第42卷 第3期
2023年 5月

华 中 农 业 大 学 学 报
Journal of Huazhong Agricultural University

Vol.42 No.3
May 2023,260～270

王登辉,卢邦,李强,等.油菜直播机组无人播种作业远程监测系统设计[J].华中农业大学学报,2023,42(3):260-270.
DOI:10.13300/j.cnki.hnlkxb.2023.03.030

油菜直播机组无人播种作业远程监测系统设计

王登辉,卢邦,李强,李浩鹏,孙阳,丁幼春

华中农业大学工学院/农业农村部长江中下游农业装备重点实验室,武汉430070

摘要 为解决油菜直播机组无人播种作业过程中田间播种质量信息难以实时直观展示的问题,本研究以雷沃804拖拉机及其搭载的2BYQ-8型气送式油菜直播机为试验平台,设计一套油菜直播机组无人播种作业远程监测系统。该系统由油菜直播机组无人播种作业平台、无人播种作业数据采集系统和播种质量监测云平台三部分构成,通过对雷沃804拖拉机档位、离合、动力输出装置(power take off,PTO)、悬挂机构进行电控液压改装,设计相应控制策略实现直播机组的无人播种作业;利用车载路由器组建播种监测终端和车载计算机之间的局域网,实现对播种数据与导航数据的融合同步,并通过网络连接传输给云平台进行数据存储与实时展示;云平台计算播种质量数据及其对应的田间位置数据,基于网页端高精度地图生成田间作业区域的播种状态图。结果显示,直播机组无人播种作业段横向平均偏差0.037 m,最大偏差0.125 m,电控液压改装系统运行稳定、可靠,满足直播机组无人作业要求,4G网络条件下,云平台通信最大数据传输时延不超过100 ms,云存储数据完整无遗漏,各播种通道田间播量检测准确率不低于96.16%,满足远程监测系统实时性和准确性要求。研究表明,该系统可实现油菜直播机组的田间无人播种作业和对作业区域播种信息的精确采集与直观展示。

关键词 油菜直播机;导航作业;远程监测;数据传输;电控液压改装;无人播种作业

中图分类号 S223.2 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2023)03-0260-11

油菜作为我国最重要的油料作物之一,其产量与播种作业过程中的播种质量息息相关,无人导航技术具有人力投入少、作业效率高的优点,在油菜播种作业过程中已经得到相关应用[1-2]。对田间播种数据与导航定位数据进行采集、融合和可视化,可以直观反映田间不同播种区域的播种质量信息,对于预测油菜田间产量[3]、评估播种机作业效果[4]具有重要的作用。基于播种监控装置添加GNSS定位模块[5]获取播种定位信息的方式其定位精度较低,无法满足生成播种状态图需要,而单独添加RTK高精度定位装置[6]导致监测系统成本过高,不利于推广使用。因此,将播种机的无人导航与播种监测系统两者融合,在实时获取播种质量与导航定位信息生成播种状态图的同时适当降低成本,对于提高油菜播种智能化水平具有重要意义。

国内学者在播种机导航方面进行了相关研究,张朝宇等[7]设计了油菜播种机自适应路径跟踪和田头调头换行算法,提高了无人播种作业路径跟踪和调头对行精度。杨洋等[8]对拖拉机作业机组进行线控改装,设计了导航与播种机构协同控制策略,满足无人播种作业要求。张雁等[9]和王伟康等[10]分别提出了水稻直播机和收获机模糊自适应控制器,实现了水田环境下直播机和收获机的自动驾驶作业。詹文轩等[11]采用无人驾驶拖拉机挂载小麦精密播种机,其导航跟踪精度满足小麦播种作业需求。徐琪蒙等[12]研发了小麦播种自走式农用移动平台,可自主完成行走转向和自动化播种作业。上述研究重点在于改善播种机导航作业效果与提高控制精度,而结合播种监控技术对田间播种作业数据进行采集、融合与分析研究较少。

在播种监控方面,国内外学者进行了相关研究,Karimi等[5]基于红外传感原理开发了播种监测系统,计算单位面积排种质量并结合GPS数据在图形界面进行显示。丁幼春等[13]设计了油菜播种质量监测系统,由种子传感装置获取播种质量信息,结合北斗定位数据存储至云平台。丁友强等[14]基于Android和CAN总线技术开发了玉米播种机监控系统,实现了

收稿日期:2023-02-13
基金项目:国家重点研发计划项目(2021YFD2000402;2021YFD2000402-3);湖北省重点研发计划项目(2021BBA080)
王登辉,E-mail:2575633691@qq.com
通信作者:丁幼春,E-mail:kingbug163@163.com

播种机位置实时监控和作业面积实时统计等功能。黄东岩等[15]采用压电传感器和RTK-GPS定位技术获取玉米播种质量田间定位信息，实现了对玉米播种质量数据的远程管理。Yan等[16]基于播种监控与高精度卫星定位技术建立了玉米播种田间着床位置预测方法，具有较高的预测精度。上述研究结合低精度或RTK高精度定位模块获取定位数据，存在着定位精度低，无法生成播种状态图或成本较高，不利于推广使用的问题。

本研究结合无人导航与播种监控技术，基于油菜直播机组设计无人播种作业远程监测系统，以实现油菜直播机组的田间无人播种作业和对作业区域播种信息的精确采集与直观展示，进一步提高油菜播种智能化水平。

1　材料与方法

1.1　系统总体设计

1)无人播种作业远程监测系统总体结构。该系统由无人播种作业平台、数据采集系统和播种质量监测云平台3个部分组成。其中，无人播种作业平台主要包括雷沃804拖拉机、2BYQ-8型气送式油菜直播机[17](8行排种，幅宽2.3 m)、转向控制箱和液压机构控制箱；数据采集系统包括车载路由器(蒲公英R300S路由器)、车载计算机(LegionY7000P)、中小粒径种子流监测装置[18]、油菜播种作业监测终端[19]、北斗RTK移动站，系统整体结构如图1所示。

2)系统工作原理。该系统基于无人播种作业平台实现油菜直播机组的无人播种作业，数据采集系统采集作业过程中的无人播种作业数据，上传至播种监测云平台进行数据存储与状态图生成。播种机组作业过程中，车载计算机根据路径跟踪算法计算前轮目标转角，通过转向控制箱控制转向液压缸伸缩，使前轮转至目标角度。同时，车载计算机根据机具协同控制策略向液压机构控制箱发送控制命令，通过电磁阀驱动相应液压机构动作，实现油菜直播机组的一键启动、无人播种、田头转弯和作业完成停止。种子流监测装置实时采集各通道播种数据，传输至播种监测终端进行汇总整理，车载计算机融合导航数据和播种质量数据并发送至云平台服务器，服务器将实时作业数据存储至云数据库，网页端通过网络连接实时接收作业数据并生成播种状态图，对田间不同位置播种质量信息进行可视化展示，油菜直播机组远程监测系统总体结构如图2所示。

1. 车载路由器 Vehicle router；2. 播种监测终端 Seeding monitoring terminal；3. 转向控制箱 Steering control box；4. 液压机构控制箱 Hydraulic mechanism control box；5. 播种监测云平台 Seeding monitoring cloud platform；6. 北斗RTK移动站 Beidou RTK mobile station；7. 车载计算机 Vehicle computer；8. 种子流传感装置 Seed flow sensing device.

图1　无人播种作业远程监测系统总体结构

Fig.1　Overall structure of remote monitoring system for unmanned seeding operation

1.2　油菜直播机组无人播种作业平台构建

1)雷沃拖拉机电控液压改装。为实现基于油菜

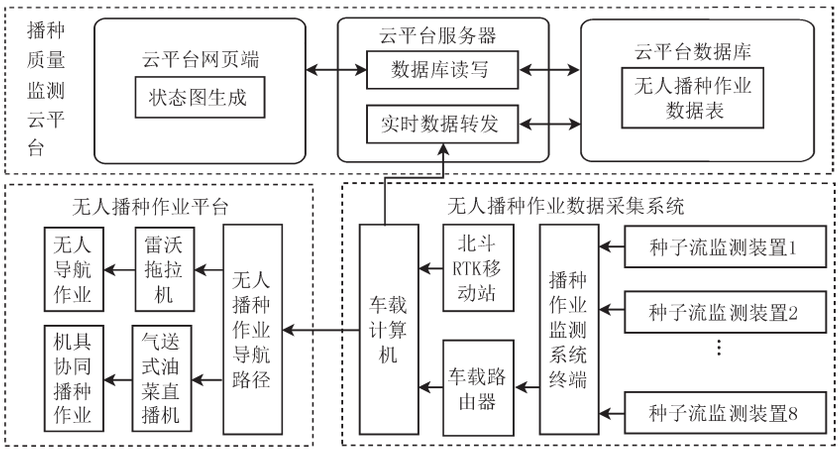
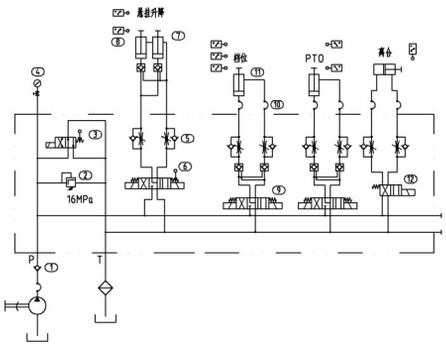


图2　远程监测系统总体结构图

Fig.2　Overall structure of the control system

直播机组的无人播种作业，本研究对雷沃804拖拉机的悬挂、档位、动力输出装置(power take off，PTO)和离合作业机构进行电控液压改装，通过电磁阀通断控制液压缸运动，实现对各作业机构的自动控制，从而完成无人播种作业。液压改装油路设计如图3所示，液压泵为整个液压系统提供压力，管式单向阀防止液压油回流，压力表显示整个液压系统压力，应急电磁换向阀和过压溢流阀作为安全阀串联在液压回路中，当发生紧急情况或系统压力超过安全阀值(16 MPa)时启动，保证整个液压系统安全运行。



1. 管式单向阀 Tube type check valve；2. 过压溢流阀 Overpressure relief valve；3. 应急电磁换向阀 Emergency solenoid valve；4. 压力表 Pressure gauges；5. 单向节流阀 One-way throttle valve；6. 悬挂控制电磁换向阀 Suspension solenoid valve；7. 悬挂控制液压缸 Suspension hydraulic cylinder；8. 霍尔传感器 Hall sensors；9. 档位控制电磁换向阀 Gear solenoid valve；10. 高压软管 High pressure hose；11. 档位控制液压缸 Gear hydraulic cylinder；12. 离合控制电磁换向阀 Clutch solenoid valve.

图3 电控液压改装油路设计

Fig.3 Design of electric control hydraulic modified oil circuit

为实现对悬挂作业机构的精准控制，在拖拉机液压油路中加装带应急手柄的电磁换向阀(华德4WEM6J型)和单向节流阀(华德Z2FS6型)，电磁换向阀用于控制悬挂机构升降动作，单向节流阀用于调节悬挂的升降速度，在悬挂机构抬升和下降位置安装霍尔传感器，作为反馈信号停止悬挂升降动作，从而实现对悬挂升降机构的闭环控制。

为实现对拖拉机档位、离合和PTO作业机构的自动控制，除上述电磁换向阀、节流阀外，需额外安装液压缸执行机构，通过活塞杆运动带动相应机械结构运动，实现对各作业机构的自动控制。拖拉机共有前进档、后退档和空档3种档位，采用3个霍尔传感器检测液压油缸是否动作到位，采用液压缸连接钢丝绳经过定滑轮组拉动离合踏板的方式实现对离合机构的控制，由于松离合时对液压缸位置精度要求较低，故只采用单个霍尔传感器检测踩离合时踏板是否运动到位，以减小液压系统复杂度。

为保证液压系统安全、高效运行以及对各液压机构的精确控制，引入霍尔传感器信号作为反馈信号实现对液压系统的闭环控制，系统输入为车载计算机发出的液压系统控制指令，通过串口通信控制NI板卡数字输出口电压变为高电平，使继电器吸合，电磁换向阀两端电压上升为12 V，液压油路处于正向导通状态，液压油推动液压缸动作，实现液压机构动作，当液压机构运动到霍尔传感器安装位置时触发霍尔信号，霍尔信号通过NI板卡反馈至车载计算机，液压缸动作停止。

2)无人播种作业路径跟踪方法。鉴于实际播种作业农田多为矩形，因此，本研究针对矩形田块进行路径规划，为确保油菜直播机组在田间进行完整的导航播种作业，根据直播机组最小转弯半径r、直播机组作业幅宽d规划合理高效的导航路径(图4)。

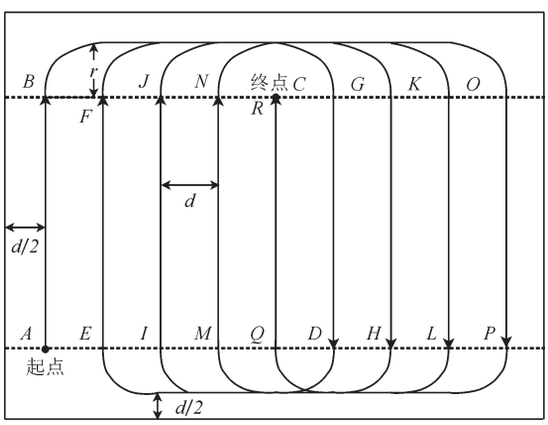


图4 导航路径规划

Fig.4 Navigation path planning

对于图4所示的矩形田块，所规划的导航路径可以分为播种作业路径与田头转弯路径2个部分，播种作业路径由田块边界偏移得到，以油菜播种机作业幅宽d作为规划路径偏移值，首条路径由作业边偏移$d/2$距离得到，如图4中直线AB所示，之后依次偏移d得到作业路径EF、IJ等。田头转弯路径采用弧线与直线组合的形式连接各个播种作业路径，根据油菜直播机组转弯半径r确定转弯弧线半径，如图4中弧线BC、DE等，播种作业路径与田头转弯路径结合即油菜直播机组导航路径。导航路径从作业起点A出发跟踪播种作业路径AB到达B点，继续跟踪田头转弯路径BC至C点，之后跟踪播种作业路径CD至D点，再次跟踪田头转弯路径DE至E点，之后依次跟踪播种作业路径与田头转弯路径直到终点R，完成

播种作业。

为降低油菜直播机组控制系统复杂性，结合直播机组转向特点，采用阿克曼转向模型[20]对油菜直播机组进行运动学建模分析，得到油菜直播机组位置与航向角、前进速度的变化关系。采用纯追踪路径跟踪算法[21]，并根据直播机组的位置和航向角计算获得目标前轮转角，再通过液压转向机构控制前轮达到目标值，从而跟踪所规划的导航路径。

3）机具协同控制策略。为确保油菜直播机组在无人导航作业过程中完成播种作业，需制订机具协同控制策略，油菜直播机组工作时所处的工作状态可分为起始状态、播种作业状态、田头转弯状态、停止状态4种（表1）。

表1　直播机组作业状态

Table 1　Direct seeder unit working status

直播机组作业状态 Direct seeder unit working status	机具状态 Seeder status	离合状态 Clutch status	PTO状态 PTO status	档位状态 Gear status
起始状态 Initial state	保持抬升 Maintain uplift	分离 Separate	不工作 Not	空档 Neutral
播种作业状态 Seeding operation status	保持下放 Keep down	结合 Combine	工作 Working	前进档 Forward gears
田头转弯状态 Field turning state	保持抬升 Maintain uplift	结合 Combine	不工作 Not working	前进档 Forward gears
停止状态 Stop status	保持抬升 Maintain uplift	分离 Separate	不工作 Not working	空档 Neutral

直播机组进行无人播种作业时，首先处于起始状态（在作业起始点等待作业开始），此时直播机悬挂处于抬升状态，档位处于空挡。当播种机开始跟踪播种作业路径时，档位切换至前进挡，悬挂机具放下，进入播种作业状态并开始播种作业，当跟踪田头转弯路径时，悬挂机具抬升，进入田头转弯状态并调整播种作业位置。当再次跟踪至下一条播种作业路径时，悬挂机具下放，再次进入播种作业状态进行播种作业，之后根据所跟踪的导航作业路径依次切换播种机状态，作业结束后切换为停止状态，悬挂机具抬升，档位切换至空挡，完成播种作业。直播机组状态切换流程如图5所示。

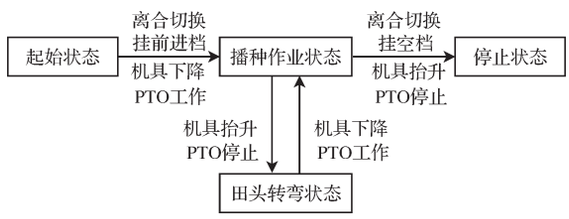


图5　直播机组作业状态切换流程图

Fig.5　Flow chart of live unit operation state switching

1.3　无人播种作业数据采集系统

1）数据采集系统结构。播种状态图直观反映了田间不同作业区域播种质量的差异，生成状态图的前提是获取同步对应的田间播种和导航定位数据，本研究设计的无人播种作业数据采集系统如图6所示。该系统由云平台MySQL数据库、云平台服务器、云平台网页端、北斗RTK移动站、车载计算机、车载路由器、播种作业监测终端和种子流监测装置组成。导航数据由车载计算机获取，车载计算机通过RS232串口接收北斗RTK移动站所发送的$GPRMC格式北斗定位报文，解析并获取报文中的位置、航向和速度信息，同时记录直播机组无人作业路径跟踪状态作为导航数据。播种数据由笔者所在课题组前期研制的油菜播种作业监测终端获取。该系统监测8路种子流监测装置产生的电平信号，计算得到各通道播量、排种频率信息，具体参见文献[19]。

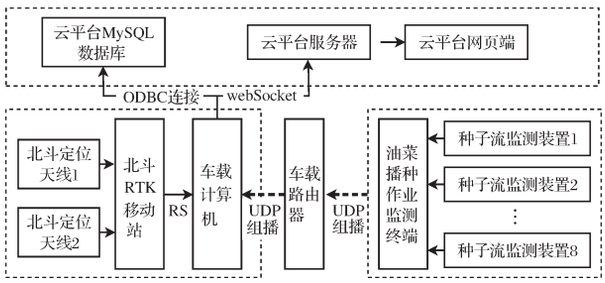


图6　数据采集系统结构框图

Fig.6　Data acquisition system architecture block diagram

为实现对导航和播种数据的融合同步，本研究采用车载路由器组建播种作业监测终端和车载计算机之间的局域网，同时改进播种监测终端软件程序，使用Python语言编程，基于threading模块开发独立运行的播种数据传输子线程seedInfoSend，读取实时播量、排种频率数据，通过局域网发送至车载计算机与导航数据进行同步（图7）。考虑到局域网内部数据传输可靠性较高，且传输的播种数据量较少，采用UDP广播方式发送数据，以减少系统复杂度。数据以JSON格式传输，播种数据发送频率与北斗报文接收频率保持一致，设置为10 Hz。

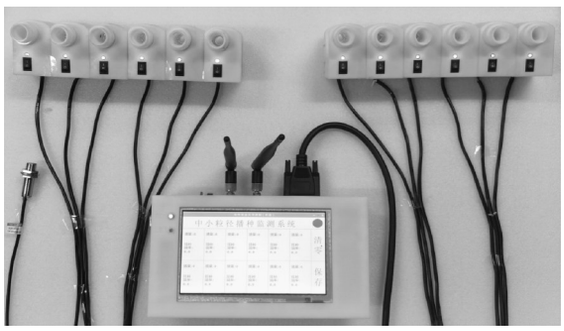


图7 油菜播种作业监测系统

Fig.7 Rapeseed sowing operation monitoring system

2)数据同步采集软件流程。本研究通过采样定时器实现对无人播种作业数据的同步采集,定时器定时结束后,车载计算机将最新播种和导航定位数据上传至云平台存储和展示。考虑到播种质量状态图显示的流畅性,数据采样频率f设置为1 Hz。为保证数据存储稳定性,采用ODBC数据库访问接口访问云平台MySQL数据库,同时编写相应SQL语句将作业数据保存至数据表中。webSocket网络通信协议具有实时性高、网络开销小的特点,本研究采用其作为车载计算机与云平台网页之间的数据传输协议,以满足对无人播种作业数据的高频次实时传输要求。无人播种作业数据采集程序基于QT框架和C++语言编写,采用QThread多线程技术确保数据采集程序独立运行(图8)。

3)无人播种作业数据包设计。为保证网络传输过程中无人播种作业数据的完整性和规范性,对其数据包格式进行了设计,数据包内远程监测参数包括播种机作业状态、经度、纬度、速度、航向、各通道播量和排种频率数据。无人播种作业数据包大小为59个字节,其定义如表2所示。数据包中的数据类型分为BYTE(占用1个字节),WORD(占用2个字节)和DWORD(占用4个字节)3种数据类型,在保证所传输数据的完整性以及精度的前提下,为数据分配所需要的占用字节数最少的数据类型,以尽可能少地占用网络资源。

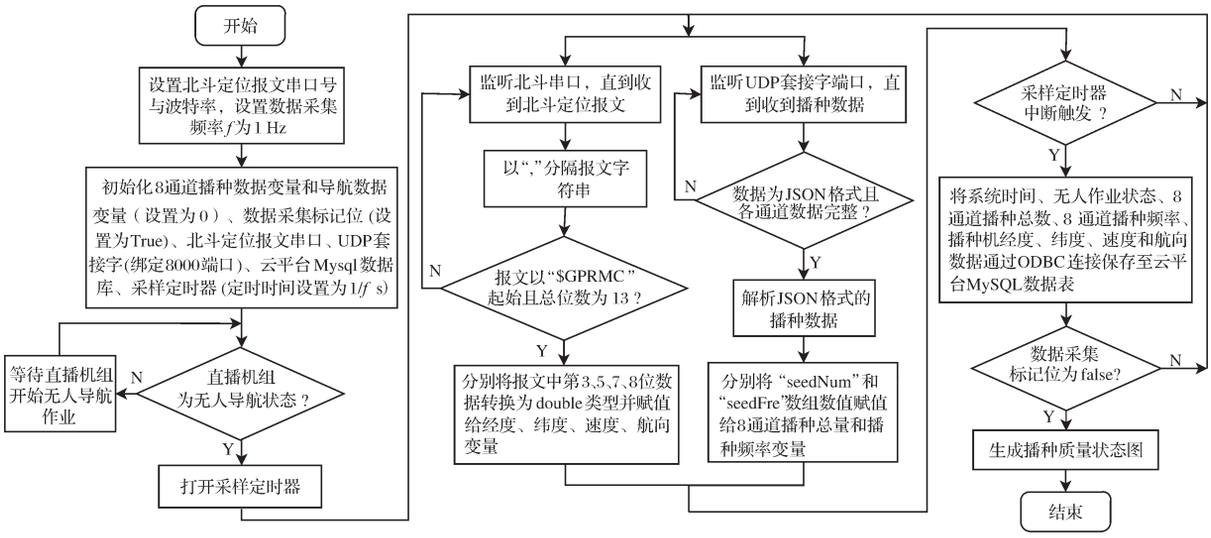


图8 无人播种作业数据采集软件流程

Fig.8 Unmanned seeding operation data collection software process

数据包由字符‘#’开始,方便云平台对数据进行检验;第2~5号字节为无人播种作业数据的采样时间,以UNIX时间戳格式进行传输;第6号字节为无人作业路径跟踪状态用于判断当前油菜直播机组是否处于播种作业状态;第7~14号字节和第15~22号字节为当前经度和纬度,其数值为度格式的经、纬度值乘以10^9,共占用8个字节;第23~24号字节和第25~26号字节分别为速度和航向,其真实值由有效值左移两位得到,保留2位小数;第27~42号字节表示8个通道的播量;第43~58号字节表示8个通道的排种频率,真实值保留2位小数;第59位为CRC(循环冗余校验)校验位,用于检测传输过程中数据是否发生改变。

1.4 播种质量监测云平台

1)播种状态图生成方法。为直观反映田间不同作业区域的播种质量效果,本研究以高精度航拍地图作为云平台网页端背景,网页左上角设置下拉菜单按钮用于实现状态图生成、清除、导航控制、实时信息显示等功能,旁边采用基于Highcharts实现的双柱状图用于展示实时播量和排种频率信息(图9)。

表 2　无人播种作业数据包定义

Table 2　Unmanned seeding operation data package definition

字节编号 Byte number	定义 Definition	数据类型 Data types
1	起始符 Start character	BYTE
2～5	数据时间 Data time	DWORD
6	作业状态 Job status	BYTE
7～14	经度 Longitude	BYTE
15～22	纬度 Latitude	BYTE
23～24	速度 Speed	WORD
25～26	航向 Course	WORD
27～42	8通道播量 8-channel broadcast volume	WORD
43～58	8通道排种频率 8-channel seeding frequency	WORD
59	校验位 Check bit	BYTE

播种状态图基于高精度航拍地图实现，通过计算播种质量数据与各行田间位置数据，调用Google离线地图API在田间播种区域添加表示当前位置播种质量的地图标记点，从而得到播种状态图。

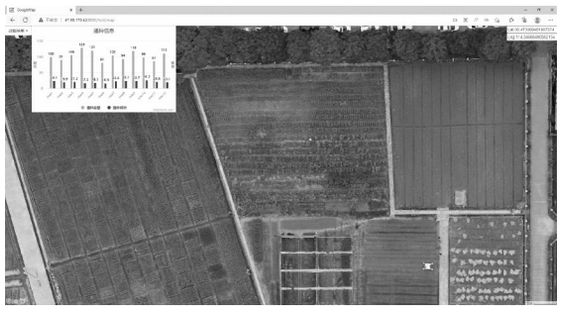


图 9　油菜播种监测云平台网页端界面

Fig.9　Rapeseed planting monitoring cloud platform web interface

高精度地图由无人机航拍、切片得到，相比于普通Google地图具有更高的层级和清晰度，同时根据田间实际坐标对地图偏移进行校正，使其满足生成田间播种状态图需求，通过初始化google.maps.Map()对象将其加载至云平台网页。地图标记点图片大小设置为10像素×10像素，中心为圆形色块，四周透明，中心色块采用红、黄、绿3种颜色，分别代表重播、漏播和合格3种播种质量状态。生成播种状态图时，根据各通道播种质量数据与各通道播种位置数据调用google.map.Marker()方法在网页端高精度地图上添加各个地图标记点图片。

网页端无人播种作业数据的获取可分为实时接收和数据库查询2种方式，数据实时接收由云平台服务器webSocket连接实现，云服务器初始化WebSocketServer对象，调用onMessag()方法接收车载计算机发送的实时数据，并转发至云平台网页端。数据库查询由云平台网页实现，通过Mybatis数据库操作框架查询云数据库中车载计算机存储的无人播种作业数据。

油菜直播机组只在无人播种状态进行播种作业，因此，生成播种状态图时需舍弃田头转弯状态数据，同时根据播种质量数据计算方法和直播机与各通道播种位置映射模型计算各通道播种质量数据与相应位置数据，调用google.map.Marker()方法生成播种状态图(图10)。

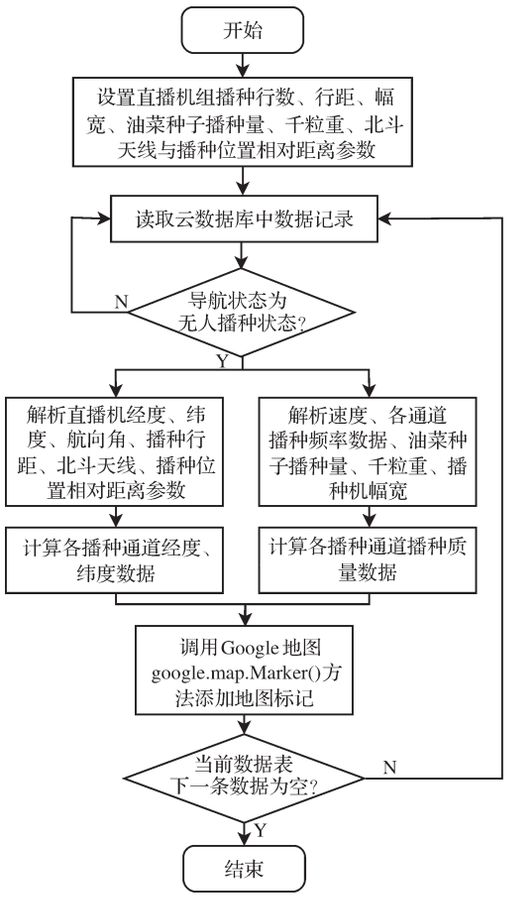


图 10　播种状态图生成流程

Fig.10　Seeding status map generation process

2)播种质量评价。根据直播机幅宽、行数、前进速度、油菜种子播种量和千粒重计算当前时刻理论排种频率，参照国标GB/T 6973—2005《单粒(精密)播种机试验方法》，以排种频率映射种子粒距关系，计算当前时刻播种机质量是否合格，当实际排种频率大于1.5倍理论排种频率时，认为产生重播；小于0.5倍时，认为产生漏播；否则认为合格。

$$f_t=\frac{15\times S\times l\times v}{10\times n\times m} \tag{1}$$

$$\begin{cases}0.5f_t\leqslant f\leqslant 1.5f_t & (\text{合格})\\ f>1.5f_t & (\text{重播})\\ f<0.5f_t & (\text{漏播})\end{cases} \tag{2}$$

其中，f_t为当前理论排种频率，Hz；S为播种量，g/667 m^2；l为直播机幅宽，m；n为播种机行数，m为油菜种子千粒重，g；v为播种机前进速度，m/s；f为当前实际排种频率，Hz。

3)直播机与各通道播种位置映射模型。为得到各通道播种质量数据所对应的田间位置，需构建直播机与各通道播种位置映射模型。直播机平面位置坐标可由车载北斗天线坐标表示，直播机组低速行进时，各播种通道播种位置平面坐标可近似认为各通道实际播种坐标，由于油菜直播机组在无人播种作业时路径跟踪偏差较小，认为播种机作业时基本保持直线行驶，拖拉机顶端北斗天线与挂接的播种机播种位置变化可忽略不计。因此，可得到北斗天线与播种机各通道播种位置之间的位置关系，如图11所示。

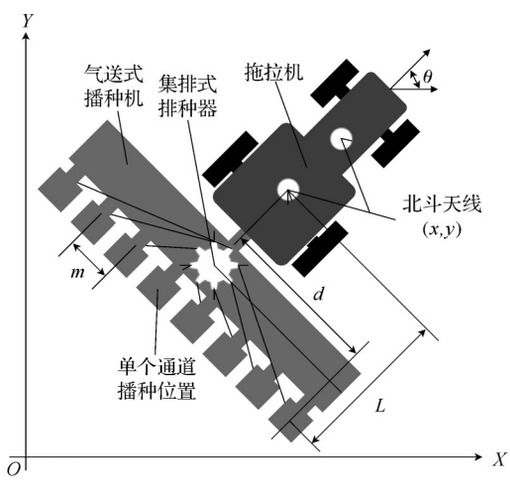


图11 北斗天线与各通道播种位置关系

Fig.11 Beidou antenna in relation to each channel seeding position

云平台网页接收到的播种机定位信息为经、纬度数据，需根据墨卡托投影将其转化为平面坐标[22]。对各播种通道平面坐标进行反墨卡托投影换算，即可得到各播种通道经、纬度坐标。北斗天线安装在直播机组的中心轴线上，假设它的经、纬度坐标经过墨卡托投影后li在作业平面上的投影坐标是(x,y)，第i行播种位置的投影坐标为(x_i,y_i)，两者之间的计算公式：

$$\begin{cases}x_i=x-L\cos\theta+[d-(8-i)m]\sin\theta\\ y_i=y-L\sin\theta-[d-(8-i)m]\cos\theta\end{cases} \tag{3}$$

式(3)中，m为播种行距，m；L为北斗天线与播种机各通道播种位置在前进方向上的距离，m；θ为车辆航向角，(°)；d为北斗天线与边缘播种位置在垂直前进方向上的距离，m。

1.5 系统试验

1)数据传输性能试验。试验时车载计算机首先打开播种监测云数据库，同时建立与云平台网页之间的webSocket网络连接，设定测试数据包大小为61字节，测试数据包唯一编号占用2字节，其余部分按照前文所述的数据包格式填充，数据包内经度、纬度、航向、速度等数据随编号依次累加，便于比对数据传输过程中是否改变，发送时间间隔1 s，持续10 min，即测试上传600个数据包，大小共计36.6 kb。云平台网页监听webSocket网络连接，接收到数据包后立刻发回车载计算机，利用车载计算机计算从数据包被发出到被接收所经历的传输时间。

2)路面试验。在华中农业大学油菜全程机械化试验基地进行水泥路面试验，具体试验步骤如下：启动软件程序，调节悬挂机具霍尔传感器安装位置，使机具下降时不会触及地面。①按照无人播种作业路径规划算法规划导航路径，播种路径设置为11行，播种机组初始上线位置偏差设为1 m，速度档位设置为Ⅱ档慢速，起始时拖拉机处于空挡状态，悬挂机构处于抬升状态。②无人导航过程中通过对转向、离合、档位和悬挂机构的协同控制，完成一键启动、无人播种、田头转弯和作业完成停止等操作。③在试验过程中对播种机位置、航向、速度、转向、离合、档位和悬挂机构状态进行记录。

3)田间试验。2022年9月26日在湖北省安陆市永祥农机现代农业示范基地开展田间试验(图12)。试验仪器设备包括油菜播种监测云平台、华油杂62油菜种子、雷沃804拖拉机、车载计算机、2BYQ-8型气送式油菜直播机、北斗RTK移动站、导航控制箱、车载路由器、薄面激光-硅光电池中小粒径种子流监测装置、油菜宽幅播种作业监测系统终端、北斗RTK移动站前轮转向控制箱、液压机构控制箱等。同时，利用接种袋、数粒仪、标签纸等对检测结果进行记录。

具体试验步骤如下：①向播种机种箱内添加适量油菜种子，使用接种袋收集排种器所排出的种子，安装车载路由器、播种监控终端和种子流传感装置

图 12　田间试验场景

Fig.12　Field test scenes

等播种监测部件；连接前轮转向控制箱、液压机构控制箱，启动油菜直播机，平板电脑登录云平台网页端，开启播种监测终端、车载计算机软件程序。②在车载计算机选取作业田块边界，按照路径规划策略生成套行作业路径，共有11条播种作业路径，云平台网页选择实时接收数据，生成播种质量状态图，点击开始导航按钮，油菜直播机组按照所规划的矩形田块播种作业路径进行无人导航作业，并将作业过程中的实时数据上传至云平台。③在网页端生成播种质量状态图。作业完成后利用Navicat软件查看云数据库中数据内容，同时对接种袋内的种子数量进行人工数粒，统计每个通道种子数，计算远程监测系统播量田间检测准确率，播量检测准确率计算公式如下：

$$p=(1-\frac{m-n}{n})\times 100\% \tag{4}$$

其中，p 为播量检测准确率，m 为实际播量，n 为检测播量。

2　结果与分析

2.1　数据传输性能

数据传输性能试验以无人播种作业数据包在车载计算机和云平台之间的往返传输时延和云数据库数据是否完整为试验指标，评估远程监测系统对所监测数据的实时稳定传输能力。利用Navicat软件查看云服务器数据库中数据内容与测试数据包进行比对，测试数据包内数据均准确上传至云数据库数据表中，数据完整无遗漏。webSocket连接实时传输数据时延如图13所示，信号的传输时延集中在50～80 ms，最大不超过100 ms，满足播种状态图实时生成需求。试验结果表明，远程监测系统数据传输满足实时性和稳定性要求。

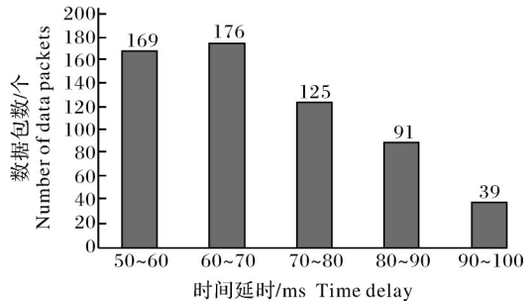


图 13　数据包传输时延

Fig.13　Packet transmission delay

2.2　路面试验

试验开始前，为满足播种农艺要求，需调节播种机排种频率至合适范围内，根据《2022年全国油菜秋冬种技术意见》(http://www.moa.gov.cn/gk/nszd_1/2022/202209/t20220916_6409379.htm)，将油菜直播机播种量设置为300 g/667 m^2，导航作业时播种机前进速度为0.8～1.2 m/s，测得华油杂62油菜千粒重为4.93 g，根据公式计算得到各通道理论排种频率范围为20.99～31.49 Hz，通过改变排种器直流电机两端电压，调节播种机电机转速，最终控制播种机排种频率在理论排种频率范围内。

试验结果显示，油菜直播机组跟踪导航路径完成播种作业，播种作业段横向平均偏差为0.037 m，最大偏差为0.125 m，电控液压机构能够准确接收控制命令完成相应动作，实现直播机组的一键启动、无人播种、田头转弯和作业完成停止，满足无人播种作业需求。油菜直播机组作业轨迹如图14所示，在路面试验结果中，拖拉机最大横向偏差相对较大，其原因可能是由于拖拉机角度传感器通过连杆机构与前轮转轴进行连接安装，受安装方式影响，拖拉机前轮实际转角与角度传感器感应值之间存在死区误差，从而导致拖拉机在转弯时产生较大横向偏差，在田间试验前，对角度传感机构进行改进和修理，拖拉机

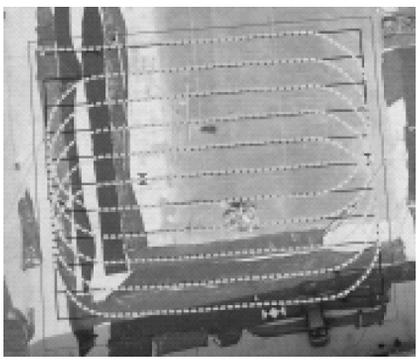


图 14　直播机组作业轨迹

Fig.14　Seeding unit operation track

横向偏差偏大的情况有所改善。

2.3 田间试验

由表3和表4可知，数据通信系统在田间作业环境下工作稳定，田间播种量检测精度不低于96.16%，满足田间播种质量监测要求。田间播种质量如图15所示，可见田块大部分区域播种质量处于合格区间，部分区域存在漏播与重播，而出现漏播与重播可能是排种器受倾斜震动影响导致各通道播种不均匀、排种器气压不稳定、导种管种子积累等因素影响。人工查看田间实际播种情况，并与播种状态图所展示的漏播、重播和合格区域进行对比分析，发现田间大部分区域播种较为均匀，而状态图所显示的漏播区域实际田间播种也较为稀疏，而重播区域其播种量相对较大，说明本研究所生成的播种状态图可直观反映田间实际播种质量情况。

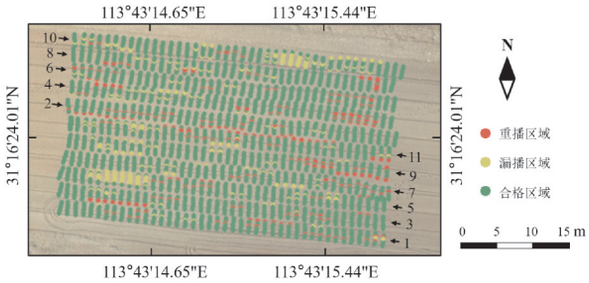


图15 田间播种质量状态图

Fig.15 Field sowing quality status chart

表3 无人播种作业田间试验数据(部分)

Table 3 Unmanned seeding operation field trial data (partial)

数据编号 Data number	经度/(°) Longitude	纬度/(°) Latitudee	航向/(°) Heading	速度/(m/s) Speed	Fre1	Fre2	Fre3	Fre4	Fre5	Fre6	Fre7	Fre8
1	31.273 103 92	113.721 025 71	272.83	1.09	35.33	33.23	32.01	31.37	21.99	21.61	18.31	19.86
2	31.273 104 85	113.721 014 50	274.83	1.10	21.89	23.08	22.13	37.16	25.47	37.81	26.30	20.05
3	31.273 105 79	113.721 003 38	276.29	1.15	19.27	28.47	26.75	24.32	24.14	22.73	25.21	32.15
4	31.273 107 18	113.720 992 43	275.56	1.12	25.36	25.74	31.27	21.74	26.43	37.08	23.75	34.53
5	31.273 108 51	113.720 980 91	274.36	1.10	13.99	29.94	25.91	23.76	19.61	26.65	19.43	23.10
6	31.273 109 75	113.720 969 26	273.00	1.03	24.05	25.09	19.98	25.67	24.21	23.89	24.27	24.30
7	31.273 110 64	113.720 957 79	273.15	1.12	17.34	31.50	18.98	37.06	34.40	22.36	22.27	27.95
8	31.273 111 51	113.72 0946 50	272.54	1.13	33.81	32.92	27.94	33.39	19.84	28.97	26.94	16.08
9	31.273 112 20	113.720 935 23	272.88	1.08	32.88	16.21	17.23	26.91	27.13	30.41	19.32	25.95
10	31.273 113 15	113.720 923 58	272.44	1.02	20.19	27.24	30.68	32.58	27.68	25.45	20.62	20.06
11	31.273 113 90	113.720 912 27	273.06	1.03	32.80	32.66	40.10	25.25	24.98	32.98	22.44	22.19
12	31.273 114 51	113.720 901 15	273.99	1.08	35.54	36.06	38.95	19.76	23.33	30.68	13.93	25.83
…	…	…	…	…	…	…	…	…	…	…	…	…

表4 田间播量检测准确率

Table 4 Field sowing detection accuracy

装置序号 Device number	监测播量/粒 Monitoring seeding volume	实际播量/粒 Actual seeding volume	播量准确率/% Seeding accuracy
1	10 750	10 396	96.77
2	10 810	10 730	99.25
3	11 096	10 881	98.06
4	11 387	10 960	96.25
5	10 821	10 406	96.16
6	11 171	10 827	96.92
7	10 749	10 600	98.61
8	11 297	11 074	98.02

3 讨 论

本研究搭建了油菜直播机组无人播种作业平台，对雷沃拖拉机进行电控液压改装并设计液压控制策略，实现了油菜直播机组无人播种作业。设计了直播机组播种质量信息采集系统与播种质量监测云平台，实现了直播机组播种质量信息的采集与播种状态图的生成。试验结果表明，油菜直播机组无人播种作业的作业段横向平均偏差为0.037 m，最大偏差为0.125 m，云平台与车载计算机之间的数据传输时延不超过100 ms；直播机组电控液压改装系统运行稳定、可靠；田间检测播量准确率不低于96.16%。本研究在课题组前期研究[14]的基础上融合北斗定位数据和播种监测数据，并基于云平台生成播种状态图，实现了对田间播种质量数据的实时显示，与已有播种质量监测系统[16]相比，具有监测精度高、成本较低的特点，进一步可结合播深信息，获取种子在田间的三维空间分布，更加精确评估田间播种效果。该系统能够实现无人播种作业、播种状

态图生成等功能，有助于提升油菜直播作业智能化水平，可为后续油菜无人播种过程中播种数据挖掘、田间精确管理、产量预测提供支持。

参考文献 References

[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 X Y，LIAO Q X，LIAO Y T，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 with English abstract).

[2] 张闻宇，丁幼春，王雪玲，等. 基于SVR逆向模型的拖拉机导航纯追踪控制方法[J]. 农业机械学报，2016，47(1)：29-36. ZHANG W Y，DING Y C，WANG X L，et al. Pure pursuit control method based on SVR inverse-model for tractor navigation[J]. Transactions of the CSAM，2016，47(1)：29-36(in Chinese with English abstract).

[3] 曾宇，雷雅丽，李京，等. 氮、磷、钾用量与种植密度对油菜产量和品质的影响[J]. 植物营养与肥料学报，2012，18(1)：146-153. ZENG Y，LEI Y L，LI J，et al. Effects of application amounts of nitrogen，phosphate and potassium and planting density on yield and quality of rapeseed[J]. Plant nutrition and fertilizer science，2012，18(1)：146-153(in Chinese with English abstract).

[4] 赵丽琴，郭玉明，张培增，等. 小麦免耕播种机性能指标的关联度分析与灰色聚类评估[J]. 农业工程学报，2011，27(9)：54-57. ZHAO L Q，GUO Y M，ZHANG P Z，et al. Correlation degree analysis and gray clustering evaluation on performance indices of wheat no-tillage planter[J]. Transactions of the CSAE，2011，27(9)：54-57(in Chinese with English abstract).

[5] KARIMI H，NAVID H，BESHARATI B，et al. Assessing an infrared-based seed drill monitoring system under field operating conditions[J]. Computers and electronics in agriculture，2019，162：543-551.

[6] XIE C J，ZHANG D X，YANG L，et al. Precision seeding parameter monitoring system based on laser sensor and wireless serial port communication[J/OL]. Computers and electronics in agriculture，2021，190：106429 [2023-02-13]. https://doi.org/10.1016/j.compag.2021.106429.

[7] 张朝宇，董万静，熊子庆，等. 履带式油菜播种机模糊自适应纯追踪控制器设计与试验[J]. 农业机械学报，2021，52(12)：105-114. ZHANG C Y，DONG W J，XIONG Z Q，et al. Design and experiment of fuzzy adaptive pure pursuit control of crawler-type rape seeder[J]. Transactions of the CSAM，2021，52(12)：105-114(in Chinese with English abstract).

[8] 杨洋，查家翼，李延凯，等. 拖拉机机组无人作业协同控制系统设计与试验[J]. 农业机械学报，2022，53(2)：421-429. YANG Y，ZHA J Y，LI Y K，et al. Design and experiment of unmanned operation cooperative control system for tractor operating unit[J]. Transactions of the CSAM，2022，53(2)：421-429(in Chinese with English abstract).

[9] 张雁，李彦明，刘翔鹏，等. 水稻直播机自动驾驶模糊自适应控制方法[J]. 农业机械学报，2018，49(10)：30-37. ZHANG Y，LI Y M，LIU X P，et al. Fuzzy adaptive control method for autonomous rice seeder[J]. Transactions of the CSAM，2018，49(10)：30-37(in Chinese with English abstract).

[10] 王伟康，罗承铭，张国忠，等. 双电机履带式水稻收获机底盘自动导航系统设计与试验[J]. 华中农业大学学报，2022，41(2)：199-207. WANG W K，LUO C M，ZHANG G Z，et al. Design and experiment of automatic navigation system for rice harvester with dual-motor crawler chassis[J]. Journal of Huazhong Agricultural University，2022，41(2)：199-207(in Chinese with English abstract).

[11] 詹文轩，王家忠，弋景刚，等. 基于无人驾驶的小麦密行精密播种机组的设计与试验[J]. 河北农业大学学报，2022，45(1)：115-120. ZHAN W X，WANG J Z，YI J G，et al. Design and test of driverless electric tractor implement combination for wheat precision seeding[J]. Journal of Hebei Agricultural University，2022，45(1)：115-120(in Chinese with English abstract).

[12] 徐琪蒙，李洪文，何进，等. 小麦播种自走式农用移动平台设计与试验[J]. 农业工程学报，2021，37(14)：1-11. XU Q M，LI H W，HE J，et al. Design and experiment of the self-propelled agricultural mobile platform for wheat seeding[J]. Transactions of the CSAE，2021，37(14)：1-11(in Chinese with English abstract).

[13] 丁幼春，陈礼源，王登辉，等. 油菜播种质量监测系统设计与试验[J]. 华南农业大学学报，2021，42(6)：43-51. DING Y C，CHEN L Y，WANG D H，et al. Design and test of monitoring system for rapeseed sowing quality[J]. Journal of South China Agricultural University，2021，42(6)：43-51(in Chinese with English abstract).

[14] 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)：33-41，62. DING Y Q，LIU Y W，YANG L，et al. Monitoring system of maize precision planter based on android and CAN bus[J]. Transactions of the CSAM，2019，50(12)：33-41，62(in Chinese with English abstract).

[15] 黄东岩，朱龙图，贾洪雷，等. 基于GPS和GPRS的远程玉米排种质量监测系统[J]. 农业工程学报，2016，32(6)：162-168. HUANG D Y，ZHU L T，JIA H L，et al. Remote monitoring system for corn seeding quality based on GPS and GPRS[J]. Transactions of the CSAE，2016，32(6)：162-168(in Chinese with English abstract).

[16] YAN B X，WU G W，XIAO Y J，et al. Development and evaluation of a seed position mapping system[J/OL]. Computers and electronics in agriculture，2021，190：106446 [2023-02-13]. https://doi.org/10.1016/j.compag.2021.106446.

[17] 王磊，廖宜涛，廖庆喜，等. 气送式油菜播种机集排器供种装置设计与试验[J]. 农业机械学报，2021，52(2)：75-85. WANG L，LIAO Y T，LIAO Q X，et al. Design and test on centralized metering seed feeding device of air-assisted planter for rapeseed[J]. Transactions of the CSAM，2021，52(2)：75-85(in Chinese with English abstract).

[18] 丁幼春，朱凯，王凯阳，等. 薄面激光-硅光电池中小粒径种子流监测装置研制[J]. 农业工程学报，2019，35(8)：12-20. DING Y C，ZHU K，WANG K Y，et al. Development of monitoring device for medium and small size seed flow based on thin surface laser-silicon photocell[J]. Transactions of the CSAE，2019，35(8)：12-20(in Chinese with English abstract).

[19] 丁幼春，陈礼源，董万静，等. 油菜宽幅播种作业监测系统设计

与试验[J].农业工程学报,2021,37(13):38-45.DING Y C, CHEN L Y, DONG W J, et al. Design and experiment of the sowing monitoring system for a wide-width rapeseed planter[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(13): 38-45(in Chinese with English abstract).

[20] 白晓平,胡静涛,高雷,等.农机导航自校正模型控制方法研究[J].农业机械学报,2015,46(2):1-7.BAI X P, HU J T, GAO L, et al.Self-tuning model control method for farm machine navigation[J].Transactions of the CSAM, 2015, 46(2): 1-7(in Chinese with English abstract).

[21] 李逃昌,胡静涛,高雷,等.基于模糊自适应纯追踪模型的农业机械路径跟踪方法[J].农业机械学报,2013,44(1):205-210.LI T C, HU J T, GAO L, et al. Agricultural machine path tracking method based on fuzzy adaptive pure pursuit model[J]. Transactions of the CSAM, 2013, 44(1): 205-210(in Chinese with English abstract).

[22] QIU Z M, SHI G X, ZHAO B, et al.Combine harvester remote monitoring system based on multi-source information fusion[J/OL].Computers and electronics in agriculture, 2022, 194: 106771 [2023-02-13].https://doi.org/10.1016/j.compag.2022.106771.

Remote monitoring system for unmanned sowing operation of rapeseed direct seeding

WANG Denghui, LU Bang, LI Qiang, LI Haopeng, SUN Yang, DING Youchun

College of Engineering /Ministry of Agriculture and Rural Affairs Key Laboratory of Agricultural Equipment in Mid-Lower Yangtze River, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, *China*

Abstract A remote monitoring system for unmanned sowing operation of rapeseed direct seeding unit was designed by taking the Reeva 804 tractor and its equipped 2BYQ-8 air-fed rapeseed direct seeding machine as the test platform to solve the problem that it is difficult to display the field sowing quality information in real time and intuitively during the unmanned sowing operation of rapeseed direct seeding unit. The system consists of three parts including unmanned sowing platform, unmanned sowing data collection system and sowing quality monitoring cloud platform. Corresponding control strategies were designed to achieve unmanned sowing operation of the direct seeding unit through the electric and hydraulic modification of the gear, clutch, power take off (PTO), and suspension mechanism of the Lovol 804 tractor. A vehicle mounted router was used to establish a local area network between the seeding monitoring terminal and the on-board computer to realize the fusion and synchronization of seeding data and navigation data. Data were transmitted to cloud platforms through network connections for data storage and real-time display. The cloud platform calculated the seeding quality data and its corresponding field location data, and generated the seeding status map of the field operation area based on the high-precision map on the web page. Results showed that the average lateral deviation of the unmanned sowing operation section of direct seeding unit was 0.037 m, with a maximum deviation of 0.125 m. The electric and hydraulic modification system operates stably and reliably, meeting the unmanned operation requirements of the direct seeding unit. The maximum data transmission time delay of the cloud platform communication did not exceed 100 ms under the 4G network conditions. The cloud storage data is complete without omission, the accuracy of field sowing detection of each sowing channel is not less than 96.16%, meeting the real-time and accuracy requirements of remote monitoring system. It is indicated that the system can realize the unmanned sowing operation of rapeseed oil direct seeding unit in the field and the accurate collection and intuitive display of sowing information in the operation area. It will provide reference for the remote monitoring of rapeseed sowing operation, the analysis and visualization of sowing data.

Keywords rapeseed direct seeding; navigation operation; remote monitoring; data transmission; electronic and hydraulic modifications; unmanned sowing operations

(责任编辑:陆文昌)