DOI: 10.3901/JME.2019.16.091

考虑驾驶员操纵失误的车道偏离辅助 人机协同控制*

高振刚^{1,2} 陈无畏¹ 谈东奎¹ 赵林峰¹ 汪洪波¹

(1. 合肥工业大学汽车与交通工程学院 合肥 230009;

2. 鄂尔多斯应用技术学院 鄂尔多斯 017000)

摘要: 人机协同控制车辆是降低道路交通事故的重要手段之一, 针对因驾驶员操纵失误而引发的车道偏离问题, 提出一种基于人机协同的车道偏离辅助控制方法。采用模型预测控制设计的车道偏离辅助控制器可保证车辆在不同速度下稳定地跟踪车道线, 通过求解跨道时间并设定其阈值有效触发车道偏离预警, 控制辅助系统开启与关闭。根据驾驶员状态、车辆状态、车路相对位置关系实时决策驾驶员与辅助控制器协同控制因子, 并由协同因子决定辅助系统的转向力矩。CarSim/Simulink 环境下的联合仿真及基于 CarSim/LabVIEW RT 的硬件在环试验表明: 与驾驶员单独操纵相比, 基于人机协同的车道偏离辅助系统在避免车道偏离的同时使横向偏差有所减小; 与无协同控制相比, 人机协同降低了控制器对驾驶员操纵的干预, 充分说明所提出的人机协同车道偏离辅助方法提高了车辆行驶的安全性及驾驶舒适性。

关键词: 驾驶员失误; 车道偏离辅助; 模型预测控制; 人机协同

中图分类号: U461

Human-machine Cooperative Lane Departure Assist Control Considering Driver Manipulate Failure

GAO Zhengang^{1,2} CHEN Wuwei¹ TAN Dongkui¹ ZHAO Linfeng¹ WANG Hongbo¹

(1. School of Automotive and Transportation Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009;

2. Ordos Institute of Technology, Ordos 017000)

Abstract: Human-machine cooperative control of vehicle is one of the important ways to reduce road traffic accidents, according to the unintended lane departure caused by driver manipulate failure, a lane departure assist control based human-machine cooperative is proposed. Based on model predictive control, the lane departure assist controller is designed that ensure the vehicle tracks the lane stable at different speeds. The time to lane crossing is solved and with appropriate threshold value, which can trigger lane departure warning as well as start and shutdown the assist system. The cooperative control factor between the driver and the controller is decided in real time based on driver state, vehicle state and vehicle-road relative position, the assist torque of steering is determined by the cooperative control factor. Simulation in CarSim/Simulink and hardware in the loop test verified that: compared to the driver manipulate, the human-machine cooperative assist system can avoid the lane departure and decrease the lateral distance to some extent; Compared to the control without cooperative, human-machine cooperative reduced the intervention of the controller to the driver, which fully explained that the proposed method can improve the safety and comfort ability of vehicle driving.

Key words: driver failure; lane departure assist; model predictive control; human-machine cooperative

0 前言

对大量交通事故的调查和分析表明, 驾驶员疲

劳和注意力分散引发的车辆偏离道路是造成交通事故频发的重要原因。以车道偏离辅助系统为主导的车辆主动安全技术可在驾驶员操纵失误时, 辅助驾驶员完成转向操纵, 实现人机协同控制。与依靠驾驶员单独控制车辆及自动驾驶系统相比, 辅助系统协同驾驶员控制车辆可有效解决因驾驶员操纵失误及自动驾驶系统故障而导致的车辆安全行驶问题, 是当前车辆主动安全技术研究中的热点问题。

* 国家自然科学基金(51675151, 51375131, U1564201)、内蒙古自治区自然科学基金(2016MS0532)、内蒙古自治区高等学校科学研究(NJZY16376)和江苏省道路载运工具新技术应用重点实验室开放基金(BM20082061504)资助项目。20181008 收到初稿, 20190508 收到修改稿

为提高车辆的安全性,王家恩等^[1]提出了一种基于期望横摆角速度的车辆横向控制方法,通过改装车辆转向机构实现车道保持控制, MARINO 等^[2]考虑时变车速等非线性因素,基于主动前轮转向实现车道保持, WONHEE 等^[3]则研究了基于转向力矩控制的车道保持系统,由于可与 EPS 系统共用执行机构,其在结构方案和成本控制方面更为合理。然而,考虑当前复杂的交通状况,基于车道保持的自动驾驶系统在实际应用中的可靠性仍有待进一步提高,而上述研究也均未深入研究驾驶员与车道保持系统在控制车辆转向过程中的相互影响。

设计与驾驶员协同控制车辆的车道偏离辅助系统,需要研究两个关键问题:其一是辅助系统仅在必要时才启动,且能有效纠正因驾驶员操纵失误而引发的车道偏离;其二是在人机协同控制车辆转向过程中减小人机冲突,保证驾驶员驾驶的舒适感^[4]。

NICOLETA 等^[5]将驾驶员的转矩视为干扰,设计了车道保持系统,通过估计车道偏离的不变集分析驾驶员输入对车道保持性能的影响,由于车道保持系统始终具有控制主权,驾驶员转矩与车道保持系统转矩相互抵抗而导致驾驶舒适性较差; WANG 等^[6]设计触觉引导转矩控制器以辅助驾驶员跟踪车道中心线,驾驶员始终占据控制主权,考虑驾驶员操纵转向盘的滞后性,人机冲突仍较为明显。为减小人-机冲突, SOUALMI 等^[7-8]建立了驾驶员在环的人-车-路闭环模型,并针对闭环系统设计全局 T-S 模糊控制器,由于在设计控制器时充分“理解”驾驶员意图,该方法明显提高了人机协调性,但并未考虑驾驶员参数变化对系统性能的影响或针对不同熟练程度的驾驶员不具有鲁棒性。谈东奎等^[9]采用分层控制方法设计车道偏离辅助系统,根据驾驶员状态及车路相对位置关系使控制主权在驾驶员和辅助系统之间切换,在实现纠正车道偏离的同时减小了人机冲突,但其控制主权分配模块较为复杂。

基于上述分析,本文针对车道偏离中的人机协同控制问题,采用模型预测控制(MPC)方法设计了基于 EPS 的车道偏离辅助系统控制器,由简化算法计算跨道时间,通过设定合适的阈值控制辅助系统启动与关闭,驾驶员与辅助系统的转向控制主权及辅助系统的转向力矩由驾驶员状态和车路位置关系等确定的协同控制因子实时调节。设置了驾驶员容易发生操纵失误并引发车道偏离的三种工况,通过仿真及试验研究分析了基于人机协同控制的车道偏离辅助系统的有效性。

1 系统建模

1.1 车辆-道路模型

假设车辆安装了检测车道线的视觉传感系统,在图 1 中,由车辆与道路的位置关系,车辆前方预瞄距离 l_s 处的横向位置偏差 y_L 及航向角偏差 ψ_L 为^[10]

$$y_L = y_{CG} + l_s \sin \psi_L \quad (1)$$

$$\psi_L = \psi_V - \psi_R \quad (2)$$

式中, y_{CG} 为车辆质心与道路中心线的距离, ψ_V 为车辆航向角, ψ_R 为期望航向角。

图1 车辆-道路模型

不失一般性, ψ_L 较小时, y_L 及 ψ_L 关于时间 t 的导数

$$\dot{y}_L = v_y + l_s r + \psi_L v_x - l_s v_x \rho_{ref} \quad (3)$$

$$\dot{\psi}_L = \dot{r} - v_x \rho_{ref} \quad (4)$$

式中, v_x 、 v_y 分别为车辆纵向和侧向速度, r 为车辆横摆角速度, ρ_{ref} 为道路曲率。

忽略空气动力学的影响,具有侧向及横摆运动的车辆横向动力学模型为^[11]

$$\begin{cases} \dot{\beta} = \frac{F_{yf} + F_{yr}}{mv_x} - r \\ \dot{r} = \frac{l_f F_{yf} - l_r F_{yr}}{I_z} \end{cases} \quad (5)$$

式中, F_{yf} 、 F_{yr} 分别为车辆前后轮胎的侧向力, l_f 、 l_r 分别为车辆前后轴至质心间的距离, I_z 为车身绕 z 轴的转动惯量, m 为整车质量, β 为车辆质心侧偏角。

在轮胎侧偏角 α_i 较小时,其与轮胎侧向力 F_{yi} 关系可以近似为线性关系,即

$$F_{yi} = C_i \alpha_i \quad (6)$$

式中, $i = f, r$ 分别代表车辆的前轮与后轮, C_i 为轮胎侧偏刚度值, α_i 的近似值为

$$\begin{cases} \alpha_f = \frac{l_f r}{v_x} + \beta - \delta_f \\ \alpha_r = \beta - \frac{l_r r}{v_x} \end{cases} \quad (7)$$

将式(6)、(7)代入式(5)中, 得

$$\begin{cases} \dot{\beta} = \frac{2(C_f + C_r)}{mv_x} \beta + (-1 + \frac{2(l_r C_r - l_f C_f)}{mv_x^2}) r + \frac{2C_f}{mv_x} \delta_f \\ \dot{r} = \frac{2(l_r C_r - l_f C_f)}{I_z} \beta - \frac{2(l_r^2 C_r + l_f^2 C_f)}{I_z v_x} r + \frac{2l_f C_f}{I_z} \delta_f \end{cases} \quad (8)$$

1.2 转向机构动力学模型

以转向管柱式 EPS 为例, 其转向机构动力学模型如下

$$J_c \ddot{\theta}_c + B_c \dot{\theta}_c = T_d + T_c - \frac{T_r}{R_s} \quad (9)$$

式中, θ_c 、 J_c 、 B_c 分别为转向管柱转角、转动惯量、阻尼, T_d 与 T_c 分别为驾驶员与辅助系统施加在转向机构上的转矩, R_s 为前轮与转向机构的减速比, T_r 为转向阻力矩。

不考虑转向系统的摩擦阻力, 转向阻力矩 T_r 主要由轮胎回正力矩引起, 其值为

$$T_r = 2C_f \alpha_f \eta_t \quad (10)$$

式中, η_t 为轮胎拖距。转向盘转角与前轮转角满足关系式 $\theta_c = R_s \delta_f$ 。

联立式(3)~(10), 并取状态向量 $\mathbf{x}_v = (\beta \ r \ \psi_L \ y_L \ \theta_c \ \dot{\theta}_c)^T$, 控制输入 $u = T_c + T_d$, 以纵向车速为时变参数的车辆-道路状态空间模型可表示为

$$\dot{\mathbf{x}}_v = \mathbf{A}_v(t) \mathbf{x}_v + \mathbf{B}_u \mathbf{u}_v + \mathbf{D}_w(t) \rho_{ref} \quad (11)$$

$$\text{式中 } \mathbf{A}_v(t) = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & 0 & 0 & a_{15} & 0 \\ a_{21} & a_{22} & 0 & 0 & a_{25} & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & l_s & v_x & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ a_{61} & a_{62} & 0 & 0 & a_{65} & 0 \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{B}_u = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{J_c} \end{pmatrix}^T$$

$$\mathbf{D}_w(t) = (0 \ 0 \ -v_x(t) \ -l_s v_x(t) \ 0 \ 0)^T$$

$$a_{11} = -\frac{2(C_r + C_f)}{m} \quad a_{12} = -1 + \frac{2(l_r C_r - l_f C_f)}{mv_x^2(t)}$$

$$a_{15} = \frac{2C_f}{mv_x(t)R_s} \quad a_{21} = \frac{2(l_r C_r - l_f C_f)}{I_z}$$

$$a_{22} = \frac{2(l_r^2 C_r + l_f^2 C_f)}{I_z v_x(t)} \quad a_{25} = \frac{2l_f C_f}{I_z R_s}$$

$$a_{61} = \frac{2C_f \eta_t}{J_c R_s} \quad a_{62} = \frac{2C_f l_f \eta_t}{J_c R_s v_x(t)}$$

$$a_{65} = \frac{2C_f \eta_t}{J_c R_s^2} \quad a_{66} = -\frac{B_c}{J_c}$$

1.3 驾驶员模型

驾驶员模型由单点最优预瞄加速度模型^[12]和神经肌肉系统^[13]组成, 如图 2 所示。

图 2 驾驶员模型

图 2 中, y^* 、 y 分别为期望及实际侧向位移, θ_c^* 、 θ_c 分别为期望及实际转向盘转角, t_p 、 t_d 、 t_c 分别为驾驶员预瞄时间、神经反应滞后时间及微分校正时间常数, ω_c 、 B_f 、 K_f 、 t_n 分别为驾驶员神经肌肉系统的上截止频率、反射阻尼、反射刚度及神经传递的滞后时间, K_a 为神经肌肉收缩产生的主动刚度。 G_{ay} 为车辆稳态增益, 其表达式为

$$G_{ay} = \frac{v_x}{(l_f + l_r)(1 + Kv_x^2)} \quad (12)$$

式中, K 为稳定性因子, $K = \frac{m}{(l_f + l_r)^2} \left(\frac{l_f}{C_r} - \frac{l_r}{C_f} \right)$ 。

2 人机协同车道偏离辅助系统控制策略

基于人机协同的车道偏离辅助控制系统主要由 CarSim 环境中的车辆模型及视觉系统、基于 LTV-MPC 的车道偏离辅助控制器、车道偏离决策模块及协同控制因子决策模块等组成, 如图 3 所示。

LTV-MPC 车道偏离辅助控制器模块主要是以建立的车辆-道路模型作为预测模型, 设计 MPC 控制器的目标函数并设置系统变量的相关约束, 将对目标函数的优化问题转为二次规划问题, 求解符合条件的 MPC 控制器参数, 保证车道保持的性能及车辆在转向控制过程的平稳性和舒适性。

车道偏离决策模块以跨道时间作为触发和消除车道偏离预警的依据。考虑车速、车路相对位置关

散化得

$$\begin{cases} \mathbf{x}_v(\mathbf{k}+1) = \mathbf{A}_{k,t} \mathbf{x}_v(\mathbf{k}) + \mathbf{B}_{k,t} u(\mathbf{k}) + \mathbf{D}_{k,t} \rho_{ref}(\mathbf{k}) \\ \mathbf{y}_v(\mathbf{k}) = \mathbf{C}_{k,t} \mathbf{x}_v(\mathbf{k}) \end{cases} \quad (20)$$

式中, 下标“ t ”表示当前时刻, 小标“ k, t ”表示 $t + kT_s$ 时刻。

选取预测时域 N_p 、控制时域 N_c , 且 $N_p \geq N_c$, 为简化LTV-MPC控制器的求解, 假设:

(1) 式(20)中系统的各状态变量及道路曲率均可通过测量或估计获得。

(2) 各参数矩阵在预测时域内的变化较小, 可忽略不计, 以 $\mathbf{A}_{k,t}$ 为例, 即

$$\mathbf{A}_{k,t} = \mathbf{A}_t, \quad k=1, 2, \dots, N_p \quad (21)$$

基于上述假设, 式(20)可进一步写为

$$\begin{cases} \mathbf{x}_p(\mathbf{k}+1) = \bar{\mathbf{A}}_t \mathbf{x}_p(\mathbf{k}) + \bar{\mathbf{B}}_t u(\mathbf{k}) \\ \mathbf{y}_p(\mathbf{k}) = \bar{\mathbf{C}}_t \mathbf{x}_p(\mathbf{k}) \end{cases} \quad (22)$$

式中, $\mathbf{x}_p^T = (\mathbf{x}_v \quad \rho_{ref})^T$, $\bar{\mathbf{A}}_t = \begin{pmatrix} \mathbf{A}_{k,t} & \mathbf{D}_{k,t} \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$,

$$\bar{\mathbf{B}}_t = \begin{pmatrix} \mathbf{B}_{k,t} \\ 0 \end{pmatrix}, \quad \bar{\mathbf{C}}_t = (\mathbf{C}_{k,t} \quad 0)。$$

取 $\Delta \mathbf{x}_p(\mathbf{k}+1) = \mathbf{x}_p(\mathbf{k}+1) - \mathbf{x}_p(\mathbf{k})$, 并令 $\mathbf{x}(\mathbf{k}+1) = (\Delta \mathbf{x}_p(\mathbf{k}+1) \quad \mathbf{y}_p(\mathbf{k}+1))^T$, 式(22)可写为

$$\begin{cases} \mathbf{x}(\mathbf{k}+1) = \tilde{\mathbf{A}}_t \mathbf{x}(\mathbf{k}) + \tilde{\mathbf{B}}_t u(\mathbf{k}) \\ \mathbf{y}(\mathbf{k}) = \tilde{\mathbf{C}}_t \mathbf{x}(\mathbf{k}) \end{cases} \quad (23)$$

式中, $\tilde{\mathbf{A}}_t = \begin{pmatrix} \bar{\mathbf{A}}_t & 0 \\ \bar{\mathbf{C}}_t \bar{\mathbf{A}}_t & 1 \end{pmatrix}$, $\tilde{\mathbf{B}}_t = \begin{pmatrix} \bar{\mathbf{B}}_t \\ \bar{\mathbf{C}}_t \bar{\mathbf{B}}_t \end{pmatrix}$, $\tilde{\mathbf{C}}_t = (0 \quad 1)。$

根据式(23), 在采样点 k_i 处, 预测时域 N_p 内状态变量的变化序列为

$$\begin{aligned} \mathbf{x}(k_i + 1/k_i) &= \tilde{\mathbf{A}}_t \mathbf{x}(k_i) + \tilde{\mathbf{B}}_t \Delta u(k_i) \\ \mathbf{x}(k_i + 2/k_i) &= \tilde{\mathbf{A}}_t^2 \mathbf{x}(k_i) + \tilde{\mathbf{A}}_t \tilde{\mathbf{B}}_t \Delta u(k_i) + \tilde{\mathbf{B}}_t \Delta u(k_i + 1) \\ &\vdots \\ \mathbf{x}(k_i + N_p/k_i) &= \tilde{\mathbf{A}}_t^{N_p} \mathbf{x}(k_i) + \tilde{\mathbf{A}}_t^{N_p-1} \tilde{\mathbf{B}}_t \Delta u(k_i) + \dots + \\ &\quad \tilde{\mathbf{A}}_t^{N_p-N_c} \tilde{\mathbf{B}}_t \Delta u(k_i + N_c - 1) \end{aligned}$$

根据状态变量序列, 可得输出向量序列

$$\begin{aligned} \mathbf{y}(k_i + 1/k_i) &= \tilde{\mathbf{C}}_t \tilde{\mathbf{A}}_t \mathbf{x}(k_i) + \tilde{\mathbf{C}}_t \tilde{\mathbf{B}}_t \Delta u(k_i) \\ \mathbf{y}(k_i + 2/k_i) &= \tilde{\mathbf{C}}_t \tilde{\mathbf{A}}_t^2 \mathbf{x}(k_i) + \tilde{\mathbf{C}}_t \tilde{\mathbf{A}}_t \tilde{\mathbf{B}}_t \Delta u(k_i) + \\ &\quad \tilde{\mathbf{C}}_t \tilde{\mathbf{B}}_t \Delta u(k_i + 1) \\ &\vdots \\ \mathbf{y}(k_i + N_p/k_i) &= \tilde{\mathbf{C}}_t \tilde{\mathbf{A}}_t^{N_p} \mathbf{x}(k_i) + \tilde{\mathbf{C}}_t \tilde{\mathbf{A}}_t^{N_p-1} \tilde{\mathbf{B}}_t \Delta u(k_i) + \dots + \\ &\quad \tilde{\mathbf{C}}_t \tilde{\mathbf{A}}_t^{N_p-N_c} \tilde{\mathbf{B}}_t \Delta u(k_i + N_c - 1) \end{aligned}$$

令

$$\begin{aligned} \mathbf{Y}_p &= (\mathbf{y}(k_i + 1/k_i) \quad \mathbf{y}(k_i + 2/k_i) \quad \dots \quad \mathbf{y}(k_i + N_p/k_i))^T \\ \Delta \mathbf{U}_p &= (\Delta u(k_i) \quad \Delta u(k_i + 1) \quad \dots \quad \Delta u(k_i + N_c - 1))^T \end{aligned}$$

可将上述关系式写为矩阵形式

$$\mathbf{Y}_p = \mathbf{H} \mathbf{x}(k_i) + \mathbf{M} \Delta \mathbf{U}_p \quad (24)$$

式中

$$\mathbf{H} = \begin{pmatrix} \tilde{\mathbf{C}}_t \tilde{\mathbf{A}}_t \\ \tilde{\mathbf{C}}_t \tilde{\mathbf{A}}_t^2 \\ \tilde{\mathbf{C}}_t \tilde{\mathbf{A}}_t^3 \\ \vdots \\ \tilde{\mathbf{C}}_t \tilde{\mathbf{A}}_t^{N_p} \end{pmatrix} \quad \mathbf{M} = \begin{pmatrix} \tilde{\mathbf{C}}_t \tilde{\mathbf{B}}_t & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \tilde{\mathbf{C}}_t \tilde{\mathbf{A}}_t \tilde{\mathbf{B}}_t & \tilde{\mathbf{C}}_t \tilde{\mathbf{B}}_t & 0 & \dots & 0 \\ \tilde{\mathbf{C}}_t \tilde{\mathbf{A}}_t^2 \tilde{\mathbf{B}}_t & \tilde{\mathbf{C}}_t \tilde{\mathbf{A}}_t \tilde{\mathbf{B}}_t & \tilde{\mathbf{C}}_t \tilde{\mathbf{B}}_t & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \tilde{\mathbf{C}}_t \tilde{\mathbf{A}}_t^{N_p-1} \tilde{\mathbf{B}}_t & \tilde{\mathbf{C}}_t \tilde{\mathbf{A}}_t^{N_p-2} \tilde{\mathbf{B}}_t & \tilde{\mathbf{C}}_t \tilde{\mathbf{A}}_t^{N_p-3} \tilde{\mathbf{B}}_t & \dots & \tilde{\mathbf{C}}_t \tilde{\mathbf{A}}_t^{N_p-N_c} \tilde{\mathbf{B}}_t \end{pmatrix}$$

选择控制目标函数

$$J = (\mathbf{R}_d - \mathbf{Y}_p)^T \bar{\mathbf{Q}} (\mathbf{R}_d - \mathbf{Y}_p) + \Delta \mathbf{U}_p^T \bar{\mathbf{R}} \Delta \mathbf{U}_p \quad (25)$$

目标函数的第一项反映了控制器求解中对期望值的跟踪能力, 第二项反映了对控制量平稳变化的要求。式中, $\mathbf{R}_d$ 为输出变量的期望值, $\bar{\mathbf{Q}}$ 为输出向量的加权系数矩阵, $\bar{\mathbf{R}}$ 为控制输入增量的加权系数。

在实际控制中, 由于助力电动机的输出转矩是有界的, 每个控制周期的转矩增量也受一定的限制, 且转矩波动过大会使车辆转向的瞬态响应较大而影响舒适性, 因而需对控制器输出转矩的大小及其增量施加约束条件。同时, 考虑路面附着系数对车辆操纵稳定性的影响, 侧向加速度的约束条件为^[18]

$$|a_y| \leq 0.85 \mu g \quad (26)$$

式中, μ 为路面附着系数, g 为重力加速度。

综合上述约束条件, LTV-MPC控制器的求解转化为如下的优化问题

$$\begin{aligned} \min J &= (\mathbf{R}_d - \mathbf{Y}_p)^T \bar{\mathbf{Q}} (\mathbf{R}_d - \mathbf{Y}_p) + \Delta \mathbf{U}_p^T \bar{\mathbf{R}} \Delta \mathbf{U}_p \\ u_{v \min} &\leq u_v \leq u_{v \max} \\ \Delta u_{v \min} &\leq \Delta u_v \leq \Delta u_{v \max} \\ |a_y| &\leq 0.85 \mu g \end{aligned} \quad (27)$$

结合二次规划的标准矩阵及约束条件进行模型预测控制器的求解^[19], 得到控制时域内的一系列控

制输入增量

$$\Delta U_p^* = (\Delta u_v^*(k_i) \quad \Delta u_v^*(k_i+1) \quad \cdots \quad \Delta u_v^*(k_i+N_c-1))^T \quad (28)$$

将控制序列中的第一个元素作为实际的控制输入增量作用于系统,实现模型预测控制的反馈机制,并在下一控制周期重复上述过程,即可实现 MPC 控制器的设计目标。

3.3 协同控制因子决策

由于驾驶员实际转向控制行为的不确定性,设计车道偏离辅助控制器时并未考虑驾驶员的转向输入,虽然 MPC 控制器可将驾驶员的转向操纵视为干扰,但如前言部分所述,辅助系统完全掌握车辆转向控制主权将使人机冲突明显,驾驶员操纵的舒适性较差。而转向主权如何分配及辅助系统施加辅助力矩的大小是人机协同控制中的关键问题^[20-21]。为此,提出一种由协同控制因子动态调整转向控制主权的方法,协同控制因子 α 的调整规则如图 5 所示,具体如下。

(1) 根据车辆跨道时间计算的结果,当车道偏离预警未触发时,认为驾驶员正确操纵车辆,车道偏离辅助控制器并不干预驾驶员的正常操纵,此时协同控制因子 $\alpha=0$,即驾驶员完全掌握控制主权。

(2) 在 t 时刻触发车道偏离预警时,进一步判断驾驶员状态,设定驾驶员转矩传感器信号的采样时间 Δt 及驾驶员转矩阈值 $T_{d,thd}$,如果 $\int_t^t |T_d| dt \geq T_{d,thd}$,认为驾驶员虽操纵失误但仍具备转向控制能力。此时,驾驶员与辅助系统共同控制车辆转向。由 $|T_d|$ 、 v_x 及 y_L 变量通过编制模糊规则确定协同控制因子 α 。设定 $|T_d|$ 的论域为 $[0, 8]$ Nm, v_x 的论域为 $[60, 120]$ km/h, $|y_L|$ 的论域 $[0,1]$ m,各变量的模糊子集均设定为 $\{S,M,L\}$,分别表示变量的小、中、大三种状态,输入变量均采用三角形隶属度函数。输出变量为协同控制因子 α ,其论域为 $[0,1]$,模糊子集为 $\{Z,S,M,L,VL\}$,分别表示零、小、中、大、较大五

种状态。模糊规则编制的原则为:触发车道偏离预警时, $|T_d|$ 越小,驾驶员施加的转向力不足,为纠正车道偏离,辅助系统需施加较大的辅助力矩, α 应取较大的值; v_x 越大,车辆转向轮到达车道边缘线的时间越短,需要较大的协同控制因子 α 纠正车道偏离; $|y_L|$ 越大,车辆偏离车道的可能性越大,同样需较大的 α 进行转向纠正。编制的模糊规则库如表 1 所示。以车速为 80 km/h 为例,由驾驶员转矩 $|T_d|$ 、预瞄处偏差 $|y_L|$ 决策协同控制因子 α 的模糊规则曲面如图 6 所示。

表 1 协同控制因子模糊规则推理库

车速 v_x	驾驶员转矩 $ T_d $	预瞄偏差 $ y_L $		
		S	M	L
S	S	S	M	VL
	M	Z	S	M
	L	Z	Z	S
M	S	S	M	VL
	M	S	M	L
	L	Z	S	L
L	S	L	VL	VL
	M	S	L	VL
	L	S	M	L

图 6 车速为 80km/h 时的模糊规则曲面

(3) 在 t 时刻触发车道偏离预警时,如果 $\int_{t-\Delta t}^t |T_d| dt < T_{d,thd}$,认为驾驶员因困倦完全失去转向控制能力,辅助系统应完全掌握车辆转向控制主权,协同控制因子 $\alpha=1$ 。

4 仿真分析

采用 Carsim 与 Simulink 联合仿真以分析模型预测控制器及人机协同车道偏离辅助系统的效果。在 Simulink 中建立车辆-道路模型、驾驶员模型、车道偏离决策模块、LTV-MPC 控制器及协同控制因子模块,CarSim 中选用 Sedan 车辆模型,道路模型截取 Alt3 from FHWA 的部分路段,如图 7 所示。道路宽

图 5 协同控制因子决策

度 $D_R = 3.75$ m, 路面附着系数设置为 $\mu = 0.85$ 。LTV-MPC 控制器参数中, $N_p = 10$, $N_c = 4$, $\bar{Q} = \text{diag}(1, 150, 800)$, $\bar{R} = 0.1$ 。设定驾驶员转矩采样时间 $\Delta t = 0.5$ s, 阈值 $T_{d,thd} = 1$ N·m。表 2 为车辆及驾驶员模型参数。

图 7 道路模型

表 2 车辆及驾驶员模型仿真参数

参数	数值
整车质量 m / kg	1 830
质心至前轮的距离 l_f / m	1.4
质心至后轮的距离 l_r / m	1.65
车身宽度 D_V / m	1.88
前轮侧偏刚度 C_f / (kN/rad)	80
后轮侧偏刚度 C_r / (kN/rad)	80
车身绕 z_c 轴的转动惯量 I_z / (kg·m ²)	2 765
转向柱转动惯量 J_c / (kg·m ²)	0.05
转向柱阻尼 B_c / [(N·m·s)/rad]	0.57
前轮至转向柱传动比 R_s	16.5
轮胎纵向拖距 η_t / m	0.225
预瞄距离 y_L / m	12
驾驶员预瞄时间 t_p / s	0.5
驾驶员反应时间 t_d / s	0.25
微分校正时间常数 t_c	0.2
NMS 上截止频率 ω_c / (rad/s)	30
NMS 反射阻尼 c_t / [(N·m·s)/rad]	3
NMS 反射刚度 k_t / [(N·m)/rad]	10
NMS 主动刚度 k_a / [(N·m)/rad]	30
NMS 神经传递时间 t_n / s	0.04

4.1 模型预测控制仿真分析

分别建立线性时不变(LTI)、考虑车速为时变参数(LTV)的车辆-道路模型, 验证模型预测控制器的有效性。由于 LTI 系统模型要求参数固定, 因此只能以某一名义车速下的车辆-道路模型设计控制器, 此处设置为 80 km/h; LTV 控制器则以车速为时变参数设计。均在车速为 100 km/h 工况下对两个控制器进行仿真比较。图 8、9 列出了两种控制器在跟踪车道中心线时的横向偏差及侧向加速度曲线。由图

可见, 所设计的模型预测控制器使车辆稳定地跟踪车道中心线, 侧向加速度的响应也在设定约束范围内。同时, 图 8 中, 在同样的仿真工况下, 由于 LTV 控制器考虑了车速时变因素, 其车道保持性能比 LTI 控制器更好。

图 8 MPC 控制下车辆质心处横向偏差

图 9 MPC 控制下车辆侧向加速度响应

4.2 车道偏离辅助人机协同控制仿真分析

在车速为 80 km/h 时分三种工况模拟驾驶员操纵失误, 进行车道偏离辅助人机协同控制仿真分析。

工况一: 驾驶员控制车辆进入第二个直道后, 在 10.5~18 s 因困倦而失去转向控制能力, $T_d = 0$, 自 18 s 恢复转向控制能力。

图 10 为车辆的跨道时间曲线, 图中, 在 10.5 s 前, 驾驶员未发生转向操纵失误时, 跨道时间 t_{LC} 大于预警设定值 $t_{LC,ON}$; 自 10.5 s 驾驶员停止对车辆的转向操纵后, 在 13.5 s 触发车道偏离预警并使辅助系统启动, 经转向纠正后, 跨道时间在 13.8 s 大于辅助系统关闭阈值 $t_{LC,OFF}$, 但由于驾驶员仍未恢复转向控制, 辅助系统并不关闭; 自 18 s 驾驶员恢复转向控制能力后, 在 23.1 s 车辆跨道时间大于设定的关闭阈值, 辅助系统停止工作。在图 11 所示的协同因子曲线中, 在 13.5 s 前未触发车道偏离预警时, 驾驶员掌握车辆转向控制主权, 协同控制因子 $\alpha = 0$; 在 13.5 s 触发车道偏离预警时, 由于 $T_d = 0$, 且采样时间内, $\int_{t-\Delta t}^t |T_d| dt < T_{d,thd}$, 辅助系统完全掌握转向控制主权, $\alpha = 1$; 至 18 s 时, 驾驶员恢复对车辆的转向操纵, 但由于此时, $t_{LC} \leq t_{LC,OFF}$, 辅助

系统并不关闭,驾驶员与辅助系统共同控制车辆转向, α 由编制的模糊规则调整其在 $[0, 1]$ 之间动态变化;在23.1 s处,辅助系统关闭,驾驶员完全掌握转向控制主权, $\alpha=1$ 。

图10 跨道时间(工况一)

图11 协同控制因子(工况一)

图12为驾驶员及失误驾驶员、协同控制及无协同控制时辅助系统施加的转向力矩。其中,协同控制是指可由协同控制因子动态决策驾驶员与辅助系统控制主权的情况;无协同控制是指驾驶员与辅助系统切换转向控制主权,即车道偏离预警未触发时由驾驶员掌握转向控制主权,否则由辅助系统掌握转向控制主权。由图可见,在10.5~18 s,驾驶员因操纵失误失去对车辆的转向控制,转矩为0;在13.5~18 s,辅助系统启动并向车辆转向系统施加辅助转矩以纠正车道偏离,由于驾驶员并未参与转向控制,协同控制与无协同控制的转向力矩相同;在18~23.1 s,辅助系统与驾驶员共同控制车辆转向,

图12 转向力矩(工况一)

辅助系统在协同控制时提供的转矩小于无协同控制,即:与无协同控制相比,协同控制为驾驶员争取了转向控制主权,当驾驶员增大纠正转向力矩时,根据协同因子模糊决策规则,辅助系统施加的转矩将进一步减小。说明协同控制可降低车道偏离辅助系统对驾驶员操纵的干预,减小人机冲突。

图13为各控制模式下车辆质心与车道中心线的横向偏差。根据车辆与道路的参数,当车辆质心偏离道路中心线距离大于0.935 m时,车辆将偏离预定车道线。图中,当驾驶员失去转向控制能力时,车辆在约14 s时偏离预定车道。而辅助系统启动后,车辆质心与车道中心线最大横向距离为0.81 m,并未发生车道偏离。同时,在18 s驾驶员恢复转向控制后,由图中可见,协同控制与辅助系统完全占据控制主权时无协同控制的横向偏差基本一致,说明基于协同控制的车道偏离辅助系统不仅减小了人机共同控制车辆转向中的冲突,车道保持性能也并未下降。

图13 车辆质心处横向偏差(工况一)

工况二:驾驶员控制车辆进入第二个弯道时,在14~25 s间施加的转向力矩过小,车辆相对车道处于转向不足状态而向外侧偏离。

图14为工况二的跨道时间曲线。由图可见,在0~14 s驾驶员正确操纵车辆时,未触发车道偏离预警;14 s驾驶员转矩过小而处于转向不足状态时,在15.1 s触发车道偏离预警,辅助系统启动并介入车辆转向控制;跨道时间在23.1 s处大于设定的系统关闭阈值。图15为工况二的协同控制因子曲线,

图14 跨道时间(工况二)

图中,在15.1~23.1 s期间,辅助系统处于启动状态,辅助系统与驾驶员协同控制因子由模糊规则调整其动态变化。

图 15 协同控制因子(工况二)

工况二下的转向力矩如图16所示。图中,辅助系统启动期间,协同控制时辅助系统施加的转向辅助力矩波动较小且在数值上小于无协同控制,辅助系统对驾驶员的操纵干预较小。图17所示的横向偏差曲线中,协同控制时,车道偏离辅助系统可有效纠正车辆转向,车辆未发生车道偏离,且对车道中心线的跟踪性能与辅助系统完全掌握控制主权时相接近。

图 16 转向力矩(工况二)

图 17 车辆质心处横向偏差(工况二)

工况三:车辆进入第二个弯道时,在14~25 s驾驶员转向力矩过大,车辆相对车道处于转向过度状态而导致车辆向内侧偏离。

由图18~21可见,自14 s起驾驶员施加的转向力矩过大时,自16.6 s触发车道偏离预警,辅助系统在16.6~23.1 s处于启动状态。在此期间,基

于协同控制的车道偏离辅助系统有效纠正了车辆向车道内侧偏离并可较为稳定地跟踪车道中心线,横向偏差仅在辅助系统启动时略大于无协同控制;而无协同控制时,辅助系统施加的反向辅助力矩较大,人机冲突明显且影响车辆的乘坐舒适性。进一步验证了设计的人机协同车道偏离辅助系统可纠正车道偏离,减小人机冲突。

图 18 跨道时间(工况三)

图 19 协同控制因子(工况三)

图 20 转向力矩(工况三)

图 21 车辆质心处横向偏差(工况三)

上述仿真结果表明,基于跨道时间的车道偏离预警可有效检测车辆偏离车道,使辅助系统在合适的时刻有效介入;人机协同控制因子决策可使转向控制主权在驾驶员、辅助系统及两者协同控制间有效切换,当驾驶员失去转向控制能力或因注意力分散等操纵失误时,设计的人机协同车道偏离辅助系统均可有效地纠正车道偏离,在保证人机冲突较小的情况下较为稳定地跟踪车道中心线,充分验证了基于人机协同的车道偏离辅助系统的有效性。

5 硬件在环试验

5.1 试验系统结构

搭建基于 CarSim/LabVIEW RT 的硬件在环试验台架,以进一步验证车道偏离辅助人机协同控制系统的有效性。试验系统由 CarSim 虚拟车辆-道路模型及其视觉系统、EPS 转向机构、自主研发的 EPS 控制器、转向阻力模拟器及 PXI 主机等组成,如图 22 所示。其中装有 LabVIEW 及 CarSim 的 PC 机与 PXI 主机通过网线实时传递信号,辅助电机控制器及转向阻力模拟器通过接线板与 PXI 实时通讯。

图 22 硬件在环试验台架

1. CarSim 虚拟环境 2. 自主开发的控制器 3. 电源
4. 阻力模拟伺服电机驱动器 5. 阻力模拟伺服电机
6. EPS 转向管柱 7. 接线板 8. PXI 主机

硬件在环试验的具体流程为:驾驶员操纵转向机构,其转矩及转角信息通过接线板发送给 PXI 主机,PXI 实时系统将信号发送至 CarSim 虚拟车辆模型并控制车辆在虚拟车道中行驶。Carsim 车辆转向阻力矩信息实时反馈至连接在转向机构下端的转向阻力模拟伺服电机;Carsim 中车辆-道路位置、车辆状态等信息发送至 PXI 主机;在 LabVIEW 中设计 LTV-MPC 控制器、车道偏离预警及协同控制因子决策算法并下载至 PXI 主机中执行,触发车道偏离预警后,助力电动机施加的辅助力矩信息将同驾驶员

转矩信息一同传输至 CarSim 车辆模型,实现车道偏离辅助人机协同硬件在环试验。

5.2 试验结果分析

硬件在环试验中,以实际驾驶员取代仿真研究中的驾驶员模型,其他条件与仿真工况相同。

试验一:模拟仿真工况一,驾驶员在约 13 s 停止对车辆的转向操纵,在约 19.5 s 恢复转向操纵。

试验结果如图 23~26 所示。图 23 中,根据跨道时间与设定阈值,当驾驶员在 13 s 处停止对车辆的转向操纵后,在 13.7 s 处触发车道偏离预警,在 21.6 s 处辅助系统关闭。图 24 中,在 13.7 s 前,驾驶员掌握控制主权;在 13.7~19.5 s,由于驾驶员没有进行转向操纵,辅助系统掌握控制主权;在 19.5~21.6 s,驾驶员恢复转向操纵时,人机协同控制因子在[0,1]动态变化。由图 25 所示的转向力矩曲线可见,19.5~21.6 s,驾驶员与辅助系统共同控制车辆转向期间,与无协同控制相比,协同控制时辅助系

图 23 跨道时间(试验一)

图 24 协同控制因子(试验一)

图 25 转向力矩(试验一)

统施加较小的转向力矩, 对驾驶员的操纵舒适性影响较小。人机协同控制的横向偏差如图 26 所示, 图中, 横向偏差最大处约为 0.77 m, 小于发生车道偏离的横向距离, 验证了基于人机协同的车道偏离辅助系统可纠正车辆发生车道偏离。

图 26 车辆质心处横向偏差(试验一)

比较仿真工况一与试验一中的各指标, 如表 3 所示。因实际驾驶员与驾驶员模型存在差异, 导致仿真工况和试验结果有所不同, 但根据表中数据, 仍然可以得出以下结论: 在仿真及试验工况下, 根据跨道时间设计的车道偏离辅助决策模块可使辅助系统适时介入和退出车辆转向控制, 在辅助系统的协同转向控制作用下, 均可避免车辆发生车道偏离, 且协同控制下的辅助转矩均方根值均小于无协同控制, 减小了辅助系统对驾驶员操纵的干预。

表 3 仿真工况一与试验一比较

指标	仿真	试验
辅助系统作用时间区间/s	[13.5, 23.1]	[13.7, 21.6]
协同控制横向偏差峰值/(N·m)	0.804 7	0.772 6
协同控制辅助转矩均方根值/(N·m)	2.88	2.38
无协同控制辅助转矩均方根值/(N·m)	3.13	2.89

试验二: 在驾驶员单独控制、驾驶员与辅助系统协同控制车辆时分别进行 10 次驾驶试验。

试验中, 驾驶员并非有意偏离车道, 同时, 为避免驾驶员对 CarSim 虚拟环境的熟练程度等客观因素对试验结果产生影响, 两类试验间隔进行。分别比较两类试验中触发车道偏离预警、发生车道偏离的次数及横向偏差的均方根值。根据表 4 的试验结果, 驾驶员单独控制车辆时, 触发车道偏离预警 17 次, 车辆偏离车道 12 次; 而人机协同控制时, 触发车道偏离预警 18 次, 与驾驶员单独控制时基本相当, 但车辆没有发生车道偏离; 且在 10 次试验中, 与驾驶员单独控制相比, 人机协同控制车辆转向的横向偏差均方根值降低了约 95%, 充分验证了基于人机协同的车道偏离辅助系统可有效纠正车辆发生车道偏离。

表 4 驾驶员与人机协同控制试验结果比较

参数	驾驶员	人机协同控制
车道偏离预警次数	17	18
车道偏离次数	12	0
横向偏差均方根值/m	0.4659	0.2389

同时, 由于协同控制因子的作用, 人机协同控制时辅助系统施加的转向力矩总不会超过无协同控制。在 10 次驾驶员与辅助系统协同控制试验中选取 2 次试验进一步验证, 在图 27、28 所示的转向力矩曲线中, 与无协同控制相比, 人机协同控制明显减小了辅助系统对驾驶员操纵的干预, 提升了驾驶舒适性。

图 27 转向力矩示例图 1(试验二)

图 28 转向力矩示例图 2(试验二)

综合分析上述仿真及试验结果可见: 采用简化算法的跨道时间在仿真及试验中均可有效触发车道偏离预警, 使辅助系统适时介入和退出车辆转向控制; 设计的车道偏离辅助系统可根据协同控制因子实时分配与驾驶员对车辆转向控制主权, 在减小人机冲突的同时可避免车辆发生车道偏离, 充分验证了所提方法的有效性及可行性。

6 结论

(1) 采用模型预测控制方法设计了车道偏离辅

助控制器,其中以车速为时变参数的 LTV-MPC 控制器可更好地跟踪车道中心线。

(2) 验证了跨道时间作为车道偏离预警触发指标的有效性。提出的协同控制因子可实时调配驾驶员与车道偏离辅助系统对转向盘的控制主权,既可有效纠正车道偏离,又减小了驾驶员与辅助系统的冲突,为人机协同控制车辆转向提供了较好的解决方案。

(3) 硬件在环试验表明,驾驶员在失去转向控制能力、相对车道转向不足或过度转向而触发车道偏离预警时,基于人机协同的车道偏离辅助系统可使横向偏差减小约 95%,且与无协同控制相比,降低了辅助系统对驾驶员操纵的干预,验证了设计的人机协同车道偏离辅助系统的有效性和可行性,提高了车辆的行驶安全性和驾驶舒适性。

参 考 文 献

- [1] 王家恩,陈无畏,王檀彬,等. 基于期望横摆角速度的视觉导航智能车辆横向控制[J]. 机械工程学报, 2012, 48(4): 108-115.
WANG Jiaen, CHEN Wuwei, WANG Tanbin, et al. Vision guided intelligent vehicle lateral control based on desired yaw rate[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(4): 108-115.
- [2] MARINO R, SCALZI S, NETTO M. Nested PID steering control for lane keeping in autonomous vehicles[J]. Control Engineering Practice, 2011: 1459-1467.
- [3] WONHEE K, YOUNG S S, CHUNG C C. Torque overlay-based robust steering wheel angle control of electrical power steering for a lane-keeping system of automated vehicles[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2016, 65(6): 4379-4392.
- [4] ROLF B, MARINUS M, VAN P. Understanding and reducing conflicts between driver and haptic shared control[C]//IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, October 5-8, 2014, San Diego, USA, 2014: 1510-1515.
- [5] NICOLETA M E, YAZID S, SAID M, et al. Driver influence on the performance of an integrated lane departure avoidance and lane keeping assistance system[C]//IEEE International Conference on Control Applications Part of 2009 IEEE Multi-conference on System and Control, Saint Petersburg, Russia, July 8-10, 2009: 119-124.
- [6] WANG Z, ZHENG R C, TSUTOMU K, et al. Evaluation of driver steering performance with haptic guidance under passive fatigued situation[C]//IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, October 9-12, 2016, Budapest, Hungary, 2016: 3334-3339.
- [7] SOUALMI B, SENTOUH C, POPIEUL J C, et al. A shared control driving assistance system: interest of using a driver model in both lane keeping and obstacle avoidance situations[C]//12th IFAC Symposium on Analysis, Design, and Evaluation of Human-machine Systems, Las Vegas, USA, August 11-15, 2013: 173-178.
- [8] SOUALMI B, SENTOUH C, POPIEUL J C, et al. Automation-driver cooperative driving in presence of undetected obstacles[J]. Control Engineering Practice, 2014, 24(1): 106-119.
- [9] 谈东奎,陈无畏,王家恩,等. 基于人机共享和分层控制的车道偏离辅助系统. 机械工程学报, 2015, 51(22): 98-110.
TAN Dongkui, CHEN Wuwei, WANG Jiaen, et al. Human-machine sharing and hierarchical control based lane departure assistance system[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(22): 98-110.
- [10] SPYRIDON Z, PANAGIOTIS T. Design of a lane-tracking driver steering assist system and its interaction with a two-Point visual driver model[C]//American Control Conference, Portland, USA, June 4-6, 2014: 3911-3917.
- [11] EUNHYEK J, KYONGSU Y, KILSOO K. A lateral driver model for vehicle-driver closed-loop simulation at the limits of handling[J]. Vehicle System Dynamics, 2015, 53(9): 1247-1268.
- [12] 白艳,贾鑫. 最优预瞄加速度驾驶员模型参数试验辨识方法研究. 汽车工程, 2015, 37(7): 788-794.
BAI Yan, JIA Xin. A research on parameter identification of optimal preview acceleration driver model by tests[J]. Automotive Engineering, 2015, 37(7): 788-794.
- [13] PICK A J, COLE D J. Neuromuscular dynamics in the driver-vehicle System[J]. Vehicle System Dynamics, 2006, 44(Sup1): 624-631.
- [14] 高振刚. 基于 EPS 的人机协同转向与悬架系统主动容错控制研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2018.
GAO Zhengang. Research on active fault-tolerant control of EPS-based human-machine cooperative steering and suspension system[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2018.
- [15] SAID M, SEBASTIEN G, MARIANA N. Time to line crossing for lane departure avoidance: A Theoretical Study and an Experimental Setting[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2006, 7(2): 226-241.
- [16] SAID M, SEBASTIEN G, MARIANAN, et al. Time to line crossing and vehicle dynamics for lane departure avoidance[C]//2004 IEEE Intelligent Transportation Systems Conference, Washington, USA, October 36,

- 2004: 618-623.
- [17] PAOLO Falcone, MOHAMMAD A, JONAS S. Predictive threat assessment via reachability analysis and set invariance theory[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2011, 12(4): 1352-1361.
- [18] RAUAMANI, R. Vehicle dynamics and control[M]. Springer, New York, 2006
- [19] WANG L P. Model predictive control system design and implementation using matlab[M]. New York: Springer, 2009.
- [20] MULDER M, ABBINK D A, BOER E R. Sharing control with haptics: Seamless driver support from manual to automatic control[J]. Human Factors, 2012, 54(5): 786-798.
- [21] SAEID K, ALIREZA K, AMIR K, et al. Torque-vectoring-based vehicle control robust to driver uncertainties[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2015, 64(8): 3359-3367.
-
- 作者简介:** 高振刚(通信作者), 男, 1985 年出生, 博士研究生。主要研究方向为车辆动力学及其控制、容错控制。
E-mail: gzg198510@163.com
- 陈无畏, 男, 1951 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为车辆动力学与控制, 发表论文 200 余篇。
E-mail: hfgdcjs@126.com