

基于DCSP的煤矿应急救援资源调配方法

李卫 张自力 吴华君

(西南大学智能软件与软件工程重点实验室 重庆400715)

摘要 在大规模群体突发事件发生后,如何实时及有效地调配资源,是保障应急救援快速实施的关键。以煤矿应急救援为背景,探讨合适的资源调配方法。分布式约束满足问题(DCSP——Distributed Constraint Satisfaction Problem)擅于表示及求解分布式环境下以协作性为主的问题,是一种解决具有信息分布、需求随环境动态变化等特点的资源调配问题的有效方法,而煤矿应急救援问题正好具有这样的特征。因此,采用DCSP方法来解决煤矿应急救援中的资源调配问题,抽取并构建了煤矿应急救援资源调配的模型,讨论了Agent模型和约束模型的定义,改进了MAWS(MAWS——Multiple Asynchronous Weak-commitment Search)算法。经实验验证,采用DCSP方法可在事故发生后的较短时间内做出有效的资源调配决策,减少资源送达到事故点的时间,为应急救援争取了大量救援时间,从而减少了煤矿事故发生后的人员伤亡和经济损失。

关键词 煤矿,应急救援,资源调配,Agent,分布式约束满足问题

中图分类号 TP311 **文献标识码** A

DCSP-based Resource Allocation Approach for Emergency Rescue in Coal Mine

LI Wei ZHANG Zi-li WU Hua-jun

(Key Laboratory of Intelligent Software and Software Engineering, Southwest University, Chongqing 400715, China)

Abstract How to allocate resources efficiently is pivotal for emergency rescue after large-scale incidents occurred. This paper discussed the appropriate resource allocation approach for emergency rescue in coal mine. Distributed constraint satisfaction problem (DCSP), an effective approach to deal with resource allocation, is suitable for showing and solving collaborative problems in distributed situation. This approach features in information distribution, demands change with dynamic environment, which are also the characteristics of emergency rescue in coal mine. This paper adopted DCSP approach to solve resource allocation of emergency rescue in coal mine, drew and formulated DCSP model, as well as defined Agent and Constraint model, and improved Multiple Asynchronous Weak-commitment Search (MAWS) algorithm which is used to solve DCSP. The experiment results testify that DCSP approach is effective and feasible to solve resource allocation for emergency rescue in coal mine.

Keywords Coal mine, Emergency rescue, Resource allocation, Agent, Distributed constraint satisfaction problem

1 引言

我国是世界上最大的产煤国,2009年总产煤量占世界总量的37%左右,煤矿事故发生率却是美国等国的30~50倍,事故死亡人数占世界煤矿死亡总人数的70%左右^[1]。我国煤矿应急救援存在管理机制薄弱、应急装备数量不足、专业救援队伍和统一信息平台缺乏等问题^[4],如何在有限的条件下有效地调配资源是保障煤矿应急救援快速实施,减少煤矿事故人员伤亡和经济损失的关键。经深入国家矿山救护基地调查研究,我国煤矿应急救援资源调配方式是电话通信、口头协调模式,即灾害发生后,下级向上级电话提出物资需求申请,上级勘察、搜索资源并下达命令。此调配方式耗时费力,严重地影响了救援时机。因此,研究煤矿应急救援资源及时、合理

的调配方法尤为重要。

应急救援资源调配一般可转化为网络最短路径问题和物资数量供求约束下供应点的选点问题来求解,Jan等人结合变邻域搜索算法和禁忌搜索算法的改进算法来求解定位-路径选择问题^[12];唐连生等人提出了一种突发事件物流配送多目标优化问题的蚁群聚类优化算法^[5];何建敏等人提出应急物资供应点的选点问题,建立以应急开始时间最早为目标数学模型及解法^[2];黄金虎建立以应急响应开始时间最早的带时变供应约束的物资分配决策模型,以求带时变条件约束的物资分配优化问题^[3]。

以上的资源调配方法都是建立在数学规划模型的基础之上,应用于我国煤矿应急救援领域具有明显的局限性;在建立模型的同时固定了变量个数,难以满足应急救援中资源需求

到稿日期:2010-06-18 返修日期:2010-11-25 本文受重庆市科技攻关计划项目(CSTC,2009AC2174)资助。

李卫(1985-),女,硕士生,主要研究方向为Agent计算与人工智能、分布式约束满足问题、物联网,E-mail:liwei116@swu.edu.cn;张自力(1964-),教授,硕士生导师,主要研究方向为多Agent系统、混合智能系统、数据挖掘;吴华君(1986-),男,硕士生,主要研究方向为Agent计算与人工智能、无线传感网、物联网。

随灾害环境动态变化的特性和要求;在决策前收集所有信息进行集中式的调配,难以支持由于煤矿应急救援统一信息平台的缺乏而形成的分布式环境。

因此,本文采用 DCSP 方法来解具有信息分布、需求随环境动态变化等特点的煤矿应急救援资源调配问题,构建煤矿应急救援资源调配模型,建立资源调配动态环境的空间分散的 Agent 模型,抽象相应的变量,给出政策约束、组织约束、规定约束以及资源约束等约束的定义,改进 MAWS 算法,通过对模型的随机数据和真实案例的实验验证 DCSP 方法应用于煤矿应急救援资源调配的可行性和有效性。

2 分布式约束满足问题

DCSP 由 Yokoo 提出^[6],是一种适合解决具有信息分布、资源受限、群体决策、环境动态变化等特点的资源调配问题的新方法。DCSP 是解决资源限制与实时需求之间矛盾的有效方法,因为 DCSP 是变量和约束都分布于空间分散的 Agents 中的约束满足问题,DCSP 的约束可很好地表示 Agent 内部及 Agents 之间的各种限制,DCSP 的算法结构可局部化 Agents 间的通信,所以,很多以协作性为主的多 Agents 系统中的应用问题都可形式化为 DCSP 问题。目前 DCSP 已被应用到分布式传感网络^[10,13]、分布式资源配置^[9]及分布式日程安排^[13,14]等问题中。

DCSP 可被形式化定义为^[7,8,11]: n 个 Agents 为 A_1, A_2, \dots, A_n , m 个变量为 V_1, V_2, \dots, V_m , m 个变量的值域为 D_1, D_1, \dots, D_m , t 个约束为 C_1, C_2, \dots, C_t ; 每个 Agent 有一个或多个变量,每个变量属于一个 Agent,表示为 $\text{belongs}(V_j, A_i)$; 约束包括 Agent 内部约束和 Agents 间的约束, A_i 知道约束关系 C_k 表示为 $\text{Known}(C_k, A_i)$ 。

DCSP 可很好地表示与求解煤矿应急救援资源调配问题。采用 DCSP 方法来解煤矿应急救援资源调配问题,就是要把煤矿应急救援中资源调配各问题映射到 DCSP 形式化框架中,并抽取相应的 Agent 模型、变量模型和约束模型。其中,煤矿应急救援中的供应点和事故点对应 DCSP 中的 Agent; 供应点及事故点的资源对应 Agent 中的变量; 资源变量在供应点存储的数量对应变量的域; 资源与资源之间、资源与供应点之间、供应点与供应点之间的各种限制表示为约束条件。

3 煤矿应急救援资源调配的 DCSP 模型

依据 DCSP 的定义,煤矿应急救援资源调配的 DCSP 模型可形式化为四元组 $\langle A, V, D, C \rangle$ 。其中, A 表示事故点 Agent 和供应点 Agent 的集合; V 表示资源的集合; D 表示资源值域的集合; C 表示所有约束的集合。下面将依次对 DCSP 模型中的 Agent 模型、变量模型和约束模型进行定义。

3.1 Agent 模型

煤矿应急救援调配中最重要的资源是救护队和各种救护装备,故本文讨论救护队和救护装备两类资源的调配。救护基地拥有救护队和各种救护装备等救援资源,具有自治性和自主调配资源能力,是煤矿应急救援资源的供应点,因此可被定义为煤矿应急救援资源调配的 DCSP 模型中的 Agent,表示为 SAgent。事故点是拥有一定的资源,具备自主经营和资源申请能力的资源需求点,故可定义模型中的 Agent 为 DA-

gent,则 $\text{Agent} = \{ \text{DAgent}, \text{SAgent}_1, \dots, \text{SAgent}_{m-1} \}$ 。

在 DCSP 中,变量、约束分布于独立的 Agent 中, Agent 通过消息的发送和接收来协商,构建 Agent 通信模型实现 DCSP 的动态协商是求解 DCSP 的关键。本文依据煤矿应急救援资源调配的动态性特点构建 DAgent 和 SAgents 的通信模型,如图 1 所示。

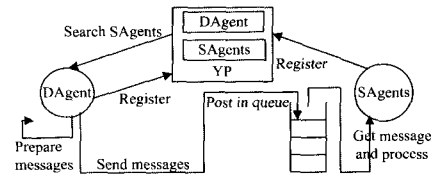


图 1 DAgent 与 SAgents 的通信模型

此模型通过注册、发送消息、协商来满足煤矿应急救援资源调配的供应点动态性、资源动态性及资源需求动态性:所有 Agents 都在黄页上注册,DAgent 可通过黄页服务动态地找到 SAgents; DAgent 与 SAgents 通信,判断 SAgents 拥有的即时资源信息;通过不同时间点发出资源申请的消息进行协商,及时地为煤矿应急救援资源调配作决策。

3.2 变量模型

本文讨论煤矿应急救援过程中最重要的资源:救护队和救护设备,故相应的资源变量有:

r : 救护人员及必备的基本设备和救护设备,每个单位 r 代表一个救护小队。

E : 救援设备,如多功能测定仪、大型水泵等各种设备, $E = \{ e_1, \dots, e_{m-1} \}$, 则 $V = \{ r, e_1, \dots, e_{m-1} \}$ 。

3.3 约束模型

依据我国管理政策及煤矿应急救援的环境,煤矿应急救援资源调配涉及到的约束条件有政策约束 C_1 , 组织约束 C_2 , 规定约束 C_3 及资源约束 C_4 , $C = \{ C_1, C_2, C_3, C_4 \}$, 其中 C_1, C_2, C_3 是 Agents 之间的约束, C_4 是 Agent 内部的约束。

(1) 政策约束

应急救援响应级别由事故的损坏程度决定,救护基地的资质级别代表救援能力,不同响应级别的事故调配不同资质级别的救护基地。设应急救援响应级别为 $I = \{ I, II, III, IV \}$, $E(i)$ 表示第 i 级灾害响应级别对应的救护基地的资质级别,则 C_1 表示为: $E(i) = \{ 1, \dots, i \}, 1 \leq i \leq 4$ 。

(2) 组织约束

救护基地的资质级别代表救援能力和救援水平,级别不同,拥有的救援资源的种类和数量标准就不同。救护基地为相应响应级别的事故提供资源支持,资源分配的规则是由上级向下级派发,下级不可向上级调配资源,如图 2 所示。

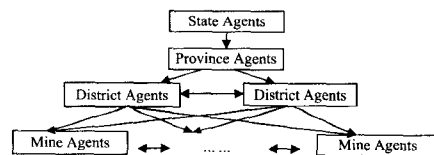


图 2 煤矿应急救援资源调配组织结构

设 $S(i)$ 代表第 i 个级别的 SAgent 物资存储量,即资质级别高的 SAgent 只能向资质级别低且资源少于自身存储量的 SAgent 分配资源。则 C_2 表示为: $i \rightarrow j$, iff, $(i < j) \&\& (S(i) > S(j))$ 。

(3) 规定约束

煤矿应急救援资源调配的第一要任是在尽可能短的时间内将所需资源送达到事故点。假设资源调配的车辆足够、交通无障碍。设 DAgent 急需的资源为 $\{v_1, v_2, \dots, v_m\}$, s_i 表示 SAgent $_i$ 到 DAgent 的距离, γ_i 表示 SAgent $_i$ 选择运输的交通工具具备的速度, Θ_j 表示第 j 种物资的调配方案, X_{ij} 代表 SAgent $_i$ 提供 DAgent 的第 j 种资源的数量。那么, 限制资源最短时间送达目的地的约束 C_3 表示为:

$$\Theta_j = \{(SAgent_i, X_{ij}), \dots, (SAgent_{n-1}, X_{(n-1)j})\};$$

$$\Theta = \{\Theta_1, \Theta_2, \dots, \Theta_m\};$$

$$T(\Theta) = \sum_{j=0}^m (\min(\frac{s_i}{\gamma_i}));$$

式中, $i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, m$ 。

(4) 资源约束

不同资质级别的救护基地拥有不同的资源标准。资源有损坏折旧、动态调配、购买新资源等变化, 因此, Agents 必须通过即时通信来获取资源信息。资源调配的前提是供应点必须拥有该资源且即时存储量大于 0, 即 SAgent $_i$ 向 DAgent $_k$ 调配 j 资源必须满足其存储量大于 0, 设 S_{ij} 表示 SAgent $_i$ 存储第 j 种资源的数量。那么, 约束 C_4 可表示为: $i \rightarrow k$, iff, $S_{ij} > 0$ 。

4 MAWS 算法的改进

煤矿应急救援资源调配涉及多资源的调配, 属于 DCSP 的多局部变量问题的求解。处理多局部变量的 DCSP 算法有: 按照 Agent 的顺序获取 Agent 内部的局部解, 再将问题形式化为 Agent 与变量一对一模式的 Agent-ordering AWS 算法; 为每个 Agent 创建多个虚拟 Agents 使问题形式化为 Agent 与变量一对一模式的 Variable-ordering AWS 算法; 利用变量顺序解决多局部变量问题的 MAWS 算法^[7]。文献[8]通过图染色实验比较了这几种算法, 证明处理多局部变量的 DCSP 问题, MAWS 算法在性能上要优于其他算法, 故本文采用 MAWS 算法作为基础。

MAWS 算法在 AWS 算法基础上引入局部变量的优先级; MAWS 算法随机产生变量的优先顺序, DAgent 依据优先级向其他 Agent 发送请求消息; DAgent 接收到 SAgent 返回的消息时, 对返回的消息内容进行约束冲突判断; 通过最小冲突启发机制来降低不当赋值。

MAWS 算法尽管能较好地解决 DCSP 的多局部问题, 但仍然无法满足煤矿应急救援资源调配的实际问题, 因为实际问题需考虑资源优先性和约束优先性问题。资源优先性问题体现在不同性质的灾害事故对于资源的需求程度不一样, 故不能随机决定资源优先级, 更不能以某种方式限定资源优先性。约束的优先性问题体现在政策约束和组织约束属于应急救援体系的政策规定, 其优先级高且不属于最小冲突启发机制的范畴, 即赋值一旦不满足这两种约束的任何一个约束, 都将被淘汰。因此本文对 MAWS 算法作如下改进:

(1) 变量优先级动态设置: 根据事故的性质和对资源的重要程度动态设定资源优先级。

(2) 在检查赋值一致性时引入约束条件优先级机制: 设政策约束和组织约束优先级最高也最严格, 当赋值满足这两个约束时, 就引入最小冲突启发机制进行判定。

改进的 MAWS 算法包括需求初始化、发送需求消息、接收赋值消息、检查一致性、改变值及优先级、回溯等工作, 其算法步骤如表 1 所列。

表 1 改进的 MAWS 算法

input: agent_view(lever, v_i , d_i , priority)
output: $\Theta = \{\Theta_1, \Theta_2, \dots, \Theta_m\}; \Theta_j = \{(SAgent_i, X_{ij}), \dots, (SAgent_n, X_{nj})\}$
1. agent_view(lever, v_i , d_i , priority) initialization
2. do send agent_view(i) to all SAgents
3. receive ok(id, v_i , d_i , s , lever, priority)
4. do ok \rightarrow current_view; check_current_view
5. if C_1 or C_2 violated, end do
6. else select $d \in D_i$, where current_view and d are consistent, do $d \rightarrow$ result_view end do
7. if no value in D_i is consistent with current_view
8. create a nogood \rightarrow agent_view(i), broadcast to other agents, turn to step3
9. while agent_view == null, end do

5 实验与分析

基于 DCSP 的煤矿应急救援资源调配, 是通过 Agents 间的通信来协作求解调配方案的方法, 实验涉及 Agent 的创建和设计, 本文采用 JADE 平台^[15]从两方面对实验进行设计。

• 验证改进的 MAWS 算法求解 DCSP 模型的可行性: 用模型生成的随机数据进行实验, 通过固定资源个数增加供应点个数和固定供应点个数增加资源个数两种方式进行测试, 如果在增加供应点或资源数量的条件下, 实验都能在合理的时间范围内获得资源调配方案, 且多次实验的最大决策时间少于传统决策时间, 我们就认为改进的 MAWS 算法求解 DCSP 模型是可行的。

• 验证 DCSP 方法应用于煤矿应急救援资源调配实际问题的有效性: 将 DCSP 方法应用于某煤矿的具体实例, 比较实验方法与实际方法的调配方案、调配决策时间及资源送达时间, 如果实验获得资源调配方案的决策时间少于案例实际决策时间, 且依据实验获得的调配方案, 能在较短时间内将资源送达到事故点, 我们就认为 DCSP 方法应用于煤矿应急救援资源调配是有效的。

5.1 模拟实验

实验创建 DAgent 和 SAgent 两类 Agents。DAgent 设置 4 个主要的类: agent_view, current_view, result_view 和 nogood, 其中 agent_view 为事故点所有的资源申请, agent_view(i) 为第 i 个资源的申请, current_view 为当前赋值 (供应点、资源种类、距离、供应数量), result_view 为某个调配方案 (供应点、供应数量), nogood 为值改变后的资源申请 (灾害级别、资源种类、资源数量、优先级); SAgent 设置 ok 类, ok 为供应点拥有的资源 (供应点、资源种类、存储量、离事故点距离、资质级别、优先级)。实验的通信通过发送消息来实现, 任务的执行通过创建 Behaviour 来实现, 具体步骤如表 1 所列, 下面分别用两种方式进行测试。

(1) 单变量多 Agents 的资源调配实验

DAgent 的变量唯一, SAgent 数量和范围逐渐增加, 每增加 1 个 SAgent, 进行 20 组随机数据的实验测试, 求解调配方案所耗的时间曲线如图 3 所示, 横坐标为 Agents 个数, 纵坐标为时间(ms)。

(2) 多局部变量多 Agents 的资源调配实验

SAgents的个数固定为5,DAgent的变量从1增到5,每增加DAgent中的1个变量,进行20组随机数据的实验测试,求解调配方案所耗的时间曲线如图4所示,横坐标为局部变量个数,纵坐标为时间(ms)。

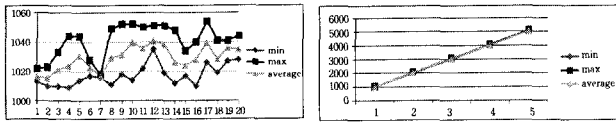


图3 单变量多Agent的应急救援资源调配时间曲线 图4 多变量多Agent环境下的应急救援资源调配时间曲线

(3)结果分析

图3示出求解资源调配的时间在(1010~1060)ms波动,其所耗时间趋于平稳,说明改进的MAWS算法求解资源调配问题不会受供应点数量的影响。图4显示改进的MAWS算法求解资源调配方案所耗时间随需求资源的增多而增多,且幅度为1000ms左右,这是由实验设计的等待时间产生的,因为在分布式环境下,消息的发送和接收受网络因素的影响,需设置等待时间来接收延迟消息,本实验设置延迟等待时间为1000ms。图3和图4求解资源调配方案所耗的时间远少于1min,说明改进的MAWS算法是稳定的。据实地调查研究,传统决策最少所耗的时间为2min,图3和图4求解资源调配方案所耗的时间皆远少于最少传统决策时间,说明改进的MAWS算法求解基于DCSP方法的资源调配问题是可行的。

5.2 实例分析

(1)事故描述

2008年3月20日,某煤矿发生Ⅲ级煤与瓦斯突出事故。事故点所属区域有2个Ⅲ级救护基地和1个Ⅳ级救护基地,分别为SAgent1,SAgent2和SAgent3,其中SAgent3是事故点集团公司救护队。事故点所属省有2个Ⅰ级救护基地和1个Ⅱ级救护基地,分别为SAgent4,SAgent5和SAgent6。“320”煤与瓦斯突出事故实际资源调配方案如表2所列。

表2 “320”煤与瓦斯突出事故资源调配方案

时间	事件	调配方案	到达时间
3.20,22:37	Ⅲ级煤与瓦斯突出	调配SAgent3,1	3.20,22:53
3.20,22:52	Ⅲ级煤与瓦斯突出	调配SAgent2,1	3.21,00:20
3.21,02:20	瓦斯浓度突然升高	无	无
3.21,09:30	事故升级为Ⅱ级	调配SAgent4,1	3.21,12:30

(2)参数设置

资源到达的时间间隔为资源调配决策时间、出动时间、车辆运行时间之和。救护队出动时间为15min。设车速均为40km/h。资源申请参数表示为(3,r,2)。各救护基地到事故点的实际距离分别为4km,14km,1km,49km,118km,158km,救护基地SAgent参数表示为资质级别、资源、数量、离事故点的距离。此事故只需调配救护队,故依救护基地实际拥有资源的情况,设置参数如表3所列。

表3 各救护基地参数

供应点	SAgent1	SAgent2	SAgent3	SAgent4	SAgent5	SAgent6
参数值	3,3,4	3,3,14	4,1,1	1,12,49	1,12,118	2,9,158

(3)DCSP方法与实际调配方法的比较

采用DCSP方法对“320”煤与瓦斯突出事故的资源调配

进行实验。实际的煤矿应急救援资源调配是电话通知、口头协调的方式,且少有研究者将资源调配方法应用于煤矿应急救援领域,因此要验证DCSP方法应用于煤矿应急救援资源调配领域是否有效,只需将实验结果与实际调配结果进行比较,如表4所列。

表4 实验调配方法与实际调配方法对比

事故	实际决策时间	实验决策时间	实际调配方案	实验调配方案	实验到达时间	实验到达时间
发生	1~2s, 15min	1058ms 1058ms	(SAgent3,1,1), (SAgent2,1,14)	(SAgent3,1,1), (SAgent1,1,4)	16min 88min	16min 22min
升级	15min	1026ms	(SAgent4,1,49)	(SAgent4,1,49)	180min	89min

表4显示实验决策时间少于实际资源调配的决策时间,实际资源调配的决策要经过电话汇报、询问、调查及电话下达命令等过程,因此除了对事故点集团公司救护队SAgent3调配的实际决策时间与实验决策时间相同之外,对于其他救护基地的调配决策时间需要15min,而实验方法所需的决策时间仅需几秒钟,即DCSP资源调配方法在灾害发生后的几秒钟内就可根据实际情况做出应急救援资源调配的决策方案,以实现资源的及时调配。若将DCSP方法应用到煤矿应急救援的联动系统中,相应救护基地能在系统做出决策方案的同时获取决策命令,节省了下达决策命令的时间,在灾害发生后的几秒钟时间内就实现了资源的及时调配。

图5示出实际的调配方案:在事故发生后调配距离事故点1km的SAgent3和距离事故点14km的SAgent2,当灾害升级时,调配具备相应救援能力的距离事故点49km的SAgent4,依据实际时间参数知3个救护基地将资源送达至事故点所花费的实际时间间隔分别是16min,88min和180min。

图6示出实验的调配方案:在事故发生后调配距离事故点1km的SAgent3和距离事故点4km的SAgent3,当灾害升级时,调配具备相应救援能力的距离事故点49km的SAgent4,根据相应救护基地与事故点的路程距离、实际资源送达事故点的车辆平均速度、救护队标准出动时间和资源的决策时间,可计算出3个救护基地将资源送达至事故点所需的时间间隔分别是16min,22min和89min。

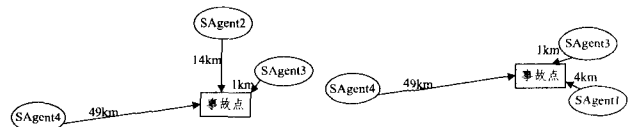


图5 实际调配方案

比较以上两种方法将资源送达事故点的时间可知,两种方法调配事故点集团公司救护队SAgent3的时间间隔一样,而对于非事故点所属的救护基地的调配,采用DCSP方法调配资源救护基地将资源送达事故点所需的时间间隔明显少于实际耗费的时间,由此说明除了调配自身拥有的资源之外,基于DCSP的煤矿应急救援资源调配方法可大大地缩短资源调配的决策时间,做出比实际方法更优的资源调配方案,使所需资源能更快速地送达事故点,实现有效的资源调配,为煤矿应急救援工作的实施争取到大量救援时间,保障应急救援工作的有效实施,从而减少煤矿事故发生后的人员伤亡和经济损失。

结束语 有效的资源调配是保障应急救援快速实施的关键,更是煤矿应急救援领域亟待解决的问题。本文将DCSP

方法应用于煤矿应急救援资源调配的实际问题中,研究并构建了相应的资源调配模型,改进了 MAWS 算法。实验证明,基于 DCSP 的煤矿应急救援资源调配方法是可行且有效的,此调配方法可为煤矿应急救援提供及时有效的决策方案。将 DCSP 方法应用于分布式协作问题中是解决应急资源调配问题的新思路,随着研究的深入,这种方法将具有更广泛的应用前景。

参考文献

- [1] <http://www.chinacoal-safety.gov.cn/mkaj/>. 2010, 03
- [2] 何建敏,刘春林,曹杰,等. 应急管理 with 应急系统——选址调度与算法[M]. 北京: 科学出版社, 2005: 125-138
- [3] 黄金虎. 应急物流系统若干关键技术的研究与实现[D]. 上海: 上海交通大学, 2007: 16-24
- [4] 王天普,李万疆. 煤矿应急救援必读[M]. 北京: 中国石化出版社, 2008: 69-77
- [5] 唐连生,程文明,梁剑,等. 应急物流配送问题的蚁群聚类算法研究[J]. 铁道运输与经济, 2008, 30(9): 66-73
- [6] Yokoo M, Durfee E H, Ishida T, et al. Distributed Constraint Satisfaction for Formalizing Distributed Problem Solving[C]// Proc. of the 12th IEEE International Conference on Distributed Computing Systems. 1992
- [7] Yokoo M, Hirayama K. Distributed Constraint Satisfaction Algorithm for Complex Local Problems[C]// Proc. of the 3th International Conference on Multi-Agent Systems (ICMAS-98). Paris, France, 1998
- [8] Yokoo M, Hirayama K. Algorithms for distributed constraint satisfaction: A review[J]. Autonomous Agents and Multi-Agent Systems, 2000, 3: 185-207
- [9] Modi P J, Jung H, Tambe M, et al. A Dynamic Distributed Constraint Satisfaction Approach to Resource Allocation[C]// Proc. of the 7th International Conference on Principles and Practice of Constraint Programming (CP 2001). Berlin: Springer-Verlag, 2001
- [10] Cesar F, Ramon B, Bhaskar K, et al. Communication and Computation in Distributed CSP Algorithms. Distributed Sensor Networks: A Multiagent Perspective [M]. Kluwer Academic Publishers, 2003: 664-679
- [11] Hirayama K, Yokoo M. The Distributed Breakout Algorithms [J]. Artificial Intelligence, 2005, 161: 85-119
- [12] Jan M, Christian P, Roberto W C, et al. A Metaheuristic to Solve a Location-Routing Problem with Non-Linear Costs[J]. Journal of Heuristics, 2005, 11: 375-391
- [13] Bejar R, Domshlak C, Fernandez C, et al. Sensor Networks and Distributed CSP: Communication, Computation and Complexity [J]. Artificial Intelligence, 2005, 161: 117-147
- [14] Salido M A. Feasible Distributed CSP Models for Scheduling Problems[J]. American Association for Artificial Intelligence, 2007, 21: 723-732
- [15] Fabio L B, Giovanni C, Dominic G, et al. Developing Multi-agent Systems with JADE[M]. Wiley Series in Agent Technology, 2007: 29-173
- [16] 高峰, 闫茂林. 突变理论及其在采矿工程中的应用[J]. 重庆工学院学报: 自然科学版, 2008, 22(2): 64-67
- (上接第 211 页)
- [3] 史开泉. P-集合与它的应用特征[J]. 计算机科学, 2010, 37(8): 1-8
- [4] Shi Kai-quan, Li Xiu-hong. Camouflaged information identification and its applications[J]. An International Journal Advances in Systems Science and Applications, 2010, 10(2): 157-167
- [5] 史开泉, 张丽. P-集合与数据外-恢复[J]. 山东大学学报: 理学版, 2009, 44(4): 8-14
- [6] 于秀清. $P_{(\rho, \sigma)}$ -集合与它的随机特性[J]. 计算机科学, 2010, 37(9): 218-221
- [7] 于秀清. P-集合的识别与筛选[J]. 山东大学学报: 理学版, 2010, 45(1): 94-98
- [8] 于秀清. P-集合与 F-外嵌入信息辨识-发现 [J]. 计算机科学, 2010, 38(2): 250-253, 270
- [9] 李豫颖, 谢维奇, 史开泉. \bar{F} -残缺数据的辨识与恢复[J]. 山东大学学报: 理学版, 2010, 45(9): 57-64
- [10] 李豫颖. F-畸变数据的生成与修复[J]. 吉首大学学报: 自然科学版, 2010, 31(3): 59-72
- [11] 张冠宇, 周厚勇, 史开泉. P-集合与双 P-数据恢复-辨识[J]. 系统工程与电子技术, 2010, 32(9): 1233-1238
- [12] 张丽, 崔玉泉, 史开泉. 外 P-集合与数据内-恢复[J]. 系统工程与电子技术, 2010, 32(6): 1919-1924
- [13] Li Yu-ying, Zhang Li, Shi Kai-quan. Generation and recovery of compressed data and redundant data[J]. Quantitative Logic and Soft Computing, 2010, 2(1): 661-671
- [14] Zhang Ling, Ren Xue-fang. P-sets and its (f, \bar{f}) -heredity[J]. Quantitative Logic and Soft Computing, 2010, 2(1): 735-742
- [15] Qui Yu-feng, Chen Bao-hui. f -Model generated by P-sets[J]. Quantitative Logic and Soft Computing, 2010, 2(1): 613-620
- [16] Xiu Ming, Shi Kai-quan, Zhang Li. P-sets and \bar{F} -data selection-discovery[J]. Quantitative Logic and Soft Computing, 2010, 2(1): 791-799
- [17] Zhang Li, Xiu Ming, Shi Kai-quan. P-sets and applications of power circle[J]. Quantitative Logic and Soft Computing, 2010, 2(1): 581-591
- [18] Lin Hong-kang, Li Yu-ying. P-sets and its P-separation theorems[J]. An International Journal Advances in Systems Science and Applications, 2010, 10(2): 209-215
- [19] Huang Shun-liang, Wang Wei, Geng Dian-you. P-sets and its internal P-memory characteristics[J]. An International Journal Advances in Systems Science and Applications, 2010, 10(2): 216-222
- [20] Wang Yang, Geng Hong-qin, Shi Kai-quan. The mining of dynamic information based on P-sets and its applications[J]. An International Journal Advances in Systems Science and Applications, 2010, 10(2): 234-240
- [21] Zhang Guan-yu, Li En-zhong. Information gene and identification of its information Knock-out/Knock-in[J]. An International Journal Advances in Systems Science and Applications, 2010, 10(2): 308-315
- [22] 王亚馥, 戴灼华. 遗传学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000: 97-110