

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2024.05.014

基于变量马达控制的喷雾机驱动防滑系统设计与试验

孙恬恬^{1,2} 毛恩荣^{1,2} 傅梁起^{1,2} 宋正河^{1,2} 李臻^{1,2} 李平³

(1. 中国农业大学工学院, 北京 100083; 2. 智能农业动力装备全国重点实验室, 北京 100083;

3. 塔里木大学机械电气化工程学院, 阿拉尔 843300)

摘要: 高地隙自走式喷雾机因其作业环境复杂易产生车轮滑转,影响静液压驱动系统流量及压力稳定性,严重时导致整机失去通过性能,故须进行防滑控制,保证其具备驱动稳定性和脱困能力。本文提出一种高地隙自走式喷雾机静液压驱动系统防滑控制方法,采用双线性模型定义滑转率与附着系数之间的关系,设计了滑模控制器,并通过田间非道路试验验证了驱动防滑系统的控制性能。试验结果表明,该系统可将喷雾机滑转率控制在0.15以内。在起步加速与匀速工况下,喷雾机滑转率均值为0.020和0.019;在越沟工况下,可2s内实现整机快速脱困。以上结果验证了所设计的喷雾机滑模驱动防滑系统具有良好的防滑性能,能够保证喷雾机在典型工况下平稳行驶,有效减少了地面不利条件对整机行驶稳定性的影响。

关键词: 喷雾机; 静液压驱动; 防滑控制; 滑模控制; 滑转率

中图分类号: S491 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2024)05-0158-09

OSID:



Design and Experiment of Spray Machine Drive Anti-skid System Based on Variable Motor Control

SUN Tiantian^{1,2} MAO Enrong^{1,2} FU Liangqi^{1,2} SONG Zhenghe^{1,2} LI Zhen^{1,2} LI Ping³

(1. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China

2. National Key Laboratory of Intelligent Agricultural Power Equipment, Beijing 100083, China

3. College of Mechanical and Electronic Engineering, Tarim University, Alar 843300, China)

Abstract: The self-propelled sprayer for high ground clearance is prone to wheel slippage in complex operating environments, which can affect the flow and pressure stability of the static hydraulic drive system. In severe cases, this can lead to a loss of maneuverability, necessitating the implementation of anti-skid control to ensure stable driving performance and the ability to escape from difficult situations. A static hydraulic drive system anti-skid control scheme was proposed for a large-scale self-propelled sprayer for high ground clearance. It defined the relationship between slip ratio and adhesion coefficient by using a bilinear model, and a sliding mode controller was designed. Field off-road tests were conducted to validate the control performance of the anti-skid system. The experimental results demonstrated that the system can control the sprayer's slip ratio within 0.15. Under conditions of initial acceleration and constant speed, the mean slip ratios were 0.020 and 0.019, respectively. Moreover, under ditch-crossing conditions, the entire machine can be rapidly freed within 2 s. These results confirmed that the designed sliding mode anti-skid system for the sprayer exhibited excellent anti-skid performance, ensuring smooth operation under typical conditions and effectively reducing the impact of unfavorable ground conditions on overall stability. The research did not utilize flow control valves or diverter valves, ensuring high control precision. It held the potential to achieve comprehensive and continuous anti-skid control for large-scale high ground clearance sprayers, thereby enhancing their driving stability, ground traversability, and active escape capability.

Key words: sprayer; hydraulic driving; anti-skid control; sliding mode control; slip rate

收稿日期: 2024-02-19 修回日期: 2024-03-12

基金项目: 兵团财政科技计划项目(2022DB001)和拼多多-中国农业大学研究基金项目(PC2023B01005)

作者简介: 孙恬恬(1998—),女,硕士生,主要从事液压系统与智能控制技术研究,E-mail: tiantian.sun@cau.edu.cn

通信作者: 李臻(1988—),男,副教授,博士生导师,主要从事农机装备智能传感与控制技术研究,E-mail: zhenli@cau.edu.cn

0 引言

大型高地隙喷雾机能够有效提高高秆作物农田的管理效率,降低劳动成本,提高农业产量和质量,其多采用分布式静液压驱动系统,以同时满足结构布置灵活、动力输出平稳和绝对动力性强等需求。然而,田间路面附着条件及不平度随机度高、复杂性高,导致喷雾机容易出现单轮或多轮打滑现象,影响其行驶稳定性、作业安全性及农业生产效率^[1-2]。

针对此问题,周倩倩等^[3]以液压四驱喷雾机为研究对象,提出了一种模糊防滑控制策略,并设计开发了相应的控制系统,通过仿真和田间试验验证了系统性能。倪静等^[4]以喷雾机车轮的相对滑转率为控制目标,提出了一种基于模糊控制的防滑控制系统,并开展了仿真验证。毛罕平等^[5]针对喷雾机转向工况下的防滑问题,开展了转向电液防滑控制设计及试验验证。陈随英^[6]提出了基于主动电比例防滑控制阀的喷雾机防滑驱动方案,设计了基于全工况的主动滑转率控制策略。付拓^[7]针对水田喷雾机设计了阀控液压马达系统驱动防滑模糊PID控制器,搭建了阀控液压试验台,并开展了单轮滑转控制试验研究。上述研究针对不同类型喷雾机多种工况,均以阀控液压系统为基础实现了驱动系统的主动防滑控制功能,即在液压回路中加装分流阀,通过控制分流阀开度调整流向各驱动马达的流量,达到驱动防滑的控制目的。采用此类方案将造成较大的节流损失,系统发热量大、能耗较高,不宜长时间连续使用。

本文设计一种针对高地隙喷雾机变量马达控制的全时静液压驱动防滑控制方案,基于滑模控制在Matlab/Simulink中开展仿真,并通过田间非道路试验验证该系统的防滑控制效果,以期实现大型高地隙喷雾机全工况全时驱动防滑控制,提高其行驶稳定性、地面通过性及主动脱困能力。

1 驱动防滑原理与系统建模

1.1 液压驱动方案与防滑原理

以某型喷雾机为研究对象,其静液压驱动系统方案如图1所示,采用单泵-四变量马达闭式调速回路。以发动机为动力源,功率流依次经变量泵、变量马达、减速器传至驱动轮。表1为该喷雾机主要参数。

在该设计方案中,当喷雾机某一车轮由于地面附着条件恶化而出现打滑时,系统压力等于负载转矩最小车轮所对应的马达压力,导致整车牵引力不

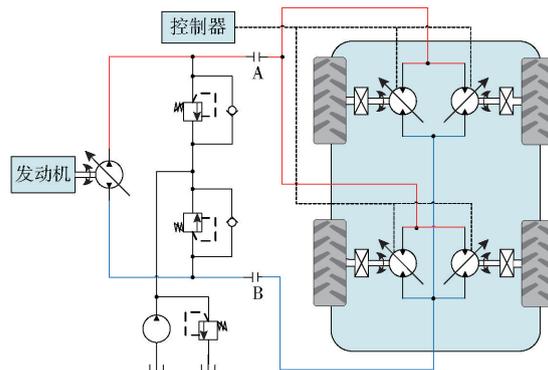


图1 喷雾机静液压驱动系统示意图

Fig. 1 Schematic of driving system of sprayer

表1 喷雾机主要参数

Tab. 1 Main specifications of sprayer

参数	数值
发动机额定功率/kW	164
发动机额定转速/(r·min ⁻¹)	2 200
整备质量/kg	8 500
药箱容积/L	3 000
整机尺寸(长×宽×高)/(mm×mm×mm)	7 050×3 750×4 650
地隙高度/mm	1 900
车轮半径/mm	870
车速最大值/(km·h ⁻¹)	30
行走泵排量/(cm ³ ·r ⁻¹)	0~125
行走泵额定转速/(r·min ⁻¹)	3 450
行走马达排量/(cm ³ ·r ⁻¹)	0~55
行走马达额定转速/(r·min ⁻¹)	4 450

足,无法行走。同时,打滑车轮的液压马达转速增高,其流量急剧增加,易出现马达超速过载等问题^[8]。为此,本研究采用控制方案如下:首先,检测车轮滑转率,当车轮滑转率超过预设阈值后,将打滑车轮的马达排量减小甚至关闭,使油液流向其他马达,以防止车轮继续打滑^[9]。同时,为保证整机行驶稳定性,避免打滑车轮马达排量减小导致的喷雾机行驶速度突变,同步将马达排量的减小量按比例分配至各滑转率储备系数较高的马达,使系统中各驱动马达总排量基本保持不变^[6]。此方法通过马达排量的实时调节实现各液压回路流量的合理分配,未采用流量控制阀或分流阀,显著减少了系统能耗,且控制精度高,可实现无级变速。

1.2 整车动力学建模

考虑整车纵、侧向移动和横摆转动等3个自由度,以及4个独立驱动车轮旋转自由度,建立七自由度整车动力学模型,如图2所示。整车纵向、侧向、横摆动力学方程为

$$m(\dot{v}_x - v_y \dot{\theta}) = (F_{yfl} + F_{yfr}) \cos \delta - (F_{yfl} + F_{yfr}) \sin \delta + F_{xrl} + F_{xrr} \quad (1)$$

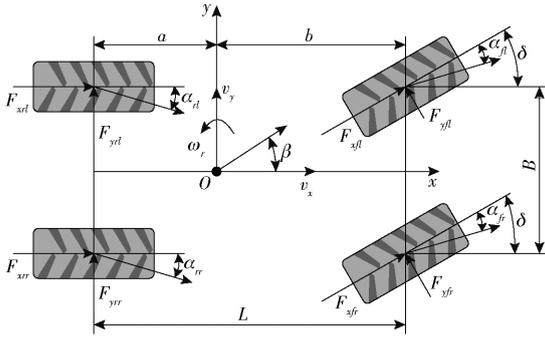


图2 七自由度整车动力学模型

Fig.2 Seven degrees of freedom based vehicle dynamic model

$$m(\dot{v}_y + v_x \dot{\theta}) = (F_{xfl} + F_{xfr}) \sin \delta + (F_{yfl} + F_{yfr}) \cos \delta + F_{yrl} + F_{yrr} \quad (2)$$

$$I_z \ddot{\theta} = [(F_{xfl} + F_{xfr}) \sin \delta + (F_{yfl} + F_{yfr}) \cos \delta] a + [(F_{xfr} - F_{xfl}) \cos \delta + (F_{yfl} - F_{yfr}) \sin \delta] \frac{B}{2} + (F_{xrr} - F_{xrl}) \frac{B}{2} - (F_{yrl} + F_{yrr}) b \quad (3)$$

式中 m ——整车质量, kg

v_x ——车辆纵向速度, m/s

v_y ——车辆侧向速度, m/s

θ ——横摆角, rad

F_{xij} ——车轮所受纵向驱动力, N

F_{yij} ——车轮所受侧向力, N

δ ——前轮转向角, rad

I_z ——整车绕 z 轴转动惯量, $\text{kg} \cdot \text{m}^2$

a ——质心到前轴距离, m

b ——质心到后轴距离, m

B ——轮距, m

式中 ij 为 fl, fr, rl, rr , 分别表示左前轮、右前轮、左后轮、右后轮。

1.3 轮胎动力学建模

该喷雾机为四轮独立驱动形式, 各轮基本受力形式相同, 建立图3所示的单轮动力学模型^[10]。车轮运动平衡方程为

$$T_{dij} - rF_{xij} + r f_s F_{zij} = I \dot{\omega}_{ij} \quad (4)$$

式中 r ——车轮动力半径, m

T_{dij} ——车轮驱动力矩, $\text{N} \cdot \text{m}$

F_{zij} ——车轮垂向载荷, N

f_s ——车轮滚动阻力系数, 取 0.03

I ——车轮转动惯量, $\text{kg} \cdot \text{m}^2$

ω_{ij} ——车轮角速度, rad/s

选用 Dugoff 模型^[11-12] 建立轮胎模型, 其为应用广泛的半经验轮胎公式, 且综合考虑轮胎刚度、滑转率等参数, 具有参数数量少、实时性强等特

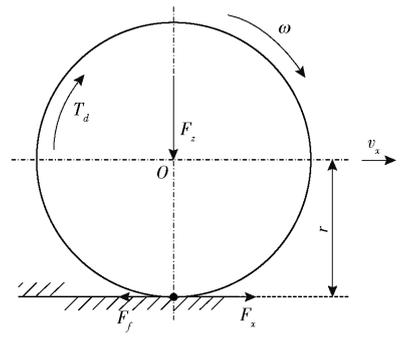


图3 单轮动力学模型

Fig.3 Single-wheel dynamic model

点^[13-14]。据此, 轮胎纵向力与侧向力可描述为^[11]

$$F_{xij} = \mu F_{zij} C_x \frac{s_{ij}}{1 - s_{ij}} f(H) \quad (5)$$

$$F_{yij} = \mu F_{zij} C_y \frac{\tan \alpha}{1 - s_{ij}} f(H) \quad (6)$$

其中

$$f(H) = \begin{cases} H(2-H) & (H < 1) \\ 1 & (H \geq 1) \end{cases} \quad (7)$$

$$H = \frac{(1 - s_{ij})(1 - \kappa v_x \sqrt{C_x^2 s_{ij}^2 + C_y^2 \tan^2 \alpha})}{2 \sqrt{C_x^2 s_{ij}^2 + C_y^2 \tan^2 \alpha}} \quad (8)$$

式中 μ ——路面附着系数

κ ——速度影响系数

H ——边界值, 用于轮胎非线性区间轮胎力的拟合

C_x ——轮胎纵向刚度, kN/rad

C_y ——轮胎侧向刚度, kN/rad

α ——车轮侧偏角, rad

s_{ij} ——滑转率

2 驱动防滑控制器设计

2.1 车轮滑转判断

针对喷雾机直线行走工况下的牵引力控制系统开展车轮滑转判断与防滑策略设计。该工况下, 前轮转向角 δ 、四轮侧偏角 α 均为 0。车轮滑转率 s_{ij} 可描述为

$$s_{ij} = \frac{\omega_{ij} r - v_x}{\omega_{ij} r} \quad (9)$$

选取 Burckhardt 模型^[15-16] 中的 7 种典型路面, 其路面附着系数随滑转率的变化如图 4 和表 2 所示。

由图 4 可知, 典型路面的最大滑转率均呈先增大后减小的趋势, 且当车轮滑转率为 0.05 ~ 0.15 时, 车轮在土路面上具有较高的纵向附着系数^[16]。结合喷雾机实际工作条件, 设置其直线行走工况下驱动防滑滑转率阈值为 0.15。当喷车轮实际滑转率小于 0.15 时不介入干预, 反之则判定为过度滑转状态, 进行主动调控。

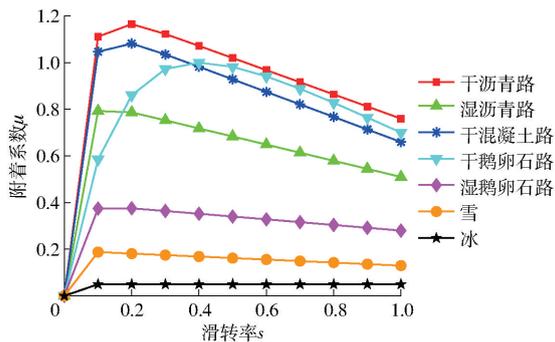


图4 典型路面的附着系数特性曲线

Fig. 4 Adhesion coefficient characteristics of typical roads

表2 不同路面最优滑转率和最大附着系数

Tab. 2 Optimal slip rate and maximum adhesion coefficient of different pavements

路面类型	最优滑转率 s_{opt}	最大附着系数 μ_{max}
干沥青路	0.17	1.17
湿沥青路	0.13	0.80
干混凝土路	0.16	1.09
干鹅卵石路	0.40	1.00
湿鹅卵石路	0.14	0.34
雪	0.06	0.19
冰	0.03	0.05

2.2 控制策略设计

在行驶工况下,喷雾机轮边转速传感器接收各车轮转速信号,导航系统接收车速信号,控制器计算各车轮实时滑转率,并根据控制策略对各变量马达排量进行调控,以实现驱动防滑功能^[6-7]。

为保证作业安全性,发动机转速及变量泵排量均由驾驶员直接操纵。整机驱动防滑控制策略流程如图5所示。当控制器检测到某一轮/两轮打滑时,控制器实时计算当前打滑车轮可发挥出的最大驱动力矩,并以此为目标输出相应的马达排量。同时,将打滑车轮马达排量的变化量平均赋予其他变量马达,以使驱动马达总体排量保持基本不变,保证整机行驶稳定性。当控制器检测到整机存在两轮以上的打滑现象时,则判定为严重打滑工况,向驾驶员发出提示信息,需进行停车等人工干预操作。

2.3 滑模控制器设计

滑模控制是一种将控制系统的状态运动点以一定速度导入滑动模态区域,并在进入后保持在滑动模态区域上运动,以达到稳定运动状态的控制方法,具有非线性好、鲁棒性强等优点^[17]。滑模控制器结构如图6所示。

将滑转率设为控制系统状态变量,对式(9)求导可得

$$\dot{s}_{ij} = \frac{v_x \dot{\omega}_{ij}}{r\omega_{ij}^2} - \frac{\dot{v}_x}{r\omega_{ij}} \quad (10)$$

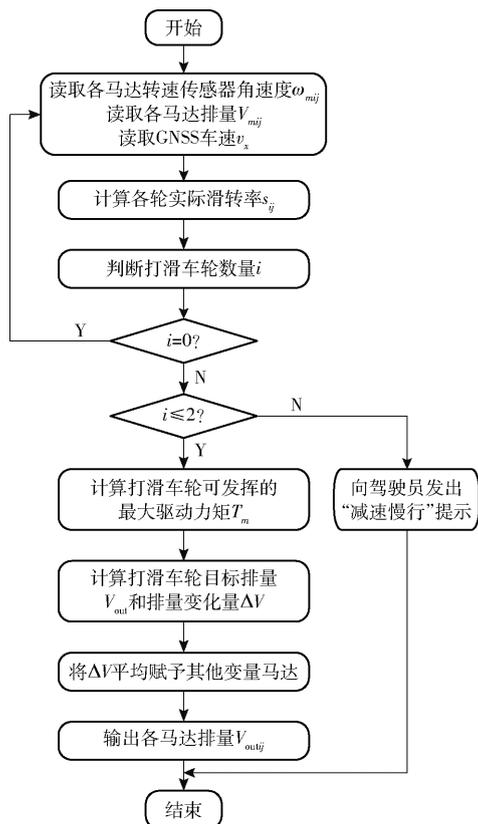


图5 控制策略流程图

Fig. 5 Control strategy

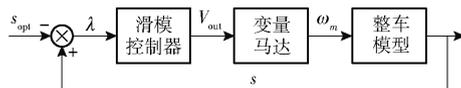


图6 滑模控制器结构图

Fig. 6 Sliding mode controller

由于喷雾机的行驶驱动力受路面附着条件影响,采用双线性模型^[18-19]计算车轮纵向路面附着系数,当实际滑转率高于最优滑转率时,其表达式为

$$\mu(s) = \frac{\mu_g(s_{ij} - s_{opt}) + \mu_{max}(1 - s_{ij})}{1 - s_{opt}} \quad (11)$$

式中 μ_g ——滑动附着系数

联立式(4)、(5)、(10)、(11)可得

$$\dot{s}_{ij} = \frac{v_x T_{dij}}{I\omega_{ij}^2 r} - \frac{\dot{v}_x}{\omega_{ij} r} + \frac{v_x f_s F_{zij}}{I\omega_{ij}^2} - \frac{[\mu_{max}(1 - s_{ij}) + \mu_g(s_{ij} - s_{opt})] s_{ij} v_x C_x F_{zij} f(H)}{I\omega_{ij}^2 (1 - s_{opt})(1 - s_{ij})} \quad (12)$$

此过程中,切换函数设计直接影响系统有效性,选择合理的切换函数可有效提升滑动模态区域的运动品质^[20]。为使控制器提供最优的驱动性能,设计切换函数为

$$\lambda_{ij} = s_{ij} - s_{opt} \quad (13)$$

为保证控制系统具有一定的趋近速度,同时希望控制系统具有较小的抖振,采用改进的指数趋近律^[20-21]为

$$\dot{\lambda}_{ij} = -\varepsilon \lambda_{ij}^2 \operatorname{sgn}(\lambda_{ij}) - k \lambda_{ij} \quad (14)$$

其中 $\varepsilon > 0, k > 0$, 既能够保证控制系统的状态运动点具有一定的趋近速度, 亦能使系统产生的抖振较小。联立式(13)、(14)可得

$$-\varepsilon \lambda_{ij}^2 \operatorname{sgn}(\lambda_{ij}) - k \lambda_{ij} = \dot{s}_{ij} - \dot{s}_{\text{opt}} \quad (15)$$

由式(10)~(15)可得滑模控制器的控制律为

$$T_{dij} = \frac{[\mu_{\max}(1-s_{ij}) + \mu_g(s_{ij}-s_{\text{opt}})]s_{ij}C_*f(H)]F_{zij}r}{(1-s_{\text{opt}})(1-s_{ij})} + \frac{f_s F_{zij}r + \frac{I\omega_{ij}\dot{v}_x - (\varepsilon \lambda_{ij}^2 \operatorname{sgn}(\lambda_{ij}) + k \lambda_{ij})I\omega_{ij}^2 r}{v_x}}{v_x} \quad (16)$$

由式(16)可计算出当前条件下打滑车轮能够发挥出的最大驱动力矩, 并以此为控制目标调节马达排量, 使马达输出力矩与目标驱动力矩相适应, 从而达到驱动防滑的目的。马达排量计算公式为

$$V_{mij} = \frac{2\pi T_{mij}}{p\eta} \quad (17)$$

$$\text{其中 } T_{mij} = \frac{T_{dij}}{n} \quad (18)$$

式中 T_{mij} ——马达输出力矩, $\text{N}\cdot\text{m}$

n ——减速比

p ——驱动系统压差, MPa

η ——马达效率

V_{mij} ——马达排量, cm^3/r

3 仿真验证

为验证驱动防滑控制系统的控制效果, 结合所建立的喷雾机动力学模型和驱动防滑控制策略, 建立 Matlab/Simulink 驱动防滑控制仿真模型^[22-23], 对比本文所设计的滑模控制算法与传统 PID 控制算法的控制效果^[24]。

与匀速行驶工况相比, 喷雾机起步加速时对驱动条件的要求更为严苛。为此, 设置发动机转速为 2000 r/min , 变量泵排量在 $1 \sim 6 \text{ s}$ 由 0 增至最大, 各轮马达初始排量设置为最大排量的 80% , 并在车速 $0 \sim 7 \text{ km/h}$ 范围内维持稳定。同时, 在第 8 s 时设置左前轮附着路面由附着良好的土地突变为附着系数较低的冰雪路面, 仿真分析结果如图 7 所示。

由图 7 可知, 当左前轮驶入冰雪路面时开始打滑。若未启动驱动防滑控制, 由于左前轮的地面附着条件变差, 系统压力降低至驱动左前轮马达所需的较小压力, 且车轮打滑导致转速升高, 压力油液集中流向左前轮马达, 导致整机在惯性作用下缓慢减速至静止。启动 PID 控制后, 控制器在 3 s 内减小左前轮马达排量, 油液分别流向其他马达, 使液压系统压力增大, 足以驱动其他各轮继续加速行驶。在

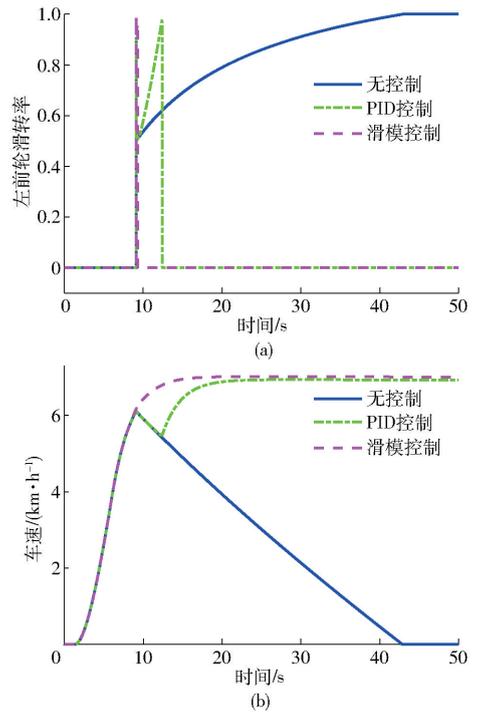


图 7 起步加速行驶仿真曲线

Fig. 7 Simulation curves of accelerated driving

滑模控制模式下, 控制器迅速反应, 减小左前轮马达排量, 其控制规律与 PID 控制类似。通过对比图 7 可以看出, 滑模控制器响应速度更快, 且无明显速度突变, 具有更好的行驶稳定性。

4 非道路验证试验

4.1 试验材料与方法

为验证高地隙自走式喷雾机驱动防滑控制系统的控制性能, 于 2023 年 12 月在河北某试验田开展非道路试验。试验路面条件为冻土雪地, 如图 8 所示, 由于喷雾机自重较大, 在该路面条件下可实现明显打滑, 且试验期间天气寒冷, 药箱中药液极易冻结, 对整机性能有较大影响, 为保证试验过程中的安全性采用空载喷雾机开展试验。试验样机搭载联适 AF302 型高精度 GNSS 定位系统, 驱动系统变量泵内置量程为 40 MPa 的压力传感器, 变量马达内置 DSA-RE 95133 型转速传感器。试验数据采集和控制信号传输均由置于驾驶室的上位机完成。



图 8 喷雾机非道路试验验证平台

Fig. 8 Off-road test verification platform of sprayer

为测试喷雾机在各种工况下的驱动防滑控制性能, 试验设计如表 3 所示^[25]。

表3 试验设计
Tab.3 Design of test

工况	变量马达初始排量/ ($\text{cm}^3 \cdot \text{r}^{-1}$)	变量泵排量/ ($\text{cm}^3 \cdot \text{r}^{-1}$)	车速/ ($\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$)
起步加速	44	0~125	0~7
匀速	44	125	7
越沟	44	125	2

4.2 结果与分析

喷雾机非道路试验曲线如图9所示,当喷雾机起步时,四轮均存在由整机惯性所致一定程度的滑转。当喷雾机未开启驱动防滑控制时,起步加速过

程中四轮均存在持续滑转现象,平均滑转率为0.034,且车速存在约5s的停滞,整机加速度波动较大。开启PID驱动防滑控制后,各轮打滑可得到有效控制,平均滑转率为0.024,控制器响应平均响应时长为0.67s,车速停滞时间约3s,整机加速度波动较小。在滑模驱动防滑控制模式下,控制器响应平均响应时长为0.33s,平均滑转率为0.020,加速过程无明显加速度波动。其中变量马达控制信号所控制的变量为马达排量占马达最大排量百分比,当信号为0时关闭马达排量,信号为100%时为最大马达排量。

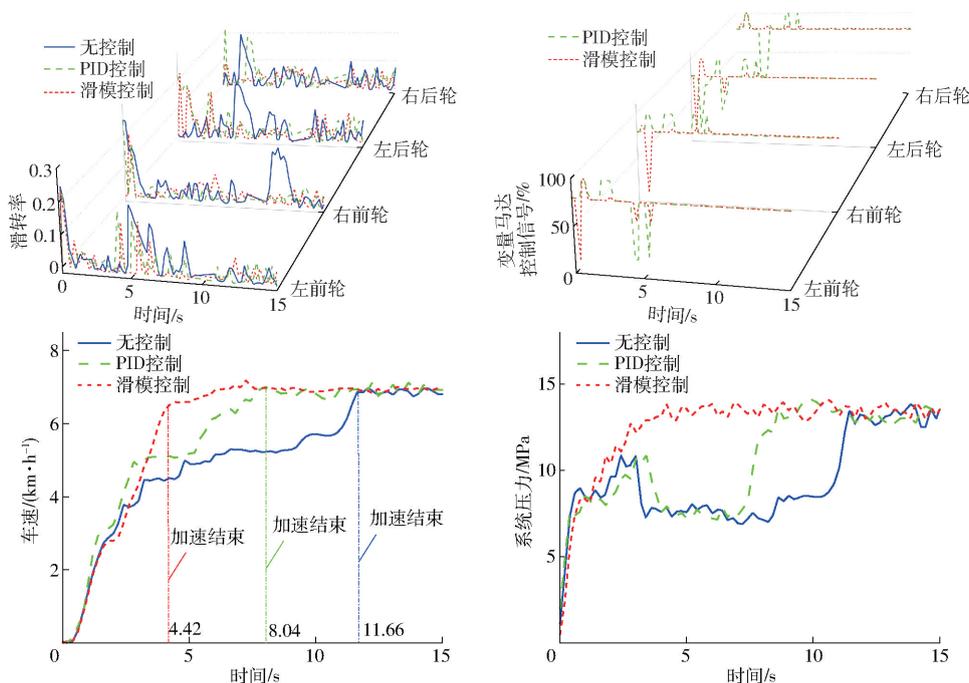


图9 喷雾机起步加速行驶工况下试验曲线

Fig.9 Test curves of sprayer under starting and accelerating driving conditions

由图10可知,在匀速行驶工况下,当喷雾机未开启驱动防滑控制时,各轮平均滑转率为0.026,车速有明显波动。开启PID控制后,各轮平均滑转率为0.023,控制器平均响应时长为0.58s,车速波动较小。在滑模驱动防滑控制模式下,控制器在0.31s内做出响应,控制四轮平均滑转率为0.019,车速无明显速度波动,整机行驶平稳。

喷雾机在越沟工况下,由于整机姿态变化引起一轮悬空,该轮因无法获得地面附着力而发生空转,造成整机难以脱困。试验中设定为右前轮越沟工况,如图11所示,当喷雾机未开启驱动防滑控制时,其左后轮空转,此时系统压力等于驱动该轮马达所需的压力,不足以驱动喷雾机脱困,故整机陷停于坑沟中。开启PID控制后,其左后轮打滑,控制器监测到该轮打滑并发出控制信号使该轮停止空转,此时系统油液压力上升使其他车轮具备足够的驱动力脱

困,但PID控制器响应存在明显延迟,整机脱困用时约为5s。开启滑模驱动防滑控制后,控制器将该轮马达排量减小,整机可在2s内快速脱困,并使车速迅速恢复平稳。

综上,各工况下整机驱动性能对比如表4所示。由表4可知,在无控制模式下,喷雾机受地面条件影响显著,行驶稳定性较差,在越沟工况下难以脱困;采用传统PID驱动防滑控制时,各轮平均滑转率有所降低,行驶稳定性有所改善,在越沟工况下可以自主脱困,但时效性相对较差;在滑模驱动防滑控制模式下,轮胎平均滑转率最低,可有效控制在0.15以内,行驶稳定性较好,且可快速自主脱困。

5 结论

(1)设计了一种基于单泵-四变量马达的大型喷雾机静液压驱动系统防滑控制方法。该方法未采

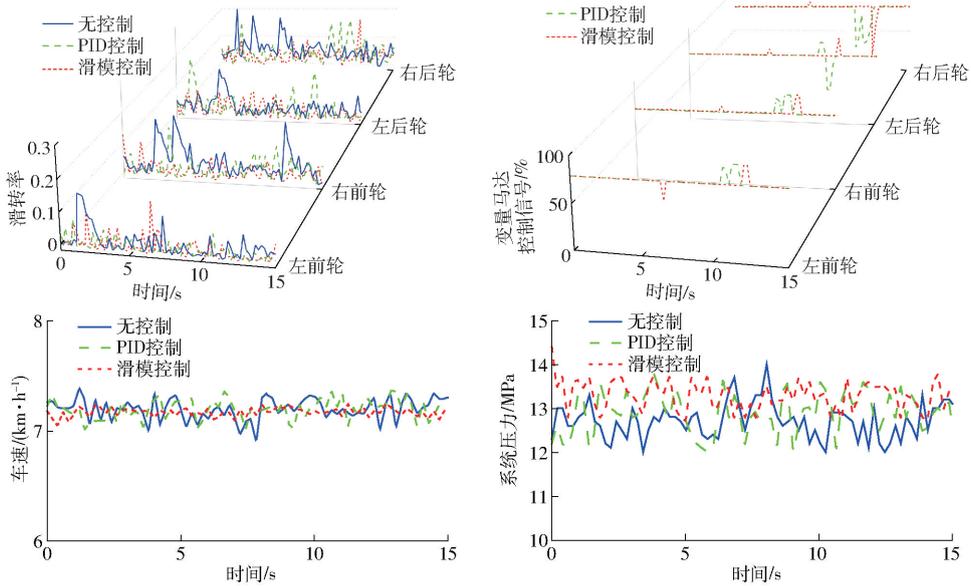


图 10 喷雾机匀速行驶工况下试验曲线

Fig. 10 Test curves of sprayer under constant speed driving

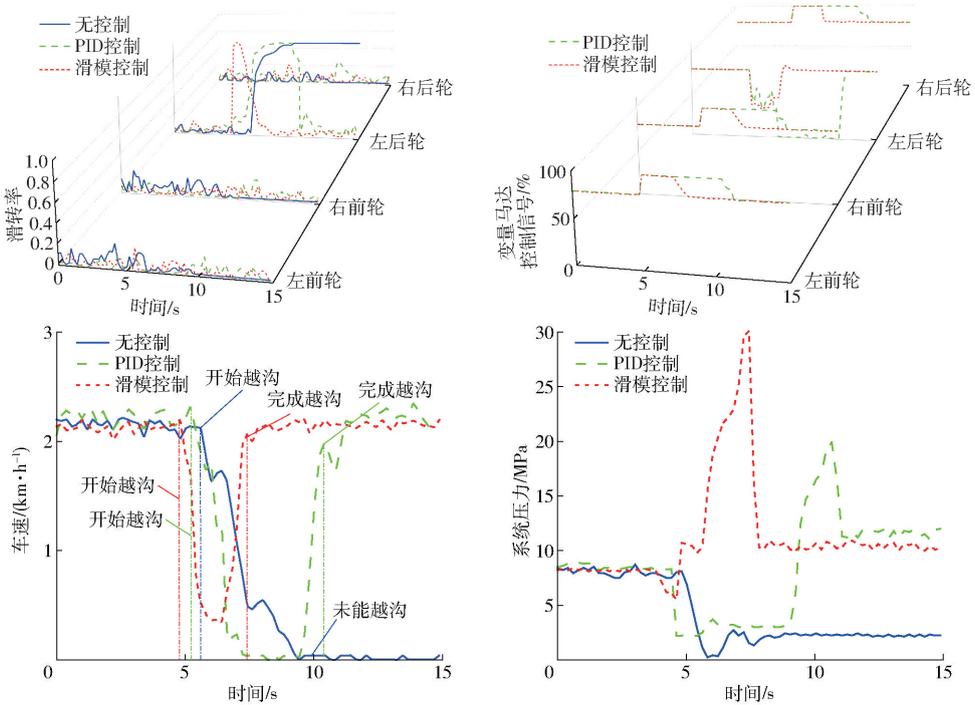


图 11 喷雾机越沟行驶工况下试验曲线

Fig. 11 Test curves of sprayer under crossing ditch

表 4 控制性能对比

Tab. 4 Control performance comparison

控制模式	起步加速	起步加速	匀速平	匀速平均	越沟
	平均滑转率	平均响应时长/s	均滑转率	响应时长/s	
无控制	0.034		0.026		
PID 控制	0.024	0.67	0.023	0.58	5
滑模控制	0.020	0.33	0.019	0.31	2

(2) 设计了控制策略与滑模控制器,并基于 Matlab/Simulink 进行仿真验证。仿真结果表明,该系统具有良好的控制性能,可以实现喷雾机驱动防滑控制。

(3) 基于该控制系统进行田间试验,试验结果表明,未开启驱动防滑控制时,整机行驶稳定性较差,在起步加速和匀速行驶工况下,平均滑转率分别为 0.034 和 0.026,遇越沟等极限工况时无法自主脱困。在 PID 驱动防滑控制模式下,喷雾机行驶较为稳定,起步和匀速行驶时轮胎平均滑转率为

用流量控制阀与分流阀,显著减少了系统能耗,且控制精度高,可实现无级变速。

0.024 和 0.023, 平均响应时长分别为 0.67 s 和 0.58 s, 越沟时可在 5 s 内自主脱困。采用滑模驱动防滑控制时, 喷雾机具有良好的行驶稳定性, 起步加速和匀速行驶时轮胎的平均滑转率约为 0.020, 平均响应时长约为 0.33 s, 并具有快速越沟的自主脱困能力。

参 考 文 献

- [1] 王伟, 陈黎卿, 杨洋, 等. 农业机械底盘技术研究现状与展望[J]. 农业机械学报, 2021, 52(8): 1-15.
WANG Weiwei, CHEN Liqing, YANG Yang, et al. Development and prospect of agricultural machinery chassis technology[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(8): 1-15. (in Chinese)
- [2] 刘国海, 李持衡, 沈跃, 等. 基于滑模自抗扰的同步转向高地隙喷雾机姿态控制[J]. 农业机械学报, 2023, 54(3): 180-189, 300.
LIU Guohai, LI Chiheng, SHEN Yue, et al. Sliding mode active disturbance rejection control of synchronous steering high clearance sprayer[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(3): 180-189, 300. (in Chinese)
- [3] 周倩倩, 温浩军, 李中祥, 等. 液压四驱喷雾机模糊防滑控制系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(增刊2): 283-288.
ZHOU Qianqian, WEN Haojun, LI Zhongxiang, et al. Design and test of fuzzy anti-skid control of four-wheel drive hydraulically driven sprayer[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(Supp. 2): 283-288. (in Chinese)
- [4] 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 Lühua, et al. Simulation and test on anti-skid system control for four-wheel drive of high clearance spray mechine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(12): 13-16, 21. (in Chinese)
- [5] 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]. 农业机械学报, 2012, 43(6): 58-62.
MAO Hanping, NI Jing, HAN Lühua, et al. Turning anti-slip control system of hydraulic four-wheel drive high clearance sprayer[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(6): 58-62. (in Chinese)
- [6] 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 slip-ratio control method for high clearance self-propelled sprayer over all operating conditions[D]. Beijing: China Agricultural University, 2017. (in Chinese)
- [7] 付拓. 水田自走式喷雾机驱动防滑控制技术研究[D]. 北京: 中国农业机械化科学研究院, 2018.
FU Tuo. Reserch on driving anti-skid control technology of paddy field self-propelled sprayer[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences, 2018. (in Chinese)
- [8] 扈凯, 张文毅. 高地隙自走式喷雾机多模式液压转向系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(9): 366-373.
HU Kai, ZHANG Wenyi. Design and experiment of multi-mode hydraulic steering system of high clearance self-propelled sprayer[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(9): 366-373. (in Chinese)
- [9] 韩明兴, 徐琨, 廖宜涛, 等. 液电混动履带底盘电液系统联合仿真与试验[J]. 农业机械学报, 2024, 55(1): 396-408, 18.
HAN Mingxing, XU Kun, LIAO Yitao, et al. Co-simulation and test of electro-hydraulic system of novel hybrid track[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(1): 396-408, 18. (in Chinese)
- [10] LEE J K, KIM J W, PARK B G. Fast anti-slip traction control for electric vehicles based on direct torque control with load torque observer of traction motor[C]//2021 IEEE Transportation Electrification Conference & Expo, 2021.
- [11] 汪洪波, 王春阳, 高含, 等. 基于 FFUKF 路面附着系数估计的汽车牵引力控制[J]. 力学学报, 2022, 54(7): 1866-1879.
WANG Hongbo, WANG Chunyang, GAO Han, et al. Vechicle traction force control based on the road adhesion coefficient estimation FFUKF[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2022, 54(7): 1866-1879. (in Chinese)
- [12] DUGOFF H, FANCHER P S, SEGEL L. An analysis of tire traction properties and their influence on vehicle dynamic performance[J]. SAE Transactions, 1970, 79: 1219-1243.
- [13] HE R, JIMENEZ E, SAVITSKI D, et al. Investigating the parameterization of dugoff tire model using experimental tire-ice data[J]. SAE International Journal of Passenger Cars-Mechanical Systems, 2016, 10(1): 83-92.
- [14] 张鹏. 高地隙喷雾机行驶稳定性控制研究[D]. 石河子: 石河子大学, 2021.
ZHANG Peng. Research on driving stability control of high-gap sprayer[D]. Shihezi: Shihezi University, 2021. (in Chinese)
- [15] 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: 1-10.
- [16] 唐文坤. 多源信息融合的路面附着系数估计算法研究[D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2021.
TUO Wenkun. Research on algorithm of road-tire adhesion coefficient estimation based on multi-source information fusion[D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Tiedao University, 2021. (in Chinese)
- [17] 黄文岳, 魏新华, 汪岸哲, 等. 基于模糊快速滑模的农用牵引车辆直线路径跟踪控制[J]. 农业机械学报, 2024, 55(2): 415-422.

- HUANG Wenyue, WEI Xinhua, WANG Anzhe, et al. Straight line path tracking control of agricultural tractor/trailer based on fuzzy fast sliding mode[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(2): 415 - 422. (in Chinese)
- [18] 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]. 农业机械学报, 2015, 46(2): 307 - 311, 42.
ZHOU Bing, XU Meng, YUAN Xiwen, et al. Acceleration slip regulation based on extremum seeking control with sliding mode [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(2): 307 - 311, 42. (in Chinese)
- [19] BRACH R. Adhesion, hysteresis and the peak longitudinal tire force[D]. Notre Dame: University of Notre Dame, 2006.
- [20] 李雪栋, 贺林, 叶炜, 等. 电动汽车 TCS 滑模控制器设计[J]. 计算机仿真, 2020, 37(2): 144 - 148, 230.
LI Xuedong, HE Lin, YE Wei, et al. Design of the sliding mode controller of TCS for electric vehicle [J]. Computer Simulation, 2020, 37(2): 144 - 148, 230. (in Chinese)
- [21] 张鹏, 张金鹏. 变结构控制的抖振问题研究[J]. 航空兵器, 2013(2): 9 - 13.
ZHANG Peng, ZHANG Jinpeng. Study on chattering of variable structure control[J]. Aero Weaponry, 2013(2): 9 - 13. (in Chinese)
- [22] 刘壮壮. 基于 LOS 视线导引法的农机路径跟踪系统滑模控制策略研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2022.
LIU Zhuangzhuang. Research on sliding mode control strategy of agricultural tractor part tracking system based on LOS guidance method[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2022. (in Chinese)
- [23] 陈雨. 高地隙喷雾机独立式立轴空气悬架设计与特性研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2017.
CHEN Yu. Research on design methods and characteristics of independent strut type air suspension system for high clearance sprayer[D]. Beijing: China Agricultural University, 2017. (in Chinese)
- [24] 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 of spray boom active suspension for large high clearance sprayer[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(21): 47 - 56. (in Chinese)
- [25] 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.

(上接第 147 页)

- [19] 陈霓, 田立权, 张正中, 等. 半喂入联合收获机双圆锥离心式清选风机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(12): 193 - 202.
CHEN Ni, TIAN Liqun, ZHANG Zhengzhong, et al. Design and experiment of double-cone centrifugal cleaning fan for semi-fed combine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(12): 193 - 202. (in Chinese)
- [20] 李佳峻, 王军, 蒋博彦, 等. 控制周向截面积分布的风机蜗壳优化设计方法[J]. 工程热物理学报, 2018, 39(12): 2665 - 2669.
LI Jiajun, WANG Jun, JIANG Boyan, et al. Optimal design method of fan volute controlling circumferential cross-sectional area distribution[J]. Chinese Journal of Engineering Thermophysics, 2018, 39(12): 2665 - 2669. (in Chinese)
- [21] 杨伦, 谢一华. 气力输送工程[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.
- [22] 崔涛. 油莎豆收获机风选除杂部件的试验研究[D]. 长春: 吉林农业大学, 2022.
CUI Tao. Experimental study on air separation and impurity removal components of oil bean harvester[D]. Changchun: Jilin Agricultural University, 2022. (in Chinese)
- [23] 杨洋, 孙步功, 张鹏, 等. 4LZY-7 型全喂入油菜联合收获机的设计与试验[J]. 干旱地区农业研究, 2019, 37(3): 283 - 290, 298.
YANG Yang, SUN Bugong, ZHANG Peng, et al. Design and experiment of 4LZY-7 all-feeding rapeseed combine harvester [J]. Agricultural Research in Arid Areas, 2019, 37(3): 283 - 290, 298. (in Chinese)
- [24] 王立军, 张传根, 丁振军. 玉米收获机清选筛体结构优化[J]. 农业机械学报, 2016, 47(9): 108 - 114.
WANG Lijun, ZHANG Chuangen, DING Zhenjun. Optimization of sifter structure of corn harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(9): 108 - 114. (in Chinese)
- [25] 张佳喜, 芮照钰, 蔡佳麟, 等. 前置式皮带夹持输送棉秆起拔机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(12): 77 - 84, 152.
ZHANG Jiayi, RUI Zhaoyu, CAI Jialin, et al. Design and experiment of cotton straw puller for front-mounted belt holding[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(12): 77 - 84, 152. (in Chinese)