LNG 接收站用反装船泵现场安装关键技术研究

刘中河　艾绍平　张　奕　胡兴乔　王卫晓
北京市燃气集团有限责任公司，　天津　300450

摘　要：液化天然气(Liquefied Natural Gas,LNG)接收站反装船泵作为深冷环境下的精密旋转设备,其安装质量直接决定接收站的运行安全与效率。为了向同类型深冷旋转设备的现场安装提供技术依据,提升反装船泵长期稳定运行水平,以某大型 LNG 应急储备项目为案例,采用案例分析法与关键技术解构法,系统研究了 LNG 反装船泵现场安装的关键技术体系。首先阐述了反装船泵的结构特性与设计要点;其次针对安装过程中的泵井直线度检测、底阀密封性测试、假泵验证、泵头分段吊装及坐泵精度控制等关键工序,进行了深入的技术分析。研究识别出安装过程的三大技术难点为泵井几何尺寸偏差导致卡阻风险、底阀密封失效风险、坐泵开度超差风险,提出了全过程尺寸链控制技术和基于动态称重的坐泵精度控制方法两项解决方案,有效保障了安装精度与可靠性。研究结果为 LNG 接收站同类设备的安装提供了技术参考和实践指导,对推动 LNG 关键设备安装技术的标准化与国产化有积极意义。

关键词：LNG 接收站;反装船泵;安装工艺;底阀;精度控制
DOI:10. 3969 /j. issn. 1006-5539. 2026. 03. 005

Key technologies for on-site installation of back-loading pumps at LNG receiving terminals

Liu Zhonghe, Ai Shaoping, Zhang Yi, Hu Xingqiao, Wang Weixiao
Beijing Gas Group Co., Ltd., Tianjin, 300450, China

Abstract: As precision rotating equipment operating in cryogenic environments, Liquefied Natural Gas (LNG) back-loading pumps play a critical role in receiving terminal operations, and their installation quality directly determines operational safety and efficiency. In order to provide a technical basis for the on-site installation of similar deep-cooling rotating equipment and enhance the long-term stable operation level of the back-loading pump, taking a large-scale LNG emergency reserve project as a case study, this paper systematically investigates the key technical framework for on-site installation of LNG back-loading pumps through case analysis and key technology deconstruction. The structural characteristics and design features of back-loading pumps are first elaborated. Subsequently, in-depth technical analysis is conducted on key installation procedures, including pump well straightness inspection, bottom valve seal testing, dummy pump verification, segmental hoisting of the pump head, and pump seating precision control. Three major technical challenges are identified: geometric deviation of the pump well causing jamming, bottom valve seal failure, and out-of-tolerance pump seating clearance. Based on these findings, two core solutions are proposed: a full-process dimensional chain control technique and a dynamic weighing-based pump seating precision control method, both of which effectively ensure installation accuracy and reliability. The

收稿日期:2026-02-10
作者简介:刘中河(1987-),男,高级工程师,硕士,主要从事 LNG 接收站建设运营工作。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

results provide technical references and practical guidance for the installation of similar equipment at LNG receiving terminals, and carry positive significance for advancing the standardization and localization of key LNG equipment installation technology.

Keywords: LNG receiving terminal; Back-loading pump; Installation technology; Bottom valve; Precision control

0 前言

近年来,全球能源结构加速向清洁低碳转型,液化天然气(Liquefied Natural Gas,LNG)作为重要的清洁能源,其贸易量和消费量持续增长。LNG 接收站作为产业链中的关键枢纽,不仅承担着接卸、储存和气化外输的传统功能,其反装船还具备区域调峰、资源调配和应急保障功能。LNG 反装船泵是反装船作业的核心设备,是一种大流量、高扬程的低温潜液式离心泵,安装于深达数十米的储罐泵井内,作业环境封闭、技术要求极高。该设备的安装质量直接关系到接收站的长期安全稳定运行,任何安装偏差或密封失效都可能导致严重的泄漏事故和重大经济损失。

然而,长期以来,大型 LNG 反装船泵的设计制造技术被少数国外公司垄断。这些公司主导了相关国际技术标准(如 API 610《石油、石化和天然气工业用离心泵》)的制定[1],但安装方面的核心技术细节和调试参数往往作为商业秘密被保护,导致中国工程公司在面对具体问题时常处于被动跟随状态。随着中国 LNG 产业的快速发展,设备国产化成为必然趋势。近年来,国内在 LNG 潜液泵的研发上取得了显著进展,部分中、小流量产品已实现国产化应用。但在大型反装船泵(流量 > 1 500 m^3 /h)领域,国产化仍处于起步阶段,对于安装技术的研究则更为零散。部分学者对 LNG 接收站关键设备的安装管理进行了探讨,但多侧重于项目管理层面;少数研究关注了具体工艺,如吊装对中、管道清洁度等,缺乏对安装全过程技术难点的系统性梳理和机理性分析。现有工程实践中,仍主要依赖厂商指导,尚未形成一套完整、成熟、可供借鉴的国产化安装技术体系。

因此,结合重大工程项目实践,深入研究 LNG 反装船泵现场安装关键技术,对于保障工程质量、提升自主技术能力具有重要意义。

本文基于北京燃气天津南港 LNG 应急储备项目,采用案例分析法和关键技术解构法,对 LNG 反装船泵现场安装关键技术进行系统性阐述和深入分析,旨在为同类工程提供技术参考,并推动相关技术的标准化进程[2-6]。

1 LNG 反装船泵特性与结构解析

1.1 设备概述与工作原理

反装船泵主要由顶板组件、底阀组件、线缆组件、泵头组件及电气仪表贯穿系统等部分构成。泵头为径向剖分的多级离心泵,电机与叶轮组安装在同一轴上,整体封闭在耐压壳体内[7]。工作时,泵体完全浸入 LNG 中,电机依靠介质冷却。反装船泵配套有吸入底阀,位于泵井底部,作为泵的入口阀门,依靠泵体自重开启。

当反装船泵运行时,依靠反装船泵泵头自重将底阀打开,实现泵井与储罐的连通,通电后,反装船泵运转将储罐内低温介质进行外输装船;当反装船泵长期不使用时,可通过钢丝绳将泵提起,底阀在弹簧作用下自动关闭,从而实现储罐与泵井的隔离[8]。

1.2 关键部件设计特点

1.2.1 顶板组件

顶板组件安装在泵井顶部法兰,承担多重功能:一是密封泵井,隔绝泵井与外部环境,避免低温介质泄漏;二是集成电缆穿线管,用于安装电气/仪表贯穿接头,实现动力及信号传输;三是设置有起吊杆与填料函,用于泵的安装定位与钢丝绳密封。顶板的设计需考虑承重、密封、绝缘与防爆要求,通常采用不锈钢焊接结构,并进行严格的压力与泄漏测试。

1.2.2 底阀组件

底阀是泵井与储罐主容器之间的关键隔离设备。其阀板通常采用双瓣或多瓣密封结构,通过弹簧预紧力保持常闭。当泵体坐下时,其重量克服弹簧力推动阀杆打开阀板;泵提起时,弹簧复位关闭阀板。底阀的密封性能至关重要,一般采用金属硬密封与弹性软密封组合的形式,确保在低温下的密封可靠性[9]。

1.2.3 线缆组件

线缆组件包括支撑钢丝绳、起吊钢丝绳、低温动力电缆、低温仪表电缆及相应的夹紧与导向装置。安装过程中,支撑/起吊钢丝绳需承担泵头全部重量,需具有高强度和良好的低温韧性。低温动力/仪表电缆需采用特殊低温绝缘材料,以确保动力及信号的传输稳定。由于泵井深达数十米,需要在泵井内对电缆及钢丝绳进行分段固定,防止因自重或介质流动引起摆动与磨损。加紧装置与导向装置均匀分布,确保泵体在泵井中居中下降,避免碰撞[10]。

1.2.4 泵头组件

泵头为立式、多级、潜液离心泵,电机与水力部件同轴。电机为三相异步电机,定转子完全浸没在低温介质

中,通过介质进行冷却。泵壳设计为锻造或铸造铝合金,确保在满足低温使用工况需求的基础上,减轻设备自重;泵头内摩擦副设计为奥氏体不锈钢与铸铜合金,可通过更换摩擦副的方式进行维修;泵轴采用锻造沉淀硬化不锈钢,其高强度、高硬度等性能完全满足低温输送工况;轴承采用低温专用轴承,通过介质进行润滑,可有效保障设备可靠稳定运转[11-13]。

2　安装前技术条件确认

2.1　环境与安全条件确认

2.1.1　储罐内部环境

储罐内部施工、清洁、干燥工作必须全部完成并验收合格。进入罐内属于受限空间作业,须严格落实气体检测各项安全要求。

2.1.2　作业许可与安全防护

办理受限空间作业票、吊装作业票等,作业人员必须佩戴全套个人防护装备,罐外需设专职监护人[14]。

2.1.3　吊装区域

设置警戒区域,检查吊车、吊索具是否完好并在安全有效期内。起重作业由持证人员统一指挥。

2.2　泵井几何尺寸精密检测

泵井的几何尺寸精度是安装成功的首要前提,需使用激光准直仪或精密铅垂法测量,直线度要求全长(50~60 m)偏差应 <10 mm;圆度要求任意截面直径偏差应 <5 mm;法兰水平度要求顶部与底部安装法兰的平面度误差应 <0.5 mm;清洁度要求泵井内壁必须无锈蚀、焊渣、油污等异物,并经白布擦拭检查确认。

2.3　设备开箱检验

一致性检查:核对泵及所有附件的型号、规格、数量是否与设计图纸和装箱单一致。

外观检查:检查设备外观有无运输损伤,特别是泵轴、叶轮、各法兰密封面、电缆接头等关键部位。

3　现场安装关键技术

3.1　现场安装核心工艺

LNG 反装船泵的现场安装是一项复杂的系统工程,其核心工艺流程见图 1。本文并非对每一步骤进行详细描述,而是聚焦于隐藏在流程背后的关键技术研究与分析[15-18]。

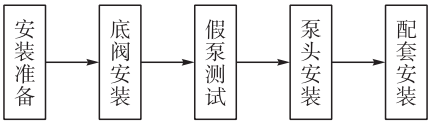

图 1　LNG 反装船泵安装工艺流程图

Fig. 1　LNG ship back-loading pump installation process

3.2　关键技术难点识别与分析

通过工程实践和系统分析,识别出 LNG 反装船泵安装过程中存在三大技术难点。

3.2.1　泵井几何尺寸偏差导致卡阻风险

数十米深的泵井由多段钢管焊接而成,其直线度和圆度的累积偏差是客观存在的。当泵体及导向装置总成的外径与泵井内径之间的设计间隙(通常仅为 5~10 mm)被几何尺寸偏差过度侵占时,就可能导致泵下放过程中的卡阻。这不仅会损坏设备,还可能延误工期。量化分析表明,当泵井直线度偏差 >10 mm 或局部圆度偏差 >5 mm 时,卡阻风险呈指数级上升[12]。

3.2.2　底阀密封失效风险

底阀是唯一在储罐投用后无法检修的部件。其密封失效将导致泵井无法被隔离,使得在线检修成为不可能。密封失效主要由两方面原因造成:一是安装过程中法兰面污染或紧固不均导致静密封失效;二是阀板动作机构因异物卡涩或弹簧疲劳,导致动密封失效。后者在假泵测试中若不仔细验证,极易被忽视。

3.2.3　底阀开度超差风险

底阀开度直接决定了泵的吸入性能。开度过小,会导致泵入口阻力增大,引发气蚀,损坏叶轮;开度过大,则可能导致阀板撞击限位,造成机构损坏。传统依靠经验下放泵体的方法,无法精确控制泵体的安装位置,而该位置直接决定底阀开度,因此存在较大风险。安装位置与设计值的允许偏差通常要求在 ±5 mm 以内,这对操作提出了极高要求。

3.3　解决方案与原理分析

针对上述技术难点,本文提出了两项解决方案,经工程实践验证,效果显著。

3.3.1　全过程尺寸链控制技术

该技术针对底阀安装难题,将“最终密封效果”这一目标分解为从法兰清洁、垫片放置、螺栓预紧到最终紧固的每一道工序的尺寸或受力控制。法兰平行度控制:在紧固过程中,使用深度尺在法兰圆周上均匀取点,监测间隙值,确保紧固后四周间隙差 <2 mm,从而保证阀座水平,为阀板动作创造良好条件;螺栓预紧力精确控制:摒弃凭经验紧固,采用扭矩扳手,并严格遵循“50% 设计扭矩预紧→80% 扭矩对角紧固→100% 扭矩最终紧固”的三步法,确保垫片受压均匀,密封可靠。

3.3.2　基于动态称重的坐泵精度控制方法

该方法将复杂的阀板开度控制问题转化为简单、直观的重量监测问题,其原理见图 2。

该方法将下放过程分为三阶段。一是自由下放阶段:吊车荷载显示为泵头及线缆组件的重量。二是接触与压缩阶段:当泵头接触阀板并开始压缩弹簧时,泵体

的一部分重量被底阀承担，吊车荷载开始从吊装总重量逐渐减小。此时在起吊杆上标记接触点位置 P1。三是全开坐实阶段：继续缓慢下放，直到底阀完全开启，泵体完全坐实在阀座上。此时，泵体重量完全由底阀承担，吊车荷载稳定为泵体 + 线缆组件的重量。此时在起吊杆上标记全开点位置 P2[19]。P1 与 P2 之间的距离 ΔH，即为实际底阀开度。将此值与设计值比对，即可精确判断坐泵精度，并通过顶部调节螺母微调，直至满足要求。

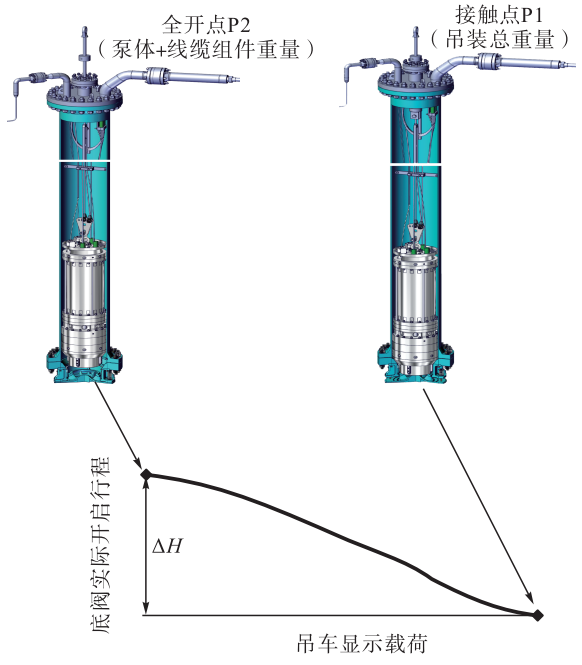

图 2　基于动态称重的坐泵精度控制原理图

Fig. 2　Schematic diagram of pump seating accuracy control based on dynamic weighing

3.4　反装船泵安装技术体系的构建

本研究通过对上述关键技术的实践和总结，初步构建了由四个维度组成的反装船泵安装技术体系。

1）基础理论验证。以假泵测试为核心，在正式安装前对整个系统的功能（底阀动作）和通过性进行理论和实验验证[20]，为后续工作提供可靠基础。

2）安装精度控制。以全过程尺寸链控制技术为代表，将精度管理的理念贯穿于每道工序，从源头上消除质量隐患。

3）操作流程优化。以分段下放与居中导向为代表，优化了长杆件在狭窄空间内的吊装工艺，通过物理手段保障了过程的稳定与安全。

4）安全风险防控。以严格的环境确认和作业许可制度为基础，贯穿整个安装过程，构建了全方位的安全保障。

这四个维度相互支撑、缺一不可，共同构成了一个科学、系统、可复制的技术框架，为 LNG 关键设备安装技术从经验型向标准化、体系化方向发展提供了清晰的路径。

4　结论与展望

4.1　结论

1）识别了安装过程的三大技术难点：泵井几何尺寸偏差导致卡阻风险、底阀密封失效风险，以及坐泵开度超差风险。这三者是影响安装成败的关键因素。

2）提出了两项解决方案，即全过程尺寸链控制技术和基于动态称重的坐泵精度控制方法。前者通过将精度要求贯穿于法兰安装的每道工序，从源头上保障了连接质量；后者利用物理原理，将不可见的阀板动作过程，通过可观测的重量变化转化为精确的行程控制，显著提升了坐泵精度和可靠性。实践证明，这两项解决方案是确保安装成功的技术核心。

3）初步构建了反装船泵安装技术体系。本文的研究并非孤立的经验总结，而是通过深度剖析一个具体工程案例，提炼出由基础理论验证（假泵测试）、安装精度控制（尺寸链）、操作流程优化（分段吊装）、安全风险防控（环境确认）四个维度构成的技术体系，为 LNG 关键设备安装技术从经验型向标准化、体系化方向发展提供了理论基础和实践路径。

4.2　展望

LNG 反装船泵作为接收站的核心设备，其安装技术是保障能源基础设施安全的关键一环。随着国家能源转型的推进，LNG 产业将持续发展，这对接收站的智能化、大型化提出了更高要求，对反装船泵的性能和安装技术也带来了新的挑战。同时，在国家大力倡导能源装备自主化的背景下，大型 LNG 反装船泵实现从设计、制造到安装、运维的全链条国产化，是行业发展的必然趋势。

参考文献：

[1] 杨晓峥. 长输管道大功率输油泵生产管理研究[D]. 青岛：中国石油大学（华东），2015.
Yang Xiaozheng. Localization of management research on high-power long distance pipeline pump [D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2015.

[2] 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 of the current status and localization of LNG cryogenic submersible pumps in China [J]. General Machinery, 2014 (11): 54-56.

[3] 王　冰. 大流量低温潜液泵结构优化设计及性能分析[D]. 北京：中国石油大学（北京），2022.
Wang Bing. Structural optimization design and performance analysis of large flow low temperature submersible pump [D].

Beijing: China University of Petroleum(Beijing), 2022.

[4] 孙晓玲,刘忠明,张　燕.液化天然气潜液泵的研制[J].低温工程,2010,1(2):20-23.
Sun Xiaoling, Liu Zhongming, Zhang Yan. Research and development of LNG submerged pump [J]. Cryogenics, 2010, 1 (2): 20-23.

[5] 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. Engineering application of submersible pumps in large tanks for LNG receiving stations [J]. General Machinery, 2018 (8): 13-15.

[6] 郭　祥,魏光华,刘红强,等.LNG 接收站扩建工程低压泵国产化应用管理[J].煤气与热力,2021,41(7):SS0016-SS0019.
Guo Xiang, Wei Guanghua, Liu Hongqiang, et al. Localization on application management of low pressure pump in LNG terminal expansion project [J]. Gas & Heat, 2021, 41 (7): SS0016-SS0019.

[7] 张翼飞,仝晓龙.液化天然气(LNG)输送泵的特点与应用[J].水泵技术,2006(6):38-40.
Zhang Yifei, Tong Xiaolong. Characteristics and applications of liquefied natural gas (LNG) transfer pumps [J]. Pump Technology, 2006 (6): 38-40.

[8] 唐　辉.低温潜液泵安装调试重点及常见问题处理[J].广东化工,2025,52(12):76-78.
Tang Hui. Key points and common problem solutions for installation and commissioning of cryogenic pump [J]. Guangdong Chemical Industry, 2025, 52 (12): 76-78.

[9] 孟庆涛,范佰涛,戴　侃.低温离心泵高速轴的结构设计及应用[J].化学工程与装备,2021(9):129-131.
Meng Qingtao, Fan Baitao, Dai Kan. Structural design and application of high-speed shaft of cryogenic centrifugal pump [J]. Chemical Engineering & Equipment, 2021 (9): 129-131.

[10] 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.

[11] 罗资琴,任永平,陈叔平,等.LNG 低温潜液泵结构及设计分析[D].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 & Superconductivity, 2012, 40 (7): 13-16.

[12] 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(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 (12): 52-54.

[13] 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. Research on the structure and application of cryogenic submersible pumps [J]. Pump Technology, 2018 (2): 1-5.

[14] 王维利,侯春生,谭秋仲,等.油气厂站压力容器检维修安全技术要求[J].石油和化工设备,2014,17(12):64-65.
Wang Weili, Hou Chunsheng, Tan Qiuzhong, et al. Safety technical requirements for inspection and maintenance of pressure vessels in oil and gas plants and stations [J]. Petro & Chemical Equipment, 2014, 17 (12): 64-65.

[15] 郭海涛,闫春颖.LNG 低压输送泵的安装[J].石油工程建设,2013,39(1):39-42.
Guo Haitao, Yan Chunying. Installation of LNG low-pressure transfer pump [J]. Petroleum Engineering Construction, 2013, 39 (1): 39-42.

[16] 黄　程.大型多级离心泵的维修与安装[J].化学工程与装备,2011(2):123-124.
Huang Cheng. Maintenance and installation of large multistage centrifugal pumps [J]. Chemical Engineering & Equipment, 2011 (2): 123-124.

[17] 曹　玉.LNG 储罐低温潜液泵自主工程安装技术分析[J].科技与创新,2023(19):86-88.
Cao Yu. Technical analysis of independent engineering installation of cryogenic submersible pumps for LNG Storage tanks [J]. Science and Technology & Innovation, 2023 (19): 86-88.

[18] 李亚东.大型多级离心泵的维修与安装研究[J].科技与企业,2014(1):251.
Li Yadong. Maintenance and installation of large multistage centrifugal pumps [J]. Technology and Enterprise, 2014 (1): 251.

[19] 梁　骞,厉彦忠,谭宏博,等.潜液式 LNG 泵的结构特点及其应用优势[J].天然气工业,2008,28(2):123-125.
Liang Qian, Li Yanzhong, Tan Hongbo, et al. Structural characteristics and application advantages of submersible LNG pumps [J]. Natural Gas Industry, 2008, 28 (2): 123-125.

[20] 陈　杰,邰晓亮,盖小刚,等.中国首套大型 LNG 储罐内潜液泵开发与工业化测试[J].油气储运,2017,36(4):435-442.
Chen Jie, Tai Xiaoliang, Ge Xiaogang, et al. Development and industrial test of the first large-scale LNG submersible pump in China [J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2017, 36 (4): 435-442.