

油菜精量集中排种器电驱控制系统设计与试验

雷小龙, 张 磊, 杨 宏, 刘懿乐, 李雨涵, 罗湄灵

(四川农业大学机电学院, 雅安 625014)

摘 要:为适应丘陵区油菜机械化精量播种要求,针对地轮驱动致使传动系统复杂或滑移影响播种精度的问题,设计了一种油菜电驱排种控制系统。该系统集成无线蓝牙传输模块、单片机模块和 Android 终端平台开发,采用优化 PID 算法,实现集排器转速随作业速度的同步控制和自动调节播种穴距。台架试验研究了油菜电驱排种控制系统的控制精度和排种性能,当集排器转速为 $10\sim 55\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 时,实际转速与理论转速的平均偏差均小于 1.5%,且转速的变异系数均小于 2.0%,稳定性较好;当穴距和作业速度分别为 $60\sim 180\text{ mm}$ 和 $1.6\sim 3.2\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 时,穴距均匀性变异系数均低于 15.0%。该系统实现了集排器电驱条件下播种穴距的同步调节,为油菜轻简化精量播种机的排种控制系统设计提供了参考。

关键词: 油菜; 农业机械; 精量播种; 集中排种器; 电驱同步控制系统

中图分类号: S223.23

文献标识码: A

文章编号: 1672-352X (2020)03-0472-08

Design and experiment of electric drive control system of precision centralized metering device for rapeseed

LEI Xiaolong, ZHANG Lei, YANG Hong, LIU Yile, LI Yuhan, LUO Meiling

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Sichuan Agricultural University, Ya'an 625014)

Abstract: A control system of electric drive seeding was designed based on the centralized metering device for rapeseed to solve the problem of complex transmission system caused by ground wheel drive for mechanized precision seeding of rapeseed in hilly area. The control system applied wireless Bluetooth transmission, MCU control and Android terminal platform development technology to realize the automatic control of seeding hill distance, and optimized PID algorithm to achieve the precise control of the rotational speed for seed metering device. The control precision and seeding stability of rape electric drive seed metering control system were conducted by bench experiment. The results showed that when the rotational speed of collector was $10\sim 55\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$, the average deviation between actual rotational speed and theoretical rotational speed and their variation coefficient was less than 1.5% and 2.0%, respectively, which met the control requirements with good control stability. When the operating speed was $1.6\sim 3.2\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ and hill distance was $60\sim 180\text{ mm}$, the variation coefficient of hill distance uniformity was less than 15.0%. The control system of the electric system realizes synchronous control under different operation velocity, which provides a reference for the design of seeding control system for rapeseed of light and simplified precision seeder.

Key words: rapeseed; agricultural machinery; precision seed metering; centralized seed metering device; electric drive synchronous control system

油菜是中国主要的油料作物,种植区域广泛。种植过程中存在人工成本高和效益低的问题,制约了油菜产业的发展^[1-2]。2018年国发[2018]42号文件《国务院关于进一步推进农业机械化和农机装备产业转型升级的指导意见》^[3],明确提出:到2025年,

油菜种机械化率需达到 50%,2017年机械化播种水平仅为 27.89%;西南油菜种植区大多位于丘陵山区,机械化水平远低于全国水平,种植环节更为薄弱^[4-6],难以满足油菜生产机械化的需求。

轻简型播种机是满足丘陵山区油菜机械化播种

收稿日期: 2019-10-30

基金项目: 国家自然科学基金(31901413)和国家级大学生创新实验计划项目(201810626037)共同资助。

作者简介: 雷小龙, 博士, 讲师。E-mail: leixl1989@163.com

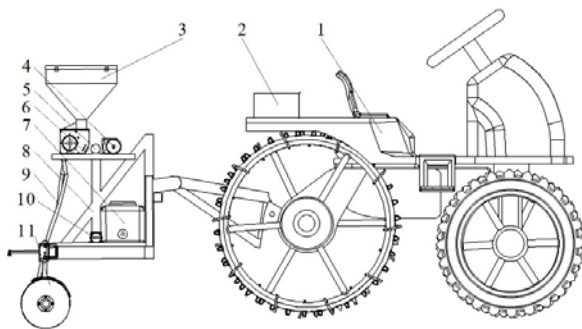
要求的重要途径, 取消地轮实现同步驱动是减少传动系统和实现轻简化的一种方式。现有的油菜精量播种机的排种器驱动力由地轮提供^[7], 但由于田间工况复杂, 易造成地轮打滑, 从而影响播种质量。国内外对于油菜精量播种的研究主要集中于排种器的结构设计和优化参数设计方面^[8-10], 相关学者研究了玉米、小麦精量排种的控制器^[11-15]。金鑫等^[16]采用车载传感器与 PIC 控制融合技术设计了 2BFJ-24 型小麦精量播种变量施肥机, 孙传祝等^[17]设计了马铃薯精密播种机智能控制系统, 陈黎卿等^[18]基于双闭环 PID 模糊算法设计了玉米精量排种控制系统。丁幼春等^[19]设计了导航免疫 PID 控制器实现小型履带式油菜播种机自动导航, 徐志成^[20]采用 Mamdani 模糊算法优化设计了自动播种机的电控系统进行控制策略, 张春岭等^[21]设计了电控玉米排种系统。诸多研究表明 PID 算法是一种有效的控制方法, 可精量控制排种和提高智能化水平。

针对油菜播种机轻简化、智能化和精准作业的要求, 本研究以油菜集中排种器为对象, 结合无线蓝牙传输、单片机控制和 Android 终端平台开发等技术, 设计一种油菜电驱排种控制系统; 拟开展油菜电驱排种控制系统控制精度和同步控制性能试验, 为油菜播种机电驱排种同步控制系统设计提供参考。

1 油菜电驱排种控制系统结构与工作原理

1.1 油菜精量播种机结构

油菜精量播种机结构如图 1 所示, 包括种箱、直流电机、电驱排种控制器、成穴精量集中排种装置、分配器、导种管和开沟器等。



1. 自走式驱动底盘; 2. 控制器; 3. 种箱; 4. 直流电机; 5. 编码器; 6. 集排器; 7. 药箱; 8. 机架; 9. 导种管; 10. 封闭除草装置; 11. 开沟器

1. Self-propelled chassis; 2. Controller; 3. Seed box; 4. DC motor; 5. Encoder; 6. Centralized metering device; 7. Pesticide box; 8. Frame; 9. Seed tube; 10. Spraying device; 11. Furrow opener

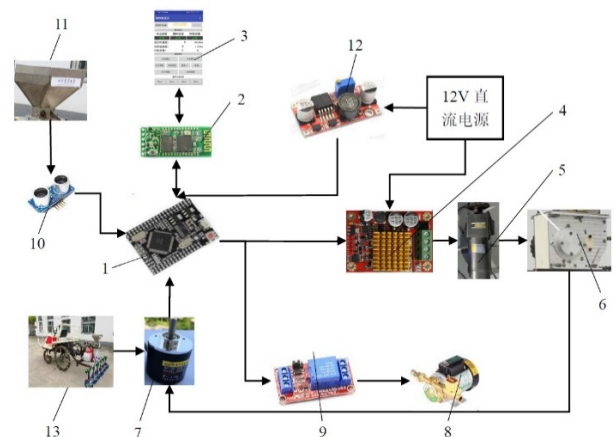
图 1 油菜精量播种机结构图

Figure 1 Structure diagram of rape precision seeder

油菜精量播种机工作时, 电驱排种控制器根据动力驱动装置行进姿态和前进速度, 实时调节排种器的电机转速, 从而调节型孔排种时间间隔, 保证排种穴距一致, 实现精量播种。电机驱动排种轮将种子投入分配器, 经导种管将种子输送至开沟器。开沟器在种床上开沟、覆土, 使种子准确投入种沟。因此, 电驱排种控制器根据动力驱动装置前进速度实时调节和控制排种器驱动电机的转速, 是该播种机的关键技术。

1.2 油菜电驱排种控制系统结构与工作原理

油菜电驱排种控制系统主要由 Arduino 主控制系统、排种器转速控制系统和辅助排种系统等组成, 如图 2 所示。油菜电驱排种控制系统完成排种电机的驱动和控制、Android 终端设置播种作业参数、封闭除草和种箱余量预警等功能。Arduino 主控制系统由 Arduino 单片机、HC-06 蓝牙模块和 Android 终端组成; 排种器转速控制系统由直流电机、旋转编码器、电机驱动模块和排种器等组成。辅助排种包括种子余量检测和封闭除草控制。



1.Arduino 单片机; 2.HC-06 蓝牙模块; 3.Android 终端; 4.电机驱动模块; 5.直流电机; 6.集排器; 7.编码器; 8.水泵; 9.继电器; 10.超声波模块; 11.种箱; 12.稳压模块; 13.机具

1. Arduino MCU; 2. HC-06 Bluetooth module; 3. Android terminal; 4. Motor drive module; 5. DC motor; 6. Centralized metering device; 7. Encoder; 8. Water pump; 9. Relay; 10. Ultrasound module; 11. Seedbox; 12. Pressure stabilizer module; 13. Rapeseed seeder

图 2 控制系统组成图

Figure 2 Composition diagram of control system

油菜播种作业时, 作业人员根据播种要求, 通过 Android 终端设定穴距等作业参数; Android 终端通过蓝牙通讯将信息数据传输到控制处理器, 控制器对协议进行解析, 得到参数信息, 改变 PWM 控制信号的占空比, 从而调节排种器转速。喷雾用水泵采用 Android 终端控制的方式, Android 终端通过

指令的传输，改变单片机引脚的电平状态，控制继电器的吸合，进而控制水泵的打开与关闭，实现封闭除草。

2 油菜电驱排种控制系统设计

2.1 控制系统硬件设计

油菜电驱排种控制系统的硬件主要由降压稳压、电机驱动、信号采集、人机交互、控制处理和继电器等模块组成，如图 3 所示；其中人机交互模块以 Arduino Mega2560 pro 单片机为处理核心，以无线蓝牙通讯和串口通讯为数据传输方式，以 Android 平台为控制终端；降压稳压模块采用 12V LM2596 DC-DC 稳压电源模块；信号采集模块采用精度为 400P/R 的 E6B2-CWZ3E 型旋转编码器，通过单片机中断口读取编码器输出脉冲信号计算出机具作业速度和集排器转速。机具作业速度和集排器转速的计算公式为：

$$n = \frac{3N}{20T} \tag{1}$$

$$v = \frac{9\pi RN}{500T}$$

式中， n 为集排器转速， $r \cdot \text{min}^{-1}$ ； v 为机具作业

速度， $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ ； N 为一个采样周期内，单片机中断计数下降沿次数； T 为采样周期， s ； R 为测速地轮半径， m 。

2.2 控制流程设计

油菜电驱排种控制系统以 Arduino 单片机为控制器和 Android 终端为控制平台，采用无线蓝牙及串口通讯为数据传输方式，完成数据处理、基于 PID 算法的排种器转速控制和 Android 终端人机交互等环节。系统控制流程如图 4 所示，系统初始化后，下位机接收 Android 终端发送的数据信息，对协议进行解析，获取不同的控制指令，完成对集中排种装置的控制。在手动播种模式下，根据作业需要在人机交互界面设定集排器转速。在自动模式下，根据农艺要求在人机交互界面设定播种穴距，处理器根据机具作业速度与穴距调节直流电机转速，使播种穴距稳定在期望穴距。

人机交互界面会实时显示作业速度和集排器转速及各控制环节是否处于正常状态；如发生异常，系统会通过 Android 平台报警，播种作业人员可停止集排器工作。

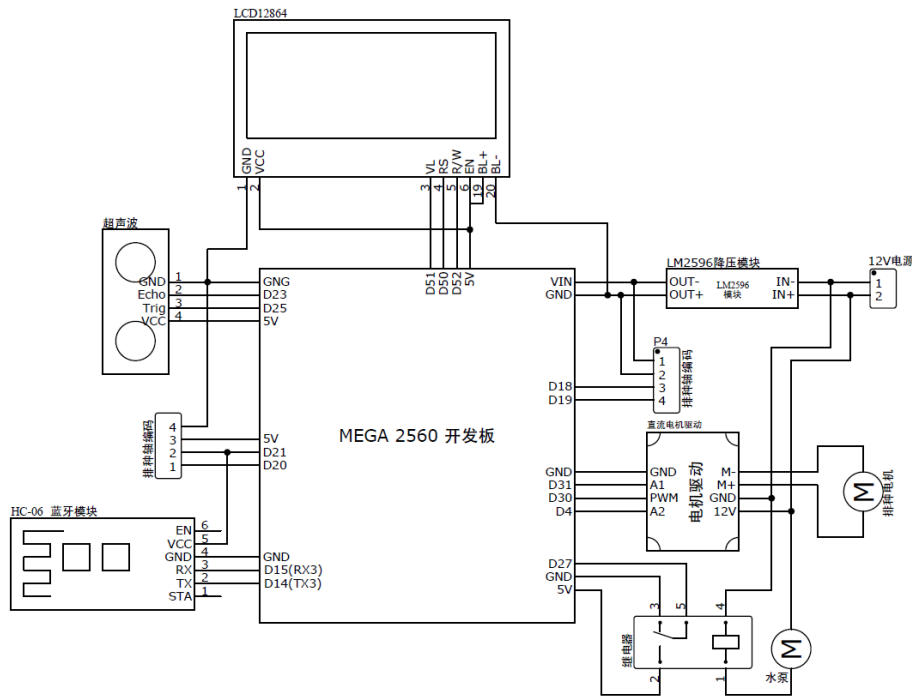


图 3 油菜精量排种控制系统电路图

Figure 3 Circuit diagram of rape precision metering control system

2.3 排种器转速控制模型

2.3.1 模型建立 为保证播种的均匀性，需使集排器转速适应机具的作业速度，本系统采用 PID 算法实现排种电机转速的实时控制，控制器根据机具作

业速度及设定穴距决策出排种最优转速，并将其作为 PID 控制器的设定值，周期性进行 PID 运算，使得电机的转速控制在设定值范围。排种最优转速 n 为：

$$n = \frac{60v}{BZ} \quad (2)$$

式中, B 为播种穴距, m ; v 为播种作业速度, $m \cdot s^{-1}$; 排种轮转速, $r \cdot min^{-1}$; Z 为排种轮型孔数。

系统通过 PID 闭环控制算法对电机转速进行控制, 电机转速会随机具作业速度实时调节, 实现机具作业速度和集排器转速的同步, 即播种穴距一致。

集排器转速控制方法如图 5 所示, 通过编码器采集播种作业速度以及集排器转速, 结合设定的作业参数决策出排种器最优转速, 将其值作为 PID 控制器的设定值, 比较设定值与反馈值, 应用 PID 算法进行调节, 输出 PWM 脉冲信号, 进而控制电机转速, 该模型属于闭环控制系统。

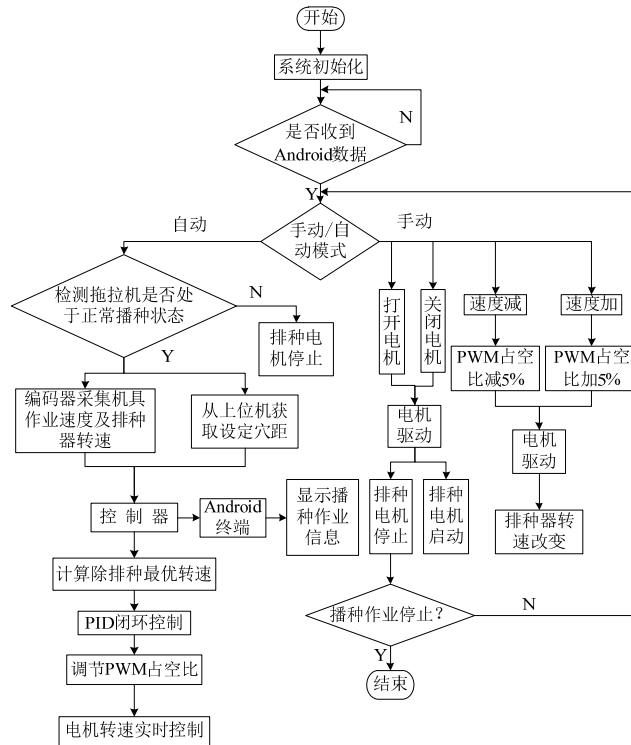


图 4 油菜精量机具控制流程图

Figure 4 Control structure diagram of precision seeder for rapeseed

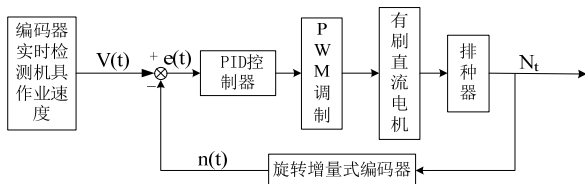


图 5 PID 控制策略

Figure 5 PID control strategy

PID 控制策略引入积分分离、抗积分饱和和梯形积分的 PID 计算公式为

$$u(n) = k_p \left\{ e(n) + R \frac{T}{T_1} \sum_{i=1}^n \frac{e(n) + e(n-1)}{2} + \frac{T_d}{T} [e(n) - e(n-1)] \right\} \quad (3)$$

式中, k_p 为比例增益; T_1 为积分时间常数; T_d 为微分时间常数; R 为积分分离系数。

2.3.2 参数整定 基于稳定边界法的 PID 参数整定使用边界稳定法整定 PID 参数的步骤^[22-23]为:

①去掉 PID 控制器的积分和微分作用, 仅留下一个较小的比例系数。

②逐渐增大比例系数, 直到系统出现临界振荡, 记临界振荡增益和临界振荡周期 T 。

③按照表 1 的经验公式整定相应的 PID 参数, 然后再进行仿真校验。

表 1 稳定边界法参数整定计算公式

Table 1 Calculating formulas for parameter tuning of stable boundary method

| 调节规律 Regulation law | 整定参数 Parameters | | |
|------------------------|-----------------|---------------|-------------|
| | k_p | k_i | k_d |
| P | $0.5k_p$ | | |
| PI | $0.045 5 k_p$ | $0.535 k_i/T$ | |
| PID | $0.6 k_p$ | $1.2 k_i/T$ | $0.075 k_d$ |

由电机学可知, 在理想条件下, 直流电机的传递函数^[24-25]为

$$G(s) = \frac{1/C_e \phi}{T_m T_d s^2 + T_m s + 1} \quad (4)$$

式中, T_m 为机电时间常数, s ; T_d 为电磁时间

常数, s ; C_e 为电动机反电动势系数; ϕ 为每极磁通, Wb 。其中直流电机主要参数为: $T_m=0.8\text{ s}$, $T_d=9\text{ ms}$, $C_e=10.5V/(r\cdot\text{min}^{-1})$, $\phi=126\text{ Wb}$ 。带入相关参数后得到系统传递函数为

$$G(s) = \frac{12}{0.00072s^2 + 0.8s + 1} \quad (5)$$

PID控制器的传递函数为

$$G(s) = k_p + \frac{Rk_i}{2s} + k_d s \quad (6)$$

经 Simulink 仿真^[26-27], PID控制器的3个参数为 $k_p=1.5$, $k_i=4$, $k_d=0.1$ 。

在该参数下的系统响应曲线如图6所示,在阶跃信号为 $10\sim 50\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 时,该参数下PID控制系统性能指标超调量最高为 20.814% ,最低为 5.373% ;上升时间最大为 0.2646 s ,最低为 0.2201 s ;调节时间最大为 0.7281 s ;延迟时间最大为 0.2299 s ;稳态误差均不超过 0.1% 。表明系统在该参数下工作时转速调节快而稳定,满足同步播种要求。

为更全面分析该PID控制器的动态性能,对PID控制器进行方波和正弦信号跟踪仿真分析,如图7所示。该PID控制器能够有效减小系统超调,使系统快速进入稳定状态;且在方波跟踪的上升或

下降阶段都具有良好跟踪性能,误差和超调均较小,表明该PID控制器能满足精量播种作业的实时性和快速性。

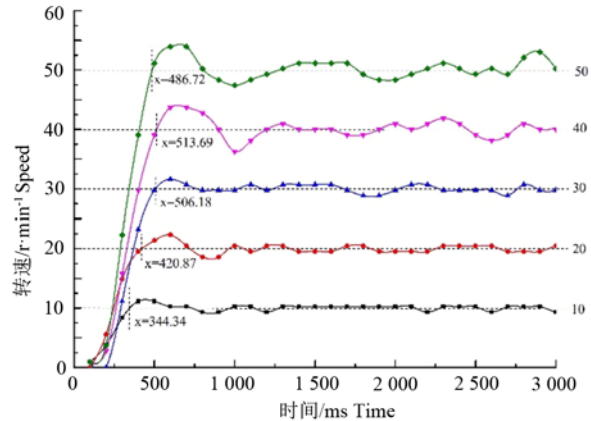


图6 系统响应曲线
Figure 6 System response curve

2.3.3 Android 终端设计 人机交互界面通过 APP inventor 平台进行开发,主要包括蓝牙通讯、播种作业参数设置、机具工作状态和排种状态的可视化,数字化显示以及封闭除草水泵开关控制、急停等功能,控制界面如图8所示。

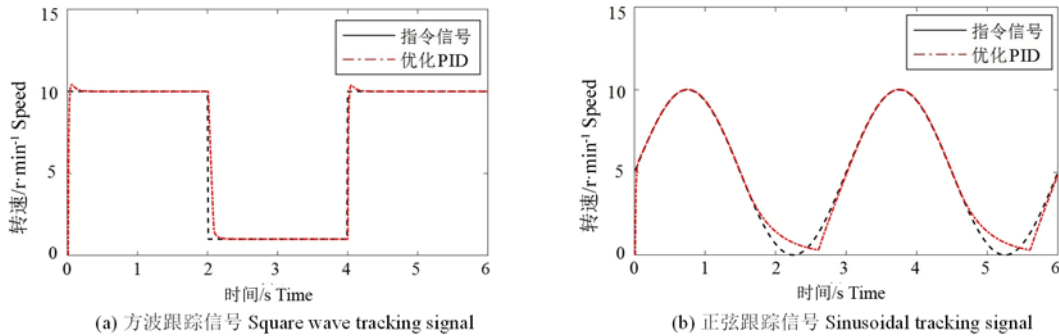


图7 信号跟踪效果
Figure 7 Impact of signal tracking



图8 Android终端人机交互界面
Figure 8 Interactive interface of Android mobile phone terminal

3 电驱排种控制系统性能试验

3.1 试验材料与装置

台架试验以成穴精量集中排种装置为对象,配套编码器及控制器进行试验,在JSP-12排种器性能检测实验台测试排种性能,供试品种为中双11,如图9所示。

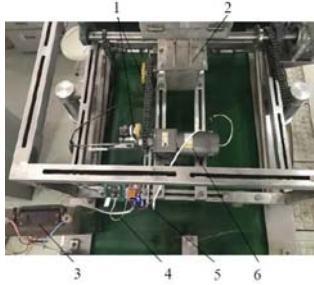
3.2 试验设计

为了验证控制系统的可行性及其稳定性,开展集排器转速控制精度、实际播种穴距与设定穴距比较和播种速度对播种穴距影响的试验。

3.2.1 集排器转速控制精度试验

试验时,通过检

测模块采集排种轴的实际转速 n_z , 采集时间为 1 min, 重复 6 次, 计算出排种转速变异系数及实际平均转速相对于理论转速的平均偏差。



1. 旋转编码器; 2. 集中排种器; 3. 12V 直流电源; 4. 控制器; 5. 电机驱动; 6. 直流电机

1. Rotary encoder; 2. Centralized metering device; 3. 12V DC Power supply; 4. Centralized metering controller; 5. Motor drive; 6. DC motor

图 9 台架试验装置

Figure 9 Bench test device

3.2.2 实际播种株距与设定穴距比较试验 在种带传输速度相同的情况下, 根据播种需求, 设定播种株距 L_z 为 60 mm、90 mm、120 mm、150 mm、180 mm 共 5 个水平, 允许的波动范围为 $\Delta L_z = \pm 0.5L_{z1}$ 。测定不同处理的穴距, 计算穴距均匀性变异系数及相对误差作为评价指标。

3.2.3 播种速度对播种穴距的影响 为探讨不同播种株距条件下的最优播种速度, 在不同设定播种株

距条件下, 重复 3 次, 机具作业速度一般为 1.6~4.0 km·h⁻¹, 增量为 0.4 km·h⁻¹, 共 6 个水平, 单次试验连续测定 200 穴种子的穴距。

3.3 试验结果与分析

3.3.1 转速控制精度试验结果 转速控制精度试验结果见表 2, 当理论排种转速为 10~55 r·min⁻¹ 时, 实际转速与理论转速的平均偏差分别为 0.98%、1.11%、1.17%、1.35%、0.77%、0.73%, 实际转速的变异系数均低于 1.5%, 表明该系统对转速的控制精度较高且稳定性好。

3.3.2 播种穴距对比分析 如表 3 所示, 实际播种穴距相对误差均在 2.5% 以下, 未超出允许穴距波动范围。在相同播种穴距条件下, 各实际播种穴距与设定播种的穴距均匀性变异系数均不超过 2.25%, 表面穴距精度较高且控制稳定。

3.3.3 播种速度对播种穴距的影响试验结果 表 4 表明, 机具作业速度为 1.6~3.2 km·h⁻¹ 时的播种穴距均匀性变异系数均低于 15%。在相同作业速度下, 随着播种穴距的增大, 变异系数呈下降趋势, 当设定穴距为 60 mm 时, 变异系数最高, 播种稳定性偏差。在相同播种穴距情况下, 播种穴距变异系数随机具作业速度增加而增加, 播种穴距稳定性整体较好。因此, 该控制系统能够满足不同作业速度要求下的不同穴距播种要求, 从而实现精量播种作业。

表 2 排种器转速试验结果

Table 2 Speed test results of seeding metering device

| 序号 Number | 理论转速/r·min ⁻¹ Theoretical rotational speed | 试验转速/r·min ⁻¹ Experimental rotational speed | | | | | | $\delta_n/\%$ |
|--------------|-------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|---------------|
| | | 第 1 行 1 st row | 第 2 行 2 nd row | 第 3 行 3 rd row | 第 4 行 4 th row | 第 5 行 5 th row | 第 6 行 6 th row | |
| 1 | 10.00 | 10.23 | 10.21 | 10.02 | 10.01 | 10.27 | 10.06 | 1.05 |
| 2 | 20.00 | 20.13 | 20.36 | 20.28 | 20.06 | 19.98 | 20.16 | 0.63 |
| 3 | 30.00 | 29.65 | 30.70 | 30.58 | 30.24 | 30.33 | 30.06 | 1.14 |
| 4 | 40.00 | 40.61 | 40.66 | 40.65 | 40.13 | 40.74 | 40.66 | 0.50 |
| 5 | 50.00 | 50.08 | 50.38 | 50.46 | 50.55 | 50.72 | 50.62 | 0.41 |
| 6 | 55.00 | 55.80 | 55.77 | 54.94 | 55.57 | 55.78 | 55.14 | 0.61 |

注: δ_n 表示转速的变异系数 Note: δ_n means variability coefficient of speed

表 3 实际播种穴距与设定穴距比较试验结果

Table 3 Test results of comparing actual and theoretical hill spacing

| 序号 Number | 理论穴距/mm Theoretical hill spacing | 实际穴距/mm Actual hill spacing | | | B_{sm}/mm | $\delta_B/\%$ | 相对误差/% Relative deviation |
|--------------|-------------------------------------|-----------------------------|----------|----------|-------------|---------------|------------------------------|
| | | B_{S1} | B_{S2} | B_{S3} | | | |
| 1 | 60 | 64.7 | 63.5 | 62.8 | 63.67 | 1.23 | 1.23 |
| 2 | 90 | 86.5 | 91.3 | 89.8 | 89.20 | 2.25 | 2.25 |
| 3 | 120 | 120.3 | 121.6 | 120.8 | 120.90 | 0.44 | 0.44 |
| 4 | 150 | 151.8 | 154.5 | 150.5 | 152.27 | 1.09 | 1.09 |
| 5 | 180 | 184.0 | 185.0 | 184.5 | 184.50 | 0.22 | 0.22 |

注: B_{sm} 表示每次试验的实际平均排种穴距; δ_B 表示穴距均匀性变异系数。下同

Note: B_{sm} represents the actual average seeding hill spacing; δ_B denotes the variation coefficient of the uniformity of the hill distance. The same as below

表 4 播种速度对播种穴距的影响试验结果

Table 4 Experimental results of the effect of operation velocity on the hill distance

| 速度 /km·h ⁻¹ Velocity | 序号 No. | 理论穴 距/mm Hill spacing | B _{Sn} | δ _B /% | 速度 /km·h ⁻¹ Velocity | 序号 No. | 理论穴 距/mm Hill spacing | B _{Sn} | δ _B /% | 速度 /km·h ⁻¹ Velocity | 序号 No. | 理论穴 距/mm Hill spacing | B _{Sn} | δ _B /% |
|---------------------------------------|-----------|-----------------------------|-----------------|-------------------|---------------------------------------|-----------|-----------------------------|-----------------|-------------------|---------------------------------------|-----------|-----------------------------|-----------------|-------------------|
| 1.6 | 1 | 60 | 62.86 | 10.08 | 2.0 | 1 | 60 | 65.83 | 5.97 | 2.4 | 1 | 60 | 68.50 | 11.88 |
| | 2 | 90 | 89.29 | 5.67 | | 2 | 90 | 89.50 | 3.67 | | 2 | 90 | 107.67 | 7.55 |
| | 3 | 120 | 121.86 | 2.50 | | 3 | 120 | 125.50 | 4.64 | | 3 | 120 | 124.83 | 4.80 |
| | 4 | 150 | 154.29 | 3.24 | | 4 | 150 | 155.83 | 3.50 | | 4 | 150 | 153.50 | 3.80 |
| | 5 | 180 | 184.00 | 4.51 | | 5 | 180 | 187.83 | 2.73 | | 5 | 180 | 188.67 | 2.76 |
| 2.8 | 1 | 60 | 64.67 | 9.78 | 3.2 | 1 | 60 | 60.83 | 8.13 | 3.6 | 1 | 60 | 77.33 | 21.32 |
| | 2 | 90 | 88.00 | 12.55 | | 2 | 90 | 89.83 | 6.45 | | 2 | 90 | 85.00 | 8.57 |
| | 3 | 120 | 122.83 | 5.40 | | 3 | 120 | 121.33 | 3.00 | | 3 | 120 | 130.50 | 10.48 |
| | 4 | 150 | 153.00 | 4.15 | | 4 | 150 | 153.50 | 4.26 | | 4 | 150 | 148.67 | 6.68 |
| | 5 | 180 | 182.33 | 4.29 | | 5 | 180 | 186.33 | 2.38 | | 5 | 180 | 184.17 | 4.52 |

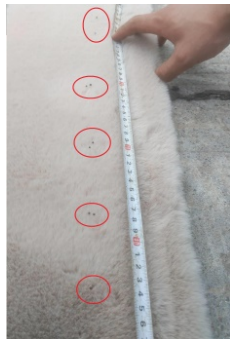
4 电驱排种控制系统路面试验

4.1 试验方法

为验证该油菜电驱排种控制系统的稳定性, 2019年9月在四川省雅安市四川农业大学现代农业研发基地开展了油菜播种机播种性能路面试验, 以油菜精量集中排种器为核心的播种机由插秧机机头驱动, 如图10所示。试验中选取长15 m, 宽4 m的路段作为试验场地, 供试品种为中双11, 通过在导种管下方铺设地毯固定种子落点。



a. 油菜路面试验



b. 油菜种子群分布

a. Rapeseed pavement experiment b. Seed population distribution

图 10 路面播种试验

Figure 10 Pavement seeding experiment

表 5 路面试验结果

Table 5 Experiment results in pavement

| 序号 Number | 理论穴距/mm Theoretical hill spacing | 实际穴距/mm Actual hill spacing | δ _B /% |
|--------------|-------------------------------------|--------------------------------|-------------------|
| 1 | 60 | 52.31 | 23.25 |
| 2 | 90 | 85.24 | 20.78 |
| 3 | 120 | 113.70 | 21.06 |
| 4 | 150 | 141.97 | 17.35 |
| 5 | 180 | 183.25 | 19.80 |

试验中机组前进速度为 3 km·h⁻¹。在设定播种穴距 60、90、120、150、180 mm 开展路面试验, 每次试验采集稳定作业后的 30 个穴距, 重复 3 次。

4.2 试验结果与分析

路面试验结果如表 5 所示, 结果表明, 不同穴距要求下的穴距均匀性变异系数均低于 25.0%, 能够满足农艺技术对穴距均匀性的要求。

5 结论

本研究结合无线蓝牙技术和 PID 控制方法, 设计了一种油菜精量集中排种器电驱控制系统。建立控制系统数学模型和传递函数, 并用 Matlab 软件进行性能仿真, 获得了 PID 控制器的 3 个参数。该参数下 PID 控制系统性能指标超调量最高为 20.81%, 最低为 5.37%; 上升时间最大为 0.264 6 s; 调节时间最大为 0.728 1 s; 稳态误差均不超过 0.1%, 系统稳定性和响应速度较好。控制系统性能试验结果表明, 当理论排种转速为 10~55 r·min⁻¹ 时, 实际转速相对于理论转速的平均偏差和变异系数均低于 1.5%。

应用油菜精量集中排种器电驱控制系统进行播种作业时, 播种穴距越大, 播种穴距稳定性越好。在穴距和作业速度分别为 60~180 mm 和 1.6~3.2 km·h⁻¹ 时, 穴距均匀性变异系数均小于 15.0%, 达到精量播种要求。本研究通过设计集中排种器电驱控制系统可实现主动排种, 并随前进速度同步调节, 保证播种穴距的稳定性; 并可通过 Android 终端调节播种作业参数, 实现对播种穴距的定量控制, 播种效果良好。

参考文献:

[1] 王汉中. 我国油菜产业发展的历史回顾与展望[J]. 中

- 国油料作物学报, 2010, 32(2): 300-302.
- [2] 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.
- [3] 国务院. 国务院关于加强推进农业机械化和农机装备产业转型升级的指导意见: 国发〔2018〕42号[R]. (2018-12-21)[2018-12-29]. http://www.gov.cn/zhengce/content/2018-12/29/content_5353308.htm.
- [4] 王汉中. 我国油菜产需形势分析及产业发展对策[J]. 中国油料作物学报, 2007, 29(1): 101-105.
- [5] 吴崇友, 金诚谦, 肖体琼, 等. 我国油菜全程机械化现状与技术影响因素分析[J]. 农机化研究, 2007, 29(12): 207-210.
- [6] 丁元法, 肖继军, 张晓辉. 精密播种机的现状与发展趋势[J]. 山东农机, 2001(6): 3-5.
- [7] 刘小谭, 唐亮, 蒋立茂, 等. 丘区油菜精量播种机研究与开发[J]. 四川农业与农机, 2016(4): 38-39.
- [8] 李兆东, 杨文超, 张甜, 等. 油菜高速精量排种器槽齿组合式吸种盘设计与吸附性能试验[J]. 农业工程学报, 2019, 35(1): 12-22.
- [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.
- [10] 雷小龙, 廖宜涛, 王磊, 等. 油麦兼用型气送式集排器增压管气固两相流仿真与参数优化[J]. 农业工程学报, 2017, 33(19): 67-75.
- [11] HE X T, DING Y Q, ZHANG D X, et al. Development of a variable-rate seeding control system for corn planters Part II: Field performance[J]. Comput Electron Agric, 2019, 162: 309-317.
- [12] 陈满, 鲁伟, 汪小岳, 等. 基于模糊 PID 的冬小麦变量追肥优化控制系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2016, 47(2): 71-76.
- [13] 程修沛, 李洪文, 王庆杰, 等. 小麦小区播种机排种控制系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2019, 50(7): 30-38.
- [14] 丁友强, 杨丽, 张东兴, 等. 玉米变量播种机单体驱动器的设计[J]. 农业工程学报, 2019, 35(11): 1-9.
- [15] 梁春英, 衣淑娟, 王熙, 等. 变量施肥控制系统 PID 控制策略[J]. 农业机械学报, 2010, 41(7): 157-162.
- [16] 金鑫, 李倩文, 苑严伟, 等. 2BFJ-24 型小麦精量播种变量施肥机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2018, 49(5): 84-92.
- [17] 孙传祝, 王法明, 李学强, 等. 马铃薯精密播种机智能控制系统设计[J]. 农业工程学报, 2017, 33(18): 36-44.
- [18] 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.
- [19] 丁幼春, 何志博, 夏中州, 等. 小型履带式油菜播种机导航免疫 PID 控制器设计[J]. 农业工程学报, 2019, 35(7): 12-20.
- [20] 徐志成. 自动播种机电控系统的模糊控制[J]. 农机化研究, 2014, 36(4): 12-15.
- [21] 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.
- [22] 何芝强. PID 控制器参数整定方法及其应用研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2005.
- [23] 王伟, 张晶涛, 柴天佑. PID 参数先进整定方法综述[J]. 自动化学报, 2000, 26(3): 347-355.
- [24] 金国强. 有刷直流电机的数学模型及参数测量方法[J]. 大学物理, 2014, 33(1): 56-60.
- [25] 刘冠艳. 基于 STM32 的有刷直流电机模糊 PID 调速系统设计[J]. 电子测量技术, 2018, 41(22): 125-128.
- [26] 谭浩, 吴何畏, 廉佳霖, 等. 基于 MATLAB 的模糊 PID 控制系统设计与仿真分析[J]. 工业控制计算机, 2019, 32(5): 58-59, 62.
- [27] 白金, 韩俊伟. 基于 MATLAB/Simulink 环境下的 PID 参数整定[J]. 哈尔滨商业大学学报(自然科学版), 2007, 23(6): 673-676, 681.