

基于数字孪生的压力钢管全生命周期健康监测与预警技术

马效波

新疆兵团勘测设计院集团股份有限公司 新疆 石河子 832000

摘要: 压力钢管作为水电站、核电站及长距离输水工程中的关键承压部件,其运行安全直接关系到重大基础设施的可靠性与人民生命财产安全。传统监测手段存在数据孤岛、响应滞后、缺乏预测能力等局限性,难以满足现代工程对高可靠性和智能化运维的需求。本文提出一种基于数字孪生(Digital Twin, DT)的压力钢管全生命周期健康监测与预警技术框架。该框架融合多源异构传感数据、物理机理模型、机器学习算法与三维可视化平台,构建高保真度的数字孪生体,实现从设计、制造、安装、运行到退役全过程的状态感知、性能评估、损伤识别与风险预警。所提方法可显著提升压力钢管结构健康状态的透明度与可预测性,为智能运维决策提供科学支撑,具有良好的工程应用前景。

关键词: 数字孪生; 压力钢管; 全生命周期; 健康监测; 智能预警

引言

压力钢管用于水利水电等领域,承担高压流体输送任务。其服役环境复杂,长期受多重作用易产生多种损伤,失效后果严重。传统结构健康监测(SHM)技术依赖传感器局部点测与定期人工巡检,存在覆盖范围有限、数据维度单一、难反映整体结构行为等问题。近年来,物联网、大数据等发展,数字孪生技术为解决挑战提供新范式,它通过构建物理实体动态镜像,实现物理与信息世界深度融合交互,有实时映射等核心能力。本文聚焦压力钢管,提出一套基于数字孪生的全生命周期健康监测与预警技术体系,旨在打破“设计-建造-运维”各阶段信息壁垒,构建数据闭环,推动运维模式从“被动响应”向“主动预防”转变。

1 数字孪生与压力钢管健康监测的契合性分析

1.1 数字孪生的核心内涵

数字孪生是一种集成多学科、多物理量、多尺度、多概率的仿真过程,利用物理模型、传感器更新、运行历史等数据,在虚拟空间中完成对物理实体的映射,从而反映其全生命周期过程。其本质并非简单的三维建模或数据可视化,而是一个持续演化的、与物理实体同步互动的智能系统。该系统由物理实体、虚拟模型、数据连接和服务功能四大核心要素构成。物理实体是现实世界中的压力钢管及其附属设施;虚拟模型则是其在数字空间中的高保真复刻,不仅包含几何外形,还嵌入材料属性、力学响应、环境交互等多维信息;数据连接保障了虚实之间的实时、双向信息流动;而服务功能则面向工程实践,提供状态监测、故障诊断、寿命预测与决策支持等价值输出。正是这种闭环反馈与动态演化机制,使数字孪生超越了传统仿真工具,成为支撑基础设施智

能化管理的新一代技术底座。

1.2 压力钢管健康监测的痛点与数字孪生的赋能

当前压力钢管健康监测面临诸多现实困境。首先,监测系统通常由不同厂商、不同原理的传感器组成,数据格式、采样频率、精度差异巨大,形成“数据孤岛”,难以有效融合以全面刻画结构状态。其次,损伤演化过程高度非线性且受多场耦合影响,如水流冲击诱发振动,振动加速疲劳裂纹扩展,同时腐蚀环境又削弱材料强度,传统单一物理模型难以准确描述此类复杂退化机制。再次,现有预警多依赖静态阈值,无法预判未来发展趋势,往往在损伤已较严重时才触发警报,错失最佳干预窗口。最后,运维决策常依赖工程师经验,缺乏基于结构剩余寿命和风险概率的量化依据,导致检修计划保守或滞后。

数字孪生技术恰好能系统性地回应上述挑战。它通过构建统一的数据湖,对多源异构数据进行标准化治理与时空对齐,为后续分析奠定高质量数据基础。在模型层面,数字孪生可集成流-固-热-化多物理场耦合仿真,更真实还原压力钢管在复杂工况下的响应行为。同时,借助人工智能算法,特别是时序预测模型与异常检测网络,数字孪生能够从历史数据中学习损伤演化规律,实现对未来状态的前瞻性推演^[1]。更重要的是,通过三维可视化交互平台,管理人员可直观理解结构健康状况,快速定位风险区域,并基于孪生体模拟不同维修方案的效果,从而做出科学、高效的运维决策。因此,数字孪生不仅是技术工具的升级,更是压力钢管健康管理理念的根本性变革。

2 基于数字孪生的压力钢管全生命周期健康监测框架

2.1 物理层(Physical Layer)

物理层核心在于构建一个覆盖全面、响应灵敏、稳

定可靠的传感网络。针对压力钢管的结构特点与典型失效模式,需在关键部位部署多种类型传感器。例如,在高应力区、焊缝、支墩附近布设光纤光栅(FBG)应变与温度传感器,因其抗电磁干扰、可分布式测量,特别适合长距离管道监测;在易腐蚀段安装电化学噪声探头或超声波测厚仪,用于实时跟踪壁厚损失;同时配置水压计、流量计等环境参数传感器,以获取外部激励信息。此外,结合视频监控与定期无人机巡检,可对表面裂纹、涂层剥落等宏观缺陷进行补充识别。所有传感器通过工业物联网网关汇聚至边缘计算节点,在本地完成数据预处理、特征提取与初步异常筛查,有效降低云端传输负担并提升响应速度。

2.2 数据层(Data Layer)

面对来自物理层的海量、高频、异构数据流,系统需采用先进的流处理引擎(如Apache Kafka与Flink)实现低延迟、高吞吐的数据接入与分发。与此同时,一个结构化的时序数据库与非结构化文档库共同构成历史数据中心,用于存储设计图纸、施工日志、历次检测报告、维修记录等全生命周期档案。为确保数据质量,必须实施严格的数据治理流程,包括信号去噪、缺失值插补、单位统一、异常值剔除等操作^[2]。尤为关键的是实现数据的时空对齐——将每一组传感器读数精确关联到压力钢管的特定桩号位置与时间戳,使得后续的模型映射与状态评估具有明确的物理意义。这一层如同数字孪生的“神经系统”,其健壮性直接决定了上层应用的可靠性。

2.3 模型层(Model Layer)

模型层是数字孪生的“大脑”,负责构建能够准确反映物理实体行为的虚拟镜像。该层采用多层次建模范式:首先,基于BIM技术或激光扫描点云重建高精度三维几何模型,作为所有信息的空间载体;其次,建立基于有限元法的物理机理模型,考虑流固耦合作用、材料非线性、接触边界等复杂因素,用于模拟在内水压力、地震、温度变化等载荷下的结构响应;再次,引入Paris公式、NACE腐蚀速率模型等经验或半经验退化模型,刻画疲劳裂纹扩展与均匀/局部腐蚀的演化过程;在此基础上,融合LSTM、Transformer等深度学习模型,利用历史监测数据训练数据驱动的预测器,捕捉物理模型难以涵盖的复杂非线性关系。最终,通过混合建模策略,将物理模型的输出作为特征输入至AI模型,或利用AI结果反向修正物理参数,形成“物理引导、数据校正”的协同机制,显著提升孪生体的整体保真度与适应性。

2.4 应用层(Application Layer)

应用层是数字孪生价值的最终体现,面向工程用户

交付具体功能服务。其核心在于将底层模型与数据转化为可操作的洞察。系统首先实现物理状态到虚拟模型的实时映射,将传感器数据以颜色梯度、矢量箭头等形式叠加于三维模型上,直观展示应力分布、变形趋势等关键信息。在此基础上,通过定义综合健康指数(CHI),融合应力安全裕度、变形限值、腐蚀程度、疲劳损伤等多个维度,对整体健康状况进行量化评估。当指标偏离正常范围时,系统启动多级预警机制:黄色预警提示关注潜在风险,橙色预警建议安排专项检测,红色预警则触发紧急停机预案。同时,结合故障树分析(FTA)与模式识别算法,系统可辅助诊断损伤成因与位置。更为重要的是,基于更新后的孪生体状态,系统可模拟未来不同工况下的结构响应,预测剩余使用寿命,并据此生成最优检修计划与资源调配建议,真正实现预测性维护。

2.5 交互层(Interaction Layer)

交互层是人机协同的桥梁,旨在提升用户体验与决策效率。通过开发基于WebGL的三维可视化平台,用户可在浏览器中自由漫游、缩放、剖切压力钢管模型,查看任意位置的历史与实时数据曲线。平台支持多终端访问,管理人员可通过移动设备接收预警推送,并在线填写处置反馈,形成闭环管理。对于复杂故障,系统支持专家远程接入,利用增强现实(AR)技术将虚拟标注叠加于现场实景,指导一线人员精准定位问题。此外,平台还提供数据回溯、对比分析、报表自动生成等功能,满足日常监控、应急指挥与绩效考核等多样化需求。良好的交互设计不仅降低了技术使用门槛,更促进了跨部门、跨地域的高效协作。

3 关键技术实现

3.1 多源数据融合与边缘-云协同架构

为应对压力钢管监测场景下数据量大、实时性高、带宽受限的挑战,系统采用“边缘-云”协同的分布式架构。边缘计算节点部署于现场,负责对高频原始信号(如振动、声发射)进行实时滤波、降采样与特征提取,仅将关键事件(如突变点、高能事件)及低频稳态数据上传至云端。云端则专注于大规模数据存储、复杂模型训练与全局优化调度^[3]。在数据融合方面,摒弃简单的加权平均,转而采用Dempster-Shafer证据理论或深度神经网络融合机制,有效处理传感器间的冗余与冲突,提升状态识别的鲁棒性。这种架构既保障了本地响应的及时性,又充分利用了云端的强大算力,实现了性能与成本的最优平衡。

3.2 高保真数字孪生体构建

首先,利用无人机倾斜摄影与地面三维激光扫描获

取高密度点云数据,经配准与去噪后生成厘米级精度的BIM模型。随后,结合设计资料与现场材质复验结果,标定钢材的弹性模量、泊松比、屈服强度等关键参数。在仿真设置中,内水压力时程由电站调度系统提供,地震动输入则依据场地地震安全性评价报告确定。初始模型运行后,将其输出的应变、位移等结果与试运行期实测数据进行对比,若存在系统性偏差,则通过参数反演或代理模型优化方法,自动调整材料阻尼、边界约束刚度等不确定参数,直至仿真与实测高度吻合。这一“建模-验证-修正”的闭环流程,确保了孪生体在服役初期即具备高保真度,为后续健康评估奠定坚实基础。

3.3 健康状态评估与损伤识别

健康状态评估的核心在于建立科学、可量化的评价体系。本文提出综合健康指数(CHI)作为统一衡量标准,其值域为0至1,越接近1表示结构越健康。CHI由应力安全系数、变形控制系数、腐蚀剩余厚度比、疲劳损伤累积度四个子项加权合成,权重可通过层次分析法(AHP)或熵权法根据工程经验或数据特征动态确定。当CHI低于预设阈值(如0.8)时,系统判定结构进入亚健康状态^[4]。对于具体损伤识别,尤其关注裂纹这类隐蔽性高、危害大的缺陷。系统采用多源信息融合判据:一方面监测声发射信号的能量、事件数与定位集中度,另一方面观察对应区域应变是否出现不可恢复的突增。只有当两类信号在时空上高度一致时,才确认裂纹萌生,有效避免单一传感器误报,提高了诊断的准确性与可信度。

3.4 基于数字孪生的预测性预警

预测性预警是数字孪生区别于传统监测系统的标志性能力。其实现路径为:首先,利用最新一轮监测数据对孪生体的当前状态进行校准,特别是更新材料退化参数(如裂纹长度、腐蚀深度);其次,输入未来一段时间的外部激励场景,如水库调度计划、气象预报、地震危

险性曲线等;接着,在考虑材料参数、载荷幅值等不确定性因素的前提下,运行数千次蒙特卡洛仿真,推演结构在未来不同时间点的响应与损伤状态;最终,统计分析得到未来6个月、1年、3年内发生屈曲失稳或泄漏失效的概率。若该风险概率超过预设的安全阈值(例如5%),系统即自动发布高级别预警,并在可视化平台上高亮风险区域,同时推荐相应的应急措施,如限压运行、加强巡检或立即停机检修。这种基于概率的风险量化方法,为管理者提供了清晰、量化的决策依据。

4 结语

本文系统阐述了基于数字孪生的压力钢管全生命周期健康监测与预警技术。通过构建“感知-建模-评估-预测-决策”一体化框架,实现了对压力钢管结构状态的透明化、智能化管理。该技术不仅有效整合了设计、施工、运维各阶段的数据资产,打破了信息孤岛,更通过融合物理机理与数据驱动方法,显著提升了健康评估的准确性与寿命预测的前瞻性。多级预警机制与沉浸式可视化交互平台的引入,进一步增强了系统的工程实用性与用户友好性。本研究的主要贡献在于提出了一个完整的技术体系。随着相关技术的持续迭代与生态的不断完善,基于数字孪生的基础设施智能运维新时代正在到来。

参考文献

- [1]王涛,叶志宾,孙凯,等.水利工程压力钢管生产车间数字孪生技术及其应用[J].科技通报,2025,41(01):67-73.
- [2]马相,马国强,王大东.压力钢管的应力与腐蚀监测系统设计与实现[J].科学技术创新,2024,(06):43-46.
- [3]梁湘津.引水式电站压力钢管爆裂诊断与修复浅析[J].能源工程,2025,45(01):96-103.
- [4]张宇,关卫国.水电站压力钢管斜管段安全检测技术[J].大坝与安全,2024,(06):21-23.