

震后交通管制下多出救点应急物资调运问题^①

李双琳^{1,2}, 马祖军^{2*}

(1. 西南交通大学交通运输与物流学院, 成都 610031;

2. 西南交通大学经济管理学院物流与应急管理研究所, 成都 610031)

摘要: 震后如何确定有效的应急物资调运路径是救灾管理部门的一项核心工作. 为提高救援成效, 并尽量减少对非灾民的影响, 在综合考虑震后灾区路网受损以及为避免交通拥挤而实施交通管制的情况下, 研究多出救点应急物资调运优化问题. 以最早应急时间和因交通管制引起的平均扰民程度最小为目标, 建立了用户均衡交通量指派条件下的多目标应急物资调运路径优化模型, 并设计了非支配解排序遗传算法(NSGA-II)进行求解. 最后, 以1994年美国北岭地震为背景构造算例进行验证, 结果表明: 通过实施交通管制可以使最早应急时间提前, 但会对非灾民的出行造成一定的影响; 而当给定救援结束时间时, 根据应急物资消耗速率可以计算最早应急时间, 从而制定相应的交通管制策略.

关键词: 地震灾害; 应急物资; 调运路径; 交通管制; 交通量指派

中图分类号: U491; F252 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-9807(2014)05-0001-13

0 引言

震后应急物资的快速有效调运是救灾工作的重中之重, 必须在有限的时间、空间和资源约束条件下快速满足应急物资的需求, 以实现时间效益最大化或者灾害损失最小化. 但大规模地震发生后, 灾区道路系统受到严重破坏, 在山区还可能诱发产生堰塞湖等次生灾害. 如“5.12”汶川大地震发生后, 24条高速公路受到影响, 161条国家级、省级干线受损, 8618条乡村公路受损, 多条对外道路曾一度中断^[1], 诱发了约257处堰塞湖^[2]. 此外, 大量的救灾与探亲车辆导致灾区交通负荷过度集中, 引起堵塞, 影响救灾. 因此, 需要同时考虑灾区路网的变化及交通需求的影响, 以实现应急物资的合理调运.

近年来应急物流系统优化问题引起了不少学者的关注, 主要包括应急设施选址或出救点选择^[3-5]、应急资源分配^[6-8]、应急物资运输^[9-10]和救援车辆路径安排^[11-13]等问题. 还有部分学者考虑了上述问题之间的关联性, 进行应急物流系统集成优化研究^[14-17]. 然而, 这些文献均未考虑灾害可能对灾区交通造成的影响.

地震对于灾区交通的影响可以归纳为两部分, 分别是运输供给与运输需求. 就运输需求而言, 以“5.12”汶川大地震为例, 整个运输网络在灾后短时间内要担负救灾及运输民生物资的双重任务. 由于救援工作的紧迫性, 应急救援部门通常会实施部分交通管制, 使得交通需求构成与灾前有明显差别, 各路段的交通量也随着时间、地点而变化. 故在选择应急物资调运路径时, 应将交通需

① 收稿日期: 2012-04-05; 修订日期: 2012-09-01.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(70771094; 90924012; 71090402); 教育部新世纪优秀人才支持计划资助项目(NCET-10-0706); 高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20090184110029); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(SWJTU11CX152, 2682013CX073); 四川省青年科技基金资助项目(09ZQ026-021); 四川省哲学社会科学规划资助项目(SC11B049); 四川省学术和技术带头人培养资金资助项目(川人社办发[2011]441号; 川财社[2012]319号); 富士康科技集团“擢才创研计划”资助项目(11F81210005).

通信作者: 马祖军(1974—), 男, 浙江开化人, 博士, 教授, 博士生导师. Email: zjma@swjtu.cn

求变化对于道路旅行时间的影响集成到路径选择模型中,这就需要通过交通指派模型的应用实现对交通量的均衡.就运输供给而言,地震可能导致道路系统受损,直接或者间接造成道路中断或道路容量降低,影响其交通功能的正常发挥,从而影响应急物资调运路径的选择.

因此,为提高救灾效率,通常需要对灾区路网实施交通管制. Iida 等^[18]阐述了在救灾中实施交通管理措施的必要性. Chang 和 Nojima^[19]考虑地震对交通道路系统的破坏,而衡量交通道路在灾后救援过程中所发挥的作用. Feng 和 Wen^[20-21]以台湾“9.21”集集大地震区域交通管制为研究背景,建立了震后区域交通管制模型,并在此基础上,基于双层规划又建立了模糊多目标交通管制模型,并通过算例验证该模型能够较好实现区域交通管制,控制救援车辆与非救援车辆进入灾区的比例.这些文献虽然引入了交通管制,却都是从区域交通管制角度,确定救援车辆与非救援车辆进入灾区的比例,并未探讨应急物资调运路径问题.而李永义等^[22]将震后道路里程、车辆速度、行程延误、交通负荷度以及路网连通可靠度等因素遴选为震后交通生命线系统的交通阻抗效用指标,提出将这些效用指标转化为一种广义交通阻抗即运输时间的理论方法,建立震后多需求点、多服务点应急物资调度的双层规划模型.该文从运输供给的角度考虑了交通阻抗相关因素对应急物资调运路径选择的影响,但没有考虑震后道路特性对救灾物资调运的影响,以及交通管制对应急物资调运路径选择的影响.

本文针对震后多出救点的应急物资调运路径决策问题,考虑地震灾害对灾区交通路网的破坏,大量救灾物资需要运送至灾区,大量灾民和非灾民需要使用交通路网.通过实施交通管制措施,保证救灾能够顺利进行的情况下,建立以最早应急时间最小和因交通管制引起的平均扰民程度最小为目标的多出救点应急物资调运优化模型,并设计有效的求解算法,最后,以1994年美国北岭地震为背景构造算例,对模型和算法进行验证.

1 模型构建

1.1 问题描述

地震或其次生灾害发生后,应急救援指挥部

需要在较短时间内将应急物资从各出救点运送至需求点,以达到救援目的,如图1所示.

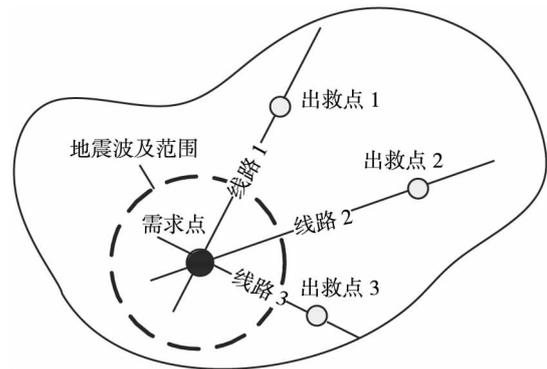


图1 多出救点应急物资调运路径示意图

Fig. 1 Multi-depot relief distribution routes

公路作为最主要的运输途径,容易受到各种外在因素的影响,如震灾对路网结构的破坏、交通需求的增加造成的交通拥堵等,因而需要采取一定的交通管制措施.但部分路段实施交通管制,必然会影响非灾民的日常出行.因此,该如何实施交通管制,以便既保证应急物资快速运输的需要,又尽可能地降低交通管制对非灾民的影响呢?本文在综合考虑震后交通路网结构以及交通管制情况下,通过重新指派交通需求,计算其最早应急时间及最小扰民程度,以满足预期目标,其具体流程如图2所示.

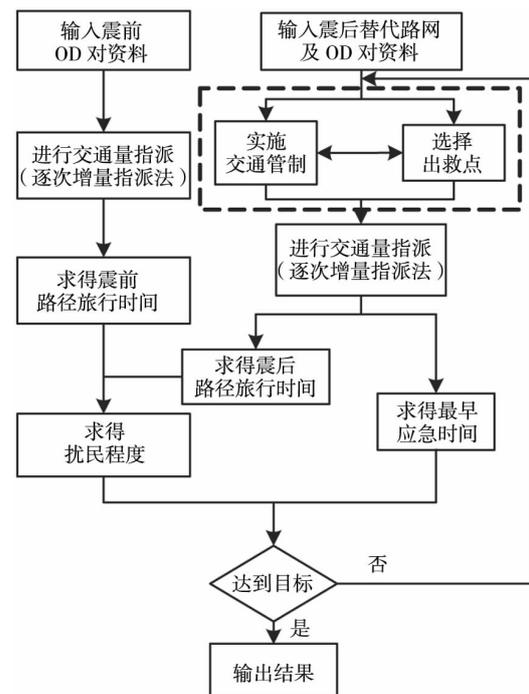


图2 震后交通管制条件下多出救点应急物资调运决策流程

Fig. 2 Decision process of post-earthquake multi-depot relief distribution under traffic control

1.2 符号说明

用 $G(L, N)$ 表示交通路网, 其中 L 为路段集合, N 为节点集合. 设某地发生地震后 $K(K \in N)$ 为应急物资需求点, 对应应急物资的消耗速率为 v ; x 为应急物资需求量 $x > 0$; $A = \{A_1, A_2, \dots, A_n\}$ 为可出救点集合 $A_a \in N, A \subseteq N, a = 1, 2, \dots, n$; A_a 的吞吐量为 $x_a, x_a > 0$ 且 $\sum_{a=1}^n x_a > x$; 各可出救点到应急物资需求点的时间为 $t_{aK}, t_{aK} \geq 0$; 应急物资运送至需求点的限制期为 $R, R > 0$. 此外, 定义如下符号:

O : 地震前后交通发生点集合 $r \in O$;

D : 地震前后交通吸引点集合 $s \in D$;

T : 实施交通管制时间长度;

Γ : 出行者对交通管制造成扰民的最大可接受程度;

Q_{rs} : 地震前 OD 对 rs 间的交通需求;

Q'_{rs} : 地震后 OD 对 rs 间的交通需求;

P_{rs}^u : 地震前 OD 对 rs 间行驶路径集合;

P_{rs}^e : 地震后 OD 对 rs 间非救援车辆行驶路径集合;

$P_{A_a K}^k$: 地震后出救点 A_a 到应急物资需求点 K 间救援车辆行驶路径集合 $A_a \in A$;

L_{rs} : OD 对 rs 间的行驶路径集合, 地震前 $L_{rs} = P_{rs}^u$, 地震后 $L_{rs} = P_{rs}^e$, 地震后救援车辆行驶路径集合 $L_{rs} = P_{A_a K}^k$;

$\bar{x}_{(ij)}$: 常规情况下路段 (ij) 的交通流量, $\forall ij \in N, (ij) \in L$;

$x_{(ij)}$: 管制情况下路段 (ij) 的交通流量;

$t_{(ij)}(x)$: 路段 (ij) 的旅行时间函数;

$f_{L_{rs}}^p$: OD 对 rs 间行驶路径集合 L_{rs} 的第 p 条行驶路径上的流量;

$\delta_{L_{rs}}^{(ij)p}$: 若路段 (ij) 在 OD 对 rs 间行驶路径集合 L_{rs} 的第 p 条行驶路径上, 则为 1, 否则为 0;

$\omega(ij)$: 若路段 (ij) 实施交通管制, 则为 1, 否则为 0.

1.3 数学模型

在建模之前, 作如下假设: 1) 交通管制信息公开, 可以被出行者及时获得从而做出出行路径选择; 2) 震后受损路段情况能够及时获得; 3) 震前、震后路网各 OD 对之间的需求已知; 4) 由交警

来完成实施交通管制路段的管制, 并进行全交通管制, 只允许救灾车辆经过.

至此, 建立优化模型如下

$$z_1 = \min V = \min \left(\max_{m \in \{1, 2, \dots, n\}} \left\{ t_{mK} - \sum_{a=0}^{m-1} \frac{x_a}{v} \right\} \right) \quad (1)$$

$$z_2 = \min \left\{ M = \frac{\text{avg} \left(\sum_{\forall rs, (ij) \in P_{rs}^e} \int_0^{x(ij)} t_{(ij)}(x) dx \right)}{\text{avg} \left(\sum_{\forall rs, (ij) \in P_{rs}^u} \int_0^{\bar{x}(ij)} t_{(ij)}(x) dx \right)} \right\} \left| M \leq \Gamma \right. \quad (2)$$

s. t.

$$\sum_{k=1}^{|P_{rs}^u|} f_{P_{rs}^u}^k = Q_{rs} \quad (3)$$

$$\bar{x}_{(ij)} = \sum_{r \in O} \sum_{s \in D} f_{P_{rs}^u}^p \delta_{P_{rs}^u}^{(ij)p}, \forall (ij) \in L, p \in P_{rs}^u \quad (4)$$

$$\sum_{k=1}^{|P_{rs}^e|} \int_0^T f_{P_{rs}^e}^k = Q'_{rs} \quad (5)$$

$$x_{(ij)} = \sum_{r \in O} \sum_{s \in D} f_{P_{rs}^e}^p \delta_{P_{rs}^e}^{(ij)p}, \forall (ij) \in L, p \in P_{rs}^e \quad (6)$$

$$t_{aK} = \sum_{A_a \in A} \sum_{(ij) \in P_{A_a K}^k} \int_0^{x(ij)} t_{(ij)}(x) dx \quad (7)$$

$$\sum_{j: (ij) \in L} \delta_{L_{rs}}^{(ij)p} - \sum_{j: (ij) \in L} \delta_{L_{rs}}^{(j,i)p} = \begin{cases} 1, & i = r \\ 0, & i \in (N/\{r, s\}), \forall i, j \in N \\ -1, & i = s \end{cases} \quad (8)$$

$$\sum_{r \in O} \sum_{s \in D} \sum_{j: (ij) \in L} f_{L_{rs}}^p \delta_{L_{rs}}^{(ij)p} = \sum_{r \in O} \sum_{s \in D} \sum_{j: (ij) \in L} f_{L_{rs}}^p \delta_{L_{rs}}^{(j,i)p}, \forall i \in (N/\{r, s\}) \quad (9)$$

$$\sum_{j: (ij) \in L} f_{L_{rs}}^p \delta_{L_{rs}}^{(ij)p} - \sum_{j: (ij) \in L} f_{L_{rs}}^p \delta_{L_{rs}}^{(j,i)p} = \begin{cases} f_{L_{rs}}^p, & i = r \\ 0, & i \in (N/\{r, s\}), \forall i, j \in N \\ -f_{L_{rs}}^p, & i = s \end{cases} \quad (10)$$

$$z_1 + \frac{x}{v} \leq R \quad (11)$$

$$f_{L_{rs}}^p \geq 0 \quad (12)$$

$$T \geq 0 \quad (13)$$

$$\Gamma \geq 0 \quad (14)$$

$$\delta_{L_{rs}}^{(ij)p} = \{0, 1\} \quad (15)$$

$$\omega_{(i,j)} = \{0, 1\} \tag{16}$$

其中,目标式(1)表示最早应急起始时间最小;式(2)表示因交通管制造成的各OD对的平均扰民程度最小, $avg(\cdot)$ 为求均值函数(因为1个OD对之间可能有多条行驶路径);约束式(3)为震前OD对需求平衡约束,即所有出行路线流量总和等于其交通需求量;式(4)为震前路段流量计算式,为所有OD对出行路线经过该路段的流量之和;式(5)为震后OD对需求平衡约束;式(6)为震后路段流量计算式;式(7)为出救点到应急物资需求点所需时间计算式,即从出救点到应急物资需求点所经过路段所需时间之和;式(8)为用户路径连续性约束,即用户在未达到D之前,进入该路段后需离开该路段;式(9)为路段流量守恒约束,即进入该路段的车辆数等于离开该路段的车辆数;式(10)为用户路径流量守恒约束,即用户在未达到D之前,进入该路段的车辆数等于离开该路段时的车辆数;式(11)表示最早应急起始时间小于物资需求时间;式(12)~(14)为非负约束;式(15)和(16)为0~1变量约束.

1.4 旅行时间函数

对于任何交通量指派过程,必须设定旅行时间函数 $t_{(i,j)}(x)$,其主要功能在于描述车辆在各种交通及道路状况下运行发生的绩效.因路段绩效函数可以得出一路网中每单位时间与平均速度的关系,而这种关系为将流量指派到各路段时容量的限制,因此又称为路阻函数.在此采用经典的美国联邦公路管理局的BPR函数,其数学表达式为

$$t_{(i,j)}(x_{(i,j)}) = t_{(i,j)}(0) \left[1 + \alpha \left(\frac{x_{(i,j)}}{C_{(i,j)}} \right)^\beta \right] \tag{17}$$

其中 α, β 为回归系数,典型取值为 $\alpha = 0.15, \beta = 4$; $t_{(i,j)}(0)$ 为路段 (i, j) 的自由流行驶时间; $C_{(i,j)}$ 为路段 (i, j) 的通行能力.根据式(17),路网具有一定的容量约束,当交通流超出路段容量后会造成路段严重拥堵,而逐次增量法只考虑路段行驶时间变化,而忽视了这种情况.因此,为满足应急情况下道路不出现拥堵情况,假设路段被分配容量 $x_{(i,j)} \geq C_{(i,j)}$ 时 $t_{(i,j)}(x_{(i,j)}) = \infty$ 表示此路段不通,当 $x_{(i,j)} < C_{(i,j)}$ 时,其旅行时间函数为

$$t_{(i,j)}(x_{(i,j)}) = t_{(i,j)}(0) \omega_{(i,j)} +$$

$$t_{(i,j)}(0) (1 - \omega_{(i,j)}) \left[1 + \alpha \left(\frac{x_{(i,j)}}{C_{(i,j)}} \right)^\beta \right] \tag{18}$$

2 模型求解

上述问题涉及震后交通管制、交通流用户均衡和多出救点选择,且彼此间具有影响和制约关系,如图3所示.即一定的交通管制会影响交通流用户均衡,进而影响出救点的选择策略,据此可判断交通管制策略能否满足应急需求,若不满足则需要调整交通管制并重新计算,从而形成一个反复循环迭代寻优的过程.因此,求解上文所建模型的具体流程如图4所示,其中各主要环节分别说明如下.

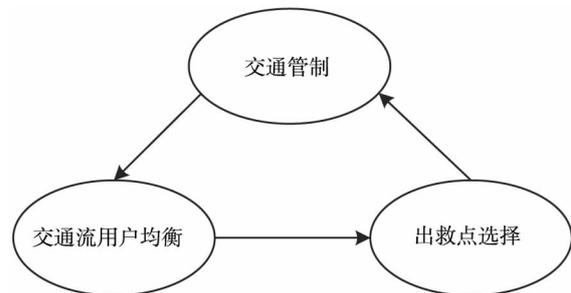


图3 震后交通管制、交通流用户均衡和多出救点选择的关系
Fig. 3 Relationship among post-earthquake traffic control, traffic assignment and multi-depot selection

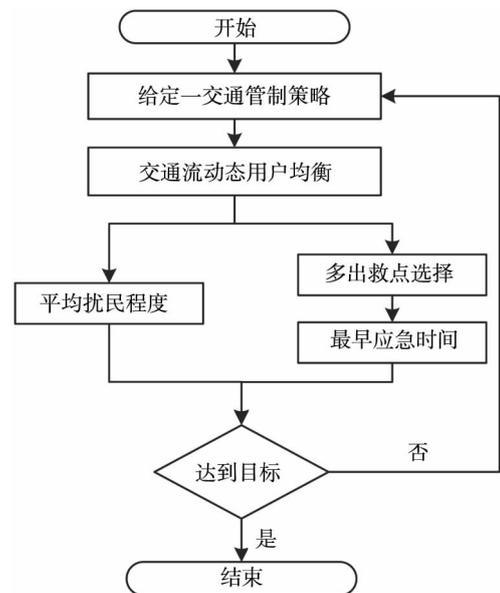


图4 模型求解流程图

Fig. 4 Flowchart for solving the model

2.1 交通流用户均衡

2.1.1 增量加载分配法

增量加载分配法(也叫增加分配法,或容量限制增量加载分配法)主要基于道路交通流特性,当交通流量增大时,行车速率随之减小,行驶时间延长,所能通过的车辆也随之减少.其基本思想是将 OD 量分成 N 等份,然后在每次迭代中更新路段阻抗,并采用下文所述改进的全有全无(improved all-or-nothing, IAON)网络加载机制将 $1/N$ 等份的 OD 量加载到网络上,计算累积路段流量^[23].其算法步骤可归纳为:

- 步骤 1 初始化.将 OD 量平分成分成 N 等份,即令 $q_{rs}^n = Q_{rs}/N, \forall rs$; 令 $x_{(i,j)}^0 = 0, \forall (i,j)$; 令 $n = 1$.
- 步骤 2 更新.令 $t_{(i,j)}^n = t_{(i,j)}(x_{(i,j)}^{n-1}), \forall (i,j)$.
- 步骤 3 增量加载.基于 $\{t_{(i,j)}^n\}, \{q_{(i,j)}^n\}$ 执行 1 次 IAON 网络加载,得到一组附加的路段流量 $\{y_{(i,j)}^n\}$.
- 步骤 4 流量累加.令 $x_{(i,j)}^n = x_{(i,j)}^{n-1} + y_{(i,j)}^n, \forall (i,j)$.
- 步骤 5 迭代终止条件.如果 $n = N$ 则算法结束 $\{x_{(i,j)}^n\}$ 即为所求解,否则令 $n = n + 1$ 并转到步骤 2.

一般来说, N 越大,增量加载分配法的结果越接近平衡解,但计算工作量相应增加.而且根据文献[24]对算法预处理的改进(按照“先多后少”的原则将每组 OD 量分成不等的 N 份),改进后的算法相比于原算法在相同 N 值前提下能获得更接近于平衡解的结果.因此,本文假定第 n 次加载的 OD 量为 $(1/2)^n Q_{rs}$,共进行 A 次迭代,由等比数列与极限定理可知,当 $A \rightarrow \infty$ 时,总分配量等于 OD 量,且 $A \geq 5$,总分配量就达到 OD 量的 96.875%.

2.1.2 改进的全有全无(IAON)分配法

由于交通管制条件下,路网中存在救援与非救援两种车辆类型,而非救援车辆无法通过交通管制路段.因此,需要对全有全无(all-or-nothing, AON)分配法进行改进,让其可以对交通管制情况下的所有 OD 量进行加载.因 AON 采用 Floyd 算法求出所有 OD 对最短路,为实现交通管制情况下救援车辆最短路的求解,本文对 Floyd 算法进行了改进.

首先,把图 $G(L, N)$ 用双标号邻接矩阵 J 表示出来.设路网如图 5 所示,则对应的双标号邻接矩阵如图 6 所示.对于实行了交通管制路段,其对应右下角标号为 1,否则为 0.

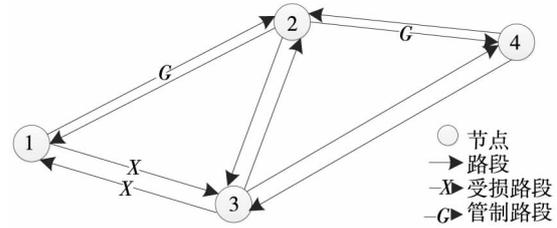


图 5 交通路网示意图

Fig. 5 The traffic network scheme

$$J = \begin{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} 3 \\ 1 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} \infty \\ 0 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} \infty \\ 0 \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} 3 \\ 0 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} 2 \\ 0 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} 2 \\ 1 \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} \infty \\ 0 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} 2 \\ 0 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} 4 \\ 0 \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} \infty \\ 0 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} 2 \\ 0 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} 4 \\ 0 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \end{bmatrix}$$

图 6 双标号邻接矩阵 J

Fig. 6 The adjacency matrix J with double marking

其次,如图 5 所示震后交通路网中,设 1 为出救点,4 为应急物资需求点,则按照如下步骤完成交通量加载.

步骤 1 将出救点 1 的应急出救部分虚拟为点 5,它与其他相关节点的位置信息与 1 相同,OD 量只有到应急地点的,其余 OD 量均为零,合并节点 $N' = N \cup \{5\}$.形成增加了虚拟点的双标号邻接矩阵 J' ,定义一矩阵 $R(|R| = |N'|)$ 用来记录插入点信息 $R(i,j)$ 表示从 N_i 到 N_j 需要经过的点,初始化 $R(i,j) = j$,用 $J'_{(i,j),\mu}$ 表示双标号邻接矩阵 $J'(i,j)$ 左上角的距离数值,用 $J'_{(i,j),\delta}$ 表示双标号邻接矩阵 $J'(i,j)$ 右下角是否进行交通管制.

步骤 2 令 $\Delta(|\Delta| = |N'|)$ 表示经过初始化后的任意两点间所需时间矩阵,其中当 $i \leq |N|, j \leq |N|$ 时 $\Delta(i,j) = J'_{(i,j),\mu} + TJ'_{(i,j),\delta}$,当 $i \leq |N|, j > |N|$ 且 $j \leq |N'|$ 时 $\Delta(i,j) = \infty$,当 $i > |N|$ 且 $i \leq |N'|, j \leq |N|$ 时, $\Delta(i,j) = J'_{(i,j),\mu}$,当 $i > |N|$ 且 $i \leq |N'|, j > |N|$ 且 $j \leq |N'|$ 时,

$\Delta(i, j) = \infty$.

步骤3 对于 $\forall k \in N' \Delta(i, j)' = \min\{\Delta(i, j), \Delta(i, k) + \Delta(k, j)\}$ 若 $\Delta(i, j)' < \Delta(i, j)$ 则 $R(i, j) = k$.

步骤4 根据矩阵 R 求得各 OD 对之间的最短路, 并把相应 OD 量加载到各个路段上, 完成 OD 量的加载.

2.2 多出救点选择问题

在地震对交通路网造成破坏及交通管制条件下, 假设出救点 A_1, A_2, \dots, A_n 到应急物资需求点 K 所需时间为 $t_{a,K}$, 且已知的的话, 不妨假设有 $0 < t_{1,K} < t_{2,K} < \dots < t_{n,K} f(\leq R)$ 为应急结束时间, 并假定 $t_{0,K} = 0, x_0 = 0, \mu_0 = 0$ 则有如下表达式^[25]

$$f = z_1 + \frac{x}{v} \tag{19}$$

用 $\varphi = \{(A_{a_1}, x'_{a_1}), (A_{a_2}, x'_{a_2}), \dots, (A_{a_m}, x'_{a_m})\}$ 表示多出救点选择方案, 其中 $0 < x'_{a_k} \leq x_{a_k}$, $\sum_{k=1}^m x'_{a_k} = x, \mu_1, \mu_2, \dots, \mu_m$ 为 $1, 2, \dots, n$ 子列的一个排列. 则对于 $\forall t \in [z_1, f]$, 有 $\sum_{p \in \{kl | t_{k,K} \leq t, k=1, 2, \dots, m\}} x'_{a_p} \geq (t - z_1)v$. 用 x_s 为所有关于最早应急起始时间 z_1 连续可行的方案集合, 则多出救点选择问题可转化为

$$\begin{cases} \min_{x_s \neq \phi} z_1 \\ \text{s. t. } z_1 + \frac{x}{v} \leq R \end{cases} \tag{20}$$

因此可得出如下结论.

结论1 若方案 $\varphi \in x_s$, 则有 $z_1 \geq \min_{p \in \{1, 2, \dots, m\}} t_{a_p, K}, f \geq \max_{p \in \{1, 2, \dots, m\}} t_{a_p, K}$, 因 $z_1 < \min_{p \in \{1, 2, \dots, m\}} t_{a_p, K}$ 表示在第一批应急物资未到之前进行应急, 与常理不符, 而 $f < \max_{p \in \{1, 2, \dots, m\}} t_{a_p, K}$ 表示应急在最后一批物资到达之前就已经结束, 则该方案肯定不是最优方案.

结论2 若 $z_1 \geq \max_{p \in \{1, 2, \dots, m\}} t_{a_p}$, 则方案 $\varphi \in x_s$, 即 φ 关于最早应急起始时间 z_1 是连续可行的.

证明 对于 $\forall t \in [z_1, f]$ 按照方案 φ t 时刻到达 K 的应急物资数量 x , 即全部所需物资 t 时刻都已到达, 由式(19)可知

$$\sum_{p \in \{kl | t_{a_k, K} < t, k=1, 2, \dots, m\}} x'_{a_p} = x = (f - z_1)v \geq (t - z_1)v$$

显然 $\varphi \in x_s$.

结论3 若 $\min_{x_s \neq \phi} s = s^*$ 则 $t_{1,K} \leq s^* \leq t_{p,K} \leq f^*$ 其中 $f^* = s^* + \frac{x}{v}$.

证明 由结论2可知, 存在方案 φ^* 关于最早应急起始时间 $t_{p,K}$ 是连续可行的, 即 $\varphi^* \in x_{t_p}$, 且 $x_{t_p} \neq \phi$, 又由于 $\min_{x_s \neq \phi} s = s^*$, 可知 $s^* \leq t_p$. 又 $t_{1,K} = \min_{k \in \{1, 2, \dots, p\}} t_{k,K}, t_{p,K} = \max_{k \in \{1, 2, \dots, p\}} t_{k,K}$ 根据结论1, 有 $s^* \geq t_{1,K}, f^* \geq t_{p,K}$, 故有 $t_{1,K} \leq s^* \leq t_{p,K} \leq f^*$. 根据上面的结论, 可以得出:

定理1 若 $\sum_{k=0}^{p-1} x_k < x \leq \sum_{k=0}^p x_k$ 成立, 则 $\varphi^* = \{(A_1, x_1), (A_2, x_2), \dots, (A_p, x - \sum_{k=0}^{p-1} x_k)\}$ 为问题(20)的最优方案.

证明 设 $\min_{x_s \neq \phi} s = s^*$, 由结论3可知 $t_{1,K} \leq s^* \leq t_{p,K} \leq f^*$. 因为 $x_{s^*} \neq \phi$ 则必存在一方案 φ , 且 $\varphi = \{(A_{a_1}, x'_{a_1}), (A_{a_2}, x'_{a_2}), \dots, (A_{a_m}, x'_{a_m})\} \in x_{s^*}$, 其中 $0 < x'_{a_k} \leq x_{a_k}, \sum_{k=1}^m x'_{a_k} = x, \mu_1, \mu_2, \dots, \mu_m$ 为 $1, 2, \dots, n$ 子列的一个排列. 因此要使定理1成立, 只需证明 $\varphi^* \in s^*$ 即可.

又因为 $\varphi \in s^*$ 则对于 $\forall t \in [z_1^*, f^*] f^* = z_1^* + x/v$, 有 $\sum_{p \in \{kl | t_{k,K} \leq t, k=1, 2, \dots, m\}} x'_{a_p} \geq (t - z_1^*)v$, 又因为 $t_{p,K} = \max_{k=1, 2, \dots, p} t_{k,K}$ 需要分两种情况进行讨论:

I. 若 $z_1^* \geq t_{p,K}$, 由结论2可知 $\varphi^* \in s^*$.

II. 若 $z_1^* < t_{p,K}$, 则对于 $\forall t \in [z_1^*, f^*]$, 当 $t \in [z_1^*, t_{p,K})$ 时, 按照方案 φ^* , t 时刻已送达 K 的应急物资数量为 $\sum_{k=\{p | t_{p,K} < t, p=1, 2, \dots, n\}} x_k \geq \sum_{k=\{p | t_{a_p, K} < t, p=1, 2, \dots, m\}} x_{a_k} \geq \sum_{k=\{p | t_{a_p, K} < t, p=1, 2, \dots, m\}} x'_{a_k} \geq (t - z_1^*)v$; 当 $t \in [t_{p,K}, f^*]$ 按照方案 φ^* , t 时刻已到达 K 的应急物资数量为 $x \geq (t - z_1^*)v$, 故 $\varphi^* \in s^*$ 因而定理1得证.

2.3 最早应急时间求解

从上一节可知 φ^* 为问题(20)的最优方案, 而相对于方案 φ^* 其最小可能的应急时间为 z_1^* . 由结论3可知 z_1^* 必然满足 $t_{1,K} \leq z_1^* \leq t_{p,K}$, 即

$z_1^* \in [t_{1K}, t_{pK}]$.

定理 2 若最小可能应急时间 z_1 满足 $t_{1K} \leq z_1 \leq t_{pK}$, 则方案 φ^* 关于最小可能应急时间 z_1 也是连续可行的充要条件是 $\forall t \in [0, t_{pK}]$ 都有

$$\sum_{a=\{at_{aK} < t, \mu=0, 1, \dots, p\}} x_a \geq (t - z_1)v \quad (21)$$

1) 必要性证明 由于 $t_{1K} \leq z_1 \leq t_{pK}$, 且 $z_1 \geq 0$, 则对于 $\forall t \in [0, t_{pK}]$ 需要分两种情况讨论:

I. 当 $t \in [0, z_1)$ 时, 式(21) 左边为小于零的数, 而右边为大于等于零的数, 显然成立.

II. 当 $t \in [z_1, t_{pK}]$ 时, 根据结论 3 可知, $[z_1, t_{pK}] \subset [z_1, f]$, 而对于 $\forall t \in [z_1, f]$, 都有 $\sum_{p \in \{k | t_{kK} \leq t, k=1, 2, \dots, m\}} x'_{a_p} \geq (t - z_1)v$, 而 φ^* 作为 φ 的重要表现形式, 根据定理 1, 显然成立.

2) 充分性证明 由结论 1 可知 $f \geq t_{pK}$, 故

I. 若 $f = t_{pK}$, 则 $[z_1, f] \subset [0, t_{pK}]$, 显然结论成立.

II. 若 $f > t_{pK}$, 对于 $\forall t \in [z_1, f]$ 则需要分两种情况进行讨论:

a) 当 $t \in [z_1, t_{pK}]$, 由于 $[z_1, t_{pK}] \subset [0, t_{pK}]$, 按照方案 φ^* , t 时刻已到达 K 的应急物资数量为 $\sum_{a=\{at_{aK} < t, \mu=1, 2, \dots, p\}} x_a \geq (t - z_1)v$.

b) 当 $t \in (t_{pK}, f]$ 按照方案 φ^* , t 时刻已到达 K 的应急物资数量为 x , 即已经满足应急需求, 也就是说 $\sum_{a=\{at_{aK} < t, \mu=1, 2, \dots, p\}} x_a = x \geq (t - z_1)v$.

故 $\varphi^* \in x_s$, 从而定理 2 得证.

定理 3 最优方案 φ^* 对应的最早应急起始时

间为 $\max_{k \in \{1, 2, \dots, p\}} \left(t_{kK} - \sum_{a=\{at_{aK} < t_{kK}, \mu=0, 1, \dots, p\}} \frac{x_a}{v} \right) (t_{0K} = 0, x_0 = 0)$.

证明 令

$$\hat{s} = \max_{k \in \{1, 2, \dots, p\}} \left(t_{kK} - \sum_{a=\{at_{aK} < t_{kK}, \mu=0, 1, \dots, p\}} \frac{x_a}{v} \right)$$

则 $\hat{s} \leq \max_{k \in \{1, 2, \dots, p\}} (t_{kK}) = t_{pK}$, 又 $\hat{s} \geq t_{1K} -$

$$\sum_{a=\{at_{aK} < t_{1K}, \mu=0, 1, \dots, p\}} \frac{x_a}{v} = t_{1K}$$

故有 $t_{1K} \leq \hat{s} \leq t_{pK}$.

I. 若 $\varphi^* \in x_s$, 则有 $z_1 \geq \hat{s}$, 因为若 $\varphi^* \in x_s$, 根据定理 2, 对于 $\forall t \in [0, t_{pK}]$ 有

$\sum_{a=\{at_{aK} < t, \mu=0, 1, \dots, p\}} x_a \geq (t - z_1)v$. 因此, 假设 δ 为充分小的正数, 则当 $t \in (t_{kK} - \delta, t_{kK})$ 时, t 时刻到达 K 的应急物资数量有如下关系

$$(t - z_1)v \leq \sum_{a=\{at_{aK} < t, k=0, 1, \dots, p\}} x_a, \quad (22)$$

$$(t - z_1)v = \sum_{a=\{at_{aK} < t_{kK}, \mu=0, 1, \dots, p\}} x_a$$

当 $t \rightarrow t_{kK}$ 时, 根据式(22) 可得

$$(t_{kK} - z_1)v \leq \sum_{a=\{at_{aK} < t_{kK}, \mu=0, 1, \dots, p\}} x_a$$

从而

$$z_1 \geq t_{kK} - \sum_{a=\{at_{aK} < t_{kK}, \mu=0, 1, \dots, p\}} \frac{x_a}{v}, k = 1, 2, \dots, p$$

即

$$z_1 \geq \max_{k \in \{1, 2, \dots, p\}} \left(t_{kK} - \sum_{a=\{at_{aK} < t_{kK}, \mu=0, 1, \dots, p\}} \frac{x_a}{v} \right) = \hat{s}$$

II. 若 $\varphi^* \in x_s$, 则由

$$\hat{s} = \max_{k \in \{1, 2, \dots, p\}} \left(t_{kK} - \sum_{a=\{at_{aK} < t_{kK}, \mu=0, 1, \dots, p\}} \frac{x_a}{v} \right)$$

可知 $\hat{s} \geq vt_{kK} - \sum_{a=\{at_{aK} < t_{kK}, \mu=0, 1, \dots, p\}} \frac{x_a}{v}$, 其中 $k = 1, 2, \dots, p$, 从而可得 $\sum_{a=\{at_{aK} < t_{kK}, \mu=0, 1, \dots, p\}} x_a \geq (t_{kK} -$

$\hat{s})v$, 其中 $k = 1, 2, \dots, p$. 于是对于 $\forall t \in [0, t_{pK}]$, 设 $\lambda = \arg \min \{t_{aK} \geq t, a = 1, 2, \dots, p\}$, 则有 $(t - \hat{s})v \leq (t_{\lambda K} - \hat{s})v \leq \sum_{a=\{t_{aK} < t_{\lambda K}, \mu=0, 1, \dots, p\}} x_a$, 当且仅当

$t = t_{\lambda K}$ 时, 有 $\sum_{a=\{t_{aK} < t_{\lambda K}, \mu=0, 1, \dots, p\}} x_a <$

$\sum_{a=\{t_{aK} < t, \mu=0, 1, \dots, p\}} x_a$, 故根据定理 2, $\varphi^* \in x_s$, 定理 3 得证.

推论 1 在震后和交通管制条件下, 出救点 A_a 到应急地点 K 所需时间 t_{aK} 已知, 且有 $t_{1K} < t_{2K} < \dots < t_{pK}$ 的情况下, 其最优方案为 φ^* 对应的最早应急时间为

$$\max_{k \in \{1, 2, \dots, p\}} \left(t_{kK} - \sum_{a=0}^{k-1} \frac{x_a}{v} \right).$$

2.4 混合遗传算法求解交通管制策略

由图 4 可知, 本文所建模型的求解是个反复循环迭代寻优的过程, 与遗传算法的基因进化特性类似. 况且震后交通管制通常是对部分路段实施管制, 因而对于此类交通管制策略的求解是一类组合优化问题, 属于 NP-hard 问题. 因此, 为快

速得出有效的交通管制策略,防止迭代寻优陷入局部最优,需要采用具有良好全局寻优能力,且具有并行特性的算法进行求解.而遗传算法是借鉴生物界进化规律演化而来的随机化搜索方法,具有内在的隐并行性和良好的全局寻优能力,且在组合优化领域得到了广泛应用.因此,本文在简单遗传算法(SGA)的基础上进行改进,设计了一种非支配解排序混合遗传算法(NSGA-II),对其进行求解,具体步骤如图7所示.

2.4.1 算法步骤

1) 染色体编码

对于每一条路段只有管制与不管制两种情况,因而每一条染色体通过对所有路段采用0-1方式进行编码,其中0表示该路段不进行交通管制,1表示进行交通管制.

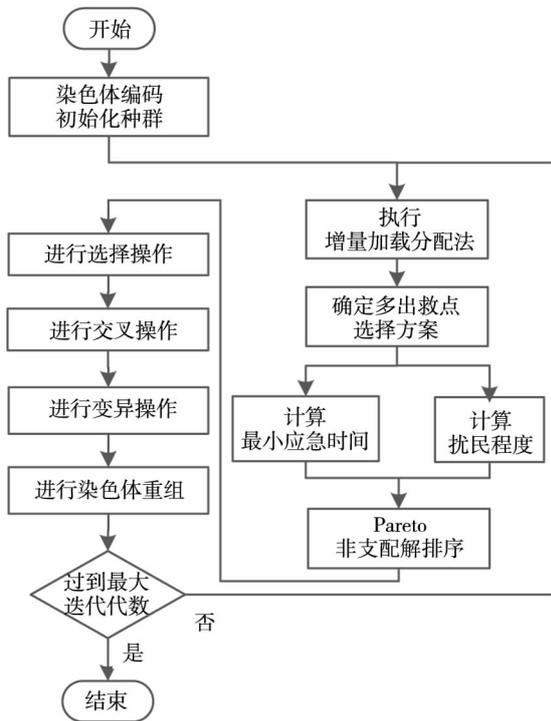


图7 混合遗传算法流程图

Fig. 7 The hybrid genetic algorithm

2) 适应度计算(非支配解排序)

对染色体进行解码,获得受交通管制的路段后,进行交通流均衡分配,进而得到出救点选择方案,可求解出最早应急时间 z_1 和所有OD对之间的平均扰民程度的最大值 z_2 .再对种群中所有染色体对应的目标值 z_1 和 z_2 进行非支配解排序^[26-27],得到不同 Pareto 前沿面.

3) 选择操作

采用两轮锦标赛淘汰方式进行染色体选择.

4) 交叉算子

由染色体编码可知,染色体长度为路网中路段数,因而为避免大规模网络影响算法的收敛速度,采用均匀交叉算子进行染色体交叉操作.

5) 变异算子

同交叉算子一样,采用均匀变异算子对染色体进行变异操作.

6) 终止条件

当迭代代数大于最大迭代代数时,终止迭代,输出 Pareto 前沿面.

2.4.2 算法复杂度分析

设上述混合遗传算法的种群规模为 P ,迭代次数为 M ,问题规模为网络结构图 $G(L, N)$,在增量加载分配法进行 Λ 次IAON迭代, K 个可选出救点的情况下,上述问题的计算复杂度分析如下.混合遗传算法首先需要进行编码操作,然后每次迭代都要经过解码、适应度计算及非支配解排序、选择、交叉变异以及染色体重组操作,因此可以分步骤进行复杂度计算:1) 对于编码操作,其复杂度为 $P \cdot O(L)$;2) 对于每次迭代来说,其解码复杂度为 $O(1)$;迭代一次的算法复杂度即为两次IAON复杂度,而IAON算法复杂度为 $O((N+K)^2) + O((N+K)^3) + O((N+K)^2)$;对于出救点选择方案以及最早应急时间计算,只需进行从小到大排序即可得知,因此其复杂度为 $O(K^2)$;对于扰民程度的计算,为每个OD对时间增幅的计算,其计算复杂度为 $O(N^2)$.之后对相应目标进行非支配解排序,根据文献[26]和[27]可知,其算法复杂度为 $O(P^2 \lg P)$;3) 对于遗传算法的选择操作,采用两次锦标赛淘汰机制,其复杂度为 $O(P)$;对于交叉、变异算子均采用均匀交叉或者均匀变异,其复杂度为 $O(L)$;重组操作,其复杂度为 $O(P)$.因此,整个算法的计算复杂度可表示为

$$O(P, M, G(L, N), K, \Lambda) = P * O(1) + M * O(P) + M * P * (O(L) + 2 * \Lambda * (2 * O((N+K)^2) + O((N+K)^3))) + O(K^2) + O(P^2 \lg P) + O(N^2) + 2 * O(L) + M * O(P) \approx 2 * \Lambda * M * P * O((N+K)^3)$$

可以看出,混合遗传算法计算量与其种群规模、

迭代次数 以及所研究路网节点数的立方成正比。

3 算例分析

3.1 算例构造

Chen 和 Tzeng^[28] 根据 1994 年美国北岭地震情形 在不改变各城市区位特性和拓扑结构特性条件下 将北岭地震灾区抽象为经典的 Sioux-Fall 路网拓扑结构 共有 24 个节点 76 条边 并根据 GIS 分析以及航拍技术获得震后路网各个路段的受损情况(因桥梁坍塌或者滑坡等造成该路段无法通行) 如图 8 所示. 本文以此为背景构造算例, 验证震后在路网受到破坏 部分路段实施交通管制情况下的多出救点应急物资调运优化模型及算法的可行性.

设图中应急物资需求点 5 对应急物资的需求量转化为 OD 通行量后为 100 000 车当量, 其消耗速度为 10 000 车当量 /h. 此外, 可用出救点 7、12、18、20 和 24 的吞吐量分别为 3 000 车当量 /h、2 000 车当量 /h、3 000 车当量 /h、3 000 车当量 /h 和 2 000 车当量 /h. 震前路网特征数据以及各 OD 对的交通需求(其中节点 1-3、9-11、13、18-19 处的流量不守恒) 参见文献 [29]; 地震造成部分路段的通行能力下降情况见表 1; 震后 OD 对交通需求变化情况见表 2.

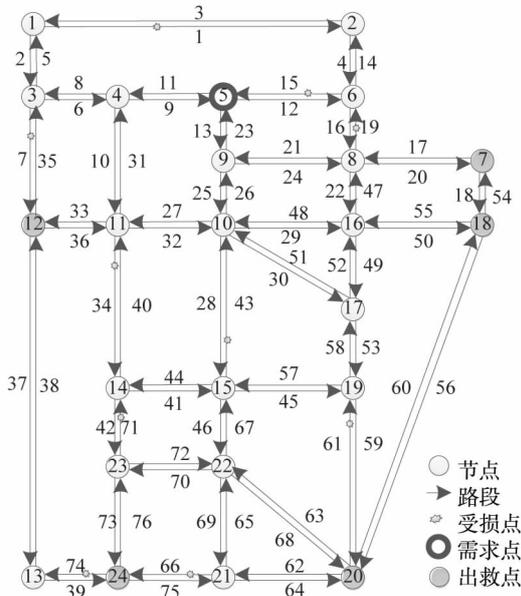


图 8 Sioux-Fall 路网结构

Fig. 8 Sioux-Fall network

表 1 震后受影响路段的通行能力

Table 1 Post-earthquake flow capacity of affected roads

路段 ID	起始节点	终止节点	路段长度 /km	路道数	α	β	交通容量 / 车当量 · h ⁻¹	速度限制 /km · h ⁻¹
2	1	3	6	1	0.15	4	12 530.9	30
3	2	1	6	1	0.15	4	18 630.6	48
4	2	6	5	1	0.15	4	3 697.65	50
5	3	1	4	1	0.15	4	21 023.3	50
6	3	4	4	1	0.15	4	12 620.4	45
8	4	3	4	1	0.15	4	12 620.4	45
9	4	5	2	1	0.15	4	2 867.43	50
10	4	11	6	1	0.15	4	3 886.76	48
11	5	4	2	1	0.15	4	2 867.43	45
12	5	6	4	1	0.15	4	4 330	52
13	5	9	5	1	0.15	4	8 645	50
14	6	2	5	1	0.15	4	3 697.65	50
16	6	8	2	1	0.15	4	4 245.32	46
28	10	15	6	1	0.15	4	2 876.46	42
39	13	24	4	1	0.15	4	4 100.34	42
40	14	11	4	1	0.15	4	3 654.65	54
42	14	23	4	1	0.15	4	800.56	50
59	19	20	4	1	0.15	4	2 468.26	36
75	24	21	3	1	0.15	4	3 678.86	48

表 2 震后部分 OD 对的交通需求变化情况

Table 2 The change in flow capacity of partial OD pairs after the earthquake

编号	起始点	终止点	交通需求变化 / 车当量 · h ⁻¹
1	1	20	+ 300
2	2	20	+ 100
3	4	19	+ 150
4	5	7	+ 400
5	5	18	+ 300
6	5	19	+ 100
7	5	20	+ 200
8	11	8	+ 100
9	12	18	+ 100
10	19	3	- 150
11	20	4	- 200
12	20	5	- 100
13	21	8	- 200
14	22	5	- 200
15	22	8	- 150
16	24	16	- 150

3.2 算例求解

算法参数设置如下: 增量加载法分配法迭代次数 $\Lambda = 6$, 遗传算法种群规模 $P = 100$, 最大迭代代数 $M = 700$, 交叉概率 $P_c = 0.9$, 变异概率 $P_m = 0.1$, 锦标淘汰池大小 $T = P/2$. 采用 Matlab 语言对算法编程实现, 通过 Intel Core2 i5 2.25GHz 2G 内存的机器运行 1 387.01s, 其收敛效果如图 9 所示. 最后所得 Pareto 解集如图 10 所示, 对应的交通管制措施、出救点选择、最小应急时间、应急物资调运策略和扰民程度如表 3 所示.

从图 9 可以看出, 算法在 500 代左右跳出了局部最优解, 最后收敛到了 Pareto 第一前沿面上, 如图 9 和图 10 所示, 说明算法具有较好的收敛性.

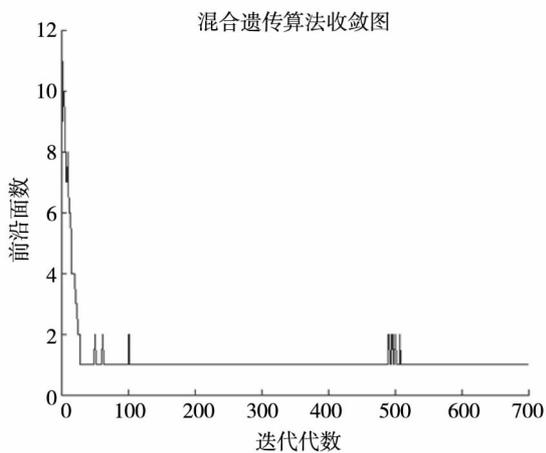


图 9 混合遗传算法收敛图

Fig.9 Convergence of hybrid genetic algorithm

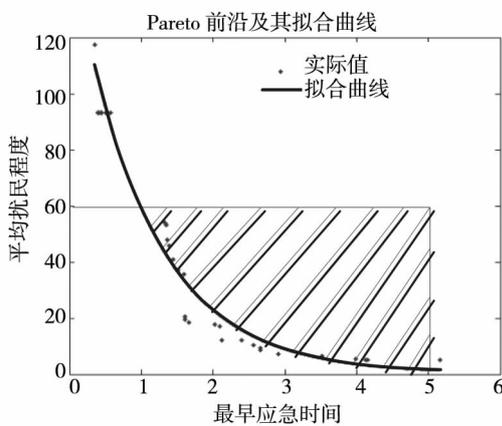


图 10 Pareto 解集及其拟合曲线

Fig.10 Pareto set of and its fitting curve

设应急物资需求点 5 需要在 15 h 内完成救援工作, 根据式(19)、(20) 可以计算其最早应急时间 $z_1 \leq 5$. 因而在 $z_1 \leq 5$ 且平均扰民程度 $\Gamma \leq 60\%$ 的情况

下, 可行解区域如图 10 中阴影部分所示, 根据所求 Pareto 最优解, 可得最优 Pareto 解集.

由表 3 可知, 随着最早应急时间的推后, 因交通管制策略造成的平均扰民程度大幅度下降; 交通管制策略也发生了变化, 主要体现在出救路径中被实施交通管制路段数所占比例呈下降趋势. 但当最早应急时间推迟到 4 h 以后, 出救路径中被实施交通管制路段数所占比例出现上升现象, 这是因为在对其他非救援路径上的路段进行交通管制时造成救援路径所在路段的交通流量上升, 阻碍了救援的展开, 因而为达到救援目的, 增加了对出救路径的主要路段实施交通管制, 如路段 17 和 21. 但不管交通管制策略如何变化, 可用出救点的选择以及出救点的救援路径保持不变(旅行时间会变). 综合考虑地理因素, 发现所选择的救援路径都是沿着边缘高速公路进行运输, 目的是尽量减少对灾区内部的交通造成拥堵而扰民, 符合实际情况.

4 结束语

本文综合考虑了震后交通路网结构发生变化、OD 需求发生变化的情况下, 多出救点联合参与救援情况下的应急物资调运问题. 为了提高救援效率, 需要实施必要的交通管制措施来达到应急物资的快速合理调运的目的. 为此, 文中建立了震后交通管制条件下的多出救点应急物资调运优化模型, 并设计了一种 NSGA-II 混合遗传算法对模型进行求解, 最后以美国北岭地震为背景构造算例对模型进行验证. 结果表明: 通过实施交通管制可以使最早应急时间提前, 但会对非灾民的出行造成一定的影响; 而当给定救援结束时间时, 根据应急物资消耗速率可以计算最早应急时间, 从而制定相应的交通管制策略.

本文只考虑了车辆出救路径, 进一步的研究可考虑车辆完成救援任务后的返回路径, 以及返回路径流量对整个交通路网的影响. 此外, 除了考虑出救路径的救援时间最短, 还可考虑路径的可靠性, 如受次生灾害或者余震造成中断的可能性. 本文假设交通管制信息完全公开, 能够及时被获取, 对于不完全信息情形也有待进一步的研究.

表 3 部分具有代表性的 Pareto 解及其对应的策略和目标
Table 3 Part of representative Pareto solutions and their corresponding strategies and objectives

编号	最早应急时间 /h	平均扰民程度(%)	实施交通管制的路段	选择的出救点	出救路径(旅行时间 /h)	出救路径中被实施交通管制路段数所占比例(%)
1	0.50	93.09	12/16/17/21/23/30/48/49/54/69/75	7/18/20/24	7-8-9-5 (0.48) 18-7-8-9-5 (0.51) 20-18-7-8-9-5 (0.70) 24-21-20-18-7-8-9-5 (1.92)	57.14
2	1.32	54.09	16/17/21/48/49/51/54/69/75/76		7-8-9-5 (1.38) 18-7-8-9-5 (1.41) 20-18-7-8-9-5 (1.54) 24-21-20-18-7-8-9-5 (1.87)	57.14
3	1.52	36.94	10/14/16/21/28/48/51/54/69/75/76		7-8-9-5 (1.61) 18-7-8-9-5 (1.64) 20-18-7-8-9-5 (1.74) 24-21-20-18-7-8-9-5 (2.06)	42.86
4	2.03	17.85	12/17/21/22/36/49/69/75/76		7-8-9-5 (1.73) 18-7-8-9-5 (1.76) 20-18-7-8-9-5 (1.85) 24-21-20-18-7-8-9-5 (2.57)	42.86
5	2.57	10.29	10/21/28/33/44/48/51/59/75/76		7-8-9-5 (2.83) 18-7-8-9-5 (2.86) 20-18-7-8-9-5 (3.15) 24-21-20-18-7-8-9-5 (4.72)	28.57
6	2.90	7.13	9/10/12/21/28/36/59/75/76		7-8-9-5 (2.45) 18-7-8-9-5 (2.49) 20-18-7-8-9-5 (2.64) 24-21-20-18-7-8-9-5 (3.45)	28.57
7	3.50	6.61	9/10/12/21/22/28/36/59/75		7-8-9-5 (2.65) 18-7-8-9-5 (2.68) 20-18-7-8-9-5 (2.86) 24-21-20-18-7-8-9-5 (4.34)	28.57
8	4.12	5.17	9/10/17/21/22/44/51/59/75		7-8-9-5 (2.70) 24-21-20-18-7-8-9-5 (4.70) 18-7-8-9-5 (2.73) 20-18-7-8-9-5 (2.98)	42.86
9	5.16	5.09	9/10/12/17/21/44/48/51/59/75		7-8-9-5 (2.54) 24-21-20-18-7-8-9-5 (5.72) 18-7-8-9-5 (2.57) 20-18-7-8-9-5 (2.87)	42.86

参 考 文 献:

[1]刘爱文,夏 珊,徐 超. 汶川地震交通系统震害及震后抢修[J]. 震灾防御技术,2008,3(3): 243-250.
Liu Aiwen, Xia Shan, Xu Chao. Damage and emergency recovery of the transportation systems after Wenchuan earthquake [J]. Technology for Earthquake Disaster Prevention, 2008, 3(3): 243-250. (in Chinese)

[2]Cui P, Zhu Y, Han Y, et al. The 12 May Wenchuan earthquake-induced landslide lakes: Distribution and preliminary risk evaluation[J]. Landslides, 2009, 6(3): 209-223.

[3]Jia H, Ordez F, Dessouky M M. Solution approaches for facility location of medical supplies for large-scale emergencies[J]. Computers & Industrial Engineering, 2007, 52(2): 257-276.

- [4] Rawls C G, Turnquist M A. Pre-positioning of emergency supplies for disaster response [J]. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2010, 44(4): 521–534.
- [5] 樊 博. 基于空间聚类挖掘的城市应急救援机构选址研究 [J]. *管理科学学报*, 2008, 11(3): 16–28.
Fan Bo. Spatial clustering mining method for site selection problem of emergency response center [J]. *Journal of Management Sciences in China*, 2008, 11(3): 16–28. (in Chinese)
- [6] Sheu J B. An emergency logistics distribution approach for quick response to urgent relief demand in disasters [J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2007, 43(6): 687–709.
- [7] Sheu J B. Dynamic relief-demand management for emergency logistics operations under large-scale disasters [J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2010, 46(1): 1–17.
- [8] 吕永波, 贾 楠, 任锦鸾, 等. 救灾物资发放问题的动态遗传算法求解 [J]. *管理科学学报*, 2008, 11(3): 29–34.
Lü Yongbo, Jia Nan, Ren Jinluan, et al. Dynamic genetic algorithm for problems of distributing goods to disaster areas [J]. *Journal of Management Sciences in China*, 2008, 11(3): 29–34. (in Chinese)
- [9] Tzeng G H, Cheng H J, Huang T D. Multi-objective optimal planning for designing relief delivery systems [J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2007, 43(6): 673–686.
- [10] Widener M J, Horner M W. A hierarchical approach to modeling hurricane disaster relief goods distribution [J]. *Journal of Transport Geography*, 2011, 19(4): 821–828.
- [11] Shen Z, Dessouky M M, ORDEZ F. A two-stage vehicle routing model for large-scale bioterrorism emergencies [J]. *Networks*, 2009, 54(4): 255–269.
- [12] 魏 航, 魏 洁. 随机时变网络下的应急路径选择研究 [J]. *系统工程学报*, 2009, 24(1): 99–103.
Wei Hang, Wei Jie. Emergency path problem in stochastic and time-varying network [J]. *Journal of Systems Engineering*, 2009, 24(1): 99–103. (in Chinese)
- [13] 田 军, 马文正, 汪应洛, 等. 应急物资配送动态调度的粒子群算法 [J]. *系统工程理论与实践*, 2011, 31(5): 898–906.
Tian Jun, Ma Wenzheng, Wang Yingluo, et al. Emergency supplies distributing and vehicle routes programming based on particle swarm optimization [J]. *System Engineering – Theory & Practice*, 2011, 31(5): 898–906. (in Chinese)
- [14] Yi W, Özdamar L. A dynamic logistics coordination model for evacuation and support in disaster response activities [J]. *European Journal of Operational Research*, 2007, 179(3): 1177–1193.
- [15] Afshar A M, Haghani A. Modeling integrated supply chain logistics in real-time large-scale disaster relief operations [J]. *Socio-Economic Planning Sciences*, 2012, 46(4): 327–338.
- [16] 代 颖, 马祖军, 朱道立, 等. 震后应急物资配送的模糊动态定位路径问题 [J]. *管理科学学报*, 2012, 15(7): 60–70.
Dai Ying, Ma Zujun, Zhu Daoli, et al. Fuzzy dynamic location-routing problem in post-earthquake delivery of relief materials [J]. *Journal of Management Sciences in China*, 2012, 15(7): 60–70. (in Chinese)
- [17] 王绍仁, 马祖军. 震害紧急响应阶段应急物流系统中的 LRP [J]. *系统工程理论与实践*, 2011, 31(8): 1497–1507.
Wang Shaoren, Ma Zujun. Location-routing problem in emergency logistics system for post-earthquake emergency relief response [J]. *System Engineering – Theory & Practice*, 2011, 31(8): 1497–1507. (in Chinese)
- [18] Iida Y, Kurauchi F, Shimada H. Traffic management system against major earthquakes [J]. *IATSS research*, 2000, 24(2): 6–17.
- [19] Chang S E, Nojima N. Measuring post-disaster transportation system performance: The 1995 Kobe earthquake in comparative perspective [J]. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 2001, 35(6): 475–494.
- [20] Feng C M, Wen C C. Traffic control management for earthquake-raided area [J]. *Journal of the Eastern Asia Society for transportation studies*, 2003, (5): 3261–3275.
- [21] Feng C M, Wen C C. A fuzzy bi-level and multi-objective model to control traffic flow into the disaster area post earthquake [J]. *Journal of the Eastern Asia Society for transportation studies*, 2005, (6): 4253–4268.
- [22] 李永义, 李伯权, 储 浩. 交通生命线系统震后应急调度模型及方法 [J]. *南京工业大学学报(自然科学版)*, 2011, 33(1): 33–37.

- Li Yongyi, Li Boquan, Chu Hao. Emergency scheduling model and its method of traffic lifeline system after earthquake [J]. Journal of Nanjing University of Technology(Natural Science Edition), 2011, 33(1): 33–37. (in Chinese)
- [23] Manheim M L, Ruiter E R, Dodotrans I. A Decision-Oriented Computer Language for Analysis of Multimode Transportation Systems [R]. HRB Highway Research Record, 1970.
- [24] 王 炜. 城市交通网络规划理论与方法研究 [D]. 南京: 东南大学, 1989.
Wang Wei. Research on Theory and Method of Urban Transport Network Planning [D]. Nanjing: Southeast University, 1989. (in Chinese)
- [25] 刘春林, 盛昭瀚, 何建敏. 基于连续消耗应急系统的多出救点选择问题 [J]. 管理工程学报, 1999, 13(3): 13–16.
Liu Chunlin, Sheng Zhaohan, He Jianmin. Multi-depot selection in emergency systems with continuous consumption resources [J]. Journal of Industrial Engineering and Engineering Management, 1999, 13(3): 13–16. (in Chinese)
- [26] Deb K, Agrawal S, Pratap A, et al. A fast elitist non-dominated sorting genetic algorithm for multi-objective optimization: NSGA-II [J]. Lecture notes in computer science, 2000, (1917): 849–858.
- [27] Deb K, Pratap A, Agrawal S, et al. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II [J]. Evolutionary Computation, IEEE Transactions on, 2002, 6(2): 182–197.
- [28] Chen Y W, Tzeng G H. A fuzzy multi-objective model for reconstructing the post-quake road-network by genetic algorithm [J]. International Journal of Fuzzy Systems, 1999, 1(2): 85–95.
- [29] Chang L. Transportation System Modeling and Applications in Earthquake Engineering [D]. Urbana-Champaign: University of Illinois, 2010.

Post-earthquake multi-depot relief distribution under traffic control

LI Shuang-lin^{1,2}, MA Zu-jun²

1. School of Transportation and Logistics, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;
2. Institute for Logistics and Emergency Management, School of Economics and Management, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China

Abstract: To generate adequate distribution routes for relief materials after an earthquake is the kernel of an effective traffic management system. By considering the road network partially destroyed by earthquake and the traffic control executed to avoid traffic congestion, the post-earthquake multi-depot relief distribution problem was explored to improve the rescue efficiency and reduce the influence on non-victim people. A multi-objective optimization model for user equilibrium-based post-earthquake relief distribution problem was developed to minimize the earliest start time of emergency response and the disturbance of traffic control of non-victim people. A no-dominate sort genetics algorithm (NSGA-II) was designed to solve the model. Finally, the 1994 Northridge earthquake is taken as an example to verify the model and algorithm. The results show that the earliest start time of emergency responses can be advanced by implementing traffic control measures at the expense of the travel inconvenience of non-victim people. Given the end time of emergency responses, the earliest start time of emergency responses can be calculated according to the material consumption speed, and the corresponding traffic control strategy can be set down.

Key words: earthquake disaster; relief materials; distribution routes; traffic control; traffic assignment