doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2026.07.006

高地隙喷雾机侧倾稳定性主动控制策略研究

秦陈建[1]　郑招辉[1,2]　汪光岩[1]　谭明冲[1]　刘旭珍[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: 针对高地隙喷雾机作业时易受到路面激励发生侧倾失稳的问题,提出一种基于附加主动转向的操纵稳定性集成控制策略,构建包含高精度魔术公式轮胎模型的 8 自由度整车动力学模型,精确地描述车辆的非线性动态特性,基于滑模变结构控制理论,设计了一种双层结构的侧倾稳定性控制器:上层控制器为车身姿态滑模控制器,负责计算维持车身稳定所需的附加广义力矩;下层控制器为电液位置伺服滑模控制器,精准执行上层控制器给出的转向调整指令。搭建喷雾机侧倾稳定性控制试验平台,对控制器的有效性进行验证。试验结果表明:在角阶跃工况下,横摆角速度、侧倾角、质心侧偏角的平均误差绝对值分别下降了 15.7%、9.3%、35.0%;在正弦工况下,横摆角速度、侧倾角、质心侧偏角的平均误差绝对值分别下降了 17.8%、8.6%、25.0%,经验证,设计的主动转向策略有效提高了喷雾机的侧倾稳定性。这充分证明了该控制策略在抑制车身侧倾、维持行驶路径方面的有效性,为改善高地隙喷雾机在低速复杂工况下的主动安全性能提供了解决方案。

关键词: 高地隙喷雾机; 侧倾稳定性; 滑模控制

中图分类号: S491　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2026)07-0068-12　　**OSID**:

Research of Active Control Strategy for Lateral Stability of Highland Gap Sprayers

QIN Chenjian[1]　ZHENG Zhaohui[1,2]　WANG Guangyan[1]　TAN Mingchong[1]　LIU Xuzhen[1]

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

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

Abstract: Aiming to address the issue of lateral tipping instability that high-clearance sprayers are prone to roll when subjected to road excitations, an integrated control strategy for maneuvering stability was proposed based on additional active steering. An eight-degree-of-freedom vehicle dynamics model, incorporating a high-precision magic formula tire model, was established to accurately describe the vehicle's nonlinear dynamic characteristics. Based on sliding mode variable structure control theory, a two-layer lateral stability controller was designed: the upper controller was the vehicle body attitude sliding mode controller, responsible for calculating the additional generalized torque required to maintain vehicle body stability; the lower controller was the electro-hydraulic position servo sliding mode controller, which precisely executed the steering adjustment commands given by the upper controller. A test platform for sprayer lateral stability control was constructed to verify the effectiveness of the controller. Test results showed that under step steering conditions, the absolute mean errors of yaw rate, roll angle, and centroid lateral deviation angle were decreased by 15.7%, 9.3%, and 35.0%, respectively; under sinusoidal conditions, the absolute mean errors of yaw rate, roll angle, and centroid lateral deviation angle were decreased by 17.8%, 8.6%, and 25.0%, respectively. The results validated that the designed active steering strategy effectively improved the lateral stability of the sprayer. This fully demonstrated the effectiveness of the control strategy in suppressing vehicle body roll and maintaining the driving path, providing a valuable solution for improving the active safety performance of high-clearance sprayers under low-speed complex conditions.

Key words: highland gap sprayer; lateral stability; sliding mode control

收稿日期: 2026-01-08　修回日期: 2026-01-23

基金项目: 国家棉花产业技术体系建设项目(CARS-15-26)和国家重点研发计划项目(2022YFD1400303)

作者简介: 秦陈建(1999—),男,硕士生,主要从事农业机械设计及其自动化研究,E-mail: 2476553382@qq.com

通信作者: 郑招辉(1992—),男,副教授,博士,主要从事农业机械设计及其自动化研究,E-mail: zzh19930118@126.com

0　引言

高地隙自走式喷雾机是一种大型的高效植保类农业机械，是进行田间作业管理的重要机械[1]。它的应用范围不仅局限于大规模经济作物的播前和苗前土壤处理，以及病虫害的防治，还具有适用于高粱、玉米等高秆作物中后期病虫害防治的特点[2-4]。

我国高地隙喷雾机的发展起步晚，与国外已经成熟的机具还存在一定的差距。因此，研制适用于我国棉花、玉米等作物植保需求的高性能喷雾机具有重要意义。

高地隙自走式喷雾机属于大型现代化智能装备，具有底盘离地间隙高、宽高比小、质心高和载药容量大等特点。喷雾机行驶过程中不仅有转场时的平坦路况，还有田间地沟等凹凸不平的复杂路况。一旦行驶速度过快，转向角度过大或外部激励变化较大时，容易发生侧翻的危险[5-7]。为提升其行驶稳定性，国内学者已开展了多项控制研究：例如，周辰雨等[8]设计了基于概率融合 T-S 模糊的主动悬架鲁棒控制器；丁凯[9]通过建立六自由度模型，采用模糊 PID 控制提升了抗侧翻性能；张鹏[10]则利用滑模控制与直接横摆力矩控制来改善行驶稳定性。

然而，上述研究大多基于经典或智能 PID 等控制方法，对喷雾机特有的“车-液-路”强耦合动力学特性考虑不足，且控制策略多移植自乘用车领域，未充分针对其大惯性、高重心、大轨距等结构特点进行优化，在真实复杂工况下的适应性与鲁棒性仍有待验证。与此同时，国外先进产品已将成熟的车辆动力学控制技术深度集成，实现了主动侧倾控制等功能的精准产品化，突显了国内在高端底盘平台与智能协同控制方面存在的差距[11-13]。

为此，本文聚焦于高地隙喷雾机侧倾稳定性控制，针对现有研究中模型精度不足、控制策略工况适应性弱的问题展开研究。考虑到主动转向控制能够在侧翻风险出现时直接调节前轮转角以维持稳定，且其执行方式与喷雾机的动力系统和龙门式车架布局更为匹配，便于工程实现，因此本文选用主动转向控制作为侧倾稳定性的主要控制方式，以提升系统在复杂工况下的安全性与实用性。

1　高地隙自走式喷雾机模型建立

本文研究的高地隙自走式喷雾机如图 1 所示，整机底盘采用龙门式结构，药箱置于龙门式结构两侧，以提高整机的适应性和通过性，同时能够有效减少药液晃动对喷雾机横向运动的影响；整机驱动采用静液压全时四轮驱动系统，速度控制采用电比例控制方式，实现机器的高速和低速两挡可切换；田间作业速度为 6 km/h，转场过程中速度可达 30 km/h；转向动作通过转向油缸伸缩推动转向立柱旋转实现。

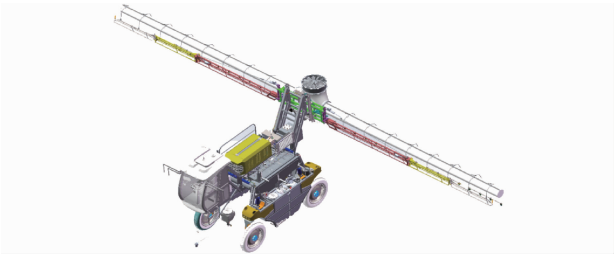


图 1　高地隙自走式喷雾机三维图

Fig. 1　3D drawing of high-clearance sprayer

1.1　二自由度参考模型

忽略转向系统、悬架、空气阻力的影响，认为车辆只做平行于地面的平面运动，且车辆纵向速度视为恒定。因此车辆只有沿 y 轴的横向运动和绕 z 轴的横摆运动两个自由度[14]。限定横向加速度在 0.4 g 以下，轮胎侧偏特性处于线性范围[15]，同时忽略左右轮胎由于载荷的变化而引起的轮胎特性变化以及轮胎回正力矩的作用，将车辆简化为如图 2 所示的二自由度模型。

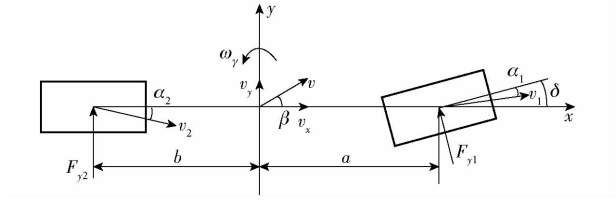


图 2　二自由度车辆模型示意图

Fig. 2　Schematic of two-degree-of-freedom vehicle model

二自由度车辆模型的运动微分方程可表示为

$$\begin{cases} mv_x(\dot{\beta}+\omega_\gamma)=k_1\left(\beta+\dfrac{a\omega_\gamma}{v_x}-\delta\right)+k_2\left(\beta-\dfrac{b\omega_\gamma}{v_x}\right) \\ I_z\dot{\omega}_\gamma=ak_1\left(\beta+\dfrac{a\omega_\gamma}{v_x}-\delta\right)-bk_2\left(\beta-\dfrac{b\omega_\gamma}{v_x}\right) \end{cases} \tag{1}$$

式中　m——整车质量

δ——总的前轮转向角度

I_z——车辆绕 z 轴的转动惯量

k_1、k_2——前轴、后轴的侧偏刚度

a、b——车辆质心到前、后轴距离

1.2　整车模型的建立

为了便于研究高地隙自走式喷雾机在低速工作时车辆操纵稳定性控制，建立喷雾机 8 自由度整车动力学数学模型。8 个自由度分别为车辆的纵向（沿 x 轴平移）、横向（沿 y 轴平移）、横摆（绕 z 轴旋转）、侧倾（绕 x 轴旋转）及 4 个车轮的旋转运动[16]。整车动力学模型的输入为车辆方向盘转角、纵向车

速、制动/驱动力矩;输出为表征车辆动力学特性的各个状态量,如横摆角速度、质心侧偏角、车身侧倾角。

车辆的运动状态十分复杂,完全模拟车辆的动力学关系并不现实,因此在建模时,将作以下理想化假设[17-18]:

(1)忽略空气动力学影响:由于喷雾机作业速度较低(通常 30 km/h 以内),空气阻力及升力矩可忽略。

(2)悬架系统简化为等效侧倾刚度和阻尼:将复杂的悬架结构等效为绕侧倾中心的扭转弹簧和阻尼器,用以表征车身侧倾特性。

(3)车轮与喷雾机悬架在运动过程中产生的耦合振动:悬架与车轮之间高频、小幅度的局部耦合振动,对整车的侧倾稳定性影响相对较小。

(4)喷雾机在运行过程中,忽略药箱中药液晃动作用力所引起的误差。

根据上述的假设,建立车辆纵向、横向及横摆运动模型,如图 3 所示。

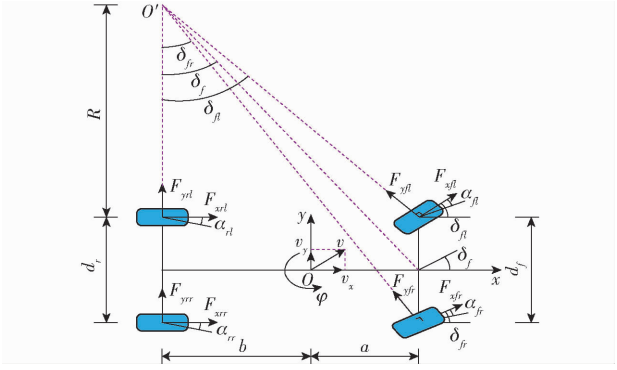


图 3 车辆纵向、横向及横摆运动模型

Fig. 3 Longitudinal, lateral and yaw motion of vehicle

车辆具有阿克曼转向特性,即所有车轮的瞬时转向中心均为点 O'[19],由几何关系可知

$$\begin{cases}\tan\delta_{fl}=\dfrac{a+b}{R}\\ \tan\delta_{f}=\dfrac{a+b}{R+0.5d_r}\\ \tan\delta_{fr}=\dfrac{a+b}{R+d_r}\end{cases}\tag{2}$$

式中 δ_{fl}、δ_{fr}——车辆左、右前轮转角

δ_f——车辆前轴中心瞬时转角

d_r——车辆后轴轮距

R——转向中心到左后轮距离

式(2)变形得

$$R=\frac{a+b}{\tan\delta_{fl}}=\frac{a+b}{\tan\delta_{f}}-\frac{d_r}{2}=\frac{a+b}{\tan\delta_{fr}}-d_r\tag{3}$$

求解式(3)可得车辆左、右前轮转角公式为

$$\begin{cases}\delta_{fl}=\arctan\dfrac{2(a+b)\tan\delta_f}{2(a+b)-d_r\tan\delta_f}\\ \delta_{fr}=\arctan\dfrac{2(a+b)\tan\delta_f}{2(a+b)+d_r\tan\delta_f}\\ \delta_f=\dfrac{\delta_{sw}}{i_{sw}}\end{cases}\tag{4}$$

式中 δ_{sw}、i_{sw}——车辆方向盘转角、转向系传动比

车辆纵向、横向运动学微分方程为

$$\begin{cases}a_x=\dot v_x-v_y\dot\phi\\ a_y=\dot v_y-v_x\dot\phi\end{cases}\tag{5}$$

式中 a_x、a_y——车辆纵向、横向加速度

v_x、v_y——车辆纵向、横向速度

$\dot\phi$——车辆横摆角速度

车辆纵向、横向动力学微分方程为

$$\begin{cases}ma_x=F_{xfl}\cos\delta_{fl}+F_{xfr}\cos\delta_{fr}-(F_{xfl}\sin\delta_{fl}+\\ \qquad F_{yfr}\sin\delta_{fr})+F_{xrl}+F_{xrr}\\ ma_y=F_{yfl}\cos\delta_{fl}+F_{yfr}\cos\delta_{yr}+F_{xfl}\sin\delta_{fl}+\\ \qquad F_{xfr}\sin\delta_{fr}+F_{yrl}+F_{yrr}\end{cases}\tag{6}$$

式中 F_{xfl}、F_{xfr}、F_{xrl}、F_{xrr}——车辆左前、右前、左后、右后轮胎纵向力

F_{yfl}、F_{yfr}、F_{yrl}、F_{yrr}——车辆左前、右前、左后、右后轮胎侧向力

车辆绕 z 轴的横摆运动微分方程为

$$\begin{aligned}I_z\ddot\phi=&\frac{d_f}{2}(F_{xfr}\cos\delta_{fr}-F_{xfl}\cos\delta_{fl}+F_{yfl}\sin\delta_{fl}-F_{yfr}\sin\delta_{fr})+\\ &a(F_{xfr}\sin\delta_{fr}+F_{xfl}\sin\delta_{fl}+F_{yfr}\cos\delta_{fr}+F_{yfl}\cos\delta_{fl})+\\ &\frac{d_r}{2}(F_{xrr}-F_{xrl})-b(F_{yrr}+F_{yrl})\end{aligned}\tag{7}$$

式中 I_z——车辆绕 z 轴的转动惯量

车辆侧倾运动如图 4 所示。

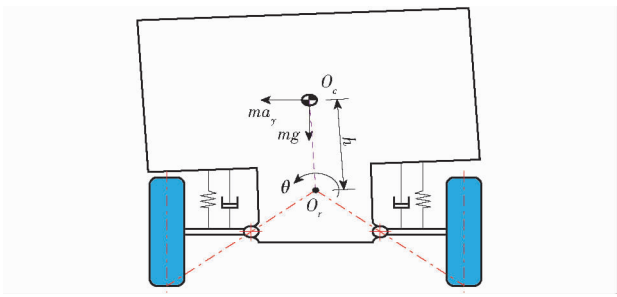


图 4 车辆侧倾运动示意图

Fig. 4 Diagram of vehicle roll motion

车辆绕 x 轴的侧倾运动微分方程为

$$I_x\ddot\theta=I_{xz}\ddot\phi+ma_yh-C_\theta\dot\theta-K_\theta\theta+mgh\theta\tag{8}$$

式中 I_x——车辆绕 x 轴的转动惯量

I_{xz}——车辆对 xoz 平面的惯性积

θ——车身侧倾角

$\dot{\theta}$——车身侧倾角速度

$\ddot{\theta}$——车身侧倾角加速度

C_θ、K_θ——车身侧倾角阻尼系数和车身侧倾角刚度

h——车辆质心到车身侧倾中心距离

g——重力加速度

车轮的旋转运动对车辆横摆运动的控制十分重要。考虑车辆在平面内的运动车轮转动，得到车轮受力分析图[20]如图 5 所示。

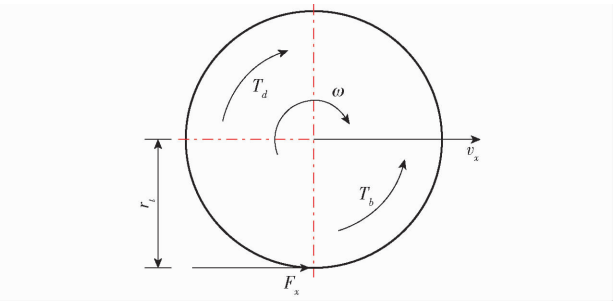


图 5　车轮受力示意图

Fig. 5　Diagram of wheel force

车辆 4 个车轮旋转运动微分方程为

$$\begin{cases} I_t\dot{\omega}_{fl} = -F_{xfl}r_t - T_{bfl} \\ I_t\dot{\omega}_{fr} = -F_{xfr}r_t - T_{bfr} \\ I_t\dot{\omega}_{rl} = -F_{xrl}r_t - T_{brl} + T_{drl} \\ I_t\dot{\omega}_{rr} = -F_{xrr}r_t - T_{brr} + T_{drr} \end{cases} \tag{9}$$

式中　I_t——4 个车轮绕旋转中心的转动惯量

ω_{fl}、ω_{fr}、ω_{rl}、ω_{rr}——4 个车轮的角速度

r_t——4 个车轮的滚动半径

T_{bfl}、T_{bfr}、T_{brl}、T_{brr}——4 个车轮的制动力矩

T_{drl}、T_{drr}——后桥驱动轮的驱动力矩

车辆 4 个轮胎垂向载荷计算公式为

$$\begin{cases} F_{zfl} = mg\dfrac{b}{2l} - ma_x\dfrac{h_g}{2l} - ma_y\dfrac{h_g b}{d_f l} \\ F_{zfr} = mg\dfrac{b}{2l} - ma_x\dfrac{h_g}{2l} + ma_y\dfrac{h_g b}{d_f l} \\ F_{zrl} = mg\dfrac{a}{2l} + ma_x\dfrac{h_g}{2l} - ma_y\dfrac{h_g a}{d_r l} \\ F_{zrr} = mg\dfrac{a}{2l} + ma_x\dfrac{h_g}{2l} + ma_y\dfrac{h_g a}{d_r l} \end{cases} \tag{10}$$

其中　$l = a + b$

式中　F_{zfl}、F_{zfr}、F_{zrl}、F_{zrr}——4 个轮胎垂向载荷

l——车辆轴距

h_g——车辆质心距地面高度

d_f——车辆前轴轮距

车辆 4 个轮胎侧偏角计算公式为

$$\begin{cases} \alpha_{fl} = \delta_{fl} - \arctan\left(\dfrac{v_y + a\dot{\phi}}{v_x - d_f\dot{\phi}/2}\right) \\ \alpha_{fr} = \delta_{fr} - \arctan\left(\dfrac{v_y + a\dot{\phi}}{v_x + d_f\dot{\phi}/2}\right) \\ \alpha_{rl} = -\arctan\left(\dfrac{v_y - b\dot{\phi}}{v_x - d_r\dot{\phi}/2}\right) \\ \alpha_{rr} = -\arctan\left(\dfrac{v_y - b\dot{\phi}}{v_x + d_r\dot{\phi}/2}\right) \end{cases} \tag{11}$$

式中　α_{fl}、α_{fr}、α_{rl}、α_{rr}——左前轮、右前轮、左后轮、右后轮侧偏角

车辆 4 个车轮旋转中心纵向速度计算公式为

$$\begin{cases} v_{xfl} = \left(v_x - \dfrac{d_f}{2}\dot{\phi}\right)\cos\delta_{fl} + (v_y + a\dot{\phi})\sin\delta_{fl} \\ v_{xfr} = \left(v_x + \dfrac{d_f}{2}\dot{\phi}\right)\cos\delta_{fr} + (v_y + a\dot{\phi})\sin\delta_{fr} \\ v_{xrl} = v_x - \dfrac{d_r}{2}\dot{\phi} \\ v_{xrr} = v_x + \dfrac{d_r}{2}\dot{\phi} \end{cases} \tag{12}$$

式中　v_{xfl}、v_{xfr}、v_{xrl}、v_{xrr}——4 个车轮旋转中心纵向速度

车辆制动时，滑移率表示车轮滑动部分所占的比例，其计算公式为

$$\begin{cases} \lambda_{fl} = \dfrac{v_{xfl} - r_t\omega_{fl}}{v_{xfl}} \\ \lambda_{fr} = \dfrac{v_{xfr} - r_t\omega_{fr}}{v_{xfr}} \\ \lambda_{rl} = \dfrac{v_{xrl} - r_t\omega_{rl}}{v_{xrl}} \\ \lambda_{rr} = \dfrac{v_{xrr} - r_t\omega_{rr}}{v_{xrr}} \end{cases} \tag{13}$$

式中　λ_{fl}、λ_{fr}、λ_{rl}、λ_{rr}——4 个车轮制动时的纵向滑移率

1.3　轮胎模型

由于喷雾机的轮胎与地面直接接触，轮胎特性很大程度上影响着路径追踪的效果和行驶稳定性，因此，需要研究轮胎特性，保证轮胎侧偏角、滑移率在合理范围内。魔术轮胎模型可以较为精确地描述轮胎的纵向力、侧向力和回正力矩，已经成为目前汽车操纵动力学研究中广泛采用的一种经验公式[21]。图 6 为 Simulink 中搭建的轮胎模型，通过使用魔术公式轮胎模型可以提高轮胎力学特性表达式的拟合精度，有助于轮胎的性能分析。

魔术公式的一般表达式为

$$\begin{cases} y(x) = D\sin(C\arctan(Bx - E(Bx - \arctan(Bx)))) \\ Y(x) = y(x) + S_v \\ x = X + S_h \end{cases} \tag{14}$$

式中 Y——侧向力、纵向力或回正力矩

X——侧偏角或滑移率

D——峰值因子

C——形状因子

B——刚度因子

E——曲率因子

S_h——水平方向偏移量

S_v——垂直方向偏移量

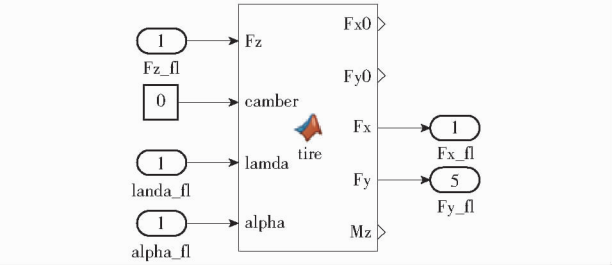


图 6 魔术公式搭建轮胎模型

Fig. 6 Magic formula building tire model

轮胎的侧向力、纵向力和回正力矩公式由一系列修正因子构成,计算公式如下[22-24]:

侧向力

$$F_y = D\sin(A_1\arctan(Bx - E(Bx - \arctan(BX)))) + S_v \tag{15}$$

纵向力

$$F_x = D\sin(A_2\arctan(Bx - E(Bx - \arctan(BX)))) + S_v \tag{16}$$

回正力矩

$$M_z = D\sin(A_3\arctan(Bx - E(Bx - \arctan(BX)))) + S_v \tag{17}$$

式中 A_1、A_2、A_3——拟合参数

2 喷雾机侧倾稳定控制器设计

本文研究的是曲线运动引起的喷雾机侧倾,车辆曲线运动产生侧向加速度,而侧向加速度是引起车辆侧倾的主要原因[25-26]。因此,通过有效调节车辆的曲线运动姿态,合理地控制车辆的侧向加速度,能够有效地降低车辆侧翻的风险,提高车辆的侧倾稳定性。

2.1 喷雾机稳定性控制策略

以建立的线性二自由度车辆模型对驾驶员输入引起的前轮转角给出理想横摆角速度,乘以一个大于 1 的系数得到目标横摆角速度,以此为依据进行主动转向以提高车辆转向趋势[27]。由于主动转向控制的施加,驾驶员输入将趋于减小,因此以驾驶员输入转角作为线性二自由度车辆模型的输入变量也有利于期望值的收敛,保证侧倾稳定性控制。图 7 为控制框图。

本文主动转向控制中以前轮转角作为输入变量,前轮主动转向修正角度为控制器的输出变量,与驾驶员输入引起的前轮转向角度叠加后输入给车辆模型,可表示为

$$\delta = \delta_d + \delta_c \tag{18}$$

式中 δ_d——驾驶员输入引起的前轮转向角度

δ_c——主动转向控制引起的附加前轮转向角度

横摆角速度是车辆转向能力的表征,在稳态转向工况下横摆角速度对前轮转角输入的稳态响应可表示为

$$\omega_\gamma = \frac{v_x\delta}{l(1 + Kv_x^2)} \tag{19}$$

其中

$$K = \frac{m}{l^2}\left(\frac{a}{k_2} - \frac{b}{k_1}\right) \tag{20}$$

式中 k_1、k_2——前、后轴轮胎侧偏刚度

K 为不足转向系数,$K = 0$ 时车辆表现为中性转

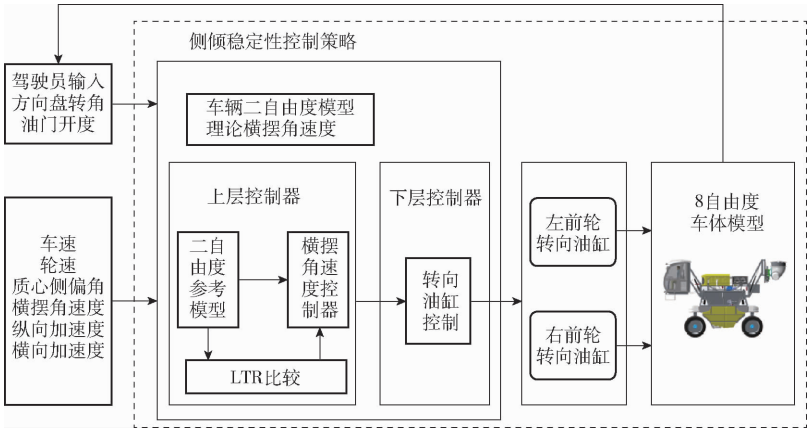


图 7 侧倾稳定性控制框图

Fig. 7 Block diagram of roll stability control

向；当 $K<0$ 时车辆表现为过度转向；当 $K>0$ 时车辆表现为不足转向。

车轮的垂直载荷变化可以通过横向载荷转移率（LTR）来描述，将横向载荷转移率作为喷雾机侧倾稳定性一个指标[28]。侧向加速度过大是车辆侧翻的主要诱导因素，通过主动转向控制横向载荷转移率实际上也控制了侧向加速度。当横向载荷转移率超过设定的安全阀值（LTR_h），主动转向系统立即控制 LTR_h 的值在安全范围之内，当横向载荷转移率低于安全阈值，控制停止。本文将横向载荷转移率的安全阈值取为 0.8[29]。

主动转向控制转角 δ_c 应该满足

$$W=\frac{(2R_\phi h+2h_0)(\delta_d+\delta_c)v_x^2}{gBL+KBv_x^2}<a_0W_h \tag{21}$$

式中　W——横向载荷转移率

W_h——横向载荷转移率设定的安全阈值

a_0——调整系数

R_ϕ——侧倾转向系数

h_0——车辆质心高度

δ_d——驾驶员输入转角

δ_c——主动转向控制附加的修正转角

在实际瞬态响应过程中会有一个超调量，需要引入一个调整系数 a_0，且 $0<a_0<1$，这个参数与悬架阻尼和刚度及车身参数有关。由此可得

$$\delta_c<\frac{a_0(gBL+KBv_x^2)W_h}{(2R_\phi h+2h_0)v_x^2}-\delta_d \tag{22}$$

当δ_c满足以上关系，LTR 控制在安全值范围内。

2.2　上层控制器设计

前轮转向的二自由度模型为

$$\begin{bmatrix}\dot\beta\\ \dot\omega_r\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\dfrac{k_f+k_r}{mv_x} & \dfrac{ak_f-bk_r}{mv_x^2}-1\\ \dfrac{ak_f-bk_r}{I_z} & \dfrac{a^2k_f+b^2k_r}{I_zv_x}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\beta\\ \omega_r\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}\dfrac{-k_f}{mv_x} & 0\\ \dfrac{-ak_f}{I_z} & \dfrac{1}{I_z}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\delta\\ M_z\end{bmatrix} \tag{23}$$

式中　k_f、k_r——前、后轴侧偏刚度

在主动转向横摆角速度滑模控制器的设计中，实际的横摆角速度 ω_r 和期望的横摆角速度 ω_{rd} 的误差 s 为

$$s=\omega_r-\omega_{rd} \tag{24}$$

整理可得

$$\dot s=\frac{ak_f-bk_r}{I_z}\beta+\frac{a^2k_f+b^2k_r}{I_zv_x}\omega_r-\frac{ak_f}{I_z}\delta+M_z-\dot\omega_{rd} \tag{25}$$

为了满足 $s=0$，采用等速趋近律设计控制器

$$\dot s=-K\mathrm{sgn}(s) \tag{26}$$

对于实际系统而言，滑模控制不可避免地存在抖振现象，为了减少抖振，采用边界层方法来修正滑模控制律，用饱和函数来代替符号函数，主动转向的附加转角的大小为

$$\delta_c=\delta-\delta_d=\left(1-\frac{bk_r}{ak_f}\right)\beta+\frac{a^2k_f+b^2k_r}{ak_fv_x}\omega_r+\frac{M_zI_z}{ak_f}-\frac{I_z}{ak_f}\dot\omega_{rd}-Ks_{at}(s/\Delta)-\delta_d \tag{27}$$

式中　$s_{at}()$——饱和函数　　Δ——边界层厚度

2.3　下层控制器设计

下层为滑模变结构控制器的设计，针对系统的两个运动阶段进行对应的控制器设计。第 1 部分是滑模面的设计，它对应于系统向滑模面运动的阶段；第 2 部分是控制律的设计，它对应于系统到达滑模面后并趋于稳定的阶段。在设计滑模面和控制律时，需要考虑系统的动态特性、控制目标和实际应用需求，以确保控制器能够有效地控制系统并满足设计要求。

（1）滑模面设计

被控对象为三阶系统，$\boldsymbol{X}=[x\quad \dot x\quad \ddot x]$ 为系统状态变量。设定 r 为给定的输入信号，y 为系统输出信号，所以系统的误差 $e=r-y$，定义系统的误差向量

$$\boldsymbol{E}=[e_1\quad e_2\quad e_3]^{\mathrm T}=[r-y\quad \dot r-\dot y\quad \ddot r-\ddot y]^{\mathrm T} \tag{28}$$

误差状态方程为

$$\dot{\boldsymbol{E}}=\begin{bmatrix}0 & 1 & 0\\ 0 & 0 & 1\\ 0 & -\omega_h^2 & -2\xi_h\omega_h\end{bmatrix}\boldsymbol{E}+\begin{bmatrix}0\\ 0\\ K_h\omega_h^2\end{bmatrix}u+\begin{bmatrix}0\\ 0\\ \dddot r+2\xi_h\omega_h\ddot r+\omega_h^2\dot r\end{bmatrix} \tag{29}$$

式中　u——控制输入变量

K_h——控制增益系数

ξ_h——阻尼比

所设计的滑模切换函数为

$$s=c_1e_1+c_2e_2+e_3 \tag{30}$$

对于满足 $c_1e_1+c_2e_2+e_3=0$，简化滑模运动的微分方程得

$$s=c_1e_1+c_2e_2+e_3=c_1e_1+c_2\dot e_1+\ddot e_1=0 \tag{31}$$

式（31）决定了滑动模态的动态品质，采用极点配置法求得 c_1、c_2，得到参数。

（2）控制系统设计

对于滑模变结构控制器的设计为

$$u = u_{eq} + u_{sw} \tag{32}$$

式中u_{eq}是等效控制，能够实现系统状态的跟踪，即将系统的状态一直保持在滑模面上；u_{sw}是切换控制，使系统状态趋近于滑模面，削弱系统的抖振，本节将采用指数趋近律。

由$\dot{s}=0$可得等效控制为

$$u_{eq} = \frac{1}{K_h\omega_h^2}[(c_1-\omega_h^2)e_2 + (c_2-2\xi_h\omega_h)e_3 + \dddot{r} + 2\xi_h\omega_h\ddot{r} + \omega_h^2\dot{r}] \tag{33}$$

切换控制部分，选择指数趋近律，即切换控制为

$$u_{sw} = -\varepsilon\mathrm{sgn}(s) - ks \tag{34}$$

综上所述，滑模变结构的控制器设计为

$$u = u_{eq} + u_{sw} = \frac{1}{K_h\omega_h^2}[(c_1-\omega_h^2)e_2 + (c_2-2\xi_h\omega_h)e_3 + \dddot{r} + 2\xi_h\omega_h\ddot{r} + \omega_h^2\dot{r} + \varepsilon\mathrm{sgn}(s) + ks] \tag{35}$$

3 喷雾机侧倾稳定性仿真分析

利用 AMESim 和 Matlab/Simulink 对高地隙自走式喷雾机侧倾稳定性控制的联合仿真模型进行设计，如图 8 所示。

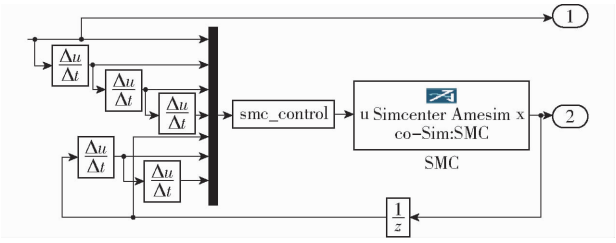


图 8 转向系统滑模联合仿真模型

Fig. 8 Steering system simulation model

为了验证设计的侧倾稳定性控制方法的有效性，在 Simulink 中建模仿真，进行验证，如图 9 所示。

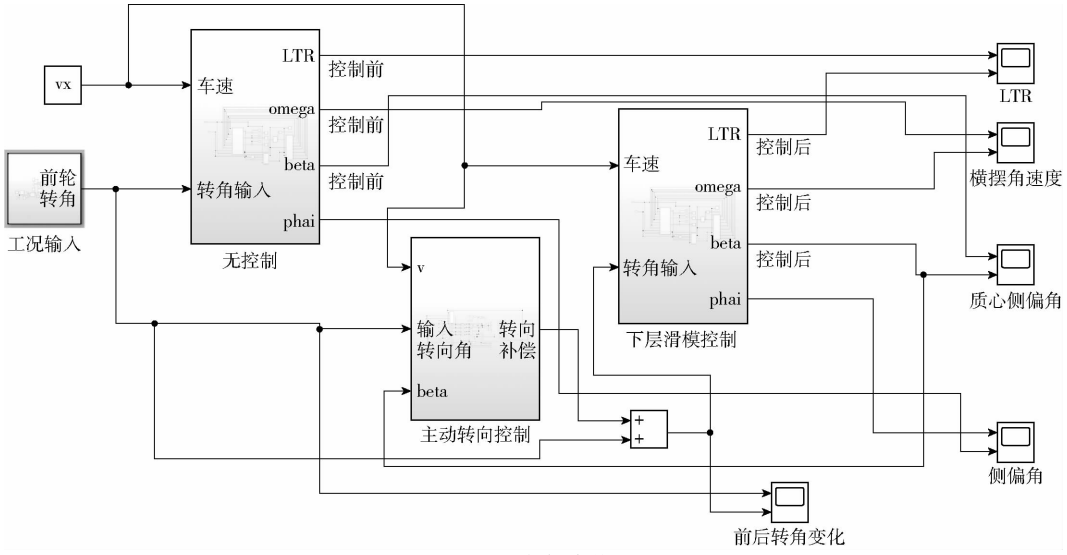


图 9 整车仿真模型

Fig. 9 Steering system simulation model

喷雾机系统参数根据实际情况进行设定，根据喷雾机作业环境设定路面参数，行驶路况决定仿真速度与路径形状。不同转向输入模式激发了系统不同的动态响应：正弦输入考察的是系统在周期性交变激励下的频域特性与跟踪性能；而阶跃输入考察的是系统在突发冲击下的瞬态响应与稳定裕度。这直接导致了横向载荷转移率(LTR)、横摆角速度、侧倾角等关键指标呈现出不同的变化规律。

将喷雾机车速设定为 30 km/h，前轮转角在时间 1 s 时阶跃输入，设定前轮转角为 30°，即为 0.524 rad，路面附着系数为 0.5，如图 10 所示。

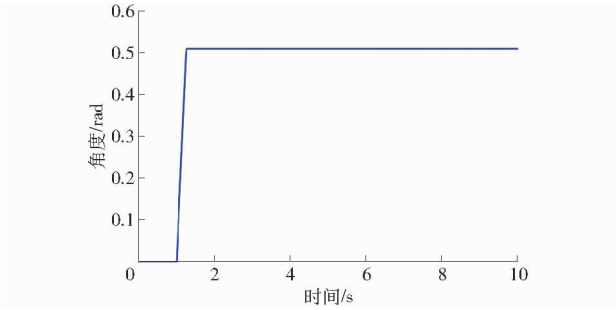


图 10 前轮转角阶跃输入曲线

Fig. 10 Front wheel angle step input curve

前轮转角在 1 s 时瞬间达到 30°，相当于一个突加的侧向力冲击。这会立即产生一个很大的侧向加速度，导致载荷在左右轮间剧烈转移，因此 LTR 会迅速攀升至一个峰值。此时，药液在惯性作用下也会发生剧烈的单侧晃动，进一步加剧载荷转移，使 LTR 峰值更高，侧翻风险瞬间凸显。图 11 是控制前后横向载荷转移率曲线，施加控制以后，横向载荷转移率平均误差绝对值降低了 24.8%，外侧车轮的垂直载荷增大，喷雾机的侧倾稳定性明显增强。

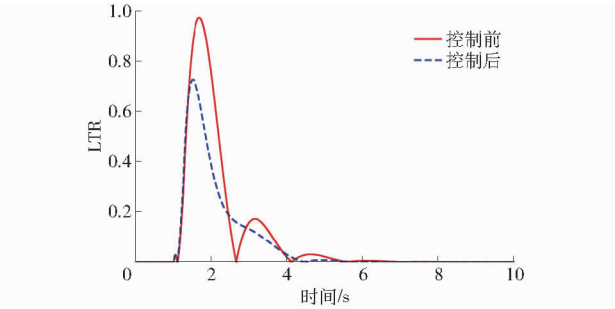


图 11　横向载荷转移率仿真曲线

Fig. 11　LTR simulation curves

阶跃工况下，可能产生较大的瞬态值。在低附着路面上，轮胎侧向力极易饱和，导致质心侧偏角快速增大，是车辆出现甩尾或推头等失稳趋势的直接信号。图 12 是质心侧偏角控制前后的曲线图，质心侧偏角平均误差绝对值减小了 40.0%，控制之后的质心侧偏角波动减少，在第 1 次波动之后，能够较快地趋近于稳态。

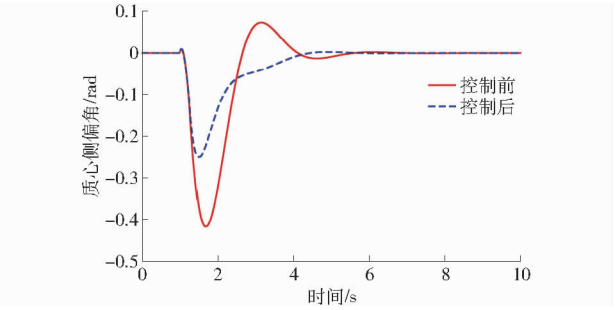


图 12　质心侧偏角仿真曲线

Fig. 12　Centroid sideslip angle simulation curves

阶跃响应验证了系统在突发危险工况下的瞬态干预能力与鲁棒性，其核心在于快速抑制 LTR 和侧倾角的冲击峰值，并约束质心侧偏角以防失稳。控制精度以横向载荷转移率(LTR)和质心侧偏角的稳态误差为主要评价指标。综上所述，在 1 s 时施加 30°阶跃转向输入后，无控制时 LTR 峰值高达 1，已发生侧翻，而在本文控制策略下，LTR 峰值在 0.5 s 时被稳定在约 0.7 以内，4 s 后趋于 0。同时，质心侧偏角的峰值由无控制时的 0.4 rad 降低至 0.25 rad，在 0.8 s 后逐渐趋于稳定，无振荡现象。仿真表明，在突发转向冲击下，本文控制器能快速干预，实现高精度的稳态稳定，将车辆维持在安全平衡状态。

车速设定为 30 km/h，前轮转角在时间 1 s 时正弦输入，设定前轮转角为 30°，即为 0.349 rad，路面附着系数为 0.5。前轮转角输入如图 13 所示。

前轮转角以正弦规律摆动，侧向加速度呈周期性变化。因此，LTR 会随之呈现周期性波动，其峰值通常低于阶跃工况的冲击峰值。横摆角速度的理想状态是跟随前轮转角，也呈现一个同频率的正弦变化。其相位滞后和幅值衰减是核心评价指标。滞后

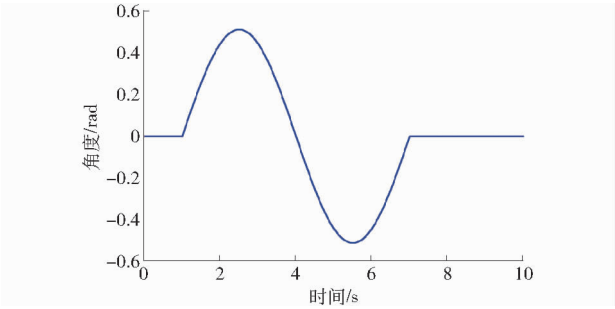


图 13　前轮转角正弦输入曲线

Fig. 13　Front wheel angle sine input curve

过大，则车辆转向指令执行慢；幅值衰减过大，则车辆转向不灵敏。这直接反映了控制系统在频域内的跟踪性能。图 14 是控制前后喷雾机横摆角速度图，未施加控制时，横摆角速度接近 1.5 rad/s，且横摆角速度波动较大，在施加控制之后，横摆角速度平均误差绝对值最大降低了 45.5%，且横摆角速度的波动变缓。

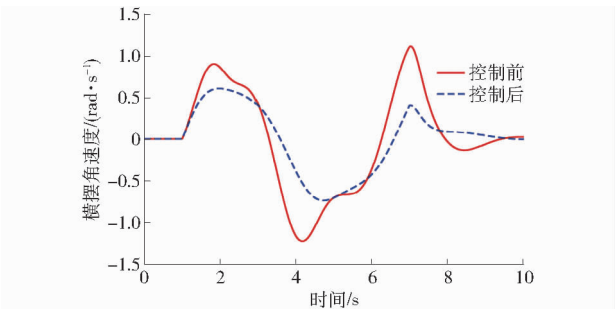


图 14　横摆角速度仿真曲线

Fig. 14　Yaw rate simulation curves

正弦工况下，侧倾角同样呈现周期性波动。此时，需要关注侧倾角相对于转向输入的相位关系，以及侧倾角波动的幅值是否被有效抑制。若控制得好，侧倾角幅值应远小于无控制状态，且相位滞后小。图 15 是控制前后的侧倾角变化曲线，控制之后的侧倾角相较于控制之前的侧倾角平均误差绝对值也降低了 11.0%，控制之后的曲线更加平缓，反映在喷雾机上则是横向摆动幅度大幅度减小。

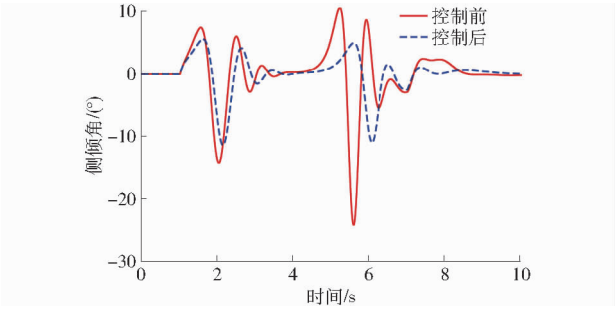


图 15　侧倾角仿真曲线

Fig. 15　Roll angle simulation curves

正弦响应检验了系统在持续周期激励下的动态衰减与跟踪性能，其核心在于减小横摆与侧倾的幅

值衰减和相位滞后,保证行驶平顺性与精准性。控制精度以横摆角速度和侧倾角的跟踪精度为核心评价指标。综上所述,在 1 s 时施加 30°正弦转向输入后,其横摆角速度幅值在 -1 ~1 rad/s 之间,采用本文控制策略后其幅值控制在 -0.5 ~0.5 rad/s 之间,同时侧倾角由最大峰值 -25 rad 减小到 -10 rad。仿真表明,在持续交变工况下,本控制系统具备良好的信号跟踪与干扰抑制精度,确保了车辆行驶的平顺性与可预测性。

4 试验

4.1 喷雾机侧倾稳定性试验平台

本文以喷雾机侧倾稳定性系统开发为目标,建立了能够实现喷雾机侧倾稳定性控制系统开发与研究的车载试验平台,试验平台总体方案如图 16 所示。

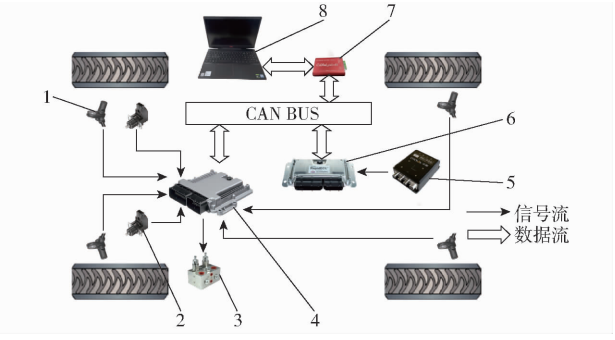


图 16 侧倾稳定性控制系统试验平台总体方案

Fig. 16 Overall scheme of rolling stability control system on-board test platform

1. 轮速传感器 2. 前轮传感器 3. 三位五通换向阀 4. 喷雾机行驶控制器 5. 车身姿态传感器 6. 侧倾稳定性控制器 7. CAN 分析仪 8. 监控计算机

试验平台主要由传感器、执行器、控制器和监控系统 4 部分组成,基于实际喷雾机建立,如图 17 所示。通过传感器实时采集车辆的运行状态,在侧倾稳定性控制器中运行控制算法,生成控制指令驱动执行器动作,实现稳定性控制。



图 17 喷雾机硬件设备位置

Fig. 17 Sprayer hardware device location

4.2 侧倾稳定性控制系统试验

进行侧倾稳定性试验,高地隙自走式喷雾机药箱装满药液,按照 30 km/h,给前轮转角阶跃和正弦 30°进行试验,由于在实车的试验过程中具有一定危险,故将横向载荷转移率的阈值(LTR_h)设置为 0.65,即 $-0.65 < W < 0.65$ 时,认为喷雾机安全行驶,无侧翻危险,侧倾稳定性控制器不输出附加前轮控制转角,否则将施加附加前轮转角。使用计算机通过 CAN 转 USB 模块接入 CAN 总线,对试验过程数据进行采集储存,在 Matlab、Excel、Origin 软件中进行筛选、处理、分析所采集的数据。

在 30 km/h 阶跃输入 30°的情况下,图 18 为喷雾机前轮转角数据,通过观察截取片段的前轮转角值可以看出在截取时间段内的 3 s 左右,喷雾机侧倾稳定性控制器触发;图 19 是喷雾机质心侧偏角图,实际的喷雾机质心侧偏角降低了 35.0%,控制后的质心侧偏角在第 1 次波动之后,减小了第 4 秒位置处的波动,能够较快地趋近于稳态;图 20 为横摆角速度曲线图,横摆角速度平均误差绝对值也相较于未施加控制降低了 15.7%,喷雾机横摆角速度波动减小;图 21 为喷雾机侧倾角曲线图,控制之前的车体簧上侧倾角度接近 15°,在施加控制之后,侧倾角平均误差绝对值降低了 9.3%。

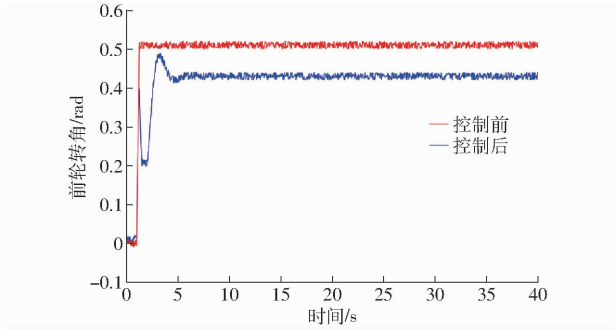


图 18 前轮转角阶跃输入 30°跟踪曲线

Fig. 18 Front wheel steering angle step input 30° tracking curves

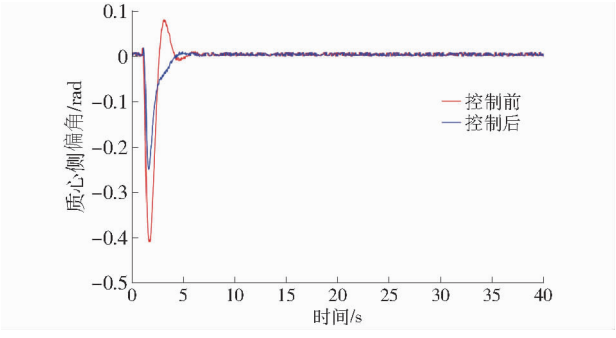


图 19 阶跃输入 30°质心侧偏角跟踪曲线

Fig. 19 Step input 30° center of mass sideslip angle tracking curves

在 30 km/h 速度下,前轮转角正弦输入 30°的情

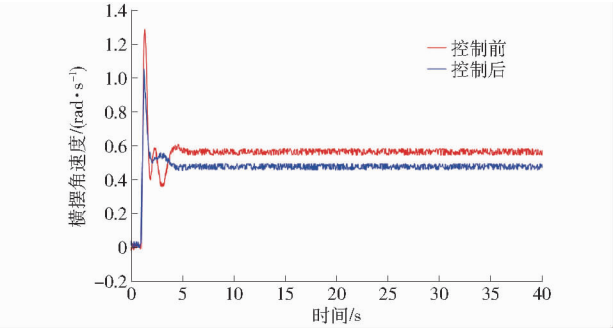


图 20　阶跃输入 30°横摆角速度跟踪曲线

Fig. 20　Step input 30° yaw rate tracking curves

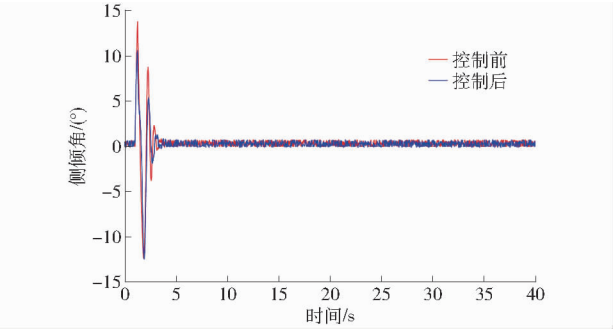


图 21　阶跃输入 30°侧倾角跟踪曲线

Fig. 21　Step input 30° roll angle tracking curves

况下，图 22 为喷雾机前轮转角数据，通过观察截取片段的前轮转角可以看出在截取时间段内的 5 s 左右，喷雾机侧倾稳定性控制器触发；图 23 是喷雾机质心侧偏角图，实际喷雾机的质心侧偏角平均误差绝对值降低了 25.0%，控制后的质心侧偏角整体振动幅度有很大减小；图 24 为横摆角速度曲线图，横摆角速度也相较于未施加控制的平均误差绝对值降低了 17.8%，喷雾机横摆角速度波动减小；图 25 为喷雾机侧倾角曲线图，控制之前的车体簧上侧倾角度接近 10°，在施加控制之后，侧倾角平均误差绝对值降低了 8.6%。

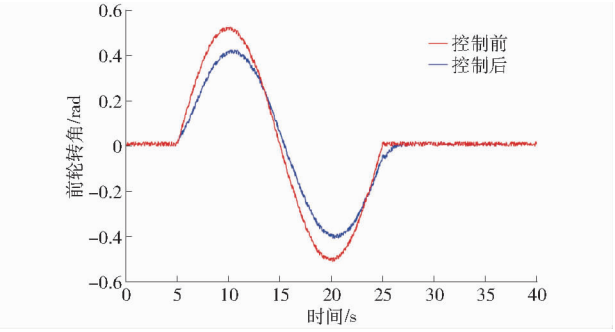


图 22　前轮转角正弦输入 30°跟踪曲线

Fig. 22　Front wheel steering angle sine input 30° tracking curves

试验结果表明：本文开发的喷雾机侧倾稳定性控制系统能够较好地估算出临界横向载荷转移系数，准确得出喷雾机的行驶状态；通过实车试验，验证了下层控制器对前轮转向油缸的控制，能够较好

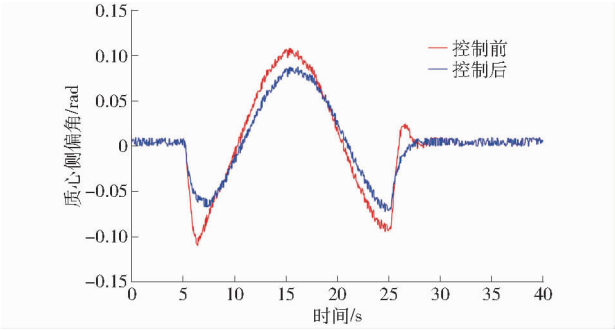


图 23　正弦输入 30°质心侧偏角跟踪曲线

Fig. 23　Sine input 30° center of mass side slip angle tracking curves

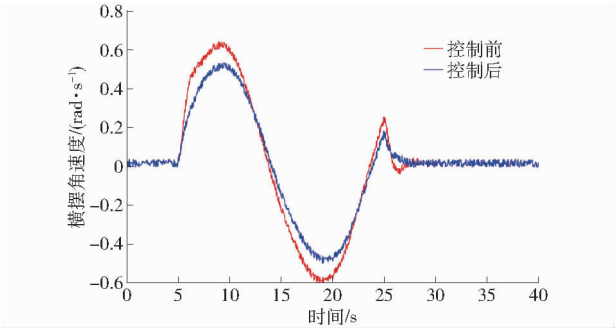


图 24　正弦输入 30°横摆角速度跟踪曲线

Fig. 24　Sine input 30° yaw rate tracking curves

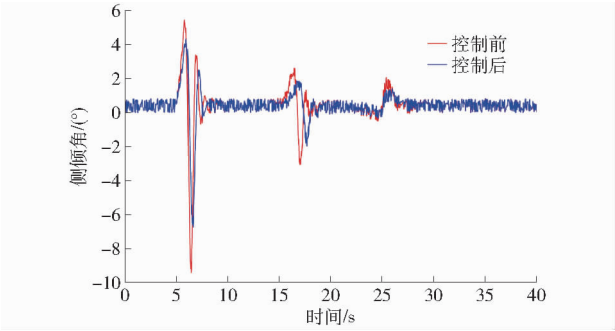


图 25　正弦输入 30°侧倾角跟踪曲线

Fig. 25　Sine input 30° roll angle tracking curves

执行附加前轮转角后的喷雾机转向。综上所述，本文所设计的控制策略在阶跃与正弦工况下表现出的快速响应性、高精度稳态调节和强鲁棒性，为其应对田间非规则路况的随机激励、附着突变等挑战奠定了坚实基础。尽管实车试验在标准场地上进行，但其展现的控制机理与性能指标，清晰地表明了该策略在真实复杂作业环境下具备高度的应用潜力和实用价值。

5　结论

（1）根据高地隙自走式喷雾机侧倾稳定性控制原理，提出基于主动转向的侧倾稳定性控制策略。建立喷雾机底盘关键结构数学模型，在 Simulink 中搭建喷雾机底盘模型，根据前轮转向机构的液压原理图，在 AMESim 中搭建了前轮转向机构的液压模型，并完成了对前轮转向机构的模型辨识，得到了前

轮转向机构的传递函数,通过输出数据验证了模型的正确性。

(2)对喷雾机侧倾稳定性控制参数进行分析,确定以横摆角速度、横向载荷转移率为控制目标。设计了以横摆角速度为控制参数的上层滑模控制器和下层电液位置伺服控制的滑模控制器。在 Simulink 和 AMESim 中建立联合仿真模型,对前轮转向输入角阶跃工况和正弦工况进行仿真,结果表明,在角阶跃工况下,横向载荷转移率、质心侧偏角的平均误差绝对值分别下降了 24.8%、40.0%;在正弦工况下,横摆角速度、侧倾角的平均误差绝对值分别下降了 45.5%、11.0%。

(3)针对喷雾机侧倾稳定性控制进行试验,在角阶跃工况下,横摆角速度、侧倾角、质心侧偏角的平均误差绝对值分别下降了 15.7%、9.3%、35.0%;在正弦工况下,横摆角速度、侧倾角、质心侧偏角的平均误差绝对值分别下降了 17.8%、8.6%、25.0%,有效提高了喷雾机的侧倾稳定性。

参 考 文 献

[1] 陈雨. 高地隙喷雾机独立式立轴空气悬架设计方法与特性研究[D]. 北京:中国农业大学,2017.
CHEN Yu. Design method and characteristics of an independent vertical-axis air suspension for a high-clearance sprayer[D]. Beijing: China Agricultural University, 2017. (in Chinese)

[2] 周志艳,周铭杰,陈羽立,等. 喷杆喷雾机旋翼悬浮式喷杆自动调平控制系统研究[J]. 农业机械学报,2022,53(12):70-79.
ZHOU Zhiyan, ZHOU Mingjie, CHEN Yuli, et al. Research on a rotor hovering-type automatic boom leveling control system for boom sprayers[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(12): 70-79. (in Chinese)

[3] 李瑞敏. 高地隙玉米喷雾机施药装置的设计研究[D]. 石河子:石河子大学,2015.
LI Ruimin. Design study of the pesticide application device for a high-clearance corn sprayer[D]. Shihezi: Shihezi University, 2015. (in Chinese)

[4] 余希胜. 高地隙喷雾机侧倾稳定性控制研究[D]. 石河子:石河子大学,2020.
YU Xisheng. Roll stability control of a high-clearance sprayer[D]. Shihezi: Shihezi University, 2020. (in Chinese)

[5] 张佳彬. SUV 侧翻机理及主动防侧翻控制理论研究[J]. 汽车实用技术,2022,47(5):46-49.
ZHANG Jiabin. Study on SUV rollover mechanism and active anti-rollover control theory[J]. Automobile Applied Technology, 2022, 47(5): 46-49. (in Chinese)

[6] 严世榕,严钟辉. 基于差动制动的客车防侧翻控制研究[J]. 福州大学学报(自然科学版),2015,43(1):83-88.
YAN Shirong, YAN Zhonghui. Bus anti-rollover control based on differential braking[J]. Journal of Fuzhou University (Natural Science Edition), 2015, 43(1): 83-88. (in Chinese)

[7] 刘国海,李持衡,沈跃,等. 同步转向高地隙喷雾机模糊自适应轨迹跟踪预测控制[J]. 农业机械学报,2021,52(9):389-399.
LIU Guohai, LI Chiheng, SHEN Yue, et al. Fuzzy-adaptive trajectory-tracking predictive control for a synchronous-steering high-clearance sprayer[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(9): 389-399. (in Chinese)

[8] 周辰雨,易莎,余强,等. 概率融合的抗侧翻智能主动悬架控制研究[J]. 控制工程,2024,31(1):126-133.
ZHOU Chenyu, YI Sha, YU Qiang, et al. Intelligent active suspension anti-rollover control based on probabilistic fusion[J]. Control Engineering of China, 2024, 31(1): 126-133. (in Chinese)

[9] 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 roll stability modeling and control methods of a high-clearance sprayer[D]. Shihezi: Shihezi University, 2019. (in Chinese)

[10] 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 a high-clearance sprayer[D]. Shihezi: Shihezi University, 2021. (in Chinese)

[11] LI Boyuan, HUNANG Chao, WU Yang, et al. A three-dimensional integrated non-linear coordinate control framework for combined yaw and roll-stability control during tyre blow-out[J]. Sensors, 2021, 21(24): 8328.

[12] TUGRUL O, SEDA A, ILKE T, et al. Neural network based redesign of morphing UAV for simultaneous improvement of roll stability and maximum lift/drag ratio[J]. Aircraft Engineering and Aerospace Technology, 2018, 90(8): 1203-1212.

[13] HICKMAN S J, GUO F, CAMDEN C M, et al. Efficacy of roll stability control and lane departure warning systems using carrier-collected data[J]. Journal of Safety Research, 2015, 52: 59-63.

[14] 王林泽,李庆敏,周坤雷,等. 电驱无人农用动力装备设计与试验[J]. 农业机械学报,2025,56(12):110-120.
WANG Linze, LI Qingmin, ZHOU Kunlei, et al. Design and experiment of an electric-drive unmanned agricultural power equipment[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(12): 110-120. (in Chinese)

[15] 余志生. 汽车理论(第 6 版)[M]. 北京:机械工业出版社,2018:155-185.

[16] 王子杰,刘国海,张多,等.高地隙四轮独立驱动喷雾机路径跟踪模型预测控制[J].智慧农业(中英文),2021,3(3):82-93.
WANG Zijie, LIU Guohai, ZHANG Duo, et al. Model predictive control for path tracking of a high-clearance four-wheel independent-drive sprayer[J]. Smart Agriculture, 2021, 3(3): 82-93. (in Chinese)

[17] NEKOUKAR V, MAHDIAN D N. Robust path tracking of a quadrotor usingadaptive fuzzy terminal sliding mode control[J]. Control Engineering Practice, 2021, 110(3):47-63.

[18] 聂振宇,李晋阳,陈云飞.宽幅喷杆喷雾机振动传递特性分析与试验[J].农机化研究,2024,46(1):25-34.
NIE Zhenyu, LI Jinyang, CHEN Yunfei. Analysis and experiment on vibration transmission characteristics of a wide boom sprayer[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2024, 46(1): 25-34. (in Chinese)

[19] 卢丽霞,李刚,姬晓.分布式电动汽车协调控制方法研究[J].制造业自动化,2023,45(3):9-14.
LU Lixia, LI Gang, JI Xiao. Research on coordinated control methods for distributed electric vehicles[J]. Manufacturing Automation, 2023, 45(3): 9-14. (in Chinese)

[20] 祝青园,程家琪,陈轩伟,等.无人驾驶铰接转向车辆路径跟踪控制研究综述[J].农业机械学报,2024,55(1):1-21.
ZHU Qingyuan, CHENG Jiaqi, CHEN Xuanwei, et al. A review of path tracking control for unmanned articulated steering vehicles[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(1): 1-21. (in Chinese)

[21] 肖怀阳,魏道高,蒋艮生.基于分叉理论的前轮外倾角对极限工况下车辆转向行驶稳定性影响研究[J].汽车工程学报,2011,1(3):101-105.
XIAO Huaiyang, WEI Daogao, JIANG Gensheng. Influence of front-wheel camber angle on vehicle steering stability under limit conditions based on bifurcation theory[J]. Chinese Journal of Automotive Engineering, 2011, 1(3): 101-105. (in Chinese)

[22] 毕松,韩奕非.果园滑动转向机器人轮胎动力学参数实时估计方法[J].农业机械学报,2023,54(8):110-121,192.
BI Song, HAN Yifei. Real-time estimation method of tire dynamics parameters for sliding steering robots in orchards[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(8): 110-121,192. (in Chinese)

[23] 寇发荣,常航涛,王倩磊,等.基于状态估计的车辆横摆稳定性分析方法研究[J].郑州大学学报(工学版),2025,46(3):105-110,127.
KOU Farong, CHANG Hangtao, WANG Qianlei, et al. Vehicle yaw stability analysis method based on state estimation[J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2025, 46(3): 105-110, 127. (in Chinese)

[24] 赵明慧,郭浩然,张利鹏,等.四轮独立转向分布式驱动电动汽车单轮转向失效行驶稳定性控制[J].机械工程学报,2024,60(10):507-522.
ZHAO Minghui, GUO Haoran, ZHANG Lipeng, et al. Driving stability control of a distributed-drive electric vehicle with four-wheel independent steering under single-wheel steering failure[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2024, 60(10): 507-522. (in Chinese)

[25] 王龙龙,蓝鸿,周胥,等.拖拉机极限态侧翻回稳陀螺主动控制系统设计与试验[J].农业机械学报,2022,53(2):320-327.
WANG Longlong, LAN Hong, ZHOU Xu, et al. Design and experiment of an active gyroscopic control system for tractor rollover recovery under extreme conditions[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(2): 320-327. (in Chinese)

[26] 高超,李擎,李伟文,等.一种防侧滑/侧翻的车辆路径规划方法[J].机械设计与制造,2023(9):263-267.
GAO Chao, LI Qing, LI Weiwen, et al. A vehicle path planning method for preventing sideslip/rollover[J]. Machinery Design & Manufacture, 2023(9): 263-267. (in Chinese)

[27] 刘鑫.分布式驱动车辆规划控制及横向稳定性控制研究[D].长春:吉林大学,2023.
LIU Xin. Research on planning control and lateral stability control of distributed-drive vehicles[D]. Changchun: Jilin University, 2023. (in Chinese)

[28] 范硕,王洪亮,孙平.考虑车辆横摆及侧倾稳定性的智能车辆纵垂向集成控制技术研究[J].农业装备与车辆工程,2024,62(7):34-39.
FAN Shuo, WANG Hongliang, SUN Ping. Research on integrated control technology of intelligent vehicles considering yaw and roll stability[J]. Agricultural Equipment & Vehicle Engineering, 2024, 62(7): 34-39. (in Chinese)

[29] 秦嘉浩,刘海帆,SUHC S,等.拖拉机动量飞轮主动防侧翻控制与模型试验研究[J].农业机械学报,2020,51(2):515-520.
QIN Jiahao, LIU Haifan, SUHC S, et al. Active anti-rollover control of a tractor using a momentum flywheel and model experimental study[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(2): 515-520. (in Chinese)