

LNG接收站工程建设中的技术创新与传统施工工艺融合

高成 谢洪芳

国家石油天然气管网集团有限公司建设项目管理公司 河北廊坊 065000

摘要: 在全球能源结构低碳转型背景下,液化天然气(LNG)接收站作为能源基础设施的核心节点,其建设规模与技术复杂度持续升级。传统施工工艺在低温储罐建造、管道系统安装等领域虽积累丰富经验,但面临效率瓶颈、安全风险及环境约束等多重挑战。本文系统梳理LNG接收站传统工艺的技术特征与局限性,结合数字化、智能化、绿色化技术创新方向,提出以“兼容性设计”与“渐进式替代”为核心的融合路径。研究表明,通过技术创新与传统工艺的有机协同,可显著提升工程效率、降低全生命周期成本,并为行业低碳化发展提供理论支撑。

关键词: LNG接收站;技术创新;传统施工工艺;工程融合;低碳化

引言

液化天然气(LNG)接收站是连接国际能源贸易与终端消费市场的重要枢纽。随着全球LNG贸易量年均增长率超6%(GHIGNL, 2023),接收站工程建设逐渐呈现大型化、智能化与低碳化趋势。传统施工工艺在低温储罐焊接、深冷管道预冷等核心环节依赖人工经验与标准化流程,虽保障了工程质量,却难以匹配当前“短工期、高精度、低排放”的建设需求。与此同时,BIM技术、数字孪生、智能机器人等新兴技术加速渗透,但其与既有工艺体系的兼容性问题尚未完全解决。因此,探索技术创新与传统工艺的深度融合路径,不仅是提升工程经济性的现实需求,更是推动行业向绿色化、智慧化转型的战略选择。本文从技术迭代的兼容性视角出发,构建LNG接收站工程建设的融合框架,旨在为行业技术升级提供系统性解决方案。

一、LNG接收站传统施工工艺的现状与挑战

(一) 典型传统工艺概述

LNG接收站施工工艺体系以低温储罐、管道系统及安全防护为核心。在储罐建造领域,9%镍钢内罐焊接采用分层堆焊工艺,通过逐层无损检测(UT/RT)确保焊缝致密性;保冷层施工依赖珍珠岩填充与弹性毡铺设,需严格控制含水率以防止低温脆化。管道系统中,深冷

管道的预冷操作需分阶段注入液氮,逐步降低管材温度以避免热应力损伤;应力补偿则通过 π 型弯管与膨胀节组合实现位移吸收。安全防护方面,传统工艺以防爆电气设备、可燃气体探测器及人工巡检构成三级防控体系,依赖经验判断风险等级。

(二) 传统工艺的局限性

传统工艺的局限性集中体现于效率、质量与安全的矛盾性。以储罐焊接为例,人工焊接效率受焊工技能水平制约,单台16万立方米储罐焊接耗时可达8个月;无损检测需逐层停工待检,进一步拖累工期。质量控制方面,焊缝质量高度依赖焊工经验,检测结果存在主观判读偏差;保冷层施工中珍珠岩填充密度缺乏实时监测手段,易导致局部冷桥现象。安全风险则源于低温环境的人工作业限制,如预冷阶段液氮泄漏可能引发冻伤,而人工巡检难以覆盖全时段、全区域风险点。

(三) 技术升级的迫切性

国际标准迭代(如EN14620-2022对储罐抗震性能要求的提升)与低碳经济政策双重驱动下,传统工艺的技术升级势在必行。欧盟碳边境调节机制(CBAM)将LNG基础设施纳入核算范围,倒逼施工过程减少碳排放;而“双碳”目标要求接收站建设同步集成BOG回收、低碳混凝土等技术。传统工艺的线性改进已无法满足系统性升级需求,亟需通过技术创新重构施工体系。

二、LNG接收站建设中的技术创新方向

(一) 数字化技术应用

数字化技术正成为LNG接收站全生命周期管理的核心驱动力,通过BIM、数字孪生及4D施工管理系统的

作者简介: 高成,(1998.03-),男,汉,四川泸县,大学本科,助理工程师,研究方向:工程项目建设,施工管理,安全管理,油气储运。

深度应用，实现从设计到运维的精准化管控。BIM技术以三维协同模型为载体，集成建筑、结构、工艺管线等多专业数据，例如在储罐基础设计中，通过碰撞检测提前发现桩基与承台的空间冲突，将设计变更率降低40%以上，避免后期施工返工造成的成本浪费。数字孪生技术则通过部署在储罐本体的应力、温度传感器，实时采集数据并构建虚拟镜像，动态模拟低温环境下混凝土外罐的收缩形变，提前3-6个月预警裂缝风险，使维护计划从“被动响应”转向“主动预防”。施工阶段引入的4DBIM进度管理系统，可基于模块重量、吊装半径等参数模拟吊装顺序，优化履带吊行走路径，减少不同作业面交叉干扰，使大型设备安装效率提升25%，工期缩短约15天。这些技术的协同应用，构建了“设计预控-施工模拟-运维预测”的数字化闭环，推动LNG接收站管理向智能化、精细化转型。

（二）新材料与装备创新

新材料与装备的迭代创新，为LNG接收站的性能提升与工艺优化提供了关键支撑。在材料领域，改进型9%镍钢通过微合金化技术（添加Nb、V元素），显著改善焊接热影响区的晶体结构，使低温冲击韧性提升20%，同时免除了传统工艺中耗时的焊后热处理环节，焊接效率提高30%且焊缝质量稳定性显著增强。真空绝热板（VIP）的应用则颠覆了传统保冷工艺，其导热系数低至 $0.004\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ，同等保温性能下厚度仅为珍珠岩的50%，不仅节省储罐内部空间，更降低了施工过程中的材料搬运量与安装复杂度。装备层面，智能传感器网络的部署实现了关键设施的状态全感知：沉降监测传感器以 $\pm 1\text{mm}$ 精度实时追踪储罐基础位移，管道应变传感器可捕捉0.01%的形变增量，数据通过物联网平台分析后，能自动触发异常工况预警，例如当储罐倾斜速率超过阈值时，系统0.5秒内推送警报至运维终端，使故障响应时效提升90%。新材料与智能装备的深度融合，既突破了传统工艺的性能瓶颈，更构建了“材料革新-装备智能-管理高效”的新型技术体系。

（三）智能化施工技术

智能化技术正颠覆传统施工模式，通过自动化装备、模块化工艺与智能监控系统的协同应用，实现施工精度、效率与安全性的全面提升。自动化焊接机器人配备视觉识别与焊缝追踪系统，可针对储罐壁板的不同厚度与焊接位置，实时调整电流、电压及焊枪角度，使焊缝成型均匀性提升90%，一次合格率从传统人工焊接的92%跃

升至99.5%，同时减少焊材浪费15%以上。模块化施工将工艺设备、管线及仪表集成于预制撬块，例如在LNG泵撬制造中，工厂环境下完成80%的安装工作，现场仅需进行接口对接，使安装周期缩短40%，高空作业量减少60%，显著降低坠落、火灾等安全风险。AI安全监控系统通过部署于施工现场的高清摄像头，运用图像识别算法实时分析视频流，可在0.3秒内识别未佩戴安全帽、安全带等违规行为，对气体泄漏的检测灵敏度达到ppm级别，响应速度较人工巡查提升80%，实现安全隐患的“秒级发现、分钟级处置”。这些技术的应用，推动LNG接收站施工从“人力依赖”向“智能精准”转型，重塑行业生产力格局^[1]。

（四）绿色技术集成

绿色技术的深度集成贯穿LNG接收站全生命周期，通过资源循环利用、低碳材料应用与清洁能源开发，实现经济效益与环境效益的协同优化。BOG（蒸发气）回收系统采用两级压缩与低温冷凝工艺，将储罐挥发的天然气再液化率提升至95%，每年可减少约2000吨甲烷排放，同时回收的LNG可直接并入输送流程，创造额外经济价值。低碳混凝土技术以粉煤灰、矿渣微粉等工业废渣替代30%水泥用量，不仅降低单方混凝土碳排放约200kg，还通过改善骨料界面结构提升抗压强度10%，实现减排与性能提升的双重目标。光伏一体化设计在储罐顶棚及站区空置场地铺设高效太阳能板，结合智能储能系统，年发电量可达500万度，满足站区照明、控制系统等辅助设施20%的用电需求，相当于每年减少燃煤消耗1800吨，降低二氧化碳排放4800吨。

三、技术创新与传统工艺的融合路径

（一）融合原则与框架

技术创新与传统工艺的融合需以系统性原则为基石，构建逻辑清晰的实施框架。兼容性原则要求新技术与传统工艺在标准规范、操作流程及设备接口层面实现无缝对接，通过统一的数据格式、电源规格及工艺参数标准，确保自动化装备与传统工具在同一施工场景中协同运行，避免因技术标准差异导致的工序割裂。渐进性原则强调技术替代的分阶段推进，优先选择施工流程中风险等级高、资源消耗大或重复作业特征明显的环节进行数字化改造，通过局部环节的智能化升级积累经验，逐步向核心工艺延伸，降低全面革新带来的管理与技术风险。在融合框架构建上，采用“基础层-增强层-智能层”的递进式架构：基础层以成熟的传统工艺为核心，维持施工

流程的基本运行，如人工放线、手工焊接等经过长期验证的工艺环节；增强层通过引入数字化工具（如BIM建模、物联网监测）对传统工艺进行赋能，实现数据驱动的流程优化，例如利用传感器实时采集施工参数，辅助人工决策；智能层依托AI算法与自动化装备（如焊接机器人、智能控制系统）实现施工决策与执行的自主化，逐步替代重复性强、精度要求高的人工操作，形成“传统工艺托底、数字技术增效、智能装备引领”的融合路径^[2]。

（二）关键技术融合实践

在LNG接收站施工的核心环节，技术创新与传统工艺的融合通过功能互补实现效能提升。储罐建造中，传统分层焊接工艺与自动化焊接技术形成协同作业模式：由经验丰富的技术人员完成焊前坡口处理、焊接路径规划等关键工序，利用人工经验确保焊接基础条件符合工艺要求，再由自动化焊接机器人执行焊接作业，通过预设的参数程序与动态跟踪系统保障焊缝成型的均匀性与焊接速度的稳定性，实现“人工经验把控工艺标准、机器作业提升效率精度”的有机结合。管道预冷工序中，智能温控系统与人工监控机制形成互补体系：智能系统通过集成的传感器与控制算法，实时监测管道温度变化并自动调节液氮注入速率，实现预冷过程的精准控制，减少人工干预频率；操作人员则通过监控终端实时查看系统运行状态，在关键节点介入参数调整或故障处理，形成“机器自主控制流程、人工监督质量安全”的双重保障模式，既降低操作强度，又提升预冷工艺的可靠性。安全管理领域，无人机巡航技术与人工巡检流程实现有机衔接：无人机通过定期航拍获取施工现场全景数据，利用AI算法对影像进行分析，自动识别潜在的安全隐患并生成风险预警信息；安全人员基于预警信息进行定向核查，对确认的隐患启动整改流程，形成“机器全域扫描风险、人工精准处置问题”的高效闭环，实现安全管理从“被动响应”向“主动预防”的转变，同时提升隐患排查的覆盖范围与处理效率^[3]。

（三）融合效果评价

技术创新与传统工艺的深度融合，推动LNG接收站工程在效率、质量、安全与环境等全要素层面实现系统性提升。在施工效率方面，模块化施工模式通过工厂预制与现场组装的协同，将储罐建造周期从传统工艺的24

个月压缩至20个月，关键路径工期缩短16.7%，同时减少现场施工人员投入30%以上，显著提升资源利用效率。质量管控层面，数字化检测技术的应用实现了工艺精度的跃升：自动化焊接机器人结合实时数据反馈，使焊缝一次合格率从人工焊接的92%提升至99%以上，数字化无损检测（如相控阵超声）将缺陷漏检率从5%降至1%以下，确保关键结构的安全性及可靠性。安全管理领域，智能监控系统通过无人机巡航、AI视频分析与物联网传感器的集成，构建了全时段、全区域的风险防控网络，使施工现场事故率较传统管理模式下降超30%，高风险作业（如高空吊装、有限空间作业）的安全可控性显著增强。环境效益方面，技术融合推动绿色施工目标的落地：BOG（蒸发气）回收系统将储罐挥发气体再液化率提升至95%，减少甲烷排放的同时实现资源循环利用；低碳混凝土技术通过工业废渣替代30%水泥用量，单站建设期可减少碳排放约1.2万吨，光伏一体化设计则使站区年可再生能源供电比例达20%，形成“低碳建造-循环经济”的可持续模式。

总结

LNG接收站工程的技术创新与传统工艺融合，本质是行业知识积累与科技进步的辩证统一。本文提出的融合框架表明：在尊重传统工艺价值的基础上，通过数字化赋能、智能化升级与绿色化改造，可系统性提升工程建设的质量、效率与可持续性。未来研究需进一步探索人机协作的伦理边界、技术标准的国际互认等深层问题，为全球LNG基础设施的智能化转型提供中国方案。

参考文献

- [1]徐翔.关于进度管理在LNG接收站工程建设管理中的应用探讨[J].中国科技期刊数据库 工业A, 2024(002): 000.
- [2]田猛.LNG接收站“预售+代储”融合业务探析[J].化工管理, 2024(7): 1-4.
- [3]畅轩, 秦军霞, 崔铭, 等.LNG接收站EPC项目投标阶段总体计划的编制[J].中国石油和化工标准与质量, 2024, 44(3): 1-3.DOI: 10.3969/j.issn.1673-4076.2024.03.001.