

自适应巡航控制系统主动换道功能研究

武子为 秦玉英

(辽宁工业大学, 锦州 121001)

【摘要】针对传统自适应巡航控制(ACC)系统在遇到前方低速车辆时仅能保持低速跟驰的局限性,开发了一种具有换道功能的ACC系统。首先将驾驶模式细分为定速巡航、跟随巡航和换道巡航,并基于速度不满意度制定了多模式切换策略以灵活应对不同的驾驶场景和驾驶员需求,然后,在现有ACC系统的基础上加入主动换道功能,应用五次多项式精确规划换道轨迹,基于模型预测控制(MPC)算法构建了换道巡航轨迹跟踪控制器。最后,基于MATLAB/Simulink/CarSim对所搭建的控制器进行验证,结果表明,该策略可以实现符合驾驶员意图的主动换道功能。

关键词:自适应巡航控制 模型预测控制 主动换道 五次多项式

中图分类号:U471.1 **文献标志码:**A **DOI:** 10.20104/j.cnki.1674-6546.20240321

Research on Active Lane Change Function Based on Adaptive Cruise Control System

Wu Ziwei, Qin Yuying

(Liaoning University of Technology, Jinzhou 121001)

【Abstract】To address the challenge where the traditional Adaptive Cruise Control (ACC) are limited to maintain low-speed following when encountering a low-speed vehicle in front, an ACC control system with lane change function is developed. Firstly the system subdivides the driving modes into three types: cruise control, cruise following and lane change cruise, and a multi-mode switching strategy based on speed dissatisfaction is formulated to flexibly respond to different driving scenarios and driver's needs. On the basis of the existing adaptive cruise system, the active lane change function is added, and the quintic polynomial is used to accurately plan the lane change trajectory, and then the lane change cruise trajectory tracking controller is constructed based on the Model Predictive Control (MPC) algorithm. Finally, the controller is verified based on MATLAB/Simulink/CarSim. The simulation results show that the proposed strategy meets the requirements of active lane change in line with the driver's intention.

Key words: Adaptive Cruise Control (ACC), Model Predictive Control (MPC), Lane change, Quintic polynomial

【引用格式】武子为,秦玉英. 自适应巡航控制系统主动换道功能研究[J]. 汽车工程师, 2025(8): 42-48.

WU Z W, QIN Y Y. Research on Active Lane Change Function Based on Adaptive Cruise Control System[J]. Automotive Engineer, 2025(8): 42-48.

1 前言

在换道工况^[1]中,换道行为分为两种:强制换道,即因路面状况限制,驾驶员依道路交通安全法规指引,被迫改变行驶车道;自由换道,即当前车道前方存在低速行驶的车辆,驾驶员为获得更好的驾驶体验,选择换道以获得更高的车速。传统的自适应巡航控制(Adaptive Cruise Control, ACC)系统研究主要

针对车辆的纵向运动,在遇到低速行驶的车辆时,主车仅能以较小的速度跟随前方车辆,不能满足驾驶员的主观需求。

在自适应巡航控制基础上开发主动换道技术,可以提高车辆在复杂交通环境下的行驶效率。通过设计多模式切换策略,对车辆进行横、纵向控制,不仅可显著提高乘坐的舒适性和便捷性^[2],还可通过优化行驶路径和减少不必要的加减速有效提高道路利用率^[3]。

目前,针对具有换道功能的系统控制策略研究较少。张智能^[4]以跟踪误差最小为目标,采用粒子群优化算法对分数阶PID控制器的参数进行了整定,但PID控制算法在横向控制过程中瞬态响应较差,只适用于路径曲率较小以及低速跟踪的场景。姚军^[5]提出了具有转向控制功能的自适应巡航控制系统,主要对纵向、横向以及横、纵向耦合控制进行研究,但未涉及换道功能。

基于此,本文在建立ACC系统模型的基础上,考虑驾驶员的期望速度,基于速度不满意度^[6]设计多模式切换策略,然后在现有基于PID^[7]构建的定速巡航控制器和基于模型预测控制(Model Predictive Control, MPC)算法构建的跟随巡航控制器基础上采用MPC算法^[8]构建换道巡航轨迹跟踪控制器,并利用五次多项式^[9]规划换道轨迹,最后,利用MATLAB/

Simulink/CarSim开展仿真验证。

2 自适应巡航控制系统设计

本文采用上、下两层控制器的分层控制^[10]方法实现ACC系统的定速巡航、跟随巡航、换道巡航功能。上层控制器根据主车所在车道前方的实时交通状况决策当前所处模式。当雷达传感器检测到主车前方有行驶车辆,且当前速度无法满足预设的满意度条件(如低于驾驶员期望速度或道路条件允许的更高速度)时,系统会自动触发换道巡航操作。下层控制器将上层控制器规划的期望加速度转化为具体的车辆控制动作,即节气门开度与制动踏板压力,确保车辆按照既定的巡航模式行驶,并保持与前车的安全距离。本文自适应巡航控制系统的技术路线如图1所示。

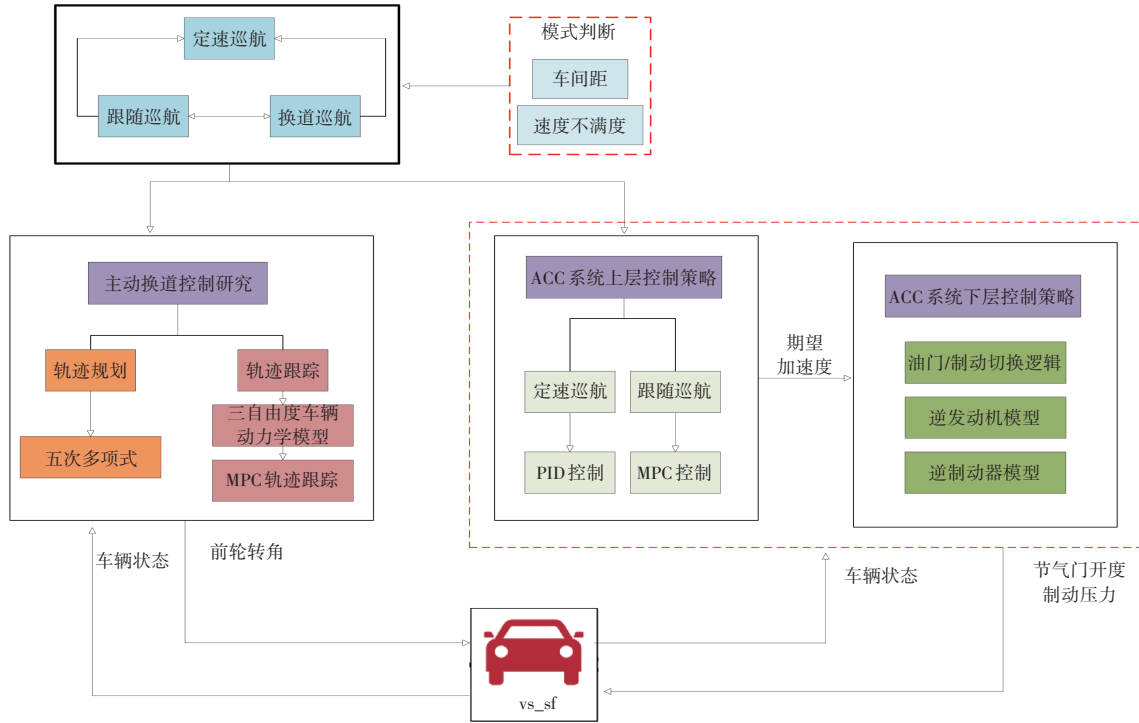


图1 自适应巡航控制系统技术路线

2.1 纵向动力学模型

2.1.1 逆发动机模型

根据力学平衡推导期望的输出扭矩:

$$F_t = F_r + F_w + F_i + F_j \quad (1)$$

式中: $F_t = T_{iq} i_0 i_g \eta_T / r$ 为克服阻力所需的驱动力, $F_r = mgf \cdot \cos \alpha$ 为滚动阻力, $F_w = C_d A_w \rho_w v_x^2 / 2$ 为风阻, $F_i = mg \cdot \sin \alpha$ 为爬坡阻力, $F_j = \delta m a_x$ 为加速阻力, T_{iq} 为发动机扭矩, i_0 为主减速器传动比, i_g 为变速器传动比, η_T 为传动系统的传动效率, r 为车轮滚动半径,

m 为整车质量, g 为重力加速度, f 为滚动阻力系数, α 为道路坡度, C_d 为空气阻力系数, A_w 为车辆迎风面积, ρ_w 为空气密度, v_x 为车速, δ 为旋转质量换算系数, a_x 为车辆纵向加速度。

假设道路坡度为0, 即 $\cos \alpha = 1$, $\sin \alpha = 0$, 可得期望发动机扭矩为:

$$T_{des} = \frac{(mgf + \frac{1}{2} C_d A_w \rho_w v_x^2 + \delta m a_{des}) r}{i_0 i_g \eta_T} \quad (2)$$

式中: a_{des} 为期望加速度, T_{des} 为期望发动机扭矩。

车辆在行驶过程中,发动机扭矩的期望输出与发动机工作状态的对应关系参照发动机MAP图:

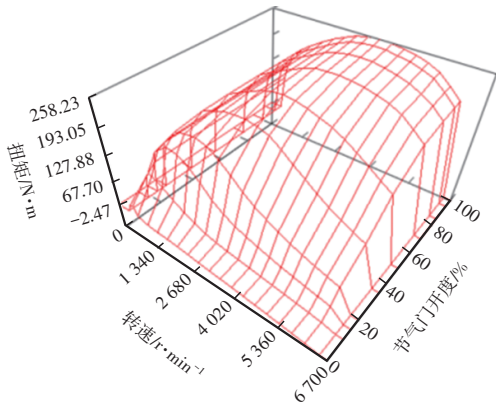
$$T_{des}=f(\beta,\omega) \quad (3)$$

式中: β 为节气门开度。

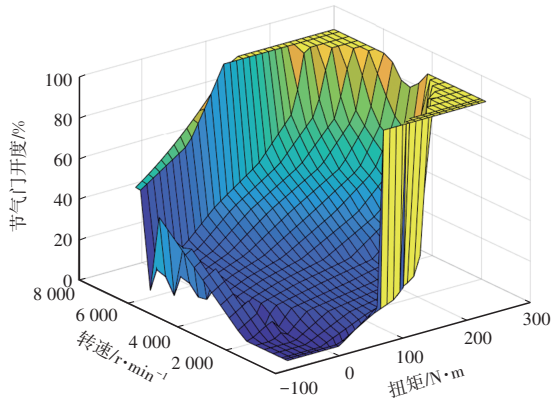
在车辆动力控制系统中,期望的发动机扭矩输出可以转化为对期望节气门开度 β_{des} 的调节,同时受到发动机转速 ω 的影响:

$$\beta_{des}=f(T_{des},\omega) \quad (4)$$

CarSim中C级轿车用额定功率为125kW的发动机的MAP图如图2a所示,为了更直接地理解节气门开度对发动机性能的影响并进行节气门控制,本文对其进行了逆转换处理,结果如图2b所示。



(a)发动机MAP图



(b)发动机逆MAP图

图2 发动机MAP图和逆MAP图

2.1.2 逆制动器模型

车辆在制动过程中,驱动力 $F_t=0$,发动机没有输出扭矩。车辆的受力分析为:

$$ma_{des}=-(F_{sb}+F_t+F_w) \quad (5)$$

当制动力 F_{sb} 小于路面最大制动力时,制动力与制动压力 P_{des} 满足:

$$F_{sb}=(T_{br}+T_{br})r=K_b P_{des} \quad (6)$$

式中: T_{br} 、 T_{br} 分别为前、后轮制动力矩; $K_b=780$ 为比例常值,可由仿真试验测得。

期望制动压力的计算公式为:

$$P_{des}=\frac{\left|ma_{des}+mgf+\frac{1}{2}C_d A_w v_x^2\right|}{K_b} \quad (7)$$

2.2 上层控制器设计

2.2.1 期望跟随间距

在ACC系统中,常采用固定车间时距,车速与期望跟随间距成正比,该方法计算量小、原理简单。本文考虑安全性和使用工况,选用计算简单的固定车间时距^[11]作为安全跟随车间距模型的设计参数:

$$d_{des}=\tau_h v_x+d_0 \quad (8)$$

式中: d_{des} 为期望的安全车间距; τ_h 为车间时距,一般取为1~3s; d_0 为最小车间距,一般取为2~7m。

2.2.2 换道巡航设计

2.2.2.1 多模式切换策略设计

当雷达检测到前方存在车辆时,系统立即捕获并分析前车的运动状态信息,进入跟随巡航模式。如果主车的实际速度持续低于预设的期望速度,并且这种速度不满足状态持续一段时间,当速度不满意度达到设定阈值且具备换道条件时,车辆执行换道巡航。换道流程如图3所示。

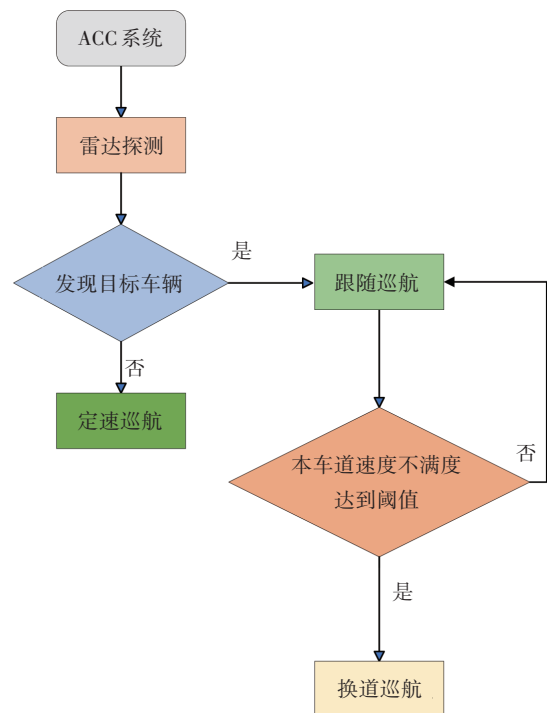


图3 主动换道流程

在车辆跟车过程中,如果前方存在低速行驶的车辆,使自车实际车速无法满足期望车速,通过设置一个定值作为主车是否换道的条件,并引入速度不满意度模型。速度不满意度模型是指期望速度与实际速度之差随时间累积的量,设实际车速为 v 、期望车速为 v_{des} ,速度不满意度模型可表示为:

$$V(k) = V(k-1) + \frac{v_{des} - v}{v_{des}} \cdot \Delta T \quad (9)$$

式中: $V(k)$ 为 k 时刻的速度不满意度, ΔT 为采样时间。

2.2.2.2 轨迹规划

本文在横向控制中采用五次多项式轨迹模型设计换道轨迹,该模型能够精准地贴合换道过程中的各项要求,确保轨迹的连续性、平滑性以及曲率的平稳过渡,从而优化换道操作的舒适性和安全性:

$$\begin{cases} x(t) = v_x t \\ y(t) = w_l \left[10 \left(\frac{v_x t}{d} \right)^3 - 15 \left(\frac{v_x t}{d} \right)^4 + 6 \left(\frac{v_x t}{d} \right)^5 \right] \end{cases} \quad (10)$$

式中: $x(t)$ 、 $y(t)$ 分别为纵向位移、横向位移, t 为换道时间, w_l 为车道宽度, d 为纵向位移。

2.2.2.3 模型预测控制

在横向控制中,车辆基于三自由度动力学模型,采用MPC方法对换道轨迹进行跟踪。根据牛顿第二定律分析车辆沿 x 向、 y 向、 z 向的运动,受力平衡方程分别为:

$$m\ddot{x} = m\dot{y}\dot{\varphi} + 2F_{yf} + 2F_{yr} \quad (11)$$

$$m\ddot{y} = -m\dot{x}\dot{\varphi} + 2F_{xf} + 2F_{xr} \quad (12)$$

$$I_z \ddot{\varphi} = 2aF_{yf} - 2bF_{yr} \quad (13)$$

式中: φ 为横摆角, F_{xf} 、 F_{xr} 分别为车辆前、后轮所受纵向力的合力, F_{yf} 、 F_{yr} 分别为车辆前、后轮所受侧向力的合力, I_z 为绕 z 轴的转动惯量, a 、 b 分别为质心与前、后轴的距离。

轮胎在车身坐标系下所受的力与纵、侧向力的关系为:

$$\begin{cases} F_{xf} = F_{lf} \cos \delta_f - F_{cf} \sin \delta_f \\ F_{xr} = F_{lr} \cos \delta_r - F_{cr} \sin \delta_r \\ F_{yf} = F_{lf} \sin \delta_f + F_{cf} \cos \delta_f \\ F_{yr} = F_{lr} \sin \delta_r + F_{cr} \cos \delta_r \end{cases} \quad (14)$$

式中: F_{lf} 、 F_{lr} 分别为前、后轮所受纵向力, F_{cf} 、 F_{cr} 分别为前、后轮所受侧向力, δ_f 、 δ_r 分别为前、后轮转角。

前、后轮胎的侧偏角公式为:

$$\begin{cases} \alpha_f = \frac{\dot{y} + a\dot{\varphi}}{\dot{x}} - \delta_f \\ \alpha_r = \frac{\dot{y} - b\dot{\varphi}}{\dot{x}} \end{cases} \quad (15)$$

车轮的滑移率 S_s 为:

$$S_s = \begin{cases} \frac{rvw_l}{V} - 1 & (v > rw_l, v \neq 0) \\ 1 - \frac{V}{rw_l} & (v < w_l, w_l \neq 0) \end{cases} \quad (16)$$

式中: w_l 为轮胎旋转角速度。

为简化计算、提高模型实用性,本文未涉及轮胎动态载荷转移的影响,因此,轮胎所受垂向载荷为:

$$\begin{cases} F_{zf} = \frac{bmg}{2(a+b)} \\ F_{zr} = \frac{amg}{2(a+b)} \end{cases} \quad (17)$$

式中: F_{zf} 、 F_{zr} 分别为车辆前、后轮所受垂向载荷。

前、后轮侧向力、纵向力可根据轮胎侧偏角、滑移率获得:

$$\begin{cases} F_{cf} = C_{cf} \left(\delta_f - \frac{\dot{y} + a\dot{\varphi}}{\dot{x}} \right) \\ F_{cr} = C_{cr} \frac{b\dot{\varphi} - \dot{y}}{\dot{x}} \end{cases}, \begin{cases} F_{lf} = C_{lf} s_{sf} \\ F_{lr} = C_{lr} s_{sr} \end{cases} \quad (18)$$

式中: C_{cf} 、 C_{cr} 分别为前、后轮侧偏刚度, C_{lf} 、 C_{lr} 分别为前、后轮的纵向刚度, s_{sf} 、 s_{sr} 分别为车辆前、后轮滑移率。

建立车辆非线性动力学模型:

$$\begin{cases} m\ddot{y} = -m\dot{x}\dot{\varphi} + 2 \left[C_{cf} \left(\delta_f - \frac{\dot{y} + a\dot{\varphi}}{\dot{x}} \right) + C_{cr} \frac{b\dot{\varphi} - \dot{y}}{\dot{x}} \right] \\ m\ddot{x} = m\dot{y}\dot{\varphi} + 2 \left[C_{lf} s_{sf} + C_{cf} \left(\delta_f - \frac{\dot{y} + a\dot{\varphi}}{\dot{x}} \right) \delta_f + C_{lr} s_{sr} \right] \\ I_z \ddot{\varphi} = 2 \left[aC_{cf} \left(\delta_f - \frac{\dot{y} + a\dot{\varphi}}{\dot{x}} \right) - bC_{cr} \frac{b\dot{\varphi} - \dot{y}}{\dot{x}} \right] \\ \dot{X} = \dot{x} \cdot \cos \varphi - \dot{y} \cdot \sin \varphi \\ \dot{Y} = \dot{x} \cdot \sin \varphi + \dot{y} \cdot \cos \varphi \end{cases} \quad (19)$$

在横向运动中,通过控制前轮转角实现车辆的转向。因此,定义模型预测控制器中的控制量为前轮转角 $\mu = \delta_f$,状态量为 $\chi = [\dot{y} \ \dot{x} \ \varphi \ \dot{\varphi} \ Y \ X]^T$,其中, \dot{y} 、 \dot{x} 、 φ 、 $\dot{\varphi}$ 、 Y 、 X 分别为车辆的纵向速度、横向速度、横摆角、横摆角速度、纵向位移、横向位移。

3 仿真结果分析

本文采用CarSim中C级车自带的动力学模型,利用MATLAB/Simulink/CarSim仿真平台输出前轮转角,对参考轨迹进行跟踪,如图4所示。

在CarSim中搭建整车动力学模型,选用额定功率为125 kW的发动机,部分参数如表1所示。将输

入、输出接口与 Simulink 模型连接。输入端口输入前轮转角,输出端口输出车辆的状态量,主要用于输入到 MPC 系统中进行预测或者观测。输入参数包括车辆的横纵向速度、横摆角、横摆角速度、纵向位置、横向位置和前、后轮滑移率。

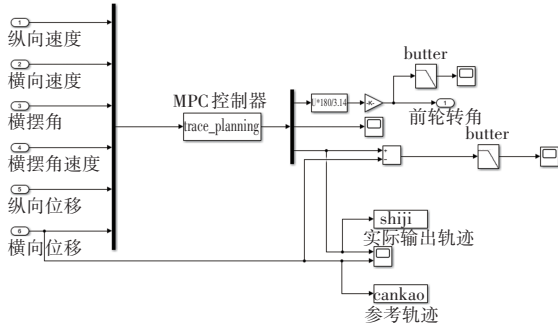


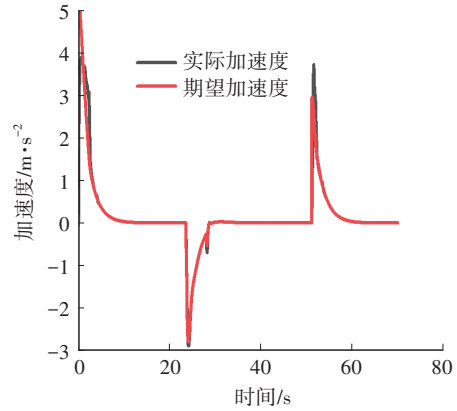
图4 换道轨迹跟踪仿真模型

表1 车辆参数

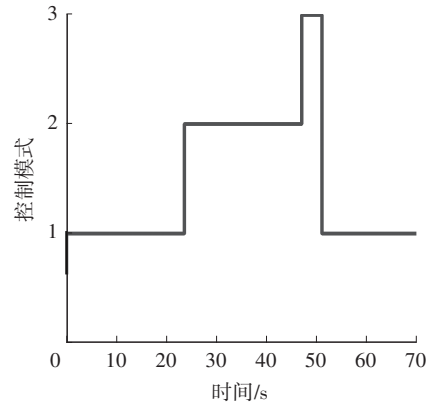
参数	取值
簧载质量/kg	1 270
质心与前轴的距离/mm	1 015
质心与后轴的距离/mm	1 895
质心高度/mm	540
轴距/mm	2 910
整车高度/mm	1 610

轨迹跟踪模型预测控制器的参数设置为:仿真步长 $T=0.02\text{ s}$,控制步长 $N_c=1$,预测步长 $N_p=15$,系统权重矩阵 $Q = \begin{bmatrix} 200 & 0 \\ 0 & 100 \end{bmatrix}$ 、 $R=[6.5 \times 10^5]$,松弛因子权重 $\rho=1\ 000$ 。

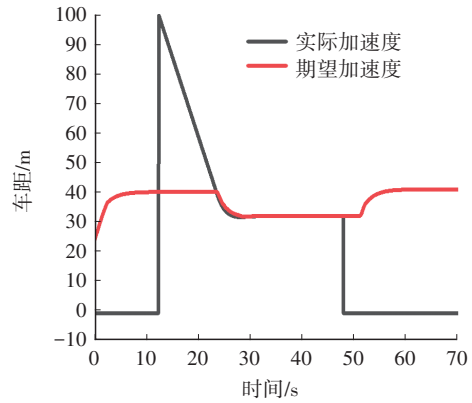
在 CarSim 中设定主车定速巡航目标车速为 80 km/h ,初始车速为 40 km/h ,在主车前方约 150 m 处设置目标车辆,目标车以 60 km/h 的车速匀速行驶 80 s ,仿真结果如图 5、图 6 所示。其中,控制模式取 1、2、3 分别表示定速巡航、跟随巡航、换道巡航。



(b)加速度

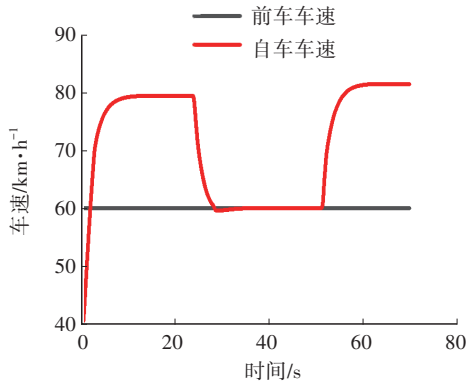


(c)模式切换

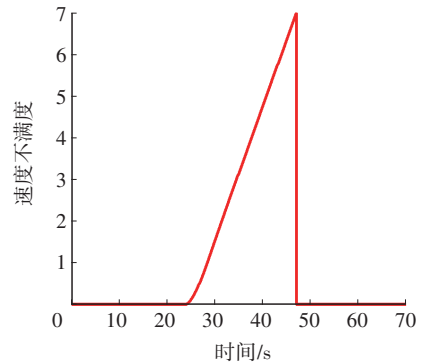


(d)车间距离

图5 定速-跟随-换道巡航工况纵向控制仿真结果



(a)车速



(a)速度不满意度

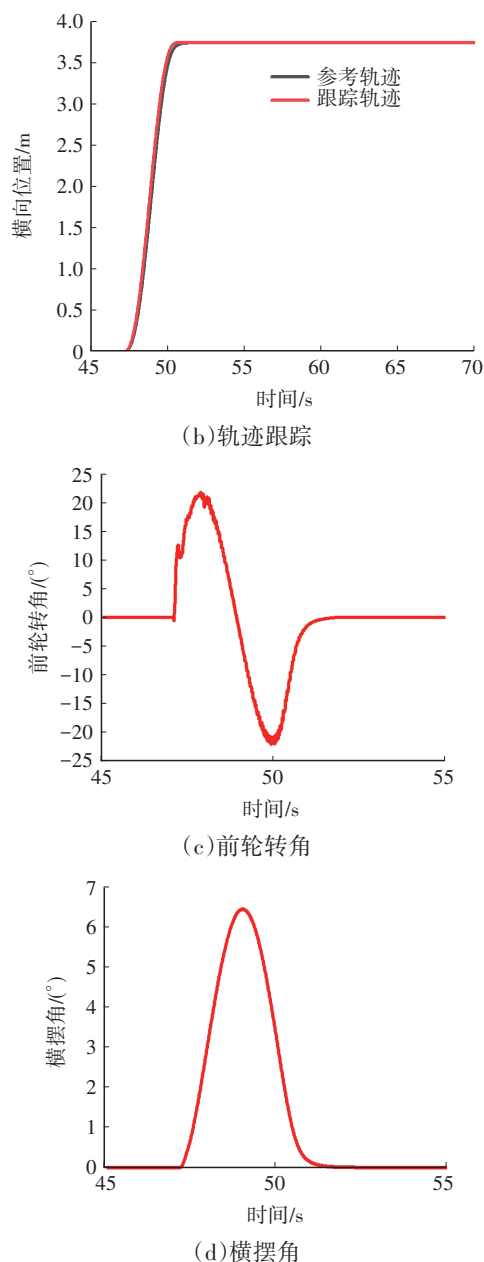


图6 定速-跟随-换道巡航工况横向控制仿真结果

由仿真结果可知,初始时刻雷达未探测到目标车辆,主车从初始 40 km/h 的速度快速提高到 80 km/h 执行定速巡航。在第 24 s 时雷达探测到目标车辆,随即进入跟随巡航,并且响应目标车辆,将车速由 80 km/h 降低至 60 km/h,当达到期望安全车车间距时,稳定跟随前车。当主车实际车速低于所设定的定速巡航车速时,随着速度不满意度累积,驾驶员将产生换道意图。在第 47 s 时速度不满意度达到设定阈值 7 后执行换道模式,主车对参考轨迹进行稳定跟踪,且车辆横摆角和前轮转角均在合理范围内。换道结束后,主车未探测到前方车辆,执行定速巡航模式,速度逐渐提高至设定车速 80 km/h。

4 结束语

为提高车辆在复杂交通环境下的行驶效率,本文提出速度不满意度并基于此设计了多模式切换策略。在换道巡航模式下,为了规划出平滑且符合车辆动力学特性的换道轨迹,采用三自由度车辆模型,利用五次多项式规划换道轨迹。最后,通过 MATLAB/Simulink/CarSim 进行仿真测试。

仿真结果表明,主车可以按照所设定的多模式切换策略稳定切换巡航模式,能够实现传统意义上的定速巡航与跟随巡航,也可满足驾驶员换道意图进行主动换道。在换道模式下,本文所搭建的控制器可以高效、可靠地跟踪规划的参考轨迹实现自主换道。

参考文献

- [1] 钟异莹,陈坚,邵毅明,等. 强制性换道的空间特征对分流区交通流的影响[J]. 交通运输系统工程与信息, 2020, 20(5): 114-120.
ZHONG Y Y, CHEN J, SHAO Y M, et al. Influence of Spatial Characteristics of Forced Lane Change on Traffic Flow in Diversion Area[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2020, 20(5): 114-120.
- [2] 李玮,段建民. 车辆巡航自适应控制研究[J]. 公路交通科技, 2010, 27(1): 132-137.
LI W, DUAN J M. Research on Vehicle Cruise Adaptive Control[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2010, 27(1): 132-137.
- [3] XIAO L Y, FENG G. A Comprehensive Review of the Development of Adaptive Cruise Control Systems[J]. Vehicle System Dynamics, 2010, 48(10): 1167-1192.
- [4] 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 Z N, LI Y N, YU Y H, et al. Research on Local Path Planning and Tracking Algorithm of Intelligent Vehicle under Complex Dynamics[J]. China Journal of Highway and Transport, 2022, 35(9): 372-386.
- [5] 姚军. 基于前车换道意图辨识的智能巡航控制算法研究[D]. 长春: 吉林大学, 2020.
YAO J. Research on Intelligent Cruise Control Algorithm Based on Lane Change Intention Identification of Preceding Vehicle[D]. Changchun: Jilin University, 2020.
- [6] 陈慧,王洁新. 基于驾驶人不满度的高速公路自动驾驶换道决策[J]. 中国公路学报, 2019, 32(12): 1-9+45.
CHEN H, WANG J X. Lane Change Decision of

- Expressway Automatic Driving Based on Driver Dissatisfaction[J]. China Journal of Highway and Transport, 2019, 32(12): 1-9+45.
- [7] 黄晶, 韦伟, 邹德飏. 基于个性化间距策略的自适应巡航系统模式切换策略研究[J]. 汽车工程, 2020, 42(10): 1302-1311.
- HUANG J, WEI W, ZOU D B. Research on Handover Strategy of Adaptive Cruise System Based on Personalized Spacing Strategy[J]. Automotive Engineering, 2020, 42(10): 1302-1311.
- [8] 赵亚男, 王泰翔, 高利, 等. 基于模型预测控制的可变目标距离自适应巡航控制研究[J]. 北京理工大学学报, 2023, 43(5): 499-509.
- ZHAO Y N, WANG T X, GAO L, et al. Research on Variable Target Distance Adaptive Cruise Control Based on Model Predictive Control[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2023, 43(5): 499-509.
- [9] 闫尧, 李春书, 唐风敏. 基于五次多项式模型的自主车辆换道轨迹规划[J]. 机械设计, 2019, 36(8): 42-47.
- YAN Y, LI C S, TANG F M. Lane Change Trajectory Planning of Autonomous Vehicles Based on Fifth Polynomial Model[J]. Journal of Machine Design, 2019, 36(8): 42-47.
- [10] 刘小勇. 智能车辆自主换道控制方法研究[D]. 重庆: 重庆理工大学, 2019.
- LIU X Y. Research on Autonomous Lane Change Control Method of Intelligent Vehicle[D]. Chongqing: Chongqing University of Technology, 2019.
- [11] 龚李龙. 车辆自适应巡航控制系统的算法研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2012.
- GONG L L. Research on Algorithm of Vehicle Adaptive Cruise Control[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2012.
- (责任编辑 斛 畔)
- 修改稿收到日期为2024年10月20日。

(上接第41页)

- ZHAO L. ERPs Experimental Tutorial[M]. Nanjing: Southeast University Press, 2010.
- [9] 杨柳. 基于脑电数据分析的驾驶行为研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2019.
- YANG L. Driving Behavior Study Based on Electroencephalography Data Analysis[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2019.
- [10] HE Z, XIONG J J, ZHONG M. The Comparison of the Analysis of Means and the Analysis of Variance[C]// International Conference on Modern Industrial Engineering and Engineering Management in New Century, 2001: 419-421.
- [11] QIN D L, LI Z F. Orthogonal Design and Analysis of Variance Based Performance Analysis of Differential Evolution Algorithm[C]// International Conference on Manufacturing Science and Engineering. Dalian, China: IEEE, 2013: 2702-2707.
- (责任编辑 斛 畔)
- 修改稿收到日期为2025年3月29日。