

引用格式: 藉雪军, 王翔, 杨华龙. 考虑蒸发率变化的液化天然气海运库存路径问题[J]. 大连海事大学学报, 2026, 52(1): 31-39.

考虑蒸发率变化的液化天然气海运库存路径问题

藉雪军, 王翔, 杨华龙*

(大连海事大学 交通运输工程学院, 辽宁 大连 116026)

摘要: 针对液化天然气(LNG)海运库存路径问题(MIRP), 依据 LNG 蒸发率与船舱内外温差和货物量间的变化关系, 建立各航次船舶航行及港口装卸过程的 LNG 蒸发量函数。以海运物流公司总成本最小化为目标, 构建考虑蒸发率变化的 LNG-MIRP 非线性随机规划模型, 运用机会约束与分段线性割线逼近两种模型转换方法, 并将其转化为混合整数线性规划模型。以亚马尔运往中国的 LNG 项目为例对所建模型及算法进行验证。结果表明, 考虑蒸发率变化的 LNG-MIRP 非线性随机规划模型可显著降低船舶燃油成本和 LNG 蒸发损失, 从而节省物流总成本。敏感性分析表明, LNG 价格上涨将导致物流总成本增加, 港口库存水平置信参数存在合理取值。研究结论可为海运物流公司 LNG-MIRP 决策提供有益参考。

关键词: 液化天然气(LNG); 海运库存路径问题(MIRP); 非线性随机规划模型; 蒸发率; 模型转换

中图分类号: U695.28; F426.22; F274 **文献标志码:** A
文章编号: 1006-7736(2026)01-0031-09

doi: 10.16411/j.cnki.issn1006-7736.2026.01.004

Liquefied natural gas maritime inventory routing problem considering changes of boil off rate

Ji Xuejun, WANG Xiang, YANG Hualong*

(Transportation Engineering College,

Dalian Maritime University, Dalian 116026, China)

Abstract: This paper studied the liquefied natural gas maritime inventory routing problem (LNG-MIRP) with the mode of shipping logistics company managed inventory. Based on the relationship between LNG boil off rate, temperature difference inside and outside the cabin, and cargo volume, the

LNG boil off functions for each voyage and port loading/unloading process were established. An LNG-MIRP nonlinear stochastic programming model was constructed by considering changes of LNG boil off rate with the objective of minimizing the total cost of maritime logistics companies. Then, the model was transformed into a mixed integer linear programming model by employing the two model transformation methods of chance constraint and piecewise linear secant approximation. Taking the LNG project from Yamal to China as an example, the proposed model and its algorithm were validated and analyzed. The results show that considering changes of boil off rate within LNG-MIRP can significantly reduce ship fuel costs and LNG boil off losses, thereby saving the total logistics costs. Sensitivity analysis indicates that an increase in LNG prices will lead to an increase in total logistics costs. The research conclusions can provide useful references for LNG-MIRP decision-making of maritime logistics companies.

Key words: liquefied natural gas (LNG); maritime inventory routing problem (MIRP); nonlinear stochastic programming model; boil off rate; model transformation

0 引言

液化天然气(LNG)海运是一种既经济又安全的重要运输方式。海运物流公司通常会与客户签订 LNG 长期供应合同, 在合同期内通过船舶运输及港口库存调配, 履行满足客户 LNG 需求的义务。此时, 海运物流公司需要做出一系列关键决策, 包括航线路径和船期设计, 各港口 LNG 库存

收稿日期: 2025-05-06; 修回日期: 2025-06-27

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(72071024)

作者简介: 藉雪军(1998—), 男, 博士生, E-mail: jixuejun@dmlu.edu.cn; 杨华龙*(1964—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, E-mail: hlyang@dmlu.edu.cn

量、装卸量确定等,由此产生了 LNG 海运库存路径问题(MIRP)。由于 MIRP 具有航线路径远、运输时间长和配送量大等特点,在该模式下,船舶航速作为关键决策变量,对船舶航行成本和航次时间的影响极为显著^[1]。这既是其与传统(陆上)库存路径问题中通常假设的配送车辆速度恒定^[2]的显著差异,也是 MIRP 决策的难点所在。同时,鉴于 LNG 具有海运安全风险较高、客户需求不可随意中断等特性,LNG-MIRP 已成为海运物流公司亟待解决的一项紧迫且复杂的研究课题。

针对风险因素,Zhao 等^[3]关注了港口拥堵和航道风险对 LNG 海运配送安全性的影响,构建了 LNG 海运船队配置及运输路径优化模型;Cho 等^[4]则聚焦于极端天气对港口访问中断风险的影响,构建了一个考虑决策者风险偏好的两阶段随机混合整数规划模型;Li 等^[5]在综合考虑港口拥堵风险、航行安全与应急、船队运营成本及运输时间成本等因素的基础上,构建了多港口转运背景下的 LNG-MIRP 优化模型。针对需求稳定性要求,Msakni 等^[6]根据长期和短期客户的不同需求,考虑港口时间窗口、泊位可用性、库存及液化终端储存容量等因素,构建了 LNG-MIRP 混合整数规划模型;Rakke 等^[7]考虑 LNG 需求类型和合同约定交付方式,建立了一种基于 LNG 交付方式的优化模型;钟铭等^[8]针对 FOB 模式下由买方控制货物运输的 LNG-MIRP,建立了 LNG-MIRP 混合整数规划模型。

上述文献在 LNG-MIRP 的安全风险与需求保障领域均取得许多有益的研究成果,但大都未考虑 LNG 蒸发因素,或对其蒸发量未做量化分析(或“未纳入研究范畴”)。然而,LNG 蒸发普遍存在于供应链各环节,尤其是在 LNG 运输和装卸过程中,LNG 蒸发最为突出^[9]。Lee 等^[10]对储存容器中的 LNG 蒸发率进行了预测研究,结果显示,LNG 的蒸发率与内外温差呈正比关系。LNG 蒸发不仅会造成货物损失,还会减少有效供给量,进而导致需求得不到充分满足。为此,赵瑞嘉等^[11]考虑蒸发因素,提出采用 LNG 动力船舶(即以自然蒸发与强制蒸发的 LNG 作为燃料)的运输方案,建立了船舶航速、LNG 自然蒸发量及航次交付量三者间的关联函数,构建了 LNG 动力船舶航线配船与航速联合优化模型。在此基础上,孙

宇轩等^[12]结合航速与蒸发气(BOG)需求量的关联关系,设计科学的 BOG 管理策略,建立了 LNG 海上运输航线配船与航速的联合优化模型。Ghi-ami 等^[13]在假定 LNG 蒸发率固定的前提下,构建了考虑蒸发因素的 LNG 陆运库存路径问题模型,提出了基于蒸发损失的 LNG 库存补货与陆上运输路径策略。以上文献尽管运用算例验证了考虑 LNG 蒸发因素的必要性,但均基于 LNG 蒸发率固定不变的假定,但该假定对于海运路径远、时间长且配送量大的 LNG-MIRP 而言,其研究结论的适用性非常有限。

为此,本文分别建立 LNG 船舶航行与港口装卸的蒸发量函数,在此基础上构建考虑蒸发率变化的 LNG-MIRP 优化模型,以期得到经济高效的港口库存、船舶路径、航速及配送量优化方案。

1 问题描述

在 LNG 海运供应链中,海运物流公司需根据客户 LNG 需求变化等情况,在每个决策期制定 LNG 海运与需求港库存计划,安排运输船队在规定的往返航次时间内,以多航次方式将 LNG 从供应港运至需求港存储,以满足客户需求。例如,在亚马尔 LNG 海运供应链项目中,海运物流公司通过 LNG 运输船队,经东向北极航线穿越白令海峡,将 LNG 从萨别塔港运往中国沿海各需求港,其海运航线如图 1 所示。

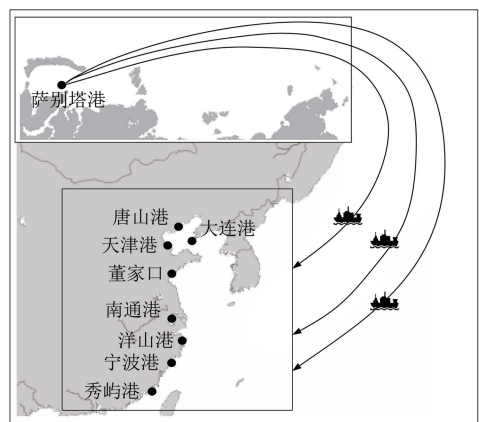


图 1 亚马尔液化天然气海运航线

Fig.1 Routes for Yamal LNG

海运物流公司每隔一段时间需进行一次 LNG-MIRP 决策,在决策期内的每个航次,均会安排一组(3 艘)船舶将 LNG 从萨别塔港运往中国

沿海需求港。其面临的主要决策为:各船舶在供应港的装货量、在需求港的挂靠顺序及卸货量、航线路径,以及各航段的航行速度。通过这些决策,在满足客户需求的同时,实现 LNG-MIRP 总成本最小化。

为便于问题求解,本文结合实际情况做出如下假设:(1) LNG 海运采取定期模式;(2)发船间隔期内各港的客户需求服从正态分布,且均值和方差已知。

2 模型构建

2.1 符号说明

为便于问题分析与求解,参数与变量符号表示及说明见表 1。

表 1 参数与变量

Tab.1 Parameters and variables

符号	说明
Ω	港口集合
Δ	船舶集合
Γ	航次集合
E	船舶往返航次时间
Q_{it}	航次 t 港口 i 的需求
μ_{it}	航次 t 港口 i 的需求均值
σ_{it}	航次 t 港口 i 的需求标准差
V_k	船舶 k 容量
S_k^{\max}	船舶 k 最高航速
S_k^{\min}	船舶 k 最低航速
I_i	港口 i 初始库存
I_i^{\min}	港口 i 库存下限
I_i^{\max}	港口 i 库存上限
C_i	港口 i 单位库存成本
R_i	港口 i 的单位装卸货时间
G_{ki}	船舶 k 在港口 i 的港口使费
H_{ki}	船舶 k 在港口 i 的单位装/卸货成本
D_{ij}	港口 i 至港口 j 航段的距离
F	燃油价格
P	液化天然气价格
ρ_k	船舶 k 燃油消耗系数
δ	蒸发率常数
W_{it}	航次 t 港口 i 的外部环境温度
W_{itj}	航次 t 港口 i 至港口 j 航段外部环境温度
W	液化天然气温度
ε	库存置信水平
x_{tkij}	航次 t 船舶 k 从港口 i 至港口 j 为 1, 否则为 0
y_{tki}	航次 t 船舶 k 挂靠港口 i 为 1, 否则为 0
q_{tki}	航次 t 船舶 k 在港口 i 的装/卸货量
s_{tkij}	航次 t 船舶 k 从港口 i 至港口 j 的航速
g_{tkij}	航次 t 船舶 k 从港口 i 至港口 j 的装载量
f_{tkij}^{fuel}	航次 t 船舶 k 从港口 i 至港口 j 的燃油消耗量
f_{tki}^{port}	航次 t 船舶 k 在港口 i 装卸 LNG 蒸发量
f_{tkij}^{sail}	航次 t 船舶 k 从港口 i 至港口 j LNG 蒸发量

2.2 相关函数

(1)燃油消耗量函数。船舶单位时间内燃油消耗量与航速的立方成正比^[14]。因此,可建立航次 t 船舶 k 从港口 i 至港口 j 航段的燃油消耗量函数为:

$$f_{tkij}^{\text{fuel}} = \rho_k \delta_{tkij}^3 \frac{D_{ij}}{s_{tkij}} = \rho_k D_{ij} s_{tkij}^2 \quad \forall t \in \Gamma, k \in \Delta, i, j \in \Omega \quad (1)$$

(2)期末库存量函数。LNG 港口库存大都以满足客户当期需求的中转库存为主,因此货物到港后一般会被客户快速运走。本文借鉴文献 [15], 按照期末库存量计算库存成本, 建立的航次 t 港口 i 的期末库存量函数为:

$$f_{it}^{\text{inve}} = I_i + \sum_{r=1}^t \left\{ \sum_{k \in \Delta} [1 - \delta(W_{ri} - W) R_i] q_{rki} - Q_{ri} \right\} \quad \forall t \in \Gamma, k \in \Delta, i \in \Omega \quad (2)$$

(3)船舶靠港成本函数。船舶靠港成本包括港口使费和装卸成本,由此建立的航次 t 船舶 k 在港口 i 的靠港成本函数为:

$$f_{tki}^{\text{call}} = G_{ki} + H_{ki} q_{tki}, \forall t \in \Gamma, k \in \Delta, i \in \Omega \quad (3)$$

(4) LNG 蒸发量函数。参考文献 [10, 13], 建立的航次 t 船舶 k 从港口 i 至港口 j 航段的 LNG 蒸发量函数为:

$$f_{tkij}^{\text{sail}} = \delta (W_{itj} - W) \frac{D_{ij} g_{tkij}}{s_{tkij}}, \forall t \in \Gamma, k \in \Delta, i, j \in \Omega \quad (4)$$

航次 t 船舶 k 在港口 i 的 LNG 蒸发量函数为:

$$f_{tki}^{\text{port}} = \delta (W_{it} - W) R_i q_{tki}, \forall t \in \Gamma, k \in \Delta, i \in \Omega \quad (5)$$

2.3 随机规划模型

LNG 需求具有随机波动且季节性明显的特征。根据问题描述, 建立需求变动下考虑蒸发因素的 LNG-MIRP 随机规划模型 [M1]。

目标函数:

$$\min z = \sum_{i \in \Gamma} \sum_{k \in \Delta} \sum_{j \in \Omega} F f_{tkij}^{\text{fuel}} + \sum_{i \in \Gamma} \sum_{i \in \Omega \setminus \{0\}} C_i f_{ti}^{\text{inve}} + \sum_{i \in \Gamma} \sum_{k \in \Delta} \sum_{i \in \Omega} f_{tki}^{\text{call}} + P \left(\sum_{i \in \Gamma} \sum_{k \in \Delta} \sum_{j \in \Omega} f_{tkij}^{\text{sail}} + \sum_{i \in \Gamma} \sum_{k \in \Delta} \sum_{i \in \Omega} f_{tki}^{\text{port}} \right) \quad (6)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{j \in \Omega \setminus \{0\}} x_{tkji} + \sum_{j \in \Omega \setminus \{0\}} x_{tkij} = 2y_{tki}, \quad q_{tki} \geq 0, g_{tkij} \geq 0, \forall t \in \Gamma, k \in \Delta, i, j \in \Omega \quad (17)$$

$$\forall t \in \Gamma, k \in \Delta, i \in \Omega \setminus \{0\} \quad (7)$$

$$x_{tkij}, y_{tki} \in \{0, 1\}, \forall k \in \Gamma, k \in \Delta, i, j \in \Omega \setminus \{0\} \quad (18)$$

$$g_{tkij} \leq V_k x_{tkij}, \forall t \in \Gamma, k \in \Delta, i, j \in \Omega \setminus \{0\} \quad (8)$$

$$\sum_{l \in \Omega} (g_{tkli} - f_{tkli}^{\text{sail}}) - q_{tki} = \sum_{j \in \Omega} g_{tkij} \\ \forall t \in \Gamma, k \in \Delta, i \in \Omega \setminus \{0\} \quad (9)$$

$$I_i^{\min} \leq I_i + \sum_{r=1}^l \left\{ \sum_{k \in \Delta} [1 - \delta(W_{ri} - W) R_i] q_{rki} - Q_{ri} \right\} \leq I_i^{\max} \\ \forall t \in \Gamma, i \in \Omega \setminus \{0\} \quad (10)$$

$$q_{tki} \leq V_k y_{tki}, \forall t \in \Gamma, k \in \Delta, i \in \Omega \setminus \{0\} \quad (11)$$

$$\sum_{i \in \Omega \setminus \{0\}} q_{tki} \leq V_k, \forall t \in \Gamma, k \in \Delta \quad (12)$$

$$\sum_{l \in \Omega} g_{tklj} - \sum_{l \in \Omega} g_{tkli} + V_k (1 - x_{tkij}) \leq V_k - q_{tki} \\ \forall t \in \Gamma, k \in \Delta, i, j \in \Omega \quad (13)$$

$$q_{tki} \leq \sum_{j \in \Omega} g_{tkji} \leq V_k, \forall t \in \Gamma, k \in \Delta, i \in \Omega \quad (14)$$

$$\sum_{i \in \Omega} \sum_{j \in \Omega} \frac{D_{ij}}{S_{tkij}} + \sum_{i \in \Omega} R_i q_{tki} \leq E, \forall t \in \Gamma, k \in \Delta \quad (15)$$

$$S_k^{\min} \leq s_{tkij} \leq S_k^{\max}, \forall t \in \Gamma, k \in \Delta, i, j \in \Omega \quad (16)$$

$$\Pr \left\{ I_i + \sum_{r=1}^l \left\{ \sum_{k \in \Delta} [1 - \delta R_i (W_{ri} - W)] q_{rki} \right\} - \sum_{r=1}^l Q_{ri} \geq I_i^{\min} \right\} \geq 1 - \varepsilon, \forall t \in \Gamma, i \in \Omega \setminus \{0\} \quad (19)$$

$$\Pr \left\{ I_i + \sum_{r=1}^l \left\{ \sum_{k \in \Delta} [1 - \delta R_i (W_{ri} - W)] q_{rki} \right\} - \sum_{r=1}^l Q_{ri} \leq I_i^{\max} \right\} \geq 1 - \varepsilon, \forall t \in \Gamma, i \in \Omega \setminus \{0\} \quad (20)$$

于是, 可将随机规划模型 [M1] 转换为确定型规划模型 [M2]。目标函数:

$$\min z = F \sum_{i \in \Gamma} \sum_{k \in \Delta} \sum_{j \in \Omega} \rho_k D_{ij} s_{tkij}^2 + \sum_{i \in \Gamma} \sum_{i \in \Omega \setminus \{0\}} C_i \left\{ I_i + \sum_{r=1}^l \left\{ \sum_{k \in \Delta} [1 - \delta (W_{ri} - W) R_i] q_{rki} - \mu_{ri} \right\} \right\} + \\ \sum_{i \in \Gamma} \sum_{k \in \Delta} \sum_{i \in \Omega} (G_{ki} + H_{ki} q_{tki}) + P \left(\sum_{i \in \Gamma} \sum_{k \in \Delta} \sum_{j \in \Omega} f_{tkij}^{\text{sail}} + \sum_{i \in \Gamma} \sum_{k \in \Delta} \sum_{i \in \Omega} f_{tki}^{\text{port}} \right) \quad (21)$$

s.t. 式(7)~式(9), 式(11)~式(18)

$$I_i + \sum_{r=1}^l \left\{ \sum_{k \in \Delta} [1 - \delta (W_{ri} - W) R_i] q_{rki} - \mu_{ri} - \sigma_{ri} \Phi^{-1}(1 - \varepsilon) \right\} \geq I_i^{\min}, \forall t \in \Gamma, i \in \Omega \setminus \{0\} \quad (22)$$

$$I_i + \sum_{r=1}^l \left\{ \sum_{k \in \Delta} [1 - \delta (W_{ri} - W) R_i] q_{rki} - \mu_{ri} - \sigma_{ri} \Phi^{-1}(1 - \varepsilon) \right\} \leq I_i^{\max}, \forall t \in \Gamma, i \in \Omega \setminus \{0\} \quad (23)$$

式(22)、式(23)中, Φ^{-1} 为标准正态分布函数的逆函数。

式(6)为液化天然气海运物流公司实现总成本最小化的优化目标。其中, 第1项为船舶航行成本, 第2项为 LNG 库存成本, 第3项为船舶靠港成本, 第4项为船舶航行和港口装卸过程中的 LNG 蒸发损失。式(7)为挂靠次数约束, 规定各航次中每艘船舶对同一需求港最多挂靠一次; 式(8)为各航次船舶路径流量约束; 式(9)为船舶路径的流量守恒约束; 式(10)为各航次港口库存水平约束; 式(11)为船舶最大装卸量约束; 式(12)为船舶容量约束; 式(13)、式(14)为消除子循环约束; 式(15)为船舶航次时间约束; 式(16)为船舶航速约束; 式(17)、式(18)为变量约束。

3 模型转换

3.1 确定型转换

模型 [M1] 的目标函数与约束式(10)因包含随机需求 Q_{ri} , 存在无法直接求解的问题。为此, 利用机会约束原理, 在给定库存置信水平 ε 的前提下, 可得:

3.2 线性化转换

在模型 [M2] 中, 目标函数式(21)和约束式

(7)、(15)均含有非线性结构,既有决策变量的倒数项,又有决策变量的平方项。因此,模型 [M2]为一个非线性的混合整数规划模型,仍无法直接求解。为此,本文根据模型特征,对其进行线性化转换,具体步骤如下。

首先,采用倒数法。令 u_{tkij} 为决策变量 s_{tkij} 的倒数,即 $u_{tkij} = 1/s_{tkij}, \forall t \in \Gamma, k \in \Delta, i, j \in \Omega$, 使约束式(6)、(12)线性化。

然后,采用线性割线近似方法。采用 u_{tkij} 替换 s_{tkij} 后,目标函数式(21)的第 1 项仍存在非线性结构,需对其进行进一步的线性化处理。具体步骤如下。

Step1: 确定函数自变量范围并将其分为若干

$$\bar{f}_\tau(u_{tkij}) = \frac{f(U_{k(\tau+1)}) - f(U_{k\tau})}{U_{k(\tau+1)} - U_{k\tau}} u_{tkij} + \frac{U_{k\tau} f(U_{k(\tau+1)}) - U_{k(\tau+1)} f(U_{k\tau})}{U_{k\tau} - U_{k(\tau+1)}}, \forall t \in \Gamma, k \in \Delta, i, j \in \Omega, \tau \in \{1, 2, \dots, L\} \quad (24)$$

函数 $f(u_{tkij})$ 与第 τ 个线性近似分段函数 $\bar{f}_\tau(u_{tkij})$ 如图 2 所示。由图 2 可知,当等分份数 L 足够大时,线性分段函数 $\bar{f}_\tau(u_{tkij}) (\forall \tau \in \{1, 2, \dots, L\})$ 便与 $f(u_{tkij})$ 近似。因此,采用上述方法,同时引入辅助 0-1 变量 $\alpha_{tkij\tau}$ 与参数 $B (B$ 为极大数),可将模型 [M2] 转化为可通过商用软件求解的混合整数线性规划模型 [M3]。

目标函数:

$$\begin{aligned} \min z = & F \sum_{t \in \Gamma} \sum_{k \in \Delta} \sum_{i, j \in \Omega} \sum_{\tau=1}^L \alpha_{tkij\tau} \bar{f}_\tau(u_{tkij}) + \sum_{t \in \Gamma} \sum_{i \in \Omega \setminus \{0\}} C_i \left\{ I_i + \sum_{r=1}^i \left\{ \sum_{k \in \Delta} [1 - \delta R_i (W_{ri} - W)] q_{rki} - \mu_{ri} \right\} \right\} + \\ & \sum_{t \in \Gamma} \sum_{k \in \Delta} \sum_{i \in \Omega} (G_{ki} + H_{ki} q_{tki}) + P \left(\sum_{t \in \Gamma} \sum_{k \in \Delta} \sum_{i, j \in \Omega} f_{tkij}^{sail} + \sum_{t \in \Gamma} \sum_{k \in \Delta} \sum_{i \in \Omega} f_{tki}^{port} \right) \end{aligned} \quad (25)$$

s.t. 式(7)~式(9), 式(11)~式(14), 式(17)~式(18), 式(22)~式(23)

$$\sum_{i \in \Omega} \sum_{j \in \Omega} D_{ij} u_{tkij} + \sum_{i \in \Omega} R_i q_{tki} \leq E, \forall t \in \Gamma, k \in \Delta \quad (26)$$

$$\bar{f}_\tau(u_{tkij}) \geq \frac{f(U_{k(\tau+1)}) - f(U_{k\tau})}{U_{k(\tau+1)} - U_{k\tau}} u_{tkij} + \frac{U_{k\tau} f(U_{k(\tau+1)}) - U_{k(\tau+1)} f(U_{k\tau})}{U_{k\tau} - U_{k(\tau+1)}} - B(1 - \alpha_{tkij\tau}) \quad (28)$$

$\forall t \in \Gamma, k \in \Delta, i \in \Omega \setminus \{0\}, \tau \in \{1, 2, \dots, L\}$

$$\sum_{\tau=1}^L \alpha_{tkij\tau} = 1, \forall t \in \Gamma, k \in \Delta, i, j \in \Omega \quad (29)$$

个小区间。记 $f(u_{tkij}) = \rho_k D_{ij} / u_{tkij}^2, U_k^{\min} = 1/S_k^{\max} \leq u_{tkij} \leq U_k^{\max} = 1/S_k^{\min}, \forall t \in \Gamma, k \in \Delta, i, j \in \Omega$ 。将区间 $[U_k^{\min}, U_k^{\max}]$ 等分成 L 份, 获得 $L+1$ 个等分点, 其中, 第 τ 个等分点的取值为 $U_{k\tau} = U_k^{\min} + (\tau - 1)(U_k^{\max} - U_k^{\min})/L$ 。

Step2: 确定线性近似函数。 $f(u_{tkij})$ 的定义域由 u_{tkij} 的取值范围确定, 变量取值范围被等分成 L 个区间, 表示为 $[U_{k\tau}, U_{k(\tau+1)}], \forall \tau \in \{1, 2, \dots, L\}$ 。选择经过点 $U_{k\tau}$ 和点 $U_{k(\tau+1)}$ 的割线作为第 τ 个区间的线性近似线段, 则 $f(u_{tkij})$ 在变量 u_{tkij} 取值范围为 $[U_{k\tau}, U_{k(\tau+1)}]$ 时的线性分段函数可表示为:

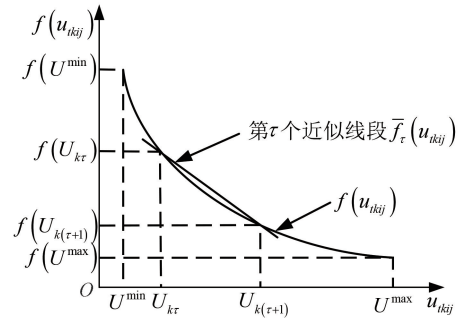


图 2 函数 $f(u_{tkij})$ 的线性近似

Fig.2 A linear approximation of the function $f(u_{tkij})$

$$\frac{1}{S_k^{\max}} \leq u_{tkij} \leq \frac{1}{S_k^{\min}}, \forall t \in \Gamma, k \in \Delta, i \in \Omega \setminus \{0\} \quad (27)$$

$$\alpha_{tkij\tau} \in \{0, 1\}, \forall t \in \Gamma, k \in \Delta, i, j \in \Omega, \tau \in \{1, 2, \dots, L\} \quad (30)$$

4 算例分析

4.1 算例数据与计算结果

本文以图 1 所示的亚马尔液化天然气海运航线项目为例进行分析。假设某海运物流公司船队共有 6 艘 LNG 船舶,每个航次安排 3 艘船舶完成配送任务,船舶单航次往返时间为 4 周,发船间隔期为 2 周,设置决策期为秋季的 12 周(共 6 个航次)。船舶容量、航速范围及燃油消耗常数取自文献 [16] 和 Clarkson 数据库;港口间距离、外

部环境温度分别取自船讯网 (<https://routes.shipxy.com/>)、地球大数据科学工程数据共享服务系统 (<https://data.casearth.cn/sdo/list?searchKey>);LNG 温度统一设定为 -162°C 。各港口 LNG 单位装卸成本均为 1 元/ m^3 ,单位库存成本均为 11.20 元/(周· m^3),LNG 价格为 5 000 元/ m^3 。库存置信水平设置为 0.10,参照文献[5]给出的部分港口需求均值数据,各需求港期初库存、各航次需求均值及标准差见表 2。

表 2 期初库存、各航次需求均值及标准差

需求港	期初库存	μ_{1i}	σ_{1i}	μ_{2i}	σ_{2i}	μ_{3i}	σ_{3i}	μ_{4i}	σ_{4i}	μ_{5i}	σ_{5i}	μ_{6i}	σ_{6i}
大连港	3.0	2.56	0.21	2.66	0.21	2.75	0.23	3.20	0.29	3.35	0.25	3.42	0.22
唐山港	3.2	2.42	0.22	2.45	0.25	2.52	0.26	3.10	0.26	3.22	0.29	3.25	0.28
天津港	2.9	2.45	0.27	2.55	0.24	2.55	0.29	2.88	0.23	3.03	0.26	3.10	0.21
董家口港	2.9	2.50	0.23	2.68	0.23	2.70	0.24	3.12	0.20	3.27	0.22	3.40	0.29
南通港	3.2	2.59	0.25	2.60	0.22	2.70	0.24	3.10	0.23	3.15	0.25	3.20	0.25
洋山港	2.9	2.44	0.29	2.60	0.30	2.70	0.23	3.15	0.27	3.00	0.21	3.31	0.25
宁波港	2.8	2.45	0.27	2.55	0.24	2.60	0.30	2.95	0.29	3.05	0.24	3.10	0.21
秀屿港	2.8	2.56	0.27	2.57	0.29	2.72	0.22	3.15	0.27	3.25	0.29	3.40	0.25

通过将线性分段数量从 60 递增至 140,构造 9 组算例,采用 Python 3.9 调用 Gurobi 在 AMD Ryzen 7 5800H 处理器、16 GB 内存的电脑上求

解,不同分段数量下的总成本及运行时间见表 3 (结果均为在相同条件下运行 20 次的平均值)。

表 3 不同线性分段数量下的总成本和运行时间

数据	线性分段数量									
	60	70	80	90	100	110	120	130	140	
总成本/10 ⁶ 元	75.338	75.243	75.206	75.187	75.110	75.026	75.019	74.983	74.983	
运行时间/s	112.67	114.10	117.43	118.29	123.99	124.83	128.79	128.86	130.53	
GAP/%	0.56	0.44	0.39	0.36	0.26	0.15	0.14	0.09	0.09	

由表 3 可知,随着线性分段数量增多,总成本逐渐降低。其中,当分段数量为 130 时,总成本不再降低。此时,计算时间在可接受范围内,GAP 值也低于 0.1%,求解精度较高。究其原因在于本文目标为总成本最小化,当线性分段数量较小时,求解精度较差,总成本较大;随着线性分段数量增加,求解结果与最优解间的差距减小,总成本也随之减小。本文在后续计算中,选取分段数量为 130。

本文模型与文献 [11] 模型(蒸发率固定)的结果对比见表 4。

表 4 不同模型下各项成本对比
Tab.4 Comparison of various costs under different models

对比模型	成本/10 ⁶ 元				
	总成本	燃油成本	靠港成本	蒸发损失	库存成本
本文	74.983	31.689	10.581	3.166	29.547
文献[11]	78.367	33.289	10.782	4.315	29.982
变化率/%	-4.51	-5.05	-1.89	-36.30	-1.47

由表 4 可知,相比文献 [11] 的模型,本文模型可使海运物流公司的 LNG 总成本降低 4.51%,体现出更优的成本优化效果。从成本构成来看,降低的成本主要来自燃油消耗与 LNG 蒸发损失

两部分,这与模型对航速和蒸发率的精细化优化直接相关。本文模型在配送时较为精确地测算了在不同航次时间范围内船舶航行和在港口装卸的 LNG 蒸发量变化,进而对各需求港配送量和各航段航速进行了优化,减少了船舶的燃油成本和 LNG 蒸发造成的损失。因此,考虑 LNG 在船舶航行和装卸过程中蒸发率的变化因素,可以有效降低海运物流公司 LNG 配送的总成本。

在秋季运营场景下,各航次船舶航速情况如图 3 所示。由图 3 可见,随着秋季决策期内航次数增加,船舶在重载航段航速整体呈下降趋势,在压载(即空载)航段,航速整体呈上升趋势。这是由于随着航次数增加,航次内各航段的外部环境温度逐渐降低,LNG 船舱内/外温差变小,在船舶航行和装卸过程中 LNG 蒸发率也开始变小。由式(4)、(5)可知,LNG 蒸发量等于 LNG 蒸发率与航行时间/装卸时间的乘积,因此,蒸发损失成本也开始降低。海运物流公司可采取差异化航速策略:重载航段降低航速、延长航行时间,以减少燃油成本;压载航段提高航速,以确保船舶在规定时间内往返航次时间内返回供应港,执行下一航次。

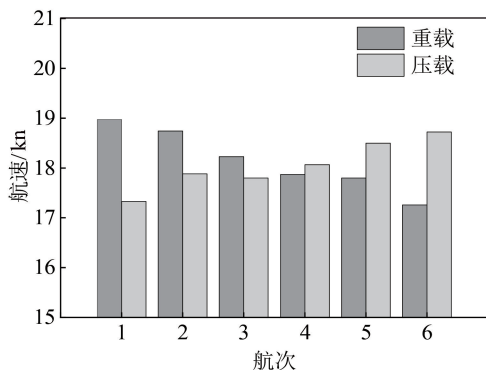


图 3 各航次的船舶航速

Fig.3 Speed of ships on each voyage

4.2 敏感性分析

外部环境温度直接影响 LNG 蒸发率,进而作用于蒸发量;LNG 价格通过改变客户需求,影响配送方案的制定;库存置信水平则通过调控库存量,对配送量产生间接影响。三者共同构成影响 LNG-MIRP 决策的关键环境与参数变量。为此,本文针对外部环境温度、LNG 价格及库存置信水平等参数进行敏感性分析,以验证所建模型的适用性。

(1) 外部环境温度敏感性分析。在保持其他

参数不变情况下,本文选取夏季 12 周的外部环境温度数据进行计算,得到夏季海运物流公司 LNG 总成本为 7 539.5 万元,较秋季上升 0.55%。究其原因,夏季外部环境温度高于秋季,导致 LNG 运输与装卸过程与外界环境温差增大,LNG 蒸发率上升,进而增加蒸发损失。因此,海运物流公司应在夏季适度提高船舶航速,降低航行过程中的蒸发损失,以实现总成本最小化。

(2) LNG 价格敏感性分析。保持其他参数不变,将 LNG 价格从 3600 元/ m^3 递增至 6400 元/ m^3 ,构造 8 组数据,对本文模型与文献 [11] 模型进行 LNG 价格敏感性分析,结果如图 4 所示。由图 4 可知,LNG 价格上涨会推动海运物流公司总成本逐步增加,原因是价格上涨使航行与装卸过程中 LNG 蒸发损失的经济成本同步上升。同时,本文模型的总成本始终低于文献 [11] 模型,且随 LNG 价格上涨,两者成本差距逐渐扩大,进一步验证了本文模型的有效性。

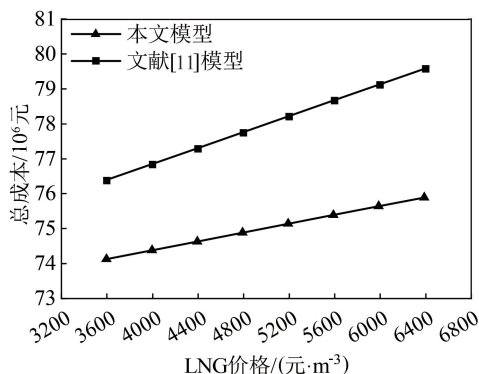


图 4 LNG 价格的敏感性分析结果

Fig.4 Sensitivity analysis results for LNG price

(3) 库存置信水平的敏感性分析。保持其他参数不变,将库存置信水平从 0.06 递增至 0.20,构造 8 组数据,对模型进行该参数的敏感性分析,结果如图 5 所示。由图 5 数据可知,当库存置信水平参数从 0.06 逐步增大时,海运物流公司的总成本呈现“先下降后上升”的 U 型变化趋势。其中,当库存置信水平参数为 0.10 时,海运物流公司总成本最小。这是因为,当库存置信水平参数取值较小时,意味着海运物流公司趋于保守,使各港口持有的库存较高,库存成本增加,由此导致海运物流公司总成本升高。而当库存置信水平参数较大时,海运物流公司为保障客户服务水平、降低缺货风险,需在各港口持有更高库存,导

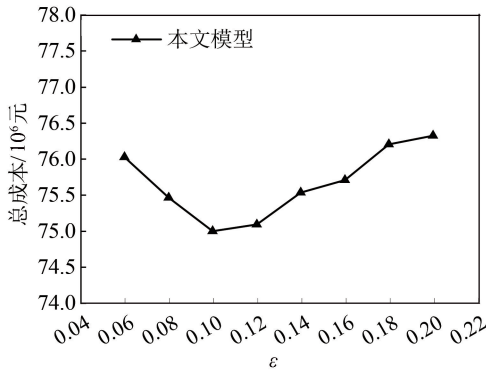


图 5 置信参数的敏感性分析结果

Fig.5 Sensitivity analysis results for confidence parameters

致总体库存成本上升;若遇需求波动,还需提高船舶航速以加快补货,进而推高燃油成本。两者叠加,最终使总成本升高。

5 结 论

本文提出考虑蒸发率动态变化的 LNG-MIRP 非线性随机规划模型,并以亚马尔 LNG 项目为案例开展模拟验证,得出以下结论。

(1)考虑蒸发率变化能够有效降低船舶燃油成本和 LNG 蒸发损失。不同时期各航段外部环境温度的变化将影响船舶的最优航速:船舶在重载航段,航速会随着外部环境温度的降低整体呈下降趋势;在压载航段,航速则呈上升趋势。海运物流公司应在充分掌握客户需求变动因素的基础上,结合不同季节外部环境温度变化,定期地开展考虑 LNG 蒸发率变化的 LNG-MIRP 优化决策,确定合理的港口装/卸量和船舶各航段航速,以有效降低物流总成本。

(2)LNG 价格上升会推动物流总成本增加,但相较已有研究的固定蒸发率假设,本文模型的总成本增幅更缓,表明 LNG 价格上升时,考虑蒸发率变化的 LNG-MIRP 优化效果更显著。海运物流公司需关注 LNG 市场价格波动,通过及时调整运输计划与库存管理策略应对市场动态,以保障竞争力与盈利能力。

(3)随着置信参数增大,海运物流公司总成本呈先下降后上升的趋势。这表明在需求不确定的市场环境下,置信水平参数存在一个合理的取值范围。海运物流公司应在对需求进行精准预测的基础上,结合自身实力、市场竞争状况,并参

照行业标杆企业的水平,设置一个合理的库存置信水平,使各港口持有适量的库存,以提高 LNG 储运的经济效益。

参考文献 (References):

- [1] CASTRO P M. Maritime inventory routing with speed optimization; a MIQCP formulation for a tanker fleet servicing FPSO units [J]. Computers & Chemical Engineering, 2025, 192: 15.
- [2] BERTAZZI L, CHAGAS G O, COELHO L C, et al. Online algorithms for the multi-vehicle inventory-routing problem with real-time demands [J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2025, 170: 104892.
- [3] ZHAO Z B, WANG X F, WANG H, et al. Fleet deployment optimization for LNG shipping vessels considering the influence of mixed factors [J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2022, 10(12): 2034.
- [4] CHO J, LIM G J, KIM S J, et al. Liquefied natural gas inventory routing problem under uncertain weather conditions [J]. International Journal of Production Economics, 2018, 204: 18-29.
- [5] LI M Y, FAGERHOLT K, SCHUTZ P. Maritime inventory routing with transshipment: the case of Yamal LNG [J]. Flexible Services and Manufacturing Journal, 2023, 35(1): 269-294.
- [6] MSAKNI M K, HAOUARI M. Short-term planning of liquefied natural gas deliveries [J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2018, 90: 393-410.
- [7] RAKKE J G, ANDERSSON H, CHRISTIANSEN M, et al. A new formulation based on customer delivery patterns for a maritime inventory routing problem [J]. Transportation Science, 2015, 49(2): 384-401.
- [8] 钟铭, 姬若晨, 林诚凯. 基于离岸交付模式的大规模液化天然气库存路径问题 [J]. 上海海事大学学报, 2024, 45(4): 23-31.
ZHONG M, JI R C, LIN C K. Large scale liquefied natural gas inventory routing problem based on free onboard mode [J]. Journal of Shanghai Maritime University, 2024, 45(4): 23-31. (In Chinese)
- [9] 巫威眺, 王殿雷, 马昌喜. 液化天然气库存路径问题建模与算法 [J]. 中国公路学报, 2022, 35(11): 252-270.
WU W T, WANG D L, MA C X. Model and algorithm for inventory routing problem of liquefied natural gas [J]. China Journal of Highway Transport, 2022, 35(11):

- 252-270. (In Chinese)
- [10] LEE D H, CHA S J, KIM J D, et al. Practical prediction of the boil-off rate of independent-type storage tanks [J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2021, 9(1): 36-36.
- [11] 赵瑞嘉, 孙宇轩, 牛东翔, 等. 混合蒸发气动力下液化天然气海运航线配船优化[J]. *交通运输系统工程与信息*, 2024, 24(2): 304-312.
- ZHAO R J, SUN Y X, NIU D X, et al. Fleet deployment and voyage planning optimization for liquefied natural gas shipping under power of mixed boil off gas[J]. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2024, 24(2): 304-312. (in Chinese)
- [12] 孙宇轩, 赵瑞嘉, 赵振宇. 考虑 BOG 管理的 LNG 海上运输航线配船优化[J]. *大连海事大学学报*, 2024, 50(4): 41-48.
- SUN Y X, ZHAO R J, ZHAO Z Y. Optimization of LNG sea transportation route allocation considering BOG management[J]. *Journal of Dalian Maritime University*, 2024, 50(4): 41-48. (In Chinese)
- [13] GHIAMI Y, DEMIR E, VAN WOENSEL T, et al. A deteriorating inventory routing problem for an inland liquefied natural gas distribution network[J]. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2019, 126: 45-67.
- [14] BROUER B D, ALVAREZ J F, PLUM C E M, et al. A base integer programming model and benchmark suite for liner-shipping network design [J]. *Transportation Science*, 2014, 48(2): 281-312.
- [15] NAJY W, ARCHETTI C, DIABAT A. A column generation-based matheuristic for an inventory-routing problem with driver-route consistency [J]. *European Journal of Operational Research*, 2025, 324(2): 382-397.
- [16] DAI L, JING D Y, HU H, et al. An environmental and techno-economic analysis of transporting LNG via Arctic route[J]. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 2021, 146: 56-71.

本刊关于插图的绘制要求

线条图应清晰且有区分度,可用 Word 或 Visio 打开编辑。字体字号要求:中文字体为宋体,英文字体为 Times New Roman,字号为 8 磅。

坐标曲线图的坐标轴、标值线的画法应规范。如果坐标轴未给出标值线和标值,坐标原点应用字母“O”标注,在坐标轴的末端应按照增量方向画出箭头,标目应排在坐标轴末端的外侧。如果坐标轴上已给出标值线和标值,坐标原点应用阿拉伯数字“0”或实际数值标注,不宜画出表示增量方向的箭头,标目应居中排在坐标轴的外侧,标注形式为“量的符号或名称/单位符号”。

图题应准确、简明地阐释插图内容。插图的分图宜使用字母编号,如(a)(b)(c)。插图中的英文一般应改为中文。图元注应置于图题上方,整图注应置于图题下方。图元的注码与注文之间可用一字线或下圆点隔开,各条注之间应用分号隔开,最后一条注末应用句号。