doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2023.03.018

基于滑模自抗扰的同步转向高地隙喷雾机姿态控制

刘国海　李持衡　沈　跃　刘　慧　张亚飞　赵　莎
(江苏大学电气信息工程学院, 镇江 212013)

摘要: 为提高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,提出了一种滑模自抗扰姿态控制策略。首先,基于同步转向结构建立喷雾机姿态控制模型;其次,将喷雾机的姿态控制模型进行解耦并转换为反馈系统标准型;然后,设计线性扩张状态观测器对模型总扰动进行实时补偿,并根据补偿后的模型推导出终端滑模控制律;最后,分别通过仿真试验以及场地试验对姿态控制器的性能进行验证。在场地试验中:当目标转角为 5°时,喷雾机前、后转向角的响应时间分别为 1.55 s 和 1.45 s,当目标转角为 20°时,前、后转向角的响应时间分别为 3.05 s 和 2.95 s。本文所提出的滑模自抗扰姿态控制器与传统 PID 姿态控制器相比,前、后转向角的响应速度分别提高 8.42% 与 1.89%,稳态误差分别降低 2.96% 与 3.15%。仿真试验与场地试验结果表明,滑模自抗扰姿态控制算法收敛速度快、鲁棒性强,能够满足喷雾机在不同环境下进行无人自主导航作业的需要。

关键词: 高地隙喷雾机; 同步转向结构; 姿态控制; 终端滑模自抗扰控制器
中图分类号: S49　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2023)03-0180-10　　**OSID**:

Sliding Mode Active Disturbance Rejection Control of Synchronous Steering High Clearance Sprayer

LIU Guohai　LI Chiheng　SHEN Yue　LIU Hui　ZHANG Yafei　ZHAO Sha
(*School of Electrical and Information Engineering*, *Jiangsu University*, *Zhenjiang* 212013, *China*)

Abstract: To improve the response speed and robustness of the synchronous steering high clearance sprayer to the target attitude, a sliding mode active disturbance rejection controller was proposed to realize the attitude control for the synchronous steering chassis. Firstly, the attitude control model was built based on the synchronous steering structure. Then the attitude control model of the sprayer was decoupled and transformed into standard type of feedback system. After that, the extended state observer was designed to compensate the total disturbance of the model in real time, and the terminal sliding mode control rate was derived according to the attitude control model of the sprayer. Finally, the performance of the attitude controller was verified by simulation tests and field tests. In the field test, when the target angle was 5°, the response time of the front and rear steering angles of the sprayer was 1.55 s and 1.45 s. When the target angle was 20°, the response time of the front and rear steering angles of the sprayer was 3.05 s and 2.95 s, respectively. Compared with the traditional PID controller, the response speed of the forward and rear steering angles of the sliding mode active disturbance rejection controller proposed were increased by 8.42% and 1.89%, respectively, and the steady-state error was decreased by 2.96% and 3.15%, respectively. The simulation and field test results showed that the sliding mode active disturbance rejection attitude control algorithm had fast convergence speed and strong robustness, which can meet the needs of unmanned autonomous navigation operation of the sprayer in different environments.

Key words: high clearance sprayer; synchronous steering structure; attitude control; sliding mode active disturbance rejection controller

收稿日期: 2022-05-07　修回日期: 2022-06-14
基金项目: 国家自然科学基金项目(51975260)和江苏省普通高校研究生科研创新计划项目(KYCX213369)
作者简介: 刘国海(1964—),男,教授,博士生导师,主要从事电机、复杂系统控制与非线性智能控制研究,E-mail: ghliu@ujs.edu.cn
通信作者: 沈跃(1978—),男,教授,博士生导师,主要从事无人农机、智能控制和农业机器人研究,E-mail: shen@ujs.edu.cn

0　引言

农业安全是国之大事[1]，中国作为一个人口大国，充足的粮食生产供应是社会进步与经济发展的重要保障[2]。然而我国农业发展深受病虫灾害的困扰，植保工作面临艰巨的挑战[3-6]。高地隙喷雾机作为一种可靠的农业植保机械，凭借着作业效率高、施药效果好、安全性可靠等优点，成为我国水稻生产机械化的重要组成部分[7-9]。

农机姿态控制系统是实现自主导航作业的基础，随着新能源农机的发展与电子控制策略的引入，姿态控制器可以通过直接调节车轮的驱动力与制动力来提高农机运行的稳定性与安全性[10-11]。因此，针对这方面的控制策略也得到了长足的发展[12]。

从当前国内外的研究现状[13-19]来看，受限于现有农机平台的设计，大多数研究都是直接对其转向机构进行电气化改装，通过加装电动方向盘以及角度传感器来实现对转向机构的嵌套闭环控制。这种方式虽然简单易实现，但其控制效果受转向机构控制系统以及农机平台综合性能影响较大。同步转向高地隙喷雾机采用无人化设计，具有特殊的转向结构与先进的动力驱动系统，相较传统的喷雾机能够更好地应对水田这种复杂的作业环境，但新的转向结构也给姿态控制系统的设计带来了新问题[20]。由于该结构灵活，自身姿态易受到外界干扰，并影响喷雾机的轨迹跟踪效果[21]。本文首先针对同步转向结构建立姿态控制模型；其次，以实时状态补偿思想为基础，将喷雾机姿态控制模型转换为反馈系统标准型；之后，基于姿态控制模型完成滑模自抗扰姿态控制器设计；最后，基于 Matlab 平台进行同步转向高地隙姿态控制仿真试验并分别在硬质沥青路面与水田复杂环境下进行场地试验，以对滑模自抗扰姿态控制器的性能进行验证。

1　同步转向高地隙喷雾机动力学建模

1.1　同步转向高地隙喷雾机系统构成

本文研究的同步转向高地隙喷雾机如图 1 所示，主要由混合动力系统、作业系统、车载控制系统、液压系统以及同步转向底盘构成。其中，该喷雾机的行走机构同步转向底盘结构如图 2 所示。

同步转向高地隙喷雾机的底盘结构由前后转向桥、喷雾机车轮以及车架所构成。喷雾机的车架主体由多根方形金属管焊接而成。由于田间路径泥泞湿滑，为提高喷雾机在田间的防滑性能，对车轮的胎面进行了针对性设计。喷雾机前、后转向桥结构相同，均由一个支撑桥与一个回转支承装置所构成。



图 1　同步转向高地隙喷雾机实物

Fig. 1　Picture of synchronous steering high clearance sprayer

1. 混合动力系统　2. 作业系统　3. 车载控制系统　4. 液压系统　5. 同步转向底盘

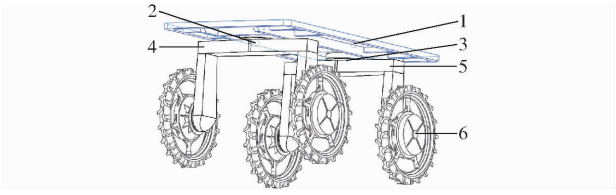


图 2　同步转向高地隙喷雾机底盘结构图

Fig. 2　Chassis structure of synchronous steering high clearance sprayer

1. 车架　2. 前轴回转支撑装置　3. 后轴回转支撑装置　4. 前转向桥　5. 后转向桥　6. 轮毂电机

转向桥通过回转支承装置与车架相连，可以绕中心自由转动。该喷雾机采用“油电混合供能，全电力驱动”的动力方案代替了传统的机械传动结构，车轮由轮毂电机直接驱动，电缆线可以直接从转向桥的内部引入电机。考虑到喷雾机在作业时大部分外力均作用于转向桥上，为提高喷雾机的整体刚性与环境适应能力，设计了由门型刚体全焊接连接而成的转向桥。

1.2　同步转向结构运动学模型

与常见的车辆转向结构不同（图 3a ~ 3c），同步转向结构如图 3d 所示。该喷雾机轮毂电机均独立可控，因此可以利用喷雾机姿态控制算法与电机控制算法来直接控制 4 个轮毂电机的输出转速。最终通过调整车轮输出转速来调节喷雾机转角，实现对运动状态的控制。

因此，本文基于同步转向结构的运动原理以及喷雾机自身工作特点建立喷雾机姿态控制模型。由于本喷雾机作业速率低且车轮材料质地较硬，在建模时假设喷雾机车轮的横向力不会使车轮发生形变，且车轮与地面之间的作用力均为静摩擦力。设定逆时针方向为圆周运动正方向，在二维坐标系中定义出喷雾机姿态控制模型如图 4 所示。图中，φ 为喷雾机航向角，v 为喷雾机行进速度，q 为前转向桥航向角，p 为后转向桥航向角，α 为喷雾机前轴转角，β 为喷雾机后轴转角，V_{Fl} 为喷雾机左前轮速度，

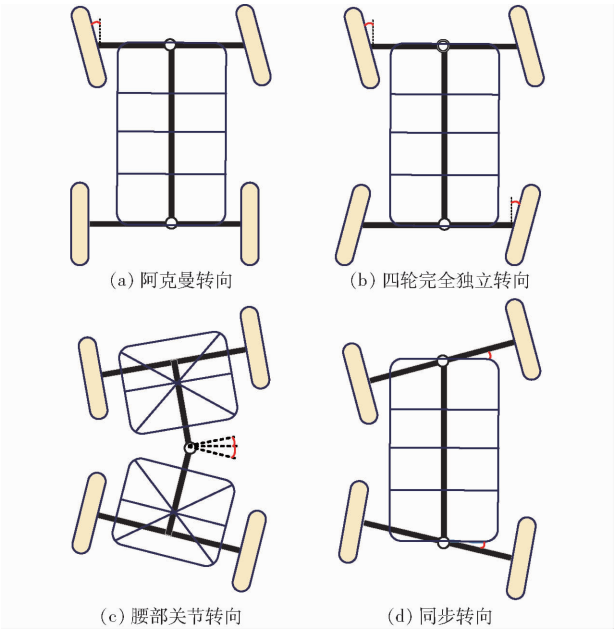


图 3 传统喷雾机与本喷雾机转向机构对比

Fig. 3 Comparison of steering mechanism between traditional sprayer and proposed sprayer

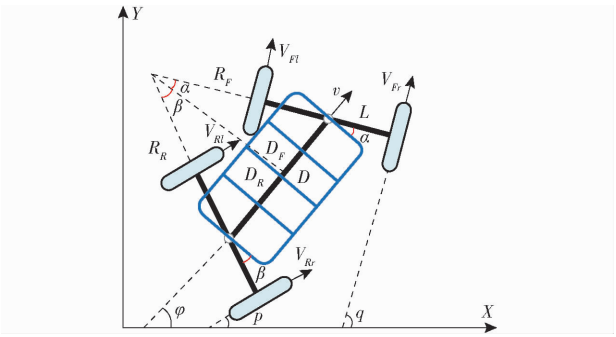


图 4 同步转向高地隙喷雾机姿态控制模型

Fig. 4 Attitude control model of synchronous steering high clearance sprayer

V_{Fr}为喷雾机右前轮速度，V_{Rl}为喷雾机左后轮速度，V_{Rr}为喷雾机右后轮速度，L 为喷雾机左右轮距，D 为喷雾机前后轴距，D_F 为转向前轴分量，D_R 为转向后轴分量，R_F 为前轴转向半径，R_R 为后轴转向半径。

由于喷雾机前、后转向桥与车架相连接，因此喷雾机前、后轴车轮在沿喷雾机主轴方向上具有分速度相同的机械约束为

$$v=\frac{V_{Fl}+V_{Fr}}{L}\cos\alpha=\frac{V_{Rl}+V_{Rr}}{L}\cos\beta \tag{1}$$

将喷雾机整体视为一个等效刚体，根据喷雾机前、后轴分速度及刚体运动学可得喷雾机航向角速度的表达式为

$$\dot{\varphi}=\frac{(V_{Fl}+V_{Fr})\sin\alpha}{2D}-\frac{(V_{Rl}+V_{Rr})\sin\beta}{2D} \tag{2}$$

由于喷雾机前、后转向桥可以分别绕着车架前、后转向桥中心自由旋转，且转角在没有外界干扰的情况下只受轮毂电机输出转速影响。基于这一特点，将转向桥的运动分解为跟随喷雾机的运动以及绕自身中心的圆周运动。根据以上关系可以得出喷雾机前、后转向桥航向角变化率表达式为

$$\dot{q}=\frac{V_{Fl}-V_{Fr}}{L} \tag{3}$$

$$\dot{p}=\frac{V_{Rl}-V_{Rr}}{L} \tag{4}$$

联立式(2)~(4)可以得出喷雾机前、后轴转角与四轮输出转速之间的关系为

$$\dot{\alpha}=\dot{q}-\dot{\varphi}=\frac{V_{Fl}-V_{Fr}}{2}-\frac{(V_{Fl}+V_{Fr})\sin\alpha}{2D}+\frac{(V_{Rl}+V_{Rr})\sin\beta}{2D} \tag{5}$$

$$\dot{\beta}=\dot{p}-\dot{\varphi}=\frac{V_{Rl}-V_{Rr}}{2}-\frac{(V_{Fl}+V_{Fr})\sin\alpha}{2D}+\frac{(V_{Rl}+V_{Rr})\sin\beta}{2D} \tag{6}$$

根据阿克曼转向定律推导出喷雾机前、后轴转向半径与转角的关系为

$$D_F=\frac{D\tan\alpha}{\tan\alpha+\tan\beta} \tag{7}$$

$$D_R=\frac{D\tan\beta}{\tan\alpha+\tan\beta} \tag{8}$$

$$R_F=\frac{D}{(\tan\alpha+\tan\beta)\cos\alpha} \tag{9}$$

$$R_R=\frac{D}{(\tan\alpha+\tan\beta)\cos\beta} \tag{10}$$

将喷雾机行进速度 v 代入式(7)、(8)，可得到在达到稳定的转向姿态时，4 个车轮输出速度与喷雾机姿态的关系为

$$\begin{cases}V_{Fl}=\dfrac{v}{\cos\alpha}-\dfrac{vL\tan\alpha}{2D_F}\\ V_{Fr}=\dfrac{v}{\cos\alpha}+\dfrac{vL\tan\alpha}{2D_F}\\ V_{Rl}=\dfrac{v}{\cos\beta}-\dfrac{vL\tan\beta}{D_R}\\ V_{Rr}=\dfrac{v}{\cos\beta}+\dfrac{vL\tan\beta}{D_R}\end{cases} \tag{11}$$

然而当喷雾机从之前的稳定姿态转向下一个目标姿态的转移状态时，喷雾机各个轮速关系不再满足式(11)，而是处于一种过渡状态。但喷雾机前、后车轮沿喷雾机主轴方向分速度与合力相同的约束(式(1))依然存在。因此，接下来基于动力学方法建立姿态控制模型。

1.3 同步转向结构姿态控制模型

如图 5 所示，在同步转向高地隙喷雾机运动时，喷雾机 4 个车轮分别受到纵向力与横向力的作用。其中，纵向力用来维持喷雾机的纵向运动，横向力用

来提供喷雾机在进行圆周运动时的向心力。图 5 中，F_{Fl} 为喷雾机左前轮纵向力，F_{Flx} 为左前轮横向力，F_{Fr} 为喷雾机右前轮纵向力，F_{Frx} 为右前轮横向力，F_{Rl} 为喷雾机左后轮纵向力，F_{Rlx} 为左后轮横向力，F_{Rr} 为喷雾机右后轮纵向力，F_{Rrx} 为右后轮横向力。

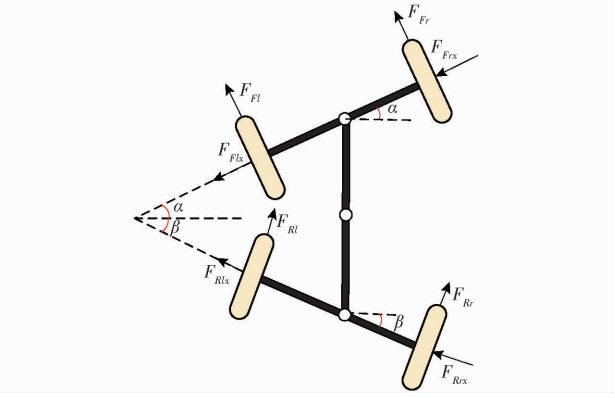


图 5　喷雾机车轮受力示意图

Fig. 5　Kinematics model sketch of synchronous steering high clearance sprayer

由于在本模型中，该喷雾机的横向力完全由车轮与地面的摩擦力提供，因此可得喷雾机车轮纵向力 F_i 与输出转矩 Γ_i 以及转速 V_i 之间的关系为

$$F_i = \Gamma_i r \tag{12}$$

$$\dot{V}_i = \frac{\Gamma_i}{J_i} r \tag{13}$$

式中　r——车轮半径

J——各个车轮转动惯量

下角 i 为 Fl、Fr、Rl、Rr，分别表示左前、右前、左后、右后。

在此基础上，引入前、后轴净转矩差分别为 ΔT_{df} 与 ΔT_{dr}，得出同步转向高地隙喷雾机姿态控制模型为

$$\begin{cases} \ddot{\alpha} = \dfrac{2r\Delta T_{df}}{JL} - \dfrac{v(\sec^2\alpha - \sec^2\beta)}{D} \\ \ddot{\beta} = \dfrac{2r\Delta T_{dr}}{JL} - \dfrac{v(\sec^2\alpha - \sec^2\beta)}{D} \end{cases} \tag{14}$$

由式(14)可知，喷雾机前、后轴转角是一个不仅受自身控制量的影响，也受后、前轴状态量影响的耦合系统。本文为方便控制器的设计，将喷雾机姿态控制系统中前、后轴的耦合项视为一种扰动。这样，可以将整个系统解耦成 2 个独立的单输入单输出系统。由于同步转向高地隙喷雾机结构复杂且部分机械结构并不满足绝对的刚性约束，难以对所有的不确定性进行详细建模。考虑上述因素，本文将建模不准确与未建模部分、外界对控制系统的扰动和耦合项视为总扰动。利用“反馈系统标准型”将喷雾机的姿态表示为

$$\begin{cases} \alpha = x_{11} \\ \dot{x}_{11} = x_{12} \\ \dot{x}_{12} = \dfrac{2r\Delta T_{df}}{JL} - \dfrac{v(\sec^2\alpha - \sec^2\beta)}{D} + \omega_1 = \\ \qquad f(\alpha,\beta,t) + \dfrac{2\Delta u_f}{L} = x_{13} + \dfrac{2\Delta u_f}{L} \\ \dot{x}_{13} = \dot{f}(\alpha,\beta,t) \end{cases} \tag{15}$$

$$\begin{cases} \beta = x_{21} \\ \dot{x}_{21} = x_{22} \\ \dot{x}_{22} = \dfrac{2r\Delta T_{dr}}{JL} - \dfrac{v(\sec^2\alpha - \sec^2\beta)}{D} + \omega_2 = \\ \qquad g(\alpha,\beta,t) + \dfrac{2\Delta u_r}{L} = x_{23} + \dfrac{2\Delta u_r}{L} \\ \dot{x}_{23} = \dot{g}(\alpha,\beta,t) \end{cases} \tag{16}$$

式中　ω_1、ω_2——外界扰动以及未建模部分

Δu_f、Δu_r——控制量　　x_{11}——前轴转角

$f(\alpha,\beta,t)$、$g(\alpha,\beta,t)$——喷雾机前、后转向轴包括动态耦合以及未建模部分在内的总扰动

x_{12}——前轴转角的一阶导数

x_{13}——前轴总扰动　　x_{21}——后轴转角

x_{22}——后轴转角的一阶导数

x_{23}——后轴总扰动

2　滑模自抗扰姿态控制系统设计

2.1　过渡过程与状态观测器设计

过渡过程主要由微分跟踪器（Tracking differentiator，TD）构成[22]。它可以根据目标状态与被控对象的响应特性，将阶跃输入的目标量转换为一个过程变量，从而降低系统的起始误差，平衡系统的快速性与超调量[23]。

传统的非线性过渡过程设计为

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = x_3 \\ \dot{x}_3 = \mathrm{fhan}(x_1 - v_0, x_2, \gamma, h) \\ y_1 = x_1 \\ y_2 = x_2 \\ y_3 = x_3 \end{cases} \tag{17}$$

式中　v_0——目标状态输入值

y_1、y_2、y_3——过渡过程输出值

γ——速度因子　　h——离散步长

fhan——最速微分函数

x_1——过渡过程给出的目标转角

x_2——目标转角的一阶导数

x_3——目标转角的二阶导数

fhan 函数定义为

$$\text{fhan} = -\gamma\left(\frac{a}{d}-\text{sign}(a)\right)s_2-\gamma\text{sign}(a)$$

其中 $d=\gamma h^2$ $a=(a_0+y-a_2)s_1+a_2$

$$a_0=hx_2 \qquad s_2=\frac{\text{sign}(a+d)-\text{sign}(a-d)}{2}$$

$$a_1=\sqrt{d(d+8|y|)}$$

$$a_2=a_0+\frac{\text{sign}(y)(a_1-d)}{2}$$

$$s_1=\frac{\text{sign}(y+d)-\text{sign}(y-d)}{2}$$

$$y=x_1+a_0$$

$$\text{sign}(x)=\begin{cases}1 & (x>0)\\ 0 & (x=0)\\ -1 & (x<0)\end{cases}$$

式中 y——观测器输入状态

线性扩张状态观测器(Linear extended state observer,ESO)主要用于估计系统中的不确定部分与外界扰动,并实现实时补偿[24-25]。

基于式(17)所表示的喷雾机姿态控制模型可以设计出线性扩张状态观测器为

$$\begin{cases}e=z_1-y\\ \dot z_1=z_2+\beta_1 e\\ \dot z_2=z_3+\beta_2 e+b_0u\\ \dot z_3=-\beta_3 e\end{cases} \tag{18}$$

式中 β_1、β_2、β_3——观测器参数

e——观测误差 u——控制量

z_1、z_2、z_3——观测器状态

b_0——控制率补偿值

为实现线性扩张状态观测器对目标状态的收敛,定义状态量与观测量的误差矩阵 $\boldsymbol{\varepsilon}$ 为

$$\boldsymbol{\varepsilon}=[\varepsilon_1 \quad \varepsilon_2 \quad \varepsilon_3]^{\mathrm{T}}=[x_1-z_1 \quad x_2-z_2 \quad x_3-z_3]^{\mathrm{T}} \tag{19}$$

由于喷雾机前、后转角状态方程一致,因此对前轴扩张状态观测器的稳定性分析,对后轴同样适用。联立式(18)、(19),有

$$\begin{bmatrix}\dot\varepsilon_1\\ \dot\varepsilon_2\\ \dot\varepsilon_3\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}-\beta_1 & 1 & 0\\ -\beta_2 & 0 & 1\\ \beta_3 & 0 & 0\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\varepsilon_1\\ \varepsilon_2\\ \varepsilon_3\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}0\\ 0\\ 1\end{bmatrix}\dot f(\alpha,\beta,t)=\overline{\boldsymbol{A}}\boldsymbol{\varepsilon}+\overline{\boldsymbol{B}}\dot f(\alpha,\beta,t) \tag{20}$$

矩阵$\overline{\boldsymbol{A}}$的特征方程为

$$[\lambda\boldsymbol{I}-\overline{\boldsymbol{A}}]=\begin{bmatrix}\lambda+\beta_1 & -1 & 0\\ \beta_2 & \lambda & -1\\ -\beta_3 & 0 & \lambda\end{bmatrix}=0 \tag{21}$$

式中 $\boldsymbol{I}$——单位矩阵 λ——矩阵特征值

化简后,有特征方程

$$\lambda^3+\beta_1\lambda^2+\beta_2\lambda-\beta_3=0 \tag{22}$$

因此,只要选择合适的参数 β_1、β_2、β_3,便可使$\overline{\boldsymbol{A}}$为 Huiwitz 矩阵。由 Lyapunov 方法可知,对于任意给定的对称正定矩阵 $\boldsymbol{Q}$,只要存在一个正定矩阵 $\boldsymbol{P}$ 满足关系

$$\overline{\boldsymbol{A}}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P}+\boldsymbol{P}\overline{\boldsymbol{A}}=-\boldsymbol{Q} \tag{23}$$

便可实现扩张状态观测器对喷雾机前、后转向轴各个状态以及总扰动的收敛。

2.2 终端滑模控制律设计

由于线性扩张状态观测器可以实现对“总扰动”的实时反馈补偿,因此将喷雾机姿态控制模型简化为反馈系统标准型

$$\begin{cases}\dot x_{01}=x_{02}=\dot\alpha\\ \dot x_{02}=\Delta f(\alpha,\beta,t)+bu_f\end{cases} \tag{24}$$

$$\begin{cases}\dot x_{11}=x_{12}=\dot\beta\\ \dot x_{12}=\Delta g(\alpha,\beta,t)+bu_r\end{cases} \tag{25}$$

其中,b 为控制量的比例系数,$\Delta f(\alpha,\beta,t)$ 与 $\Delta g(\alpha,\beta,t)$ 为扩张状态观测器对前、后转向轴各自总扰动进行实时补偿时存在的误差,且设定误差的界限分别为 $\Delta f(\alpha,\beta,t)\leqslant F$,$\Delta g(\alpha,\beta,t)\leqslant G$,$F$ 与 G 分别为前、后转向轴的最大误差,u_f、u_r 分别为前后轴轮速的控制量。

由于喷雾机前后转向桥的结构相同,姿态控制模型也相似,因此针对前转向桥的模型分析与控制器设计对后转向桥也同样适用。设喷雾机过渡过程给出的前转向轴偏转角的状态量 $\boldsymbol{x}_1=[x_{01} \quad \dot x_{01}]^{\mathrm{T}}$,目标量 $\boldsymbol{x}_d=[x_{01d} \quad \dot x_{01d}]^{\mathrm{T}}$,则可定义喷雾机前转向轴误差矩阵为:$\boldsymbol{e}=\boldsymbol{x}_1-\boldsymbol{x}_d=[x_{01}-x_{01d} \quad \dot x_{01}-\dot x_{01d}]^{\mathrm{T}}=[e \quad \dot e]^{\mathrm{T}}$。

之后,基于误差矩阵可以设计出滑模函数的滑模面 $\boldsymbol{s}$ 如下

$$\begin{cases}\boldsymbol{s}=\boldsymbol{C}(\boldsymbol{E}-\boldsymbol{P})\\ \dot{\boldsymbol{s}}=\boldsymbol{C}(\dot{\boldsymbol{E}}-\dot{\boldsymbol{P}})\end{cases} \tag{26}$$

其中 $\boldsymbol{C}=[c \quad 1]$

$$\boldsymbol{P}=[p(t) \quad \dot p(t)]^{\mathrm{T}}$$

式中 c——常数

$p(t)$——终端滑模函数

$\boldsymbol{E}$——误差矩阵

为实现状态量 $\boldsymbol{x}_1$ 在指定时间 T 内完成对期望状态 $\boldsymbol{x}_d$的收敛,在构造终端滑模函数时,取 $\boldsymbol{E}(0)=\boldsymbol{P}(0)$以及 $\boldsymbol{P}(T)=0$。由此可以构造 $p(t)$在条件:$0\leqslant t\leqslant T$ 下的表达式

$$p(t)=e(0)+\dot{e}(0)t+0.5\ddot{e}(0)t^2-\left(\frac{a_{00}}{T^3}e(0)+\frac{a_{01}}{T^2}\dot{e}(0)+\frac{a_{02}}{T}\ddot{e}(0)\right)t^3+\left(\frac{a_{10}}{T^4}e(0)+\frac{a_{11}}{T^3}\dot{e}(0)+\frac{a_{12}}{T^2}\ddot{e}(0)\right)t^4-\left(\frac{a_{20}}{T^5}e(0)+\frac{a_{21}}{T^4}\dot{e}(0)+\frac{a_{22}}{T^3}\ddot{e}(0)\right)t^5 \quad (27)$$

将条件 $\boldsymbol{E}(0)=\boldsymbol{P}(0)$ 及 $\boldsymbol{P}(T)=0$ 代入式(27)，有 $a_{00}=-10$，$a_{01}=-15$，$a_{02}=-6$，$a_{10}=-6$，$a_{11}=8$，$a_{12}=-3$，$a_{20}=-1.5$，$a_{21}=1.5$，$a_{22}=-0.5$。

为实现对状态量 $\boldsymbol{x}_1$ 的控制，因此 $\ddot{e}$ 可表示为

$$\ddot{e}=\ddot{x}_{01}-\ddot{x}_{01d}=\Delta f(\alpha,\beta,t)+bu-\ddot{x}_{01d} \quad (28)$$

联立式(24)、(26)，定义出滑模面为

$$\dot{s}=\boldsymbol{C}(\dot{\boldsymbol{E}}-\dot{\boldsymbol{P}})=\boldsymbol{C}\dot{\boldsymbol{E}}-\boldsymbol{C}\dot{\boldsymbol{P}}=\dot{e}-\dot{p}+c(\ddot{e}-\ddot{p})=\dot{e}-\dot{p}+c(\Delta f(\alpha,\beta,t)+bu-\ddot{x}_{01d}-\ddot{p}) \quad (29)$$

为设计控制律以实现姿态控制系统的收敛，选取李雅普诺夫函数 V 为

$$V=\frac{1}{2}s^2 \quad (30)$$

根据李雅普诺夫函数可知，$V\geqslant 0$ 恒成立。为实现 $\dot{V}$ 负定，根据式(29)可设计喷雾机姿态控制律为

$$u=-\frac{1}{b}\left[\frac{1}{c}(\dot{e}-\dot{p})-\ddot{x}_{01d}-\ddot{p}+\varepsilon\operatorname{sign}(s)\right] \quad (31)$$

其中　　$\varepsilon=F+\varepsilon_0 \quad (\varepsilon_0>0)$

将姿态控制律代入李雅普诺夫函数中，有

$$\dot{V}=s\dot{s}=c(\Delta f(\alpha,\beta,t)-\varepsilon|s|)\leqslant-\varepsilon_0|s|\leqslant 0 \quad (32)$$

因此，当 $\dot{V}\equiv 0$ 时，$s\equiv 0$，由 LaSalle 不变性可知，$t\to\infty$ 时，$s\to 0$，$e\to 0$，$\dot{e}\to 0$。从而证明该控制器可以使喷雾机前、后转向轴在有限时间内实现对目标状态的收敛与稳定。最后，设计出滑模自抗扰(Sliding active disturbance rejection control, SADRC)同步转向高地隙喷雾机姿态控制器，如图 6 所示，其中，v_{00}、v_{10}分别为前、后转向轴的目标转角，v_{01}、v_{02}、v_{11}、v_{12}分别为过渡过程的输出，e_{01}、e_{02}、e_{11}、e_{12}分别为过渡过程输出值与扩张状态观测器观测值之间的误差。

3　仿真试验

为验证滑模自抗扰姿态控制器的控制效果，本文基于 Matlab 平台建立了同步转向高地隙喷雾机同结构仿真机械模型与滑模自抗扰姿态控制器模型进行了联合仿真。

3.1　喷雾机姿态控制仿真平台建立

Matlab/Simscape 平台是一款可靠的物理系统建模插件。为了准确模拟同步转向高地隙喷雾机的结构特点以及姿态控制效果，本文先使用 SolidWorks 来建立喷雾机的等比例模型，为提高联合仿真试验的可信度，喷雾机模型的参数设计均与实际参数一致。之后将 SolidWorks 中的喷雾机仿真模型导入至 Matlab/Simscape 中，并按照实际参数对模型的各个部件进行定义，建立的同步转向结构仿真模型如图 7 所示。

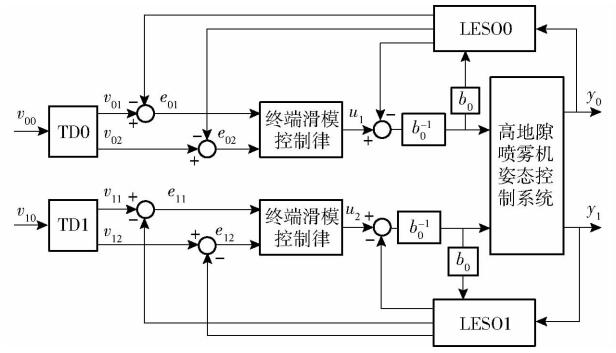


图 6　滑模自抗扰姿态控制系统

Fig. 6　Diagram of SADRC of synchronous steering high clearance sprayer

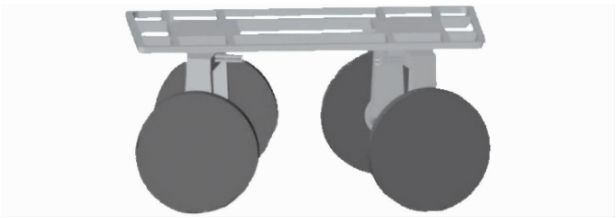


图 7　同步转向结构仿真模型

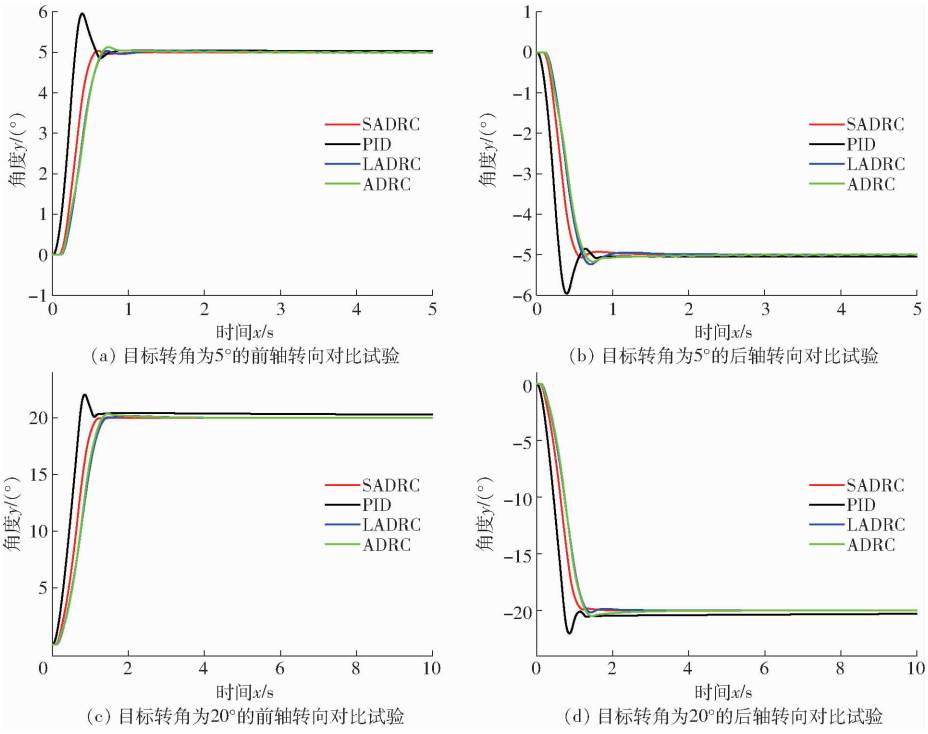
Fig. 7　Simulation model of synchronous steering structure

最后，在 Matlab/Simulink 平台上完成滑模自抗扰姿态控制器的设计，并与仿真模型联立，完成喷雾机姿态控制仿真平台的设计。喷雾机仿真模型与终端滑模控制率主要参数如下：喷雾机左右轮距 $L=1\,580$ mm，喷雾机前后轴距 $D=3\,200$ mm，车轮半径 $r=450$ mm，正常作业行驶速度 v 为 0 ~ 3 m/s，仿真试验离散步长 $h=0.001$ s。通过试验分析，最终确定扩张状态观测器参数 $\beta_1=18.6$，$\beta_2=115.32$，$\beta_3=238.328$，控制率补偿值 $b_0=1.2$，常数 $c=15$，观测器的误差界限 $F=G=6$。

3.2　姿态控制器理想路面仿真试验

在仿真试验中，假设喷雾机的车轮与地面不会发生相对摩擦，并且分别采用 PID 控制器、非线性自抗扰(ADRC)控制器以及线性自抗扰(LADRC)控制器进行对比试验。仿真试验的目标转角分别采用喷雾机最大转角 20°以及较小转角 5°，从而可以得出喷雾机姿态控制效果对比如图 8 所示。

通过对喷雾机姿态控制联合仿真试验的数据进行分析，得出相关数据如表 1 ~ 4 所示。



(a) 目标转角为5°的前轴转向对比试验 (b) 目标转角为5°的后轴转向对比试验

(c) 目标转角为20°的前轴转向对比试验 (d) 目标转角为20°的后轴转向对比试验

图 8 理想条件下喷雾机姿态控制仿真试验结果

Fig. 8 Simulation results of attitude control system in ideal state

表 1 喷雾机前轴仿真试验结果($\alpha=5°$)

Tab. 1 Simulation results of front-axis steering angle for $\alpha=5°$ in ideal state

控制方式	响应时长/s	稳定时长/s	超调量/%
PID	0.28	1.05	19.02
ADRC	0.57	0.92	2.56
LADRC	0.56	0.86	0.68
SADRC	0.46	0.63	0.76

表 2 喷雾机前轴仿真试验结果($\alpha=20°$)

Tab. 2 Simulation results of front-axis steering angle for $\alpha=20°$ in ideal state

控制方式	响应时长/s	稳定时长/s	超调量/%
PID	0.67	3.67	9.80
ADRC	1.29	1.73	1.70
LADRC	1.14	1.76	0.85
SADRC	0.95	1.17	0

表 3 喷雾机后轴仿真试验结果($\beta=5°$)

Tab. 3 Simulation results of rear-axis steering angle for $\beta=5°$ in ideal state

控制方式	响应时长/s	稳定时长/s	超调量/%
PID	0.28	0.94	19.18
ADRC	0.55	1.02	3.42
LADRC	0.53	0.89	4.76
SADRC	0.45	0.62	1.26

通过仿真数据分析可得,虽然 PID 控制器的响应速度比 SADRC 控制器略快,但产生了较大的超调,稳定时长更长。与 LADRC 控制器以及 ADRC 控制器相比,SADRC 控制器的响应速度与收敛速度更快,超调量更小,稳定时长更短。虽然喷雾机后轴较前轴的控制效果略差,但依然可以在有限时间内完成对目标转角的收敛,实现有效的姿态控制。

表 4 喷雾机后轴仿真试验结果($\beta=20°$)

Tab. 4 Simulation results of rear-axis steering angle for $\beta=20°$ in ideal state

控制方式	响应时长/s	稳定时长/s	超调量/%
PID	0.67	3.96	10.01
ADRC	1.09	2.05	2.53
LADRC	1.09	2.08	0.82
SADRC	0.93	1.16	0

3.3 姿态控制器非理想路面仿真试验

由于高地隙喷雾机大多在田间工作,水田泥泞的环境以及不平整的路面会对喷雾机姿态控制造成更多干扰。由于传统控制器大多采用“基于误差,消除误差”的控制论思想,这虽然为控制器设计提供了便捷方案,但也使得控制器的控制效果滞后于对象状态的变化。同时,这些控制器的可控参数较少,难以在这种多变的环境下提供较好的控制效果。滑模自抗扰控制器不仅可以通过喷雾机的状态反馈来对总扰动实时进行补偿,还引入了误差变化率以及过渡过程来实现对喷雾机姿态的控制。因此,所提出的控制器在这种具有不确定性的条件下有较好的抗干扰能力。

在对滑模自抗扰控制器鲁棒性的验证试验中,

将喷雾机角度传感器反馈的干扰用一种白噪声来表示，同时在喷雾机的前进方向安放一个障碍物。通过这些附加条件，来分析本控制器在外界扰动下的控制效果。在仿真中，目标转角设定为 0，白噪声均值设定为 0，标准差设定为 0.3°，障碍物设置为圆柱体，半径为 8 cm。试验结果如图 9 所示。

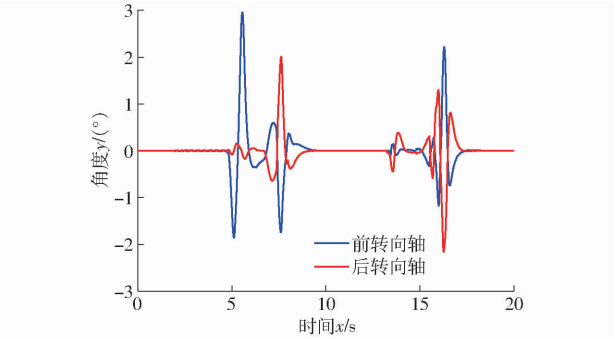


图 9　非理想条件下喷雾机姿态控制仿真试验结果

Fig. 9　Simulation results of attitude control system in non-ideal state

从图 9 可以看出，喷雾机前轴在越障时最大偏角为 2.927°，稳定时间为 4.62 s；喷雾机后轴在越障时最大偏角为 2.162°，稳定时间为 4.11 s。喷雾机前、后转向桥的转向角在经过障碍物之后，存在较小的振荡，相对转向轴的转向角也会受到一定的影响，但二者均能实现对目标状态的快速收敛与稳定。

4　场地试验

为验证同步转向高地隙喷雾机在正常工作环境下姿态控制器的有效性与鲁棒性，本文采用姿态控制器分别在硬质沥青路面与田间泥泞环境下进行场地试验。

4.1　试验平台

试验以 3WPZ－500 型高地隙喷雾机为控制对象，该控制对象目前搭载了由车载控制单元、4G 路由器、车载嵌入式计算机、角度传感器以及远程控制计算机组成的喷雾机姿态控制系统，如图 10 所示。

其中，角度传感器用来实时获取喷雾机前后桥转向角的信息，并通过 RS－485 串口通信协议传输给车载嵌入式计算机。车载嵌入式计算机基于喷雾机的实时状态信息来生成对应的控制信号，并输出给车载控制单元。车载控制单元通过 CAN 总线来控制各个轮毂电机的状态，最终完成对喷雾机姿态的调节。远程控制端计算机通过 4G 路由器构建的局域网与车载嵌入式计算机相连，用来记录试验数据，控制喷雾机转向角度以及试验开始与停止。喷雾机整体控制系统逻辑如图 11 所示。

4.2　硬质路面下姿态控制场地试验

喷雾机在硬质沥青路面下姿态控制试验在江苏大学主路附近进行，场地试验环境如图 12 所示。

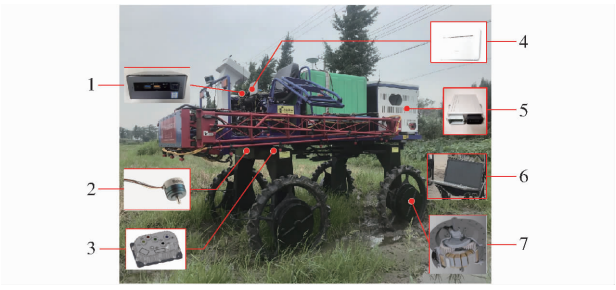


图 10　高地隙喷雾机姿态控制系统

Fig. 10　Attitude control system of sprayer

1. 车载嵌入式计算机　2. 角度传感器　3. 轮毂电机驱动器　4. 4G 路由器　5. 车载控制单元　6. 远程控制端计算机　7. 轮毂电机

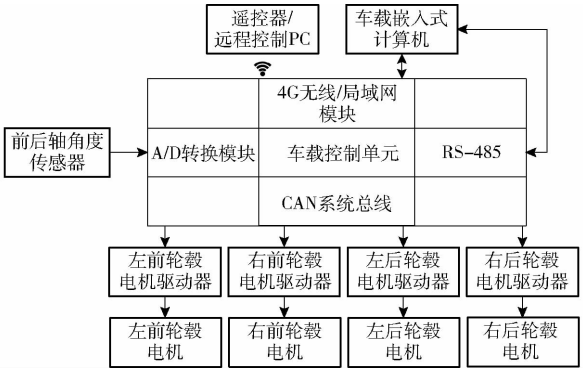


图 11　喷雾机整体控制系统设计图

Fig. 11　Design of control system for sprayer



图 12　硬质路面下喷雾机姿态控制场地试验

Fig. 12　Field test of attitude control on hard road

在本次试验中，设定喷雾机行驶速度为正常作业速度 1 m/s，目标转角分别采用喷雾机最大转向偏角 20°以及较小转角 5°，姿态控制器分别为改进前的 PD 控制算法以及改进后的滑模自抗扰控制算法，场地试验结果如图 13 所示。

由图 13 可知，改进前，当喷雾机目标转角为 5°时，前轴转向角 α 存在 4.72% 的稳态误差，响应时间为 2.05 s；后轴转向角 β 存在 5.81% 的稳态误差，响应时间为 1.95 s。改进后，喷雾机前轴转向角 α 存在 2.80% 的稳态误差，响应时间为 1.55 s；后轴转向角 β 存在 1.81% 的稳态误差，响应时间为 1.45 s。当喷雾机目标转角为 20°时，改进前，喷雾机前轴转

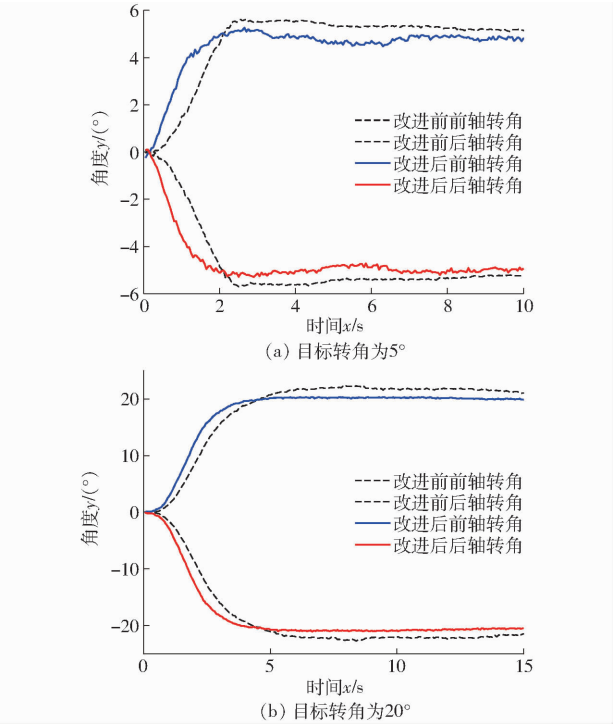


图 13 硬质路面下喷雾机姿态控制场地试验结果

Fig. 13 Result of field test of attitude control on hard pavement

向角 α 存在 7.80% 的稳态误差,响应时间为 3.95 s;后轴转向角 β 存在 8.35% 的稳态误差,响应时间为 3.80 s。改进后,喷雾机前轴转向角 α 存在 1.08% 的稳态误差,响应时间为 3.05 s;后轴转向角 β 存在 4.55% 的稳态误差,响应时长为 2.95 s。

从场地试验可以看出,在使用滑模自抗扰姿态控制器时,喷雾机对目标姿态的响应速度分别提高 8.42% 与 1.89%,稳态误差分别降低 2.96% 与 3.15%,且前、后轴转向角全部收敛于目标转角并趋向于稳定。

4.3 田间环境姿态控制场地试验

为进一步验证算法在复杂环境下的有效性,在南通海安某处的水田中进行了喷雾机水田泥泞环境下的姿态控制试验。设定喷雾机行驶速度为 1 m/s,目标转角分别为 20°与 5°。为保证试验的安全性,加装了辅助转向链杆。喷雾机水田试验环境如图 14 所示。场地试验结果如图 15 所示。

由图 15 可知,在田间泥泞的工作环境下,当喷雾机目标转角为 5°时,前轴转向角 α 的响应时间为 2.25 s,最大误差为 1.64°;后轴转向角 β 的响应时间为 2.14 s,最大误差为 1.13°。当喷雾机目标转角为 20°时,前轴转向角 α 的响应时间为 3.28 s,最大误差为 2.60°;后轴转向角 β 的响应时间为 3.23 s,最大误差为 3.45°。从试验结果可以看出,喷雾机在田间泥泞环境下,虽然其姿态在稳定后会存在一定的波动,但仍能正常完成转向操作并将波动维持在较小范围。这说明了滑模自抗扰姿态控制器在复杂环境下具有较强的适应性与抗干扰能力。



图 14 田间泥泞环境下喷雾机姿态控制场地试验

Fig. 14 Field test of attitude control in puddy field

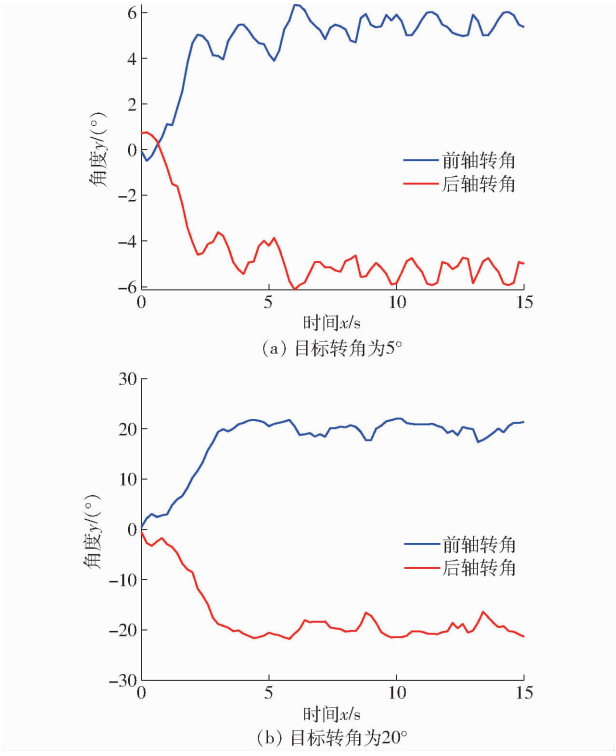


图 15 田间环境下喷雾机姿态控制场地试验结果

Fig. 15 Result of attitude control in puddy field

4.4 试验结果讨论

从仿真试验数据可以看出,滑模自抗扰控制器的响应速度更快,超调更小,并且可以实现对过渡过程的完全跟踪。这是由于滑模自抗扰控制器在设计时,将喷雾机前、后轴转角误差的导数也列入了状态量与控制率中,这使得转角可以在有限时间内实现对目标状态的收敛。

通过喷雾机在硬质路面的姿态控制结果可以发现,滑模自抗扰姿态控制器的稳定性较好,但是在前、后转向角稳定后会存在一定的振荡,同时会有一定的稳态误差。经分析,一方面是由于安装于喷雾机前、后转向桥中的角度传感器反馈的数据存在一

定的波动；另一方面，为提高喷雾机在水田中的行走能力，对喷雾机车轮在传统的圆形基础上进行了特殊设计。这使得喷雾机在正常行走时会受到来自车轮以及自身结构的干扰，从而对前后转向轴的转角造成一定的影响。

喷雾机在水田中的姿态控制效果较硬质路面下的略差。这是因为喷雾机车轮宽度较窄，且水田环境复杂、路面泥泞、土质松软，水田若要提供与正常路面相同的支持力，则要产生相比于正常路面更大的形变。这使得喷雾机在水田中受重力影响一直处于半陷入泥中的状态。当喷雾机在田间行进时，车轮不仅要提供向前的驱动力，还要向两侧排开泥土，这种外界较大的干扰给喷雾机姿态的稳定性带来了一定的影响。

综上所述，喷雾机在硬质沥青路面以及水田泥泞环境下均可以实现正常转向，且响应速度快，稳态误差小，抗干扰性好，可以满足实际喷雾机无人化作业的需求。

5　结论

（1）基于 Matlab 平台搭建了同步转向高地隙喷雾机的同比例仿真模型。并在此基础上进行了在理想状态下，滑模自抗扰控制器与其它控制器以不同转向角为目标的对照试验。同时，在喷雾机目标路径上存在障碍物的情况下，进行滑模自抗扰鲁棒性测试试验。通过姿态控制结果可知，在理想状态下，所设计的滑模自抗扰控制器可以实现喷雾机姿态的完全控制，且相较于其它 3 种控制器，可以实现对目标姿态的快速响应、快速收敛和稳定跟踪。

（2）在场地试验中，喷雾机以速度 1 m/s 分别在硬质沥青路面以及田间环境中对其姿态进行控制。从试验结果来看，滑模自抗扰姿态控制器的各种性能均得到了验证，所设计的姿态控制系统也可以很好地满足喷雾机无人自主导航作业的需求。

参　考　文　献

[1] 高延雷，张正岩，王志刚. 城镇化提高了农业机械化水平吗？——来自中国 31 个省（区、市）的面板证据[J]. 经济经纬，2020，37(3)：37－44.

[2] REN Guoqiang, LIN Tao, YING Yibin, et al. Agricultural robotics research applicable to poultry production: a review[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2020, 169: 105216.

[3] 李震，何青海，孙宜田，等. 国内外农用喷雾机的发展现状及趋势[J]. 农业装备与车辆工程，2019，57(3)：23－26.

[4] 罗锡文，廖娟，胡炼，等. 我国智能农机的研究进展与无人农场的实践[J]. 华南农业大学学报，2021，42(6)：8－17.
LUO Xiwen, LIAO Juan, HU Lian, et al. Research progress of intelligent agricultural machinery and practice of unmanned farm in China[J]. Journal of South China Agricultural University, 2021, 42(6): 8－17. (in Chinese)

[5] 刘雪美，刘兴华，崔慧媛，等. 作物冠层雾滴沉积研究进展与展望[J]. 农业机械学报，2021，52(11)：1－20.
LIU Xuemei, LIU Xinghua, CUI Huiyuan, et al. Research progress and trend analysis of crop canopy droplet deposition[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(11): 1－20. (in Chinese)

[6] 翟肇裕，曹益飞，徐焕良，等. 农作物病虫害识别关键技术研究综述[J]. 农业机械学报，2021，52(7)：1－18.
ZHAI Zhaoyu, CAO Yifei, XU Huanliang, et al. Review of key techniques for crop disease and pest detection[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(7): 1－18. (in Chinese)

[7] 景亮，张亚飞，沈跃，等. 四轮独立驱动高地隙无人喷雾机轨迹跟踪自适应控制[J]. 农业机械学报，2021，52(12)：408－416.
JING Liang, ZHANG Yafei, SHEN Yue, et al. Adaptive trajectory tracking control of 4WID high clearance unmanned sprayer [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(12): 408－416. (in Chinese)

[8] 刘慧，龙友能，何思伟，等. 四轮独立电驱动高地隙喷雾机辅助转向系统设计与试验[J]. 农业工程学报，2021，37(13)：30－37.
LIU Hui, LONG Youneng, HE Siwei, et al. Design and experiment of the auxiliary steering system for a four-wheel independent electrically driven high clearance sprayer[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(13): 30－37. (in Chinese)

[9] ZHUA Q, CHEN W, HU H, et al. Multi-sensor based attitude prediction for agricultural vehicles[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2019, 156: 24－32.

[10] 徐坤，骆媛媛，杨影，等. 分布式电驱动车辆状态感知与控制研究综述[J]. 机械工程学报，2019，55(22)：60－79.
XU Kun, LUO Yuanyuan, YANG Ying, et al. Review on state perception and control for distributed drive electric vehicles [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(22): 60－79. (in Chinese)

[11] 刘刚，靳立强. 分布式电动车的线性自抗扰稳定性控制策略[J]. 北京理工大学学报，2017，37(3)：250－254.
LIU Gang, JIN Liqiang. Stability control system of distributed drive electric vehicles using linear active disturbance rejection control[J]. Transaction of Beijing Institute of Technology, 2017, 37(3): 250－254. (in Chinese)

[12] 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.

[13] 黎永键，赵祚喜，高俊文，等. 东方红拖拉机电控液压转向系统设计及试验研究[J]. 农机化研究，2016，38(11)：246－251.

[14] SERGIO A D, RAFAEL V de S, CARLOS A V, et al. Fractional PID controller in an active image stabilization system for mitigating vibration effects in agricultural tractors[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2016, 131: 1－9.

（下转第 300 页）

very large corpora. Springer, Dordrecht, 1999: 157 – 176.
[27] DAI D, XIAO X Y, LÜ Y J, et al. Joint extraction of entities and overlapping relations using position-attentive sequence labeling[C]// Thirty-third AAAI Conference on Artificial Intelligence, 2019: 6300 – 6308.
[28] 胡滨,汤保虎,姜海燕,等. 家禽诊疗文本多实体关系联合抽取模型研究[J]. 农业机械学报, 2021, 52(6): 268 – 276.
HU Bin, TANG Baohu, JIANG Haiyan, et al. Joint extraction model of multi-entity relations for poultry diagnosis and treatment text[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(6): 268 – 276. (in Chinese)
[29] 李伟康, 李炜, 吴云芳. 深度学习中汉语字向量和词向量结合方式探究[J]. 中文信息学报, 2017, 31(6):140 – 146.
LI Weikang, LI Wei, WU Yunfang. Combination methods of Chinese character and word embeddings in deep learning[J]. Journal of Chinese Information Processing, 2017, 31(6):140 – 146. (in Chinese)
[30] 李新琴, 史天运, 李平, 等. 基于文本的高速铁路信号设备故障知识抽取方法研究[J]. 铁道学报, 2021, 43(3):92 – 100.
LI Xinqin, SHI Tianyun, LI Ping, et al. Research on knowledge extraction method for high-speed railway signal equipment fault based on text[J]. Journal of the China Railway Society, 2021, 43(3):92 – 100. (in Chinese)
[31] 陈晓玲, 唐丽玉, 胡颖, 等. 基于 ALBERT 模型的园林植物知识实体与关系抽取方法[J]. 地球信息科学学报, 2021, 23(7):1208 – 1220.
CHEN Xiaoling, TANG Liyu, HU Ying, et al. Extracting entity and relation of landscape plant's knowledge based on ALBERT model[J]. Journal of Geo-information Science, 2021, 23(7):1208 – 1220. (in Chinese)
[32] 赵鹏飞, 赵春江, 吴华瑞, 等. 基于 BERT 的多特征融合农业命名实体识别[J]. 农业工程学报, 2022, 38(3):112 – 118.
ZHAO Pengfei, ZHAO Chunjiang, WU Huarui, et al. Recognition of the agricultural named entities with multi-feature fusion based on BERT[J]. Transactions of the CASE, 2022, 38(3):112 – 118. (in Chinese)
[33] SIENČNIK S K. Adapting word2vec to named entity recognition[C]// Proceedings of the 20th Nordic Conference of Computational Linguistics (NODALIDA 2015), 2015: 239 – 243.
[34] GRAVES A, FERNÁNDEZ S, SCHMIDHUBER J. Bidirectional LSTM networks for improved phoneme classification and recognition[C]// International Conference on Artificial Neural Networks, 2005.

(上接第 189 页)

[15] 何杰,朱金光,罗锡文,等. 电动方向盘插秧机转向控制系统设计[J]. 农业工程学报,2019,35(6):10 – 17.
HE Jie, ZHU Jinguang, LUO Xiwen, et al. Design of steering control system for rice transplanter equipped with steering wheel-like motor[J]. Transactions of the CSAE,2019,35(6):10 – 17. (in Chinese)
[16] 张智刚,罗锡文,李俊岭. 轮式农业机械自动转向控制系统研究[J]. 农业工程学报,2005,21(11):77 – 80.
ZHANG Zhigang, LUO Xiwen, LI Junling. Automatic steering control system of wheeled model farming machinery[J]. Transactions of the CSAE,2005,21(11):77 – 80. (in Chinese)
[17] ZHUA Qingyuan, WEI Chena, HU Huosheng, et al. Multi-sensor based attitude prediction for agricultural vehicles[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2019,156:24 – 32.
[18] QIU Quan, FAN Zhengqiang, MENG Zhijun, et al. Extended-Ackerman steering principle for the coordinated movement control of a four-wheel drive agricultural mobile robot[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2018,152: 40 – 50.
[19] 张瑶,李佩娟,贾茜,等. 基于自适应粒子群的农机自动转向系统分数阶控制[J]. 甘肃农业大学学报,2019,54(4):199 – 204.
[20] 沈跃,何思伟,刘慧,等. 高地隙喷雾机自转向电动底盘控制系统设计与试验[J]. 农业机械学报,2020,51(11):385 – 392,402.
SHEN Yue, HE Siwei, LIU Hui, et al. Modeling and control of self-steering electric chassis structure of high clearance sprayer[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2020,51(11):385 – 392,402. (in Chinese)
[21] 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. Trajectory tracking and fuzzy adaptive model predictive control of high clearance synchronous-steering sprayer[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021,52(9):389 – 399. (in Chinese)
[22] 高志强. 自抗扰控制思想探究[J]. 控制理论与应用,2013,30(12):1498 – 1510.
GAO Zhiqiang. On the foundation of active disturbance rejection control[J]. Control Theory & Applications, 2013,30(12): 1498 – 1510. (in Chinese)
[23] GAO Zhiqiang. Scaling and bandwidth-parameterization based controller-tuning[C]// Proceedings of the 2003 American Control Conference. Denver: IEEE,2003: 4989 – 4996.
[24] HAN Jingqing. From PID to active disturbance rejection control[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2009, 56(3):900 – 906.
[25] 李向阳,高志强. 抗扰控制中的不变性原理[J]. 控制理论与应用,2020,37(2):236 – 244.
LI Xiangyang, GAO Zhiqiang. The invariance principle in disturbance rejection control[J]. Control Theory & Applications, 2020, 37(2): 236 – 244. (in Chinese)