

# LNG 接收站冬季保供期气化器协同运行策略 与能耗分析研究

刘 博 (中海油江苏天然气有限责任公司, 江苏 盐城 224000)

**摘要:** 本文以江苏 LNG 接收站为研究对象, 针对冬季保供期间浸没燃烧式气化器 (SCV) 运行成本高、稳定性差的问题, 通过优化开架式海水气化器 (ORV) 在低温海水条件下的运行负荷, 提出节能降耗的运行策略。通过实验数据拟合建立 ORV 最大操作负荷计算模型, 验证了 ORV 在海水温度低至 2℃ 时的安全运行可行性。实践表明, 该策略可使冬季保供期间日均节约成本 37.44 万元, 有效提升接收站运行经济性与环保性。

**关键词:** LNG 接收站; 开架式海水气化器; 浸没燃烧式气化器; 冬季保供

**中图分类号:** TM619 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-5167 (2026) 007-0108-04

## Research on the Coordinated Operation Strategy and Energy Consumption Analysis of Vaporizers during the Winter Supply Guarantee Period of LNG Receiving Terminals

Liu Bo (Cnooc Jiangsu Natural Gas Co., LTD Yancheng Jiangsu 224000, China)

**Abstract:** This paper takes the Jiangsu LNG receiving Station as the research object. Aiming at the problems of high operating cost and poor stability of the submerged combustion vaporizer (SCV) during the winter supply guarantee period, by optimizing the operating load of the open-type seawater vaporizer (ORV) under low-temperature seawater conditions, energy-saving and consumption-reducing operation strategies are proposed. The calculation model of the maximum operating load of ORV was established through experimental data fitting, verifying the feasibility of safe operation of ORV when the seawater temperature drops to 2℃. Practice has shown that this strategy can save an average of 374,400 yuan per day during the winter supply guarantee period, effectively enhancing the economic and environmental performance of the receiving station's operation.

**Key words:** LNG receiving terminal; Open-type seawater vaporizer; Submerged combustion vaporizer; Winter supply guarantee

### 1 LNG 接收站气化外输现状与能耗问题分析

#### 1.1 外输工艺与设备配置

LNG 储罐内存储的 LNG 通过低压泵输出进入工艺区, 一路去再冷凝器上部 FV 阀处, 对 BOG 进行冷凝, 冷凝后的 LNG 与再冷凝器 LV 阀通过的 LNG 一起汇合, 进入到高压泵<sup>[1]</sup>。通过叶轮多级加压, 输送至开架式海水气化器 (ORV) 或者浸没燃烧式气化器 (SCV) 进行气化, 最终进入外输管网。

#### 1.2 冬季保供能耗问题凸显

在海水温度低于 6℃ 时, ORV 负荷率下降, 需启用 SCV 补充外输能力。当海水温度降至 3℃ 以下时, SCV 需全额承担外输任务, 日均能耗成本高达 124.8 万元, 且设备故障风险增加。因此, 突破 ORV 低温运行限制成为降耗关键。

### 2 ORV 低温运行优化策略研究

#### 2.1 目标设定与可行性分析

结合目前接收站 LNG 工艺输送现状, 以降低冬季保供期间气化器的使用成本为目的, 决定将 ORV 的

海水运行温度由 3℃ 降低至 2℃, 增加开架式海水气化器的负荷率来节约成本。

在对 LNG 接收站进行设计时, 通常对 ORV 海水入口温度做出限制。但在实际生产中, 当海水入口温度低于设计要求时, 在合理降低 ORV 运行负荷的前提下使用 ORV, 可以达到设备安全、工艺稳定<sup>[2]</sup>。冬季 ORV 处理 LNG 的能力受海水入口温度的影响, 但对不同海水入口温度下单台 ORV 的最大允许 LNG 流量尚无有效的计算方法, 不利于指导生产操作<sup>[3]</sup>。通过 Origin 软件对海水入口温度、海水出口温度、LNG 流量运行数据进行拟合, 得到了 ORV 最大允许 LNG 流量函数式, 可以较精确地计算不同海水入口温度下 ORV 能够处理的最大 LNG 流量, 工艺班组可利用该函数式在低海水温度下 ( $\leq 6^\circ\text{C}$ ) 调整 ORV 在安全负荷下运行, 实现最大程度利用 ORV 进行气化外输, 节省冬季运行成本。

#### 2.2 要因分析与对策制定

要因分析从人员、设备、物料、方法、环境五个

维度系统排查了十二项末端因素。经过逐一验证，最终确认核心要因是海水温度过低，其作为 ORV 唯一热源，温度下降直接导致传热温差减小与气化能力衰减，属于固有物理特性限制，成为提升运行效率的关键瓶颈<sup>[4]</sup>。

对策制定聚焦于突破海水温度这一刚性约束，核心是建立 ORV 在低温工况下的安全运行边界。具体措施是在冬季保供期组织专项测试，设定海水入口温度 2 至 6 摄氏度的实验区间，维持海水流量恒定，控制 LNG 入口压力稳定，通过调节 LNG 流量观察不同负荷下的海水温降与设备状态。测试旨在获取多组工况数据，重点监测翅片结冰高度与海水出口温度关联性。

基于测试数据，利用数值拟合方法构建海水温度、LNG 流量与运行负荷的数学模型，量化 ORV 在低温条件下的最大处理能力。该模型将给出以海水出口温度为安全阈值的负荷判定标准，为在低于传统设计温度时持续启用 ORV 提供理论依据与操作指南，从而实质性地扩展设备适用温度范围，替代高能耗的 SCV 运行模式<sup>[5]</sup>。

### 2.3 实验设计与数据拟合

2023 年冬季保供期间，实验设计以获取 ORV 在临界温度区间的精确运行边界为核心目标。测试窗口选定在冬季保供高峰期，针对两台典型 ORV 单元展开持续监测。实验严格控制关键边界条件：海水流量稳定在 8000 m<sup>3</sup>/h，LNG 入口压力维持在 8~9 MPa 的典型操作范围。变量调控聚焦于海水入口温度与 LNG 流量的耦合关系，在海水入口温度 2~6 摄氏度的目标区间内，阶梯式调整 LNG 流量，并密切监控换热管翅片结冰形态与高度。每组工况稳定运行时间超过 1h，以获取完全热平衡后的稳态数据。这种设计思路旨在模拟实际保供外输的连续性与稳定性要求，通过主动在接近设备理论极限的条件下操作，系统性地采集 ORV 从安全运行到临界状态的完整数据谱。实验共计获得 225 组有效工况数据，详尽记录了不同海水温度、不同 LNG 流量下对应的海水温降、天然气出口温度等关键参数，为后续构建量化模型奠定了坚实的数据基础。

数据拟合阶段致力于将大量现场数据转化为具有预测能力的工程模型。面对海水温度、LNG 流量与海水出口温度之间的复杂非线性关系，采用 Origin 2018 软件进行二维非线性曲面拟合，选取的 Parabola2D 函数模型能较好地描述变量间的曲面关系。拟合过程不仅追求数学上的相关性，更注重其物理意义的合理性。最终得到的拟合关系式，以海水入口温度 (T<sub>in</sub>) 和

LNG 流量 (QLNG) 为自变量，可计算出对应的海水出口温度 (T<sub>out</sub>)。

该模型的工程价值在于其逆向应用：将安全运行的海水出口温度阈值设定为 1 摄氏度，代入拟合公式后，即可反解出特定海水入口温度下 ORV 的最大允许 LNG 流量。分析结果表明，当海水入口温度低至 2 摄氏度时，ORV 仍能维持约 25.2 t/h 的操作负荷，相当于其额定能力的 14%；而随着温度升至 5.2 摄氏度，最大负荷即可达到满额的 180 t/h。这一由实验数据驱动的数学模型，将以往依赖经验判断的操作边界转化为可量化的计算标准，为操作人员在低温条件下最大化利用 ORV 提供了精确的决策依据，实现了从定性操作到定量化、精细化控制的跨越。拟合结果如图 1、图 2 所示：

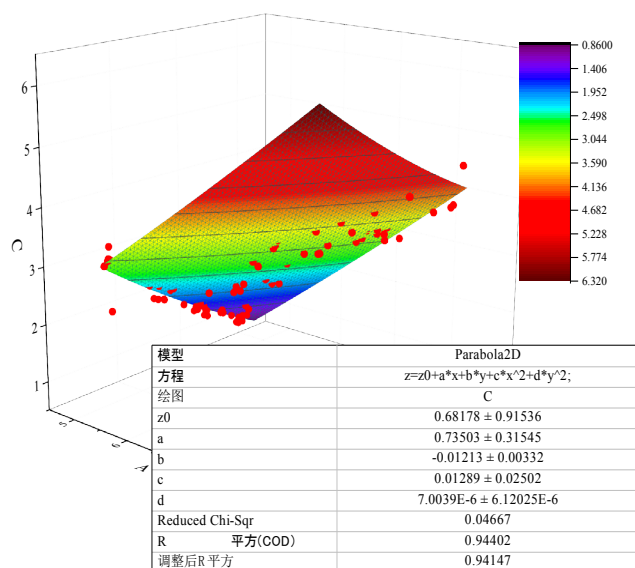


图 1 ORV-A 非线性曲面拟合图

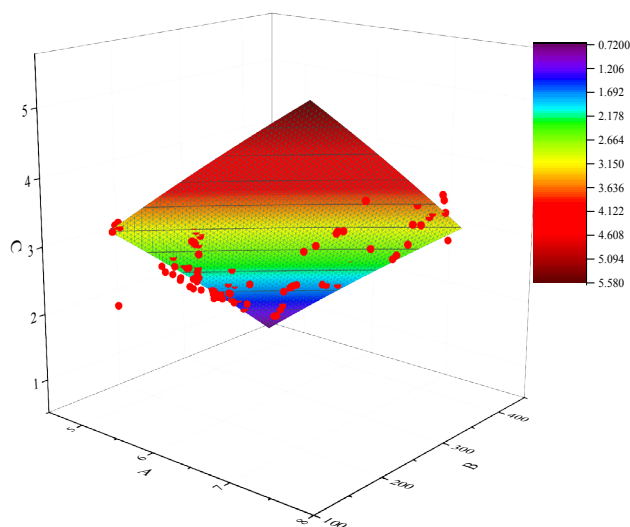


图 2 ORV-D 非线性曲面拟合图

以海水入口温度和 LNG 流量为自变量, 得到海水出口温度的拟合关系式:

$$\begin{aligned} \text{ORV-A: } T_{\text{out}} &= 0.68178 + 0.73503T_{\text{in}} - 0.01213Q_{\text{LNG}} + 0.01289T_{\text{in}}^2 + 7.0039 \times 10^{-6} \cdot Q_{\text{LNG}}^2 \\ \text{ORV-D: } T_{\text{out}} &= -0.86959 + 1.22707T_{\text{in}} - 0.00837Q_{\text{LNG}} - 0.02439T_{\text{in}}^2 - 2.7414 \times 10^{-6} \cdot Q_{\text{LNG}}^2 \end{aligned} \quad (1)$$

式中:  $T_{\text{out}}$ 、 $T_{\text{in}}$  分别为 ORV 海水出口、入口温度 ( $^{\circ}\text{C}$ );  $Q_{\text{LNG}}$  为 ORV 处理的 LNG 流量 ( $\text{t/h}$ )。

为了计算 ORV 最大操作负荷  $Q_{\text{max}}$ , 将拟合式 (1) 中的海水出口温度设定为  $1^{\circ}\text{C}$ , 得到以下表达式:

$$\begin{aligned} \text{ORV-A: } Q_{\text{max}} &= \frac{0.01213 \pm \sqrt{2.80156 \times 10^{-5} \times (0.31822 - 0.01289T_{\text{in}}^2 - 0.73503T_{\text{in}})}}{1.40078 \times 10^{-3}} \\ \text{ORV-D: } Q_{\text{max}} &= \frac{-0.00837 \pm \sqrt{0.00837^2 - 4 \times 2.7414 \times 10^{-6} \times (0.02439T_{\text{in}}^2 - 1.22707T_{\text{in}} + 1.86959)}}{2 \times 2.7414 \times 10^{-6}} \end{aligned} \quad (2)$$

根据式 (2), 得到海水入口温度与 ORV 最大操作负荷之间的定量关系。在海水温度为  $2^{\circ}\text{C}$  的临界条件下, ORV 仍可维持  $25.2 \text{ t/h}$  的气化能力; 而当海水温度上升至  $5.2^{\circ}\text{C}$  时, 设备处理能力达到设计上限的  $180 \text{ t/h}$ 。这一规律为运行策略的制定提供了明确界限: 在海水温度低于  $2^{\circ}\text{C}$  时, 出于设备安全考虑应停用 ORV; 当温度处于  $2^{\circ}\text{C}$  至  $5.2^{\circ}\text{C}$  区间时, 需依据模型计

算结果动态控制运行负荷; 而当海水温度高于  $5.2^{\circ}\text{C}$  后, ORV 则具备满负荷运行的条件。

### 3 实施效果与效益评估

#### 3.1 运行效果验证

根据现场实际运行情况, 对 2024 年 1 月后的 ORV 气化器运行参数进行了统计, 详细记录了 ORV 运行时海水流量、海水入口温度、海水出口温度、海水入口压力等 10 个参数, 结合设备管道管振、声振情况, 先后检验了海水温度为  $4.5^{\circ}\text{C}$  和  $3.5^{\circ}\text{C}$  时所达到的效果。

因为现场条件要求, 无法测出更低海水温度下的 ORV 数据, 但是通过表 1 和表 2 的数据可知, 海水温度在  $4.5^{\circ}\text{C}$  和  $3.5^{\circ}\text{C}$  时, ORV 的最大负荷可以达到计算结果要求, 翅片结冰高度满足设计要求, 验证了对策有效可行。

#### 3.2 经济效益

通过降低 ORV 海水的可操作温度, 提高 ORV 汽化器的使用负荷率, 为完成外输任务, 需要保持启动运行 4 台 ORV, 1 台 SCV, 其中 ORV 以 70% 负荷运

表 1 大流量外输 ORV 相关参数统计表 ( $4.5^{\circ}\text{C}$ )

海水进口温度 $^{\circ}\text{C}$		海水出口温度 $^{\circ}\text{C}$		LNG 流量 $\text{m}^3/\text{h}$		海水流量 $\text{m}^3/\text{h}$		天然气出口温度 $^{\circ}\text{C}$		实时瞬时流量 $\text{Nm}^3/\text{h}$
ORV-C	ORV-D	ORV-C	ORV-D	ORV-C	ORV-D	ORV-C	ORV-D	ORV-C	ORV-D	
4.44	4.43	1.11	1.12	348	334	8456	7901	3.45	3.81	417664
4.40	4.37	1.10	1.13	340	326	8498	7927	3.48	3.80	408192
4.42	4.38	0.93	1.05	348	333	8084	7877	3.20	3.65	420800
4.37	4.31	0.83	0.98	349	334	8034	7790	3.00	3.52	417600
4.33	4.27	1.56	1.80	228	217	7936	7754	3.82	4.13	277696
4.30	4.25	1.76	1.93	231	222	8008	7764	4.20	4.31	279232

表 2 大流量外输 ORV 相关参数统计表 ( $3.5^{\circ}\text{C}$ )

海水进口温度 $^{\circ}\text{C}$		海水出口温度 $^{\circ}\text{C}$		LNG 流量 $\text{m}^3/\text{h}$		海水流量 $\text{m}^3/\text{h}$		天然气出口温度 $^{\circ}\text{C}$		实时瞬时流量 $\text{Nm}^3/\text{h}$
ORV-C	ORV-D	ORV-C	ORV-D	ORV-C	ORV-D	ORV-C	ORV-D	ORV-C	ORV-D	
3.58	3.51	1.05	1.12	238	241	8034	7861	3.43	3.51	291392
3.57	3.52	1.03	1.06	232	233	8034	7877	3.41	3.50	284992
3.56	3.50	1.04	1.08	232	234	8136	7892	3.42	3.50	285888
3.49	3.43	0.98	1.03	228	232	8156	7901	3.33	3.42	284032
3.46	3.39	1.06	1.12	219	220	7992	7866	3.35	3.42	268672
3.42	3.36	1.18	1.13	215	219	7952	7734	3.19	3.39	265972

行, ORV 共完成外输量 1680 万  $\text{m}^3$  天然气, 需要 SCV 完成剩余 120 万  $\text{m}^3$  天然气外输量, 需要消耗的天然气量为  $120 \times 1.5\% = 1.8$  万方, 按照燃气费 5.2 元/方计算, 每天共计花费 9.36 万元。相比对策实施前, 每天可节约 37.44 万元, 7 天共计节约 262.08 万元。

### 3.3 社会与环境效益

优化 ORV 运行效率不仅降低了生产成本, 还提高了接收站的能效和竞争力。此外, 减少了运行 SCV 所产生的费碱和废气排放, 带来了巨大的社会效益。

### 4 结语

本文聚焦于解决开架式气化器在低温海水条件下运行效率受限的核心问题, 综合运用现场测试、数据采集与模型拟合等方法, 科学揭示了海水温度是制约 ORV 运行效率的关键要因, 并创新性地构建了以海水出口温度为安全阈值的 ORV 最大操作负荷计算模型。研究成功将 ORV 的安全运行温度下限从传统的  $3^\circ\text{C}$  拓展至  $2^\circ\text{C}$ , 形成了可量化、可操作的具体运行策略, 并已纳入公司操作规程实现成果固化。该研究为江苏 LNG 接收站提供了一套经过实践验证的、能够在极寒

天气下显著降低能耗的具体技术方案, 实现了可观的经济效益并提升了保供韧性, 为整个 LNG 行业提供了一个解决类似共性问题的科学方法论示范。

### 参考文献:

- [1] 林日寿. 低温乙烯汽化器封头法兰泄漏防治措施探讨[J]. 石化技术, 2025, 32(04): 218-220.
- [2] 顾陈杰, 徐建浩, 王健, 等. LNG 汽化器换热管内螺旋线圈传热性能强化研究[J]. 低温工程, 2024, (01): 31-37.
- [3] 胡佳煜. 液氯汽化装置的危险与可操作性分析 (HAZOP) 应用研究与优化[J]. 化工设计通讯, 2023, 49(02): 80-82+94.
- [4] 贾劲松. 液化天然气汽化器技术研究进展及发展分析[J]. 化工装备技术, 2022, 43(03): 15-19.
- [5] 苏阳. LNG 接收站运维的管理创新[J]. 化学工程与装备, 2020, (10): 118-119+123.

### 作者简介:

刘博 (1989.02-), 男, 汉, 陕西眉县, 本科, 中级工程师, 研究方向: 天然气。

