生态农业学报,2018,26(10):1501-1514.  
HU C S,ZHANG Y M,QIN S P,et al.Nitrogen processes and related environmental effects on agro-ecosystem in the North China Plain[J].Chinese Journal of Eco-Agriculture,2018,26(10):1501-1514.
- [6] 李 红,汤 攀,陈 超,等.中国水肥一体化施肥设备研究现状与发展趋势[J].排灌机械工程学报,2021,39(2):200-209.  
LI H,TANG P,CHEN C,et al.Research status and development trends of integrated water-fertilizer application equipment in China[J].Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering,2021,39(2):200-209.
- [7] 施卫明,王 远,闵 炬.中国农业面源污染防控研究进展与工程案例[J].土壤学报,2023,60(5):1309-1323.  
SHI W M,WANG Y,MIN J.Research progress and engineering cases of agricultural non-point source pollution prevention and control in China[J].Acta Pedologica Sinica,2023,60(5):1309-1323.
- [8] 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 H T,XIE H Y,JIA C Y.Research status and development trend of fertilizer discharge devices in organic fertilizer applicators[J].Journal of Agricultural Mechanization Research,2022,44(8):262-268.
- [9] 李贵蓉,苏欣彤,周 鑫,等.气力辅助式对种穴施肥装置设计与试验[J].农业机械学报,2024,55(12):191-200.  
LI G R,SU X T,ZHOU X,et al.Design and experiment of pneumatic-assisted seed-hole fertilization device[J].Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2024,55(12):191-200.
- [10] 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 Q X,CHEN Y,ZHANG Q S,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.
- [11] 刘正道,王星力,李 爽,等.基于行星轮系的玉米穴施肥自动对种系统设计与试验[J].农业机械学报,2023,54(3):60-67.  
LIU Z D,WANG X L,LI S,et al.Design of maize automatic hole fertilization system targeting at seed based on planetary gear train[J].Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2023,54(3):60-67.
- [12] DU X,LIU C L,JIANG M,et al.Design and development of fertilizer point-applied device in root-zone[J].Applied Engineering in Agriculture,2022,38(3):559-571.
- [13] 姬长英,李忠国,汤拯东,等.螺杆泵式水田化肥深施机的排送肥机构研究[J].南京农业大学学报,2003,26(1):85-88.  
JI C Y,LI Z G,TANG Z D,et al.Study on fertilizer discharge mechanism of screw pump type paddy field deep fertilizer applicator[J].Journal of Nanjing Agricultural University, 2003,26(1):85-88.
- [14] 王金武,李树伟,张 翌,等.水稻精量穴直播机电驱式侧深穴施肥系统设计与试验[J].农业工程学报,2018,34(8):43-54.  
WANG J W,LI S W,ZHANG Z,et al.Design and experiment of electric-driven side deep hole fertilization system for rice precision hill-seeding machine[J].Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2018,34(8):43-54.
- [15] 汤 攀,任 妮,易中懿,等.比例施肥泵吸肥活塞结构优化与试验[J].农业工程学报,2022,38(21):33-41.  
TANG P,REN N,YI Z Y,et al.Structural optimization and experiment of proportional fertilization pump suction piston[J].Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2022,38(21):33-41.

- [16] 魏纪德. 螺杆泵工作特性研究及应用[D]. 大庆:大庆石油学院,2007.  
WEI J D.Study on working characteristics and application of screw pump[D].Daqing:Daqing Petroleum Institute,2007.
- [17] 周连考,龚绍海,赵继生. 单螺杆泵的设计与试验研究[J]. 水泵技术,1999(3):19-25.  
ZHOU L K,GONG S H,ZHAO J S.Design and experimental study of single screw pump[J].Pump Technology,1999(3):19-25.
- [18] 刘晓伟,王火焰,朱德进,等. 氮肥施用方式对水稻产量以及氮、磷、钾养分吸收利用的影响[J]. 南京农业大学学报,2017,40(2):203-210.  
LIU X W,WANG H Y,ZHU D J,et al.Effects of nitrogen application methods on rice yield and nutrient uptake of nitrogen, phosphorus and potassium[J].Journal of Nanjing Agricultural University,2017,40(2):203-210.
- [19] LIU Y X,DING W C,HE P,et al.Estimating thresholds of nitrogen, phosphorus and potassium fertilizer rates for rice cropping systems in China[J].Frontiers in Plant Science,2024,15:1470774.
- [20] 叶大鹏,赵继宁,青家兴,等. 基于 EDEM 的电动螺旋式小型施肥机关键部件的设计与试验[J]. 沈阳农业大学学报,2023,54(1):81-89.  
YE D P,ZHAO J N,QING J X,et al.Design and experiment of key components of electric screw-type small fertilizer applicator based on EDEM[J].Journal of Shenyang Agricultural University,2023,54(1):81-89.
- [21] 钟功祥,雷鹏燕,祝令闯. 全金属单螺杆油泵的结构参数分析及优化[J]. 流体机械,2020,48(5):18-25,43.  
ZHONG G X,LEI P Y,ZHU L C.Structural parameter analysis and optimization of all-metal single screw oil pump[J].Fluid Machinery,2020,48(5):18-25,43.
- [22] 张雅蓉,刘大为,谢方平,等. 水稻侧深施肥倾斜螺旋杆式排肥装置参数优化与试验[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版),2024,50(6):109-114,122.  
ZHANG Y R,LIU D W,XIE F P,et al.Parameter optimization and experiment of inclined screw fertilizer discharge device for rice side-deep fertilization[J].Journal of Hunan Agricultural University(Natural Sciences),2024,50(6):109-114,122.
- [23] 沈曾民,杨子芹,赵东林,等. 碳纳米管/ABS 树脂基复合材料的力学性能和雷达波吸收性能的研究[J]. 复合材料学报,2003(2):25-29.  
SHEN Z M,YANG Z Q,ZHAO D L,et al.Study on mechanical properties and radar wave absorption properties of carbon nanotube/ABS resin composites[J].Acta Materiae Compositae Sinica,2003(2):25-29.
- [24] 丁 瑜,彭博识,夏振尧,等. 3D 打印弯曲根系拉拔力学特性试验研究[J]. 水文地质工程地质,2024,51(1):82-90.  
DING Y,PENG B S,XIA Z Y,et al.Experimental study on pull-out mechanical properties of 3D printed curved root system[J]. Hydrogeology & Engineering Geology,2024,51(1):82-90.
- [25] 刘彩玲,魏 丹,宋建农,等. 颗粒肥料离散元仿真边界参数系统化研究[J]. 农业机械学报,2018,49(9):82-89.  
LIU C L,WEI D,SONG J N,et al.Systematic study on discrete element simulation boundary parameters of granular fertilizer[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2018,49(9):82-89.
- [26] 陈 硕,江礼坚,林谢昭,等. 基于离散元法的面粉颗粒接触参数标定试验[J]. 农业工程学报,2024,40(11):69-76.  
CHEN S,JIANG L J,LIN X Z,et al.Calibration test of contact parameters of flour particles based on discrete element method[J].Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2024,40(11):69-76.
- [27] 刘大为,段佳鹏,陈星宇,等. 基于 EDEM 的稻种离散元摩擦参数标定[J]. 沈阳农业大学学报,2023,54(2):189-195.  
LIU D W,DUAN J P,CHEN X Y,et al.Calibration of Friction Parameters of Seed Particle Models of Hybrid Rice Based on EDEM[J].Journal of Shenyang Agricultural University,2023,54(2):189-195.
- [28] 温翔宇,袁洪方,王 刚,等. 颗粒肥料离散元仿真摩擦因数标定方法研究[J]. 农业机械学报,2020,51(2):115-122,142.  
WEN X Y,YUAN H F,WANG G,et al.Calibration method of friction coefficient in discrete element simulation of granular fertilizer[J].Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2020,51(2):115-122,142.
- [29] WU Z Y,LI H W,LU C Y,et al.Development and evaluations of an approach with full utilization of point cloud for measuring the angle of repose[J].Computers and Electronics in Agriculture,2023,209:107799.
- [30] 李 旭,廖俊卿,曾金平,等. 基于 EDEM 仿真的机械式辣椒精量排种装置设计与试验[J]. 沈阳农业大学学报,2024,55(5):552-564.  
LI X,LIAO J Q,ZENG J P,et al.Design and experiment of precision mechanical metering device for pepper seed based on EDEM[J].Journal of Shenyang Agricultural University,2024,55(5):552-564.
- [31] 崔志豪,郑威强,张立萍. 基于开沟施肥的撒肥圆盘设计与试验[J]. 农机化研究,2024,46(10):120-128,137.  
CUI Z H,ZHEN W Q,ZHANG L P, et al.Design and experiment of fertilizer spreading disc based on furrow fertilization[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research,2024,46(10):120-128,137.
- [32] 张 锐,韩佃雷,吉巧丽,等. 离散元模拟中沙土参数标定方法研究[J]. 农业机械学报,2017,48(3):49-56.  
ZHANG R,HAN D L,JI Q L,et al.Research on parameter calibration method for sand in discrete element simulation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2017,48(3):49-56.