

基于模糊神经网络算法的智能汽车轨迹自适应跟踪控制研究

刘瀚蔚,王旭东,黄剑龙

重庆工商大学 机械工程学院,重庆 400067

摘要:目的 针对传统单一控制方法在智能汽车轨迹跟踪控制领域应用工况受限,实时性较低,精确度不高的问题,提出一种基于模糊神经网络算法的横纵向协同控制策略(ANFIS-LQR/PID),旨在保证智能汽车在不同道路条件下轨迹跟踪的精确性和驾乘人员的舒适性。方法 对汽车的运动情况进行分析并构建模型,将其投影到 Frenet 坐标系下,并以期望坐标和当前坐标的偏差值作为状态变量,构建一个跟踪误差模型。将设计的自适应模糊神经网络调节策略与车辆横纵向协同控制器进行融合,实现了横向线性二次控制(LQR)与纵向比例积分微分(PID)权重系数的实时调节,有效解决了不同车速下的跟踪控制问题。结果 通过 PreScan-CarSim/Simulink 软件搭建联合仿真平台,设计了连续弯道跟车、双车道变速超车、大曲率弯道加速跟车等 3 种涉及不同横纵向控制问题的工况进行仿真验证。结论 仿真结果表明:本文所设计的基于模糊神经网络算法的横纵向协同控制器在各种工况下均能将车辆的轨迹跟踪误差稳定地控制在限制范围内,同时在最优控制下保证了驾乘人员的舒适性。

关键词:智能汽车;跟踪控制;LQR;PID;ANFIS

中图分类号:U463.6;TP273 **文献标识码:**A **doi:**10.16055/j.issn.1672-058X.2025.0006.009

Research on Adaptive Tracking Control of Intelligent Vehicle Trajectory Based on Fuzzy Neural Network Algorithm

LIU Hanwei, WANG Xudong, HUANG Jianlong

School of Mechanical Engineering, Chongqing Technology and Business University, Chongqing 400067, China

Abstract: Objective Aiming at the problems of limited application scenarios, poor real-time performance, and low accuracy of traditional single-control methods in the field of intelligent vehicle trajectory tracking control, a lateral-longitudinal collaborative control strategy based on a fuzzy neural network algorithm(ANFIS - LQR/PID)is proposed. The aim is to ensure the accuracy of trajectory tracking of intelligent vehicles under different road conditions and the comfort of drivers and passengers. **Methods** The motion of the vehicle is analyzed and a model is constructed. This model is projected onto the Frenet coordinate system, and a tracking error model is built with the deviation values between the desired and current coordinates as state variables. The designed adaptive fuzzy neural network adjustment strategy is integrated with the vehicle's lateral-longitudinal collaborative controller to achieve real-time adjustment of the weight coefficients of lateral linear quadratic regulation (LQR) and longitudinal proportional-integral-derivative (PID), so as to effectively solve the problem of tracking control under different vehicle speeds. **Results** The PreScan-CarSim/Simulink software is used to build a joint simulation platform. The platform is used to simulate three working conditions(continuous curve following, two-lane variable-speed overtaking, and large-curvature curve acceleration following)involving different lateral-longitudinal control problems for verification. **Conclusion** The simulation results show that the lateral-longitudinal

收稿日期:2023-03-05 修回日期:2023-04-19 文章编号:1672-058X(2025)06-0063-09

基金项目:重庆市自然科学基金项目(CSTC2020JCYJ-MSXMX0803);重庆市教委科学技术研究项目(KJQN202100824)。

作者简介:刘瀚蔚(1997—),男,重庆人,硕士研究生,从事智能汽车跟踪控制研究。

引用格式:刘瀚蔚,王旭东,黄剑龙. 基于模糊神经网络算法的智能汽车轨迹自适应跟踪控制研究[J]. 重庆工商大学学报(自然科学版),2025,42(6):63-71.

LIU Hanwei, WANG Xudong, HUANG Jianlong. Research on adaptive tracking control of intelligent vehicle trajectory based on fuzzy neural network algorithm[J]. Journal of Chongqing Technology and Business University (Natural Science Edition), 2025, 42(6): 63-71.

collaborative controller based on the fuzzy neural network algorithm designed in this paper can stably control the vehicle's trajectory tracking error within the specified range under various working conditions. Additionally, it ensures the comfort of drivers and passengers under optimal control.

Keywords: intelligent vehicle; tracking control; LQR; PID; ANFIS

1 引言

随着汽车融合新能源、计算机、通信、互联网等领域的特色优势飞速发展,智能网联汽车的前景越来越好。智能汽车的关键技术主要涉及环境的感知、决策与规划以及车辆的跟踪控制。在实际生活中,轨迹跟踪控制需要综合考虑车辆的横向和纵向控制,以及对不同道路条件和车辆工况的适应性,因此需要根据车辆运动学输出和实时反馈的车辆驾驶状态,结合车辆动力学特性和智能控制算法,实现对车辆行驶过程的精准平稳控制^[1]。

针对智能汽车的轨迹跟踪控制问题,国内外研究人员已进行了大量研究工作。轨迹跟踪控制可根据控制策略所参考的模型来划分。基于几何学模型的控制策略从汽车转向操纵时车辆与参考轨迹间的相对位姿关系与阿克曼转向几何的关系出发,如纯跟踪算法^[2]和 Stanley 算法^[3]。基于动力学模型的控制策略进一步考虑了车辆的受力情况和实时车速,以及涉及车辆的具体物理性质,如模型预测控制法(MPC)^[4]、比例积分微分控制法(PID)^[5-6]、线性二次控制法(LQR)^[7-8]等。

轨迹跟踪控制问题研究中,对于控制的不同侧重划分为横向控制与纵向控制。在横向控制中,Kapania 等^[9]通过分析侧偏角和参考线的切线方向,提出一种保证闭环系统稳定的曲率前馈 LQR 控制策略,但这种控制方法在仿真实验中会使得车辆出现小幅度抖动;Goodarzi 等^[10]通过增加横摆力矩的方法,有效控制了转向中侧向力过大的问题,提高了控制系统的跟踪性能;Wang 等^[11]提出一种能够高效获取车辆行进中横向偏差和横摆角偏差数据的鲁棒状态反馈控制策略,提高了横向控制的实时性。在纵向控制中,Hang 等^[12]提出一种将滑模控制和径向基神经网络融合的自适应纵向速度跟踪控制策略,通过仿真实验证明纵向速度的跟踪精度更高且具有更好的鲁棒性;Guo^[13]等在仿真和实车实验中成功验证了结合动力学模型的 MPC 算法能有效提高纵向控制中速度和加速度的跟踪精度。

上述跟踪控制方法的研究大多局限在单一的横向或者纵向控制,难以适应复杂的工况和道路环境。将车辆驾驶过程中的纵向速度控制与横向方向控制进行联合控制的研究成为当下需要急切解决的问题。史鸿枫等^[14]在跟踪控制器设计中,在横向控制策略中加入

车速以作修正,并通过反馈机制实时更新模型,把车辆的运动控制问题转化为最优控制问题,实现了横纵向协同控制;曹轩豪^[15]面对差动制动在跟踪控制器中对于纵向动力学影响较大的问题,设计出一种无缝介入机制的智能汽车多执行控制器,提高了车辆的横纵向稳定性;丛森森等^[16]为提高智能汽车在极限工况中的横向稳定性,通过构建动态稳定域和设计限幅控制,设计出一种动态滑模控制器;郭明新等^[17]为验证不同工况下车辆变速下的协同跟车控制,以跟踪轨迹误差和与前车的安全距离作为性能指标,设计出一套耦合车辆模型的综合评价体系;Bae 等^[18]设计出一种上下分层式综合横纵向协同控制系统,上层横向控制系统负责车辆的方向控制,下层纵向控制系统负责车辆的速度控制,上下层系统相互耦合,保证了整个控制系统的闭环,提高了车辆轨迹跟踪的稳定性和精确性。

目前智能汽车的跟踪控制研究大多聚焦于单一的横向或纵向控制,如果应用到横纵向协同控制,会因为实时性的限制难以达到平稳与精确的控制效果。本文提出一种基于自适应模糊神经网络(ANFIS)与 LQR 和 PID 结合的控制策略。这种策略区别于单一的模糊控制或其他设定规则的 LQR 和 PID 权重系数调整方法,在现有研究基础上,通过自适应模糊神经网络将模糊控制与神经网络结合的优势运用在 LQR 和 PID 权重系数的实时调整上,通过大量数据集完成训练后,神经网络可以不借助专家经验找到复杂系统中输入输出的关系,实时性不会因为需要大量的在线计算而降低,调整后的权重系数也更符合当前车速的控制效果,得到更精确的前轮转角控制量,以提高不同工况下车辆的控制精度,实现智能汽车的横纵向协同控制。

2 轨迹跟踪误差动力学模型

2.1 车辆动力学简化模型

如图 1 所示,为了分析车辆的基本特性,简化转向的影响,默认车辆为前轮驱动,以前轮转角为输入;同时忽略悬架系统的作用,研究车辆沿 y 轴的侧向运动与绕 z 轴的横摆运动,一共两个自由度。此外,考虑到汽车运动中轮胎的侧偏特性,保持侧向加速度在较小范围以内,将实际运动的车辆简化为一种线性二自由度的汽车模型。

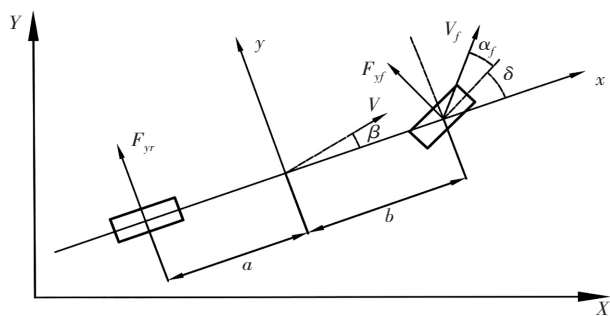


图1 车辆动力学模型

Fig.1 Dynamics model of vehicle

将轮胎侧偏角与侧偏力的线性关系以及前后轮侧偏角及其速度关系代入模型,得到车辆关于横向加速度和横摆角加速度的状态空间方程:

$$\dot{X} = A \cdot X + B \cdot U \quad (1)$$

式(1)中:

$$X = \begin{pmatrix} y \\ \dot{y} \\ \varphi \\ \dot{\varphi} \end{pmatrix}$$

$$A = \begin{pmatrix} \frac{C_{af} + C_{ar}}{mv_x} & \frac{aC_{af} - bC_{ar}}{mv_x} - v_x \\ \frac{aC_{af} - bC_{ar}}{I_z v_x} & \frac{a^2 C_{af} + b^2 C_{ar}}{I_z v_x} \end{pmatrix}$$

$$B = \begin{pmatrix} \frac{C_{af}}{m} \\ -\frac{aC_{af}}{I_z} \end{pmatrix}$$

其中, m 为车辆质量, I_z 为车辆转动惯量, a 、 b 为质心到前后轴的距离, C_{af} 、 C_{ar} 为前后轮侧偏刚度。

2.2 轨迹跟踪误差动力学模型

在智能汽车驾驶的轨迹跟踪控制系统中,用车辆当前位置与规划路线位姿信息的误差作为状态变量的动力学模型,能够更加直观地分析前轮转角与车辆横纵位置的关系(图3)。同时,对车辆当前位置加入一定的预瞄距离,能够更贴合实际的驾驶情况。

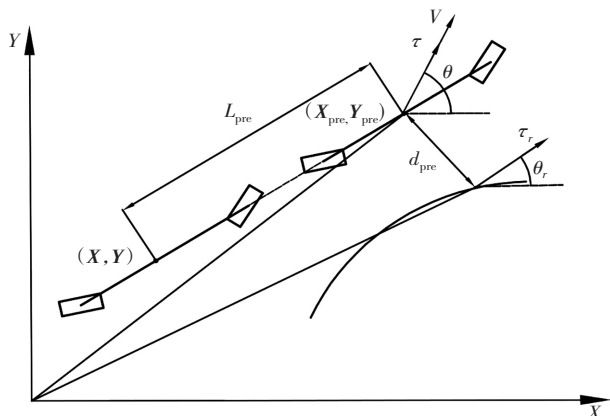


图2 轨迹跟踪误差模型

Fig.2 Model of path tracking error

定义横向位移误差 $e_d = d_{pre}$, 航向角误差 $e_\varphi = \theta - \theta_r$ 。由航向角与质心侧偏角和横摆角的关系以及三角函数公式,代入车辆动力学模型,可以得到关于轨迹跟踪误差的动力学模型:

$$\dot{X} = A \cdot X + B \cdot U + C \cdot \dot{\theta}_r \quad (2)$$

式(2)中:

$$X = \begin{pmatrix} e_d \\ \dot{e}_d \\ e_\varphi \\ \dot{e}_\varphi \end{pmatrix}$$

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{C_{af} + C_{ar}}{mv_x} & -\frac{C_{af} + C_{ar}}{m} & \frac{aC_{af} - bC_{ar}}{mv_x} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & \frac{aC_{af} - bC_{ar}}{I_z v_x} & \frac{aC_{af} - bC_{ar}}{I_z} & \frac{a^2 C_{af} + b^2 C_{ar}}{I_z v_x} \end{pmatrix}$$

$$B = \begin{pmatrix} 0 \\ \frac{C_{af}}{m} \\ 0 \\ -\frac{aC_{af}}{I_z} \end{pmatrix}, C = \begin{pmatrix} 0 \\ \frac{aC_{af} - bC_{ar}}{mv_x} - v_x \\ 0 \\ \frac{a^2 C_{af} + b^2 C_{ar}}{I_z v_x} \end{pmatrix}$$

3 ANFIS-LQR/PID 控制器设计

3.1 横向 LQR 控制器设计

LQR 控制的本质是通过构造目标函数和求解黎卡提方程得到最优的控制信号来减少成本。在实际中通过调节权重系数 Q 与 R , 求解出满足实际控制问题的控制信号。

对于已知的系统状态方程:

$$\dot{X}(t) = A \cdot X(t) + B \cdot U(t) \quad (3)$$

式(3)中, $U(t) = -KX(t)$ 为系统确定的最优反馈控制率。通过求解矩阵 K 使性能指标 J 达到最小:

$$J = \int_0^\infty [X^T(t) \cdot Q \cdot X(t) + U^T(t) \cdot R \cdot U(t)] dt \quad (4)$$

Q 代表状态量权重矩阵, R 代表控制量权重矩阵:

$$Q = \text{diag}(q_1, q_2, q_3, q_4), R = (r) \quad (5)$$

基于二次型性能指标, LQR 系统的设计目的是推导出矩阵 K 。经推导, J 的最优控制规律是线性的, 得到

$$U(t) = -KX(t) = -R^{-1}B^T P X(t) \quad (6)$$

矩阵 P 为黎卡提方程的解:

$$A^T P + P A - P B R^{-1} B^T P + Q = 0 \quad (7)$$

将最优控制规律 U 代入, 推导得到预瞄轨迹跟踪误差

动力学模型:

$$\dot{X} = (A - BK) \cdot X + C \cdot \dot{\theta}_r \quad (8)$$

由于式(8)中 $\dot{\theta}_r$ 项的存在,即使矩阵控制 U 满足最优控制规律, K 的取值仍然不能使得 $\dot{X}$ 、 X 同时为零,即车辆在弯道时,即使 $(A - BK)$ 趋于稳定,跟踪误差也不会完全收敛到 0。所以引入一个前馈控制来确保车辆在弯道路线的稳定控制,实现零稳态误差。这个闭环系统可以表示为

$$\dot{X} = A \cdot X + B \cdot (-K \cdot X + \delta_f) + C \cdot \dot{\theta}_r \quad (9)$$

经推导得到:

$$X = \begin{pmatrix} \frac{1}{k_1} \left\{ \dot{\theta}_f - \frac{\dot{\theta}_r}{V_x} \left[a + b - bk_3 - \frac{mV_x^2}{a+b} \left(\frac{b}{C_{af}} + \frac{a}{C_{ar}} k_3 - \frac{a}{C_{ar}} \right) \right] \right\} \\ 0 \\ -\frac{\dot{\theta}_r}{V_x} \left(b + \frac{a}{a+b} \cdot \frac{mV_x^2}{C_{ar}} \right) \\ 0 \end{pmatrix} \quad (10)$$

对式(10)进行分析,横向位移误差可以在前馈误差选取合适的值时为 0,横摆角误差则与汽车本身的结构参数有关,无法通过改变前馈误差来改变。所以可得到:

$$\dot{\theta}_f = \frac{\dot{\theta}_r}{V_x} \left[a + b - bk_3 - \frac{mV_x^2}{a+b} \left(\frac{b}{C_{af}} + \frac{a}{C_{ar}} k_3 - \frac{a}{C_{ar}} \right) \right] \quad (11)$$

加入前馈控制得到最优控制规律:

$$U = -K \cdot X + \delta_f \quad (12)$$

3.2 纵向 PID 控制器设计

PID 控制主要通过设计模型的比例、积分、微分 3 种调节规律,并将其结合在一起达到控制效果。PID 控制算法可表示为

$$U(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (13)$$

式(13)中, $U(t)$ 为 PID 算法的输入控制量;在车辆纵向控制中, $e(t)$ 为车辆当前速度和期望速度的偏差值; K_p 、 K_i 和 K_d 分别代表控制器的比例系数、积分系数和微分系数。根据已经建立的轨迹跟踪误差动力学模型,可以得到纵向位移的误差 e_s 为车辆当前位置在 Frenet 坐标系下的投影与目标点的距离:

$$e_s = (\vec{X} - \vec{X}_r) \cdot \tau_r \quad (14)$$

车辆在 Frenet 坐标系下的纵向速度为

$$\dot{S} = \frac{1}{1 - k_r d} (v_x \cos e_\varphi - v_y \sin e_\varphi) \quad (15)$$

3.3 自适应模糊神经网络 ANFIS

在实际车辆驾驶过程中,车速的变化会对控制器轨迹跟踪的效果带来很大的影响,横向控制器的权重系数 Q 和 R ,纵向控制器的权重系数 K_p 、 K_i 、 K_d 都无法很好地适应车速的变化。引入模糊控制虽可以达到控制策略权重系数的自适应调节,但其中的隶属度函数和专家的先验知识仍然缺乏自学习和调整的能力。

自适应模糊神经网络控制策略在车辆领域和控制领域中应用广泛,这种控制策略将神经网络的自学习能力和模糊控制的推理能力进行了融合。图 3 是具有 5 层 ANN 结构的典型 Sugeno 模糊模型^[19],其中输入是期望车速和期望车速的变化率。

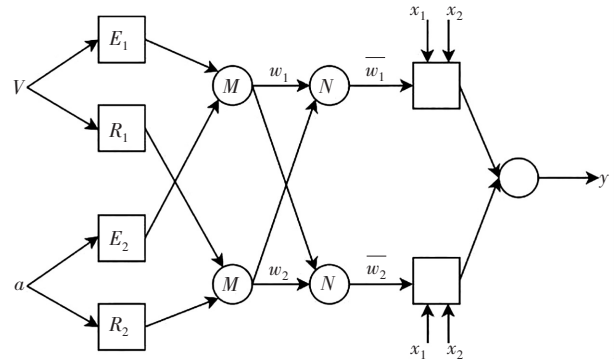


图 3 模糊神经网络模型

Fig. 3 Model of ANFIS

第 1 层为输入层,将输入变量车速误差和加速度误差模糊化,其中每个神经元节点代表一个逻辑语言值。隶属函数选择高斯函数:

$$\mu_{ij}(x_i) = \exp \left(-\frac{(x_i - m_{ij})^2}{(\sigma_{ij}^2)} \right) \quad (16)$$

式(16)中, i 表示输入变量的数量, j 表示模糊变量的数量, $\mu_{ij}(x_i)$ 表示输入变量对应的模糊变量值, m_{ij} 和 σ_{ij} 表示高斯函数的中心值和宽度。

第 2 层完成模糊化任务,这一层的输出为所有输入信号相乘,得到每个规则的触发强度:

$$W_k = \mu_{1i}(x_1) \times \mu_{2i}(x_2) \quad (17)$$

第 3 层和第 4 层共同完成模糊推理的过程,第 3 层完成规则的前件,实现归一化计算:

$$\bar{W}_k = \frac{W_k}{\sum W_k} \quad (18)$$

第 4 层完成规则的后件,进行模糊推理并输出结果:

$$y_k = \bar{W}_k \cdot f_k = p_k \cdot x_1 + q_k \cdot x_2 + r_k \quad (19)$$

第 5 层实现清晰化过程。采用加权平均法,最后输出控制量:

$$y = \sum_k \overline{W_k} \cdot y_k \tag{20}$$

3.4 ANFIS 横纵向协同控制策略设计

ANFIS-LQR/PID 横纵向协同控制策略是将模糊控制、神经网络控制、LQR 控制与 PID 控制结合在一起,实现控制器中横纵向控制权重系数的自适应调整,从而使得车辆在不同车速下,不仅能够保证跟踪效果,而且使得驾乘人员的舒适性在满足当前跟踪效果的同时,一直处于最优状态^[20]。

ANFIS-LQR/PID 横纵向协同控制策略如图 4 所示。横向控制方面,控制回路将前端规划的最优轨迹与当前车身的位姿信息处理后,将当前车速误差以及车辆加速度误差输入训练后的自适应模糊神经网络模型中,输出自适应的权重矩阵,再结合车身参数及质心误差输出 LQR 控制部分的前轮转角,最后加入前馈补偿,完成最终汽车前轮转角输出。对于纵向控制,将规划轨迹的速度输入自适应模糊神经网络模型中,输出 K_p 、 K_i 、 K_d ,完成汽车速度输出。

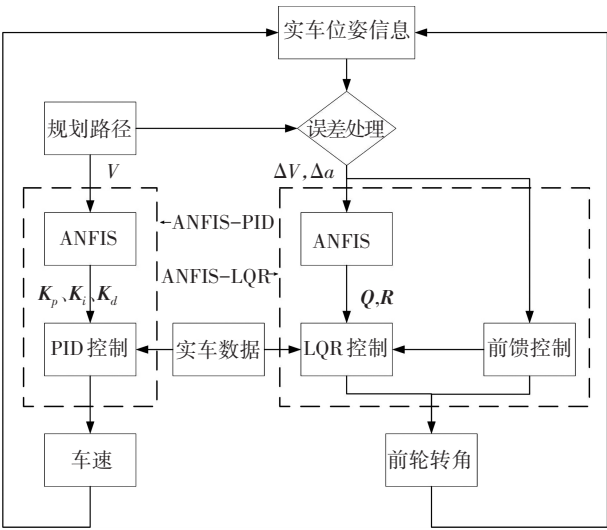


图 4 ANFIS-LQR/PID 控制策略

Fig. 4 ANFIS-LQR/PID control strategy

对于 LQR 权重矩阵系数, Q 为状态量权重矩阵, Q 矩阵中的 q_1 、 q_2 、 q_3 、 q_4 分别代表车辆横向控制中的横向位移误差、横向速度误差、航向角误差、航向角速度误差的权重系数; R 为控制量权重矩阵, r 为车辆前轮转角的权重系数。衡量车辆跟踪控制的精确性通常考虑横向位移误差 q_1 和航向角误差 q_3 的波动范围,驾乘人员的舒适性通常取决于前轮转角 r 的变化程度。在车辆的纵向控制中, PID 权重系数 K_p 、 K_i 、 K_d , 分别决定了纵向速度过程中的响应速度、超调限制和抗干扰操作的稳定性。

根据上述分析,误差计算模块将车辆速度偏差 Δv 及加速度偏差 Δa 输入横纵向控制器各自的自适应模

糊神经网络模型,然后通过模型中的混合学习算法找到自适应输出权重系数。在横向控制器中,将 q_2 、 q_4 设置为固定值 1,输出 q_1 、 q_3 、 r ,完成车辆的横向控制。在纵向控制器中,输出 K_p 、 K_i 、 K_d ,完成车辆的纵向控制。

各输入输出变量模糊论域参考朱兴建提出的智能汽车车辆控制测评标准^[21],如表 1 所列。允许误差为 10^{-4} ,训练次数为 3 000。

表 1 变量论域

Table 1 Domain of variables

变 量	论 域
e_d	(-0.5, 0.5)
e_φ	(-0.5, 0.5)
V_e	(-1, 1)
V_a	(-1, 1)
q_1	(0, 100)
q_3	(0, 60)
r	(0, 100)
K_p	(0, 100)
K_i	(0, 100)
K_d	(0, 100)

4 联合仿真分析

为验证所设计的 ANFIS-LQR/PID 横纵向协同控制策略,利用 PreScan-CarSim/Simulink 联合仿真的形式对设计的控制器进行测试。其中 PreScan 仿真部分主要搭建传感器和收集道路环境信息,车辆类型选择 Audi_A8_Sedan。CarSim 仿真部分主要利用其输入输出设置车辆动力学模型参数,车辆类型选择 C 级 Hatchback。车辆主要参数如表 2 所示。

表 2 整车参数

Table 2 Parameters of the vehicle

参数名称	数 值
车身质量 m/kg	1 570
质心到前轴距离 a/m	1.396
质心到后轴距离 b/m	1.732
前轮总侧偏刚度 $F_{yt}/(\text{N} \cdot \text{rad}^{-1})$	-34 100
后轮总侧偏刚度 $F_{yr}/(\text{N} \cdot \text{rad}^{-1})$	-32 250
Z 轴转动惯量 $I_z/(\text{kg} \cdot \text{m}^2)$	1 750

ANFIS-LQR/PID 横纵向协同控制策略区别于单一的转弯和直线驾驶控制,侧重于实际驾驶中需要同时横纵向控制的驾驶场景。设置 3 种仿真控制场景分别对应低速与高速下的协同控制。连续弯道仿真工况测试的是智能汽车在连续横向变化的同时如何保持纵

向车速稳定;加速超车仿真工况考验的是车辆在纵向速度急剧变化的同时,横向控制如何维持车辆在车道上的稳定驾驶;大曲率变速跟车工况测试的是车辆在大曲率弯道中横向控制保持稳定输出的同时如何保持纵向车速按规划持续变化。这 3 种场景也是实际驾驶中最常见的驾驶场景。

4.1 连续弯道定速巡航工况仿真

图 5—图 9 描绘了车辆在连续弯道轨迹中定速巡航的仿真实验结果。图 5 与图 6 分别是航向角误差和横向位移误差。ANFIS-LQR/PID 横纵向协同控制策略可以控制车辆在连续弯道的路线下,将航向角误差和横向误差控制在 0.07 rad 和 0.25 m 以内。航向角误差在两个弯道入弯时出现小于 0.01 rad 的波动,整个横向控制满足了实际弯道驾驶中的横向控制要求。

图 7 与图 8 分别是速度误差和纵向位移误差。ANFIS-LQR/PID 横纵向协同控制策略在纵向控制方面,将速度误差和纵向位移误差控制在 0.03 m/s 和 0.25 m 以内。连续弯道仿真工况对纵向控制的稳定性要求较高,仿真结果完全满足纵向控制的驾驶要求。结合图 9 综合轨迹误差分析,车辆在进入弯道前的直线驾驶中重合规划路线,在弯道驾驶的过程中,轨迹偏差小于 0.2 m 。对照美国道路几何标准中园区和城市街道的横纵向误差,车辆的控制效果达到了实际驾驶的精确性要求^[22]。

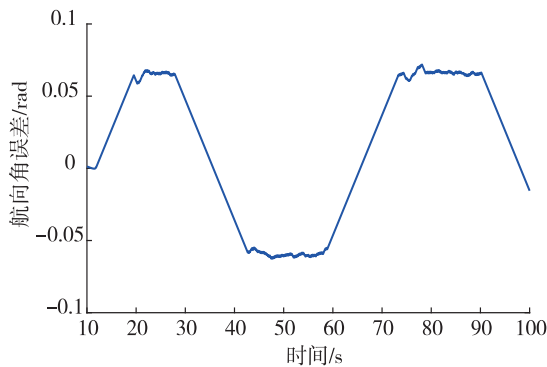


图 5 连续弯道的航向角误差

Fig. 5 Course angle deviation in continuous curves

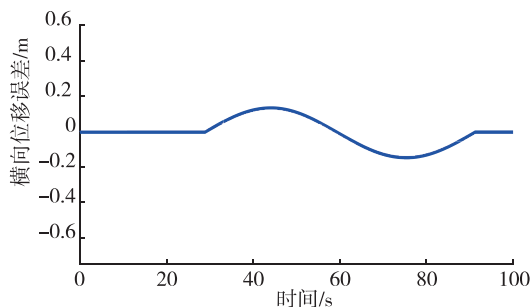


图 6 连续弯道的横向位移误差

Fig. 6 Lateral displacement deviation in continuous curves

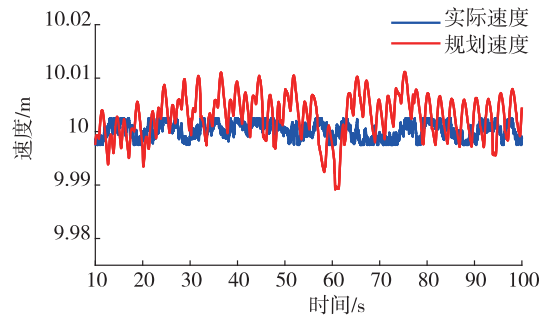


图 7 连续弯道的速度误差

Fig. 7 Speed deviation in continuous curves

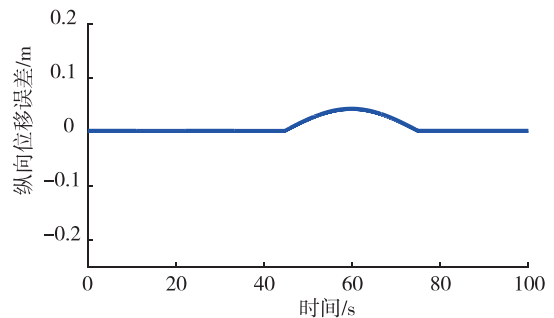


图 8 连续弯道的纵向位移误差

Fig. 8 Longitudinal displacement deviation in continuous curves

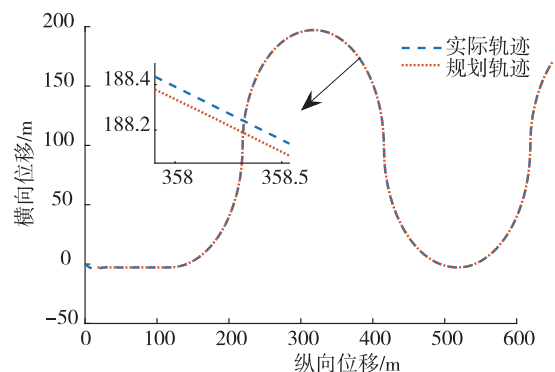


图 9 连续弯道的轨迹误差

Fig. 9 Track deviation in continuous curves

4.2 双车道加速超车工况仿真

图 10—图 14 描绘了车辆在双车道轨迹加速变道超车的仿真实验结果。图 10 与图 11 分别是航向角误差和横向位移误差。从结果可以看出: ANFIS-LQR/PID 横纵向协同控制策略可以在双车道的加速变道超车实验中,将航向角误差和横向误差控制在 0.04 rad 和 0.25 m 以内。横向误差主要出现在初始加速和后半段驶入第二车道阶段,在初始加速阶段也让航向角误差达到峰值,但 0.04 rad 的偏差仍在可控范围以内。

图 12 与图 13 分别是速度误差和纵向位移误差。从结果可以看出: ANFIS-LQR/PID 横纵向协同控制策略在纵向控制方面,将速度误差和纵向位移误差控制在 0.5 m/s 和 0.2 m 以内。超车工况仿真实验中对于车辆纵向控制中速度的要求较高,结合图 14 综合轨迹

误差,对照美国道路几何标准中高速行驶的横纵向误差,车辆的控制效果达到了实际驾驶的精确性要求^[22]。

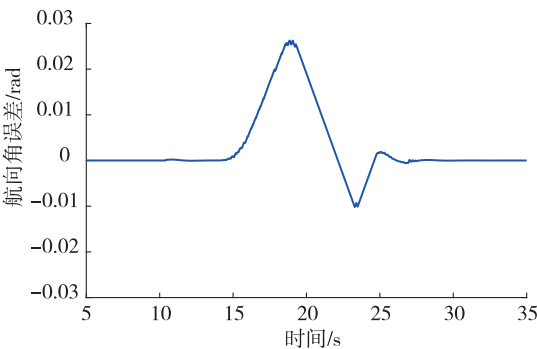


图 10 基于超车工况的航向角误差

Fig. 10 Course angle deviation under overtaking condition

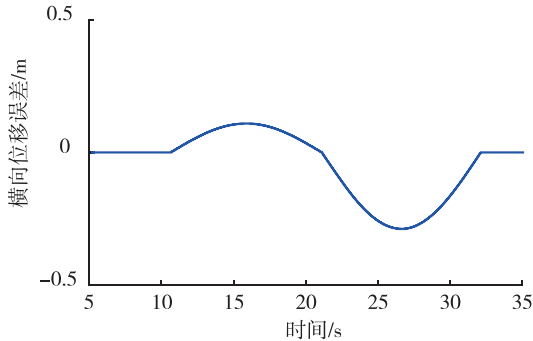


图 11 基于超车工况的横向位移误差

Fig. 11 Lateral displacement deviation under overtaking condition

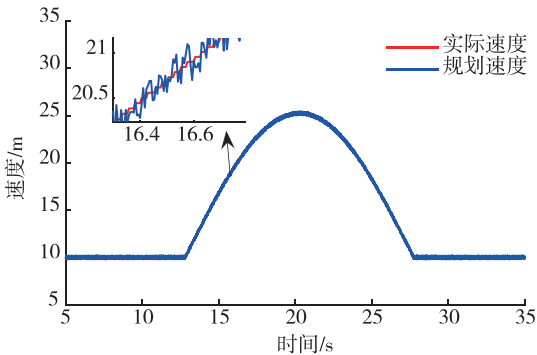


图 12 基于超车工况的速度误差

Fig. 12 Speed deviation under overtaking condition

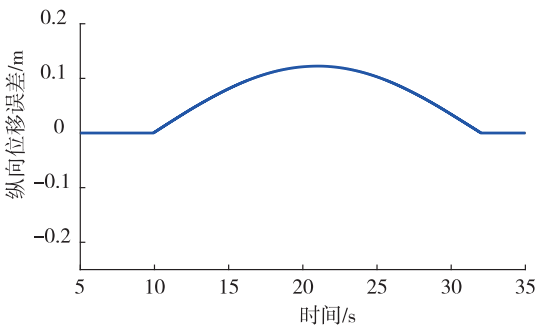


图 13 基于超车工况的纵向位移误差

Fig. 13 Longitudinal displacement deviation under overtaking condition

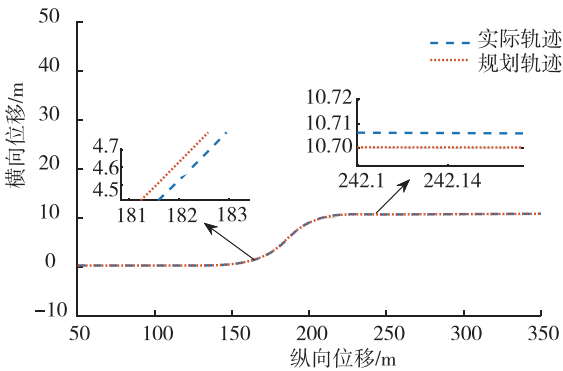


图 14 基于超车工况的轨迹误差

Fig. 14 Track deviation under overtaking condition

4.3 大曲率变速跟车工况仿真

图 15—图 19 展示了车辆在大曲率变速跟车仿真实验中的控制效果。图 15 和图 16 展示了航向角误差和横向位移误差的变化情况。采用 ANFIS-LQR/PID 横纵向协同控制策略,车辆在大曲率变速跟车工况实验中,能够将航向角误差和横向误差控制在 0.06 rad 和 0.18 m 以内。航向角误差和横向误差峰值主要集中在进入弯道的最初阶段,但随着车辆行驶,即使车辆速度不断增大,控制策略仍然将误差逐渐降低。在初始进入弯道阶段,航向角误差和横向误差也在可控范围以内。

图 17 和图 18 展示了速度误差和纵向位移误差的变化情况。采用 ANFIS-LQR/PID 横纵向协同控制策略,在大曲率变速跟车仿真实验中,车辆在纵向控制方面能够将速度误差控制在 0.3 m/s 以内,纵向位移误差方面,虽然在大曲率弯道中随着车速上升,误差在不断变大,但峰值仍然控制在 0.1 m 以内。在大曲率变速跟车仿真实验中,要求车辆在保持固定航向角下,纵向控制速度要达到较高的控制精度。结合图 19 的综合轨迹误差分析,车辆的控制效果达到了实际驾驶的精确性要求,满足美国道路几何标准中高速行驶的速度误差要求^[22]。

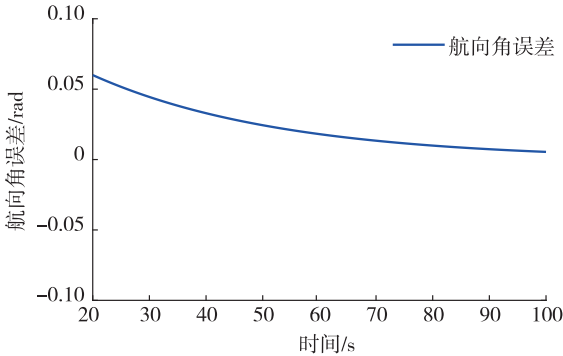


图 15 大曲率工况的航向角误差

Fig. 15 Course angle deviation under large curvature condition

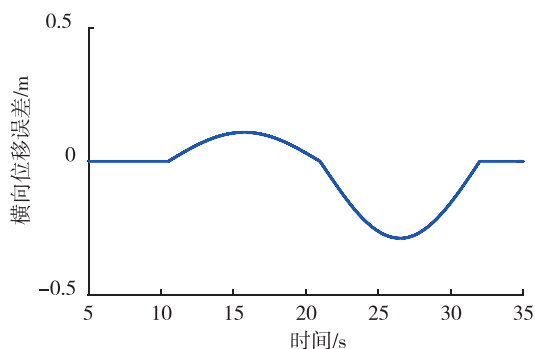


图 16 大曲率工况的横向位移误差

Fig. 16 Lateral displacement deviation under large curvature condition

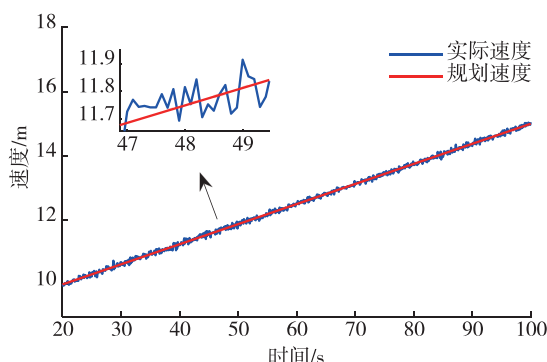


图 17 大曲率工况的速度误差

Fig. 17 Speed deviation under large curvature condition

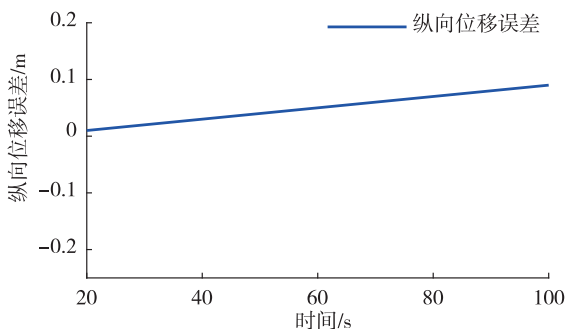


图 18 大曲率工况的纵向位移误差

Fig. 18 Longitudinal displacement deviation under large curvature condition

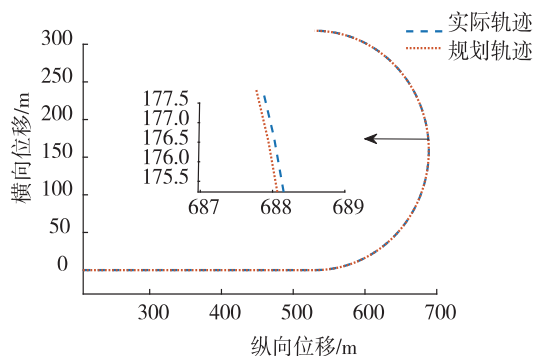


图 19 大曲率工况的轨迹误差

Fig. 19 Track deviation under large curvature condition

5 结论

针对智能汽车轨迹跟踪控制问题,通过建立以车辆轨迹与规划轨迹之间的误差为状态变量的轨迹误差动力学模型,设计了一种 ANFIS-LQR/PID 横纵向协同控制策略,利用预瞄补偿提高轨迹跟踪实时性,并结合状态方程信息加入前馈控制模块以消除系统稳态误差。同时,针对横纵向控制策略中,固定的权重系数无法精确而平稳地控制不同工况下的智能汽车轨迹跟踪这一问题,提出一种基于自适应模糊神经网络的参数调节策略来提高轨迹跟踪控制的精确性和实时性。通过 PreScan-CarSim/Simulink 联合仿真证明了设计的 ANFIS-LQR/PID 横纵向协同控制策略在不同车速工况下均具有较好的跟踪控制效果。

参考文献(References):

- [1] 熊璐, 杨兴, 卓桂荣, 等. 无人驾驶车辆的运动控制发展现状综述[J]. 机械工程学报, 2020, 56(10): 127-143.
XIONG Lu, YANG Xing, ZHUO Gui-rong, et al. Review on motion control of autonomous vehicles[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56(10): 127-143.
- [2] SNIDER J M. Automatic steering methods for autonomous automobile path tracking[R]. Pittsburgh: Carnegie Mellon University Pittsburgh PA Robotics Institute, 2009.
- [3] HOFFMANN G M, TOMLIN C J, MONTEMERLO M, et al. Autonomous automobile trajectory tracking for off-road driving: Controller design, experimental validation and racing[C]// American Control Conference. New York: IEEE, 2007: 2296-2301.
- [4] NAM H, CHOI W, AHN C. Model predictive control for evasive steering of an autonomous vehicle[J]. International Journal of Automotive Technology, 2019, 20(5): 1033-1042.
- [5] 臧勇, 蔡英凤, 孙晓强, 等. 基于可拓博弈的智能汽车轨迹跟踪协调控制方法研究[J]. 机械工程学报, 2022, 58(8): 181-194.
ZANG Yong, CAI Ying-feng, SUN Xiao-qiang, et al. Research on trajectory tracking and coordination control method of intelligent vehicle based on extendable game[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2022, 58(8): 181-194.
- [6] 张智能, 李以农, 余颖弘, 等. 复杂动态环境下智能汽车局部路径规划与跟踪算法研究[J]. 中国公路学报, 2022, 35(9): 372-386.
ZHANG Zhi-neng, LI Yi-nong, YU Ying-hong. Research on local path planning and tracking algorithm of intelligent vehicle

- in complex dynamic environment[J]. China Journal of Highway and Transport, 2022, 35(9): 372–386.
- [7] 高琳琳,唐风敏,郭蓬,等. 自动驾驶横向运动控制的改进LQR方法研究[J]. 机械科学与技术, 2021, 40(3): 435–441.
- GAO Lin-lin, TANG Feng-min, GUO Peng, et al. Research on improved LQR method for self-driving vehicle lateral motion[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2021, 40(3): 435–441.
- [8] 胡杰,钟鑫凯,陈瑞楠,等. 基于模糊LQR的智能汽车路径跟踪控制[J]. 汽车工程, 2022, 44(1): 17–25, 43.
- HU Jie, ZHONG Xin-kai, CHEN Rui-nan, et al. Path tracking control of intelligent vehicles based on fuzzy LQR[J]. Automotive Engineering, 2022, 44(1): 17–25.
- [9] KAPANIA N R, GERDES J C. Design of a feedback-feedforward steering controller for accurate path tracking and stability at the limits of handling[J]. Vehicle System Dynamics, 2015, 53(12): 1687–1704.
- [10] GOODARZI A, SABOOTEH A, ESMAILZADEH E. Automatic path control based on integrated steering and external yaw-moment control[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, 2008, 222(2): 189–200.
- [11] WANG R R, JING H, HU C, et al. Robust H_∞ path following control for autonomous ground vehicles with delay and data dropout[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2016, 17(7): 2042–2050.
- [12] HANG P, CHEN X, ZHANG B, et al. Longitudinal velocity tracking control of a 4WID electric vehicle[J]. IFAC-papers OnLine, 2018, 51(31): 790–795.
- [13] GUO J, LUO Y, LI K. Adaptive neural-network sliding mode cascade architecture of longitudinal tracking control for unmanned vehicles[J]. Nonlinear Dynamics, 2017, 87(4): 2497–2510.
- [14] 史鸿枫,刘明春,黄菊花. 智能电动车辆横纵向协同运动控制[J]. 南昌大学学报(工科版), 2021, 43(1): 62–72.
- SHI Hong-feng, LIU Ming-chun, HUANG Ju-hua. Lateral and longitudinal motion cooperative control of intelligent electric vehicle[J]. Journal of Nanchang University (Engineering & Technology), 2021, 43(1): 62–72.
- [15] 曹轩豪. 自动驾驶汽车跟驰换道运动控制与决策规划研究[D]. 长春: 吉林大学, 2022.
- CAO Xuan-hao. Motion control and decision planning for car following and lane changing of autonomous vehicle[D]. Changchun: Jilin University, 2022.
- [16] 丛森森,高峰,许述财. 基于动态稳定域的车辆横纵向稳定性协同控制[J]. 汽车工程, 2022, 44(6): 900–908.
- CONG Sen-sen, GAO Feng, XU Shu-cai. Cooperative control of vehicle lateral and longitudinal stability based on dynamic stability region[J]. Automotive Engineering, 2022, 44(6): 900–908.
- [17] 郭明新,郭戈,蔡凌,等. 基于时变模型预测控制方法的车辆横纵向协同控制[J]. 交通运输工程与信息学报, 2023, 21(1): 164–177.
- GUO Ming-xin, GUO Ge, CAI Ling, et al. Vehicle lateral and longitudinal cooperative following-control based on time-varying model predictive control method[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering and Information Technology, 2023, 21(1): 164–177.
- [18] BAE I, MOON J, CHA J, et al. Integrated lateral and longitudinal control system for autonomous vehicles[C]// Proceedings of the 17th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems. Piscataway: IEEE Press, 2014: 406–411.
- [19] 金爱娟,邵飞旋,严紫光. 基于自适应模糊神经网络的感应电机矢量控制[J]. 电子科技, 2022, 35(9): 65–73.
- JIN Ai-jun, SHAO Fei-xuan, YAN Zi-guang. Vector Control of induction motor Based on adaptive fuzzy neural network[J]. Journal of Electronic Science and Technology, 2022, 35(9): 65–73.
- [20] 辛亮,杜子学,许舟洲. 基于ANFIS-PID控制策略的主动悬架动力学性能研究[J]. 机械设计与制造, 2022(5): 157–159.
- XIN Liang, DU Zi-xue, XU Zhou-zhou. Study on dynamic performance of active suspension based on ANFIS-PID control strategy[J]. Mechanical Design and Manufacturing, 2022(5): 157–159.
- [21] 朱兴建. 基于模糊自适应MPC的无人驾驶车辆轨迹跟踪控制研究[D]. 成都: 西华大学, 2022.
- ZHU Xing-jian. Based on fuzzy adaptive MPC unmanned vehicle trajectory tracking control research[D]. Chengdu: Huaxi University, 2022.
- [22] REID T G R, HOUTS S E, CAMMARATA R, et al. Localization requirements for autonomous vehicles[J]. SAE International Journal of Connected and Automated Vehicles, 2019, 2(3): 173–190.

责任编辑:李翠薇