doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2026.07.014

残膜回收机作业状态监测系统设计与试验

张庆怡[1]　胡金杉[1]　方会敏[1]　王新忠[1,2]　陈学庚[1,2]
(1.江苏大学农业工程学院,镇江 212013;2.石河子大学机械电气工程学院,石河子 832003)

摘要:现有残膜回收机普遍缺乏有效的作业状态监测系统,导致操作人员难以实时掌握机具工作状况,无法及时应对突发故障;同时,作业面积计算也依赖人工或滞后统计,缺乏实时性与准确性。这两方面问题严重制约了机具作业效率与回收效果。为此,本文设计了基于“端-边-云”协同的残膜回收机作业状态监测系统,通过机具关键作业参数在设备层的实时感知、边缘层的异常检测与控制,以及云端的数据管理与高效计算,实现残膜回收机作业状态参数的实时采集、异常检测、报警控制和远程监控。首先基于残膜回收机结构和工作原理提出整机监测系统方案,完成软硬件选型、部署与核心程序开发;进而阐述了关键过程数据的处理方法,特别是基于工况信息的有效作业数据提取机制与作业面积计算方法。田间试验表明,该监测系统对车速、打杆转速、捡拾转速及打包转速的监测相对误差分别为 0.84%、0.54%、3.46% 和 1.27%,仓门状态与捡拾深度报警有效度为 100% 和 98%,远程监测有效度为 100%。在作业面积计算方面,基于有效作业轨迹的实时增量面积计算方法平均准确率为 92.57%,基于轨迹点轮廓的闭合面积计算方法准确率为 97.09%。该系统可实现关键作业参数的实时感知、边缘侧智能决策与云端协同管理,不仅提升了作业可靠性、避免了频繁的人工检查,也为残膜回收机的优化设计与作业智能决策提供了有效的数据支撑。

关键词:残膜回收机;作业状态;实时监测;远程监控
中图分类号:S223.5　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2026)07-0155-10　　**OSID**:

Design and Experiment of Operational Status Monitoring System for Residual Film Recycling Machine

ZHANG Qingyi[1]　HU Jinshan[1]　FANG Huimin[1]　WANG Xinzhong[1,2]　CHEN Xuegeng[1,2]
(1. *School of Agricultural Engineering*, *Jiangsu University*, *Zhenjiang* 212013, *China*
2. *College of Mechanical and Electrical Engineering*, *Shihezi University*, *Shihezi* 832003, *China*)

Abstract: Currently, most residual film recycling machines lack an effective operational status monitoring system, making it difficult for operators to grasp the working conditions of the equipment in real time and respond promptly to sudden failures. At the same time, the calculation of the working area still relies on manual or post-event statistics, resulting in insufficient real-time capability and accuracy. These two issues significantly restrict operational efficiency and compromise the recovery process. To address this, a residual film recycling machine operational status monitoring system was designed based on “device-edge-cloud” collaboration. The system achieved real-time perception of key operational parameters at the device layer, anomaly detection and control at the edge layer, and data management and efficient computing at the cloud layer, thereby realizing real-time acquisition, anomaly detection, alarm control, and remote monitoring of operational status parameters for residual film recycling machine. Firstly, the overall design of the monitoring system was presented, including hardware and software selection, deployment, and core program development. It then elaborated on the processing methods for key data, particularly the mechanism for extracting effective operational data based on working condition information and the algorithm for calculating operational area. Field experiments showed that the monitoring relative errors for machine speed, beating shaft rotation speed, pickup rotation speed and baling rotation speed,

收稿日期:2026-01-04　修回日期:2026-01-16
基金项目:国家重点研发计划项目(2023YFD1701903)和中国博士后科学基金项目(2023M741433、2025M772490)
作者简介:张庆怡(1990—),男,讲师,博士,主要从事智能农机装备研究,E-mail:zhangqingyi@ujs.edu.cn
通信作者:陈学庚(1947—),男,研究员,中国工程院院士,主要从事棉花生产机械化和残膜污染治理研究,E-mail:chenxg130@sina.com

were 0.84%, 0.54%, 3.46%, and 1.27%, respectively. The effectiveness of door status and pickup depth alarms reached 100% and 98%, respectively, and remote monitoring effectiveness reached 100%. Regarding operational area calculation, the real-time incremental area calculation method based on valid operational trajectories achieved an average accuracy of 92.57%, while the closed area calculation method based on trajectory point contour reached an accuracy of 97.09%. This system enabled real-time perception of key operational parameters, intelligent decision-making at the edge, and collaborative management in the cloud. It not only enhanced operational reliability and avoided frequent manual inspections but also provided effective data support for the optimized design and intelligent operational decision-making of residual film recycling machine.

Key words: residual film recycling machine; operational status; real-time monitoring; remote monitoring

0 引言

新疆是我国重要的棉花生产地区,地膜覆盖技术已广泛应用[1]。地膜使用极大地提高了棉花生产水平,但同时也带来了严重的残膜污染问题[2-3]。目前,机械回收是治理残膜污染的主要手段[4-5]。近年来,研究者在残膜回收机关键部件设计与优化方面取得了重要进展,包括拾膜齿[6-8]、输送清杂装置[9-10]、集膜打包机构[11]等核心部件,以及残膜回收机整机研究[12-13]。然而,针对残膜回收机关键作业部件工作参数的实时监测研究仍相对滞后[14]。

对残膜回收机关键作业部件的工作参数进行监测,有助于及时发现残膜回收作业质量异常与机器故障,保障残膜回收作业效果。时谦等[15]利用电涡流传感器以及霍尔传感器监测捡拾机构存在的跳齿问题;薛党勤等[16]利用应变监测以及扭矩监测两个模块监测残膜回收机中松土齿耙以及脱膜辊的应变程度。相关研究验证了通过关键部件监测可有效提升残膜回收机的作业效率与回收效果。在农业机械作业管理中,准确的作业面积统计是结算作业费用、实现精细化作业管理不可或缺的核心数据基础。当前研究多基于农机定位数据,采用 Alpha Shapes[17]以及改进的 NSGA-Ⅱ[18]等不同的算法提取作业面积,以提升计算精度。王德阳等[19]通过卡尔曼滤波算法和构成角方法筛选有效作业面积轨迹,根据有效作业轨迹以及幅宽利用缓冲区计算重复作业面积以及有效面积。FANG 等[20]利用固定的 DBSCAN 参数,结合根据残膜回收机作业特点建立的筛选规则识别残膜回收轨迹中的田地区域与道路区域,并进行作业面积计算。现有面积测算方法仅依赖 GNSS 轨迹数据,而与农机作业部件的实际工况相割裂。由于缺乏对实际工作状态的感知,在复杂的田间作业条件下,系统难以从原始轨迹中精准甄别出真正的有效作业段。

为实现残膜回收机作业状态信息与面积数据的同步采集与融合,本文设计一套基于“端-边-云”协同架构的残膜回收机作业状态监测系统。该系统在设备层实现对打杆机构、捡拾机构、打包机构等全流程关键作业参数的实时感知;在边缘层完成异常检测、实时控制与作业面积计算;在云端实现数据管理、存储与深度分析。通过融合作业部件实时工作参数对卫星定位轨迹进行预处理,系统能够精准提取有效作业轨迹,克服了以往面积测算方法单纯依赖 GNSS 数据导致的轨迹提取复杂、准确性不足的问题。通过基于有效作业轨迹的实时增量面积计算方法和基于轨迹点轮廓的闭合面积计算方法,分别实现作业面积的实时估算和最终高精度核算,兼顾监测的即时性与结果的准确性。为实现残膜回收作业的实时状态监测、精准面积核算与远程可视化管控提供可靠的技术支撑。

1 监测系统总体设计

1.1 残膜回收机结构与工作原理

自走式残膜回收机结构如图 1 所示,主要由秸秆粉碎还田装置、残膜捡拾机构、残膜输运打包机构构成。其工作原理为:机具田间作业时,秸秆粉碎还田装置将秸秆进行粉碎处理,后由螺旋输送器将碎棉秆排放至机具一侧。残膜捡拾机构的弹齿挑起地膜,经输送机构至集膜箱,由打包装置对已回收的残膜进行打包。当集膜箱内的地膜达到一定容量时,

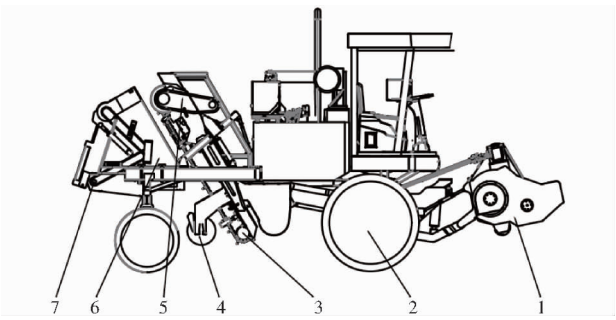


图 1 残膜回收机结构示意图

Fig. 1 Schematic of mechanical structure of residual film recycling machine

1. 秸秆粉碎装置 2. 行走轮 3. 残膜捡拾机构 4. 限深轮 5. 残膜输送机构 6. 集膜箱 7. 集膜箱仓门

液压系统开启膜箱仓门卸膜。

1.2　整机作业状态监测系统方案

残膜回收机的主要作业环节包括秸秆粉碎还田、残膜捡拾与输送打包等。在机械结构确定的前提下，其作业效果主要取决于打杆机构转速、捡拾机构转速、打包机构转速、捡拾深度及作业车速等关键可控变量[8]。在实际作业过程中，若各关键机构未在其合理转速范围内工作，将导致秸秆粉碎效果和残膜回收效果过差；若打包仓门未能及时关闭，将导致已回收的膜卷散落；若捡拾机构未下降到合理工作深度即进行残膜回收作业，将导致残膜捡拾率低甚至无法捡拾。为避免此类异常情况发生，驾驶员需频繁下车查验位于机具前端的秸秆粉碎还田装置和后端的各关键机构，严重影响了作业效果和效率。

采集并分析残膜回收机的实时作业数据，对于优化机具设计、评估回收质量以及实现精准运维具有重要价值。为此，本文基于“端-边-云”架构，设计了一套残膜回收机作业状态监测系统，其总体架构如图 2 所示。

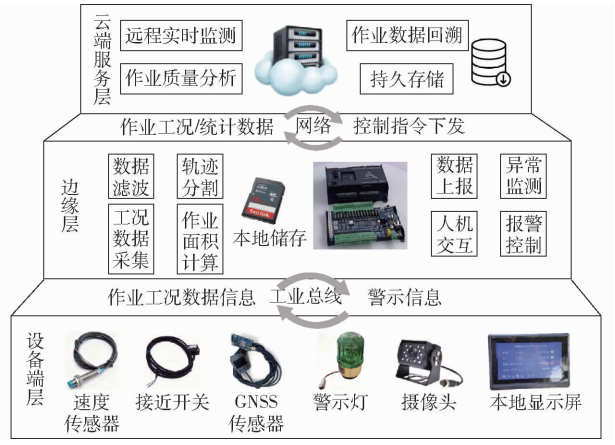


图 2　残膜回收机监测系统框图

Fig. 2　Framework diagram of residual film recycling machine monitoring system

该系统旨在实现对关键作业参数的实时感知、边缘侧智能判断与云端数据管理，从而提升作业可靠性，并为后续的机具优化与智能决策提供数据支撑。该架构自下而上分为：

设备端层：由转速传感器、接近开关等各类传感器、警示灯等执行机构及显示屏等人机交互设备组成，是系统的感知与执行末梢。

边缘层：以车载控制器为核心，实现残膜回收机工况数据实时采集与处理、异常工作状态识别与报警处理、作业轨迹数据处理和作业面积计算、本地人机交互等功能，确保驾驶员能够及时查看相关装置的运行情况，并及时做出调整。

云端服务层：借助移动通信网络，将边缘层处理后的作业工况数据和作业统计数据等关键数据上传至云平台，进行作业大数据持久存储、分析与可视化，支持远程实时监控、作业数据回溯。

2　监测系统设计

2.1　硬件选型与安装

残膜回收作业过程会产生振动以及严重沙尘的情况，选择的传感器需具有一定的抗振性和稳定性。

（1）考虑到监测系统不仅需要完成传感器信息的采集，还需要进行面积计算，选用 STM32H7 系列芯片作为主控制器的核心芯片。该芯片基于 32 位 Arm Cortex ®- M7 内核，运行频率高达 600 MHz，支持双精度浮点运算。

（2）转速传感器选择 SC12 - 20K 型齿轮转速传感器，支持 0 ~ 20 kHz 频率检测，感应距离 2 mm，允许使用温度范围 - 40 ~ 150℃。

（3）仓门开闭监测使用 LJ12A3 - 4 - Z/BX 型接近开关，检测距离 4 mm，响应时间小于等于 2.5 ms，安装至仓门闭合区域。

（4）捡拾深度检测采用 ME - 8108 接触式滚轮限位开关，最小动作行程 35°，具备常开和常闭触点，橡胶接口线防水防尘。

（5）卫星定位通过移远通信 LC29H 实现，支持多卫星双频段定位和 RTK 定位，自主定位精度 1 m，RTK 定位精度 1 cm + 1ppm（RMS），导航更新频率 1 ~ 10 Hz，支持 NMEA0183 协议，通过串口与主控芯片通信，波特率 9 600 ~ 3 000 000 b/s。模组实现作业设备的实时位置定位与运动轨迹记录并传输至控制器。

（6）人机交互设备选择大彩 DC10600KM101AV 型可交互触控屏，处理器主频 400 MHz，分辨率 1 024 像素 × 600 像素，支持 RS485 通讯协议，通讯波特率 1 200 ~ 115 200 b/s，支持 CVBS 摄像头信号输入。

（7）远程通信选用移远通信 EC200S - CN，支持 4G 全网通频段，可通过 UDP、TCP 或 MQTT 协议上传数据到指定服务器。

（8）本地储存设备选用 SanDisk 的 SD 卡，型号为 SDSDUNB - 016G - ZN3IN，存储容量为 16 GB，通过 SDIO 接口与主控制器通信，支持高速读写与数据校验，写入速度与读取速度分别为 10、80 MB/s。

2.2　主控制器软件设计

开机后，主控制器自动读取已储存的设置信息，并初始化系统、创建用户任务、启动多任务，进入任务调度环节。通过逻辑判断，对相关部件参数进行

实时监测与记录。

考虑到采集系统的实时性要求,采用实时操作系统 FreeRTOS 实现各个任务的调度与管理。系统核心由 5 个独立任务组成,通过消息队列实现任务间通信。开关检测任务(switchTask)等待读取 4 路 GPIO 输入状态,采用位操作技术将开关状态封装为字节数据,需要更新显示的内容放入显示队列(xQueue_show);速度处理任务(speedTask)用于从速度队列(xQueue_speed)取出定时器的计数值,根据传感器的设置参数计算转速和车速,并利用中值滤波和滑动窗口滤波算法预处理数据,结果放入显示队列(xQueue_show)。卫星定位任务(gpsTask)负责接收 GNSS 模块的 GNGGA 语句,并解析时间、经纬度信息,同时读取开关检测任务(switchTask)数据,生成作业轨迹报文。该报文随后进入作业统计任务(areaTask)中,用于作业轨迹数据集的构造、作业面积的计算,面积计算结果经 xQueue_show 数据队列后进入人机交互任务(hmiTask)进行数据显示、上报服务器和本地保存。软件流程图如图 3 所示。

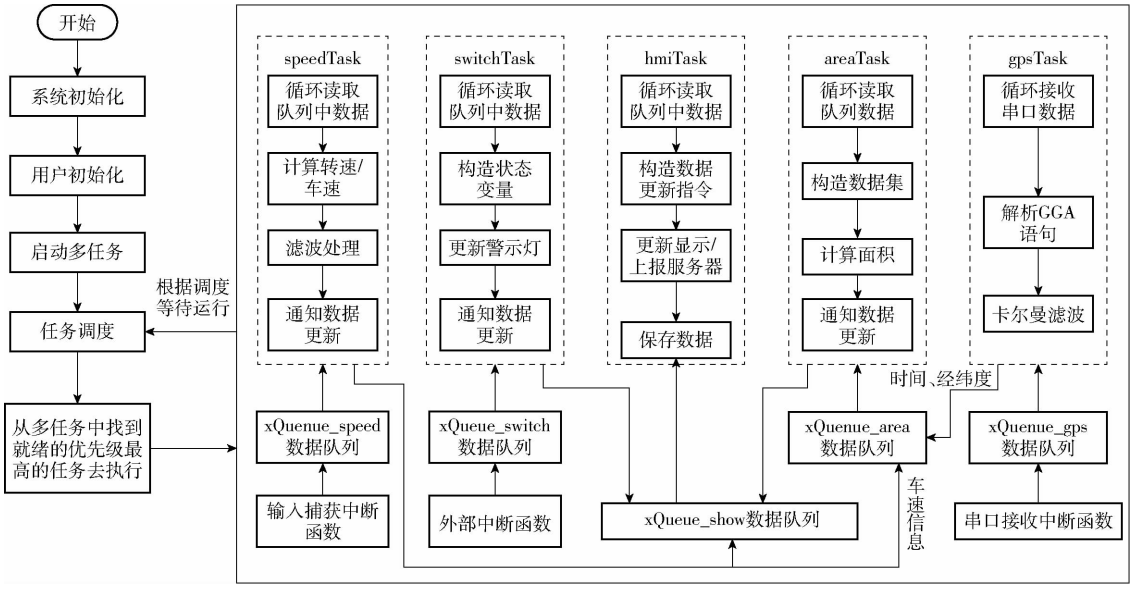


图 3 软件流程图

Fig. 3 Flowchart of software

2.2.1 工况数据采集

(1)转速信号采集:在定时器的输入捕获中断处理函数中,通过计算相邻边沿的时间间隔来计算信号频率 f,将数据放入速度数据队列(xQueue_speed)。速度任务(speedTask)循环读取速度数据队列中数据,根据预设的齿数 Z 计算相关机构的转速 R,即

$$R=\frac{60f}{Z} \tag{1}$$

(2)车速信号采集:车速 v 通过驱动轮轴的转速换算得到,换算公式为

$$v=0.06\pi DR \tag{2}$$

式中 D——车轮有效滚动直径,m

车速信号输入 xQueue_show 队列和 xQueue_area 队列。

(3)状态量信号采集:针对仓门开闭状态、捡拾深度这类变化缓慢的物理量,采用外部中断触发机制,仅在信号跳变时启动处理流程,以高效完成状态变量的更新。配置外部中断引脚,设置为双边沿触发;在中断服务函数中,读取当前引脚状态将新状态发送到 xQueue_switch 队列;switchTask 从队列中读取状态数据,并通过硬件定时器进行去抖动处理;确认状态稳定后,与上一次保存的状态比较,如果状态改变,则更新系统状态和警示灯,同时显示数据更新。

(4)GNSS 数据采集:对于 GNSS 模块提供的定位、时间、航向角等数据,采用异步串行通信(UART)接口。系统通过 DMA 空闲中断方式接收数据包,依据 NMEA0183 协议解析经纬度、时间、航向角等数据,并将其放入 xQueue_area 队列中。

2.2.2 异常检测与报警控制

为提高残膜回收机作业的可靠性与作业质量,设计了一套智能报警控制系统。该系统通过动态关联设备运行状态,实现异常情况的分级精准报警,将报警类型明确划分为“作业质量提醒”、“性能严重异常”与“安全功能故障”3 个等级,从而有效区分轻微提醒、需干预的警告及必须立即处理的故障。具体设计如表 1 所示。

2.3 云端服务器软件设计

云端服务器程序基于 Node. js 搭建,利用 net、

表 1　报警分类、触发条件和提醒方式

Tab. 1　Alarm classification, triggering conditions and notification methods

类型	触发条件	报警方式	提示内容
预警（提醒）	工作参数（如转速、车速）连续 5 s 偏离推荐工作范围 50%	黄灯点亮 屏幕显示	工作参数异常，可能导致收膜质量下降
严重报警（警告）	参数严重异常：关键参数连续 5 s 严重偏离推荐工作范围 100% 性能劣化：同一预警在单次作业中频繁触发（如连续 5 次）	黄灯闪烁 屏幕显示	打杆/捡拾/打包转速信号异常，可能导致功能失效，请立即检查！
故障报警（故障）	车辆行驶中，仓门未闭 车辆行驶中，捡拾机构未在“工作”位置	红灯闪烁 屏幕显示	停车确认仓门关闭/捡拾机构处于工作位置

http 及 ws 核心模块实现对边缘设备层经 4G 网络上传数据的接收、实时处理、持久化存储与交互式可视化管理。具体包括：

（1）通过 net 模块创建的 TCP 服务器监听并维护与远程控制器的长连接，持续接收边缘层上传的机器工况和作业统计数据。接收到原始数据后，服务器进行解密、协议解析与有效性校验。随后，将结构化数据异步写入 MySQL 数据库进行持久化存储，确保所有历史状态可追溯。

（2）为满足管理端对实时性的要求，系统利用 ws 模块构建 WebSocket 服务器。一旦有新的设备数据被接收并处理，系统会主动通过已建立的 WebSocket 连接将数据推送到 Web 前端，从而实现管理界面的数据实时刷新与可视化展示，形成从物理设备到用户界面的低延迟数据流。

（3）响应来自边缘层的特定计算请求（如基于历史数据序列的面积计算）。服务器调用业务逻辑处理单元，查询数据库中的相关记录，执行计算后，将结果通过对应的 TCP 链路下发至请求设备，完成边缘协同计算任务。

（4）通过 http 模块提供的 RESTful API 接口，响应前端管理界面的各类查询请求（如按时间范围、设备标识进行条件检索），从 MySQL 数据库中获取相应数据并以 JSON 格式返回，支撑 Web 端的图表生成与历史数据分析[21]。

3　关键数据处理方法

3.1　基于工况信息的有效作业轨迹提取

当车速满足预设范围并且工作部件处于工作状态时，判定当前工作状态为有效状态，否则视为无效状态。如图 4 所示，从定位数据集合中提取有效作业状态，其中图 4b 与图 4d 分别是从原始的定位数据点集（图 4a 与图 4c）中，依据作业状态进行识别筛选得到的结果。假设车速 v 预设范围是[v_{min},

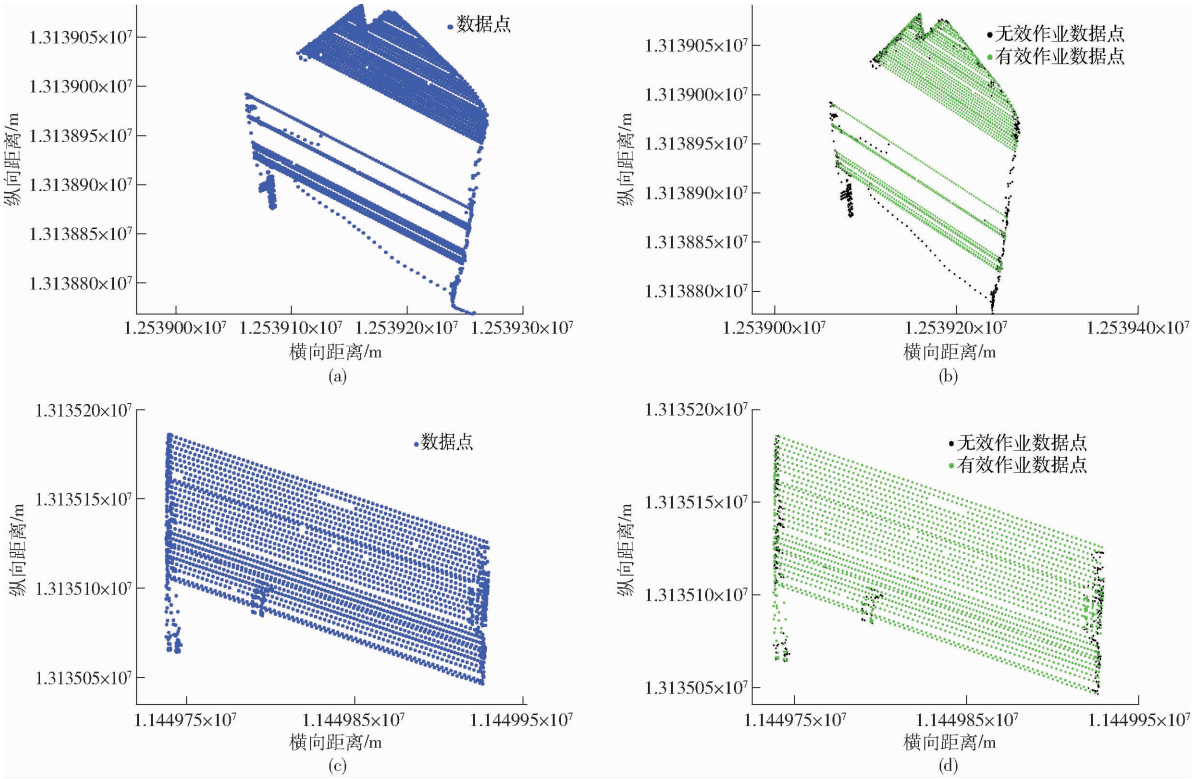


图 4　有效作业数据点集的提取

Fig. 4　Extraction of effective operational data points set

$v_{max}]$,工作状态是一个布尔值,用 w 表示,其中 $w=1$ 表示工作状态,$w=0$ 表示非工作状态。对于每个时间点 t,有效状态 e_t 是一个二进制变量,由车速和工作部件状态共同决定。即有效状态 e_t 定义为

$$e_t = I\{v_{min} \leqslant v_t \leqslant v_{max}\} I\{w_t = 1\} \tag{3}$$

其中,$I\{\cdot\}$ 是指示函数,当条件为真时返回 1,否则返回 0。

设 $T=\{t_1,t_2,\cdots,t_n\}$,其中 t_n 为 GNSS 模块接收到的时间戳。对于每个时间戳 $t \in T$,可得到轨迹点坐标 $p_t=(\phi_t,\lambda_t)$,其中:ϕ_t 为纬度,λ_t 为经度。可以得到此时的数据记录

$$r_t = (t, p_t, e_t) \tag{4}$$

所有的数据记录组成完整 GNSS 轨迹数据集

$$D = \{r_t \mid t \in T\} = \{(t, p_t, e_t) \mid t \in T\} \tag{5}$$

有效作业数据集 D_{eff} 是 D 的子集,定义为

$$D_{eff} = \{r_t \in D \mid e_t = 1\} = \{(t, p_t, 1) \mid t \in T, e_t = 1\} \tag{6}$$

3.2 基于有效作业轨迹的实时增量面积计算方法

针对残膜回收机作业过程中面积实时计算需求,本文提出一种基于有效作业轨迹的实时增量面积计算方法。该方法通过卫星定位装置实时获取机具经纬度坐标,经坐标转换函数映射为平面直角坐标系下的位置点。为消除定位误差带来的轨迹漂移,采用卡尔曼滤波算法对轨迹点进行实时平滑处理。核心计算过程采用动态缓冲区合并策略:首先,为每个有效轨迹点创建作业宽度缓冲区;其次,建立基于 R 树的空间索引结构,将缓冲区的最小外接矩形(MBR)作为索引节点;然后,通过增量式计算方法,仅处理新轨迹点与已有缓冲区的重叠区域,避免重复计算;最后,基于多边形布尔运算实时更新总面积。

计算步骤如下:

(1)设定机具的作业幅宽,初始化 R 树索引,总面积 $S=0$,上一个轨迹点 P_l 设为空。

(2)当接收到一个新的轨迹点 $P_c \in D_{eff}$ 时,采用 UTM 投影将 WGS84 坐标转换为平面坐标[22]

$$\begin{bmatrix} x_c \\ y_c \end{bmatrix} = f_{UTM}(\lambda, \phi, z) \tag{7}$$

式中 λ——经度 ϕ——纬度

z——UTM 投影带号

f_{UTM}——UTM 投影下的坐标转换函数

(3)以上一个轨迹点 $P_l(x_l,y_l)$ 和当前轨迹点 $P_c(x_c,y_c)$ 计算航向角 θ_c,即

$$\theta_c = \arctan\frac{y_c - y_l}{x_c - x_l} \tag{8}$$

以轨迹点 $P_c(x_c,y_c)$ 和 $P_l(x_l,y_l)$ 的中点 $P_m(x_m,y_m)$ 为中心,生成宽度为 W、长度为 L(P_c 与 P_l 直线距离)的矩形缓冲区 R_k,即

$$R_k = \text{ConvexHull}\{V_1, V_2, V_3, V_4\} \tag{9}$$

其中,V_1、V_2、V_3、V_4 是矩形的 4 个顶点坐标,坐标为

$$V_1 = \left(x_c - \frac{W}{2}\sin\theta_c - \frac{L}{2}\cos\theta_c, y_c + \frac{W}{2}\cos\theta_c - \frac{L}{2}\sin\theta_c\right) \tag{10}$$

$$V_2 = \left(x_c - \frac{W}{2}\sin\theta_c + \frac{L}{2}\cos\theta_c, y_c + \frac{W}{2}\cos\theta_c + \frac{L}{2}\sin\theta_c\right) \tag{11}$$

$$V_3 = \left(x_c + \frac{W}{2}\sin\theta_c + \frac{L}{2}\cos\theta_c, y_c - \frac{W}{2}\cos\theta_c + \frac{L}{2}\sin\theta_c\right) \tag{12}$$

$$V_4 = \left(x_c + \frac{W}{2}\sin\theta_c - \frac{L}{2}\cos\theta_c, y_c - \frac{W}{2}\cos\theta_c - \frac{L}{2}\sin\theta_c\right) \tag{13}$$

(4)设已有缓冲区集合为 $R_l=\{R_1,R_2,\cdots,R_{k-1}\}$,新缓冲区为 R_k。从 R 树索引中查询所有与 R_k 相交的历史缓冲区矩形。计算 R_k 与每个历史缓冲区矩形的交集,合并这些交集并计算面积。则新增面积 ΔS_k 表示为

$$\Delta S_k = A(R_k) - A\left(R_k \cap \bigcup_{i=1}^{k-1} R_i\right) \tag{14}$$

式中,$A(\cdot)$ 表示多边形面积函数。对于有 n 个顶点的多边形 P,其顶点按顺时针或逆时针排列为 $(x_1,y_1),(x_2,y_2),\cdots,(x_n,y_n)$,面积计算公式为

$$A(P) = \frac{1}{2}\left|\sum_{i=1}^{n}(x_i y_{i+1} - x_{i+1} y_i)\right| \tag{15}$$

其中 $x_{n+1}=x_1 \quad y_{n+1}=y_1$

(5)更新累计面积,计算式为

$$S_t(k) = S_t(k-1) + \Delta S_k \tag{16}$$

(6)窗口向前滑动,将新缓冲区 R_k 插入到历史缓冲区集合 R_l 中,将当前轨迹点 P_c 赋值给上一个轨迹点 P_l,新接收一个轨迹点作为当前轨迹点 P_c,从步骤(2)开始下一轮计算。

3.3 基于轨迹点轮廓的闭合面积计算方法

基于有效作业轨迹的实时增量面积计算方法虽然能够提供即时反馈,但其精度受轨迹点密度、采样频率及定位误差的影响。特别是在转弯和边界区域,轨迹点分布不均匀易导致面积计算偏差。为此,在作业完成后,可利用全部轨迹点信息,通过轮廓拟合方法得到更准确的作业轨迹边界,避免缓冲区重叠或遗漏问题,从而计算更精确的作业面积。具体步骤如下:

(1)设有效作业轨迹点集为 $D_{eff}=\{P_1,P_2,\cdots,P_n\}$,其中每个轨迹点 $P_i=(x_i,y_i,t_i)$ 包含平面坐标 (x_i,y_i) 和时间戳 t_i。首先按时间戳升序排序,确保 $t_1 \leqslant t_2 \leqslant \cdots \leqslant t_n$。

(2)从时间戳最早的点P_1开始,依次检查相邻点的时间间隔。设时间连续阈值为$\Delta t_{\max}$(通常根据作业类型和采样频率设定,如 5 s),当相邻点时间差$t_{i+1}-t_i>\Delta t_{\max}$时,认为轨迹在此处中断,将当前点之前连续的点划分为一段轨迹。最终得到 m 个连续轨迹段 $T=\{T_1,T_2,\cdots,T_m\}$,其中 $T_k=\{(x_{k,1},y_{k,1},t_{k,1}),\cdots,(x_{k,l},y_{k,l_k},t_{k,l_k})\}$ 表示第 k 个轨迹段,包含l_k个点。

(3)对每个轨迹段 T_k中的点进行道格拉斯-普克简化,在保证形状精度的同时减少点数,提高计算效率。道格拉斯-普克简化的简化阈值设为 $\epsilon=W/10$。

(4)将简化后的轨迹视为折线,沿折线生成宽度为 W 的缓冲区。具体过程如下:①对于折线的每个线段 $L_j=P_{k,j}P_{k,j+1}$,计算其单位方向向量

$$\boldsymbol{d}_j=\frac{(x_{k,j+1}-x_{k,j},y_{k,j+1}-y_{k,j})}{\|\boldsymbol{P}_{k,j+1}-\boldsymbol{P}_{k,j}\|} \tag{17}$$

②计算线段的单位法向量(垂直于线段指向左侧)

$$\boldsymbol{n}_j=(-d_{j,y},d_{j,x}) \tag{18}$$

③将线段向两侧平移 $W/2$,得到两条平行线

$$L_j^{\text{left}}=\left\{\boldsymbol{P}+\frac{W}{2}\boldsymbol{n}_j\,\middle|\,\boldsymbol{P}\in L_j\right\} \tag{19}$$

$$L_j^{\text{right}}=\left\{\boldsymbol{P}-\frac{W}{2}\boldsymbol{n}_j\,\middle|\,\boldsymbol{P}\in L_j\right\} \tag{20}$$

④在线段端点处,以 $W/2$ 为半径作圆弧连接两侧平行线,形成封闭区域。

(5)将上述平移后的线段和圆弧离散化为多边形顶点,最终得到轨迹段 T_k的缓冲区多边形 B_k,表示为顶点序列 $V_k=\{(x_1^k,y_1^k),(x_2^k,y_2^k),\cdots,(x_{n_k}^k,y_{n_k}^k)\}$,顶点按逆时针方向排列。

(6)对所有轨迹段的缓冲区进行并集运算,得到完整的作业区域 A

$$A=\bigcup_{k=1}^{m}B_k \tag{21}$$

由于缓冲区多边形可能存在重叠,使用多边形并集算法将所有缓冲区合并,得到一个多边形集合。这个集合中的每个多边形代表一个连通分量,但多边形可能带有孔洞。

(7)设作业区域 A 由 M 个连通分量组成,每个连通分量 C_m包含一个外边界和若干个内边界(孔洞)。则实际作业面积 S 为所有外边界面积之和减去所有内边界面积之和,即

$$S=\sum_{m=1}^{M}\left(S_{\text{outer},m}-\sum_{h=1}^{H_m}S_{\text{inner},m,h}\right) \tag{22}$$

式中　$S_{\text{outer},m}$——第 m 个连通分量外边界的面积

$S_{\text{inner},m,h}$——第 h 个内边界(孔洞)的面积

H_m——第 m 个连通分量包含的孔洞数

每个多边形(无论是外边界还是内边界)的面积使用鞋带公式计算。对于顶点序列 $V=\{(x_1,y_1),(x_2,y_2),\cdots,(x_n,y_n)\}$,其面积为

$$S=\frac{1}{2}\sum_{i=1}^{n}(x_iy_{i+1}-x_{i+1}y_i) \tag{23}$$

其中$x_{n+1}=x_1,y_{n+1}=y_1$。外边界顶点按逆时针排列时面积为正,内边界顶点按顺时针排列时面积为负,因此直接求和即可得到净面积。

4　试验

4.1　试验地点与方法

为了验证监测系统的性能能否满足实际要求,于 2025 年 11 月在新疆维吾尔自治区库尔勒市开展了残膜回收监测系统的田间试验,对系统监测的数据准确性与传输稳定性进行验证,试验现场见图 5。



图 5　监测系统硬件组成与分布

Fig. 5　Monitoring system hardware composition and distribution

残膜回收机正常回收残膜作业,以五点采样方法进行各个参数的随机测样。

选择手持转速仪(VICTOR,VC6236P,分辨率 0.1 r/min)、秒表(申沃,XL-026N,精准度 0.01 s)、卷尺(2 m,50 m)以及便携式计算机,进行关键部件(捡拾机构、打包机构以及打杆机构等)转速、仓门状态、整机作业速度、数据传输量的测量。

4.2 结果分析

4.2.1 工作状态监测准确性

各关键部件的转速测量结果如表 2 所示。利用手持式转速表测得的打杆转速实测值与监测值的绝对误差为 11.87 r/min,相对误差为 0.54%;捡拾转速的实测值与监测值的绝对误差为 2.54 r/min,相对误差为 3.46%;打包转速的实测值与监测值的绝对误差为 2.03 r/min,相对误差为 1.27%。其中,打杆转速的测量相对误差最小,捡拾转速的测量相对误差最大,这主要是因为打杆转速比捡拾转速高的多。然而,捡拾转速的测量绝对误差仅 2.54 r/min,且 3 种关键部件转速的测量误差都在可接受范围内,说明本监测系统可满足关键部件的转速监测要求。同时,对于残膜回收机工作速度监测而言,车速的实测值与监测值的绝对误差为 0.06 km/h,相对误差为 0.84%,亦可以满足车速的监测要求。

表 2 各关键部件转速的监测结果

Tab. 2 Result of speed monitoring for key components

项目	车速/(km·h^{-1})	打杆转速/(r·min^{-1})	捡拾转速/(r·min^{-1})	打包转速/(r·min^{-1})
实测值	6.56 ± 0.19	2 180.47 ± 4.66	73.34 ± 1.86	159.16 ± 2.63
监测值	6.50 ± 0.18	2 168.60 ± 5.50	70.80 ± 1.70	157.13 ± 2.39
相对误差/%	0.84	0.54	3.46	1.27

对仓门进行连续开-闭试验,检验仓门打开时监测系统能否发出仓门未关的报警。试验结果表明,在 100 次的仓门开闭试验中,仓门打开时能够正确发出报警信号,且准确率为 100%。对捡拾齿进行合格深度检验试验,检验捡拾齿未达指定深度时能否持续发出深度不达标的报警。试验结果表明,在 100 次捡拾深度合格性检测中,仅出现 2 次捡拾齿未达指定深度前停止报警的情况(即未达合格捡拾深度却被系统判定为捡拾深度合格)。究其原因,残膜回收机机架的安装余量使捡拾齿下降速度过快过程中,突然接触接近开关,造成了系统误判。后续将加入算法识别接近开关的瞬时受力以规避此异常情况。

4.2.2 面积监测准确性

为了验证本监测系统在面积统计上的准确性,本次共采集了 12 个残膜回收作业区域进行面积计算对比试验。分别利用凸包法和网格法与本文中的作业面积计算方法(基于有效作业轨迹的实时增量面积计算方法和基于完整轨迹点轮廓的闭合面积计算方法)进行对比。

采用 4 种面积计算方法分别计算 12 个地块面积,结果如图 6 所示。基于轨迹点轮廓的闭合面积计算方法(完整轮廓法)平均准确率达到了 97.09%。基于轨迹点所在网格的算法(网格法)和基于有效作业轨迹的实时增量面积计算方法(实时增量法)准确率次之,为 93.41% 和 92.57%。凸包法的面积计算准确率最低,仅为 90.52%,因其在处理不规则地块时存在较大误差。对不规则田地区域进行凸包计算时,由于田地区域的边界突出会造成凸包的过度计算,导致计算出的作业面积偏大,如地块 6。总体而言,实时增量法可用于残膜回收机作业时的实时作业面积计算;当次作业结束时完整轮廓法可以提供更为准确的面积数据,为残膜回收作业监测提供有力的数据支撑。

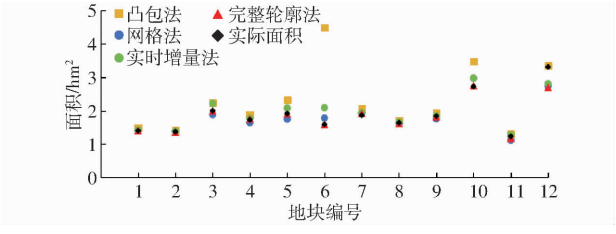


图 6 基于不同方法的作业面积比较

Fig. 6 Comparison of working area based on different methods

4.2.3 远程数据监测准确性与实时性

在残膜回收机工作过程中改变作业速度、调节关键部件(打杆、捡拾、打包装置)转速、人为开闭仓门等,检验远程端的数据显示是否会实时变化。试验结果表明,机载屏幕上显示数值与远程监测端数值一致,且网络端能正常更新数据,远程数据监测准确度 100%。PC 端、手机端和现场实测对比图见图 7。

为了验证系统的数据传输性能,本研究编写了基于 Python requests 库的自动化监测脚本,对数据上传至云端、并下发至 Web 端的延迟时间数据进行

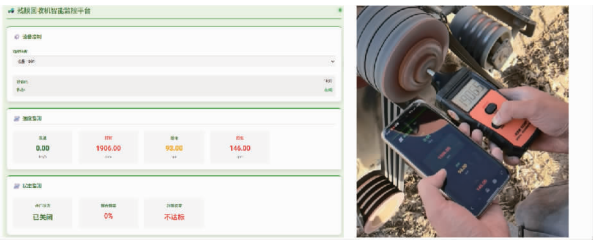


图 7　PC 端、手机端和现场实测图

Fig. 7　Measurement images of PC, mobile and on-site

记录。样本数据采集选择分段统计法，每间隔 5 min 截取连续 30 s 内的平均延时。经过连续 14 h 的通信稳定性试验，数据传输延时的结果如图 8 所示，平均延时仅为 32.74 ms，满足监测系统实时性的要求。

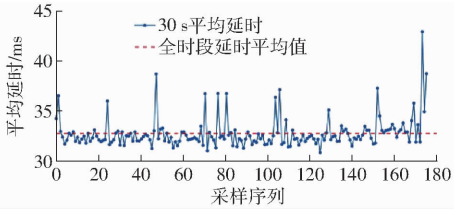


图 8　数据传输延时测试结果

Fig. 8　Test results of data transmission latency

5　结论

（1）设计并实现了一种基于“端-边-云”协同的残膜回收机作业状态监测系统。该系统集成了转速传感器、接近开关、卫星定位模块、人机交互终端及报警装置，能够对捡拾机构、打包机构、打杆机构及行驶速度等关键工况参数进行实时监测，并准确判断仓门状态与捡拾机构位置，实时反馈至人机交互界面。通过本地终端与远程 Web 平台，系统实现了作业状态显示、作业轨迹记录、面积计算及全过程可视化追溯，为残膜回收作业提供了完整的监测与管理解决方案。

（2）田间试验结果表明，系统运行状态监测准确可靠，其中作业速度与关键部件转速（捡拾、打包及打杆机构）监测平均误差小于 5%，仓门状态与捡拾机构位置识别准确率分别为 100% 和 98%。系统 4G 通信稳定，远程数据监测准确度 100%。该系统运行稳定可靠，实现了残膜回收作业的实时监测、远程可视化管理和数据集中存储，显著降低了操作人员工作强度，为残膜回收机的优化设计与作业智能决策提供了有效的数据支撑。

（3）在作业面积统计方面，明确了两种面积计算方法的互补应用策略。试验表明，基于有效作业轨迹的实时增量面积计算方法（准确率 92.57%）能够提供作业区域的实时可视化进度，满足驾驶员田间作业引导与管理端动态调度的实时需求；而基于轨迹点轮廓的闭合面积计算方法（准确率 97.09%）利用完整的作业轨迹构建已作业田地区域边界，能够提供更加准确的作业面积数据，适用于作业结束后的最终核算与精准计费。两者结合可以满足“过程管控”与“结果结算”的不同需求，为残膜回收作业提供了全流程的数据支撑。

参　考　文　献

[1] YAN H, MA J, ZHANG J, et al. Effects of film mulching on the physiological and morphological parameters and yield of cucumber under insufficient drip irrigation[J]. Irrigation and Drainage, 2022,71(4):897 - 911.

[2] 赵岩, 陈学庚. 我国棉花产业高质量生产面临的问题与展望[J]. 塔里木大学学报, 2023,35(1):1 - 8.
ZHAO Yan, CHEN Xuegeng. Problems and prospects of high-quality cotton production in China[J]. Journal of Tarim University, 2023,35(1):1 - 8. (in Chinese)

[3] 温浩军, 陈学庚, 陈浩, 等. 农田地膜回收机械应用现状与发展[J]. 农业环境科学学报, 2024,43(6):1271 - 1277.
WEN Haojun, CHEN Xuegeng, CHEN Hao, et al. Application status and development of farmland mulch recycling machinery [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2024,43(6):1271 - 1277. (in Chinese)

[4] 缑海啸, 温浩军, 陈学庚. 二阶钉齿链板式残膜回收装置设计与试验[J]. 农业工程学报, 2024,40(19):1 - 11.
GOU Haixiao, WEN Haojun, CHEN Xuegeng. Design and test of the two-order pin-tooth chain plate type residual film recovery device[J]. Transactions of the CSAE, 2024, 40(19): 1 - 11. (in Chinese)

[5] 蒋德莉, 颜利民, 陈学庚, 等. 纵向型钉齿链式地膜捡拾装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2025,56(1):267 - 281.
JIANG Deli, YAN Limin, CHEN Xuegeng, et al. Improved design and test of longitudinal nail-tooth-chain plastic film pickup device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery. 2025,56(1):267 - 281. (in Chinese)

[6] HUANG W, WANG H, DAI W, et al. Study on the throwing device of residual film recycling machine for the plough layer[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2024,227:109679.

[7] JIANG D, YAN L, CHEN X, et al. Design and experiment of nail tooth picking up device for strip type residual film recycling and baling machine[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2023,16(6):85 - 96.

[8] ZHANG Z, CHEN X, WANG X, et al. Design and test of the arc-shaped nail-tooth roller residual film recovery machine from the sowing layer[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2024,17(1):90 - 98.

[9] 田绍华, 王萍, 康建明, 等. 气吸式残膜回收机集膜装置改进设计与试验[J]. 中国农机化学报, 2023,44(4):1 - 6.
TIAN Shaohua, WANG Ping, KANG Jianming, et al. Improved design and test of film collecting device of air suction residual

film recovery machine[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2023,44(4):1 - 6. (in Chinese)

[10] 王旭峰, 胡灿, 鲁兵, 等. 抛膜链齿输送式残膜回收机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2018,49(3):122 - 129.
WANG Xufeng, HU Can, LU Bing, et al. Design and experiment of sprocket conveying residual film recycling machine of casting film[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery. 2018,49(3):122 - 129. (in Chinese)

[11] 杨松梅, 陈学庚, 颜利民, 等. 残膜回收机带式卷膜装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2021,52(2):135 - 144.
YANG Songmei, CHEN Xuegeng, YAN Limin, et al. Design and experiment on belt-type curl-up film device for residual plastic film recycling machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021,52(2):135 - 144. (in Chinese)

[12] 史增录, 张学军, 刘小鹏, 等. 卷辊式耕层残膜回收机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2024,55(2):128 - 137.
SHI Zenglu, ZHANG Xuejun, LIU Xiaopeng, et al. Design and test of roll-type tillage layer residual film recovery machine [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024,55(2):128 - 137. (in Chinese)

[13] 张慧明, 陈学庚, 颜利民, 等. 随动式秸秆还田与残膜回收联合作业机设计与试验[J]. 农业工程学报, 2019,35(19):11 - 19.
ZHANG Huiming, CHEN Xuegeng, YAN Limin, et al. Design and test of master-slave straw returning and residual film recycling combine machine[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(19): 11 - 19. (in Chinese)

[14] 周亚宾, 卓海鹏, 谢建华, 等. 链耙式残膜回收机链传动故障监测系统的设计[J]. 农机化研究, 2022,44(10):82 - 87.
ZHOU Yabin, ZHUO Haipeng, XIE Jianhua, et al. Design of chain drive fault monitoring system of chain harrow residual film recycle[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2022,44(10):82 - 87. (in Chinese)

[15] 时谦, 周亚宾, 谢建华, 等. 链耙捡拾机构双链传动同步性监测系统的设计[J]. 中国农机化学报, 2021,42(11):7 - 11.
SHI Qian, ZHOU Yabin, XIE Jianhua, et al. Design of synchronization monitoring system for double chain drive of chain rake picking mechanism[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2021,42(11):7 - 11. (in Chinese)

[16] 薛党勤, 董兆森, 张佳喜. 滚筒式残膜回收机关键部件应力应变监测系统设计与实验[J]. 南阳理工学院学报, 2024,16(4):58 - 63.
XUE Dangqin, DONG Zhaosen, ZHANG Jiaxi. Design and experiment of stress and strain monitoring system for components of drum film recovery machine[J]. Journal of Nanyang Institute of Technology, 2024,16(4):58 - 63. (in Chinese)

[17] 孙艺哲, 李季, 刘斌, 等. 基于改进 Alpha Shapes 算法的农机作业面积测量[J]. 中国农机化学报, 2019,40(8):144 - 148.
SUN Yizhe, Li Ji, LIU Bin, et al. Measurement of agricultural machinery operation area based on improved Alpha Shapes algorithm[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2019,40(8):144 - 148. (in Chinese)

[18] 史扬明, 吴华瑞, 缪屿晟, 等. 基于农机空间运行轨迹的作业面积测量研究[J]. 农机化研究, 2026,48(1):167 - 173.
SHI Yangming, WU Huarui, MIAO Weisheng, et al. Measurement of operating area based on spatial running trajectory of agricultural machinery[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2026,48(1):167 - 173. (in Chinese)

[19] 王德阳, 张若宇, 段宏伟, 等. 残膜回收机有效作业面积监测系统设计研究[J]. 农机化研究, 2025,47(1):54 - 60.
WANG Deyang, ZHANG Ruoyu, DUAN Hongwei, et al. Design and research of effective working area monitoring system for residual film recycling machine[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2025,47(1):54 - 60. (in Chinese)

[20] FANG Huimin, HU Jinshan, CHEN Xuegeng, et al. DBSCAN - MFI based improved clustering for field-road classification in mechanical residual film recovery[J]. Agriculture, 2025,15(15):1651.

[21] 左毅, 刘浩鲁, 陈子轩, 等. 基于物联网的热泵式低温循环粮食烘干机监控系统研究[J]. 农业机械学报, 2024,55(9):442 - 449.
ZUO Yi, LIU Haolu, CHEN Zixuan, et al. Design of monitoring system for heat pump grain low temperature circulating dryer based on internet of things[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024,55(9):442 - 449. (in Chinese)

[22] 过家春, 赵秀侠, 吴艳兰. 空间直角坐标与大地坐标转换的拉格朗日反演方法[J]. 测绘学报, 2014,43(10):998 - 1004.
GUO Jiachun, ZHAO Xiuxia, WU Yanlan. Transformation from cartesian to geodetic coordinates using lagrange inversion theorem[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2014,43(10):998 - 1004. (in Chinese)