

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2026.06.008

油麦兼用气送式集排器随速控制系统设计与试验

施彬彬¹ 覃绍礼¹ 段凯² 李文成¹ 廖庆喜^{1,3} 廖宜涛^{1,3}

(1. 华中农业大学工学院, 武汉 430070; 2. 咸宁市农业科学院, 咸宁 437100;

3. 农业农村部长江中下游农业装备重点实验室, 武汉 430070)

摘要: 针对现有集中气送式油麦兼用播种机油菜、小麦开环电驱播种时, 缺乏对机具排种速率动态响应和机具作业状态的实时监测, 导致播种机实际播量误差较大、机手操作流程复杂等问题, 本文设计了一种油麦兼用气送式集排器随速控制系统。该系统采用 STM32 单片机控制, 通过人机界面信息交互调整播量、非接触式雷达精准测速及倾角传感器实时作业姿态检测, 实现播种机油麦播种工况选择及作业状态精准识别, 配合集排器工作转速随速调整及排种控制器驱动逻辑动态匹配, 实现了播种机油菜、小麦电驱排种自动控制。试验结果表明, 雷达田间测速在不同地表工况下误差不大于 2.76%、稳定性变异系数不大于 4.12%, 显著优于地轮编码器测速方法; 倾角传感器角度检测误差为 0.13°~0.15°, 可准确检测播种机作业姿态; 田间播种状态下, 控制系统在不同作业速度时均可实现油麦兼用随速播种, 油菜、小麦播量控制误差分别小于 2% 和 3.5%。田间试验结果表明, 搭载油麦兼用气送式集排器随速控制系统的播种机实际田间作业时, 油菜、小麦出苗各行株数一致性变异系数分别为 8.59%、12.96%, 满足油麦兼用播种作业标准要求, 且相较于传统排种电机开环匀速驱动方式, 油菜、小麦各行株数一致性变异系数分别降低 8.33、5.06 个百分点。研究结果可为播种机兼用智能发展提供技术支撑。

关键词: 油菜; 小麦; 随速控制系统; 兼用排种; 气送式集排器

中图分类号: S223.2

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2026)06-0078-13

OSID:



Design and Experiment of Speed-adaptive Control System for Rapeseed and Wheat Air-assisted Centralized Metering Device

SHI Binbin¹ QIN Shaoli¹ DUAN Kai² LI Wencheng¹ LIAO Qingxi^{1,3} LIAO Yitao^{1,3}

(1. College of Engineering, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China

2. The Academy of Agricultural Sciences in Xianning, Xianning, 437100, China

3. Key Laboratory of Agricultural Equipment in Mid-lower Yangtze River, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Wuhan 430070, China)

Abstract: Aiming at the problems existing in the open-loop electric-driven seeding process of rapeseed and wheat for the current centralized air-conveyed combined seeder for rapeseed and wheat, such as the lack of dynamic response of seeding rate to the operating speed of the machine and real-time monitoring of the machine's operating status, which result in large errors in the actual seeding rate of the seeder and cumbersome operation procedures for the operator, a speed-adaptive control system for rapeseed and wheat air-assisted centralized metering device was designed. The system was controlled by an STM32 microcontroller. Utilizing human-machine interface information exchange to adjust the seeding rate, precise speed measurement via non-contact radar, and real-time operation posture detection through an inclination sensor, it realized the selection of seeding conditions and accurate identification of the operation state for the seeder, combining with the speed adjustment of the metering device and the dynamic matching of the metering device's drive logic, the automatic control of the electric drive seeding for rapeseed and wheat was achieved. The experimental results showed that the radar field speed

收稿日期: 2025-07-20 修回日期: 2025-10-09

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFD1600503)、华中农业大学“要术开物计划”培育项目(2662025GXPY004)和国家现代油菜产业技术体系油菜耕种机械化岗位(CARS-12-27)

作者简介: 施彬彬(1998—),男,博士生,主要从事农机装备智能化研究,E-mail: shibinbin@webmail.hzau.edu.cn

通信作者: 廖宜涛(1982—),男,教授,博士生导师,主要从事现代农业装备设计与测控研究,E-mail: liaotao@mail.hzau.edu.cn

measurement method had an error of no more than 2.76% and a stability variation coefficient of no more than 4.12% under different ground conditions, significantly outperforming the ground wheel encoder speed measurement method. The inclination sensor had an angle detection error of $0.13^{\circ} \sim 0.15^{\circ}$, enabling accurate detection of the seeder's operating posture. Under the field seeding conditions, the control system could achieve speed-adaptive seeding for both rapeseed and wheat at different operating speeds, with the control errors of rapeseed and wheat sowing rates being less than 2% and 3.5%, respectively. The field experiment results showed that when the seeder equipped with the speed-adaptive control system was actually used in field operation, the consistency variation coefficients of the number of plants per row for rapeseed and wheat were 8.59% and 12.96%, respectively, meeting the requirements of the sowing operation standard for rapeseed and wheat. Moreover, compared with the traditional open-loop uniform speed drive method of the seed metering motor, the consistency variation coefficients of the number of plants per row for rapeseed and wheat were decreased by 8.33 percentage points and 5.06 percentage points, respectively.

Key words: rapeseed; wheat; speed-adaptive control system; dual-purpose seeding; air-assisted centralized metering device

0 引言

油菜、小麦是我国南方地区冬季主要油粮作物,两者播期毗邻,机械化播种工序相似^[1],开发油麦兼用播种机可显著降低机械化生产投入成本、提高机具利用效率,提升新型经营主体机械化服务效益^[2]。气送式集排器以高速气流为载体对种子进行输送分配,具有种子外形尺寸及输种通量适应性强、作业效率高优点,广泛应用于先进的播种装备中^[3-4]。

气送式集排器工作过程由供种、混种、输种、分配及导种等串联环节组合而成^[1]。为提高其油菜、小麦兼用性及排种性能稳定性,学者通过关键部件兼用结构设计^[5-6]、气流-种子-集排器互作机理分析^[7-8]、工况参数最佳组合探究^[9-11]等方式,对各串联环节开展了深入研究,目前已基本实现集排器油麦兼用稳定排种。随着智能化播种技术的发展,集排器稳定电机直驱替换^[6,12]、多类别传感器作业信息融合检测^[13-14]、控制系统自适应反馈调控^[15-16]等技术的应用成为趋势,相关学者通过雷达、测速地轮和GPS获取播种机作业速度^[1,13]、光电传感器检测种子漏播堵塞及料仓料位情况^[13,17-18]、云平台播种参数选择及机具工况信息显示^[19]等方式,配合关键播种部件电驱替换及配套控制系统自动调控等技术^[1-2,18],为实现播种机自动精准变量作业提供了理论支撑,但现有研究多针对单一作物开展,且各技术间融合程度较低,鲜见适用于油菜、小麦等粒径及播量差异较大的兼用、自动播种控制系统研究,使得目前油麦兼用气送式播种机实际机播作业时,仍采用电机开环预设速度驱动排种器^[4,6],缺乏对机具作业速度的排种速率动态响

应,导致播种机田间实际播量与理论所需播量间误差较大。同时,在田间作业中,除播种状态外,播种机还存在转弯、掉头、暂停等非作业状态,现有控制系统未见针对机具作业状态监测及对应排种器响应驱动的研究,排种驱动器仍需人工判定操控,而驾驶员需同时操控机具悬挂、挡位、转向、油门等,实际作业时驾驶员操作繁琐、误操作概率较大、易出现非播种状态误播或播种状态漏播等问题,极大限制了播种机操作便利性及作业效率。

针对上述问题,本文设计一种油麦兼用气送式集排器随速控制系统,采用人机界面信息交互,可根据作业需求选择油菜、小麦播种,且播量兼容两类作物播量调整;通过非接触式雷达测速及油菜、小麦排种速率调控模型构建,实现集排器油麦排种量实时随速调整;通过倾角传感器监测机具抬升姿态,结合速度检测值,以实现播种机工作状态实时判定及集排器对应运行逻辑自动调控。

1 系统结构及工作原理

1.1 系统整体结构

油麦兼用气送式集排器随速控制系统主要由机载中央控制器、人机交互屏幕、油麦兼用气送式集排器、排种控制器、电源模块、作业姿态检测器及作业速度检测器等组成,整体结构如图1所示。

机载中央控制器为系统信息收发、处理及运算中心;人机交互屏幕用于设置作业参数并实时显示播种机工况信息;作业速度检测器用于实时检测播种机作业速度;作业姿态检测器用于实时检测播种机作业时抬起、放下姿态;排种控制器由直流电机、直流风机及两者驱动器构成,直流电机用于驱动油麦兼用气送式集排器排种轴转动、直流风机为气送

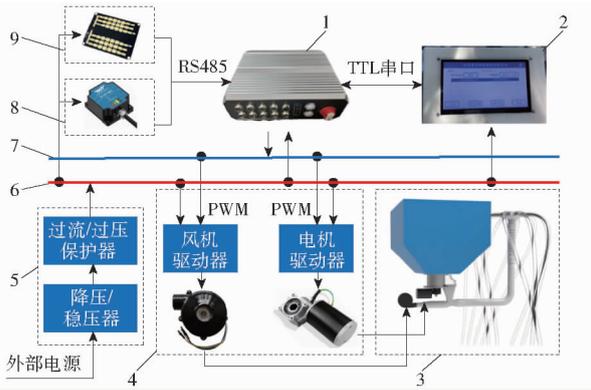


图1 集排器控制系统整体结构图

Fig. 1 Structure diagram of centralized metering device control system

1. 机载中央控制器 2. 人机交互屏幕 3. 油麦兼用气送式集排器 4. 排种控制器 5. 电源模块 6. 直流电源总线 7. 信号总线 8. 作业姿态检测器 9. 作业速度检测器

式集排器提供种子输送气流,驱动器通过接收机载中央控制器输出信号,可驱动直流电机及直流风机在目标工况下运行。控制系统各硬件于气送式油麦兼用联合播种机上的位置分布如图2所示。



图2 播种机控制系统硬件分布图

Fig. 2 Distribution diagram of control system hardware

1. 机载中央控制器 2. 直流风机 3. 排种电机 4. 人机交互屏幕 5. 作业姿态检测器 6. 作业速度检测器

1.2 系统工作原理

系统工作时,用户先通过人机交互屏幕选择播种种子类型及播量等农艺参数,机载中央控制器基于农艺参数信息选择对应排种速率调控模型,再使作业速度检测器、作业姿态检测器同步进入检测状态,并实时接收两传感器检测值。依据检测值不同,系统将田间作业工况下播种机工作状态分为预播、播种、转弯、暂停4种,机载中央控制器判别播种机各时刻工作状态后,将判定结果传输至人机交互屏幕实时显示,并匹配对应排种控制器驱动逻辑,循环调控直流风机、排种电机运行,使油麦兼用气送式集排器实时随速排出对应排量油菜或小麦种子,进而实现控制系统田间播种全过程自动控制及播种量随速精量调控,具体工作流程如图3所示。播种机工作状态具体判定方法如图4所示,其中预播状态指

播种机已完成播种作业准备工作,等待开始播种的状态;播种状态指播种机田间正常随速播种时的状态;转弯状态指播种机于田间转弯、掉头时的状态;暂停状态指播种机因堵种、漏播等突发情况导致需要紧急暂停时的状态。

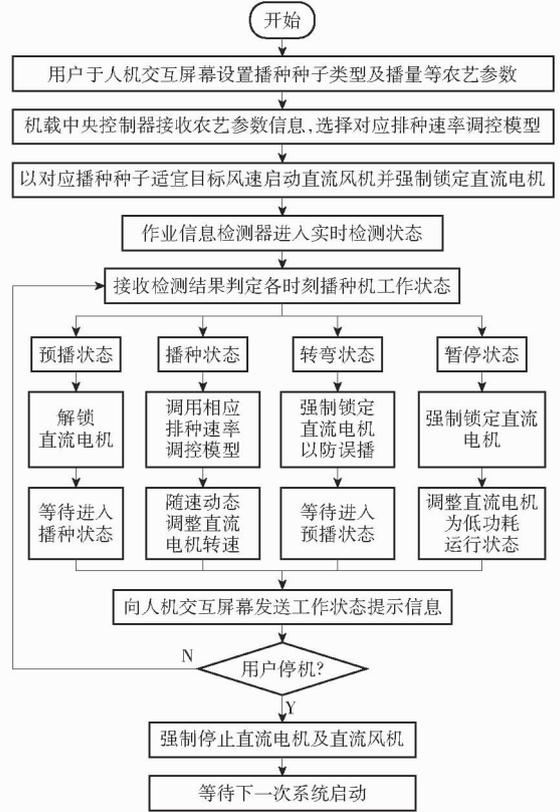


图3 控制系统流程图

Fig. 3 Control system flowchart

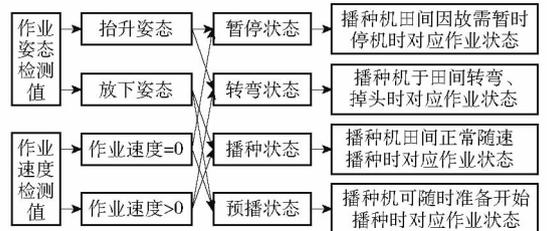


图4 播种机工作状态判定方法

Fig. 4 Working state determination method of seeder

2 系统硬件设计与选型

2.1 油麦兼用气送式集排器

选用的油麦兼用气送式集排器为课题组前期开发并已产业化应用的排种器,主要由种箱、供种装置、直流电机、直流风机、文丘里管、混种管、分配器、增压管、输种管等组成,如图5所示。工作时,供种装置在直流电机驱动下按照播量需求输出连续均匀的油菜或小麦定量种子流,种子流在自身重力及离心力作用下自落种口落入文丘里管中,与风机输出的高速气流交汇、混合形成气固两相流,两相流经混

种管进一步混合及增压管增压后被输送至分配器，由分配器均匀分配后经输种管排出，从而完成精量排种过程^[6]。研究表明，该集排器油菜、小麦排种速率满足播种机作业速度 12 km/h 以下时的播量需求，且油菜、小麦总排量稳定性变异系数始终低于 1.20%^[5-6]。

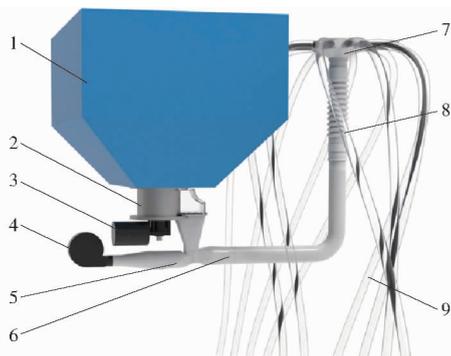


图 5 油麦兼用气送式集排器结构示意图

Fig. 5 Structure diagram of air-assisted centralized metering device for rapeseed and wheat

- 1. 种箱 2. 供种装置 3. 直流电机 4. 直流风机 5. 混种管
- 6. 文丘里管 7. 分配器 8. 增压管 9. 输种管

2.2 机载中央控制器

机载中央控制器是随速控制系统控制和协调各模块稳定运行的核心硬件，主要任务包括接收播种机关键作业信息，包括用户配置的播种农艺参数及

系统功能选择信息、作业信息检测器采集的机具作业速度及作业姿态信息等；处理上述信息，生成各时刻对应最佳控制策略，并输出相应电信号调控排种驱动器运行，使集排器各时刻实际排量均趋近于理论所需排量。为满足上述工作需求，以 STM32F103ZET6 单片机为微控制器，以 $\mu\text{C}/\text{OS}-\text{III}$ 实时操作系统为系统内核，自主设计一种机载中央控制器如图 6 所示。该控制器主要硬件电路如图 7 所示，包括 STM32 电路、人机交互屏幕电路、排种控



图 6 机载中央控制器

Fig. 6 Onboard central controller

制器电路及作业信息检测器电路等，其中 STM32 电路为单片机最小系统电路，是保证单片机正常运行的基础；人机交互屏幕电路通过单片机串口通讯实现单片机与触摸屏之间信息交互；排种控制器电路通过单片机定时器通道输出 PWM 占空比信号实现直流电机、直流风机驱动；作业信息检测器电路通过

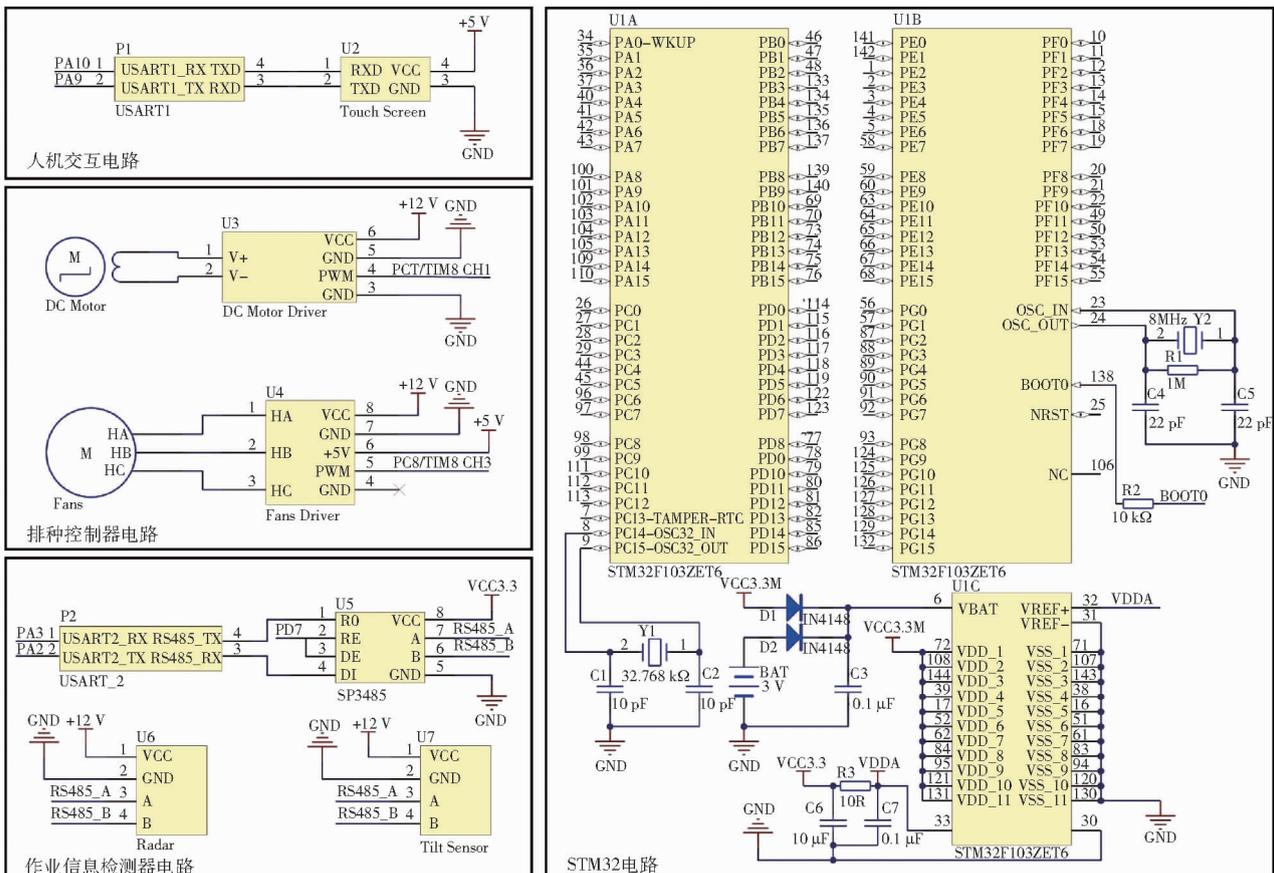


图 7 机载中央控制器硬件电路图

Fig. 7 Hardware circuit diagram of onboard central controller

SP3485 芯片将单片机串口 TTL 信号转变为 RS485 信号,实现作业速度及姿态检测器与单片机间的串联并行通信。

2.3 人机交互屏幕

人机交互屏幕是实现用户与机载中央控制器之间信息交互的关键部件,根据前期研究结果及播种机田间功能需求^[18],选用 TJC8048X370-011 型触摸屏为人机交互屏幕,并设计人机交互界面如图 8 所示,包括系统工作、停机、播种种子品种及对应播量选择、余料排空、料位监测等功能选项卡和机具作业速度、抬起角度、工作状态等信息存储显示窗口。根据《小麦全程机械化生产规范》《油菜农机农艺结合生产技术规程》等可知,南方地区油菜、小麦机械化条播推荐播量分别为 4.5~7.5 kg/hm² 及 120~225 kg/hm²,因此本系统设置播量选择选项卡中油菜、小麦播量可选范围时参考设置为该范围。

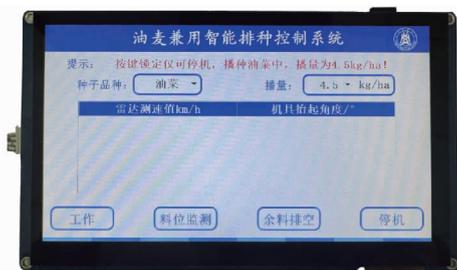


图 8 人机交互界面

Fig. 8 Human-computer interaction interface

人机交互屏幕与机载中央控制器之间通讯流程如图 9 所示,具体通讯方式为自定义 8 字节十六进制字符串数据传输协议,通过指定不同位字节含义,实现数据集中于两者间的传递,字符串结构为 55 55 (1) (2) (3) (4) 0D 0A,其中 55 55 为起始标志位,0D 0A 为结束标志位,(1)为功能选择代码,(2)为播种种子类型,(3)和(4)为对应播量。

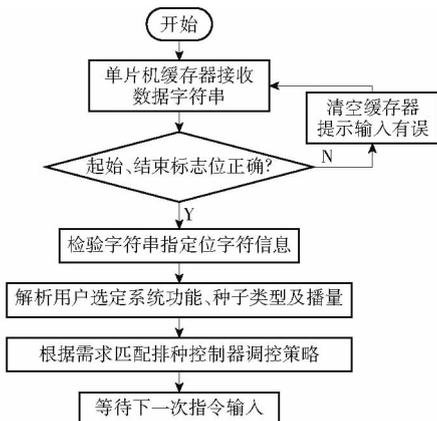


图 9 人机交互信息接收流程图

Fig. 9 Human-machine information interaction flowchart

2.4 作业信息检测器

2.4.1 作业速度检测器

作业速度精准检测是实现控制系统随速精量排种的基础,目前农业机械测速方法主要有轮速传感器测速、卫星测速和雷达测速 3 种,其中轮速传感器测速法无法避免因测速轮滑移、胎压变化导致的测速不准问题^[19];卫星测速法适用于开阔地带及高速作业工况,但存在初始信号固定延迟及遮蔽环境下信号易漂移、丢失等问题^[20];毫米波雷达测速法田间抗环境干扰能力强、响应快速、安装便捷,但测速精度受地表植被覆盖等因素影响较大^[13,21]。鉴于本文主要针对南方地区冬油菜、冬小麦种植场景,播种机作业需适应平坝丘坡山坳等多种地形,作业速度设计为 2~6 km/h^[2],且田块土壤普遍黏重,系统采用非接触式雷达测速方案,使雷达作业于耕整后种床平整厢面,以期实现播种机作业速度精准检测,工作原理如图 10 所示。

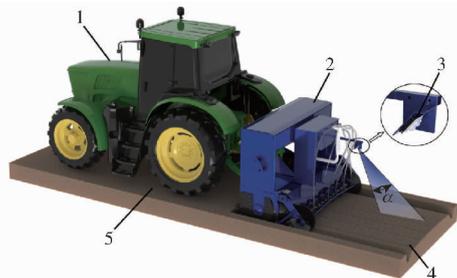


图 10 雷达测速原理

Fig. 10 Radar speed measurement principle

1. 拖拉机 2. 播种机 3. 毫米波雷达 4. 已耕种床厢面 5. 未耕地表

根据毫米波雷达工作原理可知,播种机作业时,当运动中的雷达发出波束照射地表,所接收反射波的频率会发生对应频移,通过测量实时频移量即可计算雷达运动速度,计算式为^[16]

$$V_R = \frac{cf_d}{2\cos\theta f_i} \quad (1)$$

式中 V_R ——雷达实时检测速度, km/h

c ——光速,取 1.079×10^9 km/h

f_d ——反射波频移, GHz

θ ——安装角度, (°)

f_i ——发射波频率, GHz

选用湖北永祥农机装备有限公司提供的毫米波雷达,该雷达支持 RS485 串联并行通信,发射波频率为 24 GHz,发射波波束角 α 达 25°,满足丘陵山区小田块低速高精度测速需求。同时,为进一步提高雷达测速准确性、减少随机误差对系统工作性能的影响,采用“高频速度检测+滑动平均滤波”算法,以频率 3 Hz 更新并滤波雷达实时速度检测值^[17],

获得播种机实际作业速度,滤波公式为

$$V = \begin{cases} \frac{V_{R_i} + V_{R_{i-1}} + V_{R_{i-2}} + \dots + V_{R_0}}{N} & (i \leq N) \\ \frac{V_{R_i} + V_{R_{i-1}} + V_{R_{i-2}} + \dots + V_{R_{i-N+1}}}{N} & (i > N) \end{cases} \quad (2)$$

($i=0,1,\dots$)

式中 V ——播种机实际作业速度,km/h

N ——滑动平均滤波窗口样本值,取 12

2.4.2 作业姿态检测器

作业姿态检测是播种机工作状态识别的前提,由工作原理可知,播种机田间作业时仅存在抬升和放下 2 种姿态,且机具姿态切换依赖于拖拉机三点悬挂抬升角度的改变,因此现有研究多通过角度传感器实时采集拖拉机三点悬挂下拉杆对地角度,并与标定临界角比较方式^[22],判定播种机田间作业姿态;但由于南方地区雨热同期,冬油菜、冬小麦播种时田块湿烂现象显著,拖拉机不同田块作业时陷土深度不一,使得播种机正常播种时三点悬挂下拉杆所需抬升角度不同,易导致误判现象产生。为此,采用将作业姿态检测器固装于雷达安装板侧壁,使其实时测量播种机与种床厢面垂直方向之间的倾斜角度方式,实现对机具作业姿态精准判定,具体判定原理如图 11 所示。

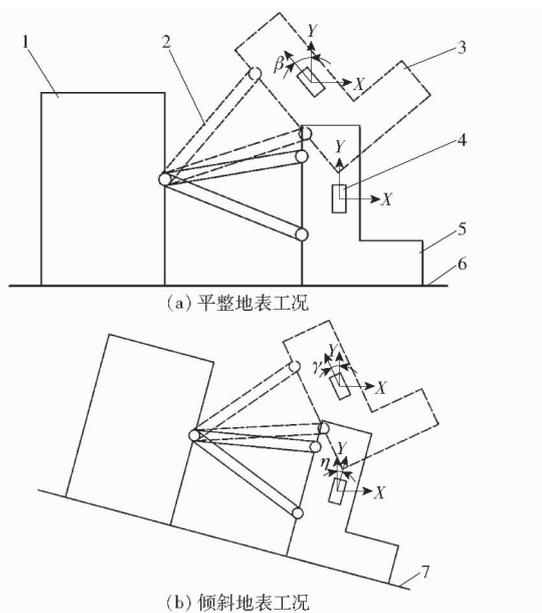


图 11 作业姿态判定原理

Fig. 11 Working attitude determination principle

1. 拖拉机 2. 三点悬挂机构 3. 抬升状态播种机 4. 倾角传感器
5. 静置状态播种机 6. 平田 7. 坡田

设定种床厢面垂直方向为 Y 轴,平行种床厢面方向为 X 轴;播种机静置于水平路面时倾斜角为 0° ,以 Y 轴为轴心向拖拉机方向倾斜时倾斜角大于 0° 。由图 11a 可知,当播种机于平整田块作业时,静

置状态下倾斜角为 0° ;最大抬升状态下,为保证机具田间运输通过性能,倾斜角 β 大于等于 0° ;作业状态下,机具因旋耕区域土壤堆积呈前高后低姿态,倾斜角远小于 0° ^[23],此时标定临界角 φ 为机具静置倾斜角 0° ,即可实现机具作业姿态精准判定。由图 11b 可得,播种机坡田作业时,理论临界角 φ 应为田块坡度 η ,其中播种机自下而上作业时 η 小于 0° 、自上而下作业时 η 大于 0° ,故此时机具倾斜角 γ 为

$$\gamma = \beta + \eta \quad (3)$$

鉴于适宜机械化播种耕地坡度均在 15° 以下^[2]、三点悬挂最大抬升角度一般为 40° ,可得自下而上作业时 γ 为 $-15^\circ \sim 25^\circ$ 、自上而下作业时 γ 为 $15^\circ \sim 55^\circ$,但基于安全性考虑,播种机实际坡田作业时多采用自上而下运移、自下而上播种方式,且自下而上播种时为保证充足的旋耕深度,播种机前犁需前倾插入土壤,导致机具倾斜角大于地表坡度。因此,为使播种机顺坡向下运移时均被判定为抬升状态,并避免播种机上坡播种时因机具前倾导致系统误判,综合考虑后设定不同坡度下系统工作状态判定临界角 φ 均为 0° ,并选用维特 SINAT-485 型倾角传感器为作业姿态检测器,该传感器支持 RS485 通讯,角度测量范围为 $-180^\circ \sim 180^\circ$,测量精度达 0.01° ,满足系统检测需求。

2.4.3 作业信息检测流程

作业信息检测器与机载中央控制器之间通信流程如图 12 所示,基于 RS485 通信“一主多从+主机轮询从机应答”工作原理,作业速度与作业姿态检测器通过串联连接共用同一通信通道,当机载中央控制器以给定频率向两检测器发送轮询命令时,两检测器实时应答并按序传回检测值,控制器结合实时判定及滑移滤波等算法处理检测值,即可得到机具实时作业速度及作业姿态。

2.5 排种控制器

排种控制器由直流电机、直流风机及两者驱动器构成,是控制系统排种过程执行硬件,其中直流电机转速决定集排器供种装置供种速率、直流风机输出风速影响集排器混种管内气固两相流形成,因此其调控精度直接决定系统排种速率准确性。

根据前期研究,气送式集排器工作时,若混种管内气流风速低于临界值,种子将难以与气流充分混合形成悬浮的气固两相流,导致其堵塞于混种管中无法排出,其中油菜、小麦排种时气流风速临界值分别为 15 、 18 m/s^[5],因此选用兰旺克 WJ9070FL 型直流风机,该风机采用直流电压 12 V 供电,输出风速无极可调,最大输出气流风速达 34 m/s。当气流风速满足需求后,播种机播量与机具幅宽、作业速度及

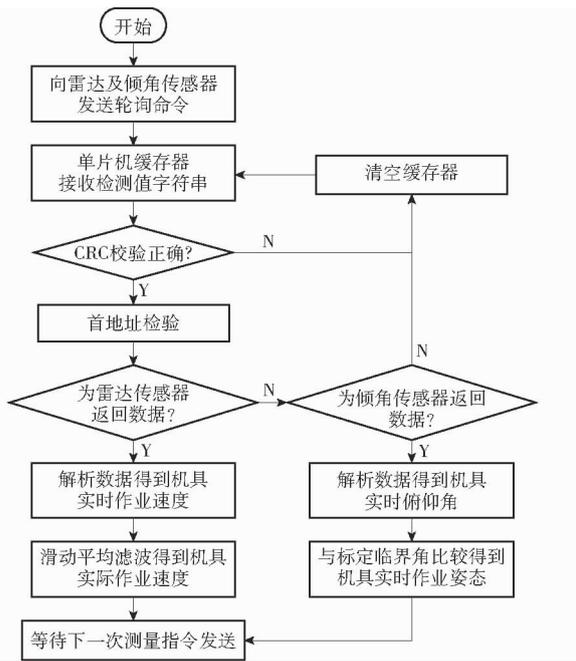


图12 作业信息检测流程图

Fig. 12 Seeding information detection flowchart

集排器排种速率间关系为

$$M = \frac{3Q}{5BV} \quad (4)$$

式中 M ——播种机播量, kg/hm^2

Q ——集排器排种速率, g/min

B ——播种机幅宽, m

由于集排器排种速率与排种轴转速呈正相关关系^[6],因此采用直流12V通用通孔直流电机直接驱动排种六方轴方式,通过实时调控直流电机转速即可实现播种机播量动态调整。

3 排种速率调控模型构建

排种速率调控模型是保证系统作业过程中实际排种量与预设播量一致性的依据,由前述分析可知,气送式集排器油菜、小麦实际排种速率与直流电机转速成正比,而电机转速由机载中央控制器输出PWM占空比决定,因此为确定适宜排种速率调控模型,需探究控制器输出占空比-电机转速-集排器油菜小麦排种速率之间关系。为此,搭建试验台架如图13所示,图中单片机输出至电机、风机驱动器的PWM占空比具体值由人工通过触摸屏设定;台架整体供电由直流12V开关电源供给。

3.1 电机排种转速模型

为确定电机排种转速模型,开展油菜、小麦稳定排种时单片机输出占空比与直流电机转速之间关系探究试验。试验时,采用“华油杂62”油菜和“郑麦9023”小麦商品化种子为试验材料,采用手持光电式测速计为转速测量装置,测量不同输入



图13 排种速率调控模型测试平台

Fig. 13 Test platform of seeding rate control model

1. 单片机 2. 触摸屏 3. 电机驱动器 4. 风机驱动器 5. 直流12V开关电源 6. 油菜兼用气送式集排器

占空比下,集排器油菜、小麦稳定排种时,直流电机对应排种转速;其中占空比为10%~100%,每隔5%设置一个水平,每组试验重复3次取平均值,结果如图14所示。

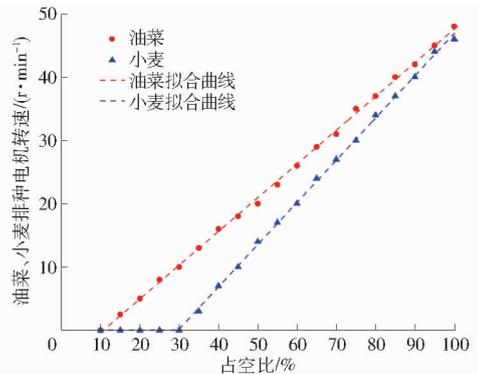


图14 油菜小麦排种电机转速变化曲线

Fig. 14 Change curves of motor speed in rapeseed and wheat seeding condition

由图14可知,在占空比10%~100%输入范围内,油菜、小麦排种工况下直流电机排种转速均达到0~50 r/min ,且均存在启动临界占空比,其中油菜排种工况为10%、小麦排种工况为30%;相同输入占空比下,油菜排种工况电机转速显著高于小麦排种工况,且随着输入占空比增大,两者转速差异逐渐减小。分析原因为油麦兼用气送式集排器供种装置工作时,因种子-供种装置内壁摩擦力、种层压力、种间摩擦力等阻力作用^[6],存在最小启动转矩,而油菜种子表面光滑、球形度高、流动性好,小麦种子粒径是油菜种子2~4倍、表面粗糙、流动性差^[2],导致小麦排种工况电机启动转矩显著高于油菜排种工况,进而造成油菜、小麦排种电机启动临界占空比差异显著;但随着排种电机转速逐渐增加,油菜、小麦种群流动性随之增大,使得种群平均动能变高、种间摩擦力减小,电机带动排种轴稳定旋转所需功率减小,且相同容积下,小麦种子因粒径更大导致种群数量更少、种间摩擦力减幅更大,进而造成油菜、小麦

排种工况在输入占空比增大时,排种电机转速趋于接近现象产生。

使用最小二乘法拟合曲线,得到油麦兼用气送式集排器油菜、小麦排种工况下排种电机转速随输出占空比变化曲线方程为

$$\begin{cases} R_y = 0.5330K - 5.7088 \\ R_x = 0.6671K - 19.8309 \end{cases} \quad (5)$$

式中 R_y ——油菜排种工况电机转速, r/min

R_x ——小麦排种工况电机转速, r/min

K ——输入占空比, %

方程决定系数 R^2 均为 0.99, 拟合效果良好。

3.2 排种速率调控模型

采用“华油杂 62”油菜和“郑麦 9023”小麦种子为试验材料,并参考前期油麦兼用气送式集排器最佳排种转速结论^[6],油菜,小麦排种时分别设定排种电机转速为 5 ~ 30 r/min 和 20 ~ 45 r/min,每 5 r/min 设置一个水平,试验时通过称量 60 s 时间内集排器排出种子质量确定其排种速率,每组试验重复 3 次取平均值,试验结果如图 15 所示。

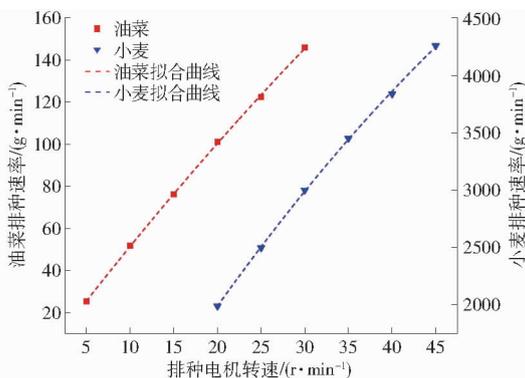


图 15 油菜小麦排种速率变化曲线

Fig. 15 Change curves of seeding rate of rape and wheat

由图 15 可知,集排器油菜、小麦排种速率分别为 25 ~ 150 g/min、2 000 ~ 4 300 g/min,结合式(4)及图 8 油菜小麦农艺播量调整范围可得,集排器实际排种速率满足播种机作业速度为 2 ~ 6 km/h 时的油菜、小麦播种农艺需求播量。使用最小二乘法拟合曲线,得到油麦兼用气送式集排器油菜、小麦排种速率与排种电机转速关系式为

$$\begin{cases} Q_y = -0.019\omega^2 + 5.468\omega - 1.419 \\ Q_x = -0.644\omega^2 + 132.212\omega - 398.316 \end{cases} \quad (6)$$

式中 Q_y ——油菜排种速率, g/min

Q_x ——小麦排种速率, g/min

ω ——排种电机转速, r/min

方程决定系数 R^2 为 0.99, 拟合效果良好。联立式(5)、(6),即可得到集排器油菜、小麦排种速率调控模型,系统根据此调控模型,通过输入不同占空比

PWM 信号改变排种转速,即可实现播种机实际播量调速动态调节功能。

4 控制系统性能试验

4.1 系统测速精度试验

目前,我国针对雷达测速法在农业生产领域应用的研究较少,且已有研究多采用购买国外农机公司成熟雷达产品并直接使用其测速结果方式^[15-16,24],存在价格高昂、售后困难、雷达实际田间测速精度不明等问题,为此选用合作农机企业自研测速雷达,并对其开展测速精度影响因素及田间测速性能试验,以探究雷达测速法在田间作业时的适用性及可靠性。

4.1.1 影响因素台架试验

由式(1)可知,毫米波雷达速度检测值主要由其安装角度及反射波频移量决定,而根据多普勒效应可知,雷达所接收反射波频移量与各时刻雷达与被测物间相对运动速度有关,因此雷达测速精度理论上应受安装角度及检测速度影响,为探究其对测速精度的实际影响规律,搭建试验台架如图 16 所示。通过将铜胶带间隔粘贴于传送带表面,模拟田间凹凸不平地表;通过固定安装的雷达照射运行的传送带,模拟田间测速场景;使用编码器+计米轮检测传送带运行速度,作为基准速度^[19];使用触摸屏存储雷达及编码器实时速度检测值,以便进行测速误差分析。



图 16 雷达测速精度检测试验台

Fig. 16 Radar speed accuracy detection test bench

1. 可调倾角平台 2. 角度测量仪 3. 铜胶带 4. 雷达 5. 编码器+计米轮组合 6. 单片机 7. 触摸屏 8. 传送带

试验时,以速度检测值间相对误差为评价指标,以雷达安装角度及检测速度为试验因素开展二因素五水平正交旋转试验,探究各因素对雷达测速精度的影响规律。根据产品技术手册及控制系统应用场景需求,分别设定安装角度为 30° ~ 60°,检测速度为 1 ~ 6 km/h,试验因素编码如表 1 所示;参考系统所使用滑动平移滤波算法工作参数,设定雷达及编码器检测频率为 3 Hz,单次试验采集 12 组速度后取

平均值计算相对误差,每组试验重复3次取平均值,试验结果如表2所示, X_1 和 X_2 为因素编码值。

表1 因素编码

Tab.1 Factors and coding of test

编码	因素	
	安装角度/(°)	检测速度/(km·h ⁻¹)
1.414	60.00	6.00
1	55.61	5.27
0	45.00	3.50
-1	34.39	1.73
-1.414	30.00	1.00

表2 试验设计方案与结果

Tab.2 Experiment design and response values

试验序号	因素		测速值间相对误差 Y_1 /%
	X_1	X_2	
1	-1	-1	13.24
2	1	-1	6.06
3	-1	1	19.37
4	1	1	4.99
5	-1.414	0	31.51
6	1.414	0	5.73
7	0	-1.414	0.70
8	0	1.414	1.28
9	0	0	0.63
10	0	0	4.35
11	0	0	1.88
12	0	0	3.11
13	0	0	0.17
14	0	0	3.97
15	0	0	0.29
16	0	0	0.12

将试验结果导入 Design-Expert 软件进行方差分析和回归拟合,得到测速值间相对误差响应函数 Y_1 的回归方程为

$$Y_1 = 1.82 - 7.25X_1 + 0.73X_2 - 1.80X_1X_2 + 8.68X_1^2 - 0.14X_2^2 \quad (7)$$

对回归方程进行方差分析,结果如表3所示。由表3可知,该模型拟合度极显著($P < 0.01$),失拟项不显著($P > 0.05$),表明该模型可准确预测试验结果,且不存在其他影响评价指标的主要因素;同时,回归项 X_1 、 X_1^2 影响极显著, X_2 、 X_1X_2 、 X_2^2 影响不显著,表明测速值间相对误差仅受雷达安装角度影响,与检测速度、检测速度及安装角度交互作用无关。分析原因为当安装角度为固定值时,雷达所接收反射波频移量与检测速度间呈近线性关系,使得测速误差在不同检测速度下为相近值。

为进一步确定测速精度最佳时的雷达安装角度,以测速值间相对误差小于等于2%为约束条件,

表3 相对误差方差分析结果

Tab.3 Analysis of variance results of relative error

方差来源	平方和	自由度	F	P
模型	1 040.58	5	38.19	<0.000 1**
X_1	420.70	1	77.19	<0.000 1**
X_2	4.31	1	0.79	0.394 8
X_1X_2	12.97	1	2.38	0.153 9
X_1^2	602.44	1	110.54	<0.000 1**
X_2^2	0.15	1	0.028	0.871 6
残差	54.50	10		
失拟	32.48	3	3.44	0.080 8
误差	22.02	7		
总和	1 095.08	15		

注:**表示影响极显著($P < 0.01$)。

利用 Design-Expert 软件的 Optimization - Graphical 模块求得因素最优范围如图17黄色区域所示,结果表明当安装角度为 $49.5^\circ \pm 4.6^\circ$ 、雷达检测速度为 $0 \sim 12$ km/h 时,均能实现测速精度小于等于2%,因此田间实际作业时,设定雷达传感器于播种机上固定安装角度为 49.5° 。

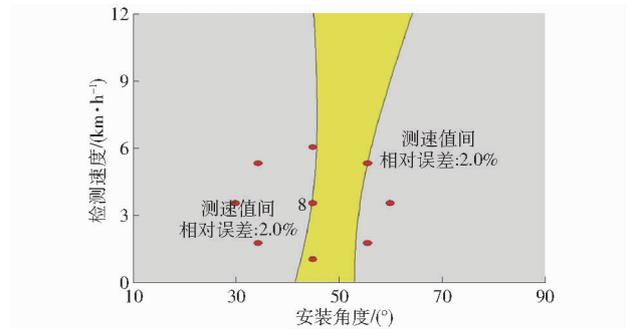


图17 因素最优范围

Fig.17 Optimal range of factor

4.1.2 不同地表工况验证试验

为进一步探究雷达传感器在实际田间作业时的测速精度,以课题组前期研发并已市场化应用的2BFGQ-6型油麦兼用联合播种机为载体,以沃得奥龙1004C型拖拉机为牵引动力,分别开展拖拉机在慢2、慢3、慢4、快2、快3、快4 6个速度挡位,放下三点悬挂、打开PTO驱动旋耕刀、使播种机模拟实际田间播种工况时,雷达在坡旱地及稻茬地等典型地表工况的测速精度试验,试验机具及地表工况如图18所示。

试验时,采用雷达测速、地轮编码器测速及标杆法测速对比方法,以标杆法测速值为基准值,对比雷达及地轮编码器测速精度,其中标杆法通过人工测量田间50m距离并首尾放置标杆后,手动记录播种机通过两标杆时间间隔,计算播种机平均前进速度;雷达及地轮编码器测速法则以频率3Hz更新,检测播种机在作业距离50m内各时刻前进速度,并通过



图18 雷达测速精度田间试验

Fig. 18 Field tests of radar velocity measurement accuracy

1. 雷达 2. 油麦兼用联合播种机 3. 测速地轮 4. 编码器 5. 标杆 6. 米尺

滑动平均滤波算法滤波检测值,得到前进速度数据集及平均前进速度,进而计算得数据集稳定性变异

系数及平均前进速度相对标杆法检测值误差,每组试验重复3次取平均值,试验结果如表4所示。

表4 不同地表工况测速试验结果

Tab. 4 Speed test results of different surface conditions

序号	工况	速度挡位	标杆法		地轮编码器		雷达		
			测速值/ ($\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$)	测速值/ ($\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$)	稳定性变 异系数/%	相对误差/ %	测速值/ ($\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$)	稳定性变 异系数/%	相对误差/ %
1	坡旱地	慢2	1.45	1.25	26.86	13.79	1.49	2.92	2.76
2		慢3	1.86	1.79	4.79	3.76	1.84	2.77	1.08
3		慢4	3.44	3.53	2.72	2.62	3.45	3.70	0.29
4		快2	2.21	2.19	3.71	0.90	2.15	2.89	2.71
5		快3	2.86	2.55	20.22	10.84	2.81	4.12	1.75
6		快4	5.55	5.63	4.27	1.44	5.40	3.51	2.70
7	稻茬地	慢2	1.43	1.35	3.77	5.59	1.45	2.11	1.40
8		慢3	1.82	1.85	1.69	1.65	1.83	1.98	0.55
9		慢4	3.13	2.69	10.23	14.06	3.15	2.17	0.64
10		快2	2.09	2.01	3.94	3.83	2.05	1.86	1.91
11		快3	2.72	2.36	9.15	13.24	2.76	1.51	1.47
12		快4	5.07	4.43	30.44	12.62	5.13	2.54	1.18

由表4可知,在不同拖拉机速度挡位及地表工况下,雷达测速值与标杆法测速值间相对误差均不大于2.76%、与台架试验结论相符,测速值稳定性变异系数均不大于4.12%、测速稳定性较优;地轮编码器测速值变异系数及其与标杆法测速值间相对误差在不同工况时差异较大,且两者间呈正相关关系,分析原因为地轮编码器测速存在随机滑移误差,导致测速值易发生突变而大幅偏离正常值,进而造成相对误差及变异系数同时增大现象。同时,相较于稻茬地工况,坡旱地工况下雷达测速值变异系数较高而相对误差差异较小,分析原因为拖拉机坡地工作时,因地表坡度变化导致机具前进速度均匀性较差,使得雷达不同时刻测速值间差异增大,但测速准确性未变,进而造成变异系数增大而相对误差不变现象;地轮编码器测速值变异系数及相对误差均小幅降低,分析原因为坡旱地作业时,耕地土壤疏松且拖拉机顺坡而上前进,使得播种机旋耕开沟时畦沟底部部分松散土壤向下流动挤压测速轮,造成测速轮滑移率降低,进而使测速精度提高。综上,地轮

编码器测速法在不同工况下均存在随机滑移误差,导致其变异系数和相对误差相较于雷达测速法分别平均增加7.48%和5.49%,而雷达测速法不受检测速度及地表工况影响,测速精度及稳定性满足控制系统田间实际作业时的测速需求。

4.2 系统姿态识别精度试验

为探究控制系统对播种机实际作业姿态的识别精度,开展播种机倾斜角度检测及作业姿态识别试验。试验时,先将磁吸式角度检测仪吸附于播种机横梁,检测得播种机静置于水平路面时倾斜角度为 -1.25° ,再依据图11设定将此角度设置为倾角传感器基准 0° ,并操纵拖拉机三点悬挂调整播种机倾斜角度,使角度检测仪检测角度分别为 8.75° 、 3.75° 、 -1.25° 、 -6.25° ,对应记录系统倾角传感器检测的机具倾斜角度及人机界面显示的机具抬升、工作状态,试验结果如表5所示。

由表5可知,播种机倾斜角度为 8.75° 、 3.75° 、 -6.25° 时,系统检测机具作业姿态正确;倾斜角度为 -1.25° 时,系统错误检测机具为抬升状态,结合

表5 姿态识别精度试验结果

Tab.5 Test results of operation attitude recognition accuracy

角度检测仪检测角度/(°)	基准状态对应角度/(°)	倾角传感器检测角度/(°)	系统识别播种机姿态
8.75	10.00	10.13	抬升
3.75	5.00	5.14	抬升
-1.25	0	0.15	抬升
-6.25	-5.00	-4.86	工作

各角度下倾角传感器实际检测值,分析原因为倾角传感器存在安装误差,造成其检测值存在 $0.13^{\circ} \sim 0.15^{\circ}$ 固定偏差,但鉴于播种机实际播种状态时,倾斜角度远小于 -1.25° ,因此该误差在可以接受范围内。

4.3 系统田间排量精度试验

当测速精度及姿态识别精度均满足要求后,为验证油麦兼用气送式集排器随速控制系统实际工作性能,需对其田间工况下实际排量精度进行检验。为此,将控制系统搭载于2BFGQ-6型播种机上,并以东风井关T1054型拖拉机为牵引动力,开展慢2、慢3、慢4 3个速度挡位,播种机分别随速播种油菜、小麦时的实际排量测试试验。

试验时,设置油菜、小麦理论播量分别为6、225 kg/hm²,并参考GB/T 9478—2005《谷物条播机试验方法》,于输种管出口处套设网袋,收集播种机作业50 m作业距离内随速排出的所有油菜或小麦种子,称量后计算其与播种机理论应排出种子质量间的相对误差,每组试验重复3次取平均值,试验结果如图19所示。由图19可知,搭载控制系统的油麦兼用播种机在不同速度挡位下随速播种时,油菜排量相对误差均小于2%、小麦排量相对误差均小于3.5%,有效实现了播种机田间实际油菜、小麦播种时排种量的精准控制。

5 田间播种试验

为进一步验证油麦兼用气送式集排器随速控制系统的田间作业效果,分别于2022年10月24日及11月8日在湖北省咸宁市汀泗桥镇丘陵山区油菜机械化播种应用示范基地开展油菜、小麦田间播种试验,其中油菜播种田块为稻茬地、小麦播种田块为坡旱地,实际播种前,对系统随速自动播种性能开展验证试验,试验结果如表6所示,结果表明系统在不同地表工况下均可实现对播种机工作状态自动检测和对排种控制器随速自动控制。

田间播种时,播种油菜选用“华油杂62”商品化种子,播种小麦选用“郑麦9023”商品化种子;依据

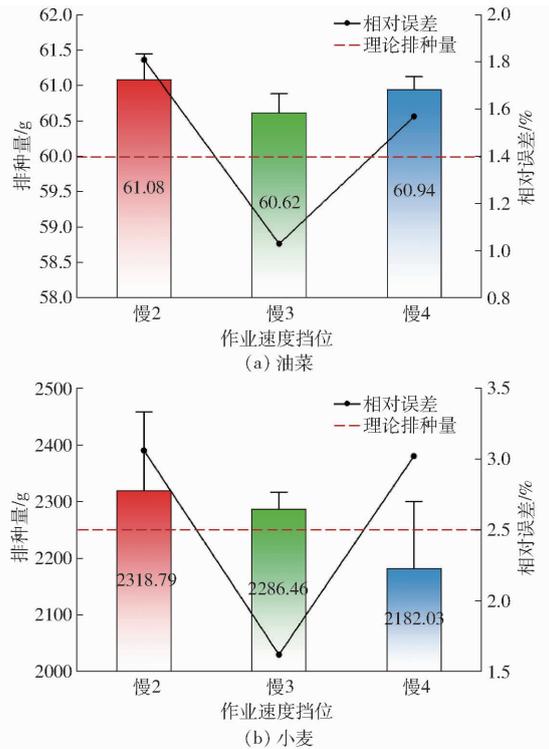


图19 排种精度试验结果

Fig. 19 Seeding accuracy test results

表6 随速自动播种性能验证试验结果

Tab.6 Results of verification test on performance of automatic seeding

作业田块	作业速度	作业姿态	屏显工作状态	风机状态	电机状态
稻茬地	大于0	抬升	转弯	高功耗运行	停止
	大于0	放下	播种	高功耗运行	随速旋转
	等于0	抬升	暂停	低功耗运行	停止
	等于0	放下	预播	高功耗运行	停止
坡旱地	大于0	抬升	转弯	高功耗运行	停止
	大于0	放下	播种	高功耗运行	随速旋转
	等于0	抬升	暂停	低功耗运行	停止
	等于0	放下	预播	高功耗运行	停止

播种机结构参数,播种行数为6行,播种后厢面宽度为2 m;通过人机交互界面分别设定油菜、小麦播种量为6、225 kg/hm²,并使播种机随速自动播种,作业过程及出苗情况如图20所示。

播种25 d后,分别对油菜、小麦出苗情况进行测量,测量方法为:随机选取油菜、小麦出苗田块中5块2 m×1 m面积田块作为样本区域,分别记录每个样本区域内各行出苗数量。根据测量结果可知,油菜、小麦平均株距分别为79.17、13.15 mm;如表7所示,各行株数一致性变异系数分别为8.59%、12.96%,满足油菜、小麦种植农艺要求,且相较于采用排种电机开环匀速驱动方式播种^[6],使用油麦兼用气送式集排器随速控制系统播种的油菜、小麦各行株数一致性变异系数分别降低8.33、5.06个百分点。

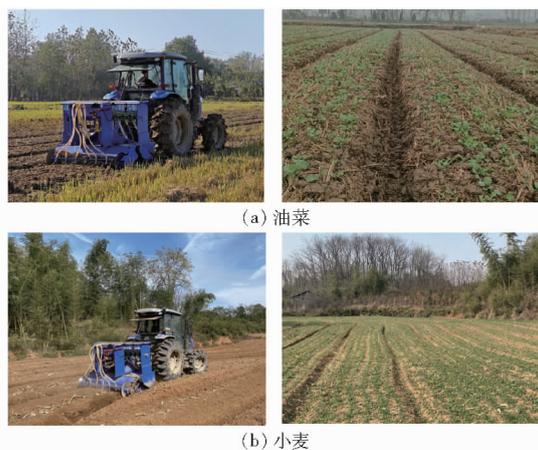


图20 田间播种试验及出苗情况

Fig. 20 Field seeding test and seedling emergence

表7 各样本区域出苗情况测量值

Tab. 7 Measured values of seedling emergence in each sample area

样本区域	各行株数一致性变异系数/%	
	油菜	小麦
A1	10.44	10.55
A2	5.06	14.33
A3	10.17	15.19
A4	6.97	13.47
A5	10.30	11.28
平均值	8.59	12.96

6 结论

(1)设计了一种油麦兼用气送式集排器随速控制系统。通过人机界面信息交互、耕整后平整厢面非接触式雷达测速、机具抬升姿态实时检测、播种机工作状态自动判定及田间随速自动油麦兼用播种等

方式,有效实现了播种机播种状态全程监测、播种全过程自动控制、油菜小麦播种量随速精准调控等功能。

(2)开展了播种机田间作业时工作状态分类方法的分析,确定了播种机不同工作状态时排种电机、供气风机应匹配的运行控制逻辑;搭建了系统测试平台,确定了系统的油菜、小麦排种速率调控模型均为近线性关系。

(3)开展了系统工作性能检测试验,包括系统测速精度、姿态识别精度及田间排量精度试验。结果表明,雷达传感器测速精度仅受安装角度影响,当安装角度为 49.5° 时,不同地表工况下其田间实际测速误差均不大于 2.76% 、测速值稳定性变异系数均不大于 4.12% ,显著优于地轮编码器测速精度;倾角传感器针对播种机倾斜角度检测误差仅为 $0.13^\circ \sim 0.15^\circ$,可准确检测播种机作业姿态;实际田间播种时,控制系统在不同作业速度下均可实现油菜、小麦随速播种,且油菜、小麦播量相对误差分别小于 2% 、 3.5% ,可有效实现田间实际油麦播量的精准调控。

(4)将油麦兼用气送式集排器随速控制系统搭载于2BFGQ-6型油麦兼用联合播种机开展田间试验,结果表明,控制系统在实际田间作业过程可有效实现播种机播种全过程自动控制;当设定油菜、小麦播种量分别为 6.225 kg/hm^2 时,测得田间油菜、小麦出苗平均株距分别为 79.17 、 13.15 mm ,各行株数一致性变异系数分别为 8.59% 、 12.96% ,满足油菜、小麦种植农艺要求,且相较于排种电机开环匀速驱动方式,使用随速控制系统播种的油菜、小麦各行株数一致性变异系数分别降低 8.33 、 5.06 个百分点。

参 考 文 献

- [1] 廖庆喜,雷小龙,廖宜涛,等. 油菜精量播种技术研究进展[J]. 农业机械学报,2017,48(9):1-16.
LIAO Qingxi, LEI Xiaolong, LIAO Yitao, et al. Research progress of precision seeding for rapeseed[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(9): 1-16. (in Chinese)
- [2] 廖宜涛,施彬彬,王传奇,等. 南方丘陵山地油菜和小麦播种机械化发展现状与趋势[J]. 农业工程学报,2025,41(1):12-26.
LIAO Yitao, SHI Binbin, WANG Chuanqi, et al. Development status and trend of mechanization of rapeseed and wheat sowing in hilly and mountainous region of southern China[J]. Transactions of the CSAE, 2025, 41(1): 12-26. (in Chinese)
- [3] HU H J, ZHOU Z L, WU W C, et al. Distribution characteristics and parameter optimisation of an air-assisted centralised seed-metering device for rapeseed using a CFD-DEM coupled simulation[J]. Biosystems Engineering, 2021, 208: 246-259.
- [4] 李晓冉,廖庆喜,王磊,等. 稻麦油兼用高速气送式集排器型孔轮设计与试验[J]. 农业工程学报,2023,39(14):35-48.
LI Xiaoran, LIAO Qingxi, WANG Lei, et al. Design and experiments of the type-hole wheel with high-speed air-assisted centralised metering device for rice, wheat and rapeseed[J]. Transactions of the CSAE, 2023, 39(14): 35-48. (in Chinese)
- [5] 廖宜涛,王传奇,施彬彬,等. 油麦兼用气送式排种系统高通量混种装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2024,55(12):134-146.
LIAO Yitao, WANG Chuanqi, SHI Binbin, et al. Design and text of high-throughput seed mixing device for rapeseed and wheat with air-fed seed discharging system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(12): 134-146. (in Chinese)
- [6] 施彬彬,王传奇,陈雪儿,等. 油麦兼用气送式集排器立槽式供种装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2024,55(9):102-115.
SHI Binbin, WANG Chuanqi, CHEN Xueer, et al. Design and experiment of vertical groove seed feeding device in air-assisted

- centralized metering device for rapeseed and wheat[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(9): 102–115. (in Chinese)
- [7] LEI X L, LIAO Y T, ZHANG Q S, et al. Numerical simulation of seed motion characteristics of distribution head for rapeseed and wheat[J]. Computers & Electronics in Agriculture, 2018, 150: 98–109.
- [8] 高筱钧,王世同,吴晓鹏,等. 播种机气送式集排器增压管内种子流运移特性研究[J]. 农业机械学报,2023,54(增刊1):47–56,75.
- GAO Xiaojun, WANG Shitong, WU Xiaopeng, et al. Seed flow migration characteristics in booster tube of gas-fed collector[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(Supp. 1): 47–56, 75. (in Chinese)
- [9] 雷小龙,廖宜涛,丛锦玲,等. 油菜小麦兼用气送式直播机集排器参数优化与试验[J]. 农业工程学报,2018,34(12): 16–26.
- LEI Xiaolong, LIAO Yitao, CONG Jinling, et al. Parameter optimization and experiment of air-assisted centralized seed-metering device of direct seeding machine for rape and wheat[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(12): 16–26. (in Chinese)
- [10] CAO X Y, WANG L, LIAO Q X, et al. Simulation of the mixing component of a horizontal air-assisted centralised wheat metering device[J]. Biosystems Engineering, 2024, 243: 13–26.
- [11] HE S Y, QIAN C, JIANG Y C, et al. Design and optimization of the seed feeding device with DEM–CFD coupling approach for rice and wheat[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2024, 219: 108814.
- [12] 马文鹏,尤泳,王德成,等. 苜蓿切根补播施肥机气送式集排系统优化设计与试验[J]. 农业机械学报,2021,52(9): 70–78.
- MA Wenpeng, YOU Yong, WANG Decheng, et al. Optimal design and experiment of pneumatic and pneumatic collecting and discharging system of alfalfa cut-root reseeding and fertilizer applicator[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(9): 70–78. (in Chinese)
- [13] 杜兆辉,和贤桃,杨丽,等. 玉米精准变量播种技术与装备研究进展[J]. 农业工程学报,2023,39(9):1–16.
- DU Zhaohui, HE Xiantao, YANG Li, et al. Research progress on precision variable-rate seeding technology and equipment for maize[J]. Transactions of the CSAE, 2023, 39(9): 1–16. (in Chinese)
- [14] DU Z H, YANG L, ZHANG D X, et al. Design and experiment of a soil organic matter sensor-based variable-rate seeding control system for maize[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2025, 229: 109752.
- [15] WANG W W, SHI W B, LIU C, et al. Development of automatic wheat seeding quantity control system based on Doppler radar speed measurement[J]. Artificial Intelligence in Agriculture, 2025, 15(1): 12–15.
- [16] WANG Y X, ZHANG W Y, QI B, et al. Research on control system of corn planter based on radar speed measurement[J]. Agronomy, 2024, 14(5): 1043.
- [17] 朱龙图,廖庆喜,刘海,等. 油菜机械离心式集排器排种量控制系统设计与试验[J]. 农业工程学报,2022,38(10):19–29.
- ZHU Longtu, LIAO Qingxi, LIU Hai, et al. Design and test of the seeding amount control system for the rape mechanical metering device[J]. Transactions of the CSAE, 2022, 38(10): 19–29. (in Chinese)
- [18] 施彬彬,郑娟,王磊,等. 小粒径种子气力自适应排种系统设计与试验[J]. 农业机械学报,2023,54(8):30–41.
- SHI Binbin, ZHENG Juan, WANG Lei, et al. Design and experiment of pneumatic adaptive seeding system for small particle size seeds[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(8): 30–41. (in Chinese)
- [19] 廖庆喜,吴崇,张青松,等. 油菜精量联合直播机随速播种控制系统设计与试验[J]. 农业机械学报,2022,53(12):49–58,159.
- LIAO Qingxi, WU Chong, ZHANG Qingsong, et al. Design and experiment of speed-dependent seeding control system of rapeseed precision combined seeding machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(12): 49–58, 159. (in Chinese)
- [20] 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)
- [21] LING L, WU G W, WEN C K, et al. Influence of speed measurement method on performance of an electric-drive maize precision planter[J]. Biosystems Engineering, 2024, 238: 175–187.
- [22] 祝清震,武广伟,朱志豪,等. 冬小麦精准分层施肥宽苗带播种联合作业机研究[J]. 农业机械学报,2022,53(2):25–35.
- ZHU Qingzhen, WU Guangwei, ZHU Zhihao, et al. Design and test on winter wheat precision separated layer fertilization and wide-boundary sowing combined machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(2): 25–35. (in Chinese)
- [23] 祝清震,武广伟,罗长海,等. 基于姿态实时监测的多路精准排肥播种控制系统研究[J]. 农业机械学报,2018,49(增刊): 155–163.
- ZHU Qingzhen, WU Guangwei, LUO Changhai, et al. Design of multipath precision fertilizer and sowing control system based on attitude real time monitoring[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(Supp.): 155–163. (in Chinese)
- [24] 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)