

基于无线网络的拖拉机遥操作系统设计与试验

薛金林 卫瑶瑶 闫嘉 董淑娴 张凌峰

(南京农业大学工学院, 南京 210031)

摘要: 为降低驾驶员的劳动强度以及改善其工作条件,设计了一套基于无线网络的拖拉机遥操作系统。首先提出了拖拉机遥操作系统总体设计方案,然后针对茂源 MY250 型拖拉机进行了执行机构改造,包括离合、制动、转向、油门、熄火执行机构以及启动控制,并设计了遥操作控制系统,包括用户界面与车载控制系统。最后进行了通信性能测试、执行功能测试与驾驶试验。结果表明,遥操作系统平均指令通信时延为 0.074 ms,视频时延最大不超过 373 ms,拖拉机各执行机构控制误差最大不超过 2.21%,行驶速度为 2.08 km/h 时,直线行驶最大误差绝对值不超过 208.5 mm,RMS 误差最大不超过 85.5 mm。

关键词: 拖拉机; 遥操作; 无线网络; 用户界面; 车载控制系统

中图分类号: S232.3; TN925+.93 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2018)08-0395-08

Design of Wireless Network for Tractors Based on Teleoperation System

XUE Jinlin WEI Yaoyao YAN Jia DONG Shuxian ZHANG Lingfeng

(College of Engineering, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210031, China)

Abstract: To reduce the labor intensity and improve the working conditions for drivers, a teleoperation system was developed for tractors. First of all, a general design was expanded according to requirements that the teleoperation system should be achieved. Through wireless network communication, the tractor's working environment can be transmitted with video to a teleoperation terminal where an operator was located, and the operator can send commands to drive tractor. Then a MY 250 tractor was refitted for remote steering, clutch, braking, throttle, shutdown and ignition by installing actuators such as motors and electric putters. In addition, a teleoperation control system was designed, including a user interface and an on-board control system. Finally, tests were carried out to detect the system performances about communication, action and driving. Results demonstrated that the average communication delay was 0.074 ms, and the maximum video delay was 373 ms for the teleoperation system, the maximum control error was 2.21% for all actuators, and the maximum absolute error was no more than 208.5 mm when the tractor was driven along a straight line at speed of 2.08 km/h by the teleoperation system, with a maximum root mean square (RMS) error of 85.5 mm. This research can provide reference and solution for the development of agricultural machinery with teleoperation technology.

Key words: tractor; teleoperation; wireless network; user interface; on-board control system

0 引言

由于恶劣的工作条件以及设计普遍较差的拖拉机车体结构,驾驶员在农田作业中容易过早疲劳,从而导致作业质量下降,甚至发生意外事故,且长期作业会引起脊柱变形、劳损扭伤等职业病,严重影响驾驶员的身心健康^[1-4]。遥操作技术可以实现远距离

的机器操作,现已在航天航空^[5]、深海探测^[6]、医学^[7]、工业^[8]等多个领域得以研究与应用。而遥操作技术与农业生产的结合可以有效降低驾驶员的劳动强度以及改善工作条件,提高作业质量^[9-10]。目前遥操作模式在农业机械领域的操作方案主要分为基于无线电的遥控模式^[11-16]和基于网络的遥操作模式。但基于无线电的遥控模式控制距离短,且控

收稿日期: 2018-03-19 修回日期: 2018-04-10

基金项目: 江苏省科技计划项目(BK20151436)

作者简介: 薛金林(1974—),男,教授,博士,主要从事农业车辆测控技术和智能化研究,E-mail: xuejinlin@njau.edu.cn

制误差会随距离增大而增大,应用范围有限。随着计算机网络的飞速发展,基于网络的遥操作突破了距离的限制,受到了国内外学者的重视。

MURAKAMI 等^[17] 基于 LAN 开发了一种用于履带式施肥机的遥操作系统,试验结果表明直线行驶的最大误差不超过 0.3 m。刘佰鑫^[18] 基于 WLAN 搭建了果实采摘机器人遥操作平台,系统的位置跟踪性能很好。LIU 等^[19] 基于 802.11n 标准无线网络为水果采摘机器人设计了基于立体视觉的远程操作接口界面,并验证了所提出方案的有效性。梅银成等^[20] 基于 GSM 网络设计了温室自走式弥雾机远程控制系统,系统响应时间为 3 s,喷雾均匀性较好。苏清华^[21] 基于 IEEE802.11g 标准无线网络设计开发了农用移动机器人远程嵌入式监控系统,并进行了数据的网络传输延迟测试。王嘉宁等^[22] 基于无线网络设计了温室 CO₂ 浓度监控系统,可实现信息智能化管理与远程同步,以及温室内 CO₂ 浓度的智能调控。曹如月等^[23] 基于 Web-GIS 设计了多机协同作业远程监控平台,可实现实时显示多机作业轨迹及信息,以及多机任务调度。总体而言,目前国内遥操作技术在农业生产领域已有了一些研究与应用,但关于拖拉机遥操作技术的相关研究较少。本文设计一种基于无线网络的拖拉机遥操作系统,通过对现有拖拉机的改造及遥操作控制系统的设计,以期实现拖拉机远程启动、起步、加速、制动、转向以及熄火。

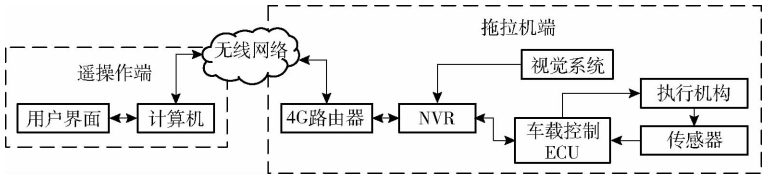


图 1 遥操作系统结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of teleoperation system

息。视觉系统的视频数据经无线网络通信环节实时传输至遥操作端,并在用户界面中显示。

无线网络通信环节基于“4G 网络 + VPN”方式进行信息交换,如图 2 所示。选用提供公网 IP 的云服务器搭建 OpenVPN 服务器,4G 路由器与遥操作工作站(计算机)作为客户,通过 OpenVPN 与云服务器组成虚拟局域网络(Virtual private network,

1 总体设计方案

所设计的拖拉机遥操作系统应满足如下基本要求:①远程操纵,操作人员能够远距离操纵拖拉机,如同车载驾驶员操纵一样。②实时通信,确保操作人员的操纵指令实时地传输给拖拉机。③环境感知,操作人员能够实时地感知拖拉机作业环境,以便及时判断、处理与操纵。④人机交互,通过合适的硬件与软件接口,保证远程操纵、实时通信、环境感知等基本要求的实现。

基于上述基本要求,拖拉机遥操作系统主要分为遥操作端与拖拉机端,两者之间通过无线网络通信环节进行通信,如图 1 所示。遥操作端计算机通过无线网络通信环节获取拖拉机端视频数据,并在用户界面上显示。操作人员根据用户界面的视频实时了解拖拉机的工作环境 with 状态,对拖拉机下达启动、起步、加速、制动、转向与熄火等控制指令。拖拉机控制指令经无线网络通信环节的 4G 路由器与网络硬盘录像机(Network video recorder,NVR)发送至车载控制 ECU,车载控制 ECU 接收指令后控制执行机构动作,执行机构的状态信息由传感器采集并反馈至车载控制 ECU。拖拉机端视觉系统由安装在拖拉机上的前置摄像机与顶置摄像机组成,前置摄像机获取拖拉机正前方一定距离内的农田环境图像信息,顶置摄像机安装在拖拉机上,获取拖拉机周围的环境信

VPN)。视频数据直接由 NVR 传输至遥操作端计算机;遥操作端操作人员的操作指令经过无线网络通信环节由 NVR 传输给车载控制 ECU。

2 拖拉机执行机构改造

为实现远程启动、起步、加速、制动、转向与熄火等基本功能,对茂源 MY250 型拖拉机的启动与熄火系统、离合装置、油门装置、制动装置与转向装置等进行改造。

2.1 参数测量

在改造之前,分别测量得离合器踏板力与行程为 160 N 与 120.0 mm,制动踏板力与行程为 250 N 与 57.8 mm,油门踏板力与行程为 35 N 与 36.8 mm,

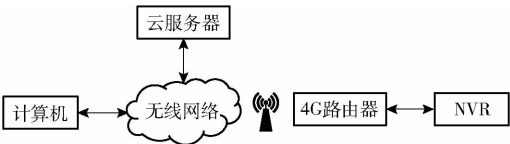


图 2 无线网络通信环节

Fig. 2 Wireless network communication link

方向盘转矩与转角为 $1.8\text{ N}\cdot\text{m}$ 与 $\pm 360^\circ$, 转向角范围为左 31° 至右 32° , 熄火拉杆力与行程为 20 N 与 38.4 mm , 这些参数可以为执行机构的设计与选型提供依据。

目前拖拉机基本为手动变速, 进行自动换挡改造成本较高, 同时基于拖拉机在田间作业时挡位固定, 因此, 没有进行换挡装置改造。在实际使用中, 可以将拖拉机挡位固定于 1 挡或 2 挡, 通过控制离合、制动与油门等执行机构实现拖拉机的起停与速度控制。

2.2 离合、制动执行机构

因拖拉机车身结构紧凑, 可用来布置执行机构的空间有限, 故采用步进电机与钢丝绳相结合的方式驱动离合器与制动踏板, 如图 3 与图 4 所示。该方式安装灵活, 且占用空间小。为便于钢丝绳的收放以及固定, 在电机轴上安装绕线轮, 并采用与不锈钢钢丝绳规格相同的卡头使钢丝绳两端分别与踏板、绕线轮固定为一体, 以保证钢丝绳不会脱落。根据踏板驱动力以及执行机构开放的工作环境, 最终选取直径为 2.0 mm 的 316 不锈钢钢丝绳, 最大承载力 $2\,120\text{ N}$, 抗拉强度可达 $1\,770\text{ MPa}$, 且采用右交互捻, 因此韧性高且不松散; 2.25 kN 拉力下的伸长率为 1.05% , 故在最大踏板驱动力为 250 N 时, 钢丝绳伸长量可忽略不记, 将其看成刚性的。



图 3 离合执行机构
Fig.3 Diagram of clutch actuator



图 4 制动执行机构
Fig.4 Diagram of braking actuator

为保证执行机构能够提供足够的拉力, 必须选用合适的步进电机与钢丝绳。步进电机所需的转矩计算公式为

$$T = kFr/\eta \tag{1}$$

式中 T ——步进电机所需转矩
 k ——放大系数
 F ——驱动踏板所需的力, 取 250 N
 r ——绕线轮半径
 η ——传动效率

由于步进电机位置固定, 而离合、制动踏板的运动轨迹为非线性曲线, 钢丝绳力的方向不可能始终与踏板力方向保持一致, 故电机的转矩应选大一些, 取放大系数 $k = 2$ 。离合器与制动执行机构的绕线轮半径 r 均为 0.015 m 。此处将离合、制动执行机构看作一个定滑轮机构, 因摩擦力小, 定机械效率 η 为 0.95 。由式(1)计算得离合器电机与制动电机所需转矩 T 分别为 $5.05\text{ N}\cdot\text{m}$ 与 $7.89\text{ N}\cdot\text{m}$ 。最终离合器与制动执行机构分别选择 86BYG250C 型与 86BYGH250D 型步进电机, 保持转矩分别为 $6\text{ N}\cdot\text{m}$ 与 $12\text{ N}\cdot\text{m}$, 满足需求, 技术参数如表 1 所示。

表 1 步进电机参数
Tab.1 Parameters of stepping motors

型号	步距角/($^\circ$)	保持转矩/($\text{N}\cdot\text{m}$)	额定电流/A	驱动器型号
86BYG250C	1.8	6	6.0	MA860H
86BYGH250D	1.8	12	5.6	HB-860H
57BYG250-80	1.8	2	3.0	ZD-2HD542

2.3 转向执行机构

在原有转向机构的基础上, 采用步进电机与齿轮系相结合的方式控制转向。步进电机上嵌套主动轮, 通过固定支架使主动轮与安装在方向盘上的从动轮啮合, 从而实现转向控制, 如图 5 所示。



图 5 转向执行机构
Fig.5 Diagram of steering actuator

为保证转向执行机构能提供足够的转矩, 需要选择合适的步进电机与齿轮系。步进电机所需转矩计算公式为

$$T_1 = kz_1T_2/(\eta z_2) \tag{2}$$

式中 z_1 、 z_2 ——主动轮与从动轮的齿数
 T_1 、 T_2 ——电机转矩和方向盘转矩

鉴于拖拉机在田间行驶时路况复杂且阻力较

大,所需的转向转矩较大,故取放大系数 $k = 3$ 。根据机械设计手册中齿轮的选取要求^[24],确定主动轮齿数 z_1 为 17,从动轮齿数 z_2 为 73,齿轮传动效率 η 为 0.9。拖拉机启动后转动方向盘所需力矩 T_2 为 $1.8\text{ N}\cdot\text{m}$ 。由式(2)计算可得电机转矩 T_1 为 $1.40\text{ N}\cdot\text{m}$,选择 57BYG250-80 型步进电机,保持转矩为 $2\text{ N}\cdot\text{m}$,满足需求,其技术参数见表 1。根据转向步进电机输出轴与方向盘尺寸,进一步确定了齿轮内径,具体参数如表 2 所示。

表 2 齿轮参数

Tab.2 Parameters of gears

	模数 m	齿数 z	分度圆直径	内径
	/mm		d/mm	d_{in}/mm
小动轮	3.5	17	59.5	9
大齿轮	3.5	73	255.5	200

2.4 油门、熄火执行机构

油门踏板与熄火拉杆的驱动力较小,且由于油门踏板与熄火拉杆处布置空间有限,故选择电动推杆作为油门与熄火功能的执行器。用螺钉将油门踏板杆与电动推杆的推头相连,用钢丝绳将熄火拉杆与电动推杆推头相连,如图 6 与图 7 所示。油门电动推杆所需力计算公式为

$$F' = kF_1 \tag{3}$$

式中 F' ——油门电动推杆所需力
 F_1 ——油门踏板驱动力



图 6 油门执行机构
Fig.6 Diagram of throttle actuator

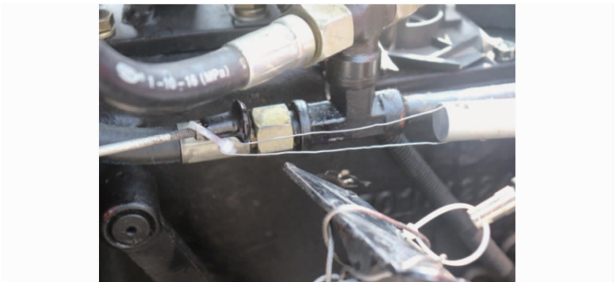


图 7 熄火执行机构
Fig.7 Diagram of shutdown actuator

由于油门踏板运动轨迹为非线性曲线,为保证电动推杆的力足够大,取放大系数 k 为 2,由式(3)可

得,油门电动推杆所需力 F' 为 70 N,选择 TG-400B 型直筒式高速直流电动推杆,最大推/拉力为 300 N,行程 100 mm,满足需求。由于熄火拉杆是简单的直线运动,所以本文在选型时没有对电动推杆所需力进行放大,选择旭日 LFHA 型直流电动推杆驱动油门,最大推/拉力为 100 N,行程为 100 mm,满足需求。油门与熄火执行机构的电动推杆参数如表 3 所示。

表 3 电动推杆参数

Tab.3 Parameters of electric putters

型号	电压 U/V	行程 S/mm	最大推/拉力 F/N	最大速度 V_{max} $/(\text{mm}\cdot\text{s}^{-1})$	最小安装尺寸 L/mm
TG-400B	24	100	300	270(无负载)	335($S+235$)
LFHA	12	100	100	90(无负载)	200($S+100$)

2.5 启动控制

采用继电器电路实现拖拉机的启动控制。由于拖拉机瞬间启动电流可达 60 A,选用最大承受电流为 80 A 的继电器。

3 遥操作控制系统设计

3.1 用户界面设计

基于 Microsoft Visual Studio 2010 的 MFC 模块设计遥操作用户界面(图 8),主要由用户信息区、视频区与操作区组成。位于界面顶部的是用户信息区,用户登陆成功并设置串口后可对拖拉机进行遥操作。位于界面中部的视频区为前置摄像机与顶置摄像机所采集的图像信息,左侧图像为拖拉机的前方作业环境,右侧图像为拖拉机的周边作业环境,有助于操作员进行路径规划、速度控制与安全避障等。位于界面底部的操作区可以实现初始化、启动、起步、转向、加速、制动、熄火等控制。



图 8 遥操作用户界面
Fig.8 User interface of teleoperation system

3.2 车载控制系统设计

3.2.1 车载控制系统硬件结构

车载控制系统硬件结构如图 9 所示。车载控制

ECU 为基于 ATMEGA8 微处理器的 DM368 控制板,其中 ADC 模块采集执行机构相应的转角与位移信息,PWM 模块产生 3 路 PWM 信号至步进电机驱动器以控制步进电机转动,开关模块控制驱动板上的高/低电位输入以进一步控制电动推杆动作,UART 模块内含 RS232/485 串口将数据传输至 NVR。

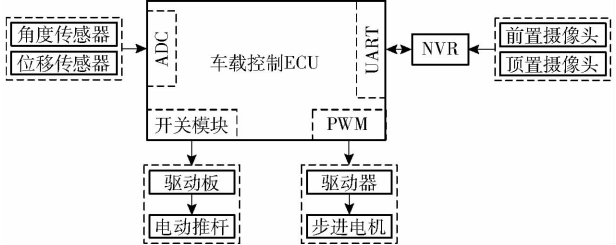


图 9 车载控制系统
Fig. 9 On-board control system

角度传感器用于读取拖拉机转角,选取世新电子科技有限公司生产的 WDD35 - D4 型角度传感器,线性 0.1%,机械转角 0°~360°,电气转角(345±2)°,电压输出 0~5 V,安装于前轮转向柱处。位移传感器用于读取离合、制动、油门踏板的位移,选取西域电压型拉绳位移传感器,线性 0.1%,电压输出 0~5 V,通过钢丝绳将位移传感器拉绳与离合、制动、油门踏板相连。拖拉机视觉系统中前置摄像机与顶置摄像机分别选用海康威视 DS - 2CD2T12 - I3 型摄像机与 DS - 2CD3942F - 1 型鱼眼摄像机。摄像机关键技术参数如表 4 所示。

表 4 摄像机关键技术参数
Tab. 4 Main parameters of cameras

型号	像素	焦距 /mm	水平视 角场/(°)	垂直视 角场/(°)
DS - 2CD2T12 - I3	1 280 × 960	4. 0	71	55
DS - 2CD3942F - 1	2 048 × 1 536	1. 6	186	106

由于前置与顶置摄像机分辨率较高,视频码流较大,因此需要选择一款可以处理高清视频的设备。目前较为常用的是 NVR,其主要功能是通过网络控制和管理 IP 视频设备,传输数字视频码流,并进行存储、配置及管理。选择配有设备网络软件开发工具包(Software development kit, SDK)的海康威视 DS - 7608N - G2 型 NVR,通过调用 SDK 中相关函数传输视频数据与指令数据。

3.2.2 车载控制系统软件设计

遥操作系统的控制主程序采用 C 语言开发实现,控制流程如图 10 所示。车载控制 ECU 上电后,首先进行初始化,包括时钟配置、串口初始化、定时器初始化。然后遥操作端与之进行通信确认是否连接,如果连接成功,等待并接收遥操作端控制指令,

远程控制拖拉机的启动、离合、制动、油门、转向以及熄火。

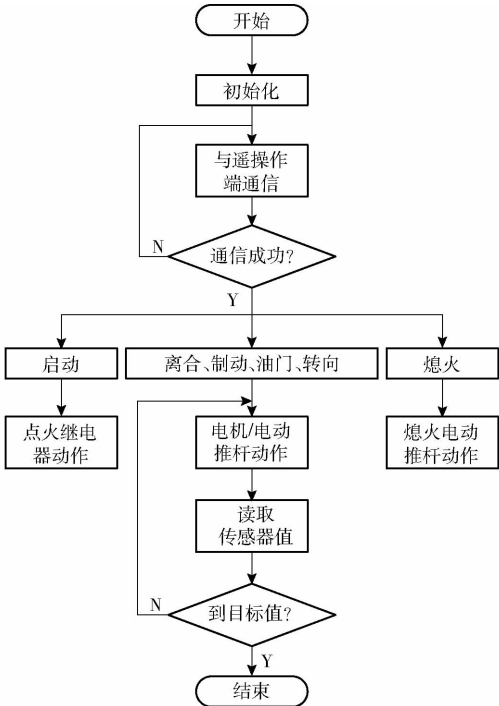


图 10 程序流程图
Fig. 10 Flow chart of program

4 性能测试与试验

为验证遥操作系统的可行性以及操作性能,先后进行通信性能测试、执行功能测试与驾驶试验。

4.1 通信性能测试

通信时延是遥操作系统稳定性的关键,若通信时延过长,会影响到行车安全性以及系统可靠性。本文中遥操作系统的传输信息主要为指令与视频数据,故进行了指令通信测试与视频通信测试。

4.1.1 指令通信测试

拖拉机端设备上电,车载控制 ECU 初始化完成后,计算机上显示“55 41 52 54 20 4F 4B 21”,对照 ASC II 码即为“UART OK!”,此为通信成功提示。使用 gettimeofday 函数获取从计算机发送指令到车载控制 ECU 返回数据至计算机的总时间,可以精确到微秒量级,3 次测量取平均值为 0.074 ms,指令通信时延很小。

4.1.2 视频通信测试

相对于指令数据,视频数据量大,传输速度相对较慢,其时延长对系统操作影响大。根据我国公共安全行业推荐标准 GA/T 1128—2013 进行视频时延测量^[25],先准备 2 台计算机,一台安装所设计的用户界面作为图形工作站,另一台作为测试计算机。

测试方法如下：

(1)在图形工作站与测试计算机上均安装同一个精度误差绝对值小于等于 1 ms 的毫秒级计时器软件。

(2)同时启动 2 个毫秒级计时器软件,计时时间大于等于 20 s 后,将测试计算机放置在摄像机前侧。

(3)打开图形工作站的用户界面获取摄像机视频,对图形工作站显示器进行屏幕截图。

(4)对截图中的 2 个计时器进行读数,视频时延计算公式为

$$\Delta T = T_1 - T_2$$

(4)

式中 T_1 ——图形工作站中计时器读数

T_2 ——测试计算机中计时器读数

ΔT ——视频时延

由于打开两计时器时不可能做到完全同时,通过操作员的多次训练,可以保证两计时器打开时间相差 10 ~ 20 ms,这里取 20 ms,故平均视频时延的误差为 ± 20 ms。选取不同时间段进行视频时延测量,每小时测量 5 组数据,共测试 3 d,测试平均时延如表 5 所示。

由表 5 可知,3 d 中视频时延最大为 373 ms,发生在第 3 天 12:00—13:00 的时间段;视频时延最小为 227 ms,发生在第 1 天 10:00—11:00 的时间段。总体而言,视频通信性能可以满足需求。事实上,课题组正在进行针对网络时延的非线性时变滞后系统的控制策略研究,以期进一步提高信息远程传输的稳定性。

表 6 各功能试验结果

Tab. 6 Test results of functions

参数	踩离合	抬离合	油门	制动	转向	熄火	启动
平均控制误差/(mm 或(°))	1. 06	1. 06	0. 58	0. 88	1. 41	0. 76	
平均执行时间/s	1. 003 4	1. 600 0	0. 315 3	1. 245 5	4. 031 8	0. 499 9	0. 799 7

注:转向误差单位是(°),其他误差单位均为 mm。

表 6 中,由于启动控制不涉及机械位移,而属于电气状态控制,故没有列出控制误差。从表 6 可知,该遥操作系统各执行机构平均控制误差较小,平均执行时间较短,与人工操作相当,满足系统需求。

4.3 驾驶试验

在南京农业大学农业机械试验场地上用石灰粉标出参考直线,约为 68 m,然后进行 3 组遥操作驾驶试验,试验场景如图 11 所示。试验时拖拉机挡位固定在 1 挡,通过 GPS 实时追踪直线行驶轨迹,此处仅给出 3 组驾驶试验中试验 1 的轨迹追踪和误差

表 5 平均视频时延测试结果

Tab. 5 Test results of average video delay ms

时间段	第 1 天	第 2 天	第 3 天
09:00—10:00	292	282	255
10:00—11:00	227	313	281
11:00—12:00	343	248	240
12:00—13:00	365	349	373
13:00—14:00	274	305	272
14:00—15:00	241	296	348
15:00—16:00	308	263	293
16:00—17:00	297	332	367

4.2 执行功能测试

执行功能测试主要测试遥操作系统各功能的控制误差与执行时间。为了测量控制误差,先对角度传感器与位移传感器进行了标定,以获取角度/位移与传感器输出电压之间的关系。由于熄火执行机构在设计时没有安装传感器,故测试时加装了与油门机构相同的位移传感器。然后将拖拉机前轴架起,根据期望执行机构应达到的目标值发送执行指令,当执行机构执行完成时,获取传感器实际输出电压,根据传感器标定关系换算成执行机构角度或位移实际值,将实际值与目标值相减取绝对值,即为执行机构的控制误差。

在离合、油门、制动、转向、启动以及熄火执行功能对应的程序内添加 gettimeofday 函数获取各功能的执行时间,其中,离合、油门、制动以及熄火的执行时间是指执行机构从初始位到终止位的总时间,转向执行时间是指从转向左极限到转向右极限的总时间,启动执行时间是指成功启动所用时间。测试 5 次的平均控制误差与平均执行时间如表 6 所示。



图 11 驾驶试验场地

Fig. 11 Scene of driving test

曲线以作示例,如图 12 与图 13 所示。根据 GPS 数据,行驶速度约为 2.08 km/h。

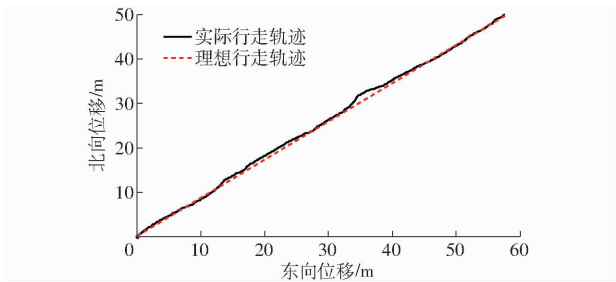


图 12 GPS 追踪结果 (试验 1)

Fig. 12 Test results of GPS tracking(test 1)

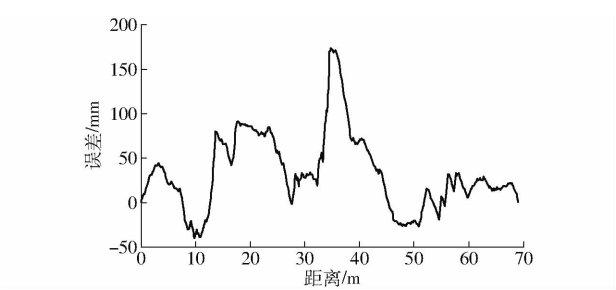


图 13 误差曲线 (试验 1)

Fig. 13 Error curve(test 1)

为了分析遥操作系统的驾驶性能,对 3 组驾驶试验进行了误差分析,如表 7 所示。由表 7 可知,3 组试验的最大误差绝对值不超过 208.5 mm,而一名熟练的驾驶员所行驶的最大误差绝对值为 150.0 mm,造成这一现象的原因为:操作员的操作

表 7 误差分析

Tab. 7 Error analysis

试验	最大误差	平均误差	RMS 误差
1	173.0	32.5	54.8
2	-165.1	-2.2	45.9
3	-208.5	-68.3	85.5
平均值	-66.9	-12.7	62.1

注:在最大误差与平均误差中,正数表示行驶方向的右侧,负数表示行驶方向的左侧。

技巧不够熟练,缺乏预判与及时处理偏驶的能力。由平均误差可知,在驾驶过程中试验 1 总体偏向驾驶方向的右侧,而试验 2 与试验 3 总体偏向左侧。3 组试验的 RMS 误差最大不超过 85.5 mm,则表明遥操作系统直线行驶稳定性较高。

5 结论

(1)基于茂源 MY250 型拖拉机设计了一套基于无线网络的遥操作系统,实现了远程控制拖拉机启动、起步、油门、制动、转向、熄火等。

(2)试验表明,遥操作系统视频时延最大不超过 373 ms,平均指令通信时延为 0.074 ms,拖拉机各执行机构控制误差最大不超过 2.21%。行驶速度为 2.08 km/h 时,拖拉机直线行驶最大误差绝对值不超过 208.5 mm,RMS 误差最大不超过 85.5 mm,基本满足远程操作拖拉机需求。

参 考 文 献

1 雷玲,王兴盛,廉鹏飞,等. 拖拉机振动对驾驶员身体健康影响的调查研究[J]. 拖拉机与农用运输车, 2012, 39(6): 20-23.
LEI Ling, WANG Xingsheng, LIAN Pengfei, et al. Investigation and research on influence of tractor vibration on driver health [J]. Tractor & Farm Transporter, 2012, 39(6): 20-23. (in Chinese)

2 DU Haiping, LI Weihua, ZHANG Nong. Vibration control of vehicle seat integrating with chassis suspension and driver body model [J]. Advances in Structural Engineering, 2013, 16(1): 1-10.

3 VELMURUGAN P, KUMARASWAMIDHAS L A, SANKARANARAYANASAMY K. Whole body vibration analysis for drivers of suspended cabin tractor semitrailer[J]. Experimental Techniques, 2014, 38(2): 47-53.

4 薛金林,汪珍珍,伊力达尔·伊力亚斯,等. 轮式拖拉机振动系统横向固有频率理论建模及验证[J]. 农业工程学报, 2016, 32(19): 51-56.
XUE Jinlin, WANG Zhenzhen, YILIDAER·Yiliyasi, et al. Lateral natural frequency modeling and verification for vibration systems of wheeled tractors[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(19): 51-56. (in Chinese)

5 吴伟仁,周建亮,王保丰,等. 嫦娥三号“玉兔号”巡视器遥操作中的关键技术[J]. 中国科学: 信息科学, 2014, 44(4): 425-440.
WU Weiren, ZHOU Jianliang, WANG Baofeng, et al, Key technologies in the teleoperation of Chang'E-3 “Jade Rabbit” Rover [J]. SCIENTIA SINICA Informationis, 2014, 44(4): 425-440. (in Chinese)

6 ZHANG J, LI W, YU J, et al. Development of a virtual platform for telepresence control of an underwater manipulator mounted on a submersible vehicle[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(2): 1716-1727.

7 左国玉,于双悦,龚道雄. 遥操作护理机器人系统的操作者姿态解算方法研究[J]. 自动化学报, 2016, 42(12): 1839-1848.
ZUO Guoyu, YU Shuangyue, GONG Daoxiong. Operator attitude algorithm for telerobotic nursing system[J]. Acta Automatic Sinica, 2016, 42(12): 1839-1848. (in Chinese)

8 KHUDHER D, POWELL R, ABBOD M. Operational space control in hexapod robot for humanitarian demining applications[C]// 2017 3rd International Conference on Control, Automation and Robotics. IEEE, 2017: 212-216.

9 许丽佳,冉春森,王文娟,等. 小型无线遥控和实时配药喷施机的研制[J]. 农业工程学报, 2012, 28(10): 13-19.
XU Lijia, RAN Chunseng, WANG Wenjuan, et al. Development on small pesticide spraying machine with real-time mixing and

- remote-control spraying[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(10): 13–19. (in Chinese)
- 10 王元杰, 刘永成, 杨福增, 等. 温室微型遥控电动拖拉机的研制与试验[J]. 农业工程学报, 2012, 28(22): 23–29. WANG Yuanjie, LIU Yongcheng, YANG Fuzeng, et al. Development and test of tiny remotely controlled electric tractor for greenhouses[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(22): 23–29. (in Chinese)
- 11 庞雄斌, 刘海, 郭翔, 等. 喷水推进转向式遥控渔药喷施机的设计[J]. 湖北农业科学, 2017, 56(13): 2532–2535, 2539. PANG Xiongbin, LIU Hai, GUO Xiang, et al. Design of the hydraulic jet propulsion machine for spraying fishery drug[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2017, 56(13): 2532–2535, 2539. (in Chinese)
- 12 茹煜, 贾志成, 范庆妮, 等. 无人直升机远程控制喷雾系统[J/OL]. 农业机械学报, 2012, 43(6): 47–52. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20120609&flag=1&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2012.06.009. RU Yu, JIA Zhicheng, FAN Qingni, et al. Remote control spraying system based on unmanned helicopter[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(6): 47–52. (in Chinese)
- 13 AHMAD A Y, MOHD N A S, MOHD K M N, et al. Position control mathematical modelling and operational evaluation of tele-operated electro-hydraulic actuator (T-EHA)[J]. Applied Mechanics and Materials, 2015, 773–774: 163–167.
- 14 陈训教, 吕志军, 薛向磊, 等. 无线遥控步行插秧机的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33(17): 10–17. CHEN Xunjiao, LÜ Zhijun, XUE Xianglei, et al. Design and performance experiment of wireless remote control walking rice transplanter[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(17): 10–17. (in Chinese)
- 15 阳帅, 蒋蘋, 胡文武, 等. 履带式拖拉机可视遥控驾驶系统的设计及试验[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2016, 42(5): 561–566. YANG Shuai, JIANG Pin, HU Wenwu, et al. Design and experiment of a visual remote control driving system for crawler tractor[J]. Journal of Hunan Agricultural University(Natural Sciences), 2016, 42(5): 561–566. (in Chinese)
- 16 刘双喜, 戚武振, 王金星, 等. 烟草打顶抑芽机无线控制系统设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(8): 53–60. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20170805&flag=1&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2017.08.005. LIU Shuangxi, QI Wuzhen, WANG Jinxing, et al. Design and test of wireless control system for tobacco topping machine[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(8): 53–60. (in Chinese)
- 17 MURAKAMI N, ITO A, WILL J D, et al. Development of a teleoperation system for agricultural vehicles[J]. Computers & Electronics in Agriculture, 2008, 63(1): 81–88.
- 18 刘佰鑫. 基于 WLAN 的果实采摘机器人基础平台研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2015. LIU Baixin. Research on fruit-harvesting robot foundation platform combines with WLAN[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2015. (in Chinese)
- 19 LIU B, GONG L, CHEN Q, et al. A stereo visual interface for manipulating the grasping operation of a fruit-harvesting robot[M]. ICIRA 2014: Intelligent Robotics and Applications, 2014 (Part 2): 239–244.
- 20 梅银成, 祁力钧, 冀荣华, 等. 温室自走式弥雾机远程控制系统的研究与试验[J]. 中国农业大学学报, 2015, 20(1): 170–175. MEI Yincheng, QI Lijun, JI Ronghua, et al. Design and experiment of remote control system of greenhouse self-propelled mist sprayer[J]. Journal of China Agricultural University, 2015, 20(1): 170–175. (in Chinese)
- 21 苏清华. 农用移动机器人远程嵌入式监控系统研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2010. SU Qinghua. Research on embedded wireless remote control system of agricultural mobile robot[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2010. (in Chinese)
- 22 王嘉宁, 牛新涛, 徐子明, 等. 基于无线传感器网络的温室 CO₂ 浓度监控系统[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(7): 280–285. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170735&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2017.07.035. WANG Jianing, NIU Xintao, XU Ziming, et al. Monitoring system for CO₂ concentration in greenhouse based on wireless sensor network[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(7): 280–285. (in Chinese)
- 23 曹如月, 李世超, 魏爽, 等. 基于 Web-GIS 的多机协同作业远程监控平台设计[J]. 农业机械学报, 2017, 48(增刊): 52–57, 14. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2017s009&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2017.S0.009. CAO Ruyue, LI Shichao, WEI Shuang, et al. Remote monitoring platform for multi-machine cooperation based on Web-GIS[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(Supp.): 52–57, 14. (in Chinese)
- 24 濮良贵, 纪名刚, 陈国定, 等. 机械设计[M]. 北京: 高等教育出版社, 2012: 186–235.
- 25 GA/T 1128—2013 安全防范视频监控高清晰度摄像机测量方法[S]. 2013.