

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.2020.04.022

## 考虑震后道路抢修的多目标应急调度模型\*

田晓勇<sup>1</sup>, 冯延超<sup>1</sup>, 陈亮<sup>1,2</sup>, 李奇男<sup>3</sup>, 王京京<sup>1</sup>, 崔洪军<sup>1,2</sup>

(1. 河北工业大学土木与交通学院, 天津 300401; 2. 天津市绿色交通工程材料技术中心, 天津 300401;  
3. 中国人民解放军空军 95169 部队, 广西 南宁 530031)

**摘要:** 为保证救援物资及时、合理地配送至受灾区, 将道路抢修情况纳入应急调度优化问题中, 引出可变路网结构的概念, 基于此情形, 考虑受损路段抢修及抢修时间, 对车辆运输时间进行修正; 以平均车辆运输时间和系统物资未满足度最小化为目标, 建立基于灾害抢修的应急调度优化模型; 结合改进的最短路 Dijkstra 算法, 设计第二代非支配排序遗传算法(NSGA-II)进行求解。最后以“九寨沟地震”作为算例, 与传统模型方案进行比较, 验证模型和算法的有效性, 为决策者制定应急调度方案和实施提供依据和支持。

**关键词:** 自然灾害; 应急物资调度; NSGA-II; 多目标优化; 道路抢修

**中图分类号:** U492.22; F252 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2020)04-0664-09

## Multi Objective Emergency Dispatching Model Considering Post-earthquake Road Repair

TIAN Xiaoyong<sup>1</sup>, FENG Yanchao<sup>1</sup>, CHEN Liang<sup>1,2</sup>, LI Qinan<sup>3</sup>, WANG Jingjing<sup>1</sup>,  
CUI Hongjun<sup>1,2</sup>

(1. School of Civil and Transportation Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China;

2. Green Traffic Engineering Materials Technology Center of Tianjin, Tianjin 300401, China;

3. Unit 95169 of the People's Liberation Army of China, Nanning 530031, China)

**Abstract:** In order to ensure timely and reasonable delivery of relief materials to the affected areas, road repairs are included in the emergency dispatch optimization problem, and the concept of variable road network structure is defined. Considering the repair and repair time of the damaged road sections, vehicle transportation time is corrected. Using the average vehicle transportation time and system material unsatisfied degree as objective functions, an emergency scheduling optimization model based on post-disaster road rehabilitation is proposed. Combining with the shortest path Dijkstra algorithm, the Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm-II(NSGA-II) is designed to solve the proposed model. Finally, taking the “Jiuzhaigou earthquake” as an example, the validity of the model and algorithm is verified by comparing with the traditional scheme model. This study provides the basis and support for the formulation and implementation of emergency scheduling scheme.

**Keywords:** natural disasters; emergency supplies scheduling; NSGA-II; multi-objective optimization; road repair

\* 收稿日期: 2018-07-30; 修回日期: 2018-09-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(51678212)、河北省高等学校科学技术研究项目(QN2018231)资助

作者简介: 田晓勇(1982-), 男, 博士研究生。主要从事交通管理与控制技术、应急管理研究。Email: 53101381@qq.com

通讯作者: 陈亮(1978-), 男, 副教授。主要从事道路交通管理科学与技术、应急管理研究。Email: karlchen@126.com

## 引言

日益频发的自然灾害给社会造成巨大人员伤亡和经济损失<sup>[1]</sup>。灾害发生后,快速高效的应急资源配送和供应,是灾后救援有效展开的前提,对于减少人员伤亡和灾害损失具有重要意义。

作为灾害应急管理的重要分支,应急物资调度优化问题研究已成为国内外学术界的热点问题<sup>[2]</sup>。应急管理专家 S. Tufekci 等<sup>[3]</sup>指出应急管理本质上是一个复杂的多目标优化问题;G. H. Tzeng 等<sup>[4]</sup>考虑应急调度时间和成本的最小化,建立了应急物资多周期动态配送模型;M. Huang 等<sup>[5]</sup>以运输时间、运输速度与物资分配的公平性为目标建立模型,优化应急物资配送的车辆路径问题;M. Najafi 等<sup>[6]</sup>提出了应急物资配送多目标随机模型;李巧茹等<sup>[7]</sup>基于最大应急准时开始可能度和最小资源布局调度费用目标,构建应急资源配置模糊规划模型;唐伟勤等<sup>[8]</sup>以应急需求和时间满意度最大为目标,构建基于灰色白化函数的应急物资调度模型;王付宇等<sup>[9]</sup>考虑总救援时间最短和伤员救援权重值最大为目标,建立震后救援车辆应急调度两阶段数学规划模型。

上述学者从应急时间、物资需求满足率、应急成本等多方面构建应急调度模型,但较少考虑基于重大自然灾害背景下道路受损情况。对应急物资调度而言,如果考虑修复毁损路段,那么调度车辆所依托的是未确定的、可变的路网结构。李军军等<sup>[10]</sup>通过分析道路抢修工作对车辆通行的影响,建立基于最小需求未满足量和运输延迟成本的多目标优化模型;陈森等<sup>[11]</sup>、李孟军等<sup>[12]</sup>综合考虑抢修毁损路段和车辆配送,研究灾后道路抢修和应急物资调度问题;慕安冬<sup>[13]</sup>考虑道路受损、维修时限、运输任务需求等因素,提出最短时间路径评估算法;孟丹<sup>[14]</sup>考虑道路交通网络受损情况,构建需求不确定和道路受损条件下的应急物资调度模型。但以上文献均认为道路只要抢修,就处于连通状态,未考虑道路抢修时间,不符合应急道路抢修的实际情况。

综上所述,针对可变路网结构情形下,考虑受损路段抢修的相关文献较少,或者直接排除因灾害影响而通行受阻的路段,或者在具体建模时,未考虑受损路段的抢修时间。基于此,本文考虑因灾害

而导致的受损交通路段抢修以及抢修时间,对车辆运行时间进行修正,建立基于灾害抢修的应急调度模型,并设计相应的多目标进化算法进行模型求解。

## 1 问题描述

### 1.1 问题提出

重大自然灾害使应急调度任务区域内道路大面积损毁,其中部分路段因灾害导致道路中断,车辆无法通行,应急物资配送车辆在调度时常因道路损毁而绕行,延长了应急调度时间。若抢修一些关键位置的损毁道路恢复通行,则可避免远程绕行,有效缩短车辆行驶时间<sup>[15]</sup>,在此过程中,路网结构发生改变。

为便于理解,对“路网结构可变”的定义如下:为了达成特定的目的,采取积极主动的措施或行为使路网中的路段连通结构(简称为路网结构)发生改变的情形。客观上,路网结构变化源于对毁损路段应急修复产生的车辆通行功能恢复的变化。对应急物资调度而言,如果考虑修复毁损路段,那么调度车辆所依托的是未定的、可变的路网结构。

因此,本文考虑抢修因灾害受损的交通路段,结合道路抢修时间,对车辆运行时间进行修正,建立基于灾害抢修的应急调度优化模型。需要决策的问题是:基于可变路网结构,在应急物资可用量、车辆运力和车辆容量的限制下,安排车辆服务受灾点的数量和顺序,确定应急车辆的运输路线以及为相应受灾点配送应急物资数量,实现两个目标的最优化:(1)最小化平均车辆运输时间;(2)最小化系统物资需求量未满足度。

### 1.2 车辆运行时间修正策略

(1)考虑道路受损情况对车辆运行时间修正。对于部分失效路段,车辆通行时间增加,将此部分时间表示为车辆在应急状态下通过的时间,即为车辆应急通行时间;对于完全失效路段,可认为车辆的应急通行时间为无穷大。

(2)考虑道路抢修时间对车辆运行时间修正。若考虑失效路段抢修,则需比较车辆到达该路段时刻与道路抢修时间的关系。当车辆到达失效路段时刻不小于道路抢修时间,说明该失效路段已被抢通,车辆可正常通行;反之,说明该失效路段仍在抢

修中;对部分失效路段,车辆通过该路段的时间为应急通行时间;对完全失效路段,允许车辆停车等待至该路段被抢通,然后正常通过该路段。

## 2 模型建立

### 2.1 基本假设

模型假设条件如下:

(1)受灾点与配送中心之间的道路损毁程度及道路抢修时间等数据是已知的。

(2)假设受损路段可由多个工作队同时进行抢修,且抢修所需资源充足。

(3)受灾点的物资需求量已知,可由受灾人数及受灾的严重程度估算得到。

(4)应急物资可混装,各车辆均满载配送,不计物资装卸时间。

(5)配送车辆完成当前配送任务后,允许停留在其服务的最后一个受灾点上,不须返回配送中心。

(6)允许对满载车辆进行拆分配送。

### 2.2 符号与变量说明

$G=(V, E, W, RT)$ 是根据灾后受灾区域内路况抽象出来的带权无向结构。 $V$ 是 $G$ 的顶点集合( $V=\{i_1, \dots, i_n\}$ ),表示道路节点, $N$ 为受灾点集合, $N=\{i \in V | i=1, 2, \dots, n\}$ , $n$ 为受灾点个数, $M=\{i \in V | i=n+1\}$ 为应急配送中心集合,即表示设1个配送中心。 $E$ 是 $G$ 的边集合( $\{i, j\} \in E$ ),表示路段,设 $NE$ 表示正常路段集合( $NE \subset E$ ),剩余路段均为失效路段集合 $LE(LE \subset E)$ ,包括完全失效集合 $CE$ 和部分失效路段集合 $PE$ 。 $W$ 表示边 $\{i, j\}$ 的权值集合( $w(i, j) \in W$ ),即当路段 $\{i, j\}$ 连通时,车辆正常通过这条路段的时间。 $RT$ 表示抢修时间集合( $rt(i, j) \in RT$ ),表示路段 $\{i, j\}$ 被抢通所需要的时间。假定应急救援活动开始时刻 $t$ 为0,应急抢修与应急调度工作同步展开。

模型中其他符号和变量定义如下:

$d_i$ 为受灾点 $i$ 的需求量; $Q$ 为应急配送中心的物资供应量; $K$ 为应急配送中心拥有的救援车辆集合, $k \in K$ ;  $C_k$ 为救援车辆 $k$ 的容量; $w_{ij}$ 为车辆正常通过路段 $(i, j) \in E$ ;  $\theta_{ij}$ 为车辆通过路段 $(i, j)$ 的

应急运输时间与正常运输时间比例,具体数值由道路受损程度估计, $(i, j) \in PE$ ;  $rt(i, j)$ 为路段 $\{i, j\}$ 抢修时间, $(i, j) \in E$ ;

$$g = \begin{cases} 1, & \left( \begin{array}{l} \text{车辆到达失效路段}(i, j) \text{时,} \\ \text{路段已被抢通,}(i, j) \in LE \end{array} \right) \\ 0, & \text{否则} \end{cases}$$

$t_{ijk}$ 为车辆 $k$ 通过路段 $(i, j) \in E$ ,可表示为:

$$t_{ijk} = \begin{cases} w_{ij}, & (i, j) \in NE \text{ 或 } g = 1 \\ \theta_{ij} w_{ij}, & g = 0 \text{ 且 } (i, j) \in PE \\ \infty, & g = 1 \end{cases} \quad (1)$$

决策变量:

$$x_{ijk} = \begin{cases} 1, & \text{车辆} k \text{从点} i \text{运送物资到点} j, (i, j) \in E \\ 0, & \text{否则} \end{cases}$$

$y_{ik}$ 为车辆 $k$ 为需求点 $i$ 提供应急物资的数量, $i \in N$ 。

### 2.3 数学模型

对所有受灾点而言,拟构建的应急物资调度规划模型有两个目标:一是最小化平均车辆运输时间;二是最小化系统物资未满足度。

目标函数:

$$T = \min \frac{\sum_{k \in K} \sum_{(i, j) \in E, x_{ijk} = 1} t_{ijk}}{K} \quad (2)$$

$$S = \min \left\{ \sum_{i \in N} \frac{d_i - \sum_{k \in K} y_{ik}}{d_i} \right\} \quad (3)$$

约束条件:

$$\sum_{k \in K} y_{ik} \leq d_i \quad (4)$$

$$\sum_{i \in N} d_i \geq Q \quad (5)$$

$$\sum_i \sum_k y_{ik} = Q \quad (6)$$

$$\sum_{i \in N} y_{ik} = C_k, \forall k \in K \quad (7)$$

约束条件式(4)表示配送到受灾点 $i$ 处应急物资量不超过其需求量;式(5)表示所有受灾点的需求量总和不小于配送中心的应急物资可用量;式(6)表示向受灾点配送的所有应急物资总量等于配送中心的应急物资可用量;式(7)表示救援车辆容量限制,即从配送中心出发的车辆均为满载配送。

### 3 算法求解策略

采用NSGA-II算法求解基于灾害抢修的多目标应急物资调度问题。考虑抢修因灾害袭击的失效路段,结合抢修时间,对车辆运行时间进行修正。在此过程中,利用改进的最短路算法Dijkstra算法搜索配送中心与各受灾点之间最短路径,得到车辆最短行驶时间。

#### 3.1 改进Dijkstra算法

改进Dijkstra算法思想:在网络图 $G$ 中,从始点 $i_0$ 出发,逐步顺序的向外探寻,每向外延伸一个路段都要求是最短的。针对失效路段 $(i,j)$ 失效程度,需要比较到达节点 $i$ 的时间 $T(i)$ 与该路段抢修时间 $rt_{ij}$ 来确定路段 $(i,j)$ 的通行状态,若是部分失效路段,不允许停车等待,当 $T(i) < rt_{ij}$ ,按照 $\theta_{ij}w_{ij} (\theta_{ij} > 1)$ 缓慢进行,反之正常通行,若是完全失效路段,允许停车等待至路段抢修畅通,因此,传统Dijkstra算法中的集合 $L$ 中 $T(i_0, i)$ 的更新规则需作出改变。

改进Dijkstra算法流程如图1所示。

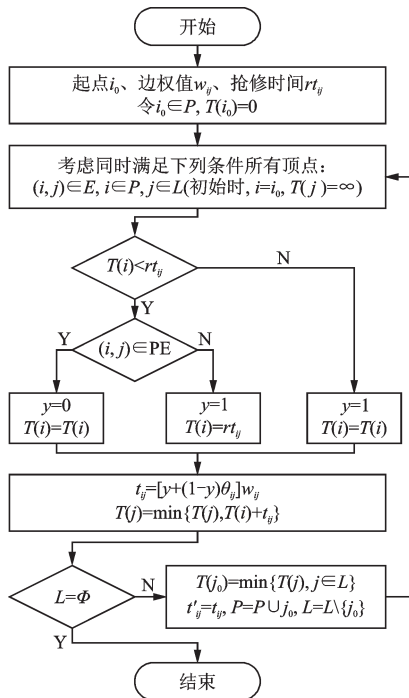


图1 改进Dijkstra算法流程

Fig.1 Flow chart of improved Dijkstra algorithm

#### 3.2 算例求解流程

(1)应急救援活动开始。由救灾中心决定何时

启动灾害救援活动,活动开始后,根据收集到的受灾点需求量、配送中心物资量和车辆数等,初始化算法初始数据。

(2)初始化种群。根据NSGA-II算法的编码机制产生规模为 $pop$ 的随机种群 $P_t^i (t=0)$ 。

(3)计算种群 $P_t$ 中每个染色体对应目标函数值。根据染色体的解码规则,结合改进Dijkstra算法,求得车辆在配送中心与受灾点之间的最短行驶时间和运输路线,通过车辆运输路线得到车辆服务的受灾点数量和物资配送量,计算各个受灾点的物资未满足度。

(4)选择、交叉和变异操作。引入NSGA-II精英选择策略,根据快速非支配排序结果和拥挤度算子的大小,对种群进行二元锦标赛选择操作;采用PX交叉法和逆转变异法对种群中染色体进行交叉和变异操作。

(5)算法终止条件。当算法运行代数达到所设定的最大运行代数时,算法停止,并输出包括Pareto最优解在内的满足目标函数与限制条件的所有解。

(6)救灾活动结束。将所有解反馈给决策者,决策者从中选取合适的解作为解决方案。

模型求解流程如图2所示。

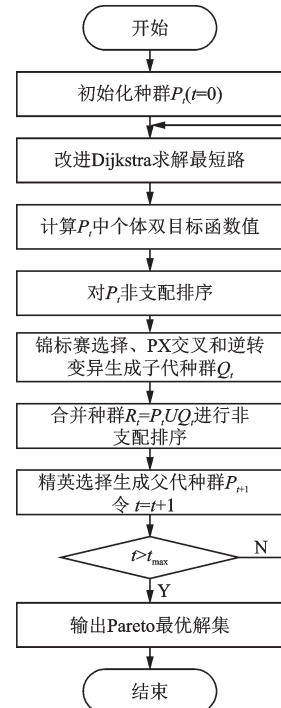


图2 模型求解流程

Fig.2 Flow chart of model solution

## 4 算法分析

### 4.1 算例说明

本实验以九寨沟地震为背景,将各受灾点和配送中心之间的道路抽象为运输网络,选取(1~5)较严重的受灾点,其余道路节点(6~12)均为转运点,如图3所示。

图3路网中,有4个关键路段因灾害影响而受损,标“圆点”的路段受影响而阻断,为完全失效路段;以虚线标示的路段表示路面部分受损,为部分失效路段;剩余路段未受到毁损,均为正常路段。

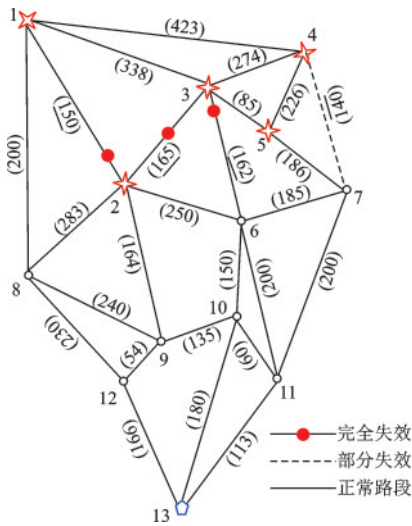


图3 九寨沟灾后交通路网示意

Fig.3 Sketch map of Jiuzhaigou traffic network after the disaster

### 4.2 数据处理

现筹集一批物资为250个单位,配送中心部署有5辆车,假定所有车辆类型相同,即车辆容量均为50个单位,车辆全部满载配送。

基于假设条件,对有关数据作以下处理和说明:

(1)各个受灾点的物资需求量由计算机随机产生,见表1。

(2)车辆通过各个路段的正常行驶时间如图3所示。其中,带下划线表示两点间道路损毁。为便于计算机处理,车辆在未直接相连的点与点之间的运行时间设为10 000。

(3)表2为配送中心到各个受灾点的最短行驶路径和时间,通过最短路Dijkstra算法求得。

(4)由于路网中4个关键失效路段需要抢修,现组织4个抢修工作队分别对失效路段进行同时抢修,各路段的具体失效信息以及抢修时间见表3。

表1 受灾点应急物资需求

Table 1 The emergency material demand of the disaster points

受灾点	$i_1$	$i_2$	$i_3$	$i_4$	$i_5$
资源需求量	52	29	70	84	45

表2 配送中心到受灾点最短路径及时间

Table 2 The shortest path and time of the distribution center to the disaster area

受灾点	最短行驶路径	最短行驶时间/min
1	13→12→9→2→1	534
2	13→12→9→2	384
3	13→11→6→3	475
4	13→11→7→4	453
5	13→11→7→5	499

表3 各毁损路段失效程度及道路抢修时间

Table 3 The failure degree of the damaged sections and the time of road repair

路段	$i_1 - i_2$	$i_2 - i_3$	$i_3 - i_6$	$i_4 - i_7$
失效程度	完全	完全	完全	部分
抢修时间/min	400	380	324	300

当车辆到达某失效路段时,若路段已被抢通,则通行时间取该路段的正常通行时间值;若路段未被抢通,对于完全失效路段来说,通行时间为10 000;对于部分失效路段来说,车辆通过该路段的时间为应急通行时间,在这里,以部分失效路段(4,7)为例,设车辆通过部分失效路段的应急时间与正常通行时间比例 $\theta_{47}$ 为2,即车辆通过部分失效路段(4,7)的通行时间为 $\theta_{47}w_{47}$ 。

### 4.3 实验结果及分析

本实验采用 Matlab 语言编写算法程序求解。NSGA-II控制参数设置为:种群规模 $pop=100$ ,迭代次数 $gen=100$ ,交叉概率 $p_c=0.9$ ,变异概率 $p_m=0.09$ 。

#### 4.3.1 三种情形下的实验结果及分析

##### (1)震前的车辆配送方案

假设地震发生前的路网结构为0。如图3路网

中,所有路段均完好,车辆全部正常通行。基于此情形下,结合实验数据,对算例进行求解如图4所示,算法平均运行时间为67.8 s。

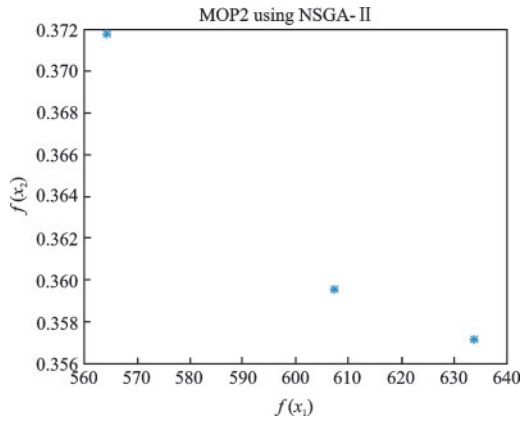


图4 实验结果  
Fig.4 Results of test

通过仿真运行,图4显示了3个平面坐标点:(564.2,0.371 8)、(633.8,0.357 1)、(607.2,0.359 5),即3组非劣解值对应的两个目标下的函数值: $f(x_1)$ 和 $f(x_2)$ ,分别表示模型中平均车辆运输时间 $T$ 和系统物资未满足度 $S$ 。选取其中2组基于两个最优目标下对应的车辆配送方案见表4。

对目标1平均车辆运输时间分析。方案一中平均运输时间最小为564.2 min,大多车辆都基于最短路径行驶。由于车辆容量限制和考虑车辆满载配送,部分车辆对多个受灾点提供物资。

对目标2系统物资未满足度分析。方案二中系统物资未满足度最小为0.357 1,在应急物资调度过程中,有时为满足更多受灾点的需求,配送车辆需行驶较长的时间为更多受灾点提供服务。

## (2)传统模型的实验结果

假设震后路网结构为1。如图3所示路网中,有4个路段因灾害受损,其中3个路段为完全失效路段,车辆通行受阻。传统模型是排除所有车辆不能通行的路段,考虑全部可以通车的路段。基于此情形下,对算例进行求解,算法多次运行,得到如图5所示的实验结果,且算法平均运行时间为65.2 s。选取其中2组非劣解对应的基于两个最优目标的车辆配送方案见表5。

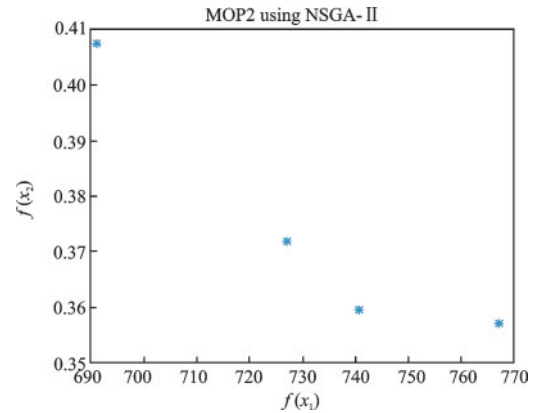


图5 传统模型实验结果  
Fig.5 Results of tradition model test

地震发生后,由于完全失效路段(2,1)和(6,3)通行受阻,导致配送车辆服务受灾点的最短行驶路径发生变化。以配送车辆1为受灾点1提供物资为例,震前,车辆到受灾点1的最短路径为13→12→9→2→1,运行时间为534 min;震后,车辆因路段(2,1)道路阻断而绕行,绕行路径为13→12→8→1,由原来的534 min增加到596 min,延长了车辆的运行时间。

表4 基于两个最优目标的车辆配送方案

Table 4 Vehicle distribution schemes based on double optimal objectives

方案	目标函数	车辆行驶路径	运输时间/min	受灾点分配量	备注
一	(564.2,0.371 8)	13→11→7→4	453	$q(4)=50$	—
		13→12→9→2→1	534	$q(1)=50$	—
		13→12→9→2→3	549	$q(2)=29; q(3)=21$	—
		13→11→6→3→5	560	$q(3)=49; q(5)=1$	—
		13→11→7→5→4	725	$q(5)=44; q(4)=6$	—
二	(633.8,0.357 1)	13→12→9→2→1	534	$q(2)=29; q(1)=21$	—
		13→12→9→2→1→2→3	849	$q(1)=31; q(3)=19$	—
		13→11→6→3	475	$q(3)=50$	—
		13→11→7→4	453	$q(4)=50$	—
		13→11→7→5→3→4	858	$q(5)=45; q(3)=1; q(4)=4$	—

表 5 基于两个最优目标的车辆配送方案

Table 5 Vehicle distribution schemes based on double optimal objectives

方案	目标函数	震后车辆行驶路径	运输时间/min	受灾点分配量	备注
一	(691.2, 0.407 5)	13→12→8→1	596	$q(1)=50$	—
		13→11→7→5→3	584	$q(5)=45; q(3)=5$	—
		13→11→7→5→3	584	$q(3)=50$	—
		13→12→9→2→6→7→4	1099	$q(2)=29; q(4)=21$	7→4缓行
		13→11→7→4	593	$q(4)=50$	7→4缓行
二	(767.2, 0.357 1)	13→12→8→1	596	$q(1)=50$	—
		13→11→7→5→3	584	$q(5)=45; q(3)=5$	—
		13→11→7→5→3	584	$q(3)=50$	—
		13→11→7→4	593	$q(4)=50$	7→4缓行
		13→12→9→2→8→1→3→4	1479	$q(2)=29; q(1)=2;$ $q(3)=15; q(4)=4$	—

对比表 4 和表 5 可知,地震发生前后,配送车辆到受灾点 4 的最短路径未发生变化,均为 13→11→7→4,但震后车辆的运行时间增加。这是由于路段 (7,4) 因震害影响受到部分毁损,致使车辆行驶速度下降,通行时间增加。

(3) 本模型的实验结果

地震发生后,如图 3 所示路网中,考虑抢修因灾害受损的交通路段,随着失效路段不断被抢通,整个路网结构呈现出随时间变化的状态。假定应急救援活动开始时刻  $t=0$ ,当  $t < rt(3,6)$  时,所有失效路段都在抢修中,均未被抢通,此时路网结构为 1;当  $rt(3,6) \leq t < rt(2,3)$  时,失效路段 (3,6) 已被抢通,路网结构发生改变;当  $rt(2,3) \leq t < rt(1,2)$  时,失效路段 (2,3) 已被抢通,路网结构又发生改变;当  $t \geq rt(1,2)$ ,全部失效路段均被抢通,路网结构恢复到震前结构为 0。基于可变路网结构,对算例进行

仿真计算,结果如图 6 所示,算法平均运行时间为 80.8 s。选取其中 2 组对应的基于两个最优目标的车辆配送方案见表 6。

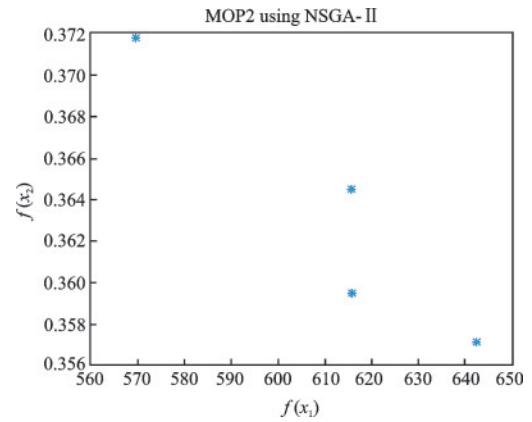


图 6 本模型实验结果

Fig.6 Results of the model test

表 6 基于两个最优目标的车辆行驶方案

Table 6 Vehicle driving schemes based on double optimal objectives

方案	目标函数	车辆行驶路径	运输时间/min	受灾点分配量	备注
一	(569.6, 0.371 8)	13→11→7→4	453	$q(4)=50$	—
		13→12→9→2→1	550	$q(1)=50$	2→1等 16 min
		13→12→9→2→3	549	$q(2)=29; q(3)=21$	—
		13→11→6→3→5	571	$q(3)=49; q(5)=1$	6→3等 11 min
		13→11→7→5→4	725	$q(5)=44; q(4)=6$	—
二	(642.4, 0.357 1)	13→11→7→5→3	584	$q(5)=45; q(3)=5$	—
		13→11→6→3	486	$q(3)=50$	6→3等 11 min
		13→11→7→4	453	$q(4)=50$	—
		13→12→9→2→1	550	$q(2)=29; q(1)=21$	2→1等 16 min
		13→12→9→2→1→2→3→4	1 139	$q(1)=31; q(3)=15; q(4)=4$	2→1等 16 min

震后,考虑失效路段抢修与抢修时间,有些失效路段在车辆到达该路段时已恢复其通行功能。例如配送车辆1为受灾点4提供物资量,车辆的运行时间为453 min,与表5中震后对应行驶路径相比,缩短了140 min;有些失效路段在车辆到达该路段时,路段虽然在抢修中,但车辆却选择停车等待一段时间至路段被抢通。例如车辆2服务受灾点1,当车辆到达节点2时, $t = 384$  min,路段(2,1)还未完成抢修,此时车辆选择停车等待16 min,直到路段抢修完成,继续通行,并与表5中震后车辆为受灾点1提供服务相比,车辆的最短行驶路径发生变化,对应的行驶时间缩短。

#### 4.3.2 模型对比与分析

将传统模型与本模型计算配送方案的两个最优目标函数值进行对比见表7。

由表7可知,震后两种模型下基于两个最优目标对应的配送方案,平均车辆运输时间和系统物资未满足度均不小于震前的运行结果,这是由于震后的道路运输网络因震害袭击而受损,会改变车辆的最短行驶路径,从而影响车辆的运输时间以及受灾点所分配的物资量。

在传统模型和本模型所得的两种配送方案中,基于目标1的最优值,本模型计算的平均车辆运输时间较传统模型分别降低了2.33%和2.29%;基于目标2的最优值,本模型所得的系统物资未满足度分别降低了17.59%和0%。说明本模型得到的最优目标值均优于传统模型,且对应配送方案均为较优的车辆配送方案。

表7 模型最优目标函数值对比结果

Table 7 Comparison results of optimal objective function value

方案	震前	震后	
		传统模型	本模型
一	T	564.2	569.6
	S	0.371 8	0.371 8
二	T	633.8	642.4
	S	0.357 1	0.357 1

## 5 结 论

(1)针对震后受灾情况,基于可变路网结构,将道路抢修情况引入应急调度优化决策中,考虑抢修

因灾害影响而受损的路段,结合抢修时间,对车辆运输时间进行修正;构建以平均车辆运输时间和系统物资未满足度最小为目标的双目标应急调度优化模型。

(2)通过结合改进的最短路Dijkstra算法,设计相应NSGA-II算法求解模型,以“九寨沟地震”作为算例分析,与传统模型得到的配送方案相比,本文模型获得方案的最优目标函数值均优于传统模型方案的计算结果,验证了模型和算法的有效性。

(3)本文提出的基于灾害抢修的应急调度模型,是在假设道路抢修组织安排工作已完成的基础上构建的,下一步需研究抢修和应急物资调度集成优化问题,以确定最优抢修策略和物资调度方案。

## 参考文献:

- [1] 陈 刚. 灾后应急物资敏捷保障模型及算法研究[D]. 成都:西南交通大学,2015.  
Chen G. Research on urgent relief quick response model and algorithm for post-disaster [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2015. (in Chinese)
- [2] Bilham R. Disaster management: preparing for the worst[J]. Nature, 2013, 502:438-439.
- [3] Tufekci S, Wallace W A. The emerging area of emergency management and engineering[J]. IEEE Transactions on Engineering Management, 2002, 45 (2) : 103-105.
- [4] Tzeng G H, Cheng H J, Huang T D. Multi-objective optimal planning for designing relief delivery systems [J]. Transportation Research Part E, 2007, 43 (6) : 673-686.
- [5] Huang M, Smilowitz K, Balci B. Models for relief routing: equity, efficiency and efficacy[J]. Transportation Research Part E, 2012, 48(1): 2-18.
- [6] Najafi M, Eshghi K, Dullaert W. A multi-objective robust optimization model for logistics planning in the earthquake response phase[J]. Transportation Research Part E Logistics & Transportation Review, 2013, 49 (1): 217-249.
- [7] 李巧茹,崔 宁,陈 亮,等.干线公路应急资源布局与配置的模糊规划模型[J].工业安全与环保,2015,41 (8):30-33.  
Li Q R, Cui N, Chen L, et al. Fuzzy decision model for emergency resource allocation and configuration of arterial highway[J]. Industrial Safety and Environmental Protection, 2015,41(8): 30-33. (in Chinese)

