

# 应急物流资源与任务匹配的HTN规划方法研究

杨世元<sup>1</sup>, 程肖冰<sup>1\*</sup>, 赵安琪<sup>2\*</sup>, 杨喆<sup>1</sup>, 李航<sup>1</sup>

<sup>1</sup>北京联合大学城市轨道交通与物流学院, 北京

<sup>2</sup>中国邮政集团公司北京市分公司, 北京

收稿日期: 2022年10月24日; 录用日期: 2022年11月23日; 发布日期: 2022年11月30日

## 摘要

突发事件发生后, 面对众多不确定因素, 利用HTN领域知识和规划任务分解原理, 对应急行动方案进行调整、识别、逐层分解, 将复合型任务分解成原子动作, 最终确定应急行动方案, 解决不确定条件下应急物资的调运问题。各种不确定性因素引发受灾点需求量 $b_j$ 、运输时间 $t_{ij}$ 以及单位运输成本 $c_{ij}$ 表现为不确定数, 分析不确定数的属性并构建多目标模型, 运用区间数、三角模糊数理论完成模型求解。实例分析证明, 应急时间比目标时间缩短138单位, 运输总成本648单位, 安全运输期望值为80.2个单位, 实现了时效性、经济性、安全性的多目标要求。

## 关键词

HTN规划, 任务匹配, 区间数, 三角模糊数

# Research on HTN Planning Method for Matching Emergency Logistics Resources and Tasks

Shiyuan Yang<sup>1</sup>, Xiaobing Cheng<sup>1\*</sup>, Anqi Zhao<sup>2\*</sup>, Zhe Yang<sup>1</sup>, Hang Li<sup>1</sup>

<sup>1</sup>College of Urban Rail Transit and Logistics, Beijing Union University, Beijing

<sup>2</sup>Beijing Branch of China Post Group Corporation, Beijing

Received: Oct. 24<sup>th</sup>, 2022; accepted: Nov. 23<sup>rd</sup>, 2022; published: Nov. 30<sup>th</sup>, 2022

## Abstract

After the occurrence of an emergency, facing many uncertain factors, using HTN domain knowledge

\*通讯作者。

文章引用: 杨世元, 程肖冰, 赵安琪, 杨喆, 李航. 应急物流资源与任务匹配的 HTN 规划方法研究[J]. 运筹与模糊学, 2022, 12(4): 1585-1594. DOI: 10.12677/orf.2022.124166

and the principle of planning task decomposition, the emergency action plan was adjusted, identified, and decomposed layer by layer. The compound task was decomposed into atomic actions, and the emergency action plan was finally determined to solve the problem of emergency material allocation and transportation under uncertain conditions. The demand  $b_j$ , transportation time  $t_{ij}$  and unit transportation cost  $c_{ij}$  of the disaster hit points caused by various uncertain factors were expressed as uncertainties. The attributes of the uncertainties were analyzed and a multi-objective model was built. The model was solved by using interval number and triangular fuzzy number theory. The case analysis proved that the emergency time is 138 units shorter than the target time, the total transportation cost was 648 units, and the expected value of safe transportation was 80.2 units, which realized the multi-objective requirements of timeliness, economy and safety.

## Keywords

HTN Planning, Task Matching, Interval Number, Triangular Fuzzy Number

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

近年来,突发事件频繁发生,并伴随次生和衍生灾害,甚至产生灾害链现象。特别是重大地震灾害,不仅破坏环境、生态平衡,而且严重危害人民的生命和财产安全。应急资源的调运关系着救援的及时性、有效性,震后不同时段对应急资源有着不同的需求,利用 HTN 规划应急资源的重要度等级,匹配应急物资调配任务,实施有效救援。

## 2. 基本理论

在实际应急突发事件中,有许多不确定的因素,比如受灾人数随着时间的推移发生变化、天气状况和道路状况的不确定性等。各种不确定性因素引起的各需求点  $B_j (j=1,2,\dots,n)$  的需求量  $b_j$ 、供应点  $A_i$  到需求点  $B_j$  的运输时间  $t_{ij}$  和单位运输成本  $c_{ij}$  均为不确定性数,需求量  $b_j$  为服从正态分布的随机变量、运输时间  $t_{ij}$  为区间数、单位运输成本  $c_{ij}$  为三角模糊数。利用 HTN 规划方法建立基于时效性、经济性、安全性的多目标模型,运用区间数、三角模糊数理论完成多目标模型的求解,使得应急时间最短,成本最小,物资安全运送期望最大。

### 2.1. HTN 规划方法

对于多目标模型,需要应用多目标最优化理论进行求解,其解法分为将多目标模型转化为一个单目标模型的解法和转化成多个单目标模型,也就是将复合型任务分解成原子动作,进行求解。而不确定条件可以通过相关理论转化为确定性实数进行求解。此过程运用了 HTN 规划方法,基本理论如下。

HTN 规划任务分解过程:应急行动方案的制定通过 HTN 规划方法利用领域知识,通过方法实例,递归地将复合任务进行逐层分解,直至分解成为越来越具体原子形式[1]。图 1 为分解过程。

#### 2.1.1. 问题描述

设  $A_1, A_2, A_3, \dots, A_m$  为  $m$  个应急物资供应点,  $B_1, B_2, B_3, \dots, B_n$  为  $n$  各应急物资需求点,各供应点  $A_i (i=1,2,\dots,m)$  的最大供应量为  $a'_i$ ,实际的供应量为  $a_i$ ,各需求点  $B_j (j=1,2,\dots,n)$  的需求量为  $b_j (b_j$  为随

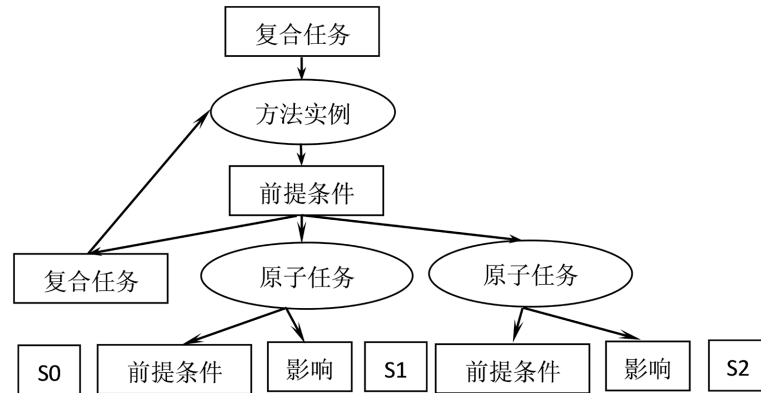


Figure 1. HTN planning task decomposition process  
 图 1. HTN 规划任务分解过程

机变量, 服从正态分布, 即  $b_j \sim N(\mu_j, \sigma_j)$ , 且  $\sum_{i=1}^m a'_i \geq \sum_{j=1}^n b_j$ 。供应点  $A_i$  供应到  $B_j$  的应急物资数量为  $x_{ij}$ , 运输时间为  $\tilde{t}_{ij}$  ( $\tilde{t}_{ij}$  为区间数, 且  $\tilde{t}_{ij} = [t_{ij}^-, t_{ij}^+]$ ,  $t_{ij}^-$  为区间下限,  $t_{ij}^+$  为区间上限), 需求点  $B_j$  的运输时间目标值为  $t_j$ , 那么单位物资延迟时间为  $(\tilde{t}_{ij} - t_j)$  单位物资运输成本为  $\tilde{c}_{ij}$  ( $\tilde{c}_{ij}$  为三角模糊数, 即  $\tilde{c}_{ij} = [c_{ij1}, c_{ij2}, c_{ij3}]$ ,  $c_{ij1}$  为模糊数的悲观值;  $c_{ij2}$  为模糊数的正常值;  $c_{ij3}$  为模糊数的乐观值), 道路通畅概率为  $p_{ij}$ , 目标概率  $P_0$ 。

2.1.2. 模型建立

为使应急时间最短, 成本最小, 物资安全运送期望最大, 建立如下模型:

$$\min \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m x_{ij} (\tilde{t}_{ij} - t_j) \tag{1}$$

$$\min \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m \tilde{c}_{ij} x_{ij} \tag{2}$$

$$\max \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m P_{ij} x_{ij} \tag{3}$$

$$\text{s.t. } \sum_{i=1}^m a_i = \sum_{j=1}^n b_j \tag{4}$$

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} = a_i \tag{5}$$

$$\sum_{i=1}^m x_{ij} \geq b_j \tag{6}$$

$$0 \leq a_i \leq a'_i \tag{7}$$

$$\tilde{t}_{ij} = [t_{ij}^-, t_{ij}^+] \tag{8}$$

$$\tilde{c}_{ij} = [c_{ij1}, c_{ij2}, c_{ij3}] \tag{9}$$

$$b_j \sim N(\mu_j, \sigma_j) \tag{10}$$

$$x_{ij} = 0, \text{ 当 } p_{ij} = P_0 \text{ 时} \tag{11}$$

$$x_{ij} \geq 0 \tag{12}$$

模型中, 式(1)~(3)为目标函数。式(4)~(12)为约束条件, 式(1)表示应急物资的总延误时间最短; 式(2)表示应急物资的总成本最小; 式(3)表示应急物资安全运送期望值最大。

约束条件中, 式(4)表示实际总供应量满足总需求量; 式(5)表示各供应点分配给各需求点的应急物资之和等于该供应点的实际供应量; 式(6)表示各需求点从各供应点分配到的应急物资之和大于等于该需求点的需求量; 式(7)表示各供应点的实际供应量不超过其最大供应量; 式(8)运输时间为  $\tilde{t}_{ij}$  ( $\tilde{t}_{ij}$  为区间数, 且  $\tilde{t}_{ij} = [t_{ij}^-, t_{ij}^+]$ ,  $t_{ij}^-$  为区间下限,  $t_{ij}^+$  为区间上限); 式(9)  $\tilde{c}_{ij}$  为三角模糊数,  $c_{ij1}$  为模糊数的悲观值;  $c_{ij2}$  为模糊数的正常值;  $c_{ij3}$  为模糊数的乐观值; 式(10)需求量  $b_j$  为服从正态分布; 式(11)表示应急物资调度保证在一定的安全条件下 ( $p_{ij} \geq P_0$ ) 运行; 式(12)表示从供应点  $i$  分配给需求点  $j$  的应急物资数量非负[2]。

显然, 该模型为不确定性线性规划模型, 模型中既有区间数、三角模糊数, 还有随机变量[3]。在处理此类问题时, 可通过以下相关理论将上述不确定性数转化为确定性实数。区间数、三角模糊数的基本理论如下。

### 2.2. 区间数

**定义 1.1**  $[a,b]$  为区间数,  $a, b \in R$ ,  $a \leq b$ ,  $a, b$  称为区间数的端点。

**定义 1.2** 设  $[a,b], [c,d] \in I(R)$ , 区间数的运算定义如下:

$$[a,b] + [c,d] = [a+c, b+d]$$

$$[a,b] - [c,d] = [a-c, b-d]$$

$$k[a,b] = \begin{cases} [ka, kb], k \geq 0 \\ [kb, ka], k < 0 \end{cases}$$

**定义 1.3** 区间数  $a = [a^-, a^+]$ ,  $\omega(a) = a^+ - a^-$  为区间数  $a$  的宽度,  $m(a) = \frac{a^- + a^+}{2}$  为区间中点[4]。

**定义 1.4** 若  $I$  为区间数域,  $R$  为实数域, 可以定义一个算子  $O: I \rightarrow R$ ,  $\omega_\lambda(a) = m(a) + \lambda\omega(a)$ , 把区间数映射到实数集上, 其中,  $\lambda$  表示偏好参数,  $\lambda = [-\frac{1}{2}, \frac{1}{2}]$ 。

对于冒险型的决策者, 取  $-\frac{1}{2} \leq \lambda \leq 0$ ; 对于中立型的决策者, 取  $\lambda = 0$ ; 对于保守型的决策者, 取  $0 \leq \lambda \leq \frac{1}{2}$ 。这样, 就把区间数关系转换为对应的实数关系, 并把决策者的偏好作为参数融入到应急物资调度决策中。

### 2.3. 三角模糊数

**定义 1.5** 若  $\tilde{a}$  是一模糊数, 其隶属函数定义如上, 则称  $I_T(\tilde{a})$  为该模糊数的整体期望值, 其中  $I_T(\tilde{a}) = \frac{I_L(\tilde{a}) + I_R(\tilde{a})}{2}$ 。

由定义可得: 对于  $\tilde{a} = (a, b, c)$ , 有:  $I_T(\tilde{a}) = \frac{a+c+2b}{4}$ 。

三角模糊数的运算如下:

$$I_T\left(\sum_{i=1}^n \tilde{a}_i\right) = \sum_{i=1}^n I_T(\tilde{a}_i)$$

$I_T(\xi a) = \xi I_T(\tilde{a})$  ( $\xi$  为任意实数)

**定义 1.6** 若  $S = \{\tilde{a}_1, \tilde{a}_2, \tilde{a}_3, \dots, \tilde{a}_n\}$  是模糊集, 取  $\forall \tilde{a}_i, \tilde{a}_j \in S (i \neq j)$ ,

若  $I_T(\tilde{a}_i) < I_T(\tilde{a}_j)$ , 则称  $\tilde{a}_i < \tilde{a}_j$ ;

若  $I_T(\tilde{a}_i) = I_T(\tilde{a}_j)$ , 则称  $\tilde{a}_i = \tilde{a}_j$ ;

若  $I_T(\tilde{a}_i) > I_T(\tilde{a}_j)$ , 则称  $\tilde{a}_i > \tilde{a}_j$ ;

这样, 就把三角模糊数映射为一个对应的实数, 就把不可比的三角模糊数转换为可比的实数。

### 3. 应急资源分类和特点

#### 3.1. 应急资源分类

在地震灾害应急救援过程中, 可以用来减轻或预防地震灾害的影响, 保证相关人员在应急物流资源过程中的安全。地震灾害应急资源是地震应急救援的必要条件, 是紧急救援和灾民安置的基础和保障。以下是地震灾害应急物流所需的另外几种主要资源[5]。

##### 1) 人力资源

发生突发灾害后, 需要专业人员进行救援, 需要专家进行评估, 需要人员制定应急方案, 所以人作为人力资源, 十分重要。如指挥员、组织者、志愿者等。

##### 2) 应急财力资源

应急社会各界人士的捐赠资金、地方政府下发的拨款、保险提供的赔偿资金是应急财力资源主要组成部分。

##### 3) 应急技术资源

通过网络在线授课、媒体宣传、播报等可以实时更新, 精准共享地震预测、震中自救、震后抗震防病的信息。避免灾民因盲目紧张, 手足无措造成恐慌。

##### 4) 应急设备资源

目前, 我国的主要交通工具是卡车; 在紧急情况下或汽车无法到达时, 将使用航空运输或其他交通工具。在发生地震灾害时, 应优先安排和调度运输, 确保运输的安全、可靠和畅通。

##### 5) 专用应急物资

以地震为例, 根据类别将救灾物品进行分类。第一类是生活类物品, 在第一大类中还分为 5 小类, 包括应急暂时食宿类、动力燃烧类、污染整治类、通讯广播类、照明装备类。强地震灾害会导致建筑物倒塌, 许多幸存者会被困在倒塌的房屋下面, 这就需要相应的搜救仪器和营救设备; 同时, 剧烈的地震造成道路损坏、房屋倒塌, 山体崩塌等, 为营救、物资调运造成阻碍, 所以起重器、牵引设备等成为解救被埋人员和清理道路的重要资源, 所以第二类是救生类物品。在第二大类中还分为 6 小类, 包括生命救助类、器械用具类、救援运载类、工程装备类、调运工具类、工程原料类。首先人员伤亡是突发地震灾害的常见现象, 受伤的灾民, 包括在救援任务中受伤的救援人员都需要进行紧急治疗, 然后, 由于大量尸体被埋在地下, 还可能出现细菌污染甚至爆发瘟疫, 所以, 第三类是医用类物品, 在第三大类中还分为 2 小类, 包括生命支持类、防护用品类。第四类专用应急物资为保暖类物品, 包括帐篷、褥子、睡袋、取暖工具等。

#### 3.2. 应急物资特点

##### 1) 不确定性

突发事件是人们在毫无准备、未知的状况下发生的。对于发生哪类自然灾害, 什么时候发生、在哪发生、波及多少人都是不可预料的。所以物资所需的类型、数量、运输方式都是未知的。

## 2) 不可替代性

应急物资是灾害发生后所需的物资，如生命救助类物资、恒明支持类物资等。

## 3) 时效性

灾害发生后，物资需要尽快到达灾区。如果太慢就是普通物资了。

## 4) 滞后性

所有的决策都是在灾害发生后决定的。对物资种类、数量的需求也是根据受灾情况确定的。

# 4. HTN 规划分析

## 4.1. 建立基于层次任务分析 HTN 的物流管理体系

面对个各种各样的自然灾害，我国的应急管理体系尚不完善。像地震灾害事件，部分救灾物资找不到发放的渠道，很多组织筹集到很多物资，但并没有在第一时间送到重灾区。还有部分没有经过专业培训的志愿者，冲动的来到救灾区域，他们不懂如何科学的开展救援工作，更不懂如何应对在救灾过程发生的突发事件，名义上为志愿者，实则救援工作造成了阻碍。因此，合理的协调社会资源、人力资源，提高救援质量和效率，避免资源浪费是应急管理体系中必不可少的。我们需要运用物流管理科学、层次任务网络(HTN)规划方法，逐层剖析，分析其重要度，保证应急物流系统的通畅、时效和安全运行，构建系统和完善的应急物流管理体系[6]。

### 1) 应急物流管理系统组成

应急物流由流向、流体、载体、流程、流量、流速、时间七要素组成。构建应急物流管理体系，合理调用物流资源，快速找到距离灾害发生区域最近的物资储备点，保证运输路线畅通，路线正确，高质量、高速度的将应急物资及时配置到所需地点，为灾区尽快开始救援提供保障。

### 2) 应急物流分类管理的基础

“流体”、“载体”和“流向”是典型的可分类元素。在自然灾害应急物流中，载体通常是中心到地方的应急物资储备、运输枢纽和节点、区域物流中心、社会团体和企业储备等。流动方向通常是救灾现场临时确定的。这两个因素是应急物流的决定因素和稳定因素。对应急物流分类进行管理的概念较为笼统，举例解释应急物流分类进行管理的概念，如：当灾害发生时，需要判断是人为灾害还是自然灾害，一般来讲，自然灾害对应急物流的运用较多，自然灾害发生后，首先根据不同类别判断需求，再根据救援阶段的不同调整应急物资。

### 3) 应急物流分类管理的依据

对应急物资分类管理时，需要考虑应用的效用，除此之外，还要考虑三点。第一，突发应急资源要了解储备点的物资种类和数量，当其中一个储备点无法满足供应时，尽快从其他储备点调配。第二，突发灾害具有动态变化的时期，当产生二次灾害时，应急物资的需求也会变化。第三，灾害等级除外的情况下，有的灾害需要同一品种但数量很大的应急物资，有的灾害需要更多种类的应急物资，这也与灾难本身的复杂性和破坏性有关。

## 4.2. 应急资源任务分解

以地震为例，在地震突发的情况下，利用 HTN 规划方法解决应急资源调运问题，运用任务分解方法分解应急资源，并分析上层应急资源与下层应急资源是如何确立的，图 2 为应急资源任务分解树[7]。(注：所有应急资源的排列都是无序的)。

地震灾害发生后，要通过分析地震的级别、震源的位置、地震波及的面积，设施的损坏程度、房屋倒塌程度等划分上层应急资源都有哪些。下层应急资源需求数量，需要通过比率计算出来。然后将下层

资源进行分配，选择合适的运输队，完成资源从储备点运输到灾区的安置点[8]。

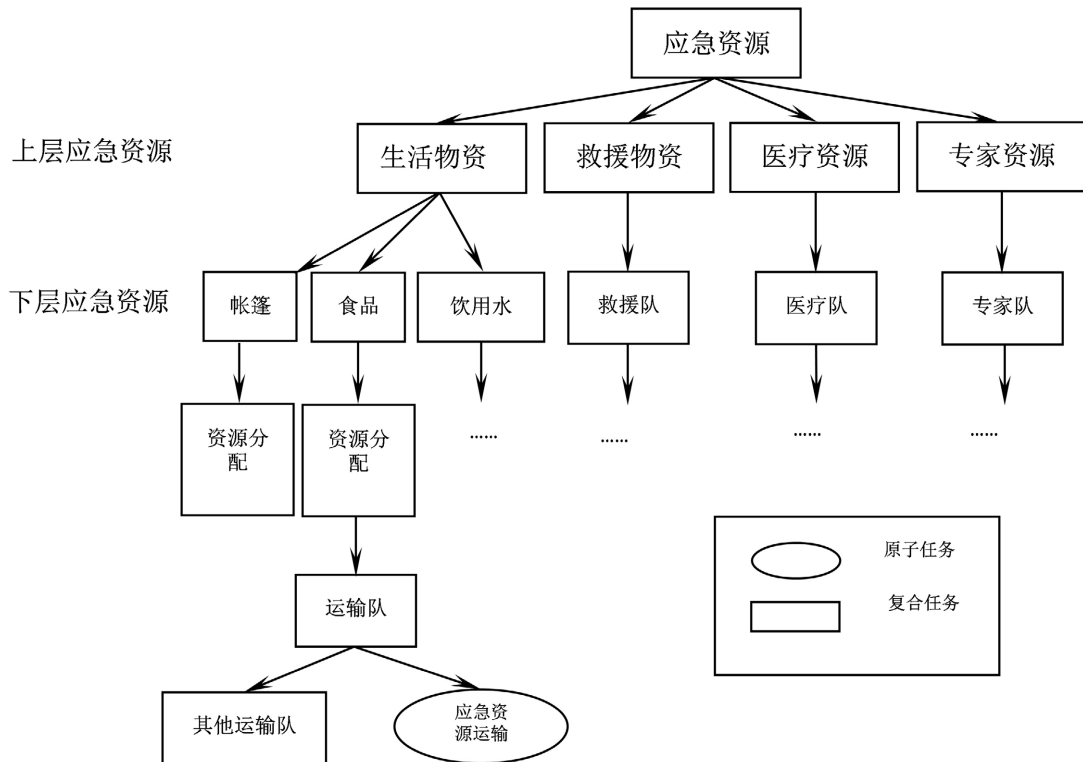


Figure 2. Emergency resource task decomposition tree  
图 2. 应急资源任务分解树

### 5. 案例分析

在地震灾害应急救援任务中，需要各种资源，人是一切资源中最宝贵的，其他一切资源都是在人的作用下流动的。根据受灾程度匹配救援人员数量、专家队伍数量等是非常重要的。在救援人员的配置上，有专门的救援人员、指挥员、官兵、志愿者等。其中，专业救援人员和军队官兵是地震灾害救援工作的主要力量。接受过专业培训的志愿者作为助手。对于地震灾难，仅靠人员数量无法保证救援效果，盲目救援是对人力物力的巨大浪费。如何配备专业的救援技术人员，将在很大程度上决定救援效果。由于专业救援人员数量有限，在专业技术人员的指导下，部队官兵和志愿者在现场全力配合救援工作，最大限度地提高了人力资源救援的效率。除了根据受灾程度匹配救援人员外，在不同时期应急物资的需求种类、重要程度以及物资调运问题上的任务匹配也是十分重要的[9]。

以地震为研究背景，分析在不确定资源约束的条件下，利用 HTN 规划方法，将复合型问题分解成原子问题(将多目标问题转化成单目标问题)，解决随机条件下应急物资调度问题，将供应点与需求点进行任务匹配[10]。

在时间、成本、道路是否通畅不确定的条件下，利用 HTN 规划方法确定应急行动方案的思路，分析三个受灾地区(应急需求点)需要从附近的三个仓库(应急供应点)调拨大量的生活用品。

数据如下：应急供应点的总最大供应量为 100，其中  $a'_1 = 25$ ， $a'_2 = 30$ ， $a'_3 = 45$ ，各应急需求点的需求量为服从正态分布的随机变量，其中  $b_1 \sim N(10,5)$ ， $b_2 \sim N(50,10)$ ， $b_3 \sim N(20,5)$ ，取置信水平  $\alpha = 0.8$ 。

供应点  $A_i$  供应到  $B_j$  的道路原始属性值，即初始任务(运输时间  $\tilde{t}_{ij}$  ( $\tilde{t}_{ij}$  为区间数、即  $\tilde{t}_{ij} = [t_{ij}^-, t_{ij}^+]$ )、单位

物资运输成本  $\tilde{c}_{ij}$  ( $\tilde{c}_{ij}$  为三角模糊数, 即  $\tilde{c}_{ij} = [c_{ij1}, c_{ij2}, c_{ij3}]$  和道路通畅概率  $p_{ij}$ ) 如表 1 所示, 各需求点  $B_j$  的运输时间目标值分别为  $t_1 = 8, t_2 = 7, t_3 = 6$ 。目标概率为  $p_0 = 0.6$ , 允许误差  $\varepsilon = 0.01$ 。

**Table 1.** Initial task list (original attribute values of roads supplied from supply point  $A_i$  to  $B_j$ )

**表 1.** 初始任务列表(供应点  $A_i$  供应到  $B_j$  的道路原始属性值)

	$B_1$			$B_2$			$B_3$		
	$\tilde{t}_{ij}$	$\tilde{c}_{ij}$	$P_{ij}$	$\tilde{t}_{ij}$	$\tilde{c}_{ij}$	$P_{ij}$	$\tilde{t}_{ij}$	$\tilde{c}_{ij}$	$P_{ij}$
$A_1$	[5,7]	[6,8,12]	0.6	[6,8]	[4,8,12]	0.6	[4,6]	[4,7,12]	0.7
$A_2$	[4,6]	[5,7,11]	0.7	[4,6]	[3,6,11]	0.8	[5,7]	[6,7,9]	0.5
$A_3$	[7,9]	[5,8,15]	0.5	[3,5]	[3,5,9]	0.9	[3,5]	[4,6,10]	0.8

设决策者进行的优化都是保守型的, 所以  $\lambda = 1/2$ , 要想计算不确定条件下的多目标函数, 需要将运输时间  $t_{ij}$ 、单位物资运输成本  $c_{ij}$ 、需要通过定义 1.4 求解, 将它们转化为确定的实数。从而得到优化后的属性列表(单位物资延误时间( $t_{ij}-t_j$ ))、单位物资运输成本  $c_{ij}$  和道路通畅概率  $p_{ij}$ , 如表 2 所示。

$$\omega(a) = a^+ - a^-;$$

$$m(a) = (a^- + a^+) / 2;$$

$$\omega_\lambda(a) = m(a) + \lambda\omega(a);$$

所以  $A_1B_1$  对应点  $\omega_\lambda(a) = (7-5)/2 + (7+5)/2 = 7$ ;

$$t_{ij} - t_j = \omega_\lambda(a) - t_1 = 7 - 8 = -1;$$

以此类推可求出其他值。

又:  $c_{ij} = (c_{ij1} + c_{ij3} + 2c_{ij2}) / 4$ ;

所以  $A_1B_1$  对应点  $c_{ij} = (6 + 12 + 2 \times 8) / 4 = 8.5$ ;

以此类推可求出其他值。

以上计算结果如表 2 所示。

**Table 2.** Road Optimization Attribute Values Supplied from  $A_i$  to  $B_j$  at Supply Point

**表 2.** 供应点  $A_i$  供应到  $B_j$  的道路优化属性值

	$B_1$			$B_2$			$B_3$		
	$t_{ij} - t_j$	$c_{ij}$	$P_{ij}$	$t_{ij} - t_j$	$c_{ij}$	$P_{ij}$	$t_{ij} - t_j$	$c_{ij}$	$P_{ij}$
$A_1$	-1	8.5	0.6	1	8	0.6	0	7.5	0.7
$A_2$	-2	7.5	0.7	-1	6.5	0.8	1	8	0.5
$A_3$	1	9	0.5	-2	5.5	0.9	-1	6.5	0.8

需求量  $b_1 \sim N(10,5)$ ,  $b_2 \sim N(50,10)$ ,  $b_3 \sim N(20,5)$ , 服从正态分布, 根据公式将其约束条件转化为确定的形式。

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} = a_i, \quad 0 \leq a_i \leq a'_i, \quad \text{所以} \quad \sum_{j=1}^n x_{ij} \leq a'_i;$$

因为  $a'_1 = 25$ ,  $a'_2 = 30$ ,  $a'_3 = 45$ , 所以,  $x_{11} + x_{12} + x_{13} \leq 25$ ;

以此类推可求出其他约束条件。



定义:  $\phi^{-1}(0.8) = 0.842$ ;  $b_j \sim N(\mu_j, \sigma_j)$ ;  $\sum_{i=1}^n x_{ij} \geq \mu_j + \sigma_j \phi^{-1}(\alpha)$ ;

则:  $x_{11} + x_{21} + x_{31} \geq \mu_1 + \sigma_1 \times \phi^{-1}(0.8) = 10 + 5 \times 0.842 = 121$

$$x_{11} + x_{21} + x_{31} \geq 121,$$

以此类推可求出其他约束条件。

又因为当  $p_{ij} < P_0$  时  $x$  值为 0, 所以  $x_{23} = x_{31} = 0$ 。

由以上数据, 可以列出具体模型:

$$\min T(x) = -x_{11} + x_{12} - 2x_{21} - x_{22} + x_{23} + x_{31} - 2x_{32} - x_{33}$$

$$\min T(x) = 8.5x_{11} + 8x_{12} + 7.5x_{13} + 7.5x_{21} + 6.5x_{22} + 5.5x_{32} + 6.5x_{33}$$

$$\max S(x) = 0.6x_{11} + 0.6x_{12} + 0.7x_{13} + 0.7x_{21} + 0.8x_{22} + 0.9x_{32} + 0.8x_{33}$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} x_{11} + x_{12} + x_{13} \leq 25 \\ x_{21} + x_{22} + x_{23} \leq 30 \\ x_{11} + x_{21} + x_{31} \geq 14.21 \\ x_{12} + x_{22} + x_{32} \geq 58.42 \\ x_{13} + x_{23} + x_{33} \geq 24.21 \\ x_{23} = x_{31} = 0 \\ x_{ij} \geq 0 \end{cases}$$

$$\text{可解得: } x = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 24 \\ 17 & 13 & 0 \\ 0 & 45 & 0 \end{bmatrix}.$$

相应的目标值  $\min T(x) = -138$ ,  $\min M(x) = 648$ ,  $\max S(x) = 80.2$ 。

通过 HTN 规划方法制定应急行动方案的思路解得: 需求点  $B_1$  的物资由供应点  $A_1$  和  $A_2$  联合供应, 其中  $A_1$  供应 1 个单位,  $A_2$  供应 17 个单位; 需求点  $B_2$  的物资由供应点  $A_2$  和  $A_3$  联合供应, 其中  $A_2$  供应 13 个单位,  $A_3$  供应 45 个单位; 需求点  $B_3$  的物资由供应点  $A_1$  供应 24 个单位。相应的总延误时间为-138, 即所有物资到达需求点的时间比目标时间早 138 个单位, 运输总成本为 648, 安全运输期望值为 80.2 个单位, 计算结果验证了 HTN 规划方法多目标模型实现了时效性、经济性、安全性的多目标要求。

## 6. 结论

自然灾害的突然爆发给人们的生命安全造成威胁, 引起社会动荡, 在多目标任务下, 要先将复杂的任务分解成一个单目标的任务, 将复合型任务分解成原子动作, 进行求解。突发事件存在不确定性, 在不确定条件下, 通过相关理论转化为确定性实数进行求解。本文以地震为背景, 在需求量、运输时间和单位物资运输成本均不确定的情况下, 建立了多目标模型, 利用 HTN 规划方法制定应急行动方案的过程解决不确定条件下应急物资调度问题。为使应急时间最短, 成本最小, 物资安全运送期望最大, 运用区间数、三角模糊数的理论, 完成多目标模型的求解, 保证了救援工作效率的同时, 更节约了成本避免造成不必要的浪费。更解决了不确定条件下应急物资调度问题, 根据需求点的随机需求, 实现供应点到需求点的最优任务匹配。

## 基金项目

北京市教委科技一般资助项目(KM202011417002); 北京联合大学 2022 年“启明星”大学生科技创新创业项目: 震后应急物资需求预测及 HTN 调度决策研究。

## 参考文献

- [1] 王喆, 王世昌, 李明磊, 唐攀. 层次任务网络规划在应急物流方案制定中的应用研究[J]. 安全与环境工程, 2017, 24(5): 15-20.
- [2] 郝西浩, 张玲. 震后救灾网络中应急资源配置鲁棒优化研究[J]. 武汉理工大学学报(信息与管理工程版), 2019, 41(6): 560-566.
- [3] 张梦玲, 王晶, 黄钧. 不确定需求下考虑供应商参与机制的应急资源配置鲁棒优化研究[J]. 中国管理科学, 2020, 28(7): 102-111.
- [4] 王喆, 蒋壮, 王世昌, 刘丹. 应急智能规划中基于约束满足的资源协作方法[J]. 系统工程学报, 2020, 35(6): 816-837.
- [5] 唐攀, 祁超, 王红卫. 基于层次任务网络规划的应急行动方案制定方法[J]. 管理评论, 2016, 28(8): 43-50.
- [6] 邵天浩, 张宏军, 程恺, 等. 层次任务网络中的重新规划研究综述[J]. 系统工程与电子技术, 2020, 42(12): 2834-2846.
- [7] 刘明周, 王强, 凌琳. 基于分层任务网络的云制造任务分解方法[J]. 中国机械工程, 2017, 28(8): 924-930.
- [8] 王喆, 王世昌, 涂圣友, 等. 应急行动方案决策研究综述[J]. 武汉理工大学学报(信息与管理工程版), 2019, 41(5): 467-472, 484.
- [9] 张旭, 胡小慧. 面向地震救援的应急物资临时储备库规划研究[J]. 数学的实践与认识, 2020, 50(22): 11-19.
- [10] 李伟利. 考虑优先级的应急物流系统 LRP 问题研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京交通大学交通运输学院, 2019.