

文章编号:1671-1637(2024)06-0001-25

高速公路交通事故应急关键资源调配研究综述

靳引利¹, 高鹏¹, 谭二龙², 李林蔚¹, 刘坤³

(1. 长安大学 电子与控制工程学院, 陕西 西安 710064; 2. 北京航空航天大学 交通科学与工程
学院, 北京 102206; 3. 港珠澳大桥管理局, 广东 珠海 519060)

摘要:定义了高速公路应急关键资源,根据高速公路交通事故应急救援的预防、准备、响应阶段,将高速公路应急关键资源调配分为应急设施点选址、应急关键资源配置与调度,系统回顾了这三方面的研究成果,探讨了目前存在的问题与后续研究方向。研究表明:在应急设施点选址方面,现有研究多面向高速公路规划初期场景,选址结果也较为固定,有必要研究面向道路运营阶段的路侧小型和微型应急设施点选址方法,受限于模型求解性能,现有研究较少考虑大规模应急设施点选址,组合式求解算法有望在此取得突破;在应急关键资源配置方面,现有研究假设在事故初期就可获得完备的事故信息,与实际情况不符,利用静态资源配置方案设计动态资源配置策略更贴合实际;在应急关键资源调度方面,交通事故后的不确定性为应急关键资源调度带来了挑战,应研究鲁棒性强的交通状态估计方法,事故后交通状态的时变特性对应急车速有较大影响,应研究融合动态路径规划与交通控制策略的应急关键资源调度方法,面向未来,有必要研究混合交通流与智能网联汽车环境下的应急关键资源调度方法,深入探究应急车辆调度过程中车速的动态变化规律;在三者融合方面,高速公路场景下的一体化优化研究尚未开展,有必要研究面向桥梁、山区等特殊场景的陆海空天立体化应急关键资源调配理论和验证方法,进一步提升高速公路运输网络韧性。

关键词: 交通规划; 应急关键资源调配; 应急设施点选址; 应急关键资源配置; 应急关键资源调度

中图分类号: U491.31 **文献标志码:** A **DOI:** 10.19818/j.cnki.1671-1637.2024.06.001

Review on key emergency resource deployment for expressway traffic accidents

JIN Yin-li¹, GAO Peng¹, TAN Er-long², LI Lin-wei¹, LIU Kun³

(1. School of Electronics and Control Engineering, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China;
2. School of Transportation Science and Engineering, Beihang University, Beijing 102206, China;
3. Hong Kong-Zhuhai-Macao Bridge Authority, Zhuhai 519060, Guangdong, China)

Abstract: The key emergency resources for expressways were defined. In terms of the prevention, preparation, and response stages of emergency rescue for expressway traffic accidents, the key emergency resource deployment for expressways was divided into emergency facility location selection, allocation and dispatching of key emergency resources. The research achievements in the three aspects were systematically reviewed, and the existing problems and future research directions were discussed. Research results show that in terms of the location selection for emergency facility, current research is mostly oriented to the initial scenario of

收稿日期: 2024-05-05

基金项目: 国家重点研发计划(2019YFB1600703); 陕西省交通运输厅交通科研项目(22-04X)

作者简介: 靳引利(1972-), 男, 陕西西安人, 长安大学教授, 工学博士, 从事高速公路安全运营和突发事件应急处置研究。

引用格式: 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.

Citation: JIN Yin-li, GAO Peng, TAN Er-long, et al. Review on key emergency resource deployment for expressway traffic accidents[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2024, 24(6): 1-25.

expressway planning, and the location selection result is relatively fixed. It is necessary to study the location selection methods for small and miniature emergency facilities oriented towards the stage of road operation. Limited by the model's solving performance, existing research seldom considers the location selection for large-scale emergency facility. The combined solving algorithm that integrates multiple optimization algorithms is expected to make breakthroughs. In terms of the key emergency resource allocation, current research assumes that the complete accident information is available during the initial phase of the accident, which is inconsistent with actual condition. Using a static allocation scheme to design a dynamic resource allocation strategy is more realistic. In terms of the key emergency resource dispatching, uncertainty after traffic accidents brings challenges. Robust methods estimating the traffic state should be studied. The time-varying characteristics of traffic state after traffic accidents have great impact on the speeds of emergency vehicles. The key emergency resource dispatching methods integrating the dynamic path planning and traffic control strategies should be studied. Looking toward the future, it is necessary to study the key emergency resource dispatching method in the environment with mixed traffic flow and intelligent and connected vehicles. The dynamic change law of vehicle speed in the process of emergency vehicle dispatching should be deeply explored. In terms of the integration, the research on the integrated optimization of expressway scenarios has not yet been studied. Therefore, it is necessary to study the theory and verification methods of key emergency resource deployment for land-sea-air-space oriented towards special scenarios, such as bridges and mountainous areas, so as to improve the resilience of expressway transportation network. 6 tabs, 11 figs, 128 refs.

Key words: transportation planning; key emergency resource deployment; location selection for emergency facility; key emergency resource allocation; key emergency resource dispatching

Author resume: JIN Yin-li(1972-), male, professor, PhD, yljn@chd.edu.cn.

Foundation items: National Key Research and Development Program of China (2019YFB1600703); Traffic Research Project of Department of Transport of Shaanxi Province (22-04X)

0 引 言

近 10 年,高速公路交通事故造成巨大人员伤亡和经济损失,严重影响社会可持续发展。高速公路发生交通事故后,由于事故车辆缺乏必要的救援资源和医疗救助,救援部门需携带应急资源及时前往事故现场,最大程度降低人员伤亡和财产损失,保障道路畅通。根据交通运输部门的研究统计,交通事故中的重伤人员若在 30 min 内得到恰当救护,其存活机率在 80%左右,在 60 min 内得到恰当救护,其存活机率在 40%左右,在事故发生后 90 min 内救护,存活机率不足 10%^[1]。调查显示,交通事故中约有 2/3 的重伤人员是由于未能及时得到救援而丧生,只有 15%的伤员是乘坐救护车就医^[2]。虽然世界范围内已经开展多种事故风险监测预警与预测研究,但仍无法准确预测事故发生的时间与地点,因此,为大幅降低高速公路交通事故所造成的损失,有

必要深入开展高速公路应急救援研究。应急资源调配技术是应急救援的关键技术,针对高速公路交通事故场景开展应急资源调配研究,设计合理高效的应急设施点选址方案、资源配置方案以及资源调度方案,对提升救援效率,降低人员伤亡、经济损失与救援成本具有重要意义。

应急资源为开展应急活动所需要的人力、物资、资金、设施设备、信息及技术等各类资源的总和^[3]。资金、信息及技术资源间接影响应急救援效率,为辅助型应急资源;人力、物资及设施设备资源直接影响应急救援进程,为应急救援中的关键资源。将应急关键资源定义为应急救援过程中的人力、物资及设施设备资源。此外,高速公路应急关键资源具备外溢特性,常规情况下,高速公路应急关键资源针对高速公路突发事件提供应急保障;特殊情况下,高速公路应急关键资源面向全社会提供应急保障。

目前,尽管学者针对应急关键资源调配中的单

项任务进行了综述^[4-8],但尚缺乏统一的综述。实际上,应急设施点选址、应急关键资源配置、应急关键资源调度三者相互影响。应急关键资源配置受应急设施点位置约束,开展资源的预置与重分配;应急关键资源调度受应急关键资源种类、数量约束,选择开放的应急设施点将资源调度至事故点;应急设施点选址基于历史交通事故发生数量、位置、资源需求、实际资源调度时间等开展布局优化。Rand等^[9-10]认为应同时考虑选址、配置与调度优化,如果单独优化可能会导致结果次优。从系统角度看,应急关键资源调配系统一般由战略和运营两模块组成^[3]。战略模块包含应急设施点选址与应急关键资源配置,即设施选址与资源预置问题。运营模块为应急关键资源调度,即车辆路由问题。从救援流程角度看,完整的应急救援过程按照交通事故的生命周期规律可分为预防、准备、响应和恢复阶段。应急关键资源调配主要涉及预防、准备与响应3个阶段的决策。如图1所示,预防阶段的决策是根据道路规划设置应急设施点并预置应急关键资源;准备阶段的决策是根据事故点位置在预防阶段输出的应急设施点中选择开放个数,并确定应急关键资源数量与种类;基于准备阶段的决策,响应阶段获取应急设施点位置、数量及各设施点资源种类、数量,规划车辆路线将应急关键资源从开放的应急设施点调度至事故点。从运筹学角度看,应急设施点选址、应急关键资源配置与应急关键资源调度涉及组合优化求解,本质上都是一类非确定性多项式难(Non-Deterministic Polynomial-Hard, NP-Hard)问题。由此可见,系统地梳理应急设施点选址、应急关键资源配置、应急关键资源调度研究进展,并综合考虑给出未来研究方向十分必要。

目前,高速公路应急关键资源调配研究与应用存在5个难点:(1)高速公路建设所处环境及成本使得应急设施点选址倍受局限,而高车速的行驶环境极易导致严重交通事故,面向更高的需求,事故点附近为其负责的应急设施点可能无法满足需求;(2)高速公路运营管理机制及成本导致应急关键资源配置存在种类数量配置不科学等问题,同时,受应急设施点布局制约,资源配置存在不平衡、不协调问题;(3)大规模路网环境可能导致应急关键资源调度过程难以最优,存在路径冗余或可靠性低的问题;(4)高流量的行驶环境加剧了事故后交通状态的不确定性,应急关键资源调度需考虑交通状态的不确定性;(5)随着实际应用中问题规模的不断扩大,对应急关键资源调配模型求解实时性要求越来越高,传统优化算法很难实现大规模组合优化问题的在线求解。高速公路交通事故救援体系完善及其关键技术的研究已有较长的时间,近10年信息技术的发展已使社会对应急关键资源调配的研究有了更丰富的工具手段和理论方法,高速公路交通事故应急关键资源调配研究面临技术更新和体系重构。

综上,为了厘清高速公路交通事故应急关键资源调配的研究现状,本文系统性回顾和评述了应急设施点选址、应急关键资源配置及调度模型。在应急设施点选址方面,首先简要分析了应急设施点选址的影响因素,重点梳理了静态确定情景、静态随机情景以及动态随机情景下的选址优化模型,研究了3种情景下选址模型的适应性,总结了选址模型的求解算法,并分析了优缺点;在应急关键资源配置方面,首先从多阶段资源配置模型、资源需求预测技术以及应急设备资源方面回顾了静态资源配置的研究

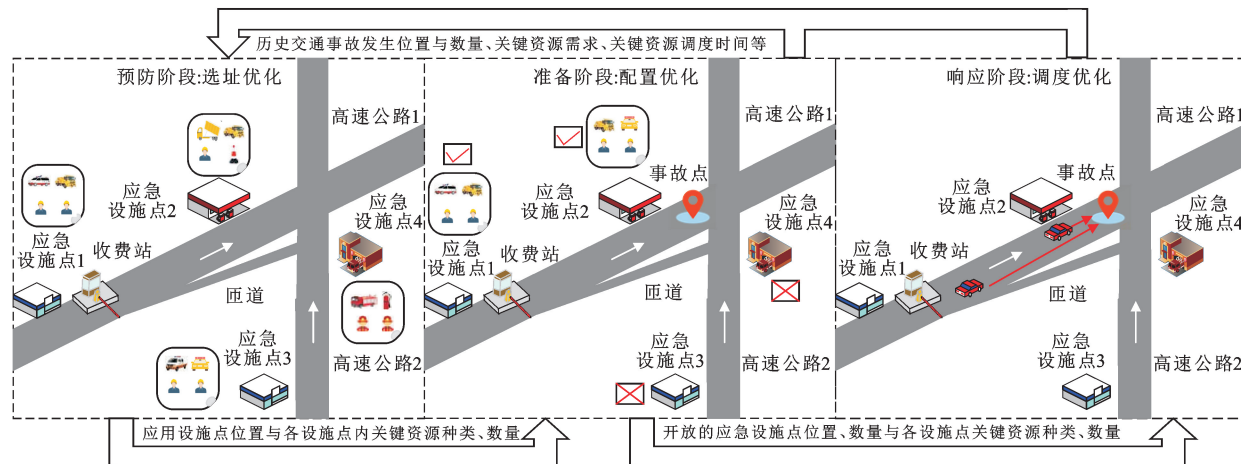


图1 高速公路应急关键资源调配过程

Fig. 1 Process of key emergency resource deployment for expressway

进展,其次针对资源需求不确定、二次事故下的场景及求解算法方面回顾了动态资源配置的研究进展,最后给出了应急关键资源配置研究总结;在应急关键资源调度方面,首先梳理了不同优化目标下的应急关键资源调度研究现状,其次从考虑潜在事故、多事故点及事故优先级、资源需求及交通状态不确定方面回顾了应急关键资源调度研究进展,最后总结了应急关键资源调度研究现状;基于以上研究,展望了应急关键资源调配研究的未来发展趋势,旨在为高速公路应急关键资源调配研究提供指导,并促进三者融合发展。

1 高速公路应急设施点选址

在高速公路交通事故事前战略决策中,道路运营管理部门的一个重要任务是优化应急设施点布局及数量,以满足事故点的覆盖需求。中国高速公路应急设施点主要规划在高速公路管理所、收费站以及服务区等部门,常规情况下为高速公路管理服务点及应急关键资源的储备点,突发事件情况下作为应急关键资源的调配点;美国高速公路应急设施点主要为休息区、服务区、加油站及道路沿线救援点^[11];日本高速公路应急设施点主要为服务区及道路沿线的防灾仓库^[12]。国外大多在道路运营管理中心部署救护车、消防车以联合多部门开展救援,且

道路沿线具备微型设施点,因此,国外多针对救护车、消防车等车辆层级开展设施点选址优化研究^[13]。在中国,仅有部分重点路段(隧道、桥梁)管理所具备消防站,救护车不会部署至高速公路上。国内侧重对固有应急设施点数量与布局优化的研究,如在原有基础上增加应急设施点或扩大规模以提高覆盖需求,或者优化应急设施点的布局,迁移应急设施点位置以优化覆盖需求等。车辆级别的微型应急设施点部署优化可以在满足覆盖率的条件下提高选址的灵活性。根据国内外应急设施点种类的不同,面向不同救援阶段,高速公路应急设施点选址问题可分为静态确定情况下的选址问题、静态随机情况下的概率选址问题和动态随机情况下的重选址问题。本文解析了应急设施点选址问题,如图2所示,圆圈区域为应急设施点的覆盖区域,静态确定情况下的选址针对事故预防阶段,优化固定应急设施点;静态随机情况下的概率选址针对事故预防阶段,考虑潜在事故影响,优化固定应急设施点;动态随机情况下的重选址针对事故响应阶段,对车辆级别的微型设施点进行优化。应急设施点选址研究组织架构如图3所示,首先分析应急设施点影响因素;其次从优化目标个数、随机概率的不确定性表征、覆盖率估计以及融合模型方面回顾了静态情景下的选址研究进展;进而通过多周期选址与重选址问题回顾了动

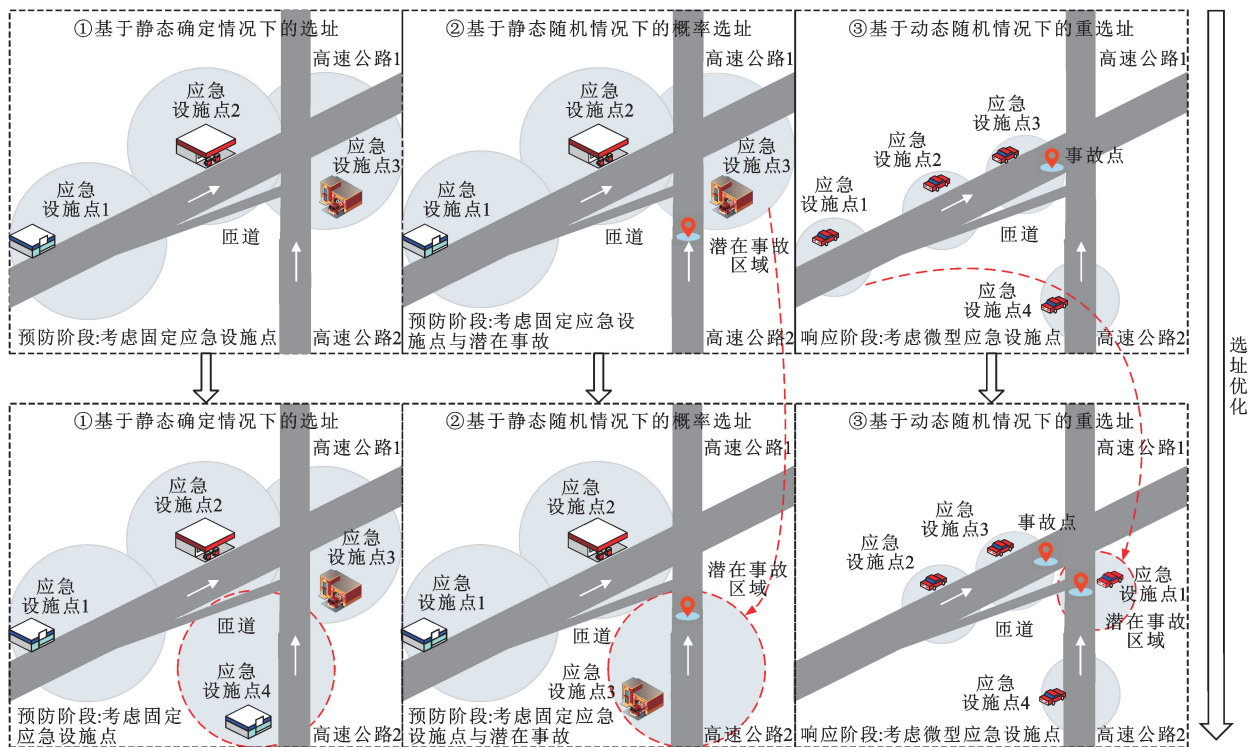


图2 应急设施点选址问题解析

Fig. 2 Analysis of location problem for emergency facility

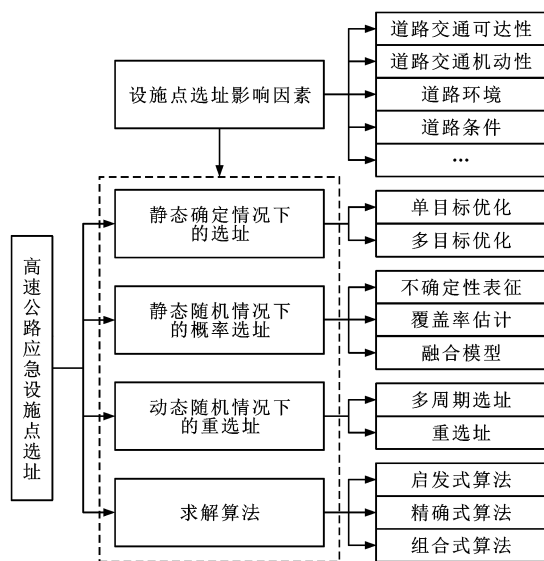


图 3 高速公路应急设施点选址组织架构

Fig. 3 Organizational structure of location selection for emergency facility on expressway

态情景下的选址优化研究,梳理了应急设施点选址优化求解算法并进行了优缺点分析;最后总结了高速公路应急设施点选址研究现状。

最初,选址问题被认为是运筹学中的经典问题之一,多应用于城市急救中心、消防站、导弹仓库以及物流中心的选址^[14]。高速公路应急设施选址问题旨在满足多种约束条件下最大化应急设施点覆盖率与利用率,最小化资源派遣时间和应急设施建设成本。选址问题包含 4 个基本要素:空间、顾客、设施和度量^[15]。高速公路应急设施点选址的空间为区域高速公路网,其中: C_i 为事故点 i 处的顾客; S_j 为应急设施点 j 处的设施; d_k 为具备权重的路段 k 的空间距离或时间距离度量,如图 4 所示。

应急设施点布局受事故数量、位置制约,且受多种因素影响,包括道路交通可达性、道路交通机动

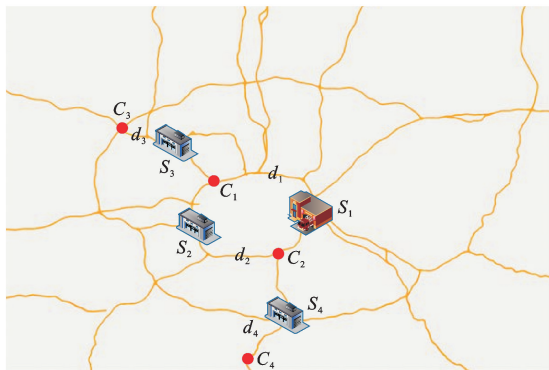


图 4 应急设施点选址规划要素

Fig. 4 Elements of location selection planning for emergency facility

性、道路环境、社会经济等^[16]。路段道路条件不同会影响路段安全性,根据路段的危险度计算路段权重,将路段权重加入到高速公路应急设施点选址模型更贴合实际。Rodrigues 等^[17]考虑了道路交通因素及管理因素对应急设施点布局的影响,将管理因素作为影响权重加入到选址模型中;Akdogan 等^[18]对道路条件、道路事故发生率、交通流量进行了归一化评估,研究结果表明模型考虑选址影响权重可以提高约 13% 的应急救援时间;Chanta 等^[19]考虑应急设施点布局的公平性,通过权衡设施点布局的公平与效率使选址布局更加合理且更加贴近实际,并定量分析了多种应急设施布局影响因素,量化了各影响因素的权重,在降低应急设施点建设成本的同时,使应急响应时间缩短了 10% 左右^[20]。

1.1 静态确定情况下的选址

静态确定情况下的选址指的是在事故预防阶段,优化固定应急设施点选址,包含应急设施点的增加、减少及改扩建,以期提升应急设施点覆盖率或降低成本。应急设施点覆盖率、救援时间、建设成本、运营成本等常作为静态确定情况下的选址优化目标,应急服务水平、救援时限等为约束条件。该问题假设发生事故时应急设施点可以及时提供救援,该假设适用于高速公路处于非拥挤状态情景,当高速公路饱和和流状态常态化时,该问题可能不适用。

在单目标应急设施点选址优化方面,覆盖率是学者重点优化的目标。Toregas 等^[21]在 1971 年首次提出位置集合覆盖问题(Location Set Covering Problem, LSCP)用以解决应急设施点选址,LSCP 假设资源无限情况下,使用最小数量的应急设施点覆盖道路区域,以期简化现实世界中的选址问题;Zografos 等^[22]为减少高速公路交通事故响应时间,采用 LSCP 优化高速公路应急设施点。类似的还有 P-中值(P-Median)模型和 P-中心(P-Center)模型^[23]。以上模型假设一个应急设施点仅对一个事故点负责。Church 等^[24]提出了最大覆盖位置问题(Maximal Covering Location Problem, MCLP),其主要解决在应急设施点有限的情况下覆盖更多道路区域,旨在充分利用有限的应急设施点;Nelas 等^[25]采用扩展的设备串联分配模型确定了高速公路多车型应急车辆站点位置,并应用至葡萄牙中部 Coimbra 地区的高速公路,选取了 30 个不同场景进行仿真测试,研究结果表明增加应急站点车辆数量 2 倍,平均覆盖率为 95.5%,增加应急站点车辆数量 3 倍,平均覆盖率会达到 99.3%,但应急站点车辆使

用率会从 100% 降为 95%，即会存在车辆冗余情况。

在多目标应急设施点选址优化方面，覆盖率、救援时间、建设成本、建设数量等多作为学者优化目标。Alsalloum 等^[26-27]在 MCLP 模型目标的基础上分别加入了覆盖人口最大化、救援时间最短的目标，使用改进的 MCLP 建模了双目标选址问题；Liu 等^[28]使用改进的双标准模型（Double Standard Model, DSM）解决了城市道路紧急医疗服务车队车辆选址问题，并用遗传算法进行求解，结果表明，在服务可靠性 90% 的标准下，车队最多可服务 92.4% ~ 95.5% 的事故点；濮居一等^[29-30]以优化救援时间、建设成本、运营费用等构建了网络层级的静态多目标应急设施点优化模型。近年来，无人机常用来进行应急关键资源调配，由于无人机飞行距离受到续航能力限制，其充电站位置也是典型的设施点选址优化问题。Shavarani^[31]使用多级设施位置模型，以最大化覆盖区域和最小化建设成本为优化目标，使用混合遗传算法求解了充电站的最佳数量与位置。随着高速公路流量和事故的增加，应急设施点选址的关键变为应急设施点能否及时派遣合适的应急车辆，如距离最近、处于服务空闲状态等^[29]，使得应急设施选址开始转向概率选址。

1.2 静态随机情况下的概率选址

静态随机情况下的概率选址指的是在事故预防阶段，考虑潜在事故对固定应急设施点的影响，给定应急设施点一定的繁忙概率。更确切地说，假设事故点对资源的需求是随机的，应急设施点对多个事故点负责，进而优化应急设施点数量或位置。该问题考虑了潜在事故，更加贴近于实际情况，在高速公路应急设施选址中应用较为广泛。模型中的设施繁忙概率或随机分布的表征、动态覆盖率的估计是静态随机情况下概率选址的关键。此外，融合多种选址模型有利于强化不确定因子对选址模型的影响，增强了应急设施点选址模型的鲁棒性。

Daskin^[32]提出了最大期望覆盖位置问题（Maximum Expected Covering Location Problem, MECLP），假设所有设施都具有相同的繁忙概率并独立运行，以期最大化期望覆盖水平；Repede 等^[33]扩展了 MECLP 模型，使用拉格朗日松弛法将时间变化的需求加入到模型中，结果表明该方法使 MECLP 模型在将事故点覆盖率增加 10% 的基础上，救护车响应时间减少了 36%；Bharsakade 等^[34]分析了孟买-普拉高速公路 94.5 km 沿线的事故多发区，采用 MECLP 模型对高速公路应急设施点进

行选址，使用机器学习（Machine Learning, ML）中的均值漂移算法确定了聚类中心，并给每辆救护车分配相同的繁忙概率，结果表明该方案可以保证救护车在 8 min 内到达事故现场；Yu 等^[35]结合选址过程中的主客观因素，提出了基于加权灰色目标策略的应急系统选址概率模型。实际上，事故点的时空分布不均匀特性会导致各个设施点实际繁忙概率不同。部分研究人员尝试去松弛原有模型假设以期更贴近实际情况，Park 等^[36]通过考虑高速公路潜在事故的不确定性，解决了相互依存事件的选址问题。以上模型中的假设便于求解网络最优值，但缺乏对预期覆盖率的准确估计。

近年来，研究人员开始探索使用超立方体排队模型（Hypercube Queueing Model, HQM）动态估计应急设施点覆盖率，以期求解静态随机情况下的应急设施点选址问题。Takeda 等^[37]应用 HQM 研究了巴西坎皮纳斯道路紧急医疗设施的选址问题，结果表明随着救护车位置的分散，系统的平均救援时间从 13.6 min 减少到 11.4 min，事故点的覆盖率也得了改善，同时救护车的工作量可以保持不变；Mendonça 等^[38]针对巴西圣保罗-里约热内卢高速公路紧急医疗系统的救护车部署情况，以救护车的平均响应时间为主要目标对应急设施点进行了概率选址研究，在保证救护车响应系统不出现排队的情况下，系统的平均响应时间为 10.6 min，但 31% 的救护车会出现空闲状态，造成资源冗余。HQM 可以根据历史事故中的车辆到达率近似应急设施点的繁忙概率，在随机情况下的概率选址方面适应性较强。

在融合多种模型建模应急设施点选址问题方面，Geroliminis 等^[39]融合 HQM 和 LSCLP 对城市交通网络多个应急响应单元进行了部署优化研究；Davoudpour 等^[40]针对多周期交通事故请求的情况，融合 MECLP 与 HQM 研究应急车辆选址，并应用于伊朗德黑兰城市小型急救中心，但由于应急车辆不足，应急响应效率并没有显著提高；Wang 等^[41]考虑交通拥堵情况下的选址问题，提出了两阶段选址模型，采用广义 Benders 分解算法求解混合整数非线性规划模型（Mixed Integer Nonlinear Programming, MINLP）。融合模型进一步增加不确定因素在选址模型中的权重，强化不确定因子对选址模型的影响，为建模大规模随机选址问题提供了新思路和方法。

1.3 动态随机情况下的重选址

尽管静态情况下的概率选址考虑了潜在事故情况，但仅通过设定设施点繁忙概率或随机分布表征

随机性,事故演化的非线性仍会为选址优化带来不确定性。动态随机情况下的重选址面向车辆层级的微型设施点,包含两部分:多周期选址与重选址问题。多周期选址首先将应急设施点服务时间分成多个时间段,每个时间段的需求大多假设是固定的,为每个时间段制定不同的选址方案,应急车辆在不同的时间段间执行选址方案并移动至相应位置,体现多周期性。重选址问题是考虑当前事故和潜在事故情况下,事故需求是随时间动态变化的,应急车辆位置可以进行重新部署,体现动态性和实时性。重选址问题的核心是计算效率与可靠性,设计优化求解算法是该问题的关键。国外针对救护车、消防车重选址研究较广泛,形成了完备的理论体系^[42],受限于高速公路多部门救援协调机制不健全问题,目前国内在此仍没有突破,未来可以面向路政车、救护车等车辆层级的微型应急设施点开展重选址研究。

多周期选址方面,Rajagopalan等^[43]放宽了设施点繁忙概率一致并相互独立的假设,结合动态可用覆盖位置(Dynamic Available Coverage Location, DACL)模型与 HQM 解决多周期选址问题;Gendreau等^[44]假设多周期事故需求是一致的,基于 MECLP 提出了动态 MECLP 解决多周期选址问题。高速公路应急救援具有需求紧急、资源异质等特点^[45],除将效率与成本作为优化目标外,近年来部分学者开始关注应急救援中的人道主义。郭鹏辉等^[45]以救援及时性、综合满意度与公平性为优化目标,将公平性目标建模为各需求节点满意度的方差,构建了多目标混合整数规划(Mixed Integer Programming, MIP)模型,并使用基于目标分解的协同进化算法对模型进行求解;Wang等^[46]以救援及时性与资源短缺数量作为优化目标构建了动态多目标覆盖模型(Dynamic Multi-Objective Coverage Model, DMOCM),使用资源短缺数量表征了救援公平性。在重选址问题方面,Nogueira等^[42]针对救护车位置重选址问题,允许在应急响应过程中重新规划车辆位置,从而动态调整覆盖率,研究表明考虑覆盖范围随时间变化的情况下,应急响应时间可以缩短 10% 左右;Zeng等^[47]提出了时变需求和多目标下的重选址问题,在多个时间段内建立了以最大覆盖需求、最小平均救援时间和最小建设成本为目标的 DMOCM,并使用遗传算法进行求解,结果表明在满足最大覆盖需求下,DMOCM 的最优解在平均救援时间和施工成本方面均优于 MCLP 与 LSCP。应急车辆具备随车物资,动态随机情况下的重选址问题将应急车辆

认为是一个微型设施点,此类问题较静态选址更具灵活性和适应性,是未来的研究热点之一。

近年来,研究人员不断放松对高速公路应急设施模型的原有假设,从而使问题模型更加贴近实际。为了更加清晰地梳理应急设施点选址模型,表 1 分别从优化目标、约束条件、适应性以及能否解决问题①~③对高速公路部分选址模型进行了总结,问题①是静态确定情况下的位置覆盖选址,问题②是静态随机情况下的概率选址,问题③是动态随机情况下的重选址^[22,24,28,37,42-43,45-49]。

1.4 求解算法

从运筹学的角度看,高速公路应急设施点选址问题是 NP-hard 问题。为了优化求解应急设施点选址问题,学者开始探索不同类型的求解算法,以期提高模型求解性能。表 2 梳理了近期选址模型求解算法概况。启发式算法、精确式算法、组合式算法常用来求解应急设施点选址模型^[39,46,50-67]。

1.4.1 启发式算法求解

遗传算法^[39,50]、粒子群算法^[51-52]、禁忌搜索算法^[53-54]、邻域搜索算法^[55]等常用来求解应急设施点选址问题。Angulo等^[52]使用多目标粒子群算法求解了应急救援站双层模型(Bi-Level Model, BLM),较粒子群算法可以提升 7% 的计算时间;Başar等^[54]使用禁忌搜索算法求解了 DSM,仿真结果表明,相对于分支定界算法,禁忌搜索算法可以在短时间内搜寻到最优解。启发式算法在大规模复杂选址模型中应用较为广泛,可以在较短时间内接近最优解,且具有相似的分析流程框架,不需要为特定的目标函数和场景约束设计特定的搜索框架,几乎可以适应任何形式的目标函数与约束条件,但容易陷入局部最优解,不能保证搜寻到全局最优解。此外,启发式算法的启发函数设计通常需要领域知识与经验,其性能也会受到启发函数影响,需要不断优化才能提高算法求解性能。

1.4.2 精确式算法求解

分支定界算法^[56-57]、分支切割法^[58-59]、 ϵ 约束法^[60-61]是常用的精确式求解算法。Gendron等^[62]使用分支定界算法求解 MCLP,结果表明在小规模选址案例上分支定界算法可以在有限时间内求出最优解;Abounacer等^[60]使用 ϵ 约束法求解多目标设施选址问题,研究结果表明求解 3 个应急设施点和 15 个需求点算例的帕累托前沿平均需要约 22 min,而求解 4 个应急设施点和 45 个需求点算例的帕累托前沿平均超过 8 h。不同于启发式算法,精确式

表 1 应急设施点选址模型
Table 1 Location selection models for emergency facility

文献	模型	优化目标	约束条件	适应性	①	②	③
[22]	LSCP	最小化响应时间	应急设施点数量	确保在有限应急设施点数量下的救援响应时间	✓		
[24]	MCLP	最大化覆盖率	应急设施点数量、服务能力	确保在有限应急设施点数量与服务能力下的设施覆盖率	✓		
[28]	DSM	最大化覆盖率	应急车辆数、服务可靠性	确保在有限应急车辆数与服务可靠性下的应急车辆覆盖率	✓	✓	
[37]	HQM	最小化响应时间	应急车辆数	确保在有限应急车辆数下的救援响应时间		✓	✓
[43]	DACL	最小化应急车辆数	覆盖范围、服务可靠性	时间周期内确保在不同覆盖范围和有限服务可靠性下的应急车辆数		✓	✓
[45]	双层选址-路径-配给	最小化响应时间、最大化综合满意度、公平性	应急车辆数、设施点容量、供给能力	时间周期内确保在有限应急车辆数、设施点容量与供给能力下的响应时间、满意度与公平性	✓	✓	✓
[46]	DMOCM	最小化响应时间、最小化资源短缺数量	事故点需求、应急设施点服务能力	时间周期内确保在不确定事故需求及应急设施点服务能力下的响应时间、资源短缺数量,使用资源短缺数量表征救援公平性		✓	✓
[42]	随机规划(Stochastic Programming, SP)	最小化救援总成本	服务能力及计算时间	确保在有限设施点服务能力和模型求解时间下的应急救援成本		✓	✓
[47]	DMOCM	最大化覆盖率、最小化救援时间、最小化建设成本	应急设施点数量、计算次数	时间周期内确保在有限应急设施点数量和计算次数下的覆盖率、救援时间及建设成本		✓	✓
[48]	多目标鲁棒优化(Robust Optimization, RO)	最小化救援总成本、服务公平性	应急设施点供给能力、应急车辆数	时间周期内确保在有限应急设施点供给能力及应急车辆数下的救援成本与公平性		✓	✓
[49]	两阶段 RO	最小化总成本	应急设施点容量、服务公平性	时间周期内确保在有限应急设施点容量与服务公平性下的救援总成本		✓	✓

表 2 应急设施点选址模型求解算法
Table 2 Solving algorithms of location selection models for emergency facility

文献	模型	求解算法	算法类型	算例数	算例规模
[46]	多目标位置-分配(Location-Allocation, LA)	多目标超启发式算法	启发式算法	6	最大 8 个应急设施点、8 个需求点
[52]	BLM	粒子群算法	启发式算法	1	67 个应急设施点、8 个高速公路路段
[54]	BLM	禁忌搜索算法	启发式算法	1	7 个应急设施点、7 个需求点
[65]	MCLP	遗传算法	启发式算法	1	84 个应急设施点、459 个需求点
[66]	多目标非线性整数规划(Nonlinear Integer Programming, NLIP)	帕累托遗传算法	启发式算法	1	14 个应急设施点
[60]	多目标 LA	ϵ 约束法	精确式算法	4	最大 4 个应急设施点、45 个需求点
[67]	LA	分支定界算法	精确式算法	2	最大 10 个应急设施点、40 个需求点
[63]	分层设施选址	混合粒子群算法+禁忌搜索算法	组合式算法	1	10 个应急设施点、24 个需求点
[64]	BLM	免疫算法+蚁群算法	组合式算法	1	3 个应急设施点、13 个需求点

算法能给出模型的最优解,适用于小规模选址问题,但随着问题规模的增大,模型复杂度呈指数倍数增长,求解效率较低且可能无法求解。

1.4.3 组合式算法求解

组合式算法大多融合 2 种或多种优化算法,如粒子群算法与禁忌搜索算法的组合,粒子群算法的

随机搜索特性会导致全局搜索不充分,而禁忌搜索算法可以避免局部最优,两者组合既能保证模型求解效率,又可保证不会陷入局部最优;再如分支定界算法与禁忌搜索算法的组合,分支定界算法可以提供模型的初始解,禁忌搜索算法用以搜索模型的最优解。Ouyang 等^[63]使用将粒子群算法和禁忌搜索

算法求解了选址模型,目标是最小化总体加权距离,数值仿真结果表明在大中型选址模型求解中,精确式算法无法获取全局最优解,遗传算法可以获取全局最优解,但计算时间会超过 20 h,而使用粒子群算法和禁忌搜索算法结合求解模型,在获取全局最优解的情况下,计算时间可以减少 35%;Xi 等^[64]认为交通事故的不确定性会引起应急需求的不确定,因此,在构建选址模型时应考虑需求权重,最后使用

免疫算法与蚁群算法求解 BLM,值得注意的是,其认为单一求解算法适合求解最佳路径或覆盖范围,在求解 2 个或多个因素影响下的选址问题时,性能可能会下降。图 5 归纳了应急设施点选址统一建模框架和使用粒子群算法与禁忌搜索算法的求解流程,粒子群算法会将每个粒子找到的最优解与整个种群中所有粒子找到的最优解传递给禁忌搜索算法,用以构建禁忌列表。

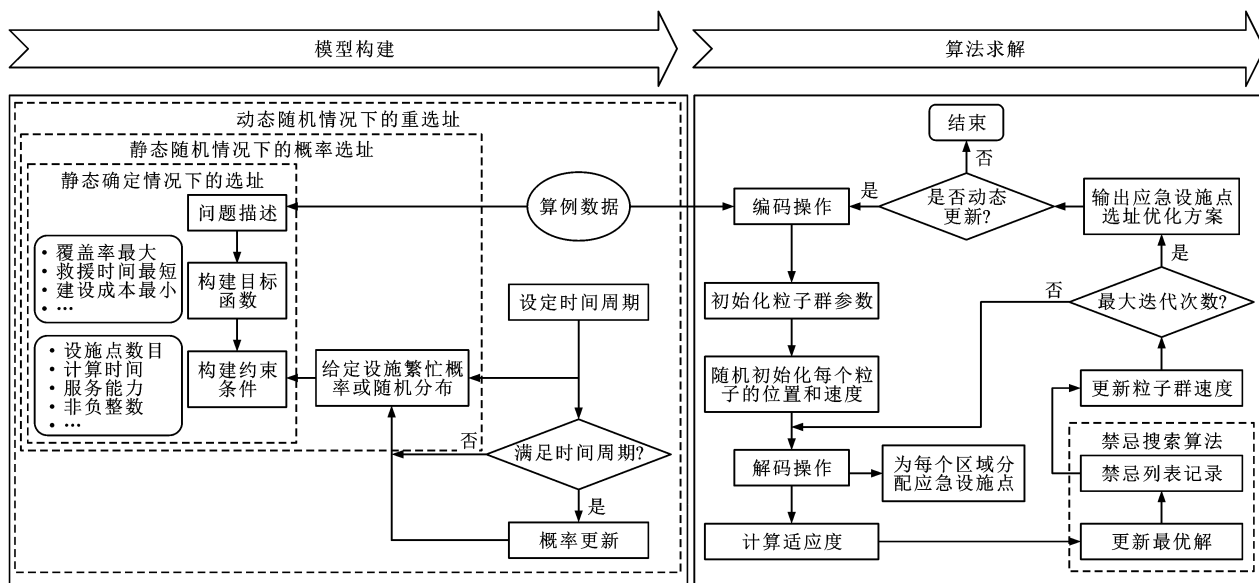


图 5 应急设施点选址统一建模框架与算法求解流程

Fig. 5 Unified modeling framework and solving algorithm process of location selection for emergency facility

1.5 小结

目前,学者从模型构建与求解算法两方面开展了高速公路应急设施点研究,取得了一定的成果。本文将应急设施点选址分为静态确定情况下的选址、静态随机情况下的概率选址和动态随机情况下的重选址 3 个子问题,梳理了以上三部分及求解算法的研究现状,形成以下结论。

(1)在模型构建方面,总的来说,覆盖模型及其变体、DSM、HQM、RO 及其变体多用以研究高速公路选址优化问题,覆盖模型较为简单,易于理解和应用,适应性较强,RO 在建模中不需要参数的分布模型和不确定参数的模糊隶属函数,在不确定性处理方面具有较高的适应性,近年来使用较广泛;现有研究针对高速公路应急设施选址考虑因素较为单一,多为应急设施点数量、应急响应时间和应急车辆数等,实际情况下应急设施点选址会受空间、环境、经济以及服务满意度等因素的影响,在应急设施点选址模型目标函数中加入影响因素会使模型更加贴近实际,例如研究应急设施点空间/经济交叉耦合影响,可动态调整空间/经济因素以体现应急设施点选

址过程受到不同程度的影响;近似排队模型及 SP 在解决随机情况下的选址问题表现出了良好的性能,融合多种模型对随机情况下的应急设施点选址进行建模是更好的解决办法;在动态重选址问题研究中,大多文献将救援效率和成本作为目标函数,出于伦理方面的考虑,考虑建立救援公平性与救援效率成本结合的选址目标函数更具实际性;针对中国高速公路“一路一公司”和属地管理的模式,如何从网络层级构建选址模型以优化现有设施布局是研究的重点。随着多部门协调救援机制的健全及面向更高的救援需求,未来应从车辆层级开展路侧小型和微型应急设施点的部署优化及有效性验证方法;应考虑优化动态应急设施点,而不单独依赖于高速公路管理所、服务区等固有应急设施点,提升应急设施的覆盖率与灵活性。

(2)在求解算法方面,应急设施点选址问题的目标函数、场景约束条件与算例规模是选择求解算法的关键因素。在较早的研究中,学者通常将选址问题简化,使用单一优化算法求解选址模型。精确式算法多用来求解小规模选址模型,大规模选址算例

多使用启发式算法求解。随着城市发展及交通网络的演变,不确定因素会降低模型适应性,当选址模型考虑不确定性因素(如交通流的演变等)时,模型复杂程度呈指数倍数增加,精确式算法及单一启发式算法可能无法满足复杂选址模型求解,出现求解效率低下或全局搜索不充分的问题,因此,在保证选址模型构建贴合实际的情况下,如何提升模型求解效率并找到全局最优解(多目标下为最优解集)是该领域未来研究的关键。目前,少量研究探索组合式算法求解选址问题的可行性和适应性,组合式算法在求解大规模复杂选址模型时表现出良好的性能和潜力,由此可预见,使用组合式算法求解选址模型将是未来的研究热点之一。

2 高速公路应急关键资源配置

高速公路应急关键资源配置是综合多个应急设施点在交通事故前进行的资源预置(静态资源配置)和应急响应时进行按需配置(动态资源配置)的过程,旨在保证响应质量的情况下节省应急关键资源,降低救援成本,提高应急响应效率。高速公路不同的应急设施点具备不同种类、数量的应急关键资源,部署在高速公路路侧的锥形桶、照明灯、紧急救援电话、消防喷淋设备、广播系统及风机等设备资源可以供救援人员进行先期处置,避免二次事故。高速公路应急关键资源具备外溢特性,因此,在静态资源配置中考虑外溢特性,纳入周边环境影响特征更能发挥应急关键资源的作用。将可持续发展绩效纳入应急关键资源配置优化目标具有广泛的研究前景,更能体现绿色交通理念。为梳理该领域研究现状,根据交通事故应急救援的预防与准备阶段,将高速公路交通事故应急关键资源配置分成 2 个主要子任务:静态应急关键资源配置和动态应急关键资源配置。本文解析了应急关键资源配置问题,如图 6 所示,静态应急关键资源配置针对事故预防阶段,对资源进行预置;动态应急关键资源配置针对事故准备阶段,对资源进行重分配。本节首先回顾多阶段资源配置模型、资源需求预测技术在静态应急关键资源配置中的研究进展,简要分析了设备资源在高速公路应急关键资源配置中的作用;其次回顾了不确定下的应急关键资源配置、二次事故下的应急关键资源配置以及配置方案动态求解的研究进展;最后给出了高速公路应急关键资源配置研究总结,组织架构如图 7 所示。

2.1 静态应急关键资源配置

静态应急关键资源配置是交通事故发生前区域内的资源配置,具备静态性。静态应急关键资源配置侧重于在应急设施点预置所需应急关键资源,以实现事故随发即用,如根据历史事故信息将应急关键资源预置在应急设施点内,再如部署在高速公路路侧的设备资源,一般都属于静态应急关键资源配置。静态应急关键资源配置重点关注历史事故的空间分布和规模,进而归纳历史事故规律,预先形成资源配置方案。目前,大多研究使用多阶段规划模型与资源需求预测技术开展静态应急关键资源配置研究。

学者大多采用两阶段或三阶段规划模型求解资源配置优化问题。第 1 阶段根据历史事故频率或严重程度确定应急设施点初始解集合,第 2 阶段考虑随机因素或不确定因素的影响,基于初始解集合配置相应资源。Yan 等^[68]考虑高速公路应急关键资源的快速配置问题,提出了两阶段模型,第 1 阶段采用模糊分类方法构建了交通事故严重程度的分类模型,第 2 阶段基于规则的网络模型结合专家知识和历史案例经验,建立了应急关键资源快速配置推理模型,并确定了应急关键资源需求的优化配置模型;Chai 等^[69]以资源配置时间和配置成本为目标,将事故资源需求的随机性作为约束条件,建立了 SP 模型,并使用粒子群随机仿真算法进行求解。

识别道路事故黑点后预测各应急设施点的资源需求具有较高的准确率及适应性。Tsai 等^[70]根据应急设施点附近的历史资源需求数据对各应急设施点进行了需求预测,根据需求预测分布,采用跳跃粒子群算法求解了多目标救护车配置模型;Luan 等^[71]认为应急关键资源的预先配置是对不确定性交通事故加强防范的机制,使用改进的事故频数法识别了事故黑点,获得了事故概率,以最小化应急响应时间、救援成本和需求属性的遗憾值为目标函数,提出了一个三阶段随机遗憾最小化模型,结果表明该方法对高速公路应急关键资源的预先配置具有较好的适应性。表 3 总结了近期静态应急关键资源配置模型^[68-71]。高速公路交通事故具有明显的随机性和偶发性,静态关键资源配置仅能给出粗略的关键资源配置方案。尽管部分学者考虑了事故的随机性,但事故演变规律难以研判,且高速公路应急设施点固有的规划布局使得静态关键资源配置难以满足动态事故场景变化的需要。

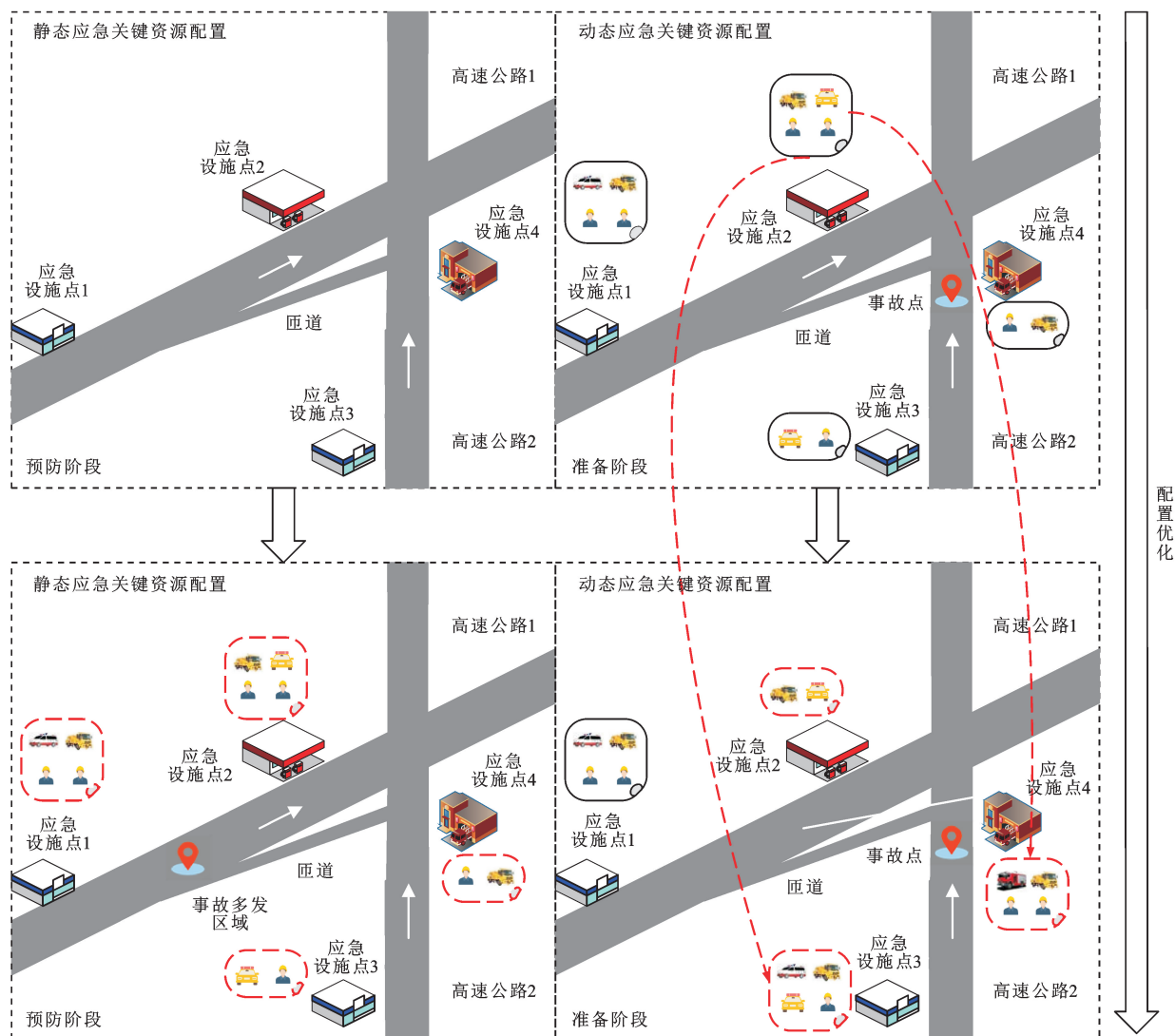


图 6 应急关键资源配置问题解析

Fig. 6 Analysis of key emergency resource allocation

表 3 静态应急关键资源配置模型

Table 3 Static key emergency resource allocation models

文献	模型	考虑因素	试验地点	应急关键资源
[68]	模糊分类+基于规则的网络模型	各部门对资源需求度	安徽省高速公路	交警:60个锥形桶、4辆车、4名人员、10个警戒带、6个警示标志、10个闪光灯; 医疗:20个急救箱、3辆救护车、6名医生、6名护士、10 000个血袋; 消防:8名人员、2个消防泵、1个灭火器、2辆危化品救援车、2台液压切割机、2个回收灌; 路政与养护:3辆清障车、2台起重机、3辆拖车、30件雨衣
[69]	SP模型	资源配置时间、配置成本、事故资源需求随机度	南京市高速公路	交警、高速公路管理局、消防、养护、医疗部门,清障车、拖车、消防车、救护车
[70]	四叉树+多目标配置模型	资源需求空间分布	台湾省新北市	救护车
[71]	改进事故频数法+三阶段随机遗憾最小化模型	应急响应时间、救援成本、需求属性遗憾值	潍坊、日照、临沂	清障车

部署在高速公路上的设备资源,如路侧锥形桶、照明灯、紧急救援电话、消防喷淋设备、广播系统及

风机在应急救援中可以实时为救援人员所用,从而在短时间内控制事故造成的影响甚至降低事故损

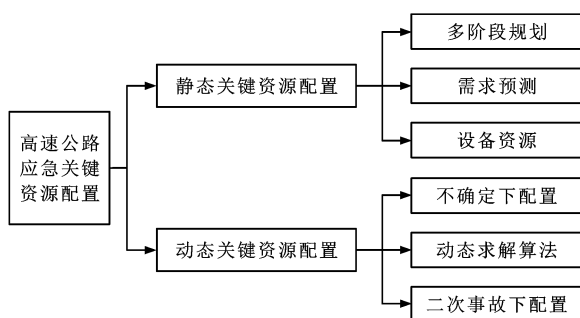


Fig. 7 Organizational structure of key emergency resource allocation for expressway

失。图 8 展示了设备资源配置在应急救援中的作用,在交通事故发生后,救援人员可通过事故点附近的锥形桶管控事故现场,避免二次事故。Su 等^[72]认为隧道照明设备及机电设备在高速公路应急救援处置中至关重要,将以上设备与高速公路隧道实时预警系统相连并进行远程控制,用以突发事件先期

处置;Takano 等^[73]调查了日本常磐高速公路紧急救援电话对应急救援响应的影响,普通高速公路上紧急救援电话间隔为 1 km,而隧道内间隔为 200 m,结果表明安装紧急救援电话可以降低该道路 23% 的应急救援时间。可以看出,路侧设备资源可以在应急救援过程中提升应急救援效率,但由于设备资源通常在运营期之前完成配置,因此,应考虑设备资源的配置优化方法及有效性验证方法,降低设备资源作用响应时间。

2.2 动态应急关键资源配置

静态资源配置的静态性及交通事故的不确定性导致其难以满足资源的动态需要。动态资源配置具备更广泛的研究前景。动态应急关键资源配置指交通事故发生后,区域内设施点应急关键资源储备不足,需要应急关键资源重分配,具备动态性和不确定性。动态应急关键资源配置侧重于应急关键资源的重分配,以实现资源动态流转,如事故发生后应急关

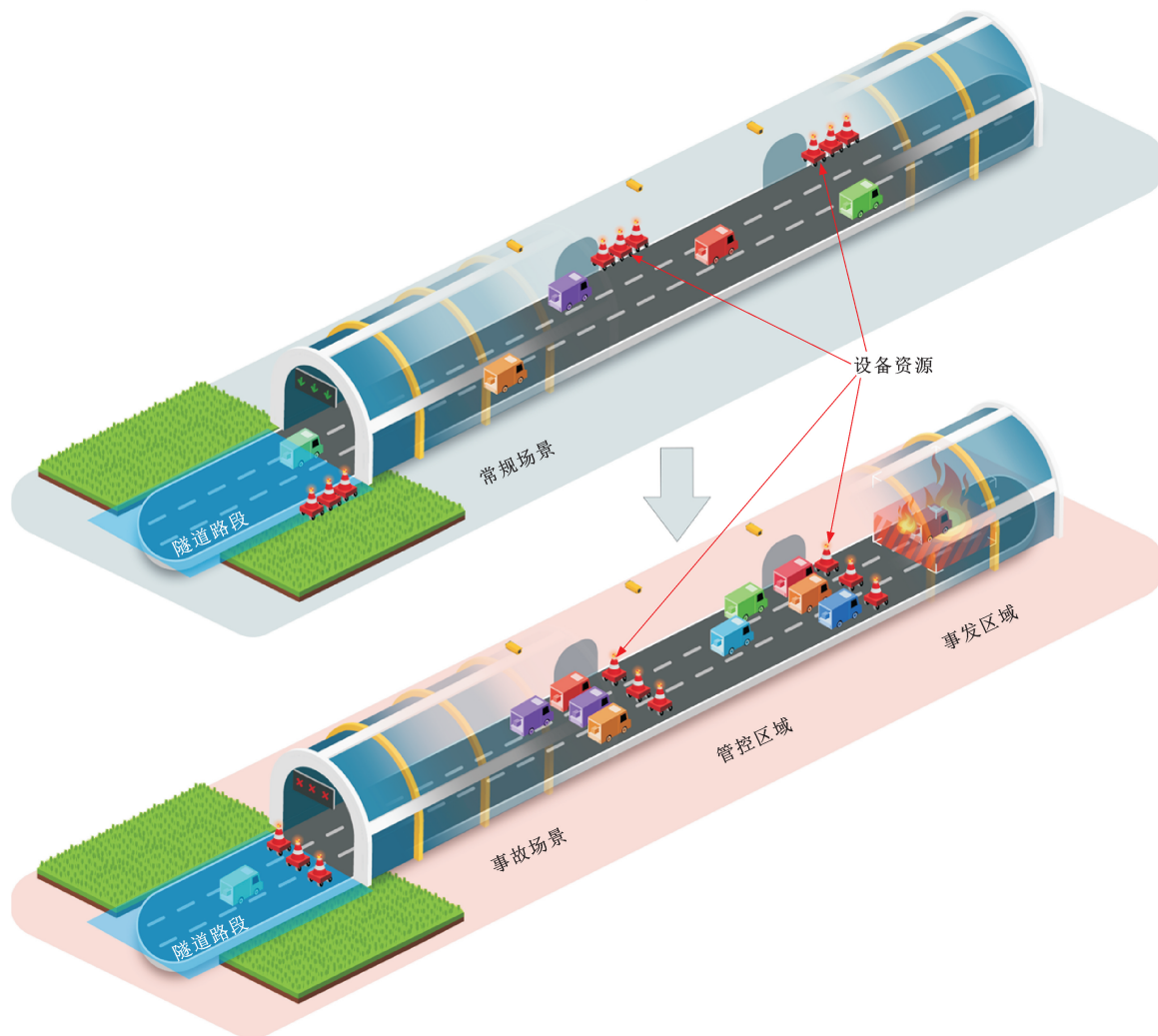


图 8 应急救援中的设备资源配置

Fig. 8 Equipment resource allocation in emergency rescue

键资源不足情况下,需要多个设施点的应急关键资源重分配,动态应急关键资源配置通常考虑资源需求的不确定性。此外,实时可靠计算是动态资源配置的关键,可持续发展绩效是新的优化目标^[74-75]。目前,学者大多从需求不确定、考虑二次事故的应急关键资源配置及动态求解算法方面开展研究。

Yan 等^[76]认为高速公路交通事故是不可预测的,应急救援过程处在一个动态的环境中,提出一种融合环境信息的动态资源配置模型,使用基于自适应编码的遗传算法进行求解,研究结果表明动态资源配置模型可以解决交通流不确定性问题,但计算时间不稳定,10次试验平均计算时间为18.25 s,峰值为80 s;柴干等^[77]针对交通事故与潜在事故随机性的特点,建立了交通救援资源配置的SP模型,将救援服务水平、事故概率权重、配置点至事故点的权值以及随机资源引入作为模型参数,并应用于河南省高速公路,结果表明该方法生成的资源配置方案可以满足高概率事故区域的救援需求,同时可减少需求区域的资源配置数量,节省救援成本。

此外,有部分学者研究了二次事故下的资源配置问题,将一次事故与二次事故产生的救援成本作为优化目标。濮居一等^[78-79]考虑了高速公路二次事故下的应急关键资源配置,使用机会成本法描述了服务期间可能发生的交通事故,以期解决二次事故下应急关键资源配置问题。近年来有学者考虑使用马尔可夫决策过程(Markov Decision Process, MDP)解决动态资源配置问题,MDP在动态规划及随机模拟问题中有良好的性能。Bouyahia 等^[80]给出了交通事故造成道路拥堵情况下的应急关键资源配置方法,提出一种新的两阶段交通资源配置方案,第1阶段使用马尔可夫随机场(Markov Random Field, MRF)模拟和预测道路上的交通拥堵,第2阶段根据拥堵传播预测结果,采用MDP自动配置应急关键资源。

以上研究在求解模型过程中出现了计算时间不稳定、实时性不理想的问题。为了逼近实际情况,在计算过程中考虑不确定因素影响,导致模型变量数量和范围随时间变化,求解模型过程也会动态变化,进而导致模型求解时间较长或不稳定,因此,在资源配置模型中选取的变量数量和范围较大时,会出现较大计算时间延误和波动。为了解决以上问题, Park 等^[81]给出了一种新思路,假设高速公路交通事故是相互依存的(考虑潜在事故),且模型的规模是根据应急车辆、路网规模、服务时间和多个事件之间

的间隔滚动优化的,即资源配置策略是根据事件信息不断更新的(在线优化),动态规划算法用来求解最优资源配置方案,研究结果表明试验案例都可在10 s内求解出最优资源配置方案,在求解时间方面体现出良好的性能。在交通事故发生早期,道路运营管理人员很难获取详细的事故信息,资源配置方案应随着事故信息的补全而动态调整。动态规划算法可以在考虑事故动态演变规律和特征的同时找到全局最优解,且可以利用实际知识和经验提高求解效率,使用动态规划算法求解应急关键资源配置问题具备较大的研究潜力。值得注意的是,动态规划算法在大规模配置模型求解过程中会出现维度灾难问题,所需计算开销较大,可通过降维方法将高维动态规划问题分解成低维动态规划问题,避免维度灾难。

近年来,学者尝试在应急救援中反映可持续发展理念。构建应急关键资源模型时,将可反映可持续发展理念的指标作为优化目标,如碳排放量、不利环境影响、公平性等^[74,82]。Zarei 等^[83]认为将可持续发展理念与应急关键资源配置问题进行结合是有必要的。表4梳理了应急关键资源配置研究概况。

2.3 小结

本节根据交通事故应急救援的不同阶段,将应急关键资源配置分成静态应急关键资源配置和动态应急关键资源配置2个子任务,梳理了现有研究成果,形成以下研究结论。

(1)在静态资源配置方面,现有研究着重关注历史事故数据的时空分布特征,进而归纳历史事故信息规律,在事故发生前预先形成资源配置方案。针对事故黑点进行特征分析有助于根据实际情况合理配置应急关键资源,事故黑点的分析与挖掘是此类研究的关键。现有研究多立足于高速公路环境建模应急关键资源配置问题。事实上,高速公路应急关键资源具备明显的外溢特性,除应对高速公路突发事件外,还应在抢险救灾、公共卫生安全事件中发挥作用。针对邻近河流或山区环境的高速公路,将周边环境特征纳入应急关键资源配置模型值得探索,如将洪涝灾害点位作为约束条件优化应急关键资源配置数量与种类。此外,部署在高速公路的设备资源可以显著提升救援效率,其部署间隔、位置在规划之初按照相关标准文件执行,面向更高要求的救援需求,路侧设备资源在实际应用中按照现有标准进行配置的适应性还有待验证。

(2)在动态资源配置方面,考虑交通事故的不确

表 4 应急关键资源配置概况

Table 4 Overview of key emergency resource allocation

文献	优化目标	模型	求解算法	算例规模	可持续发展
[74]	资源需求率、不利环境影响、经济成本	随机双层优化模型	样本平均近似法、全局准则混合算法	2 个应急设施点、3 个需求点	是
[75]	公平性、配置时间	MIP 模型		6 个应急设施点、5 类应急关键资源	是
[76]	配置时间	整数规划模型	自适应遗传算法	5~10 类应急关键资源,每类资源需求最大 20 个	否
[79]	配置成本	MIP 模型	基于局部搜索的线性规划算法	10 个应急设施点、5 个需求点、3 个二次事故点、46 类应急关键资源	否
[81]	配置时间	动态规划模型		5 辆应急车辆、30 km 高速公路	否
[82]	配置成本、碳排放量	单层多目标 SP 模型	矩阵编码的遗传算法	5 个应急设施点、4 类应急关键资源	是
[84]	配置成本	两阶段 SP 模型	粒子群算法	41 个应急设施点、3 类应急关键资源	否
[85]	配置成本、资源需求率	分布式 RO 模型	平均绝对偏差的模糊集与近似方法结合	4 个应急设施点、4 类应急关键资源	否
[86]	配置延时、配置成本	基于智能体的车辆派遣模型	启发式算法	4 个应急设施点、2 个需求点、35 辆应急车辆	否

定性与需求的不确定性,具备更高的研究潜力与价值。现有研究大多在建模第 1 阶段表征交通事故不确定性或需求不确定性,第 2 阶段构建优化目标与约束条件,进而使用优化算法求解模型。考虑不确定性与动态特性的资源配置模型不可避免地带来求解效率的低下与不稳定问题,动态规划算法可以在考虑事故动态过程演变联系和特征的同时找到全局最优解,且可以利用实际知识和经验提高求解效率。大规模资源配置模型涉及多维数值计算,使用动态规划算法求解可能会出现维度灾难,需要进行降维处理。未来,在大规模应急关键资源配置中,融合动态规划算法与降维方法求解资源配置模型可能具备较大的研究潜力。在交通事故早期,道路运营管理部门可能无法获取事故的全部信息,为应急关键资源配置带来了挑战,根据不断完备的事故信息在一定时间周期内动态生成资源配置方案有望解决此问题。面向更高的救援需求,将能反映可持续发展理念的指标纳入资源配置目标函数值得探索。可持续发展目标分为社会、经济和环境目标,通过提取应急任务清单进行设计、评估,进而选择面向任务的应急关键资源配置策略,使应急关键资源配置方案可以最大程度地提高救援过程的可持续绩效。动态应急关键资源配置应以静态资源配置方案为基础,最大限度地利用静态配置方案设计动态资源配置策略会降低救援成本,因此,融合静态资源配置模型与动态资源配置模型,形成两阶段资源配置建模框架具备一定的研究价值。

3 高速公路应急关键资源调度

高速公路应急关键资源调度是从应急设施点根据应急地点的需求派遣应急关键资源的过程,旨在以调度时间、调度成本及调度延迟时间等为优化目标,以应急设施点数、应急关键资源种类等为约束,使用优化算法求解,实现缩短应急救援响应时间的目的。道路运营管理部门规划出合理的应急救援路径是高速公路应急关键资源调度决策的关键。图 9 展示了典型高速公路应急关键资源调度场景,应急关键资源调度路径有 3 条,路径 1 可由应急设施点 2 到达事故点,路径 2 可由豁口 1 逆行到达事故点,路径 2 可由豁口 2 到达事故点,常规情景下路径 1 为最短路径,但高速公路交通事故可能导致上游车辆排队,甚至占据应急车道,此时路径 1 不是应急调度最优路径;同理,路径 2 会出现逆行场景,路径 3 则距离最长。参考李建斌^[87]对应急关键资源调度研究的思路,归纳出高速公路应急关键资源调度研究的 3 个维度,如图 10 所示。目标个数对应单目标与多目标优化问题,事故数对应潜在事故与多事故点问题,考虑因素对应资源调度中的不确定性问题,此类不确定包含交通状态及资源需求的不确定,因此,高速公路应急关键资源调度从优化目标、事故数和考虑因素上可以分为考虑不同优化目标的应急关键资源调度、考虑潜在事故的应急关键资源调度、考虑多事故点和事故优先级的应急关键资源调度、考虑不确定性的应急关键资源调度。目标个数、事故

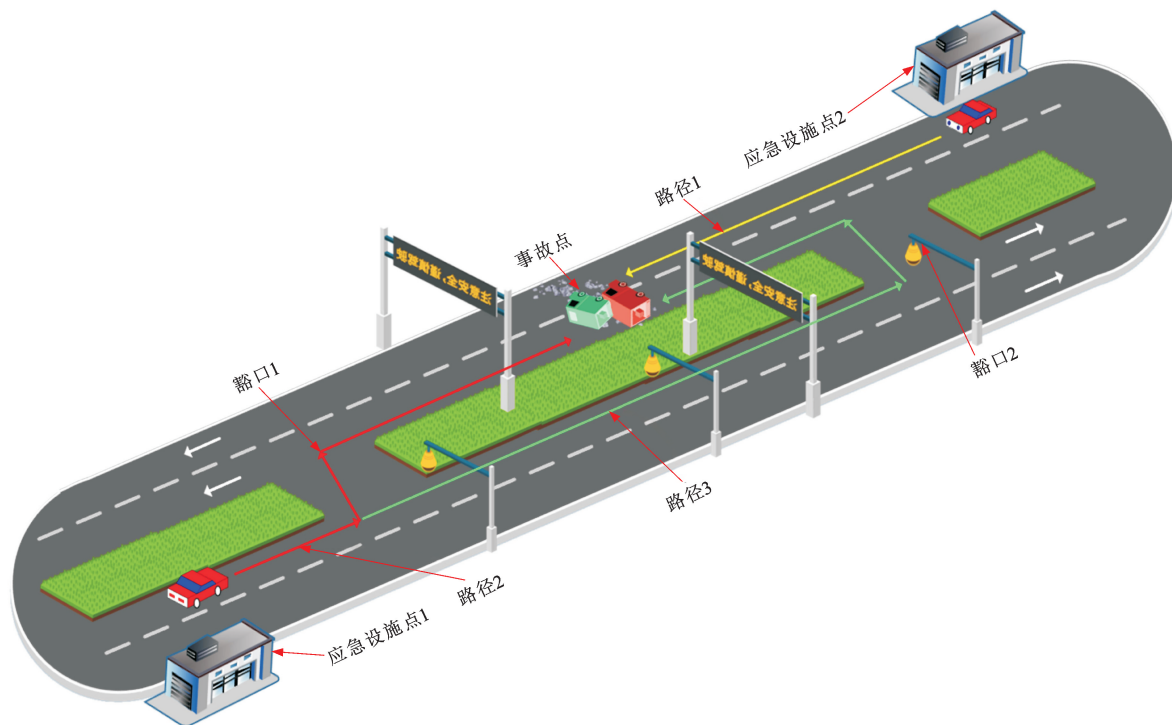


图9 典型高速公路应急关键资源调度场景

Fig. 9 Typical scenario of key emergency resource dispatching for expressway

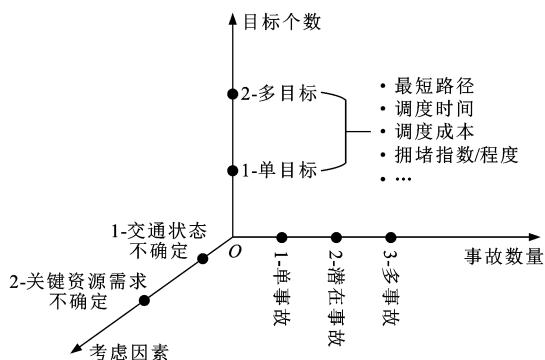


图10 高速公路应急关键资源调度方法研究的3个维度

Fig. 10 Three dimensions of research on key emergency resource dispatching methods for expressway

数与考虑因素在资源调度研究过程中并非相互独立,多个子问题会相互交织,本文为厘清应急关键资源调度研究现状,划分以上4个子问题,使得概述目标各有侧重。图11为本节组织架构,首先从优化目标个数方面梳理了不同优化目标下的资源调度现状,其次从考虑潜在事故、多事故点及事故优先级、资源需求及交通状态不确定方面回顾了研究进展,最后给出了应急关键资源调度的研究总结。

最初为了简化调度问题,学者假设事故点只有1个,即单一事故下的应急关键资源调度,应急关键资源调度问题则转变为寻找最近应急设施点的问题。Dijkstra^[88]提出的Dijkstra算法为静态网络最

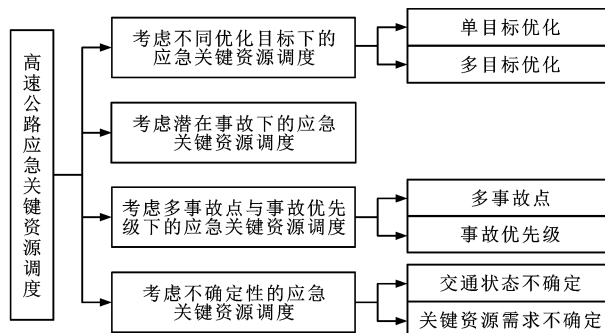


图11 高速公路应急关键资源调度组织架构

Fig. 11 Organizational structure of key emergency resource dispatching for expressway

短路径算法;Bellman^[89]提出的Bellman-Ford算法用于解决负边权重的最短路径问题;Hart等^[90]提出A*算法用以解决静态最短路径问题。以上算法皆可求解高速公路应急关键资源调度的最短路径,将高速公路收费站、路口等作为网络节点,将路段作为网络的边,将路段的实际距离作为节点之间距离。由于此类问题较为简单,考虑因素较为单一,较少实际应用于高速公路中。为更加贴合实际,通常以上算法的一些变体被应用于高速公路应急关键资源调度问题中^[91-93]。

3.1 考虑不同优化目标的应急关键资源调度

高速公路应急关键资源调度从优化目标个数上可分为单目标与多目标优化,从优化目标类型上又

可分为调度时间、调度成本、调度延迟时间、路径可靠性(路径选择风险)与多个目标的组合优化。通常,高速公路交通事故会导致部分车道甚至全部车道中断,进而导致拥堵现象。Yao 等^[94]分析了应急车辆救援出行时间,结果表明应急车辆没有遇到排队、遇到排队但有可用车道相对于遇到排队没有可用车道时,平均行程时间分别降低了 50.1% 和 22.2%,因此,若仅考虑应急设施点至事故点的最短距离,而不考虑交通事故及交通状态时变特性导致的排队现象,则可能出现调度延误,增加调度时间。针对单一最短路径存在局限性问题,学者开始考虑将调度时间作为目标函数进行优化,实现了从最短路径到最优路径的转变。

在单目标优化方面,Wei 等^[95-96]将最短调度时间作为优化目标,以期提升整体救援效率。近年来,学者不断松弛模型假设,纳入交通状态时变特性以期提高模型适应性。实时交通状态及行程时间预测成为应急关键资源调度的关键技术。Zhao 等^[97]考虑到事故后应急车辆出行时间的不确定性,实时预测了车辆行程时间,建立了以应急车辆最短调度时间为目标的 NLIP。事故点处发生交通拥堵会影响事故上游的主线通行能力,应急车辆路径规划必须考虑交通状态的动态时变特性。Alvarez 等^[98]认为将拥堵作为动态属性是优化路径最有效的方法,将拥堵代价实时反映到应急车辆路径中的动态方法可以缩短 11% 的调度时间;Wen 等^[99]认为交通事故会导致事故点上游交通流环境发生动态变化,构建了时序协同进化路径优化模型,并使用改进的波纹扩散算法求解动态最优路径。部分学者考虑将调度成本作为目标函数进行优化。Li 等^[100]为了最小化车辆调度总成本,开发了基于拉格朗日松弛的插入启发式算法来解决车辆重新调度问题。此外,调度延迟时间、路径可靠性^[101]也是学者优化的目标。高速公路应急关键资源调度单目标优化问题可以得出最优解,但单目标优化固有的权值难以确定、目标量纲不统一导致的鲁棒性差等问题致使其难以实际应用,如仅考虑最短调度时间作为优化目标,资源需求及路径可靠性则难以保证,导致应急关键资源冗余、调度路径不可靠等问题。

在多目标优化方面,Zhao 等^[102]以最短调度时间和最小拥堵程度为目标,考虑了道路网络交通的动态时变特性、紧急资源需求约束、救援时间约束以及路径可靠性,建立了应急车辆动态路径规划的两阶段模型,并使用两阶段混合蛙跳算法求解;

He 等^[103]以车辆最短出行时间和最优资源分配为目标,构建了汽车制动模型与两阶段模型来求解应急车辆最优路径,以期提升救援效率,避免资源浪费;Ghannadpour 等^[104]提出了一种基于遗传算法和 3 个基本模块的求解策略来解决具有模糊时间窗的多目标动态车辆路径问题,旨在最小化所需车队总规模、总行驶距离和车辆等待时间。

通常,多目标优化不是寻求某一目标的最优,而是寻求多个目标的协调和平衡,为一组由众多帕累托最优解组成的最优解集合。事实上,不同于常规路径规划问题,高速公路应急关键资源调度更注重效率性原则,应在保证调度效率的同时优化其他目标,如可以考虑调度时间、调度成本、调度时间与路径可靠性等的多目标优化。此外,较单目标优化模型,多目标优化模型更为复杂,其多个目标函数可能存在冲突关系,导致模型求解效率低下,难以满足实时性要求,选择合适的求解算法更为必要。为梳理不同优化目标下的应急关键资源调度研究概况,表 5 总结了应急关键资源调度问题模型、优化目标与求解算法,决策方式为模型的静态与动态决策,静态决策为应急关键资源调度前的决策,动态决策更注重信息的周期更新,如考虑了交通状态的时变特性或道路拓扑结构的变化,整个调度过程采用周期性动态决策机制^[46,95,99,105-111]。

3.2 考虑潜在事故的应急关键资源调度

交通事故是随机且不可预测的,高速公路应急关键资源调度过程中可能会出现潜在事故,为整个应急调度过程增加不确定性,考虑潜在事故的高速公路应急关键资源调度也是研究热点之一。目前,大多研究将不确定因素的模糊化为确定性因素或者使用机会成本法将潜在事故纳入应急关键资源调度模型。

Zhu 等^[112]为了揭示高速公路事故救援过程的不确定性,采用模糊规划方法建立了应急关键资源调度模型,以最小的模糊调度决策时间来反映全封闭高速公路事故发生后对事故上游交通流的影响,模糊机会约束用来反映潜在事故的不确定性与现有资源配置之间的关系,并用遗传算法进行求解,以河南省高速公路网为例进行验证,结果表明模糊调度方法可以用来缩短决策时间和减少救援成本;Chai 等^[113-114]将高速公路潜在事故影响因素纳入应急调度决策中,提出了一种改进的应急救援资源调度方法,使用遗传算法进行求解,并以南京市高速公路网为例,研究结果表明在潜在事故影响下,该模型可以

表 5 考虑不同优化目标下的应急关键资源调度模型

Table 5 Key emergency resource dispatching models considering different optimization objectives

目标个数	文献	模型	优化目标	求解算法	决策方式
单目标 优化	[95]	无向图模型	最短调度时间	改进的 Dijkstra 算法	动态
	[99]	时序协同进化模型	最短调度时间	改进波纹扩散算法	动态
	[105]	无向图模型	最短路径	Dijkstra 算法	静态
	[106]	时间依赖图模型	最短路径	双向 A* 算法	动态
	[107]	动态规划模型	最短路径	粒子群算法	动态
	[108]	选址-路径问题(Location-Routing Problem, LRP)模型	最短调度时间		静态
多目标 优化	[46]	MINLP 模型	最小救援成本、最少资源	多目标超启发式算法	动态
	[109]	混合整数线性规划(Mixed Integer Linear Programming, MILP)模型	最少资源、最大路径可靠性	多目标进化算法	动态
	[110]	整数非线性规划模型	最短救援时间、最小延迟时间、最少救援车辆	改进引力搜索算法	静态
	[111]	MILP 模型	最少资源、最小救援成本、最大路径可靠性	改进樽海鞘算法	动态

生成最优的应急关键资源调度方案并具备适用性,在此基础上,其进一步松弛了模型假设,基于垂直排队理论构建了救援路径行程时间估计方程,并使用分支定界算法求解,该方程旨在优化考虑救援行程延误时间及潜在事故影响下的资源调度路径和救援成本。

机会成本法可以把交通事故及潜在事故的救援成本做一步加和进行求解。Pu 等^[115]以河南省高速公路为例,基于机会成本模型、改进的场景分解算法和针对事故隐患的遗传算法,建立了高速公路应急关键资源调度模型;龚静^[116]以最小救援成本为目标函数,运用机会成本法建立了救援车辆派遣模型,将模型应用于山区高速公路隧道群应急关键资源调度。机会成本法在以救援成本为优化目标的应急关键资源调度模型中表现出了良好的性能,其可计算考虑潜在事故的救援成本。此外,通过模拟救援路径上的潜在事故逼近真实道路救援场景也可用来研究潜在事故下的应急关键资源调度。Duan 等^[117]针对事故引起的路况不可预测的变化,将应急关键资源调度分为初始调度和动态调整两阶段,以事故严重程度为关键因素,救援时间为目标函数建立了考虑潜在事故的车辆动态调度模型,并将混合蛙跳算法的全局搜索策略采用概率模型估计分布算法来避免局部最优解;以北京市高速公路网为例,在调度过程中模拟了救援路径上发生新事故的场景,动态调整了路径和调度策略,研究结果表明该模型可以动态调整车辆路径,以及时应对潜在事故导致的路况突然变化,避免应急调度延误。

由于潜在事故进一步增加了交通状态特性与资源需求的不确定性,考虑潜在事故的应急关键资源调度更应注重调度方案的动态和实时调整性。理论上,潜在事故属于未发生事故,如何平衡已发生事故与潜在事故之间的应急关键资源调度是当前研究领域的难点问题,因此,针对潜在事故下的应急关键资源调度问题,应着重考虑在问题建模中纳入交通状态时变特性。此外,应急关键资源调度方案的动态调整与生成在解决潜在事故下的应急关键资源调度问题中展现了相当的优越性。未来应考虑建立多周期动态应急关键资源调度模型,将应急关键资源调度进程划分为多个时间窗口,针对每个时间窗口纳入交通状态时变特性及潜在事故发生概率,进而动态求解最优资源调度方案。

3.3 考虑多事故点和事故优先级的应急关键资源调度

实际高速公路应急救援过程中,同一个救援周期内可能会存在多个应急关键资源事故点,在考虑事故严重程度及公平性的基础上,资源事故点会存在优先级关系。多事故点资源调度通常被视为一类多目标优化问题,理想点法多用来平衡多个目标。考虑事故优先级的应急关键资源调度通常被视为一类多阶段协作问题,多阶段资源调度模型是常用的建模框架,事故优先级较高的事故点放在第 1 阶段,优先级较低的事故点放在第 2 阶段。

在多事故点应急关键资源调度方面,Li 等^[118]设计了一个考虑资源到达时间和运输成本的多目标、多点对多点的应急关键资源调度模型,研究结果

表明该模型在速度和合理性上具备良好的性能;Wang 等^[119]以可靠性最高、成本最低为目标,建立了应急关键资源从多个应急设施点向多个事故点调度的优化模型,由于目标的矛盾性,其使用理想点法来求解模型,将 2 个目标之间的理想点视为最佳方案。理想点常用来求解多事故点下的应急关键资源调度问题,引入理想点可以平衡多个目标需求,多事故点下的应急关键资源调度可以仅以最小化调度时间作为优化目标,但由于其存在多个事故点,如何平衡多个事故点之间的调度需求进而找出最优解仍是研究的难点。

在事故优先级下的应急关键资源调度方面,Xu 等^[120]在考虑事故优先级的情况下,提出了最小化应急设施点和调度时间的多阶段资源调度模型,认为考虑事故优先级更符合实际情况;Niu 等^[101]认为区分事故优先级、合理调配应急关键资源是高速公路应急救援的关键,以最小应急调度延误为优化目标,构建了多阶段多事故应急关键资源调度模型,并使用改进的遗传算法求解模型。考虑事故优先级的应急关键资源调度大多遵循先事故、先调度的原则。事实上,首次发生的交通事故可能是轻微事故,因此,将事故严重程度纳入事故优先级判别具有实际意义。高速公路交通事故存在明显的交织耦合机理,一次事故的演化及交通状态的时变特性可能导致次生事故发生,如何平衡多个资源点需求,同时兼顾效率性与公平性是研究的关键。

3.4 考虑不确定性的应急关键资源调度

目前,准确预测交通事故发生时间与位置仍是较大挑战,受限于信息获取手段,决策者很难根据事故初期信息确定资源需求;同时,事故点区域的交通状态时变特性会导致应急车辆实际行程时间与规划行程时间的差异,因此,考虑应急关键资源需求及事故后交通状态的不确定性,对提升应急关键资源调度可靠性至关重要。近年来,学者通过多种方法将不确定情况转化为确定性,如双层规划分散式决策、模糊理论方法、RO 及多智能体强化学习(Multi-Agent Reinforcement Learning, MARL)方法。

在交通状态不确定性方面,刘波等^[121]考虑了道路连通可靠性和行程时间可靠性对应急救援车辆路径选择的影响,建立了应急车辆调度的双层 RO,运用双层优化分散式决策方式下的转化定理将不确定系数的双层 RO 模型转化为确定性的双层优化。RO 模型^[122-123]、基于动态场景的 SP 模型^[124]也常用来处理交通状态的不确定性。在资源需求不确定性

方面,Tang 等^[125]采用模糊理论方法处理了应急救援过程中资源需求的不确定性问题,考虑专家评价的优先级、应急节点的需求和调度时间满意度隶属度的模糊性,结合理想点法,提出了一种最优解的约束参数区间搜索算法,研究结果表明该方法可以解决应急关键资源需求不确定情况下的调度问题;Zhou 等^[126]使用 MARL 解决了需求不确定下的多周期应急关键资源调度问题,研究结果表明该算法具有更好的收敛性;Zhang 等^[127]针对重大公共卫生事件影响下的应急关键资源调度问题及关键资源需求的不确定性,提出了需求预测网络设计-决策调整模型,并使用滚动优化来求解。目前,应急关键资源调度中多用不确定性模糊化、设计动态变化场景及结合交通管控策略等方法解决不确定性问题,如通过变化的场景动态更新模型参数,或通过交通管控技术解决交通状态的不确定性。此外,由于交通事故是动态发展变化的,事故信息随着事故发展而不断完善,因此,动态调整信息不完整的关键资源调度策略也是一种解决不确定性问题思路。

为了直观展示近期应急关键资源调度研究概况,表 6 总结了 4 种高速公路应急关键资源调度建模环境下的研究^[98,101-102,116-117,119-121,124-125,128]。

3.5 小 结

总的来说,图模型、动态规划模型、整数规划模型及其多种变体、SP 模型及其变体多用于高速公路交通事故应急关键资源调度研究。整数规划模型及其变体适应性较强,RO 模型在处理不确定问题上使用较广泛。回顾了不同优化目标下、潜在事故下、多事故点及事故优先级下、不确定性下的应急关键资源调度 4 个子任务形成以下研究结论。

3.5.1 考虑不同优化目标的应急关键资源调度

高速公路应急关键资源调度优化目标为调度时间、调度成本、调度延迟时间、路径可靠性和多个目标的组合,开展研究时应根据要解决问题的侧重点选取合适的优化目标;交通状态估计可以预测路网交通态势,为求解最优调度模型提供数据支撑;纳入路网动态属性构建关键资源调度模型可以增强模型对路网环境的适应性;面向更高的调度需求,应在保证最小化调度时间的同时优化其他目标;多目标优化通常具备更高的模型复杂度,设计准确高效的求解算法尤为必要,组合式求解算法有望在获取全局最优解的同时保证算法求解效率与稳定性。

3.5.2 考虑潜在事故的应急关键资源调度

潜在事故进一步增加了交通状态特性与关键资

表 6 应急关键资源调度研究概况
Table 6 Overview of research on key emergency resource dispatching

文献	建模环境	上层目标函数	下层目标函数	决策方式	算例规模	描述
[98]	拥堵	最小化出行距离	最小化出行成本	分散	43 个节点、197 个路段、 50 辆车	采用动态拥堵信息更新机制将 拥堵代价纳入模型
[102]	拥堵	最小化车辆出行时间	最小化拥堵程度	分散	46 个节点、85 个路段、 8 辆应急车辆	构建交通拥堵程度函数并作为 优化目标
[116]	潜在事故	最小化救援成本		集中	3 个应急设施点、3 个 潜在事故点、1 个事故点	以历史事故数据计算潜在事故 发生概率并纳入优化模型
[117]	潜在事故	最小化救援时间	最小化救援成本	分散	46 个节点、85 个路段、8 辆 应急车辆、3 个潜在事故点	实时更新行驶速度函数,确保应急 车辆不通过发生事故的路段
[119]	多事故点	最小化救援时间	最小化运输成本	分散	3 个事故点、9 个 应急设施点	引入理想点法求解,以期平衡 多事故点的需求
[120]	事故优先级	最小化应急设施点	最小化救援时间	分散	2 个事故点、9 个应急 设施点	构建事故影响程度评价函数, 确定事故优先级
[101]	事故优先级	最小化救援延误		集中	10 个节点、15 个路段、 2 个事故点	根据事故严重程度确定事故 优先级
[121]	不确定性	最大化救援可靠性	最小化救援时间	分散	16 个节点、3 辆应急车辆	使用 RO 模型转化不确定参数约束
[124]	不确定性	最小化救援成本	最大化响应需求	分散	15 辆应急车辆	使用情景分析法处理需求不确定, 使用时间窗口解决交通流不确定性
[125]	不确定性	最大化救援点需求	最小化救援时间	分散	4 个事故点、4 个应急设施点	使用模糊理论处理不确定性
[128]	不确定性	最小化救援时间	最小化救援成本	分散	10 个节点、4 辆应急车辆、 4 个事故点	使用 RO 模型转化不确定 参数约束

源需求的不确定性,因此,在构建考虑潜在事故的应急关键资源调度模型时,必须将交通状态时变特性纳入模型中,模拟调度中的潜在事故,进而构建调度场景,有望为考虑潜在事故的应急关键资源调度研究提供新的验证思路。此外,应急关键资源调度方案的动态生成与优化在解决潜在事故下的应急关键资源调度问题中展现了相当的优越性。

3.5.3 考虑多事故点与事故优先级的应急关键资源调度

考虑多事故点的应急关键资源调度问题多使用理想点法求解,理想点用来平衡多个调度需求。考虑事故优先级的应急关键资源调度大多遵循先事故、先调度的原则。事实上,首次发生的交通事故可能是轻微事故,因此,将事故严重程度纳入事故优先级判别对具有一定的研究价值。

3.5.4 考虑不确定性的应急关键资源调度

交通事故不可预测及交通状态的时变特性会带来不确定性问题,RO 模型可以将不确定参数约束转化为确定性约束,适应性较强。现有研究大多假设应急车辆在道路上行驶的速度是稳定且平均的,这将导致救援时间与实际情况的不匹配,考虑应急

车辆调度过程中车速的变化分布更符合实际。同时,恶劣天气对高速公路通行能力与车速有着显著影响,未来应考虑在建模环境中考虑恶劣天气影响的应急关键资源调度模型。此外,将应急关键资源调度与高速公路交通控制技术结合值得探索。近年来强化学习(Reinforcement Learning, RL)在动态规划中的优越性愈发明显,旨在求解 MDP 最优策略,可以解决关键资源调度中的不确定性问题,如事故信息的不完备、环境的动态变化,且可实现调度策略的动态生成,有望突破现有技术瓶颈,促进高速公路应急关键资源调度研究的进一步优化。

4 未来展望

(1)应急设施点选址方面:在应急设施点选址模型目标函数中加入相关影响因素会使模型更加贴近实际,例如研究应急设施点空间/经济交叉耦合影响,以建模多因素影响下的应急设施点选址问题;近似排队模型及 SP 模型可以在优化目标函数时纳入不确定因子,未来可深入研究;考虑将救援公平性及事故人员存活率作为选址模型优化目标,体现以人为本;考虑开发组合式求解算法,提升大规模应急设

施点选址模型求解精度与性能;针对中国高速公路“一路一公司”和属地管理的模式,应考虑从网络层级构建应急设施点选址模型,优化现有设施布局;随着多部门协调救援机制的健全及面向更高的救援需求,未来应从车辆层级开展路侧小型应急设施点及微型应急设施点的部署优化及有效性验证方法,提升应急关键资源调配的覆盖率与灵活性。

(2)应急关键资源配置方面:随着高速公路交通事故数据质量与数量的不断完善,考虑使用基于数据驱动的方法识别道路事故黑点,提升静态关键资源配置方案合理性;设备资源部署在高速公路路侧,具备可控制、响应快等特点,研究设备资源的部署位置、数量及其有效性验证方法有助于提升先期处置效率;动态规划算法可以纳入事故动态过程演变联系和特征,在解决动态应急关键资源配置问题上具有良好的性能,考虑在动态规划模型中纳入降维方法,提升大规模关键资源配置的求解效率与稳定性;针对交通事故早期信息不完善问题及事故动态演化机理,研究动态应急关键资源配置方案生成与调整方法;随着《2030 年可持续发展议程》的提出,将可持续发展理念与应急关键资源配置模型融合逐渐成为研究热点,可以考虑采用运作研究/管理科学方法定量刻画应急关键资源配置的可持续发展理念,选取可以反映可持续发展理念的指标,如配置过程中的资源冗余量、碳排放量等作为优化目标,构建基于效率+可持续发展绩效的多目标资源配置模型;融合静态与动态关键资源配置模型形成两阶段建模框架,提升应急关键资源利用率。

(3)应急关键资源调度方面:交通状态估计为应急关键资源调度的关键技术,深度学习算法、融合数据驱动与模型驱动的算法、物理知识神经网络等有望提高交通状态估计的准确率与可靠性;针对高速公路交通事故不可预测及交通状态时变特性带来的不确定性,具备滑动时间窗口的动态周期调度模型可以降低不确定性影响;将应急关键资源调度与高速公路交通管控技术结合提供了解决交通状态不确定性问题的新思路;深度强化学习具有求解速度快、模型泛化能力强的优势,在应急车辆实时路径规划求解方面可以深入探索;MARL 方法可以表征多智能体之间的竞合关系,使用 MARL 方法有望解决多事故点下关键资源调度的博弈问题;随着通信技术及智能交通系统的不断发展,混合交通流及智能网联汽车环境下的高速公路应急关键资源调度必将成为未来的研究热点之一;在此基础上,可松弛应急车

辆在道路上行驶速度是稳定且平均的假设,考虑应急车速的动态变化,增强调度模型的适应性。

(4)三者融合方面:高速公路场景下的选址、配置、调度一体化优化研究尚未开展,未来可以借助应急物流领域理论开展一体化优化模型研究,如整合设施选址与车辆路径的 LRP 及多层 LRP;结合双层规划理论与关键资源调度过程中的博弈行为,建立大规模、全过程的优化调配模型;三者融合后的模型复杂度会呈指数增加,未来一个重点研究方向是结合多个局部问题形成应急关键资源调配大系统,从大系统角度优化求解调配问题;构建高速公路交通事故应急案例规则,形成全场景、多要素应急知识库,使得应急关键资源调配有据可依;高速公路存在特殊场景(桥梁、山区、隧道等),随着多式联运的兴起,多式联救成为可能;研究构建多模式融合下的应急关键资源调配体系,完善面向特殊场景的陆海空天立体化的应急关键资源调配理论及验证方法必将成为未来研究热点之一。

参考文献:

References:

- [1] 杨惠敏,陈雨人,方守恩,等. 高速公路交通事故救援时间与生存率关系模型研究[J]. 交通信息与安全,2015,33(4):82-86.
YANG Hui-min, CHEN Yu-ren, FANG Shou-en, et al. A study of the relationship between rescue time and survival rate of traffic accidents on freeways using a Cox regression model[J]. Journal of Transport Information and Safety, 2015, 33(4): 82-86. (in Chinese)
- [2] PAL C, HIRAYAMA S, NARAHARI S, et al. An insight of World Health Organization (WHO) accident database by cluster analysis with self-organizing map (SOM)[J]. Traffic Injury Prevention, 2018, 19(S1): 15-20.
- [3] WANG Duo, YANG Kai, YANG Li-xing, et al. Distributional robustness and lateral transshipment for disaster relief logistics planning under demand ambiguity[J]. International Transactions in Operational Research, 2024, 31(3): 1736-1761.
- [4] PRODHON C, PRINS C. A survey of recent research on location-routing problems[J]. European Journal of Operational Research, 2014, 238(1): 1-17.
- [5] ARINGHIERI R, BRUNI M E, KHODAPARASTI S, et al. Emergency medical services and beyond: addressing new challenges through a wide literature review[J]. Computers and Operations Research, 2017, 78: 349-368.
- [6] DÖNMEZ Z, KARA B Y, KARSU Ö, et al. Humanitarian facility location under uncertainty: critical review and future prospects[J]. Omega, 2021, 102: 102393.
- [7] LIU Yang, YUAN Yun, SHEN Jie-yi, et al. Emergency response facility location in transportation networks: a

- literature review[J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 2021, 8(2): 153-169.
- [8] SHEN Jin-xing, LIU Kun, MA Chang-xi, et al. Bibliometric analysis and system review of vehicle routing optimization for emergency material distribution[J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 2022, 9(6): 893-911.
- [9] RAND G K. Methodological choices in depot location studies[J]. *Journal of the Operational Research Society*, 1976, 27(1): 241-249.
- [10] SALHI S, RAND G K. The effect of ignoring routes when locating depots[J]. *European Journal of Operational Research*, 1989, 39(2): 150-156.
- [11] BOLOORI ARABANI A, FARAHANI R Z. Facility location dynamics: an overview of classifications and applications[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2012, 62(1): 408-420.
- [12] IWAKATA M, OKAMOTO N, ISHIDA H, et al. A study of freight facility location in Tokyo Metropolitan and its future[J]. *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, 2015, 11: 722-738.
- [13] CELIK TURKOGLU D, EROL GENEVOIS M. A comparative survey of service facility location problems[J]. *Annals of Operations Research*, 2020, 292(1): 399-468.
- [14] ZHAO Ming, CHEN Qiu-wen, MA Jian, et al. Optimizing temporary rescue facility locations for large-scale urban environmental emergencies to improve public safety[J]. *Journal of Environmental Informatics*, 2017, 29(1): 61-73.
- [15] 田德红,何建敏,孙海信. 基于 Multi-Agent 的应急物资储存点布局优化研究[J]. *中国矿业大学学报(社会科学版)*, 2019, 21(1): 67-81.
- TIAN De-hong, HE Jian-min, SUN Hai-xin. Research on the optimal layout of emergency material storages based on multi-agent system[J]. *Journal of China University of Mining and Technology (Social Sciences)*, 2019, 21(1): 67-81. (in Chinese)
- [16] MLADINEO N, KNEZIC S, JAJAC N. Decision support system for emergency management on motorway networks[J]. *Transportmetrica*, 2011, 7(1): 45-62.
- [17] RODRIGUES L F, MORABITO R, CHIYOSHI F Y, et al. Towards hypercube queuing models for dispatch policies with priority in queue and partial backup[J]. *Computers and Operations Research*, 2017, 84: 92-105.
- [18] AKDOGAN M A, BAYINDIR Z P, IYIGUN C. Location analysis of emergency vehicles using an approximate queueing model[J]. *Transportation Research Procedia*, 2017, 22: 430-439.
- [19] CHANTA S, MAYORGA M E, KURZ M E, et al. The minimum p -envy location problem: a new model for equitable distribution of emergency resources[J]. *IIE Transactions on Healthcare Systems Engineering*, 2011, 1(2): 101-115.
- [20] TORO-DÍAZ H, MAYORGA M E, CHANTA S, et al. Joint location and dispatching decisions for emergency medical services[J]. *Computers and Industrial Engineering*, 2013, 64(4): 917-928.
- [21] TOREGAS C, SWAIN R, REVELLE C, et al. The location of emergency service facilities[J]. *Operations Research*, 1971, 19(6): 1363-1373.
- [22] ZOGRAFOS K G, NATHANAIL T, MICHALOPOULOS P. Analytical framework for minimizing freeway-incident response time[J]. *Journal of Transportation Engineering*, 1993, 119(4): 535-549.
- [23] TANSEL B C, FRANCIS R L, LOWE T J. State of the art-location on networks: a survey. Part: the p -center and p -median problems[J]. *Management Science*, 1983, 29(4): 482-497.
- [24] CHURCH R, REVELLE C. The maximal covering location problem[J]. *Papers of the Regional Science Association*, 1974, 32(1): 101-118.
- [25] NELAS J, DIAS J. Optimal emergency vehicles location: an approach considering the hierarchy and substitutability of resources[J]. *European Journal of Operational Research*, 2020, 287(2): 583-599.
- [26] ALSALLOUM O I, RAND G K. A goal-programming model applied to the EMS system at Riyadh City, Saudi Arabia[R]. Lancaster: Lancaster University, 2003.
- [27] ALSALLOUM O I, RAND G K. Extensions to emergency vehicle location models [J]. *Computers and Operations Research*, 2006, 33(9): 2725-2743.
- [28] LIU Yi, LI Zhong-zhi, LIU Jing-xian, et al. A double standard model for allocating limited emergency medical service vehicle resources ensuring service reliability[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2016, 69: 120-133.
- [29] 濮居一. 高速公路交通应急救援资源调配决策方法研究[D]. 南京: 东南大学, 2019.
- PU Ju-yi. Research on decision-making method of freeway traffic emergency rescue resource deployment[D]. Nanjing: Southeast University, 2019. (in Chinese)
- [30] 胡安兵. 基于遗传算法的高速公路应急站点选址模型及应用[J]. *交通信息与安全*, 2013, 31(5): 104-106, 111.
- HU An-bing. Freeway emergency location model and application using genetic algorithm[J]. *Journal of Transport Information and Safety*, 2013, 31(5): 104-106, 111. (in Chinese)
- [31] SHAVARANI S M. Multi-level facility location-allocation problem for post-disaster humanitarian relief distribution: a case study[J]. *Journal of Humanitarian Logistics and Supply Chain Management*, 2019, 9(1): 70-81.
- [32] DASKIN M S. A maximum expected covering location model: formulation, properties and heuristic solution[J]. *Transportation Science*, 1983, 17(1): 48-70.
- [33] REPEDE J F, BERNARDO J J. Developing and validating a decision support system for locating emergency medical vehicles in Louisville, Kentucky[J]. *European Journal of Operational Research*, 1994, 75(3): 567-581.

- [34] BHARSAKADE R S, KULKARNI O S. Analysis of and modeling for emergency medical services facility location for road accidents on highway[J]. *International Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development*, 2018, 8(1): 595-604.
- [35] YU De-jian, ZHOU De-qun, HE Xiao-rong. A weighted grey target theory-based strategy model for emergency facility location[C]//IEEE. 2009 IEEE International Conference on Grey Systems and Intelligent Services (GSIS). New York: IEEE, 2009: 1158-1162.
- [36] PARK H, SHAFABI A, HAGHANI A. A stochastic emergency response location model considering secondary incidents on freeways[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2016, 17(9): 2528-2540.
- [37] TAKEDA R A, WIDMER J A, MORABITO R. Analysis of ambulance decentralization in an urban emergency medical service using the hypercube queueing model[J]. *Computers and Operations Research*, 2007, 34(3): 727-741.
- [38] MENDONÇA F C, MORABITO R. Analysing emergency medical service ambulance deployment on a Brazilian highway using the hypercube model[J]. *Journal of the Operational Research Society*, 2001, 52(3): 261-270.
- [39] GEROLIMINIS N, KEPAPTSOGLU K, KARLAFTIS M G. A hybrid hypercube-genetic algorithm approach for deploying many emergency response mobile units in an urban network[J]. *European Journal of Operational Research*, 2011, 210(2): 287-300.
- [40] DAVOUDPOUR H, MORTAZ E, HOSSEINIJOUS S A. A new probabilistic coverage model for ambulances deployment with hypercube queueing approach[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2014, 70(5-8): 1157-1168.
- [41] WANG Qing-yi, NIE Xiao-feng. A stochastic programming model for emergency supply planning considering traffic congestion[J]. *IIE Transactions*, 2019, 51(8): 910-920.
- [42] NOGUEIRA L C, PINTO L R, SILVA P M S. Reducing emergency medical service response time via the reallocation of ambulance bases[J]. *Health Care Management Science*, 2016, 19(1): 31-42.
- [43] RAJAGOPALAN H K, SAYDAM C, XIAO J. A multiperiod set covering location model for dynamic redeployment of ambulances[J]. *Computers and Operations Research*, 2008, 35(3): 814-826.
- [44] GENDREAU M, LAPORTE G, SEMET F. The maximal expected coverage relocation problem for emergency vehicles[J]. *Journal of the Operational Research Society*, 2006, 57(1): 22-28.
- [45] 郭鹏辉, 朱建军, 王嵩华. 考虑异质物资合车运输的灾后救援选址-路径-配给优化[J]. *系统工程理论与实践*, 2019, 39(9): 2345-2360.
- GUO Peng-hui, ZHU Jian-jun, WANG He-hua. Location-routing-allocation problem with consolidated shipping of heterogeneous relief supplies in post-disaster rescue[J]. *Systems Engineering—Theory and Practice*, 2019, 39(9): 2345-2360. (in Chinese)
- [46] WANG Zheng, LENG Long-long, DING Jun-jie, et al. Study on location-allocation problem and algorithm for emergency supplies considering timeliness and fairness[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2023, 177: 109078.
- [47] ZENG Ling-tai, LIU Yu-gang, TANG Yu-tian, et al. Study of the dynamic location of emergency rescue facilities for urban bus considering rescue urgency[C]//IEEE. The 5th International Conference on Transportation Information and Safety. New York: IEEE, 2019: 868-874.
- [48] ESHGHI A A, TAVAKKOLI-MOGHADDAM R, EBRAHIMNEJADS, et al. Multi-objective robust mathematical modeling of emergency relief in disaster under uncertainty[J]. *Scientia Iranica*, 2022, 29(5): 2670-2695.
- [49] QI Ming-yao, YANG Ying, CHENG Chun. Location and inventory pre-positioning problem under uncertainty[J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2023, 177: 103236.
- [50] IANNONI A P, MORABITO R, SAYDAM C. A hypercube queueing model embedded into a genetic algorithm for ambulance deployment on highways[J]. *Annals of Operations Research*, 2008, 157(1): 207-224.
- [51] TAN Zhe-yi, ZHANG Qian, DENG Wei-liang, et al. A simulation-based optimization for deploying multiple kinds road rescue vehicles in urban road networks[J]. *Computers and Industrial Engineering*, 2023, 181: 109333.
- [52] ANGULO E, CASTILLO E, GARCÍA-RÓDENAS R, et al. A continuous bi-level model for the expansion of highway networks[J]. *Computers and operations research*, 2014, 41: 262-276.
- [53] SALMAN F S, YÜCEL E. Emergency facility location under random network damage: insights from the Istanbul case[J]. *Computers and Operations Research*, 2015, 62: 266-281.
- [54] BAŞAR A, ÇATAY B, ÜNLÜYURT T. A multi-period double coverage approach for locating the emergency medical service stations in Istanbul[J]. *Journal of the Operational Research Society*, 2011, 62(4): 627-637.
- [55] MRKELA L, STANIMIROVIĆ Z. A variable neighborhood search for the budget-constrained maximal covering location problem with customer preference ordering[J]. *Operational Research*, 2022, 22(5): 5913-5951.
- [56] BERESNEV V, MELNIKOV A. Exact method for the capacitated competitive facility location problem[J]. *Computers and Operations Research*, 2018, 95: 73-82.
- [57] PARRAGH S N, TRICOIRE F. Branch-and-bound for bi-objective integer programming[J]. *INFORMS Journal on Computing*, 2019, 31(4): 805-822.
- [58] ÁLVAREZ-MIRANDA E, FERNÁNDEZ E, LJUBIĆ I. The recoverable robust facility location problem[J]. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2015, 79:

- 93-120.
- [59] LIN Yun-hui, TIAN Qing-yun. Branch-and-cut approach based on generalized benders decomposition for facility location with limited choice rule[J]. *European Journal of Operational Research*, 2021, 293(1): 109-119.
- [60] ABOUNACER R, REKIK M, RENAUD J. An exact solution approach for multi-objective location-transportation problem for disaster response[J]. *Computers and Operations Research*, 2014, 41: 83-93.
- [61] HAMMAD A W A, AKBARNEZHAD A, REY D. Sustainable urban facility location: minimising noise pollution and network congestion[J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2017, 107: 38-59.
- [62] GENDRON B, KHUONG P V, SEMET F. A lagrangian-based branch-and-bound algorithm for the two-level uncapacitated facility location problem with single-assignment constraints[J]. *Transportation Science*, 2016, 50(4): 1286-1299.
- [63] OUYANG Chao, ANSARI R. Applying a hybrid particle swarm optimization-tabu search algorithm to a facility location case in Jakarta[J]. *Journal of Industrial and Production Engineering*, 2017, 34(3): 199-212.
- [64] XI Jian-feng, MU Kai, DING Tong-qiang, et al. A macroscopic and hierarchical location model of regional road traffic disaster relief material repository[J]. *Advances in Mechanical Engineering*, 2019, 11(1): 1-9.
- [65] JARAMILLO J H, BHADURY J, BATTA R. On the use of genetic algorithms to solve location problems[J]. *Computers and Operations Research*, 2002, 29(6): 761-779.
- [66] 马昌喜, 石褚巍, 杜波. 轴辐式应急救援网络规划[J]. *交通运输工程学报*, 2023, 23(3): 198-208.
- MA Chang-xi, SHI Chu-wei, DU Bo. Hub-and-spoke emergency rescue network planning[J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2023, 23(3): 198-208. (in Chinese)
- [67] AKYÜZ M H, ALTINELI K, ÖNCAN T. Location and allocation based branch and bound algorithms for the capacitated multi-facility Weber problem[J]. *Annals of Operations Research*, 2014, 222(1): 45-71.
- [68] YAN Song, WANG Jun-li, ZHU Yin. Road emergency events resources optimization and allocation model[J]. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2018, 392: 062128.
- [69] CHAI Gan, SUN Ying-ying, ZHU Cang-hui. Particle swarm optimization algorithm for emergency resource allocation on expressway[C]//ACM. *Proceedings of the first ACM/SIGEVO Summit on Genetic and Evolutionary Computation*. New York: ACM, 2009: 135-140.
- [70] TSAI Y, CHANG K W, YIANG G T, et al. Demand forecast and multi-objective ambulance allocation[J]. *International Journal of Pattern Recognition and Artificial Intelligence*, 2018, 32(7): 1859011.
- [71] LUAN Si-liang, YANG Qing-fang, WANG Wei, et al. Random regret-minimization model for emergency resource preallocation at freeway accident black spots[J]. *Journal of Advanced Transportation*, 2018, 2018: 3513058.
- [72] SU Dong-lan, GUO Zhong-yin, LI Zhi-yong, et al. Operation risk model and monitoring-warning system of expressway tunnels[J]. *Transportation Research Procedia*, 2016, 14: 1315-1324.
- [73] TAKANO K, KIRIHARA K, KAWAGUCHI K, et al. Highway facilities on the Joban expressway to contribute to the reconstruction of the Tohoku Region[C]//IEEE. *IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS)*. New York: IEEE, 2019: 1-5.
- [74] LIU Ming, LIN Tao, CHU Feng, et al. A new stochastic bi-level optimization model for post-disaster relief scheduling problem in sustainable Humanitarian supply chains with uncertain relief supplies and demands[J]. *IFAC PapersOnLine*, 2022, 55(10): 2481-2486.
- [75] AHMADI G, TAVAKKOLI-MOGHADDAM R, BABOLI A, et al. A decision support model for robust allocation and routing of search and rescue resources after earthquake: a case study[J]. *Operational Research*, 2022, 22(2): 1039-1081.
- [76] YAN Yuan-kun, KONG Yan, FU Zhang-jie. Dynamic resource scheduling in emergency environment[J]. *Journal of Information Hiding and Privacy Protection*, 2019, 1(3): 143-155.
- [77] 柴干, 赵倩, 黄琪, 等. 高速公路交通应急救援资源的配置[J]. *中国安全科学学报*, 2010, 20(1): 165-170.
- CHAI Gan, ZHAO Qian, HUANG Qi, et al. Allocation of emergency rescue resources for freeway traffic[J]. *China Safety Science Journal*, 2010, 20(1): 165-170. (in Chinese)
- [78] 濮居一, 柴干, 过秀成. 考虑救援路径拥挤状态的交通应急资源派遣方法[J]. *东南大学学报(自然科学版)*, 2018, 48(6): 1102-1107.
- PU Ju-yi, CHAI Gan, GUO Xiu-cheng. Dispatching method for traffic emergency resource considering congestion state of rescue route[J]. *Journal of Southeast University (Natural Science Edition)*, 2018, 48(6): 1102-1107. (in Chinese)
- [79] ZHANG Jiang-hua, LI Jin, LIU Zhi-ping. Multiple-resource and multiple-depot emergency response problem considering secondary disasters[J]. *Expert Systems with Applications*, 2012, 39(12): 11066-11071.
- [80] BOUYAHIA Z, HADDAD H, JABEUR N, et al. A two-stage road traffic congestion prediction and resource dispatching toward a self-organizing traffic control system[J]. *Personal and Ubiquitous Computing*, 2019, 23(5): 909-920.
- [81] PARK H, WADDELL D, HAGHANI A. Online optimization with look-ahead for freeway emergency vehicle dispatching considering availability[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2019, 109: 95-116.
- [82] CAO Ce-jun, LI Cong-dong, YANG Qin, et al. A novel multi-objective programming model of relief distribution for sustainable disaster supply chain in large-scale natural

- disasters[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 174: 1422-1435.
- [83] ZAREI M H, CARRASCO-GALLEGO G R, RONCHI S. On the role of regional hubs in the environmental sustainability of humanitarian supply chains[J]. *Sustainable Development*, 2019, 27(5): 846-859.
- [84] WANG Bo-chen, DENG Wei-liang, TAN Zhe-yi, et al. A two-stage stochastic optimization for disaster rescue resource distribution considering multiple disasters[J]. *Engineering Optimization*, 2024, 56(1): 1-17.
- [85] ZHANG Jiang-hua, LI Yu-chen, YU Guo-dong. Emergency relief network design under ambiguous demands: a distributionally robust optimization approach[J]. *Expert Systems with Applications*, 2022, 208: 118139.
- [86] 朱苍晖,李兴华,柴 干. 基于 agent 的高速公路救援车辆动态派遣方法[J]. *东南大学学报(自然科学版)*, 2011, 41(增): 68-73.
- ZHU Cang-hui, LI Xing-hua, CHAI Gan. Agent-based dynamic dispatch of traffic rescue vehicles in expressway network[J]. *Journal of Southeast University (Natural Science Edition)*, 2011, 41(S): 68-73. (in Chinese)
- [87] 李建斌. 高速公路突发事件紧急救援关键技术研究[D]. 西安:长安大学, 2012.
- LI Jian-bin. Research on key technology of freeway incident emergency respond[D]. Xi'an: Chang'an University, 2012. (in Chinese)
- [88] DIJKSTRA E W. A note on two problems in connexion with graphs[J]. *Numerische Mathematik*, 1959, 1(1): 269-271.
- [89] BELLMAN R. On a routing problem[J]. *Quarterly of Applied Mathematics*, 1958, 16(1): 87-90.
- [90] HART P E, NILSSON N J, RAPHAEL B. A formal basis for the heuristic determination of minimum cost paths[J]. *IEEE Transactions on Systems Science and Cybernetics*, 1968, 4(2): 100-107.
- [91] HAMDI S, PRIHANDOKO P. Analisis algoritma Dijkstra dan algoritma Bellman-Ford sebagai penentuan jalur terpendek menuju lokasi kebakaran (studi kasus: Kecamatan Praya Kota)[J]. *Energy-Jurnal Ilmiah Ilmu-Ilmu Teknik*, 2018, 8(1): 26-32.
- [92] SHI Liu-hong, YANG Bin. An emergency routing model based on fuzzy road connectivity[C]//IEEE. 2011 IEEE International Conference on Computer Science and Automation Engineering. New York: IEEE, 2011: 465-469.
- [93] KIRONO S, ARIFANTO M I, PUTRA R E, et al. Graph-based modeling and Dijkstra algorithm for searching vehicle routes on highways[J]. *International Journal of Mechanical Engineering and Technology*, 2018, 9(8): 1273-1280.
- [94] YAO Jiao, DAI Ya-xuan, NI Yi-ling, et al. Deep characteristics analysis on travel time of emergency traffic[J]. *International Journal of Computational Science and Engineering*, 2020, 22(1): 162-169.
- [95] WEI Xiao-ge, WEI Lyu, SONG Wei-guo. Rescue route reselection model and algorithm for the unexpected accident[J]. *Procedia Engineering*, 2013, 62: 532-537.
- [96] YANG Di, YANG Shun-xin, JIN Yu-heng, et al. Design of deploying expressway incident response trucks in regional expressway networks: a case study in Shanxi Province[C]//ASCE. 15th COTA International Conference of Transportation Professionals. Reston: ASCE, 2015: 2135-2145.
- [97] ZHAO Mu-hua, LIU Jian, HU Xiao-jian. A path selection method for traffic accident emergency rescue on expressway network[C]//IEEE. Proceedings of 2011 International Conference on Transportation, Mechanical, and Electrical Engineering. New York: IEEE, 2011: 1861-1866.
- [98] ALVAREZ P, LERGA I, SERRANO-HERNANDEZ A, et al. The impact of traffic congestion when optimising delivery routes in real time. A case study in Spain[J]. *International Journal of Logistics Research and Applications*, 2018, 21(5): 529-541.
- [99] WEN Hui-ying, WU Jia-bin, DUAN Yu-chen, et al. A methodology of timing co-evolutionary path optimization for accident emergency rescue considering future environmental uncertainty[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 131459-131472.
- [100] LI Jing-quan, MIRCHANDANI P B, BORENSTEIN D. A Lagrangian heuristic for the real-time vehicle rescheduling problem[J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2009, 45(3): 419-433.
- [101] NIU Yu-xin. A novel model and GA-based solution for resource scheduling in highway emergency rescue[C]//Atlantis Press. Proceedings of the 2018 7th International Conference on Energy, Environment and Sustainable Development. Dordrecht: Atlantis Press, 2018: 1549-1553.
- [102] ZHAO Jian-dong, GUO Yu-jie, DUAN Xiao-hong. Dynamic path planning of emergency vehicles based on travel time prediction[J]. *Journal of Advanced Transportation*, 2017, 2017: 9184891.
- [103] HE Feng, HE Rui-chun, SUN Sheng-nan, et al. Research on the model of emergency fire rescue vehicle routing selection and resource allocation[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2014, 641/642: 824-828.
- [104] GHANNADPOUR S F, NOORI S, TAVAKKOLI-MOGHADDAM R, et al. A multi-objective dynamic vehicle routing problem with fuzzy time windows: model, solution and application[J]. *Applied Soft Computing*, 2014, 14: 504-527.
- [105] YAMADA T. A network flow approach to a city emergency evacuation planning[J]. *International Journal of Systems Science*, 1996, 27(10): 931-936.
- [106] NANNICINI G, DELLING D, SCHULTES D, et al. Bidirectional A* search on time-dependent road networks[J]. *Networks*, 2012, 59(2): 240-251.
- [107] ZHAO Jian-dong, DUAN Xiao-hong. A novel particle swarm optimization algorithm for solving the shortest path problem in highway network[J]. *Advances in Transportation Studies*, 2015, 4(2): 97-106.

- [108] 赵 扬,王 雷,赵秋红.考虑时间延误的高速公路应急救援模型研究[J].系统科学与数学,2020,40(5):844-856.
ZHAO Yang, WANG Lei, ZHANG Qiu-hong. Study on emergency rescue model of expressway with time delay[J]. Journal of Systems Science and Mathematical Sciences, 2020, 40(5): 844-856. (in Chinese)
- [109] ZHOU Ya-wen, LIU Jing, ZHANG Yu-tong, et al. A multi-objective evolutionary algorithm for multi-period dynamic emergency resource scheduling problems[J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2017, 99: 77-95.
- [110] TIAN Guang-dong, FATHOLLAHI-FARD A M, REN Ya-ping, et al. Multi-objective scheduling of priority-based rescue vehicles to extinguish forest fires using a multi-objective discrete gravitational search algorithm[J]. Information Sciences, 2022, 608: 578-596.
- [111] WAN Meng-ran, YE Chun-ming, PENG Da-jiang. Multi-period dynamic multi-objective emergency material distribution model under uncertain demand[J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2023, 117: 105530.
- [112] ZHU Cang-hui, LI Xing-hua, CHAI Gan. The optimization approach for traffic rescue resource dispatch on expressway based on fuzzy programming[C]//CAO Bing-yuan, WANG Guo-jun, GUO Si-zong, et al. Fuzzy Information and Engineering 2010: Volume I. Berlin: Springer, 2010: 313-326.
- [113] CHAI Gan, WANG Xi-ying, GUO Jian-hua. Optimized dispatch of expressway block removal and rescue resources based on genetic algorithms[C]//ASCE. International Conference on Transportation Information and Safety. Reston: ASCE, 2011: 802-815.
- [114] CHAI Gan, CAO Jin-de, HUANG Wei, et al. Optimized traffic emergency resource scheduling using time varying rescue route travel time[J]. Neurocomputing, 2018, 275: 1567-1575.
- [115] PU Ju-yi, GUO Xiu-cheng, CHAI Gan, et al. Emergency rescue resource dispatch of expressway based on potential accidents and GA: case study of Henan, China[J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 409/410: 1262-1268.
- [116] 龚 静.多事故点救援车辆综合派遣问题研究[J].交通与运输, 2014,30(1):199-202.
GONG Jing. Research on the rescue vehicle consolidated dispatching of multiple accident points[J]. Traffic and Transportation, 2014, 30(1): 199-202. (in Chinese)
- [117] DUAN Xiao-hong, NIU Tian-yong, HUANG Qi. An improved shuffled frog leaping algorithm and its application in dynamic emergency vehicle dispatching[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2018, 2018: 7896926.
- [118] LI Yan-rong, LI Xiao-yong, HOU Li-yang, et al. A multi-objective emergency resource scheduling method based on MOEA/D[C]//ACM. Proceedings of the 2019 2nd International Conference on Algorithms, Computing and Artificial Intelligence. New York: ACM, 2019: 219-224.
- [119] WANG Wei, HUANG Li, GUO Zhao-xia. Optimization of emergency material dispatch from multiple depot locations to multiple disaster sites[J]. Sustainability, 2017, 9(11): 1978-1985.
- [120] XU Sheng, XU Zhou-hua, LIU Yi. Optimal dispatch of oil spill resources considering resource priority[C]//IEEE. 2016 IEEE International Conference on Intelligent Transportation Engineering. New York: IEEE, 2016: 76-79.
- [121] 刘 波,李 砚.应急物资车辆调度的鲁棒双层优化模型[J].系统工程,2016,34(5):77-81.
LIU Bo, LI Yan. Robust bilevel optimization model for vehicle routing of emergency commodities[J]. Systems Engineering, 2016, 34(5): 77-81. (in Chinese)
- [122] SUN Hua-li, WANG Yang, XUE Yao-feng. A bi-objective robust optimization model for disaster response planning under uncertainties[J]. Computers and Industrial Engineering, 2021, 155: 107213.
- [123] AKBARPOUR M, ALI TORABI S A, GHAVAMIFAR A. Designing an integrated pharmaceutical relief chain network under demand uncertainty[J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2020, 136: 101867.
- [124] WANG Wei, WANG Shuai-an, ZHEN Lu, et al. EMS location-allocation problem under uncertainties [J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2022, 168: 102945.
- [125] TANG Zhao-ping, QIN Jin, SUN Jian-ping. Railway emergency resource dispatching optimization based on fuzzy satisfaction degree under the priority principle[J]. Journal of Intelligent and Fuzzy Systems, 2017, 33(5): 2677-2686.
- [126] ZHOU Ya-wen, LIU Jing. A multi-agent genetic algorithm for multi-period emergency resource scheduling problems in uncertain traffic network[C]//IEEE. 2017 IEEE Congress on Evolutionary Computation. New York: IEEE, 2017: 43-50.
- [127] ZHANG Jiang-hua, LONG Daniel-zhuoyu, LI Yu-chen. A reliable emergency logistics network for COVID-19 considering the uncertain time-varying demands[J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2023, 172: 103087.
- [128] ADARANG H, BOZORGI-AMIRI A, KHALILI-DAMGHANI K, et al. A robust bi-objective location-routing model for providing emergency medical services[J]. Journal of Humanitarian Logistics and Supply Chain Management, 2020, 10(3): 285-319.