

# 基于处方图的油菜精准变量施肥调控系统设计与试验

丁幼春<sup>1,2</sup> 李浩鹏<sup>1,2</sup> 董万静<sup>1,2</sup> 张栋津<sup>1,2</sup> 徐春保<sup>1,2</sup>

(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:** 针对目前油菜直播机施肥作业过程中施肥调控精度低、土壤肥力分布不同难以实现时空差异化肥力补给的问题,设计了一种基于处方图的油菜精准变量施肥线性自抗扰调控系统。提出了基于云端高精度地图规划作业路径对施肥处方图进行栅格划分的方法,为机具施肥提供了指导性施肥量。构建了排肥器的线性自抗扰控制算法,Matlab 仿真确定了关键参数,并与 PID 控制算法对比,线性自抗扰控制算法在抗干扰、超调量、稳态误差分别提高了 39.08%、91.77%、86.96%。台架试验结果表明:施肥调控系统在设定施肥量和作业速度下,排肥器颗粒肥排量平均控制精度为 98.06%。路面试验结果表明:基于处方图的变量施肥调控系统在变量施肥作业时,通过滞后距离补偿,平均施肥位置滞后距离为 0.28 m,不同位置的施肥量控制精度均大于 95.67%。田间试验结果表明:线性自抗扰控制算法在不同栅格区域内施肥量控制精度不低于 95.21%,优于 PID 控制算法。该研究可为油菜生产中基于土壤养分的精准变量施肥提供技术支持。

**关键词:** 油菜; 施肥处方图; 变量施肥; 线性自抗扰控制

中图分类号: S126 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2025)03-0256-11

OSID:



## Design and Experiment of Precise Variable Fertilization Control System for Oilseed Rape Based on Prescription Maps

DING Youchun<sup>1,2</sup> LI Haopeng<sup>1,2</sup> DONG Wanjing<sup>1,2</sup> ZHANG Dongjin<sup>1,2</sup> XU Chunbao<sup>1,2</sup>

(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 current reality of low accuracy of fertilizer regulation and control during the fertilizer application operation of oilseed rape direct seeding machine, and the difficulty of realizing spatiotemporal differentiated fertilizer replenishment with different soil fertility distributions, an accurate variable fertilizer application linear self-resistant regulation and control system was designed based on the prescription map for oilseed rape. A method of raster division of the fertilizer prescription map based on the cloud-based high-precision map planning operation path was proposed, which provided a guiding fertilizer amount for the machine fertilizer application. A linear self-immunity control algorithm for fertilizer dischargers was constructed. Matlab simulation determined the key parameters, and comparison with the PID control algorithm showed that the linear self-immunity control algorithm improved the anti-interference, overshooting amount, and steady-state error by 39.08%, 91.77%, and 86.96%, respectively, compared with the latter. The results of the bench test showed that the average control accuracy of the fertilizer dispenser's granular fertilizer discharge was 98.06% under the set fertilizer application rate and operating speed of the fertiliser application regulation system. The road test results indicated that the prescription map-based variable fertilization control system, after compensating for lag distance during variable fertilization operations, achieved an average fertilization position lag distance of 0.28 m, with the control accuracy of fertilizer application volume exceeding 95.67% across different positions. The results of the field test showed that the linear self-immunity control algorithm had a control accuracy of no less than 95.21% of the fertilizer amount in different grid areas, which was better than the PID control algorithm. The research result can provide an effective reference for accurate variable

fertilizer application based on soil nutrients in oilseed rape production.

**Key words:** oilseed rape; fertilizer prescription maps; variable fertilization; linear active disturbance rejection control

## 0 引言

油菜是我国重要的油料作物,其生长过程中离不开充足的养分供给。土壤自然肥力难以满足作物生长需求时,科学施肥成为保障油菜稳产高产的重要措施<sup>[1]</sup>。传统施肥方式无法针对土壤肥力的时空差异性,实现精准变量施肥,导致施肥过程中肥料资源利用效率低和局部施肥不足等问题,进而影响油菜产量<sup>[2-4]</sup>。基于处方图的油菜变量施肥技术能根据土壤养分空间分布进行“按需施肥”,不仅提高肥料利用率,还有效缓解过量施肥导致的环境污染问题<sup>[5]</sup>。

施肥处方图的获取是变量施肥的前提,梁栋等<sup>[6]</sup>基于四端法原理,设计了一种车载式大田土壤电导率快速检测系统,为精准施肥处方图的制作提供决策信息。BRAMBILLA等<sup>[7]</sup>通过实时土壤测图技术优化化肥分配策略,提高作物产量。于丰华等<sup>[8]</sup>根据农用无人机识别的最小栅格,构建追肥处方图,通过追肥模型计算各栅格的追肥量,实现水稻分蘖期的追肥作业。王金峰等<sup>[9]</sup>选取单个自然田块作为独立测试单元,验证变量控制系统的定位精度及电子处方图指导施肥作业切实可靠。目前施肥处方图的制作已取得一定进展,但在将其与施肥机具的有效结合应用方面仍然存在不足。

变量施肥调控系统是实现油菜变量施肥的关键技术环节。为提高施肥量控制精度,国内外学者主要围绕机具作业速度监测、施肥位置滞后补偿及施肥量控制等方面开展研究。针对机具作业速度波动导致实际施肥量与目标设定排量不匹配的问题,赵学观等<sup>[10]</sup>提出了一种融合北斗单点测速和地轮测速的双测速模式,根据这两种测速方式在不同作业条件下的适用性进行切换,以提高机具的测速精度。廖庆喜等<sup>[11]</sup>设计了基于RTK测速的油菜随速排种系统,提高了排种精度。针对变量施肥位置的滞后问题,孟志军等<sup>[12]</sup>建立了变量施肥作业系统的位置滞后模型,将施肥位置的滞后转化为时间延迟,作为系统的修正量,以修正施肥的滞后距离。赵硕等<sup>[13]</sup>通过分析施肥过程中的滞后现象,建立施肥位置滞后模型,并提出阈值控制算法,实现对落肥位置的精准控制。国内外学者多采用PID控制、模糊控制等多种变量控制技术来实现肥料的精准施用<sup>[14-15]</sup>。王辉等<sup>[16]</sup>针对外槽轮式排肥器排肥均匀性差的问

题,提出了一种基于肥料流量反馈的分段式PID控制方法,有效改善了排肥均匀性。田敏等<sup>[17]</sup>针对液肥变量施肥控制系统,设计了基于遗传算法的模糊PID控制方法,提高变量施肥的流量控制精度。张继成等<sup>[18]</sup>设计了一种基于增量式PID闭环控制算法的多种固体肥精准施肥控制系统,实现了氮、磷、钾肥的实时自动配比与精量施入。在田间复杂环境影响下,针对不同的排肥特性,变量施肥调控系统在抑制外界扰动、稳态跟踪性能等方面仍需进一步优化。

基于上述油菜播种过程中变量施肥问题,本文提出结合云端高精度地图规划作业路径构建的处方图,进行精细化栅格划分,获得不同位置的施肥量。针对离心腔盘挤出式排肥器排量控制的变量需求,仿真设计线性自抗扰控制算法关键参数,实现排肥器随速、随位置变量调控,并开展相关性能试验,评估变量调控系统的控制效果。

## 1 变量施肥调控系统总体设计

### 1.1 整体结构与工作流程

基于处方图的变量施肥调控系统主要包括变量施肥云端和变量施肥调控终端。变量施肥调控终端主要由变量施肥控制器、离心腔盘挤出式排肥器、拖拉机电源、直流电机驱动器、编码器、直流电机、GNSS天线、北斗双天线高精度定位系统M600等组成,系统硬件结构框图如图1所示。

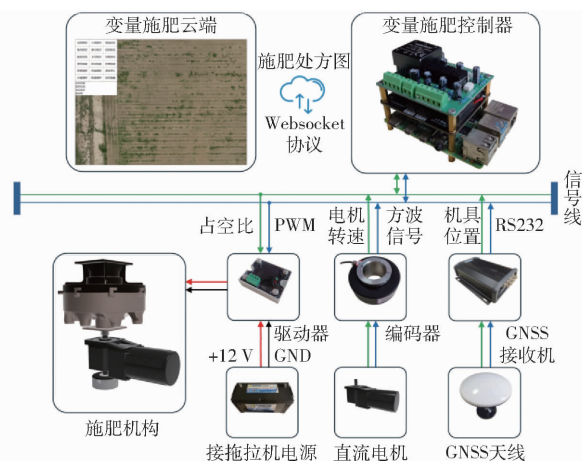


图1 调控系统硬件结构框图

Fig. 1 Block diagram of hardware structure of control system

为实现机具远程调控与作业状态监控,将变量施肥网页端和数据库部署在云服务器上。借助云端高精度地图框选目标田块边界,规划作业路径并对

施肥处方图进行栅格划分,为机具施肥提供指导性施肥量。

在基于处方图的变量施肥作业中,调控终端加载云端数据库中施肥处方图数据,将栅格经纬度坐标和施肥量数据存储于程序中。调控终端接收北斗接收机发出的 NMEA - 0183 (National marine electronics association) 报文,解析 NMEA - 0183 报文并提取 \$GPRMC 帧中的机具经纬度坐标、航向和速度等信息。

根据机具在田块中的作业路径顺序,逐步判断其当前所处的施肥处方图栅格位置,并将已作业完成的栅格区域从后续位置判断中剔除,以减少机具位置判断的计算量。同时,根据机具所在栅格区域的指导性施肥量,结合作业速度计算排肥器的目标转速。

当拖拉机悬挂下降,使微动开关闭合时,调控终端输出 PWM 信号给施肥电机驱动器,利用拖拉机电源为驱动器供电。通过驱动器控制施肥电机,从而带动与其相连的排肥器主轴转动,肥料颗粒随着离心腔盘的旋转从腔室内排出,经过排肥管落入土壤中,实现变量施肥作业。编码器实时监测排肥器转速,并将排肥器转速信息反馈给调控终端,实现排肥器主轴转速的闭环控制。

## 1.2 施肥处方图栅格划分方法

针对油菜施肥作业过程中变量需求,研发了基于高精度地图的油菜直播机变量施肥管控云端。本文所使用油菜直播机最大作业速度为 9 km/h,通过试验发现本研究施肥滞后时间为 1.52 s,为满足作业需求,根据最大作业速度与滞后时间的乘积来确定栅格长度,计算得出栅格长度为 3.8 m,为便于实际施肥作业,设置栅格长度为 5 m,机具作业幅宽为 2.3 m。通过框选目标田块边界,根据机具的作业幅宽和栅格长度,对目标田块进行作业路径规划和栅格划分,并将栅格划分后每个栅格 4 个顶点的经纬度坐标及对应的指导性施肥量信息上传到云数据库,如图 2 所示。

首先,使用 DJI MAVIC 3 型无人机拍摄目标田块可见光正射影像数据,并将影像数据导入大疆智图软件处理,生成目标田块的可见光 TIFF (Tag image file format) 图像文件。将图像切片处理生成瓦片图并上传至云端,构建田块的高精度地图。在高精度地图上框选目标田块边界,利用百度地图 API (Application programming interface) 提取田块边界顶点的经纬度信息,并将经纬度信息转换成平面坐标。

为适应田间环境并提升作业效率,采用扫描线

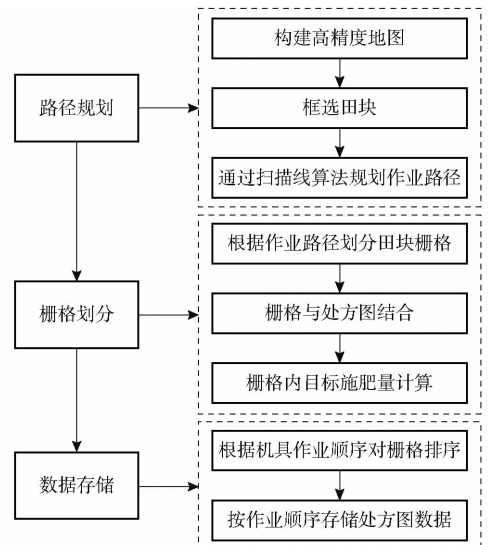


图 2 施肥处方图栅格划分流程图

Fig. 2 Flowchart of raster division for fertilization prescription map

算法对多边形田块边界进行规划,选取边界最长边作为基准边进行扫描。将边界顶点平面坐标和机具作业幅宽作为输入,通过扫描线算法生成机具作业路径<sup>[19]</sup>。

随后,将作业路径与边界最长边左侧的相邻边作为基准边,沿作业路径方向以栅格长度为步长进行扫描,获取扫描线与作业路径的交点。将交点向作业路径两侧延伸 0.5 倍的作业幅宽,以确定栅格的 4 个顶点坐标,并沿逆时针方向对栅格顶点进行标号,如图 3 所示。图中,灰色线代表田块边界,橙色线为划分的栅格边界,蓝色线表示机具作业路径,黑色圆点则为栅格顶点。

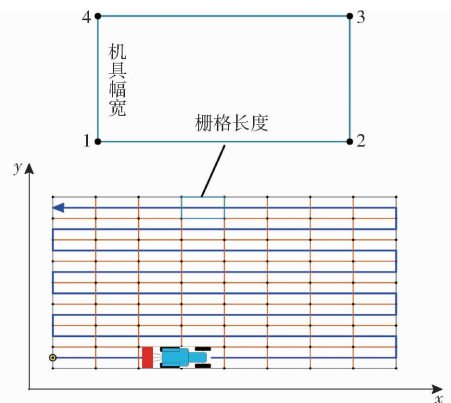


图 3 田块栅格划分

Fig. 3 Field grid division

将栅格坐标与土壤氮含量分布图结合,对土壤氮含量分布图进行栅格划分。依据各栅格区域内的土壤碱解氮含量、肥料当季利用率及肥料养分质量分数等参数,计算不同区域的指导性施肥量<sup>[20]</sup>。

采用颜色编码技术,将计算出的施肥量数据映射到对应的栅格区域。在网页端上,通过颜色差异

呈现的目标施肥量被集成到高精度地图中,生成了一幅可视化的施肥指导图,如图 4 所示。

为提高变量施肥过程中控制器判断机具所处栅格位置的计算效率,设计了一种基于作业路径的施肥处方图云数据库存储格式。施肥处方图中的栅格顶点平面坐标转换为经纬度坐标,并按机具的作业路径对处方图栅格数据进行排序,如图 4 所示。随后将排序后的处方图栅格数据上传到数据库中,如表 1 所示。变量施肥调控终端通过访问云数据库中存储的施肥处方图信息,获得不同位置指导性施肥量。



图 4 变量施肥云端

Fig. 4 Variable fertilization cloud platform

表 1 施肥处方图存储格式

Tab. 1 Storage format for fertilization prescription map

栅格 ID	纬度 1/(°)	经度 1/(°)	纬度 2/(°)	经度 2/(°)	纬度 3/(°)	经度 3/(°)	纬度 4/(°)	经度 4/(°)	施肥量/(kg·hm <sup>-2</sup> )
1	32.134 845 1 N	112.324 094 0 E	32.134 865 8 N	112.324 094 4 E	32.134 868 5 N	112.324 041 5 E	32.134 847 8 N	112.324 041 1 E	570
2	32.134 847 8 N	112.324 041 1 E	32.134 868 5 N	112.324 041 5 E	32.134 871 2 N	112.323 988 6 E	32.134 850 4 N	112.323 988 2 E	525
3	32.134 850 4 N	112.323 988 2 E	32.134 871 2 N	112.323 988 6 E	32.134 873 9 N	112.323 935 7 E	32.134 853 1 N	112.323 935 3 E	465
4	32.134 853 1 N	112.323 935 3 E	32.134 873 9 N	112.323 935 7 E	32.134 876 5 N	112.323 882 9 E	32.134 855 8 N	112.323 882 4 E	480
5	32.134 855 8 N	112.323 882 4 E	32.134 876 5 N	112.323 882 9 E	32.134 879 2 N	112.323 830 0 E	32.134 858 5 N	112.323 829 5 E	510
6	32.134 858 5 N	112.323 829 5 E	32.134 879 2 N	112.323 830 0 E	32.134 881 9 N	112.323 777 1 E	32.134 861 2 N	112.323 776 7 E	540
:	:	:	:	:	:	:	:	:	:

## 2 变量施肥控制器设计

所用排肥器为徐春保等<sup>[21]</sup>研制的离心腔盘挤出式排肥器,其颗粒肥排量与排肥器主轴转速呈线性关系,为提高排肥精度,采用 LADRC 控制算法调节排肥器主轴转速。变量施肥控制器总体结构图如图 5 所示。基于处方图的变量施肥调控系统控制精度主要受油菜直播机测速精度、施肥滞后距离以及排肥转速控制精度的影响。

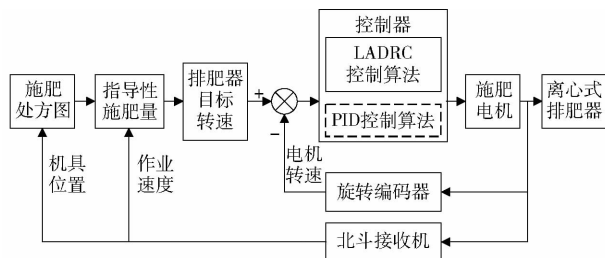


图 5 控制器总体结构图

Fig. 5 Overall structure diagram of controller

### 2.1 变量施肥控制算法

#### 2.1.1 排肥器排肥特性

本文所使用的排肥器在排肥作业时,电机驱动离心腔盘转动,肥料颗粒在重力和上层肥料压力的作用下,进入离心腔盘内部。肥料颗粒随着离心腔盘的旋转,被匀肥叶片推动并沿匀肥锥面均匀分散到离心腔盘的圆周上,具有一定初速度的肥料颗粒在上层肥料压力、重力和匀肥叶片的共同作用下从

排肥口排出,完成排肥作业。根据排肥量-转速标定试验确定离心腔盘挤出式排肥器排肥流量与排肥器转速关系为

$$q_0 = 237.2r - 404.4 \quad (1)$$

式中  $q_0$ ——离心式排肥器排肥流量, g/min

$r$ ——离心式排肥器转速, r/min

由式(1)可知,排肥器转速在 30 ~ 130 r/min 时,所对应排肥量调节范围为 6 711.6 ~ 30 431.6 g/min。单位面积上的施肥量计算公式为

$$Q = \frac{1}{6} \frac{q_0}{Lv} \quad (2)$$

式中  $Q$ ——单位面积施肥量, kg/hm<sup>2</sup>

$L$ ——油菜直播机作业幅宽, m

$v$ ——直播机作业速度, m/s

联立式(1)、(2)求得目标施肥量  $Q$  为

$$Q = \frac{1}{6} \frac{237.2r - 404.4}{Lv} \quad (3)$$

排肥器转速在 30 ~ 130 r/min,可满足每公顷最大施肥量 750 kg 时 3 ~ 9 km/h 的油菜施肥作业需求。排肥器各行排量一致性变异系数不大于 6.72%,同行排肥量稳定性变异系数不大于 4.84%,实际排肥量相对误差小于 4.54%,破碎率低于 0.89%。该排肥器排量调节范围广,实际排肥量与理论排肥量之间的相对误差小,排肥过程稳定,破碎率低。在进行变量施肥作业时,排肥器能跟随目标施肥量和车速变化,动态调节排肥量,实现变量

施肥。

对调控系统中所使用的直流电机进行分析,该电机经联轴器与排肥器相连。为确定排肥器排肥过程中系统传递函数,在直流减速电机上加装编码器实时监测电机转速,调控系统记录输出占空比与施肥电机的转速信息,导入 Matlab 进行系统辨识得到施肥电机控制系统的传递函数。经过系统辨识工具箱辨识后确定的系统传递函数  $G(s)$  为

$$G(s) = \frac{8.892s + 0.04603}{s^2 + 6.699s + 0.03441} \quad (4)$$

式中  $s$ ——复变量

### 2.1.2 LADRC 控制算法设计

在施肥电机上安装编码器,实时监测排肥器转速变化,使用线性自抗扰控制算法,实现对排肥器转速的闭环控制,提高变量调控系统施肥精度。自抗扰控制器主要由扩张状态观测器 (Extended state observer, ESO)、跟踪微分器 (Tracking differentiator, TD) 和非线性误差反馈 (Nonlinear states error feedback, NLSEF) 3 部分组成,与 PID 控制器相比,ADRC 的一个显著优势在于其能够识别并将系统中的干扰视为一个状态变量进行实时监测与补偿,降低外部扰动对系统性能的影响<sup>[22]</sup>。但 ADRC 需要整定的参数过多,调参复杂,故文献[23-25]提出一种线性自抗扰控制器 (Linear active disturbance rejection control, LADRC),实现电机转速的闭环控制。LADRC 主要由线性扩张状态观测器 (LESO) 和 PD 控制器组成。在二阶 LADRC 控制系统中,假设被控对象的数学模型为

$$\ddot{y} = f(y, \dot{y}, w, t) + bu = -a_1\dot{y} - a_2y + w + bu \quad (5)$$

式中  $y$ ——系统输出

$t$ ——时间

$f()$ ——包含外扰和内扰的总扰动

$u$ ——系统输入

$b$ ——控制增益

$w$ ——外部扰动

$a_1, a_2$ ——系统参数

其中  $a_1, a_2, w$  均未知,由于  $b$  值实际中较难获取,将  $b_0$  作为  $b$  的估计值,将估计不准的部分  $(b - b_0)u$  并入到  $f$  中。将式(5)改写成

$$\ddot{y} = f + b_0u \quad (6)$$

式中  $b_0$ ——被控对象高频增益

选取状态变量:  $x_1 = y, x_2 = \dot{y}, x_3 = f$ , 设  $\mathbf{X} = [y \ \dot{y} \ f]^T$  为包含了扰动的扩张状态,将式(6)转换为扩张状态空间表达式形式

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{X}} = \mathbf{A}\mathbf{X} + \mathbf{B}u + \mathbf{E}f \\ y = \mathbf{C}\mathbf{X} \end{cases} \quad (7)$$

其中

$$\begin{cases} \mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \\ \mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 \\ b_0 \\ 0 \end{bmatrix} \\ \mathbf{E} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \\ \mathbf{C} = [1 \ 0 \ 0] \end{cases} \quad (8)$$

式中  $\mathbf{A}$ ——状态转移矩阵(增益矩阵)

$\mathbf{B}$ ——噪声驱动矩阵

根据公式(7)设计全阶连续线性扩张状态观测器为

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{z}} = \mathbf{A}\mathbf{Z} + \mathbf{B}u + \mathbf{L}(y - \hat{y}) \\ \hat{y} = \mathbf{C}\mathbf{Z} \end{cases} \quad (9)$$

其中

$$\mathbf{Z} = [z_1, z_2, z_3]^T$$

式中  $\mathbf{Z}$ ——对  $x$  观测器的状态向量

$\hat{y}$ ——观测器

$\mathbf{L}$ ——状态观测器误差反馈增益矩阵

状态观测器误差反馈增益矩阵  $\mathbf{L}$  为  $\mathbf{L} = [\beta_1 \ \beta_2 \ \beta_3]^T$ , 当  $\mathbf{A} - \mathbf{L}\mathbf{C}$  渐进稳定时,  $z_1 \rightarrow y, z_2 \rightarrow \dot{y}, z_3 \rightarrow f$ , 因此总扰动能够被估计出,从而使其被更快地抑制。

状态误差反馈控制律为

$$u = \frac{k_p(r - z_1) + k_d(r' - z_2) - z_3}{b_0} = \mathbf{K}_o(\hat{\mathbf{r}} - \mathbf{z}) \quad (10)$$

其中

$$\hat{\mathbf{r}} = [r \ r' \ 0]^T \quad (11)$$

$$\mathbf{K}_o = \frac{[k_p \ k_d \ 1]}{b_0} \quad (12)$$

式中  $\hat{\mathbf{r}}$ ——扩张参考输入信号

$r'$ ——参考输入信号的导数

$k_p$ ——比例增益

$k_d$ ——微分增益

$\mathbf{K}_o$ ——反馈控制增益

二阶 LADRC 需要整定的参数是反馈控制增益  $\mathbf{K}_o$  与状态观测器误差反馈增益  $\mathbf{L}$ <sup>[26]</sup>。通过带宽法调节控制器带宽和观测器带宽  $w_c, w_o$ , 得到增益  $\mathbf{K}_o, \mathbf{L}$  的各个元素为

$$\begin{cases} \beta_1 = 3w_o \\ \beta_2 = 3w_o^2 \\ \beta_3 = w_o^3 \\ k_p = w_c^2 \\ k_d = 2w_c \end{cases} \quad (13)$$

对于常见的工程对象,一般进行设计时,观测器带宽为控制器带宽的 2~5 倍<sup>[27]</sup>。

### 2.1.3 系统仿真对比与分析

为验证 LADRC 控制算法在变量施肥调控系统中的鲁棒性与抗干扰性能,运用 Matlab/Simulink 平台分别搭建 PID 和 LADRC 控制模型。油菜直播机变量施肥作业时作业速度在 3~9 km/h,施肥量为 300~750 kg/hm<sup>2</sup>,对应离心式排肥器转速在 30~130 r/min。变量施肥调控系统作业过程中,调控系统通过调节 PWM 脉冲信号的占空比,实现对电机转速控制,进而实现对排肥量的控制,因此仿真模型使用阶跃信号作为输入,以评估 LADRC 控制算法的鲁棒性和优越性,并在系统 1.5 s 时加入一个外部扰动来测试系统的抗干扰性。

系统传递函数采用式(4),控制器参数采用试凑法取得,PID 控制器的  $K_p$ 、 $K_i$ 、 $K_d$  分别取 1.15、15.16、0.01;LADRC 控制器的  $w_c$ 、 $w_o$ 、 $b_0$  分别取 150、400、6 000。通过阶跃响应对 2 个控制算法进行仿真对比,结果如图 6 所示,性能指标如表 2 所示。

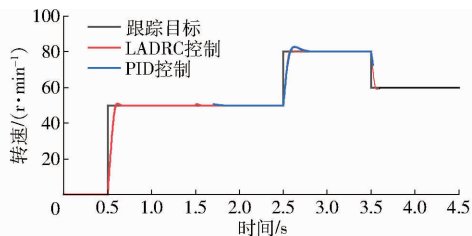


图 6 LADRC 阶跃响应对比图

Fig. 6 Step response comparison of LADRC

表 2 LADRC 阶跃响应性能参数

Tab. 2 Step response performance parameters of LADRC

算法	上升时间 $t_r/s$	调节时间 $t_s/s$	超调量/%	稳态误差/ %
PID	0.140	0.476	10.330	0.184
LADRC	0.185	0.290	0.850	0.024

由图 6 与表 2 可知,LADRC 控制算法的调节时间、超调量、稳态误差分别提高了 39.08%、91.77%、86.96%。尽管 LADRC 控制算法的上升时间与 PID 算法相差不大,但其超调量和稳态误差明显较小,同时表现出更强的抗干扰能力。考虑到本文提出的基于处方图的变量施肥调控系统在实际作业中易受外界复杂环境的干扰,而 PID 算法在抗干扰能力上较 LADRC 算法存在不足,LADRC 控制算法在动态跟踪、稳定输出和抗干扰方面更能满足系统的需求。因此,采用 LADRC 控制算法更有利于提高调控系统的整体性能。

### 2.2 速度信号滤波算法

油菜直播机组在田间作业过程中,北斗系统的

定位精度受天气环境等因素影响,导致速度测量数据中出现噪声波动。为提高测速数据的精度,本研究引入卡尔曼滤波算法对速度数据进行滤波处理。卡尔曼滤波是一种基于状态空间模型的递归滤波算法,能够有效抑制测量噪声,提高测量数据的精度和稳定性<sup>[28-29]</sup>。卡尔曼滤波器提供了一种离散时间状态过程的预测速度状态方法,定义的线性状态方程和测量方程为

$$\begin{cases} \mathbf{X}_k = \mathbf{A}\mathbf{X}_{k-1} + \mathbf{B}w_{k-1} \\ \mathbf{Z}_k = \mathbf{H}\mathbf{X}_k + v_k \end{cases} \quad (14)$$

式中  $\mathbf{X}_k$ —— $k$  时刻的系统状态变量

$\mathbf{X}_{k-1}$ —— $k-1$  时刻的系统状态变量

$w_{k-1}$ —— $k-1$  时刻系统的噪声

$\mathbf{Z}_k$ —— $k$  时刻观测向量

$v_k$ —— $k$  时刻观测噪声

$\mathbf{H}$ ——观测矩阵

卡尔曼滤波器可以通过时间更新方程和状态更新方程对系统状态变量进行估计。卡尔曼滤波器时间更新方程和状态更新方程为

$$\begin{cases} \hat{\mathbf{X}}_k^- = \mathbf{A}\hat{\mathbf{X}}_{k-1} + \mathbf{B}u_{k-1} \\ \mathbf{P}_k^- = \mathbf{A}\mathbf{P}_{k-1}\mathbf{A}^T + \mathbf{Q} \\ \mathbf{K}_k = \frac{\mathbf{P}_k^- \mathbf{H}^T}{\mathbf{H}\mathbf{P}_k^- \mathbf{H}^T + \mathbf{R}} \\ \hat{\mathbf{X}}_k = \hat{\mathbf{X}}_k^- + \mathbf{K}_k(\mathbf{Z}_k - \mathbf{H}\hat{\mathbf{X}}_k^-) \\ \mathbf{P}_k = (\mathbf{I} - \mathbf{K}_k \mathbf{H})\mathbf{P}_k^- \end{cases} \quad (15)$$

式中  $\hat{\mathbf{X}}_k^-$ —— $k-1$  时刻对  $k$  时刻状态的预测值

$\hat{\mathbf{X}}_k$ —— $k$  时刻的系统状态估计值

$\mathbf{R}$ ——测量噪声协方差矩阵

$\mathbf{I}$ ——单位矩阵

$\mathbf{K}_k$ —— $k$  时刻系统的滤波增益

$\mathbf{Q}$ ——系统噪声方差矩阵

$\mathbf{P}_k^-$ —— $k-1$  时刻对  $k$  时刻预测误差协方差矩阵

$\mathbf{P}_k$ —— $k$  时刻误差估计协方差矩阵

由于相邻时刻速度信号变化幅度较小,设置状态转移矩阵  $\mathbf{A} = 1$ ,测量矩阵  $\mathbf{H} = 1$ 。初始状态为 0,初始估计协方差为 1。结合卡尔曼滤波器对速度信号的滤波效果测试结果,设置噪声协方差  $\mathbf{Q}$  为 0.01,观测噪声协方差  $\mathbf{R}$  为 0.2。试验场所为硬化路面,设置拖拉机固定挡位和发动机转速,匀速通过 120 m 距离,测量卡尔曼滤波前后机具行进速度,测量结果如图 7 所示。

拖拉机行进速度为 1.5 m/s 时,北斗接收机在卡尔曼滤波前的测速误差为 -8.89%~7.57%,经过卡尔曼滤波后,测速误差降至 -3.80%~3.21%。

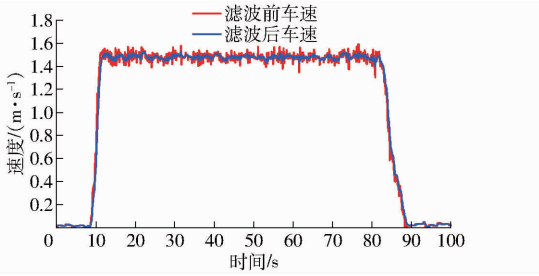


图7 滤波前后速度对比

Fig. 7 Speed comparison before and after filtering

由此可见,经卡尔曼滤波后,将北斗接收机测速误差控制在3.80%以内。因此,可将滤波后的速度数据作为拖拉机行进速度,并传输至主控制器以实现随速控制。

### 2.3 滞后距离补偿算法

在基于处方图的变量施肥系统中,调控终端通过解析GNSS接收机传输的NMEA-0183格式报文获取机具的位置、速度和航向等数据。基于经纬度信息控制器确定机具当前所在的栅格区域,并提取该位置对应的目标施肥量。控制器结合机具的作业速度,动态计算排肥器的目标转速。随后控制器发出相应的控制指令,调整排肥器转速,实现肥料的确排出,最终肥料落到地面,完成施肥作业。在该过程中,从获取机具位置信息到肥料下落到地面的时间间隔定义为滞后时间 $T_{lag}$ 。滞后时间的存在导致施肥作业出现滞后距离。为提高各栅格区域内施肥量的控制精度,将施肥滞后时间作为补偿,对变量施肥调控系统进行修正。这种补偿措施可以更精确地匹配目标施肥区域与实际施肥位置,优化施肥效果,提高系统的施肥精度。

进行施肥位置滞后距离试验,通过网页端框选一块 $2.3\text{ m} \times 10\text{ m}$ 施肥栅格。试验时,设定离心式排肥器转速为30、50、70、90、110、130 r/min,油菜直播机前进速度为3~9 km/h,测量排肥器在不同前进速度和转速下的施肥位置滞后距离。颗粒肥滞后距离从施肥量开始变化的田块边界算起,取实际施肥量达到目标施肥量的95%为施肥滞后距离结束点。

试验后,在试验区域测量排肥器在不同前进速度和转速下的滞后距离,排肥器施肥位置滞后距离与前进速度及转速关系如图8a所示。由图8a可知施肥位置滞后距离与排肥器转速无关,与机具作业速度呈正相关关系。

施肥位置滞后时间可通过施肥位置滞后距离除以机具作业速度来计算得出,施肥位置滞后时间计算公式为

$$T_{lag} = \frac{3.6L_{lag}}{v} \quad (16)$$

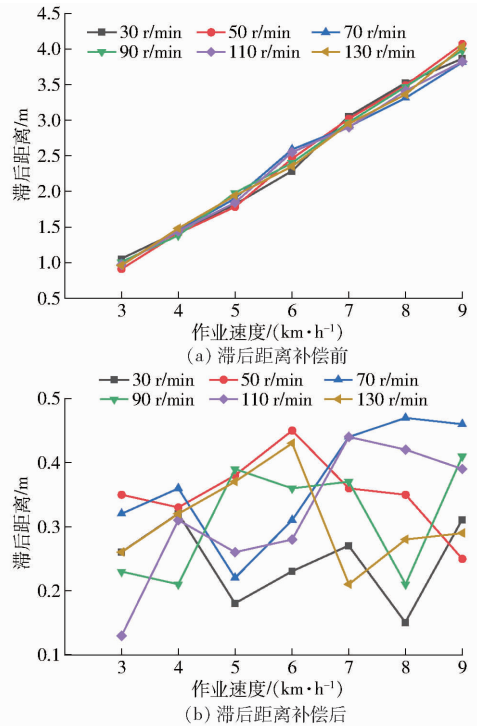


图8 施肥位置滞后距离变化曲线

Fig. 8 Variation curves of fertilizer position lag distance

式中  $L_{lag}$ ——滞后距离, m

计算得到施肥位置滞后时间为1.52 s,为减少施肥位置滞后距离,将计算后的滞后时间作为时间补偿对调控系统进行修正,通过解析北斗报文,获取直播机组经纬度、速度和航向信息,将施肥口的经纬度坐标沿航向方向偏移,偏移距离为滞后时间乘以当前机具作业速度。测量修正后施肥位置滞后距离,如图8b所示,修正后系统平均滞后距离为0.28 m。当作业速度达到9 km/h时,修正后相较于修正之前滞后距离减少了83%。通过施肥位置滞后距离补偿算法能有效提高基于处方图的变量施肥精度。

## 3 试验结果与分析

### 3.1 台架试验

#### 3.1.1 台架试验方法

为验证LADRC控制算法的施肥量控制精度,搭建变量施肥性能试验台,试验所用主要设备为排肥器、直流有刷电机、调控终端、直流稳压电源、肥箱、编码器、接料箱、排肥导管等,如图9所示。

试验过程中,设定目标施肥量为300、450、600 kg/hm<sup>2</sup>,机具作业幅宽为2.3 m,机具作业速度为3、6、9 km/h下匀速行驶,每次试验时间为30 s,理论排肥量计算公式为

$$M_1 = \frac{Mvtl}{36} \quad (17)$$

式中  $M_1$ ——理论排肥量, kg/hm<sup>2</sup>

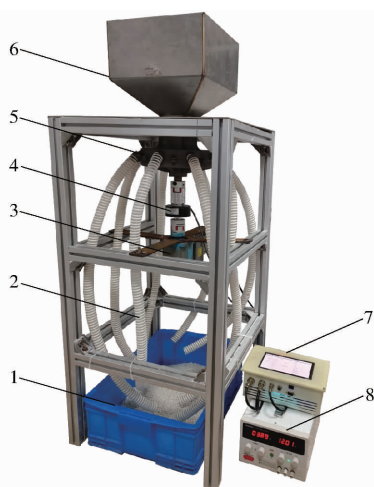


图 9 施肥试验台

Fig.9 Fertilizer test bench

- 1. 接料箱 2. 排肥导管 3. 施肥电机 4. 编码器 5. 排肥器
- 6. 肥箱 7. 调控终端 8. 直流稳压电源

$M$ ——目标施肥量,  $\text{kg}/\text{hm}^2$

$l$ ——机具作业幅宽,  $\text{m}$

在排肥器 8 路排肥管下方放置接料箱, 每次试验结束后使用高精度电子秤称量接料箱内肥料, 得到实际排肥量, 并与目标排肥量进行对比, 计算施肥量控制精度, 计算公式为

$$\theta = \left( 1 - \frac{|M_1 - M_2|}{M_1} \right) \times 100\% \quad (18)$$

式中  $\theta$ ——施肥量控制精度, %

$M_2$ ——实际施肥量,  $\text{g}$

### 3.1.2 台架试验结果分析

通过施肥量控制精度计算公式, 得到 LADRC 与 PID 两种控制算法在施肥量控制精度上的对比结果, 如表 3 所示。试验结果表明, 在不同的目标施肥量和作业速度下, LADRC 控制算法平均排肥量控制精度为 98.06%, 高于 PID 控制算法的 95.8%。在

表 3 变量施肥调控系统台架对比试验

Tab.3 Bench comparison test of variable fertilization control systems

$M/$ ( $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ )	$v/$ ( $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ )	理论 排肥 量/ $\text{kg}$	LADRC	PID	LADRC	PID
			控制实 际排肥 量/ $\text{kg}$	控制实 际排肥 量/ $\text{kg}$	排肥量 控制精 度/%	排肥量 控制 精度/%
300	3	1.724	1.774	1.824	97.11	94.21
	6	3.448	3.372	3.278	97.79	95.06
	9	5.172	5.114	5.327	98.87	97.01
450	3	2.586	2.514	2.759	97.21	93.32
	6	5.172	5.062	5.234	97.87	98.81
	9	7.759	7.848	7.431	98.85	95.78
600	3	3.448	3.537	3.226	97.43	93.55
	6	6.897	6.731	6.774	97.60	98.22
	9	10.345	10.192	9.987	98.52	96.54

排肥作业过程中, 由于肥料颗粒的大小和形状不一致, 以及肥料颗粒与排肥器腔盘之间发生碰撞摩擦, 导致排肥量产生波动, 使得理论排肥量与实际排肥量存在偏差。LADRC 控制算法相较于后者有更高的控制精度, 满足随速变量施肥精度要求。

## 3.2 路面试验

### 3.2.1 路面试验方法

为验证调控系统在不同位置时施肥量控制精度, 在湖北省孝感市开展基于处方图的变量施肥路面试验。在网页端上框选目标田块区域, 点击“梳式路径”按钮自动生成变量施肥作业路径, 并对目标田块进行栅格划分, 分别设置各栅格内目标施肥量为 300、450、600、450、300  $\text{kg}/\text{hm}^2$ , 如图 10 所示。



图 10 变量施肥路面试验

Fig.10 Variable fertilization road test

通过点击“上传路径”按照指定格式将处方图和路径点信息上传到云数据库, 变量调控终端通过读取云数据库获取处方图信息, 随后自动开启基于处方图的变量施肥路面试验。试验过程中, 油菜直播机作业速度为 3~9  $\text{km}/\text{h}$ , 调控系统通过解析北斗接收机发出的 NMEA-0183 报文, 获取油菜直播机所处栅格位置、作业速度和航向信息, 实时调整排肥器颗粒肥排量。

### 3.2.2 路面试验结果分析

调控系统完成变量施肥作业后, 沿油菜直播机组作业路径每隔 1 m, 收集作业路径上颗粒肥并装袋编号, 路面试验现场如图 11 所示。



图 11 路面试验现场

Fig.11 Road test site

使用高精度电子秤称量肥料, 通过施肥量控制精度计算公式, 计算不同位置上的精度, 沿作业路径绘制施肥量的分布图, 如图 12 所示。



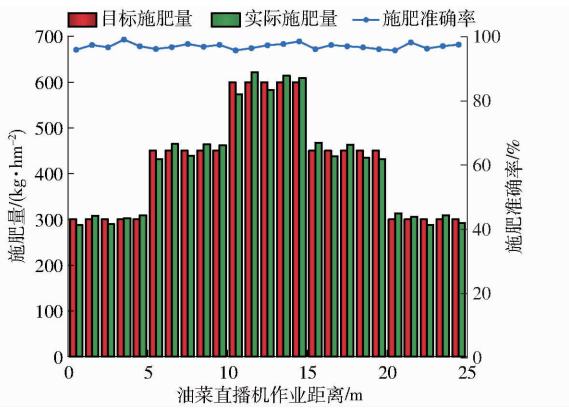


图12 施肥量分布图

Fig. 12 Fertilizer application distribution map

由图12可知,油菜直播机在基于处方图的变量施肥作业时,当油菜直播机通过栅格边界时,目标施肥量发生变化,调控系统通过滞后距离补偿算法,施肥准确率不低于95.67%;当油菜直播机通过栅格边界后,目标施肥量未发生变化时,排肥器目标排量不发生较大变化,施肥准确率提高至96.43%。该调控系统在不同施肥量目标条件下均能够实现较高的施肥量控制精度,满足变量施肥要求。

### 3.3 田间试验

#### 3.3.1 田间试验方法

为进一步验证变量施肥调控系统在田间复杂环境下对施肥量的控制精度,于2024年10月11日在湖北省襄阳市开展基于处方图的变量施肥田间试验。网页端框选目标田块边界,目标田块长35m、宽23m,依据油菜播种农艺要求和直播机作业幅宽对目标区域田块进行作业路径规划及栅格划分,并确定栅格区域中心点坐标。

试验前采用五点取样法采集各栅格区域内土壤样品,在每个栅格中选取中心点和4个角点,共5个采样点,采样深度为20cm,反映表层土壤的有效养分分布情况,并记录采样点所处栅格的地理位置。利用高精度元素分析仪对土壤样品中的碱解氮含量进行检测,生成土壤养分分布图,如图13所示。

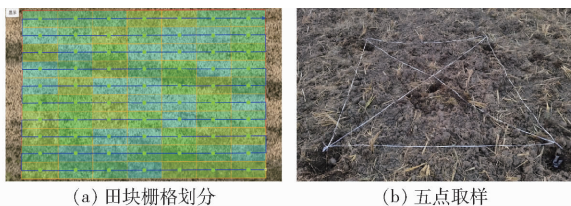


图13 数据采集图

Fig. 13 Data collection diagram

为实现变量施肥,本研究基于养分平衡法建立了测土推荐施肥模型,获取油菜目标施肥量<sup>[30-31]</sup>,生成的施肥处方图用于指导变量施肥作业。其具体

计算公式为

$$F = \frac{eM - 2.25dn}{kx} \quad (19)$$

式中  $F$ ——每公顷推荐施肥量,  $\text{kg}/\text{hm}^2$   
 $M$ ——每公顷油菜目标产量,  $\text{kg}/\text{hm}^2$   
 $e$ ——油菜养分系数  
 $n$ ——土壤碱解氮含量,  $\text{mg}/\text{kg}$   
 $d$ ——土壤有效养分校正系数, %  
 $k$ ——肥料当季利用率  
 $x$ ——肥料中该元素质量分数

油菜养分系数即单位产量的养分吸收量,冬油菜氮肥养分系数为5.8;油菜肥料利用率中氮元素肥料平均利用率为34.2%;土壤有效养分校正系数不是一个固定值,它与土壤测试值呈明显的负相关,相关计算公式为

$$d = \frac{5.57 + \frac{3226.05}{n}}{100} \times 100\% \quad (20)$$

整合公式(19)、(20)得到每公顷推荐施肥量计算式

$$F = \frac{eM - (12.53n + 2.25 \times 3226.05)}{100kx} \quad (21)$$

试验使用湖北丰益肥业生产的油菜专用肥,结合公式(21)计算得到该栅格区域内目标施肥量,生成施肥处方图。

试验过程中,机具作业速度在3~9  $\text{km}/\text{h}$ ,调控系统接收施肥处方图与机具位置信息,自主判断机具所在栅格区域位置,获得栅格区域内目标施肥量。根据公式(3)实时计算并调节排肥器转速,实现基于处方图的变量施肥作业,如图14所示。



图14 田间试验场景

Fig. 14 Field test scene

#### 3.3.2 田间试验结果分析

田块共有10个厢面,每个厢面根据施肥处方图栅格计算得到不同的目标施肥量,在机具排肥管下方套上接料袋,对排肥器实际排量进行测量。机具完成每厢施肥作业后,通过高精度电子秤称量实际施肥量。

根据公式(18)计算LADRC和PID控制算法施肥量控制精度,结果如表4所示。试验结果表明:LADRC控制算法在各厢面的施肥量控制精度均达到95.21%,相较于PID算法提高了5.15个百分

点,施肥量控制精度标准差为 1.10, 低于后者的 2.46。LADRC 控制算法具有更小的偏差和更高的稳定性,在田间工作环境下仍能保持较高的施肥量控制精度。

表 4 变量施肥田间试验结果

Tab.4 Results of field test for variable fertilization

厢号	目标施肥量/kg	LADRC 实际施肥量/kg	PID 实际施肥量/kg	LADRC 控制精度/%	PID 控制精度/%
1	2.586	2.703	2.329	95.48	90.06
2	3.448	3.557	3.244	96.84	94.08
3	8.621	8.734	8.842	98.69	97.44
4	3.621	3.486	3.882	96.27	92.79
5	6.897	6.630	6.654	96.13	96.48
6	6.034	5.745	5.714	95.21	94.70
7	4.310	4.228	3.956	98.10	91.79
8	3.793	3.915	3.958	96.78	95.65
9	2.931	3.048	2.665	96.01	90.92
10	3.966	3.856	3.654	97.23	92.13

## 4 结论

(1)设计了一种基于施肥处方图的油菜精准变

量施肥线性自抗扰调控系统。提出基于云端高精度地图规划作业路径对施肥处方图进行栅格划分的方法,为机具施肥提供了指导性施肥量。调控系统根据栅格区域内不同的施肥量和作业速度智能调节排肥器转速,实现肥料变量施入。

(2)提出卡尔曼滤波解决北斗测速数据波动和滞后距离补偿算法施肥位置滞后问题。进行北斗测速滤波前后速度对比试验和施肥位置滞后补偿试验,试验结果表明,北斗测速经卡尔曼滤波后速度波动降低 9.66%;平均施肥位置滞后距离为 0.28 m,降低了 83%,有效提高栅格区域内施肥量的控制精度。

(3)通过 Matlab 仿真,验证 LADRC 控制算法在调控系统中的抗干扰性,结果表明,LADRC 控制算法在抗干扰、超调量、稳态误差方面与 PID 控制算法相比分别提高了 39.08%、91.77%、86.96%,综合性能优于后者。搭载基于处方图的变量施肥调控系统田间试验表明,当车速为 3~9 km/h 时,调控系统在各栅格内施肥量控制精度不低于 95.21%,满足基于处方图的变量施肥系统的施肥要求。

## 参 考 文 献

- [1] BALAFOUTIS A, BECK B, FOUNTAS S, et al. Precision agriculture technologies positively contributing to GHG emissions mitigation, farm productivity and economics[J]. Sustainability, 2017,9(8): 1339.
- [2] 唐汉,王金武,徐常塑,等. 化肥减施增效关键技术研究进展分析[J]. 农业机械学报, 2019, 50(4): 1-19. TANG Han, WANG Jinwu, XU Changsu, et al. Research progress analysis on key technology of chemical fertilizer reduction and efficiency increase [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(4): 1-19. (in Chinese)
- [3] 吕伟生,肖小军,肖国滨,等. 缓释肥侧位深施及用量对油菜产量和肥料利用率的影响[J]. 农业工程学报, 2020, 36(19): 19-29. LÜ Weisheng, XIAO Xiaojun, XIAO Guobin, et al. Effects of lateral deep application and dosage of slow-release fertilizer on yield and fertilizer utilization efficiency of rape (*Brassica napus* L.) [J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(19): 19-29. (in Chinese)
- [4] MIRZAKHANINAFCHI H, SINGH M, DIXIT A K, et al. Performance assessment of a sensor-based variable-rate real-time fertilizer applicator for rice crop[J]. Sustainability, 2022, 14(18): 11209.
- [5] 翟长远,杨硕,王秀,等. 农机装备智能测控技术研究现状与展望[J]. 农业机械学报, 2022, 53(4): 1-20. ZHAI Changyuan, YANG Shuo, WANG Xiu, et al. Status and prospect of intelligent measurement and control technology for agricultural equipment [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(4): 1-20. (in Chinese)
- [6] 梁栋,胡丽娜,王秀,等. 车载式大田土壤电导率在线检测系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(6): 274-285. LIANG Dong, HU Li'na, WANG Xiu, et al. Design and experiment of vehicle-mounted field soil electrical conductivity online detection system [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(6): 274-285. (in Chinese)
- [7] BRAMBILLA M, ROMANO E, TOSCANO P, et al. From conventional to precision fertilization: a case study on the transition for a small-medium farm[J]. AgriEngineering, 2021, 3(2): 38-46.
- [8] 于丰华,曹英丽,许童羽,等. 基于高光谱遥感处方图的寒地分蘖期水稻无人机精准施肥[J]. 农业工程学报, 2020, 36(15): 103-110. YU Fenghua, CAO Yingli, XU Tongyu, et al. Precision fertilization by UAV for rice at tillering stage in cold region based on hyperspectral remote sensing prescription map [J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(15): 103-110. (in Chinese)
- [9] 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)

- [10] 赵学观, 金鑫, 邹伟, 等. 基于双测速模式的玉米追肥机控制系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(增刊1): 145 - 153.  
ZHAO Xueguan, JIN Xin, ZOU Wei, et al. Design and experiment of double speed measurement mode of corn topdressing control system based on spectral information[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51 (Supp.1): 145 - 153. (in Chinese)
- [11] 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)
- [12] 孟志军, 赵春江, 付卫强, 等. 变量施肥处方图识别与位置滞后修正方法[J]. 农业机械学报, 2011, 42(7): 204 - 209.  
MENG Zhijun, ZHAO Chunjiang, FU Weiqiang, et al. Prescription map method for variable rate application of fertilizer[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(7): 204 - 209. (in Chinese)
- [13] 赵硕, 宗泽, 刘刚. 基于电机驱动的定位施肥控制系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2019, 50(增刊): 91 - 95, 114.  
ZHAO Shuo, ZONG Ze, LIU Gang. Design and test on position fertilization control system based on motor drive[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(Supp.): 91 - 95, 114. (in Chinese)
- [14] 孙文峰, 刘海洋, 王润涛, 等. 基于神经网络整定的PID控制变量施药系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(12): 55 - 64, 94.  
SUN Wenfeng, LIU Haiyang, WANG Runtao, et al. Design and experiment of PID control variable application system based on neural network tuning[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(12): 55 - 64, 94. (in Chinese)
- [15] 王润涛, 刘瑶, 王树文, 等. 基于模糊控制的车速跟随变量喷雾系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(6): 110 - 117.  
WANG Runtao, LIU Yao, WANG Shuwen, et al. Design and experiment of speed-following variable spray system based on fuzzy control[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(6): 110 - 117. (in Chinese)
- [16] 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. (in Chinese)
- [17] 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)
- [18] 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)
- [19] 卢邦, 董万静, 丁幼春, 等. 基于云-端高精度地图的油菜无人播种作业系统设计与试验[J]. 智慧农业(中英文), 2023, 5(4): 33 - 44.  
LU Bang, DONG Wanjing, DING Youchun, et al. An rapeseed unmanned seeding system based on cloud-terminal high precision maps[J]. Smart Agriculture, 2023, 5(4): 33 - 44. (in Chinese)
- [20] 安晓飞, 付卫强, 魏学礼, 等. 基于处方图的垄作玉米四要素变量施肥机作业效果评价[J]. 农业机械学报, 2017, 48(增刊): 66 - 70.  
AN Xiaofei, FU Weiqiang, WEI Xueli, et al. Evaluation of four-element variable rate application of fertilization based on maps[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(Supp.): 66 - 70. (in Chinese)
- [21] 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)
- [22] 王淞, 赵斌, 衣淑娟, 等. 基于IGWO-LADRC的电动绿豆播种机控制系统研究[J]. 农业机械学报, 2022, 53(增刊1): 87 - 98.  
WANG Song, ZHAO Bin, YI Shujuan, et al. Electric-driven mung bean precision seeder control system based on IGWO-LADRC[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(Supp.1): 87 - 98. (in Chinese)
- [23] 白杰, 朱日兴, 王伟, 等. 基于线性自抗扰控制技术控制器设计的控制方法[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(10): 4149 - 4153.  
BAI Jie, ZHU Rixing, WANG Wei, et al. Study on control method for designing set-point controller via LADRC technique[J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(10): 4149 - 4153. (in Chinese)

20(2):150-157.

- [29] WANG L G, CHEN J F, OOI J F. Abreakage model for particulate solids under impact loading[J]. Powder Technology, 2021, 394:669-684.
- [30] ZHOU B N, ZHOU Y, YANG H L, et al. Modelling radio frequency heating of randomly stacked walnut kernels with different particle size[J]. Biosystems Engineering, 2023, 228:56-66.
- [31] 黄婉媛, 任德志, 宫元娟, 等. 基于 Abaqus 的耦合式玉米秸秆皮糠分离仿真与试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(7):124-133.  
HUANG Wanyuan, REN Dezhi, GONG Yuanjuan, et al. Coupling separation simulation analysis and test of corn stalk rind-pith based on Abaqus[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(7):124-133. (in Chinese)
- [32] MA G, ZHANG Y, ZHOU W, et al. The effect of different fracture mechanisms on impact fragmentation of brittle heterogeneous solid[J]. International Journal of Impact Engineering, 2018, 113:132-143.
- [33] ZHANG H, LIU H L, ZENG Y, et al. Design and performance evaluation of a multi-point extrusion walnut cracking device [J]. Agriculture, 2022, 12(9):1494.
- [34] 孙延成. 基于差速辊的黄贮玉米籽粒破碎装置设计与试验研究[D]. 淄博:山东理工大学, 2022.  
SUN Yancheng. Design and experimental study on grain crushing device of yellow storage corn based on differential roller[D]. Zibo:Shandong University of Technology, 2022. (in Chinese)
- [35] 韩闰劳, 左志刚, 赵宗朝. 对辊挤压式杏核破壳机关键部件的优化设计[J]. 机械研究与应用, 2020, 33(5):139-141.  
HAN Runlao, ZUO Zhigang, ZHAO Zongchao. Optimization design for the key components of twin-roll extrusion apricot shell breaker[J]. Mechanical Research & Application, 2020, 33(5):139-141. (in Chinese)
- [36] 何义川, 王序俭, 曹肆林, 等. 对辊挤压式核桃破壳装置的设计与试验研究[J]. 江苏农业科学, 2012, 40(9):350-352.  
HE Yichuan, WANG Xujian, CAO Silin, et al. Design and experimental study of roller extrusion walnut shell breaking device [J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2012, 40(9):350-352. (in Chinese)

(上接第 266 页)

- [24] 姜炎坤, 朴亨, 王鹏, 等. 采用线性自抗扰技术的高精度温度控制系统研制[J]. 红外与激光工程, 2023, 52(2):296-301.  
JIANG Yankun, PIAO Heng, WANG Peng, et al. Research on high precision temperature control system using linear auto disturbance rejection technique[J]. Infrared and Laser Engineering, 2023, 52(2):296-301. (in Chinese)
- [25] 夏长亮, 李正军, 杨荣, 等. 基于自抗扰控制器的无刷直流电机控制系统[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(2):85-89.  
XIA Changliang, LI Zhengjun, YANG Rong, et al. Brushless DC motor control system based on active disturbance rejection controller[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(2):85-89. (in Chinese)
- [26] 马良玉, 王月, 马进. 基于 PI 参数的二阶线性自抗扰控制参数整定[J]. 控制工程, 2024, 31(10):1761-1767.  
MA Liangyu, WANG Yue, MA Jin. Parameter tuning of second-order linear active disturbance rejection control based on PI parameters[J]. Control Engineering of China, 2024, 31(10):1761-1767. (in Chinese)
- [27] 韩文杰, 谭文. 基于 PID 参数整定的线性自抗扰控制参数整定[J]. 控制与决策, 2021, 36(7):1592-1600.  
HAN Wenjie, TAN Wen. Tuning of linear active disturbance rejection controllers based on PID tuning rules[J]. Control and Decision, 2021, 36(7):1592-1600. (in Chinese)
- [28] 王学斌, 徐建宏, 张章. 卡尔曼滤波器参数分析与应用方法研究[J]. 计算机应用与软件, 2012, 29(6):212-215.  
WANG Xuebin, XU Jianhong, ZHANG Zhang. Research on parameter analysis and application methods of Kalman filter[J]. Computer Applications and Software, 2012, 29(6):212-215. (in Chinese)
- [29] 钟银, 薛梦琦, 袁洪良. 智能农机 GNSS/INS 组合导航系统设计[J]. 农业工程学报, 2021, 37(9):40-46.  
ZHONG Yin, XUE Mengqi, YUAN Hongliang. Design of the GNSS/INS integrated navigation system for intelligent agricultural machinery[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(9):40-46. (in Chinese)
- [30] 杜君, 孙克刚, 白由路, 等. 北方褐土区冬小麦养分平衡施肥参数研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(5):1113-1122.  
DU Jun, SUN Kegang, BAI Youlu, et al. Study on parameters of balanced fertilization for winter wheat in cinnamon soil in Northern China[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2015, 21(5):1113-1122. (in Chinese)
- [31] 杜君, 白由路, 杨俐苹, 等. 养分平衡法在冬小麦测土推荐施肥中的应用研究[J]. 中国土壤与肥料, 2012(1):7-13.  
DU Jun, BAI Youlu, YANG Liping, et al. Application of nutrient balance method in soil testing and fertilizer recommendation for winter wheat[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2012(1):7-13. (in Chinese)