

同步转向高地隙喷雾机模糊自适应轨迹跟踪预测控制

刘国海 李持衡 沈跃 刘慧
(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轨迹跟踪的稳定性与鲁棒性,提出一种基于模型预测控制理论的模糊自适应轨迹跟踪方法。首先,基于刚体运动学以及几何约束推导出喷雾机的非线性运动学模型,并对该运动学模型进行简化;然后,基于简化的运动学模型建立喷雾机的状态预测模型;最后,结合实际工况设计了模糊自适应预测控制器。仿真试验表明:与传统的预测控制器相比,模糊自适应预测控制器的跟踪速度更快、稳定性更好。场地试验表明:在进行初始误差 2.5、5 m 的直线轨迹跟踪以及无初始误差的圆形轨迹跟踪时,其平均误差分别为 0.044 2、0.060 2、0.090 1 m。本文建立的喷雾机运动学模型可以很好地体现同步转向高地隙喷雾机的运动特点,设计的模糊自适应预测控制器可以保证喷雾机路径跟踪的准确性和鲁棒性。

关键词: 高地隙喷雾机; 同步转向; 轨迹跟踪; 模糊自适应预测控制器

中图分类号: S49 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2021)09-0389-11 **OSID:** 

Trajectory Tracking and Fuzzy Adaptive Model Predictive Control of High Clearance Synchronous-steering Sprayer

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

Abstract: To improve the stability and robustness of path tracking based on the high clearance synchronous-steering sprayer, a fuzzy adaptive trajectory tracking control method was designed based on model predictive control theory. Firstly, the nonlinear kinematic model and the simplified kinematic model of the sprayer were derived based on rigid body kinematics and geometric constraints. Then, based on the simplified kinematics model, the state prediction model of the sprayer was established. Finally, the fuzzy adaptive predictive controller was designed according to the actual conditions. Simulation result showed that the fuzzy adaptive predictive controller can improve the stability and rapidity compared with the traditional predictive controller. The experiment results showed that the average error of the method was 0.044 2 m, 0.060 2 m and 0.090 1 m when the linear trajectories, with initial errors are 2.5 m and 5 m, and circular trajectories were tracked. The established kinematic model can well reflect the movement characteristics of the high clearance synchronous-steering sprayer, and the design of the fuzzy adaptive model predictive controller can guarantee the veracity and robustness of the sprayer path tracking.

Key words: high clearance sprayer; synchronous-steering; trajectory tracking; fuzzy adaptive model predictive controller

0 引言

农业机械自动驾驶技术是实现智慧农业以及现

代化精细农业的基础^[1-3],不仅可以有效降低劳动强度与农业生产成本,还能提高作业精度与作业效率^[4-7]。农机路径跟踪方法作为农机自动驾驶的关

收稿日期: 2020-10-02 修回日期: 2021-01-05
基金项目: 国家自然科学基金项目(51975260)、江苏省重点研发计划项目(BE2018372)、江苏省自然科学基金项目(BK20181443)、江苏高
校青蓝工程项目和镇江市重点研发计划项目(NY2018001)
作者简介: 刘国海(1964—),男,教授,博士生导师,主要从事电机控制、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,主要从事无人农机与智能控制、农业机器人研究,E-mail: shen@ujs.edu.cn

键技术也因此得到了长足的发展。农业机械作业环境复杂多变,其自身也具有大时滞、强耦合和高度非线性的特性,这要求农机轨迹跟踪算法具有较好的自适应能力和鲁棒性^[8-10]。

目前,农业机械导航控制方法包括 PID 控制、模糊控制、纯追踪控制、神经网络控制和最优控制等^[11]。文献[12]提出的免疫 PID 控制方法提升了响应速度,并减小了跟踪偏差。文献[13-15]提出的模糊自适应控制方法可以有效提高自主导航控制系统的快速性和稳定性。文献[16]提出的启发式动态规划路径跟随控制方法可以有效提高受控对象的环境适应性和自主优化能力。文献[17]基于纯追踪模型设计了曲线路径跟踪控制算法,其功能可靠,并且具有良好的稳定性和跟踪精度。

同步转向高地隙喷雾机结构新颖,适合在水田环境中工作,但其动力学建模复杂^[18],与文献[19-24]中的传统车辆模型以及其他受控对象模型均有较大差异。针对这一问题,本文基于刚体运动学以及几何约束建立用于轨迹跟踪的同步转向高地隙喷雾机运动学模型,并以其运动特点为基础进行简化。在简化模型的基础上建立预测模型,并设计模糊自适应规则,将二者结合提出模糊自适应预测控制策略,基于 Matab/Simulink 平台进行仿真试验以及场地试验,对模糊自适应预测控制器的性能进行验证。

1 运动学建模

1.1 结构组成

同步转向高地隙喷雾机(图 1)主要由控制箱、前后转向桥、轮毂电机、折叠喷杆以及车载导航系统构成。喷雾机的车架主体由多根方形金属管焊接而成。该设计不仅能够有效减轻喷雾机的自身质量,增强负载能力,还能提高喷雾机在平台上的空间利用率。



图 1 同步转向高地隙喷雾机实物图
Fig. 1 Picture of high clearance synchronous-steering sprayer

1. 控制箱 2. 前后转向桥 3. 轮毂电机 4. 折叠喷杆 5. 车载导航系统

同步转向高地隙喷雾机的底盘结构(图 2)由

前、后转向桥以及喷雾机车架组成。

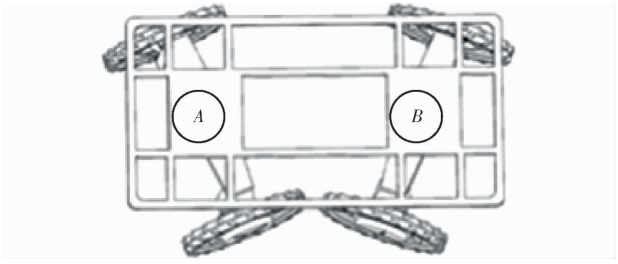


图 2 同步转向喷雾机底盘
Fig. 2 Chassis frame of synchronous-steering sprayer

其中,前后转向桥结构相同,分别由 1 个旋转支承装置、1 个支撑桥以及 2 个由轮毂电机驱动的轮胎构成。前后转向桥分别通过平面轴承和车架前后转向桥中心的 A、B 相连接。喷雾机前后 4 个轮毂电机的转矩均独立可控。在喷雾机工作时,前后转向桥可以分别围绕着图 2 中 A、B 处 2 个旋转轴进行旋转,从而实现对车辆姿态的调节。

1.2 同步转向底盘运动学建模

同步转向高地隙喷雾机的运动特点是由其独特的转向机构所决定的。与传统四轮驱动高地隙喷雾机“四轮同时负责驱动,转向机构额外提供转向力矩”的运动方式不同(图 3),同步转向高地隙喷雾机可以利用速度闭环通过直接调整喷雾机 4 个轮毂电机的输出转矩来改变轮毂电机的输出转速,从而对前后转向桥的转角进行调节,最终实现控制喷雾机自身姿态,完成喷雾机前后转向机构同步转向或直行的作业目标。

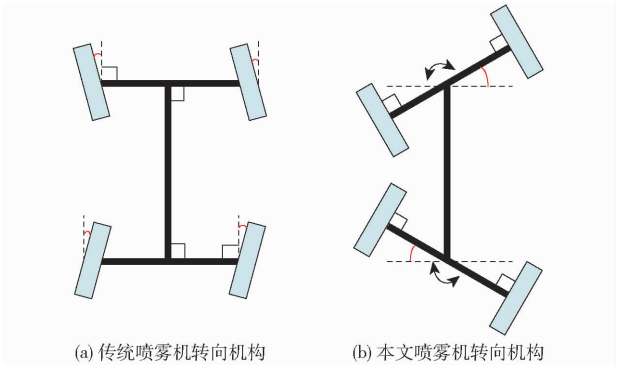


图 3 传统喷雾机与本文喷雾机转向机构对比
Fig. 3 Comparison of steering mechanism between traditional sprayer and this sprayer

基于喷雾机的运动情况以及自身工作特点,以喷雾机的初始位置为原点,并在二维笛卡尔坐标系中定义出车辆模型如图 4 所示,图中 x 为喷雾机定位横坐标、 y 为喷雾机定位纵坐标、 φ 为喷雾机航向角、 M 为喷雾机定位点、 q 为前转向桥航向角、 p 为后转向桥航向角、 α 为前转向桥转角、 β 为后转向桥转角、 V_{Fl} 为喷雾机左前轮速度、 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。

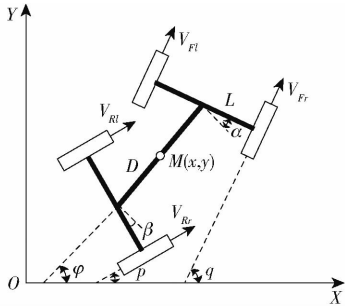


图 4 同步转向高地隙喷雾机运动学模型
Fig. 4 Kinematics model sketch of high clearance synchronous-steering sprayer

在运动学模型的设计中,将喷雾机 4 个轮毂电机的速度 ($V_{Fl}, V_{Fr}, V_{Rl}, V_{Rr}$) 设为控制量,将喷雾机定位点 M 的横坐标 x 、纵坐标 y 以及喷雾机主轴与 X 轴的夹角 φ (航向角) 设为状态量。假设喷雾机在运动时,车轮与地面之间不会发生相对滑动,且喷雾机仅在坐标平面上运动,同时设定逆时针方向为旋转运动的正方向。由此可建立喷雾机的运动学方程为

$$\dot{x} = \frac{V_{Fl} + V_{Fr}}{2} \cos \alpha \cos \varphi \quad (1)$$

$$\dot{y} = \frac{V_{Rl} + V_{Rr}}{2} \cos \beta \sin \varphi \quad (2)$$

$$\dot{\varphi} = \frac{V_{Fl} + V_{Fr}}{2} \sin \alpha - \frac{V_{Rl} + V_{Rr}}{2} \sin \beta \quad (3)$$

将喷雾机前后转向桥的运动分解为转向桥绕自身轴心的转动以及跟随喷雾机主体中心 M 横摆运动。由此,可以推出喷雾机前后转向机构的运动学约束为

$$\dot{q} = \frac{V_{Fl} - V_{Fr}}{L} \quad (4)$$

$$\dot{p} = \frac{V_{Rl} - V_{Rr}}{L} \quad (5)$$

$$\dot{\alpha} = \dot{q} - \dot{\varphi} \quad (6)$$

$$\dot{\beta} = \dot{p} - \dot{\varphi} \quad (7)$$

由于喷雾机前后转向桥连在同一个主轴上,于是有一个沿喷雾机主轴方向速度相同的运动学约束为

$$\frac{V_{Fl} + V_{Fr}}{2} \cos \alpha = \frac{V_{Rl} + V_{Rr}}{2} \cos \beta \quad (8)$$

假设车轮和地面不打滑,设车轮速度为 V_i ,半径为 d ,角速度为 ω_i ,可得车轮角速度与速度的关系为

$$\omega_i = \frac{V_i}{d} \quad (9)$$

其中, i 取 Fl, Fr, Rl, Rr , 表示左前、右前、左后、右后车轮。

1.3 同步转向底盘简化运动学建模

为了增强喷雾机在工作时的抗干扰能力以及转向稳定性,在喷雾机的 2 组转向桥之间,加入了一个辅助转向链杆,如图 5 所示^[25]。

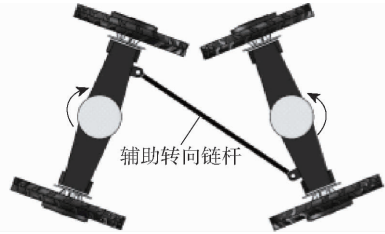


图 5 辅助转向下喷雾机转向模型
Fig. 5 Steering model of sprayer with auxiliary rod

基于上述特点,于平面直角坐标系建立喷雾机结构图如图 6 所示。喷雾机推杆连接点在初始状态与转向中心的距离为 a ,与喷雾机主轴中心沿 Y 轴方向上的距离为 b 。设喷雾机前后转向桥所在直线的斜率分别为 k 与 $-k$,则 2 个连接点之间的距离

$$Z = 2 \sqrt{\frac{a^2}{k^2 + 1} + b^2}.$$

文献[26]证明了前后转向桥连杆约束法以及利用 PD 控制器进行喷雾机姿态控制的可行性,并且提出,在合理地设计连杆的位置之后,PD 控制器通过控制轮毂电机转速来调节喷雾机姿态,便可实现喷雾机前后转向桥转向时的同步约束。

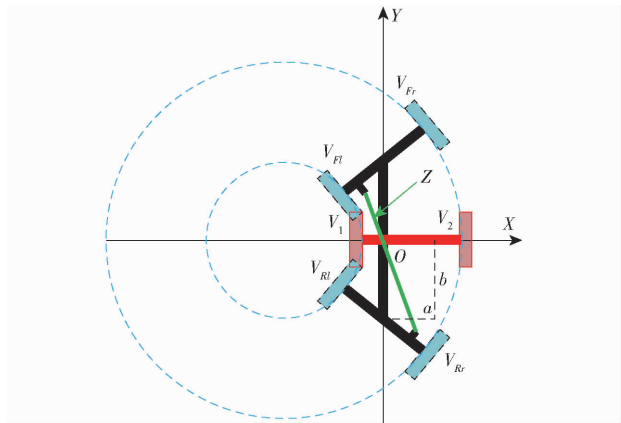


图 6 同步转向高地隙喷雾机简化原理图
Fig. 6 Simplified schematic of high clearance synchronous-steering sprayer

因此,在满足连杆约束的条件下,喷雾机转向时的前、后两组转向桥的转角互为相反数。如图 6 所示, V_1 为喷雾机左侧轮胎速度、 V_2 为喷雾机右侧轮胎速度。当喷雾机以固定转向半径进行转向工作时,喷雾机的左、右同侧轮毂电机转速相同 ($V_{Fl} = V_{Rl}, V_{Fr} = V_{Rr}$),且喷雾机左、右两侧车轮的轨迹为 2 个同心圆。而针对传统高地隙喷雾机的简化模

型——“自行车模型”并不能很好地体现出本喷雾机的前后转向桥同步转向的运动特点,并且忽视了车辆在转向时转向桥转角以及车轮转速的变化过程。基于喷雾机以上结构特点与运动特点,可以将喷雾机的整车模型近似简化为具有 $V_1 = V_{Fl} = V_{Rl}$ 及 $V_2 = V_{Fr} = V_{Rr}$ 特性的差速平衡车模型。

在简化设计出“平衡车模型”(图 7)的基础上,当喷雾机仅在坐标平面上运动时,可得运动学约束方程

$$\dot{x} = \frac{V_1 + V_2}{2} \cos \varphi$$

(10)

$$\dot{y} = \frac{V_1 + V_2}{2} \sin \varphi$$

(11)

$$\dot{\varphi} = \frac{V_1 - V_2}{L}$$

(12)

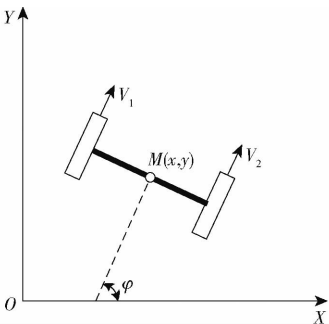


图 7 同步转向高地隙喷雾机简化运动学模型
Fig.7 Simplify kinematics model sketch of high clearance synchronous-steering sprayer

1.4 喷雾机简化模型线性化与离散化

联立喷雾机运动学约束方程(式(10)~(12)),并将其中的位置信息 (x, y, φ) 分别设置为状态量 $\boldsymbol{X}$ 和输出量 $\boldsymbol{Y}$,将模型左、右两侧轮胎的速度 (V_1, V_2) 设置为控制量 $\boldsymbol{u}$ 。可以将车辆运动学模型表达为与时间 t 的相关函数,即

$$\dot{\boldsymbol{X}} = \boldsymbol{f}(\boldsymbol{X}, \boldsymbol{u})$$

(13)

$$\boldsymbol{Y} = \boldsymbol{C}\boldsymbol{X}$$

(14)

其中

$$\boldsymbol{X} = [x(t), y(t), \varphi(t)]^T$$

$$\boldsymbol{u} = [V_1(t), V_2(t)]^T$$

式中 $\boldsymbol{C}$ —— 3×3 的单位矩阵

利用泰勒公式将上述非线性时变系统模型在参考点处展开,转换为线性系统。本文将车辆的目标轨迹以及对应速度设置为参考量

$$\dot{\boldsymbol{X}}_r = \boldsymbol{f}(\boldsymbol{X}_r, \boldsymbol{u}_r)$$

(15)

式中 $\boldsymbol{X}_r$ ——系统状态参考量

$\boldsymbol{u}_r$ ——系统输入参考量

将模型在参考点上展开后,只保留一次项,忽略高阶项,有

$$\dot{\boldsymbol{X}} = \boldsymbol{f}(\boldsymbol{X}, \boldsymbol{u}) = \boldsymbol{f}(\boldsymbol{X}_r, \boldsymbol{u}_r) + \boldsymbol{J}_X(\boldsymbol{X} - \boldsymbol{X}_r) + \boldsymbol{J}_u(\boldsymbol{u} - \boldsymbol{u}_r)$$

(16)

其中

$$\boldsymbol{J}_X = \left. \frac{\partial \boldsymbol{f}}{\partial \boldsymbol{X}} \right|_{\boldsymbol{X} = \boldsymbol{X}_r, \boldsymbol{u} = \boldsymbol{u}_r} \quad \boldsymbol{J}_u = \left. \frac{\partial \boldsymbol{f}}{\partial \boldsymbol{u}} \right|_{\boldsymbol{X} = \boldsymbol{X}_r, \boldsymbol{u} = \boldsymbol{u}_r}$$

将喷雾机的实际状态量与参考状态量的误差用 $\tilde{\boldsymbol{X}}$ 来表示,有

$$\tilde{\boldsymbol{X}} = \boldsymbol{X} - \boldsymbol{X}_r$$

(17)

$$\dot{\tilde{\boldsymbol{X}}} = \dot{\boldsymbol{X}} - \dot{\boldsymbol{X}}_r$$

(18)

将式(18)代入式(16)中,可以得出喷雾机简化模型的线性化公式为

$$\dot{\tilde{\boldsymbol{X}}} = \boldsymbol{J}_X(\boldsymbol{X} - \boldsymbol{X}_r) + \boldsymbol{J}_u(\boldsymbol{u} - \boldsymbol{u}_r) =$$

$$\boldsymbol{J}_X \tilde{\boldsymbol{X}} + \boldsymbol{J}_u \tilde{\boldsymbol{u}} = \boldsymbol{A}(t) \tilde{\boldsymbol{X}} + \boldsymbol{B}(t) \tilde{\boldsymbol{u}}$$

(19)

其中

$$\boldsymbol{A}(t) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -\frac{V_1(t) + V_2(t)}{2} \sin \varphi(t) \\ 0 & 0 & \frac{V_1(t) + V_2(t)}{2} \cos \varphi(t) \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{B}(t) = \begin{bmatrix} \frac{1}{2} \cos \varphi(t) & \frac{1}{2} \cos \varphi(t) \\ \frac{1}{2} \sin \varphi(t) & \frac{1}{2} \sin \varphi(t) \\ \frac{1}{2L} & -\frac{1}{2L} \end{bmatrix}$$

之后对其进行离散化处理。令 T 为离散时长,便可以得出基于简化模型的离散化线性状态表达式

$$\tilde{\boldsymbol{X}}(k+1) = \boldsymbol{A}(k) \tilde{\boldsymbol{X}}(k) + \boldsymbol{B}(k) \tilde{\boldsymbol{u}}(k)$$

(20)

其中

$$\boldsymbol{A}(k) = \boldsymbol{I}_{3 \times 3} + \boldsymbol{T}\boldsymbol{A}(t)$$

$$\boldsymbol{B}(k) = \boldsymbol{T}\boldsymbol{B}(t)$$

2 模糊自适应预测控制系统设计

2.1 预测模型设计

在建立喷雾机预测模型时,为了提高系统的可控性,将前一时刻的控制量加入到预测模型的状态变量中,从而预测模型的状态变量 $\boldsymbol{\varepsilon}$ 为

$$\boldsymbol{\varepsilon}(k) = \begin{bmatrix} \boldsymbol{X}(k) \\ \boldsymbol{u}(k-1) \end{bmatrix}$$

令 $\hat{\boldsymbol{\varepsilon}}(k) = \boldsymbol{\varepsilon}(k) - \boldsymbol{\varepsilon}_r(k)$,将状态变量 $\boldsymbol{\varepsilon}$ 代入离散化的状态模型中,从而有

$$\begin{cases} \boldsymbol{\varepsilon}(k+1) = \tilde{\boldsymbol{C}}\tilde{\boldsymbol{A}}\boldsymbol{\varepsilon}(k) + \tilde{\boldsymbol{B}}\Delta\boldsymbol{u}(k) \\ \boldsymbol{Y}(k) = \tilde{\boldsymbol{C}}\boldsymbol{\varepsilon}(k) \end{cases}$$

(21)

其中

$$\tilde{\boldsymbol{A}} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{A}(k) & \boldsymbol{B}(k) \\ \boldsymbol{O}_{2 \times 3} & \boldsymbol{I}_{2 \times 2} \end{bmatrix} \quad \tilde{\boldsymbol{B}} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{B}(k) \\ \boldsymbol{I}_{2 \times 2} \end{bmatrix}$$

$$\tilde{\boldsymbol{C}} = [\boldsymbol{C} \quad \boldsymbol{O}_{3 \times 2}]$$

式中 $\Delta u(k)$ ——控制量 $u(k)$ 的变化量

O ——零矩阵 $I_{2 \times 2}$ —— 2×2 单位矩阵

由式 (21) 可以递推出 $\varepsilon(k+2)$ 、 $\varepsilon(k+3)$ 、 $\varepsilon(k+4)$ 、 $\cdots$ 、 $\varepsilon(k+N_p)$ 的表达式。设喷雾机的预测模型的预测时长为 N_p ，预测模型的控制时长为 N_c ($N_c \leq N_p - 1$)，可以整理出基于模型的预测矩阵为

$$M(k) = \delta \varepsilon(k) + \theta \Delta u(k) \tag{22}$$

其中

$$M(k) = \begin{bmatrix} \varepsilon(k+1) \\ \varepsilon(k+2) \\ \vdots \\ \varepsilon(k+N_c-1) \\ \varepsilon(k+N_c) \\ \vdots \\ \varepsilon(k+N_p) \end{bmatrix} \quad \delta = \begin{bmatrix} \tilde{C}\tilde{A} \\ \tilde{C}\tilde{A}^2 \\ \vdots \\ \tilde{C}\tilde{A}^{N_c-1} \\ \tilde{C}\tilde{A}^{N_c} \\ \vdots \\ \tilde{C}\tilde{A}^{N_p} \end{bmatrix}$$

$$\theta = \begin{bmatrix} \tilde{C}\tilde{B} & 0 & \cdots & 0 \\ \tilde{C}\tilde{A}\tilde{B} & \tilde{C}\tilde{B} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \tilde{C}\tilde{A}^{N_c-1}\tilde{B} & \tilde{C}\tilde{A}^{N_c-2}\tilde{B} & \cdots & \tilde{C}\tilde{B} \\ \tilde{C}\tilde{A}^{N_c}\tilde{B} & \tilde{C}\tilde{A}^{N_c-1}\tilde{B} & \cdots & \tilde{C}\tilde{A}\tilde{B} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \tilde{C}\tilde{A}^{N_p}\tilde{B} & \tilde{C}\tilde{A}^{N_p-1}\tilde{B} & \cdots & \tilde{C}\tilde{A}^{N_p-N_c-1}\tilde{B} \end{bmatrix}$$

2.2 滚动优化模型设计

在进行目标函数设计时，采用左右两侧车轮的速度为其状态量。同时，为防止系统出现无可行解的情况，引入了权值系数 ρ 以及松弛因子 τ ^[27]，得出目标函数为

$$J(t) = \sum_{i=1}^{N_p} \|X(t+i|t) - X_r(t+i|t)\|^2 Q + \sum_{i=1}^{N_c-1} \|\Delta u(t+i|t)\|^2 R + \rho \tau^2 \tag{23}$$

式中 Q ——状态量权重矩阵

R ——控制量权重矩阵

将目标函数展开，并舍弃不可控量，可得目标函数

$$J = [\Delta u^T \quad \tau] \begin{bmatrix} \theta^T Q \theta + R & 0 \\ 0 & \rho \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta u \\ \tau \end{bmatrix} + [2E^T Q \theta \quad 0] \begin{bmatrix} \Delta u \\ \tau \end{bmatrix} \tag{24}$$

其中

$$E = \delta X_r$$

在试验中，本高地隙喷雾机在控制量上有一定的条件约束。为此在进行二次规划求解时对状态量约束设计为

$$\begin{cases} u_{\min} \leq u(k) \leq u_{\max} \\ \Delta u_{\min} \leq \Delta u(k) \leq \Delta u_{\max} \end{cases} \tag{25}$$

式中 $u_{\max}$ 、 $u_{\min}$ —— $u(k)$ 上、下限

$\Delta u_{\max}$ 、 $\Delta u_{\min}$ —— $\Delta u(k)$ 上、下限

2.3 反馈校正

由本喷雾机的预测模型可知， $\Delta u(k)$ 为控制量 $u(k)$ 的增量，将其代入式 (21)，有

$$\begin{aligned} \tilde{A}\tilde{\varepsilon}(k) + \tilde{B}\Delta u(k) &= \\ \left[A(k)\tilde{X}(k) + B(k)\tilde{u}(k-1) + B(k)\Delta u(k) \right] &= \\ \tilde{u}(k-1) + \Delta u(k) & \\ \begin{bmatrix} \tilde{X}(k+1) \\ \tilde{u}(k) \end{bmatrix} & \end{aligned} \tag{26}$$

将式 (26) 中 $\Delta u(k)$ 提取出来并化简，有

$$u(k) = u_r(k) + u(k-1) - u_r(k-1) + \Delta u(k) \tag{27}$$

式中 $u_r(k)$ 、 $u_r(k-1)$ ——已知的参考控制量

$u(k-1)$ ——已知的前一时刻的控制量

可以通过之前滚动优化模型确定 $\Delta u(k)$ 。因此，可以得出最优反馈控制信息 $u(k)$ 。

2.4 模糊自适应规则设计

预测控制通过计算控制对象的预测状态矩阵，来对目标函数进行滚动优化以及反馈校正来实现对被控对象的控制。预测控制效果与预测时长有关。同时，从之前的预测状态矩阵 (式 (22)) 可知，本喷雾机的预测模型矩阵的维度为 $[3N_p, 3N_p]$ ，因此预测控制的运算复杂度与预测时长呈指数相关。当其预测时长较长时，会增加控制系统的运算负担，降低控制效率。当预测时长较短时，虽具有运算量小的特点，但其鲁棒性低，易受到干扰而出现波动。为解决这一问题，本文提出了一种基于实时误差的模糊自适应调整预测时长的方法，如图 8 所示。

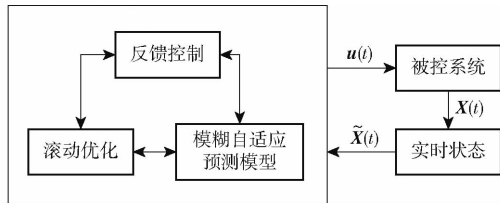


图 8 模糊自适应预测控制原理图

Fig. 8 Schematic of fuzzy direct-adaptive predictive control

2.4.1 输入输出变量模糊化

以实际状态和目标状态距离的误差 e 以及误差 e 相对于当前速度 v 的变化率 d_e 为模糊控制器的输入，设预测时长参数 N_p 为模糊控制器的输出。其中， $e = \sqrt{(y - y_r)^2 + (x - x_r)^2}$ ， $d_e = \dot{e}/v$ 。

综合喷雾机的实际性能,对输入输出变量进行模糊化处理:

- (1)误差 e ,基本论域为 $[0\text{ m},10\text{ m}]$,量化等级为 $\{\text{ZE}(\text{零}),\text{PS}(\text{正小}),\text{PM}(\text{正中}),\text{PB}(\text{正大})\}$,量化因子为1。
- (2)误差相对于速度的变化率 d_e ,基本论域为 $[-1,1]$,量化等级为 $\{\text{N}(\text{负}),\text{ZE}(\text{零}),\text{P}(\text{正})\}$,量化因子为1。
- (3)预测时长 N_p ,基本论域为 $[20,60]$,量化等级为 $\{\text{S}(\text{小}),\text{MS}(\text{中小}),\text{M}(\text{中}),\text{MB}(\text{中大}),\text{B}(\text{大})\}$,比例因子为1。

2.4.2 模糊规则设计

文献[28]提出,预测控制时长较长的控制系统抗干扰性能好,但运算复杂度高,运算用时长,而预测控制时长较短的控制系统运算复杂度低,但抗干扰性能较差。同时在跟踪误差稳定之后,预测时长不同的控制系统的控制效果相近。在之后的仿真试验中发现,应用预测控制时长较长的控制系统在进行轨迹跟踪时,波动小,超调小但快速性较低。而应用预测控制时长较短的控制系统在进行轨迹跟踪时,快速性好,但会出现较大的超调量。综合以上特性,设计了如下模糊规则:

- (1)在误差稳定在一个较小的范围时,表明喷雾机轨迹跟踪稳定,此时输出较短的预测时长来降低系统的复杂度。
- (2)在误差小且误差变化率为正数时,说明在跟踪误差较小时由于总扰动,使误差增大,此时输出较长的预测时长来提高轨迹跟踪的抗干扰能力。在误差小且误差变化率为负数时,提高输出的预测时长来防止跟踪时出现超调的现象。
- (3)在误差大且误差变化率为正数时,输出较长的预测时长来保证轨迹跟踪的稳定性。在误差大且误差变化率为负数时,输出较短的预测时长来提高轨迹跟踪的快速性。

根据输入输出的模糊化设计以及模糊规则的设计原则可以设计模糊规则表(表1)以及模糊规则曲面图(图9)。

表 1 模糊控制规则

Tab.1 Fuzzy control regulation

e	d_e		
	N	ZE	P
ZE	S	S	B
PS	B	MB	B
PM	S	MS	MB
PB	S	M	B

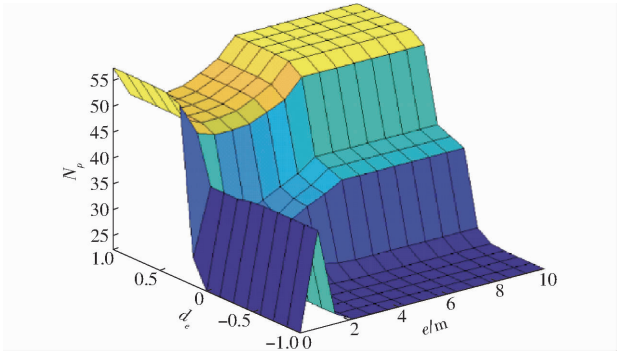


图 9 模糊规则曲面

Fig.9 Surface of fuzzy regulation

3 仿真试验

为测试所设计的预测控制器的性能,进行了仿真试验。综合同步转向高地隙喷雾机的相关参数,仿真试验的基础参数如下:

车辆左右轮距 $L=1\,580\text{ mm}$,车辆左右轴距 $l=1\,510\text{ mm}$,车辆前后轴距 $D=3\,200\text{ mm}$,在转场过程中正常道路的行驶速度 V 为 $0\sim10\text{ m/s}$,进行喷药作业时行驶速度 V 为 $0\sim3\text{ m/s}$,定参预测控制器的预测时长 N_p 为 60 及 25,控制时长 N_c 为 50 及 20,松弛因子 $\tau=5$,离散时长 $T=0.05\text{ s}$,在转场过程中正常道路行驶时的控制量约束为 $[-10\quad -10]^T\leq u(k)\leq[10\quad 10]^T$,在进行喷药作业时的控制量约束为 $[-3\quad -3]^T\leq u(k)\leq[3\quad 3]^T$,控制量变化率的约束为 $[-0.005\quad -0.005]^T\leq \Delta u(k)\leq[0.005\quad 0.005]^T$,喷雾机的初始状态为 $X=[0\quad 0\quad 0]^T$ 。

将文中设计的模糊自适应预测控制算法即模糊自适应模型预测控制(Model predictive control, MPC)以及预测控制算法用 S 函数进行封装,并且在 Matlab/Simulink 平台中建立车辆的运动学模型,最后完成仿真平台的搭建。

3.1 预测控制器控制性能验证

为了验证模糊自适应预测控制器的控制效果和性能,以不同的轨迹为参考目标,与不同预测时长的定参预测控制器进行对比仿真试验。在本次试验中,分别以初始误差为 5 m 的直线轨迹(模拟变道情景)以及半径为 25 m 的圆形轨迹(模拟转向情景)跟踪为例,进行轨迹跟踪仿真试验,其结果如图 10 所示。

从图 10b 与图 10d 中可以看出,采用不同预测时长的定参预测控制器在直线轨迹和圆形轨迹的跟踪效果未稳定时,应用预测时长较长的控制器的喷雾机没有超调现象,并且稳定前的波动较少,跟踪 2 种路径的稳定时长分别为 9.03、12.53 s;应用预测时长较短的控制器的喷雾机虽然响应较快,但达到

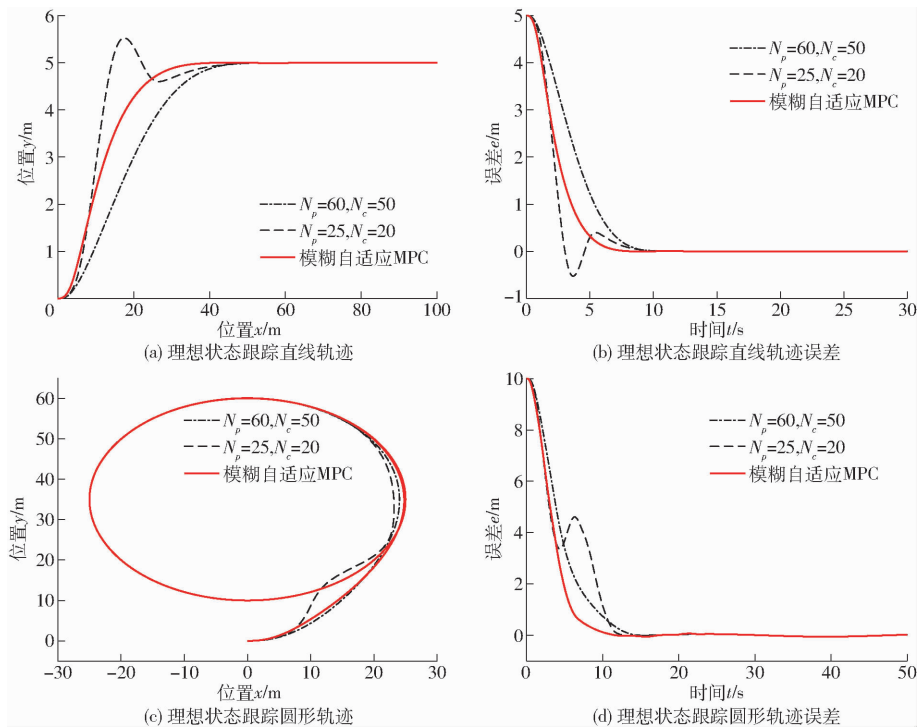


图 10 理想状态轨迹跟踪仿真结果

Fig. 10 Path tracking simulation results in ideal state

误差零点之后出现了超调现象并产生了波动,跟踪 2 种路径的稳定时长分别为 8.23、11.75 s。从采用模糊自适应预测控制器的喷雾机响应可以看出,它在跟踪直线轨迹以及圆形轨迹的稳定时长分别为 6.63、9.62 s。综合试验结果可以看出,模糊自适应预测控制器兼具了轨迹跟踪的快速性与稳定性,其控制效果较定参的预测控制器更好。

在实践中,可以综合实际需求来确定模糊规则,从而达到在保证车辆完成相关工作的前提下,提高控制效率与控制效果的目的。

3.2 预测控制器鲁棒性能验证

对于相关参数变化较少的控制器来说,由车辆定位系统反馈的车辆位置以及航向角的误差,会使得控制器的工作效果下降。由于高地隙喷雾机大多在田间工作,由工作路况不平稳引起的喷雾机侧滑、定位信息反馈不准确的问题会更加突出。模糊自适应预测控制器是通过对当前车辆位置信息的状态反馈来修改自身的控制参数并对控制量进行优化,因此,模糊自适应预测控制器在这种具有不确定性干扰的条件下具有一定的鲁棒性。

在对控制器鲁棒性的验证试验中,将喷雾机状态反馈的干扰用一种白噪声来表示,以此来分析控制器的鲁棒性。在仿真试验中,用来模拟定位信息干扰的白噪声的均值设定为 0,标准差设定为 0.3 m,模糊自适应预测控制器与定参预测控制器的

参数与之前一致,分别对直线轨迹以及圆形轨迹进行跟踪。试验结果如图 11 所示。

对仿真试验数据进行分析,得出 3 种预测控制器的控制效果如表 2、3 所示。从表 2、3 可以看出,在对 2 种不同路径进行跟踪时,喷雾机相对于参考轨迹的误差远小于车辆位置反馈信息干扰。

从被控对象自身实际的状态反馈来看,在受到干扰时,预测控制器不会因此出现输出控制量的突变,因此车辆的实际状态虽然会受到一定的干扰,但是相对于反馈干扰,被控对象的跟踪效果受到的影响较小。通过对比,相对于定参预测控制器,模糊自适应预测控制器在受到相同干扰的情况下,误差均值以及方差更小,跟踪效果更好。

因此,模糊自适应预测控制器在位置反馈受到干扰时,具有较强的鲁棒性。

4 场地试验

4.1 试验平台

本试验以 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速度控制器、姿态控制器、Modbus 通信系统以及前后桥转向角传感器组成的车辆下层控制系统。试验中,采用差分 GPS 定位系统进行喷雾机的定位。通过实现喷雾机控制系统、导航定位系统,以及模糊自适应控制系统与轨迹规划系统的相互通信,来建立喷雾机轨迹跟踪系统“上层-下层”之间的联系。在本试验中,利用

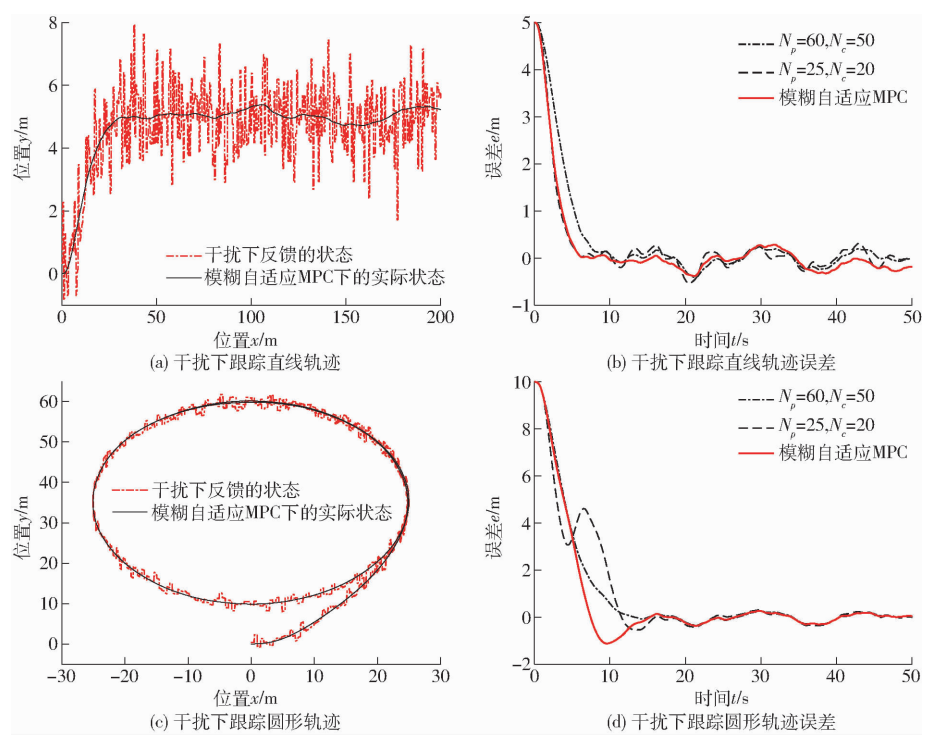


图 11 干扰状态下轨迹跟踪仿真结果

Fig. 11 Path tracking simulation results in disturbance state

表 2 干扰下跟踪直线轨迹仿真结果

Tab.2 Simulation results of straight path tracking simulation results in disturbance state			m
控制方式	误差平均值	误差标准差	
$N_p=60,N_c=50$	0.108	0.084	
$N_p=25,N_c=20$	0.129	0.143	
模糊自适应	0.105	0.075	

表 3 干扰下跟踪圆形轨迹仿真结果

Tab.3 Simulation results of circular path tracking simulation results in disturbance state			m
控制方式	误差平均值	误差标准差	
$N_p=60,N_c=50$	0.120	0.092	
$N_p=25,N_c=20$	0.141	0.117	
模糊自适应	0.111	0.081	

(路面平整、硬度适中、略有倾斜), 面积约为 50 m×50 m, 有较大的缓冲空间。试验场景如图 13 所示。

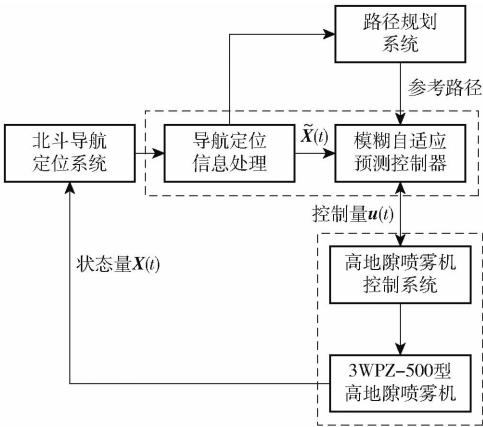


图 12 高地隙喷雾机轨迹跟踪系统

Fig. 12 Path tracking system of high clearance sprayer



图 13 试验场景图

Fig. 13 Picture of experimental scene

嵌入式计算机来进行导航定位信息处理以及承担模糊自适应预测控制器的功能。嵌入式计算机通过 RS-232 接口获取从差分 GPS 定位系统传输来的数据,由 Matlab 中的导航信息处理程序对接收的数据进行处理,并利用模糊自适应预测控制器生成对应的控制策略;然后将控制信息经由 Modbus 协议发送至 3WPZ-500 型高地隙喷雾机;最后喷雾机执行相应动作完成轨迹跟踪任务。由此,设计出基于 3WPZ-500 型高地隙喷雾机的轨迹跟踪系统如图 12 所示。

试验场地为江苏大学图书馆广场(32.119 794 610 9°N, 119.302 928 414 4°E)。试验场地的路面为石板路

1. 基站 2. 嵌入式计算机 3. 3WPZ-500 型高地隙喷雾机 4. 接收机

4.2 直线轨迹跟踪试验

在进行直线型轨迹跟踪试验时,以喷雾机的初始位置为原点,建立二维坐标系。之后,基于此二维坐标系进行目标轨迹的设计。在试验中分别采用初始误差为 2.5 m 和 5 m 的直线为目标轨迹。设计喷雾机的初始位置坐标为(0,0),初始航向角为 0°,目标左侧轮胎速度 $V_1 = 1$ m/s,目标右侧轮胎速度 $V_2 = 1$ m/s。直线轨迹跟踪试验结果如图 14 所示。

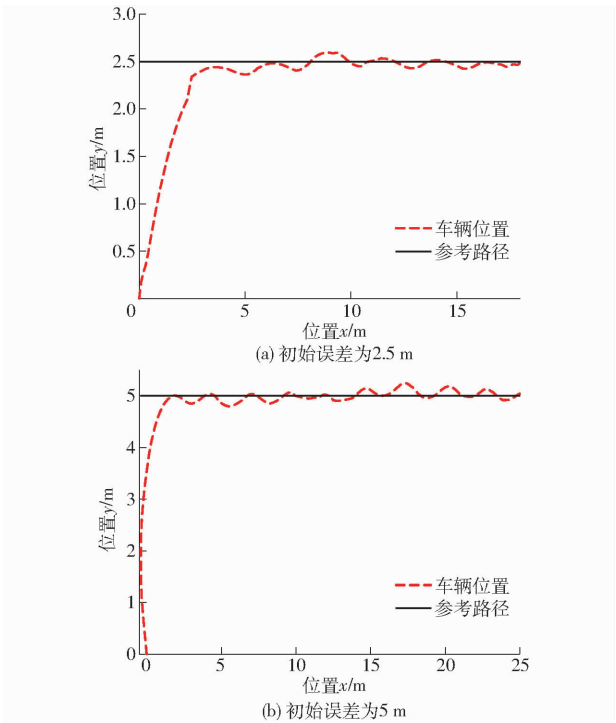


图 14 喷雾机直线轨迹跟踪结果

Fig. 14 Straight path tracking results of sprayer

直线轨迹跟踪稳定后,通过对差分 GPS 定位系统所记录的数据与目标路径进行对比分析,得出喷雾机直线跟踪结果如表 4 所示。

表 4 喷雾机直线轨迹跟踪数据

Tab.4 Straight path tracking data of sprayer m			
初始误差	最大误差	误差平均值	标准差
2.5	0.095 6	0.044 2	0.051 8
5.0	0.111 8	0.060 2	0.088 2

这 2 个组别的稳定时间分别为 4.8、6.4 s,其稳定时间较短,响应的快速性均较高。

4.3 圆形轨迹跟踪试验

基于之前建立的二维坐标系进行圆形轨迹设计。在试验中采用距离半径为 3 m 的圆形轨迹为目标轨迹。设计喷雾机的初始位置坐标为(0,0),初始航向角为 -90°,目标左侧轮胎速度 $V_1 = 1.209$ m/s,目标右侧轮胎速度 $V_2 = 0.791$ m/s。圆形轨迹跟踪试验结果如图 15 所示。

通过对差分 GPS 定位系统所记录的数据与目

标路径进行对比分析,得出喷雾机圆形路径跟踪的最大误差为 0.117 9 m,绝对误差为 0.090 1 m,标准差为 0.043 6 m。

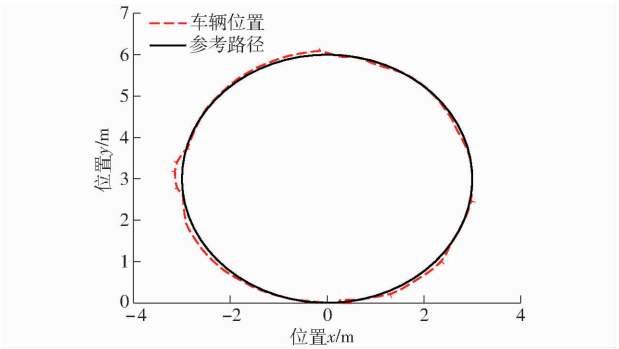


图 15 喷雾机圆形轨迹跟踪结果

Fig. 15 Compound path tracking results of sprayer

4.4 讨论

综合以上数据,可以看出喷雾机以相同的速度进行圆形轨迹跟踪时的准确性略低于直线轨迹跟踪时的准确性。出现这样的现象一方面是由于喷雾机自身对于速度与姿态的响应有一定的延时,这一问题在需要实时更改喷雾机姿态的轨迹跟踪试验中尤为突出;另一方面,由于在进行预测矩阵的设计时,对喷雾机的运动学模型进行了线性化处理,在进行转向运动时由于航向角的变化以及喷雾机自身刚性结构的影响,其非线性、强耦合的特点愈发突出,使得预测模型与喷雾机的实际模型有了较大的出入,因此降低了圆形轨迹跟踪的准确性。

综合喷雾机在直线轨迹以及圆形轨迹的跟踪结果,可以发现虽然其轨迹跟踪的稳定性较好,但是在稳定后会存在一定的波动。除了喷雾机自身控制系统的问题,一方面是由于差分 GPS 定位系统在进行定位工作时的数据不稳定,这会对轨迹跟踪试验产生一定的干扰;另一方面,因为试验场地有一定的坡度,当喷雾机在这样的场地上行驶时,由斜坡产生的侧向力会对其自身的姿态造成干扰。

综合来看,喷雾机以上 3 组试验的误差分别为 0.044 2、0.060 2、0.090 1 m,标准差分别为 0.051 8、0.088 2、0.043 6 m。其误差较小,稳定性较高,可以满足实际生产工作的需求。

5 结论

(1) 针对同步转向高地隙喷雾机这种特殊结构的农业车辆建立了运动学模型。为简化控制器的设计,以本高地隙喷雾机的转向特点以及结构特点为基础,建立了简化运动学模型“平衡车模型”。并在简化模型的基础上,综合实际工况完成了模糊自适

应预测控制器设计,并分别进行了仿真试验验证以及场地试验验证。

(2)基于 Matlab/Simulink 平台进行了理想状态以及环境具有干扰的状态下,分别采用模糊自适应预测控制器以及定参预测控制器进行跟踪直线轨迹以及跟踪圆形轨迹的对照试验。从试验结果来看,在理想状态时,所设计的模糊自适应预测控制器可以实现在直线轨迹以及圆形轨迹上的完全跟踪,且

相较于定参预测控制器,它兼具了跟踪快速性和稳定性。在具有干扰的情况下,所设计的模糊自适应预测控制器可以较好地抵抗外界的干扰,具有较强的鲁棒性。

(3)在场地试验中,喷雾机以 1 m/s 的速度分别对直线轨迹与圆形轨迹进行了跟踪。从跟踪结果来看,模糊自适应预测控制器的各种性能均得到了验证,其跟踪结果也可以很好地满足实际需求。

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.
GAO Yanlei, ZHANG Zhengyan, WANG Zhigang. Does urbanization improve agricultural mechanization—panel evidence from 31 provinces in China[J]. Economic Survey, 2020,37(3):37-44. (in Chinese)
- [2] 谭晨佼,李铁林,王东飞,等. 农业机械自动导航技术研究进展[J]. 农机化研究,2020,42(5):7-14,32.
TAN Chenjiao, LI Yilin, WANG Dongfei, et al. Review on automatic navigation technologies of agricultural machinery[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2020,42(5):7-14,32. (in Chinese)
- [3] 杨阳阳. 基于模型预测控制的路径跟踪控制方法研究[D]. 镇江:江苏大学,2018.
YANG Yangyang. Research on path tracking control method based on model predictive control[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2018. (in Chinese)
- [4] HAN Shufeng, HE Yong, FANG Hui. Recent development in automatic guidance and autonomous vehicle for agriculture: a review [J]. Journal of Zhejiang University (Agric. & Life Sci.), 2018,44(4):381-391,515.
- [5] 谢斌,武仲斌,毛恩荣. 农业拖拉机关键技术发展现状与展望[J/OL]. 农业机械学报,2018,49(8):1-17.
XIE Bin, WU Zhongbin, MAO Enrong. Development and prospect of key technologies on agricultural tractor [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018,49(8):1-17. http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180801&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.08.001. (in Chinese)
- [6] ALI R, NOBORU N, HIROSHI O, et al. A review of autonomous agricultural vehicles [J]. Journal of Terramechanics, 2020, 91:155-183.
- [7] ORTIZ B V, BALKCOM K B, DUZY L, et al. Evaluation of agronomic and economic benefits of using RTK-GPS-based auto-steer guidance systems for peanut digging operations[J]. Precision Agriculture, 2013, 14(4):357-375.
- [8] ZHU 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.
- [9] 戴增辉,何凤琴. 智能农机自动导航系统应用研究[J]. 农机化研究,2018,40(2):202-206.
DAI Zenghui, HE Fengqin. Research on the application of intelligent automatic navigation system of agricultural machinery[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2018,40(2):202-206. (in Chinese)
- [10] 张漫,季宇寒,李世超,等. 农业机械导航技术研究进展[J/OL]. 农业机械学报,2020,51(4):1-18.
ZHANG Man, JI Yuhang, LI Shichao, et al. Research progress of agricultural machinery navigation technology [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020,51(4):1-18. http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20200401&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.04.001. (in Chinese)
- [11] 孟宇,汪钰,顾青,等. 基于预见位姿信息的铰接式车辆 LQR-GA 路径跟踪控制[J/OL]. 农业机械学报,2018,49(6):375-384.
MENG Yu, WANG Yu, GU Qing, et al. LQR-GA path tracking control of articulated vehicle based on predictive information [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018,49(6):375-384. http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20180645&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.06.045. (in Chinese)
- [12] 丁幼春,何志博,夏中州,等. 小型履带式油菜播种机导航免疫 PID 控制器设计[J]. 农业工程学报,2019,35(7):12-20.
DING Youchun, HE Zhibo, XIA Zhongzhou, et al. Design of navigation immune controller of small crawler-type rape seeder [J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(7):12-20. (in Chinese)
- [13] 张雁,李彦明,刘翔鹏,等. 水稻直播机自动驾驶模糊自适应控制方法[J/OL]. 农业机械学报,2018,49(10):30-37.
ZHANG Yan, LI Yanming, LIU Xiangpeng, et al. Fuzzy adaptive control method for autonomous rice seeder [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018,49(10):30-37. http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20181004&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.10.004. (in Chinese)
- [14] 李逃昌,胡静涛,高雷,等. 基于模糊自适应纯追踪模型的农业机械路径跟踪方法[J/OL]. 农业机械学报,2013,44(1):

- 205 – 210.
- LI Taochang, HU Jingtao, GAO Lei, et al. Agricultural machine path tracking method based on fuzzy adaptive pure pursuit model[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(1): 205 – 210. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20130139&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.01.039. (in Chinese)
- [15] 唐小涛, 陶建峰, 李志腾, 等. 自动导航插秧机路径跟踪系统稳定性模糊控制优化方法[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(1): 29 – 34.
- TANG Xiaotao, TAO Jianfeng, LI Zhiteng, et al. Fuzzy control optimization method for stability of path tracking system of automatic transplanter[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(1): 29 – 34. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20180103&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.01.003. (in Chinese)
- [16] 宋彦, 张羊阳, 姚琦, 等. 基于启发式动态规划的履带机器人路径跟随控制方法[J/OL]. 农业机械学报, 2019, 50(11): 24 – 33.
- SONG Yan, ZHANG Yangyang, YAO Qi, et al. Path following control method of tracked mobile robot based on heuristic dynamic programming[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(11): 24 – 33. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20191103&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.11.003. (in Chinese)
- [17] 刘兆朋, 张智刚, 罗锡文, 等. 雷沃 ZP9500 高地隙喷雾机的 GNSS 自动导航作业系统设计[J]. 农业工程学报, 2018, 34(1): 15 – 21.
- LIU Zhaopeng, ZHANG Zhigang, LUO Xiwen, et al. Design of automatic navigation operation system for Lovol ZP9500 high clearance boom sprayer based on GNSS[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(1): 15 – 21. (in Chinese)
- [18] 张炳南. 4WID 高地隙喷雾机设计与运动控制研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2019.
- ZHANG Bingnan. Design and motion control of 4WID high-clearance sprayer[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2019. (in Chinese)
- [19] XU S, PENG H. Design, analysis, and experiments of preview path tracking control for autonomous vehicles [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2020, 21(1): 48 – 58.
- [20] HE H, HUI J, CHAO S, et al. Stochastic model predictive control of air conditioning system for electric vehicles: sensitivity study, comparison, and improvement [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2018, 14(9): 4179 – 4189.
- [21] 王辉, 王桂民, 罗锡文, 等. 基于预瞄追踪模型的农机导航路径跟踪控制方法[J]. 农业工程学报, 2019, 35(4): 11 – 19.
- WANG Hui, WANG Guimin, LUO Xiwen, et al. Path tracking control method of agricultural machine navigation based on aiming pursuit model[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(4): 11 – 19. (in Chinese)
- [22] PENG H, WANG W, AN Q, et al. Path tracking and direct yaw moment coordinated control based on robust MPC with the finite time horizon for autonomous independent-drive vehicles [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2020, 69(6): 6053 – 6066.
- [23] HU C, WANG R, YAN F, et al. Output constraint control on path following of four-wheel independently actuated autonomous ground vehicles[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2016, 65(6): 4033 – 4043.
- [24] WANG M, LUO J, WALTER U. An on-linear model predictive controller with obstacle avoidance for a space robot [J]. Advances in Space Research, 2016, 57(8): 1737 – 1746.
- [25] 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/OL]. 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. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20201142&flag=1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2020.11.042. (in Chinese)
- [26] 何思伟. 四轮独立电驱动高地隙喷雾机的建模与辨识[D]. 镇江: 江苏大学, 2020.
- HE Siwei. Modeling and identification of four-wheel independent electrically driven high clearance sprayer[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2020. (in Chinese)
- [27] 龚建伟, 姜岩, 徐威. 无人驾驶车辆模型预测控制[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2014.
- [28] 张万枝, 白文静, 吕钊钦, 等. 线性时变模型预测控制器提高农业车辆导航路径自动跟踪精度[J]. 农业工程学报, 2017, 33(13): 104 – 111.
- ZHANG Wanzhi, BAI Wenjing, LÜ Zhaoqin, et al. Linear time-varying model predictive controller improving precision of navigation path automatic tracking for agricultural vehicle[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(13): 104 – 111. (in Chinese)