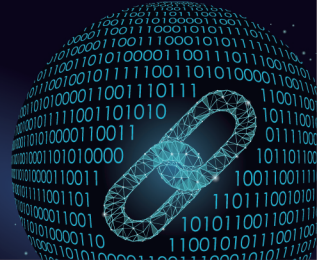




中国科技期刊卓越行动计划项目入选期刊

# 控制与决策

CONTROL AND DECISION



## 基于综合经济效益优化的匝道合流车辆编队策略

孟芸, 廖世龙, 王萍, 黄鹤, 杨盼盼

引用本文:

孟芸, 廖世龙, 王萍, 黄鹤, 杨盼盼. 基于综合经济效益优化的匝道合流车辆编队策略[J]. *控制与决策*, 2024, 39(7): 2233–2241.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2022.2002>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 基于领航-跟随的有人/无人机编队队形保持控制

Formation keeping control for manned/unmanned aerial vehicle formation based on leader–follower strategy

控制与决策. 2021, 36(10): 2435–2441 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0453>

#### 基于虚拟结构法的多移动机器人分布式预测控制

Distributed predictive control of multiple mobile robots based on virtual structure method

控制与决策. 2021, 36(5): 1273–1280 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1136>

#### 通信中断时的网联车辆协作自适应巡航控制

Cooperative adaptive cruise control of connected vehicles under communication interruption

控制与决策. 2021, 36(4): 933–939 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0837>

#### 通信中断时的网联车辆协作自适应巡航控制

Cooperative adaptive cruise control of connected vehicles under communication interruption

控制与决策. 2021, 36(4): 933–939 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0837>

#### 分布式多无人机的时变编队非线性控制设计

Time-varying formation nonlinear control of distributed multiple UAVs

控制与决策. 2021, 36(10): 2490–2496 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0136>

# 基于综合经济效益优化的匝道合流车辆编队策略

孟芸<sup>1</sup>, 廖世龙<sup>1</sup>, 王萍<sup>2†</sup>, 黄鹤<sup>1</sup>, 杨盼盼<sup>1</sup>

(1. 长安大学 电子与控制工程学院, 西安 710064; 2. 中山大学 智能工程学院, 广东 深圳 518107)

**摘要:** 研究高速公路匝道车辆序列合并编队的优化协调问题, 根据环境参数优化设置合并阈值, 减少排放、节约编队成员时间成本和燃油资源。首先, 针对合流中自由车辆与已有车队同时存在的复杂场景给出阈值编队方案, 结合车辆运动学和全期望公式, 计算与编队阈值相关的特征值: 1) 队列规模概率; 2) 时间增量期望; 3) 队列间距期望。然后, 根据特征值分析各经济成本增量, 并利用连续动力学状态方程的转换推导行驶约束安全集, 建立基于阈值的优化编队模型, 在安全性前提下最大化车辆队列的全程综合经济效益。最后, 通过仿真对比所提出策略与直接编队策略, 验证所提出策略能够提升综合经济效益并满足计算实时性要求。仿真结果表明了巡航距离以及车辆密度对编队的综合经济效益影响较大。

**关键词:** 车辆编队; 匝道合流; 编队阈值; 协调优化; 综合经济效益; 计算实时性

中图分类号: U-9 文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2022.2002

引用格式: 孟芸, 廖世龙, 王萍, 等. 基于综合经济效益优化的匝道合流车辆编队策略[J]. 控制与决策, 2024, 39(7): 2233-2241.

## Ramp merging platoon formation strategy based on comprehensive economic benefits optimization

MENG Yun<sup>1</sup>, LIAO Shi-long<sup>1</sup>, WANG Ping<sup>2†</sup>, HUANG He<sup>1</sup>, YANG Pan-pan<sup>1</sup>

(1. College of Electronics and Control Engineering, Chang'an University, Xi'an 710064, China; 2. College of Intelligent Systems Engineering, Sun Yat-Sen University, Shenzhen 518107, China)

**Abstract:** A coordinated platoon formation technique with a threshold is developed to coordinate the vehicle sequences to merge on the highway ramp. The merge threshold based on environmental parameters is optimized to reduce emissions, save time costs and fuel resources. First of all, this paper gives a threshold platoon formation scheme to overcome the complexity induced by the coexist of free vehicles and existed platoons. Then combining the vehicle kinematics and full expectation formula, the paper calculates the characteristic values related to the formation threshold: 1) the likelihood of the platoon size, 2) the expectation of time increments, and 3) the expectation of platoon spacing. Secondly, the economic cost increment is analyzed according to the characteristic values, and the set of the driving constraint safety is derived by the transformation of the continuous dynamic state equation. Then the platoon formation optimization model based on the threshold is built, which maximizes the comprehensive economic benefits with the guarantee of safety. Finally, the proposed strategy is compared with the direct platoon formation technique in the simulation, which demonstrates that the proposed strategy can increase the comprehensive economic benefits and meet the real-time computing requirement. In addition, according to the simulation results, cruising distance and traffic density are the key factors affecting the comprehensive economic benefits of the platoon.

**Keywords:** platoon; ramp merging; formation threshold; coordination and optimization; comprehensive economic benefits; real-time computation

## 0 引言

近年来, 由于公路基础设施的升级和车辆智能化程度的提高, 智能交通领域中的车辆编队技术发展迅速<sup>[1-2]</sup>. 车辆编队是一种基于车联网实现的新型公路

运行模式, 其中跟随车根据领航车的行为状态进行一系列的驾驶操作, 使得车辆在较短的车间距下稳定行驶, 且研究表明编队具有以下多项经济效益<sup>[3]</sup>: 1) 车辆在队列中行驶时产生的“滑流效应”将与前后车形

收稿日期: 2022-11-18; 录用日期: 2023-05-10.

基金项目: 国家重点研发计划项目(020YFB1600400); 陕西省重点研发计划项目(023-YBGY-212).

责任编辑: 郭戈.

†通讯作者. E-mail: wangp358@mail.sysu.edu.cn.

成真气流带,使得车辆受到的空气阻力降低,从而节约能源<sup>[4]</sup>;2)车辆间车头时距缩短,提升道路交通流量,且减少了车辆的巡航用时<sup>[5]</sup>。

在高速公路入口匝道处,主车道与匝道进行车辆合流时,两侧驶入车辆具有潜在冲突,可能引起车速降低、车队解体等问题。合流过程中车间距过近将增加安全隐患,车间距过远则浪费道路资源,以致交通拥堵和降低通过效率<sup>[6]</sup>。因此,匝道处需要协调合流车辆序列进行重组编队,从而在安全性前提下提升道路效率并获得经济效益。近年来的相关研究根据场景地理范围,可分为运输层、编队层和车辆层3个层级<sup>[7-8]</sup>。运输层侧重于运输层优化模型设计和求解算法开发,通过规划车辆行驶路径和行驶速度节约成本<sup>[9-16]</sup>。Boysen等<sup>[9]</sup>使用了多项式时间算法求解不同车队的共同时间窗口长度,并以此判断队列形成的效率和收益。Luo等<sup>[10]</sup>通过混合整数线性规划将路线调度、速度选择等集成至一个模型内,求解了最优行程协调策略。为了得到所有车辆的最优轨迹并实现精确稳定的跟踪控制,Guo等<sup>[11]</sup>设计了一种分布式轨迹控制和固定时间跟踪的分层控制框架,通过基于间距误差最小化的分布式凸优化获得车辆行驶的最优轨迹。Turri等<sup>[12]</sup>提出了一种应用型双层控制框架来获取道路地形信息和实时控制编队车辆行为,并预测队列最佳燃油速度曲线。此外,为了使得尽可能多的车辆能够加入队列,Abdolmaleki等<sup>[13]</sup>设计了一个规划编队车辆行程的时间扩展网络。Liu等<sup>[14]</sup>通过引入碳排放函数和交通拥堵指数,获得了时变路网中最优编队车辆的行驶路径。对于求解算法的开发,Larsson等<sup>[15]</sup>和Deng等<sup>[16]</sup>分别提出了多种改良的启发式算法来求解最优的编队车辆行驶路径和行驶速度。然而,运输层研究并未涉及编队是如何从多辆自由行驶的车辆通过协调形成队列的问题。

编队层多关注个体车辆在协调器控制下的编队行为<sup>[17-20]</sup>。如Larson等<sup>[17]</sup>设计了一种协调匝道车辆行驶速度的分布式控制器,并将成本阈值作为控制启动条件。Chen等<sup>[18]</sup>提出了将车辆最佳合并序列与车辆自适应速度相结合来建立二阶车辆跟驰模型,且触发条件取决于目标经济效益。此外,Gao等<sup>[19]</sup>建议在匝道上游设置编队区,在车辆数量达到设定规模时执行编队策略。事实上,编队层大多数研究只注重编队过程是否能够完成,如文献<sup>[20]</sup>中的直接编队策略(direct formation strategy, DFS),即所有车辆序列在合并区内保持原有车速行驶,若在安全反应时间间隔内到达匝道,则两序列直接进行合并,而没有考虑在匝

道车辆队列形成过程中对行程成本进行限制以及对后续经济收益进行保障,也未考虑车辆出现的随机性对上述成本和收益的影响,从而无法为网络协调策略提供全面的经济效益评估标准。

车辆层侧重于车队内车辆横纵向运动控制以及车间距策略的实时跟踪,防止外部干扰对队列控制稳定性造成影响,从而使得队列获得经济效益<sup>[21-25]</sup>。Li等<sup>[21]</sup>基于强化学习实现车辆队列控制,使得控制器具有更高的实时性并降低队列的燃油消耗。Gao等<sup>[22]</sup>设计了一种网联车数据驱动控制方法,通过最小化距离和速度误差来节省燃料消耗。对于队列控制过程中存在的干扰,Guo等<sup>[23-24]</sup>先后提出了具有故障因子下限的2次间隔策略和基于非线性车辆动力学的策略自适应容错控制方法,以补偿执行器故障和饱和的影响。Wen等<sup>[25]</sup>开发了一种基于跟踪误差的采样数据队列控制方法,将队列控制建模为马尔可夫交换时滞系统以同时处理车辆队列的通信拓扑切换、通信延迟等问题。然而,车辆层只关注单车行程经济效益目标的实现,并未考虑同时行驶的多车辆经济效益的综合结果。

综上所述,已有成果并未解决如何在匝道合流中针对编队策略进行优化的问题。因此,本文提出一种基于阈值的合并编队策略(threshold formation strategy, TFS),在安全性前提下,以综合经济效益为目标建立统计最优化模型,求解最佳车头时距编队阈值。其中:如何采用随机过程理论构建编队阈值和编队规模、时间增量以及队列间距3项特征值的解析关系式,进而分析各成本增量以及相应约束是本文需要解决的难点问题。本文的主要内容如下。

1) 本文以匝道处车辆序列合流为研究场景,且初始车辆序列规模不限,能够同时表征自由车辆形成车队、自由车辆加入车队和多车队合并等场景;

2) 本文针对匝道合流中同时存在自由车辆和已有队列的复杂场景,利用合并概率作为关键转换变量,结合运动学和全期望公式进行联合分析,构建编队阈值和车队规模、时间增量期望以及队列间距期望3项特征值的解析关系;

3) 基于上述3项特征值,本文以编队阈值为决策变量,综合考虑行驶全程的时间成本、燃油消耗和排放作为优化目标,并以保障行驶安全性为约束建立成本增量最优化模型。

## 1 编队过程建模和特征值

本节利用随机过程对合并区内的车辆编队过程进行建模,并在此基础上对队列规模、队列间距等特

征值进行分析计算. 如图1所示, 在公路匝道车辆合流处设置编队协调器, 执行基于编队阈值的合并编队策略TFS. 编队阈值记为 $r$ , 协调器将车头时距与 $r$ 进行比较, 若车头时距小于 $r$ , 则进行编队.

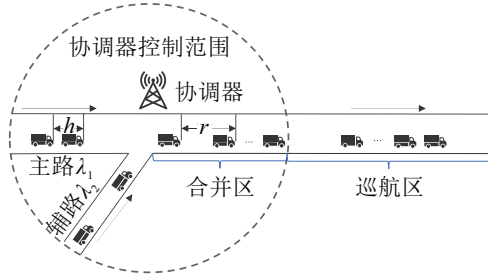


图1 公路匝道车辆序列合流场景

1.1 车辆到达和合并过程

图1中: 到达匝道的车辆序列分别来自主路和辅路, 且均为泊松到达过程, 到达率分别为 $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$ , 单位为序列每秒, 即每秒到达的车辆序列个数, 英文符号表示为seq/s. 随后多个序列以相同车速汇入合并区. 将第 $k$ 组序列进入合并区的时间记为 $S_k$ , 将第 $k$ 组序列与第 $k-1$ 组序列间的到达时间间隔记为 $X_k = S_k - S_{k-1}$ . 序列的到达为泊松过程, 因此,  $X_k (k = 1, 2, \dots)$  为独立同分布的随机变量<sup>[26]</sup>.

1.2 队列规模分析

图2为合并区入口处车辆位置. 其中:  $K_i^m$  为合并区内第 $i$ 组主路待合并序列;  $y_i^m$  为其规模大小, 即所包含车辆的个数; 令  $K_j^s$  为来自辅路的待合并序列;  $j = 1, 2, \dots$  为辅路序列索引编号;  $y_j^s$  为第 $j$ 组辅路序列规模, 且在合并完成后对于队列规模有  $y = y_i^m + \sum_j y_j^s$  成立;  $X_{K_i^m}$  为主路序列  $K_i^m$  与前方序列间的车头时距;  $X_{K_j^s} (j = 1, 2, \dots)$  为辅路序列  $K_j^s$  与前方序列间的车头时距;  $w_i^m$  和  $w_j^s (j = 1, 2, \dots)$  为后方序列头车与前方序列尾车间的车头时距, 如  $w_1^s$  即为辅路序列  $K_1^s$  的头车与主路序列  $K_i^m$  的尾车间的车头时距.

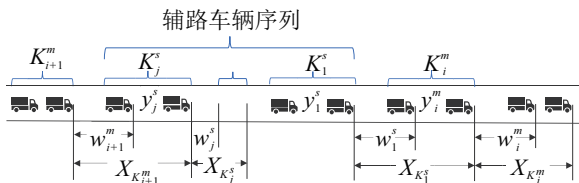


图2 合并区入口处车辆位置

合流后巡航区内车辆队列  $K_n^c$  的规模大小为  $y$ , 并将其规模记为  $|K_n^c|$ , 则概率  $P\{|K_n^c| = y\}$  为

$$P\{|K_n^c| = y\} = e^{-\lambda_1[r+(y_i^m-1)h]} \sum_j (1 - e^{-\lambda_2[r+(y_j^s-1)h]}), \quad j = 1, 2, \dots \quad (1)$$

其中:  $K_n^c$  为完成编队合并后的车辆队列,  $y$  为队列规模大小,  $r$  为编队阈值,  $h$  为队列内车头时距. 推导过程如下.

由图2可见, 主路序列  $K_i^m$  与辅路序列  $K_j^s (j = 1, 2, \dots)$  间初始车头时距在编队阈值范围内,  $K_i^m$ 、 $K_{i+1}^m$  到达率为  $\lambda_1$ ,  $K_j^s (j = 1, 2, \dots)$  到达率为  $\lambda_2$ , 序列间车头时距满足  $X_{K_j^s} = w_j^s + (y_{j-1}^s - 1)h (j = 1, 2, \dots)$ , 则由泊松过程分布函数得到序列间合并概率

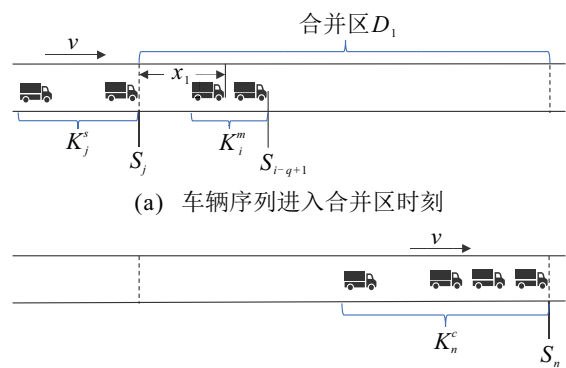
$$\begin{cases} P\{X_{K_j^s} \leq [r + (y_{j-1}^s - 1)h]\} = 1 - e^{-\lambda_2[r+(y_{j-1}^s-1)h]}, \\ P\{X_{K_{i+1}^m} \leq [r + (y_j^s - 1)h]\} = 1 - e^{-\lambda_1[r+(y_j^s-1)h]}. \end{cases} \quad (2)$$

车辆队列  $K_n^c$  的规模为  $y$  的概率质量函数为

$$P\{|K_n^c| = y\} = P\{X_{K_{i+1}^m} > [r + (y_j^s - 1)h]\} P\{X_{K_j^s} \leq [r + (y_{j+1}^s - 1)h]\} \dots P\{X_{K_1^s} \leq [r + (y_1^s - 1)h]\} = e^{-\lambda_1[r+(y_i^m-1)h]} \sum_j (1 - e^{-\lambda_2[r+(y_j^s-1)h]}). \quad (3)$$

1.3 时间增量期望值分析

通过合并区时, 满足编队条件的跟随序列  $K_j^s$  加速跟上前方领航序列  $K_i^m$ , 因此, 跟随序列  $K_j^s$  存在合并区穿越时间增量. 如图3所示:  $D_1$  为合并区距离,  $v$  为车辆速度,  $q$  为领航序列  $K_i^m$  的规模, 跟随序列  $K_j^s$  的头车与领航序列  $K_i^m$  的尾车间的初始车头距离记为  $x_1$ . 其中: 图3(a)为跟随序列  $K_j^s$  和领航序列  $K_i^m$  进入合并区时刻的状态, 进入时刻分别记为  $S_j$ 、 $S_{i-q+1}$ ; 图3(b)为车队  $K_n^c$  的离开时刻  $S_n$ .



(a) 车辆序列进入合并区时刻

(b) 车辆序列离开合并区时刻

图3 合并区车辆位置

相邻序列合并编队的时间增量期望值  $E[T_n]$  为

$$E[T_n] = (1 - e^{-\lambda_2 r}) \left[ \left( \frac{1}{\lambda_1} - h \right) e^{\lambda_1 r} - r - \frac{1}{\lambda_1} + \frac{1}{\lambda_2} - \frac{r}{e^{\lambda_2 r} - 1} \right]. \quad (4)$$

推导过程如下: 在无编队指令时, 跟随序列合并区穿越时间为  $t_f = D_1/v$ . 若满足阈值条件  $x_1/v \leq r$ ,

则初始距离  $x_1$  和合并过程中跟随序列  $K_j^s$  行驶距离  $d_1$  为

$$\begin{cases} x_1 = \frac{(t_1 + t_2)t_1 a}{2}, \\ d_1 = v(t_1 + t_2) + x_1 + (q - 1)x_0. \end{cases} \quad (5)$$

其中:  $t_1$  和  $t_2$  分别为跟随序列  $K_j^s$  加速跟车和减速接近所用时间,  $a$  为车队行驶加速度,  $x_0$  为队列内车头距离. 此时, 得到执行编队时跟随序列穿越合并区的时间为  $t_p = t_1 + t_2 + (q - 1)x_0/v$ . 编队行驶距离  $d_1$  为合并区长度, 且车头时距  $h = x_0/v$ , 则时间增量  $T_n = t_f - t_p = S_j - S_{i-q+1} - (q - 1)h$ , 其累积分布函数为  $P\{T_n \leq t\} = \sum_{y=1}^{\infty} P\{T_n \leq t | |K_n^c| = y\} P\{|K_n^c| = y\}$ , 且有  $T_n = w_1^m + w_2^m + \dots + w_{q-1}^m + w_q^m - (q - 1)h$ . 式中:  $w_q^m$  为领航序列  $K_i^m$  的头车与跟随序列  $K_j^s$  的尾车间的车头时距;  $w_1^m, w_2^m, \dots$  为待合并领航序列  $K_i^m$  内车头时距, 由全期望公式得到  $E[T_n]$ , 即

$$E[T_n] = \sum_{y=2}^{\infty} P\{|K_n^c| = y\} \{E[w_q^m | w_q^m \leq r] - h + (y - 2)E[w_1^m | w_1^m \leq r] - (y - 2)h\}. \quad (6)$$

由式(2)和(6)化简得到式(4).

#### 1.4 队列间距期望值分析

相邻巡航车队应保持适当间距以满足行驶安全性, 如图4所示. 其中:  $w_{n,y}^c$  为车队  $K_n^c$  的尾车与车队  $K_{n+1}^c$  的头车间的车头时距; 车队  $K_n^c$  内车间车头时距记为  $w_{n,1}^c, w_{n,2}^c, \dots$ , 下标  $1, 2, \dots, y$  为车辆索引编号. 到达率为  $\lambda_1$  的车队  $K_n^c$  与  $K_{n+1}^c$  的车头时距  $Z_n = w_{n,1}^c + w_{n,2}^c + \dots + w_{n,y}^c$ , 其期望值  $E[Z_n]$  为

$$E[Z_n] = \frac{e^{\lambda_1 r}}{\lambda_1}. \quad (7)$$

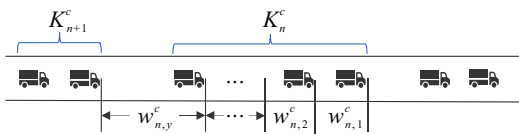


图4 巡航区车队位置

推导过程如下: 由全期望公式得到

$$E[Z_n] = \sum_{y=1}^{\infty} P\{|K_n^c| = y\} \{E[w_{n,y}^c | |K_n^c| = y] + \dots + E[w_{n,y-1}^c | |K_n^c| = y]\}. \quad (8)$$

车队  $K_n^c$  规模概率质量函数为  $P\{|K_n^c| = y\} = e^{-\lambda_1 r} (1 - e^{-\lambda_1 r})^{y-1}$ , 且有  $w_{n,y}^c > r, w_{n,1}^c \leq r, w_{n,2}^c \leq r, \dots, w_{n,y-1}^c \leq r$ , 则时距期望值为

$$E[Z_n] = \sum_{y=1}^{\infty} P\{|K_n^c| = y\} \{E[w_{n,y}^c | w_{n,y}^c > r] + (y - 1)E[w_{n,y}^c | w_{n,y}^c \leq r]\}. \quad (9)$$

因车头时距概率密度函数为  $P\{w_{n,y}^c = r\} = \lambda_1 e^{-\lambda_1 r}$ , 得到条件期望  $E[w_{n,y}^c | w_{n,y}^c > r] = \frac{1}{\lambda_1} + r$ ,  $E[w_{n,y}^c | w_{n,y}^c \leq r] = \frac{1}{\lambda_1} - \frac{r}{e^{\lambda_1 r} - 1}$ . 代入式(9), 得到

$$E[Z_n] = \sum_{y=1}^{\infty} e^{-\lambda_1 r} (1 - e^{-\lambda_1 r})^{y-1} \left[ \frac{1}{\lambda_1} + r + (y - 1) \left( \frac{1}{\lambda_1} - \frac{r}{e^{\lambda_1 r} - 1} \right) \right], \quad (10)$$

化简得到队列间距期望值式(7).

## 2 基于编队阈值的总成本增量模型和约束

本节建立编队综合经济效益最优化模型. 首先, 采用时间、燃油以及碳排放成本增量作为经济效益衡量指标, 然后, 结合3类特征值确定模型约束条件.

### 2.1 总成本增量

总成本增量  $\Delta C(r)$  为时间成本增量  $\Delta C^{\text{time}}(r)$ 、燃油成本增量  $\Delta C^{\text{fuel}}(r)$  以及碳排放成本增量  $\Delta C^{\text{carbon}}(r)$  的和. 当  $\Delta C(r)$  为负值时, 编队行为能够获得经济效益, 将其表述为

$$\Delta C(r) = \Delta C^{\text{time}}(r) + \Delta C^{\text{fuel}}(r) + \Delta C^{\text{carbon}}(r). \quad (11)$$

#### 2.1.1 时间成本增量

当跟随序列在合并区内加速行驶以达到编队目的时, 该序列穿越合并区的时间将缩短, 其时间成本增量为

$$\Delta C^{\text{time}}(r) = -\beta \varphi_1 E[T_n]. \quad (12)$$

其中:  $\beta$  为跟随序列规模,  $\varphi_1$  为时间成本换算系数.

#### 2.1.2 燃油成本增量

将合并过程中跟随序列因加速导致的燃油消耗增量记为  $\Delta F_{D_1}$ , 因形成队列而获得的燃油消耗减少量记为  $\Delta F_{D_2}$ . 由文献[17]中对基于距离和车速的空气阻力变化导致的燃油消耗增量公式得到

$$\Delta F_{D_1} = \alpha D_1 \left[ \left( \frac{D_1}{D_1 - v T_n} v \right)^2 - v^2 \right], \quad (13)$$

其中  $\alpha$  为附加燃油消耗系数. 对  $\Delta F_{D_1}$  泰勒展开后, 得到

$$E[\Delta F_{D_1}] = \alpha \int \frac{\partial \Delta F_{D_1}}{\partial T_n} \Big|_{T_n=0} T_n f(T_n) dT_n = 2\alpha v^3 E[T_n]. \quad (14)$$

对巡航区  $D_2$  的燃油节省  $\Delta F_{D_2}$ , 有下式成立:

$$E[\Delta F_{D_2}] = \varepsilon \eta D_2 P\{X_{K_n} \leq r\} = \varepsilon \eta D_2 (1 - e^{-\lambda_2 r}). \quad (15)$$

其中:  $\varepsilon$  为燃油节省率,  $\eta$  为燃油效率. 则可知

$$\Delta C^{\text{fuel}}(r) = \beta \varphi_2 E[\Delta F_{D_1}] - \varphi_2 E[\Delta F_{D_2}], \quad (16)$$

其中  $\varphi_2$  为国际燃油价格.

### 2.1.3 碳排放成本增量

由排放因子法得到碳排放成本增量

$$\Delta C^{\text{carbon}}(r) = p_{\text{CO}_2} cF. \quad (17)$$

其中:  $p_{\text{CO}_2}$  为单位碳价,  $c$  为碳排放因子, 碳排放源消耗量  $F = \beta E[\Delta F_{D_1}] - E[\Delta F_{D_2}]$ .

## 2.2 编队约束分析

### 2.2.1 总体旅行时间增量约束

在合并区内加速行驶的序列总体旅行时间将缩短, 则可知  $E[T_n] > 0$ .

### 2.2.2 燃油成本增量约束

序列在最优编队阈值下合并的燃油消耗节省量应大于合并过程中的燃油增量, 即  $\beta E[\Delta F_{D_1}] < E[\Delta F_{D_2}]$ , 化简得到

$$E[T_n] < \frac{\varepsilon \eta D_2 (1 - e^{-\lambda_2 r})}{2\alpha \beta v^3}. \quad (18)$$

### 2.2.3 编队合并区范围约束

由于协调器控制范围有限, 前后序列需在合并区范围内完成编队. 假设在合并区  $D_1$  内前后序列初始车头距离为  $x$ , 忽略车头时距  $h$  对计算范围的影响, 跟随序列最大加减速度绝对值恒为  $a_{\text{max}}$ , 则可执行编队的约束范围为  $x + 2\frac{v}{\sqrt{a_{\text{max}}}}\sqrt{x} \leq D_1 \times 10^3$ , 求解得到编队阈值  $r$  的约束上限范围为

$$r \in \left[ 0, \frac{\left( \sqrt{\frac{v^2}{a_{\text{max}}} + D_1 \times 10^3} - \frac{v}{\sqrt{a_{\text{max}}}} \right)^2}{v} \right]. \quad (19)$$

### 2.2.4 巡航过程中前后队列间安全间距约束

在巡航区内, 若两队列间的间距过小, 则发生紧急情况时车辆制动性能将无法满足减速要求. 本文选择前车跟随式 (predecessor following, PF) 通信拓扑, 且车间通信时延与执行器延迟的和为 0.2 s, 则可知安全裕量  $R_s = 0.2v$ . 当道路前方车辆  $i_1$  在  $t_0$  时刻以小于队列速度  $v_0$  的速度  $v_1$  行驶时, 为了避免车辆碰撞, 后方车队领头车辆  $i_0$  以该类型车辆最小加速度  $a_{i_0, \text{min}}$  减速行驶, 则在时刻  $t$  两队列间的间距  $X(t)$  为

$$X(t) = X(t_0) + (v_1 - v_0)(t - t_0) - \frac{1}{2} a_{i_0, \text{min}} (t - t_0)^2, \quad (20)$$

其中  $X(t_0)$  为在  $t_0$  时刻两队列间的间距. 后方队列头车从  $v_0$  减速至  $v_1$  所需时间为  $T = \frac{v_1 - v_0}{-a_{i_0, \text{min}}}$ , 则两队列间的最小间距  $X(t_0 + T)$  为

$$X(t_0 + T) = X(t_0) + (v_1 - v_0)T - \frac{1}{2} a_{i_0, \text{min}} T^2. \quad (21)$$

进一步结合安全裕量得到队列间具有安全间距的充分条件为  $X(t_0) \geq \frac{3(v_1 - v_0)^2}{2a_{i_0, \text{min}}} + R_s$ . 当  $v_1 = 0$  时,

队列间距期望值应满足  $E[Z_n] \geq \frac{3v}{2a_{\text{min}}} + \frac{R_s}{v}$ , 其中  $a_{\text{min}}$  为最小加速度, 化简得到编队阈值  $r$  的约束下限范围为

$$r \geq \frac{\ln\left(\frac{3v}{2a_{\text{min}}} + 0.2\right) + \ln \lambda_1}{\lambda_1}. \quad (22)$$

### 2.2.5 队列内安全车间距约束

1) 队列内车头时距上限. 当车辆以队列模式行驶时, 空气阻力系数的变化受队列内车头时距大小的影响, 由文献 [27] 中的实验数据可知, 在车头时距  $h_i$  属于以下区间时:

$$\frac{2L}{v} \leq h_i \leq \frac{5L}{v}, \quad (23)$$

空气阻力系数可视为常数, 即车辆队列行驶过程中所受空气阻力大小分布均匀, 其中  $L$  为车身长度.

2) 队列内车头时距下限. 在保证队列间具有足够的安全间距前提下, 引入安全约束来确定队列内的车辆车头时距下限. 设一般车辆连续动力学状态方程为

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} \dot{v}_i \\ \dot{s}_i \end{bmatrix} = f(x_i, a_i) = \begin{bmatrix} a_i \\ v_i \end{bmatrix}. \quad (24)$$

其中:  $s_i$ 、 $v_i$  和  $a_i$  分别为车辆  $i$  的位置、速度和加速度, 此时, 车辆  $i$  的连续动力学状态方程为

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_{i-1} \\ \dot{x}_i \end{bmatrix} = F(x_{i-1}, x_i, a_{i-1}, a_i) = \begin{bmatrix} f(x_{i-1}, a_{i-1}) \\ f(x_i, a_i) \end{bmatrix}. \quad (25)$$

式中: 车辆  $i$  的加速度  $a_i$  为控制输入, 车辆  $i-1$  的加速度  $a_{i-1}$  是视为干扰的外界输入. 车辆  $i$  的连续动力学状态方程的控制输入  $a_i$  和外界输入  $a_{i-1}$  的约束为

$$a_{i-1} = \begin{cases} [-a_{i-1, \text{min}}, a_{i-1, \text{max}}], & v_{i-1} > 0; \\ [0, a_{i-1, \text{max}}], & v_{i-1} = 0. \end{cases}$$

$$a_i = \begin{cases} [-a_{i, \text{min}}, a_{i, \text{max}}], & v_i > 0; \\ [0, a_{i, \text{max}}], & v_i = 0. \end{cases} \quad (26)$$

令  $\hat{L} = L + R_s$  为车辆的虚拟车身长度, 得到安全集  $\psi_i$  为

$$\psi_i = \{[x_{i-1}^T, x_i^T]^T : g_u(x_{i-1}, x_i) \geq 0, u = 1, 2, 3, 4\}. \quad (27)$$

其中  $g_u(x_{i-1}, x_i)$  的表达式如下所示:

$$\begin{cases} g_1(x_{i-1}, x_i) = s_{i-1} - s_i - \hat{L} + \frac{v_{i-1}^2}{2a_{i-1, \text{min}}} - \frac{v_i^2}{2a_{i, \text{min}}}, \\ g_2(x_{i-1}, x_i) = s_{i-1} - s_i - \hat{L}, \\ g_3(x_{i-1}, x_i) = v_{i-1}, \\ g_4(x_{i-1}, x_i) = v_i. \end{cases} \quad (28)$$

本文考虑同质性车辆队列,所有车辆的行驶加速度最值相等,若状态  $[x_{i-1}^T, x_i^T]^T$  位于安全集  $\psi_i$  中,则车辆  $i$  的安全约束条件为

$$\begin{cases} s_{i-1} - s_i - \hat{L} + \frac{v_{i-1}^2}{2a_{i-1,\min}} \geq \frac{v_i^2}{2a_{i,\min}}, \\ s_{i-1} - s_i - \hat{L} \geq 0, \\ v_{i-1} \geq 0, \\ v_i \geq 0. \end{cases} \quad (29)$$

结合安全裕量和队列内车头时距上限将距离约束转化为车头时距约束,得到队列内车头时距下限为

$$h_i \geq \frac{v_i}{2a_{\min}} - \frac{v_{i-1}}{2a_{\min}} + \frac{L}{v_i} + 0.2. \quad (30)$$

综上所述,本文将基于综合经济效益的编队阈值求解建模为一个最优化问题,如下式所示:

$$\begin{aligned} \min_r \Delta C(r) &= \Delta C^{\text{time}}(r) + \Delta C^{\text{fuel}}(r) + \Delta C^{\text{carbon}}(r); \\ \text{s.t. } 0 < E[T_n] &< \frac{\varepsilon \eta D_2 (1 - e^{-\lambda_2 r})}{2\alpha\beta v^3}, \\ r &\geq \frac{\ln\left(\frac{3v}{2a_{\min}} + 0.2\right) + \ln\lambda_1}{\lambda_1}, \\ r &\leq \frac{\left(\sqrt{\frac{v^2}{a_{\max}}} + D_1 \times 10^3 - \frac{v}{\sqrt{a_{\max}}}\right)^2}{v}, \\ \frac{v_i}{2a_{\min}} - \frac{v_{i-1}}{2a_{\min}} + \frac{L}{v_i} + 0.2 &\leq h_i \leq \frac{5L}{v_i}. \end{aligned} \quad (31)$$

其中:目标函数表示跟随序列执行编队时总成本的增量值;在约束条件中,约束第1条由式(18)得到,其下限值表示该合并过程为跟随序列加速跟车,上限值保证序列的编队行为具有燃油经济效益;约束第2条和第3条由式(19)和(22)得到,其下限值保证在巡航区正常行驶的车辆队列间具有足够的安全间距,上限值表示序列应在可控制范围(合并区范围)内完成编队行为;约束第4条由式(23)和(30)得到,表示队列内车辆车头时距满足在等风阻系数下的安全性条件限制。

### 3 不同条件下的最优阈值和总成本增量仿真分析

本节针对不同的合并区距离、跟随序列规模、巡航区长度和车辆序列到达率条件,分别给出了最优编队阈值的求解结果.为了验证所提出TFS策略能够提升综合经济效益,在不同场景条件下对TFS与已有文献<sup>[20]</sup>中的DFS方案进行性能对比,并分析讨论策略计算的复杂性和实时性要求。

目标函数为带约束的非线性多变量函数,因此,本文采用fmincon函数对优化模型(31)进行求解.此外,由于碳排放成本增量  $\Delta C^{\text{carbon}}(r)$  与燃油成本增量

$\Delta C^{\text{fuel}}(r)$  为线性比例关系,二者变化趋势分析一致,且在仿真结果中碳排放成本增量  $\Delta C^{\text{carbon}}(r)$  数值偏小,为  $10^{-3}$  量级,因此省略其仿真结果展示.场景参数数值如表1所示。

表1 场景参数

参数	值/单位
$\varphi_1$	0.072 \$ / s
$\varphi_2$	0.868 \$ / L
$v$	25 m / s
$\alpha$	$6.78 \times 10^{-7} \text{ L} \cdot \text{s}^2 / \text{m}^3$
$a_{\max}$	4 m / s <sup>2</sup>
$a_{\min}$	1 m / s <sup>2</sup>
$\varepsilon$	0.1
$\eta$	41 L / (100 km)
$p_{\text{CO}_2}$	0.006 3 \$ / kg
$c$	0.732 7 kg carbon / L
$L$	8.6 m

#### 3.1 合并区距离

本节以合并区距离  $D_1$  为自变量,对最优编队阈值  $r$  和各成本增量变化趋势进行分析(部分参数如下:  $\beta = 3 \text{ veh}$ ,  $\lambda_1 = 0.05 \text{ seq} / \text{s}$ ,  $\lambda_2 = 0.03 \text{ seq} / \text{s}$ ).如图5(a)所示:最优编队阈值  $r$  与巡航距离正相关,这是因为长距离巡航时进行合并编队能够获得更高的经济效益,因此最优编队阈值较高,从而促进更多的编队行为;反之,在短距离巡航时编队经济效益较低,又受到合并区距离  $D_1$  限制,所以最优编队阈值  $r$  存在且恒处于饱和上限,此上限同样正比于巡航区长度  $D_2$ .由图5(b)可见:TFS策略能够减少车辆行驶的时间成本,且长距离合并区的最优编队阈值  $r$  较高,能够提供更高的时间经济效益,而DFS策略不存在加速合并过程,因此不存在时间成本节省.图5(c)中:TFS策略燃油成本增量  $\Delta C^{\text{fuel}}(r)$  与巡航区长度  $D_2$  正相关,并因合并区距离  $D_1$  限制最终趋于定值,如式(15)所示,且在合并区距离  $D_1$  较长时,燃油节省效益将会减少,这是由于此时最优编队阈值  $r$  的上限更高,从而增大了因加速编队导致的燃油消耗增量;而DFS策略的燃油效益只来源于巡航过程,因此不受合并区距离  $D_1$  影响.各成本累加后TFS策略的综合经济效益相比于DFS策略最高可节省1.02\$,且随着巡航区长度  $D_2$  和合并区距离  $D_1$  的增加,TFS策略的经济效益增幅更大。

#### 3.2 跟随序列规模

本节研究辅路驶入的跟随序列规模  $\beta$  对最优编队阈值  $r$  和各成本增量变化趋势的影响(部分参数如下:  $D_1 = 1 \text{ km}$ ,  $\lambda_1 = 0.05 \text{ seq} / \text{s}$ ,  $\lambda_2 = 0.03 \text{ seq} / \text{s}$ ).由图5(d)可见:大规模序列的最优编队阈值  $r$  较小,这是因为更多的车辆进行加速跟车将会导致燃油成本

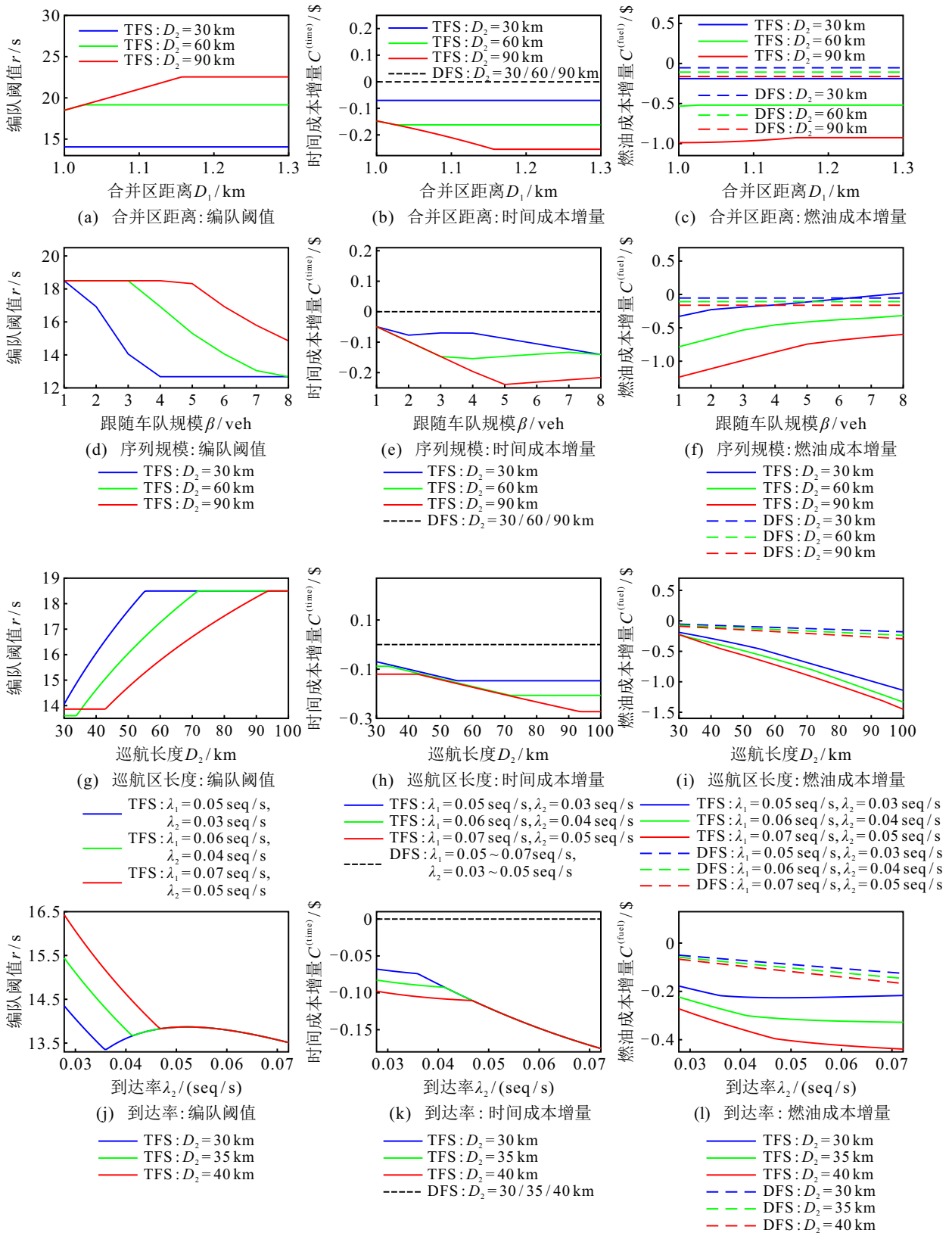


图5 不同场景条件下最优编队阈值和各成本增量变化趋势

更高,需要更长的巡航距离  $D_2$  来保证编队的经济效益. 图5(e)中: TFS策略的时间成本增量  $\Delta C^{\text{time}}(r)$  在序列规模  $\beta$  较小时呈线性增长,但是随着规模增大,增长趋势出现拐点并逐渐下降,这是由于最优编队阈值  $r$  开始减小导致时间增量期望值  $E[T_n]$  下降,从而

造成时间成本的节省效益降低. 图5(f)中: TFS策略的燃油成本增量  $\Delta C^{\text{fuel}}(r)$  随着跟随序列规模  $\beta$  增大而下降,但是,同条件下的经济效益依然高于DFS策略,这是因为大规模序列合并时,增加了部分燃油消耗导致整体效益降低,但是,在TFS策略中序列能够

获得的编队机会远多于DFS策略. 在该场景下, TFS策略的综合经济效益相比于DFS策略最高可节省1.13\$, 这是因为跟随序列规模只对编队过程中产生的成本有影响, 如加速跟车导致的燃油消耗, 而DFS策略的总成本增量仅来源于跟随序列的燃油效益.

### 3.3 巡航区长度

本节针对不同巡航区长度 $D_2$ 下最优编队阈值 $r$ 和各成本增量的变化趋势进行分析(部分参数如下:  $\beta = 3 \text{ veh}$ ,  $D_1 = 1 \text{ km}$ ). 由图5(g)可见: 在到达率较高时最优编队阈值 $r$ 在短距离巡航中取值恒为定值, 这是因为此时路面车辆密度较大, 为了保证前后车队具有足够裕量的安全间距, 编队阈值不得低于安全下限. 图5(h)中: 时间成本增量 $\Delta C^{\text{time}}(r)$ 随着巡航区长度 $D_2$ 增大而增大, 且在不同到达率条件下具有不同的时间成本增量最大值, 这同样是因为受到最优编队阈值 $r$ 的安全下限影响, 且又受制于合并区距离 $D_1$ 的上限, 在巡航距离较长时恒为定值, 即出现时间成本增量 $\Delta C^{\text{time}}(r)$ 的上下界范围. 图5(i)中: TFS策略的燃油成本增量 $\Delta C^{\text{fuel}}(r)$ 在编队阈值未达到上限时经济效益增速有所降低, 是由于此时最优编队阈值 $r$ 仍然处于增长阶段, 导致编队燃油消耗量持续增加, 减少了经济效益, 但是, 长距离巡航条件下TFS策略的综合经济效益仍然远高于DFS策略.

### 3.4 车辆序列到达率

由第3.3节可知, 在短距离巡航中序列到达率对最优编队阈值 $r$ 和成本增量的影响存在较大差异, 因此, 本节对该问题进行解析(部分参数如下:  $\beta = 3 \text{ veh}$ ,  $D_1 = 1 \text{ km}$ ,  $\lambda_1 = \lambda_2 + 0.02 \text{ seq/s}$ ). 由图5(j)可见: 在安全性前提下, 最优编队阈值 $r$ 随着车辆密度增大而不断降低, 以获得更高的经济效益, 同时场景内行驶车辆的编队阈值安全下限逐步升高, 阈值从拐点处开始恒等于下限值. 图5(k)中: 时间成本增量 $\Delta C^{\text{time}}(r)$ 随着到达率 $\lambda_1$ 和 $\lambda_2$ 不断增大且最后呈线性关系, 这是因为受到编队阈值变化的影响, 且从拐点处开始编队阈值恒为安全下限, 使得时间成本增量 $\Delta C^{\text{time}}(r)$ 正比于到达率. 图5(l)中: TFS策略的燃油成本增量 $\Delta C^{\text{fuel}}(r)$ 随着到达率的升高呈曲线变化, 且在编队阈值的下限节点后燃油成本增量 $\Delta C^{\text{fuel}}(r)$ 增速减缓, 是由于在高到达率下的最优编队阈值 $r$ 需要权衡经济效益与安全保证, 而DFS策略的燃油成本增量 $\Delta C^{\text{fuel}}(r)$ 则因只需考虑车辆到达时间而呈慢速率的线性增长. 由TFS策略和DFS策略的计算数据可知, 在长距离巡航和路面车辆密度较高时, 所提出优化编队策略在性能方面相比于一般的直接编队

策略经济效益更具优势.

### 3.5 计算复杂性和实时性分析

本文采用内点法求解优化问题, 其时间复杂度为 $O(\rho^{3.5})$ , 其中 $\rho$ 为目标函数(31)的变量规模. 本文优化问题变量是编队阈值 $r$ 和队列内车头时距 $h$ , 变量规模 $\rho$ 恒为2. 仿真算例均在Matlab R 2021 b环境下运行, 计算平台参数如下: CPU为Intel(R) Core TM i7, 主频为2.30 GHz, 内存为16 GB. 最佳编队阈值计算时长结果如表2所示.

表2 计算时长仿真结果

条件状态	状态值	计算时长范围/s
合并区长度 $D_1$	1 ~ 1.3 km	0.012 ~ 0.031
跟随序列规模 $\beta$	1 ~ 8 veh	0.010 ~ 0.025
巡航区长度 $D_2$	30 ~ 100 km	0.011 ~ 0.024
车辆序列到达率 $\lambda_2$	0.03 ~ 0.07 seq/s	0.012 ~ 0.022

由表2可见, 本文不同交通环境中模型求解时长恒处于较小范围(0.010 ~ 0.031 s). 根据协调器功能, 每有一组序列进入合并区, 协调器状态数据即进行一次更新, 由TFS模型可知, 协调器状态数据更新时间间隔将不低于一辆车完全进入合并区的用时, 即 $\frac{L}{v} = \frac{8.6}{25} \text{ s} = 0.344 \text{ s}$ . 阈值计算时长远小于状态数据更新时间间隔, 计算复杂性能够满足实时性要求.

## 4 结论

本文研究了匝道场景下用于提升车辆序列综合经济效益的基于编队阈值的合并编队策略, 并分别针对与经济效益相关的特征值, 包括车队规模概率、时间增量期望以及队列间距期望, 推导它们与编队阈值间的解析关系, 进而构建车辆行驶的总成本增量模型, 并以编队过程经济效益性、合并范围合理性以及车队行驶安全性为约束条件, 求解最优编队阈值. 仿真结果显示: 基于阈值的优化编队策略相比于一般的直接编队策略能够获得更多的经济效益, 在队列规模较小、巡航距离较长时性能提升更为显著, 且策略的计算过程能够满足复杂性和实时性要求.

### 参考文献(References)

- [1] Guo G, Xu Y G, Xu T, et al. A survey of connected shared vehicle-road cooperative intelligent transportation systems[J]. Control and Decision, 2019, 34(11): 2375-2389.
- [2] Zuo Z Q, Liu Z X, Wang Y J. A survey of optimal control for mixed traffic system with vehicle-road-cloud integration[J]. Control and Decision, 2023, 38(3): 577-594.
- [3] Bhoopalam A K, Agatz N, Zuidwijk R. Planning of truck platoons: A literature review and directions for future research[J]. Transportation Research—Part B:

- Methodological, 2018, 107: 212-228.
- [4] Tsugawa S, Jeschke S, Shladover S E. A review of truck platooning projects for energy savings[J]. IEEE Transactions on Intelligent Vehicles, 2016, 1(1): 68-77.
- [5] Robinson T, Chan E, Coelingh E. Operating platoons on public motorways: An introduction to the sartre platooning programme[C]. The 17th World Congress on Intelligent Transport Systems. Busan, 2010: 1-11.
- [6] Scarinci R, Hegyi A, Heydecker B. Definition of a merging assistant strategy using intelligent vehicles[J]. Transportation Research—Part C: Emerging Technologies, 2017, 82: 161-179.
- [7] Alam A, Besselink B, Turri V, et al. Heavy-duty vehicle platooning for sustainable freight transportation: A cooperative method to enhance safety and efficiency[J]. IEEE Control Systems Magazine, 2015, 35(6): 34-56.
- [8] Sturm T, Krupitzer C, Segata M, et al. A taxonomy of optimization factors for platooning[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2021, 22(10): 6097-6114.
- [9] Boysen N, Briskorn D, Schwerdfeger S. The identical-path truck platooning problem[J]. Transportation Research—Part B: Methodological, 2018, 109: 26-39.
- [10] Luo F Q, Larson J, Munson T. Coordinated platooning with multiple speeds[J]. Transportation Research—Part C: Emerging Technologies, 2018, 90: 213-225.
- [11] Guo G, Zhao Z W, Zhang R Y K. Distributed trajectory optimization and fixed-time tracking control of a group of connected vehicles[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2023, 72(2): 1478-1487.
- [12] Turri V, Besselink B, Johansson K H. Cooperative look-ahead control for fuel-efficient and safe heavy-duty vehicle platooning[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2017, 25(1): 12-28.
- [13] Abdolmaleki M, Shahabi M, Yin Y F, et al. Itinerary planning for cooperative truck platooning[J]. Transportation Research—Part B: Methodological, 2021, 153: 91-110.
- [14] Liu C S, Shen L Z, Sheng H Y, et al. Research on low-carbon time-dependent vehicle routing problem with traffic congestion avoidance approaches[J]. Control and Decision, 2020, 35(10): 2486-2496.
- [15] Larsson E, Sennton G, Larson J. The vehicle platooning problem: Computational complexity and heuristics[J]. Transportation Research—Part C: Emerging Technologies, 2015, 60: 258-277.
- [16] Deng L, Hajiesmaili M H, Chen M H, et al. Energy-efficient timely transportation of long-haul heavy-duty trucks[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2018, 19(7): 2099-2113.
- [17] Larson J, Liang K Y, Johansson K H. A distributed framework for coordinated heavy-duty vehicle platooning[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2015, 16(1): 419-429.
- [18] Chen N, van Arem B, Alkim T, et al. A hierarchical model-based optimization control approach for cooperative merging by connected automated vehicles[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2021, 22(12): 7712-7725.
- [19] Gao Z J, Wang J F, Chen L, et al. Cooperative merging control on freeway based on platooning of connected and automated vehicles[J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2022, 52(2): 335-343.
- [20] Xiong X, Sha J, Jin L. Optimizing coordinated vehicle platooning: An analytical approach based on stochastic dynamic programming[J]. Transportation Research—Part B: Methodological, 2021, 150: 482-502.
- [21] Li Y F, Zhou F T, Huang L W, et al. Longitudinal control of connected vehicle platoon based on deep reinforcement learning[J]. Control and Decision, DOI: 10.13195/j.kzyjc.2022.2094.
- [22] Gao W N, Jiang Z P, Ozbay K. Data-driven adaptive optimal control of connected vehicles[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2017, 18(5): 1122-1133.
- [23] Guo G, Li P, Hao L Y. Adaptive fault-tolerant control of platoons with guaranteed traffic flow stability[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2020, 69(7): 6916-6927.
- [24] Guo G, Li P, Hao L Y. A new quadratic spacing policy and adaptive fault-tolerant platooning with actuator saturation[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2022, 23(2): 1200-1212.
- [25] Wen S X, Guo G. Sampled-data control for connected vehicles with Markovian switching topologies and communication delay[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2020, 21(7): 2930-2942.
- [26] Xiong X, Xiao E D, Jin L. Analysis of a stochastic model for coordinated platooning of heavy-duty vehicles[C]. IEEE the 58th Conference on Decision and Control. Nice, 2019: 3170-3175.
- [27] Zabat M, Farascari S, Browand F, et al. Drag measurements on a platoon of vehicles[R]. Berkeley: Institute of Transportation Studies, 1994: 1-77.

## 作者简介

孟芸(1987—),女,副教授,博士,从事车辆队列、车路协同等研究, E-mail: mengyun@chd.edu.cn;

廖世龙(2000—),男,硕士生,从事车辆队列、自动控制等研究, E-mail: 2021132053@chd.edu.cn;

王萍(1982—),女,教授,博士生导师,从事人机协同、智能控制等研究, E-mail: wangp358@mail.sysu.edu.cn;

黄鹤(1979—),男,教授,博士生导师,从事无人系统测控、信息融合等研究, E-mail: huanghe@chd.edu.cn;

杨盼盼(1985—),男,副教授,博士,从事智能网联汽车队列控制、智能机器人集群运动控制等研究, E-mail: panpanyang@chd.edu.cn.