

文章编号:1003-207(2013)02-0152-09

# 突发事件应急救援人员的派遣模型研究

袁媛,樊治平,刘洋

(东北大学工商管理学院,辽宁沈阳 110004)

**摘要:**本文针对突发事件应急救援人员派遣问题,考虑位于不同出救点的救援人员到达救援需求点执行救援任务的应急救援时间满意度,以及救援人员对不同应急救援任务的胜任程度,以应急救援时间满意度最大以及救援人员完成救援任务的“效果”最佳为目标,建立了突发事件应急救援人员派遣的优化模型。针对优化模型的特点,给出了有效的求解方法。最后,通过一个算例分析说明了构建的模型及所给出的求解方法的可行性和有效性。

**关键词:**应急救援;人员派遣;应急救援时间满意度;救援任务胜任程度;优化模型

**中图分类号:**C935; N945 **文献标识码:**A

## 1 引言

突发事件是指规模较大并且对生命和财产构成严重威胁的突然发生的紧急事件<sup>[1-2]</sup>。近年来,包括自然灾害、事故灾难、公共卫生事件、社会安全事件在内的各种类型的突发事件频繁发生,造成了巨大的人员伤亡和财产损失。因此,关于突发事件应急管理的研究已引起了国内外一些学者的关注<sup>[3-5]</sup>。

在突发事件发生后,通常需要尽快派遣救援人员前往事件发生地并开展有效的应急救援,以尽可能降低突发事件造成的损失。需要指出的是,由于突发事件应急救援的时间紧迫性,突发事件应急救援人员的派遣需要考虑位于不同地点的救援人员到达事发地点所需的时间。此外,由于突发事件应急救援中往往面临多个不同的救援任务,因此还需要考虑救援人员对不同应急救援任务的胜任程度,以使救援人员完成救援任务的“效果”最佳。因此,如何获取最优的应急救援人员派遣方案,在使突发事件得到迅速响应的同时,保证救援人员完成救援任务的“效果”最佳,这是一个具有实际意义的研究课题。目前,关于突发事件应急救援人员派遣问题的研究所见甚少,但可看到一些其他背景下人员派遣

或指派问题的研究成果<sup>[6-12]</sup>。例如,Sampson<sup>[6]</sup>针对公共服务中作为志愿者参与服务的人员派遣问题,考虑参与服务的志愿者的数量以及志愿者对不同服务任务的参与意愿,建立了目标规划模型,并通过模型的求解得到志愿者派遣方案。Seyda 和 Irem<sup>[7]</sup>针对考虑在职时间和工作强度等因素的医护人员的工作调度问题,建立了能够获取医护人员最优指派方案的混合整数规划模型,并设计了求解模型的列生成算法。Falasca 和 Zobel<sup>[8]</sup>针对人道组织中的志愿者派遣问题,考虑志愿者的能力以及对各项任务的参与意愿,建立了多目标优化模型,并通过模型的求解获得最优的志愿者派遣方案。可以看到,已有研究涉及的人员派遣方法大多是针对公共服务、医疗服务等特定背景下的人员派遣问题,没有考虑突发事件应急救援时间紧迫、出救点分散、救援任务多样等复杂特征,不适合直接被用来解决突发事件背景下的应急救援人员派遣问题。为此,本文针对突发事件应急救援人员的派遣问题,考虑位于不同地点的救援人员前往事件发生地开展救援的应急救援时间满意度以及救援人员对应急救援任务的胜任程度,通过优化模型的建立与求解,获得最优的应急救援人员派遣方案。

## 2 问题描述

下列符号用来表示突发事件应急救援人员派遣问题的集和量:

$A = \{A_1, A_2, \dots, A_m\}$ : 应急救援人员出救点的集合,其中  $A_i$  表示第  $i$  个出救点,  $i = 1, 2, \dots, m$ 。

$a = (a_1, a_2, \dots, a_m)$ : 应急救援人员出救点中可

收稿日期:2011-06-10; 修订日期:2012-09-11

基金项目:国家自然科学基金重大研究计划培育项目(90924016);国家自然科学基金项目(71101020, 71001020, 71271051);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(N090406003, N100406012, N110706001)

作者简介:袁媛(1980-),女(满族),辽宁抚顺人,东北大学工商管理学院讲师,博士后,研究方向:应急管理。

供派遣的救援人员数量向量,其中  $a_i$  表示出救点  $A_i$  中可供派遣的人员数量,  $i = 1, 2, \dots, m$ 。

$P_i = \{P_{i1}, P_{i2}, \dots, P_{ia_i}\}$ : 出救点  $A_i$  中的救援人员的集合,其中  $P_{ij}$  表示出救点  $A_i$  中的第  $j$  名应急救援人员,  $j = 1, 2, \dots, a_i$ 。

$D$ : 应急救援需求点。

$R = \{R_1, R_2, \dots, R_n\}$ : 救援需求点  $D$  中的救援任务集合,其中  $R_k$  表示第  $k$  项救援任务,  $k = 1, 2, \dots, n$ 。

$T_k^1$ : 救援任务  $R_k$  的最佳救援时间限,如果救援人员能够在  $T_k^1$  之前到达救援需求点并针对任务  $R_k$  展开救援,将取得最佳的救援效果。

$T_k^2$ : 救援任务  $R_k$  的有效救援时间限,若救援人员在  $T_k^1$  和  $T_k^2$  期间到达救援需求点并针对任务  $R_k$  展开救援,仍能实施有效的救援,但救援效果有所下降。

$T_k^{\max}$ : 救援任务  $R_k$  的救援失效时间限,若救援人员在  $T_k^2$  之后到达,则难以针对任务  $R_k$  实施有效救援,救援效果迅速下降;若在  $T_k^{\max}$  以后到达,则完全没有救援效果。

$t_i$ : 救援人员从出救点  $A_i$  到救援需求点  $D$  的到达时间。在突发事件发生的情况下,可能会出现道路拥堵、桥梁损坏等影响救援人员到达时间的不确定性因素,所以  $t_i$  的值通常很难精确估计。在本文中,考虑在一定的时间区间内对  $t_i$  进行估计,即  $t_i \in [t_i^L, t_i^U]$ ,  $0 \leq t_i^L \leq t_i^U$ 。

$d = (d_1, d_2, \dots, d_n)$ : 完成救援任务所需要的救援人员数量向量,其中  $d_k$  表示完成救援任务  $R_k$  所需要的救援人员数量,  $k = 1, 2, \dots, n$ 。

$H_{ij} = (h_1^{ij}, h_2^{ij}, \dots, h_n^{ij})$ : 救援人员  $P_{ij}$  对救援任务胜任程度的意向性指示向量,其中  $h_k^{ij}$  表示救援人员  $P_{ij}$  根据对自身救援技能的评估所填报的对救援任务  $R_k$  胜任程度的意向性指示信息,若救援人员  $P_{ij}$  完全不能胜任任务  $R_k$ , 则  $h_k^{ij} = \varphi$ 。由于救援人员通常只能熟练掌握 1-2 项救援技能,因此本文中考虑每名救援人员至多只能填报两项能够胜任的意向救援任务,并且当填报了两项意向救援任务时,救援人员对第一意向任务的胜任程度高于对第二意向任务的胜任程度。这里,记:

$$h_k^{ij} = \begin{cases} a, & \text{任务 } R_k \text{ 为人员 } P_{ij} \text{ 的第一意向救援任务} \\ b, & \text{任务 } R_k \text{ 为人员 } P_{ij} \text{ 的第二意向救援任务} \\ \varphi, & \text{其他} \end{cases} \quad (1)$$

$R_{ij} = (r_1^{ij}, r_2^{ij}, \dots, r_n^{ij})$ : 救援人员  $P_{ij}$  的意向救援任务的标识向量,其中  $r_k^{ij}$  表示救援任务  $R_k$  是否

为救援人员  $P_{ij}$  的意向救援任务。 $r_k^{ij}$  的取值可依据如下的公式(2)确定,即:

$$r_k^{ij} = \begin{cases} 1, & h_k^{ij} = a \text{ 或 } h_k^{ij} = b \\ 0, & h_k^{ij} = \varphi \end{cases} \quad (2)$$

由于救援人员至多只能填报 2 项意向救援任务,因此有  $0 < \sum_{k=1}^n r_k^{ij} \leq 2$ 。

$x_{ijk}$ : 决策变量。 $x_{ijk} = 1$  表示将出救点  $A_i$  中的救援人员  $P_{ij}$  分配至救援需求点完成任务  $R_k$ , 否则  $x_{ijk} = 0$ 。

图 1 是一个突发事件应急救援人员派遣问题的示意图,表 1 综合描述了救援人员填报的对救援任务胜任程度的意向性指示信息的情况。本文所要解决的问题是:考虑救援需求点中多个救援任务对于救援人员数量、救援人员到达时间的要求,以及救援人员对于救援任务的胜任程度,构建救援人员派遣的优化模型,并通过模型的求解获得最优的救援人员派遣方案,使得应急救援的救援时间满意度最大,并使得救援人员完成救援任务的“效果”最佳。同时,要求每名救援人员只能被派遣去完成他所填报的意向救援任务中的某一项救援任务,而分配到每项救援任务的救援人员数量满足该任务对救援人员的数量要求。

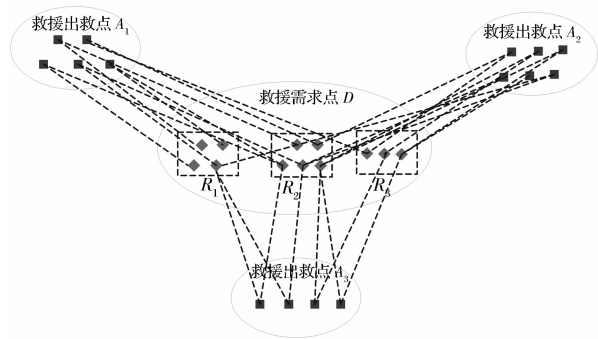


图 1 突发事件应急救援人员派遣问题示意图

本文的研究问题中,不考虑救援人员的派遣成本,并且仅考虑可供派遣的救援人员数量充足的情况。为保证救援人员数量充足,首先假设应急救援出救点中可供派遣的救援人员的全部数量不少于各应急救援任务所需要的救援人员数量之和,即  $\sum_{i=1}^m a_i \geq \sum_{k=1}^n d_k$ ; 其次,由于救援人员只能被派遣去完成他所填报的意向救援任务中的一项救援任务,因此针对每一项救援任务,假设填报的意向救援任务中包含该项任务的救援人员数量不少于该任务的需求人

表 1 救援人员对救援任务胜任程度的意向性指示向量

$A_i$	$P_{ij}$	$R_1$	$R_2$	...	$R_k$	...	$R_n$
		$d_1$	$d_2$	...		...	$d_n$
$A_1$	$P_{11}$	$h_1^{11}$	$h_2^{11}$	...		...	$h_n^{11}$
	$P_{12}$	$h_1^{12}$	$h_2^{12}$	...		...	$h_n^{12}$
	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$		$\vdots$	$\vdots$
	$P_{1a_1}$	$h_1^{1a_1}$	$h_2^{1a_1}$	...		...	$h_n^{1a_1}$
$A_2$	$P_{21}$	$h_1^{21}$	$h_2^{21}$	...		...	$h_n^{21}$
	$P_{22}$	$h_1^{22}$	$h_2^{22}$	...		...	$h_n^{22}$
	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$		$\vdots$	$\vdots$
	$P_{2a_2}$	$h_1^{2a_2}$	$h_2^{2a_2}$	...		...	$h_n^{2a_2}$
$\vdots$							
$A_i$							
	$P_{ij}$	—————→				$h_k^{ij}$	
$\vdots$							
$A_m$	$P_{m1}$	$h_1^{m1}$	$h_2^{m1}$	...		...	$h_n^{m1}$
	$P_{m2}$	$h_1^{m2}$	$h_2^{m2}$	...		...	$h_n^{m2}$
	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$		$\vdots$	$\vdots$
	$P_{ma_m}$	$h_1^{ma_m}$	$h_2^{ma_m}$	...		...	$h_n^{ma_m}$

数,即  $\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{a_i} r_k^{ij} \geq d_k, k = 1, 2, \dots, n$ ; 最后,为了避免由于救援人员填报的意向救援任务过于集中而可能出现某些救援任务无人可派的情况,这里假设对于救援任务集合中的任意两个不同的救援任务  $R_{k_1}, R_{k_2}$ , 填报意向中包含这两项任务的救援人员数量之和不少于这两项任务的需求人数之和,即

$$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{a_i} \max\{r_{k_1}^{ij}, r_{k_2}^{ij}\} \geq (d_{k_1} + d_{k_2}), k_1, k_2 = 1, 2, \dots, n \text{ 且 } k_1 \neq k_2$$

### 3 突发事件应急救援时间满意度的计算

为了对突发事件实施应急救援,考虑救援人员从出救点到达救援需求点的时间是一个非常重要的因素,它将直接影晌应急救援的最终效果。因此,需要构建救援人员到达救援需求点的时间与应急救援效果的函数关系,即需要构建应急救援时间满意度函数。这里,借鉴 Knight 等<sup>[13]</sup>,代颖等<sup>[14]</sup>,李国旗等<sup>[15]</sup>中分别针对救护车调度问题、应急物资配送问题和应急物流设施选址问题所建立的预期患者存活率函数、物资送达时间满意度函数和应急物流需求点满意度函数,并考虑到突发事件应急救援中各个救援任务对应急救援时间的要求,构建来自出救点  $A_i$  的救援人员完成救援任务  $R_k$  的应急救援时间满意度函数  $f_k(t_i)$  如下:

$$f_k(t_i) = \begin{cases} 1, & t_i \leq T_k^1 \\ \frac{(S_k^0 - 1)(t_i - T_k^1)}{T_k^2 - T_k^1} + 1, & T_k^1 < t_i \leq T_k^2 \\ \frac{S_k^0(t_i - T_k^{\max})}{T_k^2 - T_k^{\max}}, & T_k^2 < t_i \leq T_k^{\max} \\ 0, & t_i > T_k^{\max} \end{cases} \quad (3)$$

其中,  $S_k^0$  为救援人员在  $T_k^2$  时刻到达救援需求点并针对任务  $R_k$  进行救援的应急救援时间满意度。在现实中,  $T_k^1$ 、 $T_k^2$ 、 $T_k^{\max}$  以及  $S_k^0$  的值可由参与应急救援的专家依据对救援任务时间紧迫性的评估给出。

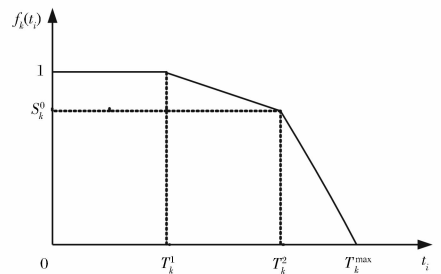


图 2 突发事件应急救援时间满意度函数

应急救援时间满意度函数  $f_k(t_i)$  的曲线形状如图 2 所示。由公式(3)及图 2 可以看出,应急救援时间满意度与任务  $R_k$  对救援时间的具体要求以及救援人员从出救点  $A_i$  到达救援需求点  $D$  的时间  $t_i$  有

关。当救援人员能够在救援任务  $R_k$  的最佳救援时间限  $T_k^1$  之前到达时,应急救援时间满意度为 1;当救援人员在任务  $R_k$  的最佳救援时间限  $T_k^1$  和有限救援时间限  $T_k^2$  期间到达时,应急救援时间满意度呈小幅下降趋势;当救援人员在任务  $R_k$  的有限救援时间限  $T_k^2$  之后到达时,应急救援时间满意度呈大幅下降趋势;当救援人员在救援失效时间限  $T_k^{\max}$  以后到达,则完全没有救援效果,应急救援时间满意度为 0。

在突发事件应急救援的情境下,救援人员到达救援需求点的时间  $t_i$  的值往往难以精确估计。在本文中,假设  $t_i$  在区间  $[t_i^l, t_i^u]$  内服从均匀分布,  $t_i^u \geq t_i^l \geq 0$ , 则可用  $[t_i^l, t_i^u]$  区间内的应急救援时间满意度的期望值  $s_{ik}$  表示救援人员从出救点  $A_i$  被派遣至救援需求点  $D$  完成任务  $R_k$  的应急救援时间满意度,即:

$$s_{ik} = \begin{cases} 1, & t_i^l \leq t_i \leq T_k^1 \\ 1 + \frac{(S_k^0 - 1)(t_i^u - T_k^1)^2}{2(t_i^u - t_i^l)(T_k^2 - T_k^1)}, & t_i^l \leq T_k^1, T_k^1 < t_i \leq T_k^2 \\ 1 + \frac{(S_k^0 - 1)(t_i^u + t_i^l - 2T_k^1)}{2(T_k^2 - T_k^1)}, & T_k^1 < t_i^l \leq t_i \leq T_k^2 \\ \frac{S_k^0(t_i^u - T_k^2)(T_k^2 + t_i^l - 2T_k^{\max})}{2(t_i^u - t_i^l)(T_k^2 - T_k^{\max})} + \frac{S_k^0(T_k^2 - t_i^l)(t_i^l + T_k^2 - 2T_k^1) + (T_k^2 - t_i^l)^2}{2(t_i^u - t_i^l)(T_k^2 - T_k^1)}, & T_k^1 < t_i^l \leq T_k^2, T_k^2 < t_i \leq T_k^{\max} \\ \frac{S_k^0(t_i^u + t_i^l - 2T_k^{\max})}{2(T_k^2 - T_k^{\max})}, & T_k^2 < t_i^l \leq t_i \leq T_k^{\max} \end{cases} \quad (5)$$

#### 4 突发事件应急救援人员派遣模型

设  $W_{ij} = (\omega_1^{ij}, \omega_2^{ij}, \dots, \omega_n^{ij})$  为救援人员  $P_{ij}$  对救援任务的胜任程度权重向量,其中  $\omega_k^{ij}$  表示根据救援人员  $P_{ij}$  给出的针对任务  $R_k$  的胜任程度意向性指示信息  $h_k^{ij}$  确定的完成任务  $R_k$  的胜任程度权重,其计算公式为:

$$\omega_k^{ij} = \begin{cases} 1, & h_k^{ij} = a \\ 0.5, & h_k^{ij} = b \\ 0, & h_k^{ij} = \varphi \end{cases} \quad (6)$$

根据本文的问题描述和变量定义,可构建如下的应急救援人员派遣模型:

(P1)

$$\max z_1 = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{a_i} \sum_{k=1}^n s_{ik} x_{ijk} \quad (7)$$

$$\max z_2 = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{a_i} \sum_{k=1}^n \omega_k^{ij} x_{ijk} \quad (8)$$

$$s. t. \sum_{k=1}^n x_{ijk} \leq 1, i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, a_i \quad (9)$$

$$s_{ik} = \frac{\int_{t_i^l}^{t_i^u} f_k(t) dt}{t_i^u - t_i^l} \quad (4)$$

$t_i^u$  和  $t_i^l$  的取值与应急救援时间满意度函数中的关键转折点  $T_k^1$ 、 $T_k^2$ 、 $T_k^{\max}$  在数值上可能具有多种不同的大小关系,因而也将具有多个相对应的应急救援时间满意度计算方法。而在突发事件应急救援中,为保证救援效果,对到达时间  $t_i$  的估计应尽可能准确,这里要求对于救援人员到达时间的估计区间  $[t_i^l, t_i^u]$  中至多只能包含一个应急救援时间满意度函数中的关键转折点。因此,区间  $[t_i^l, t_i^u]$  针对应急救援时间满意度函数中的关键转折点可能具有 5 种不同的分布情况,根据公式(3)和(4),可以得出相对应的应急救援时间满意度  $s_{ik}$  的计算公式为:

$$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{a_i} x_{ijk} = d_k, k = 1, 2, \dots, n \quad (10)$$

$$x_{ijk} \leq r_k^{ij}, i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, a_i; k = 1, 2, \dots, n \quad (11)$$

$$x_{ijk} = 0 \text{ 或 } 1, i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, a_i; k = 1, 2, \dots, n \quad (12)$$

其中,目标函数(7)表示救援人员派遣的总体应急救援时间满意度最大;目标函数(8)表示救援人员对救援任务的总体胜任程度最大,即救援人员完成救援任务的“效果”最佳;约束条件(9)表示每位救援人员至多只被派遣完成一项救援任务;约束条件(10)表示被派遣去完成任务  $R_k$  的人员数量等于该任务所需要的救援人员数量;约束条件(11)表示救援人员只能被派遣去完成他所填报的意向救援任务中的某一项救援任务。

#### 5 模型的求解

##### 5.1 目标函数系数规范化

模型(P1)是双目标优化模型,通常将双目标优化模型转化为单目标优化模型进行求解。由于模型

(P1)的两个目标函数可能具有不同的量纲,为了将模型(P1)转化为单目标优化模型,首先需要将对目标函数(7)和(8)进行规范化处理。由于目标函数(7)中的应急救援时间满意度系数  $s_{ik}$  和目标函数(8)中的救援人员  $P_{ij}$  对救援任务的胜任程度权重系数  $\omega_k^{ij}$  都是效益型指标,因此可采用如下的公式(8)对目标函数系数进行规范化:

$$s'_{ik} = \frac{s_{ik} - s_{ik}^{\min}}{s_{ik}^{\max} - s_{ik}^{\min}}, i = 1, 2, \dots, m; k = 1, 2, \dots, n \tag{13}$$

$$\bar{\omega}_k^{ij} = \frac{\omega_k^{ij} - \omega_k^{\min}}{\omega_k^{\max} - \omega_k^{\min}}, i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, a_i; k = 1, 2, \dots, n \tag{14}$$

其中,  $s^{\min} = \min\{s_{ik} \mid i = 1, 2, \dots, m; k = 1, 2, \dots, n\}$ ,  $s^{\max} = \max\{s_{ik} \mid i = 1, 2, \dots, m; k = 1, 2, \dots, n\}$ ;  $\omega^{\min} = \min\{\omega_k^{ij} \mid i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, a_i; k = 1, 2, \dots, n\}$ ,  $\omega^{\max} = \max\{\omega_k^{ij} \mid i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, a_i; k = 1, 2, \dots, n\}$ 。

### 5.2 转化为单目标模型

将规范化后的系数带入模型(P1)并采用线性加权法<sup>[16]</sup>将模型(P1)转化为单目标模型,可得如下的模型(P2):

(P2)

$$\max z = v_1 \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{a_i} \sum_{k=1}^n s'_{ik} x_{ijk} + v_2 \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{a_i} \sum_{k=1}^n \bar{\omega}_k^{ij} x_{ijk} \tag{15}$$

$$= \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{a_i} \sum_{k=1}^n (v_1 s'_{ik} + v_2 \bar{\omega}_k^{ij}) x_{ijk} \tag{15}$$

$$s. t. \sum_{k=1}^n x_{ijk} \leq 1, \tag{16}$$

$$i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, a_i \tag{16}$$

$$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{a_i} x_{ijk} = d_k, k = 1, 2, \dots, n \tag{17}$$

$$x_{ijk} \leq r_k^{ij}, i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, a_i; k = 1, 2, \dots, n \tag{18}$$

$$x_{ijk} = 0 \text{ 或 } 1, i = 1, 2, \dots, m; \tag{18}$$

$$j = 1, 2, \dots, a_i; k = 1, 2, \dots, n \tag{19}$$

其中,  $v_1$  和  $v_2$  分别表示模型(P1)的两个目标函数的权重或重要程度,  $v_1 > 0$ ,  $v_2 > 0$ ,  $v_1 + v_2 = 1$ 。

### 5.3 模型的求解方法

可以看出,模型(P2)是一个广义最优指派问题。当救援人员数量和救援任务数较大时,可采用专用的优化软件工具(如 Lingo 等)或设计模型求解算法进行模型(P2)的求解。当救援人员数量和救援任务数较小时,可以考虑将模型(P2)转化为传统最优

指派问题的模型,并采用匈牙利法<sup>[17]</sup>进行求解。下面给出采用匈牙利法求解模型(P2)的具体做法。

首先,构建  $q$  个救援人员 ( $P_{11}, P_{12}, \dots, P_{1a_1}, P_{21}, P_{22}, \dots, P_{2a_2}, \dots, P_{m1}, P_{m2}, \dots, P_{ma_m}$ ,  $q = \sum_{i=1}^m a_i$ ) 完成  $q$  项救援任务 ( $M^1, M^2, \dots, M^q$ ) 的指派效率矩阵  $L = [l_{ij}^u]_{q \times q}$ , 其中  $l_{ij}^u$  表示救援人员  $P_{ij}$  完成任务  $M^u$  的“效率”评价价值,并规定每项任务  $M^u$  只由一名救援人员完成,  $i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, a_i, u = 1, 2, \dots, q$ 。为此,依据每项救援任务对救援人员的需求人数,将救援任务  $R_k$  展开成相同的  $d_k$  项任务 ( $k = 1, 2, \dots, n$ ), 并添加 ( $q - \sum_{k=1}^n d_k$ ) 项虚拟任务。若记  $U^k$  和  $U'$  分别表示针对救援任务  $R_k$  ( $k = 1, 2, \dots, n$ ) 展开的任务和虚拟任务的上标集合,则  $U^k$  和  $U'$  可以通过如下的公式确定:

$$U^k = \begin{cases} \{1, 2, \dots, d_1\}, & k = 1 \\ \{\sum_{j=1}^{k-1} d_j + 1, \sum_{j=1}^{k-1} d_j + 2, \dots, \sum_{j=1}^k d_j\}, & k = 2, 3, \dots, n \end{cases} \tag{20}$$

$$U' = \{ \sum_{j=1}^n d_j + 1, \sum_{j=1}^n d_j + 2, \dots, q \} \tag{21}$$

相应地,指派效率矩阵  $L$  中的元素  $l_{ij}^u$ , 即救援人员  $P_{ij}$  完成任务  $M^u$  的“效率”评价价值为:

$$l_{ij}^u = v_1 s'_{ik} + v_2 \bar{\omega}_k^{ij}, u \in \{u \mid u \in U^k \text{ 且 } r_k^{ij} = 1\}, i = 1, 2, \dots, m, j = 1, 2, \dots, a_i \tag{22}$$

$$l_{ij}^u = -M, u \in \{u \mid u \in U^k \text{ 且 } r_k^{ij} = 0\}, i = 1, 2, \dots, m, j = 1, 2, \dots, a_i \tag{23}$$

$$l_{ij}^u = 0, u \in \{u \mid u \in U'\}, i = 1, 2, \dots, m, j = 1, 2, \dots, a_i \tag{24}$$

在公式(23)中,  $M$  为足够大的正数,这里取  $M = \max\{v_1 s'_{ik} + v_2 \bar{\omega}_k^{ij} \mid i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, a_i; k = 1, 2, \dots, n\}$ 。

进一步地,将指派效率矩阵  $L = [l_{ij}^u]_{q \times q}$  转化为指派成本矩阵  $C = [c_{ij}^u]_{q \times q}$ , 其中  $c_{ij}^u$  表示救援人员  $P_{ij}$  完成任务  $M^u$  的“成本”,其计算公式为:

$$c_{ij}^u = N - l_{ij}^u, i = 1, 2, \dots, m, j = 1, 2, \dots, a_i, u = 1, 2, \dots, q \tag{25}$$

在公式(25)中,  $N$  是足够大的正数,这里取  $N = \max\{l_{ij}^u \mid i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, a_i; u = 1, 2, \dots, q\}$ 。

依据指派成本矩阵  $C = [c_{ij}^u]_{q \times q}$ , 可以构建如下最优指派问题的数学模型:

(P3)

$$\min F = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{a_i} \sum_{u=1}^q c_{ij}^u y_{ij}^u \quad (26)$$

$$s. t. \sum_{u=1}^q y_{ij}^u = 1, i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, a_i \quad (27)$$

$$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{a_i} y_{ij}^u = 1, u = 1, 2, \dots, q \quad (28)$$

$$y_{ij}^u = 0 \text{ 或 } 1, i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, a_i; u = 1, 2, \dots, q \quad (29)$$

在模型 (P3) 中,式(26)为目标函数,表示完成所有任务  $M^1, M^2, \dots, M^q$  的总“成本”最小;式(27)和式(28)为约束条件,其中,式(27)表示每个救援人员最多只能被指派来完成一项任务,式(28)表示每项任务只能由一个救援人员完成;式(29)为 0-1 约束条件,即  $y_{ij}^u = 1$  表示救援人员  $P_{ij}$  被指派来完成任务  $M^u$ , 否则,  $y_{ij}^u = 0$ 。

## 6 算例

下面以地震灾害应急医疗救援为背景,通过一个算例分析来说明本文提出的应急救援人员派遣模型的潜在应用。

假设某一地区发生了地震灾害,灾害发生后,该地区内某一地点需要从周边地区紧急派遣应急医疗救援人员前往该地区开展救援。应急医疗救援中有 4 项需要完成的任务,分别为搜救现场对受伤人员的紧急医疗处置任务 ( $R_1$ );地震应急安置点中对受伤人员的医疗救治任务 ( $R_2$ );地震应急安置点中对受伤人员的护理任务 ( $R_3$ );该受灾地点的医疗卫生防疫任务 ( $R_4$ )。各救援任务对于应急医疗救援人员的需求数量分别是  $d_1 = 2, d_2 = 2, d_3 = 4, d_4 = 3$ 。该地区周边有 4 个应急救援出救点  $\{A_1, A_2, A_3, A_4\}$ , 各出救点中可供派遣的应急医疗救援人员数量分别是  $a_1 = 2, a_2 = 4, a_3 = 3, a_4 = 4$ ;各出救点到达救援需求点所需时间的估计区间分别为  $t_1 \in [3, 4], t_2 \in [1, 2], t_3 \in [4, 5], t_4 \in [5, 6]$ , (单位为:小时)。各出救点中的救援人员对救援任务胜任程度的意向性指示向量如表 2 所示,各救援任务对于应急救援的时间要求如表 3 所示。

应用本文中所提出的方法来解决以上应急救援人员派遣问题,主要的计算过程被描述如下:

依据公式(5)和公式(6),得到从各出救点派遣救援人员至救援需求点完成救援任务的应急救援时间满意度以及救援人员对救援任务胜任程度的权重

分别如表 4 和表 5 所示。

根据公式(13)和(14),可获得规范化后的目标函数系数  $s'_{ik}$  和  $\bar{w}_k^j$  分别如表 6 和表 7 所示。

考虑到在突发事件的应急救援中,决策者往往对于应急救援时间满意度更加重视,因此,这里取  $v_1 = 0.7, v_2 = 0.3$ 。根据公式(22)-公式(25),构建指派成本矩阵  $C = [c_{ij}^u]_{q \times q}$ ,如表 8 所示。

表 2 救援人员对救援任务胜任程度的意向性指示向量

$A_i$	$P_{ij}$	$R_1$	$R_2$	$R_3$	$R_4$
		$d_1=2$	$d_2=2$	$d_3=4$	$d_4=3$
$A_1$	$P_{11}$	$a$	$b$		
	$P_{12}$		$a$	$b$	
$A_2$	$P_{21}$		$a$	$b$	
	$P_{22}$		$b$	$a$	
$A_3$	$P_{31}$	$a$		$b$	
	$P_{32}$			$a$	$b$
$A_4$	$P_{41}$	$b$	$a$		
	$P_{42}$			$a$	$b$
$A_4$	$P_{43}$			$a$	$b$
	$P_{44}$		$a$	$b$	

表 3 各救援任务对应急救援的时间要求

$R_k$	$T_k^l$ (小时)	$T_k^r$ (小时)	$T_k^{\max}$ (小时)	$S_k^0$
$R_1$	2	3	6	0.6
$R_2$	3	5	7	0.8
$R_3$	4	6	8	0.7
$R_4$	5	10	13	0.9

表 4 各出救点的救援人员完成救援任务的应急救援时间满意度  $s_{ik}$

$A_i$	$R_1$	$R_2$	$R_3$	$R_4$
$A_1$	0.50	0.95	1.00	1.00
$A_2$	1.00	1.00	1.00	1.00
$A_3$	0.30	0.85	0.93	1.00
$A_4$	0.10	0.6	0.78	0.99

表 5 救援人员对救援任务胜任程度的权重  $w_k^j$

$A_i$	$P_{ij}$	$R_1$	$R_2$	$R_3$	$R_4$
		$d_1=2$	$d_2=2$	$d_3=4$	$d_4=3$
$A_1$	$P_{11}$	1	0.5	0	0
	$P_{12}$	0	1	0.5	0
$A_2$	$P_{21}$	0	1	0.5	0
	$P_{22}$	0	0.5	1	0
$A_3$	$P_{31}$	1	0	0.5	0
	$P_{32}$	0	0	1	0.5
$A_4$	$P_{41}$	0.5	1	0	0
	$P_{42}$	0	0	1	0.5
$A_4$	$P_{43}$	0	0	1	0.5
	$P_{44}$	0	1	0.5	0

表 6 规范化后的应急救援时间满意度系数  $s'_{ik}$

$A_i$	$R_1$	$R_2$	$R_3$	$R_4$
$A_1$	0.44	0.94	1.00	1.00
$A_2$	1.00	1.00	1.00	1.00
$A_3$	0.22	0.83	0.92	1.00
$A_4$	0	0.56	0.76	0.99

表 7 规范化后的救援人员对救援任务胜任程度的权重系数  $\omega_{ij}^u$

$A_i$	$P_{ij}$	$R_1$	$R_2$	$R_3$	$R_4$
		$d_1=2$	$d_2=2$	$d_3=4$	$d_4=3$
$A_1$	$P_{11}$	1	0.5	0	0
	$P_{12}$	0	1	0.5	0
	$P_{21}$	0	1	0.5	0
$A_2$	$P_{22}$	0	0.5	1	0
	$P_{23}$	0.5	1	0	0
	$P_{24}$	0	1	0	0.5
$A_3$	$P_{31}$	1	0	0.5	0
	$P_{32}$	0	0	1	0.5
	$P_{33}$	0	0	0.5	1
$A_4$	$P_{41}$	0.5	1	0	0
	$P_{42}$	0	0	1	0.5
	$P_{43}$	0	0	1	0.5
	$P_{44}$	0	1	0.5	0

1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1

根据得到的最优解,可以获得救援人员的派遣方案是:出救点  $A_1$  中的救援人员  $P_{11}$ 、出救点  $A_2$  中的救援人员  $P_{23}$  被派遣去完成任务  $R_1$ ; 出救点  $A_2$  中的救援人员  $P_{21}$  和  $P_{24}$  被派遣去完成任务  $R_2$ ; 出救点  $A_1$  中的救援人员  $P_{12}$ , 出救点  $A_2$  中的救援人员  $P_{22}$ 、出救点  $A_3$  中的救援人员  $P_{31}$  和  $P_{32}$  被派遣去完成任务  $R_3$ ; 出救点  $A_3$  中的救援人员  $P_{33}$ 、出救点  $A_4$  中的救援人员  $P_{42}$  和  $P_{43}$  被派遣去完成任务  $R_4$ 。

为了进一步说明本文给出模型和算法的可行性和有效性,表 9 中给出了应用本文模型所获得的人员派遣方案(表 9 中的目标  $z$ )与仅考虑应急救援时间满意度(表 9 中的目标  $z_1$ )或者仅考虑救援人员胜任程度(表 9 中的目标  $z_2$ )时所获得的人员派遣方案的对比结果,并计算了相应的应急救援时间满意度和救援人员对救援任务的胜任程度。通过表 9 可以看出,同时考虑应急救援时间满意度和救援人员胜任程度时,所得到的派遣结果不同于仅考虑单一目标的派遣结果,能够在保证救援人员胜任救援任务的同时,获得较高的应急救援时间满意度。

依据公式(13),构建如下最优指派问题的数学模型:

$$\min F = \sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^{a_i} \sum_{u=1}^{13} c_{ij}^u y_{ij}^u$$

$$s. t. \sum_{u=1}^{13} y_{ij}^u = 1, i = 1, 2, \dots, 4, j = 1, 2, \dots, a_i$$

$$\sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^{a_i} y_{ij}^u = 1, u = 1, 2, \dots, 13$$

$$y_{ij}^u = 0 \text{ 或 } 1, i = 1, 2, \dots, 4; j = 1, 2, \dots, a_i; u = 1, 2, \dots, 13$$

采用匈牙利法对模型进行求解,得到的最优解为:

$$Y^* = [y_{ij}^{u*}]_{13 \times 13} =$$

表 8 指派成本矩阵  $C=[c_{ij}^u]_{q \times q}$

$P_{ij}$	$M^1$	$M^2$	$M^3$	$M^4$	$M^5$	$M^6$	$M^7$	$M^8$	$M^9$	$M^{10}$	$M^{11}$	$M^{12}$	$M^{13}$
$P_{11}$	0.39	0.39	0.19	0.19	2	2	2	2	2	2	2	1	1
$P_{12}$	2	2	0.04	0.04	0.15	0.15	0.15	0.15	2	2	2	1	1
$P_{21}$	2	2	0	0	0.15	0.15	0.15	0.15	2	2	2	1	1
$P_{22}$	2	2	0.15	0.15	0	0	0	0	2	2	2	1	1
$P_{23}$	0.15	0.15	0	0	2	2	2	2	2	2	2	1	1
$P_{24}$	2	2	0	0	2	2	2	2	0.15	0.15	0.15	1	1
$P_{31}$	0.55	0.55	2	2	0.21	0.21	0.21	0.21	2	2	2	1	1
$P_{32}$	2	2	2	2	0.06	0.06	0.06	0.06	0.15	0.15	0.15	1	1
$P_{33}$	2	2	2	2	0.21	0.21	0.21	0.21	0	0	0	1	1
$P_{41}$	0.85	0.85	0.31	0.31	2	2	2	2	2	2	2	1	1
$P_{42}$	2	2	2	2	0.17	0.17	0.17	0.17	0.16	0.16	0.16	1	1
$P_{43}$	2	2	2	2	0.17	0.17	0.17	0.17	0.16	0.16	0.16	1	1
$P_{44}$	2	2	0.31	0.31	0.32	0.32	0.32	0.32	2	2	2	1	1

表 9 考虑不同目标时的应急救援人员派遣方案

目标 $z_i$	$R_1$	$R_2$	$R_3$	$R_4$	总体时间满意度 $(\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{a_i} \sum_{k=1}^n s_{ijk} x_{ijk})$	总体胜任程度 $(\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{a_i} \sum_{k=1}^n \omega_{ijk}^k x_{ijk})$
$z$	$P_{11}, P_{23}$	$P_{21}, P_{24}$	$P_{12}, P_{22}, P_{31}, P_{32}$	$P_{33}, P_{42}, P_{43}$	10.34	8.5
$z_1$	$P_{21}, P_{24}$	$P_{22}, P_{23}$	$P_{11}, P_{12}, P_{31}, P_{33}$	$P_{32}, P_{41}, P_{44}$	10.84	3.5
$z_2$	$P_{11}, P_{31}$	$P_{12}, P_{44}$	$P_{21}, P_{22}, P_{32}, P_{43}$	$P_{33}, P_{24}, P_{42}$	9.05	9.5

## 7 结语

本文针对突发事件应急救援人员派遣问题,构建了优化模型,并给出了模型的求解方法。在模型的构建中考虑了应急救援任务存在时间紧迫性、救援人员对各救援任务胜任程度不同、救援人员到达救援需求点的时间存在不确定性等特点,通过求解本文给出的模型获得的派遣方案,更符合突发事件应急救援人员派遣问题的实际需求。在进一步的研究中,还需要针对模型的特点开发具有更高计算性能的求解算法,如多目标进化算法等。

### 参考文献:

[1] 中华人民共和国法制办. 中华人民共和国突发事件应对法[M]. 北京:中国法制出版社,2007.

[2] 计雷,池宏,陈安,等. 突发事件应急管理[M]. 北京:高等教育出版社,2006.

[3] Larson R C, Metzger M D, Cahn M F. Responding to emergencies: lessons learned and the need for analysis [J]. Interfaces, 2006, 36(6): 486-501.

[4] Simpson N C, Hancock P G. Fifty years of operational research and emergency response [J]. Journal of Operational Research Society, 2009, 60(S1): S126-S139.

[5] 姜艳萍,樊治平,苏明明. 应急决策方案的动态调整方法研究[J]. 中国管理科学,2011,19(5): 104-108.

[6] Sampson S E. Optimization of volunteer labor assignments [J]. Journal of Operations Management, 2006, 24(4): 363-377.

[7] Seyda T, Irem O. A constraint programming based solution approach for medical resident scheduling problems

[J] Computers & Operations Research, 2011, 38(1): 246-255.

[8] Falasca M, Zobel C. An optimization model for volunteer assignment in humanitarian organizations [J]. Socio-Economic Planning Sciences, 2012, Forthcoming.

[9] Topaloglu S. A multi-objective programming model for scheduling emergency medicine residents [J]. Computers & Industrial Engineering, 2006, 51(3): 375-388.

[10] Yang C C, Lin W T, Chen H M, Shi Y H. Improving scheduling of emergency physicians using data mining analysis [J]. Expert Systems with Applications, 2009, 36(2): 3378-3387.

[11] Gordon L, Erkut E. Improving volunteer scheduling for the Edmonton Folk Festival [J]. Interfaces, 2004, 34(5): 367-376.

[12] 付芳,周泓. 基于免疫遗传算法和列生成的多项目人力资源调度研究[J]. 中国管理科学,2010,18(2): 120-126.

[13] Knight V A, Harper P R, Smith L. Ambulance allocation for maximal survival with heterogeneous outcome measures [J]. Omega, 2012, 40(6): 918-926.

[14] 代颖,马祖军,郑斌. 突发公共事件应急系统中的模糊多目标定位一路径问题研究[J]. 管理评论,2010,22(1):121-128.

[15] 李国旗,张锦,刘思婧. 城市应急物流设施选址的多目标规划模型[J]. 计算机工程与应用,2011,47(19): 238-241.

[16] 胡毓达. 多目标决策——实用模型和选优方法[M]. 上海:上海科学技术出版社,2010.

[17] 运筹学教材编写组. 运筹学[M]. 北京:清华大学出版社,1990.

## Study on the Model for the Assignment of Rescue Workers in Emergency Rescue

YUAN Yuan, FAN Zhi-ping, LIU Yang

(School of Business Administration, Northeastern University, Shenyang 110004, China)

**Abstract:** In this paper, model for the assignment of emergency rescue workers and the solution method to the model are proposed. Firstly, considering the degree of time satisfaction for emergency rescue and the degree of workers' qualification for different rescue task, an assignment model is built to maximize the de-



gree of time satisfaction and to maximize the result of emergency rescue. Then, the solution method of the model is given according to the characteristics of the optimization model. Finally, a numerical example is used to illustrate the feasibility and validity of the proposed model.

**Key words:** emergency rescue; rescue worker assignment; degree of time satisfaction for emergency rescue; degree of workers' qualification for rescue task; optimization model

### 《第十五届中国管理科学学术年会》征文通知

**会议主题** “两型社会”建设与管理创新

**主办单位** 中国优选法统筹法与经济数学研究会 湖南大学  
中国科学院科技政策与管理科学研究所 《中国管理科学》编辑部

**承办单位** 湖南大学工商管理学院

**协办单位** 中南大学商学院 国防科技大学信息系统与管理学院

**会议时间** 2013年10月25-28日

**会议地点** 湖南·长沙

<b>征文范围</b>	优选法与优化管理	统筹法与项目管理	营销工程与管理
	经济数学与数量经济	金融工程与风险管理	会计审计与财务管理
	工业工程与运作管理	信息系统与商务智能	社会安全与应急管理
	物流工程与供应链管理	计算管理方法与实验	公共管理与社会管理
	数据挖掘与知识管理	创业与中小企业管理	两型社会与生态文明建设
	人力资源与绩效管理	技术创新与技术经济	能源与环境管理
	战略管理与认知决策	战略型新兴产业与产业金融	

**主题报告** 邀请管理科学界著名专家和学者围绕我国社会经济发展面临的主要问题、学科发展前沿问题、理论研究与应用实践的最新进展做大会报告。

**综合论坛** 邀请政府官员、企业精英和管理科学界的专家学者，结合当前我国及湖南两型社会建设过程中的管理科学热点问题探讨。

**专项交流** 设专项主题学术交流，为广大大致致力于管理科学的青年学者提供一个更广阔的学术交流平台。

**征稿要求**

- 未在其它学术会议、论文集和刊物上公开发表过。
- 文章具体格式可参照《中国管理科学》近期期刊。
- 来稿篇幅要求5-8页（5页以内版面费600元，超过5页每增加一页加收版面费150元）。
- 请作者于2013年6月30日之前按下列E-mail地址将电子版传给会议秘书处。在稿件首页须注明征文类别（从征文范围中选择一个）。
- 来稿请注明征文类别（从征文范围中选择一个接近的类别填写）、作者的单位、通讯地址、邮编、联系电话及E-mail地址，并在邮件标题上注明“征文”字样。

**论文出版**

- 经过专家评审后录用的论文刊登在《中国管理科学》2013年（专辑）上，并被CNKI数字图书馆全文收录（[www.cnki.net](http://www.cnki.net)）。
- 第十五届中国管理科学学术年会将继续开展“优秀论文报告奖”的评奖活动，并颁发获奖证书。其中获年会分组会议评议推荐的论文（推荐比例为20-30%），将由《中国管理科学》优先录用，此外同时择优推荐给《系统工程》和《经济数学》，列入2014年的刊登计划。
- 论文录用通知将在2013年7月31日前发出。《中国管理科学》2013（专辑）在会议结束后30日内出版（会前印刷所有录用论文的长摘要并提供全文光盘）。

会议具体情况请登陆中国优选法统筹法与经济数学研究会网站（[www.Scope.org.cn](http://www.Scope.org.cn)）、中国管理科学网站（[www.zgg1kx.com](http://www.zgg1kx.com)）及中国学术会议网站（[www.zgg1kxnh2013.conf.cnki.net](http://www.zgg1kxnh2013.conf.cnki.net)）。

**会议秘书处**

北京8712信箱中国“双法”研究会傅继良、张玲 邮编：100190 E-mail: shuangfa@casipm.ac.cn 联系电话：010-62542629  
长沙市岳麓山、湖南大学工商管理学院 朱慧明、周忠宝 邮编：410082  
E-mail: hdglxy@126.com 联系电话：13517311705、13487575460