

基于数字孪生技术的石油储罐泄漏预警系统构建与应用研究

杨文兵（山东惟普新能源有限公司，山东 东营 257300）

摘要：石油行业而言，若石油储罐泄漏，会引发严重后果，传统监测手段存在一定缺陷。为化解这一难题，开展基于数字孪生技术的石油储罐泄漏预警系统的探究，使光纤光栅温度传感器、多种软件建模及人工智能算法实现融合，构建起系统架构，实施人员培训、预警响应等各项工作。系统做到了高精度的预警，增进安全管理效率，减少事故产生的损失规模，为石油储罐安全监测拿出新方案，促进石油行业数字化安全管理技术进步。

关键词：数字孪生技术；石油储罐；泄漏预警；温度场；智能诊断

中图分类号：TE88 文献标识码：A 文章编号：1674-5167（2025）018-0157-03

Research on the Construction and Application of a Digital Twin-Based Leakage Warning System for Petroleum Storage Tanks

Yang Wenbing (Shandong Weipu New Energy Co., Ltd., Dongying Shandong 257300, China)

Abstract: In the petroleum industry, leakage from storage tanks can lead to severe consequences, and traditional monitoring methods have inherent limitations. To address this challenge, this study investigates a leakage warning system for petroleum storage tanks based on digital twin technology. By integrating fiber Bragg grating (FBG) temperature sensors, multi-software modeling, and artificial intelligence (AI) algorithms, a comprehensive system architecture is constructed. Key implementation steps include personnel training, warning response protocols, and system validation. The proposed system achieves high-precision leakage detection, enhances safety management efficiency, and significantly reduces potential losses from accidents. It provides a novel solution for tank safety monitoring and advances digital safety management technologies in the petroleum industry.

Keywords: Digital Twin Technology; Petroleum Storage Tanks; Leakage Warning; Temperature Field; Intelligent Diagnosis

伴随全球能源需求逐步攀升，石油作为核心能源，其储存安全举足轻重，要是石油储罐出现泄漏，将造成环境被污染和巨大经济亏损。数字化转型的浪潮为石油储罐安全监测赋予新契机，数字孪生技术发展势头迅猛，鉴于现有的背景，探索该技术于石油储罐泄漏预警领域的应用价值极大。它不仅有潜力突破传统监测局限，还可引领石油行业安全管理模式革新，为能源产业的可持续发展提供坚强后盾，值得深入探究。

1 数字孪生技术概述与应用背景

数字孪生技术是一种多源信息融合的数字化技术，旨在通过对物理实体进行多维度、多学科、多物理量和多时空的物理仿真，实现对其属性、行为和规则的模拟与映射。该技术的发展历程丰富且具有标志性意义，2003年，Michael Grieves教授首次提出数字孪生概念，将其定义为“与物理产品等价的虚拟数字化表达”，此后这一概念不断演变和完善。2012年，NASA首次将数字孪生概念应用于航天领域，通过构建航天器的数字孪生模型，对航天器在太空复杂环境下的运行状态进行实时监测和预测，有效提升了航天

器的可靠性和安全性。

在工业4.0和智能制造快速发展的大背景下，数字孪生技术在众多领域得到了广泛应用。在制造业，西门子公司利用数字孪生技术建立了信息空间上的制造流程模型，实现了对物理实体全生命周期的数字化管理^[1]。通过在设计阶段构建数字孪生模型，能够提前模拟产品的制造过程和性能表现，及时发现并解决潜在问题，从而缩短产品研发周期，降低生产成本。在电力行业，数字孪生技术被应用于电网管理。通过创建电网设备的数字孪生体，实时监测设备的运行状态，实现对电网故障的精准预测和快速诊断，保障了电力供应的稳定性和可靠性。

2 基于数字孪生的泄漏预警系统关键技术创新

2.1 数据采集与传输技术创新

为实现精准监测，选用分布式光纤光栅温度传感器进行数据采集，北京大成永盛公司定制的北诺毛细无缝钢管光纤光栅温度传感器，能精确测量微小温度变化，且无需通电，可有效避免因通电带来的安全隐患。其工作原理基于光纤光栅的反射波长随温度变

化的特性,通过测量反射波长的变化来获取温度信息。在数据传输方面,采用了光纤传输与无线传输相结合的方式,光纤传输部分,利用传输光缆将传感器采集到的数据传输至光信号解调仪,如北京大成永盛科技公司的 FT-16 系列 -B/S 系统中的解调仪,能高效准确地解析光信号。为满足远程监测需求,借助 PyMySQL 将解调后的温度数据上传至云端数据库,实现数据的远程实时获取,确保在任何地点都能及时掌握石油储罐的温度数据,为后续的泄漏预警分析提供可靠的数据支持。

2.2 数字孪生模型构建技术创新

利用 Revit 和 3ds MAX 软件建立石油储罐的几何模型,精确还原储罐的结构形状、尺寸等信息,将几何模型导入 Geomagic Design X 软件,打散为点云模型,并导出 ply 文件。在 Python 环境中,借助 Open3D 和 NumPy 等模块对 ply 格式的点云数据进行处理,通过下采样、分割、精简和去噪等操作,得到适用于数值计算的稀疏化点云模型。使用 Python 中的 3D Delaunay 算法生成四面体网格,构建数字模型,结合石油储罐传热和应力分析的基本理论,编写温度和应力稳态数值计算程序。

2.3 泄漏预警分析技术创新

基于数字孪生模型提供的全域温度场和应力场数据,采用先进的算法进行泄漏预警分析。利用机器学习算法中的支持向量机分类算法(SVM-SVC)对温度云图进行分析,实现泄漏判定功能。具体来说,通过将正常工作状态和不同泄漏工况下的云图进行灰度直方图统计,提取云图的灰度特征作为样本进行训练,模型精度可达 99.1%,能够准确判断石油储罐是否发生泄漏。

在泄漏位置计算方面,采用线性回归算法,通过对泄漏初期区域的识别,将该区域的中心坐标作为特征进行训练,计算得到的泄漏位置误差在云图坐标高度上为 0.7pixel,反算到石油储罐圆周高度误差为 0.283m,能够为泄漏应急处理提供较为准确的位置信息。结合卷积神经网络(CNN)、长短期记忆神经网络(LSTM)和自注意力机制(Self-Attention Mechanism)等深度学习算法,基于 Seq2Seq 架构搭建泄漏范围预测模型,有效预测泄漏区域的时空变化,为提前采取防范措施提供依据。

3 石油储罐泄漏预警系统的应用实践

3.1 系统架构搭建

数据采集层选用高精度的光纤光栅温度传感器,如型号为 FBG-T500 的传感器,它能精准捕捉石油储罐各部位温度变化,通过传输光缆将数据传至解调仪,

例如使用的 SM130-700 解调仪可将光信号转换为数字信号。网络传输层借助 5G 网络和工业以太网,保障数据高速稳定传输。在模型构建方面,运用 Revit 建立精确的石油储罐三维几何模型,再通过 3ds MAX 进行细节优化,利用 Geomagic Design X 生成点云模型

3.2 人员培训与意识提升

人员对基于数字孪生技术的石油储罐泄漏预警系统的熟练掌握和高度重视,是系统发挥作用的重要保障,培训围绕系统核心技术展开,涵盖光纤光栅温度传感器的工作原理,像其如何依据光信号变化感知温度;以及数字孪生模型构建流程,包括从几何模型搭建到数值计算的步骤等^[2]。可邀请行业资深专家,以某石油企业因员工操作失误导致预警延误进而引发小型泄漏事故的真实案例为切入点,深入讲解不当操作的危害。

在培训方式上,采用线上线下结合的模式。线上利用专业学习平台,如“智学网”,提供丰富的课程资源,方便人员随时学习;线下开展实操培训,在模拟的石油储罐场景中,让人员实际操作传感器安装、数据采集设备调试及系统软件使用等,通过定期考核,督促人员提升技能水平,强化对系统重要性的认知,使人员深刻理解自身工作在预防泄漏事故中的关键作用。

3.3 预警响应与应急处理

当石油储罐泄漏预警系统发出警报,快速且科学的响应与处理能有效控制事故发展,系统一旦监测到异常,会立即通过声光报警器发出高分贝警报声和闪烁灯光,同时向相关人员的手机发送包含泄漏位置、初步判断泄漏程度等信息的短信通知,例如使用华为 OceanConnect 物联网平台实现信息的快速推送。依据预先制定的详细应急处理方案,相关人员迅速行动,操作人员需在 5 分钟内通过系统操作界面远程关闭距离泄漏点最近的截断阀门,如型号为 Z41H-16C 的闸阀,阻止石油继续泄漏。启动消防喷淋系统,如选用的 ZSFG 型湿式报警阀组控制的喷淋系统,对泄漏区域进行降温,抑制油气挥发,利用无人机搭载热成像设备对泄漏现场进行实时监测,将图像数据实时回传至指挥中心,为后续决策提供依据,按照应急预案,组织专业维修团队携带专业工具赶赴现场,依据系统提供的数据进行精准修复,最大程度降低泄漏事故造成的损失。

4 数字孪生技术应用的优势与成效

4.1 预警准确性显著提升

基于数字孪生技术构建的石油储罐泄漏预警系统采用高精度的监测设备,如北京大成永盛公司定

制的北诺毛细无缝钢管光纤光栅温度传感器,其测温精度可达 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$,能精准捕捉石油储罐温度的微小变化。通过分布式布置,在大型石油储罐上每隔 3m-4m 安装一组传感器,全面覆盖储罐各个关键部位,获取详细的温度数据,系统运用先进的算法模型对采集到的数据进行深度分析。利用卷积神经网络(CNN)和长短期记忆神经网络(LSTM)相结合的算法,对温度云图进行特征提取和趋势预测。该算法经过大量实际工况数据的训练,能准确识别出泄漏初期的细微温度变化特征。在实际应用中,对多次模拟泄漏场景的测试结果表明,系统能够在泄漏发生后的 1min 内发出预警,且定位误差不超过 0.283m,有效避免了误报和漏报情况的发生,为及时采取应急措施提供了可靠依据。

4.2 安全管理效率大幅提高

借助数字孪生技术的石油储罐泄漏预警系统通过实时数据采集和传输,如利用北京大成永盛科技公司的 FT-16 系列-B/S 系统,实现了对石油储罐运行状态的 24h 不间断监测。一旦监测到异常情况,系统自动触发预警机制,以声光报警、短信通知等多种方式及时告知相关人员。在数据处理方面,系统采用高效的数据处理软件,如 MATLAB 数据分析软件,能够快速对大量的监测数据进行处理,生成直观的可视化报告。这些报告清晰展示了储罐的温度分布、应力变化等关键信息,使管理人员能够迅速了解储罐的运行状况,系统还具备历史数据查询和对比功能,方便管理人员对不同时期的数据进行分析,及时发现潜在的安全隐患。

4.3 事故损失有效降低

当系统监测到泄漏预警后,能迅速提供准确的泄漏位置和泄漏量信息,通过线性回归算法计算得出的泄漏位置误差在云图坐标高度上为 0.7pixel,反算到实际储罐圆周高度误差为 0.283m,为应急处理提供了精准的决策依据。根据这些信息,可立即启动针对性的应急处理方案。如迅速关闭相关阀门,如型号为 Z41H-16C 的闸阀,有效阻止石油进一步泄漏,启动消防和防泄漏应急装置,如使用的泡沫灭火系统能迅速覆盖泄漏区域,抑制油气挥发,降低火灾风险;围堰设施可防止泄漏的石油扩散,减少对周边环境的污染。

5 系统优化与持续发展策略

5.1 技术融合与创新升级

将先进的传感器技术与数字孪生模型深度融合,选用如美国 FISO 公司生产的高精度光纤光栅温度传感器 F-P550,其具备卓越的温度分辨率,能精确感知

0.1 $^{\circ}\text{C}$ 的温度变化,在石油储罐的罐壁、罐顶等关键部位密集布置,实现对储罐温度场的全方位实时监测,引入云计算技术,采用阿里云的弹性计算服务 ECS,为系统提供强大的计算能力,确保海量监测数据能够快速处理和分析,结合大数据分析算法,如 Apache Hadoop 大数据处理平台,对历史数据和实时数据进行深度挖掘,发现潜在的泄漏风险模式。

5.2 系统拓展与多场景应用

基于现有技术拓展系统功能,让它能适配常规立式圆柱形石油储罐,也可用于球形、卧式等不同储罐类型。依据不同储罐结构特点,对数字孪生模型的几何、物理参数设置予以优化。场景应用上,系统从陆地石油储罐监测,拓展到海上石油平台储罐监测。某海上石油平台部署一套定制泄漏预警系统,借助卫星通信技术远程传输数据,解决海上通信难题。用这系统实时监测平台多个储罐,多次成功避开海水腐蚀引发的潜在泄漏事故。

5.3 人才培养与团队建设

高校和企业携手开展专业课程,像清华大学跟中石油合作开了“数字孪生与石油工程”课程。课程内容包含数字孪生技术原理、石油储罐监测技术,还有数据分析算法等多方面知识。学生经理论学习、实践操作,掌握系统开发、维护技能。企业内部常组织培训,会请行业专家来讲课,像参与过美国战略石油储备项目监测系统建设的专家,来分享先进技术经验、实际案例。还鼓励团队成员参加技术研讨会,像每年的全球数字孪生技术大会,以此拓宽技术视野。企业还组建跨学科团队,把计算机科学、石油工程、自动化控制等多领域专业人才聚集起来。

6 结语

依托数字孪生技术搭建的石油储罐泄漏预警系统,组合多种技术达成创新突破。在数据采集、模型构建、预警分析等方面的成果十分显著,切实提高预警精准度、安全管理效能,降低事故所致的损失规模,看重技术融合升级、系统拓展应用以及人才培养团队组建。该系统为石油储罐的安全运行筑牢可靠保障,加快石油行业数字化监测进程步伐,助力行业达成安全生产及可持续发展。

参考文献:

- [1] 魏岩磊. 石油储罐倒装法施工质量管理挑战与对策[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2025, 45(04): 31-33.
- [2] 孟凡龙. 浅析石油储罐维修作业中的安全管理措施与优化[J]. 中国设备工程, 2025, (S1): 331-332.
- [3] 潘李冬, 许皆乐, 古玉祺, 等. 基于物元可拓理论的石油储罐风险评价[J]. 化工机械, 2024, 51(06): 938-943.