

山区公路隧道应急救援资源优化模型研究

付立家¹, 李彬旗², 刘林², 杨杼¹

(1. 招商局重庆交通科研设计院有限公司, 重庆 400067; 2. 重庆交通大学交通运输学院, 重庆 400074)

摘要: 针对山区公路隧道在应急救援资源量配置中存在的随意性和盲目性问题, 深入研究应急救援资源配置的原则, 提出一种针对山区公路隧道网络的资源配置优化模型。该模型通过对路网进行抽象和建模, 有效地布局了应急救援点, 并引入分阶段协作策略, 以优化应急救援资源的配置, 不仅关注了如何高效利用有限的救援资源, 还着重考虑了实际操作的可行性和效果。通过实例验证, 该模型展现出良好的实用性和可操作性, 可为山区公路隧道应急救援工作提供科学依据和有效工具。

关键词: 综合交通运输; 山区公路; 救援资源; 配置优化模型

中图分类号: U492.8 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-1807(2025)15-0074-07

山区高速公路地域地形地貌及气象条件复杂, 限制安全运营的因素众多, 桥隧比例大, 危险路段行车安全风险倍增, 再加上山区常年多雾、雨雪天气频繁, 路面湿滑、能见度低, 给驾驶员带来了额外的挑战, 长大纵坡、地质病害等危险路段叠加造成行车安全风险, 对应急救援要求高^[1]。

当前, 公路隧道的应急救援配置方案普遍存在随意性和盲目性^[2], 这直接或间接影响了救援效果。研究表明, 在事故发生后, 能否迅速开展救援行动直接影响到伤亡人数的多少。在交通事故中, 如果重伤员能够在 30 min 内得到救助, 存活率可高达 80%; 而在 60 min 内, 存活率降至 40%; 超过 90 min 后仅为 10%^[3]。由于山区高速公路地形复杂、交通不便, 救援响应时间普遍较长, 影响了救援的效果。在构建救援配置模型时, 需综合考虑物资成本、响应时间以及各救援点的物资容量, 以实现资源的最优配置^[4]。这种优化不仅能提升救援效率, 还能有效控制应急开支。因此, 实施山地高速公路抢险救灾力量配置的标准化和规范化具有重大理论与实践意义。

1 应急救援资源配置需求分析

1.1 应急救援资源配置需求

在应急管理中, 应急救援资源配置不仅是基础与保障, 更是确保有效利用资源以应对突发事件的关键。由于山区公路隧道事故的突发性, 应急救援

需要在很短的时间内明确应急方案并进行快速的物资调配, 突发事件发生后再制定应急方案, 往往会错失救援的最佳时机^[5]。山区公路隧道通常地理位置偏僻, 交通条件复杂, 突发事件(如交通事故、自然灾害、火灾等)具有不确定性和突发性。由于山区环境特殊, 救援行动往往面临道路受限、通信中断等困难。合理的应急资源配置是确保救援过程顺利进展的关键。过度配置可能造成资源浪费, 而配置不足则会延误救援时机, 导致人员伤亡和财产损失的增加。因此, 必须根据隧道的具体特点, 提前做好应急资源和力量的合理配置, 确保一旦发生突发事件, 能够迅速响应、有效应对^[6]。这能够使资源配置更加有针对性, 从而确保在突发事件发生时, 各项救援资源能够迅速到位, 以最大限度地减轻事故影响和损失。

在配置应急救援力量之前, 必须进行全面的分析^[7]。山区公路隧道应急救援需求分析包括: 综合评估各类需求, 结合隧道实际和历史数据, 确定资源配置方案。精准分析确保救援资源合理分布, 提升应急响应速度和效率, 助力规划和决策。在这一阶段, 关键的工作是根据高速公路隧道段的实际情况和历史数据, 提出相应的应急救援资源配置需求^[3]。这不仅涵盖了物资的数量和种类, 还需要考虑救援人员的专业技能和设备的配置。通过这一系统的需求分析, 可以为后续的资源配置提供科学

收稿日期: 2024-12-16

作者简介: 付立家(1980—), 男, 吉林珲春人, 硕士, 正高级工程师, 研究方向为智能交通、交通安全; 通信作者李彬旗(2001—), 男, 山西长治人, 硕士研究生, 研究方向为交通运输; 刘林(2001—), 男, 新疆昌吉人, 硕士研究生, 研究方向为交通运输; 杨杼(1989—), 男, 重庆人, 硕士, 高级工程师, 研究方向为智能交通、交通安全。

依据,从而提高应急响应的整体效率和效果。

1.2 应急救援资源配置需求分析内容

1.2.1 山区高速公路应急资源配置方案现状分析

目前,山区高速公路的应急资源分配是按照行政区域来进行的^[8],保证各个地区都可以对本地区的应急救援资源进行有效的管理和调配。

各行政区域负责本区域内的资源管理,以提升响应能力。同时,设立一个中央监控中心负责整体监督,并在各行政区域内设立多个监控分中心,实时监控高速公路状况和应急响应,确保信息的快速传递与资源的高效利用。这些分中心负责实时监测道路状况,并协调救援资源的调度。在各区域内设有排障分中心和路政分中心,分别负责现场清理和执法协调。这种分工使得应急处理更高效。同时,各分中心配备交警、养护人员及急救设备,确保在事故发生时能迅速提供支持和救助。

救护资源与消防资源分配方式见表1。

表1 救护和消防资源分配方式

资源	分配方式
救护资源	城市120救护系统:城市120救护系统是一个高效的急救网络,负责在城市范围内提供快速医疗服务 ^[7]
	高速公路应急救援站:高速公路公司通过协作和组建方式,在高速公路出入口和服务区建立应急救援站
	高速公路服务区:服务区不仅提供休息和补给的功能,也是急救资源的重要位置
	乡镇医院通过与高速公路管理部门的合作,能够有效扩展急救资源的覆盖范围
消防资源	在119城市消防系统的基础之上,进行统一调度以及救援 ^[9]
	配备含有多种功能的消防器材,确保在突发事件中能迅速响应。设立应急救援点,配置足够的救援车辆,以满足突发事件的保障需求。定期进行资源测试和演练,以提升应急响应能力,确保破拆和灭火等救援行动高效实施
	建立专门的消防队伍,负责隧道内的日常巡查和突发事件的应急响应

1.2.2 应急资源配置需求分析

根据应急管理要求与目标,结合山区公路隧道可利用的应急资源如消防救护等,对山区公路隧道区段应急救援力量配置根据相应的需求进行分析分配。

(1)各个救援部门义务责任以及建立的应急救援体系。明确各救援部门在高速公路突发事件中的具体职责,包括交通管理部门负责现场指挥与道路封闭、医疗救护队伍提供紧急医疗服务、消防部门负责火灾和救援等。建立层级分明的应急救援管理体制,确保各部门之间的信息共享和指挥协

调,提升应急响应的整体效率和一致性^[10]。

(2)科学的资源调配与配置方法。根据事故类型和规模,评估资源需求,运用运筹学中的优化模型制定资源调配策略。结合历史数据和实时监测信息,动态调整资源配置,确保人力、设备和物资的有效使用。同时,考虑不同突发事件的特点,制定针对性的资源分配方案,以应对多种可能的紧急情况,且易受外界因素影响,因此面临着多种潜在风险^[11]。

(3)应急资源的布局。合理规划应急资源的布局,包括设置快速反应的资源站点和临时指挥中心,确保在事故发生时资源能迅速到达。制定科学的交通疏散方案,通过标识、信号灯调整和交通人员引导,减少交通拥堵,提高救援效率,保障公众安全。

(4)建立评估与反馈机制。建立应急救援后的评估与反馈机制,对每次突发事件的响应过程进行总结与分析。收集各方意见和建议,评估资源配置的有效性和应急响应效率,为今后的资源配置和管理改进提供数据支持,以持续提升应急救援能力。

2 应急救援资源布局模型

在应急管理中,资源的合理配置对于提升救援响应效率至关重要。根据成本约束、时间约束和资源约束,需要构建应急资源布局模型,确保救援团队能够在最短的时间内及时抵达事故现场。在山区公路和隧道群区段等复杂地形中,路段分析单元的设置有助于优化救援资源布局。

通过构建0~1数学规划模型,可以设定目标函数^[12],以最小化救援响应时间,同时考虑资源配置约束,使得应急效益最大化。各个参数的含义和参数值将影响整个模型的运算结果,合理的参数设置能够显著节约成本,提高应急管理效益。

针对当前山区公路隧道建立一个合理可行的力量分配模型,主要工作包括确定总目标建立相应的关系函数、设定约束条件、选择合适的应急资源,明确对应的参数以及数值的确定。

2.1 路网的抽象表达

在建立合适的应急资源配置模型时,首先对现有的山区公路路网进行抽象化表示^[13]。考虑到建立新的应急资源站点耗费大量人力物力,本文侧重于利用现有消防站、医疗中心和警力配备等单位作为应急资源的配置来源,旨在通过优化配置,提升救援效率和响应速度,确保突发事件得到及时处置。

将现有的山区公路路网进行描述,采取以下方法,把现有的应急资源点和应急需求点抽象为网络节点^[14],把各个节点之间的路段抽象为弧,通过该方法表示路网。定义为 $G(P, Y)$, P 为网络节点集合, Y 为弧集。其他的定义如下。

(1) 设 A 为应急资源配置点的集合,其中包含 m 个应急资源配置点,应急资源点表示为 $A_i (i=1, 2, \dots, m)$ 。

(2) 因为不同路段对应的权重各不相同,根据分离式路基的布局对现有山区公路网进行路段划分(图 1)。以 G65 高速公路水武路段为例,把 3 个横向连接划分为独立的路段,其余路段按照隧道和桥梁划分成不同的区段。该集合为 B , 其中 $B_j (j=1, 2, \dots, n)$ 代表区域路网中的第 j 个路段。

(3) V_j 表示路网中各路段的危险度 ($j \in N$)。对于正在运营的高速公路,可以用一段时间的事故率来表示其危险程度,这里需要统计一段时间内发生的交通事故数量。因为不同的交通事故会带来不同的危害程度,为了方便比较,需要确定统一的度量,这里选择将事故数换算成标准事故数来计算^[15]。

$$V_j = \frac{P_j}{Q_j} \quad (1)$$

$$P_j = \sum_{s=1}^z \theta_s P_{js} \quad (2)$$

式中: P_j 为路段 j 发生的标准交通事故数; Q_j 为路段 j 发生的标准交通量; P_{js} 为 j 路段出现 s 级交通事故的数量; θ_s 为事故 s 级的加权数,伤亡人数、经济损失等均与其有关; s 为事故等级序号; z 为事故分级数。

对于还未正式运营的高速公路,根据高速公路的实际的行车条件和现有的道路环境来计算其危险程度,公式为

$$V_j = V_0 K_j^1 K_j^2 K_j^3 \quad (3)$$

式中: V_0 为危险程度一般的高速公路; K_j^1 为道路线形修正系数; K_j^2 为当前路段安全设施修正系数; K_j^3

为高速公路环境修正系数。 $K_j^1 K_j^2 K_j^3 \geq 0$ 。

(4) 用 q_j 表示路网中各路段对应的权重值, $j \in N, 0 \leq q_j \leq 1, \sum_{j=1}^n q_j = 1$ 。由于高速公路各路段的条件差异显著,不同路段的行车条件、车辆运行情况以及交通设施配置各不相同,导致其安全性也存在差异。因为这些差异,事故的分布并不均匀,安全性较差的路段往往是事故多发点。针对不同路段的危险性,可分配相应的权重,权重越大代表路段的危险性越高,从而在资源调配时予以重点关注和处理。 q_j 的计算公式为

$$q_j = \frac{V_j}{\sum_{j=1}^n V_j} \quad (4)$$

(5) 用 α_j 表示一个路段上的交通时间的环境限制权重, $j \in N$ 。通过对环境状况的分析发现,从应急物资点到需求点所需的时间是有限的。在以隧道为需求点的山区公路隧道段,其桥隧比大,且采用分离式路基进行单向通行,造成行车耗时长。为此,有必要对道路网络中的各种限制条件赋予对应的限制权值,以体现它们的作用。

(6) 用 β_j 描述道路网络对交通时间的信息限制权重, $j \in N$ 。通过对以上信息约束条件的分析可以看出,在实施紧急救灾过程中,由于各路段的通信设施的不同,造成了不同的信息资源获取时间上的差异,而如果不及时将会造成应急资源从资源点向需求点的延迟。所以,有必要对每个路段的限制权值进行加权表达。因此,需要用权重 β_j 来表示各路段在这一方面的约束权重值。

2.2 应急救援点布局模型构建

结合目标比选理论,本文目标函数设定为达到最好的应急效益。这意味着在满足各种应急资源约束条件的情况下,所选的应急资源配置结果应能取得最大的经济和社会效益^[16]。根据式(5),上述问题可以转化为以下数学模型:

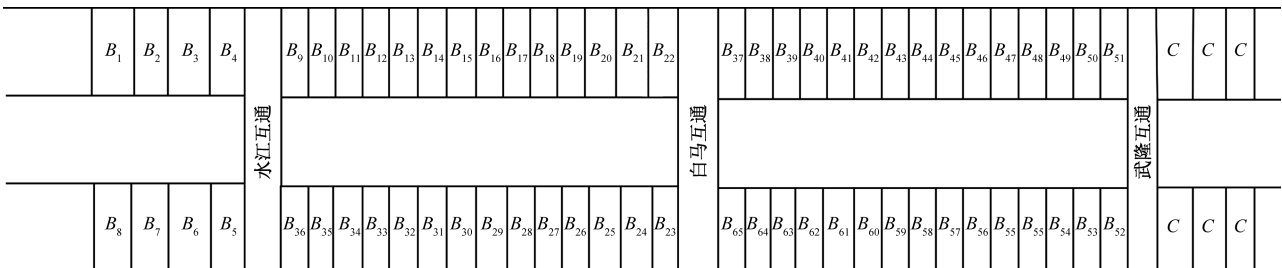


图 1 山区公路隧道路网段划分

$$\begin{cases} \max f[A_1, A_2, \dots, A_m] = \sum_{j=1}^n R[q_j] \alpha_j \beta_j B_j \\ \sum_{i=1}^m c_i A_i \leq C \\ A_i = \{1, 0\} \\ B_j = \{0, 1\} \\ i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n \end{cases} \quad (5)$$

式中: f 为目标函数,这里指的是应急资源配置优化模型所要达到的目标,即实现最大的经济和社会效益; R 为应急救援点的集合; c_i 为第*i*个应急资源点的资源量; C 为应急总资源量,也就是应急资源总量的约束条件。

本模型所建立的选址布局模型能满足各种紧急情况下的应急资源限制与分散目标布局问题,并通过穷举方法求解此类问题。但随着权重的增加,算法的复杂性和计算量也越来越大。可采用最大综合效益(单位应急资源成本所能带来的综合效益)来衡量。

3 应急救援资源配置优化模型

随着山区高速公路路网的基本形成,如果继续为各条公路配置不同的应急救援资源,将会造成资源的闲置和浪费。所以,在突发事件中,要充分发挥网络中各个救援点之间的协同作用,对救援资源进行最优分配^[6]。

在给定的高速公路网络中,已经获取了救援资源的布置地点,根据交通事故发生的历史数据进行分析,可识别出事故多发区,即潜在事故发生点^[7]。这些事故点划分到最近的救援配置点管理范围内,以便快速响应。事故处理分为两个阶段:第1阶段由最近的配置点应急响应,但需保留部分资源以应对其他可能的事故;第2阶段由远端配置点提供额外资源支持,同时确保其自身区域的应急能力。通过协作调度,优化救援资源分配,缩短响应时间并提高资源利用效率。

3.1 分布协作式应急救援资源配置优化模型

在此模型基础上,结合交通网络的实际情况,对交通网络中的紧急救援点进行定位。在研究分布式协同应急救灾能力优化问题时,假定每个高速公路上都有一个以上的救灾资源点,并且在这个地区中,可以设置多个可供救援的资源点并设定该区域内的救援资源,配置点总数为*n*个,则配置的资源点的集合*S*可表示为*S* = {*S_i* | *i* = 1, 2, ..., *n*} , 设为 *S₁*, *S₂*, ..., *S_n* ; 在路网中潜在的事故点有 *m* 个, 综合考虑各节点与其所承担的事件点之间的联系, 可以将事故点的集合表示 *A* = {*A_i* | *i* = 1, 2, ..., *n*;

j = 1, 2, ..., *m*} 。

模型中出现的符号定义如下: R_i 为配置点*S_i*拥有的资源总数; Q_i^j 为事故发生地*A_i*需要的资源总数; q_i^j 为配置点*S_i*在第1阶段向事故发生地*A_i*派出的资源数; q_k^j 为配置点*S_k*向事故发生地*A_i*派出的第2阶段需求资源数($k = 1, 2, \dots, n, k \neq i$); p 为满足潜在事故发生地资源需求的概率, $p \in [0, 1]$; e_k^j 为配置点*S_k*是否在二阶段向事故发生地*A_i*派出救援资源,若派出,则 $e_k^j = 1$,若不派出,则 $e_k^j = 0$ 。

在上述设定的变量中, R_i 为巨册变量,对于不同的配置点而言, R_i 有可能取多个不同的值; Q_i^j 、 q_i^j 、 q_k^j 的取值与突发事件的类型、等级及事故发生地的交通运行状况有关,可根据事故发生地*A_i*所处路段的历史事故数据分时间段统计分析得到。 p 用来表征潜在事故发生地对救援资源需求的紧急性,如果潜在事故发生点发生的交通事故比较小,为一般事故或者轻微事故,对救援资源的需求不是很紧急, p 的取值就较小;如果潜在事故发生地发生的交通事故非常严重,说明事故急需救援资源,此时 p 的取值较大。

应急救援资源调配优化模型以保障突发事件点对救灾资源的需要为前提,分两个阶段进行资源调配,使得道路网络上的救灾资源总量达到最少。而每一位位置点所需的应急救援力量,应至少应满足目前发生的交通事故现场对救灾资源的需求,以及以一定概率 p 满足其他可能发生的突发事件的救灾物资需求的总和。

以路网内应急救援资源最小为目标,构建一个分布协作应急救援资源配置优化模型,如式(6)~式(11)所示。其中式(6)为目标函数,表示山区公路应急总资源最少;式(7)~式(11)为约束条件。

$$Z = \min \sum_{i=1}^n R_i \quad (6)$$

$$q_i^j + \sum_{k=1, k \neq i}^n e_k^j q_k^j \geq Q_i^j,$$

$$i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m_i \quad (7)$$

$$q_i^j + p q_i^h \leq R_i,$$

$$i = 1, 2, \dots, n; j, h = 1, 2, \dots, m_i; j \neq h \quad (8)$$

$$e_k^j q_k^j + q_k^t \leq R_k,$$

$$k = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m_i; t = 1, 2, \dots, m_k \quad (9)$$

$$\sum_{k=1, k \neq i}^n e_k^j,$$

$$i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m_i \quad (10)$$

$$e_k^i = 0, 1,$$

$$i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m_k \quad (11)$$

式(7)表示在资源容量限制下,各突发事件点接收的总应急物资不少于事故现场的物资需求。式(8)表示资源量限制下,各配置节点所具有的总资源既要满足已发生的交通事故,又要保证其他可能出现的事故点的救援资源。式(9)表示对于资源量限制,指出了当第 2 期事故发生时,各资源配置点在将第 2 期资源供给给已发生交通事故的情况下,还应能满足该区域内再次发生交通事故时所需的资源量。式(10)、式(11)为式(6)的系数约束,在应急救援中,只需两个布置点就能满足应急救援的要求。

3.2 案例分析

一个具有 5 条高速公路的地区高速公路网络,5 条高速公路分别为 G2 京沪高速、G42 沪蓉高速、G25 长深高速、G40 沪陕高速、S1 南京绕城高速。各快速路各设 1 个应急物资调配点,南京应急调配中心、镇江应急调配站、无锡应急救援中心、扬州应急响应点、常州应急调配中心分别由 P1、P2、P3、P4、P5 表示。假定道路网络中存在 10 个可能发生交通事故的地点,这些地点由 A1、A2、A3、A4、A5、A6、A7、A8、A9、A10 来表示。图 2 为事故现场和紧急救助配置点的位置示意图。潜在事故发生点两阶段资源需求见表 2。事故发生概率见表 3。

通过 MATLAB 进行优化求解后得到应急资源配置结果,见表 4~表 6。优化前后对比如图 3 所示。通过优化,资源总量由 750 降低到 600,降低了 20%。其中 P1、P2、P3、P4、P5 配置点的资源分配分别减少了 25%、20%、25%、20%、11%。

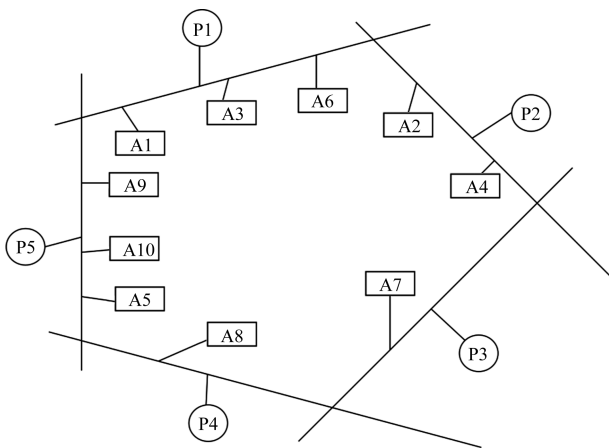


图 2 事故发生地与应急救援配置点之间位置关系

表 2 潜在事故发生点两阶段资源需求

事故点	第 1 阶段需求	第 2 阶段需求	所需总资源
A1	50	40	90
A2	30	30	60
A3	60	20	80
A4	40	50	90
A5	70	30	100
A6	50	40	90
A7	30	20	50
A8	40	30	70
A9	60	50	110
A10	70	60	130

表 3 事故发生概率

事故点	事故发生概率	事故点	事故发生概率
A1	0.10	A6	0.10
A2	0.05	A7	0.05
A3	0.20	A8	0.30
A4	0.15	A9	0.20
A5	0.25	A10	0.15

表 4 分布协作式应急救援资源配置结果

配置点	分配的救援资源	配置点	分配的救援资源
P1	150	P4	80
P2	120	P5	160
P3	90	总量	600

表 5 各应急救援资源配置点二阶段参与救援情况

事故点	P1	P2	P3	P4	P5
A1	1	0	0	0	1
A2	0	1	0	0	0
A3	1	0	1	0	0
A4	0	1	0	1	0
A5	0	0	0	0	1
A6	1	0	0	1	0
A7	0	0	1	1	0
A8	1	0	1	0	1
A9	0	1	0	1	1
A10	1	0	0	1	1

表 6 未进行分步协作式应急救援资源配置结果

配置点	分配的救援资源数量	配置点	分配的救援资源数量
P1	200	P4	100
P2	150	P5	180
P3	120	总量	750

4 经典案例分析

4.1 案例背景

2010 年 5 月 12 日,中国四川省汶川县发生了 7.9 级强烈地震,震中附近的山区受灾严重。由于地形复杂、交通和通信设施损坏,灾区与外界的联系非常困难,救援队伍的部署和物资的运输面临巨大的挑战。地震发生后,如何迅速调动和部署救援资源以最快速度到达灾区,成为一个紧迫的问题。

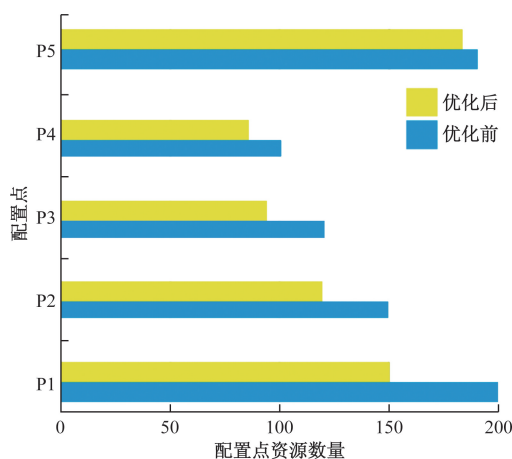


图3 应急救援资源优化前后对比

4.2 优化作用

在这种灾难性事件中,数学优化模型可以在多个维度上发挥作用。

(1)资源调度优化。数学优化模型帮助确定不同类型的救援资源(如医疗队、消防队、警察等)应如何调度。模型根据灾区的位置、受灾程度和资源可用性,自动计算出最优的资源调配方案,减少资源浪费,保证每一支队伍都能在最短的时间内到达最需要的地方。

(2)路径规划优化。四川地震发生的地区大多地处山区,交通网络严重受损,传统的最短路径算法(如Dijkstra算法)难以满足实际需求。优化模型可以根据实时交通情况、道路损坏程度等信息,调整路径规划,避免选择已经无法通行的道路,确保救援队伍选择最佳通行路线。

(3)应急响应时间最小化。在复杂地形条件下,救援队伍的响应时间直接关系到灾区人民的生死^[17]。优化模型可以帮助识别事故高风险区域,优先将资源配置到最急需救援的地方,并自动计算最短路径,从而有效缩短响应时间。

(4)动态调度和调整。由于地震后的灾区环境变化多端,交通状况、资源的可用性也随时变化。优化模型可以进行实时更新,基于新获取的数据信息进行动态调整,确保救援行动始终高效、及时。

4.3 模型优化的实际应用

在四川地震后,优化模型主要涉及以下几个方面的实际应用。

(1)救援资源的最优部署。四川省内有多个消防队、医疗站、应急仓库等资源分布。优化模型通过考虑交通网络、灾区密度和资源需求,计算出每个基地应派遣多少人力和物资,确保每个灾区都能

及时获得救援。

(2)路径和交通网络的实时更新。模型通过动态监控交通状况(如道路封闭、交通事故等),实时更新路线图,避免队伍选择已损坏的道路。救援人员根据新的交通信息选择最佳路线,从而缩短到达灾区的时间。

(3)多目标优化。在灾后紧急情况下,除了缩短响应时间,优化模型还考虑其他目标,如资源成本、风险规避等。通过多目标优化,模型可以平衡救援时间和成本,避免在确保速度的同时浪费过多资源。

(4)模拟与预测。除了传统的路径规划,优化模型还可以基于历史数据和灾情预判,模拟不同情况下的救援效果。例如,通过预测不同救援路径的运输时间、车辆通行能力等,优化模型可以提前进行模拟,选择最优的预防措施。

4.4 优化意义

(1)减少灾后生还者的等待时间。在四川地震后,优化模型帮助紧急调用了救援资源,确保了迅速到达灾区的医疗团队、搜救队伍和救援物资。通过减少响应时间^[18],救援队伍能在第一时间赶到灾区,从而大大减少了生还者的等待时间,为更多的生命争取到了宝贵的时间。

(2)提高资源的使用效率。四川地震灾区的地理环境复杂,救援资源有限。优化模型帮助调度中心精确计算各个救援单位的需求和资源可用性,从而确保每一份资源都得到最大化利用。例如,模型会优先将重伤员急救资源调配到伤员最为集中的地方,避免资源的重复和浪费。

(3)确保有限资源的最大化效益。在灾区,有限的救援人员和物资必须在极短的时间内分配到最关键的地方。优化模型能够自动分析灾情的重度,确定哪些区域最需要优先救援,并在时间和空间上进行最合理的资源配置。这样不仅能提高救援效率,还能确保灾民的基本生存需求得到满足。

(4)科学决策支持。在实际的应急管理中,决策者往往面临信息不完全、环境复杂等挑战。通过优化模型,决策者可以获得基于数据的最优解决方案,避免凭经验和直觉做出错误的决策,从而提高决策的科学性和可靠性。

(5)增强应急响应的灵活性。由于四川地震后的道路受损严重,救援资源的进出受到限制,传统的调度方式难以适应快速变化的情况。通过优化模型,系统可以实时根据最新的地形、路况和灾情

进行动态调度,保证救援队伍和物资能够灵活调整路线和部署,从而最大化应急响应的适应性。

5 结论

构建了山区公路隧道应急救援力量优化配置模型,旨在提高救援效率和减少响应时间。通过综合考虑地形、气候及事故类型,提出了合理的救援生命财产安全资源布局方案。研究表明,科学的资源配置能有效提升救援效果,保障全。尽管模型具有理论适用性,但实际应用中仍需结合具体数据进行验证,并根据地区差异进行调整。未来研究可探索智能化资源调配技术,以实现更灵活的应急响应。研究成果为山区公路隧道的应急救援提供了重要的理论依据和实践指导,助力提升安全运营水平。

参考文献

- [1] 罗晶,周阳,胥松. 山区高速公路隧道智慧一体化管控平台的设计与实现[J]. 公路交通技术, 2024, 40(4): 183-186, 193.
- [2] 欧军歌. 应急救援行动的安全链[J]. 现代职业安全, 2021(1): 93-95.
- [3] 闫鹏,杨帅,张强. 航空应急救援专业化力量建设的战略性思考(中): 我国航空应急救援面临的形势[J]. 中国减灾, 2019(3): 32-33.
- [4] 脱蕊. 面向突发公共卫生事件下区域应急物资分配研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2024.
- [5] 刘成国,陈富强. 浅谈处置高速公路隧道火灾首要解决的三个问题[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2017, 37(21): 135-137.
- [6] 孙兰兰,张轩轩. 供应链信息溢出视角下客户 CVC 对供需长鞭效应的影响研究[J/OL]. 系统工程理论与实践, 1-23[2024-11-28]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2267.N.20250425.1508.002.html>.
- [7] 杨村. 山区公路应急救援力量配置优化模型研究[J]. 中小企业管理与科技(上旬刊), 2016(4): 50-53.
- [8] 任喜荣,樊英. 突发事件信息机制碎片化的多元整合[J]. 广西社会科学, 2021(4): 114-120.
- [9] 郑辉,余志华. 消防监督管理中存在的问题及应对措施研究[J]. 今日消防, 2023, 8(6): 60-62.
- [10] 夏一雪,郭其云,杨隽,等. 我国古代公共危机应急救援的历史经验与有益启示[J]. 学术论坛, 2012, 35(7): 55-60.
- [11] 曹虎朋. 基于 SDN 和网络切片的确定性网络资源分配机制的研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2024.
- [12] 冒朝静. 山区高速公路分离式路段突发事件应急管理资源配置研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2013.
- [13] 张岚,董宝田,寇淋淋,等. 基于三角模糊数的城市轨道交通应急救援中心不确定性选址研究[J]. 铁道学报, 2022, 44(10): 17-23.
- [14] 高明瑶,石红国. 基于改进点-弧模型的铁路网车流径路优化模型研究[J]. 铁道运输与经济, 2020, 42(7): 40-44.
- [15] 崔汗星,赵启兰,宋光,等. 考虑路网动态性的危险品运输风险评估方法研究[J]. 北京交通大学学报(社会科学版), 2025, 24(1): 63-74.
- [16] 瞿波,李鑫,项兴尧,等. 考虑网络重构的微电网并/离网协同调度策略研究[J]. 电气传动, 2025, 55(2): 48-58.
- [17] 郑屹桐,谢昊阳. 资源有限的跨区域应急物资联合调度[J]. 综合运输, 2023, 45(12): 48-54.
- [18] 张国富,崔晨曦,苏兆品,等. 基于多智能体强化学习的路网抢修与物资配送集成优化[J/OL]. 控制理论与应用, 1-9[2024-11-28]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/44.1240.TP.20250424.1614.052.html>.

Research on the Optimization Model of Emergency Rescue Resources for Mountainous Highway Tunnels

FU Lijia¹, LI Binqi², LIU Lin², YANG Xun¹

(1. China Merchants Chongqing Communications Technology Research Institute Co., Ltd., Chongqing 400067, China;

2. School of Transportation, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: In order to address the issues of arbitrariness and blindness in emergency rescue force allocation for mountainous highway tunnels, the principles of emergency response resource allocation was studied, and an optimized resource allocation model specifically tailored for mountainous highway tunnel networks was proposed. By abstracting and modeling the road network, this model effectively positions emergency response points and introduces a phased collaboration strategy to optimize the deployment of emergency rescue forces, which not only focuses on efficiently utilizing limited rescue resources but also emphasizes the feasibility and effectiveness of practical operations. Through case study validation, this model demonstrates robust practicality and operability, it can provide a scientific basis and effective tool for emergency rescue efforts in mountainous highway tunnels.

Keywords: integrated transport; mountain highway; rescue power; optimality model for allocation