

# 高地隙施药机自动驾驶系统研制与试验

印 祥<sup>1</sup>, 安家豪<sup>1</sup>, 王艳鑫<sup>1</sup>, 王应宽<sup>1,2</sup>, 金诚谦<sup>1,3\*</sup>

(1. 山东理工大学农业工程与食品科学学院, 淄博 255000; 2. 农业农村部规划设计研究院, 北京 100125;  
3. 农业农村部南京农业机械化研究所, 南京 210000)

**摘 要:** 针对农业自动驾驶、电动自动转向、农机自动控制、精量施药控制等关键技术的集成应用问题, 该研究以高地隙喷杆喷雾机为平台, 基于机电液一体化控制与软硬件标准化, 研制了用于高地隙施药机的自动驾驶系统。根据底盘机构和工作原理设计了电控执行机构, 实现发动机启停、转向、油门调节、车速调节、液泵启停、喷杆伸缩的自动控制。设计了基于 CAN 总线的整车通信控制网络, 实现手动遥控和自动驾驶 2 种模式的自由切换。设计了基于姿态测量的定位误差校正方法, 补偿导航定位过程中因机体倾斜造成的位置测量误差, 提出地头转弯过程中的直线作业路径规划方法, 以提高调头的准确性并保证邻接行的上线精度。在验证自动操控机构和通信控制网络稳定性的基础上进行了手动遥控和自动驾驶的对比试验。结果表明: 作业速度 3.6 km/h 时, 遥控操作和自动驾驶 2 种模式下横向偏差最大值分别为 20.81 和 8.84 cm, 航向偏角最大值为 7.86° 和 2.48°, 横向偏差的均方根误差最大值为 7.47 和 4.66 cm。该研究设计的高地隙施药机自动驾驶系统能够实时准确执行手动遥控和自动驾驶 2 种模式下的操作指令, 自动驾驶模式下的路径跟踪精度较高, 满足田间施药作业需求。

**关键词:** 农业机械; 自动驾驶; 高地隙施药机; 倾斜校正; 自动控制

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2021.09.003

中图分类号: TP273

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2021)-09-0022-09

印祥, 安家豪, 王艳鑫, 等. 高地隙施药机自动驾驶系统研制与试验[J]. 农业工程学报, 2021, 37(9): 22-30. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2021.09.003 <http://www.tcsae.org>

Yin Xiang, An Jiahao, Wang Yanxin, et al. Development and experiments of the autonomous driving system for high-clearance spraying machines[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2021, 37(9): 22-30. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2021.09.003 <http://www.tcsae.org>

## 0 引 言

随着卫星定位、自动驾驶、机电液融合控制等技术在农业中的深入应用, 农业机械的自动化和智能化水平不断提高。具备自动驾驶和自动驾驶的智能农机装备已经开始应用于农业生产, 在保证田间作业质量的同时减轻了工作人员劳动强度, 代表着未来农业的发展方向<sup>[1-3]</sup>。

农业机械在田间行驶的同时需要完成既定的作业任务, 即实现行走底盘和作业机构的一体化控制。在自动驾驶作业过程中, 需要以机具路径跟踪为研究对象进行实时定位与导航控制<sup>[4-5]</sup>。黎永键等<sup>[6-10]</sup>以实时动态全球导航卫星系统 (Real-Time Kinematic Global Navigation Satellite System, RTK-GNSS) 和惯性测量单元 (Inertial Measurement Unit, IMU) 作为导航传感器开发具备自动行走与机具控制的拖拉机、高地隙施药机、联合收获机、插秧机。

高地隙施药机作为一种高效的田间管理农业机械, 主要用于液态农药和化肥的喷施。其自动驾驶系统主要包括导航控制系统、遥控操作系统、行走控制系统和喷药控制系统等 4 个子系统。在导航控制系统研究方面, 许多研究人员针对轮式农田车辆的路径跟踪建立了车辆运动数学模型、导航误差计算方法和跟踪控制算法, 设计了转向控制器和导航控制器, 在水平路面上的直线路径跟踪误差小于 5 cm, 田间试验路径跟踪误差均小于 10 cm<sup>[11-15]</sup>。自动驾驶高地隙施药机的行走控制功能主要包括自动转向、速度自动调节和油门自动控制。杨洋等<sup>[16-18]</sup>采用多种型式的电机及传动机构替代原车方向盘, 通过控制电机的旋转速度和旋转方向实现转向轮的角度偏转。在喷药控制方面, 蒋焕煜等<sup>[19-21]</sup>采用基于机器行驶速度或作物空间变异的精量喷雾控制方法, 调节电控流量阀的出口开度或脉冲宽度调制 (Pulse Width Modulation, PWM) 喷头的占空比以达到施药量的自动控制。

从以上分析可以看出, 在农业机械自动驾驶、电动自动转向、精量施药等方面已经具备较为成熟的技术和产品, 其中的各个产品均具备独立的操作系统和通信协议。对于一个完整的自动驾驶作业机组, 要实现自主行走、精量作业等功能的集成控制, 打破各个子系统间的软硬件技术壁垒, 就必须解决操控机构自动化及软硬件标准化的问题。在高地隙施药机的自动驾驶系统研究方面, 需要考虑上述各个子系统的融合控制、自动驾驶和

收稿日期: 2020-11-30 修订日期: 2021-03-02

基金项目: 山东省重大科技创新工程项目 (2019JZZY010734); 山东省自然科学基金项目 (ZR2020MC085); 国家重点研发计划项目 (2017YFD0700405); 山东省高等学校优势学科人才团队培育计划项目 (2016-2020)

作者简介: 印祥, 副教授, 博士, 研究方向为农机自主导航与智能作业装备。Email: 666513@163.com

\*通信作者: 金诚谦, 博士, 研究员, 研究方向为大田作物种植与收获机械化与智能化技术。Email: 412114402@qq.com

遥控操作 2 种模式间的切换、各子系统间的数据交换以及整机性能的优化。

为提高田间施药的作业效率和质量、有效应对劳动人员农药中毒的潜在风险，本研究以高地隙施药机自动驾驶为研究对象，开展以自主行走与执行机构自动控制为核心的多系统融合控制研究。基于自主研发的电动自动转向系统、自动导航系统、油门调节器和静液压传动 (Hydro-Static Transmission, HST) 调节器，建立适用于高地隙施药机的自动控制策略、倾斜补偿方法、路径规划方法和喷雾控制方法，实现高地隙施药机的自动驾驶。

### 1 高地隙施药自动驾驶系统组成

自动驾驶高地隙施药系统以山东华盛中天机械集团股份有限公司的 3WP-500G 喷杆喷雾机为平台，由行走控制系统、喷雾控制系统、导航控制系统、遥控处理模块、自动驾驶地面站组成，如图 1 所示。其中，喷杆喷雾机的性能参数如表 1 所示。导航控制系统和遥控处理模块同时接收自动驾驶地面站的操控信号，将控制指令发布至 CAN 总线，行走控制系统和喷雾控制系统接收并执行 CAN 总线指令。

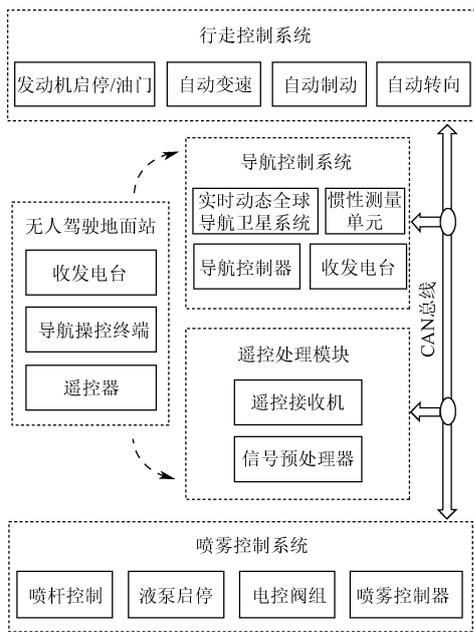


图 1 高地隙施药机自动驾驶系统

Fig.1 Autonomous driving system of high-clearance spraying machine

表 1 华盛 3WP-500G 喷杆喷雾机主要技术指标

Table 1 Main technical index of Huasheng 3WP-500G sprayer

技术指标 Technical indexes	参数值 Values
发动机功率 Motor power/kW	15.4
长×宽×高 Length×Width×Height/(mm×mm×mm)	4 100×9 900×2 540
轮距×轴距 Wheelbase×Tread/mm×mm	1 500×1 500
喷幅 Sprinkling width/mm	1 100
离地间隙 Ground clearance/mm	1 200
作业速度 Working speed/(km·h <sup>-1</sup> )	0~5.6
最小转弯半径 Minimum turning radius/mm	3 500
药箱容积 Tank volume/L	500

高地隙施药机自动驾驶系统所使用的平台具备全液压助力转向器、HST 驱动系统、拉线式的无级变速器、油门调节器和制动装置，其三段喷杆的升降和伸缩均采用电磁换向阀控制，液泵输入轴通过电磁离合器与发动机输出轴联接。喷雾控制系统采用宁波市力成农用喷雾技术有限公司的三段式喷雾阀组，能够根据行驶车速实时调节流量阀的开口大小以保证施药量的均匀一致，如图 2 所示。



1.定位天线 2.定向天线 3.行走控制机构 4.转向电机 5.喷雾阀组  
1.Positioning antenna 2.Vector antenna 3.Driving control mechanisms 4.Steering motor 5.Spraying valve group

图 2 自动驾驶高地隙施药机

Fig.2 Autonomous driving high-clearance spraying machine

导航控制系统采用基于天宝定位板卡 BD982 和 RTX 差分服务的双天线定位定向接收机和 VectorNav 的惯性测量单元 VN100 作为导航传感器。导航控制器由山东理工大学自主研发<sup>[15]</sup>，用以接收位置和姿态信息、运行数据处理和导航算法，并向行走控制系统和喷雾控制系统发送指令数据。

自动驾驶地面站通过收发电台与导航控制系统、遥控处理模块进行数据传输，其导航操控终端与导航控制系统远程连接，进行参数设置、路径规划、过程监控等导航操作。遥控器与遥控接收机无线连接，接收机的输出信号由信号预处理器负责转换并发布至 CAN 总线上。

根据高地隙施药机的行走操作机构、喷雾阀组的动作原理、自动驾驶系统结构及功能，本研究在设计自动操控机构的基础上制定了 CAN 总线通信控制协议，并针对高地隙施药机自动导航需求提出基于倾斜补偿的定位误差校正方法、适用于宽幅作业的路径规划方法以及相对安装位置自动标定方法。

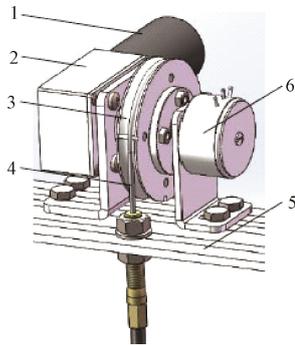
### 2 高地隙施药机的控制系统设计

高地隙施药机的自动控制包括行走控制和喷雾控制两部分。在行走控制方面，因变速、油门、制动等机构均采用拉线式，在此以自动油门装置设计为例介绍其结构和工作原理。自动转向装置采用低成本的普通直流无刷电机，进行转向控制器设计。

#### 2.1 自动油门装置

自动油门装置用于实时接收操作指令，根据指令数

据调节油门大小。薛金林等<sup>[22]</sup>针对拖拉机油门踏板的动作过程设计了基于电动推杆的油门调节装置,用编码器检测并反馈油门开度。本研究中的高地隙施药机采用拉线式油门通过操作手柄调节其大小,如图3所示。



1.直流电机 2.减速器 3.拉线轮 4.油门拉线 5.固定支架 6.角度传感器  
1.DC motor 2.Reducrer 3.Rolling wheel 4.Throttle cable 5.Fixing frame 6.Angle sensor

图3 自动油门装置

Fig.3 Automatic throttle mechanism

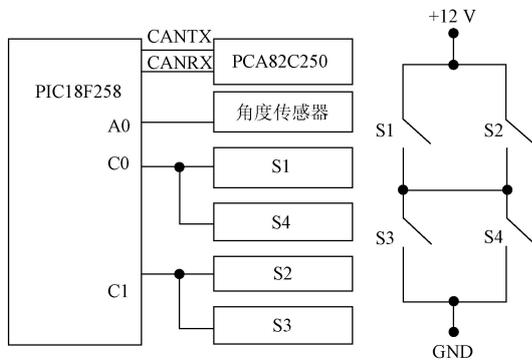
自动油门装置由油门电子控制单元 (Electronic Control Unit, ECU)、WDD35D 旋转电位计、减速电机、拉线轮组成,主要工作部件的性能参数如表2所示。

表2 自动油门装置主要部件参数

Table 2 Values of main components of automatic throttle mechanism

主要部件 Main components	技术指标 Technical indexes	参数值 Values
减速电机 Reducer motor	功率/W	18
	电压/V	12
	转速/(r·min <sup>-1</sup> )	10
拉线轮 Rolling wheel	直径/mm	60
	厚度/mm	10
角度传感器 Angle sensor	电压/V	5.0
	阻值/kΩ	5.0
	测量范围/(°)	0~180

油门拉线的一端固定并绕在拉线轮上,拉线轮在减速电机带动下转动以改变油门大小。旋转电位计的输入轴随拉线轮转动以测量拉线轮的旋转位置。油门 ECU 以 PIC18F258 处理器为核心,由 PCA82C250 提供 CAN 总线物理接口,由 4 个 CMOS 功率管的通断组合控制电机的正反转,其接线原理如图4所示。



注: A0 为 PIC18F258 处理器的模拟输入引脚; C0、C1 为 PIC18F258 处理器的数字输出引脚; S1、S2、S3、S4 为 CMOS 功率管。  
Note: A0 is a pin of PIC18F258 for analog input; C0 and C1 are pins of PIC18F258 for digital output; S1, S2, S3 and S4 are CMOS power tubes.

图4 油门电子控制单元接线图

Fig.4 Wiring diagram of throttle electronic control unit

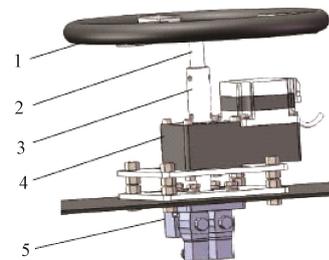
当 C0 高电平、C1 低电平时, S1 和 S4 导通, 减速电机正转; 当 C0 低电平、C1 高电平时, S2 和 S3 导通, 减速电机反转。油门 ECU 通过 A/D 转换端口 A0 实时读取电位计反馈的数值, 将此数值与 CAN 总线上的油门指令进行比较, 通过端口 C0、C1 的高电平控制 MOS 管开关 S1、S2、S3、S4 的通断, 使减速电机带动拉线轮旋转至期望位置。

自动变速装置通过拉线调节静液压传动 (Hydro-Static Transmission, HST) 转臂的位置, 而自动制动装置通过拉线压紧制动器的定盘和动盘。除拉线行程不同外, 其结构和工作过程均与自动油门装置相同。在实际安装使用时, 需根据拉线的极限位置确定拉线轮的旋转角度范围。

## 2.2 自动转向装置

自动转向系统根据转向指令将导向轮旋转至期望角度。杨洋等<sup>[16,23]</sup>采用直流电机带动全液压助力转向器的方式实现了高速插秧机等农业机械的自动转向, 针对电机工作原理、控制方式和通信协议开发了转向控制器。其系统的工作性能、输出扭矩和集成应用受限于厂家提供的电机结构和通信协议, 无法满足自动驾驶高地隙施药机对转向装置兼容性的功能需求。

本文开发的自动转向装置由转向电机、转向控制器、角度传感器组成。转向电机由 12V、100W 的直流无刷电机和速比为 40 的减速器组成, 其输出扭矩和转速的额定值分别为 10 N·m 和 80 r/min, 如图5所示。转向电机为空心轴输出, 输出轴的下端与液压转向器联接, 上端与方向盘联接以便于观察转向机构的动作。角度传感器用于测量转向轮的偏转角度, 以模拟电压形式反馈至转向控制器。



a. 转向电机安装  
a. Installation of steering motor



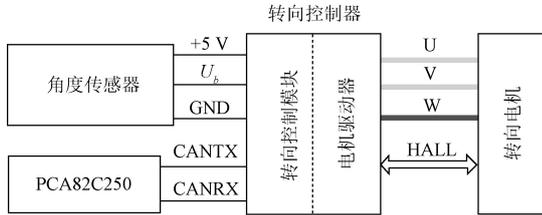
b. 角度传感器安装  
b. Installation of angle sensor

1.方向盘 2.输出轴 3.联轴器 4.转向电机 5.液压转向单元 6.固定支架  
7.角度传感器 8.前桥 9.转向臂 10.球头拉杆 11.活塞杆 12.转向油缸  
1.Steering wheel 2.Output shaft 3.Coupler 4.Steering motor 5.Hydraulic steering unit 6.Fixing frame 7.Angle sensor 8.Front axle 9.Steering arm 10.Universal drawbar 11.Piston rod 12.Steering cylinder

图5 自动转向装置

Fig.5 Automatic steering mechanism

转向控制器由转向控制模块和电机驱动器组成，转向控制模块以 PIC18F258 为核心处理器，接收 CAN 总线上的转向指令，读取角度传感器的测量值，控制减速电机带动全液压转向器动作，使转向轮旋转至期望角度，其工作原理如图 6 所示。

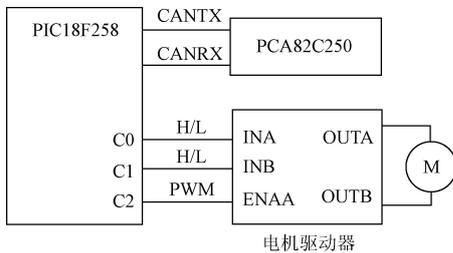


注： $U_b$  为角度传感器的输出电压，V；CANTX 为转向控制器的 CAN 总线发送端；CANRX 为转向控制器的 CAN 总线接收端；U、V、W 为转向电机相线；HALL 为转向电机的霍尔总线。  
 Note:  $U_b$  is the output voltage of angle sensor, V; CANTX is the pin of the steering controller for data transmission on the CAN bus; CANRX is the pin of the steering controller for data receiving from the CAN bus; U, V and W are phase cables of the steerin motor; HALL stands for the hall bus of the steering motor.

图 6 自动转向工作原理  
 Fig.6 Principles of automatic steering

### 2.3 精量喷雾控制器

针对喷雾阀组中流量阀的执行机构及其特性，设计了如图 7 所示的精量喷雾控制器，包括 PIC18F258 单片机及外围电路、CAN 总线物理芯片 PCA82C250、L298N 电机驱动器。



注：H/L 表示端口 C0、C1 输出的高低电平信号；PWM 表示 C2 输出的脉宽调制信号；INA 和 INB 为电机驱动器的电机旋转方向控制端口；ENAA 为电机驱动器的电机转速控制端口；OUTA 和 OUTB 为电机驱动器与电机的连接端口。  
 Note: H/L stands for the output level of C0 and C1; PWM stands for the pulse width modulation signal from C2; INA and INB are pins for control of the rotating direction of the motor; ENAA is the pin for speed control of the motor; OUTA and OUTB are pins for motor driver and motor.

图 7 精量喷雾控制器接线图  
 Fig.7 Wiring diagram of precision spraying controller

精量喷雾控制器接收 CAN 总线上的速度信息和期望流量值，通过端口 C0、C1、C2 控制流量阀电机的动作以调节其开口大小从而改变药液流量。

### 2.4 CAN 总线通信网络

自动驾驶高地隙施药机具备油门、车速、刹车、喷杆、液泵、精量喷雾、发动机启停等多个控制装置的 ECU，均需接收导航系统和遥控装置的控制指令。为便于 ECU 间的数据传输，设计了图 8 所示的 CAN 总线通信网络，具备不同 ID 的所有节点均可收发 CAN 总线信息。

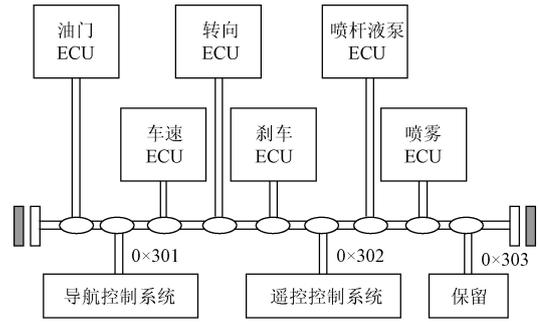


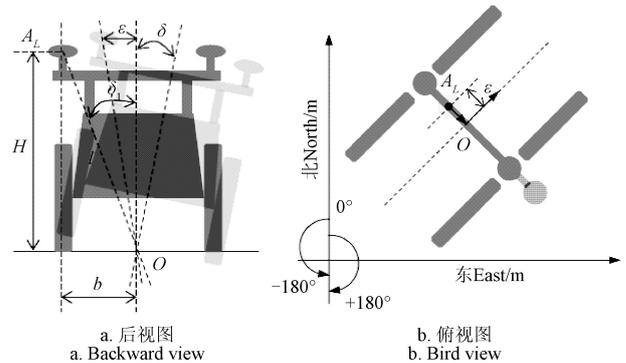
图 8 CAN 总线通信网络  
 Fig.8 CAN-bus communication network

人工遥控/自动导航 2 种控制模式间的切换由遥控操作系统进行决定，各个执行机构的 ECU 接收导航控制系统和遥控操作系统发布的 CAN 总线控制指令（油门、车速、转向、刹车、喷杆伸缩与升降、液泵启停、发动机启动/熄火等）并根据控制模式和节点 ID 选择执行相应的 CAN 总线控制指令。

## 3 导航控制方法

### 3.1 定位误差校正

自动驾驶高地隙施药机为自走式农业机械，整机质量 1 300 kg，轮胎宽度 12 mm。与拖拉机、联合收获机相比，其质量较小、胎面较窄，受田间地面起伏的影响极易发生倾斜。底盘最小离地间隙为 1 100 mm，GNSS 天线固定位置的离地高度为 2.46 m，在左右倾斜（即横滚角） $1^\circ$  时天线偏离误差达 40 mm，在作业过程中需要实时感知车体的倾斜角度以进行定位测量误差校正，如图 9 所示。



注： $H$  为定位天线离地高度，m； $b$  为车轮中心至重心  $O$  的垂直距离，m； $\delta_1$  为  $OA_L$  与车体前进方向的夹角， $(^\circ)$ ； $\varepsilon$  为定位天线与重心  $O$  的横向距离，m； $\delta$  为车体横滚角， $(^\circ)$ ； $l$  为线段  $OA_L$  的长度，m； $A_L$  为定位天线安装位置。  
 Note:  $H$  is the height of the position antenna from the ground, m;  $b$  is the distance from the wheel to the vehicle body center, m;  $\delta_1$  is the angle between  $OA_L$  and car body forward direction,  $(^\circ)$ ;  $\varepsilon$  is the distance from the position antenna to the vehicle center  $O$ , m;  $\delta$  is the roll angle of the vehicle body,  $(^\circ)$ ;  $l$  is the distance of  $OA_L$ , m;  $A_L$  is installation position of position antenna.

图 9 车体倾斜误差校正  
 Fig.9 Correction of vehicle inclination error

He 等<sup>[24]</sup>基于三维姿态传感器测量插秧机的空间姿态，并根据 RTK 定位系统测量得到的位置数据计算插秧机构的实际位置，以消除机体倾斜引起的定位误差。其在计算过程中，需要精确测量天线与机体、机体与插秧

部的相对位置。而对于不同机型, 实际相对测量精度难以保证。在直线导航过程中, 在一定倾斜范围内机体的横滚角对横向偏差影响最大、对航向角的影响可忽略, 而俯仰角对横向偏差和航向角测量的影响可以忽略。因此, 本研究在考虑横滚角的前提下, 只需测量天线中心位置与机具中心的相对距离, 便于导航系统在现场的快速安装使用。

定位天线和定向天线分别安装于机器的左右两侧, 以垂直于地面的天线所在平面、车体中心线、地面三者的交点位置作为机器的实际位置, 则在车体横向平面内定位天线与重心  $O$  的横向距离  $\varepsilon$  为:

$$\varepsilon = l \cdot \sin \Delta\delta \quad (1)$$

其中,

$$\Delta\delta = \delta_1 - \delta \quad (2)$$

根据  $\Delta\delta$  的值可以判断点  $A_L$  相对于车体中心线的位置。当  $A_L$  位于车体中心线的左侧和右侧时, 矢量  $A_L O$  的方向角  $\Psi_A$  分别如式 (3) 和 (4) 所示。

$$\Psi_A = \Psi_V + \frac{\pi}{2} \quad (3)$$

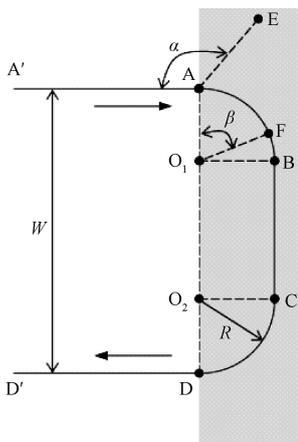
$$\Psi_A = \Psi_V - \frac{\pi}{2} \quad (4)$$

式中  $\Psi_V$  为 RTK-GNSS 车体航向角, 以 UTM 平面坐标系的正北为基准。点  $O$  的平面坐标  $(E_O, N_O)$  由  $A_L$  坐标  $(E_A, N_A)$  按式 (5) 计算。

$$\begin{cases} E_O = E_A + \varepsilon \cdot \sin \Psi_A \\ N_O = N_A + \varepsilon \cdot \cos \Psi_A \end{cases} \quad (5)$$

### 3.2 作业路径规划

自动驾驶高地隙施药机在自动驾驶模式下, 能够按照路径规划完成直线自动行驶、地头自动调头、自动上线等基本动作。在水平路面上的最小转弯半径  $R$  是 3.5 m, 喷幅  $W$  是 12 m, 按照矩形地头转弯方式进行路径规划, 如图 10 所示。



注:  $W$  为作业喷幅, m;  $\alpha$  为 AE 与 AA' 的夹角, ( $^\circ$ );  $\beta$  为  $O_1 F$  与  $O_1 A$  的夹角, ( $^\circ$ );  $R$  为最小转弯半径, m。  
Note:  $W$  is working width, m;  $\alpha$ -the angle between AE and AA', ( $^\circ$ );  $\beta$  is the angle between  $O_1 F$  and  $O_1 A$ , ( $^\circ$ );  $R$  is the minimum turning radius, m.

图 10 地头路径规划

Fig.10 Path planning at headland

当机器到达点 A 后开始执行地头调头过程, 以最小转弯半径转弯至点 B 后沿直线行驶至点 C, 然后以最小转弯半径到达点 D, 接着沿下一作业路径继续直线作业。在自动驾驶过程中机器一直处于行驶状态, 因导航误差和位置测量采样间隔的存在, 机器不可能经过点 A。因此, 需要综合考虑以上因素判断机器是否到达地头。在采样频率足够大、导航精度较高的情况下, 机器以较小的横向偏差经过点 A, 按公式 (6) 计算当前位置测量点 E 与点 A 的距离  $d$ 。

$$d = \|\eta - \eta_A\| \quad (6)$$

式中  $\eta$  为机器当前位置 E 的平面坐标;  $\eta_A$  为点 A 的平面位置坐标。当距离  $d$  小于设定值时, 即判断为到达地头。在导航精度较差的情况下, 因横向偏差较大, 距离  $d$  不会小于设定值, 采用如下方法计算夹角  $\alpha$ :

$$\alpha = \arccos\left(\frac{\overline{A'A} \cdot \overline{AE}}{\|\overline{A'A}\| \cdot \|\overline{AE}\|}\right) \quad (7)$$

若  $\alpha > 90^\circ$ , 即判断机器到达地头。

在实际作业过程, 因作业地块土质差异和机器自重变化, 其最小转弯半径有所不同。为保证地头调头时路径跟踪的准确性、调头后上线的快速精准, 在作业过程中实时测量最小转弯半径  $R$ 。

$$R = \frac{\|\overline{AF}\|}{2\sin(\beta/2)} \quad (8)$$

式中  $\|\overline{AF}\|$  为点 A 到点 F 的距离, 其值由 RTK-GNSS 测量所得。

在机器到达点 B 后, 根据半径  $R$  的大小由公式 (9) 和 (10) 分别计算点 B 和点 C 的平面坐标  $(E_B, N_B)$  和  $(E_C, N_C)$ , 以生成导航路径并使机器沿路径 BC 自动行驶。

$$\begin{bmatrix} E_B \\ N_B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_A + \|\overline{AB}\| \cdot \sin \Psi_{AB} \\ N_A + \|\overline{AB}\| \cdot \cos \Psi_{AB} \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$\begin{bmatrix} E_C \\ N_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_A + \|\overline{AC}\| \cdot \sin \Psi_{AC} \\ N_A + \|\overline{AC}\| \cdot \cos \Psi_{AC} \end{bmatrix} \quad (10)$$

其中, 矢量  $\|\overline{AB}\|$  和  $\|\overline{AC}\|$  的大小由公式 (11) 计算。

$$\begin{cases} \|\overline{AB}\| = \sqrt{2}R \\ \|\overline{AC}\| = \sqrt{R^2 + (W - R)^2} \end{cases} \quad (11)$$

矢量的方向角  $\Psi_{AB}$  和  $\Psi_{AC}$  由公式 (12) 计算。

$$\begin{cases} \Psi_{AB} = \Psi_V + \frac{\pi}{4} \\ \Psi_{AC} = \Psi_V + \arctan \frac{W - R}{R} + \frac{\pi}{4} \end{cases} \quad (12)$$

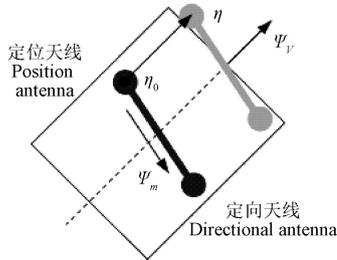
### 3.3 关键参数自动标定

因机体结构尺寸不同、安装过程存在一定的随机性, 导航传感器在自动驾驶高地隙施药机上的固定位置有所差异, 需要事先对与导航控制相关的多个关键参数进行标定, 主要包括航向、姿态、转向角度极限位置、直线

行驶前轮角度等。其中，航向的准确测量受定位天线和定向天线安装位置的影响，且需要在机器行驶过程中进行标定。

如图 11 所示，航向自动标定过程中，机器从  $\eta_0$  开始以固定的转向角前进，同时记录 RTK-GNSS 测量的位置序列和航向序列，计算行驶距离  $d_0$ ：

$$d_0 = \|\eta - \eta_0\| \quad (13)$$



注： $\eta_0$  为机器初始位置； $\eta$  为机器当前位置； $\Psi_m$  为 GNSS 测量航向角，(°)； $\Psi_v$  为实际航向角，(°)。  
 Note:  $\eta_0$  is the initialization position;  $\eta$  is the current position;  $\Psi_m$  is the GNSS measurement heading, (°);  $\Psi_v$  is moving direction heading, (°).

图 11 航向标定  
 Fig.11 Heading calibration

当  $d_0$  大于行驶距离设定值时，航向角变化值  $\Delta\Psi$  为：

$$\Delta\Psi = \|\Psi - \Psi_0\| \quad (14)$$

式中  $\Psi$  和  $\Psi_0$  分别为机器在  $\eta$  和  $\eta_0$  时的航向角，(°)。若  $\Delta\Psi$  小于航向角变化设定值  $1.5^\circ$ ，则认为机器直线行驶，此时机器实际航向角  $\Psi_v$  由公式 (15) 计算。

$$\Psi_v = \text{atan} \frac{E - E_0}{N - N_0} \quad (15)$$

其中  $(E_0, N_0)$  和  $(E, N)$  分别为位置  $\eta_0$  和  $\eta$  的 UTM 平面坐标。在位置  $\eta$  时的航向测量值为  $\Psi_m$ ，测量航向偏差为

$$\varepsilon_H = \Psi_v - \Psi_m \quad (16)$$

则在标定后的航向角为

$$\Psi_a = \Psi_m + \varepsilon_H \quad (17)$$

同时，记录位置  $\eta$  处的角度传感器的测量值  $\varphi_0$ ，即为机器直线行驶时的前轮角度。在自动转向过程中，转向控制器以  $\varphi_0$  值为直线行驶基准，根据转向指令计算前轮的目标角度。

#### 4 田间试验

为了测试人工遥控和自动驾驶 2 种操作模式下的系统稳定性和路径跟踪精度，于 2020 年 9 月在山东省淄博市山东理工大学生态无人农场进行田间试验。

##### 4.1 试验条件

试验地块的前茬作物是青贮玉米，行距 60 cm，青贮收获后的留茬高度 20~25 cm，如图 12 所示。

试验区域为 60 m×30 m，在人工遥控和自动驾驶 2 种模式下的直线行驶和地头转弯分别重复 3 次，用车体上安装的 VectorNav VN-100 型 IMU 测得田间行驶时的横滚角范围是  $-3.5^\circ \sim +3.5^\circ$ 。



图 12 试验区域与试验条件  
 Fig.12 Test field and conditions

##### 4.2 试验方法

自动驾驶高地隙施药机的作业幅宽是 12 m，作业路径为直线，采用矩形地头转弯方式。人工遥控和自动驾驶时的测试速度均为 3.6 km/h。

如图 13 所示，用 RTK-GNSS 测量作业区域中  $A_0$ 、 $B_0$  两点的坐标 (588 536.219, 4 073 823.937)、(588 587.175, 4 073 817.858)，用拉直的软绳标记出基准行  $A_0B_0$  及相邻行  $A_1B_1$  为人工遥控操作提供参考。为避免标记路线与实际行驶路径重合不便于人工操作，设置 50 cm 的左侧偏移量使目标路径与规划路径横向偏移 50 cm。自动驾驶高地隙施药机从点  $A_0$  开始启动作业，行驶路线为  $A_0 \rightarrow B_0$ 、 $B_1 \rightarrow A_1$ ，到达边界时进行地头转弯后进入邻接行继续作业。在人工遥控模式下，操作人员跟随机器移动的同时使用遥控器控制机器的动作使其沿软绳标记出的直线作业行前进，用 RTK-GNSS 记录行驶路径并计算横向偏差和航向偏差。在自动驾驶模式下，导航控制器向机器各 ECU 发送指令实现路径自动跟踪等动作，自动完成地头转弯并进入下一直线作业行。

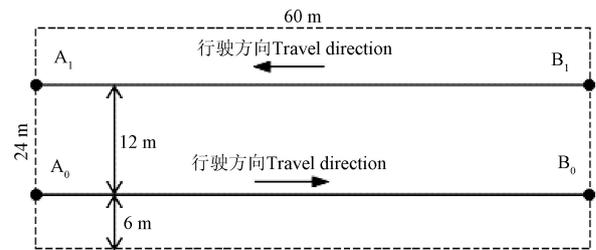


图 13 试验路径规划  
 Fig.13 Test path planning

##### 4.3 结果与分析

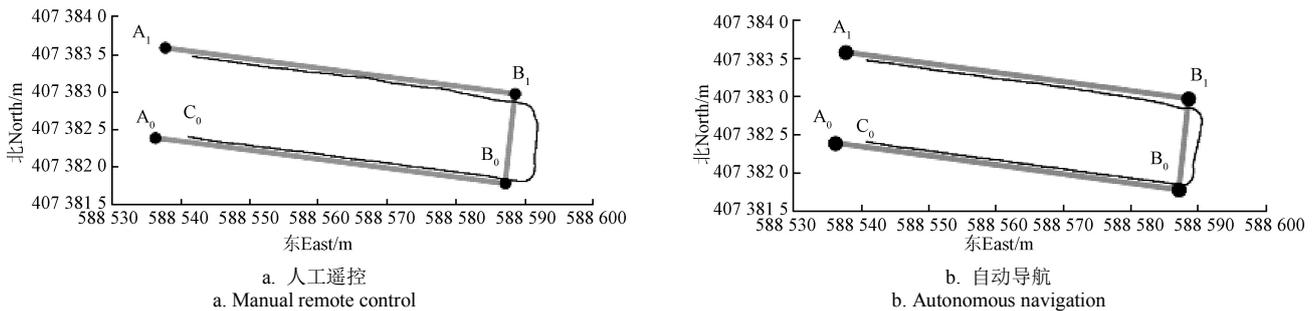
图 14 为人工遥控和自动驾驶 2 种模式下的实际行驶路径与规划路径对比。在人工遥控模式下，由人工操作遥控器使自动驾驶高地隙施药机从点  $C_0$  (588 541.066, 4 073 824.061) 出发沿目标路径  $A_0B_0$  和  $A_1B_1$ 。在自动驾驶模式下，自动驾驶高地隙施药机从点  $C_0$  (588 540.798, 4 073 824.147) 出发，其初始横向偏移和航向偏角分别为 14 cm 和  $4.4^\circ$ ，上线距离是 2.2 m，横向偏差和航向偏角收敛至平均值的距离是 3.3 m。

在地头转弯控制方面，人工遥控模式下的转弯过程存在一定的随机性，在积累一定的作业经验后操作人员

能够保证转弯后的准确快速上线。而自动驾驶模式下的转弯过程较为稳定,能够根据转弯方式自动完成调头并准确快速上线。人工遥控和自动驾驶下的直线路径跟踪误差如表3所示。

由表3中可知,人工遥控模式下直线路径跟踪的横向偏差和航向偏差的最大值分别为20.81 cm和7.86°,RMS误差最大值分别为7.47 cm和2.66°。横向偏差在0附近波动,平均值为0.02和0.90 cm,表明操作人员能够感知到较大偏离并及时操控机器做出响应,同时表明自动转向系统能够实时执行人工遥控操作指令将转向轮偏转至目标角度,转向响应特性和准确度均满足作业要求。自动驾驶模式下直线路径跟踪的横向偏差和航向偏差的

最大值分别为8.84 cm和2.48°,直线路径的RMS误差最大值分别为4.66 cm和1.08°。由人工遥控和自动驾驶两种模式下的数据对比可以看出,自动驾驶模式下路径跟踪的RMS误差值均小于人工遥控模式下的误差值,具备较高的路径跟踪精度。同文献[7]所研制的喷杆喷雾机自动驾驶系统在旱田条件下的试验结果相比,其最大横向偏差和最大RMS误差均较小,能够满足喷雾作业要求。因此,在自动驾驶模式下所研制的高地隙施药机自动驾驶系统具备快速收敛性且保持较高的稳定性和准确度。而人工遥控模式下,需要操作人员兼顾横向偏差和航向偏差的同时自行确定前轮转向角的大小,且航向偏差较小时肉眼难以感知导致误差过大且不稳定。



注:  $A_0B_0$ 、 $B_0B_1$ 、 $A_1B_1$  为规划路径,用灰实线表示,从点  $C_0$  开始的细实线为实际行驶路径。

Note:  $A_0B_0$ ,  $B_0B_1$  and  $A_1B_1$  are the planned paths presented by thick lines in gray, and the thin line in black starts from  $C_0$  indicates the actual trajectory covered by the sprayer.

图14 不同驾驶模式的路径跟踪测试结果

Fig.14 Path tracking test results of different driving modes

表3 人工遥控和自动驾驶模式下的路径跟踪误差

Table 3 Path tracking errors under manual remote control and autonomous navigation

作业模式 Operation mode	路径 Paths	横向偏差 Lateral error/cm			航向偏差 Heading error/(°)		
		平均值 Average	最大值 Maximum	均方根误差 Root mean square errors	平均值 Average	最大值 Maximum	均方根误差 Root mean square errors
人工遥控 Manual remote control	$A_0B_0$	0.02	12.6	5.89	0.66	4.14	2.66
	$A_1B_1$	0.90	20.81	7.47	0.76	7.86	2.44
自动驾驶 Autonomous navigation	$A_0B_0$	2.01	7.21	3.45	0.23	2.43	1.08
	$A_1B_1$	3.16	8.84	4.66	0.13	2.48	1.02

## 5 结论

为提高施药作业机械的自动化和智能化程度,避免操作人员现场农药中毒等潜在风险,本文以高地隙施药机自动驾驶系统为研究对象,设计了操纵机械关键部件和自动驾驶控制方法,并对高地隙施药机自动驾驶系统的田间作业性能进行了试验验证,主要结论如下:

1) 设计了用于油门调节、车速调节、自动转向、发动机启停、喷杆伸缩、液泵启停的自动执行机构、控制ECU和CAN总线通信控制系统,能够接收人工遥控系统和自动驾驶系统的控制指令,实现了作业模式的实时切换;

2) 通过分析定位误差来源,提出了倾斜误差补偿方法,根据天线安装位置和车体横滚角度实时解算机器的实际位置,能够有效应对田间地面起伏不平的作业状态;

3) 通过实时记录转弯过程计算最小转弯半径,进行地头转弯过程中的直线路径规划,提高了地头导航的准确度,同时减小邻接行的上线距离;

4) 田间试验表明,作业速度为3.6 km/h时,人工遥

控和自动驾驶均能使机器沿作业路径行驶;在有参考标记的情况下,人工遥控和自动驾驶的最大横向偏差为20.81和8.84 cm,平均值为0.90和3.16 cm,均方根误差最大为7.47和4.66 cm,表明高地隙施药机自动驾驶系统的转向机构具备较高的稳定性和准确度。

### [参考文献]

- [1] 胡静涛,高雷,白晓平,等.农业机械自动驾驶技术研究进展[J].农业工程学报,2015,31(10):1-10.  
Hu Jingtao, Gao Lei, Bai Xiaoping, et al. Review of research on automatic guidance of agricultural vehicles[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(10): 1-10. (in Chinese with English abstract)
- [2] Li S C, Xu H Z, Ji Y H, et al. Development of a following agricultural machinery automatic navigation system[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2019, 158: 335-344.
- [3] Wang H, Noguchi N. Adaptive turning control for an agricultural robot tractor[J]. International Journal of

- Agricultural and Biological Engineering, 2018, 11(6): 113-119.
- [4] Backman J, Oksanen T, Visala A. Navigation system for agricultural machines: Nonlinear Model Predictive path tracking[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2012, 82: 32-43.
- [5] Leonardo GM, Marcin MF, Auat C. Collision risk reduction of N-trailer agricultural machinery by off-track minimization[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2020(178): Article 105757.
- [6] 黎永键, 赵祚喜, 黄培奎, 等. 基于 CAN 总线的拖拉机导航控制系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2016, 47(S1): 36-42.  
Li Yongjian, Zhao Zuoxi, Huang Peikui, et al. Design and experiment of navigation control system for tractor based on CAN bus[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(S1): 36-42. (in Chinese with English abstract)
- [7] 刘兆朋, 张智刚, 罗锡文, 等. 雷沃 ZP9500 高地隙喷雾机的 GNSS 自动驾驶作业系统设计[J]. 农业工程学报, 2018, 34(1): 15-21.  
Liu Zhaopeng, Zhang Zhigang, Luo Xiwen, et al. Design of automatic navigation operation system for Lovol ZP9500 high clearance boom sprayer based on GNSS[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2018, 34(1): 15-21. (in Chinese with English abstract)
- [8] 靳标, 李建行, 朱德宽, 等. 基于自适应有限冲激响应-卡尔曼滤波算法的 GPS/INS 导航[J]. 农业工程学报, 2019, 35(3): 75-81.  
Jin Biao, Li Jianxing, Zhu Dekuan, et al. GPS/INS navigation based on adaptive finite impulse response-Kalman filter algorithm[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2019, 35(3): 75-81. (in Chinese with English abstract)
- [9] Zhang Z, Noguchi N, Ishii K, et al. Optimization of steering control parameters based on a combine harvester's kinematic model[J]. Engineering in Agriculture, Environment and Food, 2014, 7(2): 91-96.
- [10] Yin X, Du J, Noguchi N, et al. Development of autonomous navigation system for rice transplanter[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2018, 11(6): 89-94.
- [11] 王辉, 王桂民, 罗锡文, 等. 基于预瞄追踪模型的农机导航路径跟踪控制方法[J]. 农业工程学报, 2019, 35(4): 11-19.  
Wang Hui, Wang Guimin, Luo Xiwen, et al. Path tracking control method of agricultural machine navigation based on aiming pursuit model[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2019, 35(4): 11-19. (in Chinese with English abstract)
- [12] 丁幼春, 何志博, 夏中州, 等. 小型履带式油菜播种机导航免疫 PID 控制器设计[J]. 农业工程学报, 2019, 35(7): 12-20.  
Ding Youchun, He Zhibo, Xia Zhongzhou, et al. Design of navigation immune controller of small crawler-type rape seeder[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2019, 35(7): 12-20. (in Chinese with English abstract)
- [13] 魏爽, 李世超, 张漫, 等. 基于 GNSS 的农机自动导航路径搜索及转向控制[J]. 农业工程学报, 2017, 33(增刊 1): 70-77.  
Wei Shuang, Li Shichao, Zhang Man, et al. Automatic navigation path search and turning control of agricultural machinery based on GNSS[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2017, 33(Supp.1): 70-77. (in Chinese with English abstract)
- [14] 黄培奎, 赵祚喜, 靳俊栋, 等. 基于 AutoTrac 的导航控制参数整定方法试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31(增刊 2): 100-106.  
Huang Peikui, Zhao Zuoxi, Jin Jundong, et al. Navigation control parameter tuning method based on AutoTrac[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(Supp.2): 100-106. (in Chinese with English abstract)
- [15] Yin X, Wang Y X, Chen Y L, et al. Development of autonomous navigation controller for agricultural vehicles[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2020, 13(4): 70-76.
- [16] 杨洋, 张刚, 查家翼, 等. 基于直流电机与全液压转向器直联的自动转向系统研究[J]. 农业机械学报, 2020, 51(8): 44-54, 61.  
Yang Yang, Zhang Gang, Zha Jiayi, et al. Design of automatic steering system based on direct connection of DC motor and full hydraulic steering gear[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(8): 44-54, 61. (in Chinese with English abstract)
- [17] Yin X, Noguchi N. Development and evaluation of a general-purpose electric off-road robot based on agricultural navigation[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2014, 7(5): 14-21.
- [18] 任文涛, 迟德霞, 刘金波, 等. 遥控插秧机自动转向系统设计及试验[J]. 农业机械学报, 2012, 43(1): 175-179.  
Ren Wentao, Chi Dexia, Liu Jinbo, et al. Design and test on remote rice transplanter automatic steering system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(1): 175-179. (in Chinese with English abstract)
- [19] 蒋焕煜, 张利君, 刘光远, 等. 基于 PWM 变量喷雾的单喷头动态雾量分布均匀性实验[J]. 农业机械学报, 2017, 48(4): 41-46.  
Jiang Huanyu, Zhang Lijun, Liu Guangyuan, et al. Experiment on dynamic spray deposition uniformity for PWM variable spray of single nozzle[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(4): 41-46. (in Chinese with English abstract)
- [20] Mariano G, Luis E, Manuel P, et al. Autonomous systems for precise spraying-Evaluation of a robotised patch sprayer[J]. Biosystems Engineering, 2016, 146: 165-182.
- [21] Nuyttens D, Zwervaegher I, Dekeyser D. Spray drift assessment of different application techniques using a drift test bench and comparison with other assessment methods[J].

- Biosystems Engineering, 2017, 154: 14-24.
- [22] 薛金林, 卫瑶瑶, 闫嘉, 等. 基于无线网络的拖拉机遥控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 with English abstract)
- [23] 何杰, 朱金光, 罗锡文, 等. 电动方向盘插秧机转向控制系统设计[J]. 农业工程学报, 2019, 35(6): 10-17.
- He Jie, Zhu Jinguang, Luo Xiwen, et al. Design of steering control system for rice transplanter equipped with steering wheel-like motor[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2019, 35(6): 10-17. (in Chinese with English abstract)
- [24] He J, Luo X W, Zhang Z G, et al. Positioning correction method for rice transplanters based on the attitude of the implement[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2020, 176: 105598.

## Development and experiments of the autonomous driving system for high-clearance spraying machines

Yin Xiang<sup>1</sup>, An Jiahao<sup>1</sup>, Wang Yanxin<sup>1</sup>, Wang Yingkuan<sup>1,2</sup>, Jin Chengqian<sup>1,3\*</sup>

(1. School of Agricultural Engineering and Food Science, Shandong University of Technology, Zibo 255000, China;

2. Academy of Agricultural Planning and Engineering, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100125, China;

3. Nanjing Institute of Agricultural Mechanization, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Nanjing 210000, China)

**Abstract:** This study aims to improve the automation and intelligence of high-clearance sprayers, while avoiding pesticide poisoning to operators. An unmanned high-clearance sprayer was therefore developed and then manufactured using state-of-the-art autonomous navigation, mechanical, electrical, and hydraulic technologies. A conventional high-clearance booming sprayer was selected to serve as the platform. The electrical system of the sprayer was composed of five sub-systems, including the driving control, navigation, remote control, spraying, and ground station. Electric devices were designed to realize automatic control of engine start/stop, four-wheel steering, throttle aperture, moving speed, spraying pump, and booming beams. A micro-controller PIC18F258 with CAN and serial ports was utilized to process data, and then send signals to the relays and motor drivers that rotated DC motors as executors. An electric steering was also developed, including the brushless motor, potentiometer, motor driver, and steering controller. The brushless motor was used to provide the steering torque, where the output shaft of the motor was connected directly to the input shaft of the hydraulic steering unit. A CAN-bus communication network was established to allow for the real-time switch between two modes, such as remote control and autonomous navigation. A dual-antenna RTK-GNSS receiver and an Inertial Measurement Unit (IMU) were used as navigation sensors to collect the positioning and attitude data. An attitude-based correction was proposed to compensate positioning measurements corrupted by the chassis inclination, thereby accurately acquiring the actual position of the sprayer. The RTK-GNSS positioning data was also utilized to calculate the actual minimum turning radius during the headland turn, particularly considering kinematic characteristics in fields with various soil conditions. A straight path also needed to be planned according to the turning radius, in order to ensure the explicit turning trajectory and accurate path tracking after finishing the headland turn. The reason was that the distance between adjacent working paths was considerably larger than that of the turning radius, where the working width was 12 m. An automatic calibration was introduced to determine the range of steering angle, steering angle in straight and heading measurement shift for the high-accuracy driving. The correction was also necessary to consider the installation of GNSS antennas and the potentiometer on different fixing locations with respect to the machine body. As such, a comprehensive validation was gained on the automatic operating mechanisms and CAN-bus network communication. A series of experiments were also conducted to evaluate the performance of newly-developed unmanned high-clearance sprayers under remote control and autonomous navigation, in terms of automatic operation in path tracking. The results showed that the maximum values were 20.81 and 8.84 cm under the remote control and autonomous navigation, with the average errors of 0.90 and 3.16 cm on the left, and the maximal root mean square errors of 7.47 and 2.66 cm, respectively, in terms of the lateral error, indicating that the executing mechanisms responded to operation commands in a stable and rapid way. The driving performance under autonomous navigation was much better than under remote control in agricultural spraying.

**Keywords:** agricultural machinery; autonomous navigation; high-clearance spraying machine; inclination correction; automatic control