

拖拉机田间作业参数无线检测系统研究

代冬¹ 陈度^{1,2} 张宾¹ 王玲¹ 王书茂¹

(1. 中国农业大学工学院, 北京 100083; 2. 中国农业大学现代农业装备优化设计北京市重点实验室, 北京 100083)

摘要: 针对当前拖拉机检测系统功能集成度低、检测参数不全面、传输距离有限的问题, 开发了拖拉机田间作业参数无线检测系统。该系统由传感器、数据采集仪及上位机软件监测平台 3 部分组成, 能够实现 PTO 转矩及转速、油耗、发动机转速、悬挂提升力、力位调节加载力、加载角度、行驶速度、车轮转速、牵引力等多种参数的采集、无线发送与存储。系统工作时, 数据采集仪中的车载检测仪将采集的传感器数据发送至无线数据接收器, 无线数据接收器通过串口将数据传输至上位机软件监测平台, 实现对各类试验参数的实时监测与数据处理。为验证检测系统的可行性与稳定性, 对系统进行了采集通道的计量, 结果显示模拟信号通道绝对误差绝对值最大为 0.003 V, 引用误差最大为 0.03%, 频率信号通道检测绝对误差最大为 2 Hz, 引用误差最大为 0.013%, 满足对拖拉机作业参数的采集需求。在此基础上, 进行了 PTO 转矩参数及拖拉机无负载行驶速度采集试验。试验结果表明, 检测系统可以实现转矩参数的稳定采集及数据的无线传输; 在 5、8、14 km/h 3 挡车速匀速行驶下, 拖拉机车轮转速与实际行驶速度基本一致, 最大相对误差分别为 2.0%、1.2% 及 0.7%。本系统可满足对拖拉机工作性能参数的无线检测需求, 数据采集稳定且采集精度较高, 为拖拉机多作业参数的无线采集提供有效手段。

关键词: 拖拉机; 多参数检测; 无线传输; LabVIEW

中图分类号: S219.9; S237 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2020)S1-0568-08

Wireless Data Acquisition System for Tractor Field Operation

DAI Dong¹ CHEN Du^{1,2} ZHANG Bin¹ WANG Ling¹ WANG Shumao¹

(1. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China

2. Beijing Key Laboratory of Modern Agricultural Equipment Optimization Design, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: Focused on the problems of low function integration, incomplete detection parameters and limited transmission distance of tractor detection system, a wireless detection system for tractor field operation parameters was developed. The system was composed of three parts: sensors, data acquisition instrument and PC monitoring software platform. It can realize the collection, wireless transmission and storage of various parameters such as PTO torque, PTO speed, fuel consumption, engine speed, suspension lifting force, force position adjustment, loading force, loading angle, driving speed, wheel speed, and traction force and so on. When the system was in working condition, the vehicle-mounted detector in the data acquisition instrument sent the collected sensor data to the wireless data receiver, and the wireless data receiver transmitted the data to the software monitoring platform through the serial port to realize real-time monitoring and processing of various test parameters. So as to verify the feasibility and stability of the detection system, the acquisition channel of the system was measured. The results showed that the maximum absolute error of the analog signal channel was 0.003 V, the maximum reference error was 0.03%, and the maximum absolute error of the frequency signal channel detection was 2 Hz, the maximum reference error was 0.013%. Therefore, the system can meet the requirements for collecting tractor operating parameters. Based on that, the data acquisition test of the PTO torque parameters and the tractor's no-load driving speed was carried out, and the results showed that the detection system had the ability to achieve stable acquisition of torque parameters and wireless transmission of data; when the tractor was driving at a constant speed of 5 km/h, 8 km/h and 14 km/h respectively, the tractor wheel speed was basically the same as the actual driving speed, and the maximum relative errors were 2.0%,

收稿日期: 2020-08-10 修回日期: 2020-09-18

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0700102)

作者简介: 代冬(1993—), 男, 博士生, 主要从事机电一体化研究, E-mail: 18811503599@163.com

通信作者: 陈度(1981—), 男, 高级工程师, 主要从事智能农机装备和计算机测控技术研究, E-mail: tchendu@cau.edu.cn

1.2% and 0.7% respectively. This system satisfied the requirements of wireless detection for tractor working performance parameters, with stable collection process and high accuracy, providing an effective means for the wireless collection of tractor multi-operation parameters.

Key words: tractor; multi parameter detection; wireless transmission; LabVIEW

0 引言

随着农机领域测控技术及信息技术的快速发展,我国拖拉机也开始不断向智能化、自动化的方向发展^[1-3]。作为农机具田间工作的主要动力来源,拖拉机的工作性能直接影响着田间工作效率和工作质量^[4-5]。因此,为适应拖拉机的不断发展,提高田间工作效率,降低能源消耗,掌握其生命周期内各阶段的工作性能,开发适用于拖拉机机组田间工作参数及性能的检测系统备受重视^[6-7]。

近年来,国内外对于拖拉机参数检测系统的研究已有很多。SINGH 等^[8]利用 CR3000-XT 设计了一套数据采集系统,安装在拖拉机上用于监测和记录前后轮速度、燃油消耗、牵引力及耕深等参数,通过控制设置机具不同耕深检测相应滑转率及牵引力验证采集系统的能力及准确性。吴媿等^[9]为对拖拉机电性能进行测试,基于虚拟仪器技术设计了电性能综合测试系统,对拖拉机上发电机和蓄电池电压、电流及发动机转速、车速、温度等进行测试与分析。YAHYA 等^[10]将数据采集和差分全球定位系统相结合,检测车轮转速、车速、PTO 转矩等参数,根据其耕种地理位置绘制了拖拉机-机具的性能空间测图。李忠利等^[11]将无线通信技术与拖拉机牵引性能试验有效结合,实现牵引性能试验的滑转率、牵引功率、油耗等的无线检测。上述研究包含了对拖拉机作业速度、滑转率、动力输出、牵引力、发电机转

速、温度等参数的检测,但现阶段还存在一些不足:单一检测系统检测参数较少或只针对某一部分进行检测,无法实现单系统多功能多参数检测;系统检测参数固定,无备用或扩展参数;多数检测系统为有线传输,无法进行实时监测与显示,需人员随车试验,环境较为危险且可操作性差。

为解决上述问题,本文设计拖拉机田间作业参数无线检测系统,以实现拖拉机的 PTO 试验、液压提升试验、力位控制试验、牵引性能试验^[12]中 PTO 转矩、PTO 转速、油耗、发动机转速、悬挂提升力、提升行程、力位调节加载力、加载角度、行驶速度、车轮转速、牵引力等多种参数的实时检测与状态分析。该系统采用美国 NI 公司的 cRIO 控制器及信号采集模块,利用无线数传模块实现下位机数据的远程无线传输,结合 LabVIEW 开发平台设计上位机监测软件及界面,以实现拖拉机作业参数的精确测量,以及作业状态的实时监测与分析、显示与存储等功能。

1 检测系统总体方案

为实现拖拉机作业状态及参数的综合检测,开发了拖拉机田间作业参数无线检测系统,该系统对拖拉机 PTO 试验^[13]、液压提升试验、力位控制试验、牵引性能试验等多类试验参数进行模块化检测,将拖拉机各部分性能试验的参数检测合为一个系统,极大降低检测设备和成本,总体方案如图 1 所示。

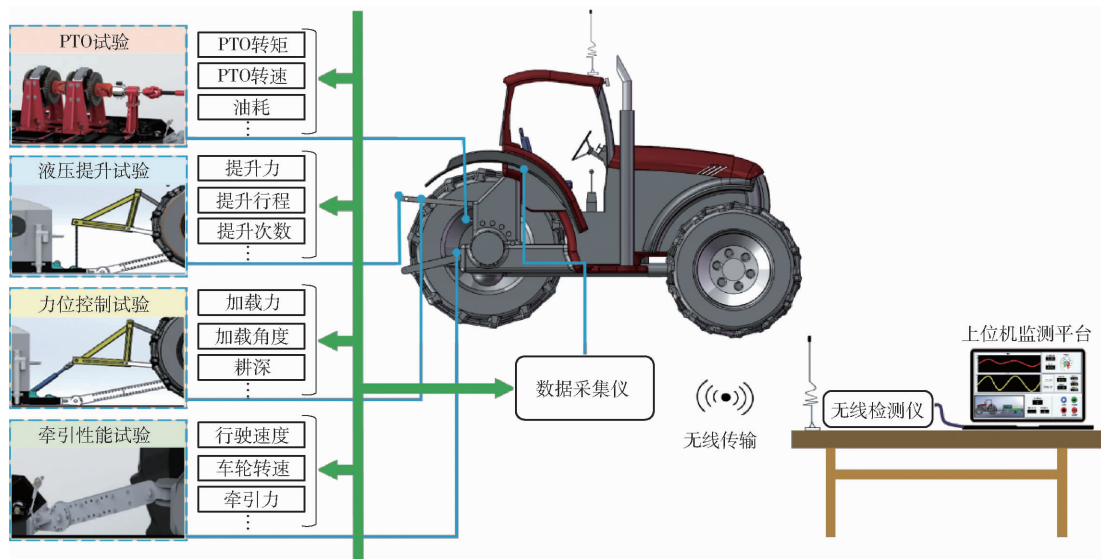


图 1 无线检测系统总体方案

Fig. 1 Overall scheme of wireless detection system

检测系统总体方案设计分为3部分:传感器、数据采集仪及上位机软件监测平台,数据采集仪中选用NI-cRIO控制器并结合计数测频等模块对拖拉机PTO转矩、PTO转速、油耗、发动机转速、悬挂提升力^[14]、提升行程、力位调节加载力、加载角度、行驶速度、车轮转速、牵引力等多种参数进行检测,使用无线数传模块的无线传输方式将数据打包发送至上位机软件监测平台,最终实现系统的远程实时监

测、数据分析与处理。

2 基于NI-cRIO的数据采集仪设计

根据研究需要及硬件参数要求,进行无线检测仪硬件系统的设计,硬件结构如图2所示,分为传感器、车载检测仪及无线数据接收器3部分,实现整个系统中传感器信号的采集、数据的无线传输、数据的分析及后期处理等。

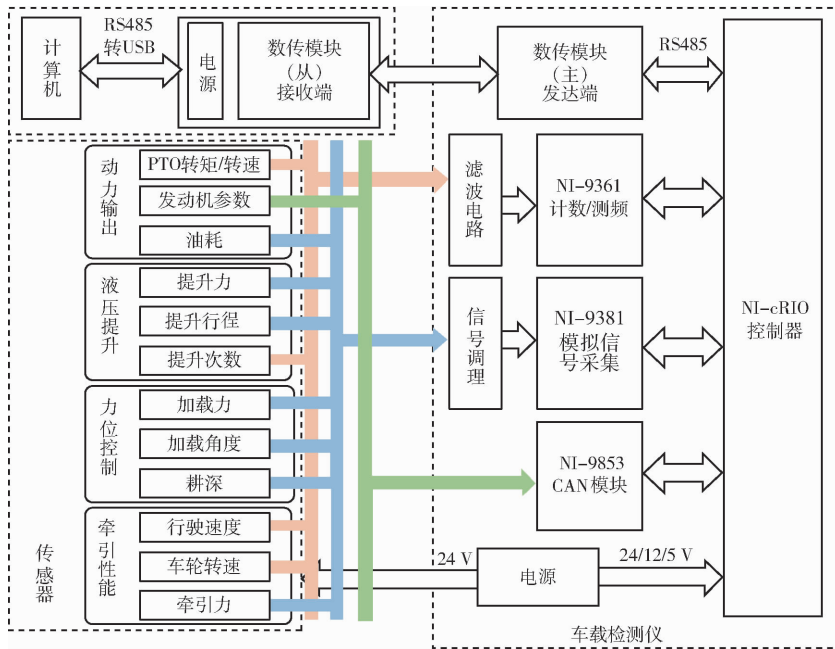


图2 硬件结构框图

Fig. 2 Hardware structure diagram

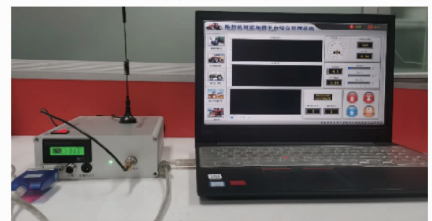
2.1 数据采集仪

数据采集仪包括车载检测仪及无线数据接收器两部分。车载检测仪内部设计主要包括控制器、信号采集单元、信号处理单元、信号传输单元及系统供电单元。考虑整个检测系统设计需求及精度要求,选用美国NI公司的cRIO作为检测系统的控制器,基于LabVIEW RIO架构,并结合Real-Time及LabVIEW FPGA实现高性能、灵活强大的硬件系统。cRIO控制器配合NI-9853 CAN模块、NI-9381及NI-9361信号采集模块^[9,15]实现整套系统中逻辑运算、执行过程控制、信号采集、输入输出控制、数据通信等操作。检测箱中还包括信号调理电路、滤波电路、无线数传模块及供电等部分。系统可通过有线及无线两种方式工作,以方便调试及测量,车载检测仪实物图如图3a所示。

无线数据接收器是拖拉机作业参数测试数据的远程接收端,内置无线数传模块及供电电池,接收车载检测仪采集的数据,并通过RS485转USB传输至计算机进行数据处理,开发的无线数据接收器如图3b所示。



(a) 车载检测仪



(b) 无线数据接收器

图3 数据采集系统实物图

Fig. 3 Physical diagrams of data acquisition system

2.2 主要传感器选型

根据拖拉机检测参数及检测系统需求对传感器进行特性及型号选择。选用NI-cRIO控制器^[9],同时配备NI-9853 CAN模块进行发动机及部分试验的CAN通信^[16]及数据传输,NI-9381模块实现模拟量信号、开关量等信号的输入输出,NI-9361

模块进行脉冲计数及频率测量。根据拖拉机的 PTO 转矩、PTO 转速、油耗、悬挂提升力、提升行程、力位调节加载力、加载角度、行驶速度、车轮转速等参数

进行传感器的选择,部分传感器具体型号及参数如表 1 所示。

选用 GPS KD-10 型测速仪进行拖拉机行驶车

表 1 主要传感器参数

Tab.1 Main sensor parameters

传感器/模块	型号	主要特性	供电(DC)电压/V
计数/测频模块	NI-9361	32 位计数器,8 个计数器 DI,0~5 V 差分/0~24 V 单端	24
模拟量采集模块	NI-9381	8 路 AI,8 路 AO,4 个 DIO,输入/输出量程 0~5 V	24
转矩传感器	HX-901T	转矩范围:-1 000~1 000 N·m,转速范围:0~3 000 r/min	24
旋转编码器	SCHA	输出信号:5 V 脉冲,分辨率:360 脉冲/转	5~24
GPS 测速仪	KD-10	脉冲当量 1~10 mm(默认 4 mm/脉冲)	12
温湿度传感器	HY-102	温度量程 -40~125℃,相对湿度量程 0~100%,输出信号 0~5 V	9~36
拉力传感器	CYT-201	额定载荷 1~200 kN,综合精度 0.1% F·S 输出信号 0~5 V	10
轴销传感器	LZ-ZXF40	量程 1~10 t,输出信号 0~10 V	24

速信息的测量, GPS 更新频率为 10 Hz,速度原始精度 0.1 m/s,并选用默认脉冲当量 4 mm(4 mm/脉冲),脉冲输出频率为 10~25 kHz。SCHA 旋转编码器进行拖拉机驱动轮转速测量,得出理论速度,输出 AB 相 5 V 脉冲信号,分辨率为 360 脉冲/转。旋转编码器和 GPS 测速仪配合使用,对拖拉机作业时的理论速度及实际速度进行检测^[17]。

根据车轮转速计算拖拉机理论速度计算式为

$$v_1 = 3.6 \frac{2\pi RP_1}{tm_1} \quad (1)$$

式中 v_1 ——拖拉机理论速度, km/h
 R ——驱动轮回转半径, m
 P_1 ——采样周期内编码器脉冲数
 m_1 ——编码器分辨率, 脉冲/转
 t ——采样周期, s

根据 GPS 测速仪得出拖拉机实际速度计算式为

$$v_2 = 3.6 \times 10^{-3} \frac{P_2 m_2}{t} \quad (2)$$

式中 v_2 ——拖拉机实际速度, km/h
 P_2 ——采样周期内 GPS 脉冲数
 m_2 ——GPS 脉冲当量, 4 mm/脉冲

3 基于 FPGA 的系统软件设计

系统上位机监测软件在虚拟仪器软件平台 LabVIEW 上进行开发设计,借助 LabVIEW 的图形化、通用性、模块化编程特点,实现良好的人机交互界面设计。系统监测软件功能设计主要涵盖 4 部分:①数据操作模块,完成采集数据的存储与回放、显示及数据分析与处理等功能。②数据通信模块,实现上下位机数据通信过程的参数设置及调试等。③测试与标定模块,对无线传输过来的各通道信号进行显示与测试,同时对更换不同型号的传感器参

数进行设置。④软件设置模块,对软件的用户密码、系统参数等通用功能进行设置。监测软件功能框图如图 4 所示。

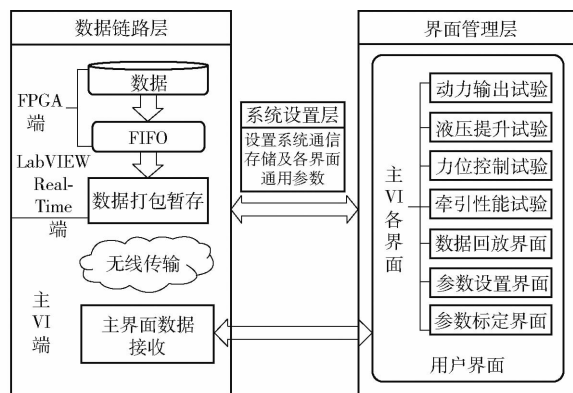


图 4 监测软件功能框图

Fig.4 Function block diagram of monitoring software

基于虚拟仪器技术设计的具有虚拟化、模块化、可复用性等特点的数据监测软件平台及用户界面^[18],能够使用户方便地操作并控制程序的运行,实现系统运行状态的实时监控^[6]。借助数据流编程方式,对监测软件以数据链路、界面管理、系统设置 3 层结构式开发,如图 5 所示。结合 LabVIEW Real-Time 模块和 LabVIEW FPGA 模块设计部署硬件终端,实时读取各类传感器信号,经 FIFO 及 LabVIEW Real-Time 模块实现数据打包与传输^[9],发送给远程上位机终端,进行数据的进一步处理。

4 试验与分析

4.1 检测系统计量

为了验证拖拉机无线检测系统软硬件的稳定性、正确性以及测试精度^[19],对下位机硬件系统数据采集通道进行了计量。通过仪器产生标准信号,由检测系统采集、无线传输并处理显示后,将显示值与采集的标准值进行对比。为使测试试验有更高的

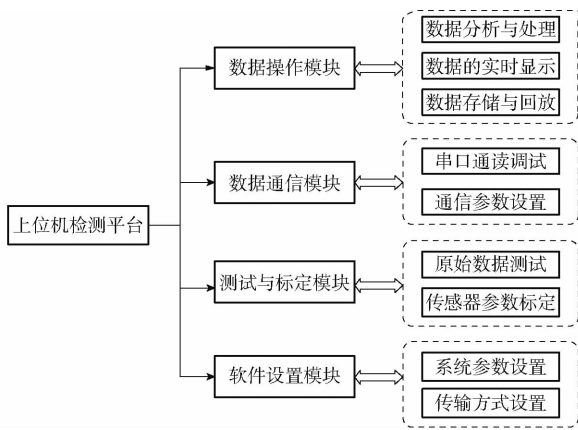


图5 监测软件结构框图

Fig.5 Structural block diagram of monitoring software

准确性,在试验的设计过程中引用 JJG 315—1983、JJF 1001—1998、JJG 349—2001 等标准^[20-21],并选取测量量程内不少于 10 个检定点进行试验。

4.1.1 模拟信号通道计量

检测系统模拟信号通道中,选择通道 AD1 作为模拟电压信号测量通道,测量量程为 0 ~ 10 V。考虑仪器的线性误差,在测量量程内选取 12 个检测点,测试结果如表 2 所示。

表 2 电压信号通道计量结果

Tab.2 Test results of voltage signal channel

序号	标准值/V	显示值/V	绝对误差/V	引用误差 Y/%
1	0	0	0	0
2	0.500	0.500	0	0
3	1.000	0.999	-0.001	0.01
4	2.000	1.999	-0.001	0.01
5	3.000	2.998	-0.002	0.02
6	4.000	3.997	-0.003	0.03
7	5.000	4.997	-0.003	0.03
8	6.000	6.001	0.001	0.01
9	7.000	6.999	-0.001	0.01
10	8.000	7.999	-0.001	0.01
11	9.000	8.998	-0.002	0.02
12	10.000	9.999	-0.001	0.01

由试验结果可知,该检测系统进行电压信号采集时,测量量程 0 ~ 10 V,绝对误差绝对值最大为 0.003 V,最大引用误差为 0.03%。

4.1.2 频率信号通道计量

检测系统有 4 路频率测量通道,选取通道 F11 作为频率量信号测量通道,输入 1 ~ 15 000 Hz 的 5 V 峰值的标准方波信号,在测量范围内选取 11 个检测点,测试结果如表 3 所示。

由试验结果可知,该检测系统进行频率信号采集时,测量频率范围 1 ~ 15 000 Hz,最大绝对误差为 2 Hz,最大引用误差为 0.013%。

表 3 频率信号通道计量结果

Tab.3 Test results of frequency signal channel

序号	标准值/Hz	显示值/Hz	绝对误差/Hz	引用误差 Y/%
1	1	1	0	0
2	5	5	0	0
3	10	10	0	0
4	50	50	0	0
5	100	100	0	0
6	500	500	0	0
7	1 000	1 000	0	0
8	5 000	4 999	-1	0.007
9	8 000	8 001	1	0.007
10	10 000	10 001	1	0.007
11	15 000	15 002	2	0.013

4.2 典型参数试验

对检测系统进行两组测试试验:①在土槽中进行动力输出轴的转矩检测试验。②在场地进行拖拉机驱动轮回转半径标定及作业速度参数的运行与测试。

4.2.1 PTO 转矩检测试验

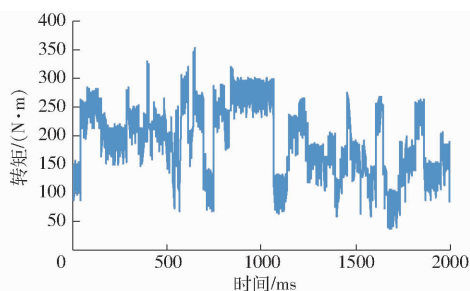
为测试系统的 PTO 参数采集,在土槽中进行了动力输出轴的转矩检测试验,将 HX-901T 型转矩传感器通过花键轴安装至动力输出轴与旋耕机具之间。对拖拉机动力输出轴转矩检测时,采样频率设置 500 Hz,并将采集的数据进行两种方法处理:①高速采集并保存至 NI-cRIO 控制器 SD 存储中,以保证数据的完整可靠。②考虑数传模块单次传输字节数及延时情况,将每秒采集到的 500 个数据点,每 10 个点取平均,计算后的平均值打包并通过数传模块 200 ms 发送一次,远程观测拖拉机旋耕过程中 PTO 的负载变化曲线。

截取试验过程 2s 的数据,绘制曲线(图 6a),通过无线传输方式将提取并平均后的数据发送至上位机,绘制曲线如图 6b 所示。从图 6a 与图 6b 转矩曲线变化趋势对比及试验过程可知,检测系统可以实现连续稳定的数据采集,数据的无线传输方式满足试验需求。

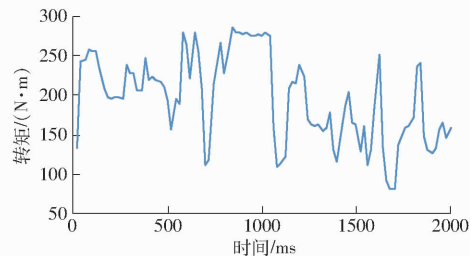
4.2.2 驱动轮回转半径标定

驱动轮回转半径是测量拖拉机行驶理论速度及理论行驶距离的重要依据,但拖拉机在田间作业测试时,驱动轮行驶半径难以直接获得或人为准确测量。因此在速度测量试验前,对拖拉机驱动轮回转半径进行标定试验,以计算出相对准确的驱动轮半径。首先借助红外线激光水平仪在驱动轮上做一条由驱动轮中心垂直向下的标记线,控制车辆在驱动轮转过 N 圈时停下,测出拖拉机行驶的直线距离 L ,并结合旋转编码器所测量脉冲数 P_1 计算得出本次

测量驱动轮半径 R , 其标定方法示意图如图 7 所示。



(a)SD存储数据



(b)无线传输数据

图 6 PTO 转矩检测结果

Fig. 6 Torque test results of power take-off shaft



图 7 驱动轮回转半径标定方法示意图

Fig. 7 Schematic of calibration method for driving wheel turning radius

计算出准确的驱动轮行驶圈数 N 为

$$N = \frac{P_1}{m_1} \quad (3)$$

计算出拖拉机工作时驱动轮回转半径为

$$R = \frac{L}{2\pi N} = \frac{Lm_1}{2\pi P_1} \quad (4)$$

选用 John Deere1354 型拖拉机并结合上位机软件监测平台的半径标定界面进行试验,如图 8 所示。选用的旋转编码器分辨率 m_1 为 360 脉冲/转,在场地无悬挂负载行驶,驱动轮行驶约 10 圈,测量拖拉机驱动轮中心的移动距离 L ,测得编码器脉冲数 P_1 ,

并代入式(4)得到半径 R ,进行 3 组试验,每组测试 3 次并取平均值,3 组人工测量,试验结果如表 4 所示。由表 4 可看出,多次标定试验结果之间误差较小,比人工测量的方式更加准确稳定。

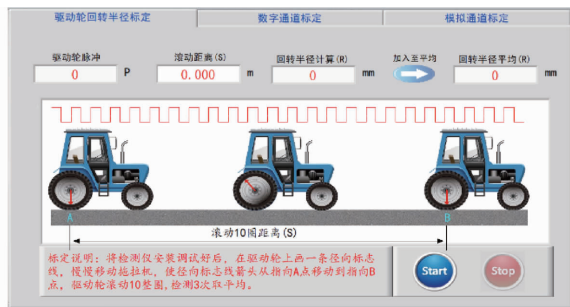


图 8 驱动轮回转半径标定软件界面

Fig. 8 Software interface of driving wheel turning radius calibration

表 4 驱动轮半径标定试验结果

Tab. 4 Driving wheel radius calibration test results

序号	行驶距离/m	脉冲数	行使圈数	计算半径/m	人工测量半径/m
1	52.60	3 618	10.05	0.833	0.85
2	52.48	3 622	10.06	0.830	0.83
3	52.53	3 604	10.01	0.835	0.84

4.2.3 拖拉机车速检测

为了检验无线检测系统对拖拉机作业速度测量的可行性及准确性,在驱动轮回转半径标定试验后,在道路进行了拖拉机行驶速度试验。通过旋转编码器进行拖拉机理论速度的测量,GPS 测速仪进行拖拉机实际速度的测量^[22]。假设拖拉机在道路匀速行驶时不打滑,采集、计算并对比两速度参数,判断无线检测系统中拖拉机作业速度测量部分的准确度及可行性等。考虑拖拉机在不同作业状态下行驶速度,本试验分别以 5、8、14 km/h 3 挡车速行驶测试,测试结果如图 9 所示。

由试验结果可知,在车辆达到并保持在 5、8、14 km/h 左右匀速行驶时,所测得拖拉机理论速度与实际速度基本一致。去除启动阶段的数据,车速

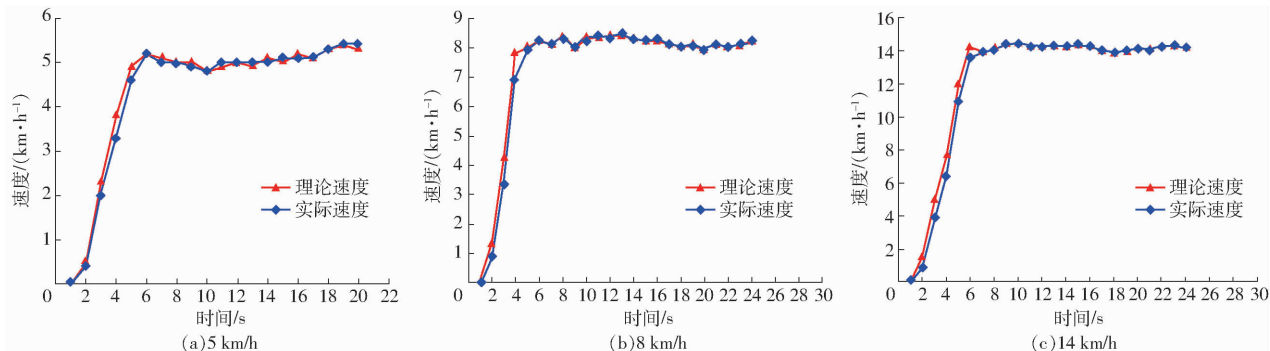


图 9 不同挡位车速测试结果

Fig. 9 Speed test results of different gears

为 5 km/h 时理论和实际速度最大相对误差为 2.0%，车速为 8 km/h 时最大相对误差为 1.2%，车速为 14 km/h 时最大相对误差为 0.7%。试验表明拖拉机在正常作业行驶时，GPS 测速仪及无线检测系统对速度测量准确度及精度较高，满足拖拉机作业速度的检测。

5 结论

(1) 开发了一套拖拉机田间作业参数无线检测系统。该系统由传感器、数据采集仪及上位机软件监测平台 3 部分组成，实现对 PTO 转矩、PTO 转速、油耗、发动机转速、悬挂提升力、力位调节加载力、加载角度、行驶速度、车轮转速、牵引力等多种参数的采集与检测。

(2) 基于虚拟仪器软件平台开发了上位机远程监测软件，针对检测对象进行了用户界面模块化设

计，实现了拖拉机性能试验及作业状态的实时监测与控制、分析与存储等功能。

(3) 对检测系统进行了模拟信号及脉冲信号通道的计量试验、动力输出轴的转矩检测试验、拖拉机驱动轮回转半径的标定试验及行驶速度的检测试验，试验结果表明：检测系统可以实现转矩参数的稳定采集及数据的无线传输；在 5、8、14 km/h 3 挡车速匀速行驶下，拖拉机理论速度与实际行驶速度基本一致，最大相对误差分别为 2.0%、1.2% 及 0.7%。由试验可知，检测系统可以实现连续稳定的数据采集，数据的无线传输方式满足试验需求。

(4) 拖拉机田间作业参数无线检测系统，满足拖拉机作业参数的检测需求，实现了拖拉机多种试验的多参数检测及无线数据传输，并具有通道可扩展性及良好的人机交互界面，为以后拖拉机田间工作性能参数检测与试验提供了有效手段。

参 考 文 献

- [1] 赵剡水, 杨为民. 农业拖拉机技术发展观察[J]. 农业机械学报, 2010, 41(6): 42-48.
ZHAO Yanshui, YANG Weimin. Technological development of agricultural tractor[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(6): 42-48. (in Chinese)
- [2] ASHOK K A, TEWARI V K, NARE B, et al. Embedded digital drive wheel torque indicator for agricultural 2WD tractors[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2017, 139: 91-102.
- [3] 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)
- [4] 徐立友, 赵一荣, 赵学平, 等. 电动拖拉机综合台架试验系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(1): 355-363.
XU Liyou, ZHAO Yirong, ZHAO Xueping, et al. Design and test of multifunctional test system for electric tractor [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(1): 355-363. (in Chinese)
- [5] 薛金林, 卫瑶瑶, 闫嘉, 等. 基于无线网络的拖拉机遥操作系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2018, 49(8): 395-402.
XUE Jinlin, WEI Yaoyao, YAN Jia, et al. Design of wireless network for tractors based on teleoperation system [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery. 2018, 49(8): 395-402. (in Chinese)
- [6] LACOUR S, BURGUN C, PERILHON C, et al. A model to assess tractor operational efficiency from bench test data[J]. Journal of Terramechanics, 2014, 54: 1-18.
- [7] 钟文军. 基于互联网的拖拉机远程监测系统的设计与实现[D]. 南京: 南京农业大学, 2016.
ZHONG Wenjun. The design and implementation of remote monitoring system for tractor based on tractor of internet [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2016. (in Chinese)
- [8] SINGH C D, SINGH R C. Computerized instrumentation system for monitoring the tractor performance in the field[J]. Journal of Terramechanics, 2011, 48(5): 333-338.
- [9] 吴婓, 刘鹏飞, 张小龙. 拖拉机经济性虚拟综合测试系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2016, 47(3): 117-123.
WU Ti, LIU Pengfei, ZHANG Xiaolong. Design and field test of integrated virtual test system for tractor economy performance [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(3): 117-123. (in Chinese)
- [10] YAHYA A, ZOHADIE M, KHEIRALLA A F, et al. Mapping system for tractor-implement performance[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2009, 69(1): 2-11.
- [11] 李忠利, 闫祥海, 周志立. 无线通信技术在拖拉机牵引性能测试中的应用[J]. 河南科技大学学报(自然科学版), 2019, 40(1): 78-83, 9.
LI Zhongli, YAN Xianghai, ZHOU Zhili. Application of wireless communication technology to tractor traction performance testing[J]. Journal of Henan University of Science and Technology (Natural Science), 2019, 40(1): 78-83, 9. (in Chinese)
- [12] OSINENKO P V, GEISSLER M, HERLITZIUS T. A method of optimal traction control for farm tractors with feedback of drive torque[J]. Biosystems Engineering, 2015, 129: 20-33.
- [13] 李忠利, 闫祥海, 周志立. 负荷车电涡流缓速器加载控制系统研究[J]. 西安交通大学学报, 2018, 52(3): 126-131.
LI Zhongli, YAN Xianghai, ZHOU Zhili. Study on the eddy current retarder loading control system of loading vehicles[J].

- Journal of Xi'an Jiaotong University, 2018, 52(3): 126 - 131. (in Chinese)
- [14] ROEBER J B W, PITLA S K, KOCHER M F, et al. Tractor hydraulic power data acquisition system[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2016, 127: 1 - 14.
- [15] 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)
- [16] ROHRER R A, PITLA S K, LUCK J D. Tractor CAN bus interface tools and application development for real-time data analysis[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2019, 163: 104847.
- [17] 乔晓东, 王晓燕, 颜华, 等. 基于虚拟仪器的后悬挂农具田间测试系统[J]. 农业机械学报, 2013, 44(10): 98 - 103. QIAO Xiaodong, WANG Xiaoyan, YAN Hua, et al. Experiment platform for rear suspension[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(10): 98 - 103. (in Chinese)
- [18] 祝青园, 王书茂, 康峰, 等. 虚拟仪器技术在农业装备测控中的应用[J]. 仪器仪表学报, 2008, 29(6): 1333 - 1338. ZHU Qingyuan, WANG Shumao, KANG Feng, et al. Application of virtual instrument technology in agricultural equipment measurement and control system[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2008, 29(6): 1333 - 1338. (in Chinese)
- [19] 尹彦鑫. 少免耕播种机信息流远程监测方法研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2014. YIN Yanxin. Monitor method research for information flow of no-tillage seeder[D]. Beijing: China Agricultural University, 2014. (in Chinese)
- [20] 张成涛, 谭彧, 吴刚, 等. 基于无线传输方式的农业装备共性参数测控系统研究[J]. 农业机械学报, 2010, 41(增刊): 257 - 262. ZHANG Chengtao, TAN Yu, WU Gang, et al. Parameters measurement and control systems of agricultural equipment similarity based on various wireless transmission modes[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(Supp.): 257 - 262. (in Chinese)
- [21] 尹彦鑫, 郑永军, 成智华, 等. 少免耕播种机牵引阻力远程监测系统[J]. 农业工程学报, 2014, 30(6): 1 - 8. YIN Yanxin, ZHENG Yongjun, CHENG Zhihua, et al. Tractive resistance remote monitor system for no-tillage seeder[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(6): 1 - 8. (in Chinese)
- [22] 李导, 张志刚, 王在满, 等. 拖拉机滑转率无线测试系统的研制[J]. 农机化研究, 2018, 40(8): 241 - 244. LI Dao, ZHANG Zhigang, WANG Zaiman, et al. A research of wireless slip rate test system on tractors [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2018, 40(8): 241 - 244. (in Chinese)

(上接第 567 页)

- [12] CHISHOLM C J. Experimental validation of a tractor overturning simulation[J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1979, 24(4): 395 - 415.
- [13] YISA M G, TERA O H. Dynamics of tractor-implement combinations on slopes (Part I): state-of-the-art review[J]. Journal of the Faculty of Agriculture, Hokkaido University, 1995, 66(2): 240 - 262.
- [14] YISA M G, TERA O H, KUBOTA M. Dynamics of tractor-implement combinations on slopes (Part II): computer simulation of directional dynamics[J]. Journal of the Faculty of Agriculture, Hokkaido University, 1995, 66(2): 263 - 275.
- [15] YISA M G, TERA O H, NOGUCHI N. Dynamics of tractor-implement combinations on slopes (Part III): stability regions and optimum design parameters[J]. Journal of the Faculty of Agriculture, Hokkaido University, 1998, 68(1): 1 - 16.
- [16] YISA M G, TERA O H, KUBOTA M. Dynamics of tractor-implement combinations on slopes (Part IV): experimental validation of simulation mode[J]. Journal of the Faculty of Agriculture, Hokkaido University, 1998, 68(1): 17 - 31.
- [17] GONZALEZ D O, GORRIZ B M, BERROCAL I I, et al. Development of an automatically deployable roll over protective structure for agricultural tractors based on hydraulic power: prototype and first tests [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2016(124): 46 - 54.
- [18] LINDHORST C M, HOY R M, PITLA S K, et al. Dynamic ROPS test for tractors over 6,000 kilogram[J]. Transactions of the ASABE, 2018, 61(1): 53 - 62.
- [19] 司俊德, 王国强, 闫振华, 等. 翻车保护结构及其吸能构件设计与性能仿真[J]. 农业机械学报, 2010, 41(8): 20 - 24. SI Junde, WANG Guoqiang, YAN Zhenhua, et al. Design and performance simulation of ROPS and energy-absorbing device [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(8): 20 - 24. (in Chinese)
- [20] 陈光阔, 李永武, 薛明. 拖拉机翻车防护装置强度试验分析[J]. 拖拉机与农用运输车, 2014(5): 23 - 26. CHEN Guangkuo, LI Yongwu, XUE Ming. Test analysis of tractor roll-over protective structure strength[J]. Tractor & Farm Transporter, 2014(5): 23 - 26. (in Chinese)
- [21] 陈小玲. 拖拉机防护装置强度试验台的设计研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2016. CHEN Xiaoling. Research on strength test of tractor[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2016. (in Chinese)