

文章编号:1007-6735(2013)05-0415-05

多资源消耗应急系统调度模型及算法

郑昊, 高岩

(上海理工大学 管理学院, 上海 200093)

摘要: 结合应急系统多点出救的特征,研究了在资源消耗速率为非负可积函数的情况下,构建基于应急时间最早的连续型应急资源调度模型,并给出相应算法.对模型及所提出的求解算法进行实证研究,结果表明:模型与算法有效,并能对突发事件应急资源调度起到积极的作用.

关键词: 连续性消耗; 多资源; 应急资源调度; 调度模型

中图分类号: N 945.12

文献标志码: A

Dispatching Model and Algorithm for Multi-resource Emergency Systems

ZHENG Hao, GAO Yan

(Business School, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: Considering the multi-objective, dynamic, uncertain and time-sensitive features of emergency resource scheduling, the fast reaction time was focused as an important research subject. According to the characteristic of emergency system, the multi-resource emergency systems model with consumption rates of nonnegative and integrable functions was introduced. A new model was built based on the object of earliest emergency-start-time, and the corresponding algorithm was provided. The results of empirical research illustrate that the model and the algorithm are both effective and play an active role in emergency resource scheduling. They also provide a theoretical support to emergency scheduling decision.

Key words: continuous consumption; multi-resource; emergency source dispatching; dispatching model

近年来无论是自然灾害、事故灾害还是公共安全灾害,爆发的频率、规模都明显增加,因此,应急系统的设计和管理便显得尤为重要^[1].步入21世纪以来,应急管理得到长足的发展,各种介绍应急系统及

其在各行业中应用的文献不断涌现^[2-4].突发的地震、水灾、核泄露等恶性事件发生时,临场快速地给出相关救灾物资调度能极大减少人员伤亡^[5].我国地域辽阔,灾害时有发生,如南方雪灾和四川汶川地

收稿日期: 2012-12-26

基金项目: 上海市科委资助项目(10550500800)

第一作者: 郑昊(1987-),男,硕士研究生.研究方向:应急管理. E-mail: zhenghao.87@163.com

通讯作者: 高岩(1962-),男,教授.研究方向:复杂系统分析与优化. E-mail: gaoyan@usst.edu.cn

震均给国家带来了巨大灾害^[6]. 这些灾害的特点是受灾点集中、物资需求量大、物资调配复杂, 因此需要多个物资储备点同时出救. 面对突如其来的灾害, 如何快速合理的调度救援物资是一个亟待解决的问题.

当突发性重大自然灾害发生时, 往往存在灾害点同时需要调集多种救援设备和物资的现象. 目前国内关于应急资源调度的研究大都针对资源消耗速率一定, 主要包括多资源组合、多目标规划、模糊优化、连续消耗等方面^[7-11]. 刘春林等^[9]在考虑连续消耗应急系统的一般调运方法的基础上, 提出了以最早应急开始时间为目标的固定消耗速率应急资源调度模型及相应的求解算法. 赵林度等^[10]建立了具有脉冲需求的应急资源调度模型, 研究了单目标和二阶段资源调度问题. 李梅霞等^[11]研究了消耗速率为函数的单资源连续型应急资源调度模型, 特别给出了应急时间最早的单资源应急调度模型及算法, 并从理论上进行了分析和证明.

国外方面, 应急系统的研究起步比较早, 相关的研究及应用大量涌现, 例如 Zografos 等^[12]研究了基于响应时间最短的适时决策支持系统的公路网事故响应模型; Jae^[13]研究了灾害发生时如何分配有限的车辆资源将伤员运送到医院, 确保伤员存活率最高; Gulay 等^[14]提出了一种分层多标准方法解决直升机在救灾中的调度问题, 使派遣的直升机和飞行员数目在满足需求的情况下成本最低.

上述研究大都是在考虑资源消耗速率为恒定值时, 构建的资源调度模型和算法, 但是由于灾害现场伤亡人数往往具有不可预测性, 因此应急资源消耗数量也不会简单的为一个恒定值. 笔者在以上研究的基础上, 构建消耗速率为非负可积函数的连续型多资源应急系统调度模型. 该模型以最早应急时间为目标, 给出资源调度总方案和最早应急开始时间的求取算法, 并通过实证分析验证算法的有效性和实用性.

1 问题描述

设 $A_1, A_2, \dots, A_n$ 为 n 个应急资源供应点 (出救点); A 为应急地点; $x_1, x_2, \dots, x_m$ 分别为 m 种应急物资需求量, (x_j 表示对第 j 种资源的需求量); A_i 中第 j 种资源可用量表示为 x_{ji} ($i = 1, 2, \dots, n$); $v_j(y)$ 为第 j 种资源消耗速率 ($v_j(y)$ 为可积函数, 且 $v_j(y) \geq 0$); s_j 为第 j 种资源参与应急的

开始时间; f_j 为其完成时间; (A_i, x'_{ji}) 为出救点 A_i 的资源 j 的调度方案, 即从出救点 A_i 调度出的第 j 种资源为 x'_{ji} ; 应急物资从 A_i 到应急地点 A 的时间为 t_i ($t_i > 0$), 不妨设 $t_1 \leq t_2 \leq \dots \leq t_n$. 由于救灾工作一般要经历混乱、平稳有序到救灾结束, 资源消耗数量应是先增加, 然后趋于平衡, 最后会逐渐递减, 不失一般性, 本文以线性连续可积非负函数为资源消耗函数.

对于第 j 种资源而言, 其消耗速率 $v_j(y)$ 为可积函数且 $v_j(y) \geq 0$, 则第 j 种资源的需求量 x_j 满足

$$\sum_{i=1}^n x_{ji} \geq \sum_{i=1}^n x'_{ji} = x_j = \int_{s_j}^{f_j} v_j(y) dy \quad (j = 1, 2, \dots, n) \quad (1)$$

因此, 本模型研究的应急资源调度问题可以描述为: 当 A 地发生突发事件后, 应快速给出一个应急资源调度方案

$$\boldsymbol{\varphi} = \begin{bmatrix} x'_{11} & x'_{12} & \cdots & x'_{1n} \\ x'_{21} & x'_{22} & \cdots & x'_{2n} \\ \vdots & \cdots & \cdots & \vdots \\ x'_{m1} & x'_{m2} & \cdots & x'_{mn} \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中 $0 \leq x'_{jpi_k} \leq x_{jpi_k}$

定义 1 如果对于总调度方案 $\boldsymbol{\varphi}$ 中任意单一资源 j ($j = 1, 2, \dots, m$), $\boldsymbol{\varphi}_j = (x'_{j1}, x'_{j2}, \dots, x'_{jn})$ ($\boldsymbol{\varphi}_j$ 为单资源方案) 关于起始时间 s 是连续可行的, 则称总调度方案式 (2) 关于起始时间 s 是连续可行的.

设对于第 j 种资源, 起始时间 s 是连续可行的所有方案的集合为 χ_{js} , 模型最优解为确定参与应急的出救点及各自的应急物资量, 在保证应急物资连续供应的条件下, 使得应急开始时间最早, 即求解下述问题

$$\min_{\chi_{js}^j \neq \emptyset, j=1, 2, \dots, m} s \quad (3)$$

式中, $\emptyset$ 为空集.

2 多资源应急系统调度模型的求解

结合相关问题的描述与假设, 给出多资源连续消耗应急资源调度模型的总调度方案和最早应急开始时间的求解, 并给出相应的证明.

2.1 调度方案

由定义 1 知, 对于式 (2) 中任一应急资源 j_k 的方案 $\boldsymbol{\varphi}_{jk}$, 文献^[7]中给出的性质仍然成立.

性质 1 若 $\varphi_{j_k} = x_{s'_{j_k}}$ 则 $\forall s''_j \geq s'_j$ 有 $\varphi_j \in \chi_j''$;

性质 2 若 $x_{s'_{j_k}} \neq \phi$ 则 $\forall s''_j \geq s'_j$ 有 $\chi_j'' \neq \phi$;

性质 3 若 $\varphi_j \in \chi_{s_j}$, 对于第 j 种资源的应急开始时间 s_j 和应急结束时间 f_j 则有

$$s_j \geq \min_{k=1,2,\dots,m} t_{j_k}, f_j \geq \max_{k=1,2,\dots,m} t_{j_k}$$

性质 4 若 s_j 满足

$$s_j \geq \max_{k=1,2,\dots,m} t_{j_k}$$

则方案 $\varphi_j \in \chi_{s_j}$, 即 φ_j 关于起始时间 s_j 是连续可行的.

性质 5 若 s_j^* 满足

$$s_j^* = \min_{\chi_{s_j} \neq \phi} s$$

则 $t_{j_1} \leq s_j^* \leq t_{j_p} \leq f_j^*$ (其中 f_j^* 由 $\int_{s_j^*}^{f_j^*} v_j(y) dy$ 求得)

对于第 j 种资源(单资源), 假设由其求得对应的最优方案为

$$\varphi_j^* = (x_{j_1}^*, x_{j_2}^*, \dots, x_{j_n}^*) \quad (j = 1, 2, \dots, m)$$

令总调度方案为 $\varphi^* = (\varphi_1^*, \varphi_2^*, \dots, \varphi_m^*)^T$, 即

$$\varphi^* = \begin{bmatrix} x_{11}^* & x_{12}^* & \dots & x_{1n}^* \\ x_{21}^* & x_{22}^* & \dots & x_{2n}^* \\ \vdots & \dots & \dots & \vdots \\ x_{m1}^* & x_{m2}^* & \dots & x_{mn}^* \end{bmatrix}$$

定理 1 对于多个应急资源需求, 当应急资源消耗速率为非负可积函数时, φ^* 为式(3)对应模型的最优方案.

证明 由于 φ^* 是由 m 个 $\varphi_{j_k}^* = (x_{j_k1}^*, x_{j_k2}^*, \dots, x_{j_kn}^*)$ 行向量构成的矩阵, 对于 φ^* 中任意资源 j_p 的调度方案 $\varphi_{j_p}^*$ 是相互独立的, 因此若证 φ^* 为式(2)的最优方案($\varphi^* \in \chi_{s^*}$), 需要证明 φ^* 中任意资源 j_p 可行且在开始时间为 s^* 时最优. 设

$$\min_{x_{s_j} \neq \phi, j=1,2,\dots,m} s = s^*$$

由性质 5 知, $t_{j_k} \leq s_{j_k}^* \leq t_{j_k p} \leq f_{j_k}^*$, 因为 $\chi_{s_{j_k}^*} \neq \phi$, 显然存在一个方案 $\chi_{s_{j_k}^*} \in \chi_{s^*}$, 假设

$$\varphi_{j_p}^* = (x_{j_p1}^*, x_{j_p2}^*, \dots, x_{j_pn}^*)$$

其中, $0 \leq x_{j_p i}^* \leq x_{j_p i}$, $\sum_{k=1}^m x_{j_k i_k}^* = x_{j_k i_k}$, $i_1, i_2, \dots, i_k$ 为 $1, 2, \dots, n$ 的一个子排列. 下证对于另一种资源 j_q , 单一方案 $\varphi_{j_q}^* \in \chi_{s^*}$. 因为 $\chi_{s_{j_k}^*} \in \chi_{s^*}$, 由定义 1 知, $\forall t \in [s^*, f^*]$, 有

$$\sum_{k \in \{k \mid t_{i_k} \leq t, k=1,2,\dots,n\}} x_{j_q i_k}^* \geq \int_{s^*}^t v_{j_q}(y) dy$$

又因为 $t_q = \max t_k (k=1,2,\dots,n)$, s^* 和 t_q 的大

小无法确定, 当 $s^* \geq t_q$, 由性质 4 知 $\varphi_{j_p}^* \in \chi_{s^*}$ 明显成立.

现在主要考虑当 $s^* < t_q$ 时, 可以将 $[s^*, f_{j_q}^*]$ 分成两个区间 $[s^*, t_q]$ 和 $[t_q, f_{j_q}^*]$, 按两种情形进行讨论. 其中 $\forall t \in [s^*, f_{j_q}^*]$.

情形 1 $t \in [s^*, t_q]$, 按照方案 φ^* , t 时间到达 A 的资源 j_q 的数量为

$$\sum_{k \in \{j \mid t_{j_k} \leq t, j=1,2,\dots,m\}} x_{j_q}^* \geq \sum_{k \in \{j \mid t_{i_k} \leq t, j=1,2,\dots,m\}} x_{j_q i_k}^* \geq \sum_{k \in \{j \mid t_{i_k} \leq t, j=1,2,\dots,m\}} x_{j_q i_k}^* \geq \int_{s^*}^t v_{j_q}(y) dy$$

情形 2 $t \in (t_q, f_{j_q}^*]$, 按照方案 φ^* , t 时间到达 A 的资源 j_q 的数量为

$$x_{j_q}^* \geq \int_{s^*}^t v_{j_q}(y) dy$$

由以上证得, 当总调度方案 φ^* 的应急开始时间为 s^* 时, 任意资源 j_q 均可行, 则由定义 1 知, $\varphi^* \in \chi_{s^*}$. 定理得证.

2.2 最早开始时间

定理 1 已经证明了 φ^* 为式(3)的最优方案, 现给出求方案 φ^* 对应的应急开始时间 s^* . 首先, 文献[11]中关于单一资源 j_q 在消耗速率为 $v_{j_q}(y)$ 的情况下的引理 2, 在多资源的情况下仍适用.

引理 2 若 $t_1 \leq s \leq t_q$, 则方案 φ^* 中任意资源 j_q 关于起始时间 s 连续可行的充分必要条件是 $\forall t \in [0, t_q]$, 有

$$\sum_{k \in \{j \mid t_{i_k} \leq t, j=1,2,\dots,m\}} x_{j_q i_k}^* \geq \int_s^t v_{j_q}(y) dy$$

结合引理 2 的相关叙述, 给出定理 3 用来求解总调度方案 φ^* 对应的应急开始时间 s^* .

定理 3 方案 φ^* 对应的应急开始时间

$$s^* = \max_{x_{s_j} \neq \phi, j=1,2,\dots,m} s_j^*$$

总调度方案 φ^* 是由 n 个 $\varphi_{j_k}^* = (x_{j_k1}^*, x_{j_k2}^*, \dots, x_{j_kn}^*)$ 的行向量构成, 因此需要证明在统一的应急开始时间 s^* 下, 任意资源 j_q 均可行($\varphi_{j_q}^* \in \chi_{s^*}$)

证明 令

$$s = \max_{x_{s_j} \neq \phi, j=1,2,\dots,m} s_j^*$$

显然, $s \leq \max t_k = t_p$, 又由 $s \geq t_1$, 故 $t_1 \leq s \leq t_q$. 设单一资源 j_p 的应急开始时间 $s_{j_p}^* = s^*$, 资源 $j_q (p \neq q)$ 对应的应急开始时间为 $s_{j_q}^*$, 则 $s_{j_q}^* \leq s_{j_p}^*$. 只需要证明在统一的应急开始时间 s^* 下, 资源 j_q 也可行, 即 $\varphi_{j_q}^* \in \chi_{s^*}$. 由式(1)可知

$$\int_{s_{j_q}^*}^{f_{j_q}^*} v_{j_q}(y) dy = \sum_{k=1}^m x'_{j_q i_k}$$

$$\int_{s^*}^{f_{jq}^*} v_{jq}(y) dy \leq \int_{s_{jq}^*}^{f_{jq}^*} v_{jq}(y) dy \leq$$

$$\sum_{k \in \{j \mid t_i < t_{kj} = 1, 2, \dots, n\}} x_{jqk}$$

由定理 2 可知, $\varphi_{jq}^* \in \chi_{s^*}^*$. 由于定理 2 题设和结论互为充分必要条件, 反过来, 则 $\forall t \in [0, t_p]$, 有

$$\int_{s^*}^t v_{jq}(y) dy \leq \sum_{i \in \{j \mid t_i < t_i = 1, 2, \dots, n\}} x_{jqk} \leq$$

$$\int_{\max s_j^*}^t v_{jq}(y) dy$$

则 $s^* \geq \max s_j^*$, 根据最早应急时间 s^* 应取最小值, $s^* = \max s_j^*$. 定理得证.

2.3 求解算法

根据定理 1 和定理 3 及相关证明过程, 给出多资源应急系统调度模型的总调度方案 and 对应的最早应急开始时间的求解算法. 算法步骤如下:

步骤 1 比较各应急点应急时间的大小, 按照 t_k 的大小从小到大顺序将 A_i 重新排列;

步骤 2 对于每种资源的应急需求量

$$0 \leq x'_{ji} \leq x_{ji}, \sum_{i=1}^n x'_{ji} = x_j$$

$$(j = 1, 2, \dots, m; i = 1, 2, \dots, n)$$

根据 $p_j = \min \{k \mid \sum_{i=1}^k x_{ji} \geq x_j, j = 1, 2, \dots, m\}$, 求出第 j 种资源需要 p_j 个出救点;

步骤 3 当 $j \leq m$ 时, 重复步骤 2, 即可求出每种资源对应的单资源方案, 进而求出总调度方案 φ^* ;

步骤 4 具体计算依照文献[11]. 计算单一资源应急最早开始时间, 即第 j 种资源应急最早开始时间 s_j^* ;

步骤 5 根据定理 2, 求得总调度方案 φ^* 对应的最早应急开始时间

$$s^* = \max_{j=1, 2, \dots, m} s_j^*$$

3 实证分析

某地 A 发生严重事故, 急需 3 种应急物资 x_1, x_2, x_3 . 现有 $A_1, A_2, A_3, A_4, A_5, A_6, A_7, A_8$ 8 个物资供应点可以提供物资. 采用文献[7]中数据, 设事故发生地 A 对 3 种物资的需求量分别为 $x_1 = 20, x_2 = 30, x_3 = 92$. 各出救点 A_i 能提供第 j 种资源的量 x_{ji} 如表 1 所示, 到达 A 所需要的时间 t_i 如表 2 所示.

表 1 各出救点的物资量及到达时间

Tab.1 Arrival time and number of each relief point

出发点	t_i		
	1	2	3
A_1	3	6	8
A_2	2	8	12
A_3	5	4	4
A_4	4	10	20
A_5	2	16	28
A_6	12	10	16
A_7	11	12	36
A_8	6	8	8

表 2 各出救点到达灾害现场场地所需要的时间

Tab.2 Arrival time of each relief point to disaster

出救点	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	A_6	A_7	A_8
t_i	1	4	8	14	18	22	23	28

假设 3 种物资消耗的速率分别为

$$v_1(y) = \begin{cases} 2y & (0 \leq y \leq 20) \\ 40 & (20 < y \leq 40) \\ -y + 80 & (y > 40) \end{cases}$$

$$v_2(y) = \begin{cases} y & (0 \leq y \leq 15) \\ 15 & (20 < y \leq 15) \\ -y + 30 & (y > 15) \end{cases}$$

$$v_3(y) = \begin{cases} 3y & (0 \leq y \leq 20) \\ 60 & (20 < y \leq 60) \\ -y + 60 & (y > 60) \end{cases}$$

a. 由于 $t_1 \leq t_2 \leq \dots \leq t_8$, 故无需对 A_i 重新排列.

b. 根据算法步骤 2, 分别算得资源 j 的单一方案

$$\varphi_1^* = (3, 2, 5, 4, 2, 4, 0, 0)$$

$$\varphi_2^* = (6, 8, 4, 10, 2, 0, 0, 0)$$

$$\varphi_3^* = (8, 12, 4, 20, 28, 16, 4, 0)$$

则方案 $\varphi^* = (\varphi_1^*, \varphi_2^*, \varphi_3^*)^T$, 即

$$\varphi^* = \begin{bmatrix} 3 & 2 & 5 & 4 & 2 & 4 & 0 & 0 \\ 6 & 8 & 4 & 10 & 2 & 0 & 0 & 0 \\ 8 & 12 & 4 & 20 & 28 & 16 & 4 & 0 \end{bmatrix}$$

其中, 第一种资源需要 6 个出救点, 分别为 $A_1, A_2, A_3, A_4, A_5, A_6$. 第二种资源需要 5 个出救点, 分别为 A_1, A_2, A_3, A_4, A_5 . 第三种资源需要 7 个出救点, 分别为 $A_1, A_2, A_3, A_4, A_5, A_6, A_7$.

c. 算出每种资源的应急开始时间 $s_j^* (j = 1, 2, 3)$, 即

$$s_1^* = 7, s_2^* = \sqrt{133}, s_3^* = \sqrt{\frac{607}{3}}$$

$$\text{根据定理 3, } s^* = \max\{s_1^*, s_2^*, s_3^*\} = \sqrt{\frac{607}{3}},$$

$$\text{即应急开始时间为 } s^* = \sqrt{\frac{607}{3}}$$

当 $v_1(y) = 1, v_2(y) = 2, v_3(y) = 4$ 时, 文献[7]中算例即为本文的一个特例.

4 小 结

在假设应急物资的消耗速率为非负可积函数的情况下, 提出了以最早应急时间为目标的多资源应急系统调度模型及相应方案、应急开始时间的求解算法, 并利用实证分析验证了算法的有效性和实用性. 但是该多资源应急系统调度模型仍存在着不足, 首先面对应急环境的紧迫性和不可预测性, 各种应急资源的消耗速率函数难以获得. 其次, 本文所给模型只是建立在以“应急开始最早”的基础上, 但是以“应急开始最早”作为目标的方案可能很多, 无论从费用或系统稳定性角度, 考虑“应急时间最早的前提下出救点数目最少”的二阶段问题更有实际意义. 由于出行车辆的多少直接关系到系统的稳定性和可靠性. 因此可以在文中模型的基础上建立“应急开始最早、出救点数目最少”的二阶段应急资源调度模型为 $\varphi^{**} : \min_{\varphi \in X_s^*} N(\varphi)$. 此外, 在实际应用中, 由于应急系统所处环境的多变性, 各出救点的应急时间不是一个确定的时间, 而是一个区间数, 因此如何在应急时间不确定的情况下选择“应急时间最早”的多资源连续型消耗系统方案将是一个有意义的研究课题.

参考文献:

- [1] 陶泽琼, 高岩. 基于改进目标规划方法的应急系统优化选址模型[J]. 技术与创新管理, 2012, 33(2): 179 - 182.
- [2] Liu S. Employing system of systems engineering in China's emergency management[J]. IEEE systems journal, 2011, 5(2): 289 - 308.
- [3] Tassetto D, Fazli E H, Werner M A. Novel hybrid algorithm for passive localization of victims in emergency situations[J]. International Journal of Satellite Communications and Networking, 2011, 29(5): 461 - 478.
- [4] Yang J F, Gao Y. Emergency evacuation model and algorithm in the building with facilities[J]. Intelligent Information Management Systems and Technologies, 2012, 8(3): 283 - 292.
- [5] 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.
- [6] 耿泽飞, 胡飞虎, 陈慧敏, 等. 多灾害点应急资源调度模型研究与实现[J]. 计算机应用与软件, 2010, 22(2): 63 - 66.
- [7] 刘春林, 盛昭瀚, 何建敏. 基于连续消耗应急系统的多出救点选择问题[J]. 管理工程学报, 1999, 13(3): 3 - 6.
- [8] 戴更新, 达庆利. 多物资组合应急调度问题的研究[J]. 系统工程理论与实践, 2000, 12(9): 52 - 55.
- [9] 刘春林, 沈厚才. 一类离散应急供应系统的两目标优化模型[J]. 中国管理科学, 2003, 11(4): 27 - 31.
- [10] 赵林度, 刘明, 戴东甫. 面向脉冲需求的应急资源调度问题研究[J]. 东南大学学报, 2008, 38(6): 1116 - 1120.
- [11] 李梅霞, 车海涛. 应急资源调度模型与算法[J]. 运筹与管理, 2011, 20(3): 72 - 76.
- [12] Zografos K G, Konstantinos N A, George M V. A real-time decision support system for roadway network response logistics[J]. Transportation Research Part C, 2002, 10(1): 1 - 18.
- [13] Choi J Y. Stochastic scheduling problems for minimizing tardy jobs with application to emergency vehicle dispatching on unreliable road networks[D]. New York: University of New York, 2003.
- [14] Gulay B, Linet O, Ahmet C. An interactive approach for hierarchical analysis of helicopter logistics in disaster relief operations[J]. European Journal of Operational Research, 2002, 140(1): 118 - 133.

(编辑: 金虹)