

基于预案模板的 HTN 规划知识建模方法及其应用

唐 攀 王红卫 王 哲

(华中科技大学系统工程研究所 武汉 430074)

(华中科技大学图像信息处理与智能控制教育部重点实验室 武汉 430074)

摘 要 应急决策是应急管理的基础和核心,HTN(Hierarchy Task Net)规划为应急决策提供了一种有效手段,是目前研究的热点问题。针对基于 HTN 规划求解应急决策问题存在领域知识难于建模的问题,在利用基于 PetriNet 的工作流模型对应急预案进行建模的基础上,提出了一种将预案模板转化为 HTN 规划领域知识模型的方法。在此基础上,将基于预案模板的应急决策问题建模为应急任务规划问题,利用 HTN 规划系统 SHOP2(Simple Hierarchical Ordered Planner 2)进行规划求解,实现复杂应急态势条件下通过选择和组织应急计划片段科学制定应对方案,并以某区域洪灾应急响应为例开展了应用研究。

关键词 应急预案模板,应急决策,层次任务网络规划

Method of Modeling Knowledge for HTN Planning Based on Emergency Plan Template and its Application

TANG Pan WANG Hong-wei WANG Zhe

(System Engineering Institute, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

(State Key Laboratory of Education Ministry for Image Processing and Intelligence Control, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract Emergency decision-making is the basis and core of emergency management. HTN planning provides an effective mean for it and is the hot issue of current research. According to the hard problem of modeling the domain knowledge during the process of solving the emergency decision making problem based on HTN planning, on the foundation of modeling the emergency plan using workflow model based on PetriNet, this paper presented a method of translating the emergency plan template to the HTN planning domain knowledge model. Then, we modeled the emergency decision-making problem as a mission-planning problem, used the HTN planning system SHOP2 to solve it, and realized to make action plans by selecting and organizing emergency plan segments scientifically in the face of complex situation. Finally, we carry out the application research in the flood response work of some area.

Keywords Emergency plan template, Emergency decision-making, Hierarchy task net planning

1 问题提出

应急决策是突发事件应急管理的基础和核心,其本质是面对复杂应急态势科学制定应对方案,实现对突发事件的干预和控制。知识规划^[1]作为一种关于动作的推理,通过选择和组织一组动作,实现预先给定的目标,是理性决策的关键环节,为求解复杂决策问题提供了一种有效方法,能够用以支持应急决策者科学制定应对方案。目前,国内外学者开展了大量将知识规划方法,尤其是 HTN 规划用于求解应急决策问题的研究工作。Siebra^[2]等人在 HTN 规划模型 O-Plan 的基础上开发了 I-X 框架系统,用以解决地震灾害响应领域应对方案的制定问题。美国海军研究室开发了 HICAP^[3](基于分层交互案例规划结构的规划器),系统的核心是利用 HTN 规划器 SHOP(Simple Hierarchical Ordered Planner)规划生成

应急疏散方案。Biundo^[4]等人将基于状态空间的规划方法和 HTN 规划相结合,提出了一种混合任务规划方法,在对行动和系统状态进行抽象的基础上,解决了领域建模困难和搜索空间爆炸的问题,并应用于防洪应急管理中。Asuncion^[5]提出了一种时态增强的 HTN 规划模型 SIADEX,用于辅助应急决策人员制定森林火灾应对方案。目前,在利用 HTN 规划模型辅助应急决策者制定应对方案的过程中,存在 HTN 规划领域知识难以建模的问题,阻碍了该方法在基于任务规划的应急决策领域的应用。所以,如何建立应急领域知识模型,是基于任务规划方法求解应急决策问题的关键。

目前,为有效应对突发事件,各级应急管理机构根据对突发事件的预想和应急管理工作实践编制了一系列应急预案^[6],用以指导和规范应急响应人员的处置行为。同时,学术界提出了一种通过建立预案模板描述应急领域知识的方法,

到稿日期:2009-11-06 返修日期:2010-02-25 本文受国家自然科学基金重点支持项目(90924301)和科技部“十一五”国家科技支撑计划课题专题(2008BAB29B07-2)资助。

唐 攀(1983-),男,博士生,主要研究方向为应急决策及其决策支持技术,E-mail:tangpan001@163.com;王红卫(1966-),男,博士生导师,主要研究方向为公共安全、应急管理、物流与供应链等;王 哲(1980-),男,博士生,主要研究方向为应急管理、国民经济动员。

以实现应急预案文本的标准化。其中,基于 Petri 网的工作流模型能够有效建模应急处置工作流程,是对应急预案进行建模的一种有效工具。针对基于 HTN 规划制定应对方案过程中存在应急领域知识难以建模的问题,本文在分析基于 Petri 网的工作流模型建立的应急预案模板特征的基础上,提出了一种将预案模板转换为 HTN 规划领域知识模型的方法,为建立 HTN 规划领域知识模型提供了一种有效途径。在此基础上,提出将该方法应用于基于预案模板的应急决策过程,通过将基于 Petri 网的工作流模型建立的预案模板转化为 HTN 领域知识模型,并利用 HTN 规划模型 SHOP2 自动生成给定应急态势下的应对方案,从而实现复杂应急态势条件下应急计划片段的合理选择和组合,为科学制定应对方案提供了一种有效途径。最后,以某区域洪灾险情处置应急决策过程为案例,开展以上方法的应用研究。

2 应急预案建模和 HTN 规划

2.1 基于工作流模型的应急预案建模

为高效开展应急处置工作,应急管理人员根据对突发事件的预想和应急管理工作实践,编制了应急预案、标准操作程序(SOPs)等一系列文件,用以指导应急处置工作。通常,应急预案是若干应急计划片段的集合,由实现某种功能的应急任务集合及其逻辑关系组成,描述了突发事件应急态势满足特定条件时需采取的应急行动及其步骤。目前,应急预案是非结构化文档,计算机无法识别应急任务,导致无法根据预案描述的应急领域知识支撑应急决策过程的开展。所以,分析应急预案文本的结构特征,建立应急预案模板,是基于预案的应急决策过程应解决的首要问题。

在深入分析国内外多套应急预案的基础上,针对应急预案文本描述了一系列应急计划片段这一根本特征,我们将应急目标、应急过程等应急计划片段组成元素抽象成应急任务模型,利用基于 PetriNet 的工作流模型^[7]对应急计划片段进行建模,从而构建应急预案模板。应急预案模板 $EPT = \{K_1, \dots, K_n\}$, K_i 表示应急预案中的行动及其逻辑关系,包括简单过程模板和复杂过程模板。简单过程模板 $spt = (name, P, prec, effect)$, 描述单个应急实体能够直接执行的应急任务。 $name$ 表示任务的名称,描述任务执行的内容,使应急决策者理解执行该任务的相关工作; $P = \{p_j\}$, $(1 \leq j \leq m)$ 是描述任务的参数项集合,包括变量和常量; $prec$ 和 $effect$ 分别描述该过程模板执行的系统状态满足的前提条件和执行后对应急系统状态造成的影响,采用逻辑原子进行描述。复杂过程模板 $cpt = (name, P, prec)$, 描述应急实体不能直接执行的应急过程,各参数定义与简单过程模板相同。通常,复杂过程模板执行效果无法描述,一般通过分解为一系列具有逻辑关系的应急过程集合来完成。基于 PetriNet 的工作流模型能够规范地建模应急计划片段描述的应急任务和决定任务执行次序的条件,并且建模过程直观。因此,我们采用基于 PetriNet 的工作流模型建立应急预案模板,描述应急预案文本刻画的应急领域知识。

基于 PetriNet 的工作流模型建立的某区域洪灾险情处置过程模板如图 1 所示。如果发生堤防崩塌险情 $pre1$ (happen E1 Loc), 则运输石块到出现地点 $t4$ (transport Stone), 然后抛投石块控制险情 $t9$ (! pop Stone); 如果发生溃口险情 $pre2$

(happen E2 Loc), 则分别运输混凝土块 $t5$ (transport Concrete) 和运输铁丝 $t6$ (transport Ironwire) 至出险地点, 并将两者绑定 $t8$ (! combine Concrete Ironwire), 最后抛投混凝土块联合体 $t10$ (! pop Combo) 到溃口处, 最终控制险情。

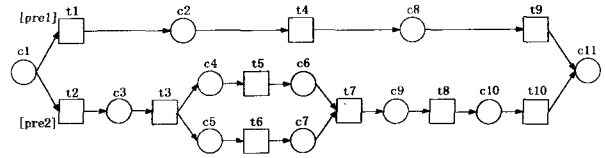


图 1 某区域洪灾险情应急预案模板

利用基于 PetriNet 的工作流模型对应急计划片段进行建模具有以下特点: 1) 针对突发事件复杂性和多变性的特点, 能够描述可能的应急态势及其在不同条件下应采取的应急行动; 2) 能够对应急业务流程进行抽象, 在多个层次上对应急业务流程进行描述; 3) 针对应急领域知识文件抽象性和通用性的特点, 提供应急处置业务流程抽象和不完备的描述, 适应不同突发事件的应急处置工作; 4) 利用 PetriNet 能够对应急计划片段中描述的应急业务流程进行结构分析和性能分析。所以, 基于 Petri 网的工作流模型能够有效描述应急计划片段的组成元素及其逻辑关系, 为构建应急预案模板提供了一种有效的工具。

2.2 HTN 规划系统 SHOP2

HTN 规划是一种通过对任务进行分解来实现动作推理的知识规划模型, 是目前应用最为广泛的规划方法。Erol^[8] 提出了 HTN 规划的形式化定义, 其知识描述模型包括原始任务、复杂任务、任务网络、操作和方法。原始任务是能够直接执行的任务; 复杂任务通过分解为原始任务和其它复杂任务来完成; 任务网络是具有一定先序约束关系的原始任务或复杂任务组成的集合; 与经典规划相同, 操作描述了执行原始任务的前提条件和影响; 方法描述了复杂任务的执行途径, 通过在特定条件下将复杂任务分解为具有一定约束关系的子任务集合, 从而完成该任务。与经典规划不同的是, HTN 规划不需要描述系统的目标状态, 规划的过程是通过递归地将初始任务网络中的复杂任务分解为一系列具有约束关系的子任务集合, 最终形成实例化的操作序列, 从而实现规划问题求解。在初始状态下执行该序列, 能够完成初始任务网络中的所有任务。

目前, 美国 Maryland 大学 Nau 等人开发的基于状态的前序 HTN 规划系统 SHOP^[9] (Simple Hierarchical Ordered Planner) 和 SHOP2^[10] 是应用广泛的、领域独立的 HTN 规划系统。其中, SHOP 是基于“海上搜救”应用发展起来的 HTN 规划系统, 它基于 Erol 提出的形式化定义来建立领域知识模型。针对 SHOP 在应用过程中存在的问题, 该研究团队在 SHOP 的基础上开发了 SHOP2, 该系统能够进行混合的数字和符号计算, 基于公理进行推理和调用外部函数。在 2002 年国际规划大赛中, SHOP2 表现优异, 取得了 4 个最高奖项中的一个。目前, 作为领域独立的 HTN 规划系统, SHOP2 在工程管理、应急疏散、软件系统集成、无人驾驶机控制等方面得到了广泛应用^[11]。与经典规划相比, HTN 规划模型 SHOP2 具有以下特点: 1) 将目标表达为具有复杂先序约束关系的任务集合, 有效地适应了应急决策问题系统目标状态难以直接给定的特点; 2) 通过方法描述任务之间的分解关系, 与

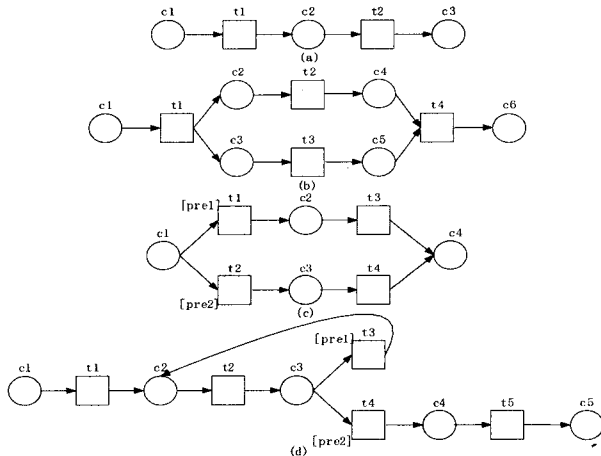
应急决策领域中将任务进行层次化组织的特点相似;3)规划的过程通过任务分解实现,与应急决策中通过分解目标、制定方案的过程相似,且搜索空间由方法的分支所决定,规划的效率较高。所以,SHOP2 为建立应急领域任务规划模型提供了一种有效途径。

3 预案模板与 HTN 知识模型的映射

HTN 规划通过基于前提条件的推理,能够选择和组织完成初始任务(目标)一系列应急行动,为应急决策者在复杂应急态势条件下制定应对方案提供了一种有效手段。目前,该方法存在领域知识难以建模的问题。所以,如何将预案模板描述的应急领域知识转化为 SHOP2 领域知识模型,是利用 HTN 规划支持应对方案制定过程的关键问题。在分析预案模板基本结构的基础上,本节提出了一种将组成预案模板的基本 workflow 模型转换为 SHOP2 领域知识模型的算法,并在此基础上提出了一种将预案模板转换成 SHOP2 领域知识模型的程序,为有效建立应急领域 SHOP2 知识模型提供了一种有效途径。

3.1 预案模板的基本结构

预案模板包括简单过程模板和复杂过程模板两类。利用基于 PetriNet 的 workflow 模型建立的复杂过程模板由应急任务及任务之间的路由结构组成,应急任务和路由结构是应急预案模板的基本元素。描述复杂过程模板的 workflow 模型包括顺序控制结构(Sequence-Ctrl)、并行控制结构(Parallel-Ctrl)、选择控制结构(Choice-Ctrl)和循环控制结构(Repeat-Ctrl) 4 种。通常,只包含一种路由结构的 workflow 模型称为基本 workflow 模型。按照路由结构的分类,基本 workflow 模型包括顺序控制结构基本 workflow 模型、并行控制结构基本 workflow 模型、选择控制结构基本 workflow 模型和循环控制结构基本 workflow 模型,如图 2 所示。路由结构描述了应急任务的执行次序,通过将应急任务与上述 4 种基本路由结构进行合理组织,能够对任何复杂过程模板进行描述。同理,基于 PetriNet 的 workflow 模型建立的应急预案复杂过程模板可以分解为基本 workflow 模型集合,并利用该集合实现对复杂过程模板的描述。



(a) 顺序控制结构基本 workflow 模型; (b) 并行控制结构基本 workflow 模型; (c) 选择控制结构基本 workflow 模型; (d) 循环控制结构基本 workflow 模型

图 2 基于 PetriNet 的 workflow 模型基本路由结构

3.2 基本 workflow 模型的转换算法

基于 PetriNet 的 workflow 模型能够实现对应急计划片段描

述的领域知识的刻画,为建立通用的应急预案模板提供了有效手段。在分析预案模板基本组成元素的基础上,将 Petri-Net 的 workflow 模型的基本结构元素转换成 SHOP2 领域知识模型,是建立预案模板与 SHOP2 知识模型映射关系的基础。在分析简单过程模板和描述复杂过程模板基本路由结构的基础上,本节提出了一种将简单过程模板和基本路由结构转换成 SHOP2 知识模型的算法,包括简单过程模板转换函数、顺序路由结构转换函数、并行路由结构转换函数、选择路由结构转换函数和循环路由结构转换函数。

(1) 简单过程模板转换函数

Translate-Simple-process(sp)

输入:简单过程 sp

输出:操作 o

1) 将 sp 的名称 $name$ 和参数集合 P 作为操作的名称和参数集合;

2) 将 sp 前提条件 $prec$ 作为操作符的前提条件 $prec$;

3) 将 sp 效果中的负文字作为操作符的删除列 $Delete$;

4) 将 sp 效果中的正文字作为操作符的添加列 Add ;

返回: $o = (; operator(name P) prec Delete Add)$

(2) 顺序控制结构基本 workflow 模型转换函数

如果复杂任务 cp 由多个任务一个接一个执行完成,则该任务构成顺序控制结构基本 workflow 模型,如图 2(a)所示。复杂任务 cp 通过执行 $t1$ 后,再执行 $t2$ 完成。将顺序控制结构基本 workflow 模型转换为 SHOP2 领域知识模型的算法如下:

Translate-Sequence-process(cp, sc)

输入:复杂过程 cp , 顺序控制结构基本 workflow 模型 sc

输出:方法 M

1) 将 cp 的名称 $name$ 和参数集合 P 作为待分解任务的名称和参数集合;

2) 将 cp 的前提条件 $prec$ 作为方法的分解条件;

3) 将 sc 中的任务作为 cp 的子任务,且顺序执行;

返回: $M = (; method(name P) Prec(t1 t2))$

(3) 并行控制结构基本 workflow 模型转换函数

如果复杂过程 cp 由多个任务并行执行或以任意次序执行完成,则该任务构成并行控制结构基本 workflow 模型,如图 2(b)所示。复杂任务 cp 通过同时执行 $t1$ 和 $t2$,或先执行 $t1$ 再执行 $t2$,或先执行 $t2$ 再执行 $t1$ 3 种情况完成(注:SHOP2 不支持 $t1$ 和 $t2$ 同时执行过程的描述)。将并行控制结构基本 workflow 模型转换为 SHOP2 领域知识模型的算法如下:

Translate-Parallel-process(cp, pc)

输入:复杂过程 cp , 并行控制结构基本 workflow 模型 pc

输出:方法 M

1) 将 cp 的名称 $name$ 和参数集合 P 作为待分解任务名称和参数集合;

2) 将 pc 中的任务作为 cp 的子任务,子任务之间以任意次序执行;

返回: $M = (; method(name P) prec(; unordered t1 t2))$

(4) 选择控制结构基本 workflow 模型转换函数

如果复杂过程 cp 的执行过程涉及在多个任务中进行选择,则该任务构成选择控制结构基本 workflow 模型,如图 2(c)所示。当满足虚拟任务 $t1$ 的前置条件 $pre1$ 时,执行任务 $t3$;当满足虚拟任务 $t2$ 的前提条件 $pre2$ 时,执行任务 $t4$ 。将

选择控制结构基本工作流程模型转换为 SHOP2 领域知识模型的算法如下:

Translate-Choice-process(cp, cc)

输入: 复杂任务 cp , 选择控制结构基本工作流程模型 cc

输出: 方法 M

1) 将 cp 名称 $name$ 和参数集合 P 作为待分解任务的名称和参数集合;

2) $precond1 = pre \cap pre1, precond2 = pre \cap pre2$;

返回: $M = (:method(name P) precond1 t1 precond2 t2)$

(5) 循环控制结构基本工作流程模型转换函数

如果复杂过程 cp 的执行涉及某个任务的反复执行, 则该任务构成循环控制结构基本工作流程模型, 如图 2(d) 所示。当满足虚拟任务 $t3$ 的前置条件 $pre1$ 时, 重复执行任务 $t2$, 直至满足虚拟任务 $t4$ 的前置条件 $pre2$ 时, 执行任务 $t5$ 。将循环控制结构基本工作流程模型转换为 SHOP2 领域知识模型的算法如下:

Translate-Repeat-process(cp, rc)

输入: 复杂过程 cp , 循环控制结构基本工作流程模型 rc

输出: 方法集合 $\{M1, M2\}$

1) 将 cp 的名称 $name$ 和参数集合 P 作为待分解任务的名称和参数集合;

2) 将 cp 的前提条件 pre 作为 $M1$ 分解的前提条件;

3) 设置复杂任务 $cp1$, 名称为 $name1$, 参数集合为复杂任务 cp 的参数集合 P ;

返回: $M1 = (:method(name P) pre(t1(name1 P) t5)); M2 =$

$(:method(name1 P) pre1(t2(name1 P1))())$

复杂任务 $cp1$ 有两种执行途径, 当满足条件 $pre1$ 时, 通过顺序执行 $t2$ 和 $cp1$ 完成; 否则采取第二种执行途径, 该执行途径的条件为空, SHOP2 检测时总为真, 所以, 该方式下不执行任何任务。

3.3 预案模板转换程序

简单过程模板和 4 种基本工作流程模型是基于 PetriNet 的工作流模型描述的预案模板的基本组成元素, 通过对以上基本组成元素进行合理组织能够描述任何预案模板定义的应急工作流程。在以上 5 种基本结构元素转换算法的基础上, 本部分提出一种将基于 PetriNet 的工作流模型建立的预案模板转换为 SHOP2 领域知识模型的程序, 为利用 SHOP2 领域知识模型描述预案模板刻画的应急领域知识提供了一种有效手段。

预案模板转换程序如下:

第一步 在预案模板 $EPT = \{K_1, \dots, K_n\}$ 中任意选择过程模板 $K_i \in EPT$;

如果 K_i 是简单过程模板, 则执行以下步骤:

1) 执行 $O = \text{Translate-Simple-process}(K_i)$;

2) 将操作模型 O 添加到 SHOP2 的领域知识模型 D 。

如果 K_i 是描述复杂任务 cp 的复杂过程模板, 则执行以下步骤:

1) 将预案模板 K_i 转换为基本工作流程模型集合 $QSet = \{Q_1, \dots, Q_n\}$, Q_i 是描述复杂任务 cp_i 的基本工作流程模型;

2) 对任意 $Q_i \in QSet$, 执行以下步骤:

a) 如果 Q_i 是顺序路由结构, 执行程序:

$M = \text{Translate-Sequence-process}(cp_i, Q_i)$;

b) 如果 Q_i 是并行路由结构, 执行程序: $M = \text{Translate-parallel-process}(cp_i, Q_i)$;

c) 如果 Q_i 是选择路由结构, 执行程序: $M = \text{Translate-choice-process}(cp_i, Q_i)$;

d) 如果 Q_i 是循环路由结构, 执行程序: $M = \text{Translate-repeat-process}(cp_i, Q_i)$;

第三步 将方法模型 M 加入 SHOP2 领域知识 D ;

通常, 按照以上转换程序得到领域知识模型中的方法模型较多, 可以将方法模型进行合并。

4 应用

利用基于 PetriNet 的工作流模型描述的某区域洪灾险情处置预案模板 K 如图 1 所示, 该模板描述了洪灾险情处置任务 $cp1$ 的执行过程。 $cp1$ 由崩塌险情处置任务 $cp2$ 和溃口险情处置任务 $cp3$ 组成的选择控制结构基本工作流程模型 Q_1 描述; $cp2$ 由应急任务 $t4$ (transport Stone) 和 $t9$ (! pop Stone) 组成的顺序控制结构基本工作流程模型 Q_2 描述; $cp3$ 由物资筹集任务 $cp4$ 、任务 $t8$ (! combine Concrete Ironwire) 和 $t10$ (! pop Combo) 组成的顺序控制结构基本工作流程模型 Q_3 描述; $cp4$ 由任务 $t5$ (transport Concrete) 和 $t6$ (transport Ironwire) 组成的并行控制结构基本工作流程模型 Q_4 描述。根据以上分析, 将描述洪灾险情处置任务的预案模板 K 进行分解得到基本工作流程模型集合 $QSet = \{Q_1, Q_2, Q_3, Q_4\}$ 。根据 3.2 节提出的基本工作流程模型转换算法, 对 $Q_i \in QSet$ 执行以下转换程序:

1) Q_1 是选择控制结构基本工作流程模型, 执行 Translate-choice-process($cp1, Q_1$), 得到方法模型:

$m_1 = (:method cp1 pre1 cp2 pre2 cp3)$

2) Q_2 是顺序控制结构基本工作流程模型, 执行 Translate-Sequence-process($cp2, Q_2$), 得到方法模型:

$m_2 = (:method cp2() t4 t9)$

3) Q_3 是顺序控制结构基本工作流程模型, 执行 Translate-Sequence-process($cp3, Q_3$), 得到方法模型:

$m_3 = (:method cp3() (cp4 t8 t10))$

4) Q_4 是并行控制结构基本工作流程模型, 执行 Translate-parallel-process($cp4, Q_4$), 得到方法模型:

$m_4 = (:method cp4() (unorder t5 t6))$

通过以上转换程序得到方法模型集合 $M = \{m_1, m_2, m_3, m_4\}$, 其中 m_2, m_3 和 m_4 只有一个分支, 可将其进行合并, 得到描述预案模板 K 的 SHOP2 领域知识模型, 如图 3 所示。

```
(:method (floodresponse)
;; case1
(happen E1 ? loc)
((transport Stone) (! pop Stone))
;; case2
(happen E2 ? loc-to)
((unorderd; (transport Concrete)
(transport SteerWire))
(! combine Concrete IronWire ? loc)
(! pop Combo ? loc))
)
```

图 3 洪灾应急领域知识模型

本案例中的预案模板中包括选择控制结构基本工作流程模

型、顺序控制结构基本 workflow 模型和并行控制结构基本 workflow 模型。同理,若预案模板中包括简单过程模板或循环控制结构基本 workflow 模型,2.3 节中的转换程序可将其转换为 HTN 领域知识模型。

根据对某区域洪水灾害应急预案文本进行分析,在利用基于 PetriNet 的工作流模型对预案文本描述的应急响应工作流程进行建模的基础上,采用第 2 节提出的预案模板转换程序,得到该区域洪水灾害险情处置 HTN 领域知识模型^[12],从而构建应急处置领域知识库,包括 6 个复杂任务分解方法模型和 8 个操作符模型。

在应急处置领域知识库的基础上,针对该区域的任意应急态势,在给定该态势下的初始任务网络的条件下,利用 SHOP2 的复杂推理能力能够自动推理该应急态势下的应对方案。该应对方案在初始应急态势下可行,并且执行应对方案能够完成初始任务网络中的任务。表 1 描述了一个应急决策问题实例及其规划方案。其中,初始应急态势包括发生的突发事件类型、应急资源的位置和状态等。初始应急任务为开展防洪应急响应,生成的应对方案包括 8 个操作。在初始应急态势下顺序执行该操作序列,能够完成给定的初始应急任务。

表 1 应急决策问题实例及其规划方案

Planning Problem Instance	Generated Plan
(defproblem problem floodemergency ; emergency situations (emergency-at E1 loc1-1) (material-at Stone loc2-1) (material-at Sandbag loc2-2) (material-at Concrete loc2-3) (material-at Ironwire loc2-4) (truck-at Truck1 loc3-1) (truck-at Truck2 loc3-2) (free Truck1) (free Truck2)) ; initial task net (emergencyresponse a))	[1](! reserve truck1) [2](! move truck1 loc3-1 loc2-1) [3](! load stone truck1 loc2-1) [4](! move truck1 loc2-1 loc1-1) [5](! unload stone truck1 loc1-1) [6](! move truck1 loc1-1 loc3-1) [7](! free truck1) [8](! pop stone loc1-1)

该规划过程利用 JSHOP2 对该应急决策问题进行规划求解,生成的层次任务网络如图 4 所示。初始任务网络为 (emergencyresponse a),该任务分解为两个子任务 (transport stone)和 (! pop stone loc1-1)。其中,(transport stone)是复杂任务,分解为 5 个子任务。按照 SHOP2 的推理算法,逐次对当前任务网络中的复杂任务进行分解,并在当前系统状态中应用与原始任务对应的操作符。经过 26 个规划步骤后,最终求得规划问题的解,此时得到的最底层层任务网络只包括 8 个原始任务。

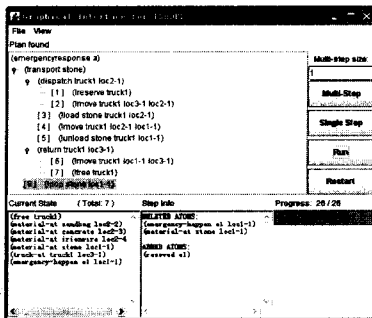


图 4 规划案例层次任务网络

结束语 目前,基于 HTN 规划求解应急决策问题存在领域知识难以建模的问题。针对该问题,在利用基于 Petri-Net 的工作流模型建立应急预案模板的基础上,本文提出了一种将预案模板转化为 HTN 规划领域知识模型的方法。在此基础上,将基于预案模板的应急决策问题建模为任务规划问题,利用 HTN 规划系统 SHOP2 进行求解,自动生成给定系统状态下的应对方案,为在复杂应急态势条件下选择和组织应急计划片段,科学制定应对方案提供了一种有效途径,并以某区域洪灾应急响应为例开展了应用研究。

应急决策环境为基于 HTN 规划的应急任务规划模型提出了特殊要求。目前,SHOP2 不能表达任务的时限条件和任务之间的同步关系,规划生成的方案是线性行动序列,不能适应不同应急实体间应急行动并行执行的特点。针对 SHOP2 在应急任务规划应用中存在的以上问题,拟在 SHOP2 规划系统的基础上建立时态 HTN 规划模型。

参考文献

- [1] Wilkins D E, DesJardins M. A call for knowledge-based planning [J]. AI Magazine, 2001, 22(1): 99-115
- [2] de Albuquerque Siebra C. a United Approach to Planning Support in Hierarchical Coalitions[R]. University of Edinburgh, 2006
- [3] Munoz Avila H, Aha D, Breslow L, et al. HICAP: An Interactive Case-Based Planning Architecture and Its Application to Noncombatant Evacuation Operations[C]//Eleventh Innovative Applications of Artificial Intelligence Conference (IAAI '99). 1999; 870-875
- [4] Biundo S, Schattenberg B. From Abstract Crisis to Concrete Relief: A Preliminary Report on Combining State Abstraction and HTN Planning[C]//Recent Advances in AI Planning, Proceedings of the 6th European Conference on Planning (ECP'01). 2001
- [5] Castillo L, Fdez O J, Palao F, et al. Efficiently handling temporal knowledge in an HTN planner[C]//Proceedings of Sixteenth International Conference on Automated Planning and Scheduling (ICAPS'06). 2006; 63-72
- [6] 中华人民共和国行业标准《生产经营单位安全生产事故应急预案编制导则》[S]. AQ/T 9002—2006
- [7] Wil Van der A, Kees Van H. workflow management model methods and systems [M]. 北京:清华大学出版社, 2004
- [8] Erol K, Hendler J, Nau D S. Semantics for Hierarchical Task Network Planning[R]. CS-TR-3239
- [9] Nau D, Cao Y, Lotem A, et al. HOP: Simple hierarchical ordered planner[C]//Proceedings of the International Joint Conference on Artificial Intelligence. (IJCAI'99). 1999; 968-973
- [10] Nau D, Au Tsz Chiu, Okhtay I, et al. SHOP2: An HTN Planning System[J]. Journal of Artificial Intelligence Research, 2003, 20: 379-404
- [11] Dana N, Au Tsz Chiu, Okhtay I, et al. Applications of SHOP and SHOP2[J]. IEEE Intelligent Systems, 2005, 20(2): 34-41
- [12] <http://tangpan001.blog.163.com/blog/static/38261147200982210029891/edit>