

应急救援中基于线性规划的多目标多资源分配模型

王悦宸, 苏醒, 贾熹滨, 郭黎敏, 丁治明

(北京工业大学信息学部计算机学院, 北京 100124)

摘要: 在应急救援中, 救援情况各不相同, 救援任务对执行时间有着严苛的限制, 而救援资源又十分匮乏, 以往单目标和一对一的资源分配方法很难有效解决应急救援中的资源分配问题. 为此提出了一种新的应急救援资源分配模型, 该模型通过组合救援资源以减少救援任务的执行时间, 同时可以增强救援资源的能力. 另外, 模型通过对多个目标的比重进行调整, 并利用线性规划方法得到更符合实际救援需求的资源分配方案. 最后, 通过采用动态规划思想中的多阶段的资源分配方式, 可以解决应急救援中的救援任务和救援资源的动态性问题. 由实验可以看出, 该模型对不同救援任务和不同救援目标都有着良好的适应性, 可以满足应急救援中救援任务和救援资源的动态性需求.

关键词: 应急救援; 多目标分配; 多资源分配; 线性规划; 动态规划

中图分类号: TP391 **文献标识码:** A doi: 10.3969/j.issn.0253-2778.2018.06.004

引用格式: 王悦宸, 苏醒, 贾熹滨, 等. 应急救援中基于线性规划的多目标多资源分配模型[J]. 中国科学技术大学学报, 2018, 48(6): 458-466.

WANG Yuechen, SU Xing, JIA Xibin, et al. A linear programming-based model for multi-object and multi-resource allocation in emergency rescue[J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2018, 48(6): 458-466.

A linear programming-based model for multi-object and multi-resource allocation in emergency rescue

WANG Yuechen, SU Xing, JIA Xibin, GUO Limin, DING Zhiming

(Faculty of Information Technology, College of Computer Science and Technology, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: In an emergency rescue, the situations are different and the deadlines of tasks and available resources are limited, difficult for the single-object and one-to-one resource allocation approaches to handle which makes it problems. To this end, an innovative model is proposed for the multi-object and multi-resource allocation in emergency rescues. By combining the resources, the time consumption for task execution is reduced and the capability of resources is enhanced. In addition, through adjusting the weights of multiple objects, linear programming is employed to generate the resource allocation plan, which can satisfy different requirements of resource allocation in an emergency rescue. Finally, through employing the idea of the multi-stage resource allocation in dynamic programming, our model can handle the dynamics of tasks and resources in an emergency rescue. Experimental results show that our model has good adaptability to multi-resource allocation in different rescue tasks and objects. In addition, the multi-

收稿日期: 2017-09-14; **修回日期:** 2018-04-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(61402449, 91546111, 91646201); 北京市教委重点项目(KZ201610005009); 中兴通讯研究基金资助.

作者简介: 王悦宸, 女, 1993年生, 硕士生. 研究方向: 智能系统. E-mail: wangyuechen@emails.bjut.edu.cn

通讯作者: 苏醒, 博士/讲师. E-mail: xingsu@bjut.edu.cn

stage characteristic of our model can suit the dynamics of tasks and resources in emergency rescues.

Key words: emergency rescue; multi-objective allocation; multi-resource allocation; linear programming; dynamic programming

0 引言

在应急救援中,救援任务的执行时间有着严格的限制,强调在抢救生命的“黄金时间”即 72 小时内进行高效率的救援行动,因此需要合理有效的方案来分配有限的救援资源(包括救援人员、工具、机械等),以保证救援资源可以被充分、合理地利用.在制定救援资源分配方案的过程中,为了使方案更加合理有效,必须要考虑 3 方面问题:①救援资源组合分组.在应急救援中,由于一些救援任务对执行时间有着较为严苛的限制,可能会导致单个救援资源无法满足其对救援时间的需求.为了保证救援任务的执行效率,多个救援资源需要组合去执行这类救援任务,在增强救援资源能力的同时,满足救援任务对执行时限的要求.②多目标救援资源分配.由于不同救援任务以及救援情况之间存在差异,救援资源的分配目标也会有所不同,单目标的救援资源分配方法通常不能满足所有应急救援的需求.为了使救援资源分配模型具有更强的适应性和灵活性,在规划救援资源分配方案时,考虑多个救援资源分配目标是必不可少的.③救援任务和救援资源的动态性.救援任务执行过程中,往往会有新的救援任务出现.而救援资源也通常是在灾害发生后陆续到达救援地点的.在救援任务和救援资源产生变化后,最初的救援资源分配方案已经不能满足当前的救援需求.

目前,国内外已经在资源分配问题上进行了大量的研究^[1-3].对于资源和任务之间一对一分配,现有研究已经给出了很多可行的方案.如 Guerriero 等的资源分配方法,采用了资源和任务的一对一分配方式,并且考虑了多个分配目标之间的比重问题,这使其得到的资源分配方案具备较强的适应性^[4].在 Guerriero 等的方法中,资源之间、任务之间没有太大差异,因此他们的方法并不需要考虑资源的组合问题.Xiang 等的方法考虑到了救援任务的不同需求和救援资源之间的差异性,其生成的资源分配方案能够解决复杂情况下的救援问题^[5].由于该方法忽略了资源之间需要组合执行任务的可能性.在救援过程中,如果只进行救援资源与救援任务之间一对一的分配,会导致有些救援任务因其自身严苛的

执行时间限制和单个救援资源能力的不足而无法被完成^[6-7],从而降低救援效率.另外,当前对于资源分配方面的许多研究都没考虑到任务和资源的动态性.而在应急救援中,这种动态性是经常存在的,在设计救援资源分配模型时,要充分考虑到救援任务和救援资源的动态性,以增加资源分配方案的适应性和灵活性,提高救援效率.

为了解决现有方法在应急救援资源分配中存在的问题,针对救援规划中的 3 个重要问题,提出了新的应急救援资源分配模型.经过该模型规划的救援资源分配方案具备以下优点:

(I)与现有的一对一的资源分配模型相比,本文救援资源分配模型能将现有救援资源进行组合,实现多种不同救援资源共同或分别执行不同的救援任务,以提高救援效率.

(II)与现有的多目标规划资源分配模型相比,本文的救援资源分配模型能按不同比重规划多种资源分配目标,以适应不同救援任务和情况下资源分配的需要.

(III)与现有的静态资源分配模型相比,本文的救援资源分配模型采用多段式的救援资源分配方式,以满足应急救援中救援任务和救援资源的动态性需求.

1 相关工作

近些年来,很多资源分配方法被提出应对各种各样的资源分配问题^[8-14].

Guerriero 等提出了无人机的资源分配方法^[4].利用图论中的概念将任务描述为图中的节点,而无人机的路径被描述为连接节点的弧.根据图中节点(任务)和弧(路径)之间的关系,通过多目标的线性规划方法为无人机规划最优的完成任务路径.此外, Guerriero 等使用了时间窗的概念,将模型中观众满意程度与时间做关联,以体现其随着时间线性变化这一特征,更有利于保证任务完成,在一对一的资源分配方面具有很好的效果.由于 Guerriero 等的资源分配方法没有考虑多个资源组合的情况,其方法无法处理复杂的救援任务.此外,由于该资源分配方法是基于已知任务信息的情况,也无法适应动态的应

急救援环境。

Xiang 等提出了医学应急资源分配模型^[5]。该模型通过线性规划的方式进行资源分配,提高了灾区中救援队的工作效率。该模型考虑到了救援任务对救援资源的不同需求。由于这些考虑比较符合现实救援情况,使得 Xiang 等的模型能够处理复杂的应急救援资源分配问题,但是依旧采用的是一对一的资源分配方式,救援资源无法组合执行救援任务。同时,该模型并没有考虑应急救援中救援资源和救援任务的动态性。

Su 等提出了救灾环境中异构智能体的动态任务分配方法^[15-16]。该方法根据救援任务的位置,首先将灾区划分成不同的区域;然后根据各区域的救援任务需求和救援资源的能力,将救援资源分配到合适的区域中去执行救援任务;最后为了适应救援任务和救援资源的动态性,Su 等还提出了各区域之间的救援资源协调机制。上述方法考虑到了救援任务的不同需求和救援资源的能力差异。同时,方法中的协调机制还可以处理应急救援中,救援任务和救援资源的动态性问题,具有较强的适应性。由于方法没有考虑到救援资源分配中的多目标规划问题,其任务分配的目标只是完成更多的救援任务,而没有考虑完成救援任务的效果和救援资源花费的时间。

在深入分析了相关方法的优缺点后,我们的模型首先从实际救援场景出发,为了使救援资源可以顺利执行时限严苛的救援任务,同时也为了使本文模型具备更广泛的适用性,首先重点研究了资源之间的组合,做到每个阶段的资源组合都能更好地适应当前救援任务的需要。其次,为了适应不同应急救援中救援任务和救援情况的不同需求,模型在进行救援资源分配时考虑到了多种分配目标。其中最主要的 3 个目标包括:救援任务执行效果最好、救援任务执行效率最高和救援任务执行时间最短。最后,模型采用了分段式的资源分配策略,可以较好地处理在救援资源分配过程中出现的救援任务和救援资源的动态性问题。

2 问题描述和数学模型

2.1 问题描述

在灾后的应急救援中,有 m 个救援任务需要执行,即 $TASK = \{task_1, task_2, \dots, task_m\}$,其中 $task_i$ 表示第 i 个救援任务。同时,有 n 个救援资源可

以执行救援任务,即 $RES = \{res_1, res_2, \dots, res_n\}$,其中 res_j 表示第 j 个救援资源。这里 m 远大于 n ,即 $m \gg n$ 。

定义 2.1 一个救援任务($task_i$)可以被表示为一个二元组:

$$task_j = \langle id, dl_i \rangle \quad (1)$$

其中, id 表示 $task_i$ 的编号; dl_i 表示 $task_i$ 的截止时间,即在 dl_i 之后对 $task_i$ 的执行被视为无效。

定义 2.2 一个救援资源(res_j)可以被表示为一个三元组:

$$res_j = \langle id, C_j, R_j \rangle \quad (2)$$

式中, id 表示 res_j 的编号; $C_j = \{c_{j,1}, c_{j,2}, \dots, c_{j,m}\}$ 表示 res_j 单独执行各个救援任务所花费的时间;其中 $c_{j,i}$ 表示 res_j 单独执行 $task_i$ 所花费的时间;而 $R_j = \{r_{j,1}, r_{j,2}, \dots, r_{j,m}\}$ 表示 res_j 单独执行各个救援任务的效果, $r_{j,i}$ 表示 res_j 执行 $task_i$ 的效果。

在实际的应急救援中,一些救援任务有着比较严苛的执行时限,这会导致单一救援资源无法在规定的时间内完成救援任务。针对这种情况,我们的模型对救援资源进行组合,让一个组内的所有救援资源共同去执行一个救援任务,以满足救援任务对执行时限的要求。

定义 2.3 一个资源分组(rg_k)可以被表示为一个具有 q 个元素的集合:

$$rg_k = \{g_{k,1}, g_{k,2}, \dots, g_{k,q}\} \quad (3)$$

式中, $g_{k,p}$ 表示第 k 个资源分组中的第 p 个资源组。

定义 2.4 一个资源组($g_{k,p}$)可以被表示为一个具有 s 个元素的集合:

$$g_{k,p} = \{res_{k,p,1}, res_{k,p,2}, \dots, res_{k,p,s}\} \quad (4)$$

式中, $res_{k,p,l}$ 表示第 k 个资源分组中的第 p 个资源组中的第 l 个救援资源(见定义 2.2),且在一个资源分组中,一个救援资源只能属于一个资源组。

当一个资源组 $g_{k,p}$ 被分配去执行一个救援任务 $task_i$ 时,我们用 $a_{k,p,i} = 1$ 来表示这次分配:

$$a_{k,p,i} = \begin{cases} 1, & \text{当 } g_{k,p} \text{ 被分配给 } task_i \\ 0, & \text{当 } g_{k,p} \text{ 没有被分配给 } TASK_i \end{cases} \quad (5)$$

$g_{k,p}$ 执行 $task_i$ 的时间 UT_i 将根据 $g_{k,p}$ 中每个救援资源单独执行 $task_i$ 的时间计算得到,即

$$UT_i = a_{k,p,i} \frac{1}{\sum_{l=1}^s \frac{1}{C_{(k,p,l),i}}} \quad (6)$$

式中, $\alpha_{k,p}$ 表示救援资源的合作系数,即多个救援资

源合作和单独执行任务时间的关系.由于这个系数很难准确估计,当今很少有方法考虑这个系数. $c(k, p, l, i)$ 表示 $g_{k, p}$ 中第 l 个救援资源单独执行 task_i 所需要的时间; s 表示 $g_{k, p}$ 中救援资源的数量.与执行时间类似, $g_{k, p}$ 执行 task_i 的效果也可以由 $g_{k, p}$ 中每个救援资源单独执行 task_i 的效果得到

$$\text{UR}_i = a_{k, p, i} \frac{1}{s} \sum_{l=1}^s r_{(k, p, l), i} \quad (7)$$

式中, $a_{k, p}$ 表示救援资源的合作系数,即 $g_{k, p}$ 中救援资源合作和单独执行任务效果的关系. $r_{(k, p, l), i}$ 表示 $g_{k, p}$ 中第 l 个救援资源单独执行 task_i 的效果;为了计算一个救援任务 task_i 是否可以被分配的资源组 $g_{k, p}$ 完成,我们提出了完成函数 $\text{complete}()$:

$$\text{complete}(a_{k, p, i}) = \begin{cases} 1, & \text{curTime} + \text{UT}_i \leq \text{dl}_i \\ 0, & \text{curTime} + \text{UT}_i > \text{dl}_i \end{cases} \quad (8)$$

式中, $a_{k, p, i}$ 表示分配 $g_{k, p}$ 去执行 task_i ; curTime 表示当前时间; UT_i 表示 $g_{k, p}$ 执行 task_i 所花费的时间; dl_i 表示 task_i 的截止时间.

2.2 救援资源分配目标

在应急救援中,由于救援任务和救援情况不同,救援资源分配目标也会有所不同.为此,我们在模型中设置了3种不同的资源分配目标:效果优先目标、效率优先目标和执行时间最短目标.

在效果优先目标中,模型以最大化救援资源执行完成救援任务的效果为主要目标,计算如下:

$$\max \sum_{p=1}^q \sum_{i=1}^m \text{complete}(a_{k, p, i}) \cdot \text{UR}_i \quad (9)$$

式中, q 表示资源组个数; m 表示救援任务个数.

在效率优先目标中,模型以最大化救援资源执行完成救援任务的个数为主要目标,计算如下:

$$\max \sum_{p=1}^q \sum_{i=1}^m \text{complete}(a_{k, p, i}) \quad (10)$$

为了使更多的救援任务在其截止时间前完成,我们加入了任务执行时间最短目标,计算如下:

$$\min \sum_{p=1}^q \sum_{i=1}^m \text{complete}(a_{k, p, i}) \cdot \text{UT}_i \quad (11)$$

本文模型可以根据不同的救援任务和救援情况,通过调整效率优先、效果优先和执行时间最短3个目标之间的比重找到最合适的救援资源分配方案.

3 模型实现

由于救援任务的数量远远大于救援资源的数量(即 $m \gg n$),救援资源无法一次完成所有的救援任务.为了满足救援任务和救援资源的动态性需求,我们采用了动态规划中分阶段的思想,将整个资源分配的过程分为多个资源分配阶段.在每个阶段的资源分配中,我们的模型都将按顺序执行如下两个步骤:

(I) 找出所有救援资源的所有的组合分组;

(II) 利用多目标线性规划方法,找出救援资源的最优组合分组和分配方案.

在每一阶段的资源分配中,上述两步将被交替执行,直到所有救援任务被完成或超过截止时间.基于上述思想,本文模型的资源分配流程可由算法3.1表示.

算法 3.1 模型资源分配流程

输入:救援任务集 TASK、救援资源集 RES、参数 α, β, γ

输出:救援资源最优的组合分组和分配方案 Allocation

```

1 curTime=0; Allocation={};
2 while(TASK≠?) do
3   RG ← ResGrouping(RES);
4   Abest ← ResAllocating(TASK, RG, α, β, γ);
5   curTime ← curTime + Max(UTi);
6   for each ak,p,i ∈ Abest do
7     TASK ← TASK \ \ taski;
8     Allocation ← Allocation + {∀ resk,p,l → taski}
9   end for
10  for each taski ∈ TASK do
11    if curTime > dli do
12      TASK ← TASK \ \ taski;
13    end if
14  end for
15  Update (TASK, RES);
16 end while
17 return Allocation;
```

算法3.1解释如下,模型的输入为所有救援任务的集合 $\text{TASK} = \{\text{task}_1, \text{task}_2, \dots, \text{task}_m\}$ 、所有救援资源的集合 $\text{RES} = \{\text{res}_1, \text{res}_2, \dots, \text{res}_n\}$ 以及多目标线性规划中不同目标间的比重 α, β, γ .模型的输出则是救援资源最优的组合分组和分配方案 Allocation.在资源分配前,当前时间点 curTime 和 Allocation 分别被初始化为0和空集(行1).整个资源分配是一个多阶段循环过程,该过程持续到所有

任务都被完成或超过截止时间(行 2).在每个阶段中,模型进行如下两步:①调用 ResGrouping()方法,找出所有救援资源的所有组合分组并存入 RG(行 3);②根据 RG,调用基于线性规划的资源分配方法 ResAllocating(),找到最优的资源组合分组和分配方案 A_{best} (行 4).在任务执行的过程中,模型将 curTime 推进到最后一个救援任务的完成时间(行 5),并将此次被执行的任务从 TASK 中去掉(行 7),同时记录本阶段的最优分配方案(行 8).接着,模型会将超过截止时间且未被完成的任务从 TASK 中去掉(行 10-14).最后,为应对救援环境的动态性,模型会将这一阶段新发现的救援任务和新加入的救援资源分别加入到 TASK 和 RES 中(行 15).当整个资源分配完成后,模型将会输出过程中所有的最优资源组合分组和分配方案 Allocation(行 17).

3.1 救援资源组合分组:ResGrouping()方法

救援资源组合分组方法(ResGrouping()方法)是核心.在现有的很多资源分配方法中,资源和任务都是一对一分配的,不用考虑资源的组合分组问题.在应急救援中,由于某些救援任务对执行时间的限制较为严苛,使单一救援资源在任务的截止时间内完成.为了提高救援任务的执行效率,我们采用递归的方式来找出所有救援资源 RES 的所有组合分组 RG.救援资源组合分组方法如算法 3.2 所示:

算法 3.2 救援资源组合分组

输入:救援资源集 RES

输出:所有救援资源组合分组 RG

```

1 RG = {};
2 for each  $res_j \in RES$  do
3    $RG \leftarrow Marshal(res_j, RG)$ ;
4 end for
5 return RG;
```

算法 3.2 解释如下,救援资源组合分组方法的输入为所有救援资源的集合 $RES = \{res_1, res_2, \dots, res_n\}$.而方法的输出为救援资源所有的组合分组 RG.首先, RG 被初始化为空集(行 1).从 RES 中的第一个救援资源 RES_1 开始,通过组合函数 Marshal()不断地将新的救援资源和 RG 中的元素组合,扩充 RG 中的组合分组(行 2-4).最后,输出 RG(行 5).组合函数 Marshal()中的具体做法,我们用表 1 中的示例来解释.

通过上述示例我们可以看出 Marshal(res_j, RG)是一个不断递归的过程,即在现有 RG 的组合

中通过加入新的元素来扩展到更多元素的组合.

表 1 Marshal()方法示例

Fig.1 Method examples of function Marshal()

res_j	RG	Marshal(res_j, RG)
res_1	{}	{ res_1 }
res_2	{ res_1 }	{ res_1, res_2 }, { res_1 }{ res_2 }
res_3	{ res_1, res_2 }, { res_1 }{ res_2 }	{ res_1, res_2, res_3 }, { res_1, res_2 }{ res_3 }, { res_1, res_3 }{ res_2 }, { res_1 }{ res_2, res_3 }, { res_1 }{ res_2 }{ res_3 }, { $res_1, res_2, res_3, res_4$ }, { res_1, res_2, res_3 }{ res_4 }, { res_1, res_2, res_4 }{ res_3 }, { res_1, res_2 }{ res_3, res_4 }, { res_1, res_2 }{ res_3 }{ res_4 }, { res_1, res_2, res_3 }{ res_4 }, { res_1, res_3 }{ res_2, res_4 }, { res_1, res_3 }{ res_2 }{ res_4 }, { res_1, res_4 }{ res_2, res_3 }, { res_1 }{ res_2, res_3, res_4 }, { res_1 }{ res_2, res_3 }{ res_4 }, { res_1, res_4 }{ res_2 }{ res_3 }, { res_1 }{ res_2, res_4 }{ res_3 }, { res_1 }{ res_2 }{ res_3, res_4 }, { res_1 }{ res_2 }{ res_3 }{ res_4 }
res_4	{ res_1, res_3 }{ res_2 }, { res_1 }{ res_2, res_3 }, { res_1 }{ res_2 }{ res_3 }	{ res_1, res_3, res_4 }{ res_2 }, { res_1, res_3 }{ res_2, res_4 }, { res_1, res_3 }{ res_2 }{ res_4 }, { res_1, res_4 }{ res_2, res_3 }, { res_1 }{ res_2, res_3, res_4 }, { res_1 }{ res_2, res_3 }{ res_4 }, { res_1, res_4 }{ res_2 }{ res_3 }, { res_1 }{ res_2, res_4 }{ res_3 }, { res_1 }{ res_2 }{ res_3, res_4 }, { res_1 }{ res_2 }{ res_3 }{ res_4 }

3.2 救援资源组合优化分配:ResAllocating()方法

在找到了所有救援资源组合分组 RG 之后,我们采用多目标线性规划的方式,为每个资源分组 $rg_k \in RG$ 找到最优资源分配方案 A_k .然后根据 A_k 的救援任务完成情况,找到最佳的 rg_k 和 A_k (即 A_{best}).由于在 rg_k 中每个资源组 $g_{k,p}$ (见定义 4)和救援任务 $task_i$ 间是一对一分配,所以通过很多现有的线性规划方法就可以找出 rg_k 的最优资源分配 A_k .救援资源组合优化分配方法如算法 3.3 所示:

算法 3.3 救援资源组合优化分配

输入:所有救援资源组合分组 RG、参数 α, β, γ

输出:救援资源最优的组合分组和分配方案 A_{best}

```

1 for each  $rg_k \in RG$  do
2   ( $obj_k, A_k$ )  $\leftarrow$  LProgramming( $rg_k, \alpha, \beta, \gamma$ );
3 end for
4  $A_{best} \leftarrow A_k$ , with Max( $obj_k$ )
5 return  $A_{best}$ ;
```

算法 3.3 解释如下:救援资源组合优化分配方法的输入为所有救援资源组合分组 RG 和多目标的比重参数 α, β, γ . 算法的输出则是当前阶段中,救援资源最优的组合分组和分配方案 A_{best} . 首先,对于每种救援资源组合 rg_k ,通过多目标线性规划方法(即 LProgramming()方法),找出 rg_k 的最佳分配 A_k 以及 A_k 的目标值 obj_k (行 1-3). 从所有的分配方案中,找出 obj_k 最高的 A_k ,作为当前阶段,救援资源最优的组合分组和分配方案 A_{best} 并输出(行 4-5).

从上面的救援资源组合优化分配过程中可以看出,多目标线性规划方法:LProgramming()为救援资源组合优化分配方法的核心. 下面给出多目标线性规划方法的目标函数和约束条件:

$$\max \alpha \sum_{p=1}^q \sum_{i=1}^m a_{k,p,i} UR_i + \beta \sum_{p=1}^q \sum_{i=1}^m a_{k,p,i} \eta_1 - \gamma \sum_{p=1}^q \sum_{i=1}^m a_{k,p,i} UT_i \eta_2 \quad (12)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{p=1}^q a_{k,p,i} \leq 1 \quad (13)$$

$$\sum_{i=1}^m a_{k,p,i} \leq 1 \quad (14)$$

$$\text{curTime} + UT_i \leq dl_i \quad (15)$$

线性规划的目标函数(式 12)包括:效果优先、效率优先和执行时间最短 3 个目标以及各目标相应的比重 α (效果优先)、 β (效率优先)和 γ (执行时间最短)($\alpha, \beta, \gamma \in [0, 1]$ 且 $\alpha + \beta + \gamma = 1$). 式(13)的限制条件为,一个资源组只能执行一个救援任务. 式(14)的限制条件为,一个救援任务只能被一个资源组执行. 式(13)和式(14)的条件限制了线性规划必须为一对一的资源分配方式. 式(15)的限制条件为当前时间加上任务的执行时间不能超过任务的截止时间. 此条件保证了被执行的救援任务一定可以在其截止时间前被完成.

3.3 多目标的对齐与目标之间的比重

为了使本文模型能够适应不同救援任务和救援情况中对于三种分配目标的不同要求,我们在多目标线性规划方法:LProgramming()中加入了 3 个目标的比重(α, β 和 γ). 由于当前 3 个规划目标的值域并不相同,如果直接调整 α, β, γ 的值,3 个分配目标并不能达到与比重一样的分布. 为了统一 3 个目标之间的比值,我们在效率优先和执行时间最短两个目标中加入了两个平衡系数 η_1 和 η_2 ,将效率最优和执行时间最短两个目标的值域统一到效果最优

目标的值域范围中.

对于 η_1 效率最优目标的平衡系数,由于效率优先目标和效果优先目标之间相差了一个效果值 (UR_i),所以用本阶段中执行任务的平均效果值作为 η_1 的值计算过程如下:

$$\eta_1 = \frac{\sum_{p=1}^q \sum_{i=1}^m a_{k,p,i} UR_i}{\sum_{p=1}^q \sum_{i=1}^m a_{k,p,i}} \quad (16)$$

式中, $\sum_{i=1}^m a_{k,p,i}$ 表示本次分配中执行救援任务数量.

对于 η_2 执行时间最短目标的平衡系数. 对执行时间目标,我们计算的是救援任务的执行时间. 对效果优先目标,我们计算的是救援任务的执行效果. 为了统一目标之间的值域, η_2 的值计算过程如下:

$$\eta_2 = \frac{\sum_{p=1}^q \sum_{i=1}^m a_{k,p,i} UR_i}{\sum_{p=1}^q \sum_{i=1}^m a_{k,p,i} UT_i} \quad (17)$$

η_2 可以被解释为本阶段分配中,救援任务的总执行效果与总执行时间的比值.

4 实验

实验目的是评估本文模型在应急救援资源分配中的表现. 实验是在 Matlab 2014a 上进行的,通过救援任务执行平均效果、阶段内救援任务的平均执行数量及任务平均执行时间 3 个方面来评判我们模型的表现.

4.1 实验设置

实验总共有 50 个救援任务需要被执行,每个救援任务的截止时间在 27~70 时间段;有 5 个救援资源来执行这些任务,每个救援资源单独执行救援任务所花费的时间为 1~5 个时间段,而它们单独执行救援任务的效果为 1~5(其中 1 为效果最差,5 为效果最佳),由于救援资源的合作系数很难准确估计,我们使用相对低的值 1 来测试模型的表现. 本实验的参数设置如表 2 所示.

首先,为了验证本文模型在救援任务与救援资源动态性的环境下资源分配的表现,在第一个实验中 50 个救援任务和 5 个救援资源是分批出现,即在实验开始时,只有 30 个救援任务和 3 个救援资源,在 10 和 20 时间段,分别有 10 个任务和 1 个救援资源被加入到救援分配中. 为了与现有的救援资源分配方法进行比较,我们还使用 Ramchurn 等提出的

基于启发式的群形成算法进行比较^[17].在 Ramchurn 等提出的方法中,救援资源的分组是根据救援资源的重用性来衡量的.而在此实验中,模型的 α 、 β 和 γ 值分别为 $1/3$ 、 $1/3$ 和 $1/3$.

表 2 实验参数设置

Tab.2 Experimental parameters

参数	值域
救援任务个数(m)	50 个
救援任务截止时间(dl_i)	27~70 个时间段
救援资源个数(q)	5 个
救援任务的执行时间($c_{(k,p,t),i}$)	1~5 个时间段
救援任务的执行效果($r_{(k,p,t),i}$)	1(最差)~5(最佳)
合作系数($\mu_{k,p}$)	1

此外,为了验证模型在多目标规划中的效果,我们还通过调整 α 、 β 和 γ 值来调整 3 种不同分配目标间的比重.本实验中, α 、 β 和 γ 的值如表 3 所示.

表 3 α 、 β 、 γ 比重配置

Tab.3 Proportion configuration of α 、 β and γ

α (效率最优)	β (效果最优)	γ (时间最短)
1	0	0
0	1	0
0.5	0	0.5
0	0.5	0.5
1/3	1/3	1/3

实验将计算和对比救援任务平均执行效果 $avg(UR_i)$ 、阶段内救援任务平均执行数量 $avg(\sum a_{k,p,i})$ 以及任务平均执行时间 $avg(UT_i)$.

4.2 实验结果及分析

实验结果在图 1、2、3 和 4 中显示.图 1 展示了在动态和静态环境中,我们的模型和 Ramchurn 等的模型在资源分配中的表现.

从图 1 可以看出,在任务平均执行效果上,救援任务和救援资源的动态性对模型基本上没有什么影响,与 Ramchurn 等的模型的差距也不是很大.

各阶段平均执行任务数量在动态环境中,由于在资源分配开始阶段救援资源和救援任务数量少于在静态环境中,所以其阶段内平均执行任务数量略少于静态环境.在 Ramchurn 等的方法中,由于是以救援资源分组的重用性来分组,救援资源主要通过合作来增加其分组的重用性,通常所有救援资源组

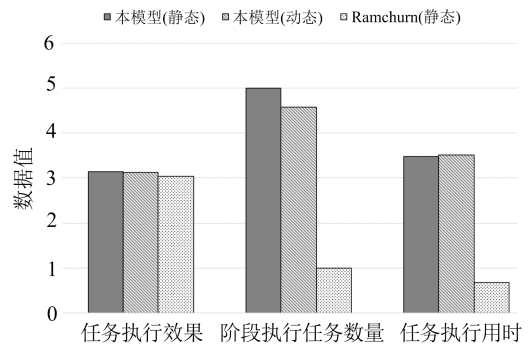


图 1 动态与静态环境中资源分配结果对比

Fig.1 Comparison of resource allocation results in dynamic and static environments

成一组来完成救援任务,因此其单个阶段执行任务数量比较少,而其任务执行阶段数远大于本文模型的救援资源分配方案.

单个任务的平均执行时间在静态和动态环境中,本文模型的救援资源分配方案差别不大.如前文所述,由于在 Ramchurn 等的方法中,通常所有救援资源组成一组来完成救援任务,其单个任务的平均执行时间远远小于本文模型的资源分配方案.

图 2 展示了单目标下(效率优先(α - β - γ 为 1-0-0)和效率优先(α - β - γ 为 0-1-0)),模型在资源分配中的表现.图 2 中横坐标为实验的 3 个表现指标:任务平均执行效果、阶段内平均执行任务数量和任务平均执行时间;纵坐标则是各项指标的数据值.

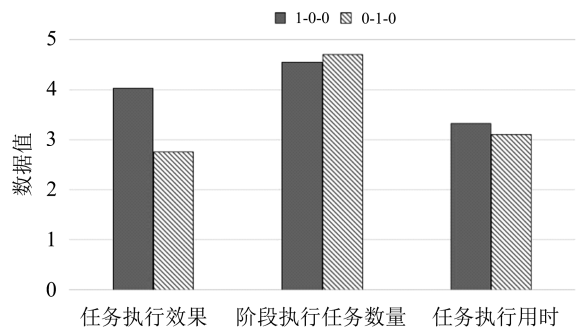


图 2 单目标资源分配方案结果对比

Fig.2 Comparison of results of single objective resource allocation schemes

从图 2 中可以看出,在任务平均执行效果上,以效果为优先目标的资源分配方案(1-0-0)比以效率为优先目标的资源分配方案(0-1-0)提升了近 46.4%.这表示在以效果为优先目标时,模型会优先分配资源去执行效果最优的任务.在以效率为优先目标时,模型以完成更多的任务为主要目标.

在各阶段平均执行任务数量上,以效果为优先

目标的分配方案(1-0-0)比以效率为优先目标的分配方案(0-1-0)降低了将约 3.3%。这是因为,在以效果为优先目标时(1-0-0),模型不会考虑任务执行的数量.在以效率为优先目标时(0-1-0),阶段内的任务执行数量是最重要的资源分配目标。

在单个任务的平均执行时间方面,以效果为优先目标的分配方案(1-0-0)略多于以效率为优先目标的分配方案(0-1-0)。

图 3 展示了多目标下($\alpha-\beta-\gamma$ 为 0.5-0-0.5、0-0.5-0.5 和 1/3-1/3-1/3),模型在资源分配中的表现.图 3 中横坐标为实验的 3 个表现指标:任务平均执行效果、阶段内平均执行任务数量和任务平均执行时间;纵坐标则是各项指标的数据值。

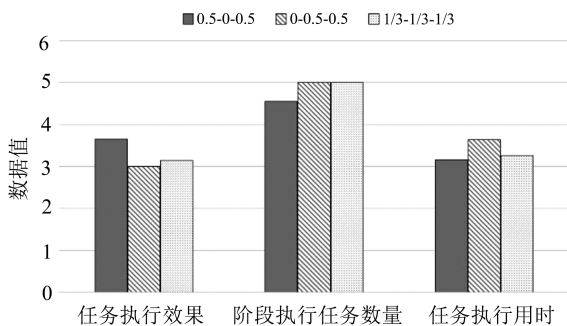


图 3 多目标资源分配方案结果对比

Fig.3 Comparison of results of multi-objective resource allocation schemes

从图 3 可以看出,在任务执行效果上,以效果和执行时间为优先目标(0.5-0-0.5)的资源分配方案依旧能保持最优.以效率和执行时间为优先目标(0-0.5-0.5)的资源分配方案的执行效果是最低的.由此可以看出,执行时间最短是一个更偏向于执行效率的分配目标,所以 3 目标平衡的资源分配方案(1/3-1/3-1/3)比以效率和执行时间为优先目标的资源分配方案(0-0.5-0.5)在执行效果上略有提升。

阶段执行任务数量方面,在以效果和执行时间为优先目标的资源分配方案(0.5-0-0.5)中,为了提高任务的执行效果,资源会合作完成一些任务,从而降低每个阶段中任务的执行数量.在以效率和执行时间为优先目标(0-0.5-0.5)和 3 目标平衡(1/3-1/3-1/3)的资源分配方案中,资源一般会选择单独执行任务,以最大化阶段内任务执行数量。

任务执行用时方面,如前文所述,在以效果和执行时间为优先目标的资源分配方案(0.5-0-0.5)中,由于救援资源会合作完成一些任务,从而提升了资源执行效率,并降低了任务的执行时间.而在以效率

和执行时间为优先目标(0-0.5-0.5)的资源分配方案中,资源会选择单独执行救援任务,所以它们的任务执行时间会被拉长.而在三目标平衡(1/3-1/3-1/3)的资源分配方案中,任务的平均执行时间会位于前两种资源分配方案之间。

图 4 展示了不同目标比重下($\alpha-\beta-\gamma$ 为 1-0-0,0-1-0,0.5-0-0.5、0-0.5-0.5 和 1/3-1/3-1/3),模型在救援资源分配中任务执行的阶段的数量(即进行了多少次资源分配).图 3 中横坐标为不同的目标比重;纵坐标则是资源分配的阶段数量。

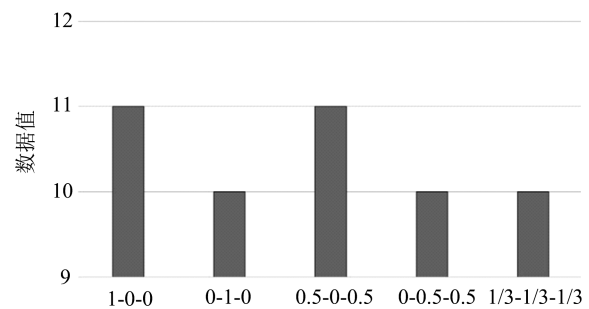


图 4 不同目标比重下任务执行阶段数量

Fig.4 Number of task execution stages in different target weights

从图 4 可以看出,以效果为优先目标(1-0-0)和以效果和执行时间为优先目标(0.5-0-0.5)的资源分配方案的执行阶段数量比其他资源分配方案略高.这是因为当以效果为优先目标时,为了减少任务的执行时间,资源分配方案中会包含一部分资源合作执行任务的情况.这种合作会减少单个阶段内执行任务的数量,从而增加了救援任务执行的阶段数量.在 3 目标平衡(1/3-1/3-1/3)的资源分配方案中,虽然以效果为优先目标会使分配方案向着执行阶段数量增加的方向偏移,但是以效率为优先目标会使分配结果向着执行阶段数量减少的方向偏移,两个目标之间有一定的抗衡性,所以整体任务执行的阶段数目没有明显的变化。

5 结论

本文提出了一种应急救援中的多目标多资源分配模型.该模型通过组合救援资源以增强救援资源的能力并减少救援任务的执行时间.另外,本文模型还可以通过调整多个救援目标的比重并利用多目标线性规划的方法得到更符合实际救援需求的救援资源分配方案.最后,通过借鉴动态规划中的分段思想,模型采用多阶段的资源分配方式来处理应急救

援中任务和资源的动态性问题.由实验结果可以看出,本文模型对动态应急救援中不同的救援任务和救援目标都有着良好的适应性.

参考文献(References)

- [1] MASHAYEKHY L, NEJAD M M, GROSU D, et al. An online mechanism for resource allocation and pricing in clouds [J]. IEEE Transactions on Computers, 2016, 65(4):1172-1184.
- [2] JUNG G, SIM K M. Agent-based adaptive resource allocation on the cloud computing environment[C]// 2011 40th International Conference on Parallel Processing Workshops. Piscataway, NY, USA: IEEE Press, 2016:345-351.
- [3] HANSEN T M, ROCHE R, SURYANARAYANAN S, et al. Heuristic optimization for an aggregator-based resource allocation in the smart grid [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 6(4):1785-1794.
- [4] GUERRIERO F, SURACE R, LOSCRI V, et al. A multi-objective approach for unmanned aerial vehicle routing problem with soft time windows constraints [J]. Applied Mathematical Modelling, 2014, 38(3): 839-852.
- [5] 向逾,胥川,陈鹏予. 医学应急救援中资源优化调度方案研究[J]. 医疗卫生装备, 2016, 37(10):40-42.
- [6] 宁丙文. 共同提升应急救援能力——记第四届中国国际安全生产应急管理论坛[J]. 劳动保护, 2013, (8): 108-110.
- [7] 郭其云,杨军,郭威. 国际应急救援管理的分析探讨[J]. 消防科学与技术, 2015, (5):629-632.
- [8] ZHANG Y, LEE C, NIYATO D, et al. Auction approaches for resource allocation in wireless systems: A survey [J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2013, 15(3):1020-1041.
- [9] FIEDRICH F, GEHBAUER F, RICKERS U. Optimized resource allocation for emergency response after earthquake disasters [J]. Safety Science, 2000, 35: 41-57.
- [10] GEROVAC B J, CARVER D C. Dynamic resource allocation: US8191070B2 [P/OL]. 2012-05-29 [2017-08-14]. <https://patents.google.com/patent/US8191070B2/en>.
- [11] SU X, ZHANG M, BAI Q. Decentralized Task Allocation Under Space, Time and Communication Constraints in Disaster Domains[M]//Smart Modeling and Simulation for Complex Systems. Tokyo: Springer, 2015:41-57.
- [12] SU X, ZHANG M, BAI Q. Coordination for dynamic weighted task allocation in disaster environments with time, space and communication constraints[J]. Journal of Parallel & Distributed Computing, 2016, 97:47-56.
- [13] ZHANG Q, ZHU Q, BOUTABA R. Dynamic resource allocation for spot markets in cloud computing environments[C]// 2011 Fourth IEEE International Conference on Utility and Cloud Computing. Piscataway, NY, USA: IEEE Press, 2012:178-185.
- [14] YAACOUB E, DAWY Z. A survey on uplink resource allocation in ofdma wireless networks [J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2012, 14(2): 322-337.
- [15] SU X, ZHANG M, BAI Q. Dynamic task allocation for heterogeneous agents in disaster environments under time, space and communication constraints[J]. The Computer Journal, 2015, 58(8): 1776-1791.
- [16] SU X, ZHANG M, BAI Q, et al. A dynamic coordination approach for task allocation in disaster environments under spatial and communicational constraints [C] // Workshop at the Twenty-Eighth Conference on Artificial Intelligence. Quebec City, Canada: AAAI, 2014.
- [17] RAMCHURN S D, POLUKAROV M, FARINELLI A. Coalition formation with spatial and temporal constraints[C]// Proceedings of the 9th International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems. Toronto, Canada, 2010: 1181-1188.