

玉米青贮收获机多参数检测系统设计与试验

汪凤珠^{1,2} 赵博^{1,2} 刘阳春^{1,2} 毛文华^{1,2} 王吉中^{1,2} 姜含露^{1,2}

(1. 中国农业机械化科学研究院集团有限公司, 北京 100083; 2. 土壤植物机器系统技术国家重点实验室, 北京 100083)

摘要: 针对当前玉米青贮收获机作业参数人工检测效率低、自动检测手段匮乏、检测参数间相互独立、难以支撑关联分析等问题,设计了基于CAN总线和虚拟仪器的玉米青贮收获机田间多参数检测系统。该检测系统由作业质量检测装置、机械部件工况检测装置、液压部件工况检测装置和上位机监测软件构成,可以实现发动机输出转速与扭矩、割茬高度、收获生产率、割台工作转速与扭矩、切碎辊工作转速与扭矩、抛送风机工作转速与扭矩、行走部件转速与扭矩、喂入部液压泵输出流量与压力等多种参数的系统性测量与综合分析,并结合现行标准用于玉米青贮收获作业的整机合格性评价。田间试验结果表明,多参数检测系统能够实现玉米青贮收获机作业参数的全面、动态、连续和稳定测量。其中,扭矩参数静态测量的最大相对误差在 $\pm 0.5\%$ 范围内,空载工况下的试验组间均值差异性不大于 $0.75\text{ N}\cdot\text{m}$,试验组内重复性测量最大极差为 $1.28\text{ N}\cdot\text{m}$,最大变异系数为 0.012 ;收获工况下的检测数据与实际工况始终保持一致,可以准确获取不同机器参数下的整机转速与扭矩动态变化趋势;液压流量参数测量的最大相对误差为 1.13% ,额定作业工况下的相对误差为 0.53% ;收获生产率参数测量的模型回归系数为 0.89 ,平均相对误差为 11.1% ;割茬高度参数测量的最大相对误差为 4.78% 。玉米青贮收获机作业性能综合测试系统通信正常,数据采集稳定可信,有效降低田间检测复杂度,可为玉米青贮收获机的参数在线检测、适用性综合评价与整机设计优化等提供技术支持。

关键词: 玉米青贮收获机; 作业质量; 检测系统; CAN总线; 虚拟仪器

中图分类号: S225.8; S237 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2023)01-0127-10

OSID:



Design and Experiment of Multi-parameter Detection System for Corn Silage Harvester

WANG Fengzhu^{1,2} ZHAO Bo^{1,2} LIU Yangchun^{1,2} MAO Wenhua^{1,2} WANG Jizhong^{1,2} JIANG Hanlu^{1,2}

(1. Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences Group Co., Ltd., Beijing 100083, China

2. State Key Laboratory of Soil-Plant-Machine System Technology, Beijing 100083, China)

Abstract: In order to solve the problems of the low efficiency of manual detection, the lack of automatic detection methods, the independence of the detection parameters and the difficulty of supporting correlation analysis in corn silage harvester, a multi-parameter data monitoring system for silage machines based on CAN bus and virtual instruments was designed. The monitoring system was composed of operation quality detection device, mechanical parts power detection device, hydraulic component power monitoring device and monitoring software, which can realize systematic measurement and comprehensive analysis of various parameters such as engine speed and torque, stubble retention height, harvesting efficiency, header part speed and torque, chopping roller speed and torque, throwing fan speed and torque, walking part speed and torque, feeding pump inlet and outlet pressure and hydraulic pipeline flow, etc. And the qualification evaluation of the whole machine can be realized under the current national standard. The field test results showed that the multi-parameter test system can realize the comprehensive, dynamic, continuous and stable measurement of the operating parameters in the field, and the maximum relative error of torque parameters in the static measurement was not more than $\pm 0.5\%$. The mean difference between the test groups was not more than $0.75\text{ N}\cdot\text{m}$ under no-load

收稿日期: 2022-03-02 修回日期: 2022-03-27

基金项目: 国家重点研发计划项目(2020YFB1709603)

作者简介: 汪凤珠(1988—),女,博士生,主要从事精准农业与农机测控技术研究,E-mail: wangfengzhu1@126.com

通信作者: 毛文华(1974—),女,研究员,博士生导师,主要从事农业电气化与自动化研究,E-mail: mwh-924@163.com

condition, while the maximum range of the repeatability measurement was 1.28 N·m, and the maximum coefficient of variation was 0.012; the monitoring data was always consistent with the actual working conditions under harvesting condition, and the dynamic trend of torque and speed parameters for the whole machine can be accurately obtained under different harvest conditions; the maximum relative error of hydraulic flow parameter in the dynamic measurement was 1.13%, and the relative error was 0.53% under the rated operating conditions. The model regression coefficient of harvesting efficiency measurement was 0.89, while the average relative error was 11.1%. The maximum relative error of stubble height detection was 4.78%. In summary, the comprehensive test system for the corn silage harvester had a good performance communication, and the data collection was stable, accurate and credible, which can effectively reduce the complexity of field detection, and can provide technical support for the online parameters detection, the comprehensive applicability evaluation and the machine design optimization in corn silage harvester.

Key words: corn silage harvesting; operation quality; detection system; CAN bus; virtual instrumentation

0 引言

由于玉米青贮收获具有最佳收获期短、作业农时要求高的特点,玉米青贮收获机械正朝着大喂入量、大功率、宽割幅和高效率的方向发展,这对作业过程中的数据支持提出了更高的要求^[1]。

近年来,国内外学者针对玉米青贮收获机作业参数检测开展了相关研究^[2-10]。目前的研究主要是检测单一或者几个机器参数,检测数据之间相对独立,缺乏系统性的作业质量及部件工况基础数据,无法进行关联分析,难以支撑玉米青贮收获机多参数融合的性能分析与综合评估方法研究。玉米青贮收获机的性能验证仍然依赖人工田间检测试验^[11-14]。

针对上述问题,本文根据玉米青贮收获机田间作业性能的实时检测与作业评价需要,基于CAN总线网络^[15-17]与虚拟仪器技术,设计基于多源信息传感的整机多参数综合检测系统,完成玉米青贮收获机作业质量、关键部件工况、发动机输出等作业参数的同步采集与数据分析,以期为玉米青贮收获机的作业性能综合评估、整机优化设计分析等提供快速有效手段^[18-20]。

1 系统构成

为了实现自走式玉米青贮收获机的性能评估及作业参数优化,构建了整机田间多参数综合检测系统,系统总体框架主要包括作业质量检测装置、整机工况检测装置、作业位置与速度检测装置、信号采集装置、车载终端装置和远程数据库系统,如图1所示。作业质量检测装置主要实现玉米青贮田间收获过程中收获生产率、割茬高度等作业质量相关参数的快速检测;整机工况检测装置主要实现玉米青贮收获机关键机械部件和液压部件的工况检测,包括

割台部件、切碎辊部件、抛送风机部件、籽粒破碎辊部件、行走部件、发动机部件的转速与扭矩检测,以及喂入部液压泵的压力与流量检测;作业位置与速度检测装置主要应用GPS/北斗双模定位模块实现玉米青贮收获机田间收获过程中实时作业位置以及作业速度的检测;信号采集装置主要实现各个传感器的硬件采集和本地传输;车载终端装置主要实现作业质量数据及整机工况数据的软件采集和分析处理,并动态数字化显示整机的参数检测结果与性能评价结果,同时通过4G网络实时传输作业数据至远程数据库系统,为玉米青贮收获机作业数据的实时远程收集提供技术支持。



图1 系统总体框架

Fig.1 Overall framework of system

2 关键参数检测方法与装置

2.1 作业质量检测方法

用于评估自走式玉米青贮收获机作业是否合格的相关指标包括:收获生产率达到设计值95%,割茬高度低于150 mm,收获损失率低于3%,切碎长度标准草长率高于85%。鉴于标准草长率、收获损失还未有直接有效的参数检测手段,本文仅针对收获生产率和割茬高度的检测方法开展研究。

2.1.1 收获生产率

收获生产率是评价玉米青贮收获机的重要作业指标,是影响切碎效果的关键因素。收获生产率太

大,玉米青贮植株喂入过快,割台部件和喂入部件容易发生堵塞故障,影响总体收获进度,同时长时间的超负荷收获作业,容易造成作业部件疲劳损坏,并影响发动机寿命。收获生产率过小将直接影响作业效率,另一方面也影响青贮的切碎效果,使切碎长度或者切碎均匀性达不到预期要求。

玉米青贮收获机只有 1 个物料入口和 1 个物料出口,其收获生产率与喂入辊入口处的喂入量相等。通过分析可得,玉米青贮收获机的实时收获生产率为

$$t = 3.6Bv\sigma p \tag{1}$$

式中 t ——收获生产率,t/h B ——喂入辊宽度,m
 s ——喂入辊开度,m v ——喂入速率,m/s
 ρ ——压实密度,kg/m³

其中,喂入辊开度 s 由安装在喂入机构浮动辊与定辊之间的位移传感器进行实时测量。喂入速率 v 近似等于喂入辊的圆周速率,由安装在上喂入辊和下喂入辊的转速传感器进行实时测量。而压实密度 ρ 受多种因素影响,主要包括玉米青贮的作物含水率、压实装置内的干物质质量和喂入辊压力等因素^[21]。本文对于相同地块条件下的收获生产率检测,不考虑作物含水率、作物品种的影响,近似认为玉米青贮的压实密度为常量,对检测模型进行简化。对于作物特性差异大的地块,需要对检测模型重新标定,确定校准系数后进行测量。

在玉米青贮收获机的喂入机构中,各喂入滚筒设计有相同的理论线速率,则玉米青贮喂入速率 v 为

$$v = \frac{D_1 \pi n_1 + D_2 \pi n_2}{120} \tag{2}$$

式中 D_1 ——前上喂入辊有效直径,m
 D_2 ——前下喂入辊有效直径,m
 n_1 ——前上喂入辊转速,r/min
 n_2 ——前下喂入辊转速,r/min

通过整理可得,收获生产率 t 计算式为

$$t = \beta(D_1 n_1 + D_2 n_2) s \tag{3}$$

式中 β ——标定系数,由田间标定试验确定

因此,本文利用拉线式位移传感器测量浮动式喂入机构的喂入辊开度,结合编码器测量的前上喂入辊转速和前下喂入辊转速,实现玉米青贮收获机收获生产率的实时检测,传感器安装如图 2 所示。

2.1.2 割茬高度

割茬高度指玉米青贮收获后,留在地块中的禾茬顶端到地面的高度。本文应用拉线式位移传感器测量割台液压缸伸长量,并基于最小二乘拟合算法建立割茬高度与割台液压缸伸长量的线性关系模

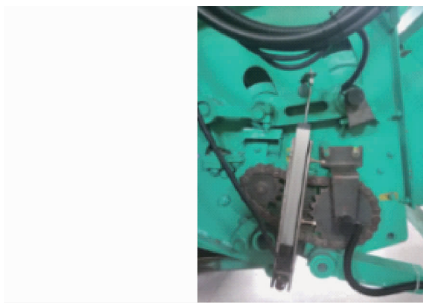


图 2 喂入辊开度和转速测量传感器安装图
Fig.2 Mounting diagram of feed roller displacement and feeding speed measurement

型,割茬高度计算公式为

$$h = a_1 + a_2 r \tag{4}$$

式中 h ——割茬高度,mm
 r ——割台液压缸伸长量,mm
 a_1, a_2 ——常量,通过标定试验确定

2.2 工况参数检测方法

割台、切碎辊、抛送风机、籽粒破碎辊、行走轴和喂入部液压泵是玉米青贮收获机的核心工作部件,其工况在线检测数据是判定部件状态与故障工况的关键信息之一,若部件工作负荷过大,则容易发生阻塞故障,给驱动部件造成严重影响;若部件工作负荷过小,则部件处于不饱和工作状态,喂入量不足,影响总体收获效率。

2.2.1 机械部件工况

用于评估机械部件状态的工况参数主要包括旋转工作轴的转速和扭矩,旋转工作轴的功率计算公式为

$$P_m = \frac{nT}{9549} \tag{5}$$

式中 P_m ——旋转轴功率,kW
 n ——旋转轴转速,r/min
 T ——旋转轴扭矩,N·m

在安装方式方面,传统的扭矩转速传感器需要采用断轴方式将传感器串联到动力源与负载之间,传感器联轴器两端的同心度无法保证,增加了原有机械系统的不稳定性。因此,本文采用多种新型安装结构的转速与扭矩传感器,包括轴上加贴应变片、延长轴和替换带轮等 3 种方式,根据玉米青贮收获机关键部件的结构特点和安装空间,分别设计相应的扭矩和转速传感器,以满足不同安装位置的转速、扭矩和功率检测需求。

在检测原理方面,采用经过特殊设计定制的旋转型应变式扭矩传感器,应用应变桥电测技术,在被测弹性轴上将专用的测扭应变片用应变胶粘贴上组成应变桥,通过非接触的方式由设在传感器上的特殊环形变压器为应变桥电路提供电源,将应变桥测

得的弹性轴微弱受扭信号进行放大、电压/频率转换(V/F),使其受到的扭矩与测到的频率成正比关系,最后用微功耗信号耦合器代替环形变压器非接触地输出5~15 kHz频率信号,其内部还带有基于光电码盘的转速测量装置,如图3所示(虚线框表示旋转部分,其余为固定部分)。

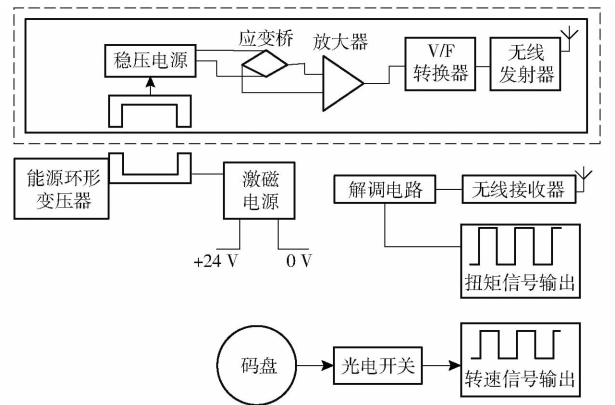


图3 关键部件转速与扭矩测量原理图
Fig.3 Principle of speed and torque measurement

传感器的现场安装如图4所示,行走轴和割台采用轴上加贴应变片式扭矩传感器。切碎辊和抛送风机采用替换带轮式扭矩传感器,即通过弹性模量系数较好的材料制作动力轮,替换原有的带轮,应用测扭应变片获得动力轮的弹性形变情况,从而间接获得被测轴的扭矩。籽粒破碎辊采用延长轴式扭矩传感器,即通过改造带轮结构,改变动力传输路线,断开负载轴与主动带轮之间的动力传输,负载轴的轴头嵌入至传感器的旋转轴套内,带轮首先驱动扭矩传感器的内侧旋转轴,再由扭矩传感器的外侧旋转轴将动力回传至负载轴,由粘贴在扭矩传感器轴上的应变桥间接获得被测轴处的负荷信息。

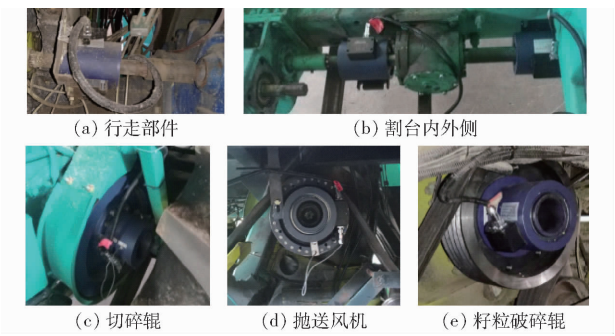


图4 转速与扭矩传感器安装图
Fig.4 Installation of speed and torque sensors

同时,为了验证扭矩传感器的静态测量精度,利用CX-5825转矩标准台,通过向静校台横梁两侧放置不同的标准砝码,设置扭矩加载值为测量量程的0、±20%、±40%、±60%和±100%,进行正负扭矩的静态标定试验。标定完成后,通过不同测量位置、安装方式和不同量程的3个扭矩传感器进行

静态测量试验,结果表明,各扭矩传感器的静态检测绝对误差为-3.38~2.85 N·m,相对误差在±0.5%内,扭矩传感器的测量精度达到检测要求。

2.2.2 液压部件工况

用于评估液压部件状态的工况参数主要包括液压管路压力和液压管路流量,采用差压式液压压力传感器和超声波式液压流量传感器进行液压传动功率的测量,如图5所示。液压部件功率计算公式为

$$P_h = \frac{\Delta p q}{60}$$
(6)

式中 P_h ——液压部件功率,kW
 Δp ——液压泵出入口压力差,MPa
 q ——液压管路流量,L/min

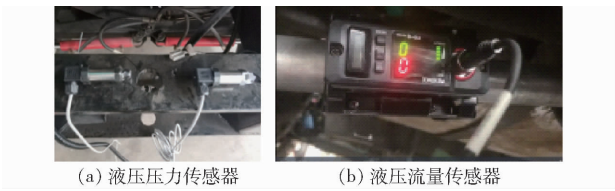


图5 液压部件工况检测传感器安装图
Fig.5 Mounting diagrams of hydraulic working condition measurement sensor

2.3 作业数据采集方法

系统各路传感器的输出类型主要包括12 V扭矩频率信号、12 V转速脉冲信号、NPN电压输出型脉冲信号和4~20 mA电流信号,如表1所示。本文基于PIC26K80控制器,设计了基于CAN总线输出的7通道频率采集模块和8通道模拟量采集模块,构建了车载CAN通道网络,用于各路传感器的硬件信号采集,满足了系统总体的数据采集需要。

3 系统软件设计

应用LabVIEW图形化工具开发了车载数据采集软件^[22-23]。软件界面主要包括机器工况显示模块、作业定位显示模块、作业质量及评价结果显示模块、发动机数据显示模块,如图6所示。

在软件底层实现上,运用多线程同步机制,集成实现各软件功能模块,主要包括系统初始化、界面操控交互、数据更新、数据接收、数据发送、异常检测与通信恢复、定位数据接收、DTU远程传输、数据实时存储和系统退出等功能,系统软件流程如图7所示。

车载数据采集软件利用CAN总线、UART串口等多种接口方式实现检测参数的实时获取和远程传输。同时,通过周期性地发出符合CAN2.0B协议的远程数据查询帧,并接收和解析各采集控制器返回的数据帧,根据ID更新相应传感器的监测数据,从而实现各路传感器数据的实时显示及保存。同时,

表 1 系统主要传感器性能参数

Tab.1 Main sensors performance parameter

传感器	型号	信号输出	检测量程	供电电压/V
割茬高度	KTC400 拉线式位移传感器	0 ~ 5 V 电压(3 线制)	0 ~ 400 mm	5
喂入辊开度	KTC250 拉线式位移传感器	0 ~ 5 V 电压(3 线制)	0 ~ 250 mm	5
上喂入辊转速	E6B2 - CWZ6C 编码器	NPN 集电极开路输出	0 ~ 6 000 r/min	12
下喂入辊转速	E6B2 - CWZ6C 编码器	NPN 集电极开路输出	0 ~ 6 000 r/min	12
工作轴扭矩	HX - 900 旋转型扭矩传感器	12 V(频率 5 ~ 15 kHz)	0 ~ 1 500 N·m	24
工作轴转速	光电式转速传感器	NPN 电压输出脉冲	0 ~ 6 000 r/min	24
	霍尔式转速传感器	NPN 集电极开路输出	0 ~ 6 000 r/min	12
液压入口压力	油压传感器	4 ~ 20 mA 电流(2 线制)	0 ~ 60 MPa	10 ~ 32(宽电压)
液压出口压力	油压传感器	4 ~ 20 mA 电流(2 线制)	0 ~ 60 MPa	10 ~ 32(宽电压)
液压流量	FD - Q32CS 液压流量传感器	4 ~ 20 mA 电流(2 线制)	0 ~ 400 L/min	24



图 6 车载数据采集软件界面

Fig.6 Software interface of online data acquisition

为了适配青贮收获机车载 CAN 网络下高速的数据帧流量,车载数据采集软件采用多队列缓存、批量化处理和通信异常检测等机制实现数据收发流程,能够在田间作业环境下,有效提高 CAN 数据实时处理效率和数据通信可靠性。

4 试验设计与结果分析

4.1 田间试验条件

为了检验玉米青贮收获机多参数测试系统在田间环境下的稳定性与可靠性,于 2019 年 9 月,在山东省诸城市某村地块进行了系统的田间性能试验。试验机型为山东五征集团有限公司的 9HQ - 4500 型自走式青贮收获机,试验作物为直立状态的饲用全株青贮玉米,收获作业选择在生长期一致、秸秆无倒伏、茎秆含水率 65% ~ 75% 的条件下进行。各传感模块机上安装位置如图 8 所示。

4.2 田间试验方法

为了获取不同作业参数下的多组田间试验数据,将地块按照长 35 m、宽 4.5 m 划分为多个试验组,每个试验组按照玉米青贮收获机作业行方向,设置为预加速区(20 m)、收获测定区(10 m)和停止作业区(5 m)。其中,预加速区和停止作业区的玉米青贮作物已经预先收割。

试验过程为:先操作玉米青贮收获机进入预加

速区,调整机器参数(包括喂入挡位、割茬高度、收获速度等)为预定值后,操控各机器部件进入额定作业状态,并使作业速度由 0 逐渐加速至设定收获速度;待整机稳定运行后,玉米青贮收获机恒速进入收获测定区,以 4.5 m 满割幅开始玉米青贮收获试验,同时由 4 名试验人员携带尼龙接料布跟随玉米青贮收获机,接取收获测定区里抛送筒抛出的所有玉米青贮物料,玉米青贮收获机收获 10 m 后到达停止作业区停止,等待机器中物料全部抛送出后结束试验。每组试验过程中,车载多参数测试系统全程连续采集机器的作业数据。试验后,对所有该试验组接取的物料进行称量,用于计算实际收获生产率,试验现场如图 9 所示。

4.3 关键参数测试

4.3.1 机械工况测量验证

4.3.1.1 空载检测

选择一天中的不同时段,独立开展 8 组青贮试验样机的田间空载测试,进行扭矩参数测量的动态稳定性和重复性验证试验。每组试验时,玉米青贮收获机保持在原地启动,将圆盘式折叠割台展开后,驾驶员操作手油门至最大位置,保持发动机为额定转速工作,并操纵工作部离合器和液压泵控制手柄,使割台部件、喂入辊、切碎辊、抛送风机进入空载运行工况。等待 15 s,待机械系统稳定后,启动自动参数测试系统,按照采样频率 20 Hz 连续采集空载工况数据,采集时间为 1 min,每组采集数据 1 200 条,绘制不同试验组下的各部件扭矩数据箱线图如图 10 所示。

从图 10 可以看出,各机器部件空载扭矩在不同试验组间均值差异性不大于 0.75 N·m,试验组内重复性测量最大极差为 1.28 N·m,最大变异系数为 0.012。割台的空载扭矩范围为 21.2 ~ 22.3 N·m,均值为 21.7 N·m,切碎辊的空载扭矩范围为 18.1 ~ 20.1 N·m,均值为 18.9 N·m,抛送风机的空载扭矩范围为 46.1 ~ 47.6 N·m,均值为 46.9 N·m。且从检

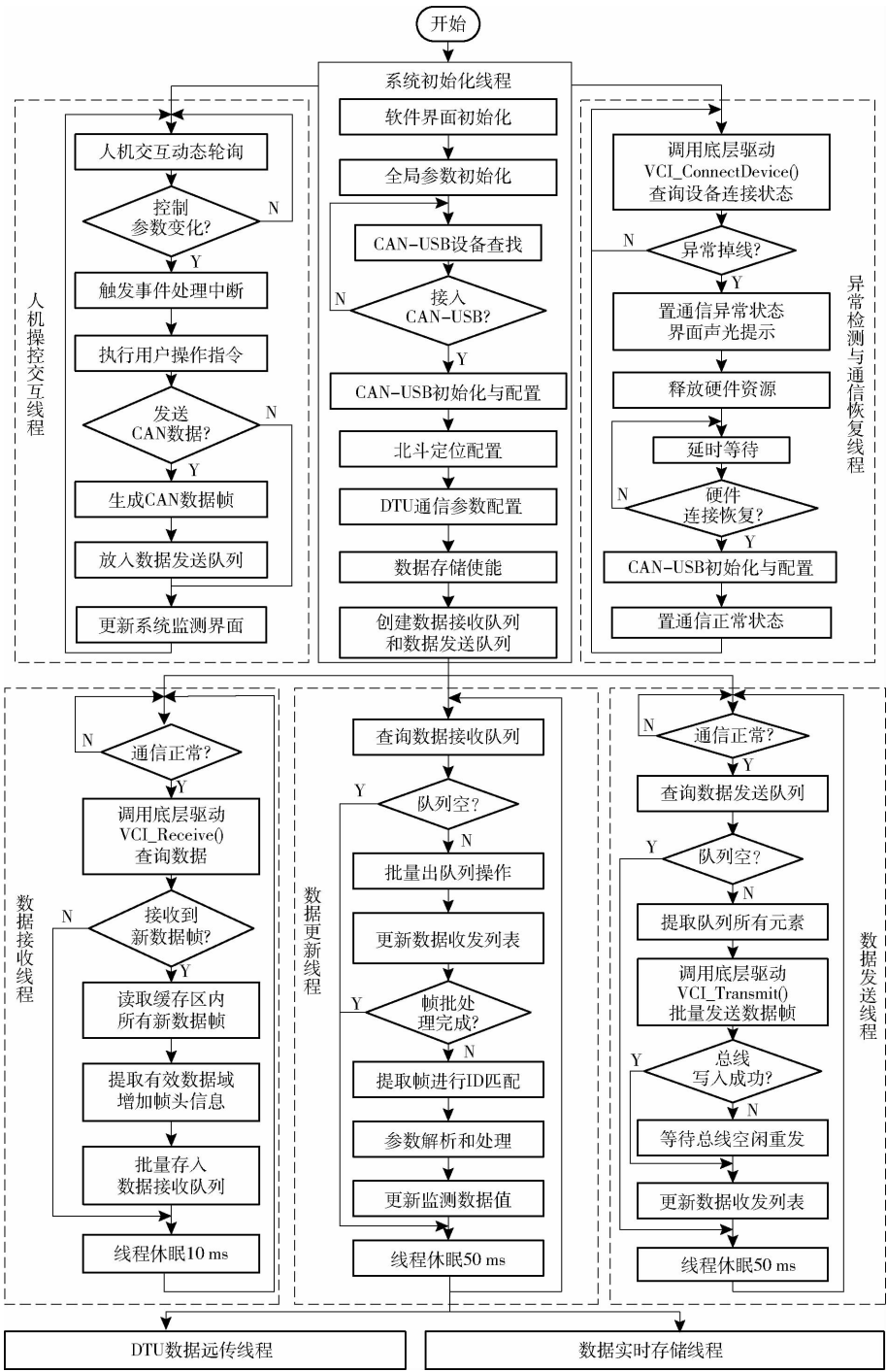


图 7 系统软件流程图

Fig. 7 Flow chart of system software design

测结果序列的分布形态上分析,各试验组的偏态系数处于 $-0.03 \sim 0.46$,绝对值均小于 0.5 ,大多数位于 0 附近,说明检测结果不偏斜,检测值较为对称地分布在均值的两侧,两端极值少。各试验组的峰态系数处于 $2.0 \sim 2.9$,均小于 3 ,呈现平峰分布^[24],说明检测序列尾部较轻,异常离群点较少,数据波动性小。试验结果表明:系统扭矩参数田间检测的动态稳定性和重复性较好。

4.3.1.2 整机工况检测

按照 4.2 节方法,在长势均匀的同—玉米青贮

地块,开展不同工况下的整机扭矩及转速测量性能验证试验。玉米青贮收获机分别以低速($1 \sim 2 \text{ km/h}$)、中速($2 \sim 3 \text{ km/h}$)和高速($3 \sim 4 \text{ km/h}$)开展田间收获作业,得到其中 3 组不同车速下的整机扭矩及转速测量结果如图 11 所示。

由图 11 可知,在预加速区,车速由 0 逐渐加速至预定作业速度,速度检测值总体较为稳定,存在轻微波动。其原因在于,机器受土壤平整度及地面割茬等的影响,行走驱动轮存在一定的滑转、滑移现象。在收获测定段,机器开始有玉米青贮植株喂入,



图 8 玉米青贮收获机传感模块机上安装位置图
Fig. 8 On-board installation location of sensors in corn silage harvester

1. 北斗定位模块 2. 车载监测终端 3. 行走转速和扭矩测量模块 4. 喂入开度测量模块 5. 割台高度测量模块 6. 喂入转速测量模块 7. 割台转速和扭矩测量模块 8. 切碎辊转速和扭矩测量模块 9. 抛送风机转速和扭矩测量模块 10. 喂入液压压力测量模块 11. 喂入液压流量测量模块



图 9 系统田间试验现场图
Fig. 9 Actual scene of system field test

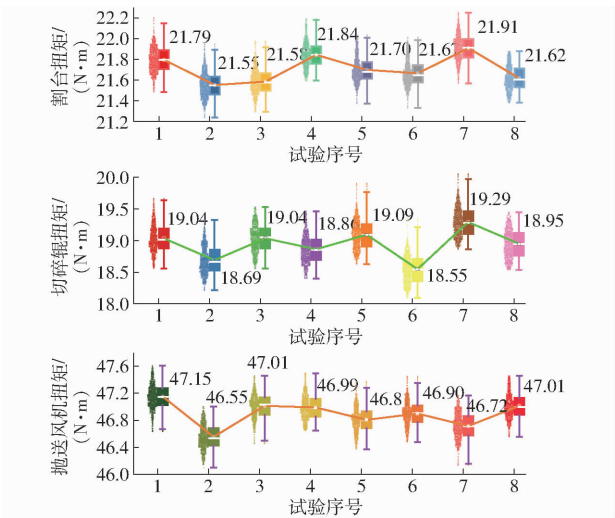


图 10 空载扭矩检测结果
Fig. 10 Test results of no-load conditions

由于收获状态的改变和作业负荷的突然增加,车速呈现不同程度瞬时的下降后,较快恢复至原有的作业速度。在部件工作转速方面,发动机、割台、切碎辊等作业部件的工作转速相比空载工况有小幅度的降低,抛送风机的工作转速相比空载工况有小幅度的增加,其原因在于,抛送风机的作用对象为经切碎辊切碎后的沿刀尖方向高速旋转抛出的玉米青贮物料,物料自身具有较高的初始进入速度,一定程度上增加了作业部件的作业速度。在部件工作扭矩方

面,所有部件的工作扭矩相比空载工况均有较高幅度的增加,扭矩变化幅值按照作业部件排序,从大到小依次为发动机、切碎辊、抛送风机、割台内轴、割台外轴。同时,随着作业速度的增加,各部件转速的降低幅度和各部件扭矩增加幅度逐渐增大,如表 2、3 所示。另一方面,转速参数呈现平稳变化,而扭矩参数呈现起伏变化,而且随着作业速度的增加,各部件的扭矩波动幅度更趋于平缓,扭矩数据检测值跳动更小。其原因在于,随着作业速度的提高,玉米青贮作物的喂入量显著增加,提高了收获过程玉米植株喂入的连续性和均匀性,减少了玉米青贮秸秆对机械系统的撞击,整机负载系统更趋于稳定,使得作业部件进入更为稳定的作业状态。因此,较小喂入量下的扭矩数据变异较大,而较大喂入量下的扭矩数据稳定性较好。试验结果表明:在田间收获作业条件下,所研发的玉米青贮收获机参数检测系统能够实时稳定地采集整机工况数据,田间动态测量结果与机器实际作业工况持续保持一致,满足玉米青贮收获机的田间参数动态检测需求。

4.3.2 液压流量测量验证

液压流量的测量位置为喂入部液压泵,选用 Linde HPV105-02L 柱塞式变量泵,其液压流量计算公式为^[25]

$$Q = \frac{k_t n_e V \eta_v}{1\,000} \tag{7}$$

式中 Q ——液压泵实际流量, L/min
 k_t ——液压泵传动比,由机械结构确定
 n_e ——发动机输出转速, r/min
 V ——液压泵排量, mL/r
 η_v ——液压泵容积效率,主要受泵工作压力影响,由泵特性曲线确定

试验时,操纵凸轮控制机构的斜盘转角为 100%,实现 100% 排量,即 V 为 105 mL/r。同时调节油门,使发动机转速分别为 600、1 200、1 800、2 100、2 270 r/min (实际调节误差不超过设定值的 $\pm 10\%$),将系统测得的液压流量测定值和计算的液压流量实际值进行对比,得到测量结果如表 4 所示,液压流量测量的最大相对误差为 1.13%,额定作业工况下的相对误差为 0.53%,满足液压工况参数的田间检测需求。

4.3.3 收获生产率测量性能

4.3.3.1 喂入参数动态检测结果

按照 4.2 节试验方法,在喂入挡位 2 下,得到喂入机构的两组工作参数动态变化曲线,如图 12 所示。在收获测定区,随着玉米青贮作物连续喂入,上喂入辊转速稳定保持在 165 r/min 附近,下喂入辊转

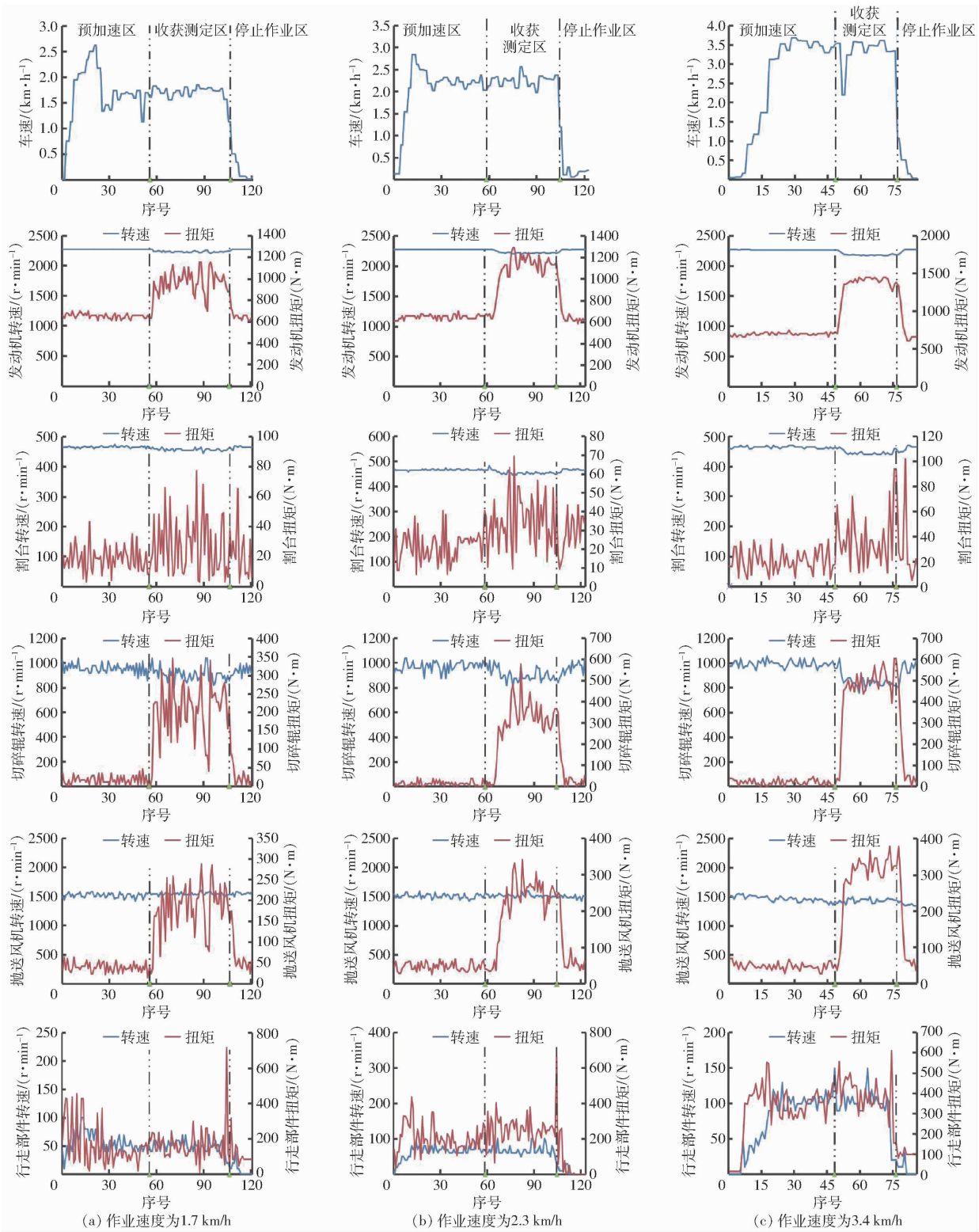


图 11 不同车速时玉米青贮收获机整机工况检测田间试验结果

Fig. 11 Field test results of silage harvester working conditions at different harvesting speeds

表 2 田间不同工况下作业部件转速测量结果

Tab. 2 Rotating speed measurement results at different harvesting speeds

作业速度/ (km·h ⁻¹)	r/min					
	发动机 转速	割台内 轴转速	割台外 轴转速	切碎辊 转速	抛送风 机转速	行走部 件转速
1.7	2 239.86	457.69	457.34	910.00	1 540.00	48.85
2.3	2 228.59	454.38	454.89	907.66	1 517.45	66.81
3.4	2 193.85	446.72	446.03	858.62	1 434.48	95.86

表 3 田间不同工况下作业部件扭矩测量结果

Tab. 3 Rotating torque measurement results at different harvesting speeds

作业速度/ (km·h ⁻¹)	N·m					
	发动机 扭矩	割台内 轴扭矩	割台外 轴扭矩	切碎辊 扭矩	抛送风 机扭矩	行走部 件扭矩
1.7	953.94	27.12	11.44	199.62	180.36	168.23
2.3	1 058.31	35.23	15.08	278.90	209.51	263.00
3.4	1 329.71	40.21	18.52	444.49	285.90	387.94

表 4 液压流量测量结果

Tab.4 Measurement results of hydraulic flow					
发动机 转速/ (r·min ⁻¹)	测量 差压/ MPa	测量 流量/ (L·min ⁻¹)	实际 流量/ (L·min ⁻¹)	绝对 误差/ (L·min ⁻¹)	相对 误差/%
600	1.70	62.6	63.4	0.8	1.13
1 271	2.60	135.2	134.1	-1.1	0.83
1 820	2.90	197.6	196.3	-1.3	-0.69
2 100	3.04	231.2	229.3	-1.9	-0.81
2 269	3.24	246.0	247.3	1.3	0.53

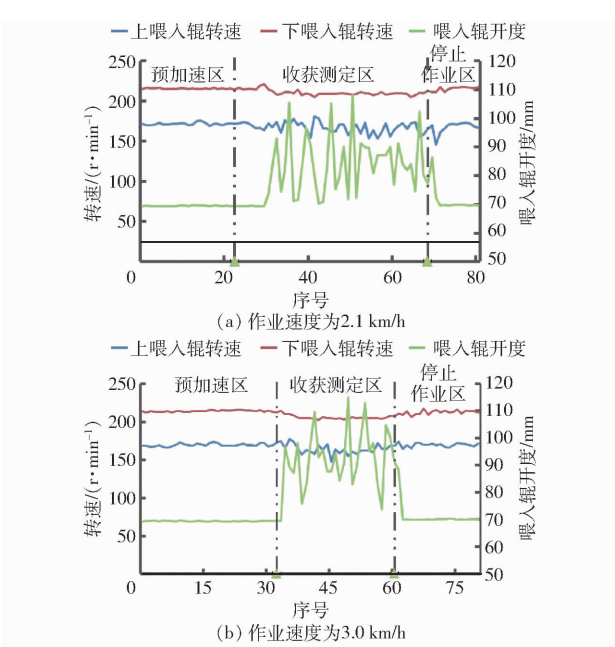


图 12 喂入辊参数田间检测结果

Fig. 12 Field test results of feed roller parameters

速稳定保持在 208 r/min 附近,喂入辊开度呈现动态起伏变化,且随着作业速度的增加,试验组的平均喂入开度显著增加。

4.3.3.2 田间标定与测量试验

通过设定不同的喂入挡位和不同的作业速度,按照 4.2 节开展青贮收获,进行 8 组不同喂入量下的田间标定试验。每组试验中,由系统自动检测获得上喂入辊转速 n_1 、下喂入辊转速 n_2 和喂入辊开度 s ,由人工接样、称量和计时计算得到青贮的实际收获生产率 t 。试验结束后,以 $t/(D_1 n_1 + D_2 n_2)$ 作为因变量,以喂入辊开度 s 作为自变量,根据公式(3),二者存在线性关系。因此,采用一元拟合回归算法建立标定模型为

$$t = 2.903\ 36(D_1 n_1 + D_2 n_2)s \tag{8}$$

即标定系数为 2.903 36,模型回归系数为 0.89。收获生产率测量的平均相对误差为 11.1%,可为玉米

青贮收获机收获生产率的动态检测提供有效技术手段。

4.3.4 割茬高度测量性能

4.3.4.1 标定试验

控制割台从最高位置逐渐变化至最低位置,再逐渐恢复到最高位置,选取行程中的 12 个测量点,将割台液压缸伸长量传感器检测的数据与人工检测的割茬高度数据进行最小二乘标定,标定结果为

$$h = 5.118r - 618.89 \tag{9}$$

结果表明:割茬高度的在线测定值与人工检测值呈现线性关系,决定系数 R^2 为 0.998,拟合度高,所设计的割台液压缸伸长量传感器在测量割茬高度时具有较高的准确性。

4.3.4.2 田间测量

每个试验组结束时,在工作幅宽上选取左、中、右 3 点测定玉米青贮的割茬高度,取均值作为该测量点处的割茬高度实际值,与经传感器检测获得的割茬高度测量值进行比较,试验结果如表 5 所示,测量最大相对误差为 4.78%,测量精度能达到田间割茬高度的实时检测需求。

表 5 割茬高度测量结果

Tab.5 Measurement results of stubble height			
测量点编号	测量值/mm	实际值/mm	相对误差/%
1	221.3	226.7	2.38
2	179.5	171.3	4.78
3	287.5	296.7	3.10

5 结论

(1)设计了一套基于 CAN 总线和虚拟仪器的玉米青贮收获机多参数在线综合检测系统,可同步采集作业质量、机械工况、液压工况的关键参数,为机器适用性综合评价与整机设计优化提供技术支持。

(2)基于 CAN 总线协议开发的玉米青贮收获机数据监测软件系统,实现了车载多源传感数据的采集、接收和存储功能,有效适配了玉米青贮收获机田间作业时高并发和高速率的车载数据通信,提高了田间数据采集的可靠性和实时性。

(3)实现了玉米青贮收获机从预加速阶段、收获测定阶段至停止作业阶段的全过程多部件的工况动态参数检测,适用于田间环境下的整机作业参数的全面、动态、连续和稳定测量。

参 考 文 献

[1] 邵合勇. 青贮饲料收获机国内外发展现状[J]. 农业工程,2017,7(4):19-21.

- [2] 张学龙,王世龙,高磊,等. 基于平稳随机信号的青贮玉米收获机台架振动测试与分析方法[J]. 中国农机化学报,2021,42(11):23-29.
ZHANG Xuelong, WANG Shilong, GAO Lei, et al. Vibration test and analysis method of silage corn harvesting machine based on smooth random signal[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2021,42(11):23-29. (in Chinese)
- [3] 徐小川. 基于 RFNB 算法的青贮饲料收获机堵塞故障诊断研究[D]. 哈尔滨:东北农业大学,2021.
XU Xiaochuan. Research on blockage fault diagnosis of silage harvester based on RFNB[D]. Harbin: Northeast Agricultural University,2021. (in Chinese)
- [4] 毛文华,韩少云,赵博,等. 基于 Netty 和 Marshalling 的青饲机工况远程监测系统研究[J]. 农业机械学报,2020,51(8):145-151.
MAO Wenhua, HAN Shaoyun, ZHAO Bo, et al. Study of remote monitoring system for silage harvester working condition based on Netty and Marshalling[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020,51(8):145-151. (in Chinese)
- [5] 孟繁佳,魏鸿怡,孟德伦,等. 青贮饲料紧实度与含水率复合传感器设计与试验[J]. 农业机械学报,2018,49(11):173-179.
MENG Fanjia, WEI Hongyi, MENG Delun, et al. Design and test of combined probe for compactness and water content of silage[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018,49(11):173-179. (in Chinese)
- [6] 王吉中. 青饲机收获中金属异物检测系统研发[D]. 北京:中国农业机械化科学研究院,2019.
WANG Jizhong. Development of metal foreign body detection system in harvesting machine[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences, 2019. (in Chinese)
- [7] SAVOIE P, LEMIRE P, THERIAULT R. Evaluation of five sensors to estimate mass-flow rate and moisture of grass in a forage harvester[J]. Applied Engineering in Agriculture, 2002,18(4):389-397.
- [8] CHRISTIAN W, FRANK B, LUISE M. Machine-specific approach for automatic classification of cutting process efficiency[C]// Proceedings of the Conference ML4CPS, 2016.
- [9] SIEBALD H, HENSEL O, BENEKE F, et al. Real-time acoustic monitoring of cutting blade sharpness in agricultural machinery[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2017, 22(6):2411-2419.
- [10] MOHSENIMANESH A, NIEUWENHOF P, NECSULESCU D S, et al. Monitoring a hydraulically-driven feed roll system with sensors on a prototype pull-type forage harvester[J]. Applied Engineering in Agriculture, 2017,33(1):23-30.
- [11] NY/T 2088—2011 玉米青贮收获机作业质量[S]. 2011.
- [12] DG/T 052—2019 青饲料收获机[S]. 2019.
- [13] GB/T 10394.3—2002 饲料收获机第3部分:试验方法[S]. 2002.
- [14] GB/T 10394.4—2009 饲料收获机第4部分:安全和作业性能要求[S]. 2009.
- [15] 蒋建东,孙远方,金骁,等. 联合收获机 CAN 总线架构设计与试验[J]. 农业机械学报,2019,50(6):93-99.
JIANG Jiandong, SUN Yuanfang, JIN Xiao, et al. CAN bus architecture design and test of combine harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019,50(6):93-99. (in Chinese)
- [16] 高原源,翟长远,杨硕,等. 精密播种机下压力和播深 CAN 总线监控与评价系统研究[J]. 农业机械学报,2020,51(6):15-28.
GAO Yuanyuan, ZHAI Changyuan, YANG Shuo, et al. Development of CAN-based downforce and sowing depth monitoring and evaluation system for precision planter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020,51(6):15-28. (in Chinese)
- [17] 张真,迟瑞娟,杜岳峰,等. 基于 CAN 总线的玉米收获智能控制系统研究[J]. 农业机械学报,2018,49(增刊):275-281.
ZHANG Zhen, CHI Ruijuan, DU Yuefeng, et al. Investigation on CAN-bus-based corn harvester intelligent control system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018,49(Supp.):275-281. (in Chinese)
- [18] 代冬,陈度,张宾,等. 拖拉机田间作业参数无线检测系统研究[J]. 农业机械学报,2020,51(增刊1):568-575.
DAI Dong, CHEN Du, ZHANG Bin, et al. Wireless data acquisition system for tractor field operation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020,51(Supp.1):568-575. (in Chinese)
- [19] 宋占华,邢书仑,王征,等. 苜蓿调制试验台测控系统设计与试验[J]. 农业机械学报,2021,52(2):122-134.
SONG Zhanhua, XING Shulun, WANG Zheng, et al. Design and experiment of measurement and control system for alfalfa conditioning test bench[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021,52(2):122-134. (in Chinese)
- [20] 张小龙,井梅,刘鹏飞,等. 拖拉机电性能虚拟综合测试系统设计与试验[J]. 农业机械学报,2017,48(4):97-102.
ZHANG Xiaolong, JING Mei, LIU Pengfei, et al. Design and field test of integrated virtual test system for tractor electrical performance[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017,48(4):97-102. (in Chinese)
- [21] EHLERT D. Advanced throughput measurement in forage harvesters[J]. Biosystems Engineering, 2002,83(1):47-53.
- [22] 陈树学. LabVIEW 宝典[M]. 北京:电子工业出版社,2017.
- [23] 许顺,佟金,李默. 基于 LabVIEW 的蔬菜切碎机性能测试及工作参数优化[J]. 农业工程学报,2017,33(3):250-256.
XU Shun, TONG Jin, LI Mo. Performance testing of vegetable chopping machine based on LabVIEW and operation parameter optimization[J]. Transactions of the CSAE, 2017,33(3):250-256. (in Chinese)
- [24] 贾俊平. 统计学[M]. 北京:中国人民大学出版社,2018.
- [25] 李壮云. 液压元件与系统[M]. 北京:机械工业出版社,2008.