

无人驾驶喷雾机电控系统设计及试验

陈黎卿^{1,2} 许泽镇^{1,2} 解彬彬³ 刘路^{1,2} 许鸣^{1,2} 郑泉^{1,2}

(1. 安徽农业大学工学院, 合肥 230036; 2. 安徽农业大学安徽省智能农机装备工程实验室, 合肥 230036;
3. 江苏大学现代农业装备与技术教育部重点实验室, 镇江 212013)

摘要: 针对黄淮海地区实行秸秆全量还田模式下的麦玉轮作、麦豆轮作等, 使得田间秸秆覆盖量较大, 虽有效改善了土壤理化环境, 却造成田间地表病虫害加重。为有效解决该问题, 并提高作业效率, 以自主设计的四轮驱动底盘为研究对象, 设计了一种以电能为纯动力的无人驾驶喷雾机电控系统。该系统以 STM32F103ZGT6 微处理器为控制核心, 基于模块化思想分别对喷雾机动力系统、网络通讯系统、转向系统和喷雾系统进行设计, 实现远距离遥控精确行走和智能喷雾。性能试验结果表明: 行驶速度为 2~4 km/h 时, 低速转向的外轮转角小于等于 23°, 转弯半径大于等于 1.45 m, 转弯路径无偏移现象, 转向可靠; 直线行驶 50 m 的平均偏移量为 2.42 m, 单位距离平均偏移率 4.84 cm/m, 偏移率较小; 行驶速度为 10 km/h 整备状态下的喷雾爬坡度不大于 25°; 大田内试验时, 在蓄电量充足情况下, 行驶速度 2~10 km/h 时, 最大续航时间不小于 5.50 h; 在最大续航工作时间内, 网络通信掉线次数小于等于 1 次, 通信可靠性较好; 遥控距离为 0~500 m 时, 车速调节控制、转向调节控制以及药液电磁阀控制响应时间均小于 0.4 s。

关键词: 玉米; 喷雾机; 远程遥控; 控制系统

中图分类号: S223.2⁺6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2019)01-0122-07

Design and Test of Electronic Control System for Unmanned Drive Sprayer

CHEN Liqing^{1,2} XU Zezhen^{1,2} XIE Binbin³ LIU Lu^{1,2} XU Ming^{1,2} ZHENG Quan^{1,2}

(1. College of Engineering, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China

2. Anhui Province Engineering Laboratory of Intelligent Agricultural Machinery Equipment, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China

3. Key Laboratory of Modern Equipment and Technology, Ministry of Education, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: An electric control system of sprayer was designed, which was driven by pure electric power and realized the unmanned self-propelled function. The STM32F103ZGT6 microprocessor was used as core and KeilµVision5 development platform was adopted in the system. Based on modular thinking, the development of sprayer power system, network communication system, steering system and spraying system was respectively carried out to realize remote control, precise walking and intelligent spraying. The field test results illustrated that when the sprayer was steered at speed of 2~4 km/h, the maximum rotation angle of the outer wheel was 23°, the minimum turning radius was 1.45 m, and the turning path had no deviation, the steering was reliable. The average offset was 2.42 m when the sprayer was straight running for 50 m, the average deviation was 4.84 cm/m, the offset was small, and the sprayer can be accurately controlled to drive by the route through the remote control. When the sprayer was spraying at top speed of 10 km/h, the effective climb gradient was less than 25°. The sprayer was tested in field, the maximum cruising time was greater than or equal to 5.50 h when the driving speed was 2~10 km/h with sufficient power storage. In the maximum battery life, the number of dropped calls of network communication was no more than 1, and the communication reliability was good. When the remote control distance of the sprayer was in the range of 0~500 m, the speed adjustment control, steering control and the response time of liquid medicine electromagnetic valve control were all less than 0.4 s. The general working condition of field operation was satisfied. This control system can effectively realize the separation

收稿日期: 2018-07-23 修回日期: 2018-08-14

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0301303)、安徽省自然科学基金项目(1708085ME135)和安徽省自然科学研究重大项目(KJ2018ZD016)

作者简介: 陈黎卿(1979—),男,教授,主要从事智能农机装备研究,E-mail: lqchen@ahau.edu.cn

通信作者: 郑泉(1970—),女,教授,主要从事智能农机装备研究,E-mail: zhengquan@ahau.edu.cn

of man and machine, ensure the safety of operators, suitable for most small farms, and effectively improve the operation efficiency of wheat plant protection.

Key words: corn; sprayer; remote control; control system

0 引言

近年来,国内外众多学者针对植保机械的变量喷雾^[1-4]、控制系统^[5-7]、对靶喷雾^[8-11]以及雾滴漂移特性^[12-14]等开展研究,取得了许多研究成果,同时航空植保机械^[15-16]也得到了迅速发展。从现有研究成果分析得知,大型喷雾机在田间行走时易造成苗带损伤,且成本高,不适宜于小型田块。航空植保机具属于新型机械,在作业的精准性、续航时间等方面依然存在需要解决的问题^[17]。近年,黄淮海两熟制地区实行秸秆全量还田,使得田间秸秆覆盖量较大,作物中后期病虫害防治任务加重,急需研制一种性能可靠的无人驾驶喷雾机控制系统。

针对上述问题,以玉米植保作业为研究对象,结合农艺特点和黄淮海地区田块特点,设计一种以 300 m 以上远距离遥控作业、良好的爬坡能力、续航时间长、通信可靠性良好等目标的无人驾驶喷雾机控制系统。

1 无人驾驶喷雾机结构与原理

1.1 整机结构

无人驾驶喷雾机的结构如图 1 所示,主要由底盘总成、喷雾工作总成、导航控制和遥控总成等 4 部分组成。主要结构参数如表 1 所示。

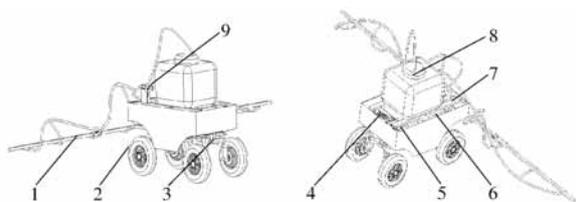


图 1 无人驾驶喷雾机结构简图

Fig. 1 Structure diagram of unmanned drive sprayer

- 1. 喷管支架 2. 轮毂电机 3. 转向机构 4. 减振弹簧 5. 步进电机
- 6. 锂电池组 7. 车架 8. 药箱 9. 药液电磁阀

表 1 无人驾驶喷雾机主要结构参数

Tab. 1 Main structure parameters of unmanned drive sprayer

参数	数值/形式	参数	数值/形式
整机型式	轮式	轴距/mm	670
整机质量/kg	80	轮距/mm	450
长×宽×高/ (mm×mm×mm)	1 300×400× 700	质心高度/mm	450
作业速度/ (m·s ⁻¹)	0.1~10	驱动方式	四轮驱动

1.2 工作原理

远程遥控喷雾机电控系统工作原理框图如图 2 所示,主要分为动力系统、转向系统、网络通讯系统、喷雾系统及控制箱 5 个模块。操作人员在田边操作控制箱按键,通过微处理器的解析实现控制命令的发送,实现喷雾机的行走、转向及喷雾等功能。

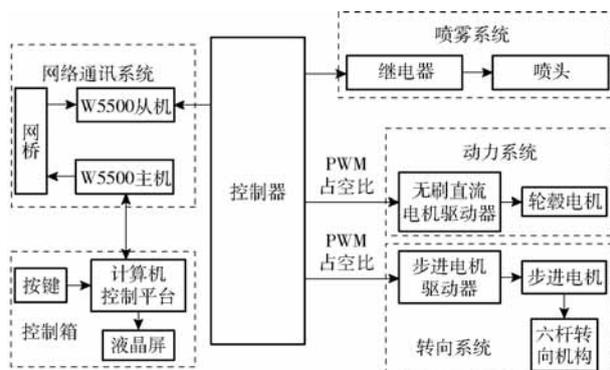


图 2 无人驾驶喷雾机控制系统框图

Fig. 2 Control system diagram of unmanned self-propelled sprayer

无人驾驶喷雾机作业时,安装在整机最前端的高清摄像头反馈喷雾机实时状态至控制箱,作业人员根据控制箱上 12864 液晶显示器显示的实时图像操作按键。控制箱是上位机电路板电路与单片机的集成封装,集成电路发出指令控制喷雾机的行走和喷雾,单片机接收视频信号。喷雾机的驱动力由轮毂电机提供,由无刷直流电机驱动器调节 PWM 进行控制;整机转向由步进电机驱动器控制,步进电机与转向机构通过齿轮齿条进行传动,实现精准转向;继电器控制喷雾机接口的点火及闭合,实现智能点火和调节药量功能。无人驾驶喷雾机所有命令均通过无线传输,由作业人员通过控制箱按键远程控制喷雾机田间作业。

2 喷雾机关键部件设计

2.1 动力系统设计

轮毂电机具有转向轻便、传动效率高、节能环保等优点。本设计采用功率 0.5 kW、额定扭矩 45 N·m 的轮毂电机作为整机的驱动部件;利用 ZM-6615 型高性能无刷直流电机驱动器控制轮毂电机,提供驱动力,其驱动结构示意图如图 3 所示。通过控制 4 个独立的驱动器,由微处理器 STM32F103ZGT6 的定时器提供 2 路 PWM 信号,控制对应驱动轮。通过 IO 接口提供其方向控制信号,实现喷雾机的前进

和后退功能的有效切换。由于耕地土质较为松软，在喷雾机行驶过程中，轮胎容易出现下陷、悬空等情况，为了避免驱动力不足，该设计采用4个轮毂电机共同驱动来提供行进动力。

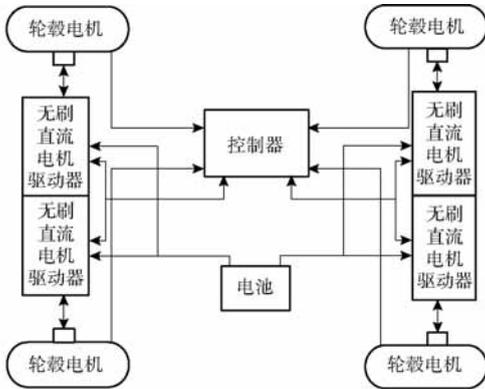


图3 四轮轮毂电机驱动结构示意图

Fig. 3 Schematic of four wheel drive

2.2 转向系统设计

喷雾机采用四杆转向机构，符合阿克曼转向原理^[18-19]，由步进电机控制四杆机构来实现，转向系统如图4所示。

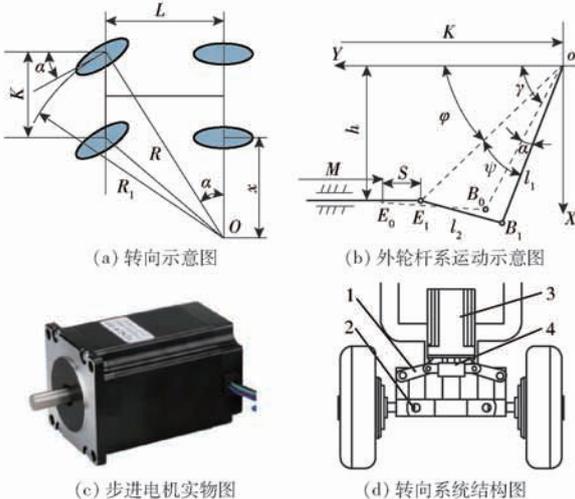


图4 转向系统

Fig. 4 Schematics of steering system

1. 横拉杆 2. 转向节 3. 步进电机 4. 齿轮齿条

步进电机转动时，输出轴上的齿轮使齿条向左或向右移动，使左右两边的杆系产生不同的运动，从而使左右车轮分别获得一个转角。设齿条向右移过某一行程S，通过右横拉杆推动右梯形臂，使之转过α。齿条行程S与外轮转角α的关系为

$$S = \frac{K-M}{2} - l_1 \cos(\gamma + \alpha) - \sqrt{l_2^2 - (l_1 \sin(\gamma + \alpha) - h)^2} \quad (1)$$

式中 l_2 ——横拉杆长度 l_1 ——梯形臂长度 h ——齿条中心线到梯形底边的安装距离 γ ——梯形底角(满载)

M ——齿条两端中心距

K ——左右两主销轴线延长线与地面交点间距离

本文采用的步进电机为86系列两相大力矩混合式步进电机，单轴输出，步距角 1.8° ，步距角精度5%。步进电机驱动器将微控制器发出的固有频率放大，通过控制脉冲频率精确调速^[20]。齿条依靠步进电机驱动，其行程可表示为

$$S = 2\pi r \frac{f\theta}{360m} \quad (2)$$

式中 f ——脉冲频率, Hz

r ——步进电机齿轮分度圆半径

θ ——步距角, ($^\circ$)

m ——步进电机细分数(整步为1, 半步为2)

由图4a可得喷雾机转弯半径公式

$$R = \frac{L}{\sin\alpha} \quad (3)$$

式中 L ——转向轴到转向中心线的距离

由图4b可得前外轮转角公式

$$\alpha = \varphi + \psi - \gamma \quad (4)$$

式中 φ ——主销中心线与偏转轴线的夹角, ($^\circ$)

ψ ——梯形臂与偏转轴线的夹角, ($^\circ$)

消去中间变量 α ，细分数 $m = 1$ ，步距角 $\theta = 1.8^\circ$ ，得到转弯半径R的关系式

$$R = \frac{L}{\sin(\varphi + \psi - \gamma)} \quad (5)$$

其中

$$\varphi = \arctan \frac{100h}{50(K-M) - \pi r f}$$

$$\psi = \arccos \frac{\left(\frac{K-M}{2} - \frac{\pi r f}{100}\right)^2 + h^2 + l_1^2 - l_2^2}{2l_1 \sqrt{\left(\frac{K-M}{2} - \frac{\pi r f}{100}\right)^2 + h^2}}$$

3 喷雾机控制系统设计

3.1 网络通讯系统设计

网络通讯系统主要以W5500以太网芯片为核心，构建局域网，并通过无线路由器与网桥实现信号的无线传输。计算机(遥控)界面控制端通过键盘模块发送指令，微处理器STM32F103ZGT6解析指令之后，通过SPI接口将数据传输至W5500网络模块写数据缓存端，通过路由器与网桥将数据传至其读数据缓存端，再通过SPI接口将数据传送至驱动端的微处理器中，读取数据后控制相应模块，从而实现喷雾机的远程遥控功能。本文采用的网桥为奥维通BreezeNET DS. 11无线网桥，该网桥低成本布线，简单安装，数据速率高达11 Mb/s，在恶劣环境及天气条件下其覆盖范围最高可达50 km，适用于农业

领域无线传输。网络通讯系统工作示意图如图 5 所示。

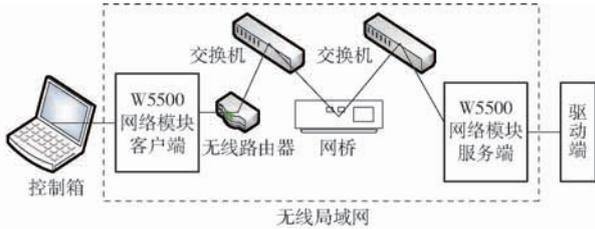


图 5 网络通讯系统工作示意图

Fig. 5 Schematic of network communication system

3.2 控制系统硬件设计

控制系统的控制电路及实物图如图 6 所示, 主要包括电源模块、继电器控制模块、按键控制模块、液晶显示模块、W5500 网络模块、行走控制模块等。图 6a 为主从机网络通讯模块电路图, 图 6b 为安装在喷雾机上从机执行箱系统电路图, 将各模块集成形成从机执行箱驱动端控制板(图 6c)、喷雾机主机控制箱(图 6d), 以实现无人驾驶喷雾机远程控制功能。

3.3 控制系统软件设计

选用 Keil μ Vision5 作为控制系统软件开发环

境,应用 C 语言进行编程。系统软件采用模块化设计思想,与硬件设计思想相互对应。系统软件框架主要分为两部分:上层程序和底层程序。软件控制框图如图 7 所示,系统软件流程图如图 8 所示。

4 性能试验

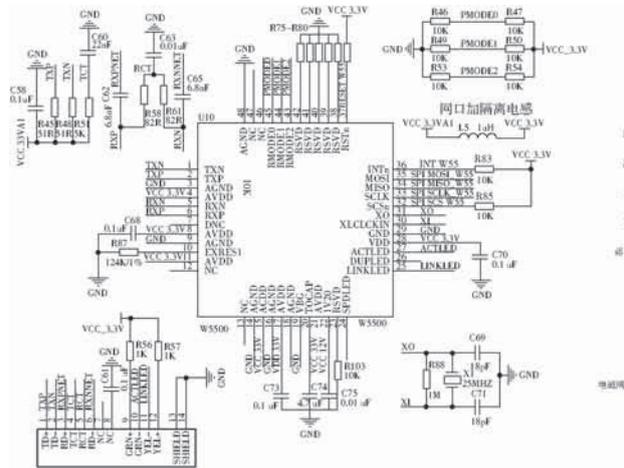
4.1 试验材料与设备

试验材料有 5 m 长卷尺,量角器,150 cm 丁字尺,采用自主设计的纯电动四轮驱动底盘,以及主机控制箱、从机执行箱、奥维通无线网桥、无线摄像头、48 V 锂电池,如图 9 所示。

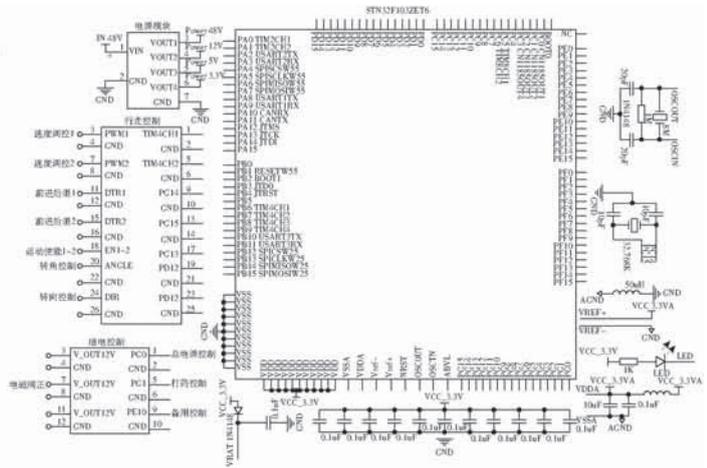
4.2 试验设计与结果分析

4.2.1 试验设计

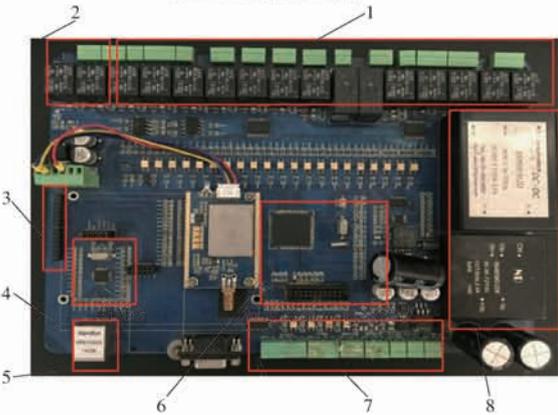
为验证无人驾驶喷雾机控制系统的可行性,于 2018 年 7 月 16 日在安徽省合肥市肥东县某家庭农场玉米地,进行电控系统转向性能试验、电控系统直线偏移量试验、电控系统爬坡能力试验、大田内遥控距离试验、通信可靠性试验、电量耐用性试验以及控制响应时间测试;以转向角、转弯半径、直线偏移量、爬



(a) 主从机网络通讯电路



(b) 从机执行箱系统电路



(c) 驱动端控制板



(d) 喷雾机主机控制箱

图 6 电控系统电路及实物图

Fig. 6 Electrical control system circuit and physical drawing

- 1. 备用继电器 2. 打药继电器 3. 备用信号输出 4. W5500 模块 5. 以太网口 6. STM32 7. 行走控制器 8. 电源模块 9. 监控箱
- 10. 网桥 11. 执行箱 12. 摄像头

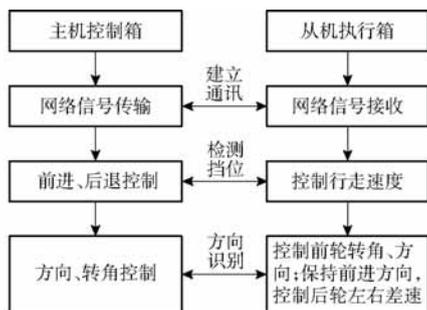


图7 控制系统软件框图

Fig. 7 Software framework of control system



图10 驾驶喷雾机转向试验

Fig. 10 Turning experiment of self-propelled sprayer

经测量,最大转角 23° ,最小转弯半径 1.45 m,内外侧轨迹呈圆形闭合,且内圆和外圆圆心基本重合。喷雾机转向系统可靠,能有效完成田间转向操作。

4.2.2.2 电控系统直线偏移量试验

无人驾驶喷雾机作业于玉米行间,行驶路线的偏移率是反映控制系统性能指标之一。具体试验方法如下:喷雾机走在规定的路线上,以 $2 \sim 4$ km/h 低速匀速行驶 50 m 后测试偏移量,重复 5 次试验并记录数据,结果如表 2 所示。

表2 直线偏移量测试结果

Tab. 2 Linear offset test results m

参数	序号					平均值
	1	2	3	4	5	
50 m 偏移量	2.30	2.60	2.35	2.44	2.42	2.42

由表 2 计算得单位距离平均偏移率 4.84 cm/m,偏移率较小。实际田间操作时,该偏移可由远程遥控喷雾机进行系统补偿以实现喷雾机高效、可靠作业。

4.2.2.3 电控系统爬坡能力试验

机械田间通过性是一项重要考核指标,根据整机总体试验要求,通过测试爬坡角度来反映整机爬坡能力,市场常见轿车爬坡角度一般在 30° 左右。试验时根据实际经验,爬坡角度设定范围 $0^\circ \sim 30^\circ$,通过人工堆积 25° 、 30° 2 个斜坡进行测试,且垂直高度均为 500 mm。试验时喷雾机整车装备质量超过 70 kg,以最高速度 10 km/h 进行爬坡试验,试验现场如图 11 所示。

试验中,随着坡度(爬坡角度)增加,无人驾驶喷雾机爬行速度降低,在 25° 和 30° 的斜坡爬坡速度较为稳定;在 30° 坡度时,由于重力作用,会偶尔发生翻车现象。综上分析,无人驾驶喷雾机可以轻松爬越 25° 以下斜坡,其最大爬坡角度为 25° 左右,可以有效完成爬坡作业,具有较好的爬坡能力,满足田间作业的一般工况。

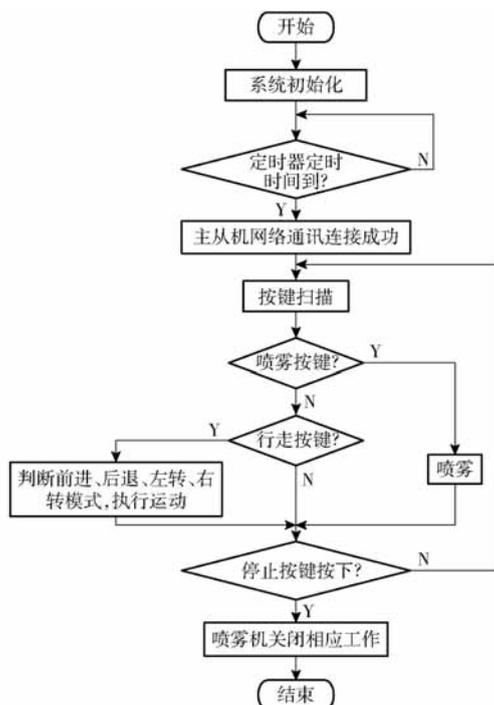


图8 系统软件流程图

Fig. 8 Flow chart of system software



图9 田间试验

Fig. 9 Field test

坡角度、最大遥控距离、最大工作时间内通信掉线次数、最大电量使用时间、控制响应时间等为评价指标。

4.2.2 试验结果分析

4.2.2.1 电控系统转向性能试验

试验时,无人驾驶喷雾机以 $2 \sim 4$ km/h 低速转向,自转一圈,获得转向内侧车轮和外侧车轮形成的内外侧轨迹,如图 10 所示,测得最大转角与最小转弯半径。



图 11 无人驾驶喷雾机爬坡试验

Fig. 11 Climbing tests of unmanned drive sprayer

4.2.2.4 通信可靠性试验

控制响应时间是控制系统稳定的关键,若控制响应时间过长,会影响到作业效果以及系统可靠性。该控制系统的传输信息主要是控制指令与视频,因此需进行控制响应时间测试、最大工作时间内通信掉线次数测试和视频传输测试。

大田内试验时,在遥控距离为 0 ~ 500 m 时,利用 NI - LabVIEW 数据采集系统对车速调节控制、转向调节控制以及药液电磁阀控制响应时间进行测试,其中,药液电磁阀的控制响应时间是指执行机构完成工作的总时间,车速调节控制响应时间和转向调节控制响应时间是指触发按键后到功能执行完成的总时间,重复 5 次试验,记录数据,如表 3 所示;在最大续航时间内,统计网络通信掉线和视频画面卡顿次数,重复 5 次试验,记录数据,如表 4 所示。

表 3 控制响应时间测试结果

Tab. 3 Control response time test results s

项目	序号					平均值
	1	2	3	4	5	
车速调节控制	0.37	0.36	0.33	0.35	0.34	0.350
转向调节控制	0.38	0.36	0.35	0.33	0.35	0.354
药液电磁阀调节控制	0.35	0.37	0.34	0.33	0.32	0.342

大田遥控距离为 0 ~ 500 m 时,车速调节控制、转向调节控制以及药液电磁阀控制响应时间均小于 0.4 s;在最大续航工作时间内,网络通信掉线次数小于等于 1 次、视频画面卡顿次数小于等于 1 次,通信可靠性良好。

4.2.2.5 电量耐用性和大田内遥控距离测试

大田内试验时,在蓄电量充足情况下,行驶速度 2 ~ 10 km/h 时,测得最大续航时间,重复 5 次试验,

表 4 视频通讯卡顿次数测试结果

Tab. 4 Video communication test results

时间段	序号				
	1	2	3	4	5
06:00—07:00	0	0	0	0	0
07:00—08:00	0	0	0	0	0
08:00—09:00	0	0	0	0	1
09:00—10:00	1	0	0	0	0
10:00—11:00	0	0	0	1	0
11:00—12:00	0	0	0	0	0

记录数据,如表 5 所示;试验中在长 280 m、宽 160 m 的一块玉米地未出现失控现象,最大遥控距离可达 500 m,延时情况如表 6 所示。

表 5 电量耐用性测试结果

Tab. 5 Electrical durability test results h

项目	序号					平均值
	1	2	3	4	5	
续航时间	5.50	5.60	5.80	6.00	5.90	5.76

表 6 遥控延时测试结果

Tab. 6 Field remote control delay test results ms

项目	序号					平均值
	1	2	3	4	5	
延迟时间	0.38	0.34	0.33	0.32	0.45	0.364

5 结论

(1)以 STM32F103ZGT6 微处理器为控制核心,基于模块化分别对喷雾机动力系统、网络通讯系统、转向系统和喷雾系统进行设计,实现远距离遥控精确行走和智能喷雾。

(2)性能试验表明:行驶速度为 2 ~ 4 km/h 时,低速转向的外轮转角小于等于 23°,转弯半径大于等于 1.45 m,转弯路径无偏移现象,转向可靠;直线行驶 50 m 的平均偏移量为 2.42 m,单位行驶距离平均偏移率 4.84 cm/m,偏移率较小;行驶速度为 10 km/h 整备状态下的喷雾爬坡角度不大于 25°;在蓄电量充足情况下,行驶速度 2 ~ 10 km/h 时,最大续航时间不小于 5.50 h,在最大续航工作时间内,网络通信掉线次数小于等于 1 次,通信可靠性较好;遥控有效距离内车速调节控制、转向调节控制以及药液电磁阀控制响应时间均小于 0.4 s。

参 考 文 献

[1] 徐艳蕾,包佳林,付大平,等. 基于多喷头组合的变量喷药系统的设计与试验[J]. 农业工程学报,2016,32(17):47-54. XU Yanlei, BAO Jialin, FU Daping, et al. Design and experiment of variable spraying system based on multiple combined nozzles[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(17):47-54. (in Chinese)

[2] 袁炜锋. 多功能变量喷雾机喷雾控制系统研究[D]. 上海:上海交通大学,2010. YUAN Weifeng. Research on spray control system of multi-functional variable sprayer [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong

University, 2010. (in Chinese)

- [3] 邱白晶, 闫润, 马靖, 等. 变量喷雾技术研究进展分析[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(3): 59-72. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20150309&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.03.009.
- QIU Baijing, YAN Run, MA Jing, et al. Research progress analysis of variable rate sprayer technology[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(3): 59-72. (in Chinese)
- [4] 邱白晶, 李佐鹏, 吴昊, 等. 变量喷雾装置响应性能的试验研究[J]. 农业工程学报, 2007, 23(11): 148-152.
- QIU Baijing, LI Zuopeng, WU Hao, et al. Experimental study on variable-rate spraying equipment response capability[J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(11): 148-152. (in Chinese)
- [5] 翟长远, 朱瑞祥, 黄胜, 等. 基于单片机的施药监测系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2011, 42(8): 70-74, 84.
- ZHAI Changyuan, ZHU Ruixiang, HUANG Sheng, et al. Design and experiment of pesticide application monitoring system based on MCU[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(8): 70-74, 84. (in Chinese)
- [6] 李春杰. 静电喷雾装置改装设计与试验研究[D]. 郑州: 河南农业大学, 2006.
- LI Chunjie. Design and experimental study on the refitting of electrostatic spray device[D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2006. (in Chinese)
- [7] 刘伟, 汪小岳, 丁为民, 等. 背负式喷雾器变量喷雾控制系统设计与特性分析[J]. 农业工程学报, 2012, 28(9): 16-21.
- LIU Wei, WANG Xiaochan, DING Weimin, et al. Design and characteristics analysis of variable spraying control system for knapsack sprayer[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(9): 16-21. (in Chinese)
- [8] 宋淑然, 陈建泽, 洪添胜, 等. 果园柔性靶喷雾装置设计与试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31(10): 57-63.
- SONG Shuran, CHEN Jianze, HONG Tiansheng, et al. Design and experiment of orchard flexible targeted spray device[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(10): 57-63. (in Chinese)
- [9] 金鑫, 董祥, 杨学军, 等. 3WGZ-500型喷雾机对靶喷雾系统设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(7): 21-27. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160704&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.07.004.
- JIN Xin, DONG Xiang, YANG Xuejun, et al. Design and experiment of target spraying system of 3WGZ-500 sprayer[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(7): 21-27. (in Chinese)
- [10] 许林云, 张昊天, 张海锋, 等. 果园喷雾机自动对靶喷雾控制系统研制与试验[J]. 农业工程学报, 2014, 30(22): 1-9.
- XU Linyun, ZHANG Haotian, ZHANG Haifeng, et al. Development and experiment of automatic target spray control system used in orchard sprayer[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(22): 1-9. (in Chinese)
- [11] 张俊雄, 曹峥勇, 耿长兴, 等. 温室精准对靶喷雾机器人研制[J]. 农业工程学报, 2009, 25(增刊2): 70-73.
- ZHANG Junxiong, CAO Zhengyong, GENG Changxing, et al. Research on precision target spray robot in greenhouse[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(Supp. 2): 70-73. (in Chinese)
- [12] 何雄奎, 曾爱军, 刘亚佳, 等. 水田风送低量喷杆喷雾机设计及其参数研究[J]. 农业工程学报, 2005, 21(9): 76-79.
- HE Xiongkui, ZENG Aijun, LIU Yajia, et al. Design and parameter test of the low volume air assistant rice boom sprayer[J]. Transactions of the CSAE, 2005, 21(9): 76-79. (in Chinese)
- [13] 邱白晶, 何耀杰, 盛云辉, 等. 喷雾机喷杆有限元模态分析与结构优化[J/OL]. 农业机械学报, 2014, 45(8): 112-116, 105. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20140818&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.08.018.
- QIU Baijing, HE Yaojie, SHENG Yunhui, et al. Finite element modal analysis and structure optimization of spray boom[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(8): 112-116, 105. (in Chinese)
- [14] 邱白晶, 杨宁, 徐溪超, 等. 喷雾机前后轮相继激励下喷杆理想运动响应提取[J/OL]. 农业机械学报, 2012, 43(2): 55-60. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20120212&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.02.012.
- QIU Baijing, YANG Ning, XU Xichao, et al. Ideal spray boom response extraction with front and rear tires excited by step track[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(2): 55-60. (in Chinese)
- [15] 邱白晶, 王立伟, 蔡东林, 等. 无人直升机飞行高度与速度对喷雾沉积分布的影响[J]. 农业工程学报, 2013, 29(24): 25-32.
- QIU Baijing, WANG Liwei, CAI Donglin, et al. Effects of flight altitude and speed of unmanned helicopter on spray deposition uniform[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(24): 25-32. (in Chinese)
- [16] 陈盛德, 兰玉彬, 李继宇, 等. 植保无人机航空喷施作业有效喷幅的评定与试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33(7): 82-90.
- CHEN Shengde, LAN Yubin, LI Jiyu, et al. Evaluation and test of effective spraying width of aerial spraying on plant protection UAV[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(7): 82-90. (in Chinese)
- [17] 魏淑艳, 江光华, 黄聪会, 等. 小麦植保机具现状分析及新作业方法的研究[J]. 农机化研究, 2014, 36(11): 258-260.
- WEI Shuyan, JIANG Guanghua, HUANG Conghui, et al. Analysis of wheat plant protection machine situation and research of new operation method[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2014, 36(11): 258-260. (in Chinese)
- [18] 孟庆华, 许进, 王东峰. 轮毂电机驱动型电动汽车动力系统研究[J/OL]. 农业机械学报, 2013, 44(8): 33-37, 20. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20130806&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.08.006.
- MENG Qinghua, XU Jin, WANG Dongfeng. Power system of electric vehicle driven by in-wheel motors[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(8): 33-37, 20. (in Chinese)
- [19] CHRISTENSEN L. Designing in-hub brushless motors[J]. Machine Design, 2014, 86(9): 40-43.
- [20] 曾锦锋, 陈晨, 杨蒙爱. 基于阿克曼转向原理的四轮转向机构设计[J]. 轻工机械, 2013, 31(3): 13-16, 19.
- ZENG Jinfeng, CHEN Chen, YANG Mengai. Design of four-wheel steering mechanism based on ackerman steering principle[J]. Light Industry Machinery, 2013, 31(3): 13-16, 19. (in Chinese)