

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2021.12.043

四轮独立驱动高地隙无人喷雾机轨迹跟踪自适应控制

景亮¹ 张亚飞¹ 沈跃¹ 何思伟¹ 刘慧¹ 崔业民²

(1. 江苏大学电气信息工程学院, 镇江 212013; 2. 南通广益机电有限责任公司, 南通 226631)

摘要: 针对高地隙喷雾机在自主导航作业中因侧滑影响而导致轨迹跟踪精度降低的问题, 提出一种基于四轮独立驱动(4WID)高地隙无人喷雾机的自适应控制方法。首先, 建立4WID高地隙无人喷雾机的运动学模型; 然后基于运动学几何约束和速度约束, 引入两个表征侧滑效应的参数构建改进位姿误差模型; 最后将参数自适应与反步控制方法结合, 设计自适应控制律实时估计并补偿侧滑效应。以典型的U形作业路径为例, 在考虑和不考虑侧滑的情况下分别进行了仿真和试验验证。仿真结果表明: 本文提出的控制算法在喷雾机出现侧滑的情况下可以保证较高的轨迹跟踪精度; 水田试验表明, 当喷雾机在常规作业速度3.6 km/h时, 与不考虑侧滑的轨迹跟踪控制算法相比, 喷雾机轨迹跟踪的横向平均绝对误差减小至0.041 m, 标准差减小至0.059 m; 纵向平均绝对误差减小至0.018 m, 标准差减小至0.015 m; 航向平均绝对误差减小至2.56°, 标准差减小至3.57°。

关键词: 高地隙无人喷雾机; 四轮独立驱动; 轨迹跟踪; 自适应控制

中图分类号: S49 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2021)12-0408-09

OSID:



Adaptive Trajectory Tracking Control of 4WID High Clearance Unmanned Sprayer

JING Liang¹ ZHANG Yafei¹ SHEN Yue¹ HE Siwei¹ LIU Hui¹ CUI Yemin²

(1. School of Electrical and Information Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China

2. Nantong Guangyi Mechanical and Electrical Co., Ltd., Nantong 226631, China)

Abstract: Aiming at the problem that track tracking accuracy of high clearance unmanned sprayer is reduced due to side slip during autonomous navigation, an adaptive control method based on four wheel independent drive (4WID) high clearance unmanned sprayer was proposed. Firstly, the kinematic model of 4WID high gap sprayer was established. Then, based on the kinematic geometric constraints and velocity constraints, two characterization parameters of side slip effect were introduced to construct the improved pose error model. Finally, combining parameter adaptation with backstepping control method, an adaptive control law was designed to estimate and compensate the unknown sideslip effect at the same time. Taking the typical U-shaped path of paddy field operation as an example, the simulation and experimental verification were carried out with and without sideslip respectively. The simulation results showed that the control algorithm can ensure high tracking accuracy when the sprayer was sideslip. The paddy field test showed that when the sprayer was operating at a normal speed of 3.6 km/h, it was compared with the trajectory tracking control algorithm without sideslip. The absolute value of the lateral mean error of the track tracking was reduced to 0.041 m and the standard error was reduced to 0.059 m, the longitudinal mean absolute error was reduced to 0.018 m and the standard error was reduced to 0.015 m, the average absolute error of heading was reduced to 2.56° and the standard error was reduced to 3.57°.

Key words: high clearance unmanned sprayer; four wheel independent drive; trajectory tracking; adaptive control

收稿日期: 2021-08-07 修回日期: 2021-10-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(51975260)、江苏省重点研发计划项目(BE2018372)、江苏省自然科学基金项目(BK20181443)、镇江市重点研发计划项目(NY2018001)和江苏高校优势学科项目(PAPD)

作者简介: 景亮(1966—),男,副教授,主要从事智慧农业、农业物联网和智能农业装备研究,E-mail: JL517@126.com

通信作者: 沈跃(1978—),男,教授,博士生导师,主要从事无人农机智能控制和农业机器人研究,E-mail: shen@ujs.edu.cn

0 引言

农机自主导航技术是农机自动化、智能化的关键技术之一,可显著提高作业质量和生产效率^[1]。目前,农机自主导航已广泛应用于耕作、播种、施肥、喷药、收获等农业生产过程^[2]。

农机自动导航包括导航位姿信息获取、导航路径规划和导航控制^[3-4],其中导航控制算法是导航系统的核心。而农机自身大延迟、大惯性和高度非线性的特征要求导航决策控制算法具备一定的自适应性和鲁棒性^[5-6]。目前国内外常用的农机导航控制方法包括 PID 控制、模糊控制、纯追踪控制、滑模变结构控制、最优控制和模型预测等^[7-10]。已有研究均假设农机作业过程中满足理想的“非完整约束条件”,即农机在行驶过程中轮胎始终保持“纯滚动无滑动”的状态^[11],然而农机的作业环境复杂多变,由于各种因素,如轮胎打滑、变形等,纯滚动约束不可能得到严格满足,特别是当农机需要在水田、坡地、湿滑草地等地面上行驶时,不可避免地发生侧滑,进而影响农机自主导航的性能,甚至影响系统的稳定性^[12]。

目前对车辆侧滑的相关研究较少。文献[13]研究了车轮打滑情况下农用车辆的轨迹跟踪控制,同时也考虑了侧滑角对导航精度的影响,结果表明农机轨迹跟踪的精度会受到车轮打滑的影响,该研究在模拟仿真环境中进行了测试,并未在实际车辆上实现。文献[14]提出了一种结合了高精度定位系统(RTK-GPS)的侧滑角观测器并将其集成到系统模型中,在试验中手动驾驶农用拖拉机,并用(RTK-GPS)记录路径,然后估算模型的参数,估算结果较为准确,为复杂环境下农机自动导航研究提供了思路。文献[15]针对果园自主导航车辆的轨迹跟踪问题,提出了一种侧滑估计器,采用高精度定位系统(RTK-GPS)估计车辆作业时的纵向和横向滑移速度,提高了果园自主导航车辆的轨迹跟踪性能,但该研究只考虑了车辆的横向控制。本文研究工作场景主要为水田、草地的四轮独立驱动(Four wheel independent drive, 4WID)高地隙喷雾机的轨迹跟踪问题。设计一种结合自适应方法与反步控制方法的轨迹跟踪控制算法。首先建立侧滑情况下高地隙喷雾机运动学模型,然后基于此模型设计自适应控制器,通过参数自适应来补偿未知侧滑效应。最后在考虑侧滑与不考虑侧滑两种情况下分别进行仿真和水田试验。

1 四轮独立电驱动运动学建模

高地隙四轮独立电驱动喷雾机的转向结构与传

统阿克曼以及差速转向结构不同,转向结构的 3D 模型如图 1 所示,主要由车架和前、后转向桥 3 部分组成,每个转向桥通过平面轴承与车架前后转向中心联接,车辆动力来自 4 个独立的大转矩轮毂电机,每个电机的转矩均可独立控制,因此无需额外转向动力就可以通过协同控制 4 个轮毂电机的转速完成直行与转向作业^[16]。为保证同步转向以及提高转向桥的抗干扰性能,通过建模与计算在前后轴之间安装了两个辅助连杆^[17]。

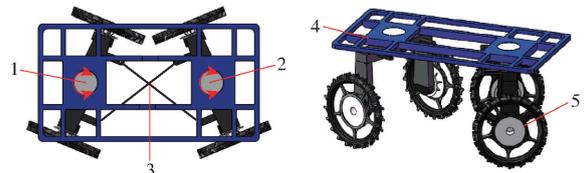


图 1 转向结构底盘

Fig. 1 Steering structure chassis

1. 前转向轴中心 2. 后转向轴中心 3. 辅助转向连杆 4. 底盘车架 5. 轮毂电机

1.1 运动学模型

喷雾机运动学模型如图 2 所示,前后转向桥通过连杆约束,确保前后转向桥同步转向。首先建立全局坐标系 XWY 与车体坐标系 xoy , A 、 B 分别为前后转向中心, L 为前后转向中心距离, D 为转向桥长度, v 为喷雾机线速度, δ 为前后转向桥转角, θ 为喷雾机在全局坐标系 XWY 中的航向, C 为转向中心, 定义逆时针旋转为正。设喷雾机左前轮、右前轮、左后轮、右后轮速度分别为 v_1 、 v_2 、 v_3 、 v_4 。由三角函数关系可得转向桥转向半径为

$$r = l_{AC} = \frac{L}{2\sin\delta} \quad (1)$$

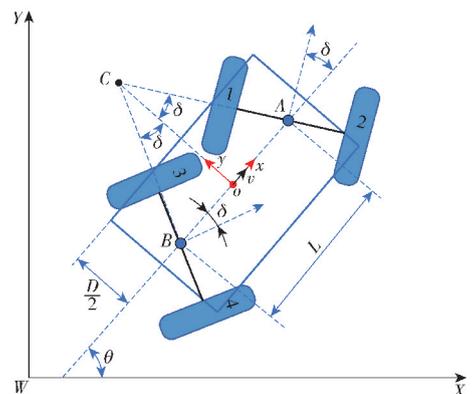


图 2 运动学模型

Fig. 2 Kinematics model of chassis

偏航角速度为

$$\dot{\theta} = \frac{v_1}{r - \frac{D}{2}} = \frac{v_2}{r + \frac{D}{2}} = \frac{v_3}{r - \frac{D}{2}} = \frac{v_4}{r + \frac{D}{2}} = \frac{v_1 + v_2 + v_3 + v_4}{4r} = \frac{v}{r} \quad (2)$$

在喷雾机转向的动态过程中,喷雾机每个车轮的速度由底盘绕转向中心点 C 的速度与前后转向桥绕各自转向中心点 A 、 B 的速度合成,即

$$\begin{cases} v_1 = \dot{\theta} \left(r - \frac{D}{2} \right) - \dot{\delta} \frac{D}{2} \\ v_2 = \dot{\theta} \left(r + \frac{D}{2} \right) + \dot{\delta} \frac{D}{2} \\ v_3 = \dot{\theta} \left(r - \frac{D}{2} \right) + \dot{\delta} \frac{D}{2} \\ v_4 = \dot{\theta} \left(r + \frac{D}{2} \right) - \dot{\delta} \frac{D}{2} \end{cases} \quad (3)$$

将式(2)代入式(3)得出四轮速度与喷雾机线速度、前后轴转角的关系式为

$$\begin{cases} v_1 = v \left(1 - \frac{D|\text{sign}\delta|}{2r} \right) - \dot{\delta} \frac{D}{2} \\ v_2 = v \left(1 + \frac{D|\text{sign}\delta|}{2r} \right) + \dot{\delta} \frac{D}{2} \\ v_3 = v \left(1 - \frac{D|\text{sign}\delta|}{2r} \right) + \dot{\delta} \frac{D}{2} \\ v_4 = v \left(1 + \frac{D|\text{sign}\delta|}{2r} \right) - \dot{\delta} \frac{D}{2} \end{cases} \quad (4)$$

为进一步验证上述所建立数学模型的正确性,使用UG软件绘制等比例喷雾机3D模型并进行运动学仿真,仿真时设置目标车速和转向角并通过式(4)计算得到的四轮轮速输入到3D模型中,设置目标速度为3.6 km/h,最大转向角为25°,在UG软件中喷雾机仿真结果如图3所示,蓝色虚线为其行走轨迹。可以看出该转向结构不仅转向半径小而且同侧前后轮轨迹几乎重合,在实际的农田应用场景中可减少对农作物的损伤。

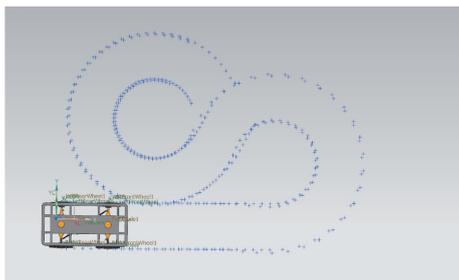


图3 UG 3D模型运动学仿真

Fig. 3 Kinematics simulation of UG 3D model

由于前后转向轴之间安装了辅助连杆,假设前后轴同步转向且转角一致,为简化计算过程,基于文献[18]中的运动学模型简化原理,将四轮模型转化为二轮车模型,如图4所示。

由图4可以看出,二轮简化模型的转向中心和运动规律与四轮模型一致,且二轮模型运动轨迹与喷雾机质心运动轨迹重合。因此以喷雾机质心为基准点建立简化的运动学模型

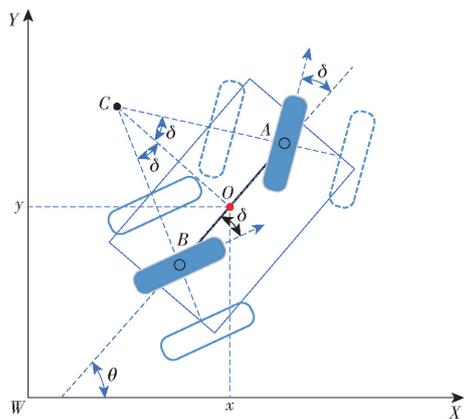


图4 运动学简化模型

Fig. 4 Simplified kinematics model of chassis

$$\dot{\mathbf{P}} = \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta \\ \sin\theta \\ 2\tan\delta/L \end{bmatrix} v \quad (5)$$

式中 \mathbf{P} ——喷雾机质心在全局坐标系下的位姿

1.2 位姿误差模型

基于运动学简化模型建立如图5所示的位姿误差模型, o 、 o_r 分别为喷雾机质心与参考质心, (x_r, y_r) 为参考喷雾机质心 o_r 在坐标系 XWY 中的坐标, (x, y) 为喷雾机质心 o 在坐标系 XWY 中的坐标, (x_e, y_e) 为向量 \mathbf{l}_{oo_r} 在坐标系 xoy 中的坐标, $c(s)$ 为目标路径的曲率, s 为从初始位置沿着目标路径的点 o_r 的曲线坐标, θ 、 θ_r 分别为喷雾机中心线相对于惯性坐标系的航向与参考航向, θ_e 为航向误差, v 、 v_r 分别为喷雾机相对于惯性坐标系的速度与期望速度, v_y 为喷雾机横向速度, δ_b 为喷雾机转向偏差。

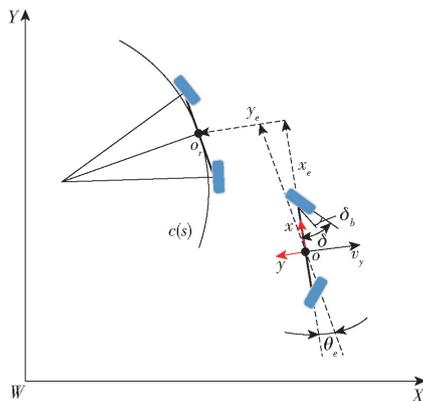


图5 位姿误差模型

Fig. 5 Kinematic error model

轨迹跟踪控制器的目标即设计合适的控制律使得

$$\lim_{t \rightarrow \infty} (|x_r - x| + |y_r - y| + |\theta_r - \theta|) = 0 \quad (6)$$

利用坐标变换将全局坐标系下误差转换为喷雾机质心坐标系下误差 \mathbf{P}_e , 计算式为

$$P_e = \begin{bmatrix} x_e \\ y_e \\ \theta_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta & 0 \\ -\sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_r - x \\ y_r - y \\ \theta_r - \theta \end{bmatrix} \quad (7)$$

假设 $|\theta_e| < \frac{\pi}{2}$, 当喷雾机不发生侧滑时, 参考式(5)可得到角速度为

$$\dot{\theta} = \omega = \frac{2v}{L} \tan\delta \quad (8)$$

喷雾机参考角速度为

$$\dot{\theta}_r = \frac{v_r}{\frac{1}{c(s)}} \quad (9)$$

将式(7)两边分别对时间求导得到理想位姿误差模型为

$$\begin{cases} \dot{x}_e = -v + v_r \cos\theta_e + \omega y_e \\ \dot{y}_e = v_r \sin\theta_e - \omega x_e \\ \dot{\theta}_e = v_r c(s) - \frac{2v}{L} \tan\delta \end{cases} \quad (10)$$

当喷雾机在水田、草地等极易发生侧滑的农业环境中工作时, 纯滚动约束很难满足, 基于理想运动学的位姿误差模型便不再适用。高地隙喷雾机为四轮独立驱动, 本文不考虑轮胎的纵向滑动, 将横向滑移速度 \bar{v}_y 与前后轴转向偏差 $\bar{\delta}_b$ 这两个可以表征侧滑效应的参数引入理想位姿误差模型。

此时喷雾机纵向速度与横向速度满足约束

$$\begin{cases} v_x = v \\ v_y = \bar{v}_y \end{cases} \quad (11)$$

角速度满足约束

$$\omega = \frac{2v_x}{L} \tan(\delta + \bar{\delta}_b) - \frac{2\bar{v}_y}{L} \quad (12)$$

由于 $\bar{\delta}_b$ 很小, 将式(11)、(12)代入到式(10)并近似线性化, 得到改进位姿误差模型为

$$\begin{cases} \dot{x}_e = -v + v_r \cos\theta_e + \omega y_e \\ \dot{y}_e = v_r \sin\theta_e - \omega x_e - \bar{v}_y \\ \dot{\theta}_e = v_r c(s) - \frac{2v}{L} \tan\delta + \frac{2\bar{v}_y}{L} - \frac{2v}{L} \tan\bar{\delta}_b \end{cases} \quad (13)$$

2 控制律设计

轨迹跟踪控制系统结构如图 6 所示, 来自 RTK 的实时位姿信息、目标路径信息和期望速度作为控制器的输入以及侧滑估计数据源, 控制器通过融合侧滑估计结果分别输出喷雾机目标速度 v_c 以及目标转角 δ_c 实现轨迹跟踪控制。为验证侧滑估计的有效性, 分别基于理想位姿误差模型以及改进位姿误差模型设计控制律并对比分析。

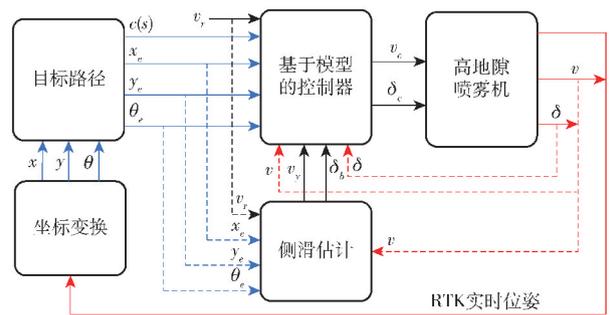


图 6 控制系统结构图

Fig. 6 Structure of control system

2.1 基于理想位姿误差模型的控制律设计

目前针对非线性系统大都采用级联形式的控制方法, 其中链式系统法^[19]以及反步控制方法^[20-21]的应用最为广泛。其中反步控制方法可以通过反向设计使控制律的设计过程系统化、结构化, 还可以控制相对阶为 n 的非线性系统, 消除了经典无源性设计中相对阶为 1 的限制^[22]。喷雾机位姿误差模型是一种复杂的非线性系统, 首先使用反步控制方法设计基于理想位姿误差模型的控制律。

由式(10)可知, y_e 为间接控制量, 当纵向偏差 x_e 与航向偏差 θ_e 为 0 时, $\dot{y}_e = 0$, 此时 y_e 为不可控量, 为保证横向误差 y_e 趋向于 0, 可利用反步控制方法逐步设计三阶非完整系统的控制律^[23], 即

$$\begin{bmatrix} v_c \\ \delta_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_x x_e + v_r \cos\theta_e \\ \arctan \frac{L\omega}{2v} \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} \text{其中 } \omega &= \frac{k_u \bar{u}_1 + y_e v_r + v_r c(s) \cos\theta_e + k_y \sin\theta_e}{\cos\theta_e + \frac{k_y x_e}{v_r}} \\ \bar{u}_1 &= \sin\theta_e - \frac{-k_y y_e}{v_r} \end{aligned} \quad (15)$$

式中 k_x, k_y, k_u ——正常数

2.2 基于改进位姿误差模型的控制律设计

由式(13)可知, 改进位姿误差模型是一个含有两个未知参数 $\bar{v}_y, \bar{\delta}_b$ 的三阶非线性系统。参考理想位姿误差模型轨迹跟踪控制律的设计思路, 并结合参数自适应与反步控制方法, 基于改进位姿误差模型设计轨迹跟踪控制律的步骤如下:

(1) 选取正定 Lyapunov 函数

$$V_1 = \frac{1}{2} x_e^2 + \frac{1}{2} y_e^2 + \frac{1}{2} (\hat{v}_y - \bar{v}_y)^T \Gamma^{-1} (\hat{v}_y - \bar{v}_y) \quad (17)$$

式中 \hat{v}_y —— \bar{v}_y 的估计值

Γ ——侧向滑移速度估计误差的控制参数

式(17)两边分别对时间求导并将式(13)代入可得

$$\dot{V}_1 = x_e(-v + v_r \cos \theta_e) + y_e(v_r \sin \theta_e - \hat{v}_y) + \frac{1}{L}(\hat{v}_y - \bar{v}_y)^T(\Gamma y_e + \hat{v}_y) \quad (18)$$

$$\dot{\hat{\rho}} = -\gamma \beta \tilde{u}_1 \quad (31)$$

选取目标转角正切值 u_2 为

$$u_2 = \frac{1}{\beta} \left(k_u \tilde{u}_1 + \alpha + \tau \hat{v}_y - \frac{\hat{v}_y}{v_r} - \beta \hat{\rho} \right) \quad (32)$$

式(32)中 k_u 为任意正常数,将式(30)~(32)代入式(26)可得

$$\dot{V}_2 = -k_x x_e^2 - k_y y_e^2 - k_u \tilde{u}_1^2 \quad (33)$$

因此 \dot{V}_2 负定。由式(20)和式(32)可得考虑侧滑效应的轨迹跟踪控制律为

$$\begin{bmatrix} v_c \\ \delta_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_x x_e + v_r \cos \theta_e \\ \arctan \left(\frac{1}{\beta} \left(k_u \tilde{u}_1 + \alpha + \tau \hat{v}_y - \frac{\hat{v}_y}{v_r} - \beta \hat{\rho} \right) \right) \end{bmatrix} \quad (34)$$

运用 Lasalle 定理^[24]得,所有的解都收敛于

$$S = \{ (x_e, y_e, \tilde{u}_1) : x_e = 0, y_e = 0, \tilde{u}_1 = 0 \} \quad (35)$$

由式(23)得,当 \tilde{u}_1 趋于 0 时,航向误差 θ_e 最终将稳定于

$$\theta_e = \arcsin \frac{\hat{v}_y}{v_r} \quad (36)$$

3 仿真验证

喷雾机的作业路线一般为田间直线行驶以及地头转向,在 Simulink 中以典型的 U 形路径作为目标轨迹对所提控制器进行仿真测试,第 1 组仿真采用不考虑侧滑效应的控制律,设置控制参数 $k_x = 1.2$, $k_y = 1.5$, $k_u = 2.5$;第 2 组仿真采用考虑侧滑效应的控制率,设置控制参数 $k_x = 1.2$, $k_y = 1.5$, $k_u = 2.5$, $\Gamma = 0.2$, $\gamma = 0.06$ 。为模拟喷雾机真实的作业环境和对比分析,在仿真开始的第 10 秒到第 40 秒内引入侧滑扰动 $\bar{v}_y = -0.2$, $\bar{\delta}_b = -0.04$,设置喷雾机目标速度 $v_r = 3.6$ km/h,初始纵向误差为 0.1 m,初始横向误差与航向误差为 0。校正前后轨迹跟踪横向、纵向和航向误差分别如图 7 所示,侧滑参数估计如图 8 所示。

由于喷雾机初始速度为 0 m/s,在仿真开始时出现了纵向误差以及航向误差,这些初始误差符合实际的工作情况。由仿真结果可以看出,当未加入侧滑影响时,基于理想运动学位姿误差模型的控制律和基于改进运动学位姿误差模型控制律都能够保证横向与纵向误差收敛到 0。当加入侧滑影响时,基于理想运动学位姿误差模型的控制律由于没有考虑侧滑效应,横向误差与纵向误差较大。而基于改进运动学位姿误差模型的控制律可以通过在线估计和补偿滑动效应,使横向与纵向误差快速收敛到 0。

选取 $u_1 = \sin \theta_e$ 作为第 1 步的虚拟输入,为保证 y_e 收敛,取 u_1 目标值计算式为

$$u_{1d} = \frac{-k_y y_e + \hat{v}_y}{v_r} \quad (19)$$

选取目标车速

$$v_c = v_r \cos \theta_e + k_x x_e \quad (20)$$

选取横向滑移加速度

$$\dot{\hat{v}}_y = -\Gamma y_e \quad (21)$$

式(19)与式(20)中 k_y 、 k_x 均为正常数,将式(19)~(21)代入式(18)可得

$$\dot{V}_1 = -k_x x_e^2 - k_y y_e^2 \quad (22)$$

此时 \dot{V} 负定,当 u_1 能够准确快速跟踪 u_{1d} 时,纵向误差 x_e 与横向误差 y_e 将收敛于 0。

(2)定义 u_1 与 u_{1d} 之差

$$\tilde{u}_1 = u_1 - u_{1d} = \sin \theta_e - \frac{-k_y y_e + \hat{v}_y}{v_r} \quad (23)$$

构建扩展 Lyapunov 函数

$$V_2 = V_1 + \frac{1}{2} \tilde{u}_1^2 + \frac{1}{2} (\hat{\rho} - \bar{\rho})^T \gamma^{-1} (\hat{\rho} - \bar{\rho}) \quad (24)$$

式中 $\hat{\rho}$ —— $\bar{\rho}$ 的估计值

γ ——转向偏差估计误差的控制参数

式(24)两边分别对时间求导可得

$$\dot{V}_2 = x_e(-v + v_r \cos \theta_e) + y_e(v_r \sin \theta_e - \hat{v}_y) + \tilde{u}_1 \dot{\tilde{u}}_1 + \frac{1}{L}(\hat{v}_y - \bar{v}_y)^T(\Gamma y_e + \hat{v}_y) + \frac{1}{\gamma}(\hat{\rho} - \bar{\rho})^T \dot{\hat{\rho}} \quad (25)$$

选取 $u_2 = \tan \delta$ 作为第 2 步的输入,将式(12)、(13)和式(23)代入式(25)并简化

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 = & -k_x x_e^2 - k_y y_e^2 + \\ & \frac{1}{L}(\hat{v}_y - \bar{v}_y)^T(\Gamma y_e - \Gamma \tau \tilde{u}_1 + \hat{v}_y) + \\ & \tilde{u}_1 \left(\alpha - \beta u_2 + \tau \hat{v}_y - \beta \hat{\rho} - \frac{\hat{v}_y}{v_r} \right) + \\ & \frac{1}{\gamma}(\hat{\rho} - \bar{\rho})^T(\gamma \beta \tilde{u}_1 + \dot{\hat{\rho}}) \end{aligned} \quad (26)$$

其中 $\alpha = c(s) v_r \cos \theta_e + y_e v_r + k_y \sin \theta_e$ (27)

$$\beta = \frac{2v}{L} \cos \theta_e + \frac{2k_y x_e v}{v_r L} \quad (28)$$

$$\tau = \frac{2}{L} \cos \theta_e + \frac{2k_y x_e}{v_r L} - \frac{k_y}{v_r} \quad (29)$$

选取侧滑参数微分值为

$$\dot{\hat{v}}_y = -\Gamma y_e + \Gamma \tau \tilde{u}_1 \quad (30)$$

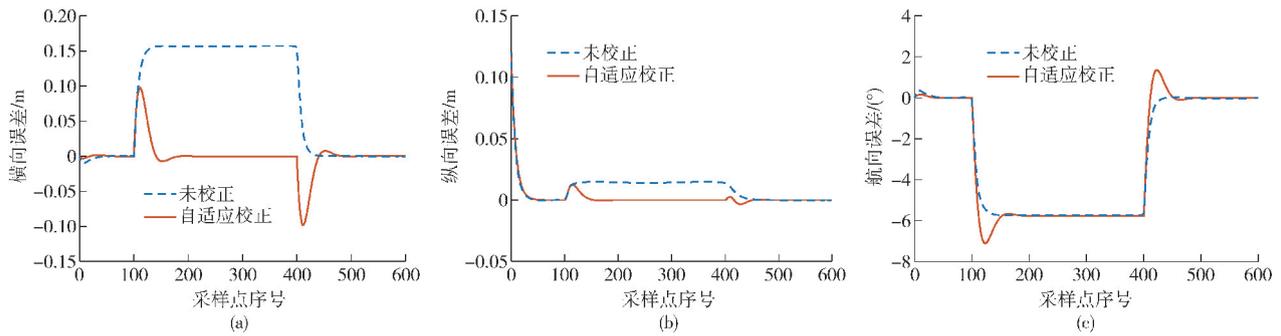
图 7 校正前后误差对比 ($T=0.1\text{ s}$)

Fig. 7 Comparisons of errors before and after correction

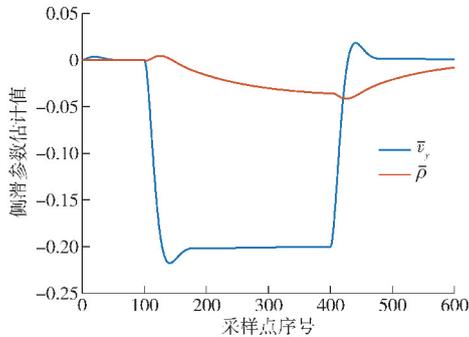
图 8 侧滑参数估计 ($T=0.1\text{ s}$)

Fig. 8 Estimation of sliding parameters

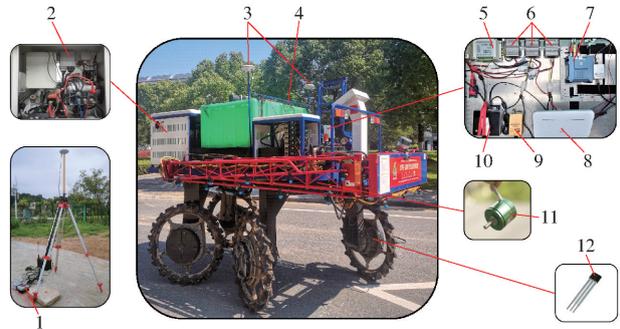


图 9 高地隙喷雾机导航系统

Fig. 9 Navigation system of high altitude gap sprayer

1. RTK 基准站 2. 整车控制单元 3. GNSS 双天线 4. 外置收发数传电台 5. 电压巡检仪 6. 电源稳压器 7. 北云 X1 组合导航系统 8. 移动路由器 9. 485 转 USB 模块 10. 微型主机 11. 角度传感器 12. 霍尔传感器

由图 7a 与图 7c 可知,侧滑效应的突然变化导致了曲线中出现显著的超调,当发生侧滑时,所提出的控制器能使航向误差收敛到式(36)所示的有界值。这在实际的作业环境属于正常现象,由于侧滑效应必然会引起轨迹偏差,为保证农机快速跟踪上期望轨迹,此时刻的实际航向与期望航向将会出现较大偏差。由图 8 可知,侧滑参数 \bar{v}_y 、 $\bar{\rho}$ 的估计结果与仿真设置值基本一致,当喷雾机进入 U 形弯的起点和终点时 \bar{v}_y 的变化很大,这对应横向偏差的超调现象。但随着喷雾机跟随上弧线后, \bar{v}_y 、 $\bar{\rho}$ 的值与仿真设置值一致。

4 试验验证

高地隙喷雾机导航系统如图 9 所示,主要由高地隙喷雾机、厘米级高精度定位系统 RTK、英特尔微型主机和 4G 路由器等构成。喷雾机上设有由 28.5 kW 汽油发电机和 72 V 蓄电池组成的油电混合的供电系统,在启动汽油发动机的情况下,喷雾机可以连续工作 12 h。运输状态下喷雾机质量、长度、宽度、高度和轴距分别为 1 680 kg、3 200 mm、1 760 mm、2 400 mm 和 1 680 mm。离地间隙 1 100 mm;工作状态下喷雾机载药 500 L,喷杆可展开至 11 200 mm。

为获得更精准的位置以及航向信息,GNSS 双天线的安装位置基线与喷雾机前进方向垂直,其中

RTK 用于获取喷雾机位置信息,作为滑移参数估计数据;移动路由器形成的局域网络实现远程端实时监测导航作业;微型主机与整车控制单元 (Vehicle control unit, VCU) 之间的信息交互借助 RS485 总线实现;喷雾机车轮以及前后转向桥中心分别安装了霍尔传感器和角度传感器,VCU 采集实时轮速和转向角度信息作为反馈信息,电压巡检仪用来获取喷雾机实时电压。

微型主机装载了 Ubuntu 以及第二代机器人操作系统 (Robot operating system, ROS2), 其中 ROS2 是一个专门针对机器人软件开发而设计的通信框架,能够满足导航控制系统的安全性、可扩展性和容错性要求^[25]。使用 C++ 语言编写 ROS2 导航算法节点、喷雾机节点与上位机界面节点,导航作业时远程端运行上位机界面节点实时监测喷雾机状态并发布目标路径信息,再运行导航算法节点订阅来自传感器的各种信息,并将计算后的控制指令发布出去;最后运行喷雾机节点订阅导航节点发布的控制指令实现导航作业。

为进一步研究侧滑对轨迹跟踪性能的影响,验证本文轨迹跟踪算法的有效性。在海安市 1.3 hm² 泥泞水田中,分别使用考虑与不考虑侧滑的控制律

进行轨迹跟踪试验。为保证试验数据的有效性,规划目标轨迹为两段 U 形轨迹(由 3 条直线与 2 条曲线组成)。喷雾机展开喷杆后喷幅为 12 m,因此设置地头转向半径为 6 m,根据地块尺寸设置直线段长度为 55 m。期望车速为 3.6 km/h,由于本文控制器跟踪的量为动态的位姿信号,在进行参数调节时先在校内水泥地平整路面设定一个目标点让喷雾机单独去跟踪并记录控制器输出信号与轨迹跟踪误差信号,在进行参数调节后跟踪效果良好的情况下,将该参数应用到水田 U 形路径的跟踪控制中,再根据喷雾机跟踪效果进行微调,最终选择一组跟踪效果较好的控制参数 $k_x = 0.1, k_y = 0.6, k_u = 0.05, \Gamma = 0.1, \gamma = 0.05$ 。试验现场如图 10 所示。



图 10 试验现场(32.581 633 89°N,120.680 085 46°E)

Fig. 10 Test site (32.581 633 89°N,120.680 085 46°E)

校正前后的轨迹跟踪如图 11 所示。由图 11a 可以看出,当喷雾机跟踪的目标路径在由直线变为曲线的开始与结束时侧滑效应较为明显,而直行时侧滑效应影响较小,但仍会引起小范围的震荡。由于考虑了侧滑效应,图 11b 中的轨迹跟踪效果更好。

侧滑参数 $\hat{v}_y, \hat{\rho}$ 的估计结果如图 12 所示。喷雾机在弧线段开始到结束过程中的侧滑效应较为明显,说明喷雾机在轨迹跟踪过程中,当跟踪的目标路径由直线变为曲线时,横向滑移速度与转向误差较大,此时侧滑的影响最严重。

校正前后横向、纵向以及航向误差如图 13 所示。图中分别标注了直线部分与曲线部分的试验结果,可以看出试验结果与仿真结果基本一致。

校正前后横向、纵向以及航向误差结果如表 1 所示。由表 1 可知,侧滑效应对横向跟踪精度以及

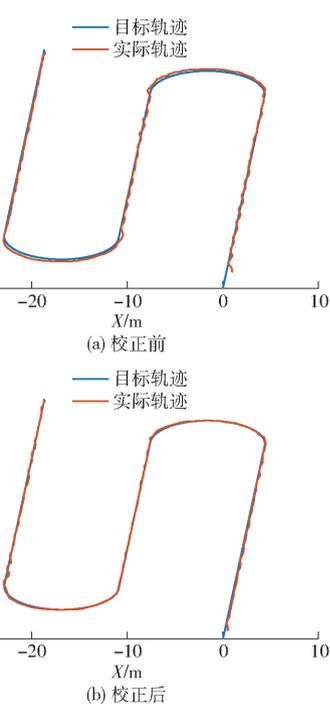
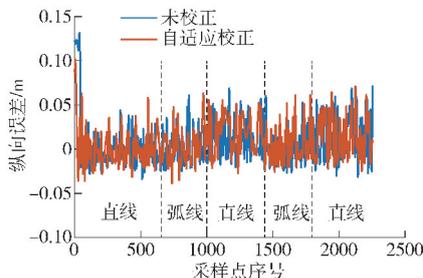
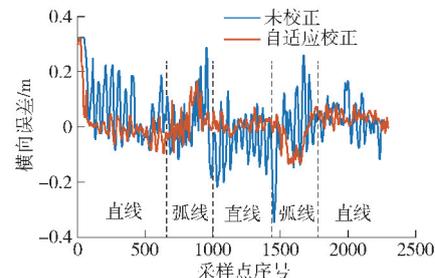


图 11 跟踪试验结果

Fig. 11 Tracking test results

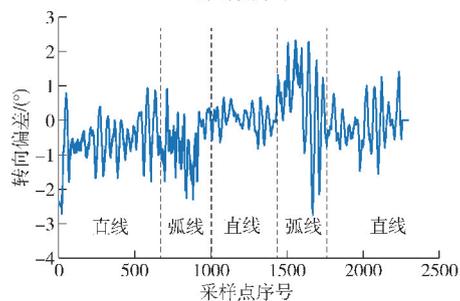
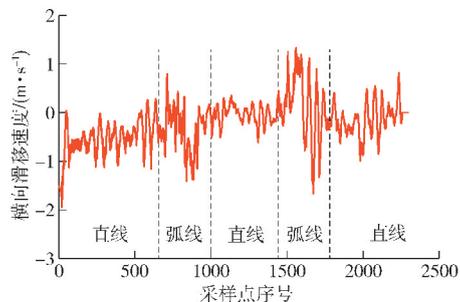


图 12 估计值($T=0.1$ s)

Fig. 12 Estimated values ($T=0.1$ s)

航向跟踪精度的影响较为明显,对纵向控制精度几乎没有影响。在不考虑侧滑的情况下,喷雾机最大

图 13 校正前后误差($T=0.1$ s)

Fig. 13 Error before and after correction ($T=0.1$ s)

横向误差为 0.287 m, 平均绝对横向误差为 0.114 m, 标准差为 0.13 m; 最大纵向误差为 0.069 m, 平均绝对纵向误差为 0.019 m, 标准差为 0.019 m; 最大航向误差为 14.56°, 平均绝对航向误差为 4.55°, 标准差为 5.54°。考虑侧滑后, 侧滑效应的影响减弱。

喷雾机最大横向误差减小为 0.167 m, 平均绝对横向误差减小为 0.041 m, 标准差减小为 0.059 m; 喷雾机纵向控制误差几乎没变化; 喷雾机最大航向误差减小为 11.97°, 平均绝对航向误差减小为 2.56°, 标准差减小为 3.57°。

表 1 轨迹跟踪误差结果

Tab. 1 Trajectory tracking error results

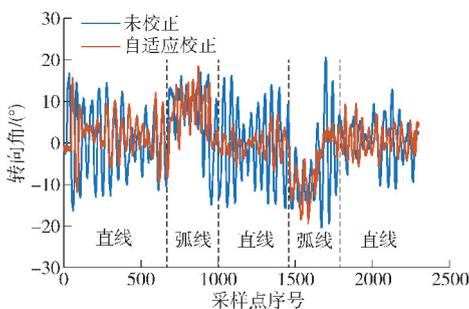
试验	最大横向 误差/m	平均绝对 横向误差/m	横向标准差/ m	最大纵向 误差/m	平均绝对 纵向误差/m	纵向标准 差/m	最大航向 误差/(°)	平均绝对航 向误差/(°)	航向标准 差/(°)
校正前	0.287	0.114	0.130	0.069	0.019	0.019	14.56	4.55	5.54
校正后	0.167	0.041	0.059	0.062	0.018	0.015	11.97	2.56	3.57

校正前后控制转角如图 14 所示。校正前的控制器未考虑侧滑进而导致轨迹跟踪时累计误差较大, 为跟踪到目标轨迹, 控制器所输出的控制转角信号波动较大, 而校正后的控制器由于考虑了侧滑, 所输出的控制转角信号更为平滑, 对转向机构更为友好。

建立了该喷雾机的运动学模型并在 UG 软件中仿真验证所建立模型的准确性。

(2) 建立了喷雾机轨迹跟踪的理想位姿误差模型以及考虑侧滑因素的改进位姿误差模型, 并分别设计轨迹跟踪控制器。以典型 U 形路径为例, 对两种控制器进行了仿真验证。结果表明, 当模型中未加入侧滑影响时, 两种控制器均可以保证喷雾机快速跟踪到目标轨迹, 跟踪精度较高; 当考虑侧滑影响时, 自适应控制律能够实时估计并补偿侧滑参数, 跟踪轨迹误差更小, 控制效果更好。

(3) 田间试验结果表明, 考虑侧滑后的轨迹跟踪最大横向误差减小为 0.167 m, 平均绝对横向误差减小为 0.041 m, 标准差减小为 0.059 m; 最大航向误差减小为 11.97°, 平均绝对航向误差减小为 2.56°, 标准差减小为 3.57°。因此, 在水田等复杂的作业环境下, 加入侧滑参数的模型更加贴合农机实际的运动规律, 基于该模型设计轨迹跟踪控制律能够有效提高农机导航精度和自动驾驶的稳定性。

图 14 转向角输入 ($T=0.1$ s)Fig. 14 Steering angle input ($T=0.1$ s)

5 结论

(1) 针对 4WID 高地隙喷雾机特殊的转向模型,

参 考 文 献

- [1] 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/OL]. 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/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(8): 1-17. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20180801&flag=1&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.08.001. (in Chinese)
- [2] 戴增辉, 何凤琴. 智能农机自动驾驶系统应用研究[J]. 农机化研究, 2018, 40(2): 202-206. DAI Zenghui, HE Fengqin. Research on the application of intelligent automatic navigation system of agricultural machinery[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2018, 40(2): 202-206. (in Chinese)
- [3] 刘刚, 康熙, 夏友祥. 基于 GNSS 农田平整全局路径规划方法与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(5): 27-33. LIU Gang, KANG Xi, XIA Youxiang. Global path planning algorithm and experiment based on GNSS-controlled precise land leveling system[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(5): 27-33. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20180503&flag=1&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2018.05.003. (in Chinese)
- [4] 张漫, 季宇寒, 李世超, 等. 农业机械导航技术研究进展[J/OL]. 农业机械学报, 2020, 51(4): 1-18. ZHANG Man, JI Yuhan, LI Shichao, et al. Research progress of agricultural machinery navigation technology [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(4): 1-18. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20200401&flag=1&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2020.04.001. (in Chinese)
- [5] 谭晨皎, 李轶林, 王东飞, 等. 农业机械自动驾驶技术研究进展[J]. 农机化研究, 2020, 42(5): 7-14. TAN Chenjiao, LI Yilin, WANG Dongfei, et al. Research progress of automatic navigation technology for agricultural machinery

- [J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2020, 42(5): 7-14. (in Chinese)
- [6] 李逃昌, 胡静涛, 高雷, 等. 基于模糊自适应纯追踪模型的农业机械路径跟踪方法[J]. *农业机械学报*, 2013, 44(1): 205-210.
LI Taochang, HU Jingtao, GAO Lei, et al. Agricultural machine path tracking method based on fuzzy adaptive pure pursuit model[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2013, 44(1): 205-210. (in Chinese)
- [7] 唐小涛, 陶建峰, 李志腾, 等. 自动驾驶插秧机路径跟踪系统稳定性模糊控制优化方法[J/OL]. *农业机械学报*, 2018, 49(1): 29-34.
TANG Xiaotao, TAO Jianfeng, LI Zhiteng, et al. Fuzzy control optimization method for stability of path tracking system of automatic transplanter[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2018, 49(1): 29-34. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20180103&flag=1&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.01.003. (in Chinese)
- [8] 熊中刚, 叶振环, 贺娟, 等. 基于免疫模糊PID的小型农业机械路径智能跟踪控制[J]. *机器人*, 2015, 37(2): 212-223.
XIONG Zhonggang, YE Zhenhuan, HE Juan, et al. Intelligent path tracking control of small agricultural machinery based on immune fuzzy PID[J]. *Robot*, 2015, 37(2): 212-223. (in Chinese)
- [9] 张雁, 李彦明, 刘翔鹏, 等. 水稻直播机自动驾驶模糊自适应控制方法[J/OL]. *农业机械学报*, 2018, 49(10): 30-37.
ZHANG Yan, LI Yanming, LIU Xiangpeng, et al. Fuzzy adaptive control method for autonomous rice seeder[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2018, 49(10): 30-37. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20181004&flag=1&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.10.004. (in Chinese)
- [10] LIU H, YAN S, SHEN Y, et al. Model predictive control system based on direct yaw moment control for 4WID self-steering agriculture vehicle[J]. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 2021, 14(2): 175-181.
- [11] 王立玲, 董力元, 马东, 等. 滑动与打滑条件下的轮式移动机器人自抗扰跟踪控制[J]. *控制理论与应用*, 2020, 37(2): 431-438.
WANG Liling, DONG Liyuan, MA Dong, et al. Auto disturbance rejection tracking control of wheeled mobile robot under sliding and slipping conditions[J]. *Control theory and Technology*, 2020, 37(2): 431-438. (in Chinese)
- [12] LENAIN R, THUILOT B, CARIOU C, et al. Mixed kinematic and dynamic sideslip angle observer for accurate control of fast off-road mobile robots[J]. *Field Robotics*, 2010, 27(2): 181-196.
- [13] MOTTE I, CAMPION G. A slow manifold approach for the control of mobile robots not satisfying the kinematic constraints[J]. *Transactions on Robotics and Automation*, 2000, 16(6): 875-880.
- [14] FANG H, LENAIN R, THUILOT B, et al. Robust adaptive control of automatic guidance of farm vehicles in the presence of sliding[C]//*International Conference on Robotics and Automation*, 2005: 3102-3107.
- [15] GOKHAN B, MARCEL B, ERHAN K, et al. Improving the trajectory tracking performance of autonomous orchard vehicles using wheel slip compensation[J]. *Biosystems Engineering*, 2016, 146: 149-164.
- [16] 沈跃, 何思伟, 刘慧, 等. 高地隙喷雾机自转向电动底盘控制系统设计与试验[J/OL]. *农业机械学报*, 2020, 51(11): 385-392, 402.
SHEN Yue, HE Siwei, LIU Hui, et al. Modeling and control of self-steering electric chassis structure of high clearance sprayer[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2020, 51(11): 385-392, 402. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20201142&flag=1&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.11.042. (in Chinese)
- [17] 何思伟. 四轮独立电驱动高地隙喷雾机的建模与辨识[D]. 镇江: 江苏大学, 2020.
HE Siwei. Modeling and identification of four-wheel independent electrically driven high clearance sprayer[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2020. (in Chinese)
- [18] 张华强, 王国栋, 吕云飞, 等. 基于改进纯追踪模型的农机路径跟踪算法研究[J/OL]. *农业机械学报*, 2020, 51(9): 18-25.
ZHANG Huaqiang, WANG Guodong, LÜ Yunfei, et al. Agricultural machinery automatic navigation control system based on improved pure tracking model[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2020, 51(9): 18-25. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20200902&flag=1&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.09.002. (in Chinese)
- [19] 董文杰, 霍伟. 链式系统的轨迹跟踪控制[J]. *自动化学报*, 2000, 26(3): 310-316.
DONG Wenjie, HUO Wei. Trajectory tracking control of chained systems[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2000, 26(3): 310-316. (in Chinese)
- [20] FRANCISCO G, RAFAEL V, SERGIO E. Trajectory tracking for fixed-wing UAV using model predictive control and adaptive backstepping[J]. *IFAC-PapersOnLine*, 2015, 48(9): 132-137.
- [21] 田晓伟. 舰船航向非线性自适应鲁棒控制方法[J]. *舰船科学技术*, 2020, 42(14): 55-57.
TIAN Xiaowei. Nonlinear adaptive robust control method for ship course[J]. *Ship Science and Technology*, 2020, 42(14): 55-57. (in Chinese)
- [22] YANG G, LIAO H, ZHOU J. Improved trajectory tracking of autonomous mobile robot based on adaptive backstepping control[C]//*Annual International Conference on CYBER Technology in Automation, Control, and Intelligent Systems (CYBER)*, 2019: 1596-1601.
- [23] 杨俊华, 吴捷, 胡跃明. 反步方法原理及在非线性的鲁棒控制中的应用[J]. *控制与决策*, 2002(17): 641-647, 653.
YANG Junhua, WU Jie, HU Yueming. Principle of backstepping method and its application in nonlinear robust control[J]. *Control and Decision*, 2002(17): 641-647, 653. (in Chinese)
- [24] 李殿璞. 非线性控制系统理论基础[M]. 北京: 清华大学出版社, 2014.
- [25] 黄开宏, 杨兴锐, 曾志文, 等. 基于ROS户外移动机器人软件系统构建[J]. *机器人技术与应用*, 2013(4): 37-41.
HUANG Kaihong, YANG Xingrui, ZENG Zhiwen, et al. Construction of outdoor mobile robot software system based on ROS[J]. *Robotic Technology and Application*, 2013(4): 37-41. (in Chinese)