

# 应急车道开放条件下交通流状态分析

张春玉<sup>1</sup>, 刘杨<sup>1</sup>, 朱东林<sup>1</sup>, 程新<sup>2</sup>

(1. 河北高速公路集团有限公司京沪分公司, 河北 沧州 061015; 2. 河北工业大学土木与交通学院, 天津 300401)

**摘要:** 高峰期或事故条件下开放应急车道作为行车道已经在国外部分高速公路得到了应用。为缓解我国重大节假日期间高速公路的周期性严重拥堵, 提升大流量路段通行效率, 本研究针对京沪高速公路开展应急车道开放使用的探索性研究。本研究综合运用理论分析与交通流实时监测技术, 采集了翔实的多车道交通运行参数, 并对开放条件下的交通流特性进行对比分析。研究发现在应急车道开放后, 交通流的通行能力显著提升, 在高密度情况下, 流量能够持续增长并避免饱和现象, 同时车辆行驶速度的下降幅度显著减小, 提高了整体道路的流畅性。开放应急车道使断面整体通行能力提升了约 20.82%, 缓解拥堵效果显著。

**关键词:** 应急车道; 交通流状态; 通行能力; 高速公路

中图分类号: U491.5+4 文献标识码: A

## Operational Analysis of Traffic Flow under Dynamic Hard Shoulder Running Conditions

ZHANG chunyu<sup>1</sup>, LIU yang<sup>1</sup>, ZHU donglin<sup>1</sup>, CHENG xin<sup>2</sup>

(1. Beijing-Shanghai Branch of Hebei Expressway Group Co., Ltd., Hebei cangzhou, 061015, China; 2. School of Civil and Transportation Engineering, Hebei University of Technology, tianjin, 300401, China)

**Abstract:** Hard shoulder running (HSR), in which the hard shoulder is temporarily opened to traffic during peak periods or under incident conditions, has already been implemented on some motorways abroad. To alleviate the recurrent severe congestion on Chinese motorways during major holidays and to improve the operational efficiency of high-volume segments, this study conducts an exploratory investigation of hard shoulder running on the Beijing-Shanghai motorway. By combining theoretical analysis with real-time traffic-flow monitoring, detailed multi-lane traffic data were collected, and the characteristics of traffic flow with and without hard shoulder running were comparatively analyzed. The results indicate that, after the implementation of hard shoulder running, the traffic capacity is significantly enhanced: under high-density conditions, the flow can continue to increase without saturating, while the decrease in vehicle speed is significantly alleviated, thereby improving the overall smoothness of traffic operations. Hard shoulder running increases the cross-sectional capacity of the studied segment by approximately 20.82%, demonstrating a pronounced effect in relieving congestion.

**Key words:** hard shoulder running; traffic flow state; traffic capacity; motorway

《交通强国建设纲要》和《国家综合立体交通网规划纲要》明确将交通运输高质量发展作为交通强国建设的一项重要指标<sup>[1-2]</sup>。随着我国经济的快速发展, 高速公路出行需求显著增加, 交通流量持续走高。尤其是在长三角、珠三角、京津冀等高度集聚的经济区域, 路网饱和度不断提高, 高速公路拥堵已由偶发性事件逐渐演变为常态化问题。此类拥堵不仅显著降低了路网通行效率, 延长了出行时间, 也对社会经济运行效率和公众出行体验造成持续负面影响。特别是在实施节假日免费通行政策期间, 交通需求短时间内激增, 导致部分关键节点通行能力严重超载, 交通拥堵已不再仅仅是交通管理问题, 更成为一种备受关注的社会现象。

收稿日期: 2025-02-04

基金项目: 国家自然科学基金项目(52372302)

目前,缓解高速公路交通拥堵主要依赖基础设施优化与交通管理调控两种途径。常规手段如匝道控制、可变限速、车道管理等,在一般大流量条件下尚可发挥一定疏导作用,但在极端大流量场景下,其缓解效果有限,难以根本性应对持续高位运行的交通压力。扩建车道、新增道路资源虽是提升通行能力最直接的方式,但往往受限于土地资源紧张、建设周期长、资金投入大及环境影响等多重现实约束,实施难度较大。在这一背景下,合理、有条件地开放应急车道,成为在既有道路条件下挖掘潜力、提升通行能力的一种创新探索思路。

本文基于 G2 京沪高速沧州段节假日应急车道开放交通组织试验的实测证据。依托系统布设的监测设备获取多车道断面交通流参数,引入 Drake 基本图模型开展开放/关闭双工况拟合与参数辨识并刻画速度-密度-流量非线性关系,进一步从自由流速度、临界密度等参数变化解释开放后交通运行机理差异,以综合评价该措施的实效性与适用性。研究旨在验证应急车道开放作为大流量高速公路交通管控补充手段的可行性,以期为相关决策与实践提供理论依据和实证参考。

## 1 研究现状

### 1.1 国内研究现状

为缓解节假日及高峰时段高速公路的拥堵压力,国内部分地区交通管理部门近年来陆续引入了应急车道临时开放措施,准许社会车辆在限定条件下使用应急车道。2019 年“五一”假期期间,沪宁高速公路无锡段开放应急车道进行试验,取得了良好的效果。刘强等<sup>[3]</sup>对该路段进行实测分析后指出,相较于未开放应急车道时,断面通行能力提升约 10%。G75 兰海高速金开互通-蔡家互通段双向早晚高峰时段对小客车开放应急车道,徐进等<sup>[4]</sup>对开放工况下的交通运行特性进行研究,发现应急车道的平均行驶速度较关闭状态提高约 20 km/h。在建模与仿真方面,叶朕<sup>[5]</sup>基于 METANET 宏观交通流模型构建应急车道使用控制下的高速公路网络,仿真结果表明,在高峰时段适时开放应急车道可额外提供约 20%~25% 的通行能力,有效减少拥堵程度,并在一定程度上改善运行安全水平。李瑞敏<sup>[6]</sup>则从优化角度出发,总结应急车道使用过程中的主要问题,提出以网络总行程时间最小化为目标的应急车道使用优化模型,为管控策略设计提供了量化依据。唐进君等<sup>[7]</sup>面向不同交通流情景,构建基于 Kriging 代理模型的遗传算法优化框架,对应急车道管控策略进行优化,使路网总行程时间减少 14.9%,碰撞暴露时间降低 44.2%。邵超逸等<sup>[8]</sup>利用 VISSIM 搭建事故区与非事故区的仿真场景,对比不同交通量条件下的延误与速度变化,结果显示,应急车道开放后非事故区整体运行收益更为明显。史玉婷等<sup>[9]</sup>提出的一种基于动态路权分配的虚拟应急车道管控策略使得平均流量峰值提高 32%。韦长念<sup>[10]</sup>分析了 2025 年春运期间 G65 包茂高速同古互通至 G78 汕昆高速回龙互道路段,在应急车道开放后发现平均速度由 20 km/h 提升至 40 km/h,同时通行能力提高了 30%,该举措有效改善了居民出行体验。在沪宁高速“智慧扩容/应急车道动态开放”实践中,为满足应急车道借道通行的安全与通行条件,采用既有横断面内的车道宽度再分配与路面养护加固:将第一车道由 3.75 m 调整为 3.5 m,同时将应急车道由 3.25 m 增宽至 3.5 m,并配套建设应急港湾群等设施以保障开放期间的应急救援与运行安全。

### 1.2 国外研究现状

ARORA 等<sup>[11]</sup>构建了基于 METANET 的拥堵检测与控制模型,将可变限速与应急车道开放联合应用于高速公路主动管控中,结果表明,两类策略分别可将车流平均速度提升 21.09%和 33.44%。COFFEY 等<sup>[12]</sup>利用 VISSIM 微观仿真生成的车辆轨迹数据,对美国宾夕法尼亚州 I-476 路段在应急车道开放条

件下的运行安全进行评估,发现虽然 TTC (Time To Collision) 指标有所降低,但交通冲突总量显著下降,从整体上抵消了 TTC 下降可能带来的安全性隐患。Marco<sup>[13]</sup>以意大利布伦纳高速公路 A22 为案例,系统分析了应急车道开放条件下的效率与安全表现,结果显示道路运行效率提高约 27%~35%,而事故发生频率变化并不显著。DUTTA 等<sup>[14]</sup>基于弗吉尼亚州州际公路 I-66 为期两年的主动交通管理实测数据,对实施应急车道开放路段的安全效应进行量化,结果表明车辆碰撞数量减少约 31%~38%。LI 等<sup>[15]</sup>通过微观仿真方法,研究英国 M25 高速公路在不同时段对卡车开放专用应急车道的运行效果,证实该策略可在高需求条件下有效缓解主线拥堵。Kuang 等<sup>[16]</sup>提出一种基于车联网环境的动态缓冲区引导策略,通过对应急车道路权进行实时分配,在显著提升应急车辆通行效率的同时,降低了其对整体交通流的扰动。Yao 等<sup>[17]</sup>则构建了基于隐马尔可夫模型的动态应急车道开放策略,并与速度协调控制相结合,仿真结果表明道路通行能力可提高约 15%~30%。Middleham<sup>[18]</sup>分析了荷兰的应急车道使用数据表明开放应急车道会显著提高道路的通行能力和阻塞密度。Geistefeldt<sup>[19]</sup>将道路通行能力界定为:在交通崩溃概率处于可接受水平时,路段所能承载的交通流率;并基于德国 A5 高速公路的实测流量数据,对交通崩溃发生概率进行了分布拟合。研究结果表明,在实施应急车道开放后,该路段的通行能力提升约 21%,同时年度拥堵持续时间减少约 90%。Ni 等<sup>[20]</sup>基于驾驶模拟器对比 2.5、3.0 m 与 3.5 m 硬路肩条件下车辆运行特性,结果表明 2.5 m 条件下车辆平均速度最低、波动最大,速度水平较 3.5 m 条件下降低约 2%~3%,反映窄应急车道对运行效率的约束作用。

### 1.3 研究评述

综上所述,国内外关于应急车道临时开放的研究总体认为:在节假日或高峰大流量条件下,通过限定开放时段、车辆准入并配套可变限速、车道控制等措施,可有效增加道路供给、缓解拥堵并提升通行能力,但提升幅度受路段几何、交通组成与管控强度等影响差异显著;安全层面多以冲突指标、事故频率等进行验证,普遍认为在合理管控下效率提升与安全风险并非必然对立。然而现有研究仍存在不足:一是仿真与驾驶模拟占比偏高,面向节假日大流量情境的现场组织试验与连续实测数据相对缺乏,导致能力增益与速度稳定性结论可复核性不足;二是安全评估多停留在结果性统计,对“管控—运行响应—风险变化”的机理与适用边界揭示不够。进一步地,可通行空间横向宽度亦是关键约束,既有道路中局部可能缩窄至约 2.5 m,窄宽度会增强横向约束、促使保守速度选择并加剧波动,从而削弱开放收益;相关模拟亦显示 2.5 m 条件下速度更低且稳定性更差。因而亟需基于实测数据系统评估应急车道开放对通行能力、车速稳定性与交通流结构的影响,并明确相应管控条件与适用边界。

## 2 理论模型

在交通流理论中,速度-密度关系模型是解析交通流特性、估算道路通行能力的关键理论基础。经典线性模型(如 Greenshields 模型)因其形式简洁而被广泛采用,但其假设速度与密度呈严格的线性关系,导致在描述自由流至拥挤流的动态转换过程中存在系统性偏差,难以准确刻画实际交通流中的非线性特征。另一方面,基于对数函数的 Greenberg 模型虽在高密度拥挤流状态下表现出良好的拟合效果,但其对数形式在密度趋近于零时趋于无穷大,导致对自由流状态(低密度区间)的刻画存在显著不足,这限制了其在全密度范围内的适用性。

为克服上述模型的局限性,本文在综合考量模型的非线性拟合能力与全流态适用性后,选取了由

Drake 提出的钟形曲线模型作为核心理论框架。该模型以其概率分布（如正态分布）的钟形曲线特征而得名，能够更光滑、更精确地描述速度随密度增加而逐渐降低的非线性过程，尤其擅长捕捉自由流稳定与拥挤流形成之间的临界过渡区域。

Drake 模型的原形式可表述为

$$v=v_f \cdot e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{k}{k_{jam}}\right)^2} \quad (1)$$

其中， $v_f$ 表示自由流速度，即车辆在无干扰条件下的期望速度； $k_{jam}$ 表示堵塞密度，即交通流陷入完全停滞的临界密度。为便于参数辨识与模型拟合，常对原模型进行对数变换，得到如下线性形式

$$\ln(v)=\ln(v_f)-\frac{k^2}{2k_{jam}^2} \quad (2)$$

通过该变换，将复杂的非线性拟合问题转化为关于 $k^2$ 的线性回归问题，极大地便利了模型参数的标定过程。通过基本交通流关系  $q=k \cdot v$ （其中 $q$ 为流量， $v$ 为速度），可由 Drake 模型进一步推导出流量-速度( $q-v$ )及流量-密度( $q-k$ )关系模型

$$q=v \cdot \frac{\sqrt{\ln v_f / v}}{\sqrt{1/(2k_{jam}^2)}} \quad (3)$$

$$q=v_f \cdot k \cdot e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{k}{k_{jam}}\right)^2} \quad (4)$$

式（4）清晰地表明，流量是密度的一个单峰函数，其曲线呈现经典的钟形特征，存在一个明确的堵塞密度 $k_{jam}$ 对应道路的理论通行能力 $q$ 。这一特性使得 Drake 模型不仅能描述速度-密度关系，更能天然地蕴含交通流的相变过程（自由流、临界流、拥挤流），为后续的通行能力分析 & 交通状态判别提供了坚实的理论依据。

### 3 案例研究

#### 3.1 案例分析

##### 3.1.1 案例介绍

G2 京沪高速公路沧州段是北京通往上海方向的一个重要组成部分。路线全长 32.362 km。高速公路主线按双向四车道建设，路基全宽 28 m，中央分隔带 3 m，左侧路缘带 0.75 m，行驶车道 2×3.75 m，应急车道 3.5 m。为缓解部分路段的拥堵问题，此应急车道开放起点始于 G2 K150+000，终点至 G2 K182+362（见图 1、图 2）。



图 1 G2 高速公路布局

Fig.1 G2 motorway layout

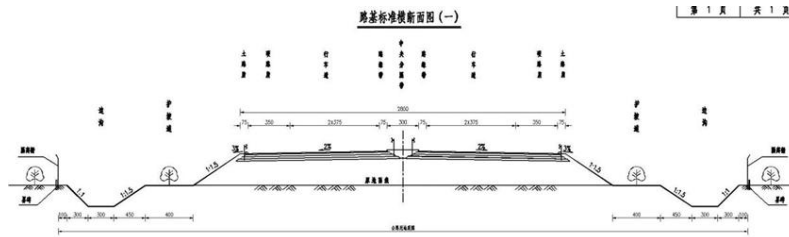


图 2 G2 高速公路横截面

Fig.2 G2 motorway cross section

### 3.1.2 应急车道开放条件下交通组织方案

该方案旨在通过科学规划和精确管理，提高京沪高速公路扩容车道的通行能力，并确保在高峰时段车辆的安全与畅通运行。为实现这一目标，制定了一系列切实可行的交通组织方案，重点在应急车道的开通与关闭、交通流的动态管控、以及车道的精准引导上进行优化。

#### 1) 基本管控方案

该方案全线采取“精准监测，主动管控”的方针，具体方案包括应急车道的借用与关闭管理、车道指示灯的配合使用、以及车道变换的动态管理。

① 扩容车道可借用时：通过门架式可变信息标志发布“前方小客车可借用应急车道”的信息，车道指示灯上方显示绿色箭头，翻转式标志牌显示“应急车道开放”<sup>[23]</sup>。同时，单悬臂信号灯与可变信息板组合设施显示绿色箭头和文字提示，指引小型车使用应急车道。

② 扩容车道不可借用时：门架式可变信息标志发布“禁止占用应急车道”信息，车道指示灯显示红色叉号，翻转式标志牌和单悬臂信号灯同步发布禁止占用应急车道的提示。

③ 扩容车道换道管理：扩容车道采用虚实线方式，车辆可以在应急车道内驶出，但禁止主线车辆驶入应急车道。

#### 2) 交通标志标线布设方案

交通标志标线布设方案的设计旨在为驾驶员提供明确的指引，确保扩容车道的顺利开放与使用

① 全线起点前的标志标线布设：起点前通过龙门架可变信息标志和可翻转式起点距离预告标志组合方式进行预告，清晰传达扩容车道开放的相关信息。标志设置在 K151+000 处，内容包括“前方 1km 小客车可借用应急车道”或“禁止占用应急车道”。

② 起点和后续各段起点的标志标线布设：为明确扩容车道开放起点位置，结合龙门架和指示标志牌，引导驾驶员逐步准备进入扩容车道。根据开放与关闭的情况，龙门架可变信息板显示相应提示，例如“小客车可借用应急车道”或“应急车道禁止占用”。

③ 路段信息引导：路段内通过悬臂式信号灯与可变信息标板，提供持续的信息引导。每隔 2km 设置一个标志，确保驾驶员能够实时掌握扩容车道的使用状态。

④ 路段换道组织：在部分路段内设置虚实线标线，允许扩容车道内车辆驶入主车道，但主线车辆禁止驶入应急车道。

#### 3) 高速公路出入口设计

出入口区域的设计考虑到交通流量和大型车辆的出入特点，采取间断性设计以确保交通安全。

① 青县服务区出口与入口：出口区域通过可翻转式标志牌和悬臂式可变信息板，传递扩容车道开放的相关信息，提醒驾驶员提前变道或驶离应急车道。服务区入口处设置悬臂式可变信息板，提醒车辆

“小客车可借用应急车道”，并通过匝道信息标志指示车辆进入扩容车道。

② 青县收费站出口与入口：收费站出口区域设置可变信息板，动态发布“应急车道前方开放”或“关闭”信息，确保扩容车道的连续通行。

### 3.1.3 应急车道开放条件下应急策略及保障措施

为保障京沪高速沧州段 K150 - K182 应急车道临时开放期间的安全与保畅，构建“开放准入—监测预警—资源预置—分级响应—复盘改进”的闭环保障体系，实现突发事件快速处置与跨部门协同。

1) 开放准入与约束条件。开放需同时满足：①应急车道具备连续完整、结构强度与宽度满足小客车通行的基础条件；②具备实时监控、事件检测、VMS 信息发布、中央分隔带活动护栏开启等安全保障条件，并明确开启/关闭程序与指挥机制；③恶劣天气、施工养护期及高风险路段不宜开放。开放期间原则上仅允许七座以下小客车通行，禁止大客车、货车及危化品运输车辆使用。

2) 设施与信息保障。依托摄像头/毫米波雷达等实现全天候监测，VMS/广播/新媒体同步发布开放状态、限速控距与绕行提示；完善应急车道标志标线与关键节点警示设施，必要时设置应急港湾/临时停靠区，为故障停车与救援作业提供安全空间。

3) 资源预置与指挥协同。在服务区、收费站等关键节点前置清障车、救护车及必要物资，提升到场效率；建立运营单位—交警—路政—消防—医疗联动的指挥体系，形成“监测研判—统一调度—现场处置—信息发布”的协同流程，可按指挥调度、交通管理、事件监测、现场处理、信息发布五类职能模块组织运行。

4) 事故分级响应与车道策略。基于“占道程度—救援需求—通行能力折减”的分级响应框架，将事件划分为I-IV级，并与车道控制策略一一对应。I级（轻微事故/故障）以快速撤离与最小干扰处置为主，优先通过远程引导完成“快处快撤”；II级（一般事故）在保障清障通达性的前提下实施“上游应急车道关闭、下游保持开放”的非对称控制，上游为清障/警务车辆提供专用通道，下游维持疏散能力以抑制排队增长；III级（严重事故）与IV级（重大事故）因存在救护、消防等多力量介入及更大的能力折减风险，采取“上下游应急车道关闭”的保通—救援优先策略，必要时叠加分流、限流或临时封控以降低二次事故风险。

5) 特殊场景与持续改进。针对部分空间受限路段，受限于缓冲区不足与救援作业面狭窄，其事故处置以“救援通道刚性保障”为优先目标：一旦发生占道事件，应急车道应及时转入专用状态并强化上游分级分流与信息提示，减少社会车辆进入受限区间导致的二次阻塞。针对雾雪等恶劣天气，采用按能见度分级的动态管控思路，将诱导警示、限速控距与开放策略联动：当能见度下降导致运行风险显著上升时，应及时收缩开放强度或关闭应急车道使用，以安全约束优先。

## 3.2 数据采集

本次数据采集分为无人机视频数据与激光雷达数据。其中无人机视频数据于2024年10月1日、2025年1月21日、2025年4月4日、2025年5月1日前往G2京沪高速青县服务区与青县收费站展开航拍工作，拍摄地点不属于飞行管制区，拍摄时间为9:00—15:00的部分时段。实验采用大疆air 3无人机进行航拍，飞行高度为220 m，视频清晰度设置为4 K，帧数为30 fps。其中2024年10月1日、2025年1月21日为应急车道未开放时段，2025年4月4日、2025年5月1日为应急车道开放时段。

### 3.3 数据处理

对激光雷达数据进行异常值清理以及降噪处理；对无人机视频数据首先剔除掉抖动或者角度偏移较大的无效影像及在录摄过程中出现视角变换等无法进行视频分析的片段，之后利用视频处理软件对视频进行分割处理，将处理之后的视频片段上传至 Data From Sky Traffic Survey 平台的 AERIAL 通道，经算法处理之后生成车辆轨迹原始数据，同时以车道边缘线和行车道分割线为依据进行视频分析系统内的坐标系设定，选择四个点（如图 3 所示）进行标定，获取交通流相关参数及信息，并利用 python 进行每 5 min 的区间划分以整合断面流量、分车道速度、分车道流量占比等相关参数。



图 3 基于四个参考点的坐标标定界面

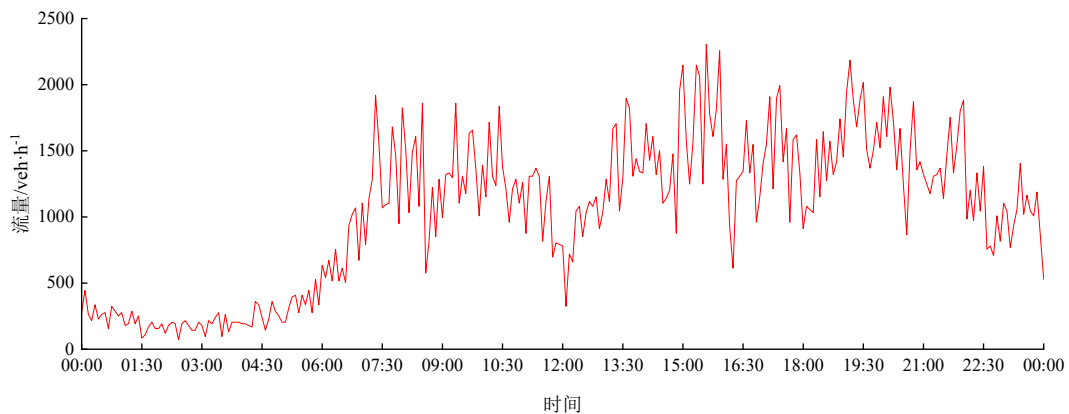
Fig 3. Coordinate calibration interface based on four reference points.

### 3.4 交通流量分析

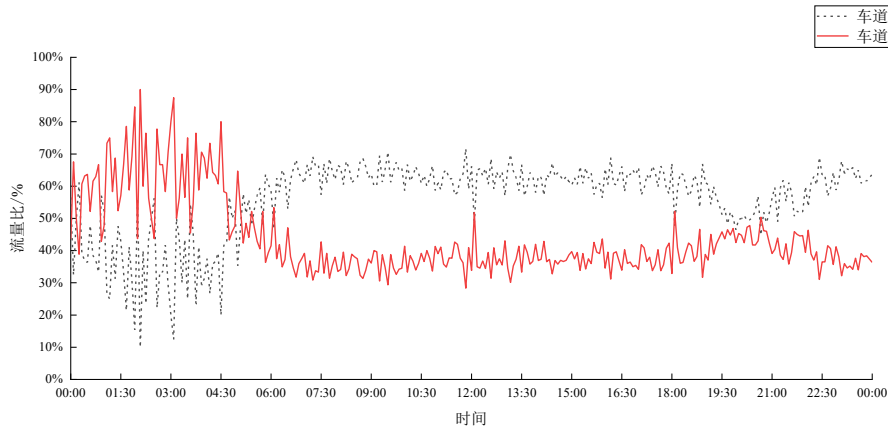
本研究以 K160+000 断面为研究对象,选取该位置应急车道开放前后具有可比性的典型时段交通流监测数据开展对比分析,以揭示应急车道开放条件下的交通流运行特征。

#### 3.4.1 应急车道关闭条件下的交通特征

在图 4 中,第一车道为小客车车道,第二车道为客货混行车道,第三车道为应急车道,下文分析应急车道关闭状态的流量情况。



(a) 断面流量



(b) 车道流量分布

图4 应急车道关闭状态下交通特征

Fig.4 Traffic characteristics under hard shoulder closure conditions

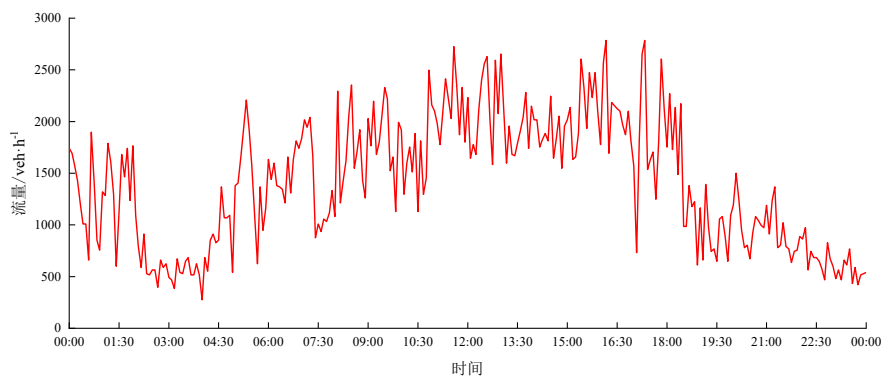
如图4所示，2025年4月3日试验断面交通流量呈现典型节假日出行特征：

1) 峰状分布形态显著，早高峰时段（07:30—10:30）以省内通勤与短途返乡车流为主，峰值流量达1 920 veh/h；晚高峰（14:00—21:00）因跨省出行需求激增，持续时间延长至7小时，峰值流量于15:35—15:40时段出现，达到2 305 veh/h。该现象主要由多重节前出行行为叠加所致：首先，跨省返乡祭扫车流受传统习俗驱动，于午后启程以实现清明当日抵达；其次，短途旅游车辆为规避假期拥堵提前进入高速路网；

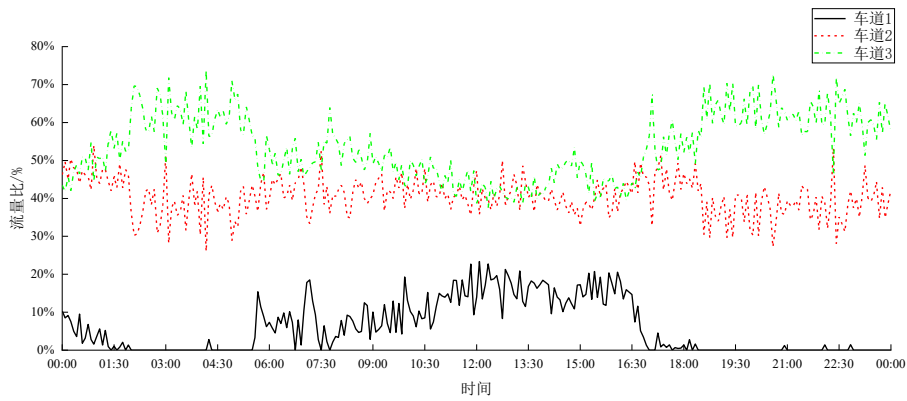
2) 车道流量构成存在时序性差异，06:00前车道1（小客车专用道）流量占比（38.2%）低于车道2（客货混行道，61.8%），归因于凌晨时段货运车辆主导路网运行；06:00后受通勤需求驱动，车道1占比（52.7%）反超车道2（47.3%），反映乘用车出行潮汐特征。

### 3.4.2 应急车道开放条件下的交通特征

依托应急车道开放试验方案及实测监测数据，对研究断面的交通运行特性进行分析。由图5可见，其各类交通参数与常规条件下相比存在显著差异。



(a) 断面流量



(b) 车道流量分布

图 5 应急车道开放状态下交通特征

Fig.5 Traffic characteristics under hard shoulder running conditions

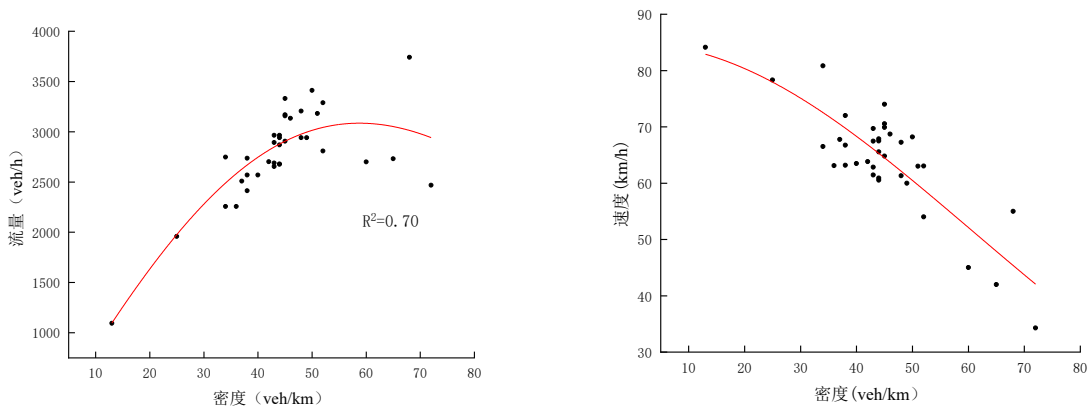
如图 5 所示，在 10:30—16:30 拥堵时段内，应急车道开放措施显著优化了交通流分布：

1) 断面通行能力显著提升，开放后最大断面交通量增至 2785 veh/h (较开放前 2305 veh/h 提升 20.82%)，次高峰值达 2725 veh/h，验证了应急车道对道路承载力的扩容效应。在 10:30–16:30 的高峰时段内，断面交通流量整体呈现出明显的波动特征，尤其是在拥堵时段，交通流量急剧增加，导致道路承载能力接近饱和，从而出现了拥堵现象。然而，随着应急车道的开放，交通流量的波动有所缓解，表现出更为均匀的分布。应急车道的开放有效分流了主线道路的车流，减少了拥堵的发生，提升了道路的通行效率；

2) 应急车道分流效能突出，该路段在 12:05—12:10 时段的分流占比达 23.36%，显示了应急车道的有效分流作用。11:20—11:25 与 11:50—11:55 时段亦分别达 22.73%和 22.68%，验证了应急车道在高峰时段的疏导效能。

### 3.5 交通流参数分析

为进一步比较应急车道与常规车道在通行能力、临界密度等方面的差异及其对断面整体运行特性的影响，本文采用 Drake 模型对交通基本关系曲线进行拟合，分析研究路段的密度 - 流量关系。将每 5 min 采集的流量与密度数据统一换算为“每小时每车道的车辆数”和“每公里每车道的车辆数”，并据此绘制散点图，如图 6、图 7 所示。

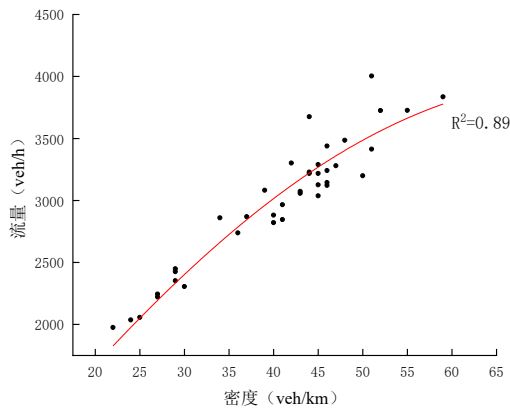


(a) 密度-流量散点图

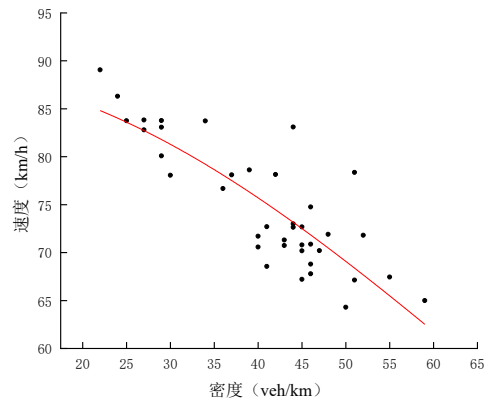
(b) 密度-速度散点图

图 6 应急车道关闭状态下交通流散点图

Fig.6 Scatter plot of traffic flow under hard shoulder closure condition



(a) 密度-流量散点图

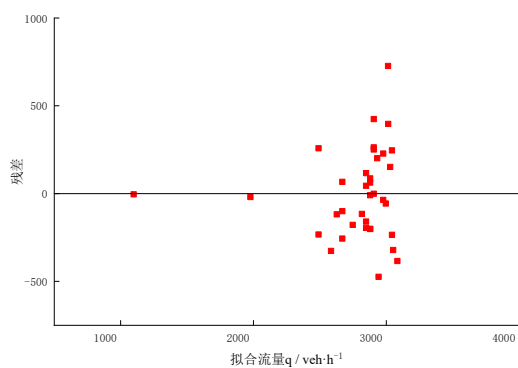


(b) 密度-速度散点图

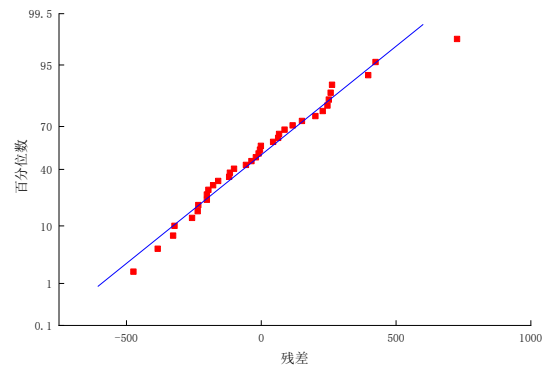
图 7 应急车道开放状态下交通流散点图

Fig.7 Scatter plot of traffic flow under hard shoulder running condition

为检验 Drake 密度-流量模型拟合的可靠性，本文输出残差，并绘制残差-拟合流量散点图与残差正态分位数-分位数图进行诊断（如图 8、图 9 所示）。结果显示，两种工况下残差整体围绕零线均衡分布，未出现明显单侧偏移或结构性趋势，表明模型能够有效刻画密度-流量关系的主要规律，拟合结果具有良好的解释性与一致性。就拟合优度而言，关闭工况  $R^2=0.70$ （其中  $R^2$  为模型的决定系数），模型可解释约 70% 的流量变化，残差在高拟合流量区仍保持正负对称但离散性相对更大，反映容量附近交通波动较强、散点离散度更高；而开放工况  $R^2=0.89$ ，模型对流量变化的解释能力进一步增强，残差分布更为集中，说明在应急车道开放条件下密度-流量关系更稳定、模型拟合一致性更高。残差正态分位数-分位数图中大部分点与参考直线贴合度较高，残差总体近似正态，模型误差结构较为稳定；少量尾部偏离可视为真实交通运行波动的正常体现，不影响总体拟合结论。综合来看，Drake 模型在两工况下均具有较好的拟合可靠性，其中开放工况表现更优，可为后续参数对比与机理分析提供有效支撑。



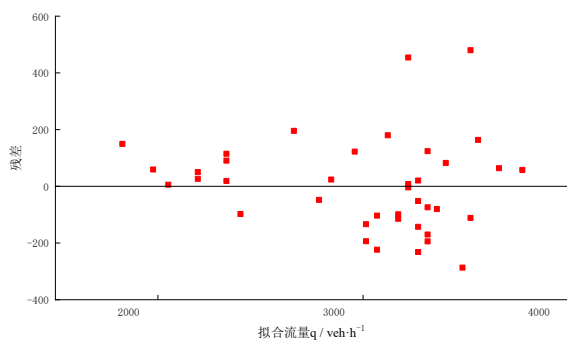
(a) 残差-拟合流量散点图



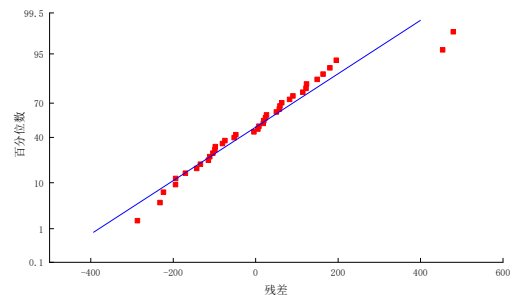
(b) 残差正态分位数-分位数图

图 8 应急车道关闭状态下 Drake 模型残差分析图

Fig.8. Residual diagnostics of the Drake model under the hard shoulder closed condition



(a) 残差-拟合流量散点图



(b) 残差正态分位数-分位数图

图 9 应急车道开放状态下 Drake 模型残差分析图

Fig 9. Residual diagnostics of the Drake model under the hard shoulder running condition

如图 8、图 9 所示，应急车道开放前后交通流的变化呈现出显著差异，尤其体现在通行能力、车流密度与速度之间的关系上。通过对比分析可以得出以下结论：

### 1) 通行能力的提升

应急车道的开放显著提高了道路的通行能力。在应急车道未开放时，随着交通密度的增加，流量逐渐趋于饱和，特别是在高密度区域，交通流量难以进一步增加，从而限制了道路的承载能力。图 5 显示，在低密度区，流量迅速增长，但随着密度继续增加，流量增长的速率逐渐减缓，并最终达到饱和状态。然而，在应急车道开放后，交通流量的增加呈现出更为平缓的趋势，即使在较高的密度条件下，流量仍能维持在较高水平。这表明，应急车道的开放有效缓解了主车道的交通压力，扩展了道路的通行能力。

在应急车道开放后，即便在密度达到 50 veh/km 甚至更高时，流量仍能持续增长，避免了流量过早达到饱和的现象。这一变化验证了应急车道在提高道路通行能力方面的显著作用，车辆得以通过应急车道有效分流，从而提升了整体通行效率。

### 2) 密度对速度的影响减缓

应急车道未开放时，随着密度的增加，车辆行驶速度显著下降。图 5 中数据显示，当交通密度超过某一临界值时，车速急剧下降，这通常表明交通拥堵加剧，流速显著降低，密度与车速之间呈现明显的负相关关系—即密度越大，车速越低。

然而，在应急车道开放后，尽管密度持续增加，车辆的速度下降幅度明显减缓，尤其是在高密度区，车速的下降幅度不再像应急车道未开放时那样剧烈。这表明，应急车道的开放有效分流了部分交通流，缓解了主车道的拥堵压力，从而帮助维持了较高的车速。在相同密度下，应急车道开放后的车速普遍高于应急车道未开放时的车速。

### 3) 交通流的优化与分流效能

应急车道开放的一个显著效果是其在高密度条件下的分流效能。在应急车道未开放时，高密度区域的交通流无法有效分流，导致流量饱和并引发严重拥堵。图表显示，在密度较高的情况下，交通流量的增长变得极为缓慢，甚至停滞，直接影响了道路的通行能力。

但在应急车道开放后，部分车流得以通过应急车道有效分流，优化了高密度时段的交通流。这一分流效应使得主车道能够维持较为稳定的流量，避免了因拥堵引起的通行效率下降。同时，由于应急车道能够分担一部分车流，高密度情况下车速下降的幅度得到了有效控制，整体交通流的流畅性得到了显著改善。

通过对 drake 模型交通流基本图进行拟合，计算出自由流速度以及临界密度如表 1 所示。

表 1 断面交通流基本参数拟合结果

状态	自由流速度/ (km/h)	堵塞密度/ (veh/km)
应急车道关闭	84.9	60.6
应急车道开放	89	70.4

对应急车道开放前后关键参数进行  $t$  检验。自由流速度  $v_f$  采用低密度区估计，检验结果显示  $v_f$  差异显著 ( $p=0.001$ ,  $p$  为  $t$  检验的显著性概率)；同时基于 Drake 模型拟合得到的堵塞密度参数  $k_{jam}$  显著增大 ( $p=0.014$ )。综上，应急车道开放对自由流与容量相关特性均具有显著提升作用。由表 1 断面交通流基本参数拟合结果可知：在应急车道关闭时，断面车道的总自由流速度约为 84.9 km/h，堵塞密度约为 60.6 veh/km；而在应急车道开放时，总自由流速度和堵塞密度分别提高至 89 km/h 和 70.4 veh/km。与应急车道关闭时相比，自由流速度提高了约 4.82%，堵塞密度则增加了约 16.17%。该试验在“五一”劳动节期间进行，此时的交通压力较大，可能在一定程度上影响了通行能力的提升。此外，法律法规对驾驶员心理的影响也可能在一定程度上对实验结果产生了干扰。若排除这两方面的影响，预计通行能力的提升幅度将更为显著。

## 4 结论

本研究综合运用理论分析与交通流实时监测技术，基于应急车道开放试验，采集了翔实的多车道交通运行参数，并对应急车道开放与关闭条件下的交通流特性进行对比分析，研究结果表明：

1) 断面通行能力显著提升且高峰期拥堵得到缓解。在应急车道开放条件下，试验断面最大交通量由 2 305 veh/h 提升至 2 785 veh/h，增幅约 20.82%；同时次高峰亦达到 2 725 veh/h，说明能力提升并非个别瞬时波动，而是在高需求阶段可稳定维持更高的通过水平。该结果表明，在节假日大流量条件下，开放应急车道能够有效延缓断面进入饱和与排队扩张的临界点，使“需求>供给”导致的拥堵形成过程被推迟，并通过提升单位时间排放能力缩短拥堵持续时间、降低拥堵强度，从而对周期性严重拥堵形成明确的缓解效应。

2) 交通流时空分布与车道利用结构得到优化。在应急车道未开放时，节假日交通流呈双峰特征，早晚高峰明显且主线车道接近饱和；应急车道开放后 10:30—16:30 拥堵时段内断面流量波动减弱、分布更为均匀，应急车道分流占比可达约 23%，有效分担了主车道流量，改善了车道间的负荷不均问题。

3) 流量 - 密度 - 速度关系改善，延缓“早饱和”并削弱速度塌陷。Drake 模型拟合结果表明，应急车道未开放时，流量随密度增加较早进入饱和区，且在高密度区车速快速下降；开放应急车道后，流量在密度达到 50.0 veh/km 甚至更高时仍可持续增长，密度 - 速度曲线在高密度区的跌落斜率明显减小，说明在相同密度水平下可维持更高运行速度，交通状态由“拥堵 - 塌陷”向“高密度 - 可运行”转变。同时自由流速度由 84.9 km/h 提高至 89.0 km/h (提升约 4.82%)，临界密度由 60.6 veh/km 提高至 70.4

veh/km（提升约 16.17%），说明在应急车道开放条件下，路段既具备更高的最优运行速度基础，也能在更大密度水平上维持最大通行能力。

## 5 研究局限性

本文基于应急车道宽度为 3.5 m、横向条件较充足的路段开展实测对比分析，研究结论在不同路段几何条件、交通组成与管理方式下的可推广性仍需进一步验证；同时，样本主要覆盖特定节假日时段，事故、气象及交通组织扰动的代表性有限，需要指出的是，应急车道宽度与路侧净空条件在不同地区与路段间存在差异，对于净宽不足 3.5 m（如约 2.5~3.0 m）的受限宽度路段，本文基于 3.5 m 条件得到的效率提升幅度与参数变化规律尚不能直接外推，后续需在多宽度样本支撑下量化能力折减并识别适用边界。此外，应急车道开放的工程应用必须以安全可控为前提，本文对安全保障机制与安全效益量化仍有待深化：一方面需明确车型准入、可变限速与车道控制、开闭触发阈值、巡逻与快速清障、救援通道保障等成套管控措施；另一方面需引入 TTC、冲突率、横向位置波动等替代安全指标，构建“效率—安全”联合评价框架，并量化时间节省、延误降低、燃油/排放变化及事故风险变化等综合效益，为开放决策提供可检验、可量化依据。

## 参考文献

- [1] 王水平. 高质量加快建设交通强国[J]. 综合运输, 2021, 43(4): 1-5.
- [2] 交通运输部规划研究院. 《国家综合立体交通网规划纲要》解读[J]. 交通建设与管理, 2021(3): 24-29.
- [3] 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.
- [4] 徐进, 罗松, 陈礼彪, 等. 高速公路应急车道开放工况车辆运行特性 [J]. 交通运输系统工程与信息, 2025, 25 (3) : 372-382.  
Xu Jin, Luo Song, Chen Libiao, et al. Operating characteristics of vehicles under hard shoulders opening conditions on expressways [J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2025, 25 (3) : 372-382.
- [5] 叶朕. 高速公路临时使用路肩优化研究 [D]. 北京: 清华大学, 2016.  
Ye Zhen. Optimization of hard shoulder running on highways [D]. Beijing: Tsinghua University, 2016.
- [6] 李瑞敏, 叶朕, 李斌. 高速公路临时路肩使用措施优化控制与仿真 [J]. 系统仿真学报, 2018, 30 (3) : 1036-1045.  
Li Ruimin, Ye Zhen, Li Bin. Optimal control and simulation of hard shoulder running on highways [J]. Journal of System Simulation, 2018, 30 (3) : 1036-1045.
- [7] 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.
- [8] 邵超逸, 黄恭敏, 黄可, 等. 高速公路硬路肩开放使用的事故场景研究 [J]. 公路, 2024,

69 (10) : 319-323.

Shao Chaoyi, Huang Gongmin, Huang Ke, et al. Study on accident scene of expressway hard shoulder opening [J]. Highway, 2024, 69 (10) : 319-323.

- [9] 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.
- [10] 韦长念. 广西贺州高速公路应急车道动态借用实践 [J]. 中国公路, 2025 (7) : 53-55.
- Wei Changnian. Dynamic borrowing practice of emergency lane of Hezhou expressway in Guangxi [J]. China Highway, 2025 (7) : 53-55.
- [11] Arora K, Kattan L. Operational and safety impacts of integrated variable speed limit with dynamic hard shoulder running [J]. Journal of Intelligent Transportation Systems, 2023, 27 (6) : 769-798.
- [12] Coffey S, Park S. Part-time shoulder use operational impact on the safety performance of interstate 476 [J]. Traffic Injury Prevention, 2020, 21 (7) : 470-475.
- [13] Guerrieri M, Mauro R. Capacity and safety analysis of hard-shoulder running (HSR). A motorway case study [J]. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 2016, 92: 162-183.
- [14] Dutta N, Boateng R A, Fontaine M D. Safety and operational effects of the interstate 66 active traffic management system [J]. Journal of Transportation Engineering, Part A: Systems, 2019, 145 (3) : 04018089.
- [15] Li Duo, Lasenby J. Mitigating urban motorway congestion and emissions via active traffic management [J]. Research in Transportation Business & Management, 2023, 48: 100789.
- [16] Kuang Zhihui, Zhao Xin, Feng Lei. Priority of emergency vehicle dynamic right-of-way control method in networked environment [J]. Applied Sciences, 2023, 13 (10) : 5883.
- [17] 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.
- [18] Middelham F. State of practice in dynamic traffic management in the Netherlands [C] //Proceedings of the 10th IFAC. 2003: 293-298.
- [19] Geistefeldt J. Operational experience with temporary hard shoulder running in Germany [J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2012, 2278 (1) : 67-73.
- [20] Ni Zifan, Ma Jianxiao, Lu Tao, et al. Research on left hard shoulder width of super multilane highway based on PTSU operation [J]. PLoS One, 2023, 18 (6) : e0287606.
- [21] 信占莹. 黄石高速公路京台至沧榆段应急车道智慧化管控建设方案 [J]. 价值工程, 2025, 44 (30) : 51-54.



通信作者: 张春玉 (1981—), 男, 高级工程师, 研究方向为高速公路运营管理。