

doi: 10.7690/bgzdh.2020.09.013

基于双层规划的海运装载方案优化

李江成, 陆 法, 许双伟

(国防大学联合勤务学院, 北京 100858)

摘要: 为解决海运装载行动中的码头资源分配和舰船装载的问题, 提出一种基于双层规划的海运装载方案优化方法。根据海运装载方案优化的主要特点, 构建基于双层规划的海运装载问题求解框架, 分别对上层码头资源分配问题和下层舰船装载问题进行建模和求解, 建立下层结果反馈及上层分配策略更新机制, 并通过诺曼底登陆中的算例数据进行实验及分析。分析结果表明: 该方法具有较高的求解效率和良好的稳定性, 能够有效地求解海运装载方案优化问题。

关键词: 海运装载; 方案优化; 双层规划; 策略更新

中图分类号: TP301.6 **文献标志码:** A

Project Optimization of Marine Loading Based on Bi-level Programming

Li Jiangcheng, Lu Fa, Xu Shuangwei

(College of Joint Service, National Defense University, Beijing 100858, China)

Abstract: In order to solve the problem of berth resource allocation and ship loading in marine loading operation, a method of marine loading project optimization based on bi-level programming was proposed. According to the main characteristics of marine loading project optimization, a solving framework of marine loading problem based on bi-level programming was built. The problem of berth resource allocation on the upper level and the problem of ship loading on the lower level were modeled and solved respectively. A mechanism of result feedback on the lower level and allocation strategy update on the upper level was built. And the experiment and analysis were carried out with the data of Normandy Landing Operations. The analysis result shows that the method has high efficiency and good stability, and it can effectively solve the problem of marine loading project optimization.

Keywords: marine loading; project optimization; bi-level programming; strategy update

0 引言

联合岛屿进攻作战, 尤其是对据守大型岛屿之敌实施的大规模渡海登陆进攻作战, 是我军未来面临的联合作战基本样式之一。由于受海洋地理环境和气象水文的影响, 对联合岛屿进攻作战的保障十分复杂、困难。特别是将需要登陆的部队人员、装备、补给品等装载到运输舰船上, 是整个作战过程的关键环节, 直接影响联合岛屿进攻作战的效果。研究海运装载问题, 通过科学配置码头、装载兵力, 制定海运装载方案, 使得整个海运装载时间最短, 对于整个联合岛屿进攻作战的顺利实施具有十分重要的意义。

目前, 一些学者对海运装载行动中的码头资源分配和舰船装载问题分别开展了相关研究。对于码头资源分配问题: 欧阳玲萍等^[1]采用蚁群算法对该问题进行了优化求解; 刘志雄^[2]采用粒子群算法进行求解, 提出了一种基于船舶和粒子位置取整的 2 维粒子编码方法; 徐清华等^[3]建立了一种多目标规

划模型, 应用遗传算法进行了求解。对于舰船装载问题: 徐贤胜等^[4]设计了一种基于启发式算法和遗传算法相结合的混合遗传算法; 高建冈等^[5]通过分析海运装载需要考虑的多种因素, 建立了方案优化模型。可以看出: 上述研究多将海运装载行动中的码头资源分配和舰船装载问题看作独立的 2 个问题, 单独对其中之一进行研究。在海运装载过程中, 码头资源分配的结果直接影响舰船装载的求解, 为了优化海运装载方案, 必须将码头资源分配和舰船装载问题进行整体考虑、一体筹划; 因此, 笔者针对海运装载方案优化问题的主要特点, 构建一种基于双层规划的求解框架。

1 问题描述

海运装载方案优化问题可以描述为: 综合考虑码头的数量、吨位, 舰船的数量、装载面积、吨位, 以及建制旅的数量、装载面积等因素, 制定码头分配及兵力装载方案, 在保证所有兵力顺利完成装载

收稿日期: 2020-04-22; 修回日期: 2020-06-01

作者简介: 李江成(1989—), 男, 河北人, 硕士, 助理工程师, 从事军事系统规划、决策与评估研究。E-mail: 18692205883@163.com。

的前提下, 实现海运装载时间最短的目标。针对问题的实际情况和求解需要, 作出假设和简化如下:

1) 所有兵力以建制旅为单位进行装载, 且连续实施, 即各建制旅不可拆分后由多艘舰船进行装载。

2) 由于舰船吨位约束为次要约束, 与装载面积约束相比影响较小, 只考虑舰船装载面积约束。

3) 舰船装载面积是指经过预处理后的有效装载面积, 建制旅装载面积是指经过修正处理后的所占装载面积。

2 基于双层规划的求解框架

通过对海运装载问题的分析, 可以将该问题看作“码头资源分配-舰船装载”双层结构, 对比双层规划理论的特性及实际应用^[6-7], 构建基于双层规划的海运装载问题求解框架。分别对上层码头资源分配问题和下层舰船装载问题进行建模和求解, 建立有效的下层结果反馈及上层分配策略更新机制, 实现海运装载方案的总体优化。

2.1 求解框架

类比双层规划理论的典型实际应用, 海运装载问题可以分为分配层和装载层 2 个层次。上层是分配层, 负责按照一定的策略将码头资源分配给各个舰船, 制定码头资源分配方案。下层是装载层, 在已知码头资源分配方案的基础上, 确定各个舰船的装载部队, 制定舰船装载方案。之后分配层再根据装载层舰船装载方案结果对分配策略进行适当的调整, 制定新一轮的码头资源分配方案, 紧接着各个舰船再基于新一轮的码头资源分配方案得出新的舰船装载方案。这样不断迭代, 最终达到总体目标的优化。

2.2 输入变量

1) GB 表示建制旅集合; NB 表示建制旅数量; AB_i 表示第 i 个建制旅装载面积; $TONB_i$ 表示第 i 个建制旅所占吨位。

2) GS 表示舰船集合; NS 表示舰船数量; AS_j 表示第 j 艘舰船装载面积; $TONS_j$ 表示第 j 艘舰船吨位; TLS_j 表示第 j 艘舰船满载装载时间; ES_j 表示第 j 艘舰船装载效率。

3) GBE 表示码头集合; NBE 表示码头数量; $TONBE_k$ 表示第 k 个码头的吨位。

2.3 决策变量

1) $x_{ij}=0,1, x_{ij}=1$ 表示第 i 个建制旅由第 j 艘舰船

装载, $x_{ij}=0$ 表示第 i 个建制旅未由第 j 艘舰船装载。

2) $y_{jk}=0,1, y_{jk}=1$ 表示第 j 艘舰船停靠在第 k 个码头, $y_{jk}=0$ 表示第 j 艘舰船未停靠在第 k 个码头。

3 码头资源分配问题

码头资源分配问题可以表示为: 已知码头资源集合 GBE , 舰船集合 GS , 在满足码头吨位约束条件的前提下, 将 GBE 中的码头资源分配给 GS 中的各个舰船, 得出码头资源分配方案。

3.1 分配模型

1) 输出变量。

$GSBE_k$: 各个码头停靠的舰船集合, $k \in GBE$ 。

2) 约束条件。

① 舰船停靠次数约束。

每艘舰船最多只能停靠在某一个码头的泊位上。

$$\sum_{k=1}^{NBE} y_{jk} \leq 1, \forall j \in GS. \quad (1)$$

② 码头吨位约束。

每个码头停靠的所有舰船吨位均小于该码头吨位限制。

$$y_{jk} TONS_j < TONBE_k, \forall j \in GS, k \in GBE. \quad (2)$$

3.2 基于启发式规则的分配算法

针对码头资源分配问题, 笔者采用基于规则的启发式算法进行求解。算法步骤如下:

1) 计算各艘舰船装载效率:

$$ES_j = AS_j / TLS_j, \forall j \in GS. \quad (3)$$

2) 计算各个待停靠码头已安排停靠舰船的总装载时间, 选择总装载时间最小的码头; 当总装载时间最小的码头有多个时, 选择序号最小的码头。

3) 根据所选码头的吨位限制, 依次对剩余舰船进行吨位约束判断, 得出可停靠在码头的剩余舰船集合。

4) 判断可停靠在码头的剩余舰船集合数目, 若为空, 则将码头从待停靠码头集合中删除, 返回 2)。

5) 采用轮盘赌的方法选择停靠舰船, 根据各艘舰船的装载效率计算适应度, 得出各艘舰船被选择的概率范围, 设置一个随机数发生器驱动轮盘转动, 确定下一艘停靠在码头的舰船, 并将该舰船从剩余舰船集合中删除。

6) 判断剩余舰船集合数目, 若为空, 操作结束, 得出各码头的舰船停靠列表; 否, 则返回 2)。

4 舰船装载问题

4.1 装载模型

舰船装载问题可以表示为：已知舰船集合 GS ，建制旅集合 GB ，在满足舰船装载面积约束条件的前提下，将 GB 中所有建制旅装载到 GS 中的舰船上，得出舰船装载方案。

1) 优化目标。

舰船装载问题的优化目标为整体装载时间最短，即实现各个码头的所有停靠舰船装载兵力所用总时间的最大值最小化。

$$V = \min : \max_{k \in GBE} \left(\sum_{j=1}^{NS} \sum_{i=1}^{NB} x_{ij} y_{jk} TLS_j \left(\frac{AB_i}{AS_j} \right) \right). \quad (4)$$

2) 约束条件。

① 建制旅装载次数约束。

每个建制旅最多只能由某一艘舰船实施装载，也就是说将各个建制旅视为最小单元，不可拆分后由多艘舰船实施装载。

$$\sum_{j=1}^{NS} x_{ij} \leq 1, \quad \forall i \in GB. \quad (5)$$

② 舰船装载面积约束。

每艘舰船上装载的所有建制旅的装载面积之和，不大于该舰船装载面积。

$$\sum_{i=1}^{NB} x_{ij} AB_i \leq AS_j, \quad \forall j \in GS. \quad (6)$$

4.2 求解舰船装载问题的改进遗传算法

根据上述模型可知，舰船装载问题可以看作多背包问题。根据算法复杂性理论，多背包问题是一类典型的 NP-Hard 问题。综合考虑问题的复杂性、规模性和可操作性等因素，笔者采用精英保留策略和基于罚函数的约束处理方法，设计一种改进遗传算法^[8-14]求解该问题，算法步骤如下：

1) 编码方法。

采用整数编码方法，设每一个染色体的长度为 N ，即建制旅数量，则该染色体表示各个建制旅装载的舰船序号 $(x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_N)$ ，其中 x_i 表示将第 i 个建制旅装载到第 x_i 艘舰船上。假设建制旅数量为 8，舰船数量为 3，则一个整数编码如 $(2, 3, 1, 2, 1, 3, 1, 2)$ 表示：将第 3、5、7 个建制旅装载到第 1 艘舰船上，第 1、4、8 个建制旅装载到第 2 艘舰船上，第 2、6 个建制旅装载到第 3 艘舰船上。

2) 适应度函数。

采用动态线性标定的方法构造适应度函数，适

应度函数的参数随着迭代次数的增加而不断变化，可以表示为

$$F = (V_{\max}^k - V) / (V_{\max}^k - V_{\min}^k) + r^k. \quad (7)$$

式中： V_{\max}^k 、 V_{\min}^k 分别为第 k 代的最大、最小目标函数值； r^k 随着迭代次数的增加而不断减小，从而起到调节选择压力的作用，实现全局搜索和局部搜索的平衡。

3) 选择操作。

采用轮盘赌和精英保留策略^[15-17]相结合的选择方法，对精英染色体采用重插入的方法予以保留。具体做法是：首先根据适应度值对父代种群中的染色体进行排序，基于一定的保留概率，将排名靠前的精英染色体暂时保存在一个外部空间；待交叉、变异操作后，再将外部空间中的精英染色体重新插入到子代种群，产生新一代种群。这种混合产生新一代种群的方式，既能保证算法的收敛速度，又能避免在交叉、变异操作后父代染色体优良基因的丢失。

4) 交叉操作。

采用均匀交叉方法，从种群中顺序选择 2 个父染色体，按照设定的交叉概率，随机产生 2 个与父染色体长度一致的 0-1 掩码，根据 2 个掩码决定子染色体的编码继承自哪个父染色体。

5) 变异操作。

采用倒位变异方法，依次遍历种群中各个染色体，按照设定的变异概率，随机选取该染色体的一段编码，然后颠倒这段编码的顺序。

6) 约束处理方法。

采用基于罚函数约束处理方法，对每个染色体，将罚函数 FP 设为每个染色体违反各个约束条件的总量，若染色体没有违反约束条件，则罚函数 FP 为 0。将罚函数 FP 乘以惩罚系数取相反数作为惩罚项，加到适应度函数上，得到修正后的适应度值

$$F' = F - \gamma(k/K)^\beta FP. \quad (8)$$

式中： γ 、 β 为常数； k 为当前迭代次数； K 为最大迭代次数。可以看出，惩罚系数 $\gamma(k/K)^\beta$ 随着迭代过程的进展而不断增加。迭代过程前期，惩罚系数较小，使得算法可以在较大的解空间内展开搜索；迭代过程后期，惩罚系数变大，则能够保证所得解的可行性。

5 效果反馈及分配策略更新机制

码头资源分配策略更新机制，采用初始策略和

分配知识共同决定分配方案的方法。其中，分配知识指将码头资源合理地分配给相应舰船进行装载活动的一种累积知识，从已采取的码头资源分配方案中抽取出来。如表 1 所示，在选择下一艘停靠舰船时，码头将以 $0.6/(0.6+0.3+0.1+0.5)=40\%$ 的概率选择第 1 艘舰船，以 $0.3/(0.6+0.3+0.1+0.5)=20\%$ 的概率选择第 2 艘舰船，依此类推。

表 1 分配知识示例

码头 1	舰船 1	舰船 2	舰船 3	舰船 4
g	0.6	0.3	0.1	0.5

在每次迭代完成之后，根据舰船装载方案结果，选取最优的舰船装载方案，获得相应的码头资源分配方案，从中提取出分配知识，用于指导后续的分配过程，从而提高分配方案的优化效果。在进行下一次码头资源分配时，采用 $\gamma=\alpha\beta$ 的方式求解分配概率，其中 α 是指初始策略得出的分配概率， β 是指分配知识得出的分配概率。

6 实例分析

以诺曼底登陆战役中第一批兵力输送中的海运装载行动为例，建制旅数量为 53 个，舰船数量为 40 艘，码头数量为 31 个。其中，各建制旅、舰船和码头的相关信息如表 2—4 所示。

表 2 建制旅数据

种类	数量	装载面积 AB_i/m^2	种类	数量	装载面积 AB_j/m^2
1	12	14 054	7	5	2 413
2	3	12 015	8	3	3 836
3	3	8 144	9	3	3 208
4	3	5 661	10	3	3 142
5	3	2 058	11	10	1 500
6	5	8 756			

表 3 舰船数据

种类	数量	装载面积 AS_j/m^2	吨位 $TONS_j/t$	装载时间 TLS_j/h
1	20	18 200	25 000	10
2	20	13 300	35 000	15

表 4 码头数据

种类	数量	吨位 $TONBE_k/t$
1	26	29 000
2	5	39 000

为了验证文中方法求解海运装载方案优化问题的可行性，笔者在 Matlab 软件上对上述算例进行仿真实验。根据实验经验和算例特点，设置每次生成分配方案数量为 10 个，迭代次数 10 次；改进遗传算法中种群规模 $NP=200$ ，交叉概率 $P_c=0.9$ ，变异概率 $P_m=0.2$ ，种群迭代次数 500 次。仿真运行 10 次，得到的最优目标值为 9.875 2 h，码头资源分配方案如表 5 所示，舰船装载方案如表 6 所示。

表 5 码头停靠方案

序号	停靠舰船	序号	停靠舰船	序号	停靠舰船
1	4、24	12	36	23	16
2	38	13	7、31	24	18
3	1、30	14	11、25	25	17
4	27	15	6、37	26	2
5	29	16	8、22	27	3
6	32	17	34	28	12
7	5、21	18	20、35	29	14
8	13、40	19	19	30	—
9	10、39	20	9	31	—
10	28	21	33		
11	15、26	22	23		

表 6 舰船装载方案

序号	装载建制旅	序号	装载建制旅	序号	装载建制旅
1	24、29	15	16、25	29	41、42、51
2	27、48、52	16	14、23	30	—
3	9、53	17	1、46、49	31	—
4	7、38	18	8、39	32	17
5	6、50	19	3	33	18
6	15、31、40	20	19、26	34	33、37
7	20、22、35	21	—	35	—
8	12、44	22	—	36	21、32
9	10	23	—	37	—
10	11、36	24	—	38	28
11	4、45	25	—	39	—
12	2	26	—	40	—
13	13、34	27	30、43、47		
14	5	28	—		

为了进一步验证文中方法的有效性，将串行求解方法和文中方法进行对比分析。其中：串行求解方法采用基于规则的启发式算法求解码头资源分配问题，得出分配方案后采用改进遗传算法求解舰船装载问题。采用 2 种方法分别仿真运行 10 次，对每次求出的最优解进行相应的统计处理，所得结果如表 7 所示。仿真结果表明：文中方法所求出的解整体上优于串行求解方法，并且该方法所求解的方差和标准差也相对较低，说明笔者提出的方法无论是在求解效率还是在稳定性方面，都有良好的表现，是正确及可行的。

表 7 算法计算结果比较

算法类别	平均解	最优解	最差解	方差	标准差
串行求解方法	14.467	11.156	15.850	2.930	1.712
文中方法	9.974	9.875	10.536	0.044	0.209

7 结束语

笔者针对海运装载方案优化问题的主要特点，构建了一种基于双层规划的求解框架，以诺曼底登陆战役第一批兵力输送中的海运装载行动为例进行求解分析。算例结果表明：该算法具有较高的求解效率和良好的稳定性，能有效地求解海运装载方案优化问题。

4 结束语

笔者设计一种基于 H_∞ 回路成形的鲁棒控制器, 使非线性、强耦合的高速直升机对象在低空复杂环境飞行时, 在双回路控制器调节下也具有良好的控制效果和鲁棒性。仿真结果表明: 该控制器的姿态内回路与位置外回路控制均达到了预期目标, 能更好地满足高速直升机低空飞行的控制, 为今后工程应用提供参考。

参考文献:

- [1] MCFARLANE D, GLOVER K. An H_∞ design procedure using robust stabilization of normalized coprime factors[C]//IEEE Conference on Decision & Control. 1988.
- [2] MCFARLANE D, GLOVER K. A loop-shaping design procedure using H_∞ synthesis[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2002, 37(6): 759-769.
- [3] GADEWADIKAR J, LEWIS F L, SUBBARAO K, et al.

(上接第 62 页)

参考文献:

- [1] 欧阳玲萍, 王锡淮, 肖健梅. 基于蚁群算法的泊位调度问题[J]. 控制工程, 2009, 16(S2): 106-109.
- [2] 刘志雄. 港口泊位调度问题的粒子群优化研究[J]. 物流工程与管理, 2010, 32(8): 101-103.
- [3] 徐清华, 季大琴, 英戈. 基于遗传算法舰船装载码头配置方案优化[J]. 火力与指挥控制, 2017, 42(4): 171-176.
- [4] 徐贤胜, 王帅. 基于遗传算法和启发策略的舰船装载方案[J]. 军事运筹与系统工程, 2008, 22(2): 40-44.
- [5] 高建冈, 邱志伟. 登陆输送编队装载方案及优选方法[J]. 舰船电子工程, 2010, 30(10): 135-137.
- [6] 吕一兵, 万仲平, 胡铁松, 等. 水资源优化配置的双层规划模型[J]. 系统工程理论与实践, 2009, 29(6): 115-120.
- [7] 高松, 阮拥军, 于同刚. 装备动员物资供应企业选择双层规划模型[J]. 兵工自动化, 2010, 29(9): 32-33, 37.
- [8] 汪定伟, 王俊伟, 王洪峰, 等. 智能优化方法[M]. 北京: 高等教育出版社, 2007: 38-46.
- [9] 虞安波, 杨家本. 多背包问题的遗传算法求解[J]. 计算技术与自动化, 2002, 21(2): 59-63.

H-Infinity Static Output-feedback Control for Rotorcraft[J]. Journal of Intelligent & Robotic Systems, 2009, 54(4): 629-646.

- [4] WANG H Q, MIAN A A, WANG D B, et al. Robust multi-mode flight control design for an unmanned helicopter based on multi-loop structure[J]. International Journal of Control Automation & Systems, 2009, 7(5): 723-730.
- [5] YANG K, LU J G. Robust variance-constrained control for a class of continuous time-delay systems with parameter uncertainties[J]. Chaos, Solitons and Fractals, 2009, 39(5): 2179-2187.
- [6] 张显库, 贾欣乐, 王新成, 等. H_∞ 鲁棒控制理论发展的十年回顾[J]. 控制与决策, 1999(4): 289-296.
- [7] 朱华, 杨一栋. H_∞ 回路成形法设计直升机飞控系统[J]. 计算机仿真, 2007, 24(7): 62-64.
- [8] DA-WEI GU D C, PETKOV P H, KONSTANTINOV M M. Robust Control Design with MATLAB®[M]. New York, 2005: 31-48.
- [9] 陈本美, 席斌. H_∞ 控制及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2010: 69-78.
- [10] 宋海生, 傅仁毅, 徐瑞松, 等. 求解多背包问题的混合遗传算法[J]. 计算机工程与应用, 2009, 45(20): 45-48.
- [11] ZHANG J W, WANG L, XING L N. Large-scale medical examination scheduling technology based on intelligent optimization[J]. Journal of Combinatorial Optimization, 2019, 37(1): 385-404.
- [12] 陈浩, 李军, 唐宇, 等. 基于动态罚函数遗传算法的电磁探测卫星多星规划方法[J]. 国防科技大学学报, 2009, 31(2): 44-50.
- [13] WANG R, LAI S M, WU G H, et al. Multi-clustering via evolutionary multi-objective optimization[J]. Information Sciences, 2018(450): 128-140.
- [14] 刘彦君. 基于改进的遗传算法与龙格库塔法的弹道求解方法[J]. 兵工自动化, 2011, 30(1): 4-7, 24.
- [15] DEB K, PRATAP A, AGARWAL S, et al. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II [J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2002, 6(2): 182-197.
- [16] ZITZLER E, THIELE L. Multiobjective evolutionary algorithms: a comparative case study and the strength Pareto approach[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 1999, 3(4): 257-271.
- [17] 赵亮, 吕剑虹. 基于改进遗传算法的风电场多目标无功优化[J]. 电力自动化设备, 2010, 30(10): 84-88.