

面向绿色航运的邮轮废弃物排放随机优化

镇璐¹, 吕文雅², 诸葛丹³, 王帅安³

(1. 上海大学 管理学院, 上海 200444; 2. 东南大学 经济管理学院, 南京 210096;

3. 香港理工大学 物流及航运学系, 香港 999077)

摘要 邮轮产业的蓬勃发展带来了一系列的海洋环境问题, 邮轮运营及船上乘客皆会产生不定量的废弃物, 通常废弃物总量远大于其承载容量, 需要在航线的多个港口处理废弃物并向港口缴纳一定费用. 因此, 与哪些港口签订长期合同, 在哪个港口排放多少废弃物等决策将会影响邮轮公司的运营成本; 这些决策需要通过一些优化模型进行科学地计算和分析. 本文基于系统工程的思维对上述决策问题背景进行了分析, 并运用数学规划的理论工具, 先后构建了确定性模型、适用于排污量参数服从任意概率分布的随机规划模型和适用于不确定参数区间的三阶段鲁棒优化模型. 随后, 本文结合上述问题与模型的特征, 设计了定制化的禁忌搜索算法和粒子群算法分别求解随机模型和鲁棒模型中的大规模问题; 并通过一些基于实际问题规模和数据特征的实验, 验证了本文所构建的决策模型的有效性和所设计算法的求解效率. 本文研究所提出的邮轮废弃物排放决策方法论对当前全球绿色航运事业的推广与发展具有一定应用价值和指导意义.

关键词 邮轮; 绿色航运; 废弃物排放; 随机规划; 鲁棒优化; 不确定性

Green shipping oriented waste disposal optimization for cruise ships under stochastic context

ZHEN Lu¹, LÜ Wenyu², ZHUGE Dan³, WANG Shuai'an³

(1. School of Management, Shanghai University, Shanghai 200444, China;

2. School of Economics and Management, Southeast University, Nanjing 210096, China;

3. Department of Logistics and Maritime Studies, The Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong 999077, China)

Abstract The rapid development of the cruise industry has brought a series of marine environmental problems. In the process of cruise navigation, cruise operation and passengers on board will produce an uncertain amount of waste. Generally, the total amount of waste is far greater than its capacity. It is necessary to dispose of waste in multiple ports of the line, which requires a certain fee to be paid to the port. Therefore, this paper studied a waste disposal problem for cruise ships to decide which port to sign and how much waste should be discharged under the uncertain amount of produced waste. These decisions affect the operating costs of cruise companies, so it is necessary to calculate and analyze scientifically through some optimization models. Based on the theory of system engineering, this paper analyzed the background of the above-mentioned decision-making problems and proposed three models successively by using the theory and tools of mathematical programming. The models include a deterministic model, a stochastic programming model that applied to arbitrary probability distributions of emission parameters,

收稿日期: 2020-05-19

作者简介: 镇璐 (1981-), 男, 汉, 湖北宜都人, 教授, 博士, 研究方向: 生产与服务运作管理优化, E-mail: lzhen@shu.edu.cn; 吕文雅 (1995-), 女, 汉, 山东烟台人, 博士研究生, 研究方向: 车辆调度与应急物流优化, E-mail: wylv@seu.edu.cn; 诸葛丹 (1991-), 女, 汉, 浙江金华人, 助理教授 (研究), 博士, 研究方向: 港口与航运物流优化, E-mail: dan.zhuge@connect.polyu.hk; 王帅安 (1984-), 男, 汉, 山东青岛人, 副教授, 博士, 研究方向: 航运网络设计, 港口运营规划, 城市交通网络建模, E-mail: hans.wang@polyu.edu.hk.

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (71831008)

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (71831008)

中文引用格式: 镇璐, 吕文雅, 诸葛丹, 等. 面向绿色航运的邮轮废弃物排放随机优化 [J]. 系统工程理论与实践, 2021, 41(2): 345-357.

英文引用格式: Zhen L, Lü W Y, Zhuge D, et al. Green shipping oriented waste disposal optimization for cruise ships under stochastic context[J]. Systems Engineering — Theory & Practice, 2021, 41(2): 345-357.

and a three-stage robust optimization model that can cope with the uncertain parameter interval. Then, considering the above problems and the characteristics of the model, this paper designed a Tabu search (TS) and particle swarm optimization (PSO) algorithms to solve large-scale problems in stochastic and robust models, respectively. Extensive experiments in this paper validated the effectiveness and efficiency of the proposed models and algorithms. The decision-making method of cruise waste emissions proposed in this paper has certain application value and guiding significance for the development of the current global green shipping industry.

Keywords cruise ship; green shipping; waste disposal; stochastic programming; robust optimization; uncertainty

1 引言

近年来世界范围的内邮轮产业得到快速发展, 据 Cruise Market Watch 统计, 2018 年全球邮轮业总额为 456 亿美元, 年载客量 2600 万人次^[1]. 然而, 邮轮的海上活动所产生的大量废弃物给海洋环境带来了严重威胁. 据 Beachapedia 收集的数据, 一艘载有 3000 名乘客的邮轮在一个典型的一周航程中会产生 100 万加仑灰水, 21 万加仑的污水, 2.5 万加仑含油污水, 超过 100 加仑的危险或有毒废物, 50 吨垃圾和固体废物^[2]. 这种现状已经促使国际和各国采取行动, 加大对船舶污染的监管力度. 中国交通运输部直属海事系统 2018 年共实施船舶防污染检查 27 万多艘, 并推进西北太平洋行动计划、北太平洋地区海岸警备执法机构论坛(北大海警机构论坛)、全球动议中国项目等框架下的水污染防治区域合作^[3].

虽然邮轮上部署的焚烧炉、压实机、研磨和粉碎机等设备可以缩减存放废弃物的空间, 但产生的废弃物总量仍普遍大于邮轮总核定的废弃物承载量, 因此需在途经的港口进行废弃物处理. 为了节省成本, 邮轮公司通常与港口签订有条件的长期合同(如: 最低处理量承诺的一年合同), 以便以较低的价格在合约港口处理废弃物. 邮轮公司需要决策签约港口、排放港口及排放量, 寻找邮轮处理废弃物总成本最小化的方案. 本文以此作为切入点, 探究不确定环境下的邮轮废弃物处理问题.

本研究属于航运研究范畴, 该领域已经有较多定量研究(Koza^[4]、Zhen 等^[5]、陈康等^[6]、邢玉伟等^[7]). 其中不乏邮轮相关的研究(Véronneau 等^[8]、Wang 等^[9]、Zhen 等^[10]), 但邮轮废弃物管理的定量研究相对较少, 多集中于定性研究. Dixon 等^[11]回顾了以《防污公约》为主的国际海事组织(international maritime organization, IMO)所制定的邮轮废弃物管理相关现行规定. Johnson^[12]对邮轮旅游的环境影响进行了分类, 并得出以下结论: 为了促进废弃物管理和可持续发展, 邮轮公司需要采取一些积极的废弃物处理措施, 而且港口运营商和港口所在地区政府也应与邮轮公司密切合作. Butt^[13]研究了南安普敦邮轮的废弃物管理状况, 调查了船舶废弃物的处理方案以及废弃物对港口的影响; 他建议港口应为废弃物提供充分的回收、减少和再利用设施. 根据 2000 年和 2002 年北海地区港口船舶废弃物接收设施可用性的调查, Carpenter 等^[14]发现, 大多数北海港口都拥有足够的接收设施, 并且已经符合欧盟关于船舶废弃物接收设施的指令. 此外, 关于邮轮固态废物管理详细回顾请参考 Sanches 等^[15]的综述. 综上可知, 现有邮轮废弃物处理的相关文献主要侧重法规和策略等方面. 本研究还涉及不确定性的应用, 运筹优化领域许多研究将不确定性纳入考虑(曹策俊等^[16]、于冬梅等^[17]、Zhen^[18]、Shu 等^[19]), 有利于获得更具鲁棒性的解, 更好地适应有限信息的现实环境. 航运业也存在诸多考虑不确定性的研究, 如航行时间不确定性(Wang 等^[20])、港口时间不确定性(Qi 等^[21])和需求不确定性(Zheng 等^[22]). Wang 等^[23]与本文的研究内容最相关, 讨论了邮轮如何选择港口处理航行中产生的废弃物, 并且将每段航程产生的废弃物量的不确定性考虑在内, 提出了确定性模型和随机模型.

在现实需求的驱动下, 本研究聚焦于邮轮废弃物处理问题. 现实的情况是复杂的, 现有国内外相关研究缺乏针对该具体问题的模型, 未将邮轮公司与港口的签约决策, 废弃物产生量不确定性, 以及信息获取情况的差异性考虑其中. 本研究将在不确定性废弃物产生量以及不同程度信息获取量的情况下决策: 与哪些港口签订合同, 在哪些港口处理废弃物以及各个港口处理废弃物的量. 这增加了决策的难度, 但同时也更符合现实需求. 希望通过本研究提供不同信息获取情况下的优化废弃物处理方案, 以此帮助邮轮公司降低废弃物处理成本, 并且改善海洋污染问题.

本文的创新点如下:

1) 本文首次将长期服务合同, 废弃物产生量不确定性, 以及信息获取情况的差异性等复杂现实情况考虑其中, 提出了一个新的邮轮排污决策优化问题.

2) 针对不同信息获取情况, 构建三种模型进行邮轮排污决策优化. 首先考虑每段航程中产生废弃物量已知的情况, 提出了一个确定性模型. 然后考虑每段航程产生废弃物量为任意概率分布的情况, 提出了随机规划模型. 最后考虑产生废弃物量的概率分布信息有限的情况, 提出了鲁棒优化模型.

3) 为解决求解难题, 本文首先采用了合适的线性化方法将非线性模型转为线性, 然后针对问题定制禁忌搜索算法和粒子群算法分别求解随机模型和鲁棒模型中的大规模问题, 通过数值实验验证了模型的有效性和算法的效率.

2 问题描述与模型构建

2.1 确定性模型

如图 1 所示, 邮轮的一条完整的航线是从港口 1 (母港) 出发, 依次经过港口 2, 3, ..., i , ..., $|P|$ (P 表示既定航线中所有停靠的港口集合), 并再次返回港口 1. 在确定性邮轮废弃物处理优化问题中, 已知航程中产生的废弃物量信息 q_i , 邮轮公司需要制定邮轮废弃物处理策略, 确定签约港口 β_i , 处理废弃物港口 z_i 以及相应处理量 x_i^c (签约港口以签约价格处理) 和 x_i^r (未签约港口以常规价格处理), 从而使废弃物处理总成本最小化. 为了便于计算, 假设当邮轮返回到母港时, 船上的废弃物将全部被清理干净, 并只考虑邮轮一次完整的航行.

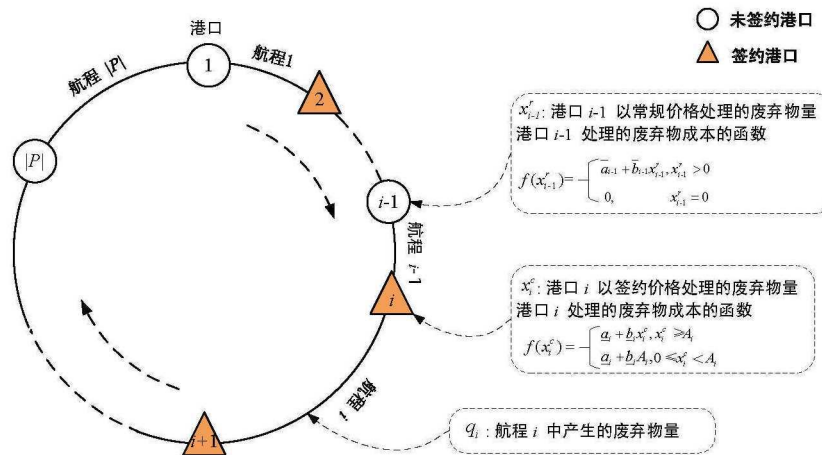


图 1 邮轮废弃物处理优化问题航行示意图

确定性模型涉及的所有数学符号说明如下:

索引和集合

- i 港口和航程
- P 航线上停靠港口的集合, $P = \{1, 2, \dots, |P|\}$

参数

- V 邮轮上废弃物装载总容量, 即邮轮最大可装载的废弃物量
- q_i 航程 i 产生的废弃物量, 满足 $q_0 := q_{|P|}$, $q_i < V$
- a_i, b_i 签约港口 i 处理废弃物的固定成本和单位可变成本
- \bar{a}_i, \bar{b}_i 未签约港口 i 处理废弃物的固定成本和单位可变成本
- A_i 签约后邮轮公司承诺在港口 i 的最低处理废弃物量

决策变量

- β_i 0-1 变量; 若与港口 i 签订长期合同为 1, 否则为 0
- x_i^c 港口 i 以签约价格处理的废弃物量

x_i^r 港口 i 以常规价格处理的废弃物量, 当 $x_i^c > 0$ 时, 其必然为 0
 y_i 邮轮离开港口 i 时, 船上的废弃物量, $y_0 := y_{|P|}$
 z_i 0-1 变量; 表示若邮轮在未签约港口 i 处理废弃物为 1, 否则为 0

$$[M1] \min \sum_{i \in P} \beta_i (\underline{a}_i + \underline{b}_i A_i) + \underline{b}_i (x_i^c - A_i)^+ + (z_i \bar{a}_i + \bar{b}_i x_i^r), \quad (1)$$

s. t.

$$y_i + q_i \leq V, \quad \forall i \in P, \quad (2)$$

$$x_i^c + x_i^r + y_i = y_{i-1} + q_{i-1}, \quad \forall i \in P \setminus \{1\}, \quad (3)$$

$$x_1^c + x_1^r = y_{|P|} + q_{|P|}, \quad (4)$$

$$x_i^c \leq V \beta_i, \quad \forall i \in P, \quad (5)$$

$$x_i^r \leq V z_i, \quad \forall i \in P, \quad (6)$$

$$z_i \leq 1 - \beta_i, \quad \forall i \in P, \quad (7)$$

$$x_i^c, x_i^r, y_i \geq 0, \beta_i, z_i \in \{0, 1\} \quad \forall i \in P. \quad (8)$$

目标函数 (1) 表示最小化邮轮废弃物处理总成本, 其中 $\beta_i (\underline{a}_i + \underline{b}_i A_i)$ 表示签约港口 i 承诺最低处理量的总成本, $\underline{b}_i (x_i^c - A_i)^+$ 表示签约港口 i 超出最低承诺处理量部分的可变成本, $(z_i \bar{a}_i + \bar{b}_i x_i^r)$ 表示未签约港口的固定成本和可变成本. 约束 (2) 确保船舶承载的废弃物量始终小于等于船舶总核定的废弃承载量, 避免船舶废弃物量超出的风险. 约束 (3) 对航线中连续的两段航程建立了联系. 约束 (4) 确保最后一个航段产生的废弃物以及其它未处理废弃物会在母港完全清理. 约束 (5)~(7) 关联了决策变量 x_i^c, x_i^r, β_i 和 z_i , 保证只有在签约港口才能以签约价格处理废弃物; 在未签约港口只能以常规价格处理废弃物. 约束 (8) 定义了决策变量.

目标函数 (1) 存在非线性部分 “ $(\cdot)^+$ ”. 为了线性化, 引入一个非负辅助变量 π_i . 如果 $x_i^c - A_i > 0$, 则 $\pi_i = x_i^c - A_i$; 如果 $x_i^c - A_i \leq 0$, 则 $\pi_i = 0$. 模型线性化为:

$$\min \sum_{i \in P} \beta_i (\underline{a}_i + \underline{b}_i A_i) + \underline{b}_i \pi_i + (z_i \bar{a}_i + \bar{b}_i x_i^r), \quad (9)$$

新增约束:

$$\pi_i \geq x_i^c - A_i, \quad \forall i \in P. \quad (10)$$

$$\pi_i \geq 0, \quad \forall i \in P. \quad (11)$$

定理 若 $\sum_{i \in P} q_i \leq V$, 且各港口处理废弃物的固定成本大于 0, 则邮轮处理废弃物问题的最优决策为仅在一个港口排放.

证明 反证法证明定理, 假设该问题最优决策为在两个港口排放, 分别为港口 j 和 k , 排放量 $x_j^* > 0$ 和 $x_k^* > 0$ (其中 * 可能为 c 或者 r , 分别表示 “签约价格处理” 和 “常规价格处理”), 两个港口的排放固定成本分别为 a_k, a_j (其中 a_k 可能为 \bar{a}_k 或者 \underline{a}_k , a_j 可能为 \bar{a}_j 或者 \underline{a}_j), 两个港口的排放固定成本分别为 b_k, b_j (其中 b_k 可能为 \bar{b}_k 或者 \underline{b}_k , b_j 可能为 \bar{b}_j 或者 \underline{b}_j). 则以下公式必须成立, 该假设才成立.

$$a_k + b_k x_k^* + a_j + b_j x_j^* \leq \min \{a_k + b_k (x_k^* + x_j^*), a_j + b_j (x_k^* + x_j^*)\}.$$

即

$$a_k + b_k x_k^* + a_j + b_j x_j^* \leq a_k + b_k (x_k^* + x_j^*),$$

$$a_k + b_k x_k^* + a_j + b_j x_j^* \leq a_j + b_j (x_k^* + x_j^*).$$

化简可知, 在 $a_k > 0, a_j > 0$ 的情况下, 上述公式不可能同时成立, 故假设不成立.

引理 若 $\sum_{i=1}^n q_i > V$, 则邮轮至少在两个港口处理废弃物.

在现实生活中, 整个航程中产生的废弃物总量通常远大于船舶可承载废弃物容量. 因此, 本文基于假设 $\sum_{i=1}^n q_i > V$ 开展邮轮废弃物处理优化问题研究, 否则该决策问题极易求解, 研究价值有限.

2.2 随机规划模型

现实比确定性情况更为复杂, 在长期规划中乘客数量会存在波动, 进而导致在不同往返 (每周) 航程中产生的废弃物量不确定. 在该情况下, 若邮轮公司可以在相对长的时间段内收集每段航程所产生的废弃物的

历史数据, 并校准每段航程产生废弃物量的概率分布, 则邮轮公司可根据概率分布产生一系列场景来模拟各种可能存在的现实情况. 以此为基础, 本文参考 Shapiro^[24] 和 Keller^[25] 研究中提及的样本平均近似 (sample average approximation, SAA) 方法, 针对邮轮废弃物处理优化问题构建随机规划模型. 随机规划模型新增的索引和集合、参数、决策变量如下:

索引和集合

- ω 场景索引
- Ω 所有场景的集合

参数

- p_ω 场景 ω 发生的概率, $\sum_{\omega \in \Omega} p_\omega = 1$. 每个场景发生的概率相同, $p_\omega = 1/(|\Omega|)$
- $q_{i\omega}$ 场景 ω 中, 航程 i 产生的废弃物量, 满足 $q_{0\omega} := q_{|P|\omega}$, $q_{i\omega} < V$

决策变量

- $x_{i\omega}^c$ 场景 ω 中, 在港口 i 以签约价格处理的废弃物量
- $x_{i\omega}^r$ 场景 ω 中, 在港口 i 以常规价格处理的废弃物量
- $y_{i\omega}$ 场景 ω 中, 邮轮离开港口 i 时, 船上的废弃物量, $y_{0\omega} := y_{|P|\omega}$
- $z_{i\omega}$ 0-1 变量, 在场景 ω 中, 表示若邮轮在未签约港口 i 处理废弃物为 1, 否则为 0

$$[M2] \min \sum_{i \in P} \beta_i (\underline{a}_i + \underline{b}_i A_i) + \sum_{\omega \in \Omega} p_\omega \left[\sum_{i \in P} \underline{b}_i (x_{i\omega}^c - A_i)^+ + (z_{i\omega} \bar{a}_i + \bar{b}_i x_{i\omega}^r) \right], \quad (12)$$

s.t.

$$y_{i\omega} + q_{i\omega} \leq V, \quad \forall i \in P, \omega \in \Omega, \quad (13)$$

$$x_{i\omega}^c + x_{i\omega}^r + y_{i\omega} = y_{i-1,\omega} + q_{i-1,\omega}, \quad \forall i \in P \setminus \{1\}, \omega \in \Omega, \quad (14)$$

$$x_{1\omega}^c + x_{1\omega}^r = y_{|P|\omega} + q_{|P|\omega}, \quad \forall \omega \in \Omega, \quad (15)$$

$$x_{i\omega}^c \leq V \beta_i, \quad \forall i \in P, \omega \in \Omega, \quad (16)$$

$$x_{i\omega}^r \leq V z_{i\omega}, \quad \forall i \in P, \omega \in \Omega, \quad (17)$$

$$z_{i\omega} \leq 1 - \beta_i, \quad \forall i \in P, \omega \in \Omega, \quad (18)$$

$$\beta_i, z_{i\omega} \in \{0, 1\}, \quad \forall i \in P, \omega \in \Omega, \quad (19)$$

$$x_{i\omega}^c, x_{i\omega}^r, y_{i\omega} \geq 0, \quad \forall i \in P, \omega \in \Omega. \quad (20)$$

目标函数 (12) 表示在不确定环境下, 最小化邮轮处理废弃物的期望成本. 成本包括三部分: 邮轮公司与港口签订长期合约的最低处理量成本, 超出最低废弃物处理量部分的成本, 以及未与港口签约的废弃物处理成本. 约束 (13) 至约束 (15) 分别为废弃物载量约束、连续两航程关联约束、废弃物清空约束. 约束 (16) 至 (18) 为决策变量之间关联约束. 目标函数 (12) 存在非线性部分 “ $(\cdot)^+$ ”, 参考 2.1 中的方法线性化为:

$$\min \sum_{i \in P} \beta_i (\underline{a}_i + \underline{b}_i A_i) + \sum_{\omega \in \Omega} p_\omega \left[\sum_{i \in P} \underline{b}_i \pi_{i\omega} + (z_{i\omega} \bar{a}_i + \bar{b}_i x_{i\omega}^r) \right], \quad (21)$$

新增约束:

$$\pi_{i\omega} \geq x_{i\omega}^c - A_i \quad \forall i \in P, \omega \in \Omega, \quad (22)$$

$$\pi_{i\omega} \geq 0 \quad \forall i \in P, \omega \in \Omega. \quad (23)$$

2.3 鲁棒优化模型

随机规划模型 [M2] 需要大量历史数据, 用于估计不确定废弃物产生量的明确概率分布. 然而, 在多数情况下较难获取到足够的历史数据. 因此, 考虑到随机规划模型的限制, 提出了只需要不确定参数区间的鲁棒优化模型, 用于优化不确定环境下邮轮废弃物处理的最坏情况. 鲁棒优化模型新增参数如下:

参数

- $[\underline{q}_i, \bar{q}_i]$ 航程 i 随机产生废弃物量的范围
- γ 保守参数, 满足 $0 \leq \gamma \leq 1$

为了构建鲁棒优化模型与上述随机规划模型之间的联系, q_i 和 \bar{q}_i 分别设定为随机规划模型 $|\Omega|$ 个场景中每段航程产生废弃物的最小值和最大值, 即: $\min_{\omega \in \Omega} q_{i\omega}, \max_{\omega \in \Omega} q_{i\omega}, i \in P, \omega \in \Omega$. 传统的鲁棒模型是对最坏情况进行优化, 使得到的解过于保守. 因此, 参考 Zhen 等^[18] 的研究, 本研究定义参数 γ 控制解的保守程度. γ 的值越大, 解的保守程度就越大; 当 $\gamma = 1$ 时, 所提的模型与传统的鲁棒优化模型相同.

$$[\text{M3}] \min \sum_{i \in P} \beta_i (a_i + b_i A_i) + Z(\mathbf{B}), \quad (24)$$

s.t.

$$Z(\mathbf{B}) = \max_q Q(\mathbf{B}, \mathbf{q}), \quad (25)$$

$$\text{s.t. } q_i \leq q_i \leq \bar{q}_i \quad \forall i \in P, \quad (26)$$

$$\frac{1}{|P|} \sum_{i \in P} \frac{(q_i - \underline{q}_i)}{(\bar{q}_i - \underline{q}_i)} \leq \gamma, \quad (27)$$

$$Q(\mathbf{B}, \mathbf{q}) = \min_{x_i^c, x_i^r, y_i, z_i} \sum_{i \in P} [b_i(x_i^c - A_i)^+ + (\bar{a}_i z_i + \bar{b}_i x_i^r)]. \quad (28)$$

s.t. 约束 (2)~(8)

鲁棒优化模型为三阶段模型, 该模型的第三阶段, 目标为最小化长期合同最低处理量以外的成本 $Q(\mathbf{B}, \mathbf{q})$. \mathbf{B} 表示 β_i 的向量, \mathbf{q} 表示 q_i 的向量, $\forall i \in P$. 模型的第二阶段通过约束 (26) 和 (27) 优化最坏情况, 即 $Q(\mathbf{B}, \mathbf{q})$ 中的最大成本, 目标函数为 $Z(\mathbf{B})$. 最后, 本文通过求解模型的第一阶段获得最小总成本, 包括 $Z(\mathbf{B})$ 和合同涉及最低废弃物处理的成本.

目标函数 (28) 中仍然存在非线性部分 “ $(\cdot)^+$ ”, 参考 2.1 中的方法线性化为:

$$Q(\mathbf{B}, \mathbf{q}) = \min_{x_i^c, x_i^r, y_i, z_i} \sum_{i \in P} [b_i \pi_i + (\bar{a}_i z_i + \bar{b}_i x_i^r)], \quad (29)$$

新增约束: 约束 (10), (11).

在某种程度上, 对邮轮公司而言鲁棒优化模型是随机规划模型的替代方案, 旨在通过控制参数 γ 来优化最坏情况和控制解的保守程度.

3 算法设计

3.1 禁忌搜索算法

大规模随机规划模型由于其计算复杂度较高, 难以在短时间内由求解器 (例如: CPLEX) 进行求解. 因此, 本文采用了禁忌搜索算法 (tabu search, TS), 该算法能够在合理时间内求解大规模随机规划模型. 禁忌搜索算法属于邻域搜索算法, 通过引入灵活的存储结构和禁忌准则来避免迂回搜索, 并通过藐视准则赦免一些被禁忌的优良解, 进而保证多样化的有效探索以最终实现全局优化.

首先, 生成初始解作为全局寻优的基础, 本研究随机生成 50 个可行解, 从中选择模型 [M2] 中目标函数值最小的可行解作为初始解, 即 $\mathbf{B}_0 = \{\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_{|P|}\}$. 然后, 针对变量 β_i 进行邻域变化, 随机生成两个不同的港口 (即港口 i 和港口 j), 将 β_i 和 β_j 的值变换为 $(1 - \beta_i)$ 和 $(1 - \beta_j)$. 禁忌表中记录索引 i 和 j , 产生邻域解, 之后的迭代不再选择, 以避免迂回搜索, 陷入局部最优, 从而向更优的解空间探寻.

3.2 粒子群算法

本文的三阶段鲁棒优化模型 [M3] 求解复杂度高, 第三阶段是第二阶段的子问题, 第二阶段嵌套在第一阶段中. 考虑到优化复杂性, 对于港口签约的 0-1 决策变量 $\beta_i, i \in P$, 本文采用穷举的方法; 而粒子群优化算法 (particle swarm optimization, PSO) 被用于搜索最坏情况下产生的废弃物量. 粒子群算法属于群体仿生类算法, 通过在群体中的个体合作和信息共享来寻找一个好的解. 对于第 t 次迭代的粒子 n , 其位置表示为 $\mathbf{q}_n^t = (q_{n1}^t, q_{n2}^t, \dots, q_{n|P|}^t)$, 速度表示为 $\mathbf{v}_n^t = (v_{n1}^t, v_{n2}^t, \dots, v_{n|P|}^t)$. 同时, 粒子 n 的个体最优位置定义为 $\mathbf{p}_n^t = (p_{n1}^t, p_{n2}^t, \dots, p_{n|P|}^t)$; 直到第 t 次群体的全局最优位置定义为 $\mathbf{g}^t = (g_1^t, g_2^t, \dots, g_{|P|}^t)$. 在第 $t+1$ 次迭代时, 粒子的速度和位置更新公式如下所示:

$$v_{ni}^{t+1} = \omega^t v_{ni}^t + c_1 r_1 (p_{ni}^t - q_{ni}^t) + c_2 r_2 (g_i^t - q_{ni}^t), \quad (30)$$

$$q_{ni}^{t+1} = q_{ni}^t + v_{ni}^{t+1}, \quad (31)$$

Algorithm 1: 禁忌搜索算法

- 1 设 B_{cbest} 为当前最优解, B_{gbest} 为全局最优解, t 为迭代次数, \underline{t} 为 B_{gbest} 连续未改进的次数. 初始化禁忌表, 设 $L \leftarrow \emptyset$. 集合 L 的长度限制为 l , 即 $|L| \leq l$
- 2 初始化一个可行解 B_0 , 将其作为当前最优解 (即 B_{cbest}) 和全局最优解 (B_{gbest}). 设 $t \leftarrow 1, \underline{t} \leftarrow 0$
- 3 生成 B_{cbest} 的 20 个邻域解, 组成集合 B^t , 即 $B^t = \{B_1^t, B_2^t, \dots, B_{20}^t\}$
- 4 根据模型 [M2], 计算新的邻域解的目标函数值
- 5 更新 B_{cbest} 和 B_{gbest} :
 - 1) 从集合 B^t 中选择目标函数值最小的邻域解 (即 \hat{B}^t). ①若 \hat{B}^t 中改变的港口索引不在禁忌表 L 中, 则 $B_{\text{cbest}} \leftarrow \hat{B}^t$, 把对应的索引加入 L ; ②若 \hat{B}^t 中改变的港口索引在禁忌表 L 中, 且 B_{gbest} 的目标函数值大于 \hat{B}^t 的目标函数值, 则 $B_{\text{cbest}} \leftarrow \hat{B}^t$; ③否则, 将 \hat{B}^t 从集合 B^t 中去掉, 并重复步骤 5 1);
 - 2) 若 $|L| > l$, 将最先加入 L 中改变的港口索引从集合中去掉;
 - 3) 若 B_{gbest} 的目标函数值大于 B_{cbest} 的目标函数值, 则使 $B_{\text{gbest}} \leftarrow B_{\text{cbest}}$;
 - 4) 若 B_{gbest} 没有改变, 使 $\underline{t} \leftarrow \underline{t} + 1$; 否则 $\underline{t} \leftarrow 0$
- 6 若 $\underline{t} \leq 5$ 并且 $t \leq 10$, 使得 $t \leftarrow t + 1$ 并转到步骤 3; 否则, 返回最优解 B_{gbest} 及其目标函数值, 算法停止运行

其中 ω^t 表示惯性因子并反映粒子的运动习惯. c_1 和 c_2 是学习因子, 也称加速常数, 用来平衡个体最优位置和全局最优位置的收敛速度. 为了避免陷入局部最优, 生成服从均匀分布的 $[0, 1]$ 范围内的随机数 r_1 和 r_2 .

应用于鲁棒优化模型的粒子群算法求解过程如下: 穷举所有合同签订的解 (即 B). 对于每个给定的 B , 粒子群优化算法搜索最坏情况下的产生废弃物量 q , 用 CPLEX 求解目标函数 $Q(B, q)$ 得到每个粒子的适应度值. 然后, 粒子群优化算法可求解出模型 $Z(B)$ 的值, 在此基础上易求得第一层目标函数 [M3]. 粒子群算法框架如下:

Algorithm 2: 粒子群算法

- 1 定义 c_1 和 c_2 为学习因子, r_1 和 r_2 为 $[0, 1]$ 的随机数, t 为迭代数量, T 为最大迭代次数, N 为产生的粒子的集合, \bar{v}_n 和 \underline{v}_n 分别为粒子 n 的最大和最小速度, \bar{q}_n 和 \underline{q}_n 分别是粒子 n 的最大和最小位置
- 2 基于约束 (27), 初始化 $|P|$ 维的 $|N|$ 个粒子的位置和速度, 即 q_n^0 和 $v_n^0, n \in N$
- 3 根据模型 [M3] 中的 $Q(B, q_n^0)$ 求解粒子 n 的适应度值
- 4 计算个体最优 $p_n^0, n \in N$ 和全局最优 g^0 , 设置 $t \leftarrow 0$
- 5 **while** $t + 1 \leq T$ **do**
- 6 1) 根据公式 (30)、(31) 分别计算新的速度 v_{ni}^{t+1} 和新的位置 $q_{ni}^{t+1}, n \in N, i \in P$;
- 7 2) 在 i 维中, 若粒子 n 的位置或速度超过各自的范围, 则: ①若 $q_{ni}^{t+1} < \underline{q}_n$, 令 $q_{ni}^{t+1} \leftarrow \underline{q}_n$; 若 $q_{ni}^{t+1} > \bar{q}_n$, 令 $q_{ni}^{t+1} \leftarrow \bar{q}_n$; ②若 $v_{ni}^{t+1} < \underline{v}_n$, 令 $v_{ni}^{t+1} \leftarrow \underline{v}_n$; 若 $v_{ni}^{t+1} > \bar{v}_n$, 令 $v_{ni}^{t+1} \leftarrow \bar{v}_n$
- 8 3) 若 i 维粒子 n , 不满足约束 (27), v_{ni}^{t+1} 和 q_{ni}^{t+1} 则根据公式 (30)、(31) 更新, 并转到上一步
- 9 4) 根据 $Q(B, q_n^{t+1})$ 计算粒子 n 的适应度值, $n \in N$
- 10 5) 更新 p_n^{t+1} 和 $g^{t+1}, n \in N$, 设置 $t \leftarrow t + 1$
- 11 **end**
- 12 返回最优解 g^t 和其目标函数值 $Q(B, q_n^{t+1})$, 且算法停止运行

4 数值实验

本节进行数值实验来验证所提模型的有效性和所提算法的效率. 相关程序由 C# 语言编写, 调用版本号为 12.6.1 的 CPLEX, 在配置为 Intel(R), 2.4 GHz, 8.00 GB 内存的电脑上运行. MARPOL 73/78 公约提及, 船舶每天会产生 8 吨的油污舱底水、每人每天 120 升至 130 升的灰水以及 20 升至 40 升的污水. 同时, 一艘载有 3,000 名乘客的船舶每周将产生 50 吨至 70 吨的固体废弃物. 假设产生的废弃物量均是估算的最小值,

则一艘邮轮航行一周产生的废弃物量可以粗略的估算为 1,086 吨. 考虑到测试实验中存在的多种情况, 结合皇家加勒比邮轮的运营数据^[26], 参考 MARPOL 73/78 公约估算数据以及港口费率表^[27] 中的废弃物处理费率, 相关实验参数设置如表 1 所示, 详述如下:

表 1 实验参数设置

参数	分布类型	分布
\bar{a}_i	均匀分布 $U(a, b)$	$U(100, 200)$
\underline{a}_i	均匀分布 $U(a, b)$	$U(60, 120)$
\bar{b}_i	均匀分布 $U(a, b)$	$U(25, 50)$
\underline{b}_i	均匀分布 $U(a, b)$	$U(15, 30)$
V	不适用	$7 \times$ 平均乘客数 $\times 6$
A_i	不适用	$7 \times$ 平均乘客数 $\times 3$
q_i	正态分布 $N(\mu, \sigma)$	$N(\text{平均时间} \times \text{平均乘客数} \times 6, \mu/12)$
每段航行时间	均匀分布 $U(a, b)$	$U(1, 3)$

4.1 随机规划模型相关数值实验

为了测试禁忌搜索算法应用于随机规划模型的效果, 本研究分别针对中小规模算例和大规模算例进行了三组实验. 表 2 中的结果表明: 在中小规模下, 禁忌搜索算法求得的目标值与最优值之间的优化间隙并不明显, 平均优化间隙约为 0.01%. 虽然 CPLEX 平均 CPU 计算时间与禁忌搜索算法的较为接近, 但是随着问题规模的增加, CPLEX 求解时间呈指数型增长, 而禁忌搜索算法求解时间增幅不大. 如表 3 所示: 禁忌搜索算法在较短的时间内能够求解大规模算例, 平均计算时间约 10 分钟, 每一个算例的计算时间不超过 20 分钟. 但是 CPLEX 求解却非常耗时甚至在三个小时内无法求解, 尤其当港口数超过 16 且场景数超过 500 时. 因此, 禁忌搜索算法具有更高的求解随机规划模型的效率.

表 2 禁忌搜索算法在随机规划模型中小规模计算结果

算例 ID	CPLEX		禁忌搜索算法		
	Obj _{CPLEX} (元)	时间 (s)	Obj _{TS} (元)	时间 (s)	优化间隙 (%)
6-200-S1	548,581	13	548,581	34	0.00
6-200-S2	502,523	15	503,112	20	0.12
6-200-S3	599,381	28	599,381	88	0.00
6-200-S4	626,768	23	626,768	49	0.00
6-200-S5	561,820	4	561,837	32	0.00
8-200-S1	975,022	41	975,022	111	0.00
8-200-S2	882,882	36	882,882	67	0.00
8-200-S3	946,664	77	946,664	61	0.00
8-200-S4	993,675	41	993,691	70	0.00
8-200-S5	737,875	59	737,875	149	0.00
10-400-S1	1,320,664	622	1,320,664	352	0.00
10-400-S2	1,343,649	495	1,343,649	232	0.00
10-400-S3	1,108,743	484	1,108,743	354	0.00
10-400-S4	1,013,792	206	1,013,792	201	0.00
10-400-S5	1,188,306	167	1,188,306	127	0.00
平均值	890,023	154	890,064	130	0.01

注: 1) 算例“6-200-S1”: 6 个港口, 200 个场景, 第 1 个算例. 2) 优化间隙 = $(\text{Obj}_{\text{TS}} - \text{Obj}_{\text{CPLEX}}) / \text{Obj}_{\text{CPLEX}}$.

场景反映了随机参数 (每段航程产生的废弃物量) 的可能值. 所收集的场景相关信息越多, 计算结果越准确. 不同的场景集合可能会导致随机规划模型产生不同的解, 同时, 即使是具有相同数量场景的集合, 随机规划模型的结果也会存在差异. 本文分别在“6 个港口”和“8 个港口”的环境下, 测试了 6 组 (即 50、100、200、500、1,000 和 2,000) 不同场景数量的实验, 每组有 10 个不同的算例. 如表 4 和图 2 所示, 当场景数量增加时, CPU 计算时间呈指数增长, 标准差、极差明显减小, 这很好地验证了随机规划模型的收敛性.

表 3 禁忌搜索算法在随机规划模型中大规模计算结果

算例 ID	CPLEX		禁忌搜索算法		
	Obj _{CPLEX} (元)	时间 (s)	Obj _{TS} (元)	时间 (s)	优化间隙 (%)
12-400-S1	1,964,897	763	1,964,897	374	0.00
12-400-S2	1,890,834	866	1,890,834	552	0.00
12-400-S3	2,280,133	676	2,280,133	481	0.00
12-400-S4	1,948,514	559	1,948,514	99	0.00
12-400-S5	1,739,009	1,107	1,739,009	330	0.00
14-500-S1	2,573,231	2,348	2,573,231	549	0.00
14-500-S2	2,778,558	2,554	2,778,558	905	0.00
14-500-S3	3,174,711	6,330	3,206,365	401	1.00
14-500-S4	2,033,076	4,262	2,036,484	558	0.17
14-500-S5	2,113,499	2,747	2,113,499	320	0.00
16-500-S1	N.A.	>10800	3,079,330	880	N.A.
16-500-S2	N.A.	>10800	3,802,352	345	N.A.
16-500-S3	N.A.	>10800	3,849,877	764	N.A.
16-500-S4	N.A.	>10800	4,066,510	649	N.A.
16-500-S5	N.A.	>10800	3,712,447	671	N.A.
平均值	-	-	2,736,136	525	-

表 4 不同场景下随机规划模型的求解结果

问题规模	场景数	平均值	标准差	最小值	最大值	极差 (最大值 - 最小值)	平均 CPU 时间 (s)
6 个港口	50	578,167	127,290	372,161	774,816	402,656	3
	100	567,360	102,399	379,874	720,855	340,982	9
	200	564,090	115,060	392,611	737,093	344,482	28
	500	540,583	101,912	308,259	639,404	331,146	332
	1,000	555,709	100,815	389,921	714,864	324,943	2,109
	2,000	574,214	97,086	415,787	685,355	269,568	4,797
8 个港口	50	854,067	223,398	432,882	1,310,270	877,389	5
	100	905,389	240,073	368,279	1,222,033	853,754	15
	200	855,137	219,432	470,643	1,253,688	783,045	40
	500	861,287	210,663	442,532	1,204,487	761,955	1,462
	1,000	807,804	210,832	454,075	1,123,263	669,188	4,326

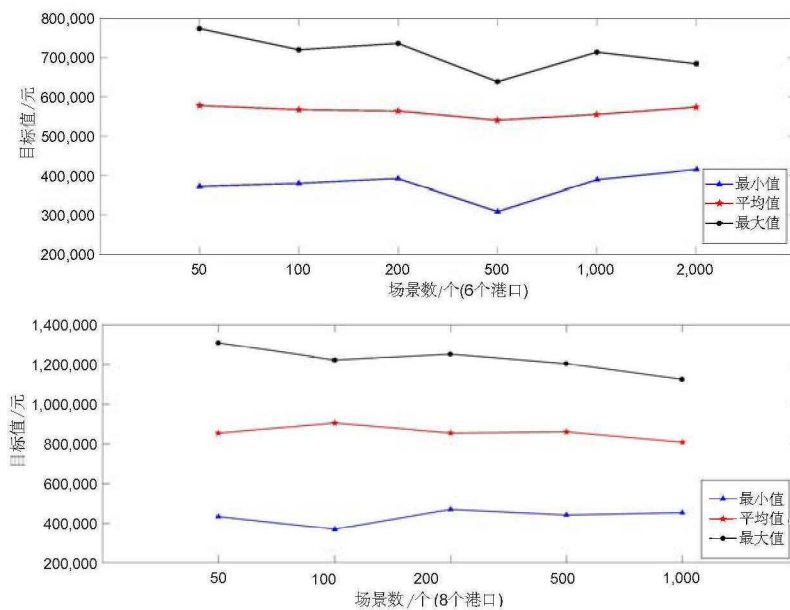


图 2 随着场景数量增加随机规划模型的收敛性

此外, 将随机规划模型与确定性模型进行比较, 可以检验本研究中随机解的价值. 为使实验具可比性, 确定性模型被设定为一个特殊的随机模型, 每段航程产生废弃物量为所有场景的平均值. 具体求解过程如下:

首先求解随机规划模型 [M2] 得到目标值 $Obj_{[M2]}$; 然后求解确定型模型, 将求解出的合同签订决策代入到随机模型中求解最优值 $Obj_{[M1]}$.

如表 5 所示, 本文进行了 10 个算例数值实验来验证随机解的价值, 包括“4 个港口, 50 个场景”和“6 个港口, 500 个场景”. $Obj_{[M2]}$ 和 $Obj_{[M1]}$ 的平均优化间隙为 3.05%, 所有算例中 $Obj_{[M2]}$ 都优于模型 $Obj_{[M1]}$.

表 5 随机解的价值

算例	$Obj_{[M2]}$	$Obj_{[M1]}$	优化间隙 (%)	时间 (s)
4-50-S1	302,038	313,740	3.73	1
4-50-S2	339,401	346,504	2.05	2
4-50-S3	282,013	290,511	2.93	1
4-50-S4	353,815	359,348	1.54	1
4-50-S5	211,857	218,367	2.98	1
6-500-S1	566,964	588,069	3.59	3
6-500-S2	695,336	720,517	3.49	4
6-500-S3	473,184	488,382	3.11	5
6-500-S4	460,817	476,901	3.37	3
6-500-S5	635,839	660,005	3.66	6
平均值	432,126	446,234	3.05	3

注: 优化间隙 = $(Obj_{[M1]} - Obj_{[M2]}) / Obj_{[M2]}$.

为了进一步验证随机规划模型的有效性, 提出了在现实中普遍使用的较低可变成成本合同策略 (lower variable cost contract, LVCC) 与之进行对比实验. LVCC 策略求解步骤如下:

1) 计算邮轮公司签订长期合同的港口平均数量, $K = \lceil \frac{\sum_{i \in P, \omega \in \Omega} q_{i\omega}}{V(\Omega)} \rceil$.

2) 升序排列所有港口处理废弃物的单位可变成本, 选择前 K 个港口与其签订长期合同.

将 LVCC 策略的解代入模型 [M2], 并将求得的目标值与禁忌搜索算法的目标值进行比较. 如表 6 所示, LVCC 策略与禁忌搜索算法的计算结果平均优化间隙为 26.01%, 说明禁忌搜索算法与 LVCC 策略相比, 能够节约 26.01% 的成本.

4.2 鲁棒优化模型相关数值实验

为了验证粒子群算法的有效性, 本节提出了高成本高污染策略 (higher cost more waste, HCMW) 与之比较. HCMW 策略是在考虑保守程度的情况下, 构建一个关于每条航程所产生废弃物量的很差的情况. 首先, 选择具有最大单位可变成本的港口, 考虑到约束 (26) 和 (27), 使港口的前一个航程产生尽可能多的废弃物, 并将该港口从港口集合中删除. 然后重复该步骤, 直到港口集合为空集.

策略: HCMW 策略

```

1 设置  $R = \gamma$ , 定义两个集合:  $S, S'$ , 其中  $S = P, S' = \emptyset$ 
2 while  $S \neq \emptyset$  do
3   在集合  $S$  中选择单位可变成本最大的港口  $i$ 
4   if  $R \geq \frac{1}{|P|}$  then
5      $q_{i-1} \leftarrow \bar{q}_{i-1}$ 
6   else
7      $q_{i-1} \leftarrow R(\bar{q}_{i-1} - \underline{q}_{i-1})|P| + \underline{q}_{i-1}$ 
8   end
9   设置  $S = S \setminus \{i\}, S' = S' \cup \{i\}$ , 并且更新  $R \leftarrow \gamma - \frac{1}{|P|} \sum_{i \in S'} \frac{q_{i-1} - \underline{q}_{i-1}}{\bar{q}_{i-1} - \underline{q}_{i-1}}$ 
10 end
11 返回  $q_i, i \in P$ , 并停止运行

```

表 6 随机规划模型结果比较分析

问题规模	算例	Obj _{LVCC}	Obj _{TS}	优化间隙 (%)	时间 (s)
6 个港口 500 个场景	6-500-S1	602,439	602,439	0.00	94
	6-500-S2	555,691	555,691	0.00	100
	6-500-S3	1,148,605	724,121	36.96	118
	6-500-S4	735,833	638,546	13.22	229
8 个港口 500 个场景	8-500-S1	2,275,064	1,106,379	51.37	274
	8-500-S2	842,488	821,802	2.46	279
	8-500-S3	1,527,746	1,161,082	24.00	275
	8-500-S4	1,596,800	1,204,487	24.57	110
10 个港口 500 个场景	10-500-S1	2,543,194	1,513,859	40.47	317
	10-500-S2	2,019,175	1,220,461	39.56	177
	10-500-S3	1,351,275	923,165	31.68	424
	10-500-S4	1,286,706	1,104,873	14.13	145
12 个港口 500 个场景	12-500-S1	3,298,989	2,215,390	32.85	444
	12-500-S2	2,454,991	2,118,240	13.72	502
	12-500-S3	2,709,933	1,666,375	38.51	605
	12-500-S4	3,195,551	2,343,287	26.67	208
14 个港口 500 个场景	14-500-S1	4,589,613	2,701,235	41.14	369
	14-500-S2	5,306,504	2,816,794	46.92	261
	14-500-S3	3,131,615	3,006,245	4.00	475
	14-500-S4	3,313,468	2,052,155	38.07	258
平均值	-	2,224,284	1,524,831	26.01	283

注: 优化间隙 = (Obj_{LVCC} - Obj_{TS})/Obj_{LVCC}.

在此基础上, 本文进行了小规模鲁棒优化模型数值实验, 结果如表 7 所示. 表 7 中三个目标函数值的具体求解方式如下:

1) Obj_q: 穷举所有 B , 根据 HCMW 策略确定每组穷举的 B 对应的 q , 从模型 [M3] 中删除约束 (26) 和 (27), CPLEX 求解目标函数 (29). 获得 B 的最优解, 求得模型 [M3] 的目标函数值 Obj_q.

2) Obj_B: 将从 (1) 中求得的 B 的最优解代入到鲁棒模型中, 使用粒子群算法求解模型, 得到的目标函数值 Obj_B.

3) Obj_{PSO}: 使用粒子群算法直接求解模型 [M3], 决策 B 和 q , 得到目标函数值 Obj_{PSO}.

表 7 粒子群算法应用于鲁棒优化模型的表现

问题规模	算例	Obj _q	Obj _B	Obj _{PSO}	优化间隙 1 (%)	优化间隙 2 (%)
4 个港口 $\gamma=0.4$	4-R1	247,058	290,047	197,256	14.82	31.99
	4-R2	227,354	234,147	229,205	2.90	2.11
	4-R3	296,244	350,897	276,267	15.58	21.27
	4-R4	278,397	353,256	236,317	21.19	33.10
6 个港口 $\gamma=0.6$	6-R1	1,124,183	1,168,282	1,048,969	3.77	10.21
	6-R2	1,367,325	1,790,681	1,295,346	23.64	27.66
	6-R3	2,169,027	2,231,736	2,120,270	2.81	4.99
	6-R4	1,995,860	2,034,516	1,917,215	1.90	5.77
8 个港口 $\gamma=0.8$	8-R1	2,922,097	3,032,655	2,566,925	3.65	15.36
	8-R2	3,501,704	3,597,762	3,095,617	2.67	13.96
	8-R3	1,995,666	2,094,314	1,407,378	4.71	32.80
	8-R4	2,578,053	2,678,065	2,116,149	3.73	20.98
平均值	-	1,558,581	1,654,697	1,375,576	8.45	18.35

注: 1) 算例“4-R1”: 4 个港口, 第 1 个算例.

2) 优化间隙 1=(Obj_B - Obj_q)/Obj_B; 优化间隙 2=(Obj_B - Obj_{PSO})/Obj_B.

当选择签约的港口相同时, Obj_q 小于相应的 Obj_B, 并且平均优化间隙为 8.45%, 意味着粒子群优化算

法比 HCMW 策略找到更差情况的效率更高。Obj_{PSO} 小于相应的 Obj_B, 并且平均优化间隙为 18.35%, 意味着纯粒子群算法比 HCMW 策略能更好地优化搜索到的最坏情况。因此, 可以得出结论, 粒子群算法能有效求解鲁棒优化模型。

4.3 实验小结

通过本章数值实验, 总结的邮轮优化的模型和算法选择方面的建议如下:

1) 当邮轮公司拥有大量历史数据, 可以获得废弃物产生量的概率分布时, 采用随机规划模型进行优化决策; 当较难获取足够数据, 只能确定废弃物产生量的取值区间时, 采用鲁棒优化模型进行优化决策更为有效。

2) 针对 10 个港口, 400 个场景以下的小规模随机规划决策, 建议采用 CPLEX 求解, 可以在合理时间内获得最优方案; 针对大规模的问题决策, 则建议采用禁忌搜索算法求解, 它在求解时间和求解质量之间取得了很好的平衡。此外, 建议邮轮公司不再采用传统的、普遍使用的 LVCC 策略, 其方案远劣于本文所提出的优化模型及算法。

3) 邮轮公司采用鲁棒优化模型决策方案, 可以更好的优化可能出现的最坏情况。此外, 如果决策者是乐观型, 可以设置较大的保守参数, 反之则可设置较小的保守参数。

5 结束语

本文研究了在不确定每条航段产生废弃物量的情况下, 邮轮废弃物处理优化问题。假设已知每段航程上产生的废弃物量, 提出了邮轮废弃物处理优化问题的确定性模型。针对现实中废弃物产生量的不确定性, 提出了考虑签订长期废弃物处理合同的随机规划模型和鲁棒优化模型。随后提出了两种启发式算法来求解模型。数值实验结果验证了所提模型的有效性和所提算法的效率。通过与相关领域的最新研究比较, 本文贡献主要包含如下三点:

就学术方面而言, 本文考虑了每段航程产生废弃物数量的不确定性, 与港口签订长期服务合同等现实因素, 开创性的将长期合同引入邮轮排污决策优化问题。同时, 根据邮轮排污决策优化问题的特性, 在随机规划模型的基础上, 进一步提出了鲁棒优化模型, 基本能够处理该问题的各个情况。本文提出的禁忌搜索算法和粒子群优化算法分别用于求解大规模情况下的随机规划模型和鲁棒优化模型。大量的数值实验表明: 所提算法能够在合理时间内求得较好的解, 随机规划模型可以显著节省排污总成本, 鲁棒优化模型能够优化最坏情况下的邮轮排污决策。

1) 本文探究了一个新的邮轮绿色运营领域的问题。现有的邮轮管理相关领域的研究文献多聚焦于邮轮产业发展与管理的定性研究, 很少有研究关注邮轮废弃物处理优化问题, 且对现实情况的考虑不充分。本文探究了一个新的邮轮绿色运营领域的废弃物处理问题, 考虑将废弃物处理决策与长期合同签订决策相结合, 开展了量化决策优化问题研究。2) 本文为了处理每段航程产生的废弃物量的不确定性, 针对不同的信息获取情况, 构建了两个模型: 随机规划模型, 适用于废弃物产生量概率分布已知的情况; 鲁棒优化模型, 适用于只知道上下界的有限信息的问题, 在现实中的应用更加广泛。此外, 鲁棒优化模型对最坏情况下的废弃物处理决策是有效的, 其保守程度也是可以控制的。3) 本文定制化禁忌搜索算法和粒子群算法分别求解随机模型和鲁棒模型中的大规模问题。通过数值实验, 证明了所提模型的有效性和算法的效率, 此外与简单的策略相比, 所提的随机规划模型平均可节省 26% 的废弃物处理成本。考虑到邮轮公司每年可能花费数百万美元用于邮轮处理废弃物, 因此本文研究结果可能对邮轮公司降低运营成本具有潜在的社会经济意义。

本文对邮轮废弃物处理优化问题做出了一定的贡献, 但该研究领域还有待进一步扩充和深入研究: 本研究只考虑了一次航行中在相同港口进行邮轮废弃物处理优化。但是现实情况通常更加复杂, 邮轮产品受到某些因素的影响, 邮轮在同一航线的多次航行中, 处理废弃物港口决策可能会发生变化, 这将会使该问题变得更加复杂。这些复杂的现实因素将会在后续研究建模中做进一步分析和扩展。

参考文献

- [1] Cruise Market Watch. 2018 Worldwide cruise line market share[EB/OL]. [2020-02-01]. <https://cruisemarketwatch.com/market-share/>.

- [2] U.S. Beachapedia. Cruise ship pollution[EB/OL]. [2020-02-01]. http://www.beachapedia.org/Cruise_Ship_Pollution.
- [3] 中华人民共和国生态环境部. 2018年中国海洋生态环境状况公报 [EB/OL]. [2020-02-01]. <http://hys.mee.gov.cn/dtxx/201905/P020190529532197736567.pdf>.
- [4] Koza D F. Liner shipping service scheduling and cargo allocation[J]. *European Journal of Operational Research*, 2019, 275(3): 897–915.
- [5] Zhen L, Hu Z, Yan R, et al. Route and speed optimization for liner ships under emission control policies[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2020, 110: 330–345.
- [6] 陈康, 徐鹏飞, 杨忠振. 考虑货主选择惯性的班轮运输系统优化模型 [J]. *管理科学学报*, 2017, 20(7): 104–114.
Chen K, Xu P F, Yang Z Z. Container shipping system design considering the shipper's choice inertia[J]. *Journal of Management Sciences in China*, 2017, 20(7): 104–114.
- [7] 邢玉伟, 杨华龙, 马雪菲. 差异化定价策略下的远洋洲际班轮航速与航线配船优化 [J]. *系统工程理论与实践*, 2018, 38(12): 232–244.
Xing Y W, Yang H L, Ma X F. Optimization of containership sailing speed and fleet deployment for continental ocean liner based on freight rate differentiation strategy[J]. *Systems Engineering — Theory & Practice*, 2018, 38(12): 232–244.
- [8] Véronneau S, Roy J, Beaulieu M. Cruise ship suppliers: A field study of the supplier relationship characteristics in a service supply chain[J]. *Tourism Management Perspectives*, 2015, 16: 76–84.
- [9] Wang K, Wang S A, Zhen L, et al. Cruise service planning considering berth availability and decreasing marginal profit[J]. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2017, 95: 1–18.
- [10] Zhen L, Li M, Hu Z, et al. The effects of emission control area regulations on cruise shipping[J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2018, 62: 47–63.
- [11] Dixon D, Hughes G. Coastal cruise ship waste management[J]. *Marine Technology*, 2011, 37(4): 216–222.
- [12] Johnson D. Environmentally sustainable cruise tourism: A reality check[J]. *Marine Policy*, 2002, 26(4): 261–270.
- [13] Butt N. The impact of cruise ship generated waste on home ports and ports of call: A study of Southampton[J]. *Marine Policy*, 2007, 31(5): 591–598.
- [14] Carpenter A, Macgill S M. The EU Directive on port reception facilities for ship-generated waste and cargo residues: The results of a second survey on the provision and uptake of facilities in North Sea ports[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2005, 50(12): 1541–1547.
- [15] Sanches V L, Aguiar M R D C M, de Freitas M A V, et al. Management of cruise ship-generated solid waste: A review[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2020, 151: 110785. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2019.110785>.
- [16] 曹策俊, 李从东, 屈挺, 等. 救援物资跨区域调度双层规划模型 —— 考虑幸存者感知满意度和风险可接受度 [J]. *管理科学学报*, 2019, 22(9): 113–128.
Cao C J, Li C D, Qu T, et al. A bi-level programming model for relief trans-regional scheduling: Taking into consideration survivors' perceived satisfaction and risk acceptability[J]. *Journal of Management Science in China*, 2019, 22(9): 113–128.
- [17] 于冬梅, 高雷阜, 赵世杰. 不确定与损毁情景下可靠性设施选址鲁棒优化模型与算法研究 [J]. *系统工程理论与实践*, 2019, 39(2): 498–508.
Yu D M, Gao L F, Zhao S J. Robust optimization model and algorithm for reliability facility location under uncertainty and failure scenarios[J]. *Systems Engineering — Theory & Practice*, 2019, 39(2): 498–508.
- [18] Zhen L. Tactical berth allocation under uncertainty[J]. *European Journal of Operational Research*, 2015, 247(3): 928–944.
- [19] Shu J, Song M. Dynamic container deployment: Two-stage robust model, complexity, and computational results[J]. *INFORMS Journal on Computing*, 2014, 26(1): 135–149.
- [20] Wang S A, Meng Q. Sailing speed optimization for container ships in a liner shipping network[J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2012, 48(3): 701–714.
- [21] Qi X T, Song D P. Minimizing fuel emissions by optimizing vessel schedules in liner shipping with uncertain port times[J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2012, 48(4): 863–880.
- [22] Zheng W, Li B, Song D P. Effects of risk-aversion on competing shipping lines' pricing strategies with uncertain demands[J]. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2017, 104: 337–356.
- [23] Wang S A, Zhen L, Zhuge D. Dynamic programming algorithms for selection of waste disposal ports in cruise shipping[J]. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2018, 108: 235–248.
- [24] Shapiro A, Homem-De-Mello T. A simulation-based approach to two-stage stochastic programming with recourse [J]. *Mathematical Programming*, 1998, 81(3): 301–325.
- [25] Keller B, Bayraksan G. Scheduling jobs sharing multiple resources under uncertainty: A stochastic programming approach[J]. *IIE Transactions*, 2010, 42(1): 16–30.
- [26] 皇家加勒比邮轮. 七天六晚上海日本航线 [EB/OL]. [2020-02-01]. <https://www.rcclchina.com.cn/Rccl.Cruise/CruiseDetail?shipCode=QN&sailDate=2019-02-05>.
- [27] 中国连云港. 港口费率表 [EB/OL]. [2020-02-01]. <http://www.lygport.com.cn/cost.aspx>.