

# 考虑资源分配的 HTN 规划方法及其应用<sup>①</sup>

王 喆, 王红卫, 唐 攀, 祁 超, 王 剑

(华中科技大学系统工程研究所, 图像信息处理与智能控制教育部重点实验室, 武汉 430074)

摘要: 针对应急决策中方案制定过程和资源分配过程紧密耦合的特点, 设计了一种满足 HTN (Hierarchy Task Net) 规划动作推理机制的方法来求解带资源分配的规划问题. 本方法在 HTN 规划中扩展了资源时间轴来描述资源函数; 对于各类资源, 在规划推理过程中通过不同的处理流程, 将资源分配信息转化为 HTN 规划的当前全局资源状态; 并在 HTN 规划搜索行动序列的同时, 采用资源约束规则和资源约束层次传播规则控制每一步行动所对应的系统状态满足资源约束和时间约束. 最后以某区域应急资源筹集为例, 将本方法应用于 HTN 规划模型 SHOP2 (Simple Hierarchical Ordered Planner 2) 证实了其有效性和实用性.

关键词: 层次任务网络规划; 智能规划; 资源分配; 应急决策

中图分类号: TP18 文献标识码: A 文章编号: 1007-9807(2013)03-0053-08

## 0 引言

应急决策<sup>[1]</sup>是在突发事件应急管理中面对复杂应急态势, 识别应急处置目标, 选择合理的战略战术, 制定应急处置方案, 实现对事件干预和控制的过程. 由于应急决策具有突发性、非常规性、开放性和时效性的特征, 使用理想化的数学模型难以应对复杂的应急决策问题, 而智能规划方法<sup>[2]</sup>可以充分准确地描述应急领域知识, 并通过知识推理寻求应急处置方案. 特别是, HTN (hierarchy task net) 规划由于其通过任务分解形成应对方案的思路与应急决策者实际进行应急处置的过程相类似, 从而成为了应急决策中最为广泛采用的智能规划方法. Drabbleh 和 Tate<sup>[3]</sup>、Siebra<sup>[4]</sup>开发的 I-X 框架系统以 HTN 规划模型 O-Plan 为核心, 主要解决地震灾害响应领域的实际问题. Asuncion 等提出 HTN 规划模型 SIADEX<sup>[5]</sup>, 成功应用到了森林火灾应急方案的制定中. Nau<sup>[6-8]</sup>

等研发的 HTN 规划模型 SHOP 和 SHOP2 (simple hierarchical ordered planner) 广泛应用于应急疏散等应急决策问题. 但是 HTN 规划采用了任务网络来描述动作推理过程, 因此难以直接控制资源状态的变化以有效地处理资源分配问题, 而应急决策中又存在着方案制定过程和资源分配过程高度耦合的特征. 方案制定过程中选择不同的任务执行方式会产生不同的资源需求, 同时资源因素又决定了应急决策者选择应急目标、战略和战术等决策行为. 针对应急决策的这种特征, 不应将规划分析和资源分配独立成两个连贯过程, 而需要设计满足 HTN 规划动作推理机制的方法来处理规划中的资源分配问题.

随着智能规划技术不断的应用于实际领域, 设计考虑资源分配的 HTN 规划方法已经引起了一些学者的关注. 目前, 智能规划中的资源处理技术的研究可以分为两类: 面向状态的处理技术和面向时间的处理技术. 面向状态的处理技术在规

① 收稿日期: 2011-05-19; 修订日期: 2012-02-21.

基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目(90924301); 国家自然科学基金重大研究计划集成资助项目(91024032); 科技部“十一、五”国家科技支撑计划资助项目(2008BAB29B07-2); 国家杰出青年基金资助项目(71125001); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2011T5139).

作者简介: 王 喆(1980—), 男, 湖北武汉人, 博士. Email: philo\_wang@163.com

划推理的过程中通过全局资源状态来验证规划方案的可行性。O-Plan2<sup>[3]</sup>是HTN规划模型中采用这一方法的代表,采用了RUM(resource utilisation manager)方法在规划过程中执行资源的乐观和悲观估计,以处理资源问题。然而这种方法没有处理资源需求中的相对时间约束,也没有处理层次任务中的资源约束。面向时间的处理技术则采用一组随时间变量改变的函数来描述资源状态的局部演化。这种技术能处理更复杂的本地资源需求。但是,由于没有了当前全局资源状态,从而不能直接验证规划方案的资源可行性。由于HTN规划是基于状态的前序规划,所以在HTN规划中采用面向时间的处理技术时需要设计支持时态推理的方法<sup>[2]</sup>。SIADEx和HTN规划模型SIPE2均采用了此类技术;SIADEx<sup>[5]</sup>设计了时态增强结构可以用来处理HTN规划中的资源问题,而SIPE2<sup>[9]</sup>通过规划评价在评价阶段处理资源约束。

本文根据应急领域的实际需求,对考虑资源分配的HTN规划方法进行研究。为了融合以上两种技术的长处,本文通过将资源函数自动地转化为全局资源状态来统筹管理资源推理。这样,应急领域专家可以通过基于资源时间轴的资源函数专注于描述本地的资源和时间需求。而本文采用资源分配基本处理流程,将这些资源函数自动地转化为HTN规划中的全局资源状态,并验证其可行性。进一步,本文设计了资源约束层次传播规则以处理层次任务中的资源分配问题。实例测试表明,该方法能够有效地解决应急决策中的一些具体问题,具有良好的实用价值。

## 1 考虑资源分配的HTN规划方法

HTN规划<sup>[2,10,11]</sup>通过认知与识别领域知识,根据预先给定的目标任务,采用任务递归分解的推理方法,将规划方案中的非原子任务(nonprimitive task)分解为原子任务(primitive task),综合选择和组织出一组完全由原子任务组成的行动序列。而资源分配则是在限定时间内将有限的资源分配给一组给定任务。可见,考虑资源分配的HTN规划方法需要在任务分析和推理过程中动态地进行资源和时间的分配。但是,HTN规划前序分层的推理机制对在规划过程中进行资源分配

这种精细调度提出了更高的要求。

为了有效的求解资源受限条件下的应急决策问题,本文设计了考虑资源分配的HTN规划方法,其总体思路如图1所示。首先设计了资源时间轴,通过资源时间轴上的函数可以描述资源状态的局部演化。资源时间轴是时态规划中的时间轴(timeline)技术在资源分配方面的扩展,采用多时间轴预处理(multi-timeline preprocessing, MTP)技术<sup>[7]</sup>为每种资源分别建立记录其状态的时间轴,并在HTN规划动作推理过程中控制其进程。资源时间轴的基本结构可以表示为5元组 $(X, D, C, Q, M)$ ,其中 $(X, D, C)$ 是简单时态网络(simple temporal networks, STN)<sup>[12]</sup>描述模型, $X$ 是离散的时间变量集; $D$ 是所有时间变量的定义域; $C$ 是时间约束集合。本文在基于STN的时间轴的基础上扩展了资源状态描述模型 $(Q, M)$ ; $Q$ 是资源状态集合,是集合 $X$ 中的每一个时间点对应资源状态的变化量, $M$ 是 $Q$ 中所有变量的定义域;通过 $(Q, M)$ 可以描述每个时间点上的资源约束。对于考虑同类资源分配的任务,在HTN规划中通过调用其资源时间轴,定义两个时间点最早开始时间start和最晚结束时间end,则任务执行时间duration  $\leq$  end-start。通过各任务的时间点即可以描述该资源需求的绝对时间约束。而对于该资源需求的相对时间约束,即各任务的时间点之间的约束关系,在HTN规划中可以通过添加因果链来实现<sup>[2,5]</sup>。

对于不考虑层次任务的资源分配问题,本方法设计了资源分配基本处理流程,将资源时间轴上的资源函数自动地转化为HTN规划中的全局资源状态,并验证其可行性。而对于层次任务的资源分配问题,本方法结合HTN规划自上而下的任务分解机制,设计了资源约束层次传播规则,将上层任务的资源约束和时间约束传播至下层任务,直至所有任务都可以通过本文所提出的基本处理流程来进行资源分配。

在应急决策中运用这一方法,需要利用扩展后的HTN规划模板对应急领域知识进行描述,形成应急任务规划方法。在具体的应急决策中,设置具体的初始状态、环境状态和任务需求,就可以通过应急任务规划方法对应急管理中的具体问题进行求解,最终得到一组带资源分配信息的应急任务执行序列。

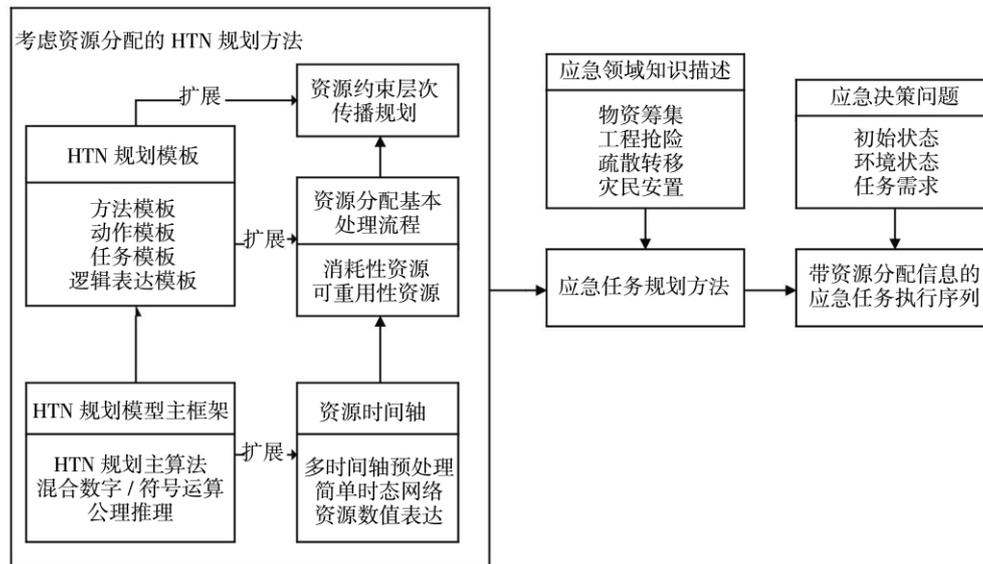


图 1 考虑资源分配的 HTN 规划方法求解应急决策问题的总体思路

Fig. 1 Primary processes of solving emergency decision-making issues by HTN planning considering resource allocation

### 1.1 资源分配基本处理流程

考虑资源分配的 HTN 规划方法需要在其任务中说明资源需求的种类,资源所处位置及需求数量等资源信息.并在任务推理过程中,在符合 HTN 规划前序推理机制的前提下,实现对资源数量的分配.而任务对资源的需求方式不同,在 HTN 规划中资源分配处理流程也会有所不同.所以,需要将资源划分为消耗性资源和可重用性资源<sup>[2]</sup>分别进行处理.

1) 消耗性资源指的是在任务的执行过程中被消耗的资源,一些文献将该类资源称之为

consumable resources<sup>[2]</sup>.消耗性资源  $re$  有一个最大容量  $QM_{re}$ ,任何时刻的当前值都要位于区间  $[0, QM_{re}]$ .因为目前 HTN 规划模型基本上都不支持持续性任务<sup>[4, 5, 7, 9]</sup>,所以本文只考虑资源消耗在任务的起始时刻瞬时完成,而不考虑在任务执行过程中持续消耗的情况.针对消耗性资源  $re$ ,需要先定义其资源时间轴,并在其资源时间轴上定义当前时间  $CT_{re}$  和当前值  $CQ_{re}$ .在此基础上就可以为规划领域中的任务  $A1$  扩展消耗性资源  $re$  的分配处理流程,图 2 是为其示意图.

```

for every operator  $AI$  in the planning domain
  add four parameters ? $re$ ; ? $A1\_start$ ; ? $A1\_duration$  and ? $A1\_cost$  to  $AI$ 
  for each resource  $re$  in  $AI$ 's precondition
    add two definition ? $t1 \leftarrow Start$ ; ? $t2 \leftarrow End$ 
    where  $Start$  is the record of  $re$ 's early start time and  $End$  is the record of  $re$ 's deadline
    add three definition  $QM_{re}$ ;  $CT_{re}$ ;  $CQ_{re}$ 
    add an assignment ? $A1\_duration \leftarrow AI\_duration$ 
    where  $AI\_duration$  is the formula for calculating  $re$ 's duration
    add an assignment ? $A1\_cost \leftarrow AI\_cost$ 
    where  $AI\_cost$  is the formula for calculating  $re$ 's cost for  $AI$ 
    add four constraints:  $QM_{re} > = CQ_{re}$ ;  $-?A1\_cost > = 0$ ; ? $A1\_start > = ?t1$ ; ? $t2 > = ?A1\_start + ?A1\_duration$ ; ? $A1\_start > = CT_{re}$ 
  for each resource  $re$  in  $AI$ 's effect
    add two effects to change the value of  $CT_{re}$  to ? $A1\_start + ?A1\_duration$ ; change the value of  $CQ_{re}$  to  $CQ_{re} - ?A1\_cost$ 
  
```

图 2 消耗性资源分配处理流程

Fig. 2 Consumable resource allocation processes

**步骤 1** 在任务  $A1$  的参数列中添加资源  $re$ 、开始时间  $A1\_start$ 、执行时间  $A1\_duration$  和资源消耗  $A1\_cost$ .

**步骤 2** 在任务  $A1$  的前提条件中读取在资源时间轴上记录的该任务中消耗性资源  $re$  的资源约束和时间约束的状态属性.这些状态属性包

括最早开始时间  $start$ 、最晚结束时间  $end$ 、最大容量  $QM_{re}$ 、当前时间  $CT_{re}$  和当前值  $CQ_{re}$ 。

步骤3 在任务  $A1$  的前提条件中,计算任务  $A1$  的执行时间和所需该资源的消耗量。

步骤4 在任务  $A1$  的前提条件中添加通用的资源约束规则使本次任务执行后该资源的当前值位于区间  $[0, QM_{re}]$ ,并使开始时间和执行时间满足最早开始时间和最晚结束时间的要求,同时使本次任务对该资源状态的修改在当前时间之后。

步骤5 更新任务  $A1$  的效果中该资源的时间状态和数量状态。

2) 可重用性资源指的是在任务的执行过程中占用且在任务完成后被释放的资源,文献中将该类资源称之为 reusable resource<sup>[2,13]</sup>。可重用性资源  $rr$  同样有一个最大容量  $QM_{rr}$ ,任何时刻的储值都要位于区间  $[0, QM_{rr}]$ 。本文只考虑资源的占

用在任务的起始时刻瞬时完成,而资源的释放在任务的终止时刻瞬时完成。与消耗性资源不同的是,可重用性资源  $rr$  需要在其资源时间轴中记录各任务的开始时刻及相应的资源占用量和各任务的结束时刻及相应的释放量;而可重用性资源  $rr$  在当前时间  $CT_{rr}$  的当前值需要通过计算获得,这样做可以在规划过程中及时回收被释放的资源。其计算方法是:预先记录规划开始时刻的资源量  $INI_{rr}$ ,然后在  $A2$  的前提条件中计算在当前时间以前被分配的总资源量  $all\_allocation$  和被释放的总资源量  $all\_deallocation$ ;而在任务  $A2$  开始执行后的瞬间的资源储值为  $INI_{rr} - (all\_allocation - all\_deallocation) - A2\_allocation$ 。利用上述参数,通过和消耗型资源相似的步骤就可以对 HTN 规划中的可重用性资源进行处理。图3是为任务  $A2$  扩展可重用性资源  $rr$  的资源分配处理流程的示意代码。

```

for every operator A2 in the planning domain
  add four parameters ?rr; ?A2_start; ?A2_duration and ?A2_allocation to A2
  for each resource re in A2's precondition
    add two definition ?t1 ← Start; ?t2 ← End
    where Start is the record of re's early start time and End is the record of re's deadline
    add three definition  $INI_{rr}$ ;  $QM_{rr}$ ;  $CT_{rr}$ 
    add two assignments ?all_allocation ← all_allocation, ?all_deallocation ← all_deallocation
    where all_allocation is the formula for calculating total number of rr's occupation before A2_start and all_deallocation is the
    formula for calculating total number of rr's release before A2_start
    add an assignment ?A2_duration ← A2_duration
    where A2_duration is the formula for calculating rr's duration
    add an assignment ?A2_allocation ← A2_allocation
    where A2_allocation is the formula for calculating rr's allocation for A2
    add four constraint:  $QM_{rr} \geq INI_{rr} - (?all\_allocation - all\_deallocation) - ?A2\_allocation \geq 0$ ; ?A2_start > = ?t1;
    ?t2 > = ?A2_start + ?A2_duration; ?A2_start > =  $CT_{rr}$ 
  for each resource re in A2's effect
    add two definitions: A2_allocation and A2_deallocation
    where A2_allocation is the record of (?A2_start, ?A2_allocation) in rr's timeline and A2_deallocation is the record of
    (?A2_start + ?A2_duration, -?A2_allocation) in rr's timeline
    add effect to change the value of  $CT_{rr}$  to ?A2_start + ?A2_duration.

```

图3 可重用性资源分配处理流程

Fig. 3 Reusable resource allocation processes

需要指出的是,某些资源对于一些任务,会体现出消耗性资源的性质,而对于另外一些任务,这些资源又体现出可重用性资源的性质。例如本文的实例中的石料,在运输过程中处于被占用的状态;而对于工程抢险任务,石料又是消耗性资源。所以,采用哪种资源分配处理流程需要根据具体的任务来判断。而对于时段之间的相对约束,则可以通过 Allen 区间代数将其描述为时刻间的相互关系加以处理<sup>[5]</sup>。

### 1.2 资源约束层次传播规则

为了求解层次任务的资源分配问题,设计了 HTN 规划的资源约束层次传播规则。通过资源约束层次传播规则能够在 HTN 规划任务推理过程中伴随其自上而下的任务分解过程进行资源约束传播。这样就可以将上层任务的资源约束和时间约束传播至下层任务,直至所有任务都可以通过资源分配基本处理流程来进行资源分配。HTN 规划中存在着顺序结构、无序结构和选择结构这三种基本任务分解结构<sup>[2,4]</sup>。图4是一个同时出现了

这3种基本结构的HTN规划任务分解树,而图5是其相应的简单时态网络示意图.通过图4和图5全面分析了各类资源约束层次传播规则.

1) 顺序结构 表示下层任务执行的顺序必须和上层任务分解的顺序一致.按顺序结构将上层任务B1分解成下层任务t1和t2的示意代码如下  
(:method (B1 parameter) precondition (t1 t2))

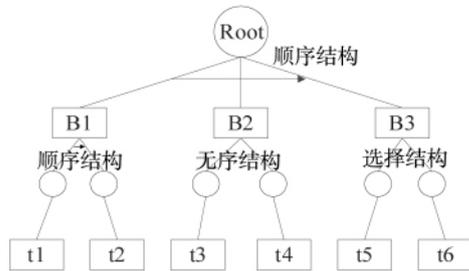


图4 HTN 规划任务分解树  
Fig.4 HTN planning tree

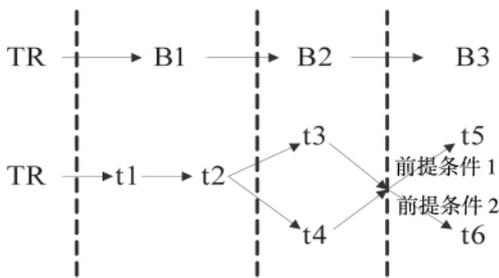


图5 HTN 规划简单时态网络  
Fig. 5 Simple temporal networks for HTN planning

对于顺序结构,首先t1和t2要全部继承B1的资源约束和时间约束,然后还需要增加时间约束  $0 \leq t2\_start - t1\_end \leq +\infty$ .其次,对于消耗性资源约束,如果B1的资源约束为  $Q1 \leq B1\_cost \leq Q2$  ( $Q1, Q2 \in [0, Q_{re}]$ ,且  $Q1 \leq Q2$ ),则t1需要满足  $Q1 \leq t1\_cost \leq Q2$ ,并且需要为t2增加资源约束  $Q1 - t1\_cost \leq t2\_cost \leq Q2 - t1\_cost$ ;而对于可重用性资源,由于t2执行已经确认在t1之后,即被t1占用的可重用性资源在t2开始执行前已经被释放,所以t1和t2只需全部继承B1的资源约束即可.

2) 无序结构 表示下层任务执行顺序没有特定的要求.按无序结构将上层任务B2分解成下层任务t3和t4的示意代码如下  
(:method (B2 parameter) precondition (:unordered t3 t4))

对于无序结构,t3和t4要全部继承B2的资源约束和时间约束.对于消耗性资源约束,如果B2的资源约束为  $Q1 \leq B2\_cost \leq Q2$  ( $Q1, Q2 \in [0,$

$Q_{re}]$ ,且  $Q1 \leq Q2$ ),则需要为t3和t4增加资源约束  $Q1 \leq t3\_cost + t4\_cost \leq Q2$ .而对于可重用性资源,如果B2的资源约束为  $Q1 \leq B2\_allocation \leq Q2$  ( $Q1, Q2 \in [0, Q_{re}]$ ,且  $Q1 \leq Q2$ ),那么对于t3首先需要计算t3\_start时刻前的B2的无序结构中其他子任务的占用量和释放量  $t3\_this\_allocation$  和  $t3\_this\_deallocation$ ,然后为t3增加资源约束  $Q1 \leq t3\_allocation + t3\_this\_allocation - t3\_this\_deallocation \leq Q2$ ;同样,对于t4首先需要计算t4\_start时刻前的B2的无序结构中其他子任务的占用量和释放量  $t4\_this\_allocation$  和  $t4\_this\_deallocation$ ,然后为t4增加资源约束  $Q1 \leq t4\_allocation + t4\_this\_allocation - t4\_this\_deallocation \leq Q2$ .

3) 选择结构 表示下层任务根据上层任务的前提条件选择一部分执行.按选择约束将上层任务B3分解成下层任务t5和t6的示意代码如下  
(:method (B3 parameter) Case1 precondition1 t5 Case2 precondition2 t6)

对于选择结构,t5和t6只需要全部继承B3的资源约束和时间约束即可.

## 2 实例分析

本文选取应急物资筹集问题来验证方法的有效性和实用性.本实例是典型的在考虑资源分配的过程中进行应急决策的问题,来源于三峡区域洪水灾害应急响应的具体场景.其问题描述如下:设区域  $C_1, C_2, \dots, C_n$  为石料厂,即物资储备点;  $C_i$  储存石料  $X(C_i)$  吨 ( $X(C_i) > 0, i = 1, 2, \dots, n$ ).区域  $D_1, D_2, \dots, D_m$  为防洪抢险现场,即物资需求点;设  $D_i$  在时刻  $t(D_i)$  前,需要筹集石料  $Y(D_i)$  吨 ( $Y(D_i) > 0, i = 1, 2, \dots, m$ ).且  $\sum X(C_i) \geq \sum Y(D_i)$ .各物资需求点  $D_i$  在时刻  $t(D_i)$  触发一个工程抢险任务,消耗石料  $Y(D_i) * k(D_i) \%$  吨 ( $k(D_i) \in [0, 100]$ ,即消耗系数);在时刻  $t(D_i)$  后,物资需求点  $D_i$  多余的石料可以用于满足其他物资需求点的需求.各区域间的距离记为  $d(x, y)$  千米 ( $x, y \in (C_1, C_2, \dots, C_n, D_1, D_2, \dots, D_m)$ ).石料调度的总费用不能超过  $M$  元.

运输石料采用两种可选方式.

1) 委托给公路运输队 这种方式安全高效, 但每千米费用较高. 记公路运输队为 TEAM<sub>1</sub>, TEAM<sub>2</sub>, …, TEAM<sub>m</sub>; TEAM<sub>i</sub> (i ∈ {1, 2, …, m}) 的运力记为 CAPACITY(t), 时速记为 SPEED(km/h), 起始位置为 LOC ∈ {C<sub>1</sub>, C<sub>2</sub>, …, C<sub>n</sub>}, 费用记为 SPEND(¥/km).

2) 直接组织运输 即自己组织卡车和司机进行运输. 这种方式每千米费用较低, 但是速度慢. 同时, 为了保证安全, 根据物资需求点的任务级别, 一辆卡车需要配多名司机, 司机不足时, 需要从其他区域调配. 调配司机需要付出费用和等待时间. 记区域 C<sub>i</sub> 起始时刻有卡车 u(C<sub>i</sub>) 辆, 司机 v(C<sub>i</sub>) 位. 卡车的统一运力为 CAPACITY\_TRUCK(t), 统一时速为 SPEED\_TRUCK(km/h), 统一费用记为 SPEND\_TRUCK(¥/km). 司机在各区域间移动记为统一时间 T\_DRIVER(h) 和统一费用 W\_DRIVER(¥). 为区域 D<sub>i</sub> 的物资需求服务的卡车至少配有 L(D<sub>i</sub>) 位司机才能保证安全.

设定公路运输队或卡车往返, 均需按全运力计费. 装载、卸载石料统一记为 h(h), 空车往返不用装卸. 只需 1 名司机.

本实例能够全面的验证本文提出的考虑资源

分配的 HTN 规划方法的有效性. 因为在本实例中选择运输方式等环节适用于任务规划来处理, 而车辆调度等环节又是典型的调度优化问题<sup>[14, 15]</sup>, 而且两者耦合在一起. 在本实例所分配的资源中, 消耗性资源有资金, 可重用性资源有公路运输队、卡车和司机. 而石料在运输任务中处于被占用的状态; 而对于工程抢险任务, 石料又是消耗性资源. 并且在本实例中, 又同时出现了 HTN 规划任务分解中的 3 种基本结构, 例如装载、运输、卸载石料属于顺序结构, 分别通知卡车和副驾驶来本地属于无序结构, 而选择运输方式属于选择结构.

如果不考虑资源分配, 本问题只有预先选定偏好为委托给公路运输队或直接组织运输, 并默认在资源充足的情况下进行规划分析, 然后再核算其总费用和运输任务执行时间等参数. 本文采用考虑资源分配的 HTN 规划方法的运行结果和原 HTN 规划方法中优先选择委托给公路运输队或直接组织运输的两种结果进行比较. 通过在 HTN 规划模型 SHOP2 中构建上述方法来求解本实例. 本实例的参数众多, 本文通过固定其他参数, 同时增加物资石料的筹集量  $\sum Y_i$  来测试该方法的性能. 表 1 为本次测试中的固定参数一览表.

表 1 测试用固定参数表

Table 1 Parameters of experimental evaluation

(a) 车辆与司机相关参数

(a) Parameters of vehicle and driver

总费用 / ¥	卡车运力 / t	卡车速度 / km · h <sup>-1</sup>	卡车费用 / ¥	司机移动时间 / h	司机移动费用 / ¥	装卸时间 / h
100 000	25	45	20	1	100	0.2

(b) 地理信息与资源分布相关参数

(b) Parameters of geographic information and resource distribution

区域 编号	距离 C <sub>1</sub> / km	距离 C <sub>2</sub> / km	距离 D <sub>1</sub> / km	距离 D <sub>2</sub> / km	距离 D <sub>3</sub> / km	物资 储备	k(D <sub>i</sub> )	截至 时间	卡车数 量 / 辆	司机数 量 / 位	L(D <sub>i</sub> )
C <sub>1</sub>	0	40	50	45	60	800	/	/	2	5	/
C <sub>2</sub>	40	0	60	45	50	1 000	/	/	2	5	/
D <sub>1</sub>	50	60	0	20	30	/	100	20	1	1	2
D <sub>2</sub>	45	20	20	0	15	/	100	22	1	1	3
D <sub>3</sub>	60	30	30	15	0	/	100	23	1	1	2

(c) 公路运输队相关参数

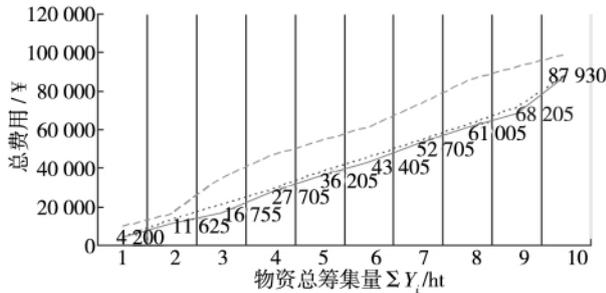
(c) Parameters of transport team

队伍编号	Team <sub>1</sub>	Team <sub>2</sub>	Team <sub>3</sub>	Team <sub>4</sub>	Team <sub>5</sub>
运输能力 / t	80	80	60	80	60
速度 / km · h <sup>-1</sup>	67	70	66	65	68
地点	C1	C2	C1	C2	C1
费用 / ¥	65	70	50	64	55

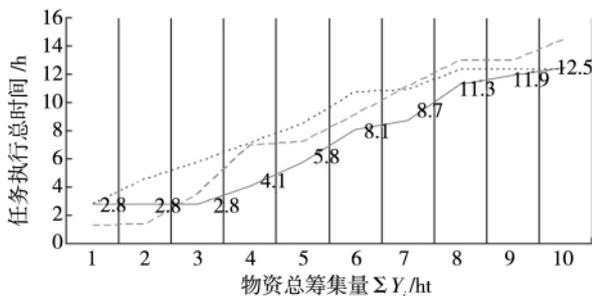
图 6 是本次测试的结果, 其中: 实线是考虑资源分配的 HTN 规划方法, 且采用费用最小为优化

函数的测试结果, 在图中标有具体的数值; 长虚线是优先委托给公路运输队的测试结果; 短虚线是

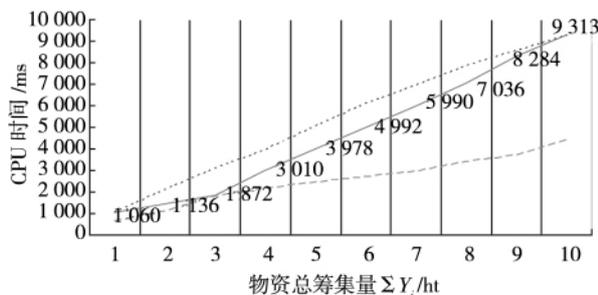
优先采用直接组织运输的测试结果.



(a) 物资筹集总费用变化曲线  
(a) Curves of cost



(b) 任务执行时间变化曲线  
(b) Curves of execution time



(c) CPU 时间变化曲线  
(c) Curves of CPU time

图 6 物资筹集问题测试结果

Fig. 6 Experimental result of emergency logistics distribution problem

图 6(a)、图 6(b) 表示规划解的质量,分别是整个物资调配的总费用和任务执行的总时间随物

资筹集量的增加而变化的曲线.可见,采用了考虑资源分配的 HTN 规划方法后,整个物资调配的总费用明显低于其他两种情况,而任务执行的总时间则没有明显区别.图 6(c) 代表规划系统的性能,是获取规划解的 CPU 时间随物资筹集量的增加而变化的曲线.而对于本测试中的后两种方法,需要在获取行动序列后再核算其总费用等参数.本图所记录的 CPU 时间还包括了其后期核算参数所需要付出的 CPU 时间.由于考虑了资源分配,HTN 规划的搜索空间有所增加,但当总筹集量达到 1 000 t 获取规划解的 CPU 时间仍可以控制在 10 s 以内.所以在实际的应急系统中,依然具有良好的应用价值.

### 3 结束语

本文根据应急决策中方案制定过程和资源分配过程紧密耦合的特征,构建了将资源函数转换为规划系统当前全局资源状态的方法以在规划执行过程中求解资源分配问题.本方法属于应急决策领域的智能规划与资源调度的集成方法,为资源约束下的应急决策提供了有效的途径.通过应用于应急物资筹集问题,并在 HTN 规划系统 SHOP2 中进行求解,证实了其有效性和实用性.然而由于考虑了资源分配后 HTN 规划的搜索空间有所增加,对 HTN 规划模型的优化性能也就提出了更高的要求.本方法与约束传播等优化算法相结合,有效地提高了 HTN 规划系统中的资源优化性能,是未来研究的重要问题之一.

### 参考文献:

[1] 翟晓敏,盛昭瀚,何建敏. 应急研究综述与展望[J]. 系统工程理论与实践,1998,18(7): 17-24.  
Zhai Xiaomin, Sheng Zhaohan, He Jianmin. Recent developments of emergency study[J]. Systems Engineering - Theory & Practice, 1998, 18(7): 17-24. (in Chinese)

[2] Ghallab M, Nau D, Traverso P. Automated Planning: Theory and Practice[M]. San Francisco: Elsevier Press, 2004.

[3] Drabble B, Tate A. The use of optimistic and pessimistic resource profiles to inform search in an activity based planner [C]// Proceedings of the International Conference on AI Planning Systems(AIPS), 1994: 243-248.

[4] Siebra A. A united approach to planning support in hierarchical coalitions[D]. Edinburgh: University of Edinburgh, 2006.

- [5]Castillo L , Fdez-Olivares J , Garc Ma-Perez O , et al. Efficiently handling temporal knowledge in an HTN planner [C]// Proceedings of International Conference on Automated Planning and Scheduling( ICAPS) ,2006: 63 – 72.
- [6]Nau D , Cao Y , Lotem A , et al. SHOP: Simple hierarchical ordered planner [C]// Proceedings of the International Joint Conference on Artificial Intelligence ( IJCAI) ,1999: 968 – 973.
- [7]Nau D , Tsz-Chiu A , Okhtay I , et al. SHOP2: An HTN planning system [J]. Journal of Artificial Intelligence Research , 2003 ,20( 12) : 379 – 404.
- [8]Nau D , Tsz-Chiu A , Okhtay I , et al. Applications of SHOP and SHOP2 [J]. IEEE Intelligent Systems ,2005 ,20( 5) : 34 – 41.
- [9]Wilkins D , Myers K , Lowrance J , et al. Planning and reacting in uncertain and dynamic environment [J]. Journal of Experiment and Theoretical AI ,1995 ,7( 1) : 197 – 227.
- [10] Wilkins D. Practical Planning: Extending the Classical AI Planning Paradigm [M]. San Mateo , CA: Morgan Kaufmann ,1988.
- [11]Erol K ,Hendler J ,Nau D. UMCP: A sound and complete procedure for hierarchical task-network planning [C]// Proceedings of the International Conference on AI Planning System ( AIPS) ,1994: 249 – 254.
- [12]Dechter R , Meiri I , Pearl J. Temporal constraint networks [J]. Artificial Intelligence ,1991 ,49: 61 – 95.
- [13]Laborie P. Algorithms for propagating resource constraints in AI planning and scheduling: Existing approaches and new results [J]. Artificial Intelligence ,2003 ,143( 2) : 151 – 188.
- [14]衣方磊 ,徐寅峰 ,辛春林. 局内动态配送车调度管理及其竞争策略 [J]. 管理科学学报 ,2007 ,10( 4) : 1 – 8.  
Yi Fanglei , Xu Yinfeng , Xin Chunlin. On-line management in dynamic distribution-truck scheduling problem and its strategies [J]. Journal of Management Sciences in China ,2007 ,10( 4) : 1 – 8. ( in Chinese)
- [15]王旭坪 ,阮俊虎 ,张 凯 ,等. 有模糊时间窗的车辆调度组合干扰管理研究 [J]. 管理科学学报 ,2011 ,14( 6) : 2 – 15.  
Wang Xuping , Ruan Junhu , Zhang Kai , et al. Study on combinational disruption management for vehicle routing problem with fuzzy time windows [J]. Journal of Management Sciences in China ,2011 ,14( 6) : 2 – 15. ( in Chinese)

## HTN Planning method with resource allocation and its application

WANG Zhe , WANG Hong-wei , TANG Pan , QI Chao , WANG Jian

Institute of Systems Engineering , Huazhong University of Science and Technology , Key Laboratory of Education Ministry for Image Processing and Intelligent Control , Wuhan 430074 , China

**Abstract:** Considering the coupling relationship between planning and resource scheduling in emergency decision-making , this paper proposes a method for planning problem considering resource allocation by extending the mechanism of HTN planning. By designing the resource timeline to describe the resources' functions , this method transforms resource information into the global resource states by different resource allocation processes for different kinds of resources during the process of HTN planning. While searching the actions in HTN planning , the resource constraint rules and the hierarchical resource constraint propagation rules are established to control the global resource states which correspond with every step of actions satisfying resource constraints and temporal constraints. Finally , the effectiveness and practicability is confirmed by applying this method to the HTN planning system SHOP2 in a case of emergency logistics distribution problems.

**Key words:** hierarchy task net planning; intelligent planning; resource allocation; emergency decision-making