

齿带式残膜回收机捡拾机构故障监测系统设计与试验

谢建华^{1,2} 朱小端¹ 时 谦^{1,2} 张 毅^{1,2} 刘旋峰³ 蒋永新³

(1. 新疆农业大学机电工程学院, 乌鲁木齐 830052; 2. 新疆智能农业装备重点实验室, 乌鲁木齐 830052;
3. 新疆维吾尔自治区农业科学院农业装备研究所, 乌鲁木齐 830091)

摘要: 针对齿带式残膜回收机在作业过程出现收膜皮带断裂、捡拾钉齿脱落等典型故障问题,设计了一种捡拾机构故障监测系统。以 STM32 为下位机数据采集核心,采用 Qt 框架开发上位机监测界面,为增强田间抗干扰能力,利用 RS485 总线进行数据通信。结合捡拾钉齿周向排布结构,选取脱膜辊转速和相邻钉齿通过传感器时间间隔作为关键监测参数。通过对正常工况下样本数据的筛选与多项式、指数等多类函数拟合对比,正常工况下建立转速与理论时间间隔的二阶指数衰减函数最优模型,引入自然指数函数计算监测值与理论值相对偏差,以增强数据特征差异。将归一化处理后的转速、时间间隔及其相对偏差作为特征向量,输入经超参数优化的多层感知器 (Multilayer perceptron, MLP) 进行分类识别,并由 Softmax 函数输出故障状态,整体模型训练识别准确率达 98.65%。模型对比试验结果表明 MLP 性能优于支持向量机与随机森林模型;台架验证试验中,系统平均识别准确率为 96.13%。研究结果可为齿带式残膜回收机故障监测系统开发提供理论和技术参考。

关键词: 残膜回收机; 捡拾机构; 监测系统; 拟合曲线; MLP 多层感知机

中图分类号: S226.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2026)10-0110-12

OSID:



Design and Experiment of Fault Monitoring System for Pickup Mechanism of Tooth-belt Type Residual Film Recycler

XIE Jianhua^{1,2} ZHU Xiaoduan¹ SHI Qian^{1,2} ZHANG Yi^{1,2} LIU Xuanfeng³ JIANG Yongxin³

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China
2. Xinjiang Key Laboratory of Intelligent Agricultural Equipment, Urumqi 830052, China
3. Institute of Agricultural Equipment, Xinjiang Academy of Agricultural Sciences, Urumqi 830091, China)

Abstract: Aiming to address typical operational failures such as belt breakage and pickup tooth detachment in film-recovery machines, a fault monitoring system for the pickup mechanism was designed. This system employed an STM32 microcontroller as the data acquisition core and utilized the Qt framework to develop the upper-level monitoring interface. To enhance field interference resistance, RS485 bus communication was adopted for data transmission. Considering the circumferential arrangement of the pick-up teeth, the film-stripping roller speed and the time interval between adjacent teeth passing sensors were selected as key monitoring parameters. Through screening sample data under normal operating conditions and comparing polynomial, exponential, and other function fits, an optimal second-order exponential decay function model was established for the relationship between rotational speed and theoretical time interval values under normal conditions. The natural exponential function was introduced to calculate the relative deviation between monitored and theoretical values, enhancing data feature differentiation. Normalized rotational speed, time interval values, and their relative deviations were used as feature vectors input into a hyperparameter-optimized multilayer perceptron (MLP) for classification. The Softmax function outputted fault states, achieving an overall model training recognition accuracy of 98.65%. Model comparison and bench validation tests demonstrated that the MLP outperformed support vector machines and random forest models. Bench validation achieved an average system recognition accuracy of 96.13%. These findings can provide theoretical and technical references for developing fault

收稿日期: 2025-10-21 修回日期: 2026-01-06

基金项目: 新疆维吾尔自治区重点研发计划项目(2022B02022-3、2022B02017-3)

作者简介: 谢建华(1975—),女,教授,博士生导师,主要从事残膜回收及再利用技术与装备研究,E-mail: xjh199032@163.com

monitoring systems for gear-belt residual film recovery machines.

Key words: residual film recovery machine; picking mechanism; fault monitoring system; fitting curve; MLP multi-layer perception machine

0 引言

机械化回收农田残膜是治理地膜污染的一种有效手段^[1-2]。齿带式残膜回收机具备低含杂率和高效率捡拾能力,被广泛应用于农田地膜回收作业。捡拾齿带作为齿带式残膜回收的关键作业部件,在田间复杂环境影响下^[3-5],极易发生收膜皮带断裂、捡拾钉齿脱落等典型故障。及时发现故障齿带并迅速采取停机措施,能有效减少机具损害,降低维修成本,提升作业质量。

学者针对残膜回收机具故障监测开展了相关研究。周亚宾等^[6]针对链耙式残膜回收机工作时易发生的链耙捡拾机构跳齿、链传动系统过载等现象,设计了一套链传动在线监测系统,通过监测链轮和法兰盘转速,判断是否发生跳齿和过载故障。柯泽荣^[7]以齿链式残膜回收机为研究对象,设计了一套田间作业状态在线监测系统,实时监测齿链式残膜回收机关键部件转速、旋转部件温度以及起膜装置入土深度,通过阈值实现故障报警。董兆森等^[8]以滚筒式残膜回收机松土齿耙为研究对象,设计了一种基于 ANSYS 分析与传感器标定的应力应变监测系统,通过实时采集微小变形数据,实现对壅土过载工况的提前预警监测。尽管在残膜回收机具故障监测领域的研究进展缓慢,但在其他农业机械故障监测领域已开展了大量研究并取得诸多进展。习晨博等^[9]基于联合收获机多源转速与振动信号,提出融合堆叠去噪自动编码器(SDAE)与 BP 神经网络的故障诊断方法(SDAE-BP),通过深度特征提取与状态辨识,实现了高精度作业故障监测。王皓等^[10]提出一种基于粒子群算法(PSO)优化堆叠降噪自编码器(SDAE)的智能诊断方法,通过融合采棉头转速比与液压压力,实现了对采棉头堵塞故障诊断。QIU 等^[11]提出一种基于转速融合指数、部件滑移率和自适应门限判别方法,通过多源信息融合实现联合收获机故障诊断,系统准确率达 97.46%。综上所述,尽管深度学习与多源信息融合等方法在农业机械故障诊断中已取得良好效果,通过引入机器学习等技术融入数据处理流程,构建可靠的故障诊断模型,可提升故障识别准确率。

针对齿带式结构周向等距分布捡拾钉齿结构特点,本文设计一种齿带式捡拾机构故障监测系统。通过实时采集转速动态信号与捡拾钉齿通过时间间

隔(下文简称时间间隔),建立正常转速下理论时间间隔函数拟合模型,引入相对自然指数量化理论与实际时间间隔特征,以多层感知机为齿带分类模型,实现对齿带作业状态下的故障识别。与支持向量机(SVM)、随机森林(RF)进行模型比对,并进行台架验证试验和故障齿带分类精度验证。

1 齿带式捡拾机构工作与监测原理

1.1 齿带式残膜回收机结构与工作原理

齿带式残膜回收机如图 1 所示,主要由螺旋搅拌器、捡拾钉齿、收膜皮带、张紧辊、脱膜辊、脱膜风机、张紧定位辊、起膜辊、起膜齿等组成。其中,齿带作为主要工作部件,单根齿带由螺栓将多个捡拾钉齿与收膜皮带连接固定,并沿收膜皮带以周向等间距方式均匀有序分布在其表面。多根齿带并列嵌入起膜辊、张紧辊、脱膜辊对应的沟槽内。

作业过程中,起膜齿划破土层,稳定向前疏松前方土壤。脱膜辊带动捡拾齿带转动,捡拾钉齿随齿带做周向匀速转动,依次顺时针插入土壤,进行残膜捡拾及残膜定向输送。同时,螺旋搅拌器将前侧拥堵的土、棉秆混合物及齿带捡拾过程回落的杂质等排向机具侧面交接行。当残膜随捡拾齿带输送至脱膜辊处,随捡拾齿带上拾膜钉齿位姿的变化和脱膜风机的作用,残膜落入后方打包腔内,打包装置打包。脱膜完成后齿带进入回转侧,延续机具作业轨迹捡拾机构进行往复运动,依次形成残膜捡膜、分离、输送、脱膜闭环作业。

1.2 齿带钉齿排布分析

捡拾钉齿排布对挑膜效果至关重要。同等转速下,若钉齿间距过大,会导致相邻两钉齿作业时间间隔过长,降低对残膜的输漏效果;间距过小,则会使协同作用的地膜面积减小,加之残膜自身延伸率有限,极易造成地膜过度撕裂^[12-13]。无法在相邻钉齿间被有效衔接,从而破坏捡拾过程连续性,难以满足捡拾钉齿齿端绝对划动曲线重叠的要求。

为此,根据捡拾连续性要求进行捡拾钉齿排布分析,如图 2 所示,建立以起膜辊轴心 o_1 原点,机具前进方向为 x 轴坐标。参照不间断连续捡拾临界条件^[14]

$$\begin{cases} v(t_2 - t_1) < 2(L + r + \sigma) \sin \alpha \\ h_l < L + r + \sigma - (L + r + \sigma) \cos \alpha \end{cases} \quad (1)$$

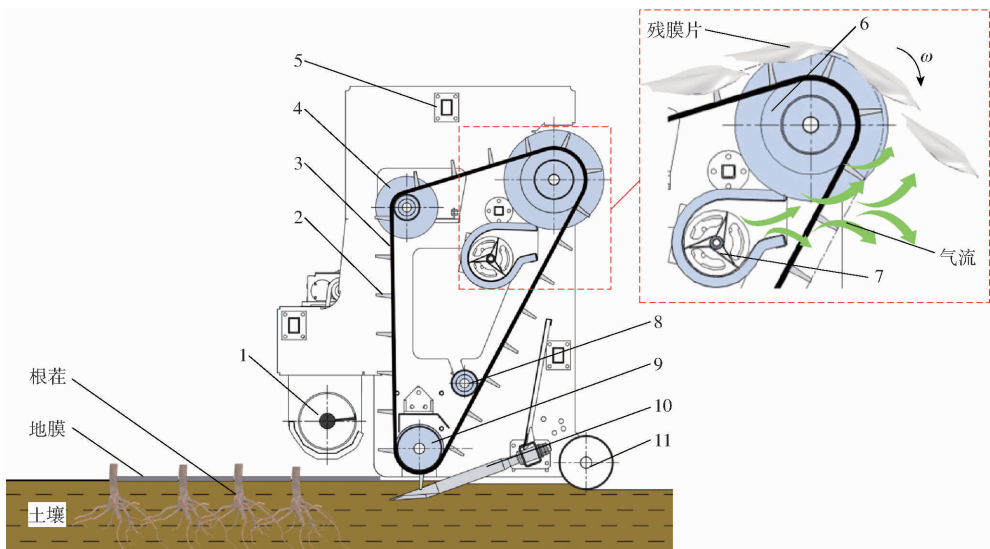


图1 齿带式残膜回收机整体结构示意图

Fig.1 Overall structural diagram of toothed belt residual film recovery machine

1.螺旋搅拌器 2.捡拾钉齿 3.收膜皮带 4.张紧辊 5.机架 6.脱膜辊 7.脱膜风机 8.张紧定位辊
9.起膜辊 10.起膜齿 11.平地限深轮

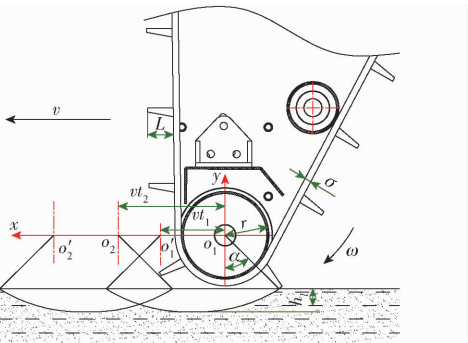


图2 捡拾钉齿作业轨迹示意图

Fig.2 Schematic of pick-up track for nail-grasping operations

其中

$$\begin{cases} t_1 = 2\alpha/\omega \\ t_2 = \beta/\omega \end{cases} \quad (2)$$

可得

$$2\alpha - \frac{2(L+r+\sigma)\omega}{v} \sin\alpha < \beta \quad (3)$$

式中 v ——机具前进速度, m/s
 t_1 ——第1个捡拾钉齿入土到出土时间间隔, s
 t_2 ——相邻2个捡拾钉齿相继入土时间间隔, s
 L ——捡拾钉齿长度, mm
 r ——起膜辊半径, mm
 σ ——收膜皮带厚度, mm
 h_t ——捡拾钉齿入土作业深度, mm
 α ——捡拾钉齿入土初始相位角, ($^\circ$)
 β ——相邻两捡拾钉齿夹角, ($^\circ$)
 ω ——转动角速度, rad/s

确定相邻钉齿作业时间约束条件,进而推导出相邻两捡拾钉齿夹角 β 。由此配置合理钉齿数量 K ,同

时满足捡拾钉齿间距处于残膜延伸率允许的合理范围内。

捡拾钉齿均匀分布数量为

$$K = \frac{L_d}{L_{arc}} \quad (4)$$

其中

$$L_{arc} = 2\pi \frac{\beta}{360} (r + L + \sigma) \quad (5)$$

式中 L_{arc} ——两捡拾钉齿间距, mm

L_d ——收膜皮带长度, mm

由捡拾钉齿在土壤挑膜过程划过弧长公式(式(5))可见,在钉齿间距固定、转速恒定条件下,各相邻钉齿间时间间隔会趋于一个由转速决定的理论值。同理,通过相邻捡拾钉齿间距与时间转换关系公式 $T_f = L_{arc}/\omega(r + L + \sigma)$,监测当前转速下相邻捡拾钉齿通过的时间间隔,当实际时间间隔偏离理论时间间隔,即可判断齿带是否处于故障状态。

1.3 监测原理

正常齿带捡拾作业中,随着收膜辊转速趋于稳定,相邻捡拾钉齿间时间间隔会逐渐趋近于一个对应的理论值。捡拾机构典型故障包括捡拾钉齿脱落、收膜皮带断裂、收膜皮带异常拉伸。当捡拾钉齿出现脱落,收膜皮带持续转动,实际捡拾钉齿间距大于或等于2倍理论间距;若单根收膜皮带发生断裂,该根捡拾作业失效,同辊其他齿带不受影响;受田间环境干扰,捡拾钉齿间距超出正常拉伸范围,其相对正常捡拾钉齿间距将出现差值。根据上述典型故障情况,鉴于捡拾钉齿属于铁质零件且呈等间距方式排布,可采用电感传感器对钉齿进行监测,在传感器感知范围内,产生电平脉冲信号,利用微处理器捕获

脉冲边沿变化,测得在当前转速下相邻钉齿通过的时间间隔 T_f 。

单根捡拾齿带监测示意图如图 3 所示,钉齿脱落时捕获到的时间间隔将超出正常值的 2 倍;收膜皮带断裂时,由于无钉齿通过,则传感器无法检测到钉齿通过信号,超出微处理器通道捕获范围,时间间隔将标记为 0;而在异常齿带情况下,监测到的时间间隔将与正常值存在一定差值,且异常状态下间距

波动较大,实际捕获的数据具有较高分散性,易与正常时间间隔间形成较小差异。通过构建正常工况下收膜辊转速与时间间隔的关系模型,获得当前转速对应的理论时间间隔 T_h ,进而计算理论值与实际监测值间的偏差。最后,将转速、实际时间间隔及其偏差作为特征输入,建立齿带故障分类模型,以提取故障相关的深层非线性特征,实现对正常、异常、收膜皮带断裂及捡拾钉齿脱落 4 种工作状态的精准辨识。

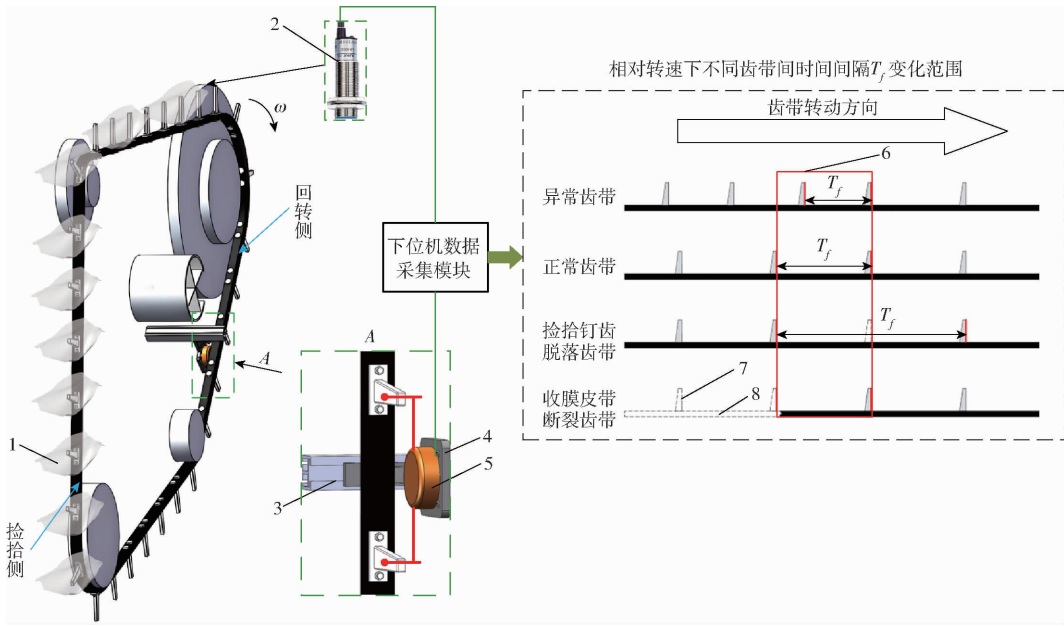


图 3 齿带式残膜回收机监测系统监测原理图

Fig. 3 Monitoring principle diagram of monitoring system of tooth belt residual film recovery machine

1. 残膜片 2. 霍尔传感器 3. 滑动支架 4. 固定支架 5. 电感式接近传感器 6. 正常捡拾钉齿监测区间 7. 捡拾钉齿缺失 8. 收膜皮带断裂

2 监测系统设计

2.1 监测系统总体设计

监测系统总体结构框图如图 4 所示,主要由传感器、下位机数据采集模块、上位机监测与人机交互模块、电源模块组成。

下位机数据采集模块对脱膜辊转速和各齿带时间间隔经滤波和信号处理后,相继得到当前转速和捡拾钉齿通过的时间间隔信息。通过 RS485 通讯协议将数据传输到上位机监测与人机交互模块,实时监测捡拾钉齿运行状态,当识别出齿带故障,即可触发报警机制,提醒驾驶员停车检查。

2.2 监测系统硬件组成

系统硬件主要包括传感器、微处理器、通讯模块、旭日 X3 派、触摸显示屏、有源蜂鸣器等。采用 STM32F103C8T6 微处理器作为下位机主控芯片,该微处理器运行频率 72 MHz、内部具备 4 个 16 位定时器、多个 GPIO 丰富外设 I/O 引脚、USART、I²C 等通讯模式,能充分保证数据实时采集与传输需

求^[15-16]。

为应对捡拾机作业环境中的粉尘、膜杂混合物干扰,避免被捡拾钉齿碰撞损坏,传感器应与钉齿保持安全间距,同时持续稳定地采集信号。经传感器对比(表 1),选用沪龙 NJK-5002C 型霍尔传感器监测脱膜辊转速、WQ-HE80-D40NK-W 型电感式传感器监测齿带间隔。在脱膜辊上固定磁钢,即脱膜辊每旋转 1 周,固定在其上的磁钢触发霍尔传感器产生 1 个脉冲信号,计算出脱膜辊对应的转速。WQ-HE80-D40NK-W 型电感式传感器工作面由工业级陶瓷材料密闭封装,有效隔绝灰尘进入,工作面监测范围为 $\pi \times (80/2)^2 \text{ mm}^2$,感应面积较大,能有效监测铁制捡拾钉齿通过传感器的时间间隔。

为避免田间复杂环境对传输信号产生干扰,系统采用双重抗干扰设计。在信号采集 I/O 引脚端口配置滤波电路,抑制传感器电磁脉冲噪声干扰;通过微处理器捕获各传感器信号通道,稳定采集脱膜辊转速、捡拾钉齿时间间隔。在数据传输层采用 TTL

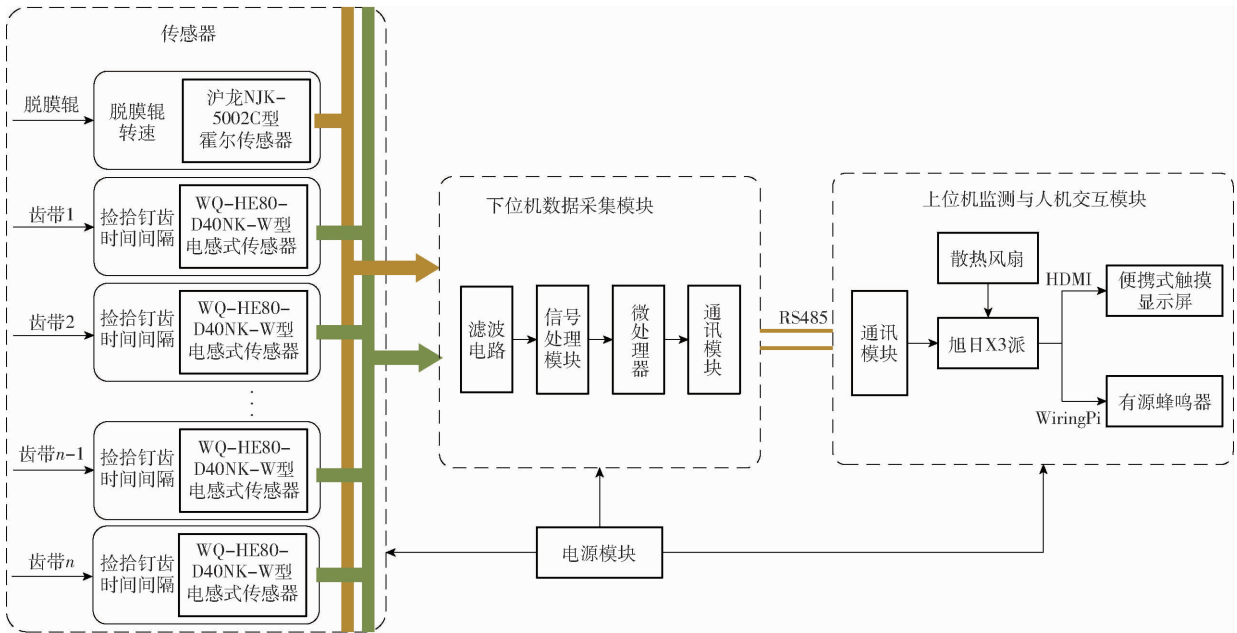


图 4 监测系统总体结构框图

Fig. 4 Monitoring system overall structure block diagram

表 1 系统主要传感器性能参数

Tab. 1 Main sensor performance parameters of system

监测参数	传感器型号	主要特性
脱膜辊转速	沪龙 NJK - 5002C 型 霍尔传感器	量程范围:0 ~ 1 000 r/min 输出信号:脉冲电平输出 工作电压(DC):6 ~ 36 V
单根收膜皮 带捡拾钉齿 时间间隔	WQ - HE80 - D40NK - W 型电感式传感器	感应距离:0 ~ 40 mm 输出信号:脉冲电平输出 工作电压(DC):10 ~ 30 V

转 RS485 通讯模块,通过差分信号与阻抗抑制田间传输中数据干扰,保证作业数据传输的完整性与实时性。

监测系统上位机部分以北京地平线机器人技术研发有限公司的旭日 X3 派作为主控制器,配合人机交互显示屏、有源蜂鸣器、TTL 转 RS485 通讯模块及 5 V 散热风扇等外围设备构成完整系统。主控制器搭载四核 ARM Cortex - A53 处理器,配备 HDMI 接口、GPIO 控制引脚等丰富外设,能够运行嵌入式 Linux 操作系统并支持 Qt 图形界面开发。基于此硬件平台,系统可实现数据存储、人机交互界面显示、声光报警等功能。考虑到残膜回收机在田间作业时的供电稳定性需求,采用 12 ~ 24 V 宽电压输入的降压模块,将车载电源转换为稳定电压,对整个监测系统硬件设备供电。

2.3 监测系统程序设计

根据系统硬件框图和带式残膜回收机监测原理,构建了一套完整的故障监测系统,由下位机数据采集模块和上位机监测交互模块 2 部分组成。下位机以 STM32 微处理器为核心,采用 Keil μ Vision5 作

为开发环境,应用 C 语言标准库进行程序开发。系统上电后首先执行初始化流程,配置定时器、GPIO 输入捕获通道及 USART 串口通信等外设。考虑到残膜捡拾作业中脱膜辊转速较低,采用测周法进行转速测量;通过 STM32 输入捕获功能检测传感器信号,当捕获到相邻 2 次脉冲信号时,定时器记录时间间隔,处理器据此计算出脱膜辊实时转速。

为确保相邻捡拾钉齿时间间隔的测量精度,系统采用 STM32 硬件定时器,将其最小时间基准配置为 1 ms。当 WQ - HE80 - D40NK - W 型电感式传感器检测到钉齿经过时,会产生电平变化信号;该信号经滤波电路处理后,在对应 I/O 引脚形成稳定的下降沿,触发定时器输入捕获功能,记录当前时间戳。系统通过计算相邻 2 次捕获事件的时间戳差值,并结合定时器溢出计数进行校正,精确得到相邻钉齿时间间隔。最后,系统按照设定的数据协议格式,实时向上位机传输当前区段的转速与钉齿时间间隔测量结果,具体数据采集流程如图 5 所示。

上位机监测与人机交互模块基于 Qt 跨平台框架,采用 C + + 语言开发^[17]。通过 Qt 图形库构建交互界面,驾驶员可触摸按钮设置参数。如图 6 所示,在完成通信配置后,通过 RS485 总线接收数据,并依次解析协议格式获取脱膜辊转速、齿带时间间隔及齿带号等参数,并通过信号槽机制将数据显示到主界面并存储至 SQLite 数据库。如图 7 所示,在持续监测过程中,当算法监测出故障齿带时,系统立即触发报警,并通过信号槽机制更新主界面,调用 WiringPi 库控制旭日 X3 派的蜂鸣器引脚发出警报,同时在界面相应齿带位置改变图标颜色,并在状态

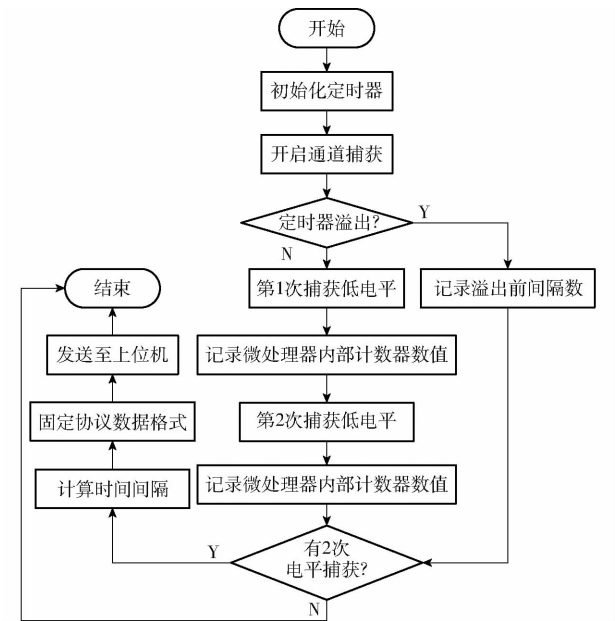


图 5 时间间隔数据采集流程图

Fig. 5 Interval value data acquisition flowchart

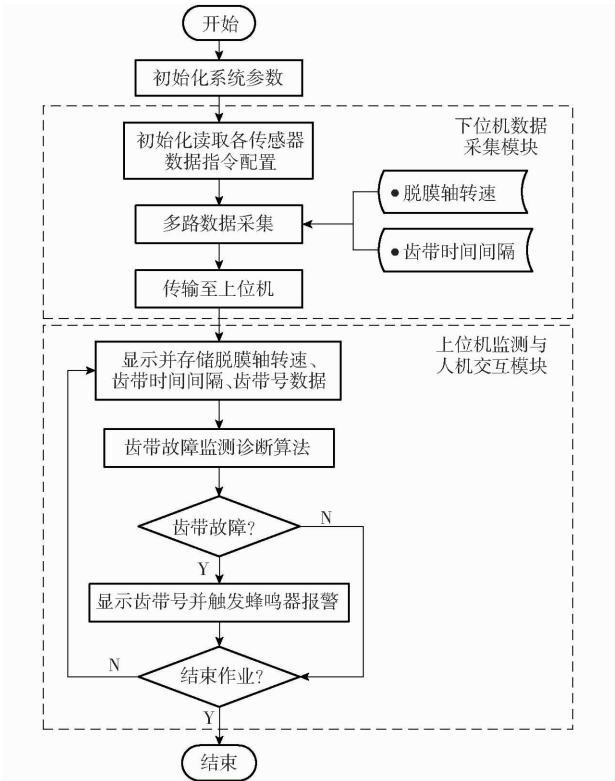


图 6 监测系统工作流程图

Fig. 6 Monitoring system work flowchart

栏显示具体故障信息,便于驾驶员及时处理,避免设备进一步损坏。

3 数据采集与处理

3.1 试验台架搭建

为确定齿带捡拾机构故障监测系统运行时识别异常时间间隔精度,设计了齿带式残膜捡拾机构试验台架,模拟捡拾机构在实际作业过程运行状态。



图 7 上位机主界面和监测设备

Fig. 7 Upper computer main interface and monitoring equipment

2025 年 7 月在新疆农业大学智能装备实验室搭建,整体结构如图 8 所示。系统主要由 104YYJT250-3 型交流减速电机、US-52 型交流电机调速器、V 型皮带、皮带轮、张紧轮、沪龙 NJK-5002C 型霍尔传感器、WQ-HE80-D40NK-W 型电感式传感器和 40 铝型材机架等组成。根据实际捡拾钉齿的等间距排布和高度要求,经过多轮材料比选,最终选用沉头螺栓模拟捡拾钉齿,并按实际间距固定在皮带表面。沪龙 NJK-5002C 型霍尔传感器安装在减速电机侧,WQ-HE80-D40NK-W 型电感式传感器固定在脱膜辊回转侧,在有效感应距离 40 mm 内调整至最佳灵敏度,确保准确采集钉齿时间间隔数据。

3.2 齿带故障诊断方法

3.2.1 多层感知机

多层感知机(MLP)由多个感知机模型连接组成,也称为多层前馈网络^[18],如图 9 所示,主要模拟多层神经元之间信息传递,除输入输出层外,中间可以包含多个隐藏层,能有效实现对数据的分类和预测^[19-21]。其核心特点在于层与层之间采用全连接,每层神经元的输出会完整传递到下一层所有神经元。

为避免每层输出仅是上一层输入的线性组合,无法拟合复杂非线性情况,通过引入非线性激活函数,对隐藏层净输入特征向量进行处理,得到隐藏层输出。隐藏层到输出层映射过程中,引入新的权重和偏置进行线性运算,生成中间结果。然后通过 Softmax 激活函数完成分线性变换,以此输出各类别概率,最终将每个输出符合概率的类别传递至分类

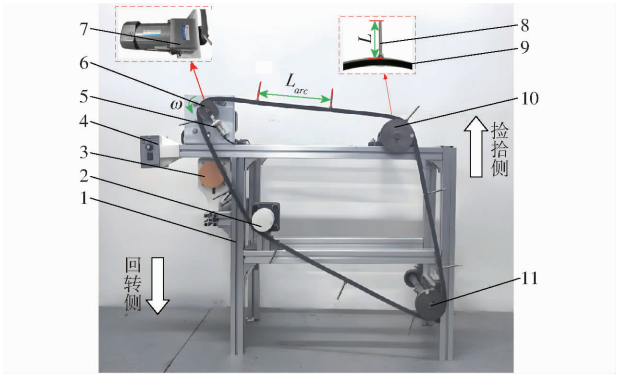


图 8 齿带式残膜捡拾机构试验台

Fig. 8 Test bench for tooth belt residual film picking mechanism

1. 40 mm × 40 mm 铝型材机架 2. 张紧定位辊 3. WQ - HE80 - D40NK - W 型电感式传感器 4. US - 52 型交流电机调速器 5. 沪龙 NJK - 5002C 型霍尔传感器 6. 收膜辊 7. 104YYJT250 - 3 型交流减速电机 8. 沉头螺栓 9. 104YYJT250 - 3 型交流减速电机 10. 张紧辊 11. 起膜辊

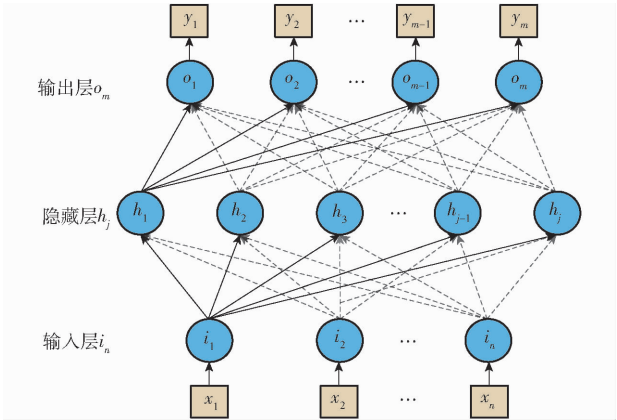


图 9 MLP 模型结构图

Fig. 9 MLP model structure diagram

结果。

3.2.2 理论转速与时间间隔关系拟合函数

正常工况下,随着转速增加,时间间隔呈逐渐减小趋势。根据捡拾钉齿排布理论分析,正常捡拾过程中钉齿脱落时所对应的时间间隔为理论值 2 倍,收膜皮带断裂后将超出通道捕获时间范围导致时间间隔为 0,并在异常工况下的时间间隔在相同转速下会显著偏离正常值,表现出更为明显的差异。因此,通过建立正常转速与正常时间间隔间的拟合模型,获得不同转速下时间间隔理论值,有利于后续故障特征分类。

3.2.3 捡拾机构故障监测系统故障诊断流程

针对捡拾作业过程故障样本数据非线性特征难以有效提取的问题,提出一种融合拟合曲线模型与 MLP 的故障诊断方法。如图 10 所示,系统首先初始化拟合函数模型并构建 MLP 网络,利用拟合函数计算当前转速下的理论时间间隔。然后提取正常状

态、收膜皮带断裂和捡拾钉齿脱落等工况下,实际时间间隔与理论值间的差异特征。最后将处理后的特征输入 MLP 模型完成齿带故障分类。

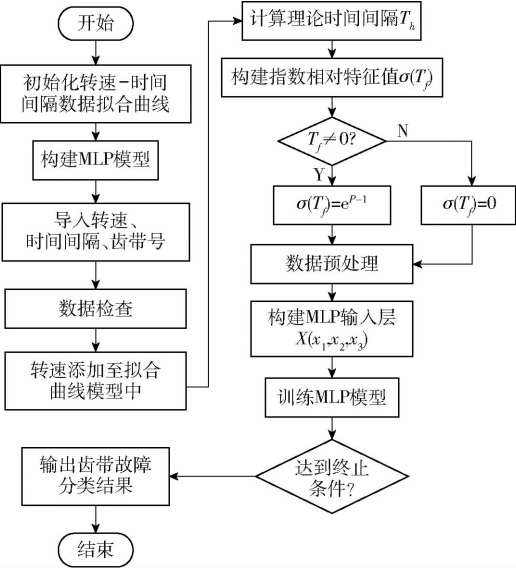


图 10 监测系统故障诊断流程

Fig. 10 Monitoring system fault diagnosis process

结合齿带作业原理,正常齿带作业拟合时间间隔理论值与实际监测时间间隔偏差比特征值集中于 1。当出现钉齿脱落,实际钉齿脱落后采集的监测时间间隔为理论间隔 2 倍。此外,异常数据点受实际间隔点影响,会引发显著偏差且偏差比显著偏离 1,若直接引用实际值与理论值的绝对差值,会受量纲差异影响。为提升模型对故障特征的敏感度并契合分类逻辑,将理论和实际采集的时间间隔采用指数自然函数进行处理后再添加至 MLP 输入层。

指数自然函数能有效增强故障与正常状态间的比例差异,通过对特征进行缩放和量纲统一,以提升模型对特征差异的捕捉效率^[22]。该函数具备连续性,可在不引起特征突变的条件下,通过非线性变换放大显著异常特征。经变换后,正常数据对应的偏差特征值集中在 1 附近,而钉齿脱落等异常状态的特征则被明显放大,更好区分异常数据。针对齿带断裂故障,由于其实际时间间隔为 0,对此将相对偏差进行差异化处理,将齿带断裂下的相对偏差标记为 0,以突出该故障特征。计算式为

$$\sigma(T_f) = \begin{cases} 0 & (T_f = 0) \\ e^{P-1} & (T_f \neq 0) \end{cases} \quad (6)$$

其中

$$P = \frac{T_f}{T_h}$$

式中 $\sigma(T_f)$ ——相对比例特征值

P ——偏差比

3.3 故障数据采集

转速采集准确性高度影响捡拾钉齿时间间隔特

征与理论时间间隔差距,为准确评估台架试验系统可靠性,采用 US-52 型交流电机调速器控制电机转速,以模拟残膜回收过程脱膜辊转速与时间间隔的动态分布。开展单点转速全周期试验:即在若干转速点,分别进行正常作业时间间隔数据采集的台架试验。通过非接触式希玛 AR926 型光电转速测量仪(分辨率:0.1 r/min,量程:2.5~99 999 r/min)作为基准,实时测量脱膜辊转速。并结合人工辅助观察模式,以检查数据采集过程是否存在时间间隔遗漏。

如图 11 所示,在满足齿带运动的初拉力下,实际转速调控范围为 17~142 r/min,涵盖正常残膜捡拾作业所需转速^[23-26]。测量转速与台架实际转速间偏差为-0.8~2.2 r/min,测得系统转速精度为 95.6%~99.7%,平均监测精度为 99.4%。随着转速增加,正常时间间隔上下幅度在恒定范围内,转速与时间间隔分布符合上述监测原理预期分析。

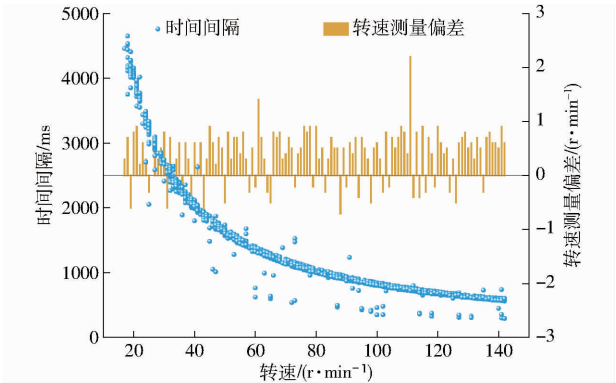


图 11 转速与时间间隔数据分布变化特征
Fig. 11 Characteristics of rotational speed and interval value distribution changes

由于齿带故障发生往往具备突发性,同时,残膜回收作业受季节性影响,为辨别齿带式残膜回收机在作业过程捡拾钉齿脱落,收膜皮带断裂主要故障特征。通过人为模拟故障在捡拾机构试验台架采集特征数据,分别进行 4 种数据采集试验:①正常捡拾作业。②人为拆除单个螺栓,模拟钉齿脱落。③人为剔除全部钉齿,模拟收膜皮带断裂后,不同转速下时间间隔为 0。④模拟齿带打滑等非正常作业,异常点时间间隔。试验采用单点全周期试验,部分试验数据如表 2 所示。

3.4 数据处理

通过上述试验获得齿带捡拾钉齿脱落、断裂等脱膜辊转速和各齿带时间间隔数据。由于试验中存在一定干扰,采集到的原始数据存在异常值和缺失值,因此需对试验数据进行处理^[27]。主要包括样本数据,转速-时间间隔所有属性值都为 0;对样本数

表 2 部分样本数据集

Tab.2 Partial sample datasets

时刻	脱膜辊转速/ 时间间隔/		齿带号
	(r·min ⁻¹)	ms	
2025-07-12 13:14:01	24	3 289	齿带 1
2025-07-12 13:14:04	24	3 274	齿带 1
2025-07-12 13:14:07	24	3 284	齿带 1
2025-07-12 13:14:10	25	3 225	齿带 1
2025-07-12 13:14:13	25	3 210	齿带 1
⋮	⋮	⋮	⋮
2025-07-12 16:31:53	121	671	齿带 1
2025-07-12 16:31:54	121	687	齿带 1
2025-07-12 16:31:54	121	683	齿带 1
2025-07-12 16:31:55	122	660	齿带 1

据中,单个样本空缺,则表示缺失需剔除。数据样本中齿带号作为本次转速、时间间隔对应的齿带状态标识,用于区分特定齿带,不参与后续算法诊断处理过程;时间作为数据采集时的序列标识,用于记录数据的时序信息。

累计采集试验样本数据 9 143 条,时间间隔共分为 4 类,经数据处理和筛选后,得到 8 876 个样本数据。将数据集按 70% 训练集和 30% 测试集随机划分,最终生成训练集 6 213 个数据样本,测试集 2 663 个数据样本,样本数据划分如表 3 所示。

表 3 样本数据划分

Tab.3 Sample data division

模式	训练集样本数	测试集样本数	状态标签
正常	4 248	2 073	1
异常点数据	710	305	2
收膜皮带断裂	272	117	3
捡拾钉齿脱落	403	168	4

3.5 模型评价指标

为准确评价识别结果的有效性,采用决定系数(R^2)、均方根误差(RSME)进行分析。为综合评价拟合函数和 MLP 模型在捡拾机构齿带分类性能,采用准确率(Accuracy)、精确率(Precision)、召回率(Recall)和 F1 值(F1-score)作为评价指标。

4 试验结果与分析

4.1 模型试验结果

4.1.1 拟合函数曲线模型

应用 Origin 2021 数据处理软件,利用数据集内正常处理后的转速与时间间隔数据集进行拟合。在权衡样本数据分布与避免过拟合情况下,依据正常转速与时间间隔样本数据分布情况,分别采用多项式拟合、指数函数和幂函数拟合函数对样本数据拟合进行对比,拟合曲线方程如图 12 所示。

由图 12 可以看出,指数函数为二阶指数衰减函

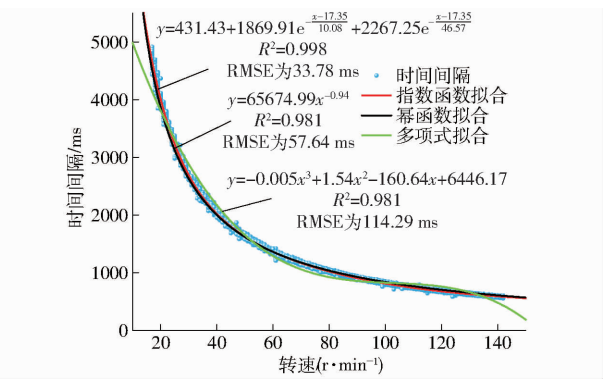


图 12 不同关系函数模型拟合结果

Fig. 12 Fitting results for different relationship function models

数, R^2 为 0.998, RMSE 为 33.78 ms,总迭代次数为 6 次,优于多项式函数、幂函数,表明其精准捕捉正常转速-时间间隔的分布规律,即在正常捡拾机构作业过程,二阶指数衰减函数拟合模型能准确为异常检测提供可靠的理论时间间隔。

通过 8 次不同转速验证试验,检验建立的函数拟合模型偏差率,试验结果如表 4 所示。由表 4 可见,偏差率为 0.53% ~ 2.25%。偏差率变化受脱膜辊转速影响,捡拾机构在加速作业过程理论时间间隔与实际时间间隔出现明显差异,而急剧加速会使收膜皮带的动态惯性增加,拟合函数模型的预测理论时间间隔偏离实际时间间隔,导致偏差率一定程度上升。

表 4 理论时间间隔拟合验证试验结果

Tab.4 Theoretical interval value fitting validation

test results

试验 序号	转速/ ($r \cdot \min^{-1}$)	实际时间 间隔/ms	理论时间 间隔/ms	偏差率/%
1	24	3 381	3 363	0.53
2	27	3 052	2 992	2.00
3	38	2 079	2 127	2.25
4	52	1 615	1 598	1.06
5	78	1 035	1 052	1.61
6	90	896	909	1.43
7	112	721	728	0.96
8	136	613	608	0.82

4.1.2 拟合函数和 MLP 模型试验

由样本数据分析可知,异常转速下,时间间隔点只占小部分且随机分布,避免因样本类别不平衡对 MLP 模型分割边界造成干扰。同时,为提升模型训练效率与分类精度,消除特征间量纲差异影响,对所有特征样本数据在训练前进行归一化处理,将其统一映射至[0,1]量级内。

构建 MLP 分类模型时以收膜辊转速、齿带表面

捡拾钉齿时间间隔、相对偏差作为输入特征,确定 MLP 模型输入层为 3,输出层对应 4 种齿带分类状态。设置 2 个隐藏层,分别布置 16、8 个神经元,采用 Adam 优化器进行训练,学习率为 0.001。为充分保持模型泛化能力,设置最大迭代次数为 500,为防止过拟合,设置损失值连续迭代 50 次未下降时训练自动终止。通过多次试验和重复筛选多个激活函数,选定 tanh 函数作为隐藏层激活函数。

试验结果如图 13 所示,随着迭代次数增加,损失值持续下降,模型在训练 119 次时终止,训练损失值稳定在 0.109。图 13b 为以 Softmax 输出分类结果图测试集不同状态间分类混淆矩阵结果。根据混淆矩阵^[28],在 2 663 个测试样本中,对角线上的正确分类样本数为 2 627,其他错误分类样本数为 36。整体分类准确率达到 98.65%,原因可能为类别 2 与类别 1 间由于类别间特征分布相近等因素造成 20 个类别 2 数据误预测为类别 1。但模型总体精确率为 97.37%,召回率为 97.40%,F1 值为 97.32%,表明所提方法在齿带状态分类任务中具备较好识别效果。

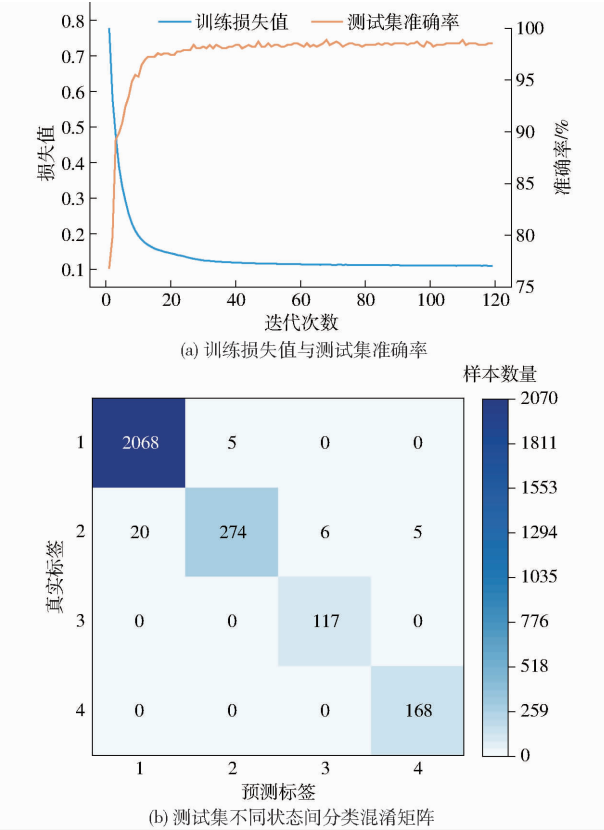


图 13 模型训练结果

Fig. 13 Model training result

4.2 不同模型性能试验

为评估本文方法在齿带捡拾机构特征数据分类表现,溯源模型对齿带分类本质问题,采用上述统一特征数据集,按比例 7:3 划分训练集与测试集。与

支持向量机(SVM)、随机森林(RF)机器学习模型进行试验对比,以检验齿带分类性能有效性。各对比模型设置如下:①随机森林数量为 100,最大深度为 5,正则化参数设置为最小分裂样本数 8 和最小叶节点样本数 1,特征比例为 0.6,以防止过拟合。为处理类别不平衡,采用基于频率的类别权重,随机种子数量为 42。②SVM 核函数半径为 3.2,惩罚因子为 0.2,多项式核阶数为 3,随机种子数量为 42。

经过多次重复试验,各模型在测试集上的表现如表 5 所示。从综合性能来看,二阶指数衰减函数 + MLP 模型在所有评价指标上均显著优于对比模型。随机森林模型准确率为 91.25%,但其精确率(84.31%)和 F1 值(83.95%)相对较低,表明该模型在正类样本判断上存在一定误判。SVM 模型虽准确率达到 94.14%和精确率 96.55%,但召回率为 87.21%。相比之下,二阶指数衰减函数 + MLP 模型测试集准确率为 98.65%,精确率为 97.37%,召回率为 97.40%和 F1 值为 97.32%,各项指标均保持在较高水平且相对均衡,表明该模型不仅具有出色分类准确性,同时在正负样本识别上保持良好的平衡性,能够有效降低误判。

表 5 不同模型性能试验结果

Tab.5 Performance test results of different models				
模型	准确率	精确率	召回率	F1 值
RF	91.25	84.31	85.62	83.95
SVM	94.14	96.55	87.21	89.64
二阶指数衰减函数 + MLP	98.65	97.37	97.40	97.32

4.3 台架验证试验

为验证监测系统在实际工况的有效性和可行性,2025 年 8 月于新疆农业大学智能装备实验室在自主搭建测试平台开展试验验证(图 14),以确保试验结果能反映真实作业条件下的系统性能。试验采用准确率作为评价指标,即累计分类正确数占样本试验总样本数百分比。

4.3.1 试验方案

针对齿带常见捡拾钉齿脱落、收膜皮带断裂等异常典型故障类型,通过人为随机拆除捡拾钉齿,模拟捡拾钉齿脱落;人为延长异常钉齿间距,使正常齿带间产生差异;人为调整台架张紧定位轮控制皮带张紧度,并将收膜皮带安装至带轮边沿一侧,使齿带运行至一定范围后脱离带轮,模拟收膜皮带断裂。在试验过程,控制齿带转速在 17 ~ 142 r/min 变化,模拟正常状态下不同转速齿带真实状态。由于捡拾钉齿、皮带拆卸安装等需大量时间,每组数据采集总数控制为 150 个样本,确保数据代表性,且作业过程

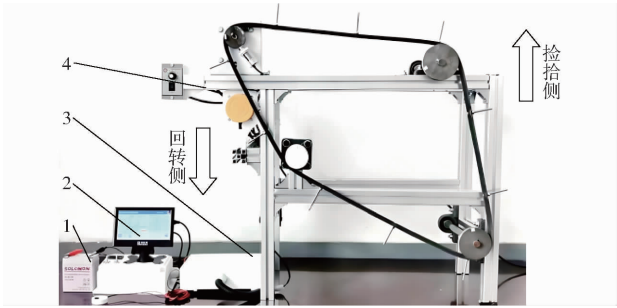


图 14 系统故障监测试验

Fig. 14 System fault monitoring and testing

1. 12 V 电源电池 2. 上位机监测与人机交互模块 3. 下位机数据采集模块 4. 捡拾台架

通过人为调整捡拾台架,模拟捡拾钉齿应对异常振动情况。

4.3.2 台架试验结果与分析

共进行 5 组独立测试,每组包含 150 个样本,试验结果如表 6 所示。从表 6 可以看出,系统试验 1、2、4、5 表现出色,准确率不小于 96%。试验 3 准确率为 90.66%,低于其他组次,原因为试验中异常齿带时间间隔与正常样本类型的特征信号在特定转速范围内存在较大相似性,导致部分样本数据误判。总体而言,5 组试验平均准确率达到 96.13%,对断裂故障的整体识别准确率较好。

表 6 台架试验结果

Tab.6 Bench test results			
试验次数	样本数量	分类正确数量	准确率/%
1	150	148	98.66
2	150	146	97.33
3	150	136	90.66
4	150	147	98.00
5	150	144	96.00
准确率平均值			96.13

5 结论

(1)针对齿带式残膜回收机捡拾机构在作业过程中频繁性出现齿带断裂、捡拾钉齿脱落等典型故障问题,基于捡拾机构中收膜皮带周向等距分布捡拾钉齿结构特点,应用嵌入式开发技术,设计了一种齿带式残膜回收机捡拾机构故障监测系统,实现齿带故障辨别。

(2)为解决捡拾钉齿状态分类问题,将正常转速下捡拾钉齿通过的时间间隔进行多种函数拟合,并引入指数自然函数,增强对理论和监测时间间隔特征差别。以脱膜辊转速、齿带时间间隔、相对特征值作为 MLP 输入,以正常、异常、收膜皮带断裂、捡拾钉齿脱落 4 种齿带状态作为输出,整体分类准确

率达到 98.65%。

(3)与支持向量机和随机森林进行对比模型试验,结果表明所采用的二阶指数衰减函数与 MLP 多层感知器相结合的齿带故障分类方法,相较于

SVM、RF 准确率分别提升 4.51、7.40 个百分点,充分体现出更强的泛化能力。故障检测系统齿带故障分类效果台架验证试验结果表明能有效区分正常与故障齿带。

参 考 文 献

[1] 胡灿,王旭峰,陈学庚,等. 新疆农田残膜污染现状及防控策略[J]. 农业工程学报, 2019, 35(24): 213 – 224.
HU Can, WANG Xufeng, CHEN Xuegeng, et al. Current situation and control strategies of residual film pollution in Xinjiang [J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(24): 213 – 224. (in Chinese)

[2] 赵岩,陈学庚,温浩军,等. 农田残膜污染治理技术研究现状与展望[J]. 农业机械学报, 2017, 48(6): 1 – 14.
ZHAO Yan, CHEN Xuegeng, WEN Haojun, et al. Research status and prospect of control technology for residual plastic film pollution in farmland[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(6): 1 – 14. (in Chinese)

[3] 吴智勋,马少辉,任伟,等. 国内残膜回收机拾捡装置研究现状及展望[J]. 新疆农机化, 2025(4): 40 – 44, 49.
WU Zhixun, MA Shaohui, REN Wei, et al. Research status and prospects of domestic residual film recycling machine pickup device [J]. Xinjiang Agricultural Mechanization, 2025(4): 40 – 44, 49. (in Chinese)

[4] WEI L, LIU X, SUN W, et al. Design and testing of an integrated corn stubble residual film-recycling machine[J]. Agriculture, 2024, 14(10): 1809.

[5] YANG S, WANG B, RU S, et al. Review of agricultural plastic film recycling equipment from China[J]. INMATEH Agricultural Engineering, 2024, 74(3): 683 – 698.

[6] 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 and experiment of vertical rotary cultivator [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2022, 44(10): 82 – 87. (in Chinese)

[7] 柯泽荣. 齿链式残膜回收机田间作业状态在线监测系统设计与试验[D]. 银川:宁夏大学, 2023.
KE Zerong. Design of on-line monitoring system for field operation status of the tooth chain type residual film recovery machine [D]. Yinchuan: Ningxia University, 2023. (in Chinese)

[8] 董兆森,张佳喜,周欣,等. 基于无线通讯技术的松土装置应力应变监测系统设计与试验[J]. 新疆农业科学, 2024, 61(4): 1029 – 1040.
DONG Zhaosen, ZHANG Jiayi, ZHOU Xin, et al. Design and experiment of stress and strain monitoring system for soil loosening device based on wireless communication technology [J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2024, 61(4): 1029 – 1040.

[9] 习晨博,杨光友,刘浪,等. 基于 SDAE – BP 的联合收割机作业故障监测[J]. 农业工程学报, 2020, 36(17): 46 – 53.
XI Chenbo, YANG Guangyou, LIU Lang, et al. Operation faults monitoring of combine harvester based on SDAE – BP [J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(17): 46 – 53. (in Chinese)

[10] 王皓,韩科立,韩树杰,等. 基于粒子群算法和 SDAE 的采棉头故障诊断研究[J]. 农业机械学报, 2023, 54(增刊 2): 164 – 172.
WANG Hao, HAN Keli, HAN Shujie, et al. Fault diagnosis method and experiment of cotton picking head based on particle swarm optimization algorithm and SDAE [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(Supp. 2): 164 – 172. (in Chinese)

[11] QIU Zhaomei, SHI Gaoxiang, ZHAO Bo, et al. Combine harvester remote monitoring system based on multi-source information fusion [J/OL]. Computers and Electronics in Agriculture, 2022, 194. DOI: 10.1016/J. COMPAG. 2022. 106771.

[12] JIANG Deli, CHEN Xuegeng, YAN Limin, et al. Design and testing of friction-type nail-tooth-chain-plate residual-film-picking system [J]. Agriculture, 2024, 14(4): 512.

[13] 王昭宇,陈学庚,颜利民,等. 随动式残膜回收机起膜捡拾机构设计与试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(4): 80 – 90.
WANG Zhaoyu, CHEN Xuegeng, YAN Limin, et al. Design and experiment on collecting and removing device for profile modeling residual plastic film collector[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(4): 80 – 90. (in Chinese)

[14] 陈兴华,陈学庚,李景彬,等. 钉齿滚筒式播前残膜回收装置设计与试验[J]. 农业工程学报, 2020, 36(2): 30 – 39.
CHEN Xinghua, CHEN Xuegeng, LI Jingbin, et al. Design and test of nail-teeth roller-type residual film recovery device before sowing [J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(2): 30 – 39. (in Chinese)

[15] 李宝刚,王祥,李玉环,等. 气力式精量播种机电控系统设计与分布式电驱调压控制策略[J]. 农业机械学报, 2025, 56(9): 417 – 426, 472.
LI Baogang, WANG Xiang, LI Yuhuan, et al. Integrated development of pneumatic precision seeder drill electronic control system and distributed electric drive pressure regulation control strategy [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(9): 417 – 426, 472. (in Chinese)

[16] 秦伟,李裕武,钱诚,等. 水稻小区育种播种机精量排种装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2025, 56(9): 140 – 152.
QIN Wei, LI Yuwu, Q Cheng, et al. Design and experiment of precision seed metering device for rice plot breeding seeder

[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(9):140 – 152. (in Chinese)

[17] 徐春保,张栋津,董万静,等. 油菜机直播气力式变径精量排肥系统设计与试验[J]. 农业工程学报,2025,41(10):28 – 39.
XU Chunbao, ZHANG Dongjin, DONG Wanjing, et al. Design and experiment of the pneumatic forced type variable diameter precision fertilizer discharging system for rape machine direct seeding [J]. Transactions of the CSAE, 2025, 41(10): 28 – 39. (in Chinese)

[18] 朱烨均,徐伟雄,孙志成,等. 基于贝叶斯优化的鲢鱼投饲量多层感知机预测算法研究[J]. 农业机械学报,2025, 56(10):165 – 174.
ZHU Yejun, XU Weixiong, SUN Zhicheng, et al. Bayesian optimization-based multilayer perceptron prediction algorithm for catfish feeding quantity[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(10): 165 – 174. (in Chinese)

[19] 易怀胜,李少义,陈汉新,等. 一种多特征融合的 WSA – MLP 齿轮箱故障诊断方法[J]. 噪声与振动控制,2025,45(6): 162 – 168.
YI Huaisheng, LI Shaoyi, CHEN Hanxin, et al. A multi-feature fusion method for WSA – MLP gearbox fault diagnosis[J]. Noise and Vibration Control, 2025, 45(6): 162 – 168. (in Chinese)

[20] 殷开俊,顾巧祥,叶良朋. 基于 LSTM – MLP 的煤矿供电系统故障预测[J]. 煤矿机械,2025,46(7):180 – 183.
YIN Kaijun, GU Qiaoxiang, YE Liangpeng. Fault prediction of coal mine power supply system based on LSTM – MLP[J]. Coal Mine Machinery, 2025, 46(7):180 – 183. (in Chinese)

[21] 章文峰,刘小平,梁惠施,等. 利用贝叶斯优化多层感知机的光伏阵列在线故障诊断方法[J]. 科学技术与工程,2024, 24(23):9905 – 9913.
ZHANG Wenfeng, LIU Xiaoping, LIANG Huishi, et al. Online fault diagnosis method for photovoltaic arrays using Bayesian optimized multilayer perceptron[J]. Science and Technology and Engineering, 2024, 24(23): 9905 – 9913. (in Chinese)

[22] LIU J, CHEN J, WANG D. Linear and exponential fault-assistant feature extraction methods for process monitoring [J]. Control Engineering Practice, 2021, 109: 104732.

[23] 康晓悦,赵岩,陈学庚,等. 齿带式残膜捡拾机构的设计与试验[J]. 甘肃农业大学学报,2020,55(2):166 – 174.
KANG Xiaoyue, ZHAO Yan, CHEN Xuegeng, et al. Design and experiment of nail-teeth belt residual film collector [J]. Journal of Gansu Agricultural University, 2020, 55(2):166 – 174. (in Chinese)

[24] 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)

[25] 杨松梅,颜利民,莫毅松,等. 随动式残膜回收机捡拾装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2018,49(12):109 – 115,164.
YANG Songmei, YAN Limin, MO Yisong, et al. Design and experiment on collecting device for profile modeling residual plastic film collector[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(12): 109 – 115,164. (in Chinese)

[26] WANG Peng, CHEN Xuegeng, WEN Haojun. Research and experiment on the removal mechanism of light impurities of the residual mulch film recovery machine[J]. Agriculture,2022,12(6):775.

[27] 唐宏宾,龚杨春,董晋阳,等. 基于 CNN – SE – LSTM 和多传感器数据的轴向柱塞泵故障诊断[J]. 机床与液压,2024, 52(16):224 – 232.
TANG Hongbin, GONG Yangchun, DONG Jinyang, et al. Fault diagnosis of axial piston pump based on CNN – SE – LSTM and multi-sensor data[J]. Machine Tools & Hydraulics, 2024, 52(16):224 – 232. (in Chinese)

[28] CHAO Q,GAO H H,TAO J F,et al. Fault diagnosis of axial piston pumps with multi-sensor data and convolutional neural network[J].Frontiers of Mechanical Engineering, 2022,17(3): 36.