溢油应急决策中的物资调度方法①

罗吴辉, 栾翠菊

(上海海事大学 信息工程学院, 上海 201306)

摘 要: 针对多出救点多物资多目标应急调度问题的特点, 并结合溢油敏感区等对响应时间的限制, 提出了基于不同响应时间段的动态优化模型. 以应急救援时间最早和出救点数目最少为优化目标, 对不同响应时间段分别运用理想点法和构造剔除集合确定最优调度方案. 最后通过算例验证了所提出调度方法的可行性.

关键词: 溢油; 应急决策; 理想点; 多目标; 动态优化模型

Material Dispatch in Decision Making for Oil Spill Emergency Response

LUO Wu-Hui, LUAN Cui-Ju

(College of Information Engineering, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China)

Abstract: A dynamic optimization model is proposed based on different response time. The model considers the features of multi-retrieval depots, multi-resource and multi-objective emergency scheduling problem, and combines with the constraints of response time led by the sensitive areas of oil spill. With the earliest emergency rescue time and the fewest number of retrieval depots as the optimization goal, the perfect point method and structuring elimination assemble are used to get the optimal scheduling scheme according to different response time slots. Finally, a numerical example is given to verify the feasibility of the proposed scheduling method.

Key words: oil spill; emergency response decision; perfect point; multi-objective; dynamic optimization model

1 引言

随着世界经济交流日益频繁, 各种由自然或人为引起的重大溢油突发事件时有发生. 而对于比较大规模的溢油事故, 往往单个港口或者海区难以单独处理, 需要多个港口或海区共同援助[1]. 在救援过程中, 须在满足救援响应时间需求的前提下, 选取最优化的出救点救助才能尽可能减少不必要的损失. 由此可见, 溢油救援物资的优化调度方法是溢油应急决策中需要研究的关键问题之一.

针对应急决策方面的资源调度已经有大量的研究. Tong Shaocheng[2], 陈达强[3]等提出一次性消耗下的单资源应急调度方法. 栾翠菊等[4]提出了以溢油处理时间最早和出救点数目最少的多目标优化调度, 采用穷举法和贪心算法的结合给出调度方法. 刘春林等[5,6], 孙敏[7], 高淑萍[8]分别在不同约束条件下就响应时间和出救点数量进行多目标优化调度方面的研究. 戴更新等[9]就多种应急资源多个出救点的特点, 以最早响应时间为调度目标, 将多种资源转化单种资源进行优化调度, 建立了相应的数学模型并取得了较好的成果, 但从费用的角度考虑, 可能会出现出救点数目过多造成不必要的费用开支. 刘春林等[10]研究了一次性应急资源调度的模糊决策问题, 给出了需求和应急开始时间满意度最大、兼顾出救点最少的调度方案, 但模型中只考虑单个应急点和一种应急资源.

文献中提出不同调度方案, 然并没有结合溢油事故的特性分析. 由溢油事故特性可知, 溢油是否影响相关敏感区等资源对响应时间提出了限制, 不同于其他应急救援, 需要多个港口或者海区的相互合作. 因而结合溢油应急特点, 本文的研究为基于不同响应时间段的动态优化模型, 考虑应急救援时间和救援费用

① 收稿时间:2014-02-27;收到修改稿时间:2014-03-31

© 中国科学院软件研究所 http://www.c-s-a.org.cn

多目标, 类型为一次性消耗的多物资优化调度.

2 问题描述及分析

2.1 问题的描述

设在溢油事故中, $A_1, A_2, L\ , A_n$ 为 n 个应急物资供应点, B 为溢油应急点, 需要 m 种应急物资, $c_1, c_2, L\ , c_m$ 为每种物资的需求量, c_{ij} 为物资供应点 A_i 对物资 C_j 现有的储存量, c_{ij}' 为调度中实际物资供应量, 从 A_i 到 B 需要的时间记为 t_i ($t_i \ge 0$). 为简单起见, 不妨设 $t_1 \le t_2 \le L\ \le t_n$ (即各供应点距离应急点所需要的时间按升序排列), 其中须满足 $1 \le i \le n$, $1 \le j \le m$, $0 \le c_{ij}' \le c_{ij}$ 和 $\sum_{i=1}^{n} c_{ij} \ge c_j$ (表明总的物资存储量一定能够满足应急点的需求量), 并且对于任一个 A_i , 有 $c_{ij} \ge 0$, 且不全为 0. 根据溢油事故应急特点, 溢油应急物资调度的任务是制定调度方案, 在满足应急需求的条件下, 使得救援时间最早且救援费用最少.

根据溢油事故情况[1]造成的出救费用难以准确估计, 结合应急类调度问题的研究, 可以将费用最少问题转化成出救点数目最少问题[9]. 出救点数目越少, 各出救单位及人员费用开支就越少, 救援成功率也相对更加稳定. 所以, 溢油应急物资调度的目标改为响应时间最早和出救点数量最少.

针对上述问题描述, 设出救方案 ξ 为 $\xi = \{\xi_1, \xi_2, L\ , \xi_m\}$, 第 j 种物资应急调度方案为 $\xi_j = \{(A_{d_1}, c_{d_1 j}), (A_{d_2}, c_{d_2 j}), L\ , (A_{d_k}, c_{d_k j})\}$, 调度方案中 $d_1, d_2, L\ , d_k$ ($1 \le k \le n$) 为数列 $1, 2, \cdots, n$ 的一个组合排列, 并且满足 $\sum_{i=1}^{k} c_{d_i j}' = c_j$, $j = 1, 2, L\ , m$. 救助响应时间为 $T(\xi)$, 出救点总数为 $N(\xi)$. 由一次性消耗调度可得知 $T(\xi) = \max(t_i)$, $i = d_1, d_2, ..., d_k$, 出救点数量 $N(\xi) = |\xi|$, 即集合 ξ 的元素的个数. 所可行的调度方案记为 Ω , 则要求出 Ω 中某一方案 ξ , 使得满足以下调度目标:

$$\min T(\xi) \tag{1}$$

$$\min N(\xi) \tag{2}$$

约束条件为:

$$\sum_{i=1}^{k} c_{d_i j}' = c_j, 0 \le c_{d_i j}' \le c_{d_i j} (j = 1, 2, L\ , m), t_{d_i j} > 0$$

根据中国溢油应急计划的规定, 我国的溢油应急分为三个层次: 全国、海区(含特殊区域)、港口水域, 并由此制定各级的溢油应急计划. 由中国各应急辖区分布图可知, 为了能够独立处理也可以联合处理方便稳定, 其各救援物资供应点不多且应该是种类齐全且是按比例配置.

根据溢油事故特点可知, 若溢油随着海水的漂流(风力等影响)扩散到敏感区等(包括岸线、珍惜生物及植物等)所造成的损失巨大[1]. 据此, 给出如下定义和假定:

定义 1. 应急点所需的各种资源都到达个应急点, 并且满足个应急点需求量的时候, 应急救援开始进行, 此时称为应急开始时间.

定义 2. 根据 GIS 系统预测出溢油是否扩散到敏感区, 从溢油事故开始发生到预测出溢油扩散到敏感区的这段时间, 称为最晚响应时间.

假定 溢油事故发生后且没有救援条件下, 在没有影响到敏感区等($t \le T$), 应急点所造成的损失量, 随着时间的发展呈线性增长模式; 若影响到敏感区等($t > T$), 应急点造成的损失量将急剧增长.

记应急点的损失量为 L, 则溢油事故造成的损失量可以表示为

$$L = \begin{cases} \int_{t_s}^{t_e} f(t)dt, & t \le T \\ \infty\ , & t > T \end{cases} \tag{3}$$

上式中的 $f(t)$ 即假定中的线性函数, 表示 t 时刻溢油事故造成的损失量. t_s 为溢油事故发生的时刻, t_e 为救援物资到达后溢油事故影响的结束时刻, T 为影响到敏感区等最晚响应时间.

由上述给出的假定可知, 在 $t \le T$ 情形下, 应急点造成的损失量随时间呈线性增长, 则要找出 Ω 中的某个方案 ξ , 使得同时满足(1)和(2)的最优方案; 若 $t > T$ 情形下, 应急点造成的损失量随时间急剧增长, 则要找出 Ω 中的某个方案 ξ , 优先满足(1)目标条件下, 再满足(2).

2.2 问题的分析

① $t \le T$

在这种情况下, 为典型的多目标规划问题, 响应时间最早 $\min T(\xi)$ 却不一定出救点数量最少 $\min N(\xi)$, 反之一样. 对于此类问题可以采用理想点的方法来进行求解. 理想点方法基本思想是求出各目标函数的最优值和最劣值, 即其正理想点和负理想点, 利用公式求出各非劣方案 ξ_v 和正负理想点的相对接近度 ε_v , 按相对接近度 ε_v 的大小排序, 其中值最大的为最优方案. 对于本问题, 不妨设 $T(\underline{\xi}'), T(\overline{\xi}'), N(\underline{\xi}''), N(\overline{\xi}'')$ 分别为(1)

© 中国科学院软件研究所 http://www.c-s-a.org.cn

和(2)的正理想点和负理想点, 则每个非劣方案 ξ，与正理想点的接近度为

$$R_v=\omega_1\frac{T(\underline{\xi}')}{T(\xi_v)}+\omega_2\frac{N(\underline{\xi}'')}{N(\xi_v)} \tag{4}$$

与负理想点的接近度为

$$r_v=\omega_1\frac{T(\xi_v)}{T(\overline{\xi}')}+\omega_2\frac{N(\xi_v)}{N(\overline{\xi}'')} \tag{5}$$

式中, ω_1 和 ω_2 分别为关于响应时间和出救点数目的权重, 其数值可由相关专家给出且满足归一化条件 $\omega_1+\omega_2=1$，在本文中均采取 0.5, 每个非劣方案 ξ 对理想点的相对接近度为:

$$\varepsilon_v=\frac{R_v}{R_v+r_v},0\le\varepsilon_v\le 1 \tag{6}$$

ε_v 越大表明调度方案越好, 所以运用理想点法将原式(1)和(2)多目标问题转化成公式(6)单目标问题.

②$t>T$

由于理想点法的适用范围是两个目标函数是线性增减, 只是权重不同, 目标函数之间并没有优先级之分, 其针对非线性问题往往效果不理想. 在此采用贪心算法的思想, 寻找出救点集合, 求出剔除淘汰集合, 给出出救方案, 算法思想如下.

根据应急点给出的物资需求,将各出救点 $A_1,A_2,\cdots,A_n$ 按响应时间 t_i 升序排列, 由物资需求求出最早响应时间 t_i，即可确定出救点集合为 $RA=\{A_1,A_2,\cdots,A_i\}$，再将出救点 $A_1,A_2,\cdots,A_i$ 按不同物资 j 降序排列, 分别求出各物资的淘汰集合 $(RA^-)_j$，并通过 $RA^-=(RA^-)_1\cap(RA^-)_2\cap\cdots\cap(RA^-)_i$ 求出剔除集合 RA^-, 最后将出救物资较少的出救点 A_i 剔除掉, 得到最少出救点集合, 即在满足表达式(2)下寻找到了满足 $\min N(\xi)$ 的最少出救点集合.

3　模型求解及算法步骤

3.1　$t\le T$

在这种情况下, 欲求解公式(4)和(5), 必须先求出 $T(\xi)$ 和 $N(\xi)$ 的正负理想点.

3.1.1　$T(\underline{\xi}'),T(\overline{\xi}'),N(\underline{\xi}''),N(\overline{\xi}'')$ 的分析及满意度 ε_v 的求解

直观地看, 要求出 $T(\underline{\xi}')$，即在选择出救点时应该优先选取那些出救时间小的出救点, 则在满足救援物资条件下, 每种物资的出救时间最大值即是整个救援行动的最早响应时间, 即为所要求的 $T(\underline{\xi}')$. 由最晚响应时间 T 可知 $T(\overline{\xi}')=T$.

由题意知, 在 $t\le T$ 情形下, $RA=\{A_1,A_2,\cdots,A_i\}$，将集合 RA 中元素按响应时间 t_i 升序排列, 对物资 c_j，必然会存在一个临界点, 即 $\sum_{p=1}^{q_j-1}c_{pj}<c_{pj}\le\sum_{p=1}^{q_j}c_{pj}$，并且可以得出第 j 种物资以应急开始时间最早的最优调度方案 $\xi_j'=\{(A_1,c_{1j}'),(A_2,c_{2j}'),\cdots,(A_q,c_j-\sum_{p=1}^{q_j}c_{pj})\}$，则最早应急开始时间为出救点 $A_1,A_2,\cdots,A_{qj}$ 运输时间中最大的一个. 同理, 可以求出其他物资的最早救援时间, 则此时最优方案为 $\xi'=\{\xi_1',\xi_2',\cdots,\xi_m'\}$，$T(\underline{\xi}')=\max(t_{q1},t_{q2},\cdots,t_{qm})$. 由 $t\le T$ 前提可得知 $T(\underline{\xi}')\le T(\overline{\xi}')=T$.

而求解 $N(\underline{\xi}''),N(\overline{\xi}'')$，由 $t\le T$ 前提, 令 $t_i\le T<t_{i+1}$，出救点集合 $RA=\{A_1,A_2,\cdots,A_i\}$，响应时间为 t_i，则分别求出每种物资 j 的淘汰的集合 $(RA^-)_j$，由 $RA^-=(RA^-)_1\cap(RA^-)_2\cap\cdots\cap(RA^-)_i$，最后求出 RA^- 中的剔除集合 $RA^-{}'$，即所要求的 $N(\underline{\xi}'')=|RA-RA^-{}'|$，$N(\overline{\xi}'')=|RA|$.

由满意度公式(6), 在 $t\le T$ 前提下, 针对每种非劣方案 ξ_v 分别求解出 ε_v，并比较各方案满意度的大小.

3.1.2 算法步骤

根据上文的调度思想, 提出调度算法 1 如下:

算法 1.

输入: A_i,c_j,c_{ij},t_i,T；

输出: $t\le T$ 情形下, 每种物资按此刻 t_i 的出救方案 ξ_v^*，出救点个数 n'，响应时间 t_i，满意度 ε_v 以及最后由满意度 ε_v 确定出的出救点集合及各出救点出救物资数量.

步骤 1: 根据提供的需求, 将各出救点 $A_1,A_2,\cdots,A_n$ 按响应时间 t_i 升序排列, 求出最早响应时间 t_i，若 $t_i\le T$，令序号 $v=0$，$n'=n$ (n' 用于记录 t_i 时刻出救点的数量), 求出 $T(\underline{\xi}'),T(\overline{\xi}'),N(\underline{\xi}''),N(\overline{\xi}'')$，转入步骤 2, 否则, 转入算法 2.

步骤 2: 由响应时间 t_i，求出 $T(\xi_v)=t_i$.

步骤 3: 在响应时间 t_i 下, 找出满足 $N(\xi_v)<n'$ 的组合, 如果存在这样的组合, 则 $n'=N(\xi_v)$，$v=v+1$，转入步骤 4; 否则, 转入步骤 5.

步骤 4: 由公式(6) $\varepsilon_v=\frac{R_v}{R_v+r_v}$ 计算 t_i 时刻的满意度, 记录响应时间 t_i，对每种物资按此刻 t_i 的出救方案 ξ_v^*，出救点个数 n' 和满意度 ε_v.

步骤 5: 如果 $t_i\le T$，则 $i=i+1$，转入步骤 2; 否则, 转入步骤 6.

© 中国科学院软件研究所　http://www.c-s-a.org.cn

步骤 6: 按序号 v 打印出各结果, 比较各个 ε_v 值, 选取 ε_v 最大的出救方案, 即本次调度的最优解.

3.2 $t>T$

根据给出的物资需求, 求出满足需求条件的最早响应时间 t_i, 即得出出救点集合 $RA=\{A_1,A_2,\mathrm{L}\ ,A_i\}$, 将各出救点 $A_1,A_2,\mathrm{L}\ ,A_n$ 按各物资的储备数量降序排列, 然后按 RA 集合中的出救点对每种物资 j 求出最少出救点个数 q_j, 得出 $Q=\max(q_j)$, 并建立集合 $(RA^-)_j$, 即每种物资 j 选取可以淘汰的出救点 A_i 的集合 $(RA^-)_j$. 求出 $RA^-=(RA^-)_1\cap(RA^-)_2\cap\mathrm{L}\ \cap(RA^-)_m$, 并在淘汰集合 RA^- 中确定最后需要去除的出救点集合 $RA^-{}'$(即 $RA^-{}'$ 集合中的元素全部剔除掉), 得出满足 $\min T(\xi)$ 的条件下, 出救点数量最少的方案为 $RA-RA^-{}'$. 根据上述调度思想, 给出调度算法 2 如下:

算法 2.

输入: A_i,c_j,c_{ij},t_i,T;

输出: $t>T$ 情形下, 出救点集合及相应出救点出救物资数量.

步骤 1: 根据应急点的需求, 将各出救点 $A_1,A_2,\mathrm{L}\ ,A_n$ 按响应时间 t_i 升序排列, 求出最早响应时间 t_i, 将各出救点 $A_1,A_2,\mathrm{L}\ ,A_n$ 按各物资的储备数量降序排列, 求出每种物资 C_j 的最少出救点个数 q_j, 得出 $Q=\max(q_j)$, 即 Q 就是可能的出救点数量的最小值. 若 $t_i>T$, 转入步骤 2, 否则, 转入算法 1.

步骤 2: 令出救点集合 $RA=\{A_1,A_2,\mathrm{L}\ ,A_i\}$, 分别对每种物资 j 求出 $(RA^-)_j$.

步骤 3: 求出 $RA^-=(RA^-)_1\cap(RA^-)_2\cap\mathrm{L}\ \cap(RA^-)_m$, 令 $n'=i-Q$.

步骤 4: 若 $n'>0$, 转入步骤 5, 否则, 转入步骤 6.

步骤 5: 对集合 RA^- 找出 n' 个出救点, 若剩下的出救点满足应急需求, 则计算出剔除集合 $RA^-{}'$, 转入步骤 6, 否则, $n'=n'-1$, 转入步骤 4.

步骤 6: 得出出救点集合为 $RA-RA^-{}'$

4 算例

为了验证上述方法的可行性, 本文引入一个算例进行测试. 假设有 10 个溢油应急物资供应点 $A_1\sim A_{10}$, 一个溢油应急点 B, 需要 3 种应急物资, 3 种物资的需求量分别是: (20, 19, 15), 各个物资供应点的储备量具体如表 1 所示.

表 1 各个出救点相关物资的信息

出救点 A_i	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	A_6	A_7	A_8	A_9	A_{10}
响应时间 t_i	2	3	4	4	6	7	9	11	16	20
C_1	3	1	4	6	4	5	8	6	7	12
C_2	5	2	2	6	3	4	7	8	6	9
C_3	3	4	5	2	5	6	5	9	7	7

由应急点 B 对各物资的需求可计算出最早响应时间为 $t_6=7$ 和 $Q=3,T(\underline{\xi}')=7,T(\overline{\xi}')=16,N(\underline{\xi}'')=3,N(\overline{\xi}'')=9$.

①若最晚响应时间 $T=16$, 可知 $t\le T$, 则采用算法 1, 计算过程及结果如表 2 所示.

由表 2, 比较各个方案 ξ_v^* 的满意度 ε_v, 选取其中最大值 $\varepsilon_v=0.61703$, 即方案 $v=1$ 为此次出救的最佳调度方案, 选取 $RA=\{A_1,A_3,A_4,A_5,A_6\}$ 这 5 个出救点, 最早响应时间为 7.

表 2 计算过程及结果

序号 v	响应时间 t_i	出救点 n'	出救方案 ξ_v^*	满意度 ε_v
1	$t_i=7$	5	$(\underline{A_1,1}),(A_3,4),(A_4,6),(A_5,4),(A_6,5)$ $(\underline{A_1,4}),(A_3,2),(A_4,6),(A_5,3),(A_6,4)$ $(A_1,0),(\underline{A_3,5}),(A_4,2),(A_5,5),(A_6,6)$	0.61703
2	$t_i=9$	4	(共 8 种调度组合, 这里列举其中一种) $(A_1,3),(A_5,4),(A_6,5),(A_7,8)$ $(A_1,5),(A_5,3),(A_6,4),(A_7,7)$ $(A_1,0),(\underline{A_5,4}),(A_6,6),(A_7,5)$	0.60274
3	$t_i=11$	3	$(A_4,6),(A_7,8),(A_8,6)$ $(\underline{A_4,4}),(A_7,7),(A_8,8)$ $(\underline{A_4,1}),(A_7,5),(A_8,9)$	0.61582
4	由 $Q=3$ 可知 $n'\ge3$, 算法终止			

© 中国科学院软件研究所 http://www.c-s-a.org.cn

②若最晚响应时间 $T=5$，可知 $t>T$，则采用算法 2，过程如下：

a. 计算出各物资 C_j 的最早开始时间分别为 $t_{C1}=7, t_{C2}=7, t_{C3}=6$，可知最早响应时间 $t_i=7$.

b. 由 $t_i=7$ 可知出救点集合 $RA=\{A_1, A_2, \cdots, A_6\}$，分别求出集合 $(RA^-)_1=\{A_1, A_2\}$，$(RA^-)_2=\{A_2, A_3, A_5\}$，$(RA^-)_3=\{A_1, A_2, A_3, A_4, A_5, A_6\}$.

c. 由 $RA^-=(RA^-)_1 \cap (RA^-)_2 \cap (RA^-)_3=\{A_2\}$，则可由 $n'=i-Q$ 可求出 $RA^-{}'=\{A_2\}$.

d. 最后得出出救方案 $RA-RA^-{}'=\{A_1, A_3, A_4, A_5, A_6\}$，具体调度结果如表 3 所示.

表 3　$t>T$ 情况下，算法 2 调度结果

物资 \ 出救点	A_1	A_3	A_4	A_5	A_6
C_1	1	4	6	4	5
C_2	4	2	6	3	4
C_3	0	5	2	5	6

由上述结果分析可知，对于 $t\le T$ 情形，选取 $RA=\{A_1, A_3, A_4, A_5, A_6\}$ 这 5 个出救点，最早响应时间为 7. 事实证明，这一调度结果是所有可行的调度方案中应急开始时间最早的，同时出救点个数也是最少的，应急点的损失也是最小的. 对于 $t>T$ 情形，给出了最优出救方案优先满足最早响应时间下的最少出救点数量. 由此说明，运用本文中的方法来解决多出救点多物资调度策略问题是可行的.

5　总结

本文针对溢油事故应急决策中救援物资调度方法进行研究，并具体结合溢油敏感区等对响应时间的限制，提出了基于不同响应时间段的动态优化目标，考虑应急救援时间和出救点数目多目标给出了相应的调度算法，并运用算例对其进行验证与测试，结果表明能较好的解决溢油应急决策中多出救点多物资调度方案的选择问题，对溢油应急决策提供了良好的理论基础.

参考文献

1 王宁,鲍君忠.海上搜救与溢油应急处理技术.大连:大连海事大学出版社,2009.

2 Tong SC. Interval number and fuzzy number linear programming. Fuzzy Set and System, 1996, 66(6): 12–14.

3 陈达强,刘南,缪亚萍.基于成本修正的应急物流物资响应决策模型.东南大学学报(哲学社会科学版),2009,11(1): 67–70.

4 栾翠菊,王晓峰.溢油应急决策中的设备优化调度方法研究.计算机工程与应用,2012,48(19):23–27.

5 刘春林,何建敏,盛昭瀚.多出救点应急系统最优方案的选取.管理工程学报,2000,14(1):13–15.

6 刘春林,沈厚才.一类离散应急供应系统的两目标优化模型.中国管理科学,2003,11(4):27–31.

7 孙敏,潘郁.多资源复杂网络的应急调度研究.运筹与管理,2009,18(6):165–169.

8 高淑萍,刘三阳.应急系统调度问题的最优决策.系统工程与电子技术,2003,25(10):1222–1224.

9 戴更新,达庆利.多资源组合应急调度问题的研究.系统工程理论与实践,2009,9(9):52–55.

10 刘春林,施建军,刘春雨.模糊应急系统组合优化方案选择问题的研究.管理工程学报,2002,16(2):25–28.

11 胡飞虎,耿泽飞,陈慧敏,孙林岩.多资源组合多目标应急调度问题的研究.微计算机信息,2009,25(7):9–10.

© 中国科学院软件研究所 http://www.c-s-a.org.cn