基于模糊逻辑控制的滑移转向底盘避障控制方法

李 磊[1,2], 佘小明[1,2*], 唐兴隆[1,2], 张 涛[1,2], 董继伟[1,2],
古愉川[1,2], 周晓晖[1,2], 冯 伟[1,2], 杨清慧[1,2]

(1. 重庆市农业科学院农业机械研究所,重庆 401329,中国;
2. 农业农村部西南山地智慧农业重点实验室(部省共建),重庆 401329,中国)

摘 要: [**目的/意义**]目前,针对同时实现自动驾驶底盘轨迹跟踪和避障控制的研究还存在跟踪性能不足、执行器易抖动和系统复杂度过高的问题,提出了一种简洁算法同时实现底盘的轨迹跟踪和避障控制。[**方法**]利用模糊并行分布式补偿策略设计全局Takagi-Sugeno(T-S)模糊控制器,设计线性二次型调节器(Linear Quadratic Regulator, LQR)控制器作为每个局部系统的控制器,实现底盘的轨迹跟踪。在全局开环T-S模糊系统中设计一个新的LQR_{obs}控制器用于实时动态轨迹规划,实现避障控制,并且设计了一个模糊控制器来动态调整增益矩阵。利用模糊融合控制器将两个控制器联合起来形成最终的控制输入。[**结果和讨论**]测试表明,在没有障碍物时,轨迹跟踪的横纵向跟踪误差分别为0.041 m和0.052 m。在有障碍物时,该方法可以实时生成参考轨迹实现避障控制。设计的模糊控制器可以根据工况实时调整LQR_{obs}控制器的增益矩阵,与增益矩阵固定的LQR_{obs}控制器相比,其跟踪误差降低了33.9%。[**结论**]该方法利用简洁的算法结构同时实现了底盘的轨迹跟踪和避障控制,为底盘的轨迹跟踪和避障控制研究提供了一种新的参考。

关键词: 滑移转向;轨迹跟踪;避障控制;LQR;模糊逻辑控制
中图分类号: TP272 **文献标识码:** A **文章编号:** SA202408003

引用格式:李磊, 佘小明, 唐兴隆, 张涛, 董继伟, 古愉川, 周晓晖, 冯伟, 杨清慧. 基于模糊逻辑控制的滑移转向底盘避障控制方法[J]. 智慧农业(中英文), 2026, 8(1): 213-225. DOI: 10.12133/j.smartag.SA202408003

LI Lei, SHE Xiaoming, TANG Xinglong, ZHANG Tao, DONG Jiwei, GU Yuchuan, ZHOU Xiaohui, FENG Wei, YANG Qinghui. Obstacle Avoidance Control Method of Electric Skid-Steering Chassis Based on Fuzzy Logic Control[J]. Smart Agriculture, 2026, 8(1): 213-225. DOI: 10.12133/j.smartag.SA202408003 (in Chinese with English abstract)

0 引 言

随着信息化和智能化的不断普及,无人驾驶农机得到广泛应用,在缓解人口老龄化,乡镇空心化等现象时效果显著[1]。无人驾驶农机可以降低30%~60%的用工成本,作业效率提升20%~60%,显著降低驾驶人员的工作强度。并且无人驾驶农机还可以利用先进的传感器技术、定位技术实现精准作业,提高作业精度[2]。农机自动驾驶技术分为环境感知技术、路径决策与规划技术、路径跟踪控制技术[3,4]。路径跟踪控制作为关键技术之一,良好的控制技术可以提高农机作业的准确性和稳定性[5]。因此,本研究将针对路径跟踪控制技术进行研究。

目前,针对农机装备的跟踪控制方法主要有基于数学模型的方法和基于控制理论的方法[6,7]。其中,数学模型的方法通过农机与参考路径的几何模型计算出农机的期望前轮转角与横摆角速度实现控制,其中以Pure Pursuit算法[8-10]和Stanley算法[11-13]运用较为广泛;基于控制理论的方法主要有线性二次型调节器(Linear Quadratic Regulator, LQR)[14-16]、Proportion Integral Differential(PID)[17-19]、模型预测控制(Model Predictive Con-

收稿日期:2024-08-06
基金项目:重庆市市级财政科技创新(cqaas2023sjczsy006,KYLX20240500075,KYLX20240500039);重庆市技术创新与应用发展专项面上项目(CSTB2023TIAD-GPX0037);重庆市科研机构绩效激励引导专项(cstc2022jxjl80008)
作者简介:李 磊,硕士,工程师,研究方向为智能农机装备自动控制。E-mail:lileiCBD@163.com
*通信作者:佘小明,正高级工程师,研究方向为无人驾驶农机装备研制。E-mail:244471221@qq.com
copyright©2026 by the authors (登录www.smartag.net.cn免费获取电子版全文)

trol, MPC)[20-22]、模糊逻辑控制(Fuzzy Logic Control)[23]等。

以上控制算法没有考虑路径中有障碍物的情况，这与实际作业工况不符。目前也有一些考虑避障的跟踪控制研究，但大都是将避障和跟踪作为两个独立的模块进行设计，增加了系统的冗余度，降低了控制效率。GUTIÉRREZ等[24]采用了模块化且可扩展的航路点跟踪控制器，实现底盘的避障和跟踪控制。但该底盘的横向控制器缺少约束，计算结果容易超过执行器的最大允许值。DANG等[25]基于Backstepping技术提出了一种用于轨迹跟踪和避障的自适应控制器，采用协作方法开发，但该方法存在设计过程复杂、实施困难的问题。

选取无人驾驶滑移转向底盘作为研究对象，与普通的前轮转向底盘相比，采用滑移转向的底盘可以实现小角度的转弯半径，甚至是原地转向和掉头，在丘陵山地等狭窄的作业场景中应用广泛[26]。考虑到底盘在作业场景中会有作业操作人员和其他农业机械存在，容易与底盘产生碰撞，这些外界因素对于底盘来说都是障碍物。为了使底盘能够顺利完成作业，必须在轨迹跟踪的过程中实时躲避参考路径中的障碍物，并顺利回到参考轨迹上。

因此，针对无人驾驶滑移转向底盘提出了一种同时实现轨迹跟踪和避障的控制方法。首先，设计了底盘的运动学误差模型。其次，利用T-S(Takagi-Sugeno)模糊模型和并行分布式补偿(Parallel Distributed Compensation, PDC)算法设计了T-S模糊控制器，并对T-S模糊控制器中的每个局部系统都使用了LQR反馈控制器来实现底盘的轨迹跟踪功能。当底盘面对障碍物时，在全局开环T-S模糊系统中设计了LQR_{obs}控制器来进行动态轨迹规划，实现避障控制，并设计了模糊控制器来实时调整其增益矩阵($\boldsymbol{Q}$，$\boldsymbol{R}$)。为了使底盘既能躲避障碍物又不丢失轨迹跟踪的能力，设计了模糊融合控制器将跟踪速度和避障速度联合起来。最后，对该方法进行仿真测试和试验测试。

1 模型设计

1.1 运动学模型设计

图1为前轮转向底盘的运动学模型。x，y表示纵向位置和横向位置(m)，θ为航向角(rad)，ω为横摆角速度(rad/s)，v为底盘的速度(m/s)，d为底盘的轴距(m)，δ为前轮转角(°)。

在惯性坐标系XOY下，通过运动的合成与分解

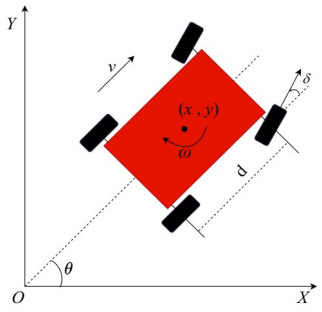


图1 前轮转向底盘运动学模型

Fig. 1 Kinematic model of the front-steering chassis

可得运动学模型，如公式(1)所示。

$$\begin{bmatrix}\dot{x}\\ \dot{y}\\ \dot{\theta}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\cos\theta\\ \sin\theta\\ \tan\delta/\mathrm{d}\end{bmatrix}v \tag{1}$$

选取[v，ω]作为轨迹跟踪的控制量，利用公式(2)。将公式(1)转换为公式(3)的形式。

$$\omega = v\tan\delta/\mathrm{d} \tag{2}$$

$$\begin{bmatrix}\dot{x}\\ \dot{y}\\ \dot{\theta}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\cos\theta & 0\\ \sin\theta & 0\\ 0 & 1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}v\\ \omega\end{bmatrix} \tag{3}$$

滑移转向底盘与差速转动类似，将其简化为两轮差速转动机器人，如图2所示。

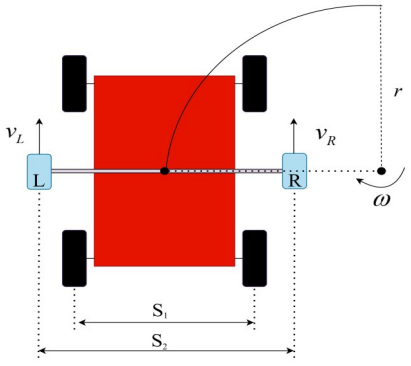


图2 滑移转向底盘运动学模型

Fig. 2 Kinematic model of skid-steering chassis

该等效模型以质心和曲率中心为横轴，假设虚拟左右轮的位置位于L点和R点。根据文献[27]中关于滑移转向底盘运动学模型设计的内容，可以得到公式(4)的等式：

$$r=\frac{v}{\omega}=\frac{(v_L+v_R)\mathrm{s}_2}{2(v_R-v_L)} \tag{4}$$

式中：s_2为虚拟轴距，m；v_L和v_R为虚拟左右轮的速度，m/s；r为曲率半径，m。

等效运动学模型是基于底盘的虚拟左右轮进行设计的，其质心处的速度和横摆角速度可以由虚拟

左右轮的速度进行计算，如公式（5）所示。

$$\begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dfrac{v_R + v_L}{2} \\ \dfrac{v_R - v_L}{s_2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dfrac{1}{2} & \dfrac{1}{2} \\ \dfrac{1}{s_2} & \dfrac{-1}{s_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_R \\ v_L \end{bmatrix} \tag{5}$$

其逆运动方程为公式（6）：

$$\begin{bmatrix} v_R \\ v_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v + \dfrac{s_2}{2}\omega \\ v - \dfrac{s_2}{2}\omega \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \dfrac{s_2}{2} \\ 1 & -\dfrac{s_2}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix} \tag{6}$$

将公式（5）代入公式（3）可以得到基于左右轮速的运动学模型，如公式（7）所示。

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dfrac{\cos\theta}{2} & \dfrac{\cos\theta}{2} \\ \dfrac{\sin\theta}{2} & \dfrac{\sin\theta}{2} \\ \dfrac{1}{s_2} & \dfrac{-1}{s_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_R \\ v_L \end{bmatrix} \tag{7}$$

1.2 运动学误差模型设计

为设计控制器，需要将运动学模型中的状态变量设计为底盘与参考路径之间的位置、方向误差。将参考路径中的参考点同样看成一辆底盘，那么这个误差为当前位置底盘与参考路径上底盘之间的误差，如图3所示。

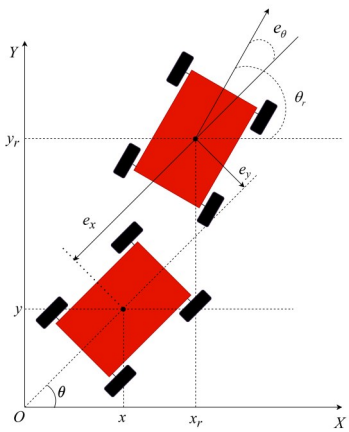


图3　滑移转向底盘运动学误差模型

Fig. 3　Kinematic error model of skid-steering chassis

从图3可以得到滑移转向底盘的误差表达式如公式（8）所示。

$$\begin{bmatrix} e_x \\ e_y \\ e_\theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta & 0 \\ -\sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_r - x \\ y_r - y \\ \theta_r - \theta \end{bmatrix} \tag{8}$$

式中：x_r(m)，y_r(m)，θ_r(rad)为参考位置和航向；e_x(m)，e_y(m)，e_θ(rad)为位置误差和航向角误差。联合公式（3）可以得到运动学误差模型，如公式（9）所示：

$$\begin{bmatrix} \dot{e}_x \\ \dot{e}_y \\ \dot{e}_\theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos e_\theta & 0 \\ \sin e_\theta & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_r \\ \omega_r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -1 & e_y \\ 0 & -e_x \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \boldsymbol{u} \tag{9}$$

式中：v_r为参考点的速度，m/s；ω_r为参考点的横摆角速度，rad/s；$\boldsymbol{u}$为控制输入，如公式（10）所示。

$$\boldsymbol{u} = \boldsymbol{u}_F + \boldsymbol{u}_B = \begin{bmatrix} v_r \cos e_\theta \\ \omega_r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix} \tag{10}$$

式中：$\boldsymbol{u}_F$为系统的前馈控制输入，由参考路径生成；$\boldsymbol{u}_B$为反馈控制输入。

联合公式（5）、公式（9）和公式（10）可得公式（11）所示的滑移转向底盘运动学误差模型表达式。

$$\begin{bmatrix} \dot{e}_x \\ \dot{e}_y \\ \dot{e}_\theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & (v_{R_r} - v_{L_r})/s_2 & 0 \\ -(v_{R_r} - v_{L_r})/s_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_x \\ e_y \\ e_\theta \end{bmatrix} + x \begin{bmatrix} 0 \\ \sin e_\theta/2 \\ 0 \end{bmatrix} (v_{R_r} + v_{L_r}) + \begin{bmatrix} -\dfrac{1}{2} & -\dfrac{1}{2} \\ 0 & 0 \\ -\dfrac{1}{s_2} & \dfrac{1}{s_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_R \\ v_L \end{bmatrix} \tag{11}$$

式中：v_{R_r}和v_{L_r}分别为参考点的左右轮速度，m/s，由轨迹规划模块提前给出。

对公式（11）进行线性化操作（$e_x = e_y = e_\theta = 0$），可得公式（12）所示的滑移转向底盘运动学误差模型表达式。

$$\begin{bmatrix} \dot{e}_x \\ \dot{e}_y \\ \dot{e}_\theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & (v_{R_r} - v_{L_r})/s_2 & 0 \\ -(v_{R_r} - v_{L_r})/s_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_x \\ e_y \\ e_\theta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -1/2 & -1/2 \\ 0 & 0 \\ -1/s_2 & 1/s_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_R \\ v_L \end{bmatrix} \tag{12}$$

公式（12）的状态空间形式为公式（13）。

$$\dot{\boldsymbol{e}} = \boldsymbol{A}\boldsymbol{e} + \boldsymbol{B}\boldsymbol{u} \tag{13}$$

式中：$\boldsymbol{e}$为底盘状态量的误差矩阵；$\boldsymbol{A}$和$\boldsymbol{B}$为系数矩阵。当v_L或v_R非零时该系统是可控的。v_L和v_R在其范围内的不同值可以生成不同的线性误差模型，这些模型可以用来设计T-S模糊模型。

2　轨迹跟踪和避障控制系统设计

底盘控制系统设计的主要目的是实现底盘的轨迹跟踪和避障控制。首先设计T-S模糊模型，然后利用PDC算法设计底盘的轨迹跟踪控制器，并且利用LQR控制器获取每个子模块的优化增益。再次，

设计LQR_{obs}避障控制器，并且该控制器的增益矩阵由一个模糊控制器进行实时调节。最后，通过一个模糊融合控制器将这两个控制器的输出联合起来，形成最终的控制输入。图4为底盘的轨迹跟踪和避障系统控制框图。

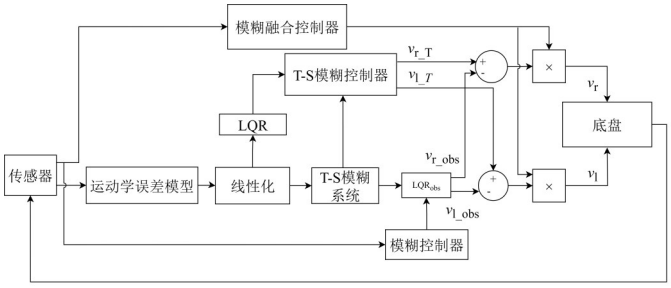


图4 轨迹跟踪和避障控制系统框图

Fig. 4 Diagram block of trajectory tracking and obstacle avoidance system

2.1 T-S模糊模型

在实际工况中，由于系统的复杂性、变量多和外部干扰等因素导致难以正确描述系统的动态。此时可以通过简化系统动态达到控制目的，但会损失控制性能。由于模糊逻辑控制对系统模型依赖度低的原因，利用模糊控制的T-S模型逼近原始系统是一个有效和灵活的方法[28, 29]。利用T-S模糊模型来近似逼近公式（12）所示的系统模型，则它的第i条模糊规则由公式（14）给出：

$$R^i:\ \text{if}\ w_1(t)=F_{i1},\ \cdots w_g(t)=F_{ig},\ \text{then:}$$

$$\dot{\boldsymbol{e}}(t)=\boldsymbol{A}_i\boldsymbol{e}(t)+\boldsymbol{B}_i\boldsymbol{u}(t) \tag{14}$$

式中：$w_1(t)$，$w_2(t)$，…，$w_g(t)$为前置变量；F_{ig}为模糊集；i=1，2，3，…，L；L表示模糊集的序号；$\boldsymbol{A}_i\in\boldsymbol{R}^{n\times n}$，$\boldsymbol{B}_i\in\boldsymbol{R}^{n\times m}$，为状态矩阵和输入矩阵。

全局T-S模糊系统模型如公式（15）所示。

$$\dot{\boldsymbol{e}}(t)=\frac{\sum_{i=1}^{L}\mu_i(w(t))\left\{\boldsymbol{A}_i\boldsymbol{e}(t)+\boldsymbol{B}_i\boldsymbol{u}(t)\right\}}{\sum_{i=1}^{L}\mu_i(w(t))} \tag{15}$$

式中：$w(t)=[w_1(t),\ w_2(t),\ \cdots,\ w_g(t)]$；$\mu_i(w(t))$如公式（16）所示。

$$\mu_i(w(t))=\prod_{j=1}^{g}F_{ij}(w_j(t)) \tag{16}$$

式中：F_{ij}为$w_j(t)$隶属度函数的级数。

令$h_i=\mu_i/\sum\mu_i$作为第i次模糊规则的激活方程，公式（15）可以写为公式（17）。

$$\dot{\boldsymbol{e}}(t)=\sum_{i=1}^{L}h_i(w(t))\left\{\boldsymbol{A}_i\boldsymbol{e}(t)+\boldsymbol{B}_i\boldsymbol{u}(t)\right\} \tag{17}$$

对于i=1，2，3，…，L，$\mu_i(w(t))\geqslant 0$，并且该激活函数有公式（18）所示的凸函数属性。

$$\sum_{i=1}^{L}h_i(w(t))=1 \tag{18}$$

2.2 PDC算法

PDC算法的本质是将整个T-S模糊系统分成若干个模糊子系统，并单独为每个模糊子系统设计一个控制器，然后通过局部控制器的模糊加权组合得到全局控制器[30]。这种方法不仅可以提高系统性能，还可以避免试错法中涉及的收敛问题和复杂的模糊隶属度函数[31]。因此，若将模糊控制器的模糊规则的前件部分与T-S模糊模型保持一致，那么就可以为局部控制器的设计提供很大的便利[29]。由此产生的全局控制器是线性控制器的模糊融合，其目的是稳定公式（15）中的模糊系统。T-S模糊控制器的第i条规则由公式（19）给出。

$$R^i:\ \text{if}\ w_1(t)=F_{i1},\ \cdots w_g(t)=F_{ig},\ \text{then}$$

$$\boldsymbol{u}(t)=-\boldsymbol{K}_i\boldsymbol{e}(t) \tag{19}$$

式中：$\boldsymbol{K}_i$为反馈控制的增益，i=1，2，3，…，L。

通过匹配全局模糊系统，全局T-S模糊控制器可以表示为公式（20）的形式：

$$\boldsymbol{u}(t)=-\sum_{i=1}^{L}h_i(w(t))\boldsymbol{K}_i\boldsymbol{e}(t) \tag{20}$$

将公式（20）代入公式（17）可以得到闭环系统，如公式（21）所示。

$$\dot{\boldsymbol{e}}(t)=\sum_{i=1}^{L}\sum_{j=1}^{L}h_i(w(t))h_j(w(t))\left\{\boldsymbol{A}_i-\boldsymbol{B}_i\boldsymbol{K}_j\right\}\boldsymbol{e}(t) \tag{21}$$

该模糊系统需要满足文献［31］中的稳定性定理，因此，利用MATLAB中的线性矩阵不等式工具箱进行求解（LMI toolbox），计算每个子系统中满足稳定性要求的最优控制律。

2.3 LQR控制器设计

LQR是一种应用广泛的最优控制方法，用于求解给定性能指标的反馈控制系统的最优解，具有最优性、鲁棒性和简单性的特点，目前被广泛应用于自动控制、航空航天、机械工程等领域[32]。根据PDC算法，本节将设计LQR控制器用于计算T-S模糊控制器中的每个子系统的最优解。

由于本研究使用了误差状态空间模型，控制问题表述如下。

控制输入计算如公式（22）：

$$\boldsymbol{u}(t) = -\boldsymbol{K}\boldsymbol{e}(t) \tag{22}$$

目标函数计算如公式（23）：

$$J = \int_{t_0}^{\infty} (\boldsymbol{e}^T\boldsymbol{Q}\boldsymbol{e} + \boldsymbol{u}^T\boldsymbol{R}\boldsymbol{u})\,dt \tag{23}$$

式中：J为目标函数；$\boldsymbol{Q}$和$\boldsymbol{R}$为系数矩阵。

线性系统计算如公式（24）：

$$\dot{\boldsymbol{e}}(t) = \boldsymbol{A}\boldsymbol{e}(t) + \boldsymbol{B}\boldsymbol{u}(t) \tag{24}$$

其中K的组成如公式（25）所示：

$$\boldsymbol{K} = \boldsymbol{R}^{-1}\boldsymbol{B}^T\boldsymbol{P} \tag{25}$$

$\boldsymbol{P}$为公式（26）所示的代数Riccati方程的解：

$$\boldsymbol{P}\boldsymbol{A} + \boldsymbol{A}^T\boldsymbol{P} + \boldsymbol{Q} - \boldsymbol{P}\boldsymbol{B}\boldsymbol{R}^{-1}\boldsymbol{B}^T\boldsymbol{P} = 0 \tag{26}$$

2.4 LQR_{obs}避障控制器设计

在全局开环系统中设计一个新的LQR_{obs}控制器用于实现障碍物的躲避，其实现方法为当系统检测到环境中的障碍物时LQR_{obs}控制器开始工作。检测的依据为障碍物与底盘之间的距离，由底盘上的距离传感器获取。若距离低于某个阈值时，LQR_{obs}控制器开始工作，实时动态规划出一条无障碍物的局部路径。当底盘上的距离传感器检测到与障碍物之间的距离高于某个阈值时，判定底盘已经成功躲避障碍物，LQR_{obs}控制器停止工作。

LQR_{obs}控制器有两个增益矩阵$\boldsymbol{Q}$、$\boldsymbol{R}$的选取决定了LQR_{obs}控制器的控制性能。通常这两个参数都是基于设计人员在不断试错中总结出来的固定参数，但往往只适合某些固定的行驶工况，很难适应路径中突然出现障碍物的场景。因此，为了更好地实现避障功能，设计了一个模糊控制器，用来实时调节LQR_{obs}控制器的增益矩阵$\boldsymbol{Q}$、$\boldsymbol{R}$。将获取的距离和底盘的速度作为模糊控制器的输入，模糊控制器的输出为LQR_{obs}控制器的增益矩阵（$\boldsymbol{Q}$，$\boldsymbol{R}$）的值，从而优化LQR_{obs}控制器的输出值，实现更加平滑的避障控制。

本研究利用一个Mandani模糊控制器来对这两个矩阵参数进行实时调节。该模糊控制器有2个输入，其中一个为当前底盘与参考路径中障碍物之间的距离（D_{ob}，m）；另一个为底盘的速度（v_T，m/s）。有5个输出，分别为增益矩阵$\boldsymbol{Q}$的对角元素（q_1，q_2，q_3）和$\boldsymbol{R}$的对角元素（r_1，r_2）。输入（出）变量的基本论域和量化等级如表1所示，其中ZE、PS、PM、PB为用来描述变量的一个区域，分别表示零（Zero, ZE）、正小（Positive Small, PS）、正中（Positive Medium, PM）和正大（Positive Big, PB）。图5为输入（出）变量的隶属度函数，表2为模糊控制规则，描述了利用逻辑语言来选取增益矩阵的规则。例如，如果障碍物很近（PS），则矩阵$\boldsymbol{Q}$中的q_1设置为高（PB）实现底盘的快速响应。同时，为了避免快速响应导致底盘失去跟踪稳定性，还需要对矩阵$\boldsymbol{R}$中的r_1进行调整。如果障碍物很远（PB），则q_1，r_1分别设置为0（ZE）和高（PB）让底盘跟踪参考轨迹。

表1　LQR_{obs}避障控制增益矩阵参数设置

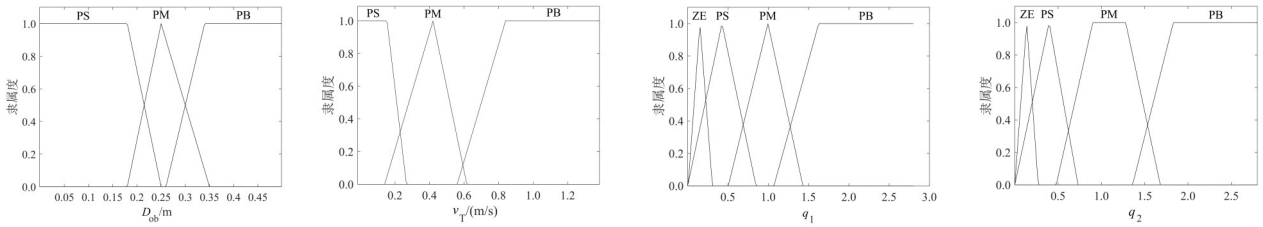
Table 1　Parameters setting of gain matrix of the LQR_{obs} obstacle avoidance

名称	类别	基本论域	量化等级
D_{ob}	输入	［0 m，0.5 m］	{0 m，0.25 m，0.5 m} = {PS，PM，PB}
v_T	输入	［0 m/s，1.4 m/s］	{0 m/s，0.4 m/s，1.4 m/s} = {PS，PM，PB}
q_1	输出	［0，3］	{0，0.4，1，3} = {ZE，PS，PM，PB}
q_2	输出	［0，3］	{0，0.4，1，3} = {ZE，PS，PM，PB}
q_3	输出	［0，3］	{0，0.5，0.8，3} = {ZE，PS，PM，PB}
r_1	输出	［0，0.014］	{0，0.004，0.006，0.014} = {ZE，PS，PM，PB}
r_2	输出	［0，0.014］	{0，0.004，0.006，0.014} = {ZE，PS，PM，PB}

2.5 模糊融合控制器设计

如果在参考轨迹上存在障碍物，底盘必须在跟踪参考轨迹的同时避开这些障碍物。因此，底盘将同时受跟踪速度（v_{r_T}，v_{l_T}）和避障速度（v_{r_obs}，v_{l_obs}）的控制，此时需要设计融合控制器将这两种速度进行融合。本研究选取Mamdani模糊控制器来实现，将输入设置为底盘与障碍物之间的距离D_{ob}和底盘与障碍物之间的角度θ_{ob}，其中θ_{ob}的论域为［−4 rad，4 rad］，量化等级为｛−4 rad，0 rad，4 rad｝= ｛NB，PS，PB｝，其中NB为用来描述变量的一个区域，表示负大（Negative Big, NB）。输出为融合增益F，论域为［0，1］，量化等级为｛0，0.5，1｝= ｛PS，PM，PB｝。输入（出）隶属度函数如图6所示，融合增益的模糊规则如表3所示，描述了利用逻辑语言来选取融合增益的规则。例如，如果障碍物很近（PS），障碍物与底盘之间的角度偏大（PB），则F设置为高（PB），增加最终输入值中避障速度的比重，让底盘快速躲避障碍物。如果障碍物很远（PB），则F设置为低（PS），让底盘跟踪参考路径。

由上述模糊融合控制器可以得到底盘最终的控



a. D_{ob}隶属度函数 b. v_T隶属度函数 c. q_1隶属度函数 d. q_2隶属度函数

e. q_3隶属度函数 f. r_1隶属度函数 g. r_2隶属度函数

图5 LQR_{obs}避障控制增益矩阵隶属度函数

Fig. 5 Membership function of gain matrix of the LQR_{obs} obstacle avoidance

表2 LQR_{obs}避障控制增益矩阵模糊控制规则

Table 2 Fuzzy rule of gain matrix of the LQR_{obs} obstacle avoidance

规则数	输入		输出				
	D_{ob}	v_T	q_1	q_2	q_3	r_1	r_2
1	PS	PS	PB	PB	PB	ZE	ZE
2	PS	PS	PB	PB	PB	PS	PS
3	PS	PS	PB	PB	PB	PB	PB
4	PM	PM	PS	PS	PS	PM	PM
5	PM	PM	PM	PM	PM	PM	PM
6	PM	PM	PB	PB	PB	PB	PB
7	PB	PB	ZE	ZE	ZE	PB	PB
8	PB	PB	ZE	ZE	ZE	PB	PB
9	PB	PB	ZE	ZE	ZE	PB	PB

制输入如公式（25）所示。

$$\begin{cases} v_r = (1-F)v_{r_T} + Fv_{r_obs} \\ v_l = (1-F)v_{l_T} + Fv_{l_obs} \end{cases} \tag{25}$$

3 仿真测试

为了验证本研究所提避障控制方法的有效性和正确性，在MATLAB-Simulink中进行联合仿真测试。

表3 模糊融合控制的模糊规则

Table 3 The fuzzy rules of the fuzzy fusion control

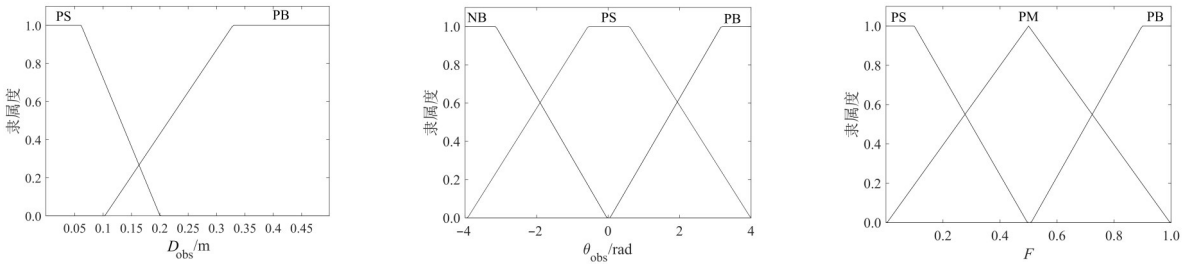
θ_{obs}	D_{obs}	
	PS	PB
NB	PB	PS
PS	PM	PS
PB	PB	PS

3.1 仿真环境

仿真所采用的硬件设备为Intel Xeon E-2244 G 3.80 GHz，32 GB RAM。MATALB版本为2020a。选取自主研制的底盘作为仿真对象[33]，相关参数见表4。

3.2 仿真设计

选取直线和曲线组成的路径为参考路径，如图7a所示。在弯道处设置一处障碍物，障碍物用一个底圆直径380 mm、顶圆直径340 mm、高度500 mm的圆台表示，如图7b所示。



a. D_{ob}隶属度函数 b. θ_{ob}隶属度函数 c. F隶属度函数

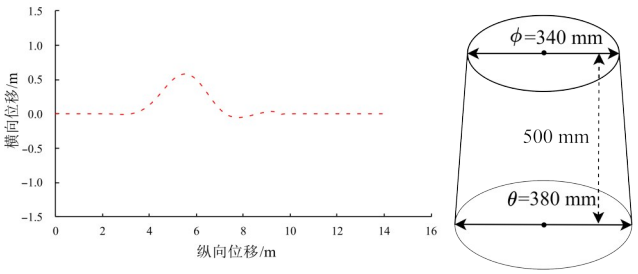
图6 模糊融合控制隶属度函数

Fig. 6 Membership function of the fuzzy fusion control

表 4　滑移转向底盘参数

Table 4　Parameters of the skid-steering chassis

参数名称	单位	数值
整机形式	/	轮式
外形尺寸	mm	1 500×1 200×800
装备质量	kg	200
载重	kg	100
平均最高车速	km/h	5
轴距	mm	800
轮距	mm	1 100
虚拟轴距	mm	1 250
LQR 增益矩阵 $\boldsymbol{Q}$	/	diag(1,1,1)
LQR 增益矩阵 $\boldsymbol{R}$	/	diag(0.005,0.005)



a. 仿真参考路径　　b. 障碍物参数

图 7　底盘跟踪避障仿真设计

Fig. 7　Simulation design of tracking of obstacle avoidance of chassis

设计了如图 8 所示的 Matlab-simulink 联合仿真实验。

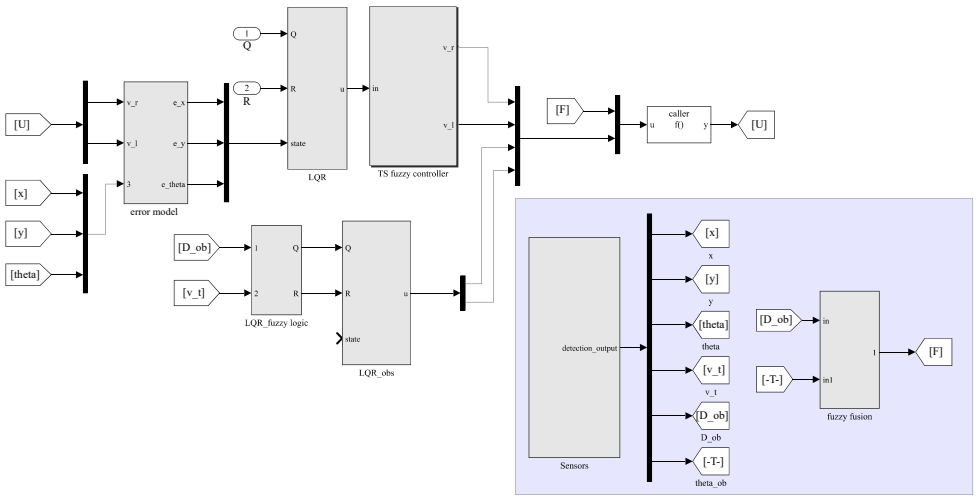


图 8　Matlab-simulink 仿真实验设计

Fig. 8　Design of Matlab-simulink simulation experiment

3.3 仿真结果分析

图 9 和图 10 分别为底盘在有、无障碍物时的跟踪结果。图 11a～图 11e 为有障碍物时模糊 LQR_{obs} 控制器的增益矩阵变化情况。表 5 为模糊逻辑控制算法在有/没有障碍物时的跟踪结果对比。

从图 9 和表 5 可以看出，没有障碍物时全局模糊控制器可以实现稳定跟踪，横纵向的直线和曲线平均跟踪误差均控制在 0.1 m 以下。从图 10 和表 5 可以看出，有障碍物时控制系统将激活 LQR_{obs} 控制器实现障碍物躲避。从图 11 可以看出，为 LQR_{obs} 控制器设计的模糊控制器可以根据障碍物的位置和底盘的速度动态调整增益矩阵，控制底盘避障后快速收敛到参考轨迹上。

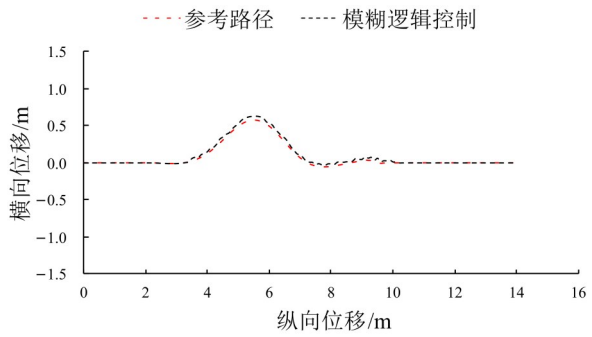


图 9　底盘无障碍物时的跟踪结果(仿真)

Fig. 9　Tracking results of chassis without obstacles (simulation)

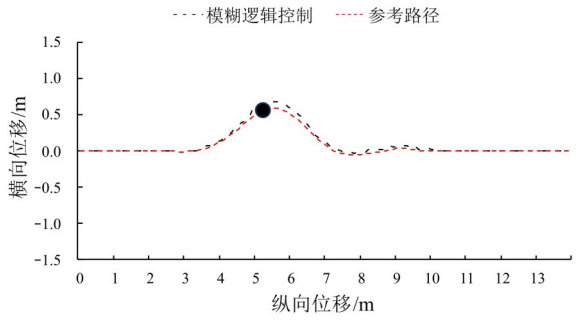
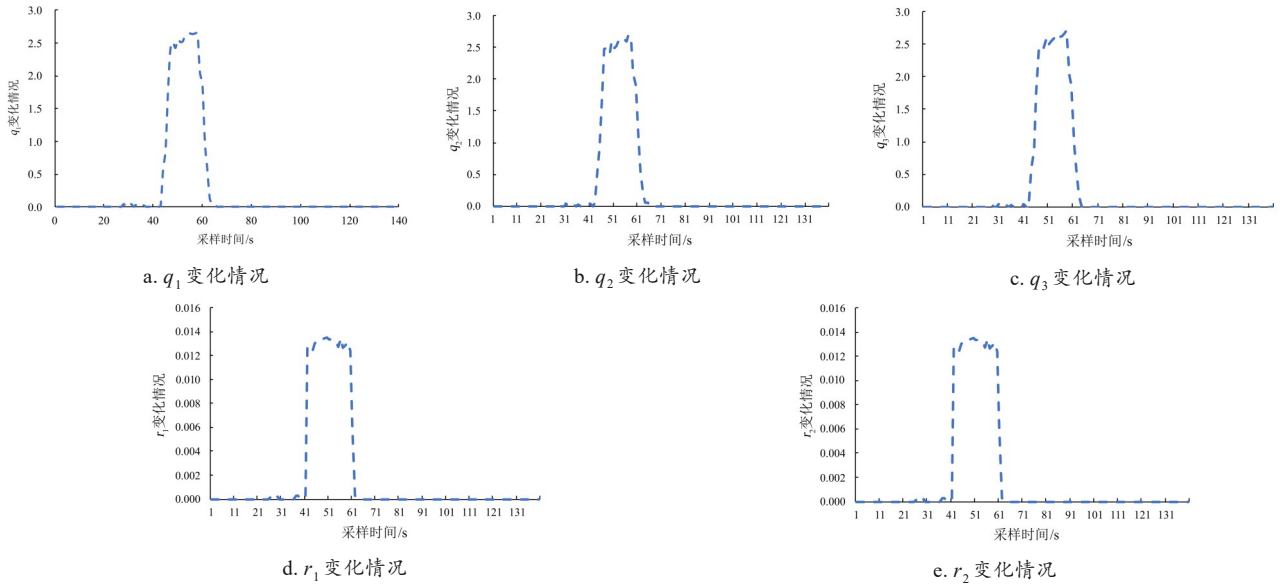


图 10　底盘有障碍物时的跟踪结果(仿真)

Fig. 10　The tracking results of chassis with obstacles (simulation)



a. q_1 变化情况　b. q_2 变化情况　c. q_3 变化情况

d. r_1 变化情况　e. r_2 变化情况

图 11　LQR_{obs} 避障控制器增益矩阵变化情况(仿真)

Fig. 11　Changes of gain matrix of LQR_{obs} obstacle avoidance controller (simulation)

表 5　不同工况下的仿真结果对比

Table 5　Comparison of simulation results under different working conditions

工况	横向平均跟踪误差/m	纵向平均跟踪误差/m	直线平均横向跟踪误差/m	直线平均纵向跟踪误差/m	曲线平均横向跟踪误差/m	曲线平均纵向跟踪误差/m
无障碍物	0.036 5	0.048 2	0.021	0.030	0.065	0.078
有障碍物	0.189	0.223	0.023	0.028	0.532	0.489

4　试验测试

4.1　试验平台

为了验证该方法的有效性，将该方法部署在自主研制的农用电动滑移转向底盘上进行试验测试，如图 12 所示。底盘的驱动方式为滑移转向驱动，由两个伺服直流电机带动链条进行驱动。配备了英伟达 Jeston Nano 控制主板，5 个倍加福超声波传感器（分别位于正前、左前、右前、左后、右后），全球导航卫星系统（Global Navigation Satellite System, GNSS），惯性导航系统（Inertial Navigation System, INS）等设备。其中伺服电机的额定功率 1 000 w、额定转速 3 000 r/min、额定转矩 3 200 N·m，同时直流伺服电机自带双驱伺服控制器，支持电机数据的读取。

采用机器人操作系统（Robot Operating System, ROS）进行试验验证。利用 5 个倍加福（Pepperl-Fuchs）超声波传感器检测障碍物的位置，可以实现毫米精度的检测。利用超声波传感器自带的同步输入功能可以实现 5 个传感器之间以内轮循同步的方式发射超声脉冲，实现 5 个传感器的并行操作。利用 GNSS/INS 惯导系统获取底盘的位置信息和横（纵）向的加速度信息。利用直流伺服电机自带的反馈元件获取电机的转速和底盘的速度信息。

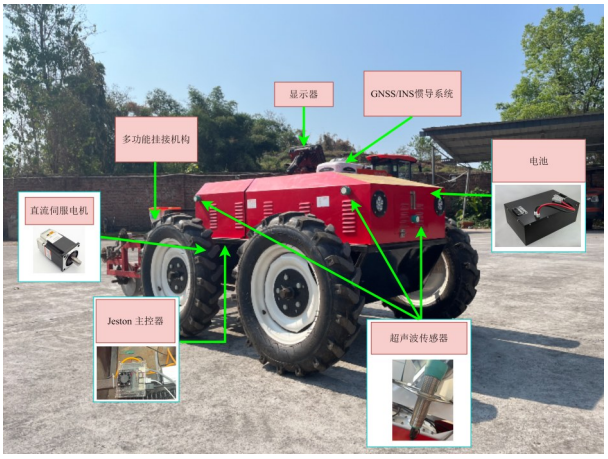


图 12　部署跟踪避障导航系统的电动滑移转向底盘

Fig. 12　Electric skid steer chassis with tracking and obstacle avoidance navigation system

4.2　试验设计

底盘可以用于农业作业中的播种、除草、施药、覆膜等一系列作业，选取图 13 所示的试验场景，用于模拟播种和覆膜作业场景。该作业场景中包括了直行、掉头、转弯等常见农业作业路径。



图 13　滑移转向底盘避障试验场景

Fig. 13　Experiments scenario of obstacle avoidance of skid-steering chassis

对该路径进行加载和预处理，可以得到图 14 所示的参考路径。路径中的黑点表示路径中的障碍物，共设置了 4 个障碍物。

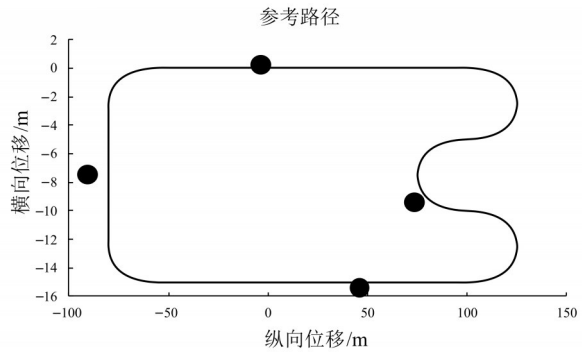


图 14　滑移转向底盘避障试验参考路径

Fig. 14　Reference path of skid-steering chassis obstacle avoidance experiments

为了验证 LQR_{obs}+模糊控制器的有效性，试验测试中将加入增益矩阵固定的 LQR_{obs} 控制器进行对比，固定增益矩阵的值为：$\boldsymbol{Q}$=diag（1，1，1），$\boldsymbol{R}$=diag（0.015，0.015）。

4.3 试验结果与分析

在没有障碍物时，底盘的控制系统仅由 T-S 模糊控制器控制底盘进行跟踪，结果如图 15 所示，横、纵向的跟踪误差如图 16 和图 17 所示。

无障碍物时，底盘横纵向平均跟踪误差分别为 0.041 和 0.052 m，弯道处的横纵向平均跟踪误差分别为 0.131 和 0.352 m，处于可以接受范围之内（小于 0.6 m）[24]。

在面对障碍物时，底盘的控制系统由 T-S 模糊控制器和 LQR_{obs} 控制器联合控制。为了验证模糊控制器对 LQR_{obs} 增益矩阵调整后的跟踪效果，加入了增益矩阵固定的 LQR_{obs} 控制器进行对比，试验结果如图 18 和图 19 所示。

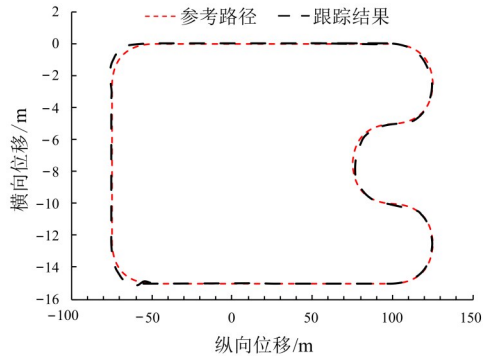


图 15　底盘无障碍物时的跟踪结果（试验）

Fig. 15　Tracking results of chassis without obstacles (experiments)

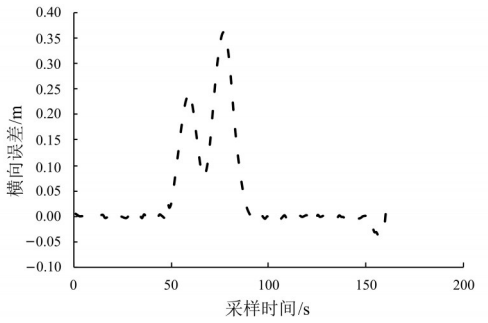


图 16　底盘无障碍物时的横向跟踪误差（试验）

Fig. 16　Lateral tracking error of chassis without obstacles (experiments)

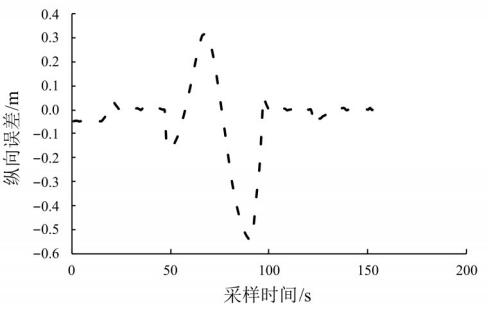


图 17　底盘无障碍物时的纵向跟踪误差（试验）

Fig. 17　Longitudinal tracking error of chassis without obstacles (experiments)

从图 18 和图 19 可以看出，搭载了模糊逻辑控制器和没有搭载模糊逻辑控制器两种控制方法都能在行驶的过程中躲避障碍物。其中，具有模糊控制器的 LQR_{obs} 控制器在避障后能够迅速回到参考路径，整体跟踪误差较没有模糊控制器的方法降低了 33.9%。增益矩阵固定的控制器由于障碍物的影响，在避障完成之后不能及时地回到参考路径上，从而影响后续的跟踪结果，整体误差较大。LQR_{obs} 控制器在跟踪过程中的增益矩阵变化情况如图 20a～

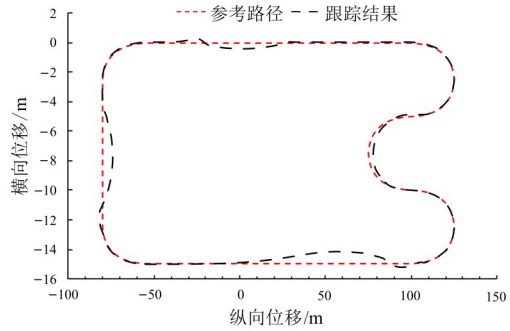


图 18 搭载模糊避障控制器的底盘避障跟踪结果(试验)

Fig. 18 Obstacle avoidance and tracking results of chassis with fuzzy obstacle avoidance controller (experiments)

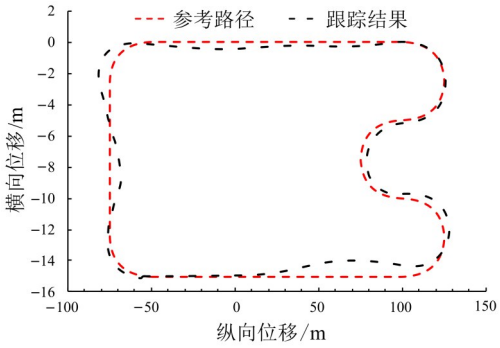


图 19 未搭载模糊避障控制器的底盘避障跟踪结果(试验)

Fig. 19 Obstacle avoidance and tracking results of chassis without fuzzy obstacle avoidance controller (experiments)

图 20e 所示。

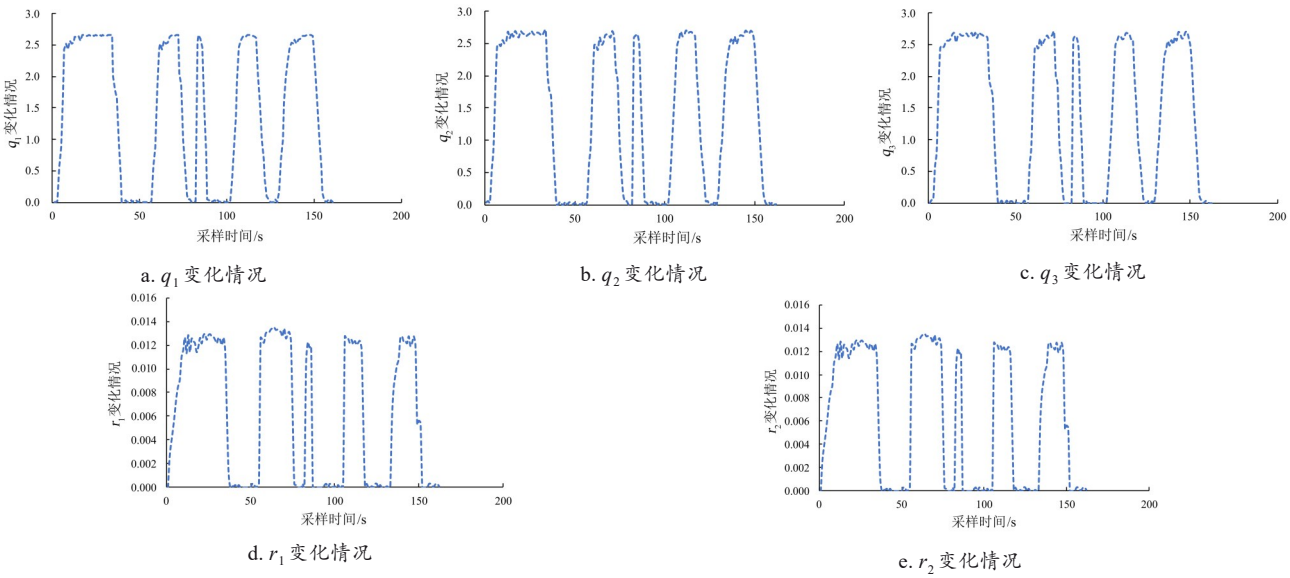
图 21 展示了底盘在面对路径中其中一个障碍物时的避障及跟踪结果，从图 21a～图 21c 分别表示底盘对障碍物的识别、底盘躲避障碍物，以及成功躲避障碍物后回到参考轨迹。图 22 为躲避其中一个障碍物时的横、纵向跟踪误差。

从图 21 和图 22 中可以看出，农机底盘在完成避障后可以快速地收敛到参考路径上。

以上试验结果表明，在没有障碍物时，农机底盘可以利用 T-S 模糊控制器实现对参考轨迹的跟踪，整个跟踪过程横纵向的平均误差分别为 0.041 和 0.052 m。在面对障碍时，T-S 模糊控制器和 LQR_{obs} 控制器通过联合控制可以同时实现底盘的避障和跟踪控制。设计的模糊控制器可以对 LQR_{obs} 控制器的增益矩阵进行动态调整，跟踪误差相较于固定增益矩阵的控制器降低了 33.9%。

5 总 结

轨迹跟踪和避障控制是自动驾驶底盘的重要组成部分，但目前大多数研究将这两个问题作为两个独立的任务来完成，这将导致底盘在面对障碍物时需要先停止轨迹跟踪，完成避障之后再次实现轨迹跟踪，如果避障后距离参考路径太远则会影响后续的跟踪效果。目前也有一些轨迹跟踪和避障同时进行的研究，但这些研究要么不够平滑容易出现抖动现象，要么控制系统太过复杂。本研究则提出了一种基于模糊逻辑控制的方法来同时解决轨迹跟踪和避障控制问题。通过设计底盘的运动学模型和运动学误差模型获取 T-S 模糊模型。基于 T-S 模糊模型利用 PDC 算法设计了 T-S 模糊控制器，利用 LQR 作为其每个子系统的反馈控制器用于实现底盘的轨迹跟踪。在全局开环控制器中又设计了一个新的



a. q_1 变化情况　b. q_2 变化情况　c. q_3 变化情况

d. r_1 变化情况　e. r_2 变化情况

图 20 LQR_{obs} 避障控制器增益矩阵变化情况(试验)

Fig. 20 Change circumstances of gain matrix of LQR_{obs} of obstacle avoidance (experiments)



a. 底盘对障碍物的识别　b. 底盘躲避障碍物　c. 底盘避障后回到参考路径

图 21　底盘面对单个障碍物时的避障跟踪结果（试验）

Fig. 21　Obstacle avoidance and tracking results of chassis under a single obstacle（experimental）

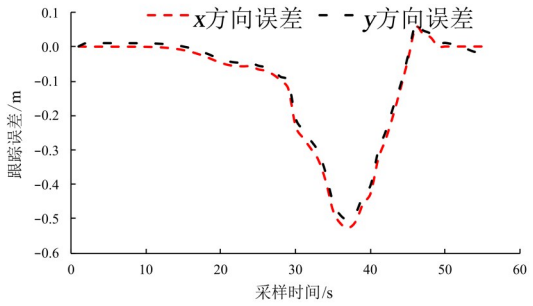


图 22　底盘面对单个障碍物时的横纵向跟踪误差（试验）

Fig. 22　Lateral and longitudinal tracking errors of chassis under a single obstacle（experiments）

LQR_{obs}控制器实现动态轨迹规划，实现避障，并且该控制器的增益矩阵由一个模糊控制器进行实时动态调整。设计了模糊融合控制器来将T-S模糊控制器和LQR_{obs}控制器结合起来形成底盘最终的速度输入。利用了MATLAB-Simulink对该控制方法进行联合仿真验证，并将该方法部署到自研的农用滑移转向底盘中进行试验测试，结果表明，该方法能够在轨迹跟踪的同时实现避障控制，并且控制系统简洁高效；避障后可以快速地将跟踪误差收敛到零，实现更加平滑的避障控制。设计的模糊控制器可以动态调整LQR_{obs}控制器的增益矩阵，相较于不采用模糊控制器的控制方法，该方法的整体控制精度提高了33.9%。

提出的基于模糊算法的跟踪避障控制方法简洁高效，能够同时实现底盘的轨迹跟踪和避障控制，跟踪和避障效果显著。但目前该控制方法还只能处理参考路径中的静态障碍物，后续将针对动态障碍物进行研究。

利益冲突声明：本研究不存在研究者以及与公开研究成果有关的利益冲突。

参考文献：

[1] 代辛, 管寿青, 王元杰. "走出去"助力中国农机装备新质生产力发展[J]. 农业展望, 2024, 20(11): 3-9.
DAI X, GUAN S Q, WANG Y J. "Going global" boosts the development of new quality productive forces in Chinese agricultural machinery equipment[J]. Agricultural Outlook, 2024, 20(11): 3-9.

[2] 重庆市农业科学院. 基于模糊逻辑控制的电动农机滑移、转向、避障控制系统及方法:202411485474.X[P]. 2025-01-24.

[3] XIE B B, LIU J Z, HE M, et al. Research progress on Autonomous Navigation Technology of Agricultural Robot[C]// 2021 IEEE 11th Annual International Conference on CYBER Technology in Automation, Control, and Intelligent Systems (CYBER). Piscataway, New Jersey, USA: IEEE, 2021: 891-898.

[4] ROSHANIANFARD A, NOGUCHI N, OKAMOTO H, et al. A review of autonomous agricultural vehicles (The experience of Hokkaido University)[J]. Journal of Terramechanics, 2020, 91: 155-183.

[5] 陈建, 王艺霏. 无人驾驶拖拉机路径跟踪控制方法综述[J]. 农机化研究, 2024, 46(8): 1-7.
CHEN J, WANG Y F. Overview of path tracking control methods for unmanned tractors[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2024, 46(8): 1-7.

[6] LI L, LI J, ZHANG S Y. Review article: State-of-the-art trajectory tracking of autonomous vehicles[J]. Mechanical Sciences, 2021, 12(1): 419-432.

[7] ZHA Y F, DENG J X, QIU Y Y, et al. A survey of intelligent driving vehicle trajectory tracking based on vehicle dynamics[J]. SAE International Journal of Vehicle Dynamics, Stability, NVH, 7(2): 221-248.

[8] 王鑫, 凌铭, 饶启鹏, 等. 基于改进Stanley算法的无人车路径跟踪融合算法研究[J]. 汽车技术, 2022(7): 25-31.
WANG X, LING M, RAO Q P, et al. Research on fusion algorithm of unmanned vehicle path tracking based on improved Stanley algorithm[J]. Automobile Technology, 2022(7): 25-31.

[9] WANG L, ZHAI Z Q, ZHU Z X, et al. Path tracking control of an autonomous tractor using improved Stanley controller optimized with multiple-population genetic algorithm[J]. Actuators, 2022, 11(1): 22.

[10] SUN Y, CUI B B, JI F, et al. The full-field path tracking of agricultural machinery based on PSO-enhanced fuzzy Stanley model[J]. Applied Sciences, 2022, 12(15): 7683.

[11] BIJAY R, AMARENDRA M, ASIM D. Steer guidance of autonomous agricultural robot based on pure pursuit algorithm and LiDAR based vector field histogram[J]. Journal of Applied Science and Engineering, 2023, 26(10): 1363-1372.

[12] YANG Y, LI Y K, WEN X, et al. An optimal goal point determination algorithm for automatic navigation of agricultural machinery: Improving the tracking accuracy of the pure pursuit algorithm[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2022, 194: 106760.

[13] LIU J, YANG Z H, HUANG Z J, et al. Simulation performance evaluation of pure pursuit, Stanley, LQR, MPC controller for autonomous vehicles[C]// 2021 IEEE International Conference on Real-time Computing and Robotics (RCAR). Piscataway, New Jersey, USA: IEEE, 2021: 1444-1449.

[14] ZHAO C, ZHANG C, GUO F, et al. Research on path following control method of agricultural machinery autonomous navigation through lqr-feed forward control[C]// 2021 IEEE International Conference on Data Science and Computer Application (ICDSCA). Dalian, China: IEEE,

2021: 228-233.
[15] PURBOWASKITO W, TELAUMBANUA M. Simulation study of Kalman-bucy filter based optimal yaw rate control system for autonomous tractor[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2019, 355(1): 012102.
[16] DENG Z W, JIN Y H, GAO W, et al. A closed-loop directional dynamics control with LQR active trailer steering for articulated heavy vehicle[J]. Proceedings of The Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, 2023, 237(12): 2741-2758.
[17] GENG G S, JIANG F, CHAI C, et al. Design and experiment of magnetic navigation control system based on fuzzy PID strategy[J]. Mechanical Sciences, 2022, 13(2): 921-931.
[18] LIU J, WU X, QUAN L, et al. Fuzzy adaptive PID control for path tracking of field intelligent weeding machine[J]. AIP Advances, 2024, 14(3): 35-45.
[19] 张锦辉, 李彦明, 齐文超, 等. 基于神经网络PID的丘陵山地拖拉机姿态同步控制系统[J]. 农业机械学报, 2020, 51(12): 356-366.
ZHANG J H, LI Y M, QI W C, et al. Synchronous control system of tractor attitude in hills and mountains based on neural network PID[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(12): 356-366.
[20] 严国军, 贲能军, 顾建华, 等. 基于MPC的无人驾驶拖拉机轨迹跟踪控制[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2019, 38(9): 1-6.
YAN G J, BEN N J, GU J H, et al. Trajectory tracking control of intelligent tractor based on MPC algorithm[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2019, 38(9): 1-6.
[21] TOUMIEH C, LAMBERT A. Decentralized multi-agent planning using model predictive control and time-aware safe corridors[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2022, 7(4): 11110-11117.
[22] 贺庆, 冀杰, 冯伟, 等. 割草机器人自适应时域MPC路径跟踪控制方法[J]. 智慧农业(中英文), 2024, 6(3): 82-93.
HE Q, JI J, FENG W, et al. Adaptive time horizon MPC path tracking control method for mowing robot[J]. Smart Agriculture, 2024, 6(3): 82-93.
[23] LIU L X, WANG X, WANG X S, et al. Path planning and tracking control of tracked agricultural machinery based on improved A* and fuzzy control[J]. Electronics, 2024, 13(1): 188.
[24] 赵立军, 贾云帆, 殷文科, 等. 基于模型预测控制的履带式除草机器人设计与试验[J]. 智能化农业装备学报(中英文), 2024, 5(4): 84-94.
ZHAO LJ, JIA YF, YIN WK, et al. Design and experiment of a tracked weeding robot based on model predictive control[J]. Journal of Intelligent Agricultural Mechanization, 2024, 5(4):84-94.
[25] DANG S T, DINH X M, KIM T D, et al. Adaptive backstepping hierarchical sliding mode control for 3-wheeled mobile robots based on RBF neural networks[J]. Electronics, 2023, 12(11): 2345.
[26] BULGAKOV V, PASCUZZI S, IVANOVS S, et al. Measure of the deflections from linear trajectory of a skid-steer gantry tractor during its motion[C]// 2021 IEEE International Workshop on Metrology for Agriculture and Forestry (MetroAgriFor). Piscataway, New Jersey, USA: IEEE, 2021: 22-26.
[27] IBRAHIM F, ABOUELSOUD A A, FATH EL BAB A M R, et al. Discontinuous stabilizing control of skid-steering mobile robot (SSMR)[J]. Journal of Intelligent & Robotic Systems, 2019, 95(2): 253-266.
[28] TSAI S H, CHEN Y W. A novel identification method for Takagi-Sugeno fuzzy model[J]. Fuzzy Sets and Systems, 2018, 338: 117-135.
[29] SHENG Z L, LIN C, CHEN B, et al. An asymmetric Lyapunov-krasovskii functional method on stability and stabilization for T-S fuzzy systems with time delay[J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2022, 30(6): 2135-2140.
[30] GHANY M A, SHAMSELDIN M A. Parallel distribution compensation PID based on Takagi-Sugeno fuzzy model applied on Egyptian load frequency control[J]. International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE), 2020, 10(5): 5274.
[31] MAITI R, SHARMA KDAS, SARKAR G, et al. Modeling and control of delayed, nonlinear, uncertain, and disturbed air heater employing fuzzy PDC-L1 adaptive scheme[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2021, 68(11): 11328-11338.
[32] MAGHFIROH H, NIZAM M, ANWAR M, et al. Improved LQR control using PSO optimization and Kalman filter estimator[J]. IEEE Access, 2022, 10: 18330-18337.
[33] 潘良, 佘小明, 傅川, 等. 小型通用轮式电动底盘设计与试验[J]. 农机化研究, 2023, 45(9): 240-244.
PAN L, SHE X M, FU C, et al. Design and test of small all-purpose wheeled electric chassis[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2023, 45(9): 240-244.

Obstacle Avoidance Control Method of Electric Skid-Steering Chassis Based on Fuzzy Logic Control

LI Lei[1,2], SHE Xiaoming[1,2*], TANG Xinglong[1,2], ZHANG Tao[1,2], DONG Jiwei[1,2], GU Yuchuan[1,2], ZHOU Xiaohui[1,2], FENG Wei[1,2], YANG Qinghui[1,2]

(1. *Chongqing Academy of Agricultural Sciences*, *Institute of Agricultural Machinery Research*, *Chongqing* 401329, *China*; 2. *Southwest Mountain Smart Agricultural Key Laboratory*, (*Co-construction by the Ministry and Province*), *Ministry of Agriculture and Rural Affairs*, *Chongqing* 401329, *China*)

Abstract: [Objective] Trajectory tracking and obstacle avoidance control are important components of autonomous driving chassis, but

most current studies treat these two issues as two independent tasks, which will cause the chassis to stop trajectory tracking when facing an obstacle, and then implement trajectory tracking again after completing obstacle avoidance. If the distance from the reference path after obstacle avoidance is too far, the subsequent tracking performance will be affected. There are also some studies on trajectory tracking and obstacle avoidance at the same time, but these studies are either not smooth enough and prone to chatter, or the control system is too complex. Therefore, a simple algorithm is proposed that can simultaneously implement trajectory tracking and obstacle avoidance control of the chassis in this research. **[Methods]** First, the kinematic model and kinematic error model of the chassis were designed. Since skid-steering was adopted, the kinematic model of the chassis was simplified to a two-wheel differential rotation robot model when designing the mathematical model. Secondly, the Takagi-Sugeno (T-S) fuzzy controller of the chassis was designed. Since the error model of the chassis was designed in advance, the T-S fuzzy model of the chassis could be designed. Based on the T-S model, a T-S fuzzy controller was designed using the parallel distributed compensation (PDC) algorithm. The linear quadratic regulator (LQR) controller was used as the state feedback controller of each fuzzy subsystem in the T-S fuzzy controller to form a global T-S fuzzy controller, which could realize the trajectory tracking function of the chassis when there were no obstacles. Secondly, the obstacle avoidance controller of the chassis was designed. A new LQR_{obs} controller was designed in the global open-loop system to generate the reference trajectory to avoid obstacles. When the system detects an obstacle in the environment, the LQR_{obs} controller starts working, and generates a new path by judging the distance between the obstacle and the chassis, so that the chassis could avoid the obstacle. When the chassis bypassed the obstacle, the LQR_{obs} controller stopped working. In order to better realize the obstacle avoidance function, a fuzzy controller was designed to adjust the gain matrices $\boldsymbol{Q}$ and $\boldsymbol{R}$ of the LQR_{obs} controller in real time. Then, in order to realize trajectory tracking and obstacle avoidance controlled at the same time, a fuzzy fusion controller was designed to combine the two controllers to form the final chassis input, and the Mamdani fuzzy controller was selected to achieve it. Finally, the method was simulated and experimental tested. The simulation test used joint simulation test used MATLAB-Simulink and the experiments based on the self-developed electric multi-functional chassis were conducted. **[Results and Discussions]** The simulation results showed that when there were no obstacles, the control method could achieve stable trajectory tracking in the reference path composed of straight lines and curves. When there were obstacles, the vehicle could avoid them smoothly and quickly converge to the reference trajectory. When facing obstacles, the designed fuzzy logic LQR_{obs} controller could adaptively change the controller gain matrix according to the vehicle's speed and the distance between the current obstacles to achieve rapid convergence. The experimental results showed that when there were no obstacles, the chassis could use the T-S fuzzy controller to achieve stable tracking of the reference trajectory, and the average errors in the lateral and longitudinal directions of the entire tracking process were 0.041 and 0.052 m, respectively. When facing obstacles, the T-S fuzzy controller and the LQR_{obs} controller realized the obstacle avoidance and tracking control of the chassis through joint control. The fuzzy controller was used to adjust the gain matrix of the LQR_{obs} controller in real time, and the tracking error was reduced by 33.9% compared with the controller with a fixed gain matrix. **[Conclusions]** The control system can simultaneously realize the trajectory tracking and obstacle avoidance control of the chassis, can quickly converge the tracking error to zero, and achieve smooth obstacle avoidance control. Although the control method proposed is simple and efficient, and the tracking and obstacle avoidance effects are significantly improved, the control method can only handle static obstacles on the reference path at present, and subsequent research will focus on dynamic obstacles.

Key words: skid steering; trajectory tracking; obstacle avoidance control; LQR; fuzzy logic control

Foundation items: Chongqing Municipal Fiscal Science and Technology Innovation (cqaas2023sjczsy006, KYLX20240500075, KYLX20240500039); Chongqing Municipal Technology Innovation and Application Development Special Project (CSTB2023TIAD-GPX0037); Chongqing Municipal Scientific Research Institutions Performance Incentive Guidance Special Project (cstc2022jxjl80008)

First author: LI Lei, E-mail: lileiCBD@163.com

***Corresponding author:** SHE Xiaoming, E-mail: 244471221@qq.com