

高速智慧扩容下应急车道事故分级动态管控

刘杨¹, 谷巨平¹, 葛胜洁²

(1. 河北高速公路集团有限公司京沪分公司, 河北 沧州 061011; 2. 河北工业大学土木与交通学院, 天津 300401)

摘要: 针对高速公路智慧扩容事故场景下应急车道管控方式单一、事故分级与控制策略衔接不足的问题, 提出一种面向事故分级的应急车道动态控制方法。综合人员伤亡、交通影响和次生风险构建事故严重性指数, 采用专家打分确定权重, 并基于模糊 C 均值聚类得到四级事故阈值为 0.383、0.765、1.169。在此基础上, 建立事故等级、事故位置与应急车道控制方式之间的对应关系, 并利用 SUMO 对常闭、常开和分级动态控制策略进行对比。结果表明, I 级主车道事故中, 分级动态控制较常闭策略平均速度提高 6.22%; I 级应急车道事故中, 较常开策略平均速度提高 14.26%, 最大排队长度降低 93.33%; II 级事故中, 救援延误降低 86.66%; 桥梁事故中, 救援延误较常开策略降低 98.81%。研究结果可为智慧扩容条件下高速公路事故场景应急车道分级管控提供参考。

关键词: 交通工程; 事故分级; 智慧扩容; 应急车道; SUMO 仿真

中图分类号: U292.16

文献标志码: A

Dynamic Graded Control of Emergency Lane Accidents Under Expressway Intelligent Capacity Expansion

LIU Yang^{*1}, GU Juping¹, GE Shengjie²

(1. Jinghu Branch of Hebei Expressway Group Co., Ltd., Cangzhou, 061011 China; 2. School of Civil and Transportation Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China)

Abstract: To address the problems of undifferentiated emergency lane control and insufficient coordination between accident classification and control strategies under expressway intelligent capacity expansion, a dynamic emergency lane control method based on accident classification is proposed. An accident severity index is constructed by considering casualties, traffic impact, and secondary risk. Indicator weights are determined using an expert scoring method, and accident severity index thresholds of 0.383, 0.765, and 1.169 are obtained through fuzzy C-means clustering. On this basis, the relationship among accident grade, accident location, and emergency lane control mode is established. SUMO is then used to compare the always-closed, always-open, and graded dynamic control strategies. The results show that, in a Level-I main-lane accident, the graded dynamic control strategy increases the average speed by 6.22% compared with the always-closed strategy. In a Level-I emergency-lane accident, compared with the always-open strategy, it increases the average speed by 14.26% and reduces the maximum queue length by 93.33%. In a Level-II accident, rescue delay is reduced by 86.66%. In a bridge accident, rescue delay is reduced by 98.81% compared with the always-open strategy. The results can provide a reference for graded emergency lane control in expressway accident scenarios under intelligent capacity expansion.

Key words: traffic engineering; accident classification; intelligent capacity expansion; emergency lane; SUMO simulation

在智慧交通背景下,动态开放应急车道逐渐成为高速公路智慧扩容的一种重要方式。这里所说的智慧扩容,主要是指在不新增道路资源的条件下,根据交通运行状态对应急车道进行开放或关闭,以提高既有道路的使用效率^[21-22]。但交通事故或突发事件发生后,应急车道的作用会发生变化。应急车道一方面可以缓解主线交通压力,另一方面又需要保障救援车辆通行,其使用方式会直接影响事故处置和道路运行安全。高速公路事故发生后,道路通行能力通常会在短时间内下降,拥堵也容易向上游扩散,并进一步影响救援车辆到达和现场处置^[19]。在桥梁、山区等空间受限或风险较高的路段,事故影响更容易被放大,这类路段对应急车道管控的及时性和针对性也提出了更高要求^[3,9]。

围绕高速公路事故情景下的交通运行调控与应急车道管理,现有研究主要集中于应急车道功能利用、事故条件下交通运行特征、事故分级与风险评估,以及数据驱动管控方法等方面。应急车道管控研究已由单纯的开放效果分析,逐步延伸至动态启用、时空优化和主动控制。史玉婷等^[1]提出虚拟应急车道管理策略,刘强等^[2]基于现场试验分析了应急车道开放对断面通行能力的改善作用;刘国庆、孙广林^[11]对紧急启用模型进行了综述,归纳了启用判据与建模方法;唐进君等^[6]结合 Kriging 代理模型与遗传算法优化应急车道开放时序和空间范围,说明管控策略设计会直接影响效率与安全表现。与此同时,基于拥堵预测、目标检测和交通状态识别的应急车道启闭决策也逐渐受到关注^[12,18]。

事故条件下的交通运行研究,主要关注拥堵变化、瓶颈通行能力和交通组织方式。Pan 等^[14]分析了瓶颈区拥堵形成、消散及动态排放过程。De Luca 等^[15]采用聚类方法划分危险区,并用来描述事故影响范围。卢胜聪等^[8]提出事故条件下的分级限速策略,并验证了该策略对事故区域运行状态的改善作用。单晶^[13]从非常态路网协同管控角度,讨论了多种管控措施联合使用的问题。在事故分级与严重性评估方面,相关研究也已有一定基础。龚鹏飞^[4]基于层次分析法构建了交通突发事件应急响应分级模型,Wang 等^[7]采用两级模糊综合评价方法对事故严重性进行预测,程新颖^[9]围绕山区高速公路,开展了事故多发段识别与安全等级划分研究。随着数据获取与智能分析能力提升,复杂网络、多源信息融合、风险场建模及轨迹规划等方法也被用于事故成因分析、分类识别和运行风险刻画^[5,10,16-18,20]。总体来看,现有研究已经为应急车道管控、事故条件下交通运行分析和事故分级评估提供了一定基础。但这些研究中,事故分级结果与具体控制策略之间的衔接仍不够直接。已有成果更多关注应急车道启用条件、交通改善效果或事故风险预测,对事故发生后如何根据等级和位置调整应急车道控制方式的讨论还不充分。桥梁等高风险路段的差异化控制,也仍有进一步研究的空间。

因此,本文面向高速公路事故后的应急车道管控需求,结合人员伤亡、交通运行影响及潜在次生风险,构建事故严重性指数,并引入模糊 C 均值聚类方法完成事故分级。在此基础上,建立事故等级、事故发生位置与应急车道控制方式之间的对应关系,形成事故点应急车道上下游开放、上游封控下游开放及上下游关闭等分级动态控制规则,同时将桥梁等高风险路段纳入从严管控范围。进一步依托交通仿真平台构建多类事故场景,对比应急车道常闭、常开与分级动态控制策略的运行表现,从交通效率与救援保障两个方面进行综合评价,为事故条件下应急车道分级管控提供参考。

1 事故分级与应急车道动态控制方法

1.1 事故严重性指数构建

事故发生后,其影响并不只体现在道路通行能力下降,还与人员伤亡情况及次生风险扩散有关。仅以单一指标判断事故程度,难以反映事故对交通运行、救援处置和现场安全造成的综合影响。为此,构建事

故严重性指数 S ，用于对不同事故情形下的综合影响进行量化：

$$S = \omega_1 F_1 + \omega_2 F_2 + \omega_3 F_3 \quad (1)$$

式中： F_1 为人员伤亡函数， F_2 为交通影响函数， F_3 为次生风险函数； ω_1 、 ω_2 、 ω_3 分别表示三个维度的权重。

人员伤亡函数用于表征事故后果的直接严重程度，按伤亡情况取值：

$$F_1 = \begin{cases} 0, & \text{无死亡} \\ 1, & \text{有伤员} \\ 2, & \text{有死亡} \end{cases} \quad (2)$$

交通影响函数用于反映事故对道路通行能力的削弱程度。考虑到本文后续采用仿真样本开展事故分级，故根据事故工况与无事故工况下的下游断面流量变化计算：

$$F_2 = 1 - \frac{q_a}{q_0} \quad (3)$$

式中： q_0 为无事故工况下的断面流量， q_a 为事故工况下的断面流量。当事故导致断面通行能力下降时， F_2 随之增大。

次生风险函数 F_3 用于刻画事故发生后可能引发二次事故或扩大事故影响的潜在风险，次生风险评估赋值依据综合考虑《公路交通应急抢通技术规程》、《危险货物道路运输安全管理办法》及相关研究成果，并结合高速公路桥梁事故应急处置经验进行确定。

表 1 次生风险函数赋值方法

Tab.1 Assignment Method of Secondary Risk Function	
风险情形	赋值分数
普通路段	0
存在起火风险、视线严重受限等情况	0.5
事故发生于桥梁等空间受限路段	0.8
涉及危化品、易燃易爆物等高风险情形	1.0

为确定三个指标在事故严重性评价中的相对权重，聘请相关领域专家进行打分并结合层次分析法，采用 1—9 标度对各指标进行两两比较，并构造判断矩阵。人员伤亡直接对应事故后果，重要性高于交通影响；交通影响反映事故对道路运行状态的直接扰动，重要性高于次生风险；人员伤亡相对于次生风险的重要性差异更明显。由此构建判断矩阵 A ：

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 3 & 5 \\ 1/3 & 1 & 3 \\ 1/5 & 1/3 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

采用和积法计算权重，并进行一致性检验，得到指标权重向量 W ：

$$W = (\omega_1, \omega_2, \omega_3)^T = (0.633, 0.260, 0.107)^T \quad (5)$$

判断矩阵最大特征根为 $\lambda_{\max} = 3.039$ ，一致性指标 $C.I. = 0.019$ ，一致性比例 $C.R. = 0.033 < 0.1$ ，满足一致性要求。

因此，事故严重性指数可表示为：

$$S = 0.633F_1 + 0.260F_2 + 0.107F_3 \quad (6)$$

1.2 基于模糊 C 均值聚类的事事故分级

事故严重性指数 S 为连续变量，还需进一步确定其与事故等级之间的对应关系。考虑到智慧扩容条件下可直接用于分级分析的同口径事故样本较少，基于 SUMO 构建事故情景样本，并据此开展聚类分级。

为保持分级样本与后续管控策略仿真场景的一致性，样本仿真中将基础交通流量统一设为 3600 veh/h。根据事故占道位置、邻近车道扰动程度、车型组成变化及车流随机性，共构建 200 组事故情景样本，样本场景主要对应单向 2 条主车道加 1 条应急车道的高速公路基本路段，事故影响情形包括应急车道受阻、主车道受阻及不同邻近车道扰动组合，车型组成和随机车流用于反映同类事故在不同交通组成和车流扰动下的运行差异。上述样本用于计算交通影响函数 F_2 ，再依据样本对应的 F_1 、 F_2 和 F_3 取值，计算事故严重性指数 S ，为与《公路交通突发事件应急预案》中的公路交通突发事件响应体系保持一致，将聚类数设定为 4，采用模糊 C 均值聚类方法对 200 组事故严重性指数样本进行分级。其目标函数为：

$$J_m = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^c u_{ij}^m \|S_i - v_j\|^2 \quad (7)$$

式中： N 为样本数， c 为聚类数， u_{ij} 为第 i 个样本隶属于第 j 类的隶属度， S_i 为第 i 个事故样本的严重性指数， v_j 为第 j 类聚类中心， m 为模糊加权指数。聚类数 c 取 4，模糊加权指数 m 取 2，最大迭代次数设为 100，收敛阈值取 10^{-5} 。聚类完成后，按照聚类中心由小到大的顺序，将其依次对应为 I 级、II 级、III 级和 IV 级事故。以相邻聚类中心的中点作为等级分界值，得到事故严重性指数的分级阈值，结果见表 2。

表 2 模糊 C 均值聚类结果及事故等级阈值

Tab.2 Fuzzy C-Means Clustering Results and Accident Severity Grade Thresholds

事故等级	聚类中心	严重性指数区间	样本数
I 级	0.0446	$0 \leq S < 0.383$	80
II 级	0.7216	$0.383 \leq S < 0.765$	40
III 级	0.8091	$0.765 \leq S < 1.169$	40
IV 级	1.5285	$S \geq 1.169$	40

进一步计算聚类有效性指标，模糊划分系数（FPC）为 0.9926，Xie-Beni（XB）指数为 0.0378。FPC 越接近 1 表明样本隶属关系越清晰，XB 越小表明类内聚集性和类间分离性越好，说明聚类结果具有较好的区分度，聚类过程在 12 次迭代后满足收敛条件。整体来看，各类样本归属较为明确，所得阈值可用于后续事故等级识别与应急车道分级控制。

1.3 事故等级与应急车道分级控制策略

事故发生后，应急车道的功能不是固定的。当事故发生于主车道且未占用应急车道时，应急车道仍具备临时通行条件，适当开放可以分担主线交通压力；当事故发生于应急车道时，若继续维持常开，车辆会不断进入事故影响区，容易增加并道冲突和局部排队；当事故等级提高，救援、清障和现场处置需求增强时，应急车道又需要优先作为救援通道和作业空间使用。

因此，应急车道控制不能只依据事故等级确定，还需兼顾事故发生车道位置，并结合事故发生后的应急处置需求和通行效率进行判断。对于 I 级事故，若事故发生在主车道，应急车道可用于分流；若事故发生在应急车道，则应关闭事故点上游入口，防止后续车辆继续进入事故区域。对于 II 级事故，救援和清障需

求已经开始增强，应急车道需要在交通疏解和救援保障之间进行协调。对于Ⅲ级及Ⅳ级事故，应急车道不宜继续作为社会车辆通行空间，而应优先保障救援车辆通行、清障作业和风险隔离。

桥梁等高风险路段需要单独考虑。由于桥梁路段空间受限，车辆疏散、救援停靠和清障作业条件均弱于普通路段，一旦事故影响扩大，处置难度会明显增加。因此，桥梁事故应按照从严原则处理，同等级事故下控制策略应向更保守的状态调整。

根据事故等级和事故发生位置，本文将应急车道控制方式归纳为三类：上下游开放、上游封控下游疏导和上下游关闭。其中，上下游开放适用于事故未占用应急车道、救援需求较低的场景；上游封控下游疏导适用于事故发生于应急车道或需要兼顾救援通行的场景；上下游关闭适用于事故等级较高、救援保障或风险隔离需求较强的场景。具体控制规则见表 3。

表 3 事故分级控制规则

Tab.3 Accident classification control rules

事故等级	事故位置	决策输出（应急车道状态）	决策逻辑
I 级	主车道	上下开	事故未占用应急车道，可发挥分流作用
I 级	应急车道	上关下开	关闭上游入口，防止车辆继续进入事故点； 下游开放用于疏导已进入车辆
II 级	任意	上关下开	兼顾交通疏解与救援保障，限制上游车辆进入事故影响区
III级及Ⅳ级	任意	上下均关	应急车道优先用于救援通行、清障作业和风险隔离

表 3 中，上关下开表示关闭事故点上游应急车道入口，同时保持事故点下游应急车道开放，用于疏导已进入车辆；上下均关表示事故点上下游应急车道均不再作为社会车辆通行空间，而优先服务救援车辆、清障车辆和现场安全作业。对于桥梁等高风险路段，本文按照从严原则处理，控制策略按Ⅲ级及以上事故执行。

在具体控制过程中，当需要关闭事故点上游应急车道时，在事故点上游约 1 km 范围内设置预警和车辆诱导，引导已进入应急车道的车辆逐步并回主线；在事故点上游约 500 m 处关闭应急车道入口，限制后续车辆继续进入事故影响区。事故点下游应急车道在满足安全条件时保持开放，用于疏导已进入车辆，减少事故点附近滞留。

1.4 评价指标

为比较不同应急车道控制策略的运行效果，本文从交通运行效率、排队扩散和救援保障三个方面选取评价指标，包括平均速度、流量—速度关系、最大排队长度和救援延误时间。

平均速度用于反映事故发生后路段整体运行状态。仿真过程中，统计各时刻路段内车辆的平均运行速度，并绘制速度—时间变化曲线，用于比较不同策略下交通状态的恢复过程。

最大排队长度用于描述事故影响向上游扩散的程度。本文根据仿真中停车或低速车辆数量估算排队长度，其表达式为：

$$L_q(t) = N_q(t) \cdot l_q \quad (8)$$

式中： $L_q(t)$ 为 t 时刻排队长度； $N_q(t)$ 为该时刻处于排队状态的车辆数； l_q 为单车折算排队间距。最大排队长度为仿真时段内各时刻排队长度的最大值：

$$L_{q,\max} = \max L_q(t) \quad (9)$$

流量—速度关系用于分析不同策略下断面通行能力与运行速度之间的对应变化。为比较不同控制策略下交通流状态和通行能力差异，采用 Greenshields 基本图对仿真输出数据进行拟合：

$$v = v_f \left(1 - \frac{k}{k_j} \right) \quad (10)$$

式中： v 为交通流速度； v_f 为自由流速度； k 为交通流密度； k_j 为阻塞密度。根据交通流基本关系 $q = kv$ ，可得到流量—速度关系：

$$q = k_j v - \frac{k_j}{v_f} v^2 \tag{11}$$

式中： q 为断面流量。该拟合主要用于辅助比较不同策略下交通流状态变化，不作为单独的理论模型展开。

为分析不同应急车道控制策略对应应急救援效率的影响，引入救援延误时间作为评价指标，将其定义为实际到达时间与理想畅通条件下最短到达时间之间的差值。考虑到救援车辆在不同路段及交通状态下的运行速度存在差别，进一步引入交通密度参数，用以刻画拥堵程度对应急响应过程的影响。

$$T_{\text{延误}} = \int_0^L \frac{1}{V_{\text{应急}}(x, \rho)} dx - \frac{L}{V_{\text{最大}}} \tag{12}$$

(实际耗时-最快耗时)

式中： x 代表路段上的位置， ρ 代表交通密度/拥堵程度， L 是救援起点到事故点的道路长度， $V_{\text{应急}}(x, \rho)$ 表示不同位置、不同拥堵程度下，实际开的速度， $V_{\text{最大}}$ 为道路最大行驶速度。

2 仿真场景与参数设置

2.1 仿真路网与交通流输入

仿真道路选取长度为 10 km 的单向高速公路基本路段，设置 2 条主车道和 1 条应急车道，用于模拟事故发生后主线车道与应急车道之间的通行组织关系。道路设计限速设为 100 km/h，各车道采用统一基础限速，车辆实际运行速度由车辆类型参数、跟驰模型、换道行为及局部交通状态共同决定。事故点设置在距起点 5 km 处，以保证事故点上下游均具有足够的排队形成和疏散空间。

交通流输入采用分时段方式，以反映高峰时段交通需求的波动。0—1200 s、1200—2400 s 和 2400—3600 s 三个时段内的输入交通为 3600 veh/h。车辆类型包括小客车和大车两类，大车比例设为 15%。小客车最大速度取 100 km/h，大车最大速度取 80 km/h。仿真步长取 1 s，仿真总时长为 3600 s。为降低随机发车及车辆行为随机性对结果的影响，各事故场景在相同路网、交通流和控制策略条件下分别设置 5 组随机种子，取 seed=1、2、3、4、5 进行重复仿真，后续评价指标取 5 次仿真结果的平均值。基础输入参数见表 4。

表 4 SUMO 仿真基础输入参数

Tab.4 Basic Input Parameters of SUMO Simulation

参数名称	设置值	说明
基本路段长度	10 km	用于I级、II级事故基本路段仿真
桥梁路段长度	2 km	用于桥梁高风险事故补充场景
车道组成	2+1	单向 2 条主车道+1 条应急车道
道路设计限速	100 km/h	作为路网基础限速参数
交通流输入	3600 veh/h	单向总交通流量
大车比例	15%	用于反映车辆组成对交通运行的影响
小客车最大速度	100 km/h	对应 car 车辆类型
大车最大速度	80 km/h	对应 truck 车辆类型

仿真步长	1 s	保证车辆跟驰和换道过程连续
仿真时长	3600 s	用于观察事故影响形成和恢复过程
事故发生时刻	600 s	事故注入时刻
事故位置	距起点 5 km	保证事故点上下游均有影响传播空间
事故处置时间	2700 s	对应事故处置及救援通过程
上游预警距离	1 km	用于动态策略下提前诱导车辆变道
上游封控距离	500 m	用于限制车辆继续进入事故影响区
随机种子 seed	1、2、3、4、5	用于多次重复仿真，降低随机性影响

2.2 事故场景设置

将前文提出的应急车道分级控制规则转化为 SUMO 仿真中的具体控制逻辑。仿真设置应急车道常闭、应急车道常开和分级动态控制三类策略。其中，常闭策略下应急车道不向社会车辆开放；常开策略下应急车道持续允许车辆通行；分级动态控制策略根据事故等级和事故发生位置，对事故点上下游应急车道采取开放、封控或疏导措施。

动态控制过程中，当事故点上游应急车道需要封控时，在事故点上游约 1 km 处对已进入应急车道的车辆进行变道引导，并在上游约 500 m 处关闭应急车道入口，限制新增车辆进入事故影响区；事故点下游应急车道在满足安全条件时保持开放，用于疏导车辆并保障救援通行。

为增强不同策略之间的横向可比性，仿真在 I 级事故、II 级事故和桥梁高风险事故场景下均设置常闭、常开和分级动态控制三种策略进行比较。各策略对比时，基础路网、交通流输入、车辆组成、事故位置、事故发生时刻和处置时间保持一致，仅改变应急车道控制方式。

3 仿真设计与结果分析

从交通运行效率与救援保障两个维度，对比应急车道常闭、常开与分级动态控制三种策略下的交通运行表现。选取流量时序变化、速度演变特征、最大排队长度及救援延误时长等作为评价指标。由于不同事故等级下应急车道功能定位存在差异，仿真部分选取I级、II级及桥梁事故场景开展对比分析。

I级事故的影响范围相对有限，通行效率是主要考虑因素。常闭策略属于较保守的控制方式。为分析应急车道开放对主线运行效率的影响，I级事故场景主要对比常闭策略与分级动态控制策略。

II级事故中，通行效率和救援保障之间的矛盾更加明显。常开策略可以在短时间内提高通行能力，但也可能影响救援车辆通行。因此，II级事故场景主要对比常开策略与分级动态控制策略，用于分析动态控制在保障救援通行条件下的运行效果。

III、IV 级事故现场风险更高、处置需求更强，应急车道需优先保障救援通行、清障作业与风险隔离，管控目标以安全保障为主。该等级下，分级动态控制的决策逻辑与常闭策略趋于一致；若再与常开策略进行效率对比，虽然可以体现短时通行差异，但不符合高等级事故救援优先、安全优先的处置原则。因此，III、IV 级事故仅在管控规则中明确其保守控制逻辑，不再单独开展仿真对比。桥梁路段受空间条件与风险扩散特征影响，管控原则更为保守，可用于补充验证高风险场景下分级动态策略的运行效果，后续随着道路智慧扩容的运营，可以结合采集道路真实数据，延伸开展专项分析。

为比较各管控策略的运行效果，采用相对改善率表征分级动态策略相较于对照策略的变化幅度。I 级事故风险较低，重点检验分级动态策略相较于常闭策略释放应急车道通行功能的改善效果，因此以常闭策

略为基准；II 级事故需兼顾通行效率与救援保障，重点检验分级动态策略相较于常开策略对救援通行的改善效果，以常开策略为基准；桥梁事故属于高风险情景，需同时考察其相较于常闭和常开策略的运行差异，因此分别以常闭和常开策略为基准。相对改善率按式 (13) 计算：

$$\eta = \frac{|X_d - X_b|}{X_b} \times 100\% \quad (13)$$

式中： η 为相对改善率； X_d 为分级动态策略指标值； X_b 为基准策略指标值。平均速度、最大通行能力等正向指标对应提升率，最大排队长度、救援延误等负向指标对应降低率。

3.1 不同事故场景下运行状态对比

为比较不同事故场景下三种策略的运行状态变化，图 1—图 4 分别给出了速度变化、流量—速度关系及排队或救援指标对比。图 1 中，常闭策略速度水平整体低于常开和分级动态控制，流量—速度拟合结果也显示开放应急车道后断面通行能力有所提高，说明当事故未占用应急车道时，应急车道可以发挥分流作用。图 2 中，事故发生于应急车道后，常开策略速度下降更明显，最大排队长度也明显增大；分级动态控制在事故发生后虽有短时波动，但随后速度恢复较快，流量—速度关系和排队结果均优于常开策略。图 3 中，常开策略虽然具有一定通行能力，但救援延误明显增加，分级动态控制在速度恢复、排队控制和救援保障方面表现更均衡。图 4 中，桥梁事故下常开策略受影响最明显，事故解除后速度较快回升，主要与前期积压车辆集中释放有关；分级动态控制的速度、排队和救援延误整体接近常闭策略，体现出桥梁高风险场景下偏保守的控制特点。

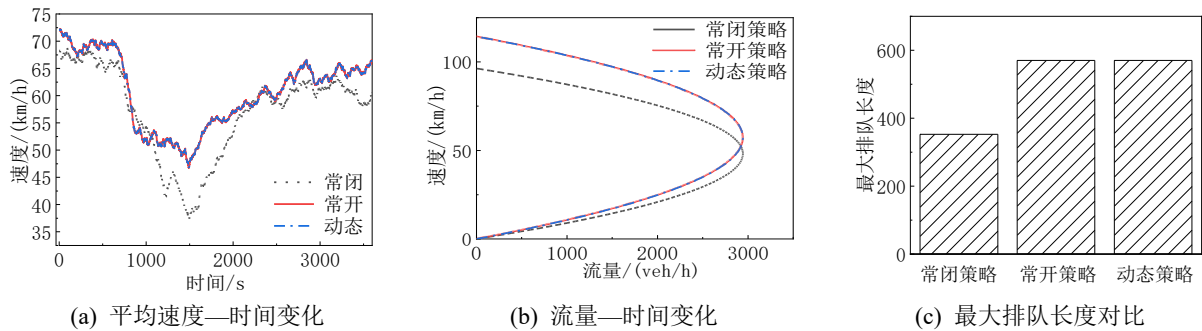


图 1 I 级主车道事故场景下三种策略运行状态对比

Fig.1 Comparison of operating states under three strategies in level I accident scenario

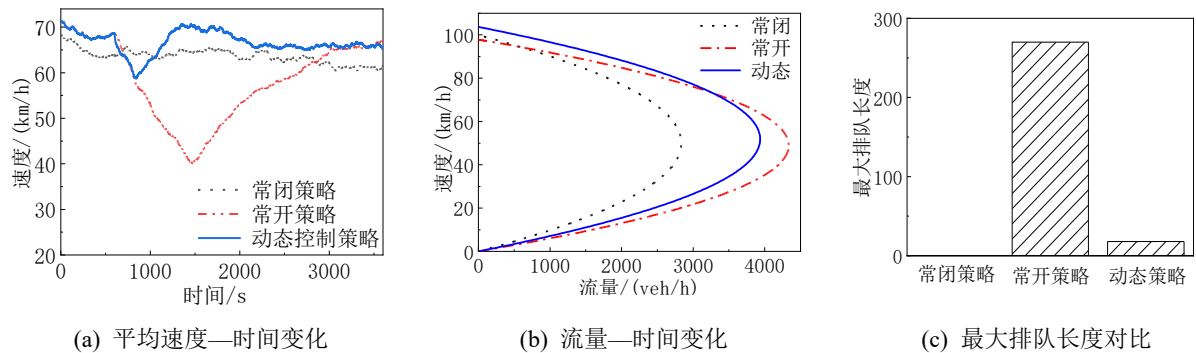


图 2 I 级应急车道事故场景下三种策略运行状态对比

Fig.2 Comparison of operating states under three strategies in level I emergency lane accident scenario

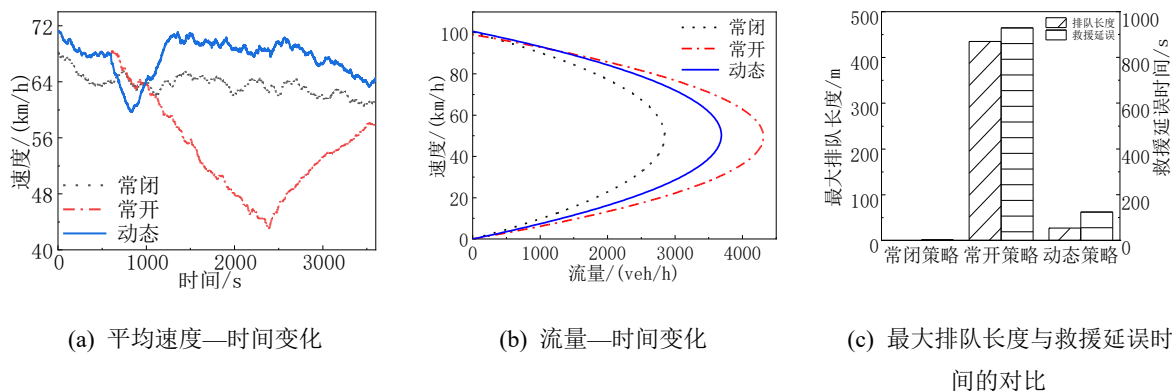


图 3 II 级事故场景下三种策略运行状态对比

Fig.3 Comparison of operating states under three strategies in level II accident scenario

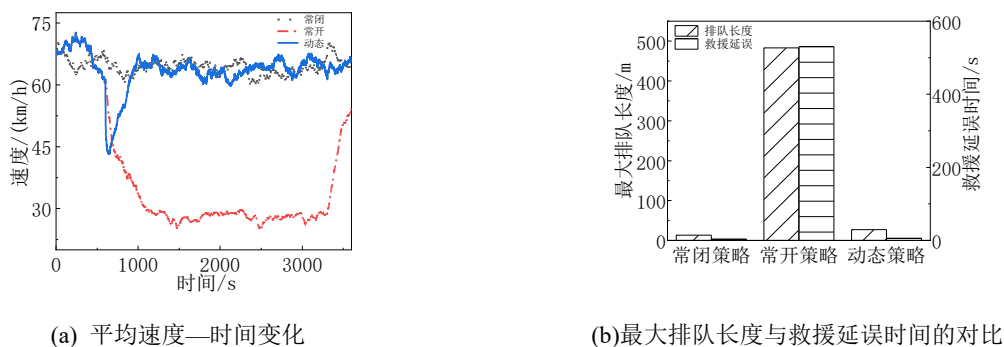


图 4 桥梁高风险场景下三种策略运行状态对比

Fig.4 Comparison of operating states under three strategies in bridge high-risk scenario

3.2 评价指标与改善率分析

表 5 汇总了各事故场景下的平均速度、最大排队长度和救援延误时间。I级主车道事故中，分级动态控制和常开策略的平均速度均高于常闭策略，说明事故未占用应急车道时，开放应急车道可以改善通行效率。I级应急车道事故中，分级动态控制的平均速度最高，最大排队长度明显低于常开策略，说明上游封控能够减少事故点附近车辆聚集。II级事故中，动态控制在保持较高运行速度的同时降低了救援延误。桥梁事故中，动态控制整体效果接近常闭策略，并明显优于常开策略。整体来看，分级动态控制可以根据事故等级和事故发生位置，在交通疏散与救援保障之间进行调整。

表 5 不同事故场景下三种控制策略评价指标对比

Tab.5 Comparison of evaluation indicators under different scenarios

事故场景	控制策略	平均速度/(km/h)	最大排队长度/m	救援延误/s
I 级主车道事故	应急车道常闭	57.056	352.5	—
	应急车道常开	60.602	570	—
	分级动态控制	60.602	570	—
I 级应急车道事故	应急车道常闭	63.614	0.0	—
	应急车道常开	58.332	270.0	—
	分级动态控制	66.650	118	—
II 级事故	应急车道常闭	63.577	0	3.151
	应急车道常开	56.558	435	929.351

	分级动态控制	67.477	27	123.951
	应急车道常闭	64.491	13.5	3.723
桥梁事故	应急车道常开	37.714	483	530.323
	分级动态控制	63.589	27	6.323

计算相对改善率后可以看出，分级动态控制在不同事故场景下的作用并不相同。I级主车道事故中，事故没有占用应急车道，分级动态控制较常闭策略平均速度提高约 6.22%。这说明应急车道在低等级主车道事故中可以发挥分流作用。I级应急车道事故中，动态控制较常开策略平均速度提高约 14.26%，最大排队长度降低约 93.33%。这说明“上关下开”可以减少车辆继续进入事故点附近，对排队扩散有明显抑制作用。II级事故中，动态控制在保持较高运行速度的同时，使救援延误时间较常开策略降低约 86.66%，最大排队长度降低约 93.79%。这说明动态控制可以同时兼顾交通疏解和救援保障。桥梁高风险事故中，动态控制较常开策略平均速度提高约 68.61%，救援延误时间降低约 98.81%。其整体运行状态接近常闭策略，说明高风险场景下应急车道控制更应偏向救援保障和安全处置。

3.3 适用范围与参数影响说明

需要说明的是，本文提出的分级动态控制策略并非适用于所有高速公路事故场景，其应用效果与道路条件和交通运行状态有关。本文仿真的基础条件为单向 2 条主车道加 1 条应急车道，交通流量为 3600 veh/h，大车比例为 15%，事故点位于路段中部，且事故点上下游均具有一定的车辆疏散空间。在这一条件下，分级动态控制能够较清楚地反映事故等级、事故位置与应急车道功能切换之间的关系。

从适用范围看，该策略更适合用于应急车道连续、具备交通检测和信息诱导条件的高速公路基本路段。交通需求不同，策略效果也会不同。当交通需求较低时，主线车道本身还有一定通行空间，应急车道开放带来的改善可能不明显。当交通需求接近瓶颈通行能力时，应急车道动态开放的疏导作用会更明显，但救援通道被占用的风险也会增加。车辆组成也会影响运行效果。大车比例升高后，车辆换道扰动会增多，交通流恢复难度也会加大。对于应急车道宽度不足、连续性较差，或者事故靠近出入口、瓶颈区的情况，不适于直接套用本文仿真结果，还需要结合具体道路条件和现场管控要求进行判断。

4 结论

采用面向事故分级的应急车道动态控制方法，对智慧扩容条件下高速公路事故场景中的应急车道管控问题进行了研究，得到以下结论：

- 1) 应急车道在事故条件下并不只承担单一通行功能。事故未占用应急车道时，可用于交通疏解；事故发生于应急车道或救援需求增强时，应转向救援保障和现场处置。基于此，本文建立了事故等级、事故位置与应急车道控制方式之间的对应关系。
- 2) 仿真结果表明，分级动态控制能够根据事故场景调整应急车道状态。I级主车道事故中，动态控制与常开策略均能改善运行速度；I级应急车道事故中，动态控制较常开策略平均速度提高 14.26%，最大排队长度降低 93.33%；II级事故中，救援延误较常开策略降低 86.66%。
- 3) 桥梁高风险事故中，常开策略不适用于持续通行组织，容易加重运行扰动和救援延误。分级动态控制较常开策略平均速度提高 68.61%，救援延误降低 98.81%，说明高风险路段下应急车道控制应更偏向救援保障和安全处置。后续仍需结合不同交通流、大车比例和事故位置进一步验证。

参考文献:

- [1] 史玉婷, 干宏程, 王一帆. 混合交通流下高速公路虚拟应急车道管控策略 [J]. 交通运输研究, 2025, 11 (3): 23-33.
Shi Yuting, Gan Hongcheng, Wang Yifan. Virtual emergency lane control strategy for expressways under mixed traffic flow conditions [J]. Transport Research, 2025, 11 (3): 23-33.
- [2] 刘强, 丁璠, 张志祥, 等. 应急车道开放条件下高速公路交通运行特性分析 [J]. 中外公路, 2022, 42 (4): 252-257.
Liu Qiang, Ding Fan, Zhang Zhixiang, et al. Analysis of traffic characteristics for expressway on section with emergency lane running [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2022, 42 (4): 252-257.
- [3] 靳引利, 高鹏, 谭二龙, 等. 高速公路交通事故应急关键资源调配研究综述 [J]. 交通运输工程学报, 2024, 24 (6): 1-25.
Jin Yinli, Gao Peng, Tan Erlong, et al. Review on key emergency resource deployment for expressway traffic accidents [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2024, 24 (6): 1-25.
- [4] 龚鹏飞. 城市道路交通突发事件应急响应分级研究 [J]. 现代城市研究, 2015 (3): 23-27.
Gong Pengfei. Classification of emergency response to urban road traffic emergencies [J]. Modern Urban Research, 2015 (3): 23-27.
- [5] Li Chuzhao, Zhou Yangming, Tao Zhiyu, et al. Dynamic evaluation of emergency lane occupation based on an improved driving risk field model [J]. Accident Analysis & Prevention, 2025, 220: 108143.
- [6] 唐进君, 胡立鹏, 李明洋, 等. 基于 Kriging 遗传算法的高速公路应急车道管控优化 [J]. 系统仿真学报, 2024, 36 (5): 1165-1178.
Tang Jinjun, Hu Lipeng, Li Mingyang, et al. Optimization of highway emergency lane control based on Kriging genetic algorithm [J]. Journal of System Simulation, 2024, 36 (5): 1165-1178.
- [7] Wang Guanghui, Li Jinbo, Shen Lingfeng, et al. Towards efficient and accurate prediction of freeway accident severity using two-level fuzzy comprehensive evaluation [J]. Heliyon, 2024, 10 (16): e36396.
- [8] 卢胜聪, 王芳, 柳稳强, 等. 事故条件下高速公路分级限速策略研究 [J]. 交通工程, 2025, 25 (3): 7-15.
Lu Shengcong, Wang Fang, Liu Wenqiang, et al. Research on the grade-based speed limit strategy on highways under accident conditions [J]. Journal of Transportation Engineering, 2025, 25 (3): 7-15.
- [9] 程新颖. 山区高速公路事故多发段两阶段鉴别与安全分级研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2025.
Cheng Xinying. Research on two-stage identification and safety classification of accident-prone sections in mountainous expressways [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2025.
- [10] Liu Yang, Shi Congling. Mandatory lane-changing decision making and planning in emergency situations [J]. Transportation Safety and Environment, 2023, 5: tdac041.
- [11] 刘国庆, 孙广林. 高速公路应急车道紧急启用模型综述 [J]. 数学的实践与认识, 2025, 55 (10): 140-146.
Liu Guoqing, Sun Guanglin. Overview of activation models for emergency lanes on highways [J]. Mathematics in Practice and Theory, 2025, 55 (10): 140-146.
- [12] 徐康, 曾潇, 贾青青, 等. 基于机器学习的交通拥堵预测与应急车道管控模型研究 [J]. 数学的实践与认识, 2025, 55 (10): 131-139.
Xu Kang, Zeng Xiao, Jia Qingqing, et al. Research on traffic congestion prediction and emergency lane control model based on machine learning [J]. Mathematics in Practice and Theory, 2025, 55 (10): 131-139.
- [13] 单晶. 基于智慧扩容的非常态模式下高速公路路网协同管控研究 [J]. 科技创新与应用, 2025, 15 (30): 94-97.
Shan Jing. Research on collaborative management and control of expressway network under abnormal mode based on intelligent expansion [J]. Technology Innovation and Application, 2025, 15 (30): 94-97.
- [14] Pan Yuyan, Cheng Qixiu, Li Anran, et al. Analysis of congestion key parameters, dynamic discharge process,

and capacity estimation at urban freeway bottlenecks: a case study in Beijing, China[J]. Transportation Letters, 2025, 17 (6) : 984-1003.

- [15] De Luca M, Mauro R, Russo F, et al. Before-after freeway accident analysis using cluster algorithms [J] . Procedia - Social and Behavioral Sciences, 2011, 20: 723-731.
- [16] Wang Yongdong, Zhai Haonan, Cao Xianghong, et al. Cause analysis and accident classification of road traffic accidents based on complex networks [J] . Applied Sciences, 2023, 13 (23) : 12963.
- [17] Oh C, Ban Y. Cross-modality interaction-based traffic accident classification [J] . Applied Sciences, 2024, 14 (5) : 1958.
- [18] Zhang Chaokai, Cheng Hao, Wu Rui, et al. Development of a traffic congestion prediction and emergency lane development strategy based on object detection algorithms [J] . Sustainability, 2024, 16 (23) : 10232.
- [19] Kang Minji, Cho S H, Park S H. Investigation of factors affecting the duration of full-lane-closure accidents on the freeway [J] . KSCE Journal of Civil Engineering, 2026, 30 (2) : 100343.
- [20] Wang Yue, Zhang Meng, Yang Xixi, et al. Research on virtual emergency lane optimization and control strategy based on VISSIM expressway [J] . Ain Shams Engineering Journal, 2025, 16 (12) : 103750.
- [21] 鲁文强, 谢波, 赵东亮. 高速公路智慧扩容中动态开放应急车道背景下既有横断面优化研究 [J] . 山东交通科技, 2025 (3) : 34-37.
Lu Wenqiang, Xie Bo, Zhao Dongliang. Research on optimization of existing cross-sections under the background of dynamic opening of emergency lanes in intelligent expansion of expressway [J] . Shandong Jiaotong Keji, 2025 (3) : 34-37.
- [22] Yao Jinqiang, Qian Yu, Feng Zhanyu, et al. Hidden Markov model-based dynamic hard shoulders running strategy in hybrid network environments [J] . Applied Sciences, 2024, 14 (8) : 3145.



通信作者: 刘杨 (1989—), 女, 高级工程师, 研究方向为高速公路智慧化与数字化转型。