

电磁脉冲式水稻侧深射肥装置设计与试验

夏俊芳^{1,2} 张北海¹ 郑侃^{1,2} 程健¹ 倪阳¹ 陈天铭¹

(1. 华中农业大学工学院, 武汉 430070; 2. 农业农村部长江中下游农业装备重点实验室, 武汉 430070)

摘要: 为满足水稻直播同步侧深施肥深度及其稳定性要求,结合水稻种植农艺特点,本文提出一种基于大颗粒肥精准点施的电磁脉冲式水稻侧深射肥装置。通过射肥装置撞针机构电磁能量转化与冲击后颗粒肥运动学分析,结合所建立的侵彻模型明确了动、定磁铁长度、半径及励磁线圈长度、外半径等结构参数为射肥深度的影响因素,并根据撞针机构吸附条件与运动临界条件,确定影响因素取值范围与励磁线圈最小输入功率;基于射肥装置进行ANSYS Electronics 电磁仿真,开展 Plackett – Burman 与 Box – Behnken 试验,构建射肥装置关键因素与射肥深度二次回归模型,确定最优组合为动磁铁半径 12.5 mm、动磁铁长度 10 mm、定磁铁半径 10 mm、励磁线圈长度 56 mm;验证试验结果表明,撞针机构冲击速度与仿真值最大误差为 0.34 m/s,射肥深度与侵彻模型理论值相对误差 $\pm 7\%$;射肥装置性能试验结果表明,射肥深度合格率为 91.01%、深度均值为 4.48 ~ 5.14 cm、深度变异系数为 7.78% ~ 17.61%,电磁脉冲式水稻侧深射肥装置在实现深度要求的前提下具有良好稳定性。

关键词: 侧深施肥; 水稻; 电磁; 脉冲式

中图分类号: S222.3 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2026)14-0173-12 **OSID:** 

Design and Experiment of Electromagnetic Pulse-driven Rice Side-deep Fertilizer Injection Device

Xia Junfang^{1,2} Zhang Beihai¹ Zheng Kan^{1,2} Cheng Jian¹ Ni Yang¹ Chen Tianming¹

(1. College of Engineering, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China

2. Key Laboratory of Agricultural Equipment in Mid-lower Yangtze River, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Wuhan 430070, China)

Abstract: Aiming to meet the depth and depth stability requirements for synchronous rice direct seeding with side-deep fertilization, an electromagnetic pulse-driven rice side-deep fertilizer injection device was proposed based on precision point application of large granular fertilizer, incorporating agronomic characteristics of rice cultivation. Through the electromagnetic energy conversion analysis in striker pin mechanism and the kinematic analysis of fertilizer particles subjected to impact, combined with the established penetration model, the structural parameters, including the length and radius of the moving magnet, the length and radius of the fixed magnet, outer radius and length of the excitation coil were identified as key influencing factors on the fertilizer injection depth. The feasible ranges of these parameters and the minimum input power of the excitation coil were determined based on adsorption and critical motion conditions of the striker pin mechanism. A transient simulation model of the fertilizer injection device was developed in ANSYS Electronics, followed by conducting Plackett – Burman and Box – Behnken simulation-based experiments. The quadratic regression model was subsequently established to characterize the relationship between key structural parameters and fertilizer injection depth. Based on this model, the optimal structural parameter combination was determined as follows: moving magnet radius was 12.5 mm, moving magnet length was 10 mm, fixed magnet radius was 10 mm, and excitation coil length was 56 mm. Validation tests demonstrated that the maximum velocity deviation between the striker pin mechanism's impact speed and simulation values was 0.34 m/s, while the relative

收稿日期: 2025-03-29 修回日期: 2025-05-27

基金项目: 国家自然科学基金项目(32271994)、湖北省自然科学基金面上项目(2024AFB696)和校自主科技创新基金项目(2662024GXPY008)

作者简介: 夏俊芳(1963—),女,教授,博士生导师,主要从事现代农业装备设计与测控研究,E-mail: xjf@mail.hzau.edu.cn

通信作者: 郑侃(1987—),男,副教授,博士,主要从事稻麦轮作耕播技术与装备研究,E-mail: zhengkan@mail.hzau.edu.cn

error of fertilizer injection depth compared with penetration model theoretical values remained within $\pm 7\%$. Performance evaluation of the fertilizer injection system revealed that the qualification rate of injection depth reached 91.01% ; mean depth values were distributed between 4.48 cm and 5.14 cm ; depth variation coefficients ranged from 7.78% to 17.61% . The electromagnetic pulse-driven rice side-deep fertilizer injection device was demonstrated to exhibit satisfactory stability while meeting depth requirements.

Key words: side-deep fertilization ; rice ; electromagnetic ; pulse-driven

0 引言

水稻作为全球最重要的粮食作物之一,其高产稳产对保障粮食安全具有重要意义。施肥作为水稻生长的关键环节,直接影响作物产量、养分利用效率。传统撒施或浅施方式易导致肥料流失、挥发及利用率低,不仅造成资源浪费,还可能引发农田生态环境污染^[1]。侧深施肥将肥料准确地施于离秧苗根部一定距离和深度的土壤中,使肥料在土壤中缓慢释放,供水稻生长发育,显著提高了肥料利用率,有效减少面源污染,契合绿色高效施肥理念,具有广泛的应用前景^[2]。

目前,侧深施肥装置作业对象多为小颗粒肥料,采用机械式或机械气力式工作原理,这些研究主要集中在排肥机构^[3-8]和 气力输送分配机构^[9-12] 优化等方面。近年来,大颗粒肥料因缓释性能好、养分释放稳定等农艺优势,在水稻种植中受到广泛关注^[13-14],且大颗粒肥料具有良好的物理机械性能,有利于机械排肥与导肥管输送。文献[15-17]设计 了大颗粒水田施肥装置,此类装置与小颗粒肥施肥装置类似,均需先开沟后施肥,对水稻直播泥浆土壤扰动较大,不利于直播同步施肥作业。辛明金等^[18]研制了水田超大颗粒肥气力加速器,为非入土式施肥作业提供了实现方案,该装置对加速器稳定输入气力要求较高,在连续作业中施肥深度稳定性有待验证。

电磁驱动技术响应速度较快,能在毫秒甚至微秒级对控制指令精准响应,在稳定精准控制方面优势显著,远超传统机械驱动,契合农业生产快速调节与稳定工作的需求。近年来国内外诸多科研团队都投身于电磁驱动技术在农业机械领域的探索。李永磊等^[19]通过控制电磁变频激振装置清筛频率实现清筛装置激振力精准调控从而实现种子高效清筛。Jia 等^[20]采用电磁激励技术提供核桃采摘过程所需的撞击力,为丘陵山区果园采摘提供了更多的机械化解 决方案。李思语等^[21]结合 Halbach 阵列的磁场强化特性与 PCB 印制绕组技术,构建了双转子单定子的电磁驱动架构,在无需外部供电条件下实现了拖拉机轮速精确传感。因此,将电磁驱动技术与

侧深射肥技术结合,有望提高施肥稳定性,以精准力度连续射出大颗粒肥料,实现定点、定量、定深施肥。

结合水稻侧深施肥农艺要求,本文提出一种电磁脉冲式水稻侧深射肥装置,对电磁射肥过程进行分析,构建电磁撞针-颗粒肥-土壤射肥动力学模型,通过有限元仿真试验探明射肥装置关键结构参数对射肥深度的影响,对结构参数进行优化,以满足水稻直播同步侧深连续施肥稳定性要求。

1 射肥装置与工作原理

1.1 射肥装置结构

如图 1 所示,电磁脉冲式水稻侧深射肥装置由定磁铁、吸附弹簧、复位弹簧、射肥撞针、动磁铁、励磁线圈及线圈骨架等组成。定磁铁固定在卡座内,励磁线圈密绕在线圈骨架中部,复位弹簧底部固定在线圈骨架底部,吸附弹簧与卡座固连,复位弹簧顶部与吸附弹簧底部各自固定有推板,动磁铁通过撞针扣盖固定在撞针凹槽内与撞针共同构成撞针机构,撞针机构与上、下推板之间的导槽构成转动副。为保证动磁铁所受磁场力不受干扰,除定、动磁铁及励磁线圈外,射肥装置其他部件采用工程塑料材料 3D 打印而成。

1.2 工作原理

电磁脉冲式水稻侧深射肥装置工作原理如图 2 所示。励磁线圈在直流电源外加电压作用下将电能转换为磁场能驱动初始静止的动磁铁带动撞针机构在导槽内向下加速运动;当动磁铁到达励磁线圈中间位置时撞针机构达到最大速度,此时排肥轮将单粒颗粒肥输送至重力补偿装置中,颗粒肥在支撑弹簧和支撑板作用下静止限位在射肥撞针正下方,撞针底部与颗粒肥接触,颗粒肥受撞击后与撞针机构进行速度交换并获得一定速度入射泥浆;完成射肥动作后励磁线圈断电,在励磁线圈续流作用下,动磁铁受向上的复位弹簧弹力与向线圈中部的动磁拉力带动撞针反向减速并回弹;励磁线圈电流逐渐减小至不再对动磁铁产生动磁力,动磁铁回到定磁铁静磁力范围内,在定磁铁静磁吸力作用下复位静止,射肥装置完成 1 个射肥周期。

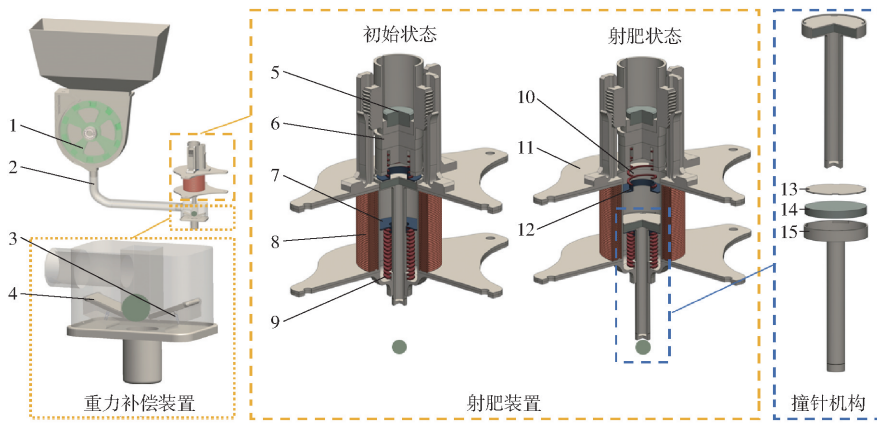


图 1 电磁脉冲式水稻侧深射肥装置结构图

Fig. 1 Structural assembly diagram of pulsed electromagnetic device for rice side-deep fertilization

1. 排肥轮 2. 导肥管 3. 支撑弹簧 4. 支撑板 5. 定磁铁 6. 卡座 7. 下推板 8. 励磁线圈 9. 复位弹簧 10. 吸附弹簧
11. 线圈骨架 12. 下推板 13. 扣盖 14. 动磁铁 15. 撞针

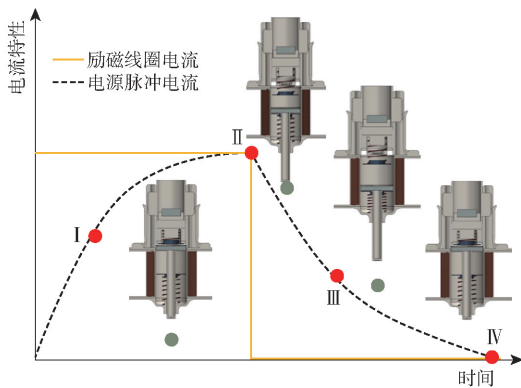


图 2 电磁脉冲式水稻侧深射肥装置工作原理

Fig. 2 Working principle of device

- I. 临界运动 II. 射肥 III. 减速 IV. 复位

2 关键部件参数设计

2.1 射肥运动过程分析

射肥运动包括: 动磁铁受电磁力进行加速阶段、撞针机构冲击颗粒肥与颗粒肥入射泥浆阶段。基于能量转换与运动学理论对射肥过程进行分析, 明确装置对射肥深度的影响因素。

2.1.1 撞针机构电磁能量转化分析

撞针机构所获得的最大动能主要来源于动磁铁所受电磁力做功, 该动能决定颗粒肥受冲击后的速度进而影响颗粒肥入射深度。撞针机构临界运动到射肥过程, 动磁铁受励磁线圈动磁力 F_{zm} 、定磁铁静磁力 F_{zs} 、吸附弹簧弹力 F_k 、自身重力 G 作用^[22-23], 其中动磁力、重力与弹簧弹力为撞针机构提供动能, 静磁力阻碍加速, 此过程撞针机构遵循动能定理, 即

$$\frac{Mv^2}{2} = \frac{Mgl_c}{2} + \frac{k(x_0 - x_1)^2}{2} + \int_{l_c+l_{p1}}^0 F_{zm} dz + \int_{l_c+l_{p1}}^0 F_{zs} dz \quad (1)$$

其中

$$\begin{cases} F_{zm} = \frac{B_{r1} \sqrt{P(t)}}{2 \sqrt{\epsilon l_c (R_c^2 - r_c^2)}} \int_{-\frac{l_c}{2}}^{\frac{l_c}{2}} \int_{r_c}^{R_c} \sum_e em_z f_z dr_1 dz_1 \\ f_z = \left(1 - \frac{m_1}{2}\right) K(m_1) - E(m_1) \\ m_1 = \frac{4R_{p1}r_1}{m_2^2} \\ m_2^2 = (R_{p1} + r_1)^2 + \left(z + \frac{el_{p1}}{2} - z_1\right) \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} F_{zs} = \frac{B_{r1}B_{r2}}{2\mu} \sum_{i=1}^2 \sum_{j=3}^4 k_1 k_2 k_3 f'_z (-1)^{i+j} \\ f'_z = K(k_4) - \frac{1}{k_2} E(k_4) + \left(\frac{k_1^2}{k_3^2} - 1\right) \Pi\left(\frac{k_4}{1 - k_2}, k_4\right) \\ k_2 = \frac{(R_{p1} - R_{p2})^2}{k_1^2} + 1 \\ k_3^2 = (R_{p1} - R_{p2})^2 + k_1^2 \\ k_4 = \frac{4R_{p1}R_{p2}}{k_3^2} \quad (0 < k_4 \leq 1) \end{cases} \quad (3)$$

式中 M ——撞针机构质量之和, kg

v ——撞针机构冲击速度, m/s

B_{r1} ——动磁铁剩磁强度, T

B_{r2} ——定磁铁剩磁强度, T

μ ——真空磁导率

$P(t)$ ——励磁线圈功率, W

ϵ ——励磁线圈电阻率, $\Omega \cdot m$

l_{p2} ——定磁铁长度, mm

R_{p2} ——定磁铁半径, mm

h ——动磁铁与定磁铁间距, mm

r_c ——励磁线圈内半径, mm

R_c ——励磁线圈外半径,mm
 x_0 ——自由长度,mm
 x_1 ——限极压缩长度,mm
 l_c ——励磁线圈长度,mm
 l_{p1} ——动磁铁长度,mm
 R_{p1} ——动磁铁半径,mm
 z ——动磁铁位移,mm
 r_1, z_1 ——积分变量
 K, E, Π ——第一、二、三类完全椭圆积分
其中 $f_z, e, m_1, m_2, f_z', k_1, k_2, k_3, k_4$ 为中间变量。静磁力参数取值见表1。

表 1 静磁力参数取值

Tab.1 Parameters determination of static magnetic force		
k_1	$i=1$	$i=2$
$j=3$	$-(l_{p1}+h+z)$	$-(l_{p1}+l_{p2}+h+z)$
$j=4$	$-(h+z)$	$-(l_{p2}+h+z)$

2.1.2 冲击后颗粒肥运动学分析

如图3所示,撞针机构动能最大时冲击颗粒肥为颗粒肥提供入射泥浆速度,冲击过程直接影响撞针机构与颗粒肥速度交换,侵彻结束时射肥深度与入射速度关系密切。假设撞针与颗粒肥为完全弹性碰撞,支撑弹簧仅提供颗粒肥静止所需支持力,忽略支撑板对碰撞的阻碍,视碰撞结束后颗粒肥速度为入射泥浆速度,遵循动量守恒和能量守恒,即

$$\begin{cases} Mv = Mv_1 + mv_2 \\ \frac{Mv^2}{2} = \frac{Mv_1^2}{2} + \frac{mv_2^2}{2} \end{cases} \quad (4)$$

式中 v_1 ——碰撞后撞针机构速度,m/s
 v_2 ——颗粒肥入射速度,m/s
 m ——颗粒肥质量,g

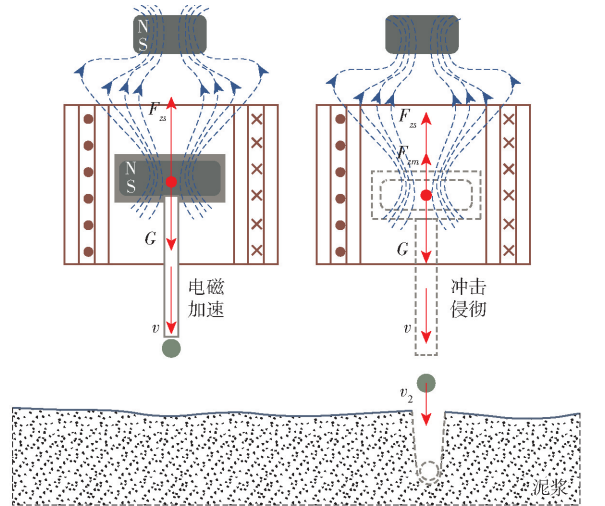


图3 冲击与侵彻

Fig.3 Impact and penetration phases

由式(4)和式(1)可知

$$\begin{cases} E_k = \int_{l_c+l_{p1}}^0 F_{zm} dz + \int_{l_c+l_{p1}}^0 F_{zs} dz \\ v_2 = \frac{2\sqrt{2}M}{M+m} \sqrt{\frac{E_k + Mgl_c + k(x_0 - x_1)^2}{M}} \end{cases} \quad (5)$$

颗粒肥侵彻深度 p 与颗粒肥物理性质及入射速度间关系为^[24-25]

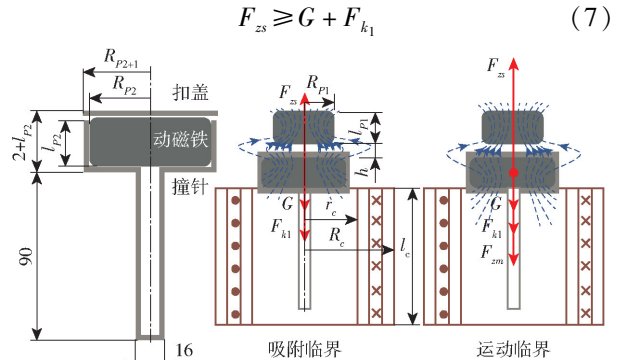
$$\begin{cases} p = 1.02\rho(26.2\sqrt{d} + 1.75d - 6.3) \left(\frac{v_2}{1000}\right)^{0.4} \\ H = p - d/2 \end{cases} \quad (6)$$

式中 ρ ——颗粒肥密度,g/cm³
 d ——颗粒肥直径,cm
 H ——射肥深度,cm

射肥装置所用肥料为自制颗粒肥,依据《水稻科学施肥指导意见》和水稻直播同步侧深点施肥农艺要求^[26](行距25 cm,穴距14 cm,深度4~6 cm、5 cm最优)计算每穴需18-18-18复合肥1.4 g,将复合肥破碎后添加一定粘结剂重组,成肥直径约为16 mm,单粒平均质量3.1 g,密度均值1.45 g/cm³。式(6)表明颗粒肥密度和直径一定时,射肥深度与入射速度正相关,结合式(5)可知,入射速度与动、定磁铁半径及长度、励磁线圈外半径及长度等参数关系密切,影响射肥深度。

2.2 射肥部件参数设计

射肥装置结构参数与电源输入功率参数设计满足吸附临界和运动临界条件如图4所示,可间接保障射肥深度稳定、装置正常工作。为确保撞针机构在励磁线圈未通电时吸附静止,实现连续稳定作业,动磁铁所受静磁力应不小于撞针机构重力与吸附弹簧最大弹力之和



重力、吸附弹簧弹力组成向下运动的合力,应不小于定磁铁向上的静磁力,即

$$F_{zmax} + G + F_{k1} \geq F_{zs}$$

(8)

动磁力由励磁线圈在动磁铁两极面的磁场强度差值产生,随着动磁铁距离励磁线圈中心位置减小而减小,动磁铁处于励磁线圈外部时动磁力衰减较快^[27],为充分利用动磁力对撞针机构进行加速,初始时刻动磁铁底面与励磁线圈上顶面对齐。吸附弹簧选择 PEEK 材质,弹性系数 k 为 0.17 N/mm,自由长度 x_0 为 36 mm,极限压缩长度 x_1 为 16 mm。定磁铁与动磁铁间距越小,定磁铁可以以更小结构尺寸为动磁铁提供集中静磁力,间距略大于吸附弹簧极限压缩长度即可,确定为 25 mm。撞针机构沿线圈骨架导槽顺畅滑动,励磁线圈内壁与动磁铁外圆柱面之间保留单边 3 mm 间隙,即 $r_c = R_{p2} + 3\text{ mm}$ 。

由动磁力解析式可知,剩磁强度为与动磁力正相关的独立参数,剩磁强度增大,颗粒肥入射速度与射肥深度也随之增大,为尽可能确保射肥深度以满足农艺要求,动、定磁铁选择剩磁强度较大的钕铁硼永磁铁,牌号为 52UH,剩磁强度 1.442 T,矫顽力 14.1 kOe。结合式(7)、(8)及装置在实际场景下安装尺寸要求,基于 Matlab 和复化高斯积分法,以 2 mm 为动磁铁、定磁铁及励磁线圈结构尺寸取值步长,对稳态时式(2)、(3)进行求解,确定关键结构参数取值,如表 2 所示,并计算得在此结构参数范围所有组合内,动磁铁均可脱离定磁铁开始运动的最小输入功率为 170 W。

表 2 射肥装置结构参数

Tab. 2 Device structural parameters

mm

参数	数值
动磁铁半径 R_{p1}	8 ~ 20
动磁铁长度 l_{p1}	15 ~ 20
定磁铁半径 R_{p2}	10 ~ 15
定磁铁长度 l_{p2}	20 ~ 30
励磁线圈外半径 R_c	40 ~ 50
励磁线圈长度 l_c	40 ~ 80

电磁加速与冲击侵彻过程的分析表明,动磁铁、定磁铁及励磁线圈结构参数为影响射肥深度关键因素,然而动磁力和静磁力解析式使得各结构参数与射肥深度间呈复杂的非线性关系,无法直接明确射肥深度与结构参数间的关系。采用仿真试验的方法对结构参数取值合理性进行判断,结合仿真结果揭示固定输入功率下射肥装置关键结构参数对射肥速度的作用机制及其对射肥深度的影响。

3 射肥装置仿真

3.1 射肥装置电磁瞬态仿真模型

在 ANSYS Electronics 2022 R1 中建立仿真模型如图 5 所示,求解类型为 2D 瞬态、关于 Z 轴回转对称,边界条件为气球边界条件。内部空气域为与动磁铁同尺寸的运动区域内部真空域,在瞬态运动仿真中有助于提高仿真准确度。仿真模型中运动域为宽度 $(r_c + R_{p1})/2$ 的真空运动域,动磁铁运动至励磁线圈中部时完成加速,仿真位移为 $0 \sim (l_{p1} + l_c)/2$ 。在机械瞬态中动磁铁与撞针和扣盖紧密固连,因此撞针与扣盖质量须计入机械瞬态设置的质量,撞针与扣盖材质均为 3D 打印树脂材料,密度为 1.05 g/cm³,动磁铁密度为 7.5 g/cm³。

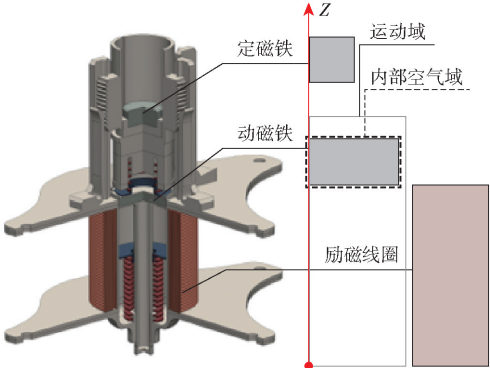


图 5 电磁瞬态仿真模型

Fig. 5 Electromagnetic transient simulation model

动磁铁外负载力为撞针机构重力和吸附弹簧弹力之和,ANSYS Electronics 提供了 Position 内置位置函数 Pos ,机械瞬态中撞针机构重力和弹簧力为

$$\begin{cases} G = 9.8(7.5V_1 + 1.05V_2) \\ F_k = 0.17(20 - Pos) \quad (0 \leq Pos \leq 20) \end{cases}$$

(9)

式中 V_1 ——动磁铁体积,cm³

V_2 ——撞针与扣盖体积之和,cm³

动、定磁铁采用钕铁硼永磁铁,相对磁导率为 1.022 7,充磁坐标系选择圆柱坐标系,方向为 Z 轴正向,励磁线圈材料设置为铜,其余部分材料为真空。网格划分数量决定着仿真结果准确度,空气域内部最大单元长度 0.5 mm,其余模型内部最大单元长度 0.2 mm,缩短仿真时间确保仿真精度。采用参数化建模方式建立仿真模型,励磁线圈电感量、电阻以及匝数计算式为

$$\begin{cases} N = \frac{l_c(R_c - r_c)}{D^2} \\ L = \frac{7.87N^2Q^2}{3Q + 9l_c + 10C} \\ R = \frac{4\epsilon l_c(R_c^2 - r_c^2)}{D^4} \end{cases}$$

(10)

式中 R ——励磁线圈电阻, Ω
 L ——励磁线圈电感, H
 N ——励磁线圈匝数
 Q ——励磁线圈平均直径, m
 C ——励磁线圈径向厚度, m
 D ——励磁线圈线径, m

为了降低电阻,使用 0.99 mm 的漆包线绕制励磁线圈,仿真模型中不引入定值电阻,仅考虑励磁线圈电阻,依据式(10)计算励磁线圈匝数并设置线圈激励为正向。激励中设置励磁线圈匝数后添加到依据电感电流增加规律的 Winding 中,励磁线圈两端电流输入随时间 t 变化为

$$I(t) = \sqrt{\frac{170}{R}}(1 - \exp(-tR/L)) \quad (11)$$

在瞬态求解器中,采用迭代步长 0.5 ms 进行时间离散化处理,求解时间域确保仿真时长充分涵盖动磁铁完整位移过程即可。在后处理中生成励磁线圈电流、撞针机构负载力、Z 轴方向合力、速度和位移随时间变化的动态特性表,通过上述报告验证仿真模型物理合理性,获得动磁铁在加速完成后达到的最大速度。

3.2 仿真试验设计

将仿真所得撞针机构最大速度代入式(5)、(6)可得理想条件下射肥深度,以此为试验指标,使用 Design-Expert 软件对电磁加速过程涉及的结构参数进行 Plackett – Burman 仿真试验,试验方案如表 3 所示。将 Plackett – Burman 试验筛选得到动磁铁半径、动磁铁长度、定磁铁半径、励磁线圈长度作为 Box – Behnken 试验因素,试验编码如表 4 所示,选取 3 个中心点进行四因素三水平 Box – Behnken 试验。

表 3 Plackett – Burman 试验方案

Tab.3 Plackett – Burman experiment protocol

序号	因素						V/ (m·s ⁻¹)	H/ cm
	$R_{p1}/$	$l_{p1}/$	$R_{p2}/$	$l_{p2}/$	$R_c/$	$l_c/$		
	mm	mm	mm	mm	mm	mm		
1	20	20	10	20	40	80	3.543 0	5.23
2	20	20	10	25	50	80	3.413 1	5.14
3	8	20	15	20	50	80	3.633 8	5.15
4	20	20	15	20	40	40	3.015 6	4.86
5	20	10	15	25	40	80	2.426 4	4.36
6	8	10	10	20	40	40	3.186 0	4.73
7	8	20	10	25	50	40	3.472 8	5.04
8	20	10	10	20	50	40	2.550 8	4.46
9	20	10	15	25	50	40	2.111 0	4.08
10	8	10	10	25	40	80	3.230 9	4.77
11	8	10	15	20	50	80	2.946 7	4.56
12	8	20	15	25	40	40	3.707 6	5.19

表 4 Box – Behnken 试验因素编码

Tab.4 Box – Behnken experiment factors coding

编码	因素			
	$R_{p1}/$ mm	$l_{p1}/$ mm	$R_{p2}/$ mm	$l_c/$ mm
-1	8	20	15.0	80
0	14	15	12.5	60
1	20	10	10.0	40

3.3 结果与方差分析

Plackett – Burman 试验结果方差分析如表 5 所示,模型 P 为 $0.001 < 0.05$,表明模型拟合程度较好,具有统计学意义。决定系数 $R^2 = 0.971\ 4$,调整后 R^2 为 0.937,多元线性回归模型具有良好预测能力,变异系数 C_v 为 1.95%,表明 PB 试验可信度和精确度较好。ANOVA 结果表明,在 95% 置信水平 ($P < 0.05$) 下,4 个因素对响应变量具有显著影响,影响因素定磁铁长度和励磁线圈半径未表现出统计学意义 ($P > 0.05$)。

表 5 Plackett – Burman 试验方差分析

Tab.5 Plackett – Burman experiment ANOVA

方差来源	平方和	自由度	均方	F	P
模型	1.480 0	6	0.247 3	28.28	0.001 0
R_{p1}	0.143 0	1	0.143 0	16.36	0.009 9
l_{p1}	1.110 0	1	1.110 0	127.00	<0.000 1
R_{p2}	0.114 1	1	0.114 1	13.05	0.015 3
l_{p2}	0.014 0	1	0.014 0	1.60	0.261 3
R_c	0.042 0	1	0.042 0	4.81	0.079 9
l_c	0.060 2	1	0.060 2	6.89	0.046 8
残差	0.043 7	5	0.008 7		
总和	1.53	11			

根据方差分析和帕累托图(图 6),显著因素按影响强度排序如下:动磁铁长度 ($P < 0.0001$) 表现出最强的正向效应,效应值为 11.27%,表明在试验范围(10 ~ 20 mm)内,动磁铁长度增加可显著提升射肥深度;动磁铁半径 ($P = 0.009\ 9$) 与定磁铁半径 ($P = 0.015\ 3$) 效应值分别为 -4.04% 与 -3.61%,其显著性虽低于前者,但仍表明适度减小定磁铁半

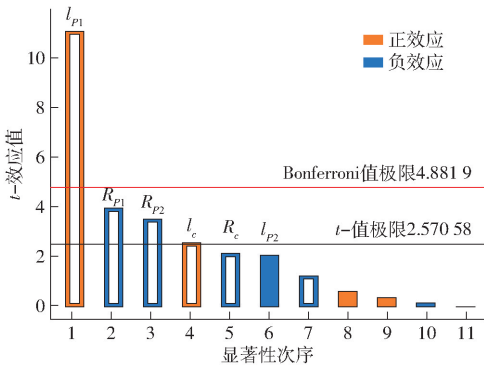


图 6 Plackett – Burman 试验帕累托图

Fig.6 Pareto chart of Plackett – Burman experiment

径与动磁铁半径对射肥深度具有优化潜力;励磁线圈长度($P = 0.0468$)效应最弱,效应值为 2.62%,对射肥深度影响最小。在后续试验中对影响不显著的因素不予考虑,为尽可能减小结构尺寸便于安装、缩减装置制造成本,在 Box - Behnken 试验中固定磁铁长度 20 mm,励磁线圈外半径 40 mm。

采用四因素三水平 Box - Behnken 设计构建二次回归模型,依据仿真结果建立的射肥深度与动磁铁长度等因素间的二次多项式回归方程为

$$\begin{aligned} H = & -0.172R_{p1} + 0.236l_{p1} - 0.09R_{p2} + 0.069l_c - \\ & 0.065R_{p1}^2 - 0.036l_{p1}^2 - 0.018R_{p2}^2 - 0.051l_c^2 - \\ & 0.02R_{p1}l_{p1} - 0.043R_{p1}R_{p2} + 0.028R_{p1}l_c + \\ & 0.03l_{p1}R_{p2} - 0.008l_{p1}l_c + 0.003R_{p2}l_c + 5.21 \end{aligned}$$

(12)

Box - Behnken 部分试验结果如表 6 所示,通过方差分析(表 7)对二次多项式模型进行显著性检验,其中模型 $P < 0.0001$ 极显著;失拟项 $P = 0.2065 > 0.05$,拟合方程 $R^2 = 0.9988$, $R_{adj}^2 = 0.9974$, $R_{pre}^2 = 0.9932$,二者差值较小表明模型拟合度较好且有良好的预测性。交互因素二次项 $l_{p1}l_c$ 和 $R_{p2}l_c$ ($P > 0.05$)不显著,其余各项均极显著,结合表 7 可知,影响射肥深度 4 个关键因素主效应顺序为 l_{p1} 、 R_{p1} 、 R_{p2} 、 l_c 。

表 6 Box - Behnken 仿真试验部分结果

Tab.6 Partial simulation results of Box - Behnken experiment

序号	因素				$V/(m \cdot s^{-1})$	H/cm
	R_{p1}/mm	l_{p1}/mm	R_{p2}/mm	l_c/mm		
1	8	10	12.5	60	3.1758	5.01
2	20	10	12.5	60	2.7995	4.72
3	8	20	12.5	60	3.9282	5.53
4	20	20	12.5	60	3.3824	5.16
5	14	15	10.0	40	3.3794	5.16
6	14	15	15.0	40	3.1227	4.97
7	14	15	10.0	80	3.5879	5.30
8	14	15	15.0	80	3.3342	5.12
9	8	15	12.5	40	3.4956	5.24
10	20	15	12.5	40	2.9298	4.83
11	8	15	12.5	80	3.5808	5.30
12	20	15	12.5	80	3.1680	5.00
13	14	10	10.0	60	3.2158	5.04
14	14	20	10.0	60	3.8157	5.45
15	14	10	15.0	60	2.9000	4.80
16	14	20	15.0	60	3.6285	5.33
17	8	15	10.0	60	3.6485	5.34
18	20	15	10.0	60	3.2691	5.08
19	8	15	15.0	60	3.5091	5.25
20	20	15	15.0	60	2.9267	4.82
21	14	10	12.5	40	2.8970	4.80

表 7 Box - Behnken 试验方差分析

Tab.7 Box - Behnken experiment ANOVA

方差来源	平方和	均方	F	P
模型	1.22	0.0872	709.30	<0.0001
R_{p1}	0.3536	0.3536	2877.02	<0.0001
l_{p1}	0.6674	0.6674	5429.76	<0.0001
R_{p2}	0.0972	0.0972	790.78	<0.0001
l_c	0.0574	0.0574	467.05	<0.0001
$R_{p1}l_{p1}$	0.0016	0.0016	13.02	0.0036
$R_{p1}R_{p2}$	0.0072	0.0072	58.78	<0.0001
$R_{p1}l_c$	0.0030	0.0030	24.61	0.0003
$l_{p1}R_{p2}$	0.0036	0.0036	29.29	0.0002
$l_{p1}l_c$	0.0002	0.0002	1.83	0.2010
$R_{p2}l_c$	0.0000	0.0000	0.2034	0.6600
R_{p1}^2	0.0225	0.0225	183.32	<0.0001
l_{p1}^2	0.0070	0.0070	57.02	<0.0001
R_{p2}^2	0.0016	0.0016	13.29	0.0034
l_c^2	0.0140	0.0140	113.97	<0.0001
残差	0.0565	0.0056		
失拟项	0.0014	0.0001	4.23	0.2065
纯误差	0.0001	0.0000		
总和	1.22			

3.4 典型仿真动力学趋势

由图 7 可知,电磁瞬态仿真试验中各组动力学参数随时间的变化趋势高度一致,仅因结构参数的差异导致数值不同,选取 Plackett - Burman 第 1 组结构参数组合作为代表案例,其参数变化完整反映系统的共性动力学行为。由于未施加外部支撑力,随着动磁力增大,撞针机构初始合力(0~5 ms)呈缓慢衰减趋势,其矢量方向与 Z 轴正向同向,构成运动阻力。撞针机构在 5 ms 时实现动磁力、弹簧力、重力与静磁力的动态平衡,此后合力矢量方向转为 Z 轴负向,与运动方向相同,其幅值呈先增后减非线性特征,速度变化趋势与其保持一致。位移达到 $(l_{p1} + l_c)/2 = 50$ mm 时所受合力再次减小为零,此时速度达到最大,这一动态演变过程与射肥过程分析相契合,初步验证了仿真模型可靠性。

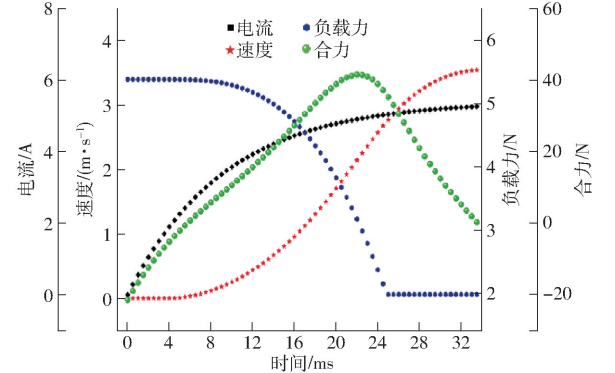


图 7 仿真试验一致性趋势

Fig.7 Consistency trend of experiment

3.5 最优参数组合与响应面分析

为获得射肥装置关键结构参数最优组合,以建立的二次回归方程为性能指标函数,射肥深度 5 cm 为目标值,采用极值理论进行优化求解,约束条件为动磁铁半径 8 ~ 20 mm、动磁铁长度 10 ~ 20 mm、定磁铁半径 10 ~ 15 mm、励磁线圈长度 40 ~ 80 mm。求解得到多种参数优化组合,为选用较近规格的永磁铁型号,圆整后选取参数组合为动磁铁半径 12.5 mm,动磁铁长度及定磁铁半径 10 mm,励磁线圈长度 56 mm,依据建立的二次回归模型计算射肥深度为 5.04 cm,按照优化结果进行仿真,得到射肥深度为 4.91 cm,相对误差为 2.65%,与回归方程预测结果基本一致。

结合图 8a 可知,固定动磁铁半径时,射肥深度与动磁铁长度正相关,表明动磁铁长度增加对静磁力做功增长效应小于对动磁力和重力做功增长效应,原因是重力做功随动磁铁体积增加有所增大,同时动磁铁长度增加导致励磁线圈在动磁铁两端面所产生的磁场强度差增大导致动磁力增大。动磁铁长度相同时,动磁铁半径增加则会导致相反的情

况,此时在整个加速过程静磁力做功的增加更为明显,表明相较于增加动磁铁长度,增大动磁铁半径使静磁力和静磁力负功显著提升。图 8b 表明了动磁铁半径和定磁铁半径同时增加会使得射肥深度减小,尽管静磁力增强导致励磁线圈预触发状态对应的时间节点向后偏移,从而导致全加速过程电流增加,动磁力累积性增长,然而在积分长度不变情况下,二者同时增加会导致静磁力显著提高,静磁力所作负功的增加相较于动磁力做功增加更为显著。图 8c 表明定磁铁半径改变相较于励磁励磁线圈长度的改变更能影响射肥深度,固定动磁铁半径时,励磁线圈长度增加会导致射肥深度增加,表明加速过程位移增大,重力和动磁力做功随之提高,而静磁力做功增加并不显著,可能原因是随着动定磁铁距离的增加,静磁力显著减小,在更大位移上累积增长效果趋于平缓。由图 8d 可知,固定定磁铁半径时,动磁铁长度增加会显著提高射肥深度,固定动磁铁长度时增加动磁铁半径则会减小射肥深度,可同时增加动磁铁长度和减小定磁铁半径大幅提高射肥深度。

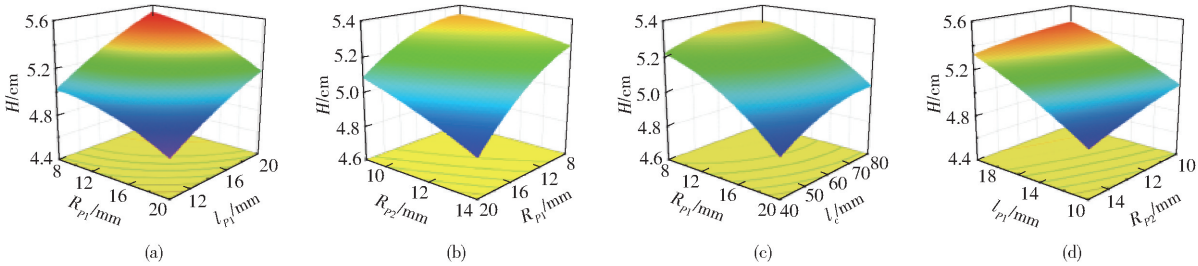


图 8 Box - Behnken 试验交互作用响应面

Fig. 8 Box - Behnken experiment with interaction response surfaces

4 试验

结合 Box - Behnken 试验给出的最优结构参数组合进行验证试验,测量撞针速度、颗粒肥入射速度和射肥深度,验证仿真模型准确性与侵入模型在低速条件下的适用性;搭建试验台架进行射肥装置性能试验,检验射肥深度及深度稳定性。

4.1 射肥验证试验

4.1.1 验证试验材料

试验所用土壤取自华中农业大学水稻试验田,取样过程及试样制备均按照 GB/T 50123—2019《土工试验方法标准》进行,采集泡田后表层 20 cm 土壤,取样时清除取样区域地表稻茬、杂草,将取样后土壤置于烘箱进行干燥、去除杂质、粉碎、过筛。水稻泡田后泥浆含水率 50% 左右^[28-30],在土盒中每个格子放入 2.5 kg 粉碎后稻田土,依据含水率定义在每个格子中加入 1.25 kg 水,配置成射肥试验泥

浆静置 24 h。图 9 为验证试验台,包括射肥装置、台架、颗粒肥、土槽以及试验电路。

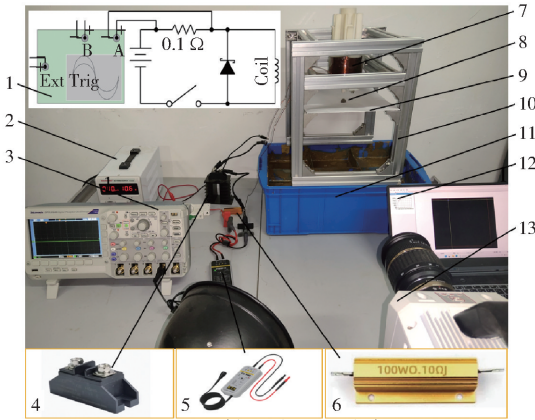


图 9 射肥验证试验台

Fig. 9 Test bench for fertilizer injection performance validation

- 1. 测量电路 2. 稳压电源 3. 示波器 4. 肖特基二极管 5. 差分探头 6. 功率电阻 7. 射肥装置 8. 颗粒肥 9. 重力补偿纸 10. 台架 11. 土槽 12. 计算机 13. 高速摄像机

试验台架为铝合金材质,导磁能力较弱,可避免对励磁线圈磁场产生干扰。为观测撞针机构加速过程以及撞针机构与颗粒肥的碰撞速度交换过程,采用重力补偿纸固定颗粒肥,固定纸正对射肥撞针位置开有略小于颗粒肥直径的孔,可保证颗粒肥在碰撞过程几乎不受阻力同时支撑固定颗粒肥。试验电路如图 9 左上所示,励磁线圈两端反向并联的肖特基二极管型号为 MBR50A,平复开关断开瞬间励磁线圈产生的较大反向电压以保护电路元器件,示波器型号为 Tektronix DPO2014B,监测励磁线圈电感特性,示波器差分探头并联在 $0.1\ \Omega$ 大功率电阻两端。高速摄像机型号为千眼狼 5KF10,采集频率最高可达 $190\ 800\ \text{f/s}$,利用相机视频处理软件,可捕捉到射肥撞针与颗粒肥加速过程。

4.1.2 试验方法

试验前将射肥台架放在土槽网格上方,调整射肥撞针底部到颗粒肥距离为 $5\ \text{cm}$ 。直流稳压电源输出模式为电压输出,依据式(10)计算最优结构参数组合下励磁线圈电阻,结合欧姆定理计算电源所需设置输

入电压,示波器触发模式为单次触发。高速摄像机采集时间间隔 $0.5\ \text{ms}$,延时 $200\ \text{ms}$ 开始采集,采集时长为 $1\ \text{s}$,采集完成后自动将数据保存至计算机。试验开始时同时按下计算机高速摄像采集按钮和电路中空气开关,摄像机记录射肥过程,励磁线圈通电并加速动磁铁带动撞针机构撞击颗粒肥,颗粒肥入射泥浆完成一次射肥。在高速摄像图像视频处理软件中,设置撞针直径为像素尺寸标尺,以撞针和颗粒肥实际运动方向为测量轴,图 10 中点 P1 和 P2 为追踪撞针和颗粒肥的标记点,可通过高速摄像机视频中的标记点进行捕捉得到射肥撞针与颗粒肥加速过程的速度。为验证射肥模型,将实测颗粒肥入射速度代入式(6)得到理论射肥深度。标记测深杆与泥浆表面接触时相对于标尺底部的点位,射肥完成后将测深杆垂直插入到颗粒肥入射泥浆所形成的深穴中,待测深杆底部与颗粒肥接触并稳定后标记测深杆相对标尺的点位,用直尺测量 2 个点位距离,该距离减去颗粒肥半径即为颗粒肥射肥深度。试验结束后调整台架位置进行相同试验,并重复试验 6 次。

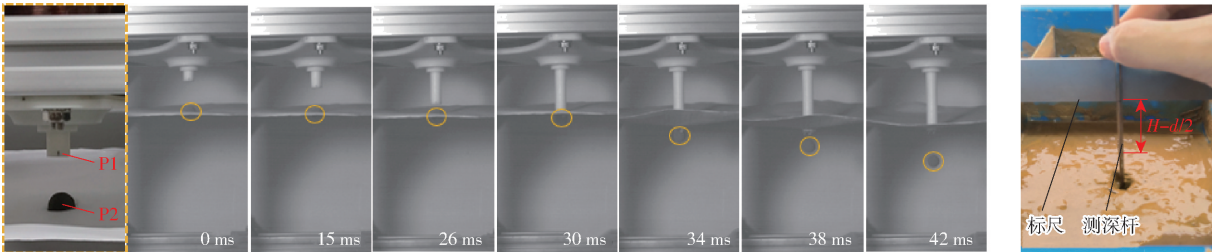


图 10 射肥速度及深度测量

Fig. 10 Measurement of fertilizer injection velocity and depth

4.1.3 试验结果与分析

实测励磁线圈电阻为 $5.1\ \Omega$,监测电阻阻值 $0.1\ \Omega$,因此直流电源电压为 $30.02\ \text{V}$,励磁线圈两端电流变化应为 $51V(t)$,测量结果如图 11a 所示,其中加速阶段仿真与试验撞针速度结果如图 11b 所示。由图 11 可知,撞针机构运动加速趋势基本与仿真结果保持一致。仿真撞针速度为 $3.24\ \text{m/s}$,计算得理论入射速度为 $6.4\ \text{m/s}$,实际碰撞过程存在一定能量损失,颗粒肥实际入射速度相较于理论入射速度偏小。由表 8 可知,实测射肥深度与理论射肥深度最大误差为 6.19% ,高速侵彻模型在射肥作业中具有良好的适用性。

4.2 射肥装置性能试验

4.2.1 性能试验材料

如图 12 所示,采用长度 $1.5\ \text{m}$ 、宽度 $30\ \text{cm}$ 、深度 $18\ \text{cm}$ 的土槽盛放试验泥浆,土壤制备流程与射肥验证试验制土流程一致,制备好的土壤放置于传送带上,电磁脉冲射肥装置固定在重力补偿装置正上方,射肥装置所需脉冲电源由鼎阳 SDG2042X 型

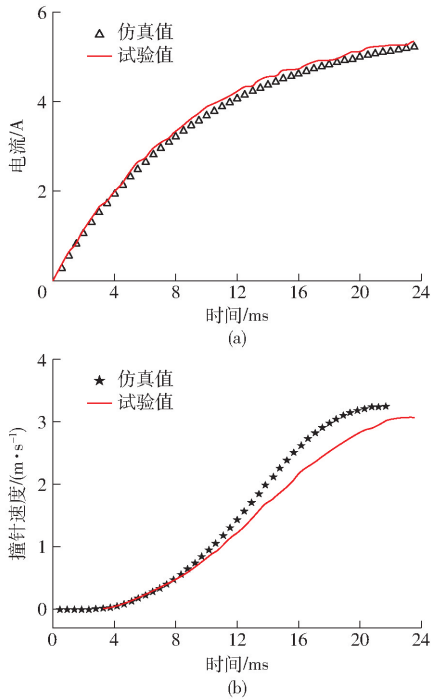


图 11 仿真实验验证结果

Fig. 11 Results of simulation validation test

表 8 验证试验结果

Tab. 8 Results of validation tests

参数	测量组号					
	1	2	3	4	5	6
实测撞针速度/(m·s ⁻¹)	3.07	2.97	2.93	2.9	3.02	2.97
实测入射速度/(m·s ⁻¹)	5.37	5.11	5.24	5.03	5.17	4.95
理论射肥深度/cm	4.63	4.52	4.58	4.49	4.55	4.46
实测射肥深度/cm	4.4	4.6	4.7	4.4	4.8	4.2
相对误差/%	5.23	1.74	2.55	2.05	5.21	6.19



图 12 射肥装置性能试验

Fig. 12 Performance test of fertilizer injection device

1. 土槽 2. 导肥管 3. 排肥器 4. 肥箱 5. 射肥装置 6. 重力补偿装置 7. 信号发生器 8. 功率放大器 9. 传送带

信号发生器和功率放大器组成。

4.2.2 试验方法

前期研究表明,当排肥装置前进速度 0.3 m/s、排肥轮直径 200 mm、型孔数 10 个时排肥效果最佳,性能试验时射肥装置固定,调节传送带线速度为 0.3 m/s 模拟射肥装置前进速度,连接射肥装置供电电路,信号发生器输出方波脉宽 466 ms,占空比 5.15%,经功率放大器后输出脉冲电压峰值 29.4 V。打开信号发生器、传送带以及排肥器驱动电机开关,排肥轮转动将肥箱内颗粒肥单粒输送至重力补偿装置内,加速后撞针机构冲击颗粒肥入射泥浆。水稻种植要求株距 14 cm,所用土槽长度 1.5 m,单次试验可获得 10 组数据,射肥深度测量方法与验证试验一致,试验结束后将已入射的颗粒肥剔除并用微型搅拌机对泥浆进行搅拌还原,重复试验 10 次。参照 NY/T 1003—2006《施肥机械质量评价技术规范》和 NY/T 1143—2006《播种机质量评价技术规范》,射肥装置作业效果指标计算式为

$$\left\{ \begin{aligned} \overline{H} &= \frac{\sum_{i=1}^k H_i}{k} \\ V_H &= \frac{S_H}{\overline{H}} \times 100\% \\ S_H &= \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^k (H_i - \overline{H})^2}{k - 1}} \end{aligned} \right. \quad (13)$$

式中 $\overline{H}$ ——射肥深度平均值,cm

k ——单次试验射肥数量
 S_H ——射肥深度标准差,cm
 V_H ——射肥深度变异系数,%

4.2.3 性能试验结果与分析

性能试验效果如图 13 所示,性能试验中排肥器排出肥料 89 粒,充入射肥装置中的颗粒肥精准完成射肥。射肥深度测量结果如表 9 所示,射肥深度在 4~6 cm 间的合格数为 81 粒,不计空射粒数射肥深度合格率为 91.01%,大于深度合格率最小值 80%,射肥深度均值为 4.48~5.14 cm,射肥深度变异系数为 7.78%~17.61%,满足射肥作业深度及稳定性要求。



图 13 性能试验效果

Fig. 13 Effectiveness of performance test operations

表 9 射肥深度测量结果

Tab. 9 Fertilizer injection depth measurement results

试验序号	合格数/个	均值/cm	标准差/cm	变异系数/%
1	9	5.14	0.40	7.78
2	7	4.75	0.73	15.37
3	8	4.86	0.80	16.46
4	8	5.01	0.72	14.37
5	9	5.09	0.45	9.04
6	10	4.94	0.58	11.74
7	6	4.77	0.84	17.61
8	7	5.14	0.70	13.62
9	9	4.82	0.81	16.80
10	8	4.48	0.46	10.27

5 结论

(1)结合侧深点施肥农艺要求提出了电磁脉冲式水稻侧深射肥装置,通过射肥装置工作过程分析探明了射肥装置对射肥深度的影响因素,主要为动磁铁、定磁铁、励磁线圈半径、长度等结构参数,结合吸附临界条件确定了关键结构参数取值范围,通过撞针机构运动临界条件确定了此范围内励磁线圈最小输入功率。

(2)Plackett - Burman 仿真试验结果表明励磁线圈半径和定磁铁长度对射肥深度影响不显著;Box - Behnken 试验结果表明对射肥深度影响由大到小为动磁铁长度、动磁铁半径、定磁铁半径、励磁线圈长度,建立了射肥装置结构参数与射肥深度间的

二次回归模型,通过二次响应面分析了主影响因素改变射肥深度的可能原因,得到了最优射肥深度的结构参数组合。

(3) 基于最优的结构参数组合进行了射肥验证试验,试验结果表明撞针机构冲击速度与仿真基本

一致,仿真模型较为准确性,射肥深度测量结果验证了高速侵彻模型在低速射肥中的适用性。射肥装置性能试验结果表明,连续作业时射肥深度合格率达 91.01%,射肥深度变异系数符合标准要求,射肥装置性能良好。

参 考 文 献

[1] Wang Jinfeng, Wang Zhentao, Weng Wuxiong, et al. Development status and trends in side-deep fertilization of rice[J]. *Renewable Agriculture and Food Systems*,2022,37:550–575.

[2] 潘圣刚,莫钊文,罗锡文,等. 机械同步深施肥对水稻群体质量及产量的影响[J]. *华中农业大学学报*,2013,32(2):1–5. Pan Shenggang, Mo Zhaowen, Luo Xiwen, et al. Effects of deeply mechanized fertilizer application on the quality and grain yield of direct seedling rice[J]. *Journal of Huazhong Agricultural University*,2013,32(2):1–5. (in Chinese)

[3] 王金峰,尚文虎,翁武雄,等. 圆盘顶出式水田侧深施肥装置设计与试验[J]. *农业机械学报*,2021,52(6):62–72. Wang Jinfeng, Shang Wenhui, Weng Wuxiong, et al. Design and experiment of disc ejection type paddy field side deep fertilization device[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2021,52(6):62–72. (in Chinese)

[4] 王金峰,刘源峰,翁武雄,等. 滑槽回转式水田侧深施肥装置设计与试验[J]. *农业机械学报*,2022,53(10):76–85. Wang Jinfeng, Liu Yuanfeng, Weng Wuxiong, et al. Design and experiment of chute rotary side deep fertilizing device in paddy field[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2022,53(10):76–85. (in Chinese)

[5] 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)

[6] 徐文智,袁全春,曾锦,等. 果园四头倾斜螺旋式精准排肥器设计与试验[J]. *农业机械学报*,2024,55(增刊2):30–40. Xu Wenzhi, Yuan Quanchun, Zeng Jin, et al. Design and experiment of four-head inclined spiral precision fertilizer dischargers in orchard[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*,2024,55(S2):30–40. (in Chinese)

[7] 徐征鑫,李贵蓉,王超,等. 玉米大垄双行气力集排式追肥装置设计与试验[J]. *农业机械学报*,2025,56(4):52–60. XU Zhengxin, LI Guirong, WANG Chao, et al. Design and experiment of pneumatic centralized fertilizer application device for maize large ridge double row planting[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2025,56(4):52–60. (in Chinese)

[8] 徐涛. 圆盘气送式水稻侧深施肥装置的设计与试验[D]. 武汉:华中农业大学,2024. Xu Tao. Design and experiment of disc air-delivery type rice side-deep fertilization device[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2024. (in Chinese)

[9] 徐红梅,赵亚兵,李中鑫,等. 风送式水稻侧深施肥装置的设计与试验[J]. *华中农业大学学报*,2025,44(1):276–287. Xu Hongmei, Zhao Yabing, Li Zhongxin, et al. Design and experiment of wind-delivered rice side-deep fertilization device[J]. *Journal of Huazhong Agricultural University*, 2025,44(1):276–287. (in Chinese)

[10] Zha Xiantao, Zhang Guozhong, Zhang Shijie, et al. Design and experiment of centralized pneumatic deep precisionertilization device for rice transplanter[J]. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*,2024,17(2):14–26.

[11] 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 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)

[12] Zeng S, Wei S, Liao M, et al. Design and experiments of the airflow type fertilizer application monitoring system for rice direct seeders[J]. *Transactions of the CSAE*, 2022, 38(17):22–30.

[13] 刘路. 水稻专用超大颗粒控释尿素的研制[D]. 泰安:山东农业大学,2020. Liu Lu. Development of large tablet controlled-release urea for rice[D]. Taian:Shandong Agricultural University,2020. (in Chinese)

[14] 李红宇,李逸,赵海成,等. 点深施肥对寒地水稻产量品质及氮肥利用率的影响[J]. *华北农学报*,2021,36(1):159–168. Li Hongyu, Li Yi, Zhao Haicheng, et al. Effects of point deep fertilization on yield, quality and nitrogen utilization of rice in cold region[J]. *Aoriculturae Boreali-Sinica*,2021,36(1):159–168. (in Chinese)

[15] Wohab M A, Islam M S, Hoque M A, et al. Design and development of a urea super granule applicator for puddle rice field [J]. *Journal of Agricultural Engineering Technology*, 2009,37:57–62.

[16] Paul S, Rahman M A, Nath B C, et al. Design and development of a prilled urea applicator[J]. *Agricultural Sciences*, 2021, 12(5):530–548.

[17] Hossen M A, Huda M D, Islam M S, et al. Design and development of a manually operated urea supper granule (USG) applicator[J]. Agricultural Mechanization in Asia,2013, 44(2): 85 – 91.

[18] 辛明金,张曼,朱仰昆,等. 超大颗粒肥水田气力深施加速器设计及参数优化[J]. 农业工程学报,2024,40(8):43 – 52.
Xin Mingjin, Zhang Man, Zhu Yangkun, et al. Design and parameter optimization of the accelerator for pneumatic deep application of super-large fertilizer granule in paddy field[J]. Transactions of the CSAE, 2024,40(8):43 – 52. (in Chinese)

[19] 李永磊,徐泽昕,万里鹏程,等. 种子清选机电磁变频激振清筛装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2023,54(7):123 – 133.
Li Yonglei, Xu Zexin, Wan Lipengcheng, et al. Design and test of electromagnetic variable frequency excitation sieve-cleaning device of seed cleaner[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(7): 123 – 133. (in Chinese)

[20] Jia Na, Li Guangqiu, Hu Anguo, et al. Design and experimental research of a portable walnut harvester based on electromagnetic excitation technology[J]. Inmateh-Agricultural Engineering, 2024,74(3): 345 – 357.

[21] 李思语,李臻,何志祝,等. 基于印制绕组的电磁式自供电拖拉机轮速传感器研究[J]. 农业机械学报,2023,54(增刊1):411 – 418.
Li Siyu, Li Zhen, He Zhizhu, et al. Design of electromagnetic self-powered tractor wheel speed sensor based on printed winding[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2023,54(S1):411 – 418. (in Chinese)

[22] Robertson W,Cazzolato B,Zander A, et al. A simplified force equation for coaxial cylindrical magnets and thin coils[J]. IEEE Transactions on Magnetics,2011,47(8):2045 – 2049.

[23] Robertson W, Cazzolato B, Zander A, et al. Axial force between a thick coil and a cylindrical permanent magnet: optimizing the geometry of an electromagnetic actuator[J]. IEEE Transactions on Magnetics,2012, 48(9):2479 – 2487.

[24] Young C W. Depth prediction for earth-penetrating projectiles[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 1969,95(3):803 – 818.

[25] Savvateev A F, Budin A V, Kolikov V A. High-speed penetration into sand[J]. International Journal of Impact Engineering, 2001,26(1/10):675 – 681.

[26] Wang Jinwu, Li Shuwei, Zhang Zhao, et al. Design and experiment of electrical drive side deep hill-drop fertilization system for precision rice hill-direct-seeding machine[J]. Transactions of the CSAE, 2018,34(8):43 – 54.

[27] 曹琪,王皓,余觉. 基于电磁变刚度的力控制装置研究[J]. 机械设计与研究,2020,36(3):170 – 175,181.
Cao Qi, Wang Hao, Yu Jue. Research on the force control device based on electromagnetic variable stiffness principle[J]. Machine Design and Research,2020,36(3):170 – 175,181. (in Chinese)

[28] 鲁植雄,姬长英,潘君拯. 据机械组成和含水量预测水田土壤粘附力[J]. 南京农业大学学报,1999,22(2):114 – 116.
Lu Zhixiong, Ji Changying, Pan Junzheng. Prediction of paddy soil adhesion to steel based on mechanical composition and water content[J]. Journal of Nanjing Agricultural University,1999,22(2):114 – 116. (in Chinese)

[29] 姬长英,潘君拯. 水田土壤强度的模糊预测探索[J]. 农业机械学报,1999,30(2):8 – 12.
Ji Changying, Pan Junzheng. Fuzzy prediction of paddy soil strength[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,1999,30(2):8 – 12. (in Chinese)

[30] 周浩. 激光控制水田精准平地打浆关键技术研究[D]. 广州:华南农业大学,2019.
Zhou Hao. Study on key technologies of laser-controlled paddy field levelling-beater[D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2019. (in Chinese)