

陈瑜, 郑欢, 马瑞峻, 等. 基于 PLC 的拔抛秧机械手监控系统设计与试验 [J]. 华南农业大学学报, 2021, 42(5): 97-104.
CHEN Yu, ZHENG Huan, MA Ruijun, et al. Design and experiment of monitoring system for rice seedling transplanting manipulator based on the programmable logic controller[J]. Journal of South China Agricultural University, 2021, 42(5): 97-104.

基于 PLC 的拔抛秧机械手监控系统设计与试验

陈瑜, 郑欢, 马瑞峻, 郑普峰, 詹佳豪
(华南农业大学 工程学院, 广东 广州 510642)

摘要:【目的】设计一套拔抛秧机械手监控系统,以提高拔抛秧机械手设备的自动化和信息化水平。【方法】根据拔抛秧机械手工作原理,采用可编程控制器 (Programmable logic controller, PLC) 作为主控单元设计了系统的硬件电路和软件程序,采用触摸屏和组态软件设计了拔抛秧机械手的人机交互监控界面,并采用 GRM530 通讯模块、云服务器、Android 手机和 Android Studio 软件设计了远程监控系统手机 APP。该监控系统工作时,GRM530 通讯模块读取 PLC 中指定的存储器数据,通过 4G 网或 WIFI 将数据上传到云服务器内,Android 手机 APP 可直接访问并下载该云服务器中的数据,最后在 APP 中可视化地呈现出来。【结果】该监控系统工作稳定可靠,远程通信测试重复 10 次试验的丢包率均为 0,平均时延为 25 ms,表明 Android 手机 APP 客户端和拔抛秧机械手可以实现稳定可靠的双向通信。该系统的数据传输是双向的,人机交互功能正常,触摸屏和 Android 手机 APP 均能精准地反馈设备的工作状态和工作数据,用户可以通过 Android 手机 APP 对 PLC 发送控制指令,实现整个系统的监控一体化,远程控制指令响应延时低,最高响应延时不超过 0.63 s。【结论】该拔抛秧机械手监控系统可以对拔抛秧机械手工作状态和工作数据进行远程实时监控,具有良好的人机交互界面,对促进信息化与农机装备的深度融合具有一定指导意义。

关键词: 移栽机械手; PLC; 监控系统; 触摸屏; 手机 APP
中图分类号: S223.92; TP277 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-411X(2021)05-0097-08

Design and experiment of monitoring system for rice seedling transplanting manipulator based on the programmable logic controller

CHEN Yu, ZHENG Huan, MA Ruijun, ZHENG Pufeng, ZHAN Jiahao
(College of Engineering, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

Abstract: 【Objective】In order to improve the automation and information levels of rice seedling transplanting manipulator, a set of monitoring system for rice seedling transplanting manipulator was designed. 【Method】According to the working principle of rice seedling transplanting manipulator, the programmable logic controller (PLC) was used as the main control unit, and the hardware circuit and software program of the system were designed. The human-machine interaction monitoring interface of rice seedling transplanting manipulator was designed with a touch screen and the configuration software. The mobile APP for remotely monitoring system was designed with the GRM530 communication module, cloud server, Android mobile phone, and Android Studio

software. When the monitoring system was working, the GRM530 communication module read the specified memory data in the PLC and uploaded the data to the cloud server through 4G network or WIFI. Then the Android mobile APP could directly access and download the data in the cloud server. Finally, the data was presented visually in the APP. 【Result】 The monitoring system was stable and reliable. The packet loss rates of remote communication for 10 repeated tests all were 0 and the average time delay was 25 ms, which showed that the Android mobile APP client and the rice seedling transplanting manipulator could realize stable and reliable two-way communication. The data transmission of the system was bidirectional. The human-machine interaction function was normal, and the touch screen and Android mobile APP could accurately feedback the working status and data. The user could send the control instructions to PLC through the Android mobile APP to realize the monitoring and controlling integration of the whole system. The response delay of remote control command was low, and the maximum response delay was no more than 0.63 s. 【Conclusion】 The monitoring system of rice seedling transplanting manipulator can remotely monitor the working status and data of the manipulator in real-time. It has a good human-machine interaction interface and has a certain guiding significance for promoting the deep integration of informatization and agricultural machinery.

Key words: transplanting manipulator; PLC; monitoring system; touch screen; mobile APP

水稻 *Orryza sativa L.* 是中国主要的粮食作物，目前，我国水稻耕整和收获环节机械化程度较高，但种植环节机械智能化程度较低^[1-3]。农业农村部在《全国农业机械化发展第十三个五年规划》中提出，实施“互联网+”农业机械化，促进信息化与农机装备、作业生产、管理服务深度融合^[4]。因此，发展水稻机械化与智能化种植技术有助于提高我国水稻种植水平。随着物联网技术的发展，将远程控制技术融合于拔抛秧机械手设备^[5-7]，不仅可以减轻设备使用人员的工作量、降低劳动力成本，还可以提高设备作业的效率和质量^[8-9]。邵耀坚^[10]和马瑞峻等^[11-13]提出了一种 2 自由度穴盘钵苗拔抛秧机械手，通过不断改进优化进一步完善了设备的控制系统，主控单元由原来的单片机更换为更加稳定的可编程控制器 (Programmable logic controller, PLC)，增加触摸屏作为人机交互的硬件设备，并设计了良好的人机交互界面。本研究结合物联网和 Android 手机 APP 技术设计了拔抛秧机械手远程监控系统，并通过试验测试了系统的可靠性。

1 基于 PLC 的拔抛秧机械手硬件设计

基于 PLC 的拔抛秧机械手硬件设备由执行组和监控组 2 部分组成 (图 1)。执行组实物图如图 1a 所示，执行组包括左右水平运动的龙门架、竖直上下同步反向运动的 2 组机械臂和步进进给运动的秧盘传送带，这 3 个运动部件由伺服电机驱动控制；龙门架和左、右 2 组机械臂的运动限位检测由

4 个漫反射式开关传感器完成；秧盘传送带的进给运动检测由光纤式传感器完成；左、右 2 个秧夹分别与 2 组机械臂连接，秧夹的开闭状态由 2 个步进电机驱动控制，秧夹的运动轨迹为平面矩形轨迹 (2 自由度笛卡尔坐标运动)^[14]。具体工作原理可参照文献 [10-11]。监控组实物图如图 1b 所示，监控组包括 SIMAIC PLC S7-200 Smart CPU ST60、ST30 和模拟量输入模块 EM AI04 组成的控制柜，SIMAIC SMART 700 IE V3 触摸屏，用于数据传输的 GRM530 通讯模块，用于数据中转的巨控云服务器 Web 客户端以及用于接收数据和发送指令的 Android 手机 APP 客户端。

2 PLC 监控系统和软件设计

2.1 PLC 监控系统设计

2.1.1 硬件设计 马瑞峻等^[13]设计的控制系统以单片机为主控单元，该控制系统虽然能够满足拔抛秧机械手基本的控制要求，但是并没有设计显示屏等扩展模块来监测和传输设备本身的工作状态和工作数据。本文采用 PLC 作为主控器，结合触摸屏和 GRM530 通讯模块^[15-16]设计了拔抛秧机械手监控系统，既满足设备作业性能的控制要求，也实现了农机具的远程监控。监控系统硬件电路连接如图 2 所示，图中伺服电机 M0 驱动龙门架水平左右运动，伺服电机 M1 驱动左、右 2 组机械臂竖直上下同步反向运动。伺服电机运动的控制方式为指令脉冲+方向位置，即运用 SIMAIC S7-200 SMART CPU ST60 提供的 2 个数字量输出 Q0.0 和 Q0.1 产

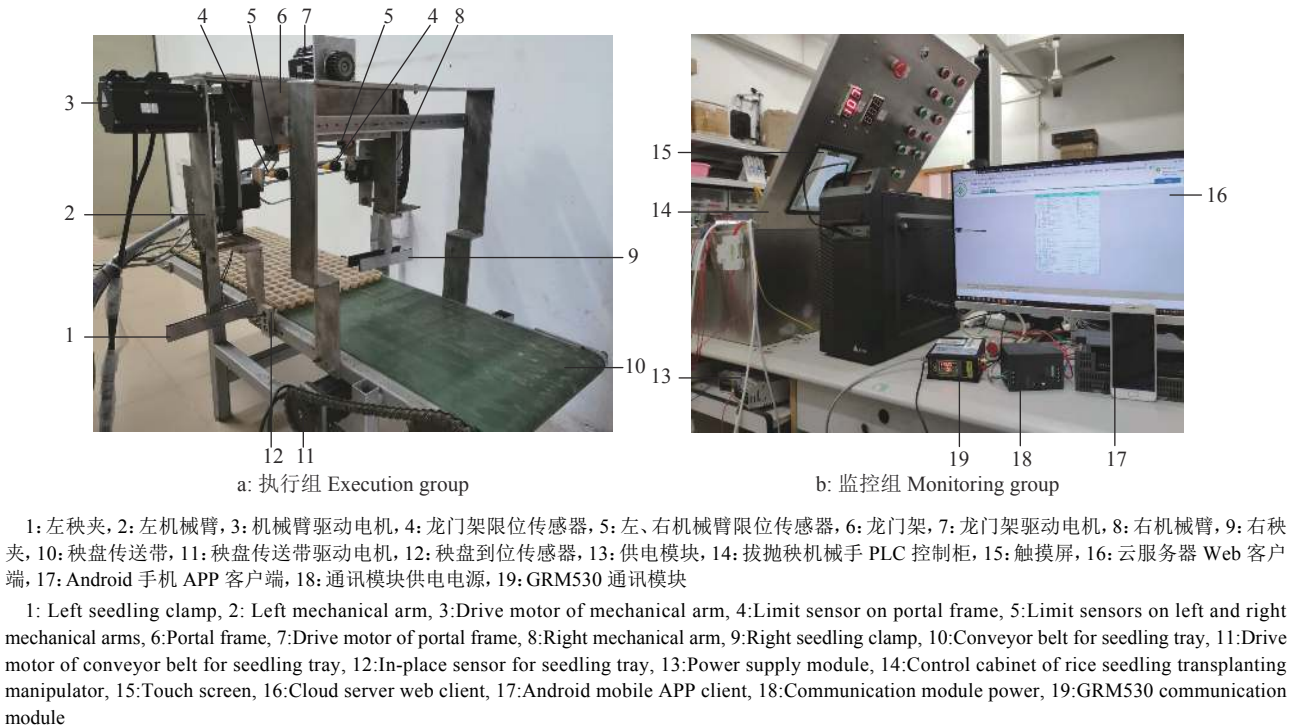


图 1 基于 PLC 的拔抛秧机械手硬件设备实物图

Fig. 1 The hardware of manipulator of rice seedlings transplanting based on PLC

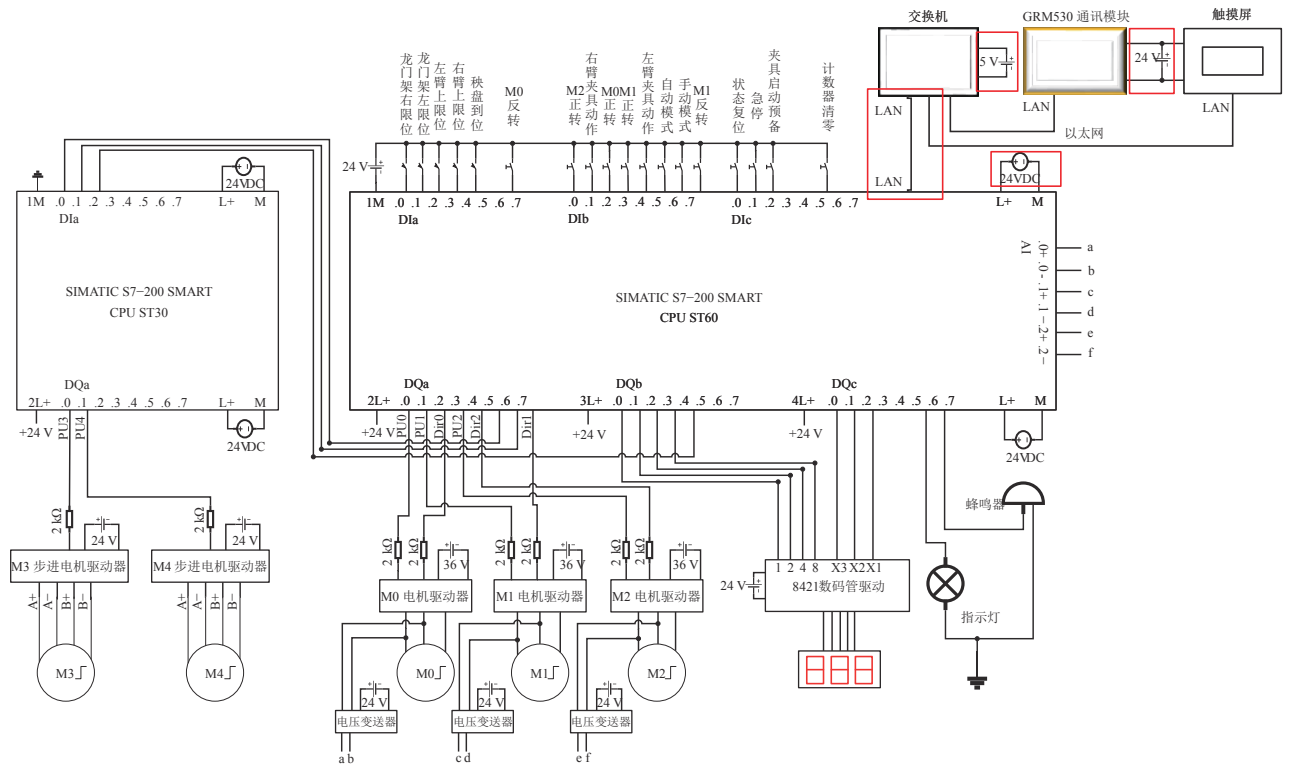


图 2 监控系统硬件电路图

Fig. 2 Circuit diagram of monitoring system hardware

生 PWM 指令脉冲, 以控制伺服电机 M0 和 M1 的旋转速度, Q0.2 和 Q0.7 控制电机的旋转方向; 龙门架左、右限位传感器 (I0.0 和 I0.1) 作为龙门架左右往复运动的停止信号, 左、右机械臂上下运动限位传感器 (I0.2 和 I0.3) 作为左、右机械臂上下往复运动的停止信号。CPU ST60 的 Q0.3 端口输出 PWM 脉冲控制伺服电机 M2 旋转, 从而驱动秧盘传送带进给运动, 由于进给运动方向不变, 故 M2 方向信

号端 Q0.4 始终为低电位, 秧盘到位传感器 (I0.4) 为秧盘传送带进给运动的停止信号。将伺服电机外接 3 个电压变送器后与 PLC 的模拟量输入模块连接, 读取伺服电机工作电压是否正常。电机工作电压异常时, 监控系统发出警报, 以防止设备长时间工作状态下, 电机 M0、M1 的不断正反转和电机 M2 的不断启动停止导致的电机过热, 从而发生电机故障。

马瑞峻等^[13]设计的拔抛秧机械手左、右 2 个秧夹的开闭由 2 个直流电磁阀驱动, 该电磁阀工作 10 min 左右就会出现过热并停止运行, 影响拔抛秧机械手的工作效率。本文的秧夹开闭状态改进为由步进电机的旋转驱动控制, 解决了之前直流电磁阀过热停机的问题。由于 CPU ST60 只有 3 个数字量输出端口可直接产生 PWM 脉冲控制电机运转, 为方便进一步控制, 引入 S7-200 SMART CPU

ST30 的数字量输出 Q0.0 和 Q0.1 产生 PWM 脉冲控制步进电机。8421 数码管驱动显示拔抛秧机械手已拔秧苗行数, 指示灯显示设备启停状态, 蜂鸣器提示伺服电机故障报警。

2.1.2 PLC 程序设计 基于 PLC 的拔抛秧机械手监控系统有 4 种控制模式, 分别是手动控制模式、自动控制模式、上位机触摸屏控制模式和 Android 手机 APP 控制模式。PLC 程序采用西门子编程软件 STEP 7-MicroWIN Smart 编写, 该平台提供 3 种程序编辑器 (梯形图、语句表和功能模块图), 本设计采用梯形图^[17]进行开发。根据拔抛秧机械手监控系统的功能分析, 运用模块化设计方式, 分功能完成 PLC 程序的编写。如图 3 所示, PLC 程序模块包括电机初始化程序、复位和急停程序、自动控制程序、电机工作电压采集程序、秧苗行计数程序、手动控制程序和报警程序。

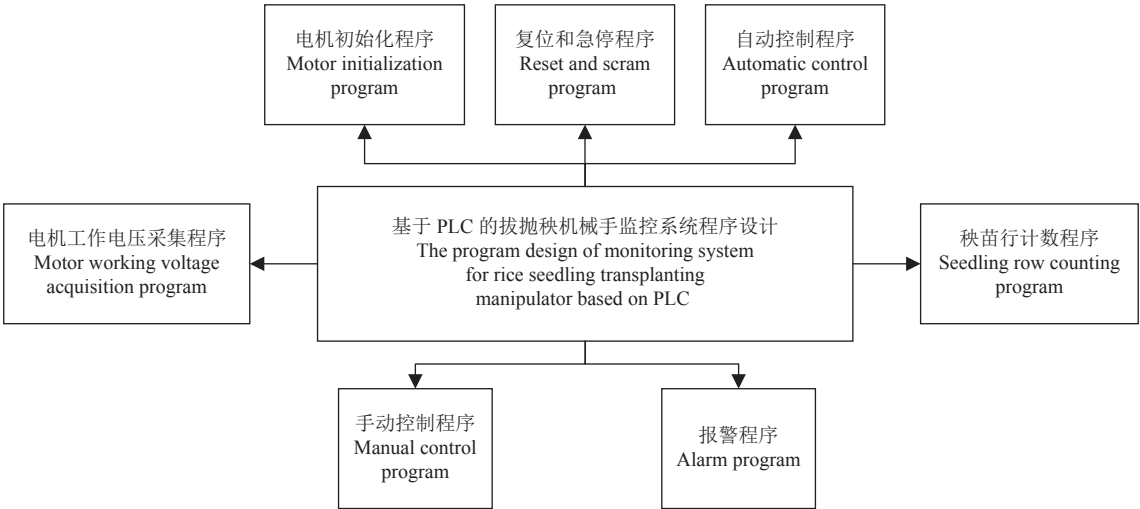


图 3 PLC 程序模块框图

Fig. 3 The block diagram of PLC program

2.2 监控软件设计

2.2.1 触摸屏监控软件设计 触摸屏采用西门子的 SMART 700 IE V3, 监控界面采用 WinCC flexible SMART V3 组态软件^[17]开发。在该组态软件中创建与 PLC 输入、输出点参数一一对应的变量, 并设置相应的数据类型和地址, 随后创建触摸屏画面并进行变量连接; 根据软件客户端功能层次分析, 设计系统登录主界面、系统监控界面和电压报表监控界面, 并在相应的界面设计功能窗口^[18]。系统监控界面如图 4 所示, 该界面包括秧盘计数、报警灯、拔抛秧频率、伺服电机位置与速度、系统控制按钮和手动控制按钮窗口。用户可在此界面设置系统控制模式, 并对已拔秧苗行数以及伺服电机的位置和速度进行监测。点击“电压报表界面”按钮

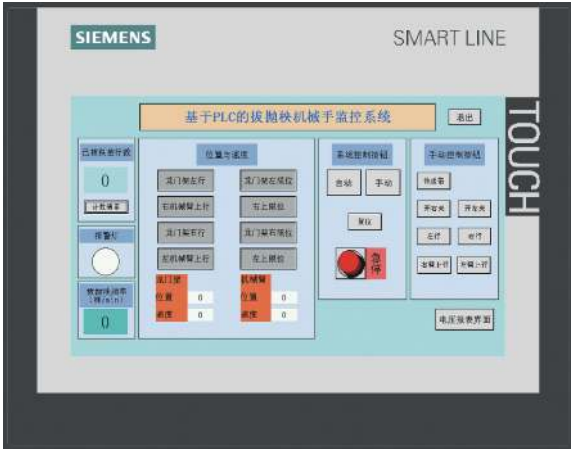


图 4 触摸屏人机交互界面

Fig. 4 Human-machine interaction interface of touch screen

后触摸屏跳转到电压报表界面, 此时, 监控系统每隔 100 ms 采集 1 次秧盘传送带驱动电机、龙门架驱动电机和机械臂驱动电机的工作电压, 3 个电机工作电压数值通过换算后以曲线的形式显示出来。同时, 监控系统也会采集控制左、右 2 个秧夹动作的电压信号。

2.2.2 远程监控系统设计 1) GRM530 通讯模块。GRM530 是广州巨控科技公司开发的专门用于 PLC 远程监控和远程维护的无线通讯模块, 该模块可实现 PLC 远程调试、触摸屏远程下载、组态软件远程监控和手机 APP 监控等功能。通讯模块内置 TCP/IP 协议栈, 能通过 3G/4G、WIFI 和以太网直接访问网络; SIMATIC S7-200 Smart PLC 的数据可通过该模块在 Internet 进行传输^[19]。

2) 远程监控系统整体架构。在设备运行时 PLC 现场采集各个部件的运行参数和工作数据, 通过 GRM530 通讯模块将 PLC 中的数据上传至云服务器, 云服务器将收到的数据解析后保存至云数据库并备份; 电脑或手机客户端可直接访问并下载云数据库内 PLC 工作的实时数据, 这些数据通过客户端软件的处理后, 最终以数据或图表的形式呈现给客户, 实现可视化读取。同时, 该系统的数据传输是双向的, 用户也可以通过客户端对 PLC 发送控制指令, 实现了整个系统的监测与控制一体化。整体架构如图 5 所示。

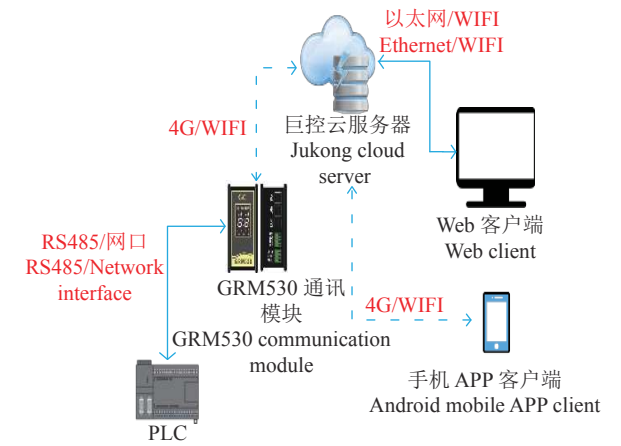


图 5 远程监控系统整体架构图

Fig. 5 The architecture diagram of remote monitoring system

3) Android 端监控软件设计。本设计采用 Android 智能设备作为拔抛秧机械手的远程人机交互软件的载体, 既方便用户操作, 也符合农业物联网发展趋势的要求^[20]。Android 手机 APP 客户端监控软件采用 Android studio 开发, 根据远程监控软件的功能层面分析, 开发监控界面并建立逻辑编

程^[21], 包括访问巨控云服务器并获取数据、拔抛秧机械手远程监控系统登录界面 (包括用户登录功能)、远程监控系统主界面、远程监控系统工作过程指示灯界面、远程监控系统报表系统界面 (包括龙门架、机械臂、秧盘传送带 3 个驱动电机的工作电压报表) 和远程监控系统手动控制界面。Android 手机 APP 客户端远程监控系统登录界面及手动控制界面如图 6 所示。



图 6 远程监控系统 Android 手机 APP 客户端

Fig. 6 The android mobile APP client of remote monitoring system

3 基于 PLC 的拔抛秧机械手监控系统的试验和结果

2020 年 9 月 25 日, 在华南农业大学工程学院进行基于 PLC 的拔抛秧机械手监控系统性能试验。试验前确认硬件设备接线无误, 触摸屏和 GRM530 通讯模块使用 LAN 电缆通过交换机与 PLC 连接且通讯正常, GRM530 通讯模块和 Android 手机可通过 WIFI 访问网络。

3.1 Android 手机 APP 客户端远程控制试验和结果

为验证 Android 手机 APP 客户端对拔抛秧机械手远程控制的准确性与时效性, 首先, 进行远程通信测试试验。本文采用文献 [5] 的远程通信测试方法, 利用 “Ping” 命令检查网络是否连接, 并测试网络延时, 如图 7 所示。由图 7 的试验数据可知, 远程通信测试试验未出现丢包问题, 且平均延时为 25 ms。重复 10 次试验, 丢包率均为 0, 表明 Android 手机 APP 客户端和拔抛秧机械手能实现稳定可靠的双向通信。



图 7 互联网 Ping 指令测试
Fig. 7 Internet Ping command test

在 Android 手机上打开“监控系统”APP, 输入账号和密码登录系统后, 在 APP 内设置拔抛秧机

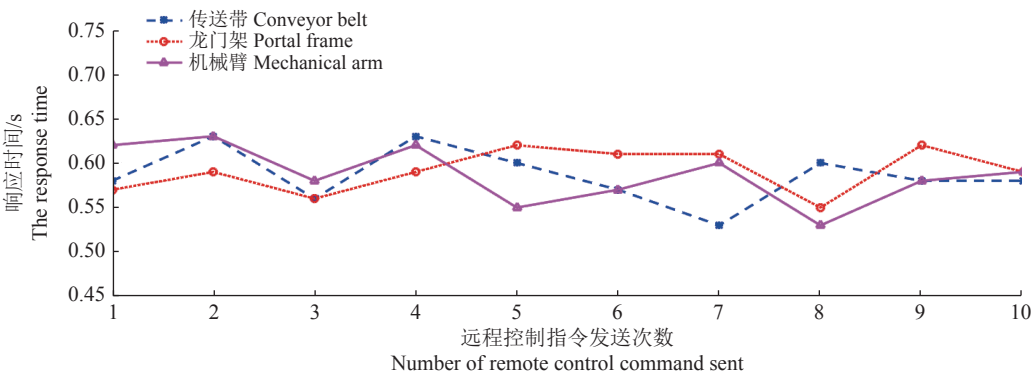


图 8 拔抛秧机械手远程控制响应时间
Fig. 8 The response time for remote control of rice seedling transplanting manipulator

3.2 拔抛秧机械手工作状态监测试验和结果

将穴盘为 23 行×12 列的白色带土秧盘^[22]放置在秧盘传送带上, 设置拔抛秧机械手为自动控制模式, 设备在自动控制模式下自动运行 10 min 后, 分别观察手机 APP 和触摸屏上反馈的拔抛秧机械手工作状态, 并对比所反馈的工作状态与实际工作状态是否一致。

拔抛秧机械手工作状态监控界面如图 9 所示。从手机 APP 监控界面(图 9)可以观察到, 拔抛秧机械手的龙门架在向右运动, 右机械臂在上限位处。随后, 在触摸屏监控主界面(图 10)可以观察到, 拔抛秧机械手的龙门架已运动到右限位处, 右机械臂仍在上限位处。此时, 拔抛秧频率为 80 株/min, 已拔秧苗行数为 69 行(3 盘)。试验结果表明, 手机 APP 和触摸屏端均能反馈拔抛秧机械手的工作状态, 并与拔抛秧机械手的实际工作状态一致。

3.3 拔抛秧机械手电机电压曲线监测试验和结果

在拔抛秧机械手工作状态监测试验方案中, 点击触摸屏监控主界面的“电压报表界面”按钮后

械手为手动控制模式, 进入“手动控制界面”, 按照拔抛秧机械手工作原理在“手动控制界面”中依次对传送带、龙门架和机械臂发送控制指令, 观察远程控制指令发出后拔抛秧机械手是否做出正确动作响应, 并测试响应时间, 试验重复 10 次, 结果如图 8 所示。由图 8 可见, 传送带、龙门架和机械臂的远程控制响应时间平均分别为 0.586、0.591 和 0.587 s, 最长响应时间分别为 0.63、0.62 和 0.63 s, 响应时间的长短受 Android 手机和 GRM530 通讯模块所连接的网络信号影响。试验结果表明, Android 端远程监控系统稳定可靠, APP 发出控制指令后, 拔抛秧机械手的传送带、龙门架和机械臂均能产生正确的动作响应, 并且在网络信号正常的状态下响应延时低。



图 9 手机 APP 监控界面
Fig. 9 Monitoring interface of mobile APP

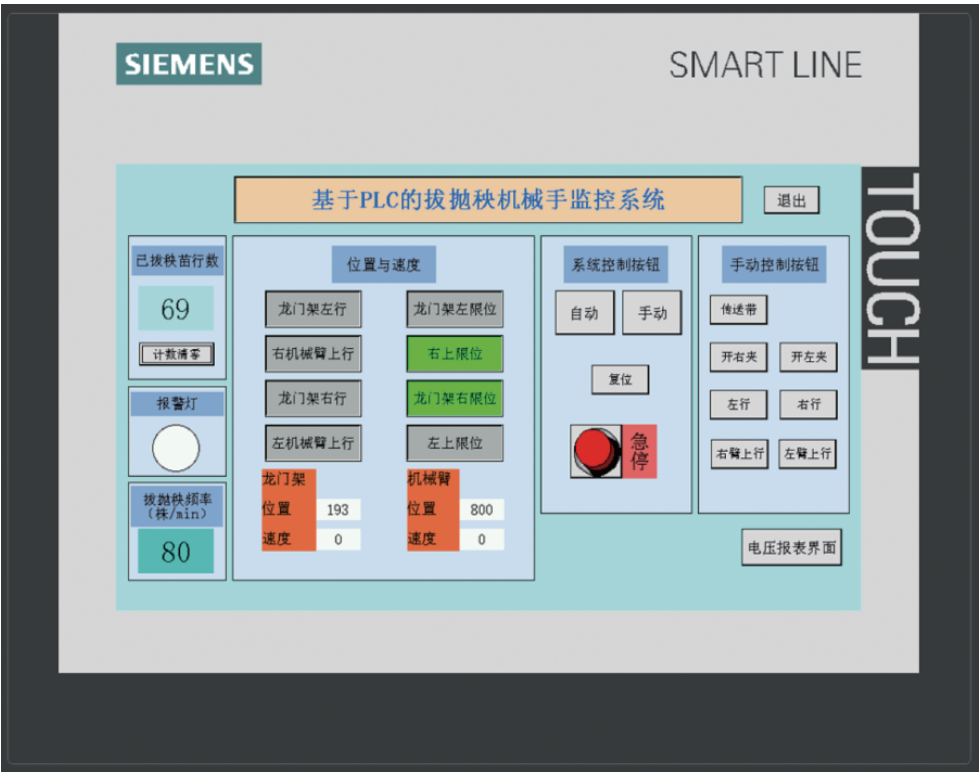


图 10 触摸屏监控界面

Fig. 10 Monitoring interface of the touch screen

进入电压报表界面, 如图 11 所示, 在该界面下观察触摸屏能否正确反馈控制左、右 2 个秧夹动作 (打开放秧或闭合夹秧) 的电压信号 (0 或 1), 以及传送带、龙门架和机械臂驱动电机的工作电压曲线, 工

作电压曲线的横坐标为时间, 纵坐标为电压。由图 11 可知, 秧夹动作的电压信号和 3 个电机的工作电压曲线均呈周期性变化, 且在 30 s 内有 T1~T3 共 3 个完整周期。以图中 T1 周期为例,

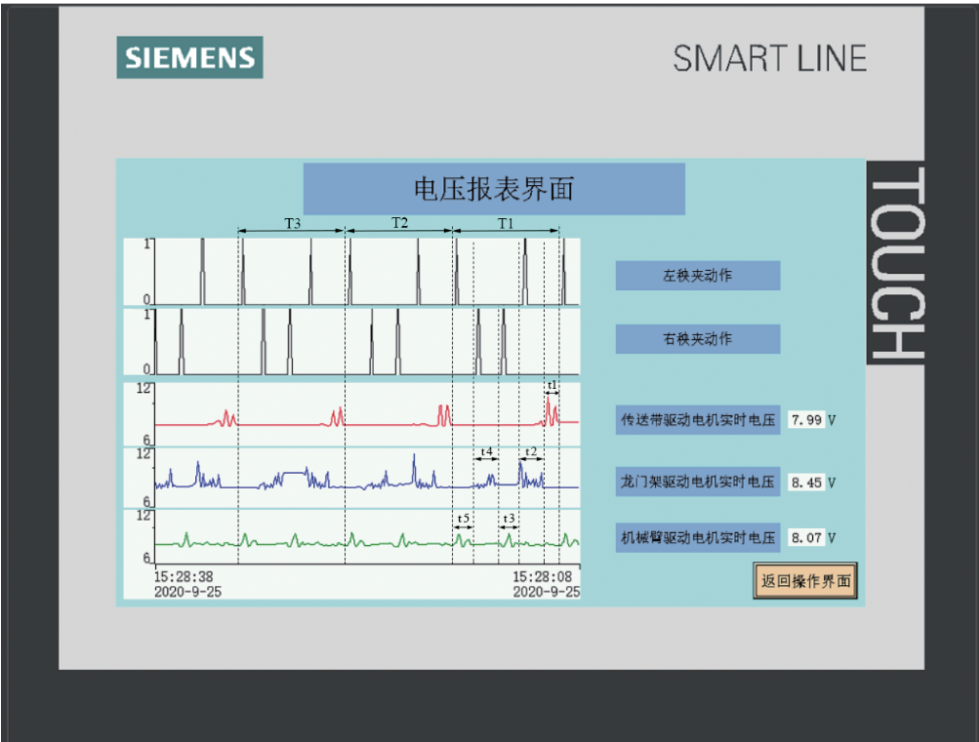


图 11 触摸屏电机电压报表界面

Fig. 11 Report interface of motor voltage in touch screen

t1 时间段内拔抛秧机械手的传送带 (红色曲线) 运动送秧, 系统检测到秧苗行到位信息时传送带停止; t2 时间段内龙门架 (蓝色曲线) 向右运动, 使左秧夹进入左半边秧苗行, 随后左秧夹 (第 1 排黑色曲线) 闭合夹秧; t3 时间段内左机械臂 (绿色曲线) 向上运动从而拔起左半边秧苗行, 同步右机械臂向下运动, 随后右秧夹 (第 2 排黑色曲线) 打开放秧; t4 时间段内龙门架向左运动, 使右秧夹进入右半边秧苗行, 随后右秧夹闭合夹秧; t5 时间段内右机械臂向上运动从而拔起右半边秧苗行, 同步左机械臂向下运动, 随后左秧夹打开放秧; 紧接着进入下一个周期, 传送带继续进给下一行秧苗, 此时左、右 2 个秧夹的开闭状态为左开右闭。在 1 个工作周期内拔抛秧机械手传送带运动了 1 次, 龙门架与机械臂分别运动了 2 次, 左、右 2 个秧夹分别打开放秧 1 次、闭合夹秧 1 次。

4 结论

根据拔抛秧机械手的工作原理, 设计了基于 PLC 的监控系统硬件电路和软件程序, 监控系统可以使拔抛秧机械手进行自动有序的拔抛秧工作, 也可以进行单步手动作业调试。基于触摸屏设计了良好的人机交互界面, 使用者可以直接在触摸屏上监控拔抛秧机械手的工作状态和工作数据, 通过电压报表界面观测拔抛秧机械手的传送带、龙门架和机械臂驱动电机的工作电压曲线, 控制左、右 2 个秧夹动作的电压信号, 从而判断拔抛秧机械手是否正常工作。基于 GRM530 通讯模块、巨控云服务器和 Android 手机, 设计了基于 PLC 的拔抛秧机械手远程监控系统手机 APP, 实现了 Android 手机 APP 客户端与控制系统的双向通信。试验结果表明, 远程监控系统运行稳定可靠, 数据的接收与控制指令的发送稳定, 系统响应延时低。

本文设计的拔抛秧机械手监控系统提升了拔抛秧机械手作业的信息化水平, 促进了信息化与农机装备的深度融合。

参考文献:

[1] 罗锡文, 王在满. 水稻生产全程机械化技术研究进展[J]. 现代农业装备, 2014(1): 23-29.

[2] 夏倩倩, 张文毅, 纪要, 等. 我国机械抛秧技术与装备的研究现状及趋势[J]. 中国农机化学报, 2019, 40(6): 201-208.

[3] 胡建平, 张晨迪, 王留柱, 等. 全自动温室钵苗移栽机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2016, 47(S1): 149-154.

[4] 农业部. 全国农业机械化发展第十三个五年规划[N]. 中国农机化导报, 2017-01-05 (7).

[5] 吴亚奎, 祁力钧, 张豪, 等. 基于嵌入式互联网的远程智

能喷雾控制系统设计[J]. 农业工程学报, 2018, 34(20): 28-35.

[6] JIRAPOND M, NATHAPHON B, SIRIWAN K, et al. IoT and agriculture data analysis for smart farm[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2019, 156: 467-474.

[7] ZHANG R Y, HAO F Q, SUN X. The design of agricultural machinery service management system based on internet of things[M]. *Procedia Computer Science*, 2017, 107: 53-57.

[8] 李瑾, 郭美荣, 高亮亮. 农业物联网技术应用及创新发展策略[J]. 农业工程学报, 2015, 31(S2): 200-209.

[9] GUPTA N, KHOSRAVY M, PATEL N, et al. Economic data analytic AI technique on IoT edge devices for health monitoring of agriculture machines[J]. *Applied Intelligence*, 2020, 50(11): 3990-4016.

[10] 邵耀坚. 水稻工厂化育秧拔苗机械手及仿生机理的研究[J]. 华南农业大学学报, 2000, 21(1): 78-81.

[11] 马瑞峻, 区颖刚, 邵耀坚. 机械手式水稻有序行抛机构的设计[J]. 农业机械学报, 2002, 33(1): 36-38.

[12] 马瑞峻, 区颖刚, 赵祚喜, 等. 水稻钵苗机械手取秧有序移栽机的改进[J]. *农业工程学报*, 2003, 19(1): 113-116.

[13] 马瑞峻, 樊元君, 黄倩, 等. 2 自由度夹子式水稻穴钵钵苗拔抛机械手设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2015, 46(6): 35-43.

[14] 马锐, 曹卫彬, 任玲, 等. 整排穴盘苗移栽机取送苗装置的设计与研究[J]. 农机化研究, 2019, 41(4): 85-90.

[15] 胡建平, 常航, 杨丽红, 等. 自动移栽机整排取苗间隔投苗控制系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2018, 49(6): 78-84.

[16] LIU J Z, ZHAO S Y, LI N, et al. Development and field test of an autonomous strawberry plug seeding transplanter for use in elevated cultivation[J]. *Applied Engineering in Agriculture*, 2019, 35(6): 1067-1078.

[17] 陈玉仑, 孙晨阳, 卢中山, 等. 基于可编程控制器的猪胴体喷淋冷却作业控制系统设计[J]. 农业工程学报, 2018, 34(3): 273-278.

[18] 付威, 罗锡文, 曾山, 等. 水稻精量旱穴播机穴距电液比例控制系统的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31(9): 25-31.

[19] SUSHANTH G, SUJATHA S. IoT based smart agriculture system[M]. New York: IEEE, 2018.

[20] 丁友强, 刘彦伟, 杨丽, 等. 基于 Android 和 CAN 总线的玉米播种机监控系统研究[J]. 农业机械学报, 2019, 50(12): 33-41.

[21] BARKUNAN S R, BHANUMATHI V, BALAKRISHNAN V. Automatic irrigation system with rain fall detection in agricultural field[J/OL]. *Measurement*, 2020, 156: 107552. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.107552>.

[22] 樊元君, 马瑞峻, 黄倩, 等. 穴盘水稻钵苗自动送秧机构及控制系统设计与试验[J]. 华南农业大学学报, 2016, 37(4): 117-123.