

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.S2.033

液压四驱喷雾机模糊防滑控制系统设计与试验

周倩倩¹ 温浩军^{1,2} 李中祥¹ 张伟荣¹ 易哲田¹ 王国良¹

(1. 石河子大学机械电气工程学院, 石河子 832000; 2. 农业农村部西北农业装备重点实验室, 石河子 832000)

摘要: 自走式喷雾机由于其作业路面复杂多样易产生滑转,需防滑控制保持机具稳定驱动,本文提出一种模糊防滑控制策略,设计了控制器,并在 Matlab/Simulink 中对控制系统进行了仿真分析,仿真结果表明:该模糊防滑控制系统可以有效将滑转率控制在 0.05 左右。最后通过田间试验验证了驱动防滑控制系统的性能,试验表明,所设计的全时四驱液压驱动喷雾机模糊防滑控制机具在低速行进时,未开启防滑控制时相对滑转率均值为 0.078,开启后相对滑转率均值为 0.028;在中速行进时,未开启防滑控制时相对滑转率均值为 0.109,开启后滑转率均值为 0.031;在高速行进时,未开启防滑控制时相对滑转率均值为 0.110,开启后相对滑转率均值为 0.035,表明了该控制系统防滑控制效果良好。

关键词: 自走式喷雾机; 防滑控制; 电液控制; 控制策略; 试验

中图分类号: S491 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2020)S2-0283-06

Design and Test of Fuzzy Anti-skid Control of Four-wheel Drive Hydraulically Driven Sprayer

ZHOU Qianqian¹ WEN Haojun^{1,2} LI Zhongxiang¹ ZHANG Weirong¹ YI Zhetian¹ WANG Guoliang¹

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Shihezi University, Shihezi 832000, China)

(2. Northwest Key Laboratory of Agricultural Equipment, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Shihezi 832000, China)

Abstract: During the field of self-propelled sprayer, due to the large quantity and volume of whole vehicle and its working on the complex and diverse road, which lead to the self-propelled sprayer prone to slip, and requires an anti-skid control strategy to maintain stable driving of the machine. For this reason, a fuzzy anti-skid control strategy and controller was proposed. Based on the control system, the simulation analysis of the controlling system was carried out by Matlab/Simulink, the simulation result showed that the fuzzy anti-skid control system can effectively control the slip rate at the ideal of 0.05. Finally, the performance of the driving anti-skid control system was verified through field tests. The result of the experiment showed that when the design of the full-time four-wheel drive hydraulically driven sprayer fuzzy anti-skid control device was traveling at low speed, the average slip rate was 0.078 with the situation of without anti-skid control. By contest, when the opening of the anti-skid the average slip rate was 0.028; when the self-propelled sprayer traveling with a medium speed and the anti-skid control was closed, the average slip rate was 0.109. However, when the anti-skid control was turned on and the average slip rate was 0.031; when the self-propelled sprayer traveling with a high speed and the anti-skid control was closed, the average slip rate was 0.110, but the average slip rate was 0.035 after it was opened. Above experiments indicated that the control system had a good anti-skid control effect. The research results provided a theoretical basis for the anti-skid control of four-wheel drive hydraulically system of self-propelled sprayer.

Key words: self-propelled spray machine; anti-slip control; electro-hydraulic control; control strategy; test

收稿日期: 2020-08-09 修回日期: 2020-09-18

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0200705, 2017YFD0201904)

作者简介: 周倩倩(1996—),女,硕士生,主要从事农业机械设计及其自动化研究, E-mail: 1947798872@qq.com

通信作者: 温浩军(1971—),男,研究员,博士生导师,主要从事农业机械设计及其自动化研究, E-mail: 547273950@qq.com

0 引言

棉花是新疆农业经济的支柱产业,由于棉花高密度栽培形成的行距狭窄、植株超密、封行超早、枝叶总量超多的情况^[1],使得常规植保喷雾机具不能满足现行植保作业要求,尤其在棉花机械采收前喷施脱叶催熟剂作业中,药剂难以喷施到棉花中下层枝叶和叶片背面,作业效果差、农药有效利用率低^[2]。我国农业经济种植模式总体向着密植化和智能精量方向发展。而密植模式使得精量作业变得困难,植株株高较高且间距短,传统的喷洒模式很难深入株群中央位置,植株冠层中下部位也难以被雾滴流穿透,因此具有强力喷洒能力和超长臂展且能够精准喷雾的自走式喷杆喷雾机的需求将会越来越大。

打滑往往会伴随作业姿态和速度的不稳定造成施药量的不均匀^[3]。同时,由于打滑可能导致底盘沉降^[4],不仅有可能损伤作物,严重时还会损毁喷雾机具甚至对驾驶员的安全产生威胁。对于此类喷雾机,需要搭载具有防滑控制的驱动系统^[5]。喷雾机作业过程中会经过不同时期、不同湿度、不同颗粒度和不同黏度的路面谱^[6],而且其防滑控制涉及到驱动转向角、驱动轮转速以及驱动轮扭矩等连续变量,同时又与试验平台的轮距、轴距、载量都有关系^[7]。因此本文提出一种模糊防滑控制系统,根据液压驱动原理和喷雾机驱动时的受力情况设计模糊防滑控制系统方案,并在 Matlab/Simulink 中对该控制系统进行仿真分析,最后通过田间试验验证该驱动防滑控制系统的防滑控制效果。

1 液压四驱模糊防滑控制系统设计方案

1.1 液压驱动原理

在现有机具基础上,制定了自走式喷雾机防滑控制布局设计方案如图 1 所示。采用双泵四马达闭式调速回路,底盘动力传动路线为发动机经过发动机、液压泵、RTM 防滑控制阀、液压马达、减速器驱动车轮转动;其中主要包含 RTM 防滑控制阀,它可以将液压泵的单路流量分成四通道分别与对应的 4 个轮边马达相连,从而实现对各驱动轮驱动状态的单独控制。

1.2 车轮滑转判断

本文所设计的高地隙自走式喷雾机为四轮独立驱动,故采用单轮车辆模型进行建模分析,假设喷雾机处于直线行驶状态,考虑其车轮的滚动阻力,单轮受力分析如图 2 所示^[8]。

根据图 2 得到车轮运动微分方程为

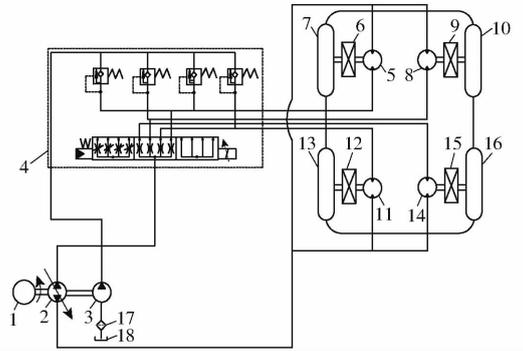


图 1 驱动布局图

Fig. 1 Drive layout

1. 发动机 2. 主油泵 3. 副油泵 4. RTM 防滑控制阀 5. 左前马达 6. 左前加速器 7. 左前轮 8. 右前马达 9. 右前减速器 10. 右前轮 11. 左后马达 12. 左后减速器 13. 左后轮 14. 右后马达 15. 右后减速器 16. 右后轮 17. 过滤器 18. 油箱

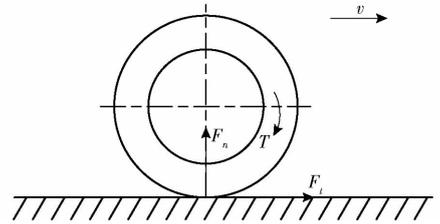


图 2 单个轮胎受力分析图

Fig. 2 Stress analysis diagram of single tire

$$m \dot{v} = F_t - \varphi F_n \quad (1)$$

$$T = \frac{pV}{2\pi} \eta_m i \eta_j \quad (2)$$

$$F_t = \frac{2T}{D} \quad (3)$$

- 式中 m ——机具质量, kg
 v ——行驶速度, km/h
 F_t ——车轮与路面之间的附着力, N
 φ ——路面附着系数
 F_n ——车轮与路面之间的垂直载荷, N
 T ——作用在车轮的力矩, N·mm
 p ——液压马达压力, MPa
 V ——液压马达排量, cm³/r
 η_m ——液压马达机械效率
 i ——减速器中齿轮传动比
 η_j ——减速器机械效率
 D ——车轮直径, mm

以最低转速车轮(设转速为 n_1)为基准,判断四轮相对打滑情况。则各车轮相对滑转率为

$$S_c = \frac{n_i - n_1}{n_i} \quad (i = 1, 2, 3, 4) \quad (4)$$

假设最低转速车轮滑转率为 S_0 , 则其转速为

$$n_1 = \frac{v}{R(1 - S_0)} \quad (5)$$

式中 R ——车轮半径

当车轮滑转率 $S \in (0.05, 0.15)$ 时, 车轮在土路面上具有较高的纵向附着系数^[9-10], 由于最低速车轮本身存在一些滑转, 为了使其他车轮也都可以处于最佳滑转率范围内行驶, 将理想的相对滑转率取为 0.05。

采用转速传感器实时采集 4 个车轮转速, 并根据式(4)计算相对滑转率, 当 $S_c > 0.05$ 时, 对该轮进行滑转率控制。

1.3 模糊防滑控制模型建立

模糊防滑控制系统框图如图 3 所示。当驾驶控制面板开始动作时, 速度传感器根据驱动轮的实际转动情况, 将带有矢量的速度传递给防滑控制器, 再根据速度计算各车轮相对滑移率^[11-13], 然后防滑控制器再根据控制策略对 RTM 阀进行调节以控制液压马达流量。

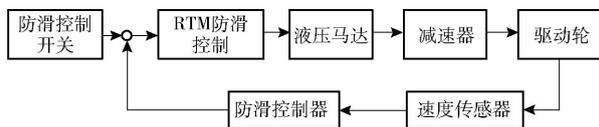


图 3 模糊防滑控制系统框图

Fig. 3 Fuzzy anti-skid control block diagram

2 液压四驱防滑控制策略设计与仿真

2.1 模糊控制器设计

由于喷雾机的防滑控制是一个动态多样的过程, 拥有多个变量和多重离散因素, 本文采用模糊控制策略进行控制^[14-15], 图 4 为模糊控制原理图。

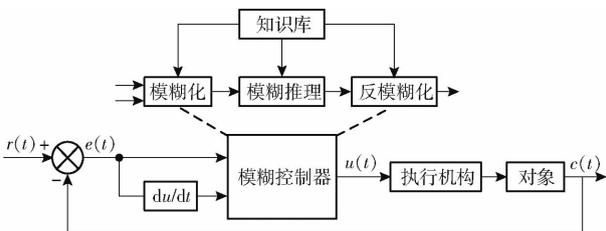


图 4 模糊控制原理图

Fig. 4 Schematic of fuzzy control

根据上述防滑控制原理, 输入模型应变量为驱动桥滑转率差值 $R = S_c - S_0$ 及其变化率 R_c , 输出 V_{out}

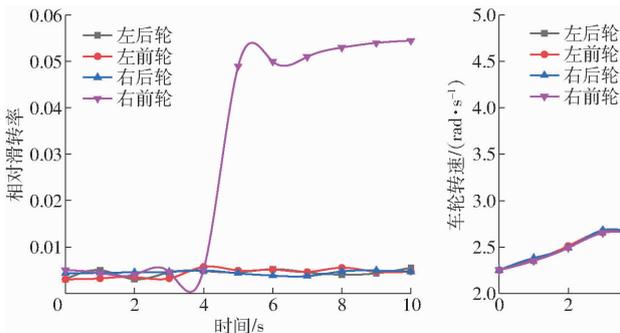


图 6 防滑模糊控制系统响应特性

Fig. 6 Response characteristics of anti-slip fuzzy control system

为 RTM 阀控电压, 控制器结构如图 5 所示。

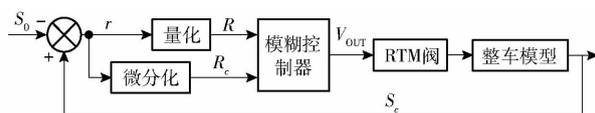


图 5 模糊控制器结构

Fig. 5 Fuzzy controller structure

2.2 模糊控制规则

根据所设计的模糊控制器结构, 可知条件语句为滑转率差值与其变化率, 当相对滑转率差值较大时, RTM 阀干预较大, 而当相对滑转率差值较小时, RTM 阀干预较小^[16-20]。通过对防滑控制过程进行分析的控制思路为: 当 $R < 0, R_c < 0$ 时, $V_{out} = 0$ 。当 $R < 0, R_c > 0$ 时, V_{out} 为以 R_c 为自变量的因变量。当 $R = 0, R_c = 0$ 时, 无需调节 RTM 阀输入。由此建立了喷雾机模糊控制策略, 如表 1 所示。

表 1 基于 RTM 阀的防滑模糊控制器控制规则

Tab. 1 Control rule of anti-slip fuzzy controller based on RTM valve and parameters of whole machine of highland gap spray rod spray machine

滑转率差值 R	滑转率变化率 R_c						
	NL	NM	NS	ZE	PS	PM	PL
NS	ZE	ZE	ZE	ZE	ZE	PS	PS
ZE	ZE	ZE	ZE	ZE	PS	PS	PM
PS	ZE	ZE	PS	PS	PM	PM	PL
PM	ZE	PS	PS	PM	PL	PVL	PVL
PL	PS	PS	PM	PL	PVL	PVL	PVL
PVL	PS	PM	PL	PVL	PVL	PVL	PVL

3 模糊防滑控制策略仿真

结合上文所建立的模糊控制策略, 建立了 Matlab/Simulink 模糊控制模型^[21-22]。当试验平台从 3 km/h 加速至 6 km/h, 预设当速度平稳在 6 km/h 第 5 秒时, 使右前桥强制为滑转态, 仿真结果如图 6 所示。

由图 6 可知, 模糊防滑控制可以有效将右前轮相对滑转率控制在 0.05 左右, 右前轮转速得到有效控制, 未发生严重打滑现象, 且车速相比无控制时得

到一定提高。

4 田间试验

4.1 试验

自走式喷杆喷雾机驱动系统防滑控制性能田间试验于2019年5月中旬进行,试验地点选择在中农丰茂植保公司试验田,如图7所示。试验前将药箱注水直至满载,模拟装药量1800 L,并将自走式喷杆喷雾机行驶至预设滑转试验地段,对该地段进行注水工作。在正常试验及滑转试验地段分别架设高速摄影机记录行走姿态,并在该路段随机选出10个测试点,计算各车轮相对滑转率。将自走式喷杆喷雾机左前轮记为驱动轮1、左后轮记为驱动轮2、右后轮记为驱动轮3、右前轮记为驱动轮4^[23],如图8所示。



图7 自走式喷杆喷雾机田间试验

Fig.7 Field test chart of self-propelled sprayer

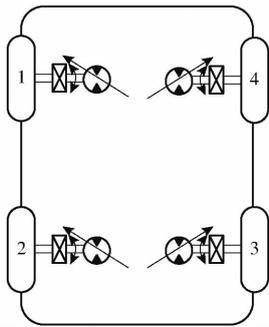


图8 轮号标记图

Fig.8 Round number map

4.2 试验方案

使用计算机通过RS232接口采集驱动系统的压力、温度、转向角、行驶速度以及在不同试验地段上以各种速度行驶时,滑转产生的时刻、时长、次数。

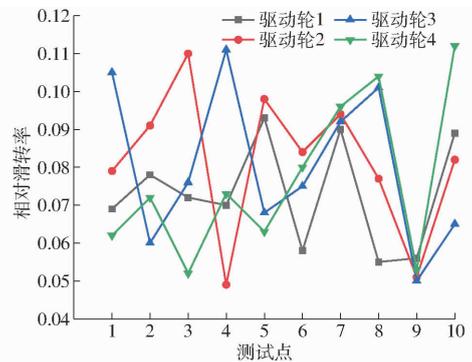
(1) 喷雾机以低速挡位3 km/h速度分别在普通试验和滑转试验地段行进并逐渐将速度提高至6 km/h。在滑转地段产生滑转后开启防滑控制,将车辆行至终点后洁净车轮,再以3 km/h速度在滑转路段行进加速至6 km/h。

(2) 喷雾机以中速挡位8 km/h速度分别在普通试验和滑转试验地段行进并逐渐将速度提高至12 km/h。在滑转地段产生滑转后开启防滑控制,将车辆行至终点后洁净车轮,再以8 km/h速度在滑转路段行进加速至12 km/h。

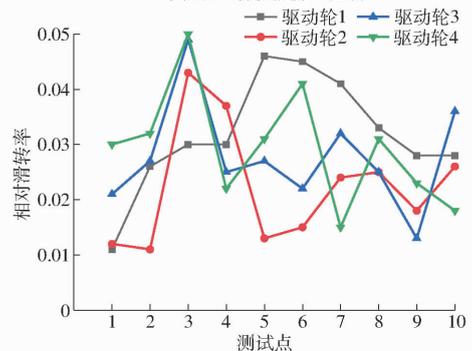
(3) 喷雾机以高速挡位12 km/h速度分别在普通试验和滑转试验地段行进并逐渐将速度提高至15 km/h。在滑转地段产生滑转后开启防滑控制,将车辆行至终点后洁净车轮,再以12 km/h速度在滑转路段行进加速至15 km/h。

4.3 试验结果与分析

低速作业未开启模糊防滑控制时(图9a),其相对滑转率均值为0.078,四驱动轮均表现出一定的滑转现象。开启模糊防滑控制后低速作业组四轮相对滑转率均在滑转极限内(图9b),其相对滑转率均值为0.028,在测试点3时,驱动轮2、驱动轮3、驱动轮4的相对滑转率均上升。其中驱动轮3达到0.049,驱动轮2达到0.043。



(a) 未开启模糊防滑控制



(b) 开启模糊防滑控制

图9 低速组试验结果对比

Fig.9 Comparison charts of experimental results of low-speed group

中速作业未开启模糊防滑时(图10a),相对滑转率均值为0.109,一开始出现较为明显的滑转,其中驱动轮3在测试点9与测试点10之间产生流量汇集现象,喷雾机向驱动轮3轮侧沉降。开启模糊防滑控制后整个测试阶段未产生滑转现象(图10b),相对滑转率均值为0.031,在测试点8驱动轮3与驱动轮4相对滑转率有明显上升,可能是瞬时对角线驱动轮离地。

高速作业组不开启模糊防滑控制时(图11a),车轮保持行走姿态平稳较为困难,横摆和侧倾明显。开启模糊防滑控制后(图11b),在测试点2驱动轮3出现滑转,滑转率达到0.051,超过滑转标准0.001。

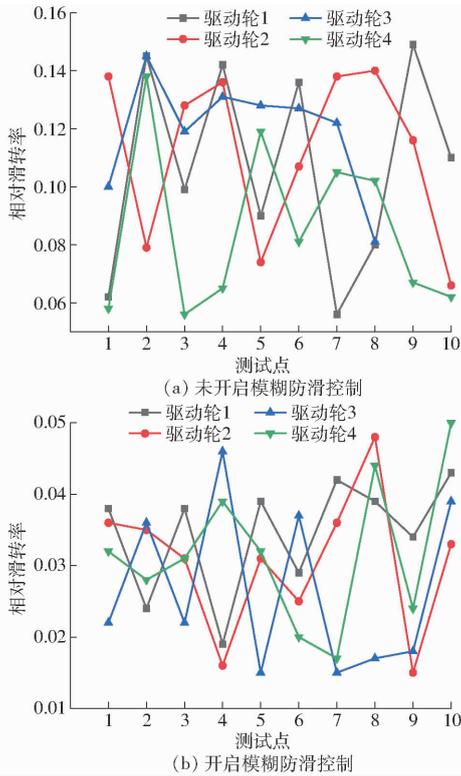


图 10 中速组试验结果对比

Fig. 10 Comparison charts of experimental results of medium speed group

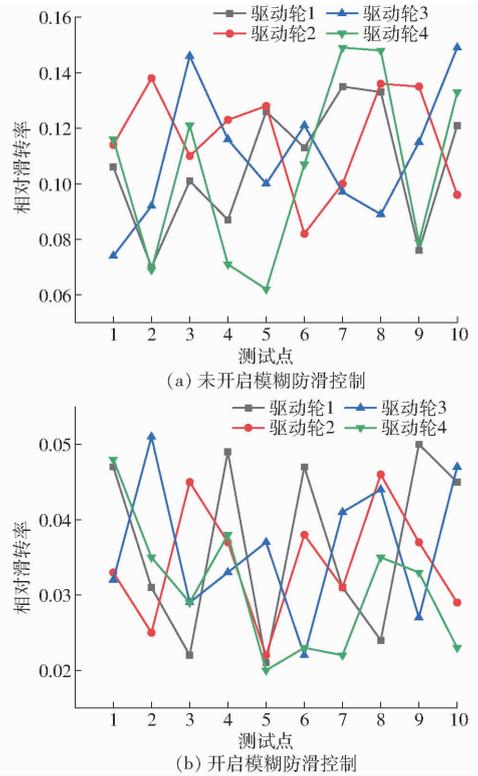


图 11 高速组试验结果对比

Fig. 11 Comparison charts of experimental results of high speed group

通过高速摄影录像,未观察到滑转现象。

5 结论

(1)模糊控制将喷雾机各轮相对滑转率控制在0.05左右,田间试验与仿真趋势一致,其中驱动轮3即右后轮平均滑转率最高,驱动轮1即左前轮平均滑转率最低。

(2)所设计的全时四驱液压驱动喷雾机模糊防滑控制机具低速行进时,未开启模糊防滑控制相对滑转率均值为0.078,开启后相对滑转率均值为0.028;在中速行进时,未开启防滑控制时相对滑转率均值为0.109,开启后相对滑转率均值为0.031;在高速行进时,未开启防滑控制时相对滑转率均值为0.110,开启后相对滑转率均值为0.035。

参 考 文 献

- [1] 周艳. 气力式静电感应喷雾系统研究[D]. 北京:中国农业大学,2015.
ZHOU Yan. Research on pneumatic static induction spray system [D]. Beijing: China Agricultural University, 2015. (in Chinese)
- [2] 潘佛维. 密植作物用植保机械分禾装置的研究[D]. 石河子:石河子大学,2018.
PAN Fochu. Research on plant protection machinery for close planting crops [D]. Shihezi: Shihezi University, 2018. (in Chinese)
- [3] 丁凯. 高地隙喷雾机侧倾稳定性建模及控制方法研究[D]. 石河子:石河子大学,2019.
DING Kai. Research on modeling and control method of roll stability of high ground clearance sprayer [D]. Shihezi: Shihezi University, 2019. (in Chinese)
- [4] 何咨毅. 分布式电驱车辆牵引力控制的研究[D]. 秦皇岛:燕山大学,2019.
HE Ziyi. Research on distributed electric drive vehicle traction control [D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2019. (in Chinese)
- [5] 周良富,薛新宇,周立新,等. 果园变量喷雾技术研究现状与前景分析[J]. 农业工程学报,2017,33(23):80-92.
ZHOU Liangfu, XUE Xinyu, ZHOU Lixin, et al. Research status and prospect analysis of variable spray technology in orchard [J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(23): 80-92. (in Chinese)
- [6] 张硕. 基于滑模变结构的重型拖拉机犁耕作业滑转率控制方法研究[D]. 北京:中国农业大学,2018.
ZHANG Shuo. Research on the control method of heavy tractor plowing slip rate based on sliding mode variable structure [D]. Beijing: China Agricultural University, 2018. (in Chinese)
- [7] 鲁浩. 基于瞬时转向中心实时估计的滑动转向车辆运动轨迹预测方法研究[D]. 北京:北京理工大学,2016.

- LU Hao. Research on the prediction method of sliding steering vehicle trajectory based on instantaneous steering center real-time estimation[D]. Beijing:Beijing Institute of Technology, 2016. (in Chinese)
- [8] 倪静,毛罕平,韩绿化,等.高地隙四轮驱动喷雾机防滑系统控制仿真与试验[J].农业机械学报,2010,41(12):13-16,21.
NI Jing, MAO Hanping, HAN Luhua, et al. Control simulation and test of anti-skid system for upline gap four-wheel drive spray machine [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(12):13-16, 21. (in Chinese)
- [9] IVANOV V, SAVITSKI D, AUGSBURG K, et al. Wheel slip control for all-wheel drive electric vehicle with compensation of road disturbances[J]. Journal of Terramechanics, 2015, 61(10):1-10.
- [10] 陈随英.高地隙自走式喷雾机全工况滑转率控制方法研究[D].北京:中国农业大学,2017.
CHEN Suiying. Research on the control method of slip rate of high ground clearance self-propelled sprayer in all working conditions[D]. Beijing:China Agricultural University, 2017. (in Chinese)
- [11] 周兵,徐蒙,袁希文,等.基于滑模极值搜索算法的车辆驱动防滑控制策略[J/OL].农业机械学报,2015,46(2):307-311,342.
ZHOU Bing, XU Meng, YUAN Xiwen, et al. Acceleration slip regulation based on extremum seeking control with sliding mode [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(2):307-311, 342. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20150245&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.02.045. (in Chinese)
- [12] NAM K, HORI Y, LEE C. Wheel slip control for improving traction-ability and energy efficiency of a personal electric vehicle [J]. Energies, 2015, 8(7):6820-6840.
- [13] 凌铭泽.模型驱动的汽车稳定性控制系统关键技术研究[D].长春:吉林大学,2019.
LING Mingze. Research on key technologies of model-driven vehicle stability control system[D]. Changchun:Jilin University, 2019. (in Chinese)
- [14] 洪亮.一种四轮驱动混合动力电动汽车的驱动防滑控制研究[D].福州:福州大学,2010.
HONG Liang. Research on the anti-skid control of a four-wheel drive hybrid electric vehicle[D]. Fuzhou:Fuzhou University, 2010. (in Chinese)
- [15] 宋琦,王卫兵,喻俊志,等.移栽机械臂的设计及仿真研究[J].中国农机化学报,2020,41(5):12-16.
SONG Qi, WANG Weibing, YU Junzhi, et al. Design and simulation research of transplanting robot arm [J]. Journal of Chinese Agricultural Machanization, 2020, 41(5):12-16. (in Chinese)
- [16] 鲍婕.某6×6车辆操纵稳定性研究[D].北京:北京理工大学,2015.
BAO Jie. Research on the handling and stability of a 6×6 vehicle[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2015. (in Chinese)
- [17] HE J, ZUO X, ZHANG C, et al. Anti-slip control based on optimal slip ratio for heavy-haul locomotives[J]. The Journal of Engineering, 2019(23):9069-9074.
- [18] 孟淑丽,郝雷.基于模糊PID的农业智能喷雾控制系统设计与试验[J].农业工程,2019,9(11):36-38.
MENG Shuli, HAO Lei. Design and experiment of agricultural intelligent spray control system based on fuzzy PID [J]. Agricultural Engineering, 2019, 9(11):36-38. (in Chinese)
- [19] 江英杰,张合吉,陶功权,等.防滑控制参数对高速车辆车轮磨损的影响[J].中南大学学报(自然科学版),2019,50(12):3007-3014.
JIANG Yingjie, ZHANG Heji, TAO Gongquan, et al. Influence of anti-skid control parameters on wheel wear of high-speed vehicles [J]. Journal of Central South University (Natural Science Edition), 2019, 50(12):3007-3014. (in Chinese)
- [20] ZIREK A, VOLTR P, LATA M. Validation of an anti-slip control method based on the angular acceleration of a wheel on a roller rig [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 2019: 0954409719881085.
- [21] 薛涛,李伟,杜岳峰,等.大型高地隙喷雾机喷杆主动悬架自适应模糊滑模控制[J].农业工程学报,2018,34(21):47-56.
XUE Tao, LI Wei, DU Yuefeng, et al. Adaptive fuzzy sliding mode control for active suspension of high altitude gap sprayer [J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(21):47-56. (in Chinese)
- [22] 殷新东.基于模糊算法的工程机械驱动防滑控制系统的设计与研究[D].南京:南京农业大学,2011.
YIN Xindong. Design and research of anti-skid control system for construction machinery drive based on fuzzy algorithm [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2011. (in Chinese)
- [23] 毛罕平,倪静,韩绿化,等.高地隙液压四轮驱动喷雾机转向防滑控制系统[J/OL].农业机械学报,2012,43(6):58-62.
MAO Hanping, NI Jing, HAN Luhua, et al. Steering anti-skid control system for hydraulic four-wheel drive sprayer at high gap [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(6):58-62. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20120611&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.06.011. (in Chinese)