

doi: 10.7690/bgzd.2018.10.006

基于 GTSP 问题的舰艇编队海上补给规划

秦芙蓉, 罗朝晖, 董 鹏

(海军工程大学管理工程系, 武汉 430033)

摘要: 为研究综合补给舰为舰艇编队实施伴随保障的物资补给过程, 对舰艇编队海上补给规划问题进行研究。阐述伴随保障方式下 3 种常见补给策略, 以巡回牧师策略为例, 以最小补给时间为目标建立海上补给规划问题模型, 将该问题类比为广义旅行商问题 (generalized travel salesman problem, GTSP) 并运用启发式算法进行求解。以某舰艇编队物资补给任务为算例进行计算, 得出了该补给任务的最小补给时间及最优补给路径。结果表明: 将海上补给规划问题类比为 GTSP 问题能有效实现问题求解, 模型及算法能够为海上伴随补给保障提供决策支持。

关键词: 海上补给规划; 补给策略; 广义旅行商问题; 启发式算法

中图分类号: TJ83 **文献标志码:** A

Scheduling of Underway Replenishment for a Battle Group Based on Generalized Traveling Salesman Problem

Qin Furong, Luo Zhaohui, Dong Peng

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

Abstract: In order to study the replenishment process of the comprehensive supply ship for the warship formation to implement the accompanying support, the underway replenishment planning of the warship formation is studied. This paper expounds three common replenishment strategies under the accompanied support mode. Taking the touring pastor strategy as an example, an underway replenishment planning model is established with the goal of minimum replenishment time. This problem is analogous to the generalized travel salesman problem (GTSP) and solved by using heuristic algorithm. The minimum replenishment time and optimal replenishment path of a warship formation are obtained by taking the replenishment task of a warship formation as an example. The results show that the analogue of the seaborne supply planning problem to the GTSP problem can effectively solve the problem, and the model and algorithm can provide decision support for the seaborne adjoint replenishment support.

Keywords: underway replenishment scheduling; replenishment tactics; generalized traveling salesman problem; heuristic algorithm

0 引言

我海军舰艇编队在远洋海域执行各种作战任务, 具有任务持续时间长、结构复杂和保障难度大等特点, 依靠综合补给舰实行伴随补给是延长编队自持时间的有效手段, 研究其对舰艇编队的海上补给过程具有重要意义。

目前, 国外仅有少部分学者对海上补给规划问题展开研究, 且主要是将其与越野跑问题、传统旅行商 (travel salesman problem, TSP) 问题类比^[1-3], 或者对补给过程进行数学描述并且运用软件直接求解^[4]。而国内相关研究仍集中在补给训练仿真^[5]及物资需求预测^[6]方面, 仅在近期才有极少学者对海上补给的路径规划问题进行了研究^[7-10]。并且目前研究中很少有将巡回牧师 (circuit rider, CR) 策略下的海上补给规划问题类比为 GTSP 进行求解的文献, 采用启发式算法解决海上补给规划问题的文献

也非常少。笔者研究 CR 策略下的海上补给规划问题, 将其类比为 GTSP 问题, 建立海上补给规划模型并运用启发式算法求解最短补给路径, 得出合理规划结果, 验证模型及算法的可行性。该策略下的补给规划还可引申至其他 2 种策略。

1 物资补给策略比较分析

目前, 伴随保障方式下, 常见的补给策略主要分 3 种: 送报男孩、加油站以及巡回牧师策略^[1]。

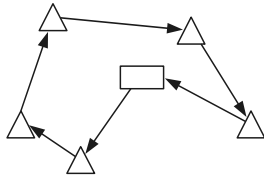
送报男孩策略 (delivery boy, DB) 由综合补给舰依次航行至有补给需求的作战舰船所在位置, 并对作战舰船进行补给。CR 由作战舰船和综合补给舰航行至补给会合点进行补给的策略。当作战舰船被安排补给时, 作战舰船与补给船在特定的补给点会合以完成补给作业。加油站策略 (gas station, GS) 由作战舰船依次驶离战位航行至综合补给舰处接受

收稿日期: 2018-07-14; 修回日期: 2018-08-19

基金项目: 海军工程大学科研自主立项项目 (20161613); 海军工程大学科研自主立项项目 (20161614)

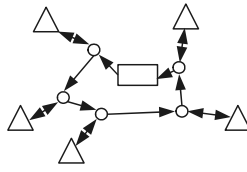
作者简介: 秦芙蓉 (1993—), 女, 安徽人, 硕士, 从事装备采购管理研究。

补给的策略。



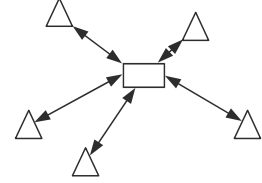
□：综合补给舰
△：作战舰船

(a) 送报男孩策略



□：综合补给舰
△：作战舰船
○：补给会合点

(b) 巡回牧师策略



□：综合补给舰
△：作战舰船

(c) 加油站策略

图 1 3 种补给策略

3 种策略如图 1 所示。

从图中可以看出，巡回牧师策略是上述 2 种策略的折中：当补给会合点位于综合补给舰的部署位置，此策略可等价于 GS 策略；当补给会合点位于各作战舰船的部署位置，此策略便等价于 DB 策略。因此，研究 CR 策略下的海上物资补给规划问题更具代表意义。

2 CR 策略下的补给规划模型

在舰艇编队的常规航行中，外界不确定性较低，对补给作业一般考虑经济性、时效性指标，此处以高效完成补给作业，最小化补给时间为优化目标。

假设如下参数： qq 为约定的补给会合点； $d_{b(i,p)}$ 为综合补给舰从初始位置航行至作战舰船 i 的补给会合点 p 处所需要的航行时间； $d_{i(i,p)}$ 为作战舰船 i 从其战位航行至其补给会合点 p 处所需的航行时间； $d_{(i,p)(j,q)}$ 为综合补给舰从作战舰船 i 的补给会合点 p 航行至作战舰船 j 的补给会合点 q 所需要的航行时间； $d_{(j,q)e}$ 为综合补给舰从作战舰船 j 的补给会合点 q 航行至结束位置所需要的航行时间； $X^1_{b(i,p)}$ 为逻辑参数，表示当综合补给舰首先在 p 处为作战舰船 i 提供补给，则 $X^1_{b(i,p)}=1$ ，否则为 0； $X^k_{(i,p)(j,q)}$ 为逻辑参数，表示当综合补给舰 $k-1$ 阶段在 p 处为作战舰船 i 提供了补给，且 k 阶段在 q 处对作战舰船 j 提供补给，则 $X^k_{ij}=1$ ，否则为 0； $X^{n+1}_{(j,q)e}$ 为逻辑参数，表示当综合补给舰最后在补给会合点 q 处为作战舰船 j 提供补给，完毕后返回结束位置，则 $X^{n+1}_{(j,q)e}=1$ ，否则为 0； $U_{(i,p)}$ 为逻辑参数，表示当作战舰船 i 在补给会合点 p 处进行了补给，则 $U_{(i,p)}=1$ ，否则为 0。根据以上分析，建立平时状态下的最小补给时间模型：

$$\min \sum_{i=1}^n \sum_{p=1}^m (d_{b(i,p)} + r_i) X^1_{b(i,p)} + \sum_{k=2}^n \sum_{i=1}^n \sum_{p=1}^m \sum_{j=1}^n \sum_{q=1}^m (d_{(i,p)(j,q)} + r_j) \cdot$$

$$X^k_{(i,p)(j,q)} + \sum_{j=1}^n \sum_{q=1}^m d_{(j,q)e} X^{n+1}_{(j,q)e} \quad (1)$$

s.t.

$$\sum_{j=1}^n \sum_{q=1}^m X^1_{b(j,q)} = 1; \quad (2)$$

$$X^1_{b(i,p)} = \sum_{j=1}^n \sum_{q=1}^m X^2_{(i,p)(j,q)}, \forall i, p; \quad (3)$$

$$\sum_{j=1}^n \sum_{q=1}^m X^{k-1}_{(j,q)(i,p)} = \sum_{j=1}^n \sum_{q=1}^m X^k_{(i,p)(j,q)}, \forall k \geq 3, i, p; \quad (4)$$

$$\sum_{j=1}^n \sum_{q=1}^m X^n_{(j,q)(i,p)} = X^{n+1}_{(i,p)e}, \forall i, p; \quad (5)$$

$$\sum_{i=1}^n \sum_{p=1}^m X^{n+1}_{(i,p)e} = 1; \quad (6)$$

$$X^1_{b(i,p)} + \sum_{k=2}^n \sum_{j=1}^n \sum_{q=1}^m X^k_{(j,q)(i,p)} = U_{(i,p)}, \forall i, p; \quad (7)$$

$$\sum_{p=1}^m U_{(i,p)} = 1, \forall i. \quad (8)$$

式(1)是目标函数，表示编队总补给时间最小。约束条件(2)—(7)要求综合补给舰每一阶段只能在舰船的其中一个会合点补给一艘舰船；式(8)是保证所有的舰船仅能被补给一次。

3 算法设计

3.1 问题及求解思路阐述

采用 CR 策略时， n 艘作战舰船拥有若干个补给点(设每艘各有 m 个)，补给时需在 m 个不同的会合点中选择，使补给时间最短。运用该策略下的路径规划问题类似于 GTSP 问题：给定 n 个城市子集(每个子集含数个城市节点)以及城市之间的距离，一个旅行商从某一城市出发，每个子集都须被访问但只能访问其中一个城市后回到原城市，求最短的旅行路径。类比可知，每一艘作战舰船的补给会合点的集合对应一个城市集合，每艘作战舰船的补给会合点对应子集中的城市节点，最短旅行路径则对

应最小补给时间。

因此，在决定最小补给时间时，笔者考虑将其类比为 GTSP 问题，由于该问题是一个 NP 完全问题 (non-deterministic poly-nominal complete)，即无法找到一个多项式时间算法求得其最优解。随着问题规模的增大，依靠精确算法的求解时间将呈指数型增长，效率较低，因此考虑采用启发式算法进行问题求解。

3.2 算法设计

对于 CR 策略下的海上补给规划问题，具体求

$$\text{TravelTime} = \frac{F(y_j - y_i) + \left\{ \left[F(y_j - y_i) \right]^2 + (S^2 - F^2) \left[(x_j - x_i)^2 + (y_j - y_i)^2 \right] \right\}^{\frac{1}{2}}}{S^2 - F^2} \quad (9)$$

其中： F (编队航行速度)=12 kn； S (参与补给的舰船速度)=18 kn。

则舰船子集的遍历顺序可通过如下步骤确定：从上述路径补给舰的第一个补给点起，该点所属舰船第一个被补给；判断路径的下一个会合点所属舰船是否已被补给，若未被补给，则作为第二个被补给的舰船，否则考虑下一个补给点，直至所有节点均被判断。该方法在解决普通 GTSP 问题时一般重复数次，以得到不同的次序，但海上补给规划问题由于必须从补给舰初始位置出发并回到原位置，且舰船数量一般不多，所以仅需从补给舰起始点两侧的补给会合点各重复一次，按上述方法得到 2 种舰船补给次序 (2 种次序有可能相同)。

2) 运用动态规划^[11]求解上述各补给次序的最短路径： $S_0, S_1, S_2, \dots, S_n$ 表示按上述方法补给次序实施补给的舰船 (其中 S_0 为综合补给舰， S_n 为最后一艘遍历的舰船子集)； L_0 为从补给舰初始位置出发，遍历所有子集并回到原位置的最短路径长度； L_{oj} 为从 S_0 出发到子集 S_k 的会合点 j 的最短路径的长度，该路径仅访问 S_1, \dots, S_{k-1} 舰船子集中的一个会合点； d_{ij} 则为两会合点之间的最短航行距离。最短路径 L 的算法可表示如下：

$$L = \min L_0; \quad (10)$$

s.t.

$$L_0 = \min_{j \in S_n} [L_{oj} + d_{j0}]; \quad (11)$$

$$L_{oj} = \min_{l \in S_{k-1}} [L_{ol} + d_{lj}], \forall j \in S_k, k > 1; \quad (12)$$

$$L_{oj} = d_{oj}, \forall j \in S_1. \quad (13)$$

式(10)是目标函数，表示所求得的最短路径。约

解算法阐述如下：

1) 应用多阶 (multiple order method, MO) 的方法^[11]决定舰船的补给次序：首先确定遍历所有 $nm + 1$ (包括补给舰原始位置在内) 个点的时间最小的舰船航行路径。

为求得舰艇编队处于航行状态时综合补给舰到各作战舰船的航行时间，假定舰艇编队航行速度为 12 kn，参与补给的舰船速度为 18 kn，坐标 (x_i, y_i) 至坐标 (x_j, y_j) 的航行时间可由下式^[4]求得：

束条件(11)使得从起始点出发的补给舰到最后一个舰船子集 S_n 的补给路径最短；式(12)要求补给舰到舰船子集 S_1, \dots, S_{k-1} 的补给路径最短；式(13)表示补给舰到第一个子集 S_1 的最短补给路径等于补给舰航行至距离该子集最近的会合点 j 的路径。

文献[11]表明采用 MO 法及动态规划对于解决 GTSP 问题在 CPU 时间和优化结果上具有良好表现。

4 案例分析

设某舰艇编队，其舰艇编成、各舰船物资需求及补给会合点相对位置如表 1。

表 1 舰艇编队力量编成及补给点方位

舰艇编号	舰艇类型	物资需求	补给点编号	相对方位 θ	相对距离 L/nm
1	AOE	—	1	180	5
2	CV	(1,1,1,1)	2-1	0	2
			2-2	-135	2
3	CG	(1,1,1,1)	3-1	30	15
			3-2	0	20
4	DDG	(1,1,1,1)	4-1	-30	10
			4-2	-90	8
5	DD(1)	(1,1,1,0)	5-1	30	45
			5-2	0	50
6	DD(2)	(1,1,1,0)	6-1	-30	45
			6-2	-60	50
7	FF	(1,1,0,0)	7-1	150	20
			7-2	180	15

该算例中，假设每艘作战舰船各拥有 2 个补给会合点，共有 4 种物资需要补给。为简化问题，此处不考虑物资需求的数量，而假定每次为舰船补给的量均为一批次。每批次物资的补给时间设为 0.5, 1.5, 2 h。

CR 策略下的补给规划是求解最佳补给路径，使得补给时间最小。根据上述算法，首先根据 MO 法，运用解决 TSP 问题的模拟退火算法^[12]确定案例

中 13 个点(包括补给舰原始位置在内)的遍历顺序。仿真平台为 Matlab 8.3, 初始参数设置为初始温度 $T_0=1000$, 降温速率 $q=0.8$, Metropolis 链长 $B=200$, 终止温度 $T_{\text{end}}=1e-3$ 。运行程序并且计算得: 最短的补给路径为 1-(2-2)-(2-1)-(4-1)-(3-2)-(3-1)-(5-1)-(5-2)-(6-1)-(6-2)-(4-2)-(7-2)-(7-1)-1, 平均求解时间为 3.28 s, 遍历所有会合点的补给路径如图 2。由此得到 2 种舰船补给次序: 1-2-4-6-5-3-7-1; 1-7-2-4-3-5-6-1。

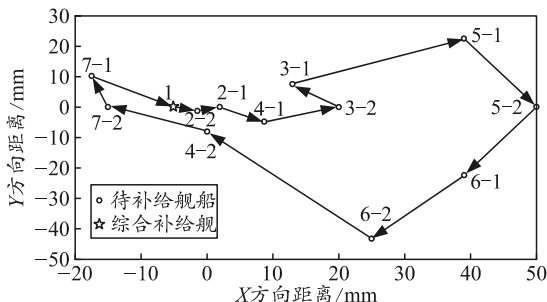


图 2 遍历所有会合点的补给路径

再运用动态规划求解最短补给路径, 结果为: 1-(7-2)-(2-2)-(4-1)-(6-1)-(5-2)-(3-2)-1, 对应的最小航行时间为 12.05 h。总补给时间为最短路径的航行时间与物资补给作业时间之和, 因此最小补给时间为 34.55 h。补给路径如图 3。

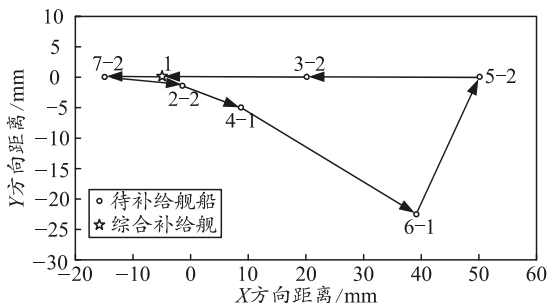


图 3 CR 策略下的最短补给路径

仿真结果表明: 将 CR 策略下的海上补给规划问题类比为 GTSP 问题, 能有效实现该问题的求解, 利用以上启发式算法能够得出满意解, 求解时间在可接受范围内, 符合海上补给的特点。

对于另外 2 种策略, 通过将补给会合点的位置设定在作战舰船位置处, 综合补给舰位置, 即可转换为 DB 策略及 GS 策略, 从而实现这 2 种策略下的方案求解。

5 结束语

笔者分析了海上补给的 3 种常见策略, 并以其

中最具代表性的 CR 策略为例, 以最小补给时间为目标建立了海上补给规划模型。在将其类比为 GTSP 问题的基础上, 运用启发式算法进行模型求解, 得出了合理的规划结果, 验证了模型及算法的合理性和可行性, 其结果可为海上补给规划问题提供一定的决策依据。同时, 也存在着舰艇编队编成简单、补给会合点位置设定不够科学等问题, 需在下一步研究中加以改进。

参考文献:

- [1] HARDGRAVE, STEPHEN W. Determining the Feasibility of Replenishing a Dispersed Carrier Battle Group[D]. California: Naval Postgraduate School, 1989.
- [2] DUNN, JEFFREY S. Scheduling underway replenishment as a generalized orienteering problem[D]. California: Naval Postgraduate School, 1992.
- [3] MORSE T C. Optimization of combat logistics force required to support major combat operations[D]. California: Naval Postgraduate School, 2008.
- [4] WU T L. Optimization models for underway replenishment of a dispersed carrier battle group[D]. California: Naval Postgraduate School, 1992.
- [5] 杨军, 徐岩山, 任爱娣, 等. 海上补给仿真训练系统中高架索形态模型研究[J]. 海军工程大学学报, 2006, 18(4): 90-94.
- [6] 岳奎志, 韩维, 于承军, 等. 舰艇编队物资海上分段补给的系统动力学模型[J]. 系统仿真学报, 2013, 25(3): 154-157.
- [7] 余鹏, 何学军. 基于蚁群算法的舰艇编队海上补给路径规划方法[J]. 海军工程大学学报, 2014, 26(2): 108-112.
- [8] 黄必佳, 王公宝. 航母编队油料伴随补给规划模型及算法研究[J]. 兵工自动化, 2015, 34(9): 78-82.
- [9] 张堃, 曹迎槐. 基于鱼群算法的舰队补给最短路径即仿真[J]. 电子制作, 2015(8Z): 40.
- [10] DONG P, YU P, Qin F. Study on Optimization Algorithm of Underway Replenishment Routine Project for Naval Battle Group[Z]. International Journal of Simulation-Systems, Science & Technology, 2016.
- [11] HU B. Effective Neighborhood Structures for the Generalized Traveling Salesman Problem[J]. European Conference on Evolutionary Computation in Combinatorial Optimization, 2008, 4972: 36-47.
- [12] 史峰. MATLAB 智能算法 30 个案例分析[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2011: 58-66.