

基于 GPS 测速的电驱式玉米精量播种机控制系统

丁友强 杨 丽 张东兴 崔 涛 和贤桃 钟翔君

(中国农业大学工学院, 北京 100083)

摘要: 传统玉米精量播种机多采用地轮、链条驱动排种器,高速作业时因地轮打滑、链条跳动易造成播种粒距增大、粒距均匀性下降等问题,难以保证播种质量。针对这一问题,设计了基于 GPS 测速的电驱式玉米精量播种机控制系统,该系统以 STM32 为主控制器,采用 Android 手机终端设置播种株距、排种盘型孔数等作业参数,采用 GPS 接收器采集拖拉机的前进速度,根据 GPS 提供的速度信息实时调节排种器转速,从而实现排种器转速与拖拉机前进速度的实时匹配。为了检测该系统的性能,以编码器测速方式为对照,进行了 3 种株距(18、22、25 cm)、5 种作业速度(4、6、8、10、12 km/h)下的对比试验。试验结果表明,在相同株距、相同作业速度下,GPS 测速方式的变异系数小于编码器测速方式,且 GPS 测速方式的播种粒距合格指数和变异系数受作业速度的影响更小。在低速 4 km/h 时,GPS 测速方式的平均合格指数比编码器测速方式低 5.39 个百分点;作业速度 6~10 km/h 时,GPS 测速方式的平均合格指数比编码器测速方式高 7.96 个百分点;在高速 12 km/h 时,GPS 测速方式的平均合格指数比编码器测速方式高 14.32 个百分点;表明 GPS 测速方式更适宜于高速作业工况。

关键词: 玉米精量播种机; GPS 测速; 编码器测速; 电驱式; 控制系统

中图分类号: S24 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2018)08-0042-08

Control System of Motor-driving Maize Precision Planter
Based on GPS Speed Measurement

DING Youqiang YANG Li ZHANG Dongxing CUI Tao HE Xiantao ZHONG Xiangjun

(College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: Traditional precision maize planters mostly use land wheel to drive or measure speed, the phenomenon of land wheel slippage and chain hopping is easy to occur under high-speed operation conditions, so it's difficult to ensure the seeding quality. In allusion to the problems mentioned above, a control system of motor-driving maize precision planter based on GPS speed measurement was proposed. Different from traditional maize precision planters' control system, in the new control system, STM32 was utilized as the MCU, Android-powered devices were adopted to set seeding parameters, GPS receivers were used to collect the tractor's working speed, the rotational speed of motor would vary with the tractor's working speed in real time, and then the sowing axis' rotational speed would match the tractor's working speed dynamically. To check up the performance of the new control system, the comparison test was carried out at three plant spacings of 18 cm, 22 cm and 25 cm, and five speeds of 4 km/h, 6 km/h, 8 km/h, 10 km/h and 12 km/h. The field experiment results demonstrated that distance variation coefficient of the control system based on GPS was less than control system based on encoder under the same experimental conditions, sowing qualified index and distance variation coefficient of the control system based on encoder was more predominantly affected by working speed than control system based on GPS. Under different plant spacing conditions, the average sowing qualified index of the control system based on GPS was 5.39 percentage points lower than that of the control system based on encoder while working speed was 4 km/h. Increased working speed to 6~10 km/h, the GPS mode was 7.96 percentage points higher than that of encoder mode. When the working speed was risen to 12 km/h, the GPS mode was 14.32 percentage points higher than that of encoder mode.

Key words: precision maize planter; GPS speed measurement; encoder speed measurement; motor driving; control system

收稿日期: 2018-04-18 修回日期: 2018-06-15

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0700703)

作者简介: 丁友强(1994—),男,博士生,主要从事农业装备智能化研究,E-mail: dyq@cau.edu.cn

通信作者: 杨丽(1975—),女,教授,博士生导师,主要从事农业装备智能化和玉米生产全程机械化研究,E-mail: yl_hb68@126.com

0 引言

玉米播种作业质量直接影响后期长势,进而影响产量^[1-2]。精量播种技术可节约良种、提高植株分布均匀度、使植株更好地利用水肥光热条件,从而实现节本增收,因此近年来已成为玉米播种的主要发展方向^[3-4]。

为实现高速精量播种,除了需性能稳定、播种精度高、适宜高速作业的排种器外,排种器的驱动方式也至关重要。传统播种机多采用地轮和链条驱动,在高速作业时易出现地轮打滑、链条跳动的现象,无法保证播种质量^[5-10]。相关学者针对以上问题进行了研究,印祥等^[11]设计了一种基于光电编码器测速的玉米精量播种机智能控制系统,实现了播种粒距和播种机作业速度的动态匹配;张春岭等^[12-13]采用雷达测速仪检测播种机实时速度,并通过编码器采集排种器实时转速进行反馈控制,提高了排种精度;HE 等^[14]提出了采用电机驱动排种器,采用编码器测速、并加入滑移率参数进行速度修正的驱动方案,提高了播种质量。但编码器测速仍然受到地轮打滑的影响,且不同地块、不同土壤条件都有不同的滑移率,不能保证修正参数的普适性,无法从根本上解决地轮打滑的问题。

针对以上问题,本文设计一种基于 GPS 测速的电驱式玉米精量播种机控制系统,采用 Android 手机终端设置播种作业参数,GPS 接收器采集播种机的前进速度,主控制器根据采集到的速度信息实时调节排种器驱动电机的转速,以期达到精量播种的目的。

1 系统整体设计和工作原理

基于 GPS 测速的电驱式玉米精量播种机控制系统主要由主控制器、Android 手机终端、GPS 接收器、直流无刷电机驱动器、直流无刷电机、减速器、排种器和信号灯组成。如图 1 所示,系统工作时,由安装在拖拉机驾驶室顶部的 GPS 接收器获取卫星报文,通过串口将报文信息传输到主控制器,主控制器从中解算出拖拉机的前进速度后,综合用户通过 Android 手机终端设置的播种作业参数配置定时器,输出相应占空比的 PWM 控制信号。在这个过程中,信号灯将以 GPS 接收报文的频率闪动,示意已成功获取卫星报文信息,电机驱动器根据接收到的 PWM 信号调整电机转速,同时采集电机实时转速,根据实际转速与理论转速的差值对电机进行闭环控制,从而实现对排种盘转速的精确控制,达到精量播种的目的。

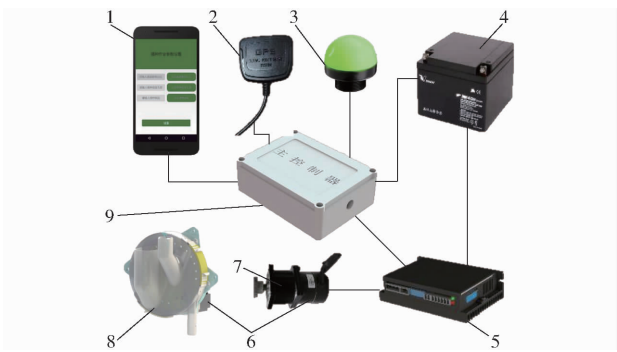


图 1 系统结构图

Fig. 1 System structural diagram

1. Android 手机终端 2. GPS 接收器 3. 信号灯 4. 拖拉机蓄电池 5. 直流无刷电机驱动器 6. 直流无刷电机 7. 减速器 8. 排种器 9. 主控制器

2 系统硬件设计

2.1 信号处理单元设计

考虑到系统未来功能的可拓展性,选择意法半导体公司生产的基于 Cortex - M3 内核的 32 位单片机 STM32F105RCT6 作为主控芯片,该单片机拥有 64k SRAM,最高运行频率 72 MHz;同时有多个定时器和多种通讯模块,性价比高,可以满足高性能、低功耗的设计要求。

2.2 信号采集单元设计

2.2.1 GPS 信号采集

GPS 接收器是采集播种机速度信息的核心部件,本系统选用上海吉度信息科技有限公司生产的 UB - 355 型 GPS 接收器,该 GPS 接收器速度精度为 0.1 m/s,最大信号更新频率 10 Hz,工作温度 - 40 ~ 80℃,冷启动时间在 26 s 之内,热启动时间仅需 1 s,以上关键参数均可满足系统需要。

由于 UB - 355 采用 RS232 串口通讯,而主控制器芯片选用 STM32F105RCT6,其片上串口电平类型为 TTL 电平,设计了图 2 中的电平转换电路,以实现二者之间的通讯。

2.2.2 作业参数采集

系统采用 Android 智能手机作为人机交互设备,用以设定株距、排种盘型孔数和传动比 3 个作业参数。

考虑到田间复杂的作业环境,采用有线通讯方式进行作业参数传输,以保证信号传输的稳定性,普通 Android 手机具有耳机、USB 两种有线通讯接口,选用耳机接口进行通讯需进行 A/D 转换,STM32 方面可借助现有的编解码芯片进行开发,而 Android 方面解调编程复杂,开发难度大,故选择 USB 口进行通讯^[15-16]。设计如图 2 所示的 USB 通讯电路,其核心为 CH9343 芯片,该芯片针对 USB Android 手机终端提供了 GPIO、PWM、UART、SPI Master、SPI

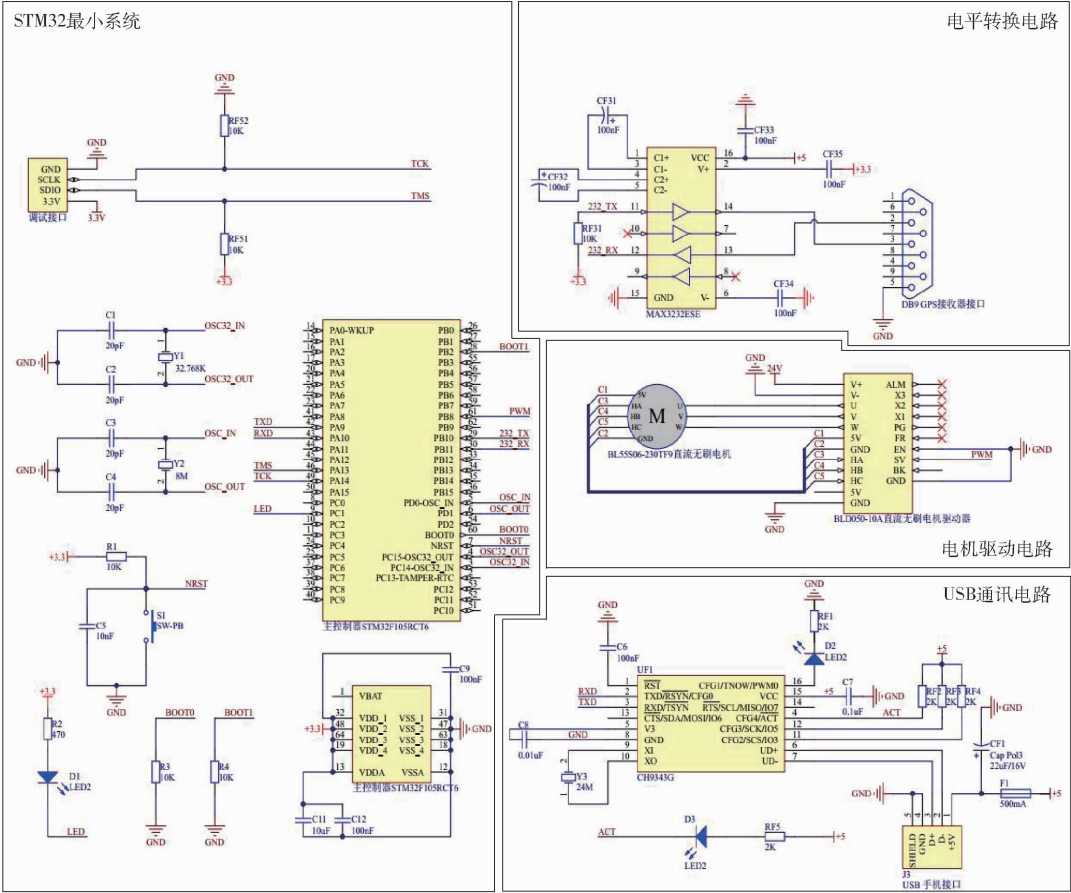


图 2 控制系统原理图

Fig.2 Schematic diagram of control system

Slave 及 I²C 主机共 6 种模式,可以通过配置 CFG2、CFG3、CFG4 3 个引脚的电平选择 CH9343 的工作模式^[17-18],这里将 3 个引脚都配置为高电平,使其工作在 UART 模式。

2.3 排种器驱动单元设计

排种器驱动单元主要由直流无刷电机驱动器、直流无刷电机、减速器以及排种器组成。本试验中选用中国农业大学研制的气压组合孔式玉米精量排种器(图 3),该排种器在作业速度达到 10.9 km/h 时,仍能保证 95% 以上的合格率^[19-20];根据最大作业速度和株距,选择减速器传动比为 10;直流无刷电机驱动扭矩为

$$M_1 = K \frac{M_2}{\mu_1 \mu_2} \tag{1}$$

式中 M_1 ——电机驱动扭矩,N·m

K ——安全系数

M_2 ——作业时排种器最大负荷,N·m

μ_1 ——周向传动传动比

μ_2 ——减速器传动比

本系统所用气压组合孔式玉米精量排种器作业时最大排种负荷 $M_2 = 3.72 \text{ N} \cdot \text{m}$ ^[14];周向传动传动比 $\mu_1 = 5$;减速器传动比 $\mu_2 = 10$;安全系数 K 取 2。

由式(1)计算得电机驱动扭矩为 0.148 8 N·m,选用时代超群 BL55S06-230TF9 型直流无刷电机,其额定转矩为 0.18 N·m,可满足作业要求;选用 BLD5010A 型智能直流无刷驱动器,该驱动器通过采集电机的霍尔信号判断出当前电机的实际转速,并结合目标转速进行实时调整,可实现电机转速的闭环控制,驱动器和控制系统的连接方式如图 2 中的电机驱动电路部分。

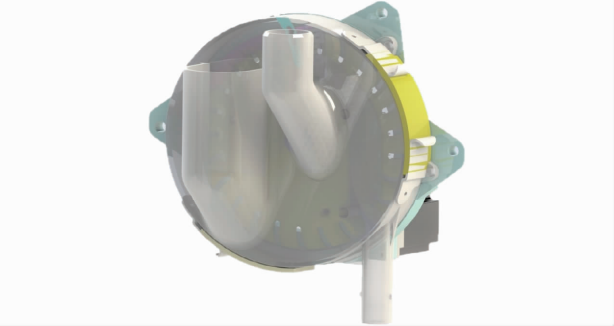


图 3 气压组合孔式玉米精量排种器

Fig.3 Pneumatic maize precision seed metering device with combined holes

3 系统软件设计

本控制系统的软件包括两部分:主控端硬件驱

动程序和 Android 手机终端人机交互程序。主控端硬件驱动程序基于 keil Vision 5 进行开发,采用 C 语言编程;Android 端人机交互程序基于 Android Studio 进行开发,采用 Java 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对来自各个单元的信息进行综合分析计算,再通过配置片上定时器输出控制信号。其整体流程如图 4 所示,系统一方面在循环中不断查询播种作业参数是否更新,另一方面根据当前播种作业参数和 GPS 接收器获取的拖拉机速度实时调整排种器驱动电机的转速。

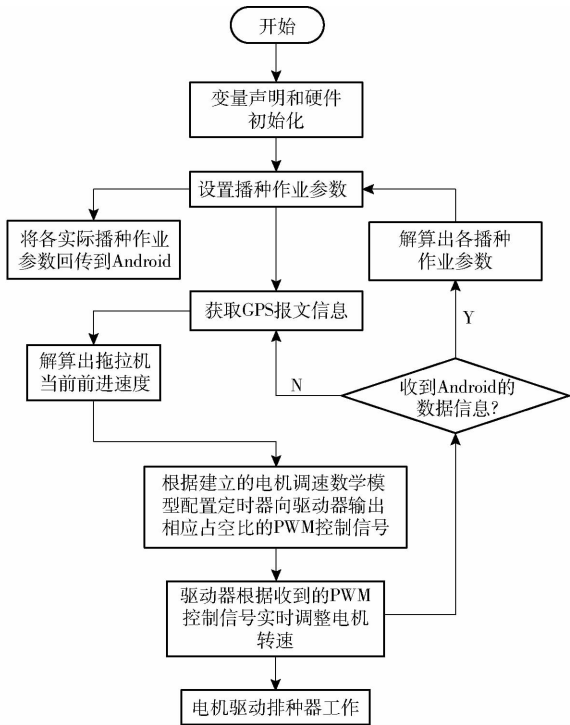


图 4 主控端整体流程图

Fig. 4 Program flow chart of overall control system

3.1.1 速度信息的获取

UB-355 输出的定位数据采用 NMEA-0183 协议,利用 ASCII 码传递信息,主要包括 GNGGA (GPS 定位信息) 帧、GNGSA (当前卫星信息) 帧、GPGSV (可见 GPS 卫星信息) 帧、GNRMC (推荐定位信息) 帧、GNVTG (地面速度信息) 帧、GNGLL (大地坐标信息) 帧。其中速度信息包含在 GNVTG (地面速度信息) 帧中,基本格式如下:

\$ GNVTG,(1),T,(2),M,(3),N,(4),K,(5)

* hh (CR) (LF)

\$ GNVTG: \$ 为帧命令起始位,GN 为识别符,VTG 为语句名;

- (1):以真北为参考基准的地面航向;
- (2):以磁北为参考基准的地面航向;
- (3):地面速率(单位:节/h);

(4):地面速率(单位:km/h);

(5):模式指示(A 为自主定位,D 为差分,E 为估算,N 为数据无效)。

可以看出,通过处理 GNVTG 帧中(4)处的数据可得到当前拖拉机的前进速度,具体流程如图 5 所示,其中 GPS 报文缓存器数组 GPS_BUFF、接收状态变量 RX_STA,GPS_BUFF 用来存储来自 GPS 接收器的报文信息,RX_STA 用以统计报文长度并作为报文是否接收完毕的标志,其次对串口 3、定时器 4、信号灯控制 IO 口等相关外设进行初始化,初始化完成后开启串口 3 的数据接收中断和定时器 4 的溢出中断,当接收到的数据超出最大长度或在接收到一节数据后连续 20 ms 未接收到下一节数据,即标记接收完成,而后查询数组 GPS_BUFF 中是否含有“\$GNVTG”字段,没有则清空 GPS_BUFF 数组继续等待数据,有则改变信号灯开关状态并返回该字段地址 p1,计算出自 p1 地址处出现第 7 个“,”字符的地址偏移 a,提取 p1+a 地址至下一个“,”字符地址间的所有字符,最后将得到的字符转换为数值即为拖拉机的前进速度,单位为 km/h。

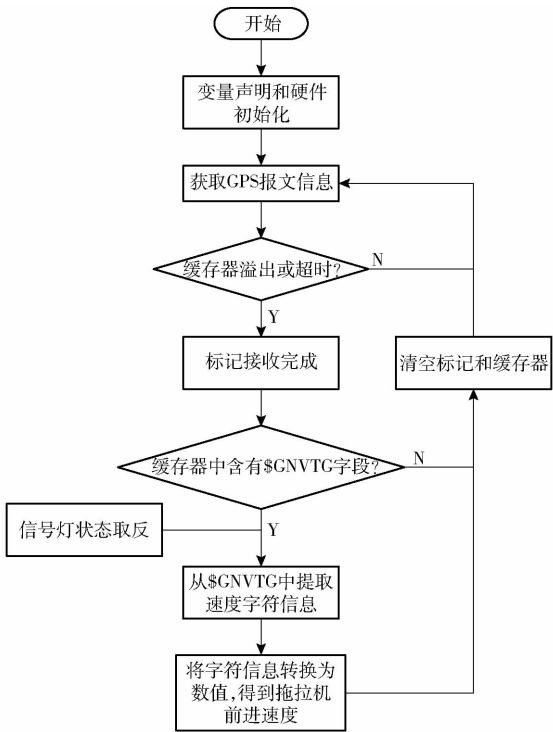


图 5 速度解析程序流程图

Fig. 5 Program flow chart of velocity computing

为了提高程序的执行效率,通过 UB-355 自带的配置软件设定接收器只接收 GNVTG 帧。

3.1.2 电机调速的数学模型

系统在工作过程中,应尽量保证作业株距和预设株距的一致性,这就要求电机转速与拖拉机前进速度动态匹配。作业距离和作业时间、拖拉机前进

速度的关系式为

$$\Delta S = \frac{1\,000v\Delta t}{3\,600}$$

(2)

式中 Δt ——任意时间间隔, s
 ΔS —— Δt 内作业距离, m
 v ——拖拉机前进速度, km/h

作业距离和作业时间、直流无刷电机转速、排种盘型孔数、预设株距的关系式为

$$\Delta S = \frac{n_1}{60\mu_1\mu_2} \frac{\ln_2\Delta t}{100}$$

(3)

式中 n_1 ——直流无刷电机转速, r/min
 n_2 ——排种盘型孔数
 l ——预设株距, cm

直流无刷电机转速、定时器捕获/比较寄存器值、自动重装载寄存器值、PWM 占空比为 100% 时的电机转速之间的关系为

$$V_{CCR} = \frac{n_1V_{ARR}}{n_{\max}}$$

(4)

式中 V_{CCR} ——定时器捕获/比较寄存器值
 V_{ARR} ——定时器自动重装载寄存器值
 $n_{\max}$ ——PWM 占空比为 100% 时电机转速, r/min

综合式(2)~(4), 可得定时器 V_{CCR} 值和拖拉机前进速度 v 的关系为

$$V_{CCR} = \frac{5\,000v\mu_1\mu_2V_{ARR}}{3\ln_2n_{\max}}$$

(5)

3.1.3 作业参数的采集和控制信号的输出

为方便解析数据, 自定义 STM32 和 Android 手机终端作业参数传输协议如下:

- $\$WKPARM, (1), (2), (3),$
 $\$$ 为帧命令起始位, WKPARM 为语句名;
(1): 播种株距;
(2): 排种盘型孔数;
(3): 传动比(周向传动传动比 μ_1 和减速器传动比 μ_2 之积)。

如图 6 所示, 主控制器上电复位后, 对相关外设进行初始化, 主要包括 DMA、串口 1 和定时器 1; 初始化完成后, 程序读取来自 Android 手机终端设置的作业参数信息, 通过 DMA 将参数信息直接存储到缓存器 Rx_Buffer 数组中, 然后查询 Rx_Buffer 数组中是否存在“\$WKPARM”字段, 没有则清空 Rx_Buffer 数组并继续接收信息, 有则返回其地址 p2; 计算出自 p2 地址处出现的第一个“,” 字符的地址偏移 b_1 , 提取 $p2 + b_1$ 地址至下一个“,” 字符地址间的所有字符, 将得到的字符转化为数值, 即得到播种株距参数; 同样方式重复两次, 得到排种盘型孔数、传

动比参数, 将 3 个作业参数回传到 Android 手机终端后, 再结合 3.1.1 节中获取的拖拉机前进速度 v , 3.2.2 节中定时器的 V_{CCR} 值即可实时调节 PWM 占空比, 实现排种器转速和拖拉机前进速度的动态匹配。

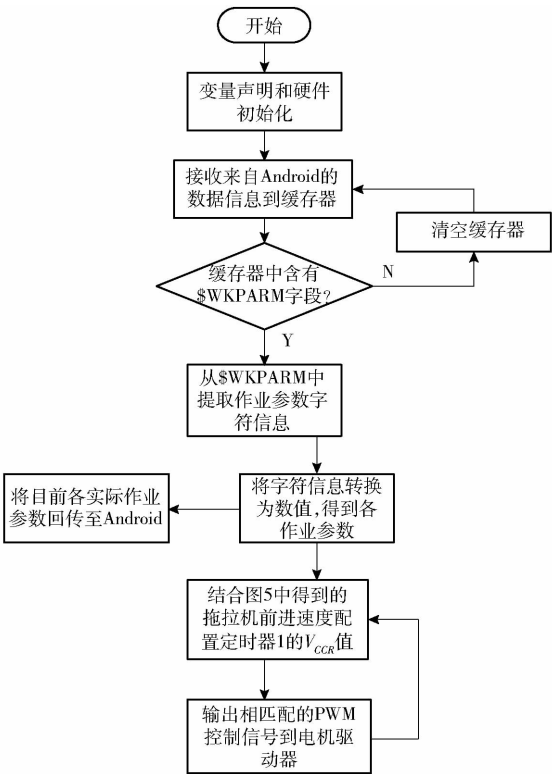


图 6 作业参数采集和控制信号输出流程图
Fig. 6 Program flow chart of capturing work parameter and outputting control signal

3.2 Android 手机终端人机交互程序

人机交互程序的主要功能是根据实际作业情况设置株距、排种盘型孔数、传动比 3 个参数。

3.2.1 功能设计

基于 CH9343 开发的 Android 人机交互程序包括接口层 (CH9343 Interface Layout) 和用户层 (User Layout) 2 个部分, 接口层中定义了 WCHUARTInterface 类, 该类中实现了 SetConfig、WriteData、ReadData 方法, 其中 SetConfig 方法用来设置 CH9343 波特率 (9 600)、数据位 (8)、停止位 (1)、奇偶校验位 (无), 考虑到系统工作时并不需要改变以上参数, 故设置为定值; 从输入界面获取到设置的作业参数之后, 按照 3.1.3 节中 STM32 和 Android 手机终端作业参数传输协议, 调用 WriteData 方法将作业参数传输到 STM32; 为了明确是否设置成功, 通过调用 ReadData 方法将作业参数再回传至 Android 手机终端, 用户通过比较回传过来的参数和目的参数是否一致决定是否需要再次设置。

3.2.2 界面设计

Android 端人机交互界面设计的原则是简洁易懂,方便操作。Genymotion 模拟软件界面如图 7 所示,左边一栏 3 个文本框分别用于输入传动比、排种盘型孔数、播种株距,输入完成后,点击设置按钮,参数信息传输至主控制器,设置成功后,右边一栏会接收到主控制器回传过来的当前传动比、排种盘型孔数、播种株距信息。



图 7 播种参数配置 APP

Fig.7 Config APP of seeding parameters

4 试验和数据分析

4.1 田间试验

为了测试系统的作业效果,对编码器测速和 GPS 测速两种作业方式进行对比试验。在同一台播种机的两个播种单体上装载两种系统,二者除控制方式不同外,其余均保持相同。将播种株距、播种速度作为试验因素,播种株距设 18、22、25 cm 3 个水平,播种速度设 4、6、8、10、12 km/h 5 个水平进行全因素试验。播种作业完成后,用人工扒种的方式将播下的种子全部扒出,随机取 3 段分别采集数据,每段连续测量 250 个株距。试验于 2017 年 11 月 17 日在河北省固安县西市村进行(图 8)。

4.2 数据分析

数据处理和评价依据中华人民共和国国家标准《单粒(精密)播种机试验方法》(GB/T 6973—

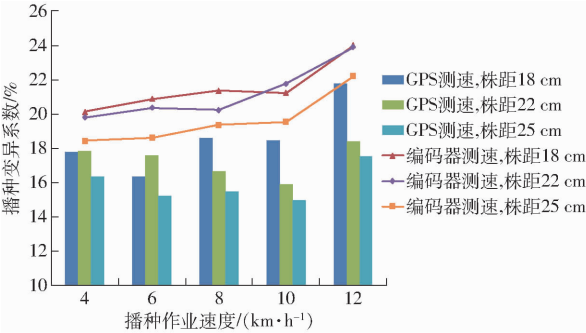


图 9 不同作业株距和作业速度下的合格指数和变异系数

Fig.9 Sowing qualified index and distance variation coefficient under different seed spacings and working speeds



(a) 编码器和GPS的安装



(b) 播种作业



(c) 数据采集

图 8 田间试验

Fig.8 Field experiment

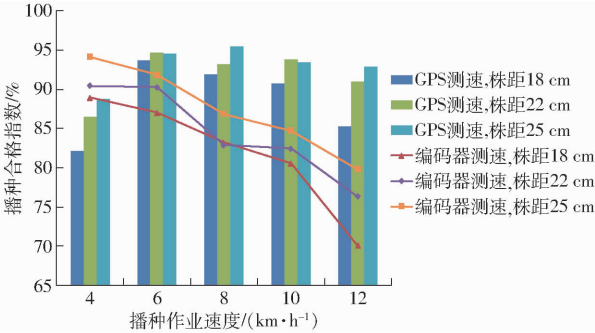
2005),将合格指数、变异系数作为评价控制系统性能指标。

两种控制方式的合格指数、变异系数随作业速度和作业株距变化的趋势如图 9 所示。可以看出:

(1)相同作业速度下,两种作业方式均表现出播种株距越大,合格指数越大,变异系数越小的趋势,在作业速度为 4 km/h 时, GPS 测速方式平均合格指数小于编码器测速方式,而其余作业速度下均大于编码器测速方式。

(2)相同作业株距下,随着作业速度的提高,编码器测速方式合格指数下降,变异系数升高;GPS 测速方式合格指数先上升后下降,变异系数先下降后上升;且 GPS 测速方式的合格指数和变异系数受作业速度的影响更小。

(3)在相同试验条件下,GPS 测速方式变异系数均小于编码器测速方式;在低速 4 km/h 时,GPS



测速方式的平均合格指数比编码器测速方式低 5.39 个百分点;作业速度 6 ~ 10 km/h 时, GPS 测速方式的平均合格指数比编码器测速方式高 7.96 个百分点;在高速 12 km/h 时, GPS 测速方式的平均合格指数比编码器测速方式高 14.32 个百分点;表明 GPS 测速方式更适宜高速作业。

5 结论

(1) 设计了基于 GPS 测速的电驱式玉米精量播种机控制系统, 系统以 STM32 单片机作为主控制器, 以 Android 手机终端作为人机交互设备, 用 GPS 接收器采集拖拉机前进速度, 建立了排种器驱动电机的调速模型, 避免了地轮打滑对播种作业造成的

影响, 进一步发挥出排种器高速作业的潜力, 改善了播种作业质量。

(2) 以作业速度和播种株距为试验因素, 以播种合格指数、变异系数为评价指标进行全因素试验, 结果表明, 在相同试验条件下, GPS 测速方式的变异系数均小于编码器测速方式; 在低速 4 km/h 时, GPS 测速方式的平均合格指数比编码器测速方式低 5.39 个百分点; 作业速度 6 ~ 10 km/h 时, GPS 测速方式的平均合格指数比编码器测速方式高 7.96 个百分点; 在高速 12 km/h 时, GPS 测速方式的平均合格指数比编码器测速方式高 14.32 个百分点; 表明 GPS 测速方式更适宜于高速作业工况。

参 考 文 献

- 1 THARP BRENT E, KELLS JAMES J. Effect of glufosinate-resistant corn (*Zea mays*) population and row spacing on light interception, corn yield, and common lambsquarters (*Chenopodium album*) growth[J]. *Weed Technology*, 2001, 15(3): 413–418.
- 2 SHAPIRO C A, WORTMANN C S. Corn response to nitrogen rate, row spacing, and plant density in eastern nebraska[J]. *Agronomy Journal*, 2006, 98(3): 529.
- 3 杨丽, 史嵩, 崔涛, 等. 气吸与机械辅助附种结合式玉米精量排种器[J/OL]. *农业机械学报*, 2012, 43(增刊): 48–53. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2012s10&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.S0.010.
- 4 YANG Li, SHI Song, CUI Tao, et al. Air-suction corn precision metering device with mechanical supporting plate to assist carrying seed[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2012, 43(Sup.): 48–53. (in Chinese)
- 5 杨丽, 颜丙新, 张东兴, 等. 玉米精密播种技术研究进展[J/OL]. *农业机械学报*, 2016, 47(11): 38–48. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20161106&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.11.006.
- 6 YANG Li, YAN Bingxin, ZHANG Dongxing, et al. Research progress on precision planting technology of maize[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(11): 38–48. (in Chinese)
- 7 董天峰, 贾洪雷, 姜鑫铭, 等. 窄行距玉米免耕播种机设计与试验[C]//2012 中国农业机械学会国际学术年会, 杭州, 2012.
- 8 刘华伟. 舵轮式破茬免耕玉米播种机研究[D]. 淄博: 山东理工大学, 2011.
- 9 LIU Huawei. The study of a helm-shaped stubble cutting no-tillage corn drill[D]. Zibo: Shandong University of Technology, 2011. (in Chinese)
- 7 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.
- 10 LOU Xiuhua. Controller for seed metering device used in precision drill[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2004, 9(2): 15–17. (in Chinese)
- 8 张喜瑞, 何进, 李洪文, 等. 水平拔草轮式玉米免耕播种机设计和试验[J]. *农业机械学报*, 2010, 41(12): 39–43.
- 9 ZHANG Xirui, HE Jin, LI Hongwen, et al. Design and experiment on no-till planter in horizontal residue-throwing finger-wheel type for maize[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2010, 41(12): 39–43. (in Chinese)
- 9 付乾坤, 荐世春, 贾洪雷, 等. 玉米灭茬起垄施肥播种机的设计与试验[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(4): 9–16.
- 10 FU Qiankun, JIAN Shichun, JIA Honglei, et al. Design and experiment on maize stubble cleaning fertilization ridging seeder[J]. *Transactions of the CSAE*, 2016, 32(4): 9–16. (in Chinese)
- 10 MOYER J R, ROMAN E S, LINDWALL C W, et al. Weed management in conservation tillage systems for wheat production in North and South America[J]. *Crop Protection*, 1994, 13(4): 243–259.
- 11 印祥, 杨腾祥, 金诚谦, 等. 玉米精量播种智能控制系统研制[J]. *农机化研究*, 2018, 40(9): 125–128.
- 12 YIN Xiang, YANG Tengxiang, JIN Chengqian, et al. Design of real-time mixing system for seed coating of forage seeds[J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2018, 40(9): 125–128. (in Chinese)
- 12 张春岭. 电控玉米排种器的设计与试验[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2016.
- 13 ZHANG Chunling. Design and test of electronic control seeding system for maize[D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2016. (in Chinese)
- 13 张春岭, 吴荣, 陈黎卿. 电控玉米排种系统设计与试验[J/OL]. *农业机械学报*, 2017, 48(2): 51–59. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170207&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.02.007.

ZHANG Chunling, WU Rong, CHEN Liqing. Design and test of electronic control seeding system for maize [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017,48(2): 51–59. (in Chinese)

14 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.

15 李皓瑜,唐荣斌. Android 设备与 STM32 单片机通信方式的研究[J]. 通讯世界, 2014(21): 37–39.

16 孔元. Android 设备与 STM32 单片机通信方式探讨[J]. 数字技术与应用, 2016(1): 31.

17 苏加斌,李红波,许鹏,等. 基于 IAP15W 和 CH9343 的手机虚拟示波器设计[J]. 电子世界,2016,495(9): 76–77.

18 姚晓通,高宇,蒋占军. 基于 Andriod 系统的 USB 数据采集系统设计与研究[J]. 计算机应用与软件,2016,33(12): 198–201.

YAO Xiaotong, GAO Yu, JIANG Zhanjun. Research and design of USB data acquisition system based on Andriod system[J]. Computer Applications and Software, 2016,33(12): 198–201. (in Chinese)

19 史嵩,张东兴,杨丽,等. 气压组合孔式玉米精量排种器设计与试验[J]. 农业工程学报,2014,30(5): 10–18.

SHI Song, ZHANG Dongxing, YANG Li, et al. Design and experiment of pneumatic maize precision seed-metering device with combined holes[J]. Transactions of the CSAE, 2014,30(5): 10–18. (in Chinese)

20 史嵩. 气压组合孔式玉米精量排种器设计与试验研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2015.

SHI Song. Design and experimental research of the pneumatic maize precision seed-metering device with combined holes [D]. Beijing: China Agricultural University, 2015. (in Chinese)

~~~~~

(上接第 419 页)

15 PANG H, SHAHINPOOR M. Inverse dynamics of a parallel manipulator[J]. Journal of Field Robotics, 2010,11(8): 693–702.

16 张东胜,许允斗,姚建涛,等. 五自由度混联机器人逆动力学分析[J/OL]. 农业机械学报,2017,48(9):384–391. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20170949&flag=1](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20170949&flag=1). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.09.049.

ZHANG Dongsheng, XU Yundou, YAO Jiantao, et al. Inverse dynamic analysis of novel 5-DOF hybrid manipulator [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2017,48(9):384–391. (in Chinese)

17 MOOSAVIAN S A A, POURREZA A, ALIPOUR K. Kinematics and dynamics of a hybrid serial-parallel mobile robot[C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2009: 1358–1363.

18 GUO W, LI R, CAO C, et al. Kinematics, dynamics, and control system of a new 5-degree-of-freedom hybrid robot manipulator [J]. Advances in Mechanical Engineering, 2016,8(11):1–19.

19 LUH J Y S, WALKER M W, PAUL R P C. On-line computational scheme for mechanical manipulators[J]. Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, 1980,102(2): 69–76.

20 李二伟,赵铁石,陈宇航,等. 一类含有虚拟转轴的新型摇摆台构型综合与分析[J]. 机器人, 2016, 38(1): 41–48.

LI Erwei, ZHAO Tieshi, CHEN Yuhang, et al. Type synthesis and analysis of a family of novel roll-pitch platform with virtual rotation axis[J]. Robot, 2016, 38(1): 41–48. (in Chinese)

21 ZHAO T, LI E, BIAN H, et al. Type synthesis and analysis of rotational parallel mechanisms with a virtual continuous axis[J]. Mechanism and Machine Theory, 2017, 109: 139–154.

22 ZHAO T, GENG M, CHEN Y, et al. Kinematics and dynamics hessian matrices of manipulators based on screw theory[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2015,28(2): 226–235.

23 同济大学数学系. 工程数学,线性代数[M]. 5 版. 北京: 高等教育出版社,2007: 71–73.

24 刘晓,赵铁石,高佳伟. 非惯性系下舰载稳定平台动力学建模及特性分析[J]. 机器人, 2014,36(4): 411–418.

LIU Xiao, ZHAO Tieshi, GAO Jiawei. Dynamic modeling and analysis of ship-based stabilizing platform in non-inertial system [J]. Robot, 2014, 36(4):411–418. (in Chinese)