

DOI: 10.19951/j.cnki.1672-9331.20230331001

文章编号: 1672-9331(2024)01-0141-09

引用格式: 王正武, 滑肖月. 面向出口匝道分流的协同换道策略研究[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2024, 21(1): 141-149.

Citation: WANG Zhengwu, HUA Xiaoyue. Research on cooperative lane change strategy for off-ramp diversion[J]. J Changsha Univ Sci Tech (Nat Sci), 2024, 21(1): 141-149.

面向出口匝道分流的协同换道策略研究

王正武, 滑肖月

(长沙理工大学 交通运输工程学院, 湖南 长沙 410114)

摘要:【目的】提高网联高速出口匝道路段通行效率,降低交通事故风险,保障分流车辆通行秩序。【方法】针对出口匝道上游智能网联车辆(connected automated vehicle, CAV)的换道行为所导致的交通紊乱问题,提出一种协同换道策略。兼顾通行效率和舒适度,以研究时段内所有CAV平均速度、平均加速度变化率的加权和最小为目标,以速度、加速度、加速度振动、换道起点与分流点的纵向距离等为约束,构建CAV动态速度协同优化模型,有计划地优化每个时段每辆CAV的速度。采用Gurobi优化器求解协同控制模型,并使用SUMO软件建立仿真场景评估协同控制效果。【结果】与无控制情形相比,所提出的协同方法在不同总流量和分流比例下能使车辆平均速度最高提高17.7%,总延误降低75.9%以上,平均加速度变化率改善9.3%以上;当分流比例一定时,一定总流量情况下,总流量越高平均速度、平均加速度变化率改善效果越好;在安全换道所要求的最小纵向距离约束下,出口匝道路段通行效率最高。【结论】在不同总流量和分流比例下,协同策略可为换道车辆创造换道间隙,改善通行效率,提高乘客舒适度。

关键词: 智能网联车辆; 出口匝道; 通行效率; 协同控制; 交通控制

中图分类号: U491.5⁺4

文献标志码: A

Research on cooperative lane change strategy for off-ramp diversion

WANG Zhengwu, HUA Xiaoyue

(School of Traffic and Transportation Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China)

Abstract: [Purposes] The paper aims to improve the efficiency of the off-ramp section of the connected expressway, reduce the risk of traffic accidents and ensure the order of diversion vehicle traffic. [Methods] A cooperative lane changing strategy is proposed to address the traffic disorder caused by the lane changing behavior of connected automated vehicle (CAV) upstream of the off-ramp. Taking into account both traffic efficiency and comfort, a collaborative CAV dynamic speed optimization model is constructed with the objective of minimizing the weighted sum of the average speed and average acceleration of all CAV during the speed, acceleration, acceleration vibration, and the longitudinal distance between the start of the lane change and the diversion point as constraints to systematically optimize the speed of each CAV in each period. The Gurobi optimizer is used to solve the cooperative control model, and a simulation scenario is built using SUMO to

收稿日期: 2023-03-31; 修回日期: 2023-06-02; 接受日期: 2023-07-03

基金项目: 长沙市科技重大专项(kh2301004); 湖南省自然科学基金项目(2023JJ30039); 湖南省交通科技项目(202140); 湖南省研究生科研创新项目(CX20220862)

通信作者: 王正武(1973—)(ORCID: 0000-0003-1635-7939), 男, 教授, 主要从事交通运输规划与管理方面的研究。

E-mail: zhengwu.wang@126.com

投稿网址: <http://csjgxbzk.csust.edu.cn/cslgdxxbzk/home>

evaluate the cooperative control effect. [Findings] The results show that the proposed synergistic method can improve the average vehicle speed by up to 17.7%, reduce the total delay by more than 75.9%, and improve the average acceleration change rate by more than 9.3% under different total flow and diversion ratios compared with the uncontrolled case the diversion ratio is certain, for a certain total flow rate, the higher the total flow rate, the better the improvement of the average velocity and the average acceleration rate of change the minimum longitudinal distance constraint of safe lane change requirement, the exit ramp section has the highest traffic efficiency. [Conclusions] Under different total flow and diversion ratio, the synergistic strategy can create lane change gap for lane change vehicles, improve traffic efficiency and enhance passenger comfort.

Key words: connected automated vehicle; off-ramp; traffic efficiency; cooperative control; traffic control

Foundation item: Project (kh2301004) supported by Major Science and Technology Program of Changsha; Project(2023JJ30039) supported by Natural Science Foundation of Hunan Province; Project (202140) supported by Hunan Provincial Transportation Science and Technology; Project (CX20220862) supported by Hunan Provincial Postgraduate Research Innovation

Corresponding author: WANG Zhengwu (1973—)(ORCID:0000-0003-1635-7939), male, professor, research interest: transportation planning and management. E-mail: zhengwu.wang@126.com

0 引言

高速公路出口匝道路段驶出车流和主线车流相互交织,易造成交通拥堵和事故。已有研究表明,出口匝道路段发生交通拥堵易传播到上游^[1],其中换道行为是产生拥堵的主要原因之一^[2-3],频繁发生的拥堵影响了通行效率^[4]。

传统的出口匝道控制方法主要有可变限速^[5]、变道预警^[6]等,这些方法主要是基于宏观交通流来进行广播式被动控制的,控制效果与驾驶员的服从情况有关,故控制效果不太理想。近年来,汽车行业正向着智能化、无人化的方向发展^[7],智能网联车辆(connected automated vehicle, CAV)的出现为主动交通管理提供了机遇。与传统车辆相比,CAV依靠传感技术和V2X通信技术获取周围车辆状态信息(位置、速度、加速度等)与驾驶意图,能更好地协调车辆运动,从而提高了交通效率,保障了交通安全,改善了交通环境^[8-10]。

智能网联技术出现后,出口匝道控制研究主要有传统方法改进^[11-12]、控制策略^[13-17]、换道模型^[16-18]、控制框架^[19]等方面。ALI SILGU等^[11]和HAN等^[12]将自动驾驶与传统方法联动实现了对出

口匝道的管控。ZHENG等^[13]改进智能驾驶模型(intelligent driver model, IDM)和尽量减少因换道引起的整体制动模型(minimizing overall braking induced by lane changes, MOBIL),开发了一个用于智能网联环境的仿真平台;采用启发式方法确定了最优协作区域,并应用协同换道策略辅助分流。NAGALUR SUBRAVETI等^[14]提出了一种车道分配策略,提前为车辆分配车道,为合并或驶出车辆创造空间,尽量减少换道行为。张勇^[15]提出了一种基于滚动时域的出口匝道队列分流轨迹规划模型,该模型为主干道车辆队列中的车辆生成轨迹规划。DONG等^[16]构建了自主变道(discretionary lane change, DLC)和强制变道(mandatory lane change, MLC)模型,提出了出口匝道路段的3种路径控制策略。HAO等^[17]基于强制换道压力构建了体现驾驶员位置偏好的强制换道意图模型和强制换道位置概率密度函数。DONG等^[18]在自主变道模型中引入风险因素,设计了CAV驶出匝道时的五步强制换道决策模型。DONG等^[19]建立了换道轨迹优化的迭代学习框架来应对出口匝道上游因换道引起的交通瓶颈问题。

迄今为止,随着网联技术的发展,网联高速出口匝道控制越来越被关注,其协同控制方法被学

者们提出,但出口匝道协同控制研究仍不够充分,而且1)多数控制模型将出口匝道路段的最低速度限制设置为零,这与实际不符,出口匝道路段主线有最低行驶速度限制,同时过低的行驶速度易导致追尾等事故;2)主要关注的是CAV的速度控制,忽略了换道过程中车辆横向移动时也在纵向移动的事实,未考虑换道时的纵向距离约束;3)协同优化时多侧重于效率、油耗,很少考虑乘客的舒适度等目标。

本文以网联高速公路出口匝道路段为研究对象,兼顾通行效率和舒适度,以平均速度最大、平均加速度变化率最小为目标,考虑速度、加速度、加速度振动、纵向距离等约束,构建动态车辆速度协同优化模型,有计划地优化每个时段每辆CAV的速度,为换道车辆创造换道间隙,提高通行效率。

1 协同控制策略

如图1所示的高速公路双车道分流场景,在出口匝道上游设置协同控制区。该区域内所有车道均有换道分流需求。为满足换道分流需求,并保障系统运行效率和乘客舒适度,本文提出一种车速协同控制策略:1)按时间间隔 Δt 划分控制周期时长 T ,在系统优化协同控制区域内控制周期时长 T 内所有车辆的纵向速度,为换道车辆创造安全间隙;2)拟采用换道车辆与目标间隙前后车辆的速度差约束来减少换道车辆对主线通行车辆的干扰;3)通过纵向距离约束为行驶中的换道车辆提供所需的最小纵向距离。

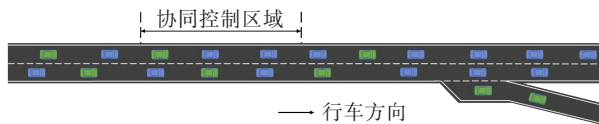


图1 协同控制场景

Fig. 1 Cooperative control scenario

2 模型构建

2.1 基本假设

为简化协同控制优化过程,做如下基本假设:1)不考虑CAV的通信延迟;2)将换道看作瞬时动作,不考虑横向轨迹;3)所有车辆均为智能网联车,具有相同的动力性能;4)在分流过程中不允许超车。

2.2 协同控制模型

借鉴XIE等^[20]的最优控制策略,最大限度地提高所有车辆的平均速度,减小平均加速度变化率,并结合出口匝道换道的特点,构建速度协同优化模型,相关符号见表1。

表1 协同控制模型的参数和符号描述

Table 1 Description of the parameters and symbols of the cooperative control model

符号	单位	描述
l		车道编号(0、1分别表示内侧、外侧车道)
m		协同控制区任意车道车辆队列中车辆序列号
$a_{l,m}(t)$	m/s^2	车道 l 上的车辆 m 在时间 t 的加速度
$v_{l,m}(t)$	m/s	车道 l 上的车辆 m 在时间 t 的速度
$x_{l,m}(t)$	m	车道 l 上的车辆 m 在时间 t 的位置
h_s	s	最小安全时间间隔
v_{\max}/v_{\min}	m/s	最大允许速度/最小允许速度
a_{\max}/a_{\min}	m/s^2	最大允许加速度/最小允许加速度
a_{\max}^{diff}	m/s^3	最大加速度的变动
v_{\max}^{diff}	m/s	换道车辆与外侧车辆最大车速差
ω_1, ω_2		权重系数
Δt	s	时间间隔
T	s	控制周期时长
m_0		T 内控制区域内侧车道上的车辆总数
m_1		T 内控制区域外侧车道上的车辆总数
m_c		内侧车道上换道至外侧车道上的车辆总数
m_r^{lc}		内侧换道车辆在内侧车道上的序列号
$L_{0,m_r^{\text{lc}}}$	m	换道车辆 m_r^{lc} 的换道起点与分流点间的距离
L_s	m	换道车辆纵向距离限制值

为减少换道对主线车流的干扰,限制分流换道车辆与目标间隙车辆速度差,保障换道车辆以及外侧车道车辆不产生较大的速度波动,进而减少对目标车道车辆速度的扰动,同时,因乘客舒适度与加速度振动相关^[21],故本文以加速度变化率最小为目标之一。为保障在分流前安全、成功换道,本文采用纵向距离约束来限定极限换道位置。为减少低速造成的负面影响,还设置了最低速度限制。根据协同控制策略构建的动态速度协同优化模型为:

$$\min z = -\frac{\omega_1 \sum_{l=0}^1 \sum_{m=1}^{m_l} \sum_{t=1}^T v_{l,m}(t)}{(m_0 + m_1)T} + \quad (1)$$

$$\frac{\omega_2 \sum_{l=0}^1 \sum_{m=1}^{m_l} \sum_{t=1}^{T-1} |a_{l,m}(t+1) - a_{l,m}(t)|}{(m_0 + m_1)(T-1)} \quad (2)$$

$$x_{l,m}(t) - x_{l,m}(t-1) = v_{l,m}(t-1) \times \Delta t \quad (3)$$

$$\forall l, m, t = 2, \dots, T$$

$$v_{l,m}(t) - v_{l,m}(t-1) = a_{l,m}(t-1) \times \Delta t$$

$$\forall l, m, t = 2, \dots, T$$

$$a_{\min} \leq a_{l,m}(t) \leq a_{\max} \quad \forall l, m, t \quad (4)$$

$$|a_{l,m}(t) - a_{l,m}(t-1)| \leq a_{\max}^{\text{diff}} \times \Delta t \quad (5)$$

$$\forall l, m, t = 2, \dots, T$$

$$v_{\min} \leq v_{l,m}(t) \leq v_{\max} \quad \forall l, m, t \quad (6)$$

$$x_{l,m-1}(t) - x_{l,m}(t) \geq h_s \times v_{l,m}(t) \quad (7)$$

$$\forall l, t, m = 2, \dots, m_l$$

$$|x_{0,m_r}(T) - x_{1,j}(T)| \geq \begin{cases} h_s \times v_{0,m_r}(T), x_{1,j}(T) > x_{0,m_r}(T) \\ h_s \times v_{1,j}(T), x_{1,j}(T) \leq x_{0,m_r}(T) \end{cases} \quad (8)$$

$$\forall r = 1, 2, \dots, m_c, j = 1, 2, \dots, m_l$$

$$|v_{0,m_r}(T) - v_{1,j}(T)| \leq v_{\max}^{\text{diff}} \quad (9)$$

$$\forall r = 1, \dots, m_c, j = 1, \dots, m_l$$

$$L_{0,m_r} \geq L_s \quad (10)$$

$$\forall r = 1, \dots, m_c$$

式中的 L_s 可根据换道轨迹曲线(如5次多项式曲线)及换道时刻的车速计算确定, L_{0,m_r} 可根据 T 计算确定。

式(1)右侧第一项为最大化研究时间内的平均速度,即保障运行效率;第二项为最小化研究时间内的平均加速度变化率,即保障车辆乘客的舒适度;式(2)与式(3)是车辆动力学约束;式(4)、(5)、(6)分别是加速度、加速度振动、速度限制;式(7)表示的是相同车道上不同车辆之间的间隔约束;式(8)是换道安全约束,表示在协同控制最后一个时间步长内,换道车辆与目标间隙前后车辆应满足最小间距;式(9)是换道扰动约束,换道车辆与外侧车道上车辆的速度差小于规定值;式(10)是换道分流车辆的纵向距离约束,因为分流车辆需要在分流点之前完成换道行为。目标函数以及约束中含有的绝对值及判断语句,可以根据Gurobi求解器的规则对目标函数中的第二项以及约束条件(8)进行线性化处理。

3 仿真试验

采用SUMO仿真软件搭建高速公路出口匝道仿真测试环境,利用Gurobi求解控制模块。

3.1 仿真场景

在SUMO中创建一条长为1.1 km的双车道高速公路,如图2所示,每条车道宽3.75 m,出口匝道为单车道。协同控制区的长度设置为300 m^[22],车

辆长5 m,限速设置为80 km/h(即22 m/s)^[24], L_s 为110 m^[25],减速车道的长度设置为125 m。

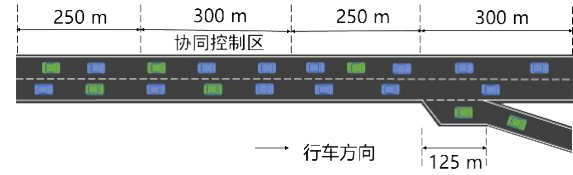


图2 研究场景位置布局

Fig. 2 Study scene location layout

为验证模型的有效性,将协同控制与无控制场景进行对比。研究时间为3 600 s,仿真预热时间为0~30 s。参照文献[23],按4个主线总流量(1 000、1 400、1 800、2 200辆/h)和3个分流比例(80:20、65:35、50:50)设置12个场景,其中,80:20表示主线直行车流占总流量80%,分流车辆占20%,其余分流比例的含义以此类推。这些流量均被随机分配到各主线车道上。仿真参数设置见表2。

表2 仿真参数

Table 2 Simulation parameters

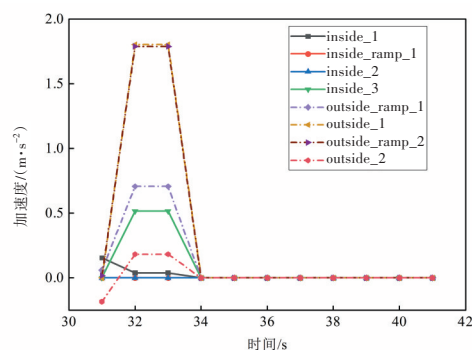
参数	值	单位
h_s	1.0	s
v_{\max}	22.0	m/s
v_{\min}	10.0	m/s
v_{\max}^{diff}	0.0	m/s
a_{\max}, a_{\min}	3, -3	m/s ²
a_{\max}^{diff}	3.0	m/s ³
ω_1, ω_2	1.0	
Δt	1.0	s
T	10.0	s
L_s	110.0	m

3.2 结果分析

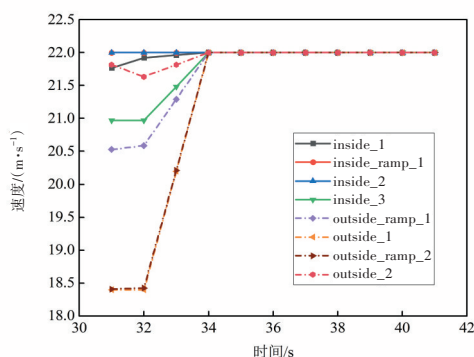
基于SUMO仿真平台进行:1) 协同控制有效性验证;2) 不同总流量和分流比例下协同控制与无控制的比较分析;3) 换道分流车辆纵向距离约束的影响分析;4) 不同权重系数的影响分析。

3.2.1 协同换道有效性分析

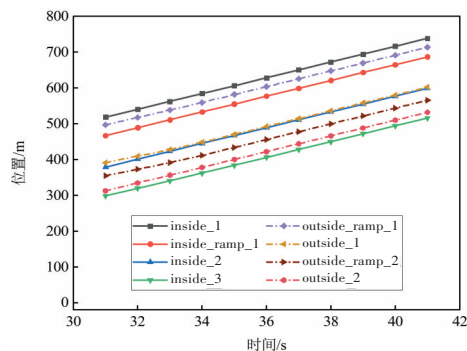
为更好地了解车辆调整过程,以时间区间31~41 s、总流量2 200辆/h和分流比例50:50为例进行说明。协同优化模型计算结果的仿真结果如图3所示,如在31 s,协同控制区有8辆CAV,其中inside_ramp_1表示内侧车道的1号分流车辆,inside_1表示内侧车道的1号直行车辆,outside_ramp_1表示外侧车道的1号分流车辆,outside_1表示外侧车道的1号直行车辆,其余以此类推。



(a) 加速度



(b) 速度



(c) 位置

图3 车辆轨迹数据示意图

Fig. 3 Schematic diagram of vehicle trajectory data

由图3(a)和3(b)可知,车辆速度、加速度均满足约束条件,从31 s开始,8辆车均以不同加速度开始加速,在34 s以后均以限定值行驶,运行效率高。由图3(c)可知,在协同控制前,目标间隙就已经满足换道间隙要求;经协同控制后,目标间隙仍保持在一个安全范围内。因此,本文提出的协同控制通过主线车辆速度的调整,让内侧车道的换道分流车辆安全平稳地换至外侧。

3.2.2 不同控制方案的比较分析

将协同控制方案(方案1)与无控制方案(方案2)的仿真结果进行比较分析,主要比较这两种方案下的平均速度、总延误、平均加速度变化率以及车辆时空速度热力图,验证方案的有效性。使用3个不同的随机数种子,取平均值,得到不同总流量和分流比例下的仿真结果如表3~5所示。

由表3~5可知:1) 不同总流量和分流比例下,方案1的性能指标均比方案2(无控制方案)的好。而且方案1的平均加速度变化率一直维持在较低水平,表明方案1能够有效地改善乘客的舒适度。2) 当分流比例不变时,随着总流量的增加,与方案2相比,方案1的平均速度提升率、平均加速度变化率的改善效果显著。总延误降低率呈现先升后降的趋势,说明随着流量的增加,总延误的改善效果有所下降。3) 当总流量一定时,分流比例增加,与方案2相比,方案1的改善效果基本稳定,相差不大。其中,当总流量为2 200辆/h、分流比例为50:50时,平均速度的改善效果较好;当总流量为1 000辆/h、分流比例为50:50时,总延误的改善效果较差;当总流量为2 200辆/h、分流比例为50:50时,平均加速度变化率的改善效果也较好。

表3 不同总流量和分流比例下平均速度的仿真结果

Table 3 Simulation results of average speed for total flow and diversion ratios

m/s

分流比例	不同方案	1 000辆/h	1 400辆/h	1 800辆/h	2 200辆/h
50:50	方案1	20.78(+4.3%)	20.70(+8.6%)	20.54(+12.5%)	20.26(+17.7%)
	方案2	19.92	19.06	18.25	17.21
65:35	方案1	21.00(+3.7%)	20.88(+6.9%)	20.64(+10.8%)	20.36(+15.3%)
	方案2	20.25	19.54	18.63	17.66
80:20	方案1	21.15(+3.8%)	21.05(+6.9%)	20.93(+10.1%)	20.54(+14.9%)
	方案2	20.37	19.7	19.01	17.88

注:括号内的数值表示评价指标在协同控制方案(方案1)下相较于无控制方案(方案2)下的变化率。

表4 不同总流量和分流比例下总延误的仿真结果

Table 4 Simulation results of total delay for total flow and diversion ratios

s

分流比例	不同方案	1 000辆/h	1 400辆/h	1 800辆/h	2 200辆/h
50:50	方案1	457.51(-75.9%)	924.34(-85.0%)	1 911.02(-84.7%)	3 820.51(-83.5%)
	方案2	1 898.17	6 159.11	12 503.39	23 142.14
65:35	方案1	279.05(-79.6%)	753.53(-83.6%)	1 903.80(-82.2%)	3 731.13(-81.3%)
	方案2	1 366.19	4 593.84	10 685.89	19 963.17
80:20	方案1	228.96(-82.9%)	596.89(-86.5%)	1 279.67(-86.2%)	3 475.95(-81.7%)
	方案2	1 341.13	4 419.79	9 305.58	19 038.48

注:括号内的数值表示评价指标在协同控制方案(方案1)下相较于无控制方案(方案2)下的变化率。

表5 不同总流量和分流比例平均加速度变化率的仿真结果

Table 5 Simulation results of average acceleration rate of change for total flow and diversion ratios

m/s³

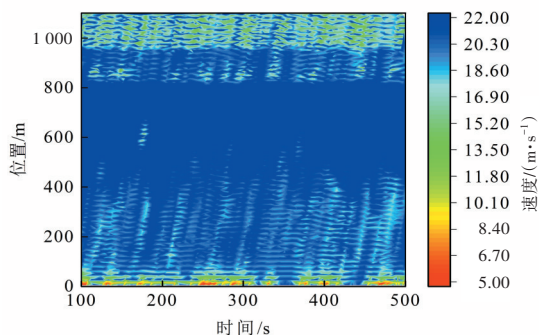
分流比例	不同方案	1 000辆/h	1 400辆/h	1 800辆/h	2 200辆/h
50:50	方案1	0.133(-24.4%)	0.147(-52.0%)	0.183(-60.0%)	0.228(-64.7%)
	方案2	0.176	0.306	0.457	0.645
65:35	方案1	0.107(-11.6%)	0.130(-42.5%)	0.174(-54.8%)	0.219(-60.5%)
	方案2	0.121	0.226	0.385	0.554
80:20	方案1	0.088(-9.3%)	0.108(-43.8%)	0.131(-56.0%)	0.196(-60.3%)
	方案2	0.097	0.192	0.298	0.494

注:括号内的数值表示评价指标在协同控制方案(方案1)下相较于无控制方案(方案2)下的变化率。

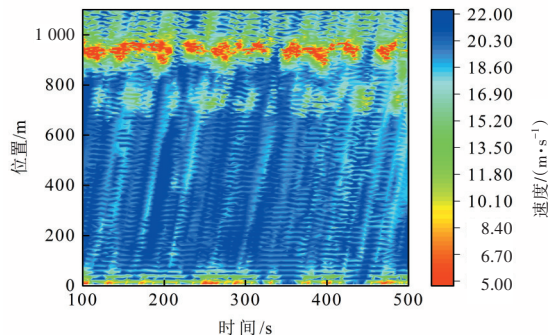
当总流量为2 200辆/h、分流比例不同时,协同控制区车辆时空速度热力图见图4(采样间隔为1 s)。

由图4可知,在方案1下车辆速度基本维持在较高水平,而在方案2下,在路段800~1 000 m,速

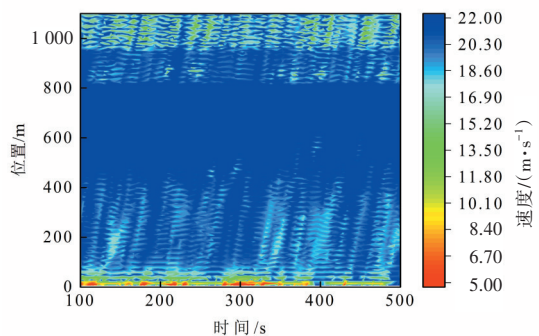
度明显下降,且波动较大,这是由分流车辆需降低车速等待驶出主线的机会导致的。由于方案1设定了最低速度限制,车辆速度基本维持在模型设置的限速以上,且没有出现车速突然降低的情况,主线分流车辆均可以较高速度分流至减速车道。



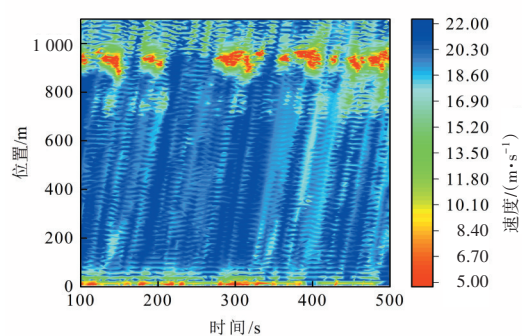
(a) 分流比例为50:50(方案1)



(b) 分流比例为50:50(方案2)



(c) 分流比例为65:35(方案1)



(d) 分流比例为65:35(方案2)

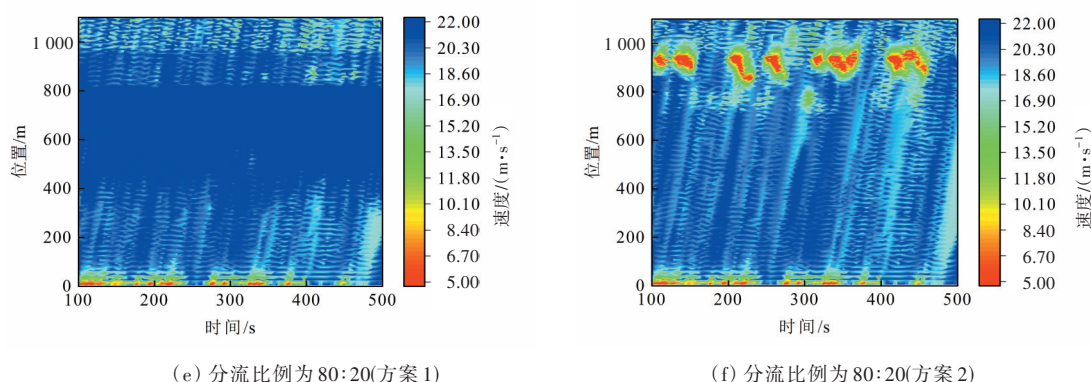


图4 车辆时空速度热力图

Fig. 4 Vehicle spatial and temporal velocity thermograms

3.2.3 纵向距离约束的影响分析

纵向距离约束是协同控制的一个重要参数,本文通过仿真分析距离约束对车辆总延误的影响,结果如图5所示。

由图5可知:1) 不同总流量和分流比例下,距离约束增大,车辆延误升高;2) 当分流比例一定时,若总流量小,66、110、154 m 3种距离约束下车辆延误差距很小;若总流量大,这3种距离约束下车辆延误差距逐渐拉大;3) 当总流量一定时,若分流比例低,这3种距离约束下车辆延误差距很小;

4) 在相同总流量与分流比例下,66 m与110 m距离约束的延误较为接近。因此,纵向距离约束取值越小,通行效率越高,但为了限制车速下的通行安全,需满足安全换道要求的最小纵向距离。

3.2.4 不同权重的影响分析

为了验证目标函数不同权重对结果的影响,本文设置了3种权重,用平均速度作为评价不同权重影响结果的指标,结果如图6所示。

由图6可知:1) 两个权重系数比为1:10时,平均速度最小;2) 当流量较大时,权重系数比为1:1

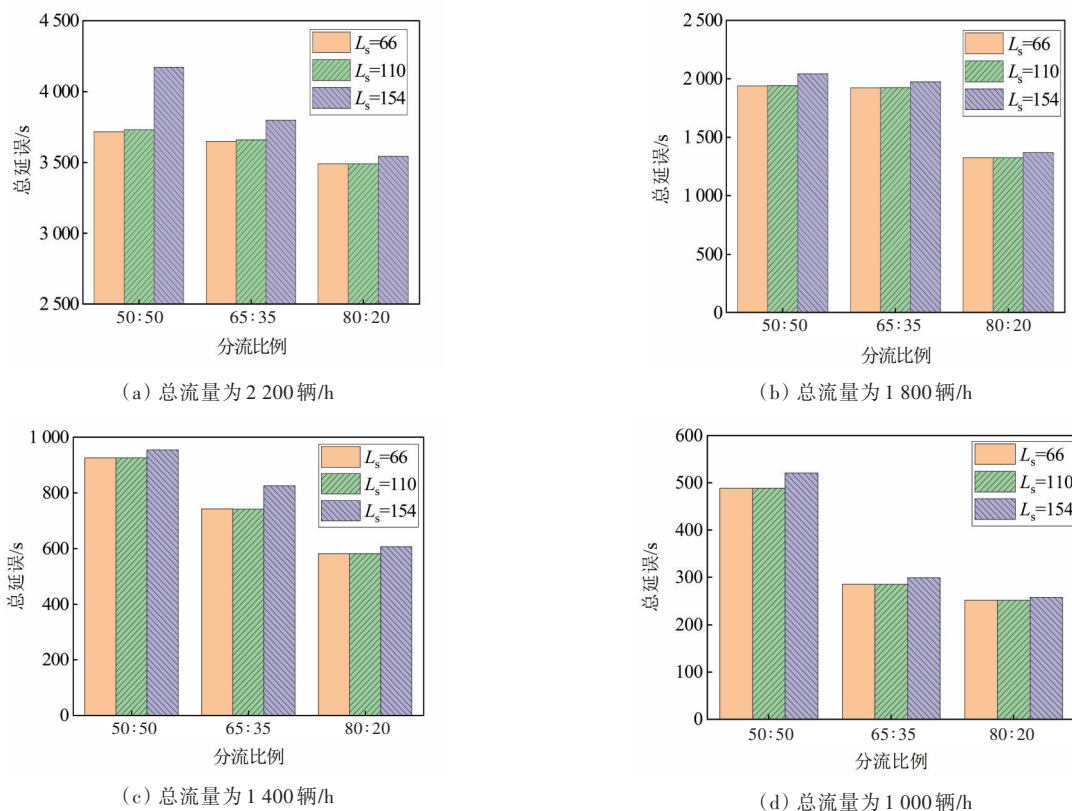


图5 不同纵向距离约束下车辆总延误对比

Fig. 5 Comparison of total vehicle delay under different distance constraints

时的平均速度与权重系数比为10:1时的基本相等,其中,总流量为2 200辆/h、分流比例为50:50时两者的差距最明显,而总流量为1 000辆/h、分流比例为80:20时平均速度的差距最小。故1:1与10:1的权重系数比相对较好,此时有更大的平均速度,且总流量越大,分流比例越高,平均速度的差距越明显。

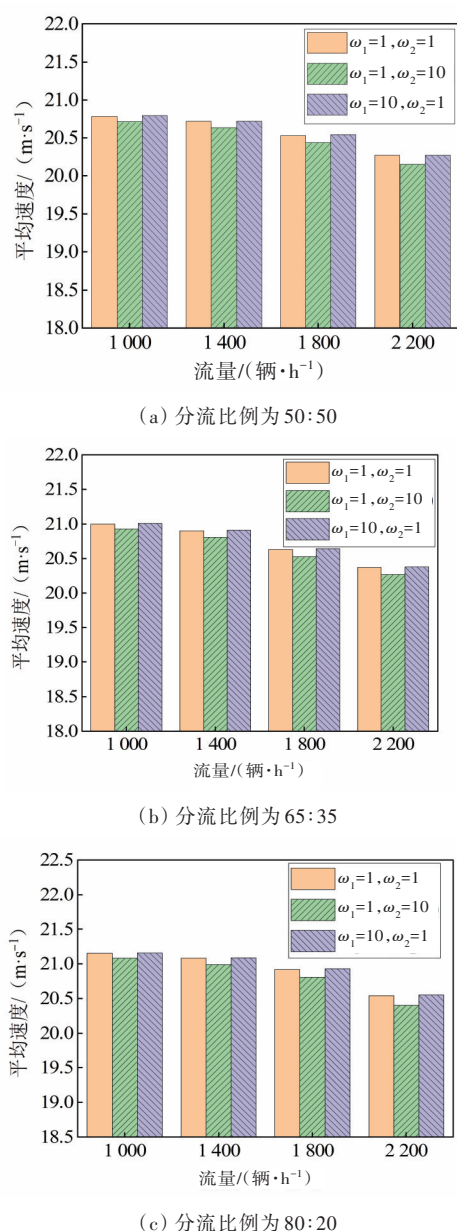


图6 不同权重系数下车辆平均速度对比

Fig. 6 Comparison of average vehicle speed under different weighting factors

4 结论

为减少换道分流车辆对主线交通的干扰,提

出了一种基于最优控制的协同控制模型。通过优化主线车辆的纵向速度,使主线换道分流车辆在分流点之前换道至外侧车道,尽量降低换道对主线车辆的干扰,使分流车辆平稳换道。不同总流量和分流比例下的仿真分析验证了协同控制的有效性;与无控制方案相比,协同控制方案能有效提升车辆平均速度,降低总延误,且总流量越大,平均速度改善效果越显著;协同控制方案下平均加速度变化率的改善率维持在9.3%以上,说明协同控制方案能有效改善乘客的舒适度。

[参考文献]

- [1] JIN W L. Asymptotic traffic dynamics arising in diverge-merge networks with two intermediate links [J]. Transportation Research, Part B: Methodological, 2009, 43(5): 575-595. DOI: 10.1016/j.trb.2008.10.002.
- [2] VAN BEINUM A, FARAH H, WEGMAN F, et al. Driving behaviour at motorway ramps and weaving segments based on empirical trajectory data [J]. Transportation Research, Part C: Emerging Technologies, 2018, 92: 426-441. DOI: 10.1016/j.trc.2018.05.018.
- [3] HUANG Z F, ZHANG Z H, LI H J, et al. Determining appropriate lane-changing spacing for off-ramp areas of urban expressways [J]. Sustainability, 2019, 11(7): 2087. DOI: 10.3390/su11072087.
- [4] 杨建中, 王召强, 李昕怡. 出口匝道衔接辅路交织段运行特征及长度研究[J]. 交通科学与工程, 2019, 35(4): 98-103. DOI: 10.3969/j.issn.1674-599X.2019.04.016.
- [5] YANG Jianzhong, WANG Zhaoqiang, LI Xinyi. Study on the operation characteristics and the length of the weaving section between exit ramp and auxiliary road [J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2019, 35(4): 98-103. DOI: 10.3969/j.issn.1674-599X.2019.04.016.
- [6] QIAN G B, LEE J B. Variable speed limits for motorway off-ramp queue protection [J]. IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine, 2020, 12(2): 64-76. DOI: 10.1109/mits.2018.2879164.
- [7] GONG S Y, DU L L. Optimal location of advance warning for mandatory lane change near a two-lane highway off-ramp [J]. Transportation Research, Part B: Methodological, 2016, 84: 1-30. DOI: 10.1016/j.trb.2015.12.001.
- [8] 武和全, 刘瑾, 龚创业, 等. 自动驾驶汽车的碰撞安全性研究综述[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2023, 20(2): 35-44. DOI: 10.19951/j.cnki.1672-9331.20230115001.
- [9] WU Hequan, LIU Jin, GONG Chuangye et al. A review of crash safety research on self-driving cars [J]. Journal of Changsha University of Technology (Natural

- Science), 2023, 20 (2): 35–44. DOI: 10.19951/j.cnki.1672-9331.20230115001.
- [8] SMITH S, RAZO M. Using traffic microsimulation to assess deployment strategies for the connected vehicle safety pilot [J]. Journal of Intelligent Transportation Systems, 2016, 20 (1): 66–74. DOI: 10.1080/15472450.2014.889941.
- [9] GHIASI A, LI X P, MA J Q. A mixed traffic speed harmonization model with connected autonomous vehicles [J]. Transportation Research, Part C: Emerging Technologies, 2019, 104: 210–233. DOI: 10.1016/j.trc.2019.05.005.
- [10] OLIA A, ABDELGAWAD H, ABDULHAI B, et al. Assessing the potential impacts of connected vehicles: mobility, environmental, and safety perspectives [J]. Journal of Intelligent Transportation Systems, 2016, 20 (3): 229–243. DOI: 10.1080/15472450.2015.1062728.
- [11] ALI SILGU M, ERDAGI I G, GOKSU G, et al. Combined control of freeway traffic involving cooperative adaptive cruise controlled and human driven vehicles using feedback control through SUMO [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2022, 23 (8): 11011–11025. DOI: 10.1109/tits.2021.3098640.
- [12] HAN L, ZHANG L, GUO W A. Optimal differential variable speed limit control in a connected and autonomous vehicle environment for freeway off-ramp bottlenecks [J]. Journal of Transportation Engineering, Part A: Systems, 2023, 149 (4): 04023009. DOI: 10.1061/jtepbs.teeng-7456.
- [13] ZHENG Y, RAN B, QU X, et al. Cooperative lane changing strategies to improve traffic operation and safety nearby freeway off-ramps in a connected and automated vehicles environment [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2020, 21 (11): 4605–4614. DOI: 10.1109/tits.2019.2942050.
- [14] NAGALUR SUBRAVETI H H S, SRIVASTAVA A, AHN S, et al. On lane assignment of connected automated vehicles: strategies to improve traffic flow at diverge and weave bottlenecks [J]. Transportation Research, Part C: Emerging Technologies, 2021, 127: 103126. DOI: 10.1016/j.trc.2021.103126.
- [15] 张勇. 基于滚动时域的出口匝道队列分流轨迹规划模型[D]. 西安: 长安大学, 2022.
ZHANG Yong. Rolling horizon based trajectory planning model for queue diversion in off ramp [D]. Xi'an: Chang'an University, 2022.
- [16] DONG C Y, WANG H, LI Y, et al. Route control strategies for autonomous vehicles exiting to off-ramps [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2020, 21 (7): 3104–3116. DOI: 10.1109/TITS.2019.2925319.
- [17] HAO W, ZHANG Z L, GAO Z B, et al. Research on mandatory lane-changing behavior in highway weaving sections [J]. Journal of Advanced Transportation, 2020, 2020: 3754062. DOI: 10.1155/2020/3754062.
- [18] DONG C Y, WANG H, WANG W, et al. Hybrid traffic flow model for intelligent vehicles exiting to off-ramp [J]. Acta Physica Sinica, 2018, 67 (14): 144501. DOI: 10.7498/aps.67.20172752.
- [19] DONG C Y, XING L, WANG H, et al. Iterative learning control for lane-changing trajectories upstream off-ramp bottlenecks and safety evaluation [J]. Accident; Analysis and Prevention, 2023, 183: 106970. DOI: 10.1016/j.aap.2023.106970.
- [20] XIE Y C, ZHANG H X, 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, 2017, 21 (2): 136–147. DOI: 10.1080/15472450.2016.1248288.
- [21] 闫茂德, 张钰瑶, 杨盼盼, 等. 基于多目标优化的智能网联汽车队列换道方法[J]. 计算机仿真, 2022, 39 (3): 145–149, 329. DOI: 10.3969/j.issn.1006-9348.2022.03.028.
YAN Maode, ZHANG Yuyao, YANG Panpan, et al. Lane change method of intelligent networked vehicle platoon based on multi-objective optimization [J]. Computer Simulation, 2022, 39 (3): 145–149, 329. DOI: 10.3969/j.issn.1006-9348.2022.03.028.
- [22] SHI Y J, YU H, GUO Y J, et al. A collaborative merging strategy with lane changing in multilane freeway on-ramp area with V2X network [J]. Future Internet, 2021, 13 (5): 123. DOI: 10.3390/fi13050123.
- [23] 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. DOI: 10.1016/j.trc.2017.04.015.
- [24] HU X W, SUN J. Trajectory optimization of connected and autonomous vehicles at a multilane freeway merging area [J]. Transportation Research, Part C: Emerging Technologies, 2019, 101: 111–125. DOI: 10.1016/j.trc.2019.02.016.
- [25] 张新锋, 夏八科, 张甫城. 基于 V2V 的高速换道轨迹多目标规划[J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2020, 41 (2): 131–137. DOI: 10.3969/j.issn.1671-7775.2020.02.002.
ZHANG Xinfeng, XIA Bake, ZHANG Fucheng. Multi-objective planning of high-speed lane changing trajectory based on V2V [J]. Journal of Jiangsu University (Natural Science Edition), 2020, 41 (2): 131–137. DOI: 10.3969/j.issn.1671-7775.2020.02.002.

(责任编辑:赵冰;校对:石月珍;英文编辑:刘至真)