

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2520318

基于MSWOA优化的Fuzzy-LADRC大豆株间避苗除草控制系统*

陆孝杰^{1,2} 王文成^{1,2} 余智科^{1,2} 许仕林^{1,2} 郑诗翰^{1,2}

(1. 广西高校先进制造与自动化技术重点实验室 桂林 541006; 2. 桂林理工大学机械与控制工程学院 桂林 541006)

摘要: 针对田间复杂作业环境下的自动除草控制系统参数整定困难、抗干扰能力差、轨迹跟踪精度低,导致大豆株间机械避苗除草困难、伤苗率高的问题,提出了一种基于多策略改进的鲸鱼优化算法(MSWOA)优化的大豆株间避苗除草控制系统,以控制步进电机角速度实现除草刀精准的避苗除草。首先,对株间避苗除草建立数学模型,并将模糊控制器与线性自抗扰控制器(LADRC)进行结合,提升系统的抗扰动性能。其次,通过MSWOA整定模糊线性自抗扰控制器(Fuzzy-LADRC)的关键参数,通过多个基准函数的对比测试,证明了MSWOA具有更好的寻优性能和稳定性。最后,在株间除草控制系统模型上进行仿真实验分析,以确定最优的控制策略。仿真实验结果表明,改进后的算法控制方法较于其他控制方法收敛速度更快、收敛精度更高,有效提升了系统的控制性能;经过MSWOA优化的Fuzzy-LADRC控制系统相较于传统PID和LADRC受干扰恢复时间分别减少了86.0%、10.9%;通过将MSWOA与其他算法的参数整定进行对比,也验证了改进后算法在该控制系统中优越性。该控制系统在抗干扰能力、响应速度上有着明显的优势,能够适应复杂的田间工作环境,满足精准避苗除草的控制要求。

关键词: 株间除草;模糊—线性自抗扰;多策略改进型鲸鱼优化算法;参数优化

中图分类号: TP273;TN99 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.80

Soybean inter-plant seedling avoidance and weeding control based on Fuzzy-LADRC optimized by MSWOA

Lu Xiaojie^{1,2} Wang Wencheng^{1,2} Yu Zhike^{1,2} Xu Shilin^{1,2} Zheng Shihan^{1,2}

(1. Key Laboratory of Advanced Manufacturing and Automation Technology, Guangxi Universities, Guilin 541006, China;

2. School of Mechanical and Control Engineering, Guilin University of Technology, Guilin 541006, China)

Abstract: Aiming at the problems of difficult parameter tuning, poor anti-interference ability and low trajectory tracking accuracy of automatic weeding control systems in complex field operating environments, which lead to difficulties in mechanical seedling avoidance and weeding between soybean plants and a high seedling damage rate, a soybean inter-plant seedling avoidance and weeding control system optimized by (multi-strategy improved whale optimization algorithm, MSWOA) is proposed. This system controls the angular velocity of the stepper motor to achieve precise seedling avoidance and weeding with the weeding knife. Firstly, a mathematical model for inter-plant seedling avoidance and weeding is established, and a fuzzy controller is combined with a linear active disturbance rejection controller (LADRC) to improve the anti-disturbance performance of the system. Secondly, the MSWOA is used to tune the key parameters of the fuzzy-linear active disturbance rejection controller (Fuzzy-LADRC). Comparative tests with benchmark functions prove that MSWOA has better optimization performance and stability. Finally, simulation experiments are conducted on the inter-plant weeding control system model to determine the optimal control method. The simulation results show that the improved algorithm-based control method exhibits faster convergence speed and higher convergence accuracy compared with other control methods, effectively enhancing the system's control performance. Specifically, the Fuzzy-LADRC control system optimized by MSWOA reduces the disturbance recovery time by 86.0% and 10.9% respectively in contrast to the traditional PID and LADRC control systems. Additionally, by comparing the parameter tuning effects of MSWOA with other algorithms, the superiority of the improved algorithm in this control system is further verified. This control system possesses distinct advantages in anti-disturbance capability and response speed, enabling it to adapt to complex field working environments and meet the control requirements for precise seedling avoidance and weeding operations.

Keywords: inter-plant weeding; fuzzy-linear active disturbance rejection control; multi-strategy improved whale optimization algorithm; parameter optimization

0 引言

作为承载千年农耕文明的作物,大豆在我国粮食安全

与产业体系中占据战略支点地位^[1]。它作为“油瓶子”与“肉盘子”的根基,大豆油占我国食用植物油消费的四成以上,其蛋白更是饲料产业的核心支撑,我国通过大豆振兴计

收稿日期:2025-12-01

* 基金项目:国家自然科学基金(52467022)、广西自然科学基金(2021GXNSFAA220038)项目资助

划实现产能突破,2024 年产量稳定在 2 000 万吨以上,大豆的稳定生产是国家粮食安全战略的关键一环^[2]。大豆田间除草是大豆生产中至关重要的环节,直接影响大豆的产量、品质和种植效益^[3-4]。机械的行间除草技术已经相对成熟^[5],但对于作物的株间除草,因受到作物生长周期不同导致所需避苗半径和株距不同、部分杂草位置靠近秧苗、复杂的田间作业环境会引起较多干扰等原因,导致除草控制系统难以稳定工作,避苗精度低,株间机械除草伤苗率高^[6]。

针对田间复杂环境下的作物株间避苗除草的需求,国内外许多学者对该问题进行研究,通过优化控制算法增强系统抗干扰能力、鲁棒性及响应效率。刘星星等^[7]通过确定除草机各部件参数,通过单片机和比例-积分-微分(proportional-integral-derivative, PID)参数整定设计了一种株间电驱动避障除草机,完成了仿真试验与田间验证,为相关作物株间除草机研发提供了科学依据。韩豹等^[8]使用超声测距技术与 PID 控制算法,研发了控制除草部件入土深度的系统,使用 PID 算法对除草刀入土深度进行调节,使系统拥有较快的调节时间,但抗干扰能力较弱。徐畅等^[9]引入蚁群优化算法优化 PID 控制起重机变幅液压缸位置,结果表明优化后的 PID 控制系统在多种干扰下具有较优的响应性能和较低的跟踪误差。黄凯等^[10]通过设计底盘驱动系统模糊 PID 控制器,并提出算法优化模糊 PID 的量化因子与比例因子,来避免局部最优。尽管这些理论方法在响应速度和抗干扰能力上具有一定的优势,但由于各自的限制,农业上机械自动化除草仍普遍采用传统 PID 控制并需要人工调节。因此,开发更稳定、高效的避苗除草控制策略,以降低机械自动化除草的伤苗率,是目前亟待解决的关键问题。

线性自抗扰控制(linear active disturbance rejection control, LADRC)具有较低的模型依赖和较强的抗干扰能力,同时兼顾优异的动态性能,能够通过对内外误差进行实时估计并进行补偿实现稳定的控制。袁若丹等^[11]使用 PID 与 LADRC 相结合的方法,利用 PID 控制参数调节便捷、跟踪快速的特点和 LADRC 增强系统鲁棒性和抗干扰能力,提高了系统的控制效率,在抗扰动方面明显优于单纯的 PID 控制。王文成等^[12]融合 LADRC 与模糊 Smith 预估器,解决了单一 LADRC 应对大时滞能力不足、传统 Smith 控制器参数自适应差的问题,提升系统鲁棒性和快速响应性。Ji 等^[13]使用粒子群算法(particle swarm optimization, PSO)优化 LADRC 的参数控制农药喷洒,其研究结果表明相较于 PID 控制, LADRC 控制器抗干扰能力和响应速度更强,但使用 PSO 整定参数方法较为简单,系统控制效果有较大提升空间。张小龙^[14]提出融合蚁群算法和 PSO 的混合算法对 LADRC 进行参数优化来进行避苗除草,通过仿真测试验证其在抗干扰性、鲁棒性上具有一定优势,但在避苗精度上仍可提升。上述控制方法基本能够实现作物株间除草作业,但在复杂的田间作业环境下仍存在参数

整定困难、抗干扰能力一般、响应速度较慢的问题。因此,本文在大豆苗草视觉检测的研究基础上,针对现有株间除草控制存在的问题,提出了一种基于多策略改进鲸鱼算法(multi-strategy improved whale optimization algorithm, MSWOA)优化的模糊线性自抗扰(fuzzy linear active disturbance rejection control, Fuzzy-LADRC)大豆株间避苗除草控制系统,创新性地 将模糊控制器与 LADRC 相结合,通过模糊控制器对参数进行动态调整,实现了静态和动态扰动全面抑制,抗扰带宽更广,在保留 LADRC 较为简单的结构的同时,使系统的鲁棒性显著提升;针对控制器的参数整定困难问题,本文对鲸鱼优化算法(whale optimization algorithm, WOA)进行了多个策略上的改进,并将改进后的算法应用于 LADRC 的参数优化。

1 株间除草工作原理及系统建模

1.1 大豆株间除草装置

本设计的大豆株间除草装置如图 1 所示。该装置的核心组成部分包括机架、株间除草机构、对行机构、视觉模块、电控箱以及驱动轮。其中,除草装置整体装配于机架之上,装置后轮采用万向轮设计,前轮为驱动轮,由轮毂电机提供动力驱动;株间除草机构搭载在对行机构上,借助步进电机的驱动来完成避苗控制动作;对行机构则由伺服电机驱动,通过带动除草机构移动来实现精准对行控制;视觉模块安装在机架上方,用以区分大豆植株与杂草,定位杂草位置。

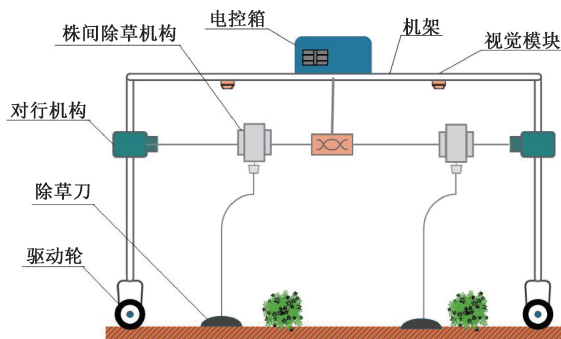


图 1 除草装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of weeding device

1.2 视觉检测模块设计

视觉检测模块根据除草装置的要求,采用 MVHS510GC 相机从地面 40~50 cm 高度垂直向下采集得到 2 056×2 464 pixels 的原始图像,后期处理为 640×640 pixels。检测算法采用 YOLOv7 进行构建,定位误差<16 pixel,检测速度为 33.8 fps,能够实时对目标进行检测。视觉检测方案的流程如图 2 所示。首先,由相机对田间苗草信息进行采集,检测算法对所得信息进行处理;其次,通过检测信息来计算作物相对信息、株距、避苗半径等关键信息;最后,将信息传输到控制器中,由控制器进行输出控制。

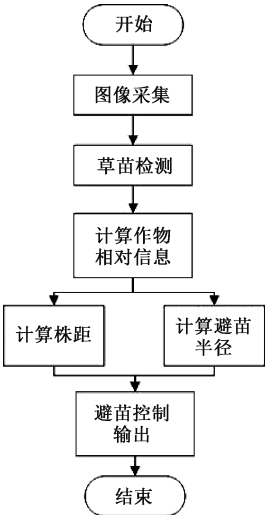


图 2 视觉检测方案流程

Fig. 2 Flow chart of visual inspection scheme

1.3 株间避苗除草工作原理

由于播种不均匀、生长环境等因素会导致大豆植株大小和距离不同,所需避苗半径及大豆株距将会发生变化,研究的株间除草装置的避苗除草工作原理如图 3 所示。其中 v 为装置前进速度, R_1 为除草刀半径, R_2 、 R_3 、 R_4 为保护半径, L_1 、 L_2 为大豆株距, ω_1 、 ω_2 、 ω_3 为电机转速。

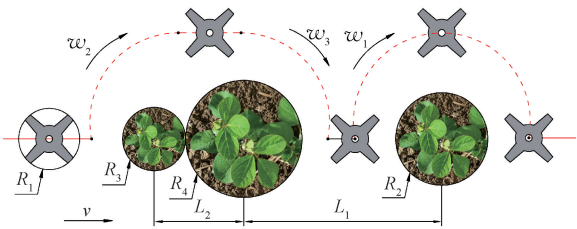


图 3 株间避苗除草工作原理

Fig. 3 Working principle of inter-plant seedling avoidance and weeding

除草刀避苗除草的运动轨迹可分解为除草刀回转中心的平移运动和除草刀绕圆心的圆周运动,平移运动所用时间 $t_1 = 2R/v$, 其中 R 为保护半径; v 为装置前进速度;圆周运动所用时间 $t_2 = 2\pi/\omega$, 其中 ω 为电机转速;通过运动所用时间相等 $t_1 = t_2$, 可得步进电机所需转速 $\omega = \pi v/R$ 。若运动轨迹与保护区域发生干涉,则装置在避苗开始和结束阶段之间的平移时间 $t_3 = L/v$, 其中 L 为相邻大豆株距。

根据图 3 可知,若 $L_2 < 2R_1 + R_3 + R_4$, 除草刀运行轨迹将会与避苗保护区域干涉,除草刀先做 1/4 圆周运动后再平移 L_2 来进行避苗运动,在避苗结束时再做 1/4 圆周运动进行复位,如图 3 中 R_3 、 R_4 避苗轨迹所示;若 $L_1 > 2R_1 + R_2 + R_4$, 除草刀运行轨迹与保护区域不发生干涉,除草刀围绕植株旋转半个圆周并复位,如图 3 中 R_2 、 R_4 避苗轨迹所示。

1.4 株间避苗除草控制系统数学模型

针对株间避苗除草装置的间歇运动需求,驱动机构需要选用步进电机,结合该装置运动的特点,选用了 86 CM85 型步进电机,并选用配套的 DM860 电机驱动器。该电机参数如表 1 所示。

表 1 86CM85 电机参数

Table 1 Parameters of 86CM85 motor	
工作参数	数值
步距角 $\theta / (^{\circ})$	1.8
保持力矩 $M / (N \cdot m)$	8.5
额定相电流 I / A	6.0
电感 L / mH	4.25
相电阻 R / Ω	0.53
转子惯量 $J / (kg \cdot cm^2)$	2.7
粘性阻尼系数 B	0.05
转子齿数 Z_r	40

为方便求解此步进电机的传递函数,将忽略磁饱和与电感非线性、两相绕组互感、涡流损耗、库仑摩擦与静摩擦等对控制性能影响较小且会大幅简化建模与控制器设计的因素。通过线性化物理建模得到步进电机传递函数如式(1)所示。

$$G_s(s) = \frac{\omega_2}{\omega_1} = \frac{\frac{K_t I Z_r}{J}}{s^2 + \frac{B}{J}s + \frac{K_t I Z_r}{J}} \tag{1}$$

式中: K_t 为电机反电势系数, $K_t = M/I = 1.42$ 。

将表 1 各个参数代入式(1),则步进电机传递函数

$$G_s(s) = \frac{126.22}{s^2 + 0.019s + 126.22^{\circ}}$$

株间除草装置的减速器动力传递可看作比例环节, $G_c(s) = R/d_0$, 其中 R 为刀杆回转直径, $R=100\text{ mm}$; d_0 为滚轮直径, $d_0=73\text{ mm}$;代入参数可求得 $G_c(s) = 1.37$ 。控制处理器进行数据采集和预处理,将其传递函数看作比例环节, $G_D(s) = 100k \times \theta_1$, 其中实际步距角 $\theta_1 = \theta_0/n_0$, 电机固有步距角 $\theta_0=1.8^{\circ}$, 减速比 $n_0=5$; 将各参数代入求得控制处理器传递函数 $G_D(s) = 0.02$ 。

步进电机驱动器可看作比例环节,通过理论分析与数值计算验证,最终得到其传递函数为 $G_E(s) = 9$ 。减速器用以降低转速、放大力矩并提升定位精度,其传递函数可看作比例环节 $G_F(s) = 1/n_0$, 将 n_0 的参数值代入得 $G_F(s) = 0.2$ 。速度编码器一般看作比例环节,其传递函数可看为 $G_H(s) = 1$ 。

由以上各个模块组成的避苗除草控制系统传递函数表示为:

$$G(s) = \frac{G_s(s)G_c(s)G_D(s)G_E(s)G_F(s)}{1 + G_s(s)G_c(s)G_D(s)G_E(s)G_F(s)G_H(s)} \tag{2}$$

将各环节传递函数代入式中,得到控制系统总传递函数为:

$$G(s) = \frac{6}{s^2 + 0.019s + 132.22} \quad (3)$$

2 株间避苗除草装置控制算法

2.1 线性自抗扰控制器

田间工作环境中干扰较多且环境多变,故采用二阶 LADRC 来提高避苗除草控制系统的抗干扰能力、响应速度以及控制精度。自抗扰控制作为一种新型鲁棒控制策略,其核心在于通过扩张状态观测器(extended state observer, ESO)实现系统内外扰动的实时估计与补偿,突破了传统模型依赖型控制方法的局限^[15]。通过对状态观测器的线性重构进一步提出线性自抗扰控制,将原非线性 ESO 结构转化为频域可解析形式,可显著提升参数整定的工程适用性^[16]。简化后的二阶 LADRC 结构如图 4 所示。

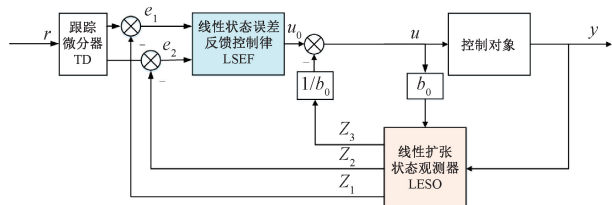


图 4 二阶 LADRC 结构

Fig. 4 Second-order LADRC structure

对避苗除草控制系统进行分析,系统输出可描述为二阶微分方程,如式(4)所示。

$$\ddot{z} = f(z, \dot{z}, w(t), t) + bu \quad (4)$$

式中: z 为系统输出,即步进电机转速, $f(z, \dot{z}, w(t), t)$ 为总扰动。LADRC 可以将总扰动进行统一估计,来实现精准补偿,因此,式(4)简化为:

$$\ddot{z} = u_0 \quad (5)$$

通过选择各个状态变量: $x_1 = z, x_2 = \dot{z}, x_3 = f$, 则原方程可以转为连续扩张状态方程,如式(6)所示。

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = x_3 + bu \\ \dot{x}_3 = \dot{f} \\ y = x_1 \end{cases} \quad (6)$$

式(6)中的线性 ESO 可表示为:

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}}_1 = -\beta_1(\hat{x}_1 - z) + \hat{x}_2 \\ \dot{\hat{x}}_2 = -\beta_2(\hat{x}_1 - z) + \hat{x}_3 + bu \\ \dot{\hat{x}}_3 = -\beta_3(\hat{x}_1 - z) \end{cases} \quad (7)$$

式中: $\hat{x}_1, \hat{x}_2, \hat{x}_3$ 为观测器的状态量,其中 z 为系统输出, $\hat{x}_1$ 为位置观测值; $\hat{x}_2$ 为速度观测值; $\hat{x}_3$ 为系统总扰动的观测值; $\hat{x}_1 - z$ 为位置跟踪; $\hat{x}_2 - z$ 为速度跟踪; $\hat{x}_3$ 系统总扰动的观测值; b 为系统固有控制量增益的估计值; $\beta_1, \beta_2, \beta_3$ 为观测器增

益。观测器增益通过调整观测器的状态估计误差修正力度,进而决定观测器的收敛速度、估计精度与抗噪能力。

将式(7)拉普拉斯反变换可得:

$$\dot{v}_0 = 6u - 0.019\dot{v}_0 - 132.22v_0 \quad (8)$$

线性状态误差反馈(linear state error feedback, LSEF)及扰动补偿可表示为:

$$\begin{cases} e_1 = v_0 - \hat{x}_1 \\ e_2 = -\hat{x}_1 \\ u_0 = K_p e_1 + K_i e_2 \\ u = (u_0 - \hat{x}_1)/b \end{cases} \quad (9)$$

式中: K_p, K_i 为线性状态误差反馈的增益, u_0 为其输出值; u 为补偿控制量; v_0 为系统输入量。

由式(8)可知, b 可设为 6;并进一步求得式(7)的特征方程为:

$$\lambda(s) = s^3 + \beta_1 s^2 + \beta_2 s + \beta_3 \quad (10)$$

采用极点配置法,将特征方程式(10)的理想极点配置到 $-\omega_0$ ($\omega_0 > 0$), 则有 $\beta_1 = 3\omega_0, \beta_2 = 3\omega_0^2, \beta_3 = \omega_0^3$, 其中 ω_0 为观测器带宽。采用极点配置法,可得式(9)参数为 $K_p = \omega_c^2$, $K_i = 2\xi\omega_c$ 其中 ξ 为阻尼比, ω_c 为控制器带宽。本研究取 $\xi = 1$, 则特征方程为 $\lambda(s) = (s + \omega_c^2)$ 。因此二阶线性自抗扰系统需要选取的参数即控制器带宽和观测器带宽。

2.2 改进模糊线性自抗扰控制器设计

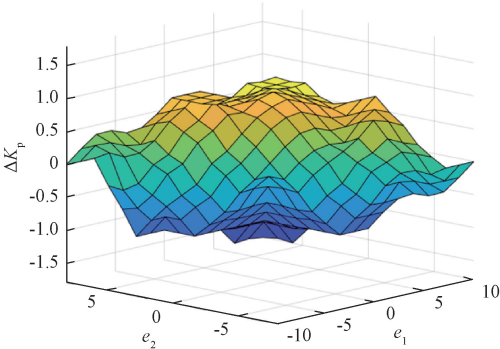
在避苗除草的步进电机驱动控制中,传统的线性自抗扰控制器依赖精确参数整定,但系统进行作业时,土壤阻力变化、杂草分布不均、地面不平整等扰动具有随机性和非线性,难以建立精确模型,固定的参数易出现响应滞后、超调或抗扰不足等问题。因此引入模糊控制来对误差反馈控制律进行实时调节,实现对田间作业的复杂工况需求^[17]。模糊控制无需依赖精确模型,可通过模拟人工操作经验,利用位置误差和误差变化率建立规则表,动态调整 PID 的比例和微分参数以达到快速响应突发扰动的效果,如遇到硬杂草时增强比例作用提升驱动力,临近苗株时增大微分作用抑制超调,有效弥补固定参数 PID 的局限性,提升除草刀平移运动的轨迹跟踪精度和抗扰能力,保障避苗除草作业的精准性与稳定性。在此以除草刀位置误差 e_1 和除草刀移动速度误差 e_2 作为模糊控制器的两个输入,控制参数修正值 ΔK_p 和 ΔK_i 作为输出,以实现自适应调整 LSEF 的参数要求,提高控制器的控制效果与抗干扰性。

将输入变量模糊子集论域除草刀位置误差 e_1 与移动速度误差 e_2 的模糊子集论域确认为 $[-10 \text{ mm}, 10 \text{ mm}]$ 与 $[-8 \text{ mm/s}, 8 \text{ mm/s}]$, 输出变量模糊子集论域 ΔK_p 与 ΔK_i 的模糊论域设计为 $[-3, 3]$ 。在模糊论域上定义 7 个语言子集为 {负大(NB), 负中(NM), 负小(NS), 零(ZO), 正小(PS), 正中(PM), 正大(PB)}。应用 Mamdani 法对 ΔK_p 与 ΔK_i 进行模糊化处理,最后采用质心法进行清晰化推理^[18],建立的模糊规则如表 2 所示。

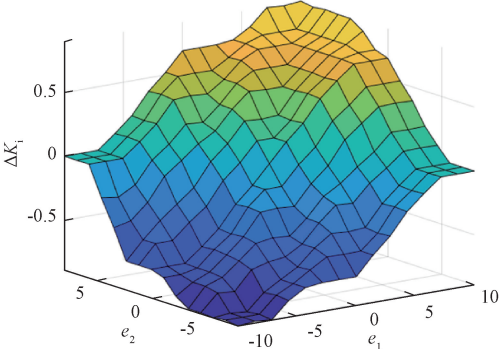
表 2 $\Delta K_p, \Delta K_i$ 模糊规则
Table 2 $\Delta K_p, \Delta K_i$ fuzzy rule

e_2	e_1						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PB/NB	PB/NB	PM/NM	PM/NM	PS/NS	ZO/ZO	ZO/ZO
NM	PB/NB	PB/NB	PM/NM	PS/NS	PS/NS	ZO/ZO	NS/ZO
NS	PM/NB	PM/NM	PM/NS	PS/NS	ZO/ZO	NS/PS	NS/PS
ZO	PM/NM	PM/NM	PS/NS	ZO/ZO	NS/PS	NM/PM	NM/PM
PS	PS/NM	PS/NS	ZO/ZO	NS/PS	NS/PS	NM/PM	NM/PB
PM	PS/ZO	ZO/ZO	NS/PS	NM/PS	NM/PM	NM/PM	NB/PB
PB	ZO/ZO	ZO/ZO	NM/PS	NM/PM	NM/PM	NB/PB	NB/PB

输入模糊变量的语言值{负大(NB),正大(PB)}取为高斯形隶属度函数,其余论域都取三角形隶属度函数。通过模糊规则表和隶属度函数可以得到 ΔK_p 与 ΔK_i 的三维视图,如图 5 所示。



(a) 模糊输出量 ΔK_p 的三维视图
(a) 3D view of fuzzy outputs ΔK_p



(b) 模糊输出量 ΔK_i 的三维视图
(b) 3D view of fuzzy outputs ΔK_i

图 5 模糊输出量 ΔK_p 与 ΔK_i 的三维视图
Fig. 5 3D view of fuzzy outputs ΔK_p and ΔK_i

根据输入误差除草刀位置误差 e_1 和误差其误差变化率 e_2 得到模糊控制输出的修正量 $\Delta K_p, \Delta K_i$, 与线性误差反馈律中的初始值 K_{p0}, K_{i0} 进行求和计算得出线性误差反馈律中 K_p 与 K_i 的实时值,即式(11)所示。

$$\begin{cases} K_p = K_{p0} + \Delta K_p \\ K_i = K_{i0} + \Delta K_i \end{cases} \tag{11}$$

本研究的避苗除草系统(图 6)通过结合模糊控制和自抗扰控制系统,形成具有动态重构特性的复合控制结构。该结构通过实时对除草刀位置误差 e_1 和误差其误差变化率 e_2 进行模糊推理,实现对误差反馈律的增益参数动态调整,使系统具有强抗复杂扰动能力、轨迹跟踪精度高、动态响应平滑稳定、适应能力强的优点。

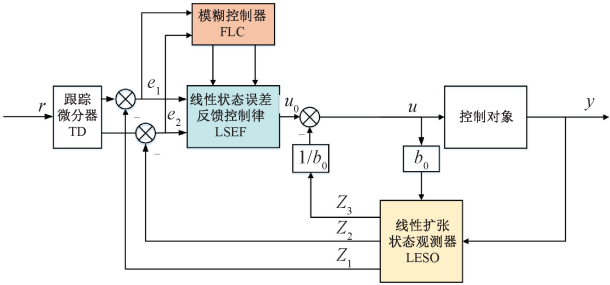


图 6 二阶模糊线性自抗扰流程
Fig. 6 Second-order Fuzzy-LADRC structure

3 改进鲸鱼算法优化 Fuzzy-LADRC 控制

3.1 鲸鱼优化算法

WOA 是模拟座头鲸捕食行为发展而来的一种群智能优化算法,该算法主要包含搜索猎物、包围猎物和螺旋气泡网捕食 3 个阶段^[19]。

自然界中,鲸鱼会随机搜索周围区域以寻找新的猎物,为增大搜索范围,鱼群会通过随机选择个体进行位置更新实现全局探索。WOA 中,参与群体捕猎行为的每一头鲸鱼均对应优化问题解空间中的一个可行解 $\mathbf{X}$, 通过模拟鲸鱼群体的随机游来完成位置更新。当 $|A| > 1$ 时,鲸鱼通过式(12)、(13)更新下一次位置。

$$\mathbf{X}(t+1) = \mathbf{X}_{\text{rand}} - \mathbf{A} \cdot \mathbf{D}_{\text{rand}} \tag{12}$$

$$\mathbf{D}_{\text{rand}} = |\mathbf{C} \times \mathbf{X}_{\text{rand}}(t) - \mathbf{X}(t)| \tag{13}$$

式中: t 为迭代次数, $\mathbf{X}(t)$ 为当前位置, $\mathbf{X}_{\text{rand}}$ 为任意鲸鱼位置, $\mathbf{A}$ 和 $\mathbf{C}$ 代表向量系数,定义如式(14)所示。

$$\begin{cases} \mathbf{A} = 2ar - \mathbf{a} \\ \mathbf{C} = 2r \end{cases} \tag{14}$$

式中: r 为 $[0,1]$ 之间的随机数, $a = 2 - 2t/T$, 可得 a 的值

从 2 线性递减至 0, 同时 A 的值也同时减小。

随着 t 的增加, $|A|$ 逐渐减小至 1, 鲸鱼开始对猎物进行包围。此时, 鲸鱼以猎物为最优个体, 其余鲸鱼向最靠近猎物的鲸鱼位置靠近并更新位置。

$$\mathbf{X}(t+1) = \mathbf{X}^*(t) - A \cdot D \quad (15)$$

$$D = |C \cdot \mathbf{X}^*(t) - \mathbf{X}(t)| \quad (16)$$

式中: $\mathbf{X}^*(t)$ 是种群中最优个体的位置。

当 $|A| < 1$ 时, 鲸鱼有 50% 的概率通过螺旋式游动并释放气泡形成网罩围捕猎物和 50% 概率继续以最优个体位置对猎物继续进行包围。该过程在算法中表述为式(17)。在迭代过程中, 收缩系数 $|A|$ 持续减小, 使搜索范围逐渐精确化, 最终当 $|A| = 0$ 时完成收敛。

$$\mathbf{X}(t+1) = \begin{cases} \mathbf{X}^*(t) - A \cdot D, & p < 0.5 \\ D_1 e^{bl} \cos(2\pi l) + \mathbf{X}^*(t), & p \geq 0.5 \end{cases} \quad (17)$$

式中: b 为螺旋形状参数, 本文设置为 1; l 为 $[-1, 1]$ 之间的随机数, D_1 为当前个体与最优个体之间的距离。随机概率 p 为 $[0, 1]$ 之间的随机数。

3.2 多策略改进的鲸鱼优化算法

对于传统 WOA 存在一定的缺陷, 本文通过 Sine 混沌映射代替原始种群初始化, 从而提高初始解的质量; 通过非线性时变因子提升了全局搜索能力; 通过自适应权值来提升算法局部开发能力; 此外, 还引入了 Levy 飞行算子增强算法全局勘探能力、帮助跳出局部最优^[20]。

1) Sine 混沌映射

传统 WOA 的种群生成方法随机性高, 对算法的收敛速度有很大影响。对此引入结构简单、计算速度快的 Sine 映射^[21], 增强了种群初始化的多样性, 避免初始分布不均, 从而提升 WOA 算法的优化精度与稳定性。Sine 混沌映射的表述如下:

$$\mathbf{X}(t+1) = \mu \sin[\pi \mathbf{X}(t)] \quad (18)$$

2) 非线性时变因子和自适应权值

在 WOA 的性能优化中, 参数 A 的动态调节机制至关重要, 其调节效果主要由收敛因子 a 决定。传统算法中收敛因子 a 随迭代次数线性递减, 会导致搜索猎物与包围猎物的切换生硬, 缺乏自适应调节, 同时后期收敛速度较慢。因此, 本文提出一种改进的分段非线性收敛策略, 将收敛因子 a 的模型更新为:

$$a = \begin{cases} 1 + \cos\left(p \times \frac{t}{T}\right), & t \leq 0.5T \\ \cos\left(p \times \frac{t - 0.5T}{T}\right), & t > 0.5T \end{cases} \quad (19)$$

为优化鲸鱼的捕猎效率, 本文提出一种自适应权值策略, 以更好地反映猎物位置对鲸鱼种群更新的动态影响。该策略的数学模型如式(20)所示。

$$\omega(t) = \frac{2}{\pi} \cdot \tan\left(\frac{t}{T}\right) \quad (20)$$

鲸鱼的位置的数学模型变更为:

$$\mathbf{X}(t+1) =$$

$$\begin{cases} \mathbf{X}_{\text{rand}} \cdot \omega(t) - A \cdot D_{\text{rand}}, & p < 0.5, \quad |A| > 1 \\ \mathbf{X}^*(t) \cdot \omega(t) - A \cdot D, & p < 0.5, \quad |A| \leq 1 \\ D_1 e^{bl} \cos(2\pi l) + \mathbf{X}^*(t) \cdot [1 - \omega(t)], & p \geq 0.5 \end{cases} \quad (21)$$

自适应权值策略通过非线性动态调整优化搜索过程。初始阶段以较低权值来降低初期目标模糊带来的干扰, 保证充分的全局勘探; 随着迭代深入, 通过权值逐步加大, 以增强最优解对种群的引导作用, 来提高局部开发效率, 该策略显著提升了算法的收敛稳定性和求解精度。

3) 随机比较策略

传统 WOA 算法中搜索猎物通过随机一只鲸鱼来进行位置更新, 全局开发的能力弱。随机比较策略通过随机选择两只鲸鱼进行位置比较, 选取出二者中适应度更优秀的个体, 位置较差个体向更优秀的个体进行位置的调整, 该过程如式(22)所示。

$$\mathbf{X}_{\text{new}} = \begin{cases} \mathbf{X} + \text{rand}(0, 1) \times (\mathbf{X} - \mathbf{X}_p), & f(x_p) \leq f(x) \\ \mathbf{X} + \text{rand}(0, 1) \times (\mathbf{X}_p - \mathbf{X}), & f(x_p) > f(x) \end{cases} \quad (22)$$

4) Levy 飞行变异增强策略

传统 WOA 算法在优化复杂问题时, 易出现种群多样性下降、迭代后期陷入局部最优^[22]。通过给予当前最优个体以 Levy 飞行算子扰动, 当个体陷入局部最优时, 算子能够产生较大步长使算法跳出局部最优, 增强算法全局勘探能力, 同时也会产生小步长加速局部搜索。引入 Levy 飞行算子如式(23)所示。

$$\mathbf{X}^*(t+1) = \mathbf{X}^*(t) \cdot [1 + \alpha \cdot \text{Levy}(\beta)] \quad (23)$$

式中: α 为步长系数, 在此取 $\alpha(t) = \alpha_0 \cdot (1 - t/T_{\text{max}})$, $\alpha_0 = 0.1$, $\text{Levy}(\beta)$ 为服从莱维分布的随机数。

通过对 a 线性衰减取值, 前期 a 大, 强化 Levy 大步长特性以跳出局部最优; 后期 a 小, 保留小步长加速收敛。而 $\text{Levy}(\beta)$ 自带小步密集、大步稀疏的特性, 可以加速局部搜索, 又能帮助跳出局部最优。

3.3 改进 MSWOA 算法流程

步骤 1) 设定 WOA 算法初始化参数、鲸鱼规模、最大迭代次数。

步骤 2) 以 Sine 混沌映射对鲸鱼种群初始化。

步骤 3) 更新非线性因子 a 与自适应权重, 并对 $|A|$ 的数值进行更新。

步骤 4) 根据 $|A|$ 和 p 的数值来选择鲸鱼更新方式并对鲸鱼位置进行更新。

步骤 5) 进行全局搜索根据随机比较策略更新较差个体位置。

步骤 6) 利用 Levy 飞行变异增强策略对当前最优值扰动, 产生新解。

步骤 7) 判断算法是否达到最大迭代次数, 若是则输出最优解, 则算法结束; 否则返回步骤 3)。

4 实验与仿真

4.1 多策略改进的鲸鱼算法性能分析

为验证本文提出的 MSWOA 的性能优势,故选取 WOA 算法、PSO 算法、灰狼优化算法 (grey wolf optimizer, GWO) 和 蝴蝶 优 化 算 法 (butterfly

optimization algorithm, BOA) 与其进行对比实验。对比试验采用的函数均为经典基准函数,测试函数的选取如表 3 所示,表中函数 $F_1 \sim F_3$ 为单峰函数,用以验证算法在最优解附近的精细搜索能力和收敛速度; $F_4 \sim F_6$ 为多峰函数,验证算法跳出局部最优、探索全局最优的能力。

表 3 测试函数
Table 3 Test function

测试函数	维度	范围
$F_1(x) = \sum_{i=1}^n x_i^2$	30	$[-100,100]$
$F_2(x) = \sum_{i=1}^n (\sum_{j=1}^i x_j)^2$	30	$[-100,100]$
$F_3(x) = \max_i \{ x_i , 1 \leq i \leq n \}$	30	$[-100,100]$
$F_4(x) = \sum_{i=1}^n [x_i^2 - 10\cos(2\pi x_i) + 10]$	30	$[-5.12,5.12]$
$F_5(x) = -20\exp(-0.2\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^n x_i^2} - \exp(\frac{1}{n}\sum_{i=1}^n \cos(2\pi x_i))) + 20 + e$	30	$[-32,32]$
$F_6(x) = \frac{1}{4\,000}\sum_{i=1}^n x_i^2 - \prod_{i=1}^n \cos(\frac{x_i}{\sqrt{i}}) + 1$	30	$[-600,600]$

为确保对比实验的公正性,所有算法均使用 MATLAB R2024a 进行仿真测试。测试的基本参数设置为种群数 $N=30$,最大迭代次数为 500。对每个函数独立

测试 30 次,统计出算法的平均值和标准差,统计结果如表 4 所示,通过平均值可以反映出算法的寻优精度,标准差反映出算法的寻优稳定性。

表 4 各算法的平均值与标准差
Table 4 Mean values and standard deviations of each algorithm

函数	指标	MSWOA	WOA	PSO	GWO	BOA
F_1	平均值	0.00×10^0	8.32×10^{-71}	3.43×10^{-4}	2.03×10^{-27}	1.25×10^{-11}
	标准差	0.00×10^0	3.98×10^{-70}	1.02×10^{-3}	2.94×10^{-27}	9.36×10^{-13}
F_2	平均值	0.00×10^0	4.13×10^4	8.24×10^1	1.27×10^{-5}	1.23×10^{-11}
	标准差	0.00×10^0	1.23×10^4	2.43×10^1	2.54×10^{-5}	1.01×10^{-12}
F_3	平均值	0.00×10^0	4.67×10^1	1.02×10^0	1.03×10^{-6}	6.43×10^{-9}
	标准差	0.00×10^0	2.62×10^1	1.98×10^{-1}	1.11×10^{-6}	3.93×10^{-10}
F_4	平均值	0.00×10^0	7.23×10^{-15}	5.54×10^1	3.23×10^0	6.34×10^0
	标准差	0.00×10^0	2.31×10^{-14}	1.16×10^1	3.68×10^0	3.37×10^1
F_5	平均值	8.56×10^{-16}	4.12×10^{-15}	1.65×10^{-1}	1.02×10^{-13}	6.03×10^{-9}
	标准差	8.43×10^{-31}	2.14×10^{-15}	3.88×10^{-1}	1.51×10^{-14}	3.98×10^{-10}
F_6	平均值	0.00×10^0	9.43×10^{-3}	1.06×10^{-1}	2.56×10^{-3}	5.75×10^{-12}
	标准差	0.00×10^0	3.65×10^{-2}	1.30×10^{-2}	6.03×10^{-3}	3.16×10^{-12}

对表 4 的数据进行分析可以得到,对于单峰测试函数,MSWOA 均能寻到最优解,在多峰测试函数上,虽未能寻到最优解,但对比于其他的优化算法,其仍具有更高的寻优精度。从标准差上来看,改进后的 MSWOA 算法在稳定性上优于大多数算法。为更直观地反映本文所提算法的收敛速度及跳出

局部最优的能力,各算法收敛曲线如图 7 所示。

4.2 不同改进策略对算法影响分析

本文对算法的改进策略分别为 Sine 混沌映射 (WOA1)、非线性时变因子 (WOA2)、自适应权值 (WOA3)、随机比较策略 (WOA4) 和 Levy 飞行变异增强

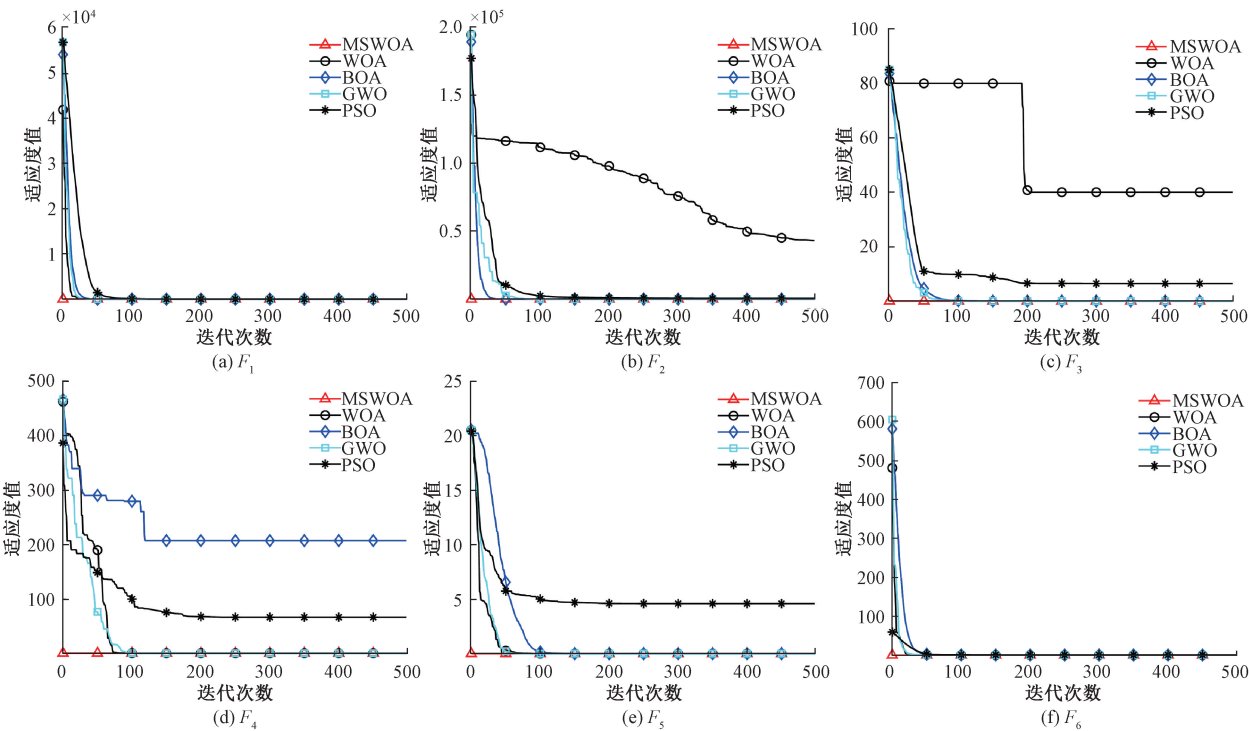


图 7 各算法收敛曲线

Fig. 7 Convergence curves of each algorithm

策略(WOA5)。通过采用与 4.1 节相同的测试函数(表 3)与参数设置对各个策略进行测试,验证不同策略对

MSWOA 算法性能的提升,统计出算法的平均值和标准差,不同策略的测试结果如表 5 所示。

表 5 各改进策略的平均值与标准差

Table 5 Mean and standard deviation of each improved strategy

函数	指标	WOA	WOA1	WOA2	WOA3	WOA4	WOA5	MSWOA
F_1	平均值	8.32×10^{-71}	0.00×10^0	1.24×10^{-72}	0.00×10^0	7.36×10^{-93}	1.43×10^{-70}	0.00×10^0
	标准差	3.98×10^{-70}	0.00×10^0	4.03×10^{-72}	0.00×10^0	4.49×10^{-92}	6.55×10^{-70}	0.00×10^0
F_2	平均值	4.13×10^4	0.00×10^0	4.02×10^4	2.45×10^{-285}	3.23×10^3	3.86×10^4	0.00×10^0
	标准差	1.23×10^4	0.00×10^0	1.15×10^4	0.00×10^0	8.38×10^3	1.07×10^4	0.00×10^0
F_3	平均值	4.67×10^1	0.00×10^0	4.23×10^1	1.35×10^{-162}	3.78×10^{-15}	3.54×10^0	0.00×10^0
	标准差	2.62×10^1	0.00×10^0	2.54×10^1	0.00×10^0	9.32×10^{-15}	8.47×10^0	0.00×10^0
F_4	平均值	7.23×10^{-15}	0.00×10^0	6.99×10^{-15}	0.00×10^0	0.00×10^0	0.00×10^0	0.00×10^0
	标准差	2.31×10^{-14}	0.00×10^0	2.12×10^{-14}	0.00×10^0	0.00×10^0	0.00×10^0	0.00×10^0
F_5	平均值	4.12×10^{-15}	8.93×10^{-16}	3.97×10^{-15}	9.63×10^{-16}	2.13×10^{-15}	2.34×10^{-15}	8.56×10^{-16}
	标准差	2.14×10^{-15}	9.05×10^{-31}	2.07×10^{-15}	9.27×10^{-31}	1.44×10^{-15}	9.71×10^{-16}	8.43×10^{-31}
F_6	平均值	9.43×10^{-3}	0.00×10^0	0.00×10^0	0.00×10^0	0.00×10^0	4.32×10^{-8}	0.00×10^0
	标准差	3.65×10^{-2}	0.00×10^0	0.00×10^0	0.00×10^0	0.00×10^0	2.66×10^{-7}	0.00×10^0

由表 5 可知,不同的改进策略中,Sine 混沌映射对 WOA 算法性能的提升效果最显著,其次为自适应权值。在单峰函数测试场景下,随机比较策略的性能优化效果优于 Levy 飞行变异增强策略;而在多峰函数测试中,Levy 飞行变异增强策略具有更优的性能改善能力。同时,非线性时变因子策略对算法性能的优化作用在上述 5 种改进策略中表现最弱。

MSWOA 结合了 5 种改进策略,相较于只采用单一策略改进的算法具有更高的寻优精度和稳定性。MSWOA 算法通过融合上述 5 种改进策略的优势,具有更快的收敛速度与更高的寻优精度,证明了多策略改进算法的合理性。

4.3 避苗除草系统的仿真分析

根据上述株间除草控制策略和模型,建立系统模型并

在 MATLAB/Simulink 上进行仿真实验。在系统模型准确的前提下,搭建 PID、LADRC、Fuzzy-LADRC 3 种控制器,使用 MSWOA 对 LADRC 和 Fuzzy-LADRC 中的参数进行优化处理,将 3 种株间除草电机控制策略对比,来确定改进后的 Fuzzy-LADRC 控制器的优越性。

在田间复杂作业环境中,避苗除草系统易受到各种内、外部干扰。为验证 Fuzzy-LADRC 抗干扰能力的优越性,在 0 s 时将单位阶跃信号作为系统输入信号,在 5 s 时添加 10 个单位的阶跃干扰信号,用以模拟除草机在田间遇到坚硬杂草而产生巨大阻力时的情况,通过测试 3 种控制策略控制系统的抗干扰能力,得到阶跃响应曲线如图 8 所示;相关数据指标如表 6 所示。

由图 8 和表 6 可知,基于 MSWOA 优化的 Fuzzy-LADRC 大豆株间除草控制系统的性能指标相较于其他两种控制策略,在多个方面均具有优势。在调节时间方面,

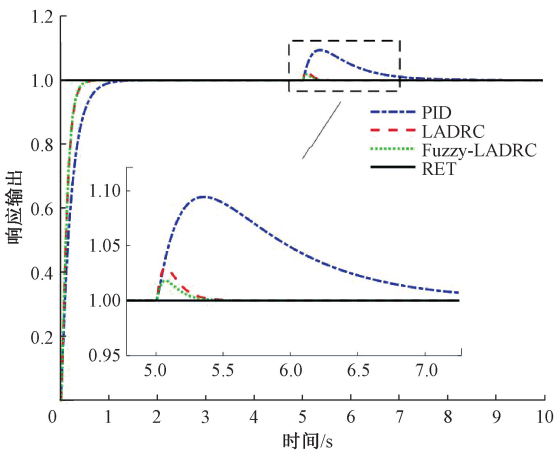


图 8 不同控制策略受到阶跃干扰时响应曲线

Fig. 8 Response curves of different control strategies under step disturbances

表 6 3 种控制策略的控制性能指标

Table 6 Control performance indicators of the three control strategies

控制策略	超调量 $\delta / \%$	调节时间 $t_d / (\times 10^{-1} \text{ s})$	扰动峰值 $(\times 10^{-2})$	恢复时间 $t_s / (\times 10^{-1} \text{ s})$
PID	0	16.0	109.4	29.3
LADRC	0	8.2	102.9	4.6
Fuzzy-LADRC	0	7.6	101.8	4.1

采用 3 种不同的控制策略,系统输出分别经过 1.6、0.82、0.76 s 后趋于稳态;在受干扰后的恢复时间方面,MSWOA 优化后的 Fuzzy-LADRC 控制相较于 PID 和 LADRC 控制的恢复时间分别减少了 86.0%、10.9%;且 Fuzzy-LADRC 受到阶跃干扰的影响更小,能有效提升系统的控制性能,解决参数整定困难的问题。

避苗除草系统在田间工作时易受到地面凹凸不平,导致机具震荡等频繁的周期性影响。为检验系统面对此类干扰时的抗干扰能力,将 5 s 时的阶跃干扰更换为幅值为 3,频率为 5 Hz 的正弦干扰,其余条件不进行改变,模拟系统在田间工作时遇到周期性干扰的情况,得到的阶跃响应曲线如图 9 所示。

从图 9 可以看出,在面对复杂工作环境而产生的机具震荡时,经 MSWOA 优化后的控制策略相较于传统的 PID 控制具有更强的抗干扰能力,且加入了模糊控制策略的 LADRC 相较于传统的二阶 LADRC 抗周期性干扰能力更强。

大豆株间除草作业的精准度受到控制系统响应速度的直接影响。为评估输入信号突变时系统的控制表现,对系统施加突变输入并进行测试,得到的响应曲线如图 10 所示。结果显示,当输入信号发生突变时,Fuzzy-LADRC 控制器相较于传统 PID 控制器和 LADRC 控制器响应速度更快。

为验证 MSWOA 算法的优越性,本研究基于 ITAE 准则的 LADRC 参数优化问题,将 MSWOA 与 BOA、PSO、

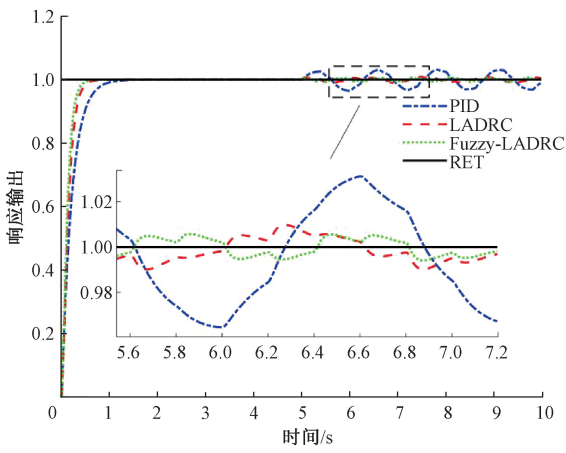


图 9 不同控制策略受到周期性干扰时响应曲线

Fig. 9 Response curves of different control strategies under periodic disturbances

WOA 3 种算法性能进行对比分析,为降低寻优难度以避免算法优化计算时间过长以及参数寻优的无边界性,根据控制系统模型要求,将种群规模设置为 40,最大迭代次数为 50 代,4 种智能算法适应度变化曲线如图 11 所示。

由图 11 可知,PSO 与 BOA 均表现出较快的初始收敛速度,但分别于 19 次和 28 次迭代后陷入局部最优(适应度值分别为 0.465 和 0.372),存在明显的早熟收敛现象。WOA 在第 18 次迭代达到更优的局部最优值(0.295),但后期表现出全局探索能力不足。相比之下,多策略改进后

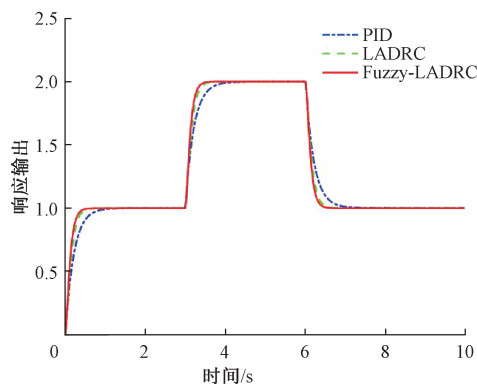


图 10 突变输入下的系统阶跃响应曲线

Fig. 10 System step response curves under sudden inputs

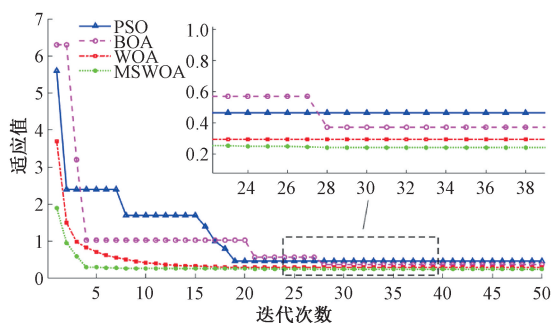


图 11 4 种算法寻优对比

Fig. 11 Optimization comparison of the four algorithms

的 MSWOA 通过增强策略,更好的平衡了全局探索与局部开发能力,在第 6 代迅速收敛至 0.275,而后通过 Levy 飞行变异增强策略进一步驱动算法持续优化,最终在第 27 迭代成功寻获全局最优适应度值 0.242。结果表明,相较于其他算法,MSWOA 优化的 LADRC 参数在寻优精度、收敛效率等方面均有显著优势。

5 结 论

针对在田间复杂环境之中机械自动除草伤苗率高的问题,本文研究了一种基于 MSWOA 优化的 Fuzzy-LADRC 大豆株间避苗除草控制系统。通过对传统的 WOA 进行多个策略的优化,使优化后的 WOA 具有较强的全局搜索能力和局部开发能力,同时提升了算法跳出局部最优能力;通过对多个算法进行仿真分析比较,验证了改进后的 WOA 具有较高的收敛精度和稳定性。

本文通过将模糊控制与 LADRC 控制进行结合,使控制系统提升了非线性与不确定性适应能力,并提升了系统鲁棒性,使系统能抵御复杂扰动。将改进后的 WOA 应用于 Fuzzy-LADRC 控制系统中并通过仿真进行验证,结果表明:本文提出的控制方法相较于 PID 控制和 LADRC 的控制,调节时间更快;在加入随机干扰后,MSWOA 优化的 Fuzzy-LADRC 受到干扰的影响小也能较快的恢复稳态,

证明其具有较好的适应能力;在突变输入下 MSWOA 优化的 LADRC 控制也具有更好的快速响应能力;通过几种算法在 LADRC 参数优化上的对比,也验证了 MSWOA 的优越性,可见本文提出的系统能满足精准避苗除草的控制要求。

本文设计的株间避苗除草系统中,视觉识别模块单帧采集周期为 29.6 ms,速度编码器采样周期为 10 ms,两者的输出数据存在时间戳偏差,当除草装置行进速度过快时,避苗动作会滞后,未来可进行多传感器数据同步系统开发降低数据延迟差;虽然提出的大豆株间避苗除草控制系统具有良好的控制效果,但受限于当前实验条件与研发进度,仅进行了 Simulink 仿真验证,未来将搭建实物平台进一步实验,落实到实际应用中。

参考文献

- [1] 肖滢,孙思奇,崔思宇,等. 转基因玉米和大豆产业化现状与展望[J]. 中国农业大学学报, 2025, 30(9): 1-14.
Xiao Ying, Sun Siqi, Cui Siyu, et al. Current status and future prospects of industrialization of genetically modified corn and soybean [J]. Journal of China Agricultural University, 2025, 30(9): 1-14.
- [2] 李冬梅,马俊凯. 新形势下中国粮食动态风险缓冲储备机制构建研究[J]. 中国特色社会主义研究, 2025(4): 51-59.
Li Dongmei, Ma Junkai. Research on the construction of China's dynamic risk buffer reserve mechanism for grain under the new situation[J]. Studies on Socialism with Chinese Characteristics, 2025(4): 51-59.
- [3] 丁力,袁业超,李源源,等. 大豆行间驱拨组合式除草机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2025, 56(9): 344-354.
Ding Li, Yuan Yechao, Li Yuanyuan, et al. Design and testing of combined soybean inter-row roundup weeder[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(9): 344-354.
- [4] 张如标,孙永达,徐吉东,等. 土壤封闭除草技术在大豆玉米复合种植田的应用效果[J]. 中国植保导刊, 2024, 44(7): 86-88.
Zhang Rubiao, Sun Yongda, Xu Jidong, et al. Application effect of soil-applied herbicide technology in soybean-corn intercropping fields[J]. China Plant Protection, 2024, 44(7): 86-88.
- [5] Tang Z H, Xi X B, Zhang B F, et al. Design and experiment of an inter-row weeding machine applied in soybean and corn strip compound planting(SCSCP)[J]. Agronomy, 2024, 14(9): 2136-2136.
- [6] 杨卜,邬鑫,张梦磊,等. 基于深度强化学习的除草

- 机器臂路径规划研究[J]. 农机化研究, 2025, 47(5): 15-21.
- Yang Bu, Wu Xin, Zhang Menglei, et al. Path planning of weeding robot arm based on deep reinforcement learning [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2025, 47(5): 15-21.
- [7] 刘星星, 车金宁, 杨潇, 等. 枸杞株间电驱动避障除草机设计与试验[J]. 农业工程学报, 2024, 40(23): 104-114.
- Liu Xingxing, Che Jinning, Yang Xiao, et al. Design and test of the intra-row electric driven obstacle avoidance weeder for wolfberry[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2024, 40(23): 104-114.
- [8] 韩豹, 郭畅, 高英玲, 等. 大豆株间除草单体机构及关键部件设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(6): 112-121.
- Han Bao, Guo Chang, Gao Yingling, et al. Design and experiment of soybean intra-row weeding monomer mechanism and key components [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(6): 112-121.
- [9] 徐畅, 李明, 张春丽. 建筑起重机变幅液压缸位置 ACO 优化 PID 控制优化[J]. 机械设计与制造, 2024(2): 179-182, 188.
- Xu Chang, Li Ming, Zhang Chunli. Position control optimization of truck crane luffing hydraulic cylinder based on ACO optimization PID[J]. Machinery Design & Manufacture, 2024(2): 179-182, 188.
- [10] 黄薛凯, 施印炎, 汪小昆, 等. 丘陵山地果园纯电驱动除草机器人研制[J]. 农业工程学报, 2025, 41(18): 28-41.
- Huang Xuekai, Shi Yinyan, Wang Xiaochan, et al. Design and development of a fully electric weeding robot for hilly and mountainous orchards [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2025, 41(18): 28-41.
- [11] 袁若丹, 陈勇, 吴红. 基于 LADRC 算法的电动液压能源系统高效控制研究[J]. 机床与液压, 2025, 53(17): 127-134.
- Yuan Ruodan, Chen Yong, Wu Hong. Research on efficient control of electro-hydraulic energy system based on LADRC algorithm [J]. Machine Tool & Hydraulics, 2025, 53(17): 127-134.
- [12] 王文成, 余智科, 郑诗翰. 基于改进型蜉蝣算法 Fuzzy-Smith-LADRC 混凝投药[J]. 电子测量技术, 2025, 48(3): 10-17.
- Wang Wencheng, Yu Zhike, Zheng Shihan. Coagulation dosing based on an improved dung beetle algorithm Fuzzy-Smith-LADRC [J]. Electronic Measurement Technology, 2025, 48(3): 10-17.
- [13] Ji X, Wang A C, Wei X H. Precision control of spraying quantity based on linear active disturbance rejection control method [J]. Agriculture, 2021, 11(8): 761.
- [14] 张小龙. 花生株间除草避苗控制系统的设计与研究[D]. 桂林: 桂林理工大学, 2025.
- Zhang Xiaolong. Design and research of control system for weeding and avoiding seedlings among peanut plant [D]. Guilin: Guilin University of Technology, 2025: 41-53.
- [15] 杨旭红, 徐坤, 张苏捷, 等. 基于 ADRC 的微电网传输变换器带宽自整定控制研究[J]. 电子测量技术, 2024, 47(15): 44-52.
- Yang Xuhong, Xu Kun, Zhang Sujie, et al. Research on bandwidth self-tuning control of microgrid transmission converters based on ADRC [J]. Electronic Measurement Technology, 2024, 47(15): 44-52.
- [16] 刘小松, 朱焕海, 单泽彪, 等. 基于双曲正切视线制导的轮式移动机器人目标跟踪自抗扰控制[J]. 仪器仪表学报, 2024, 45(12): 201-209.
- Liu Xiaosong, Zhu Huanhai, Shan Zebiao, et al. Active disturbance rejection control for target tracking of wheeled mobile robot based on hyperbolic-tangent line-of-sight guidance[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2024, 45(12): 201-209.
- [17] 范巍. 基于改进遗传算法的废水处理中给水泵出口压力模糊控制方法[J]. 国外电子测量技术, 2025, 44(5): 193-199.
- Fan Wei. Fuzzy control method of feed pump outlet pressure in wastewater treatment based on improved genetic algorithm[J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2025, 44(5): 193-199.
- [18] 孙非, 崔特, 曹宇赫, 等. 基于模糊反馈线性化和自适应扩张状态观测器的 USM 六自由度镇定控制[J]. 仪器仪表学报, 2024, 45(5): 311-318.
- Sun Fei, Cui Te, Cao Yuhe, et al. USM six degrees of freedom stabilization control based on fuzzy feedback linearization and adaptive extended state observer[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2024, 45(5): 311-318.
- [19] 谢良波, 韩伸, 张钰坤. 融合邻域搜索的自适应鲸鱼优化算法[J]. 电子测量与仪器学报, 2024, 38(12): 124-134.
- Xie Liangbo, Han Shen, Zhang Yukun. Adaptive

whale optimization algorithm combining neighborhood search[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2024, 38(12): 124-134.

[20] Yang W B, Xia K W, Fan S R, et al. A multi-strategy whale optimization algorithm and its application[J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2022, 108: 104558.

[21] 王鹏, 周俊, 伍星, 等. 改进 Sine 混沌映射 CO-ELM 锂离子电池 RUL 预测[J]. 储能科学与技术, 2025, 14(4): 1603-1616.

Wang Peng, Zhou Jun, Wu Xing, et al. Remaining useful life prediction of a lithium-ion battery based on a cheetah optimization-extreme learning machine with improved Sine chaotic mapping[J]. Energy Storage Science and Technology, 2025, 14(4): 1603-1616.

[22] 何净宽, 魏雪义. 基于改进麻雀算法优化电源的 BPPID 控制策略[J]. 电子测量技术, 2024, 47(24): 39-48.

He Jingkuan, Wei Xueyi. BPPID control strategy for

optimizing power supply based on improved sparrow algorithm[J]. Electronic Measurement Technology, 2024, 47(24): 39-48.

作者简介

陆孝杰, 硕士研究生, 主要研究方向为先进控制策略的改进与复合控制。

E-mail: zhihr1114@163.com

王文成(通信作者), 硕士生导师, 副教授, 主要研究方向为控制技术、工业电气自动化及复杂建模等。

E-mail: wwc816@163.com

余智科, 硕士研究生, 主要研究方向为复杂系统控制与工业过程控制。

E-mail: 2120231385@glut.edu.cn

许仕林, 硕士研究生, 主要研究方向为机器视觉图像处理。

E-mail: 2120241390@glut.edu.cn

郑诗翰, 硕士研究生, 主要研究方向为机器视觉图像处理。

E-mail: 2120231395@glut.edu.cn