

# 基于层次任务网络规划的应急行动方案制定方法

唐攀<sup>1</sup> 祁超<sup>2,3,4</sup> 王红卫<sup>2,3,4</sup>

(1. 暨南大学公共管理学院, 广州 510632;

2. 华中科技大学自动化学院, 武汉 430074;

3. 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;

4. 安全预警与应急联动技术湖北省协同创新中心, 武汉 430070)

**摘要:** 应急行动方案制定是应急响应关键环节, 其本质是应急指挥部门根据获取的应急信息, 对错综复杂的应急态势进行综合研判, 根据各相关部门的应急领域知识, 识别应急目标, 并制定相应的行动方案。本文分析了应急响应决策过程, 定义了这一过程涉及到的关键要素, 定义了应急行动方案制定决策问题。在此基础上, 分析了应急行动方案制定方法的相关研究, 提出基于层次任务网络(HTN)规划的应急行动方案制定方法, 着重探讨了在应急领域中运用 HTN 规划方法所要解决的关键科学问题, 为 HTN 在应急领域的应用构建了较完整的理论框架, 为今后的相关研究提供可借鉴的思路。

**关键词:** 应急决策; 应急行动方案制定; 层次任务网络规划

DOI:10.14120/j.cnki.cn11-5057/f.2016.08.006

## 引言

突发事件通常前兆不充分, 具有明显的复杂性特征和潜在次生衍生危害, 破坏性严重, 采用常规管理方式难以应对处置, 具有突发性、蔓延性、不确定性、严重性、社群性等特点, 对应急管理部门开展快速有效的应对措施提出了挑战。突发事件应急管理是通过及时准确的信息处理、决策和执行, 预防非常规突发事件的发生、控制突发事件的规模、妥善处理突发事件的局面、最大限度地减少突发事件发生后的可能损失。应急管理分为预备、预警、响应和恢复四个阶段, 本文集中关注应急响应阶段。应急响应阶段包含了一系列的动态决策过程: 在突发事件突然发生或出现征兆时, 迅速收集应急信息, 包括事件信息、环境信息、资源情况等; 以此为基础, 进行态势分析和综合研判; 根据相关应急领域知识、专家经验、案例数据等确定应急目标; 协调各应急响应参与单位, 制定协同应对方案; 组织方案实施并跟踪执行情况, 根据态势动态演化情况调整方案, 直至险情得以化解。

应急行动方案制定是应急响应关键环节, 其本质是根据各相关部门的应急领域知识, 针对确定的应急目标, 制定多部门协同处置的行动方案。应急行动方案制定问题具有以下特征:

(1) 应急响应过程往往涉及多个相关部门, 例如多个地区的政府部门、非政府组织、社会公众、其他单位, 甚至外国救援队伍。这些部门在平时工作中缺乏合作经验, 然而在应急处置过程中却需要统一指挥, 协同应对。这要求在制定应对方案的过程中, 消解局部目标的冲突, 信息共享, 在有限时间内有效投放大量的应急服务和物资, 避免救援力量分布不合理、孤军奋战以及资源的浪费的现象。同时, 应急响应成员来自不同的领域, 具有不同的知识背景, 应急领域知识的异构性使有效管理应急态势信息和领域知识成为有效制定应急行动方案的重要前提。

(2) 应急环境和态势涉及众多相互耦合的要素, 突发事件发生发展和演变过程与应急行动执行过程共同导致应急环境和态势的动态变化。同时, 应急过程中的信息往往不确定、不可知、或不准确。因此要求应急行动方案制定决策方法能够适应信息动态变化且不确定的情况。

收稿日期: 2015-11-24

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(71371079); 安全预警与应急联动技术湖北省协同创新中心开放课题(JD20150103)。

作者简介: 唐攀, 暨南大学公共管理学院副教授, 博士; 祁超(通讯作者), 华中科技大学自动化学院副教授, 博士; 王红卫, 华中科技大学自动化学院教授, 博士。

(3) 应急过程需要在短时间内调拨和配送大量的人力和物力资源,因此,与传统的决策过程相比,应急行动方案制定过程对成本的考虑相对较少,但必须考虑时间紧迫性和资源稀缺,例如,必须考虑资源优化配置的行动方案生成方法,资源缺项问题的处理方法,由于资源受限带来的部分可满足问题等。

(4) 应急决策具有层次性,由于涉及部门众多,往往从国家到地方成立具有组织层次结构的应急指挥部门,从上级指挥部门到下级指挥部门,所处理的决策问题也从宏观到微观逐渐细化,直至各执行单位可操作的行动方案。决策依据则是以预案、案例、规则、经验等为主要体现形式的领域知识。

以汶川地震救灾救援工作为例,国务院抗震救灾总指挥部成立了由各部委牵头的九个工作组,并在成都设立了前方总指挥部,同时灾区各级政府也分别成立了指挥机构,四川省政府成立的抗震救灾指挥部又下设了八个工作组,涉及众多部门。同时,参与应急的救援队伍庞大,救援任务错综复杂,整个过程先后出动军队武警 14.6 万人(其中武警部队 2.3 万人),组织民兵预备役 7.5 万人,动用车辆机械 9670 台、飞机(直升机) 193 架,解救被困群众 140 万人。应急行动方案制定问题是一种典型的大规模复杂决策问题,具有非结构化的特征。对于这类问题,一方面,无法完全采用数学建模和优化方法,因为这类方法需要将复杂任务还原为大量单个行动来处理,对大规模问题,这完全不切实际;另一方面,也不能完全依赖人脑,因为在应急过程中会产生大量动态、不确定的信息,任何天才的决策者都无法及时收集、整理、分析、综合这些信息而做出选择决定。因此,要做出科学的应急决策,不但要有能够处理复杂问题的高速自动化的信息收集、处理、分析、综合的系统支持,还需要充分利用领域专家知识。

基于此,本文提出基于层次任务网络(HTN)规划的应急行动方案制定方法。首先,HTN 规划是一种基于分层分解思想动作推理方法,其解决问题的思路与人类的认知过程相符,模拟了人类决策的过程。而分层分解的思想使得 HTN 规划能够处理大规模问题,对现实问题具有较强的应用价值;同时,HTN 规划方法在任务分解的过程中能够很好地利用和描述领域知识,与应急决策的需求相互吻合。基于 HTN 规划的应急行动方案制定决策过程主要是指在突发事件发生后,应急指挥人员根据应急态势确定任务目标,以应急响应参与单位的领域知识为基础,将高层次的任务目标层层分解,成为逐渐具体化的子任务,直至形成具有可执行性的原子动作,即产生了完成任务目标的行动方案。到目前为止,HTN 规划被广泛应用于生产规划与调度、军事后勤任务规划以及航天器的规划与调度等领域,在应急管理领域的应用也已引起了越来越多的关注。

本文围绕应急行动方案制定决策问题,首先分析了应急响应决策过程,定义了这一过程涉及到的关键要素,以此为基础定义了应急行动方案制定决策问题;以此为基础分析了应急行动方案制定方法的相关研究,并提出了基于 HTN 规划的应急行动方案制定方法体系;探讨了在应急领域中 HTN 规划方法所要解决的关键科学问题;为 HTN 规划在应急领域的应用构建了较完整的理论框架;为今后的相关研究提供可借鉴的思路。

## 应急行动方案制定决策问题描述

### 1、应急响应决策过程

突发事件的发生将触发应急响应过程。根据我国的突发事件应对法,突发事件(Event)是指突然发生,造成或者可能造成严重社会危害,需要采取应急处置措施予以应对的自然灾害、事故灾难、公共卫生事件和社会安全事件。这里的“突发”并不是指灾害事故是在突然间发生的,而是指灾害要素由量变到质变突破临界值是在较短时间内发生的,具有“突发”的特点<sup>[1]</sup>。

突发事件的作用对象是承灾载体(HazardCarrier),一般包括人、物、系统(人与物及其功能共同组成的经济社会与自然系统)三方面,是突发事件应急的保护对象。承灾载体在突发事件作用下的破坏表现为本体破坏和功能破坏两种形式。承灾载体的破坏有可能导致其蕴含的灾害要素的激活或意外释放,从而导致次生衍生灾害,形成突发事件链<sup>[1]</sup>。

应急响应决策过程开始于获取信息,即对应急态势的感知,从而探查环境,寻求决策的条件。应急态势信息主要涉及突发事件本身、承灾载体、应急组织及相关资源,例如,突发事件的类型、发生的地点、严重程度、复杂程度,承灾载体的性质特征、破坏程度、承受能力、恢复能力,应急组织的完整性、合理性、处置经验,以及应急资源的数量位置等。这些信息为有效预测事件发展态势提供了重要的基础。应急态势感知是开展应急响

应决策工作的前提和基础。

根据应急态势感知信息,应急组织成员根据应急领域知识,在各成员任务目标的基础上,通过协商讨论形成应急团队认可的任务目标集合,决定了应急组织的行动方向,从而引导应急行动方案的制定。

为了完成应急任务目标,需要制定具体的行动方案。根据各成员的领域知识,对应急任务目标进行层层分解,直到能够执行的行动。制定应急行动方案的方法一方面要求在当前态势下,能够快速搜索获得行动方案,另一方面,要求能够符合应急响应过程时间资源约束以及动态性的特征的基础上,获得更好的方案。

应急行动方案确定后,将作为应急指令进行签署和发布,相关应急参与单位组织执行相关应急行动。应急执行的执行过程将充满动态不确定性,需要对执行情况进行审评并动态反馈到各级指挥部门,另外,应急行动方案的执行将作用于承灾载体,带来态势的变化,应急指挥部门将根据方案执行情况及态势变化相应地调整或重新制定应急行动方案。

图 1 描述了整个应急响应决策过程。需要指出的是,应急响应决策过程中的四个主要的决策阶段与西蒙提出的规范化决策过程相一致。其中,应急态势感知阶段获取决策所需依据的信息,对应于情报活动阶段;任务目标识别和行动方案制定阶段对应于方案设计和选择阶段;而行动方案监督执行阶段则对应于活动审查阶段。在整个过程中,应急组织是各决策环节的决策和执行主体。应急领域知识则是整个决策过程的主要依据。

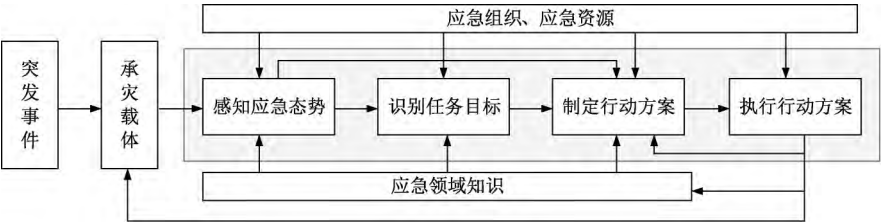


图 1 应急响应决策过程

2、关键要素

基于上述的应急响应过程的描述,我们定义了这一决策过程中所涉及的关键要素,主要包括突发事件、承灾载体、应急组织、任务目标、应急态势和应急领域知识。应急组织是应急响应决策和执行主体,突发事件发生后,相应级别的应急指挥机构需视情况设立临时的现场指挥部,对事件现场的所有应急救援工作实施统一指挥和管理,设计合理的组织结构增强各部门之间的联系,协调行动和资源。现场指挥部是在应急响应过程中,依据应急管理规章制度(如应急预案)的规定,由平时政府职能部门扮演特定层级的角色构成。任务目标是相应于具体的突发事件,根据领域知识所识别的需要完成的一系列相互关联的任务,是应急行动方案制定所针对的具体问题。应急态势描述了当前时刻受到突发事件影响的承灾载体和参与应急响应的单位(包括单位的资源情况)的状态,是制定应急行动方案所需依据的信息。应急领域知识是在处置突发事件的实践中不断累积获得的用于描述客观事实的主要概念,领域专家和决策者的认识、经验教训,规律等的综合知识,是应急指挥团队开展应急决策的基本依据,主要有应急预案、应急管理制度、标准操作程序、应急案例以及经验等几种重要载体。表 1 描述了这些关键要素的基本属性。

表 1 应急响应决策过程的关键要素

关键要素	属性
突发事件	类型: 自然灾害、事故灾难、公共卫生事件和社会安全事件等
	强度: 描述了突发事件的等级
	时间: 发生时间
	空间: 受影响的空间范围
	传播形式: 物质、能量、信息三种主要形式
	影响范围: 描述地理边界
承灾载体	受影响人群: 伤害程度、人数
	受损实体: 实体名称、实体类型、位置、损坏程度
	受影响系统: 系统类型(包括地理环境、生态系统、经济系统、网络、交通运输系统等)、破坏程度

(续表)

关键要素	属性
应急组织	<p>角色: 表示各部门在应急响应过程中所扮演的角色集合,例如现场指挥、抢险搜救、交通运输、物资发放角色等。每个角色又需要承担具体的职责。</p> <p>层级: 表示角色在应急组织中的层级</p> <p>职能部门: 表示参与应急响应的政府职能部门。各政府职能部门的属性包括: 部门名称; 部门可支配的资源实体集合,其中资源实体通过资源实体 ID、资源实体名称、资源类型、资源数量和资源位置描述; 该职能部门扮演的角色; 该部门的角色层级。资源类型包括物力资源(消耗性资源和可重用资源)及人力资源两类。</p> <p>关系矩阵: 描述了单位间的权威或平等关系</p>
任务目标	<p>任务集合: 根据领域知识识别的具体需要完成的任务目标集合,其中各项任务可以通过任务名称、任务类型(例如运输、抢险任务)、任务下达部门、任务负责部门,以及任务的资源或时间约束来描述。</p> <p>任务间的偏序关系</p> <p>时间: 标记态势发展的时间轴</p>
应急态势	<p>突发事件: 突发事件的当前状态</p> <p>承灾载体: 承灾载体的当前状态</p> <p>职能部门: 职能部门的当前状态,包括资源状态</p>
应急领域知识	应急预案、应急管理制度、标准操作程序和应急案例等

### 3、应急行动方案制定决策问题

应急行动方案制定决策问题主要是指应急决策者基于当前态势,根据应急领域知识,为完成所识别的应急任务目标集合所制定的落实到各具体职能部门和执行单位的操作层面的行动方案,描述了各具体任务的执行单位、执行时间和资源,如图 2 所示。

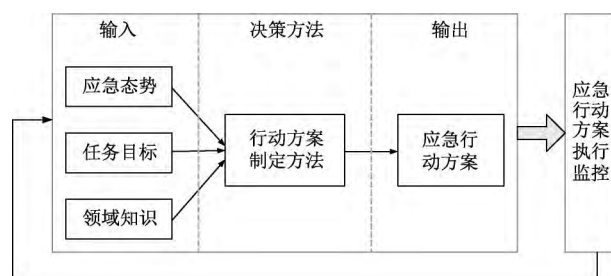


图 2 应急行动方案制定决策问题

应急行动方案制定决策问题以应急态势、任务目标和领域知识作为输入,以具体的行动方案作为输出,需要考虑应急决策环境的特殊性,并考虑方案执行过程中的动态性和不确定性。本文以应急行动方案制定方法为关注的焦点,提出基于 HTN 的应急行动方案制定决策方法体系。

## 基于 HTN 的应急行动方案制定决策方法体系

### 1、HTN 规划方法及其应用

HTN 规划以给定的初始状态、任务目标和领域知识为输入,以行动方案为输出。初始状态描述了规划初始时刻系统的状态;任务目标是指描述了应完成的任务集合及其逻辑关系的初始任务网络;领域知识包括操作符集合和方法集合,操作符描述了完成原子任务的动作执行的前提条件及其对系统状态产生的执行效果,方法描述了对任务的分解途径,包括其前提条件和子任务。输出的行动方案描述了完成任务目标的动作序列。HTN 规划器在初始状态下,根据方法集合,对初始任务网络进行分解,直到任务网络中只含有可由实例化操作符实现的原子任务为止。

在实际应用中,任务规划往往是一个动态的过程。它应该能够描述规划和动作的交互,具有规划监控、规划修改和重新规划的机制。这种情况下的 HTN 规划的系统模型应包括 HTN 规划器、控制器和系统环境三个部分,如图 3 所示。其中,控制器负责执行并监控方案的实施,系统环境受动作执行和外部事件的影响,控制器向规划器返回规划的执行状态以便进行动态的规划。

HTN 规划的思想最初是 Sacerdoti<sup>[2]</sup> 在 1975 年的研究中提出并发展而来的, Sacerdoti<sup>[2]</sup> 和 Tate<sup>[3]</sup> 的有关

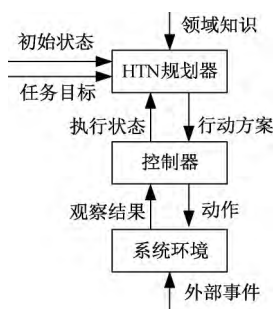


图3 HTN规划系统模型

规划空间规划方面的研究,使人们的视线从状态空间规划技术转移到规划空间规划技术中来,其有关任务分解和分层规划的思想可看作是后来 HTN 技术的萌芽。1994 年 Erol 等提出了 HTN 规划的形式化模型,分析了它的复杂性,证明了其可靠性和完备性,并将其与 STRIPS 规划进行了比较,说明了 HTN 规划的优点<sup>[4]</sup>。1998 年 Nau 等提出了一种全序规划控制策略,使 HTN 规划在众多应用领域实现了更好的效果<sup>[5]</sup>。1998 年 Tsuneto 等分析了采用外部前提条件方式的优点,它能够在不破坏模型完整性的情况下提高实际应用的效率,为 HTN 规划器的设计提供了坚实的理论基础<sup>[6]</sup>。在众多研究的基础上,研究人员已经开发了多个 HTN 规划器,如最早的 HTN 规划器系统之一 Nonlin<sup>[3]</sup>,第一个被证明是可靠且完备的规划系统 UMCP<sup>[7]</sup>,以及后来的 SIPE-2、O-Plan2、SIADEx 和 SHOP2 等。

其中,在应急相关领域,美国海军研究实验室开发的 HICAP( Hierarchical Interactive Case-Based Architecture for Planning) 将 SHOP 与案例推理模块 NaCoDAE<sup>[9]</sup> 相结合,用于生成危急情况下的人员疏散方案<sup>[8]</sup>。SHOP2 还被成功应用于美国海军研究实验室开发的 AHEAD( Analogical Hypothesis Elaboration for Activity Detection) 系统<sup>[10]</sup>,该系统用于分解和评价恐怖威胁,根据 HTN 的领域描述, AHEAD 调用 SHOP2 生成一定假设条件下的行动序列, SHOP2 会将生成的行动序列与外部证据库中的信息进行比对,检验证据与 SHOP2 生成的行动是否吻合,从而判定危险程度。SIADEx 是专门为森林火灾制定行动方案的规划系统,主要包括规划、本体、外部数据与应用接口、用户接口、监控器和 web 中心等模块<sup>[11-13]</sup>。

## 2、基于 HTN 的应急行动方案制定方法

图4描述了基于 HTN 的应急行动方案制定决策方法体系。该方法体系的各环节对应于应急响应过程中的各决策阶段。本文关注的焦点是基于 HTN 的应急行动方案制定方法,态势信息、领域知识、任务目标是基于 HTN 的应急行动方案制定方法的输入,对所制定方案的执行情况的监控及反馈则充分体现了应急过程的高度动态性和不确定性的特征。

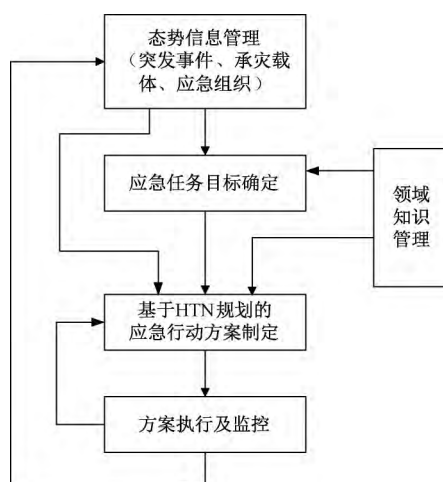


图4 基于 HTN 的应急行动方案制定决策方法体系

应急态势信息是为应急行动方案制定所获取的当前突发事件、承灾载体以及参与单位和资源的状态信息,是决策的基础。而领域知识则是 HTN 生成科学有效的应急行动方案的依据,以 Domain 文件的形式作为

规划器的输入。因此,及时、全面的应急态势信息和准确、完备的应急领域知识是基于 HTN 制定应急行动方案的重要基础。应将知识管理理念引入应急领域,在指导和规划应急管理与应急决策系统建设的同时,实现对应急态势信息和应急领域知识的管理。

目标识别本身对应急决策具有重要的意义并充满挑战。在应急决策过程中,参与单位往往根据局部的应急态势进行分布式决策,制定各自的应急目标。各部门的局部目标间以及局部目标与动态应急态势产生的目标间往往具有复杂的相互关系如促进关系、依赖关系和阻碍关系等。如果各部门间缺乏有效的沟通和协调,无法识别目标间的促进关系,则降低了提高应急决策质量的潜在可能性;无法识别目标间的依赖关系,当目标间的依赖关系推迟到应急方案执行过程中暴露时,将对其他部门产生期望外的行为,对其自身应急目标的实现造成“计划外”的干扰;目标之间的阻碍关系产生目标冲突,如不能及时消解冲突将阻碍了全局目标的实现,这是最坏、最严重的情况。因此,需要研究如何在应急决策个体自主制定局部目标的基础上,协调确保全局目标的一致和优化。

在确定任务目标的前提下,HTN 规划方法可基于领域知识对任务目标进行逐层分解,获得可执行的动作序列。然而,应急领域的特殊性对 HTN 规划方法提出了新的要求。应急决策的核心问题是在应急态势动态变化和应急资源稀缺等应急响应特殊约束条件下,如何保证参与应急响应的多个部门协调和快速地制定应对方案,并根据动态变化的应急态势对应对方案进行实时调整,有效组织和实施突发事件应急处置工作。

### 基于 HTN 的应急任务规划方法关键问题

#### 1、HTN 规划中的时间管理

应急行动方案是由多个应急响应实体共同协作执行的应急任务组成,且应急任务之间具有复杂时态约束关系。这使得应急行动方案制定和执行变得更为困难。运用 HTN 规划解决应急任务规划问题必须研究其处理时间约束的机制。

应急任务之间存在定量和定性的时间约束条件。应急响应过程涉及多个应急响应实体执行的相互依赖的应急任务,导致应急任务之间存在顺序或同步关系。当无法描述应急任务之间具体的定量时间约束关系时,应急任务之间定性的时间依赖关系可用偏序关系来表示<sup>[14]</sup>。应急行动需由应急响应实体在时间区间内通过执行多个步骤完成,具有时间持续性特征。各部门的应急行动之间也会存在时间依赖关系和并发执行关系。因此,建立应急行动之间的并发控制机制是保证参与应急响应的多个实体实现应急行动协调开展的基本手段。应急响应过程中应急组织目标具有时限条件。如果应急行动方案制定过程时间过长,将导致该方案执行时间减少,甚至造成方案不可行。因此,要求应急响应组织快速制定应急行动方案,并组织实施。然而,应急行动方案制定过程涉及大量的应急任务和行动,搜索空间大,计算时间长。为适应实时、动态和复杂的决策环境,应急组织需要根据动态变化的应急态势快速得到可行的应急行动方案,并不追求最优方案。

#### 2、HTN 规划中的资源管理

资源受限问题是突发事件应急响应过程中所关注的一个关键问题。在实际的应急决策中,任务分解与资源调度过程相互耦合。不同的应急任务完成方式提出了不同的资源需求,而资源状态又决定了应急指挥人员选择应急目标、分解任务的决策行为。针对应急决策的这种特征,应急任务规划不应将规划分析和资源调度分离成两个独立过程<sup>[15]</sup>。但是,由于 HTN 规划采用了任务网络来描述动作推理过程,难以直接控制资源状态的变化以有效的处理资源受限的应急决策问题<sup>[16]</sup>。因此,必须研究 HTN 规划中的资源管理问题,使 HTN 规划能够直接处理资源调度,这样 HTN 规划才有可能解决实际应急决策问题。

要使 HTN 规划能够直接处理资源问题,首先要针对应急资源的多样性要求,实现 HTN 规划模型具有资源表达能力;由于规划模型增加了资源表达新的属性,在 HTN 规划的任务分解和状态空间搜索过程中如何实现资源推理是一个关键问题;另一方面,由于需要对不同资源的表达,又要考虑时态特征,使规划问题的搜索空间大大增加,会使 HTN 规划的求解时间增加,可考虑约束可满足技术来加速资源推理过程。因此,要实现 HTN 规划能直接处理资源问题,应要解决应急资源描述、资源推理和加速问题。

#### 3、多部门协作任务规划方法

应急响应工作往往涉及多个地区的多个政府部门,需要多个部门共同协作完成。其应急决策也涉及多个

部门,需要共同参与完成决策方案制定,那么应急决策规划是典型的分布式协作规划。在制定应急响应任务时,应急决策规划并不是一个静态的运用协作规划方法给出协同的任务方案的过程,然后由不同部门分头执行。实际上,应急态势信息瞬息万变,规划和执行过程中均会产生部门方案的调整,由于方案之间可能存在依赖关系<sup>[17]</sup>,这些调整会使不同部门本地方案造成冲突,无法按原有规划正常执行,这就需要用合理的协调机制在规划和执行过程中随时能调整各自方案使得全局方案能够正常实现。因此,应急任务中的协作规划应是一个动态过程,而且在各个部门进行规划过程中必须考虑协作问题,而不是各自完整规划出本地方案后再进行协调,才可能随时得到完整可行的全局应急方案。

传统的协作规划一般首先由不同部门规划出完整本地方案,随后通过信息交互确认彼此方案间的依赖关系,并利用协调机制处理依赖关系,最后各单位根据协调结果调整各自规划方案使得全局方案完整可行,这种协作方法可认为是规划结果的协作。在应急任务规划中,各个部门进行规划过程中应要随时考虑协作问题,这就要设计一种新的协作规划框架,将协调依赖关系的协作过程嵌入 HTN 规划器的规划过程,来实现规划过程的协作。在新的协作规划框架中,为了使规划器能够在规划过程中展开协作处理依赖关系,需要研究适用于规划过程中使用的解决冲突关系的协调机制,以实现在与其他规划器作协调的过程中确认冲突的产生并有效消解方案间的冲突。另一方面,在应急决策规划中,应急资源协作是一个经常遇到的关键问题,需要根据消解冲突的协调机制,研究应急资源的协同方法。

#### 4、动态应急决策环境下的 HTN 规划

动态性与不确定性是应急决策的两大主要特征,一方面,随着应急态势的演化,新的事件不断产生,另一方面,应急行动方案执行过程中充满不确定性,与方案预计的执行情况产生出入。而传统的 HTN 规划往往只考虑静态的决策问题,较少考虑应急方案的实际执行过程以及外部事件发生对应急方案的影响。因此,针对应急决策过程,需要研究 HTN 规划在动态应急决策环境下的应用。

对 HTN 规划来说,应急决策环境信息体现在应急目标信息以及应急态势信息两个方面。应急目标信息是应急行动完成后预计达到的最终状态集,而应急态势信息包含了环境信息、资源等信息,是应急行动的初始状态集。在执行过程中,可能出现两种常见情形:其一,实际的任务执行时间或资源消耗情况与应急行动方案有所偏差,导致时间和资源约束不满足;其二,在执行过程中出现新的外部事件,而外部事件对当前执行任务有所影响。针对第一种情况,需要加以判断,如果执行过程带来的时间和资源与原方案的差异在约束范围内,则对方案进行调整,继续执行;如果超出约束范围,则取消未执行任务,根据新的应急决策环境,重新设定应急目标并获取新的应急环境属性值,重新规划方案。而第二种情况下,新的外部事件将触发重新构建规划问题,制定方案。

## 结 论

本文围绕应急行动方案制定决策问题,提出基于 HTN 的应急行动方案制定决策方法体系。作为典型的人工智能规划方法,HTN 规划方法通过分层分解的推理思想能够有效处理大规模的规划问题,并且在分解过程中充分利用领域知识,与应急决策的决策过程吻合。然而,应急决策的领域特殊性对 HTN 规划提出了新的挑战,本文正是在分析和定义应急行动方案制定决策问题的基础上,着重探讨了考虑应急领域特征情况下 HTN 规划需解决的关键问题。为 HTN 在应急领域的应用构建了较完整的理论框架,为今后的相关研究提供可借鉴的思路。

#### 参考文献:

- [1] 范维澄,刘奕.城市公共安全体系架构分析[J].城市前沿管理,2009,11(5):38-41
- [2] Sacerdoti E. The Nonlinear Nature of Plans [C]. Proceedings of the 4th International Joint Conference on Artificial Intelligence, Tbilisi, Georgia, USA, 1975
- [3] Tate A. Generating Project Networks [C]. Proceedings of the 5th International Joint Conference on Artificial Intelligence, Cambridge, Massachusetts, USA, 1977
- [4] Erol K., Hender J., Nau D. S. Semantics for Hierarchical Task Network Planning [R]. Technical Report, CS-TR-3239, UMIACS-TR-94-31, ISR-TR-95-9, University of Maryland, March 1994

- [5] Nau D. , Smith S. , Erol K. Control Strategies in HTN Planning: Theory Versus Practice [C]. Proceedings of the 15th National Conference on Artificial Intelligence , American Association for Artificial Intelligence , American Association for Artificial Intelligence , 1998
- [6] Tsuneto R. , Hendler J. , Nau D. Analyzing External Conditions to Improve the Efficiency of HTN Planning [C]. Proceedings of the 15th National Conference on Artificial Intelligence , American Association for Artificial Intelligence , 1998
- [7] 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 Systems , Chicago , 1994
- [8] Munoz-Avila H. , Aha D. W. , Breslow L. , Nau D. HICAP: An Interactive Case-Based Planning Architecture and its Application to Noncombatant Evacuation Operations [C]. Proceedings of the 16th National Conference on Artificial intelligence , American Association for Artificial Intelligence , 1999
- [9] Breslow L. , Aha D. W. NaCoDAE: Navy Conversational Decision Aids Environment [R]. Technical Report AIC-97-018 , Navy Center for Applied Research in Artificial Intelligence , Washington D.C. , 1998
- [10] Murdock J. W. , Aha D. W. , Breslow L. AHEAD: Case-Based Process Model Explanation of Asymmetric Threats [R]. Technical Report , AIC-02-203 , Navy Center for Applied Research in Artificial Intelligence , Washington D.C. , 2002
- [11] Asunción M. , Castillo L. , Fdez-Olivares J. , et al. SIADEX: An Interactive Knowledge-Based Planner for Decision Support in Forest Fire Fighting [J]. AI Communications , 2005 , 18( 4) : 257-268
- [12] Asunción M. , Castillo L. , Fdez-Olivares J. , et al. SIADEX: A Real World Planning Approach for Forest Fire Fighting [C]. Proceedings of the 2nd Starting AI Researchers' Symposium , Valencia , Spanish , 2004
- [13] Castillo L. , Fdez-Olivares J. , Garcia-Pérez O. , et al. Plan Design , Execution and Monitoring for Crisis Episodes: the SIADEX Environment [C]. Proceedings of the 16th International Conference on Automated Planning and Scheduling , The English Lake District , UK , 2006
- [14] Siebra C. Planning Requirement for Hierarchical Coalitions in Disaster Relief Domains [J]. Expert Update , 2005 , 8( 1) : 20-24
- [15] Smith D. E. , Frank J. , Honsson A. K. Binding the Gap Between Planning and Scheduling [J]. Knowledge Engineering Review , 2000 , 15( 1) : 47-83
- [16] Nau D. , Tsz-Chiu A. , Okhtay I. SHOP2: An HTN Planning System [J]. Journal of Artificial Intelligence Research , 2003 , 20( 12) : 379-404
- [17] Decker K. S. TAEMS: A Framework for Environment Centered Analysis and Design of Coordination Mechanisms [M]. In G. O' Hare and N. Jennings ( editors) , Foundations of Distributed Artificial Intelligence , Chapter 16. Wiley Inter-Science , 1996

### *Emergency Response Action Plan Development Based on Hierarchical Task Network Planning*

*Tang Pan<sup>1</sup> , Qi Chao<sup>2 3 4</sup> and Wang Hongwei<sup>2 3 4</sup>*

( 1.School of Public Administration , Jinan University , Guangzhou 510632;

2.School of Automation , Huazhong University of Science and Technology , Wuhan 430074;

3.Key Laboratory of Image Processing and Intelligent Control of Education Ministry , Huazhong University of Science and Technology , Wuhan 430074;

4.Hubei Collaborative Innovation Center for Early Warning and Emergency Response Technology , Wuhan 430070)

**Abstract:** Emergency response action plan development is one of the most critical issues in the emergency response. The emergency response commander is required to analyze the complex situation , to choose and reconstruct the emergency domain knowledge from a number of involved agencies and to develop an efficient action plan to complete a set of event objectives. This research analyzes the emergency decision-making process responding to catastrophes such as natural disasters or extreme events. After essential factors involved in the process are defined , the decision-making problem of emergency action plan development is further defined. Then the methodology of emergency action plan development based on Hierarchical Task Network ( HTN ) planning is proposed. This paper further discusses the research opportunities of applying HTN planning to emergency management , dedicating to constructing a theoretical framework of the methodology of HTN-based emergency response action plan development for researchers.

**Key words:** emergency response decision-making , emergency response action plan development , hierarchical task network planning