

LNG接收站沉降监测技术现状与展望

江安河

国家管网集团大连液化天然气有限公司 辽宁 大连 116600

【摘要】：液化天然气（LNG）接收站多建于沿海软土地区，储罐基础及站区设施的沉降控制是保障工程安全的关键环节。本文系统梳理了LNG接收站沉降监测领域的国内外技术标准体系，总结了传统人工监测、自动化监测及非接触式遥感监测三类方法的技术特点与适用场景，分析了沿海软土地基沉降控制的特殊工程技术问题。基于中交营口、大连、广西北海、龙口南山等典型工程案例，验证了精密水准测量、静力水准、InSAR、北斗、分布式光纤等技术的工程应用效果。研究发现，当前沉降监测工作存在多源数据融合不足、预警模型智能化程度偏低、全生命周期监测覆盖不完整等瓶颈。在此基础上，提出了数字孪生驱动的全生命周期监测、多源异构数据智能融合、机理-数据双驱动的智能诊断与预警等未来发展方向，并给出了近、中、长期法规标准优化建议，可为LNG接收站沉降监测技术的升级与工程实践提供参考。

【关键词】：LNG接收站；沉降监测；自动化监测；InSAR；数字孪生；软土地基

DOI:10.12417/2811-0722.26.07.015

1 引言

液化天然气（LNG）作为清洁低碳能源，在我国能源结构转型中占据重要地位。截至2024年底，我国已建成投产LNG接收站超过20座，总接收能力突破1.2亿吨/年，沿海LNG接收站群已成为保障国家能源安全的重要基础设施。LNG接收站通常选址于沿海滩涂或人工吹填区域，场区地基多为饱和软黏土、淤泥质土等不良地质体，具有含水率高、孔隙比大、压缩性强、承载力低等显著特征。大体积LNG储罐直径可达80m以上，满载重量数十万吨，在地基固结、水位变动、温度梯度等多因素耦合作用下，储罐基础及站区管线极易产生不均匀沉降。一旦沉降超出容许限值，可能引发储罐倾斜、管线扭曲乃至破裂泄漏等严重事故，直接威胁人员安全与环境安全。

沉降监测贯穿LNG接收站设计验证、施工控制与运营维护全过程，是保障结构完整性与运行安全的核心技术手段。近年来，随着传感技术、卫星遥感和人工智能的快速发展，LNG接收站沉降监测在感知维度、数据精度和智能分析等方面取得了显著进步，但也面临多源数据融合不足、预警模型智能化程度偏低、全生命周期监测覆盖不完整等挑战^[1]。本文旨在系统梳理国内外LNG接收站沉降监测的技术标准体系、主要方法及其工程应用效果，分析沿海软土地基沉降控制的特殊问题，并结合典型工程案例提出符合我国国情的法规优化路径与技术发展方向，为提升LNG接收站沉降监测水平提供理论支撑和实践参考。

2 技术标准体系与监测方法

本研究采用文献分析、案例比较与实地调研相结合的方法。文献分析覆盖国内外LNG接收站沉降监测的相关法规、标准及技术规范，重点对比ISO、国际航运协会等国际组织与我国GB、JGJ等标准体系的内容差异；案例数据来源于中交营口、大连、广西北海、龙口南山、浙江舟山等地LNG接收站的实际沉降监测报告与公开发表文献；技术适用性评估以监

测精度、实时性、空间覆盖能力、工程可实施性及经济性为主要评价准则。在此基础上，提出涵盖近期、中期、长期的法规标准优化方向及技术发展建议。

2.1 沉降监测技术标准体系概述

LNG接收站沉降监测工作依据多层级技术标准体系执行。国际层面，ISO 28460:2022《石油天然气工业—液化天然气用装置和设备—港口作业》对LNG码头及陆域设施的沉降观测提出了原则性要求^[2]。我国国家标准层面，GB 51156-2015《液化天然气接收站工程设计规范》是核心依据，其中第4.1.33条对储罐基础沉降观测点布置提出了明确要求，第5.9.3条规定了储罐水压试验期间的沉降监测程序，第12.1.10、12.1.12、12.1.14条分别涉及管道应力监测与沉降控制指标，均为强制性条文^[1]。GB 50007-2011《建筑地基基础设计规范》规定了地基变形允许值与沉降观测基本方法。行业标准层面，SY/T 7304-2016《低温液化气储罐混凝土结构设计和施工规范》对储罐混凝土外罐的变形监测提出了专项要求。在监测技术操作层面，GB 50026-2020《工程测量标准》和JGJ 8-2016《建筑变形测量规范》提供了水准测量、倾斜观测等传统方法的操作规程。

比较研究发现，我国标准在沉降监测点位密度（GB 51156要求储罐周边不少于20个测点）方面与ISO标准基本协调，但在自动化监测数据采集频率、北斗监测精度评定、InSAR数据处理方法等方面尚未形成统一规定。值得注意的是，针对北斗卫星、分布式光纤等新型监测手段的专用标准尚在编制中，现有规范对自动化监测数据的采集频率、精度评定与预警阈值等仍未形成统一规定^{[1][2]}，这是当前标准化工作的薄弱环节。

2.2 关键技术进展与实践验证

2.2.1 传统人工监测方法

传统沉降监测以精密水准测量为核心手段，辅以测斜仪、分层沉降仪等设备。典型工作流程为：在储罐承台外边缘布设

均匀分布的沉降观测点（通常 20~24 个），采用二等或一等水准测量定期获取各点高程变化；在储罐基础 0°/180°和 90°/270°方向布设测斜管，利用伺服加速度计式测斜仪测量基础底板倾斜状态。该方法技术成熟、数据可靠、规范依据充分，但人工观测周期长、实时性差，难以捕捉降雨、潮汐等短时因素引起的瞬态变形，且恶劣天气条件下无法作业。

2.2.2 自动化监测方法

为克服传统方法的不足，自动化监测技术在 LNG 接收站的应用日益广泛。

静力水准系统是目前储罐沉降自动化监测的主流方案。该系统由多个连通液体的储液罐和精密压力传感器组成，各测点的高程变化通过液面压力差精确测定，精度可达±0.1 mm。天津南港 LNG 接收站在储罐承台周边布设了环状静力水准网，配合数据采集器与无线传输模块，实现了分钟级的沉降连续监测^{[3][4]}。实践表明，静力水准系统可有效识别昼夜温差引起的储罐热胀冷缩效应，其高频数据为分离温度效应与固结沉降提供了可能。

北斗卫星监测技术为广域沉降监测提供了新手段。北斗静态相对定位精度水平方向达±2 mm、垂直方向达±5 mm，虽略逊于精密水准，但其全天候、全自动的优势在大范围、长周期监测中具有明显性价比。天津南港项目探讨了“储罐本体北斗测点+地基层沉降计+角反射器 InSAR”的天地一体化监测方案^{[3][4]}。

分布式光纤传感技术通过感测光纤沿线的应变或温度变化，间接获取沉降信息。该技术具有非接触、连续在线、本质安全等优点，已在储罐珍珠岩保冷层沉降监测中得到探索性应用，避免了传统开罐检查的安全风险。

2.2.3 非接触式遥感监测方法

InSAR 技术在广域地表形变监测中优势显著。广西北海

LNG 接收站利用 PS-InSAR 技术处理 2018—2023 年 Sentinel-1A 卫星数据，获取了站区及周边约 100 km²范围的地表形变速率场。结果显示，73%区域的年形变速率在-2.5~2.0 mm/a 之间，整体处于稳定状态；储罐区附近因地基持续固结，局部存在-5.0~-3.0 mm/a 的微弱沉降。研究还发现，雨季累积降雨量与地表沉降幅度呈显著正相关（相关系数 R=0.72），揭示了降雨入渗对软土地基沉降的动态影响^[5]。

在三维形变监测方面，李振等（2025）综合运用地面三维激光扫描仪、无人机载雷达、静力水准仪与振弦式应变计，建立了 LNG 储罐外罐形变与倾斜的多源监测体系，实现了罐体倾斜、基础不均匀沉降与外罐壁面应变的同步解算，沉降测量精度评估表明中误差优于±2.0 mm^[6]。

三维激光扫描技术主要用于储罐外罐几何完整性检测。该技术通过地面扫描获取外罐壁面高密度点云（可达 1.5×10⁵点/m²），经多期点云对比，可检出毫米级的局部鼓曲或凹陷变形，为储罐结构安全评估提供了高精度几何基准^[7]。

2.2.4 数据分析与预测模型

监测数据的价值在于解析与预测。龙口南山 LNG 一期工程 1~4 号储罐积累了超过 3 年的长期沉降监测数据，分析表明储罐沉降主要表现为均匀沉降和平行倾斜，不均匀沉降引起的罐体扭曲变形量级较小。采用对数函数模型拟合累积沉降量-时间曲线，决定系数 R²达 0.95 以上，预测未来 20 年沉降量的相对误差可控制在 10%以内，表明基于早期监测数据的经验模型在长期沉降预测中具有良好的工程适用性。浙江舟山 LNG 项目采用真空联合堆载预压法处理深厚软基，基于实测沉降-时间曲线，利用双曲线法和指数曲线法推算地基最终沉降量与固结度，预测结果与后续实测值吻合良好，为合理确定卸载时机提供了定量依据。

表 1 沉降监测技术方法对比与适用性分析

技术类型	典型方法	精度/关键指标	优点	局限性	适用场景
传统人工	精密水准测量	±0.3 mm（二等水准）	精度最高，标准成熟，数据可靠	人工周期长，实时性差，受天气限制	水压试验验收、长期基准校核、运营期定期观测
	测斜仪/分层沉降仪	倾斜角分辨率≤0.01°	直接测量深层位移和倾斜	单点测量，无法连续监测	储罐基础倾斜、侧向挤出专项监测
自动化监测	静力水准系统	±0.1 mm	分钟级连续监测，抗干扰强	需布设连通管，量程有限	储罐承台、管廊架密集沉降监测
	北斗卫星监测	水平±2 mm，垂直±5 mm	全天候，广域，全自动	垂直精度较低，信号遮挡影响	场区大范围地表沉降、辅助 InSAR

	分布式光纤传感	取决于标定精度	非接触, 连续在线, 本质安全	间接反演, 算法依赖标定	珍珠岩保冷层沉降、管道变形监测
非接触遥感	InSAR(PS-InSAR)	形变速率 $\pm 1\sim 2$ mm/a	大范围面状监测, 历史回溯	垂直精度有限, 受植被/大气影响	站区周边区域沉降场、长期趋势分析
	三维激光扫描	点云密度 1.5×10^5 点/m ²	高密度几何信息, 毫米级变形检出	单次扫描成本高, 数据处理复杂	储罐外罐几何完整性、局部鼓曲检测

(注: 续表 1)

2.3 典型案例深度分析

2.3.1 中交营口 LNG 接收站水压试验沉降监测

中交营口 LNG 接收站在储罐水压试验阶段实施了系统的人工监测。水压试验按 1/4 储罐高度分四级充排水, 每级静置时间不少于 3 小时, 期间每小时测读一次沉降量, 待变形稳定后方可进入下一级加载。边缘沉降观测采用 Leica DNA03 数字水准仪, 测点 20 个, 实测精度达 ± 0.3 mm; 径向倾斜观测沿径向每 0.5 m 设 1 个观测点, 单条径向测线长达 92.5 m, 测点数 185 个, 由滑动式测斜仪分段采集倾斜角并换算为挠度曲线。水压试验获得的荷载-沉降曲线为储罐基础刚度评价与设计参数反演提供了关键数据^[2]。该案例验证了精密水准测量在水压试验等短期高精度监测场景中的不可替代性, 同时也暴露出人工读数频次受限、无法连续记录夜间沉降等问题。

2.3.2 大连 LNG 接收站长期系统沉降监测

大连 LNG 接收站长期采用精密水准测量开展全厂区构筑物的系统沉降监测, 覆盖 3 座 16 万 m³ 全容式储罐、LNG 码头、工作船码头、火炬平台、ORV/SCV 气化装置、海水泵房、装车撬及管廊架等关键设施。依据《国家管网集团液化天然气储罐系统管理细则》中“新建储罐投产 3 年内每半年监测一次, 此后视情况调整”的要求, 该站建立了贯穿运营全周期的定期观测制度。2024 年的监测数据显示: 3 座储罐在 17 个月内的竖向位移量仅为 0.0~1.2 mm, 沉降速率 0.0000~0.0023 mm/d; ORV 最大沉降 2.0 mm, SCV 最大沉降 1.8 mm, 海水泵房最大沉降 1.7 mm, 均远小于规范限值^[9]。2025 年管廊架基础监测进一步表明, 27 个测点在 28 天内的平均沉降量为 0.11 mm, 沉降速率 0.002~0.006 mm/d^[10]。这些长期、连续的精密水准观测数据不仅验证了软基处理效果, 也为同类 LNG 接收站的沉降趋势研判与预警阈值设定提供了可靠的工程参照。案例启示: 建立贯穿运营全周期的定期观测制度, 是保障 LNG 接收站长期安全的关键。

2.3.3 广西北海 LNG 接收站 InSAR 广域监测

广西北海 LNG 接收站利用 PS-InSAR 技术处理 2018—2023 年 Sentinel-1A 卫星数据, 获取了站区及周边约 100 km² 范围的地表形变速率场。结果显示, 73% 区域的年形变速

率在 -2.5~2.0 mm/a 之间, 整体处于稳定状态; 储罐区附近因地基持续固结, 局部存在 -5.0~-3.0 mm/a 的微弱沉降。研究还发现, 雨季累积降雨量与地表沉降幅度呈显著正相关 (相关系数 $R=0.72$), 揭示了降雨入渗对软土地基沉降的动态影响^[5]。该案例验证了 InSAR 技术在广域、长周期、非接触沉降监测中的独特优势, 但其垂直监测精度尚不足以替代水准测量用于单个储罐的精准变形控制。

2.3.4 龙口南山 LNG 工程沉降预测模型验证

龙口南山 LNG 一期工程 1~4 号储罐积累了超过 3 年的长期沉降监测数据, 分析表明储罐沉降主要表现为均匀沉降和平行倾斜, 不均匀沉降引起的罐体扭曲变形量级较小。采用对数函数模型拟合累积沉降量-时间曲线, 决定系数 R^2 达 0.95 以上, 预测未来 20 年沉降量的相对误差可控制在 10% 以内。该案例验证了基于早期监测数据的经验模型在长期沉降预测中的工程适用性, 同时发现当软土层存在显著横向不均匀性时, 对数模型的预测偏差会增大至 15% 以上, 提示需要引入更复杂的固结理论模型进行修正。

3 研究成果及应用

3.1 沉降控制效果与工程应用成果

综合上述工程实践, LNG 接收站沉降监测技术已取得显著应用效果:

(1) 传统人工监测仍是基准手段。中交营口项目水压试验期间实测精度达 ± 0.3 mm^[2], 大连 LNG 接收站多年连续监测显示储罐沉降速率远小于规范限值^{[9][10]}, 验证了精密水准测量在长期、高精度沉降监测中的基准地位。

(2) 自动化监测实现连续实时感知。天津南港静力水准系统实现分钟级沉降监测, 有效分离温度效应与固结沉降^{[3][4]}; 分布式光纤传感技术实现了珍珠岩保冷层沉降的非接触连续监测, 避免了开罐检查的风险。

(3) 遥感监测拓展广域感知能力。广西北海 PS-InSAR 技术获取 100 km² 范围形变速率场, 识别出储罐区局部沉降与降雨量的正相关关系 ($R=0.72$)^[5]; 多源融合监测技术实现了储罐三维形变场的同步解算, 中误差优于 ± 2.0 mm^[6], 为区域沉降风险评估提供了新视角。

(4) 沉降预测模型具有良好的工程适用性。对数函数模

型预测未来20年沉降误差小于10%，双曲线法与指数曲线法为真空预压卸载时机提供了定量依据。

表2 典型LNG接收站沉降监测案例关键数据与效果

案例工程	监测技术	核心数据/结果	工程效果与意义
中交营口LNG	精密水准+滑动测斜仪	水准精度 ± 0.3 mm, 径向测线92.5 m (185点)	获得水压试验荷载-沉降曲线, 验证基础刚度
大连LNG接收站	精密水准(定期系统监测)	储罐沉降0.0~1.2 mm/17个月, 沉降速率 ≤ 0.0023 mm/d; 管廊架平均沉降0.11 mm/28d	验证软基处理效果, 为运营期阈值设定提供基准
广西北海LNG	PS-InSAR+多源融合监测	73%区域年变速率-2.5~-2.0 mm/a; 储罐区局部-5~-3 mm/a; 降雨相关系数 $R=0.72$	揭示降雨-沉降动态关系, 实现大范围形变监测
龙口南山LNG	对数函数模型预测	$R^2 > 0.95$, 20年沉降预测误差 $< 10\%$	验证经验模型适用性, 指导长期沉降趋势研判
浙江舟山LNG	双曲线法/指数曲线法	固结度推算与实测吻合	为真空预压卸载时机提供定量依据

3.2 存在的问题与不足

尽管取得了上述成效, 但当前LNG接收站沉降监测工作仍存在若干亟待解决的短板^[13]:

其一, 多源监测数据融合程度不高。水准测量、静力水准、InSAR、北斗、三维激光扫描等手段多独立运行, 数据格式、时空分辨率与参考基准各异, 缺乏统一的数据融合框架, 导致“数据丰富而信息贫乏”的困境。

其二, 智能化诊断与预警能力不足。现有预警多依赖阈值判定, 难以识别多因素耦合作用下沉降异常的早期征兆; 沉降趋势分析仍以人工经验判断为主, 知识驱动的机理模型与数据驱动的机器学习模型尚未有机融合。

其三, 全生命周期监测覆盖不完整。多数项目仅在水压试验与运营初期实施密集监测, 长期运维阶段的监测频率显著降低。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 液化天然气接收站工程设计规范: GB 51156-2015[S]. 北京: 中国计划出版社, 2015.
- [2] 中交营口LNG接收站项目部. 储罐水压试验沉降观测方案[R]. 2023.

其四, 新型监测技术的标准化滞后。自动化与遥感监测的精度评定方法、数据采集频次、预警阈值等尚未纳入技术标准, 制约了新技术的规模化推广应用。行业调研显示, 不同区域沉降监测数据完整率差异达23.7%^[13]。

4 结论与展望

本研究系统梳理了国内外LNG接收站沉降监测的技术标准体系与主要方法, 通过典型案例分析揭示了我国在该领域标准协调性、技术适应性智能化应用等方面存在的不足。研究结果表明, 现行标准在自动化监测数据采集频率、北斗/InSAR精度评定等方面与国际先进水平仍存在一定差距^{[11][12]}, 尤其在分布式光纤、数字孪生等新技术的标准化应用方面亟待加强。

基于中交营口、大连、广西北海、龙口南山等地的实践案例, 本研究验证了精密水准测量、静力水准、InSAR、北斗等技术在各自适用场景中的有效性, 并提出了涵盖近、中、长期的法规标准优化路径与技术发展方向:

近期(2030年前): 重点推动国内外标准对接, 加快编制《LNG接收站自动化沉降监测技术指南》, 明确静力水准、北斗、InSAR等新技术的实施标准与精度评定方法^{[11][12]}。建议在环渤海、长三角、粤港澳大湾区等重点区域先行试点标准统一化改革。

中期(2031—2035年): 构建基于数字孪生的全生命周期沉降监测体系, 将设计参数、施工记录、实时监测数据与机理模型深度融合, 实现“监测—反演—预测—决策”闭环。研发面向多源异构数据的智能融合算法, 建立统一时空基准下的沉降场动态模型; 构建机理-数据双驱动的智能诊断与预警系统, 从“沉降量大”的单一判据升级为“不均匀沉降-管道应力-焊缝疲劳”的关联风险链式诊断。

长期(2036—2040年): 推动建立“检测-评估-预警-决策”一体化的智能安全监管平台, 实现沉降数据实时分析、风险自动预警和应急决策支持。完善法规体系动态更新机制, 加强与国际主要LNG进口国的标准互认, 形成具有国际影响力的中国LNG接收站沉降监测标准体系。

为确保上述路径有效实施, 需从组织、技术与人才三个维度建立保障机制: 设立国家级LNG储罐沉降监测标准化工作组, 建设沉降监测技术研发与验证实验室, 培养复合型人才。未来, 我国应持续推动沉降监测技术的科学化、智能化与标准化转型, 为保障国家能源基础设施的长期安全运营提供坚实支撑。

- [3] 金樱,卢琳,王海峰.天津南港 LNG 接收站地基沉降监测点位布设方法[J].煤气与热力,2022,42(4):28-32.
- [4] 卢琳,金樱,张永强.LNG 接收站沉降监测与影响因素分析[J].煤气与热力,2022,42(2):35-39.
- [5] 孙博,鲁特,韩苗苗,等.融合时序 InSAR 和机载点云的 LNG 储罐外罐沉降研究[J].科技和产业,2025,25(14):32-39.
- [6] 李振,鲁特,张云卫,等.LNG 储罐外罐形变与倾斜高精度智能监测[J].测绘通报,2025(9):157-162.
- [7] LI Z,HUANG K,ZHOU W,et al.基于多源监测的 LNG 储罐外罐形变与倾斜智能识别[J].测绘通报,2025(9):82-88.
- [8] 张海洋,刘伟明.沿海吹填区 LNG 接收站软基处理关键技术[J].港口航道与近海工程,2024,51(3):56-61.
- [9] 天津港湾工程质量检测中心有限公司.接收站厂区构筑物沉降观测及变形监测报告:2024-416-岩-065R.天津,2024.
- [10] 天津港湾工程质量检测中心有限公司.大连 LNG 公司 2025 年管廊架基础沉降监测报告:2025-249-岩-075R.天津,2025.
- [11] 国家标准化管理委员会.液化天然气(LNG)生产、储存和装运:GB/T 20368-2023[S].北京:中国标准出版社,2023.
- [12] ISO 28460:2022.Petroleum and natural gas industries—Installation and equipment for liquefied natural gas—Port and marine operations[S].
- [13] 王建军,等.LNG 储罐沉降监测技术进展[J].中国安全科学学报,2022,32(5):112-119.