

# 高速公路突发事件应急响应机制与协同调度模型构建

毛伟华<sup>1</sup> 邵亚宗<sup>2</sup>

1. 焦作市新时代高速公路有限公司 河南 焦作 454000

2. 河南省中工设计研究院集团股份有限公司 河南 郑州 450000

**摘要:** 随着我国高速公路网络规模持续扩大和交通流量迅猛增长,高速公路突发事件(如交通事故、恶劣天气、危化品泄漏、道路塌方等)频发,对交通安全、通行效率及社会经济运行构成严重威胁。构建科学高效的应急响应机制与协同调度模型,已成为提升高速公路应急管理能力的关键路径。本文首先系统梳理了高速公路突发事件的类型、特征及其影响机制;其次,基于“平急结合、分级响应、多方协同”的原则,构建了涵盖监测预警、信息共享、指挥决策、资源调度、现场处置与事后评估的全流程应急响应机制;在此基础上,提出了一种融合多源数据驱动与多主体协同优化的调度模型框架,引入改进型多目标粒子群优化算法(MOPSO)实现应急资源的动态分配与路径规划。研究成果可为智慧高速背景下应急管理体系建设提供理论支撑与实践指导。

**关键词:** 高速公路;突发事件;应急响应机制;协同调度;多目标优化;智能交通系统

## 引言

截至2024年底,我国高速公路总里程已突破18万公里,稳居世界第一,形成了覆盖广泛、功能完善的国家干线交通网络。然而,伴随路网密度与车流强度的双重提升,高速公路运行安全面临严峻挑战。据统计,全国每年发生高速公路突发事件超过10万起,其中重大交通事故占比约15%,直接经济损失超百亿元,并常引发大规模拥堵、二次事故甚至区域性交通瘫痪。传统应急管理普遍存在“信息孤岛”“响应滞后”“部门割裂”等问题,难以满足现代高速公路“快速感知、精准研判、高效联动、科学处置”的应急管理需求。近年来,随着物联网(IoT)、大数据、人工智能(AI)及车路协同(V2X)等技术的发展,为构建智能化、协同化的应急响应体系提供了新契机。因此,亟需从机制设计与模型构建两个维度出发,系统性地提升高速公路突发事件应对能力。

## 1 高速公路突发事件特征与影响分析

### 1.1 突发事件类型与成因

高速公路突发事件的类型多样,成因复杂,通常可归纳为交通事故、自然灾害、基础设施故障、公共安全事件以及公共卫生事件五大类。交通事故是最常见的类型,包括追尾、侧翻、多车连环碰撞等,多由驾驶员超速、疲劳驾驶、违规变道或受恶劣天气影响所致<sup>[1]</sup>。自然灾害如暴雨、冰雪、浓雾、山体滑坡乃至地震,往往导致能见度骤降、路面结冰或路基损毁,严重影响行车安全。基础设施故障则表现为桥梁隧道结构异常、照明或

通信系统失效、护栏损坏等,虽不直接造成人员伤亡,但可能诱发次生事故。公共安全事件中,危化品运输车辆泄漏尤为危险,不仅威胁现场人员生命,还可能污染环境;而恐怖袭击或群体性事件虽属低频,但后果极其严重。此外,在特殊时期如新冠疫情暴发期间,高速公路还需承担防疫检疫、交通管制等公共卫生应急任务,进一步拓展了突发事件的内涵。

### 1.2 事件演化特征

高速公路突发事件具有突发性、连锁性、时空聚集性与高危害性四大典型特征。突发性体现在事件发生往往缺乏明显前兆,要求应急系统具备“秒级感知、分钟级响应”的能力。连锁性则表现为单一事件极易引发二次碰撞或大范围交通波动,形成“蝴蝶效应”,例如一起轻微追尾若未及时处理,可能在几分钟内演变为数十辆车连环相撞的恶性事故。时空聚集性反映在事故高发于特定路段(如长下坡、急弯、互通立交区)与特定时段(如节假日返程高峰、凌晨疲劳驾驶高发期),这为风险预警与资源前置部署提供了依据。高危害性不仅指人员伤亡与财产损失的直接后果,还包括由此引发的社会信任危机、物流中断及区域经济扰动,其影响远超普通城市道路事故。

### 1.3 影响机制

突发事件对高速公路运行的影响是多层次、系统性的。首先,事故占用车道直接导致有效通行断面缩减,通行能力急剧下降;其次,后方车辆因紧急制动或频繁变道造成交通流紊乱,形成以事故点为中心的“震荡

波”并向上游传播，引发大范围拥堵；再次，由于信息不对称，后方驾驶员无法及时获知前方路况，往往在临近事故点时才采取避让措施，加剧了混乱程度；最后，若应急通道未被有效保障，消防、医疗等关键救援力量将难以快速抵达现场，延误黄金救援时间<sup>[2]</sup>。因此，应急响应核心目标在于通过快速控制事态、高效调配资源、科学组织交通，最大限度缩短事件持续时间，加速路网功能恢复，并优先保障人员生命安全。

## 2 高速公路应急响应机制构建

### 2.1 构建原则

面对复杂多变的突发事件，应急响应机制的构建必须遵循系统性、协同性与前瞻性原则。本文提出以“平急结合、分级响应、多方协同”为核心指导思想。所谓“平急结合”，强调日常管理与应急状态的无缝衔接，即在非应急状态下持续完善预案、演练与资源配置，确保突发事件发生时能迅速切换至应急模式。“分级响应”要求根据事件的性质、规模、影响范围等因素设定不同响应等级，匹配相应的指挥权限与资源投入，避免“小题大做”或“大题小做”。“多方协同”则着眼于打破交警、路政、消防、医疗、气象、高速公路运营单位等主体之间的职能壁垒，通过制度设计与技术平台实现信息互通、指令统一、行动同步。此外，机制建设还需坚持数据驱动与闭环管理理念，依托智能感知体系实现态势实时掌握，并通过事后评估反馈不断优化整个应急流程。

### 2.2 机制框架设计

基于上述原则，本文构建了“五阶四维”应急响应机制，覆盖从事件发生前到恢复后的全生命周期。

#### 2.2.1 监测预警阶段

利用视频监控、毫米波雷达、ETC门架、浮动车GPS、气象站等多源感知设备，实时采集交通流、环境、事件信息；基于AI算法（如YOLO目标检测、LSTM时序预测）实现异常事件自动识别与风险等级初判；建立预警阈值体系，触发分级预警（蓝、黄、橙、红）。

#### 2.2.2 信息共享与指挥决策阶段

构建“省级—市级—路段级”三级应急指挥中心，实现纵向贯通；建立跨部门信息共享平台（如基于区块链的可信数据交换），打破信息壁垒；运用数字孪生技术构建虚拟路网，支持多方案推演与辅助决策<sup>[3]</sup>。

#### 2.2.3 资源调度与协同处置阶段

根据事件类型、位置、规模，自动匹配应急预案库；动态调度最近的清障车、巡逻车、救护车、消防车等资源；通过V2X车路协同系统向周边车辆推送预警信

息，引导分流或减速。

### 2.2.4 现场处置与交通组织阶段

实施“先控后处”策略：先封闭事故区域、设置警示标志，再开展救援；启动临时交通管制方案（如借道通行、远程诱导、收费站限流）；协调无人机、机器人等新型装备参与高危场景处置。

### 2.2.5 事后评估与机制优化阶段

对响应时效、资源利用率、公众满意度等指标进行量化评估；建立案例知识库，用于预案迭代与人员培训；反馈至日常管理，优化路网设计与运维策略。

## 3 协同调度模型构建

### 3.1 问题描述

设某高速公路路段发生突发事件，需从多个应急资源点（如服务区、救援站）调度K类资源（清障车、救护车、消防车等）至事件点。目标是在满足时间窗、容量、优先级等约束下，实现：

最小化总响应时间；

最小化资源调度成本；

最大化关键资源（如医疗）优先级保障。

该问题属于多目标、多约束、动态车辆路径问题（MDVRP）的扩展。

### 3.2 模型假设

路网拓扑已知，各路段通行时间可实时更新；

应急资源点位置与可用数量固定；

事件点位置、类型、所需资源种类与数量已知；

不同资源具有不同优先级权重；

允许资源途中协同（如清障车与交警联合行动）。

### 3.3 数学模型

定义符号如下：

I: 事件点集合,  $i \in I$

J: 资源点集合,  $j \in J$

K: 资源类型集合,  $k \in K$

$d_{ij}$ : 资源点j到事件点i的最短路径距离

$t_{ij}$ : 对应通行时间（考虑实时拥堵）

$c_k$ : 单位资源k的调度成本

$r_{ik}$ : 事件i对资源k的需求量

$s_{jk}$ : 资源点j可提供的资源k数量

$w_k$ : 资源k的优先级权重（如救护车 $w = 0.6$ ，清障车 $w = 0.3$ ）

目标函数：

$$\min Z_1 = \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} t_{ij} \cdot x_{ijk}$$

$$\min Z_2 = \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} c_k \cdot x_{ijk}$$

$$\max Z_3 = \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} w_k \cdot x_{ijk}$$

其中 $x_{ijk}$ 为0-1变量,表示是否从 $j$ 调度 $k$ 类资源至 $i$ 。

约束条件:

需求满足约束:

$$\sum_{j \in J} x_{ijk} \geq r_{ik}, \quad \forall i \in I, k \in K$$

资源供给约束:

$$\sum_{i \in I} x_{ijk} \leq s_{jk}, \quad \forall j \in J, k \in K$$

时间窗约束(以黄金救援时间30分钟为例):

$$t_{ij} \leq T_{\max}, \quad \text{若 } x_{ijk} = 1$$

整数约束:

$$x_{ijk} \in \{0,1\}$$

### 3.4 求解算法:改进型多目标粒子群优化(MOPSO)

针对该多目标优化问题的NP-hard特性,本文采用改进型多目标粒子群优化算法(MOPSO)进行求解。传统PSO算法在处理多目标问题时易陷入局部最优且解集分布不均,为此,本文引入多项改进策略:首先,设置外部存档机制用于存储并更新非支配解集,有效维持种群多样性;其次,采用自适应惯性权重策略,使算法在初期具备较强全局搜索能力,后期则聚焦于局部精细搜索;再次,利用拥挤距离排序方法在存档更新时优先保留分布均匀的解,确保Pareto前沿的广度与均匀性;最后,在每次迭代后对存档中的优质解施加2-opt局部搜索算子,进一步提升解的质量。算法流程从初始化粒子群开始,经过目标函数评估、个体与全局最优更新、速度位置调整、局部优化等多个步骤,最终输出一组Pareto最优解供决策者根据实际偏好进行选择。

## 4 讨论与政策建议

### 4.1 模型局限性

首先,模型未充分纳入驾驶员微观行为反应,例如恐慌性变道或过度减速等非理性行为可能加剧交通流紊乱,影响调度路径的实际通行效率。其次,模型假设应急资源点布局固定,未能与长期的路网规划或资源站点优化问题耦合,限制了其在战略层面的应用价值。此外,在极端恶劣天气(如特大暴雪、浓雾)条件下,部分感知设备(如摄像头)的可靠性可能大幅下降,导致事件识别延迟或误判,进而影响模型输入数据的准确性<sup>[4]</sup>。这些问题提示我们,未来的应急调度模型需进一步融合行为科学、鲁棒优化与不确定性建模等跨学科方法。

### 4.2 政策建议

基于研究成果,本文提出以下政策建议以推动高速公路应急管理体系现代化。第一,应加快推进“智慧高速”新型基础设施建设,重点部署毫米波雷达、边缘计算节点及5G-V2X通信基站,夯实全域感知与车路协同能力。第二,亟需出台跨部门应急联动法规或标准,明确交警、路政、消防、医疗等主体在应急响应中的法定职责、协作流程与信息共享义务,从制度上破解“九龙治水”困局。第三,建议由国家层面牵头构建高速公路应急事件数据库,系统归集历史事件的时空特征、处置过程与效果评估数据,为AI模型训练与预案优化提供高质量样本。第四,大力推广基于数字孪生的应急演练平台,通过高保真模拟提升一线指挥员与操作人员的实战能力。第五,探索“平急两用”资源储备新模式,例如将部分日常养护车辆改造为具备清障、照明、通信等多功能的应急单元,提升资源利用效率与系统韧性。

## 5 结语

本文围绕高速公路突发事件应急管理这一复杂系统工程,构建了“五阶四维”应急响应机制,并提出了融合多源数据与多目标优化的协同调度模型。研究表明:在机制层面,通过全链条闭环设计与多主体协同,可有效破解“信息孤岛”与“响应迟滞”难题;在模型层面,改进型MOPSO算法能在多约束条件下生成高质量调度方案,显著提升应急效率;在实践层面,该体系可与现有智慧高速平台无缝集成,具备良好的可扩展性与落地价值。未来研究将聚焦于人-车-路-云一体化应急决策、不确定环境下鲁棒调度及基于强化学习的自适应响应策略等方向,进一步推动高速公路应急管理向智能化、韧性化演进。

## 参考文献

- [1]郑先绪,孙绍云,王杰,等.高速公路突发事件应急管理系统建设浅析[J].中国交通信息化,2024,(S1):220-222+238.
- [2]张佳音.面向突发事件的高速公路网交通韧性评价方法及提升策略研究[J].自动化应用,2025,66(14):89-93.
- [3]王永胜,罗梦琪.基于人工智能技术的高速公路突发事件智能监测系统[J].中国建设信息化,2025,(05):70-73.
- [4]栾剑,张晨,茹含,等.突发事件下高速公路交通状态演变因素分析[C]//中国公路学会,中国航海学会,中国铁道学会,中国航空学会,中国汽车工程学会.2024世界交通运输大会(WTC2024)论文集(交通工程).西北农林科技大学水利与建筑工程学院;长沙智能驾驶研究院有限公司;,2024:598-604.