

# LNGC 液货舱加注阶段压力平衡控制的实操参数优化与安全边界研究

李晓杰

招商局重工(江苏)有限公司

DOI:10.32629/etd.v6i7.18212

**[摘要]** 液化天然气运输船(LNGC)液货舱加注前惰化、置换、冷舱及加注氮四阶段的压力平衡控制关乎作业安全与效率。本文聚焦中央液货处理系统(CHS),基于实船数据构建综合压力控制模型,模拟反演提出各阶段关键操作参数优化范围,结合材料耐受极限等划定安全压力阈值,构建全流程风险防控体系,并给出新船设计与工艺标准建议。研究形成量化实操工艺指导原则,为新一代LNGC设计及CHS系统优化集成提供理论依据与数据支撑。

**[关键词]** LNG 运输船; 液货舱; CHS 系统; 参数优化; 安全边界

**中图分类号:** U663.83 **文献标识码:** A

## Research on Operational Parameter Optimization and Safety Boundary for Pressure Balance Control During LNGC Tank Refueling

Xiaojie Li

China Merchants Heavy Industry (Jiangsu) Co., Ltd

**[Abstract]** The pressure balance control during the four stages of inerting, purging, cold cargo, and nitrogen loading in the LNG tanks of a liquefied natural gas carrier (LNGC) is critical to operational safety and efficiency. This study focuses on the central cargo handling system (CHS), constructing a comprehensive pressure control model based on real vessel data. Through simulation and inversion, it proposes optimized parameter ranges for each stage, defines safe pressure thresholds by considering material tolerance limits, establishes a full-process risk prevention system, and provides recommendations for new vessel design and process standards. The research formulates quantifiable operational guidelines, offering theoretical foundations and data support for the design and optimized integration of next-generation LNGCs and CHS systems.

**[Key words]** LNG carrier; LNG tanks; CHS system; parameter optimization; safety boundary

### 引言

液化天然气(LNG, Liquefied Natural Gas)运输船(LNGC, Liquefied Natural Gas Carrier)液货舱加注作业的安全性与效率,核心取决于惰化、置换、冷舱及加注氮四阶段的压力平衡控制<sup>[1]</sup>。当前实船操作中,压力控制参数多依赖经验,缺乏量化优化指导,安全边界界定亦存在模糊性,易引发舱体结构损伤或作业中断风险。中央液货处理系统(CHS, Cargo Handling System)作为压力控制核心单元,其工况匹配性直接影响控制效果<sup>[2]</sup>。本文基于实船操作数据,聚焦CHS系统主导下的分阶段压力动态特性,开展参数优化与安全边界研究,旨在形成实操性工艺指导原则,为LNGC设计优化与作业安全保障提供理论与数据支撑。

### 1 基于CHS系统的各阶段压力动态分析与模型构建

#### 1.1 数据来源与CHS系统工况分析

本研究的数据来源于三艘17.4万立方米级LNGC连续12个航次的完整加注准备阶段操作记录,涵盖惰化、置换、冷舱及加注氮全过程。数据主要包括各液货舱压力、温度时序数据,以及中央液货处理系统(CHS)的关键工况参数,如惰气发生器/氮气发生器输出流量、纯度、温度,以及总管压力、各舱进口阀开度等。CHS系统作为压力平衡的核心,其工况直接决定了输入气流的物理状态与总量。分析表明,系统输出的气体流量稳定性、温度及纯度是影响舱内压力变化速率与平衡点的关键初始条件,其运行状态为后续分阶段压力动态建模提供了直接的输入边界。中央液货处理系统架构如图1所示。

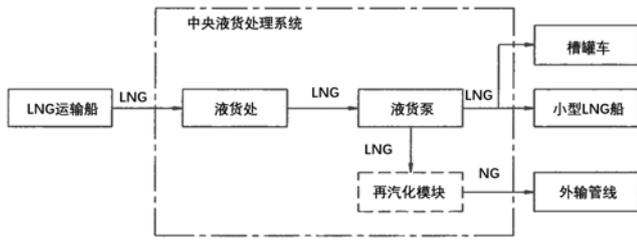


图1 中央液货处理系统架构图

1.2分阶段“压力—时间”动态特性研究

基于实船数据,各阶段压力动态呈现显著差异,各加注准备阶段压力—时间动态特性模拟曲线如图2所示。惰化阶段,压力随时间快速上升并逐渐趋于稳定,符合气体填充动态平衡特征;置换阶段,压力波动幅度收窄,呈现平稳过渡趋势,反映出气替换过程中的压力精细调节;冷舱阶段,由于低温介质引入,舱内温度下降导致压力明显降低,其变化速率受冷源强度与流量控制;加注氮阶段,压力随氮气输入小幅上升并最终稳定于目标预备值。各阶段压力时变曲线揭示了不同工艺目标下的控制重点,为后续建模与参数优化奠定基础。

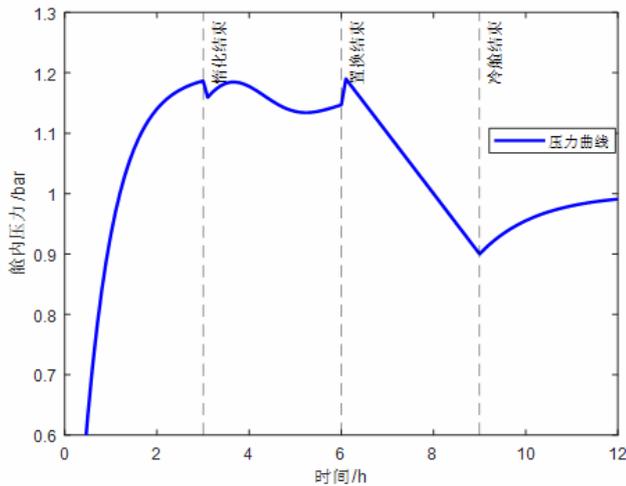


图2 各加注准备阶段压力—时间动态特性模拟曲线图

1.3多因素影响下的综合压力控制模型建立

基于各阶段压力动态特性分析,本文综合考虑舱内气体状态变化、CHS系统输入条件及环境因素,建立综合压力控制模型。该模型以质量守恒与理想气体状态方程为基础,结合气体流动方程与热平衡关系<sup>[3]</sup>,描述舱压P随时间t变化的动态过程:

$$\frac{dP}{dt} = \frac{R}{V} \left( \frac{dm_{in}}{dt} T_{in} - \frac{dm_{out}}{dt} T_{out} \right) + \frac{P}{T} \frac{dT}{dt} \quad (1)$$

其中,P为舱内绝对压力(Pa);V为液货舱净容积(m<sup>3</sup>),视为恒定;R为气体常数(J·mol<sup>-1</sup>·K<sup>-1</sup>),随气体组分变化;dm<sub>in</sub>/dt与dm<sub>out</sub>/dt分别为通过CHS系统进入及排出舱内的气体质量流量(kg·s<sup>-1</sup>);T<sub>in</sub>、T<sub>out</sub>分别为进、出气体的热力学温度(K);T为舱内气体平均温度(K),其变化率dT/dt在冷舱阶段受低温介

质流量与换热强度影响显著。

模型进一步引入CHS系统控制变量,包括惰气/氮气流量Q<sub>g</sub>、纯度η、进气温度T<sub>in</sub>及舱阀开度K<sub>v</sub>(影响流出阻力),建立流量与压力变化的耦合关系:

$$\frac{dm_{in}}{dt} = \rho_g \cdot Q_g \cdot K_v \quad (2)$$

其中,ρ<sub>g</sub>为进气密度(kg·m<sup>-3</sup>),与气体组分、温度及压力相关。通过联立上述方程并进行阶段参数适配,可实现对惰化、置换、冷舱及加注氮各阶段压力变化的动态模拟与预测,为后续参数优化提供量化工具。

2 控制参数优化与安全边界的确定

2.1各阶段压力控制优化参数范围的提出

基于第2.3节所建立的综合压力控制模型,对惰化、置换、冷舱及加注氮四个阶段分别进行模拟与反演计算,提出关键操作变量的优化参数范围,各阶段压力控制优化参数范围如表1所示。

表1 各阶段压力控制优化参数范围

阶段	关键控制变量	优化参数范围	目标压力/变化控制
惰化	惰气流量(Q)	800-1200Nm <sup>3</sup> /h	平稳上升至~110kPa
	进气温度(T <sub>in</sub> )	40-50°C	
置换	氮气纯度(η)	≥99.5%	压力波动≤±2kPa
	氮气流量(Q)	500-800Nm <sup>3</sup> /h	
冷舱	低温氮气温度(T <sub>in</sub> )	阶段降温,起始≥-50°C	压力下降速率≤1.5kPa/min
	低温氮气流量(Q)	600-900Nm <sup>3</sup> /h	
加注氮	氮气流量(Q)	300-500Nm <sup>3</sup> /h	稳定于~105kPa
	舱阀开度(K)	0.6-0.8	

表1清晰界定了加注准备四阶段的压力控制核心要素,现总结如下:惰化阶段以惰气流量和进气温度为关键控制变量,将二者分别控制在800-1200Nm<sup>3</sup>/h、40-50°C,实现舱压平稳升至110kPa的目标;置换阶段聚焦氮气纯度与流量,通过纯度≥99.5%、流量500-800Nm<sup>3</sup>/h的参数控制,确保压力波动不超过±2kPa;冷舱阶段重点调控低温氮气的温度与流量,温度采用阶段降温模式且起始不低于-50°C,流量控制在600-900Nm<sup>3</sup>/h,保障压力下降速率≤1.5kPa/min;加注氮阶段通过300-500Nm<sup>3</sup>/h的氮气流量及0.6-0.8的舱阀开度,使舱压稳定于105kPa。上述优化参数范围明确了各阶段操作窗口,为实操中的参数调整提供了精准依据。

2.2安全边界的划定与风险防控

安全边界划定以液货舱材料耐受极限、结构强度校核结果及安全阀设定值为核心依据,结合综合压力控制模型反演结果,明确四阶段压力安全阈值<sup>[4]</sup>。惰化与置换阶段,压力上限不超过130kPa(安全阀开启压力的80%),下限不低于90kPa,避免负压导致舱体失稳;冷舱阶段压力下限严控为85kPa,防止低温与负压叠加引发结构热应力损伤;加注氮阶段压力波动范围限定为100~110kPa,规避接近安全阀动作值的误触发风险。

风险防控体系以CHS系统为核心,构建压力—温度—流量联动联锁机制:当舱压超安全边界±5kPa时,系统自动调节阀开度

或切断气源;冷舱阶段实时监控降温速率,超1.5kPa/min时启动旁通补氮。同时,依托实船数据建立异常预警模型,对流量突变、纯度不达标等风险源提前预判,形成“边界界定—实时监控—连锁处置”的全流程防控闭环,保障作业安全。安全边界划定与风险防控流程如图3所示。

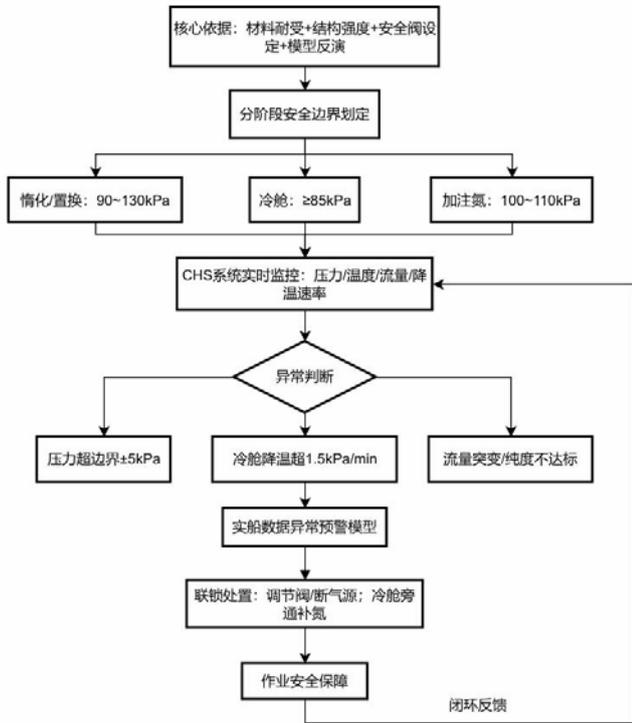


图3 安全边界划定与风险防控流程图

2.3对新船设计与工艺标准的建议

基于本研究的参数优化结果与安全边界分析,对新一代LNG设计及工艺标准提出以下针对性建议<sup>[5]</sup>。设计层面,需强化CHS系统的定制化与智能化升级,建议集成多变量耦合控制模块,实现惰气/氮气流量、温度与舱阀开度的自适应调节,同时预留压力预警与连锁逻辑的扩展接口,提升系统对优化参数的适配能力。液货舱结构设计应结合各阶段安全压力阈值,针对性优化材料选型与壁厚分布,重点强化冷舱阶段低温与负压叠加工况下的结构冗余,降低热应力损伤风险。

工艺标准层面,建议将本研究提出的各阶段优化参数范围纳入行业实操规范,替代传统经验化操作模式,形成量化的工艺指导文件。同时,规范加注准备全流程的压力监测要求,明确各阶段压力、温度等关键参数的采样频率与记录标准。此外,建立基于本研究压力控制模型的岗前模拟培训体系,配套制定异常工况处置预案,推动工艺标准与实操培训、安全管理的深度融合,为LNG加注作业的安全高效开展提供全链条保障。

3 结语

本文围绕LNG液货舱加注准备四阶段压力平衡控制核心问题,基于实船数据构建综合压力控制模型,精准划定各阶段优化参数范围与安全压力边界,建立“边界界定—实时监控—连锁处置”全流程风险防控体系,并提出针对性的新船设计与工艺标准建议。研究突破传统经验化操作局限,形成量化、可实操的压力控制工艺指导原则,为新一代LNG设计优化及CHS系统安全集成提供重要理论支撑与数据依据,对提升加注作业安全性与效率具有显著实践价值。未来可进一步结合智能算法拓展模型适配性。

招商局集团创新资助项目:大型LNG运输船自主化设计与建造关键技术研究(项目编号:CMHI-E05-1-2024-006)。

[参考文献]

[1]邵彦山.LNG运输船液货装卸自动控制系统设计[J].装备制造技术,2025,(08):160-164.  
 [2]吴军,王继鸣,邵孟飞,等.FLNG液货处理系统初步研究[J].中国水运,2021,(23):60-62.  
 [3]陈海键.基于镜像映射的LNG船液舱压力系统鲁棒控制[D].大连海事大学,2021.  
 [4]徐鹏飞,张国栋,吴圆跃,等.VLGC液货舱惰化作业技术研究[J].船舶与海洋工程,2025,41(03):29-33.  
 [5]王安琪,沙正荣,王怀仪,等.双碳背景下LNG动力船舶的发展趋势[J].航海,2025,(06):5-7.

作者简介:

李骁杰(1991--),男,汉族,江苏南通人,本科,工程师,研究方向:船舶与海工平台轮机,管系建造。