

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2016.09.021

# 高速公路分阶段协作应急资源调度模型

于福莹, 宋之杰, 崔冬初

(燕山大学 经济管理学院, 河北 秦皇岛 066004)

**摘要:** 根据高速公路交通事件应急救援目标, 在假设救援资源配置点固定的前提下, 首先, 对高速公路区域路网进行网络化抽象处理, 以区域路网内救援资源配置总量最小为目标函数, 进行了应急资源的配置优化。然后, 以应急响应时间最小为目标, 同时满足事故点应急资源的最大需求, 建立了分阶段协作救援资源调度模型; 最后, 利用LINGO软件和MATLAB软件进行了实例求解分析。结果表明: 经过优化后, 各配置点的资源配置量和路网的总资源配置量均有明显的降低, 总资源量降低了36%; 分阶段协作应急资源调度模型有助于应急资源的合理调度。

**关键词:** 交通工程; 应急资源; 分阶段协作; 配置优化; 响应时间

中图分类号: U491

文献标识码: A

文章编号: 1002-0268(2016)09-0136-05

## A Model for Expressway Emergency Resource Scheduling Based on Phased Collaboration

YU Fu-ying, SONG Zhi-jie, CUI Dong-chu

(School of Economics and Management, Yanshan University, Qinhuangdao Hebei 066004, China)

**Abstract:** According to the goal of expressway traffic incident emergency rescue, under the assumption that rescue resources configuration points is fixed, the regional expressway network is processed by networked abstraction at first. Taking the minimum of the total rescue resources configuration in regional network as the objective function, the emergency resource configuration is optimized. Then, the emergency resource scheduling model based on phased collaboration is built with the goal of minimum emergency response time and meeting the biggest emergency resource need of accident points. Finally, the example is solved and analyzed by applying LINGO and MATLAB software. The result shows that (1) the resource configuration amounts of each configuration point and road network are significantly lower after optimization, the Total resource allocation amount is reduced by 36%; (2) the proposed model contributes to reasonable scheduling of emergency resources.

**Key words:** traffic engineering; emergency resource; phased collaboration; configuration optimization; response time

## 0 引言

目前, 我国高速公路的应急管理体系并不完善。国外研究表明, 事故后的紧急救援对于人员伤亡的减少至关重要。随着救援响应时间的不断延长, 人员伤亡情况会愈加严重<sup>[1]</sup>。因此, 如何进行资源的配置和调度已成为研究的关键。

针对应急救援资源的配置和调度方法, 国内外做了大量研究。Mock等<sup>[2]</sup>提出了应急管理知识模型并成功应用于西班牙水灾救援管理。Lord等<sup>[3]</sup>综合考虑中心点和中位点, 给出了双目标函数及算法。Ukkusuri<sup>[4]</sup>提出了灾前供应资源点选址模型, 目标是使至少一个资源覆盖需求点的概率最大化。Barbarosoglu<sup>[5]</sup>为了解决物资的供需不平衡问题, 提

收稿日期: 2015-12-17

基金项目: 河北省科学技术研究与发计划软科学研究项目(144576136D), 河北省自然科学基金项目(G2014203230)

作者简介: 于福莹(1976-), 女, 吉林长春人, 副研究员。(yufuying2000@163.com)

出了多种类货物、多运输方式两阶段网络流模型。Sayyady 等<sup>[6]</sup>建立了混合整数线性规划模型, 以寻找非预知灾害情况下的居民最优疏散路径。Ziliaskopoulos 等<sup>[7]</sup>使用线性规划模型解决应急疏散与救援组合问题, 实现了总行程时间加权值最短。田依林<sup>[8]</sup>利用 AHP 法结合模糊决策理论构建了应急资源选址模型。杜柯等<sup>[9]</sup>提出了应急资源首次配置与调度的单事故指派模型和调度最短时间响应指派模型。潘郁等<sup>[10]</sup>建立了多目标应急资源调度数学模型。柴干等<sup>[11]</sup>构建了高速公路交通应急救援资源配置随机模型, 并通过研究模型的参数选择、求解和配置结果建立了完整的应急资源配置方案。张玲<sup>[12]</sup>考虑多个受灾点同时需要资源和灾害的不确定性, 建立了多资源点-多需求点多目标规划模型。以上模型均将动态信息完整、可靠作为前提条件, 其理论价值大于实际效果。

本文对高速公路路网进行抽象网络化处理, 充分考虑事故不同阶段路网内各资源配置点资源之间的协作, 分别以资源配置总量和响应时间最小为目标, 构建应急资源配置优化模型和分阶段协作应急资源调度模型, 并进行实例验证。

## 1 问题描述

应急救援调度是在应急资源配置的基础上完成的, 是高速公路交通事件应急处理的关键。在高速公路区域路网中某路段或多个路段发生交通事故时, 可能由于事件检测技术或信息采集设备的不完善造成事件信息与需求不充分, 进行首次资源调度之后还要根据交通事故的实际情况进行多次资源调度。因此在进行应急资源的调度时应该充分考虑路网内多个资源配置点的协作, 保证资源调度的及时有效。

## 2 模型构建

### 2.1 路网抽象化处理

为了简化高速公路路网, 需要对其进行网络化处理。假设救援资源配置点位置已知, 综合分析交通事故历史数据, 将事故多发点作为潜在事故点, 即应急救援点, 按照就近原则将其划分到各救援配置点管理范围, 以事故多发点、事故黑点为质心。资源配置点是路网内的服务区、交通管理中心、养排中心等; 网络节点则是各资源配置点、收费站、枢纽站等。将各节点用弧连接, 完成高速公路路网的抽象化处理。

事故的处理过程分为两个阶段, 第 1 阶段由最

近的救援资源配置点提供资源, 第 2 阶段由其他救援资源配置点提供, 通过多个配置点的协作降低事故响应时间, 使整个路网救援资源总数最小。

### 2.2 应急资源配置优化模型

假设路网内每条高速公路至少有 1 个资源配置点, 区域内共有  $m$  个配置点, 则配置点集合  $R$  可表示为  $R = \{R_i | i = 1, 2, \dots, m\}$ ; 共有  $n$  个潜在事故点。由于潜在事故点与资源配置点具有对应关系, 事故点集合  $P$  可表示为  $P = \{P_i^j | i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n\}$ 。

以高速公路区域路网内救援资源配置总量最小为目标, 构建应急救援资源配置优化模型。

$$Z = \min \sum_{i=1}^m S_i, \quad (1)$$

$$\text{s. t. } k_i^j + \sum_{l=1, l \neq i}^m x_l^j k_l^j \geq K_i^j \\ (i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n_i), \quad (2)$$

$$k_i^j + p k_i^f \leq S_i (i = 1, 2, \dots, m; j, f = 1, 2, \dots, n_i, j \neq f), \quad (3)$$

$$x_l^j k_l^j + k_l^v \leq S_l \\ (l = 1, 2, \dots, m, l \neq i; j = 1, 2, \dots, n_i; v = 1, 2, \dots, n_l), \quad (4)$$

$$\sum_{l=1, l \neq i}^m x_l^j = 1 (i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n_i), \quad (5)$$

$$x_l^j = 0, 1 (i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n_i), \quad (6)$$

式中,  $Z$  为优化目标, 表示路网中应急资源配置总量;  $S_i$  为决策变量, 表示配置点  $R_i$  拥有的资源;  $k_i^j$  和  $k_i^f$  分别为第 1 阶段配置点  $R_i$  向事故点  $P_i^j$  和  $P_i^f$  派出的资源;  $k_l^j$  和  $k_l^v$  分别为第 2 阶段配置点  $R_l$  向事故点  $P_i^j$  和  $P_i^v$  派出的资源;  $S_l$  表示配置点  $l$  拥有的资源;  $K_i^j$  为事故点  $P_i^j$  需要的资源;  $p$  为潜在事故点对资源需求的紧急程度,  $p \in [0, 1]$ , 事故愈严重, 其值愈大;  $x_l^j$  为第 2 阶段  $R_l$  是否向  $P_i^j$  派出救援资源,  $x_l^j = 1$  表示派出,  $x_l^j = 0$  表示不派出。

式 (1) 为目标函数, 表示高速公路区域路网内救援资源配置总数最小。式 (2) 至式 (4) 为资源数量约束, 式 (2) 表示每个事故点接收到的资源数量总和不小于需求量; 式 (3) 表示每个配置点拥有的资源总量不仅能满足已经发生的交通事故第 1 阶段对救援资源的需求, 还要满足其他潜在事故点的需求; 式 (4) 表示每个配置点在提供第 2 阶段的需求资源后, 还必须能够满足管辖范围内发生另一起交通事故时第 1 阶段需要的资源量。

式(5)、(6)为式(1)的系数约束,表示仅需要两个配置点派出资源即可满足事故救援需求的前提条件。

### 2.3 分阶段协作应急救援资源调度模型

高速公路区域路网内资源配置点的集合为  $R = \{R_i \mid i = 1, 2, \dots, m\}$ , 位置固定。假设发生  $n$  起交通事故, 事故发生地用  $j$  来表示, 则事故点集合可表示为  $P = \{P_j \mid j = 1, 2, \dots, n\}$ 。

构建分阶段协作应急救援资源调度模型如下。

$$Z = \min \left\{ \sum_{j=1}^n [g_j(0) + \sum_{h=1}^N s_j(h)] - \sum_{h=0}^N \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m q_{ij}(h) + \sum_{j=1}^n [s_j(h) - \sum_{i=1}^m q_{ij}(h)] + \sum_{h=0}^N \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m (h + r_{ij} T_{ij}) \right\}, \quad (7)$$

$$\text{s. t. } \sum_{j=1}^n q_{ij}(h) \leq k_i(h-1) - \sum_j q_{ij}(h-1) \quad (i = 1, 2, \dots, m; h = 0, 1, 2, \dots, N), \quad (8)$$

$$r_{ij} = \begin{cases} 1 & P(T_{ij} < T_0^y) \geq 0.8 \\ 0 & P(T_{ij} < T_0^y) < 0.8 \end{cases}, \quad (9)$$

式中,  $Z$  为应急响应时间;  $g_j(0)$  为首次向交通事故发生地  $j$  调度的资源;  $s_j(h)$  为  $h$  时刻向交通事故发生地  $j$  提供的补充资源;  $N$  为救援资源调度时段数量, 根据事故严重程度结合历史经验数据确定;  $P$  为概率值;  $q_{ij}(h)$  为  $h$  时刻资源配置点  $i$  向事故发生地  $j$  调度的资源, 为大于零的整数;  $k_i(h)$  为资源配置点  $i$  在  $h$  时刻能提供的资源, 为大于零的整数;  $T_{ij}$  为资源配置点  $i$  到事故发生地  $j$  的行程时间;  $r_{ij}$  为交通状态调节系数;  $T_0^y$  为平均行程时间历史数据。式(7)为目标函数, 表示应急响应时间最小; 式(8)~式(9)表示资源配置点向各事故发生地提供的资源数不能高于其资源总数。

## 3 实例验证与分析

### 3.1 配置优化模型验证

以高速公路 G22, G15, G1511, G25 部分路段组成的区域路网为实例进行验证。假设每条高速公路上有 1 个资源配置点, 潜在的事故点共有 9 个。资源配置点与潜在事故点的位置关系如图 1 所示。

分析历史救援数据, 得出潜在事故点救援过程中各阶段资源需求, 如表 1 所示。由历史事故等级情况, 确定概率  $P$  的取值为 0.5。

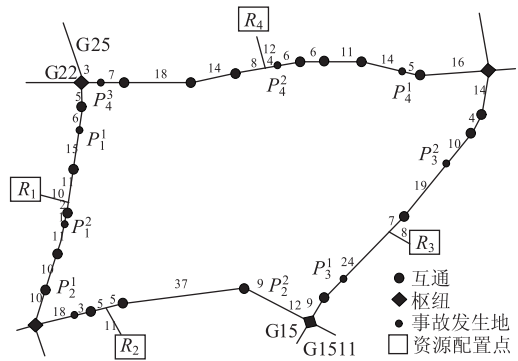


图 1 资源配置点与潜在事故点位置图

Fig. 1 Location of resource allocation points and potential accident points

表 1 事故发生地资源需求

Tab. 1 Resource demand of accident points

资源配置点	事故点	第 1 阶段	第 2 阶段	资源需求量
$R_1$	$P_1^1$	30	40	70
$R_1$	$P_2^1$	30	20	50
$R_2$	$P_1^2$	20	40	60
$R_2$	$P_2^2$	40	30	70
$R_3$	$P_1^3$	50	60	110
$R_3$	$P_2^3$	60	30	90
$R_4$	$P_1^4$	30	40	70
$R_4$	$P_2^4$	60	30	90
$R_4$	$P_3^4$	50	50	100

将表 1 中数据代入模型中, 采用 LINGO 软件求解目标函数值结果, 如表 2 所示。

表 2 应急资源配置优化结果

Tab. 2 Optimization result of emergency resource configuration

资源配置点	资源配置量
$R_1$	$S_1 = 50$
$R_2$	$S_2 = 45$
$R_3$	$S_3 = 115$
$R_4$	$S_4 = 130$
总配置数	$Z = 340$

资源配置点在事故处理第 2 阶段是否派出救援资源情况如表 3 所示。其中“1”代表派出; “0”代表不派出。

表 3 资源配置点第 2 阶段派出资源情况

Tab. 3 Resource sending from resource configuration points in second stage

资源配置点	事故点								
	$P_4^3$	$P_1^1$	$P_1^2$	$P_2^2$	$P_3^1$	$P_3^2$	$P_4^1$	$P_4^2$	
$R_1$	0	0	1	0	0	0	0	0	
$R_2$	0	0	0	0	0	0	0	0	
$R_3$	0	1	0	0	0	0	1	1	
$R_4$	1	0	0	1	1	1	0	0	

若不采用资源配置优化, 即配置点只负责所在路段事故的应急救援, 资源配置量由式 (10) 求得:

$$S'_i = \max(k_i^j + pk_i^f) \quad (j, f = 1, 2, \dots, n, j \neq f, i = 1, 2, \dots, n) \quad (9)$$

未进行优化的资源配置量如表4所示。

表4 未进行配置优化的资源配置量

Tab. 4 Resource configuration amounts before optimization

资源配置点	资源配置量
$R_1$	$S'_1 = 95$
$R_2$	$S'_2 = 100$
$R_3$	$S'_3 = 155$
$R_4$	$S'_4 = 180$
总配置数	$Z' = 530$

图2为应急资源配置优化前后对比, 可以看出, 各配置点的资源配置经过优化后都有所降低, 配置点1和2降低得较明显, 分别为47%和55%; 配置点3和4的资源数量分别降低26%和28%。资源总量降低36%, 说明配置优化具有明显作用, 节约了资源, 避免了浪费。

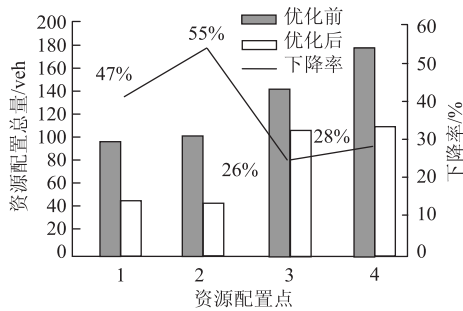


图2 应急资源配置优化前后对比

Fig. 2 Comparison of emergency resource configuration before and after optimization

### 3.2 分阶段协作调度模型验证

假设路网内发生4起交通事故, 有4个资源配置点提供救援资源。从资源配置点到事故发生点的行程时间  $T_{ij}$  如表5所示, 各资源配置点初始状态拥有的资源数量如表7所示, 各交通事故发生地首次调度和补充调度需要的资源数量如表6和表7所示。

表5 资源配置点到事故发生点的行程时间

Tab. 5 Travel time from configuration points to accident points

资源配置点	事故发生点			
	$P_1$	$P_2$	$P_3$	$P_4$
$R_1$	11	19	6	9
$R_2$	8	16	11	17
$R_3$	14	6	12	10
$R_4$	15	21	13	17

表6 交通事故发生点的首次调度车辆数 (单位: veh)

Tab. 6 First scheduling demanded vehicles of accident points (unit: veh)

事故发生点			
$P_1$	$P_2$	$P_3$	$P_4$
20	15	70	80

表7 交通事故点不同时刻调度需求车辆数 (单位: veh)

Tab. 7 Scheduling demanded vehicles of accident points in different time (unit: veh)

资源需求	h 时刻							
	1	2	3	4	5	6	7	8
$s_1(h)$	0	0	0	10	0	0	10	0
$s_2(h)$	0	0	0	0	20	0	0	0
$s_3(h)$	0	0	0	0	20	30	0	0
$s_4(h)$	0	0	0	0	0	10	0	20

利用本文构建的分阶段协作应急资源调度模型, 充分考虑事故严重程度和资源配置点配置的资源数量, 利用 Matlab 软件编程求解, 结果如表8所示。

表8 应急资源调度方案

Tab. 8 Emergency resource scheduling schemes

$q_{ij}(0)$	$P_1$	$P_2$	$P_3$	$P_4$	$q_{ij}(1)$	$P_1$	$P_2$	$P_3$	$P_4$
$R_1$	20	0	0	0	$R_1$	0	0	0	0
$R_2$	0	15	0	0	$R_2$	0	0	0	0
$R_3$	0	0	70	0	$R_3$	0	0	0	0
$R_4$	0	0	0	80	$R_4$	0	0	0	0
$q_{ij}(2)$	$P_1$	$P_2$	$P_3$	$P_4$	$q_{ij}(3)$	$P_1$	$P_2$	$P_3$	$P_4$
$R_1$	0	0	0	0	$R_1$	0	0	0	0
$R_2$	0	0	0	0	$R_2$	0	0	0	0
$R_3$	0	0	0	0	$R_3$	0	0	0	0
$R_4$	0	0	0	0	$R_4$	0	0	0	0
$q_{ij}(4)$	$P_1$	$P_2$	$P_3$	$P_4$	$q_{ij}(5)$	$P_1$	$P_2$	$P_3$	$P_4$
$R_1$	10	0	0	0	$R_1$	0	0	0	0
$R_2$	0	0	0	0	$R_2$	0	0	0	0
$R_3$	0	0	0	0	$R_3$	0	20	0	0
$R_4$	0	0	0	0	$R_4$	0	0	20	0
$q_{ij}(6)$	$P_1$	$P_2$	$P_3$	$P_4$	$q_{ij}(7)$	$P_1$	$P_2$	$P_3$	$P_4$
$R_1$	0	0	0	0	$R_1$	10	0	0	0
$R_2$	0	0	0	0	$R_2$	0	0	0	0
$R_3$	0	0	10	0	$R_3$	0	0	0	0
$R_4$	0	0	20	10	$R_4$	0	0	0	0
$q_{ij}(8)$	$P_1$	$P_2$	$P_3$	$P_4$					
$R_1$	0	0	0	0					
$R_2$	0	0	0	20					
$R_3$	0	0	0	0					
$R_4$	0	0	0	0					

求解过程如下:

Step 1: 根据各事故发生地救援资源首次调度需

求  $g_i(0)$  和  $h$  时刻调度需求  $s_j(h)$ , 求得事故发生地  $j$  的  $h$  时刻资源需求量;

Step 2: 计算资源配置点在  $h$  时刻所提供的救援资源数量  $k_i(h)$ ;

Step 3: 将资源配置点  $i$  到事故发生地  $j$  的行程时间  $T_{ij}$  等相关数据代入模型及约束条件中, 计算不同时刻从资源配置点  $i$  到事故发生点  $j$  的救援资源调度数量  $q_{ij}(h)$ 。

#### 4 结论

高速公路救援资源的配置和调度是应急救援的重要部分。优化资源配置, 可以节约资源, 避免浪费; 分阶段资源调度, 可以提高救援效率, 降低救援成本。本文主要完成了以下工作:

(1) 对高速公路路网进行了抽象化处理, 以资源配置总量最小为目标, 构建了应急资源配置优化模型。(2) 提出了分阶段协作资源调度模型。(3) 利用 LINGO 和 MATLAB 软件进行了模型的验证和实例分析, 结果表明, 本文的模型可以通过 5 个有效时段的配送完成 4 次交通事件环境应急救援资源的配置工作, 具有一定的可实施性和实用性。

#### 参考文献:

#### References:

- [1] BERTINI R L, ROSE M W. Using Archived ATMS Data for the Performance Evaluation of a Freeway Incident Response Program [C] // Proceedings of the 7th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems. [S. l.]: IEEE, 2004.
- [2] MOCK C N, GLOYD S, ADJEI S, et al. Economic Consequences of Injury and Resulting Family Coping Strategies in Ghana [J]. Accident Analysis and Prevention, 2003, 35 (1): 81-90.
- [3] LORD D, WASHINGTON S P, IVAN J N. Poisson, Poisson-gamma and Zero-inflated Regression Models of Motor Vehicle Crashes: Balancing Statistical Fit and Theory [J]. Accident Analysis and Prevention, 2005, 37 (1): 35-46.
- [4] UKKUSURI S V, YUSHIMITO W F. Location Routing Approach for the Humanitarian Prepositioning Problem [J]. Transportation Research Record, 2008, 2089: 18-25.
- [5] BARBAROSOGLU G, ARDA Y. A Two-stage Stochastic Programming Framework for Transportation Planning in Disaster Response [J]. Journal of the Operational Research Society, 2004, 55 (1): 43-53.
- [6] SAYYADY F, EKSIIOGLU S D. Optimizing the Use of Public Transit System during No-notice Evacuation of Urban Areas [J]. Computers & Industrial Engineering, 2010, 59 (4): 488-495.
- [7] ZILIASKOPOULOS A K. A Linear Programming Model for the Single Destination System Optimum Dynamic Traffic Assignment Problem [J]. Transportation Science, 2000, 34 (1): 37-49.
- [8] 田依林, 杨青. 突发事件应急能力评价指标体系建模研究 [J]. 应用基础与工程科学学报, 2008, 16 (2): 200-208.  
TIAN Yi-lin, YANG Qing. Study of the Evaluation Index System Model of the Emergency Capability on Emergency [J]. Journal of Basic Science & Engineering, 2008, 16 (2): 200-208.
- [9] 杜柯, 高曙, 陈先桥, 等. 高速公路应急资源动态调度系统研究与实现 [J]. 武汉理工大学学报: 交通科学与工程版, 2013, 37 (2): 330-333.  
DU Ke, GAO Shu, CHEN Xian-qiao, et al. Research and Implementation of Emergency Resources Dynamic Scheduling System for Highway [J]. Journal of Wuhan University of Technology: Transportation Science & Engineering Edition, 2013, 37 (2): 330-333.
- [10] 孙文圃, 许金良, 刘文君. 交通环境对高速公路运营安全性影响综合评价 [J]. 公路交通科技, 2014, 31 (12): 124-131.  
SUN Wen-pu, XU Jin-liang, LIU Wen-jun. Comprehensive Evaluation of Effect of Traffic Environment on Expressway Traffic Operational Safety [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2014, 31 (12): 124-131.
- [11] 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. Allocation of Emergency Rescue Resources for Freeway Traffic [J]. China Safety Science Journal, 2010, 20 (1): 165-170.
- [12] 刘文峰, 李斌, 郝亮. 智能交通技术在改善道路交通安全中的潜在优势 [J]. 公路交通科技, 2012, 29 (增1): 121-124.  
LIU Wen-feng, LI bin, HAO Liang. Potential Advantages of Intelligent Transport Technologies in Improving Road Safety [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2012, 29 (S1): 121-124.