

基于模糊快速滑模的农用牵引车辆直线路径跟踪控制

黄文岳¹ 魏新华¹ 汪岸哲¹ 吉鑫¹ 高原源¹ 王晔飞¹ 施圣高²

(1. 江苏大学农业工程学院, 镇江 212013; 2. 上海上实现代农业开发有限公司, 上海 202183)

摘要: 为解决无人驾驶牵引式农机在非结构化环境中作业时直线跟踪精度低、上线速度慢、抗干扰能力差等问题, 提出了一种基于模糊快速滑模控制的农用牵引式车辆直线路径跟踪控制方法。首先利用车辆运动学模型与参考路径建立牵引车辆直线路径跟踪误差模型, 并提出一种基于模糊参数整定的快速滑模直线路径跟踪方法, 解决了滑模控制算法的控制器抖振与机具快速上线问题。通过 Lyapunov 稳定性分析可知, 所设计控制方法可保证牵引机具跟踪参考路径, 同时铰接角收敛至零。最后, 基于 Simulink 仿真与实车试验对该控制方法的有效性 with 优越性进行测试。田间实车试验表明, 使用本文控制方法时, 拖车和挂车最大路径跟踪横向误差分别为 0.11、0.12 m, 拖车和挂车跟踪误差方差分别为 0.001 3、0.001 5 m²; 相较于传统基于等速趋近律设计的滑模控制器, 上线时间提升约 58%, 最大跟踪误差减小约 66%。

关键词: 农用牵引车辆; 直线路径跟踪; 滑模控制; 模糊控制

中图分类号: S24

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2024)02-0415-08

OSID:



Straight Line Path Tracking Control of Agricultural Tractor-trailer Based on Fuzzy Fast Sliding Mode

HUANG Wenyue¹ WEI Xinhua¹ WANG Anzhe¹ JI Xin¹ GAO Yuanyuan¹ WANG Yefei¹ SHI Shengao²

(1. College of Agricultural Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China

2. Shanghai SHC Modern Agriculture Development Co., Ltd., Shanghai 202183, China)

Abstract: In order to address the challenges posed by low linear tracking accuracy, slow on-line speed and poor anti-disturbance rejection ability in unmanned tractor-trailer agricultural vehicles operating in unstructured environments, a straight-line path tracking control method based on fuzzy fast power sliding mode control was designed. Firstly, a straight-line path tracking error model was developed for agricultural tractor-trailer vehicles, grounded in the vehicle's kinematic model and the reference path. A straight-line path tracking method based on fast power sliding mode theory and fuzzy parameter adjustments was proposed, which solved the sliding mode controller chattering problem and also improved the on-line speed. Rigorous Lyapunov stability analysis was presented to affirm the stability of the closed-loop system. The designed control method ensured that the tractor-trailer effectively tracked the reference path, while the articulation angle converged to zero at the same time. The effectiveness and superiority of the proposed control method were evaluated through Simulink simulations and real vehicle tests. Field experiments revealed that when employing this control method, the maximum path tracking lateral errors for the tractor and trailer were 0.11 m and 0.12 m, respectively, with tracking error variance values of 0.001 3 m² and 0.001 5 m². Compared with the traditional sliding mode controller designed based on constant reaching law, the online time was improved approximately by 58%, and the maximum tracking error was reduced roughly by 66%. The designed method can effectively improve the stability and speed of the tractor-trailer path tracking.

Key words: agricultural tractor-trailer; straight line path tracking; sliding mode control; fuzzy control

收稿日期: 2023-06-07 修回日期: 2023-07-04

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022ZD0115804)、江苏省农业自主创新项目(CX(22)2040)和江苏省重点研发计划项目(BE2021313)

作者简介: 黄文岳(1977—), 男, 博士生, 主要从事智能农业装备研究, E-mail: 1000002385@ujs.edu.cn

通信作者: 魏新华(1972—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事智能农机装备研究, E-mail: wei_xh@126.com

0 引言

随着制导、控制、微电子等技术与理论不断进步,无人驾驶农机进入快速发展阶段^[1-2]。其中农用牵引车辆因其灵活、省力、高效等特性被广泛应用于“耕、种、管、收”等农业全生产环节^[3]。牵引车辆的路径跟踪控制模型为典型高阶欠驱动非线性系统,该问题解决难度大,目前备受学界与工业界关注^[4]。

近年来学者对农机路径跟踪控制进行了大量研究,其主要集中在基于运动学、动力学与无模型依赖的控制上,相关学者也对模糊控制、智能控制、滑模控制等先进控制方法进行大量研究^[5-7]。其中,文献[8]建立牵引机组动力学模型,提出一种非线性控制器,但需在联轴处额外增加控制系统;文献[9]设计了一种用于插秧机的纯追踪方法,利用模糊控制规则实现前视距离动态调整;文献[10]针对水田环境下施药机路径跟踪控制问题,提出一种基于扰动观测器的复合终端滑模控制器;文献[11]针对平地机组路径跟踪控制问题采用自适应比例-积分-微分控制,利用非线性构造函数方法对控制器参数进行实时整定;文献[12]为解决农机变速跟踪控制,采取基于线性链式模型的反馈控制方法并进行直线路径跟踪测试。相比于整机路径跟踪控制,牵引车辆受非完整运动学约束,上述链式模型控制方法无法解决其路径跟踪问题。由于测量误差、安装精度、轮胎形变、路面附着系数变化等因素,在牵引车辆路径跟踪过程中模型参数摄动与外部扰动难以避免,因此研究一种鲁棒性强的牵引车辆路径跟踪控制方法仍有必要^[13-14]。在众多先进控制理论中,滑模控制由于具有对参数摄动与外部扰动的不敏感性、实际部署简单等优点备受关注^[15-16]。文献[17]针对牵引车辆提出一种基于固定高增益的滑模控制方法,但存在控制抖振现象,易对车辆机械结构造成损害。文献[18-20]提出基于边界层方法、高阶滑模、参数自适应、积分滑模等方案,解决控制抖振问题,但这些方法尚未在农用牵引式车辆中进行实际应用。

针对传统滑模控制方法存在抖振问题,本文采用滑模快速趋近律设计一种用于牵引车辆直线路径跟踪的滑模路径跟踪控制器,同时利用模糊控制规则进行控制器参数整定,以期在该控制器作用下确保牵引车辆跟踪参考路径且联轴处夹角收敛至零,同时减少控制器抖振问题。

1 牵引车辆路径跟踪数学模型

考虑农业场景下牵引车辆多在低速状态下进行作业,其受运动学约束影响较大,因此采用如图 1 所

示简化的牵引车辆运动学模型,其中拖车与机具间通过联轴进行连接,选取待跟踪路径为 X 轴; $P_i (i = 0, 1, 2)$ 分别为跟踪目标点、拖车与挂车铰接点、挂车轮轴中心点;拖车后轴中心处位姿表示为 (x_t, y_t, θ_t) ;车辆速度为 v ,拖车角速度为 ω 。假设车辆沿跟踪路径正方向行驶,即 $v > 0$;铰接点处铰接角度为 φ ; $L_i (i = 1, 2, 3)$ 分别为所需车身长度参数; δ 为车辆前轮转角。

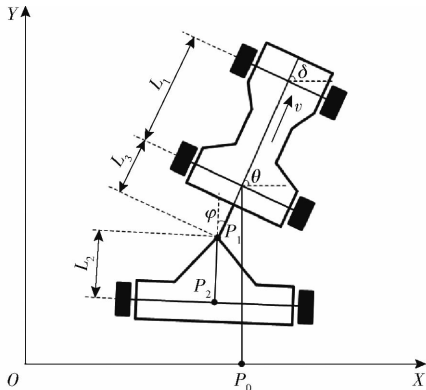


图 1 农用牵引车辆路径跟踪示意图
Fig.1 Schematic of tractor-trailer path tracking

对拖车后轴中心进行速度分解,可得牵引车辆运动学方程为

$$\begin{cases} \dot{x} = v \cos \theta \\ \dot{y} = v \sin \theta \\ \dot{\theta} = \omega = \frac{v \tan \delta}{L_1} \\ \dot{\varphi} = -\frac{v}{L_2} \sin \varphi - \frac{v}{L_1 L_2} (L_3 \cos \varphi + L_2) \tan \delta \end{cases} \quad (1)$$

式(1)所述模型为典型的高阶欠驱动非线性系统,其直接控制难度较大。为简化分析,本文选取直线为其期望跟踪路径,该直线路径可表示为

$$\alpha_1 x + \alpha_2 y + \alpha_3 = 0 \quad (2)$$

式中 $\alpha_i (i = 1, 2, 3)$ 为期望直线路径几何常数且满足 $\alpha_1^2 + \alpha_2^2 \neq 0$ 。当牵引车辆位置信息满足式(2)时,认为被控车辆已跟踪上期望直线路径。

定义误差变量为 $\xi = \alpha_1 x_t + \alpha_2 y_t + \alpha_3$, 并对其进行微分计算,可得

$$\dot{\xi} = v \alpha \left(\frac{\alpha_1}{\alpha} \cos \theta_t + \frac{\alpha_2}{\alpha} \sin \theta_t \right) \quad (3)$$

其中

$$\alpha = \alpha_1^2 + \alpha_2^2$$

进一步,根据期望直线路径几何计算,令 $\cos \theta_d =$

$$\frac{\alpha_2}{\alpha}, -\sin \theta_d = \frac{\alpha_1}{\alpha}。$$

式(3)可进一步简化为 $\dot{\xi} = v \alpha \sin (\theta_t - \theta_d)$ 。令 $\bar{\theta} = \theta_t - \theta_d$, 结合式(1)可得牵引车辆直线路径跟踪误差方程为

$$\begin{cases} \dot{\xi} = v\alpha\sin\bar{\theta} \\ \dot{\bar{\theta}} = \frac{v}{L_1}u \\ \dot{\varphi} = -\frac{v\sin\varphi}{L_2} - v\left(\frac{L_3}{L_1L_2}\cos\varphi + \frac{1}{L_1}\right)u \end{cases} \quad (4)$$

将 $u = \tan\delta$ 作为控制输入。

本文控制目的转换为设计控制律 $u = \tan\delta$ 使得误差方程(4)在原点处镇定。

2 滑模控制方法设计

根据第1节跟踪误差建模可知,本文控制目的转换为误差方程(4)在原点处的镇定问题。滑模控制是一种鲁棒性较强且易于实现的控制算法,在无人机^[21]、无人潜水器^[22]、无人车^[23]等领域已有实际应用,但其实际部署在农用牵引式车辆尚未见报道。一般滑模控制主要包含趋近状态和滑模状态两种状态。在车辆具有初始误差情况下,可认为其处于趋近状态,需设计合适的趋近律确保滑模变量趋近于设计的滑模面,使得车辆快速上线;当滑模变量位于滑模面后,便按照预定轨迹运动。由于非结构化作业环境中的未知干扰,会造成滑模变量出现逃逸现象,利用传统滑模控制中的不连续符号函数项部分,可对扰动进行压制,迫使滑模变量运行于预定滑模面上,但会出现控制器抖振^[24]。控制器抖振会造成车辆机械结构不可逆损坏,故需避免该现象^[25-26]。本文首先设计线性滑模面,确保当滑模变量位于滑动面时跟踪误差与铰接角度趋近于原点。其次为解决传统滑模控制依赖于不连续函数项进行抗扰易造成控制器抖振的问题,采用快速趋近律设计连续的滑模控制器,减少抖振现象。同时为减轻控制器参数整定负担,利用模糊控制思想针对控制参数设计相应的模糊规则,实现控制器参数整定。最终,实现牵引车辆快速、稳定跟踪期望直线路径。

2.1 基于等速趋近律的滑模控制器设计

为实现牵引车辆跟踪参考路径同时联轴处夹角收敛至零,首先设计线性滑模面

$$s = \xi + \beta_1\bar{\theta} + \beta_2\varphi \quad (5)$$

式中 $\beta_i (i=1,2) > 0$, 为可调参数。当该滑模变量趋近于0时,可保证牵引车辆位置误差与铰接角渐进趋近于0。

对式(5)进行求导计算,可得

$$\begin{aligned} \dot{s} &= \dot{\xi} + \beta_1\dot{\bar{\theta}} + \beta_2\dot{\varphi} = \\ &v\alpha\sin\bar{\theta} + \frac{\beta_1vu}{L_1} - \frac{\beta_2v\sin\varphi}{L_2} - \beta_2v\left(\frac{L_3}{L_1L_2}\cos\varphi + \frac{1}{L_1}\right)u = \\ &-\frac{\beta_2v\sin\varphi}{L_2} + v\alpha\sin\bar{\theta} + v\frac{\beta_1L_2 - \beta_2L_3 + \beta_2L_2}{L_1L_2}u \end{aligned} \quad (6)$$

为使滑模变量趋近于所设计的滑模面式(5),利用传统等速趋近律设计滑模控制器

$$u = \frac{L_1(\beta_2v\sin\varphi - L_2v\alpha\sin\bar{\theta} - L_2K\text{sign}(s))}{v(\beta_1L_2 - \beta_2L_3 + \beta_2L_2)} \quad (7)$$

式中 K ——控制器增益

利用反三角函数计算可得目标前轮转角为

$$\delta = \arctan \frac{L_1(\beta_2v\sin\varphi - L_2v\alpha\sin\bar{\theta} - L_2K\text{sign}(s))}{v(\beta_1L_2 - \beta_2L_3 + \beta_2L_2)} \quad (8)$$

选取 Lyapunov 函数为 $V_1 = \frac{1}{2}s^2$, 验证在式(8)

作用下系统的稳定性,对其求导可得

$$\dot{V}_1 = s\dot{s} = s(-K\text{sign}(s)) = -K|s| \leq 0 \quad (9)$$

根据 Lyapunov 稳定性理论可知在控制器式(7)的作用下系统是稳定的。但前轮偏转角式(8)中含不连续项部分,因此抖振问题不可避免,且式(8)中在滑模变量趋近阶段采用等速趋近律,在初始误差较大情况下存在车辆上线速度慢的问题。为解决上述问题,采取一种基于快速趋近律设计的滑模控制器,并通过设计模糊规则实现控制器参数的整定,确保系统误差快速收敛,减弱控制器抖振现象。

2.2 基于快速趋近律的滑模控制器设计

为实现滑模变量快速趋近的目的,采用快速趋近律

$$\dot{s} = -K_1s - K_2|s|^\beta\text{sign}(s) \quad (10)$$

式中 K_1, K_2, β 为需设计的控制器参数。式(10)可视为滑模变量 s 的动力学方程,由于其含有非光滑项部分,通过合适的参数调节可保证 s 在趋近阶段的抗扰能力与趋近速度显著优于等速趋近律。

结合式(6)与式(10),可得滑模控制器为

$$u = \frac{L_1}{v(\beta_1L_2 - \beta_2L_3 + \beta_2L_2)}(\beta_2v\sin\varphi - L_2v\alpha\sin\bar{\theta} - L_2K_1s - L_2K_2|s|^\beta\text{sign}(s)) \quad (11)$$

同样的,利用反三角函数计算有

$$\delta = \arctan \left(\frac{L_1}{v(\beta_1L_2 - \beta_2L_3 + \beta_2L_2)}(\beta_2v\sin\varphi - L_2v\alpha\sin\bar{\theta} - L_2K_1s - L_2K_2|s|^\beta\text{sign}(s)) \right) \quad (12)$$

与前轮转角式(8)相比,基于快速趋近律设计的前轮转角式(12)控制量连续,因此抖振现象大大减弱。同时利用控制器非光滑的动态特性,可大大提高滑模变量在趋近阶段的抗扰性能与趋近速度。

选取 Lyapunov 函数为 $V_2 = \frac{1}{2}s^2$, 验证在式(11)

作用下系统的稳定性,对其求导可得

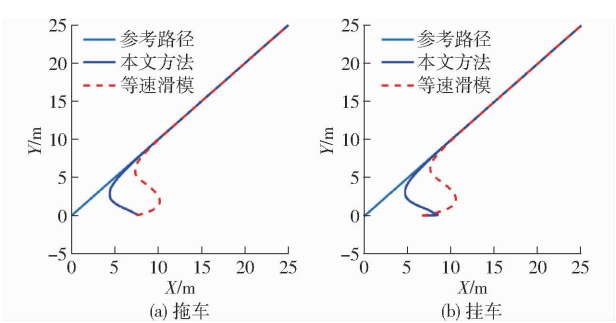


图 4 牵引车辆路径跟踪轨迹

Fig. 4 Path tracking trajectories of tractor-trailer

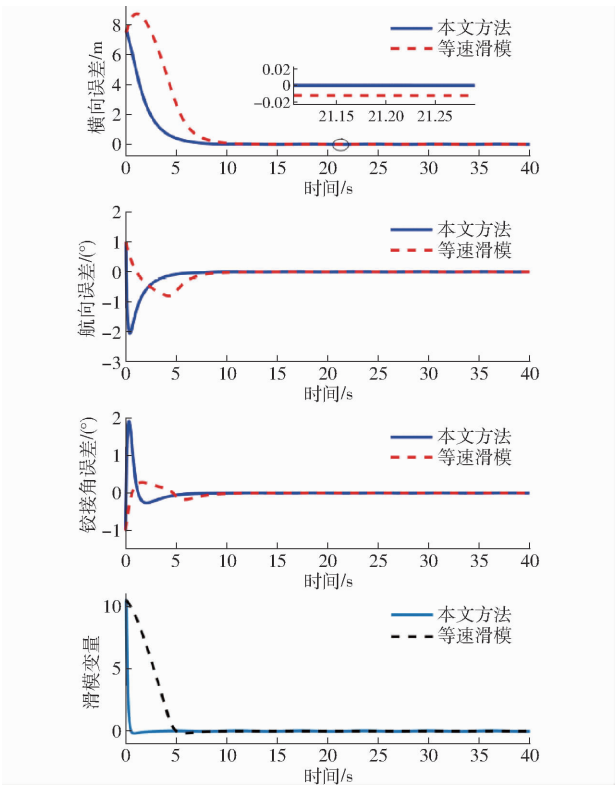


图 5 牵引车辆路径跟踪状态

Fig. 5 Vehicle states of tractor-trailer

20% ;滑模变量从初始状态到趋近于滑模面的时间提升大于 50%。当车辆快速上线进入稳态后,本文控制方法的直线跟踪精度提升大于 20%。仿真结果表明本文提出的模糊快速趋近滑模控制器显著优于传统的等速滑模控制器,进一步,仿真搭建也为实车试验提供了参数选取指导。

4 试验

4.1 试验平台

以东方红-1104 型牵引式施肥机组为试验对象,对本文控制方法有效性进行验证。对其进行电控化改造,加装 2 套北斗星通双天线 RTK 定位定向系统,其中一套位于拖拉机后轴中心处用于记录拖车行驶轨迹;另外一套安装于牵引车辆处,卫星天线放置于牵引机具后轮轴的中心位置,测量其运动过程中的位置与航向信息;通过拖车与挂车间航向角误差可获得铰接角度信息;采用上海联适 EMS2 型转向驱动单元替代原方向盘,其工作电流可达 10 A,具有扭矩大、精度高等特点,IP65 防尘防水,适合农机恶劣作业环境^[27];前轮转角测量采用北京天海科公司 DWQCAB-V-CH 型角度传感器,其线性度为 0.02%,角分辨率为 0.022°;以 STM32F429 芯片为核心开发通用自主行车控制系统,该系统具备多路 RS232/485 串口通信接口、多路 AD/DA 通道、多路数字输入输出通道,满足车辆路径跟踪需求;导航上位机采用工控计算机作为处理核心,采用基于 Qt 环境自主开发的导航软件,其可实现 AB 线导航、全田块导航、轨迹存储等功能,可为控制系统提供车辆位置、航向、铰接角误差等信息^[28]。整体试验平台如图 6 所示。

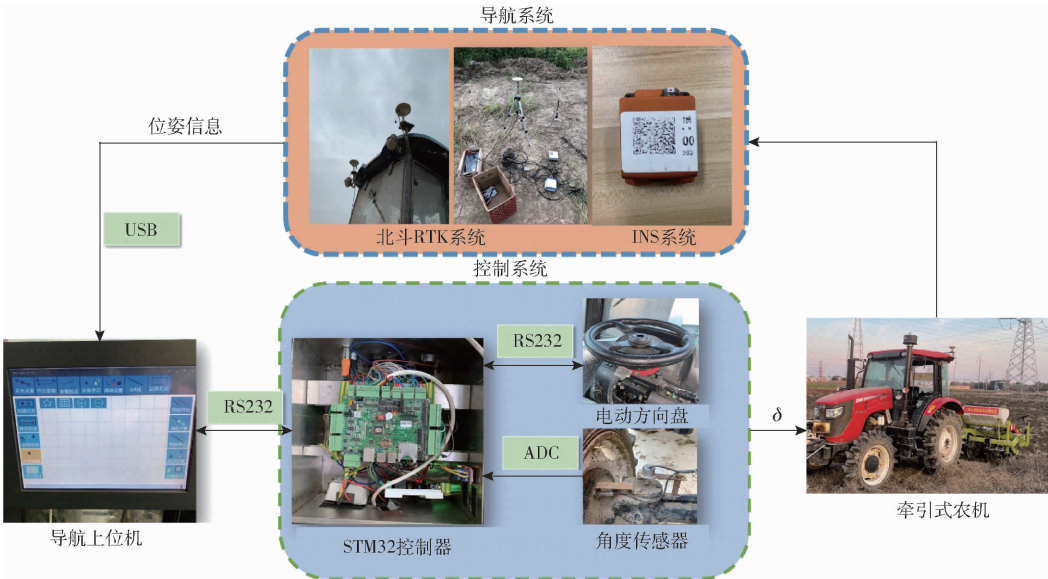


图 6 试验平台

Fig. 6 Test platform

试验前采取人工手持打点设备方式在田间规划出目标直线路径,人工驾驶测试车辆至参考路径附近,开启导航上位机,此后导航上位机按规定报文格式以频率 10 Hz 向下位机控制系统发送位姿等信息。控制系统经报文数据解析、控制算法计算、前轮偏转角闭环控制后实现车辆运动控制。式(2)、(3)中通过辅助误差变量构建简化路径跟踪误差模型。由于期望直线路径已知,为进一步描述牵引机具直线路径跟踪过程,利用点到直线距离公式计算车辆横向误差,计算式为

$$|d| = \frac{|\alpha_1 x_t + \alpha_2 y_t + \alpha_3|}{\sqrt{\alpha_1^2 + \alpha_2^2}} = \frac{|\xi|}{\sqrt{\alpha}}$$

(15)

如图 7 所示,为进行误差极性判断,采取

$$\Delta = (x_{r1} - x_d)(y_{r2} - y_d) - (y_{r1} - y_d)(x_{r2} - x_d)$$

(16)

式中 (x_{r1}, y_{r1}) ——点 T_k 坐标
 (x_{r2}, y_{r2}) ——点 T_{k+1} 坐标
 (x_d, y_d) ——参考点 D_k 坐标

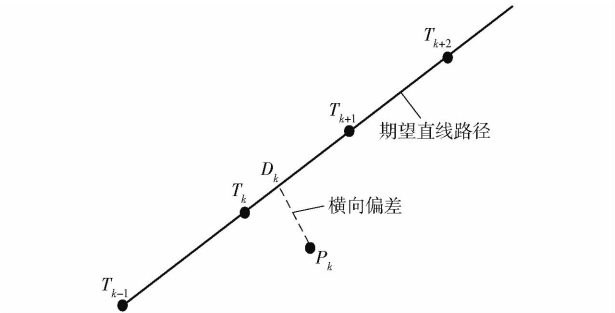


图 7 横向误差计算

Fig. 7 Calculation of lateral deviation

若 $\Delta > 0$ 时,横向误差为负值,反之为正值。此外,航向误差为车辆当前航向与规划路径参考航向之差。在试验过程中导航上位机按照频率 10 Hz 记录车身行驶轨迹与误差信息,并以文本文件格式存储于工控计算机中。分别于平坦水泥路面和田间进行路径跟踪测试,测试场景如图 8 所示。



图 8 试验场景

Fig. 8 Experimental sites

4.2 水泥路面路径跟踪试验

水泥路面实车试验在江苏大学东山操场进行,测试路面为干燥硬质水泥路面,拖车初始横向

误差为 -0.5 m ,选择传统等速趋近滑模算法作为对照组,全过程中拖车与挂车横向误差变化如图 9 所示。

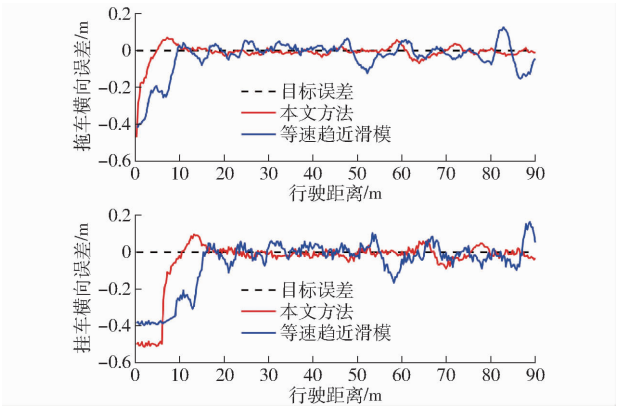


图 9 拖车与挂车横向误差(水泥路面)

Fig. 9 Lateral errors of tractor and trailer (cement pavement road)

由图 9 可看出,除初始条件横向误差 -0.5 m 外,上线后采取本文控制算法的拖车和挂车其路径的横向误差绝对值都保持在 0.07 m 以内,上线效果优异,收敛速度快,且超调和抖振较小。而等速趋近律滑模算法上线较慢,上线后抖振较大,拖车最大横向误差达 0.15 m 。误差见表 2、3。

表 2 上线后拖车路径跟踪误差统计(水泥路面)

Tab. 2 Statistics of tractor path tracking error after online (cement pavement road)

控制器	最大误差/m	平均值/m	方差/m ²
等速趋近滑模	0.15	0.04	0.005 5
本文	0.06	-0.02	0.001 1

表 3 上线后挂车路径跟踪误差统计(水泥路面)

Tab. 3 Statistics of trailer path tracking error after online (cement pavement road)

控制器	最大误差/m	平均值/m	方差/m ²
等速趋近滑模	0.16	0.04	0.006 4
本文	0.07	-0.03	0.001 4

4.3 田间作业路径跟踪试验

田间实车试验在镇江市京口区润果农场试验田中进行,试验时田间为干燥水稻秸秆田。拖车与挂车在 2 种控制器下行驶轨迹如图 10 所示,横向误差如图 11 所示。

拖车与挂车横向误差如表 4 与表 5 所示。由表知基于模糊快速趋近律设计的滑模控制器可使得牵引车辆在行驶到 18 m 处即可上线,其稳态绝对误差最大值为 0.11 m ,跟踪误差方差为 $0.001 3\text{ m}^2$;而基于等速趋近设计的滑模控制器在上线过程中出现超调现象且当行驶到 67 m 处时拖车稳态绝对误差最大值为 0.17 m 。由于基于等速趋近律设计的滑模

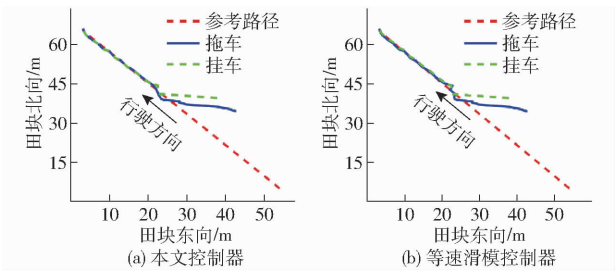


图 10 跟踪轨迹
Fig. 10 Tracking trajectories

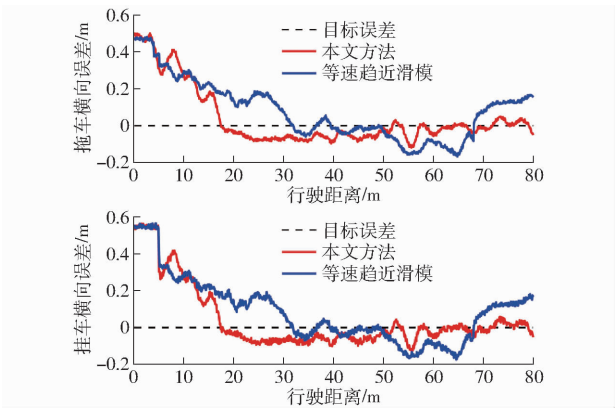


图 11 拖车与挂车横向误差(田间)
Fig. 11 Lateral errors of tractor and trailer on field

表 4 上线后拖车路径跟踪误差统计(田间)
Tab. 4 Statistics of tractor path tracking error
after online (field)

控制器	最大误差/m	平均值/m	方差/m ²
等速趋近滑模	0.17	-0.04	0.006 7
本文	0.11	-0.03	0.001 3

控制器在上线过程中拖车的超调现象,导致挂车同样在上线前出现多次超调现象,其主要原因为基于等速趋近律设计的滑模控制器中存在控制器抖振,导致车辆状态急剧变化,此时挂车最大横向绝对误

表 5 上线后挂车路径跟踪误差统计(田间)
Tab. 5 Statistics of trailer path tracking error
after online (field)

控制器	最大误差/m	平均值/m	方差/m ²
等速趋近滑模	0.18	-0.05	0.007 4
本文	0.12	-0.04	0.001 5

差可达 0.18 m;基于模糊快速趋近律设计的滑模控制器可保持挂车横向误差绝对值在 0.12 m 内。上述试验结果表明本文所设计的控制方法在与基于等速趋近律设计的滑模控制器相比,车辆上线速度提升约 58%,最大跟踪误差减小 66%。

5 结论

- (1)为解决农用牵引式车辆在田间无人自主作业时直线路径跟踪精度不高的问题,本文基于运动学分析,引入辅助误差变量建立直线路径跟踪下的牵引车辆路径跟踪误差模型。
- (2)基于快速趋近律设计农用牵引式车辆直线滑模路径跟踪控制方法,并利用 Lyapunov 理论对系统稳定性进行分析。同时结合模糊理论实现控制器参数整定,提升了车辆路径跟踪的上线速度与稳态跟踪精度,解决传统滑模控制器抖振问题。
- (3)基于 Simulink 仿真软件对本文所提控制算法进行仿真,并利用实车试验平台对所设计控制方法有效性进行验证。实车试验表明相较传统基于等速趋近律设计的滑模控制器,在田间工况下所设计控制方法可使车辆上线速度提升约 58%,最大跟踪误差减小 66%;拖车和挂车最大路径跟踪误差分别为 0.11、0.12 m,拖车和挂车跟踪误差方差分别为 0.001 3、0.001 5 m²。

参 考 文 献

[1] 李道亮,李震. 无人农场系统分析与发展展望[J]. 农业机械学报, 2020, 51(7): 1-12.
LI Daoliang, LI Zhen. System analysis and development prospect of unmanned farming[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(7): 1-12. (in Chinese)

[2] 孟志军,王昊,付卫强,等. 农业装备自动驾驶技术研究现状与展望[J]. 农业机械学报, 2023, 54(10): 1-24.
MENG Zhijun, WANG Hao, FU Weiqiang, et al. Research status and prospects of agricultural machinery autonomous driving [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(10): 1-24. (in Chinese)

[3] SHOJAEI K. Coordinated saturated output-feedback control of an autonomous tractor-trailer and a combine harvester in crop-harvesting operation[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2021, 71(2): 1224-1236.

[4] ALIPOUR K, ROBAT A B, TARVIRDIZADEH B. Dynamics modeling and sliding mode control of tractor-trailer wheeled mobile robots subject to wheels slip[J]. Mechanism and Machine Theory, 2019, 138: 16-37.

[5] 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]. 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]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(10): 30-37. (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] 冀杰,贺庆,赵立军,等. 除草机器人自适应快速积分终端滑模跟踪控制技术[J]. 农业机械学报,2023,54(6):55-64.
JI Jie, HE Qing, ZHAO Lijun, et al. Adaptive fast integrating terminal sliding mode tracking control technique for weeding robot[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(6): 55-64. (in Chinese)
- [8] MURILLO M, SÁNCHEZ G, DENIZ N, et al. Improving path tracking performance of an articulated tractor-trailer system using a non-linear kinematic model[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2022, 196: 106826.
- [9] 唐小涛,陶建峰,李志腾,等. 自动导航插秧机路径跟踪系统稳定性模糊控制优化方法[J]. 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]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(1): 29-34. (in Chinese)
- [10] 林洪振,李彦明,袁正华,等. 水田植保机自主作业滑模抗干扰路径跟踪方法[J]. 农业机械学报,2021,52(9):383-388.
LIN Hongzhen, LI Yanming, YUAN Zhenghua, et al. Sliding mode anti-interference path tracking method for autonomous operation of paddy field plant protection machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(9): 383-388. (in Chinese)
- [11] 景云鹏,刘刚,金志坤. 农田平地机导航侧滑估计与自适应控制方法[J]. 农业机械学报,2020,51(9):26-33.
JING Yunpeng, LIU Gang, JIN Zhikun. Adaptive guidance control method with sideslip estimation for land leveler pulling by tractor[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(9): 26-33. (in Chinese)
- [12] 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]. 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]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(2): 59-65. (in Chinese)
- [13] 沈跃,张亚飞,刘慧,等. 农业装备自动控制技术研究综述[J]. 农业机械学报,2023,54(8):1-18.
SHEN Yue, ZHANG Yafei, LIU Hui, et al. Research review of agricultural equipment automatic control technology[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(8): 1-18. (in Chinese)
- [14] 史扬杰,程馨慧,奚小波,等. 农业机械导航路径跟踪控制方法研究进展[J]. 农业工程学报,2023,39(15):1-14.
SHI Yangjie, CHENG Xinhui, XI Xiaobo, et al. Research progress on the path tracking control methods for agricultural machinery navigation[J]. Transactions of the CSAE, 2023, 39(15): 1-14. (in Chinese)
- [15] 黄皓,涂群章,蒋成明,等. 基于扰动观测器的农用驱动电机变速滑模控制[J]. 农业机械学报,2022,53(7):447-458.
HUANG Hao, TU Qunzhang, JIANG Chengming, et al. Variable speed sliding mode control of agricultural drive motor based on disturbance observer[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(7): 447-458. (in Chinese)
- [16] 张凯,全力,晋世博. 电动拖拉机永磁电机模糊滑模无传感器控制研究[J]. 农业机械学报,2023,54(9):431-438.
ZHANG Kai, QUAN Li, JIN Shibao. Sensorless control of permanent magnet motor for electric tractor based on fuzzy sliding mode observer[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(9): 431-438. (in Chinese)
- [17] 赵翊,杨珏,张文明,等. 农用轮式铰接车辆滑模轨迹跟踪控制算法[J]. 农业工程学报,2015,31(10):198-203.
ZHAO Xuan, YANG Jue, ZHANG Wenming, et al. Sliding mode control algorithm for path tracking of articulated dump truck[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(10): 198-203. (in Chinese)
- [18] UTKIN V I, POZNYAK A S. Adaptive sliding mode control with application to super-twist algorithm: equivalent control method[J]. Automatica, 2013, 49(1): 39-47.
- [19] JI X, DING S, WEI X, et al. Path tracking of unmanned agricultural tractors based on a novel adaptive second-order sliding mode control[J]. Journal of the Franklin Institute, 2023, 360(8): 5811-5831.
- [20] SUN H, LI S, SUN C. Finite time integral sliding mode control of hypersonic vehicles[J]. Nonlinear Dynamics, 2013, 73(1): 229-244.
- [21] ZHENG E H, XIONG J J, LUO J L. Second order sliding mode control for a quadrotor UAV[J]. ISA Transactions, 2014, 53(4): 1350-1356.
- [22] YAN Z, WANG M, XU J. Robust adaptive sliding mode control of underactuated autonomous underwater vehicles with uncertain dynamics[J]. Ocean Engineering, 2019, 173: 802-809.
- [23] ZHANG L, DING H, SHI J, et al. An adaptive backstepping sliding mode controller to improve vehicle maneuverability and stability via torque vectoring control[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2020, 69(3): 2598-2612.
- [24] 贾全,张小超,苑宏伟,等. 拖拉机自动转向系统容错自适应滑模控制方法[J]. 农业工程学报,2018,34(10):76-84.
JIA Quan, ZHANG Xiaochao, YUAN Yanwei, et al. Fault-tolerant adaptive sliding mode control method of tractor automatic steering system[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(10): 76-84. (in Chinese)
- [25] 刘金琨. 滑模变结构控制 MATLAB 仿真[M]. 北京:清华大学出版社,2005.
- [26] 高为炳. 变结构控制的理论及设计方法[M]. 北京:科学出版社,1996.
- [27] 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 CSAE, 2019, 35(6): 10-17. (in Chinese)
- [28] 周俊,何永强. 农业机械导航路径规划研究进展[J]. 农业机械学报,2021,52(9):1-14.
ZHOU Jun, HE Yongqiang. Research progress on navigation path planning of agricultural machinery[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(9): 1-14. (in Chinese)