

舰艇编队海上物资再补给目标优化研究

秦芙蓉 罗朝晖 董 鹏

(海军工程大学管理工程系 武汉 430033)

摘要 为对舰艇编队的物资的再补给过程进行优化研究,首先,分析了舰艇编队物资补给的全过程,阐述了物资再补给的必要性;其次,将常见的应急物资调度问题与海上物资再补给问题进行比较,分析二者的联系与区别;接着,基于海上再补给对物资的要求,以再补给任务完成时间最短及物资调度总成本最小为目标建立优化模型,并类比应急物资调度中出救点的组合优化问题进行算法设计;最后,以某舰艇编队实施常规再补给任务为例,运用所设计的算法进行求解,得出合理的规划方案。结果验证了算法的有效性以及运用算法解决海上物资再补给问题的可行性。

关键词 舰艇编队,海上物资再补给,运输调度

中图分类号 E953 文献标识码 A

Object Optimization Research of Underway Materials Resupplying for Battle Group

QIN Fu-rong LUO Zhao-hui DONG Peng

(Department of Management Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract In order to improve the process of battle group's underway materials resupplying, this research analyzed the whole process of underway replenishment scheduling and the necessity of transportation scheduling. Afterwards, a comparison between ordinary emergency resources scheduling and underway materials transportation scheduling was made, and the similarities and differences were analyzed. Then, based on requirements of transportation scheduling, this research presented a multi-objective optimization model by taking the minimum task completion time and the minimum task cost as objectives. Lastly, an algorithm was designed to solve this scheduling problem and a typical example is given. A reasonable scheme is obtained by using models and algorithm above, which verifies effectiveness and feasibility of the algorithm.

Keywords Underway battle group, Underway materials resupplying, Transportation scheduling

为了维护我国海洋权益及保卫海上安全,建设一支强大的远洋战斗力量成为海军发展的必然方向。远洋实施巡防、演习作战等任务具有航行时间长、任务复杂、物资需求量大等特点^[1];而编队自持能力有限,虽然综合补给舰可为各作战舰船实施伴随补给,但单纯依靠综合补给舰往往很难满足长时间的物资保障。当物资缺乏时,由综合补给舰返回岸基前进基地进行物资再补给显然不符合实际情况,而海上运输船队作为岸基基地与舰艇编队的中转站,起到了“海上物流中心”的作用,极大缩短了综合补给舰进行物资再补给的时间,是远洋物资补给不可或缺的一环。构建“岸基前进基地—运输船队—综合补给舰”的分段接力式补给模式可有效提高海上补给的能力和效率^[1]。分段接力式补给模式的示意图如图 1 所示。

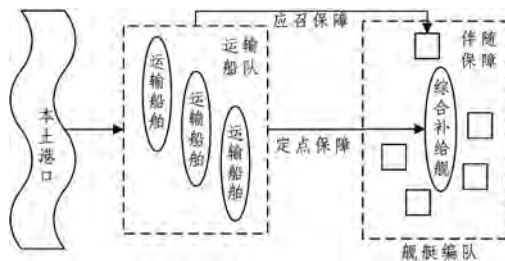


图 1 分段接力式补给模式的示意图

其中,由运输船队实施的物资保障过程被称为物资再补给或物资运输调度。运输船队一般由弹药船、油船等构成,本文将海上物资再补给问题界定为根据任务情况、物资的需求情况、运输船队的可用情况等,指派适当的船舶以合适路径完成对综合补给舰或作战舰船的补给,以节约运输成本和降低运输风险为目标,在尽可能短的时间内完成运输保障任务或保障作战效能的发挥。但目前国内外几乎未见专门针对该问题的研究,经分析,其在一定程度上与应急物资调度问题有相似之处。对应急物资调度问题加以分析研究,借鉴已有的丰富研究成果,将有助于解决海上运输船队的物资调度问题。然而,两者也有许多不同之处,必须加以区分。

本文在分析两者区别的基础上,针对海上再补给过程对物资运输调度的特殊需求,选择合适的目标建立多目标优化模型,并在应急物资调度相关算法的基础上进行改进及重新设计,以实例证明模型及算法的有效性。

1 海上物资再补给与应急物资调度的联系与区别

应急物资的调度,就是在给定的时间范围内将一定数量、种类的应急物资按照一定的顺序准确运送至需求地点。对该过程的研究一般分为两类^[2]:1)将应急物资调度问题转化为

对最短行驶路线的求解问题;2)将应急物资调度问题转化为对物资供应点的选择问题,即当存在多个物资数量及种类各不相同的物资供应点时,如何选择参与应急的物资供应点而使特定目标达到最优的问题。

本文的海上物资再补给问题研究的是运输船队为舰艇编队提供物资再补给的过程。船队包括若干艘船舶,其所能提供的物资种类、数量各不相同。当舰艇编队中的综合补给舰甚至是特殊情况下的作战舰船提出再补给需求时,需要决定如何合理指派运输船舶,确定补给的物资种类、数量以及运输路径,使运输任务高效完成。

因此,第二类应急物资的调度问题与本文物资再补给问题具有相似之处:运输船队及其船舶相当于物资供应点,待补给的补给舰或作战舰船相当于应急需求点,船队的物资则相当于应急物资,目标则都要对出救点、物资种类及数量进行规划,使特定的目标达到最优。例如,大部分学者的研究都以“应急时间开始最早”“出救点数量最少”为目标^[3-5]建立模型,以进行多出救点的优化研究。

海上物资再补给的运输路径与陆地不同,且其优化目标应当根据任务及自身特点而定;再如两者的出救点及应急点的概念、路径限制等不同。主要不同之处在于:1)出救点对象不同。应急物资调度中研究的是对各出救点的合理选择;海上物资再补给研究的是对运输船舶的合理指派,单艘运输船舶既作为运载工具,又作为“出救点”,即单个运输船队对应于应急物资调度问题中的“多出救点问题”。2)运载工具的概念不同。应急物资调度中,出救点的物资由陆上运载工具承担,易受运载量、陆上交通网络的限制^[8],对其的优化研究为车辆路径问题(VRP);而海上物资再补给中的每一艘运输船舶便是运载工具,受固定线路的限制较少,一般不需要考虑路径限制。3)优化目标不同。目前,应急物资调度的相关研究一般都以“应急开始时间”最早、“出救点数量”最少等为目标对多出救点进行优化选择。海上物资再补给问题的优化目标应当根据自身特点而定。在执行巡航等常规任务时,若无应急物资调度中的任务紧迫性,可将任务完成时间最短、成本最小、动用船舶数量最少等为目标进行优化研究。本文综合考虑再补给任务的完成时间及总成本,以建立多目标模型。

2 海上物资再补给问题的数学描述

在执行巡航等常规任务时,再补给任务一般没有强烈紧迫性,且考虑到未来采用民船作为运输船舶保障我国远洋舰艇编队的可能性,因此一定程度上平衡了时效性与经济性指标,以完成再补给任务“时间最短”“总成本最小”为优化目标建立多目标规划模型。本文假设该情境下的物资再补给是包含单运输船队、单需求点(即综合补给舰)、多物资种类的调度问题,具体描述如下:

运输船队A有n艘运输船舶 $A = \{a_i | i = 1, 2, \dots, n\}$;再补给会合点为B;舰船 a_i 可提供的j种物资数量为 $X_i = \{x_{ij} | i = 1, 2, \dots, n\}$;需求点对j种资源的需求量 $D = \{d_j | j = 1, 2, \dots, L\}$;运输船舶 a_i 航行到再补给会合点并实施补给的成本为 c_i ,航行时间为 t_i ,对应的再补给作业时间为 t_{ib} (假设其与补给物资的种类和数量无关),不妨设 $t_1 \leq t_2 \leq \dots \leq t_n$,再补给任务的完成时间为T。规划参与任务的船舶和各自提供的物资量,使再补给任务完成时间最短且总成本最小。

其中,再补给任务完成时间定义为从运输任务下达到最后一艘船舶完成再补给任务时止。第i+1艘运输船舶完成作业时,再补给任务已持续时间 $T_{i+1} = \max(t_i + t_{ib}, t_{i+1}) + t_{(i+1)b}$ 。

设全部可行方案的集合为 ϕ ,建立多目标模型如下:

$$\begin{cases} \min T(\varphi) \\ \min C(\varphi) = \sum_{e=1}^q c_{i_e} \end{cases} \quad (1)$$

$$s. t. \varphi \in \phi \quad (2)$$

3 算法设计

3.1 模型求解思路阐述

本问题为多目标模型,可使用理想点法进行模型求解。令 $\sup\{T(\varphi)\}$ 和 $\sup\{C(\varphi)\}$ 、 $\inf\{T(\varphi)\}$ 和 $\inf\{C(\varphi)\}$ 分别为目标函数的正、负理想点,则某一可行方案 φ 与正理想点的接近程度 R_φ 以及与负理想点的接近程度 r_φ 分别为:

$$\begin{cases} R_\varphi = \omega_1 (\inf\{C(\varphi)\}/C(\varphi)) + \omega_2 (\inf\{T(\varphi)\}/T(\varphi)) \\ r_\varphi = \omega_1 (C(\varphi)/\sup\{C(\varphi)\}) + \omega_2 (\inf\{T(\varphi)\}/T(\varphi)) \end{cases} \quad (3)$$

目标分量的权重 ω_1 和 ω_2 ($\omega_1 + \omega_2 = 1$)可由专家或决策人员通过实践经验、综合评价等方式给出,其值的大小并不影响算法流程,因此为简单起见,本文各取0.5。综上,可得某一可行方案 φ 与理想点的接近程度 $\mu_\varphi = R_\varphi / (R_\varphi + r_\varphi)$ 。上述多目标模型可转化为:

$$\max \mu_\varphi \quad (4)$$

$$s. t. \varphi \in \phi \quad (5)$$

首先须求得 $\sup\{T(\varphi)\}$ 和 $\sup\{C(\varphi)\}$ 、 $\inf\{T(\varphi)\}$ 和 $\inf\{C(\varphi)\}$ 。具体方法如下:求得一系列可行方案的任务完成时间及成本,取最短时间及最小成本作为 $\inf\{T(\varphi)\}$ 和 $\inf\{C(\varphi)\}$ 。当运输船舶均参与运输任务时,任务的最短完成时间及总成本最大,即 $\sup\{T(\varphi)\} = T_{i_n}$, $\sup\{C(\varphi)\} = \sum_{i=1}^n c_i$ 。

3.2 算法设计

基于以上分析,设计算法如下:

(1)令 $h = n, v = 0$ 。

(2)对每艘运输船舶按补给成本 c_1, c_2, \dots, c_h 由小到大的顺序排序(若值相等则依次按 t_i, t_{ib} 排序)得序列 $a_{i_1}, a_{i_2}, \dots, a_{i_h}$ (其中 i_1, i_2, \dots, i_h 为 $1, 2, \dots, n$ 的一个排列)。若存在 $q(1 \leq q \leq n)$,使 $\sum_{h=1}^{q-1} x_{i_h j} \leq d_j \leq \sum_{h=1}^q x_{i_h j}$ 成立,则得一可行方案:

$$\varphi_v = \{(a_{i_1}, X_{i_1}), (a_{i_2}, X_{i_2}), \dots, (a_{i_q}, D - \sum_{e=1}^{q-1} X_{i_e})\}$$

求得 $T(\varphi_v), C(\varphi_v), v = v + 1$;若不存在u,则执行步骤(5)。

(3) $h = h - 1$,执行步骤(2)。

(4)求得 $\sup\{T(\varphi)\}$ 和 $\sup\{C(\varphi)\}$,统计所有方案得 $\inf\{T(\varphi)\}$ 和 $\inf\{C(\varphi)\}$ 。

(5)计算各方案的 μ_φ 值,值最大的为最优方案。

考虑到减少出动的船舶数量,一般也会带来成本的降低,而按照以上算法求得的 φ_v 往往并不是出动船舶的最少的方案。分别求解每一种物资对应需求的临界下标 u_j ,令:

$$N_{\max} = \max u_j (j = 1, 2, \dots, L)$$

可知任一方案出动船舶的数量不小于 N_{\max} 。出动船舶的数量为 $N_{\max} \sim i_u$ 的可行方案也可能是性质较好的可行方案,因此设计改进算法如下:

(1)、(2)、(3)同上。

(4)求得 N_{\max} , 令 $n' = N_{\max}$ 。

(5)判断 n' 是否小于 u , 若小于, 则执行下一步; 若不小于, 则执行步骤(8)。

(6)求出运输船舶集合的所有 n' 组合, 若存在可行方案, 则求得所有方案 $\varphi_v', T(\varphi_v'), C(\varphi_v')$ 。若不存在, 则进行下一步。

(7) $n' = n' + 1$, 执行步骤(5)。

(8)、(9)同上方案(4)、(5)。

至此, 出动船舶数量小于 i_u 的非劣方案均已求出, 而大于 i_u 的方案易知一定不优于已得方案, 因此基于上述算法即可求得最优方案。

4 案例分析

某运输船队 A 有 10 艘运输船舶, 再补给会合点(即综合补给舰)共需 3 种物资 L_1, L_2, L_3 , 需求量分别为(20, 18, 17)。各

运输船舶的航行时间 t_i 、补给时间 t_{ib} 、每次补给的成本 c_i 及可提供的 3 种物资数量如表 1 所列。需要规划派出的船舶及各自提供的物资量, 使再补给任务完成时间最短且总成本最小。

表 1 多种物资的物资再补给问题数据

	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	a_7	a_8	a_9	a_{10}	D
t_i	4	5	6	7	7	8	8	9	9	10	/
t_{ib}	1.5	2	1.2	1	2	2.5	3	1.8	3.5	3	/
c_i	6	10	8	7	8	7	6	12	12	9	/
L_1	7	1	5	9	4	2	4	5	12	3	20
L_2	8	3	2	5	4	7	10	3	4	5	18
L_3	5	6	4	6	3	9	3	3	4	10	17

采用上述算法, 求解过程及结果如表 2 所列。

$N_{\max} = 2, n' = 2;$

$\sup\{T(\varphi)\} = 25.5, \sup\{C(\varphi)\} = 85,$

$\inf\{T(\varphi)\} = 9.7, \inf\{C(\varphi)\} = 25。$

表 2 海上物资再补给规划过程

h	根据 c 的大小排序	u	v	方案 φ	$C(\varphi_v)$	$T(\varphi_v)$	μ_φ
10	$a_1, a_7, a_4, a_6, a_3, a_5,$ a_{10}, a_2, a_9, a_8	4	1	$\left\{ \begin{matrix} (a_1, 7) & (a_7, 4) & (a_4, 9) & (a_6, 0) \\ (a_1, 8) & (a_7, 10) & (a_4, 0) & (a_6, 0) \\ (a_1, 5) & (a_7, 3) & (a_4, 6) & (a_6, 3) \\ (a_1, 7) & (a_7, 4) & (a_4, 9) & (a_6, 0) \end{matrix} \right\}$	26	13.5	0.668
9	$a_1, a_7, a_4, a_6, a_3, a_5,$ a_2, a_9, a_8	4	2	$\left\{ \begin{matrix} (a_1, 8) & (a_7, 10) & (a_4, 0) & (a_6, 0) \\ (a_1, 5) & (a_7, 3) & (a_4, 6) & (a_6, 3) \\ (a_1, 7) & (a_7, 4) & (a_4, 9) & (a_6, 0) \end{matrix} \right\}$	26	13.5	0.668
8	$a_1, a_7, a_4, a_6, a_3, a_5,$ a_2, a_8	4	3	$\left\{ \begin{matrix} (a_1, 8) & (a_7, 10) & (a_4, 0) & (a_6, 0) \\ (a_1, 5) & (a_7, 3) & (a_4, 6) & (a_6, 3) \\ (a_1, 7) & (a_7, 4) & (a_4, 9) & (a_6, 0) \end{matrix} \right\}$	26	13.5	0.668
7	$a_1, a_7, a_4, a_6, a_3, a_5,$ a_2	4	4	$\left\{ \begin{matrix} (a_1, 8) & (a_7, 10) & (a_4, 0) & (a_6, 0) \\ (a_1, 5) & (a_7, 3) & (a_4, 6) & (a_6, 3) \\ (a_1, 7) & (a_4, 9) & (a_6, 2) & (a_3, 2) \end{matrix} \right\}$	26	13.5	0.668
6	$a_1, a_4, a_6, a_3, a_5, a_2$	4	5	$\left\{ \begin{matrix} (a_1, 8) & (a_4, 5) & (a_6, 5) & (a_3, 0) \\ (a_1, 5) & (a_4, 6) & (a_6, 6) & (a_3, 0) \\ (a_1, 7) & (a_4, 9) & (a_3, 4) & (a_5, 0) \end{matrix} \right\}$	28	10.7	0.706
5	a_1, a_4, a_3, a_5, a_2	4	6	$\left\{ \begin{matrix} (a_1, 8) & (a_4, 5) & (a_3, 2) & (a_5, 3) \\ (a_1, 5) & (a_4, 6) & (a_3, 4) & (a_5, 2) \\ (a_1, 7) & (a_4, 9) & (a_3, 4) & (a_2, 0) \end{matrix} \right\}$	29	10.2	0.710
4	a_1, a_4, a_3, a_2	4	7	$\left\{ \begin{matrix} (a_1, 8) & (a_4, 5) & (a_3, 2) & (a_2, 3) \\ (a_1, 5) & (a_4, 6) & (a_3, 4) & (a_2, 2) \end{matrix} \right\}$	31	9.7	0.708
3	不存在 u	/	/	/	/	/	/
n'	/	/	/	/	/	/	/
2	$a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6,$ a_7, a_8, a_9, a_{10}	/	/	无	/	/	/
3	$a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6,$ a_7, a_8, a_9, a_{10}	/	/	$\left\{ \begin{matrix} (a_1, 7) & (a_6, 2) & (a_9, 11) \\ (a_1, 8) & (a_6, 7) & (a_9, 3) \\ (a_1, 5) & (a_6, 9) & (a_9, 3) \end{matrix} \right\}$	25	14	0.668
4	$n' = u$, 算法终止	/	/	/	/	/	/

比较各个方案的 μ_φ 值, 选取其中最大的值 0.710, 对应的出动船舶为 a_1, a_4, a_3, a_5 , 对应的物资调度方案 φ_v 为:

$$\left\{ \begin{matrix} (a_1, 7) & (a_4, 9) & (a_3, 4) & (a_5, 0) \\ (a_1, 8) & (a_4, 5) & (a_3, 2) & (a_5, 3) \\ (a_1, 5) & (a_4, 6) & (a_3, 4) & (a_5, 2) \end{matrix} \right\}$$

方案对应的目标值 $T(\varphi_v) = 10.2, C(\varphi_v) = 29$ 。

结束语 本文在阐述海上物资再补给必要性的基础上, 讨论了远洋舰艇编队海上再补给问题。通过比较应急物资调度问题与海上物资再补给的联系和区别, 建立了海上再补给多目标规划模型; 并借鉴已有算法, 在理想点法的基础上设计了求解物资再补给任务完成时间最短及总成本最小模型及算法, 并进行案例求解, 得出了合理的规划结果。模型及算法完

善了我国远洋舰艇编队物资再补给的研究, 有助于保障舰艇编队长时间、高强度任务的顺利执行, 为我国海军走向深蓝提供坚实的物资支撑。同时, 本文对运输船舶调度成本的计算、理想点法目标权重的取值较为简便, 且未考虑物资的连续消耗特性, 需要在今后工作中加以改进。

参考文献

[1] 王军生, 李木易. 美海军航母编队海上后勤保障模式及启示[J]. 海军装备维修, 2014(6): 6-8.

[2] 王杏. 救灾物流中的物资调运模型研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2007.

```
loadAggregation()-mondrian, rolap, FastBatchingCell-
Rea-der, Batch
loadAggregation()-mondrian, rolap, FastBatchingCellrea-
der
executeBody(Query)-mondrian, rolap, Result
```

2.2 K-means 算法的实现

以监测系统中的温度数据为例,获得簇数据集以及聚集计算目标数据后,采用 Weka 系统设置模型参数,实现算法建模、仿真^[11]。数据聚类分析结果如图 5 所示。

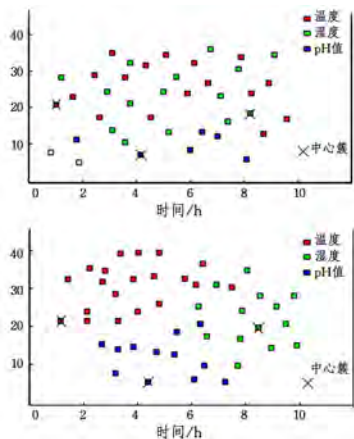


图 5 聚类分析结果

2.3 线性回归算法的实现

实现了聚类算法后,未缓存的数据已经被归类到相异度最低的缓存单元格,通过数据处理后其效果得到进一步改善。之所以加入回归算法是为了应用回归算法本身的可预测性。

传统的报警系统为数据设置阈值,当数据超出阈值范围时启动报警装置。但这种装置反应迟钝,没有足够的缓冲时间。此前,我们设定在各维度中加入了变化量这一属性,取各温、湿度值 t_n 与 t_{n+1} 间的差值。在回归算法中,对于变化量属性的数值,可进一步求取变化量的变化值,也就是读数的变化率。监测回归曲线时,当变化率超出设定范围时,说明数据异常,则激活报警系统,使问题于萌芽状态解决,提高了系统的安全性。

同样地,以采集的温度数据为例,用 Weka 系统来实现回归算法,其回归分析结果如图 6 所示。

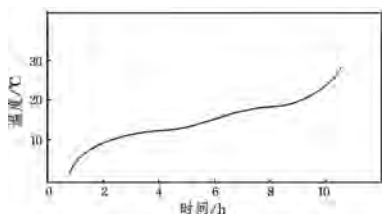


图 6 线性回归曲线

最后,记录并统计报警反应的时间,结果如表 1 所列。

表 1 二者的反应时间对比

报警方式	参数反应	时间/ms
传统报警装置	温度	36
	湿度	42
	pH 值	56
回归算法	温度	17
	湿度	16
	pH 值	16

从表中可知,传统的预警系统与基于算法分析统计的预警系统的反应时间相差较大,基于算法分析的预警方式可以更好地保护系统实施的安全性。

结束语 文中提出了一种将 ROLAP 技术与改进型数据挖掘算法相结合的新型数据处理方法,它不仅能多维的基础上展示查询,且改进型 K-means 算法能更高效地将未缓存数据聚集分类。在融入了回归算法后,得到更敏感的预警系统。根据所有仿真结果以及预警时间的对比可知,新型数据处理方法成功融合了两种数据库工具,提高了数据存储、分类的维度和精准度,信息查询的准确度以及系统的反应速度为研究更多数据库工具的融合提供了技术依据,以挖掘更多、更深层次的数据信息,并适应数据化时代的发展。

参考文献

- [1] 沈敬伟,周廷刚,温永宁,等.基于面向对象数据库的空间数据管理[J].西南大学学报(自然科学版),2013,35(4):132-137.
- [2] 游进国,董朋志,胡宝丽,等.语义 OLAP 缓存技术研究[J].小型微型计算机系统,2015,36(7):1470-1475.
- [3] 陈阵.基于关系型数据库 OLAP 策略的研究与实现[D].大连:大连理工大学,2002.
- [4] 邱怀娜.OLAP 和数据挖掘技术在高校科技管理决策中的应用[D].北京:北京化工大学,2003.
- [5] 刘建宇.基于关系型数据库的 OLAP 的研究[J].煤炭技术,2013,32(4):152-154.
- [6] 张阳,何丽,朱颀东.一种改进的 K-means 动态聚类算法[J].重庆师范大学学报(自然科学版),2016(1):97-101.
- [7] 花俊,胡庆松,李俊,等.海洋牧场远程水质监测系统设计和实验[J].上海海洋大学学报,2014,23(4):588-593.
- [8] 王建平,徐其林,张茂林.基于 EPA 标准的 ZigBee 网络构建方法的研究[J].计算机测量与控制,2008,16(1):121-123.
- [9] 纪雯,王建辉,顾树生,等.基于系统聚类的自动知识获取方法简[J].控制工程,2016,23(10):1527-1532.
- [10] 殷婷,肖敏,陈岭,等.基于 CQPM 的 OLAP 查询日志挖掘及推荐[J].浙江大学学报工学版,2012,46(11):2052-2060.
- [11] 王会青,陈俊杰,侯晓晶,等.决策树分类的属性选择方法的研究[J].太原理工大学学报,2011,42(4):346-348.

(上接第 561 页)

- [3] SHEU J B. Dynamic Relief-Demand Management for Emergency Logistics Operations under Large-Scale Disasters[J]. Transaction Research Part E,2010,46(1):1-17.
- [4] 戴更新,达庆利.多资源组合应急调度问题的研究[J].系统工程理论与实践,2000,20(9):52-55.
- [5] 刘春林,何建敏,施建军.一类应急物资调度的优化模型研究[J].中国管理科学,2001,9(3):29-36.

- [6] BARBAROSOLU G,ARDA Y. A two-stage stochastic programming framework for transportation planning in disaster response[J]. Journal of the Operational Research Society,2004,55(1):43-53.
- [7] 何建敏,刘春林,曹杰,等.应急管理应急系统——选址,调度与算法[M].北京:科学出版社,2005:101-109.
- [8] 罗朝晖,董鹏,黎放.有运力限制条件下的军械紧急调运优化模型研究[J].海军工程大学学报,2006,18(3):1-6.