

文章编号:1671-1637(2022)03-0174-10

大规模路网中分布式车辆群体协同决策方法

裴华鑫^{1,2}, 杨敬轩^{1,2}, 胡坚明^{1,2}, 张毅^{1,2,3,4}

(1. 清华大学 信息科学技术学院, 北京 100084; 2. 清华大学 北京信息科学与技术国家研究中心, 北京 100084;
3. 清华-伯克利深圳学院, 广东 深圳 518055; 4. 东南大学 现代城市交通技术江苏高校
协同创新中心, 江苏 南京 210096)

摘要:为解决车路协同环境下大规模路网中车辆群体协同决策问题,提出了分布式车辆群体协同决策方法;在深入分析交通控制特性的基础上,构建了路网分解模型,将大规模协同决策问题分解成若干个同质小规模子问题,每个子问题覆盖了上游路段、路口和下游路段这 3 类不同交通区域;基于虚拟车辆映射技术构建了车辆群体协同决策模型,将路口区域二维车辆群体协同决策问题转化为一维问题;与路段区域内车辆群体协同决策方式相同,在路口区域内通过控制虚拟车队中车辆的等效车头时距来完成车辆之间的交互和冲突消解,进而采用统一的协同决策参数来解决各子问题中不同区域内车辆群体的协同决策问题;基于不同区域内车辆群体协同决策参数的统一化,设计了上、下游区域之间的协作机制来保证上游车辆在充分考虑下游交通状态的基础上做出合适的驾驶决策。仿真结果表明:在不同的交通需求设置下,采用提出的方法后,车辆在通过冲突区的过程中均具有平滑的时空轨迹,避免了车辆时空轨迹出现剧烈波动;相对于纯分布式方法,提出的方法在给定的仿真条件下可使车辆燃油消耗最大降低 14%;因此,在大规模路网中实施提出的分布式车辆群体协同决策方法可有效降低冲突区对车流连续性的影响,从而保证了车辆安全、平稳、环保地行驶。

关键词:智能交通;智能车路协同系统;协同决策;大规模路网;分布式策略

中图分类号:U491.2 **文献标志码:**A **DOI:**10.19818/j.cnki.1671-1637.2022.03.014

Distributed cooperative decision-making method for vehicle swarms in large-scale road networks

PEI Hua-xin^{1,2}, YANG Jing-xuan^{1,2}, HU Jian-ming^{1,2}, ZHANG Yi^{1,2,3,4}

(1. School of Inoformation Science and Technology, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. Beijing National Research Center for Information Science and Technology (BNRist), Tsinghua University, Beijing 100084, China; 3. Tsinghua-Berkeley Shenzhen Institute (TBSI), Shenzhen 518055, Guangdong, China; 4. Collaborative Innovation Center of Modern Urban Traffic Technologies, Southeast University, Nanjing 210096, Jiangsu, China)

Abstract: To resolve the cooperative decision-making problem for vehicle swarms in large-scale road networks under the vehicle-infrastructure cooperative environment, a distributed cooperative decision-making method for vehicle swarms was proposed. On the basis of the in-depth analysis on the traffic control characteristics, the road network decomposition model was built to

收稿日期:2022-01-22

基金项目:国家重点研发计划(2018YFB1600600)

作者简介:裴华鑫(1994-),男,安徽安庆人,清华大学工学博士研究生,从事车路协同与自动驾驶方法研究。

导师简介:张毅(1964-),男,北京人,清华大学教授,工学博士。

引用格式:裴华鑫,杨敬轩,胡坚明,等.大规模路网中分布式车辆群体协同决策方法[J].交通工程学报,2022,22(3):174-184.

Citation:PEI Hua-xin, YANG Jing-xuan, HU Jian-ming, et al. Distributed cooperative decision-making method for vehicle swarms in large-scale road networks[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2022, 22(3): 174-184.

decompose the large-scale cooperative decision-making problem into several homogeneous small-scale sub-problems, each covering three different types of traffic areas: the upstream road segment, intersection, and downstream road segment. By the virtual vehicle mapping technique, the cooperative decision-making model of vehicle swarms was constructed to transform the two-dimensional cooperative decision-making problem of vehicle swarms at intersections into a one-dimensional problem. Similar to the cooperative decision-making method for vehicle swarms in the road segment areas, the interaction and conflict resolution between vehicles at intersections were accomplished by controlling the equivalent time headway of vehicles in the virtual vehicle platoon, and then the unified cooperative decision-making parameters were used to solve the cooperative decision-making problem of vehicle swarms in different areas of each sub-problem. Upon the unification of the cooperative decision-making parameters of vehicle swarms in different areas, the cooperative mechanism between the upstream and downstream areas was designed to ensure that the appropriate driving decisions could be made by the upstream vehicles under the full consideration of the downstream traffic states. Simulation results show that under different traffic demand settings, smooth spatiotemporal trajectories are presented by all vehicles while passing through the conflict areas after the proposed method is adopted, and the violent fluctuations in vehicle spatiotemporal trajectories are avoided. Compared with the purely distributed method, the fuel consumption of vehicles reduces by up to 14% with the proposed method under the given simulation conditions. Therefore, the proposed distributed cooperative decision-making method for vehicle swarms is effective in reducing the impact of conflict areas on the traffic flow continuity after being implemented in large-scale road networks, and thus ensuring the safe, smooth, and environmentally friendly driving of vehicles. 7 figs, 30 refs.

Key words: intelligent transportation; intelligent vehicle-infrastructure cooperative system; cooperative decision-making; large-scale road network; distributed strategy

Author resumes: PEI Hua-xin(1994-), male, doctoral student, phx17@mails.tsinghua.edu.cn; ZHANG Yi(1964-), male, professor, PhD, zhyi@tsinghua.edu.cn.

Foundation item: National Key Research and Development Program of China (2018YFB1600600)

0 引言

车路协同环境下,车辆与车辆之间、车辆与道路基础设施之间可通过车车通信和车路通信技术实现交通状态信息的实时共享^[1]。在此基础上,交通系统凸显出了网络化、强耦合和无边界等特殊属性,在有效增加道路交通控制智能性的同时也极大地增加了交通控制问题的复杂性^[2]。

基于全时空交通信息感知、融合和交互,车辆群体协同决策技术被认为是解决车路协同环境下新型交通系统交通控制问题的有效手段,通过微观层面的车辆控制实现宏观层面交通性能的提升,从而使车流达到安全、高效和稳定的运行状态^[2-4]。

已有有关车辆群体协同决策的研究大多集中在局部典型场景,可以分为2类,分别是一维和二维车辆群体协同决策技术。前者解决的是路段上行驶方

向相同的车辆之间的协同决策问题,强调如何控制合适的车间距来保持交通流的稳定性,同时提升交通安全和效率^[5-8];后者聚焦如何协调冲突区(如路口冲突区、匝道合流区)附近来自不同方向的车辆轨迹,使其安全、高效地通过冲突区域^[4,9-17]。

与局部典型场景下的车辆群体协同决策问题不同,包含多个交叉口的大规模路网场景中的车辆需要通过多种不同类型区域并与多车进行交互,因此,同一车辆在不同区域内的运动轨迹之间存在耦合,不同车辆在同一区域内的运动轨迹之间也存在耦合,给路网场景下车辆协同决策问题的求解带来很大挑战^[18-19]。

目前已有一些学者初步研究了规模场景下的车辆协同决策问题。一类典型的方法是去中心化策略,规定路网中各区域的车辆独立进行决策,相邻区域之间不存在协作机制^[20-21]。Wang等^[20]对

交通路网中路口和路段区域内的车辆分别进行控制;Mahbub等^[21]将单个路口的协调策略直接应用于包含多个路口的路网场景。由于不同区域内的车辆运动轨迹相互耦合,这种采用独立决策模式的策略不能最大程度地发挥车辆群体协同决策技术在提升车流连续性和稳定性方面的作用,增加了交通控制性能的不确定性。另一类方法是直接将路网中所有车辆的运行轨迹考虑进一个大规模优化问题^[22-23]。Ashtiani等^[22]将路网场景中的车辆群体协同决策问题构建成混合整数规划,这使得问题的计算复杂度急剧上升,难以求解。此外,现在已有部分学者开始探索不同区域车辆之间的协同决策问题^[24-25]。Xu等^[24]对路段区域的车辆进行了提前调整,便于车辆在冲突区处的通行。然而,关于协同机制的研究还可进一步完善,使其能更好地适应交通系统中不同区域的交通控制特性,并提升模型的普适性。

现有研究难以同时考虑计算复杂度和交通管控性能,因此,亟待提出全新的车辆群体协同决策算法,以实现计算效率和协调性能之间的良好平衡。鉴于此,本文建立了一种路网分解模型,将大规模交通路网分解成不同区域,将原来的大规模车辆群体协同决策问题分解成若干个小规模子问题;基于路网分解结果构建了一种不同区域车辆之间的协同决策模型,研究了交通系统中的冲突区域对车流连续性的影响;针对不同交通需求场景,分析了路网分解模型和协同决策模型联合作用下的交通管控性能。

1 问题描述

1.1 场景描述

本文研究的车路协同环境下车辆群体协同决策场景如图1所示,图中阴影区域表示冲突区,不同方向的车辆在该区域内可能会发生碰撞。车路协同环境下在每个冲突区附近安装一个路侧设备,用于协调其控制范围内车辆在冲突区的通行,路侧设备的

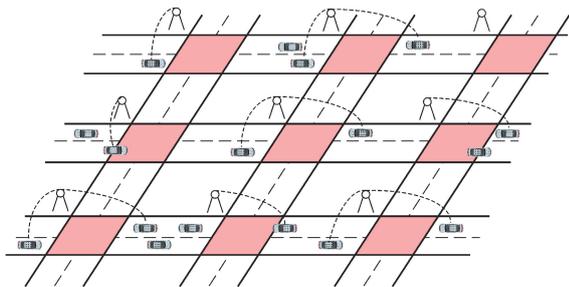


图1 典型大规模路网场景

Fig. 1 Typical large-scale road network scenario

控制范围称为路口控制区域。一般情况下,路口控制区域的大小由稳定的车路通信距离确定。此外,路网场景中除路口控制区域外的其他区域被称为路段区域,该区域内的车辆可通过车车通信实现协同决策与控制功能。为了方便描述,给出与本文研究场景相关的3个假设条件:路网场景中所有车辆均为网联自动驾驶车,即车辆具备车车(路)通信和自动驾驶功能;本文中车车(路)通信环境是理想的,即不考虑延时、丢包等现象;不考虑路段上车辆的换道行为。

1.2 科学问题

大规模路网场景下车辆群体协同决策的目标可以描述为:基于车路协同平台,在掌握全局交通状态信息的基础上制定合适的车辆驾驶计划,使得路网中的车辆运行趋于稳定、均衡,进而达到保证交通安全、提高交通效率、减少能耗排放和提升舒适度的目的。为了实现上述目标,需要解决下述4个科学问题。

问题1:针对路网场景下车辆运动轨迹之间的强耦合性,对车辆运动进行解耦,以实现车辆群体协同决策。路网场景下每辆车需要通过多个区域,并且不同区域与不同车辆之间存在交互,因此,同一车辆在不同区域的运动轨迹存在耦合,不同车辆在同一区域的运动轨迹也存在耦合。故路网场景下的车辆群体协同决策问题具有强耦合性,给问题的求解带来挑战。

问题2:针对大规模路网的无边界特性,降低车辆群体协同决策问题的计算复杂度,使其满足车辆控制实时性要求。路网场景覆盖范围广,考虑的车辆数目多,大大增加了车辆群体协同决策问题的计算复杂度,给问题的高效求解带来挑战。

问题3:路网场景中的冲突区是影响交通通行性能的瓶颈区,建立冲突区域的车辆通行模型,从而减小冲突区对车辆稳定运行的影响。路网中的冲突区域阻碍了交通的连续通行,导致连续流演化为间断流,增加了交通控制的难度,也给车辆的稳定运行带来了极大挑战。

问题4:路网中不同区域的车辆之间进行协同决策,以实现车辆稳定运行。不同区域车辆运动之间存在强耦合,在解耦的同时还需保留不同区域的高效协同,以提升交通控制性能。由于不同区域交通控制特性不同,目前没有统一的控制参数来完成不同区域之间的协同任务,同样给车辆协同决策带来很大的挑战。

2 分布式车辆群体协同决策模型构建

2.1 路网分解模型

针对大规模路网场景下车辆群体协同决策问题的强耦合性(问题 1)和无边界性(问题 2),本文提出路网分解模型来实现路网场景下车辆群体协同决策任务的解耦,并降低问题求解的复杂度,以满足车辆群体协同决策对实时性的要求。

选用图 2 所示场景,通过深入分析路网场景中不同区域的交通控制特性,本文提出路网分解模型,将交通路网在时间和空间维度上进行分解:在空间维度上,交通路网被划分成多个路段区域和路口区域,不同区域根据各自范围内车辆的运动特性分布

式进行相应的车辆协调;在时间维度上,某一辆车在通过路网的过程中会依次进入不同区域并参与对应区域的车辆协调。

在上述路网分解的基础上,通过深入分析影响车辆群体协同决策性能的关键因素,将路网中不同空间区域定义成 3 类节点,即上游路段节点、路口节点和下游路段节点,如图 2(b)所示。上游路段节点位于冲突区域上游的路段区域,该区域内车辆向靠近冲突区的方向行驶;路口节点在冲突区附近,位于路侧设备控制范围内的区域,包括一个冲突区域和相邻的部分路段区域;下游路段节点位于冲突区下游的路段区域,该区域内的车辆向远离冲突区的方向行驶。

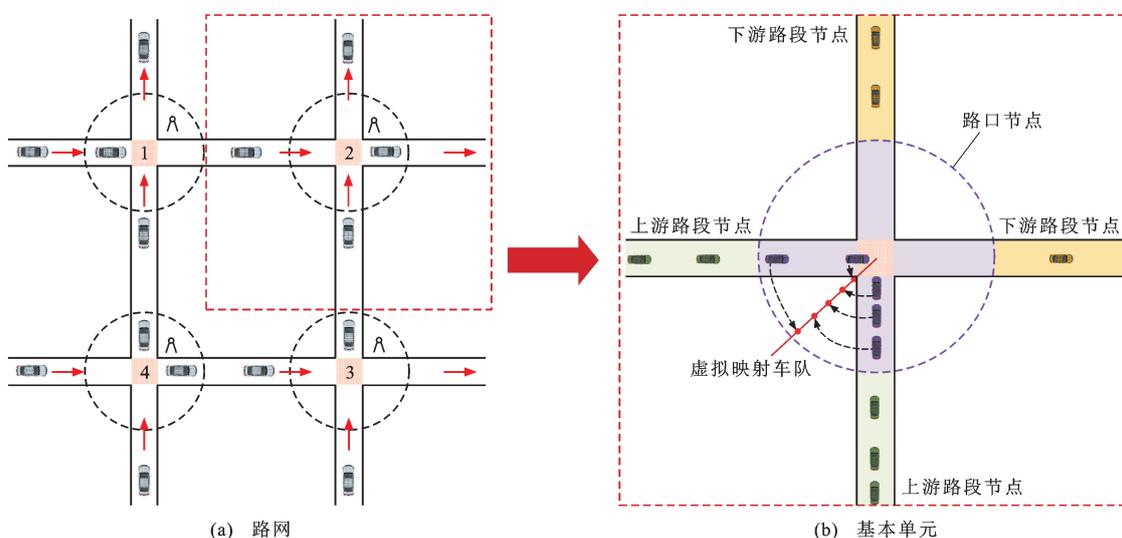


图 2 路网分解模型示意

Fig. 2 Schematic of road network decomposition model

进一步地,如图 2 所示,路网由若干个基本单元组成,而每个基本单元需包含上述 3 类节点。每个基本单元可形成路网场景下车辆群体协同决策的一个子问题。此外,由于当前路口的下游路段节点等价于下一个路口的上游路段节点,因此,相邻的子问题之间存在一定程度的重叠,如图 3 所示。基于此,交通路网中的大规模车辆群体协同决策问题可分解成若干个相对独立的小规模同质子问题,各自完成不同区域范围内的车辆群体协同决策任务。进而通过分布式求解各个子问题即可实现大规模路网场景下车辆群体协同决策任务。

至此,大规模路网场景下的车辆群体协同决策问题就转化为如何提升分解后各子问题的求解性能,最终达到全局交通控制性能的提升。

2.2 协同决策模型

为了消减路网中冲突区域对车辆稳定运行的负

面影响(问题 3),同时保证路网中不同区域之间的协作运行(问题 4),本节针对 2.1 节所述路网基本单元中不同节点之间的协同决策问题,提出分布式协同决策模型以实现车辆的稳定运行。首先,通过

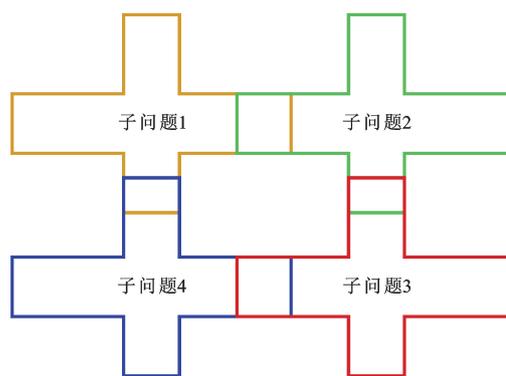


图 3 问题分解示意

Fig. 3 Schematic of problem decomposition

对路口节点内的车辆通行进行建模,采用统一的参数(即车辆车头时距)实现路段节点和路口节点内的车辆控制,便于不同区域车辆之间的协作运行;然后,通过设计路网基本单元上、下游节点之间的协同机制,实现上、下游区域内车辆之间的协同决策,最终实现由间断流向近似连续流的转换。

2.2.1 路段通行建模

一般情况下,路段区域内的车辆群体协同决策是通过控制前后车辆之间的车头时距实现的,以保证路段上的车流稳定高效地运行,因此,路段上的车辆通行控制问题可以看作一维群体协同决策问题^[26]。

路段上的车辆通过调整自身的行驶速度使其与前车保持期望的车头时距,如图 2(b)所示。路段上的车辆驶入路口节点后即按路口区域通行策略行驶。

2.2.2 路口通行建模

相对于路段控制,路口车辆群体协同决策问题涉及到来自不同方向的车流在冲突区的交汇,车辆控制难度更大。路口区域内的车辆通行控制问题可以看作二维群体协同决策问题。为了便于不同区域车辆之间的协作运行,减小冲突区域对车辆稳定运行的影响,本文采用虚拟映射技术^[27-28]将路口控制问题转化为一维群体协同决策问题。与路段上的车辆控制类似,路口区域同样可通过控制车辆之间的等效车头时距(虚拟车队中车辆之间的车头时距)来实现安全高效通行,因此,路段区域和路口区域即可采用统一的参数对车辆进行控制。

依据路口控制区域内的车辆距离冲突区的远近将各方向车辆依次映射进虚拟车队,形成一维车辆群体协同决策问题,如图 2(b)所示。此时,各车可依据其前车的行驶状态动态调整自身行驶速度,使车辆以安全的车头时距通过路口冲突区。这种路口控制方式有以下优点:路口区域车辆群体协同决策问题被分解成多个一对一的车辆决策问题,实现了车辆运动轨迹之间的解耦;每个一对一的车辆决策问题可以由一个简单的跟车模型进行求解,即可通过控制车辆之间的等效车头时距参数来完成协同决策任务;路口区域车辆控制可与路段区域车辆控制保持统一的参数,便于多节点之间协同决策。

2.2.3 协同决策机制

如图 4 所示,路网基本单元内部的协同决策机制包含 3 个节点,即上游路段节点、路口节点和下游路段节点。为了保证车辆在不同区域内稳定运行,相邻上、下游路段节点需要交互信息,车辆依据此信息

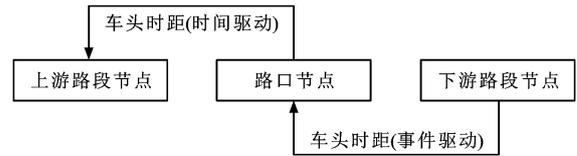


图 4 基本单元内部协同决策机制

Fig. 4 Cooperative decision-making mechanism in basic unit

可提前达到理想的行驶状态,避免频繁改变车辆的控制输入,从而减小冲突区对车辆稳定运行的影响。

路段和路口内的车辆均可通过控制车辆的车头时距来完成协同决策任务,因此,上游路段节点内车辆可根据下游路段节点中相应车辆的车头时距做出合适的决策,使得上游路段节点适当地调整车辆的车头时距,以提升车流行驶稳定性。如图 4 所示,路网基本单元中包含 2 类上、下游路段节点之间的交互,即上游路段节点和路口节点之间的交互以及路口节点和下游路段节点之间的交互。这 2 类作用机制的不同点如下。

(1)冲突区是影响交通安全和效率的瓶颈区,上游路段节点内车辆的稳定运行受下游冲突区的影响较大,因此,上游路段节点内的车辆控制需要充分考虑路口节点内的车辆运行状态。具体来说,路口节点定时将虚拟车队中与上游路段车辆运行方向相同的车辆的平均车头时距信息发送给上游路段节点,上游路段节点中各车以此平均车头时距为期望提前调整自身速度。一般情况下,一段时间内某方向的交通需求不会发生较大的变化,因此,上游路段车辆据此调整自身速度可保证车辆在进入路口区域时无需大幅度调整自身的运动状态,从而提升行驶稳定性。此外,上游路段节点和路口节点之间的交互每隔固定的时间间隔就会触发一次,以应对交通需求的变化,故称之为时间驱动机制。

(2)与上游路段节点相比,下游路段节点中的车辆运行状态对路口节点内的车辆协同决策的影响较小,因此,一般情况下,路口节点内的车辆控制无需考虑下游路段交通状态对其的影响。然而,在某些特殊情况下,路口节点控制需要充分考虑下游路段节点中的车辆运行状态。例如,下游路段节点中发生交通事故,导致车辆行驶缓慢,此时路口节点就需要重新考虑冲突区的路权分配方案,改变相关车辆的车头时距,避免短时间内过多的车辆进入下游路段而造成更为严重的拥堵。显然,路口节点和下游路段节点之间的交互为事件驱动机制,即在下游路段节点发生异常交通事件时,下游路段才将其内车辆的平均车头时距发送给路口节点,使路口节点做

出合适的决策来保证车辆稳定运行。

综上所述,路网分解模型和协同决策模型有效的直观原因:一般情况下,远处车辆运动轨迹对近处车辆运动的影响较小,各车在进行轨迹规划时无需考虑远处车辆。在这一交通领域知识驱动下,一方面,路网分解模型可以避免不同路口处车辆运动轨迹之间的耦合给求解带来的困难,而在协调性能方面牺牲较少;另一方面,协同决策模型保留了路口节点和上游路段节点之间的协作,从而保证了车辆群体协同决策的性能。换言之,路网分解模型和协同决策模型在求解难度和协调性能之间取得了较好的平衡。

3 分布式车辆群体协同决策算法实现

3.1 路段节点车辆控制算法

上游路段中的车辆 F、G 和 H 之间需要保持期

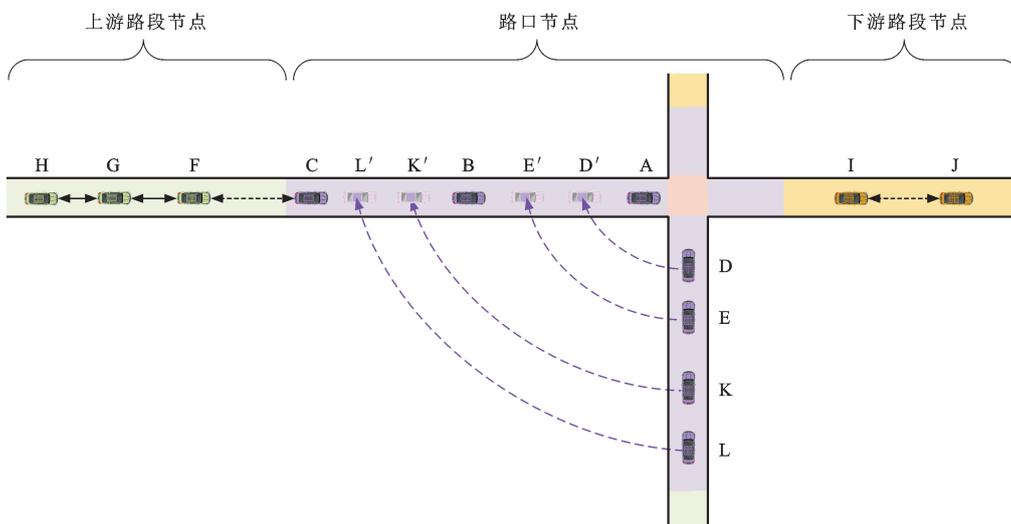


图5 分布式车辆群体协同决策算法实现

Fig. 5 Algorithm implementation of distributed cooperative decision-making for vehicle swarms

如果路段节点内的车辆车头时距满足 $h_{i,1}(t) > h_d$, 则后车可加速行驶以缩小与前车的车头时距, 此时后车的速度控制方式为

$$v_i(t + \rho) = \min\{v_i(t) + a_{\max}\rho, v_{\max}\} \quad (2)$$

式中: ρ 为车辆的控制时间间隔; a_{\max} 为车辆的最大加速度; v_{\max} 为车辆的最大行驶速度。

如果路段节点内的车辆车头时距满足 $h_{i,1}(t) \leq h_d$, 则后车需要减速行驶以增大与前车的车头时距, 此时后车的速度控制方式为

$$v_i(t + \rho) = \max\{v_i(t) - b_{\max}\rho, v_{\min}\} \quad (3)$$

式中: b_{\max} 为后车的最大减速度; v_{\min} 为车辆的最小行驶速度。

类似地, 下游路段节点内的车辆同样也按照上述控制方式进行相应调整。

望车头时距 h_d , 以保证车辆行驶的安全性和稳定性, 如图 5 所示, 其中: F、G、H 为上游路段节点中的车辆代号; I 和 J 为下游路段节点中的车辆代号; A、B、D、E、K、L 为路口节点中的车辆代号; D'、E'、K'、L' 分别为车辆 D、E、K、L 映射后对应的虚拟车辆代号。根据第 2 节中所述协同决策机制, 可知 h_d 的选取由路口节点内相关车辆的车头时距确定, 路段节点中各车需要通过调节自身的速度来和前车保持合适的车头时距。为达到这个目的, 先给出车辆之间车头时距的计算方式, 即

$$h_{i,1}(t) = \frac{d_{i,1}(t) + l_1}{v_i(t)} \quad (1)$$

式中: $h_{i,1}(t)$ 为前车和后车在 t 时刻的车头时距; $d_{i,1}(t)$ 为前车和后车在 t 时刻的车间距离; $v_i(t)$ 为后车在 t 时刻的速度; l_1 为前车的车身长度。

3.2 路口节点车辆控制算法

根据 2.2 节建立的路口通行模型, 路口区域内车辆的二维群体协同决策通过 2 步操作转化为一维车辆群体协同决策问题。第 1 步依据车辆距离冲突区的远近确定车辆通过冲突区的先后顺序; 第 2 步依据分配好的车辆通行顺序, 将路口控制区域内的车辆映射成虚拟车队, 进而可采用路段车辆控制方式来完成冲突区内的车辆交互任务。

如图 5 所示, 确定好车辆通行顺序后, 路口节点内不同方向的车辆可映射成一维的虚拟车队。不同方向的车辆 A、B、C、D、E、K、L 映射成虚拟车队, 其先后顺序依次为: A → D' → E' → B → K' → L' → C。真实车辆与相应的虚拟车辆具有相同的速度, 并且二者离冲突区中心的距离也是相同的。这种情况下,

虚拟车队中的各车(头车 A 除外)需要按照规定的顺序保持合适的安全车头时距以跟随相应的前车行驶,直至安全通过冲突区。

基于上述分析,路口节点二维群体协同决策问题转化成了一维车辆跟驰问题。虚拟车队中的任意两车在通过冲突区时需要保持合适的安全车头时距来避免车辆在冲突区发生碰撞。一般情况下,如果前后车来自同一方向(如车辆 D 和 E),那么这 2 辆车之间可以保持较小的安全车头时距通过冲突区;而如果前后车来自不同方向(车辆 A 和 D),那么这 2 辆车之间需要保持较大的安全车头时距来消解冲突区内部的横向冲突,因此,可以给出有关车辆车头时距的安全约束,即

$$h_{D'E'}, h_{K'L'} \geq \Delta_{t,1} \quad (4)$$

$$h_{AD'}, h_{E'B}, h_{BK'}, h_{L'C} \geq \Delta_{t,2} \quad (5)$$

$$\Delta_{t,1} < \Delta_{t,2} \quad (6)$$

式中: $\Delta_{t,1}$ 为前后车来自同一车道时的最小安全车头时距; $\Delta_{t,2}$ 为前后车来自不同车道时的最小安全车头时距; $h_{D'E'}$ 、 $h_{K'L'}$ 、 $h_{AD'}$ 、 $h_{E'B}$ 、 $h_{BK'}$ 、 $h_{L'C}$ 分别为车辆 D'与车辆 E'、车辆 K'与车辆 L'、车辆 A 与车辆 D'、车辆 E'与车辆 B、车辆 B 与车辆 K'、车辆 L'与车辆 C 之间的车头时距。

基于上述分析,路口节点内的车辆可按上述算法安全通过冲突区。

在此基础上,依据 2.2.3 节构建的协同决策机制,路口节点可定期给上游路段节点提供期望车头时距 h_d 。针对图 5 中车辆 F、G、H 来说,它们需要获得路口虚拟车队中与其处于同一车道车辆之间的平均车头时距(即虚拟车队中车辆 A、B 和 C 的平均车头时距 \bar{h})并将该值作为上游路段节点中车辆的期望车头时距,即

$$\bar{h} = \frac{h_{AB} + h_{BC} + \dots}{N-1} \quad (7)$$

$$h_d \approx \bar{h} \quad (8)$$

式中: N 为虚拟车队中与车辆 F、G、H 处于同一车道的车辆数,图 5 中 $N=3$; h_{AB} 和 h_{BC} 分别为车辆 A 与车辆 B、车辆 B 与车辆 C 之间的车头时距。

路段节点中的车辆按此期望值行驶至路口区域后,稍做调整即可满足冲突区通行要求,避免了频繁、大幅度地调整车辆的控制输入,提升了车辆的行驶稳定性,也降低了冲突区对车流连续性的影响。

此外,如果下游路段节点发生异常情况,比如车流平均车头时距很小(如图 5 中的车辆 I 和 J 的车头时距 h_{ij}),上游路口在为车辆分配路权时,需要充

分考虑下游路段的交通状态,避免加重下游的拥堵。本文重点考虑路口节点和上游路段节点之间的协同决策机制。

4 仿真分析

以图 5 所示场景为例,重点分析车辆时空轨迹的安全性、稳定性以及车辆燃油消耗指标。图 5 场景中,路口节点 2 个方向的上游路段处将按一定的车辆到达率生成车辆,向冲突区驶去。各方向车辆先后通过上游路段区域和路口区域,最终驶向下游路段区域。仿真试验中,路段长度设置为 200 m,路口控制区长度为 200 m。车辆几何尺寸及动力学特性参数设置如下:车辆长度为 5 m, $v_{\max}=15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, $v_{\min}=0$, $a_{\max}=3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$, $b_{\max}=5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$, $\rho=0.1 \text{ s}$ 。为了充分验证本文所提模型在不同场景下的有效性,根据交通需求在仿真中设置了 3 类场景。在各场景下随机设置目标车头时距等参数,以验证提出的方法在各种参数设置下的相关性能。

场景 1:车辆到达率分别为 900、1 800 $\text{veh} \cdot \text{h}^{-1}$;启动协同决策机制之前路段车辆的目标车头时距为 1 s,车辆在冲突区时 $\Delta_{t,1}=1.0 \text{ s}$, $\Delta_{t,2}=1.5 \text{ s}$ 。

场景 2:车辆到达率分别为 720、1 440 $\text{veh} \cdot \text{h}^{-1}$;启动协同决策机制之前路段车辆的目标车头时距为 1.5 s,车辆在冲突区时 $\Delta_{t,1}=1.5 \text{ s}$, $\Delta_{t,2}=2.0 \text{ s}$ 。

场景 3:车辆到达率分别为 600、1 200 $\text{veh} \cdot \text{h}^{-1}$;启动协同决策机制之前路段车辆的目标车头时距为 1 s,车辆在冲突区时 $\Delta_{t,1}=2.0 \text{ s}$, $\Delta_{t,2}=3.0 \text{ s}$ 。

为了突出本文协同决策机制的有效性,在仿真中引入一种对比方法,即纯分布式算法^[25]。该方法在按路网分解之后不采用 2.2 节中提出的协同决策机制,即路段和路口节点独立决策,相互之间不存在协作机制。

4.1 车辆行驶时空轨迹

针对上述 3 种场景,分别仿真 200 s 连续的交通过程,依据车辆的时空轨迹定性、直观地分析本文方法与对比方法在车辆行驶安全性和稳定性方面的差异。不同场景、不同方法下的车辆时空轨迹如图 6 所示,其中 0 位置表示冲突区入口, $-400 \sim 0 \text{ m}$ 的轨迹描述了车道 1 上各车向冲突区行驶的过程; $0 \sim 400 \text{ m}$ 的轨迹表示车道 2 上各车向冲突区行驶的过程。由图 6 可知:在不同场景中采用对比方法时,路口车辆和路段车辆之间不存在协同决策机制,车辆在进入路口控制区域(距冲突区入口 200、 -200 m)时,车辆的运动轨迹发生较大波动,这是

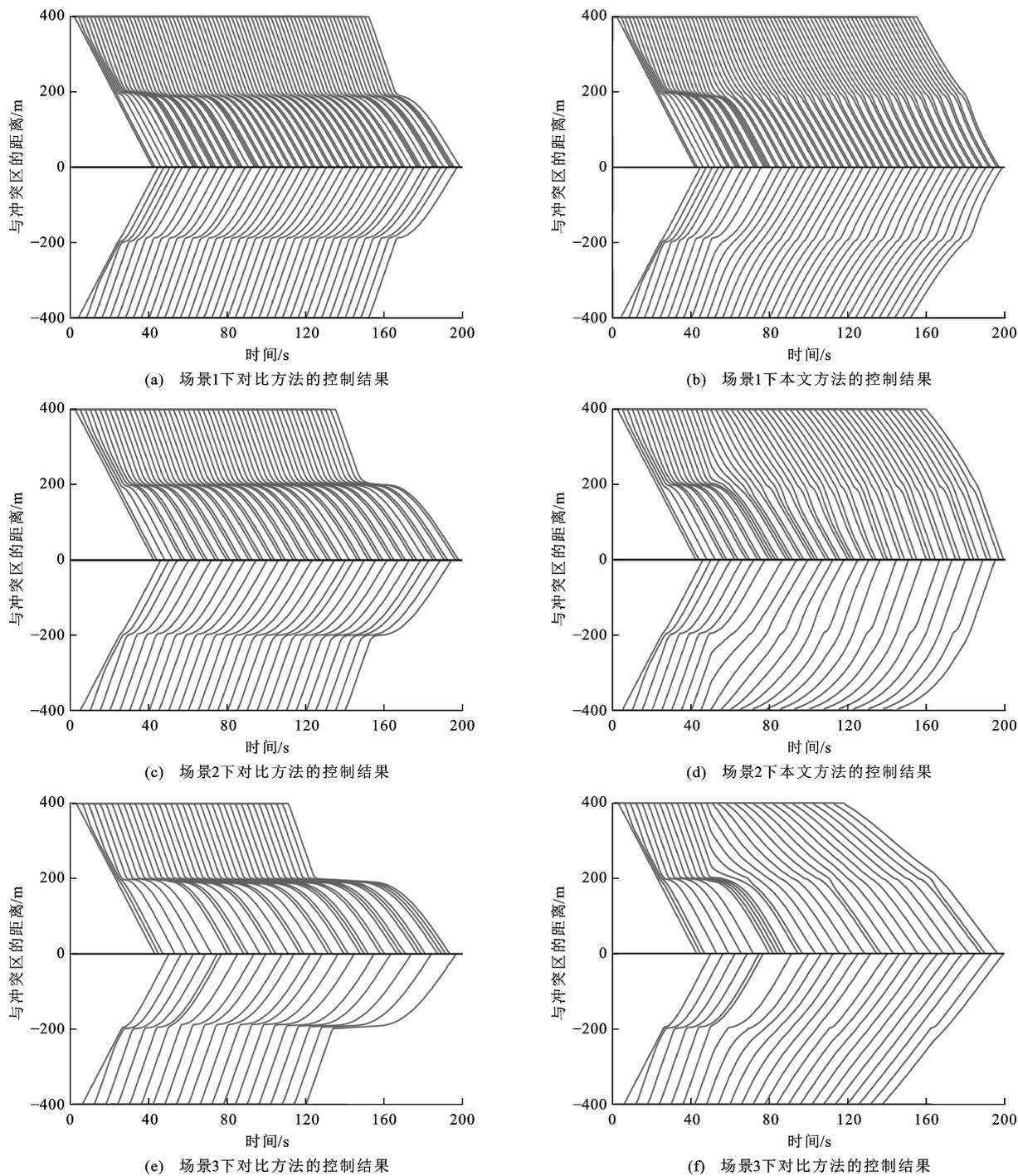


图 6 不同方法在不同场景下的车辆时空轨迹对比

Fig. 6 Comparison of vehicle space-time trajectories of different methods in different scenarios

因为各车在进入路口控制区后不仅需要考虑同车道前车的运动状态对自身的影响,还需要考虑其他方向车辆对其轨迹的影响,以避免在冲突区发生横向碰撞,造成车辆在从路段区域向路口区域过渡的过程中,控制输入发生了较大变化,对车辆行驶的稳定性的影响产生了很大的负面影响;车辆在进入路口控制区时均发生了急刹车动作,造成此处交通拥堵,车车间距缩短,很容易发生追尾事故,对车辆行驶安全性也造

成很大影响。在不同场景中采用本文方法时,假设系统在 50 s 时启动协同决策机制,即 50 s 之前的控制策略与对比方法相同,50 s 之后采用本文方法,系统时间在 50 s 之前时,车辆的运动轨迹与对比方法下的运动轨迹趋势相同;系统时间在 50 s 之后时,车辆的时空轨迹得到了明显改善,采用协同决策机制后,车辆在从路段区域向路口区域过渡时并没有发生明显的控制输入变化,只是对轨迹做了微小调

整,车辆时空轨迹更加平稳、连续,有效提升了车辆行驶稳定性;此外,采用协同决策机制之后,整个运动过程中车辆之间的安全间距相对稳定,不存在急剧缩短的情况,这也说明了本文方法有效提升了车辆的行驶安全性。

总之,从仿真结果可以看出,本文方法有效消减了路网中的冲突区对车辆行驶稳定性和安全性的影响,将城市路网中的间断流转换成了近似连续流。

4.2 车辆平均燃油消耗

为了进一步验证本文方法在交通控制上的优势,定量对比分析车辆燃油消耗指标,采用 Ding 等^[29-30]提出的多项式模型来统计车辆燃油消耗,即

$$F_i = \int_{t_s}^{t_e} f_{v,i}(t) dt \quad (9)$$

$$f_{v,i}(t) = f_{c,i}(t) + f_{a,i}(t) \quad (10)$$

$$f_{c,i}(t) = b_0 + b_1 v_i(t) + b_2 v_i^2(t) + b_3 v_i^3(t) \quad (11)$$

$$f_{a,i}(t) = a(t)[c_0 + c_1 v_i(t) + c_2 v_i^2(t)] \quad (12)$$

式中: F_i 为车辆 i 通过图 5 所示场景消耗的燃油; t_s 和 t_e 分别为车辆进入和离开场景的时间; $f_{v,i}(t)$ 为车辆 i 在时刻 t 的燃油消耗; $f_{c,i}(t)$ 为车辆 i 以车速 $v_i(t)$ 匀速行驶时每秒的燃油消耗; $f_{a,i}(t)$ 为车辆 i 由于正加速度引起的额外燃油消耗,当车辆的加速度 $a(t) \leq 0$,汽车引擎会依靠车辆的动能旋转,这种情况下, $f_{a,i}(t) = 0$; $b_0 \sim b_3$ 、 $c_0 \sim c_2$ 均为系数。

参考文献[30]中的参数设置,式(11)、(12)中的系数设置如下: $b_0 = 0.1569$, $b_1 = 2.45 \times 10^{-2}$, $b_2 = 7.415 \times 10^{-4}$, $b_3 = 5.975 \times 10^{-5}$, $c_0 = 7.224 \times 10^{-2}$, $c_1 = 9.681 \times 10^{-2}$, $c_2 = 1.075 \times 10^{-3}$ 。

统计不同场景下采用不同控制方法的车辆平均燃油消耗,如图 7 所示,可以看出:本文方法在各种场景下均可降低车辆的平均燃油消耗,在给定的仿真条件下可使车辆燃油消耗最大降低 14%。

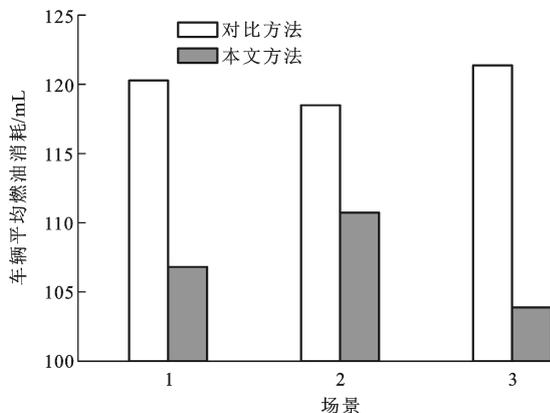


图 7 平均燃油消耗对比

Fig. 7 Comparison of average fuel consumptions

5 结 语

(1)提出的路网分解模型将大规模路网场景下的车辆群体协同决策问题分解成若干个子问题,对多车运动轨迹进行了解耦,并有效降低了大规模场景下车辆群体协同决策问题的建模和求解难度。

(2)针对每个子问题设计了路段-路口协同决策机制,保证了路口节点和路段节点内车辆之间的协作运行,使得车辆在从路段向路口过渡时可更加平稳和安全。

(3)将路口和路段上车辆协同决策的控制参数统一为车头时距,便于实现路口和路段之间的协同,也提升了模型的普适性。

(4)本文提出的方法仅考虑了自动驾驶汽车,后续将进一步拓展至混合交通场景,实现自动驾驶汽车和人类驾驶汽车之间的协同决策。

参 考 文 献 :

References :

- [1] 李 克 强, 戴 一 凡, 李 升 波, 等. 智能网联汽车(ICV)技术的发展现状及趋势[J]. 汽车安全与节能学报, 2017, 8(1): 1-14.
LI Ke-qiang, DAI Yi-fan, LI Sheng-bo, et al. State-of-the-art and technical trends of intelligent and connected vehicles[J]. Journal of Automotive Safety and Energy, 2017, 8(1): 1-14. (in Chinese)
- [2] 张 毅, 姚 丹 亚, 李 力, 等. 智能车路协同系统关键技术与应用[J]. 交通运输系统工程与信息, 2021, 21(5): 40-51.
ZHANG Yi, YAO Dan-ya, LI Li, et al. Technologies and applications for intelligent vehicle-infrastructure cooperation systems[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2021, 21(5): 40-51. (in Chinese)
- [3] MAHBUB A M I, MALIKOPOULOS A A. Conditions to provable system-wide optimal coordination of connected and automated vehicles[J]. Automatica, 2021, 131: 109751.
- [4] LI Li, WANG Fei-yue. Cooperative driving at blind crossings using intervehicle communication[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2006, 55(6): 1712-1724.
- [5] FENG Shuo, ZHANG Yi, LI S E, et al. String stability for vehicular platoon control: definitions and analysis methods[J]. Annual Reviews in Control, 2019, 47: 81-97.
- [6] GONG Si-yuan, SHEN Jing-lai, DU Li-li. Constrained optimization and distributed computation based car following control of a connected and autonomous vehicle platoon[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2016, 94: 314-334.
- [7] CUI Lian, CHEN Zheng, WANG A, et al. Development of a robust cooperative adaptive cruise control with dynamic topology[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2022, 23(5): 4279-4290.

- [8] WON M. L-platooning: a protocol for managing a long platoon with DSRC[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2022, 23(6): 5777-5790.
- [9] DRESNER K, STONE P. Multiagent traffic management: a reservation-based intersection control mechanism[C]//*IEEE. Proceedings of the Third International Joint Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems*. New York: IEEE, 2004: 530-537.
- [10] DRESNER K, STONE P. A multiagent approach to autonomous intersection management[J]. *Journal of Artificial Intelligence Research*, 2008, 31: 591-656.
- [11] LI Li, WEN Ding, YAO Dan-ya. A survey of traffic control with vehicular communications[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2014, 15(1): 425-432.
- [12] MENG Yue, LI Li, WANG Fei-yue, et al. Analysis of cooperative driving strategies for nonsignalized intersections[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2018, 67(4): 2900-2911.
- [13] XU Biao, LI S E, BIAN You-gang, et al. Distributed conflict-free cooperation for multiple connected vehicles at unsignalized intersections[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2018, 93: 322-334.
- [14] PEI Hua-xin, FENG Shuo, ZHANG Yi, et al. A cooperative driving strategy for merging at on-ramps based on dynamic programming[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2019, 68(12): 11646-11656.
- [15] PEI Hua-xin, ZHANG Yu-xiao, ZHANG Yi, et al. Optimal cooperative driving at signal-free intersections with polynomial-time complexity[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2021, DOI: 10.1109/TITS.2021.3118592.
- [16] ZHANG Y J, MALIKOPOULOS A A, CASSANDRAS C G. Optimal control and coordination of connected and automated vehicles at urban traffic intersections[C]//*IEEE. 2016 American Control Conference (ACC)*. New York: IEEE, 2016: 6227-6232.
- [17] PEI Hua-xin, ZHANG Jia-wei, ZHANG Yi, et al. Fault-tolerant cooperative driving at signal-free intersections[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, 2022, DOI: 10.1109/TIV.2022.3159088.
- [18] LI Li, WANG Fei-yue. Cooperative driving at adjacent blind intersections[C]//*IEEE. 2005 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics*. New York: IEEE, 2005: 847-852.
- [19] ZHANG Jia-wei, PEI Hua-xin, BAN Xue-gang, et al. Analysis of cooperative driving strategies at road network level with macroscopic fundamental diagram[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2022, 135: 103503.
- [20] WANG Yun-peng, CAI Pin-long, LU Guang-quan. Cooperative autonomous traffic organization method for connected automated vehicles in multi-intersection road networks[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2020, 111: 458-476.
- [21] MAHBUB A M I, MALIKOPOULOS A A, ZHAO Liu-hui. Decentralized optimal coordination of connected and automated vehicles for multiple traffic scenarios[J]. *Automatica*, 2020, 117: 108958.
- [22] ASHTIANI F, FAYAZI S A, VAHIDI A. Multi-intersection traffic management for autonomous vehicles via distributed mixed integer linear programming[C]//*IEEE. 2018 Annual American Control Conference*. New York: IEEE, 2018: 6341-6346.
- [23] CHALAKI B, MALIKOPOULOS A A. An optimal coordination framework for connected and automated vehicles in two interconnected intersections[C]//*IEEE. 2019 IEEE Conference on Control Technology and Applications*. New York: IEEE, 2019: 888-893.
- [24] XU Qing, CAI Meng-chi, LI Ke-qiang, et al. Coordinated formation control for intelligent and connected vehicles in multiple traffic scenarios [J]. *IET Intelligent Transport Systems*, 2021, 15(1): 159-173.
- [25] PEI Hua-xin, ZHANG Yi, TAO Qing-hua, et al. Distributed cooperative driving in multi-intersection road networks[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2021, 70(6): 5390-5403.
- [26] YU Hai-yang, JIANG Rui, HE Zheng-bing, et al. Automated vehicle-involved traffic flow studies: a survey of assumptions, models, speculations, and perspectives[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2021, 127: 103101.
- [27] UNO A, SAKAGUCHI T, TSUGAWA S. A merging control algorithm based on inter-vehicle communication [C] // *IEEE. Proceedings of the IEEE/IEEJ/JSAI International Conference on Intelligent Transportation Systems*. New York: IEEE, 1999: 783-787.
- [28] SAKAGUCHI T, UNO A, KATO S, et al. Cooperative driving of automated vehicles with inter-vehicle communications[C]//*IEEE. Proceedings of the IEEE Intelligent Vehicles Symposium*. New York: IEEE, 2000: 516-521.
- [29] DING Ji-shi-yu, LI Li, PENG H, et al. A rule-based cooperative merging strategy for connected and automated vehicles[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2020, 21(8): 3436-3446.
- [30] KAMAL M A S, MUKAI M, MURATA J, et al. Ecological vehicle control on roads with up-down slopes [J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2011, 12(3): 783-794.