

文章编号: 1006-7736(2014)01-0113-04

## LNG 罐式集装箱陆海联运配箱量优化模型

孙家庆<sup>1</sup>, 唐丽敏<sup>1</sup>, 王成武<sup>2</sup>, 阎英美<sup>1</sup>

(1. 大连海事大学 交通运输管理学院, 辽宁 大连 116026; 2. 中石油昆仑燃气有限公司总调度室, 北京 100101)

**摘要:** 以企业利润最大为目标, 建立 LNG 罐式集装箱陆海联运配箱量优化模型. 针对 LNG 不宜久存于罐式集装箱及罐式集装箱成本高、租金贵等特点, 引入惩罚函数和决策变量, 进一步优化罐式集装箱的运作效率和满足不同偏好决策者的需求. 同时, 基于 LNG 的安全储运, 引入罐式集装箱安全储运时间约束. 最后, 借助 LINGO 优化软件, 实例验证所建模型. 结果表明, 该模型可以很好地应用在 LNG 陆海联运罐式集装箱配置优化实践中.

**关键词:** 综合交通运输; 液化天然气(LNG); 罐式集装箱; 配箱量; 非线性优化

中图分类号: U169.6

文献标志码: A

## Optimized model of configuration volume of LNG tank container in land-sea combined transport

SUN Jia-qing<sup>1</sup>, TANG Li-min<sup>1</sup>,  
WANG Cheng-wu<sup>2</sup>, YAN Ying-mei<sup>1</sup>

(1. Transportation Management College, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China; 2. Scheduling Department, Petro China Kunlun Gas Co., LTD, Beijing 100101, China)

**Abstract:** Based on the objective of maximizing the enterprise profit, this paper established optimized model of configuration volume of LNG tank container in land-sea combined transport. For the LNG not being long time stored in tank container and the high cost and the rent for container tank container, a punishing function and the decision-making factor were introduced to further optimize the operational efficiency of the tank container and meet the needs of different decision makers with different preferences. At the same time, the tank container security storage and transportation time were considered in the constraint conditions based on the safety of LNG storage and transportation. Finally, with the aid of the LINGO optimization software, this paper verifies the model with an example, and results show that the proposed model can be used in tank

container configuration optimization of LNG land-sea combined transport in practice.

**Key words:** integrated transportation; liquefied natural gas (LNG); tank container; configuration volume; nonlinear optimization

## 0 引言

集装箱调运优化问题是动态优化问题, 集装箱箱型、需求节点、多种运输方式的配合、运输能力的限制等问题会影响集装箱调运优化结果. 同时, 受运输需求的影响、供给的随机性增加了集装箱调运问题的复杂性. 为此, Chen 等<sup>[1]</sup>建立了两阶段的海运集装箱空箱调运的动态随机模型; KOZAN<sup>[2]</sup>探讨了影响多式联运效率的相关因素, 并建立了基于 1 个集装箱码头的网络模型; JANS-EN 等<sup>[3]</sup>建立了基于 1 个港口的集装箱运作计划模拟模型, 以用于日常集装箱的调度计划; 陈超等<sup>[4]</sup>引入鲁棒优化理论, 在航线需求不确定的基础上, 优化集装箱配置与舱位分配; 杨扬<sup>[5]</sup>应用动态规划思想, 建立了多种箱型的集装箱空箱调运优化模型; 冀玉<sup>[6]</sup>建立了基于两阶段的海铁联运空箱调运优化模型.

随着 LNG 项目设施竣工投产, LNG 进口大幅增加, 我国 LNG 加气站将遍布许多城市节点、高速公路和内河水域, LNG 终端市场的需求呈现分布广泛、批量灵活多样的趋势, 多元化消费需求迫切需要开发基于罐式集装箱的 LNG 陆海联运模式, 以充分发挥其“一装一卸、全程密封、一罐到底、门到门服务”的优势. 值得注意的是, LNG 是天然气(甲烷 CH<sub>4</sub>) 在经净化及超低温状态下

收稿日期: 2013-07-11.

基金项目: 国家社会科学基金资助项目(13BGJ031); 辽宁省教育厅高校科研项目(2009A814).

作者简介: 孙家庆(1963-), 男, 副教授, 硕士生导师, E-mail: dlmusjq@163.com.

(-162℃、一个大气压)冷却液化的产物,压力/温度变化会引起 LNG 蒸发,易引发安全问题,因此,LNG 不宜久存于罐式集装箱,同时罐式集装箱也因其成本高、租金贵而需要及时周转.因此,应针对 LNG 及罐式集装箱本身特点,科学地构建 LNG 罐式集装箱配置量优化模型.

## 1 问题描述与建模

### 1.1 系统假定

(1) 一定时期,在各节点的罐箱供给量和需求量是已知的;(2) 只考虑一种箱型,即 40 英尺;(3) 罐式集装箱在供应点,不产生额外的等车时间,即卸船即装车承运;(4) 罐式集装箱调运决策期为  $T$  天,决策间隔以  $T$  天计算;(5) 如两个节点间某种运输方式的运输时间大于决策间隔,则表示该种运输方式不可行;(6) 罐式集装箱必须在决策期内清空,否则返回 LNG 接收站以保障安全;(7) 车辆完全满足罐式集装箱调运时间及调运量,有明确的车辆调运周期;(8) 所有罐式集装箱为新造箱,已有明确维修周期和报废率;(9) 已知罐式集装箱陆海联运模式中所涉及的各项调运费用.

### 1.2 决策变量及参数改进

#### (1) 决策变量

$X_{ij}^t$ :  $t$  时期, LNG 罐式集装箱从节点  $i$  到节点  $j$  的调运数量(TEU).

#### (2) 参数定义

$S_i^t$ :  $t$  时期,节点  $i$  的供应能力,即供应量;  $D_i^t$ :  $t$  时期,节点  $i$  的需求能力,即需求量;  $V_i$ : LNG 需求地  $i$  处,一集装箱的 LNG 完全消费速度(天/箱),  $i = 1, 2, \dots, n$ ;  $Q$ : 决策期  $T$  内系统配置的集装箱总数量(TEU);  $q$ : 每套集装箱数量,与船舶载运量有关(TEU);  $T_h$ : 海路运输时船舶的航行时间(d);  $T_n$ : 班期(d);  $T_d$ : 公路运输时集装箱在陆地的中转时间(d);  $T_s$ : 罐式集装箱储运 LNG 的安全时间(d);  $C_{ij}$ : 采用某  $M$  种(公路、水路)运输方式,将罐式集装箱从  $i$  地运往  $j$  地的费用(元/km);  $T_w$ : 仓储时间(d);  $C_w$ : 罐式集装箱的仓储成本(元/d);  $C_F$ : 单个罐式集装箱的平均维修成本(元/箱);  $\partial$ : 决策周期内,罐式集装箱维修平均概率;  $C_M$ : 决策周期内,单个罐式集装箱的管理成本(元/箱);  $C_{ij}$ : 从  $i$  地调运到  $j$  地的罐式集装箱数量(箱);  $P$ : 单价,罐式集装箱的造价成本(元);  $\omega$ : 不同的决策权重.

### 1.3 目标函数及约束条件

#### (1) 目标函数

本文目标为利润最大,为此建立目标函数:

$$\max R = I - C$$

$$C = pQ + \sum \sum X_{ij} C_{ij} + \sum \sum X_{ij} C_w + \partial \sum X_{ij} C_F + C_M + \omega F$$

其中:  $F$  为惩罚函数;  $\omega$  为目标调整变量,表示决策者对机会成本的重视程度. 利润 = 收入 - 成本. 总成本包括购箱成本、运输成本、仓储成本、维修成本、管理成本和机会成本.

在实践中,罐式集装箱可以存放于用户处充当仓储设备,以减少加气站等固定设施的建造成本.然而,罐式集装箱造价成本高,在用户处储存,相当于闲置,其运营或租箱等收益将减少.对此,本文引入惩罚函数计算机会成本.罐式集装箱单箱建造成本为 640 000 元,以企业内部收益率 15% 为基准,假设残值率为 5%,投资年限为 10 年,则罐式集装箱单箱年投资收益为 125 974 元,一年 365 天,分摊到每天为 353.69 元.以罐箱年投资收益作为仓储费用,则在终端消费点处罐式集装箱单箱仓储成本为  $C_w = 354$  元,因此,本文建立的惩罚函数:

$$F = \begin{cases} (1 - P_{t_a}) \times 354Q \frac{t_a}{t_n} & P_{t_a} \leq 0.97 \\ 0 & P_{t_a} > 0.97 \end{cases}$$

#### (2) 约束条件

本文建立的约束条件如下:

s. t.

$$X_{sd}^t \leq q \quad (1)$$

$$\sum X_{ij}^t = X_{sd}^t \quad (2)$$

$$\sum X_{ij}^t \geq \sum V_j^t \quad (3)$$

$$t_h/2 + t_n + t_d \leq t_s \quad (4)$$

$$t_d = t_h/2 + t_n \quad (5)$$

$$F(t) = 1 - e^{-g(t)} \quad (6)$$

$$g(t) = (t - \partial)/\eta \quad (7)$$

$$\partial = \min(X_{DI}/V_{Di}) \quad (8)$$

$$\beta = \bar{t} - \partial \quad (9)$$

$$\sum_i X_{ij} = \sum_j X_{ji} \quad (10)$$

$$Q = \sum_i X_{ij} \frac{(t_h + t_d)}{t_n} \quad (11)$$

其中: 式(1)表示罐式集装箱转运量应小于 LNG 船舶的额定载货量; 式(2)表示罐式集装箱应保

证供需平衡,满足 LNG 气源供应约束;式(3)表示集装箱配置量应满足 LNG 下游客户货运需求;约束(4)表示罐式集装箱周转时间应小于罐式集装箱的安全储运时间;约束(5)表示公路运输周转时间取为最长的可周转时间,为海上航行时间和班期之和,如果实际内陆周转时间比最长的内陆周转时间长,则将产生惩罚成本;约束(6)—约束(9)表示 LNG 罐式集装箱内陆周转时间规律公式<sup>[7]</sup>;约束(10)为航线均衡运行约束,为保证系统均衡运行,在每个消费终端 D 处,运入的罐式集装箱数量等于运出的罐式集装箱数量;约束(11)为航线总配箱量。LNG 资源最终都将以各种运输方式运至消费终端消费,所以罐式集装箱配置量等于通过各种运输方式运至消费终端的运输量。

2 模拟计算与结果分析

2.1 模型求解算法

LNG 多式联运模式下罐式集装箱配置量预测模型是非线性优化模型,借助 LINGO 软件进行求解。

2.2 实际的 LNG 陆海联运系统的界定、相关数据收集与计算

本文以大连 LNG 接收站为供应点,采用罐式集装箱方式,通过海上集装箱班轮运输将 LNG 运至需求地天津港(以 D 代表天津港),然后再以公路运输方式将 LNG 供给 7 个市内加气站和 1 个加油站等终端客户加气站(分别命名为 D<sub>1</sub>,D<sub>2</sub>,⋯,D<sub>8</sub>)。各节点的需求量与距离如表 1、2 所示。

表 1 LNG 各节点需求总量

Tab. 1 The total demand of LNG in every node

需求点	年需求量		日需求量	
	万 L	万 t	万 L	万 t
D <sub>1</sub>	73	32.85	2	0.9
D <sub>2</sub>	365	164.25	10	4.5
D <sub>3</sub>	292	131.4	8	3.6
D <sub>4</sub>	328.5	147.83	9	4.1
D <sub>5</sub>	693.5	312.08	19	8.6
D <sub>6</sub>	438	197.10	12	5.4
D <sub>7</sub>	584	262.80	16	7.2
D <sub>8</sub>	803	361.35	22	9.9

表 2 各节点间公路运输距离 km

Tab. 2 The distance of each node

	D	D <sub>1</sub>	D <sub>2</sub>	D <sub>3</sub>	D <sub>4</sub>	D <sub>5</sub>	D <sub>6</sub>	D <sub>7</sub>
D	0	48	27	36	26	50	10	40

因需求点 D<sub>1</sub>,D<sub>2</sub>,⋯,D<sub>7</sub> 为市内加气站,故不考虑其运输时间。公路运输费用的计算,通过调研

实际运作,归纳公式为:  $C = 4500 + 0.3 \times \text{货物周转量}$ 。

假设罐式集装箱单箱建造成本为 640 000 元,罐式集装箱的使用年限为 20 a,残值为 5000 元,银行年利率  $i = 8\%$ ,则根据技术经济学中等额系列资本回收公式,  $A = P(A/P, 8\%, 20) - F(A/F 8\%, 20)$ ,可得模型罐式集装箱单箱购箱费用为 65 000 元/(箱·年)。

实践中,投入使用的罐式集装箱为新造箱,管理费用也难以统计,故对模型中涉及的罐式集装箱维修、管理费用等其他费用,采用估算值为 18 000 元。

将收集的数据代入模型,则

$$\max R = 4000X_{SD} - C$$

$$C = pQ + 6000X_{sd} + 2000X_{ds} +$$

$$\sum \sum X_{ij}C_{ij} + 40\left(\frac{X_{ij} \times 16.5}{V_j}\right)X_{ij} + 18\,000 + \omega F$$

2.3 求解结果与分析

借助 LINGO 软件进行求解。程序中,决策周期为 1a,取每航次船舶的平均载箱量  $A = 200$  TEU,运费为重箱 6000 元/TEU,空箱 2000 元/TEU。LNG 罐式集装箱的安全储运时间  $B = 40$  d。每航次的往返航行时间  $H = 6$  d,班期  $N = 7$  d。决策变量  $w = 1$ 。模型运行状况及求解结果如图 1 所示。

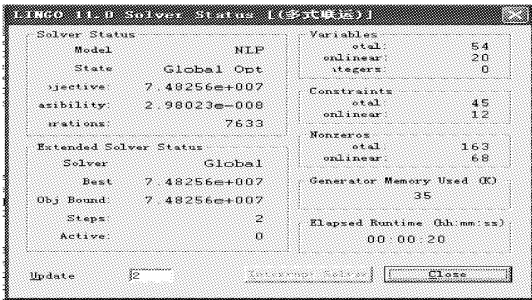


图 1 LINGO 软件运行状态图

Fig. 1 Operation state of LINGO

本文建立的模型为 NLP(非线性规划)模型,全局优化下最优解  $Z = 280$  TEU,利润  $R = 7.48$  千万元,成本  $C = 4.4$  亿元。同时,通过 LINGO 程序求解,可以得到多式联运模式下 LNG 罐式集装箱在内陆节点间的调度优化结果(表 3)。

表 3 各节点罐式集装箱调运数量 TEU

Tab. 3 Scheduling number between each node

	D	D <sub>1</sub>	D <sub>2</sub>	D <sub>3</sub>	D <sub>4</sub>	D <sub>5</sub>	D <sub>6</sub>	D <sub>7</sub>	Sum
D	50	19	15	5	37	23	9	42	200

## 4 结 论

在分析 LNG 罐式集装箱配置影响因素的基础上,以企业利润最大为目标,建立陆海联运下 LNG 罐式集装箱配置量优化模型.在目标函数中引入惩罚函数和决策变量,以进一步优化罐式集装箱的运作效率和满足不同偏好的决策者的需求.在约束条件中,除了考虑运输能力、货物供需和均衡运行约束外,基于 LNG 的安全储运,引入罐式集装箱安全储运时间约束.实例验证表明,该模型可以很好地应用在 LNG 陆海联运罐式集装箱配置优化实践中.

### 参考文献(References):

- [1] CHEN C Y. A two-stage stochastic network model and solution methods for the dynamic empty container allocation problem[J]. *Transportation Science*, 1998, 32(2): 52-60.
- [2] KOZAN E. Optimizing container transfers at multimodal terminals[J]. *Mathematical and Computer Modeling*, 2000, 31(4): 10-12.
- [3] JANSEN B, SWINKELS P C J, TEEUWEN G J A et al.

Operational planning of a large-scale multi-modal transportation system[J]. *European Journal of Operational Research* 2004, 156(1): 41-53.

- [4] 陈超, 曾庆成. 集装箱航线资产配置鲁棒优化模型[J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2009(1): 101-105.  
CHEN Chao, ZENG Qing-cheng. Robust optimization model for asset deployment in a container shipping line[J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2009(1): 101-105. (in Chinese)
- [5] 杨扬, 王迪. 港口集装箱空箱调度的遗传算法优化[J]. *物流科技*, 2010(2): 25-28.  
YANG Yang, WANG Di. Optimize the empty containers disposition of ports with genetic algorithm[J]. *Logistics Sci-Tech* 2010(2): 25-28. (in Chinese)
- [6] 冀玉. 海铁联运集装箱空箱调运问题研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2011.  
JI Yu. Research on empty containers reposition for sea-rail transportation [D]. Dalian: Dalian Maritime University 2011. (in Chinese)
- [7] 周翔. 对集装箱内陆周转时间分布规律的讨论[J]. *集装箱化*, 2002(10): 14-17.  
ZHOU Xiang. Discussion on timing law for container is-land turn-round [J]. *Containerization*, 2002(10): 14-17. (in Chinese)

(上接第 112 页)

## 5 结 论

一方面,应合理布局大型原油码头,使我国原油进口的主要接卸港能够满足 VLCC 以及未来更大型油轮的服务需求,从而保证我国进口原油的承接;另一方面,构建多元化的石油供应格局,实施多元化的原油进口战略,从而降低产油国政治风险及地区冲突对我国原油进口的干扰和影响,保证进口原油的供应;此外,还应不断谋求新的运输通道,加大管道等陆上运输线路的开拓,形成多元化石油运输网络,以分散过度依赖海上运输带来的安全问题.

### 参考文献(References):

- [1] 贾大山, 孙峻岩, 罗洪波. 中国石油海运通道安全评价与对策[J]. *大连海事大学学报* 2006, 32(2): 62-66.  
JIA Da-shan, SUN Jun-yan, LUO Hong-bo. Chinese importing oil marine lane safety evaluation and strategy [J]. *Journal of Dalian Maritime University*, 2006, 32(2): 62-66. (in Chinese)
- [2] 杨晓龙, 刘希宋. 我国石油进口风险分析及对策[J]. *技术经济* 2005(8): 31-34.  
YANG Xiao-long, LIU Xi-song. Risk analysis and countermeasures study on China petroleum importing [J]. *Technology Economics*, 2005(8): 31-34. (in Chinese)

- [3] 王彬. 我国原油进口海上运输通道安全保障研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2009.  
WANG Bin. Analysis on the safety of SLOCS for crude oil import of China [D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2009. (in Chinese)
- [4] 陈飞儿, 张仁颐. 我国原油进口航线网络的优化[J]. *上海海事大学学报* 2006, 27(2): 75-80.  
CHEN Fei-er, ZHANG Ren-yi. Optimization of Chinese crude oil import route network [J]. *Journal of Shanghai Maritime University*, 2006, 27(2): 75-80. (in Chinese)
- [5] 初良勇. 我国水上石油物流系统与分拨运输网络研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2007.  
CHU Liang-yong. Study on waterborne petroleum logistics system and distribution & transportation network of China [D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2007. (in Chinese)
- [6] 李敏敏. 基于需求分布的中国原油进口海运运输网络优化研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2009.  
LI Min-min. The optimization of an imported crude oil maritime transportation network for China based on demand distribution [D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2009. (in Chinese)
- [7] 辻井道伸. 关于马六甲·新加坡海峡海盗威胁的风险评估[D]. 大连: 大连海事大学, 2009.  
SHI JING Dao-shen. The risk assessment on the piracy in Malacca-Singapore Strait [D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2009. (in Chinese)