

基于FSMC-Kalman的带式高速导种装置控制系统研究

王 淞¹ 衣淑娟¹ 赵 斌^{1,2} 李衣菲^{1,3} 王光宇¹ 李帅霏¹ 孙文胜¹

(1. 黑龙江八一农垦大学工程学院, 大庆 163319; 2. 黑龙江省农机智能装备重点实验室, 大庆 163319;

3. 东北农业大学工程学院, 哈尔滨 150030)

摘要:为解决带式高速导种装置导种过程中导种电机与排种器驱动电机转速同步率低、稳定性差,造成播种株距变异系数升高,播种均匀度差的问题,提出一种基于模糊滑模卡尔曼(Fuzzy sliding mode control-Kalman, FSMC-Kalman)算法的带式高速导种装置控制系统。通过对系统运动过程分析建立了排种电机、导种电机与作业速度的关系,为研究系统控制策略,对两个电机建立了数学模型。提出的FSMC-Kalman算法利用模糊算法动态整定滑模控制器中的逼近系数与速率系数,并在反馈环节加入卡尔曼滤波算法,从而增强控制系统的鲁棒性与自适应能力。仿真试验表明:基于FSMC-Kalman算法的导种电机转速无超调,调节时间为0.22 s,稳态误差为4.68 r/min;基于FSMC-Kalman算法的排种电机转速也无超调,调节时间为0.23 s,稳态误差为1.96 r/min。台架试验表明:FSMC-Kalman算法4种作业速度的平均合格株距变异系数为7.98%。FSMC-Kalman算法相较于SMC算法平均合格株距变异系数降低4.67个百分点,相较于FSMC算法平均合格株距变异系数降低3.36个百分点,相较于SMC-Kalman算法平均合格株距变异系数降低2.06个百分点。基于FSMC-Kalman的带式高速导种装置控制系统能够使导种电机与排种器驱动电机高同步率稳定工作,从而提高播种均匀度。

关键词:带式高速导种装置; 控制系统; 模糊算法; 滑模控制; 卡尔曼滤波

中图分类号: S223.2

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2024)12-0169-11

OSID:



Belt-type High-speed Seed Guide Device Control System Based on FSMC-Kalman

WANG Song¹ YI Shujuan¹ ZHAO Bin^{1,2} LI Yifei^{1,3} WANG Guangyu¹ LI Shuaifei¹ SUN Wensheng¹

(1. College of Engineering, Heilongjiang Bayi Agricultural University, Daqing 163319, China

2. Heilongjiang Provincial Key Laboratory of Intelligent Agricultural Machinery Equipment, Daqing 163319, China

3. College of Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

Abstract: In order to solve the problem of low synchronization rate and poor stability of the speed of the driving motor and the belt high-speed guide device, which results in the increase of seeding distance coefficient and poor sowing uniformity, a control system of belt high-speed guide device based on fuzzy sliding mode control-Kalman (FSMC-Kalman) algorithm was studied. Through the analysis of the system movement process, the relationship between the train and guide motors and the operation speed was established to establish the mathematical model of the two motors. The proposed FSMC-Kalman algorithm used the approximation coefficient and rate coefficient in the fuzzy algorithm, and added the Kalman filter algorithm in the feedback link, so as to enhance the robustness and adaptability of the control system. The simulation test showed that the speed of guide motor based on FSMC-Kalman algorithm had no overshoot, the adjustment time was 0.22 s, and the steady state error was 4.68 r/min; the speed of type motor based on FSMC-Kalman algorithm had no overshoot, the adjustment time was 0.23 s, and the steady state error was 1.96 r/min. The bench test showed that the average qualified plant spacing coefficient of variation of the four operation speeds of FSMC-Kalman algorithm was 7.98%. The FSMC-Kalman algorithm reduced the average coefficient of variation by 4.67 percentage points, which

收稿日期: 2024-08-06 修回日期: 2024-09-01

基金项目:北大荒农垦集团有限公司2023年农机研发制造推广应用一体化试点项目、国家自然科学基金项目(52275246)和黑龙江省重点研发计划重大项目(2022ZX05B02)

作者简介:王淞(1998—),男,博士生,主要从事农机装备智能化研究,E-mail: 2941904409@qq.com

通信作者:衣淑娟(1965—),女,教授,博士生导师,主要从事农机装备智能化研究,E-mail: yishujuan_2005@126.com

was 3.36 percentage points lower than that of the FSMC algorithm, and 2.06 percentage points lower than the average coefficient of variation of the SMC – Kalman algorithm. The control system of belt high-speed guide device based on FSMC – Kalman can make the guide motor and the seed type drive motor work stably with high synchronization rate, thus improving the sowing uniformity.

Key words: belt-type high-speed seed guide device; control system; fuzzy algorithm; SMC; Kalman filter

0 引言

高速精密播种^[1]是现代农业大规模生产中的关键技术,通过提升作业效率与作业精度,改善作业质量从而节约劳动力和增加作物单产。在高速精密播种过程中,导种阶段尤为关键,该阶段涉及种子从排种口排出经导种装置被精准投入种床的过程^[2]。在高速作业条件下,带式导种装置利用输送带对种子进行全程约束^[3-4],使其在导种装置中显著减少种子与管壁碰撞和弹跳现象,减少因碰撞导致的漏播、重播和均匀度下降的现象,使其保持始终有序状态。这种主动式的引导方法有效降低了播种机振动等干扰因素对种子引导过程的影响^[5-6],确保了高速播种作业的高精度。所研究的带式导种装置的驱动力来自于直流电机,其作业速度需要与排种器转速、机车作业速度相匹配才能保证带式导种装置稳定、有序地投种^[7-9],故研究一套双电机高转速下同步率高且稳定工作的带式高速导种装置控制系统是当前亟待解决的问题。

目前针对电动播种控制系统研究中,在不增加硬件成本的情况下,对控制策略的研究有助于提升控制系统性能,故大量学者针对电机控制策略进行深入研究^[10-17]。

现有方法均为采用欠约束式导种设备的电驱动排种器控制方法,尚未涉及带式导种装置协同控制方法。本文研究基于FSMC – Kalman的带式高速导种装置控制系统。通过分析系统过程建立排种电机、导种电机与作业速度的关系,设计带式高速导种装置控制系统硬件电路和软件流程,以实现有序排种、纳种、输种和投种。

1 系统运动分析

研究的带式导种装置^[18-20],其纳种机构与Precision Planting公司生产的v – set型气吸式排种器的内种盘型孔直接相接,从而代替原有排种器的凸轮释压式卸种结构。实际上排种器相当于带式导种装置的一个有序供种系统,由于纳种机构的存在,排种盘型孔上的种粒会有序通过纳种装置进入导种带种腔,在种粒初始落入种腔时其位置是随机

的,但因其高速运行,种带速度大于种子下落速度,种子会始终处于所在种腔上托片正下方,被带动向下运动,因随机落入点形成的种腔内位置偏差会自动矫正,使相邻两粒种子始终保持固定距离,故系统可不考虑两电机的初始位置。其中,纳种机构和导种机构均由同一个直流电机通过减速机构驱动,主动带轮通过导种电机驱动减速机构转动,其转动的同时带动导种带逆时针旋转。带式高速导种装置结构示意图如图1所示。

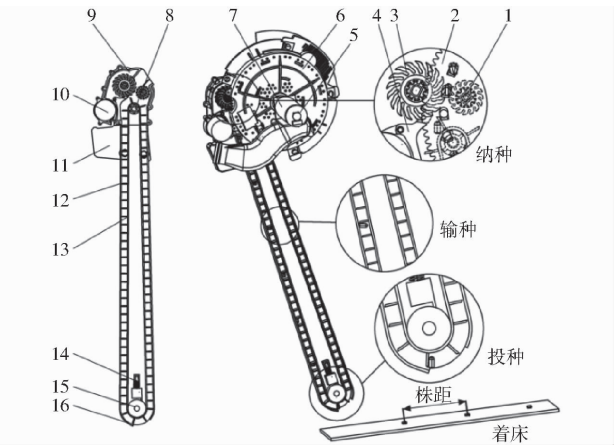


图1 带式高速导种装置结构示意图
Fig.1 Structure diagram of belt-type high-speed seed guide device

1. 副拨指轮 2. 种盘 3. 主拨指轮 4. 防卡限位块 5. 霍尔传感器 6. 气吸式排种器 7. 排种电机 8. 主动带轮 9. 减速齿轮箱 10. 导种电机 11. 带速监测模块 12. 种带壳体 13. 导种带 14. 张紧机构 15. 从动带轮 16. 投种口

根据装置减速关系可知,导种带主动带轮与导种电机转速比为1:3.6,所研究导种带主动带轮半径 $r=9\text{ mm}$,则导种带线速度为

$$v_1 = 2\pi r \frac{n_1}{3.6 \times 60} = \frac{\pi n_1}{1.2 \times 10^4} \tag{1}$$

式中 v_1 ——导种带线速度, m/s
 n_1 ——导种电机转速, r/min

由导种带运动条件可知,在作业速度为 v_2 、理论株距为 D 的情况下,相邻两粒种子的投种间隔时间应等于相邻两粒种子被纳入种腔内的时间间隔 t ,为

$$t = \frac{18D}{5v_2} = \frac{S}{v_1} \tag{2}$$

式中 S ——相邻两粒种子的理论种腔间距, m

如图 1 所示,研究的带式导种装置单个种腔长度 $S_0 = 15\text{ mm}$,在高速作业条件下,为保证排种电机和导种电机转速上限在合理阈值内,需固定每隔 5 个种腔纳入 1 粒种子^[19]。故在种带上两粒种子理论间距 $S = 90\text{ mm}$ 。将式(1)代入式(2)中可得导种电机转速 n_1 为

$$n_1 = \frac{300v_2}{\pi D} \tag{3}$$

排种器由一个直流电机直接驱动排种器主轴,故排种电机转速即为排种盘转速。纳种轮为导种带提供了稳定有序的种子流,在导种电机转速一定时,单粒种子纳入种腔所用的时间几乎一致,故不影响相邻两粒种子被纳入种腔内的时间间隔。为保证固定每隔 5 个种腔纳入 1 粒种子,在固定时间 t_0 内种腔转过数量需为排种器排出种子数量 5 倍,即

$$\frac{5Kn_2t_0}{60} = \frac{v_1t_0}{S_0} \tag{4}$$

式中 K ——排种盘型孔数,个

n_2 ——排种电机输出轴转速, r/min

为保证固定每隔 5 个种腔纳入 1 粒种子,同时种腔转过数量也需为导种带投出种子数量的 5 倍,即

$$\frac{25v_2t_0}{18D} = \frac{v_1t_0}{S_0} \tag{5}$$

联立式(4)、(5),可得排种电机转速 n_2 为

$$n_2 = \frac{50v_2}{3DK} \tag{6}$$

试验对象为玉米,采用的排种器玉米种盘型孔数 $K = 27$,将已知参数代入式(3)、(6)可得

$$n_1 = \frac{95.54v_2}{D} \tag{7}$$

$$n_2 = \frac{0.62v_2}{D} \tag{8}$$

以作业速度与两个电机转速理论关系为系统设计依据,开发一套采用双电机控制的气吸式高速精量播种机带式导种控制系统。

2 控制系统设计

带式高速导种装置控制系统包括主控制器电路、电源转换电路、通讯电路、双电机驱动电路、排种电机测速电路、导种带测速模块等。根据排种器满载最高速扭力试验选定排种电机,利用 DYN - 200 型动态扭矩传感器与排种器主轴同轴连接,利用实验室的大型三相交流电机同轴驱动,实际多次测得系统运行过程中平均转矩为 $1.46\text{ N}\cdot\text{m}$,最大转矩为

$1.75\text{ N}\cdot\text{m}$,为保证电机负载裕量,电机负载安全系数取 1.5。研究的最大作业速度对应的排种器转速为 49.6 r/min ,故排种电机应选用最大转矩大于 $2.63\text{ N}\cdot\text{m}$,负载转速大于 50 r/min 的电机。排种电机选用广东省深圳市名扬电机有限公司生产的 MY42GP - 4260 型直流行星减速电机,减速比为 1:27,其搭载了 HE12B 型霍尔传感器同步监测电机转速。其通过减速机放大的最大转矩达到 $2.94\text{ N}\cdot\text{m}$,负载转速为 150 r/min ,均满足系统运行需求。导种电机选用安徽省安庆市卡其心公司生产的 LK - 550 型直流电机。其同样可满足带式导种装置的最高速稳定运行。因其转速过快,如果直接利用霍尔传感器采集转速,可能会导致转速采集失真,使得采集偏差过大。故利用先前研究的带式导种性能监测模块^[21]监测导种带的线速度,作为导种电机的速度反馈。系统选用 STM32F103RBT6 型单片机作为主控制器,该控制器具有高性能、丰富的外设支持、低功耗特性与最高 72 MHz 运行频率等特点,充分保证系统二次开发能力与算法运行速度需求。人机交互模块选用 DMT10600T070_01W 型工业串口屏,其稳定性好、性价比高,具有数据存储功能,操作界面可移植性强等优点。采用 12 V 电源为两个电机与人机交互界面供电,设计电路中还有 5 V 电源为带速监测模块与霍尔传感器供电,保证了整个系统硬件电路的供电需求。该系统还可以监测系统重播率、漏播率,进一步设计种子流异常报警功能,从而形成完整的监控系统。两个电机参数如表 1 所示。系统总体结构如图 2 所示。

表 1 排种电机与导种电机关键参数
Tab.1 Key parameters for seeding motor and guiding motor

电机类型	参数	数值
导种电机	额定电压/V	12
	空载电流/A	0.80
	负载转速/($\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$)	150
	最大转矩/($\text{N}\cdot\text{m}$)	2.94
排种电机	额定电压/V	12
	空载电流/A	1.27
	额定转速/($\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$)	15 000
	额定转矩/($\text{N}\cdot\text{m}$)	0.08

由上述运动学分析可知,带式高速导种装置控制系统需要同时控制排种电机与导种电机,在不同作业速度下,按照各自理论转速稳定运行,故双电机控制电路是硬件系统中的核心模块。电机驱动芯片选取美国德州仪器公司生产的 DRV8432DKD 型集成电机驱动器芯片。其集成了多个功能,包括驱动

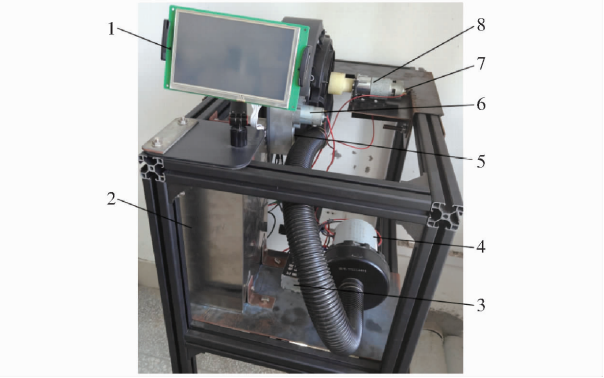


图 2 系统总体构成图

Fig. 2 Overall system composition diagram

1. 人机交互界面 2. 控制箱(含供电模块) 3. 风机调速器
4. 风机 5. 带速监测模块 6. 导种电机 7. 霍尔传感器 8. 排种电机

电路、电流感应、保护电路等,减少了外部组件数量,简化了电路设计。内置过热保护和短路保护,提高了系统的可靠性和安全性。该芯片是一个双通道电机驱动器,可以同时驱动两个电机,其包含 2 个 H 桥电路,每个 H 桥可独立控制一个直流电机的转速,其特点十分符合本系统开发需求,设计了其外部电路,带式玉米高速导种装置控制系统的双电机驱动电路如图 3 所示。

依据系统硬件选型、控制原理与实际应用需求,编写了带式高速导种装置控制系统的软件流程,双电机控制系统的软件流程主要包括:初始化播种参数,例如设置种盘型孔数、理论株距、作业速度的模拟量等固定参数。进而计算出导种电机和排种电机理论转速,设置两电机控制,实施控制逻辑以保持每

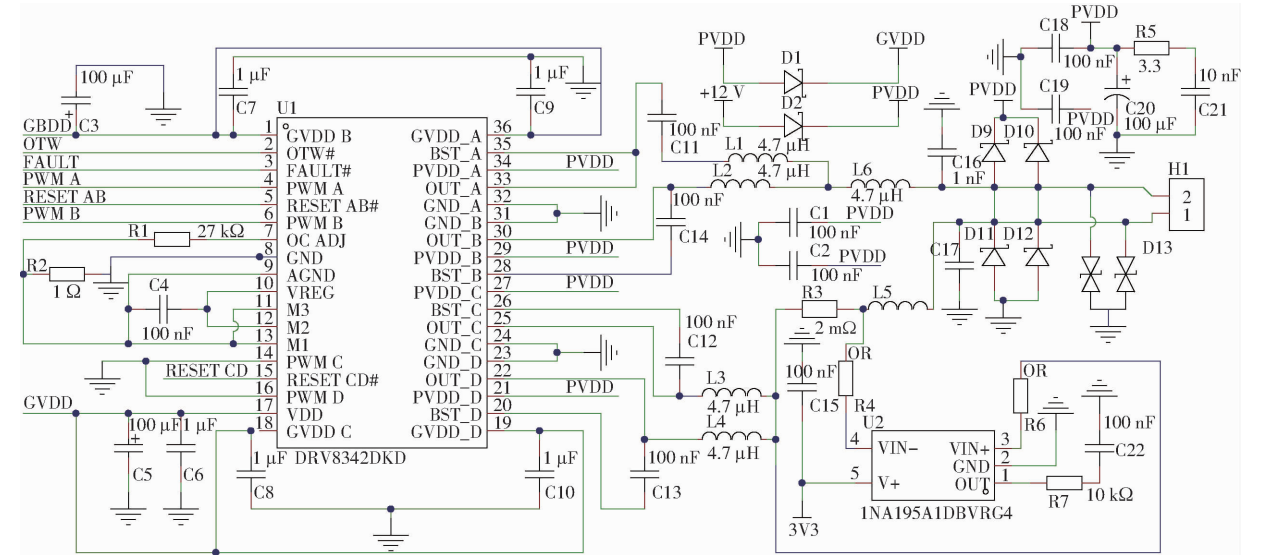


图 3 双电机驱动电路

Fig. 3 Dual motor drive circuit

隔 5 个种腔纳入 1 粒种子,利用监测模块监控种子流并调整电机转速以匹配作业速度和理论株距。同时,系统通过传感器进行反馈调整,确保播种精度,并利用控制算法实时调整两电机转速精度,最终在任务完成后关闭系统停止播种。带式玉米高速导种装置控制系统软件流程如图 4 所示。

3 控制策略

3.1 电机数学模型建立

直流电机机械特性方程与他励直流电动机机械特性方程形式相同。由于直流电机反电动势和转矩波动比较大,其机械特性方程中转矩与反电动势采用平均转矩和平均反电动势概念。根据直流电机原理得到电压平衡方程

$$U_0 = L \frac{dI}{dt} + IR + C_e n \tag{9}$$

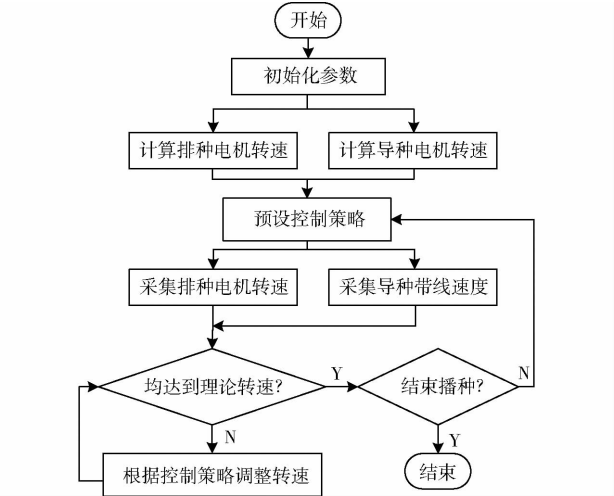


图 4 控制系统软件流程图

Fig. 4 Flowchart of control system software

式中 U_0 ——电枢电压,V
 L ——电枢电感,H

I ——电枢电流, A
 R ——电枢电阻, Ω
 C_e ——反电动势系数, $V \cdot s / \text{rad}$
 n ——电机转速, r / min

电机转矩平衡方程为

$$T_e = J \frac{dn}{dt} + T_f \quad (10)$$

式中 T_e ——电磁力矩, $N \cdot m$
 J ——转动惯量, $\text{kg} \cdot m^2$
 T_f ——负载力矩, $N \cdot m$

由式(9)、(10)可计算出电机的微分方程为

$$T_d T_m \frac{d^2 n}{dt^2} + T_m \frac{dn}{dt} + n = \frac{1}{C_e} U_0 \quad (11)$$

式中 T_d ——电磁时间常数, ms
 T_m ——机械时间常数, ms

将式(11)进行拉普拉斯变换,得到电机传递函数为

$$G(s) = \frac{\frac{1}{C_e}}{T_m T_d s^2 + T_m s + 1} \quad (12)$$

机械时间常数与电磁时间常数计算式为

$$T_m = \frac{RJ}{K_t C_e} \quad (13)$$

$$T_d = \frac{L}{R} \quad (14)$$

式中 K_t ——转矩常数

将得出的导种电机参数 $T_m = 0.5084 \text{ ms}$ 、 $T_d = 0.6098 \text{ ms}$ 、 $C_e = 0.00192 \text{ V} \cdot \text{s} / \text{rad}$ 代入式(12)得导种电机数学模型

$$G_1(s) = \frac{520.8}{0.31s^2 + 0.5084s + 1} \quad (15)$$

同理,排种电机参数 $T_m = 3.951 \text{ ms}$ 、 $T_d = 0.6696 \text{ ms}$ 、 $C_e = 0.00189 \text{ V} \cdot \text{s} / \text{rad}$,代入式(12)可得排种电机数学模型

$$G_2(s) = \frac{529.1}{2.65s^2 + 3.9510s + 1} \quad (16)$$

3.2 控制算法

滑模控制^[23]是一种建立在现代控制理论上的控制理论,其核心为李雅普诺夫函数,滑模控制的核心是建立一个滑模面,将被控系统拉到滑模面上,使系统沿着滑模面运动。滑模控制能够改善系统的动态性能,此特点可使带式导种装置与配套排种器的双电机控制系统无论在加速和减速过程中都能够快速准确地跟随系统指令,从而确保两个电机的控制精度及同步率。因在高速运行时研究系统电机受到内部和外部的各种干扰,系统抗干扰能力也需进一步增强,故在控制反馈加入卡尔曼滤波算法^[24],

可以有效滤除速度监测系统产生的噪声与误差,增强系统的鲁棒性。卡尔曼算法可以在无传感器模型条件下直接对控制系统进行状态估计和预测,预测方程和观测方程为

$$X_k = FX_{k-1} + Q_k \quad (17)$$

$$Y_k = HX_k + R_k \quad (18)$$

式中 X_k ——时刻 k 状态向量
 Y_k ——时刻 k 观测向量
 F ——状态转移矩阵
 H ——观测矩阵
 Q_k ——控制输入矩阵
 R_k ——观测噪声协方差矩阵

直流电机实际上是一个二阶系统,若 x_1 为导种电机角位移,此二阶系统可以表示为

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = u \end{cases} \quad (19)$$

式中 x_2 ——导种电机角速度, rad / s
 u ——控制输入电压, V

状态矩阵通过改善状态估计的质量,在 FSMC - Kalman 控制系统中起到连接观测器和控制器的作用。其不仅提高了控制精度和系统稳定性,还增强了系统鲁棒性和适应性,使整个控制系统能够更有效地应对复杂和动态变化的环境。故需要对该矩阵内部参数进行整定。根据导种电机数学模型可以得到导种电机控制系统状态方程

$$G_1(s) = \frac{y}{u} = \frac{520.8}{0.31s^2 + 0.5084s + 1} = \frac{1680}{s^2 + 1.64s + 3.226} \quad (20)$$

$$520.8u = 0.31 \frac{d^2 y}{dt^2} + 0.5084 \frac{dy}{dt} + y \quad (21)$$

令 $x_1 = y$,则有

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 = \frac{dy}{dt} \\ \dot{x}_2 = -3.226x_1 - 1.64x_2 + 1680u \end{cases} \quad (22)$$

则导种电机控制目标状态矩阵 $\dot{x}$ 为

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -3.226 & -1.64 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1680 \end{bmatrix} u \quad (23)$$

研究的控制目标即期望的电机角位移为 x_{1d} ,而系统的控制目的是使 x_1 趋近于 x_{1d} ,系统误差 $e = x_{1d} - x_1$,则误差变化率 e_c 有

$$e_c = \dot{x}_{1d} - \dot{x}_1 = \dot{x}_{1d} - x_2 \quad (24)$$

则结合 Kalman 滤波的控制系统滑模面表达式为

$$\dot{s} = ce_c + \dot{e}_c = c(\dot{x}_{1d} - \dot{x}) + \ddot{x}_{1d} + 3.226x_1 + 1.64x_2 - 1\,680u \quad (25)$$

式中 $\dot{s}$ ——趋近率
 c ——指数衰减系数

其中,指数衰减系数 c 用于确保系统状态到达滑模面后能沿着滑模面运动,并且抑制高频振荡。该参数经人工调整后设定为 20。趋近律设计一般形式有

$$\dot{s} = \begin{cases} -\varepsilon \operatorname{sgn}(s) & (\varepsilon > 0) \\ -\varepsilon \operatorname{sgn}(s) - ks & (\varepsilon > 0, k > 0) \\ -k|s|^\alpha \operatorname{sgn}(s) & (0 < \alpha < 1) \end{cases} \quad (26)$$

$$\text{其中} \quad \operatorname{sgn}(s) = \begin{cases} 1 & (s > 0) \\ -1 & (s < 0) \end{cases} \quad (27)$$

式中 ε ——逼近系数
 k ——增益系数
 α ——滑模面权重

选择指数趋近律,则控制量 u 为

$$u = -ce_c - \varepsilon \operatorname{sgn}(s) \quad (28)$$

代入本系统的滑模面推导过程为

$$c(\dot{x}_{1d} - \dot{x}) + \ddot{x}_{1d} + 3.226x_1 + 1.64x_2 - 1\,680u = -\varepsilon \operatorname{sgn}(s) - ps \quad (29)$$

式中 p ——速率系数
可解出

$$u = \frac{1}{1\,680}(ce_c + \varepsilon \operatorname{sgn}(s) + ps + \ddot{x}_{1d} + 3.226x_1 + 1.64x_2) \quad (30)$$

其中,逼近系数 ε 影响系统状态到达滑模面的动态过程。 ε 越大,系统状态趋近于平衡状态的速度越快,但同时也可能导致系统响应剧烈,产生高频振荡。速率系数 p 决定了系统状态在滑模面上的运动速度,直接决定了系统的调节时间。这两个参数决定了系统的稳态误差与调节时间,在控制过程中是两个需要动态调整的参数,故需要进行自适应整定。

通过模糊控制器^[23]整定滑模控制器中的 ε 和 p ,可在保持滑模控制优点的同时,通过模糊控制自

适应性来实时动态调整上述关键参数,从而提高系统的整体性能和适应性。设计的模糊控制器采用 Mamdani 模糊推理方法,包含排种电机模糊控制器 2 个输入变量 e' 和 e'_c ,其论域均为 $[0, 5]$,导种电机模糊控制器 2 个输入变量 e 和 e_c ,其论域均为 $[0, 10]$,根据对两个输出变量 p 和 ε 的预先试凑调参经验,确定论域均为 $[10, 80]$ 和 $[5, 30]$ 。该控制器共有 56 条模糊规则,通过最小和最大操作进行规则前提和结论的蕴含与聚合,并采用质心法进行去模糊化。输入和输出变量均采用三角形隶属度函数进行模糊化处理,以实现输入空间到输出空间的映射,从而有效处理系统不确定性和模糊性。模糊控制器输入输出隶属度如图 5 所示。整定参数模糊面如图 6 所示。模糊规则如表 2 所示。

如图 5、6 和表 2 所示,设计的模糊规则涵盖所有可能的输入组合,包括 7 个常规模糊集和 1 个特殊的非归属集。规则的分布显示出一定的对称性和非线性特征,在输入较小或较大时倾向于给出较大的输出,而在中间区域则是相对平缓的响应。该设计旨在实现精细的非线性控制,适用于需要在变化性较强条件下提供灵活响应的复杂系统,同时也为异常情况提供了统一的处理方式,最终增强了带式高速导种装置控制系统的鲁棒性。

3.3 仿真试验

控制系统的仿真试验环境为 AMD EPYC™ 7642 – 48C – 96T CPU@3.0 GHz,运行内存 256 GB,操作系统为 64 位 Windows 10,采用的仿真软件为 Matlab 2022b/Simulink。试验模拟播种作业速度 16 km/h 下理论株距 0.2 m 的理论作业条件,两个电机理论转速的阶跃响应状况,导种电机理论转速为 7 643.2 r/min,排种电机去掉减速器后的理论转速为 1 339.2 r/min。研究只探讨控制系统中排种电机超调量、调节时间、稳态误差等电气特性,故不考虑减速器因阻尼效应带来的排种电机输出轴转速偏

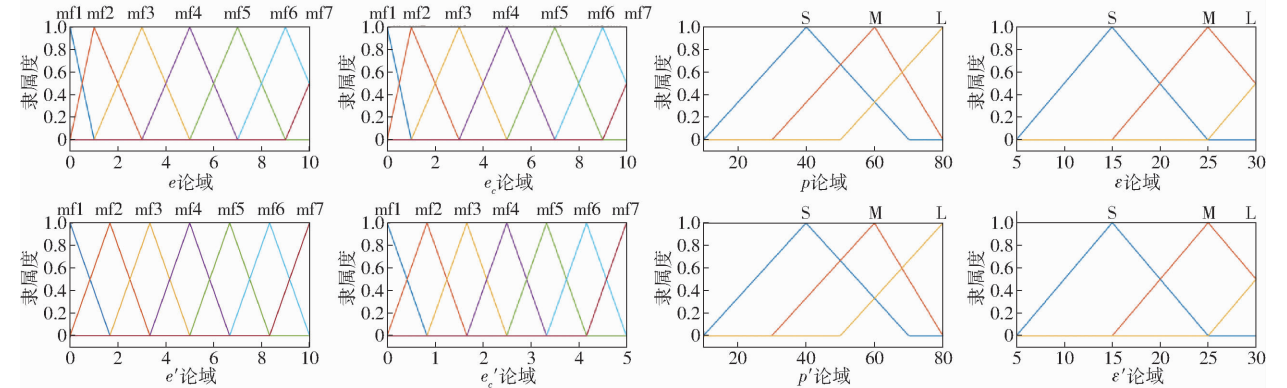


图 5 模糊控制器输入输出隶属度

Fig. 5 Affiliation of fuzzy controller inputs and outputs

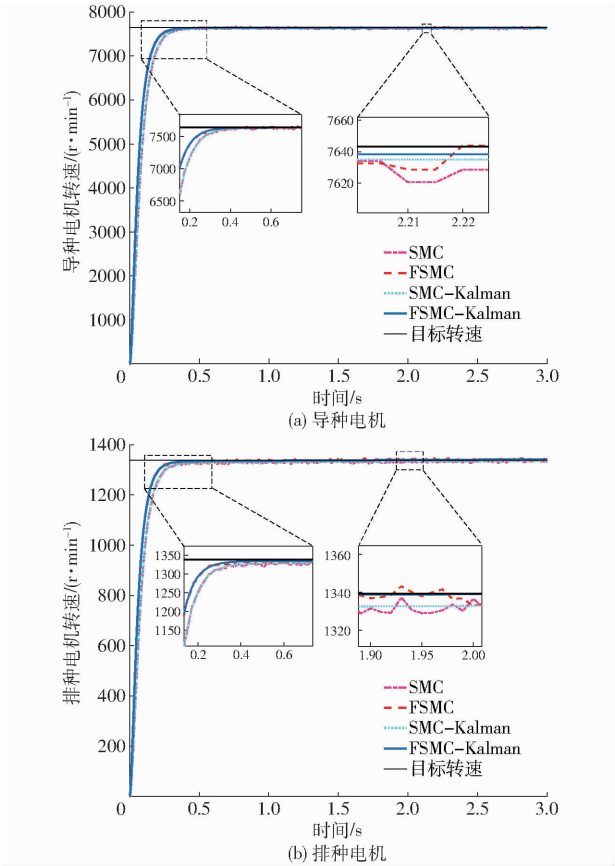


图 8 4 种控制策略阶跃响应曲线

Fig. 8 Step response curves for four control strategies

一样,加入 Kalman 算法后系统受干扰后均能恢复至之前的系统稳态状况。基于 FSMC - Kalman 算法的排种电机转速的稳态误差仅为 1.96 r/min,相较 SMC 算法稳态误差减少 9.71 r/min,相较 FSMC 算法稳态误差减少 2.05 r/min,相较 SMC - Kalman 算法稳态误差减少 6.14 r/min。

未结合 Kalman 算法的 2 种控制策略受干扰影响极大,而且结合了模糊自适应与卡尔曼滤波的滑模控制器在控制双电机系统时,无论在稳态误差、调节时间和抗干扰能力上较先前的算法均有较大提升。

4 试验

4.1 转速精度试验

为探究基于 FSMC - Kalman 的带式高速导种装置控制系统的双电机转速精度及同步性,开展了双电机转速精度试验。2024 年 5 月 20 日于黑龙江八一农垦大学高速精量播种实验室进行。利用自主设计的带式高速导种装置试验台,固定待测转速部分机构,利用两支美国路创公司生产的 DT - 2234A 型高精度数字光电测速仪(精度: ± 0.1 r/min)同时监测系统,在玉米理论株距 200 mm,作业速度 13、14、15、16 km/h 时的排种盘与主动带轮的实际转速,采集两电机转速稳定后 60 s 的平均转速。该测速仪需在被测物上粘贴一个反射条带,用作光电脉冲的发生标志物。两个电机因已经分别与带式导种装置及排种器连接工作,无粘贴反射条带的位置,所以选用了间接测量法。排种盘转速监测是直接监测排种电机与排种器联轴器的转速,即排种盘转速;导种电机转速主要监测相邻种带托片的线速度,并反推主动带轮的实际转速。每组作业速度均重复 8 次,取平均值,并计算两电机各自 8 组转速变异系数以及双电机转速偏差比。

因为导种带的每个种腔是隔断式结构,为确保种子不会串入应进种腔的相邻种腔,两个电机同步率至关重要。同步性越高,纳种与导种衔接越有序,播种均匀度越好。故也将双电机转速平均偏差比纳入后续试验指标,与平均转速和转速变异系数共同评价系统的精准性、稳定性和匹配度。研究利用偏差比间接表示电机同步性,双电机转速偏差比 U 计算式为

$$U = \left| \frac{0.62n_1}{95.54n_2} - 1 \right| \times 100\% \tag{31}$$

式中 U 越接近 0,证明偏差越小,同步率越高,说明此时两电机同步性越好,株距分布趋势越均匀。表 4 为双电机转速精度试验结果。

表 4 双电机转速精度试验结果

Tab. 4 Dual motor speed accuracy test results

作业速度/ (km·h ⁻¹)	部件	理论转速/ (r·min ⁻¹)	实际转速/(r·min ⁻¹)								平均转速/ (r·min ⁻¹)	变异系 数/%	平均偏 差比/%
			N1	N2	N3	N4	N5	N6	N7	N8			
13	主动带轮	1 725.0	1 710.5	1 715.3	1 713.4	1 726.9	1 720.6	1 714.5	1 718.4	1 710.6	1 716.3	0.32	0.26
	排种盘	40.3	39.4	39.8	40.8	39.7	40.8	40.9	39.8	40.5	40.2	1.49	
14	主动带轮	1 857.7	1 847.9	1 843.8	1 849.5	1 842.6	1 858.3	1 855.2	1 846.4	1 846.9	1 848.8	0.29	0.45
	排种盘	43.4	42.6	43.2	43.9	42.5	42.6	44.1	42.6	42.8	43.0	1.47	
15	主动带轮	1 990.4	1 984.5	1 976.2	1 980.4	1 984.9	1 981.9	1 978.9	1 980.3	1 981.2	1 981.0	0.14	0.83
	排种盘	46.5	45.1	46.0	45.2	46.5	46.0	46.9	45.8	46.0	45.9	1.31	
16	主动带轮	2 123.1	2 115.2	2 111.6	2 113.5	2 120.3	2 109.5	2 112.0	2 115.9	2 108.7	2 113.3	0.18	0.55
	排种盘	49.6	48.2	49.0	49.1	48.3	50.4	48.5	50.5	48.9	49.1	1.81	

由表 4 可知,带式导种装置主动带轮转速在 4 组作业速度下,平均转速为 16 km/h 时偏差最大,最大偏差为 10.2 r/min;平均转速为 13 km/h 时偏差最小,最小偏差为 8.7 r/min。平均转速偏差极小,且变异系数均小于 1%,证明导种电机具有一定的控制精度及稳定性。4 组作业速度下,平均转速为 15 km/h 时偏差最大,最大偏差为 0.6 r/min;平均转速为 13 km/h 时偏差最小,最小偏差为 0.1 r/min。平均转速偏差也极小,且变异系数均小于 2%,证明排种电机控制精度及稳定性同样优秀。各作业速度下的双电机平均偏差比均小于 1%,证明带式高速导种装置控制系统排种电机与导种电机转速同步率高,理论播种均匀度好,为实际播种性能试验提供了理论基础。

4.2 台架试验

为探究带式玉米高速导种装置控制系统的实际作业性能,开展了台架试验。试验材料选用德国 KWS 种子股份有限公司选育的“德美亚 1 号”玉米种子,种子经人工筛选,待试验种子净度达到 100%,其含水率为 $(11.4 \pm 0.13)\%$,千粒质量为 $(301.13 \pm 0.39) \text{ g}$,平均密度为 1.233 g/cm^3 。种子形状为“马齿”形,选取其中 500 粒玉米种子进行尺寸测量,其平均长度为 9.85 mm,平均宽度为 7.22 mm,平均厚度为 4.32 mm。试验于 2024 年 5 月 25—28 日在黑龙江八一农垦大学工程学院播种装备实验室开展。利用 JPS-16 型计算机视觉排种性能检测试验台^[25]监测各系统实际作业效果。该试验台基于相对运动原理,利用种床带相对于带式高速导种装置控制系统的相对运动,从而模拟机具前进作业;同时油泵将黏性黄油喷于种床上形成油带,从而模拟土壤,也更易观察播种状况;同时利用图像采集处理系统进行实时检测并采集数据上传至计算机,可以准确测定并输出各项播种性能指标。试验通过采集理论株距 200 mm 条件下,在理论作业速度 13、14、15、16 km/h 下基于 4 种不同算法播种系统的播种合格率、漏播率、重播率、变异系数与合格株距变异系数,变异系数为包括重播株距与漏播株距在内所有株距的变异系数;而合格株距变异系数即为每组株距样本去掉重播株距与漏播株距后的合格株距的变异系数,试验引入两种变异系数的目的为:可以同时考量装置自身的可靠性以及剔除因设计缺陷造成的重播和漏播情况后,综合判断控制系统稳定性。

根据 GB/T 6973—2005《单粒(精密)播种机试验方法》可知,如规定理论粒距为 L ,理论上应播 1 粒种粒的区间而实际上却没有种粒的情况称之为

漏播。在统计计算时,种粒间距在 $(1.5L, +\infty)$ 区间则称之为漏播。理论上应播 1 粒种粒的区间而实际上却播种下了 2 粒及 2 粒以上种粒的情况称之为重播。在统计计算时,凡是种粒间距在 $[0, 0.5L]$ 区间则称之为重播,而种粒间距在 $(0.5L, 1.5L]$ 区间则称之为合格播种。

每组试验采集稳定运行后连续的 120 个株距,重复 3 次。从而验证所研究的基于 FSMC - Kalman 的带式高速导种装置控制系统的稳定性与精确性。试验台架如图 9 所示。台架试验结果如表 5 所示。

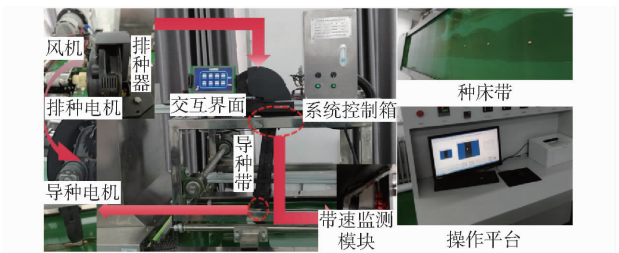


图 9 试验台架

Fig. 9 Test bench

表 5 台架试验结果

Tab. 5 Bench test results

控制策略	作业速度/ ($\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$)						%
		合格 率	漏播 率	重播 率	变异 系数	合格株距 变异系数	
SMC	13	98.33	1.11	0.56	14.60	10.88	
	14	98.06	1.11	0.83	16.30	11.89	
	15	98.06	1.39	0.56	17.08	13.08	
	16	97.78	1.94	0.28	18.89	14.73	
FSMC	13	98.33	1.11	0.56	14.45	9.97	
	14	98.06	1.39	0.56	16.07	10.97	
	15	98.33	1.39	0.28	15.52	11.84	
	16	98.06	1.67	0.28	17.19	12.55	
SMC - Kalman	13	98.61	0.83	0.56	13.09	8.62	
	14	98.33	0.83	0.83	13.58	9.25	
	15	98.61	1.11	0.28	14.58	10.85	
	16	98.06	1.39	0.56	15.33	11.44	
FSMC - Kalman	13	98.61	0.83	0.56	11.24	6.22	
	14	98.61	0.83	0.56	11.16	7.35	
	15	98.33	1.39	0.28	13.75	8.56	
	16	98.33	1.39	0.28	14.16	9.78	

由表 5 可知,在作业速度 13 ~ 16 km/h 下,4 种控制策略在合格率均保持在较高水平,最低合格率也高达 97.78%,最高漏播率仅为 1.94%,最高重播率仅为 0.83%。且随作业速度增加,所有控制策略的播种性能都有不同程度的下降。由图 10 可知,随着作业速度升高,实际株距相较于理论株距离散性越来越大;且同种作业速度下,FSMC - Kalman 相较于其他 3 种控制系统其株距离散性更小。然而,在高速下 FSMC - Kalman 和 SMC - Kalman 性能下降幅度较小,随着作业速度升高,合格株距变异系数平

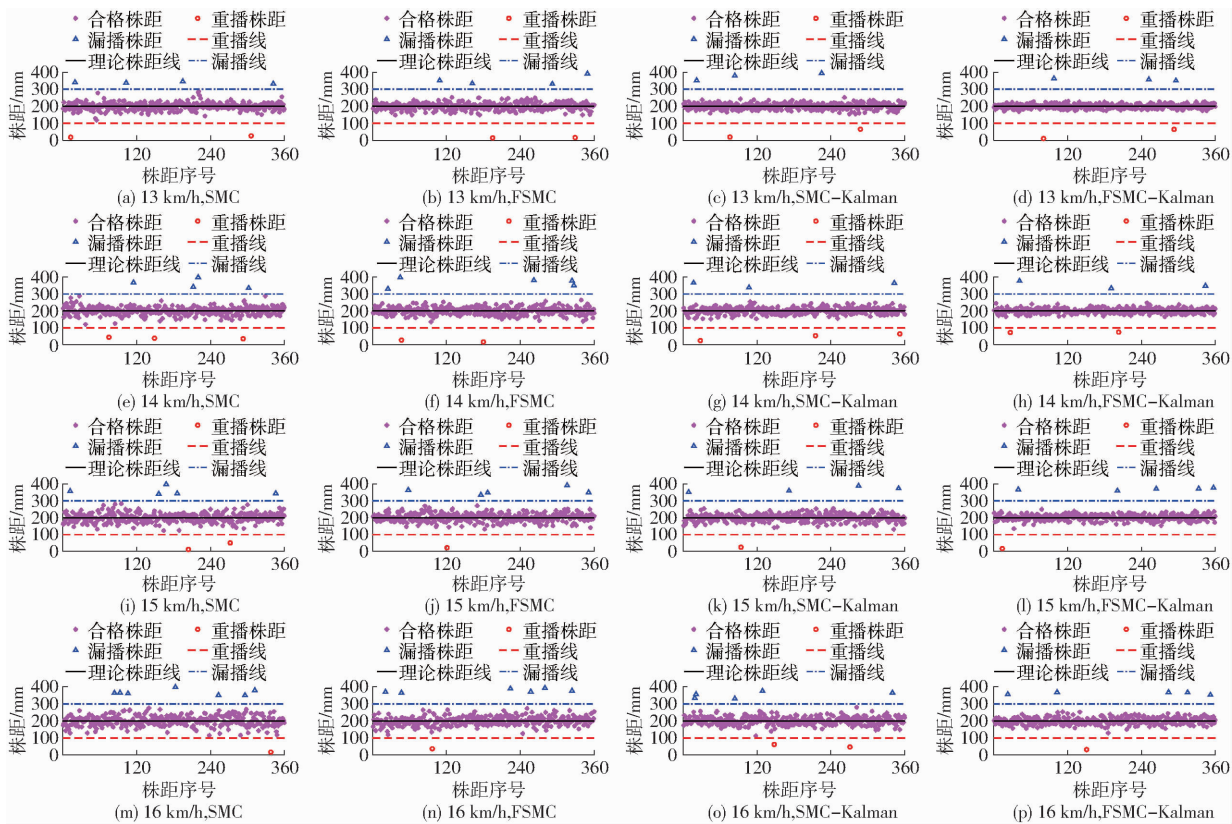


图 10 4 种控制策略在 4 种作业速度下株距分布情况

Fig. 10 Distance distribution of four control strategies at four operation speeds

均下降 3.19 个百分点,且两种算法合格株距变异系数均小于 11.5%,在针对高速播种作业时适应性更强。表明在结合了 Kalman 算法的控制系统稳定性更好。从其极低的重播率可以看出,因其纳种机构的作业机理可避免两粒种子进入同一个种腔,发生重播的情况可能是两粒尺寸较小的种子被同时吸附在种盘型孔上,一同被纳入种腔。同时,较高的播种合格率也证明了系统控制性能良好。

在播种均匀度方面,基于 FSMC - Kalman 的带式高速导种装置控制系统相较于其他 3 种控制系统变异系数更低。在去除漏播与重播后的合格株距变异数更能反映双电机控制系统的稳定性与精确性,FSMC - Kalman 算法 4 种作业速度的平均合格株距变异系数为 7.98%,当作业速度为 13 km/h 时达到最低,合格株距变异系数为 6.22%;当作业速度 16 km/h 时达到最高,合格株距变异系数为 9.78%。FSMC - Kalman 算法相较于 SMC 算法平均合格株距变异系数降低 4.67 个百分点,相较于 FSMC 算法平均合格株距变异系数降低 3.36 个百分点,相较于 SMC - Kalman 算法平均合格株距变异系数降低 2.06 个百分点。控制系统能够使带式玉米高速导种装置导种电机与排种器驱动电机高同步率稳定工作,从而使播种均匀度提高。

5 结论

(1)研究了基于 FSMC - Kalman 的带式高速导种装置控制系统,通过对系统运动过程分析建立了排种电机、导种电机与作业速度关系,设计了带式高速导种装置控制系统硬件电路与软件流程。实现了系统有序排种、纳种、输种、投种的应用需求。

(2)仿真试验结果表明:基于 FSMC - Kalman 算法的导种电机转速无超调,调节时间仅为 0.22 s,稳态误差仅为 4.68 r/min;基于 FSMC - Kalman 算法的排种电机转速也无超调,调节时间仅为 0.23 s,稳态误差仅为 1.96 r/min。该算法提升了系统控制精度和系统稳定性,且增强了系统鲁棒性和适应性。

(3)台架试验结果表明:基于 FSMC - Kalman 算法控制系统的 4 种作业速度平均合格株距变异系数为 7.98%。FSMC - Kalman 算法相较于 SMC 算法平均合格株距变异系数降低 4.67 个百分点,相较于 FSMC 算法平均合格株距变异系数降低 3.36 个百分点,相较于 SMC - Kalman 算法平均合格株距变异系数降低 2.06 个百分点。控制系统能够使带式玉米高速导种装置导种电机与排种器驱动电机高同步率、高精度工作,从而提高播种均匀度。

参 考 文 献

- [1] 杨丽, 颜丙新, 张东兴, 等. 玉米精密播种技术研究进展[J]. 农业机械学报, 2016, 47(11): 38 - 48.
YANG Li, YAN Bingxin, ZHANG Dongxing, et al. Research progress on precision planting technology of maize[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(11): 38 - 48. (in Chinese)
- [2] 郑娟, 廖宜涛, 廖庆喜, 等. 播种机排种技术研究态势分析与趋势展望[J]. 农业工程学报, 2022, 38(24): 1 - 13.
ZHENG Juan, LIAO Yitao, LIAO Qingxi, et al. Trend analysis and prospects of seed metering technologies[J]. Transactions of the CSAE, 2022, 38(24): 1 - 13. (in Chinese)
- [3] 陈永亮. 高速免耕播种机单体设计与试验研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2020.
CHEN Yongliang. Design and experimental study of high speed no tillage seeder monomer[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2020. (in Chinese)
- [4] 廖宜涛, 李成良, 廖庆喜, 等. 播种机导种技术与装置研究进展分析[J]. 农业机械学报, 2020, 51(12): 1 - 14.
LIAO Yitao, LI Chengliang, LIAO Qingxi, et al. Research progress of seed guiding technology and device of planter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(12): 1 - 14. (in Chinese)
- [5] 陈学庚, 钟陆明. 气吸式排种器带式高速导种装置的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2012, 28(22): 8 - 15.
CHEN Xuegeng, ZHONG Luming. Design and test on belt-type seed delivery of air-suction metering device[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(22): 8 - 15. (in Chinese)
- [6] 刘全威. 高速播种机种子精准投送机构设计与试验研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2017.
LIU Quanwei. Design and experiment of seed precise delivery mechanism for high-speed planter[D]. Beijing: China Agricultural University, 2017. (in Chinese)
- [7] 丁友强, 杨丽, 张东兴, 等. 基于 GPS 测速的电驱式玉米精量播种机控制系统[J]. 农业机械学报, 2018, 49(8): 42 - 49.
DING Youqiang, YANG Li, ZHANG Dongxing, et al. Control system of motor-driving maize precision planter based on GPS speed measurement[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(8): 42 - 49. (in Chinese)
- [8] 夏俊芳, 魏有帅, 郑侃, 等. 宽苗带小麦播种机多行匀播分控系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2024, 55(10): 145 - 156.
XIA Junfang, WEI Youshui, ZHENG Kan, et al. Design and experiment of multi-line uniform sowing and separate control system for wide seedling belt wheat seeder[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(10): 145 - 156. (in Chinese)
- [9] 苑严伟, 白慧娟, 方宪法, 等. 玉米播种与测控技术研究进展[J]. 农业机械学报, 2018, 49(9): 1 - 18.
YUAN Yanwei, BAI Huijuan, FANG Xianfa, et al. Research progress on maize seeding and its measurement and control technology[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(9): 1 - 18. (in Chinese)
- [10] LI B, SUN D, HU M, et al. Research on economic comprehensive control strategies of tractor-planter combinations in planting, including gear-shift and cruise control[J]. Energies, 2018, 11: 686.
- [11] CHEN J, ZHANG H, PAN F, et al. Control system of a motor-driven precision no-tillage maize planter based on the CANopen protocol[J]. Agriculture, 2022, 12: 932.
- [12] 王淦, 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(Suppl. 1): 87 - 98. (in Chinese)
- [13] HE X, CUI T, ZHANG D, et al. Development of an electric-driven control system for a precision planter based on a closed-loop PID algorithm[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2017, 136: 184 - 192.
- [14] 姚颖飞, 陈学庚, 纪超, 等. 基于模糊 PID 控制的玉米精量播种机单体驱动器设计与试验[J]. 农业工程学报, 2022, 38(6): 12 - 21.
YAO Yingfei, CHEN Xuegeng, JI Chao, et al. Design and experiments of the single driver for maize precision seeders based on fuzzy PID control[J]. Transactions of the CSAE, 2022, 38(6): 12 - 21. (in Chinese)
- [15] 陈黎卿, 解彬彬, 李兆东, 等. 基于双闭环 PID 模糊算法的玉米精量排种控制系统设计[J]. 农业工程学报, 2018, 34(9): 33 - 41.
CHEN Liqing, XIE Binbin, LI Zhaodong, et al. Design of control system of maize precision seeding based on double closed loop PID fuzzy algorithm[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(9): 33 - 41. (in Chinese)
- [16] WANG W, WU K, ZHANG Y, et al. The development of an electric-driven control system for a high-speed precision planter based on the double closed-loop fuzzy PID algorithm[J]. Agronomy, 2022, 12: 945.
- [17] 张春岭, 吴荣, 陈黎卿. 电控玉米排种系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2017, 48(2): 51 - 59.
ZHANG Chunling, WU Rong, CHEN Liqing. Design and test of electronic control seeding system for maize[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(2): 51 - 59. (in Chinese)
- [18] MA C, YI S, TAO G, et al. Research on receiving seeds performance of belt-type high-speed corn seed guiding device based on discrete element method[J]. Agriculture, 2023, 13: 1085.

MIAO Ronghui, LI Zhiwei, WU Jinlong. Lightweight maturity detection of cherry tomato based on improved YOLO v7[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(10): 225–233. (in Chinese)

[19] HUA Yong, XU Hongzhen, LIU Jiaodi, et al. A peanut and weed detection model used in fields based on BEM–YOLO v7–tiny[J]. Mathematical Biosciences and Engineering: MBE, 2023, 20(11): 19341–19359.

[20] 袁培森, 丁毅飞, 徐焕良. 基于深度主动学习与 CBAM 的细粒度菊花表型识别[J]. 农业机械学报, 2024, 55(2): 258–267. YUAN Peisen, DING Yifei, XU Huanliang. Fine-grained chrysanthemum phenotype recognition based on deep active learning and CBAM[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(2): 258–267. (in Chinese)

[21] 靳宁, 孙林, 张东彦, 等. 基于 CBAM–U–HRNet 模型和 Sentinel–2 数据的棉花种植地块提取[J]. 农业机械学报, 2023, 54(11): 159–168. JIN Ning, SUN Lin, ZHANG Dongyan, et al. Classification of cotton planting area using CBAM–U–HRNet model and Sentinel–2 data[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(11): 159–168. (in Chinese)

[22] 王美华, 吴振鑫, 周祖光. 基于注意力改进 CBAM 的农作物病虫害细粒度识别研究[J]. 农业机械学报, 2021, 52(4): 239–247. WANG Meihua, WU Zhenxin, ZHOU Zuguang. Fine-grained identification research of crop pests and diseases based on improved CBAM via attention[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(4): 239–247. (in Chinese)

[23] HE Kaiming, ZHANG Xiangyu, REN Shaoqing, et al. Spatial pyramid pooling in deep convolutional networks for visual recognition[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2015, 37(9): 1904–1916.

[24] 袁培森, 欧阳柳江, 翟肇裕, 等. 基于 MobileNetV3Small–ECA 的水稻病害轻量级识别研究[J]. 农业机械学报, 2024, 55(1): 253–262. YUAN Peisen, OUYANG Liujiang, ZHAI Zhaoyu, et al. Lightweight identification of rice diseases based on improved ECA and MobileNetV3Small[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(1): 253–262. (in Chinese)

[25] 马宏兴, 董凯兵, 王英菲, 等. 基于改进 YOLO v5s 的轻量化植物识别模型研究[J]. 农业机械学报, 2023, 54(8): 267–276. MA Hongxing, DONG Kaibing, WANG Yingfei, et al. Lightweight plant recognition model based on improved YOLO v5s[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(8): 267–276. (in Chinese)

[26] 李丽, 卢世博, 任浩, 等. 基于改进 YOLO v5 的复杂环境下桑树枝干识别定位方法[J]. 农业机械学报, 2024, 55(2): 249–257. LI Li, LU Shibo, REN Hao, et al. Mulberry branch identification and location method based on improved YOLO v5 in complex environment[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(2): 249–257. (in Chinese)

(上接第 179 页)

[19] 马成成, 衣淑娟, 陶桂香, 等. 带式玉米高速导种装置旋夹纳种机理分析与参数优化[J]. 农业机械学报, 2023, 54(7): 134–143. MA Chengcheng, YI Shujuan, TAO Guixiang, et al. Mechanism analysis and parameter optimization of corn seeds receiving by rotating clamp of belt-type high-speed seed guiding device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(7): 134–143. (in Chinese)

[20] LI Y, ZHOU W, MA C, et al. Design and optimization of the seed conveying system for belt-type high-speed corn seed guiding device[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2024, 17(2): 123–131.

[21] 王淦, 衣淑娟, 赵斌, 等. 高速精量播种机带式高速导种装置导种性能红外监测系统研究[J]. 农业机械学报, 2024, 55(12): 160–168. WANG Song, YI Shujuan, ZHAO Bin, et al. Study on infrared performance monitoring system of belt-type high-speed seed guide device for high-speed precision seeder[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(12): 160–168. (in Chinese)

[22] TURSINI M, PETRELLA R, PARASILITI F. Adaptive sliding-mode observer for speed-sensorless control of induction motors[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2000, 36(5): 1380–1387.

[23] SUN J, WANG Z, ZHANG J, et al. Shuttle-free zinc-iodine batteries enabled by a cobalt single atom anchored on N-doped porous carbon host with ultra-high specific surface area[J]. Journal of Energy Storage, 2024, 90(6): 111716.

[24] PONTICELLI L, BARBARO M, MANDRAGORA G, et al. Comparison of KF-based vehicle sideslip estimation logics with increasing complexity for a passenger car[J]. Sensors, 2024, 24: 4846.

[25] 邱兆美, 张巍朋, 赵博, 等. 小粒种子电动播种机作业质量监测系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2019, 50(4): 77–83. QIU Zhaomei, ZHANG Weipeng, ZHAO Bo, et al. Design and test of operation quality monitoring system for small grain electric seeder[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(4): 77–83. (in Chinese)