

控制与决策

Control and Decision

基于混合整数规划的智能网联车冲突区时序优化模型

姚志洪, 蒋阳升, 胡蓉, 张永祥, 罗孝羚

引用本文:

姚志洪, 蒋阳升, 胡蓉, 等. 基于混合整数规划的智能网联车冲突区时序优化模型[J]. *控制与决策*, 2021, 36(3): 705–710.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0886>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

带不相关并行机和有限缓冲MHFS调度的混合启发式算法

Hybrid heuristic algorithm for multi-stage hybrid flow shop scheduling with unrelated parallel machines and finite buffers

控制与决策. 2021, 36(3): 565–576 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0835>

基于鲁棒优化的云医疗资源配置问题

Robust optimization based medical resource allocation problem in cloud healthcare system

控制与决策. 2021, 36(2): 469–474 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0455>

考虑卸载顺序约束的成品油二次配送车辆路径问题

Vehicle routing problem of refined oil secondary distribution considering unloading sequence constraints

控制与决策. 2020, 35(12): 2999–3005 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2018.1756>

基于改进萤火虫算法的区域交通信号配时优化

Timing optimization of regional traffic signals based on improved firefly algorithm

控制与决策. 2020, 35(12): 2829–2834 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1835>

凸优化与A*算法结合的路径避障算法

Convex optimization and A-star algorithm combined path planning and obstacle avoidance algorithm

控制与决策. 2020, 35(12): 2907–2914 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0351>

基于混合整数规划的智能网联车冲突区时序优化模型

姚志洪^{1,2,3†}, 蒋阳升^{1,2}, 胡蓉^{1,2}, 张永祥^{1,2}, 罗孝羚^{1,2}

(1. 西南交通大学 交通运输与物流学院, 成都 611756; 2. 西南交通大学 综合交通运输大数据应用技术国家工程实验室, 成都 611756; 3. 重庆交通大学 重庆市交通运输工程重点实验室, 重庆 400074)

摘要: 智能网联车的大规模应用为交通冲突区域的优化与管理提供了新的机遇和挑战. 为保证冲突区域车辆的汇入安全, 提高冲突区域车流的运行效率, 引入优化时间区间的概念, 以车辆平均延误为优化目标, 车辆通过冲突区域的最小安全时间间隔为约束条件, 构建车辆进入冲突区域时序的混合整数线性规划模型. 为研究不同流量状态对模型结果的影响, 设计不同流量场景的数值仿真实验. 结果表明: 与不优化时序相比, 所提出的模型和算法能够有效地减少车辆的延误和油耗, 且最大能够减少 54.23% 的车辆延误和 34.36% 的燃油消耗.

关键词: 交通工程; 智能网联车; 最优时序; 混合整数线性规划; 冲突区域; 油耗

中图分类号: U491.5

文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2019.0886

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



引用格式: 姚志洪, 蒋阳升, 胡蓉, 等. 基于混合整数规划的智能网联车冲突区时序优化模型[J]. 控制与决策, 2021, 36(3): 705-710.

Mixed integer programming model of scheduling for connected automated vehicles in a conflict zone

YAO Zhi-hong^{1,2,3†}, JIANG Yang-sheng^{1,2}, HU Rong^{1,2}, ZHANG Yong-xiang^{1,2}, LUO Xiao-ling^{1,2}

(1. School of Transportation and Logistics, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China; 2. National Engineering Laboratory of Application Technology of Integrated Transportation Big Data, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China; 3. Chongqing Key Laboratory of Traffic Transportation, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: The large-scale application of connected automated vehicles (CAVs) provides new opportunities and challenges for the optimization and management of traffic conflict zones. In order to ensure the safety of vehicles and improve the operation efficiency of traffic flow in conflict areas, the concept of planning time interval is introduced. Then, with the average vehicle delay as the optimization objective and the minimum safety time interval of vehicles passing through the conflict zone is the constraint, a 0-1 mixed integer linear programming (MILP) model for the scheduling of vehicles entering the conflict zone is proposed. Finally, to study the influence of different traffic volumes on the proposed model, the numerical simulation experiments of different traffic scenarios are designed. The results show that the proposed model and algorithm can effectively reduce vehicle delays and fuel consumption compared with the vehicle schedule without optimization. The maximum reduction is 54.23% of vehicle delays and 34.36% of fuel consumption.

Keywords: traffic engineering; connected automated vehicle; optimal scheduling; MILP; conflict zone; fuel consumption

0 引言

交通冲突^[1-2](匝道口、交叉口、施工区域)通常指不同方向的车辆在该区域通行时存在碰撞风险,而这些区域通常采用信号控制或停车让行等措施来保证交通安全. 现有研究表明,冲突区域不仅存在安全隐患,也是造成车辆延误和燃油消耗的主要节点^[3-5]. 近

年来,随着国家智能网联车发展的相关政策和战略^[6]的提出,智能网联车将会在未来得到长足的发展. 最新研究表明^[7],2050年道路上智能网联车的普及率将会达到90%. 因此,智能网联车将在未来得到大规模应用. 智能网联车可通过车-车、车-路通讯交换更多的信息,也可通过路-车通讯对车辆速度进行优化控

收稿日期: 2019-06-21; 修回日期: 2019-08-27.

基金项目: 国家自然科学基金项目(51578465, 71771190, 71901183); 重庆市交通运输工程重点实验室开放基金项目(2018TE01); 西南交通大学2019年研究生学术素养提升计划项目(2019KCJS46); 湖南省教育厅资助科研项目(16B008).

责任编辑: 郭戈.

†通讯作者. E-mail: zhyao@my.swjtu.edu.cn.

制. 因此, 智能网联车的应用不仅能够极大地提升交通效率, 还能够减少燃油消耗^[8-13], 这也为冲突区域的运营、管理和优化带来了新的机遇和挑战.

国内外相关学者对智能网联车的应用进行了研究, 主要集中在交通流特性^[10-11]、智能网联车协同通讯^[14-16]、车辆轨迹优化^[17]和信号控制优化^[12-13]等方面. 其中, 在车辆轨迹优化方面, He等^[9]考虑到交叉口车辆排队的影响, 提出了一种最优速度模型为智能网联车提供速度引导建议. 研究表明, 通过速度引导能够减少9%的车辆行程时间和29%的车辆燃油消耗. Wan等^[17]针对智能网联车混合交通流场景, 假定交叉口信号配时方案固定, 提出了一种具有解析解的车辆速度引导模型. 仿真结果表明, 随着智能网联车渗透率的增加, 混合车队的油耗能够得到很大程度的减少. 随后, 相关学者对信号和车辆轨迹协同优化进行了研究. Yu等^[13]以单交叉口为应用场景, 提出了基于混合整数规划的交通信号和车辆轨迹优化模型. 仿真结果表明, 与感应控制相比, 该模型不仅能够增加交叉口的通行能力, 还能减少车辆延误和燃油消耗. Feng等^[12]提出了交通信号和车辆轨迹两阶段优化模型, 以车辆延误和燃油消耗为优化目的, 该模型分别采用动态规划算法和最优控制理论去优化交叉口的信号配时方案和车辆轨迹. 结果表明, 与固定配时和自适应控制相比, 该模型能够同时减少车辆延误和燃油消耗. 以上这些模型的基本假设均为采用信号灯来控制车辆进出交叉口, 未探讨对车辆进入交叉口的顺序进行优化.

基于以上研究现状可知, 目前大多研究并未考虑对车辆进入冲突区域的时序进行优化. 因此, 本文拟对智能网联车冲突区域时序优化问题进行研究. 针对智能网联车冲突区域的优化和管理问题, 构建混合整数时序优化模型, 并通过数值仿真验证文中模型不仅能够避免车辆之间的冲突, 还能够有效地减少车辆的延误和油耗.

1 问题描述

如图1所示, 常见的冲突区域包括匝道车辆汇入冲突和无信号控制交叉口不同方向车辆之间的冲突. 在人工驾驶车辆环境下, 当车辆即将到达冲突区域时, 车辆需要减速观察另一个方向是否有来车, 这将直接导致车辆延误和油耗的增加. 智能网联车环境下, 可以通过优化车辆到达冲突区域的时间顺序, 从而使车辆避免冲突的同时以较高的速度通过冲突区域, 以达到减少车辆延误和油耗的目的. 以匝道汇

入冲突区域为例, 若不优化智能网联车通过冲突区域的顺序, 则智能网联车采用先进先出的方式通过匝道冲突区域, 这将带来较大的延误和油耗. 因此, 本文研究如何通过优化智能网联车到达匝道冲突区域的顺序来减少车辆延误和油耗.

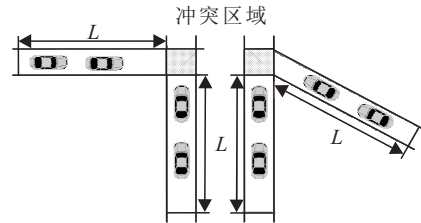


图1 常见冲突区类型

如图1所示, 本文研究的冲突区域通常由两个相互冲突的方向组成, 每个方向可由 i 表示, 其中有 $i \in I = \{1, 2\}$. 假设控制区域边界到冲突区的长度为 L , 每个方向路段的自由流速度为 $V_i, i \in I$. 给定优化间隔 ΔT , 若当前时刻为 T_0 , 则优化时间区间为 $[T_0, T_0 + \Delta T]$. 该时间区间内从方向 i 进入控制区域的车辆集合可用 N_i 表示. 因此, 该时间区域内进入控制区域的所有车辆可表示为 $j \in N_i = \{1, 2, \dots, |N_i|\}$. 假设用 t_{ij}^- 、 t_{ij}^* 和 t_{ij}^+ 分别表示第 i 个方向第 j 辆车进入控制区域的时间、到达冲突区域的理想时间(以自由流速度到达冲突区域)和优化后实际到达冲突区域的时间, 则本文问题可表示为在考虑前后车辆通过冲突区域时间间隔安全约束的基础上, 优化所有车辆到达冲突区域的时间, 以达到最小延误的目的.

2 基于混合整数规划的智能网联车时序优化模型

本文以匝道汇入冲突区为例, 无信号交叉口冲突区本质上与匝道冲突一致. 如图1所示, 将主干路方向设为 $i = 1$, 匝道方向设为 $i = 2$. 以一个简单的例子来说明时序优化的解空间. 假设主干路和匝道都有两辆即将进入冲突区的车辆, 主干路方向车辆按前后顺序编号为1和2, 匝道方向车辆按前后顺序编号为3和4. 假设同一方向的车辆按先进先出规则, 则时序优化问题可表示为保证同一方向车辆进入冲突区域的顺序不变的基础上(如编号为1的车辆比编号为2的车辆先到达和通过冲突区域), 优化两个方向车辆进入冲突区域的时间和顺序, 从而最大程度上减少车辆平均延误和油耗的目的. 以下简单分析一下主干路和匝道分别只有两辆车的顺序种类, 如表1所示.

表1 简单顺序分析表

编号	顺序
1	1 → 2 → 3 → 4
2	1 → 3 → 2 → 4
3	1 → 3 → 4 → 2
4	3 → 4 → 1 → 2
5	3 → 1 → 4 → 2
6	3 → 1 → 2 → 4

由表1可知,当主干路和匝道均有2辆车时,其可能通过冲突区域的顺序有6种.进一步分析可知,假设主干路有 m 辆车,匝道有 n 辆车,由排列组合知识可知其可能的顺序种数为 $A_{m+n}^{m+n}/A_m^m A_n^n$.因此,随着车辆数量的增加,可能顺序种类数将会很大,枚举法将不适合问题的求解.下文将具体分析如何建立混合整数规划模型来优化车辆通过冲突区域的时序问题.

2.1 时间参数分析

时序优化模型涉及到的时间参数有车辆进入控制区域的时间、车辆到达冲突区域的理想时间(以自由流速度到达冲突区域)和优化后车辆实际到达冲突区域的时间.其中,在智能网联车环境下,车辆进入控制区域的时间可以准确地计算^[18].因此,本文假设在优化起始时刻 T_0 、优化时间区间 $[T_0, T_0 + \Delta T]$ 内车辆进入控制区域的时间,即 $t_{ij}^-, \forall i \in I, j \in N_i$ 已知,则根据控制区域边界到冲突区域边界的距离和路段的自由流速度,可采用如下公式计算车辆理想到达冲突区域的时间:

$$t_{ij}^* = t_{ij}^- + \frac{L}{V_i}, \forall i \in I, j \in N_i. \quad (1)$$

其中: t_{ij}^* 和 t_{ij}^- 分别表示第 i 个方向第 j 辆车进入控制区域的时间和到达冲突区域的理想时间; L 表示控制区域边界到冲突区域边界的距离,一般认为通讯覆盖为球形区域,因此每个方向的距离均相等; V_i 表示第 i 个方向的自由流速度.

2.2 目标函数

在确定相关的时间参数后,可构建延误目标函数.车辆的延误可表示为实际行程时间减去理想的行程时间(以自由流速度通过).因此,第 i 个方向的车总延误可表示为

$$D_i = \sum_{j \in N_i} \left(t_{ij}^+ - t_{ij}^- - \frac{L}{V_i} \right), \forall i \in I. \quad (2)$$

其中: D_i 表示第 i 个方向的车辆总延误; t_{ij}^+ 表示第 i 个方向第 j 辆车实际到达冲突区域的时间,为需要优化的变量.

通过式(2)计算每个方向的车辆总延误,从而得到整个优化时间区间内所有车辆的平均延误值如下

所示:

$$D = \sum_{i \in I} \sum_{j \in N_i} \left(t_{ij}^+ - t_{ij}^- - \frac{L}{V_i} \right) / \sum_{i \in I} |N_i|. \quad (3)$$

其中: D 表示优化时间区间内所有车辆的平均延误; $|N_i|$ 表示优化时间区间内第 i 个冲突方向的车辆数.

2.3 约束条件

分析可知,车辆实际到达冲突区域的时间肯定不能大于其理想到达冲突区域的时间,因此该约束可以表示为

$$t_{ij}^+ \geq t_{ij}^*, \forall i \in I, j \in N_i. \quad (4)$$

另外,需要保证同一个方向上先进入控制区域的车辆先通过冲突区域(FIFO).若保证相邻两辆车安全通过冲突区域,设同一个方向相邻两辆车通过冲突区域的时间间隔必须不小于 τ ,则该约束可表示为

$$t_{ij}^+ \geq t_{i(j-1)}^+ + \tau, \forall i \in I, j \in N_i, \quad (5)$$

其中 τ 表示同一方向相邻两辆车通过冲突区域的最小时间间隔.参考文献[18-19],本文取值为1s.

同时,需要保证不同方向的相邻两辆车通过冲突区域的最小时间间隔要求.若用 ω 表示不同方向相邻两辆车通过冲突区域的最小时间间隔,则不同方向上任意两辆车通过冲突区域的时间间隔均应大于该值,该约束可以表示为

$$|t_{1m}^+ - t_{2n}^+| \geq \omega, \forall m \in N_1, n \in N_2, \quad (6)$$

其中 ω 表示不同方向相邻两辆车通过冲突区域的最小时间间隔.参考文献[18-19],本文取值为1.5s.

考虑到式(6)中带有绝对值不利于求解,可引入0-1顺序变量的方法简化为带条件的线性约束.引入0-1顺序变量 B_{mn} ,可将式(6)表示为

$$\begin{cases} t_{1m}^+ - t_{2n}^+ \geq \omega, & B_{mn} = 1; \\ t_{2n}^+ - t_{1m}^+ \geq \omega, & B_{mn} = 0; \end{cases} \quad (7)$$

$$\forall m \in N_1, n \in N_2.$$

其中 B_{mn} 为0-1变量,方向1中编号为 m 的车比方向2中编号为 n 的车先通过冲突区域时为1,否则为0.

进一步引入一个较大值 M ,可将式(7)的条件约束转换为以下两个等效的约束公式:

$$B_{mn} \times M + t_{2n}^+ - t_{1m}^+ \geq \omega, \forall m \in N_1, n \in N_2; \quad (8)$$

$$(1 - B_{mn}) \times M + t_{1m}^+ - t_{2n}^+ \geq \omega, \forall m \in N_1, n \in N_2. \quad (9)$$

综上分析可知,该模型的目标函数为式(3),约束条件为式(4)~(9),均为线性公式.因此,该优化模型为一个混合整数线性规划模型,可直接采用Matlab、Cplex或Lingo等商业软件进行求解.其中,在获得最

优时序后,可采用 Gpops 软件对车辆轨迹进行优化,从而获得车辆在控制区域内的轨迹,进而基于轨迹参考文献[18],计算获得车辆的油耗值.由于该部分并非本文主要研究内容,此处不作详细讨论.

3 数值仿真分析

3.1 时序优化模型

在进行数值仿真实验之前,需要确定文中模型和算法的相关参数.参考相关文献[12-13],假设车辆到达均服从泊松分布;仿真总时长设为900s,优化时间间隔为10s;参考短程通行技术^[20],控制区域长度设为300m;参考文献[18-19],其他相关参数取值如表2所示.

表2 仿真参数设置

变量符号	含义	取值
T/s	仿真时长	900
$\Delta T/s$	优化时间间隔	10
L/m	控制区域长度	300
$V_i/(m/s)$	路段自由流速度	15
τ/s	同方向通过冲突区域相邻车辆最小安全时间间隔	1.0
ω/s	冲突方向通过冲突区域相邻车辆最小安全时间间隔	1.5

为验证本文模型和算法在不同流量条件下的优化效果,分别在不同流量场景下进行测试,并与不优化时序的控制效果进行对比.其中,不同仿真流量场景如表3所示.

表3 仿真实验场景

编号	流量/(veh/h)	
	方向1	方向2
1	900	900
2	1200	900
3	1200	1200
4	1800	1200
5	1800	1800
6	2400	1800

由表3可知:编号为1、3和5的场景,两个冲突方向的流量大小一致,适合道路施工部分封闭和流量均衡的交叉口冲突区域;编号为2、4和6的场景,两个方向流量大小不一样,考虑到一般匝道流量比主干路流量小,其类似于匝道冲突场景.

所有仿真场景均在 Matlab 平台中实现,且仿真电脑配置 CUP 为 i7-6500U,内存为 8GB.考虑到随机性的影响,每组仿真场景采用不同随机种子仿真 10 次,取 10 次的平均值为该组仿真实验的最终结果.其中,文中模型求解时间对比如表4所示.

表4 模型求解时间对比

编号	车辆数/veh	平均单次求解时间/s	总求解时间/s
1	451	0.0144	1.2999
2	522	0.0176	1.5800
3	609	0.0208	1.8733
4	754	0.0324	2.9129
5	895	0.0676	6.0874
6	1049	0.0990	8.9112

由表4可知,随着流量的增大,优化时间间隔内的车辆数逐渐增多,模型需要求解的变量越多,求解时间越长.但模型单次求解时间均在0.01s以内,满足实际应用需求.

3.2 仿真结果分析

分别对表3中的6种场景进行仿真,可获得不同场景下本文模型和不考虑时序优化模型的控制效果.6种场景下两种控制方法的车辆延误和油耗分别如表5和表6所示(注:表中油耗数据为车辆进入控制区域到离开控制区域的油耗值,可根据优化的轨迹数据,参考文献[18]计算得到).其中,两种不同方法优化下的车辆轨迹图和部分优化结果分别如图2和表7所示.

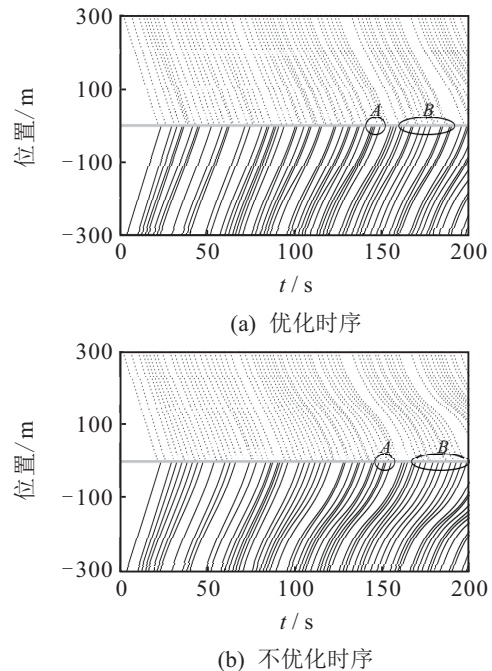


图2 时空轨迹(场景编号3)

由表5可知,6种场景下本文模型和算法优化的车辆延误均比不考虑时序优化的延误小,且6种场景的延误减少百分比均在10%以上,最大可以减少54.23%的车辆平均延误.图2表示了两个冲突方向控制区域内车辆的时空轨迹曲线,图2(a)和图2(b)分别表示不优化时序(即采用FIFO规则)和优化时序的轨迹结果.其中: y 轴0m、-300m和300m分别表示

表5 车辆延误对比

编号	车辆数 / veh	不考虑时序优化 / s		考虑时序优化 / s		延误减少	
		总延误	平均延误	总延误	平均延误	减少值 / s	减少百分比 / %
1	451	291.76	0.65	260.07	0.58	-0.07	-10.82
2	522	961.57	1.84	693.17	1.33	-0.51	-27.75
3	609	13 840.64	22.72	6 358.01	10.40	-12.32	-54.23
4	754	68 109.42	90.33	39 471.49	52.36	-37.97	-42.04
5	895	158 837.01	177.50	91 334.69	102.08	-75.42	-42.49
6	1 049	287 445.49	273.98	172 225.05	164.16	-109.82	-40.08

表6 车辆油耗对比

编号	车辆数 / veh	不考虑时序优化 / mL		考虑时序优化 / mL		延误减少	
		总油耗	平均油耗	总油耗	平均油耗	减少值 / mL	减少百分比 / %
1	451	6 920.99	14.59	6 387.11	13.47	-1.12	-7.67
2	522	13 479.75	25.82	11 018.86	21.11	-4.71	-18.26
3	609	26 765.34	41.88	20 605.86	32.12	-9.76	-23.30
4	754	69 959.52	74.83	49 767.51	53.24	-21.59	-28.85
5	895	133 846.28	145.67	88 232.46	96.04	-49.63	-34.07
6	1 049	225 074.03	184.99	147 743.54	121.44	-63.56	-34.36

表7 部分车辆优化时序(第21~30辆车)

车辆进入冲突区域编号		21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
优化时序	到达冲突区域的时间 / s	57.34	58.84	60.34	61.84	62.84	64.34	65.34	68.87	71.85	73.35
	冲突方向	2	1	2	1	1	2	2	2	1	2
不优化时序	到达冲突区域的时间 / s	58.93	60.43	61.93	63.43	64.93	66.43	67.93	71.46	74.43	75.93
	冲突方向	2	1	2	1	2	1	2	2	1	2

冲突区域边界、冲突方向1和冲突方向2的控制区域边界;虚线和实线分别表示冲突方向1和冲突方向2上的车辆从进入控制区域边界到通过冲突区域的时空轨迹。由图2可知,本文模型可以通过优化冲突方向车辆通过冲突区域的时序来减少其延误。例如,图2中的A和B区域所示,不优化时序时,冲突方向的车辆按先到先出的策略,会出现较多的冲突方向车辆交叉通过冲突区域,此时的延误较大(冲突方向通过冲突区域相邻车辆最小安全时间间隔为1.5 s);而本文模型能对时序进行优化,尽量避免冲突方向车辆交叉通过冲突区域次数,增加同方向车辆成组通过冲突区域的次数(同方向通过冲突区域相邻车辆最小安全时间间隔为1 s),从而达到有效减少车辆延误的效果。同时,表7中的结果也进一步验证了该结论,如第24、25和26辆车,本文模型优化结果通过冲突区域的顺序为冲突方向1上的两辆车同时通过,然后冲突方向2上的一辆车通过。采用不优化时序(FIFO),则为冲突方向1和冲突方向2上的车辆交叉通过。

本文研究两种方法时,均采用Gpops软件对车辆轨迹进行了优化。从表6的车辆油耗可知,与不优化时序相比,本文模型和算法也能够有效地减少车辆

的燃油消耗,且随着车辆流量的增加,燃油消耗减少越来越明显,最高可减少34.36%的车辆燃油消耗。分析可知,虽然两种方法均对车辆轨迹进行了优化,但本文模型和算法优化的车辆延误更小,即时空图中车辆的轨迹更短,车辆在行车过程中加减速的时间更短。由现有研究^[12-13]可知,车辆的油耗与车辆的加减速大小和时长有关。因此,本文模型和算法优化车辆时序不仅能够很大程度上减少车辆的平均延误,还能有效地节约车辆燃油消耗。

4 结论

本文以减少车辆延误和燃油消耗为优化目标,构建了基于混合整数线性规划智能网联车冲突区域时序优化模型。通过数值仿真实验得出结论:与不优化时序相比,本文模型可以通过优化冲突方向车辆通过冲突区域的时序来减少其延误和油耗。通过不同流量场景的仿真结果得到,最大能够减少54.23%的车辆延误和34.36%的燃油消耗。

下一步将针对更为复杂的冲突区域(如多转向交叉口),研究时序优化模型和算法,或针对智能网联车混合交通流,研究基于混合车队的时序优化方法。

参考文献(References)

- [1] Sayed T, Sany Z. Traffic conflict standards for intersections[J]. *Transportation Planning and Technology*, 1999, 22(4): 309-323.
- [2] 郭延永, 刘攀, 吴瑶, 等. 考虑异质性的贝叶斯交通冲突模型[J]. *中国公路学报*, 2018, 31(4): 296-303.
(Guo Y Y, Liu P, Wu Y, et al. Bayesian traffic conflict model accounting for heterogeneity[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2018, 31(4): 296-303.)
- [3] Papageorgiou M, Habib H S, Jean M B. Alinea: A local feedback control law for on-ramp metering[J]. *Transportation Research Record*, 1991, 1320(1): 58-67.
- [4] Feng Y H, Head K L, Khoshmashgham S, et al. A real-time adaptive signal control in a connected vehicle environment[J]. *Transportation Research, Part C: Emerging Technologies*, 2015, 55: 460-473.
- [5] Papageorgiou M, Papamichail I, Spilioulou A, et al. Real-time merging traffic control with applications to toll plaza and work zone management[J]. *Transportation Research, Part C: Emerging Technologies*, 2008, 16(5): 535-553.
- [6] 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 K Q, Dai Y F, Li S B, 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.)
- [7] Bansal P, Kockelman K M. Forecasting americans' long-term adoption of connected and autonomous vehicle technologies[J]. *Transportation Research, Part A: Policy and Practice*, 2017, 95: 49-63.
- [8] Li X P, Ghiasi A, Xu Z G, et al. A piecewise trajectory optimization model for connected automated vehicles: Exact optimization algorithm and queue propagation analysis[J]. *Transportation Research, Part B: Methodological*, 2018, 118: 429-456.
- [9] He X Z, Liu H X, Liu X B. Optimal vehicle speed trajectory on a signalized arterial with consideration of queue[J]. *Transportation Research, Part C: Emerging Technologies*, 2015, 61: 106-120.
- [10] 秦严严, 王昊. 智能网联车辆交通流优化对交通安全的改善[J]. *中国公路学报*, 2018, 31(4): 202-210.
(Qin Y Y, Wang H. Improving traffic safety via traffic flow optimization of connected and automated vehicles[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2018, 31(4): 202-210.)
- [11] 秦严严, 王昊, 王炜. 智能网联环境下的混合交通流LWR模型[J]. *中国公路学报*, 2018, 31(11): 147-156.
(Qin Y Y, Wang H, Wang W. LWR model for mixed traffic flow in connected and autonomous vehicular environments[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2018, 31(11): 147-156.)
- [12] Feng Y H, Yu C H, Liu H X. Spatiotemporal intersection control in a connected and automated vehicle environment[J]. *Transportation Research, Part C: Emerging Technologies*, 2018, 89: 364-383.
- [13] Yu C H, Feng Y H, Liu H X, et al. Integrated optimization of traffic signals and vehicle trajectories at isolated urban intersections[J]. *Transportation Research, Part B: Methodological*, 2018, 112: 89-112.
- [14] 郭戈, 岳伟. 智能交通系统中的车辆协作控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 2016: 1-5.
(Guo G, Yue W. Collaborative vehicle control in smart transportation systems[M]. Beijing: China Machine Press, 2016: 1-5.)
- [15] Guo G, Wen S. Communication scheduling and control of a platoon of vehicles in VANETs[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2015, 17(6): 1551-1563.
- [16] Guo G, Wang L. Control over medium-constrained vehicular networks with fading channels and random access protocol: A networked systems approach[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2014, 64(8): 3347-3358.
- [17] Wan N, Vahidi A, Luckow A. Optimal speed advisory for connected vehicles in arterial roads and the impact on mixed traffic[J]. *Transportation Research, Part C: Emerging Technologies*, 2016, 69: 548-563.
- [18] Ghiasi A, Li X, Huang Z, et al. A joint trajectory and signal optimization model for connected automated Vehicles[C]. *Transportation Research Board 98th Annual Meeting*. Washington DC: Washington Convention Center, 2019: 1-10.
- [19] Xu H L, Feng S, Zhang Y, et al. A grouping-based cooperative driving strategy for CAVs merging problems[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2019, 68(6): 6125-6136.
- [20] Emmelmann M, Bernd B, Christopher K. Vehicular networking: Automotive applications and Beyond[M]. Chichester: John Wiley & Sons, 2010.

作者简介

姚志洪(1991—), 男, 博士生, 从事智能网联车系统建模与优化控制的研究, E-mail: zhyao@my.swjtu.edu.cn;

蒋阳升(1975—), 男, 教授, 博士生导师, 从事交通系统建模与优化等研究, E-mail: jiangyangsheng@swjtu.cn;

胡蓉(1997—), 女, 硕士生, 从事智能网联车安全的研究, E-mail: 1263469521@qq.com;

张永祥(1992—), 男, 博士生, 从事铁路时刻表优化的研究, E-mail: bk20100249@my.swjtu.edu.cn;

罗孝羚(1991—), 男, 博士生, 从事公共交通规划的研究, E-mail: luoxiaoling@my.swjtu.edu.cn.

(责任编辑: 齐 霖)