

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.09.003

高地隙植保机辅助驾驶系统设计与试验

陈黎卿^{1,2} 许鸣^{1,2} 柏仁贵^{1,2} 杨洋^{1,2} 张铁³ 杨学军³(1. 安徽农业大学工学院, 合肥 230036; 2. 安徽省智能农机装备工程实验室, 合肥 230036;
3. 中国农业机械化科学研究院, 北京 100083)

摘要: 针对高地隙植保机作业时驾驶员视野较差导致压苗伤苗的问题, 提出了一种辅助驾驶方法。以某高地隙植保机为研究对象, 设计了一套人机辅助驾驶系统。首先详细阐述了辅助驾驶系统的液压系统设计方案, 在此基础上进行了转向系统结构改进; 其次基于预瞄算法和二自由度车辆转向模型, 进行转向系统前轮转角控制研究; 最后基于 LabVIEW 软件创建了辅助驾驶控制系统。在 0.5 m/s 的速度条件下, 分别在水泥路面和玉米田间环境下进行了试验, 试验结果表明, 水泥路面条件下, 辅助驾驶系统直线路径跟踪偏差均值为 5.2 cm、标准差为 3.4 cm; 玉米田间行驶条件下, 辅助驾驶系统的跟踪偏差均值为 6.8 cm、标准差为 4.8 cm; 设计的辅助驾驶系统在宽行种植作物中具有良好的实用性。

关键词: 植保机; 高地隙; 辅助驾驶; 预瞄算法; 电液转向阀组

中图分类号: S224.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2019)09-0025-08

Design and Test of Auxiliary Driving System for High-gap Plant Protection Machine

CHEN Liqing^{1,2} XU Ming^{1,2} BAI Rengui^{1,2} YANG Yang^{1,2} ZHANG Tie³ YANG Xuejun³

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

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

3. Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences, Beijing 100083, China)

Abstract: Aiming at the problem of injured seedlings caused by poor vision of drivers in the operation of plant protection machinery in high ground clearance, a method of assistant driving was proposed. A high-gap plant protection machine was taken as the research object, and a man-machine aided driving system was designed. Firstly, the hydraulic system design of the auxiliary driving system was elaborated in detail, on this basis, the structure of the steering system was improved. Secondly, based on preview algorithm and two-degree-of-freedom vehicle steering model, the front wheel angle control of steering system was studied. Finally, the control system software was created based on LabVIEW. The software control system included speed control system, navigation and positioning system and steering control system. Under the condition of 0.5 m/s speed, the experiments were carried out on cement pavement and maize dryland respectively. The test results showed that the average linear path tracking error of auxiliary driving system was 5.2 cm and the standard deviation was 3.4 cm under cement pavement condition, and the average tracking error of auxiliary driving system was 6.8 cm and the standard deviation was 4.8 cm under the driving condition of corn crop between lines. Based on the above test data, it was concluded that the plant protection machinery auxiliary driving system met the field driving requirements. The auxiliary driving system designed had good practicability in wide-line crop cultivation.

Key words: plant protection machine; highland clearance; auxiliary driving; preview algorithm; electro-hydraulic steering valve set

收稿日期: 2019-02-11 修回日期: 2019-04-30

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0700902)、安徽省自然科学基金项目(1708085ME135)和安徽省自然科学基金研究重大项目(KJ2018ZD016)

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

0 引言

高地隙植保机作为田间管理机械的一种,其作业环境较为复杂,驾驶员操纵时受到视野和植株遮挡等影响,易出现伤苗现象。近年来,国内外众多学者针对拖拉机、植保机械的自动驾驶^[1-5]、导航控制系统^[6-10]、对靶喷雾^[11-15]以及雾滴漂移特性^[16-18]等开展研究,取得了一定的研究成果,为高地隙植保机的自动驾驶发展打下了基础。从现有研究成果分析得知,目前高地隙植保机的自动驾驶主要集中于导航或图像处理等技术在机械上的应用,针对驾驶系统的设计主要是使用电机控制的转向系统,但在田间转向等特殊工况下依然存在转向延迟的问题,尚需进一步研究。

本文以黄淮海地区玉米植保机为研究对象,通过在现有高地隙植保机基础上对其液压系统进行设计,开发一套基于液压控制的辅助驾驶系统,使其作业时具有人工驾驶和辅助驾驶两种模式。

1 传统高地隙植保机结构与原理

1.1 整机结构

高地隙植保机结构简图如图1所示,主要由四轮驱动系统、前后液压转向系统、柴油机、油泵、液压无级变速系统、分动器等组成。主要结构参数如表1所示。

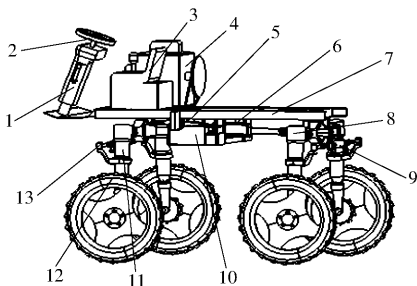


图1 高地隙植保机结构简图

Fig.1 Structure diagram of high-gap plant protection machine

1. 转向柱 2. 方向盘 3. 座椅 4. 柴油机 5. 油泵 6. 分动器
7. 机架 8. 后桥 9. 后轮转向油缸 10. 液压油箱 11. 前桥
12. 人字形轮胎 13. 前轮转向油缸

1.2 工作原理

该高地隙植保机为四轮驱动,动力传递顺序依次是柴油机、油泵、液压无级变速器(HST)、分动器、驱动桥。转向系统采用液压转向控制,液压转向的动力由柴油机带动油泵提供;油泵上装有液压无级变速系统,通过驱动电机带动拉杆改变HST中柱塞泵的变量盘倾斜角度控制其排量和方向,改变柱塞马达的转速与方向,从而控制分动器的转速达到控制车速的目的;其中动力、转向系统示意图如图2所示。

表1 高地隙植保机主要结构参数

Tab.1 Main structure parameters of high-gap plant protection machine

参数	数值/型式
整机型式	轮式
整机质量/kg	850
长×宽×高/(mm×mm×mm)	3 000×1 640×2 200
行驶速度/(km·h ⁻¹)	0.1~10
发动机最大功率(对应转速)/kW(r·min ⁻¹)	15(3 600)
轴距/mm	1 750
轮距/mm	1 500
最小离地间隙/mm	1 100
驱动方式	四轮驱动
发动机最大扭矩(对应转速)/(N·m)(r·min ⁻¹)	84(1 820)

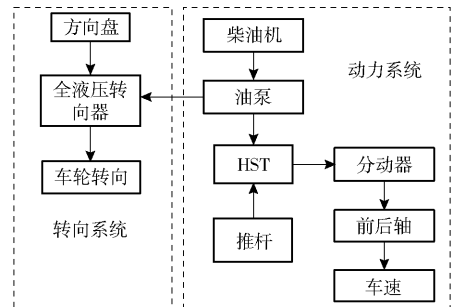


图2 高地隙植保机动力和转向系统示意图

Fig.2 Power and steering system schematic of high-gap plant protection machine

2 辅助驾驶系统设计

2.1 设计方案

高地隙植保机离地间隙较高,驾驶员难以观察到行间行走时的苗带情况,易出现压苗、伤苗等现象,因此设计的辅助驾驶系统应能够实现行间自主行走。为了实现辅助驾驶功能,在原有高地隙植保机液压助力转向系统基础上并联一套辅助转向液压系统,原理如图3所示。图中P为系统压力油输入口、T为系统回油口、P1为全液压转向器压力油输入口、T1为全液压转向器回油口、P2为优先阀的优先口、LS为负载压力反馈口。通过电磁阀开关实现人工驾驶和辅助驾驶自动切换功能,该电动助力转向阀组由博世力士乐生产,型号为TG171200,主要由液压锁、比例换向阀、卸载阀、逻辑阀、电磁阀、溢流阀、优先阀等部件组成。其中液压锁的作用是确保植保机的原转向系统工作时不受并联的电动助力转向阀组影响;比例换向阀是通过输入电信号而连续按比例对液压油的流量、方向进行控制;卸载阀的作用是控制油泵的卸荷和加载;电磁阀的作用是通过通断电改变比例阀油路的通断;溢流阀的作用是保护阀组油路;逻辑阀的作用是对比例换向阀的供油节流口进行压力补偿,保证进出口压差基本保持

不变,从而使比例换向阀的输出流量只与阀芯开口大小有关,而不受负载压力变化的影响;优先阀是保证油路优先从P2口进入负荷传感型全液压转向器,当全液压转向器处于中位时油路不通,在优先阀的油压达到某一值时推动弹簧实现换向。系统在原有的液压助力转向基础上,并联了该阀组模块,压力油从P口进入,经过优先阀,并从P2口流出进入全液压转向器的P1口,此时处于人工驾驶状态;当方向盘处于中位并给电磁阀通电时,则使辅助驾驶油路连通,液压油在优先阀作用下进入比例换向阀,此时处于辅助驾驶状态,当人工转动方向盘时,全液压转向器阀芯离开中位,优先阀油压降低,优先阀在弹簧的作用下实现换向,此时液压油从P2口流向全液压转向器,人工驾驶直接启动,该功能可保证辅助驾驶系统的安全性。两种驾驶模式通过按键操作,按键安装在操作面板上,驾驶员可以根据行驶时的行间状态进行模式切换。辅助驾驶状态时,液压油在优先阀的作用下经比例换向阀到达转向油缸,工作时利用NI板控制比例阀的电信号从而控制阀芯的移动,达到对液压油流量、方向的控制,使油缸产生位移,完成辅助驾驶工况下的自动转向工作。

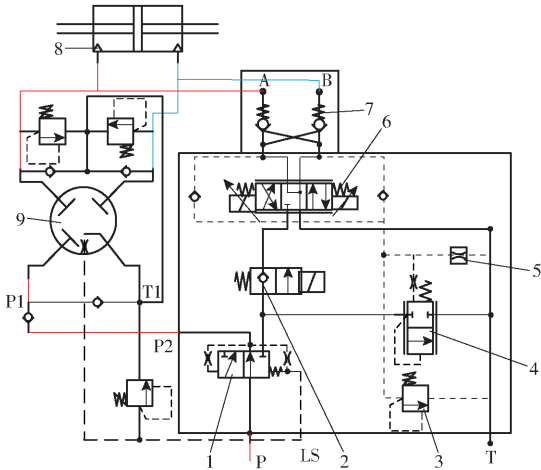


图3 辅助转向液压系统原理图

Fig.3 Principle diagram of auxiliary steering hydraulic system

1. 优先阀 2. 电磁阀 3. 溢流阀 4. 逻辑阀 5. 卸载阀 6. 比例换向阀 7. 双向液控单向阀 8. 转向油缸 9. 负荷传感型全液压转向器

2.2 转向系统结构改进

为了获得行走中轮胎转向角度和转向液压缸的映射关系,建立如图4所示转向系统几何模型,其中A为油缸固定端,O为转向柱的中心点,B为转向节臂的移动端,转向节臂的转角即为转向轮的转角。当车辆从直线方向向右转向时活塞杆向右移动,A、B之间的距离X增大。

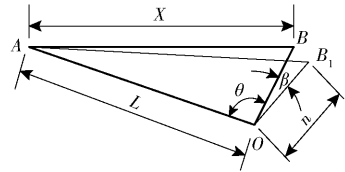


图4 转向轮偏转角与油缸位移关系图

Fig.4 Relationship diagram between steering wheel angle and cylinder displacement

图4中 β 为右侧车轮转角, ($^\circ$); L 为油缸固定端到转向柱中心点的距离, mm; n 为转向节臂长度, mm。设 X_p 为油缸位移, mm, 车轮转角 β 和转向油缸位移 X_p 的映射关系为

$$\beta = \arccos \frac{L^2 + n^2 - (X + X_p)^2}{2nL} - \arccos \frac{L^2 + n^2 - X^2}{2nL} \quad (1)$$

根据实际测量, 确定 $L = 440$ mm, $n = 160$ mm, $X = 470$ mm, 得到油缸位移 X_p 与右轮转角 β 之间的映射关系如图5所示。

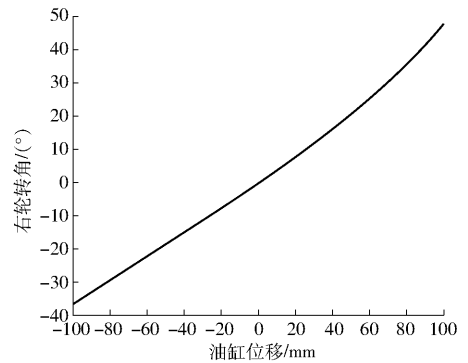


图5 车轮转角与油缸位移之间的关系曲线

Fig.5 Relationship between wheel angel and cylinder displacement

由图5可知, 油缸位移与转角近似呈线性关系, 数据拟合确定两者的比例系数 K 为6.758 rad/m, 通过采集油缸位移和轮胎转角数据, 验证比例系数 K 的准确性, 试验数据拟合得到比例系数 K 为6.743 rad/m, 相对误差0.22%。根据该特点以及转向机构处于往复摆动的运动方式, 采用铰接式直线位移传感器, 型号为KPC-175mm, 其基本参数为: 有效行程175 mm, 内部电阻5 k Ω , 滑刷正常工作电流不超过10 μ A, 线性精度 $\pm 0.1\%$, 输出为0~100%给定输入工作电压。如图6所示, 位移传感器与油缸采用铰接式平行连接, 转向油缸的位移等量转换到拉杆式位移传感器上, 通过采集电压信号实现转向油缸的位移测量, 并由比例系数 K 得到前轮转角。

2.3 控制系统设计

辅助驾驶系统控制结构如图7所示, 通过电子

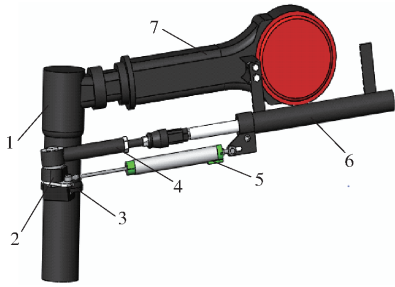


图6 传感器安装位置结构图

Fig. 6 Structure diagram of sensor installation position

1. 转向柱 2. 转向节臂 3. 连接块 4. 转向油缸推杆 5. 位移传感器 6. 转向油缸 7. 驱动桥

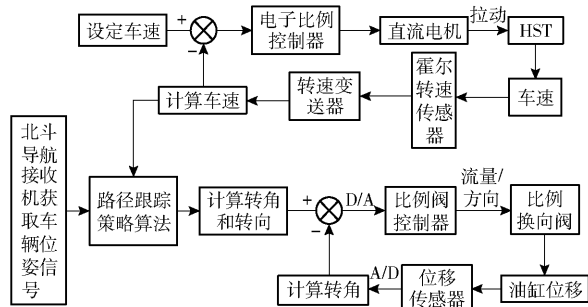


图7 辅助驾驶控制系统原理图

Fig. 7 Principle diagram of auxiliary driving control system

比例控制器控制直流电机推动拉杆控制 HST 达到控制车速的目的,在高低隙底盘车轮位置安装霍尔转速传感器,获取植保机行走速度,作为路径跟踪控制模块的反馈输入。北斗导航接收机获取车辆姿态信号,并由路径跟踪控制算法得到转角信号,比例换向阀控制车轮转向。

根据电动助力转向阀组的特性将比例集成控制阀块简化为通过控制比例换向阀阀芯的左右移动实现液压油方向和流量的精确控制。由文献[19]得知电液比例阀控缸的特性,从而获得液压缸活塞位移对阀芯位移的传递函数为

$$\frac{X_p}{X_v} = \frac{\frac{K_q}{A_p}}{s \left(\frac{s^2}{w_h^2} + \frac{2\zeta_h}{w_h} s + 1 \right)} \quad (2)$$

式中 X_v ——比例换向阀阀芯位移, m

K_q ——滑阀流量增益

A_p ——主滑阀阀芯的有效作用面积, m^2

w_h ——主滑阀液压放大级的固有频率

ζ_h ——主滑阀液压放大级的阻尼比

阀控缸系统为非线性传递,本文采用 PID 控制算法实现转向系统闭环控制。

预瞄算法被广泛地应用在机器人的路径跟踪上^[20]。该算法以车的后轴为切点,纵向车身为切线,通过控制前轮转角 δ ,使车辆可以沿着一条经过

预瞄点的圆弧行驶。高地隙植保机在行间作业时以低速直线行驶为主,将高地隙植保机简化为两轮转向模型,如图 8 所示。

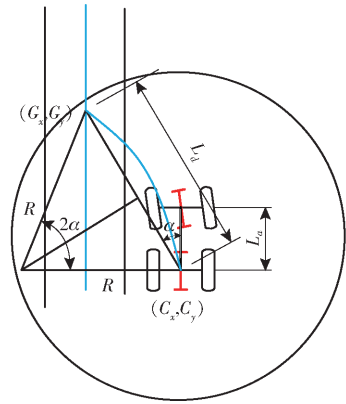


图8 追踪模型直线跟踪原理图

Fig. 8 Line tracking schematic of pursuit model

图 8 中, (G_x, G_y) 为规划路径上的预瞄点; (C_x, C_y) 为车辆当前位置; L_d 为预瞄距离,即后轮与预瞄点的距离; L_a 为车身轴距; α 为车与预瞄点的夹角。根据正弦定理可得到

$$\frac{L_d}{\sin(2\alpha)} = \frac{R}{\sin\left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right)} \quad (3)$$

$$\frac{L_d}{2\sin\alpha\cos\alpha} = \frac{R}{\cos\alpha} \quad (4)$$

$$\text{化简得到} \quad R = \frac{L_d}{2\sin\alpha} \quad (5)$$

式中 R ——圆弧曲率半径

根据阿克曼转向公式,前轮转角 δ 为

$$\delta = \arctan \frac{L_a}{R} \quad (6)$$

由式(5)、(6)可得

$$\delta = \arctan \frac{2L_a \sin\alpha}{L_d} \quad (7)$$

根据文献[21],可得到预瞄距离计算公式

$$L_d = Av^2 + Bv + C \quad (8)$$

式中 v ——车辆行驶速度

A 、 B 、 C ——常数

式(8)中等式右边第 1 项表示车辆制动距离, $A = 1/(2a_{\max})$,其中 a_{\max} 为车辆最大制动加速度,经试验测量,该植保机最大制动加速度为 2 m/s^2 ;第 2 项表示车辆遇到异常情况进行紧急制动时的车辆反应距离,令 B 为 0.2;第 3 项表示车辆的最小转弯半径,经试验测量最小转弯半径为 4.0 m。

在给定车体初始位置和航向角下,根据车辆横向运动模型计算车辆下一刻的车体位置和航向角等信息,模拟北斗导航反馈给车体的姿态信息,建立 Matlab/Simulink 仿真模型如图 9 所示。

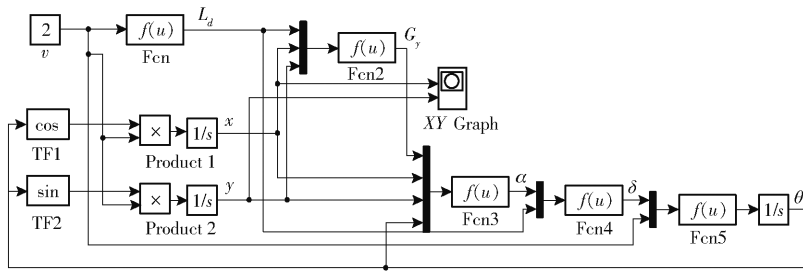


图 9 高地隙植保机仿真模型

Fig. 9 Simulation model of plant protection machine with highland clearance

仿真结果如图 10 所示,黑线为规划路径,红线代表车辆以 2 m/s 的速度行驶时的行驶轨迹;初始位置横坐标为 8 m,纵坐标为零,航向角 θ 设为 0.8π 、初始车轮转角为零。图 11 分别为前轮偏角控制量随时间的变化曲线和车辆位置偏差曲线图,仿真结果显示在横向偏差 3 m 的情况下,时间在 2.9 s 时,横向偏差接近零,之后方向开始回正,7 s 后横向偏差保持为零,满足高地隙植保机玉米田间作业要求。

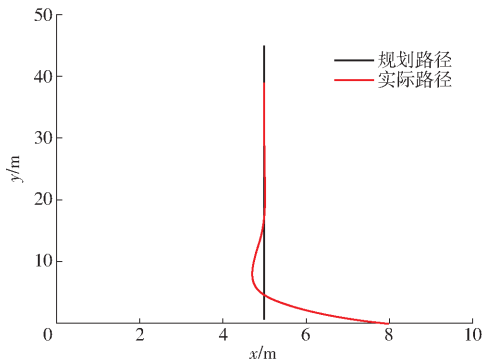


图 10 路径跟踪曲线

Fig. 10 Tracking curve

3 田间试验

3.1 试验测试平台搭建

构建高地隙植保机辅助驾驶系统试验平台,主要包括车身位姿信息采集、上位机控制系统、下位机控制系统,如图 12 所示。

系统的主要组成为:双天线 GNSS 组合定位系

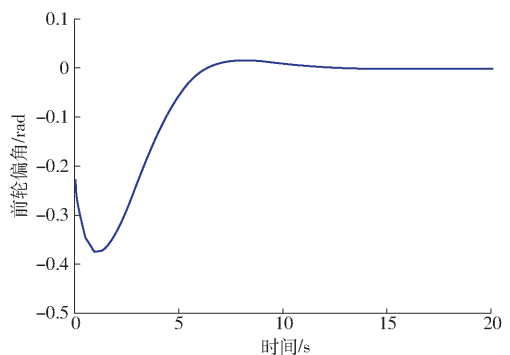
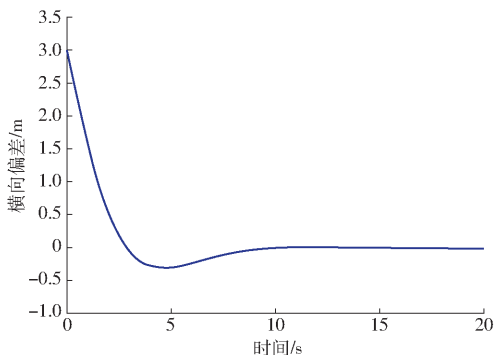


图 11 仿真效果

Fig. 11 Simulation effect diagrams

统、电动助力转向阀组、路径跟踪控制模块、铰接式直线位移传感器、NI PXI-1036 型机箱、PXI6211 型板卡、霍尔开关、转速变送器、比例阀控制器、电子比例控制器;GNSS 系统采用的是斗星通 C201-AT-680 型接收机,实时动态差分(RTK)水平精度为 $(10 + 10^{-6}D)$ mm, D 表示移动站与基准站距离, km; 电源输入 DC 10 ~ 32 V;霍尔开关基本参数:输出方式是三线 NPN 常开,检测距离 4 mm,工作电压 DC 12 V,感应方式为磁铁;转速变送器型号 HY194-BS4N,基本参数:输入 0 ~ 60 r/min,输出 DC 0 ~ 5 V,齿数为 5 齿,精度 0.5 级,工作电压 DC 12 V;电子比例控制器型号 BL1-L12,工作电压 DC 12 V,电流小于 25 mA,功率 80 W。首先利用双天线 GNSS 接收机测得当前车身的位姿(经度、纬度、航向角等),上位机采集当前位姿信息,并将经纬度坐标经过高斯投影转换到空间直角坐标系中,最后转换到局部坐标。同时在上位机中搭建路径跟踪控制算法,将已规划路径进行离散化,基于预瞄距离搜索预瞄点,利用预瞄算法获得期望的前轮偏角。

3.2 辅助驾驶行走试验

为验证辅助驾驶系统行间行走性能,分别在水泥地和玉米田间两种工况下进行试验,玉米生长处于三叶期阶段,土质较松软,试验时以辅助驾驶模式进行路径跟踪。考虑到植保机在田间工作时的速度范围,试验车速设定为 0.5 m/s,水泥路面试验在安徽农业大学机电工程园进行、玉米田间试验在安徽

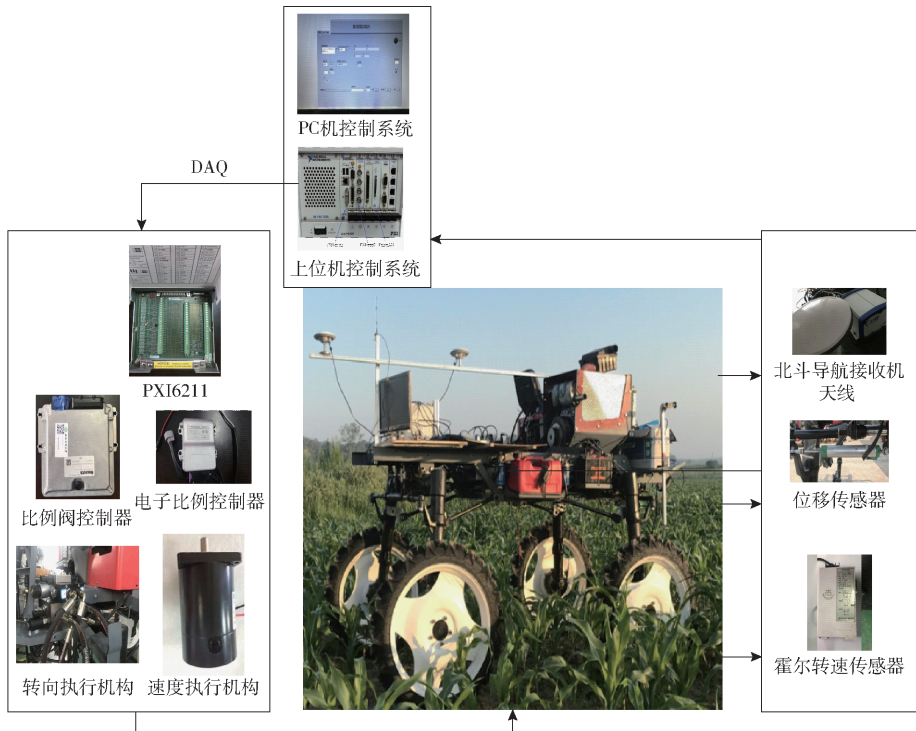


图12 试验系统结构图

Fig. 12 Test system structure diagram

省肥东县某家庭农场进行。水泥路面导航作业轨迹、横向偏差、前轮偏角如图13所示,玉米田间作业轨迹、横向偏差、前轮偏角如图14所示。试验结果表明,在水泥路面上,导航的控制偏差均值为5.2 cm,横向

位置偏差的标准差为3.4 cm。在玉米田间路面上,导航的控制偏差均值为6.8 cm,横向位置偏差的标准差为4.8 cm,不同路面条件下导航控制偏差的标准差相近,表明辅助驾驶系统具有较好的稳定性。

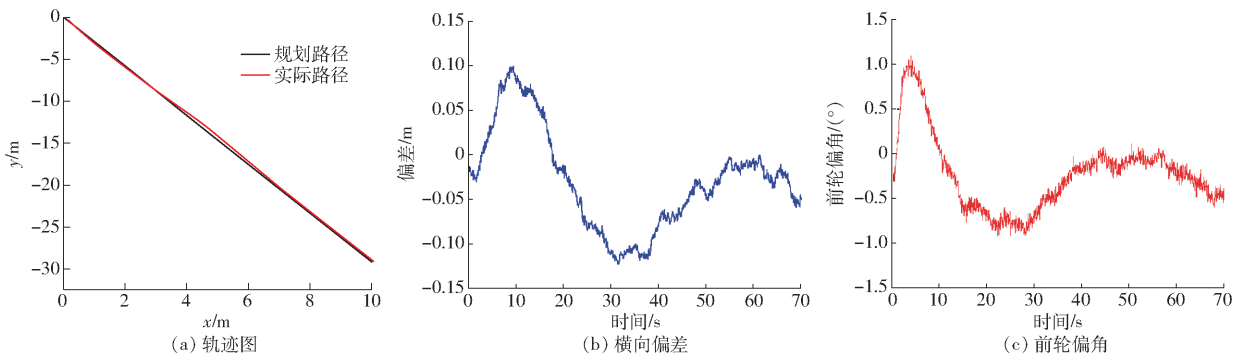


图13 水泥路面辅助驾驶试验结果

Fig. 13 Assisted driving test results with concrete pavement

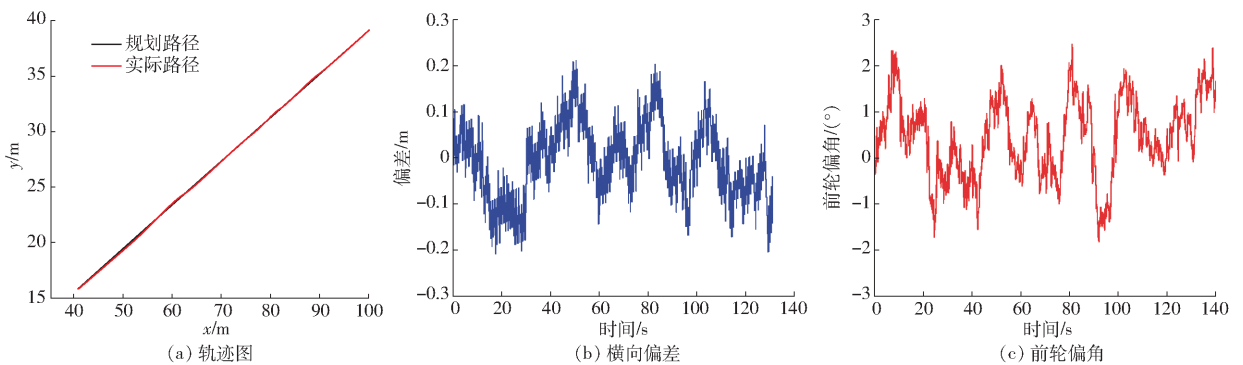


图14 玉米田间辅助驾驶试验结果

Fig. 14 Assisted driving test results with corn field

4 结论

(1) 针对传统高地隙植保机作物行间行走容易压苗的问题,进行了辅助驾驶系统设计,给出了液压系统、转向系统、控制系统等结构的详细设计方案;同时基于预瞄算法进行了高地隙植保机辅助驾驶系统的设计。

(2) 基于 NI 设备和 LabVIEW 软件设计了高地隙植保机辅助驾驶系统田间试验,试验表明:该系统能够满足既定路径下的行驶,在水泥路面和玉米田间两种不同的环境下,横向位置偏差均值为 5.2、6.8 cm,标准差为 3.4、4.8 cm;该辅助驾驶系统具有良好的行驶稳定性和行间作业精度,能够满足作业需求。

参 考 文 献

- [1] 罗锡文,张智刚,赵祚喜,等. 东方红 X-804 拖拉机的 DGPS 自动导航控制系统[J]. 农业工程学报,2009,25(11): 139-145.
LUO Xiwen, ZHANG Zhigang, ZHAO Zuoxi, et al. Design of DGPS navigation control system for Dongfanghong X-804 tractor [J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(11): 139-145. (in Chinese)
- [2] 刘进一,杜岳峰,张硕,等. 基于 GNSS/MIMU/DR 的农业机械组合导航定位方法[J/OL]. 农业机械学报,2016,47(增刊):1-7
LIU Jinyi, DU Yuefeng, ZHANG Shuo, et al. Automatic navigation method for agricultural machinery based on GNSS/MIMU/DR information fusion [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016,47(Supp.): 1-7. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=2016S001&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.S0.001. (in Chinese)
- [3] 郭娜,胡静涛,王鹤. 基于 GPS 导航的插秧机作业控制系统[J/OL]. 农业机械学报,2013,44(1):200-204.
GUO Na, HU Jingtao, WANG He. Intelligent operation control system for rice transplanter based on GPS navigation [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013,44(1):200-204. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20130138&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.01.038. (in Chinese)
- [4] BENTONBEVLY D J, DAVID M. Adaptive steering control of a farm tractor with varying yaw rate properties [J]. Journal of Field Robotics, 2009,26(6-7):519-536.
- [5] 伟利国,张权,颜华,等. XDNZ630 型水稻插秧机 GPS 自动导航系统[J]. 农业机械学报,2011,42(7):186-190.
WEI Ligu, ZHANG Quan, YAN Hua, et al. GPS automatic navigation system design for XDNZ630 rice transplanter [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(7): 186-190. (in Chinese)
- [6] 张美娜,吕晓兰,陶建平,等. 农用车辆自主导航控制系统设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2016,47(7):42-47.
ZHANG Meina, LÜ Xiaolan, TAO Jianping, et al. Design and experimental of automatic guidance control system in agricultural vehicle [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016,47(7): 42-47. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20160707&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.07.007. (in Chinese)
- [7] LENAIN R, THUILOT B, CARIOU C, et al. A new nonlinear control for vehicle in sliding conditions; application to automatic guidance of farm vehicles using RTK GPS [C] // Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2004,5:4381-4386.
- [8] 黎永键,赵祚喜,黄培奎,等. 基于 DGPS 与双闭环控制的拖拉机自动导航系统[J/OL]. 农业机械学报,2017,48(2):11-19.
LI Yongjian, ZHAO Zuoxi, HUANG Peikui, et al. Automatic navigation system of tractor based on DGPS and double closed-loop steering control [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017,48(2): 11-19. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20170202&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.02.002. (in Chinese)
- [9] 李革,王宇,郭刘粉,等. 插秧机导航路径跟踪改进纯追踪算法[J/OL]. 农业机械学报,2018,49(5):21-26.
LI Ge, WANG Yu, GUO Liufen, et al. Improved pure tracking algorithm for transplanter navigation path tracking [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(5): 21-26. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20180502&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.05.002. (in Chinese)
- [10] 刘兆朋,张智刚,罗锡文,等. 雷沃 ZP9500 高地隙喷雾机的 GNSS 自动导航作业系统设计[J]. 农业工程学报,2018,34(1):15-21.
LIU Zhaopeng, ZHANG Zhigang, LUO Xiwen, et al. Design of GNSS automatic navigation operation system for Revo ZP9500 high ground gap sprayer [J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(1): 15-21. (in Chinese)
- [11] 刘雪美,李扬,李明,等. 喷杆喷雾机精确对靶施药系统设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2016,47(3):37-44.
LIU Xuemei, LI Yang, LI Ming, et al. Design and test of precision spraying system for spraying rod sprayer [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016,47(3): 37-44. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20160306&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.03.006. (in Chinese)
- [12] 宋淑然,陈建泽,洪添胜,等. 果园柔性对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)
- [13] 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.
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. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20160704&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.07.004. (in Chinese)
- [14] 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)
- [15] 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)
- [16] 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)
- [17] 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)
- [18] 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 Jiuyu, 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)
- [19] 王春行. 液压控制系统[M]. 北京:机械工业出版社,2008.
- [20] SNIDER J M. Automatic steering methods for autonomous automobile path tracking, CMU[D]. Pittsburgh: Carnegie Mellon University,2009.
- [21] 刘凯. 无人驾驶车辆体系结构与定位导航技术研究[D]. 北京:北京理工大学,2010.
LIU Kai. Study of architecture system and navigation technology of unmanned grand vehicle[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2010. (in Chinese)

~~~~~

(上接第24页)

- [13] 刘兆祥,刘刚,籍颖,等. 基于自适应模糊控制的拖拉机自动导航系统[J]. 农业机械学报,2010,41(11):148-152.  
LIU Zhaoxiang, LIU Gang, JI Ying, et al. Tractor automatic navigation system based on adaptive fuzzy control[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(11):148-152. (in Chinese)
- [14] ANTONELLI G, CHIAVERINI S, FUSCO G. A fuzzy-logic-based approach for mobile robot path tracking[J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2007, 15(2):211-221.
- [15] COEN T, ANTHONIS J, BAERDEMAEKER J D. Cruise control using model predictive control with constraints[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2008, 63(2):227-236.
- [16] KRAUS T, FERREAU H J, KAYACAN E, et al. Moving horizon estimation and nonlinear model predictive control for autonomous agricultural vehicles[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2013, 98: 25-33.
- [17] 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.
- [18] CARIOU C, LENAIN R, BERDUCAT M, et al. Autonomous maneuvers of a farm vehicle with a trailed implement in headland [C]//ICINCO, 2010(2): 109-114.
- [19] KAYACAN E, KAYACAN E, RAMON H, et al. Distributed nonlinear model predictive control of an autonomous tractor-trailer system[J]. Mechatronics, 2014, 24(8):926-933.
- [20] 李逃昌,胡静涛,高雷,等. 一种与行驶速度无关的农机路径跟踪方法[J/OL]. 农业机械学报,2014,45(2):59-65.  
LI Taochang, HU Jingtao, GAO Lei, et al. Agricultural machine path tracking method irrelevant to travel speeds[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(2): 59-65. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20140211&flag=1&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20140211&flag=1&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.02.011. (in Chinese)
- [21] 龚建伟. 无人驾驶车辆模型预测控制[M]. 北京:北京理工大学出版社,2014.
- [22] SAMSON C. Control of chained systems application to path following and time-varying point-stabilization of mobile robots[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1995, 40(1): 64-77.