doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2026.03.038

面向可靠性试验的拖拉机作业信息智能监测系统研究

赵子豪[1,2]　肖赞航[1]　温昌凯[1,2]　宋正河[1,2]　谢　斌[1,2]　贾　方[3]
徐立友[2,4]　闫祥海[2,4]　梅鹤波[5]

(1.中国农业大学工学院, 北京 100083; 2.智能农业动力装备全国重点实验室, 北京 100083;
3.洛阳西苑车辆与动力检验所有限公司, 洛阳 471000; 4.河南科技大学车辆与交通工程学院, 洛阳 471003;
5.北京市农林科学院智能装备技术研究中心, 北京 100097)

摘要: 针对拖拉机田间可靠性试验监测人力物力消耗大、数据易缺失、故障监测手段匮乏的问题,本文设计了一种用于拖拉机可靠性试验分析的作业信息智能监测系统。基于可靠性考核标准与评价体系,确定拖拉机组的关键监测参数及计算方法,设计包括传感器、数据采集终端等的监测系统硬件、基于 LabVIEW 编程语言和 Windows 10 IoT 软件实时操作系统的监测系统软件部分和远程监测平台。最终,开展台架、试验场和田间试验,结果表明:监测系统测取的拖拉机燃油消耗与实际值的拟合决定系数 R^2 为 0.958 2,测取的发动机转速与实际值的最大误差为 0.47%,测取的作业面积与实际面积最大误差为 3.10%,满足可靠性试验分析的精度需求;75 h 田间试验表明,拖拉机的高负荷作业时间为 54.56 h,累计燃油消耗量为 512.96 kg,作业面积为 57.75 hm^2,平均小时油耗为 6.83 kg/h,平均单位工作量油耗为 8.88 kg/hm^2,平均生产率达 0.77 hm^2/h,田间作业平均负荷系数为 58%,监测系统工作稳定性与可靠性较高。此外,通过该监测系统发现了 1 次驾驶员无法发现的故障。本文研发的监测系统可为拖拉机可靠性试验分析与验证提供有效的技术手段。

关键词: 拖拉机; 可靠性试验; 作业信息; 智能监测系统
中图分类号: S24; S219.1　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2026)03-0400-10　　**OSID**:

Tractor Operation Information Intelligent Monitoring System for Reliability Testing

ZHAO Zihao[1,2]　XIAO Zanhang[1]　WEN Changkai[1,2]　SONG Zhenghe[1,2]　XIE Bin[1,2]
JIA Fang[3]　XU Liyou[2,4]　YAN Xianghai[2,4]　MEI Hebo[5]

(1. *College of Engineering, China Agricultural University, Beijing* 100083, *China*
2. *State Key Laboratory of Intelligent Agricultural Power Equipment, Beijing* 100083, *China*
3. *Luoyang Xiyuan Vehicle and Power Inspection Institute Co., Ltd., Luoyang* 471000, *China*
4. *College of Vehicle and Traffic Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang* 471003, *China*
5. *Intelligent Equipment Research Center, Beijing Academy of Agriculture and Forestry Science, Beijing* 100097, *China*)

Abstract: Aiming to address the issues of significant resource consumption, data loss, and limited fault monitoring capabilities in field reliability testing of tractors, an intelligent tractor operation information monitoring system for reliability test analysis was developed. Based on reliability assessment standards and evaluation systems, the key parameters and calculation methods required for monitoring tractor unit reliability were determined, the hardware design of the tractor operation information monitoring system was developed, including components such as sensors and a data acquisition terminal. The software component and remote monitoring platform of the system were designed by using LabVIEW and the Windows 10 IoT system. Bench test, test track trials, and field tests were carried out, and the results showed that the monitoring system achieved an R^2 of 0.958 2 for measured tractor fuel consumption compared with actual values, with a maximum error of 0.47% for measured engine speed and a maximum

收稿日期: 2025-04-15　修回日期: 2025-04-27
基金项目: 国家自然科学基金项目(32301719)和智能农业动力装备全国重点实验室开放课题(SKLIAPE2025019)
作者简介: 赵子豪(2000—),博士生,主要从事新能源农机装备智能化研究,E-mail: zzh13780285325@163.com
通信作者: 温昌凯(1994—),副教授,博士,主要从事新能源农机装备智能化研究,E-mail: changkai.wen@cau.edu.cn

error of only 3.1% for measured operation area compared with actual area, meeting the accuracy requirements for reliability test analysis. During a 75-hour field test, the developed system reliably monitored tractor operation reliability information. Specifically, the tractor's high-load operation time was 54.56 h, cumulative fuel consumption was 512.96 kg, operation area was 57.75 hm^2, average hourly fuel consumption was 6.83 kg/h, average fuel consumption per unit workload was 8.88 kg/hm^2, average productivity was 0.77 hm^2/h, and the average field operation load coefficient was 58%. Additionally, the monitoring system identified one fault that was undetectable by the operator. The monitoring system developed can provide an effective technical tool for the analysis and validation of tractor reliability tests.
Key words: tractor; reliability testing; operation information; intelligent monitoring system

0　引言

拖拉机作为农业生产中重要的动力机械，通常挂载多种农机具完成耕、种、管、收多种作业环节[1-2]。因此，拖拉机的可靠程度和连续工作时间十分重要，直接关系到农业生产能否正常如期完成，对于增收增产具有重要意义[3-4]。但是，复杂的作业环境、种类繁多的作业场景、多变的牵引负荷，导致拖拉机实际作业中故障种类繁多、工况数据冗余、可靠性数据记录与分析困难[5-6]。

现阶段，可靠性考核试验主要分为台架试验和田间试验两种[7-8]。台架试验主要通过模拟拖拉机田间作业载荷谱加载来验证拖拉机可靠性[9]。与台架试验相比，田间试验通过跟踪拖拉机实际作业的可靠性状况，直接反映拖拉机整机作业的可靠性能。但是，我国开展拖拉机可靠性田间试验通常由试验人员实时跟随、实地掌握试验情况，并记录数据和拖拉机故障[10-11]。这种传统方式不仅耗费大量的人力物力，还无法实时掌握拖拉机的动态参数，难以准确评估拖拉机作业质量的可靠性和稳定性。因此，开发可服务于田间可靠性试验与验证的拖拉机作业信息监测系统迫在眉睫[12-13]。

随着智能测控技术的不断发展，农机装备智能化不断推进，结合多传感器技术，可实现关键作业参数的实时监测、远程监测与管理[14]。目前，诸多农机厂商开发应用了针对农机装备作业信息的远程监测管理装置与系统。John Deere 公司为全面监控和管理农业生产过程，开发了系列化的基于 ISO 11783 总线的拖拉机耕种监控系统，并接入 JD LINK 数据平台，帮助用户提高农业生产效率和质量[15]。CASE 公司为实时跟踪机器田间作业的任务完成情况、燃油消耗情况，开发了 AFS DISPLAY 测试终端。CNH 公司为优化拖拉机操纵系统以减少驾驶员的疲劳程度，使用 AFS Connect 技术采集拖拉机的转向、速度、液压等参数，实现拖拉机作业状态监测[16]。上述研究多以拖拉机、收获机整机作业参数远程监测系统为主，旨在提高整机作业效率、减少驾驶员负担[17]。

目前，诸多科研人员开展了农机装备田间作业关键参数的测取与云平台应用相关研究。YIN 等[18]基于 MPU6050 运动处理模块设计了一种车身姿态传感器，通过实时监测深松作业中后悬挂拉杆的角度计算耕作深度，并基于 IoT 技术搭建了深松监测云平台；田间试验表明，耕作深度检测误差小于 1.2 cm。OKSANEN 等[19]基于 OPC（开发平台通信）协议，开发了一套联合收获机产量监测系统，并配备基于联合收获机的服务器系统端和远程监控客户端。LI 等[20]为监测农场作物生产的环境数据，利用 IoT LoRaWAN 监测系统架构，开发了一个基于 Web 网络的可视化界面，实现监测数据可视化。

上述研究面向农机装备田间作业性能的关键参数，开发了相应的监测终端，实现了目标功能[21]。但是，在拖拉机可靠性方面，缺少可覆盖可靠性试验关键环节并实时分析试验进度、结果的拖拉机作业信息监测系统。因此，结合智能测控技术与物联网（Internet of Things，IoT）技术，着重分析可靠性田间试验考核指标与具体测试计算方法[22]，开展用于可靠性试验的拖拉机作业信息监测系统研发与试验至关重要。

针对拖拉机田间可靠性试验监测人力物力消耗大、数据易缺失、故障监测手段匮乏的问题，基于拖拉机作业工况及试验需求，确定拖拉机机组可靠性考核需要监测的关键参数和计算方法，研发集成作业参数采集、数据传输、远程监测等功能的拖拉机可靠性试验监测系统，开展系统的台架、试验场以及田间作业试验，验证监测系统的准确性与稳定性，为拖拉机可靠性试验的分析与验证提供有效的技术手段。

1　作业信息监测方法

按照 NY/T 2453—2013《拖拉机可靠性考核》，除满足作业时间、作业项目、作业油耗 3 项试验要求外，田间试验下的拖拉机可靠性通常采用平均当量

严重故障间隔时间($t_{MTBF_{2D}}$)和无故障性综合评分(Q)进行考核。当量故障数是指在拖拉机田间试验过程中发生的故障,依据标准量化为与致命、严重、一般及轻度故障相当的故障数。平均当量严重故障间隔时间计算式为

$$t_{MTBF_{2D}} = n_0 \frac{T_0}{r_{2D}} \tag{1}$$

式中 r_{2D}——当量严重故障数

n_0——台数,依据发动机标定功率的不同取 2 或 3

T_0——定时截尾试验时间,h

通过拖拉机使用期间的故障率、故障处理能力以及停机时间等多个指标计算无故障性综合评分值(Q),计算式为

$$Q = 100 - \frac{T_g}{n_0 T_0} \sum_{i=1}^{r_e} (T_i E_i) \tag{2}$$

式中 T_g——目前先进拖拉机产品 MTBF 值,一般取 300 h

r_e——在可靠性田间试验过程中,试验样机发生的故障总数

T_i——试验样机出现第 i 个故障时的累计故障时间,h

E_i——第 i 个故障的发生时间系数

在进行可靠性田间试验时,应保证拖拉机实际作业工况符合考核标准中的各项规定和农艺要求。作业项目规定轮式拖拉机田间负荷作业(旋耕、播种、收获等)时间要大于累计时间的 70%,运输时间小于 30%。此外,在田间试验过程中,相关标准要求全程测量记录拖拉机的瞬时油耗、累计油耗和各项作业的作业量油耗,从而分析拖拉机的负荷程度。

由此可见,作业时间、作业油耗、作业面积 3 个参数对于拖拉机可靠性考核具有重要意义,是计算两个关键指标的基础数据。下面着重阐述 3 个参数的监测方法。

1.1 作业时间监测方法

采集作业时间信息有助于评估拖拉机在实际工作条件下的使用寿命和持久性,以及在长时间工作下各个部件的耐久性和可靠性。记录作业时间并将其分类为空转时间(发动机工作无行走)、空行时间(发动机工作无负荷)、负荷作业时间。针对这一要求,本文通过发动机瞬时油耗 G_a、发动机转速 n 和拖拉机行驶速度 V 3 个监测指标对拖拉机作业时间和作业种类进行划分,其中 G_1为拖拉机进行 PTO 试验时 30% 负荷所对应的油耗,G_2为大于当前平均负荷系数的油耗值,判断标准见表 1。本系统通过拖拉机 CAN 总线获取发动机瞬时油耗、转速和冷却液温度。拖拉机行驶速度通过 GNSS 模组测速法获得,并使用多普勒频移法来修正采集到的 GNSS 信号频率。

表 1 拖拉机作业时间监测方法

Tab.1 Tractor operating time monitoring methods

作业状态	判定标准	系统采取措施及数据处理
停机	$G_a=0, n=0$	不计入作业时间,停机状态,各项数据均为 0
空转时间	$n\neq0, V=0$	不计入作业时间
空行时间	$V\neq0, G_a<G_1$	计入作业时间,统计时间、油耗、行驶轨迹
作业时间	$V\neq0, G_1<G_a<G_2$	计入作业时间,统计时间、油耗、作业面积,提醒驾驶员加大负荷
	$V\neq0, G_a>G_2$	计入作业时间,统计时间、油耗、作业面积
维修保养	$G_a=0, n=0$	不计入作业时间,停机状态,摄像头监视维修人员,统计维修时间

1.2 作业油耗监测方法

在可靠性试验过程中,应实时测量并计算各种作业的燃油消耗率,以监测拖拉机的故障信息,并判断和调节其负荷程度。燃油消耗率主要的相关参数为平均小时油耗与平均负荷系数,选用高精度油耗仪精确读取拖拉机时间段内的实际油耗量,并对 1 h 内的油耗量进行累加,从而得到平均小时油耗 G 为

$$G = \frac{\sum_{i=1}^{I} G_i t_i}{t_1 + t_2 + \cdots + t_i} \tag{3}$$

式中 G_i——第 i 段时间内的平均油耗,L/h

t_i——第 i 段时间,h

I——时间段数

平均负荷系数是指拖拉机在工作时所承担的总负荷与拖拉机动力输出轴最大功率的比值,计算式为

$$\xi_{fp} = \frac{P_{dp}}{P_{db}} \times 100\% \tag{4}$$

式中 ξ_{fp}——试验样机田间试验的平均负荷系数,%

P_{dp}——平均利用功耗近似值,kW

P_{db}——标定转速下的动力输出轴最大功率,kW

当拖拉机的平均负荷系数较低时,表明其工作效率较低,可靠性较差。相反,当拖拉机的平均负荷系数较高时,表明其工作效率较高,可靠性较好。根据拖拉机可靠性考核标准的规定,轮式拖拉机平均

负荷系数要大于 55%，履带拖拉机平均负荷系数要大于 60%。

1.3　作业面积监测方法

针对拖拉机可靠性田间试验作业面积大、作业时间长的特点，本文基于北斗卫星导航系统研究了一种动态面积测量法：将 GNSS 模组采集的经纬度坐标通过卡尔曼离散滤波算法过滤噪声，利用高斯-克吕格坐标转换方法将其转换为平面坐标系，最后对高斯转换后的拖拉机作业轨迹平面坐标使用 Delaunay 三角剖分算法绘制作业边界，最终计算得到拖拉机作业面积。

由于 GNSS 模组测量拖拉机田间作业时的经纬度坐标会受到多种因素的影响，因此需要通过滤波处理提高坐标精度。卡尔曼离散滤波模型考虑时间与测量更新，可在保留经纬度坐标原有特征的基础上，有效去除信号中的噪声。因此，本文选择卡尔曼离散滤波算法处理拖拉机田间作业的实际坐标。

滤波后的经纬度坐标基于 WGS－84 椭球坐标系统，难以计算作业轨迹面积，因此本系统通过高斯-克吕格投影法将原坐标转换为平面坐标。其中，高斯-克吕格投影法采用 3 度带进行计算。获得高斯平面坐标点后，使用 Delaunay 三角剖分算法确定拖拉机试验轨迹最大分布。在将所有的高斯坐标点解析为 Delaunay 三角形后，计算每个三角形的边长，然后使用海伦公式对小三角形面积进行求和即可得到拖拉机可靠性田间试验的作业面积。

2　作业信息监测系统设计

根据可靠性考核指标的要求，必须严格按照实际使用工况对被试拖拉机开展可靠性试验，即满足作业时间、作业项目、作业油耗的试验要求。因此，本系统对发动机转速、油耗、拖拉机车速、经纬度位置信息等数据进行实时采集监测，同时计算作业面积。

结合上述可靠性考核监测指标、监测参数、方法及实际试验需求，对拖拉机可靠性田间试验作业信息监测系统进行总体设计，主要分为硬件系统和软件系统两部分。监测系统总体方案如图 1 所示。

2.1　硬件系统设计

本系统基于工控机自研数据采集终端，工控机型号为 WLT－070R－AP20，采用基于 Cortex－A8 的 CPU 架构，具备 RS232、RS485、CAN 总线等通讯功能。本研究设计的监测系统，基于多传感器，通过 SAE J 1939 协议实时采集拖拉机发动机转速、冷却液温度等参数，通过串口通讯实时采集拖拉机油耗、作业位置以及时间等参数；同时通过网络摄像头对

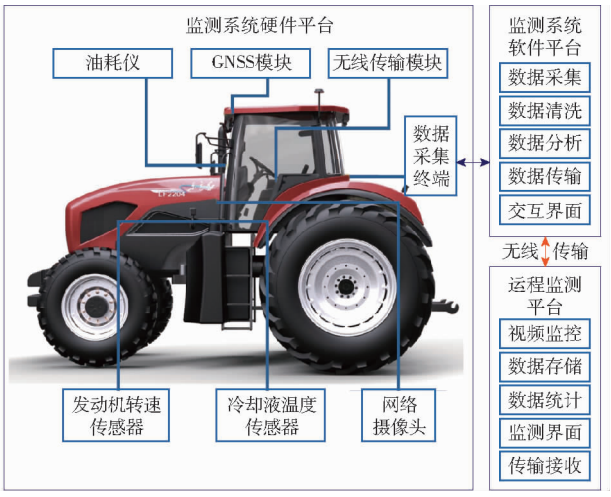

图 1　监测系统总体方案

Fig. 1　Overall program of monitoring system

拖拉机田间作业场景进行实时监控，方便试验人员监测拖拉机可能发生的故障。硬件系统设计的总体方案如图 2 所示。

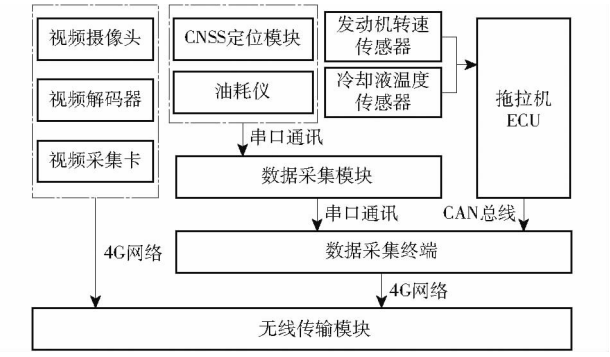

图 2　硬件系统总体架构

Fig. 2　Overall hardware system structure

数据采集终端：由工控机、显示屏、电源线接口等组成，实现对油耗仪、GNSS 模组等硬件模块的信息采集。

油耗仪：考虑到拖拉机田间作业时间长、发动机温度变化较大、平均时段燃油消耗量监测需求等多种因素，选用 HOCM03 型油耗仪。该油耗仪通过容积法测量燃油消耗量，即测量被消耗一定容积的燃油所需要的时间间隔，计算式为

$$B=\frac{3\,600V_t\rho}{t} \tag{5}$$

式中　B——燃油消耗率，kg/s

V_t——消耗的燃油容积，L

ρ——燃油密度，kg/L

t——测量时间间隔，s

GNSS 模组：使用 BT－M002 GNSS 模组采集被试拖拉机进行田间作业可靠性试验时的位置信息，定位精度为 1.5 m、速度检测精度为 0.05 m/s、动态航向角精度为 0.3°。定位天线置于拖拉机车顶顶

部,具体高度需依照不同类型、功率拖拉机进行详细测量。为了优化采集终端的研产成本,同时考虑安装难度,采用模组绝对定位法,即通过北斗卫星与模组之间的位置测量值直接确定 GNSS 模组在 WGS-84 坐标系下相对于坐标原点的绝对位置。

拖拉机田间作业环境恶劣,容易受到土壤不平整的影响发生车身倾斜,导致 GNSS 模组也随之发生倾斜,从而产生定位误差。为了提高拖拉机定位的精确度,通过航向角对车身倾斜导致的误差进行修正,拖拉机在平面坐标系 X 轴、Y 轴上的投影偏差为

$$e_x = H\sin\theta \tag{6}$$

$$e_y = H\sin\beta \tag{7}$$

式中 H——GNSS 模组距水平地面高度

θ——拖拉机在 X 轴方向的倾斜角

β——拖拉机在 Y 轴方向的倾斜角

e_x——拖拉机在 X 轴的投影偏差

e_y——拖拉机在 Y 轴的投影偏差

由于 e_x、e_y 为车体在平面坐标系的投影偏差,而面积计算是在高斯坐标系下,因此需要将 e_x、e_y 转换为高斯坐标系下的投影偏差,即

$$\begin{bmatrix} e_x \\ e_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\psi & \sin\psi \\ -\sin\psi & \cos\psi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e'_x \\ e'_y \end{bmatrix} \tag{8}$$

式中 ψ——拖拉机航向角

e'_x——高斯坐标系下拖拉机在 X 轴的投影偏差

e'_y——高斯坐标系下拖拉机在 Y 轴的投影偏差

根据式(8)计算高斯平面坐标系下的偏差,并用此偏差修正原始的经纬度信息,以提高拖拉机作业位置信息的精度。

无线传输模块:采用 4G DTU 模块实现采集终端与试验人员计算机端的远程通讯。油耗仪、GNSS 模组等的原始数据通过串口双向透传至 DTU 转 4G 上报至服务器。若 4G 信号欠佳甚至缺失时,将实时获取的数据、视频等暂存于数据采集终端的工控机内,待 4G 恢复正常状态再进行上传。

完成设备选型后,根据各设备供电和信号传输的需求,设计了系统的通讯与供电线路,如图 3 所示。

2.2 软件系统设计

拖拉机可靠性作业参数监测系统的软件系统应实现准确稳定的数据采集、通讯、故障预警,并且保证试验人员具有良好的人机交互体验,以提高监测系统的可视性、操作性。基于 Windows 10 IoT 软件实时操作系统,在 .NET 框架上使用 C 语言对采集

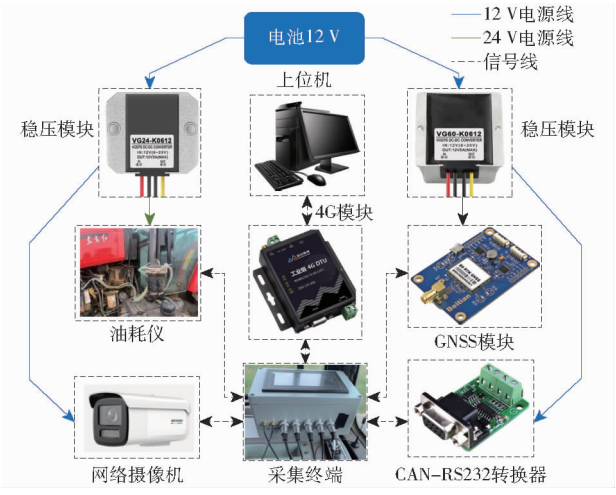

图 3 硬件系统电源与信号线路图

Fig. 3 Hardware system power and signal line diagram

终端软件平台进行设计,完成了数据采集、数据解析、数据存储、无线传输以及人机交互界面的功能开发。同时,基于 LabVIEW 编程语言设计远程监测平台,实现监测界面与主要模块的功能。作业信息监测软件系统方案如图 4 所示。采集终端软件平台直接连接到底层传感器,对这些传感器数据进行采集并发送到远程监测平台。远程监测平台接收采集终端发送的数据,对可靠性考核指标和相关参数进行显示监测。

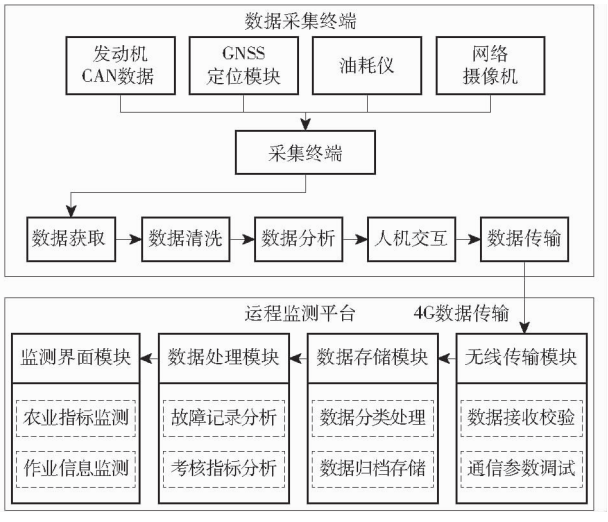

图 4 软件系统方案框图

Fig. 4 Block diagram of software system

远程监测平台的人机交互软件界面如图 5 所示。

3 试验验证

3.1 基础性能验证试验

本文通过台架试验模拟拖拉机田间作业时的动力输出轴载荷状况,验证车载数据采集终端的油耗仪采集、拖拉机 CAN 总线读取的准确性。此次试验使用由国家拖拉机质量检测检验中心研制开发的



图 5　远程监测平台软件界面

Fig. 5　Remote monitoring platform software interface

PTO 试验台，主要由试验台加载电机、动力输出轴扭矩传感器、发动机转速传感器等组成。其加载电机额定功率为 110 kW，额定转速为 1 500 r/min，主要适用于 110 kW 以下的拖拉机动力输出轴功率试验。台架的转速传感器和扭矩传感器用来测试被试拖拉机发动机转速和扭矩，转速传感器精度为 ±1 r/min。本次试验使用东方红 LX704 型拖拉机，试验现场如图 6 所示。



图 6　台架试验现场

Fig. 6　Bench test site

PTO 台架通过输出不同的扭矩和转速来模拟拖拉机不同的工作负载和工作条件。根据台架试验标准规定，PTO 正常工作功率不超过拖拉机最大功率的 75%，由于本试验中被试拖拉机最大功率为 70 kW，所以 PTO 输出功率控制在 50 kW，转矩控制在 100 ~ 750 N·m 范围内。试验共模拟了 9 个工况（见表 2），试验过程始终由一位驾驶员操作拖拉机切换不同工作挡位，保证拖拉机动力输出和试验数据的合理性。

表 2　模拟工况参数

Tab. 2　Simulated working conditions parameters

模拟工况	PTO 转矩/(N·m)	PTO 转速/(r·min^{-1})	功率/kW
1	200	2 387	49. 95
2	300	1 588	49. 94
3	400	1 193	49. 87
4	500	951	49. 81
5	550	861	49. 39
6	600	787	49. 52
7	640	738	49. 48
8	680	690	49. 26
9	750	622	48. 91

此外，为验证系统监测作业面积的准确性，在拖拉机试验场展开试验，对 GNSS 模组使用动态面积测量法计算得到的作业面积精度进行验证，并对远程监测软件平台无线传输、数据处理、实时监测等模块的稳定性与可行性展开验证试验，如图 7 所示。



图 7　远程监测平台验证试验

Fig. 7　Remote monitoring platform validation test

试验拖拉机以 10 km/h 的速度，按照相同的轨迹绕试验场进行 10 次模拟作业试验。试验过程中，采集终端每 1 s 发送 1 次 GNSS 数据，远程监测平台记录经纬度坐标的变化，并通过建立的卡尔曼离散滤波模型对数据进行滤波处理。

3. 2　田间试验验证

本文开展系统的可靠性田间试验，一方面验证拖拉机可靠性试验作业信息监测系统的可行性与稳定性，另一方面验证该监测系统实际应用于拖拉机可靠性田间试验的实际效果。需要说明的是，由于标准中规定的农艺作业时间为 1 500 h，即需要连续作业数十个月，受试验条件限制，不对作业时间进行监测考核。

拖拉机可靠性田间试验于 2023 年 7 月 4—22 日在河南省洛阳市孟津区农田进行，实际作业 14 d，作业内容包括犁耕、旋耕、播种和压实。被试拖拉机为东方红 LX1204 型轮式拖拉机，配套机具作业幅宽为 2. 30 m。将数据采集终端、相关传感器和摄像头安装在被试拖拉机上，如图 8 所示。

田间试验过程中，监测系统的数据采集终端对发动机转速、行驶速度、燃油消耗率、经纬度位置信息、作业面积、作业时间等信息进行监测和分析，通过远程监测平台接收试验数据，并计算燃油消耗率、累计油耗、平均负荷系数、作业面积、作业分类和时间等参数。同时，监测系统记录试验过程中潜在的拖拉机故障信息并存储到监测平台中。

3. 3　试验结果分析

3. 3. 1　台架试验结果分析

为验证采集的瞬时油耗和累计油耗的准确性，对 CAN 总线读取的拖拉机发动机燃油消耗率与油



图 8 试验样机

Fig. 8 Test prototype

耗仪得出的燃油消耗率进行了拟合，拟合曲线如图 9 所示，经 CAN 总线读取的拖拉机发动机燃油消耗率与油耗仪得出的燃油消耗率拟合曲线的决定系数 $R^2 = 0.958\ 2 > 0.8$，拟合良好。

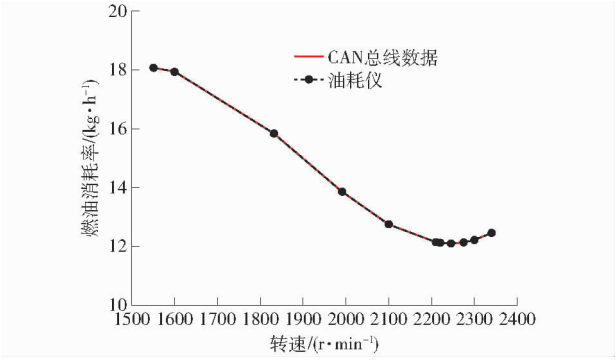

图 9 燃油消耗率拟合曲线

Fig. 9 Fuel consumption rate fitting curve

为验证采集的发动机转速的准确性，对监测系统得到的发动机转速与 PTO 台架转速传感器测得的转速进行比较分析，如图 10 所示。

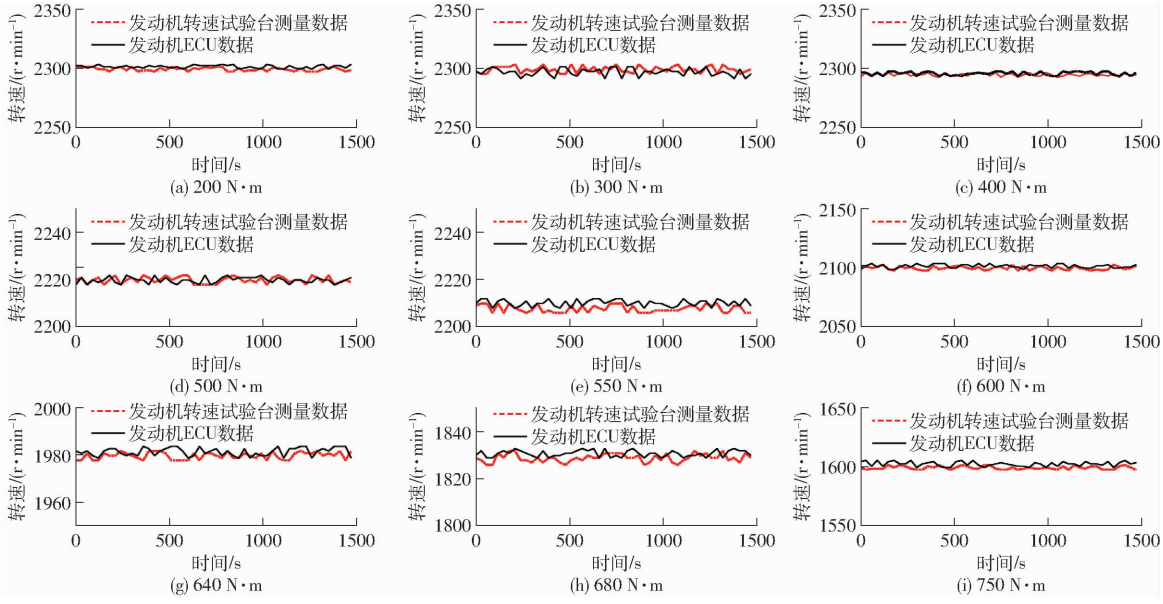

图 10 发动机转速台架试验结果

Fig. 10 Engine speed bench test results

结果表明，在 PTO 模拟试验中，发动机转速保持在 1 550 ~ 2 350 r/min 范围内，通过监测系统得到的发动机转速与 PTO 台架转速传感器测得的转速保持了良好的数据拟合性，两者之间最大误差为 0.47%。在 3.6 h 的 PTO 台架试验中，通过油耗仪测得拖拉机累计耗油量为 39.26 kg，在此过程中采集终端保持稳定运行。

因此，台架试验验证了数据采集终端的可行性，表明油耗仪测得的累计油耗、拖拉机 CAN 总线读取的瞬时油耗与发动机转速能够满足拖拉机作业信息的监测需求。

3.3.2 试验场试验结果分析

通过监测系统测取的作业面积如图 11 所示，经分析可知，滤波处理后得到的经纬度数据曲线更加平滑，并且较好地保留了信号特征，便于后续对拖拉机作业面积的计算。并且进一步获取拖拉机轨迹和拟合的作业面积，图 12 为 Delaunay 法提取出的拖拉机轨迹轮廓图，图 13 为绘制的外轮廓包含面积图。

为充分验证作业面积监测方法准确性，在同一试验场进行了 10 次拖拉机模拟作业，实时采集作业中的经纬度信息，从而计算每次的作业面积。试验

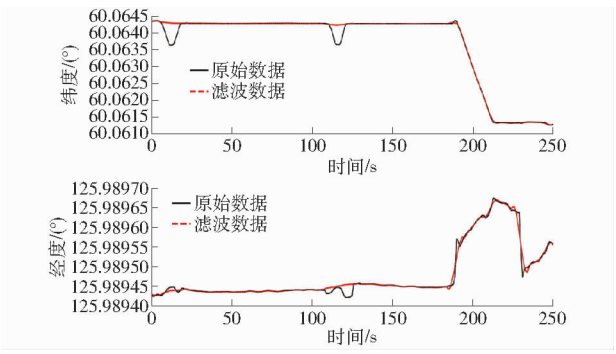

图 11　原始经纬度与滤波处理对比图

Fig. 11　Comparison of original latitude and longitude with filter processing

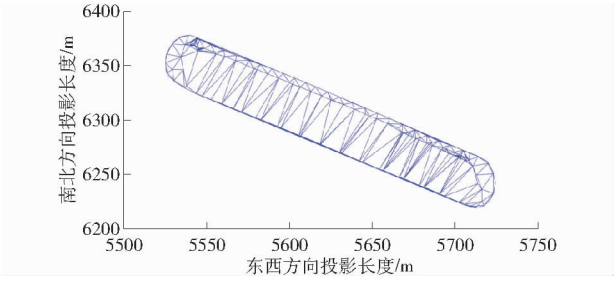

图 12　Delaunay 法提取拖拉机轨迹轮廓图

Fig. 12　Tractor trajectory contour extraction by Delaunay method

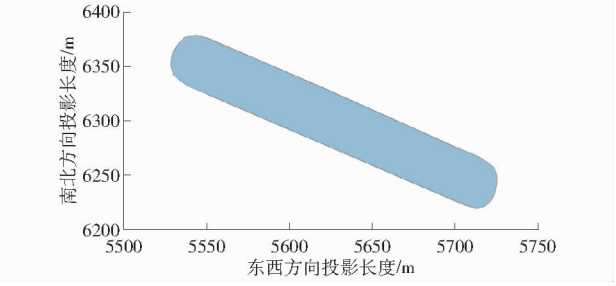

图 13　外轮廓包含面积图

Fig. 13　Area map of outer contour

数据如表 3 所示，试验场实际面积为 11 936 m^2，监测系统面积测量最大误差为 3.10%，验证了动态面积测量法的准确性。

表 3　动态面积测量结果

Tab. 3　Dynamic area measurement results

测试次数	测量面积/m^2	测量误差/%
1	11 745	1.60
2	12 239	2.54
3	12 145	1.75
4	11 911	0.21
5	12 228	2.45
6	12 103	1.40
7	11 566	3.10
8	11 595	2.87
9	11 834	0.85
10	11 872	0.54

远程监测平台在无线传输软件设计部分采用 CRC 校验对传输的数据进行核验，为检验无线传输模块的丢包率与延迟率，分别在不同传输周期下传输 100 次数据包，并对比采集终端发送数据包个数和远程监测平台核验后数据包个数，如表 4 所示。不同的数据传输周期会对 4G 通讯的丢包率产生影响。在通讯距离不变的情况下，数据传输频率越快，丢包率就越大；当传输周期大于 0.05 s 时，数据传输无丢失。

表 4　信号传输丢包率测试结果

Tab. 4　Signal transmission packet loss rate test results

传输周期/s	发送数据包数/个	接收数据包数/个	丢包率/%
5.00	100	100	0
3.00	100	100	0
2.00	100	100	0
1.00	100	100	0
0.50	100	100	0
0.10	100	100	0
0.05	100	98	2
0.02	100	88	12
0.01	100	84	16

在进行数据通讯时，采集终端在发送数据的同时记录发送时间作为本次传输的起始时间戳，远程监测平台接收到数据并记录接收时间作为本次传输的终止时间戳，两个时间相减得到本次 4G 传输的延时时间。以传输周期为 1 s 进行 100 次数据传输，最大延时为 0.159 s，平均延时为 0.156 s，满足监测需求。

3.3.3　田间试验结果分析

基于田间试验，检测拖拉机油耗、发动机转速、作业时间、作业面积、行驶速度、作业场景等信息，分析拖拉机是否符合可靠性考核标准规定的试验要求。主要情况如下：

(1)作业类型分析

通过查阅 LX1204 型拖拉机技术参数表，确定其负荷作业的临界燃油消耗率 G_1 为 3.69 kg/h，根据上文的作业时间判定方法可知：当转速大于 0 r/min，车速为 0 km/h 时，判定为空转时间，不计入作业时间；当瞬时油耗小于 3.69 kg/h 时，判定为运输作业；瞬时油耗大于等于 3.69 kg/h，判定为负荷作业，计入负荷作业时间。

计算负荷作业时间占总工作时间的比例，结果如表 5 所示。结果表明，7 月 13 日和 7 月 15 日负荷作业时间占比最低，仅为总工作时间的 62%，该时间段拖拉机的作业效率和经济性较差，拖拉机可能存在故障问题。综上，本次可靠性考核田间试验的累计工作时间为75 h，累计负荷作业时间占比为

表 5 负荷作业时间占比统计结果

Tab. 5 Load operating time percentage statistics

日期	工作总时间/h	负荷作业时间/h	负荷作业时间占比/%
7 月 4 日	5.5	4.16	75.62
7 月 5 日	8.7	6.65	76.44
7 月 6 日	9.8	7.90	80.69
7 月 7 日	7.8	6.26	80.20
7 月 10 日	6.3	4.58	72.75
7 月 11 日	2.8	1.89	67.46
7 月 12 日	2.6	2.22	85.56
7 月 13 日	6.3	3.88	61.55
7 月 14 日	4.3	3.28	76.19
7 月 15 日	5.0	3.13	62.51
7 月 16 日	5.0	3.43	68.60
7 月 19 日	4.9	3.35	68.34
7 月 20 日	2.0	1.40	70.10
7 月 22 日	2.4	2.13	88.99

72.75%,大于可靠性考核标准要求的 70%,符合作业项目的规定要求。

(2)作业油耗分析

记录油耗仪采集的拖拉机作业中各个时间段的燃油消耗量,通过数据分析处理得出平均小时油耗,然后根据所得平均小时油耗,在拖拉机动力输出轴曲线上查得平均利用功耗近似值,计算得出平均负荷系数。试验数据处理结果如图 14 所示。

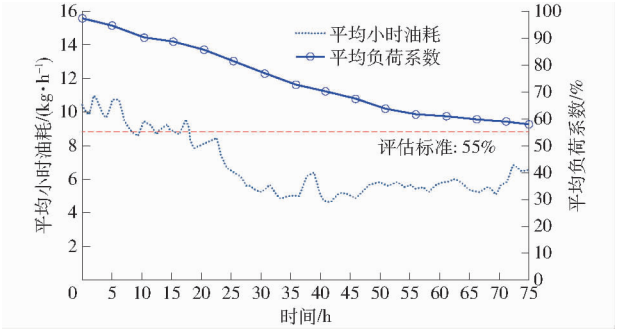

图 14 平均负荷系数试验结果

Fig. 14 Average load factor test results

经分析可知,0 ~ 20 h 内,拖拉机平均小时油耗较高,此时拖拉机工作效率较高,燃油经济性较好,平均负荷系数远高于可靠性考核标准要求的 55%;但随着时间的推移,平均小时油耗降低,拖拉机燃油经济性变差,最终平均负荷系数逐渐减小至 58%,但仍大于可靠性考核标准要求的 55%,结果表明本次试验符合可靠性考核标准中作业油耗的农艺要求。

(3)作业面积分析

基于采集的拖拉机作业的经纬度坐标,计算可靠性试验作业面积为 57.75 hm^2。结合累计油耗和累计工作时间计算出拖拉机单位工作量油耗为 8.88 kg/hm^2,平均生产率为 0.77 hm^2/h。

(4)故障信息分析

在累计 75 h 的田间试验中,分别通过驾驶员申报、视频监测和监测参数异常的方式,累计记录到 1 次拖拉机故障,即散热器漏液。

在 7 月 13 日 16:25,监测系统分析发动机冷却液温度在 20 min 内攀升至 87℃,并且过程中未因发动机转速降低而变小,如图 15 所示。因此判断是散热器发生故障,在更换冷却液并清理散热片后恢复正常。

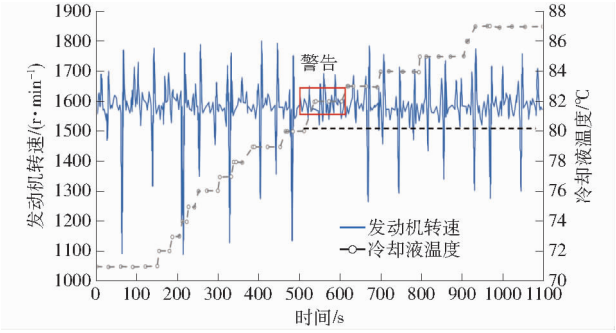

图 15 散热器故障曲线

Fig. 15 Unusual radiator curve

(5)监测数据汇总

经分析所有试验数据可知,拖拉机累计工作时间 75 h,其中负荷作业时间 54.56 h,占总工作时间的 72.75%;累计燃油消耗量为 512.96 kg,作业面积达 57.75 hm^2,平均小时油耗为 6.83 kg/h,平均单位工作量油耗为 8.88 kg/hm^2,平均生产率为 0.77 hm^2/h,田间作业平均负荷系数为 58%。作业项目和作业油耗均满足可靠性考核标准体系相关要求,满足拖拉机可靠性考核要求,试验结果具备代表性。此外,试验中共发生故障 1 次,由试验人员通过监测平台监测发现。

综合上述,本文所研制拖拉机可靠性田间试验作业信息监测系统保持稳定工作,可准确采集、实时显示相关监测参数和可靠性评价指标,满足拖拉机可靠性田间试验的监测要求。

4 结论

(1)针对可靠性试验的拖拉机作业信息监测需求,确定了包含作业时间、作业项目、作业油耗等参数在内的可靠性考核关键指标及计算方法,研发了集成作业参数采集、数据传输、远程监测功能一体化的拖拉机作业信息监测系统。

(2)75 h 田间可靠性试验结果显示,监测系统可稳定获取拖拉机作业信息,其中,拖拉机高负荷作业时间为 54.56 h,累计燃油消耗量达 512.96 kg,作业面积为 57.75 hm^2,平均小时油耗为 6.83 kg/h,平均单位工作量油耗为 8.88 kg/hm^2,平均生产率达

0.77 hm^2/h，田间作业平均负荷系数为 58%。

(3)研发的拖拉机田间作业信息监测系统可有效获取可靠性验证所需的关键作业指标，极大减少了可靠性试验的人力物力，并解决了数据易缺失与故障信息监测手段匮乏的问题，可为拖拉机可靠性试验的分析与验证提供有效的技术手段。

参 考 文 献

[1] 谢斌，武仲斌，毛恩荣. 农业拖拉机关键技术发展现状与展望[J]. 农业机械学报，2018，49(8)：1－17.
XIE Bin，WU Zhongbin，MAO Enrong. Development and prospect of key technologies on agricultural tractor[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2018，49(8)：1－17.（in Chinese）

[2] WEN Changkai，REN Wen，ZHU Qingzhen，et al. Reducing operation emissions and improving work efficiency using a pure electric wheel drive tractor[J]. Engineering，2024，37:230－245.

[3] 闫祥海，周志立，贾方. 拖拉机动力输出轴动态转矩载荷谱编制与验证[J]. 农业工程学报，2019，35(19)：74－81.
YAN Xianghai，ZHOU Zhili，JIA Fang. Compilation and verification of dynamic torque load spectrum of tractor power take-off [J]. Transactions of the CASE，2019，35(19):74－81.（in Chinese）

[4] MATTETTI M，MARALDI M，SEDONI E，et al. Optimal criteria for durability test of stepped transmissions of agricultural tractors[J]. Biosystems Engineering，2019，178：145－155.

[5] 赵博，张巍朋，苑严伟，等. 农业装备运维与作业服务管理信息化技术研究进展[J]. 农业机械学报，2023，54(12):1－26.
ZHAO Bo，ZHANG Weipeng，YUAN Yanwei，et al. Research progress in information technology for agricultural equipment maintenance and operation service management[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2023，54(12)：1－26.（in Chinese）

[6] 温昌凯，谢斌，宋正河，等. 拖拉机耐久性加速结构试验设计方法[J]. 吉林大学学报(工学版)，2022，52(3)：703－715.
WEN Changkai，XIE Bin，SONG Zhenghe，et al. Design method of tractor durability accelerated structure test[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition)，2022，52(3)：703－715.（in Chinese）

[7] HENSH S，TEWARI V K，UPADHYAY G. An instrumentation system to measure the loads acting on the tractor PTO bearing during rotary tillage[J]. Journal of Terramechanics，2021，96：1－10.

[8] PARAFOROS D S，GRIEPENTROG H W，VOUGIOUKAS S G，et al. Fatigue life assessment of a four-rotor swather based on rainflow cycle counting[J]. Biosystems Engineering，2014，127：1－10.

[9] SHAO Y M，LIU J，CHRIS K M. Drive axle housing failure analysis of a mining dump truck based on the load spectrum[J]. Engineering Failure Analysis，2011，18：1049－1057.

[10] KORTENBRUCK D，GRIEPENTROG H，PARAFOROS D. Machine operation profiles generated from ISO 11783 communication data[J]. Computers and Electronics in Agriculture，2017，140：227－236.

[11] 温昌凯，谢斌，杨子涵，等. 基于功率密度的大功率拖拉机变速箱壳体疲劳分析[J]. 农业机械学报，2019，50(6)：389－396，404.
WEN Changkai，XIE Bin，YANG Zihan，et al. Fatigue analysis of gearbox shell of high horsepower tractor based on power density[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2019，50(6)：389－396，404.（in Chinese）

[12] 中国农业机械化协会. 北斗农业机械远程作业监测终端技术规范：T/NJ 1101—2020[S]. 北京：中国农业出版社，2020.

[13] WEN Changkai，XIE Bin，YIN Yiyong，et al. Power density based fatigue load spectrum editing for accelerated durability testing for tractor front axles[J]. Biosystems Engineering，2020，200：73－88.

[14] WEN Changkai，XIE Bin，SONG Zhenghe，et al. Methodology for designing tractor accelerated structure tests for an indoor drum-type test bench[J]. Biosystems Engineering，2021，205：1－26.

[15] 尹彦鑫，孟志军，赵春江，等. 大田无人农场关键技术研究现状与展望[J]. 智慧农业(中英文)，2022，4(4)：1－25.
YIN Yanxin，MENG Zhijun，ZHA0 Chunjiang，et al. State-of-the-art and prospect of research on key technical for unmanned farms of field crop[J]. Smart Agriculture，2022，4(4)：1－25.（in Chinese）

[16] 王宏伟，温昌凯，刘孟楠，等. 拖拉机作业工况参数检测系统研究[J]. 农业机械学报，2023，54(增刊 2)：409－416.
WANG Hongwei，WEN Changkai，LIU Mengnan，et al. Tractor operating condition parameter testing system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2023，54(Supp. 2)：409－416.（in Chinese）

[17] AUBERT B A，SCHROEDER A，GRIMAUDO J. IT as enabler of sustainable farming：an empirical analysis of farmers' adoption decision of precision agriculture technology[J]. Decision Support Systems，2012，54(1)：510－520.

[18] YIN Y，ZHAO C，ZHANG Y，et al. Development and application of subsoiling monitoring system based on edge computing using IoT architecture[J]. Computers and Electronics in Agriculture，2022，198：106976.

[19] OKSANEN T，LINKOLEHTO R，SEILONEN I. Adapting an industrial automation protocol to remote monitoring of mobile agricultural machinery：a combine harvester with IoT[J]. IFAC－PapersOnLine，2016，49(16)：127－131.

[20] LI Ruochen，WEN Changkai，LI Shuyan，et al. Quality prediction of tractor rotary tillage based on BiConvLSTM with self-attention[J]. Computers and Electronics in Agriculture，2023，191：106482.

[21] 陈学庚，温浩军，张伟荣，等. 农业机械与信息技术融合发展现状与方向[J]. 智慧农业(中英文)，2020，2(4)：1－16.
CHEN Xuegeng，WEN Haojun，ZHANG Weirong，et al. Advances and progress of agricultural machinery and sensing technology fusion[J]. Smart Agriculture，2020，2(4)：1－16.（in Chinese）

[22] 李淑艳，李若晨，温昌凯，等. 基于 GAF－DenseNet 的旋耕作业质量等级识别模型[J]. 农业机械学报，2022，53(11)：441－449.
LI Shuyan，LI Ruochen，WEN Changkai，et al. Quality indentification model of tractor rotary tillage based on GAF－DenseNet [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2022，53(11)：441－449.（in Chinese）