



计算机科学

COMPUTER SCIENCE

基于中继保障的分布式海战补给路径优化

曾祥兵, 曾斌, 李厚朴

引用本文

曾祥兵, 曾斌, 李厚朴. 基于中继保障的分布式海战补给路径优化[J]. 计算机科学, 2024, 51(6A): 230600113-9.

ZENG Xiangbing, ZENG Bin, LI Houpu. [Optimization of Distributed Naval Warfare Supply Path Based on Relay Guarantee](#) [J]. Computer Science, 2024, 51(6A): 230600113-9.

相似文章推荐 (请使用火狐或 IE 浏览器查看文章)

Similar articles recommended (Please use Firefox or IE to view the article)

[基于改进势场法的机器人路径规划](#)

Robot Path Planning Based on Improved Potential Field Method

计算机科学, 2022, 49(7): 196-203. <https://doi.org/10.11896/jsjcx.210500020>

[多Agent的航空器滑行策略优化](#)

Optimization of Aircraft Taxiing Strategy Based on Multi-agent

计算机科学, 2020, 47(2): 306-312. <https://doi.org/10.11896/jsjcx.181202400>

[基于剖析信息和关键路径长度的软件扇出树生成算法](#)

Profile Information and Critical Path Length Based Software Fanout Tree Generation Algorithm

计算机科学, 2010, 37(3): 248-252.

[一种基于移动Agent的分布式信息检索优化模型](#)

计算机科学, 2008, 35(7): 292-294.

[粗糙评估系统与路径优化](#)

Rough Assessment System and Path Optimization

计算机科学, 2013, 40(5): 253-256.

基于中继保障的分布式海战补给路径优化

曾祥兵¹ 曾 斌¹ 李厚朴²

¹ 海军工程大学管理工程与装备经济系 武汉 430033

² 海军工程大学导航工程系 武汉 430033

(1039674680@qq.com)

摘 要 分布式海战是未来战争形态发展的必然趋势。与传统海战样式相比,分布式海战作战部署更加灵活,作战区域更广。分布式海战条件下的后勤保障区域分布范围广、保障半径大、分散程度高,传统伴随保障方式难以适应战争形态发展。依托中继保障基地进行递进保障,并运用补给舰编队进行物资转运的补给模式,更加适合分布式海战特点。考虑复杂多变的海洋天气对远距离物资投送带来的极大影响,首先基于不同地理位置的历史天气信息模拟有效波高,然后根据有效波高测算天气因素对舰船航速及补给开销的影响程度,最后触发优化模型与仿真模型之间的反馈并得到优化方案。将优化方案与未触发仿真模型的理想优化结果进行比较,以验证不同策略的性能表现,得到契合实际应用环境的优化方案,从而提高最优路径的鲁棒性,为分布式海战物资补给提供较好的决策支撑。

关键词: 分布式海战; 中继保障; 物资转运; 路径仿真; 路径优化

中图分类号 E953

Optimization of Distributed Naval Warfare Supply Path Based on Relay Guarantee

ZENG Xiangbing¹, ZENG Bin¹ and LI Houpu²

¹ Department of Management Engineering and Equipment Economics, Naval University Engineering, Wuhan 430033, China

² Department of Navigation Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China

Abstract Distributed naval warfare is an inevitable trend in the development of future warfare patterns, compared with the traditional naval warfare style, distributed naval warfare combat deployment is more flexible, the combat area is more extensive. Under the condition of distributed naval warfare, the logistics support area is widely distributed, the support radius is large, and the degree of dispersion is high, so the traditional accompanying security approach is difficult to adapt to the development of warfare patterns. The resupply mode of relying on the relay security base for progressive security and using supply ship formations for material transfer is more suitable for the characteristics of distributed naval warfare. Considering the great influence of complex and variable ocean weather on long-distance material delivery, this paper firstly simulates the effective wave height based on the historical weather information of different geographical locations, and then measures the degree of influence of weather factors on the ship's speed and supply expenses based on the effective wave height, and finally triggers the feedback between the optimization model and the simulation model and get the optimization scheme. The optimized solution is compared with the ideal optimization result without triggering the simulation model, so as to verify the performance of different strategies and obtain the optimized solution that fits the actual application environment, thus improving the robustness of the optimal path and providing better decision support for distributed naval warfare supplies supply.

Keywords Distributed naval warfare, Relay assurance, Material transfer, Path simulation, Path optimization

近年来美国海军提出了一种称为分布式杀伤的进攻理念,在反介入环境中投入作战力量,运用更敏捷、更致命的舰船组合,以分布式方式在大范围内作战^[1-2]。国内也有研究者认为,分布式杀伤在海上战争演变过程中具有历史必然性,是未来海上战争形态发展的必然趋势^[3]。分布式杀伤的作战理念为分散区域的后勤保障带来了巨大的挑战。Zhang等^[4-5]综合考虑复杂海况及补给时间窗对舰船补给的影响,研究了分布式海战补给路径规划方法。Dong等^[6]基于两阶段优化模型,重点研究了补给物资的特殊性及其出入库时间的物资

补给顺序。现有文献在进行目标规划时,通常以获取最短时间路径为突破口,较少考虑物资转运的时间同步问题及费用开销问题。分布式杀伤的作战理念除了应用于指导战时完成作战任务,还应用于指导平时的兵力部署、后勤保障等基础力量建设及体系运行工作。此外,现代战争并不一定意味着一战定胜负,一旦战争持续时间过长,军事开支大幅增加,将会带来巨大的财政压力。以俄乌战争为例,据瑞典智库斯德哥尔摩国际和平研究所(SIPRI)2023年4月24日发布的报告^[7]:俄乌战争爆发后,欧洲去年的军事开支增幅空前,总体

基金项目:国家自然科学基金(41771487)

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China(41771487).

通信作者:曾斌(zbtrueice@163.com)

增加13%，处于近30年最高水平。其中，乌克兰的军事开支大增640%，达440亿美元，规模排全球第11。因此在保证保障时效的基础上，研究如何节省分布式海战物资补给产生的开销具有重要意义。

此外，2018年美海军研究生学院的一个课题组为分布式海上作战概念开发了一个作战想定——“海战2030”，想定中指出，天气和海况因素是影响分布式海上作战的重要因素^[8]。

本文以海上中继保障基地为依托，运用补给舰编队进行物资转运，根据历史天气数据模拟有效波高，统筹考虑天气因素对补给舰航行时间与补给开销造成的影响，结合仿真与优化模型，探寻符合实际应用环境的最优路径。

1 问题分析

为提高未来海上战争打赢能力，后勤保障模式必须与战争形态相适应。基于分布式杀伤理念的后勤保障区域可以是岛礁、海上编队临时活动区等符合分布式作战理念特点的多种区域。保障区域分布范围广、保障半径大、点位分散，传统伴随保障方式中补给舰相比作战舰艇缺乏足够的灵活性^[9-10]，即便运用伴随保障方式进行物资补给，一旦持续时间过长，伴随补给消耗殆尽，也需要从后方保障基地转运物资，因此运用补给舰编队实施补给具有一定优势。此外，分布式海战保障区域纵深一般较远，单纯依靠后方保障基地作为物资供应点可能会影响保障时效。将物资供应点前推部署，在后方保障基地与保障区域之间设置中继保障基地，可以缩短物资供应点的保障半径，提高保障时效。

Wang等^[11]依托退役舰艇改装构建海上保障平台，发挥“中继投送”功能。Lu等^[12]考虑设置无人机配送中继站，再由中继站为终端进行物资配送。Kjetil^[13]对民用背景下海上物资转运进行了优化。Yu等^[14]对舰艇编队海上物资垂直补给规划问题进行了研究。Luo等^[15]研究了基于模拟退火算法的海上舰艇补给规划。国内外现有的理论研究成果为运用中继保障基地采取编队补给的物资转运策略提供了理论依据。

如图1所示，在后方保障基地与保障区域(A区至E区)之间设置中继保障基地，在保障区域附近设置临时转运点(O_1, O_2, O_3, O_4, O_5)。需要实施大规模物资投送时，后方保障基地将物资投送至中继保障基地，大型补给舰编队再将物资从中继保障基地运至各个临时转运点，物资到达临时转运点后，由中小型补给舰将物资从临时转运点转运至保障区域。

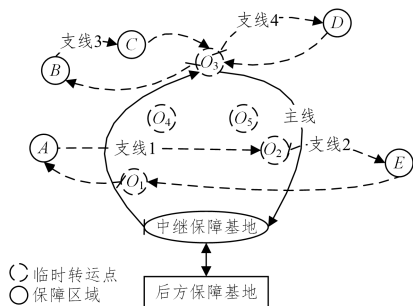


图1 物资转运示意图

Fig. 1 Schematic diagram of material transfer

在物资转运过程中，大型补给舰编队始终位于主要运输航线(主线)上航行，中小型补给舰位于支线航行。以图1中主线与支线1及支线2为例讲解具体的物资转运：大型补给舰编队从中继保障基地出发，到达临时转运点 O_1 并将保障区

域A区和E区所需的物资转交中小型补给舰，中小型补给舰装载物资后按顺序沿支线1和支线2航行，依次交付A区和E区所需的物资。在经过A区和B区时，可同步提取相应区域的待维修、报废装备并将之运输至临时转运点 O_2 并由主线上大型补给舰编队带回至中继保障基地。需要说明的是，中小型补给舰编队E区提取的待维修装备以及受伤人员等必须等到下一个循环与大型补给舰编队在临时转运点 O_2 相遇时转交给大型补给舰编队并由其带回中继保障基地处理。

与支线1和支线2类似，支线3和支线4保障B、C、D区域的物资需求。

图1中临时转运点4和5代表可供补给舰选择的潜在临时转运点，支线1和2代表1条完整的支线，但为了方便描述模型构建原理，将其人为分开。主线、支线的生成方式并不唯一，图1仅以可能会生成的一种路径作为图例。

为完成保障任务：1)主线必须经过中继保障基地，并按一定顺序访问其中一部分临时转运点后返回中继保障基地；2)支线的数量要确保补给舰能够到达所有保障区域；3)支线与主线选择的临时转运点必须一致，以便实现转运同步。

2 实现同步转运的解决思路

2.1 影响物资同步转运的主要因素

在物资转运过程中，位于主线航行的大型补给舰编队与位于支线航行的中小型补给舰编队按照预定航行时间表航行，在临时转运点实现时间同步是最理想的状态。但在实际航行过程中，很难达到理想状态，补给舰航行所处海洋环境具有不确定性，若出现暴风雨之类的极端天气，主线和支线上的补给舰都将无法按预定的计划航行时间进行航行。无论哪一方出现延迟，另一方都将被迫等待。若不及时修正，延迟的时间逐步累积，甚至会影响多个保障区域的物资保障时效。

2.2 解决思路

总体目标是基于天气的不确定性寻求一个鲁棒路径，确保能够按时完成保障任务并实现综合开销最低。

假定为主线或支线上的补给舰计划航行时间添加一部分预定冗余时间，这部分冗余时间可以被用来应对各种突发情况。如果补给舰在处理完不确定情况后的冗余时间低于预定值，则该路径被认为是鲁棒性不够的，在这种情况下，可能无法按时完成各区域的物资保障任务。

通过为存在风险的路径分配惩罚因子，可以淘汰风险过大的路径，增强路径的鲁棒性。主要的思路是：对潜在路径进行模拟仿真，后对相应的仿真路径进行优化计算，针对不同天气情况下的仿真路径，在优化过程中添加不同的惩罚因子。具体提高路径鲁棒性的方法主要有两种：1)预先确定足够的冗余时间，确保这部分冗余时间能够充分应对各种突发状况。2)确保在计划时间内，始终有一部分可自由支配的空闲时间，如果受天气因素导致补给舰航速降低，发生了时间延迟，在处理完不确定情况后通过提高航行速度恢复预定冗余时间值。

3 路径优化模型

3.1 参数设置

构建数学优化模型，能实现路径最优，而要使生成路径与实际应用环境契合，则需根据实际情况进行仿真模拟。因此，将优化模型与仿真模型结合，将有助于寻找符合实际应用的最优方案。关于仿真过程，将在第4—6节予以介绍。首先介

绍数学优化模型,设置相关参数如表 1—表 3 所列。

表 1 集合参数

Table 1 Set parameters

参数	含义
$P(o)$	临时转运点集合
$P(r)$	中继保障基地集合
$P(a)$	保障区域集合
$R(m)$	主线集合
$R(d)$	支线集合
$R_p(m)$	包含临时转运点 $p \in P(o)$ 的主线集合
$R_p(d)$	包含 p 区域的支线集合
$V(i)$	主线补给舰集合
$v(i)$	支线补给舰集合
$S(s)$	仿真路径集合
$R_p(d)(m)$	包括临时转运点 $p \in P(o)$ 并连接到主线 m 的一组支线

表 2 其他参数

Table 2 Other parameters

参数	含义
$C_m(V)$	主线 $R(m)$ 上补给舰的总开销
$C_d(v)$	支线 $R(d)$ 上补给舰的总开销
$Q_m(V)$	主线 $R(m)$ 上补给舰所需的总载重(或物资装载量)
$Q_d(v)$	支线 $R(d)$ 上补给舰所需的总载重
$C(s)$	路径仿真模拟方案 s 的惩罚因子
$Q(V)$	大型补给舰的载重净载重吨
$Q(v)$	中小型补给舰的载重净载重吨
α	大于 0 的极小值
β	略大于 α 的值
$M(0)$	临时转运点 $P(o)$ 被支线补给舰访问的最大次数

表 3 决策变量

Table 3 Decision variables

参数	含义
$A(m)$	补给舰在主线 $R(m)$ 时取 1, 否则取 0
$B(d)$	补给舰在支线 $R(d)$ 时取 1, 否则取 0
$S(m)$	主线属于仿真集合时取 1, 否则取 0
$S(d)$	当支线属于仿真集合时取 1, 否则取 0
$g(s)$	当路径方案被仿真模拟时取 1, 否则取 0

3.2 目标函数

为通过仿真与优化的方式确定主线与支线的最优组合,使得航行费用、装卸费用等综合开销最低(对航线时间达不到理想状态的路线添加惩罚因子,统筹考虑保障时效与补给开销的综合影响),建立目标函数如下:

$$\min \sum_{m \in R(m)} C_m(V)A(m) + \sum_{d \in R(d)} C_d(v)B(d) + \sum_{s \in S(s)} C(S)g(s) \quad (1)$$

为使得仿真模型正常运行,建立约束变量如下:

$$\sum_{m \in R(m)} A(m) = 1 \quad (2)$$

式(2)确保方案中只能包括 1 条主线。

$$\sum_{d \in R_p(d)} B(d) \leq M(o) \sum_{m \in R_p(m)} A(m), p \in P(o) \quad (3)$$

式(3)确保不被主线补给舰访问的临时转运点中心也将不被支线补给舰访问。例如,假设 $M(0)$ 设置为 5(临时转运点 $p \in P(o)$ 最多能够被 5 艘支线上的补给舰访问),若式子右侧为 0(表明未使用主线),那么左侧(途经临时转运点 $p \in P(o)$ 的支线数量之和)也必须为 0;同理,如果式子右侧 $A(m)$ 求和为 1(表明已选用 1 条主线,途经临时转运点 $p \in P(o)$),那么左侧最大数值也只能取 5(支线上补给舰经过临时转运点 $p \in P(o)$ 的最大航次数),这个不等式充分确保未被主线补

给舰访问的临时转运点必然不会被支线补给舰访问。

$$\sum_{d \in R_p(d)} B(d) - A(m) \geq 0, p \in P(o) \quad (4)$$

式(4)确保不被支线补给舰访问的临时转运点也不会被主线补给舰访问。

$$\sum_{d \in R_p(d)} B(d) = 1, p \in P(a) \quad (5)$$

式(5)确保每个保障区域都将被支线补给舰访问。

$$Q_m(V)A(m) \leq Q(V), m \in R(m) \quad (6)$$

$$Q_d(v)B(d) \leq Q(v), d \in R(d) \quad (7)$$

式(6)及式(7)确保主线与支线补给舰装载物资数量不超过舰船净载重。

$$\sum_{d \in R_p(d)(m)} B(d) - \sum_{d \in R_p(d)} B(d) \geq A(m) - 1, p \in p(o), m \in R(m) \quad (8)$$

式(8)确保如果主线包含某临时转运点,支线必须与给定主线匹配,选择相同的临时转运点。

$$\sum_{m \in R(m)} S(m)A(m) + \sum_{d \in R(d)} S(d)B(d) - \beta g(s) + \alpha \leq S(s) \quad (9)$$

式(9)确保在优化过程中,路径已经被仿真模拟的情况下,使得 $g(s) = 1$,从而为目标函数添加相应惩罚因子; $S(s)$ 是路径仿真模拟集合,在数值上应等于主线与支线仿真数量之和($\sum_{m \in R(m)} S(m) + \sum_{d \in R(d)} S(d)$,记为 $S(s)$),在费用优化过程中的路径数量为 $\sum_{m \in R(m)} S(m)A(m) + \sum_{d \in R(d)} S(d)B(d)$,记为 $X(x)$ 。由于路径优化是在仿真的基础上进行, $X(x) \leq S(s)$ 必然成立,若该路径已被仿真模拟,则理论上 $X(x) = S(s)$ 。为满足不等式成立,则必须令 $g(s) = 1$ (这是因为 α 为大于 0 的极小值, β 仅略大于 α)。

$$\sum_{m \in R(m)} S(m)A(m) + \sum_{d \in R(d)} S(d)B(d) \geq S(s)g(s) \quad (10)$$

式(10)确保如果优化过程中选择的路径未被仿真模拟,则 $g(s) = 0$,从而避免惩罚因子被添加到目标函数。

$$A(m) \in \{0, 1\}, m \in R(m) \quad (11)$$

$$B(d) \in \{0, 1\}, d \in R(d) \quad (12)$$

$$g(s) \in \{0, 1\}, s \in S(s) \quad (13)$$

式(11)–式(13)为 0,1 变量。

4 路径生成仿真

4.1 主线生成

可以用资源表示给定状态的属性^[16],因此可以使用资源扩展功能更新资源利用情况,从而更新给定状态属性。本文与路径生成问题相关的资源主要包括时间、补给舰载重及费用开销,如果资源扩展可行,则意味着在当前状态,资源未超过最高限制。

4.1.1 主线生成状态属性参数

表 4 列出了描述主线生成过程状态的属性参数。

表 4 主线状态属性参数表

Table 4 Mainline state attribute parameters

参数	含义
P	当前访问的区域
n	包括当前访问区域的路径向量
c	部分主线的总开销
t	部分主线的总当前持续时间
a	主线补给舰从当前区域出发的时间向量
b	二进制变量,主线补给舰编队往返过程分别取 0 和 1

表 4 中主线访问区域表示中继保障基地或临时转运点, 总费用开销主要包括油料、装卸、固定维护等费用开支。

可以将完整的主线状态属性表示为: $L^M(p, [n], c, t, [a], b)$, 主线补给舰编队当前访问的区域用 $p(L)$ 表示, 准备离开当前区域时部分主线的持续时间用 $t(L)$ 表示。主线补给舰编队最开始和最终访问的区域分别用 s 和 f 表示, 起点和终点均为中继保障基地。初始状态可以记为: $L^M(s, [s], 0, 0, [0], 0)$ 。

4.1.2 主线状态更新

对于给定状态 L_A , 若其沿着路径弧 (x, y) 从区域 $x = n(L_A)$ 航行至区域 y 时, 将当前状态更新为 L_B , 状态属性根据最新的总持续时间、费用开销等资源进行更新。状态属性更新通过以下函数完成:

$$p(L_B) = y \quad (14)$$

式(14)更新当前主线补给舰编队访问区域, y 为当前最新访问的区域。

$$n(L_B) = [n(L_A), y] \quad (15)$$

式(15)用来扩展主线, 当前最新访问的区域被添加到路径中。

$$c(L_B) = \begin{cases} C^m + C_{xy}, & \text{当 } x = s \text{ 时} \\ c(L_A^M) + C_{xy}, & \text{当 } t(L_B^M) \leq t_g \text{ 时} \\ c(L_A^M) + C^m + C_{xy}, & \begin{cases} \text{当 } t(L_A^M) \leq t_g \text{ 且} \\ t(L_B^M) > t_g \text{ 时} \end{cases} \end{cases} \quad (16)$$

式(16)更新主线补给舰编队费用开销, 假定主线补给舰每次完成单个循环路线后均会产生一笔维护保养费用 C^m , 从 x 区域航行至 y 区域产生的燃料费用及在 y 区域产生的装卸费用记为 C_{xy} , 补给舰编队将物资转交支线补给舰编队的时限记为 t_g 。当 $t(L_B^M) > t_g$ 时, 表示主线补给舰在规定时间内无法完成物资交接, 必须部署新的补给舰以便在规定时间内访问所有临时转运点, 这将产生新的固定维护费用 C^m 。

$$t(L_B) = t(L_A) + t_{xy} + t_y \quad (17)$$

式(17)更新主线的当前总持续时间, t_{xy} 表示从 x 区域至 y 区域的计划航行时间, 通过添加修正系数, 可以让计划航行时间增加或减少冗余度, 添加修正系数 k 后, 计划航行时间变为 kt_{xy} 。当 $k > 1$ 时, 航行时间的冗余度会增强, 反之, 如果路径预留了空闲时间; 当 $k < 1$ 时, 会减少空闲时间, 冗余度因此减小, 但也可能因此节省一部分开销。 t_y 则表示在 y 区域的停留时间, 主要是补给物资的装卸时间。

$$a(L_B) = [a(L_A), t(L_B)] \quad (18)$$

式(18)扩展从中继保障基地或者临时转运点出发的时间向量, $t(L_B)$ 表示截止离开当前区域, 已扩展的部分路径的总持续时间, 在中继保障基地初始出发时间的基础上加上 $t(L_B)$, 就可以得到当前区域的出发时间, 并将该出发时间添加至已有的时间向量之中。

4.1.3 主线状态停止更新条件

当路径完全生成或者在状态更新过程中资源耗尽时, 状态停止更新, 函数表示如下:

$$p(L_B) = f \quad (19)$$

$$t(L_B^M) > t_g \quad (20)$$

式(19)表示当前访问区域是目标区域(中继保障基地), 则路径不再进一步扩展。式(20)表示路径的持续时间超过 t_g

时, 状态停止更新。

此外, 若在单次循环内, 一个临时转运点被主线补给舰编队二次访问, 或者补给舰编队到达 3 号临时转运点(预定补给舰返回点)后仍继续往前航行的, 状态也将停止更新。

4.1.4 主线状态更新算法

算法的简要流程如图 2 所示。

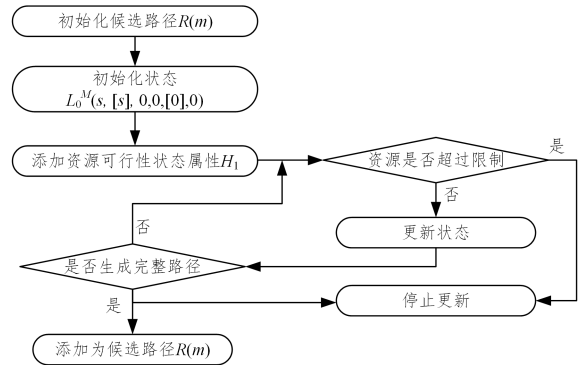


图 2 主线生成算法流程图

Fig. 2 Flow chart of mainline generation algorithm

主线生成过程中, 仿真算法应扩展所有未完成路径, 最终添加所有完整路径作为候选路径(记为 $R(m)$)。算法输入是所有主线补给舰编队能访问的一组区域 $(1, 2, 3 \dots)$, 如图 1 所示, 含中继保障基地在内, 补给舰能访问的最大区域数量为 6。访问 i 个区域时状态属性通过资源可行性表示, 记为 H_i 。

将状态属性 L_A 更新为 L_B 的简要步骤: 1) 将状态属性 L_A 和阶段 i (每访问一个新的区域便是一个新的阶段) 作为输入参数, 循环访问所有可能的区域; 2) 判断各区域是否已经访问; 3) 根据状态更新停止条件, 判断未访问区域资源的可行性; 4) 若资源可行, 将状态属性 L_A 扩展至 L_B 。

4.2 支线生成

4.2.1 支线生成状态属性参数

为方便描述支线生成过程的状态属性, 建立如表 5 所列参数。表 5 中支线访问区域包括临时转运点及保障区域, 支线的完整状态属性可记为 $L^d(p, [n], \{e\}, a, j, c, t, t_1, t_2, d_1, d_2, q_1, q_2)$, 初始状态可设置为 $L^d(s, [s], \emptyset, 0, 0, 0, 0, t_g, 0, 0, 0, 0)$, s 为出发区域, \emptyset 代表当前尚未访问任何区域, t_g 为支线的允许完成时间。

表 5 支线状态属性参数

Table 5 Branch state attribute parameter

含义	参数
p	当前访问的区域
n	包括当前访问区域的路径向量
e	访问过的所有区域的集合
a	最近访问过的区域, 用于判断路径是否仍然在支线 1 处循环
j	二进制变量, 当补给舰在支线 1 上航行时取 0, 在支线 2 航行时取 1
c	部分支线的当前总费用开销
t	部分路径的当前总持续时间
t_1	可用于完成支线 1 的总剩余时间
t_2	可用于完成支线 2 的总剩余时间
d_1	截止当前支线 1 的总持续时间
d_2	截止当前支线 2 的总持续时间
q_1	保障区域需要送往临时转运点的物资
q_2	支线补给舰为所需的最小载重

4.2.2 支线状态更新

支线更新访问区域和扩展路径的函数与主线原理类似,支线生成所需的其他扩展函数如下:

$$e(L_B) = e(L_A) \cup \{j\} \quad (21)$$

式(21)将最新访问区域添加至已访问区域的集合中。

$$c(L_B) = c(L_A) + C_{ij} \quad (22)$$

式(22)更新支线补给舰的费用开销, C_{ij} 表示从 i 区域航行至 j 区域时产生的航行费用及位 j 区域的装卸费用。

$$a(L_B) = p(L_A) \quad (23)$$

式(23)将状态属性 L_A 中当前访问的区域更新为 L_B 中最新访问的区域 $a(L_B)$ 。

$$j(L_B) = \begin{cases} 1, & j(L_A) = 1 \text{ 或 } a(L_A) = o_2 \\ 0, & \text{其他情况} \end{cases} \quad (24)$$

式(24)确保支线补给舰编队最近访问的区域为 2 号临时转运点 O_2 时,判断支线 2 开始循环,或者支线补给舰编队在扩展之前已经在支线 2 上航行时, $j(L_B)$ 取 1,保证支线 2 的及时更新。

$$t(L_B) = t(L_A) + t_{ij} + t_j \quad (25)$$

式(25)更新支线补给舰编队的航行时间, t_{ij} 为补给舰编队从 i 区域航行至 j 区域的计划航行时间(包括预定的航行冗余时间), t_j 为支线补给舰编队位 j 区域的物资装卸时间。

$$t_1(L_B) = \begin{cases} t_1(L_A) - t_{ij} - t_j, & j(L_A) = 0 \\ t_1(L_A), & j(L_A) = 1 \end{cases} \quad (26)$$

式(26)更新支线 1 的剩余可利用时间 t_1 ,随着航行时间和各区域装卸时间的增加,剩余可利用的时间逐步减少,若补给舰此时位支线 2 上航行,则 t_1 不会被更新。

$$t_2(L_B) = t_2(L_A) - t_{ij} - t_j \quad (27)$$

式(27)更新支线 2 的剩余可利用时间 t_2 ,在单个循环内, t_2 的更新会受 t_1 影响。

$$d_1(L_B) = \begin{cases} d_1(L_A) + t_{ij} + t_j, & j(L_A) = 0 \\ d_1(L_A), & j(L_A) = 1 \end{cases} \quad (28)$$

式(28)更新支线 1 的总持续时间 d_1 ,支线 2 的总持续时间 d_2 折原理与此类似,不予以赘述。

$$q_1(L_B) = q_1(L_A) + P_j \quad (29)$$

式(29)更新支线补给舰编队将各保障区域的物资(待维修装备等)送至临时转运点所需的载重, P_j 表示在 j 区域提取的物资数量。

$$q_2(L_B) = \begin{cases} \max\{q_1(L_B), q_2(L_A) + D_j\}, & j(L_B) = 0 \\ q_2(L_A) + P_j + D_j, & j(L_B) = 1 \end{cases} \quad (30)$$

式(30)更新支线补给舰编队为完成保障任务所需的最小载重, D_j 表示运送至 j 区域的物资数量。补给舰编队位支线 2 航行时,从各区域提取的物资(待维修装备等)必须等待下一个循环时转运至 2 号临时转运点,因此一旦支线 2 循环开始,从 j 区域提取的物资 P_j 及送往 j 区域的物资 D_j 同时存在于补给舰上。

支线 3 和支线 4 在当前总持续时间、剩余可利用时间、补给舰船载重等方面的更新原理与支线 1 类似。为方便构建模型,支线的时问、补给舰船载重更新仅分为两种情况(支线 1 和支线 2)。

4.2.3 支线状态停止更新条件

当支线扩展为完整路径时(访问区域为目标区域),应停止状态更新,这与主线的停止更新条件十分相似,支线的其他

停止更新条件,用以下函数表示:

$$t(L_B) > t_g \quad (31)$$

$$q_2(L_B) \geq Q_{\max} \quad (32)$$

$$j \in e \quad (33)$$

式(31)确保状态更新后的持续时间 $t(L_B)$ 超过规定时间 t_g 时,停止状态更新。式(32)确保当支线补给舰的最大载重 Q_{\max} 不满足保障任务需求时,停止更新状态。式(33)确保如果最新访问的 j 区域属于已经访问过的区域集合 e 元素时,停止更新状态。

4.2.4 支线状态更新算法

支线状态更新算法流程与主线相似,如图 2 所示。

4.3 主线补给舰编队与支线编队的时间同步

要实现主线补给舰编队与支线补给舰编队在临时转运点时间同步,以图 1 中支线 1 和支线 2 为例,支线补给舰编队位支线 1 时,其最大允许航行时间 d_1 不应超过主线补给舰北向航行时到达临时转运点 2 与临时转运点 1 的时间差。同理,支线 2 的最大允许航行时间 d_2 不应超过主线补给舰南向航行时到达临时转运点 1 与临时转运点 2 的时间差。

5 仿真需考虑的主要因素

仿真模型主要考虑现实天气因素对补给舰航速的影响,以及对主线与支线的时间同步与费用开销所造成的影响,此外,还应考虑不同规格的补给舰所受影响程度。补给舰航行速度随着基于时间变化的离散事件变化而改变,当补给舰从一个事件更新为另外一个事件时,速度被更新。

天气因素直接影响的是海浪波高,但海浪的波高分布具有较强的随机性,而有效波高是评估波浪能资源和海洋活动临界气象条件的重要参数。有效波高指的是将波高按从大到小的顺序排列,其中最大的 1/3 部分波高的平均值,通常用 H_s 表示。基于有效波高的重要性,许多学者对有效波高的合理预测进行了研究。天津大学 Deng 等^[17]基于融合模型 Res-Net-LSTM 对有效波高进行了有效预测。有效波高的预测不作为本文研究重点,但有效波高的特征属性可以为本文的仿真模型奠定良好基础。

5.1 计算航行速度

可以借用物理学中速度、功率与阻力的基本关系来预测补给舰航行速度,其基本关系的函数表示如下:

$$P = V \cdot R \quad (34)$$

在补给舰航行过程中, P 表示补给舰以速度 V 航行时所需的牵引功率; R 表示补给舰航行遇到的总阻力,总阻力主要由静水阻力(记为 R_1)、波浪产生而增加的阻力(记为 R_2)、风阻(记为 R_3)构成。

假定补给舰以恒定功率航行,当天气条件变得更为恶劣时,补给舰航行阻力增加,补给舰航行速度将随之降低。前文提到可以采用加速策略减少延误,从而实现主线与支线的同步转运,因此,在采用加速策略时,可以在最大功率限制范围内去提高牵引功率。当然,在正常情况下,补给舰以设计功率航行,提高功率是为了应对特殊情况。

下面介绍阻力计算方式。

在仿真模型中,静水阻力 R_1 被视为恒定值。为了计算由于波浪产生而增加的阻力 R_2 ,引入一种波浪校正方法,该方法被 ITTC(2014)推荐为执行标准^[18]。具体公式如下:

$$R_2 = \frac{1}{16} \rho g H_s^2 B \sqrt{\frac{B}{L}} \quad (35)$$

其中, ρ 表示海水密度, g 表示重力加速度, H_s 表示有效波高, B 表示补给舰横梁宽度, L 是指吃水线上船头到最大横梁之间长度的 95%。

假定风阻 R_3 对补给舰航速的影响通过波高表现出来, 也为了降低模型复杂程度, 不再单独计算风阻。

由式(34)和式(35)可以得出补给舰航行的速度公式:

$$V = \frac{P}{R_1 + R_2} = \frac{P}{R_1 + \frac{1}{16} \rho g H_s^2 B \sqrt{\frac{B}{L}}} \quad (36)$$

5.2 获取有效波高数据

由式(36)得出, 要评估天气对补给舰航行速度的影响, 必须获取补给舰航行路径的有效波高。而获取有效波高必须知道补给舰航行路径的地理位置, 以便根据地理位置获取相应的天气数据。假定补给舰航速在航行一定距离后予以更新, 更新速度的点称为观察点; 两个观察点之间的距离称为步距; 若补给舰航行方向在某个点位发生改变, 这个点位称为转角点。补给舰航速更新的依据是能反映天气影响的重要参数(有效波高)。在每个点位都获取准确的有效波高历史数据并不现实, 但是, 这些拥有大量有效波高历史数据的点位可以作为基准点; 用来估算某些位置的有效波高。当某个观察点需要获取较为合理的有效波高数据时, 需优先找到就近的基准点。观察点距离基准点的距离越近, 越能获取更为准确的数据; 当距离超过一定范围仍搜索不到基准点时, 可以认为观察点的有效波高等于 0, 因为这代表附近区域海况良好, 没有被过多关注。而海况波动较大的区域则会经常被关注, 因此有大量的历史数据可以参考。

5.3 距离计算

为方便计算关键点位之间的距离, 将补给舰航行的地理位置用经纬度坐标表示, 计算各个转角点之间的距离便可得到航行总距离。距离计算的主要目标是搜索附近区域就近的基准点以获取有效波高数据。由于各点位的距离较长, 基于球坐标系计算距离更符合实际。球坐标距离计算可以利用 MATLAB 实现, 不予赘述。

5.4 同步延误分析

5.4.1 同步延误原因

主线补给舰编队或者支线补给舰到达临时转运点后必须等待对方的时间称为同步延误时间。以支线 1 为例, 对延误的原因及其影响进行分析。假定路径航行的计划时间包括一部分冗余时间, 若天气原因造成航速降低而导致延迟且延迟时间超过了计划的冗余时间, 则可能会导致同步延误。导致同步延误的原因主要有 2 种, 第一种是由于支线补给舰编队的延迟造成的:

$$D(d)_{12} - t(l_1) > D(m)_{12} - t(l_m), (D(d)_{12} > t(l_1)) \quad (37)$$

支线补给舰编队在临时转运点 1 和临时转运点 2 之间的延迟表示为 $D(d)_{12}$, 支线 1 的计划冗余时间表示为 $t(l_1)$, 主线补给舰编队在两个临时转运点之间的延迟表示为 $D(m)_{12}$, 主线的计划冗余时间表示为 $t(l_m)$ 。若支线补给舰编队的延迟时间超过计划冗余时间, 支线补给舰编队的实际航行时间将超过计划航行时间。若支线补给舰编队实际航行时间超过计划航行时间的幅度大于主线补给舰编队, 支线补给舰编队的延迟将会导致主线补给舰编队必须在临时转运点等待, 从

而产生同步延误。

同步延误产生的第二种原因是由于主线补给舰编队的延迟造成的:

$$D(m)_{12} - t(l_m) > D(d)_{12} - t(l_1), D(m)_{12} > t(l_m) \quad (38)$$

与支线补给舰编队的延迟类似, 若主线补给舰实际航行时间超过计划航行时间的幅度大于支线补给舰编队, 主线补给舰的延迟也会导致支线补给舰被迫在临时转运点等待。

5.4.2 同步延误影响

同步延误会导致主线补给舰编队与支线补给舰编队无法按照规定时间汇合。进一步分析, 主线或支线上一次循环过程的同步延误有可能会造成下一个循环阶段其他路径的延误, 同步延误所带来的影响将会因此进一步扩大。

1) 主线上的同步延误影响延伸至下一阶段

$$T(m) + \max(t(m)_d, t(l_m)) + \sum_{p \in p(o)} t_0 > t_g \quad (39)$$

$T(m)$ 表示计划航行时间及装卸时间(不含预定冗余时间), $t(m)_d$ 表示主线补给舰编队因为天气影响而产生的延迟时间, $t(l_m)$ 表示主线上的预定冗余时间, t_1 表示主线补给舰在临时转运点等待支线补给舰的时间, t_g 表示主线补给舰必须完成物资投送的规定时间。若某次主线的延迟影响造成主线补给舰实际航行时间超出规定时间, 这种影响将会延伸至下一阶段。

2) 支线上的同步延误影响延伸至下一阶段

$$T(l_1) + \max(t(l_1)_d, t(l_1)) + t_{p(o_1)} + T(l_2) + \max(t(l_2)_d, t(l_2)) + t_{p(o_2)} > t_g \quad (40)$$

$T(l_1)$ 表示补给舰编队支线 1 的计划航行时间及装卸时间(不含预定冗余时间), $t(l_1)_d$ 表示支线补给舰编队因天气影响在路径 1 产生的延迟时间, $t(l_1)$ 表示支线补给舰位支线 1 的预定冗余时间, $t_{p(o_1)}$ 表示支线补给舰编队在临时转运点 1 等待主线补给舰编队的时间。 $T(l_2)$ 表示支线补给舰编队位支线 2 的计划航行时间(不含预定冗余时间), $t(l_2)_d$ 表示支线补给舰编队因天气影响在路径 2 产生的延迟时间, $t(l_2)$ 表示支线补给舰编队位支线 2 的预定冗余时间, $t_{p(o_2)}$ 表示支线补给舰编队在临时转运点 2 等待主线补给舰的时间。与主线类似, 若某次支线的延迟影响造成实际航行时间超过规定时间, 这种影响也会延伸至支线的下一阶段。

由此看来, 必须找出解决同步延误的办法以保证物资保障时效, 不然其影响可能会随着时间推移逐步放大, 造成无法估量的军事损失。

可以通过充分利用预定冗余时间、在某个时间段加快航行速度或者两种方法相结合的办法来缓解这种同步延误所带来的影响。

6 仿真的主要过程

6.1 仿真的主要输入参数

根据路径生成的原理, 补给舰编队航行路径仿真模拟的主要输入参数有: 1) 路径的地理位置信息, 得出观察点之间的距离和方向; 2) 各个基准点的天气数据——有效波高 H_s ; 3) 补给舰规格, 主要包括设计速度、计算航行速度所需的基础信息; 4) 观察点与基准点之间的最大允许距离; 5) 出发时间、步距等其他信息。

6.2 仿真的主要流程图

仿真的主要流程如图 3 所示。

仿真模型首先从优化模型中获取初始解决方案,此时路径并没有考虑现实天气等因素,模型将会在一个时间段依次对每个解决方案中的所有路径进行仿真,判断是否产生同步延误,对产生同步延误的方案添加惩罚因子;然后更新解决方案特征属性,并将解决方案放在更多的时间段内仿真,从而判断是否产生同步延误,当所有解决方案中的全部路径都在给定全部时间段进行仿真后,输出最终仿真结果。

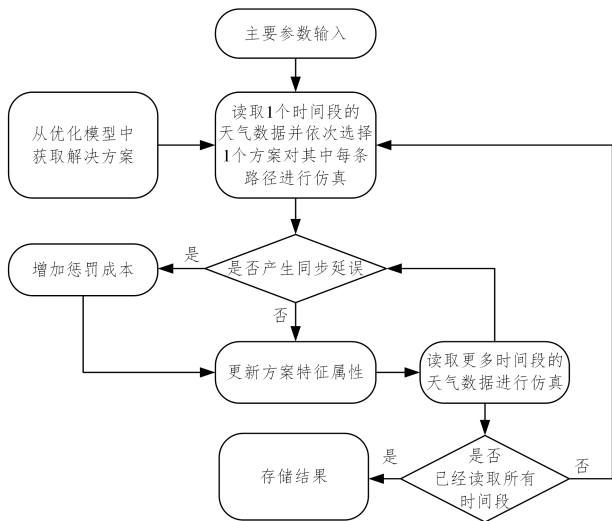


图3 仿真的主要流程图

Fig. 3 Main flow chart of simulation

7 案例分析

7.1 数据处理

图1描述的是可能出现的一种优化结果。假定现有可供主线选择的临时转运点有5个(O_1, O_2, O_3, O_4, O_5),保障区域5个(A, B, C, D, E),中继保障基地1个(O),并假定优化的方案由1条主线和2条支线构成。首先输入地理位置坐标信

息,得到各临时转运点及保障区域之间的距离见表6(本文数据均为模拟数据)。

表6 各区域之间的距离

Table 6 Distance between regions

(海里)

	O	A	B	C	D	E	O_1	O_2	O_3	O_4	O_5
O	0	85	89	97	104	120	85	89	133	104	106
A	85	0	29	64	67	114	60	84	51	64	70
B	89	29	0	8	16	86	86	90	44	24	30
C	97	64	8	0	34	59	90	95	43	66	72
D	104	67	16	34	0	69	22	72	33	56	52
E	120	114	86	59	69	0	46	31	66	46	13
O_1	85	60	86	90	22	46	0	26	52	22	36
O_2	89	84	90	95	72	31	26	0	45	26	30
O_3	133	51	44	43	33	66	52	45	0	31	28
O_4	104	64	24	66	56	46	22	26	31	0	16
O_5	106	70	30	72	52	13	36	30	28	16	0

假定中继保障基地的物资数量能够随时满足各区域的物资保障需求,各区域的物资需求如表7所列。表格中提取的物资数量表示支线补给舰编队离开各区域时需提取的物资数量,对保障区域而言,表示因维修、报废等原因,需要将各保障区域的一部分物资后送至中继保障基地的数量。对中继保障基地而言,提取的物资数量应该满足各保障区域的总物资需求。

表7 各区域物资需求表

Table 7 Material demand of each region

(t)

区域	A	B	C	D	E	中继基地
需求	2000	400	1200	800	1500	2900
提取	1000	200	800	300	600	5900

假定主线补给舰只有一种型号V,支线补给舰分为 v_1, v_2, v_3 共3种型号,发生同步延误时,假定允许补给舰在正常设计功率基础上进行加速,每条路径的预定冗余时间为相应计划航行时间的10%,其他相关参数设置如表8所列,表中关于费用开销的计量单位统一如1表列。

表8 其他参数表

Table 8 Other parameters

参数	含义	参数	含义
$Q(V)$	主线补给舰载重净载重吨 30000 t	$Q(v_3)$	支线补给舰3载重净载重吨 3100 t
$Q(v_2)$	支线补给舰2载重净载重吨 2100 t	$E(O)$	补给舰在其他区域的装卸效率 200(t/h)
$E(a)$	在保障区域的装卸效率 150(t/h)	V	补给舰设计航行速度 15(节/时)
$C(s)$	惩罚因子 50000 h	$L(V)$	主线补给舰长度 220 m
$B(V)$	主线补给舰横梁宽度 37 m	$L(v_1)$	支线补给舰1长度 100 m
$B(v_1)$	支线补给舰1横梁宽度 18 m	$L(v_2)$	支线补给舰2长度 105 m
$B(v_2)$	支线补给舰2横梁宽度 19 m	$L(v_3)$	支线补给舰3长度 110 m
$B(v_3)$	支线补给舰3横梁宽度 20 m	$P(v_1)$	支线补给舰1的牵引功率 1600 kW
$P(V)$	主线补给舰的牵引功率 12000 kW	$P(v_3)$	支线补给舰3的牵引功率 2400 kW
$P(v_2)$	支线补给舰2的牵引功率 2000 kW	$F(v_1)$	支线补给舰1设计功率下油耗 0.5(t/h)
$F(V)$	主线补给舰设计功率下油耗 1.6(t/h)	$F(v_3)$	支线补给舰3设计功率下油耗 0.7(t/h)
$F(v_2)$	支线补给舰2设计功率下油耗 0.6(t/h)	$F_1(v_1)$	路径补给舰1在加速时油耗增加 0.3(t/h)
$F_1(V)$	主线补给舰在加速时油耗增加 0.7(t/h)	$F_1(v_2)$	支线补给舰1在加速时油耗增加 0.4(t/h)
α	极小值 0.01	$F_1(v_3)$	支线补给舰1在加速时油耗增加 0.5(t/h)
$M(O)$	转运点被支线补给舰同时访问的最大数为 3	β	比 α 略大的极小值 0.02
$C(V)$	主线补给舰定期维护费用 150000/次	P_1	加速时功率允许提高 20%
$C(v_2)$	支线补给舰2定期维护费用 6000/次	$C(v_1)$	支线补给舰1定期维护费用 5000 次
C	所有区域物资装卸费用 1000/t	$C(v_3)$	支线补给舰3定期维护费用 7000/次
d_1	相邻更新航行速度点位的距离为 5 海里	$C(f)$	燃料价格 36000/t
t_g	一个模拟周期设置为 100 h	d_2	气数据基准点的最大有效距离 7 海里
$Q(v_1)$	支线补给舰1载重净载重吨 1100 t	T	模拟总时间段为 50 个模拟周期

7.2 确定性条件下的仿真优化结果

为分析天气不确定性对优化结果的影响程度,首先获取

确定性条件下的优化结果作为比较基准。确定条件下,不考虑天气影响等不确定影响因素,从优化模型中得出结果,未触

发仿真模型,在理想状态得到优化结果。触发仿真模型后,将优化方案与理想状态的优化结果进行比较,越接近理想结果,表明仿真的路径越优。

7.2.1 路径优化结果

在确定条件下,路径的优化结果如下。

主线访问路线:中继保障基地→临时转运点 4→临时转运点 3→临时转运点 5→中继保障基地;

支线 1 的访问路线:临时转运点 4→保障区域 A→临时转运点 5→保障区域 E→临时转运点 4;

支线 2 的访问路线:临时转运点 3→保障区域 B→保障区域 C→保障区域 D→临时转运点 3。

7.2.2 费用开销优化结果

确定条件下,最佳费用开销为 801 150 个计量单位,模型选择载重净载重吨为 3100t 的支线补给舰。

7.2.3 到达各区域时间

经过仿真,确定性条件下,补给舰始终能够准时到达各个区域。

7.3 不确定性条件下的仿真优化结果

7.3.1 路径优化结果

在不确定条件下,路径的优化结果如下。

主线访问路线:中继保障基地→临时转运点 1→临时转运点 3→临时转运点 2→中继保障基地;

支线 1 的访问路线:临时转运点 1→保障区域 A→临时转运点 2→保障区域 E→临时转运点 1;

支线 2 的访问路线:临时转运点 3→保障区域 B→保障区域 C→保障区域 D→临时转运点 3。

比较确定性与不确定性条件下的路径优化结果:确定性条件下,主线选择临时转运点 4 和 5。不确定条件下,主线倾向选择临时转运点 1 和 2。这是因为在不考虑天气因素的确定性条件下,由于主线补给舰航行费用相对更高,主线补给舰的航程距离短更有利于节约开销。而在考虑天气因素的不确定性影响条件下,由于主线补给舰受天气因素造成的不确定性影响更小,为减小惩罚因子,选择了更长的主线。

7.3.2 费用开销优化结果

在不确定条件下,可以采取添加冗余时间、加速(当延误导致补给舰航行的冗余时间低于预定值时加速)等策略缓解延误,相应的性能表现优劣程度如表 9 所列。

表 9 不同策略的费用开销
Table 9 Cost of different strategies

策略	费用开销	选择补给舰
策略 1	825 986	2100 吨
策略 2	817 173	3100 吨
策略 3	830 793	3100 吨
策略 4	812 366	3100 吨

在不确定条件下,策略 1 不采取任何措施缓解同步延误,最优费用开销为 825 986,相较确定条件下提高了 3.1%;策略 2 为路径添加 10% 的计划航行时间作为预定冗余时间,最优费用开销为 817 173,相较确定条件下提高了 2.0%;策略 3 在策略 2 的基础上拓展,当路径实际冗余时间小于预定冗余时间时(始终确保路径有 10% 的冗余时间),提高 20% 的航行速度,最优费用开销为 830 793,相较确定条件下提高了 3.7%;策略 4 在路径实际冗余时间低于预定冗余时间的 50% 时(始

终确保路径有 5% 的冗余时间),提高 20% 的航行速度,最优费用开销 812 366,相较确定性条件下费用开销提高了 1.4%。

从费用开销来看,策略 1 表现较差,这是由于巨大的惩罚因子造成的结果;策略 3 表现最差,这是由于补给舰在这种状态下,如果发生延误,必须有相对较长的时间段处于加速状态,从而确保每条路径有足够的冗余时间。策略 4 表现最好,相对策略 3 而言,补给舰处于加速状态的时间段更短,因加速产生的航行费用开销更低。

7.3.3 到达各区域的时间

评价策略优劣的另一个指标是到达相应区域的时间分布情况。以主线为例,50 个模拟周期内,主线补给舰到达中继保障基地或临时转运点的时间分布如图 4 所示。

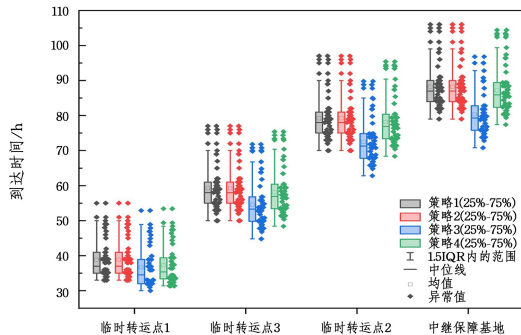


图 4 主线补给舰到达各区域的时间分布

Fig. 4 Time distribution of main line supply ships arriving in each area

图 4 中,箱形图上(下)边缘横线所对应位置是数据异常范围的数据上(下)限,上下限之外的数据称为异常值,箱盒的上(下)边界分别对应上(下)四分位数,箱盒中间横线对应中位数。从整体到达各位置的时间分布来看,策略 3 的效果最好。由于策略 3 在航行过程中一旦发现实际冗余时间不足 10% 时便开始加速,直至预定冗余时间达到计划值。经过分析发现,仍有部分数据显示为异常值,一方面可能是因为 10% 的预定冗余时间无法满足某些极端天气条件下该航段的航行要求,另一方面可能是由于异常值是一个相对概念,在策略 3 的作用下,大部分模拟期到达时间大幅度提前,但极少时期难以达到这种水平。

进一步,将 50 个模拟周期分为前后两个阶段,且后一个阶段(后 25 个模拟周期)处于冬季时期,在不采取措施的情况下,主线补给舰到达中继保障基地或临时转运点的时间分布如图 5 所示。

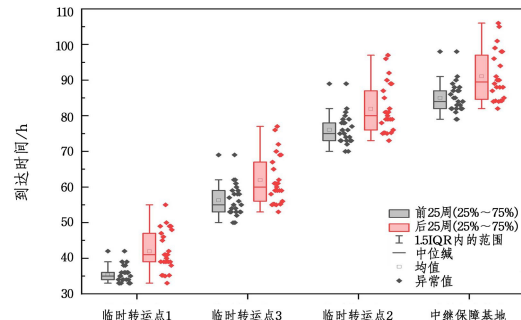


图 5 主线补给舰到达各区域的时间分布图

Fig. 5 Time distribution of main line supply ships arriving in each area

忽略极少数异常值,前 25 周的到达时间相对更为集中,这是由于前 25 周和后 25 周处于不同的季节,天气和海况因素对补给舰航行的影响程度也有所不同。

综上所述,策略的选择取决于对风险的接受程度,从保障时效出发,策略 3 更为可靠,从费用开销角度来看,策略 2 是最优选择。综合考虑保障时效与费用开销,策略 4 是最佳选择,因为它在完成的同时避免了过大的冗余时间,降低了一部分非必要的开销。这也可以看出,如果对风险的容忍度越低,越需要付出更高的经济代价。

结束语 本文以基于分布式海战的物资补给为对象,研究了不确定条件下实施中继保障策略进行物资转运的最优路径,通过仿真模型模拟不同天气对不同规格补给舰航行速度的影响来提高路径的抗干扰能力。实例证明,为计划航行时间添加合适的冗余时间并采用加速恢复策略,能够减少同步延误,降低综合开销。但文章对缺乏有效波高历史数据的海域进行了模糊化处理,存在一定局限性,下一步将针对这部分海域海况的合理预测进行研究。

参 考 文 献

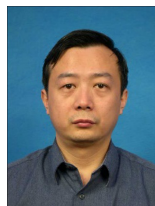
- [1] STEPHEN J. Mannila. Multi-Commodity logistic model for distributed lethality[D]. Naval Postgraduate School, 2018.
- [2] MOON, CHANGHWAN, U. S. Navy's Distributed Lethality Concept and Its Implications for East Asian Security[R]. South Korea: ROK Navy Head Quarter, 2018: 2-6.
- [3] HUANG J S. Distributed lethality is an important factor in the development of maritime warfare [J]. Science & Technology Review, 2018, 36(4): 62-68.
- [4] ZHANG Q X, ZENG B, LI H P. Underway replenishment path planning method for distributed naval warfare under the influence of sea conditions [J]. Systems Engineering and Electronics, 2020, 42(10): 2312-2319.
- [5] LI J N YANG Q SONG Y, et al. Research on the decision-making method of ship's maritime replenishment[J]. Shipbuilding of China, 2019, 60(1): 202-211.
- [6] DONG P, HUANG J S, SHI H B. Research on alongside replenishment planning at sea based on two-stage optimization model [J]. Fire Control & Command Control, 2021, 46(8): 64-70.
- [7] 新浪网. 俄乌战争爆发后欧洲军事开支增幅创新高[EB/OL]. [2023-5-10]. https://k.sina.com.cn/article_6221932120_m172db265803300zztc.html.
- [8] 张其侠. 美军分布式海上作战概念分析[EB/OL]. [2023-5-10] http://www.innovation4.cn/toutiao/046621-5903031619/?share_

token=7794fcc3-8f17-4066-aa9c-538e10305cd2.

- [9] ATKINSON, MICHAEL P. Logistic Network Model for Distributed Lethality [R]. NPS NRP Executive Summary, 2017.
- [10] STEPHEN J. Multi-commodity Logistic Model for Distributed Lethality[R]. USA: Naval Postgraduate School, 2018.
- [11] WANG X, WANG G D. Research on building marine support platform by refitting decommissioned ship[J]. Defense Transport Engineering and Technology, 2020, 18(6): 14-19.
- [12] LU L L, HU Z H. Location selection of Island UAV distribution relay station-Path optimization[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2022, 62(3): 299-308.
- [13] FAGERHOLT K. Optimization and Simulation of a Maritime Transportation System with Transshipments at Sea[D]. Norwegian University of Science and Technology, 2017.
- [14] YU P, ZHANG Y, DONG P. Research on the planning of the vertical replenishment of the naval fleet [J]. China Shipping (Second Half of Month), 2019, 19(2): 28-30.
- [15] LUO Z H, QIN F R. Naval fleet replenishment planning based on simulated annealing algorithm [J]. Journal of Naval University of Engineering, 2018, 30(4): 81-86.
- [16] IRNICH S. Resource extension functions Properties, inversion, and generalization to segments[J]. O R Spectrum, 2008, 30(1): 113-148.
- [17] DENG Z G, LI X F, WANG L. significant wave height forecast study based on machine learning[D]. Tianjin: Tianjin University, 2021.
- [18] International Towing Tank Conference. ITTC-recommended procedures and guidelines speed, speed and power trials, part 2 analysis of speed/power trial data[C]// Proceedings of the International Towing Tank Conference. 2012.



ZENG Xiangbing, born in 1992, master. His main research interest is information management.



ZENG Bin, born in 1972, Ph.D, professor. His main research interests include information management and equipment maintenance.