网络出版时间:2026-02-04 DOI:10.13207/j.jnwafu.2026.08.018

型孔间歇式水稻侧深施肥装置的设计与试验

李瑞祥,于顺吉,董晓威,薛金沂,于紫涵
(黑龙江八一农垦大学 工程学院,黑龙江 大庆 163319)

[摘 要] 【目的】设计一种满足精量控制要求的型孔间歇式水稻侧深施肥装置,为提高肥料利用率、降低水稻种植成本提供技术支持。【方法】根据水稻侧深施肥的农艺需求,结合插秧机结构空间限制,确定装置的关键作业参数和结构参数;通过对施肥装置工作过程的理论分析,明确排肥效果的主要影响因素。为实现高精度排肥控制,构建模糊PID控制算法,并采用MATLAB软件进行仿真验证;通过台架试验分析机具前进速度、型孔数量与入肥口尺寸3个参数对施肥位置合格率与排肥变异系数的影响;利用Design-Expert软件进行多因素交互作用分析,优化各参数的最佳组合。【结果】理论分析表明,排肥效果主要受型孔转盘转速ω与肥料颗粒至圆心距离L的影响。仿真分析表明,相较于传统PID控制,模糊PID控制将调节时间由0.287 s缩短至0.076 s,优化幅度达73%;同时,超调量由11.64%降低至3.86%,优化幅度达67%;台架试验结果显示,在前进速度为0.44 m/s、入肥口尺寸为729 mm^2、型孔数量为6的组合条件下,施肥位置合格率达95.09%,排肥变异系数为8.59%。【结论】所设计的型孔间歇式侧深施肥装置与模糊PID控制系统配套应用,可有效提升水稻施肥作业的精准性与稳定性,能满足水稻间歇式侧深施肥的农艺需求。

[关键词] 水稻;间歇式侧深施肥;排肥效果;模糊PID控制
[中图分类号] S244.21;S511.062 [文献标志码] A [文章编号] 1671-9387(2026)08-0170-11

Design and experiment of an orifice-type intermittent side-deep fertilization device for rice

LI Ruixiang, YU Shunji, DONG Xiaowei, XUE Jinyi, YU Zihan
(*College of Engineering, Heilongjiang Bayi Agricultural University, Daqing, Heilongjiang* 163319, *China*)

Abstract: 【Objective】 The study aims to design an orifice-type intermittent side-deep fertilization device for rice that meets the requirements of precise control, to provide technical support for improving fertilizer utilization and reduce cultivation costs. 【Method】 Based on the agronomic requirements for rice side-deep fertilization and the structural constraints of rice transplanters, the key operational and structural parameters of the device were determined. A theoretical analysis of the device's working process was conducted to identify the main factors influencing discharge performance. To achieve high-precision discharge control, a fuzzy PID control algorithm was developed and verified via MATLAB simulation. Bench tests were conducted to evaluate the effects of travel speed, orifice quantity, and inlet area on the qualification rate of fertilizer placement and the coefficient of variation of discharge. A multi-factor interaction analysis using Design-Expert software was performed to optimize parameter combination. 【Result】 Theoretical analysis revealed that the discharge performance was mainly affected by the rotary speed ω of the orifice disk and the radial distance L from the fertilizer particle to the disk center. Simulation results showed that, compared with conventional PID control, the fuzzy PID controller re-

[收稿日期] 2025-06-27 [修回日期] 2025-08-22
[基金项目] 国家重点研发计划项目(2024YFD2300104)
[作者简介] 李瑞祥(2000—),男,河南周口人,硕士,主要从事农业生产全程机械化技术与装备研究。E-mail:luckli0913@163.com
[通信作者] 董晓威(1979—),男,黑龙江拜泉人,教授,博士,硕士生导师,主要从事农业生产全程机械化技术与装备研究。E-mail:dxwai@byau.edu.cn

duced the settling time from 0.287 s to 0.076 s (a 73% improvement), enabling faster system response. The overshoot decreased from 11.64% to 3.86% (a 67% reduction), indicating higher control precision. Bench tests demonstrated that under the optimal combination of a travel speed of 0.44 m/s, an inlet area of 729 mm^2, and 6 orifices, the qualified rate of fertilizer placement reached 95.09%, and the coefficient of variation was 8.59%.【Conclusion】The integration of the proposed orifice-type intermittent side-deep fertilization device with the fuzzy PID control improves the precision and stability of rice fertilization operation, effectively meeting agronomic requirements for intermittent side-deep fertilization in rice.

Key words: rice; intermittent side-deep fertilization; fertilizer discharge effect; fuzzy PID control

作为我国粮食安全的重要支柱作物，水稻在国家粮食生产体系中占据着关键地位。长期监测数据显示，近年来我国水稻年产量始终稳定在2 000亿kg以上，约占我国全年粮食总产量的1/3[1]。然而，水稻种植正面临生产成本持续上升的挑战。一方面，由于部分耕地地力下降，为维持目标产量需增加施肥量，从而推高了投入成本；另一方面，部分地区水稻种植机械化水平较低，仍以人工作业为主，劳动效率偏低[2]。在此背景下，提高化肥利用率被认为是保障水稻高产与稳产的直接而有效的途径。随着“化肥使用量零增长行动”的持续推进，全国农用化肥折纯量呈逐年下降趋势[3]，施肥量的减少导致2023年水稻全年产量较往年降低了0.9%[4]。因此，为确保水稻产业的健康、可持续发展，就必须针对当前化肥使用过程中存在的低利用率问题，提出切实可行的解决方案。

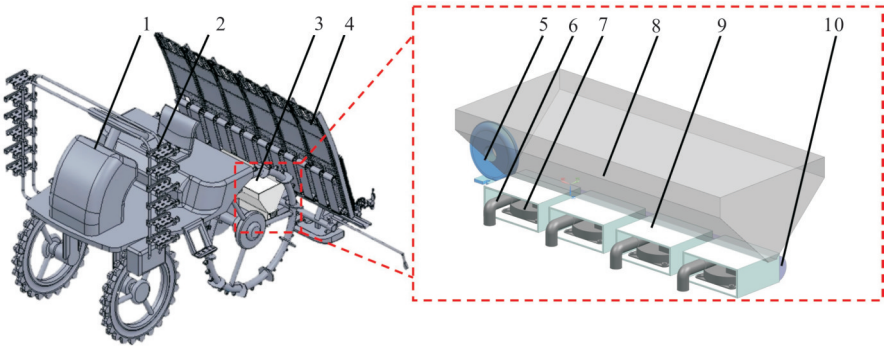
过去数十年间，“多施肥、多产粮”的经验判断在生产实践中占据主导地位，导致化肥投入普遍偏高[5-6]。为提升肥料利用率遏制过量施肥的现象，国内学者围绕水田专用施肥装备开展了大量研究[7]。有研究表明，相较于表面撒施或沟施，侧深施肥通过覆土将肥料定位于根域附近，可显著降低肥料养分的流失和挥发[8-9]。在施肥装置优化方面，王金峰等[10-11]通过运动学与动力学分析，优化了螺旋槽轮与回转滑槽式侧深施肥器的结构，显著改善了施肥均匀性并减少堵塞风险；梁方等[12]通过建立外槽轮排种器参数模型，系统分析了关键参数对控制精度的影响，并开发了自动播量控制系统；王金武等[13]针对传统排肥器施肥不均、控制精度低的问题，设计了一种电驱式外槽轮排肥器，其通过控制系统控制电机转速，实现间歇性供肥。当前穴施与变量施肥研究仍以外槽轮式结构为主，虽然在施肥精度方面有一定优势，但在高湿或泥泞环境下，仍易出现肥粒破碎、漏肥与泥水黏附等问题[14-15]。为克服这些缺陷，袁文胜等[16]设计了勺轮式排肥器，通过勺轮、盛肥盘及隔板等部件的配合迫使排出的颗粒肥料成穴，该方法也为研究间歇施肥提供了新的思路；陈长海等[17]和董晓威等[18]对螺旋式施肥机进行了深入研究，通过系统控制排肥结构的规律性运动，实现了精准的穴施作业。尽管相关机械装置已广泛应用于水稻生产，但仍存在结构复杂、适应性差等不足，还有待进一步优化与完善。

针对上述问题，本研究提出一种型孔与滑块配合的间歇式水稻侧深施肥装置，通过顶销动态调控排肥时间，结合风送系统实现肥料的精准投放与颗粒完整性保护。为确保装置正常运行，开展了关键部件的理论建模与参数设计，并通过台架试验验证施肥性能。基于试验数据，设计正交试验分析影响因素并对作业参数和结构参数进行优化，旨在解决肥料堵塞与施肥不均问题，进而为水田的高效施肥提供新的方案和设备选择。

1　型孔间歇式水稻侧深施肥装置的结构与工作原理

型孔间歇式水稻侧深施肥装置主要由秧箱、肥箱、型孔式施肥装置（型孔式排肥器、电机、风送输肥管）、秧盘放置架、控制台、风机等组成，具体结构如图1所示。其中型孔式排肥器安装在插秧机肥箱下方，采用独立的支架作为主体。肥箱固定在支架上，型孔式排肥器通过螺栓安装在支架底部并与肥箱下接口连接，风机安装在插秧机侧面通过风管与型孔式排肥器相连，这样就可以通过横向累加支架数量以适应不同的插秧机。

排肥装置的工作原理为：电机驱动型孔转盘转动，肥料在孔内滑块的推动下进入风送输肥管，并借助气流完成肥料的投放。此外，通过精确控制电机转速，可实现排肥间隔的动态调节，以适应不同插秧机的前进速度，从而提升排肥作业的精度。并且该结构设计可适应不同类型的肥料，避免肥料在排肥器内堆积，从而保障施肥作业的稳定性。



1. 控制台;2. 秧盘放置架;3. 施肥部分;4. 秧箱;5. 风机;6. 风送输肥管;7. 型孔式施肥装置;8. 肥箱;9. 支架;10. 风管。
1. Control console;2. Seedling tray rack;3. Fertilization unit;4. Seedling box;5. Fan;6. Air-assisted fertilizer delivery pipe;
7. Orifice-type fertilizer application device;8. Fertilizer box;9. Bracket;10. Air duct.

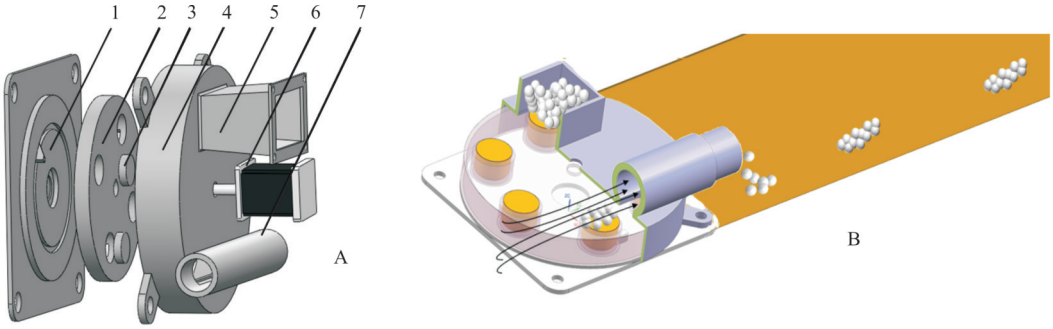
图 1 型孔间歇式水稻侧深施肥装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the perforated orifice-type intermittent side-deep fertilization device for rice

2 型孔式施肥装置的设计

2.1 型孔式施肥装置的基本结构及工作原理

型孔式施肥装置主要由底板、滑块、型孔转盘、上壳体、风送输肥管等构成。底板和上壳体通过螺栓连接安装在支架上,电机的转轴通过键销与型孔转盘连接,风管出风口与风送输肥管相连。具体构成如图 2-A 所示。



A. 排肥器分解图;B. 排肥工作原理。1. 底板;2. 型孔转盘;3. 滑块;4. 上壳体;5. 入肥口;6. 电机;7. 风送输肥管。
A.Exploded view of the fertilizer dispenser;B.Working principle of fertilizer dispensing.1.Base plate;2.Orifice disc;3.Slider;
4.Upper housing;5.Fertilizer inlet;6.Motor;7.Air-assisted fertilizer delivery pipe.

图 2 型孔式施肥装置的结构与工作原理

Fig.2 Structure and working principle of the orifice-type fertilization device

型孔式施肥装置的工作流程可划分为充肥、清肥、携肥和排肥 4 个阶段,如图 2-B 所示。在工作时装置底板和上壳体通过螺栓固定在插秧机上,型孔转盘上方安装有肥料箱,在初始状态下,滑块与型孔上半部分构成半密闭空间。电机驱动型孔转盘旋转,当型孔运行至肥箱下方时,肥料在重力作用下填充至型孔内部。当秧爪移动至预定坐标位置时,电机驱动型孔转盘旋转至排肥口对应位置。此时,滑块与顶销结合将型孔内肥料推出,被推出的肥料随即由风机产生的气流输送至排肥管,在重力与气流的协同作用下,实现定点施肥。

2.2 型孔转盘中型孔的参数设计

初步分析表明,对于型孔转盘,型孔尺寸是影响单次肥料排出质量的关键因素,而型孔数量与型孔转盘直径则共同决定了施肥的间隔与频率,从而对施肥均匀性和施肥量控制精度产生显著影响。为保证施肥量的精准,对型孔转盘的型孔参数和转盘直径参数进行分析。根据相关研究成果[19],本研究确定采用云天化公司生产的均质复合肥,施肥量为每穴 1.3 g。为减少使用中的损耗导致施肥不足,设计每穴的施肥量为 2 g。

排肥器的单次排肥量 q[20]是影响侧深施肥装置性能的核心参数,直接决定了作业过程中肥料的定量精度与均匀性,是评价装置性能的重要指标。q 的计算公式为:

$$\begin{cases} q = \sigma \rho h S, \\ S = \dfrac{\pi D^2}{4}。 \end{cases} \tag{1}$$

式中：q为排肥器单次排肥量，g；σ为肥料颗粒填充系数；ρ为肥料颗粒密度，g/cm^3；h为肥槽高度（型孔高度减去滑块高度），mm；S为肥槽横截面面积，mm^2；D为型孔直径，mm。

本研究设计的单次排肥量q为 2 g。对肥料进行物理特性测定得到肥料的粒径分布为 3.2～4.3 mm；ρ为 1 546 g/cm^3；肥料颗粒填充系数σ为 0.8；堆积角为 31.7°；肥料颗粒与装置的摩擦系数为 0.43。基于上述肥料物理参数，确定型孔直径D为 20 mm，肥槽高度h为 5 mm。由于排肥器底盘承担着整机的运动，为保障转盘平稳转动，减小滑块与底板间摩擦，降低滑块与顶销接触时的碰撞冲击，在滑块运动路径下方开方型槽，以此减少工作时的摩擦。为保障施肥过程完整，顶销高度设定为 5 mm。

2.3　型孔式施肥装置排肥过程分析

在排肥过程的初期，肥料颗粒依靠自重通过入肥口落入肥槽。由于此时肥料颗粒与型孔转盘具有较高的相对速度，容易涌向肥槽一侧，从而对充肥均匀性产生不利影响，因此对颗粒相对速度的影响因素进行分析。为此，从整体肥料中任意选取肥料颗粒i，并以i的质心为原点建立参考坐标系。排肥过程中i在肥槽内随型孔转盘一起转动，此时i在肥槽内的运动可分解为沿法线方向的匀速直线运动和沿切线方向随型孔转盘同步旋转的匀速圆周运动，其运动过程的分析如图 3 所示。

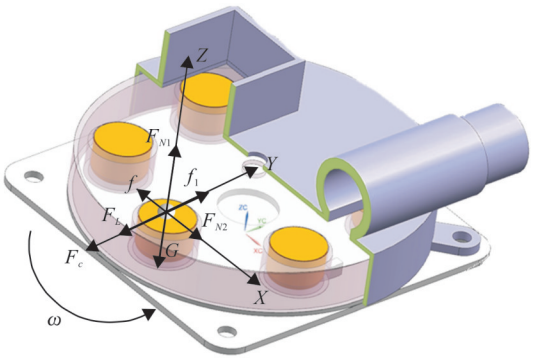


图 3　肥料颗粒在肥槽内的运动分析

Fig. 3　Analysis of the movement of fertilizer particles in the fertilizer tank

分析图 3 可知，i的受力关系式可表示为：

$$\begin{cases} F_M = G + F_{N1} + F_{N2} + F_L + F_c + f_1 + f, \\ F_c = 2m\omega v_i, \\ F_L = m\omega_i{}^2 L。 \end{cases} \tag{2}$$

式中：F_M为肥料颗粒所受合力，N；G为肥料颗粒所受重力，N；F_{N1}为肥料颗粒在垂直方向的支撑力，N；F_{N2}为肥料颗粒在水平方向的支撑力，N；F_L为肥料颗粒所受离心力，N；F_c为科氏力，N；f_1为肥料颗粒所受沿X方向摩擦力，N；f为肥料颗粒所受到的沿Y方向摩擦力，N；m为肥料颗粒的质量，g；ω为型孔转盘角速度，rad/min；ω_i为肥料颗粒与型孔转盘的相对角速度，rad/min；v_i为肥料颗粒与型孔转盘的相对速度，m/s；L为肥料颗粒与型孔转盘圆心之间的距离，mm。

其中ω的大小又与水稻的种植参数相关，有：

$$\begin{cases} t = \dfrac{L_y}{v}, \\ \omega = \dfrac{\pi}{nt}。 \end{cases} \tag{3}$$

式中：t为施肥间隔时间，s；L_y为秧苗株距，mm；v为机具前进速度，m/s；n为型孔的数量。

依据肥料颗粒受力情况建立法向和切向力学平衡方程，进一步推导得到肥料颗粒相对运动的法向加速度a_n和切向加速度a_τ的计算公式为：

$$\begin{cases} a_n = \dfrac{f_1 - 2m\omega v - m\omega_i{}^2 L}{m}, \\ a_\tau = \dfrac{\lambda F_N}{m}。 \end{cases} \tag{4}$$

式中：λ为肥料颗粒与型孔转盘之间的摩擦系数。

在肥料刚进入肥槽时，由于其仅具有向下的初始速度，肥料颗粒在落入肥槽后主要沿切向方向发生相对滑动运动。即：

$$\begin{cases} a_n = 0; \\ a_\tau = \dfrac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}t} = \dfrac{\mathrm{d}^2 s}{\mathrm{d}t^2}。 \end{cases} \tag{5}$$

式中：s为肥料相对滑动距离，mm。

求解式(5)可得肥料颗粒与型孔转盘的相对速度Δv为：

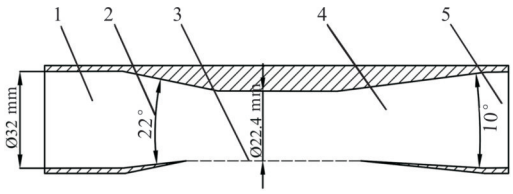
$$\Delta v = \mathrm{e}^{-2t\lambda\omega}\left[\omega L + \frac{g\left(\mathrm{e}^{2t\lambda\omega}\right)}{2\omega}\right]。 \tag{6}$$

由此可知，型孔转盘转速ω、肥料颗粒与型孔转盘圆心之间的距离L是影响肥料颗粒充肥效果的关键因素。为使肥料颗粒的法向运动状态不发生改变，即a_n=0，又已知肥料颗粒与装置的摩擦系数λ为 0.43。根据机具工作时的前进速度v，求得型孔转盘角速度ω为 60～120 rad/min。由此确定肥料颗粒到型孔转盘中心的距离L为 90 mm，并以此确定型孔转盘直径D为 120 mm。

2.4　型孔式施肥装置风送输肥管的设计

为保证肥料在排肥管路输送过程中的流畅性和稳定性，需使肥料颗粒与空气保持一个适当的气

固混合浓度比[21]。鉴于施肥风机属于低压气源系统,本研究将气固混合浓度比取为 1.2[22]。风送输肥管采用文丘里管结构设计(图 4),管路中存在多处高低起伏,因此合理确定输送气流速度尤为关键。具体而言,若输送气流速度过低,肥料颗粒易在局部管段发生沉积和堆积,导致管路堵塞,从而降低输送效率;相反,若输送气流速度过高,则会显著增加肥料颗粒与管道内壁的碰撞与摩擦,不仅加速管壁磨损,还会造成肥料颗粒的破碎。因此,综合考虑输送效率、设备耐久性及肥料颗粒完整性,输送气流速度需控制在能够防止沉积和过度磨损之间的最优区间,以实现稳定高效的输送性能[23]。



1. 气流入口;2. 收缩段;3. 出肥口;4. 扩散段;5. 气流出口。

1. Air inlet; 2. Contraction section; 3. Fertilizer outlet; 4. Diffusion section; 5. Airflow outlet.

图 4 型孔式施肥装置的风送输肥管的结构

Fig. 4 Structure of air-assisted fertilizer delivery pipe in orifice-type fertilization device

空气流量(Q)与输送机构生产率(W)、输送气流速度(V^*)、肥料悬浮速度(V_L)的关系可分别表示为:

$$Q=\frac{W}{3.6\mu\gamma}, \tag{7}$$

$$V^*=\delta V_L。 \tag{8}$$

式中:Q 为空气流量,m^3/s,本研究取 Q 为 70.49 m^3/h;W 为输送机构生产率,t/h;γ 为空气容重;μ 为气固混合浓度比;V^*为输送气流速度,m/s;V_L为肥料悬浮速度,m/s;δ 为速度系数,一般 δ 取为 2。

通过悬浮试验测得 V_L为 11.26 m/s,输送气速 V^*为 22.52 m/s。输肥管路内径由空气消耗量和输送气速所决定,其内径 d_1可由下式求得:

$$d_1=\sqrt{\frac{4Q}{\pi V^*}}。 \tag{9}$$

计算得到 d_1为 33.3 mm,综合考虑工程选型及标准化要求,选用内径为 32 mm 的输肥管。进一步依据文丘里管设计方法,确定收缩角为 22°,扩散角为 10°,得到收缩端的内径 d_2为 22.4 mm[24]。

为分析多组风送输肥管结构在工作状态下的流动特性,采用 Fluent 软件对流场进行数值模拟,获取速度分布云图如图 5 所示。图 5 表明,空气在进入风送输肥管收缩段时速度明显增加,并在收缩处达到峰值,最高可达 64.5 m/s;随后在扩散段内速度逐渐降低。沿主管道流向可观察到输送气流速度从加速到减速的周期性分布,反映出各风送输肥管结构的独立加速效应[25]。

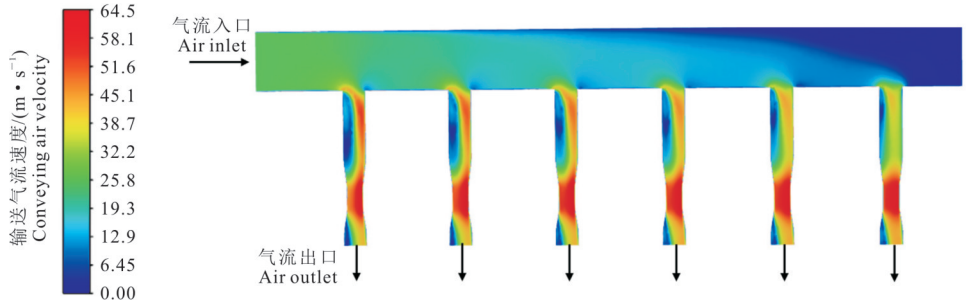


图 5 风送输肥管内部流场速度分布云图

Fig. 5 Velocity contour of the flow field inside the air-assisted fertilizer delivery pipe

3 施肥控制器的设计

基于以上影响因素分析可知,机具的前进速度 v 与型孔转盘的转速 ω 共同决定了施肥位置及施肥间距。然而,在实际作业过程中,前进速度易受作业环境与田间条件影响而产生波动,不易精确控制。因此,为提高施肥位置的精度,需要在作业前或作业过程中确定型孔转盘的转速。由于型孔转盘由驱动电机直接带动,其转速控制精度直接影响施肥精度,因此通过对驱动电机转速特性的研究与优化,建立电机转速与驱动电机输入信号间的映射关系,并通过闭环控制策略实现电机转速的快速响应与稳态精度,可有效提升施肥作业的空间精度。

3.1 模糊 PID 控制模型

为实现对电机转速的准确控制以提高施肥的准确度,采用模糊 PID 控制电机的调速,控制器结构如图 6 所示。该控制器以理论的电机转速 ω_1作为系统输入,并检测此时排肥器实际转速 ω_2,计算得到

转速误差 e 及其变化率 e_c。随后采用三角形隶属度函数对 e 和 e_c 进行模糊化处理，将精确量映射到语言变量论域。基于专家经验构建模糊规则库，并利用 Mamdani 推理机制生成 PID 参数调整量 ΔK_p、ΔK_i、ΔK_d 的模糊输出值。随后，通过解模糊化和查表法获得对应的 PID 参数调整量，并由 PID 控制器对电机转速进行调节，实现闭环控制[26]。

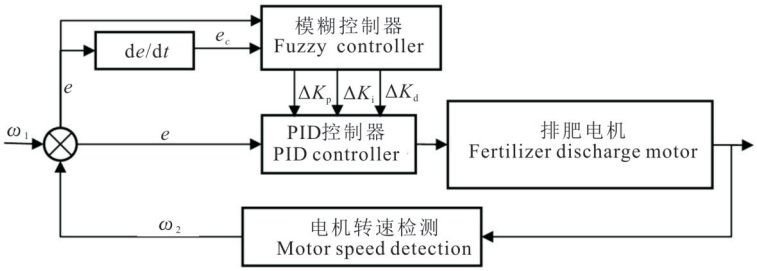


图 6　电机转速模糊控制器的结构

Fig. 6　Structure of the motor speed fuzzy controller

系统采用重心法进行去模糊处理，其表达式为：

$$z_o=\frac{\sum_{i=0}^{N}u_c(x_i)x_i}{\sum_{i=0}^{N}u_c(x_i)}。\tag{10}$$

式中：z_o 为模糊控制器输出量解模糊后的精确值；N 为求和的上限；i 为求和的下标变量；x_i 为模糊控制量论域内的值；$u_c(x_i)$ 为 x_i 的隶属度值。

3.2　系统仿真对比与分析

为验证控制算法在调控系统中的鲁棒性与抗干扰性能。使用 Matlab 软件分别搭建普通 PID 和模糊 PID 控制模型，通过调节控制模型和 PWM 脉冲信号占空比实现电机转速控制。最后以仿真时电机转速的阶跃信号作为评估控制算法鲁棒性与优越性的依据，并在 0.5 s 时刻加入外部扰动，测试系统抗干扰能力，得到电机转速阶跃信号响应值的变化曲线如图 7 所示。

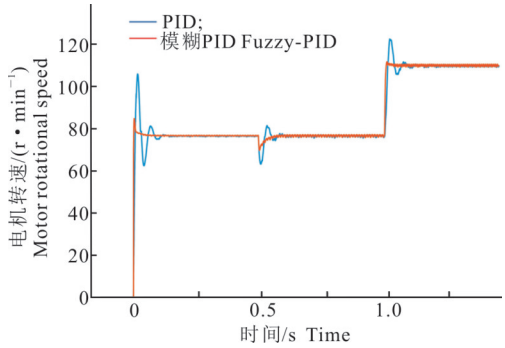


图 7　电机转速阶跃信号响应值变化曲线

Fig. 7　Response curve of the motor speed to a step input signal

分析图 7 可知，普通 PID 控制时的调节时间为 0.287 s，超调量为 11.64%；模糊 PID 控制时的调节时间为 0.076 s，超调量为 3.86%。与普通 PID 相比，模糊 PID 的调节时间和超调量分别减少了 73% 和 67%，表现出更优的响应速度与鲁棒性。综上所述，考虑到施肥调控系统在实际作业中易受外界扰动影响，而普通 PID 控制在抗干扰能力与动态响应方面存在不足，因此采用模糊 PID 控制算法更有助于提升系统的整体性能与稳定性。

4　台架试验

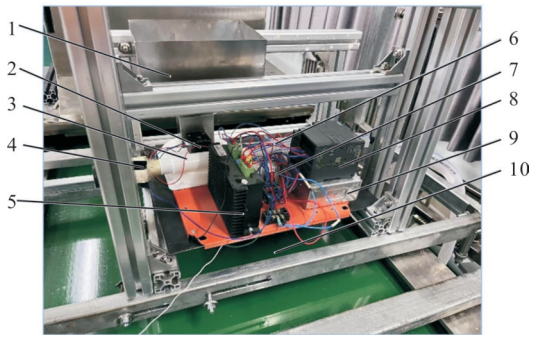
4.1　试验条件

依据 NY/T 1003－2006《施肥机械质量评价技术规范》开展试验数据测定。试验在黑龙江八一农垦大学高速水稻施肥性能实验室进行，试验台架部分如图 8 所示，试验用肥为‘云天化’牌均值复合肥，电子秤、卷尺等备用。试验过程中，将型孔式施肥装置安装于试验台架上，并通过设置传送带速度以模拟机具的前进速度，根据农艺要求将传送带速度调节范围设定为 0.3～0.6 m/s。同时，通过调节风机调速开关，使风速保持在 20 m/s，以确保试验条件的稳定性。

4.2　试验设计与方法

台架试验旨在测定施肥位置合格率和排肥变异系数。根据前期理论分析，施肥位置合格率主要受机具前进速度、型孔转盘转速及型孔数量的共同影响，其中机具前进速度决定肥料在传送带上的落点间距，型孔转盘转速与型孔数共同决定排肥频率与分布均匀性。此外，机具前进速度与型孔转盘转速存在关联性，两者共同作用于肥料的落点位置。鉴于机具前进速度不仅易于直接观测与测量，而且在实际作业中显著受到环境条件的影响，因而在试

验设计中选取机具前进速度作为研究对象。施肥稳定性的关键影响因素为型孔的充肥效率,而充肥效率又与入肥口尺寸直接相关,当入肥口尺寸较大时,型孔在转动过程中与肥料流的接触时间延长,从而提高了型孔的填充程度与充肥效率。相反,当入肥口尺寸较小时,肥料进入型孔的时间窗口缩短,导致型孔尚未充分填充即离开入肥口,最终造成充肥效率下降。因此本试验选取机具前进速度、型孔数量、入肥口尺寸为试验因素,以施肥位置合格率与排肥变异系数为响应指标,探究各因素及其交互作用对响应指标的影响规律。



1. 肥箱;2. 电机;3. 排肥器;4. 出肥管;5. 电机驱动器;6. 进风管;7. 开关;8. PLC控制器;9. 电源;10. 台架传送带。

1. Fertilizer box;2. Motor;3. Fertilizer dispenser;4. Fertilizer outlet pipe;5. Motor driver;6. Air inlet pipe;7. Switch;8. PLC controller;9. Power supply;10. Conveyor belt.

图8 型孔式施肥装置试验台架

Fig. 8 Test bench of the orifice-type fertilization device

施肥稳定性测试采用静态试验方法。将量杯置于排肥管出口处,连续收集10次排肥量作为1组,测定每组肥料质量,重复测定5组,并据此计算排肥变异系数V。施肥位置合格率Y的测定方法为:测量传送带上相邻肥料中心的距离,并与理论标准距离进行比较,以计算施肥位置合格率。其计算公式分别为:

$$\bar{x}=\frac{\sum_{n=1}^{N^*}x_n}{N^*}, \tag{11}$$

$$U=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N^*}(x_n-\bar{x})^2}{N^*-1}}, \tag{12}$$

$$V=\frac{U}{\bar{x}}\times 100\%, \tag{13}$$

$$Y=\frac{c}{N^*}\times 100\%。 \tag{14}$$

式中:$\bar{x}$为收集化肥的平均质量,g;x_n为每次收集的化肥质量,g;N^*为施肥总次数;U为标准差;V为排肥变异系数,%;Y为施肥位置合格率,%;c为施肥位置合格次数。

使用Design-Expert软件进行数据处理。以机具前进速度、型孔数量、入肥口尺寸作为试验因素,编码值分别为x_1、x_2、x_3。以施肥位置合格率(Y)与排肥变异系数(V)为响应指标,设计二次回归正交试验,因素编码表见表1,试验结果见表2。

表1 型孔式施肥装置试验参数和结构参数在二次回归正交试验中的因素水平编码表

Table 1 Factor level coding table of experimental and structural parameters of the orifice-type fertilization device in the quadratic regression orthogonal experiment

编码 Code	因素 Factor		
	机具前进速度(x_1)/(m·s^{-1}) Travel speed	型孔数量(x_2) Number of orifice	入肥口尺寸(x_3)/mm^2 Fertilizer inlet area
−1	0.30	4	400
0	0.45	6	625
1	0.60	8	900

表2 型孔式施肥装置作业参数和结构参数二次回归正交试验方案与结果

Table 2 Scheme and results of quadratic regression orthogonal experiment on operating and structural parameters of the orifice-type fertilization device

序号 Number	x_1	x_2	x_3	施肥位置合格率(Y)/% Qualification rate of fertilizer placement	排肥变异系数(V)/% Discharge variation coefficient	序号 Number	x_1	x_2	x_3	施肥位置合格率(Y)/% Qualification rate of fertilizer placement	排肥变异系数(V)/% Discharge variation coefficient
1	0.45	8	900	96.02	11.3	12	0.30	6	400	93.52	12.2
2	0.60	4	625	95.26	12.9	13	0.30	8	625	93.68	13.2
3	0.45	6	625	96.67	7.4	14	0.30	6	900	94.02	12.6
4	0.45	4	400	95.03	8.0	15	0.45	6	625	92.24	8.6
5	0.45	6	625	97.65	6.4	16	0.30	4	625	92.52	13.7
6	0.45	6	625	96.68	10.7	17	0.60	6	900	89.48	13.3

表 2（续） Table 2（continued）

序号 Number	x_1	x_2	x_3	施肥位置合格率（Y）/% Qualification rate of fertilizer placement	排肥变异系数（V）/% Discharge variation coefficient	序号 Number	x_1	x_2	x_3	施肥位置合格率（Y）/% Qualification rate of fertilizer placement	排肥变异系数（V）/% Discharge variation coefficient
7	0.45	4	900	95.21	13.2	18	0.45	6	625	92.52	7.3
8	0.45	6	625	94.79	10.2	19	0.45	8	400	88.71	14.6
9	0.45	6	625	96.35	9.8	20	0.60	6	400	82.63	13.0
10	0.45	6	625	96.35	10.2	21	0.45	6	625	96.60	8.6
11	0.60	8	625	88.26	14.6						

4.3　试验结果与分析

对型孔式施肥装置作业参数和结构参数，即机具前进速度（x_1）、型孔数量（x_2）、入肥口尺寸（x_3）的二次回归正交试验结果进行回归分析，得到施肥位置合格率 Y 和排肥变异系数 V 的二次回归方程分别为：

$$Y=95.54-2.26x_1-1.42x_2+1.86x_3-2.04x_1x_2+1.59x_1x_3+1.78x_2x_3-3.47x_1^2+0.36x_2^2-2.16x_2^3。\quad(15)$$

$$V=8.80+0.26x_1+0.73x_2+0.32x_3+0.55x_1x_2-0.03x_1x_3-2.21x_2x_3+2.90x_1^2+1.90x_2^2+1.07x_3^2。\quad(16)$$

对型孔式施肥装置排肥器的施肥位置合格率和排肥变异系数进行方差分析，结果见表 3。

表 3　型孔式施肥装置施肥位置合格率和排肥变异系数的方差分析

Table 3　Analysis of variance for the placement qualification rate and fertilizer discharge CV of the orifice-type fertilization device

方差来源 Source of variance	施肥位置合格率 Placement qualification rate					排肥变异系数 Discharge variation coefficient				
	平方和 Square sum	自由度 Degrees of freedom	F	P		平方和 Square sum	自由度 Degrees of freedom	F	P	
模型 Model	217.150	9	5.283	0.006 0	**	110.466	9	6.596	0.002 4	**
x_1	40.997	1	8.952	0.012 3	*	0.551	1	0.296	0.597 1	
x_2	16.102	1	3.516	0.087 5		4.351	1	2.338	0.154 4	
x_3	27.528	1	6.011	0.032 1	*	0.845	1	0.454	0.514 3	
x_1x_2	16.646	1	3.635	0.083 0		1.210	1	0.650	0.437 1	
x_1x_3	10.081	1	2.201	0.166 0		0.003	1	0.001	0.971 4	
x_2x_3	12.709	1	2.775	0.123 9		18.063	1	9.707	0.009 8	**
x_1^2	55.914	1	12.209	0.005 0	**	39.021	1	20.970	0.000 8	**
x_2^2	0.604	1	0.132	0.723 4		16.740	1	8.996	0.012 1	
x_3^2	21.611	1	4.719	0.052 6		5.351	1	2.876	0.118 0	
残差 Residuals	50.373	11				20.468	11			
失拟项 Lack of fit	20.336	3	1.805	0.224 1	不显著 Not significant	1.813	3	0.259	0.852 9	不显著 Not significant
误差 Error	30.037	8				18.656	8			
总和 Total	268.124	20				130.931	20			

注：** 表示影响极显著（$P<0.01$）；* 表示影响显著（$P<0.05$）。

Note：** indicates extremely significant effect（$P<0.01$）；* indicates significant effect（$P<0.05$）.

（1）施肥位置合格率。由表 3 可知，模型与因素 x_1^2 影响极显著（$P<0.01$），x_1、x_3 影响显著（$P<0.05$），而一次项 x_2 与交互项 x_1x_2、x_1x_3、x_2x_3 及二次项 x_2^2、x_3^2 影响不显著（$P>0.05$）。因此，将不显著的一次项、交互作用项和二次项的回归平方和自由度并入残差项，得到施肥位置合格率 Y 的回归方程为：

$$Y=95.54-2.26x_1-1.42x_2+1.86x_3-2.04x_1x_2-3.47x_1^2-2.16x_3^2。\quad(17)$$

其中，失拟性检验结果为 $P=0.224\ 1$（$P>0.05$），表明模型失拟性不显著，即该回归方程能够很好地反映施肥位置合格率与试验因素之间的关系。进一步分析可知，机具前进速度 x_1 与入肥口尺寸 x_3 在适宜范围内匹配时，可保证肥料落点的准确性，从而显著提高施肥位置的合格率。

（2）排肥变异系数。由表 3 可知，模型与因素 x_2x_3 以及二次项 x_1^2 对排肥变异系数 V 有极显著影响（$P<0.01$），而一次项 x_1、x_2、x_3 以及交互项 x_1x_2、x_1x_3

和二次项x_2^2、x_3^2对该指标影响不显著($P>0.05$)。同样,将不显著项并入残差项,可得到排肥变异系数V的回归方程为:

$$V=8.80-2.21x_2x_3+2.90x_1^2+1.90x_2^2+1.07x_3^2。\quad(18)$$

其中,失拟性检验结果为$P=0.852\ 9$($P>0.05$),说明模型失拟性不显著,能够较好地解释排肥变异系数与试验因素的关系。分析结果表明,型孔数量x_2与入肥口尺寸x_3的匹配直接影响肥料在排出过程中的均匀性。当型孔数量与入肥口尺寸不匹配时,易产生肥料流量波动,从而使排肥变异系数增大;适当调整这两者的配合,可有效提升排肥均匀性。

4.4 响应曲面分析

为直观分析机具前进速度x_1、型孔数量x_2和入肥口尺寸x_3的交互作用对施肥位置合格率和排肥变异系数的影响,通过Design-Expert软件绘制了机具前进速度、型孔数量、入肥口尺寸交互作用对施肥位置合格率和排肥变异系数影响的响应曲面如图9所示。

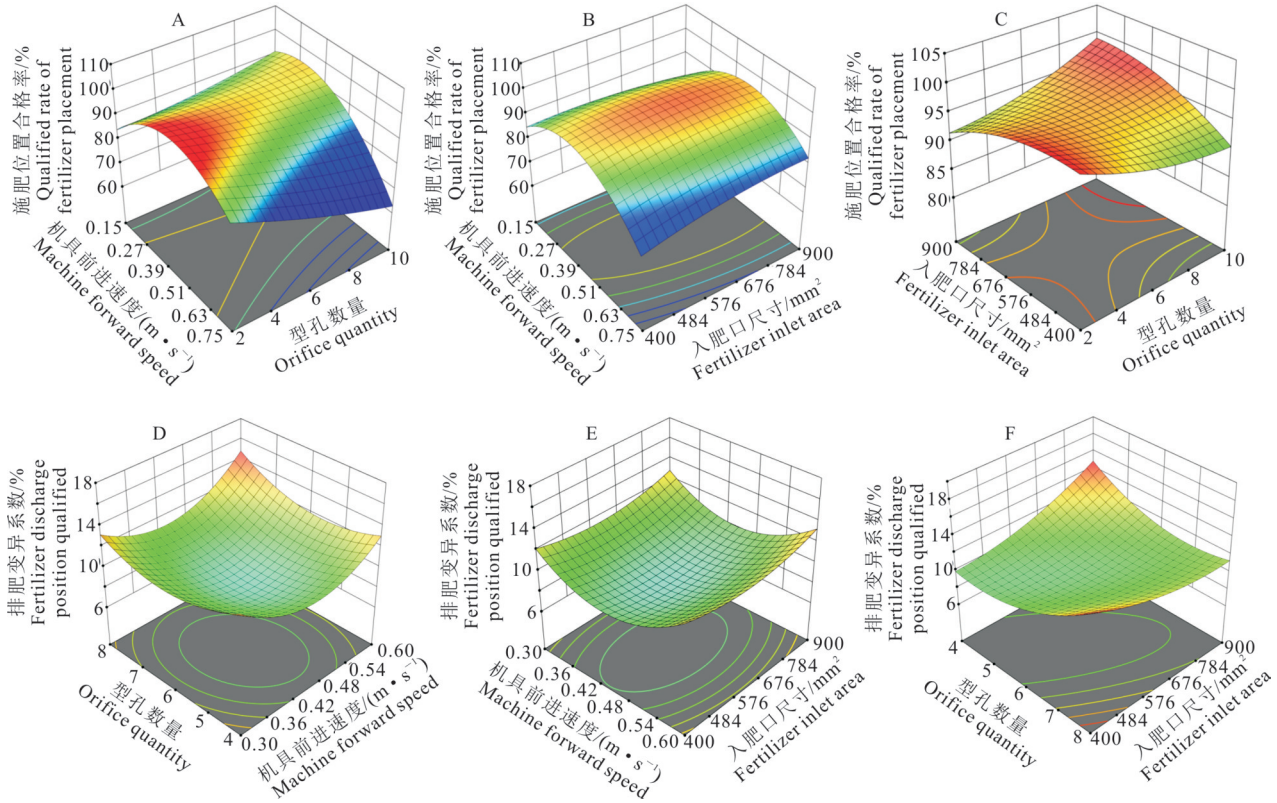


图9 机具前进速度、型孔数量、入肥口尺寸交互作用对施肥位置合格率和排肥变异系数的影响

Fig. 9 Effects of the interaction among machine forward speed, orifice quantity, and fertilizer inlet area on the qualification rate of fertilizer placement and coefficient of variation of fertilizer discharge

由图9-A,D可知,当入肥口尺寸在零水平(400 mm²),且型孔数量固定于某一水平时,随着机具前进速度的增大,施肥位置合格率先增大后减小,排肥变异系数先减小后增大;在机具的前进速度一定,型孔数量增大时,施肥位置合格率逐渐减小,排肥变异系数先减小后增大。由图9-B,E可知,当型孔数量在零水平(4个),且入肥口尺寸固定于某一水平时,随着机具前进速度的增大,施肥位置合格率先增大后减小,排肥变异系数先减小后增大;在机具前进速度一定,当入肥口尺寸增大时,施肥位置合格率先缓慢增大后缓慢减小,排肥变异系数先缓慢减小后逐渐增大。由图9-C,F可知,当机具的前进速度在零水平(0.30 m/s),且入肥口尺寸固定于某一水平时,随着型孔数量的增大,施肥位置合格率先缓慢减小后逐渐增大,排肥变异系数先缓慢减小后逐渐增大;在型孔数量一定,入肥口尺寸增大时,施肥位置合格率先缓慢增大后缓慢减小,排肥变异系数先减小后增大。

4.5 优化设计

为了获得稳定的施肥作业性能,以排肥变异系数最小为优化目标,利用Design-Expert软件进行多目标优化求解,目标和优化条件为:

$$\begin{cases} \max Y(x_1, x_2, x_3), \\ \min V(x_1, x_2, x_3), \\ 0.3 < x_1 < 0.6, \\ 4 < x_2 < 8, \\ 400 < x_3 < 900。 \end{cases} \tag{19}$$

通过对型孔间歇式水稻侧深施肥装置作业性能的优化试验结果进行分析，获得其最优作业参数与机构参数组合为：机具前进速度为0.44 m/s，型孔数量为6，入肥口尺寸为729 mm²。在该参数组合下，经性能试验测得其施肥位置合格率为95.09%，排肥变异系数为8.59%。与NY/T 1003－2006所要求的间歇侧深施肥的农艺要求（施肥位置合格率应≥80%，排肥变异系数应≤10%）相比，该结果不仅全面满足农艺要求，而且在合格率方面高出标准15.09个百分点，在均匀性方面低于变异系数上限1.41%，在施肥精度与均匀性方面均表现出明显的优势。

5　结　论

1）设计了一种型孔间歇式水稻侧深施肥装置，并系统阐述了其工作原理。在此基础上，对装置的关键部件及肥料颗粒在装置内部的运动过程进行了分析，确定了型孔转盘的直径为120 mm，型孔直径为20 mm，型孔高度为5 mm；风送输肥管内径为32 mm，收缩角为22°，收缩端的内径为22.4 mm，扩散角为10°。

2）基于Matlab仿真验证了模糊PID控制算法在施肥调控中的优越性。结果显示，普通PID控制的调节时间为0.287 s，超调量为11.64%，而模糊PID控制分别为0.076 s和3.86%，较普通PID在调节时间和超调量上分别降低73%和67%，响应速度与鲁棒性显著提升。

3）采用三因素三水平正交旋转组合试验，系统分析机具前进速度、型孔数量及入肥口尺寸对施肥性能的影响，并基于响应曲面与多目标优化算法确定最优参数组合为：前进速度为0.44 m/s，型孔数量为6，入肥口尺寸为729 mm²。在此条件下，施肥位置合格率达95.09%，排肥变异系数为8.59%，均符合水稻间歇式侧深施肥的农艺要求。

[参考文献]

[1] 崔月贞，王吕，吴玉红，等. 冬绿肥联合稻秆还田对水稻产量及稻田土壤肥力的影响[J]. 西北农林科技大学学报（自然科学版），2022，50(7)：100-108.
CUI Y Z，WANG L，WU Y H，et al. Effects of winter green manure combined with rice straw return on rice yield and paddy soil fertility[J]. Journal of Northwest Agriculture and Forestry University (Natural Science Edition)，2022，50(7)：100-108.

[2] 畅翔，脱云飞，王澍，等. 旱地水稻产量和土壤质量对水肥耦合的响应研究[J]. 西北农林科技大学学报（自然科学版），2025，53(8)：23-36.
CHANG X，TUO Y F，WANG S，et al. Response of dryland rice yield and soil quality to water-fertilizer coupling[J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition)，2025，53(8)：23-36.

[3] 林珊，于法稳，代明慧. 化肥“零增长”政策会影响粮食安全吗：基于准自然实验的RD检验[J]. 中国软科学，2024(1)：12-23.
LIN S，YU F W，DAI M H. Will fertilizer “zero-growth” policy affect food security：RD test based on quasi-natural experiment[J]. China Soft Science，2024(1)：12-23.

[4] 宋红梅，李廷亮，刘洋，等. 我国近20年主要粮食作物产量、进出口及化肥投入变化特征[J]. 水土保持学报，2023，37(1)：332-339.
SONG H M，LI T L，LIU Y，et al. Temporal variation of main grain crops yield，import and export and fertilizer consumption of China in the past 20 years[J]. Journal of Soil and Water Conservation，2023，37(1)：332-339.

[5] WANG J F，WANG Z T，WENG W X，et al. Development status and trends in side-deep fertilization of rice[J]. Renewable Agriculture and Food Systems，2022，37(5)：550-575.

[6] 段洁利，李君，卢玉华. 变量施肥机械研究现状与发展对策[J]. 农机化研究，2011，33(5)：245-248.
DUAN J L，LI J，LU Y H. Research status and development countermeasure of variable rate fertilization machinery[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research，2011，33(5)：245-248.

[7] 董晓威，黄法伟，刘俊兵，等. 穴式苗-肥同施水稻侧深施肥装置设计与试验[J]. 西南大学学报（自然科学版），2023，45(3)：58-73.
DONG X W，HUANG F W，LIU J B，et al. Design and experiment of rice deep-side fertilization device for hole-type seedling and fertilizer application[J]. Journal of Southwest University (Natural Science Edition)，2023，45(3)：58-73.

[8] OCA de M A，FLORES G. The AgriQ：a low-cost unmanned aerial system for precision agriculture[J]. Expert Systems with Applications，2021，182：115163.

[9] 万玲，谢东波，李杨，等. 玉米行间滚轮式穴施排肥器设计与试验[J]. 农业机械学报，2020，51(11)：64-73.
WAN L，XIE D B，LI Y，et al. Design and experiment of roller hole fertilizer application between corn rows[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2020，51(11)：64-73.

[10] 王金峰，高观保，翁武雄，等. 水田侧深施肥装置关键部件设计与试验[J]. 农业机械学报，2018，49(6)：92-104.
WANG J F，GAO G B，WENG W X，et al. Design and experiment of key components of side deep fertilization device for paddy field[J]. Transactions of the Chinese Society for Agri-

cultural Machinery,2018,49(6):92-104.

[11] 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 J F,LIU Y F,WENG W X,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.

[12] 梁方,杨淦光,许丰,等. 外槽轮式播种机播量控制系统设计与试验[J]. 农机化研究,2019,41(10):153-157.
LIANG F,YANG G G,XU F,et al. The seeding rate control system design and experiment of the external groove wheel seeder [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research,2019,41(10):153-157.

[13] 王金武,李树伟,张罡,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 electrical drive side deep hill-drop fertilization system for precision rice hill-direct-seeding machine[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2018,34(8):43-54.

[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 H Y,LI Y,ZHAO H C,et al. Effects of point deep fertilization on yield quality and nitrogen utilization of rice in cold region [J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica,2021,36(1):159-168.

[15] 张信,李光林,白秋薇,等. 一种外槽轮体积自动可调的定量排肥装置设计与试验[J]. 西南大学学报(自然科学版),2020,42(8):158-166.
ZHANG X,LI G L,BAI Q W,et al. Design and test of a quantitative fertilizer discharge device with automatically adjustable volume of external groove wheel [J]. Journal of Southwest University (Natural Science Edition),2020,42(8):158-166.

[16] 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 W S,LI K,JIN C Q,et al. Design and experiment of hill placement fertilizer applicator[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research,2018,40(1):145-149,165.

[17] 陈长海,许春林,毕春辉,等. 水稻插秧机侧深施肥技术及装置的研究[J]. 黑龙江八一农垦大学学报,2012,24(6):10-12,25.
CHEN C H,XU C L,BI C H,et al. Researching of rice transplanter deep side fertilizing technology and device[J]. Journal of Heilongjiang Bayi Agricultural University,2012,24(6):10-12,25.

[18] 董晓威,李伟凯,衣淑娟,等. 间歇定点精量水稻侧深施肥方法及装置的设计研究[J]. 黑龙江八一农垦大学学报,2019,31(3):56-63.
DONG X W,LI W K,YI S J,et al. Research of intermittent fixed point and precision rice side deep fertilizing method and device design [J]. Journal of Heilongjiang Bayi Agricultural University,2019,31(3):56-63.

[19] 黄法伟. 穴式水稻侧深施肥装置设计与试验[D]. 黑龙江大庆:黑龙江八一农垦大学,2022.
HUANG F W. Design and experiment of side deep fertilization device for hole-type rice[D]. Daqing,Heilongjiang:Heilongjiang Bayi Agricultural University,2022.

[20] 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 J F,SHANG W H,WENG W X,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.

[21] 左兴健,武广伟,付卫强,等. 风送式水稻侧深精准施肥装置的设计与试验[J]. 农业工程学报,2016,32(3):14-21.
ZUO X J,WU G W,FU W Q,et al. Design and experiment on air-blast rice side deep precision fertilization device [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2016,32(3):14-21.

[22] 陈威,王川,王丽伟,等. 侧深施肥装置三通管气固两相流仿真与试验[J]. 中国农机化学报,2024,45(3):74-80.
CHEN W,WANG C,WANG L W,et al. Simulation and experiment of gas-solid two-phase flow in the three-way pipe of side deep fertilization device[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization,2024,45(3):74-80.

[23] 李加念,洪添胜,冯瑞珏,等. 基于脉宽调制的文丘里变量施肥装置设计与试验[J]. 农业工程学报,2012,28(8):105-110.
LI J N,HONG T S,FENG R J,et al. Design and experiment of Venturi variable fertilizer apparatus based on pulse width modulation[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2012,28(8):105-110.

[24] 马征,李耀明,徐立章. 农业工程领域颗粒运动研究综述[J]. 农业机械学报,2013,44(2):22-29.
MA Z,LI Y M,XU L Z. Summarize of particle movements research in agricultural engineering realm[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(2):22-29.

[25] 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 Z D,WANG Q J,LI H W,et al. Fertilizer injecting route analysis and test for air-blowing seed-fertilizer hole-applicator via CFD-DEM coupling[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2019,35(21):18-25.

[26] 尤惠媛,卢文涛. 联合收获机喂入量模糊控制系统研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版),2015,43(5):229-234.
YOU H Y,LU W T. Research on fuzzy control system of feed quantity of combine harvester[J]. Journal of Northwest Agriculture and Forestry University (Natural Science Edition),2015,43(5):229-234.

(责任编辑:温晓平)