doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2025.10.029

# 油菜变径离心式排肥器双变量调控系统设计与试验

丁幼春[1,2]　张栋津[1,2]　董万静[1,2]　徐春保[1,2]　李浩鹏[1,2]

(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**:针对油菜高速播种作业中精准变量施肥问题,设计了一种基于变径离心式集中排肥器转速-开度双变量施肥控制序列的决策调控系统。通过分析多目标粒子群优化(Multi-objective particle swarm optimization, MOPSO)算法和遗传算法(Genetic algorithm, GA)的算法机理,结合标定试验建立排肥误差和控制器调节时间双目标模型,构建了 GA-MOPSO 施肥决策模型;为精准控制排肥轴转速,构建了排肥轴转速积分型滑模控制(Integral sliding mode control, ISMC)算法。仿真试验结果表明,在不同目标施肥量条件下,GA-MOPSO 算法在 30 次独立运行中所得的超体积平均值分别为 1.004、1.029、1.023,所得 Pareto 解集覆盖整个区域,连续性好,较于 MOPSO 和基于差分算法改进的多目标粒子群优化(DE-MOPSO)算法收敛性和均匀性更好;ISMC 控制算法稳态时间为 0.212 s,稳态误差为 0.013%,无超调量,较 PID 控制算法和模糊 PID 控制算法控制性能更优。台架试验结果表明,施肥决策模型选取权重向量为(0.9,0.1)生成控制序列,对比传统施肥决策方法,平均排量相对误差从 4.17% 降至 2.27%,平均响应时间从 0.92 s 降至 0.83 s;ISMC 控制算法平均排量相对误差为 2.73%,各行排量变异系数不高于 5.62%,整体性能优于 PID 控制算法和模糊 PID 控制算法。路面试验结果表明,施肥决策调控系统在连续变量作业中,平均排量相对误差为 3.56%,平均响应时间为 0.79 s。田间试验结果表明,当车速为 6~12 km/h、施肥量为 300~600 kg/hm$^2$ 时,施肥决策调控系统排肥量相对误差不高于 4.90%,响应时间不高于 1.08 s。研究结果可为集中式排肥装置高速变量施肥提供技术支持。

**关键词**:油菜; 双变量施肥; 变径离心式; 多目标粒子群; 积分型滑模控制

**中图分类号**:S126　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2025)10-0340-13　　**OSID**:

# Design and Testing of Bivariate Regulation System for Variable Diameter Centrifugal Fertilizer Spreaders in Oilseed Rape

DING Youchun[1,2]　ZHANG Dongjin[1,2]　DONG Wanjing[1,2]　XU Chunbao[1,2]　LI Haopeng[1,2]

(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**: A variable-rate fertilization control system was developed for high-speed rapeseed seeding operations, based on a dual-variable control sequence involving the rotational speed and opening of a variable-radius centrifugal centralized fertilizer applicator. A GA-MOPSO fertilization decision model was constructed by analyzing the mechanisms of the multi-objective particle swarm optimization (MOPSO) and genetic algorithm (GA), and formulating a bi-objective model with fertilization error and controller response time based on calibration experiments. An integral sliding mode control (ISMC) algorithm was designed for precise control of the fertilizer shaft speed. Simulation results showed that at varying target fertilization rates, the GA-MOPSO algorithm achieved hypervolume indicators of 1.004, 1.029, and 1.023 across 30 independent runs, with superior convergence and uniformity compared with that of MOPSO and DE-MOPSO. The ISMC algorithm achieved a steady-state time of 0.212 s, a steady-state error of 0.013%, and zero overshoot, outperforming both PID and fuzzy PID controllers. Bench tests indicated that, with a weight vector of (0.9, 0.1), the proposed decision model reduced the mean relative fertilization error from 4.17% to 2.27% and the average response time from 0.92 s to 0.83 s. The ISMC algorithm achieved an average error of 2.73%, with row-to-row coefficient of variation under

收稿日期:2025-04-22　修回日期:2025-05-23

**基金项目**:国家重点研发计划项目(2023YFD2001001)

**作者简介**:丁幼春(1978—),男,教授,博士生导师,主要从事智慧农业技术与装备研究,E-mail:kingbug163@163.com

5.62%, outperforming traditional controllers. Road tests showed a mean relative error of 3.56% and an average response time of 0.79 s. Field trials demonstrated that at speed of 6 ~ 12 km/h and application rates of 300 ~ 600 kg/hm$^2$, the error remained below 4.90% and the maximum response time was 1.08 s. The research result can provide technical support for high-speed variable-rate fertilization with centralized fertilizer applicators.

**Key words**: oilseed rape; dual-variable fertilization; variable diameter centrifugal; multi-objective particle swarm optimization; integral sliding mode control

## 0　引言

油菜是我国重要的油料作物，其种植规模和产量对保障国家粮油安全具有重要意义[1]。施肥是油菜种植的关键环节，直接影响油菜产量和品质[2-3]，精量施肥技术可提高施肥效率、减少环境污染并保证作物产量。离心式集中排肥装置具有排量范围广、结构简单、一器多行、均匀性高等优点，逐步应用于油菜直播作业[4-6]。实现离心式集中排肥装置转速和开度调节，可提高集中排肥器作业速度、排肥适应性和排量调节准确性。

快速、准确地生成转速-开度控制序列是完成双变量施肥调控的关键，国内外学者围绕生成双变量施肥控制序列方法开展相关研究。王辉等[7]通过构建肥料流量控制系统控制模型实时调节肥料流量。ZHANG 等[8-9]构建了三目标问题模型，基于分解的多目标进化算法获得转速-开度控制序列的 Pareto 解集。王金峰等[10]通过 EDEM 的排肥仿真建立样本数据集，训练和验证利用神经网络构建的双变量决策模型，以此生成双目标控制序列。YUAN 等[11]基于高斯过程和遗传算法建立转速-开度控制序列生成方法，田间试验结果表明，可以较好地完成双变量施肥作业。上述研究表明生成合理、有效的转速-开度控制序列可提高排肥性能，但目前双变量排肥控制相关研究主要聚焦单体式排肥装置，鲜有对离心集中式排肥器转速-开度控制序列生成方法研究。

单一变量的精确调控是实现双变量施肥调控的关键技术，目前针对单一变量精确调控的相关研究较多。潘成钟等[12]构建了基于粒子群优化 RBF - PID 的变量施肥控制算法，精准调控液压马达系统，提高了系统控制性能。田敏等[13]通过遗传算法改进的模糊 PID 控制算法闭环调控电液比例阀，提高了变量施肥流量控制精度。丁幼春等[14]构建了模糊 PID 控制算法闭环调控排种器，提高了棉花排种性能。朱风磊等[15]设计了一种基于 BA 优化的 BP 神经网络 PID 控制算法，实现肥料流量快速有效地调整。张继成等[16]运用增量式 PID 闭环控制算法对多种固体肥精确施控装置进行调控，实现了氮、磷、钾 3 种固体肥实时精量施入。目前，变量调控算法已趋于成熟，但双变量作业时，调控算法鲁棒性和快速响应性仍有进一步优化空间。

本文设计一种基于变径离心式集中排肥器转速-开度双变量施肥控制序列决策调控系统。通过标定试验建立排肥误差和控制器调节时间双目标模型，结合多目标粒子群优化算法（Multi-objective particle swarm optimization, MOPSO）和遗传算法（Genetic algorithm, GA），提出一种遗传算法优化的多目标粒子群（GA - MOPSO）施肥决策模型。依据 GA - MOPSO 施肥决策模型计算出不同目标施肥量下相应的 Pareto 解集，通过选择权重向量为油菜机直播变量施肥工作提供科学合理的转速-开度控制序列。同时针对排肥轴转速的精准控制与鲁棒性需求，引入积分型滑模控制算法（Integral sliding mode control, ISMC）闭环调控排肥轴转速。开展相关性能评估试验，以验证施肥决策调控系统可行性和稳定性，以期为集中式排肥装置双变量调控技术提供依据。

## 1　整体结构与工作原理

### 1.1　整体结构

基于双变量控制序列的油菜施肥决策调控系统主要由前期课题组自主研制的油菜变径离心式排肥器、施肥决策调控系统两部分组成。其中排肥器结构如图 1a 所示，主要由上壳体、离心腔盘、下壳体、主动齿轮、同步变径齿环等组成。变径结构如图 1b 所示，由舵机带动主动齿轮，进而转动同步变径齿

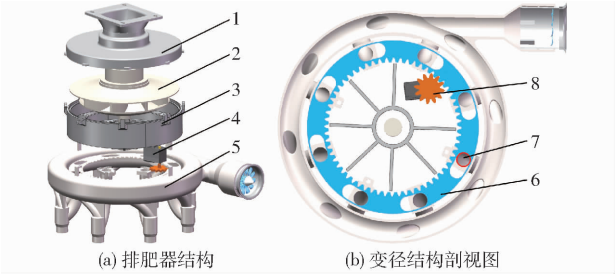



图 1　排肥装置结构示意图

Fig. 1　Schematics of fertilizer discharge device

1. 上壳体　2. 离心腔盘　3. 下壳体　4. 舵机　5. 气-肥混合机构　6. 同步变径齿环　7. 排肥口　8. 主动齿轮

环,改变与出肥口重叠面积。

施肥决策调控系统主要由云平台、树莓派 4B、总线舵机控制器、LX－224 型总线舵机、直流电机驱动器、直流减速电机、高精度编码器、电容触控屏、北斗接收机等组成,施肥决策调控系统关键部件如图 2 所示。

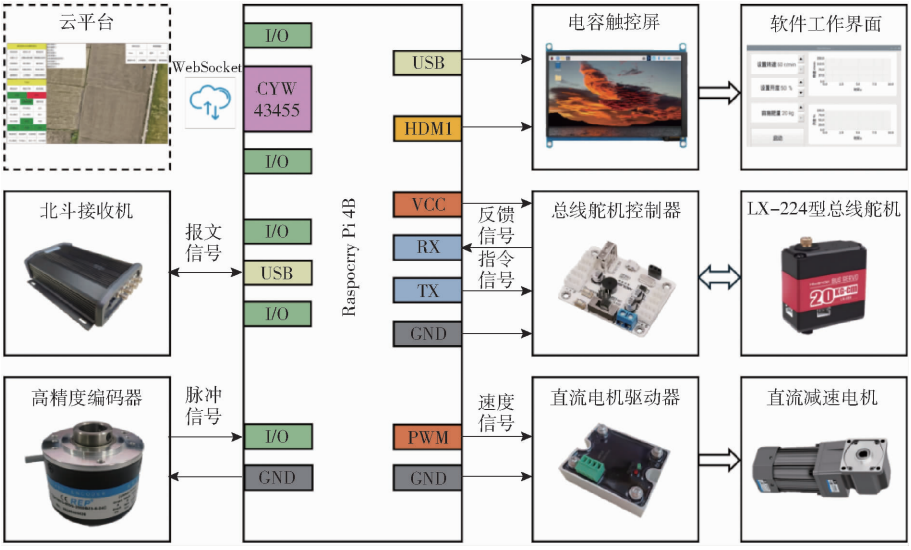



图 2 调控系统关键部件示意图

Fig. 2 Schematic of key components in control system

### 1.2 工作原理

作业前在云平台中预先设置施肥量、作业幅宽等相关参数,作业时由拖拉机牵引油菜直播机前进,通过北斗接收机获取机具位置信息和作业速度,实时反馈给施肥决策调控系统。施肥决策调控系统接收上述作业信息计算出转速-开度控制序列。通过高精度编码器和舵机位置反馈模块实时监测排肥轴转速和排肥口开度,施肥决策调控系统接收转速-开度目标控制序列和当前转速、开度状态后通过调控算法计算相应控制变量,其中转速控制变量(PWM)传入直流电机驱动器,进而驱动电机带动排肥轴转动;开度控制变量(报文信号)传入总线舵机控制器,驱动舵机带动排肥口进行开度调整,油菜变径离心式排肥器达到目标工作状态,完成变量施肥作业。油菜施肥决策调控系统工作流程如图 3 所示。

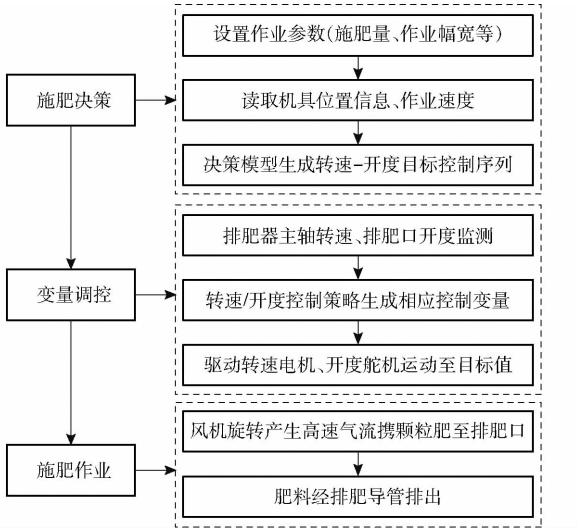



图 3 系统工作流程图

Fig. 3 Flowchart of system operation

## 2 施肥决策模型构建

### 2.1 GA－MOPSO 施肥决策模型构建方法

施肥系统具有强烈的非线性特性,不同作业条件下最优转速-开度控制序列存在差异。MOPSO 算法借鉴鸟类集体觅食生态现象,引入越界处理机制、收缩因子以及外部存档设计与维护[17－19],在复杂非线性条件下具有较高的优化能力。针对 MOPSO 算法的参数敏感性可能导致算法陷入局部最优并且损失解的多样性这一局限性,采用 GA 深度优化 MOPSO 算法的外部存档。GA 通过模拟自然界中的进化机制实现对复杂问题的优化求解[20－21],对复杂非线性问题具有强适应性。

GA－MOPSO 施肥决策模型构建流程如图 4 所示。以排肥误差和控制器调节时间作为优化目标,建立双目标模型;分别设定 MOPSO 算法和 GA 初始化参数,并基于双目标模型计算粒子适应度动态更新外部存档。利用 GA 对外部存档中的解集进一步优化,若非劣解集超出存档容量,则依据双目标模型函数值对解集进行非支配排序,通过计算拥挤距离调整外部存档规模,以保持解的均匀分布。当迭代次数达到设定的最大值时,输出最优的 Pareto 解集。在实际应用中,决策者可根据具体的施肥需求,通过调节权重向量从解集中选择合理的转速-开度控制序列,保证了决策灵活性,为精准施肥提供了科学依据。

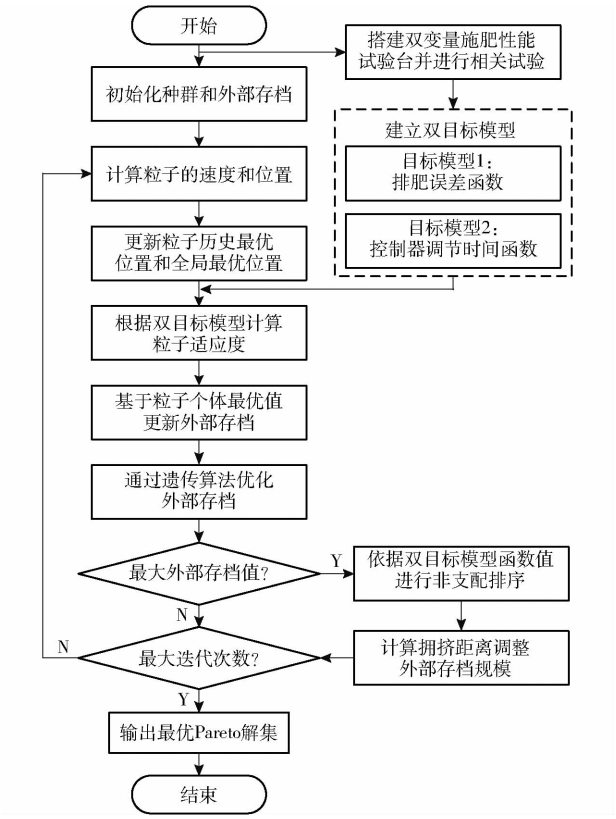



图 4　GA－MOPSO 算法构建流程

Fig. 4　Construction process of GA－MOPSO algorithm

## 2.2　双目标模型构建

以排肥误差和控制器调节时间为优化目标建立双目标模型。排肥误差是衡量目标排量与预测排量之间偏差程度的重要指标，当目标值与预测值之间的差异显著时，表明排肥误差较高；反之，若两者接近一致，则表明排肥误差较低，排肥误差目标模型定义为

$$\min f_1(L,N) = \left| \frac{|q_t - q_p|}{q_t} - e \right| \tag{1}$$

式中　$q_t$——目标排量，g/min

$q_p$——预测排量，g/min

$e$——排肥器最大允许误差，%

控制器调节时间是衡量排肥器在不同目标施肥量之间达到相应转速–开度控制序列所需的时间，包括转速调节时间和开度调节时间。调节时长直接决定了施肥量在目标区域到达时能否被及时精准调控至预设值，控制器调节时间目标模型定义为

$$\min f_2(L,N) = \{f_{adj}^{l}(L_1 - L_0), f_{adj}^{n}(N_1 - N_0)\}_{\max} \tag{2}$$

式中　$f_{adj}^{l}$——开度调节函数

$f_{adj}^{n}$——转速调节函数

$L_1$——现目标控制序列开度

$L_0$——前目标控制序列开度

$N_1$——现目标控制序列转速

$N_0$——前目标控制序列转速

为构建上述双目标模型，分别进行排量–转速–开度响应关系模型标定试验和转速、开度动态响应特性标定试验。为符合实际作业情况，试验均在排肥器腔室充满颗粒肥和恒定风速风压的条件下进行。试验地点为华中农业大学工学院油菜生产智能化技术实验室；试验材料为长江流域油菜机直播常用的缓释配方肥“宜施壮”；试验装置为油菜变径离心式排肥器。试验场景如图 5 所示。




图 5　双变量施肥性能试验台

Fig. 5　Dual-variable fertilization performance test bench

1. 肥箱　2. 排肥器　3. 开度调节舵机　4. 高精度编码器　5. 台架　6. 接肥箱　7. 直流稳压电源　8. 排肥导管　9. 排肥轴转速电机　10. 风机　11. 调控终端

### 2.2.1　排量–转速–开度响应关系模型标定试验

为确保排肥轴转速电机在稳定工作条件下运行，试验设置排肥轴转速为 30 ~ 120 r/min，调节步长为 5 r/min；为深入探究排肥口开度对排量的影响，设置排肥口开度为 14 ~ 30 mm，调节步长为 4 mm。针对不同转速、开度组合，设定工作时长为 1 min，将每次试验排出的肥料收集至接肥箱中，通过电子秤称量。每组试验重复 5 次，取平均值进行记录。

运用 Matlab 对排量标定试验数据开展曲面拟合，建立单行排量–转速–开度响应关系，拟合结果如图 6 所示。该模型决定系数为 0.989，可以准确地反映单行排量和转速、开度三者的关系。该响应关系模型为

$$q_p = -3\,186.4 + 64.468\,1N + 325.996L - 0.581\,8N^2 + 0.337\,1NL - 19.460\,5L^2 + 0.002\,4N^3 - 0.010\,7LN^2 + 0.070\,9NL^2 + 0.299\,1L^3 \quad (R^2 = 0.989) \tag{3}$$

式中　$N$——转速，r/min

$L$——开度，mm

在长江中下游稻油轮作区，油菜机直播作业速

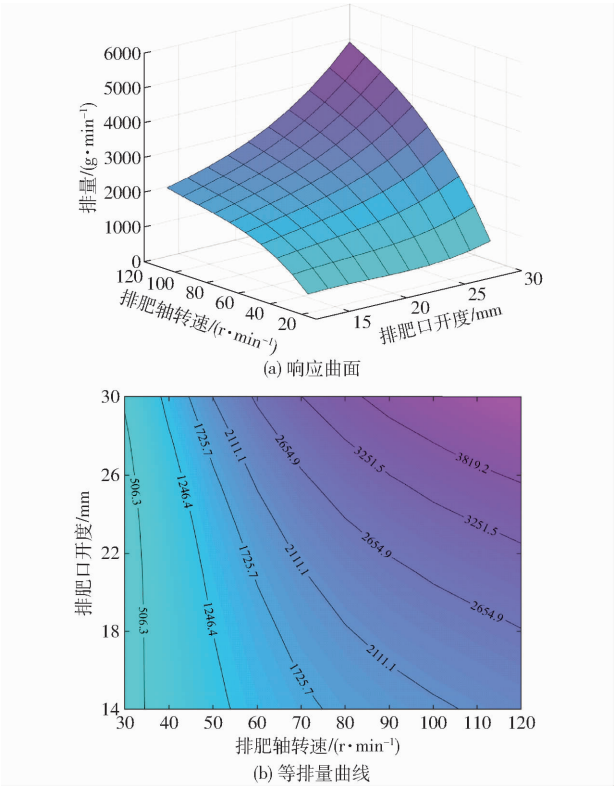



图 6 排量和转速、开度的拟合响应关系

Fig. 6 Impact of rotation speed and opening size on fertilizer discharge rate

度为 3 ~ 12 km/h,施肥量为 225 ~ 600 kg/hm$^2$,作业幅宽为 2.3 m,作业行数为 8 行[4]。由图 6a 可知,试验排量测定范围可满足长江中下游稻油轮作区油菜机直播过程中的施肥需求。油菜变径离心式排肥器单行排量与排肥轴转速、排肥口开度之间存在显著三维曲面关系,肥料排量随着转速和开度增加呈逐渐上升趋势。由图 6b 可知,不同转速与开度的控制序列可实现同一目标排量。根据不同施肥需求选择不同转速和开度参数组合,可以显著提升排肥性能。

**2.2.2** 转速、开度动态响应特性标定试验

试验设置电机转速变化幅度 $\Delta n$ 为 10 ~ 90 r/min,变化间隔为 10 r/min;设置排肥口开度变化幅度 $\Delta l$ 为 2 ~ 16 mm,变化间隔为 2 mm。通过高精度编码器和舵机位置反馈模块监测排肥轴转速和排肥口开度,调控系统以频率 100 Hz 记录一次转速和开度。针对不同转速、开度变化幅度分别进行增幅、降幅试验,每组试验重复 5 次,取平均值进行记录。

利用 Origin 2022 对试验数据进行线性拟合,线性拟合关系如图 7 所示。由图 7 可知,电机加速-时间、电机减速-时间、开度增加-时间、开度减小-时间拟合曲线决定系数 $R^2$ 为 0.979、0.970、0.990、0.967,表明转速、开度变化幅度与时间的线性关系显著。随着转速、开度变化幅度增加,电机和舵机变化到相应转速、开度所用时间都增大。其中,电机受惯性和负载特性影响,在减速过程所需时间显著大于加速过程所需时间,而舵机在开度增加过程和开度减小过程中,其动态响应并未出现显著差异。

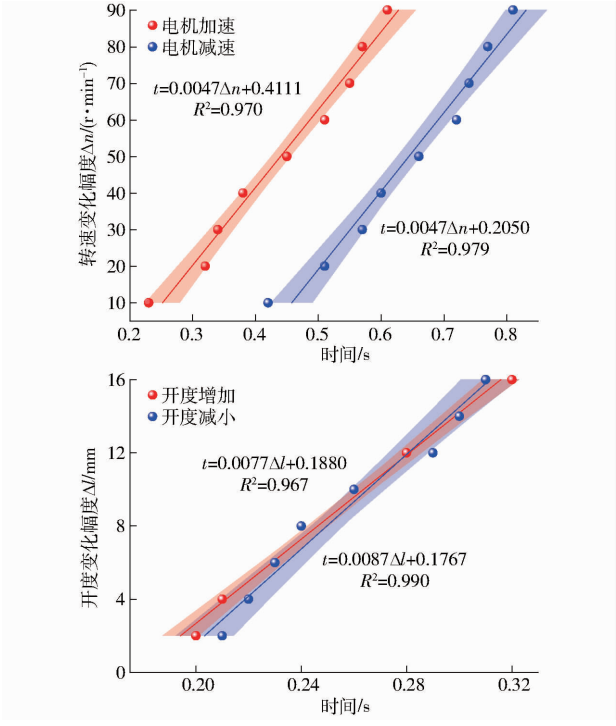



图 7 转速、开度动态响应特性线性拟合曲线

Fig. 7 Linear fitting diagram of dynamic response characteristics of speed and openness

## 2.3 仿真试验与结果分析

### 2.3.1 仿真试验条件

为验证 GA - MOPSO 算法的优越性,引入差分进化算法(Differential evolution,DE)优化外部存档,构建 DE - MOPSO 算法。差分进化算法是一种通过群体内个体间的合作与竞争而产生的全局搜索策略,可以动态跟踪当前搜索情况,以调整搜索策略,具有较强的全局收敛能力和鲁棒性[22-23]。开展 GA - MOPSO 算法与 MOPSO、DE - MOPSO 算法仿真对比试验。

仿真对比试验操作系统为 64 位 Windows 10,试验平台为 Matlab 2023a,CPU 为 Intel(R) Core(TM) i5 - 13400F CPU @ 2.50 GHz,内存为 32 GB。试验设置 MOPSO 算法粒子数量为 10,最大迭代次数为 300;设置 GA 变异概率为 0.1,交叉概率为 0.8;设置 DE 算法缩放因子为 0.4,交叉概率为 0.7。

考虑到试验客观性与实际作业区域农艺要求,仿真试验设置目标施肥量为 300、450、600 kg/hm$^2$,作业速度为 6 km/h,机具作业幅宽为 2.3 m,作业行数为 8。排量 $q$ 计算式为

$$q = \frac{60VBQ}{36k} \tag{4}$$

式中 $V$——机具作业速度,km/h

$B$——机具作业幅宽，m

$Q$——目标施肥量，kg/hm$^2$

$k$——机具作业行数

### 2.3.2　算法性能仿真结果

为探究 GA－MOPSO、DE－MOPSO 和 MOPSO 算法综合性能，选用超体积（Hypervolume，HV）评价算法收敛性和均匀性。*HV* 是一个综合评价指标，通过计算算法获得的非支配解集与参照点围成的目标空间中区域的体积验证算法的综合性能，*HV* 越大，表明算法综合性能越好[24]。*HV* 计算式为

$$HV(X,P)=\bigcup_{x\in X}^{X}V(x,P) \tag{5}$$

式中　$x$——非支配解

$X$——非支配解集

$P$——参考点

$V(x,P)$——非支配解和点 $P$ 确定的超立方体

3 种算法在不同目标施肥量下独立运行 30 次，得到 *HV* 箱线与点重叠图如图 8 所示，运行 30 次所得 *HV* 平均值如表 1 所示。

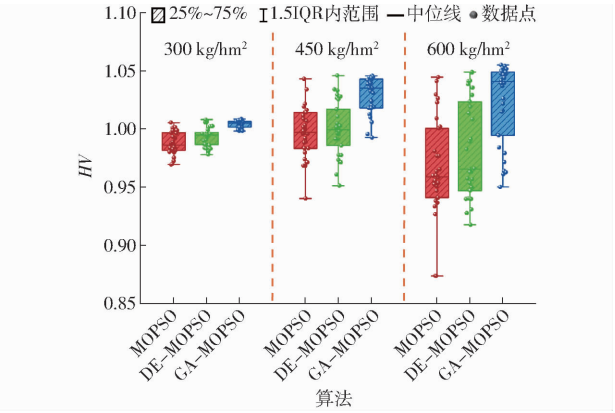



图 8　*HV* 箱线与点重叠图

Fig. 8　Overlapping diagram of box plot and points of *HV*

由图 8 可知，在不同目标施肥量下，GA－MOPSO 算法中位线显著高于 MOPSO 和 DE－MOPSO 算法，箱体范围显著窄于 MOPSO 和 DE－MOPSO 算法，无异常值。表明 GA－MOPSO 算法在施肥系统中可以找到更接近真实 Pareto 前沿的解集，收敛性和分布性更优越，在复杂施肥条件下具有更强的稳定性，无算法失效现象。由表 1 可知，在目标施肥量为 300、450、600 kg/hm$^2$时，GA－MOPSO 算法 *HV* 平均值分别为 1.004、1.029、1.023，优于 MOPSO、DE－MOPSO 算法 *HV* 平均值。综上所述，GA－MOPSO 算法在 30 次独立求解排肥误差和控制器调节时间双目标模型时表现出较为优异的综合性能。

表 1　不同算法下 *HV* 平均值

Tab. 1　Mean hypervolume values by different algorithms

| 算法 | 施肥量/(kg·hm$^{-2}$) | | |
|---|---|---|---|
| | 300 | 450 | 600 |
| MOPSO | 0.987 | 0.997 | 0.966 |
| DE－MOPSO | 0.993 | 1.000 | 0.982 |
| GA－MOPSO | 1.004 | 1.029 | 1.023 |

### 2.3.3　双目标解集分布仿真结果

为直观对比 3 种算法 Pareto 解集的收敛性和分布性，在不同目标施肥量下求解得到 Pareto 解集分布如图 9 所示。当目标施肥量为 300 kg/hm$^2$时（图 9a），3 种算法都形成了清晰的 Pareto 前沿面，但 MOPSO 算法和 DE－MOPSO 算法的 Pareto 解集整体处于上方，未能有效平衡排肥误差和控制器调节时间双目标模型。当目标施肥量为 450 kg/hm$^2$时（图 9b），MOPSO 算法排肥误差为 0～0.3 时 Pareto 解集处于上方，表明该算法在此区间的双目标权衡能力较差，DE－MOPSO 算法排肥误差为 0.5～0.75 时 Pareto 解集分布聚集，未覆盖全局前沿。当目标施肥量为 600 kg/hm$^2$时（图 9c），当排肥误差为 0.65～0.8 时，MOPSO 算法和 DE－MOPSO 算法局部收敛，整体均匀性表现较差，Pareto 解集空洞且未形成均匀的 Pareto 前沿面。GA－MOPSO 算法在不同施肥量条件下的解集都完整刻画了线性前沿面，解集覆盖范围全面，分布性好，无空洞或过度聚集的情况出现，表现明显优于另外两种算法，可以有效生成排肥误差与控制器调节时间的权衡解。

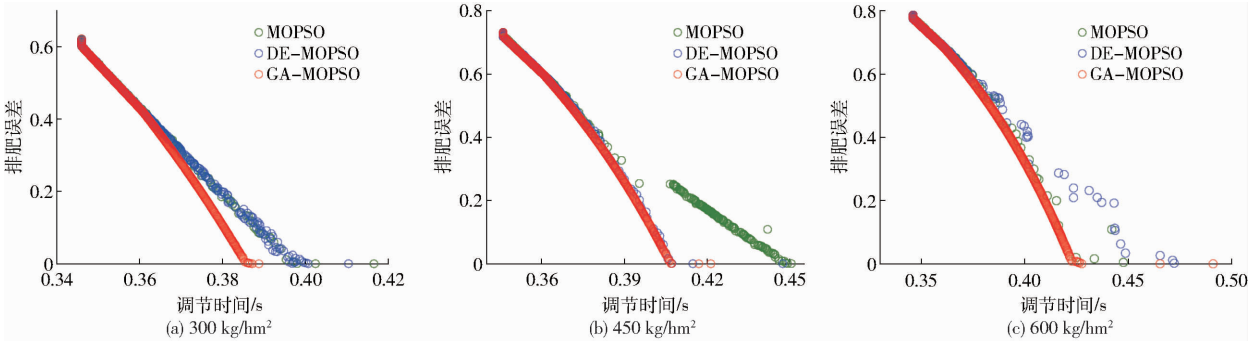



图 9　3 种模型在不同目标施肥量下的 Pareto 前沿面

Fig. 9　Pareto fronts of three models at different fertilizer amounts

综上可知,GA - MOPSO 算法在常用目标施肥量条件下表现出更强的稳定性和全局搜索能力,通过融合 GA 改善 MOPSO 算法的外部存档具有明显的优化效果,使 MOPSO 算法在优化过程中快速收敛于 Pareto 前沿面。同时 GA 对复杂非线性问题的强适应性使算法整体具有较强的跳出局部最优陷阱的能力,更适用于施肥决策中转速-开度控制序列生成。

## 3 施肥调控算法设计

施肥决策调控系统排肥精度主要受两方面因素影响:①转速-开度控制序列选择。②单一变量精准调控。保证转速、开度快速达到稳态值是双变量调控过程中的重要需求,开度调节舵机选用 LX - 224 型串行总线舵机,最大扭矩为 1.96 N·m,控制精度为 0.3°,满足高精度控制需求。排肥电机选用直流减速电机,配备高精度编码器进行转速监测和控制,为使电机在期望转速稳定运行,引入积分型滑模控制算法对排肥电机进行闭环调控。

### 3.1 排肥电机调速系统传递函数

在实际作业过程中,排肥器始终处于满负载状态,为确定该状态下系统传递函数,在双变量施肥性能试验台进行排肥电机特性测试。试验材料选用“宜施壮”缓施配方肥,在排肥腔室充满肥料和恒定风速风压的条件下对排肥电机施加阶跃电压信号,安装高精度编码器监测转速,通过调控系统记录输出占空比与电机转速。试验结束后,将试验数据导入 Matlab/System Identification 模块进行系统辨识,辨识后得到系统传递函数为

$$G(s)=\frac{493.1}{s^2+35.01s+456.3} \tag{6}$$

### 3.2 积分型滑模控制算法设计

滑模控制因其响应速度快、鲁棒性强等优点被广泛使用[25-27],但传统滑模控制需对速度信号进行微分导致高频扰动,从而引起抖震现象。故引入误差积分项构成积分型滑模控制器,该控制器可以补偿模型不确定性,提高控制精度,减少稳态误差。

假设二阶非线性系统数学模型为

$$\begin{cases}\boldsymbol{x}=(x,\dot{x})^{\mathrm{T}}\\ \ddot{x}=f(\boldsymbol{x},t)+bu(t)+d(t)\\ y=x\end{cases} \tag{7}$$

式中 $x$——系统状态变量

$f$——系统内部非线性特性

$b$——增益系数

$y$——系统输出

$d(t)$——外加干扰信号

$u(t)$——系统输入信号

定义系统跟踪误差 $e$ 为

$$e=x_d-x \tag{8}$$

式中 $x_d$——参考信号

设计积分滑模面 $s$ 为

$$s=c_1e+\dot{e}+k_I\int_0^t e(\tau)\mathrm{d}\tau \tag{9}$$

式中 $c_1$——滑模系数 $k_I$——积分增益

对式(9)求导得

$$\dot{s}=c_1\dot{e}+\ddot{e}+k_Ie \tag{10}$$

考虑到一般情况下扰动幅度较小,对系统影响微弱,故分析时忽略扰动项。为保证系统在滑模面稳定运行,取 $\dot{s}=0$,并联立式(7)和式(8)求得等效控制项 $u_{eq}$ 为

$$u_{eq}=\frac{1}{b}(c_1\dot{e}+\ddot{x}_d-f(\boldsymbol{x},t)+k_Ie) \tag{11}$$

设计切换控制项 $u_{sw}$ 为

$$u_{sw}=\frac{1}{b}K\mathrm{sgn}(s) \tag{12}$$

式中 $K$——切换增益

为有效降低滑模控制中的抖震现象,引入双曲正弦函数 $\tanh(s)$ 代替符号函数 $\mathrm{sgn}(s)$,可得

$$u_{sw}=\frac{1}{b}K\tanh(s)=\frac{1}{b}K\frac{e^x-e^{-x}}{e^x+e^{-x}} \tag{13}$$

滑模控制律 $u$ 由等效控制项 $u_{eq}$ 和切换控制项 $u_{sw}$ 组成[28],即

$$u=\frac{1}{b}(c_1\dot{e}+\ddot{x}_d-f(\boldsymbol{x},t)+k_Ie)+\frac{1}{b}K\frac{e^x-e^{-x}}{e^x+e^{-x}} \tag{14}$$

### 3.3 仿真试验与结果

为验证 ISMC 控制算法的优越性,运用 Matlab/Simulink 平台搭建 ISMC 控制算法进行阶跃响应仿真,并与 PID 控制算法和模糊 PID 控制算法进行对比。通过试凑法确定 PID 控制算法参数,$K_p$、$K_i$、$K_d$ 分别取 0.4、11.5、0.01;模糊 PID 控制算法参数通过模糊推理动态调整;ISMC 控制算法参数 $c_1$、$k_I$、$K$ 分别取 40、0.005、251。仿真结果如图 10 所示,性能指标如表 2 所示。

由图 10 可知,PID 控制算法趋于稳态速度较慢,且产生了较大的超调,控制性能次于另外两种算法;ISMC 控制算法和模糊 PID 控制算法较先趋于稳态,且整体响应快速趋于稳定。但 ISMC 控制算法较于模糊 PID 控制算法无超调,表现出更优越性能。

由表 2 可知,ISMC 控制算法稳态误差为 0.013%,稳态时间为 0.212 s,上升时间为 0.172 s,同时ISMC控制算法通过滑模面的动态约束和积分

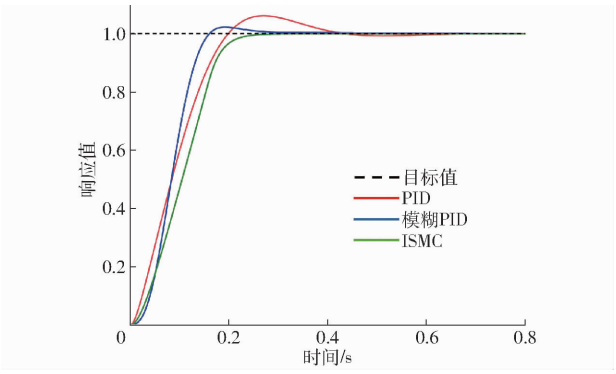



图 10　阶跃响应对比曲线

Fig. 10　Step response comparison curves

**表 2　阶跃响应性能指标**

**Tab. 2　Step response performance metrics**

| 算法 | 上升时间 $t_r$/s | 稳态时间 $t_s$/s | 超调量/% | 稳态误差/% |
|---|---|---|---|---|
| PID | 0.162 | 0.377 | 6.196 | 0.056 |
| 模糊 PID | 0.131 | 0.211 | 2.280 | 0.074 |
| ISMC | 0.172 | 0.212 | 0 | 0.013 |

误差补偿机制实现了转速无超调跟踪。PID 控制算法在稳态时间、超调量、稳态误差上的表现均次于 ISMC 控制算法，仅上升时间略优于 ISMC 控制算法。模糊 PID 控制算法和 ISMC 控制算法的稳态时间接近，但模糊 PID 控制算法超调量为 2.280%，稳态误差为 0.074%，性能表现次于 ISMC 控制算法。综上所述，ISMC 控制算法能够更好满足双变量调控过程中鲁棒性和精准控制需求。

## 4　试验结果与分析

### 4.1　施肥决策模型排肥性能台架试验

#### 4.1.1　试验方法

为验证转速-开度控制序列有效性和可行性，在双变量施肥性能试验台开展本文施肥决策方法与传统施肥决策方法台架对比试验。在传统施肥决策方法中，参照文献[29]将不同排量区间进行梯度划分，基于转速优先控制策略，每隔一个开度对应一个排量区间。当排量为 250 ~ 1 500 g/min 时，开度为 15 mm；当排量为 1 500 ~ 2 500 g/min 时，开度为 20 mm；当排量为 2 500 ~ 3 500 g/min 时，开度为 25 mm。使用 Origin 2022 拟合不同开度下排量和转速关系，当开度为 15、20、25 mm 时 $R^2$ 分别为 0.967、0.993、0.996，线性拟合结果如图 11 所示。

考虑实际作业需求，GA - MOPSO 施肥决策模型选用权重向量为(0.9,0.1)。为保证试验客观性，试验中转速调控算法统一使用 ISMC 控制算法，参数保持一致。设置目标施肥量分别为 300、450、600 kg/hm$^2$，作业速度为 6、9、12 km/h，机具作业幅宽为 2.3 m，作业行数为 8，代入式(4)计算得到排肥量。排除重复试验目标，将试验分为本文施肥决策方法和传统施肥决策方法 2 组，2 组试验皆依次增加排肥量。在排肥器任意一路排肥管下方放置接肥盒，试验过程中将数字电子秤放至接肥盒下连续称量，以频率 10 Hz 将瞬时重量发送至计算机，结合时间戳进行保存。试验在排肥腔室充满肥料和恒定风速风压条件下进行，单次试验时间设置为 30 s，每组试验重复 5 次。

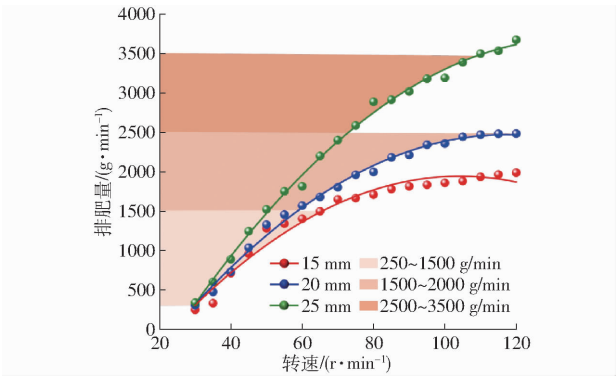



图 11　传统施肥决策方法排肥量-转速拟合曲线

Fig. 11　Fertilizer rate - speed fitting curves of traditional decision-making methods

通过实际排肥量与理论排肥量相对误差评价试验效果，相对误差 $R_E$ 计算式为

$$R_E = \frac{|M_1 - M_2|}{M_1} \times 100\% \tag{15}$$

式中　$R_E$——排肥量相对误差，%

$M_1$——目标排肥量，g

$M_2$——实际排肥量，g

#### 4.1.2　试验结果分析

台架对比试验结果如图 12 和表 3 所示。由图 12a 可知，随着目标排量的变化，GA - MOPSO 算法施肥决策模型对排肥精度影响明显。由表 3 可知，实际排肥量与理论排肥量相对误差为 1.86% ~ 2.73%，排肥量平均相对误差为 2.27%，传统施肥决策方法实际排肥量与理论排肥量相对误差为 3.62% ~ 4.87%，平均排肥量相对误差为 4.17%。表明 GA - MOPSO 算法施肥决策模型所生成的转速、开度控制序列可以有效提高排肥精度，增强排肥性能。

由图 12b 可知，从整体情况来看 GA - MOPSO 施肥决策模型所生成的转速-开度控制序列可以在一定程度上降低排肥器响应时间。由表 3 可知，传统方法平均响应时间为 0.92 s，本文方法平均响应时间为 0.83 s，这是由于排肥响应时间主要由两部分组成：控制器调节时间和肥料下落时间。在台架试验中，控制器调节时间受转速-开度控制序列变化

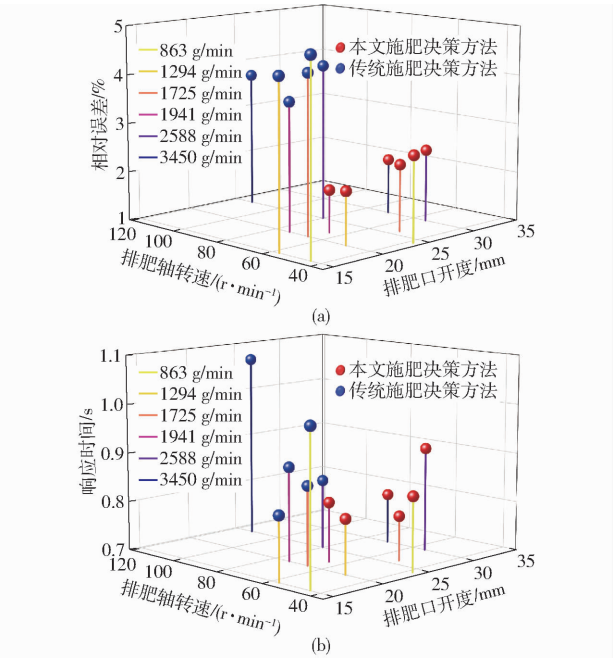



图 12 台架对比试验

Fig. 12 Comparative bench test

**表 3 台架试验结果**

**Tab. 3 Bench test results**

| 目标排量/(g·min⁻¹) | 决策方法 | 理论排肥量/g | 实际排肥量/g | 相对误差/% | 响应时间/s |
|---|---|---|---|---|---|
| 863 | 本文决策 | 431.5 | 443.3 | 2.73 | 0.85 |
| | 传统决策 | | 452.5 | 4.87 | 1.01 |
| 1 294 | 本文决策 | 647.0 | 660.7 | 2.12 | 0.81 |
| | 传统决策 | | 675.4 | 4.39 | 0.83 |
| 1 725 | 本文决策 | 862.5 | 882.8 | 2.35 | 0.79 |
| | 传统决策 | | 899.2 | 4.26 | 0.86 |
| 1 941 | 本文决策 | 970.5 | 988.6 | 1.86 | 0.82 |
| | 传统决策 | | 1 005.6 | 3.62 | 0.89 |
| 2 588 | 本文决策 | 1 294.0 | 1 325.8 | 2.46 | 0.91 |
| | 传统决策 | | 1 347.8 | 4.16 | 0.84 |
| 3 450 | 本文决策 | 1 725.0 | 1 760.7 | 2.07 | 0.80 |
| | 传统决策 | | 1 789.5 | 3.74 | 1.07 |

幅度的影响,肥料下落时间主要受颗粒流动速度和排肥管形状、长度的影响。合理科学的转速-开度控制序列可在一定程度上减小排肥响应时间,降低施肥滞后性影响。

综上可知,在连续变量施肥作业中,GA-MOPSO 施肥决策模型所生成的转速-开度控制序列可以在相对较短时间内达到更高的控制精度,更适合应用于双变量调控。

## 4.2 控制算法排肥性能台架试验

### 4.2.1 试验方法

转速控制精度是影响施肥量精度的重要因素,也是双变量控制中的重要环节。为比较实际应用中,不同控制算法对排肥性能的影响,使用 GA-MOPSO 决策模型所生成的 6 组转速-开度控制序列,分别搭载 ISMC 控制算法、模糊 PID 控制算法和 PID 控制算法进行排肥轴转速调控,并于双变量施肥性能试验台(图 5)进行试验验证。在 8 路排肥管下分别放置 8 个接肥盒,试验时间设为 30 s,试验在排肥腔室充满肥料和恒定风速风压的条件下进行。每次试验结束后使用电子秤称量各接肥盒内肥料,得到实际排肥量,每组试验重复 5 次。以相对误差和各行排量一致性变异系数作为评价指标评价不同控制算法的排肥性能。各行排量一致性变异系数计算式为

$$C_v = \frac{\sqrt{\dfrac{1}{\lambda - 1}\sum_{i=1}^{\lambda}(m_i - \overline{G}_a)^2}}{\overline{G}_a} \times 100\% \tag{16}$$

其中

$$\overline{G}_a = \frac{\sum_{i=1}^{\lambda} m_i}{\lambda} \tag{17}$$

式中 $\lambda$——采样区域个数,取 8

$\overline{G}_a$——排肥器各行实际排出肥料颗粒质量平均值,g

$m_i$——第 $i$ 行排出的实际肥料质量,g

$C_v$——各行排量一致性变异系数,%

### 4.2.2 试验结果分析

5 次试验 8 路实际排肥量总和数据分布如图 13 所示。由图 13 可知,随着排量设定值的不断变化,ISMC 控制算法较于其他两种控制算法变化幅度相对较小,表明在不同目标施肥量下,ISMC 控制算法都能保持精准性,可以更好地适应田间复杂环境。在 5 次重复试验中,相较于模糊 PID 控制算法和 PID 控制算法,ISMC 控制算法排肥量波动范围更窄,表明其对排肥量控制具有更强的鲁棒性。

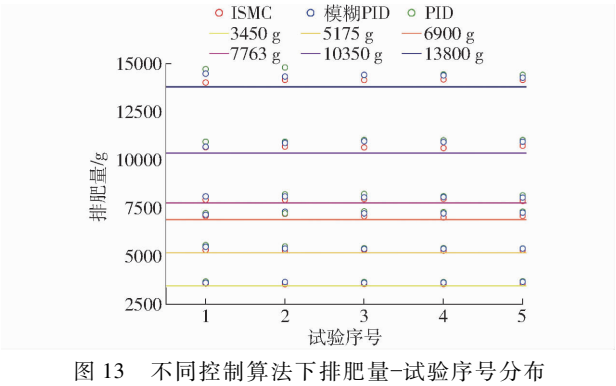



图 13 不同控制算法下排肥量-试验序号分布

Fig. 13 Distribution diagram of fertilizer application amount - test serial number by different control algorithms

统计 5 次试验实际排肥量平均值,根据式(15)、(16)分别计算实际排肥量与理论排肥量相对误差 $R_E$ 和各行排量一致性变异系数 $C_v$,计算结

果如表 4 所示。由表 4 可知，ISMC 控制算法实际排肥量与理论排肥量相对误差为 2.18% ~3.19%，平均相对误差为 2.73%；模糊 PID 控制算法实际排肥量与理论排肥量相对误差为 4.01% ~5.42%，平均相对误差为 4.64%；PID 控制算法实际排肥量与理论排肥量相对误差为 5.15% ~6.46%，平均相对误差为 5.76%。这表明 ISMC 控制算法可以更好地满足施肥决策调控系统中转速变量控制的稳定性和精确性需求。

**表 4　不同控制算法下排肥量相对误差试验结果**

**Tab.4　Test results on fertilizer application amount relative error by various control algorithms**

| 目标排量/(g·min$^{-1}$) | 控制算法 | 理论排肥量/g | 实际排肥量/g | 相对误差/% | 各行排量一致性变异系数/% |
|---|---|---|---|---|---|
| 863 | ISMC | 3 452 | 3 562 | 3.19 | 5.62 |
| | 模糊 PID | | 3 639 | 5.42 | 5.58 |
| | PID | | 3 675 | 6.46 | 5.69 |
| 1 294 | ISMC | 5 176 | 5 315 | 2.69 | 4.24 |
| | 模糊 PID | | 5 411 | 4.54 | 4.19 |
| | PID | | 5 464 | 5.56 | 4.28 |
| 1 725 | ISMC | 6 900 | 7 097 | 2.86 | 4.84 |
| | 模糊 PID | | 7 220 | 4.64 | 4.93 |
| | PID | | 7 297 | 5.75 | 4.87 |
| 1 941 | ISMC | 7 764 | 7 933 | 2.18 | 2.67 |
| | 模糊 PID | | 8 075 | 4.01 | 2.72 |
| | PID | | 8 164 | 5.15 | 2.74 |
| 2 588 | ISMC | 10 352 | 10 669 | 3.06 | 5.24 |
| | 模糊 PID | | 10 879 | 5.09 | 5.21 |
| | PID | | 10 994 | 6.20 | 5.19 |
| 3 450 | ISMC | 13 800 | 14 128 | 2.38 | 3.76 |
| | 模糊 PID | | 14 374 | 4.16 | 3.69 |
| | PID | | 14 551 | 5.44 | 3.81 |

由表 4 可知，ISMC 控制算法各行排量变异系数不高于 5.62%。不同控制算法对排肥均匀性的影响无差异性表现，当排量为 1 941 g/min 时，$C_v$相对较小，当排量为 863 g/min 时，$C_v$相对较大。这可能是由于在不同控制序列下，离心腔盘内肥料颗粒填充系数不同，充肥状态不同。当排量为 1 941 g/min 时，离心腔盘内肥料颗粒填充系数较大，充肥状态稳定，$C_v$较低。当排量为 863 g/min 时，离心腔盘内肥料颗粒填充系数较小，$C_v$相对较高。

## 4.3　路面试验

### 4.3.1　试验方法

为验证油菜变径离心式排肥器双变量调控系统在连续变量作业中的实际性能，在湖北省安陆市华中农业大学试验基地开展路面试验。使用丁幼春等[14]等提出的处方图栅格划分方式，设置栅格长度为 10 m，宽为 2.3 m，在云平台网页端框选目标作业区域，生成 5 个栅格，设置各栅格内目标施肥量为 300、450、600、450、300 kg/hm$^2$。

试验过程中油菜直播机以速度 6.2 km/h 在栅格作业区域内匀速行进。调控系统实时接收北斗接收机发出车速、经纬度等信息，判断机具位置以确定目标施肥量并生成相应转速-开度控制序列。在排肥导管出口位置安装电容式颗粒肥检测装置[30]记录排肥流量变化响应时间。电容式颗粒肥装置采样频率为 90.9 Hz，通过隔离套筒不发生堵塞的最大肥料排量为 99 g/s，检测性能台架试验中颗粒肥检测装置准确率不低于 95.65%。试验结束后，利用皮尺从栅格起点测量距离 10、20、30、40、50 m，使用 1 ~5 依次为每个栅格进行标号，清扫栅格内作业路径上的颗粒肥至栅格中部并装入带有细小间隙的接肥袋，利用高精度电子秤测量实际排肥量进而计算实际施肥量。路面试验场景如图 14 所示。




(a) 作业机具　　(b) 作业规划

图 14　路面试验场景

Fig. 14　Road surface test scenario

### 4.3.2　试验结果分析

路面试验结果如图 15 所示。由图 15 可知，当施肥量为 300 ~600 kg/hm$^2$时进行变量施肥作业，实际施肥量与理论施肥量相对误差为 2.84% ~4.31%，平均相对误差为 3.56%。在栅格边界处从当前排肥流量到目标排肥流量变化响应时间平均为 0.79 s。

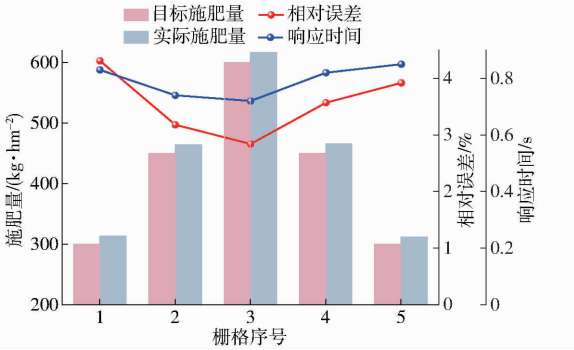



图 15　路面试验结果

Fig. 15　Road surface test results

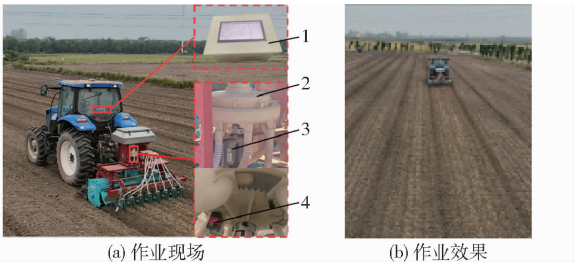
栅格 3 排量相对误差和响应时间较小。这可能

是因为在目标施肥量为 600 kg/hm$^2$ 对应的转速-开度控制序列下,离心腔盘内肥料颗粒填充系数较大,各区域肥料颗粒状态稳定,排量相对误差较小。在栅格 2 和 3 交接处,转速、开度变化幅度相对较低,响应时间相对较小。综上所述,施肥决策调控系统在连续变量施肥作业中,能在较短的排肥响应时间内达到较高的施肥精度,满足变量施肥作业要求。

### 4.4 田间试验

#### 4.4.1 试验方法

为进一步验证油菜变径离心式排肥器双变量调控系统对于排肥性能的提升,结合 GB/T 35487—2017《变量施肥播种机控制系统》中性能试验测定的要求,在湖北省襄阳市华中农业大学无人化试验示范农场开展了不同施肥量随速田间试验,田间试验场景如图 16 所示。




(a) 作业现场 (b) 作业效果

图 16 田间试验

Fig. 16 Field test

1. 调控终端 2. 排肥器 3. 排肥轴转速电机 4. 开度调节舵机

试验时设目标施肥量分别为 300、450、600 kg/hm$^2$,作业速度分别为 6、9、12 km/h,作业长度为 50 m,在排肥导管出口处安装电容式颗粒肥检测装置记录排肥流量变化响应时间,作业前向肥箱中添加颗粒肥 20 kg。每组试验完成后清理肥箱并利用高精度电子秤称量剩余颗粒肥质量,计算出作业面积内实际排肥量,以相对误差为评价指标评价田间试验排肥效果。

#### 4.4.2 试验结果分析

试验结果如表 5 所示。由表 5 可知,油菜机直播施肥量为 300 ~ 600 kg/hm$^2$、作业速度为 6 ~ 12 km/h 时,搭载油菜变径离心式排肥器双变量调控系统进行施肥作业实际排肥量与目标排肥量相对误差为 2.82% ~ 4.90%,排肥量平均相对误差为 3.89%,排肥量响应时间最大为 1.08 s。满足 GB/T 35487—2017《变量施肥播种机控制系统》中性能测定的要求。

表 5 田间试验结果

Tab. 5 Field test results

| 目标施肥量/(kg·hm$^{-2}$) | 作业速度/(km·h$^{-1}$) | 目标排肥量/g | 实际排肥量/g | 相对误差/% | 响应时间/s |
|---|---|---|---|---|---|
| 300 | 6 | 3 450 | 3 588 | 4.00 | 0.81 |
| | 9 | | 3 619 | 4.90 | 0.86 |
| | 12 | | 3 568 | 3.42 | 0.87 |
| 450 | 6 | 5 175 | 5 415 | 4.64 | 0.83 |
| | 9 | | 5 378 | 3.92 | 0.89 |
| | 12 | | 5 321 | 2.82 | 0.92 |
| 600 | 6 | 6 900 | 7 206 | 4.43 | 0.85 |
| | 9 | | 7 108 | 3.01 | 0.94 |
| | 12 | | 7 167 | 3.87 | 1.08 |

## 5 结论

(1)通过分析 MOPSO 算法和 GA 的算法机理,利用数理统计方式构建双目标模型,设计了一种基于改进多目标粒子群优化算法的施肥决策模型。通过 Matlab 进行仿真验证,仿真结果表明,在不同目标施肥量下,GA - MOPSO 算法在 30 次独立运行中所得的超体积平均值分别为 1.004、1.029、1.023,所得 Pareto 解集覆盖整个区域、连续性好,较于 MOPSO 和 DE - MOPSO 有更好的收敛性和均匀性。

(2)构建排肥轴转速的积分型滑模控制算法,通过 Matlab/Simulink 开展 ISMC 控制算法、模糊 PID 控制算法和 PID 控制算法对比仿真试验,试验结果表明,ISMC 控制算法上升时间、稳态时间和稳态误差分别为 0.172 s、0.212 s、0.013%,无超调量,综合性能优于模糊 PID 控制算法和 PID 控制算法,更适于双变量调控中转速变量的精确调控。

(3)开展目标施肥量为 300 ~ 600 kg/hm$^2$、作业速度为 6 ~ 12 km/h 条件下排肥性能试验。台架试验结果表明,在控制算法相同的情况下,GA - MOPSO 施肥决策模型选取权重向量为(0.9,0.1)生成控制序列,对比传统施肥决策方法,平均排量相对误差从 4.17% 降至 2.27%,平均响应时间从 0.92 s 降至 0.83 s,优于传统施肥决策方法。在转速-开度控制序列相同的情况下,ISMC 控制算法的平均排量相对误差为 2.73%,各行排量变异系数不高于 5.62%,整体性能优于 PID 控制算法和模糊 PID 控制算法。路面试验结果表明,施肥决策调控系统在连续变量施肥作业中排肥量平均相对误差为 3.56%,响应时间平均值为 0.79 s。田间试验结果表明,当施肥量为 300 ~ 600 kg/hm$^2$、车速为 6 ~ 12 km/h 时,搭载油菜变径离心式排肥器双变量调控系统进行作业,排肥量相对误差不高于 4.90%,响应时间不高于 1.08 s,满足田间排肥作业质量要求。

## 参 考 文 献


[1] 任涛,郭丽璇,张丽梅,等.我国冬油菜典型种植区域土壤养分现状分析[J].中国农业科学,2020,53(8):1606 - 1616.
REN Tao, GUO Lixuan, ZHANG Limei, et al. Soil nutrient status of oilseed rape cultivated soil in typical winter oilseed rape production regions in China[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2020, 53(8): 1606 - 1616. (in Chinese)

[2] ZENG F G, WANG R, JIANG Y M, et al. Growth monitoring of rapeseed seedlings in multiple growth stages based on low-altitude remote sensing and semantic segmentation[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2025, 232: 110135.

[3] ZHU Y X, WANG X C, SHI Y Y, et al. Novel detection method of fertilizer discharge flow rate for centrifugal variable spreader based on improved lightweight YOLOv5s-seg[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2025, 230: 109896.

[4] 徐春保,董万静,李浩鹏,等.离心腔盘挤出式油菜高速精量排肥器设计与试验[J].农业工程学报,2024,40(20):22 - 34.
XU Chunbao, DONG Wanjing, LI Haopeng, et al. Design and experiment of a centrifugal cavity disc extrusion type high-speed precision fertilizer apparatus for rapeseed[J]. Transactions of the CSAE, 2024, 40(20): 22 - 34. (in Chinese)

[5] 刘晓东,胡瑞,王登辉,等.基于颗粒肥料运动模型的排肥器优化与试验[J].农业机械学报,2021,52(12):85 - 95.
LIU Xiaodong, HU Rui, WANG Denghui, et al. Optimization and test of fertilizer apparatus based ongranular fertilizer movement model[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(12): 85 - 95. (in Chinese)

[6] 丁幼春,李浩鹏,董万静,等.基于处方图的油菜精准变量施肥调控系统设计与试验[J].农业机械学报,2025,56(3):256 - 266,300.
DING Youchun, LI Haopeng, DONG Wanjing, et al. Design and experiment of precise variable fertilization control system for oilseed rape based on prescription maps[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(3): 256 - 266, 300. (in Chinese)

[7] 王辉,刘艺豪,周利明,等.施肥播种机肥料流量分段式 PID 控制系统设计与试验[J].农业机械学报,2023,54(2):32 - 40,94.
WANG Hui, LIU Yihao, ZHOU Liming, et al. Design and test of fertilizer flow piecewise PID control system of fertilizer planter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(2): 32 - 40,94. (in Chinese)

[8] ZHANG J Q, LIU G, LUO C M, et al. MOEA/D - DE based bivariate control sequence optimization of a variable-rate fertilizer applicator[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2019, 167: 105063.

[9] ZHANGJ Q, LIU G. Effects of control sequence optimisation on the performance of bivariate fertiliser applicator[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2022, 192: 106594.

[10] 王金峰,吕振阳,赵敏义,等.基于处方图的水稻侧深变量施肥控制系统设计与试验[J].农业机械学报,2024,55(9):151 - 162.
WANG Jinfeng, LÜ Zhenyang, ZHAO Minyi, et al. Design and experiment of rice side-deep variable rate fertilization control system based on prescription diagrams[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(9): 151 - 162. (in Chinese)

[11] YUAN J, LIU C L, LI Y M, et al. Gaussian processes based bivariate control parameters optimization of variable-rate granular fertilizer applicator[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2010, 70(1): 33 - 41.

[12] 潘成钟,尤泳,马朋勃,等.基于粒子群优化 RBF - PID 的液肥变量施肥控制系统研究[J].农业机械学报,2024,55(增刊2):53 - 61.
PAN Chengzhong, YOU Yong, MA Pengbo, et al. Variable rate fertilization control system for liquid fertilizer based on PSO optimized RBF - PID control[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(Supp. 2): 53 - 61. (in Chinese)

[13] 田敏,白金斌,李江全.基于遗传算法的液肥变量施肥控制系统[J].农业工程学报,2021,37(17):21 - 30.
TIAN Min, BAI Jinbin, LI Jiangquan. Variable rate fertilization control system for liquid fertilizer based on genetic algorithm[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(17): 21 - 30. (in Chinese)

[14] 丁幼春,张驰海,董万静,等.基于雷达测速的棉花精量直播机排种测控系统设计与试验[J].农业机械学报,2025,56(5):59 - 70.
DING Youchun, ZHANG Chihai, DONG Wanjing, et al. Design and test of seeding measurement and control system for cotton precision directing machine based on radar speed measurement[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(5): 59 - 70. (in Chinese)

[15] 朱凤磊,张立新,胡雪,等.基于蝙蝠优化 BP - PID 算法的精准施肥控制系统研究[J].农业机械学报,2023,54(增刊1):135 - 143,171.
ZHU Fenglei, ZHANG Lixin, HU Xue, et al. Precision fertilizer application control system based on BA optimization BP - PID algorithm[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(Supp. 1): 135 - 143, 171. (in Chinese)

[16] 张继成,严士超,纪文义,等.基于增量式 PID 算法的多种固体肥精确施控系统研究[J].农业机械学报,2021,52(3):99 - 106.

ZHANG Jicheng, YAN Shichao, JI Wenyi, et al. Precision fertilization control system research for solid fertilizers based on incremental PID control algorithm[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(3): 99 – 106. (in Chinese)

[17] 叶倩琳,王万良,王铮. 多目标粒子群优化算法及其应用研究综述[J]. 浙江大学学报(工学版),2024,58(6):1107 – 1120,1232.
YE Qianlin, WANG Wanliang, WANG Zheng. Survey of multi-objective particle swarm optimization algorithms and their applications[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2024, 58(6): 1107 – 1120, 1232. (in Chinese)

[18] 冯茜,李擎,全威,等. 多目标粒子群优化算法研究综述[J]. 工程科学学报,2021,43(6):745 – 753.
FENG Qian, LI Qing, QUAN Wei, et al. Overview of multiobjective particle swarm optimization algorithm[J]. Chinese Journal of Engineering, 2021, 43(6): 745 – 753. (in Chinese)

[19] 李飞,刘建昌,石怀涛,等. 基于分解和差分进化的多目标粒子群优化算法[J]. 控制与决策,2017,32(3):403 – 410.
LI Fei, LIU Jianchang, SHI Huaitao, et al. Multi-objective particle swarm optimization algorithm based on decomposition and differential evolution[J]. Control and Decision, 2017, 32(3): 403 – 410. (in Chinese)

[20] 曲志坚,张先伟,曹雁锋,等. 基于自适应机制的遗传算法研究[J]. 计算机应用研究,2015,32(11):3222 – 3225,3229.
QU Zhijian, ZHANG Xianwei, CAO Yanfeng, et al. Research on genetic algorithm based on adaptive mechanism[J]. Application Research of Computers, 2015, 32(11): 3222 – 3225, 3229. (in Chinese)

[21] 于莹莹,陈燕,李桃迎. 改进的遗传算法求解旅行商问题[J]. 控制与决策,2014,29(8):1483 – 1488.
YU Yingying, CHEN Yan, LI Taoying. Improved genetic algorithm for solving TSP[J]. Control and Decision, 2014, 29(8): 1483 – 1488. (in Chinese)

[22] 周新宇,黄君洪,彭虎,等. 自适应双坐标系的差分进化算法求解混合变量优化问题[J]. 计算机学报,2024,47(9):2116 – 2140.
ZHOU Xinyu, HUANG Junhong, PENG Hu, et al. Differential evolution algorithm based on adaptive Bi-Coordinate systems for mixed-variable optimization problem[J]. Chinese Journal of Computers, 2024, 47(9): 2116 – 2140. (in Chinese)

[23] 陈作汉,曹洁,赵付青,等. 基于构造学习的差分进化算法求解部分可分优化问题[J]. 电子科技大学学报,2023,52(3):413 – 422.
CHEN Zuohan, CAO Jie, ZHAO Fuqing, et al. A constructive learning differential evolution algorithm for partially separable function optimization problems[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2023, 52(3): 413 – 422. (in Chinese)

[24] 纪昌明,马皓宇,彭杨. 面向梯级水库多目标优化调度的进化算法研究[J]. 水利学报,2020,51(12):1441 – 1452.
JI Changming, MA Haoyu, PENG Yang. Research on evolutionary algorithms for multi-objective optimal operation of cascade reservoirs[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2020, 51(12): 1441 – 1452. (in Chinese)

[25] 焦俊,孔文,王强,等. 基于输入模糊化的农用履带机器人自适应滑模控制[J]. 农业机械学报,2015,46(6):14 – 19,13.
JIAO Jun, KONG Wen, WANG Qiang, et al. Self-adaptive sliding mode control based on input fuzzy for agricultural tracked robot[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(6): 14 – 19, 13. (in Chinese)

[26] 李浩,朱才朝,樊志鑫,等. 基于二阶滑膜- PID 控制的风力发电机最大功率跟踪策略研究[J]. 太阳能学报,2022,43(3):306 – 314.
LI Hao, ZHU Caichao, FAN Zhixin, et al. Research on maximum power point tracking strategy of wind turbine based on second order sliding model-PID control[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2022, 43(3): 306 – 314. (in Chinese)

[27] 焦俊,陈靖,乔焰,等. 直流电机驱动农用履带机器人轨迹跟踪自适应滑模控制[J]. 农业工程学报,2018,34(4):64 – 70.
JIAO Jun, CHEN Jing, QIAO Yan, et al. Adaptive sliding mode control of trajectory tracking based on DC motor drive for agricultural tracked robot[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(4): 64 – 70. (in Chinese)

[28] 刘金琨. 滑膜变结构控制 Matlab 仿真基本理论与设计方法[M]. 3 版. 北京:清华大学出版社,2015:69 – 71.

[29] 施印炎,陈满,汪小旦,等. 稻麦精准变量施肥机排肥性能分析与试验[J]. 农业机械学报,2017,48(7):97 – 103.
SHI Yinyan, CHEN Man, WANG Xiaochan, et al. Analysis and experiment of fertilizing performance for precision fertilizer applicator in rice and wheat fields[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(7): 97 – 103. (in Chinese)

[30] 王赛. 油菜机直播颗粒肥排施检测系统设计与试验[D]. 武汉:华中农业大学,2024.
WANG Sai. Design and experiment of granular fertilizer application detection system for rapeseed mechanized direct seeding [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2024. (in Chinese)