

doi: 10.7690/bgzd.2015.09.020

航母编队油料伴随补给规划模型及算法研究

黄必佳, 王公宝

(海军工程大学理学院, 武汉 430033)

摘要: 基于航母编队油料伴随补给规划问题, 提出作战背景下补给舰船的 3 种补给策略。根据合理假设, 将解决 TSP 问题的指导思想加以改进并应用于补给规划问题中。以最小化补给时间和最大化作战效能为目标函数, 分别构建补给规划模型, 通过 Matlab 软件, 利用改进的多目标离散粒子群算法对问题进行求解, 并进行仿真实验验证。仿真结果表明: 该方法是合理、有效的, 能获得更小的补给时间和更大的编队作战效能, 较好地实现航母编队油料伴随补给规划问题的优化。

关键词: 油料伴随补给规划; 补给策略; 离散粒子群算法

中图分类号: TJ02 **文献标志码:** A

Study on the Planning Model and Algorithm of Aircraft Carrier Formation Oil with Supplies

Huang Bijia, Wang Gongbao

(College of Science, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract: Based on the planning problem of accompanied oil supply in the formation of aircraft carrier, put forwards three kinds of replenishment strategy under the background of ship combat supplies. According to reasonable assumptions, the guiding ideology to solve the TSP problem is improved and applied to the supply planning problem. Taking minimize supply time and maximum effectiveness as the objective function, supply planning model were constructed by Matlab software, to solve the problem by using the multi-objective improved discrete particle swarm algorithm, and the simulation experiment. Results show that the method is reasonable and effective which can get a smaller supply time and greater formation combat effectiveness, optimization of aircraft carrier formation with better fuel supply planning problem.

Keywords: oil with replenishment planning; supply strategy; discrete particle swarm optimization algorithm

0 引言

油料是航母编队需求量最大的后勤保障资源, 且装载多, 品种多, 补给时间长, 设施设备复杂。在作战环境下, 油料补给时间过长, 易遭受敌方空中火力和反舰导弹的打击。现代的航母编队通常分散在比较大的地理区域内, 以航空母舰(CV)为编队核心, 根据作战任务和作战样式的不同, 防御纵深可达 50~200 n mile, 这些情况极大地增加了补给舰船在执行补给任务时的难度。在补给舰船实施油料伴随补给的过程中, 编队内部的油料补给规划问题主要是研究如何确定编队内各部署位置舰艇的补给次序以及补给位置, 用以实现优化补给时间或者补给能力的目的。海上油料补给的基本方式^[1]可分为锚泊补给、航行纵向补给、航行横向补给和航向垂直补给 4 种。考虑到作战背景以及应用的广泛性, 笔者主要研究航行横向补给方式。

1 油料补给策略分析

根据合理的假设, 结合海上补给的特点, 将求解旅行商问题(traveling salesman problem, TSP)的图论方法^[2]应用于油料伴随补给规划, 补给策略^[3-4]可分为 3 类: 循环取货(milkrun, MR)策略、提款机(withdraws, WD)策略和交汇集合(rendezvous, RZ)策略。

MR 策略: 作战舰艇保持编队内部署位置不变, 补给舰船根据下达的补给需求离开起始位置, 依次行至作战舰艇位置, 实施油料补给作业, 采用此策略补给时只能对一艘作战舰艇进行补给。

WD 策略: 补给舰船保持编队内相对位置不变, 作战舰艇离开其部署位置, 行至补给舰所处位置并接受补给。采用此种策略, 理论上最多允许所有作战舰艇离开其部署位置, 然而在作战状态下, 部署位置的空缺会在一定程度上削弱整个编队的防御能力; 因此, 实际情况下最多只允许有限艘作战舰艇

收稿日期: 2015-04-19; 修回日期: 2015-05-28

作者简介: 黄必佳(1991—), 男, 湖北人, 在读硕士, 从事军事系统建模与运筹决策研究。

离开其部署位置。

RZ 策略: 补给舰船和作战舰艇同时离开其部署位置并行至约定的补给点实施补给作业。每艘补给舰船的补给点通常有若干个, 补给舰船同时只能对一艘舰船进行补给, 若 2 个补给点重叠, 则可同时进行两艘作战舰艇的补给作业。

实际上, 这 3 种决策可以定义为一种类似于光谱的复合式策略^[5], 若定义 $W=0$ 表示 WD 策略, $W=1$ 表示 MR 策略, 则 RZ 策略则可以表示为 $0 < W < 1$, W 的取值可由补给规定的总时间, 待补给作战舰艇的剩余数量, 作战区域的战斗等级及海况等决定。可以看出: RZ 是 WD 和 MR 的策略下的一种混合策略, 该策略能够在发挥补给舰船最大补给能力的情况下, 尽可能地保持编队的完整性。3 种补给策略的关系和简明示意如图 1 所示。

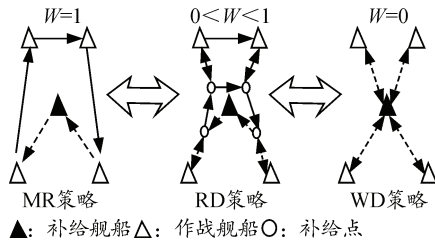


图 1 3 种补给策略的示意图

基于上述 3 种补给策略, 针对不同作战环境实施油料补给, 目标函数也要根据实际情况进行选择, 通常情况下将最小化补给时间作为优化的目标函数, 而考虑到战场环境下, 还要在最小化补给时间的基础上, 将编队整体所能达到的作战效能作为次级目标函数。同时, 在补给规定的时间受限以及在补给过程中遭到敌方攻击而迫使补给中断的情况下, 为保障编队整体的作战效能, 某些作战舰艇的油料将无法得到补给。

2 油料伴随补给规划模型

2.1 模型假设

为了能够把握模型基本结构和准确地描述油料伴随补给规划问题, 笔者对模型作出如下假设。

- 1) 补给舰船所装载的油料足够多, 可以满足所有作战舰艇的补给需求;
- 2) 每艘作战舰艇有其固定的补给时间, 不受补给顺序的影响;
- 3) 编队内的舰船都是直接行至补给点(忽略行驶途中与编队内其他舰船相遇的可能性);
- 4) 在实施补给的整个作业过程中, 参与补给的

舰船始终保持与编队的相对位置;

5) 补给过程起始于第 1 艘作战舰艇被补给, 或者补给舰船按照补给规划的方案驶离部署位置, 结束于所有船返回各自在航母编队内的部署位置;

6) 不考虑海况, 自然环境对补给过程的影响, 且不考虑补给过程中作战舰艇的控制问题。

2.2 MR 策略下的模型建立

MR 策略下, 每艘补给舰船的位置是相对固定的, 补给舰船驶离编队的中心位置依次遍历作战舰艇并提供补给, 为方便问题的表述, 笔者对模型进行如下规定: 假设航母编队内由 n 艘作战舰艇和 1 艘补给舰船构成; b 和 e 分别代表补给舰船的初始位置和完成补给过程的结束位置; i, j 表示编队内各作战舰艇的部署位置, $i, j=1, 2, \dots, n, n \geq 2$; T 表示对编队进行补给规定的总时间; k 表示实施补给作业的阶段 $k=1, 2, 3, \dots, n+1$ 。 t_i 表示作战舰艇 i 进行补给的时间; ε_i 表示作战舰艇 i 的作战效能; V_i , 若作战舰艇 i 可以被安排补给, 则 $V_i=1$, 否则 $V_i=0$; T_{bi} 表示补给舰船从初始位置 b 行至作战舰艇 i 的时间; T_{ij} 表示补给舰船从位置 i 行至作战舰艇 j 的时间; T_{je} 表示补给舰船从位置 j 行至补给结束位置 e 的时间; U_{bi}^1 , 若补给舰船从初始位置出发并首先为作战舰艇 i 提供补给, 则 $U_{bi}^1=1$, 否则为 $U_{bi}^1=0$; U_{ij}^k , 如果在补给阶段 $k-1$ 补给舰船为作战舰艇 i 提供了补给, 若 k 阶段补给舰船为作战舰艇 j 提供了补给, 则 $U_{ij}^k=1$, 否则, $U_{ij}^k=0$; U_{ie}^k 表示若作战舰艇 i 被安排最后补给, 则 $U_{ie}^k=1$, 否则 $U_{ie}^k=0$; 若补给舰船最后为作战舰艇 j 进行补给, 则 $U_{je}^{n+1}=1$, 否则 $U_{je}^{n+1}=0$ 。图 2 模拟了一个具有 3 艘作战舰艇的补给规划网络结构图。

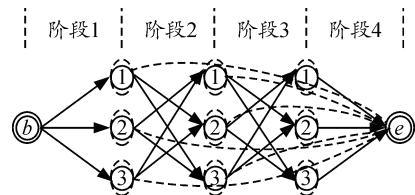


图 2 补给网络结构

根据上述分析, 构建 MR 策略下的补给规划模型如下:

$$\left. \begin{aligned} & \min \sum_{i=1}^n (T_{bi} + t_i) U_{bi}^1 + \sum_{k=2}^n \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (T_{ij} + t_j) U_{ij}^k + \\ & \sum_{j=1}^n T_{je} U_{je}^{(n+1)} \\ & \max \sum_{i=1}^n \varepsilon_i V_i \end{aligned} \right\}, \quad (1)$$

s.t.

$$\sum_{i=1}^n U_{bi}^1 = 1, \quad (2)$$

$$U_{bi}^1 = \sum_{j=1}^n U_{ij}^2 + U_{ie}^2, \forall i, \quad (3)$$

$$\sum_{j=1}^n U_{ji}^{(k-1)} = \sum_{j=1}^n U_{ij}^k + U_{ie}^k, \forall k \geq 3, i, \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^n U_{ji}^n = U_{ie}^{(n+1)}, \forall i, \quad (5)$$

$$\sum_{k=2}^{(n+1)} \sum_{j=1}^n U_{ie}^k = 1, \quad (6)$$

$$U_{bi}^1 + \sum_{k=2}^n \sum_{j=1}^n U_{ji}^k = V_i, \forall i, \quad (7)$$

$$\sum_{i=1}^n t_i V_i + \sum_{i=1}^n T_{bi} U_{bi}^1 + \sum_{k=2}^n \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n T_{ij} U_{ij}^k + \sum_{k=2}^{n+1} \sum_{i=1}^n T_{ie} U_{ie}^k \leq T. \quad (8)$$

上述约束条件保证了在各阶段的规划补给中仅可以对一艘作战舰艇提供补给，且在 $k-1$ 阶段对一艘作战舰艇进行补给之后，须在 k 阶段才能对另一艘提供补给，同时还保证了因战场环境下随时会在任一阶段结束补给的情况，以及对时间的限制进行描述。

2.3 RZ 策略下的模型建立

利用 RZ 策略进行补给时，作战舰艇可以在多个约定的位置进行补给，且相对能够保持编队队形的整体性，假设航母编队由 n 艘作战舰艇和 1 艘补给舰船构成，且编队内每艘作战舰艇都有 m 个补给位置。结合 RZ 策略，对模型进行如下规定： p, q 表示会合补给点， $p, q = 1, 2, \dots, m$ 。 $T_{b(i,p)}$ 表示补给舰船从初始位置 b 行至与作战舰艇 i 的会合补给点 p 的时间； $T_{(i,p)(j,q)}$ 表示补给舰船从与作战舰艇 i 的会合补给点 p 行至与作战舰艇 j 的会合补给点 q 的时间； $T_{(i,p)e}$ 表示补给舰艇从与作战舰艇 i 的会合补给

点 p 行至补给结束位置 e 的时间。 $U_{b(i,p)}^1$ ，若补给舰船从初始位置 b 出发并首先为与作战舰艇 i 的会合补给点 p 提供补给，则 $U_{b(i,p)}^1 = 1$ ，否则 $U_{b(i,p)}^1 = 0$ ； $U_{(i,p)(j,q)}^k$ ，如果在补给阶段 $k-1$ 补给舰船为与作战舰艇 i 的会合补给点 p 提供了补给，若 k 阶段补给舰船为与作战舰艇 j 的会合补给点 q 提供了补给，则 $U_{(i,p)(j,q)}^k = 1$ ，否则 $U_{(i,p)(j,q)}^k = 0$ ； $U_{(i,p)e}^k$ ，若补给舰船为与作战舰艇 i 的会合补给点 p 被安排最后补给，则 $U_{(i,p)e}^k = 1$ ，否则 $U_{(i,p)e}^k = 0$ ； $U_{(i,p)e}^{(n+1)}$ ，若补给舰船最后为与作战舰艇 i 的会合补给点 p 进行补给，则 $U_{(i,p)e}^{(n+1)} = 1$ ，否则 $U_{(i,p)e}^{(n+1)} = 0$ ； $V_{(i,p)}$ ，若与作战舰艇 i 的会合补给点 p 可以被安排补给，则 $V_{(i,p)} = 1$ ，否则 $V_{(i,p)} = 0$ 。图 3 描述了一个具有 3 艘作战舰艇，且每艘作战舰艇有 2 个补给位置的补给规划网络结构图。

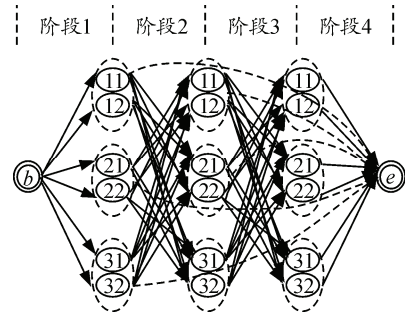


图 3 补给网络结构

根据上述分析，构建 RZ 策略下的补给规划模型：

$$\left. \begin{aligned} & \min \sum_{i=1}^n \sum_{p=1}^m (T_{b(i,p)} + t_i) U_{b(i,p)}^1 + \\ & \sum_{k=2}^n \sum_{i=1}^n \sum_{p=1}^m \sum_{j=1}^n \sum_{q=1}^m (T_{(i,p)(j,q)} + t_j) \times \\ & U_{(i,p)(j,q)}^k + \sum_{j=1}^n \sum_{q=1}^m T_{(j,q)e} U_{(j,q)e}^{(n+1)} \\ & \max \sum_{i=1}^n \sum_{p=1}^m \varepsilon_i V_{(i,p)} \end{aligned} \right\}, \quad (9)$$

s.t.

$$\sum_{j=1}^n \sum_{q=1}^m U_{b(j,q)}^1 = 1, \quad (10)$$

$$U_{b(j,q)}^1 = \sum_{j=1}^n \sum_{q=1}^m U_{(i,p)(j,q)}^2 + U_{(i,p)e}^2, \forall i, p, \quad (11)$$

$$\sum_{j=1}^n \sum_{q=1}^m U_{(j,q)(i,p)}^{(k-1)} = \sum_{j=1}^n \sum_{q=1}^m U_{(i,p)(j,q)}^k + U_{(i,p)e}^k, \forall k \geq 3, i, p, \quad (12)$$

$$\sum_{j=1}^n \sum_{q=1}^m U_{(j,q)(i,p)}^n = U_{(i,p)e}^{(n+1)}, \forall k \geq i, p, \quad (13)$$

$$\sum_{k=2}^{(n+1)} \sum_{i=1}^n \sum_{p=1}^m U_{(i,p)e}^k = 1, \quad (14)$$

$$U_{b(i,p)}^1 + \sum_{k=2}^n \sum_{j=1}^n \sum_{q=1}^m U_{(j,q)(i,p)}^k = V_{(i,p)}, \forall i, p, \quad (15)$$

$$\sum_{p=1}^m V_{(i,p)} = 1, \forall i, \quad (16)$$

$$\begin{aligned} & \sum_{i=1}^n \sum_{p=1}^m t_i V_{(i,p)} + \sum_{i=1}^n \sum_{p=1}^m T_{b(i,p)} U_{b(i,p)}^1 + \\ & \sum_{k=2}^n \sum_{i=1}^n \sum_{p=1}^m \sum_{j=1}^n \sum_{q=1}^m T_{(i,p)(j,q)} U_{(i,p)(j,q)}^k + \\ & \sum_{k=2}^{n+1} \sum_{i=1}^n \sum_{p=1}^m T_{(i,p)e} U_{(i,p)e}^k \leq T. \end{aligned} \quad (17)$$

RZ 策略和 MR 策略的模型具有相似之处，且上述约束条件还确保了每艘作战舰艇仅在一个会合补给点接受补给。

2.4 WD 策略下的模型建立

采用 WD 策略时，补给舰船可以经由左舷和右舷同时对两艘作战舰艇进行补给，则任何时候作战舰艇只能允许最多有 2 艘作战舰艇离开部署位置并行至补给舰船接受补给。考虑实际情况，假设补给舰船在执行补给任务时，在编队内的相对位置不变，补给舰船可同时对 m 艘作战舰艇进行补给，则可看作有 m 个中转站。结合 WD 策略，对模型进行如下规定： s 表示中转站， $s=1,2,\dots,m$ ， m 表示中转站的数量； k 表示补给阶段， $k=1,2,\dots,K$ ；RT 表示所有作战舰艇返回编队部署位置的总时间。

$U_{ij}^{(s,k)}$ ，如果在补给阶段 $k-1$ 作战舰艇 i 在中转站 s 接受了补给，若 k 阶段作战舰艇 j 在中转站 s 接受补给，则 $U_{ij}^{(s,k)}=1$ ，否则 $U_{ij}^{(s,k)}=0$ ； $U_{bj}^{(s,1)}$ ，若作战舰艇 j 首先行至补给舰船 b 并在中转站 s 接受补给，则 $U_{bj}^{(s,1)}=1$ ，否则 $U_{bj}^{(s,1)}=0$ ； $U_{je}^{(s,k)}$ ，若作战舰艇 j 最后在中转站 s 接受补给，则 $U_{je}^{(s,k)}=1$ ，否则 $U_{je}^{(s,k)}=0$ ；

V_i^s ，若作战舰艇 i 在中转站 s 可以被安排补给，则 $V_i^s=1$ ，否则， $V_i^s=0$ 。

根据上述分析，构建 WD 策略下的补给规划模型如下：

$$\left. \begin{aligned} & \min RT \\ & \max \sum_{s=1}^m \sum_{i=1}^n \varepsilon_i V_i^s \end{aligned} \right\}, \quad (18)$$

s.t.

$$\sum_{j=1}^n U_{bj}^{(s,1)} = 1, \forall s, \quad (19)$$

$$U_{bi}^{(s,1)} = \sum_{j=1}^n U_{ij}^{(s,2)} + U_{ie}^{(s,2)}, \forall s, i, \quad (20)$$

$$\sum_{j=1}^n U_{ji}^{(s,k-1)} = \sum_{j=1}^n U_{ij}^{(s,k)} + U_{ie}^{(s,k)}, \forall k \geq 3, i, \quad (21)$$

$$\sum_{k=2}^K \sum_{i=1}^n U_{ie}^{(s,k)} = 1, \forall s \quad (22)$$

$$U_{bi}^{(s,1)} + \sum_{k=2}^K \sum_{j=1}^n U_{ji}^{(s,k)} = V_i^s, \forall s, i, \quad (23)$$

$$\sum_{s=1}^m V_i^s \leq 1, \forall i, \quad (24)$$

$$\begin{aligned} & \sum_{i=1}^n (T_{ib} + t_i) U_{bi}^{(s,1)} + \sum_{k=2}^K \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (T_{bi} + T_{jb} + t_j) U_{ij}^{(s,k)} + \\ & \sum_{k=2}^K \sum_{j=1}^n T_{bj} U_{je}^{(s,k)} \leq RT. \end{aligned} \quad (25)$$

上述模型，当 $m=1$ 时， K 的值为 $n+1$ ，即只有一艘舰船被允许离开部署位置，不管补给次序如何，总的补给时间不会改变，该问题没有研究的实际意义。当 $m \geq 2$ 补给舰船可以同时两艘以上作战舰艇进行补给，最多为 $(n-m+1)$ 艘，因此，为求得最优方案， K 赋值 $(n-m+1)$ 。若作战舰艇行至补给舰船的时间相近，则 K 赋值 (n/m) 。

3 模型的算法设计

3.1 标准粒子群算法

粒子群算法^[6](particle swarm optimization, PSO)最早是在 1995 年由 Eberhart 和 Kennedy 共同提出，通过观察鸟类的群体性活动来进行搜索。在 PSO 算法中，种群中的每个成员代表一个粒子，每个粒子根据其飞行记忆，不断向最佳位置进行调整。粒子

在调整过程中自身飞行过的最佳位置称为个体最优值(p_{id}), 整个群体飞行过的最佳位置称为全局最优值(p_{gd})。(p_{id})和(p_{gd})位置的优劣由粒子参数带入适应度函数来判断, 粒子的飞行状态用 d 维速度 $V_i=(v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{id})$ 和位置 $Z_{id}=(z_{i1}, z_{i2}, \dots, z_{id})$ 表示, 则每个粒子通过下面的公式对目前的状态进行更新, 并诞生全新的种群。

$$v_{id}^{k+1} = \omega v_{id}^k + c_1 r_{1d} (p_{id}^k - z_{id}^k) + c_2 r_{2d} (p_{gd}^k - z_{id}^k) \quad (26)$$

$$z_{id}^{k+1} = z_{id}^k + v_{id}^{k+1} \quad (27)$$

其中: ω 为惯性权值, 起着权衡个体最优能力和全局最优能力的作用; c_1, c_2 为常数, 称为学习因子; r_{1d}, r_{2d} 是 $[0, 1]$ 内的随机数; k 为迭代次数。为了防止粒子远离搜索空间, 粒子的每一维速度 v_d 都被限制在 $[-v_{dmax}, v_{dmax}]$ 之间。

3.2 多目标离散粒子群算法

在解决诸如 TSP、VRP、JOB-SHOP 等实际问题时, 构建不同的粒子表达方式和更新公式规则, 针对文中补给问题中的多目标函数求解, 笔者采用了一种 IMDPSO 算法, 其原理是将粒子带入设定的最大最小适应度函数, 从而实现优化搜索结果。Maximin(最大最小)方法起源于游戏理论。相关文献提出可以将 Maximin 适应值函数^[7-8]运用到多目标优化的问题中。

$$f_{\maximin} = \max_{j=1, \dots, N; u \neq v} \{ \min_{i=1, \dots, m} |f_i(u) - f_i(v) + \varepsilon| \} \quad (28)$$

在上式中, 所有适应度函数值 f_{\maximin} 小于零的决定向量都可以形成非劣解空间; 因此, 在求解多目标优化问题中能够有效地利用该性质。在函数中引入偏差量 ε , 提高了种群向非劣解集前沿收敛的速度以及搜索的均匀程度。因为由式 (28) 可以看

出: 当 2 个非劣解之间的距离非常近时, f_{\maximin} 就容易得到接近零的负数。具体算法如下:

1) 初始化粒子群: 随机产生种群 N , 赋予每一个粒子以初始速度和位置。代入 maximin 适应度函数计算每个粒子的函数值, 将该函数值作为对应粒子的最优个体值, 并将 f_{\maximin} 小于 0 的个体存储于非劣解集。在非劣解集中轮续选取全局最优值。

2) 非劣解集优化: 根据适应度规则对非劣解集空间进行搜索, 排除产生非支配解的可能性。对非劣解集归类划分为 m 份并给定密度最大值。随机保留一部分密度值大于设定值的粒子。

3) 粒子的更新: 按照粒子更新公式 (26)、(27) 对粒子进行更新。

4) 适应值计算: 利用 Maximin 方法计算每个粒子的适应值。

5) 个体最优值与全局最优值更新: 将每个粒子的适应值与对应的个体最优值进行比较, 将更小的适应值作为更新后的个体最优值; 将更新后的个体存储于非劣解集, 并重新在非劣解集中轮续选取全局最优解。

6) 判断是否结束要求: 是, 则结束; 否则返回到步骤 2) 进行循环迭代。

4 仿真实验和分析

4.1 战场假定

假定航母编队由 1 艘航空母舰 (CV)、1 艘导弹巡洋舰 (CG)、1 艘导弹驱逐舰 (DDG)、2 艘驱逐舰 (DD)、1 艘导弹护卫舰 (FFG)、1 艘护卫舰 (FF) 和 1 艘补给舰船 (AOE) 组成, AOE 在编队内实施补给过程中的相对速度为 20 nm/h。表 1 给出了航母编队各舰艇的类型、作战效能、补给时间、相对方位和距离。本节主要研究 MR 策略下的模型求解问题。

表 1 航母编队作战分布

舰艇编号	舰艇类型	相对方位/ θ (以 SS 为中心)	相对距离/nm(以 SS 为中心)	作战效能	补给时间/h
1	CV	0	80	10.0	4.7
2	CG	30	100	8.0	2.6
3	DDG	-30	100	6.0	2.2
4	DD(a)	30	200	5.0	2.1
5	DD(b)	-30	200	5.0	2.1
6	FFG	180	150	4.8	2.0
7	FF	150	180	4.3	1.6

4.2 仿真计算及结果分析

根据表 1 的相关想定参数可知, 仿真平台为 Matlab7.0, 设置初始参数: 粒子群的规模为 50, 迭代次数 100, $c_1=c_2=1.2$, ω 由 1.0 线性递减至 2.0,

假设规定的补给时间为 150 h(补给时间足够大), 经仿真计算得所有作战舰艇均被补给的最小补给时间为 69.422 7 h, 补给次序为 7-6-3-5-4-2-1, 补给路径规划如图 4 所示。