

数字孪生技术在工程机械运维中的应用研究： 以液压系统故障预测为例

方泽华

广东省机械研究所有限公司，广东 广州 510000

DOI:10.61369/ME.2025040004

摘 要： 阐述数字孪生技术核心要素，介绍其在环保工程机械领域应用及优势，包括污水处理工程中对设备运维的改善。还涉及液压系统关键部件特性、故障模式，以及相关技术如数据融合算法、特征提取算法等，强调跨专业协同、维护规程重构、多目标优化算法及成本分析等在液压系统改造中的重要性，同时提及风险管理体系升级和未来结合 BIM 技术的展望。

关 键 词： 数字孪生；液压系统；工程机械运维

Research on the Application of Digital Twin Technology in Construction Machinery Operation and Maintenance: An Example of Failure Prediction of Hydraulic System

Fang Zehua

Guangdong Machinery Research Institute Co., LTD., Guangzhou, Guangdong 510000

Abstract： This paper outlines the core elements of digital twin technology and its applications and advantages in the field of environmental protection engineering machinery, particularly in improving equipment operation and maintenance in wastewater treatment projects. It also covers the characteristics and failure modes of key components in hydraulic systems, as well as related technologies such as data fusion algorithms and feature extraction algorithms. The paper emphasizes the importance of cross-disciplinary collaboration, the restructuring of maintenance procedures, multi-objective optimization algorithms, and cost analysis in the transformation of hydraulic systems. Additionally, it discusses the upgrade of risk management systems and the prospects for integrating BIM technology in the future.

Keywords： digital twin; hydraulic system; construction machinery operation and maintenance

引言

随着科技的不断发展，数字孪生技术在各领域的应用日益受到关注。ISO 23247 标准和 EN 12198 标准分别为数字孪生在机电系统及液压系统相关应用提供了规范和指导，前者主要规范机电系统中的数字孪生实现，后者则针对液压系统提出了具体指导原则。在环保工程机械领域，尤其是污水处理工程中，传统运维模式存在诸多不足，而数字孪生技术具有巨大潜在价值。它可通过多物理场建模、实时数据交互及动态映射机制等核心要素，在能效管理、异常检测等方面发挥重要作用。同时，针对污水处理机械特有工况，需构建合适的传感网络，并利用多种算法实现数据融合、故障预测等功能，以提升工程机械液压系统运维的效率和可靠性。

一、数字孪生技术基础与工程应用现状

（一）数字孪生技术理论框架

数字孪生技术包含多物理场建模、实时数据交互及动态映射机制等核心要素。多物理场建模是基础，通过对物理实体的多物理特性进行精确建模，构建虚拟模型。实时数据交互确保虚拟模型与物理实体的数据实时同步，使虚拟模型能准确反映物理实体的状态。动态映射机制则建立起虚拟模型与物理实体之间的动态

对应关系，实现两者的协同演化。数字孪生技术可在机电系统全生命周期管理中进行监控、预警，以 ISO 23247 标准为参考有助于提高其在设计、制造、运维等阶段的适用性，以实现了对机电系统更高效、精准的管理和优化^[1]。

（二）环保工程机械应用现状

在环保工程机械领域，以污水处理工程中的泵站、搅拌设备等为例，传统运维模式存在诸多不足。在能效管理方面，难以精准把控设备的能耗情况，无法实现高效节能。对于异常检测，往

往依赖人工经验和定期检查，及时性和准确性欠佳^[2]。而数字孪生技术具有巨大潜在价值。它可通过构建设备的虚拟模型，实时映射设备的运行状态，从而实现对能效的精确分析和优化。在异常检测上，能基于实时数据和虚拟模型的对比，快速、准确地发现异常情况，为设备的稳定运行和节能降耗提供有力支持。

二、污水处理机械液压系统故障机理分析

（一）液压系统关键组件工作特性

污水处理机械液压系统中，液压泵站和阀门执行机构等核心部件的工作特性对系统整体运行至关重要。液压泵站作为动力源，其输出的压力、流量等参数需满足系统要求。通过对其运行参数阈值的解析，可更好地了解其工作状态。阀门执行机构则负责控制液压系统中流体的流向和流量，其动作的准确性和及时性直接影响污水处理过程，如液压泵站的输出压力（通常需维持在10–20MPa）和流量（如20–50L/min）直接影响系统动力性能，若压力波动超过 $\pm 5\%$ 或流量下降15%可能预示泵体磨损或密封失效。阀门执行机构（如蝶阀、球阀）的响应时间（要求 $\leq 0.5\text{s}$ ）和位置精度（误差需 $< 2\%$ ）若出现偏差，会导致污泥回流比例失调或曝气量控制失准。参考EN 12198标准，构建包含压力脉动系数（ $> 10\%$ 预示气蚀）、流量突变率（30s内变化 $> 20\%$ 指示泄漏）和温升梯度（ $> 5^\circ\text{C}/\text{h}$ 暗示冷却失效）的多维指标体系，可有效识别如柱塞泵配流盘磨损（表现为压力脉动增大）、液压缸内泄（导致流量异常）等典型故障，为后续的故障诊断和预测提供有力依据^[3]。

（二）典型故障模式与失效影响

污水处理场景中存在多种液压系统典型故障模式。密封失效会导致液压油泄漏，一方面降低系统压力，影响污水处理设备的正常运行，如污水输送泵无法达到额定功率，降低污水处理效率；另一方面，泄漏的液压油可能污染环境，影响环境合规性。油液污染会使液压元件磨损加剧，堵塞油路，造成设备运行不稳定，增加设备停机风险，同时也可能影响污水处理的质量和效率。阀门卡滞会阻碍流体正常流动，使污水处理流程中断，导致设备停机，严重影响污水处理的连续性和效率，还可能因污水积压等问题引发环境风险^[4]。

三、数字孪生驱动故障预测技术实现路径

（一）多维数据融合采集体系构建

1. 物理实体传感网络部署

针对污水处理机械特有工况，需构建合适的物理实体传感网络。考虑到液压系统在运行过程中可能产生油雾和可燃性气体，存在潜在的爆炸风险，因此应评估是否需要采用符合ATEX指令的防爆型传感器。若经评估确认环保工程液压系统存在类似风险，则应设计满足ATEX指令的防爆型传感器布局方案，以确保传感器在特殊环境下的安全与正常运行^[5]。同时，集成振动、压力、油质在线监测模块，以便全面获取相关数据。通过这些措

施，构建起符合该工况的数据采集规范，为后续多维数据融合以及数字孪生驱动的故障预测提供准确、全面的数据基础。

2. 虚拟模型参数修正机制

基于卡尔曼滤波的数据融合算法在数字孪生体自校正功能实现中具有重要作用。在污水处理复杂工况下，模型易出现漂移问题，该算法通过融合多维数据，有效解决此问题。它能够对采集到的不同维度数据进行合理处理，综合考虑各种因素的影响，提高数据的准确性和可靠性。通过这种方式，数字孪生体能够根据实际工况的变化及时调整自身参数，实现虚拟模型与物理实体的高度匹配，进而为故障预测提供更精准的依据，提升工程机械液压系统运维的效率和可靠性^[6]。

（二）故障预测模型开发与验证

1. 数字线索构建与特征提取

在数字线索构建与特征提取方面，针对液压系统非平稳时序数据的特点，应用小波包分解与LSTM网络组合算法。小波包分解能够将原始数据分解到不同的频带，从而更细致地分析数据的特征。通过这种分解，可以有效捕捉到液压系统在不同工况下的细微变化。例如在泵启动、停止或负载突变时压力信号出现的瞬时波动，当液压泵或电机轴承出现磨损时振动信号高频成分的明显增加，以及油液中混入微小颗粒或水分时传感器输出信号在特定频率上的扰动特征。LSTM网络则具有处理时序数据的优势，能够学习到数据中的长期依赖关系。利用该组合算法，从分解后的数据中提取液压系统劣化特征，并建立故障发生概率与这些特征参数的映射关系，为后续的故障预测模型开发与验证提供关键的数据支持^[7]。

2. 预测模型鲁棒性验证

为验证预测模型的鲁棒性，需设计涵盖不同水质条件、载荷工况的验证实验^[8]。通过模拟实际应用中可能出现的各种复杂情况，对模型进行全面测试。采用混淆矩阵和ROC曲线来评估模型在不同应用场景下的表现。混淆矩阵能够清晰地展示模型预测的正确与错误情况，包括真正例、假正例、真反例和假反例的数量，从而计算出预测准确率。ROC曲线则以图形化的方式呈现模型在不同阈值下的真阳性率和假阳性率之间的关系，通过计算曲线下面积（AUC）来衡量模型的性能。综合这些评估指标，可以全面了解模型在不同工况下的鲁棒性，为模型的进一步优化和实际应用提供依据。

四、工程实践与项目管理融合创新

（一）污水厂液压系统改造实例

1. 项目需求与技术方案

以某10万吨/日污水处理厂液压系统改造为例，首先需分析项目的技术经济指标。这涉及到对现有液压系统运行成本、维护成本、效率等方面的评估，以确定改造的必要性和预期效益^[9]。同时，要制定符合ISO 55000资产管理标准的实施路线图。该路线图应涵盖项目规划、设计、实施、运行和维护等各个阶段，明确各阶段的目标、任务和责任人。在技术方案选择上，要综合

考虑污水处理厂的实际工况、液压系统的性能要求以及成本等因素，确保改造后的液压系统能够高效、稳定运行，提高污水处理厂的整体运营效率。

2. 跨专业协同实施要点

在污水厂液压系统改造中，跨专业协同至关重要。机械、电气、自动化专业需建立有效的协同工作机制。不同专业人员要充分沟通，明确各自职责和工作范围，确保改造工作有序进行。针对数字孪生系统与现有 DCS、PLC 系统的数据接口兼容性问题，各专业需共同研究解决方案。机械专业提供液压系统的物理结构和运行参数等信息，电气专业负责处理电力相关问题以及与控制系统的连接，自动化专业则着重于数字孪生系统的构建和数据接口的调试。通过紧密合作，实现各专业知识和技能的融合，提高改造项目的整体效率和质量，确保液压系统改造后的稳定运行^[10]。

（二）预测性维护体系构建

1. 维护策略优化设计

基于 RCM 理论，以可靠性为中心对维护规程进行重构。针对液压系统关键部件，详细分析其运行特性、故障模式及影响，确定关键性能指标。通过数据监测与分析技术，结合历史数据和实时运行数据，建立剩余寿命预测模型，从而设定合理的剩余寿命预测阈值。同时，考虑到备件库存管理对维护策略的重要性，制定剩余寿命预测阈值与备件库存的联动规则。当预测部件剩余寿命接近阈值时，及时调整备件库存水平，确保在需要维修更换部件时，备件能够及时供应，减少停机时间，提高液压系统乃至整个工程机械的运维效率和可靠性。

2. 能效-可靠性平衡模型

开发多目标优化算法对于在设备可靠性与能耗指标间建立量化关系模型至关重要。通过对大量设备运行数据的收集与分析，利用先进的算法技术挖掘其中的潜在规律。以液压系统为例，考虑压力、流量、温度等多种因素对可靠性和能耗的影响。将这些因素作为变量纳入模型中，通过算法优化找到不同工况下可靠性和能耗的平衡点。这个平衡点的确定能够为企业在设备运维决策时提供科学依据，使其在保证设备正常运行的前提下，尽可能降低能耗，同时综合考虑环保绩效和运维成本，实现经济效益和环境效益的双赢。

（三）项目管理效益量化分析

1. 技术经济性评估

采用全生命周期成本分析法对数字孪生技术在工程机械运

维中的应用进行评估。通过对比改造前后的平均无故障时间（MTBF）和平均修复时间（MTTR）指标变化，可直观了解该技术对设备可靠性和维修效率的影响。若 MTBF 显著提高，MTTR 明显降低，意味着设备运行更稳定，维修成本降低。同时，量化节能降耗带来的碳减排效益，这不仅体现了对环境的积极影响，也反映了潜在的经济价值。从成本角度看，综合考虑技术投入、运维成本以及因设备性能提升和节能减排带来的收益，全面评估数字孪生技术应用的技术经济性，为项目管理决策提供有力依据。

2. 风险管理体系升级

在工程实践与项目管理融合创新中，对于风险管理体系升级至关重要。以数字孪生技术在工程机械运维中的应用为例，通过建立基于数字孪生的风险预警矩阵，可实现对风险的精准把控。该矩阵综合考虑机械故障、环境合规、工艺达标等多维度因素。对于机械故障，数字孪生模型可实时监测设备运行数据，提前预测可能出现的故障，为维修保养提供依据。在环境合规方面，能确保工程机械的运行符合相关环保标准，避免因环境问题带来的风险。工艺达标维度则保障了施工过程中各项工艺指标的实现，提高工程质量。这种多维度的风险管控机制完善了项目风险管理体系，提升了项目管理效益，实现了工程实践与项目管理的融合创新。

五、总结

本文系统研究了数字孪生技术在污水处理机械液压系统运维中的应用。通过分析 ISO 23247 和 EN 12198 标准，构建了包含多物理场建模、实时数据交互等要素的技术框架，并针对液压泵站、阀门等关键组件的工作特性及典型故障模式展开研究。研究提出了基于 ATEX 防爆标准的传感网络部署方案，开发了结合小波包分解与 LSTM 网络的故障预测模型，并设计了涵盖多工况的模型验证方法。通过某污水厂改造实例，验证了跨专业协同实施和预测性维护体系的可行性，建立了能效-可靠性平衡模型。研究表明，数字孪生技术可显著提升液压系统运维效率，降低故障率，实现节能降耗，为环保工程机械的智能化升级提供了重要参考。

参考文献

- [1] 柳宇翀. 基于数字孪生技术的液压系统故障诊断与预测方法 [D]. 大连理工大学, 2022.
- [2] 鞠佳杉. 采煤机液压系统数字孪生体构建与预测性维护方法研究 [D]. 西安科技大学, 2022.
- [3] 蒋安桐. 基于数字孪生技术的轮辐式索桁架运维安全智能预测方法 [D]. 北京工业大学, 2021.
- [4] 许志华. 数字孪生驱动的冲击桥智能运维方法研究 [D]. 河北科技大学, 2023.
- [5] 张辉辉. 面向智能运维的行车数字孪生系统数据驱动方法研究 [D]. 东华大学, 2023.
- [6] 吕伟. 基于数字孪生的液压运维系统 [J]. 机械制造, 2022, 60(6): 40-44.
- [7] 王乃洲. 数字孪生技术在广电运维管理中的应用研究 [J]. 广播电视网络, 2023, 30(5): 35-37.
- [8] 张越宏, 袁昭成, 米雨阳, 等. 数字孪生技术在电梯智能运维中的应用探索 [J]. 中国电梯, 2023, 34(1): 49-51.
- [9] 高楠, 陈钊, 刘全东, 等. 数字孪生技术在液压设计中的应用探讨 [J]. 现代计算机, 2021, 27(26): 27-31, 37.
- [10] 吴文豪, 陈国兵, 杨自春. 数字孪生技术在船舶装备运维中的应用及挑战 [J]. 舰船科学技术, 2022, 44(8): 139-144.