

数字孪生驱动系统的预测性维护与寿命评估方法

张洪亮 41022419861008469X

摘要

数字孪生技术通过构建物理实体的高精度数字化映射,为工业系统的健康管理提供了全新的技术路径。本文针对传统预防性维护模式过度维修、维修滞后以及寿命评估精度不足的问题,梳理了数字孪生驱动预测性维护与寿命评估的整体框架,分析了多源数据融合建模、实时健康状态更新、退化趋势预测三个核心环节的技术逻辑,总结了当前主流的寿命评估方法与应用优势,并对未来技术落地过程中的挑战进行了展望。研究表明,数字孪生技术能够实现物理实体与数字模型的双向闭环交互,显著提升预测性维护的决策准确性与寿命评估的精度,为工业装备全生命周期管理提供技术支撑。

关键词

数字孪生; 预测性维护; 寿命评估; 全生命周期管理

一、引言

随着工业互联网与智能制造技术的快速发展,现代工业装备的结构复杂度与自动化程度不断提升,装备运行的安全性与可靠性直接影响着生产效率与运营成本。传统的维护模式主要分为事后维修与定期预防性维护,前者在故障发生后才进行修复,容易造成非计划停机,带来巨额经济损失;后者按照固定周期开展维护,往往存在过度维修或维修不足的问题,造成维护资源的浪费。寿命评估作为装备健康管理的核心环节,传统评估方法多依赖离线试验数据或经验公式,无法反映装备实际运行过程中的工况波动与退化演化,评估结果与实际寿命存在较大偏差。

数字孪生技术的出现为解决上述问题提供了新的思路,数字孪生通过构建与物理实体完全同步的数字化镜像,能够整合多源运行数据、物理机理知识与历史退化信息,实现装备健康状态的实时感知、退化趋势的提前预测与剩余寿命的精准评估,进而支撑预测性维护决策的动态优化。近年来,数字孪生驱动的预测性维护已经成为工业工程领域的研究热点,本文围绕数字孪生驱动系统预测性维护

与寿命评估的技术框架与核心方法展开研究，梳理技术逻辑，总结现有成果，为相关技术的落地应用提供参考。

二、数字孪生驱动预测性维护与寿命评估的整体框架

数字孪生系统的核心特征是物理空间与数字空间的双向实时交互，因此数字孪生驱动的预测性维护与寿命评估框架也围绕两个空间的交互构建，整体分为五个核心层级：物理实体层、数据传输层、数字模型层、决策输出层与反馈控制层。

物理实体层是整个框架的基础，主要包括工业装备本体、各类传感器节点与执行机构，负责采集装备运行过程中的振动、温度、压力、电流等多源状态数据，同时接收决策层输出的维护指令，完成对应的维护操作。数据传输层依托工业互联网与边缘计算节点，实现数据的实时传输与预处理，通过降噪、特征提取与数据对齐，将标准化后的状态数据传输至数字模型层，同时将决策指令下发至物理实体的执行机构。

数字模型层是整个框架的核心，整合了装备的几何模型、物理机理模型、数据驱动模型与退化规则模型，能够基于实时采集的状态数据不断更新模型参数，实现物理实体健康状态的高精度数字化映射。决策输出层基于更新后的数字模型，完成装备退化趋势的预测与剩余寿命的评估，结合装备运行约束与维护成本生成最优预测性维护决策。反馈控制层将生成的维护决策作用于物理实体，同时将维护后的装备状态数据反馈回数字模型，实现模型的持续迭代优化，形成闭环迭代的运行机制。

三、核心技术环节分析

（一）多源数据融合与数字孪生建模

高精度数字孪生模型是实现精准预测性维护与寿命评估的前提，建模过程需要整合多源异构数据，包括装备设计阶段的几何参数、材料属性，制造阶段的工艺误差，运行阶段的实时状态数据以及维护阶段的维修记录等。当前主流的建模方法分为机理驱动建模、数据驱动建模与混合建模三类，机理驱动建模基于装备失效物理与力学原理构建退化模型，精度依赖对机理的认知程度，对于复杂装备难以构建精确模型；数据驱动建模直接从历史数据中学习退化规律，不需要清晰的机理认知，但需要大量的标记退化数据支撑，泛化能力较差；混合建模方法结合机理知识约束数据驱动模型，既能减少对大规模数据的依赖，又能适应复杂装备的退化非线性特征，是当前数字孪生建模的主流方向。

（二）实时健康状态更新

数字孪生区别于传统静态模型的核心优势就是能够基于实时数据实现健康状态的动态更新。在装备运行过程中，传感器实时采集的状态数据反映了当前装备的实际健康水平，通过数据特征提取后，与数字孪生模型的输出特征进行对比，基于贝叶斯更新、粒子滤波等方法不断更新模型的退化参数，修正模型的预测偏差，保证数字模型与物理实体的状态同步。

（三）退化趋势预测与剩余寿命评估

剩余寿命评估是预测性维护决策的核心依据，当前数字孪生框架下的寿命评估方法主要分为三类：第一类是基于统计退化模型的方法，通过将实时更新的参数带入威布尔分布、伽马过程等统计退化模型，外推退化至失效阈值的时间，得到剩余寿命的概率分布；第二类是基于机器学习与深度学习的方法，利用循环神经网络、长短期记忆网络等模型学习退化序列的演化规律，基于更新后的当前状态直接预测未来的退化趋势，得到剩余寿命；第三类是融合方法，结合物理机理的退化趋势约束与数据驱动的参数更新，提升评估结果的精度与鲁棒性。

四、技术优势与应用挑战

与传统预测性维护方法相比，数字孪生驱动方法的优势主要体现在三个方面：第一，实现了全生命周期的状态同步，从装备设计、制造到运行维护全阶段的数据都能够整合到数字模型中，持续优化模型精度；第二，能够适应复杂多变的实际运行工况，通过实时数据更新动态调整预测结果，避免了离线模型无法适应工况波动的问题；第三，能够通过数字空间的仿真模拟提前验证不同维护方案的效果，选择成本最低、效率最高的维护方案，提升维护决策的科学性。

当前数字孪生驱动技术落地仍然存在一些挑战：首先，高精度数字孪生模型的构建成本较高，对于中小规模企业而言，传感器部署与模型开发的成本压力较大；其次，多源异构数据的融合与同步仍然存在技术瓶颈，不同类型数据的时间对齐、空间匹配以及缺失数据处理都会影响模型的精度；最后，数字孪生模型的实时更新对计算能力提出了较高要求，边缘计算与云边协同技术的成熟度还需要进一步提升。

五、结论

数字孪生技术为工业系统的预测性维护与寿命评估提供了全新的技术框架，通过物理空间与数字空间的双向闭环交互，能够实现健康状态的实时感知、剩余

寿命的精准评估与维护决策的动态优化。当前该领域已经在风电装备、轨道交通、航空发动机等领域取得了一系列应用成果,显著降低了非计划停机风险与维护成本。未来随着传感器技术、边缘计算与人工智能技术的不断发展,数字孪生驱动的预测性维护与寿命评估技术将进一步降低落地成本,在更多工业领域得到推广应用,为智能制造的发展提供重要支撑。

参考文献

- [1] 陶飞, 刘蔚然, 张萌, 等. 数字孪生五维模型及十大领域应用[J]. 计算机集成制造系统, 2019, 25(1): 1-18.
- [2] 张霖, 罗永隆, 原晨光. 数字孪生及其应用研究综述[J]. 中国机械工程, 2021, 32(1): 14-29.
- [3] 李根, 王友渔, 雷亚国. 数字孪生驱动的装备剩余寿命预测方法研究进展[J]. 机械工程学报, 2022, 58(20): 13-28.