

油菜气送式双变量供种装置调控系统设计与试验

张文欣¹ 张栋津¹ 董万静^{1,2} 王思达¹ 王立洲¹ 丁幼春^{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: 针对现有油菜直播机控制系统响应速度慢、决策模型精度低,导致作业效率下降、排种量误差大的问题,基于油菜气送式双变量供种装置,设计了一种转速-工作长度双变量供种的控制序列决策调控系统。通过分析多目标常青藤算法(Multi-objective Ivy algorithm, MOIVY)和莱维飞行算法(Lévy flight algorithm, LFA)的算法机理,结合标定试验建立排种相对误差、控制器响应时间和各行播量一致性变异系数的多目标适应度函数,构建了LFA-MOIVY控制序列决策模型。开展MOIVY、DE-MOIVY和LFA-MOIVY算法优越性仿真对比试验,试验结果表明,在目标播量为1.5、3.0、4.5、6.0 kg/hm²时,LFA-MOIVY算法HV平均值分别为2.35、2.63、2.02、1.98,Pareto解集覆盖范围全面,分布均匀,综合性能优于其余两种算法。台架对比试验表明,LFA-MOIVY播种决策方法较传统决策方法相比,排种相对误差下降了0.76个百分点,各行播量一致性变异系数下降了2.43个百分点,响应时间缩短了0.14 s。路面试验表明,在油菜直播机不同作业速度和播量双重变化下,排种相对误差不高于4.5%,变异系数不高于6.2%,响应时间范围为1.59~2.61 s,转速控制精度不低于97.6%,工作长度控制精度不低于98.6%,各项指标符合国家和相关行业标准要求。田间试验表明,播种量为4.5 kg/hm²,作业速度为3~12 km/h时,转速调节范围为18.8~47.0 r/min,工作长度调节范围为19.0~30.0 mm,播种精度提高3.41个百分点,变异系数下降2.24个百分点,响应时间范围为2.10~2.86 s。研究结果可为小粒径精量播种调控技术提供参考。

关键词: 油菜; 双变量供种装置; 决策模型; 多目标常青藤算法; 莱维飞行算法

中图分类号: S223.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2026)11-0220-14

OSID:



Design and Experiment of Regulation System for Air-assisted Bi-variable Seed Supply Device for Oilseed Rape

ZHANG Wenxin¹ ZHANG Dongjin¹ DONG Wanjing^{1,2} WANG Sida¹ WANG Lizhou¹ DING Youchun^{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: Aiming at the problems of slow response speed and low precision of the decision-making model in the existing rapeseed direct seeder control system, which lead to decreased operation efficiency and large seeding quantity error, a control sequence decision-making and regulation system for rotational speed-working length bi-variable seeding was designed based on the air-assisted bi-variable seeding device for rapeseed. By analyzing the algorithm mechanisms of the multi-objective Ivy algorithm (MOIVY) and Lévy flight algorithm (LFA), a multi-objective fitness function involving seeding error, controller response time, and coefficient of variation for inter-row seeding quantity consistency was established, and an LFA-MOIVY control sequence decision-making model was constructed. Comparative simulation experiments were conducted to verify the superiority of the MOIVY, DE-MOIVY, and LFA-MOIVY algorithms. The results showed that when the target seeding rates were 1.5 kg/hm², 3.0 kg/hm², 4.5 kg/hm², and 6.0 kg/hm², the average Hypervolume (HV) values of the LFA-MOIVY algorithm were 2.35, 2.63, 2.02, and 1.98, respectively. Its Pareto solution set exhibited comprehensive coverage and uniform distribution, and its overall performance was superior to

收稿日期: 2025-12-29 修回日期: 2026-01-16

基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFD2001001、2023YFD2001001-1)和湖北省农业关键核心技术攻关项目(HBANYHXGG2023-2)

作者简介: 张文欣(1995—),女,博士生,主要从事油菜机械化生产技术与装备研究,E-mail: 1327507319@qq.com

通信作者: 丁幼春(1978—),男,教授,博士生导师,主要从事油菜机械化生产智能化技术与装备研究,E-mail: kingbug163@163.com

that of the other two algorithms. Bench comparison tests indicated that compared with the traditional decision-making method, the LFA - MOIVY seeding decision-making method reduced the relative seeding error by 0.76 percentage points, the coefficient of variation by 2.43 percentage points, and shortened the response time by 0.14 s. Pavement tests showed that under the dual changes of different operation speeds and seeding rates of the rapeseed direct seeder, the relative seeding error was no more than 4.5%, the coefficient of variation was no more than 6.2%, the response time ranged from 1.59 s to 2.61 s, the rotational speed control accuracy was not less than 97.6%, and the working length control accuracy was not less than 98.6%, all of which met the requirements of national and relevant industry standards. Field tests demonstrated that when the seeding rate was 4.5 kg/hm^2 and the operation speed was $3 \sim 12 \text{ km/h}$, the rotational speed adjustment range was $18.8 \sim 47.0 \text{ r/min}$, the working length adjustment range was $19.0 \sim 30.0 \text{ mm}$, the seeding accuracy was increased by 3.41 percentage points, the coefficient of variation was decreased by 2.24 percentage points, and the response time ranged from 2.10 s to 2.86 s. The research results can provide a reference for the precision seeding regulation technology of small-seeded crops.

Key words: oilseed rape; bi-variable seed supply device; decision-making model; multi-objective Ivy algorithm; Lévy flight algorithm

0 引言

油菜是我国重要的油料作物,种植面积居世界前列,但全国平均亩产量仅 $139.4 \text{ kg}^{[1-2]}$,实施精准化种植是助力粮油作物大面积单产提升行动的重要途径^[3]。供种装置作为实现种植精准化的核心工作部件,其供种性能对保证精量播种具有重要意义。现有的精量排种方式主要包括外槽轮式、离心式、窝眼轮式、气吸式等^[4-5]。基于上述排种方式主要通过改变排种电机转速或单次取种量来实现播量调节^[6-7]。这种单一变量控制方式,在油菜直播机不同作业速度和播量双重变化的工况下,供种装置控制精度较低、调控系统响应速度较慢,播种作业精度和稳定性难以保证^[8]。课题组前期针对油菜高速直播机作业需求,研制了油菜高速气送式双变量供种装置^[9],为规避单一变量控制的弊端,如仅调整工作长度易引发种子碰撞飞溅,仅调节转速则会导致排种脉冲波动,进而降低排种精度,现将转速和工作长度作为调控系统的双重变量,在最佳区域带内,通过播种决策模型,确定不同条件下双变量的最佳序列值,对转速与工作长度进行无级调节,进一步提高供种装置种量调节的准确性和适配性。

为满足精细化变量播种要求,国内外专家学者开展了大量研究^[10-11]。在提高排种均匀性和稳定性等方面,主要围绕结构参数优化、仿真分析等展开研究^[12-13],在提高作业质量、扩大装置可调范围方面,主要围绕机械结构设计、调控系统集成等展开研究^[14-18]。上述研究表明,现有供种装置在精量播种方面已取得一定进展,但主要以控制单因素变量为主,且多采用替换供种配件、控制电机转速等方式进行播量调节,调节区间有限,仅可在小范围内实现精

量播种。

按需供给、变量执行、精准调控是智能调控的核心执行理念。为缩短系统响应时间、提高调控系统准确性,国内外学者在精准决策、自适应动态优化等方面进行了大量研究^[19-20]。马旭等^[21]设计了一种自动控制变量施肥装置,构建了施肥量在线检测及智能调控系统,作业速度为 $3.60 \sim 4.05 \text{ km/h}$,仅适宜低速作业;XIE 等^[22]提出了一种基于多传感器信息融合的精准播种方案,采用编码器和 GNSS 接收器相结合的双速测量方法,开发了电机控制模型;丁幼春等^[23]设计了一种基于处方图的油菜精准变量线性自抗扰调控系统,为机具施肥提供指导性施肥量。在控制模型构建方面^[24-25],丁幼春等^[26]研究了一种基于变径离心式集中排肥器的双变量施肥决策调控系统,构建了 GA - MOPSO 施肥决策模型;施印炎等^[27]提出了一种基于多层感知人工神经网络的排肥量预测模型,构建了 LFA - PSO - MLP 排肥量预测模型。上述研究表明现有精准变量调控系统多以变量施肥为主^[28],且主要集中在作业速度检测、装置驱动方式和控制系统架构优化等方面^[29],鲜见小粒径双变量播种调控技术方面的研究。

针对上述问题,本文在前期研究基础上,设计一种转速-工作长度双变量供种控制序列决策调控系统。通过标定试验建立排种相对误差、控制器响应时间和各行播量一致性变异系数的多目标优化模型,结合多目标常青藤算法(Multi-objective Ivy algorithm, MOIVY)和莱维飞行算法(Lévy flight algorithm, LFA),构建了一种莱维飞行算法优化的多目标常青藤(LFA - MOIVY)控制序列决策模型。通过算法性能分析、决策模型对比试验,以及路面和田间性能试验,验证控制序列决策系统的稳定性和准

确性, 以为小粒径变量播种技术提供参考。

1 整体结构与工作原理

1.1 整体结构

前期课题组研发的油菜高速气送式双变量供种装置的整机结构如图 1 所示, 主要由旋耕机、开沟

犁、供种系统、排肥系统、开沟器、北斗 RTK 天线、调控终端、各类传感器等组成, 其中双变量供种装置是满足现代精准农业高速作业、高精度播种及参数实时调控要求的关键部件, 主要由排种电机、风机、数字推杆电机、直线位移传感器、编码器、种流分配装置、排种槽轮、长度调节轮等组成。

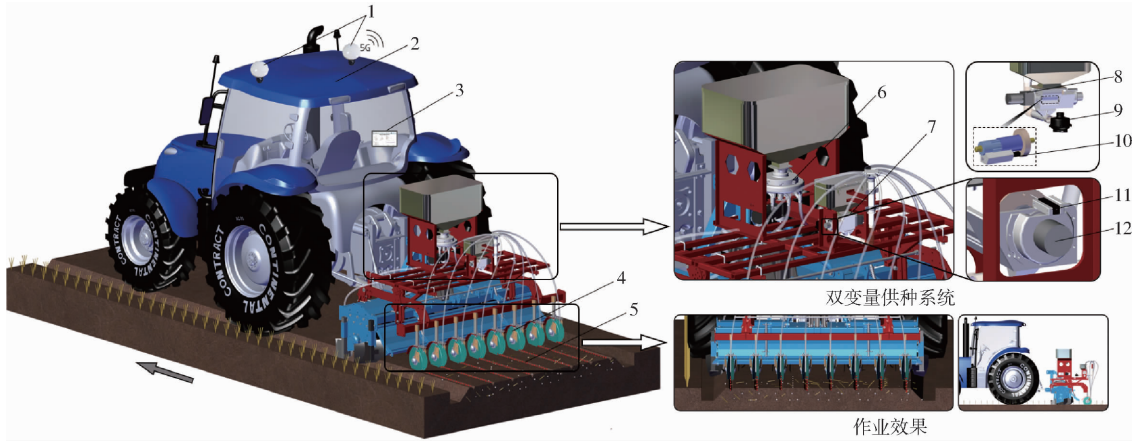


图 1 油菜高速气送式播种机整体结构图

Fig. 1 Overall structure diagram of high-speed pneumatic rapeseed seeder

1. 北斗 RTK 天线 2. 拖拉机 3. 控制终端 4. 开沟器 5. 油菜种子 6. 排肥系统 7. 供种系统 8. 排种电机 9. 风机
10. 数字推杆电机 11. 弹簧自复位式直线位移传感器 12. 编码器

1.2 工作原理

油菜气送式双变量机直播作业前, 需在云平台设置播种量、作业幅宽等参数, 播种作业时由凯斯 1404 型拖拉机三点悬挂挂接智能播种机, 牵引机具前进作业, 通过组合式开沟犁破土开畦沟, 整备出幅宽 2.3 m 的种床厢面; 同时, PTO 驱动旋耕刀具做回转运动, 完成灭茬、碎土、翻土等作业。种肥变量控制终端放置于驾驶室内, GNSS 接收机实时采集机具位置、作业速度信息并反馈给种肥变量控制终端, 系统依据设定播量和作业信息, 确定转速-工作长度最优控制序列, 随后, 分别向排种电机和数字推杆电机发送指令, 驱动执行部件作业至目标位置。通过编码器和位移传感器实时监测转速、工作长度, 播种决策调控系统在接收目标转速-工作长度控制序列和当前转速、工作长度后, 通过调控算法计算控制变量, 驱动器控制排种电机与数字推杆电机分别调整至目标工作状态, 实现转速、工作长度的双闭环控制, 完成精量播种作业。

2 双变量供种控制系统设计

2.1 硬件组成

油菜高速气送式双变量供种调控系统主要通过作业参数设定、机具作业速度信息实时采集、有效工作长度控制、排种电机转速控制、传感器实时监测, 实现供种装置双变量动态调节, 系统硬件组成如

图 2 所示。硬件系统主要由双变量供种装置、双变量供种主控制器、电源模块、直流减速电机、直流电机驱动器、编码器、数字推杆电机、信号转换模块、位移传感器、GNSS 接收机、通信与交互模块等组成。

本系统中, 拖拉机 12 V 电源经电源模块处理后为双变量供种主控制器供电。其中, 双变量供种主控制器选用树莓派 4B + 作为主控芯片, 通过脉冲信号控制电机转速, 为适应田间恶劣作业环境, 控制器配备了防尘防潮保护壳和散热风扇, 保证控制器在高湿度、高粉尘和高温环境下均能稳定可靠地运行; 直流电机驱动器选用 SUNAVY 公司生产的 2430RP 型电机驱动器, PWM 频率为 $1 \times 10^3 \sim 2 \times 10^4$ Hz; 排种电机选用欧邦有限公司生产的 070809FB 型直流减速电机, 额定功率为 20 W, 最高转速为 120 r/min; 转速反馈模块选用瑞曼德有限公司生产的 OVW2 型高精度旋转编码器, 旋转一圈接收 2 000 个脉冲; 长度反馈模块选用华芯传感有限公司生产的 S8FLP10A 型直线位移传感器, 其体积小、精度高、反应灵敏, 线性精度为 $\pm 1\%$, 重复性精度为 0.01 mm, 主要用于实时监测供种装置的工作长度; 数字推杆电机选用北京捷源高科有限公司生产的 MSD30 型电机, 其最大推拉力为 60 N, 工作速度为 10 mm/s, 最大工作行程为 30 mm, LV-TTL 接口经信号转换模块处理后, 控制推杆电机伸缩量, 实现供种装置工作长度的调节; GNSS 接收机选用上海 SINOGNSS 公司

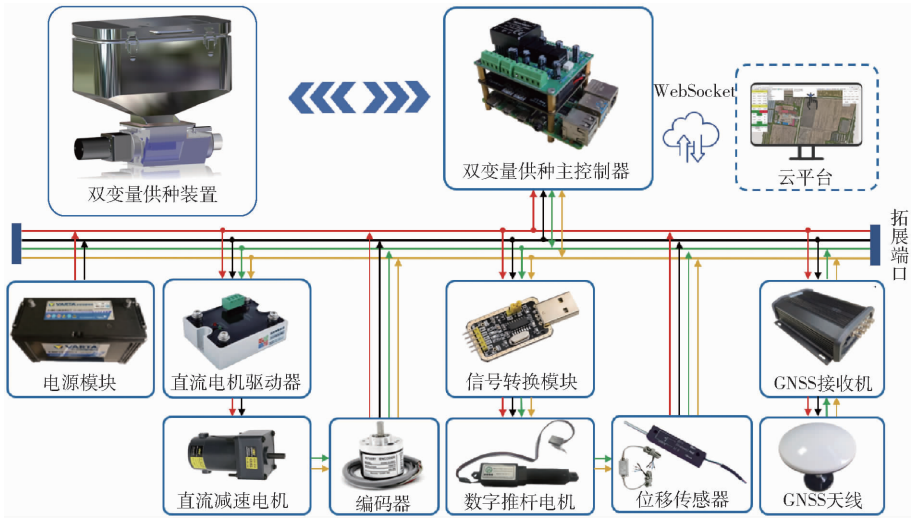


图 2 双变量供种控制系统组成

Fig.2 Bi-variable seed supply device control system composition

生产的 M600 型高精度定位定向接收机(定位精度 0.01 m),用于作业信息的实时采集。

2.2 软件设计

在播种作业过程中,为实现播量动态调节和信息通信,开发油菜气送式双变量供种装置上位机控制软件。该软件作为人机信息交互的主要媒介,其功能包括数据采集、数据处理、信息显示、参数设定和控制硬件设备等。软件系统利用 C++ 语言,在 Qt Creator 开发主体程序,同时结合 MySQL 数据库实现数据保存功能,主要包括信号传输模块、作业参数设定模块和机具控制模块,其中,机具控制方式有手动和自动两种;软件人机界面包括工作模式区、参数设定区、数据显示区和装置工作动态曲线,如图 3 所示。



图 3 控制软件人机界面

Fig.3 Control software human machine interface

信号传输模块利用串口通信技术,经信号转换实现串口信号的传输。作业参数设定模块可对目标播种量、装置有效工作长度和转速等参数进行设定,同时保存相应数据信息。机具控制模块依据作业信息对排种电机和推杆电机进行实时调控,其控制方式有手动和自动两种。在手动工作模式下,用户可依据作业要求直接对调节参数进行设定(或云平台设置);在自动工作模式下,系统解析 GNSS 信号,获

取机具当前作业速度信息,根据预设播种量,由播种决策调控系统自动控制转速和工作长度至作业目标值,工作原理已在 1.2 节阐明。控制系统流程如图 4 所示。

3 播种决策模型构建

3.1 LFA – MOIVY 播种决策模型构建方法

MOIVY 算法^[30]通过模拟常青藤植物的生长机理构建优化模型,其核心机制包括“生长点”的动态演化、“生长方向”的梯度搜索、“分支策略”的多路径探索等生物行为,该仿生机制适合用于复杂多峰函数优化场景^[31]。该算法根据多目标需求,利用其趋光性与附着性,向一个由大量非支配解构成的帕累托解集进行整体逼近,通过外部存档持续记录并更新所有的高质量非支配解。MOIVY 算法在复杂非线性条件下优化效果好、收敛速度快、稳定性强,但搜索机制过于依赖局部信息,缺乏强扰动的全局探索机制,容易陷入局部最优,为克服这一局限性,引入 LFA 算法增强全局探索能力^[32]。LFA 算法的重尾分布特性,在赋予算法精细局部搜索的同时,能够以小概率进行大步长的“跨越式探索”,规避 MOIVY 算法中依赖局部随机游走的缺陷,提升全局探索能力和种群多样性,增加找到高质量帕累托解的概率^[33]。

LFA – MOIVY 播种决策模型构建流程如图 5 所示。以排种相对误差、控制器响应时间、各行播量一致性变异系数为优化目标,建立多目标适应度函数,分别设定 MOIVY 算法和 LFA 算法的初始参数,基于多目标函数计算粒子适应度并更新外部存档。利用 LFA 算法优化外部存档,若优秀解集超出存档最大容量,则依据多目标适应度函数值对解集进行非

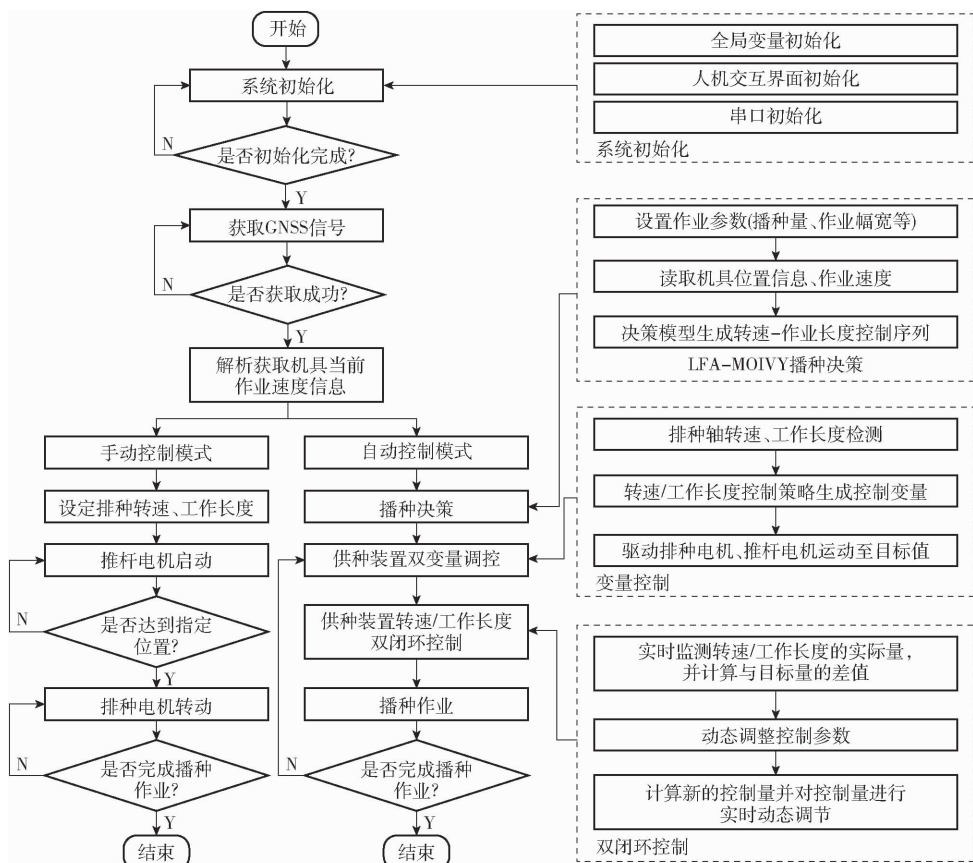


图4 控制系统流程图

Fig.4 Control system flowchart

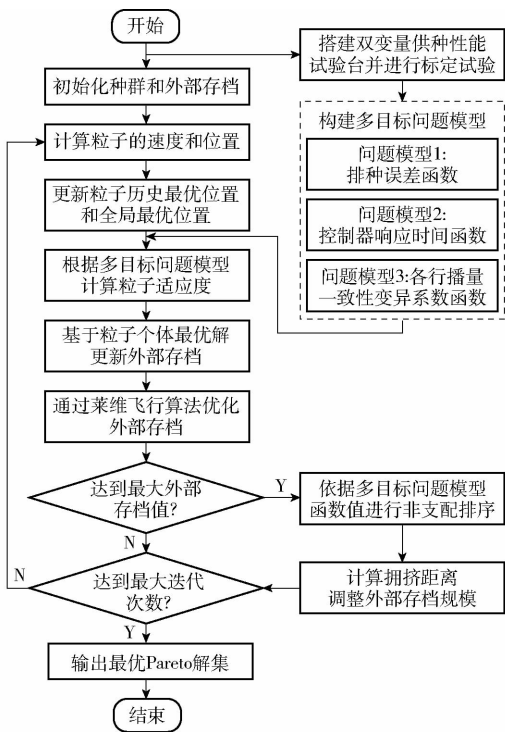


图5 LFA-MOIVY算法构建流程图

Fig.5 Flowchart of LFA-MOIVY algorithm construction

支配排序与拥挤度计算,选出新一代存档成员,以维持解集的多样性与分布性,当迭代次数达到最大值时,输出最优 Pareto 解集。在双变量供种调控系统

实际应用中,多目标适应度函数构建需遵循“目标量化—线性归一化—权重分配”的过程,决策者依据播种要求,为各目标分配权重,从解集中选择最优的转速-工作长度控制序列,提高了决策灵活性,为精准变量播种提供科学依据。

3.2 多目标优化模型构建

为实现播种量的精准控制,保证系统能够在最佳区域带内确定最优的转速-工作长度序列值,以排种相对误差、控制器响应时间、各行播量一致性变异系数为优化目标,构建多目标适应度函数。排种相对误差是实施种植精准化,提高单位面积产量的重要指标,本文赋予最高权重;各行播量一致性变异系数是保证作物合理汲取养分和光照的关键因素,若行间播量疏密不均,会导致作物减产,赋予次高权重;响应时间在常规播种作业中对播种精度的影响相对较低,优先级低于前两项。多目标适应度函数为

$$F(n,l)=\partial_1f_1(n,l)+\partial_2f_2(n,l)+\partial_3f_3(n,l) \quad (1)$$

式中 n ——排种槽轮转速,r/min

l ——工作长度,mm

$f_1(n,l)$ ——排种相对误差目标函数

$f_2(n,l)$ ——控制器响应时间目标函数

$f_3(n,l)$ ——各行播量一致性变异系数目标函数

- ∂_1 ——排种相对误差权重系数,取 0.5
 ∂_2 ——控制器响应时间权重系数,取 0.3
 ∂_3 ——各行播量一致性变异系数权重系数,取 0.2

排种相对误差是指播种机实际排种量与目标排种量之间的偏差,是衡量播种机作业精度的核心指标,相对误差越小,说明供种装置作业精度越高,反之,作业精度越低,排种相对误差目标函数定义为

$$f_1(n, l) = \left| \frac{|q_a - q_t|}{q_t} \times 100\% - \kappa \right| \quad (2)$$

式中 q_a ——实际排种量, g/min

q_t ——目标排种量, g/min

κ ——供种装置允许的最大误差, %

控制器响应时间是指供种装置在不同作业速度和播量双重变化条件下,执行部件到达目标转速和工作长度时所消耗的时间,包括转速调节时间和工作长度调节时间。调节时长是衡量调控系统实时性、动态性能的核心指标,决定了参数调控的及时性。控制器响应时间目标函数定义为

$$f_2(n, l) = \max \{ T_{adj}^{(n)}(n_1 - n_0), T_{adj}^{(l)}(l_1 - l_0) \} \quad (3)$$

式中 $T_{adj}^{(n)}$ ——转速调节时间函数

$T_{adj}^{(l)}$ ——工作长度调节时间函数

n_1 ——当前目标控制序列转速, r/min

n_0 ——之前目标控制序列转速, r/min

l_1 ——当前目标控制序列工作长度, mm

l_0 ——之前目标控制序列工作长度, mm

各行播量一致性变异系数用来反映播种机不同排种行之间实际播量与目标播量偏离程度,其数值越小,代表播种机各行播量越一致,播种质量越高,是衡量播种均匀性的核心指标。各行播量一致性变异系数目标函数定义为

$$f_3(n, l) = \frac{\sqrt{\frac{1}{u-1} \sum_{z=1}^u \left(Q_{z'}(n, l) - \frac{1}{u} \sum_{z=1}^u Q_{z'}(n, l) \right)^2}}{\frac{1}{u} \sum_{z=1}^u Q_{z'}(n, l)} \quad (4)$$

式中 $Q_{z'}$ ——第 z' 个排种口播量, g

u ——排种口数量, 取 8

3.3 多目标优化模型标定试验

为构建多目标优化模型,分别开展转速-工作长度-排种量关系模型,转速、工作长度与响应时间关系模型,以及不同转速-工作长度控制序列-各行播量一致性变异系数关系模型的标定试验。试验种子选用华油杂 520,为保证种子输送的稳定性,风机风压设置为 3 000 Pa^[34-35],参考文献[9]确定转速、工

作长度试验范围,试验装置为油菜高速气送式双变量供种装置,试验台如图 6 所示。

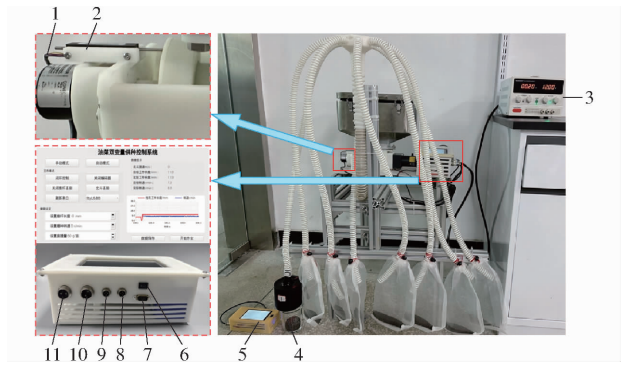


图 6 气送式双变量供种装置试验台

Fig. 6 Air-assisted bi-variable seed metering device test bench

1. 编码器 2. 位移传感器 3. 电源 4. 高通量种子流检测装置
5. 监测终端 6. 控制器电源开关 7. RS232 接口 8. 长度监测接口
9. 转速监测接口 10. 驱动器供电接口 11. 电机驱动接口

3.3.1 转速-工作长度-排种量关系模型标定试验

为保证控制系统准确性,实现精准调控,建立输入量(n, l)与输出量(q_a)关系模型。试验设置工作长度为 5、10、20、25、30 mm,转速为 10 ~ 100 r/min,以 5 r/min 为增量进行标定试验,针对不同转速、工作长度组合,每组试验时间为 60 s,各重复 3 次,试验结束后进行称量,结果取平均值。利用 Origin 对试验数据进行拟合,得转速-工作长度-排种量关系模型为

$$q_a = f(n, l) = -13.79891 - 0.00886n^2 + 0.13449nl + 0.77215n - 7.353 \times 10^{-4}l^2 + 0.54773l \quad (5)$$

拟合的转速-工作长度-排种量关系曲面如图 7 所示,模型决定系数 R^2 为 0.99,可准确反映三者之间的关系,由图 7a 可知,排种量与转速、工作长度之间呈正相关关系,由图 7b 可知,同一目标播量下,对应着无数种转速和工作长度序列组合,但当转速过低、长度过长或转速过高、长度过短时,受脉冲特性、离心力的影响,会导致供种装置排种均匀性差、精度低、种子破损率高等问题,为避免这种极端现象的发生,需引入多目标优化方法,在多目标协同最优条件下,优化播种控制决策。

3.3.2 动态响应特性标定试验

为提高工作效率,保证控制序列的科学性和合理性,开展转速、工作长度变化量与响应时间关系模型标定试验。设置转速变化量 Δn 为 10 ~ 70 r/min,增长梯度为 5 r/min;设置工作长度变化量 Δl 为 3 ~ 30 mm,增长梯度为 3 mm,通过转速反馈模块和长度反馈模块实时反馈当前值,控制终端以每 100 Hz 的频率记录一次转速与工作长度,试验结束后将数据

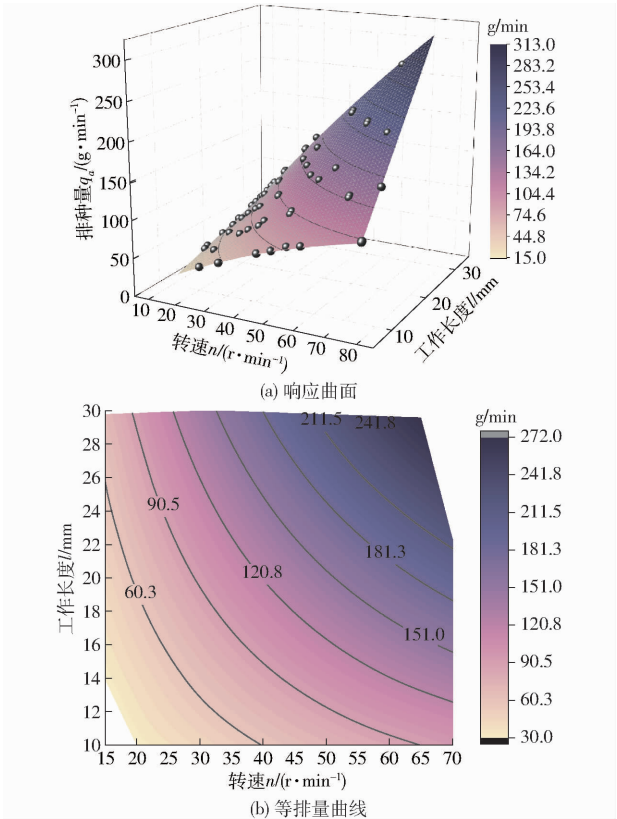


图7 转速-工作长度-排种量关系曲面
Fig.7 Rotational speed – working length – seeding rate relation surface graph

导出,统计装置达到目标值时所用时间。考虑到电机特性,分别针对不同转速、工作长度变化量进行递增、递减试验,试验重复3次,取平均值记录。

利用 Origin 对所得数据进行拟合,得转速变化量-响应时间、工作长度变化量-响应时间关系模型,如图8所示。由图可知电机增/减速与响应时间关系模型的 R^2 均为0.96,推杆电机增/减长度与响应时间关系模型的 R^2 均为0.99,模型拟合较好,转速、工作长度变化量与响应时间均呈正相关关系。

3.3.3 各行播量一致性变异系数标定试验

在不同转速-工作长度控制序列-各行播量一致性变异系数标定试验中,转速范围为10~70 r/min,以5 r/min为增长梯度;工作长度范围为3~30 mm,以3 mm为增长梯度;每组试验时间为60 s,由公式(4)计算各行播量一致性变异系数。利用 Origin 对试验数据进行统计拟合,得转速-工作长度-各行播量一致性变异关系模型为

$$D_v = f_3(n, l) = 1.233\ 14 \times 10^{-5}nl + 9.464\ 19 \times 10^{-5}l + 0.169\ 5 \quad (6)$$

式中 D_v ——各行播量一致性变异系数

拟合的转速-工作长度-各行播量一致性变异系数关系曲面如图9所示,模型决定系数 R^2 为0.91,

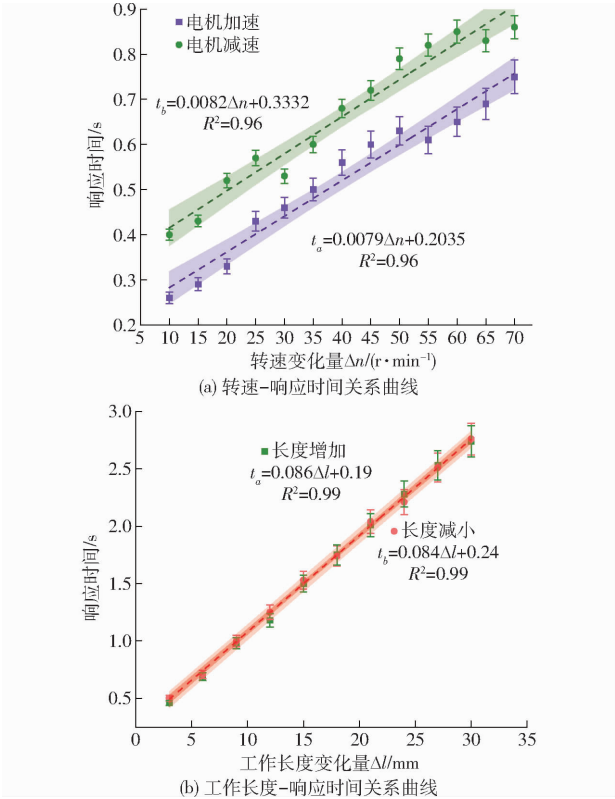


图8 转速、工作长度变化量与响应时间拟合曲线
Fig.8 Fitting curves for variation rotational speed, working length and response time

转速、工作长度对各行播量一致性变异系数影响显著。

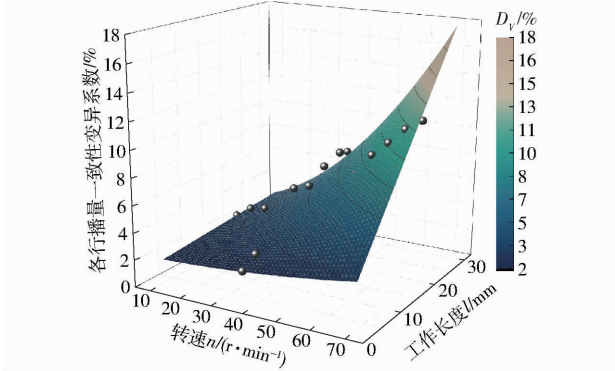


图9 转速-工作长度-各行播量一致性变异系数关系曲面
Fig.9 Rotational speed – working length – coefficient of variation relation surface graph

3.4 算法模型对比仿真试验

为检验 LFA – MOIVY 算法的合理性与有效性,引入差分进化算法 (Differential evolution, DE) 构建 DE – MOIVY 模型,将传统 MOIVY、DE – MOIVY 和 LFA – MOIVY 模型进行优越性比较。在相同仿真环境下,开展以超体积 (Hyper volume, HV)、Pareto 解集分布为试验指标的仿真性能对比试验。

3.4.1 试验环境及参数设置

仿真试验环境为: Matlab 2021a, Windows 10 操作系统, Intel (R) Core (TM) i5 – 10300H CPU @

2.50 GHz 中央处理器。试验设置最大迭代次数为 300,决策变量维度为 2;设置 LFA 算法的基准概率为 0.35,DE 算法的缩放因子为 0.3,交叉概率为 0.6,MOIVY 算法的生长因子为 0.15,生长阶段决策系数为 0.4,衰减系数为 0.896。

仿真试验目标播种量分别为 1.5、3.0、4.5、6.0 kg/hm²,作业速度为 6 km/h,机具作业幅宽为 2.3 m,则目标排种量 q_i 为

$$q_i = \frac{60Bv_m Q}{667}$$

(7)

式中 B ——机具作业幅宽,m
 v_m ——机具作业速度,m/s
 Q ——目标播量,kg/hm²

3.4.2 算法性能仿真结果

HV 是多目标优化算法性能评估的核心指标,用于衡量算法生成的 Pareto 解集所支配的目标空间体积,其值越大代表解集在目标空间中所覆盖的范围越广、质量更高,能直观地反映出解集的多样性和收敛性。HV 计算公式为

$$HV(Z,M) = \frac{z}{\bigcup_{z \in Z} V(z,M)}$$

(8)

式中 Z ——非支配解集
 M ——参考点
 z ——非支配解
 $V(z,M)$ ——非支配解和点 M 确定的超立方体

为更直观分析每种算法在不同播种量下 Pareto 解集所支配的目标空间体积,绘制 HV 箱线图,如图 10 所示。由图分析可知,各算法独立运行 30 次后,在不同播种量下,LFA-MOIVY 算法的中位线明显高于其余两种算法,箱体范围明显窄于其余两种算法,表明该算法综合性能更优;在目标播种量为 1.5、3.0、4.5、6.0 kg/hm²时,LFA-MOIVY 算法 HV 平均值分别为 2.35、2.63、2.02、1.98,对比其余两种算法,LFA-MOIVY 算法处于优势地位,说明该算法具有强大的解集生成能力,在排种精度、响应时间和各行播量一致性变异系数的多目标条件下得到的解集质量更高、稳定性更强。

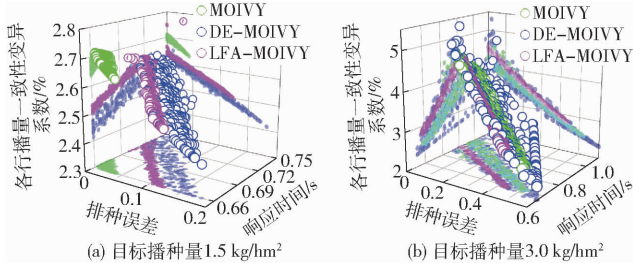


图 11 3 种模型的 Pareto 解集分布图

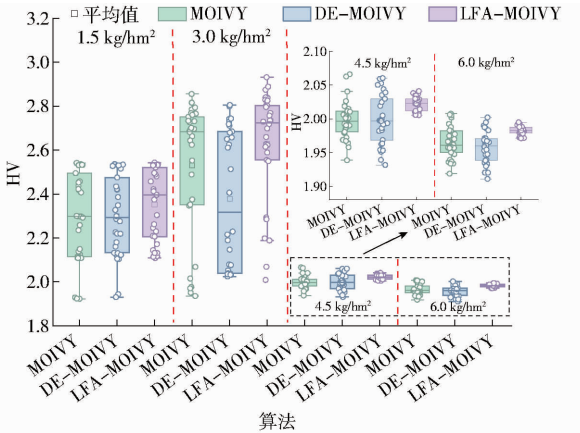


图 10 HV 箱线图

Fig. 10 HV box plot

3.4.3 解集分布仿真结果

为直观分析各算法单次运行后,Pareto 解集的覆盖范围、均匀性和收敛性,绘制不同播种量下,MOIVY 算法、DE-MOIVY 算法和 LFA-MOIVY 算法在排种相对误差、各行播量一致性变异系数和响应时间多目标空间的 Pareto 解集分布图,如图 11 所示,从图分析可知,不同播种量下,3 种算法在多个测试问题中解集分布表现出显著差异。当目标播种量为 1.5 kg/hm²时(图 11a),由解集在 $x-y$ 、 $z-x$ 、 $y-z$ 投影面的分布可知,MOIVY 算法的解集空洞且分布稀疏,未覆盖全局前沿面,DE-MOIVY 算法解集整体较分散,对优质区域的聚焦能力较弱。当目标播种量为 3.0 kg/hm²时(图 11b),MOIVY 和 DE-MOIVY 算法的解集在 $y-z$ 和 $x-y$ 投影面中分布不集中,说明在目标空间中解集过度分散、离散,出现大量无关劣解。当目标播种量为 4.5 kg/hm²时(图 11c),MOIVY 算法在各行播量一致性变异系数为 3.5%~7.0%时解集局部收敛,整体均匀性较差,说明在目标空间某一区域内,算法陷入局部最优,全局搜索能力不足,DE-MOIVY 算法的解集虽整体分布较均匀,但部分解集相对分散,收敛性不足。当目标播种量为 6.0 kg/hm²时(图 11d),MOIVY 和 DE-MOIVY 算法的解集整体远离最优前沿且分布散乱。LFA-MOIVY 算法在不同播量下,Pareto 解集前沿面均呈线性分布,覆盖范围全面,分布均匀,无局部簇聚或稀疏

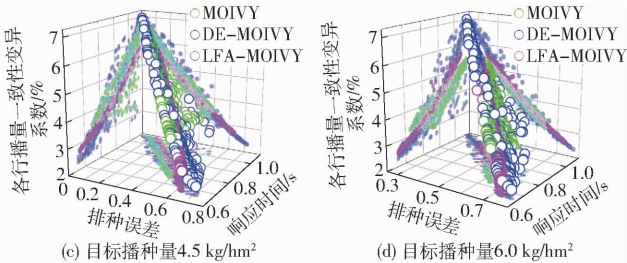


Fig. 11 Pareto solution set distribution diagrams of three models

空缺的现象,解集的收敛性、多样性和均匀性均优于其余两种算法,在目标空间内可有效生成多目标协同最优解,优化播种控制决策。

综合分析可知,在双变量播种决策场景下,LFA-MOIVY 算法的全局搜索能力与稳定性显著优于其余两种算法,通过融合 LFA 算法的全局搜索机制,MOIVY 算法在解集优化过程中能够快速收敛至全局最优前沿,更适合用于播种决策中转速-工作长度控制序列的生成。

4 验证试验

4.1 双变量调控系统台架试验

4.1.1 试验方法

为验证播种决策调控系统的可行性和科学性,开展 LFA-MOIVY 播种决策方法与传统播种决策方法台架性能对比试验,试验场景如图 6 所示。

传统播种决策方法以转速优先调节、工作长度分段调节为主,不同的工作长度对应不同的播量区间。将工作长度分为 10、15、20、25、30 mm 5 个梯度,转速范围为 15~100 r/min,分别在各个梯度下进行转速-播量标定试验,得两者关系模型为

$$P = \begin{cases} -3 \times 10^{-5} n^3 - 0.002 n^2 + 1.67 n & (l = 10 \text{ mm}) \\ -4 \times 10^{-5} n^3 - 6 \times 10^{-5} n^2 + 2.06 n & (l = 15 \text{ mm}) \\ -8 \times 10^{-5} n^3 + 0.003 2 n^2 + 2.88 n & (l = 20 \text{ mm}) \\ -1 \times 10^{-4} n^3 + 0.005 3 n^2 + 3.74 n & (l = 25 \text{ mm}) \\ -1 \times 10^{-4} n^3 + 0.003 8 n^2 + 4.77 n & (l = 30 \text{ mm}) \end{cases}$$

(9)

式中 P ——供种速率, g/min

利用 Origin 对试验数据进行拟合,不同工作长度下播量与转速的关系如图 12 所示。由图可知,当长度为 10、15、20、25、30 mm 时,供种速率分别为 24.5~61.7 g/min、30.8~88.9 g/min、43.7~154.8 g/min、57.0~238.0 g/min、72.1~318.2 g/min。

在 LFA-MOIVY 决策方法与传统方法的对比试验中,LFA-MOIVY 播种决策方法可依据播量和

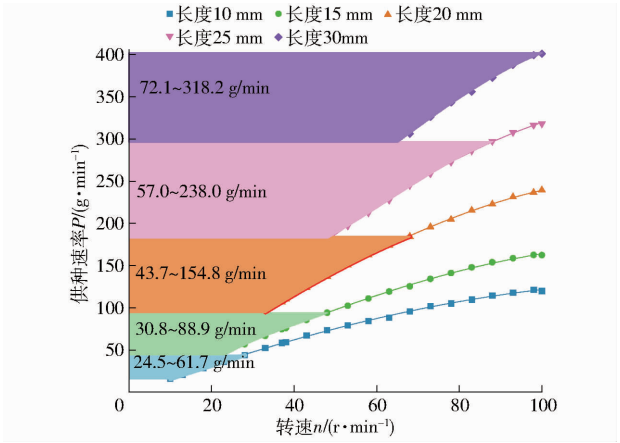


图 12 供种速率-转速关系拟合曲线

Fig. 12 Seeding rate-rotation speed fitting curves

作业速度信息,对转速与工作长度进行无级调节,其模型权重向量为(0.5,0.3,0.2)。试验分为 LFA-MOIVY 决策方法和传统决策方法 2 组,试验在不同作业速度 3、6、9、12 km/h 下,分别设置目标播量为 1.5、3.0、4.5、6.0 kg/hm²,试验指标为排种相对误差、各行播量一致性变异系数和响应时间,每组试验时间为 60 s,各重复 3 次,取平均值。变异系数由公式(4)计算可得,响应时间统计方法同 3.2 节,相对误差计算公式为

$$\varepsilon = \frac{|q_a - q_t|}{q_t} \times 100\%$$

(10)

式中 ε ——排种相对误差, %

4.1.2 试验结果分析

LFA-MOIVY 决策方法与传统方法台架对比试验结果如图 13 所示,由图 13a 分析可知,LFA-MOIVY 播种决策模型对排种精度的影响显著,本文决策方法相对误差范围为 1.56%~4.20%,平均相对误差为 3.00%,传统决策方法相对误差范围为 1.87%~6.78%,平均相对误差为 3.76%,对比分析可知,本文决策方法排种相对误差较传统决策方法下降了 0.76 个百分点,表明 LFA-MOIVY 播种决策模型生成的转速-工作长度控制序列可有效提高排种精度,保证播种作业质量。由图 13b 分析可

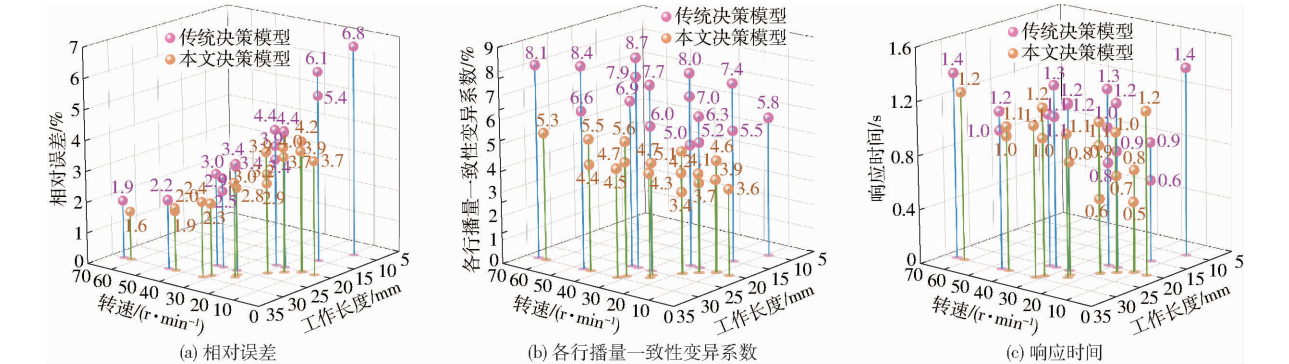


图 13 台架对比试验结果

Fig. 13 Bench comparative test results

知,本文决策方法变异系数范围为 3.40% ~ 5.57%,平均变异系数为 4.47%,传统决策方法变异系数范围为 5.04% ~ 8.70%,平均变异系数为 6.90%,对比分析可知,本文决策方法的各行播量一致性变异系数较传统决策方法下降了 2.43 个百分点,表明相较于传统模型,由 LFA - MOIVY 播种决策模型优化后的控制序列对提高播种均匀性和稳定性效果显著。由图 13c 分析可知,在经过决策模型优化后,系统的响应速度有了一定的提高,本文决策方法响应时间为 0.52 ~ 1.24 s,平均时间为 0.96 s,传统决策方法响应时间为 0.60 ~ 1.39 s,平均时间为 1.10 s,对比分析可知,本文决策方法的响应时间较传统决策方法缩短了 0.14 s,表明由 LFA - MOIVY 播种决策模型优化后的控制序列可有效提高播种作业效率。

综合分析可知,LFA - MOIVY 播种决策调控系统在油菜直播机作业中,可快速、科学、合理、有效地生成转速-工作长度控制序列,改善了播种作业精度,提高了作业效率。

4.2 路面试验

4.2.1 试验方法

为验证油菜高速气送式双变量调控系统作业性能,2025 年 10 月于湖北省襄阳市无人试验示范农场道路上开展相关性能试验,如图 14 所示。依据农

艺要求设置不同播种量,结合 NY/T 2208—2012《油菜全程机械化生产技术规范》中性能指标要求,开展精量播种变速性能试验,试验指标为排种相对误差、各行播量一致性变异系数和响应时间。在试验中拖拉机挂接不同的挡位(低 4、高 1、高 3、高 4),对应的作业速度约为 3.0、5.8、9.1、12.1 km/h,试验种子选用华油杂 520,试验时设定播种量分别为 1.5、3.0、4.5、6.0 kg/hm²,作业距离为 50 m,机具在作业过程中执行加速、匀速、减速、停机等操作,其中先稳定行驶 15 m,快速换挡后再稳定行驶 20 m,最后切换挡位行驶 15 m,分别在 0、15、35、50 m 处设置标记点,作业速度变化分别为低 4→高 3→低 4 和高 1→高 4→高 1,试验结束后称量种子质量,计算相关性能指标,试验结果如表 1 所示,然后从控制系统中导出不同速度下,各播量的转速-工作长度序列值,进行统计分析,试验结果如图 15、16 所示。



图 14 播种性能路面试验

Fig. 14 Sowing performance road surface test

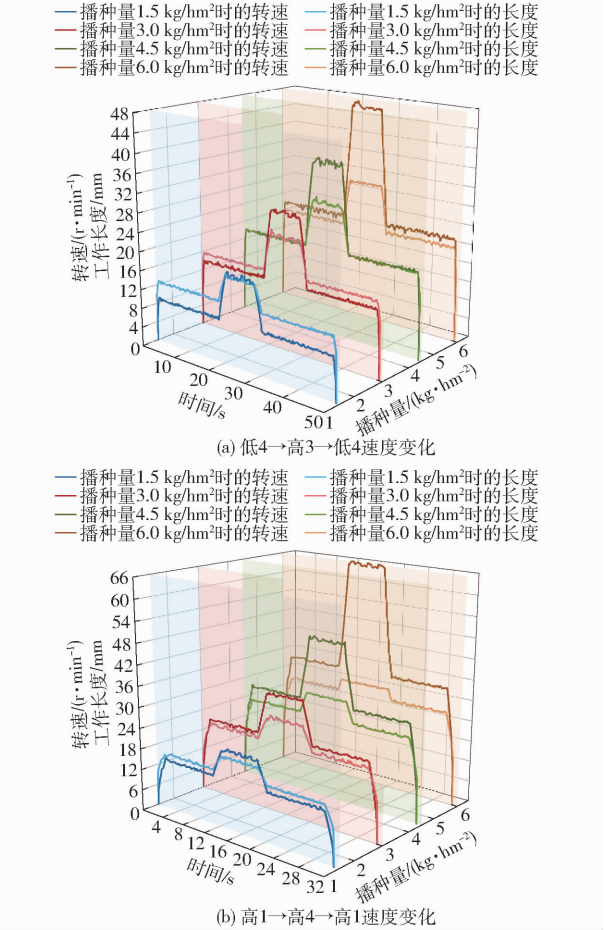
表 1 路面试验结果
Tab. 1 Results of road surface test

作业速度/ (km·h ⁻¹)	播种量/ (kg·hm ⁻²)	理论 播量/g	各行播量/g								排种相对各行播量一致性		响应 时间/s
			1	2	3	4	5	6	7	8	误差/%	变异系数/%	
3.0→9.1→3.0 (低 4→高 3→低 4)	1.5	17.17	2.2	2.3	2.0	2.1	2.1	2.2	2.3	2.3	2.5	5.1	1.59
	3.0	34.34	4.1	4.0	4.1	4.1	4.6	3.9	4.0	4.0	4.5	5.2	1.97
	4.5	51.52	6.4	6.6	6.9	6.7	6.9	6.9	6.7	7.5	4.2	4.7	2.20
	6.0	68.69	8.3	8.3	8.9	8.0	7.8	8.0	8.1	8.5	3.5	4.2	2.37
5.8→12.1→5.8 (高 1→高 4→高 1)	1.5	17.17	2.2	2.3	1.9	2.2	2.1	2.2	2.3	2.3	1.9	6.2	1.81
	3.0	34.34	4.1	4.0	4.0	4.0	4.7	4.2	4.0	4.0	3.9	5.9	2.41
	4.5	51.52	6.7	6.4	7.0	6.3	7.0	7.0	6.8	7.4	3.3	5.2	2.53
	6.0	68.69	8.6	8.2	7.6	8.5	8.2	7.9	9.0	8.5	3.2	5.2	2.61

4.2.2 结果分析

由表 1 可知,播种量为 1.5 ~ 6.0 kg/hm²,机具作业速度变化为低 4→高 3→低 4 时,变速播种相对误差范围为 2.5% ~ 4.5%,各行播量一致性变异系数范围为 4.2% ~ 5.2%,响应时间范围为 1.59 ~ 2.37 s;当作业速度变化为高 1→高 4→高 1 时,变速播种相对误差范围为 1.9% ~ 3.9%,各行播量一致性变异系数范围为 5.2% ~ 6.2%,响应时间范围为 1.81 ~ 2.61 s,各项指标均符合国家和相关行业标准要求。由图 15 可知,在变速播种作业中,转速-工

作长度控制序列值随作业速度动态调节,播种量为 1.5 ~ 6.0 kg/hm²,速度变化为低 4→高 3→低 4 时,转速调节范围为 9.0 ~ 46.5 r/min,工作长度调节范围为 13 ~ 20 mm;速度变化为高 1→高 4→高 1 时,转速调节范围为 14.0 ~ 65.5 r/min,工作长度调节范围为 16 ~ 30 mm。变速作业条件下,转速-工作长度序列值控制精度如图 16 所示,由图分析可知,在速度变化为低 4→高 3→低 4,播量为 1.5 ~ 6.0 kg/hm²时,转速的控制精度不低于 97.6%,工作长度控制精度不低于 98.6%;在速度变化为高 1→高 4→高

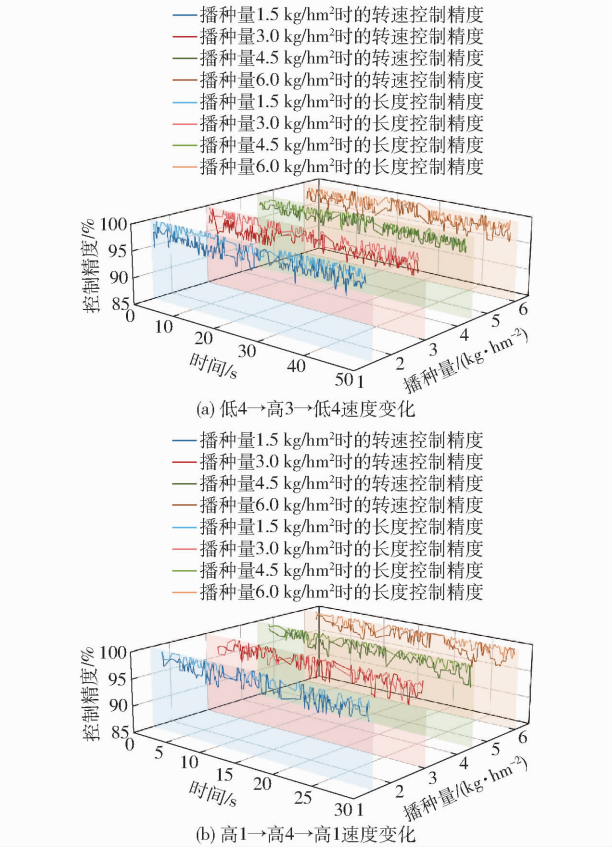


1, 播种量为 1.5 ~ 6.0 kg/hm² 时, 转速的控制精度不低于 98.1%, 工作长度的控制精度不低于 98.8%。综合分析可知, 调控系统对播种量的改变和作业速度的变化, 均能快速响应, 并能准确生成转速-工作长度控制序列值, 说明双变量调控系统在油菜直播机不同作业速度和播量双重变化下, 具有较好的适应性能和调节能力。

4.3 田间试验

4.3.1 试验方法

为检验油菜高速气送式双变量调控系统田间作业性能, 2025 年 11 月在华中农业大学襄阳现代农业产业示范基地开展田间播种试验, 机具作业方式为自动控制模式, 作业场景和油菜长势情况如图 17 所示。试验设置播量为 4.5 kg/hm², 种子选用华油杂 520, 排种口处安装高通量种子流检测装置^[36] 记录各路种子流量, 作业时机具挂接不同挡位 (低 4、高 1、高 3、高 4), 速度为 3 ~ 12 km/h, 各速度下匀速前进 50 m, 试验结束后系统导出数据, 进行统计分析, 试验结果如表 2 所示。



1. 位移传感器 2. 双变量供种装置 3. 监测终端 4. 高通量种子流检测装置

4.3.2 结果分析

由表 2 可知, 在播种量为 4.5 kg/hm²、作业速度为

3~12 km/h 时,转速的变化范围为 18.8~47.0 r/min,工作长度变化范围为 19.0~30.0 mm,随作业速度的增加,排种相对误差不高于 3.52%,参考文献[9]供种精度相较于传统播种决策方法提高了 3.41 个百分点,变异系数相较于传统播种决策方法下降了 2.24 个百分

点,各行播量一致性变异系数不大于 6.73%,响应时间范围为 2.10~2.86 s,试验过程中未出现断条现象。综上,双变量调控系统能够依据作业速度、播种量等信息,及时调整供种转速和工作长度,实现精准变量播种,满足油菜高速精量播种作业要求。

表 2 田间试验结果
Tab.2 Results of field trials

作业速度/ (km·h ⁻¹)	试验 号	供种速率/ (g·min ⁻¹)	理论 播量/ g	转速均值/ (r·min ⁻¹)	工作长 度均值/ mm	各行播量/g								排种 相对误 差/%	各行播量 一致性变 异系数/%	响应 时间/ s
						1	2	3	4	5	6	7	8			
3.0(低 4)	1					6.0	6.8	6.8	7.2	6.1	6.5	6.8	7.0			
	2	51.52	51.52	18.8	19.0	6.8	6.3	6.5	6.6	6.9	6.5	6.0	6.5	3.33	5.57	2.10
	3					6.8	6.3	7.2	6.1	7.0	6.8	7.3	6.9			
5.8(高 1)	1					6.0	6.6	5.6	6.3	6.5	6.4	6.5	7.0			
	2	103.66	51.52	28.6	24.6	5.9	7.0	6.7	6.8	7.2	7.3	6.6	7.0	3.52	6.04	2.33
	3					6.5	6.8	7.0	6.3	7.0	7.0	7.4	6.6			
9.1(高 3)	1					6.8	6.5	6.8	6.7	6.5	7.0	6.5	7.0			
	2	155.17	51.52	37.2	28.0	6.4	6.6	5.8	6.0	6.0	7.3	6.5	6.6	3.00	6.31	2.63
	3					6.1	6.8	7.4	6.8	6.1	6.3	7.2	7.5			
12.1(高 4)	1					6.4	6.0	6.7	6.5	6.3	5.8	6.8	7.1			
	2	206.69	51.52	47.0	30.0	6.5	7.0	5.7	7.0	6.6	6.5	7.3	6.6	2.55	6.73	2.86
	3					6.0	7.2	6.6	6.5	6.7	6.6	7.4	6.7			

5 结论

- (1)针对油菜直播机控制系统响应速度慢、决策模型精度低,导致作业效率下降、排种量误差大的问题,基于课题组前期油菜高速气送式双变量供种装置,设计了一种多目标常青藤优化算法的控制序列决策调控系统。
- (2)通过分析 MOIVY 和 LFA 的算法机理,以排种相对误差、控制器响应时间和各行播量一致性变异系数为优化目标,构建多目标适应度函数。通过标定试验,构建控制序列多目标优化模型。
- (3)采用 Matlab 开展 MOIVY、DE-MOIVY 和 LFA-MOIVY 模型仿真对比试验,试验结果表明,LFA-MOIVY 算法的全局搜索能力优于其余两种算法,更适合用于播种决策中转速-工作长度控制序列的生成。台架性能试验表明,本文决策方法较传统决策方法相对误差下降了 0.76 个百分点、变异系

- 数下降了 2.43 个百分点、响应时间缩短了 0.14 s,表明通过 LFA-MOIVY 播种决策模型优化后的控制序列可有效提高播种作业效率。
- (4)开展双变量调控系统路面变速性能试验,试验结果表明,播种量为 1.5~6.0 kg/hm²,机具作业速度变化为 3~12 km/h 时,转速控制精度不低于 97.6%,工作长度控制精度不低于 98.6%,相对误差不高于 4.5%,变异系数不高于 6.2%,响应时间不高于 2.61 s,各项指标均符合国家和相关行业标准要求。田间试验结果表明,在播种量为 4.5 kg/hm²,作业速度为 3~12 km/h 时,随作业速度增加,排种相对误差不高于 3.52%,变异系数不高于 6.73%,响应时间不高于 2.86 s,试验过程中未出现断条现象。双变量调控系统在油菜直播机不同作业速度和播量双重变化下,具有较好的适应性能和调节能力,能够满足油菜高速精量播种作业要求。

参 考 文 献

[1] 何蒲明,张维,张学昆,等. 农业机械化作业对油菜产量的影响研究——以湖北省为例[J]. 中国油料作物学报, 2025, 47(3): 541-551.
HE Puming, ZHANG Wei, ZHANG Xuekun, et al. Impact of agricultural mechanization on rapeseed yield-taking Hubei Province as an example[J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2025, 47(3): 541-551. (in Chinese)

[2] 李瑞,余意雯,王敦亮,等. 长江中下游油菜薹油兼用模式菜籽产量特征比较研究[J]. 作物学报,2026, 52(2):620-630.
LI Rui, YU Yiwen, WANG Dunliang, et al. Comparative study on the characteristics of rapeseed yield under the rapeseed-oil dual-purpose mode in the middle and lower reaches of the Yangtze River[J]. Acta Agronomica Sinica, 2026, 52(2):620-

630. (in Chinese)

[3] 农业农村部召开常务会议研究部署粮油作物大面积单产提升工作[J]. 中国植保导刊, 2025, 45(1): 115.

[4] 刘海,杜铮,郭翔,等. 蔬菜种子精量直播技术与装备研究进展[J]. 华中农业大学学报, 2025, 44(1): 225–238.
LIU Hai, DU Zheng, GUO Xiang, et al. Progress on technology and equipment of precision and direct seeding for vegetable seeds[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2025, 44(1): 225–238. (in Chinese)

[5] 顿国强,郭娜,纪欣鑫,等. 红萝卜侧面悬置排种勺式精量排种器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2024, 55(5): 77–86,97.
DUN Guoqiang, GUO Na, JI Xinxin, et al. Design and experiment of side-rowing spoon type precision seed metering device for radish[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(5): 77–86,97. (in Chinese)

[6] 李辉,赵武云,石林榕,等. 舀种勺舌式胡麻精量穴播器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2024, 55(3): 85–95.
LI Hui, ZHAO Wuyun, SHI Linrong, et al. Design and test of seed ladle tongue type flax precision burrow planter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(3): 85–95. (in Chinese)

[7] 侯加林,马端旭,李慧,等. 气力离心组合式小麦精量排种器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2023, 54(10): 35–45.
HOU Jialin, MA Duanxu, LI Hui, et al. Design and experiment of pneumatic centrifugal combined precision seed metering device for wheat[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(10): 35–45. (in Chinese)

[8] 张涛,任桂英,代聪,等. 油菜精量播种关键技术与装备研究进展[J]. 石河子大学学报(自然科学版), 2025, 43(1): 45–54.
ZHANG Tao, REN Guiying, DAI Cong, et al. Research progress on key technologies and equipment of precision seeding for rapeseed[J]. Journal of Shihezi University(Natural Science), 2025, 43(1): 45–54. (in Chinese)

[9] 张文欣,李浩鹏,董万静,等. 油菜高速气送式双变量供种装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2025, 56(8): 252–264.
ZHANG Wenxin, LI Haopeng, DONG Wanqing, et al. Design and experiment of high-speed air-assisted bi-variable seed supply device for oilseed rape[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(8): 252–264. (in Chinese)

[10] 汪昕,张凯良,张东兴,等. 主要粮油作物无人化精密播种技术与装备研究进展[J]. 农业机械学报, 2025, 56(9): 20–41.
WANG Xin, ZHANG Kailiang, ZHANG Dongxing, et al. Research progress on unmanned precision seeding technology and equipment for major grain and oil crops[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(9): 20–41. (in Chinese)

[11] 兰玉彬,韩金钢,张同升,等. 正态分布规律变量调节式多功能条播装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2024, 55(9): 75–88.
LAN Yubin, HAN Jin'gang, ZHANG Tongsheng, et al. Design and testing of multifunctional strip-tillage device based on normal distribution regular variable conditioning[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(9): 75–88. (in Chinese)

[12] 王云霞,黄苏同,张文毅,等. 交错勾齿式小麦精量排种器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2024, 55(7): 142–153,167.
WANG Yunxia, HUANG Sutong, ZHANG Wenyi, et al. Design and experiment of wheat precision seed metering device with staggered hook-tooth[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(7): 142–153,167. (in Chinese)

[13] 尤泳,周小艺,郭晓晴,等. 变径变距式螺旋混合排种装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2025, 56(11): 93–102.
YOU Yong, ZHOU Xiaoyi, GUO Xiaoqing, et al. Design and experiment of variable-diameter and variable-pitch spiral mixing and seeding device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(11): 93–102. (in Chinese)

[14] 李晓冉,霍佳琪,廖庆喜,等. 稻麦油兼用高速叶轮离心式集排器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2025, 56(9): 42–51,211.
LI Xiaoran, HUO Jiaqi, LIAO Qingxi, et al. Design and experiment of high-speed impeller centrifugal centralized metering device for rice, wheat and rapeseed[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(9): 42–51,211. (in Chinese)

[15] 李宝刚,王翔,刘遵民,等. Multi-algorithm fusion based control strategy for electrically-driven wind pressure regulation in pneumatic precision seeders[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2026, 240:111173.

[16] 俞亚新,潘一隆,王通,等. 播量可调式水稻毯苗条播机滚筒排种器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2025, 56(10): 310–320.
YU Yaxin, PAN Yilong, WANG Tong, et al. Design and test of drum seed metering device for drill seeding of rice blanket seedlings[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(10): 310–320. (in Chinese)

[17] BOGUSA E, VYSHEBABINA A. Design scheme and operating principle of a centrifugal seed distributor of a pneumatic grain seeder[J]. MATEC Web of Conferences, 2021, 346: 03011.

[18] 廖庆喜,罗湛程,杨恒,等. 基于RTK测速的油菜直播机随速可控可调排种控制系统研究[J]. 农业机械学报, 2024, 55(9): 65–74.
LIAO Qingxi, LUO Zhancheng, YANG Heng, et al. Variable-rate seeding control system based on RTK speed measurement for rapeseed direct seeder[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(9): 65–74. (in Chinese)

[19] WANG Weiwei, SHI Wenbing, LIU Ce, et al. Development of automatic wheat seeding quantity control system based on doppler radar speed measurement[J]. Artificial Intelligence in Agriculture, 2025, 15:12–25.

[20] 丁永前,陈冲,余洪锋,等. 小麦播种机播量控制参数自校正方法[J]. 农业机械学报, 2023, 54(4): 31–37,275.

- DING Yongqian, CHEN Chong, YU Hongfeng, et al. Self-correcting method for application rate control parameters of wheat seed drill machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(4): 31–37, 275. (in Chinese)
- [21] 马旭, 赵旭, 刘赛赛, 等. 水稻高速插秧机固体颗粒肥料变量施肥装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2023, 54(9): 99–110.
MA Xu, ZHAO Xu, LIU Saisai, et al. Design and experiment of solid particle fertilizer variable rate fertilization device for high-speed rice transplanter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(9): 99–110. (in Chinese)
- [22] XIE Chunji, LI Yang, HE Xiantao, et al. Maize precision seeding scheme based on multi-sensor information fusion[J]. Journal of Industrial Information Integration, 2025, 43: 100758.
- [23] 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)
- [24] ZHANG Jiqin, LIU Gang, LUO Chengming, 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.
- [25] 黄友锐, 陆森, 韩涛, 等. 基于 GOHBA-Fuzzy-PID 算法的施肥控制系统优化研究[J]. 农业机械学报, 2025, 56(11): 320–328.
HUANG Yourui, LU Sen, HAN Tao, et al. Optimization of fertilization control system using GOHBA-Fuzzy-PID algorithm[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(11): 320–328. (in Chinese)
- [26] 丁幼春, 张栋津, 董万静, 等. 油菜变径离心式排肥器双变量调控系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2025, 56(10): 340–352.
DING Youchun, ZHANG Dongjin, DONG Wanjing, et al. Design and testing of bivariate regulation system for variable diameter centrifugal fertilizer spreaders in oilseed rape[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(10): 340–352. (in Chinese)
- [27] 施印炎, 辛亚鹏, 汪小岳, 等. 基于多层感知机模型的稻麦双变量精准施肥机排肥策略[J]. 农业工程学报, 2025, 41(10): 51–60.
SHI Yinyan, XIN Yapeng, WANG Xiaochan, et al. Research on fertilizer application strategy for rice-wheat dual-variable precision fertilizer applicator based on MLP[J]. Transactions of the CSAE, 2025, 41(10): 51–60. (in Chinese)
- [28] 张季琴, 刘刚, 胡号, 等. 排肥单体独立控制的双变量施肥控制系统研制[J]. 农业工程学报, 2021, 37(10): 38–45.
ZHANG Jiqin, LIU Gang, HU Hao, et al. Development of bivariate fertilizer control system via independent control of fertilizing unit[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(10): 38–45. (in Chinese)
- [29] 廖宜涛, 谭钰, 廖庆喜, 等. 主要粮油作物精量播种技术与装备研究进展[J]. 农业机械学报, 2025, 56(9): 1–19.
LIAO Yitao, TAN Yu, LIAO Qingxi, et al. Research progress and development trends in precision seeding technologies for major grain and oil crops[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(9): 1–19. (in Chinese)
- [30] MOJTABA G, MOHSEN Z, PAVEL T, et al. Optimization based on the smart behavior of plants with its engineering applications; Ivy algorithm[J]. Knowledge-Based Systems, 2024, 295: 111850.
- [31] 王旭, 马家庆, 陈昌盛, 等. 无刷直流电机的改进常青藤优化自抗扰控制[J]. 科学技术与工程, 2025, 25(28): 12033–12041.
WANG Xu, MA Jiaqing, CHEN Changsheng, et al. Improvement of brushless DC motor with IVY optimized active disturbance rejection control[J]. Science Technology and Engineering, 2025, 25(28): 12033–12041. (in Chinese)
- [32] 王小涵, 刘聪锋. 面向组网雷达的粒子群优化航迹欺骗干扰方法[J]. 西安电子科技大学学报, 2025, 52(4): 180–191.
WANG Xiaohan, LIU Congfeng. Particle swarm optimization for trajectory deception jamming against networked radar systems[J]. Journal of Xidian University, 2025, 52(4): 180–191. (in Chinese)
- [33] 胡晟荣, 王强, 钱玥, 等. 面向城市环境的多无人机协同打击任务分配与路径规划算法[J]. 兵工学报, 2026, 47(1): 202–220.
HU Shengrong, WANG Qiang, QIAN Yue, et al. Multi-uva cooperative strike task assignment and path planning algorithm for urban environments[J]. Acta Armamentarii, 2026, 47(1): 202–220. (in Chinese)
- [34] 谭钰, 张翼, 金颖, 等. 油麦兼用气力辅助导种集排器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2025, 56(9): 105–116, 187.
TAN Yu, ZHANG Yi, JIN Ying, et al. Design and experiment of pneumatic-assisted seed collector for rapeseed and wheat[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(9): 105–116, 187. (in Chinese)
- [35] 廖宜涛, 王传奇, 施彬彬, 等. 油麦兼用气送式排种系统高通量混种装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2024, 55(12): 134–146.
LIAO Yitao, WANG Chuanqi, SHI Binbin, et al. Design and text of high-throughput seed mixing device for rapeseed and wheat with air-fed seed discharging system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(12): 134–146. (in Chinese)
- [36] 丁幼春, 余秋丽, 董万静, 等. 太阳能供电的油菜高速播种种子流检测装置研制[J]. 农业工程学报, 2025, 41(13): 83–93.
DING Youchun, YU Qiuli, DONG Wanjing, et al. Development of the solar-powered detection device for high-speed seeding seed flow of oil rape[J]. Transactions of the CSAE, 2025, 41(13): 83–93. (in Chinese)