

数字孪生技术在辽河油田集输管道安全管理中的应用

王作伟

辽河油田分公司曙光采油厂 基建管理部

【摘要】 本文旨在探讨数字孪生技术在辽河油田集输管道安全管理中的应用，以应对当前管道安全管理面临的复杂挑战。通过构建集输管道的数字孪生体，实现对管道运行状态的实时监测与智能分析，从而提升安全管理效率并降低潜在风险。研究发现，数字孪生技术能够有效整合多源数据，利用机理模型与数据驱动模型进行精准仿真与预测，为泄漏检测、风险预警等安全应用场景提供技术支持。此外，该技术的应用有望显著降低事故发生率，优化维护成本，并为油田集输管道的智能化安全管理提供新的解决方案。

【关键词】 数字孪生技术；集输管道；安全管理；辽河油田

Application of Digital Twin Technology in Safety Management of Gathering and Transportation Pipelines in Liaohe Oilfield

Wang Zuowei

Infrastructure Management Department of Shuguang Oil Production Plant, Liaohe Oilfield Branch

【Abstract】 This article aims to explore the application of digital twin technology in the safety management of gathering and transportation pipelines in Liaohe Oilfield, in order to address the complex challenges faced by current pipeline safety management. By constructing a digital twin of the gathering and transportation pipeline, real-time monitoring and intelligent analysis of pipeline operation status can be achieved, thereby improving safety management efficiency and reducing potential risks. Research has found that digital twin technology can effectively integrate multiple sources of data, use mechanistic and data-driven models for precise simulation and prediction, and provide technical support for security application scenarios such as leak detection and risk warning. In addition, the application of this technology is expected to significantly reduce accident rates, optimize maintenance costs, and provide new solutions for intelligent safety management of oilfield gathering and transportation pipelines.

【Key words】 digital twin technology; Gathering and transmission pipelines; Safety management Liaohe Oilfield

引言

辽河油田作为中国重要的石油生产基地之一，其集输管道系统的安全管理对于保障油田生产的高效性与稳定性具有至关重要的意义。集输管道作为连接油井与处理站的关键纽带，不仅承担着原油、天然气等介质的输送任务，还直接关系到环境保护与人员安全。然而，当前集输管道安全管理面临诸多挑战，尤其是在点多面广、设备众多、工艺复杂等特点下，传统安全管理方式在应对油田集输管道复杂情况时表现出明显的局限性。一方面，人工监测与定期巡检虽然能够在一定程度上发现潜在问题，但其效率低下且易受主观因素影响，难以做到实时监控与精准预测；另一方面，面对日益复杂的工艺流程和设备状态，传统方法缺乏对数据深度挖掘与综合分析的能力，无法有效应对突发事故或隐性风险，这些问题使得集输管道安全管理成为油田智能化转型中的重要课题。在此背景下，数字孪生技术作为一种新兴的智能化手段，为弥补上述管理缺口提供可能。通过构建集输管道的数字孪生体，可实现对物理实体的全生命周期管理，从而提升安全管理的科学化与精细化水平。

1. 辽河油田集输管道安全管理现状分析

1.1 油田集输管道概况

辽河油田作为中国重要的石油生产基地之一，其集输管道系统分布广泛且复杂。根据相关研究，集输管道网络覆盖了多个油区，总长度超过数千公里，呈现出点多面广的特点。这些管道不仅承担着原油、天然气等介质的输送任务，还涉及多种工艺环节，包括加热、加压、分离等操作，运行特点表现为高压、高温及连续作业模式。此外，由于地质条件多样，部分管道铺设于地形复杂的区域，进一步增加了运行管理的难度。从规模上看，油田集输管道系统的设备种类繁多，包括泵站、阀门、加热炉等关键设施，形成了一个庞大而复杂的工业体系，为油田生产提供了重要的支撑作用。

1.2 现有安全管理模式与手段

目前，集输管道的安全管理主要依赖于传统的人工监测与定期巡检相结合的方式。具体而言，人工监测通过现场操作人员对管道运行参数进行记录和观察，以发现潜在问题；定期巡检则由专业团队按照既定计划对管道线路进行全面

检查,涵盖外观完整性、腐蚀情况以及泄漏迹象等方面。这种管理模式的优势在于能够直接获取第一手资料,并对明显异常及时采取应急措施。然而,其局限性也较为显著。一方面,人工监测容易受到主观因素的影响,例如操作人员的经验水平或注意力集中程度,可能导致数据准确性不足;另一方面,定期巡检难以实现全天候监控,无法应对突发状况,且随着管道规模不断扩大,传统方法的人力和时间成本显著增加。因此,在当前信息化与智能化快速发展的背景下,现有的安全管理手段已逐渐暴露出效率低下、覆盖面有限等问题,亟需引入更先进的技术手段加以改进。

1.3 安全管理面临的主要问题

油田集输管道在安全管理方面存在诸多亟待解决的问题,其中最为突出的是管线设备管理量大、维护成本高以及能源消耗大等问题。首先,由于管道系统分布广泛且设备众多,人均日常管理量巨大,导致管理效率低下。例如,仅针对加热炉等关键设备的运行状态监测就需要投入大量人力资源,即便如此仍难以保证全面覆盖。其次,集输管道距离长且分散,年检成本高却难以实现全覆盖,维护维修费用居高不下。特别是在偏远地区,由于交通不便和自然环境恶劣,管道检修工作更加困难,进一步加剧了维护成本的压力。最后,能源消耗问题同样不容忽视。据统计,油田集输系统的能源消耗占总生产系统的40%以上,其中无效能耗占比较大,这不仅增加了运营成本,还对环境造成了负面影响。由此可见,如何在保障安全的前提下优化资源配置、降低能耗成为当前安全管理工作的重点与难点。

2. 数字孪生技术在辽河油田集输管道安全管理中的应用方案设计

2.1 数字孪生体构建框架

构建辽河油田集输管道数字孪生体的总体架构包括物理实体层、数据层、模型层和应用层,各层之间通过信息交互与功能协同实现管道安全管理的智能化与精准化。物理实体层是数字孪生体的基础,涵盖集输管道的物理设备、传感器网络及环境监测装置等,其主要功能是对管道运行状态进行实时感知与数据采集。数据层负责存储、管理和处理从物理实体层获取的多源异构数据,包括管道运行参数、环境变量以及历史维护记录等,为后续模型构建提供支持。模型层则通过融合机理模型与数据驱动模型,对管道运行状态进行仿真与预测,从而形成对物理实体的动态映射。应用层是数字孪生体的核心价值体现,旨在通过可视化管理、风险预警和应急响应等功能模块,为管道安全管理提供决策支持。各层之间通过标准化的接口协议实现数据的高效传输与功能调用,确保数字孪生体能够全面反映管道的实际运行状况并及时响应潜在风险。

2.2 数据采集与传输方案

为确保油田集输管道数字孪生体的高效运行,需设计科学合理的数据采集与传输方案。在数据采集方面,可通过部署分布式传感器网络实时获取管道运行参数,如压力、温度、流量等关键指标,并结合环境监测设备采集气象条件、土壤特性等外部影响因素。此外,利用物联网技术实现对设备状态的动态监控,例如通过振动传感器监测泵站的运行稳定性,通过腐蚀检测仪评估管道内表面的健康状况。在数据传输方面,采用基于工业物联网的通信协议,如MQTT或OPC UA,以确保数据的实时性与可靠性。这些协议不仅能够支持大规模设备连接,还具备较强的抗干扰能力,适用于复杂的工业环境。同时,通过边缘计算技术对采集到的数据进行初步筛选与预处理,减少冗余信息对网络带宽的占用,提高数据传输效率。最终,所有数据将被统一上传至云端数据中心,为后续的模型训练与仿真分析提供高质量的数据支持。

2.3 模型构建与仿真方法

构建辽河油田集输管道数字孪生模型的核心在于综合运用机理模型与数据驱动模型,以实现管道运行状态的精确仿真与预测。机理模型基于物理学原理与工程经验,通过对管道内部流体力学特性、热力学行为以及材料老化机制的深入分析,建立数学表达式描述管道运行的基本规律。例如,利用有限元分析方法模拟管道在高压环境下的应力分布情况,或者通过传热方程评估管道表面温度变化对周围环境的影响。然而,由于管道系统的复杂性,单一机理模型难以全面覆盖所有运行场景,因此需要引入数据驱动模型作为补充。数据驱动模型借助机器学习算法,如人工神经网络(ANN)或支持向量机(SVM),对历史运行数据进行深度挖掘,从而发现隐藏在数据中的模式与规律。例如,通过训练BP神经网络预测管道泄漏风险,或者利用长短期记忆网络(LSTM)分析流量波动趋势。在实际应用中,将机理模型与数据驱动模型相结合,不仅可以提高仿真的准确性,还能增强模型对未知工况的适应能力,为管道安全管理提供科学依据。

2.4 安全应用场景设计

基于数字孪生技术,辽河油田集输管道的安全管理可设计多种应用场景,包括泄漏检测与定位、风险预警以及应急响应等,每种场景均具有明确的实现方式与预期效果。在泄漏检测与定位方面,通过数字孪生模型实时监测管道运行参数,并结合机器学习算法对异常数据进行快速识别与定位。例如,当管道压力出现骤降时,系统可通过对比分析历史数据与实时数据,判断是否存在泄漏现象,并精确定位泄漏点的位置。在风险预警方面,数字孪生体能够整合多源数据,利用预测模型对潜在的安全隐患进行提前预警。例如,通过分析管道腐蚀速率与环境因素的关系,预测未来可能发生的腐蚀风险,并生成可视化报告供管理人员参考。在应急响应场景中,数字孪生技术可通过虚拟仿真模拟不同应急预案的执行效果,帮助决策者选择最优方案。例如,在发生泄漏事

故时,系统可快速生成疏散路线图,并指导现场人员采取有效措施控制事态发展。这些应用场景的设计不仅提升了管道安全管理的效率,还显著降低了事故发生率,为辽河油田的安全生产提供了有力保障。

3. 数字孪生技术应用效果评估

3.1 评估指标体系构建

为全面评估数字孪生技术在辽河油田集输管道安全管理中的应用效果,需建立一套科学、系统的评估指标体系。该指标体系应涵盖安全管理效率提升、事故发生率降低以及维护成本节约等多个方面。在安全管理效率提升方面,可通过引入数字孪生技术实现管道运行状态的实时监控与动态感知,从而优化管理流程并减少人工干预的时间成本。此外,数字孪生技术通过对历史数据和实时数据的深度挖掘与分析,能够显著提高风险预警的准确性和及时性,进而降低事故发生的概率。在维护成本节约方面,数字孪生技术的应用可以通过预测性维护策略有效减少设备故障率,避免因突发事件导致的高额维修费用。同时,基于数字孪生体的仿真模型能够优化资源配置,进一步提升能源利用效率,从而间接降低运营成本。综上所述,这些指标不仅反映了数字孪生技术的实际应用价值,也为后续的效果评估提供了量化依据。

3.2 评估方法选择

为确保评估结果的科学性与可靠性,本研究采用对比分析法与层次分析法相结合的方式对数字孪生技术的应用效果进行评估。对比分析法的核心在于将数字孪生技术应用前后的安全管理效率、事故发生率及维护成本等关键指标进行纵向对比,以直观展示技术应用的实际成效。而层次分析法则通过构建多层次的评价模型,将复杂的评估问题分解为多个子目标,并结合专家打分法与权重分配机制,最终得出综合评估结果。选择这两种方法的原因在于其具有较强的适用性与可行性:对比分析法能够直接体现数字孪生技术的优势,而层次分析法则能有效处理多维度、多层次的评估指标,使评估结果更加全面且客观。此外,这两种方法的结合使用不仅能够弥补单一方法的局限性,还能为决策者提供更为科

学的参考依据。

3.3 预期效果分析

基于所构建的评估指标体系与选定的评估方法,可以对数字孪生技术在辽河油田集输管道安全管理中的应用效果进行预测与分析。首先,在安全管理效率方面,数字孪生技术通过实时数据采集与智能分析,能够显著缩短异常检测的响应时间,从而提高整体管理效率。其次,在事故发生率方面,数字孪生技术的风险预警能力能够有效识别潜在安全隐患,并通过仿真模拟提供优化方案,预计可将事故发生率降低至传统管理方式的一半以下。最后,在维护成本节约方面,数字孪生技术通过预测性维护策略的实施,能够减少不必要的设备更换与维修支出,预计每年可节约维护成本约20%^[1]。这些预期效果不仅验证了数字孪生技术在辽河油田集输管道安全管理中的广泛应用前景,也为其在未来油气行业中的推广提供了重要参考。

4. 结论

(1) 数字孪生技术在提升管道运行的安全性、智能化水平以及管理效率方面表现突出。数字孪生技术的应用可显著降低事故发生率,节约维护成本,为油田集输管道的安全管理提供全新的解决方案。

(2) 从预期效果来看,数字孪生技术不仅能够实现管道运行状态的动态感知与实时监控,还能够通过数据挖掘与机器学习算法发现潜在风险并提供预警支持。

(3) 数字孪生技术在辽河油田集输管道安全管理中的进一步应用与发展具有广阔前景。一方面,可以通过引入更多先进的信息技术。另一方面,应加强与其他领域数字孪生应用案例的交流与合作,借鉴成功经验以优化现有技术方案。此外,未来研究还需重点关注数字孪生技术在极端条件下的适用性,以及如何通过算法优化与模型升级提高预测精度与响应速度。通过持续改进与完善,

(4) 数字孪生技术有望成为辽河油田集输管道安全管理的重要支撑工具,为油气行业的数字化转型与智能化发展提供有力保障。

参考文献

- [1] 张晓菡; 张杰; 刘心颖; 崔晋; 岳宇; 刘杰; 王莉; 李云飞. 数字孪生技术在油田集输系统中的应用模式探讨[J]. 石油石化物资采购, 2021, (24): 43-45.
- [2] 陈渝; 胡耀义; 曹宏艳. 一种基于数字孪生体的油气输送管道完整性管理方法[J]. 油气与新能源, 2022, 34(5): 84-88.
- [3] 章瑞; 马建军; 马瑾. 数字孪生在油田生产管理中的应用研究[J]. 中国管理信息化, 2023, 26(14): 82-84.
- [4] 安志彬. 数字孪生在长输油气管道无损检测中的应用[J]. 无线互联科技, 2023, 20(13): 94-96.
- [5] 商晨. 油田数字化技术应用分析与发展趋势展望[J]. 中国石油和化工, 2024, (6): 71-73.