

低附着路况条件下人车共享转向系统稳定控制

谢 波, 高 榕, 许富强, 田彦涛

(吉林大学 通信工程学院, 长春 130022)

摘 要: 针对冰雪天气车辆更容易失稳的情况, 研究了低附着、不对称路面情况下车辆对参考路径的稳定跟踪问题, 同时考虑了驾驶员与智能控制器的协同共享, 讨论了共享方式和驾驶权分配, 以提高车辆在冰雪路面复杂路况下的跟踪精度和转向稳定性, 保证驾驶员的驾驶体验。此外, 建立了左右轮不对称的适用于冰雪路面的车辆模型, 并确定了将冰雪路面下车辆转向稳定性约束作为后续模型预测控制求解的一部分, 在人车共享结构下, 基于模糊推理权重分配策略设计了共享转向模型预测控制器。Simulink/CarSim 联合仿真验证了本文控制系统能有效提高车辆跟踪精度和行驶稳定性。

关键词: 车辆工程; 路径跟踪控制; 模型预测控制; 共享转向控制; 驾驶权重分配

中图分类号: U461.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5497(2023)03-0713-13

DOI: 10.13229/j.cnki.jdxbgxb20221416

Stability control of human-vehicle shared steering system under low adhesion road conditions

XIE Bo, GAO Rong, XU Fu-qiang, TIAN Yan-tao

(College of Communication Engineering, Jilin University, Changchun 130022, China)

Abstract: Aiming at the problem that the vehicle is more prone to instability in ice and snow weather, the stable tracking of the vehicle to the reference path is studied under the condition of low adhesion and asymmetric road surface. At the same time, considering the cooperative sharing between the driver and the intelligent controller, the sharing mode and driving right allocation is discussed, so as to improve the tracking accuracy and steering stability of the vehicle under the complex road conditions of ice and snow road and ensure the driving experience of the driver. A vehicle model with asymmetric left and right wheels for snow and ice road surface is established. And the vehicle steering stability constraint under ice and snow pavement is determined as a part of the subsequent model predictive control solution. The human-vehicle sharing structure based on model prediction and fuzzy weight allocation strategy is established and the shared steering controller is designed. Simulink/CarSim co-simulation verifies that the designed control system can effectively improve vehicle tracking accuracy and driving stability.

Key words: vehicle engineering; trajectory tracking control; model predictive control; shared steering control; driving authority allocation

收稿日期: 2022-11-09.

基金项目: 国家自然科学基金项目-区域创新发展联合基金项目(U19A2069).

作者简介: 谢波(1995-), 男, 博士研究生. 研究方向: 智能车辆建模与协同控制. E-mail: xiebo20@mails.jlu.edu.cn

通信作者: 田彦涛(1958-), 男, 教授, 博士生导师. 研究方向: 复杂系统建模、优化与控制. E-mail: tianyt@jlu.edu.cn

0 引言

自动驾驶的发展历程可以划分为6个阶段:① L_0 为无自动辅助阶段;② L_1 为特殊功能下的辅助驾驶;③ L_2 为部分自动驾驶阶段;④ L_3 为有条件自动驾驶阶段;⑤ L_4 为高度自动驾驶阶段;⑥ L_5 为完全自动驾驶阶段。但是,目前由于技术原因以及相关法规的限制,自动驾驶的实际应用主要停留在 L_2 、 L_3 两个阶段,且可能在未来很长一段时间内长期停留在这两个阶段^[1]。因此,现在大力研究人车共享控制,希望能够更安全、稳定地发挥驾驶人和智能系统的优势,相互辅助共同完成驾驶任务^[2]。

近年来,各国学者对于人车共享驾驶展开了大量研究。目前,人车共享控制的研究方向主要集中在3种类型:①更精确的驾驶员模型及横向控制模型构建;②基于人机共驾框架的驾驶稳定性研究;③人车共享车辆驾驶权的动态实时分配^[3-5]。针对驾驶员模型和横向控制模型的设计,何仁等^[6]提出了一种根据驾驶人对环境风险的实时响应进行控制权切换的智能汽车人机共驾模型;Xie等^[7]提出了一种基于自适应预测时间的驾驶员模型,该模型能够适应复杂的驾驶工况且能提高轨迹跟踪的精度;Lazcano等^[8]在模型预测控制(Model predictive control, MPC)框架下在线计算最优转矩控制律,以保证转向任务的持续导向。驾驶员模型由基于线性二次高斯的预认知策略、感觉器官和神经肌肉动力学组成,包括肌肉共激活和反射作用。针对人机共驾框架下的驾驶横向稳定性研究,田涛涛等^[9]针对自动驾驶汽车横向控制问题,提出了一种基于无模型自适应控制的控制方案,该方法只需自动驾驶汽车的输入和输出数据,避免了对自动驾驶汽车进行复杂建模。Li等^[10]设计了一种三维动态稳定控制器,用于偏航稳定控制、偏航-横摇稳定控制和防侧翻控制,该结构能够在复杂转向机动中实现横向稳定与防侧翻的无缝集成。针对共享控制中车辆驾驶权的动态实时分配,Chouki等^[11]提出将系统感知与鲁棒控制相结合,从而实现驾驶员与车道保持辅助(Lane keeping assist, LKA)系统之间的控制权共享,决策层的控制监督旨在提供决策信号,允许两个本地控制器之间决策的平稳过渡。控制层设计基于驾驶员在环车辆系统,以提高驾驶员与自动化系统的相互理解,从而减少或避免冲突。刘

俊^[12]利用博弈理论解决共享问题以求尽可能地减少人际冲突,满足驾驶人的驾驶意愿,不违背人车共享的初衷。Tian等^[13]提出了并联式间接共享控制结构,并设计了基于模糊的权重分配器,其能有效提高驾驶精度和控制权的柔性切换。

在极端环境下,葛召浩^[14]针对高速极限工况设计了一种纵横向协同控制器,该系统能解决驾驶员无法解决的车辆行驶稳定性问题,但是没有考虑路面附着系数变化对车辆稳定性的影响。Wang等^[15]针对分布式驱动电动汽车,提出了一种实时非线性预测控制器,该控制器能够有效提高车辆在极端环境下的稳定性。张雷等^[16]为了提高汽车在高速、低附着等极限工况下轨迹跟踪的精度和车辆稳定性,设计了基于分层架构的轨迹跟踪与直接横摆力矩协调控制策略,但是这两种结构都没有考虑驾驶员的影响。

以上对常规和极端条件下人车共享控制的研究仍存在一定问题,比如,控制器的设计大多基于汽车自行车模型,模型无法模拟极端环境,模型偏差会影响控制效果;另外,人车共享控制缺乏对低附着等极端路面下的研究。因此,本文主要针对冰雪天气车辆更易失稳的问题,研究了在低附着、不对称路面情况下车辆对参考路径的稳定跟踪问题,同时考虑了驾驶员与智能控制器的协同共享,讨论了共享方式和驾驶权分配问题,以提高车辆在冰雪路面的复杂路况下的跟踪精度和转向稳定性,保证驾驶员的驾驶体验。

本文针对低附着路况条件,设计了人车共享转向系统稳定控制,一方面,针对对开路面附着系数变化问题,引入Dugoff轮胎模型,建立了能够描述冰雪路面下汽车非线性特征、左右不对称性的车辆模型。另一方面,针对冰雪环境下车辆容易失稳和共享控制分配问题,考虑了车辆在冰雪上行驶的安全性和稳定性,设计了人车共享整体框架以及同时满足实时性和控制精度的横向控制器。最后,设计权重分配模块确定驾驶员和智能控制器的权重分配系数,利用模糊推理合理分配驾驶权。

1 车辆模型建立

1.1 汽车动力学模型

汽车稳定性控制中需考虑车辆纵向、侧向和横摆3个方向的运动,忽略车辆的侧倾运动和俯

仰运动^[17]。由转矩平衡条件得出4个轮子的平衡方程,该方程能够描述冰雪路面下汽车运动的非线性特征和左右不对称的特点。在冰雪路面的典型路况,即对开路面下建立车辆系统模型。

如图1所示,将车辆质心处的坐标系定义为 $xoyz$,且将横摆运动的中心轴线与质心横截面的相交处定义为坐标原点。将车辆沿 x 轴纵向运动的前进方向选定为正方向;通过车辆质心并且与地面垂直的 z 轴的上方定义为正方向;而 y 轴方向可以通过它与 x 轴、 z 轴的关系,并由右手定则确

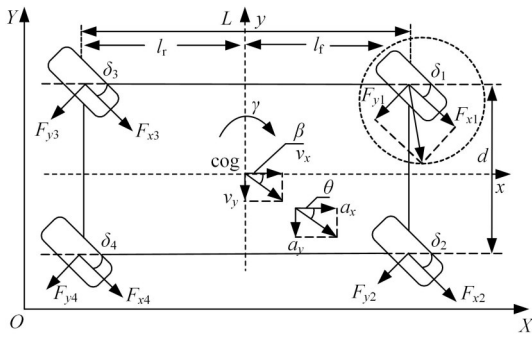


图1 七自由度车辆模型

Fig. 1 Vehicle model of 7 DOF

定。图1中, v_x 、 v_y 分别为车辆在车身坐标系下的纵向和横向速度; a_x 、 a_y 分别为车辆纵向、横向加速度; F_{xi} ($i=1,2,3,4$)为 x 轴方向上的纵向力; F_{yi} ($i=1,2,3,4$)为 y 轴方向上的侧向力; δ_i ($i=1,2,3,4$)为车轮转角; β 为汽车质心侧偏角; θ 为车辆的航向角; γ 为车辆横摆角速度; l_f 、 l_r 分别为车辆质心距离前轮和后轮的距离; d 为车轮之间的轮距; L 为车辆前、后轮间的距离。

对车辆模型进行受力分析,可以得到车辆沿不同坐标轴的力和力矩表达式,考虑 x 、 y 、 z 轴3个方向的力和力矩平衡,由转矩平衡条件得出4个轮子的平衡方程,分别如式(1)~(4)所示:

$$m(\dot{v}_x - v_y \gamma) = \sum_{i=1}^4 (F_{xi} \cos \delta_i - F_{yi} \sin \delta_i) \quad (1)$$

$$m(\dot{v}_y + v_x \gamma) = \sum_{i=1}^4 (F_{xi} \sin \delta_i + F_{yi} \cos \delta_i) \quad (2)$$

$$I_z \dot{\gamma} = \frac{d}{2} (F_{x1} \cos \delta_1 - F_{y1} \sin \delta_1 + F_{x3} \cos \delta_3 - F_{y3} \sin \delta_3) - \frac{d}{2} (F_{x2} \cos \delta_2 - F_{y2} \sin \delta_2 + F_{x4} \cos \delta_4 - F_{y4} \sin \delta_4) + l_f (F_{x1} \sin \delta_1 + F_{y1} \cos \delta_1 + F_{x2} \sin \delta_2 + F_{y2} \cos \delta_2) - l_r (F_{x3} \sin \delta_3 + F_{y3} \cos \delta_3 +$$

$$F_{x4} \sin \delta_4 + F_{y4} \cos \delta_4) \quad (3)$$

$$\begin{cases} I_w \dot{\omega}_f = T_f - R_w F_{x1} \\ I_w \dot{\omega}_{fr} = T_{fr} - R_w F_{x2} \\ I_w \dot{\omega}_{rl} = T_{rl} - R_w F_{x3} \\ I_w \dot{\omega}_{rr} = T_{rr} - R_w F_{x4} \end{cases} \quad (4)$$

式中: $\dot{\gamma}$ 为车辆横摆角加速度; I_w 为车轮的转动惯量大小; ω_f 、 ω_{fr} 、 ω_{rl} 、 ω_{rr} 为车辆行驶时轮胎旋转的角速度; T_f 、 T_{fr} 、 T_{rl} 、 T_{rr} 为行驶时的驱动力矩(制动力矩表示方法相同,方向与驱动力矩相反);轮胎旋转的角速度和驱动力矩下标的第1位代表前侧和后侧,第2位代表左侧和右侧; R_w 为车轮的有效滚动半径。

因为在进行控制器设计时选用的是前轮转向的车辆模型,所以假设作为车辆主动转向轮的前轮转角相等,即 $\delta_1 = \delta_2 = \delta_f$, δ_f 为车辆前轮转角; $\delta_3 = \delta_4 = 0$ 。

将大地坐标系与车身坐标系联系起来,则:

$$\begin{cases} \dot{Y} = v_x \sin \varphi + v_y \cos \varphi \\ \dot{X} = v_x \cos \varphi - v_y \sin \varphi \end{cases} \quad (5)$$

式中: $\dot{Y}$ 、 $\dot{X}$ 分别为车辆在大地坐标系 XOY 下的横向和纵向速度; φ 为车身与行驶方向的夹角,即横摆角,其物理意义为 $\dot{\varphi} = \gamma$ 。

1.2 轮胎模型

为避免使用轮胎测试数据以减轻计算负担,同时能够描述轮胎与地面的摩擦关系,采用Dugoff模型描述了轮胎的非线性和滑移特性,并提供了相互耦合的纵向力和侧向力计算方法^[18]。轮胎摩擦力的计算依赖于车轮滑移率 s_{xi} 、轮胎侧偏角 α_i 和垂直载荷 F_{zi} ,如下所示:

$$F_{xi} = C_{si} \frac{s_{xi}}{1 + s_{xi}} f(\lambda_i), \quad i=1,2,3,4 \quad (6)$$

$$F_{yi} = C_{ai} \frac{\tan(\alpha_i)}{1 + s_{xi}} f(\lambda_i), \quad i=1,2,3,4 \quad (7)$$

$$f(\lambda_i) = \begin{cases} \lambda_i(2 - \lambda_i), & \lambda_i < 1 \\ 1, & \lambda_i \geq 1 \end{cases} \quad (8)$$

式中: F_{xi} 、 F_{yi} 分别为每个轮胎的纵向力和侧向力; C_{si} 、 C_{ai} 分别为纵向滑移和侧向转向刚度; α_i 为轮胎侧偏角; λ_i 指定了轮胎工作区域, $\lambda_i \geq 1$ 时,表明轮胎处于线性区域,此时取值为:

$$\lambda_i = \frac{\mu F_{zi} (1 + s_{xi})}{2 \sqrt{(C_{si} s_{xi})^2 + (C_{ai} \tan \alpha_i)^2}} \quad i=1,2,3,4 \quad (9)$$

式中: μ 为路面附着系数。

2 人车共享控制器设计

2.1 间接共享控制方案

为了获得更好的驾驶体验,本文设计了并联的间接共享控制器,如图2所示。图2中, δ_{ass} 为修正后的输出前轮转角; δ_a 为MPC控制器输出的前轮转角; δ_h 为驾驶员输出前轮转角。自动驾驶系统可单独输出控制结果,并且不对驾驶员进行反馈,智能系统根据当前的路况信息和参考轨道输出最佳转向角,同时,通过权重分配模块人和机器的转向角进行修正优化,将辅助校正后的角度输入到汽车模型中,以实现汽车的较好控制。该种控制方式下,熟练驾驶员的操作大多时候都属于安全操作,因此车辆能够较好地跟随驾驶员的指令实现安全行驶;对于生疏驾驶员,自动驾驶系统能够很好地弥补驾驶员经验的不足,保证车辆行驶的安全性。该种共享方式可以在保证车辆行驶安全性的同时,较好地跟踪参考轨迹,而且能够为驾驶员提供良好的驾驶体验。

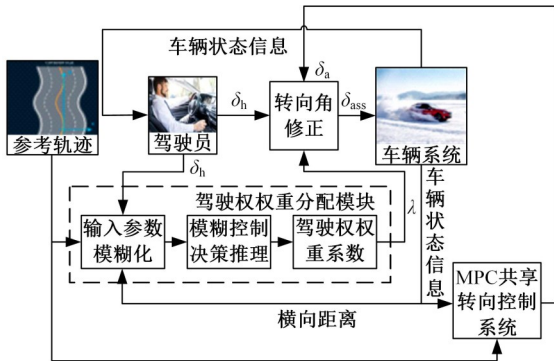


图2 人车共享结构框图

Fig. 2 Shared structure of human and vehicle

2.2 预测模型

根据所建的车辆模型(见式(1)~(5)),将非线性车辆动力学模型表示为如下形式:

$$\begin{cases} \dot{\xi}(t) = f(\xi(t), u(t)) \\ y(t) = h(\xi(t), u(t)) \end{cases} \quad (10)$$

式中:状态量 $\xi = [v_y \ v_x \ \varphi \ \dot{\varphi} \ Y \ X]^T$;控制量 $u = [\delta_i]$;输出量 $y = [\varphi \ Y]^T$ 。

首先,将非线性车辆系统(10)进行线性化,采用小角度假设对系统状态方程在工作点 $(\xi(t), u(t-1))$ 进行局部线性化处理。定义当前时刻为 t 时刻, $f(\lambda_i)$ 在1附近变化近似定义为 λ ,同时, $F_{y1,2} = F_{yf}, F_{y3,4} = F_{yr}, F_{x1,2} = F_{xf}, F_{x3,4} = F_{xr}, s_{1,2,3,4} = s, C_{a1,2} = C_f, C_{a3,4} = C_r$,最终将其转

化为:

$$\begin{cases} \dot{\xi}(t) = A(t)\xi(t) + B(t)u(t) \\ y(t) = C\xi(t) \end{cases} \quad (11)$$

$$\text{式中: } B(t) = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_{\xi_1}}{\partial u} & \frac{\partial f_{\xi_2}}{\partial u} & 0 & \frac{\partial f_{\xi_4}}{\partial u} & 0 & 0 \end{bmatrix}^T; C =$$

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}^T$$

$$A(t) = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_{\xi_1}}{\partial v_y} & \frac{\partial f_{\xi_1}}{\partial v_x} & 0 & \frac{\partial f_{\xi_1}}{\partial \dot{\varphi}} & 0 & 0 \\ \frac{\partial f_{\xi_2}}{\partial v_y} & \frac{\partial f_{\xi_2}}{\partial v_x} & 0 & \frac{\partial f_{\xi_2}}{\partial \dot{\varphi}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ \frac{\partial f_{\xi_4}}{\partial v_y} & \frac{\partial f_{\xi_4}}{\partial v_x} & 0 & \frac{\partial f_{\xi_4}}{\partial \dot{\varphi}} & 0 & 0 \\ \cos \varphi & \sin \varphi & \Xi_1 & 0 & 0 & 0 \\ -\sin \varphi & \cos \varphi & \Xi_2 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix};$$

式中: $\Xi_1 = v_x \cos \varphi - v_y \sin \varphi$; $\Xi_2 = -v_y \cos \varphi - v_x \sin \varphi$ 。

$$\text{令 } \epsilon = \tan \left(\delta - \frac{v_y + l_f \dot{\varphi}}{v_x} \right)^2 + 1; \quad \kappa =$$

$$\tan \left(\frac{v_y - l_r \dot{\varphi}}{v_x} \right)^2 + 1; \Theta = \tan \left(\frac{v_y - l_r \dot{\varphi}}{v_x} \right), \text{则有:}$$

$$\frac{\partial f_{\xi_1}}{\partial v_y} = \frac{C_f \lambda \epsilon \cos \delta + C_r \lambda \kappa \cos \delta}{v_x m(s+1)} \quad (12)$$

$$\frac{\partial f_{\xi_1}}{\partial v_x} = -\dot{\varphi} - [C_f \lambda \epsilon \cos \delta (v_y + l_f \dot{\varphi}) + C_r \lambda \kappa \cdot$$

$$\cos \delta (v_y - l_r \dot{\varphi})] (v_x^2 m(s+1))^{-1} \quad (13)$$

$$\frac{\partial f_{\xi_1}}{\partial \dot{\varphi}} = \frac{C_f \lambda l_f \epsilon \cos \delta - C_r \lambda l_r \kappa \cos \delta}{v_x m(s+1)} - v_x \quad (14)$$

$$\frac{\partial f_{\xi_2}}{\partial v_y} = -\frac{C_f \lambda \epsilon \sin \delta + C_r \lambda \kappa \sin \delta}{v_x (s+1)m} \quad (15)$$

$$\frac{\partial f_{\xi_2}}{\partial v_x} = [C_f \lambda \epsilon \sin \delta (v_y + l_f \dot{\varphi}) + C_r \lambda \kappa \sin \delta \cdot$$

$$(v_y - l_r \dot{\varphi})] (v_x^2 m(s+1))^{-1} - \dot{\varphi} \quad (16)$$

$$\frac{\partial f_{\xi_2}}{\partial \dot{\varphi}} = -v_x - \frac{C_f \lambda l_f \epsilon \sin \delta + C_r \lambda l_r \kappa \sin \delta}{v_x (s+1)m} \quad (17)$$

$$\frac{\partial f_{\xi_4}}{\partial v_y} = \frac{2C_f \lambda l_f \epsilon \cos \delta - 2C_r \lambda l_r \kappa \cos \delta}{v_x (s+1)} \quad (18)$$

$$\frac{\partial f_{\xi_4}}{\partial v_x} = [2C_r \lambda l_r \kappa \cos \delta (v_y - l_r \dot{\varphi}) - 2C_f \cdot \lambda l_f \epsilon \cos \delta (v_y + l_f \dot{\varphi})] (v_x^2 (s+1))^{-1} \quad (19)$$

$$\frac{\partial f_{\xi_1}}{\partial \dot{\varphi}} = \frac{2C_f \lambda l_f^2 \epsilon \cos \delta + 2C_r \lambda l_r^2 \kappa \cos \delta}{v_x (s+1)} \quad (20)$$

$$\frac{\partial f_{\xi_1}}{\partial u} = [F_{xf} \cos \delta + F_{xr} \cos \delta - (C_f \lambda \epsilon \cos \delta + C_r \lambda \sqrt{\epsilon-1} \sin \delta - C_r \lambda \theta \sin \delta) \cdot (s+1)^{-1}] m^{-1} \quad (21)$$

$$\frac{\partial f_{\xi_2}}{\partial u} = -[F_{xf} \sin \delta + F_{xr} \sin \delta - (C_f \lambda \epsilon \sin \delta - C_r \lambda \sqrt{\epsilon-1} \cos \delta + C_r \lambda \theta \cos \delta) \cdot (s+1)^{-1}] m^{-1} \quad (22)$$

$$\frac{\partial f_{\xi_4}}{\partial u} = l_f (2F_{xf} \cos \delta + 2C_f \lambda \sqrt{\epsilon-1} \sin \delta - 2C_f \lambda \epsilon \cos \delta (s+1)^{-1}) - l_r (2F_{xr} \cos \delta - 2C_r \lambda \theta \sin \delta (s+1)^{-1}) \quad (23)$$

对式(11)进行离散化处理,可得:

$$\begin{cases} \xi(k+1) = A(k)\xi(k) + B(k)u(k) \\ y(k) = C\xi(k) \end{cases} \quad (24)$$

式中: $A(k) = I + TA(t)$; I 为单位方阵; T 为采样周期; $B(k) = TB(t)$ 。

为了能够限制每个周期内的控制增量,避免出现控制量突变的现象,可以采用控制增量取代控制量,需要将式(24)做如下变换:

$$\chi(k|t) = \begin{bmatrix} \xi(k|t) \\ u(k-1|t) \end{bmatrix} \quad (25)$$

从而得到新的状态空间表达式为:

$$\begin{cases} \chi(k+1|t) = \tilde{A}(k)\chi(k|t) + \tilde{B}(k)\Delta u(k|t) \\ \eta(k|t) = \tilde{C}\chi(k|t) \end{cases} \quad (26)$$

式中: $\tilde{A}(k) = \begin{bmatrix} A(k) & B(k) \\ 0_{2 \times 6} & I_2 \end{bmatrix}$; $\tilde{B}(k) = [B(k) \quad I_2]$;

$\tilde{C} = [C \quad 0_{2 \times 2}]$ 。

2.3 优化问题描述

为了保证车辆能够快速、平稳地跟踪期望轨迹,考虑如下目标函数:

$$J(\chi(t), u(t-1), \Delta U(t)) = \sum_{i=1}^{N_p} \|\eta(t+i|t) - \eta_{\text{ref}}(t+i|t)\|_Q^2 + \sum_{i=1}^{N_c-1} \|\Delta u(t+i|t)\|_R^2 + \rho \epsilon^2 \quad (27)$$

式中: $u(t-1)$ 为 $t-1$ 时刻控制量; $\Delta U(t) =$

$[\Delta u(t), \dots, \Delta u(t+N_c-1)]$; η_{ref} 为参考输出量; ϵ 为松弛因子; N_p 、 N_c 分别为预测时域和控制时域; Q 、 R 、 ρ 分别为状态量、控制量和松弛因子的权重矩阵。

由式(27)可以看出:目标函数由3项组成:第1项表示实际输出与参考路径误差,反映系统对参考路径的跟随能力;第2项反映对控制增量的约束,避免出现控制量急剧变化的情况;第3项松弛因子的加入是为了防止出现无解情况。

车辆的轨迹跟踪控制问题最终可以转变成最优化问题,如下所示:

$$\begin{cases} \min_{\Delta U, \epsilon} J(\chi(t), u(t-1), \Delta U(t)) \\ \text{s.t. } \Delta U_{\min} \leq \Delta U \leq \Delta U_{\max} \\ U_{\min} \leq U \leq U_{\max} \\ Y_{\text{hc}, \min} \leq Y_{\text{hc}} \leq Y_{\text{hc}, \max} \\ Y_{\text{sc}, \min} - \epsilon \leq Y_{\text{sc}} \leq Y_{\text{sc}, \max} + \epsilon \\ \epsilon \geq 0 \end{cases} \quad (28)$$

式中: ΔU 为系统控制增量; $\Delta U_{\min}$ 、 $\Delta U_{\max}$ 分别为系统控制增量的最小值和最大值; $U_{\min}$ 、 $U_{\max}$ 分别为系统控制量的最小值和最大值; Y_{hc} 、 Y_{sc} 分别为系统硬约束和软约束输出; $Y_{\text{hc}, \min}$ 、 $Y_{\text{hc}, \max}$ 分别为系统硬约束输出的最小值和最大值; $Y_{\text{sc}, \min}$ 、 $Y_{\text{sc}, \max}$ 分别为系统软约束输出的最小值和最大值。

在每个控制周期内对式(28)进行求解,得到控制时域内的控制增量序列,取序列中第1个值作为实际控制增量输入到系统中。

2.4 基于模糊规则的权重分配策略

采用模糊控制并引入车辆行驶稳定性变量和驾驶员驾驶行为变量,分别根据车辆行驶特点和驾驶员行为特点选用相应的隶属度函数对权重系数进行调节,从而实现驾驶权重柔性切换和分配,提高车辆行驶精度和稳定性。

2.4.1 变量选取和计算

根据设计的人车共享控制结构,最终输出的前轮转角为:

$$\delta_{\text{ass}} = \lambda \delta_a + (1-\lambda) \delta_h, \quad 0 \leq \lambda \leq 1 \quad (29)$$

式中: λ 为智能系统权重系数。

模糊推理系统的输入是MPC控制器输出的转角和驾驶员期望转角。模糊推理系统根据推理规则得到智能驾驶权重系数 λ , 根据式(29)计算得到最终输出修正后的转角 δ_{ass} , 给到对应的执行器以完成车辆转向控制。

对于权重调整的原则,其基本思想是:当车辆

状态跟踪误差增大时,说明道路情况较为复杂,存在一定风险,此时已不能依赖驾驶员进行操作,MPC 控制器的权重就会相应地增大;同时,只有车辆稳定性衡量参数是不够的,在车辆横向偏离较大的情况下,如果驾驶员能够做出正确反应,那么系统就不会对其进行太多干涉,而在司机做出一些危险举动时,系统就会对其进行干涉,MPC 控制器的权重也会相应地增大,从而避免发生碰撞等危险。

基于以上驾驶权调整分配思想,选择能够反映汽车行驶稳定性的参数和驾驶员行为特征参数,并将其作为输入,经过模糊推理计算后,输出需要的权重分配系数。模糊推理结构如图 3 所示。

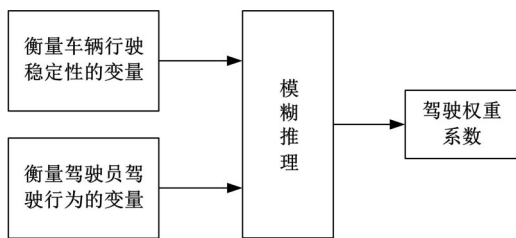


图 3 模糊推理结构

Fig. 3 Structure of fuzzy inference

设定衡量车辆行驶稳定性的变量 L_D 为:

$$L_D = \begin{cases} 0, & |\Delta y| = 0 \\ \frac{|\Delta y|}{|\Delta y_{\max}|}, & 0 < |\Delta y| < |\Delta y_{\max}| \\ 1, & |\Delta y| \geq |\Delta y_{\max}| \end{cases} \quad (30)$$

式中: L_D 为车辆横向距离偏离程度参数; Δy 为车辆行驶中实时的横向误差; $\Delta y_{\max}$ 为设定的允许的最大横向偏差值,该值越大,说明对轨迹跟踪误差的容忍度越大。

衡量驾驶员驾驶行为的变量 θ_E 为:

$$\theta_E = \begin{cases} 0, & |\delta_h - \delta_a| = 0 \\ \frac{|\delta_h - \delta_a|}{|\delta_h - \delta_a|_{\max}}, & 0 < |\delta_h - \delta_a| < |\delta_h - \delta_a|_{\max} \\ 1, & |\delta_h - \delta_a| \geq |\delta_h - \delta_a|_{\max} \end{cases} \quad (31)$$

式中: θ_E 为转向角偏离程度参数。

式(31)中, δ_a 较大时,说明驾驶员的行为与自动控制器相差较大,有所异常,继续跟随驾驶员的操作意向可能会有危险发生,驾驶权重向自动驱动器倾斜。因此, θ_E 为一个可以表征驾驶员驾驶状态的变量,可以用于模糊规则的设计。

2.4.2 模糊推理系统

(1) 模糊集合和隶属度函数

根据图 3 所设计的模糊推理结构,设定输入为 L_D 和 θ_E ,将它们按照模糊推理规则进行比较混合后得到控制器转向角权重 λ ,将其限制在 $[0, 1]$ 内。本文通过实验法和经验选取适当的模糊集合和隶属度函数。

首先,将 L_D 模糊化为 5 个模糊集合,表示为:

$$S_{L_D} = \{L_0, L_1, L_2, L_3, L_4\} \quad (32)$$

式中: L_i 为与参考轨迹的横向偏离程度, L_0 最小; L_4 最大。

将 θ_E 模糊化为 5 个模糊集合,表示为:

$$S_{\theta_E} = \{E_0, E_1, E_2, E_3, E_4\} \quad (33)$$

式中: E_j 为驾驶员与自动驾驶控制器的偏离程度; E_0 最小; E_4 最大。

同样地,将系统输出的智能驱动器权重系数也分为 5 个模糊集合: S(小)、MS(次小)、M(中)、MB(次大)、B(大),其模糊集合可写为:

$$S_\lambda = \{S, MS, M, MB, B\} \quad (34)$$

(2) 模糊推理规则

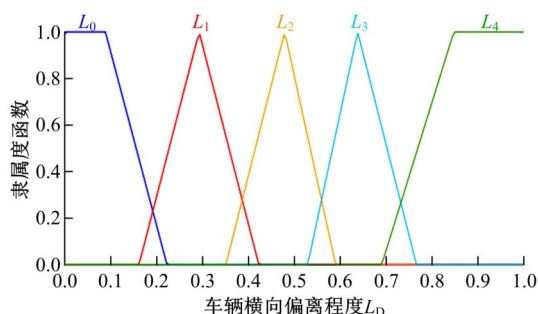
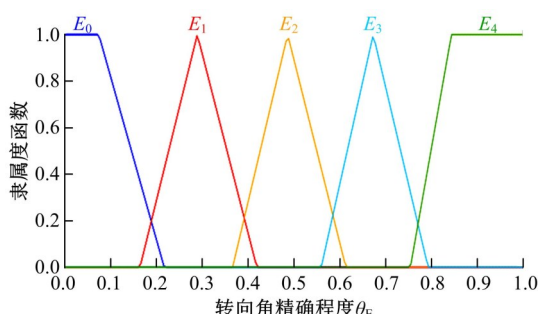
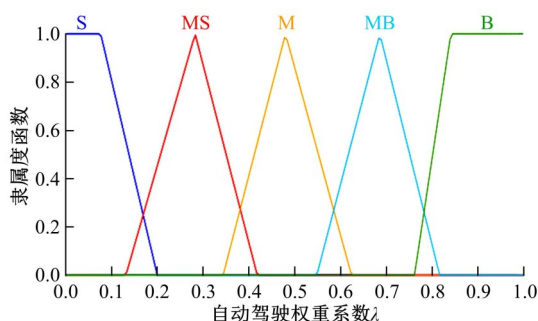
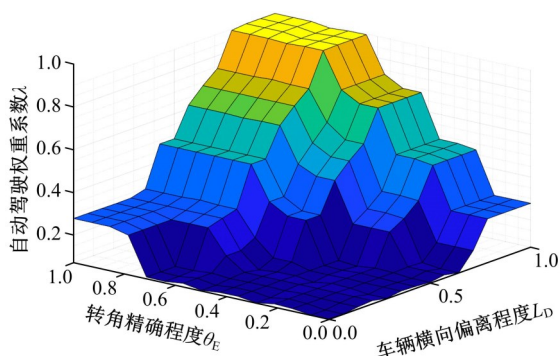
根据人们的驾驶经验,调整模糊控制的基本思想为:车辆横向距离偏差参数 L_D 越小,表示汽车运行越平稳,此时对驾驶员的控制系统不应该去干预,权重系数 λ 应该较小;同理,当转角偏离程度参数 θ_E 较小时,说明驾驶员的操作与自动驾驶器决策的差距较小,驾驶员操作熟练安全性很高,这时权重系数 λ 也应该较小。而当车辆横向距离偏差参数 L_D 和转角偏离程度参数 θ_E 都很大时,说明这时车辆行驶比较不稳定,同时驾驶员的行为与自动控制器相差较大,在此情形下,应加强对驾驶员操控的干涉,将驾驶权交给自动控制器,其输出的权重系数 λ 应当更高。具体模糊控制规则如表 1 所示。

表 1 模糊控制规则表

Table 1 Fuzzy rules

S_{θ_E}	L_0	L_1	L_2	L_3	L_4
E_0	S	S	S	S	MS
E_1	S	S	S	MS	M
E_2	S	S	MS	M	MB
E_3	S	MS	M	MB	B
E_4	MS	MS	M	MB	B

用 Matlab 仿真相应的隶属函数,如图 4~图 6 所示,自动驾驶权重系数 λ 关于 L_D 和 θ_E 的三维 map 图如图 7 所示。

图4 车辆横向偏离程度 L_D 隶属度函数Fig. 4 Membership function for the vehicle's lateral deviation L_D 图5 转向角精度程度 θ_E 隶属度函数Fig. 5 Membership function for the accuracy of the steering angle θ_E 图6 自动驾驶权重系数 λ 隶属度函数Fig. 6 Membership function for automatic driving weight λ 图7 自动驾驶权重系数 λ 关于 L_D 和 θ_E 的三维 map 图Fig. 7 Map figure of automatic driving weight λ with L_D and θ_E

3 仿真实验及结果分析

3.1 仿真测试环境说明及参数设定

在 Simulink 中搭建被控车辆动力学模型,并在 Simulink 和 CarSim 上实现联合仿真。利用联合仿真平台实现了车辆状态信息、路面信息、驾驶员决策信息等数据的双向传输。表2为车辆及控制器主要参数。

表2 车辆及控制器主要参数

Table 2 Parameters for the vehicle and controller

参数	数值
整车质量 m/kg	1 380
质心到前轴的距离 l_f/m	1.015
横摆转动惯量 $(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$	1 536.7
车轮半径 R_w/m	0.325
前轮侧倾刚度 $K_{\phi f}/(\text{N}\cdot\text{m}^{-1})$	46 560.5
前轮侧倾阻尼 $C_{\phi f}/(\text{N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	2 386
车身宽度 D/m	1.616
质心距地面高度 h/m	0.87
采样周期 T/s	0.001
预测时域 N_p	50
最大横向误差 $ \Delta_y _{\max}/\text{m}$	1
簧上质量 m_s/kg	1 270
质心到后轴的距离 l_r/m	1.895
车轮转动惯量 $I_w/(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$	1
车轮轴距 t_w/m	1.55
后轮侧倾刚度 $K_{\phi r}/(\text{N}\cdot\text{m}^{-1})$	24 955.5
后轮侧倾阻尼 $C_{\phi r}/(\text{N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	2386
道路宽度 W_r/m	3.75
重力加速度 $g/(\text{m}\cdot\text{s}^{-2})$	9.8
转向系传动比 i	15
控制时域 N_c	25
转角最大差 $ \delta_h - \delta_a _{\max}/\text{rad}$	0.45

3.2 仿真实验设计及分析

为了验证本文所设计共享控制器对参考路径的跟踪能力以及行驶系统稳定性的保持能力,设置了多种不一样的工况场景进行对比仿真实验。同时,验证人车共享系统对驾驶员的干预程度,即是否过度影响驾驶员的驾驶意愿,是否只在跟踪误差过大和驾驶员存在操作风险时加大干预程度,以确保系统的行驶安全和稳定。具体实验设置如下:针对不同工况,包括路径跟踪算法测试的基本工况(如单移线工况、双移线工况、蛇形穿杆工况),分别对其在低附着路面、良好路面以及对开路面进行测试,验证本文控制器的跟踪精度和稳定性,并且增加一般驾驶员和生疏驾驶员的

对比实验。对于一般驾驶员的操作大多时都属于安全操作,因此车辆基本能够安全行驶,此时控制器能够较好地跟随驾驶员的指令;对于生疏驾驶员的操作通常会出现操作不合理等情况,此时车辆的安全性和稳定性无法得到保障,控制器需要弥补驾驶员经验的不足,保证车辆行驶安全性。

3.2.1 单移线工况仿真验证及分析

选取对开路面进行模拟,路面设置为对开路面(路面左、右附着系数 μ_l 、 μ_r 分别为0.45和0.6),CarSim中3D路面如图8所示,初始车速设置为54 km/h,选取CarSim中自带的生疏驾驶员模型和一般驾驶员模型进行对比验证。

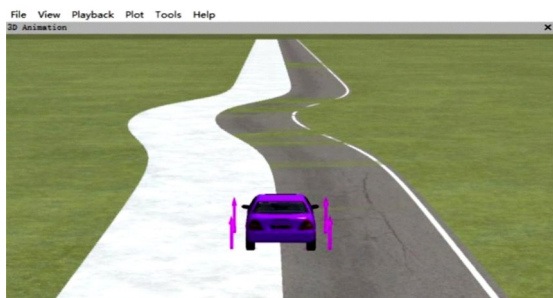


图8 对开路面3D示意图

Fig. 8 3D schematic diagram of split road surface

为了定量地分析控制器性能,将图9和图10中参数及其数据进行针对性提取,并计算其统计学指标,具体评价指标如表3和表4所示。

从图9、10和表3、4可知:一般驾驶员的驾驶员权重变化幅度明显小于生疏驾驶员的权重变化幅度,因此可得本文所设计的共享控制器对存在操作风险的驾驶员辅助效果明显,可以大幅度改善其跟踪精度、提高稳定性;而对于本身操作熟练的驾驶员,系统并不做过多干预,只对其操作进行优化,尽可能地跟随驾驶员的转向意愿。另外,根据Y方向位移、方向盘转角和横向偏差结果可知:本文所设计的共享控制器的控制效果无论是在生疏还是一般熟练的驾驶员,其控制效果都优于Carsim控制,表现出更小的跟踪误差和波动。从横向加速度对比结果可知:本文所设计共享控制器的横向加速度同样小于Carsim控制方案,说明本文控制器能够进一步提高车辆的横向稳定性。

3.2.2 双移线工况仿真验证及分析

分别在均一良好路面和对开路面情况下对比单独驾驶员操作和本文共享控制器的控制效果。

(1) 均一良好路面

设置路面附着系数 $\mu = 0.85$,相当于干燥沥

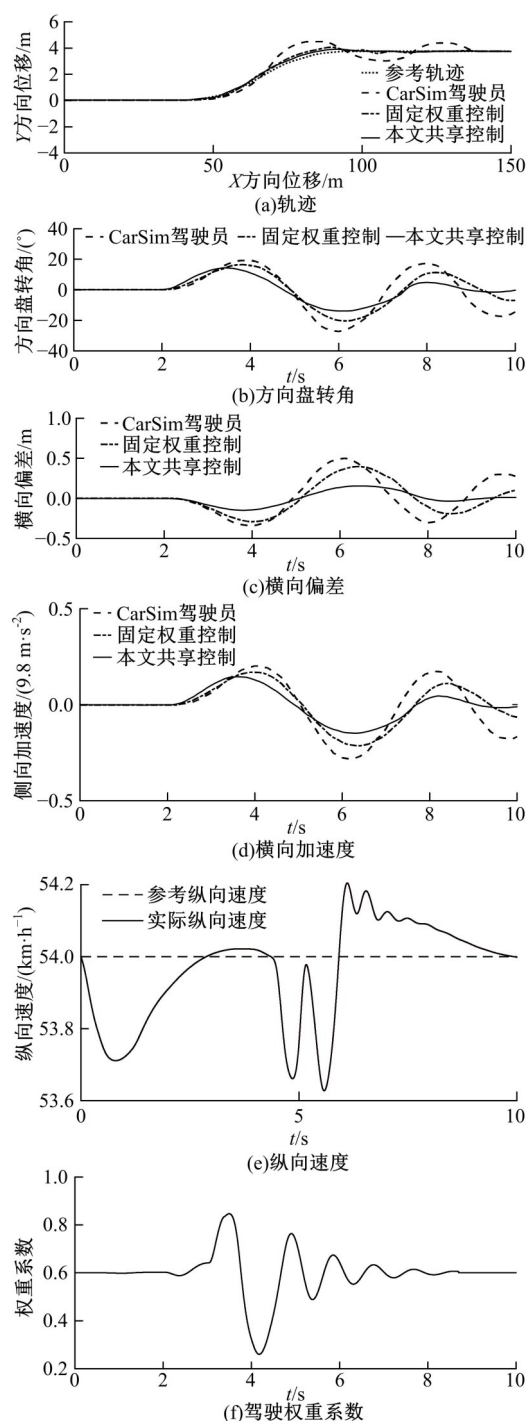


图9 对开路面下生疏驾驶员驾驶情况对比图

Fig. 9 Driving comparison diagram of the rusty driver on the split road

青路,表示均一良好路面的工况,车速为54 km/h。为了定量地分析控制器的优势性能,将图11中参数及其数据进行针对性提取,并计算其统计学指标,具体评价指标如表5所示。

由图11和表5可知:在良好均一路面情况下,无论是驾驶员还是本文所设计的共享控制器,它们的行驶轨迹都与参考轨迹基本保持一致,说明

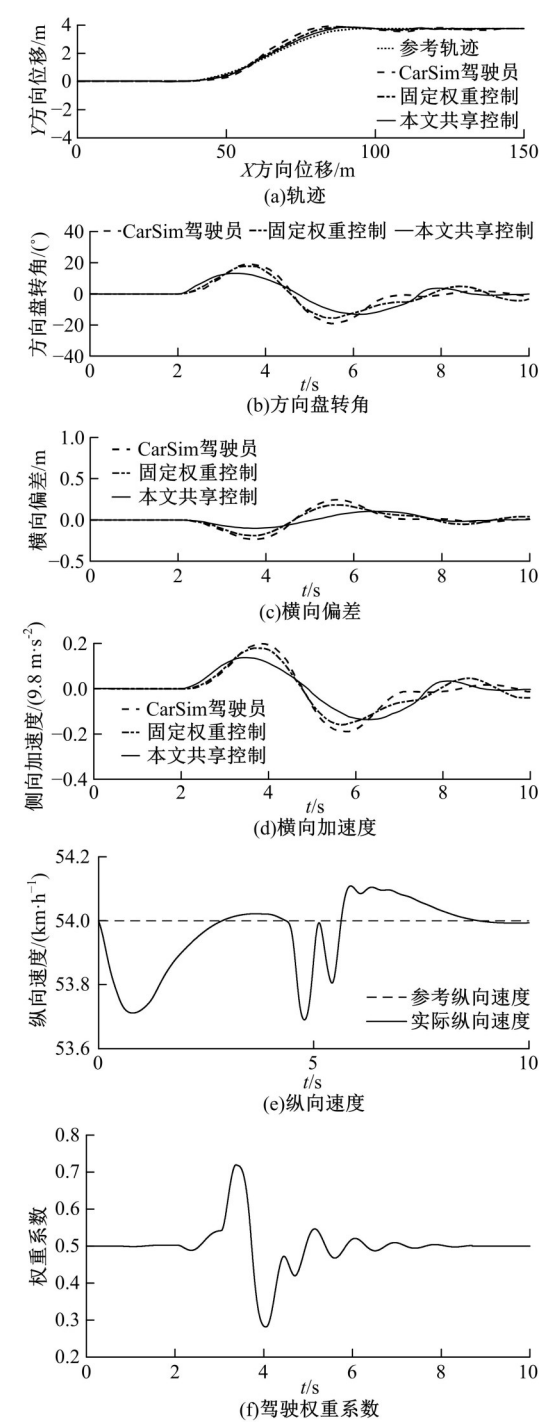


图 10 对开路面下一般驾驶员驾驶情况对比图
Fig. 10 Driving comparison diagram of the normal driver on the smooth road

二者都有一定的路径跟踪能力。驾驶员单独控制时,最大横向误差为 0.5471 m,而本文所设计的共享控制器最大横向误差为 0.5089 m,相较驾驶员操作降低了跟踪误差,因此可以看出,共享控制器整体跟踪误差更小,波动也更小,基本在 9 s 附近,其行驶轨迹无限与参考轨迹重叠,也更早地实现了稳定驾驶。另外,本文控制器的横向加速度

表 3 对开路面下单移线换道工况生疏驾驶员驾驶评价指标

Table 3 Driving evaluation index of rusty drivers in single lane shifting condition on split road

车辆参数	CarSim 驾驶员控制	固定权重控制	本文共享控制
方向盘转角最大值/(°)	27.24	20.42	14.36
方向盘转角标准值/(°)	13.35	10.04	7.49
侧向误差最大值/m	0.6997	0.3973	0.1553
侧向误差最大值占比(同 carsim 控制比较)/%	100.00	56.78	22.19
侧向误差均方根值/m	0.2468	0.1976	0.0781
侧向加速度最大值/(9.8 m·s ⁻²)	0.2831	0.1692	0.1463
侧向加速度标准差/(9.8 m·s ⁻²)	0.1361	0.1037	0.0775

表 4 对开路面下单移线换道工况一般驾驶员驾驶评价指标

Table 4 Driving evaluation index of normal drivers in single lane shifting condition on split road

车辆参数	CarSim 驾驶员控制	固定权重控制	本文共享控制
方向盘转角最大值/(°)	19.16	18.73	17.08
方向盘转角标准值/(°)	8.817	8.223	7.041
侧向误差最大值/m	0.2424	0.1781	0.1021
侧向误差最大值占比(同 CarSim 控制比较)/%	100.00	73.47	42.12
侧向误差均方根值/m	0.1126	0.0869	0.0497
侧向加速度最大值/(9.8 m·s ⁻²)	0.1988	0.1788	0.1369
侧向加速度标准差/(9.8 m·s ⁻²)	0.0906	0.0838	0.0723

和横摆角速度变化幅度更小,说明其具有更好的横向和横摆稳定性。由于路面状况良好,驾驶员操作行为合理且轨迹偏差较小,驾驶权重保持在 0.4~0.65,达到了辅助驾驶员操作的目的。因此,本文所设计的共享控制有效提高了车辆的路径跟踪精度,优化改善了驾驶员操作。

(2)对开路面

路面设置为对开路面(路面左、右附着系数 μ_1 、 μ_r 分别为 0.35 和 0.75),车速为 54 km/h。

为了定量地分析控制器的性能,将图 12 中参数及其数据进行针对性提取,并计算其统计学指标,具体评价指标如表 6 所示。

从图 12 和表 6 可知:在对开路面这种较为极限的工况中,驾驶员的操作出现了较大偏差,对参考轨迹的跟随出现了延后现象,横向最大误差为

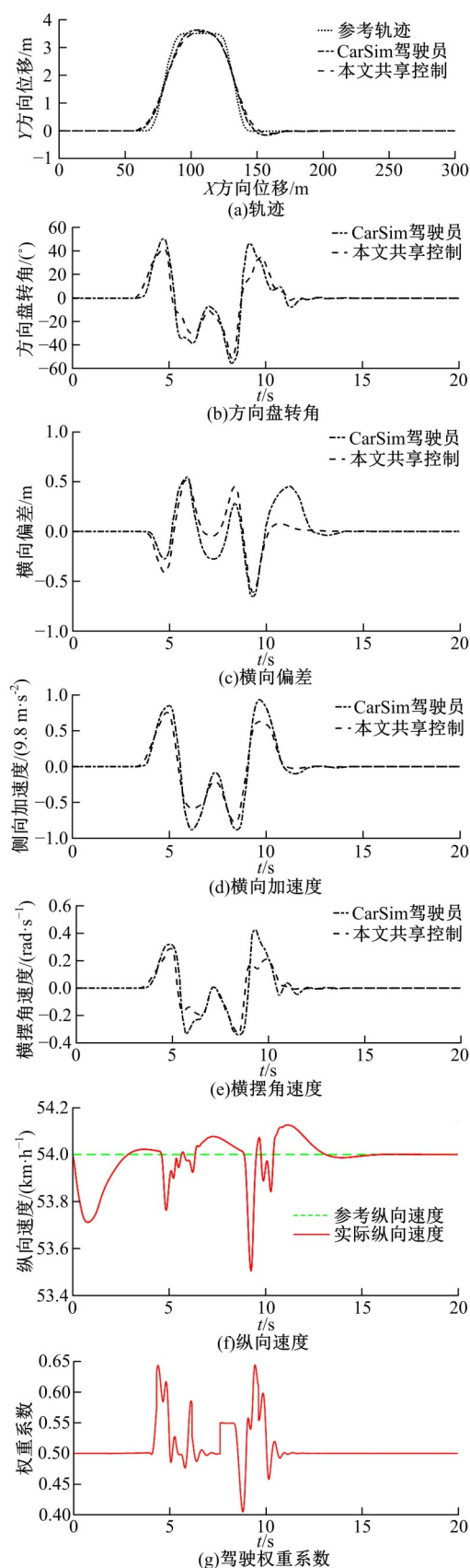


图 11 良好路面下驾驶情况对比图(DLC)

Fig. 11 Driving comparison diagram on the smooth road (DLC)

表 5 均一路面双移线工况评价指标

Table 5 Driving evaluation index on the smooth road of DLC

车辆参数	CarSim 驾驶员控制	本文共享控制
方向盘转角最大值/(°)	50.29	41.98
方向盘转角标准差/(°)	18.84	15.61
侧向误差最大值/m	0.5471	0.5089
侧向误差均方根值/m	0.1974	0.1891
侧向误差最大值占比(与 CarSim 控制比较)/%	100	95.79
侧向加速度最大值/($9.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$)	0.9343	0.7552
侧向加速度标准差/($9.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$)	0.3686	0.2959
横摆角速度最大值/($\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$)	0.4456	0.3711

0.926 m,有撞上道路边界的风险,而本文所设计的共享控制器依然表现出良好的跟踪能力,最大横向误差为 0.5779 m,保持了良好的跟踪精度。可见,在对开路面、低附着情况下时,本文所设计的共享控制器依然有效,能够保证车辆的跟踪精度。由图 12(c)可以看出:共享控制器在 10 s 附近跟踪误差就基本趋于 0,不再波动,而驾驶员在 14 s 附近才恢复稳定,有失控的风险。同样,本文控制器具有更好的横向和横摆表现,但是由于路面情况较差和为了更好地保障驾驶安全性,此时的驾驶权重系数为 0.4~0.9。因此,本文所设计的共享控制器在低附着以及对开路面情况下依然有效,能够改善驾驶员的危险操作,将跟踪精度提升至趋于良好路面的情况。

3.2.3 蛇形穿杆工况仿真验证及分析

设置路面附着系数 $\mu=0.5$,车速为 36 km/h,在蛇形工况下进行实验。

为了定量地分析控制器的优势性能,将图 13 中参数及其数据进行针对性地提取并计算其统计学指标,具体评价指标如表 7 和表 8 所示。

通过图 13 和表 7、8 可以看出:在低附着情况下,生疏驾驶员在执行蛇形穿杆任务时,显然已经不能跟上参考路径,行驶路径出现大幅度偏差,横向最大误差为 3.8797 m,此时车辆已经偏差较大接近失稳;而本文所设计的控制器,其行驶轨迹和参考路径基本保持一致,横向最大误差仅为 0.2159 m,依然保持着良好的跟踪精度;再观察方向盘转角发现,生疏驾驶员的转向角波动较大,

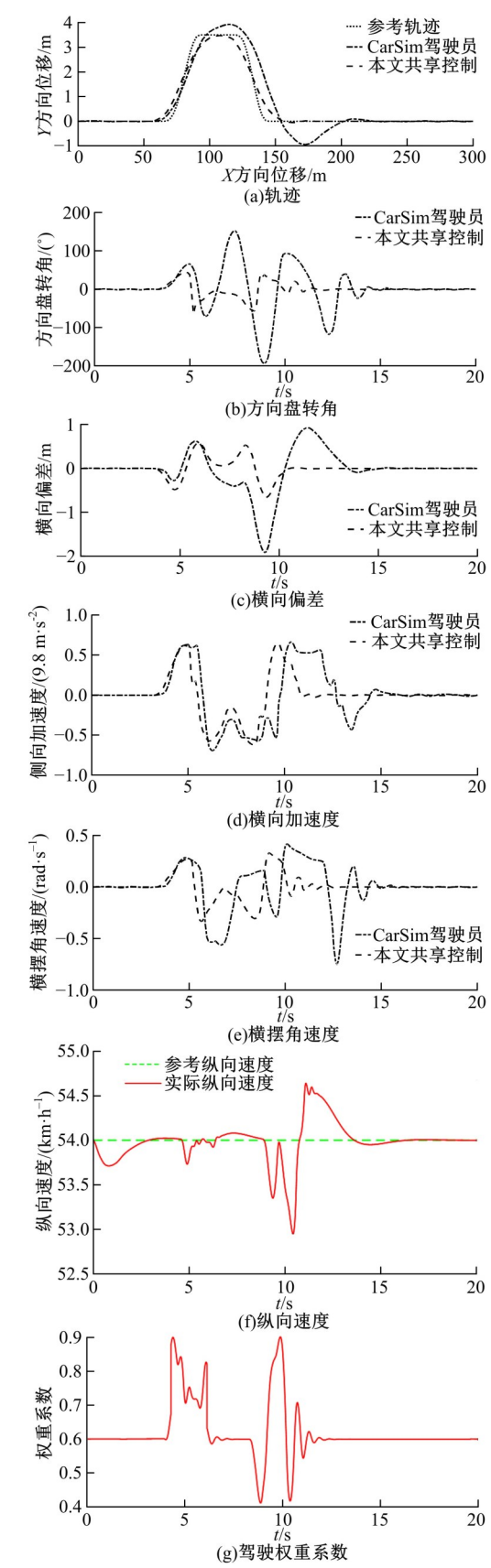


图 12 对开路面下驾驶情况对比图(DLC)
Fig. 12 Driving comparison diagram on the split road (DLC)

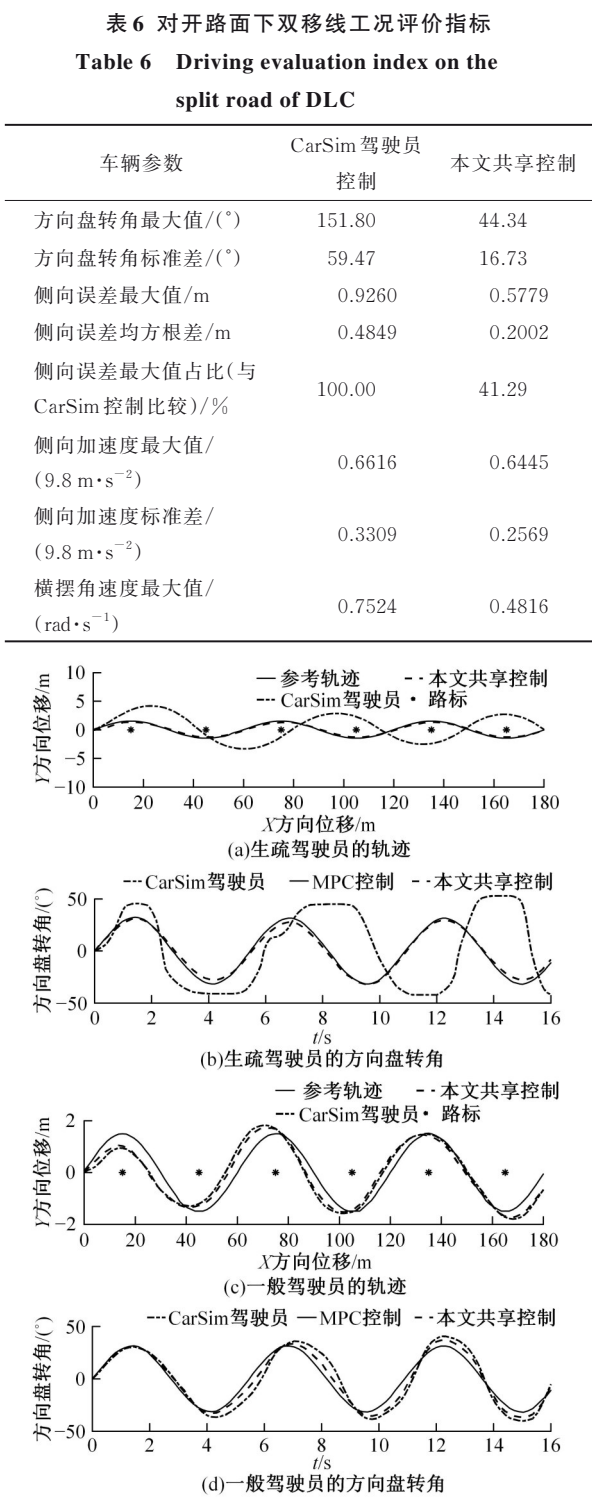


图 13 蛇形工况下驾驶情况对比图
Fig. 13 Driving comparison diagram with the snake test
最大值为 52.8° ,而本文所设计的共享控制器为 31.89° ,说明本文设计的共享控制器在驾驶员存在风险时,能够对车辆进行很好地干预,极大改善驾驶员的危险操作,使车辆稳定行驶,保证了跟踪精度。
对于一般熟练型驾驶员,可以看到其仍然保

表 7 生疏驾驶员蛇形工况评价指标

Table 7 Driving evaluation index of rusty drivers in the snake condition

车辆参数	生疏驾驶员 控制	MPC 控 制	本文共享 控制
方向盘转角最大值/(°)	52.8	32.37	31.89
方向盘转角标准差/(°)	36.23	22.26	20.63
侧向误差最大值/m	3.8797	—	0.2159
侧向误差均方根值/m	1.0591	—	0.1782

表 8 一般驾驶员蛇形工况评价指标

Table 8 Driving evaluation index of normal drivers in the snake condition

车辆参数	一般驾 驶员控制	MPC 控制	本文共享 控制
方向盘转角最大值/(°)	40.7	31.75	36.82
方向盘转角标准差/(°)	27.14	22.28	24.5
侧向误差最大值/m	1.5187	—	0.3610
侧向误差均方根值/m	1.0591	—	0.1696

持着对参考轨迹的跟踪能力,能够完成蛇形穿杆任务,有较小的横向误差,此时共享控制器对驾驶员的干预程度较小,在驾驶员能够做出正确指令时,遵循驾驶员的转向意愿,不多做干预,保证驾驶员的驾驶体验。

3.3 控制方案整体结果分析

(1)本文设计的共享控制器不仅可以提高汽车跟踪精度,而且还可以确保汽车的平稳性。

(2)本文设计的共享控制器不仅在良好均一路面下有好的控制效果,在低附着以及对开路面情况下仍然有效,能够保证车辆的跟踪精度。

(3)当道路情况良好且驾驶员能够做出正确操作时,本文所设计的共享控制器不对驾驶员的操作进行过多干预,分配给驾驶员更大权重,遵循驾驶员的驾驶指令,并对其进行优化改善。

(4)当道路情况变得复杂,且驾驶员不能够做出正确转向指令时,本文所设计的共享控制器会大幅度地进行干预,分配给智能控制系统更大权重,从而保证车辆的跟踪精度和转向稳定性。

(5)对于一般驾驶员,其操作大多时候都属于安全操作,此时控制器能够较好地跟随驾驶员的指令;对于生疏驾驶员,其操作通常会出现不合理等问题,控制器需要弥补驾驶员经验的不足,保证车辆行驶的安全性。

4 结束语

本文主要针对在冰雪天气下车辆更易失稳的

问题,研究了在低附着、不对称路面情况下车辆的稳定控制。同时,考虑驾驶员与智能控制器的协同共享,讨论了共享方式和驾驶权分配问题,以提高车辆在冰雪路面的复杂路况下的跟踪精度和转向稳定性。仿真结果表明:本文设计的共享控制器具有良好的控制效果,优于固定权重共享控制,尤其是在低附着、对开路面情况下,车辆的跟踪精度和稳定性均有显著提升,在不同路面情况下也能够保证车辆的稳定性并提高车辆的跟踪精度。此外,验证了基于模糊推理共享方案的有效性和合理性,在驾驶员操作熟练、道路情况良好时,系统不做过多干预,分配给驾驶员更多驾驶权重,满足其驾驶意愿;当道路情况转变为复杂危险、驾驶员不能做出正确操作时,系统干预程度增大,分配给智能控制器更大的权重,使车辆能够免于失稳等风险,保持车辆的跟踪精度和稳定性。

参考文献:

- [1] 宗长富,代昌华,张东. 智能汽车的人机共驾技术研究现状和发展趋势[J]. 中国公路学报, 2021, 34(6): 214-237.
Zong Chang-fu, Dai Chang-hua, Zhang Dong. Human-machine interaction technology of intelligent vehicles: current development trends and future directions[J]. China Journal of Highway and Transport, 2021, 34(6): 214-237.
- [2] 赵又群,李宇昊,邓汇凡,等. 基于Popov超稳定性的分布式电动汽车稳定性控制[J]. 吉林大学学报:工学版, 2022, 52(10): 2225-2233.
Zhao You-qun, Li Yu-hao, Deng Hui-fan, et al. Stability control of distributed electric vehicle based on popov hyperstability[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2022, 52(10): 2225-2233.
- [3] Marcano M, Díaz S, Pérez J, et al. A review of shared control for automated vehicles: theory and applications[J]. IEEE Transactions on Human-Machine Systems, 2020, 50(6): 475-491.
- [4] Wang W, Na X, Cao D, et al. Decision-making in driver-automation shared control: a review and perspectives[J]. IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, 2020, 7(5): 1289-1307.
- [5] 胡云峰,曲婷,刘俊,等. 智能汽车人机协同控制的研究现状与展望[J]. 自动化学报, 2019, 45(7): 1261-1280.
Hu Yun-feng, Qu Ting, Liu Jun, et al. Human-ma-

- chine cooperative control of intelligent vehicle: recent developments and future perspectives[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2019, 45(7): 1261-1280.
- [6] 何仁, 赵晓聪, 杨奕彬, 等. 基于驾驶人风险响应机制的人机共驾模型[J]. *吉林大学学报:工学版*, 2021, 51(3): 799-809.
- He Ren, Zhao Xiao-cong, Yang Yi-bin, et al. Man-machine shared driving model using risk-response mechanism of human driver[J]. *Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition)*, 2021, 51(3): 799-809.
- [7] Xie J, Xu X, Wang F, et al. Modeling adaptive preview time of driver model for intelligent vehicles based on deep learning[J]. *Journal of Systems and Control Engineering*, 2022, 236(2): 355-369.
- [8] Lazcano A M R, Niu T, Akutain X C, et al. MPC-based haptic shared steering system: a driver modeling approach for symbiotic driving[J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2021, 26(3): 1201-1211.
- [9] 田涛涛, 侯忠生, 刘世达, 等. 基于无模型自适应控制的无人驾驶汽车横向控制方法[J]. *自动化学报*, 2017, 43(11): 1931-1940.
- Tian Tao-tao, Hou Zhong-sheng, Liu Shi-da, et al. Model-free adaptive control based lateral control of self-driving car[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2017, 43(11): 1931-1940.
- [10] Li L, Lu Y, Wang R, et al. A three-dimensional dynamics control framework of vehicle lateral stability and rollover prevention via active braking with MPC[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2016, 64(4): 3389-3401.
- [11] Chouki S, Anh-Tu N, Amir B M, et al. Driver-automation cooperation oriented approach for shared control of lane keeping assist systems[J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2019, 27(5): 1962-1978.
- [12] 刘俊. 智能车辆人机协同转向控制策略研究[D]. 长春: 吉林大学通信工程学院, 2020.
- Liu Jun. Research on driver-automation cooperative steering control strategy of intelligent vehicle[D]. Changchun: College of Communication Engineering, Jilin University, 2020.
- [13] Tian Y, Zhao Y, Shi Y, et al. The indirect shared steering control under double loop structure of driver and automation[J]. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, 2020, 7(5): 1403-1416.
- [14] 葛召浩. 一种极限工况下人-车-路闭环系统纵横向协同控制方法[D]. 南京: 南京航空航天大学能源与动力学院, 2020.
- Ge Zhao-hao. A longitudinal-lateral cooperative control method for human-vehicle-road closed loop system under extreme conditions[D]. Nanjing: College of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2020.
- [15] Wang P, Liu H, Guo L, et al. Design and experimental verification of real-time nonlinear predictive controller for improving the stability of production vehicles[J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2020, 29(5): 2206-2213.
- [16] 张雷, 赵宪华, 王震坡. 四轮轮毂电机独立驱动电动汽车轨迹跟踪与横摆稳定性协调控制研究[J]. *汽车工程*, 2020, 42(11): 1513-1521.
- Zhang Lei, Zhao Xian-hua, Wang Zhen-po. Study on coordinated control of trajectory tracking and yaw stability for autonomous four-wheel-independent-driving electric vehicles[J]. *Automotive Engineering*, 2020, 42(11): 1513-1521.
- [17] 司振立. 基于模型预测的分布式驱动智能车轨迹跟踪研究[D]. 长春: 吉林大学汽车工程学院, 2020.
- Si Zhen-li. Research on trajectory tracking of distributed driving intelligent vehicle based on model predictive control[D]. Changchun: College of Automotive Engineering, Jilin University, 2020.
- [18] 谭运生. 电动轮汽车转向的动态稳定控制及人车闭环仿真研究[D]. 南京: 南京航空航天大学能源与动力学院, 2015.
- Tan Yun-sheng. Study of dynamic stability control and driver-vehicle closed loop system for in-wheel motor electric vehicles steering[D]. Nanjing: College of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2015.