

基于多技术融合的储罐基础沉降及结构变形监测系统在储罐完整性管理中的应用

杨 兵, 朱睿博, 林天德, 李炬坪, 张万权

国家石油天然气管网集团有限公司广西分公司, 广西 南宁

收稿日期: 2026年7月24日; 录用日期: 2026年8月21日; 发布日期: 2026年9月2日

摘 要

针对南宁油库储罐运行过程中基础沉降与结构变形可能引发的安全风险, 解决传统监测方法覆盖范围有限、实时性差、精度不足等问题, 构建符合油气行业安全标准的智能化监测体系, 为储罐完整性管理提供技术支撑, 保障库区长期安全稳定运行。本系统以南宁储油库区安全风险智能化管控平台建设项目为依托, 采用“光纤光栅传感技术 + InSAR遥感技术 + 工业互联网平台”的多技术融合方案。实施过程中严格遵循GB 50026、JGJ8等标准, 通过工厂验收试验(FAT)与现场验收试验(SAT)双重验证系统性能。该监测系统实现了储罐基础沉降与结构变形的24小时连续实时监测, 数据传输延迟 ≤ 0.1 s, 静态监测精度达0.1 pm, 全域InSAR监测覆盖整个库区且精度满足毫米级要求; 系统具备用户权限管理、设备状态可视化、预警信息等功能, 可自动识别超限数据并生成预警报告, 在试运行期间系统运行稳定。多技术融合的监测系统有效弥补了传统储罐监测手段的短板, 实现了“点-面结合、实时-全域兼顾”的监测目标, 其技术指标达到国内先进水平, 可作为油气储罐完整性管理的标准化解决方案推广应用。该系统不仅为南宁油库储罐的安全运行提供了可靠保障, 在油气仓储设施智能化监测升级方面提供了可借鉴的经验案例, 对推动油气行业安全风险管控数字化转型具有重要意义。

关键词

油气储罐, 多技术融合, 基础沉降, 结构变形, 监测系统, 完整性管理

Application of a Multi-Technology Integrated Monitoring System for Tank Foundation Settlement and Structural Deformation in Tank Integrity Management

Bing Yang, Ruibo Zhu, Tiande Lin, Juping Li, Wanquan Zhang

PipeChina Guangxi Branch, Nanning Guangxi

文章引用: 杨兵, 朱睿博, 林天德, 李炬坪, 张万权. 基于多技术融合的储罐基础沉降及结构变形监测系统在储罐完整性管理中的应用[J]. 石油天然气学报, 2026, 48(3): 374-379. DOI: 10.12677/jogt.2026.483042

Received: July 24, 2026; accepted: August 21, 2026; published: September 2, 2026

Abstract

To address the potential safety risks induced by foundation settlement and structural deformation during the operation of storage tanks at the Nanning Oil Depot, and to overcome the limitations of conventional monitoring methods—such as limited spatial coverage, poor real-time performance, and insufficient accuracy—this study develops an intelligent monitoring system that complies with the safety standards of the oil and gas industry. The system is designed to support tank integrity management and ensure the long-term safe and stable operation of the depot. Built upon the intelligent safety risk management and control platform of the Nanning Oil Depot, the system integrates three complementary technologies: fiber Bragg grating (FBG) sensing, Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR), and an industrial internet platform. The implementation strictly follows national standards including GB 50026 and JGJ 8, and the system performance was rigorously verified through both Factory Acceptance Testing (FAT) and Site Acceptance Testing (SAT). The monitoring system enables 24/7 continuous real-time surveillance of foundation settlement and structural deformation, with a data transmission delay ≤ 0.1 s, static measurement accuracy of 0.1 pm, and full-depot InSAR coverage achieving millimeter-level precision. The system incorporates user authority management, real-time equipment status visualization, and early warning capabilities, enabling automatic identification of out-of-limit data and generation of alert reports. During the trial operation, the system demonstrated stable performance. The multi-technology integrated monitoring system effectively compensates for the shortcomings of traditional monitoring approaches and achieves a synergistic “point-area combination and real-time-global coverage” monitoring strategy. Its technical performance reaches the domestic advanced level and can be promoted as a standardized solution for integrity management of oil and gas storage tanks. This system not only provides reliable safeguards for the safe operation of tanks at the Nanning Oil Depot but also offers a practical reference for the intelligent monitoring upgrade of oil and gas storage facilities, and holds significant implications for advancing the digital transformation of safety risk control in the oil and gas industry.

Keywords

Oil and Gas Storage Tanks, Multi-Technology Integration, Foundation Settlement, Structural Deformation, Monitoring System, Integrity Management

Copyright © 2026 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. 引言

1.1. 研究背景

油气储罐作为石油天然气产业链的关键仓储设施，其运行完整性直接关系到能源安全与环境安全。近年来，随着我国油气储备规模的扩大，储罐大型化、集约化趋势明显，而库区地质条件复杂(如软土地基沉降)、长期载荷作用、环境温差变化等因素，易导致储罐基础沉降与结构本体变形，若未及时监测处置，可能引发罐壁开裂、泄漏、倾斜甚至坍塌等重大安全事故。据行业统计，2018~2023 年全球共发生 12 起储罐因基础沉降导致的泄漏事故，平均每起事故造成直接经济损失超千万元，且伴随环境污染风险。

传统储罐监测多采用人工巡检(水准仪测量、应变片粘贴)结合定期检测的方式,存在以下局限:一是人工巡检不具备实时性,无法实时捕捉动态变形;二是单点测量覆盖范围有限,难以反映储罐全域变形规律;三是人工操作易受环境干扰,数据精度稳定性不足。随着工业互联网、传感技术的发展,智能化监测成为解决传统痛点的核心方向,但目前国内油气储罐监测领域仍缺乏“高精度传感 + 全域遥感 + 平台化管控”的一体化成熟方案,亟需结合实际项目构建标准化技术体系。

1.2. 研究目的

本文以南宁油库安全风险智能化管控平台建设项目为载体,旨在达成以下目标:

- 构建一套满足油气行业防爆、耐候、高可靠性要求的储罐基础沉降及结构变形监测系统,实现“实时采集、精准分析、智能预警”的全流程管控;
- 融合光纤光栅传感与 InSAR 遥感技术,形成“点式精准监测 + 面式全域覆盖”的立体监测网络,填补传统监测“点面脱节”的技术空白;
- 开发兼容第三方平台的数据接口,推动监测系统与库区安全风险智能化管控平台深度融合,为储罐完整性管理提供数据支撑与决策依据;
- 通过项目实践验证系统的技术可行性与经济性,形成可复制、可推广的油气储罐智能化监测解决方案,提升我国油气仓储设施安全管理水平。

2. 技术思路和研究方法

2.1. 总体技术思路

本文遵循“需求导向 - 技术匹配 - 系统集成 - 验证应用”的技术路线,以南宁油库储罐运行安全需求为核心,围绕“数据采集 - 传输 - 处理 - 应用”四个环节,构建多技术融合的监测体系:

- 数据采集层:采用“光纤光栅传感器 + InSAR 遥感”双源数据采集模式,点式传感器聚焦储罐关键部位(基础、罐壁)的精准监测,InSAR 技术覆盖库区全域地表变形,实现“点面互补”[1];
- 数据传输层:通过光纤(传感器 - 解调仪)、5G/LoRa (解调仪 - 服务器)、工业以太网(服务器 - 管控平台)构建多链路传输网络,确保数据实时无丢包;
- 数据处理层:依托高性能工业服务器,开发具备数据存储(实时 + 历史)、滤波分析、超限判断功能的软件系统,实现监测数据自动化处理;
- 应用层:将处理后的数据接入库区安全风险智能化管控平台,通过可视化界面展示设备状态、变形趋势,结合预警模型实现异常情况及时推送与处置。

2.2. 关键研究方法

2.2.1. 监测设备选型与技术参数确定

根据南宁油库的环境特点(高温、潮湿、可能存在油气挥发)及《通用用电设备配电设计规范》(GB 50055-2011)[2]、《石油化工仪表接地设计规范》(SH/T 3081-2019)[3]等标准,确定核心设备技术参数[4]:

- 沉降监测传感器:测量范围 100 mm (可定制),标距方向分辨率 0.1%F.S.,封装材料拉伸强度 ≥ 800 MPa、弹性模量 ≥ 40 GPa,防护等级 IP65,工作温度 $-40^{\circ}\text{C}\sim 70^{\circ}\text{C}$,接口为光纤;
- 结构变形监测传感器:测量范围 $\pm 1500\ \mu\text{e}$,标距 100 mm,其余参数同沉降传感器,确保与沉降监测数据一致性;
- 监测解调仪:光学通道数 8-32,静态/动态波长解析重复性 $\pm 1\ \text{pm}$,分辨率 0.1 pm,支持 100~240VAC 及 5/12/24VDC 供电,工作温度 $-20^{\circ}\text{C}\sim 70^{\circ}\text{C}$,兼容 5G/LoRa/网线传输;

- 工业服务器：2.2GHz/10C/20T 处理器，128G 内存，42.4T/10KSAS 硬盘(Raid5 + 1)，4 个千兆网口，2*750W 冗余电源，满足 7×24 小时稳定运行需求。

2.2.2. 多技术融合监测方案设计

- 光纤光栅传感技术应用：在储罐基础每隔 5 m 布设 1 个沉降传感器，罐壁每 10 m 布设 1 个结构变形传感器，传感器通过光纤连接至机房解调仪，实现单点高精度实时监测；光纤采用直埋 + 镀锌管保护方式敷设(禁用 PVC 材质)，满足防爆要求；
- InSAR 遥感技术应用：收集南宁油库 2022 年卫星数据(包括 SAR 影像、数字高程 DEM 数据、正射影像数据)，采用 D-InSAR 技术获取库区地表形变场，结合时序 InSAR (SBAS-InSAR)分析长期变形趋势，实现全域毫米级监测，与光纤传感数据形成“点 - 面”验证；
- 数据融合处理方法：通过时间戳对齐、数据滤波(卡尔曼滤波消除噪声)、精度校准(以 InSAR 全域数据为基准，修正单点传感偏差)，实现双源数据互补，提升监测可靠性。

2.2.3. 系统软件与接口开发

- 监测子系统功能开发：基于 Windows/Linux 操作系统，开发六大核心功能模块：
- 系统管理模块：支持用户增删改查、角色权限分配、操作日志记录；
- 数据管理模块：实现基础地理数据、监测数据的图层管理，支持二维/三维视图联动与空间/属性查询；
- 设备管理模块：可视化展示传感器、解调仪运行状态，记录维护信息；
- 监测点管理模块：按区域/类型查询监测点数据，支持数据导出；
- 预警分析模块：采用开放式脚本预警模型，可自定义超限阈值，支持预警报警提醒；
- 数据接口模块：支持 HTTP/HTTPS、数据库中间表、OPC 协议，实现与库区安全风险智能化管控平台的数据交互。

2.2.4. 系统验证与验收方法

严格遵循《石油化工仪表工程施工及验收规范》(SH/T 3551-2024) [5]、《过程工业自动化系统验收规范》(GB/T 25928-2010) [6]，分两阶段开展验证：

- 工厂验收试验(FAT)：在设备集成地进行，内容包括设备数量核对、外观检验、性能测试(如传感器精度、数据传输延迟)、系统联调(模拟现场通信环境)，由供需双方签字确认 FAT 报告后方可出厂；
- 现场验收试验(SAT)：设备安装后，进行 100%功能测试(如预警触发、数据查询)、性能测试(连续 72 小时稳定性运行)、联调测试(与管控平台对接)，形成 SAT 报告后投用。

3. 结果和效果

3.1. 系统技术性能达标情况

3.1.1. 监测精度与实时性

静态监测方面，光纤传感器标距方向精度达 1%F.S.，解调仪分辨率 0.1 pm，满足设计要求；动态监测方面，数据传输延迟 ≤ 0.1 s，采样频率 1 Hz，可实时捕捉储罐微小变形；InSAR 全域监测精度为 ± 2 mm，覆盖整个南宁油库储罐区(面积约 12 万 m²)，成功识别库区东北部边缘存在的微小沉降趋势(月沉降量 0.8 mm) [7]。

3.1.2. 环境适应性

系统在南宁夏季高温(最高 38℃)、雨季潮湿(相对湿度 80%以上)环境下连续运行 6 个月，设备无故障；传感器经 IP65 防护测试，浸泡 24 小时后性能正常，满足库区防爆、耐候要求。

3.1.3. 软件功能完整性

监测子系统各模块运行正常,可支持 50 个并发账户,预警响应时间 ≤ 30 s;数据接口成功与库区安全风险智能化管控平台对接,实现静态基础数据(传感器位置、型号)、动态监测数据(实时沉降/变形值)、分析结果(超限报告)的实时同步,数据传输成功率 100% [8]。

3.2. 项目应用效果

3.2.1. 安全风险管控能力提升

系统投用后,实现储罐变形的实时监测与自动预警,助力维修人员精确分析诱因,避免风险扩大。

3.2.2. 运维效率与经济性优化

传统人工巡检 6 次/天,系统投用后仅需 2 次/天进行设备巡回检查,运维人力成本降低 67%。

3.2.3. 数据支撑价值凸显

系统累计存储监测数据超 50 万条,通过历史数据分析,建立了南宁油库储罐变形规律模型,为储罐检修计划制定提供了数据依据,推动储罐完整性管理从“定期维修”向“预测性维修”转型。

3.3. 行业示范意义

该系统的成功应用,形成了一套符合我国油气行业标准的储罐智能化监测技术体系,其“点-面结合、多技术融合”的方案,解决了传统监测的痛点,技术指标达到国内先进水平[9]。在实施过程中形成的设备选型规范、验收流程、运维手册,为后续国内其他油气库区的储罐监测项目提供了可复制的模板;同时,系统采用的光纤光栅传感、工业互联网等技术,也为油气仓储设施的智能化升级提供了经验,助力我国油气行业技术标准持续提升。

4. 结论

1. 该系统构建的基于“光纤光栅传感 + InSAR 遥感 + 工业互联网”的储罐基础沉降及结构变形监测系统,技术方案可行、性能稳定,满足南宁油库的安全运行需求,其监测精度、实时性、环境适应性均达到目标,可有效提升储罐完整性管理水平。

2. 多技术融合是解决油气储罐监测“点面脱节、实时性差”问题的核心路径,光纤光栅传感实现关键部位的精准监测,InSAR 技术实现全域覆盖,二者结合形成“局部-整体”的立体监测网络,再通过平台化管控实现数据价值最大化,该模式可作为油气储罐智能化监测的标准化方向推广。

3. 系统在安全风险管控、运维效率、经济性方面的显著效果,验证了智能化技术在油气仓储领域的应用价值,不仅为南宁油库提供了可靠的安全保障,也为我国油气行业安全风险管控数字化转型提供了实践参考。

4. 未来优化方向:系统仍有进一步提升空间。第一,预警模型智能化升级:当前系统依赖阈值报警,未来可引入 AI 算法对多源监测数据进行融合学习,建立基于时间序列的形变趋势预测模型,提升异常识别的准确率与提前预警能力,推动从“被动报警”向“主动预测”演进。第二,监测维度拓展:可集成分布式光纤温度测量与泄漏监测功能,实现对储罐底板泄漏、介质温度场变化等多参数的同步感知,向“全参数监测”方向延伸。第三,数字孪生与决策一体化:未来可构建设备级数字孪生体,将监测数据与结构安全评价模型耦合,实现剩余强度评价与寿命预测的精准化;同时对接应急决策支持系统,形成“监测-评估-预警-响应”的闭环管理体系,推动系统向“全参数、全生命周期”的储罐完整性管理平台升级。

参考文献

- [1] 中国计划出版社. GB 50026-2020 工程测量标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 2020.
- [2] 中国计划出版社. GB 50055-2011 通用用电设备配电设计规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2011.
- [3] 国家能源局. SH/T 3081-2019 石油化工仪表接地设计规范[S]. 北京: 中国石化出版社, 2019.
- [4] 中国石油天然气管道工程有限公司. 基础沉降及结构变形监测技术规格书: XNGDT01-GI001#EGD-SP-0101 [R]. 2023.
- [5] 中华人民共和国工业和信息化部. SH/T 3551-2024 石油化工仪表工程施工及验收规范[S]. 北京: 中国标准出版社, 2024.
- [6] 中国标准出版社. GB/T 25928-2010 过程工业自动化系统验收规范[S]. 北京: 中国标准出版社, 2010.
- [7] 邢述. 空间数据扫描技术在大型常压储罐变形检测中的应用[J]. 无损检测, 2022, 44(10): 20-24.
- [8] 赵楠楠. 立式储罐基础沉降与变形后的可靠度评价[J]. 油气田地面工程, 2015, 34(5): 14-15.
- [9] 刘涛. 基于低相干光学原理的大型油罐基础沉降监测方法研究[D]: [博士学位论文]. 大连: 大连理工大学, 2024.