

考虑自动驾驶小客车的高速公路 施工区上游过渡区间距

杨 柳^{1,2}, 李鸿辉^{1,2}, 李文芳³

(1. 长沙理工大学 公路养护技术国家工程实验室, 长沙 410114; 2. 长沙理工大学 交通学院, 长沙 410114; 3. 黄河交通学院, 河南 焦作 454950)

摘 要:六车道高速公路封闭相邻两个车道时需设置两个上游过渡区,但现行规范并未规定两者间距的具体取值,考虑自动驾驶小客车(AC)的混入,研究该间距的取值问题。首先,定义警告区通行效率作为上游过渡区间距 D 的评价依据,构造动态综合评价函数,进行警告区通行效率分级;其次,通过SUMO软件建模,基于不同的交通条件,即不同的交通量 V 、人类驾驶大货车混入率 T 、AC渗透率 P ,进行 D 取不同值的模拟实验,分析警告区通行效率的变化规律;然后,基于通行效率分级,通过实验探讨 D 在不同交通条件下的取值范围;最后,分析 D 在不同交通条件下对施工区环境和通行效率的影响。模拟实验表明: D 越大警告区通行效率越高,该变化是非线性的,提高幅度随 D 的增大而变缓;随着 V 或 T 升高,警告区通行效率降低,增大 D 才能保持其不变;随着 P 升高,警告区通行效率先升高后降低,存在一个最佳的 P 使其达到最大且 D 达到最小;相对于 D 取最小值,增大 D 能降低 CO_2 排放量,在适当的交通条件下,能同时提高警告区通行效率和缩短平均行程时间。

关键词:道路工程;施工区;动态综合评价;高速公路;上游过渡区;自动驾驶小客车;交通流模拟

中图分类号:U418;U491 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5497(2025)11-3604-10

DOI:10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20240126

Distance between upstream transition zones of freeway work zone considering automatic cars

YANG Liu^{1,2}, LI Hong-hui^{1,2}, LI Wen-fang³

(1. National Engineering Laboratory of Highway Maintenance Technology, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China; 2. School of Transportation, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China; 3. Huanghe Jiaotong University, Jiaozuo 454950, China)

Abstract: When a six-lane freeway closes two adjacent lanes, two upstream transition zones need to be set up. However, the current regulations do not specify the specific value of the distance between the two. Considering the mixing of automatic cars (AC), the problem of the value of this distance is studied. Firstly, the traffic efficiency in the warning zone is defined as the evaluation basis for the upstream

收稿日期:2024-01-31.

基金项目:湖南省教育厅项目(20A009);长沙理工大学公路养护技术国家工程实验室开放基金项目(KFJ190102);长沙理工大学“双一流”国际合作项目(2019IC09).

作者简介:杨柳(1980-),男,讲师,博士.研究方向:自动驾驶道路设计理论与方法.E-mail:yangliu2005@csust.edu.cn

transition zone spacing D , and a dynamic comprehensive evaluation function is constructed to classify the traffic efficiency in the warning zone. Secondly, through SUMO software modeling, simulation experiments with different values of D were conducted based on different traffic conditions, such as different traffic volumes V , human-driving truck mixing rate T , and AC penetration rate P , to analyze the changes in traffic efficiency in the warning zone. Then, based on the classification of traffic efficiency, the range of values for D under different traffic conditions is explored through experiments. Finally, analyze the impact of D on the work zone environment and traffic efficiency under different traffic conditions. The simulation experiment shows that the larger the D , the higher the traffic efficiency in the warning zone, and this change is non-linear, with the increase rate slowing down as D increases. As V or T increases, the traffic efficiency in the warning zone decreases, and increasing D is necessary to maintain the same traffic efficiency in the warning zone. As P increases, the traffic efficiency in the warning zone first increases and then decreases. There exists an optimal P that maximizes the traffic efficiency in the warning zone and minimizes D . Compared to taking the minimum value of D , increasing D can reduce CO_2 emissions. Under appropriate traffic conditions, increasing D can simultaneously improve the traffic efficiency in warning zone and reduce the average travel time.

Key words: road engineering; work zone; dynamic comprehensive evaluation; freeway; upstream transition zone; automatic cars; traffic flow simulation

0 引 言

随着自动驾驶技术的发展,未来在高速公路上将混入自动驾驶车辆,并且人机混行将长期存在^[1]。高速公路施工区作为瓶颈路段,在自动驾驶车辆的混入下,瓶颈效应可能会更加严重,施工区布置方案也可能产生相应变化。因此,研究人机混行下的高速公路施工区布置问题,对高速公路的交通运行组织具有重要意义。

孟祥海等^[2]针对高速公路占用超车道的施工区形式,提出用运行速度和瓶颈路段通行能力分别作为车辆限速和分流的依据;Algomaiah等^[3]对高速公路施工区封闭单条车道进行模拟实验,利用通行能力、延误和排队长度等对比分析了采用不同合流位置的效果;郝嘉田等^[4]构建了高速公路半幅封闭施工时中间带开口长度的计算模型,并选取时间占有率、饱和度、速度一致性和行程延误对车辆运行状态进行分级;Zou等^[5]研究了高速公路半幅封闭时施工区交通冲突的影响因素,结果表明车辆单位长度的转弯角度影响最大;李晓虎等^[6]提出了一种考虑自动驾驶车辆换道比例和跟车时距的控制策略,将其运用于高速公路施工区,能起到提高运行车速和降低车速离散性及减少冲突次数的作用;Abdulsattar等^[7]研究得出,在各种交通量下,均存在一个网联车的最佳渗透率,让网联车的混入不会对高速公路施工区交通

运行产生影响;陈玲娟等^[8]通过构建网联车与普通车混行的跟驰及换道模型,验证了网联车在高速公路施工区对增强通行能力、提高平均车速和缩短行程时间的有效性;Tajalli等^[9]提出了一种网联车在高速公路施工区的最优控制方法,证明该方法能够减少停车次数和降低碰撞风险。

上述高速公路施工区的研究现状表明:在施工区形式方面,主要研究四车道和六车道高速公路单条车道封闭和半幅封闭,缺乏对于六车道高速公路施工区封闭两条车道的研究;研究混入自动驾驶车辆时,交通组成中没有考虑大货车,而国内高速公路上的大货车占比高、性能差,对施工区交通运行的影响不能被忽略;另外,混入自动驾驶车辆的研究集中于施工区交通流特性和交通安全,未涉及施工区几何布置。

根据《公路养护安全作业规程》(JTG H30—2015)(以下简称《规程》)的规定,六车道高速公路施工区封闭中间车道时,需同时封闭内侧或外侧车道,应设置间距不小于 200 m 的两个上游过渡区,但未给出该间距的具体取值,间距越大越有利于汇流,但过大又会加重施工区的整体瓶颈效应,间距过小又会导致汇流不畅而产生拥堵,因此,应研究该间距在不同条件下的合理取值。警告区受上游过渡区间距的影响较明显,且在警告区采集评价指标不受车道缩减的影响,因此,根据

警告区通行效率的变化来确定上游过渡区间距的取值。目前,自动驾驶小客车(Automatic car, AC)已接近实现条件,但自动驾驶大货车实现的技术难、成本高,相比非网联自动驾驶,网联自动驾驶还处于起步研究阶段,因此,考虑没有网联功能的AC混入更有现实意义。

本文以六车道高速公路封闭相邻两个车道的施工区为对象,开展以下研究工作:①建立警告区通行效率的评价体系,包括评价指标、评价标准和评价方法;②基于不同交通条件,即不同的交通量 V 、人类驾驶大货车(Human-driving truck, HT)混入率 T 和AC渗透率 P ,探讨上游过渡区间距 D 对警告区通行效率的影响;③基于不同交通条件,确定警告区通行效率分级对应的 D 取值范围;④基于不同交通条件,根据 D 取值范围的阈值,利用 CO_2 排放量和平均行程时间,分析 D 对施工区环境和通行效率的影响。

1 警告区通行效率评价体系

1.1 评价指标

考虑警告区具有空间占有率高、车辆密度大、车速慢、拥堵严重等特性,选取空间占有率(O)、交通密度(K)、空间平均车速(V_d)、平均行程延误(L)作为警告区通行效率的评价指标。AC一般有更大的车头间距,故将空间占有率和交通密度一同纳入作为评价指标。参考《公路工程技术标准》(JTG B01—2014)(以下简称《标准》),对高速公路警告区通行效率进行分级^[10],分为高(R_1)、较高(R_2)、中等(R_3)、较低(R_4)和低(R_5)共5个等级。

1.2 评价标准

根据《规程》规定,警告区最终限速值不应大于 $80 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$,本文选取 $80 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 。参考郝嘉田等^[4]和彭余华等^[10]采用的评价标准,并结合现实,警告区各评价指标对应各等级通行效率的评价标准见表1。

表1 警告区通行效率各评价指标的评价标准

Table 1 Criteria of index for traffic efficiency in warning zone

等级	$O/\%$	$K/(\text{pcu}\cdot\text{km}^{-1}\cdot\text{ln}^{-1})$	$V_d/(\text{km}\cdot\text{h}^{-1})$	$L/(\text{s}\cdot\text{veh}^{-1}\cdot\text{km}^{-1})$
R_1	<19	<38	>25	<123
R_2	$[19-25)$	$[38-48)$	$(20-25]$	$[123-146)$
R_3	$[25-30)$	$[48-56)$	$(15-20]$	$[146-173)$
R_4	$[30-35)$	$[56-72)$	$(10-15]$	$[173-189)$
R_5	≥ 35	≥ 72	≤ 10	≥ 189

1.3 评价方法

警告区的评价指标取值会随时间和空间发生变化,适合采用动态综合评价法来确定指标权重并构造评价函数。在评价指标中,取值与效益同向变化的指标为正指标,反之,则为逆指标。为了保证指标计算的准确性,让所有指标的作用方向一致,利用倒数进行正逆指标的一致化处理。由于各个指标量纲不同,直接进行加权没有实际意义,采用极值法进行归一化处理。其形式如下:

令 $M_j = \max_i a_{ij}^*, m_j = \min_i a_{ij}^*$,则:

$$a_{ij} = \frac{a_{ij}^* - m_j}{M_j - m_j} \quad (1)$$

式中: a_{ij} 为经过一致化和归一化的指标向量,属于无量纲; a_{ij}^* 为未归一化的指标向量; i 为第 i 个评价指标; j 为第 j 个评价指标的第 j 个样本值。

考虑实际情况,警告区各评价指标的极值见表2。在评价指标中只有车速是正指标,为了方便计算,将车速转化为逆指标。取极小型动态综合评价函数来评价,即评价函数值越小则警告区通行效率越高,具体形式为:

$$C_j = \sum_{i=1}^n (a_{ij})^2 \times 100 \quad (2)$$

式中: C_j 为第 j 个评价函数值,属于无量纲。

结合表1,可计算获得警告区通行效率分级,见表3。

表2 警告区通行效率各评价指标的极值

Table 2 Extremum of index for traffic efficiency in warning zone

极值	$O/\%$	$K/(\text{pcu}\cdot\text{km}^{-1}\cdot\text{ln}^{-1})$	$V_d/(\text{km}\cdot\text{h}^{-1})$	$L/(\text{s}\cdot\text{veh}^{-1}\cdot\text{km}^{-1})$
极大值	1	200	80	300
极小值	0	0	5	0

表3 警告区通行效率分级

Table 3 Level of traffic efficiency in warning zone

等级	评价函数值范围
R_1	<26.181
R_2	$[26.181, 39.694)$
R_3	$[39.694, 58.440)$
R_4	$[58.440, 86.678)$
R_5	≥ 86.678

2 建模与模拟方案

2.1 道路建模

根据《规程》的规定,高速公路施工区分为警告区(S)、上游过渡区(L_s)、纵向缓冲区(H)、工作

区(G)、下游过渡区(L_x)和终止区(Z),见图1。基于图1进行施工区的道路建模,纵坡度设为0%,车道宽取3.75 m,中央分隔带与硬路肩宽取3 m, $S=2\ 000\text{ m}$, $L_s=190\text{ m}$, $H=120\text{ m}$, $G=1\ 000\text{ m}$, $L_x=30\text{ m}$, $Z=200\text{ m}$ 。

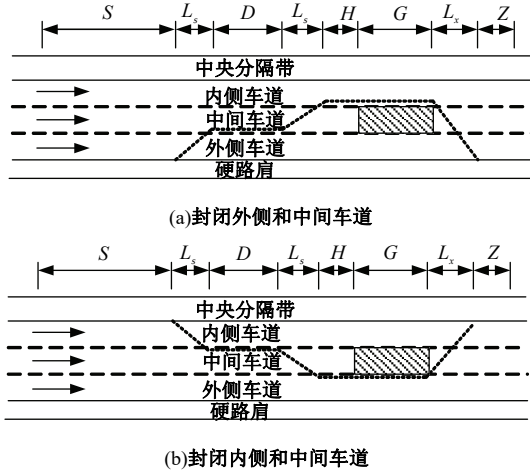


图1 施工区的车道封闭方式

Fig. 1 Lane closure method in work zone

2.2 车辆建模

考虑高速公路的交通组成现状,统一高速公路的车辆类型,建模车型设定为AC、人类驾驶小客车(Human-driving car, HC)和HT。为了保证行车安全,人机混行下所有车辆驾驶行为应有较高的一致性。在模拟实验中,车辆驾驶行为由跟驰模型和换道模型决定,故针对自动驾驶车辆和人类驾驶车辆采用不同的跟驰模型和相同的换道模型。

2.2.1 跟驰模型

考虑IDM参数意义明确,适合描述人机混行的AC跟驰状态,姚志洪等^[11]和Wang等^[12]研究表明自动驾驶车辆采用IDM能提高交通流的稳定性,因此,选用IDM作为AC的跟驰模型^[13]。其形式如下:

$$\alpha_n(t) = \theta \left[1 - \left(\frac{v_n(t)}{v_0} \right)^\delta - \left(\frac{s^*(v_n(t), \Delta v(t))}{s_n} \right)^2 \right] \quad (3)$$

$$s^*(v_n(t), \Delta v(t)) = s_0 + s_1 \sqrt{\frac{v_n(t)}{v_0}} + T v_n(t) + \frac{v_n(t) \Delta v(t)}{2\sqrt{\theta d}} \quad (4)$$

$$s_n = x_{n-1}(t) - x_n(t) - l_n \quad (5)$$

式中: $\alpha_n(t)$ 为第 n 辆车 t 时刻的加速度, $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$; θ 为最大加速度, $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$; $x_n(t)$ 为第 n 辆车第 t 时刻的位

置; $v_n(t)$ 为第 n 辆车第 t 时刻的速度, $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$; v_0 为第 n 辆车第 t 时刻的期望车速, $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$; δ 为加速度指数; $\Delta v(t)$ 为前后车的速度差, $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$; s_n 为前后车相对距离, m ; s^* 为当前状态下的期望间距, m ; s_0 为静止安全距离参数, m ; s_1 为与速度相关的安全距离参数, m ; d 为舒适减速度, $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$; T 为安全车头时距, s ; l_n 为车长, m 。

Krauss模型^[14]是一种安全距离类模型,该模型能较好地反映交通拥堵的情况,选用该模型作为HC和HT的跟驰模型。其形式如下:

$$v_s = v_0 + \frac{s - v_i t_r}{(v_0 + v_i)/2\beta + t_r} \quad (6)$$

$$v_d = \min(v_s, v_m, v_i + t_s \alpha_m) \quad (7)$$

$$v_p = v_d - \epsilon [v_s - (v_i - t_s \alpha_m)] \quad (8)$$

$$v_{i+1} = \text{ran}(v_p, v_d) \quad (9)$$

$$x_{i+1} = x_i + t_s v_{i+1} \quad (10)$$

式中: v_s 为跟驰车辆安全车速, $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$; v_0 为前车速度, $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$; v_i 为跟驰车辆当前车速, $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$; β 为车辆最大减速度, $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$; s 为车头间距, m ; t_r 为驾驶员反应时间, s ; v_d 为期望车速, $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$; v_m 为最大车速, $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$; t_s 为仿真步长, s ; α_m 为车辆最大加速度, $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$; v_p 为实际速度与期望速度的最大速度差, $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$; ϵ 为速度折减因数; ran 表示在 (v_p, v_d) 内随机取值; v_{i+1} 为跟驰车辆下一个仿真步长的车速, $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$; x_{i+1} 为下一仿真步长车辆的位置, m 。

2.2.2 换道模型

LC2013换道模型^[15]与现实中高速公路车辆的换道行为较为相符,其包含的战略、协同、战术和义务4种换道动机符合施工区的各种换道行为,故选用该模型模拟所有车辆的换道行为。每当车辆必须换道才能继续正常行驶时,车辆会执行战略换道。其形式如下:

$$d - o < v_0 \times |b| \times f \quad (11)$$

式中: d 为与车道尽头的距离, m ; o 为与车道占用率相关的折减量, m ; v_0 为接近车道尽头的期望车速, $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$; b 为执行战略换道, $b < 0$ 需向左换道, $b > 0$ 需向右换道; f 为换道成功所需时间参数, s 。

2.2.3 CO₂排放模型

中国和欧洲同类型车辆的排放因子基本相同,基于SUMO选定欧洲道路交通因子排放(HBEFA)模型作为CO₂排放的测算模型^[16]。采用HBEFA3模型,AC和HC选择PC_G_EU4排放类别,HT选择HDV排放类别。当车辆急剧加

减速时,CO₂排放会增加。

2.3 参数标定

在混行条件下,AC 与 HC 加减速性能基本一致,结合高速公路 120 km·h⁻¹的限速要求,从安全角度确定小客车的最大速度。HT 的动力性能较差,其加减速性能和最大车速均不如小客车。参考《公路路线设计规范》(JTG D20—2017),确定 3 种车型的参数取值^[17],见表 4。两种跟驰模型参数标定结果见表 5 和表 6。

LC2013 换道模型设置的参数包括遵守右侧行驶的意愿(lcKeepRigh),数值越大换道得越早;为加快速度而换道的意愿(lcSpeedGain),数值越大换道次数越多;战略性变道意愿(lcStrategic),数值越大换道得越早;上述参数取值范围均为[0,+∞)。封闭外侧和中间车道会减弱驾驶员靠右行驶的意愿,区分两种车道封闭方式下 HC 和 HT 的 lcKeepRigh 取值,AC 的 lcKeepRight 取值无须区分,以封闭外侧和中间车道取值为准,所有参数标定的结果见表 7^[18]。

表 4 车辆参数标定

Table 4 Vehicle parameter calibration

车型	长度/ m	宽度/ m	最大速度/ (m·s ⁻¹)	加速度/ (m·s ⁻²)	减速度/ (m·s ⁻²)
AC	6.00	1.80	33.33	3.00	4.50
HC	6.00	1.80	33.33	3.00	4.50
HT	18.10	2.55	22.22	0.60	3.00

表 5 IDM 参数标定

Table 5 IDM parameter calibration

$v_0/(m·s^{-1})$	$\theta/(m·s^{-2})$	$d/(m·s^{-2})$	s_0/m	s_1/m	T/s	δ
33.33	1.40	2.00	2.00	0.00	1.50	4.00

表 6 Krauss 模型参数标定

Table 6 Krauss model parameter calibration

$v_m/(m·s^{-1})$	$\alpha_m/(m·s^{-2})$	$\beta/(m·s^{-2})$	s/m	t_r/s	ϵ	t_s/s
33.33	2.60	4.50	3.00	1.50	0.50	1.00

表 7 LC2013 模型参数标定

Table 7 LC2013 model parameter calibration

lcKeepRight	lcSpeedGain	lcStrategic
1.6(封闭内侧和中间车道)	1.0(封闭外侧和中间车道)	1.8
		0.1

2.4 模拟方案

考虑图 1 中的两种车道封闭方式。参考《标准》,交通量 V 取 1 500、1 600、1 700 veh·h⁻¹;HT 混入率 T 取 0.2、0.3,HT 分配于外侧车道,HT 折算系数取 4.0,交通量的折算交通量见表 8,均低

表 8 交通量折算

Table 8 Conversion of traffic volumes

T	交通量/(veh·h ⁻¹)	折算交通量/(pcu·h ⁻¹ ·ln ⁻¹)
0.2	1 500	800
	1 600	853
	1 700	907
0.3	1 500	950
	1 600	1 013
	1 700	1 077

于高速公路二级服务水平对应的最大服务交通量 1 200 pcu·h⁻¹·ln⁻¹;AC 渗透率 P 指 AC 在小客车中的占比,取 0.1、0.5、0.9、1.0。根据《规程》,上游过渡区间距 D 取 200 m 为最小值。每次模拟时间 3 600 s,步长 1 s。

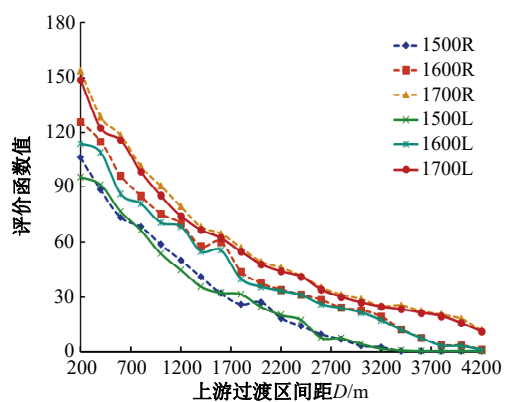
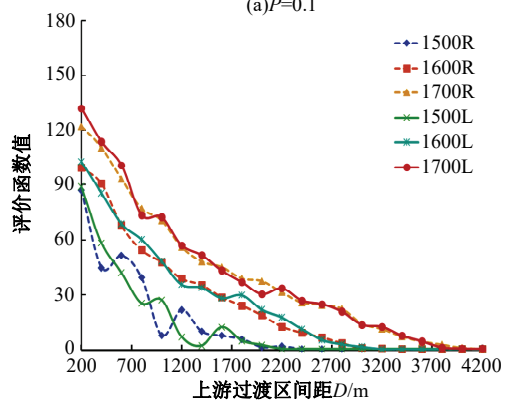
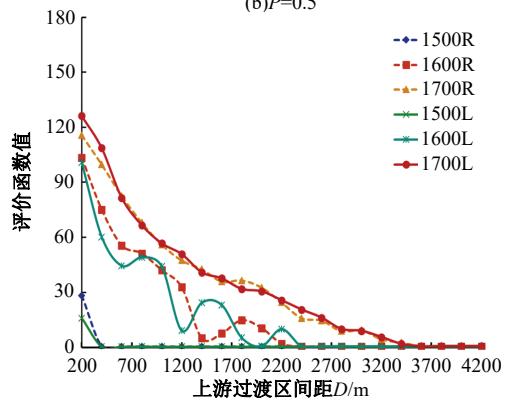
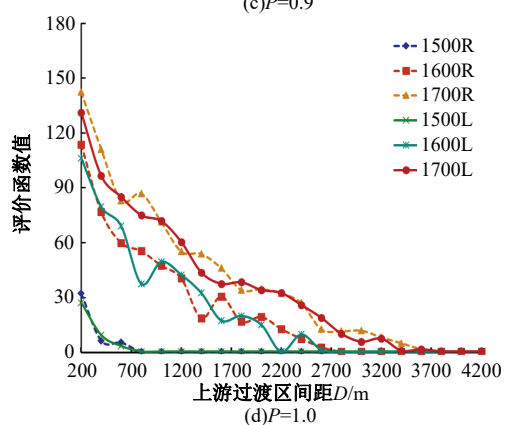
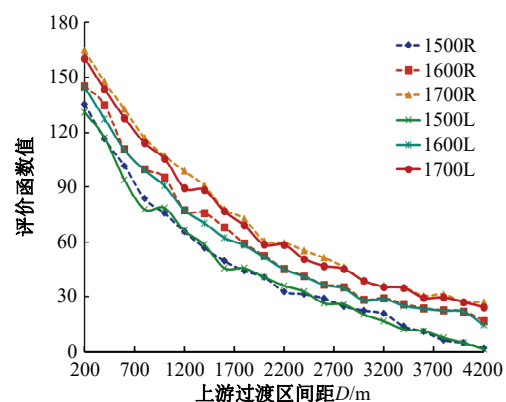
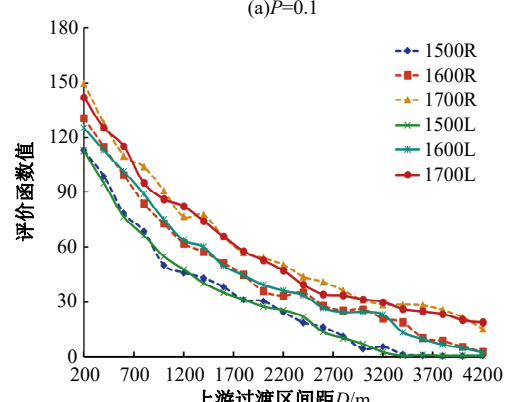
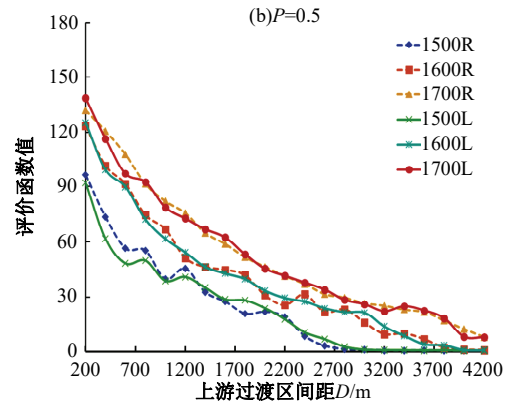
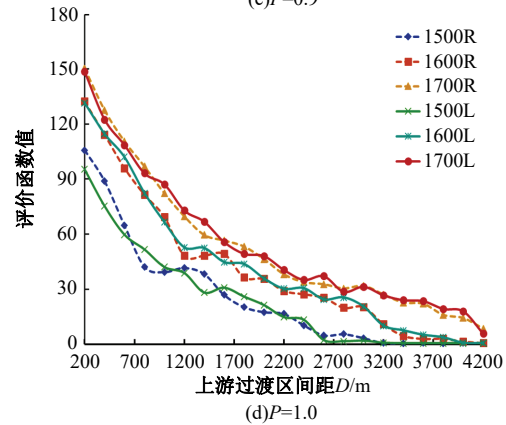
具体实验方案如下:①按照步长 200 m 增加上游过渡区间距 D 进行实验,研究其变化对警告区通行效率的影响;②在上述研究基础上,按照步长 25 m 进行实验,研究警告区通行效率分级对应 D 的阈值和取值范围;③选取 R₅ 级对应的 D 上下限阈值,用 Python 对 SUMO 进行二次开发,通过实验研究 D 值对 CO₂ 排放量和平均行程时间的影响。

3 实验结果分析与讨论

3.1 上游过渡区间距对警告区通行效率的影响

在不同交通量 V 、HT 混入率 T 、AC 渗透率 P 的作用下,获得不同上游过渡区间距 D 对应的警告区通行效率评价函数值,见图 2~图 3,图例表示交通量,其中 R 指封闭外侧和中间车道,L 指封闭内侧和中间车道,例如,1 500 R 指 $V=1 500$ veh·h⁻¹ 时施工区封闭外侧和中间车道。

由图 2、图 3 可知,随着 D 的增大,评价函数值总体呈现降低趋势,即警告区通行效率提高。以图 3(a)为例,在 D 从 1 700 m 增大到 3 700 m 的过程中,以 1 000 m 为步长,当 $V=1 500$ veh·h⁻¹ 时,评价函数值在 50、25 和 15 附近,降低幅度为 50.0% 和 40.0%;当 $V=1 600$ veh·h⁻¹ 时,评价函数值在 65、35 和 25 附近,降低幅度为 46.1% 和 28.6%;当 $V=1 700$ veh·h⁻¹ 时,评价函数值在 75、45 和 30 附近,降低幅度为 40.0% 和 33.3%。图 2、图 3 显示评价函数值随 D 的变化是非线性的,并且降低幅度总体随 D 的增大而变缓,这表明 D 的增大能缓解警告区的拥堵,但随着 D 的增大,该影响呈现降低趋势。

(a) $P=0.1$ (b) $P=0.5$ (c) $P=0.9$ (d) $P=1.0$ 图 2 $T=0.2$ 时上游过渡区间距的评价函数值Fig. 2 Evaluation function value of distance between upstream transition zones when $T=0.2$ (a) $P=0.1$ (b) $P=0.5$ (c) $P=0.9$ (d) $P=1.0$ 图 3 $T=0.3$ 时上游过渡区间距的评价函数值Fig. 3 Evaluation function value of distance between upstream transition zones when $T=0.3$

如图 2、图 3 所示,当 D 不变时,随着交通量 V 的增加,评价函数值都显著增大,即警告区通行效率明显降低。当 V 较小时,评价函数值随 D 值有一定波动,其原因可能是当交通量较小时,警告区通行效率较高,HT 对交通流的随机扰动容易引起通行效率产生波动。为探求评价函数值与 T 的关系,以图 2(a)和图 3(a)为例,当 $T=0.2$ 、 $D=200$ m 时,评价函数值在 100、120 和 150 附近,当 $T=0.3$ 、 $D=200$ m 时,评价函数值在 130、140 和 160 附近,根据图 2、图 3 可进一步发现以下规律:当其他条件相同时, $T=0.3$ 比 $T=0.2$ 对应的评价函数值更大。在图 2(a)和图 3(a)中,除 $V=1\,500$ $\text{veh}\cdot\text{h}^{-1}$ 外,封闭外侧和中间车道比封闭内侧和中间车道的评价函数值更大。从图 2(b)~(d)和图 3(b)~(d)可见,随着 P 升高,两种车道封闭方式的评价函数值无明显差异且都有所降低;但在 $P=1.0$ 时评价函数值有所提高,其原因可能是当小客车全为 AC 时有统一的驾驶行为,受 HT 的干扰会更大,导致通行效率降低。

3.2 警告区通行效率分级对应的上游过渡区间距

根据表 3,通过模拟实验获得不同条件下的上游过渡区间距 D 的取值范围,见表 9、表 10。3.1 节研究结果表明:施工区两种车道封闭方式对通行效率的影响差异较小,后续仅研究封闭内侧和中间车道的场景,见图 1(b)。

如表 9、表 10 所示,以 R_3 过渡到 R_2 为例,当 $T=0.2$ 和 $P=0.5$ 时,随着交通量 V 的增加, D 阈值为 650、1 200 和 1 775 m;当 $V=1\,600$ $\text{veh}\cdot\text{h}^{-1}$ 和 $P=0.5$ 时,随着 HT 混入率 T 升高, D 阈值为 1 200 m 和 2 000 m;当 $V=1\,600$ $\text{veh}\cdot\text{h}^{-1}$ 、 $T=0.2$ 时,随着 AC 渗透率 P 升高, D 阈值为 1 925、1 200、1 125 和 1 175 m。通过分析 D 的变化可知,若要保持警告区通行效率不变,当 V 或 T 升高时, D 需增大,当 P 升高且小于 1.0 时, D 需减小。

3.3 上游过渡区间距对施工区的整体影响

根据表 9、表 10,将 R_5 对应上游过渡区间距 D 的上限阈值记为实验组,将 R_5 对应 D 的下限阈值 200 m 定义为最小值,记为对照组,其模拟路段总长和施工区其他长度参数与实验组一致。表 9 中“—”处 D 的上限和下限阈值均取 200 m。模拟路

表 9 $T=0.2$ 时上游过渡区间距取值范围

Table 9 Range of distance between upstream transition zones when $T=0.2$

$V/$ ($\text{veh}\cdot\text{h}^{-1}$)	P	不同通行效率下的上游过渡区间距 取值范围/m		
		R_5	R_4, R_3	R_2, R_1
1 500	0.1	[200, 450)	[450, 1 375)	[1 375, $+\infty$)
	0.5	[200, 225)	[225, 650)	[650, $+\infty$)
	0.9	—	—	[200, $+\infty$)
	1.0	—	—	[200, $+\infty$)
1 600	0.1	[200, 600)	[600, 1 925)	[1 925, $+\infty$)
	0.5	[200, 400)	[400, 1 200)	[1 200, $+\infty$)
	0.9	[200, 300)	[300, 1 125)	[1 125, $+\infty$)
	1.0	[200, 325)	[325, 1 175)	[1 175, $+\infty$)
1 700	0.1	[200, 950)	[950, 2 425)	[2 425, $+\infty$)
	0.5	[200, 725)	[725, 1 775)	[1 775, $+\infty$)
	0.9	[200, 525)	[525, 1 500)	[1 500, $+\infty$)
	1.0	[200, 600)	[600, 1 600)	[1 600, $+\infty$)

表 10 $T=0.3$ 时上游过渡区间距取值范围

Table 10 Range of distance between upstream transition zones when $T=0.3$

$V/$ ($\text{veh}\cdot\text{h}^{-1}$)	P	不同通行效率下的上游过渡区间距取值范围/m		
		R_5	R_4, R_3	R_2, R_1
1 500	0.1	[200, 750)	[750, 2 025)	[2 025, $+\infty$)
	0.5	[200, 475)	[475, 1 525)	[1 525, $+\infty$)
	0.9	[200, 250)	[250, 1 325)	[1 325, $+\infty$)
	1.0	[200, 300)	[300, 1 375)	[1 375, $+\infty$)
1 600	0.1	[200, 1 125)	[1 125, 2 500)	[2 500, $+\infty$)
	0.5	[200, 825)	[825, 2 000)	[2 000, $+\infty$)
	0.9	[200, 725)	[725, 1 825)	[1 825, $+\infty$)
	1.0	[200, 750)	[750, 1 950)	[1 950, $+\infty$)
1 700	0.1	[200, 1 425)	[1 425, 2 925)	[2 925, $+\infty$)
	0.5	[200, 1 100)	[1 100, 2 450)	[2 450, $+\infty$)
	0.9	[200, 950)	[950, 2 225)	[2 225, $+\infty$)
	1.0	[200, 1 025)	[1 025, 2 275)	[2 275, $+\infty$)

段的 CO_2 排放量和平均行程时间对比如图 4~图 7 所示。

由图 4、图 5 可知,所有实验组的 CO_2 排放量都显著低于对照组,其原因是增大 D 让车辆减速更加平顺,减少车辆在两个上游过渡区之间的动能损失,从而达到降低 CO_2 排放的效果。随着交通量 V 或 HT 混入率 T 的升高, CO_2 排放量增大。随着 AC 渗透率 P 的升高, CO_2 排放量下降,这表明 AC 的混入有利于施工区的环境保护。

由图 6 可知,当 $V=1\,500$ $\text{veh}\cdot\text{h}^{-1}$ 、 $T=0.2$ 时,

除 $P=0.9$ 和 1.0 外,实验组平均行程时间均少于对照组。

从图 6、图 7 可知,当 $V=1\ 600\ \text{veh}\cdot\text{h}^{-1}$ 、 $T=0.2$ 与 $V=1\ 500\ \text{veh}\cdot\text{h}^{-1}$ 、 $T=0.3$ 时,除 $P=0.1$ 外,实验组平均行程时间都少于对照组。

结合 3.2 节的分析,可进一步得出,如果满足 $V\leq 1\ 600\ \text{veh}\cdot\text{h}^{-1}$ 、 $T\leq 0.2$ 、 $P\geq 0.5$ 和 $D\leq 400\ \text{m}$ 或 $V\leq 1\ 500\ \text{veh}\cdot\text{h}^{-1}$ 、 $T\leq 0.3$ 、 $P\geq 0.5$ 和 $D\leq 475\ \text{m}$,实验组平均行程时间就少于对照组,即增大 D 能够提高警告区通行效率并减少平均行程时间。

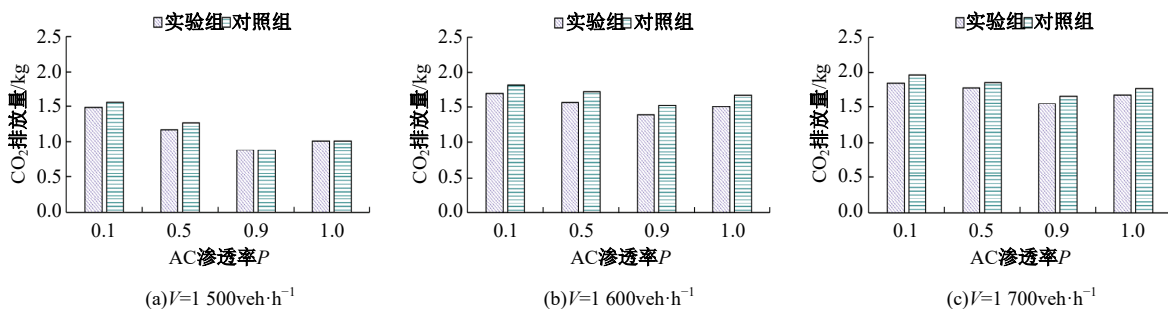


图 4 $T=0.2$ 时模拟路段的 CO_2 排放量

Fig. 4 CO_2 emissions in simulated freeway sections when $T=0.2$

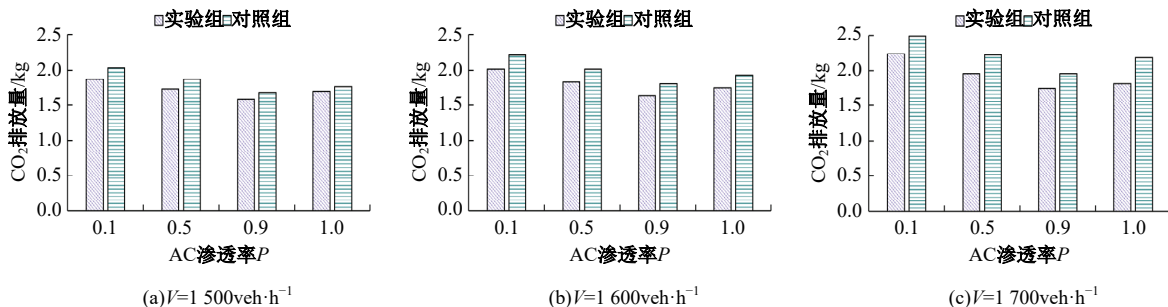


图 5 $T=0.3$ 时模拟路段的 CO_2 排放量

Fig. 5 CO_2 emissions in simulated freeway sections when $T=0.3$

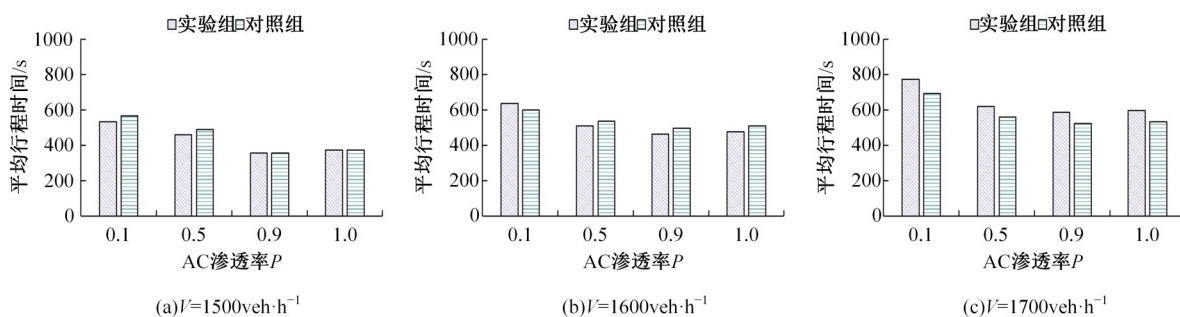


图 6 $T=0.2$ 时模拟路段平均行程时间

Fig. 6 Average travel time in simulated freeway sections when $T=0.2$

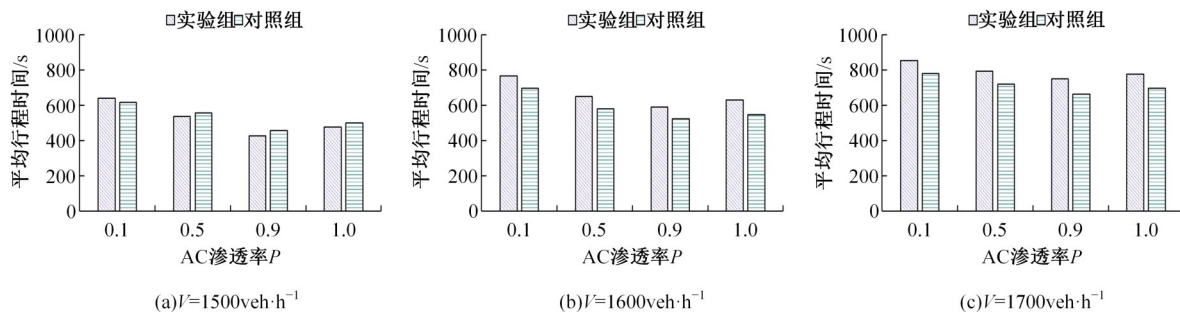


图 7 $T=0.3$ 时模拟路段平均行程时间

Fig. 7 Average travel time in simulated freeway sections when $T=0.3$

4 结 论

(1) D 增大, 评价函数值总体降低, 即警告区通行效率提高, 以 1 000 m 为步长, 变化幅度不小于 20%。评价函数值随 D 的变化是非线性的, 且降低幅度总体随 D 的增大而变缓。

(2) 随着交通量或 HT 混入率的升高, 警告区通行效率降低, 若要保持其同等的通行效率, D 需增大。AC 渗透率升高能够提高警告区的通行效率, 若要保持其同等的通行效率, D 需减小, 存在一个最佳 AC 渗透率让 D 达到最小。

(3) 当交通量较大且 AC 渗透率较低时, 封闭内侧和中间车道比封闭外侧和中间车道能明显获得更高的警告区通行效率。随着 AC 渗透率升高, 这两种车道封闭方式无显著差异。

(4) 在模拟路段总长和施工区其他长度参数不变的情况下, 相对于 D 取最小值 200 m, 增大 D 能降低 CO_2 排放量, 在适当的交通条件下, 还能兼顾提高警告区通行效率和减少平均行程时间。

参考文献:

- [1] Raj A, Kumar J A, Bansal P. A multicriteria decision making approach to study barriers to the adoption of autonomous vehicles[J]. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 2020, 133: 122-137.
- [2] 孟祥海, 张龙钊, 李生龙. 四车道高速公路部分占用超车道交通控制区交通特性及通行能力研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2020, 20(2): 218-224.
Meng Xiang-hai, Zhang Long-zhao, Li Sheng-long. Traffic characteristics and capacity of overtaking lane partly occupied traffic control zone of four-lane freeway[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2020, 20(2): 218-224.
- [3] Algomaiah M, Li Z. Exploring work zone late merge strategies with and without enabling connected vehicles technologies[J]. Transportation Research Interdisciplinary Perspectives, 2021, 9(1): 100316.
- [4] 郝嘉田, 吴忠广, 田万利, 等. 高速公路改扩建中央分隔带开口长度通用计算模型构建与验证[J]. 交通运输系统工程与信息, 2023, 23(4): 262-269.
Hao Jia-tian, Wu Zhong-guang, Tian Wan-li, et al. Construction and validation of a general calculation model for the length of the median opening for expressway renovation and expansion project[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2023, 23(4): 262-269.
- [5] Zou H, Zhu S Y, Jiang R X, et al. Traffic conflicts in the lane-switching sections at highway reconstruction zones[J]. Journal of Safety Research, 2023, 84: 280-289.
- [6] 李晓虎, 麦乐, 任杰, 等. 高速公路施工区自动车辆行驶轨迹优化方法[J]. 交通信息与安全, 2020, 38(3): 40-47.
Li Xiao-hu, Mai Le, Ren Jie, et al. A trajectory optimization method of automatic vehicles at freeway work zone[J]. Journal of Transport Information and Safety, 2020, 38(3): 40-47.
- [7] Abdulsattar H, Mostafizi A, Siam M R K, et al. Measuring the impacts of connected vehicles on travel time reliability in a work zone environment: an agent-based approach[J]. Journal of Intelligent Transportation Systems, 2020, 24: 421-436.
- [8] 陈玲娟, 张思琦, 马东方. 施工区混行车流跟驰及换道模型研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2021, 21(2): 58-64.
Chen Ling-juan, Zhang Si-qi, Ma Dong-fang. Car-following and lane-changing behavior of mixed traffic in work area[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2021, 21(2): 58-64.
- [9] Tajalli M, Niroumand R, Hajbabaie A. Distributed cooperative trajectory and lane changing optimization of connected automated vehicles: freeway segments with lane drop[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2022, 143: 103761.
- [10] 彭余华, 王晓玉, 吕纪娜, 等. 基于服务水平的高速公路养护作业工作区长度确定方法[J]. 中国公路学报, 2016, 29(5): 130-136.
Peng Yu-hua, Wang Xiao-yu, Lv Ji-na, et al. Length determination method for expressway maintenance work zone based on service level[J]. China Journal of Highway and Transport, 2016, 29(5): 130-136.
- [11] 姚志洪, 金玉婷, 王思琛, 等. 混入智能网联汽车的交通流稳定性与安全性分析[J]. 中国安全科学学报, 2021, 31(10): 136-143.
Yao Zhi-hong, Jin Yu-ting, Wang Si-chen, et al. Stability and safety analysis on traffic flow mixed with ICV[J]. China Safety Science Journal, 2021, 31(10): 136-143.

- 136-143.
- [12] Wang L C, Yang M, Li Y, et al. A model of lane-changing intention induced by deceleration frequency in an automatic driving environment[J]. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 2022, 604: 127905.
- [13] Li T N, Chen D J, Zhou H, et al. Car-following behavior characteristics of adaptive cruise control vehicles based on empirical experiments[J]. *Transportation Research Part B*, 2021, 147: 67-91.
- [14] 崔居福, 胡本旭, 夏辉, 等. SUMO平台下多种车辆跟驰模型的仿真对比分析[J]. *重庆大学学报*, 2021, 44(7): 43-54.
- Cui Ju-fu, Hu Ben-xu, Xia Hui, et al. Comparative analysis of simulation of multi-car-following models under SUMO platform[J]. *Journal of Chongqing University*, 2021, 44(7): 43-54.
- [15] 梁国华, 石权, 李瑞, 等. 高速公路合流区主要参数对自动驾驶车辆的影响[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2021, 53(9): 62-68.
- Liang Guo-hua, Shi Quan, Li Rui, et al. Impact of main parameters of merging area in highway on autonomous vehicles[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2021, 53(9): 62-68.
- [16] 何巍楠, 刘莹, 孙胜阳, 等. 基于HBEFA的城市交通温室气体排放模型——以北京本地化建模为例[J]. *交通运输系统工程与信息*, 2014, 14(4): 222-229.
- He Wei-nan, Liu Ying, Sun Sheng-yang, et al. Greenhouse gas emissions model for urban transportation based on HBEFA——the case of beijing localization model[J]. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2014, 14(4): 222-229.
- [17] 杨柳, 王创业, 王梦言, 等. 设置自动驾驶小客车专用车道的六车道高速公路交通流特性[J]. *吉林大学学报: 工学版*, 2023, 53(7): 2043-2052.
- Yang Liu, Wang Chuang-ye, Wang Meng-yan, et al. Traffic flow characteristics of six-lane freeways with a dedicated lane for automatic cars[J]. *Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition)*, 2023, 53(7): 2043-2052.
- [18] 蔺庆海, 何兆成, 谢俊, 等. 基于AVI数据与深度强化学习的城市快速路匝道协调控制方法[J]. *中国公路学报*, 2023, 36(10): 224-237.
- Lin Qing-hai, He Zhao-cheng, Xie Jun, et al. Urban expressway coordinated ramp metering approach using automatic vehicle identification data and deep reinforcement learning[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2023, 36(10): 224-237.