



主干-匝道协同编队的高速公路合流区网联车辆轨迹规划方法

杨志发, 施嘉琪, 于卓, 王龙

引用本文:

杨志发, 施嘉琪, 于卓, 等. 主干-匝道协同编队的高速公路合流区网联车辆轨迹规划方法[J]. 智能系统学报, 2026, 21(5): 1282-1291.

YANG Zhifa, SHI Jiaqi, YU Zhuo, et al. Trajectory planning methodology for connected vehicles in highway merging zones based on mainline-ramp cooperative platooning[J]. CAAI transactions on intelligent systems, 2026, 21(5): 1282-1291.

在线阅读 View online: <https://dx.doi.org/10.11992/tis.202512045>

您可能感兴趣的其他文章

视觉协同的违规驾驶行为分析方法

A visual collaborative analysis method for detecting illegal driving behavior

智能系统学报. 2021, 16(6): 1158-1165 <https://dx.doi.org/10.11992/tis.202101024>

改进光流法和GMM融合的车辆实时检测算法研究

Research on vehicle real-time detection algorithm based on improved optical flow method and GMM

智能系统学报. 2021, 16(2): 271-278 <https://dx.doi.org/10.11992/tis.201907051>

基于路网结构的城市交通事故短期风险预测方法

A short-term risk prediction method for urban traffic accidents based on road network

智能系统学报. 2020, 15(4): 663-671 <https://dx.doi.org/10.11992/tis.201910002>

线性时序逻辑约束下的滚动时域控制路径规划

Receding horizon control path planning with linear temporal logic constraints

智能系统学报. 2020, 15(2): 281-288 <https://dx.doi.org/10.11992/tis.201810038>

基于车内外视觉信息的行人碰撞预警方法

Pedestrian collision warning system based on looking-in and looking-out visual information analysis

智能系统学报. 2019, 14(4): 752-760 <https://dx.doi.org/10.11992/tis.201801016>

一种基于Multi-Egocentric视频运动轨迹重建的多目标跟踪算法

A multi-object tracking algorithm based on trajectory reconstruction on multi-egocentric video

智能系统学报. 2019, 14(2): 246-253 <https://dx.doi.org/10.11992/tis.201709003>

DOI: 10.11992/tis.202512045

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/23.1538.TP.20260707.1028.014>

主干-匝道协同编队的高速公路合流区网联车辆 轨迹规划方法

杨志发^{1,2}, 施嘉琪^{1,3}, 于卓⁴, 王龙²

(1. 广州航海学院 智能制造学院, 广东 广州 510725; 2. 吉林大学 交通学院, 吉林 长春 130025; 3. 广东工业大学 土木与交通工程学院, 广东 广州 510006; 4. 广州航海学院 文理学院, 广东 广州 510725)

摘要: 为实现高速公路主干-匝道网联车辆协同编队, 针对合流区车辆轨迹规划问题, 本文提出融合动力学稳定性约束与碰撞检测的轨迹优化方法。选用五阶多项式作为基础模型, 实现对纵横向运动的协同规划。引入二自由度车辆模型, 推导横摆角速度与质心侧偏角的稳定界限, 结合 Truksim 仿真拟合得到最小换道时长表达式 (拟合优度为 0.992), 建立动力学约束体系。采用分离轴定理 (separating axis theorem, SAT) 实现快速碰撞检测, 并构建安全风险与换道效率的综合成本函数, 通过权重调节 (0.4, 0.5, 0.6) 优化最佳换道时长, 考虑车辆动力学稳定性风险和换道效率综合成本获得最佳换道时长为 5.16 s。仿真验证主干道与匝道车辆轨迹无冲突, 换道过程平滑, 纵横向运动协同, 验证了模型有效性。

关键词: 高速公路合流区; 网联车辆协同编队; 轨迹规划; 多项式换道轨迹; 车辆二自由度; 动力学稳定性约束; 分离轴定理; 轨迹簇

中图分类号: TP273.1; U471.23 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-4785(2026)05-1282-10

中文引用格式: 杨志发, 施嘉琪, 于卓, 等. 主干-匝道协同编队的高速公路合流区网联车辆轨迹规划方法 [J]. 智能系统学报, 2026, 21(5): 1282-1291.

英文引用格式: YANG Zhifa, SHI Jiaqi, YU Zhuo, et al. Trajectory planning methodology for connected vehicles in highway merging zones based on mainline-ramp cooperative platooning[J]. CAAI transactions on intelligent systems, 2026, 21(5): 1282-1291.

Trajectory planning methodology for connected vehicles in highway merging zones based on mainline-ramp cooperative platooning

YANG Zhifa^{1,2}, SHI Jiaqi^{1,3}, YU Zhuo⁴, WANG Long²

(1. School of Intelligent Manufacturing, Guangzhou Maritime University, Guangzhou 510725, China; 2. School of Transportation, Jilin University, Changchun 130025, China; 3. School of Civil Engineering and Transportation, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China; 4. School of Arts and Sciences, Guangzhou Maritime University, Guangzhou 510725, China)

Abstract: To achieve coordinated platooning of connected vehicles on highway mainlines and ramps, this paper addresses the vehicle trajectory planning problem in merging zones by proposing a trajectory optimization method that integrates dynamic stability constraints and collision detection. A quintic polynomial is selected as the baseline model to enable coordinated longitudinal and lateral motion planning. Utilizing a two-degree-of-freedom vehicle model, stability boundaries for yaw rate and sideslip angle are analytically derived. Combined with Truksim simulations, an expression for the minimum lane-changing duration is fitted with a goodness-of-fit value of 0.992, thereby establishing a comprehensive dynamic constraint framework. The separating axis theorem (SAT) is employed to enable rapid collision detection. A composite cost function incorporating both safety risk and lane-changing efficiency is constructed. Through weighted adjustment (0.4, 0.5, 0.6), the optimal lane-changing duration of 5.16 seconds is determined, considering both vehicle dynamic stability risks and overall lane-changing efficiency. Simulation results confirm conflict-free trajectories between mainline and ramp vehicles, smooth lane-changing maneuvers, and well-coordinated longitudinal-lateral motions, thereby validating the effectiveness of the proposed model.

Keywords: expressway merging areas; cooperative platooning of connected vehicles; trajectory planning; polynomial lane-changing trajectory; two-degree-of-freedom of vehicle; dynamic stability constraints; separating axis theorem; trajectory cluster

收稿日期: 2025-12-27. 网络出版日期: 2026-07-07.

基金项目: 广东省教育厅学科能力提升项目 (K620250402).

通信作者: 于卓. E-mail: yzf2001@163.com.

高速公路合流区因其处在交通流的交汇点, 匝道车辆通过换道加入主干道车流运行, 易因车

流冲突导致车辆通行效率下降、安全风险提升^[1]。近年来,随着智能网联技术和自动驾驶技术的快速发展,网联车能进行车辆精准控制以及合流区车辆的高效组织,为解决高速公路合流区车辆编队轨迹规划提供帮助^[2]。如何合理规划合流区网联车辆协同编队轨迹,在保障合流安全的同时提升车流通过效率,对缓解高速瓶颈拥堵、推动智慧交通落地具有重要实践价值。

针对上述问题,研究涉及合流区智能车辆编队协同控制与轨迹规划^[3]。针对合流区智能车辆协同编队控制问题,国内外学者开展了大量研究工作。李春等^[2]提出3种策略,将现有研究方法归纳为反馈控制、最优控制以及强化学习控制,其中对策略方面研究众多,如双级最优边缘计算(bi-level optimal edge computing model, BOEC)模型^[4],基于生成树剪枝^[5]和多人合作博弈的优化框架^[6],虽实现全局优化,但策略对车辆通信要求高^[7]。先进先出(first in first out, FIFO)规则^[8]和时间窗预约的合流策略^[9]在动态场景下,固定的规则解非最优,适用性受限^[10]。大部分关于车辆编队策略的研究,往往基于固定的研究前提。当研究前提发生变化,如聚焦高速公路合流区,现有车辆编队策略模型适用性会受到限制。张毅等^[11]基于车路协同集中式与分布式决策架构,综述车辆群体协同决策机制与方法。此外,陈珍萍等^[10]阐述编队控制以实现车辆的定位、队列初始化、队形变换、防碰撞控制以及目标巡航等目标,车辆编队通过高效、最优化的编队策略进行控制,最终实现车辆队列协同一致。

在轨迹规划方面,合流区的轨迹规划关键在于换道轨迹规划,主流方案包括涵盖几何曲线、动力学约束最优控制及样条/多项式曲线^[12-14],常见的换道几何曲线轨迹有余弦函数换道轨迹^[12]、B样条曲线换道轨迹^[13,15]、多项式换道轨迹^[14]。多数轨迹规划研究基于理想车辆模型或几何曲线,但是面对剧烈不确定性与严重外部干扰,使得对车辆动力学特性,这可能导致规划出的轨迹在实际车辆上无法稳定跟踪,存在失稳风险^[16],需要同时考虑横摆稳定性、质心侧偏角来维持车辆稳定性^[17]。因此需要对动态多车环境下智能车换道进行轨迹规划。张宇龙等^[18]研究了动态多车环境下智能车辆的换道轨迹规划方法,提出的五次多项式因能够保证轨迹规划实时性与轨迹曲率连续性而被许多学者采用。王衍学等^[19]构建横纵向联合非线性车辆动力学模型,将其嵌入优

化框架,保障车辆的稳定性。冯黎等^[20]基于五次多项式轨迹规划进行动力学初筛,引入改进人工势场完成轨迹优选。此外,李胜琴等^[21]采用五次多项式换道模型,通过对车辆换道时侧向加速度,时间以及摆角速度设计目标函数,得到最优换道轨迹。

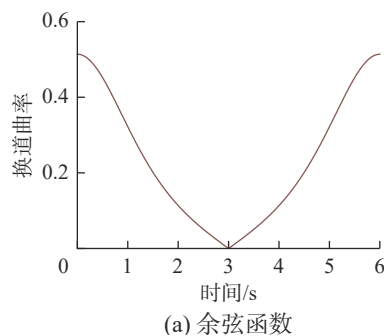
在匝道合流区域,货车较其他车型对整体车流影响更加复杂,因此本研究立足于网联自动驾驶货车,对其轨迹规划、车辆动力学、自然驾驶数据分析、碰撞检测及综合评价展开研究。经过对比余弦函数、B样条曲线、多项式换道轨迹后选用计算高效且曲线光滑的五阶多项式作为轨迹规划的基础模型,以实现车辆纵横向运动的协同描述。为进一步确保轨迹的可行性与稳定性,引入车辆二自由度动力学模型,推导出横摆角速度与质心侧偏角的稳定界限,为轨迹规划提供明确的动力学约束。同时,基于highD自然驾驶数据集分析真实换道行为中的纵向速度波动特性,以确定轨迹关键参数间的耦合关系,使规划更符合实际驾驶规律。针对合流区的交互安全,采用分离轴定理(separating axis theorem, SAT)对生成的轨迹簇进行碰撞检测,快速筛选出无碰撞风险的候选轨迹集。最终,构建一个兼顾安全风险与换道效率的综合成本函数,用以从安全轨迹集中确定最佳的换道时机与时长,从而实现安全与效率的统筹优化。

1 合流区编队轨迹规划模型

1.1 换道轨迹方法选择

在高速公路场景中,换道轨迹路径的规划是确保交通流畅和安全的重要问题。常见的换道轨迹路径公式包括基于简单几何曲线的路径规划公式、基于动力学约束的最优控制公式以及基于样条曲线的路径生成方法。

设换道总时间为6 s,换道车辆的横向位移为3.75 m,进行余弦函数、B样条曲线、多项式3种换道轨迹模拟,获得换道曲率变化如图1所示。



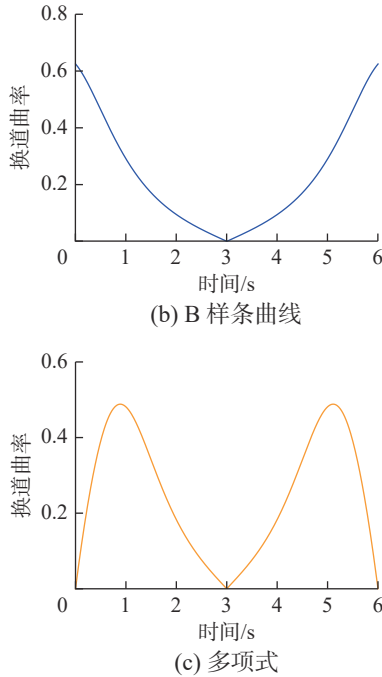


图 1 换道曲率变化

Fig. 1 Lane change curvature variation

通过对这 3 种轨迹模型的比较,与 B 样条曲线相比,多项式轨迹的计算较为简便,其计算效率较高;多项式换道模型能够适应不同的换道场景,通过调整多项式的阶数和边界条件,适应性较强,能够处理复杂的换道需求;多项式换道轨迹模型可以做到起始点和终止点的横向加速度与换道曲率从 0 开始变化,且变化过程连续自然,并且多阶导数曲线光滑连续无突变。

综合分析后,选择多项式换道轨迹模型作为本研究的基础模型。该模型能够较为准确地拟合实际换道轨迹,确保车辆在换道过程中的位置、速度和加速度变化平稳且连续,且计算效率较高,轨迹曲线具有较好的光滑性。

1.2 模型构建

对于车辆在组成车队过程中,匝道车辆需从匝道换至主干道并完成编队操作。为了尽量减少纵向和横向运动的波动,确保运动的稳定性,可制定相应的性能指标,旨在最小化纵横向的波动。

$$J_i = \int_0^{t_{i,f}} \frac{1}{2} [u_{ix}^2(t) + u_{iy}^2(t)] dt$$

式中:假设车辆横向安全启动时间为 $t_{i,lc}$,以车辆 i 准备换道的时刻为时间起止点, $t_{i,f}$ 为车辆 i 的换道时长,则对应的整体时间区间为 $[t_{i,lc} + 0, t_{i,lc} + t_{i,f}]$ 。在车体坐标系下, u_{ix} 为车辆 i 的纵向速度, u_{iy} 为车辆 i 的横向速度。

$t_{i,lc}$ 定义为待编队车辆 i 启动换道轨迹规划并向主干道汇入的初始时刻。该时刻的确定是构建安全轨迹簇的先决条件。本文基于分离轴定理

(SAT) 构建了时空包络碰撞检测模型来确定 $t_{i,lc}$ 。

输入 主干道前后车辆 $i-1$ 和 $i+1$ 的实时状态集合 I 。

计算过程 将待编队车辆与主干道车辆简化为 (oriented bounding box, OBB)。对于预设的一系列候选换道时长 $t_{i,f}$ 对应的轨迹簇,利用 SAT 算法计算待编队车辆在横向移动过程中与主干道车辆在纵向时间轴上的最小安全距离。

判定准则 当且仅当存在一条候选轨迹,使得待编队车辆与主干道前后车辆在整个换道过程中的时空投影不发生重叠时,该时刻被确立为 $t_{i,lc}$ 。

由于纵横向状态变量相互独立,因此将每辆车的最优控制问题转化为

$$\min J_i = \min J_{ix} + \min J_{iy} = \min \int_0^{t_{i,f}} \frac{1}{2} u_{ix}^2(t) dt +$$

$$\min \int_0^{t_{i,f}} \frac{1}{2} u_{iy}^2(t) dt$$

同时,因车辆纵横向状态变量相互独立,即车辆纵横向最小化波动最优控制可表述为

$$\min J_{ix} = \min \int_0^{t_{i,f}} \frac{1}{2} u_{ix}^2(t) dt$$

$$\min J_{iy} = \min \int_0^{t_{i,f}} \frac{1}{2} u_{iy}^2(t) dt$$

结合状态方程和成本函数,构造哈密顿函数和协态方程,联立求解得到

$$\begin{aligned} x(t) &= -\frac{1}{120} C_{1,ix} t^5 + \frac{1}{24} C_{2,ix} t^4 - \frac{1}{6} C_{3,ix} t^3 + \\ &\quad \frac{1}{2} C_{4,ix} t^2 + C_{5,ix} t + C_{6,ix} \\ y(t) &= -\frac{1}{120} C_{1,iy} t^5 + \frac{1}{24} C_{2,iy} t^4 - \frac{1}{6} C_{3,iy} t^3 + \\ &\quad \frac{1}{2} C_{4,iy} t^2 + C_{5,iy} t + C_{6,iy} \end{aligned}$$

在大地坐标系下,通过车辆 i 的始末状态进行方程求解。假设纵向运动轨迹方程在起止点的位移为 0,则在换道轨迹的纵向终点的位移为 l ,一般车辆在换道时车辆的纵向速度一般保持不变,所以有车辆 i 的始末状态: $x(0) = 0$, $v_{ix}(0) = v_{ix}^0$, $a_{ix}(0) = 0$ 和 $x(t_{i,f}) = l$, $v_{ix}(t_{i,f}) = v_{ix}^0$, $a_{ix}(t_{i,f}) = 0$ 。即求出

$$x(t) = \frac{(l - t_{i,f} v_{ix}^0)}{t_{i,f}^3} \left(\frac{6}{t_{i,f}^2} t^2 - \frac{15}{t_{i,f}} t + 10 \right) t^3 + v_{ix}^0 t$$

同理,假设换道轨迹的横向终点长度为 w ,则车辆 i 的始末状态: $y(0) = 0$, $v_{iy}(0) = 0$, $a_{iy}(0) = 0$ 和 $y(t_{i,f}) = w$, $v_{iy}(t_{i,f}) = 0$, $a_{iy}(t_{i,f}) = 0$ 。即求出

$$y(t) = \frac{6w}{t_{i,f}^5} t^5 - \frac{15w}{t_{i,f}^4} t^4 + \frac{10w}{t_{i,f}^3} t^3$$

所以换道轨迹规划方程为

$$\begin{cases} x(t) = \frac{(l - t_{i,f}v_{ix}^0)}{t_{i,f}^3} \left(\frac{6}{t_{i,f}^2} t^2 - \frac{15}{t_{i,f}} t + 10 \right) t^3 + v_{ix}^0 t \\ y(t) = \frac{w}{t_{i,f}^3} \left(\frac{6}{t_{i,f}^2} t^2 - \frac{15}{t_{i,f}} t + 10 \right) t^3 \end{cases}$$

式中: w 和 v_{ix}^0 为初始固定参量, $t_{i,f}$ 和 l 为待规划参量。为了简化模型的变量选择和优化建模过程,有必要对变量 $t_{i,f}$ 和 l 之间的独立性进行讨论^[22]。下面基于车辆的纵向速度波动率这一指标来进行讨论,并基于 highD 轨迹数据集得到真实的换道过程中的纵向速度波动率,从而更好地说明变量 $t_{i,f}$ 和 l 之间的关系。

车辆的纵向速度波动率为

$$r_{vx} = \frac{v_{ix}(t) - v_{ix}^0}{v_{ix}^0}$$

将车辆的纵向速度公式代入后,有

$$r_{vx} = \frac{30(l - t_{i,f}v_{ix}^0)}{t_{i,f}^3 v_{ix}^0} \left(\frac{t^2}{t_{i,f}^2} - \frac{2t}{t_{i,f}} + 1 \right) t^2$$

基于德国开源数据集 highD, 从中筛选出货车的换道轨迹点并拟合为五阶多项式, 获得纵向速度方程^[23]。货车换道纵向速度最大波动率的峰值集中在 0.025 附近, 为充分考虑普遍性, 选择覆盖 95% 区间的最大波动率 $\alpha_{vx} = 0.0718$, 可得车辆纵向速度最大波动率的绝对值:

$$\begin{aligned} \max |r_{vx}| &= \left| \frac{v_{ix}(t_{i,f}/2) - v_{ix}^0}{v_{ix}^0} \right| = \\ \frac{15}{8} \left| \frac{l}{t_{i,f}v_{ix}^0} - 1 \right| &\leq \alpha_{vx} = 0.0718 \end{aligned}$$

所以求出 $t_{i,f}$ 和 l 之间的耦合关系为 $0.962t_{i,f}v_{ix}^0 \leq l \leq 1.038t_{i,f}v_{ix}^0$ 。

在覆盖 95% 的一般情况下, 可以认为存在 $l = v_{ix}^0 \cdot t_{i,f}$, $t_{i,f}$ 和 l 之间的耦合关系较强, 可以将 $t_{i,f}$ 视为可调节的单一变量。设定车辆初始纵向速度为 20 m/s, 换道轨迹的横向终点长度 w 为 3.75 m 时, 得到轨迹簇如图 2 所示。

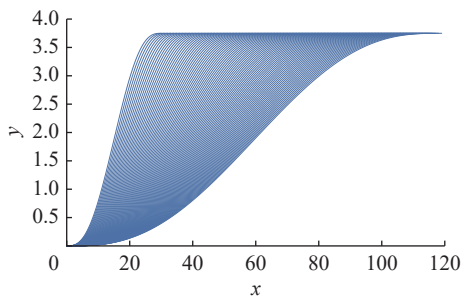


图2 换道轨迹簇

Fig. 2 Switching-trajectory clusters

2 车辆动力学稳定性约束

轨迹规划模型得到轨迹簇中有些表现为稳定状态, 而另一些则可能处于不稳定状态。针对车

辆换道场景的稳定性分析需求, 本文基于车辆二自由度动力学模型, 引入一种专属的动力学稳定界限, 此界限可实现对换道过程中车辆稳定性动态变化的定量描述。

2.1 换道轨迹方法选择

在大地坐标系下, 车辆的纵向速度始终保持恒定; 当车辆处于换道工况时, 其车体坐标系下的纵向速度如图 3 所示, 即有 $v_{ix}(t) \approx u$ 。

本文采用广泛使用的简化车辆动力学模型^[24], 将车辆视为线性二自由度刚性系统, 由该模型动力学可得, 车辆质心绝对加速度为 $a_x = \dot{u} - v\omega_r$ 和 $a_y = \dot{v} + u\omega_r$ 。其中 a_x 和 a_y 分别为车辆质心处加速度横纵向分量, u 和 v 分别为车辆质心处的速度横纵向分量, ω_r 为车辆的横摆角速度。根据二自由度模型可得 $\sum F_Y = F_{Y1} \cos \delta + F_{Y2}$ 。

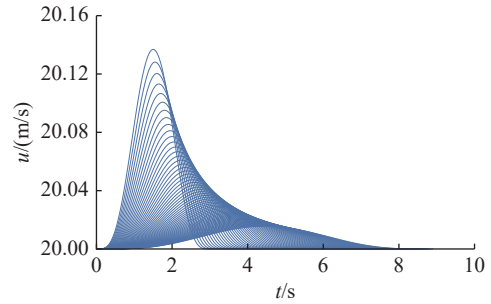


图3 车体坐标系下的纵向速度

Fig. 3 Longitudinal velocity in the vehicle body coordinate system

联合上述公式可得横摆角速度 ω_r 为

$$\omega_r = \frac{F_{Y1} \cos \delta + F_{Y2}}{mu} - \frac{\dot{v}}{u}$$

车辆 y 轴方向上的合力应满足:

$$\sum F_Y = F_{Y1} \cos \delta + F_{Y2} \leq \mu mg$$

式中: μ 为路面附着系数, 因 $v_{ix}(t) \approx u$, 可得车辆横摆角速度稳定界限:

$$|\omega_r| = \frac{F_{Y1} \cos \delta + F_{Y2}}{mv_{ix}(t)} - \frac{\dot{v}}{v_{ix}(t)} \leq \frac{\mu g}{v_{ix}(t)} - \frac{\dot{v}}{v_{ix}(t)}$$

若将车辆行驶轨迹设定为质心轨迹, 可得车辆航向角 θ 的正切值公式为 $\theta = \arctan \frac{v_{iy}(t)}{v_{ix}(t)}$; 广义换道轨迹簇所对应的车辆航向角如图 4 所示。

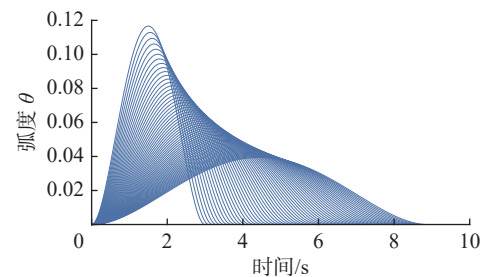


图4 车辆航向角变化

Fig. 4 Vehicle heading angle variation

由图 4 可知, 车辆航向角很小可忽略不计; 又因为 $\theta = \beta + \psi$, 即车辆横摆角也可忽略。车体坐标系和大地坐标系下的速度转换公式为

$$\begin{cases} u = v_{ix}(t) \cos \psi + v_{iy}(t) \sin \psi \\ v = -v_{ix}(t) \sin \psi + v_{iy}(t) \cos \psi \end{cases}$$

所以:

$$\dot{v} = -a_{ix}(t) \sin \psi + a_{iy}(t) \cos \psi$$

又因为 $v_{ix}(t) \approx u$, 而车辆横摆角很小, 所以有 $\dot{v} \approx a_{iy}(t)$ 。

即车辆横摆角速度的稳定限值为

$$|\omega_r| \leq \frac{\mu g - a_{iy}(t)}{v_{ix}(t)}$$

2.2 质心侧偏角稳定界限

质心侧偏角稳定界限受限于轮胎饱和特性, 轮胎与地面之间的摩擦力达到一定阈值后, 摩擦力不再随载荷的增加而线性增长, 而是趋于饱和并最终达到一个极限值^[25]。

当轮胎处于饱和状态时, 车辆的牵引力和侧向力受限, 无法提供足够的稳定性, 可能导致车辆失控或滑移, 本文基于轮胎刷子模型进行分析^[26]。假设轮胎与地面之间的接触可以视为一系列微小的接触点, 每个接触点产生一定的力, 轮胎的接触区域可以简化为多个独立的刷子, 且每个刷子的方向和长度都与轮胎的滑移状态有关。在某一特定条件下, 这些刷子会发生饱和现象。模型的表达式为

$$F_{Y1,2} = \begin{cases} -C_{\alpha 1,2} \tan \alpha_{1,2} + \frac{C_{\alpha 1,2}^2 |\tan \alpha_{1,2}|}{3\mu F_{z1,2}} \tan \alpha_{1,2} - \\ \frac{C_{\alpha 1,2}^3 \tan^3 \alpha_{1,2}}{27\mu^2 F_{z1,2}^2} \tan \alpha_{1,2}, |\alpha_{1,2}| < \arctan\left(\frac{3\mu F_{z1,2}}{C_{\alpha 1,2}}\right) \\ -\mu F_{z1,2} \operatorname{sgn} \alpha_{1,2}, \text{其他} \end{cases}$$

式中: $F_{Y1,2}$ 为前后轮侧偏力, $F_{z1,2}$ 为垂向力, $C_{\alpha 1,2}$ 为侧偏刚度, $\alpha_{1,2}$ 为侧偏角。后轴侧偏角 α_2 的稳定范围为

$$\alpha_2 = \frac{v - b\omega_r}{u} = \beta - \frac{b\omega_r}{u} \leq \arctan\left(\frac{3\mu mg}{C_{\alpha 2}} \times \frac{a}{a+b}\right)$$

推导可得稳定界限为

$$|\beta| \leq \arctan\left(\frac{3\mu mg}{C_{\alpha 2}} \times \frac{a}{a+b}\right) + \frac{b\omega_r}{v_{ix}(t)}$$

2.3 最小车辆换道时长约束

为保障车辆行驶过程中的动态稳定性, 研究通过综合耦合横摆角速度稳定界限公式与质心侧偏角稳定界限公式, 构建了一套用于量化评估车辆动力学稳定性的界限模型。通过 Trucksim 仿真试验, 得到了在不同速度 v_{ix}^0 和路面附着系数

μ 的状态下的最小车辆换道时长 $t_{i,fmin}$ 的曲面图, 如图 5 所示。

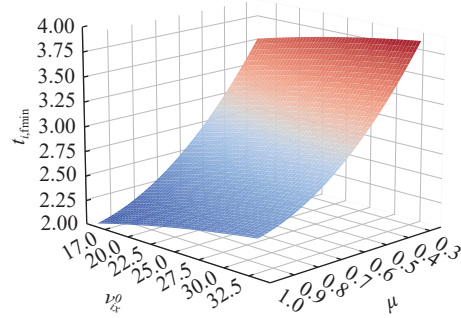


图 5 最小车辆换道时长曲面

Fig. 5 Minimum lane change duration contour

对上图中的曲面拟合后为, 得到的最小车辆换道时长 $t_{i,fmin}$ 表达式为

$$t_{i,fmin} = -4.03 \times 10^{-4} (v_{ix}^0)^2 + 2.29\mu^2 + 1.66 \times 10^{-3} \mu v_{ix}^0 + 3.92 \times 10^{-2} v_{ix}^0 - 5.17\mu + 4.35$$

其拟合程度 $R^2 = 0.992$ 。

通过最小车辆换道时长 $t_{i,fmin}$ 关于 v_{ix}^0 和 μ 的表达式, 可以计算待编队车辆的换道时长下限, 以确保符合安全的车辆动力学约束。

如图 6 所示, 针对不同类型的广义换道轨迹簇, 在路面附着系数设定为 0.8 的工况下, 通过耦合车辆横摆角速度稳定性约束与质心侧偏角稳定性约束进行联合分析, 最终确定了蓝色区域所对应的稳定轨迹簇。

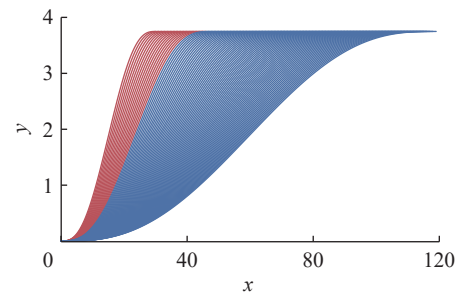


图 6 动力学约束兼容的换道轨迹集合

Fig. 6 Kinematic constraint-compatible set of lane-changing trajectories

3 轨迹规划模型关键参数分析及验证

3.1 模型关键参数分析

对于待编队车辆来说, 不合理的换道时刻 $t_{i,lc}$ 和换道时长 $t_{i,t}$ 可能会导致车辆处于碰撞风险区域, 图 7 为不同横向安全启动时间示意, 假设待编队车辆为 i 车, 其前后车辆分别为 $i-1$ 和 $i+1$ 车, 车辆与其他车辆之间的 V2V 交互通信中, 每辆车实时发送自车的信息集合 I_i 并实现共享。

$$J_{lc2} = \left(\frac{t_{i,f} - t_{i,fmin}}{T_{max} - t_{i,fmin}} \right)^2$$

基于安全风险和换道效率, 构建综合成本函数作为最佳的换道时长 $t_{i,f}^*$ 的评价指标:

$$J_{lc} = k_1 J_{lc1} + k_2 J_{lc2}$$

式中: k_1 为安全风险成本函数 J_{lc1} 的权重, k_2 为换道效率成本函数 J_{lc2} 的权重, 且有 $k_1 + k_2 = 1$ 。将对应的成本函数代入到换道时长综合成本函数中, 可以得到

$$J_{lc} = k_1 e^{1 - \frac{t_{i,f}}{t_{i,fmin}}} + k_2 \left(\frac{t_{i,f} - t_{i,fmin}}{T_{max} - t_{i,fmin}} \right)^2$$

对图 6 得到的一系列满足动力学约束的换道轨迹簇进行基于综合成本函数的换道时长评价, 分别设定 k_1 的取值为 0.4、0.5、0.6, 得到不同权重下的车辆换道时长 $t_{i,f}$ 的综合成本函数曲线, 如图 8 所示。

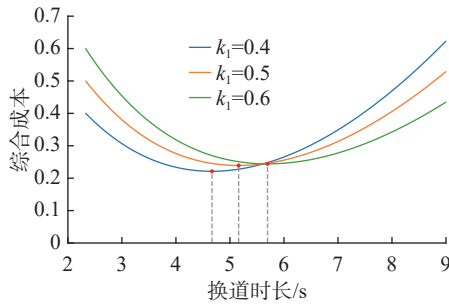


图 8 不同权重下的车辆换道时长的综合成本函数曲线
Fig. 8 Integrated cost function curves for vehicle lane-changing durations under varied weighting schemes

由图可知, 当安全风险成本的权重 $k_1 = 0.4$ 时, $t_{i,f} = 4.67$ s 时综合成本函数值最小, 此时更偏向于换道效率指标; 当 $k_1 = 0.5$ 时, $t_{i,f} = 5.16$ s 时综合成本函数值最小, 此时需综合考虑安全风险和换道效率; 当 $k_1 = 0.6$ 时, $t_{i,f} = 5.70$ s 时综合成本函数值最小, 此时更偏向于安全风险指标。因为车辆动力学稳定性风险和换道效率对于车辆的换道过程中来说都重要, 所以取安全风险成本的权重为 $k_1 = 0.5$, 最佳换道时长 $t_{i,f}^* = 5.16$ s。

3.2 模型关键参数分析合流区编队轨迹规划方法验证—五车编队为例

选择合流区五车编队决策仿真场景中, 设 B、E 车为匝道编队车辆, A、C、D 为主干道车辆进行仿真验证。

基于 SAT 避撞算法对上述仿真场景进行车辆横向安全启动时间 $t_{i,lc}$ 的分析取值, B 车的横向安全启动时间取决于 C 车的行驶状态, 当在此仿真场景下时, 车辆横向安全启动时间 $t_{i,lc} = 5.46$ s, 因为此时两车的安全包络矩形不碰撞, 即保持了

安全距离。基于 SAT 避撞算法对上述仿真场景进行车辆横向安全启动时间 $t_{i,lc}$ 的分析取值, E 车的横向安全启动时间取决于 D 车的行驶状态, 当在此仿真场景下时, 车辆横向安全启动时间 $t_{i,lc} = 8.65$ s, 因为此时两车的安全包络矩形不碰撞, 即保持了安全距离。如图 9 所示, 即此时的 B 车最佳换道时长 $t_{i,f}^* = 4.23$ s, E 车最佳换道时长为 $t_{i,f}^* = 4.55$ s。

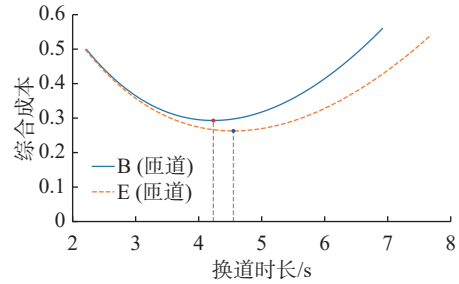


图 9 B 车、E 车换道时长的综合成本函数曲线
Fig. 9 Comprehensive cost function curves for lane-changing duration of Vehicle B and Vehicle E

图 10 展示了车辆在纵横向及时间维度的三维轨迹。可以看出, 主干道车辆 A、C、D 与匝道车辆 B、E 的运动轨迹在纵横向和时间维度上未发生交叉, 表明车辆编队过程中运动路径规划合理且无冲突风险。匝道车辆 B 和 E 在进入主干道前横向位移逐步增加, 并在完成编队后保持稳定, 说明其换道过程平滑且符合预期。同时, 主干道车辆的纵向轨迹呈现近似平行趋势, 表明其在纵向速度上保持了一致性, 从而进一步保证了整体交通流的稳定性和安全性。

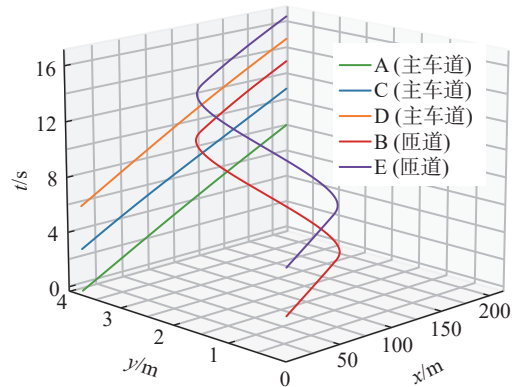


图 10 ACDBE 车的三维位置轨迹
Fig. 10 Three-dimensional trajectory of ACDBE vehicle

图 11 进一步提供了车辆在合流过程中纵横向位置、速度及加速度的情况。从图 11 (a) 和 (b) 中可以看出, 主干道车辆 A、C、D 和匝道车辆 B、E 的纵横向位置变化规律符合实际交通编队场景。匝道车辆 B 和 E 的横向位移在编队前逐渐增加并趋于稳定, 而主干道车辆保持了线性趋势。

从图 11 (c) 和 (d) 的速度变化来看,在编队过程中主干道车辆保持稳定的纵向速度,而匝道车辆 B 和 E 在横向速度上表现出明显的变化,而后段速度逐渐趋于平稳,这说明其动态响应性能良好。从图 11 (e) 和 (f) 的加速度变化分析,匝道车辆的纵横向加速度在编队过程中均保持在合理范

围内。匝道车辆 B 的横向加速度在编队初期出现一定幅度的变化后迅速减小并趋于零,说明其能够快速完成换道操作,而匝道车辆 E 的加速度变化更加平滑,进一步验证了规划算法的稳定性。仿真结果表明,在车辆编队过程中能有效实现纵横向运动的协同。

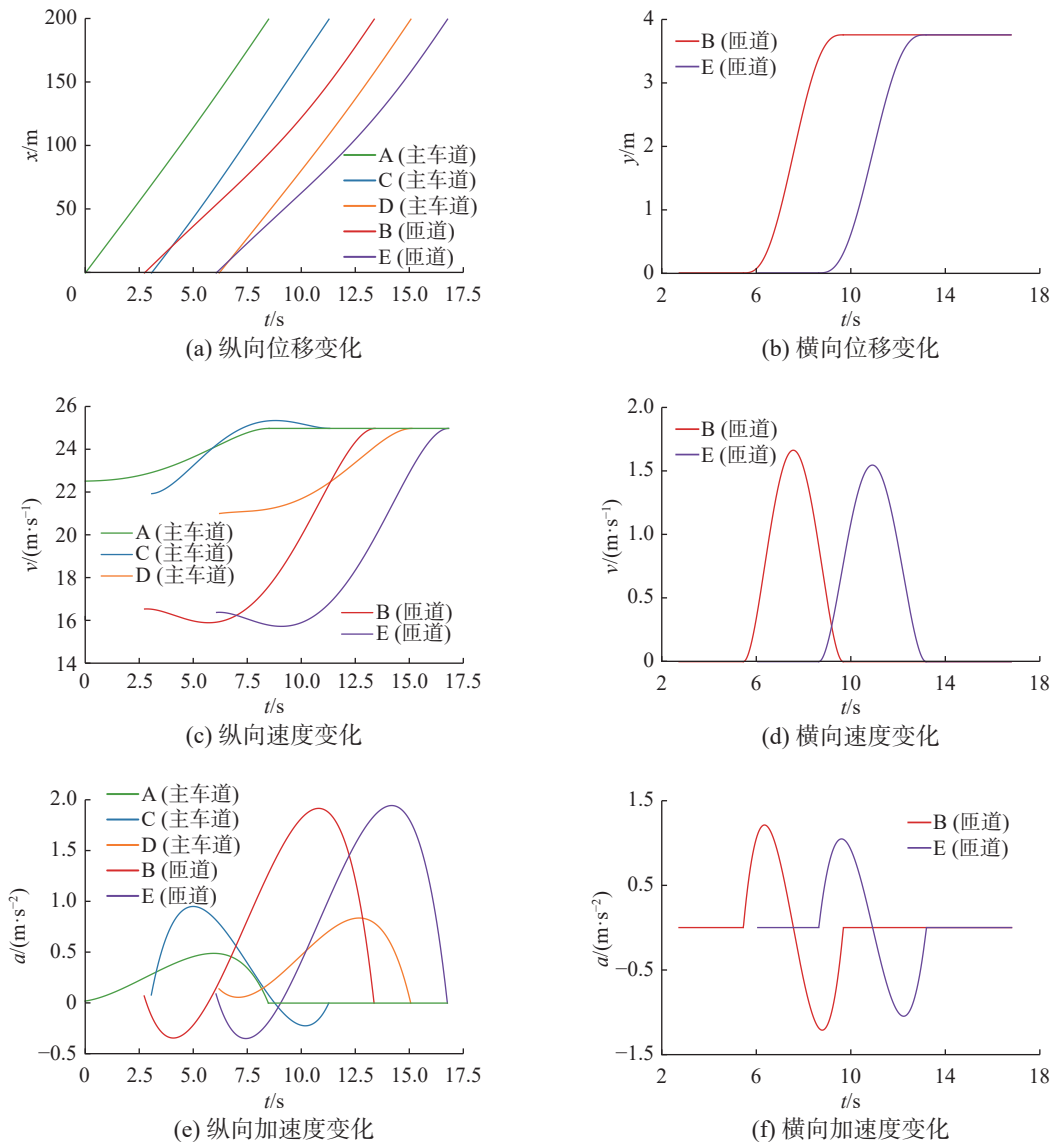


图 11 合流区五车编队场景的仿真结果

Fig. 11 Simulation results of the five-vehicle formation scenario in the confluence zone

4 结束语

本研究针对高速公路合流区网联车辆协同编队的轨迹规划问题,以轨迹平稳性、动力学安全性与换道效率为目标,开展相关研究并作出如下贡献:1)提出了一种融合动力学稳定性约束与碰撞检测的轨迹优化方法;2)推导横摆角速度与质心侧偏角的稳定界限结合 Trucksim 仿真拟合得到最小换道时长表达式,建立动力学约束体系;3)采用分离轴定理 (SAT) 实现快速碰撞检测,并

构建安全风险与换道效率的综合成本函数,获得考虑车辆动力学稳定性风险和换道效率综合成本获得最佳换道时长。以上为合流区网联车辆协同编队提供了可解析、可计算的轨迹规划框架。为高速公路智能合流系统的工程应用提供了理论依据与算法支持。后续工作可考虑引入更精细的车辆动力学模型(如非线性轮胎模型);对碰撞检测更加精细化研究;结合自适应权重策略可泛化使用场景,实现从高速公路合流区向更多车辆合流区转化。

参考文献:

- [1] 田超强, 王涛, 刘承堃. 高速公路匝道合流区车辆运行特征研究[J]. *智能城市*, 2024, 10(12): 23–26.
TIAN Chaoqiang, WANG Tao, LIU Chengkun. Analysis of vehicle operational characteristics at highway on-ramp merging areas[J]. *Intelligent city*, 2024, 10(12): 23–26.
- [2] 李春, 吴志周, 曾广, 等. 合流区智能网联汽车协同控制方法综述[J]. *计算机工程与应用*, 2024, 60(12): 1–17.
LI Chun, WU Zhizhou, ZENG Guang, et al. Review of connected autonomous vehicle cooperative control at on-ramp merging areas[J]. *Computer engineering and applications*, 2024, 60(12): 1–17.
- [3] RIOS-TORRES J, MALIKOPOULOS A A. A survey on the coordination of connected and automated vehicles at intersections and merging at highway on-ramps[J]. *IEEE transactions on intelligent transportation systems*, 2017, 18(5): 1066–1077.
- [4] YE Fei, GUO Jianlin, KIM K J, et al. Bi-level optimal edge computing model for on-ramp merging in connected vehicle environment[C]//2019 IEEE Intelligent Vehicles Symposium. Paris: IEEE, 2019: 2005–2011.
- [5] LI P T, ZHOU Xuesong. Recasting and optimizing intersection automation as a connected-and-automated-vehicle (CAV) scheduling problem: a sequential branch-and-bound search approach in phase-time-traffic hypernetwork[J]. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2017, 105: 479–506.
- [6] JING Shoucai, HUI Fei, ZHAO Xiangmo, et al. Cooperative game approach to optimal merging sequence and on-ramp merging control of connected and automated vehicles[J]. *IEEE transactions on intelligent transportation systems*, 2019, 20(11): 4234–4244.
- [7] 温清机. 面向车辆队列的车联网资源分配算法及联合控制技术研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2022.
WEN Qingji. Research on resource allocation algorithm of V2X and joint control technology for vehicle platoon-ing[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2022.
- [8] RIOS-TORRES J, MALIKOPOULOS A, PISU P. On-line optimal control of connected vehicles for efficient traffic flow at merging roads[C]//2015 IEEE 18th International Conference on Intelligent Transportation Systems. Gran Canaria: IEEE, 2015: 2432–2437.
- [9] DRESNER K, STONE P. Multiagent traffic management: a reservation-based intersection control mechanism[C]//International joint conference on autonomous agents and multiagent systems. New York: IEEE, 2004: 530–537.
- [10] 陈珍萍, 李海峰, 付保川, 等. 基于一致性理论的车辆队列研究综述[J]. *苏州科技大学学报 (自然科学版)*, 2021, 38(3): 1–11, 47.
CHEN Zhenping, LI Haifeng, FU Baochuan, et al. Review of consensus-theory-based vehicle platoon research [J]. *Journal of Suzhou University of Science and Technology (natural science edition)*, 2021, 38(3): 1–11, 47.
- [11] 张毅, 裴华鑫, 姚丹亚. 车路协同环境下车辆群体协同决策研究综述[J]. *交通运输工程学报*, 2022, 22(3): 1–18.
ZHANG Yi, PEI Huaxin, YAO Danya. Research review on cooperative decision-making for vehicle swarms in vehicle-infrastructure cooperative environment[J]. *Journal of traffic and transportation engineering*, 2022, 22(3): 1–18.
- [12] ZHAO Xiangmo, JING Shoucai, HUI Fei, et al. DSRC-based rear-end collision warning system—An error-component safety distance model and field test[J]. *Transportation research part C: emerging technologies*, 2019, 107: 92–104.
- [13] ELBANHAWI M, SIMIC M, JAZAR R N. Continuous-curvature bounded trajectory planning using parametric splines[J]. *Frontiers in artificial intelligence and applications*, 2014, 262: 513–522.
- [14] JIANG Haobin, SHI Kaijin, CAI Junyu, et al. Trajectory planning and optimisation method for intelligent vehicle lane changing emergently[J]. *IET intelligent transport systems*, 2018, 12(10): 1336–1344.
- [15] TRAN N H, NGUYEN A D, NGUYEN T N. A genetic algorithm application in planning path using B-spline model for autonomous underwater vehicle (AUV)[J]. *Applied mechanics and materials*, 2020, 902: 54–64.
- [16] WU Xitao, WEI Chao, ZHANG Hao, et al. Path-tracking and lateral stabilization for automated vehicles via learning-based robust model predictive control[J]. *IEEE transactions on vehicular technology*, 2024, 73(12): 18571–18583.
- [17] 来飞, 肖豪, 刘俊博. 基于相平面法的智能汽车路径跟踪和稳定性控制[J]. *重庆理工大学学报 (自然科学)*, 2025, 39(8): 10–18.
LAI Fei, XIAO Hao, LIU Junbo. Path tracking and stability control of intelligent vehicles based on phase plane approach[J]. *Journal of Chongqing University of Technology (natural science)*, 2025, 39(8): 10–18.
- [18] 张宇龙, 王鹏伟, 王天宇, 等. 动态多车环境智能车辆换道轨迹规划方法研究[J]. *重庆理工大学学报 (自然科学)*, 2025, 39(3): 17–23.
ZHANG Yulong, WANG Pengwei, WANG Tianyu, et al. Research on intelligent vehicle lane changing trajectory planning method in dynamic multi-vehicle environment

- [J]. *Journal of Chongqing University of Technology (natural science)*, 2025, 39(3): 17–23.
- [19] 王衍学, 裴如庆, 冯剑波. 基于 NMPC 的智能汽车变道避撞控制研究[J]. *浙江工业大学学报*, 2024, 52(3): 290–298.
WANG Yanxue, PEI Ruqing, FENG Jianbo. Research on intelligent vehicle lane change and collision avoidance control based on NMPC[J]. *Journal of Zhejiang University of Technology*, 2024, 52(3): 290–298.
- [20] 冯黎, 杜胜品. 基于改进人工势场法的车辆换道轨迹规划[J]. *运筹与模糊学*, 2024, 14(4): 134–143.
FENG Li, DU Shengpin. Vehicle lane change trajectory planning based on improved artificial potential field method[J]. *Operations research and fuzziology*, 2024, 14(4): 134–143.
- [21] 李胜琴, 丁雪梅. 基于五次多项式的智能车辆轨迹规划[J]. *江苏大学学报 (自然科学版)*, 2023, 44(4): 392–398.
LI Shengqin, DING Xuemei. Trajectory planning of intelligent vehicle based on quintic polynomial[J]. *Journal of Jiangsu University (natural science edition)*, 2023, 44(4): 392–398.
- [22] HUANG Rulin, LIANG Huawei, ZHAO Pan, et al. Intent-estimation- and motion-model-based collision avoidance method for autonomous vehicles in urban environments[J]. *Applied sciences*, 2017, 7(5): 457.
- [23] KRAJEWSKI R, BOCK J, KLOEKER L, et al. The highD dataset: a drone dataset of naturalistic vehicle trajectories on German highways for validation of highly automated driving systems[C]//2018 21st International Conference on Intelligent Transportation Systems. Maui: IEEE, 2018: 2118–2125.
- [24] 余志生. 汽车理论[M]. 6 版. 北京: 机械工业出版社, 2019.
- [25] DINCMEN E, ACARMAN T. Enhancement of handling and cornering capability for individual wheel braking actuated vehicle dynamics[C]//2007 IEEE Intelligent Vehicles Symposium. Istanbul: IEEE, 2007: 888–893.
- [26] 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): eaaw1975.
- [27] LEE I, LEE K K, SIM O, et al. Collision detection system for the practical use of the humanoid robot[C]//2015 IEEE-RAS 15th International Conference on Humanoid Robots (Humanoids). Seoul: IEEE, 2015: 972–976.
- [28] GAN Baiqiang, DONG Qiuping. An improved optimal algorithm for collision detection of hybrid hierarchical bounding box[J]. *Evolutionary intelligence*, 2022, 15(4): 2515–2527.

作者简介:



杨志发, 教授, 博士后, 主要研究方向为智能车辆技术、车辆节能技术、车路协同技术。承担省部级及以上科研项目 10 余项, 发表学术论文 60 余篇。E-mail: yangzhifa@gzmtu.edu.cn。



施嘉琪, 硕士研究生, 主要研究方向为交通运输。E-mail: 1264074564@qq.com。



于卓, 讲师, 主要研究方向为数学建模、数据挖掘技术。E-mail: yzf2001@163.com。