

复杂地质条件下LNG接收站顶管与沉井施工技术研究

梁安坤¹, 刘文新², 钟淼文¹

¹广东惠州液化天然气有限公司, 广东 惠州

²中国京冶工程技术有限公司, 北京

收稿日期: 2025年11月5日; 录用日期: 2025年12月9日; 发布日期: 2025年12月22日

摘要

我国自1954年引进顶管技术以来, 经过多年的发展, 顶管技术在我国已得到大量的实际工程应用, 且保持着高速的增长势头, 然而与国外发达国家先进的机械设备及施工技术水平相比, 我国仍然有着显著的差距, 惠州LNG接收站气化用海水取自附件电厂温排水, 取水管位于地下5.9米, 穿越2个厂区, 无法明挖, 且填石地质施工难度极大, 本文针对惠州LNG接收站顶管作业施工中的难点总结经验, 致力于推进LNG接收站非开挖技术的发展向规模化、规范化、标准化的方向发展。

关键词

LNG接收站, 长距离顶管, 复杂地质, 孤石, 双洞顶进, 泥水平衡施工工艺

Research on Pipe Jacking and Open Caisson Construction Technology of LNG Terminal under Complex Geological Conditions

Ankun Liang¹, Wenxin Liu², Miaowen Zhong¹

¹Guangdong Huizhou Liquefied Natural Gas Co., Ltd., Huizhou Guangdong

²China Jingye Engineering Technology Co., Ltd., Beijing

Received: November 5, 2025; accepted: December 9, 2025; published: December 22, 2025

Abstract

Since the introduction of pipe jacking technology into China in 1954, it has been widely applied in practical projects after years of development and maintained a high-speed growth momentum.

文章引用: 梁安坤, 刘文新, 钟淼文. 复杂地质条件下 LNG 接收站顶管与沉井施工技术研究[J]. 石油天然气学报, 2025, 47(4): 753-759. DOI: 10.12677/jogt.2025.474084

However, there remains a significant gap between China's technical level including mechanical equipment and construction techniques and that of advanced developed countries overseas. The seawater for gasification at the Huizhou LNG Terminal is taken from the warm drainage of a nearby power plant. The water intake pipe is located 5.9 meters underground, crossing two factory areas, which rules out open-cut excavation. Additionally, the rock-filled geology poses extreme construction challenges. This paper summarizes experience targeting the difficulties encountered in the pipe jacking operations of the Huizhou LNG Terminal, aiming to promote the development of trenchless technology in LNG terminals toward large-scale, standardized, and normalized directions.

Keywords

LNG Terminal, Long-Distance Pipe Jacking, Complex Geology, Boulders, Twin-Tunnel Jacking, Slurry Balance Construction Technology

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 前言

1.1. 研究背景与工程意义

液化天然气(LNG)是清洁高效的能源,接收站建设是保障国家能源安全的核心基础设施。LNG接收站通常选址于沿海或临江区域,这类场地普遍存在软土地基、高地下水位、复杂土层分布等地质难题,给关键构筑物施工带来严峻挑战。其中,长距离顶管穿越(用于管线、管廊铺设)与沉井(用于储罐基础、泵房基坑等)施工技术因具备对周边环境扰动小、适应性强等优势,成为解决复杂地质地下工程的首选方案。

惠州 LNG 接收站项目作为华南地区重要的能源枢纽工程,其接收站工程 EPC 项目只能采取多段长距离顶管穿越及大型沉井施工工艺。施工区域揭露地层以粉质粘土、粗砾砂为主,局部含砂岩层夹层,地下水位埋深仅 1.2~1.8 m,同时邻近既有输油管线和沿海防洪堤,施工精度要求轴线偏差不得超过 ± 50 mm,沉降控制值需小于 30 mm,技术难度处于行业高位。类似的虎林-长春天然气管道工程在复杂地质中完成 40 条顶管穿越,证实了该技术在能源工程中的关键作用,但也暴露了地质适配性、过程控制等共性问题。因此,系统研究复杂地质条件下两类施工技术的优化路径,对提升 LNG 接收站建设质量与安全水平具有重要现实意义,施工路径图见图 1:

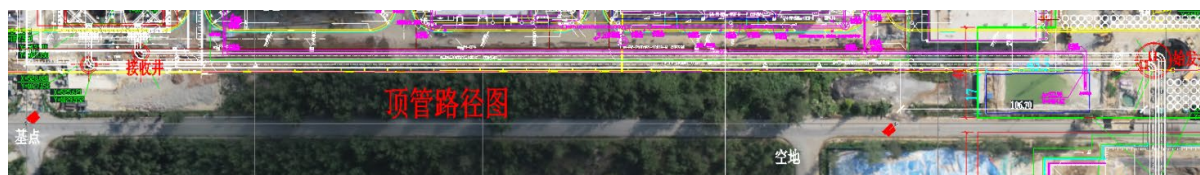


Figure 1. Pipe jacking construction path diagram

图 1. 顶管施工路径图

1.2. 国内外研究现状

1.2.1. 顶管施工技术研究进展

国际上顶管技术已发展至智能化阶段,德国海瑞克公司开发的泥水平衡顶管机可实现复杂地层的自

适应掘进，但针对沿海地区富水砂层的专项技术仍显不足。国内研究聚焦于地质适应性改进，如云南省交通规划设计院首次将泥水平衡顶管应用于深埋山岭隧道“重塑土”地层，通过钢管片及时支护解决了突泥涌水难题。在数值模拟领域，学者多采用 PLAXIS 软件构建地质 - 结构耦合模型，但对长距离顶管的顶进力衰减规律与纠偏力机制研究尚不深入。

国内研究聚焦富水砂砾层的地质适配性改进：西南交通大学提出“分级注浆 + 蜡质减阻剂”复合减阻工艺，实现 460 m 长距离顶进，平均顶进力降低 25%；广东省水利水电科学通过 PLAXIS 数值模拟，揭示了富水砂砾层中泥浆套厚度与顶进阻力的耦合关系，但对顶进过程中泥浆压力动态调整机制研究不足本文重点研究长距离顶进的泥浆流失防控技术、顶进力衰减与减阻参数的实时匹配模型。

1.2.2. 沉井施工技术研究进展

沉井施工技术在欧美国家已形成标准化体系，日本大成建设开发的“软件排沉排施工法”融合 BIM 与实时监测，实现沉井下沉全过程数字化管控。国内研究集中于软土地基沉井的抗浮与纠偏技术，如采用高压旋喷桩加固井壁周围土体，但对于 LNG 接收站特有的大直径(≥ 20 m)沉井在高水位条件下的封底质量控制研究较少。现有研究存在两个明显缺口：一是缺乏顶管与沉井施工的系统性协同方案，二是针对沿海 LNG 场地的地质 - 施工参数匹配数据库尚未建立。

国内研究集中于大直径沉井在复杂地质中的纠偏优化：同济大学针对富水砂砾层与砂岩层夹层地质，研发了“倾角仪 + 位移计”闭环纠偏系统，通过每 30 分钟采集数据，自动调整挖土顺序和冲射位置，在上海某项目直径 22 m 沉井施工中，倾斜率从 1.2%降至 0.4%；中交一航局提出“刃脚加固 + 分级下沉”纠偏工艺，通过在刃脚增设钢板和控制每层开挖厚度(≤ 0.5 m)，解决了大直径沉井在富水层的突沉与倾斜叠加问题。本文重点探讨大直径沉井(≥ 20 m)在富水砂砾层与岩层界面的纠偏响应机制，地质 - 纠偏参数的动态匹配技术。

1.3. 研究内容与技术路线

本文以惠州 LNG 接收站工程为依托，结合同类工程实践经验，重点研究三方面内容：一是复杂地质参数对顶管与沉井施工的影响机制；二是顶管顶进参数优化与沉井下沉控制的关键技术；三是全过程质量安全管控体系构建。

研究采用“理论分析 - 数值模拟 - 现场验证”的技术路线：首先通过地质勘察数据解析土层物理力学参数与施工响应关系；其次运用 BIM + Plaxis 建立三维仿真模型，模拟不同工况下的结构变形规律；最后将优化方案应用于惠州项目现场，通过传感器监测数据验证技术有效性。

2. 复杂地质对施工的影响机制与勘察优化

2.1. 典型地质条件特征解析

惠州 LNG 接收站施工区域地质勘察揭示典型复杂地层组合，按埋藏深度可分为四层，如表 1：

Table 1. Geological factors analysis table
表 1. 地质因素分析表

地层编号	地层名称	厚度(m)	主要物理力学参数	施工影响
①	杂填土	1.5~2.3	孔隙比 $e = 1.2$ ，承载力 $f_{ak} = 80$ kPa	沉井下沉易出现倾斜
②	粉质粘土	3.8~5.2	内摩擦角 $\varphi = 18^\circ$ ，粘聚力 $c = 25$ kPa	易引发顶管机刀盘堵塞
③	粗砾砂	4.2~6.7	渗透系数 $k = 3.5 \times 10^{-3}$ cm/s	顶管易发生突水，沉井降水难度大
④	砂岩层	>8.0	单轴抗压强度 $\sigma_c = 15$ MPa 顶进阻力骤增	需特殊刀盘配置

分析表明,该区域地下水位受潮汐影响明显,涨落幅度达 0.8 m,与③层粗砾砂形成典型的“富水-透水”地质组合,是施工风险主要来源。

2.2. 地质因素对施工的作用机制

2.2.1. 对顶管施工的影响

粗砾砂层的高渗透性导致顶管施工中泥浆护壁难度增加,当顶进速度超过 5 cm/min 时,易出现泥浆流失引发地面沉降。砂岩层的高强度使顶进力从粉质粘土层的 1200 kN 骤增至 3800 kN,若参数调整不及时将造成管节开裂。虎林-长春管道工程在挠力河穿越中也发现类似规律,地层变化处顶管轴线偏差率较均质地层高 3 倍。

2.2.2. 对沉井施工的影响

富水粗砾砂层使沉井下沉过程中易发生“突沉”现象,惠州项目试沉阶段曾出现 1 小时下沉 23 cm 的险情,主要因土体抗剪强度急剧降低所致。粉质粘土层与砂岩层的界面处存在明显的承载力差异,导致沉井倾斜率最高达 1.5%,超出规范限值(1%)。

2.3. 施工针对性勘察优化方法

针对 LNG 接收站施工需求,采用“常规勘察+专项探测”的复合勘察方案:在常规钻孔基础上,增设地质雷达探测,精准定位砂岩层夹层及孤石位置,探测误差控制在 ± 0.3 m;对富水区域实施压水试验,获取各土层渗透系数的动态变化规律;建立“勘察数据-施工参数”对应数据库,将土层承载力、地下水位等参数与顶进速度、降水强度等施工指标直接关联,为方案设计提供量化依据。

3. 长距离顶管穿越施工技术优化与实践

3.1. 顶管设备选型与系统改进

根据地质勘察结果,选用 YD1800 国产泥水平衡顶管机,针对惠州项目地质特点进行三项改进:一是将标准刀盘更换为“先行刀+刮刀”组合刀盘,在砂岩层区域的掘进效率提升 40%;二是优化泥浆循环系统,增设泥浆密度自动监测装置,当密度低于 1.05 g/cm³ 时自动补充膨润土[1],确保富水层护壁效果;三是升级导向系统,采用激光全站仪与惯性导航双控模式,测量频率提升至每 30 cm 一次,定位精度达 ± 2 mm,最终选型图如图 2:



Figure 2. Selection diagram of domestic slurry balance pipe jacking machine (Complete Machine)
图 2. 国产泥水平衡顶管机整机选型图

3.2. 关键施工参数优化

基于数值模拟与现场试验，确定不同地层的最优施工参数，如表 2：

Table 2. Key parameters of pipe jacking construction
表 2. 顶管施工关键参数表

地层类型	顶进速度(cm/min)	泥浆压 0.18~0.22 力(MPa)	顶进力(kN)	纠偏角度(°)
粉质粘土	4~6	0.12~0.15	1200~1800	≤0.5
粗砾砂	2~3	0.22~0.25	1800~2500	≤0.3
砂岩层	1~2	0.25~0.26	2500~4000	≤0.2

在地层转换处采用“渐变式参数调整法”，如从粉质粘土进入粗砾砂层时，顶进速度分 3 级从 5 cm/min 降至 2 cm/min，避免参数突变引发管节偏移。虎林 - 长春项目在软弱地基顶管中采用类似的参数优化策略，成功将轴线偏差控制在 20 mm 以内。

3.3. 特殊工况处置技术

3.3.1. 富水砂层防突水技术

采用“三重防控”体系：超前布设 3 口降水井，将地下水位降至作业面以下 1.5 m；顶管机前方设置探水孔，每 5 m 进行一次水压测试；在泥浆中掺入 0.5% 的丙烯酰胺类絮凝剂，提高泥浆在砂层中的附着能力。惠州项目应用该技术后，成功穿越 120 m 长富水粗砾砂段，未发生泥浆流失现象。

3.3.2. 长距离顶进减阻技术

借鉴倭肯河穿越工程的减阻经验，实施“三段式”减阻方案：顶管初始段(0~50 m)采用涂抹蜡质减阻剂，摩擦系数降至 0.15；中段(50~150 m)注入膨润土泥浆套，形成厚度≥3 cm 的润滑层；末段(150~200 m)采用“随顶随注”工艺，动态补充泥浆。最终全程平均顶进力较常规方法降低 28%。

3.4. 施工质量控制要点

建立“全流程、双预控”质量管控体系：测量放线实行“三检制”，每 10 m 进行一次轴线复核，确保累计偏差超标；关键参数实施 24 小时动态监控，通过 IoT 平台将顶进力、泥浆压力等数据实时上传，偏差超预警值时自动停机；验收阶段采用超声波检测管节接口密封性，水压试验压力达设计压力的 1.5 倍，保压 30 分钟无渗漏为合格。惠州项目顶管工程一次验收合格率达 100%，轴线最大偏差仅 28 mm。

4. 沉井下沉施工技术创新与应用

4.1. 沉井结构设计优化

针对 LNG 接收站大型沉井(直径 22 m，深度 18 m)的施工需求，采用“分节制作、分次下沉”结构方案，分 4 节制作，每节高度 4.5 m，避免一次性制作引发的开裂风险。井壁厚度采用渐变式设计，从顶部的 80 cm 增至底部的 120 cm，增强对复杂地层的适应性。在沉井刃脚处增设 10 cm 厚钢板加固，刃脚角度优化为 60°，降低下沉阻力。

4.2. 下沉控制关键技术

4.2.1. 下沉方式选择与优化

采用“排水下沉 + 不排水封底”组合工艺：在粉质粘土层(①~②层)采用明沟排水配合井点降水，将

水位控制在作业面下 0.5 m；进入粗砾砂层(③层)后改为深井降水，布设 8 口直径 300 mm 的降水井，间距 6 m，抽水强度根据水位监测数据动态调整。下沉挖土采用“分层对称开挖法”，每层开挖厚度不超过 0.5m，对称偏差控制在 50 cm 以内，有效抑制沉井倾斜。

4.2.2. 纠偏与抗浮技术

开发“监测 - 分析 - 调整”闭环纠偏系统：在沉井顶部布设 4 个倾角仪，每 30 分钟采集一次数据，当倾斜率超过 0.5%时启动纠偏。针对粉质粘土层的倾斜，采用“高侧少挖、低侧多挖”的挖土调整法；针对砂层中的倾斜，采用高压水枪冲刷低侧土体，配合配重纠偏。惠州项目沉井最终倾斜率仅 0.3%，满足规范要求。

抗浮方面，在沉井下沉至设计标高后，立即采用 C30 水下混凝土封底，厚度达 2.5 m，同时布设 6 根抗浮锚杆，每根承载力不小于 500 kN，有效抵御地下水浮力。

4.3. 数字化施工技术集成

引入“软件排沉排施工方法”，构建 BIM + 数值模拟一体化平台：采用 Revit 建立沉井三维模型，导入 Plaxis 进行下沉过程仿真，预测不同土层中的沉降量与倾斜趋势，提前优化挖土顺序；施工现场布设位移计、压力盒等 16 个传感器，数据实时同步至 BIM 模型，形成数字孪生体；当监测值偏离模拟值 10%以上时，系统自动生成调整建议。该技术应用使沉井下沉工期缩短 12 天，节约成本约 150 万元。

4.4. 安全风险防控措施

对深基坑作业等高风险工序实施动态分级管控，建立“一风险一预案”清单：针对富水砂层的突涌风险，储备沙袋、钢板等应急物资，开展“盲演 + 实战”相结合的应急演练；泥浆处置采用防渗收集池集中处理，循环利用率达 85%，避免环境污染；用电实行“三级配电、两级保护”制度，所有设备加装漏电保护器，确保施工安全。

5. 施工安全管理与环境保护措施

5.1. 安全管理体系构建

构建“预防为主、分级管控、全员排查”的精细化防控体系：建立“三级包保”责任制，项目经理、技术负责人、班组长分别对项目、工序、作业点的安全负责；推行“两级网格”管理模式，将施工区域划分为 12 个网格，每个网格配备 1 名安全员，实现风险点专人盯守；定期开展安全培训，重点培训顶管机操作、沉井急救等专项技能，培训考核合格后方可上岗。

5.2. 重大风险管控措施

针对顶管穿越邻近管线(距离仅 3 m)的风险，采用“动态监测 + 防护加固”措施：在既有管线上布设 6 个位移监测点，顶进期间每小时监测一次，沉降预警值设为 15 mm；在顶管与既有管线之间注浆加固，形成厚度 2 m 的防护层。针对沉井基坑坍塌风险，采用钢板桩结合高压旋喷桩帷幕加固，帷幕渗透系数小于 1×10^{-6} cm/s，确保基坑稳定性。

5.3. 环境保护实施要点

严格落实环保措施：施工废水经沉淀、过滤、中和三级处理后回用，回用率达 90%以上[2]；施工扬尘采用雾炮机喷洒降尘，作业区域周边设置围挡，围挡高度不低于 2.5 m；泥浆废弃物采用密闭罐车运输至指定处置场，避免污染周边水体。施工期间周边地下水水质监测结果显示，各项指标均符合《地表水

环境质量标准》(GB 3838-2002)要求。

6. 工程应用效果与技术总结

6.1. 应用效果评价

惠州 LNG 接收站顶管与沉井施工项目共计完成 3 段长距离顶管(总长 580 m)和 2 座大型沉井的施工任务。顶管工程平均日顶进速度达 4.2 m, 较计划工期提前 18 天完成; 沉井平均下沉速度控制在 1.2 m/天, 无突沉、开裂等质量问题。施工期间周边地面最大沉降量为 22 mm, 远低于 30 mm 的控制标准, 邻近构筑物及管线均未受影响。项目节约施工成本约 420 万元, 节省工期 180 天以上, 为接收站顺利引水投产创造了基础条件。

6.2. 技术创新点总结

1. 建立了“地质参数-施工参数”匹配模型, 实现复杂地层下顶管与沉井施工参数的精准优化, 顶进力降低 28%, 沉井倾斜率控制在 0.3% 以内。
2. 开发了“BIM + IoT + 数值模拟”数字化施工系统, 集成顶管参数监控与沉井下沉仿真功能, 工期缩短 12~18 天, 信息化水平显著提升。
3. 构建了“全流程双预控”质量安全管控体系, 结合“三级包保”责任制, 实现质量一次验收合格率 100%, 安全零事故。

7. 经验与展望

本文提出“三段式减阻”(蜡质减阻剂 + 膨润土泥浆套 + 随顶随注)、YD1800 泥水平衡顶管机(“先行刀 + 刮刀”组合刀盘)及顶进参数(顶进速度 2~6 cm/min、泥浆压力 0.12~0.26 MPa), 核心适配富水砂砾层(渗透系数 3.5×10^{-3} cm/s)、顶进距离 ≤ 600 m、无大型孤石(粒径 ≤ 20 cm)的地质工况, 当以下地质或工况发生变化时, 技术适用性将不再适用[3]。

参考文献

- [1] 广东省住房和城乡建设厅. DBJ15T-106-2015 顶管技术规程[S]. 北京: 中国城市出版社, 2016.
- [2] 河北省质量技术监督局. DB13/T2815-2018 顶管工程施工及验收技术规程[S]. 石家庄: 河北科学技术出版社, 2018.
- [3] 上海电力建筑工程有限公司. 惠州 LNG 接收站项目接收站工程 EPC 沉井下沉及顶管施工专项方案[R]. 2023.