

海上突发事故多物资分层应急调度模型

闫长健, 徐江波

(集美大学航海学院, 福建 厦门 361021)

[摘要] 针对海上突发事故应急物资调度的特点, 设计一套优化调度算法, 构建陆上仓库—岸基储备库—事故点的多运输工具、多种应急物资分层级调度模型。融合遗传算法和蚁群算法设计相应的算法, 并对调度模型进行求解。研究表明, 提出的算法具有计算时间少, 鲁棒性高以及搜索能力强的特点, 能够解决多物资分层储备下应急物资调度问题。

[关键词] 海上突发事故; 应急物资调度; 遗传算法; 蚁群算法; 分层调度

[中图分类号] X 928.04

Multi-Material Hierarchical Emergency Dispatching Model for Marine Accident

YAN Changjian, XU Jiangbo

(Navigation College, Jimei University, Xiamen 361021, China)

Abstract: According to the characteristics of emergency materials dispatching for maritime accidents, a set of optimization scheduling algorithm is designed, and a hierarchical scheduling model of multiple transportation tools and multiple emergency materials for onshore warehouse, shore based reserve warehouse and accident points is constructed. In order to solve the hierarchical emergency material scheduling model, a corresponding algorithm was designed to solve the scheduling model by combining the advantages of genetic algorithm and ant colony algorithm. The research results show that the proposed algorithm has the advantages of low computational time, high robustness, and strong search ability, and can well solve the emergency material scheduling problem under multi material hierarchical storage.

Keywords: emergency material scheduling; marine accident; genetic algorithm; ant algorithm; hierarchical dispatch

0 引言

海上突发事故包括船舶海上航行因碰撞、触礁、搁浅、火灾或者爆炸等海损事故^[1-2]。在进行应急响应处理时, 与陆上突发事故的不同主要体现在两个方面: 一是在处理海上突发应急事故时, 事故点会随着风、浪和水域环境的因素发生漂移; 二是在初期进行应急物资调度时, 物资主要来源于事故点附近的岸基储备库, 当发生较大海上突发事故时, 则需要陆上仓库多层级调度物资到岸基储备库进行再分配。

[收稿日期] 2021-09-17

[基金项目] 福建省教育厅项目(JAT210239)

[作者简介] 闫长健(1983—), 男, 副教授, 从事交通运输系统工程研究。E-mail:chiyan@jmu.edu.cn

http://xuebaobangong.jmu.edu.cn/zkb

目前, 针对于突发事故应急调度的研究主要是建立单层级调度模型, 结合云计算系统设计算法, 从而制定突发情况下应急物资调度时间最短、费用最低的调度方案^[3-5]。胡飞虎等^[6-7]提出了多物资、多车型的调度系统, 针对陆上突发事故设计物资联动调度; 郭子雪等^[8]通过引入三角模糊数, 解决陆上单层级应急物资调度时运输时间与物资需求量模糊化的物资分配问题; 汪强^[9-10]以海上溢油事故为背景, 分别设计了溢油事故初期单层级的单种物资应急调度和单层级的多物资应急调度模型, 并提出算例进行算法求解; 郝国柱等^[11]利用三角模糊数表征海上溢油过程中灾害点物资需求量的不确定性, 建立应急成本和最小延误时间的双目标模型; 朱雪斌^[12]针对单岸基点无法满足事故点需求的前提下, 建立海上多岸基点、单事故点下的双阶段海上应急物资调度模型, 并设计算法求解。

综合以往文献可以看出: 1) 对于突发应急事故的研究以单层级的调度为主, 主要考虑物资能够满足灾害点的需求情况下的应急调度; 2) 在海上突发事故应急物资方面, 主要考虑物资的分配, 没有结合灾害点物资需求量大时的物资安排和运输工具的物资装配方案。鉴于此, 本文结合海上突发事故应急物资调度特点, 提出陆上仓库—岸基储备库—事故点的多层级调度模型, 并结合多运输工具、多种应急物资等信息, 设计调度方案并进行求解。

1 问题描述

海上突发事故分为特大、重大、较大、一般四个等级险情^[13]。在发生相应等级的事故后, 相关专项指挥部将事态的发展趋势上报突发事件应急领导小组, 相关部门结合事故信息制定应急物资调度方案。当岸基储备库的应急物资无法满足事故点需求时, 由陆上仓库进行调配供应, 整个应急响应过程如图1所示。

在岸基储备库消耗应急物资进行救助的同时, 陆上仓库根据总物资需求量和岸基储备库的各物资不足量通过车辆运输进行调度补充。整个应急物资调度过程为: 陆上仓库 A_i —岸基储备库 S_j —事故点 D_k 。其中: i 为陆上仓库数量; j 为岸基储备库数量; k 为事故点的数量。

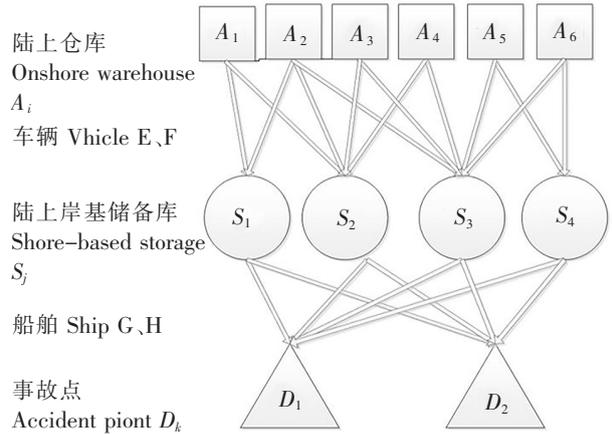


图1 海上突发事故应急物资调度结构
Fig.1 Dispatching structure of emergency supplies for marine emergencies

2 模型的构建

2.1 模型假设

假设条件:

- 1) 两级调度中所有交通工具都用上, 并且每次只装一种物资, 不混装;
- 2) 岸基储备库和陆上仓库各物资总量能满足事故点各物资需求;
- 3) 车辆多次调度, 往返一次算做完成一次调度任务;
- 4) 陆上仓库只能运往岸基储备库, 岸基储备库只能运往事故点。

求解步骤:

- 1) 先得到各岸基储备库向事故点 D_1 、 D_2 的每种物资的总数量;
- 2) 优先调度岸基储备库的储备物资, 同时分配给 G 类和 H 类船舶, G 类和 H 类两者中的一个完成调度任务花费的最长时间, 就是二级的调度时间;
- 3) 岸基储备库需要运往事故点的总数量减去岸基储备库当前的储备量, 得出陆上仓库需要调配运往岸基储备库的物质质量;
- 4) 按陆上仓库需要调配运往岸基储备库的物质质量, 分别从陆上仓库的储备里调度, 因岸基储备

库只能从指定的陆上仓库调度, 这里形成了约束;

- 5) 把陆上仓库需要调度往岸基储备库的物质质量, 同时分配给 E 类、F 类型车辆, 因为调度是同时进行, E 类和 F 类两者中的一个完成调度任务花费的最长时间, 就是一级的调度时间;
- 6) 取一级调度和二级调度时间两者最长的为方案的调度时间, 这样就形成一个解;
- 7) 按上述方式, 取 100 个解为一个种群, 然后进化, 取出时间最短的一个为当下最优解;
- 8) 经过若干次进化, 最终得到一个稳定的值, 这个值就是最优解对应的最终方案。

2.2 模型构建

根据上面假设和求解步骤, 通过定义如下函数, 从而建立目标模型。

$A_{iw} = \{a_{i1}, a_{i2}, \dots, a_{iw}\}$ 与 $S_{jw} = \{s_{j1}, s_{j2}, \dots, s_{jw}\}$ 分别表示陆上仓库 A_i 和岸基储备库 S_j 的 w 类物资存储量。其中: a_{iw} 表示第 i 个陆上仓库储备的第 w 类物资; s_{jw} 表示第 j 个岸基储备库的第 w 类物资。

$D_{kw} = \{d_{k1}, d_{k2}, \dots, d_{kw}\}$ 表示事故点 D_k 的 w 类物资需求量集合, d_{kw} 表示事故点 D_k 的 w 类物资需求量。

$\tilde{A}_{ij} = \{\tilde{a}_{i1}, \dots, \tilde{a}_{ij}\}$ 表示陆上仓库 A_i 到岸基储备库 S_j 的距离。

$\tilde{S}_{jk} = \{\tilde{s}_{j1}, \dots, \tilde{a}_{jk}\}$ 表示岸基储备库 S_j 到事故点 D_k 的距离。

$V_e (e = 1, 2, \dots, g)$ 表示该次调度任务中两级运输工具 V_e 的信息, 包含载货量 (c_e)、速度 (v_e)、交通工具数量 (n_e), 即 $V_e = \{c_e, v_e, n_e\}$ 。其中: g 表述第 g 次运输时的运输工具 (车辆和船舶)。交通工具 V_e 在整个调度过程中的总工作时间为 T_{ew} , 包含第一级陆上仓库到岸基储备库阶段车辆完成调度运输 w 类物资的时间 T_{ew1} , 以及第二级岸基储备库到事故点阶段船舶完成调度运输 w 类物资的时间 T_{ew2} 。

$V_e(q)$ 表示每次调度的物资数量。

$C_e(q)$ 表示运输工具自身的运载能力。

目标模型是求解两级调度 T_{ew1} 、 T_{ew2} 中调度时间更长的最小值, 模型目标函数为 $\min(\max(T_{ew1}, T_{ew2}))$, 以整个调度过程的两阶段完成时间最小为目标。

约束条件:

$$\sum_{k=1}^m D_{kw} > \sum_{j=1}^n S_{jw}, (w = 1, 2, \dots, p); \tag{1}$$

$$\sum_{k=1}^m D_{kw} = \sum_{i=1}^m A_{iw} + \sum_{j=1}^n S_{jw}, (w = 1, 2, \dots, p); \tag{2}$$

$$T_{ew1} = \sum_{n=1}^k A_{ij}/v_e, (i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n); \tag{3}$$

$$T_{ew2} = \sum_{n=1}^k S_{jk}/v_e, (j = 1, 2, \dots, n; k = 1, 2, \dots, m); \tag{4}$$

$$C_e(q) = V_e(q), \forall_k \in h. \tag{5}$$

其中: m 表示所有事故点数量; p 表示岸基储备库数量; n 表示陆上仓库数量; k 表示调度次数, h 属于正整数, 取值为 1, 2, 3, ...。式 (1) 表示目标函数, 以整个调度过程的两阶段完成时间最小为目标; 式 (2) 表示对于 w 类物资事故点的总需求量大于岸基储备库的总供应量; 式 (3) 表示在整个调度过程中对于 w 类型物资, 事故点的需求量等于陆上仓库调度到岸基储备库的物资量加上岸基储备库自身储备量; 式 (4) 表示在第一级调度中车辆调度运输总时间; 式 (5) 表示在第二级调度中船舶调度运输总时间; 式 (6) 表示任意一辆交通工具 e , 每次调度的物资数量等于自身的运载能力。

2.3 模型求解

遗传算法是一种通过模拟自然进化过程搜索最优解的方法^[14]。该算法将问题的求解过程转换成类似生物进化中的染色体基因的交叉、变异等过程。该算法具有较好的收敛性, 在满足计算精度要求的同时, 具有计算时间少, 鲁棒性高的优点。而蚁群算法是一种用来寻找优化路径的概率型算法^[15], 具有分布计算、信息正反馈和启发式搜索的特征, 是一种启发式全局优化算法。蚁群算法与其他启发式算法

相比, 在求解性能上, 具有很强的鲁棒性和搜索较好解的能力。本文融合遗传算法和蚁群算法, 使其在时间效率和求解效率上能够发挥更大优势。利用 python3.7 编辑代码程序, 对各参数信息进行编码, 并读取数据。前期利用遗传算法快速性、随机性、全局收敛性特点, 产生问题的可行解, 然后在有一定初始信息素分布的情况下, 充分利用蚂蚁算法并行性、正反馈性、求解效率高等特点, 构建陆上仓库—岸基储备库—事故点的多种运输工具的联合救援调度模型, 得到最优调度方案。求解算法流程如下图 2 所示。

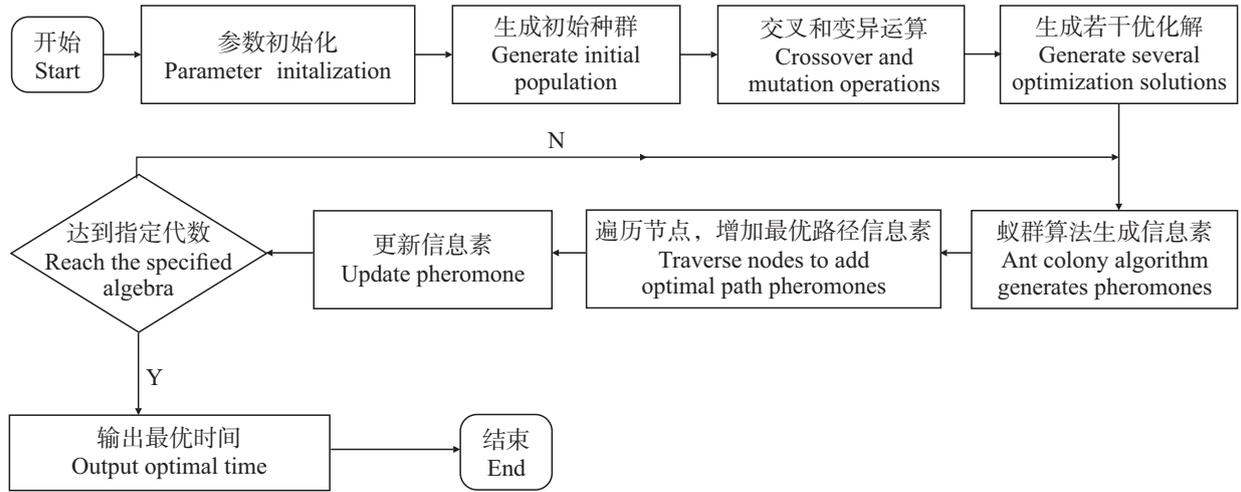


图2 求解算法流程图
Fig.2 Fusion genetic algorithm and ant colony algorithm solution flowchart

3 算例分析

假设海上发生某灾害事故, 出现两个物资需求点。其中: 陆上仓库 (A_1, A_2, \dots, A_6) 与岸基储备库 (S_1, S_2, S_3, S_4) 之间距离见表 1; 岸基储备库与事故点之间距离见表 2; 物资存储情况见表 3; 事故点物资需求及岸基储备库现有仓储情况见表 4。陆上仓库通过车辆将三种物资运输到岸基储备库, 其中: $A_1 \sim A_6$ 每点都具有 E 类车辆 6 辆; A_2, A_4, A_6 具有 F 类运输工具 4 辆。E 类运输车载货量 15 t, 速度 60 km/h。F 类运输车辆 4 辆, 载货量 18 t, 速度 40 km/h。

表 1 陆上仓库到岸基储备库之间距离

Tab. 1 The distance between on shore warehouse and shore-based storage

岸基储备库 Shore based storage	陆上仓库 Onshore warehouse					
	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	A_6
S_1	490	460	330	300	520	500
S_2	500	400	390	280	480	580
S_3	440	250	430	190	340	690
S_4	570	570	340	400	630	420

岸基储备库 S_1 配备有运输船舶 G 类 1 艘, H 类 2 艘; S_2 配备有运输船舶 G 类 2 艘, H 类 2 艘; S_3 配备有运输船舶 G 类 1 艘, H 类 2 艘; S_4 配备有运输船舶 G 类 2 艘, H 类 3 艘。其中: G 类运输船舶运量 300 t, 速度 8 kn; H 类运输船舶运量 100 t, 速度 20 kn。

根据最优解对应的数据确定最终调度方案, 500 次迭代和 1000 次迭代收敛情况分别如图 3、如 4 所示。根据 1000 次迭代结果可知, 目标函数值在很长时间

表 2 岸基储备库到事故点之间的距离

Tab. 2 The distance from the secondary shore-based storage to the accident site

事故点 Accident point	岸基储备库 Shore-based storage			
	S_1	S_2	S_3	S_4
D_1	210	140	170	290
D_2	120	80	210	170

(192 代以后) 不再发生变化, 确定此时对应的配送方案为全局最优解, 对应的配送时间为 22.2 h。

表 3 陆上仓库物资储备情况

Tab. 3 Material reserves of on shore warehouse

岸基储备库 Shore based storage	陆上仓库 Onshore warehouse					
	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	A_6
物资 Materials 1	1600	1200	2100	1100	1200	1400
物资 Materials 2	1000	800	1400	500	2000	800
物资 Materials 3	1300	600	1200	1000	1200	800

表 4 岸基储备库物资储备及需求

Tab. 4 Material reserves and demand for shore-based storage

物质 Materials	岸基储备库 Shore based storage				事故点 Accident point	
	S_1	S_2	S_3	S_4	D_1	D_2
物资 Materials 1	400	450	300	200	1500	1100
物资 Materials 2	300	250	550	250	1200	950
物资 Materials 3	450	300	300	450	1400	1000

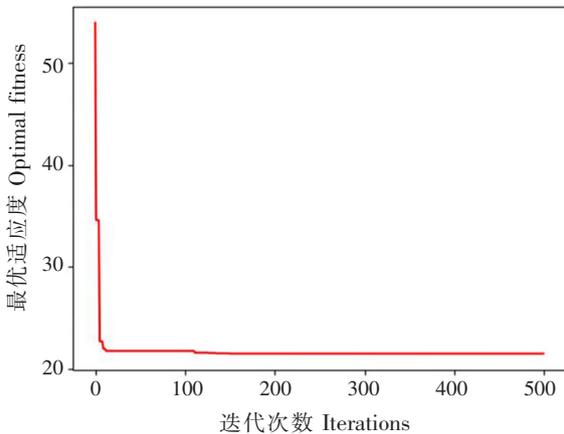


图 3 500 次迭代后任务完成时间的收敛情况
Fig.3 Convergence of task completion time after 500 iterations

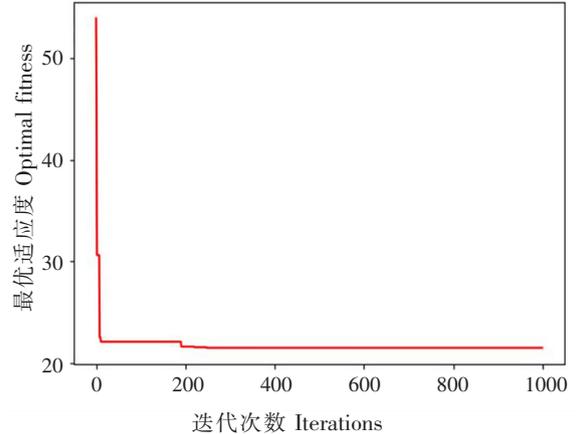


图 4 1000 次迭代后任务完成时间的收敛情况
Fig.4 Convergence of task completion time after 1000 iterations

根据本文构建的求解算法经过 192 次迭代得到调度方案, 所对应的配送方案为全局最优解。岸基储备库调度事故点物资分配方案和陆上仓库调度岸基储备库物资的分配方案如表 5 ~ 表 6 所示。通过分析表 5 和表 6 可知, 其最优解下的调度方案满足各级仓库与事故点 D_1 和 D_2 对于物资 1、物资 2 和物资 3 三种类型物资的供需关系。其中: A_1 运输到 S_1 、 S_2 、 S_3 和 S_4 的应急物资 1、物资 2 和物资 3 的总数量分别为 444, 237, 240 t; A_2 运输到 S_1 、 S_2 、 S_3 和 S_4 的应急物资 1、物资 2 和物资 3 的总数量分别为 353, 126, 149 t; A_3 运输到 S_1 、 S_2 、 S_3 和 S_4 的应急物资 1、物资 2 和物资 3 的总数量分别为 424, 118, 0 t; A_4 运输到 S_1 、 S_2 、 S_3 和 S_4 的应急物资 1、物资 2 和物资 3 的总数量分别为 86, 0, 127 t; A_5 运输到 S_1 、 S_2 、 S_3 和 S_4 的应急物资 1、物资 2 和物资 3 的总数量分别为 33, 193, 0 t; A_6 运输到 S_1 、 S_2 、 S_3 和 S_4 的应急物资 1、物资 2 和物资 3 的总数量分别为 54, 158, 207 t。 S_1 、 S_2 、 S_3 和 S_4 调度到事故点 D_1 的应急物资数量分别为 428, 663, 803, 632 t; 调度到事故点 D_2 的应急物资数量分别为 722, 337, 347, 268 t。其中, 陆上运输最长时间段为陆上仓库 A_2 运输应急物资到岸基储备库 S_3 的过程, 经过多次调度, 运输时间为 21.2 h。海上运输最长时间段为岸基储备库 S_3 到事故点 D_1 , 运输物资调度总时间为 19.8 h, 单次运输最大时间为 2.4 h。经过多次调度, 总运输时间为 22.2 h。

表5 岸基储备库调度事故点物资分配方案

Tab. 5 Material distribution plan for the dispatching accident point of the secondary shore-based storage t

事故点 Accident point	岸基 储备库 Secondary shore-based storage	物资 1 Materials 1	船舶分配物资情况 Distribution of materials by ship		物资 2 Materials 2	船舶分配物资情况 Distribution of materials by ship		物资 3 Materials 3	船舶分配物资情况 Distribution of materials by ship	
			G	H		G	H		G	H
			D ₁	S ₁		148	0		148	156
S ₂	420	200		220	200	98	102	43	0	43
S ₃	46	0		46	495	55	445	262	80	182
S ₄	168	45		123	45	0	45	419	161	258
D ₂	S ₁	252	110	142	144	120	24	326	94	232
	S ₂	30	0	30	50	0	50	257	100	157
	S ₃	254	100	154	55	0	55	38	0	38
	S ₄	32	25	7	205	100	105	31	0	31

表6 陆上仓库调度岸基储备库物资分配方案

Tab. 6 Auocation plan for material of on shore warehouse for shore based storage dispatching t

陆上仓库调 On-shore warehouse	岸基 储备库 Shore-based storage	物资 1 Materials 1	车辆分配 物资情况 Vehicle distribution of materials		物资 2 Materials 2	车辆分配 物资情况 Vehicle distribution of materials		物资 3 Materials 3	车辆分配 物资情况 Vehicle distribution of materials	
			E	F		E	F		E	F
			A ₁	S ₁		125	75		50	132
S ₂	145	80		65	105	60	45	88	52	36
S ₃	174	100		74						
S ₄										
A ₂	S ₁							100	56	44
	S ₂	108	85	23	126	46	80			
	S ₃	245	75	170				49	32	17
	S ₄									
A ₃	S ₁	98	42	56	86	55	31			
	S ₂	76	20	56	32	15	17			
	S ₃	105	95	10						
	S ₄	145	95	50						
A ₄	S ₁									
	S ₂							25	10	15
	S ₃	40	15	25				30	15	15
	S ₄	46	18	28				72	60	12
A ₅	S ₁									
	S ₂				75	70	5			
	S ₃	33	15	18						
	S ₄				118	86	32			
A ₆	S ₁									
	S ₂									
	S ₃	20	10	10				86	56	30
	S ₄	34	20	14	158	148	10	121	68	53

通过与实际情况进行对比分析可知求解结果更贴合实际, 能够为海上溢油应急物资调度提供决策依据。

4 结论

针对单一应急物资储备库应急能力有限的情况, 本文研究发生大规模溢油事故时多物资、多种运输工具、多层级的海上溢油应急物资调度, 构建了包括陆上仓库、岸基储备库和多事故点的调度模型, 为求解构建的分层多物资调度模型, 融合遗传算法和蚁群算法的优点设计了一种遗传-蚁群算法, 对调度模型进行求解, 并进行算例分析。研究表明, 该模型可以解决多应急物资储备库对多物资的分层调度分配问题, 给出合理的调度方案。但是本文研究中未考虑风流等对溢油产生的影响, 也未考虑不同物资装卸时间的问题, 这在未来研究中将进一步考虑。

[参 考 文 献]

- [1] 王宁, 鲍君衷. 海上搜救与溢油应急处置技术[M]. 大连: 大连海事大学出版社, 2009.
- [2] 张可, 刘晓佳. 基于改进的 AHP 和可拓理论的海上石油平台溢油污染等级评估[J]. 上海海事大学学报, 2018, 39(1): 98-103.
- [3] WANG H M, XU R F, XIONG Z J, et, al. Research on the optimized dispatch and transportation scheme for emergency logistics[J]. Procedia Computer Science, 2018, 129: 208-214.
- [4] SONG M L, HOU Z X. Model analysis of traffic emergency dispatching in intelligent transportation system under cloud computing[J]. International Journal of Internet Protocol Technology, 2020, 13(1): 46-54.
- [5] PARK HYOSHIN, WADDELL DEION, HAGHANI ALI. Online optimization with look-ahead for freeway emergency vehicle dispatching considering availability[J]. Transportation Research Part C, 2019, 109: 95-116.
- [6] 胡飞虎, 田朝晖, 李威. 基于遗传算法的应急物资分层调度研究[J]. 计算机工程, 2015, 41(10): 53-58.
- [7] 胡飞虎, 田朝晖, 赵沐华. 基于遗传算法的应急物资分层联动调度研究[J]. 计算机应用研究, 2016, 33(2): 439-443.
- [8] 郭子雪, 郭亮, 张蓓. 应急物资调度时间最小化模糊优化模型[J]. 中国安全科学学报, 2015, 25(10): 172-176.
- [9] 刘晓佳, 汪强, 李子木, 等. 海上船舶溢油事故多物资应急调度问题分析[J]. 中国航海, 2020, 43(4): 105-109, 140.
- [10] 汪强. 海上溢油事故多物资应急调度问题研究[D]. 厦门: 集美大学, 2020.
- [11] 郝国柱, 黄立文, 张可. 海上溢油事故双目标应急物资调度模型[J]. 安全与环境学报, 2019, 21(1): 303-308.
- [12] 朱雪斌, 吕靖. 基于双阶段的海上应急物资协同调度模型[J]. 水运管理, 2020, 42(5): 38-42.
- [13] 中华人民共和国国务院, 国家海事搜救应急预案[EB/OL]. (2006-01-22) [2021-08-30]. http://www.gov.cn/yjgl/2006-01/23/content_168935.htm, 2006.
- [14] 马永杰, 云文霞. 遗传算法研究进展[J]. 计算机应用研究, 2012, 29(4): 1201-1206.
- [15] 夏亚梅, 程渤, 陈俊亮, 等. 基于改进蚁群算法的服务组合优化[J]. 计算机学报, 2012, 35(2): 2270-2281.
- [16] 李全亮. 遗传算法与蚂蚁算法的融合在带时间窗的车辆路径问题中的应用[J]. 数学的实践与认识, 2008, 38(15): 40-48.

(责任编辑 陈 敏 英文审校 周云龙)