接收站用 LNG 反装船泵国产化研究

王　放　艾绍平　金　樱　罗祥平　卢　琳　齐　鹏　姜　波
北京市燃气集团有限责任公司，　天津　300450

摘　要：接收站用 LNG 反装船泵是液化天然气接收站实现储运转运的核心关键设备，长期依赖进口制约着中国能源装备自主可控发展。在分析国内 LNG 产业发展需求与装备国产化现状的基础上，系统阐述了大流量 LNG 反装船泵的主要技术参数与结构特征，重点围绕水力模型设计、低温动力系统、介质润滑轴承、轴向力平衡等关键技术难题开展深入研究。攻克了水力模型优化、低温轴承润滑、轴向力平衡等关键技术，样机性能指标达到设计预期。研究成果可为打破相关技术垄断、提升中国 LNG 产业链的自主保障能力提供理论支撑与工程参考。

关键词：LNG 反装船泵；国产化研究；关键技术
DOI：10. 3969 /j. issn. 1006-5539. 2026. 04. 006

Research on the localization of LNG reload pumps for receiving terminals

Wang Fang, Ai Shaoping, Jin Ying, Luo Xiangping, Lu Lin, Qi Peng, Jiang Bo
Beijing Gas Group Co. , Ltd. , Tianjin, 300450, China

Abstract: LNG reload pumps for receiving terminals are critical core equipment for storage and transshipment operations at liquefied natural gas (LNG) receiving terminals. Their long-term reliance on imports has constrained the independent and controllable development of China's energy equipment sector. Based on an analysis of domestic LNG industry development requirements and the current status of equipment localization, this paper systematically elaborates on the main technical parameters and structural characteristics of high-capacity LNG reload pumps. It focuses on in-depth research into key technical challenges including hydraulic model design, cryogenic drive systems, process-lubricated bearings, and axial thrust balance. The research findings can provide theoretical support and engineering reference for breaking relevant technological monopolies and enhancing the self-sufficiency capability of China's LNG industry chain.

Keywords: LNG reload pump; Localization research; Key technologies

0　前言

液化天然气(Liquefied Natural Gas, LNG)是中国能源结构优化调整的重要支撑，随着沿海 LNG 接收站布局持续加密，接收能力突破 1×10^8 t /a，接收站功能不断拓展完善。反装船可将储罐内 LNG 重新输送至运输船舶，对提升资源调配灵活性、保障区域供气安全有重要作用[1]。LNG 反装船泵是实现反装功能的核心动力设备，其作用是对储罐中的 LNG 进行增压。与常规罐内泵相比，反装船泵对流量要求更高，目前国内新建接收站设

收稿日期：2026-02-10
作者简介：王　放(1979-)，男，高级工程师，硕士，主要从事油气储运工程建设和运营方面的工作。E-mail：18010040767@163. com
通信作者：艾绍平(1983-)，男，高级工程师，硕士，主要从事 LNG 接收站工程建设、运营、科研及智能化研究工作。E-mail：aishaoping@ bjgas. com

计流量普遍达到 1 600 ~ 2 000 m^3 /h 量级，对设备技术性能提出严峻挑战[2]。

从全球供应格局看，具备大流量 LNG 反装船泵生产能力的厂商高度集中于 NIKKISO、EBARA 等少数企业，形成事实垄断[3]。国内已建项目均采用进口产品，单台购置成本高、维修时间长。近年来国际贸易摩擦与突发公共卫生事件导致进口设备交付周期大幅延长，部分国家重点能源项目投产进度受阻。这一现实深刻揭示了关键装备依赖进口的潜在风险，推进 LNG 反装船泵国产化已成为保障中国 LNG 北京市燃气集团有限公司（以下简称“北京燃气”）产业链自主可控的迫切需求。

北京燃气与大连深蓝泵业有限公司（以下简称“大连深蓝”）共同开展了 2 000 m^3 /h 大流量 LNG 反装船泵自主研制，核心目标是攻克水力模型设计、低温动力系统、介质润滑轴承、轴向力平衡等关键技术，研制出性能指标达国际主流水平的国产化产品，并实现工程验证与应用。

1 LNG 装船泵国产化研究现状与问题

1.1 国内外技术对比

国际上，LNG 潜液泵技术经过数十年发展已趋于成熟。NIKKISO、EBARA 公司作为该领域的领导者，其产品覆盖从罐内泵、高压泵到反装船泵的全系列，在全球 LNG 接收站市场占据主导地位[4]。这些国际知名企业的技术优势体现在以下方面。

1）深厚的技术积累。经过数十年持续研发与工程应用，形成了完整的设计理论体系和丰富的运行数据库，为新产品的开发提供强大的技术支撑[5]。

2）完善的试验验证手段。建有大型低温试验平台，可在模拟真实工况下对产品进行全面测试，确保出厂产品性能可靠。

3）成熟的供应链体系。关键零部件采用全球采购，材料性能、加工精度、质量控制均有成熟的标准体系保障。

相比之下，中国 LNG 低温泵技术研究起步较晚，早期主要依赖引进消化，自主研发能力相对薄弱[6]。近年来，随着国家对高端装备制造业的重视和加大投入，国产化进程明显加快。

1.2 国产化进程

我国 LNG 产业装备国产化工作持续推进，已在多个领域取得积极进展。从政策层面看，中华人民共和国国家发展和改革委员会、国家能源局等部门多次发文鼓励 LNG 接收站关键设备国产化，为装备制造企业提供了良好的政策环境。从技术层面看，国内企业在 LNG 低温泵领域已取得阶段性成果，已完成国产化研发并实现工程应用的类似机泵最大流量约为 500 ~ 600 m^3 /h 量级[7]，已完成样机试制的产品最大流量达约 1 500 m^3/h。从技术演进路径看，国内装备制造企业遵循“由小到大、由易到难”的发展策略，已逐步攻克低温材料、精密制造、性能测试等技术难关。

国内 LNG 反装船泵的国产化能力已实现从技术追赶到自主可控的关键跨越，如北京燃气天津南港项目国产泵流量已达 2 000 m^3 /h，扬程 180 m，可覆盖国内在用接收站最大负荷需求。国内反装船泵参数对照见表 1。

表 1 国内反装船泵参数对照表

Tab. 1 Domestic reload pump parameter

客户	流量 /(m^3·h^{-1})	扬程 /m	供货商
北京燃气	2 000	180	NIKKISO
中海油宁波 LNG	2 000	120	EBARA
国家管网漳州 LNG	1 600	147	EBARA
本研究	2 000	180	大连深蓝

1.3 当前存在的技术短板

LNG 接收站典型工艺流程图见图 1。尽管国产化工作取得一定进展，但面向 2 000 m^3 /h 量级的大流量 LNG 反装船泵，仍存在关键技术短板亟待突破[8]。

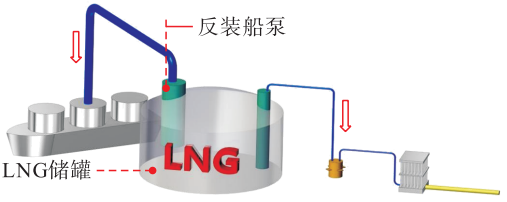

图 1 典型工艺流程图

Fig. 1 Typical process flow

1.3.1 大流量工况下的水力性能设计难题

在超大流量、低扬程工况下，既要保证泵组高效运行，又要具备优异的抗汽蚀性能，对水力模型的研发提出了极高要求。LNG 介质具有沸点低、易气化的特点，泵入口处压力稍低即可能发生气蚀，严重影响泵的性能和寿命。如何在保证大流量的同时，使泵具有足够的抗汽蚀能力，是水力模型设计的核心难题。

1.3.2 超低温环境下的材料与结构适应性不确定

LNG 反装船泵长期浸没在 -162 ℃的 LNG 介质中运行，同时还要承受频繁启停、低温与常温冷热交替。在 -196 ℃至常温的宽温域交变载荷作用下，材料收缩、间隙变化、应力分布等均需精确计算与控制。不同材料的热膨胀系数差异可能导致配合间隙变化，影响运行可靠性。国内对此缺乏系统性的试验数据与设计规范，多依赖经验估算，存在较大不确定性。

1.3.3　极端工况下的摩擦副可靠性低

以低黏度 LNG 作为唯一润滑介质，对轴承材料、表面处理、间隙设计提出严苛要求。LNG 的黏度仅为常规润滑油的几十分之一，难以形成稳定的润滑膜。同时，轴承高速旋转产生的摩擦热极易导致局部 LNG 气化，破坏润滑稳定性，严重时可能导致轴承干摩擦烧损。目前国内尚无经过长期运行验证的成熟方案。

1.3.4　整机可靠性验证体系不完善

大型 LNG 低温泵的出厂测试需模拟真实工况，对试验平台建设、测试方法标准等提出要求。LNG 具有易燃易爆特性，测试过程安全风险高，需要专门的低温试验设施和完善的安全保障措施。国内相关基础设施与技术规范仍有待完善，制约了产品的充分验证和快速迭代。

1.3.5　长期运行可靠性数据缺乏

进口产品经过数十年全球范围的广泛应用，积累了丰富的运行数据和故障案例，对产品改进和可靠性提升具有重要价值。国产产品尚缺乏大规模长期运行的数据支撑，对潜在故障模式的识别和改进措施的针对性有待加强。

2　LNG 反装船泵参数及主体结构

LNG 反装船泵作为一个高度集成的低温流体输送系统，其设计围绕在超低温环境下安全、稳定、高效地输送 LNG 这一核心功能展开[9]。本研究 LNG 反装船泵参数见表 2。

表 2　LNG 反装船泵参数表

Tab. 2　LNG reload pump parameters

额定流量 / ($m^3 \cdot h^{-1}$)	额定扬程 / m	额定转速 / ($r \cdot min^{-1}$)	电机功率 / kW	介质
2 000	180	1 470	800	LNG

该系统主要整合了以下关键功能模块。

1）动力与驱动模块。其核心为全浸式低温潜液电机。该电机整体浸没于 LNG 中运行，利用介质本身实现高效冷却，同时因其处于无氧环境，从根本上消除了燃烧风险，确保了极高的运行安全性。

2）能量转换与输送模块。该模块即泵的水力部件，通常采用离心式结构，通过叶轮旋转将机械能转化为流体动能，并由导流壳 2 个及以上部件有序引导和转换流道内的液体能量，其设计重点在于实现卓越的抗汽蚀性能，以适应 LNG 易气化的特性。

3）支承与平衡模块。在 −196 ℃ ~ +60 ℃ 的宽温域内，轴承及其润滑系统是可靠运行的关键。鉴于 LNG 黏度极低，润滑条件苛刻，通常选用材料性能稳定的氮化硅陶瓷球轴承，并辅以精密的轴向力平衡机构，共同保障转子系统在极端低温下的长期运行稳定性。

LNG 反装船泵结构见图 2。

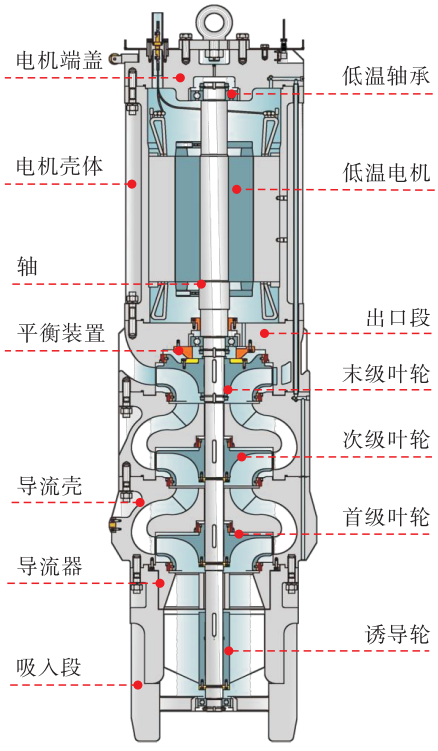

图 2　LNG 反装船泵示意图

Fig. 2　LNG reload pump

3　关键核心技术

国产 LNG 反装船泵总体研发目标为通过自主创新，使产品在关键性能指标、整体技术水平及长期运行可靠性上满足项目规格书要求[10]，并率先在北京燃气天津南港 LNG 接收站实现成功应用与工程验证。

3.1　泵水力技术

本研究首要关键核心技术是面向 LNG 反装船这一特定工况，研发与之高度适配的先进水力模型[11]。该模型必须同时满足 3 项关键性能要求：实现超大流量输送，维持极高的运行效率，并具备卓越的抗汽蚀性能。这三者共同构成了水力设计的核心目标集，也是本技术攻关的最终交付物。

为了使装船泵振动指标更低、运行更平稳，对导流壳开展了优化设计，缩短了导流壳级间距，降低泵头重心，泵在质量相同的情况下，尺寸变短，泵的整体刚性变强。紧凑型导流壳设计适当增加了流道弯曲，通过三维截面设计，保证流道各断面面积均匀过渡[12]，既减少机组轴向长度以达到降低泵组振动的要求，又满足泵组长周期运行的需求[13]。

整机水力模型及紧凑型导流壳的设计分别见图 3 和图 4。

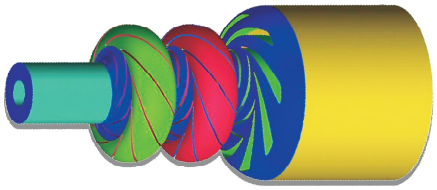

图 3　整机水力模型图

Fig. 3　Hydraulic model of the complete pump

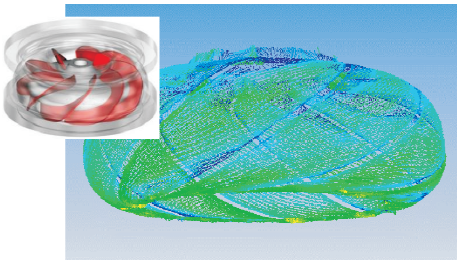

图 4　紧凑型导流壳设计图

Fig. 4　Compact diffuser casing design drawing

3.2　底阀

LNG 反装船泵采用立式、单吸、泵机共轴的一体化潜液式离心泵结构。其核心设计在于泵与电机共同浸没于低温液体中，并安装于储罐内的泵井。该结构利用泵体自重作为动力控制吸入底阀的开启与关闭，从而完成介质的输送与物理隔离。

在这一结构中，底阀的可靠性直接关乎整个泵送系统的安全，因此要求国产底阀在长期极端低温工况下，必须具备卓越的密封性、足够的结构强度及与现有国际品牌产品良好的互换性与通用性。目前，通过持续的技术攻关，国产底阀系统已在多个国内大型 LNG 接收站及调峰工程中成功应用，实现了对国际品牌产品的可靠替代与互换，验证了其工程应用的成熟度。

3.3　耐低温材料

由于泵的大流量、低扬程、大功率特性，在结构设计中，泵的关键零部件必须进行多载荷耦合下的综合强度与刚度校核，以确保所有部件在此复杂工况下，其应力与形变均处于材料安全范围内，保障结构完整性。这些载荷主要包括：泵组在立式安装状态下的持续自重应力、大流量运行引起的非稳态流体诱导力，以及大功率电机传递的极端扭矩与振动载荷。同时，还要求材料耐低温，保证低温环境下性能稳定；具备良好的强度，可满足零件功能需求；低温下材料收缩性能稳定、摩擦副材料需有自润滑性；具有良好的加工性能，便于机械加工，而且原材料应符合市场供应条件，便于采购[14]。

铝合金材料具有良好的低温机械性能，不产生火花，具备较好的机械加工性能，导热性好，具备自润滑性，有较好的干摩擦性能，低温条件下不会发生低温冷脆现象，即不会发生脆性断裂。

铜合金材料具有良好的低温机械性能，可保持其强度、塑性及韧性，低温条件下，部分性能优于常温状态，不会发生低温冷脆现象，不产生火花，热导率高，机械加工性能好，密度小，可较大程度降低设备重量。

轴采用沉淀硬化不锈钢 15－5PH，但标准材质不能满足低温下轴材质的使用要求，大连深蓝通过改变材料的热处理工艺，实现材料在低温下可靠运行，双时效热处理后，经过低温的冲击验证，轴料的韧性及其他力学性能已达到或超过了进口泵轴材料水平。

3.4　低温电机

LNG 反装船泵中的潜液电机是决定系统可靠性的核心动力源。在－162 ℃的极端低温下，构成电机的金属与绝缘材料的本构关系将发生根本性改变，这直接导致了两方面的关键技术挑战[15]：其一，绕组电阻、铁心磁导率等关键参数的改变，使得电机的电磁设计基础与常温时迥异，直接影响其出力、效率与温升[16]；其二，材料收缩、润滑剂凝固及结构件间隙变化，会显著改变转子的动态机械特性，包括临界转速、振动模态与轴承阻尼。因此，开展了针对性的低温电机特性研究，精确掌握其在低温下的起动转矩、最大转矩、过载能力等关键特性曲线，以及长期运行中的性能演变规律[17]。这项研究是建立准确低温电机设计理论、确保其在真实工况下稳定高效运行、不可或缺的科学基础。

3.5　LNG 介质润滑轴承

LNG 反装船泵的轴承润滑面临一项根本性约束：必须采用输送介质本身（即－162 ℃的低温 LNG）作为唯一的润滑与冷却剂。这一约束衍生出两个技术难题：其一，LNG 作为润滑介质，其黏度极低、润滑性能差，对轴承的材料、表面工艺与间隙设计提出了远高于常规工况的苛刻要求，致使国内目前仍普遍依赖进口高端轴承；其二，LNG 在泵内处于饱和状态，轴承在高速旋转中产生的摩擦热极易导致其局部气化。若气化量过大，不仅会破坏润滑膜的稳定性，还可能引发两相流，直接影响泵的输送效率与运行平稳性。因此，攻克低温、低黏度介质下的轴承可靠润滑与高效散热技术，是国产化研制必须翻越的一座关键技术高山[18]。

3.6　轴向力平衡

轴向力平衡一直以来都是 LNG 低温泵研究的重点之一，轴向力平衡装置可有效平衡叶轮产生的轴向力，延长轴和轴承等关键部件的使用寿命，从而确保 LNG 反装船泵在苛刻工况下的可靠性。为此，本次反装船泵借鉴并移植了大连深蓝已在 LNG 高压泵上验证成熟的轴向力平衡方案。该方案的核心在于采用了一种平衡鼓与平衡盘相结合的复合式平衡机构。其工作原理是平衡鼓负责抵消绝大部分由叶轮产生的稳态轴向力；而平衡盘则

能动态响应压力波动，自动调整平衡力，以补偿残余的、变化的轴向力。两者协同工作，可在全工况范围内实现轴向力的自动、完全平衡，从而确保推力轴承在近乎“零推力”的理想负荷状态下运行。这不仅极大降低了轴承的磨损与发热，显著延长其使用寿命，也从根本上提升了泵组运行的长期稳定性与可靠性[19]。

采用恢复率评价平衡机构的灵敏度，即当平衡盘偏离平衡位置时，需要产生一个相反的轴向力来使转子快速恢复平衡位置以实现转子的动态平衡，即恢复率 = 平衡力 / 轴向力，需满足 120% 才能保证平衡机构灵敏度平衡。

3.7　强度分析

因为泵处于低温状态下运行，保证泵的轴向及径向间隙为泵长期稳定运行的先决条件。通过对整机模型的仿真分析，LNG 反装船泵整机在温度、内压等多种载荷作用下转动部件与静止部件之间能保证一定的安全距离，保证转动部件与静止部件之间不发生摩擦，满足运行要求。图 5 为转子应力分布云图，用于评估转子结构强度是否满足低温工况。图 6 为整机变形位移分布云图，可直观反映整机在热—力耦合作用下的总体变形趋势，据此判断各关键配合间隙的变化量是否处于安全范围内。

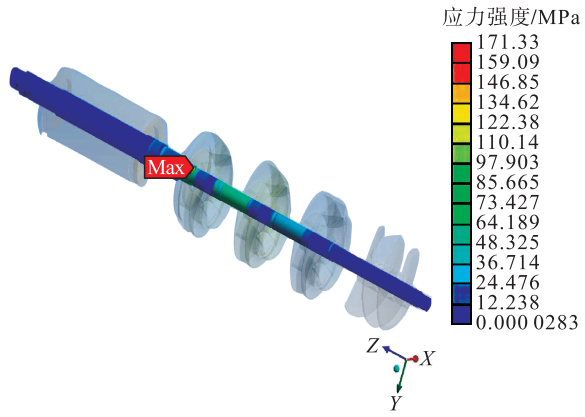

图 5　转子应力分布云图

Fig. 5　Rotor stress distribution contour plot

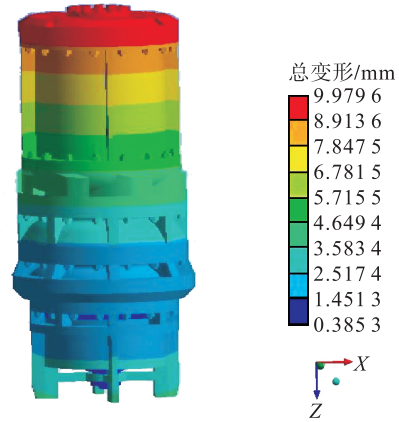

图 6　整机变形位移分布云图

Fig. 6　Complete pump deformation displacement contour plot

3.8　LNG 润滑轴承

叶轮设计有后口环（铜材质）；与后口环配对的为 LNG 润滑轴承，主体材料为铜，内部衬有 DU 套。后口环与 DU 套采用级间压差介质润滑，采用该结构可提高转子湿态刚性及运行稳定性。DU 套具有一定的退让性，在保证小间隙的同时，又可降低 2 个部件间的磨损。

3.9　铸造工艺

装船泵导流壳为中空流道结构，其尺寸大、内部流道复杂，导致其铸造难度较大。对导流壳的结构特点进行了深入分析，制定了合理的铸造工艺方案，采用大连深蓝成熟的铸造工艺及铸造经验，同时铸件工艺设计采用比利时进口铸造模拟软件 View-Cast 进行模拟铸造演示，及时预知铸造缺陷位置并进行消除。模拟分析显示缩孔均在冒口内部，凝固顺序合理。

3.10　可运行性分析

低温产品的可运行性先决条件包括：零件的精度、部件的承压能力、转子的刚度、冷变形间隙控制等。

因为泵处于低温状态下运行，泵的轴向及径向间隙的保证为泵长期稳定运行的先决条件。低温工况下，装船泵壳体部件与转子部件轴向间隙变化的主要原因如下。

1）各部件材料热膨胀系数不同。低温下，整个泵组浸没在低温介质中，合理假设各部件不存在温差。轴向间隙纯粹考虑由各部件材料热膨胀系数不同产生。

2）重力作用。泵壳体部件与转子部件由于截面刚性与材料弹性模量不同，重力作用下的轴向变形量不一致，导致间隙发生变化。经分析计算可知，由重力产生的轴向间隙变形量很小，可以忽略。

3）转子窜动。由于轴承处的窜动间隙和轴承游隙，泵组在运转状态下会发生转子窜动，使泵组轴向间隙发生变化。

大连深蓝利用 ANSYS 软件进行仿真分析，对各要素引起的间隙变形逐一进行仿真分析，确保可运行性满足设计和运行要求。

3.11　低温工艺

铝合金材料经多次冷热交替循环后，材料性能稳定，不产生韧脆转变；在交变应力下，不会产生材料的晶相变化，组织形态不会改变，不会发生类似亚稳定态奥氏体不锈钢（304）存在的低温下马氏体转变现象，不会导致应力腐蚀降低材料低温韧性。

目前国内没有成熟的适于低温泵材料的加工、制造工艺；国际上低温泵材料的加工、制造工艺为核心技术，处于技术封锁。大连深蓝开展了材料的低温力学性能研究、热处理冷处理工艺技术的研究、热膨胀系数及相互影响的研究、材料加工及热处理工艺的研究。经过反

复的试验验证总结，目前已掌握了低温泵材料加工、制造、热处理等关键生产工艺，材料性能指标达到国际同类水平；掌握了低温材料线膨胀系数及相互影响关系，建立了配合和间隙设计原则，保证机组在低温介质中可稳定运行[20]。

3.12 FMECA 分析及应对措施

在 LNG 反装船泵的国产化研制过程中，针对 6 大关键部件分别制定了专项应对措施。

水力部件方面，主要故障模式为抗汽蚀性能不足，其后果是泵组振动高、噪声大、扬程骤降，严重时损坏叶轮，导致装船作业中断。为此，研制中采用流体力学仿真技术，优化叶轮叶片入口边形状和安放角，以提高抗汽蚀性能。

轴承方面，主要故障为润滑不良，会导致振动增大，摩擦热使 LNG 气化，导致轴承烧毁、泵抱死，造成非计划停运。应对措施为：采用自润滑性能优异的 NSK 低温轴承；通过精密间隙设计，借助低温变形仿真精确控制冷态间隙，既保证润滑流量，又避免碰磨。

平衡机构方面，主要故障为平衡失效，导致低温轴承因承受过大轴向力而烧毁，且转子轴向窜动导致叶轮与壳体发生碰磨。应对措施为：采用平衡鼓与平衡盘相结合的复合式平衡机构，其中平衡鼓抵消 80% 以上稳态轴向力；同时通过仿真确保平衡机构的恢复率 > 120%，以实现全工况动态平衡。

低温潜液电机方面，主要故障为低温下启动转矩不足或绝缘失效，导致电机无法正常启动、运行中绕组短路烧毁、电机效率下降及功耗增加。应对措施包括：建立低温环境下电磁场仿真模型，针对性调整绕组设计和硅钢片选型；采用耐低温的特种薄膜导线和绝缘浸渍漆，并进行低温极限冷热循环试验验证；同时结合材料收缩特性优化定转子间隙，避免冷态卡滞。

底阀方面，主要故障为低温密封失效或无法正常启闭，造成检修时泵井无法隔离，LNG 泄漏带来重大安全隐患，且泵启动时无法正常建立灌泵条件。研制中采取如下应对措施：选用耐低温金属材料，并通过计算确保弹簧可被正常压缩与回弹；借鉴国际主流设计优化阀体流道，保证依靠自重和微小压差即可可靠开启或关闭；同时开展底阀开启与密封试验进行验证。

承压部件方面，主要故障为低温脆性断裂或应力开裂，一旦发生故障将导致泵体或管路破裂，LNG 大量泄漏，引发火灾爆炸等灾难性事故。应对措施包括：利用 View-Cast 软件进行铸造工艺仿真，消除铸件内部缩孔、缩松等缺陷；开展整机多物理场耦合分析，对整机进行温度场、压力场和重力场耦合下的应力与变形分析，确保安全裕度。

4 结论

LNG 反装船泵作为接收站核心动力设备，其国产化研制对提升我国 LNG 产业链自主可控能力有重要意义。本研究围绕 2 000 m^3 /h 大流量 LNG 反装船泵开展系统攻关，取得以下主要成果。

1）通过水力模型优化设计，实现了大流量工况下的高效率与优良抗汽蚀性能；通过低温材料体系研究，掌握了铝合金、铜合金、不锈钢等材料在超低温环境下的性能规律；通过 LNG 润滑轴承技术攻关，解决了低黏度介质润滑难题；通过复合式轴向力平衡机构设计，实现了全工况范围内轴向力自动平衡；通过结构强度与变形分析，保证了低温工况下各部件的安全间隙。上述技术突破形成了具有自主知识产权的技术体系。

2）研究成果已应用于样机制造和试验验证，各项性能指标达到设计要求。与北京燃气等终端用户建立合作，为后续工程应用奠定了基础，有望改变该类型设备长期依赖进口的局面，降低工程建设与运营成本，提升供应链安全性。

3）国产 LNG 反装船泵具有显著的成本优势和服务优势，可降低用户购置与运维成本，具有良好的市场竞争力。

后续研究将聚焦工程应用验证与长期运行可靠性考核，通过大量工业现场实际运行检验产品的性能和可靠性，收集运行数据，持续优化改进，推动国产装备从样机试制走向规模化应用，为我国 LNG 产业高质量发展提供可靠装备保障。

参考文献：

[1] 金　罕，许佳伟，施玉平. 大型 LNG 接收站反输装船方案研究[J]. 煤气与热力，2019，39(9)：4-7.
Jin Han, Xu Jiawei, Shi Yuping. Research on ship re-loading scheme for large LNG receiving terminals [J]. Gas & Heat, 2019, 39 (9): 4-7.

[2] 肖海涛，万学丽，郑　全，等. LNG 接收站用大型罐内潜液泵的国产化工程应用[J]. 通用机械，2018(8)：13-15.
Xiao Haitao, Wan Xueli, Zheng Quan, et al. Domestic application of submersible pumps in large tanks for LNG receiving stations [J]. General Machinery, 2018 (8): 13-15.

[3] 陈海平，黄　宇，郭　琦，等. 液化天然气关键装备国产化科研模式探索与实践[J]. 现代化工，2020，40(9)：1-3.
Chen Haiping, Huang Yu, Guo Qi, et al. Exploration and practice for scientific research modes in localization of key LNG equipment [J]. Modern Chemical Industry, 2020, 40 (9): 1-3.

[4] 罗资琴，任永平，陈叔平，等. LNG 低温潜液泵结构及设计

分析[J]. 低温与超导,2012,40(7):13-16.
Luo Ziqin, Ren yongping, Chen Shuping, et al. Structure and design analysis of submerged LNG cryopump [J]. Cryogenics and Superconductivity, 2012, 40 (7): 13-16.

[5] 谭宏博,厉彦忠,梁　骞,等. 液化天然气潜液泵关键技术及研发方案[J]. 现代化工,2007,27(12):52-54.
Tan Hongbo, Li Yanzhong, Liang Qian, et al. Key technologies and research schemes for submerged pumps for liquefied natural gas [J]. Modern Chemical Industry, 2007, 27 (12): 52-54.

[6] 江海斌,万学丽,景宏亮. 我国 LNG 低温潜液泵现状及国产化情况分析[J]. 通用机械,2014(11):54-56.
Jiang Haibin, Wan Xueli, Jing Hongliang. Analysis on the present situation and localization of LNG cryogenic submersible pump in China [J]. General Machinery, 2014 (11): 54-56.

[7] 孙晓玲,刘忠明,张　燕. 液化天然气潜液泵的研制[J]. 低温工程,2010(2):20-23.
Sun Xiaoling, Liu Zhongming, Zhang Yan. Research and development of LNG submerged pump [J]. Cryogenics, 2010 (2): 20-23.

[8] 王　海. LNG 接收站低温潜液泵应用[J]. 云南化工,2019,46(9):158-159.
Wang Hai. Application of submersible cryogenic pump in LNG receiving terminals [J]. Yunnan Chemical Technology, 2019, 46 (9): 158-159.

[9] 张宇鹏. 低温潜液泵结构与应用研究[J]. 水泵技术,2018(2):1-5.
Zhang Yupeng. Analysis of construction and application of the cryogenic submersible pump [J]. Pump Technology, 2018 (2): 1-5.

[10] 吕程辉,肖志远,甘正林. LNG 潜液泵推力平衡机构的设计[J]. 船海工程,2017,46(1):45-48.
Lyu Chenghui, Xiao Zhiyuan, Gan Zhenglin. Design of thrust equalizing mechanism for LNG submerged pump [J]. Ship & Ocean Engineering, 2017, 46 (1): 45-48.

[11] 张化川. LNG 接收站低温罐内潜液泵水力研发设计[J]. 低温与特气,2017,35(1):7-10.
Zhang Huachuan. The hydro development of cryogenic in tank submerged pump for LNG receiving station [J]. Low Temperature and Specialty Gases, 2017, 35 (1): 7-10.

[12] 钱　涛,陈红勋,梁成鹏. 基于 CFD 的潜液式液化天然气泵导叶设计[J]. 上海大学学报(自然科学版),2016,22(5):606-615.
Qian Tao, Chen Hongxun, Liang Chengpeng. Design of liquefied natural gas submerged pump guide vane based on CFD [J]. Journal of Shanghai University (Natural Science Edition), 2016, 22 (5): 606-615.

[13] 韩传军,李言希,程　华. 叶轮与导叶宽度匹配参数对 LNG 泵压力脉动特性的影响研究[J]. 机械科学与技术,2024,43(8):1359-1366.
Han Chuanjun, Li Yanxi, Cheng Hua. Effect of matching parameters between impeller and guide vane width on pressure pulsation characteristics of LNG pump [J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2024, 43 (8): 1359-1366.

[14] 祝勇仁,张　炜,王循明. LNG 汽车加气站用潜液泵研制[J]. 机械科学与技术,2012,31(1):163-166.
Zhu Yongren, Zhang Wei, Wang Xunming. Research and development of LNG submerged pump for LNG car gas station [J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2012, 31 (1): 163-166.

[15] 艾程柳,黄元峰,王海峰,等. 潜液式 LNG 泵低温电机及其关键技术发展综述[J]. 中国电机工程学报,2014,34(15):2396-2405.
Ai Chengliu, Huang Yuanfeng, Wang Haifeng, et al. Development of the cryogenic electrical motor for the submerged liquid natural gas pump and its key technologies [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34 (15): 2396-2405.

[16] 艾程柳,黄元峰,王海峰,等. 潜液式液化天然气泵用变频低温异步电机的关键参数设计[J]. 中国电机工程学报,2015,35(20):5317-5326.
Ai Chengliu, Huang Yuanfeng, Wang Haifeng, et al. Important parameters design of inverter-driven cryogenic induction motor for submerged liquid natural gas pump [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35 (20): 5317-5326.

[17] 黄元峰,艾程柳,王海峰. 液化天然气潜液泵低温电机导液通道的优化设计[J]. 中国电机工程学报,2015,35(24):6535-6542.
Huang Yuanfeng, Ai Chengliu, Wang Haifeng. Optimization design of flow ducts in submerged liquefied natural gas pump cryogenic motor [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35 (24): 6535-6542.

[18] 张蓓乐,余程焕,王元清,等. 采用动压轴承的高速液氮离心潜液泵设计[J]. 低温与超导,2024,52(7):47-52.
Zhang Beile, Yu Chenghuan, Wang Yuanqing, et al. Design of a high-speed centrifugal submersible liquid nitrogen pump with hydrodynamic bearing [J]. Cryogenics & Superconductivity, 2024, 52 (7): 47-52.

[19] 申　坤,张惟斌,江启峰,等. 导叶叶片数对 LNG 四级潜液泵轴向力及首级叶轮流场的影响研究[J]. 化工设备与管道,2024,61(1):57-62.
Shen Kun, Zhang Weibin, Jiang Qifeng, et al. The influence of guide vane blade number on the pressure and axial force of the first stage impeller of LNG four stage submersible pump [J]. Process Equipment & Piping, 2024, 61 (1): 57-62.

[20] 宋怀德,郭宝骏,李玉华,等. 低比转速 LNG 潜液泵的设计与工作特性研究[J]. 流体机械,2023,51(6):60-65.
Song Huaide, Guo Baojun, Li Yuhua, et al. Research on design and working characteristics of low specific speed LNG submersible pump [J]. Fluid Machinery, 2023, 51 (6): 60-65.