

# 应急智能规划中基于约束满足的资源协作方法

王喆<sup>1,2,3</sup>, 蒋壮<sup>1,2,3</sup>, 王世昌<sup>1,2,3</sup>, 刘丹<sup>1,2,3</sup>

(1. 武汉理工大学中国应急管理研究中心, 湖北 武汉 430070;

2. 安全预警与应急联动技术湖北省协同创新中心, 湖北 武汉 430070;

3. 武汉理工大学安全科学与应急管理学院, 湖北 武汉 430070)

**摘要:** 针对复合型跨地域突发事件应急管理中的资源稀缺特征, 集成层次任务网络(HTN)规划和分布式约束满足(DCSP)技术, 提出多部门应急行动方案智能规划中的资源协作方法. 先通过增强 HTN 规划的资源处理能力, 制定出限定资源变量的应急行动方案框架. 再将该方案框架编码为 DCSP 问题, 使用改进的异步回溯算法求解资源协作的具体参数. 结合城市洪涝灾害进行了多种情景的仿真实验. 结果验证了该方法在应急资源协作方案制定中的灵活性和处理速度优势.

**关键词:** 应急决策; 层次任务网络规划; 分布式约束满足; 协作规划

中图分类号: X913.4

文献标识码: A

文章编号: 1000-5781(2020)06-0816-08

doi: 10.13383/j.cnki.jse.2020.06.009

## Resource cooperation method based on constrain satisfaction in emergency intelligent planning

Wang Zhe<sup>1,2,3</sup>, Jiang Zhuang<sup>1,2,3</sup>, Wang Shichang<sup>1,2,3</sup>, Liu Dan<sup>1,2,3</sup>

(1. China Research Center for Emergency Management, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China;

2. Hubei Research Center for Crisis and Hazard Emergency Management, Wuhan 430070, China;

3. School of Safety Science and Emergency Management, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

**Abstract:** Aiming at the resource scarcity characteristics in composite transregional emergency management, this paper proposes a resource cooperation method to intelligent planning for multisectoral emergency action plan by combining hierarchical task network (HTN) plan and distributed constraint satisfaction (DCSP) technology. By enhancing the resource handling capability of HTN planning, the emergency action plan framework with limited resource variables is developed. Further, the plan framework is coded as DCSP problem, and then the improved asynchronous backtracking algorithm is designed to solve the specific parameters of resource cooperation. An experimental analysis of various scenarios is conducted using urban flood disaster. The results verify that the flexibility and processing speed advantage of the method in emergency resource cooperation plan formulation.

**Key words:** emergency decision-making; hierarchical task network plan; distributed constrain satisfaction; collaborative planning

收稿日期: 2019-09-12; 修订日期: 2020-08-19.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(71501151); 湖北省自然科学基金资助项目(2016CFB467); 国家社会科学基金资助项目(16CTQ022); 国家重点研发计划课题资助项目(2016YFC0802509).

## 1 引言

应急智能规划是突发事件中应急指挥团队通过智能规划技术组织应急决策, 快速科学制定应急行动方案(incident action plans)的过程, 是应急保障力量高效持续运作的关键. 随着我国城市化、信息化和现代化进程的加快, 自然灾害、工业事故、公共卫生事件和社会治安事件等各类突发事件频繁威胁公共安全, 给应急管理带来严峻挑战, 也要求应急决策工作更加智能和科学.

传统应急决策研究中通常将方案制定和资源调度<sup>[1,2]</sup>视为两个连贯过程, 即先结合日常的标准作业程序(standard operating procedure)制定应急行动方案, 再建立运筹学模型进行资源数量的分配. 但实际应急决策中通常资源稀缺, 而资源是应急指挥团队进行决策应对的关键, 资源因素会影响应急目标、战略和战术选择. 为了发挥应急保障力量的潜力以及更科学的安排应急资源, 需采用应急智能规划, 在方案制定过程中实现资源优化, 确保这两个过程的紧密结合和优化.

层次任务网络(hierarchical task network)规划<sup>[3]</sup>是人工智能中通过知识推理, 寻求行动方案的决策方法, 其推理过程与应急行动方案制定过程一致, 且能处理应急预案、案例<sup>[4]</sup>等复杂领域知识文本, 广泛地应用于应急决策领域. 但资源优化是 HTN 规划实际应用的瓶颈问题<sup>[5,6]</sup>, 特别是涉及多部门资源协作. 现有 HTN 规划器通常设计时间函数描述资源信息局部演化<sup>[7]</sup>来增强资源处理能力. Marc 等<sup>[8]</sup>通过时态增强结构开发出 SIADDEX 规划器, 用以处理资源推理过程. Wilkins 等<sup>[9]</sup>设计了规划评价阶段开发出 SIPE2 规划器, 通过时态函数处理资源约束. 王喆等<sup>[10,11]</sup>将资源函数转化为规划中的全局资源状态, 并将资源缺项建模为软目标约束问题求解, 并成功开发出 REHTN 规划器用以处理资源缺项问题. Qi 等<sup>[12]</sup>将资源约束转化为时间约束, 开发出 GSCCB-SHOP2 规划器, 并基于状态更新的方式实现资源推理. 但这些方法均为集中式在线规划系统<sup>[13]</sup>. 实际复合型突发事件通常需要多个应急指挥团队共同开展应急智能规划及其资源协作, 上述现有的方法尚不能处理多规划器间资源函数的协调和同步问题.

为了解决上述问题, 需要引入分布式约束满足问题(distributed constraint satisfaction problems)求解技术, 通过 DCSP 的变量一致性校验, 处理多规划器间的资源函数协调和同步. Kornienko 等<sup>[14]</sup>将 DCSP 应用于应急决策, 验证了其信息共享、鲁棒性等优势. Samadidana 等<sup>[15]</sup>设计了 DCSP 在不稳定网络环境中的运作方式, 提供了分布决策环境下算法协调技术. 但这些研究中的约束描述模型尚不符合 HTN 规划语法, 不能发挥 HTN 规划强大的知识推理能力.

基于此, 本文提出 HTN 和 DCSP 相结合的应急智能规划方法. 通过 HTN 规划生成应急行动方案的基本行动框架, 该行动框架包含了资源协作以外的所有行动, 并把未解决的资源协作信息归纳, 编码为 DCSP 问题, 使用改进异步回溯<sup>[16,17]</sup>(asynchronous backtracking)算法, 在考虑决策主体的优先级、资源短缺状态、资源可重用性和上下级关系的情况下, 求解资源协作问题, 从而得到带资源协作信息的应急行动方案. 以城市洪涝灾害为案例进行仿真测试, 检验了该方法的科学性及其特点.

## 2 问题描述

复合型突发事件发生时, 各受灾区域所需应急资源种类多、数量大, 单个资源储备点往往难以独立应对. 这就需要建立完善的应急资源协作方案, 由多个资源储备点协作为受灾区域供给应急资源, 同时优化资源供给成本.

针对应急资源储备特征和突发事件各阶段, 存在多种应急资源协作方式, 难以预先确定何时应当选择哪个机构为受灾区域供给应急资源. 为此, 各资源储备点建立 Agent 系统, 通过应急资源协作网络的形式, 实现受灾区域和资源储备点间彼此联系, 相互协调. 通过各 Agent 间的自主通讯协调, 按照资源储备点级别由低到高, 距离由近到远的原则, 由多个资源储备点协作的为某一受灾区域科学高效的供给应急资源. 这样能

够克服应急资源调配过程中资源供给形式单一,造成的应急资源短缺、成本过高、时效性不足等问题。

为了实现这一过程,基于 HTN 规划设计资源协作描述模型如下:

**定义 1** 应急规划问题  $P = \{S, T, L\}$  是由初始状态  $S$ , 初始任务网络  $T$  和级别标记  $L$  组成的三元组,其含义如下:

1) 初始状态  $S = (S_1, S_2, \dots, S_n)$ , 由带实际参数的一阶谓词组成,以描述受灾点现场环境。

2) 初始任务网络  $T = (T_1, T_2, \dots, T_n)$ , 由初始时刻任务目标组成,以描述要达到的应急救援效果。

3) 级别标记  $L = (L_d, L_s, L_a)$ , 其中  $L_d$  表示受灾点的优先级别,  $L_s$  表示资源储备点的行政级别,  $L_a$  表示行动的响应级别。

**定义 2** 应急行动方案  $I = (A, R_c, R_s)$  是由基本行动框架  $A$ , 资源协作方案  $R_c$  和资源短缺报告  $R_s$  组成的三元组,其含义如下:

1) 基本行动框架  $A = (A_1, A_2, \dots, A_n)$ , 由带参数的操作(: operator) 组成, 每个  $A_i$  可以指导应急行动的一个步骤, 依次完成  $A_i$  可达到预期救援效果。

2) 资源协作方案  $R_c = (R, D, L_a)$ ,  $R$  包含资源请求方、资源响应方、资源名称和资源数量的信息, 其取值为  $R_1$  或  $R_2$ , 具体见定义 3 和定义 4。  $D$  表示资源请求方和响应方的距离。  $L_a$  表示行动的响应级别。

3) 资源短缺报告  $R_s = (N_d, N_r, Q)$ , 其中  $N_d$  表示受灾点的名称,  $N_r$  表示所缺资源名称,  $Q$  表示所缺资源的数量。

将资源分为消耗性资源和可重用性资源, 不同类型资源的处理策略也有所不同。消耗性资源指会被消耗而不断减少的资源, 如燃油。因此, 当资源存量小于资源需求时, 会出现资源短缺。可重用性资源指只会被暂时占用, 而不会被消耗的资源, 如车辆, 可重用性资源的短缺问题与时间相关。

消耗性资源是从资源储备点到受灾点单向流动的, 所以受灾点为资源协作的请求方, 资源储备点为资源协作的响应方。可重用性资源被受灾点使用后还会返回资源储备点, 资源是在受灾点和储备点之间双向流动的, 所以受灾点和资源储备点都可以作为资源协作的请求方和响应方。

**定义 3** 消耗性资源  $R_1 = (N_d, N_s, N_{r1}, Q, c)$ , 其中  $N_d$  表示资源请求点名称,  $N_s$  表示资源响应点名称,  $N_{r1}$  表示消耗性资源名称,  $Q$  表示该消耗性资源的供给数量,  $c$  表示该资源为消耗性资源。

**定义 4** 可重用性资源  $R_2 = (N_d, N_s, N_{r2}, Q, e)$ , 其中  $N_d$  表示资源请求点名称,  $N_s$  表示资源响应点名称,  $N_{r2}$  表示可重用性资源名称,  $Q$  表示该可重用性资源的占用数量,  $e$  表示该资源为可重用性资源。

### 3 集成 HTN 和 DCSP 的规划方法

#### 3.1 基本运行框架

当复合型突发事件发生时, 各应急指挥团队将本受灾区域的应急智能规划问题  $P$  输入规划器, 然后由本地的单 Agent 资源需求识别模块使用 HTN 规划方法进行分析, 逐步分解顶层任务, 最终生成应急行动方案的基本行动框架。在生成基本行动框架的过程中, 假设在应急资源充足的前提下制定应急行动方案, 同时逐步识别各种资源不足的需求, 分析这些资源需求相关信息。

当单 Agent 资源需求识别模块在本地独立完成智能规划后, 通过网络和其他受影响区域 Agent 互相联接, 形成多 Agent 协作的资源补充模块。该模块根据各 Agent 识别并记录的资源需求信息, 将应急资源协作问题以及应急资源间的约束关系转化为 DCSP 问题, 然后使用改进异步回溯算法求解。该算法能够根据受灾区域资源需求的紧迫程度、资源储备点的距离和行政级别以及资源可重用性情况, 为每个受灾区域生成应急资源协作方案。同时, 当某一受灾区域所需资源的数量过多时, 为避免其占用过多应急资源而导致后续受灾区域的资源需求无法得到满足, 采用适当调整该受灾区域优先级的方法优化资源配置, 并生成资源短

缺报告, 方便紧急采购和调配. 最终, 将生成的基本行动框架、资源协作方案、资源短缺报告汇总整理, 从而得到完整的应急行动方案. 具体的规划过程如图 1 所示.

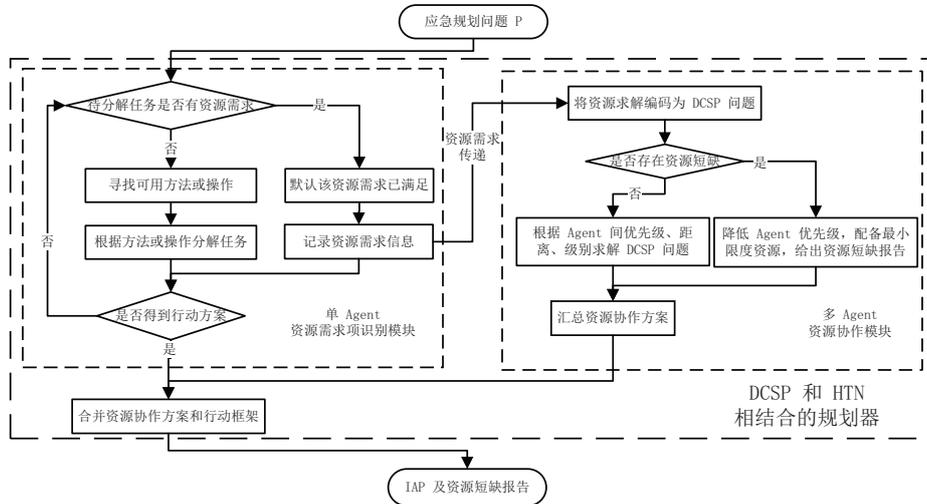


图 1 HTN 和 DCSP 相结合的规划方法

Fig. 1 Planning method combining HTN and DCSP

### 3.2 单 Agent 资源需求识别

该过程需要根据应急目标, 生成基本行动框架, 同时识别资源需求. 为此, 以 HTN 规划为核心, 为其扩展资源需求的识别与储存功能.

**定义 5** 领域知识  $Domain = (O, M)$ ,  $O$  表示操作(: operator), 处理任务网络中的原子任务,  $M$  表示方法(: method), 处理任务网络中的非原子任务.

单 Agent 资源需求识别模块的示意流程如图 2 所示.

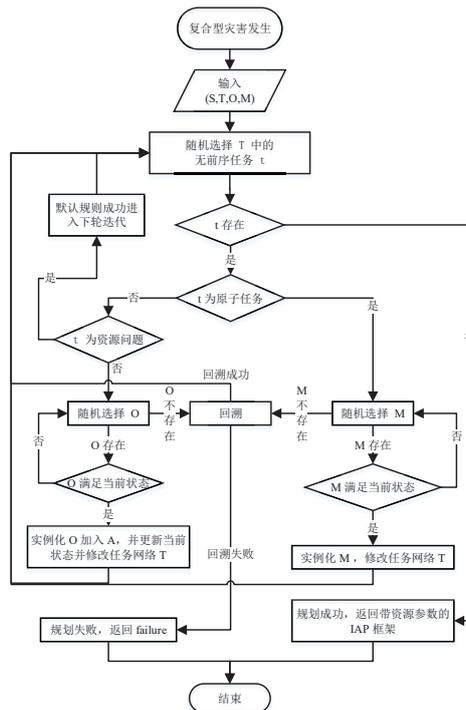


图 2 单 Agent 资源需求识别模块流程图

Fig. 2 Process of single agent resource requirement identification module

根据操作  $O$  或方法  $M$  对初始任务网络进行分解, 生成基本行动框架  $A$ . 当规划过程中出现  $t$  包含资源需求时, 系统记录该资源需求信息后, 将添加  $t$  到  $A$  中. 规划完成时, 输出  $A$ , 并把记录的资源协作问题传递给多 Agent 资源协作模块处理.

### 3.3 多 Agent 资源协作

该过程需要根据分布存在的资源需求和储备情况, 资源间的约束情况, 生成资源协作方案  $R_c$  和资源短缺报告  $R_s$ . 为此, 选用 DCSP 技术为核心, 求解分布存在于各受灾点间的资源协作问题.

**定义 6** 分布式约束满足问题  $DCSP = \{A', V', D', C'\}$ , 其中  $A' = (A_1, A_2, \dots, A_n)$  表示各独立应急决策主体 Agent, 可以为受灾点或资源储备点,  $V' = (V_1, V_2, \dots, V_n)$  表示变量集合,  $D' = (D_1, D_2, \dots, D_n)$  为变量取值范围, 每个  $V_i$  对应一个  $D_i$ ,  $C' = (C_1, C_2, \dots, C_n)$  表示变量间的约束关系.

多 Agent 资源协作模块把应急资源协作信息编码为 DCSP 问题进行求解. 在该模块中为每个受灾点和资源储备点建立 Agent, 组成应急决策主体的集合. 各 Agent 间的通讯路径如图 3 所示.

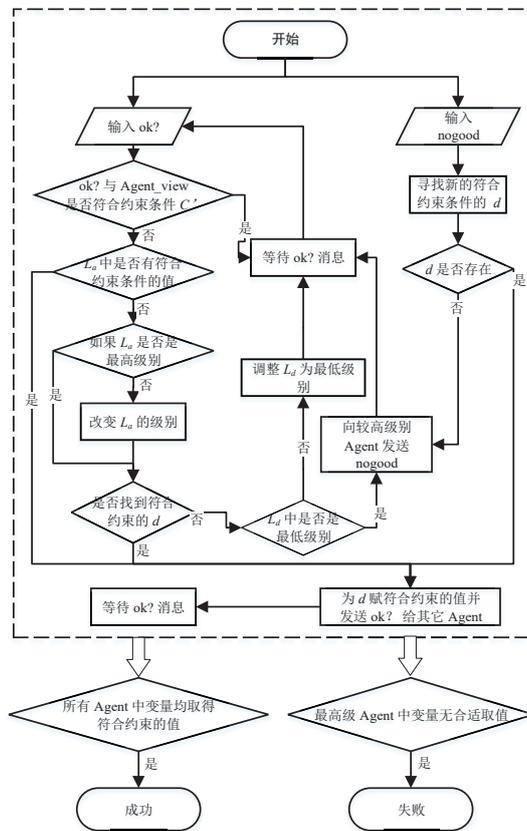


图 3 多 Agent 资源协作模块流程图

Fig. 3 Process of multi-agent resource collaboration module

根据改进 AB 算法, 确定各受灾点的资源协作方案  $R_c$  和资源短缺报告  $R_s$ . 与单 Agent 资源需求识别模块生成的基本行动框架  $A$  相结合, 得到完整应急行动方案 I.

### 3.4 改进异步回溯算法

为避免冗余计算和改进负载均衡, 将原 AB 算法中静态优先级描述改为动态优先级. 如图 4 所示, 为某一优先级 Agent 中的资源变量赋值时, 若其资源需求过大, 导致后续受灾点的资源需求都无法满足时, 就调整该 Agent 的优先级. 优先保证资源需求较少、现有资源能够满足的受灾点的资源需求. 同时为资源需求过大的受灾点分配最低限度的资源, 生成资源短缺报告  $R_s$ , 便于上级应急决策部门掌握资源短缺信息为其紧急调配资源.

同时, 为保证每个受灾点的资源需求都能最快得到满足, 改进 AB 算法按照资源储备点的行政级别由低到高, 地理距离由近到远的为受灾点补充资源. 如图 4 所示, 在受灾点向资源储备点发送资源请求消息时, 包含响应级别的变量  $L_a$ , 并根据灾情设定初始响应级别. 先由同响应级别的资源储备点由近及远的为受灾点补充资源. 当同响应级别资源储备点无法满足受灾点的资源需求时, 则提高应急响应级别, 由上级资源储备点由近及远的为受灾点补充资源. 如此重复上述过程, 便可得到整个资源协作问题的解.

## 4 仿真分析

### 4.1 实验环境配置

本文开发了 RESHOP-DCSP 分布式规划器实现 HTN 和 DCSP 相结合. 以 JSHOP2<sup>[6]</sup>为基础, 扩展资源需求处理能力, 实现 Agent 建模. 采用 JADE 平台, 实现 DCSP 中的改进异步回溯 AB 算法. 根据应急资源协作问题中受灾点和资源储备点的性质, 在分布式规划器中建立模拟受灾点的 DemandAgent 类和模拟资源储备的 SupplyAgent 类, 分别模拟受灾点和资源储备点. 实验具体环境为联想 IdeaPad U430p, Intel i5-4200U, 4 GB 内存 (DDR3L 1600MHz), Windows 7 (DirectX 11).

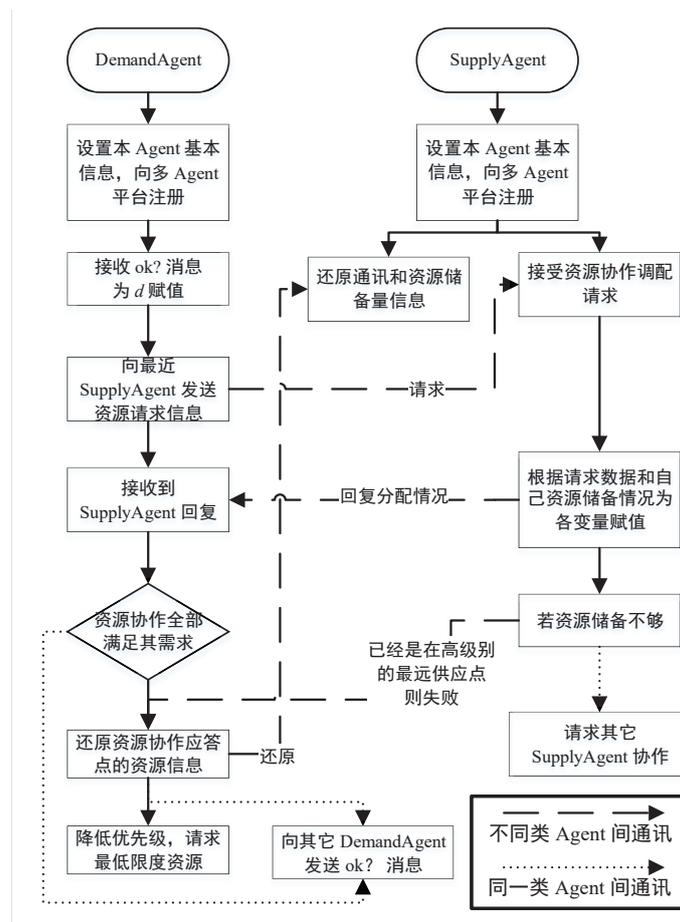


图 4 改进异步回溯算法流程图

Fig. 4 Process of improved asynchronous backtracking algorithm

### 4.2 案例描述

近三十年间, 我国因洪涝灾害造成的直接经济损失超过 4 万亿元. 特别是, 最近几年我国每年平均发生城市洪涝灾害 200 余起. 城市洪涝灾害不仅严重威胁人民的生命财产安全, 还破坏城市生活秩序和可持续发展. 城市洪涝灾害波及范围广, 通常需要多部门应急联动, 快速制定多部门应急行动方案. 同时, 城市洪涝

灾害应急处置中涉及区域警戒、工程抢险、紧急排水和疏散搜救等复杂应急行动,其方案决策的复合型特征明显,必须快速处理多部门应急资源协作问题,以保障应急响应工作有序开展。

假设某市内涝严重,有  $B_1, B_2, B_3$  三处受灾点,其中  $B_1$  居民点有大量老人和小孩,  $B_2$  为老旧社区,故其优先级  $B_1 > B_2 > B_3$ 。居民点附近有  $A_1, A_2, A_3$  三处资源储备点可以为救灾提供沙袋,土工布,转运车辆等救灾资源。其中  $A_1, A_2$  为县级资源储备点,  $A_3$  为市级资源储备点。各区域距离如表1和表2所示。

表1 受灾区域和资源储备点的距离

Table 1 Distance between disaster area and resource reserve

距离/km	$A_1$	$A_2$	$A_3$
$A_1$	0	25	40
$A_2$	25	0	30
$A_3$	40	30	0

表2 受灾区域间的距离

Table 2 Distance between disaster areas

距离/km	$B_1$	$B_2$	$B_3$
$B_1$	0	25	40
$B_2$	25	0	30
$B_3$	40	30	0

假定24h降水量已超过50mm,且还在继续上涨,应尽快疏散群众,做好相应应对措施。若应急资源存在短缺,需尽快上报。

### 4.3 仿真结果分析

为验证 RESHOP-DCSP 规划器的普适性,测试了10组不同类型组合的应急资源协作案例,包含应急资源需求类型不同,资源需求与供应的行政级别不同,资源需求负载不均衡等情况,仿真结果如表3所示。为防止搜索空间过大,本规划器设置了规划时间阈值。当规划时间在阈值以内,系统不断进行重规划,直至搜索完全部的搜索空间。当规划时间到达阈值,则输出目前最好的应急行动方案,作为满意解。

表3 10组应急物流配送问题的规划结果

Table 3 Planning results of 10 groups of emergency logistics problems

问题编号	改进异步回溯算法规划结果	CPU 时间/ms	原异步回溯算法规划结果
E1	$B_1(A_1(560,320,5)A_2(240,80,0))$	2 168	Unchanged
E2	$B_1(A_1(560,320,10)A_2(240,380,5)A_3(0,300,0)缺(0,260,0))$	2 523	Unchanged
E3	$B_3(A_2(700,380,10)A_1(100,320,5)A_3(0,300,0)缺(0,260,0))$	2 384	$B_3(A_3(350,300,5)A_2(450,380,10)A_1(0,320,0)缺(0,260,0))$
E4	$B_1(A_1(500,300,8)A_2(0,0,5))$ $B_2(A_2(300,360,0)A_3(0,0,7)B_1(0,0,3))$	2 425	$B_1(A_1(500,300,8)A_2(0,0,5))$ $B_2(A_3(300,300,7)A_2(0,60,0)缺(0,0,3))$
E5	$B_1(A_1(560,100)A_2(400,0)A_3(350,200)缺(390,0))$ $B_2(A_2(300,380)A_1(0,220))$	2 577	$B_1(A_1(560,300,7)A_2(700,0,3)A_3(350,0,0)缺(90,0))$ $B_2(A_2(0,380,2)A_1(0,20,0)A_3(0,200,6)B_1(0,0,2)缺(300,0,0))$
E6	$B_1(A_1(200,300,5))B_2(A_2(300,100,5))B_3(A_2(350,100,5))$	2 346	$B_1(A_1(200,300,5))B_2(A_2(300,100,5))$ $B_3(A_3(350,100,5))$
E7	$B_1(A_1(500,320,6)A_2(0,10,0))B_2(A_2(480,260,8)A_1(0,0,1))$ $B_3(A_2(220,110,0)A_1(60,0,0)A_3(70,90,6)B_2(0,0,2))$	2 351	$B_1(A_1(500,320,6)A_2(0,10,0))$ $B_2(A_2(480,260,8)A_1(0,0,1))$ $B_3(A_3(350,200,6)缺(0,0,2))$
E8	$B_1(A_1(560,300,8)A_2(140,0,0))$ $B_2(A_2(210,100,2)A_1(0,0,2)A_3(350,0,8)B_1(0,0,3)缺(440,0,0))$ $B_3(A_2(350,200,5))$	2 729	$B_1(A_1(560,300,8)A_2(140,0,0))$ $B_2(A_2(560,100,7)A_1(0,0,2)A_3(350,0,6)缺(90,0,0))$ $B_3(A_3(0,200,2)缺(350,0,3))$
E9	$B_1(A_1(520,320,10)A_2(0,180,0)A_3(0,300,0)缺(0,400,0))$ $B_2(A_2(300,0,7)A_1(40,0,1)A_3(350,0,4)缺(1110,100,0))$ $B_3(A_2(400,200,5))$	2 812	$B_1(A_1(520,320,10)A_2(0,380,0)A_3(0,300,0)缺(0,200,0))$ $B_2(A_2(700,0,12)A_1(40,0,0)A_3(350,0,0)缺(710,100,0))$ $B_3(A_3(0,0,5)缺(400,200,0))$
E10	$B_1(A_1(560,0,9)A_2(140,0,1)A_3(0,200,0)缺(0,1000,0))$ $B_2(A_2(100,0,7)缺(0,1100,0))$ $B_3(A_2(350,380,5)A_1(0,320,0)A_3(0,100,0))$	2 941	$B_1(A_1(560,320,9)A_2(140,380,1)A_3(0,300,0)缺(0,200,0))$ $B_2(A_2(100,0,7)缺(0,1100,0))$ $B_3(A_3(350,0,5)缺(0,800,0))$

实验结果表明本规划器具有如下特点: 1) 能够适应多种应急智能规划问题, 如单储备点或多储备点, 单受灾点或多受灾点, 单物资品种或多物资品种等情况, 无需重新对领域知识进行建模. 各问题都在 3 s 内求解, 属于实际应急决策可接受的范围. 2) 问题 E3, E6, E7 中, 改进算法先通过平级资源储备点借调应急资源, 再由上级补给. 而原算法不能考虑资源储备点级别, 出现了直接由上级资源储备点补给资源的情况. 改进算法更符合应急资源协作的实际需求. 3) 问题 E8, E9 中, 改进算法在 B2 资源需求过大时, B3 不受影响. 原算法中, B2 点需求过大会导致 B2 和 B3 点同时出现资源短缺. 可见, 改进算法考虑了各受灾点的负载均衡. 4) 问题 E7, E8 中, 改进算法在储备点可重用性资源使用完毕后, 能从相邻受灾点调配可重用性资源. 而原算法不能处理车辆等可重用资源复用的情况. 可见, 改进算法初步解决了可重用资源重复使用, 但并没有处理可重用资源的主动回收, 可能造成可重用性资源的使用时间浪费.

## 5 结束语

针对多部门应急智能规划中的资源协作问题, 设计了 HTN 和 DCSP 相结合的方法, 利用 HTN 规划构建应急行动方案的基本行动框架, 通过编码 DCSP 问题求解应急行动方案中的资源协作信息. 开发了 RESHOP-DCSP 规划器实现上述方法, 并以城市洪涝灾害问题为例进行仿真测试, 结果表明该方法能够解决多种应急资源协作情景, 具有良好的应用价值. 此外, 可重用性资源使用效率优化是改进本方法的重要发展方向.

### 参考文献:

- [1] 范维澄, 霍 红, 杨列勋, 等. “非常规突发事件应急管理研究”重大研究计划结题综述. 中国科学基金, 2018, 32(3): 297–305.  
Fan W C, Huo H, Yang L X, et al. Review of the achievements of major research plan on ‘study on unconventional emergencies management’. Bulletin of National Natural Science Foundation of China, 2018, 32(3): 297–305. (in Chinese)
- [2] Verfaillie G, Pralet C, Lemaître M. How to model planning and scheduling problems using constraint networks on timelines. Knowledge Engineering Review. 2010, 25(3): 319–336.
- [3] Georgievski I, Aiello M. HTN planning: Overview, comparison, and beyond. Artificial Intelligence. 2015, 222(5): 124–156.
- [4] 张 磊, 王延章, 陈雪龙, 等. 面向突发事件应急决策的情景建模方法. 系统工程学报, 2018, 33(1): 1–12.  
Zhang L, Wang T Z, Chen X L, et al. Scenario modeling method for unconventional emergency decision-making. Journal of Systems Engineering, 2018, 33(1): 1–12. (in Chinese)
- [5] Cheng K, Wu L, Yu X, et al. Improving hierarchical task network planning performance by the use of domain-independent heuristic search. Knowledge-Based Systems, 2018, 142(4): 117–126.
- [6] Nau D, Au T C, Ilghami O, et al. Applications of SHOP and SHOP2. IEEE Intelligent Systems, 2005, 20(2): 34–41.
- [7] Coles A, Fox M, Halsey K, et al. Managing concurrency in temporal planning using planner-scheduler interaction. Artificial Intelligence, 2009, 173(1): 1–44.
- [8] Marc D L, Castillo L, Juan F O, et al. SIADEX: An interactive knowledge-based planner for decision support in forest fire fighting. AI Communications, 2005, 18(4): 257–268.
- [9] Wilkins D, Myers K, Lowrance J, et al. Planning and reacting in uncertain and dynamic environments. Journal of Experimental and Theoretical Artificial Intelligence, 1995, 7(1): 121–152.
- [10] 王 喆, 王红卫, 唐 攀, 等. 考虑资源分配的 HTN 规划方法及其应用. 管理科学学报, 2013, 16(3): 53–60.  
Wang Z, Wang H W, Tang P, et al. HTN planning method considering resource allocation and its application. Journal of Management Sciences, 2013, 16(3): 53–60. (in Chinese)
- [11] 王 喆, 高维义, 王红卫, 等. 应急任务规划中基于软目标约束的资源缺项识别方法. 中国安全科学学报, 2015, 25(7): 159–165.  
Wang Z, Gao W Y, Wang H W, et al. Identification of resource deficiency based on soft target constraints in emergency mission planning. China Safety Science Journal, 2015, 25(7): 159–165. (in Chinese)
- [12] Qi C, Wang D, Muoz A, et al. Hierarchical task network planning with resources and temporal constraints. Knowledge-Based Systems, 2017, 133(19): 122–140.