

文章编号:1671-1637(2026)06-0239-18

面向大型岛屿的陆海联合跨海应急 投送选址-路径优化研究

李嘉诚¹, 吴迪^{*1}, 王锋², 刘保利¹, 郑建风¹

(1. 大连海事大学 交通运输工程学院, 辽宁 大连 116026; 2. 上海船舶研究设计院 船舶设计三部, 上海 201203)

摘要:综合考虑物资优先级、船队异质性及集结港与船舶的人员/物资容量等现实因素,构建了以集结港选址、运输船舶航次和航线配置为变量,以投送时间最短为目标的选址-路径优化模型;提出了一种集成优化算法,以自适应大邻域搜索算法为框架构成外层优化循环,通过嵌套改进模拟退火算法形成内部优化模块,并通过内外层交互机制实现全局与局部搜索的融合;为验证模型与算法的有效性,以向中国南海地区应急投送为例进行实证研究。研究表明:优化后投送时间由78.52 h缩短至48.03 h,较现有算法效率提升6.54%~48.51%,稳定性提高10.77%~72.92%;进一步敏感性分析发现,船舶容量、速度、集结港数量和陆上运输平均速度均与系统投送时间负相关,而投送人员与物资数量和登陆港数量均与系统投送时间正相关,边际贡献递减,小容量、低速船舶的部署会显著削弱系统性能。所提算法能有效平衡多货种优先级冲突与异质运输资源限制,可为陆海联合跨海应急投送提供兼具时效性与鲁棒性的决策支持,对特殊场景下的选址-路径问题研究具有理论拓展价值。

关键词:交通规划;应急投送;自适应大邻域搜索算法;选址-路径优化;陆海联运;航线配置

中图分类号:U491.1 **文献标志码:**A **DOI:**10.19818/j.cnki.1671-1637.2026.119

Location-routing optimization for joint land-sea emergency delivery to large islands

LI Jia-cheng¹, WU Di^{*1}, WANG Feng², LIU Bao-li¹, ZHENG Jian-feng¹

(1. College of Transportation Engineering, Dalian Maritime University, Dalian 116026, Liaoning, China;

2. Ship Design Department 3, Shanghai Merchant Ship Design & Research Institute, Shanghai 201203, China)

Abstract: Considering some real-world factors, such as material priority, fleet heterogeneity, and the personnel/material capacities of assembly ports and vessels, a location-routing optimization model was constructed. This model employed assembly port location, vessel voyage scheduling, and route configuration as variables, aiming to minimize delivery time. An integrated optimization algorithm was proposed. It leveraged an adaptive large neighborhood search algorithm as the framework for the outer-layer optimization loop. An improved simulated annealing algorithm was

出版历程:2025-04-22 收稿,2025-09-22 修回,2025-11-27 录用

基金项目:国家自然科学基金项目(72104042,72301051)

作者简介:李嘉诚(2000-),男,辽宁兴城人,工学博士研究生,E-mail:lijc@dlmu.edu.cn。

* 通信作者:吴迪(1989-),男,黑龙江大庆人,副教授,工学博士,E-mail:wudidlmu@163.com。

引用格式:李嘉诚,吴迪,王锋,等.面向大型岛屿的陆海联合跨海应急投送选址-路径优化研究[J].交通运输工程学报,2026,26(6):239-256.

Citation: LI Jia-cheng, WU Di, WANG Feng, et al. Location-routing optimization for joint land-sea emergency delivery to large islands[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2026, 26(6): 239-256.

embedded as the inner-layer optimization module. The integration of global and local search was achieved through an interaction mechanism between the inner and outer layers. The effectiveness of the proposed model and algorithm was validated through an empirical case study of emergency delivery to China's South China Sea region. Research results show that the optimized delivery time is reduced from 78.52 h to 48.03 h, showing an efficiency improvement of 6.54%-48.51% and a stability enhancement of 10.77%-72.92% in comparison with existing algorithms. Further sensitivity analysis reveals that vessel capacity, speed, the number of assembly ports, and the average speed of ground transportation are all negatively correlated with delivery time of the system, while delivery personnel and material quantities, the number of landing ports are all positively correlated with delivery time of the system, exhibiting diminishing marginal effects. Deploying small or slow vessels can significantly undermine system performance. The proposed algorithm has the capability of effectively balancing material priority conflicts and heterogeneous transportation resource constraints. It provides timely and robust decision support for joint land-sea emergency delivery, and offers theoretical implications for extending the research on location-routing problems in special scenarios.

Keywords: transportation planning; emergency delivery; adaptive large neighborhood search algorithm; location-routing optimization; joint land-sea transport; route configuration

Publication history: Received 2025-04-22; Received in revised form 2025-09-22; Accepted 2025-11-27

Funding: National Natural Science Foundation of China (72104042, 72301051)

* **Corresponding author:** WU Di, associate professor, PhD, E-mail: wudidimu@163.com.

0 引 言

在全球气候变化加剧与地缘局势日益复杂的叠加效应下,大型岛屿作为战略枢纽与生态脆弱区的双重属性愈发显著。面向大型岛屿的陆海联合跨海应急投送,是指在紧急情况下,通过陆上与海上运输协同,将大规模应急人员和物资在短时间内从大陆投送至大型岛屿的应急行动。传统单一运输模式难以满足上述需求,而陆海联合投送通过整合资源、优化网络,能显著提升应急响应的时效性与适应性。因此,针对陆海联运特性设计高效选址-路径优化方案,成为构建大型岛屿应急投送体系的核心课题,值得深入研究。

目前,关于应急投送的研究已取得一定成果。海军^[1]分析了应急投送的基本方式和常用模式,为基础理论奠定框架;朱光等^[2]探讨了重大突发事件下应急投送面临的形势与任务,强调外部环境的影响;鲍利平等^[3]结合国际新形势特点,给出了提升我军应急投送能力的对策建议。但这些研究主要集中于对应急投送能力的定性分析,缺乏对复杂投送过程的定量建模与优化探讨。关于应急投送方案优化,已有学者提出多种模型来应对不同挑战。孙华丽等^[4]考虑物资匮乏和道路破坏带来的不确定

性,建立了鲁棒优化模型;朱莉等^[5]构建了灾后应急物资分配和路径优化的多目标动态调度模型;郭鹏辉等^[6]建立了针对异质物资合车运输的多目标双层选址-路径-配给优化模型;王旭坪等^[7]构建了以最小化灾民损失和车辆调度费用为目标的混合整数规划模型;于冬梅等^[8]从需求区域和应急设施服务质量出发,构建了基于障碍、容量及安全库存约束的应急设施选址与资源分配优化模型;杨晓霞等^[9]通过分析疏散网络的拓扑结构、节点之间的连通性等,提出了火灾爆发时的多目标路径优化模型;马昌喜等^[10]通过优化救援时间和应急救援站建设成本,设计了3级轴辐式应急救援网络规划模型;赵建等有^[11]提出了考虑需求紧迫度的城市应急医疗物资配送路径优化模型;Sheu^[12]针对大规模自然灾害下信息不完备的特点,开发了动态救援-需求管理模型;Safaei等^[13]和Zahedi等^[14]分别提出了供应风险和需求不确定的双目标双层优化模型和紧急情况下货物配送计划与车辆路径的多目标决策模型;Sanci等^[15]考虑需求和修复时间的不确定性,建立了以最小化总成本为目标的两阶段随机规划模型;Huang等^[16]综合救生效用、延迟成本和公平性,开发了将资源分配与紧急配送相结合的多目标优化模型;Camur等^[17]针对北极阿拉斯加大规模救援问

题,提出了包含海上撤离动态物流决策的优化模型; Akhlaghi 等^[18]以波多黎各发生的 10 场灾难为背景,构建了随机整数规划模型。尽管上述文献为应急投送能力建设和方案优化提供了有益思路,但主要聚焦于单一运输方式,对于涉及多种运输方式协同的选址-路径优化问题,缺乏深入研究。

本文研究的陆海联合跨海应急投送选址-路径优化问题,是在多运输方式协同下,综合考虑多保障基地(起点)、多登陆港(终点)、多集结港(中转点)、多物资种类、多船型、多航次及多优先级约束的复杂选址-路径优化问题(Location-routing Problem, LRP)。现有 LRP 研究主要围绕聚类算法^[19-20]、精确算法^[21-22]和启发式算法^[23-24]三大类展开。李娅等^[25]设计了改进的遗传算法(Genetic Algorithm, GA),通过优化染色体编码与交叉变异操作实现选址和路径的集成优化;马艳芳等^[26]结合精英选择和自适应权重更新策略,设计了 GA 与粒子群算法混合的优化方法;黄凯明等^[27]进一步提出量子进化算法与 GA 相融合的双智能协同求解方法;Wang 等^[28]针对状态-时空网络中的 LRP,设计了拉格朗日松弛算法进行求解;Hof 等^[29]设计了改进自适应大邻域搜索算法求解 LRP;李慧芳等^[30]基于允许枢纽间转运和需求城市间巡回运输的物流网络,将问题分解为选址-分配与路径优化 2 个阶段,设计了两阶段 GA;杨忠振等^[31]通过混合式分组法、GA 与 Frank-Wolf 算法对建立的双层配送网络优化模型进行求解;刘欣萌等^[32]设计了基于整数编码的多智能体进化算法;Akpunar 等^[33]通过融合变邻域搜索与精英局部搜索来增强自适应大邻域搜索算法的性能;Wu 等^[34]建立扩展时空状态网络来描述交通环境的不确定性,并设计了融合自适应聚类框架和协同进化机制的两阶段优化算法;Imani 等^[35]使用增强 ϵ 约束法进行双目标优化,分析成本最小化和距离平衡目标之间的权衡;Rahmanifar 等^[36]结合 Epsilon 约束法与混合多目标进化算法来解决冷链物流环境中的 LRP。近年来,部分研究也尝试将 LRP 拓展至陆海联运背景。胡自强等^[37]以中国沿海与内河水道区域局部多式联运路网为例,考虑网络环境、流量平衡、运输转运作业与路径通过能力等因素,构建混合整数规划模型以优化路径与流量分配;张旭等^[38]面向需求与碳交易价格双重不确定情形,建立混合鲁棒随机优化模型,并提出基于蒙特卡罗采样的灾变自适应 GA;Wang 等^[39]围绕跨境多式联运网络,考虑容量等级、拥堵与规模经济效应,构建了多层次多

模态选址模型;Gao 等^[40]在模型构建中考虑铁路和水路装卸时间窗口及收货时间窗口,结合 Pareto 前沿探索多目标优化策略。以上成果丰富了陆海联运场景中集结港选址、船舶调度与装卸作业间强相关性的系统特征。面对异质运力、航线时变约束与多优先级耦合等陆海联运问题中关键特征的交织影响,传统模型与算法在跨模式、强时变的应急投送环境中表现出适应性不足,难以满足陆海联运复杂任务的高效求解需求。

区别已有文献,本文的主要工作包括:①以投送时间最短为目标,综合考虑物资优先级、港口容量、船舶容量、船舶运力、船舶航速、航线时变性等多重约束,构建基于陆海联运的多货种跨海应急投送优化模型,决策集结港选址、船舶航次安排及航线配置,填补多模式协同优化的理论空白;②提出一种内外协同优化的新算法,以自适应大邻域搜索算法作为外部框架对陆上运输计划中集结港选址进行优化,以改进模拟退火算法(Simulated Annealing Algorithm, SA)为内部模块对海上运输计划中船舶航次安排与航线配置进行优化,通过内外层交互迭代运算与全局-局部搜索融合,提升算法在复杂场景下的求解效率与稳定性;③以中国南海地区多货种应急投送为实际案例,结合该区域远离大陆、岛礁分散、航线复杂的地理特点,验证陆海联运跨海应急投送模型与算法的有效性,为国家应急管理部门优化跨海投送方案提供科学依据。

1 模型建立

1.1 问题描述

为应对大型岛屿的重大突发事件,需迅速向大型岛屿以陆海联运方式投送应急人员和物资。为满足不同应急需求,投送物资通常根据其重要性和紧迫性划分为多个类别,并对应不同的运输优先级。例如,在跨海应急投送中,第 1 类物资主要为生活必需品和急救药品,用于保障基本生存与救治需求;第 2 类物资主要为发电和动力用燃料,支撑能源供给与设备运行;第 3 类物资主要为大型救援设备,用于灾后重建和救援工作。在跨海投送过程中,相关人员和物资先从各保障基地经陆运向各集结港运输,再利用滚装船(以下简称船舶,包括民用和军用滚装船)按照物资类别优先级由集结港跨海运往登陆港。

为实现应急投送时间最短的目标,本文围绕集结港选址、船舶航次安排及航线配置 3 类关键决策,

建立面向多保障基地、多集结港、多登陆港、多物资种类、多船型、多航次及多优先级的陆海联合跨海应急投送优化模型。该模型需解决的核心问题是:在满足物资优先级、舰队异质性及集结港与船舶的人员/物资容量等现实约束的前提下,如何合理选择各保障基地人员和物资的集结港、优化船舶的航次数与具体运输任务、规划各航次的航线路径,使得完成所有应急投送任务的总时间最小。

1.2 跨海应急投送优化模型

1.2.1 模型假设

为界定研究范围,便于讨论,同时不失一般性,作出以下假设。

(1)同一保障基地的人员和物资向一个集结港进行集结。

(2)各登陆港人员和物资需求已知,一旦需求被满足,船舶不再向该港运输。

(3)船舶的航速在其航行过程中保持不变。

(4)每艘船舶在每个航次中最多只挂靠同一港口1次。

(5)研究范围限定在大陆至岛上登陆港的跨海运输阶段,岛内二次分配方案留待后续研究。

1.2.2 模型建立

为刻画面向大型岛屿的陆海联合跨海应急投送过程,构建跨海应急投送优化模型如下。

B 为目标函数,表示最小化所有船舶投送时间的最大值,即

$$B = \min \max(T_i) \quad (1)$$

式中: T_i 为船舶 i 完成所有运输任务的时刻, $i \in I$, I 为船舶集合。

为刻画运力容量限制及供需平衡关系,用式(2)~(5)进行约束:式(2)为每条船舶每个航次途径港口所装卸的人员与物资数量不超过船舶容量;式(3)为保障基地运输到集结港的资源总量不超过集结港的容量限制;式(4)为各登陆港的需求应被满足;式(5)为船舶在集结港的装载量不能超过集结港的人员与物资总量。具体为

$$0 \leq |q_{h_{n_i},m}| \leq Q_i \quad (2)$$

$$\sum_l s_l x_{l,p_a} \leq C_{p_a} \quad (3)$$

$$\sum_m \sum_i \sum_{n_i} (|q_{h_{n_i},m}| u_{n_i,p_b}) \geq R_{p_b} \quad (4)$$

$$\sum_m \sum_i \sum_{n_i} (q_{h_{n_i},m} u_{n_i,p_a}) \leq G_{p_a} \quad (5)$$

式中: $q_{h_{n_i},m}$ 为船舶 i 的第 n_i 航次中第 m 个港口 h_{n_i},m

所装卸人员与物资的数量,正数表示装载,负数表示卸载, $n_i \in N_i$, N_i 为船舶 i 的航次集合, $h_{n_i},m \in H_{n_i}$, H_{n_i} 为船舶 i 的第 n_i 航次中挂靠港口的集合; Q_i 为船舶 i 容纳人员与物资的容量限制; s_l 为保障基地 l 的人员与物资的数量总和, $l \in L$, L 为保障基地集合; x_{l,p_a} 为 0-1 变量,当保障基地 l 向集结港 p_a 集结, $x_{l,p_a}=1$,否则等于 0; C_{p_a} 为集结港 p_a 的容量限制;集结港索引 $p_a \in P_a$,登陆港索引 $p_b \in P_b$, P_a 和 P_b 分别为集结港和登陆港集合, $P_a, P_b \in P$, P 为港口集合; $u_{n_i,p}$ 为 0-1 变量,当港口 p 属于船舶 i 的第 n_i 个航次时, $u_{n_i,p}=1$,否则等于 0, $p=p_a, p_b$; R_{p_b} 为登陆港 p_b 对人员与物资的需求数量; G_{p_a} 为集结港 p_a 集结的人员与物资数量。

为保证集结港选址决策与船舶航次路径结构的协调一致,用式(6)~(9)进行约束:式(6)为所有参与投送的集结港均有船舶挂靠;式(7)为每个保障基地只能向一个集结港运输人员与物资;式(8)为船舶挂靠港口数量一致性,每一港口对每条船舶每个航次仅接受服务一次;式(9)为船舶每个航次至少挂靠一个集结港和一个登陆港。具体为

$$\sum_i \sum_{n_i} u_{n_i,p_a} \geq x_{l,p_a} \quad (6)$$

$$\sum_{p_a} x_{l,p_a} = 1 \quad (7)$$

$$\sum_p u_{n_i,p} = |H_{n_i}| \quad (8)$$

$$\sum_p u_{n_i,p} \geq 1 \quad (9)$$

为描述陆海联运中陆上集结、港口装卸及海上航行等环节的作业顺序及其时间衔接关系,用式(10)~(16)进行约束:式(10)确保船舶先装载再卸载;式(11)、(12)确保在集结港只能装载,在登陆港只能卸载;式(13)表示船舶完成投送的时间为完成集结到达集结港时间、靠离泊时间、航行时间、等待时间与装卸时间之和;式(14)表示船舶在该港口开始装载的时间,不能早于资源最晚到达时间;式(15)表示船舶装卸平衡约束;式(16)表示时间连贯性约束。具体为

$$z_{h_{n_i},m} \geq z_{h_{n_i},m-1} \quad m = 2, \dots, |H_{n_i}| \quad (10)$$

$$q_{h_{n_i},m} \geq -M z_{h_{n_i},m} \quad (11)$$

$$q_{h_{n_i},m} \leq M(1 - z_{h_{n_i},m}) \quad (12)$$

$$T_i \geq r_i + \sum_{n_i} |H_{n_i} r_i| + \sum_{n_i} \sum_{m=2}^{|H_{n_i}|} \frac{D_{h_{n_i},m-1,h_{n_i},m}}{v_i} +$$

$$\sum_{n_i} \left[\max \left\{ t_{n_i,1} - g_i, 0 \right\} + \sum_{m=2}^{|H_{n_i}|} \max \left\{ t_{n_i,m} - t_{n_i,m-1} - \frac{D_{h_{n_i,m-1},h_{n_i,m}}}{v_i}, 0 \right\} \right] + \sum_{n_i} \sum_m |q_{h_{n_i,m}}| \tau_i \quad (13)$$

$$\mu_{n_i,m} \geq x_{l,p_a} \frac{d_{l,p_a}}{v_g} \quad (14)$$

$$\sum_m q_{h_{n_i,m}} = 0 \quad (15)$$

$$t_{n_i,m} \geq t_{n_i,m-1} + \frac{D_{h_{n_i,m-1},h_{n_i,m}}}{v_i} \quad m = 2, \dots, |H_{n_i}| \quad (16)$$

式中: $z_{h_{n_i,m}}$ 为0-1变量,当船舶*i*在第*n_i*航次中第*m*个港口的操作状态为卸载时, $z_{h_{n_i,m}}=1$,否则等于0;*M*为一个充分大的正数; g_i 为船舶*i*完成集结到达集结港的时间; r_i 为船舶*i*在港口的靠离泊时间; v_i 为船舶*i*的航行速度; τ_i 为船舶*i*装卸每单位数量的人员与物资所需时间; v_g 为人员与物资从保障基地到集结港的陆上运输速度; $t_{n_i,m}$ 为船舶*i*在第*n_i*航次的第*m*个港口装卸完成时所耗费的时间; $D_{p,p'}$ 为港口*p*到港口*p'*的距离, $p' \neq p, p' \in P; H_{n_i} \subseteq P$; $\mu_{n_i,m}$ 为船舶*i*在第*n_i*航次中第*m*个集结港可开始装载的时刻; d_{l,p_a} 为保障基地*l*到港口*p_a*的距离。

1.2.3 模型扩展:登陆港需求的不确定性刻画

为提高模型对不确定环境的适应性,本文在确定性模型的基础上,引入机会约束,将登陆港的需求建模为随机变量,并通过给定置信度水平 η ,限制超出能力边界的概率在可接受范围内,从而形成鲁棒性更强的不确定性优化模型。式(4)可转化为

$$P\left(\sum_m \sum_i \sum_{n_i} |q_{h_{n_i,m}}| u_{n_i,p_b} \geq \tilde{R}_{p_b}\right) \geq 1 - \eta \quad (17)$$

式中: $\tilde{R}_{p_b}$ 为登陆港*p_b*对人员与物资的随机需求量。

因此,考虑登陆港需求量不确定的优化模型可表述为 $\min \max(T_i)$,约束条件为式(2)~(3)、式(5)~(16)。

通过引入机会约束,可确保在需求波动情况下,仍以设定的高概率满足各登陆港应急需求,增强模型对不确定性的鲁棒性。当 $\eta=0$,则随机规划模型将转化为确定性模型,保障基地人员与物资供给量等于登陆港的总需求量。

2 算法设计

本文所建模型涉及多维决策变量(如集结港选址、船舶航线规划、人员与物资分配等),各变量之间相互耦合且约束复杂,传统商业求解器(如GUROBI、

CPLEX等)难以有效应对其高维性和非线性特征,需结合模型结构特点与变量间关联机制设计有效的优化算法。自适应大邻域搜索算法因其灵活的邻域调整策略在组合优化领域应用广泛,然而在处理如本文所述的高维复杂问题时,存在收敛缓慢或容易陷入局部最优等问题。相比之下,SA凭借其基于概率跳跃的全局搜索能力,可有效避免陷入局部最优,且具备较强的局部搜索能力。鉴于此,本文提出了融合自适应大邻域搜索和模拟退火的集成优化算法,兼顾全局和局部搜索的双重优势,为陆海应急物流优化提供高效求解方案。

算法设计的核心思路是:基于自适应大邻域搜索算法建立外层循环框架,对陆上运输计划中的集结港选址进行迭代优化;同时,利用改进SA建立内部优化模块,对海上运输计划(包括船舶运输人员与物资的数量、航次数量和船舶航线等)进行优化。在算法运行过程中,外层框架在每次迭代中产生的每个集结港选址解,都会传递至内层模块进行海上运输计划的优化,并将选址解对应的最优海上运输计划反馈给外层框架,实现内外层之间的反复迭代,直至外层框架收敛,输出最佳优化结果。算法流程如图1所示。

2.1 自适应大邻域搜索算法

2.1.1 解的构造

为表示陆上运输计划中集结港的选择情况,所有保障基地对集结港的选择构成1个完整的解。解中的每个位置序号代表保障基地编号,每个位置上的编码对应该保障基地所选择的集结港。例如,当保障基地数量为20个,备选集结港数量为5个,解的表达式如图2所示。该解表示:保障基地2、12、20的人员与物资向集结港1*集结,保障基地1、3、8、11的人员与物资向集结港2*集结,保障基地4、9、17、18的人员与物资向集结港3*集结,保障基地5、6、10、14、19的人员与物资向集结港4*集结,保障基地7、13、15、16的人员与物资向集结港5*集结。

2.1.2 邻域搜索算子

为提高搜索效率并优化投送时间,设计了4种邻域搜索算子,以在搜索过程中获得更优的邻域解。各算子的具体描述如下。

(1)交换算子

该算子在解中随机选取2个保障基地,将其对应的集结港互换,以形成新解,如图3所示。由图3可知:保障基地3和16的集结港进行交换;交换后,保障基地3的人员与物资向集结港5*集结,保障基

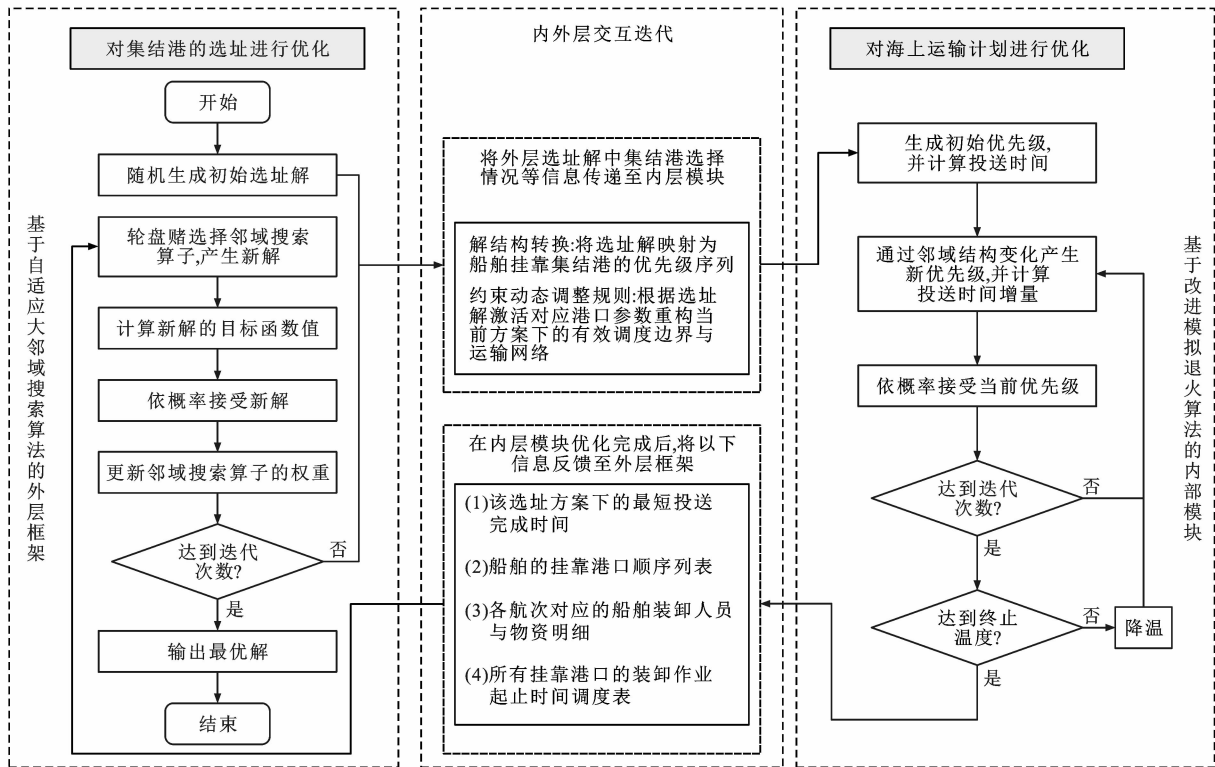


图1 算法流程

Fig. 1 Algorithm flow

保障基地编号:	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
解:	2	1	2	3	4	4	5	2	3	4	2	1	5	4	5	5	3	3	4	1

图2 解的表达式

Fig. 2 Solution expression

保障基地编号:	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
原始解:	2	1	2	3	4	4	5	2	3	4	2	1	5	4	5	5	3	3	4	1
新解:	2	1	5	3	4	4	5	2	3	4	2	1	5	4	5	2	3	3	4	1

图3 交换算子

Fig. 3 Exchange operator

地16的人员与物资向集结港2*集结。

(2) 随机替换算子

该算子随机选择1个保障基地,并从该基地对应的备选集结港集合中随机选择1个新的集结港,替换原先选择,以生成新解,如图4所示。由图4可

知:保障基地9的人员与物资由向集结港3*集结替换为向集结港1*集结。

(3) 贪婪替换算子

该算子随机选择1个保障基地,并将该基地对应的当前集结港替换为其备选集合中距离最近的集

保障基地编号:	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
原始解:	2	1	2	3	4	4	5	2	3	4	2	1	5	4	5	5	3	3	4	1
新解:	2	1	2	3	4	4	5	2	1	4	2	1	5	4	5	5	3	3	4	1

图4 随机替换算子

Fig. 4 Random replacement operator

结港,产生新解,如图5所示。由图5可知:保障基地9的人员与物资由向集结港3*集结替换为向集结港5*集结。

(4) 翻转算子

在当前解中随机选取2个不同位置的保障基地,并将两者之间所有保障基地的集结港顺序进行逆序调整,从而形成新解,如图6所示。由图6

可知:保障基地8~13经过逆序调整后,保障基地8的人员与物资向集结港5*集结,保障基地9的人员与物资向集结港1*集结,保障基地10的人员与物资向集结港2*集结,保障基地11的人员与物资向集结港4*集结,保障基地12的人员与物资向集结港3*集结,保障基地13的人员与物资向集结港2*集结。

保障基地编号:	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
原始解:	2	1	2	3	4	4	5	2	3	4	2	1	5	4	5	5	3	3	4	1
新解:	2	1	2	3	4	4	5	2	5	4	2	1	5	4	5	5	3	3	4	1

图5 贪婪替换算子

Fig. 5 Greedy replacement operator

保障基地编号:	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
原始解:	2	1	2	3	4	4	5	2	3	4	2	1	5	4	5	5	3	3	4	1
新解:	2	1	5	3	4	4	5	5	1	2	4	3	2	4	5	2	3	3	4	1

图6 翻转算子

Fig. 6 Inversion operator

2.1.3 邻域解接受准则

为避免搜索陷入局部最优并提高解的多样性,在自适应大邻域搜索算法中引入自适应退火接受准则。该准则通过在搜索过程中对当前解施加适当扰动,扩展了对解空间的探索,从而提升全局优化性能。具体而言,对于通过邻域搜索得到的候选解,其接受规则设计如下。

若候选解的适应度(即目标函数值)优于当前最优解,则直接接受该候选解并更新最优解;否则,以接受概率 $\exp\left[\frac{-(f_* - f)}{D}\right]$ 接受候选解,其中, f_* 为新解的适应度值, f 为当前解的适应度值, D 为温度, D 以 $D = D\epsilon$ 的速率减小, ϵ 为下降速率, $0 < \epsilon < 1$ 。

2.1.4 算子评分策略

在搜索过程中,设 F_{new} 、 F_{cur} 和 F_{best} 分别为新解、当前解和最优解。针对每个算子的表现进行评分,分数越高,该算子在后续迭代中被选中的概率越大。在每次迭代中,当使用邻域搜索算子后,如果得到一个新的解 F_{new} ,且该解比 F_{best} 更优,则将使用的邻域搜索算子的评分加上 θ_1 ;如果 F_{new} 比当前解 F_{cur} 更好,则将相应算子的评分加上 θ_2 ;如果 F_{new} 比 F_{cur} 差且被接受,则相应算子的评分加上 θ_3 ,其中 $\theta_1 > \theta_2 > \theta_3$ 。

2.1.5 自适应更新机制

为有效平衡各算子的使用频率并提升算法效率,采用轮盘赌机制动态选择邻域搜索算子。算子被选择的概率为 $p_{o,j} / \sum_{o=1}^O p_{o,j}$,其中, O 为邻域搜索算子集合, $p_{o,j}$ 为算子 o 在第 j 次循环时的权重,初次迭代时设置为1。

每次迭代结束后,根据所使用算子的搜索效果对其权重进行更新。更新规则为:若算子在当前阶段未被使用,其权重保持不变;若被使用,则根据式(18)基于使用次数进行调整,以实现算法自适应演化

$$w_{o,t+1} = w_{o,t} + \frac{1}{c_{o,t}} \quad (18)$$

式中: $w_{o,t}$ 为在第 t 次迭代时算子 o 的权重,算子的初始权重为1; $c_{o,t}$ 为在第 t 次迭代时算子 o 被选中的次数。

2.2 基于仿真的模拟退火算法

海上运输可归结为多保障基地、多集结港、多登陆港、多物资种类、多船型、多航次、多优先级的混合整数规划问题,涉及大量时空关联约束、船舶资源分配及优先级策略,求解难度大、变量维度高。传统模拟退火算法在此类问题中容易陷入局部最优,且计算效率随规模增加而迅速下降,难以满足紧急响应

需求。为此,本文在保留模拟退火搜索机制的基础上,结合仿真方法对解空间进行快速评估,构建了具有问题导向性的“优先级-仿真”优化机制。

2.2.1 模拟退火算法的改进

在简化解结构的基础上,利用仿真过程计算解对应的运输时间,具体改进为:设计优先级;引入仿真过程,计算优先级对应的运输时间。

(1) 优先级

在内部模块中,解结构仅需表达集结港与登陆港的挂靠优先级序列,而船舶的运输状态、载重及运输时间均通过仿真过程计算,以得到外层框架解对应的最优目标函数值。图2中解对应的优先级表达式如图7所示,该图表示:港口的挂靠优先级为集结港1*-集结港3*-集结港5*-集结港4*-登陆港7*-登陆港8*-登陆港6*-登陆港9*,该顺序即为仿真模块调度船舶过程中所遵循的挂靠逻辑基础。

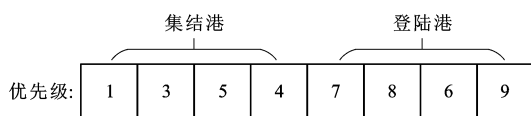


图7 优先级表达式

Fig. 7 Priority expression

(2) 仿真过程

在利用仿真过程计算投送时间时,根据约束条件,依次对各航次的挂靠港、挂靠顺序、装卸量等进行仿真计算,具体原则为:①按照待运输人员与物资的重要度优先级,船舶在有容量的前提下,优先装卸所有港口的较重要物资;②按照内部模块所表达的港口挂靠优先级,船舶优先挂靠优先级较高的港口;③船舶进行装船作业时,应尽可能满载但不超过船舶的载重限制,且无论人员满载还是物资满载,船舶都不再挂靠沿途集结港,而是直接驶向登陆港卸载;④船舶进行卸船作业时,优先卸载当前登陆港的需求量;若该港口需求已得到满足,船舶将直接前往下一登陆港进行卸载;同时,后续船舶也无需在该港口卸载。

(3) 需求不确定性约束下的仿真优化机制扩展

为求解引入机会约束后的鲁棒应急投送优化模型,在不改变原有集成算法结构的前提下,扩展了基于仿真的模拟退火算法的评估与接受机制。在目标函数中引入登陆港需求不满足的惩罚项,扩展后的适应度函数 f 为

$$f = \min_{i \in I} \max(T_i) + \lambda [\tilde{R}_{p_b} - \sum_{m \in H_{n_i}} \sum_{i \in I} \sum_{n_i \in N_i} (|q_{h_{n_i}, m}| u_{n_i, p_b})] \quad (19)$$

式中: λ 为权重系数,用于平衡投送时间与需求满足度之间的权衡。

通过预试验设置,当 λ 较大时模型更重视需求满足的鲁棒性,当 λ 较小时模型更注重最短投送时间。该机制使算法在搜索过程中能主动规避高风险解,从而提升方案在实际不确定场景中的适应能力。

2.2.2 基本步骤

基于仿真的改进模拟退火算法的运算步骤如下。

步骤1:根据外层自适应大邻域搜索算法所表达的集结港选择情况,计算各集结港集结的人员与物资数量,随机生成初始优先级 $\mathbf{X}_0$ 。

步骤2:根据初始优先级 $\mathbf{X}_0$,按照仿真原则和约束条件对船舶的航次数量、各航次挂靠港、挂靠顺序、装卸量等信息进行仿真计算。

步骤3:根据计算结果,利用式(13)确定投送时间即目标函数值 $f(\mathbf{X}_0)$,令最优解对应的优先级及最优目标函数的初值分别为 $\mathbf{X}_{\min} = \mathbf{X}_0$ 和 $f_{\min}(\mathbf{X}_{\min}) = f(\mathbf{X}_0)$ 。

步骤4:以 $\mathbf{X}_k$ (当第1次变换时 $k=0$,第2次变换时 $k=1$,以此类推)为优先级,随机交换2个集结港、2个登陆港,产生新的优先级。

步骤5:按照仿真原则和约束条件,对优先级 $\mathbf{X}_k$ 所对应的航次数量、各航次挂靠港、挂靠顺序、装卸量等信息进行仿真计算。

步骤6:根据仿真计算结果,计算新优先级对应的投送时间,即目标函数值 $f(\mathbf{X}_*)$ 。

步骤7:根据 Metropolis 准则,接受新解,并更新最优解 $\mathbf{X}_{\min}$ 及其目标函数值 $f_{\min}(\mathbf{X}_{\min})$,其准则为

$$P_{\mathbf{X}_k} = \begin{cases} 1 & f(\mathbf{X}_*) < f_{\min}(\mathbf{X}_{\min}) \\ \exp\left[\frac{f(\mathbf{X}_*) - f_{\min}(\mathbf{X}_{\min})}{T}\right] & f(\mathbf{X}_*) \geq f_{\min}(\mathbf{X}_{\min}) \end{cases} \quad (20)$$

式中: $P_{\mathbf{X}_k}$ 为新解选择概率; T 为当前温度。

步骤8:以 $T_{k+1} = \eta T_k$ 的降温策略,降低温度,其中, η 为降温系数,随机交换3个集结港、2个登陆港,产生新的优先级。

步骤9:重复步骤4~8,直至达到最低温度,输出最佳优先级对应的船舶航次数量、各航次挂靠港、挂靠顺序、装卸量和运输时间等信息。

3 实例分析

3.1 背景及数据

现以中国对南海地区进行跨海应急投送为例。假设需从中国各保障基地利用船舶以最短时间运输人员与物资至海南省海口港、洋浦港、龙湾港和三亚

港 4 个登陆港口。各保障基地分别位于广州、茂名、韶关、云浮、湛江、南宁、桂林、玉林、百色、钦州、贵阳、毕节、遵义、铜仁、六盘水、长沙、邵阳、衡阳、怀化和永州 20 个地区,共需投送人员 25 000 人,第 1 类物资 20 000 t,第 2 类物资 12 400 t,第 3 类物资 6 200 t,陆上运输速度平均为 $60 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$;可选择的集结港有广州港、茂名港、海安新港、北海港和防城港;调集 2 类船舶,共 10 艘(简记 1# 船、2# 船、…、10# 船),每艘船

的载人量和第 1~3 类物资载货量不同,军用运输船平均装载速度分别为 $1\,500 \text{ 人} \cdot \text{h}^{-1}$ 、 $1\,200 \text{ t} \cdot \text{h}^{-1}$ 、 $2\,000 \text{ t} \cdot \text{h}^{-1}$ 、 $2\,000 \text{ t} \cdot \text{h}^{-1}$,平均航速 25 kn,靠离泊需 0.5 h,船舶完成集结到达集结港的时间为 8 h;民用客货滚装船平均装载速度分别为 $1\,000 \text{ 人} \cdot \text{h}^{-1}$ 、 $800 \text{ t} \cdot \text{h}^{-1}$ 、 $1\,500 \text{ t} \cdot \text{h}^{-1}$ 、 $1\,500 \text{ t} \cdot \text{h}^{-1}$,平均航速为 20 kn,靠离泊需 1 h,船舶完成集结到达集结港的时间为 16 h。各有关参数详见表 1~5。

表 1 船舶容量

Table 1 Ship loading capacity

船舶编号	1#	2#	3#	4#	5#	6#	7#	8#	9#	10#
载人量/人	4 000	3 800	3 600	3 400	3 500	3 200	2 800	2 600	2 400	2 200
载货量/t	3 600	3 400	3 200	3 000	3 000	2 800	2 600	2 400	2 200	2 000

表 2 各保障基地人员与物资数量

Table 2 Numbers of personnel and materials at each support base

保障基地	广州	茂名	韶关	云浮	湛江	南宁	桂林	玉林	百色	钦州
人员数	2 500	0	0	0	0	2 500	4 000	0	0	0
第 1 类物资/t	2 000	0	0	0	0	4 000	3 200	0	0	0
第 2 类物资/t	0	1 200	1 200	0	0	0	0	2 000	1 000	2 000
第 3 类物资/t	0	0	0	600	600	0	0	0	0	0
保障基地	贵阳	毕节	遵义	铜仁	六盘水	长沙	邵阳	衡阳	怀化	永州
人员数	0	0	6 000	0	6 000	0	0	0	0	4 000
第 1 类物资/t	0	0	4 800	0	4 800	0	0	0	0	3 200
第 2 类物资/t	0	0	0	0	0	1 500	2 000	0	1 500	0
第 3 类物资/t	1 000	1 500	0	1 000	0	0	0	1 500	0	0

表 3 各登陆港人员与物资需求数量

Table 3 Numbers of personnel and materials at each landing port

登陆港	海口港	洋浦港	龙湾港	三亚港
人员数	8 500	6 500	6 000	4 000
第 1 类物资/t	6 800	5 400	4 800	3 000
第 2 类物资/t	4 200	3 200	3 000	2 000
第 3 类物资/t	2 100	1 600	1 500	1 000

3.2 计算结果及分析

采用 MATLAB R2023a 运行,设自适应大邻域搜索算法最大迭代次数为 1 500 次, $D=10$, $\epsilon=0.99$, $\theta_1=8$, $\theta_2=5$, $\theta_3=2$,改进 SA 的参数设置为初始温度为 100,终止温度为 0.01,各温度下内循环迭代 2 次,降温系数为 0.9,经过 1 500 次迭代后收敛,用时 142.54 s 得到优化结果,算法收敛过程见图 8。可以看出:算法在初始阶段具有较快的收敛速度,在前 250 代内,最优投送时间由初始的 71.91 h 迅速下降至约 54.20 h,说明在搜索初期,大邻域扰动操作发挥了显著的解空间探索作用,快速挖掘到一批质量较高的可行解;在 250~800 代,曲线出现多个

明显跳跃点,反映出模拟退火机制在接受一定概率的“劣解”基础上,跳出局部最优,推动了解的进一步优化;进入 850 代后,收敛曲线逐渐趋于平稳,最优投送时间维持在 48 h 附近小幅波动,表明算法已基本稳定于较优解区域。总体来看,算法收敛性能良好,初期具备较强的全局搜索能力,后期表现出较好的局部搜索与收敛稳定性,验证了所提外层自适应大邻域搜索算法与内层改进 SA 协同机制在跨海应急投送求解中的有效性。

优化后完成投送所需时间为 48.03 h,具体方案为:韶关、云浮、湛江、贵阳、毕节、铜仁、邵阳、衡阳、怀化保障基地选择茂名港为集结港;茂名、玉林、百色、钦州、六盘水、永州选择海安新港;遵义、长沙选择北海港;广州、南宁、桂林选择防城港。

10 艘船舶共执行 2 个航次,各船舶在不同港口之间承担多货种的装卸任务。具体的运输方案见表 6、7。

图 9、10 展示了跨海应急投送方案在 3 个优化阶段下的演化过程,分别对应算法在初始、迭代与全

表 4 各保障基地至集结港距离
Table 4 Distances from each support base to the
assembly port km

保障基地	广州港	茂名港	海安新港	北海港	防城港
广州	82	316	546	550	641
茂名	350	46	220	234	327
韶关	289	510	724	716	792
云浮	200	226	439	423	503
湛江	430	109	138	179	272
南宁	607	414	431	222	148
桂林	536	532	643	517	514
玉林	420	203	295	196	275
百色	831	638	644	434	361
钦州	615	315	321	112	56
贵阳	985	908	970	761	687
毕节	1 161	1 084	1 146	936	863
遵义	1 118	1 039	1 101	892	818
铜仁	927	947	1 035	875	845
六盘水	1 208	1 106	1 111	902	828
长沙	733	919	1 094	1 005	998
邵阳	635	746	915	795	786
衡阳	576	755	927	836	829
怀化	811	856	966	809	779
永州	543	650	820	728	723

表 5 各港之间距离

Table 5 Distances between ports n mile

港口	广州港	茂名港	海安新港	北海港	防城港	海口港	洋浦港	龙湾港	三亚港
广州港	0	170	255	362	398	258	320	269	331
茂名港	170	0	97	192	238	103	164	142	240
海安新港	255	97	0	103	140	15	79	100	200
北海港	362	192	103	0	46	109	102	201	231
防城港	398	238	140	46	0	145	123	236	239
海口港	258	103	15	109	145	0	66	99	193
洋浦港	320	164	79	102	123	66	0	171	142
龙湾港	269	142	100	201	236	99	171	0	104
三亚港	331	240	200	231	239	193	142	104	0

一步降低至 48.03 h,相比初始方案减少 32.36%,实现全局最优配置。整体路径网络覆盖范围广、层级清晰,反映出所建模型在实际区域应急响应中的可行性与实用性。

设定对照方案:所有保障基地均选择距离最近的集结港进行投送,即现行调度方案。对比结果见图 11,可知:在该方案下的投送时间为 78.52 h;而采用本文提出的基于自适应大邻域搜索与仿真优化

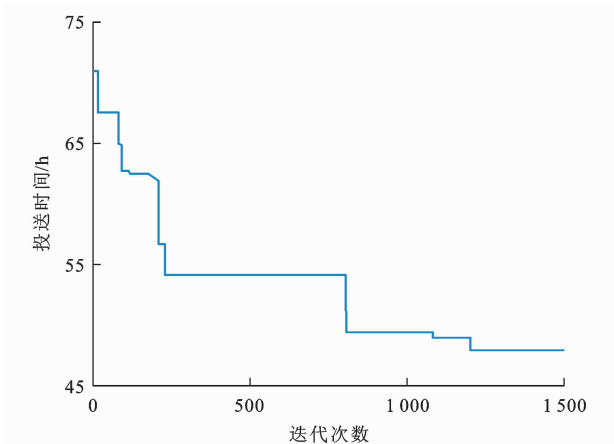


图 8 算法运行过程

Fig. 8 Algorithm execution process

局收敛阶段的典型结果。初始阶段(启发式决策方案)为基于启发式规则生成的可行投送方案,节点选择与路径连接主要遵循距离最短原则。投送时间为 71.01 h,但未充分考虑港口负载与船舶调度,整体时间效率较低,存在明显的局部最优问题。迭代阶段(局部搜索改进方案)对保障基地与集结港的选择进行了重新分配,同时,部分船舶航线得到调整,投送时间降至 54.03 h,下降 23.91%,显示出算法的动态搜索与自适应调整能力。收敛阶段(最终优化方案)为对应算法全局收敛后的最优解。此阶段的路径网络呈现出明显的层次协调特征,投送时间进

相结合的选址-路径优化策略后,系统投送时间优化至 48.03 h,降幅达到 38.84%。进一步剖析优化成效的来源,节省的 30.49 h 主要体现在 3 个方面:①通过优化船舶挂靠顺序,节省了靠离泊时间 2.00 h;②合理安排船舶与物资优先级匹配,降低因装卸等待产生的冗余时间,节省 1.52 h;③通过整合低载率航次与重构航线路径,大幅压缩不必要的航程与往返次数,有效节省航行时间约 26.97 h。上

表 6 第 1 航次船舶海上运输方案

Table 6 Maritime transportation plan of vessels for the 1st voyage

船舶编号	航线	港口作业说明
1#	防城港→洋浦港	防城港装载 4 000 人、3 600 t 第 1 类物资;洋浦港卸载 4 000 人、3 600 t 第 1 类物资
2#	防城港→洋浦港→ 海口港	防城港装载 3 800 人、3 400 t 第 1 类物资;洋浦港卸载 2 500 人、1 800 t 第 1 类物资; 海口港卸载 1 300 人、1 600 t 第 1 类物资
3#	防城港→海安新港→ 海口港	防城港装载 1 200 人、200 t 第 1 类物资;海安新港装载 2 400 人、3 000 t 第 1 类物资; 海口港卸载 3 600 人、3 200 t 第 1 类物资
4#	北海港→海安新港→ 海口港→龙湾港	北海港装载 3 400 人、1 800 t 第 1 类物资;海安新港装载 1 200 t 第 1 类物资;海口港卸载 3 400 人、 2 000 t 第 1 类物资;龙湾港卸载 1 000 t 第 1 类物资
5#	北海港→海安新港→ 海口港→龙湾港	北海港装载 200 人;海安新港装载 3 300 人、3 000 t 第 1 类物资;海口港卸载 200 人; 龙湾港卸载 3 300 人、3 000 t 第 1 类物资
6#	海安新港→龙湾港→ 三亚港	海安新港装载 3 200 人、2 800 t 第 1 类物资;龙湾港卸载 2 700 人、800 t 第 1 类物资; 三亚港卸载 500 人、2 000 t 第 1 类物资
7#	北海港→海安新港→ 洋浦港→三亚港	北海港装载 1 500 t 第 2 类物资;海安新港装载 2 800 人、1 000 t 第 1 类物资和 100 t 第 2 类物资; 洋浦港卸载 1 600 t 第 2 类物资;三亚港卸载 2 800 人、1 000 t 第 1 类物资
8#	海安新港→洋浦港→ 海口港→三亚港	海安新港装载 700 人、2 400 t 第 2 类物资;洋浦港卸载 1 600 t 第 2 类物资; 海口港卸载 800 t 第 2 类物资;三亚港卸载 700 人
9#	海安新港→海口港	海安新港装载 2 200 t 第 2 类物资;海口港卸载 2 200 t 第 2 类物资
10#	海安新港→茂名港→ 海口港→龙湾港	海安新港装载 1 500 t 第 2 类物资;茂名港装载 500 t 第 2 类物资;海口港卸载 1 200 t 第 2 类物资; 龙湾港卸载 800 t 第 2 类物资

表 7 第 2 航次船舶海上运输方案

Table 7 Maritime transportation plan of vessels for the 2nd voyage

船舶编号	航线	港口作业说明
1#	洋浦港→茂名港→ 洋浦港→三亚港	洋浦港返回茂名港;茂名港装载 2 000 t 第 2 类物资、1 600 t 第 3 类物资;洋浦港卸载 1 600 t 第 3 类物资;三亚港卸载 2 000 t 第 2 类物资
2#	茂名港→龙湾港→三亚港	茂名港装载 1 400 t 第 3 类物资;龙湾港卸载 400 t 第 3 类物资;三亚港卸载 1 000 t 第 3 类物资
3#	茂名港→海口港→龙湾港	茂名港装载 3 200 t 第 3 类物资;海口港卸载 2 100 t 第 3 类物资;龙湾港卸载 1 100 t 第 3 类物资
9#	茂名港→龙湾港	茂名港装载 2 200 t 第 2 类物资;龙湾港卸载 2 200 t 第 2 类物资

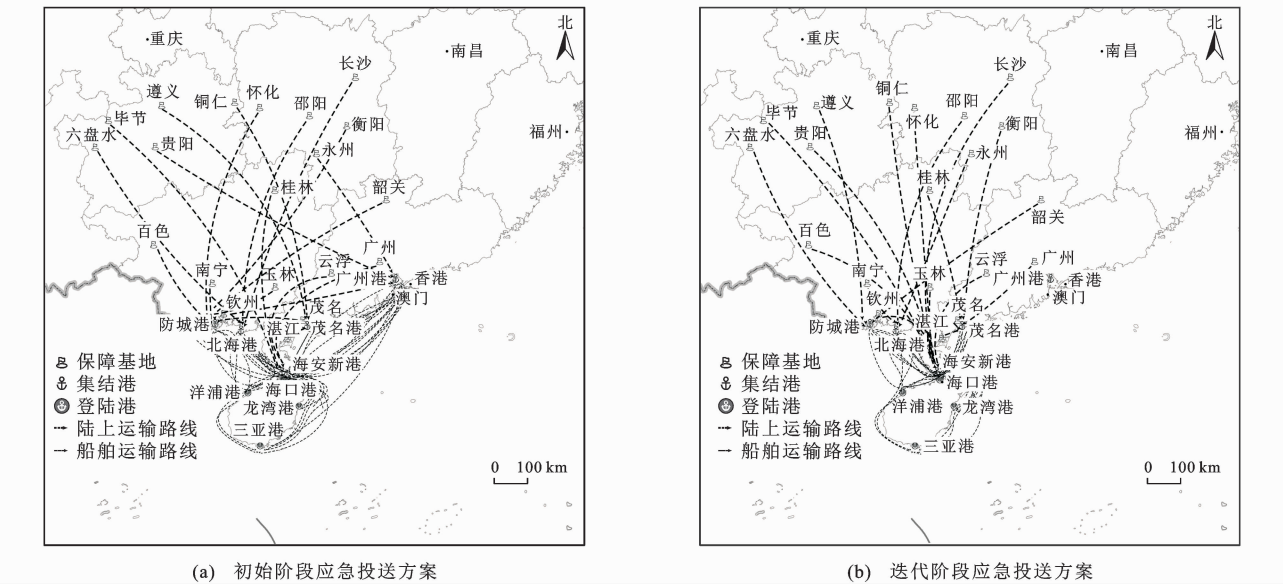


图 9 初始阶段与迭代阶段应急投送方案

Fig. 9 Emergency delivery schemes at the initial and iterative stages

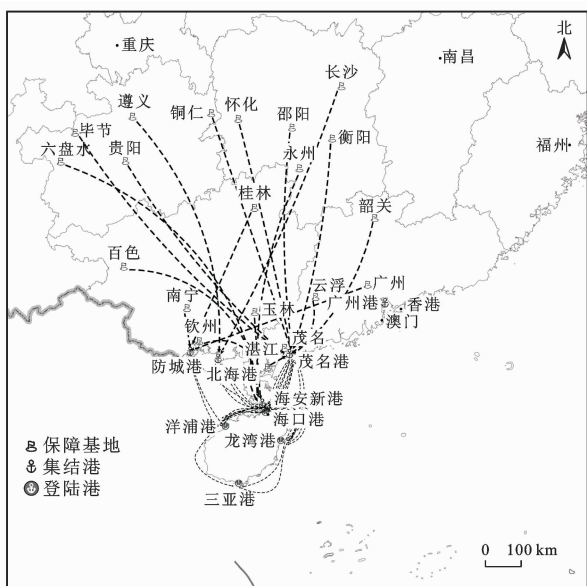


图 10 收敛阶段应急投送方案

Fig. 10 Emergency delivery scheme at the convergence stage

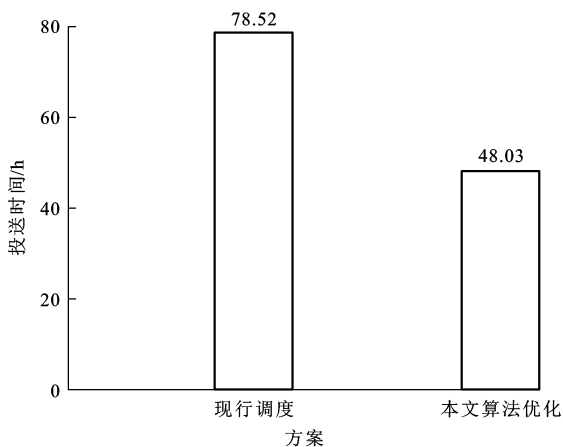


图 11 不同调度方案的对比

Fig. 11 Comparison of different preceding scheduling schemes

述多维度的改进共同促成了整体投送效率的跃升。该结果充分表明在跨区域、多保障基地、多集结港、多登陆港的应急投送系统中,单纯以距离最短为原则进行路径规划,可能导致集结港间负荷不均与船舶调度效率低下等问题,从而影响系统整体投送效率。而通过引入优化算法综合考虑港口容量、物资优先级及船队异质性等因素,能显著提升系统运行的整体协调性与调度效率。

3.3 算法对比

为验证算法的有效性,利用本文算法和现有算法求解不同规模的算例,并对比计算结果。基于第 3.2 节中的算例,通过按比例增减人员与物资的方式,生成 6 组算例。定义 y 为人员与物资数量较基准算例增加的倍数,分别设 $y=0.5, 1, 2, 3, 4, 5$ 。选

取 GA、SA、强化学习算法(Reinforcement Learning Algorithm, RL)和差分进化算法(Differential Evolution Algorithm, DE)作为标杆方法,并通过预试验对其关键参数进行了系统调优。其中 GA 种群规模为 30,交叉概率为 0.7,变异概率为 0.1。SA 初始温度取 1 000,降温系数取 0.9,终止温度取 0.01。RL 折扣因子为 0.9,学习率为 0.3,探索率为 0.3,衰减率为 0.99,训练周期为 500,探索步长为 40, Q 值为 0。DE 种群规模为 30,变异系数为 0.6,交叉概率为 0.6,最大迭代次数为 1 000 次。对比试验均在 Windows10 Intel(R)Core(TM)i7-7200CPU @2.50 GHz 4 GB 计算机上运行,各计算 10 次,具体结果见表 8、9。可以看到:本文算法在运行时间上优于 GA、SA、RL 和 DE,在 6 组算例中分别减少 13.31%~30.22%、9.05%~20.93%、24.10%~48.51%和 15.34%~35.98%;在优化结果上,本文算法得到的结果均优于其他 4 种算法,改进率分别为 6.54%~15.01%、8.60%~10.79%、9.41%~13.46%和 4.41%~9.09%;算法的稳定性同样均优于 4 个标杆方法,在 6 组算例中改进率最高分别为 17.14%~69.05%、10.77%~60.66%、36.96%~72.92%和 7.14%~56.67%。以上对比分析表明本文算法能够快速收敛并得到较好结果,避免了其他算法中存在的收敛速度慢和早熟等问题。

为避免单一场景结论偏差,在原始场景基础上,设计 3 种代表场景:需求突增场景(人员与物资需求放大 3 倍,以模拟极端应急压力)、运力衰减场景(船舶容量减少 25%、航速减少 25%,反映在资源受限条件下的系统性能)与节点中断场景(集结港数量由 5 个减至 4 个,以观察关键节点失效对整体投送效率的影响)。除上述差异外,其余参数与原始场景保持一致,图 12 展示了 4 个场景下算法的收敛过程与优化效果。结果表明,本文算法在不同场景中均表现出较快的收敛速度与更优的解质量,且在需求突增场景和运力衰减场景的高压环境下优势更为显著。

3.4 模型稳健性评估

为验证模型在需求波动下的稳健性,将登陆港需求设为随机变量。假设每个登陆港的需求服从正态分布 $N(\mu, \sigma^2)$,其中 μ 为算例的需求均值, σ^2 为方差,反映需求波动幅度,设定权重系数 λ 为 0.1。分别取置信度水平 $\alpha=0.80, 0.85, 0.90$,方差 $\sigma^2=0.10, 0.15, 0.20$ 进行鲁棒性分析,以评估模型在各不确定性程度下的性能表现。每组算例各运行 10 次,计算结果如表 10 所示。

表 8 算法结果对比
Table 8 Comparison of algorithm results

算法	性能指标	$y=0.5$	$y=1$	$y=2$	$y=3$	$y=4$	$y=5$
本文算法	平均时间/s	58.10	153.72	391.88	843.92	1 459.49	1 602.14
	平均结果/h	46.13	48.95	75.17	96.42	120.94	142.55
	平均结果的标准差/h	0.26	0.13	0.24	0.18	0.36	0.58
GA	平均时间/s	83.26	182.45	532.08	1 061.94	1 739.24	1 848.13
	平均结果/h	49.36	52.40	81.58	106.26	137.17	167.72
	平均结果的标准差/h	0.34	0.42	0.31	0.27	0.52	0.70
SA	平均时间/s	73.48	169.02	457.06	975.97	1 647.71	1 779.36
	平均结果/h	51.15	53.62	82.67	105.49	133.47	159.80
	平均结果的标准差/h	0.37	0.27	0.61	0.29	0.46	0.65
RL	平均时间/s	112.83	221.54	603.74	1 231.45	1 987.62	2 110.73
	平均结果/h	50.92	54.17	83.22	107.46	138.81	164.73
	平均结果的标准差/h	0.51	0.48	0.73	0.61	0.79	0.92
DE	平均时间/s	90.75	190.12	545.33	1 092.54	1 780.83	1 892.45
	平均结果/h	48.26	51.38	79.74	104.18	132.92	156.81
	平均结果的标准差/h	0.28	0.30	0.26	0.22	0.39	0.67

表 9 算法改进率对比
Table 9 Comparison of algorithm improvement rates %

指标类别	比较指标	$y=0.5$	$y=1$	$y=2$	$y=3$	$y=4$	$y=5$
运行时间	本文算法与 GA 相比改进率	30.22	15.75	26.35	20.53	16.08	13.31
	本文算法与 SA 相比改进率	20.93	9.05	14.26	13.53	11.42	9.96
	本文算法与 RL 相比改进率	48.51	30.61	35.09	31.47	26.57	24.10
	本文算法与 DE 相比改进率	35.98	19.15	28.14	22.76	18.04	15.34
优化结果	本文算法与 GA 相比改进率	6.54	6.58	7.86	9.26	11.83	15.01
	本文算法与 SA 相比改进率	9.81	8.71	9.07	8.60	9.39	10.79
	本文算法与 RL 相比改进率	9.41	9.64	9.67	10.27	12.87	13.46
	本文算法与 DE 相比改进率	4.41	4.73	5.73	7.45	9.01	9.09
稳定性	本文算法与 GA 相比改进率	23.53	69.05	22.58	33.33	30.77	17.14
	本文算法与 SA 相比改进率	29.73	51.85	60.66	37.93	21.74	10.77
	本文算法与 RL 相比改进率	49.02	72.92	67.12	70.49	54.43	36.96
	本文算法与 DE 相比改进率	7.14	56.67	7.69	18.18	7.69	13.43

分析发现,需求满足率随置信度水平 α 提高呈上升趋势,表明机会约束能有效控制需求满足风险。投送时间随方差 σ^2 增大略有上升,这是因为系统在应对较大不确定性时倾向选择更保守的调度方案,以确保需求满足率。

3.5 敏感性分析

在跨海应急投送模型中,船舶容量、船舶速度、投送人员与物资数量、集结港数量、登陆港数量及陆上运输平均速度是影响应急投送时间的关键因素。本节通过敏感性分析,量化这 6 个因素对应急投送

时间的影响程度和规律。

3.5.1 船舶容量与船舶速度

以基准船舶容量与速度为参考,分别取-50%、-25%、25%、50%的变化幅度各进行 10 次试验,其他数据同第 3.2 节一致(下同),计算结果如图 13 所示。

由图 13 可以看出:船舶容量变化对投送时间的影响最为显著,体现出船队运载能力对整体投送效率的主导作用;船舶容量与船舶速度之间并非简单的线性叠加关系,而是相互作用。这一结果揭示了

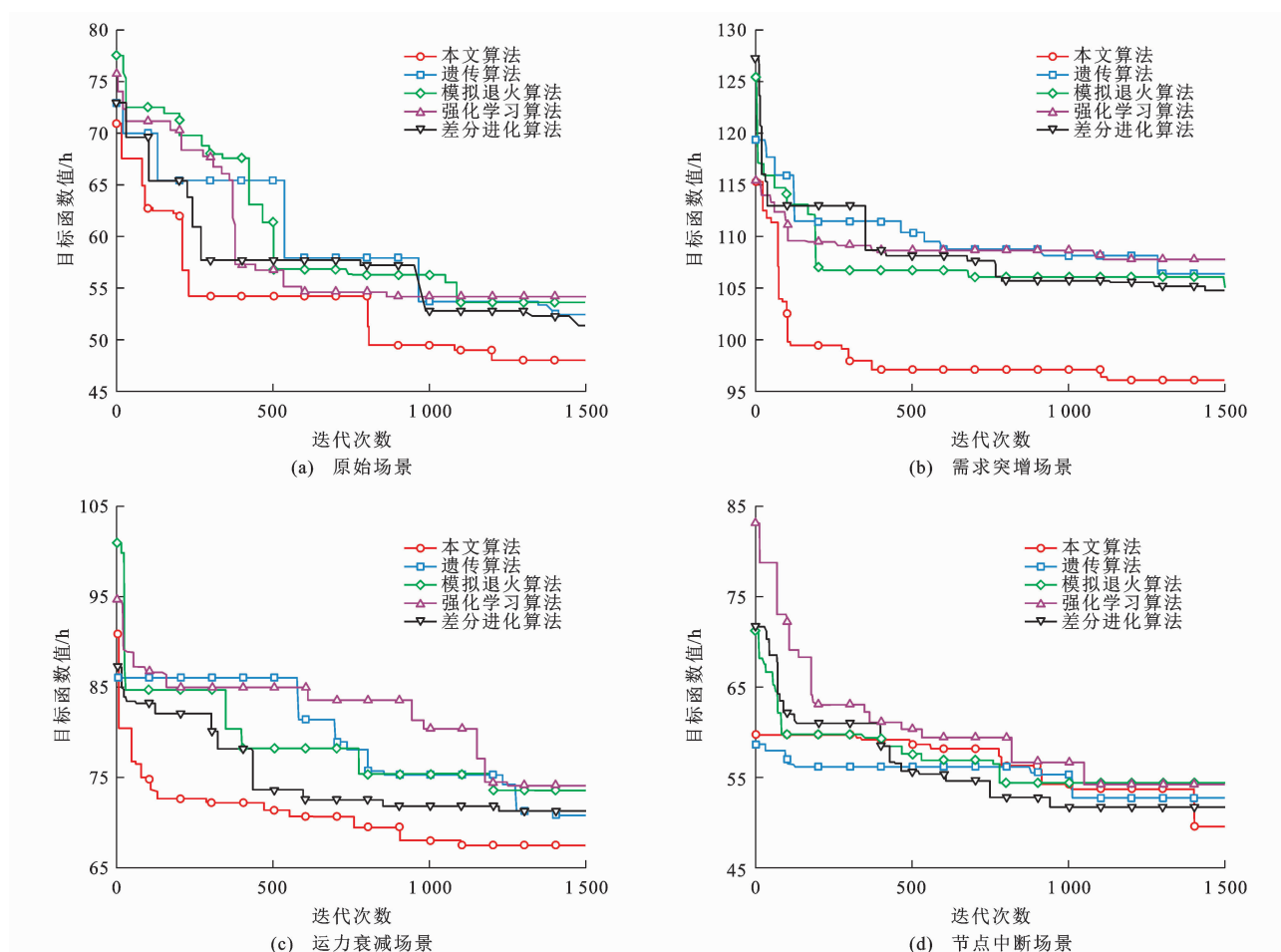


图 12 各场景下算法收敛过程

Fig. 12 Algorithm convergence processes under different scenarios

表 10 不同置信度水平与方差下的模型结果

Table 10 Model result under different confidence levels and variances

置信度水平 α	方差 σ^2	投送时间/h	需求满足比例/%	运行时间/s
0.80	0.10	56.3	86.4	144.5
	0.15	58.5	85.1	144.9
	0.20	59.4	84.4	146.3
0.85	0.10	57.4	86.7	144.1
	0.15	58.2	84.7	143.9
	0.20	58.8	83.9	148.7
0.90	0.10	57.2	86.6	148.2
	0.15	58.4	86.1	145.6
	0.20	59.2	84.9	147.8

两因素在实际调度中应综合优化,而非孤立调整某一参数,以实现系统整体性能的最大化。

3.5.2 投送人员与物资数量

针对投送人员与物资数量,分别在原数据基础上取 50%、200%、300%、400%、500% 的变化幅度各进行 10 次试验,计算结果如图 14 所示。

由图 14 可以看出:投送时间随投送数量的增大呈指数增长趋势,投送时间由 46.13 h 上升到 142.55 h,系统逐步逼近运力瓶颈,新增任务所引发的滞后效应显著增强;程序运行时间随任务规模的增大而指数式攀升,从 58.10 s 激增至 1 602.14 s,增长近 28 倍。这是因为投送规模增加会导致航次数量、装卸作业、靠泊调度等变量的数量大幅增加,导致模型解空间急剧膨胀。该现象揭示了应急投送人员与物资数量越大,系统越需要高效算法支撑,才能保证实时响应,进一步验证了所提算法在大规模场景中的应用潜力和必要性。

3.5.3 集结港数量

针对集结港数量,分别在原数据(5 个)基础上取 -40%、-20%、20%、40% 的变化幅度各进行 10 次试验,计算结果如图 15 所示。

由图 15 可以看出:集结港数量的增加提升了集结资源的可调度性,优化了保障基地与集结港之间的匹配关系,使陆上运输路径更短,单位船舶装载效率提升,从而压缩了整体投送时间;从 3 个港口增加

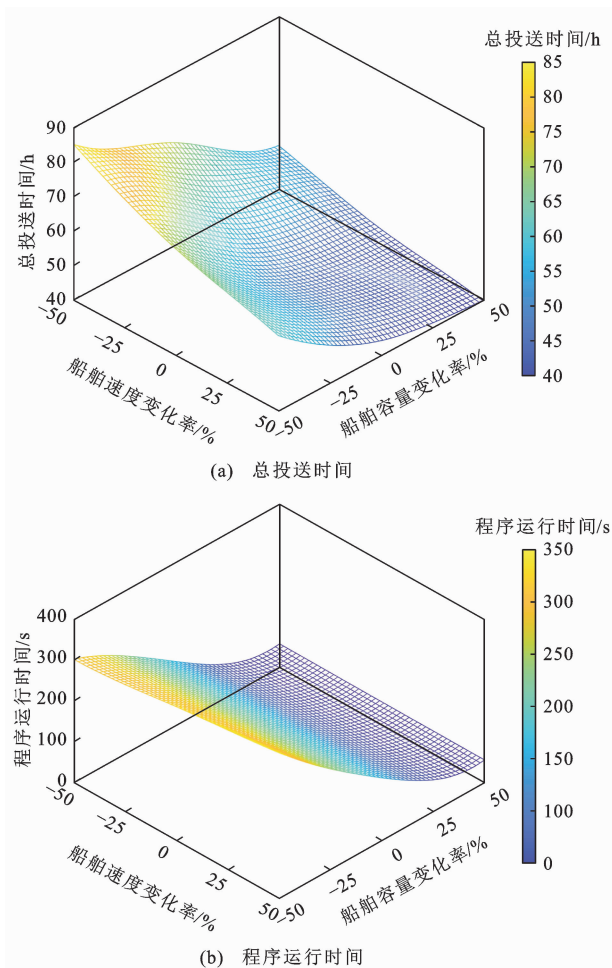


图13 船舶容量与速度的交互灵敏度分析

Fig. 13 Sensitivity analysis of the interaction between ship capacity and speed

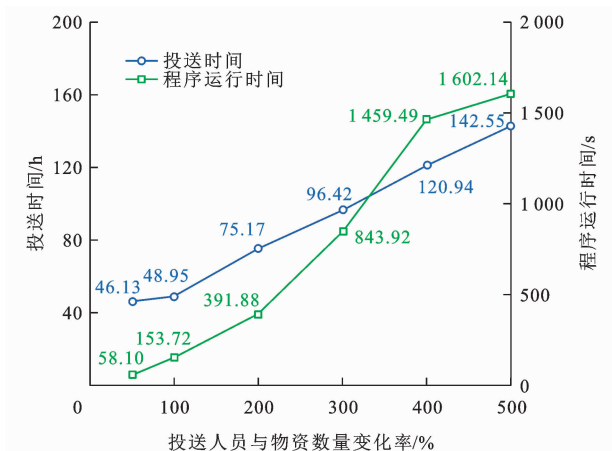


图14 投送人员与物资数量灵敏度分析

Fig. 14 Sensitivity analysis of delivery personnel and material quantities

至4个港口,投送时间大幅下降2.53 h;而从4个港口增加至5个港口,仅下降0.59 h;继续增加至6、7个港口,下降幅度仅约为0.30 h和0.15 h。这表明集结港数量的提升在前期可显著改善调度灵活

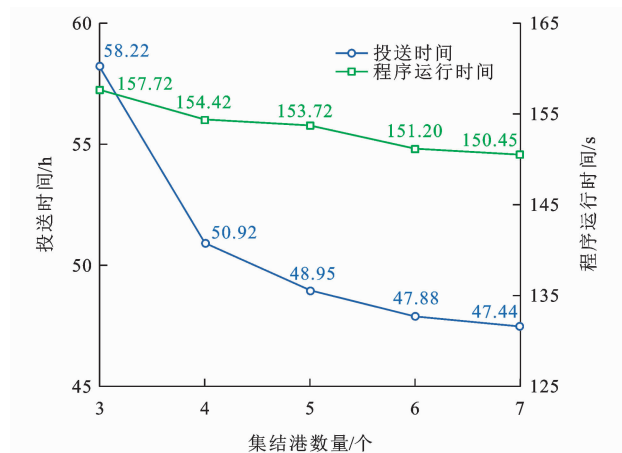


图15 集结港数量灵敏度分析

Fig. 15 Sensitivity analysis of assembly port numbers

性,但当港口数量达到一定规模后,其对系统效率的边际改善效果逐渐减弱。结合系统复杂度与调度效率综合考虑,5、6个集结港是当前场景下投送效率与资源利用的较优平衡点。超过该数量后,新增港口可能引入冗余配置,不再显著改善系统性能,甚至会带来调度分散等副作用。

3.5.4 登陆港数量

针对登陆港数量,分别在原数据(4个)基础上取-50%、-25%、25%、50%的变化幅度各进行10次试验,计算结果如图16所示。

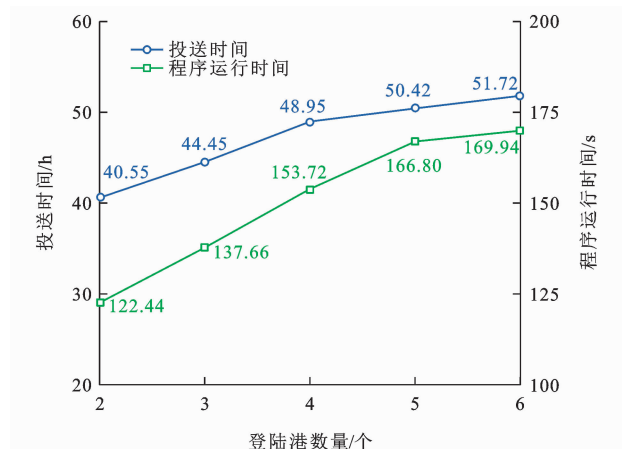


图16 登陆港数量灵敏度分析

Fig. 16 Sensitivity analysis of landing port numbers

由图16可以看出:随着登陆港数量的增加,投送时间呈现出逐步上升的趋势,这是因为每个登陆港都需要进行物资的运输、装卸等一系列操作,而这些操作不仅仅是线性叠加的;随着登陆港的增加,投送时间的边际增量逐渐递减,原因在于优化算法通过合理的航线与船舶调度,在一定程度上降低了新增登陆港带来的额外时间;从程序运行时间来看,系统的计算复杂度在增加登陆港数量时并非非线性增

长,反而表现出一种“指数式”的增长趋势,这种现象与登陆港数量的增加直接相关,意味着系统处理更多的船舶航次、装卸量等决策,从而导致计算时间的急剧增加。

3.5.5 陆上运输平均速度

针对陆上运输平均速度,分别在原数据($60 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$)基础上取 -50% 、 -25% 、 25% 、 50% 的变化幅度各进行10次试验,计算结果如图17所示。

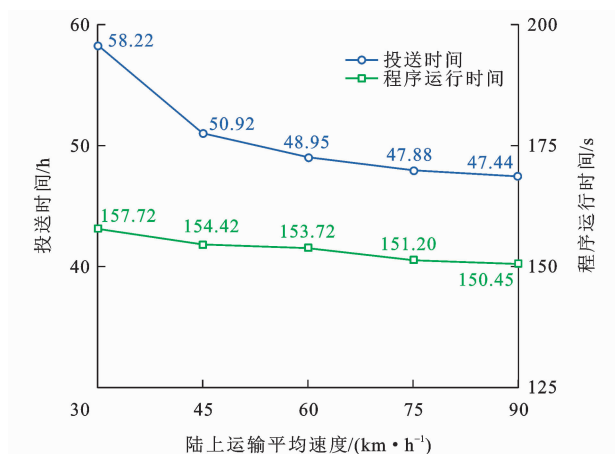


图17 陆上运输平均速度灵敏度分析

Fig. 17 Sensitivity analysis of the average speed of ground transportation

由图17可以看出:随着陆上运输平均速度的提高,投送时间呈现显著下降趋势,从最低 $30 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 条件下的 58.22 h ,降低至最高 $90 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 条件下的 47.44 h ,这表明在投送任务中,陆上集结阶段对于总体时效具有重要影响;当陆上运输平均速度超过 $75 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 后,投送时间的下降幅度趋于平缓,出现明显的边际递减效应,这是由于船舶航行和港口作业的耗时逐渐成为瓶颈,陆上运输再提速对整体时效贡献有限;从程序运行时间来看,陆上运输平均速度的提升带来的计算复杂度变化不大,程序运行时间整体维持在 $150 \sim 158 \text{ s}$,并无显著波动,这反映出模型计算复杂度主要由船舶调度决策驱动,而非陆上运输。

4 结 语

(1)为应对问题复杂性,本文将陆海联合跨海应急投送体系分解为集结港选择与海上运输2个子问题,建立了以最小化投送时间为目标的优化模型。为高效求解模型,设计了内外嵌套的集成优化算法框架:外部采用自适应大邻域搜索算法处理集结港选址问题,内部引入改进模拟退火算法优化海上运输方案,并通过信息传递实现内外模块的动态交互。

(2)以中国向南海地区跨海应急投送为例,得到了投送时间最短的优化方案。通过对比,本文算法在优化效果、稳定性及计算速度等指标上均优于遗传算法、模拟退火算法、强化学习算法和差分进化算法,验证了本文算法在处理此类问题时的合理性与有效性,也表明本文研究对于解决特殊的LRP具有理论和实用价值。

(3)本文所建立的模型在求解过程中尚未充分考虑天气突变、船舶故障、需求实时变化等不确定性动态干扰因素对陆海联合跨海应急投送时效的影响。未来研究应进一步引入这些不确定性因素,通过鲁棒性分析和不确定性优化方法,构建更加灵活且适应实际复杂环境的模型。同时,将扩展模型以支持保障基地向多个集结港分流物资,并计划纳入空运、高铁等多种运输方式的联合投送,进一步提高应急投送体系在复杂环境下的响应能力和决策可靠性。此外,未来可基于登陆港到岛内需求点的多级配送,进一步扩展岛内物资分发模型。

参 考 文 献 :

References :

- [1] 海 军. 部队战略投送模式问题探析[J]. 国防交通工程与技术, 2013, 11(5): 8-10, 47.
HAI Jun. An exploration into the modes of the strategic projection of the army[J]. Traffic Engineering and Technology for National Defense, 2013, 11(5): 8-10, 47.
- [2] 朱 光, 刘永华. 应对重大突发事件的战略投送能力建设[J]. 军事交通学院学报, 2016, 18(1): 1-5.
ZHU Guang, LIU Yong-hua. Construction of strategic projection capability for dealing with major unexpected incidents[J]. Journal of Academy of Military Transportation, 2016, 18(1): 1-5.
- [3] 鲍利平, 卜 超, 卢正升. 新形势下加速推进战略投送能力生成对策[J]. 军事交通学院学报, 2017, 19(1): 1-4.
BAO Li-ping, BU Chao, LU Zheng-sheng. Countermeasures for accelerating strategic projection capability generation under new situation[J]. Journal of Military Transportation University, 2017, 19(1): 1-4.
- [4] 孙华丽, 李泽平, 马 腾. 道路修复联合应急设施选址-路径鲁棒优化研究[J]. 系统工程理论与实践, 2023, 43(9): 2701-2716.
SUN Hua-li, LI Ze-ping, MA Teng. Robust optimization of joint road restoration and emergency location-routing[J]. Systems Engineering - Theory & Practice, 2023, 43(9): 2701-2716.
- [5] 朱 莉, 曹 杰, 顾 珺, 等. 公平缓解灾民创伤下的应急物资动态调配研究[J]. 系统工程理论与实践, 2020, 40(9): 2427-2437.
ZHU Li, CAO Jie, GU Jun, et al. Dynamic emergency supply distribution considering fair mitigation of victim

- suffering[J]. *Systems Engineering - Theory and Practice*, 2020, 40(9): 2427-2437.
- [6] 郭鹏辉,朱建军,王嵩华.考虑异质物资合车运输的灾后救援选址-路径-配给优化[J]. *系统工程理论与实践*, 2019, 39(9): 2345-2360.
- GUO Peng-hui, ZHU Jian-jun, WANG He-hua. Location-routing-allocation problem with consolidated shipping of heterogeneous relief supplies in post-disaster rescue [J]. *Systems Engineering - Theory and Practice*, 2019, 39(9): 2345-2360.
- [7] 王旭坪,马超,阮俊虎.运力受限的应急物资动态调度模型及算法[J]. *系统工程理论与实践*, 2013, 33(6): 1492-1500.
- WANG Xu-ping, MA Chao, RUAN Jun-hu. Model and algorithm of relief materials dynamic scheduling without sufficient vehicle quantity[J]. *Systems Engineering - Theory and Practice*, 2013, 33(6): 1492-1500.
- [8] 于冬梅,高雷阜,赵世杰.考虑凸形障碍的应急设施选址与资源分配决策研究[J]. *系统工程理论与实践*, 2019, 39(5): 1178-1188.
- YU Dong-mei, GAO Lei-fu, ZHAO Shi-jie. Emergency facility location-allocation problem with convex barriers[J]. *Systems Engineering - Theory and Practice*, 2019, 39(5): 1178-1188.
- [9] 杨晓霞,张蕊,李永行,等.火灾爆发时地铁站乘客疏散多目标路径优化方法[J]. *交通运输工程学报*, 2023, 23(5): 192-209.
- YANG Xiao-xia, ZHANG Rui, LI Yong-Hang, et al. A multi-objective route optimization method for passenger evacuations at subway stations during a fire outbreak[J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2023, 23(5): 192-209.
- [10] 马昌喜,石褚巍,杜波.轴辐式应急救援网络规划[J]. *交通运输工程学报*, 2023, 23(3): 198-208.
- MA Chang-xi, SHI Chu-wei, DU Bo. Hub-and-spoke emergency rescue network planning[J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2023, 23(3): 198-208.
- [11] 赵建有,韩万里,郑文捷,等.重大突发公共卫生事件下城市应急医疗物资配送[J]. *交通运输工程学报*, 2020, 20(3): 168-177.
- ZHAO Jian-you, HAN Wan-li, ZHENG Wen-jie, et al. Distribution of emergency medical supplies in cities under major public health emergency[J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2020, 20(3): 168-177.
- [12] SHEU J B. Dynamic relief-demand management for emergency logistics operations under large-scale disasters[J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2010, 46(1): 1-17.
- [13] SAFAEI A S, FARSA S, PAYDAR M M. Emergency logistics planning under supply risk and demand uncertainty[J]. *Operational Research*, 2020, 20(3): 1437-1460.
- [14] ZAHEDI A, KARGARI M, HUSSEINZADEH KASHAN A. Multi-objective decision-making model for distribution planning of goods and routing of vehicles in emergency multi-objective decision-making model for distribution planning of goods and routing of vehicles in emergency[J]. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 2020, 48: 101587.
- [15] SANCIE C, DASKIN M S. An integer L-shaped algorithm for the integrated location and network restoration problem in disaster relief[J]. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2021, 145: 152-184.
- [16] HUANG K, JIANG Y P, YUAN Y F, et al. Modeling multiple humanitarian objectives in emergency response to large-scale disasters[J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2015, 75: 1-17.
- [17] CAMUR M C, SHARKEY T C, DORSEY C, et al. Optimizing the response for Arctic mass rescue events[J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2021, 152: 102368.
- [18] AKHLAGHI V E, CAMPBELL A M, DE MATTA R E. Fuel distribution planning for disasters: Models and case study for Puerto Rico[J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2021, 152: 102403.
- [19] WANG Y, ASSOGBA K, LIU Y, et al. Two-echelon location-routing optimization with time windows based on customer clustering[J]. *Expert Systems with Applications*, 2018, 104: 244-260.
- [20] 吴迪,朱玉玺,武文龙,等.基于远海岛屿的海上常态巡航救助系统选址-路径优化[J]. *交通运输工程学报*, 2025, 25(6): 200-218.
- WU Di, ZHU Yu-xi, WU Wen-long, et al. Location-routing optimization for regular maritime cruise and emergency rescue system in remote islands [J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2025, 25(6): 200-218.
- [21] BOCCIA M, CRAINIC T G, SFORZA A, et al. Multi-commodity location-routing: Flow intercepting formulation and branch-and-cut algorithm[J]. *Computers and Operations Research*, 2018, 89: 94-112.
- [22] WANG M T, ZHANG C R, BELL M G H, et al. A branch-and-price algorithm for location-routing problems with pick-up stations in the last-mile distribution system[J]. *European Journal of Operational Research*, 2022, 303(3): 1258-1276.
- [23] LOPES R B, FERREIRA C, SANTOS B S. A simple and effective evolutionary algorithm for the capacitated location-routing problem[J]. *Computers and Operations Research*, 2016, 70: 155-162.
- [24] WANG H J, DU L J, MA S H. Multi-objective open location-routing model with split delivery for optimized relief distribution in post-earthquake[J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2014, 69: 160-179.
- [25] 李娅,王旭坪,林娜,等.村镇农产品多类型预冷设施选址-路径优化模型及算法[J]. *系统工程理论与实践*, 2022, 42(11): 3016-3029.
- LI Ya, WANG Xu-ping, LIN Na, et al. The location-routing optimization model and algorithm of multi-type precooling facilities for agricultural products[J]. *Systems Engineering - Theory and Practice*, 2022, 42(11): 3016-3029.

- [26] 马艳芳, 应 斌, 周晓阳, 等. 基于冲突合作关系的生鲜选址-路径多主体优化模型与算法[J]. 系统工程理论与实践, 2020, 40(12): 3194-3209.
- MA Yan-fang, YING Bin, ZHOU Xiao-yang, et al. Multi-agent optimization model and algorithm for perishable food location-routing problem with conflict and coordination[J]. Systems Engineering - Theory and Practice, 2020, 40(12): 3194-3209.
- [27] 黄凯明, 卢才武, 连民杰. 三层级设施选址-路径规划问题建模及算法研究[J]. 系统工程理论与实践, 2018, 38(3): 743-754.
- HUANG Kai-ming, LU Cai-wu, LIAN Min-jie. Research on modeling and algorithm for three-echelon location-routing problem[J]. Systems Engineering - Theory and Practice, 2018, 38(3): 743-754.
- [28] WANG Y, PENG S G, ZHOU X S, et al. Green logistics location-routing problem with eco-packages[J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2020, 143: 102118.
- [29] HOF J, SCHNEIDER M, GOEKE D. Solving the battery swap station location-routing problem with capacitated electric vehicles using an AVNS algorithm for vehicle-routing problems with intermediate stops[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2017, 97: 102-112.
- [30] 李慧芳, 胡大伟, 陈希琼, 等. 考虑碳排放的混合轴辐式多式联运网络枢纽扩增选址-路径问题[J]. 交通运输工程学报, 2022, 22(4): 306-321.
- LI Hui-fang, HU Da-wei, CHEN Xi-qiong, et al. Expanding hub location-routing problem for hybrid hub-and-spoke multimodal transport network considering carbon emissions[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2022, 22(4): 306-321.
- [31] 杨忠振, 穆 雪, 朱晓聪. 交通流变化下的多配送中心-多需求点配送网络优化模型[J]. 交通运输工程学报, 2015, 15(1): 100-107.
- YANG Zhong-zhen, MU Xue, ZHU Xiao-cong. Optimization model of distribution network with multiple distribution centers and multiple demand points considering traffic flow change[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2015, 15(1): 100-107.
- [32] 刘欣萌, 何世伟, 陈胜波, 等. 带时间窗 VRP 问题的多智能体进化算法[J]. 交通运输工程学报, 2014, 14(3): 105-110.
- LIU Xin-meng, HE Shi-wei, CHEN Sheng-bo, et al. Multi-agent evolutionary algorithm of VRP problem with time window[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2014, 14(3): 105-110.
- [33] AKPUNAR Ö Ş, AKPINAR Ş. A hybrid adaptive large neighbourhood search algorithm for the capacitated location routing problem[J]. Expert Systems with Applications, 2021, 168: 114304.
- [34] WU J B, LI Q H, BIE Y M, et al. Location-routing optimization problem for electric vehicle charging stations in an uncertain transportation network: An adaptive co-evolutionary clustering algorithm[J]. Energy, 2024, 304: 132142.
- [35] IMANI A, KARIMI H, DEIRANLOU M. The bi-objective multi-depot split delivery location routing problems under uncertain conditions[J]. International Journal of Systems Science: Operations and Logistics, 2024, 11: 2322512.
- [36] RAHMANIFAR G, MOHAMMADI M, GOLABIAN M, et al. Integrated location and routing for cold chain logistics networks with heterogeneous customer demand[J]. Journal of Industrial Information Integration, 2024, 38: 100573.
- [37] 胡自强, 魏玉光, 安 然, 等. 复杂网络结构与环境下多式联运网络路径优化与流量分配[J]. 交通运输系统工程与信息, 2025, 25(3): 44-60.
- HU Zi-qiang, WEI Yu-guang, AN Ran, et al. Optimization of routing and traffic allocation in multimodal transportation network with complex network structure and environment[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2025, 25(3): 44-60.
- [38] 张 旭, 袁旭梅, 降亚迪. 需求与碳交易价格不确定下多式联运路径优化[J]. 系统工程理论与实践, 2021, 41(10): 2609-2620.
- ZHANG Xu, YUAN Xu-mei, JIANG Ya-di. Optimization of multimodal transportation under uncertain demand and stochastic carbon trading price[J]. Systems Engineering - Theory and Practice, 2021, 41(10): 2609-2620.
- [39] WANG Z J, ZHANG D Z, TAVASSZY L, et al. The hierarchical multimodal hub location problem for cross-border logistics networks considering multiple capacity levels, congestion and economies of scale[J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2025, 196: 103972.
- [40] GAO T H, TIAN J, HUANG C, et al. The impact of new western land and sea corridor development on port deep hinterland transport service and route selection[J]. Ocean and Coastal Management, 2024, 247: 106910.