

基于HYSYS的LNG冷能利用方案设计与优化

汪自钊

江苏科技大学能源与动力学院, 江苏 镇江

收稿日期: 2023年7月17日; 录用日期: 2023年9月5日; 发布日期: 2023年9月12日

摘要

本文针对某型液化天然气(LNG)燃料动力渔船, 基于船舶的发电、冷库及空调的需求, 同时考虑船内余热资源以及发动机消耗的LNG汽化冷能, 以实现LNG冷能的梯级合理利用为目标, 提出其综合利用设计方案。在对设计方案系统利用Aspen HYSYS软件进行流程模拟计算的基础上, 对设计方案的循环工质选择等方面进行了优化, 最终优化方案经过工质优化后总体焓效率达到了39.54%, 设备投入可以在2.1年内回收成本。

关键词

LNG冷能, 梯级利用, 焓分析, 优化分析

Design and Optimization of LNG Cold Energy Utilization Scheme Based on HYSYS

Zizhao Wang

Energy and Power Department of Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang Jiangsu

Received: Jul. 17th, 2023; accepted: Sep. 5th, 2023; published: Sep. 12th, 2023

Abstract

This article focuses on a certain type of liquefied natural gas (LNG) fuel powered fishing vessel, based on the needs of power generation, cold storage, and air conditioning of the vessel, while considering the residual heat resources inside the vessel and the LNG vaporization cooling energy consumed by the engine. The goal is to achieve the rational utilization of LNG cooling energy in a cascade manner, and proposes a comprehensive utilization design scheme. On the basis of using Aspen HYSYS software for process simulation calculations in the design scheme system, optimization was carried out on the selection of circulating working fluids in the design scheme. After optimizing the working fluids, the overall efficiency of the optimized scheme reached 39.54%, and

the equipment investment can recover costs within 2.1 years.

Keywords

LNG Cold Energy, Step Utilization, Exergic Analysis, Optimization Analysis

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着全球经济发展和人口增加,各种环境污染和能源短缺问题越来越严重,液化天然气(LNG)作为一种洁净能源因为其经济高效和灵活方便等优势,逐渐代替传统煤和石油化石能源,在各种能源应用领域得到了广泛的应用[1]。与之相关的 LNG 冷能作为一种高品质的能量,其利用技术也开始得到高度重视,目前众多学者针对 LNG 冷能利用做了大量的研究,通常可应用于船舶的发电[2]、海水淡化[3]、冷库[4]和空调[5]等日常功能。

胡选哲等[6]针对 4800 kW 的双燃料拖船,对其设计了一种发电系统来回收 LNG 冷能和烟气余热,然后对循环工质以及热交换器端部温差进行优化分析,最终方案可以减少一个发电机组,产生较好的经济效益和环境效益。董建锴等[7]设计了一种新型的 LNG 冷能制冷的冷库系统,并对其进行了热力学分析和经济分析,结果表明该系统的焓效率达到 80.2%,投资预计 4.77 年回本,产生良好的经济效益。黄兴旺等[8]设计一套新型的船舶冷库和空调系统,然后选择了系统所需的冷媒并对其进行模拟分析,结果表明通过该系统可以有效地利用 LNG 冷能作为冷库和室内空调的冷源,从而达到节能降耗的目的。

本文以瓦锡兰 6L34DF 为主机的 LNG 燃料动力渔船为对象,有针对性地设计船舶 LNG 冷能综合利用方案,通过采用 Aspen Hysys 对该系统进行模拟分析,并进一步对循环工质进行匹配优化,以期得到以该型双燃料发动机为动力的渔船 LNG 冷能梯级最佳利用方案。

2. LNG 冷能利用系统设计

为了实现 LNG 冷能和船舶的缸套冷却水携带的低品位热能的利用,本文基于冷能梯级利用的原则设计了一种 LNG 冷能综合利用系统。具体流程如图 1 所示,该系统由四部分组成:第一部分朗肯循环发电系统,其流程为从储罐出来的 LNG 通过泵 P-100 将其加压到 0.65 MPa,然后通过热交换器 LNG-100 与朗肯循环发电系统中循环工质进行热交换。循环工质经泵 P-101 加压以及回热器 LNG-101,先在换热器 LNG-105 处与低温冷库的循环工质进行初步换热,然后在换热器 LNG-106 与缸套冷却水进行换热,将循环工质加热为过热蒸汽,在膨胀机 K-100 中做功,降压后工质进入回热器 LNG-101 以及换热器 LNG-100 中被冷凝为饱和液体后进入下一次循环。第二部分为低温冷库系统,循环工质在朗肯循环发电系统中的 LNG-105 换热以及在换热器 LNG-102 与液化天然气换热后混合在一起,经过泵 P-102 增压,然后通过蒸发器 E-100 释放冷能为低温冷库提供冷量,最后换热后的循环工质通过 TEE-100 重新分流后与朗肯循环系统和 LNG 换热,完成一个低温冷库循环。第三部分高温冷库系统,从蒸发器 E-101 出来的循环工质在换热器 LNG-103 中与 NG 换热后冷凝,经过泵 P-103 增压,然后进入蒸发器 E-101 释放冷能,最后流入 LNG-103 完成一个高温冷库循环。第四部分空调系统,从蒸发器 E-102 出来的循环工质在换热器 LNG-104

中与 NG 换热后冷凝，经过泵 P-104 增压，然后进入蒸发器 E-102 释放冷能，最后流入 LNG-104 完成一个空调循环。

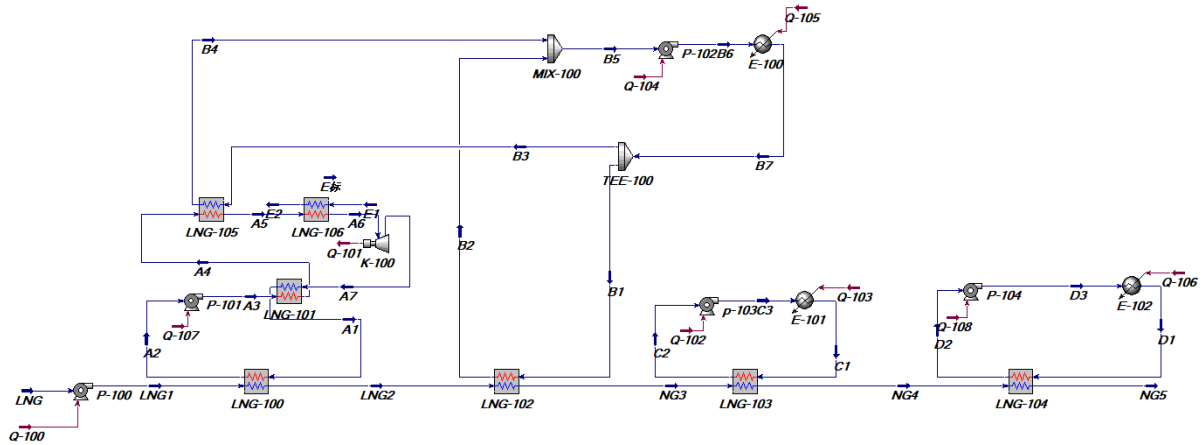


Figure 1. System flow chart
图 1. 系统流程图

对于低温朗肯循环的循环物质选择，要尽量遵循以下几点要求：环境友好性、较高的导热系数、热稳定性、较低的凝固点、较好的流动性、安全性和经济性等通用性，同时需要考虑冷凝压力蒸发压力与对应温度的关系，选择更加贴合 LNG 换热曲线的工质，本文根据文献[9]选择的单一工质如表 1 所示。

Table 1. Refrigerants for each module
表 1. 各模块制冷剂

模块	朗肯循环	低温冷库循环	高温冷库循环	空调
制冷剂	R1150	R600	R600	C12-C1

3. 数学模型的建立

3.1. 热力学模型

对 LNG 冷能的梯级利用进行热力学分析，其中系统各个参数点的焓流定义为：

$$E = m \cdot \psi \tag{1}$$

$$\psi = (h - h_0) - T_0 \cdot (s - s_0) \tag{2}$$

式中：ψ 表示比焓。

所有设备或系统的焓效率可定义为：

$$\eta = \frac{\Delta E_{x,rev}}{\Delta E_{x,in}} \tag{3}$$

式中：ΔE_{x,rev} 为收益的焓，ΔE_{x,in} 为付出的焓。

对于 LNG 冷能发电模块焓效率可定义为：

$$\eta_{发电} = \frac{P_x}{\Delta E_{LNG,in} + P_{泵,x}} \quad (4)$$

式中： P_x 为膨胀机输出功率，kW； $\Delta E_{LNG,in}$ 为发电模块所对应的 LNG 所付出的冷焓，kW； $P_{泵,x}$ 为发电模块工质泵的功率，kW。

系统总焓效率可定义为：

$$\eta_{系统} = \frac{\sum P_x + \sum \Delta E_{x,rev}}{\Delta E_{LNG,in} + \sum P_{泵,x}} \quad (5)$$

式中： $\sum P_x$ 为各发电模块膨胀机输出功总和，kW； $\sum \Delta E_{x,rev}$ 为低温冷库、高温冷库和空调模块冷负荷之和，kW； $\Delta E_{LNG,in}$ 是整个系统 LNG 所付出的冷焓，kW； $\sum P_{泵,x}$ 为系统各个泵功之和，kW。

3.2. 模拟所需的假设及参数

采用 Aspen HYSYS 软件对图 1 初始设计系统进行模拟时，做如下假设：1) 初始循环工质冷凝压力取 0.25 MPa；2) 换热器最小端差为 5℃，换热器压降为 0；3) 朗肯循环换热器中，热物流工质出口过冷度取为 2℃；4) 忽略所有换热器漏热损失和压力损失；5) 透平机入口的工质状态为饱和气体；6) 缸套水进口温度取 90℃，压力为 101 kPa，出口取 70℃；

该船主机型号为瓦锡兰 6L34DF，该主机的参数由文献[10]可知，如表 2 所示，船舶各个模块所需冷量如表 3 所示。

Table 2. Host parameter

表 2. 主机参数

主机型号	瓦锡兰 6L34DF
燃气消耗量 kg/h (80%功率)	525.1
进气压力/MPa	0.60~0.65
进气温度/℃	0~60
最大额定持续功率	3000

Table 3. The cooling capacity required for each module of the ship

表 3. 船舶各模块所需冷量

模块	冷量需求/kW
低温冷库(-60℃)	30
高温冷库(-25℃)	30
空调(12℃)	15

4. 计算结果分析与优化

4.1. 冷能利用系统模拟结果及其分析

通过前文热力计算，得出各个部分的效率和焓损如表 4 所示。由表中数据可以分析出，系统总焓效

率为 38.32%，焓损主要集中在朗肯循环发电部分，而在朗肯循环中 LNG-100 焓损占比最大，焓损为 44.58 kW。该系统不仅满足了全船冷库空调所需要的冷量，还能利用高品位的冷能发电，有效降低了全船的能耗。

Table 4. Analyze the result of calculation systematically

表 4. 系统焓分析计算结果

参数	朗肯循环	低温冷库	高温冷库	空调	整个系统
焓效率(%)	38.14	58.69	66.51	62.84	38.32
焓损(kW)	65.80	8.85	0.99	0.45	76.09

4.2. 工质优化

对于系统循环工质进行优化，要求选取工质的温熵曲线图更加贴合 LNG 换热曲线，才能降低系统的焓损。由系统焓分析看出该系统的焓损还是集中在朗肯循环发电这一块，而朗肯循环发电部分的焓损仍然主要集中在换热器 LNG-100 上，对单一工质的选择，已经无法有效地降低系统的焓损，而对朗肯循环发电部分工质考虑采用非共沸混合工质可以有效减低焓损[11]，所以考虑采用非共沸混合工质。为选择合适的混合工质，图 2 给出了几种常见的单一工质和 LNG 温熵曲线的对比。由图可知，甲烷、乙烷、乙烯与 LNG 汽化曲线较为相近，因此可以考虑将甲烷、乙烷和乙烯作为混合工质。

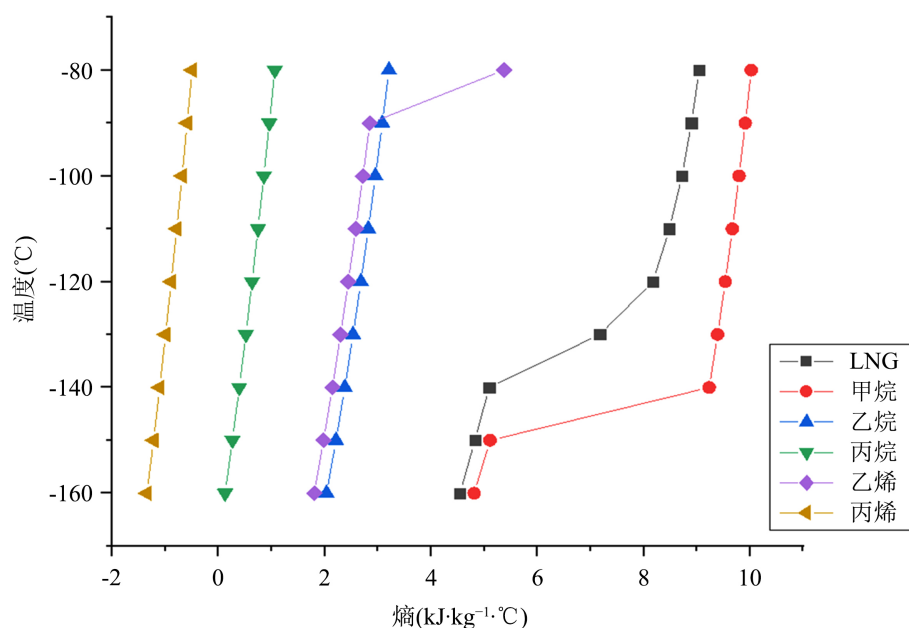


Figure 2. The temperature entropy curves of LNG (650 kPa) and common single refrigerant

图 2. 常见单一工质与 LNG (650 kPa) 温熵曲线图

通过 ASPEN HYSYS 软件改变朗肯发电循环混合工质(甲烷:乙烷:乙烯)的比例进行模拟可知，当甲烷的比例高于 50% 时，系统将出现温度交叉。下面分别选取混合工质的比例为 5:4:1、4:5:1、2:6:2、2:5:3 和 1:5:4 时所得到的混合工质与 LNG 温熵曲线图，如图 3 所示。从图中可以看出，朗肯循环的混合工质比例为甲烷:乙烷:乙烯 = 5:4:1 时，其温熵曲线最接近 LNG 的温熵曲线，所以朗肯循环的最佳混合工质比例为甲烷:乙烷:乙烯 = 5:4:1。

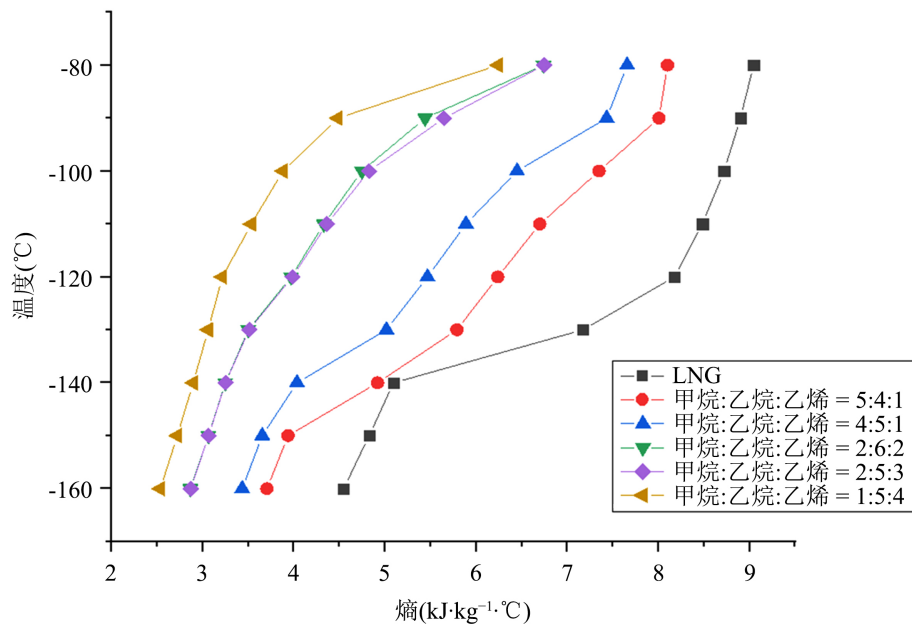


Figure 3. The temperature entropy curves of mixture (250 kPa) and LNG (650 kPa)
图 3. 混合工质(250 kPa)与 LNG (650 kPa)温熵曲线图

通过给出了工质优化前后系统膨胀机输出功率与系统总焓效率的比较情况, 计算可以得出, 当改用非共沸混合工质后, 透平输出总功率 18.02 kW 增加到 19.88 kW, 增加了将近 1.8 kW, 且系统的总焓效率也有所提升, 从最初的 38.32% 提升至 39.54%, 相比工质优化前提升了 1.4%。

5. 经济性分析

5.1. 初始设备投入

根据文献[12], 给出了系统所投入设备的总投资估算值, 如表 5 所示。

Table 5. The cost of capital investment for each component
表 5. 各组成部分的资本投资成本

设备	单价(万元)	数量	资本成本(万元)
泵	0.2	5	1
换热器	2	7	14
蒸发器	3	3	9
膨胀机	8	1	8
总计			32

5.2. 系统运行收益分析

冷库和空调制冷耗电量采用以下公式[13]计算:

$$\frac{E_{xp}}{Q} = \frac{1}{COP} \quad (6)$$

其中, E_{sp} 为制冷耗电量, Q 为总制冷量, COP 为制冷系数, 选低温冷库制冷系数为 2, 高温冷库制冷系数为 2.5, 空调制冷系数为 3。船舶发电、冷库、和空调全年运行天数为 300 天, 最终优化设计方案年收益计算如表 6 所示。通过计算可以得到回收成本周期为 2.1 年。

Table 6. The electricity cost saved by each module
表 6. 各模块所节约电费

评定项目	冷库	空调系统	发电
压缩机平均功率/(kW)	3.88	0.9	19.88
每年运行时间/(d)	300	300	300
每年节约电能/(kW·h)	27,936	6480	143,136
电价/(元/kW·h)		0.86	
每年节约金额/元	24024.96	5572.80	123096.96
合计万元/(每年)		15.27	

6. 结论

本文针对某主机型号为瓦锡兰 6L34DF 的 LNG 燃料动力渔船, 对 LNG 冷能综合利用进行设计与优化研究, 得到以下几点结论:

1) 所设计方案在能够充分地利用船上 LNG 冷能, 满足船上低温冷库、高温冷库、空调的冷能需求的同时进行 LNG 冷能发电。

2) 经工质筛选优化, 该系统中的最佳匹配工质是: 朗肯循环发电系统混合工质配比为甲烷:乙烷:乙烯 = 5:4:1。

3) 通过设计方案优化, 所设计优化方案最终的焓效率提升达到 39.54%, 不仅满足船上冷量需求, 同时获得每年 15.27 万元的较高效益, 设备投入可以在 2.1 年内回收成本。

参考文献

- [1] 李俊, 陈煜. LNG 冷能回收及梯级利用研究进展[J]. 制冷学报, 2022, 43(2): 1-12.
- [2] 杨桑宇, 胡德栋, 李博洋, 于成龙. LNG 船冷热综合利用方案中冷能发电系统的研究[J]. 中国航海, 2021, 44(4): 20-25.
- [3] 张晓荣, 张运秋, 张金男. 考虑 LNG 冷能利用的船用海水淡化装置设计[J]. 船海工程, 2019, 48(1): 71-74+80.
- [4] 汪乘红, 陈叔平, 杨发禄, 姚淑婷, 金树峰, 陈鸿乔, 赵一力. 基于 LNG 接收站冷量的冷库系统设计及经济分析[J]. 低温与超导, 2018, 46(10): 19-24.
- [5] 马哲树, 董瑞, 葛鹰, 李庆, 杨珊珊. 应用 LNG 冷能的船舶空调系统设计及分析[J]. 江苏科技大学学报(自然科学版), 2016, 30(3): 237-241+253.
- [6] 胡选哲, 孙文哲, 顾骁勇, 侯龙, 冯梦娇. LNG 动力船冷能和余热发电系统的模拟优化[J]. 中国航海, 2016, 39(2): 19-23.
- [7] 董建锴, 黄顺, 李硕, 姚杨, 姜益强. LNG 冷能用于冷库制冷性能模拟研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2017, 49(2): 103-108.
- [8] 黄兴旺, 李博洋, 胡德栋, 陈兰树, 杨桑宇. 利用 LNG 冷能的船舶冷库与空调系统设计及分析[J]. 船舶工程, 2019, 41(6): 54-57+124.
- [9] 薛菲尔. 基于 LNG 冷能利用的梯级低温朗肯动力循环优化与分析[D]: [硕士学位论文]. 上海: 上海交通大学, 2017.

-
- [10] 张玉健, 顾丛汇, 姚寿广. 某渔船燃料 LNG 冷能利用方案的设计和优化[J]. 船舶工程, 2022, 44(1): 1-7+40.
 - [11] 薛倩, 王晓霖, 刘名瑞, 李遵照. 基于混合工质的 LNG 冷能分段利用研究[J]. 工程热物理学报, 2018, 39(6): 2-4.
 - [12] 刘锐, 沈妍, 吴春明, 等. 3500 t 双燃料主机运输船 LNG 冷能利用方案设计与优化[J]. 江苏科技大学学报(自然科学版), 2021, 35(5): 38-43.
 - [13] 吴集迎, 马益民. 利用 LNG 梯级冷能的冷库系统构建与载冷剂选择[J]. 集美大学学报(自然科学版), 2012, 17(2): 126-130.