

# 基于混合遗传算法的岛礁物资补给任务规划模型

刘晨生<sup>1</sup> 宋士兵<sup>2</sup>

(1.国防大学 研究生院,北京 100091;2.国防大学 联合作战学院,北京 100091)

**摘 要:**当前,我国海洋岛礁权益的维护很大程度上依赖岛礁驻守官兵,岛礁物资补给对维护海洋权益至关重要。本文综合考虑地理因素、经济成本、保障能力和不确定天气等因素,建立多目标任务规划模型,运用基于模拟退火操作的遗传算法求解模型,对岛礁物资补给任务进行了优化。

**关键词:**混合遗传算法;多岛礁;物资补给;任务规划

**中图分类号:**E911 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-8211(2019)04-0027-06

## 1 引言

岛礁作为维护我国海洋权益的前哨,派遣人员驻扎岛礁对维护我国海洋主权具有十分重要的意义。岛礁通常远离大陆、位置分散、物资匮乏、条件恶劣,为维持岛上人员正常生存,需定期由陆上补给中心派遣补给舰船对其进行物资补给。制定物资补给方案时,要综合考虑岛屿地理位置、靠泊条件、物资需求量和存储量、存储成本、补给舰船类型、燃油经济性等复杂因素的影响。为此,需建立物资补给任务规划模型,以增强岛礁物资补给的科学性和可行性,提高岛礁物资补给的保障效益。

根据不同的保障目标和影响因素,物资补给任务规划模型可分为多种类型,本文要解决的物资补给任务规划问题,属于车辆路径问题(Vehicle Routing Problem,VRP),也称为车辆调度问题。按照影响因素及其组合形式,主要分为:运输起止点是否相同、有无车辆容量限制、有无时间窗限制、是否满载、单车场或多车场、需求是否确定等类型的车辆调度问题<sup>[1]</sup>。文献[2]针对汽车配件运输问题,以利润最大为目标,建立多目标规划模型,并采取基于聚类的遗传算法求解。文献[3]针对油料调拨问题,以保障时间和保障能力为约束,引入保障

时间窗,运用粒子群算法求解多目标油料调拨运输模型。本文根据岛礁海洋环境和守礁官兵物资补给的现实需求,建立多岛礁多种补给舰船的物资补给模型,解决岛礁物资任务规划问题。

## 2 岛礁物资补给的影响因素

岛礁物资补给由海军后勤补给部队依托岸基保障部队,运用各型补给舰船或运输机对海洋岛礁部队实施运输投送。根据补给时间、补给需求和补给效益,运输投送方案最优化受自然条件、经济成本和运输工具等多种因素影响。

(1) 地理因素。岛礁附近海底地貌、岸滩底质各不相同,且障碍物众多,靠泊条件恶劣,对运输补给载具的靠泊起降能力有较大要求,对于靠泊港口大的岛礁,补给舰可直接补给,对于靠泊港口小的岛礁,补给舰须在距岛礁 1 海里以外锚泊,通过小型补给艇进行转运实现间接补给,或采用拖船完成物资倒运。

(2) 天气因素。海洋气候天气复杂多变,是台风、暴雨、强对流等灾害天气多发区,对物资补给任务影响巨大,因天气原因不能泊靠或离港执行后续任务,是造成岛礁补给任务不能按时完成的主要原因。

收稿日期:2019-10-11;修回日期:2019-11-28

作者简介:刘晨生(1984—),男,助理工程师,硕士研究生,主要研究方向为计算机战争模拟;宋士兵(1968—),男,高级工程师,硕士,硕士生导师,主要研究方向为计算机战争模拟、军事后勤。

注:本文获得全军第二届军事建模竞赛(2018)二等奖

素,规避自然灾害天气实施快速高效补给始终是物资保障的难题。

(3) 运输成本。我国领海范围大,岛礁位置相对分散,岛礁间距离较远,距离始终是影响保障成本的主要因素。根据燃油经济性,运用不同的运输载具,规划不同的保障路径,将产生不同的运输成本。

(4) 储存成本。我国实际控制岛礁大多属于热带、亚热带海洋性气候,具有高温、高湿、高盐的突出特点,其气候炎热、多雨雾、湿度大,各类物资易腐烂、变质,长期存储需采取低温冷藏设备保鲜。大型岛礁可采取风力或太阳能发电,而小型岛礁需依靠燃料进行发电确保冷藏设备运行,物资储存成本也是物资补给应考虑的因素之一。

(5) 运输泊靠能力。近年来,我军发展了大中型补给舰船,可根据物资补给保障需求,组织海上投送力量运用相应保障能力的补给舰船对岛礁物资进行补给,并根据港口靠泊条件,组合运用综合补给舰、拖船、小艇等载具,最大发挥物资保障效益。

### 3 岛礁物资补给任务规划模型构建

#### 3.1 模型假设

根据岛礁补给保障装备种类、保障环境和保障能力等因素,模型建立的假设条件如下:

(1) 各种补给工具可以同时液体和固体物资进行装卸,两者之间互不影响。

(2) 多艘小型补给艇和拖船可以并行工作,互不影响。

(3) 补给舰必须到达各个可停靠岛礁进行物资补给。

(4) 一条运输路线上仅有一艘大型补给舰。

(5) 可运用 A、B 两种型号的补给舰、小艇和拖船进行运输补给,拖船不产生运输费用。

#### 3.2 目标函数

目标函数与补给路径、补给周期和保障成本相关,多目标取优,即在满足岛礁物资正常保障的前提下延长补给周期,以减少舰船在海上的时间,降低补给频率,达到保障成本最低。

目标函数为:

$$F(X) = \text{opt}\{f_s, f_T, f_{\text{cost}}\} \quad (1)$$

式(1)中  $f_s$  为运输路径长度,  $f_T$  为运输补给周期,  $f_{\text{cost}}$  为保障成本。

#### 3.3 模型建立

(1) 运输路径:

$$f_s = \sum_{i=1}^n S_{i-1,j}^A + \sum_{i=1}^n S_{i-1,j}^B \quad (2)$$

式(2)中,  $\sum_{i=1}^n S_{i-1,j}^A$  为 A 补给舰运输路径长度,  $\sum_{i=1}^n S_{i-1,j}^B$  为 B 补给舰运输路径长度,  $n$  为需要补给的岛礁个数,运输距离  $s_{i-1,j}$  为  $i$  岛礁与其前一个岛礁间距离,即:

$$s_{i-1,j} = \sqrt{(x_i - x_{i-1})^2 + (y_i - y_{i-1})^2}$$

(2) 装卸载时间  $T_{\text{load}}$ : 包括补给的液体和固体装卸载的时间,根据工作实际,液体和固体装卸互不干扰,可同时进行。本文中装卸载时间为液体装卸载时间和固体装卸载时间之和的最大值。即:

$$T_{\text{load}} = \max\left\{\frac{A_{i\text{液}} - (B_{i\text{液}} - C_{i\text{液}})}{d_{j\text{液}}}, \frac{A_{i\text{固}} - (B_{i\text{固}} - C_{i\text{固}})}{d_{j\text{固}}} + \frac{D_{i\text{固}}}{d_{j\text{固}}}\right\} \quad (3)$$

式(3)中  $C_{i\text{液}} = \left(\sum_0^{i-1} T_{i-1} + \frac{S_{i-1,j}}{v_j}\right) \times Csm_{i\text{液}}$ ,

$C_{i\text{固}} = \left(\sum_0^{i-1} T_{i-1} + \frac{S_{i-1,j}}{v_j}\right) \times Csm_{i\text{固}}$ ,  $\sum_0^{i-1} T_{i-1}$  为从

后勤保障中心经该路线各岛礁抵达  $i$  岛礁的时间总和;  $A_{i\text{液}}$ 、 $A_{i\text{固}}$  分别为  $i$  岛礁液、固体最大存储量;  $Csm_{i\text{液}}$ 、 $Csm_{i\text{固}}$  分别表示  $i$  岛礁液体和固体的日消耗量;  $B_{i\text{液}}$ 、 $B_{i\text{固}}$  分别为  $i$  岛礁仓储剩余液、固体量;  $C_{i\text{液}}$ 、 $C_{i\text{固}}$  分别为补给舰船抵达  $i$  岛礁时液、固体消耗量;  $d_{j\text{液}}$ 、 $d_{j\text{固}}$  分别为  $j$  运输工具液、固体装卸速度;  $D_{i\text{固}}$  为  $i$  岛礁固体回收需求;  $v_j$  为  $j$  类运输工具航速。

(3) 行驶时间  $T_i$ :  $j$  类运输舰行进抵达  $i$  岛礁并在该岛装卸载完毕的时间。

$$T_i = \frac{S_{i-1,j}}{v_j} + T_{\text{load}} \quad (4)$$

(4) 补给周期  $T_i$ : 表示补给工具给  $i$  岛礁补给完成后,到下一次前来补给时的最大自然合理时间跨度。这个时间跨度的取值取决于各岛礁中液体消耗和固体消耗的最小周期,即:

$$T_i = \min\left\{\frac{A_{i\text{液}}}{Csm_{i\text{液}}}, \frac{A_{i\text{固}}}{Csm_{i\text{固}}}\right\} \quad (5)$$

(5) 运输补给周期  $f_T$ : 指补给舰 A、B 从保障补

给中心出发,到下一次出发补给时间跨度。该周期为  $n$  个岛礁中岛礁补给周期  $T_i$  的最大最小值,即:

$$f_T = \max \min\{T_1, T_2, T_3, \dots, T_n\} \quad (6)$$

(6) 经济成本  $f_{cost}$ : 运输成本和存储成本之和,

即:

$$f_{cost} = f_{costY} + f_{costS} \quad (7)$$

各运输工具在保障过程中产生的运输成本

$f_{costY}$ :

$$f_{costY} = f_{costYA} + f_{costYB} + f_{costYT} \quad (8)$$

式(8)中  $f_{costYA} = d_A \times \sum S_{i-1,j}^A$  为 A 补给舰运输

成本,  $f_{costYB} = d_B \times \sum S_{i-1,j}^B$  为 B 补给舰运输成本,

$f_{costYT} = d_T \times \sum S_{i-1,j}^T$  为小艇运输成本。

仓储存储成本  $f_{costS}$  即各岛礁上一个补给周期内液体存储和固体存储成本之和:

$$f_{costS} = \sum_{i=1}^n (f_{costSi液} + f_{costSi固}) \quad (9)$$

式(9)中  $f_{costSi液} = T_e \times d_{si液} (A_{i液} + (A_{i液} - C_{i液}))$ , 即  $f_{costSi液} = T_e \times d_{si液} (2A_{i液} - C_{i液})$ 。

同理  $f_{costSi固} = T_e \times d_{si固} (2A_{i固} - C_{i固})$ 。

(7) 构建运输路径邻接矩阵  $A$ : 遍历以保障中心  $O$  为起点的所有各点间的距离  $S$ :

$$A = \begin{bmatrix} S_{00} & S_{01} & S_{02} & \dots & S_{0n} \\ S_{10} & S_{11} & S_{12} & \dots & S_{1n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ S_{n0} & S_{n1} & S_{n2} & \dots & S_{nn} \end{bmatrix} \quad (10)$$

(8) 给每个岛增加一个布尔型天气影响因子

$d_w$ :

$$d_w = \begin{cases} 1 & \text{可以补给} \\ 0 & \text{不可补给} \end{cases} \quad (11)$$

### 3.4 优化策略

(1) 消耗弹性策略:  $Csm_{i液}$ 、 $Csm_{i固}$  分别表示  $i$  岛礁液体和固体的日消耗量,均为弹性常数,其取值为区间范围。为确保增大补给周期,  $i$  岛礁日消耗量  $Csm_{i液}$ 、 $Csm_{i固}$  与  $T_{ei}$  的大小成反比。即各岛礁的日消耗量水平不同,可根据供给能力自适应调节,这符合底层节点自适应能力的典型特征。若某岛礁所需的补给周期越短,其日消耗量越需严格控制越小,也就是滑向取值区间的低值区,反之亦然<sup>[4]</sup>。

(2) 饥饿排队策略: 考虑到各岛礁原有部分仓储剩余量,为了尽最大可能利用这部分库存量,以

及综合考虑各岛礁仓储保障周期能力,本文为每座岛礁建立一个饥饿急切系数因子  $H_i$ ,系数因子  $H_i$  反应  $i$  岛礁需要被补给的迫切程度,  $R_i$  为  $i$  岛礁当前库存量。

$$H_i = \frac{R_i}{Csm_i} \quad (12)$$

## 4 求解算法

物资补给配送优化算法主要有精确式算法和启发式算法两种。当遇到一些不规则优化问题时,精确式算法就不能准确地搜索出最优解。而启发式算法不存在函数求导和函数连续性等限制,对多目标规划问题求解具有良好的全局搜索最优解能力,非常适合解决本文所述问题。本文运输任务规划问题是一个 NP-hard 问题,因此在模型求解过程中,岛礁物资补给任务规划模型求解问题是一个复杂的多目标规划问题。本文采用基于模拟退火操作的遗传算法,是在基本遗传算法的基础上融入模拟退火算法,通过模拟退火操作优化遗传算法中的选择、交叉和变异产生的新种群,提高遗传算法的全局搜索能力。

算法流程如图 1 所示。

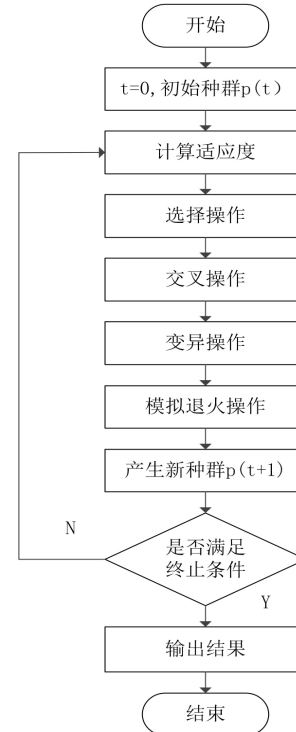


图 1 改进遗传算法流程

(1) 染色体编码。本文采取实数编码,即配送中心为 0,各岛礁为 1 2 3…。

(2) 适应度函数。以经济成本最小为适应度函数,即  $fitness = \min(f_{cost})$ 。

(3) 选择算子。采用比例选择算子。首先,计算每个个体的适应度值,群体规模为  $M$ ,  $f_i = \frac{F_i}{\sum_{j=1}^M F_j}$ ,

而后计算  $M$  个个体的累计适应度  $P_i = \sum_{j=1}^i f_j$ ,产生正态分布随机数  $r$ ,当  $p_{i-1} < r < p_i$  时,选择个体  $i$ 。

(4) 交叉算子。采用部分映射交叉算子,交叉过程分为两步。第一步,先对父代基因串进行双点交叉操作;第二步,根据交叉区域内各基因值的映射关系来修改交叉区域以外的基因位的基因值。

(5) 变异算子。采用倒位变异作为变异算子,在父体中随机的选择两个断点,将断点之间的基因逆序排列,从而产生一个新的个体。

(6) 模拟退火操作:① 控制参数初值  $t_0$ 。通过计算若干次随机变换目标函数平均增量的方法来

确定  $t_0 = \frac{-\Delta f^+}{\ln(p_0)}$ ,  $-\Delta f^+$  为目标函数多次随机变换平

均增量,设定初始接受率  $p_0$ ,得出  $t_0$  [6]。② 停止准则。多次降温后,适应度值达到终止条件后停止算法。③ 控制参数衰减函数。采用指数衰减策略,取  $t_k = \alpha t_{k-1}$ ,本文选取  $\alpha = 0.9$ 。④ 马尔科夫链长度。采用固定长度马尔科夫链  $L_K = 20$ 。⑤ 状态接受函数。采用 MetroPolis 准则作为状态接受函数,其接受新解的概率为:

$$r = \begin{cases} 1 & \Delta f \leq 0 \\ \exp\left(-\frac{\Delta f}{t}\right) & \Delta f > 0 \end{cases} \quad (13)$$

MetroPolis 接受准则的优点是,可采取一定的概率来接受优化解,避免陷入局部最优,从而达到全局或近似全局最优解。

## 5 实例验证

假设有 9 个岛礁需要补给,有 1 个岸基保障部队(补给中心),拥有两种型号的大型综合补给舰,并配有小型补给艇或拖船,岸基保障部队、岛礁及补给舰船信息,天气情况见表 1、表 2、表 3、表 4。

表 1 岸基保障部队及岛礁信息

岛礁	X 坐标	Y 坐标	能否靠岸补给	液体储量(吨)	固体储量(吨)	液体存储成本(元/吨/天)	固体存储成本(元/吨/天)	液体日消耗量(吨/天)	固体日消耗量(吨/天)	剩余液体(吨)	剩余固体(吨)	固体回收需求(吨)
补给中心	213	29										
D1	116	64	1	250	26	5	20	8	1	20	24	6
D2	188	110	1	35	8	10	40	1.5	4.5	5	16	2
D3	131	89	1	70	15	5	20	2.5	0.7	12	30	22
D4	120	92	1	90	17	5	20	3.4	0.8	16	40	5
D5	108	63	1	50	11	10	40	2	0.5	14	35	16
D6	119	80	1	22	8	10	40	0.9	0.2	7	20	2
D7	123	78	1	22	8	10	40	0.9	0.2	8	26	2
D8	118	79	0	12	3	20	80	0.6	0.1	8	20	10
D9	110	98	0	10	2	20	80	0.6	0.1	6	15	1

表 2 补给舰船信息

名称	液体满载量(吨)	液体装卸速度(吨/小时)	固体满载量(吨)	固体装卸速度(吨/小时)	航速(节)	燃油经济性(元/海里)	小艇数量
补给舰 A	200	15	40	5	20	600	2
补给舰 B	400	20	70	10	20	1000	2

基于混合遗传算法的岛礁物资补给任务规划模型

表 3 小艇信息

名称	液体满载量 (吨)	液体装卸速度 (吨/小时)	固体满载量 (吨)	固体装卸速度 (吨/小时)	航速(节)	燃油经济性 (元/海里)
小艇	1	0.6	1	0.6	10	0
拖船	10	5	5	1	8	100

表 4 天气信息

	第 1 天	第 2 天	第 3 天	第 4 天	第 5 天	第 6 天	第 7 天	第 8 天	第 9 天	第 10 天	第 11 天	第 12 天	第 13 天
D1	0	0	1	0	0	1	1	0	0	1	1	1	1
D2	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
D3	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
D4	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
D5	0	0	0	0	0	1	1	0	0	1	1	1	0
D6	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1
D7	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	1	0	1
D8	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	0	1	1
D9	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

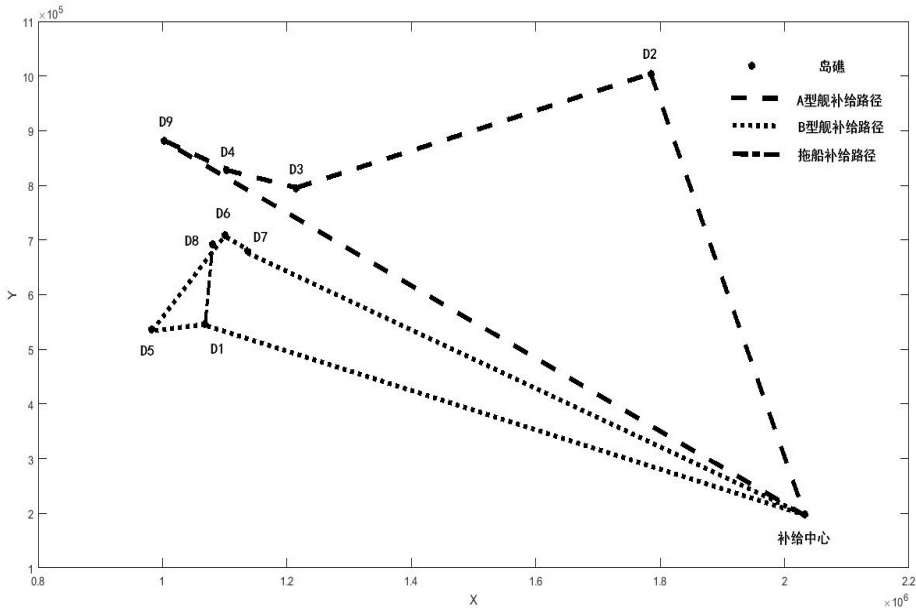


图 2 突发情况时补给方案路径图

对模型求解,在保证各岛礁补给不断情况下,尽量降低补给费用,得到最佳方案如图 2 所示。

补给舰 A 的路线为: 补给中心—D2—D3—D4—D9—补给中心,使用两艘小型补给艇对 D9 进行补给,为避开天气对补给的影响,该舰推迟 25.24 小时从补给中心出发,在第 48 小时到达 D2,补给过后在 D2 停泊 5.4 小时,于第 72 小时到达 D3,

而后依次对 D4 和 D9 进行补给,总航程 1842.8 海里,耗时 133.6 小时。

补给舰 B 的路线为: 补给中心—D1—D5—D6—D7—补给中心,当补给舰到达 D1 时,先用拖船向 D8 运送 D8 所需补充的物资,D8 上需回收的固体待下次补给舰停靠时再进行回收,或后期利用拖船转运到 D1 后进行回收,而后拖船返回 D5,等

表 5 突发情况时最佳补给方案信息表

补给舰	岛礁	与前站点距离 (海里)	航行耗时 (小时)	补给方式	停靠时间 (小时)	固体补给量 (吨)	液体补给量 (吨)	固体回收量 (吨)
A	D2	455.2	22.8	直接	7.6	7.3	33	2
	D3	327.7	16.4	直接	7.2	14	65	22
	D4	63.5	3.2	直接	5.7	15.7	85.7	5
	D9	60.5	3.0	小艇	9.11	1.07	6.28	1
B	D1	554.1	27.7	直接	15.0	24.8	24	6
	D5	46.3	2.3	小艇+拖船	45.3	8.5	39.7	16
	D6	112.9	5.6	小艇+拖船	22.8	7.5	18.6	2
	D7	25.0	1.2	小艇+拖船	8.3	6.7	18.5	2

到补给舰到达 D5 时,使用两艘小型补给艇和拖船同时对 D5 进行补给,D5 补给过后,在 D5 处停泊,待 D6 天气好转后,于第 96 小时到达 D6,对其进行补给后在岛上停泊,在第 120 小时到达 D7,总航程 1507.9 海里,耗时 155.7 小时。

方案总费用:2252188.8 元,其中拖船产生费用为 19604.5 元。

其他参数见表 5。

## 6 结束语

本文针对岛礁物资补给任务规划进行了研究,并综合考虑保障需求、保障能力、补给舰船型号、靠泊条件及天气等多种因素,建立了岛礁物资补给任务规划模型,并以某保障案例为背景,运用基于模拟退火操作的遗传算法求解。岛礁物资补给涉及因素多,本文仅针对其中几种情况建立了多目标规划模型,对岛礁物资补给任务规划进行了探索研究,

对于探索复杂条件下的岛礁物资补给任务规划以借鉴和启示。

## 参考文献

- [1] 肖建辉.车辆路径优化文献综述[J].广东技术师范学院学报(自然科学),2010(2):31-37.
- [2] 田冉,孙林夫,唐慧佳,等.多车场物流协同运输调度问题研究[J].计算机工程与应用,2015,51(21):230-236.
- [3] 闫华,何晓静,周庆忠,等.基于保障时间窗的油料调拨运输模型[J].后勤工程学院学报,2015,31(4):85-89.
- [4] 周骞,白云卯,徐春龙.基于遗传算法的多式联运物流运输配送路径优化研究[J].物流工程与管理,2015,37(247):89-104.
- [5] 姜大立,张巍.基于混合编码遗传算法的战时军事物流调运协同优化问题研究[J].军事运筹与系统工程,2018,32(1):44-51.
- [6] 刘睿琼,张文丽,侯爱华.融合模拟退火的遗传算法在车辆调度中的应用[J].计算机与数字工程,2018,345(7):1316-1319.