

DOI: 10.3901/JME.2022.08.181

基于可拓博弈的智能汽车轨迹跟踪协调控制方法研究*

臧勇¹ 蔡英凤² 孙晓强² 徐兴² 陈龙² 王海¹

(1. 江苏大学汽车与交通工程学院 镇江 212000;

2. 江苏大学汽车工程研究院 镇江 212000)

摘要: 针对智能汽车在高速过弯工况下, 轨迹跟踪误差大、横向稳定性无法保障的问题, 提出一种可拓博弈轨迹跟踪协调控制方法, 通过可拓划区域切换控制和博弈协调相结合, 突破单一控制策略的工况适应性和多策略切换的抖动问题。所提方法基于分层控制体系, 将轨迹跟踪控制分解为上层测度模式识别层和下层博弈协调层。上层基于可拓理论, 提出并联可拓测度模式识别策略, 将车-路系统实时状态映射至对应的可拓控制架构中经典域、可拓域和非域三种测度模式。下层针对不同测度模式对应设计三种控制策略, 根据上层测度模式识别结果进行实时策略切换, 引入博弈协调方法对并联可拓权重进行协调控制, 有效避免了模式切换带来的抖动问题。通过 Simulink/Carsim 建立联合仿真模型, 在双移线和“8字”形时变曲率高速工况开展算法对比验证, 所提方法相较于比例-积分-微分(Proportion-integral-derivative, PID)控制方法, 平均跟踪误差精度提升45.08%, 尤其在大曲率突变的恶劣工况下, 车辆稳定性提升44%。最后利用智能汽车试验平台进行了对比验证, 对设计智能汽车高速轨迹跟踪控制策略具有极强的指导意义和参考价值。

关键词: 智能汽车; 并联可拓控制; 关联函数; 博弈协调控制; 纳什均衡解

中图分类号: U471

Research on Intelligent Vehicle Trajectory Tracking Coordination Control Method Based on Extension Game

ZANG Yong¹ CAI Yingfeng² SUN Xiaoqiang² XU Xing² CHEN Long² WANG Hai¹

(1. School of Automotive and Traffic Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212000;

2. Automotive Engineering Research Institute, Jiangsu University, Zhenjiang 212000)

Abstract: For the problems of intelligent vehicle under high-speed cornering conditions, large trajectory tracking errors and lateral stability cannot be guaranteed, an extension game trajectory tracking coordination control method is proposed, which combines extension zone switching control and game coordination. It breaks the working condition adaptability of a single control strategy and the jitter problem of multiple strategy switching control. The proposed method is based on a hierarchical control system, which decomposes the trajectory tracking control into an upper measurement pattern recognition layer and a lower game coordination layer. Based on the extension theory, the upper layer proposes a parallel extension measurement pattern recognition strategy, and maps the real-time state of the vehicle-road system to the corresponding three measurement modes: classic domain, extension domain, and non-domain in extension control architecture. The lower layer designs three control strategies corresponding to different measurement modes. The real-time policy switching is performed based on the recognition results of upper measurement modes. The game coordination method is introduced to coordinate the parallel extension weights, which effectively avoids the jitter problem caused by mode switching control. The joint simulation model is established by Simulink / Carsim, and the algorithm is compared and verified

* 国家自然科学基金(51875255, U20A20333, U20A20331, 52072160)、国家重点研发计划(2017YFB0102603)、江苏省重点研发计划(BE2020083-3, BE2019010-2)和江苏省六大人才高峰(2018-TD-GDZB-022)资助项目。
20210111 收到初稿, 20210816 收到修改稿

in the double-shift and “8-shaped” with time-varying curvature and high-speed conditions. Compared with the Proportion-Integral-Derivative(PID) control method, the proposed method improves the average tracking error accuracy by 45.08 %, especially under bad working conditions with sudden changes in curvature, vehicle stability is improved by 44%. Finally, the intelligent vehicle experiment platform is used for comparison and verification, which has strong guiding significance and reference value for designing high-speed trajectory tracking control strategies for intelligent vehicles.

Key words: intelligent vehicles; parallel extension control; correlation function; game coordination control; nash equilibrium solution

0 前言

近年来,随着人们对交通安全和智能交通的日益关注,轨迹跟踪控制作为车辆智能驾驶系统中的关键技术,已经逐渐成为国内外学者研究的热点内容^[1-2]。其中,车辆轨迹跟踪的高精度和稳定控制是关键环节,然而在中高速、大曲率工况下,智能车辆跟踪精度和稳定性不满足要求,极大制约了智能车辆的技术进步^[3-4]。

智能驾驶汽车轨迹跟踪控制主要研究的是智能汽车对期望轨迹或车道中心线的高精度和稳定跟踪控制^[5]。针对智能汽车轨迹跟踪控制技术,国内外研究人员展开了一些研究,李克强等^[6-7]设计了轨迹跟踪最优控制方法,实现了横向位置跟踪精度、鲁棒性和乘坐舒适性的改善。张炳力等^[8]设计了一种基于模糊神经网络的智能汽车轨迹跟踪控制方法,利用神经网络的自学习和自调整特性并结合模糊控制,从而提高控制的有效性和精确性。SPIELBERG等^[9]提出了一种由物理模型驱动的去状态和输入序列构成的神经网络轨迹跟踪算法,验证了神经网络的性能优于物理模型,提高了控制方法对道路附着系数变化的适应性。

上述研究提供了丰富的轨迹跟踪控制策略,但是由于在中高速工况下,车辆环境具有较高的时变性,尤其随着轨迹曲率的增加,跟踪误差会急剧增加,控制难度加大,使得在中低速或直线工况下性能良好的控制算法面临精度下降甚至不稳定问题。究其原因,主要在于单一控制方法无法适应全局环境的时变性,无法满足轨迹跟踪全局状态的高性能要求。将系统进行多状态区域的划分,实现不同区域控制策略的切换是改善算法工况适应性的有效手段。针对此类切换控制问题,邹德飏^[10]提出了一种多模式切换的智能汽车纵向自适应巡航控制(Adaptive cruise control, ACC)策略,提高了安全性、舒适性和燃油经济性等性能指标。黄康等^[11]提出一种考虑模式切换频率的多模式混合动力汽车参数

优化方法,实现了燃油经济性和加速性能的提升。但是目前切换机制大多采用逻辑门限的方法,缺乏对系统实时状态的动态评估和控制策略的动态优化。我国学者蔡文提出的可拓理论^[12],利用对系统特征状态的关联度评估和关联度对控制参数的优化,有效突破了逻辑门限切换法的局限性,成为解决多区域切换控制问题的有效方法。陈无畏等^[13]设计了一种基于最小能耗的电动汽车横摆稳定性灰色预测可拓控制方法,实现稳定性控制模式、最小能耗控制模式和联合控制模式的切换稳定控制,提高了车辆横摆稳定性。程祥钊^[14]基于可拓控制输出方法建立的燃料电池发电系统,实现在负荷变化情况下始终让燃料电池保持在最大功率输出状态。上述研究通过可拓控制方法对系统进行状态区域划分,对不同测度模式采用不同的控制策略,实现多区域切换控制,从而提高了控制精度和性能。但是,可拓控制自身切换的突变会直接带来控制量的抖动,导致控制输出不平顺,影响了轨迹跟踪稳定性和智能汽车的乘坐舒适性,成为可拓切换控制研究无法避免的问题。

本文提出一种智能汽车可拓博弈轨迹跟踪协调控制方法,基于可拓控制理论架构,突破了单一控制策略的工况适应性问题;引入博弈协调方法^[15],有效解决了可拓切换控制带来的抖动和不稳定问题,实现了系统不同状态区域下,多种控制策略的有效综合与协调,进一步提高了轨迹跟踪控制的精度和稳定性,具有极好的实际应用价值。

1 车-路模型建立

1.1 车辆动力学模型

车辆横向动力学模型采用简化的二自由度动力学模型,即不考虑车辆的俯仰以及垂向运动,仅考虑车辆侧向运动和横摆运动。图1所示为二自由度横向动力学模型,图中, v_1 、 v_2 分别为前后轮的运动速度; v_x 、 v_y 分别为车辆质心处沿车体坐标系 x 、 y 方向的速度, v 为车辆质心处的速度^[16]。

根据牛顿第二定律和横摆力矩平衡可以得到

$$\begin{cases} mv_x \dot{\beta} = (F_{y1} + F_{y2}) - mv_x \omega_r \\ I_z \dot{\omega}_r = aF_{y1} - bF_{y2} \end{cases} \quad (1)$$

式中, m 为车辆质量; F_{y1} 、 F_{y2} 分别为前后轮侧向力; β 为车辆质心侧偏角; ω_r 为车辆质心横摆角速度; a 、 b 分别为车辆质心到前后轴距的距离; I_z 为绕 z 轴的转动惯量。

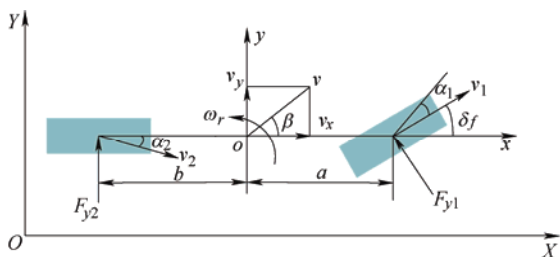


图 1 车辆横向 2 自由度动力学模型

前后轮侧向力 F_{y1} 、 F_{y2} 与前后轮侧偏角 α_1 、 α_2 相关, 表达式为

$$F_{v1} = k_1 \alpha_1 \quad F_{v2} = k_2 \alpha_2 \quad (2)$$

$$\alpha_1 = \delta_f - \frac{a\omega_r}{v_x} - \beta \quad \alpha_2 = \frac{b\omega_r}{v_x} - \beta \quad (3)$$

式中, k_1 、 k_2 分别为前后轮侧偏刚度。假设前后轮转角均为小角度, 可认为前后轮侧偏刚度均为常数。

将式(2)和式(3)代入式(1)可以得到状态空间方程, 选取状态量 $\mathbf{x} = (\beta, \omega_r)^T$

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + B\delta_f \quad (4)$$

$$A = \begin{pmatrix} -\frac{k_1 + k_2}{mv_x} & -1 - \frac{ak_1 - bk_2}{mv_x^2} \\ -\frac{ak_1 - bk_2}{I_z} & -\frac{a^2k_1 + b^2k_2}{I_z v_x} \end{pmatrix} \quad B = \begin{pmatrix} \frac{k_1}{mv_x} \\ \frac{ak_1}{I_z} \end{pmatrix} \quad (5)$$

1.2 轨迹跟踪预瞄模型

轨迹跟踪预瞄模型如图 2 所示, 图中给出了车辆运动的参考轨迹, y_L 为预瞄点处到参考轨迹的横向距离, 定义为预瞄横向位置偏差; L 为车辆质心到预瞄点的距离; ψ_d 为参考轨迹预瞄点处航向角; ψ 为车辆航向角; 定义 $\psi_r = \psi_d - \psi$ 为航向偏差。

根据图 2 几何关系, 可以得到^[17]

$$\begin{cases} \dot{y}_L = v_x \psi_r - v_y - \omega_r L \\ \dot{\psi}_r = \dot{\psi}_d - \dot{\psi} = v_x \rho - \omega_r \end{cases} \quad (6)$$

式中, ρ 为参考轨迹的曲率, 为道路弯曲半径的倒数。

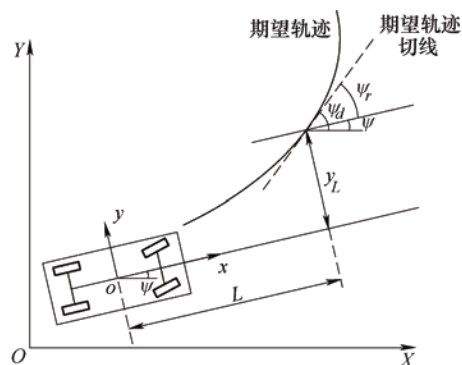


图 2 轨迹跟踪预瞄模型

2 上层并联可拓测度模式识别方法

上层并联可拓测度模式识别策略选择预瞄横向位置误差 y_L 和航向误差 ψ_r 及其变化率为可拓特征量, 同时建立基于预瞄横向位置误差和其变化率的可拓集合 $S_y(y_L, \dot{y}_L)$, 以及基于航向误差及其变化率的可拓集合 $S_\psi(\psi_r, \dot{\psi}_r)$, 然后对两个可拓集合进行区域划分、关联函数求解和测度模式识别, 实现两个并联可拓特征状态测度模式识别, 通过两个关联函数分别表征轨迹跟踪控制位置误差和航向误差的动态变化, 可拓测度模式识别策略流程如图 3 所示。

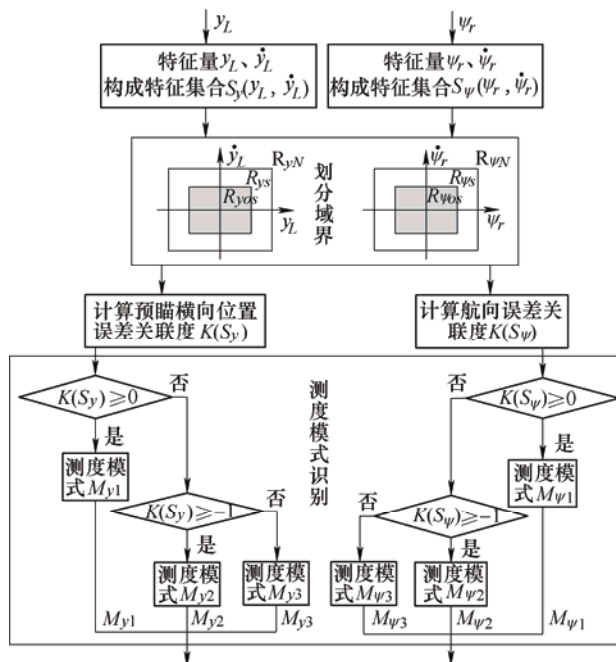


图3 上层并联可拓测度模式识别策略流程图

2.1 特征量提取和可拓集合划分

上层可拓控制特征量分别选择表征智能汽车轨迹跟踪控制精度的预瞄横向位置误差 y_L 和航向误差

ψ_r 及其变化率, 构建变化范围均在 $(-\infty, +\infty)$ 内的可拓集合 $S_y(y_L, \dot{y}_L)$ 和 $S_\psi(\psi_r, \dot{\psi}_r)$ 。

可拓集合划分将上述两个并联二维可拓集合划分为三个区域: 经典域、可拓域和非域。并且这三个区域与智能汽车轨迹跟踪过程状态相对应。可拓集合区域划分采用公差带划分方式^[18], 以零误差为公差带中心, 设计经典域公差带变化范围和可拓域公差带变化范围, 预瞄横向位置误差 y_L 经典域和可拓域边界分别定义为

$$|y_L| \leq y_{Lom} = a_1 |y_L^* + \varepsilon| \quad (7)$$

$$|y_L| \leq y_{Lm} = a_2 |y_L^* + \varepsilon| \quad (8)$$

预瞄横向位置误差变化率 \dot{y}_L 经典域和可拓域边界分别为

$$|\dot{y}_L| \leq \dot{y}_{Lom} = a_1 (|y_L^* + \varepsilon|)' \quad (9)$$

$$|\dot{y}_L| \leq \dot{y}_{Lm} = a_2 (|y_L^* + \varepsilon|)' \quad (10)$$

式中, y_{Lom} 和 y_{Lm} 分别为预瞄横向位置误差经典域边界和可拓域边界; 经过多次仿真调试可得 $a_1=0.209$, $a_2=0.537$ 分别为经典域和可拓域的公差带系数, y_L^* 定义为质心处横向位置偏差和航向偏差均为零时的预瞄点处横向位置偏差, 称之为期望预瞄点处横向位置偏差; ε 为微小量取值 0.03, 因为考虑到在直线道路工况时, 此时 y_L^* 为 0, 若没有微小量 ε 则导致经典域和可拓域边界均为零, 根据前述可拓域划分原理可知, 在直线道路时控制难度较小, 正常情况下应位于经典域中, 该微小量可以保证直线工况下经典域和可拓域不为 0, 符合实际行驶情况。同理, \dot{y}_L^* 为期望预瞄点处横向位置偏差变化率。

基于预瞄横向位置误差 y_L 及其变化率 \dot{y}_L 可拓集合划分如下。

经典域

$$\mathbf{R}_{yos} = \begin{pmatrix} (y_L, \dot{y}_L) & y_L & [-a_1 |y_L^* + \varepsilon|, a_1 |y_L^* + \varepsilon|] \\ & \dot{y}_L & [-a_1 (|y_L^* + \varepsilon|)', a_1 (|y_L^* + \varepsilon|)'] \end{pmatrix} \quad (11)$$

可拓域

$$\mathbf{R}_{ys} = \begin{pmatrix} (y_L, \dot{y}_L) & y_L & [-a_2 |y_L^* + \varepsilon|, a_2 |y_L^* + \varepsilon|] \\ & \dot{y}_L & [-a_2 (|y_L^* + \varepsilon|)', a_2 (|y_L^* + \varepsilon|)'] \end{pmatrix} \quad (12)$$

非域为在区间 $(-\infty, +\infty)$ 内除去经典域和可拓域

的区间范围。

当质心处横向位置偏差和航向偏差均为零时, 由于预瞄时间较短, 为了简化期望预瞄点处横向位置误差 y_L^* 和期望航向偏差 ψ_r^* 的估算过程, 从当前位置运动到预瞄点处期望轨迹曲率变化可忽略不计, 因而利用当前道路曲率 ρ 估算 y_L^* , 估算示意图如图 4 所示。

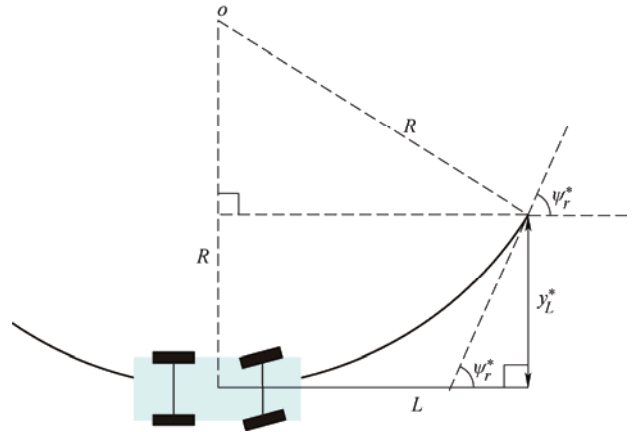


图4 预瞄点处期望误差估算示意图

根据图 4 几何关系可得

$$(R - y_L^*)^2 + L^2 = R^2 \quad (13)$$

式中, R 为当前期望道路转弯半径, 且 $R=1/\rho$ 。

根据式(13)可得

$$y_L^* = R - \sqrt{R^2 - L^2} \quad (14)$$

式中, 当期望轨迹为直线时, 且当道路曲率为 0 时, $y_L^*=0$ 。

同理, 将航向误差 ψ_r 经典域和可拓域边界分别定义为

$$|\psi_r| \leq \psi_{rom} = b_1 |\psi_r^* + \sigma| \quad (15)$$

$$|\psi_r| \leq \psi_{rm} = b_2 |\psi_r^* + \sigma| \quad (16)$$

航向误差变化率 $\dot{\psi}_r$ 经典域和可拓域边界分别定义为

$$|\dot{\psi}_r| \leq \dot{\psi}_{rom} = b_1 (|\psi_r^* + \sigma|)' \quad (17)$$

$$|\dot{\psi}_r| \leq \dot{\psi}_{rm} = b_2 (|\psi_r^* + \sigma|)' \quad (18)$$

式中, ψ_{rom} 和 ψ_{rm} 分别为航向误差经典域边界和可拓域边界; $\dot{\psi}_{rom}$ 和 $\dot{\psi}_{rm}$ 分别为航向误差变化率经典域边界和可拓域边界; 经过多次仿真调试可得 $b_1=0.45$, $b_2=0.8$ 分别为经典域和可拓域的公差带系数, ψ_r^* 为质心处横向位置偏差和航向偏差均为零时的预瞄点处航向误差, 即期望预瞄点处航向误差; $\dot{\psi}_r^*$ 为期望预瞄点处航向误差的变化率; ψ_r^* 计算方

式与上述 y_L^* 相同, σ 为微小量取值 0.018。

根据图 4 中几何关系和小角度假设, 可以得到

$$\sin \psi_r^* = \frac{2L \cdot y_L^*}{L^2 + y_L^*} \approx \psi_r^* \quad (19)$$

则基于航向误差 ψ_r 及其变化率 $\dot{\psi}_r$ 可拓集合划分为经典域

$$R_{\psi_{os}} = \begin{pmatrix} (\psi_r, \dot{\psi}_r) & \psi_r & \begin{bmatrix} -b_1 |\psi_r^* + \sigma|, b_1 |\psi_r^* + \sigma| \end{bmatrix} \\ & \dot{\psi}_r & \begin{bmatrix} -b_1 (|\psi_r^* + \sigma|)', b_1 (|\psi_r^* + \sigma|)' \end{bmatrix} \end{pmatrix} \quad (20)$$

可拓域

$$R_{\psi_s} = \begin{pmatrix} (\psi_r, \dot{\psi}_r) & \psi_r & \begin{bmatrix} -b_2 |\psi_r^* + \sigma|, b_2 |\psi_r^* + \sigma| \end{bmatrix} \\ & \dot{\psi}_r & \begin{bmatrix} -b_2 (|\psi_r^* + \sigma|)', b_2 (|\psi_r^* + \sigma|)' \end{bmatrix} \end{pmatrix} \quad (21)$$

非域为在区间 $(-\infty, +\infty)$ 内除去经典域和可拓域的范围。

2.2 基于误差和误差变化的关联函数求解

根据可拓关联函数求解原理可知, 可拓理论中基于误差和误差变化率的关联函数采用加权可拓距方法求解^[19]。对于轨迹跟踪控制预瞄横向位置误差及其变化率而言, 最佳状态为 0 状态, 对应可拓集合状态为 $S_0(0,0)$, 基于误差和误差变化率的关联函数计算过程如下。

当前预瞄横向位置误差及其变化率特征状态 $S_y(y_L, \dot{y}_L)$ 与最优点 $S_0(0,0)$ 的加权可拓距为

$$|S_y S_0| = \sqrt{y_L^2 + \dot{y}_L^2} \quad (22)$$

同理, 当前航向偏差及其变化率特征状态 $S_\psi(\psi_r, \dot{\psi}_r)$ 与最优点 $S_0(0,0)$ 的加权可拓距为

$$|S_\psi S_0| = \sqrt{\psi_r^2 + \dot{\psi}_r^2} \quad (23)$$

预瞄横向位置误差经典域界可拓距为

$$\Theta_{y0} = \sqrt{y_{Lom}^2 + \dot{y}_{Lom}^2} = a_1 \sqrt{(y_L^* + \varepsilon)^2 + (\dot{y}_L^* + \varepsilon)^2} \quad (24)$$

预瞄横向位置误差可拓域界可拓距为

$$\Theta_{y1} = \sqrt{y_{Lm}^2 + \dot{y}_{Lm}^2} = a_2 \sqrt{(y_L^* + \varepsilon)^2 + (\dot{y}_L^* + \varepsilon)^2} \quad (25)$$

同理, 航向误差经典域界可拓距为

$$\Theta_{\psi0} = \sqrt{\psi_{rom}^2 + \dot{\psi}_{rom}^2} = b_1 \sqrt{(\psi_r^* + \sigma)^2 + (\dot{\psi}_r^* + \sigma)^2} \quad (26)$$

航向误差可拓域界可拓距为

$$\Theta_{\psi1} = \sqrt{\psi_{rm}^2 + \dot{\psi}_{rm}^2} = b_2 \sqrt{(\psi_r^* + \sigma)^2 + (\dot{\psi}_r^* + \sigma)^2} \quad (27)$$

根据当前实时状态预瞄横向位置误差及其变化率特征状态 $S_y(y_L, \dot{y}_L)$ 和航向误差及其变化率可拓特征状态 $S_\psi(\psi_r, \dot{\psi}_r)$ 与最优点 $S_0(0,0)$ 的可拓距 $|S_y S_0|$ 和 $|S_\psi S_0|$, 以及两个可拓集合经典域界和可拓域界可拓距可以计算上层两个可拓集合对应的关联函数, 即为

$$K(S_y) = \begin{cases} 1 - |S_y S_0| / \Theta_{y0}, S_y \in R_{yos} \\ (\Theta_{y0} - |S_y S_0|) / (\Theta_{y1} - \Theta_{y0}), S_y \notin R_{yos} \end{cases} \quad (28)$$

$$K(S_\psi) = \begin{cases} 1 - |S_\psi S_0| / \Theta_{\psi0}, S_\psi \in R_{\psi os} \\ (\Theta_{\psi0} - |S_\psi S_0|) / (\Theta_{\psi1} - \Theta_{\psi0}), S_\psi \notin R_{\psi os} \end{cases} \quad (29)$$

2.3 测度模式识别

根据可拓测度模式识别理论对特征状态 $S_y(y_L, \dot{y}_L)$ 和特征状态 $S_\psi(\psi_r, \dot{\psi}_r)$ 进行测度模式识别。定义特征状态 $S_y(y_L, \dot{y}_L)$ 对应的三个测度模式为: M_{y1} 、 M_{y2} 和 M_{y3} ; 定义特征状态 $S_\psi(\psi_r, \dot{\psi}_r)$ 对应的三个测度模式为 $M_{\psi1}$ 、 $M_{\psi2}$ 和 $M_{\psi3}$ 。具体识别规则如下。

当 $K(S_y) \geq 0$ 时, 测度模式为 M_{y1} , 特征状态 $S_y(y_L, \dot{y}_L)$ 处于较稳定的状态, 此时预瞄横向位置误差较小, 控制精度达到较高的水平, 该区域内轨迹跟踪控制难度较小。

当 $-1 < K(S_y) < 0$ 时, 测度模式为 M_{y2} , 特征状态 $S_y(y_L, \dot{y}_L)$ 处于不合格状态, 此时预瞄横向位置误差变大, 控制精度变差, 轨迹跟踪控制难度增加, 需要在测度模式 M_{y1} 控制输出的基础上调整控制参数和附加项, 从而实时调整控制输出使得特征状态尽可能进入较好状态。

当 $K(S_y) \leq -1$ 时, 测度模式为 M_{y3} , 特征状态 $S_y(y_L, \dot{y}_L)$ 处于较差的状态, 此时无法通过调整控制参数来改善控制状态, 此时预瞄横向位置误差较大, 受到期望轨迹曲率变化影响严重, 控制难度进一步提高, 在此测度模式下结合前馈控制方法, 加快校正大曲率对跟踪精度的影响。

同理可知, 对于可拓特征状态 $S_\psi(\psi_r, \dot{\psi}_r)$ 测度模式识别结果为当 $K(S_\psi) \geq 0$ 时, 测度模式为 $M_{\psi1}$; 当 $-1 < K(S_\psi) < 0$ 时, 测度模式为 $M_{\psi2}$; 当 $K(S_\psi) \leq -1$ 时, 测度模式为 $M_{\psi3}$ 。

至此, 完成了上层可拓测度模式识别算法设计, 本节基于拓理论中偏差和偏差变化率可拓集合理

论, 设计了两个可拓特征状态 $S_y(y_L, \dot{y}_L)$ 和 $S_\psi(\psi_r, \dot{\psi}_r)$ 并联的上层可拓测度模式层控算法, 分别表征了智能汽车轨迹跟踪控制过程中预瞄横向位置误差 y_L 和航向误差 ψ_r 及其变化率的关联度动态变化过程, 为下层基于预瞄横向位置误差和航向误差控制量输出求解和博弈协调奠定基础。

3 下层可拓博弈协调控制策略

下层可拓博弈协调控制首先基于上层关联函数

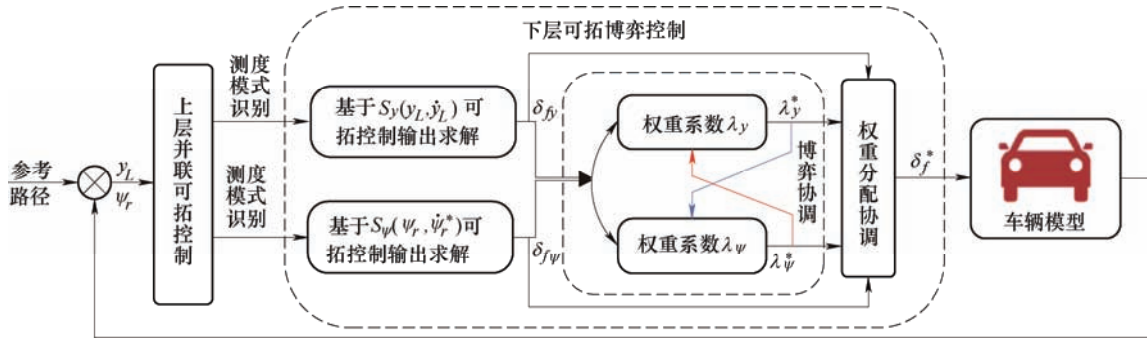


图5 下层可拓博弈协调控制流程图

3.1 下层双联可拓控制输出求解

可拓控制理论针对偏差和偏差变化率构成的特征状态设计了相应的基本控制量输出求解策略, 同时结合轨迹跟踪控制过程中大曲率轨迹对跟踪精度误差干扰较大的特点, 一方面结合可拓控制理论控制输出策略, 另一方面结合前馈控制策略, 完善了在测度模式 M_{y3} 和 $M_{\psi3}$ 时的控制输出。

以可拓特征状态 $S_y(y_L, \dot{y}_L)$ 为例详细阐述其下层控制量输出策略, 特征状态 $S_\psi(\psi_r, \dot{\psi}_r)$ 与之类似, 具体定义如下。

在测度模式 M_{y1} 时, $K(S_y) \geq 0$, 表征此时轨迹跟踪控制预瞄横向位置误差较小和其变化率较小, 在下个控制时步中不需要较大的控制量变化, 控制难度较小, 根据可拓控制理论控制输出策略可以通过反馈控制策略求解控制输出 δ_{fy} , 即

$$\delta_{fy} = -k_{y1} \cdot y_L \quad (30)$$

式中, k_{y1} 为测度模式 M_{y1} 控制系数。

在测度模式 M_{y2} 时, $-1 < K(S_y) < 0$, 表征此时轨迹跟踪控制预瞄横向位置误差变大, 并且其变化率变大, 在下个控制时步中测度模式 M_{y1} 简单反馈控制难以满足控制量要求, 控制难度变大, 根据可

值以及测度模式识别结果求解轨迹跟踪前轮转角控制量, 该控制量分别为基于上层特征状态 $S_y(y_L, \dot{y}_L)$ 求解的前轮转角 δ_{fy} 和基于上层特征状态 $S_\psi(\psi_r, \dot{\psi}_r)$ 求解的前轮转角 $\delta_{f\psi}$ 。然后利用博弈控制方法, 将前述两个前轮转角控制量加权系数进行博弈协调, 确定下层并联控制输出协调权重, 从而求得轨迹跟踪前轮转角控制量 δ_f , 即表示为 $\delta_f = \lambda_y \delta_{fy} + \lambda_\psi \delta_{f\psi}$, 式中, λ_y 和 λ_ψ 为下层博弈控制器求得的可拓控制输出协调权重系数, 下层控制流程图如图5所示。

拓控制理论控制输出策略可以通过在测度模式 M_{y1} 反馈控制策略基础上, 结合此时关联函数值添加控制输出附加项求解控制输出 δ_{fy} , 为

$$\delta_{fy} = -k_{y1} \cdot y_L + k_{y2} K(S_y) [-\text{sgn}(y_L)] \quad (31)$$

式中, k_{y2} 为测度模式 M_{y2} 附加控制项系数, $K(S_y)$ 为上层可拓控制关联函数值。

符号函数 $\text{sgn}(y_L)$ 为

$$\text{sgn}(y_L) = \begin{cases} 1 & y_L > 0 \\ 0 & y_L = 0 \\ -1 & y_L < 0 \end{cases} \quad (32)$$

在测度模式 M_{y3} 时, $K(S_y) \leq -1$, 表征此时轨迹跟踪控制预瞄横向位置误差较大, 且此时误差变化率也处于较大的范围, 导致在下一个控制时步若要达到较高的控制精度, 需要较大的控制量, 此测度模式控制难度较大, 主要原因在于期望轨迹进入到较大的曲率范围从而导致特征状态进入测度模式进入 M_{y3} , 在测度模式 M_{y2} 中附加控制项无法抵制大曲率对控制精度的干扰。根据可拓控制理论, 在该测度模式下, 控制量输出应达到最大值, 但是针对智能汽车轨迹跟踪控制具有高动态特性且该测度模式下汽车控制精度降低和控制状态不佳, 若直接

控制输出一个最大值, 会导致控制量出现一个较大的冲击, 严重影响了智能汽车轨迹跟踪控制过程的状态稳定性和安全性。因此, 结合前馈控制对大曲率工况下具有较好的校正优势, 在测度模式 M_{y3} 下, 改变测度模式 M_{y2} 附加控制项, 并结合此时特征状态关联函数优化测度模式 M_{y2} 控制附加项, 构建如下控制量输出策略

$$\delta_{fy} = -k_{y1} \cdot y_L + K(S_y) \cdot \delta_{\text{feedforward}} \quad (33)$$

式中, $\delta_{\text{feedforward}}$ 为前馈控制量, 其表示为^[20]

$$\delta_{\text{feedforward}} = \frac{l\omega_r}{v_x} - \alpha_1 + \alpha_2 \quad (34)$$

式中, l 为汽车前后轴距, 且 $l=a+b$; ω_r 为汽车横摆角速度; α_1 和 α_2 分别为前轮和后轮的侧偏角。

假设车辆为稳态转向, 且纵向运动速度 v_x 为定值, 即 $\dot{\omega}_r = 0$, $a_x = 0$, 则车辆动力学方程为

$$\begin{cases} F_{y1} + F_{y2} = m a_y \\ a F_{y1} - b F_{y2} = 0 \end{cases} \quad (35)$$

式中, $a_y = \frac{v_x^2}{R}$, R 为望路转弯半径, 且 $R = 1/\rho$ 。

基于前轮转角小角度假设, 轮胎侧向力在线性区域, 因此轮胎侧向力 F_y 可以表示为

$$\begin{cases} F_{y1} = -k_1 \alpha_1 \\ F_{y2} = -k_2 \alpha_2 \end{cases} \quad (36)$$

整车质量在前后轴的垂直载荷分布可以表示为

$$\begin{cases} F_{z1} = \frac{b}{l} mg = m_1 g \\ F_{z2} = \frac{a}{l} mg = m_2 g \end{cases} \quad (37)$$

根据式(36)和(37)可知

$$\begin{cases} -k_1 \alpha_1 = m_1 a_y = \frac{bm}{l} \frac{v_x^2}{R} \\ -k_2 \alpha_2 = m_2 a_y = \frac{am}{l} \frac{v_x^2}{R} \end{cases} \quad (38)$$

将式(38)代入式(34)可以得到前轮转角前馈控制量为

$$\delta_{\text{feedforward}} = \frac{l\omega_r}{v_x} + \frac{mv_x^2}{lR} \left(\frac{b}{k_1} - \frac{a}{k_2} \right) \quad (39)$$

同理对于特征状态 $S_\psi(\psi_r, \dot{\psi}_r)$ 采用相同的控制输出求解策略, 从而得到下层双联可拓控制输出 δ_{fy} 和 $\delta_{f\psi}$ 对应三种测度模式下的结果, 即

$$\delta_{fy} = \begin{cases} -k_{y1} \cdot y_L, M_{y1} \\ -k_{y1} \cdot y_L + k_{y2} K(S_y) [-\text{sgn}(y_L)], M_{y2} \\ -k_{y1} \cdot y_L + K(S_y) \cdot \delta_{\text{feedforward}}, M_{y3} \end{cases} \quad (40)$$

$$\delta_{f\psi} = \begin{cases} -k_{\psi1} \cdot \psi_r, M_{\psi1} \\ -k_{\psi1} \cdot \psi_r + k_{\psi2} K(S_\psi) [-\text{sgn}(\psi_r)], M_{\psi2} \\ -k_{\psi1} \cdot \psi_r + K(S_\psi) \cdot \delta_{\text{feedforward}}, M_{\psi3} \end{cases} \quad (41)$$

至此, 完成了基于预瞄横向位置误差和航向误差并联可拓控制求解, 根据权重分配加权原理可知智能汽车轨迹跟踪控制前轮转角控制量可以表示为

$$\delta_f = \lambda_y \delta_{fy} + \lambda_\psi \delta_{f\psi} \quad (42)$$

式中, λ_y 和 λ_ψ 为可拓控制输出协调加权系数, 该系数由下层博弈协调控制器求得。

3.2 博弈协调控制器

博弈协调控制器主要在下层可拓轨迹跟踪控制求解得到的两个控制量 δ_{fy} 和 $\delta_{f\psi}$ 基础上, 将两者对应的权值作为博弈控制的两个博弈对象, 通过博弈控制纳什均衡法获得均衡解 λ_y^* 和 λ_ψ^* , 解决了因为并联可拓控制切换问题和权值不合适导致的智能汽车轨迹跟踪前轮转角控制量 δ_f 的抖动, 从而改善了转角抖动带来的稳定性问题。

将前轮转角控制量 $\delta_f = \lambda_y \delta_{fy} + \lambda_\psi \delta_{f\psi}$ 代入动力学模型, 将权重系数 λ_y 和 λ_ψ 作为博弈对象, 博弈协调控制将博弈双方转化为一个线性二次微分博弈问题, 将动力学状态空间方程表示

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}_1 \lambda_y(t) + \mathbf{B}_2 \lambda_\psi(t) \quad (43)$$

式中

$$\mathbf{B}_1 = \begin{bmatrix} k_1 \delta_{fy} \\ m v_x \\ a k_1 \delta_{fy} \\ I_z \end{bmatrix} \quad \mathbf{B}_2 = \begin{bmatrix} k_1 \delta_{f\psi} \\ m v_x \\ a k_1 \delta_{f\psi} \\ I_z \end{bmatrix} \quad (44)$$

可知博弈方 $\mathbf{u}_i(t) = (\lambda_y, \lambda_\psi)^T$, $i = 1, 2$, 对于两个博弈对象可建立以下二次型代价函数^[21]

$$J_i = \frac{1}{2} \int_{t_0}^{\infty} \left\{ \mathbf{x}^T(t) \mathbf{Q}_i \mathbf{x}(t) + \sum_{j=1}^2 \mathbf{u}_i^T(t) \mathbf{R}_{ij} \mathbf{u}_i(t) \right\} dt \quad (45)$$

式中, 权重矩阵 $\mathbf{Q}_i \geq 0$, $\mathbf{R}_{ii} > 0$ 均为正对称矩阵。

根据纳什均衡原理, 博弈双方最优解 $(\lambda_y^*, \lambda_\psi^*)$ 对于所有的可能解 $(\lambda_y, \lambda_\psi)$ 必须满足

$$\begin{cases} J_1(\lambda_y^*, \lambda_\psi^*) \leq J_1(\lambda_y, \lambda_\psi^*) \\ J_2(\lambda_y^*, \lambda_\psi^*) \leq J_2(\lambda_y^*, \lambda_\psi) \end{cases} \quad (46)$$

对于上述线性二次型微分博弈问题可以求解出一个特有的开环纳什均衡解

$$\mathbf{u}_i^*(t) = -\mathbf{R}_i^{-1} \mathbf{B}_i^T \mathbf{P}_i \phi(t, 0) \mathbf{x}_0 \quad i=1, 2 \quad (47)$$

纳什均衡解在初始条件下存在的必然条件如下: ① 黎卡提方程组存在强稳定解; ② 黎卡提代数方程组有对称稳定解。

$$\mathbf{P}_i \mathbf{A} + \mathbf{A}^T \mathbf{P}_i + \mathbf{Q}_i - \mathbf{P}_i \mathbf{S}_i \mathbf{P}_i = 0 \quad i=1, 2 \quad (48)$$

即 \mathbf{P}_i 满足以下黎卡提方程

$$\begin{pmatrix} \mathbf{A}^T & 0 \\ 0 & \mathbf{A}^T \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{P}_1 \\ \mathbf{P}_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \mathbf{P}_1 \\ \mathbf{P}_2 \end{pmatrix} \mathbf{A} - \begin{pmatrix} \mathbf{P}_1 \\ \mathbf{P}_2 \end{pmatrix} (\mathbf{S}_1 \quad \mathbf{S}_2) \begin{pmatrix} \mathbf{P}_1 \\ \mathbf{P}_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \mathbf{Q}_1 \\ \mathbf{Q}_2 \end{pmatrix} = 0 \quad (49)$$

式中, $\mathbf{S}_i = \mathbf{B}_i \mathbf{R}_i^{-1} \mathbf{B}_i^T, (i=1, 2)$ 。

$\phi(t, 0)$ 满足以下传递函数

$$\dot{\phi}(t, 0) = (\mathbf{A} - \mathbf{S}_1 \mathbf{P}_1 - \mathbf{S}_2 \mathbf{P}_2) \phi(t, 0) \quad \phi(t, t) = \mathbf{I}_n$$

上述博弈控制求解到纳什均衡解 $\mathbf{u}_i^*(t) = (\lambda_y^*, \lambda_\psi^*)^T$, 从而确定智能汽车轨迹跟踪前轮转角控制量纳什均衡解 δ_f^*

$$\delta_f^* = \lambda_y^* \delta_{fy} + \lambda_\psi^* \delta_{f\psi} \quad (50)$$

至此, 完成了下层可拓控制输出和博弈协调控制, 实现智能汽车轨迹跟踪可拓协调控制。

4 仿真分析

本节针对两种典型路况双移线和“8 字形”轨迹, 通过 Matlab/Simulink 和 Carsim 联合搭建仿真模型进行仿真分析, 将可拓博弈协调控制方法与传统 PID 控制方法对比的同时, 并将其与前期研究的可拓切换轨迹跟踪控制方法^[22]进行仿真对比, 验证对可拓切换控制抖动的优化效果。车辆的主要参数如表 1 所示。

表 1 车辆参数表

参数	参数值
车辆质量 m/kg	1 430
质心距离前轴距离 a/m	1.050
质心距离后轴距离 b/m	1.550
车辆绕 z 轴的转动惯量 $I_z/(\text{kg} \cdot \text{m}^2)$	2 059
前轮侧偏刚度 $\alpha_1/(\text{N}/\text{rad})$	79 240
后轮侧偏刚度 $\alpha_2/(\text{N}/\text{rad})$	87 000

4.1 双移线道路仿真分析

道路附着系数设置为 $\mu = 0.85$; 车辆纵向速度设置为 $v_x = 100 \text{ km/h}$ 仿真结果如图 6~10 所示。

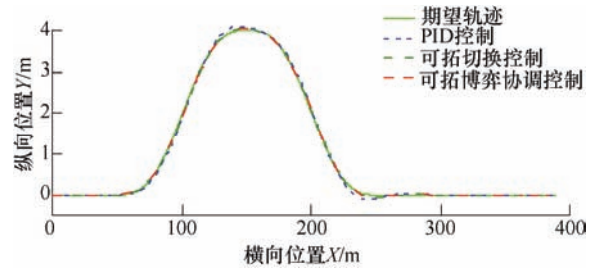


图 6 轨迹跟踪仿真对比图

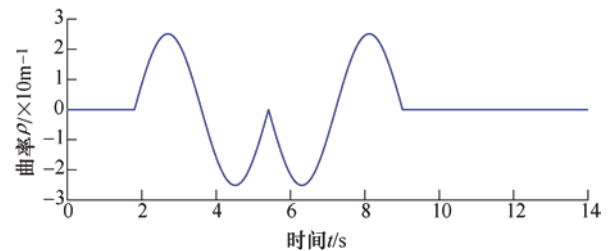
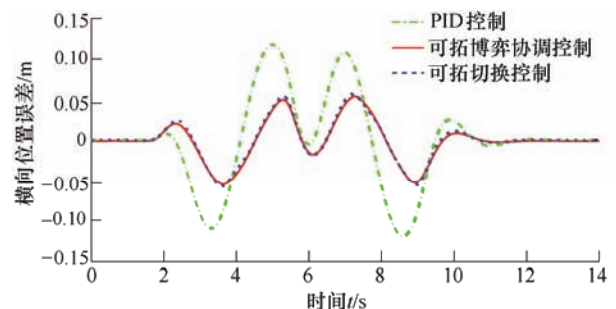


图 7 期望路径曲率变化图

如图 6 所示为双移线曲线轨迹智能汽车实际运动轨迹, 设计的参考轨迹由两部分组成直线和时变曲率的圆弧, 侧向运动距离为 4 m, 曲率变化如图 7 所示。根据智能汽车实际运动轨迹可以看出与 PID 控制方法相比, 可拓切换控制和可拓博弈协调控制均具有更高的跟踪精度, 与此同时图 8 所示的轨迹跟踪误差仿真对比结果表明, 图 8a 横向位置误差和图 8b 航向误差可拓切换控制和可拓博弈协调控制均具有较小的跟踪误差变化范围, 可拓博弈协调控制横向位置误差约在 $\pm 0.05 \text{ mm}$ 内, 航向误差小于 0.6° 。相比于 PID 控制, 可拓博弈协调控制精度提升约 45.08%, 同时在进入弯道和离开弯道可拓博弈协调控制和可拓切换控制均具有更小的超调量和更短的稳态时间。与此同时, 图 8b 中相比于可拓切换控制, 可拓博弈协调控制有效改善了切换控制控制量抖动导致的航向误差抖动变化, 并且使得航向误差峰值相比于可拓切换控制有所下降。



(a) 横向位置误差仿真对比图

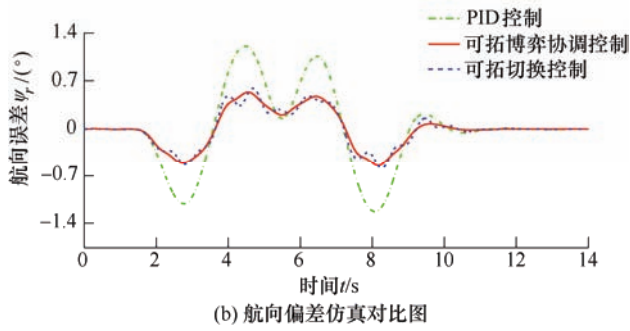


图 8 轨迹跟踪误差仿真对比

与特征状态 $S_y(y_L, \dot{y}_L)$ 和 $S_\psi(\psi_r, \dot{\psi}_r)$ 对应的关联函数 $K(S_y)$ 和 $K(S_\psi)$ 响应结果如图 9 所示。根据可拓关联函数结果可知, 当车辆处于直路状态时, 关联函数值大于零, 对应测度模式 M_{y1} , 在这种状态下, 车辆-道路系统是较为稳定的。当车辆开始进入弯道轨迹而产生侧向位移时, 两个关联函数均向负方向发展, 并且车辆-道路系统逐渐向不稳定区域发展, 该状态分别对应于测度模式 M_{y2} 和 M_{y3} 。当车辆达到道路的最大曲率时, 此时跟踪误差较大跟踪控制对应控制难度增加, 关联函数值达到负向最大值, 即进入测度模式 M_{y3} 。在车辆完成双移线运动后, 车-路系统逐渐收敛到稳定状态, 并且关联函数逐渐收敛至测度模式 M_{y1} 对应的稳定状态。从关联函数的响应结果表明了车辆-道路系统的稳定性以及在轨迹跟踪过程中高精度控制的困难程度。

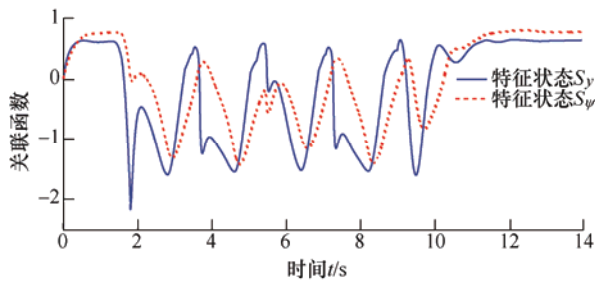
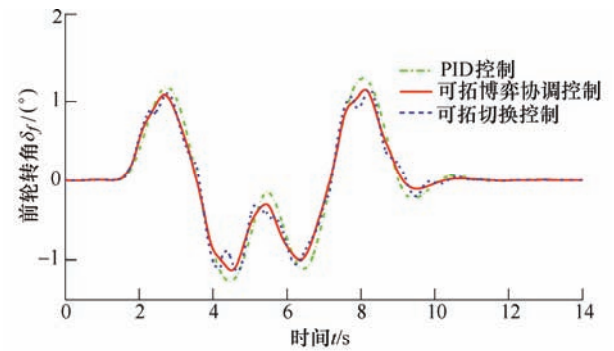


图 9 可拓关联函数变化图

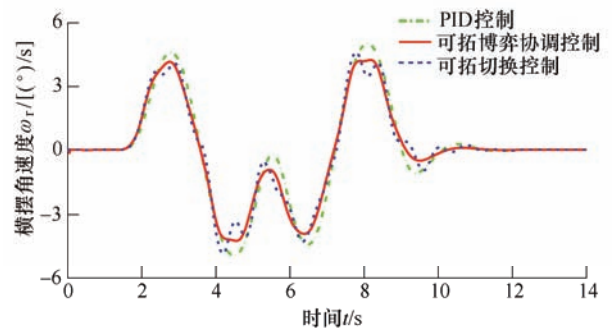
前轮转角如图 10a 所示, 前轮转角作为汽车轨迹跟踪运动控制输入, 可以发现可拓切换控制和可拓博弈协调控制均可以加快前轮转角控制量响应。在高速过弯时具有明显优势, 这主要得益于可拓博弈协调控制上层可拓关联函数与当前跟踪误差密切相关, 可以在弯道处对前方道路曲率变化更好地预知, 并且可拓关联函数直接关联下层控制输出求解, 有效加快前轮转角的响应, 在弯道中获得更为精确的前轮转向角控制量。但是值得关注的是, 在时刻 2.5 s、4.5 s 和 8 s, 可拓切换控制由于自身的切花特征, 导致了前轮转角控制量的抖动, 影响了车辆在轨迹跟踪过程的局部稳

定性。然而相比于可拓切换控制, 可拓博弈协调控制通过博弈协调权重方法有效改善前轮的抖动问题。

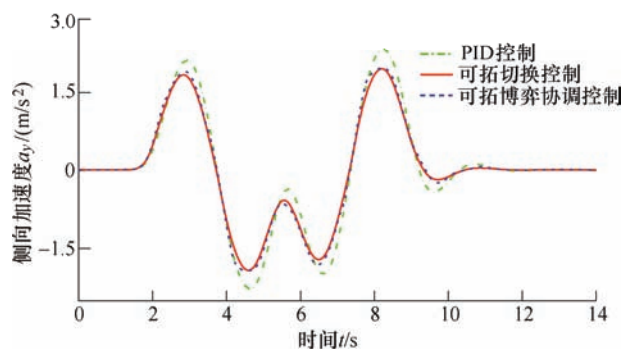
在三种控制方法中, 如图 10b、10c 所示横摆角速度和侧向加速度与期望值均保持在合理的范围内, 相比于 PID 控制, 可拓切换控制和可拓博弈协调控制均在较小的误差变化范围内变化, 提高了车辆行驶的稳定性的。与此同时, 由于可拓切换控制导致的控制量抖动问题, 使得车辆在控制切换点处出现横摆角速度抖动现象, 相比可拓切换控制, 可以发现可拓博弈协调控制有效解决了可拓切换控制的抖动带来的局部稳定性变差的问题, 进一步提升可拓控制方法在智能汽车轨迹跟踪控制应用中的性能。与传统 PID 控制方法和可拓切换控制相比, 可拓博弈协调控制方法具有更令人满意地轨迹跟踪表现, 可以大大减小车辆超过安全驾驶区域的可能性以及提高轨迹跟踪控制的横向稳定性。



(a) 前轮转角仿真对比图



(b) 横摆角速度仿真对比图



(c) 侧向加速度仿真对比图

图 10 前轮转角、横摆角速度、侧向加速度仿真对比

4.2 “8 字”形曲线仿真分析

仿真采用的“8 字”形曲线轨迹式中圆弧部分为长轴 240 m、短轴 180 m 的椭圆弧,道路附着系数设置为 $\mu=0.85$; 车辆纵向速度设置为 $v_x=80$ km/h, 仿真结果如图 11~15 所示。

如图 11 所示为椭圆“8 字”形参考轨迹和智能汽车实际运动轨迹,曲率变化如图 9 所示,弯道部分轨迹曲率约在 $0.06\sim 0.015\text{ m}^{-1}$ 范围内变化,弯道转弯半径 $66.67\sim 166.67\text{ m}$,弯道转弯半径较小且存在曲率突变工况,道路附着条件接近摩擦极限,该工况对智能汽车轨迹跟踪控制算法提出了更高的精度和稳定性要求。根据图 13 跟踪误差对比仿真结果可以明显看出,与 PID 控制方法相比,可拓切换控制和可拓博弈协调控制具有更高的跟踪精度,可拓切换控制横向位置误差小于 0.35 m ,航向误差小于 6° ; 可拓博弈协调控制横位置误差小于 0.2 m ,航向误差小于 3.2° 。尤其是在进出弯道和曲率拐点处,具有明显较小的超调误差,相比于 PID 控制,可拓博弈协调控制超调误差改善约 50%。此外,可拓博弈协调控制相比于可拓切换控制在弯道过程中,具有更加稳定的航向误差变化,这主要是由于可拓切换控制由于弯道曲率较大,使得控制策略在整个弯道部分一直处于同一个测度模式下,并且无法针对弯道过程中实时误差变化调整控制参数,无法进一步提高控制精度。

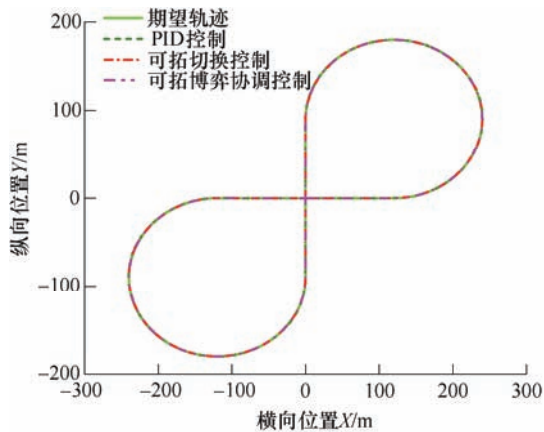


图 11 椭圆 8 字形轨迹跟踪仿真对比图

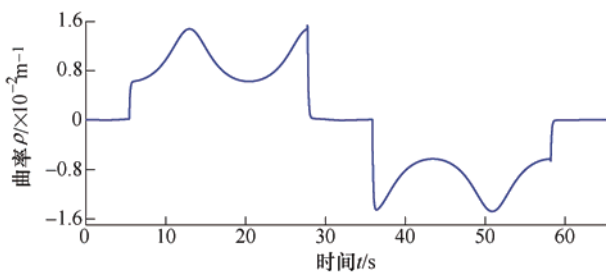
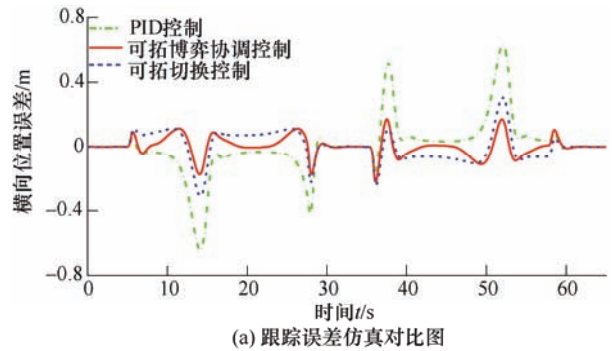
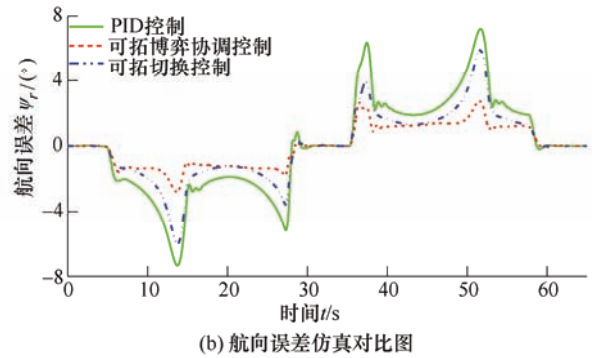


图 12 椭圆“8 字”形期望轨迹曲率变化图



(a) 跟踪误差仿真对比图



(b) 航向误差仿真对比图

图 13 轨迹跟踪误差仿真对比

特征状态的关联函数 $K(S_y)$ 和 $K(S_\psi)$ 响应结果如图 14 所示。可以看出随着车辆从直线道路进入椭圆弯道再次离开弯道,关联函数直接表征了特征状态的变化,尤其是在曲率突变点,关联函数同步变化,直接体现出曲率突变处的控制程度,从而有效预知前方道路曲率变化特征加快了控制量的响应,从而对曲率的突变干扰具有很好的抑制作用。

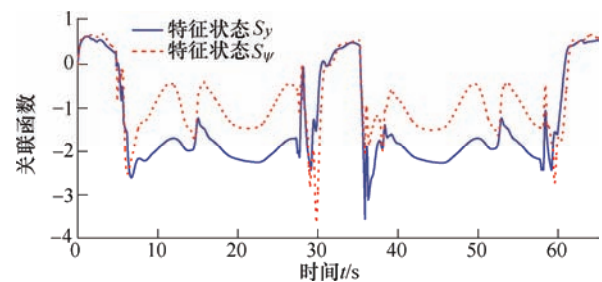
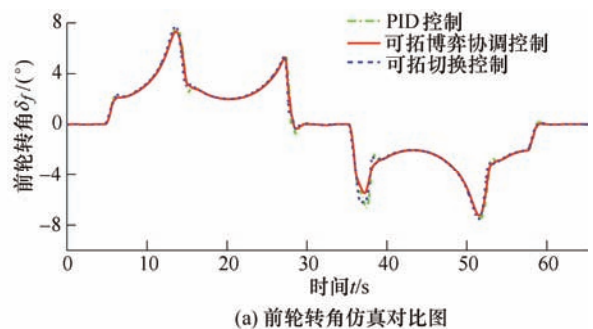


图 14 可拓关联函数变化图



(a) 前轮转角仿真对比图

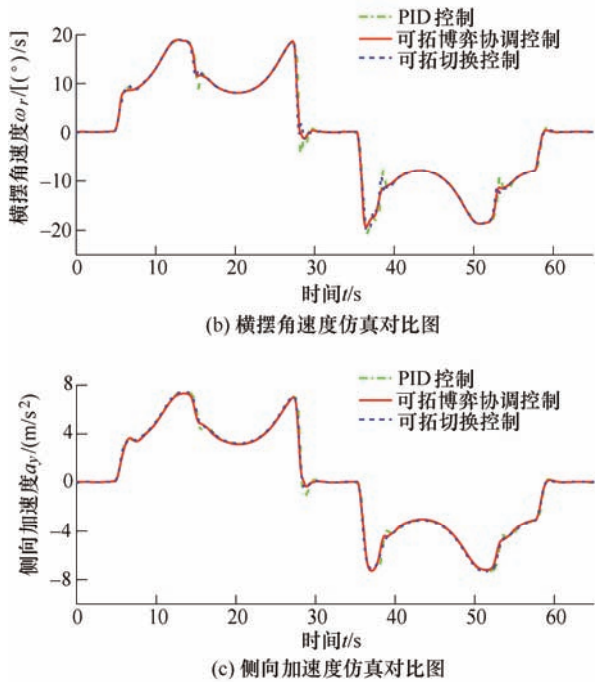


图 15 前轮转角、横摆角速度、侧向加速度仿真对比

前轮转角如图 15a 所示, 同样可以发现可拓切换控制和可拓博弈协调控制的前轮转角比 PID 控制更为精确, 在弯道中响应速度快, 有效改善了弯道响应滞后问题。此外, 相比于可拓切换控制, 可拓博弈协调控制选择两组并联可拓特征状态, 并且下层控制输出结合可拓关联函数实时调整控制参数, 结合并联可拓关联函数响应结果可以发现, 在弯道部分, 关联函数的实时变化可以不断优化前转角控制量, 使得控制过程不断向更好的模式发展, 获得更加准确的前轮转角控制量, 减小跟踪控制的横向位置误差和航向误差。

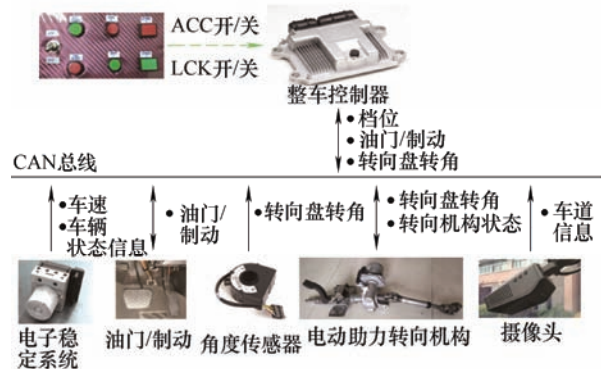
如图 15b、15c 所示横摆角速度和侧向加速度均保持在期望值附近合理的范围内, 值得注意的是, 从横摆角速误差和侧向加速度误差可以看出, 在曲率突变明显的弯道处, 可拓博弈协调控制改善了其超调量和稳态时间使得整个跟踪过程具有较好的横向稳定性, 相比于 PID 控制曲率突变处稳定性提升约 44%, 并且相较于可拓切换控制同样有一定的改善。因此, 根据椭圆“8 字”形曲线轨迹跟踪控制对比仿真结果, 可以明显地发现, 在高速时变大曲率且曲率突变明显的恶劣工况下, 可拓博弈协调控制方法有较为满意的跟踪表现, 尤其是在弯道曲率突变时, 可拓控制对前方道路控制难易程度预知能力对轨迹跟踪具有积极的改善作用。

5 实车试验分析

为了进一步验证可拓博弈协调轨迹跟踪控制方法的可行性和实时性, 基于智能驾驶测试车辆平台, 将其应用于车道中心线轨迹跟踪控制系统 (Lane center keeping, LCK) 中, 并进行实车轨迹跟踪控制测试试验, 实现对车道中心线的轨迹跟踪控制。智能驾驶测试平台如图 16 所示, 测试车辆是一辆纯电动智能驾驶轿车 (奇瑞 ARRIZO 5E) 如图 16a 所示, 其中采用了 MiniEye 公司开发的视觉传感器, 安装在前挡风玻璃上作为轨迹跟踪预瞄前视系统, 用于获取车道中心线信息, 整个智能驾驶 LCK 测试硬件系统如图 16b 所示。转角传感器用于检测方向盘转角, 惯性传感器用来检测车辆运动过程中的状态响应, 底层执行模块包括 EPS、线控油门和线控刹车。车辆运动传感器、底层执行机构和视觉传感器信号收发周期为 10 ms, 视觉传感器 CAN 信号收发波特率以及车辆 CAN 信号收发波特率均为 500 kbs。



(a) 奇瑞ARRIZO 5E智能驾驶汽车



(b) 轨迹跟踪控制实车硬件系统

图 16 智能驾驶测试平台

在实际控制过程中, 将 Matlab/Simulink 的控制算法模型编译为整车控制器可以识别并运行的代码。测试道路选择一段镇江城市标准开放三车道快速道路, 道路卫星云图如图 17 所示, 该段路段全长

约 2 200 m, 式中两段直线道路全程分别约为 816 m 和 284 m、一段最大曲率约 $1 \times 10^{-3} \text{ m}^{-1}$ 弯道全程约 1 100 m。为了验证轨迹跟踪控制精度和稳定性, 纵向运动采用定速的巡航控制, 考虑开放道路的安全性, 车辆目标速度设置为 70 km/h, 实车试验 PID 控制、可拓切换控制和可拓博弈协调控制对比结果如图 18~22 所示。



图 17 实车 LCK 测试试验道路卫星云图

摄像头检测得到的测试道路曲率如图 18 所示。可以发现最小曲线半径约为 1 000 m。转向盘角度控制量如图 19 所示, 可以发现三种控制方法转向盘角度在合理范围内, 与此同时, 可以发现进入弯道后, 可拓切换控制约在 70 s、78 s、81 s、85 s 和 91 s 时刻出现略大的峰值, 产生了转向盘转角控制量轻微抖动, 此外根据可拓博弈协调控制转向盘转角控制量可以发现, 弯道控制过程中有效解决了转向盘转角抖动问题, 获得较为稳定的控制量输出。

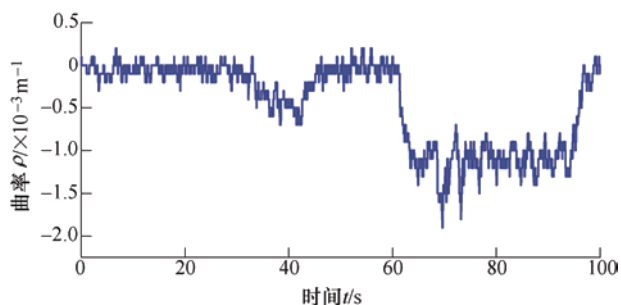


图 18 车道中心线轨迹跟踪曲率变化图

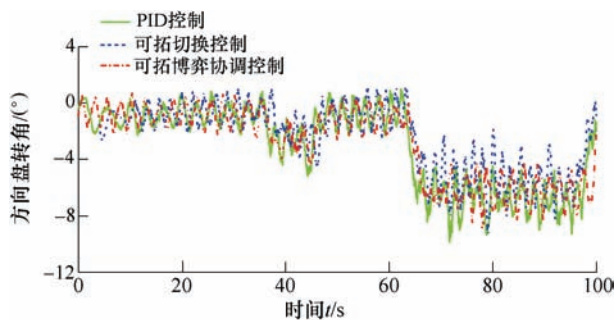
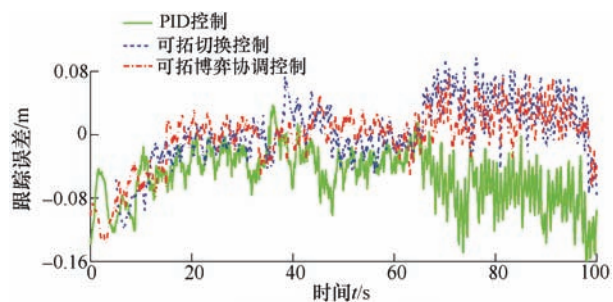


图 19 转向盘转角试验对比图

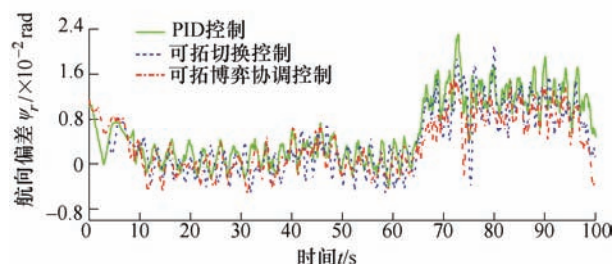
从车辆车道中心线轨迹跟踪误差和航向误差响

应结果图 20 可以看出, 三种控制方法均能将车辆保持在较小数值范围, 可拓博弈控制跟踪精度较高于 PID 控制和可拓切换控制, 尤其在弯道道路, 图 20a 看出可拓博弈控制跟踪误差小于 0.07 m。此外, 根据摄像头对车道线距离检测的方向定义可知, 车辆与左侧车道线距离均为负值, 与右侧车道线距离均为正值。因此, 可拓切换控制和可拓博弈协调控制在弯道中车辆位于车道中心线左侧, 与车道中线形成右方向误差, 即正值误差。PID 控制跟踪误差约在 $-0.12 \sim -0.04 \text{ m}$ 范围内变化, 此时车辆位于车道中心线右侧, 与车道中线形成左方向误差, 即负值误差。根据图 20b 所示航向误差对比试验结果可以发现, 相比于 PID 控制, 可拓切换控制和可拓博弈协调控制在弯道处有效改善了实际智能汽车轨迹跟踪航向误差精度, 由于可拓博弈控制方法对方向盘转角切换抖动的优化, 弯道控制可以获得更加稳定的航向误差。

根据图 21 中车辆运动的横摆角速度和侧向速度试验结果可以发现, 可拓切换控制、可拓博弈控制方法和 PID 控制方法侧向速度和横摆角速度均在合理数值内变化, 并且前两者相比于 PID 控制, 侧向加速度和横摆角速度均略小, 均具有一定的改善。为了能够进行重复的试验, 纵向控制使用定速的巡航控制, 目标速度设置的为 70 km/h, 速度如图 22 所示, 整个 LCK 控制过程包括了一部分车辆起步加速阶段。



(a) 轨迹跟踪横向位置误差试验对比图



(b) 航向偏差试验对比图

图 20 车道中心线轨迹跟踪误差试验对比

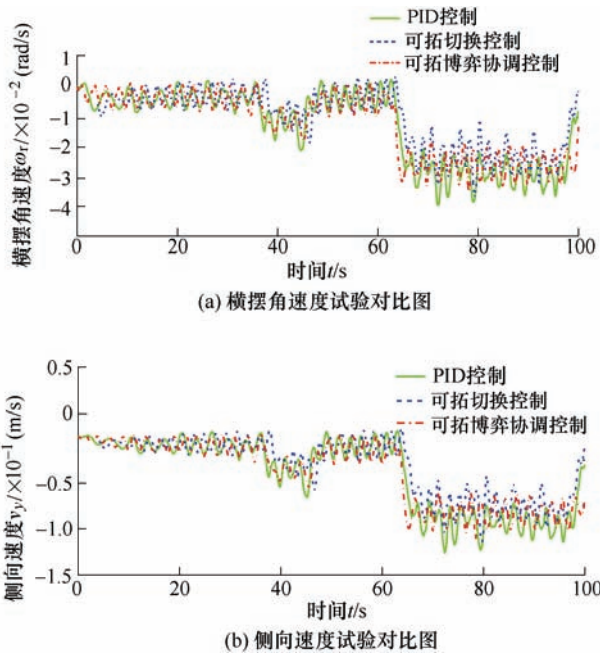


图 21 横摆角速度、侧向加速度试验对比

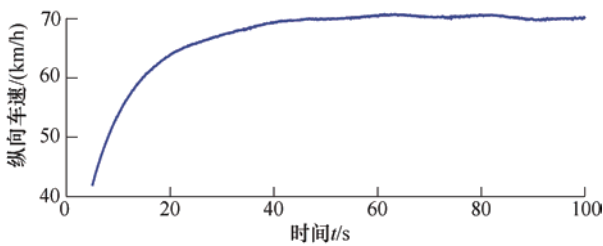


图 22 纵向车速变化图

6 结论

(1) 针对智能汽车在高速弯道工况下, 轨迹跟踪控制精度和横向稳定性差的问题, 提出一种可拓博弈协调控制方法。结果表明, 可拓博弈协调控制方法在高速时变大曲率弯道工况下具有较好的跟踪精度和横向稳定性。

(2) 可拓控制基于蔡文可拓原理, 有效解决了单一控制方法的局限性, 具有延拓高精度跟踪控制区域的优点。通过上层可拓控制分别对预瞄横向位置误差和航向误差构建并联可拓测度模式识别策略, 分别求解两个特征状态的关联函数和测度模式, 相比于常见采用一组特征状态量可以更加详细表征智能汽车轨迹跟踪过程在三种测度模式的动态变化, 同时下层可拓控制输出求解结合关联函数值和前馈-反馈控制, 使得非域测度模式下控制量更加精确可靠。

(3) 博弈协调控制方法协调均衡双方指标, 将基于预瞄横向位置误差和航向误差求得的前轮转角

控制量加权系数进行博弈, 优化了加权系数。有效解决了可拓切换控制和并联控制协调权重不合理导致的控制量抖动问题。研究结果对设计智能汽车轨迹跟踪控制策略具有极强的指导意义和参考价值, 在后续的研究工作中也会对其深入研究, 尤其是高速低附着系数的极限恶劣工况的轨迹跟踪控制问题。

参 考 文 献

- [1] OKAMOTO K, ITTI L, TSIOTRAS P. Vision-based autonomous path following using a human driver control model with reliable input-feature value estimation[J]. IEEE Transactions on Intelligent Vehicles, 2019, 4(3): 497-506.
- [2] CAI Junyu, JIANG Haobin, CHEN Long, et al. Implementation and development of a trajectory tracking control system for intelligent vehicle[J]. Journal of Intelligent & Robotic Systems, 2019, 94(1): 251-264.
- [3] HU Chuan, WANG Zhenfeng, QIN Yechen, et al. Lane keeping control of autonomous vehicles with prescribed performance considering the rollover prevention and input saturation[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2019, 2(3): 1-13.
- [4] PARK M W, LEE S W, HAN W. Development of lateral control module for zone(U-turn) maneuver of vehicle/driver cooperative autonomous driving system[C]//2016 IEEE International Transportation Electrification Conference and Expo, Asia Pacific (ITEC). Busan, Korea; IEEE, 2016: 908-912.
- [5] CHANG M K, LEE S H, CHUNG C C. Multi-rate lane keeping system with kinematic vehicle model[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2018, 1(1): 9211-9222.
- [6] 李克强, 郭磊, 王建强, 等. 基于 THASV-II 的横向主动安全系统[C]//中国智能交通年会, 2006: 646-650. LI Keqiang, GUO Lei, WANG Jianqiang, et al. Lateral active safety system based on THASV-II[C]//China Intelligent Transportation Conference, 2006: 646-650.
- [7] 王荣本, 李兵, 徐友春, 等. 基于视觉的智能车辆自动驾驶最优控制器设计[J]. 汽车工程, 2001, 23(2): 97-100. WANG Rongben, LI Bing, XU Youchun, et al. Optimal controller design for an intelligent vehicle based on vision navigation[J]. Automotive Engineering, 2001, 23(2): 97-100.
- [8] 张炳力, 李子龙, 沈干, 等. 基于模糊神经网络的智汽车轨迹跟踪研究[J]. 汽车工程, 2019(8): 98-104.

- ZHANG Bingli, LI Zilong, SHEN Gan, et al. A research on path tracking of intelligent vehicle based on fuzzy neural network[J]. *Automotive Engineering*, 2019(8): 98-104.
- [9] SPIELBERG N A, BROWN M, KAPANIA N R, et al. Neural network vehicle models for high-performance automated driving[J]. *Science Robotics*, 2019, 4(28): 1-13.
- [10] 邹德飏. 汽车自适应巡航系统的多模式切换控制研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2018.
- ZOU Debiao. Research on multi-mode switching control of automotive adaptive cruise control system[D]. Changsha: Hunan University, 2018.
- [11] 黄康, 王强, 邱明明, 等. 考虑模式切换频率的多模式混合动力汽车参数优化[J]. *西安交通大学学报*, 2019(7): 99-107.
- HUANG Kan, WANG Qiang, QIU Mingming, et al. Parameters optimization of multi-model hybrid vehicle considering mode-switching frequency[J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2019(7): 99-107.
- [12] 蔡文, 杨春燕. 可拓学的基础理论与方法体系[J]. *科学通报*, 2013, 58(13): 1190-1199.
- CAI Wen, YANG Chunyan. Basic theory and methodology on extenics[J]. *China Science Bulletin*, 2013, 58(13): 1190-1199.
- [13] 陈无畏, 王晓, 谈东奎, 等. 基于最小能耗的电动汽车横摆稳定性灰色预测可拓控制研究[J]. *机械工程学报*, 2019, 55(2): 170-181.
- CHEN Wuwei, WANG Xiao, TAN Dongkui, et al. Study on the grey predictive extension control of yaw stability of electric vehicle based on the minimum energy consumption[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2019, 55(2): 170-181.
- [14] 程祥钊. 燃料电池发电系统的控制研究[D]. 济南: 山东大学, 2019.
- CHENG Xiangzhao. Research on control fuel cell power generation system[D]. Jinan: Shandong University, 2019.
- [15] LU Shaobo, CEN Sheng, ZHANG Yanpeng. Driver model-based fault-tolerant control of independent driving electric vehicle suffering steering failure[J]. *Automotive Innovation*, 2018, 1(1): 85-94.
- [16] 汪洪波, 夏志, 陈无畏. 考虑人机协调的基于转向和制动可拓联合的车道偏离辅助控制[J]. *机械工程学报*, 2019, 55(4): 135-147.
- WANG Hongbo, XIA Zhi, CHEN Wuwei. Lane departure assistance control based on extension combination of steering and braking systems considering human-machine coordination[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2019, 55(4): 135-147.
- [17] HU Chuan, WANG Rongrong, YAN Fengjun. Output constraint control on path following of four-wheel independently actuated autonomous ground vehicles[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2016, 65(6): 4033-4043.
- [18] 陈无畏, 孙晓文, 汪洪波. 汽车差动助力转向系统的可拓协调控制[J]. *中国科学*, 2017, 47(3): 324-335.
- CHEN Wuwei, SUN Xiaowen, WANG Hongbo. Extension coordinated control of automotive differential drive assisted steering system[J]. *Science China*, 2017, 47(3): 324-335.
- [19] FLORENTIN. S. Generalizations of the distance and dependent function in extenics to 2D, 3D, and n-D[J]. *Progress in Physics*, 2012, 7(22): 54-61.
- [20] RAJAMANI R. Vehicle dynamics and control[M]. Berlin: Springer Science, 2006.
- [21] NA Xiaoxiang, COLE D J. Application of open-loop stackelberg equilibrium to modeling a driver's interaction with vehicle active steering control in obstacle avoidance[J]. *IEEE Transactions, Human-Machine Systems*, 2017, 47(5): 673-685.
- [22] 蔡英凤, 臧勇, 孙晓强, 等. 基于可拓切换控制方法的智能车辆车道保持系统研究[J]. *中国公路学报*, 2019, 32(6): 43-52.
- CAI Yingfeng, ZANG Yong, SUN Xiaoqiang, et al. Lane-keeping system of intelligent vehicles based on extension switching control method[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2019, 32(6): 43-52.

作者简介: 臧勇, 男, 1995 年出生。主要研究方向为智能汽车横向控制方法。

E-mail: 157510f02152@163.com

蔡英凤(通信作者), 女, 1985 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为智能汽车环境感知与动力学控制理论与方法。

E-mail: caicaixiao0304@126.com