

基于 Android 和 CAN 总线的玉米播种机监控系统研究

丁友强^{1,2} 刘彦伟^{1,2} 杨 丽^{1,2} 张东兴^{1,2} 崔 涛^{1,2} 钟翔君^{1,2}

(1. 中国农业大学工学院, 北京 100083;

2. 中国农业大学农业农村部土壤-机器-植物系统技术重点实验室, 北京 100083)

摘要: 设计了一种基于 Android 和 CAN 总线的玉米精量播种机监控系统,通过 GPS 接收器采集播种机速度,采用 CAN 总线分布式控制方式完成主控制器和各个播种单体之间的指令传输,通过 Android 智能设备进行人机交互,实现播种行数任意拓展、拖拉机位置实时监控、播种作业参数在线调整、作业面积实时统计等功能。台架试验结果表明,系统人机交互功能正常,排种器驱动电机调速相对误差小于 0.46%。与 eTrex209x 手持式 GPS+北斗双星接收机的田间作业面积对比试验表明,本系统作业面积统计平均相对误差为 0.81%,略高于 eTrex209x 的 0.29%,测量标准差为 0.06 hm²,优于 eTrex209x 的 0.11 hm²;与地轮驱动播种对比试验的结果表明,随着作业速度的提高两种驱动方式的作业质量整体都呈下降趋势,但本系统播种合格指数、变异系数受速度影响较小,当作业速度达到 12 km/h 时,变异系数为 18.92%,合格指数为 90.05%,分别优于地轮驱动方式的 22.17%、83.25%。

关键词: 玉米; 精量播种机; 作业监控; Android; GPS; CAN 总线

中图分类号: S24; S223.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2019)12-0033-09

Monitoring System of Maize Precision Planter Based on Android and CAN Bus

DING Youqiang^{1,2} LIU Yanwei^{1,2} YANG Li^{1,2} ZHANG Dongxing^{1,2} CUI Tao^{1,2} ZHONG Xiangjun^{1,2}

(1. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China

2. Key Laboratory of Soil - Machine - Plant System Technology, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: High speed and high precision is the development trend of maize precision planter, under the premise of ensuring the seeding quality of operation reached the national standard, the working speed of the existing pneumatic seed metering device can reach more than 12 km/h, traditional maize precision planter mostly used 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 and exert the potential of the high-speed operation of the seed meter device. In addition, the maize precision planter only has a single function, and the sowing plant spacing is mostly adjusted by gear set, so it is not possible to achieve stepless adjustment of plant spacing. A maize precision planter monitoring system based on Android and CAN bus was designed, as the system was working, the speed of the planter was collected by GPS receiver, after parsing the speed information from the GPS signal, the master controller would send the driving motor speed adjustment instruction according to the seeding operation parameters, and the command transmission between the master controller and each seeding unit was completed by CAN bus. Human machine interaction through Android smart device can realize the functions of arbitrary expansion of seeding rows, real-time monitoring of planter position, online adjustment of seeding operation parameters, and real-time statistics of working area. In order to test the performance of the system, bench test and field test were carried out respectively. The bench test results showed that the system's human-computer interaction function was normal, the position, speed and

收稿日期: 2019-05-21 修回日期: 2019-07-01

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0700703)、国家自然科学基金项目(51575515)和国家玉米产业技术体系建设项目(CARS-02)

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

working area of the planter and rotation speed of the meter can be displayed correctly. The relative error of the metering drive motor speed regulation was less than 0.45%. Field comparison test with area measurement of eTrex209x handheld GPS + Beidou binary receiver showed that the statistical average relative error of the operating area of the system was 0.81%, which was inferior to that of 0.29% of eTrex209x, and the measurement standard deviation was 0.06 hm², which was better than 0.11 hm² of eTrex209x; ground-driven seeding comparison test was carried out at plant spacing of 21 cm, and five speeds of 4 km/h, 6 km/h, 8 km/h, 10 km/h and 12 km/h, the test results showed that the quality of the two driving modes was decreased with the increase of the working speed, but the qualified index and distance variation coefficient of the system were less affected by the speed than ground wheel drive mode, when the operating speed reached 12 km/h, the distance variation coefficient did not exceed 18.92%, and the qualified index was 90.05%, which was better than that of 22.17% and 83.25% of the ground wheel drive mode.

Key words: maize; precision planter; planter position monitoring; Android; GPS; CAN bus

0 引言

作为玉米生产的关键环节,播种作业的质量直接影响后期产量^[1-4]。当前,主要通过精量播种技术提高播种质量,玉米精量播种技术是将定量的良种按照农艺要求的株距、行距和播种深度进行穴播,同时深施底肥的机械化种植技术^[5],该技术可以提高玉米植株的分布均匀性,减少植株间的光照、水肥竞争,进而提高产量^[6-7]。

精量播种机是实现玉米精量播种的关键,国外对精量播种机的研究较早,目前已由机械化转向智能化,相关产品也已投入市场。Precision Planting 公司基于 20/20 SeedSense 控制器开发的变量播种控制系统^[8-10]可根据作业处方图调整电机转速,还可以实现播种质量实时检测和精准的下压力控制;John Deere 公司的 SeedStar™2 播种控制系统^[11-12]采取多控制器协同处理的 CAN 总线分布式控制方式,具有播种质量检测、下压力控制以及变量施肥功能。国内播种机在机械性能方面与国外的差距已逐渐缩小,但在智能化方面还明显落后,实际生产中所用的玉米精量播种机大多采用地轮驱动、链条传动^[13-16],且对玉米精量播种机控制系统的研究还仅限于排种器驱动电机的调速方式上^[17-20]。高速、高精度是玉米精量播种机的发展趋势,单方面提升机械性能难以满足高速、高精度的作业要求,在现有高性能玉米精量播种机上增加监控技术可提升系统功能,提高系统性能和智能化水平,也符合精准农业的发展要求。

本文设计一种基于 Android 和 CAN 总线的玉米精量播种机监控系统,系统通过 GPS 接收器获取播种机前进速度,采用 CAN 总线分布式控制方式设定各个播种单体排种器转速,通过 Android 智能设备完成人机交互,实现播种行数任意拓展、拖拉机位置实时监控、播种作业参数在线调整、作业面积实时统

计等功能,以达到全面监测播种机实时作业状态、提高播种机智能化水平的目的。

1 系统整体结构和工作原理

如图 1 所示,玉米精量播种机监控系统由 12 V 供电电源、GPS 接收器、主控制器、Android 智能设备、CAN 总线以及单体驱动系统组成,其中单体驱动系统又包括变压器、驱动器、直流无刷电机、减速器和光电传感器。播种作业时,需要将单体驱动系统挂接到 CAN 总线接口上,其个数由播种机实际情况确定;主控制器作为整个系统的运算中心和信息枢纽,需要汇集来自系统各部分的信号,包括 GPS 接收器获取的卫星报文,Android 智能设备设置的播种作业参数,驱动器反馈的电机状态信息,综合各部分信息后,主控制器一方面将各行电机转速指令上传至 CAN 总线供驱动器驱动直流无刷电机完成播种作业,另一方面将拖拉机位置、速度、作业面积,排种器转速等信息通过 USB 线发送至 Android 智能设备,供驾驶员了解当前作业状态,在上述过程中,主控制器面板上的 GPS 信号灯和 USB 通讯指示灯会以相应频率闪动,以明确系统各部分是否正常工作。

2 硬件设计和器件选型

2.1 主控制器电源电路设计

电源电路主要由两级降压模块组成,前一级降压模块采用 LM2596-5.0 型开关电压调节器,用于将拖拉机车载蓄电池提供的 12 V 电源降至 5 V,可满足 GPS 信号电路、USB 通讯电路的电压需求,同时加入防反接二极管和滤波电路,提高电路安全性和稳定性;后一级降压模块采用 LM1117DT-3.3 型电压调节器并辅以滤波、去耦电路将前级 5 V 电压降至 3.3 V,为 STM32 主控芯片和 CAN 收发器供电,电路结构如图 2 所示。

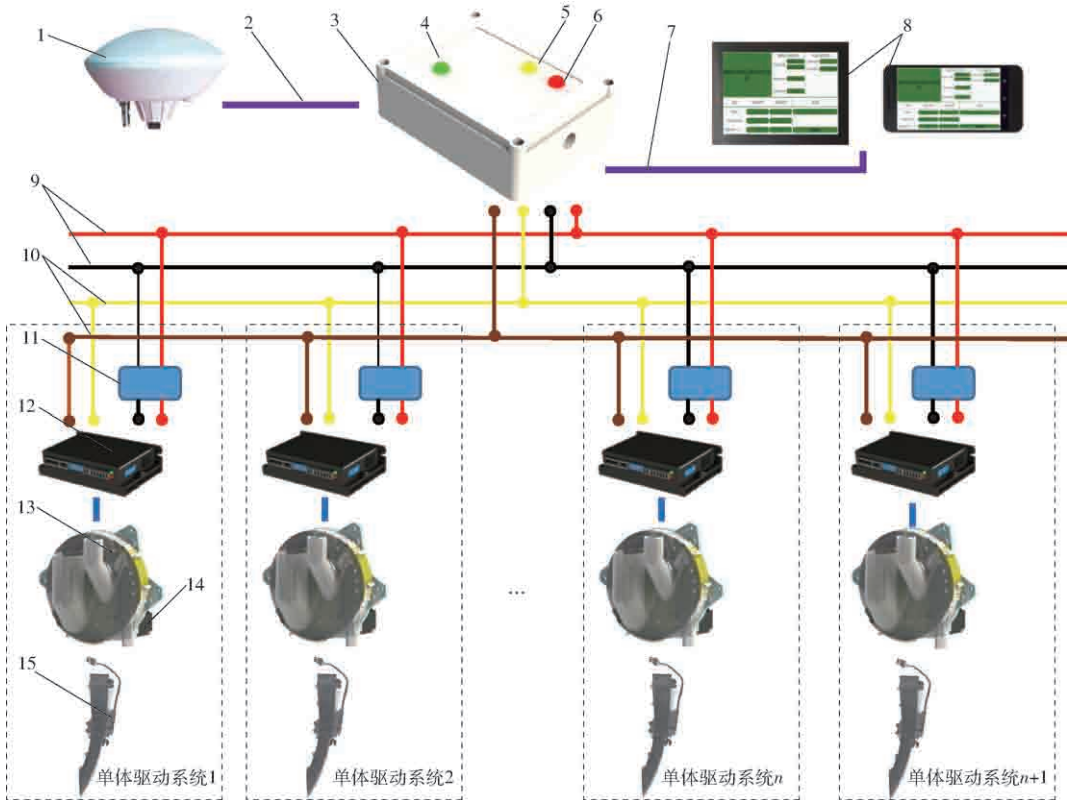


图 1 系统整体结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of system

1. GPS 接收器 2. RS232 串口线 3. 主控制器 4. GPS 信号灯 5. Android 指示灯 6. USB 通讯指示灯 7. USB 数据线 8. Android 智能设备 9. 12 V 电源线 10. CAN 总线 11. 变压器 12. 驱动器 13. 排种器 14. 直流无刷电机和减速器 15. 光电传感器

2.2 主控制器 CAN 通讯电路设计

系统采用 CAN 总线分布式控制方式,以方便根据播种机行数挂接不同的单体驱动系统个数,主控制器通过 CAN 总线和各个驱动单体进行通讯,其通讯节点由一个 CAN 控制器和一个 CAN 收发器组成,主控芯片 STM32 的 CAN 接口即为 CAN 控制器,为了构成完整节点,还需要外接一个 CAN 收发器^[21],考虑到田间作业环境,选用德州仪器公司生产的 vp230 型隔离式 CAN 收发器,该收发器可在静电干扰、电压突变和大噪声环境下正常工作,通讯电路如图 2 所示。

2.3 主控制器 USB 通讯和电平转换电路

电平转换电路负责在接收 GPS 卫星报文时将 RS232 电平转换为 STM32 可用的 TTL 电平,采用了比 MAX232 性能更稳定的 MAX3232 电平转换芯片,具备功耗低、体积小的优点;USB 通讯电路用于 STM32 和 Android 智能设备之间的通讯,其核心是一块 CH9343 型全速 USB Android Host 接口控制芯片,内置 USB 协议解析器^[22-23],可通过改变芯片接口 CFG2、CFG3、CFG4 引脚电平选择工作模式,这里将 3 个引脚都悬空,使其工作在 UART 模式。本研究是在前期研究的基础上进行的,此部分电路可靠性已通过田间试验验证^[17],故没有进行重新设计,

具体结构如图 2 所示。

2.4 主控制器面板设计

GPS 接收器、主控制器、Android 智能终端是系统的三大核心部分,能否正常工作直接影响作业质量,因此在播种机作业过程中实现 3 部分工作状态的实时监控尤为重要,将 GPS 信号灯、Android 指示灯、USB 通讯指示灯安装于主控制器面板上,以明确三者工作状态是否正常,在 Android 端人机交互界面也可以获取上述各部分的状态信息,但依靠软件实现具有延时性,从硬件上采取措施具有更高的可靠性和实时性,当系统某部分出现故障时,对应指示灯状态会立即发生变化,提醒驾驶员停机检查,减小了大面积漏播的风险。

2.5 单体驱动系统设计

驱动器电压需求为 24 V,因此需要通过变压器将车载蓄电池的 12 V 电压升至 24 V,本系统选用易稳科技 24 V、5 A 的直流变压器,具有适应性好、转化效率高的优点;为方便拓展,驱动器需具备 CAN 通讯功能,采用艾科力自动化科技有限公司开发的 ADL060-10A 型电机驱动器,该驱动器可驱动交流、无刷、有刷等不同类型的电机,直流无刷电机内置霍尔传感器,驱动器可根据霍尔传感器输出信号组合的变化频率计算出当前转速,并实现电机转速

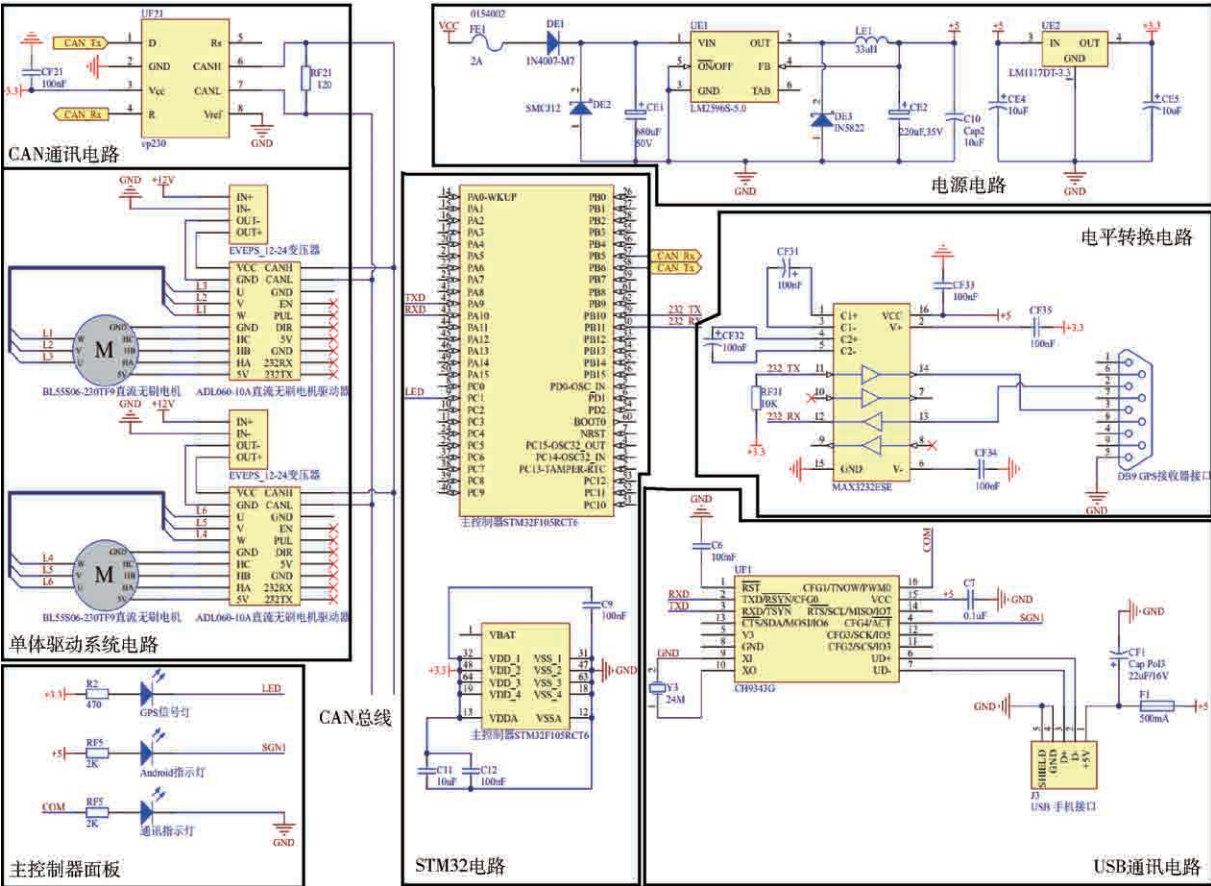


图 2 主控制器电路原理图
Fig.2 Schematic of master controller

的闭环 PID 控制,电机的转速、电流阈值可通过配套的上位机软件设定,闭环控制参数也可通过上位机软件自动整定;单体驱动系统中排种器驱动电机选用时代超群 BL55S06-230TF9 型直流无刷电机,减速器为瑞德传动科技 PL57B010A 型行星减速器,传动比为 10,其选型依据均已在前期研究中阐明^[17]。

3 软件设计

3.1 GPS 接收器静止状态下的速度漂移测定

当前电驱式播种作业的主要测速手段有编码器测速、霍尔传感器测速、雷达测速等。编码器测速无法避免高速状态下测速轮滑移、胎压变化造成测速不准的情况;霍尔传感器测速适合在水泥地上,在翻耕地上变异系数较大;雷达测速可将误差率控制在 3% 以内,但受地表状况影响较大,能提供的信息也仅限于速度一项。GPS 测速不受播种机结构、地表状况的影响,且能提供包括经纬度、航向角、高程在内的多种数据,相较于上述几种测速方式具有较大优势。

本系统在进行播种作业时,由 GPS 接收器获取播种机当前速度,在获取速度信息的过程中,会受到卫星星历误差、卫星钟差、接收器钟差、大气折射误

差以及信号的多路径效应等多种因素影响^[24-26],导致测量速度和实际速度存在差距,为衡量该误差对系统性能的影响,统计了开阔地 GPS 接收器静止状态下的速度漂移情况,采集样本数为 300 个,结果如图 3 所示,可以看出,样本中速度漂移最大值 $e_{\max} = 0.1271 \text{ m/s}$,最小值 $e_{\min} = 0.0031 \text{ m/s}$,算术平均值 $e_{\text{avg1}} = 0.0416 \text{ m/s}$;为进一步研究速度漂移的分布规律,利用 SPSS 软件对样本数据进行分析,发现其偏度系数为 0.543,峰度系数为 0.491,两者均小于 1,故可认为速度漂移近似服从正态分布,利用拉依达准则剔除稳态区间外的异常值后^[27],速度漂移平均值 $e_{\text{avg2}} = 0.0413 \text{ m/s}$,由其产生的平均株距误差公式为

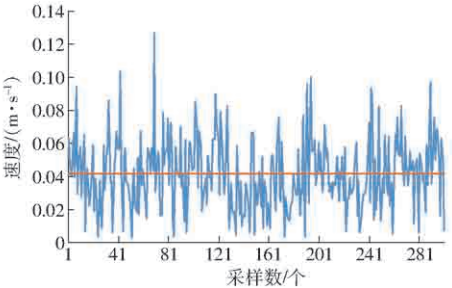


图 3 UB-355 型 GPS 接收器静止状态下的速度漂移
Fig.3 Drift velocity of UB-355 GPS receiver under stationary state

$$\Delta l = \frac{e_{\text{avg}} l}{v} \quad (1)$$

式中 Δl ——平均株距误差, cm

l ——预设株距, cm

v ——播种机当前速度, m/s

由式(1)可以看出, Δl 随着速度的增大越来越小。且同静止状态相比, GPS 接收器在动态条件下漂移情况减弱, 因此在田间实际作业时平均株距误差要小于 Δl 。

3.2 作业面积统计

为统计播种机实时作业面积, 构建了作业面积统计的数学模型, 其基本思想是对播种机速度进行时间上的积分, 计算出行驶路程后, 再乘以作业幅宽, 即可得作业面积。如图 4 所示, 横坐标为作业时间, 纵坐标为播种机速度, l_2 为 GPS 接收器获取的播种机实时速度曲线, 通过 3.1 节可知存在速度漂移, 且其最大误差 $e_{\text{max}} = 0.1271 \text{ m/s}$, 根据此误差和曲线 l_2 绘制图 4 中的 l_1 、 l_3 , 播种机实际速度曲线应介于 l_1 、 l_3 之间, 设由曲线 l_1 、 $v=0$ 、 $t=t_n$ 、 $t=0$ 所围成的曲边梯形的面积为 S_{l1} , 由曲线 l_2 、 $v=0$ 、 $t=t_n$ 、 $t=0$ 所围成的曲边梯形的面积为 S_{l2} , 由曲线 l_3 、 $v=0$ 、 $t=t_n$ 、 $t=0$ 所围成的曲边梯形的面积为 S_{l3} , 则播种机实际行驶路程 S 满足 $S_{l1} < S < S_{l3}$, S_{l3} 、 S_{l1} 、 S_{l2} 计算公式为

$$S_{l3} = \int_0^{t_n} (v(t) + |e_{\text{max}}|) dt \quad (2)$$

$$S_{l1} = \int_0^{t_n} (v(t) - |e_{\text{max}}|) dt \quad (3)$$

$$S_{l2} = \int_0^{t_n} v(t) dt \quad (4)$$

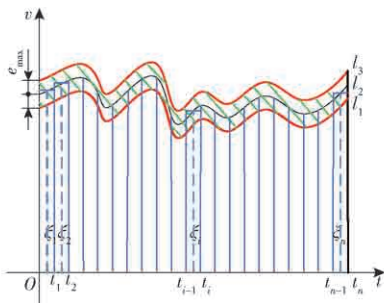


图 4 作业面积统计数学积分模型

Fig. 4 Area statistic model of worked field

联立式(2)~(4)得

$$S_{l3} = S_{l2} + |e_{\text{max}}| t_n \quad (5)$$

$$S_{l1} = S_{l2} - |e_{\text{max}}| t_n \quad (6)$$

式中 $|e_{\text{max}}|$ 为常量, 故计算出 S_{l2} , 即可得到 S_{l1} 、 S_{l3} 值, 图 4 中曲线 l_2 在区间 $[0, t_n]$ 上是连续的, 故在 $[0, t_n]$ 上可积, 考虑到 GPS 接收器接收卫星报文的频率存在上限, 必须对曲线 l_2 进行离散化处理, 可在

区间 $[0, t_n]$ 中插入若干个分点: $0 < t_1 < t_2 < t_3 < \dots < t_{i-1} < t_i < \dots < t_n$ 。将 $[0, t_n]$ 分成 n 个小区间: $[0, t_1]$, $[t_1, t_2]$, $\dots$, $[t_{i-1}, t_i]$, $\dots$, $[t_{n-1}, t_n]$ 。每个区间的长度: $\Delta t_1 = t_1 - 0$, $\Delta t_2 = t_2 - t_1$, $\dots$, $\Delta t_i = t_i - t_{i-1}$, $\dots$, $\Delta t_n = t_n - t_{n-1}$ 。设 $\lambda = \max(\Delta t_1, \Delta t_2, \dots, \Delta t_n)$, 在每个区间 $[t_{i-1}, t_i]$ 上任取一时间点 ξ_i , 由定积分定义得

$$S_{l2} = \lim_{\lambda \rightarrow 0} \sum_{i=1}^n v(\xi_i) \Delta t_i \quad (7)$$

当 λ 无限趋近于 0 时, 可得到 S_{l2} 实际值, 继而计算出 S_{l1} 、 S_{l3} 值。UB-355 型 GPS 接收器最大接收频率为 10 Hz, 所以区间最小长度为 0.1 s, 在 0.1 s 的时间里, 近似地认为播种机速度没有发生变化, 并将此作为编程依据, 其流程如图 5 所示。

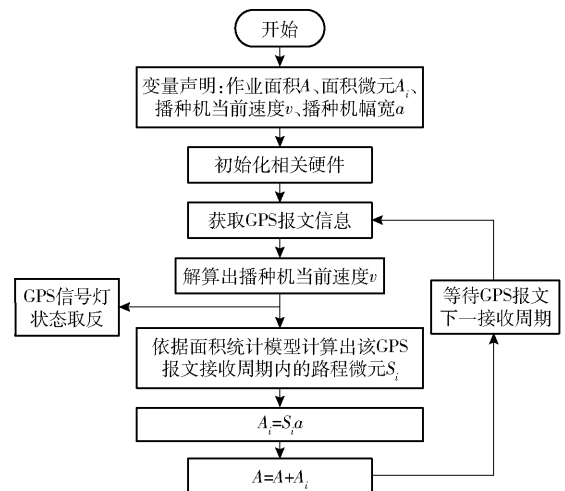


图 5 作业面积统计程序流程图

Fig. 5 Program flow chart of worked field area statistic

3.3 通讯协议定义

系统工作时, 主控制器和 Android 智能设备之间存在大量数据交互, 为保证通信速度和可靠性, 同时也为了提高软件规范性, 降低后期阅读和调试难度, 定义了如下主控制器端和 Android 端之间的通讯协议:

(1) Android 端播种作业参数设置 (AC: Android to Controller Configuration)

格式: \$ AC, P0, P1, P2, P3, P4, P5, P6, P7, P8, P9, * checksum

其中“\$”: 帧起始位; AC: 识别符; P0: 通讯协议版本; P1: 排种器驱动电机至排种器的总传动比; P2: 排种器排种盘型孔数; P3: 预设播种株距; P4~P9: 保留字段, 用于未来功能拓展; checksum: 校验和, \$ 与 * 之间所有字符异或之和。举例如下

\$ AC, V1.0, 50, 25, 20, ., ., ., ., ., * 52

其含义为这是一条由 Android 端发送至主控制器端的播种作业参数设置语句, 遵循 1.0 版本的通讯协

议,设置排种器驱动电机至排种器的总传动比为 50,排种器排种盘型孔数为 25,预设播种株距 20 cm。

(2)主控制器端播种机状态信息反馈(CA: Controller to Android message)

格式:
\$ CA, P0, P1, P2, P3, P4, P5, P6, P7, P8, P9, P10, P11, P12, P13, P14, P15 * checksum
其中“\$”:帧起始位;CA:识别符;P0:通讯协议版本;P1、P2:播种机所处位置经度、经度半球;P3、P4:播种机所处位置纬度、纬度半球;P5:播种机当前速度;P6:排种器排种盘转速;P7:已作业面积;P8~P15:保留字段,用于未来功能拓展;checksum:校验和,\$与*之间所有字符异或之和。举例如下
\$ CA, V1.0, 11640888, E, 3991553, N, 803768, 22, 237000, , , , , , , , * 4F

其含义为这是一条由主控制器端发送至 Android 端的播种机状态信息反馈语句,遵循 1.0 版本的通讯协议,当前播种机位置为东经 116.408 88°、北纬 39.915 53°,当前播种机速度为 8.037 68 km/h,排种器排种盘转速为 22 r/min,已作业面积为 0.158 hm² (2.37 亩)。

3.4 主控制器软件设计

主控制器是整个系统中功能最为复杂的部分,其软件部分主要负责实现 GPS 报文解析、CA 语句打包、AC 语句解析、排种器调速指令下发等功能。GPS 报文解析方法在前期研究中已做详细介绍,在本系统中,除了需要解析出播种机当前速度外,还需要解析出播种机当前位置经纬度坐标;CA 语句打包,是指将播种机当前速度、位置、作业参数、已作业面积以及排种器排种盘转速在内的播种机状态信息按照 3.3 节中定义的通讯协议整合成 CA 语句发送至 Android 端;AC 语句解析,是指将 Android 端设置的播种作业参数按照 3.3 节中定义的通讯协议解析出来。

$$n = \frac{5\,000v\mu}{3LN} \tag{8}$$

式中 n ——排种器驱动电机转速,r/min
 μ ——排种器驱动电机到排种器的传动比
 N ——排种器型孔数

排种器调速指令下发,是指根据解析出的播种作业参数、播种机当前速度结合公式(8)将转速指令发送至 CAN 总线上,CAN 总线上各播种单体节点接收到转速指令后由驱动器调整电机转速,保证播种株距一致。整体流程如图 6 所示。

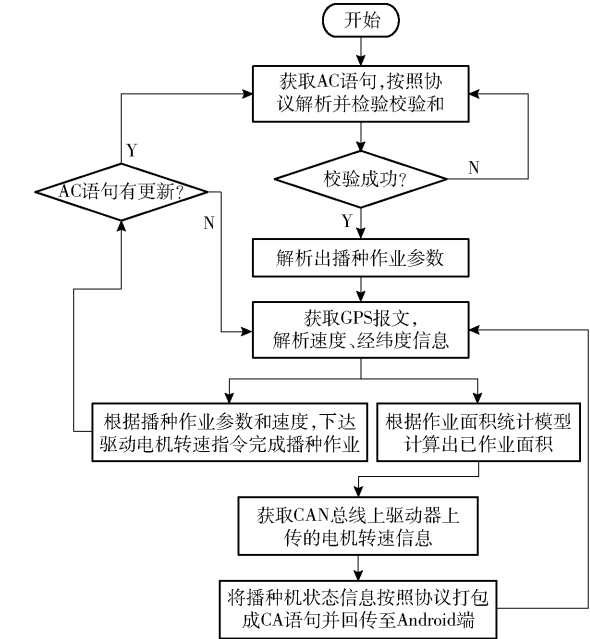


图 6 主控制器程序流程图
Fig. 6 Program flow chart of main controller

3.5 Android 端人机交互软件开发

当前 Android 智能设备已大规模普及,其优异的性能完全满足作为控制平台的需求,采用 Android 智能设备作为本系统人机交互软件载体,一方面可减少系统成本,同时也符合精准农业智能化趋势的要求。采用 Android Studio 进行开发,本系统软件可以安装在任意搭载了 Android 系统的平板或手机上,其界面如图 7 所示,作业时,通过目标参数一栏分别设置传动比、排种盘型孔数、播种株距,软件将遵循 3.3 节协议(1)将这些数据发送至主控制器,同时按照 3.3 节协议(2)将主控制器反馈的传动比、排种盘型孔数、播种株距等当前参数以及播种机位置、速度、排种盘转速、已作业面积等播种机状态信息解析出来,显示在软件界面上。



图 7 Android 端人机交互界面
Fig. 7 Human-computer interface on Android terminal

4 台架试验

台架试验能够准确控制单个变量,排除田间复杂环境对试验指标造成的可能干扰,易于评价特定因素对试验指标的影响规律。台架试验在中国农业

大学工学院精量播种实验室变量播种试验台上进行,该试验台留有 4 个电驱式排种器电机接口,采用计算机软件模拟 GPS 信号,可用于检测电驱式精量排种器作业效果,也可以检验电驱式播种机控制系统工作性能(图 8)。

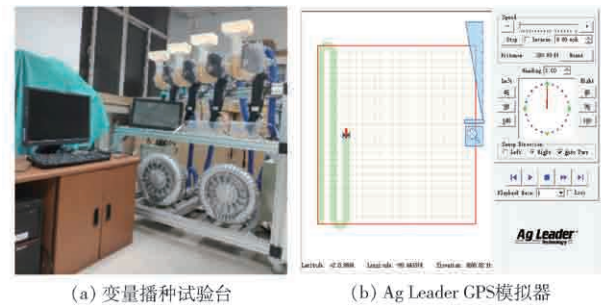


图 8 台架试验

Fig.8 Bench tests of system

4.1 系统功能试验

系统功能试验主要检测能否成功设置传动比、排种盘型孔数、播种株距等参数,以及能否根据 GPS 模拟信号正确显示播种机位置、速度、排种盘转速、已作业面积等播种机状态信息。台架试验表明,在对各个参数进行调整后,Android 端人机交互界面能够正确显示出播种机当前状态,排种器驱动电机转速也能够得到及时调整,表明系统各功能工作可靠。

4.2 排种器驱动电机调速精度试验

排种器驱动电机的调速精度是保证播种株距的基础,在实际田间作业中,播种株距除受到控制系统控制精度影响外,还会受排种器性能、导种管内种子碰撞、落种后在种床上的弹跳等多种因素的影响,通过出苗后株距的统计结果来得出控制系统控制精度存在缺陷,因此设计台架试验,统计相应作业速度下电机实际转速和理论转速的相对误差,以检验控制系统的电机调速精度,试验在传动比 50、播种株距 21 cm、排种盘型孔数 25、速度 3 ~ 18 km/h 的条件下进行,从图 9 中可以看出,电机转速相对误差均

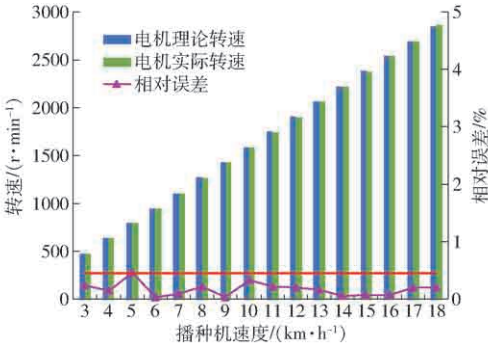


图 9 排种器驱动电机转速误差

Fig.9 Diagram of speed control precision error of drive motor

小于 0.46%,调速精度高。

5 田间试验

为了检验系统的实际性能,进行了田间试验,系统搭载在课题组研发的气力式玉米免耕精量播种机上,排种器为中国农业大学工学院研制的气压组合孔式玉米精量排种器^[28-29],由 John Deere 6B954 型拖拉机为播种机提供作业所需动力,试验于 2018 年 7 月 25 日在河北省固安县西市村进行。

5.1 作业面积统计试验

通过皮尺测得试验地块长 243 m,宽 18 m,实际面积为 0.437 3 hm²(6.56 亩),采用带有面积测量功能的中国台湾佳明公司 eTrex209x 型手持式 GPS + 北斗双星接收机进行对比试验,统计结果如表 1 所示,可以看出,本系统 3 次测量平均相对误差为 0.81%,略大于 eTrex209x 的 0.29%,在测量稳定性上,本系统测量标准差为 0.06 hm²,优于 eTrex209x 的 0.11 hm²。综合而言,本系统作业面积统计功能误差较小,可提高测量效率,降低劳动强度。

表 1 作业面积测量精度对比

Tab.1 Comparison of measurement accuracy of working area hm²

次序	本系统	eTrex209x
1	0.439 3	0.442 7
2	0.430 0	0.442 7
3	0.432 0	0.428 7

5.2 播种试验

田间试验和数据采集如图 10 所示。试验前对地块进行浅旋作业,将杂草和秸秆粉碎后混入土中,以创造良好的种床条件;所用的气力式玉米免耕精量播种机挂载有 4 个播种单体,其中 2 个播种单体采用地轮链条驱动,其余 2 个采用本系统驱动,玉米种子选用郑单 958,播种株距为 21 cm,作业速度为 4、6、8、10、12 km/h 5 个水平,采用后期出苗测株距的方式采集数据,数据处理依据 GB/T 6973—2005《单粒(精密)播种机试验方法》,将合格指数、变异系数作为评价控制系统性能的指标。

对采集的原始数据合格指数、变异系数进行方



(a) 播种作业

(b) 数据采集

图 10 田间播种试验

Fig.10 Field seeding experiments

差分析,结果如表 2 所示,可以看出,驱动方式、作业速度及其交互作用对合格指数和变异系数均有显著影响。为直观地看出两种驱动方式下速度对合格指数和变异系数的影响,绘制图 11 所示的折线图,从图中可以看出,在作业速度为 4 km/h 时,采用本系统驱动作业合格指数平均值为 94.81%,变异系数平均值为 13.59%;地轮驱动作业合格指数平均值为 94.56%,变异系数平均值为 13.42%,两种驱动方式的合格指数和变异系数均无较大差异;随着作

业速度的提高,地轮驱动作业合格指数不断下降,变异系数也逐渐增大,当作业速度达到 12 km/h 时,变异系数达到最大值 22.17%,合格指数下降到 83.25%,已低于国家标准;本系统作业合格指数在速度为 6 km/h 时达到最高,为 96.52%,之后随着速度增大而不断下降,但当速度达到 12 km/h 时,合格指数为 90.05%,变异系数为 18.92%,不难发现,在高速状态下本系统作业各指标均优于地轮驱动作业。

表 2 合格指数和变异系数双因素方差分析
Tab.2 Double factor variance analysis of qualified index and precision index

方差来源	合格指数					变异系数				
	平方和	自由度	均方	F	显著性	平方和	自由度	均方	F	显著性
作业速度	285.238	4	71.310	52.976	**	172.039	4	43.010	66.724	**
驱动方式	133.310	1	133.310	99.036	**	20.584	1	20.584	31.933	**
交互作用	36.139	4	9.035	6.712	**	11.822	4	2.955	4.585	**
误差	26.922	20	1.346			12.892	20	0.645		

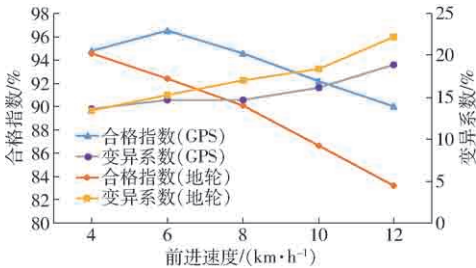


图 11 不同作业速度下的合格指数和粒距变异系数
Fig.11 Qualified index and distance variation coefficient at different working speeds

6 结论

(1)搭建了基于 Android 和 CAN 总线的玉米精量播种机监控系统,系统利用 GPS 接收器采集播种机速度,以 STM32 单片机作为主控制器核心处理芯片,负责整个系统的运算和指令下发,采用 CAN 总线分布式控制方式设定各个播种单体排种器转速,通过 Android 智能设备完成人机交互,可实现的主要功能有:播种行数任意拓展、播种机位置实时监控、播种作业参数在线调整、作业面积实时统计。

(2)对 GPS 接收器速度误差进行了分析,建立

了已作业面积积分统计模型,根据该模型设计了作业面积统计算法,与 eTrex209x 手持式 GPS + 北斗双星接收机进行了作业面积对比试验,结果表明,本系统面积测量平均相对误差为 0.81%,略高于 eTrex209x 的 0.29%,在测量稳定性方面,本系统面积测量标准差为 0.06 hm²,优于 eTrex209x 的 0.11 hm²。

(3)田间试验表明,作业速度、驱动方式及其交互作用对合格指数和变异系数均有显著影响。当作业速度为 4 km/h 时,本系统驱动作业合格指数和变异系数平均值分别为 94.81%、13.59%,地轮驱动作业合格指数和变异系数平均值分别为 94.56%、13.42%,两种驱动方式的合格指数和变异系数均无较大差异。随着作业速度的提高,两种驱动方式的合格指数和变异系数整体上都呈下降趋势,但地轮驱动作业的方式受速度影响更为显著。当作业速度达到 12 km/h 时,本系统作业合格指数为 90.05%,变异系数为 18.92%,优于地轮驱动的 83.25%、22.17%。高速作业状态下本系统作业各项指标均优于地轮驱动作业。

参 考 文 献

[1] NIELSEN R L. Effect of plant spacing variability on corn grain yield[EB/OL]. [2019-01-15]. <https://www.agry.purdue.edu/ext/corn/research/psv/Update2004.html>.

[2] NIELSEN R L. Requirements for uniform germination and emergence of corn[EB/OL]. [2019-01-15]. <http://www.agry.purdue.edu/ext/corn/news/timeless/GermEmergReq.html>.

[3] 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.

[4] DOERGE T, HALL T, GARDNER D. New research confirms benefits of improved plant spacing in corn[EB/OL]. [2018-12-29]. <http://www.pioneer.com/usa/agronomy/corn/1202.htm>.

- [5] 张东兴. 玉米全程机械化生产技术与装备[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2014.
- [6] 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.
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. 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. (in Chinese)
- [7] 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.
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(Supp.): 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. (in Chinese)
- [8] VDrive. Add capability[EB/OL]. [2018-12-21]. <http://www.precisionplanting.com/#products/vdrive/>.
- [9] You can make a real difference during planting if you can pay attention to your planter: 20/20 SeedSense Makes It Happen[EB/OL]. [2018-12-21]. <http://www.precisionplanting.com/#products/seedsense/>.
- [10] DeltaForce. Why focus on down force control[EB/OL]. [2019-1-12]. <http://www.precisionplanting.com/#products/deltaforce/>.
- [11] SeedStarTM 2 variable rate drive[EB/OL]. [2019-1-12]. http://salesmanual.deere.com/sales/salesmanual/en_NA/seeding/2010/feature/drive_system/planters/single_motor_variable_rate_drive.html?sbu=ag&link=prodcut.
- [12] SeedStarTM 2 and SeedStarTM XP monitor for planters[EB/OL]. [2019-1-12]. http://manuals.deere.com/omview/OMA104916_19/?tM.
- [13] 王庆杰, 李洪文, 何进, 等. 凹形圆盘式玉米垄作免耕播种机的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2011, 27(7): 117–122.
WANG Qingjie, LI Hongwen, HE Jin, et al. Design and experiment on concave disc type maize ridge-till and no-till planter[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(7): 117–122. (in Chinese)
- [14] 李复辉, 杜瑞成, 刁培松, 等. 舵轮式玉米免耕精量施肥播种机设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2013, 44(增刊1): 33–38.
LI Fuhui, DU Ruicheng, DIAO Peisong, et al. Design and experiment of helm-shaped no-tillage precision fertilization planter for corn[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(Supp.1): 33–38. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2013s107&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.S1.007. (in Chinese)
- [15] 戴飞, 赵武云, 唐学鹏, 等. 旱地玉米全膜覆盖双垄沟精量播种机工作参数优化[J/OL]. 农业机械学报, 2013, 44(增刊1): 39–45.
DAI Fei, ZHAO Wuyun, TANG Xuepeng, et al. Parameters optimization of precision seeder with corn whole plastic-film mulching on double ridges in dry land[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(Supp.1): 39–45. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2013s108&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.S1.008. (in Chinese)
- [16] 冉云亮. 2BMJF-4/14 型小麦玉米两用免耕播种机的设计研究[D]. 郑州: 河南农业大学, 2015.
RAN Yunliang. Design of 2BMJF-4/14 type wheat and maize dual-purpose no tillage seeding machine[D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2015. (in Chinese)
- [17] 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/OL]. 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/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(8): 42–49. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180805&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.08.005. (in Chinese)
- [18] 贾昊, 刁培松, 程卫东, 等. 基于电机直驱的玉米播种机控制系统的设计[J]. 农机化研究, 2018, 40(3): 238–242.
JIA Hao, DIAO Peisong, CHENG Weidong, et al. The design of adaptive spacing of maize no-tillage planter[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2018, 40(3): 238–242. (in Chinese)
- [19] 张振涛. 电力驱动式玉米精密播种控制系统研究[D]. 长春: 吉林农业大学, 2017.
ZHANG Zhentao. Electric drive control system of type corn precision seeding[D]. Changchun: Jilin Agricultural University, 2017. (in Chinese)
- [20] 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.
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. 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. (in Chinese)

Chinese)

- [16] 王立军,李义博,郑招辉,等.玉米收获机清选装置内杂余抛送器设计与试验[J/OL].农业机械学报,2019,50(4):124-136.
WANG Lijun, LI Yibo, ZHENG Zhaohui, et al. Design and experiment of mechanism of throwing impurity in cleaning device of maize grain harvester[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(4):124-136. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190414&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.04.014. (in Chinese)
- [17] 田阳,林静,李宝筏,等.气力式秸秆深埋还田机输送装置设计与试验[J/OL].农业机械学报,2018,49(12):36-44.
TIAN Yang, LIN Jing, LI Baofa, et al. Design and test of conveying device of pneumatic straw deep burying and returning machine[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(12):36-44. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20181205&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.12.005. (in Chinese)
- [18] 顾峰玮,胡志超,陈有庆,等.“洁区播种”思路下麦茬全秸秆覆盖地花生免耕播种机研制[J].农业工程学报,2016,32(20):15-23.
GU Fengwei, HU Zhichao, CHEN Youqing, et al. Development and experiment of peanut no-till planter under full wheat straw mulching based on “clean area planting”[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(20):15-23. (in Chinese)
- [19] 中国农业机械化科学研究院.农业机械设计手册:上册[M].北京:中国农业科学技术出版社,2007.
- [20] 徐向宏,何明珠.试验设计与 Design-Expert、SPSS 应用[M].北京:科学出版社,2010.
- [21] 刘理民,王金玉,毛文华,等.基于传感器融合阵列的果树冠层信息采集方法[J/OL].农业机械学报,2018,49(增刊):347-353,359.
LIU Limin, WANG Jinyu, MAO Wenhua, et al. Canopy information acquisition method of fruit trees based on fused sensor array[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(Supp.):347-353,359. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2018s046&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.S0.046. (in Chinese)
- [22] 杨然兵,杨红光,尚书旗,等.拨辊推送式马铃薯收获机设计与试验[J/OL].农业机械学报,2016,47(7):119-126.
YANG Ranbing, YANG Hongguang, SHANG Shuqi, et al. Design and test of poking roller shoving type potato harvester[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(7):119-126. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160717&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.07.017. (in Chinese)

(上接第 41 页)

- [21] 刘火良. STM32 库开发实战指南[M].北京:机械工业出版社,2013:212-213.
- [22] 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.
- [23] 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)
- [24] 温礼,茅旭初.基于非线性卡尔曼平滑的 GPS 定位估计方法[J]. 计算机仿真, 2007,24(12):66-69.
WEN Li, MAO Xuchu. A nonlinear Karman smoothing algorithm for improving GPS positioning precision[J]. Computer Simulation, 2007, 24(12):66-69. (in Chinese)
- [25] 王甫红,张小红,黄劲松. GPS 单点测速的误差分析及精度评价[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2007,32(6):515-519.
WANG Fuhong, ZHANG Xiaohong, HUANG Jinsong. Error analysis and accuracy assessment of GPS absolute velocity determination with SA off[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2007, 32(6):515-519. (in Chinese)
- [26] 郭爱智,王勇,刘根友,等.高频 GPS 实时单点测速误差分析[J]. 大地测量与地球动力学, 2013,33(5):34-38.
GUO Aizhi, WANG Yong, LIU Genyou, et al. Error analysis of high-rate GPS data real-time single-point velocity-determination[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2013, 33(5):34-38. (in Chinese)
- [27] 王陈陈,马明建,马娜,等.基于 GPS 的土地面积测量算法[J]. 山东理工大学学报(自然科学版), 2013,27(4):64-68.
WANG Chenchen, MA Mingjian, MA Na, et al. Research of area measurement algorithm based on GPS[J]. Journal of Shandong University of Technology(Natural Science Edition), 2013, 27(4):64-68. (in Chinese)
- [28] 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)
- [29] 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)