

液化天然气接收站卸料臂一键吹扫技术研究与应用

陈茂峰¹ 郭祥² 兰奇发¹ 王韬²

(1. 国家管网集团深圳天然气有限公司, 广东 深圳 518120)

(2. 国家管网集团液化天然气有限公司, 天津 300450)

摘要: 卸料臂吹扫作业作为接收站运行的关键环节, 传统人工操作模式存在劳动强度大、安全风险高、质量不稳定等问题, 已成为制约接收站智能化升级的瓶颈之一。本文基于国家管网集团研发的“卸料臂一键吹扫技术”, 系统介绍了其核心原理、系统架构与控制流程。该技术实现了吹扫作业无人化、精准化、本质安全化、数据可追溯化, 显著提升了接收站自动化与安全管理水平, 为行业数字化转型提供了成功范例, 具备广泛推广价值。

关键词: 接收站; 卸料臂; 一键吹扫

中图分类号: TE89

文献标识码: A

文章编号: 1674-5167 (2026) 006-0091-03

Research and Application of One-Key Purging Technology for LNG Unloading Arms

CHEN Maofeng¹, GUO Xiang², LAN Qifa¹, WANG Tao²

(1. PipeChina Shenzhen Gas Co., Ltd., Shenzhen Guangdong 518120, China)

(2. PipeChina LNG Co., Ltd., Tianjin 300450, China)

Abstract: As a key part of receiving station operations, arm purging operations in traditional manual modes face issues such as high labour intensity, safety risks, and unstable quality, it has become one of the bottlenecks restricting the intelligent upgrade of the receiving station. Based on the “one-button arm purging technology” developed by the National Pipeline Network Group, this paper systematically introduces its core principles, system architecture, and control process. This technology enables unmanned, precise, intrinsically safe and traceable purging operations, significantly improving the automation and safety management levels of receiving stations, providing a successful example for industry digital transformation, and has broad promotion value.

Keywords: Receiving Terminal; Unloading Arm; One-Key Purging

LNG 作为清洁能源的重要组成部分, 在全球能源结构转型中扮演着关键角色。随着世界各国对于碳排放的要求的日益严格, LNG 在全球范围内的需求量持续增长, 这对 LNG 接收站的运行效率与安全性提出了更高要求。统计数据表明, 2023 年全球的 LNG 贸易量达到了创纪录的 4.09 亿 t, 中国作为全球最大的 LNG 进口国之一, 年进口量超过了 6500 万 t, 如此庞大的贸易规模对于接收站运营效率提出了极致要求。

在 LNG 卸船作业中, 卸料臂是连接 LNG 运输船与陆地储罐的重要桥梁, 担负起输送 LNG 的重要任务^[1]。在每次 LNG 船舶卸料完成后, 卸料臂及相关管道内残留的 LNG 都需要通过氮气进行吹扫, 确保相关的管线内的可燃气体完全清除, 以防止在卸料臂与船方分离时残余介质与空气形成爆炸性气体混合物, 保障后续其他作业的安全。在传统的氮气吹扫作业模式中, 卸料臂氮气吹扫的作业过分依赖人工操作, 通常需要两名经验丰富的操作人员协同配合完成, 其中一人在卸料臂现场的相关管线就地压力表处监控卸料臂相关

管道压力, 另外一人对氮气的开关阀门进行操作, 从而控制氮气进入管道内的气量, 防止管道超压。这种工作模式存在以下问题: 需要人工经验丰富并相互配合、人力成本高、操作人员暴露于火灾爆炸危险环境^[2]、人为操作误差可能导致管道内吹扫不彻底或管道内压力控制偏差、缺乏自动超压保护机制, 突发情况下应急处置措施不足等。

为了解决上述问题, 国家管网集团组织 LNG 接收站相关技术人员开发并应用了“卸料臂一键吹扫技术”, 该技术通过自动化控制系统与远传仪表、远控气动阀门实现卸料臂吹扫作业的全程自动化操作。本文旨在系统性地介绍该技术的技术方案、系统组成、控制逻辑以及实际应用效果, 为 LNG 行业其他接收站的智能化升级提供参考。

1 一键吹扫技术原理与系统架构

1.1 技术原理

卸料臂一键吹扫技术的核心在于将卸料臂吹扫流程进行程序化控制, 通过中央控制室里的控制系统自

动执行吹扫步骤，并实时监测关键工艺参数（如管道压力、管道上下表面温度等），根据监测结果实时进行反馈控制。中央控制室使用的是集散控制系统（Distributed Control System，简称DCS），它是以微处理器为基础的，综合控制、通信、显示功能的自动化系统，可以实现一键吹扫作业所需要的所有功能，并具有高内聚、低耦合原则的模块化特点^[3]。卸料臂一键吹扫技术的基本流程如下：①指令接收：中央控制室操作人员通过DCS系统上卸料臂吹扫模块控制面板选择将要吹扫的卸料臂，并点击启动按钮启动吹扫程序。②条件判断：DCS系统自动检测卸料臂当前是否处于非工艺连锁状态、管道压力是否非高压报警状态，若管道处于高压报警状态，需要人工打开卸料臂旁路阀门进行泄压，待压力降低到与卸料总管压力持平后，关闭卸料臂旁路阀门，并且重新执行吹扫操作，满足卸料臂吹扫相应的条件后方继续执行吹扫，否则系统不会启动程序。③连续吹扫：通过打开氮气管道的注入阀门与卸料臂旁路阀门并保持，氮气管网压力保持在700kPa状态下进行持续3min的氮气吹扫，依靠高压氮气与卸料总管的压力差初步将残留的介质吹扫排净。④爆破吹扫：连续氮气吹扫完毕后，通过自动关闭卸料臂旁路阀门，将卸料臂内的压力憋高至设定值（450kPa），再自动快速打开卸料臂旁路阀门进行管道泄压，重复多次操作以彻底清除顽固残留介质。⑤超压保护：当出现卸料臂压力超过设定阈值（500kPa）的情况时，DCS系统自动关闭氮气注入阀门，切断压力来源，防止卸料臂及相关管道超压运行。

1.2 系统硬件组成

为了实现上述五项功能，接收站需进行一系列改造，配备完整的关键硬件才可以实现从监测到判断和执行的全流程：①远传压力表（PI）：远传压力表作为实时监测压力的元件，安装在卸料臂出口管道上，实时监测管道压力并传输至DCS控制系统，相比于传统模式不需要现场人员在不同卸料臂压力表处来回跑动监测压力，而是在DCS系统面板上同一个画面即可监测多个压力表。②氮气注入阀（V1）：根据DCS系统指令开关，控制氮气注入，相比于传统模式免去了现场通过手动阀门操作不及时、耗费人力的弊端。③卸料臂主路切断阀（V2）：根据DCS系统指令开关，用于工艺隔离。④卸料臂旁路切断阀（V3）：根据DCS系统指令开关，用于吹扫过程中的泄压排放。⑤控制面板：提供人机交互界面，具备卸料臂的选择、吹扫程序启动、吹扫程序启动重置、吹扫时间及次数设定等功能按钮。

以上所有阀门均为气动远程控制阀，阀门的动作

速度快，有利于提高控制精度。同时支持“程序控制模式”与“普通模式”切换，确保系统在自动与手动操作之间灵活转换，保障了人工操作的最高优先级。

1.3 控制系统架构

本控制系统以DCS系统为架构基础，通过自主编写的控制程序，实现了包括数据采集、逻辑执行、过程监控与故障处理在内的全流程自动化管理。具体的功能如下：①实时采集现场压力数据，实现动态监测与异常报警；②依据预设控制逻辑，自动执行阀门开关动作，自动计算时间进行后续操作；③直观地显示系统运行状态与吹扫进度，便于操作人员实时掌握系统动态；④异常中断与安全复位功能，确保系统在故障或其他异常情况出现时可靠停止并快速恢复运行。

2 一键吹扫流程详解

2.1 启动与条件判断

当操作人员在DCS系统操作面板上点击启动按钮后，系统不会立即进入吹扫流程，而是先行执行一系列安全检查。其中重点确认的有两项关键状态：一是检查卸料臂是否处于安全仪表系统（Safety Interlock System，简称SIS）的连锁保护之下，它独立于DCS系统，通过“监测-判断-执行”的联动机制^[4]，当监测到危险情况时，会立即切断氮气供应并将系统置于安全状态；二是实时监测管道压力是否已经达到了高限报警值。只有这两项条件同时满足要求时，吹扫流程才会被允许启动，若有任何一项不符合安全预设，系统会自动停止后续操作，从而确保整个工艺过程的安全可靠。

2.2 连续吹扫阶段

启动一键吹扫之后，系统先进行连续吹扫，这一步可以初步吹扫管线内残留的LNG，为后续的爆破吹扫做准备。执行以下动作：①关闭主路切断阀V2，打开氮气注入阀V1和旁路切断阀V3；②打开卸料臂双球阀，关闭船方球阀，实现工艺隔离；③氮气从V1注入，经卸料臂管线后由V3排出，持续3min。

2.3 爆破吹扫阶段

连续吹扫结束以后，系统自动转入爆破吹扫阶段，通过压力的骤变在管道内形成高速气流^[5]产生冲击力，有效清除附着在管壁的残留介质。执行以下动作：①关闭旁路切断阀V3，保持氮气注入阀V1打开，使管线压力升至450kPa；②达到设定压力后，打开旁路切断阀V3泄压30s；③重复上述过程两次，确保彻底清除残留介质，最终关闭氮气注入阀V1。

2.4 超压保护机制

在整个吹扫过程中，系统通过远传压力表实时监测卸料臂及相关管道压力。若压力一旦超过500kPa，

系统将发出指令立即关闭氮气注入阀 V1, 终止吹扫过程, 以防止设备损坏或其他异常事件的发生。

3 控制程序设计与实现

3.1 程序逻辑设计

接收站装备有4条卸料臂,以卸料臂L-1101A为例,控制程序包含以下关键步骤:①启动吹扫程序,检测所有条件是否满足;②关闭卸料臂主路切断阀,打开卸料臂旁路切断阀;③切换阀门权限至程序模式,此时系统权限大于人工,自动打开氮气注入阀;④执行连续吹扫并计时;⑤执行多次爆破吹扫,每次包括管道的增压、管道的泄压;⑥吹扫完成,自动恢复阀门权限至普通模式,此时操作人员可以手动控制阀门动作。

3.2 人机交互界面

卸料臂氮气一键吹扫的控制面板能够直观的提供操作界面,并且能够显示卸料臂氮气一键吹扫的作业进度,包括卸料臂选择按钮、吹扫时间设定、吹扫次数设定、启动/重置按钮、实时显示卸料臂管道的压力与氮气吹扫作业的进度。

系统操作人员只需选择所需要进行吹扫的卸料臂并且点击启动按键,系统即可自动完成后续卸料臂一键吹扫的所有操作。当所有卸料臂均需要吹扫时,可以利用总按钮进行一键启动对所有卸料臂执行一键吹扫的程序。

4 技术优势与应用效果

本技术在安全性、经济性与可操作性三大维度上展现出显著优势。在安全性方面,通过无人化操作有效避免了人员进入危险区域,从根本上降低了安全风险。系统能够通过卸料管道内的压力进而调节氮气注入阀门以及卸料管线的相关阀门,杜绝了因人为操作而造成的影响。同时本技术具备超压相关阀门自动关断的功能,极大提升了应急事件下的应急处理效率。在经济层面,在传统卸料臂氮气吹扫的作业中,原本需要二个经验丰富的人员在现场进行操作才能完成的氮气吹扫作业,在使用本技术后,人为操作转为了完全无人化作业,显著节约了人力成本,并且通过标准化程序对吹扫时间与吹扫流程形成了固定模式,使得卸料臂氮气吹扫作业效率和氮气吹扫质量都得到大幅提升。精准的压力控制也有助于减少设备损耗、资源浪费,并且有助于延长设备设施的使用寿命。在可操作性层面,系统支持远程卸料臂吹扫的一键启动,大幅降低了操作难度,减少了操作人员的劳动时间。在DCS操作系统中实时显示吹扫压力与吹扫进度,并且实现了吹扫的状态可视化、使得吹扫作业的管理更加便捷。具体的吹扫时间、吹扫次数等关键参数更是可以根据实际情况与吹扫需求进行灵活调整,该技术具

备良好的适应性和可操作性。

本技术已在国家管网集团下属 LNG 接收站成功投入应用。以某南方 LNG 接收站的为例,实施后取得了以下显著成效:单条卸料臂的吹扫作业时间由原来的15min缩短至10min以内,并完全实现中控室远程操控,操作人员无需抵达现场。经检测,吹扫后管线内残留可燃气体体积分数低至1%,效果明显优于传统人工操作,且未发生任何因吹扫操作不当而引起的设备故障或安全事故。自本技术投产使用以来,连续运行超30个月,完成了百余次的卸料臂氮气吹扫作业,证明了其良好的可靠性。

5 结论与展望

本文介绍的卸料臂一键吹扫技术实现了整个接收站卸料臂吹扫工艺的完全自动化和精确控制,有效避免了高依赖度的人工操作所带来的弊端。这项创新技术的出现,不仅解决了现有操作方式的诸多问题,还为 LNG 接收站的智能化现代化开辟了实际道路。

展望未来,卸料臂远程一键吹扫技术有潜力更深入地融入物联网、大数据和人工智能技术的持续发展与成熟之中。借助物联网技术,可实现设备之间的互联互通,从而实时收集运行数据,并基于智能调度和数据支持进行自动调整。大数据技术的应用能够对海量运行数据进行分析和提取,识别潜在问题和规律,预测故障,并及时发送提醒,以实现预防性维护。人工智能技术则能智能协作多条卸料臂并优化作业时间安排,根据每条卸料臂的状况和需求自动调整作业顺序和资源分配,从而提高整体生产力和资源利用率。不久的将来,这些创新应用将为液化天然气运输运营企业带来显著的效率提升,引领行业迈向更高层次的智能化。

参考文献:

- [1] 刘云,杨亮,静玉晓.LNG 装卸系统技术现状研究与分析[J].石油和化工设备,2020,23(04):44-48.
- [2] 贾萍.液化天然气接收站的安全设计[J].安全、健康和环境,2016,16(03):5-9.
- [3] 宋正龙.模块化设计在软件开发中的应用与实现分析[J].信息记录材料,2025,26(01):88-90.
- [4] 谢锦礼.安全仪表系统(SIS)的SIL评估方法研究[J].阀门,2025(10):1143-1147.
- [5] 叶得强,李成果.化工系统大口径金属管道爆破吹扫策略分析[J].化工管理,2025(29):107-109.

作者简介:

陈茂峰(1992-),男,汉族,广东茂名人,本科,研究方向:液化天然气储运。