

油菜精量联合直播机随速播种控制系统设计与试验

廖庆喜^{1,2} 吴 崇^{1,2} 张青松^{1,2} 王宝山^{1,2} 杜文斌^{1,2} 王 磊^{1,2}

(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: 针对传统油菜精量直播机多采用被动式地轮驱动排种器,高速时地轮易打滑,导致漏播、断条等现象,影响高速作业精量播种效果,且手动变速箱调整播量难以实现播种粒距、播量的精准调节等问题,设计了一种以 STM32 为主控器,通过蓝牙模块与手机端微信小程序进行实时数据交互的油菜随速播种控制系统。该系统采用地轮编码器和北斗接收器两种模式分别获取拖拉机低速和中高速作业时的前进速度,主控器分析各传感器数据并生成电机控制指令驱动闭环步进电机带动排种轴转动,实现排种轴转速与拖拉机前进速度匹配及无级播量调节;同时利用微信小程序设置目标粒距、传动比、地轮直径等参数以适用于不同类型播种机,并显示总播量、播种面积等关键参数;分析得出吸附种子临界负压为 1 477 Pa,切换测速方式临界速度为 3.7 km/h,测速范围为 1.44 ~ 12.77 km/h,电机调速频率为 5 Hz。台架试验结果表明:随速播种控制系统播种性能优于恒定转速播种,播种速度 2.6 ~ 7.8 km/h 时粒距合格指数大于 87%。田间试验结果表明:本系统搭载一器双行正负气压组合式油菜精量排种器在作业速度为 1.44 ~ 7.99 km/h 时播量误差小于 3.9%、粒距合格率不低于 84%,满足随速播种要求。

关键词: 油菜精播机; 控制系统; 随速调控; 播量无级调节; 手机端控制

中图分类号: S222.3 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2022)12-0049-10 OSID: 

Design and Experiment of Speed-dependent Seeding Control System of Rapeseed Precision Combined Seeding Machine

LIAO Qingxi^{1,2} WU Chong^{1,2} ZHANG Qingsong^{1,2} WANG Baoshan^{1,2} DU Wenbin^{1,2} WANG Lei^{1,2}

(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: Traditional precision rapeseed planters mostly use passive land wheel to drive seed metering device. The phenomenon of land wheel slippage is easy to occur under high-speed operation conditions. This phenomenon resulting in missing seeding and other more serious problems, which reduced the quality of precision seeding in high-speed operations. Besides, traditional precision rapeseed planters are difficult to achieve precise adjustment of seed spacing and seeding amount by manual gearbox. In allusion to the problems mentioned above, a speed-dependent control system of rapeseed precision seeding which used STM32 as MCU and realized real-time data interaction with the WeChat applet on the mobile phone through the Bluetooth module was proposed. Different from the traditional electric drive seeding control system, two speed measurement were used in this system, the land wheel encoder and BDS receiver were used to measure the forward speed of the tractor during low-speed and medium-high-speed operation respectively. When the system was working, MCU analyzed the data from each sensor and generated motor control commands to drive the closed-loop stepper motor to drive the rotation of the seed metering shaft, so as to realize the matching of seed metering shaft speed and tractor forward speed, and to realize the stepless seeding amount adjustment. Meanwhile, users could set parameters such as target seed spacing, ratio of transmission and land wheel diameter through the WeChat applet to apply to different seeders, and key parameters were obtained such as total seeding amount and seeding area. Crucial parameter calibration experiment showed that the critical negative pressure of adsorption seeds was 1 477 Pa, the critical speed of switching the speed measurement mode was 3.7 km/h, speed measuring range was

1.44 ~ 12.77 km/h and motor speed regulation frequency was 5 Hz. The bench experiment results showed that the seeding quality of speed-dependent control system was better than seeding at constant speed, and seed spacing qualification index was higher than 87% when the speed range was 2.6 ~ 7.8 km/h. The field experiment results showed that seeding error was less than 3.9% and seed spacing qualification index was no less than 84% at seeding speed ranged from 1.44 km/h to 7.99 km/h. The system met the requirements of rapeseed precision seeding and can provide a reference for the improvement of the structure of speed-dependent control system of precision rapeseed planters.

Key words: rapeseed precision seeding machine; control system; speed-dependent control; stepless seeding amount adjustment; mobile control

0 引言

油菜精量播种技术具有节种、省工和增效等优点,已成为油菜机械化播种的主要发展趋势,其核心是根据农艺要求提供均匀的种子流,为种子发芽、光水肥气充分利用提供良好条件^[1-3]。

国内外对精量播种技术的研究主要集中在排种器的结构设计和参数优化^[4-5],目前有多种性能稳定、播种精度高的排种器在生产实践中应用^[6-7]。传统油菜播种机多采用地轮驱动排种器,搭配手动变速箱调节播量及播种粒距^[8-9],但由于田间工况复杂、机具工作振动大,高速作业时易出现地轮打滑、悬空,链条跳动等现象,对播种质量有较大影响^[10-14]。且通过手动变速箱调节播量,使播量仅能在固定挡位调节,难以满足不同种植农艺要求及作业速度下对播量精准调控的要求。

为实现高速精量播种与播量精准调节,学者对排种器的驱动及测速方式进行了广泛研究^[15-17]。多采用电驱动,地轮编码器^[18-19]、卫星定位模块^[20]或地速雷达等方式测速,实际应用中各种测速方式的适宜测速区间具有明显差异,无法保证不同工况及不同速度下的测速准确性。

针对以上问题,本文设计一种基于地轮编码器和北斗信号接收器(简称北斗接收器)两种测速方式的随速播种控制系统。以2BFQ系列油菜精量联合直播机为平台,搭载不同类型排种器,通过微信小程序^[21]设置播种作业参数并显示系统作业信息,利用差压变送器获取负压输送头处实时负压以判断吸附种子状态,STM32 主控器自动选择速度源,生成电机控制指令并驱动电机转动,满足随速精量播种要求,为油菜播种机随速控制系统结构优化提供参考。

1 系统整体设计和工作原理

油菜随速播种控制系统主要由 STM32 主控器、蓝牙模块、微信小程序交互端、北斗接收器、地轮编码器、差压变送器及驱动模块等组成,其整机结构如

图 1 所示,控制系统结构如图 2 所示。

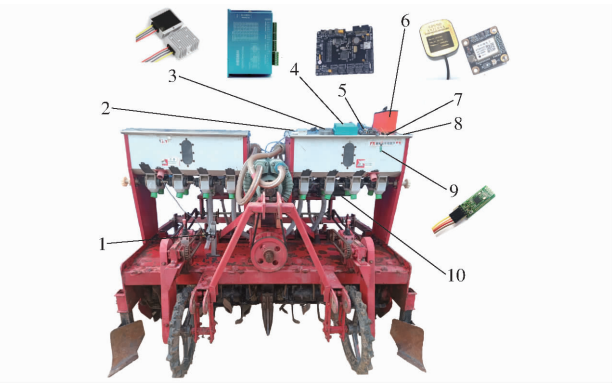


图 1 整机结构示意图

Fig. 1 Structural diagram of whole machine

1. 地轮编码器 2. 差压变送器及负压输出头 3. 48V 转 24V 模块 4. 步进电机驱动器 5. 主控器 6. 48V 电源 7. 北斗接收器 8. 5V USB 供电模块 9. 蓝牙模块 10. 排种驱动模块

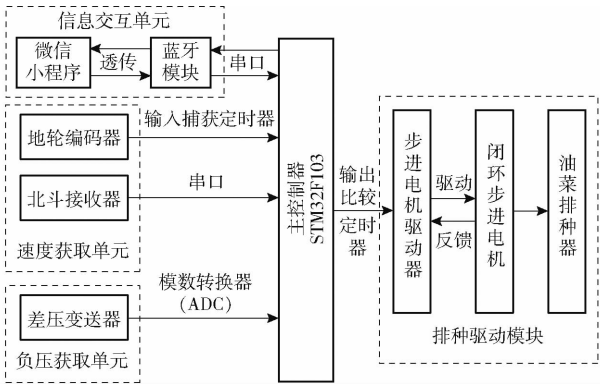


图 2 控制系统结构框图

Fig. 2 Structural diagram of control system

系统初始工作时,蓝牙模块进入透传模式使主控器与小程序建立连接,用户通过微信小程序设置播种参数信息,地轮编码器、北斗接收器及差压变送器同时进入工作状态,主控器最先读取差压变送器的负压信号,若负压达到吸附种子临界负压则开展播种作业,打开电机使能开关,读取地轮编码器和北斗接收器的速度信号,根据速度信号与设定好的参数信息生成电机控制指令,使 STM32 的定时器通过 PWM 模式产生目标频率的脉冲,脉冲进入电机驱动器经过电流环和速度环等 PID 运算,控制步进电机快速响应,以目标转速驱动排种轴转动。拖拉机变

速工作时,主控器自动选择地轮编码器与北斗接收器中较准确的速度源以驱动电机。若负压输送头处负压未达到临界负压,则主控器停止发送电机驱动脉冲,停止读取速度信号,并持续监测和判断负压值,实现随拖拉机前进速度调整排种轴转速,达到精量播种的目的。

2 系统硬件设计

2.1 信号处理模块

主控器选用意法半导体公司生产的基于 ARMv7 架构的 32 位 Cortex - M3 内核的 STM32F103VET6 单片机。该单片机拥有 512K flash、64K SRAM,最高运行频率 72 MHz;同时拥有多路模数转换器、定时器及通信接口,可以满足高性能、低功耗及低成本的设计要求。

2.2 信号采集模块

2BFQ 系列油菜精量联合直播机搭载一器双行正负气压组合式精量排种器,为获取播种作业状态,采用佛山一众传感仪器有限公司生产的 YZ1301 型差压变送器采集负压输送头负压。

地轮编码器采用欧姆龙自动化有限公司生产的 E6B2 CEZ1X 型旋转增量编码器^[22]。

北斗接收器采用杭州中科微电子有限公司生产的 ATGM332D 型北斗定位模块。

系统采用智能手机作为人机交互设备,通过蓝牙(HC-08 型)与主控器搭建信息通路。

2.3 排种器驱动模块

电机是排种器驱动模块的核心工作部件,目前常用于电驱排种的为直流无刷电机^[14]。相较于直流无刷电机,闭环步进电机内置加减速算法,低频特性良好、控制简单、精度高、响应快、无累积误差、具有 1.5 倍过载能力,能够适配常见油菜精量排种器 10 ~ 60 r/min 的转速范围,满足随速播种时频繁调速要求,提高播种精度。

排种器驱动模块主要由步进电机及减速器、步进电机驱动器、传动通轴、链轮及链条组成,以一器双行正负气压组合式油菜精量排种器为例,结构如图 3 所示。

2BFQ 系列油菜精量直播机设计播量为 2 250 ~ 3 750 g/hm²,播种粒距为 30 ~ 80 mm^[23],排种盘型孔数为 50,取目标播种粒距为 50 mm,为达到 12 km/h 的作业速度,则排种盘转速需为 80 r/min。根据最大作业速度和株距要求,选择减速器传动比为 10,则步进电机驱动扭矩^[24]为

$$M_1 = \frac{KM_2}{\mu_1\mu_2} \tag{1}$$

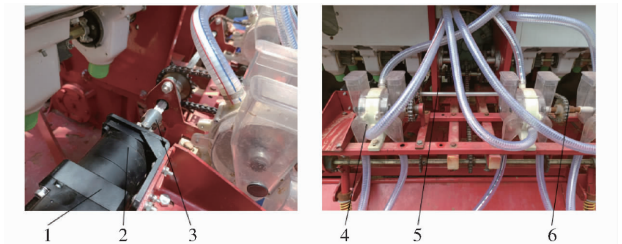


图 3 排种器驱动模块

Fig. 3 Seed metering device drive module

1. 86HBS120 型步进电机 2. 行星减速器 3. 十字万向节联轴器
4. 一器双行正负气压组合式油菜精量排种器 5. 传动通轴
6. 1:1 传动链

式中 M_1 ——电机驱动扭矩, N·m
 K ——电机安全系数,取 2
 M_2 ——作业时排种轴最大负荷, N·m
 μ_1 ——链轮传动比,取 1
 μ_2 ——减速器传动比,取 10

利用芜湖艾瑞特机电设备有限公司 ATRITER BME-006 型数显力矩扳手测得排种轴的启动扭矩为 9.8 N·m,平稳转动扭矩为 7.4 N·m。由式(1)计算得电机驱动扭矩为 1.48 N·m,选用杭州步科机电有限公司生产的 86HBS120 型步进电机,在 800 r/min 时仍可保持 3.1 N·m 的扭矩,满足作业要求;选用步科 HBS860H 型闭环步进电机驱动器,该驱动器可实现电机的速度环、电流环、位置环的三环控制,系统控制响应快、精度高。

2.4 硬件系统电路

差压变送器接 24 V 电源,信号输出线经降压后连接主控器 PC3 引脚,通过 ADC(模数转换器)获取输入电压,进而转化为风压信号;蓝牙模块与北斗接收器由主控器供电,分别通过 UART4(串口 4)和 USART2(串口 2)与主控器进行数据交互;步进电机驱动器接 48 V 电源,PULL+接主控器 PA11 引脚,主控器的 TIM1 在输出比较模式下通过 PA11 向驱动器传输脉冲驱动电机转动。

3 系统软件设计

本控制系统的软件主要由主控端硬件驱动程序和交互端微信小程序组成。主控端硬件驱动程序基于 Keil uVision5 开发,采用 C 语言编程。交互端微信交互小程序基于微信开发者程序进行开发,采用 JavaScript 语言编程。

3.1 主控端硬件驱动程序

主控端硬件驱动程序的主要功能是与交互端进行信息收发同时接收各传感器信号进行分析计算,并通过定时器输出电机控制信号,其整体流程如图 4 所示。系统与交互端保持通信,监听控制参数

的更新,同时根据各传感器信息、交互端控制参数等计算出电机控制指令,生成特定频率的 PWM 波实时控制电机转速。

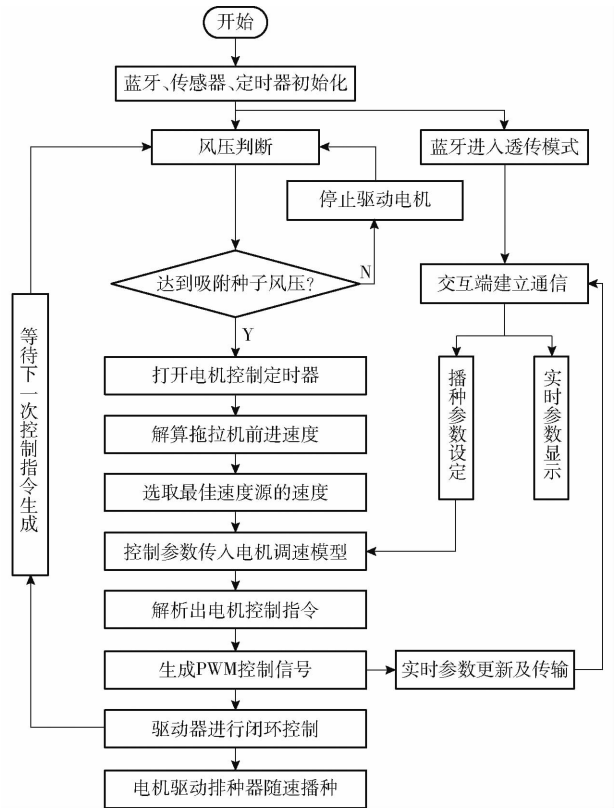


图4 主控端整体流程图
Fig.4 Program flow chart of overall control system

3.1.1 蓝牙模块配置

使用 AT 指令将蓝牙模块配置为从机模式,此模式下可被上位机搜索和连接;为了保证田间恶劣工况下的连接稳定性及传输距离,将波特率配置为 9 600 b/s;主控器供电后,蓝牙模块进入透传模式。

3.1.2 负压信号获取

差压变送器工作时输出的电压与测得的负压成正比比例关系,则

$$A_v = 1.221A_i \tag{2}$$

式中 A_v ——测得的负压,Pa
 A_i ——输入电压对应的数字量

在负压输送头的基础上添加 3 个和气室联通的宝塔头,封闭其中 2 个宝塔头,变送器负压管与未封闭宝塔头连接以获得负压,如图 5 所示。

利用深圳市聚茂源科技有限公司生产的标智 GM511 型手持式差压计在台架和田间两种条件下测得播种机负压输送头处能够吸附种子的临界负压为 1 477 Pa。因此当 $A_v \geq 1\,477\text{ Pa}$ 时,主控器拉高电机使能,打开 PWM 波生成定时器进行电机控制;若 $A_v < 1\,477\text{ Pa}$,主控器拉低电机使能,持续读取负压值并与临界负压对比判断。



图5 差压变送器及负压输送头连接方式示意图
Fig.5 Diagram of differential pressure transmitter and negative pressure delivery head connection method

3.1.3 地轮编码器速度获取

地轮编码器与地轮通过链传动连接,如图 6 所示。



图6 地轮编码器装配图
Fig.6 Diagram of ground wheel encoder assembly

利用主控器中定时器的输入捕获功能对编码器 A 和 B 两相的脉冲信号进行采集,用两个变量 h 和 c 分别记录脉冲数和圈数,编码器每产生 4 000 个脉冲定时器产生一次中断,每增加一个脉冲则 $h + 1$,每产生一个中断则 $c + 1$ 。通过另一个定时器以固定时间间隔 t 触发中断并计算此时间内的平均速度,计算后 h 与 c 清零。则拖拉机前进速度 v_E 为

$$v_E = \frac{\frac{1}{k} \left(c + \frac{h}{4\,000} \right) \pi \phi \alpha \mu_3}{t} \tag{3}$$

式中 v_E ——地轮编码器测得机具前进速度,km/h
 k ——速度单位转换系数,取 277.78
 μ_3 ——地轮与编码器传动比,取 11:10
 t ——速度解算时间间隔,取 0.2 s
 ϕ ——地轮直径,取 541 mm
 α_c ——测速误差修正系数

3.1.4 北斗接收器速度获取

ATGM332D 使用 NMEA0183 格式^[25]输出定位的原始数据。通过中科微电子有限公司配套的上位机程序将模块的接收方式设置为仅接收北斗的卫星定位数据 VTG 帧;设置信号更新频率为 5 Hz。VTG 帧基本格式如下:

\$ BDVTG, Congt, T, Cogm, M, Sog, N, kph, K, mode * CS, < CR > < LF >

其中 kph 项为对地速度, 获取 kph 段数据即可获得拖拉机实时速度 v_B , 速度解析流程图如图 7。

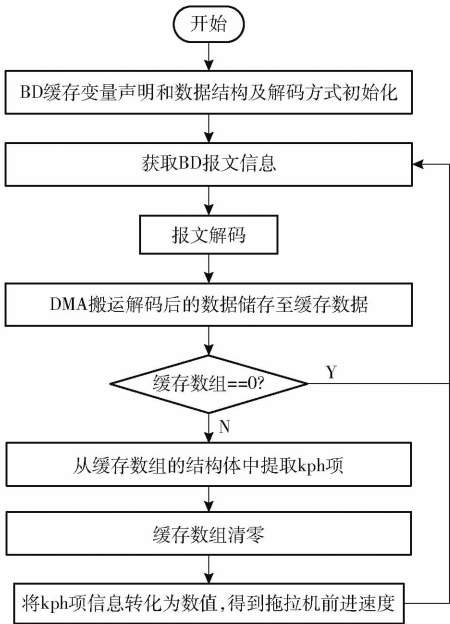


图 7 北斗速度解析程序流程图

Fig. 7 Program flow chart of BDS speed analysis

3.1.5 电机调速的数学模型

为实现随速播种控制, 需电机与拖拉机前进速度动态匹配。步进电机靠脉冲驱动, 本数学模型的目的是解算出所需脉冲频率。

脉冲频率与拖拉机前进速度的关系式为

$$A_{rr} = \frac{dmH}{Pn_1n_2\mu_2a_zkv} \tag{4}$$

式中 A_{rr} ——定时器重装载值, 通过 TIM_SetAutoreload 命令更改, 以输出目标频率脉冲, 调节电机转速

d ——目标粒距, mm

m ——排种盘型孔数

H ——定时器时钟频率, 取 72 MHz

P ——定时器预分频值, 配置定时器时写入

n_1 ——驱动器细分数

n_2 ——电机旋转一圈所需步数, 固定为 200

α_z ——传动误差修正系数

v ——拖拉机前进速度, km/h

3.1.6 工作模式切换与控制

本系统有恒定转速播种和随速播种两种工作模式。其中系统处于随速播种模式时根据式(4)进行自动实时调速, 进行随速播种作业; 系统处于恒定转速播种模式时, 排种器将被电机带动以恒定转速进行播种作业。

两种模式间可通过微信小程序设置目标粒距功能进行切换。目标粒距为正整数时, 系统处于随速播种模式; 目标粒距为 0 时, 系统处于恒定转速播种

模式。

恒定转速播种模式下通过微信小程序设置转速功能可向主控器传入目标转速 n_3 , 主控器内由

$$A_{rr} = \frac{H}{Pn_1n_2n_3\alpha_zi_z} \tag{5}$$

计算出相应 A_{rr} , 生成脉冲驱动电机以定转速转动。

3.1.7 随速播种模式速度源自动切换

当系统处于随速播种模式时启动速度源自动切换控制。

北斗接收器测得速度为 v_B , 地轮编码器测得速度为 v_E , 切换测速方式临界速度为 v_L 。速度源 v 选择模式如表 1。

表 1 速度源切换逻辑
Tab.1 Speed source switching logic

测速方式	控制方式	实时速度	测得速度	速度源
双速度源	随速播种	$> v_L$	$v_B > v_E$	v_B
			$v_B \leq v_E$	v_E
			$\leq v_L$	v_B
单北斗	随速播种	$\leq v_L$	$v_B < v_L$	v_L
			$v_B > v_L$	v_B
单地轮编码器	随速播种	$\leq v_L$		v_B
			$> v_L$	v_B

3.2 交互端微信小程序设计

3.2.1 功能设计

人机交互端的主要功能是根据实际作业情况设置目标粒距、固定转速、排种盘型孔数、机具幅宽、传动比、地轮直径及滑移率 7 个设置参数; 实时显示吸种负压、机具前进速度、排种轴转速、播种面积、播种量及工作模式 6 个显示参数。

3.2.2 软件下载与界面设计

使用智能手机打开微信, 在小程序界面搜索小程序全称“随速播种控制系统蓝牙交互软件”或简称“随速控制”即可找到, 点击进入自动完成下载与安装, 如图 8 所示。



图 8 小程序下载界面与运行界面

Fig. 8 Diagram of applet download and running interface

进入程序首先进行蓝牙连接, 完成后即可进行

控制。

4 关键参数标定与数据分析

衡量本系统性能的主要指标是粒距合格指数,对此指标有两个直接影响因素:测得拖拉机前进速度的准确性;电机控制精度和控制响应时间。

4.1 拖拉机测速试验

4.1.1 地轮编码器测速

通过地轮编码器测速试验,标定地轮滑移率,用于修正其直接测得的速度,并确定此种测速方式适用的速度区间。

以东方红 LX954 型拖拉机为动力平台,搭载 2BFQ-6 型油菜精量联合直播机。分别以慢 1、慢

2、慢 3、慢 4、中 1、中 2 (额定空载速度 2.17 ~ 7.99 km/h)6 个速度挡位前进,放下三点悬挂、地轮空载、打开 PTO 驱动旋耕刀以模拟实际田间工作情况,利用卷尺对拖拉机前进距离进行测量,利用地轮编码器记录转动圈数并通过蓝牙模块输出至手机,数据更新频率为 5 Hz,计算地轮上定点摆线长度与拖拉机位移之比,算得地轮滑移率。地轮滑移率计算公式为

$$s=\frac{L-\pi\phi n}{L}\times100\%$$

(6)

式中 s ——地轮滑移率,%
 L ——拖拉机总位移,m
 n ——地轮总转动圈数,r

试验结果如表 2。

表 2 地轮编码器测速试验结果
Tab.2 Result of land wheel encoder speed test

序号	拖拉机挡位	不同挡位地轮转动圈数/r						拖拉机总位移/m	拖拉机前进速度/(km·h ⁻¹)	地轮滑移率 s/%
		1	2	3	4	5	6			
1	慢 1	31.47	30.95	30.38	30.76	31.33	30.51	300	1.44	3.09
2	慢 2	29.97	29.83	29.84	29.62	30.19	30.57	300	2.88	5.90
3	慢 3	30.34	29.75	29.98	30.13	30.37	29.51	300	3.78	5.87
4	慢 4	27.74	27.76	28.04	27.52	27.64	27.67	300	5.89	13.03
5	中 1	28.74	28.87	28.92	28.68	29.01	28.79	300	4.76	9.56
6	中 2	24.11	25.07	26.16	25.94	27.01	24.65	300	7.99	20.05

此种测速方式下,拖拉机在低速 (1.44 ~ 3.78 km/h)前进时地轮滑移率为 3.09% ~ 5.90% ,且随着速度的增大,滑移率没有明显增加;中高速 (4.76 ~ 7.99 km/h)前进时滑移率为 9.56% ~ 20.05% ,且随着速度的增大,滑移率不断增大。

引入测速误差修正系数 α_c 对测得的速度进行修正,修正后的速度作为 v_e 传入主控器用于生成电机控制指令,则有

$$\alpha_c=\frac{1}{1-s}$$

(7)

表 3 北斗接收器测速数据
Tab.3 Statistics of BDS receiver speed

序号	测试距离/ m	总用时/ s	实际速度/ (km·h ⁻¹)	速度数据总数	测得平均速度/ (km·h ⁻¹)	速度偏移 标准差	平均速度偏 移率/%
1	200	300.5	2.36	612	2.14	0.64	-9.38
2	300	291.5	3.70	587	3.68	0.09	-0.64
3	300	241.0	4.48	486	4.40	0.22	-1.76
4	450	354.5	4.57	720	4.43	0.41	-2.96
5	600	367.5	5.89	750	5.78	0.50	-1.73
6	725	326.5	7.99	675	7.74	0.21	-3.24
7	504	185.0	9.81	331	9.76	0.43	-0.53
8	800	234.0	12.31	468	12.29	0.32	-0.14
9	550	155.0	12.34	290	12.77	0.83	3.40
10	0	220.0	0	427	0	0	0

拖拉机前进速度在 3.68 ~ 12.77 km/h 时,北斗接收器测速误差为 -3.24% ~ 3.40%,且随着速度的增大,测速误差较为稳定;如图 9 所示,拖拉机前进速度为 2.36 km/h 时,北斗接收器会出现 1 ~ 5 s 的接收速度为 0 的情况,导致测得速度误差较大,为 -9.38%,并导致播种作业时出现较大面积漏播,故此种速度下不适宜采用北斗接收器测量拖拉机速度;拖拉机静止时,测得速度恒为 0。

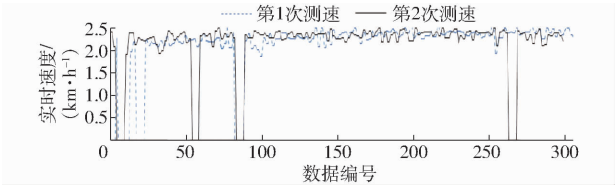


图 9 低速时北斗速度数据分布曲线

Fig. 9 Diagram of BDS speed data distribution at low speed

由于北斗接收器测得速度的误差互有正负且绝对值较小,不超过 3.4%,因此不对此速度进行修正,直接将其作为 v_B 传入主控器用于生成电机控制指令。

4.1.3 适宜测速区间

分析两种测速方式结果可得,地轮编码器的适宜测速区间为 1.44 ~ 3.78 km/h,北斗接收器的适宜测速区间为 3.68 ~ 12.77 km/h,如图 10 所示。

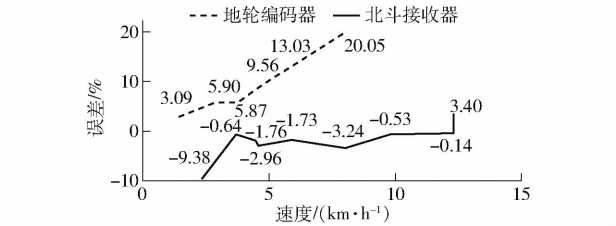


图 10 双模测速误差对比

Fig. 10 Diagram of dual mode speed measurement error

由于地轮滑移率对土壤墒情变化极为敏感,而北斗接收器对环境变换不敏感,适用范围较广,故以 3.7 km/h 为临界速度,即 $v_L = 3.7$ km/h。

4.2 传动系统控制试验

传动系统控制试验的目的是:判断传动系统的传动误差并进行修正;通过确定电机响应时间,以分析系统的调速频率。

试验采用开发板 A 驱动步进电机转动;开发板 B 适配编码器,并通过串口与计算机进行通信,传输实时转速等数据,传输频率 50 Hz。为模拟正常播种工作情况,将电机装在直播机上,并打开 PTO 产生正常工作时的负压,通过联轴器将编码器与传动通轴连接,测量传动通轴的转速。通过开发板 A 的按键驱动电机变速;通过开发板输入计算机显示与记录。

4.2.1 传动精度试验及数据分析

表 4 为传动精度试验结果。由表可知,当理论

排种速度为 10.05 ~ 50.74 r/min 时,实际转速与理论转速的平均偏差为 -5.31%,则传动误差修正系数 $\alpha_z = 1.056$ 。

表 4 传动精度试验结果

Tab. 4 Result of transmission accuracy test

目标转速/ (r·min ⁻¹)	实际转速/(r·min ⁻¹)				传动误差/%
	1	2	3	均值	
50.74	48.19	48.03	48.27	48.16	-5.08
45.47	42.95	42.79	42.95	42.90	-5.66
40.19	38.13	37.96	38.05	38.05	-5.33
35.27	33.46	33.14	33.26	33.29	-5.62
29.79	28.39	28.19	28.31	28.30	-5.01
25.04	23.20	24.01	23.60	23.60	-5.74
22.74	21.52	21.48	21.52	21.51	-5.42
15.16	14.28	14.44	14.40	14.37	-5.19
10.05	9.53	9.58	9.61	9.57	-4.74

影响传动精度的因素有:电机自身精度、测速程序、传动结构。使用同一测速程序测量电机的空载转动精度,测得转速误差为当前转速的万分之一,处于本电机 25 倍细分下标称误差 0.2% 内,符合转动精度要求,排除了电机自身精度及测速程序对传动误差的影响。传动结构部分采用了 10:1 行星减速器、十字万向节联轴器、传动通轴等,查阅相关文献得知各传动零部件均不会导致出现稳定在 -5% 左右的误差,则此稳定误差为系统误差。如表 5 所示,引入修正系数 $\alpha_z = 1.056$ 后可将传动系统误差控制在 -1% 以内,符合传动精度要求。

表 5 修正后传动精度

Tab. 5 Transmission accuracy after correcting

目标转速/ (r·min ⁻¹)	实际转速/(r·min ⁻¹)				传动误差/%
	1	2	3	均值	
50.74	50.31	50.32	50.29	50.31	-0.84
45.47	45.45	45.40	45.52	45.46	-0.04
40.19	40.02	39.88	40.44	40.11	-0.18
35.27	35.02	35.13	34.99	35.05	-0.60
29.79	29.46	29.80	29.27	29.51	-0.94
25.04	24.91	24.83	25.05	24.93	-0.45
22.74	22.70	22.35	22.53	22.53	-0.92
15.16	14.83	14.94	15.27	15.02	-0.93
10.05	10.11	9.92	9.96	10.00	-0.51

4.2.2 控制响应时间试验

表 6 为控制响应时间试验结果。以 15 r/min 为基准转速,当速度增量为 5、10、15、20、25、30、35 r/min 时,响应时间均不大于 73 ms。

4.2.3 电机调速频率

电机的控制响应时间为 73 ms,则最高电机调速频率为 13.7 Hz,北斗接收器刷新信息的频率为 1 ~

10 Hz,编码器测速频率可在较大范围实现。

表 6 控制响应时间
Tab.6 Control response time

转速变化量/ ($r\cdot\min^{-1}$)	响应时间/ms				最长响应 时间/ms
	1	2	3	4	
5	61	63	71	25	71
10	73	27	43	43	73
15	45	49	70	59	70
20	17	61	27	42	61
25	72	47	46	42	72
30	72	61	66	44	72
35	72	57	66	67	72

考虑到低功耗蓝牙传输速率较低,北斗接收器测速时间间隔越长越准确,故确定电机控制速率为 5 Hz。

5 试验

5.1 台架试验

5.1.1 试验方法

利用华中农业大学 JPZS-16 型数字化三轴振动排种器性能测试试验台开展排种性能测试。利用编码器配合跑米轮测量试验台传送带速度,作为电机控制的速度源,引出 ADC 信号线接不同电压模拟实时负压。

试验过程中,设置目标粒距为 60、80 mm 共 2 个水平,使用同一个一器双行正负气压组合式油菜精量排种器,对照组由恒定转速的电机驱动(此恒定转速由传送带速度结合目标粒距反推),试验组为由编码器作为速度源的随速播种控制系统,试验具体配置如图 11 所示。

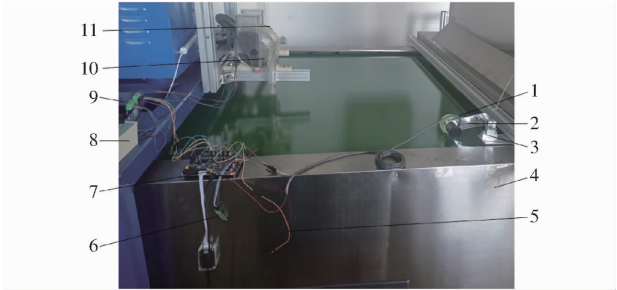


图 11 台架试验配置图

Fig. 11 Diagram of bench experiment configuration

1. 200 mm 跑米轮 2. 编码器 3. 同步支架 4. JPZS-16 型数字化三轴振动排种器性能测试试验台 5. ADC 信号输入线 6. 蓝牙模块 7. 控制板 8. 脉冲发生器 9. 步进电机驱动器 10. 一器双行正负气压组合式油菜精量排种器 11. 步进电机

以传送带不同速度为单一变量,设置传送带速度为 2.6、3.9、5.1、5.9、7.8 km/h 共 5 个水平,保持试验组与对照组正、负气压一致,所用电机、电源、驱

动器等一致,利用排种试验台检测排种性能。

5.1.2 试验结果与分析

依据 NY/T 503—2015《单粒(精密)播种机作业质量》进行数据处理与评价。台架试验结果如表 7 所示。

表 7 随速播种控制系统台架试验结果
Tab.7 Bench experiment results of speed-dependent control system

驱动方式	目标粒距/ mm	速度/ ($\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$)	粒距合格 指数/%	漏播指数/ %
定转速驱动	60	2.6	91.37	5.38
		3.9	91.46	6.19
		5.1	89.77	6.33
		5.9	88.71	4.63
		7.8	87.12	9.64
	80	2.6	93.69	3.64
		3.9	92.56	4.86
		5.1	92.77	4.94
		5.9	90.53	7.22
		7.8	88.76	6.81
随速驱动	60	2.6	92.17	5.16
		3.9	91.63	4.93
		5.1	90.38	7.11
		5.9	90.19	6.54
		7.8	90.55	6.79
	80	2.6	95.36	3.16
		3.9	93.87	3.84
		5.1	95.62	2.66
		5.9	93.26	3.25
		7.8	92.54	4.79

5 个速度水平下,目标粒距为 60 mm 时,试验组的粒距合格指数均优于对照组且均大于 90%;目标粒距 80 mm 时,试验组的粒距合格指数均优于对照组且均大于 92%;且速度在 2.6~7.8 km/h 范围内变化时,试验组均自动适应不同速度,表明随速播种控制系统满足设计要求且优于传统定转速驱动。

5.2 田间试验

5.2.1 试验方法

为验证系统的作业效果,于 2021 年 10 月 8 日在华中农业大学现代农业种植示范基地进行油菜精量播种田间试验。配套动力为东方红 954 型拖拉机、播种油菜品种为华油杂 62,使用搭载本系统的 2BFQ 系列油菜精量直播机进行播种试验,所用排种器为一器双行正负气压组合式油菜精量排种器,如图 12 所示。试验目标粒距为 60 mm,速度水平设置为慢 1、慢 2、慢 3、慢 4、中 2,其中慢 1、慢 2 速度低于 3.7 km/h,以地轮编码器作为速度源,慢 4、中 2 速度高于 3.7 km/h,以北斗接收器作为速度源,慢 3

速度在 3.7 km/h 上下跳动,以两种速度接收器作为速度源,并根据实时速度自行切换,播种作业及出苗效果如图 12a、12b 所示。

为验证随速播种控制系统对其他类型排种器的适用性,于 2021 年 9 月 28 日开展精量穴播田间

试验。如图 12c 所示,试验地点、配套动力及油菜品种与 10 月 8 日单粒精播田间试验一致。所用排种器改为小粒径种子精量穴播集排器,采用光电传感器判断播种机进入播种位置、控制电机使能开关。

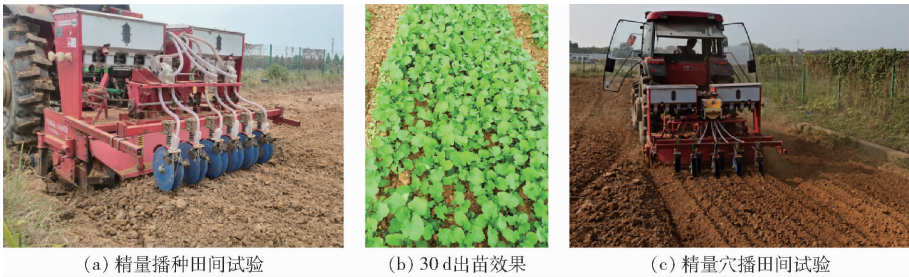


图 12 田间试验及出苗效果

Fig. 12 Diagram of field experiment and sprouting consequent

5.2.2 试验结果与分析

精量播种田间试验前,对播量进行统计测试,分别以慢 1、慢 2、慢 3 的前进速度进行播种,目标粒距 60 mm,厢面长度 54 m,统计 6 行总播量分别为 30.04、30.52、30.51 g,测量得华油杂 62 千粒质量为 5.44 g,每行播种粒数分别为 920、935、935 粒。计算得 54 m 厢面长、60 mm 粒距对应的理论粒数为 900 粒,播种量误差分别为 2.26%、3.89%、3.86%,满足精量播种播量误差国标要求。

单粒精播田间试验数据处理和评价依据 NY/T 2709—2015《油菜播种机作业质量》,将粒距合格率、播种均匀性变异系数作为本系统的性能指标。

播后 30 d 时,按照《油菜播种机作业质量》要求,5 种速度水平下的性能指标如表 8 所示。可得出本系统能够适应不同排种系统在作业速度 1.44 ~ 7.99 km/h 区间内实现播量和粒距稳定,且后

期出苗效果良好,满足设计要求。

精量穴播试验结果证明,随速播种控制系统可通过微信小程序修改参数,搭配小粒径种子精量穴播集排器进行随速播种,具有较好的适用性。

6 结论

(1)设计了基于北斗接收器和地轮编码器测速的油菜随速播种控制系统,标定了吸附种子临界负压、电机调速频率、地轮编码器与北斗接收器两种测速方式不同速度下的测速误差。试验结果表明吸附种子临界负压为 1 477 Pa;电机调速频率为 5 Hz;地轮编码器在 1.44 ~ 3.78 km/h 时,滑移率最大为 5.90%,速度修正系数为 1.063;北斗接收器在 3.67 ~ 12.77 km/h 时速度误差为 - 3.24% ~ 3.4%;两种测速方式的速度源切换临界速度为 3.7 km/h。

(2)油菜随速播种控制系统播种与定转速播种的台架对比试验结果表明:本系统播种粒距合格指数高于定转速播种,且播种速度在 2.6 ~ 7.8 km/h 内变化时,本系统均可自动适应速度变化控制播种粒距。

(3)开展了以油菜随速播种控制系统驱动小粒径种子精量穴播集排器和一器双行正负气压组合式油菜精量排种器播种的田间试验,试验结果表明,本系统可适用于不同排种器,满足作业速度 1.44 ~ 7.99 km/h 时随速播种要求,且播量和粒距稳定,出苗效果良好,满足设计要求。

表 8 粒距合格率及播种均匀性变异系数试验结果

Tab. 8 Statistics of qualified rate of seeding spacing and coefficient of variation of seeding uniformity

拖拉机速度/ (km·h ⁻¹)	播种粒距/ mm	粒距合格率/ %	播种均匀性 变异系数/%
1.44	60	92	12.03
2.88	60	89	12.98
3.78	60	90	15.93
5.89	60	87	14.60
7.99	60	84	16.67

参 考 文 献

[1] 万星宇,廖庆喜,廖宜涛,等. 油菜全产业链机械化智能化关键技术装备研究现状及发展趋势[J]. 华中农业大学学报, 2021, 40(2): 24 - 44.
WAN Xingyu, LIAO Qingxi, LIAO Yitao, et al. Situation and prospect of key technology and equipment in mechanization and intelligentization of rapeseed whole industry chain[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2021, 40(2): 24 - 44. (in Chinese)
[2] CAY A, KOCABIYIK H, MAY S. Development of an electro-mechanic control system for seed-metering unit of single seed corn

- planters Part I: design and laboratory simulation[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2018, 144:71–79.
- [3] 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)
- [4] 李洪昌,高芳,赵湛,等. 国内外精密排种器研究现状与发展趋势[J]. 中国农机化学报,2014,35(2):12–16,56.
LI Hongchang, GAO Fang, ZHAO Zhan, et al. Domestic and overseas research status and development trend of precision seed-metering device[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2014,35(2):12–16,56. (in Chinese)
- [5] 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)
- [6] 丛锦玲,余佳佳,曹秀英,等. 油菜小麦兼用型气力式精量排种器[J]. 农业机械学报,2014,45(1):46–52.
CONG Jinling,YU Jiajia,CAO Xiuying, et al. Design of dual-purpose pneumatic precision metering device for rape and wheat[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2014,45(1):46–52. (in Chinese)
- [7] 曹秀英,廖庆喜,丛锦玲,等. 离心式油菜精量排种器型孔结构设计与试验[J]. 农业机械学报,2014,45(增刊):40–46.
CAO Xiuying,LIAO Qingxi,CONG Jinling, et al. Design and experiment on metering hole structure of centrifugal precision metering device for rapeseed[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2014,45(Supp.):40–46. (in Chinese)
- [8] 林来福,廖庆喜. 2BFQ-6 型油菜精量联合直播机变量播种机构的设计[J]. 华中农业大学学报,2011,30(6):775–779.
LIN Laifu, LIAO Qingxi. Design of mechanism for variable sowing on 2BFQ-6 rape precision combined direct planter[J]. Journal of Huazhong Agricultural University,2011,30(6):775–779. (in Chinese)
- [9] 舒彩霞,付云开,王磊,等. 油菜精量直播机凸轮摇杆式播量调节机构设计与试验[J]. 农业工程学报,2020,36(10):17–25.
SHU Caixia, FU Yunkai, WANG Lei, et al. Design and experiment of cam-rocker sowing rate adjusting mechanism for rapeseed precision direct seeding machine[J]. Transactions of the CSAE,2020,36(10):17–25. (in Chinese)
- [10] 娄秀华. 精密播种机排种自动控制装置[J]. 中国农业大学学报,2004,9(2):15–17.
LOU Xiuhua. Controller for seed metering device used in precision drill[J]. Journal of China Agricultural University,2004,9(2):15–17. (in Chinese)
- [11] CAY A,KOCABIYIK H, KARAASLAN B, et al. Development of an opto-electronic measurement system for planter laboratory tests[J]. Measurement, 2017, 102:90–95.
- [12] 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)
- [13] 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)
- [14] 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)
- [15] 颜丙新,付卫强,武广伟,等. 基于卫星定位的玉米高位精播种子着床位置预测方法[J]. 农业机械学报,2021,52(2):44–54.
YAN Bingxin, FU Weiqiang, WU Guangwei, et al. Seed location prediction method of maize high-height precision planting based on satellite positioning[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2021,52(2):44–54. (in Chinese)
- [16] 孙永佳,沈景新,窦青青,等. 基于 Cortex-M3 的免耕播种机监控系统设计与试验[J]. 农业机械学报,2018,49(8):50–58.
SUN Yongjia, SHEN Jingxin, DOU Qingqing, et al. Design and test of monitoring system of no-tillage planter based on Cortex-M3 processor[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2018,49(8):50–58. (in Chinese)
- [17] 卢彩云,付卫强,赵春江,等. 小麦播种实时监控系统设计及试验[J]. 农业工程学报,2017,33(2):32–40.
LU Caiyun, FU Weiqiang, ZHAO Chunjiang, et al. Design and experiment on real-time monitoring system of wheat seeding[J]. Transactions of the CSAE, 2017,33(2):32–40. (in Chinese)
- [18] 赵金辉,刘立晶,杨学军,等. 基于 PLC 的苜蓿播种机设计与试验[J]. 农业机械学报,2016,47(增刊):84–89.
ZHAO Jinhui, LIU Lijing, YANG Xuejun, et al. Design and experiment of tef seeder based on PLC[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2016,47(Supp.):84–89. (in Chinese)
- [19] 王振华,李文广,翟改霞,等. 基于单片机控制的气力式免耕播种机监测系统[J]. 农业机械学报,2013,44(增刊1):56–60.
WANG Zhenhua, LI Wenguang, ZHAI Gaixia, et al. Monitoring system of pneumatic no-tillage sowerbased on PIC single-chip microcomputer control[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2013,44(Supp.1):56–60. (in Chinese)

- LI Tianhua, MENG Zhiwei, DING Hehe, et al. Mechanical analysis and parameter optimization of cabbage root cutting operation[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(7): 63–72. (in Chinese)
- [19] 辛尚龙, 赵武云, 戴飞, 等. 旱区全膜双垄沟播履带式玉米联合收获机的设计[J]. 农业工程学报, 2019, 35(14): 1–11.
- XIN Shanglong, ZHAO Wuyun, DAI Fei, et al. Design of crawler type corn combine harvester for whole plastic film mulching on double ridges in arid regions[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(14): 1–11. (in Chinese)
- [20] 廖宜涛, 廖庆喜, 周宇, 等. 饲料油菜薹期收获茎秆破碎离散元仿真参数标定[J]. 农业机械学报, 2020, 51(6): 73–82.
- LIAO Yitao, LIAO Qingxi, ZHOU Yu, et al. Parameters calibration of discrete element model of fodder rape crop harvest in bolting stage[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(6): 73–82. (in Chinese)
- [21] 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)
- [22] 田波平, 廖庆喜, 黄海东, 等. 2BFQ-6 型油菜精量联合直播机的设计[J]. 农业机械学报, 2008, 39(10): 211–213.
- TIAN Boping, LIAO Qingxi, HUANG Haidong, et al. Design of 2BFQ-6 precision seeder for rapeseed[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(10): 211–213. (in Chinese)
- [23] 梁晓梅, 吴玉兵, 马朝芝, 等. 不同播期和定植方式下狮山菜薹产薹特性及菜用品质分析[J]. 长江蔬菜, 2019(22): 29–33.
- LIANG Xiaomei, WU Yubing, MA Zhaozhi, et al. Analysis of characteristics and quality of Shishan flowering Chinese cabbage in different sowing dates and planting methods[J]. Journal of Changjiang Vegetables, 2019(22): 29–33. (in Chinese)
- [24] 马朝芝, 文静, 易斌, 等. 菜用甘蓝型油菜品种狮山菜薹的选育[J]. 长江蔬菜, 2019(8): 31–34.
- MA Zhaozhi, WEN Jing, YI Bin, et al. Breeding of Shishancaitai, a new rape (*Brassica napus* L.) [J]. Journal of Changjiang Vegetables, 2019(8): 31–34. (in Chinese)
- [25] 邹亮亮, 刘雪美, 李金光, 等. 基于流变特性分析的菠菜有序收获机夹持输送装置研究[J]. 农业机械学报, 2019, 50(10): 72–79.
- ZOU Liangliang, LIU Xuemei, LI Jinguang, et al. Clamping conveyer device of ordered spinach harvester based on rheological property analysis[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(10): 72–79. (in Chinese)
- [26] 马朝芝, 任生林, 周国林, 等. 播种期对狮山菜薹摘薹始期的影响[J]. 长江蔬菜, 2020(4): 43–46.
- MA Zhaozhi, REN Shenglin, ZHOU Guolin, et al. Effects of sowing date initial picking period of *Brassica napus* L. cultivar Shishancaitai[J]. Journal of Changjiang Vegetables, 2020(4): 43–46. (in Chinese)
- [27] 陈永海. 薹油两用油菜不同时期摘薹对产量性状及经济效益的影响[J]. 安徽农学通报, 2016, 22(15): 50–51.
- CHEN Yonghai. Effects of bolting at different stages on yield traits and economic benefits of oilseed rapeseed[J]. Anhui Agronomy Science Bulletin, 2016, 22(15): 50–51. (in Chinese)

(上接第 58 页)

- [20] 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(Suppl.): 155–163. (in Chinese)
- [21] 张世卓. 基于微信小程序的智能储物柜控制系统设计[D]. 大连: 大连交通大学, 2020.
- ZHANG Shizhuo. Design of intelligent storage cabinet control system based on Wechat Mini Program[D]. Dalian: Dalian Jiaotong University, 2020. (in Chinese)
- [22] 蒋晶, 蒋东方, 高航. 高可靠性增量式光电编码器接口电路设计[J]. 测控技术, 2009, 28(2): 1–4.
- JIANG Jing, JIANG Dongfang, GAO Hang. A high accuracy interface circuit design for incremental photoelectric encoder[J]. Measurement & Control Technology, 2009, 28(2): 1–4. (in Chinese)
- [23] 杨松, 廖庆喜, 陈立, 等. 2BFQ-6 型油菜精量联合直播机播种油菜的田间植株分布规律[J]. 农业工程学报, 2011, 27(12): 23–28.
- YANG Song, LIAO Qingxi, CHEN Li, et al. Distribution of rapeseed sowed by 2BFQ-6 precision planter[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(12): 23–28. (in Chinese)
- [24] 范超毅, 范巍. 步进电机的选型与计算[J]. 机床与液压, 2008(5): 310–313, 324.
- FAN Chaoyi, FAN Wei. Selection and calculation of stepping motor[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2008(5): 310–313, 324. (in Chinese)
- [25] 钱德俊, 张哲, 胡晨. NMEA0183 协议解析[J]. 电子器件, 2007(2): 698–701.
- QIAN Dejun, ZHANG Zhe, HU Chen. On parsing of NMEA0183 protocol[J]. Chinese Journal of Electron Devices, 2007(2): 698–701. (in Chinese)