

DOI: 10.19666/j.rlfed.202502121

华瀛液化天然气接收站冷能梯级利用 工艺设计及能效优化

黄 华¹, 周万伟², 季炫宇², 袁志超¹, 周 雄², 欧阳顺¹, 李已聪¹, 杨 鲁²

(1.华瀛天然气股份有限公司, 广东 潮州 521000;

2.重庆科技大学资源循环利用与碳中和技术研究院, 重庆 400000)

[摘 要] 基于广东华瀛液化天然气(LNG)接收站的设计运行条件和周边产业环境, 首先设计了一套热机循环发电耦合浅冷冻库的LNG冷能梯级利用方案, 并采用专业软件HYSYS建模求解流程中的关键参数, 以提升能效和大规模消纳冷能为目标, 对原有方案进一步优化改进。结果表明: 在全年最低气化日LNG外输量为228 t/h的条件下, 原方案采用一级热机循环与冻库结合, 年发电量超过 3.283×10^4 kW·h, 并满足了7 500 m³冻库的冷负荷需求; 而优化设计后的新方案采用“两级热机循环-浅冷冻库”设计, 通过提升热源温度, 并改用质量分数40%乙烷和60%丙烷的混合工质, 使热机循环系统的设计年发电量可提升至 6.204×10^4 kW·h, 单位质量LNG的净发电量从原先的17.54 (kW·h)/t增加到33.02 (kW·h)/t, 还可节约约5 364.1万元/年电费。尽管多级的热机循环能够减少温差造成的不可逆损失, 但考虑投入产出比及运行可靠性等因素, 第二方案能与华瀛LNG接收站实际条件紧密结合, 具有较好的工程可行性和经济性。上述2种冷能梯级利用设计方案各有优势, 适用于接收站的不同发展阶段和LNG冷能利用的不同评价指标, 为华瀛LNG接收站全面投产后的冷能利用提供了有益参考。

[关 键 词] 液化天然气; 冷能梯级利用; 热机循环; 能效优化; 经济性评价

[引用本文格式] 黄华, 周万伟, 季炫宇, 等. 华瀛液化天然气接收站冷能梯级利用工艺设计及能效优化[J]. 热力发电, 2025, 54(11): 49-57. HUANG Hua, ZHOU Wanwei, JI Xuanyu, et al. Research on cold energy cascade utilization process design and energy efficiency optimization for Huaying LNG receiving station[J]. Thermal Power Generation, 2025, 54(11): 49-57.

Research on cold energy cascade utilization process design and energy efficiency optimization for Huaying LNG receiving station

HUANG Hua¹, ZHOU Wanwei², JI Xuanyu², YUAN Zhichao¹, ZHOU Xiong²,
OUYANG Shun¹, LI Sicong¹, YANG Lu²

(1.Huaying Natural Gas Co., Ltd., Chaozhou 521000, China;

2.Institute of Resource Recycling and Carbon Neutral Technology, Chongqing University of Science and Technology, Chongqing 400000, China)

Abstract: Based on the design and operational conditions of Guangdong Huaying LNG Terminal and its surrounding industrial environment, a cascade utilization scheme integrating thermodynamic power generation with shallow cold storage was developed. Moreover, key process parameters were modeled and solved using HYSYS software to enhance energy efficiency and maximize cold energy utilization. The results show that, under the condition of minimum daily send-out (228 t/h), the original single-stage thermodynamic cycle coupled with cold storage achieved an annual power generation exceeding 32.83 GW·h while meeting the cooling demand of a 7 500 m³ cold storage facility. The optimized scheme adopts a two-stage thermodynamic cycle with shallow cold storage, via employing a 40% (weight percentage) ethane and 60% (weight percentage) propane mixed working fluid, and elevating heat source temperature, this improved design increased the annual power generation to 62.04 GW·h, and raised the net power output per unit mass of LNG from 17.54 (kW·h)/t to 33.02 (kW·h)/t, with estimated annual

收稿日期: 2025-02-13

第一作者简介: 黄华(1984), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为LNG储运及能源综合利用, hh18513102383@163.com。

通信作者简介: 季炫宇(1981), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为可再生能源与工业节能技术, jixuanyu@cqust.edu.cn。

electricity cost savings of approximately 53.641 million yuan. Although multi-stage heat engine cycles can reduce irreversible losses caused by temperature differences, considering factors such as cost-benefit ratio and operational reliability, the second scheme demonstrates strong engineering feasibility and economic viability by closely aligning with the actual conditions of the Huaying LNG Receiving Terminal. Both cascade utilization designs demonstrate distinct advantages for different development stages of the receiving terminal and different evaluation indicators for LNG cold energy utilization, providing valuable references for post-commissioning cold energy applications.

Key words: liquefied natural gas; cold energy cascade utilization; thermodynamic cycle; energy efficiency optimization; economic evaluation

作为全球最大的液化天然气 (LNG) 进口国, 2023 年中国 LNG 进口量达 7 132 万吨(约 984 亿 m^3), 同比增长 12.6%, 占全国天然气进口总量的 59.4%, 是我国天然气进口的最主要途径之一^[1]。LNG 储运温度通常维持在 $-162\text{ }^\circ\text{C}$ 以下, 在经管网供应给下游用户之前, 必须先加热气化至环境温度, 在这个过程中 LNG 约释放冷量 $830\sim 860\text{ kJ/kg}$ ^[2]。如何因地制宜、高效经济地回收利用 LNG 冷能是接收站需要解决的迫切问题。在全球范围内, 其不同温域范围内 LNG 冷能的利用方式主要包括直接利用、间接利用 2 大类^[3-4]。

LNG 冷能发电是利用 LNG 与环境 (或工业热源) 的温差, 让工质在二者之间通过热机循环做功实现发电^[5]。近年来国内外大量学者对 LNG 冷能发电技术展开研究, 基于 LNG 冷能研发的发电技术不断革新进步, 如低温动力系统^[6]、储能发电系统^[7]、热声 Stirling 发电机^[8]、以 LNG 和低温废热为冷热供应源, 以氨水为工质的冷、电联产系统等。而 Li Yongyi 团队^[9]研究了 3 个不同结构基于 LNG 冷能利用的联合发电系统: LNG 直接膨胀联合朗肯循环、2 个平行朗肯循环的联合、双膨胀结构再热系统, 再在流体参数与热力参数上进行优化改良。Shingan Bhalchandra 等^[10]结合了朗肯循环和直接膨胀循环, 以确定系统的净功率产生和效率, 结果发现工作流体压力、LNG 质量流速和涡轮机输出压力是实现最佳结果的关键变量。曾丽瑶^[11]通过对比指出朗肯循环法 (ORC) 具有经济性好、效率高、冷能回收较高的特点, 并且当工质为饱和碳氢化合物 (HC 族) 如丙烷和丁烷则有更高的单位工质净输出功。

本文针对中国石油化工集团有限公司 (中石化) 华瀛 LNG 接收站的设计生产条件, 以及其周边的产业布局和冷能需求等禀赋资源, 对 LNG 冷能梯级利用的路径进行规划设计, 并从工艺技术、经济效益和节能降碳等方面进行优化改进, 通过对比

分析不同的工艺技术方案, 为该接收站未来建设运营 LNG 冷能回收利用项目提供有益参考。

1 华瀛 LNG 接收站介绍

华瀛 LNG 接收站项目位于广东省潮州市饶平县潮州港经济区金狮湾远景港区。项目一期规划 LNG 最大气化外输能力为 $600\times 10^4\text{ t/a}$; 其中管道外输设施能力为 $460\times 10^4\text{ t/a}$ 。一期管道最小气化量为 $32\times 10^4\text{ Sm}^3/\text{h}$ (约为 228 t/h), 项目将采用中介质气化器 (IFV) 进行 LNG 气化, 其气化热源为常温海水, 海水换热后排海温降小于 $5\text{ }^\circ\text{C}$ 。单台 IFV 满负荷工作时所需海水流量约为 $8\ 000\text{ m}^3/\text{h}$, 一期设计 IFV 总流量共 $40\ 000\text{ m}^3/\text{h}$ 。

与 LNG 接收站毗邻, 且厂区中心距仅 3.5 km 的大唐潮州火力发电厂, 已建成投用 $2\times 600\text{ MW}$ 和 $2\times 1\ 000\text{ MW}$ 超超临界燃煤机组, 采用海水直冷冷凝系统, 冷却水源为临近港区海水, 流量约为 $20\ 000\text{ t/h}$ 。同时规划了 2 套 460 MW 的燃气蒸汽联合循环机组, 采用冷却塔循环水冷凝系统以减少外排海水的“热污染”, 循环水总流量约为 $60\ 000\text{ t/h}$ 。因对海洋生态环境保护的要求, 外排海水最高温升不超过 $8\text{ }^\circ\text{C}$ 。华瀛站当地全年平均海水水温为 $21.6\text{ }^\circ\text{C}$, 9 月夏季平均水温较高为 $26.6\text{ }^\circ\text{C}$, 2 月冬季平均水温较低为 $14.9\text{ }^\circ\text{C}$ 。

2 华瀛 LNG 接收站冷能梯级利用方案设计

在 LNG 冷能利用中, 深冷部分的空气分离、低温发电等技术较为成熟; 且据市场调研发现, 潮州当地及周边的空分市场已经趋于饱和。故在方案设计中, 拟采用低温发电方式对 LNG 的深中冷部分进行回收利用。同时, 华瀛 LNG 接收站周边暂未有较大规模的冻库产业, 在冷链市场方面存在一定的缺口, 因此 LNG 的浅冷部分可考虑用于冻库取冷替代机械压缩制冷, 从而实现低成本储存高价值海鲜产品, 其 LNG 冷能梯级利用的工艺路线如图 1。

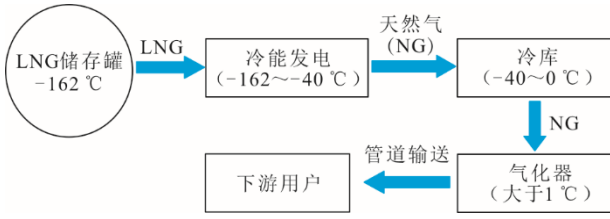


图 1 华瀛 LNG 接收站冷能梯级利用路线
Fig.1 The cascade utilization route of cold energy in Huaying LNG Terminal

2.1 LNG 冷能发电工艺设计

LNG 冷能发电技术已相对成熟，在实际工程应

用中已出现多种工艺方式，表 1 列出了较为主流的 LNG 冷能发电工艺方式^[12]。

从表 1 可以看出，每种方法都有各自的优缺点，实际工程应用也有所不同。相对于其他方法，低温朗肯循环法具有原理简单、适用性强的特点，且投资相对较小，同时也符合环保要求。综合考虑后，本文首先选择低温朗肯循环法用于 LNG 冷能发电工艺，并将浅冷部分用于冻库以提升 LNG 冷能梯级利用的整体能效。

表 1 常见发电方式优缺点对比
Tab.1 The advantages and disadvantages of common power generation methods

发电方式	优点	缺点	适用性
直接膨胀法	简单易实现	利用效率较低	主要用于小型 LNG 气化站，国外已投用多套
低温朗肯循环法	投资不高，原理简单，环保	利用效率较低	适用性强，国外已投用多套
联合法	整合不同技术优势，效率高	系统较复杂，初始投资和管理成本高	主要用于低压外输管网，国外已投用多套
混合媒体法	效率较高，可覆盖 LNG 更大的冷能温域	系统较复杂，混合工质选择比较关键	适用于大型 LNG 气化站

表 2 为几种常见的工质物性。相比于其他工质，丙烷具有较低的常压沸点和凝固点，使其在常温下易于液化，适用于多种应用场景；其次，丙烷具有适中的临界温度和临界压力，使其操作过程相对稳定可控，有利于系统安全运行；此外，丙烷相对乙烷而言价格较为经济，而且在许多地区具有广泛的供应渠道，使其成本效益更高。结合目前所需温度及相关技术的成熟运用，选用丙烷作为循环工质。

表 2 几种常见工质物性参数
Tab.2 Physical properties of common working fluids

工质	常压沸点/°C	凝固点/°C	临界温度/°C	临界压力/MPa
乙烷	-88.6	-182.5	32.2	4.6
丙烷	-42.1	-187.7	36.0	4.3
正丁烷	-0.5	-138.3	38.0	3.8
异丁烷	-11.7	-140.3	36.0	3.7
乙烯	-103.7	-169.2	9.2	5.0
丙烯	-47.7	-103.8	8.4	4.6

2.2 LNG 浅冷冻库换热工艺设计

冷能发电后，出口天然气 (NG) 温度可提升至 -40 °C 左右。由于发电系统出口 NG 温度仍然较低，而冻库所需的冷能品位不高，可将这部分 LNG 浅冷用于冻库，实现 LNG 冷能梯级利用。

2.2.1 冻库冷媒选择

冻库功能区的工作温度一般为 -30~10 °C，为了降低换热温差，提高冷能利用率，通常采用中间

冷媒进行换热。冷媒需要满足多方面要求，其中包括安全性、抗腐蚀性及热传导性能等。相比于市场其他冷媒，乙二醇水溶液（质量分数 68%）具有较低的凝固点，使其在低温环境下不易结冰，能够匹配供冷温度，有利于冻库设备的稳定运行。其次，乙二醇水溶液具有良好的热传导性能，对冻库设备和管道没有腐蚀性，安全可靠，有助于延长设备使用寿命。结合目前所需的温度及相关技术的成熟运用^[13-14]，选择质量浓度 68% 乙二醇水溶液作为冷媒将 NG 冷能置换出来用于冻库项目，为显热载冷，冻库内部的冷媒通常为液氨。

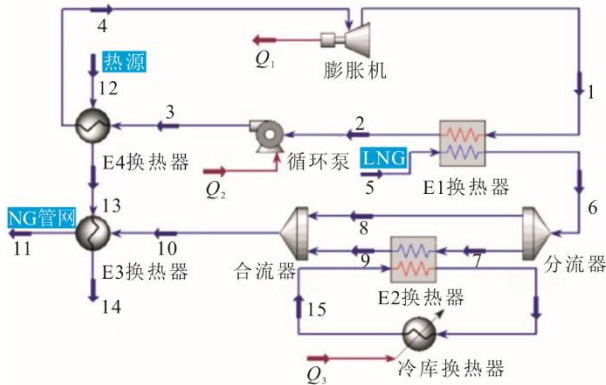
2.2.2 冻库规模及冷能需求

本文设计冻库为储存海鲜的单层低温冻库，库长 50 m、宽 30 m、高 5 m；其设计总容量为 7 500 m³，占地面积 1 500 m²。按 1 m³冷负荷 120 W 计算，冻库总冷负荷约为 900 kW，1 h 所需冷能为 3 240 MJ。为了能够给冻库传递冷量，保证冻库的稳定运行，乙二醇溶液的高、低温度应符合冻库工作温度区间。设计乙二醇溶液入口温度为 0 °C，出口温度为 -35 °C，根据热平衡计算出理论所需要的乙二醇水溶液流量为 38.57 t/h。

2.3 LNG 梯级利用工艺流程搭

本文利用 Aspen HYSYS 软件设计了如图 2 所示的 LNG 冷能用于“一级热机循环-浅冷冻库”的

梯级利用工艺流程。其中，在 E1 换热器的节点 6 出口设置 NG 旁路用于冻库用冷，使得旁路中 NG 流量匹配冻库所需冷量。整个系统的温度区间遵循梯级利用原则，采用不同的循环介质配合不同项目，将冷能利用率进一步提高；同时此系统具有简单的工艺结构，以及较强的扩展性和灵活性。热源暂选海水，使得该工艺适用于沿海大多数 LNG 接收站，具有普适性。



Q₁、Q₂为对应设备的输出功；Q₃、Q₄为对应设备的输入功

图 2 LNG 冷能梯级利用工艺流程

Fig.2 Process flow of LNG cold energy cascade utilization

为避免后续 LNG 用气量在不同季节的调峰要求影响冷能发电工艺，故在冷能利用中，按照最小的 LNG 外输量 228 t/h 设计，夏季 9 月平均海水水温为 26.6 °C。采用实际运营数据作为 LNG 冷能梯级利用的输入条件，具体见表 3。

表 3 LNG 冷能梯级利用输入条件

Tab.3 Input conditions for LNG cold energy cascade utilization

项目	内容	
LNG 的摩尔组分/%	甲烷	99.81
	氮气	0.18
	乙烷	0.01
LNG 设计质量流量/(t·h ⁻¹)	228	
LNG 入口温度/°C	-162.0	
LNG 入口压力（绝对压力）/kPa	7 300	
海水入口温度/°C	26.6	
海水设计质量流量/(t·h ⁻¹)	8 000	
热机循环发电介质	丙烷	
冻库冷媒循环介质	质量分数 68%的乙二醇溶液	
丙烷循环泵的压差/kPa	850	
膨胀机内效率%	80	
丙烷循环泵绝热效率/%	75	
换热器压差的沿程损失/kPa	10~50	

3 结果及分析

3.1 工艺参数

通过 HYSYS 软件计算得出相关的工况模拟计

算结果如表 4 所示。其中，系统出口节点 6 的 NG 温度为-76.7 °C，后端仅需要 9.5 t/h 的 NG 质量流量便可以为 7 500 m³ 冻库提供足够冷能。NG 在系统总出口温度为 24.48 °C，达到输送至下游客户使用要求，外排海水在系统出口温度为 21.62 °C，符合当地外排水的温降要求。由此可知，整个系统设计运行参数符合工艺要求和环保法规，即 LNG 冷能用于“一级热机循环-浅冷冻库”的联合方式可实现稳定的梯级利用。

表 4 模拟工况下系统发电、供冷情况

Tab.4 Power generation and cooling supply under simulated conditions

项目	模拟计算结果
发电系统 LNG 冷能/kW	54 720.0
膨胀机输出功率/kW	4 104.0
循环泵功耗/kW	105.5
热机（发电）效率/%	7.5
单位质量 LNG 的净发电量/(kW·h·t ⁻¹)	17.54
冻库系统中 NG 的质量流量/(t·h ⁻¹)	9.5
冻库供冷功率/kW	958.6
LNG 冷能综合利用率/%	9.3

注：忽略膨胀机输出的机械能转化为电能过程的能量损失，即假定发电机效率为 100%。

为了衡量能量在不同状态下转化为功的大小，引入焓的概念，用 E_x 表示。焓的计算涉及物理焓和化学焓两方面。本设计工艺中，针对 LNG 作为冷源的情况，通常只考虑其冷量焓。这意味着焓的计算主要关注 LNG 在冷却过程中释放的冷量，而忽略其他焓因素。冷量焓计算方式如下^[15]：

$$E_{x,Qc} = \left(1 - \frac{T}{T_0}\right) Q \quad (1)$$

式中：E_{x,Qc} 表示冷量焓，即吸入冷量 Q_c 时作出的最大有用功；T₀ 表示环境温度；T 为该工况下的温度；Q 为该状态下的热量。

在对系统或单个设备的整体能量进行分析时，通常只考虑输入和输出之间的能量平衡。如：

$$\sum E_{xi}^+ - \sum E_{xi}^- - \sum E_l = 0 \quad (2)$$

式中：∑E_{xi}⁺ 表示体系输入焓；∑E_{xi}⁻ 表示体系输出焓；∑E_l 表示体系焓损。

为了更全面地评估能源利用效率，引入了焓效率的概念，表示为：

$$\eta_{Ex} = \frac{\sum \Delta E_{xi}}{\sum \Delta E_{xo}} \quad (3)$$

式中：η_{Ex} 表示体系的焓效率；∑ΔE_{xo}、∑ΔE_{xi} 表

示体系输入、获得的焓。

在整个工艺模拟中, 根据式(1)一式(3), 以及 Aspen HYSYS 模拟结果, 计算出如表 5 所示的各个关键设备的冷焓情况, 对 E1 换热器内部换热情况进行分析, 结果如图 3 所示。

从表 5 可知, E1 换热器焓损最大, 达到了 13 475.00 kW, 大于其他设备焓损的总和, 进而导致其焓效率较低, 只有 32.58%。从图 3 可以看出, E1 换

热器内部传热温差跨度非常大, 为 40~120 °C, 而且通过 Aspen HYSYS 模拟软件可知, 在 E1 换热器内部, 丙烷在换热过程里发生了相变, 期间涉及气液两相进行换热, 进而导致 E1 换热器的焓较大, 即焓效率较低。系统中各关键设备的平均焓效率较低, 在 21.34%左右, 原因仍然是换热器内部的传热温差较大, 因而在工程设计中为提高焓效率可从这方面着手。

表 5 发电关键设备的焓值情况
Tab.5 Exergy values of key equipment in power generation

关键设备	支付焓/kW	收益焓/kW	焓损/kW	焓效率/%
E1 换热器	19 988	6 513	13 475.00	32.58
E4 换热器	1 159.17	160.67	998.50	13.86
膨胀机	5 418.83	4 104	1 314.83	75.74
发电系统	19 988	4 264.67	15 723.33	21.34

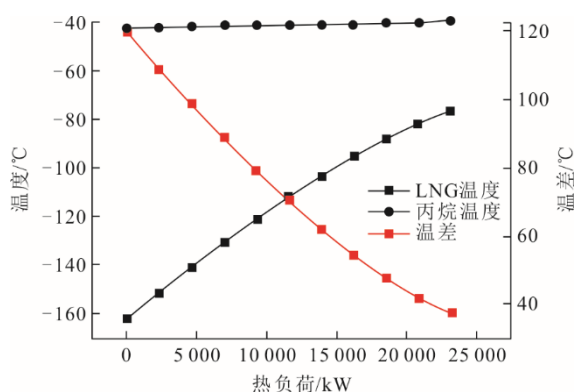


图 3 E1 换热器内部换热情况

Fig.3 The heat transfer situation inside the heat exchanger E1

3.2 系统经济性评价

由表 5 可知, 当 LNG 气化量为 228 t/h 时, 膨胀机输出功率为 4 104 kW, 假定发电机效率为 100%, 当地平均电价经调查约为 0.79 元/(kW·h), 则折合计算得发电经济收益约为 3 242.16 元/h。按热机循环系统年运行 8 000 h 计算, 年收益可达 2 593.7 万元。

该系统运行过程能为冻库提供的冷能功率为 958.6 kW, 如果以常规机械压缩式冷水机组制冷, 取制冷系数 COP 为 3, 可计算出供冷过程中折合冷能价值为 252.4 元/h, 按运行时间 8 000 h 计, 则年节约电费 202 万元。若扩大冻库建设使用规模, 整个工艺所产生的冷能价值也会相应增加。

4 基于能效的系统优化改进

结合对华瀛 LNG 接收站周边产业调研结果,

可采用毗邻热电厂的温排水与接收站的冷排水互换工艺耦合, 用以提升热电厂凝汽器和 LNG 接收站中间介质气化器 IFV 的传热效率; 并在深中冷利用部分以提升能效为目标, 增加热机循环系统的焓效率及热机效率, 实现对 LNG 深中冷部分的大规模消纳和高效率利用。

4.1 热机循环系统的改进与能效优化

根据闫玮玮等^[16]的研究分析, 在低温朗肯循环发电中, 海水的入口温度对冷能发电装置有着明显影响, 在其他条件均相同的情况下, 热源海水的温度越高, 系统发电效率越高。黄宇等^[17]的研究表明, LNG 接收站与电厂温排水耦合利用可显著降低海水泵功耗, 并减少气化设备的运行成本, 实现 LNG 冷能、工业余热等能源的有效利用。以表 5 的模拟结果来看, 其冷能发电率并不高, 只有 7.5%, 热机循环系统的出口仍然蕴含着大量冷能。同时, 由于我国 LNG 接收站输出压力普遍在 70×10^5 Pa 以上, 要将这一高压且温度为 -162 °C 的流股作为冷源直接利用, 会使得冷、热两个流股换热温差大, 所以一级热机循环对于 LNG 冷能的利用会产生较大的不可逆损失, 导致气化器和冷凝器中都有较大的焓损失。其中, 高压 LNG 的汽化过程并非等温, 在与恒温相变工质换热的过程中, 也会产生较大焓损。

针对上述问题, 拟采用多级热机循环来减少传热过程带来的焓损, 并采用多种有机物混合作为工质, 将工质的恒温冷凝替换为在一定温域内随 LNG/NG 温度变化而变温冷凝。张超等^[18-19]研究了

根据表 6、表 7 的工艺模拟结果：新方案“两级热机循环-浅冷冻库”系统单位质量 LNG 的净发电量由原先的 17.54 (kW·h)/t 提升到 33.02 (kW·h)/t；海水用量则从 8 000 t/h 降至 5 000 t/h，外排海水以及 NG 管网入口均符合潮州当地使用要求。由此可知，新方案工艺流程可行，能够实现 LNG 稳定的梯级利用。

表 8 展示了现有冷能发电部分的工艺及性能参数，从表 8 可以发现，与其他工艺相比，本研究改进的新型工艺单位质量 LNG 净发电量最高。这主

要是由于该方案的热源采用毗邻电厂的外排热海水，其热源温度较高，与循环工质形成较大温差，导致输出功增加。热源的稳定供给，也保证了发电系统的稳定运行。同时，在焓效率方面，本工艺也有较高的提升，不同级层的发电系统采用不同工质可减少相关设备的焓损，进而提升整体系统的焓效率，而文献[25]的两级热机循环串联便采用了此原理，还利用了 NG 的本身压力焓进行直接膨胀发电，故其焓效率大于其他工艺。

表 8 本研究工艺与其他现有工艺的性能对比

Tab.8 Performance comparison of the proposed process with other existing processes

发电方式	单位质量 LNG 净发电率/(kW·h·t ⁻¹)	焓效率 $H_{Ex}/\%$	海水温度/°C
二级朗肯串联+直接膨胀 ^[26] (CCC 系统)	21.34	20.75	20.0
三级朗肯循环-独立混联 ^[27]	24.26	25.70	25.0
两级朗肯循环-混联 ^[28] (TCRC 系统)	23.87	24.62	15.0~20.0
三级朗肯循环-独立混联 ^[29]	29.17 (非 LNG 做冷源)	34.30	15.0
两级朗肯串联+直接膨胀 ^[25]		42.70	15.0~20.0
两级热机循环串联	33.02	35.05	34.6

4.2.3 系统经济性及降碳效果评价

新方案采用电厂热排海水作为两级热机循环发电的热源，不仅能提高发电量，还能节约海水泵的功耗；并将海水用量则从 8 000 t/h 降至 5 000 t/h，预计节约海水泵功耗约 412.5 kW，年节约泵用电费 260.7 万元/a。参考毗邻火力发电厂的单位发电率煤耗，约折算标准煤耗为 0.361 kg/(kW·h)，标准煤的 CO₂ 和 SO₂ 排放系数分别取 2.76、0.083。计算得出 LNG 冷能项目原、新方案工艺模拟对比结果见

表 9。其中，由于冻库工艺所用 LNG 为发电工艺的二次利用，所以总需流量中不计冻库工艺的 LNG 流量。该系统年发电量为 6 204 × 10⁴ kW·h，单位质量 LNG 的净发电量从原先的 17.54 (kW·h)/t 提高到 33.02 (kW·h)/t，焓效率从原先的 21.34% 提升至 35.05%，整个系统可节约电费 5 364.1 万元。原方案可节约 1.28 万吨标准煤，而新方案的节能量提升至 2.45 万吨；另外，CO₂ 的减排量达到 6.77 万吨，展现了更为显著的降碳效果。

表 9 经济性和降碳效果分析

Tab.9 Economic and carbon reduction effect analysis

方案类型	方式	节约电量/(万 kW·h·a ⁻¹)	节约电费/(万元·a ⁻¹)	减碳量 (标准煤) / (t·a ⁻¹)	CO ₂ 减排量/(t·a ⁻¹)	SO ₂ 减排量/(t·a ⁻¹)	年需 LNG/(万 t·a ⁻¹)
原方案	发电	3 283.2	2 593.7	11 852.3	32 733.5	985.0	
	冻库	256.0	202.2	924.2	2 552.3	76.8	182.4
	总计	3 539.2	2 795.9	12 776.5	35 285.8	1 061.8	
新方案	发电	6 204.0	4 902.2	22 396.4	61 853.9	1 861.2	
	冻库	256.0	202.2	924.2	2 552.3	76.8	
	节约泵功耗	330.0	260.7	1 191.3	3 290.1	99.0	182.4
	总计	6 790.0	5 364.1	24 511.9	67 696.3	2 037.0	

5 结 论

本文根据广东华瀛 LNG 接收站的设计运行条件及周边产业环境，初步设计了“一级热机循环-浅冷冻库”的冷能利用方案，并在此基础上，利用

部分深、中冷以提升能效和大规模消纳冷能为目标，降低相关系统的焓损失，对原有方案进行了优化改进。

1) 原方案中采用以丙烷为中间介质的单级热机循环串联冻库的方式对冷能进行回收利用。新方

案采用“两级热机循环-浅冷冻库”工艺方案对原有 LNG 冷能梯级利用系统进行优化改进, 并采用毗邻电厂的温排海水为热源, 以提升系统能效。第一级循环中采用了乙烷与丙烷 (2:3) 的混合工质发电, 二级循环依然使用单工质丙烷, 使工质在相变过程中更加地贴合 LNG 气化温度曲线, 进而减少温差过大带来的热损失。新方案通过提高海水热源, 优化发电系统设计, 使得发电率及冷能回收率得到提高。该系统年发电量为 $6\ 204 \times 10^4$ kW·h, 单位质量 LNG 的净发电量从原先的 17.54 (kW·h)/t 提高到 33.02 (kW·h)/t。整个系统可节约电费 5 364.1 万元, 同时发电系统的烟效率得到提升。该工艺不仅具有显著的降本增效效果, 还具备良好的可操作性和可观的工程化推广潜力。

2) 在节能减排方面, 新方案相较于原方案取得了显著的提升。原方案可节约 1.28 万吨标准煤, 而新方案的节能量提升至 2.45 万吨; 另外, CO₂ 的减排量达到 6.77 万吨, 展现了更为显著的降碳效果。这些优化措施不仅提高了能源利用效率, 也为减少温室气体排放做出了更大贡献。

尽管新方案的利用效率更高, 但在实际的运行中需要依靠稳定热源, 且投资规模要求较高, 其静态回收期也相对较长。而原方案适用于 LNG 接收站初期运行阶段, 一次性建设投资较低, 且不考虑与电厂在工艺参数、建设和运营中的协同问题, 能够更快建设落地。在实际工程中应综合评估热源稳定性、投资能力与建设时序等因素, 以实现技术经济最优匹配。

[参 考 文 献]

- [1] 渠沛然. 国内 LNG 市场发展势头足[N]. 中国能源报. 2024-03-04(08).
QU Peiran. Domestic LNG market shows strong development momentum[N]. China Energy News, 2024-03-04(08).
- [2] 吴小华, 蔡磊, 李庭宇, 等. LNG 冷能利用技术的最新进展[J]. 油气储运, 2017, 36(6): 624-635.
WU Xiaohua, CAI Lei, LI Tingyu, et al. Latest progress in LNG cold energy utilization technology[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2017, 36(6): 624-635.
- [3] 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.
LI Jun, CHEN Yu. Research progress on LNG cold energy recovery and cascaded utilization[J]. Journal of Refrigeration, 2022, 43(2): 1-12.
- [4] 中国能源新闻网. 中国石化在广东首座 LNG 接收站正式投用[EB/OL]. (2024-09-10) [2025-02-01]. https://www.cpn.com.cn/news/yq/202409/t20240910_1735195.html. China Energy News Network. The first LNG receiving

- station of Sinopec in Guangdong is officially put into use [EB/OL]. (2024-09-10) [2025-02-01]. https://www.cpn.com.cn/news/yq/202409/t20240910_1735195.html.
- [5] 王荧光, 蔡东旭, 梁勇, 等. 循环工质对 LNG 冷能发电系统性能的影响[J]. 低碳化学与化工, 2024, 49(10): 119-128.
WANG Yingguang, CAI Dongxu, LIANG Yong, et al. The impact of working fluid on the performance of LNG cold energy power generation system[J]. Low-Carbon Chemistry and Chemical Engineering, 2024, 49(10): 119-128.
- [6] KANBUR B B, XIANG L, DUBEY S, et al. Finite sum based thermoeconomic and sustainable analyses of the small scale LNG cold utilized power generation systems[J]. Applied Energy, 2018, 220: 944-961.
- [7] KIM J, NOH Y, CHANG D. Storage system for distributed-energy generation using liquid air combined with liquefied natural gas[J]. Applied Energy, 2018, 212: 1417-1432.
- [8] HOU M, WU Z, YU G, et al. A thermoacoustic stirling electrical generator for cold exergy recovery of liquefied natural gas[J]. Applied Energy, 2018, 226: 389-396.
- [9] LI Y, ZHANG G, LIU Y, et al. A cold and power cogeneration system utilizing LNG cryogenic energy and low-temperature waste heat [J]. Energy Procedia, 2019, 158: 2335-2340.
- [10] SHINGAN B, VIJAY P, PANDIAN K. Advanced design of power generation cycle with cold utilization from LNG[J]. Arabian Journal for Science and Engineering, 2023, 48(12): 16973-16988.
- [11] 曾丽瑶. LNG 冷能发电技术及 ORC 工质优选研究[J]. 四川化工, 2021, 24(2): 22-24.
ZENG Liyao. Research on LNG cold energy power generation technology and ORC working fluid optimization[J]. Sichuan Chemical Industry, 2021, 24(2): 22-24.
- [12] 吕剑雄, 王北福, 聂立宏, 等. 液化天然气(LNG)冷能发电方法比较和研究[J]. 农村经济与科技, 2017, 28(13): 270-273.
LYU Jianxiong, WANG Beifu, NIE Lihong, et al. Comparison and research on LNG cold energy power generation methods[J]. Rural Economy and Technology, 2017, 28(13): 270-273.
- [13] 江蓉, 向润清, 赖勇杰, 等. 用于冰雪世界的 LNG 冷能换冷站技术分析[J]. 天然气化工(C1 化学与化工), 2022, 47(5): 120-124.
JIANG Rong, XIANG Runqing, LAI Yongjie, et al. Technical analysis of LNG cold energy heat exchange station for snow and ice world[J]. Natural Gas Chemical Industry (C1 Chemistry and Chemical Engineering), 2022, 47(5): 120-124.
- [14] 许海超, 王大伟. LNG 冷能用于冷库、制冰技术及经济分析[J]. 化学工业, 2022, 40(1): 66-68.
XU Haichao, WANG Dawei. Technical and economic analysis of using LNG cold energy for cold storage and ice-making[J]. Chemical Industry, 2022, 40(1): 66-68.
- [15] 沈维道, 童钧耕. 工程热力学[M]. 5 版. 北京: 高等教育出版社, 2016: 1.
SHEN Weidao, TONG Jungeng. Engineering thermodynamics[M]. 5th ed. Beijing: Higher Education Press, 2016: 1.
- [16] 闫玮玮, 秦锋, 陈锐莹, 等. 低温有机朗肯循环冷能发电在 LNG 接收站的应用[J]. 煤气与热力, 2019, 39(6): 20-24.

- YAN Weiwei, QIN Feng, CHEN Ruiying, et al. Application of low-temperature organic Rankine cycle cold energy power generation in LNG receiving station [J]. *Gas & Heat*, 2019, 39(6): 20-24.
- [17] 黄宇, 刘梦溪, 陈海平, 等. “双碳”背景下液化天然气工业园区能源耦合技术研究[J]. *现代化工*, 2023, 43(3): 213-216.
- HUANG Yu, LIU Mengxi, CHEN Haiping, et al. Research on energy coupling technology of liquefied natural gas industrial parks under the “dual-carbon” background[J]. *Modern Chemical Industry*, 2023, 43(3): 213-216.
- [18] 张超, 金海刚, 邵国芬, 等. LNG 冷能发电工质选择与参数优化[J]. *石油与天然气化工*, 2015, 44(4): 54-58.
- ZHANG Chao, JIN Haigang, SHAO Guofen, et al. Selection and parameter optimization of working fluid for LNG cold energy power generation[J]. *Chemical Engineering of Oil & Gas*, 2015, 44(4): 54-58.
- [19] 黄峰, 周亚洲, 李雅娴. LNG 接收站冷能发电工艺参数优化设计[J]. *天然气化工(C1 化学与化工)*, 2020, 45(6): 99-102.
- HUANG Feng, ZHOU Yazhou, LI Yaxian. Process parameter optimization design of LNG receiving station cold energy power generation[J]. *Natural Gas Chemical Industry (C1 Chemistry and Chemical Engineering)*, 2020, 45(6): 99-102.
- [20] BAO J, LIN Y, ZHANG R, et al. Effects of stage number of condensing process on the power generation systems for LNG cold energy recovery[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2017, 126: 566-582.
- [21] BAO J, ZHANG R, LIN Y, et al. Simultaneous optimization of system structure and working fluid for the three-stage condensation Rankine cycle utilizing LNG cold energy[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2018, 140: 120-130.
- [22] SUN Z, LAI J, WANG S, et al. Thermodynamic optimization and comparative study of different ORC configurations utilizing the exergies of LNG and low-grade heat of different temperatures[J]. *Energy*, 2018, 147: 688-700.
- [23] 豆少刚, 李金波, 文晓龙, 等. 基于 LNG 冷能发电的朗肯循环关键参数分析优化[J]. *山西化工*, 2023, 43(9): 86-89.
- DOU Shaogang, LI Jinbo, WEN Xiaolong, et al. Analysis and optimization of key parameters of Rankine cycle based on LNG cold energy power generation[J]. *Shanxi Chemical Industry*, 2023, 43(9): 86-89.
- [24] 赵鹏飞, 李瑞霞, 李宏武. LNG 接收站新型三级冷能发电循环优化方案[J]. *天然气化工(C1 化学与化工)*, 2022, 47(1): 115-121.
- ZHAO Pengfei, LI Ruixia, LI Hongwu. Optimization scheme of a novel three-stage cold energy power generation cycle for LNG receiving terminal[J]. *Natural Gas Chemical Industry (C1 Chemistry & Chemical Engineering)*, 2022, 47(1): 115-121.
- [25] FERREIRO GARCÍA R, CARBIA CARRIL J, ROMERO GOMEZ J, et al. Combined cascaded Rankine and direct expander based power units using LNG (liquefied natural gas) cold as heat sink in LNG regasification[J]. *Energy*, 2016, 105: 16-24.
- [26] CAI D, ZHAO Y, WANG Y, et al. Comparative analysis: exergetic and economic assessment of LNG cold energy power generation systems with different cold utilization methods[J]. *Thermal Science and Engineering Progress*, 2024, 54: 102844.
- [27] XUE F, CHEN Y, JU Y. Design and optimization of a novel cryogenic Rankine power generation system employing binary and ternary mixtures as working fluids based on the cold exergy utilization of liquefied natural gas (LNG)[J]. *Energy*, 2017, 138: 706-720.
- [28] BAO J, LIN Y, ZHANG R, et al. Strengthening power generation efficiency utilizing liquefied natural gas cold energy by a novel two-stage condensation Rankine cycle (TCRC) system[J]. *Energy Conversion and Management*, 2017, 143: 312-325.
- [29] ZHOU S, LIU X, BIAN Y, et al. Energy, exergy and exergoeconomic analysis of a combined cooling, desalination and power system[J]. *Energy Conversion and Management*, 2020, 218: 113006.

(责任编辑 杨嘉蕾)