doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2026.07.007

高地隙自走式喷雾机四轮独立驱动全液压转向系统研究

温浩军[1,2]　周倩倩[1,3]　郑招辉[1,2]　谭明冲[1,2]　储建军[1,2]

(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 832003;
3.江苏大学农业工程学院,镇江 212013)

摘要:为提升高地隙自走式喷雾机在复杂田间工况下的综合转向性能,提高其转向时响应速度与作业行驶稳定性,同时减小转弯半径与轮胎侧滑,基于比例前馈与横摆角速度反馈联合控制策略,设计了一种基于模糊 PID 控制器的全液压转向系统。通过 AMESim 与 Matlab/Simulink 联合仿真分析表明:所设计的控制系统能够实现后轮对前轮转角的最大跟随误差为 2.42°,符合阿克曼转向理论的范围要求。进一步搭建实物试验平台进行验证,在四轮转向模式下以 4 km/h 速度进行随机转向测试,试验结果表明:后轮转角跟随误差小于 3°,最大跟随误差为 2.6°,系统表现出良好的转角跟随特性与转向协调性。同时,四轮转向时的转向半径由两轮转向时的 7.9 m 减小至 4.8 m,提升了作业过程中的操纵稳定性与转向灵活性。

关键词:高地隙喷雾机;全液压转向系统;四轮转向;模糊 PID 控制

中图分类号:S223　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2026)07-0080-09　　**OSID**:

Research on Four-wheel Independent Drive Full Hydraulic Steering System of High-clearance Self-propelled Sprayer

WEN Haojun[1,2]　ZHOU Qianqian[1,3]　ZHENG Zhaohui[1,2]　TAN Mingchong[1,2]　CHU Jianjun[1,2]

(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* 832003, *China*
3. *Institute of Agricultural Engineering*, *Jiangsu University*, *Zhenjiang* 212013, *China*)

Abstract: Aiming to enhance the comprehensive steering performance of a high-clearance self-propelled sprayer operating under complex and uneven field conditions, focusing on improving steering response speed, driving stability, minimizing turning radius, and mitigating tire sideslip—critical factors for efficient and damage-free crop protection operations, based on a hybrid control strategy that integrated proportional feed forward control with yaw rate feedback, a full hydraulic four-wheel steering system employing a fuzzy PID controller was proposed and developed. Co-simulation conducted in AMESim and Matlab/Simulink demonstrated that the designed control system achieved precise coordination between front and rear wheels, with the maximum following error of the rear wheel angle relative to the front wheel command remaining within ± 1.8°, fully satisfying the geometric constraints of Ackermann steering theory. To further validate the system's effectiveness, a physical prototype test platform was constructed. Random steering tests were performed at a representative working speed of 4 km/h in four-wheel steering mode. Notably, the implementation of the four-wheel steering mechanism reduced the vehicle's minimum turning radius from 7.9 m (in two-wheel steering mode) to 4.8 m—a 39.2% reduction—significantly enhancing maneuverability in narrow rows and headland turns, while simultaneously improving lateral stability and operational efficiency during fieldwork. These outcomes underscored the system's potential to facilitate the transition of agricultural machinery from conventional mechanical steering toward intelligent, adaptive, and high-performance autonomous operation.

Key words: high ground clearance sprayer; fully hydraulic steering system; four-wheel steering; fuzzy PID control

收稿日期:2026-01-08　修回日期:2026-01-12

基金项目:国家棉花产业技术体系岗位科学家项目(CARS-15-26)

作者简介:温浩军(1971—),男,研究员,主要从事农业机械化与智能化装备研究,E-mail:547273950@qq.com

0　引言

随着农业机械化的推进和大规模农场合作经营方式的实施，大型高地隙植保机械已成为现代农业生产体系中实现高效、精准植保作业的关键装备，先进的植保机械是提升农药利用率、提高作业效率、增强防治效果的重要手段[1-3]。现有植保技术装备对田间复杂工况适应性差，难以满足现代农业对智能化生产的核心需求。农业装备以提升地形通过性、工况自主感知与智能决策能力为目标，实现植保作业从机械化向智能化的转型升级[4-6]。

近年来，国内外学者针对上述问题展开了相关研究。其中，多模式四轮独立转向液压系统的设计可减小喷雾机转向半径[7-8]，提高喷雾机转向灵活性和通过性[9-10]，以及进行转场作业时，减轻对作物的碾压[11]。同时喷雾机在复杂工况下，因发生轮胎-地面附着力不均导致的各轮转速与液压流量不匹配导致的底盘侧滑、激转、侧翻或转向迟滞等问题[12-14]，影响机具行驶作业的稳定性、安全性和农业生产效率[15-16]。

针对此问题，文献[17]提出了一种滑模自抗扰姿态控制策略，提高了同步转向高地隙喷雾机转向机构对目标状态的响应速度与鲁棒性。文献[18]设计了一种可实现四轮转向与蟹行的全液压负载敏感型多轮转向控制系统，提高了大型自走式喷雾机在复杂工况下的转向灵活性。文献[19]提出了一种可利用车辆平行移动来实现换行作业的控制方法，解决了传统换行方式转向半径大而需要较大转向空间的问题。文献[20]设计了基于 PID 控制算法的多模式液压转向系统，通过试验验证了所设计的转向系统具有较高的控制精度和稳定性。文献[21]研究了高地隙液压四轮驱动喷雾机的转向防滑控制系统，对控制系统在不同转角下的控制精度进行了试验验证。文献[22]提出了一种基于变量马达控制的高地隙自走式喷雾机静液压驱动系统防滑控制方法，实现底盘驱动稳定性。

针对转弯半径大、转向迟滞、轮胎打滑等问题，本文设计一种负载敏感全液压四轮转向系统，以实现两轮、四轮、楔形转向模式的协调切换。利用 AMESim 与 Matlab/Simulink 开展全液压四轮转向系统的联合仿真分析，并通过转向系统田间试验，验证所设计系统的稳定性与合理性。

1　车轮转向动力学模型建立

1.1　两轮转向

在两轮转向模式下，忽略左右车轮因载荷变化导致的轮胎特性差异及轮胎回正力矩影响，建立了转向运动学分析模型。

根据阿克曼转向理论，由图 1 所示的实际转向工况，推导出车轮运动学的几何关系

$$\cot\delta_D - \cot\delta_A = \frac{B}{L} \tag{1}$$

前轮的轮胎侧偏角为

$$\alpha_i = \beta + \frac{L\omega_r}{2u} - \delta_i \quad (i = A, D) \tag{2}$$

式中　B——两前、后轮间距离，m

L——前后轴间距离，m

u——质心的纵向速度，m/s

ω_r——绕质心的横摆角速度，rad/s

β——质心侧偏角，rad

δ_i——各轮转向角，rad

α_i——各轮侧偏角，rad

转弯半径计算公式为

$$R = L\cot\delta_A + \frac{B}{2} \tag{3}$$

式中　R——转弯半径，m

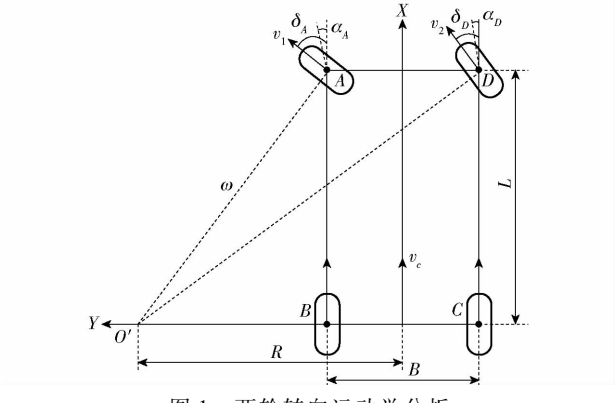


图 1　两轮转向运动学分析

Fig. 1　Motion analysis of vehicle two wheel steering

1.2　四轮转向

在四轮转向模式下，为有效减小转弯半径、抑制轮胎侧向滑移并提升底盘操纵稳定性，如图 2 所示，前、后轮进行反向转向。在进行运动学分析时，考虑了轮胎在行驶过程中表现出的非线性特性，同时为简化模型复杂度，忽略左右车轮因载荷变化对轮胎特性的影响以及轮胎回正力矩的作用。

根据阿克曼转向理论，车轮在实际工况下各轮转角间的关系为

$$\begin{cases} \cot\delta_D - \cot\delta_A = \dfrac{2B\cot\delta_A}{2R - B} \\ \cot\delta_C - \cot\delta_B = \dfrac{2B\cot\delta_A}{2L\cot\delta_A - 2R + B} \end{cases} \tag{4}$$

各轮的轮胎侧偏角为

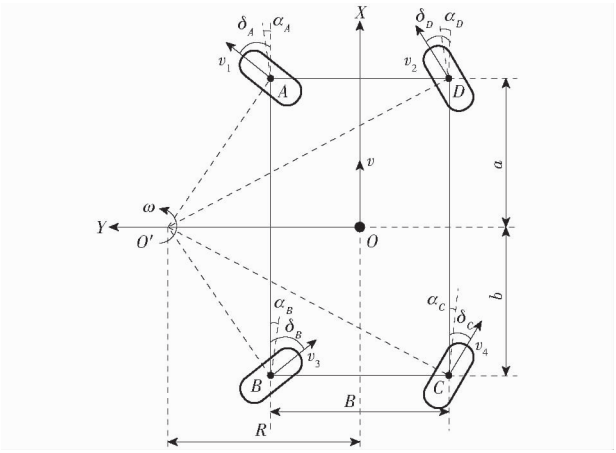


图 2 四轮转向运动学分析

Fig. 2 Motion analysis of vehicle four wheel steering

$$\begin{cases}\alpha_i=\beta+\dfrac{L\omega_r}{2u}-\delta_i\\ \alpha_j=\beta-\dfrac{L\omega_r}{2u}-\delta_j\end{cases}\quad(j=B,C)\tag{5}$$

四轮转弯半径计算公式为

$$R=\frac{1}{2}\sqrt{L^2+(L\cot\delta_A+B)^2}\tag{6}$$

1.3 喷雾机二自由度线性模型

在喷雾机进行田间掉头或转场作业时,其纵向(x 轴方向)行驶速度视为恒定。为提升整机操纵稳定性并优化四轮转向系统的实际作业性能,本研究建立了包含侧向运动与横摆运动的二自由度四轮转向底盘数学模型。该模型可表征底盘质心侧偏角及横摆角速度增益的动态特性,并基于所推导的状态方程,在 Matlab/Simulink 环境中搭建了仿真模型。

根据图 3 所示力学关系,可得到二自由度四轮转向喷雾机的动力学方程为

$$\begin{cases}mu(\dot\beta+\omega_r)=-\beta(K_f+K_r)+\\ \qquad\dfrac{L\omega_r}{2u}(K_r-K_f)+K_f\delta_f+K_r\delta_r\\ I_z\dot\omega_r=\dfrac{L}{2}\left[\beta(K_r-K_f)-\right.\\ \qquad\left.\dfrac{L\omega_r}{2u}(K_f+K_r)+K_f\delta_f-K_r\delta_r\right]\end{cases}\tag{7}$$

式中 m——整车质量,kg

K_f——前轮胎侧偏刚度,N/rad

K_r——后轮胎侧偏刚度,N/rad

δ_f——前轮转向角,rad

δ_r——后轮转向角,rad

I_z——转动惯量,kg·m^2

在二自由度四轮转向系统模型中,状态变量 $\boldsymbol{x}_{(t)}=(\beta,\omega_r)^{\mathrm T}\in\mathbf{R}^{2\times1}$;输入变量 $\boldsymbol{u}_{(t)}=(\delta_f,\delta_r)^{\mathrm T}\in\mathbf{R}^{2\times1}$;输出向量 $\boldsymbol{y}_{(t)}=(\theta,\omega_r)^{\mathrm T}\in\mathbf{R}^{2\times1}$。

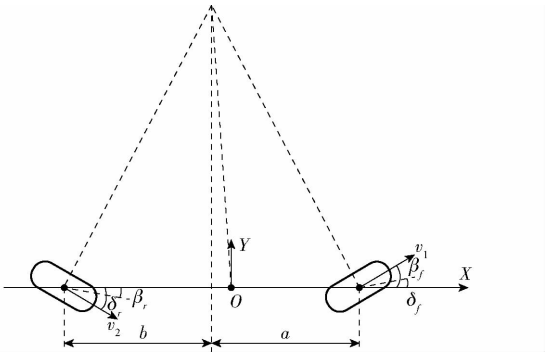


图 3 二自由度四轮转向模型

Fig. 3 2 - DOF four-wheel steering model

因此,系统的状态空间方程为

$$\begin{cases}\dot{\boldsymbol{x}}_{(t)}=\boldsymbol{A}\boldsymbol{x}_{(t)}+\boldsymbol{B}\boldsymbol{u}_{(t)}\\ \boldsymbol{y}_{(t)}=\boldsymbol{C}\boldsymbol{x}_{(t)}+\boldsymbol{D}\boldsymbol{u}_{(t)}\end{cases}\tag{8}$$

其中

$$\boldsymbol{A}=\begin{bmatrix}-\dfrac{K_f+K_r}{mu} & \dfrac{L(K_r-K_f)}{2mu^2}-1\\ \dfrac{L(K_r-K_f)}{2I_z} & \dfrac{L^2(K_r-K_f)}{4I_zu}\end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{B}=\begin{bmatrix}\dfrac{K_f}{mu} & \dfrac{K_r}{mu}\\ \dfrac{LK_f}{2I_z} & -\dfrac{LK_r}{2I_z}\end{bmatrix}\quad\boldsymbol{C}=\begin{bmatrix}1&0\\0&1\end{bmatrix}\quad\boldsymbol{D}=\begin{bmatrix}0&0\\0&0\end{bmatrix}$$

1.4 喷雾机参考模型的建立

在四轮转向底盘的运动控制中,为了实现无侧滑的理想运动状态,需将质心侧偏角控制在零值附近。为保证转向响应的一致性,四轮转向系统的横摆角速度稳态增益应与前轮转向系统等效。据此,本研究以前轮转向系统的稳态特性为参考基准,构建理想参考模型。该模型基于“零质心侧偏角”与“横摆角速度一阶惯性收敛”两项基本假设,提出了“零侧偏角-一阶横摆动力学”理想跟踪模型,为四轮转向系统的动态控制提供理论依据。

线性微分方程为

$$\begin{bmatrix}\dot\beta_d\\ \dot\omega_{rd}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}0&0\\0&-\dfrac{1}{T_e}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\beta_d\\ \omega_{rd}\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}0\\ \dfrac{k_{rd}}{T_e}\end{bmatrix}\delta_f\tag{9}$$

式中 T_e——一阶滞后时间常数,一般取 0.1 ~ 0.3

k_{rd}——二自由度前轮转向底盘横摆角速度增益,s^{-1}

β_d——参考质心侧偏角,rad

ω_{rd}——参考横摆角速度,rad/s

2 四轮转向全液压系统设计

2.1 液压系统原理

根据本文中所设计的高地隙喷雾机的整机参数:整机满载质量 8 500 kg,轴距 3 300 mm;前后轴分

别承载质量 4 250 kg。单个转向机构承重 G_s = 20 825 N，转向节立轴偏移量 e = 200 mm。轮胎选用 W9.5×32（前后轴相同），轮胎宽度 320 mm。喷雾机在田间作业时路面与轮胎之间的摩擦因数取 0.85。结合其工作环境及其转向需求设计了一种负载传感型全液压四轮转向系统，该转向系统可以实现前轮转向、四轮转向、楔形转向等多模式之间的自适应协调切换，其原理如图 4 所示。并对多功能液压转向系统中的转向液压缸、液压转向器等液压元件进行计算选型。

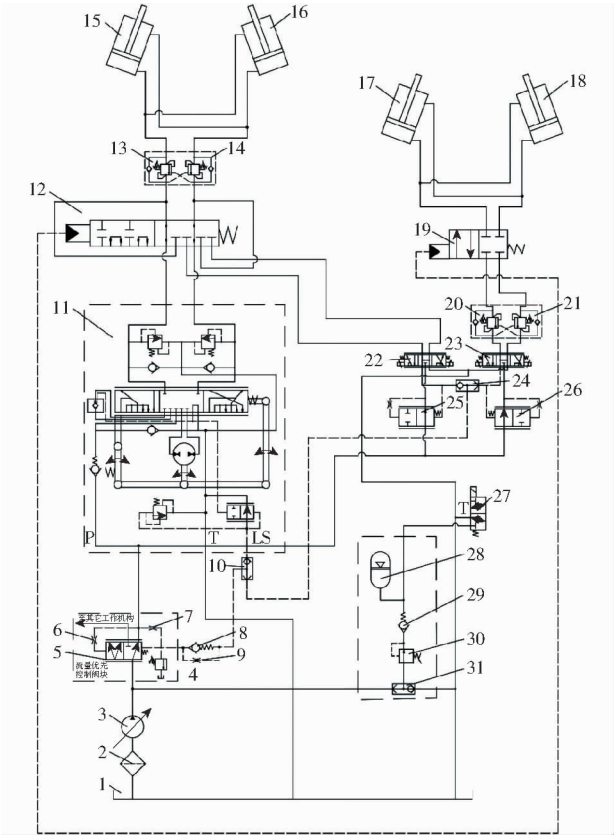


图 4　喷雾机四轮转向液压系统原理图

Fig. 4　Schematic of sprayer steering anti-skid hydraulic system

1. 液压油箱　2. 滤清器　3. 转向液压泵　4. 溢流阀　5. 负载感应流量优先阀　6、7、9. 固定节流口　8、29. 单向阀　10、24、31. 球形梭阀　11. OSPU 型负载感应闭心式液压转向器　12、19. 切换阀　13、14、20、21. 双平衡阀块　15. 左前轮转向液压缸　16. 右前轮转向液压缸　17. 左后轮转向液压缸　18. 右后轮转向液压缸　22、23. 三位五通电液比例换向阀　25、26. 压力补偿定压差减压阀　27. 电磁换向阀　28. 蓄能器　30. 减压阀

所设计的负载敏感全液压转向系统采用闭式柱塞泵作为动力源，核心控制元件包括负载感应流量优先控制阀块、OSPU 型负载敏感闭心式全液压转向器、后轮转向液压控制阀块以及前后轮转向液压缸。该系统构建为负载压力感应式闭心油路，当转向器及各控制阀处于中位或常位时，进油口处于封闭状态，不与回油路连通，从而实现系统待机时的节能状态。在转向过程中，传感油路能够实时响应各转向液压缸中的最大负载压力变化，动态调节系统输出。当系统处于非转向工况时，所有控制单元回位至中位或常位状态，传感油路与回油路连通，液压泵在卸荷压力下运行，有效降低能量损耗。负载感应流量优先控制阀通过并联压力补偿机制，优先确保转向油路的稳定流量供给，其余供其它执行机构使用，实现流量按需分配与系统效率优化。

液压转向系统基本工作过程为：当喷雾机启动时，液压油经滤清器 3 进入负载感应流量优先阀 5 与 OSPU 型负载感应闭心式液压转向器 11 的油路接通。

（1）当喷雾机处于手动转向工作状态时，电磁换向阀 27 不得电，切换阀 12、19 的控制口通过电磁换向阀 27 回油，此时切换阀 12、19 处于右位机能工作，OSPU 型负载感应闭心式液压转向器的油可以通过切换阀 12 到前轮转向油缸，三位五通电液比例换向阀 22、23 不输出液压油到前轮和后轮转向油缸，此时整个系统为手动转向工作状态。

（2）当喷雾机处于电控转向工作状态时，电磁换向阀 27 得电，经过减压阀 30 后的压力油通过电磁换向阀 27 到切换阀 12、19 的控制口进行换向，处于左位机能工作，OSPU 型负载感应闭心式液压转向器 17 的油不能通过切换阀 12 到前轮转向油缸。三位五通电液比例换向阀 22、23，通过切换阀 12、19 输出液压油到前轮和后轮转向油缸，实现对前轮和后轮转向的控制，此时整个系统为电控转向状态。

（3）当喷雾机处于四轮转向模式时，三位五通电液比例换向阀 22、23 处于左、右两机能位，转向液压油缸的负载压力通过球形梭阀 24、10 传递到负载感应流量优先阀 5 的控制油腔，此时负载感应压力补偿流量优先阀输出的油液优先保证液压转向器与后轮转向液压油缸的油液需要。在后轮转向油路中通过电磁换向阀 27、蓄能器 28 及减压阀 30 提供换向时所需的先导压力，并通过压力补偿定差减压阀 25、26 分别对比例换向阀 22、23 的控制油孔进行串联压力补偿，因此，流入转向液压油缸的油液流量不受其负载变化的影响。

为实现对各转向支路流量的解耦与精确控制，在全液压转向器及各控制阀的供油路中设计了压力补偿定差减压阀。通过串联压力补偿机制实现系统流量仅由控制口的流通面积与阀的设定压差决定，而与负载压力无关。此外，在油路设计中，需保证所有定差减压阀 25、26 的设定补偿压力均低于流量优

先阀的设定值,实现正确的流量分配优先级。

2.2 液压系统数学模型的建立

2.2.1 转向系统负载计算

根据 Taborek 给出的工程机械转向时所克服的转向阻力矩的计算公式

$$M = 0.05 G_s \frac{1}{1 + \frac{e_{sy}}{B}} \frac{B}{200} \frac{\mu_s}{0.7} \tag{10}$$

式中 M——转向阻力矩,N/m

e_{sy}——立轴的侧偏量,m

μ_s——轮胎与地面之间的摩擦因数,取 0.85

计算可知,转向阻力矩为 1 245 N/m。

2.2.2 转向器线性化流量-压力特性方程

转向器流量输出方程为

$$Q_s = k_q x - k_c p_1 \tag{11}$$

其中

$$x = \frac{1}{2}\theta d$$

$$\theta = \theta_f - \theta_m$$

式中 Q_s——流入转向器的流量,m^3/s

k_q——转向器流量增益系数,m^2/s

x——转向器转动位移,m

k_c——转向器流量-压力系数,$m^3/(s \cdot Pa)$

p_1——转向液压缸进油口压力,Pa

θ——阀套相对转角,rad

d——阀芯直径,m

θ_f——转向盘输入转角,rad

θ_m——转向器计量马达输出转角,rad

2.2.3 转向油缸进油腔流量连续性方程

转向油缸流量-位移-压力方程为

$$Q_1 = A_1 \frac{\mathrm{d}y}{\mathrm{d}t} + \frac{V_1}{E}\frac{\mathrm{d}p_1}{\mathrm{d}t} \tag{12}$$

式中 Q_1——经转向器流入转向液压缸的流量,m^3/s,假设转向器没有泄漏,则有 $Q_1 = Q_s$

A_1——转向液压缸有效作用面积,m^2

y——转向液压缸活塞位移,m

E——油液体积弹性模量,Pa

V_1——转向液压缸有效容积,m^3

2.2.4 转向油缸活塞力平衡方程

基于牛顿第二定律建立的液压缸活塞力平衡方程为

$$A_1 p_1 = m_h \frac{\mathrm{d}^2 y}{\mathrm{d}t^2} + \mu \frac{\mathrm{d}y}{\mathrm{d}t} + F_L \tag{13}$$

式中 m_h——转向液压缸的等效质量,kg

μ——活塞的等效阻尼系数,N·s/m

F_L——转向液压缸受的外负载,N

3 四轮转向系统控制器设计

为降低喷雾机转向过程中后轮对前轮转角的跟随误差,本文提出了对质心侧偏角与横摆角速度进行协同控制。考虑到实际作业过程中质心侧偏角数据难以直接获取,系统以横摆角速度作为主要反馈量,并结合与前轮转角成比例的前馈控制,构建了“比例前馈-横摆角速度反馈”联合控制策略。该策略有助于抑制轮胎侧滑与磨损,减小转弯半径,从而提升底盘行驶稳定性与作业质量,减轻对农作物的损害。

基于上述策略,四轮转向控制器的结构设计原理如图 5 所示。控制系统引入已建立的 AMESim 全液压四轮转向系统模型与二自由度底盘理想模型,通过前馈控制器与模糊控制器协同作用,最终输出的后轮转角可表示为

$$\delta_r = k\delta_f + U_{\mathrm{PID}}$$

式中 k——前馈比例系数

U_{PID}——反馈控制量,rad

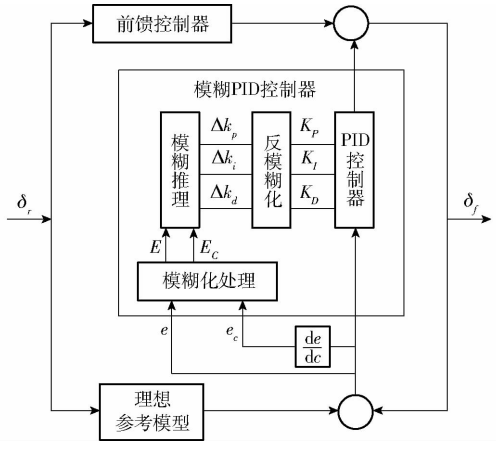


图 5 四轮转向控制器结构图

Fig. 5 Structure diagram of fuzzy PID controller

为进一步提升系统的动态性能与鲁棒性,设计了模糊 PID 控制器,融合模糊推理与 PID 控制的优势。该控制器以横摆角速度误差 e 及其变化率 e_c 作为输入,依据预设的模糊规则在线自整定 PID 参数。一方面,利用模糊推理的动态调节能力,克服传统 PID 控制超调量大、收敛慢的不足;另一方面,通过对模糊输出进行积分补偿,有效消除稳态误差。该设计实现了控制器参数的自适应调整,使系统具备快速响应、强抗干扰能力与优良的鲁棒稳定性。

误差 e 对应语言变量 E,其基本论域为[-3,3],量化论域取[-3,3],则量化因子 $k_e = 1$;误差变化率 e_c 对应语言变量 E_C,其基本论域设为[-5,5],量化论域取[-3,3],量化因子 $k_{ec} = 0.6$;PID 参数修正量 Δk_p、Δk_i、Δk_d 对应语言变量分别为 K_P、

K_I、K_D，基本论域为[-20,20]、[-6,6]、[-0.5,0.5]，量化论域均为[-1,1]，则 Δk_p、Δk_i、Δk_d 的量化因子 $k_{\Delta k_p}=20$、$k_{\Delta k_i}=6$、$k_{\Delta k_d}=0.5$。考虑到控制精度的要求，模糊子集设定为[NB,NM,NS,Z,PS,PM,PB]，分别代表负大、负中、负小、零、正小、正中、正大 7 个模糊状态。为了增强系统的鲁棒性和灵敏度，隶属函数采用三角函数，根据 PID 控制器的比例系数 k_p、积分系数 k_i、微分系数 k_d 对系统性能的影响，结合实际工程经验，制定 k_p、k_i、k_d 的模糊规则，如表 1 所示。

表 1　k_p、k_i、k_d 模糊控制规则

Tab. 1　Fuzzy control rule

e_c	e						
	NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
NB	PB/NB/PS	PB/NB/NS	PM/NM/NB	PM/NM/NM	PS/NS/NB	Z/Z/Z	Z/Z/Z
NM	PB/NB/PS	PB/NB/NS	PM/NM/NB	PS/NS/NM	PS/NS/NM	Z/Z/Z	NS/Z/NS
NS	PM/NM/Z	PM/NM/NS	PM/NS/NM	PS/NS/NM	Z/Z/NS	NS/PS/NZ	NS/PS/NS
Z	PM/NM/NS	PM/NM/NS	PS/NS/NS	Z/Z/NS	NS/PS/NS	NM/PM/NM	NM/PM/NM
PS	PS/NM/Z	PS/NM/Z	Z/Z/Z	NS/PS/Z	NS/PS/Z	NM/PM/Z	NM/PB/Z
PM	PS/Z/PB	Z/Z/NS	NS/PS/PS	NM/PS/PS	NM/PM/PS	NM/PB/PS	NB/PB/PB
PB	Z/Z/PB	Z/Z/PM	NM/PS/PM	NM/PM/PM	NM/PM/PS	NB/PB/PS	NB/PB/PB

4　仿真验证及分析

基于 Matlab/Simulink 和 AMESim 建立全液压转向系统仿真模型，仿真过程中，设置转向轮随机负载为零，在正弦信号激励下，通过仿真分析两轮转向及四轮转向液压系统的流量、车轮转角响应、车轮转角跟随、横摆角速度、质心侧偏角的响应特性。AMESim 仿真过程中模型参数设置：闭式柱塞液压泵排量 125 mL/r，额定转速 500 ~ 2 850 r/min，额定压力 42 MPa；OSPU 型负载敏感闭心式全液压转向器排量 210 mL/r；转向液压缸缸径 80 mm，行程 208 mm，活塞杆直径 40 mm，额定工作压力 16 MPa。

在正弦信号激励下，模糊 PID 与 PID 控制下的转角响应特性曲线如图 6 所示。两种控制策略均实现了基本的转角跟踪，但模糊 PID 的响应更接近输入曲线，转角响应平均误差绝对值为 1.45°，优于 PID 控制下的 3.86°且在峰值处无明显滞后。前、后轮转角跟随特性曲线如图 7 所示，模糊 PID 控制下，后轮相对前轮转角最大跟随误差为 2.42°，小于阿克曼理论的 3°。该控制方法通过有效补偿前后转向轮间的运动耦合作用，降低了后轮转向过程中的相位滞后与幅值偏差。同时，系统响应曲线平滑无超调，动态过程平稳，体现出四轮转向系统具备良好的转角跟踪精度与动态控制性能。

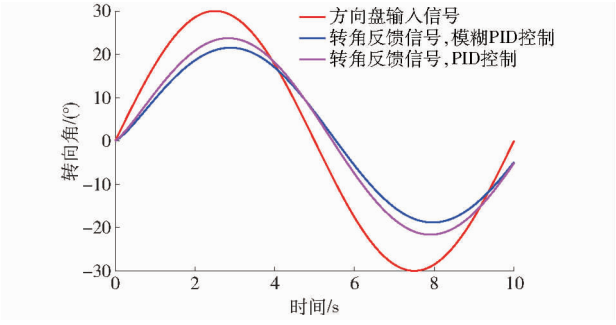


图 6　车轮转角响应特性曲线

Fig. 6　Wheel corner response curves

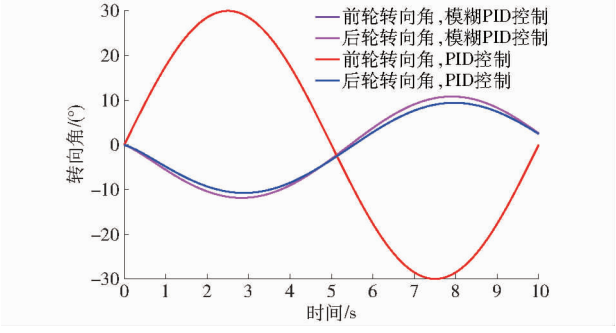


图 7　车轮转角跟随响应特性曲线

Fig. 7　Wheel rotation angle following response characteristic curves

如图 8 所示，模糊 PID 控制下横摆角速度响应平均误差绝对值为 0.08 rad/s，优于 PID 控制下的 0.12 rad/s。模糊 PID 能有效抑制横摆角速度波动，显著提升底盘的横向稳定性与控制鲁棒性。

质心侧偏角响应曲线如图 9 所示，当系统进入稳态后，底盘质心侧偏角始终维持在零值附近且随转向输入平稳变化，模糊 PID 控制下的平均跟踪误差绝对值为 0.07 rad，优于 PID 控制下的 0.10 rad。表明底盘侧向力分配合理、轮胎未发生饱和，有效降低了底盘侧滑风险。

5　试验

为分析验证所设计的全液压四轮转向系统的性能，基于课题组自主研发的高地隙自走式喷雾机为平台[23-25]，搭建了如图 10 所示多功能液压转向系

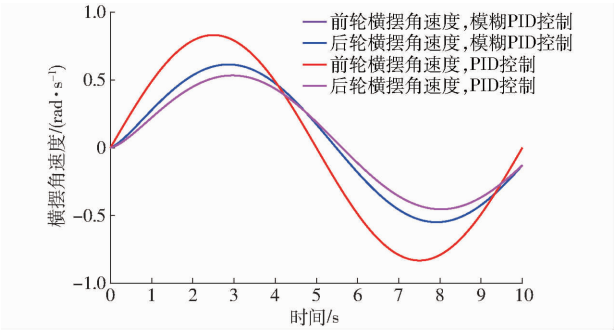


图 8 横摆角速度响应特性曲线

Fig. 8 Swing angle velocity response curves

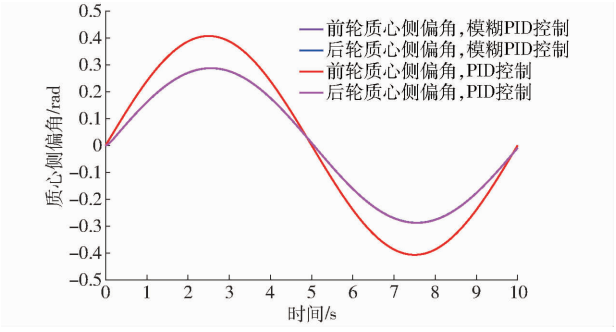


图 9 质心侧偏角响应特性曲线

Fig. 9 Centroid lateral declination response curves

统试验平台。选用力士乐角度传感器、贺德克压力传感器、贺德克手持测量仪和双 GPS 辅助惯性姿态测量系统进行喷雾机运动信号的采集,该测量系统内置加速度计测量范围 ±8 g,姿态测量精度滚转角 0.05°、俯仰角 0.05°、偏航角 0.2°,采样频率为 50 Hz。



图 10 转向系统田间试验

Fig. 10 Field test of steering system

由图 11 可知,4 个轮子近似做纯滚动运动,转向时 4 个车轮的转动中心基本相交于一点,转向角符合阿克曼转向原理;喷雾机在进行四轮转向时的转向半径由两轮转向时的 7.9 m 减小到了 4.8 m,减小了 39.2%。在实际转向过程中,左后轮对左前轮转向转角的跟随误差保持在 0°~3°范围内,在试验过程中最大转角跟随误差为 2.6°,满足高地隙自走式喷雾机在作业过程中的转向要求,能够实现较好的转向同步效果、减少了轮胎侧滑及轮胎偏磨。

由车身纵向、横向、垂向加速度试验数据曲线(图 12~14)可得,四轮转向模式与两轮转向模式相比,X、Y、Z 方向的加速度均方根分别减少了 26%、34%、2%。

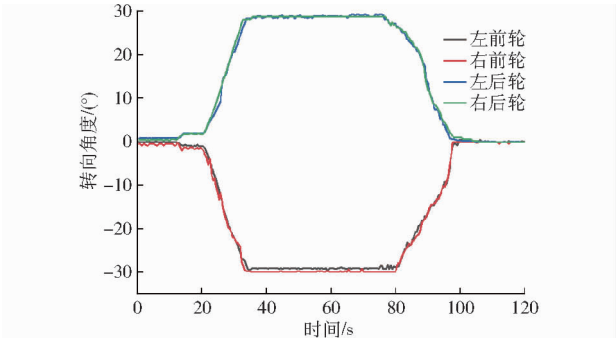


图 11 转向系统田间试验曲线

Fig. 11 Steering system field test curves

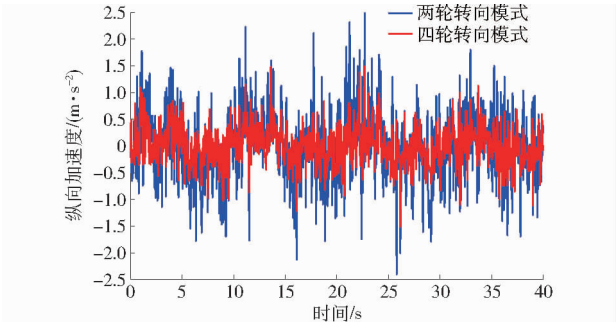


图 12 车身纵向加速度曲线

Fig. 12 Longitudinal acceleration curves

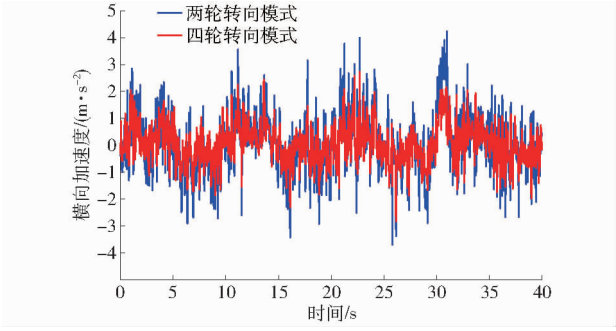


图 13 车身横向加速度曲线

Fig. 13 Lateral acceleration curves

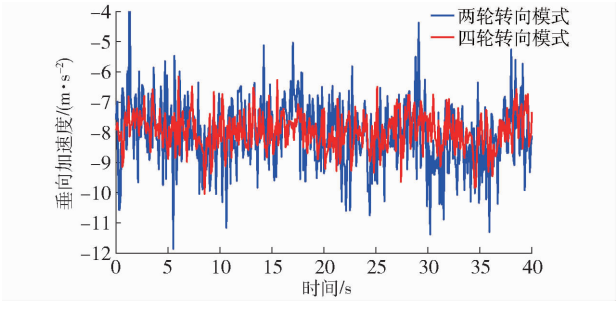


图 14 车身垂向加速度曲线

Fig. 14 Vertical acceleration curves

6 结论

(1)针对高地隙自走式喷雾机的作业环境与作业要求,结合课题组研发的喷雾机主要参数,提出

了多功能全液压四轮转向系统的整体设计方案，实现两轮、四轮、楔形转向模式的协调切换。在分析两轮与四轮转向运动学特性的基础上，设计了一种基于比例前馈与横摆角速度反馈联合控制策略的模糊 PID 控制，有效抑制了轮胎侧滑、减小了转弯半径、缩短了响应时间并降低了超调量，提高了底盘在复杂作业环境中操纵安全性与行驶稳定性。

(2)在分析多轮液压转向系统控制特性的基础上，提出了基于比例前馈与横摆角速度反馈的联合控制策略，并设计了一种用于全液压转向的模糊 PID 控制系统。通过 AMESim 与 Matlab/Simulink 联合仿真分析，对两轮与四轮转向模式下的系统性能进行了验证。仿真结果表明：转向系统符合阿克曼转向原理；四轮转向过程中，后轮相对于前轮转角的跟随误差始终小于 3°，最大跟随误差为 2.42°，满足四轮转向的控制要求。

(3)在田间路面上开展四轮转向系统性能测试，试验数据表明：后轮转向角对相应前轮转向角的跟随误差均小于 3°，在试验过程中最大转角跟随误差为 2.6°，验证了所设计液压系统的实用性及其控制方法的稳定性和准确性。

参 考 文 献

[1] CHEN Yu, MAO Enrong, LI Wei, et al. Design and experiment of a high-clearance self-propelled sprayer chassis [J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2020, 13(2): 71 – 80.

[2] 罗锡文. 人工智能与植保机械化[J]. 智能化农业装备学报(中英文), 2020, 1(1): 1 – 6.
LUO Xiwen. Artificial intelligence and plant protection mechanization [J]. Journal of Intelligent Agricultural Mechanization, 2020, 1(1): 1 – 6. (in Chinese)

[3] 郑永军,陈炳太,吕昊暾,等. 中国果园植保机械化技术与装备研究进展[J]. 农业工程学报, 2020, 36(20): 110 – 124.
ZHENG Yongjun, CHEN Bingtai, LV Haotun, et al. Research progress of orchard plant protection mechanization technology and equipment in China[J]. Transactions of the CSAE, 2020,36(20):110 – 124. (in Chinese)

[4] CAI Zengbin, XIE Dongbo, LIU Tao, et al. Design of a high-gap plant protection machine (HGPM) with stepless variable speed and power adjustable function[J]. Machines, 2023, 11(2): 265.

[5] LI W, YANG F, MAO E, et al. Design and verification of crab steering system for high clearance self-propelled sprayer[J]. Agriculture, 2022,12:1893.

[6] WANG Bangyu, ZHU Jianxi, CHAI Xinlong, et al. Research status and development trend of key technology of agricultural machinery chassis in hilly and mountainous areas[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2024, 226: 109447.

[7] ZHANG Y, WANG L, LIU H, et al. Design and experiment of multi-mode steering system of agricultural machinery for hilly and mountainous area[J]. Int. J. Agric. Biol. Eng., 2022,15(3): 112 – 120.

[8] 张华,郑加强. 4WD 型农药喷雾机液压四驱底盘直行同步控制方法比较及验证[J]. 农业工程学报, 2016, 32(23): 43 – 50.
ZHANG Hua, ZHENG Jiaqiang. Comparison of straight line driving synchronous control methods and validation of 4WD sprayer chassis with hydraulic power[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(23): 43 – 50. (in Chinese)

[9] BURNS K C. Multi-position track width sensor for self-propelled agricultural sprayers: US, 7163227[P]. 2007 – 01 – 16.

[10] BEAN A J, BLUMBERG M J, LIVDAHL R J, et al. Vehicle with offset extendible axles and independent four-wheel steering control: US, 6827176 B2 [P]. 2004 – 12 – 07.

[11] MILLER M A, STEWARD B L, WESTPHALEN M L. Effects of multi-mode four-wheel steering on sprayer machine performance[J]. Transactions of the ASABE, 2004, 47(2): 385 – 395.

[12] 刘汉涛. 汽车底盘构造与原理精解[M]. 北京:机械工业出版社, 2014.

[13] 崔龙飞. 基于钟摆式主-被动悬架的大型喷杆动力学行为与自适应鲁棒控制研究[D]. 镇江:江苏大学,2019.
CUI Longfei. Research on the dynamic behavior and adaptive robust control method of large spray boom with active and passive pendulum suspension[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2019. (in Chinese)

[14] 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 machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010,41(12):13 – 16,21. (in Chinese)

[15] 王韦韦,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)

[16] 聂建军,夏孔涛,解晓琳,等. 拱腰式农业机器人移动底盘设计与通过性研究[J]. 农业机械学报, 2025, 56(10): 736 – 745.
NIE Jianjun, XIA Kongtao, XIE Xiaolin, et al. Mobile chassis design and pass-ability of arched waist agricultural robot[J].

Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(10):736 – 745. (in Chinese)

[17] 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)

[18] 傅梁起,王龙龙,毛恩荣,等. 高地隙喷雾机全液压多轮转向控制系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2025, 56(10): 746 – 757.
FU Liangqi, WANG Longlong, MAO Enrong, et al. Design and test of full hydraulic multi-wheel steering control system for high ground clearance sprayer[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025,56(10):746 – 757. (in Chinese)

[19] 周志艳,余鑫,梁乐彬,等. 四轮转向喷杆喷雾机平移换行导航控制系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2023, 54(7): 68 – 78,143.
ZHOU Zhiyan, YU Xin, LIANG Lebin, et al. Design and experiment of translation and line feed navigation control system for four wheel steering sprayer[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023,54(7):68 – 78,143. (in Chinese)

[20] 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)

[21] 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)

[22] 孙恬恬,毛恩荣,傅梁起,等. 基于变量马达控制的喷雾机驱动防滑系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2024, 55(5): 158 – 166.
SUN Tiantian, MAO Enrong, FU Liangqi, et al. Design and experiment of spray machine drive anti-skid system based on variable motor control[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024,55(5):158 – 166. (in Chinese)

[23] 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)

[24] 李中祥,温浩军,王国良,等. 高地隙自走式喷雾机底盘悬架减振特性分析[J]. 新疆农业科学, 2021, 58(12): 2250 – 2255.
LI Zhongxiang, WEN Haojun, WANG Guoliang, et al. Test and analysis of vibration reduction characteristics of chassis test and analysis of vibration reduction characteristics of chassis[J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2021,58(12):2250 – 2255. (in Chinese)

[25] WEN H J, LIU X Y, YI Z T, et al. Design and test of the anti-skid system for self-propelled high-stem crop sprayers[J]. Int. J. Agric. & Biol. Eng., 2023,16(6):20 – 27.