

文章编号:1671-1637(2020)03-0217-08

面向智慧高速的合流区协作车辆冲突解脱协调方法

杨敏¹, 王立超¹, 张健¹, 冉斌¹, 吴静娴²

(1. 东南大学 交通学院, 江苏 南京 210096; 2. 上海理工大学 管理学院, 上海 200093)

摘要:根据网联自动驾驶车辆接近合流区的全过程特征,设定智慧高速合流车辆行驶的协调控制流程;针对高速公路合流区冲突风险问题,考虑车辆时间需求强度、车辆类型和行驶意图等因素,提出了基于合作博弈理论的高速公路合流区网联自动驾驶车辆冲突解脱协调方法;利用 MATLAB 软件对不同条件下的车辆通过合流区进行了仿真验证。仿真结果表明:智慧高速合流区车辆行驶协调规则能够实现网联自动驾驶车辆的通过请求协调,在合作博弈作用下能够进一步实现冲突系统虚拟支付成本最低的车辆调整决策;合流区车辆系统虚拟风险程度随着速度的降低而降低;当严格执行协调决策时,网联自动驾驶车辆在合流区通过过程中具有更高的稳定性;当潜在冲突点长度在一定范围内,两网联自动驾驶车辆行驶速度相同时的合作博弈效果优于车辆行驶速度不同时的合作博弈效果;利用该协调方法将冲突解脱过程的虚拟支付成本降低了 9%~14%,大大提高了网联自动驾驶车辆合流区通过过程的安全性。

关键词:交通信息;智慧公路;车路协同;合作博弈;合流区;协调决策

中图分类号:U491.255 **文献标志码:**A **DOI:**10.19818/j.cnki.1671-1637.2020.03.020

Collaborative method of vehicle conflict resolution in merging area for intelligent expressway

YANG Min¹, WANG Li-chao¹, ZHANG Jian¹, RAN Bin¹, WU Jing-xian²

(1. School of Transportation, Southeast University, Nanjing 210096, Jiangsu, China;

2. Business School, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: According to the characteristics of the entire process of connected autonomous vehicles approaching the merging area, the coordination control process of the vehicles driving in the intelligent expressway merging area was set. Aiming at solving the problem of conflict risk in expressway merging area, the factors such as vehicle time demand intensity, vehicle type, and driving intention were considered, and the conflict resolution coordination method of connected autonomous vehicles in expressway merging area was proposed based on cooperative game theory. The vehicle passing merging area under different conditions was simulated and verified by using MATLAB. Simulation result shows that coordination rules of the vehicles driving in the intelligent expressway merging area can realize the coordination of connected autonomous vehicles' passing request. Under the action of cooperative game, the vehicle adjustment decision

收稿日期:2019-12-04

基金项目:国家重点研发计划项目(2018YFB1600900);国家自然科学基金项目(51925801);中央高校基本科研业务费专项资金项目(2242019R40046)

作者简介:杨敏(1981-),男,安徽池州人,东南大学教授,工学博士,从事智慧交通车路协同研究。

通讯作者:张健(1984-),男,安徽寿县人,东南大学副教授,工学博士。

引用格式:杨敏,王立超,张健,等.面向智慧高速的合流区协作车辆冲突解脱协调方法[J].交通运输工程学报,2020,20(3):217-224.

Citation: YANG Min, WANG Li-chao, ZHANG Jian, et al. Collaborative method of vehicle conflict resolution in merging area for intelligent expressway[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2020, 20(3): 217-224.

with the lowest virtual payment cost in the conflict system can be further realized. The degree of vehicle system virtual risk in merging area decreases with the decrease of speed. When the coordination decision is strictly implemented, the connected autonomous vehicles have higher stability in the process of passing merging area. When the length of potential conflict point is within a certain range, the cooperative game effect of two connected autonomous vehicles with the same speed is better than the effect of vehicles with different speeds. The cooperative method reduces the virtual payment cost of the conflict resolution process by 9%-14%, and greatly improves the safety of the process of passing merging area of connected autonomous vehicles. 2 tabs, 10 figs, 30 refs.

Key words: traffic information; intelligent expressway; vehicle-road coordination; cooperative game; merging area; coordinated decision

Author resumes: YANG Min(1981-), male, professor, PhD, yangmin@seu.edu.cn; ZHANG Jian(1984-), male, associate professor, PhD, Jianzhang@seu.edu.cn.

Foundation items: National Key Research and Development Project of China (2018YFB1600900, 2016YFB0100906); National Natural Science Foundation of China(51925801); Special Foundation for Basic Scientific Research of Central Colleges of China (2242019R40046)

0 引 言

智慧公路是一种基于实时交通信息来改变交通态势的交互式智能系统,主要依靠部署在人、车、路、环境中的传感器和执行器等信息交互处理组件,实现智慧设施、智慧决策、智慧管控、智慧服务等多种功能,是大数据时代的高速公路新形态。它基于智慧理念,运用物联网、云计算等先进技术,通过对高速公路核心系统各项关键信息的感知、分析、挖掘,响应高速公路使用者和管理者的各类需求,从而实现高速公路的健康、和谐、可持续发展^[1-2]。

智慧公路诞生于 20 世纪 60 年代美国提出的自动公路系统,其目的是为了未来实现未来道路交通系统的安全、高效、环保和舒适。多年来智慧公路的研究积累对于公路智慧化的发展和推进做出了重要贡献,在新一轮人工智能发展背景下,智慧公路的发展已从早期概念设计、通信技术、智能车辆-公路系统^[3-5]转向了车路协同及自动驾驶等方面,利用仿真模拟、网络设施、多智能体、自适应巡航等先进技术手段^[6-9],其目的是提升公路通行能力,改善交通运行状态^[10],减少交通拥堵和交通事故,从而实现道路交通安全性和灵活性,提高公路交通流稳定性和整体性能^[11-13]。智慧公路已成为当前智能交通系统研究的热点,然而已有研究技术中对于合流区自动驾驶车辆解脱过程尚存较多不足,并且会导致一定的安全隐患,因此,建立合流区车辆通过交互规则与逻辑,协调合流区车辆通过调节方式,对于提高合

流区车辆通过的安全性和智能性具有重要意义。

目前,关于智慧高速公路入口匝道自动驾驶车辆合流方面的研究以意图估计、在线协调、优先级控制等方面为主,以改善自动驾驶车辆在通过合流区过程中的效率、经济及均匀性等问题。其中,Wei 等^[14]针对自动驾驶车辆通过过程的支付成本问题,应用意图估计方法,提取环境主体意图概率,应用基于成本函数的评估方法计算每个场景的成本,并选择与最低成本对应的决策实现合流区自动驾驶车辆的安全通过;Rios-Torres 等^[15]通过允许合流区在线协调车辆通过顺序,实现连续通过的交通流,协调解决自动驾驶车辆在高速公路合流区的通过问题;Qian 等^[16]基于优先级协调框架,研究了优先级分配问题和固定优先级下的车辆控制问题,考虑效率、舒适性和燃油经济性的要求,保证了自动驾驶车辆的平稳运行;Wang 等^[17]根据合流过程中自动驾驶车辆运行特点,设计了基于车联网的协同驾驶算法,实现了无碰撞的匝道合流方法;Letter 等^[18]开发了模拟算法并实现高速公路匝道合流区车辆的合并,在不拥挤的情况下,该算法能够减少行程时间,提高平均行程速度,提高通行能力,但是一旦达到通行能力饱和水平,合流区上游的匝道和主线路段上都产生排队等问题;Nie 等^[19]提出了分散式协同变道决策框架对交通稳定性、效率、均匀性和安全性的影响,并且对能够影响行车稳定性、均匀性和安全性的指标进行了评价,确定了该框架的发展潜力;Wang 等^[20]将自动驾驶车辆变道问题定义为一个微分博弈,在战

略超车、合作合流和选择安全间距等因素的基础上对行驶行为进行了预测,最后生成了最佳车道变换决策;Englund等^[21]给出了协同排队合并和协同交叉口超车2种试验场景,并设计了交互式测试工具,实现了自动驾驶车辆在不同场景下的协同交互决策;Wang等^[22]提出了一种V2I环境下的新型变速限制控制系统,通过构建由多个流量控制代理组成的控制系统,各代理通过分布式强化学习方法进行协作,以提高高速公路的交通通行性和安全性。

然而,上述研究在合流区车辆仿真模拟和交通流影响分析时,为降低研究系统的复杂性,一般假设试验过程中的车型固定单一,或是将“智慧的路”与“智能的车”相分离,没有考虑不同类型车辆(包括任务)对于智慧车路系统的影响以及车路协同的问题。本文针对现有研究不足,以高速公路匝道合流区为研究对象,考虑车辆在合流区潜在冲突点的时间需求强度、车辆类型、车辆自主行驶意图等个性化特点,构建车路协同的高速公路匝道合流区智慧协调控制框架,建立基于合作博弈理论的全请求协调方法,为高速公路匝道合流区智能化交通安全提升和智慧公路与车路协同发展提供技术支持。

1 基于智慧高速的合流区协作车辆冲突避险方法

在传统高速公路上非自动驾驶车辆仅靠驾驶人的驾驶经验和驾驶偏好实现合流区行驶过渡。传统的高速公路与车辆难以为驾驶人提供任何决策帮助,也不能实现行驶过程中的车辆交互,每个行驶的车辆都是独立的个体,这使得车辆在行驶过程中具有高度的随机性与离散性,在通过合流区过程中也是一样,从而大大提高了合流区内车辆冲突风险,因此,本文设计了一种以智慧高速为基础的合流区协作车辆冲突避险方法,实现高速公路的智慧主动权,并以网联自动驾驶车辆为基础,实现车辆与车辆、车辆与道路间的实时互联。

1.1 智慧高速合流区协调控制设计框架

基于智慧高速的合流区协调控制设计组成主要包括控制区域、协调中心和合流区域3个部分,如图1所示。网联自动驾驶车辆通过合流区的全过程主要包括:车辆*i*在距控制区域 S_i 处时,即刻向合流区发送通过请求;协调中心考虑合流区内车辆冲突风险,协调合流区所有通过请求,确定并反馈各车辆的行驶状态调整计划;车辆接收调整计划后,执行计划通过合流区。网联自动驾驶车辆通过合流区

时,要求车辆在进入控制区域前仅能与合流区通信一次,且车辆一旦确定了调节方式,将不再发生改变。其中,协调中心处理合流区内所有车辆通过请求确定车辆行驶状态是智慧高速公路匝道合流区车辆冲突避险设计的关键。协调控制流程见图2。

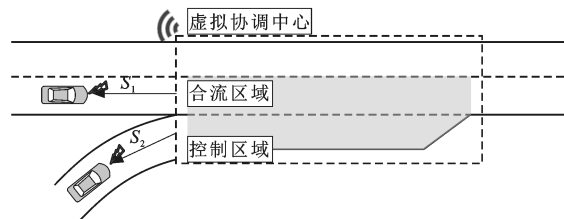


图1 智慧高速合流区组成

Fig. 1 Composition of intelligent expressway merging area

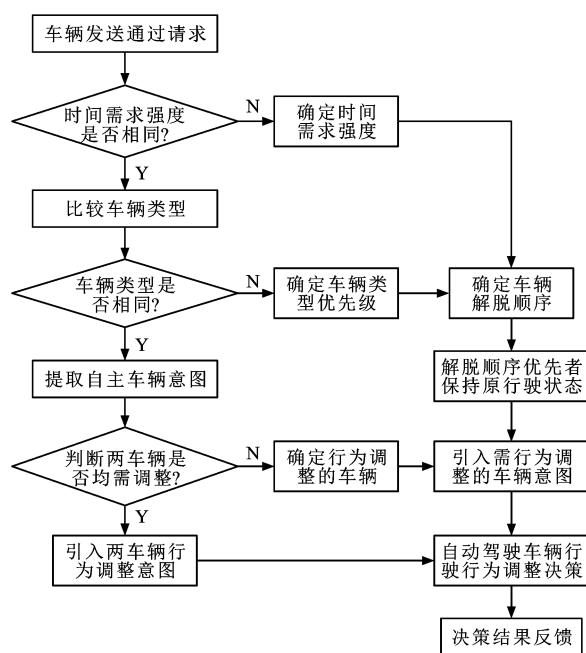


图2 协调控制流程

Fig. 2 Coordination control process

网联自动驾驶车辆*i*的时间需求强度表示为 τ_i ,并且有

$$\frac{1}{\tau_i} = \frac{l_i}{v_i} \quad (1)$$

式中: l_i 为车辆*i*以控制区域边界为起点距离潜在冲突点的长度; v_i 为车辆*i*的行驶速度。

根据文献[23]、[24]中对网联自动驾驶车辆反应时间、信息传递速率等参数的已有研究,能够保证车辆安全的最短有效时间间隔为0.6 s,在此考虑到车辆行驶过程中的信息传递和反应过程,以0.6 s为参考,对网联自动驾驶车辆的时间需求强度的比较关系进一步描述。

当 $\left| \frac{1}{\tau_1} - \frac{1}{\tau_2} \right| \leq 0.6$ 时,定义2辆网联自动驾驶

车辆时间需求强度相同;当 $\frac{1}{\tau_1} - \frac{1}{\tau_2} < -0.6$ 时,即

$\tau_1 > \tau_2$, 定义网联自动驾驶车辆 1 的时间需求强度大于网联自动驾驶车辆 2 的时间需求强度, 此时根据协调规则确定网联自动驾驶车辆 1 的排序先于网联自动驾驶车辆 2; 当 $\frac{1}{\tau_1} - \frac{1}{\tau_2} > 0.6$ 时, 即 $\tau_1 < \tau_2$ 时, 说明网联自动驾驶车辆 1 的时间需求强度小于网联自动驾驶车辆 2 的时间需求强度, 此时根据协调规则确定网联自动驾驶车辆 2 的排序先于网联自动驾驶车辆 1。

网联自动驾驶车辆的调整行为假定为速度调节和车道调节 2 种模式, 初始概率相等且相加为 1。当车辆处于合流区潜在冲突环境条件下, 上述两调节方式中会随机(利用随机函数实现)出现一种调节行为的概率削减为原来的 $\frac{1}{2}$, 为了满足概率值加和为 1 的初始条件, 剩余调节方式的概率自然发生扩大改变。

1.2 基于合作博弈的协作车辆意图协调过程

合作博弈理论广泛用于解决最大化某方利益或整体利益的实际问题研究中心, 其求解方法主要包括占优解法和以夏普利值为代表的估值解法, 在实际应用中, 占优解法由于其本身的缺陷使用较少。而夏普利值由于其唯一性、计算方法的规范性、分配方式的合理性等原因, 被广泛应用^[25-27]。

选取夏普利值^[27]作为本次合作博弈的主要理论过程, 其总代价函数的表达式为

$$c = (\alpha_1 x_1 + \alpha_2 x_2 + \cdots + \alpha_i x_i + \cdots + \alpha_n x_n) \cdot [1 + e^{-0.2(x_1 + x_2 + \cdots + \alpha_i x_i + \cdots + x_n)}] \quad (2)$$

式中: c 为系统总虚拟支付成本; α_i 为第 i 个参与者的支付权重; x_i 为第 i 个参与者的支付代价; $[1 + e^{-0.2(x_1 + x_2 + \cdots + x_n)}]$ 为夏普利值的合作博弈因子。

在所有参与者的排列集合为均匀分布的情况下, 夏普利值把期望的边际贡献分配给博弈中的每一个参与者, 即

$$d_i = \alpha_i x_i (1 + e^{-0.2x_i}) - \frac{c}{i} \quad (3)$$

式中: d_i 为第 i 个参与者的决策联盟贡献值。

以合作博弈理论中夏普利模型为基础, 将网联自动驾驶车辆意图融入到虚拟支付成本总函数中作为各虚拟支付成本的支付系数, 利用车辆当前位置距离潜在冲突点的长度及各自行驶速度确定车辆进行行为调整时所需的虚拟支付成本。在虚拟支付成本总函数方程的基础上计算各决策联盟(决策联盟是指两车是否进行调整的全部集合)组合的虚拟支付总成本, 确定决策联盟最小虚拟支付成本并确定

其对应的调整方案。若车辆均需要行为调整, 协调中心将比较各车辆在该调整方案中的贡献程度, 令贡献程度较小的车辆优先确定调节方式, 另一车辆随之确定调节方式。若只需其中单个车辆进行行为调整, 则按照协调规则中的步骤进行即可。

根据车辆之间的位置关系及行驶速度, 车辆距离潜在冲突点的长度越大, 则车辆越安全, 车辆虚拟支付成本随着距离潜在冲突点长度的增大而降低; 车辆行驶速度越高则车辆靠近潜在冲突点所用的时间就越短, 车辆也就越容易发生安全隐患, 车辆虚拟支付成本随着行驶速度的增大而增大, 由此确定虚拟支付成本来源方程为

$$\begin{cases} x_i = \frac{k_1}{l_i} + k_2 v_i & i = 1, 2 \\ k_1 + k_2 = 1 \end{cases} \quad (4)$$

式中: k_1 为距离成本比例; k_2 为速度成本比例。

虚拟支付成本函数为

$$c_j = (ax_{1,j} + bx_{2,j})[1 + e^{-0.2(x_{1,j} + x_{2,j})}] \quad (5)$$

式中: c_j 为合作博弈条件下决策联盟 j 的虚拟支付成本; a, b 分别为决策联盟 j 下车辆 1、2 支付代价 $x_{1,j}, x_{2,j}$ 的支付系数。

由于两车可协调调整行为的无序组合排列共有 4 种, 在此拟定 $j=1$ 时, 两车均需要调整; $j=2$ 时, 车辆 1 需要调整, 车辆 2 不需要调整; $j=3$ 时, 车辆 2 需要调整, 车辆 1 不需要调整; $j=4$ 时, 两车均不调整, 此时两车将会发生碰撞风险, 于是虚拟支付成本为无穷大, 在实际运行过程中此方案将直接排除。 a, b 即两车调整意图的大小, 若此车辆希望进行行为调整则为 1, 若此车辆不希望进行行为调整 b 为一个大于 1 的数; 合作博弈因子则表示两车在被协调过程中的有效合作程度。

表 1 决策联盟虚拟支付成本

Tab. 1 Virtual payment cost of decision alliances

决策联盟	车辆 2 调整	车辆 2 不调整
车辆 1 调整	(x_1, x_2)	$(x_1, 0)$
车辆 1 不调整	$(0, x_2)$	(∞, ∞)

决策联盟最小虚拟支付成本函数为

$$c_{\min} = \min(c_j) \quad j = 1, 2, 3, 4 \quad (6)$$

式中: c_{\min} 为 c_j 中所得的最小值。

最小虚拟支付成本对应决策联盟调整方案中各成员贡献值的算法为

$$\lambda_j = \min\left\{c_{j1}^* - \frac{\Delta c}{2}, c_{j2}^* - \frac{\Delta c}{2}\right\} \quad (7)$$

式中: λ_j 为决策联盟 j 中较小贡献值所对应的参与

成员; c_{j1}^* 、 c_{j2}^* 分别为非合作博弈^[28-29]条件下,决策联盟 j 最小虚拟支付成本对应方案中车辆 1、2 需支付的总成本; Δc 为合作博弈条件下两车共同节省的虚拟支付成本。

c_{j1}^* 、 c_{j2}^* 及 Δc 具体计算方法为

$$c_{j1}^* = (ax_1)(1 + e^{-0.2x_1}) \quad (8)$$

$$c_{j2}^* = (bx_2)(1 + e^{-0.2x_2}) \quad (9)$$

$$\Delta c = c_{j1}^* + c_{j2}^* - c_{\min} \quad (10)$$

并且有

$$c_j^* = c_{j1}^* + c_{j2}^* \quad (11)$$

式中: c_j^* 为非合作博弈条件下决策联盟 j 所需支付的总成本。

网联自动驾驶车辆调整意图协调过程中两车行驶行为意图的进一步展开,其具体逻辑流程如图 3 所示。

2 案例分析

为了判断基于车辆合作博弈的智慧高速合流区设计对降低风险的有效性,对多组条件下合作博弈虚拟支付成本进行比较,由于虚拟支付成本来源中的相互距离及行驶速度均从安全角度考虑,虚拟支付成本可以看为系统虚拟风险成本,因此,将其用来衡量合流区协调系统的风险降低程度是合理的,最后在 MATLAB 仿真环境中实现两车常见合流区冲突状态下的合流区协调过程。

2.1 仿真场景描述

假设 2 辆网联自动驾驶车辆分别从主路车道和匝道即将通过同一合流区,并在合流区内存在一定的潜在冲突,网联自动驾驶车辆被协调为速度调整时,网联自动驾驶车辆将在原行驶车道基础上进行加速或者减速,网联自动驾驶车辆被协调为车道调整时,网联自动驾驶车辆将在原有行驶基础上从内侧车道向外侧车道变换或者从外侧车道向内侧车道变换。

本次仿真过程选择长途巴士、救援车辆及普通社会车辆作为研究对象,根据《中华人民共和国道路交通安全法》中道路通行规定,以上 3 种车辆的优先等级为救援车辆、长途巴士、普通社会车辆。

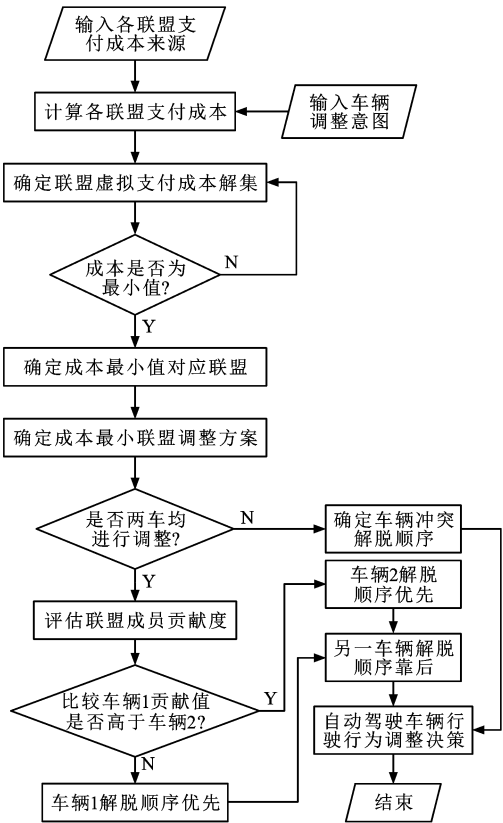


图 3 车辆调整意图协调过程

Fig. 3 Coordination process of vehicle adjustment intention

为了降低试验过程的复杂度,基于相同时间需求强度和相同车辆类型的网联自动驾驶车辆,直接对基于合作博弈全请求协调方法进行验证,为了消除 S_i 对试验结果的影响,在此将 S_i 设置为 100 m,从而给予协调中足够的协调时间。分别在 $v_1 = v_2$ 、 $l_1 = l_2$ 、 $v_1 \neq v_2$ 、 $l_1 = l_2$ 、 $v_1 = v_2$ 、 $l_1 \neq l_2$ 、 $v_1 \neq v_2$ 、 $l_1 \neq l_2$ 共 4 种场景下,对虚拟支付成本源方程中 k_1 、 k_2 进行相对变化分析,选取 $b=2,3$ 分析网联自动驾驶车辆不同程度调整意图协调结果对决策结果的影响,比较各行驶场景下两网联自动驾驶车辆经协调中心合作博弈虚拟支付成本与非合作博弈虚拟支付成本,计算各场景中网联自动驾驶车辆意图合作博弈较非合作博弈状态下的降低率,在 MATLAB 仿真软件中,对所提出的能够实现车辆合作博弈的智慧高速公路合流区进行实例测试。

表 2 四种场景下的参数

Tab. 2 Parameters of 4 scenarios

场景	主线车辆位置	S_i/m	$v_1/(\text{km} \cdot \text{h}^{-1})$	$v_2/(\text{km} \cdot \text{h}^{-1})$	l_1/m	l_2/m	a	b
1	内侧车道	100	60	60	15	15	1	2 或 3
2		100	60	40	15	15		
3	外侧车道	100	60	60	15	20		
4		100	60	40	15	20		

k_1 取值分别为 0.1、0.2、0.3、0.4、0.5、0.6、0.7、0.8、0.9, 车辆 1 为主线车辆, 车辆 2 为匝道车辆, k_1 与 k_2 的关系见式(4)。

2.2 仿真结果分析

图 4~7 为 4 种场景下网联自动驾驶车辆所需虚拟支付成本随 k_1 及 b 取值不同而发生的变化。从图 4~7 可以看出: 随着虚拟支付成本来源方程中 k_1 逐渐增大, 即 k_2 逐渐减小, 各场景下网联自动驾驶车辆意图经协调中心合作博弈后的虚拟支付成本均呈下降趋势, 由此可以看出虚拟支付成本变化趋势与 k_i 变化密切相关, k_i 在虚拟支付成本来源支付方程中被定义为网联自动驾驶车辆行驶速度权重, 两网联自动驾驶车辆距离潜在冲突点距离在一定范围内时, 车辆意图合作博弈虚拟支付成本受当前行驶速度影响程度较大, 即合流区车辆安全性受车辆行驶速度的影响程度较大, 并且合作博弈虚拟支付成本会随着虚拟支付成本来源方程中 k_1 的减小而减小, 即为合流区车辆系统虚拟风险会随着速度参数的减小而减小。

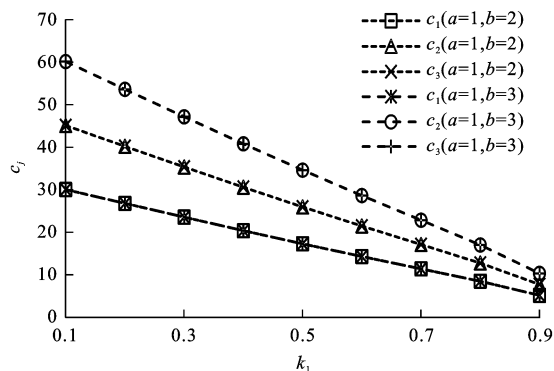


图 4 场景 1 中不同 b 下 c_j 随 k_1 变化曲线

Fig. 4 Change curves of c_j with k_1 under different b in scenario 1

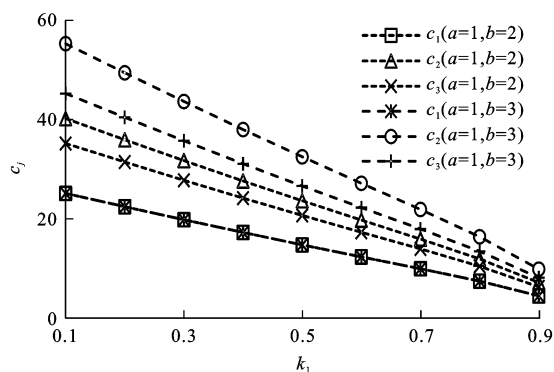


图 5 场景 2 中不同 b 下 c_j 随 k_1 变化曲线

Fig. 5 Change curves of c_j with k_1 under different b in scenario 2

根据图 4~7 可知: 无论 b 取何值, c_2 、 c_3 均大于

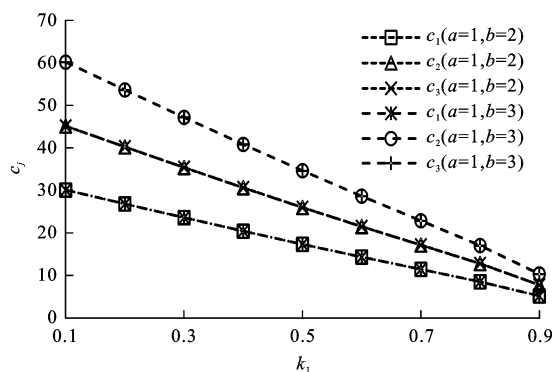


图 6 场景 3 中不同 b 下 c_j 随 k_1 变化曲线

Fig. 6 Change curves of c_j with k_1 under different b in scenario 3

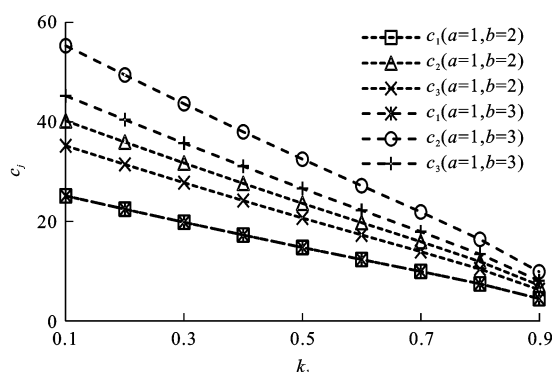


图 7 场景 4 中不同 b 下 c_j 随 k_1 变化曲线

Fig. 7 Change curves of c_j with k_1 under different b in scenario 4

c_1 ; 由于 c_1 计算过程中定义两网联自动驾驶车辆行为意图为均愿意进行行驶行为调整, 使得协调计算过程中的意图参数取值相同, 所以出现了 $b=2$ 和 $b=3$ 所对应的 c_1 相等的情况。由图 4 可知: 由于 c_2 、 c_3 的计算方式具有一定的轮转对称性, 且两网联自动驾驶车辆行驶速度及距离潜在冲突点的长度均相等, 使得 $b=3$ 条件下 c_2 与 c_3 相等。由图 5 可知: 由于合作博弈虚拟支付成本受行驶速度的影响程度较大, 使得两网联自动驾驶车辆行驶速度不同时 $b=2$ 时的 c_2 、 c_3 明显小于 $b=3$ 时的 c_2 、 c_3 。由图 6 可知: 由于合作博弈虚拟支付成本受距离潜在冲突点长度的影响程度较小, 使得两网联自动驾驶车辆距离潜在冲突点长度不同时 $b=2$ 时的 c_2 、 c_3 略小于 $b=3$ 时的 c_2 、 c_3 。由图 7 可知: 两网联自动驾驶车辆行驶速度及距离潜在冲突点的长度均不相等, 使得 $b=2$ 时的 c_2 、 c_3 明显小于 $b=3$ 时的 c_2 、 c_3 。

以上对比分析能够初步证明: 当网联自动驾驶车辆拒绝行驶行为调整的意图越强烈, 则网联自动驾驶车辆进行冲突解脱过程中所需要付出的总成本越高, 也就是说, 当系统中的网联自动驾驶车辆拒绝配合协

同中心协调决策结果时,合流区车辆通过系统的风险程度将会增加,这也与合流区常发性事故风险发生的原因相一致^[30],因此,协调中心的协调决策应该被各通过网联自动驾驶车辆严格执行,从而提高网联自动驾驶车辆在合流区通过过程中的稳定性。

图8~10为4种场景下 b 取不同值时网联自动驾驶车辆合作博弈虚拟支付成本 c_j ($j=1,2,3$)与非合作博弈虚拟支付成本 c_j^* ($j=1,2,3$)之间的比较,以及 c_j 较 c_j^* 的降低率,可以看出:4种场景下不同 b 时网联自动驾驶车辆 c_j 均小于 c_j^* ,且降低率分布在9%~14%,利用合作博弈的方法进行网联自动驾驶车辆意图协调能够降低两网联自动驾驶车辆冲突解脱虚拟支付成本;场景1、3合作博弈平均降低率相对较低,场景2、4合作博弈平均降低率相对较高,场景1、3中 $v_1=v_2$,场景2、4中 $v_1 \neq v_2$,结合前文中对 k_i 分析得出网联自动驾驶车辆 c_i 受行驶速度影响程度较大的结果,可以分析出两网联自动驾驶车辆距离潜在冲突点长度在一定范围内时,当网联自动驾驶车辆行驶速度相同时合作博弈效果要优于行驶速度不同时的合作博弈效果,即为在一定行车速度范围内,行驶速度相同时的安全性要高于行驶速度不同时的安全性。出现这种情况的原因是,两车速度相同时所给予的合流区车辆通过系统的调整空间较大,两车可能仅靠速度关系的调节便可达到协调控制的结果,从而大大降低了所需的虚拟支付成本,即提高了网联自动驾驶车辆系统通过过程的安全性。

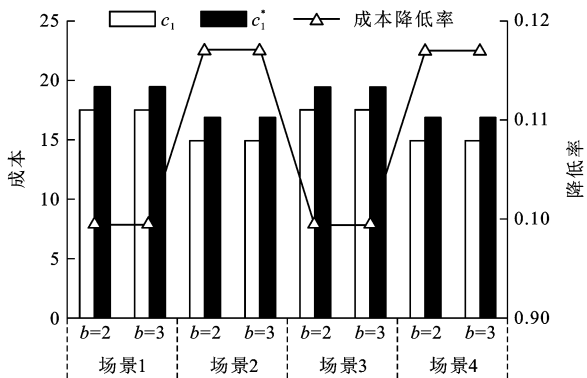


图8 各场景下 c_1 与 c_1^* 对比

Fig. 8 Comparison between c_1 and c_1^* in each scenario

3 结语

(1)分析了2辆网联自动驾驶车辆在不同试验场景、不同试验参数条件下,车辆行驶意图合作博弈的作用效果,验证了距离和速度与合作博弈效果之间的相关性,通过对参数的灵敏度分析提取了车辆

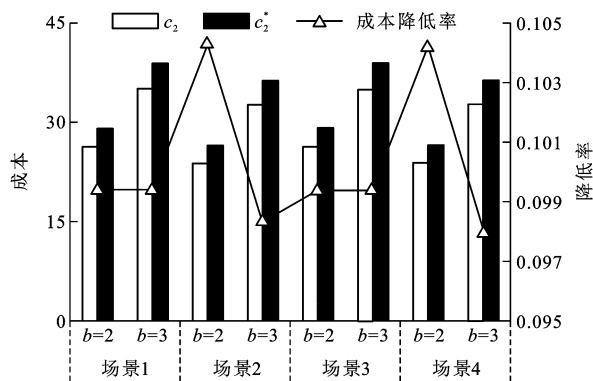


图9 各场景下 c_2 与 c_2^* 对比

Fig. 9 Comparison between c_2 and c_2^* in each scenario

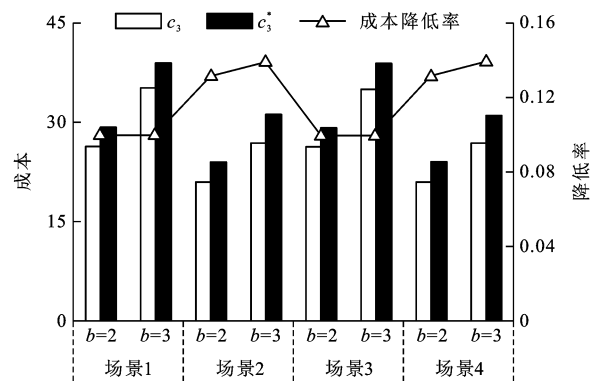


图10 各场景下 c_3 与 c_3^* 对比

Fig. 10 Comparison between c_3 and c_3^* in each scenario

行驶意图合作博弈过程所潜藏的规律。

(2)以4种试验场景对所提方法进行仿真验证,并实现与非合作博弈条件下的虚拟支付成本对比,结果表明,本文所提方法为本次研究的网联自动驾驶车辆冲突解脱过程降低虚拟支付成本9%~14%。

(3)本文主要从智慧高速的协调中心进行展开,网联自动驾驶车辆的应用仅作为已有条件而加入,并未过多考虑协调中心与网联自动驾驶车辆的通讯过程及网联自动驾驶车辆的自身功能条件,在下一步的研究中可将以上两方面的因素考虑在内,促进智慧车路系统的研究更加符合实际场景。

参考文献:

References:

- [1] FERNÁNDEZ-ISABEL A, FUENTES-FERNÁNDEZ R, MARTÍN DE DIEGO I. Modeling multi-agent systems to simulate sensor-based Smart Roads[J]. Simulation Modelling Practice and Theory, 2020, 99: 1-23.
- [2] SUN Li-jun, ZHAO Hong-duo, TU Hui-zhao, et al. The smart road: practice and concept[J]. Engineering, 2018, 4(4): 436-437.
- [3] RAO B S Y, VARAIYA P. Roadside intelligence for flow control in an intelligent vehicle and highway system[J].

- Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 1994, 2(1): 49-72.
- [4] ELLIOTT D, KEEN W, MIAO Lei. Recent advances in connected and automated vehicles[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition), 2019, 6(2): 109-131.
- [5] HEDRICK J K. Vehicle control issues in intelligent vehicle highway systems[J]. IFAC Proceedings Volumes, 1995, 28(1): 195-202.
- [6] FINOGEEV A, FINOGEEV A, FIONOVA L, et al. Intelligent monitoring system for smart road environment[J]. Journal of Industrial Information Integration, 2019, 15: 15-20.
- [7] MAHMASSANI H S. 50th anniversary invited article—autonomous vehicles and connected vehicle systems: flow and operations considerations[J]. Transportation Science, 2016, 50(4): 1140-1162.
- [8] NOWAKOWSKI C, O'CONNELL J, SHLADOVER S E, et al. Cooperative adaptive cruise control: driver acceptance of following gap settings less than one second[C]// Human Factors and Ergonomics Society. 54th Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting. Richmond: Human Factors and Ergonomics Society Inc., 2010: 2033-2037.
- [9] CHEN Dan-jue, AHN S, CHITTURI M, et al. Towards vehicle automation: roadway capacity formulation for traffic mixed with regular and automated vehicles[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2017, 100: 196-221.
- [10] XIE Yuan-chang, ZHANG Hui-xing, GARTNER N H, et al. Collaborative merging strategy for freeway ramp operations in a connected and autonomous vehicles environment[J]. Journal of Intelligent Transportation Systems: Technology, Planning, and Operations, 2017, 21(2): 136-147.
- [11] TALEBPOUR A, MAHMASSANI H S. Influence of connected and autonomous vehicles on traffic flow stability and throughput[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2016, 71: 143-163.
- [12] ZHONG Zi-jia, LEE J Y. The effectiveness of managed lane strategies for the near-term deployment of cooperative adaptive cruise control[J]. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 2019, 129: 257-270.
- [13] YE Lan-hang, YAMAMOTO T. Modeling connected and autonomous vehicles in heterogeneous traffic flow[J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2018, 490: 269-277.
- [14] WEI Jun-qing, DOLAN J M, LITKOUHI B. Autonomous vehicle social behavior for highway entrance ramp management [C] // IEEE. 2013 IEEE Intelligent Vehicles Symposium. New York: IEEE, 2013: 201-207.
- [15] RIOS-TORRES J, MALIKOPOULOS A A. Automated and cooperative vehicle merging at highway on-ramps[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2016, 18(4): 780-789.
- [16] QIAN Xiang-jun, GREGOIRE J, DE LA FORTELLE A, et al. Decentralized model predictive control for smooth coordination of automated vehicles at intersection[C]//IEEE. 2015 European Control Conference. New York: IEEE, 2015: 3452-3458.
- [17] WANG Yun-peng, E Wen-juan, TANG Wen-zhong, et al. Automated on-ramp merging control algorithm based on internet-connected vehicles [J]. IET Intelligent Transport Systems, 2013, 7(4): 371-379.
- [18] LETTER C, ELEFTERIADOU L. Efficient control of fully automated connected vehicles at freeway merge segments[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2017, 80: 190-205.
- [19] NIE Jian-qiang, ZHANG Jian, DING Wan-ting. Decentralized cooperative lane-changing decision-making for connected autonomous vehicles[J]. IEEE Access, 2016, 4: 9413-9420.
- [20] WANG Meng, HOOGENDOORN S P, DAAMEN W, et al. Game theoretic approach for predictive lane-changing and car-following control[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2015, 58: 73-92.
- [21] ENGLUND C, CHEN Lei, PLOEG J, et al. The grand cooperative driving challenge 2016: boosting the introduction of cooperative automated vehicles [J]. IEEE Wireless Communications, 2016, 23(4): 146-152.
- [22] WANG Chong, ZHANG Jian, XU Ling-hui, et al. A new solution for freeway congestion: cooperative speed limit control using distributed reinforcement learning [J]. IEEE Access, 2019, 7: 41947-41957.
- [23] LI Ye, LI Zhi-bin, WANG Hao. Evaluating the safety impact of adaptive cruise control in traffic oscillations on freeways[J]. Accident Analysis and Prevention, 2017, 104: 137-145.
- [24] LI Zhi-bin, LI Ye, LIU Pan, et al. Development of a variable speed limit strategy to reduce secondary collision risks during inclement weathers[J]. Accident Analysis and Prevention, 2014, 72: 134-145.
- [25] QUINTAS L G, MARCHI E. Equilibrium special in n -person games[J]. Journal of Optimization Theory and Applications, 1990, 67(1): 193-204.
- [26] NASH J F. Non-cooperative games[J]. Annals of Mathematics, 1951: 286-295.
- [27] SHAPLEY L S. A value for n -person games[J]. Contributions to the Theory of Games, 1953, 2(28): 307-317.
- [28] LI Yong-jun, LIN Lin, DAI Qian-zhi, et al. Allocating common costs of multinational companies based on arm's length principle and Nash non-cooperative game[J]. European Journal of Operational Research, 2020, 283(3): 1002-1010.
- [29] MOHAMMAD R, MOKHTAR B, ALI M R, et al. Balancing management of strategic aggregators using non-cooperative game theory[J]. Electric Power Systems Research, 2020, 184: 1-12.
- [30] HOU Qin-zhong, TARKO A P, MENG Xiang-hai, et al. Investigating factors of crash frequency with random effects and random parameters models: new insights from Chinese freeway study[J]. Accident Analysis and Prevention, 2018, 120: 1-12.