

中文引用格式:马飞,郭雅茹,杨治杰,等.考虑降雨强度异质性的合流区可变限速动态控制[J].中国安全科学学报,2025,35(7):57-66.

英文引用格式:MA Fei, GUO Yaru, YANG Zhijie, et al. Dynamic control for variable speed limit in merging zones considering rainfall intensity heterogeneity[J]. China Safety Science Journal, 2025, 35(7): 57-66.

考虑降雨强度异质性的合流区可变限速动态控制*

马飞¹教授,郭雅茹¹,杨治杰¹,张玉洁¹,马壮林²教授,徐玉凤³高级工程师

(1 长安大学 经济与管理学院,陕西 西安 710064;2 长安大学 运输工程学院,
陕西 西安 710064;3 西安市交通信息中心,陕西 西安 710018)

中图分类号:X951

文献标志码:A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2025.07.1016

基金项目:国家自然科学基金资助(72104034,72104037);陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2024-JC-YBMS-359,2023-JC-QN-0793);陕西省社会科学基金资助(2024R009);长安大学中央高校基本科研业务费专项资金资助(300102235625)。

【摘要】为缓解不同降雨强度诱发的高速公路合流区交通拥堵问题,提出一种考虑降雨强度异质性的合流区可变限速动态控制(RVSL)方法。综合考虑通行能力下降及车辆换道概率对合流区交通流状态的影响,并探究降雨强度异质性与车辆自由流速度的动态关系;在此基础上,基于元胞传输模型(CTM)构建合流区交通流预测模型,兼顾总行程时间和总周转量,构建可变限速优化模型;考虑降雨强度异质性对可变限速值求解的影响,利用粒子群算法求解得到最优RVSL方法,仿真分析降雨强度异质性影响下实施不同限速控制方法时高速公路交通流的演化过程。结果表明:实施考虑降雨强度异质性影响下的RVSL,当降雨强度为小雨、中雨和大雨时,对比可变限速控制(VSL),其目标函数分别减少8.41%、40.57%和32.91%;对比固定限速控制(FSL),其目标函数分别减少17.48%、55.14%和44.69%,RVSL能够有效缓解拥堵并提高高速公路的通行效率。

【关键词】降雨强度异质性;高速公路合流区;可变限速动态控制(RVSL);元胞传输模型(CTM);模型预测控制(MPC)

Dynamic control for variable speed limit in merging zones considering rainfall intensity heterogeneity

MA Fei¹, GUO Yaru¹, YANG Zhijie¹, ZHANG Yujie¹, MA Zhuanglin², XU Yufeng³

(1 School of Economics and Management, Chang'an University, Xi'an Shaanxi 710064, China;

2 School of Transportation Engineering, Chang'an University, Xi'an Shaanxi 710064, China;

3 Xi'an Transportation Information Center, Xi'an Shaanxi 710018, China)

Abstract: In order to alleviate the traffic congestion induced by different rainfall intensities, a dynamic control method of variable speed limit in merging zones considering rainfall intensity heterogeneity was proposed. The impacts of capacity reduction and vehicle lane-changing probability on the traffic flow state were comprehensively considered, and the dynamic relationship between rainfall intensity heterogeneity and vehicle free-flow speed was explored. Then, a traffic flow prediction model was constructed based on the cell transmission model. Taking into account the total travel time and total turnover, the variable speed

limit optimization model was constructed, considering the influence of rainfall intensity heterogeneity on the variable speed limit value solution, and the optimal variable speed limit dynamic control method was obtained by using the particle swarm algorithm. Simulation and analysis of the evolution of traffic flow under different speed limit control methods were conducted. The results show that when implementing the RVSL under light, moderate, and heavy rainfall, the objective function is reduced by 8.41%, 40.57%, and 32.91% compared with variable speed limit (VSL), and by 17.48%, 55.14% and 44.69% compared with fixed speed limit (FSL). The method can effectively reduce congestion and improve the efficiency of the highway.

Keywords: rainfall intensity heterogeneity; freeway merging zone; variable speed limit considering effect of rain (RVSL); cell transmission model (CTM); model predictive control (MPC)

0 引言

在高速公路合流区,匝道车辆进入主线路段时的频繁换道行为会对正常行驶车辆产生干扰,易引发高速公路交通流紊乱并导致拥堵^[1]。降雨强度异质性会不同程度地降低高速公路的自由流速度,增加车辆通行时间,影响高速公路的通行能力^[2-4]。同时,降雨会使道路能见度降低、路面摩擦力减小,道路湿滑,易导致车辆失去控制,增加交通事故风险^[5-6],雨天高速公路事故数是晴好天气下的近2倍^[7]。因此,探究降雨强度异质性影响下的交通流特性,在降雨环境中实施可变限速控制 (Variable Speed Limit, VSL) 具有重要的意义。

目前,学者们提出了基于反馈控制、运动波理论和模型预测控制 (Model Predictive Control, MPC) 的3种限速控制方法。基于反馈规则的VSL利用实时交通数据和预置交通流参数调整限速值,该算法在拥堵出现后采取行动,具有一定滞后性^[8-9]。基于运动波理论的VSL采用前馈控制结构,但其应对合流区通行能力下降等随机扰动的能力较差^[7,10]。而基于MPC算法的VSL能够较为简单地处理随机扰动和包含复杂约束的非线性情况,在提高控制精度和效率、最优化控制目标和实现动态控制方面具备优异性能^[11-12]。基于MPC算法的VSL包括交通流预测模型和可变限速优化模型,可根据研究对象和场景的特殊性构建不同算法框架。交通流预测模型能够敏感捕捉高速公路交通流状态的变化,并执行动态预测。常用的交通流模型包括元胞传输模型 (Cell Transmission Model, CTM)^[13-14] 和 METANET模型^[15-16]。由于CTM模型具有结构简单、参数标定容易、求解速度快及精度高等特点,在高速公路合流区交通流状态预测研究中得到了广泛应用^[17]。

构建交通流预测模型时,通常采用统计回归方法拟合交通状态数据与降雨数据,得到天气调节因子,宏观描述降雨强度异质性对交通流状态的整体影响^[18]。构建可变限速优化模型时,通常选择通行效率^[19-20]或通行安全^[10,21]为目标函数,基于目标函数和约束条件的特征,选择适合的算法求解优化模型。常用的求解算法有精英保留遗传算法^[11]、非支配排序遗传算法^[16]和粒子群优化算法^[22]等。综上,现有研究仍存在以下3方面不足:①天气调节因子未揭示降雨强度异质性与车速的非线性机制;②交通流预测模型忽视换道行为的影响;③可变限速优化模型较少关注降雨强度异质性的影响。

鉴于此,笔者拟基于对降雨强度异质性和车速间动态关系的探究,综合考虑车辆换道行为及合流区通行能力下降,构建交通流预测模型,并考虑降雨强度异质性对可变限速优化模型的影响,提出一种基于MPC算法的可变限速动态控制 (Variable Speed Limit Considering Effect of Rain, RVSL) 方法,以期提高高速公路的通行效率及降低交通事故发生概率。

1 降雨环境下合流区拥堵原因分析

降雨强度异质性影响下,高速公路合流区拥堵状态的涌现制约了高速公路的通行效率。车辆进入合流区时的加减速和换道等驾驶行为频繁,极易引发交通流紊乱,导致拥堵和排队现象,严重时甚至可能引发高速公路交通大面积瘫痪。因此,以降雨环境下主线3车道,匝道1车道的高速公路合流区及其上下游部分路段 (图1) 为例,探究降雨强度异质性影响下不同限速控制方法对高速公路交通状态的影响。

由图1可知:车辆在主线路段行驶时,可选择继续在当前车道行驶或换道至相邻车道。当匝道路段

车辆汇入主线路段时,首先汇入主线1车道,使部分行驶在主线1车道的车辆出现换道行为,此时匝道车辆可以继续在主线上1车道行驶,也可换道至主线2或3车道。在降雨环境下,道路能见度降低,驾驶员动态可视距离变短,地面摩擦力减小,导致车辆行驶速度下降,逐渐聚集在合流区,进而影响高速公路的正常通行。

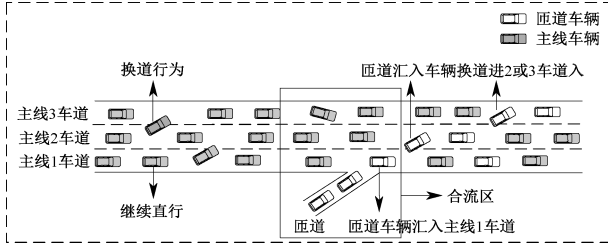


图1 问题描述

Fig. 1 Problem description

2 考虑降雨强度异质性的 RVSL 方法

2.1 基于 MPC 算法的 RVSL 方法框架

MPC 是一种能够在特定约束条件下,根据问题的特殊性构建不同预测和优化模型,通过优化目标函数获得控制指令的闭环反馈控制算法,因其具有运算速度快的特点,广泛应用于高速公路的可变限速控制。基于 MPC 算法,提出一种考虑降雨强度异质性的 RVSL 方法,其框架如图 2 所示。该框架包括能够准确预测高速公路交通流状态的改进 CTM 和执行最优限速控制的可变限速优化模型。具体可分为以下步骤:

- 1) 将实时数据输入交通状态预测模块,通过改进 CTM 预测未来一段时间内的交通流数据。
- 2) 根据设定的目标函数、约束条件和求解算法,优化求解得到最优 RVSL 方法。
- 3) 实施最优 RVSL 方法,改变车辆的行驶速度,得到新的交通状态数据。
- 4) 继续数据采样,重复上述 3 个过程。

2.2 交通流预测构建

2.2.1 基础 CTM

CTM 通过描述元胞流量、密度和速度之间的关系,预测高速公路未来的交通流状态演化。根据高速公路主线路段是否与匝道连接,将 CTM 分为基本路段模型和合流路段模型。第 t 个间隔时段内元胞 i 流向元胞 $i+1$ 的车流量 $q_i(t)$ 由上、下游元胞的发送能力 $\sigma_i(t)$ 和接受能力 $\delta_i(t)$ 所决定。发送能力和接受能力分别指元胞 i 在第 t 个间隔时段内流向

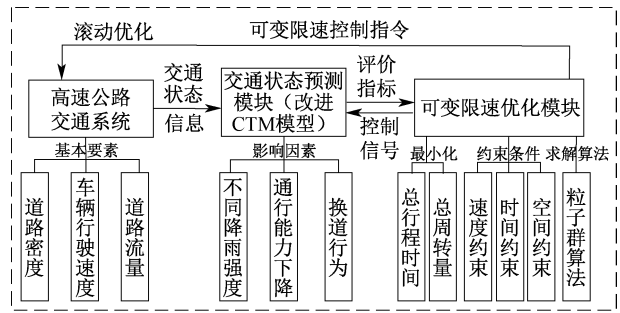


图2 基于 MPC 的 RVSL 控制框架

Fig. 2 RVSL control framework based on MPC

元胞 $i+1$ 的流量和能够接受元胞 $i-1$ 流出的流量, veh/h。基本路段 CTM 与合流路段 CTM 的发送能力及接受能力的计算公式相同,如下式:

$$\sigma_i(t) = \min \{v_i(t) \times \rho_i(t), Q_m\} \times \Delta t \quad (1)$$

$$\delta_i(t) = \min \{\omega(\rho_j - \rho_i(t)), Q_m\} \times \Delta t \quad (2)$$

式中: $v_i(t)$ 为第 t 个间隔时段内元胞 i 的速度, km/h; $\rho_i(t)$ 为第 t 个间隔时段内元胞 i 的密度, veh/km; Q_m 为道路最大通行能力, veh/h; ρ_j 为元胞阻塞密度, veh/km, 表示交通流密集到所有车辆无法移动时的密度; ω 为拥堵波速, km/h, 表示道路产生拥堵并向上游反向传播的速度。

根据元胞发送能力和接受能力,计算基本路段第 t 个间隔时段内元胞 i 向元胞 $i+1$ 传递的流量:

$$q_i(t) = \min \{\sigma_i(t), \delta_{i+1}(t)\} \quad (3)$$

由此可得基本路段 CTM 中下个间隔时段的元胞密度和速度:

$$\rho_i(t+1) = \rho_i(t) + (q_{i-1}(t) - q_i(t)/L) \quad (4)$$

$$v_i(t+1) =$$

$$\begin{cases} v & \rho_i(t+1) \leq \rho_c \\ [\rho_j - \rho_i(t+1)] \times \omega / \rho_i(t+1) & \text{else} \end{cases} \quad (5)$$

式中: ρ_c 为关键密度, 表示高速公路处于最大通行能力时的道路密度, veh/km; L 为元胞长度, km; v 为车辆自由流速度, km/h。

在合流路段 CTM 模型中, 主线元胞 i 和匝道元胞 j 中的车辆均汇入主线元胞 $i+1$ 中。元胞 i 和元胞 j 的流量计算如下:

$$q_i(t) = \max \{\delta_{i+1} - \sigma_j(t), \delta_{i+1} \times (1 - \alpha)\} \quad (6)$$

$$q_j(t) = \min \{\sigma_j(t), \delta_{i+1} \times \alpha\} \quad (7)$$

式中 α 为汇入系数, 由元胞 i 和元胞 j 的通行能力之比确定。由于主线和匝道中的车辆无路权优先级, 车辆遵循“先进先出”原则。因此, 元胞 i 和元胞 j 中的车辆以 α 的比例汇入元胞 $i+1$ 中。

2.2.2 改进 CTM

改进 CTM 综合考虑道路通行能力下降和换道行为对合流区拥堵与消散的影响,精准模拟降雨强度异质性影响下交通流状态演化。

1) 通行能力下降对元胞密度和流量的影响。当交通需求较小时,车辆间距较大,处于自由流状态,以驾驶员期望的速度行驶;匝道车辆由合流区汇入主线路段时,交通需求增大,进入合流区的车辆多于驶离车辆,通行流量逐渐接近合流区最大通行能力。超过合流区最大通行能力时,通行能力下降,车辆聚集并产生拥堵。设通行能力下降幅度为 θ ,由初始交通量和拥堵后的交通量比值确定,值越小表示通行能力下降幅度越大。因此,在改进 CTM 中,若元胞通行能力下降,则其发送和接受能力计算如下:

$$\sigma_i(t) = \min\{v_i(t) \times \rho_i(t), (1 - \theta)Q_m\} \times \Delta t \quad (8)$$

$$\delta_i(t) = \min\{\omega(1 - \theta)(\rho_j - \rho_i(t)), (1 - \theta)Q_m\} \times \Delta t \quad (9)$$

2) 换道概率对元胞密度和流量的影响。MARKOS 等^[23]提出一个基于规则分配和限制横向流量的换道模型。该模型中共有 4 种换道方式,如图 3 所示,由图 3 可知:在元胞 i 中第 t 个间隔时段内, $f_{i,l-1,l}(t)$ 和 $f_{i,l+1,l}(t)$ 分别为由车道 $l-1$ 和车道 $l+1$ 流向车道 l 的流量,veh/h; $f_{i,l,l-1}(t)$ 和 $f_{i,l,l+1}(t)$ 分别为由车道 l 流向车道 $l-1$ 和车道 $l+1$ 的流量,veh/h。当车辆不换道保持在原车道 l 行驶时,用 $q_{i-1,l,l}(t)$ 和 $q_{i,l,l}(t)$ 分别为从元胞 $i-1$ 流向元胞 i 和从元胞 i 流向元胞 $i+1$ 的流量,veh/h。

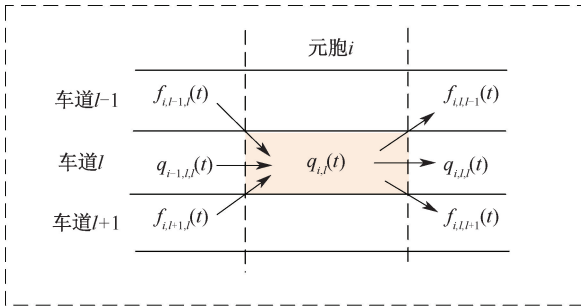


图 3 换道行为流量传输

Fig. 3 Traffic transfer diagram for lane changing behavior

根据元胞中各车道当前的流量计算横向换道的最大换道流量 $F_{i,l}(t)$,如下式:

$$F_{i,l}(t) = \min(q_{i-1,l,l}(t), (Q_m/m) \times L) \quad (10)$$

式中 m 为高速公路的车道数。

换道吸引率 $A_{i,l,l+1}(t)$ 表示元胞 i 中第 t 个间隔时段内,从车道 l 进入车道 $l+1$ 的换道流量占最大换道流量的比例,计算如下式:

$$A_{i,l,l+1}(t) = \max(0, \frac{\rho_{i,l}(t) - \rho_{i,l+1}(t)}{\rho_{i,l}(t) + \rho_{i,l+1}(t)}) \quad (11)$$

式中 $\rho_{i,l}(t)$ 和 $\rho_{i,l+1}(t)$ 分别为第 t 个间隔时段内,元胞 i 中车道 l 和车道 $l+1$ 的密度,veh/km。

由此可得,第 t 个间隔时段内,由元胞 i 车道 l 流向元胞 i 车道 $l+1$ 的换道流量 $f_{i,l,l+1}(t)$:

$$f_{i,l,l+1}(t) = F_{i,l}(t) \times A_{i,l,l+1}(t) \quad (12)$$

因此,元胞 i 车道 l 的流量计算如下式:

$$q_{i,l}(t) = q_{i-1,l,l}(t) + f_{i,l-1,l}(t) + f_{i,l+1,l}(t) - f_{i,l,l-1}(t) - f_{i,l,l+1}(t) - q_{i,l,l}(t) \quad (13)$$

3) 降雨强度异质性对自由流速度的影响。降雨时,能见度的下降会使驾驶员采取更谨慎的驾驶行为,进而影响车辆的自由流速度。车辆的自由流速度由动态可视距离和安全停车视距决定。动态可视距离指驾驶员在行车时能够清楚分辨前方道路的车辆、路障和交通标志所需要的距离,受能见度和驾驶员视力的影响,其计算如下式^[24]:

$$S_d = 0.6 \times q \times p \times (\ln K + 3.912)/3.912 \quad (14)$$

式中: S_d 为动态可视距离,m; q 为能见度,m; p 为驾驶员视力; K 为物体固有对比度,取 0.35。

能见度随降雨强度的增加而降低,计算如下式^[25]:

$$q = 252.1 \times R^{-0.8731} \quad (15)$$

式中 R 为降雨强度,mm/min。

驾驶员的视力会随车辆自由流速度的增大而减小,根据文献[24]得到的车辆自由流速度与动视力的关系,通过线性、指数、对数和多项式 4 种方式进行拟合,拟合结果见表 1。

表 1 车辆自由流速度与动视力的拟合

Table 1 Fitting of free velocity to dynamic visual acuity

拟合类型	拟合公式	拟合指数
线性	$p = -0.0037v + 1.0710$	0.9887
指数	$p = 1.0895 \exp(-0.005v)$	0.9973
对数	$p = -0.167 \ln(v) + 1.4715$	0.9400
多项式	$p = 10^{-5}v^2 - 0.0050v + 1.0907$	0.9972

安全停车视距指驾驶员在特定速度下,从发现前方障碍物到车辆完全停止所需要的最小空间距离。根据《公路路线设计规范》^[26],安全停车视距的计算如下式:

$$S_c = v \times t_c \times (3.6)^{-1} + \left(\frac{v}{3.6}\right)^2 \times (2gf)^{-1} \quad (16)$$

式中: S_c 为安全停车视距, m; t_c 为反应时间, 取 3.5 s; g 为重力加速度, 取 9.8 m/s²; f 为路面在潮湿状态下的地面摩擦因数。

安全停车视距受地面摩擦因数的影响, 降雨时, 地面会形成具有一定厚度的水膜, 车辆轮胎与路面之间的积水导致轮胎与路面部分脱离, 进而影响路面摩擦因数。因此, 路面摩擦因数与水膜厚度和车辆自由流速度有关, 计算如下式:

$$f = 0.945\,8 - 0.005\,7v - 0.011\,8d \quad (17)$$

式中 d 为水膜厚度, mm。其值与降雨强度和道路的坡度及长度有关, 其计算如下式:

$$d = 0.15 \times \left(\frac{H \times R}{6}\right)^{0.5} \times M^{0.5} \quad (18)$$

式中: H 为坡长, m; M 为道路坡度的倒数。

参照文献[25], 根据降雨强度将雨天划分为小雨、中雨、大雨和暴雨 4 种类型, 根据式(15)计算得到不同降雨强度下的能见度值。为保证交通安全, 动态可视距离不能小于当前车速下的安全停车视距, 即 $S_d \geq S_c$ 。基于这一关系, 联立式(14)一式(18), 得出不同降雨强度下车辆的自由流速度, 见表 2。

表 2 不同降雨强度下的自由流速度

Table 2 Free velocity at different rainfall intensities

降雨类型	$R/(\text{mm} \cdot \text{min}^{-1})$	q/m	$v/(\text{km} \cdot \text{h}^{-1})$
小雨	0.59	399.62	96.07
中雨	0.87	284.69	79.45
大雨	1.57	170.03	59.03
暴雨	5.72	54.99	27.65

高速公路要求通行车辆的最低行驶速度为 60 km/h, 当降雨强度为暴雨时, 车辆自由流速度仅为 27.65 km/h, 远低于高速公路的最低速度要求。因此, 仅在降雨强度为小雨、中雨和大雨时的高速公路合流区限速控制车辆。

2.3 可变限速优化模型构建

2.3.1 目标函数

考虑总行程时间(Total Travel Time, TTT)和总周转量(Total Traffic Flow, TTF)构建综合目标函数。TTT 是仿真时间内道路元胞中所有车辆通过的时间之和, 值越小表示通行效率越高。TTF 表示高速公路的利用率, 值越大表示高速公路的利用率越高。TTT 和 TTF 的计算如下式:

$$\text{TTT} = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N (\rho_i(t) \times L \times \Delta t) \quad (19)$$

$$\text{TTF} = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N (\rho_i(t) \times v_i(t) \times L \times \Delta t) \quad (20)$$

式中: T 为时间间隔数量; N 为检测器数量。

引入总行程时间参数 α_{TTT} 和总周转量参数 α_{TTF} , 构建综合目标函数, 以实现保证车辆在高速公路快速、高效通行的目的。目标函数 J 如下式:

$$J = \min(\alpha_{\text{TTT}} \times \text{TTT} - \alpha_{\text{TTF}} \times \text{TTF}) \quad (21)$$

2.3.2 约束条件及求解算法

从高速公路快速通行和安全通行 2 个角度考虑, 约束条件如下:

1) 车速约束。可变限速值既要大于高速公路的最低限速要求, 又要小于不同降雨强度下的最大行驶速度, 如下式:

$$v_{\min} \leq v_{\text{RVSL},i}(t) \leq v_{0,i}(t) \quad (22)$$

式中: $v_{\min}$ 为路段最小限速值, 取值为 60 km/h; $v_{\text{RVSL},i}(t)$ 为 t 时刻对元胞 i 施加的限速值, km/h; $v_{0,i}(t)$ 为不同降雨强度下的自由流速度, km/h, 取值见表 2。

2) 空间尺度约束。经过相邻路段时, 若限速值变化过大, 会影响车辆平稳性和驾驶舒适度。因此, 在同一间隔时段内, 元胞 i 的限速控制要满足下式的约束条件。

$$|v_{\text{RVSL},i}(t) - v_{\text{RVSL},i+1}(t)| \leq \Delta c \quad (23)$$

式中 Δc 为限速值的变化幅度, km/h。

3) 时间尺度约束。考虑到驾驶员需要有足够的时间调整行驶速度, 因此, 在相邻时间段 t 与 $t+1$ 内, 元胞 i 的限速控制要满足下式的约束条件。

$$|v_{\text{RVSL},i}(t+1) - v_{\text{RVSL},i}(t)| \leq \Delta c \quad (24)$$

满足以上 3 个约束条件后, 采用粒子群优化算法(Particle Swarm Optimization, PSO)快速求解动态可变限速值。该算法是一种基于群体的随机优化方法, 具有鲁棒性强、收敛性强、算法简单和计算效率高等优点。

3 RVSL 方法的仿真验证

3.1 RVSL 方法的仿真思路

基于 CQSkyEyeX 数据集^[27-28], 验证 RVSL 方法的有效性, 仿真思路如图 4 所示。

3.2 模型构建与参数确定

3.2.1 VISSIM 仿真模型构建

1) 仿真道路建立。基于 CQSkyEyeX 数据集中的重庆绕城高速主线路段数据集, 仿真长度为

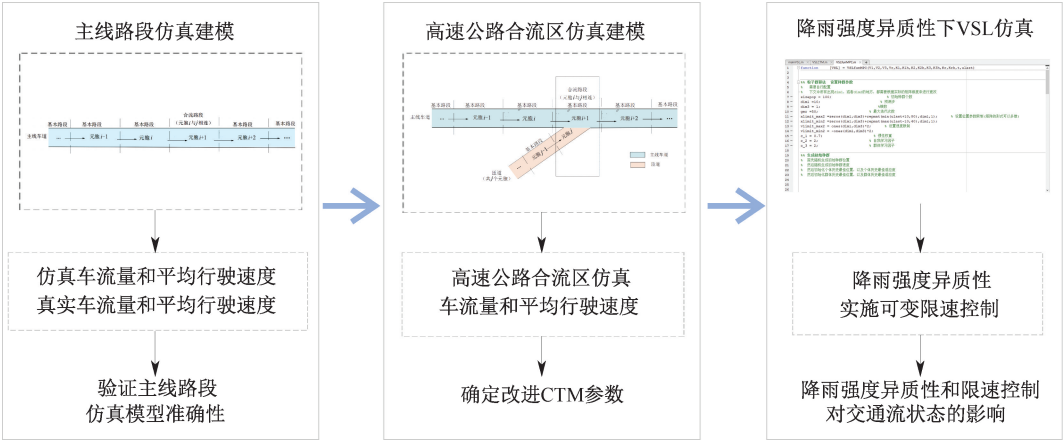


图4 RVSL 方法的仿真思路
Fig. 4 Simulation idea of RVSL

10 km、单个车道宽为 3.5 m 的 3 车道路段,将其平均划分为 10 个元胞,在每个元胞中设置 1 个监测点,采集通过每个元胞的车流量及车辆的平均行驶速度。

2) 基础数据设定。重庆绕城高速主线路段数据集为 2023 年 7 月 19 日 17:53—18:13 共计 20 min 的视频数据,包含普通轿车、货车、两轴载货车和重型卡车 4 种车型,为简化模型构建,将不同车型均换算为小汽车,不同车辆折算系数参照《公路工程技术标准》^[26]。VISSIM 软件可根据不同研究对象选择不同驾驶行为模型,设定驾驶人跟车变量、行驶速度和换道规则等,对高速公路的仿真选用 Wiedemann-99 模型。

3) 仿真数据输出。设置仿真时间为 3 600 s,得到通过每个元胞的车流量及车辆的平均行驶速度,真实和仿真情景下的结果见表 3。

表3 真实与仿真的车流量与平均行驶速度
Table 3 Real and simulated traffic volumes and average travel speed

元胞	真实流量/ (pcu·h ⁻¹)	仿真流量/ (pcu·h ⁻¹)	真实速度/ (km·h ⁻¹)	仿真速度/ (km·h ⁻¹)
1	2 628	2 640	90.0	91.1
2	2 716	2 609	90.4	90.7
3	2 706	2 592	90.8	90.3
4	2 637	2 569	91.1	90.1
5	2 608	2 536	92.1	90.2
6	2 567	2 508	92.8	90.2
7	2 568	2 463	93.8	90.1
8	2 495	2 455	94.7	90.1
9	2 517	2 427	95.2	89.9
10	2 511	2 399	95.5	89.9

利用平均绝对百分比误差 (Mean Absolute Percentage Error, MAPE) 计算真实与仿真数据之间

的差距,MAPE 值越小,模型的精确度越高。

$$MAPE = \frac{1}{2TN} \left[\sum_{t=1}^T \sum_{n=1}^N \frac{|F_M(n,t) - F_S(n,t)|}{|F_M(n,t)|} + \sum_{t=1}^T \sum_{n=1}^N \frac{|v_M(n,t) - v_S(n,t)|}{|v_M(n,t)|} \right] \quad (25)$$

式中: $F_M(n,t)$ 和 $F_S(n,t)$ 分别为第 t 个间隔时段内检测器 n 检测到的实际流量和仿真流量,veh/h; $v_M(n,t)$ 和 $v_S(n,t)$ 分别为第 t 个间隔时段内检测器 n 检测得到的实际速度和仿真速度,km/h。

根据式 (25) 计算得到 MAPE 值为 1.456%,表明模型能够精确地模拟高速公路主线路段的交通运行状况。

3.2.2 参数确定

在仿真模型的基础上,改变车道组成,增加与主线路段相接的单车道匝道路段。在合流区设置数据收集点,每 30 s 收集一次数据,得到 60 min 以内合流区车辆的行驶速度与密度变化,如图 5 所示。由图 5 可知:不进行任何限速控制的情况下,主线路段和匝道中的车辆均以最大行驶速度进入合流区,合流区车流量迅速增加。300 s 后,车辆行驶速度骤降,合流区密度快速上升,出现拥堵现象并持续至仿真结束。计算可得 CTM 模型中阻塞密度为 137 pcu/km,通行能力下降前的波速为 30 km/h,通行能力下降前后 1 min 内的流量分别为 5 520 pcu/h 和 4 080 pcu/h,通行能力下降了 26.1%,通行能力下降后的波速为 22.17 km/h。

参考文献[7,15,20],将限速值的变化幅度 Δc 设为 20 km/h。同时,为平衡行程时间和周转量,以 $\alpha_{\text{TTT}} = 1$ 为基准,令 $\alpha_{\text{TTT}} = v_{0,i}(t)$ 。

根据文献[22]设置 PSO 算法中的相关参数,种群中的个体数量 M_0 取值为 100,惯性权重 ω_0 取值

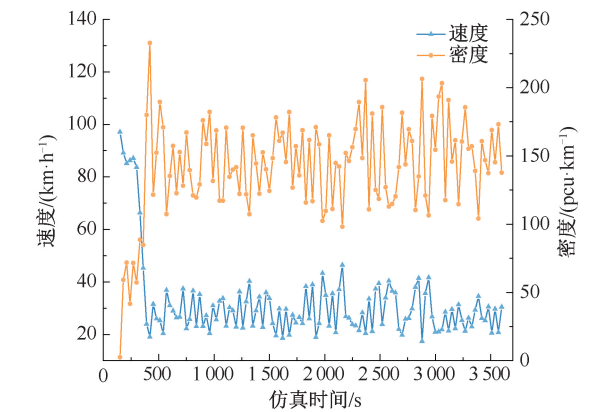


图 5 合流区车辆速度-密度变化情况

Fig. 5 Changes in vehicle speed– density in merging area
为 0.7,学习因子 c_1 和 c_2 均取值为 2,最大迭代次数 H_0 取值为 50。

3.3 结果分析

3.3.1 降雨强度异质性对元胞速度和密度的影响

1) 对元胞速度的影响。降雨强度异质性会影响元胞速度的下降和恢复,图 6 为不同降雨强度下元胞 4 和元胞 5 的速度随时间的变化,由图 6 可知:拥堵情况出现的时间和速度下降的时间会随降雨强度的增大而提早。这是因为随着降雨强度的增加,能见度降低,驾驶员的驾驶行为更加谨慎,导致车辆在合流区行驶的时间越长,聚集的车辆越多,拥堵产生越快,行驶速度下降越早。对比降雨强度异质性影响下元胞速度的恢复情况,只有当降雨强度为小雨时,元胞速度能够恢复正常交通水平。随着降雨强度变大,合流区车辆会持续较低速度行驶,无法恢复至正常状态。

2) 对元胞密度的影响。以元胞 5 为例,分析降雨强度异质性对元胞密度的影响,如图 7 所示,由图 7 可知:①降雨强度异质性会影响元胞密度上升的时间和密度峰值。随着降雨强度增大,拥堵出现的时间更早,拥堵现象越严重。当降雨强度为小雨、中雨和大雨时,元胞密度开始上升的时间分别为 30、27、12 min,元胞密度峰值分别为 59.81、69.51、76.62 veh/km。降雨强度越大,驾驶员进入合流区会车时就越谨慎,车辆行驶速度越低,导致车辆滞留的时间越久,元胞密度开始上升的时间提早,且密度峰值随之增加。②降雨强度异质性会影响元胞密度的恢复程度。当降雨强度为小雨、中雨和大雨时,元胞密度的均值比密度峰值平均降低 42.12%、20.29%和 23.40%,道路拥堵现象均有所缓解,但恢复的程度有明显差异。当降雨强度为小雨时,实施

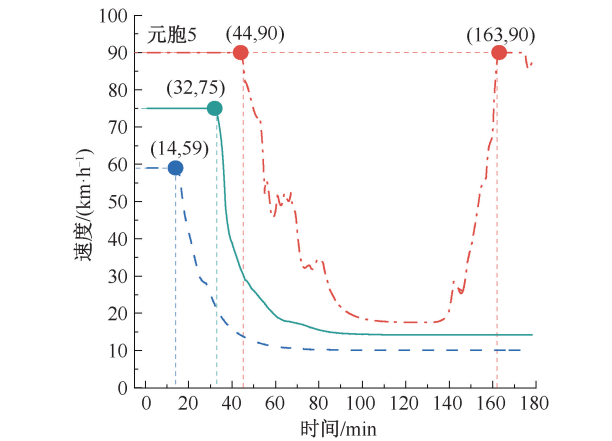
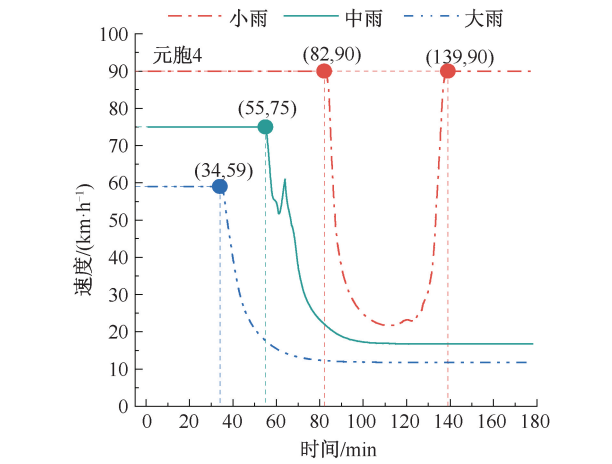


图 6 降雨强度异质性对元胞速度的影响

Fig. 6 Effects of rainfall intensity heterogeneity on cell speed

RVSL 能够使道路拥堵情况出现明显好转,但当降雨强度为中雨和大雨时,拥堵情况的恢复水平显著低于小雨时的水平。其原因是降雨强度越大,元胞密度越大,拥堵车辆驶离合流区需要更长的时间,因此,恢复时间也更长。

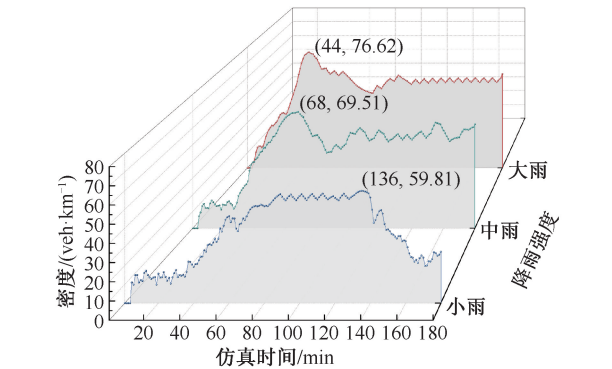


图 7 降雨强度异质性对道路密度的影响

Fig. 7 Effect of rainfall intensity heterogeneity on road density

3.3.2 限速方法对速度、密度和通行时间的影响

1) 不同限速控制方法对元胞速度的影响。不

同限速控制方法影响合流区中的车辆数和车辆进出合流区的速度,进而影响整体的车流速度,如图 8 所示,由图 8 可知:与 VSL 和固定限速(Fixed Speed Limit,FSL)相比,考虑降雨强度异质性影响的 RVSL 使元胞的速度始终处于较高水平,车辆能够更快进出合流区。当降雨强度为小雨、中雨和大雨时,实施 RVSL 比实施 VSL 元胞的最低行驶速度平均提高 48.01%、48.49%和 55.71%;实施 RVSL 比实施 FSL 元胞的最低行驶速度平均提高 73.46%、64.22%和 34.05%。RVSL 能够根据交通流状态实时调整限速值,当合流区未出现拥堵时,元胞中的车辆以较高的速度行驶;当合流区出现拥堵时,降低上游车辆的行驶速度并提高合流区车辆的行驶速度,减少进入合流区的车流量,同时使车辆以更快的速度驶离合流区,加快缓解合流区的拥堵。

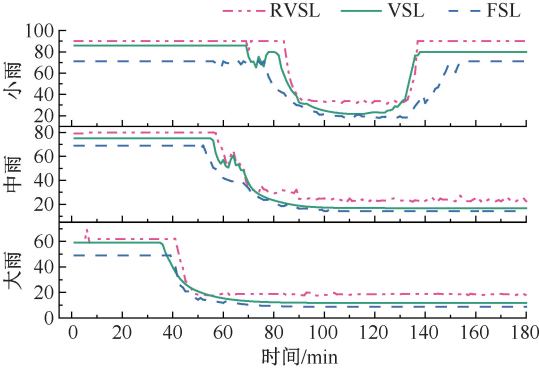


图 8 不同限速控制方法对车流速度影响
Fig. 8 Effects of different speed limit control strategies on traffic flow speed

2) 不同限速控制方法对元胞密度的影响。主线车辆与匝道车辆在合流区汇合,元胞密度增加,导致车辆行驶速度下降,速度的下降进一步提高了元胞密度,形成恶性循环。以小雨为例,分析实施 RVSL、VSL 和 FSL 控制对主线路段 1 车道的道路密度的影响,如图 9 所示,由图 9 可知:3 种限速控制方法都出现元胞密度先增加后减少,然后逐步向上游元胞传播(元胞 6→元胞 5→元胞 4→元胞 3)的趋势。但实施不同控制方法时,元胞在拥堵时间内的密度值不同。RVSL 控制时元胞密度最低,VSL 控制时次之,FSL 控制时元胞的密度最高,拥堵程度更加严重,表明 RVSL 能够有效降低道路元胞的密度,提高高速公路的通行效率。

3) 不同限速控制方法对目标函数值的影响。目标函数值越小,表明高速公路的总行程时间小且总周转量大,即高速公路的通行效率越高,实施不同

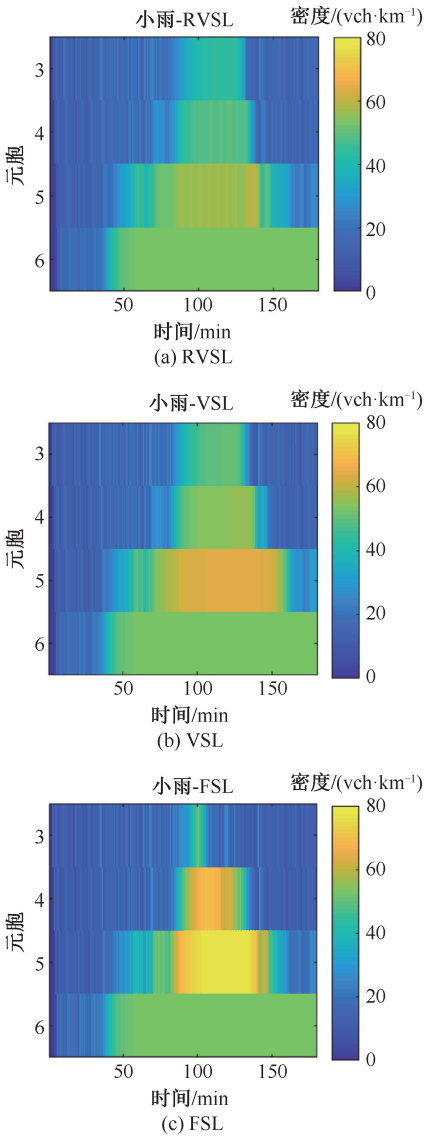


图 9 小雨强度采用 RVSL、VSL 和 FSL 的时空密度
Fig. 9 Spatio-temporal density maps with RVSL, VSL and FSL control strategies in light rainfall

控制方法时车辆的目标函数值见表 4。当降雨强度为小雨、中雨和大雨时,实施 RVSL 比 VSL 目标函数值分别降低 8.41%、40.57%和 32.91%;实施 RVSL 比 FSL 目标函数值分别降低 17.48%、55.14%和 44.69%。在小雨、中雨和大雨 3 种降雨强度下,与实施 VSL 和 FSL 相比,实施 RVSL 能有效降低目标函数值,显著提高高速公路的通行效率。

表 4 不同控制方案的目标函数值

Table 4 Objective values for different control schemes			
降雨强度	RVSL	VSL	FSL
小雨	53.48	58.39	64.81
中雨	141.65	238.36	315.75
大雨	193.99	289.14	350.72

4 结 论

1) 降雨强度异质性和高速公路自由流速度有显著影响。当降雨强度为小雨、中雨和大雨时,车辆的自由流速度分别为 96、79、59 km/h;当降雨强度为暴雨时,车辆的自由流速度为 28 km/h,不符合高速公路的最低速度要求。在实际交通管理中,可根据降雨强度的不同,确定车辆驶入高速公路时的最大行驶速度。

2) 降雨强度异质性和元胞速度和密度有显著影响。降雨强度越大,车辆行驶速度下降越早,元胞密度上升越早;降雨强度会影响速度和密度的恢复。当降雨强度为小雨时,元胞中车辆的行驶速度和密度均能够随 RVSL 的实施逐渐恢复到正常状态;当

降雨强度为中雨和大雨时,元胞中车辆的行驶速度始终维持在较低水平,而元胞密度始终维持在较高水平,合流区交通流始终处于拥堵状态。

3) 不同降雨强度下,采取 RVSL 均能显著提升高速公路合流区的通行能力。在小雨、中雨和大雨 3 种降雨强度下,与实施 VSL 和 FSL 相比,实施 RVSL 能显著提高车辆的最低行驶速度,并明显降低元胞在拥堵时段内的平均密度。与此同时,实施 RVSL 能够使兼顾总行程时间和总周转量的目标函数数值更低。

4) 未来的研究可从以下 3 方面入手:①提升降雨监测设备的实时精度并降低交通管控设施的部署成本;②在 RVSL 模型中增加降雨强度突变阈值检测机制;③提高可变限速优化模型的求解速度。

参 考 文 献

- [1] 李根,翟伟,黄海博,等. 基于多元自适应回归样条的汇合决策行为模型[J]. 清华大学学报:自然科学版, 2024, 64(1):55-62.
LI Gen, ZHAI Wei, HUANG Haibo, et al. Merging decision behavior model based on multivariate adaptive regression splines[J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 2024, 64(1):55-62.
- [2] 王殿海,黄莉莎,曾佳棋,等. 降雨对城市路网交通状态的影响机理[J]. 交通运输系统工程与信息, 2023, 23(3):48-55, 65.
WANG Dianhai, HUANG Lisha, ZENG Jiaqi, et al. Influence mechanism of rainfall on traffic state of urban road network[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2023, 23(3):48-55, 65.
- [3] ALSHARARI A, ASGHARZADEH M, KONDYLI A. Estimation of the effect of rain and incidents on freeway capacity and free-flow speed[J]. Transportation Research Record, 2020, 2674(8):536-544.
- [4] VIDAS M, TUBIĆ V, IVANOVIĆ I, et al. One approach to quantifying rainfall impact on the traffic flow of a specific freeway segment[J]. Sustainability, 2022, 14(9):DOI: 10.3390/su14094985.
- [5] 胡立伟,贺雨,侯智,等. 山区高速公路交通事故风险多维度耦合研究[J]. 中国安全科学学报, 2024, 34(5):17-27.
HU Liwei, HE Yu, HOU Zhi, et al. Multi-dimensional coupling study on traffic accident risk of highway in mountainous areas[J]. China Safety Science Journal, 2024, 34(5):17-27.
- [6] 刘艳华,曹蕾,白秀梅. 灾害天气对黑龙江省高速公路交通安全的影响及精细化防御措施[J]. 自然灾害学报, 2019, 28(3):214-218.
LIU Yanhua, CAO Lei, BAI Xiumei. Influence of disaster weather on traffic safety of freeway in Heilongjiang Province and detailed defense measures[J]. Journal of Natural Disasters, 2019, 28(3):214-218.
- [7] 刘玮蔚,刘建蓓,余强,等. 考虑高速公路运行风险的雨天可变限速方法[J]. 中国公路学报, 2022, 35(9):38-50.
LIU Weiwei, LIU Jianbei, YU Qiang, et al. Variable speed limit method for rainy weather considering freeway operation risk[J]. China Journal of Highway and Transport, 2022, 35(9):38-50.
- [8] 徐建闽,廖冬梅,马莹莹. 高速公路事故瓶颈区域可变限速控制方法[J]. 重庆交通大学学报:自然科学版, 2022, 41(11):25-33.
XU Jianmin, LIAO Dongmei, MA Yingying. Variable speed limit control method for accident bottleneck region on freeway[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University: Natural Science, 2022, 41(11):25-33.
- [9] ZHANG Yihang, IOANNOU P A. Combined variable speed limit and lane change control for highway traffic[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2016, 18(7):1 812-1 823.
- [10] 韩雨,郭延永,张乐,等. 消除高速公路运动波的可变限速控制方法[J]. 中国公路学报, 2022, 35(1):151-158.
HAN Yu, GUO Yanyong, ZHANG Le, et al. An optimal variable speed limit control approach against freeway jam waves[J]. China Journal of Highway and Transport, 2022, 35(1):151-158.
- [11] 邵敬波,黄轲,张兆磊,等. 高速公路连续瓶颈混合交通流可变限速与换道协同控制方法[J]. 交通信息与安全, 2023, 41(3):59-68, 79.
SHAO Jingbo, HUANG Ke, ZHANG Zhaolei, et al. A cooperative control method of variable speed limit and lane change for mixed traffic flow on continuous bottlenecks of freeway[J]. Journal of Transport Information and Safety, 2023,

- 41(3):59–68,79.
- [12] HAN Yu, WANG Meng, HE Ziang, et al. A linear Lagrangian model predictive controller of macro-and micro-variable speed limits to eliminate freeway jam waves[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2021, 128: DOI: 10.1016/j.trc.2021.103121.
- [13] 吴文静, 战勇斌, 杨丽丽, 等. 考虑安全间距的合流区可变限速协调控制方法[J]. *吉林大学学报:工学版*, 2022, 52(6):1 315–1 323.
WU Wenjing, ZHAN Yongbin, YANG Lili, et al. Coordinated control method of variable speed limit in on-ramp area considering safety distance[J]. *Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition*, 2022, 52(6): 1 315–1 323.
- [14] FANG Jie, YE Huixuan, EASA S M. Modified traffic flow model with connected vehicle microscopic data for proactive variable speed limit control[J]. *Journal of Advanced Transportation*, 2019; DOI: 10.1155/2019/8151582.
- [15] YUAN Tianchen, ALASIRI F, ZHANG Yihang, et al. Evaluation of integrated variable speed limit and lane change control for highway traffic flow[J]. *IFAC-PapersOnLine*, 2021, 54(2):107–113.
- [16] 唐进君, 付强, 王骋程, 等. 高速公路可变限速控制策略多目标优化[J]. *交通运输系统工程与信息*, 2023, 23(2):252–261.
TANG Jinjun, FU Qiang, WANG Chengcheng, et al. Multi-objective optimization of variable speed limit control strategy on expressway[J]. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2023, 23(2):252–261.
- [17] PRASAD P, VATSAL V, CHOWDHURY R R. Maritime vessel route extraction and automatic information system (AIS) spoofing detection[C]. 2021 International Conference on Advances in Electrical, Computing, Communication and Sustainable Technologies (ICAECT), 2021:1–11.
- [18] GUO Jing, MA Changxi, XU Xuecai, et al. Investigation on variable speed limit control strategy of expressway under adverse weather conditions[J]. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 2022, 602: DOI: 10.1016/j.physa.2022.127616.
- [19] GRUMERT E F, TAPANI A. Bottleneck mitigation through a variable speed limit system using connected vehicles[J]. *Transportmetrica A: Transport Science*, 2020, 16(2):213–233.
- [20] 韩磊, 张轮, 郭为安. 混合交通流环境下基于改进强化学习的可变限速控制策略[J]. *交通运输系统工程与信息*, 2023, 23(3):110–122.
HAN Lei, ZHANG Lun, GUO Weian. Variable speed limit control based on improved dueling double deep Q network under mixed traffic environment[J]. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2023, 23(3):110–122.
- [21] CHEN Zhi, QIN Xiao. A novel method for imminent crash prediction and prevention[J]. *Accident Analysis & Prevention*, 2019, 125:320–329.
- [22] LI Duo, RANJITKAR P, ZHAO Yifei. Mitigating recurrent congestion via particle swarm optimization variable speed limit controllers[J]. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 2019, 23:3 174–3 179.
- [23] MARKOS P, JEAN-MARC B, HABIB H. Modelling and real-time control of traffic flow on the southern part of boulevard périphérique in Paris: Part I: modelling[J]. *Transportation Research Part A: General*, 1990, 24(5):345–359.
- [24] 裴汉杰. 动视力、能见度、车速与安全[J]. *现代交通管理*, 1994(1):33–35.
- [25] 张俊, 江凡, 彭德猛, 等. 雨天环境下的交通流影响研究[J]. *中国安全科学学报*, 2023, 33(5):134–143.
ZHANG Jun, JIANG Fan, PENG Demeng, et al. Research on impact of traffic flow in rainy environments[J]. *China Safety Science Journal*, 2023, 33(5):134–143.
- [26] JTG B01—2014, 公路工程技术标准[S].
JTG B01—2014, Technical standard of highway engineering[S].
- [27] ZHANG Heshan, TAN Xin, FAN Mengwei, et al. Accurate detection and tracking of small-scale vehicles in high-altitude unmanned aerial vehicle bird-view imagery[J]. *Journal of Advanced Transportation*, 2023; DOI: 10.1155/2023/5384844.
- [28] 张河山, 范梦伟, 谭鑫, 等. 基于改进 YOLOX 的无人机航拍图像密集小目标车辆检测[J]. *吉林大学学报:工学版*, 2025, 55(4): 1 307–1 318.
ZHANG Heshan, FAN Mengwei, TAN Xin, et al. Dense small object vehicle detection in UAV aerial images using improved YOLOX[J]. *Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition*, 2025, 55(4): 1 307–1 318.



作者简介: 马飞 (1979—),男,陕西咸阳人,博士,教授,主要从事交通运输服务科学与工程方面的研究。E-mail:mafeixa@chd.edu.cn。