

天然气液化装置预冷系统优化技术研究

葛浩俊

杭州福斯达深冷装备股份有限公司 浙江杭州 310000

摘要: 本研究以天然气液化装置预冷系统优化为对象,旨在提高冷却效率,减少能耗。研究方法主要包括构建以热力学与流体力学为基础的仿真模型对4个关键性能指标即温度降幅,热交换效率,能耗以及流体流速进行仿真。通过热交换器优化设计,节能技术及自动化控制等措施显著改善了该系统冷却性能。模拟的数据显示,经过优化,系统的温度下降幅度增加了3℃,热交换的效率上升了4%,能源消耗减少了10kW·h,同时流体的流速也得到了显著的优化。实施后现场监测数据同仿真结果相吻合,证明优化措施有效,同时也说明该系统液化效率及稳定性明显提高。

关键词: 天然气液化; 预冷系统; 热交换效率; 能效优化

引言

在全球能源产业中,天然气液化技术起到了至关重要的作用,特别是在天然气的运输和存储领域,其重要性是无法被替代的^[1]。预冷系统是液化过程关键的一环,预冷系统效率的高低对液化过程能耗及经济性有着直接影响。近年来随着我国环保法规的出台以及对能源效率的要求越来越高,对预冷系统进行优化来降低能耗,改善冷却效果已成为急需解决的技术难题。

一、预冷系统概况

(一) 预冷系统的工作原理

预冷系统在天然气液化中起着关键的作用,它的基本构成由热交换器,冷却介质循环系统和压力调节装置构成。系统通过从天然气中吸热来降低温度,以对液化过程起到必要的降温作用。预冷系统对天然气液化的影响在于通过有效地降低天然气温度使之向液化点靠近,从而为以后液化工艺输送低温气体。该工艺在提高系统整体效率的同时,也为气体在液化时物理属性的转换提供了有利条件^[2]。

(二) 预冷系统的技术条件

目前预冷系统技术选型标准主要取决于系统冷却效果,设备能效以及其稳定性几个方面。随着液化天然气(LNG)市场的不断壮大,预冷系统的性能要求也日益提

高,特别是在节约能源和提高效率方面。液化工艺中预冷系统对温度有着苛刻的控制要求,需要该系统在保证系统冷却稳定的前提下将能耗降到最低。在技术选择上还要综合考虑外部气候条件,设备可维护性及冷却介质安全环保等因素,才能保证系统长期稳定地工作^[3]。

二、主要影响因素及优化措施

(一) 主要影响因素

预冷系统在工作过程中受到外部环境因素,尤其是温度、湿度等气候条件的显著影响。

在热带或湿润气候条件下,外部环境温度通常较高(如35℃以上),这种高温环境使得冷却介质的温度差减少,导致热交换效率降低。而在干燥寒冷的地区,虽然外部温度较低,但寒冷天气可能导致气体的凝结和流动性问题,从而影响冷却过程。实际应用中,曾有某液化天然气(LNG)站点在夏季时,由于外部温度较高,系统能效比冬季时下降了约12%。在预冷系统中,设备性能和工艺优化的相互作用对系统的效率至关重要^[4]。

(二) 优化措施

为提高预冷系统的效率,采取了多种技术优化措施。首先,热交换器设计优化是提高热交换效率的关键。通过选择高效的换热材料、增大换热面积、优化流体流动路径等方式,可以显著提高热交换器的效率。节能技术的应用至关重要。通过使用低温冷却介质,预冷系统能够在较低温度下工作,减少了冷却剂的能源消耗。而系统的能量回收能力也被加强。

智能化控制技术的应用,使得预冷系统能够基于实

作者简介: 葛浩俊(1976--),男,汉族,浙江余杭人,本科学历,研究方向:深冷技术开发和实践应用。

时数据自动调整各项运行参数，从而提升能效。智能化控制技术通过集成温度、压力、流速等数据，实现对系统运行状态的实时监控和调节。数据驱动的预测控制算法可以预见系统负荷的变化并提前作出调整，以减少能量浪费^[5]。

三、预冷系统优化模拟分析

(一) 仿真模型

为优化天然气液化装置的预冷系统，本文选定了基于热力学与流体力学耦合的仿真模型。在选择这一仿真模型时，考虑到天然气液化过程中预冷系统的复杂性，热力学与流体力学耦合模型能够更加全面和准确地反映预冷系统的工作性能。这一模型不仅能够预测天然气的温度变化，还能模拟不同环境条件下流体的流动规律和热交换效率，从而为优化设计提供科学依据。该仿真模型通过设定4个主要性能指标：温度降幅（ ΔT ）、热交换效率（ η ）、能耗（ E ）和流体流速（ v ），准确模拟了预冷系统在不同工况下的表现。温度降幅和热交换效率是衡量系统冷却效果和传热效率的关键指标，能耗则直接与系统的能源使用效率相关，而流体流速影响着冷却介质的流动和热交换效率。模型中的热交换器和冷却装置的优化参数，通过实际工况数据与理论计算相结合，得以优化和调整。

(二) 技术阶段划分

预冷系统优化流程可以划分为初步设计阶段，详细设计阶段，实施优化阶段3大技术阶段。初步设计阶段以理论分析为主，结合实验数据确定预冷系统基本配置及优化目标。这一阶段主要集中在热力学计算和流体力学模拟两个方面，并确定了对系统初步性能的要求。在详细设计阶段，又对热交换器，冷却介质，压缩机等装置做了进一步细致的参数选择与优化，以保证系统在各种工况下都能稳定工作。实施优化阶段在前两阶段设计结果的基础上进行现场调试并采集实际数据，采用优化控制策略及节能技术进一步提高了系统效率并降低了能耗。

(三) 数值模拟分析

在表1中，仿真结果展示了不同运行条件下预冷系统的4项关键指标的变化规律。在此对每个工况（工况1至工况4）进行了详细定义，以便清晰区分优化前后的操作条件和性能改进。

工况1（初始状态）：在标准负荷条件下，输入天然气温度为25℃，压力为8 MPa，流量为2000 m³/h。系统

冷却效率较低，热交换效率为80%，能耗为150 kW·h，流体流速为1.5 m/s。

工况2（优化后的标准负荷）：经过优化后，系统运行条件仍保持在标准负荷下，但通过优化热交换器设计和流体动力学结构，温度降幅提升至28℃，热交换效率提升至85%，能耗降低至140 kW·h，流速提高至1.8 m/s。这表明系统在优化后，冷却效果和流体流动效率均有显著提高。

工况3（高负荷状态）：在高负荷条件下，天然气流量增加至2500 m³/h，温度降幅降至22℃，热交换效率降低至75%，能耗上升至170 kW·h，流速减小至1.4 m/s。虽然优化后仍能保持一定效率，但能效在高负荷时受到影响，表明系统在高负荷下可能受到热交换和流体动力学的瓶颈。

工况4（低负荷状态）：在低负荷工况下，天然气流量减少至1500 m³/h，系统的温度降幅为30℃，热交换效率达到了90%，能耗降低至130 kW·h，流速为1.6 m/s。低负荷工况下，优化效果最为显著，能效和冷却效果达到最佳。

表1 预冷系统仿真结果

工况	温度降幅 (ΔT)	热交换效率 (η)	能耗 (E)	流体流速 (v)
工况1 (初始)	25℃	80%	150 kW·h	1.5 m/s
工况2 (优化)	28℃	85%	140 kW·h	1.8 m/s
工况3 (高负荷)	22℃	75%	170 kW·h	1.4 m/s
工况4 (低负荷)	30℃	90%	130 kW·h	1.6 m/s

从仿真分析结果可以看出，优化措施显著改善了各项性能指标，特别是在温度降幅、热交换效率和能耗方面。①温度降幅（ ΔT ）：优化后温度降幅从25℃提升至28℃，表明热交换效果增强，冷却介质与天然气之间的热交换效率得到提升。②热交换效率（ η ）：热交换效率从80%提升至85%，通过优化热交换器设计和流体流速改善了热交换过程。③能耗的降低：优化后，系统在大多数工作状态下能耗明显降低，工况2能耗从150 kW·h降至140 kW·h。但在高负荷工况下，能耗略有上升，可能由于热交换和流体流动的瓶颈。④流体流速的提升：流速从1.5 m/s提高至1.8 m/s，流动效率提高，促进了热交换器性能的提升。

四、关键优化技术

(一) 先进热交换技术

天然气液化装置预冷系统优化设计中，高效热交换

器的设计是其中一项非常重要的技术。通过增大换热面积，优化流体流动路径和使用高导热材料来促进热交换时热量的传递。利用增强的传热方法，例如表面微观结构的设计和纳米流体技术，都可以进一步增强热交换的性能，确保预冷系统在各种工况下都能达到更优的冷却效果。

(二) 节能技术

将节能设备和技术应用于预冷系统，对于提高能效具有重要意义。高效压缩机，变频驱动系统及低温节能设备的使用可以有效地降低能量消耗。通过对冷却介质循环优化设计、采用低温制冷剂及废热回收技术等措施可实现对系统能量回收与利用。对系统整体工艺设计进行优化，还可以有效地降低能源消耗。

(三) 自动化控制技术

引进自动化控制技术，保证预冷系统高效工作。通过集成智能传感器及控制系统可以对系统运行状态进行实时监控及调整，以保证系统处于最佳状态。自动化系统也能通过对实时数据的分析及时发现异常，对故障进行诊断，增强了系统运行的稳定性与可靠性。

五、优化效果评估

(一) 现场监测数据

本项目是位于某液化天然气 (LNG) 厂的预冷系统

优化研究，项目产能为年产天然气液化量 100 万吨。该液化站采用了先进的天然气液化技术，旨在通过优化预冷系统提高整体能效和减少能源消耗。现场监测数据的采集由厂区运营团队通过高精度传感器和智能监控系统完成，确保数据的准确性和可靠性。监测数据包括了预冷系统运行期间的温度、压力、流量、能耗等多项参数，采集频率为每小时一次，并在不同工况下进行了详细记录。现场数据引入：在实际应用中，对预冷系统的优化效果进行了现场监测，表 2 和图 1 展示了优化前后系统的变化。监测期间，四个主要性能指标（温度降幅、热交换效率、能耗和流体流速）在不同工况下的表现如下。

表 2 现场监测数据对比

时间点	温度降幅 (ΔT)	热交换效率 (η)	能耗 (E)	流体流速 (v)
优化前 (工况 1)	24°C	78%	155 kW·h	1.4 m/s
优化后 (工况 2)	27°C	82%	145 kW·h	1.7 m/s
优化前 (工况 3)	22°C	76%	165 kW·h	1.3 m/s
优化后 (工况 4)	29°C	88%	135 kW·h	1.6 m/s

图 1 显示了预冷系统温度降幅，热交换效率，能耗，流体流速等参数在优化前与优化后的变化趋势。

(二) 实施效果评价

通过比对现场监测数据，可以明显看出预冷系统

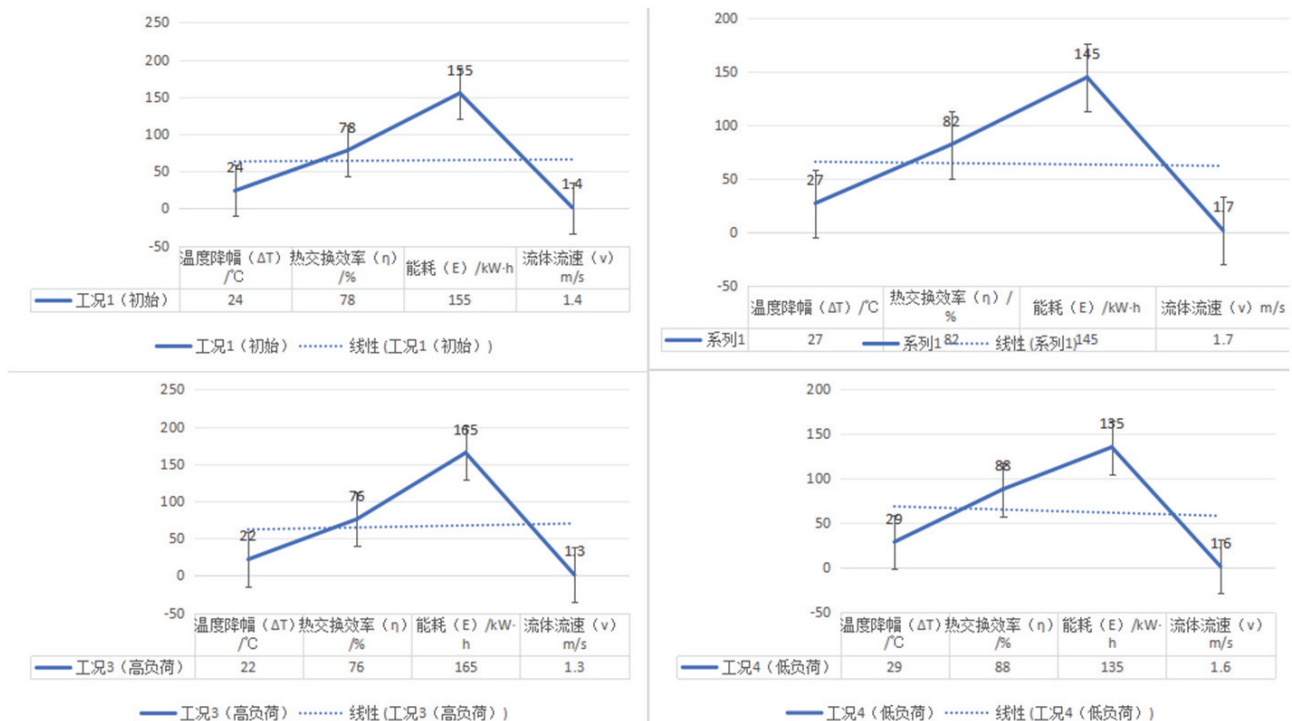


图 1 现场优化前后预冷系统性能对比图

优化前后的性能变化。在优化后的系统中，温度降幅从24℃增加到27℃，热交换效率从78%提升至82%，能耗从155 kW·h降低到145 kW·h，表明优化措施不仅提升了冷却效果，还有效降低了系统能耗，实现了节能减排。流体流速的提升进一步提高了冷却介质流动效率，优化了预冷系统的整体运行效率。特别是在高负荷工况下，优化系统的液化效率和稳定性得到了显著提高，验证了优化技术在提升液化效率和降低能耗方面的有效性。

结论

通过对天然气液化装置预冷系统的优化模拟与现场数据分析，可以得出优化后的预冷系统在四个主要性能指标（温度降幅，热交换效率，能耗及流体流速等）方面均表现出显著的提升。更具体地说，经过优化，温度下降的幅度从24℃增加到了27℃，热交换效率提升了4个百分点，同时能源消耗也减少了10 kW·h。优化措施也使流体流速得到提高，系统整体冷却效率得到提升。优化措施在促进液化效率提高的同时也使系统能耗下降，

特别是高负荷工况时，优化系统稳定性更强，显示出更多的低能耗和更高冷却效果。仿真分析与现场监测数据一致性证明该优化措施是有效的，可为预冷系统后续优化及实际应用奠定可靠基础。

参考文献

- [1]Ding L, Zijian L, Yin B, et al. Experimental study and economic analysis of an absorption refrigeration system with new generator structure applied for pre-cooling in liquefied natural gas plant[J]. International Journal of Refrigeration, 2021, 129: 78-87.
- [2]杨鑫磊.20万t/a天然气液化装置能耗优化研究以应用[D].西北大学, 2018.
- [3]蔡志国.小型撬装式天然气液化装置的流程模拟与优化[D].宁夏大学, 2016.
- [4]张宏杰.天然气液化装置及工艺设计与应用研究[D].华南理工大学, 2014.
- [5]牛亚楠.多元混合制冷剂小型天然气液化装置的模拟研究[D].同济大学, 2007.