

# 基于数字孪生技术的机电设备运行监测与优化

张荣飞

滨州市安全评价中心有限公司, 山东 滨州 256600

**[摘要]**在现代工业领域中, 机电设备的可靠性和高效运行是保证生产流程顺畅的关键因素, 尤其是在制造、能源及交通等重要行业中。然而, 传统的设备监测方式依赖于人工检查和定期检测, 往往未能实时捕捉设备状态, 影响了设备的可靠性及维护效果。随着智能制造及自动化技术的发展, 机电设备的运行监测需求不断提高, 尤其是在故障预测及维护优化方面, 数字孪生技术成为解决这一问题的重要手段。数字孪生通过建立设备的虚拟模型, 并与物理设备相互作用, 能够精确模拟设备运行状态, 从而提高故障诊断的准确性及优化维护决策。借助这一技术, 不仅实现了设备管理的智能化, 且在减少维护成本、延长设备寿命方面表现出显著优势。此文将探讨数字孪生技术在机电设备监控及优化中的应用, 重点分析数据采集、故障诊断及智能控制等方面的优势, 为智能运维提供理论支持与实践指导。

**[关键词]**数字孪生; 机电设备; 运行监测; 故障诊断; 维护优化

DOI: 10.33142/hst.v8i3.15818

中图分类号: TP391.9

文献标识码: A

## Monitoring and Optimization of Mechanical and Electrical Equipment Operation Based on Digital Twin Technology

ZHANG Rongfei

Binzhou Safety Evaluation Center Co., Ltd., Binzhou, Shandong, 256600, China

**Abstract:** In the modern industrial field, the reliability and efficient operation of electromechanical equipment are key factors in ensuring smooth production processes, especially in important industries such as manufacturing, energy, and transportation. However, traditional device monitoring methods rely on manual inspection and regular testing, often failing to capture device status in real time, which affects the reliability and maintenance effectiveness of the equipment. With the development of intelligent manufacturing and automation technology, the demand for operation monitoring of electromechanical equipment continues to increase, especially in fault prediction and maintenance optimization. Digital twin technology has become an important means to solve this problem. Digital twins can accurately simulate the operating status of equipment by establishing a virtual model of the device and interacting with physical devices, thereby improving the accuracy of fault diagnosis and optimizing maintenance decisions. With the help of this technology, not only has intelligent equipment management been achieved, but significant advantages have also been demonstrated in reducing maintenance costs and extending equipment lifespan. This article will explore the application of digital twin technology in the monitoring and optimization of electromechanical equipment, with a focus on analyzing the advantages of data collection, fault diagnosis, and intelligent control, providing theoretical support and practical guidance for intelligent operation and maintenance.

**Keywords:** digital twin; mechanical and electrical equipment; operation monitoring; fault diagnosis; maintenance optimization

随着工业领域对设备可靠性及运行效率的要求日益提高, 传统的设备管理模式逐渐显现出局限性, 尤其是在长期运维与复杂制造过程中。数字孪生技术作为一种新兴手段, 能够通过虚拟模型与实际设备的动态互动, 为设备状态提供精准的实时反馈。与传统监测方式相比, 数字孪生不仅能够实时捕捉设备运行数据, 还能够通过大数据与人工智能算法预测故障的发生, 从而有效优化维护策略, 提高设备的运行效率与稳定性。伴随着物联网、边缘计算及人工智能技术的不断发展, 数字孪生在机电设备管理中的应用越来越广泛, 逐渐成为一个备受关注的研究热点。

### 1 机电设备数字孪生内涵

随着先进制造技术的迅猛发展, 机电产品的创新设计能力已成为衡量制造业水平的重要标志。在此背景下, 先进的设计理论、方法和技术手段愈发重要。作为现代工业

体系中的核心组成部分, 机电设备的复杂性和智能化水平不断提升, 对设计方法、状态监测及维护手段提出了更高要求。数字孪生作为一种前沿技术理念, 为机电设备的状态监测、故障诊断及维护优化提供了全新的解决方案。机电产品的创新设计离不开系统工程的支撑。系统工程作为一门跨学科的方法论, 旨在通过系统化地规划、设计、实施和管理, 提升复杂系统的整体性能。在机电产品的设计过程中, 系统工程方法强调从全局视角出发, 综合考虑产品在整个生命周期中的各项因素, 包括功能需求、性能指标、成本效益、可靠性及可维护性等。通过系统工程方法的有效应用, 可优化机电产品的设计, 提升产品的综合性能和市场竞争力。

### 2 机电设备运行监测技术

#### 2.1 数据采集与传感器技术

机电设备运行状态之精确呈现, 完全依赖于数据采集

系统的高效运转。伴随物联网及微机电系统技术的迅速发展,智能传感器在温度、压力、振动、电流、电压等多种参数测量上展现出卓越性能;所获取的高精度数据经过构建完善的传感器网络后,利用无线通信技术(例如 Wi-Fi、5G 及工业以太网)实现远程实时传输<sup>[1]</sup>。整个数据采集平台由传感器网络、传输单元及存储模块构成,确保监测信息能够全方位、无遗漏地反映设备状态。为使信息交叉验证及数据融合效果达到最佳状态,各传感器之间采用多重校验机制,从而显著提升了数据采集的准确性与系统稳定性,即使在复杂工况中亦能保持优异表现。经过不断改进,数据采集技术日趋成熟,设备状态的动态反馈得以顺畅呈现,各环节间的紧密衔接充分彰显出整体采集体系的高效性能。

## 2.2 数据处理与实时监控

设备运行过程中所生成的数据不仅数量庞大,结构亦极其复杂,传统处理手段难以满足实时监控与智能分析要求。为应对此种挑战,研究者引入数字孪生技术,对采集数据进行预处理、清洗及标准化操作。依托大数据分析、边缘计算及云端平台的协同运作,关键参数能够迅速提取后及时传送至下游模块。实时数据流框架在模式识别、统计分析以及异常检测方面展现出优异性能,一旦异常情况出现,预警机制便会迅速触发;现场边缘设备的应用显著降低了数据传输延时,中心计算负载亦得以有效缓解<sup>[2]</sup>。云端平台则为数据存储及历史数据回溯提供充裕资源,而智能监测算法通过持续学习设备特性,使监控策略逐渐趋于精细。整体数据处理体系高效运行,设备状态得以实时监控,监控效果显著提升。

## 2.3 状态评估与故障诊断

对设备健康状况进行量化评估及故障判断在精细化运维管理中占有举足轻重的地位。物理设备与高精度虚拟模型之间所产生的协同效应,在实时数据驱动下构建出一个能够精确反映健康状态的评估体系。阈值判断、机器学习分类以及深度神经网络预测技术被相继应用于故障识别中,潜在故障风险可在虚拟模型与实际运行数据比对过程中迅速捕捉。设备关键指标经过动态建模后,采用混合诊断方法进行故障分类、定位及趋势预测,其准确性得以大幅提升;同时,在线学习机制促使整个诊断体系不断自我优化,设备风险提前显现,从而为精确干预提供坚实技术支撑。

## 2.4 数据融合与智能分析

机电设备运行时所产生的数据内容丰富,涵盖传感器读数、历史记录及环境参数,其高效整合是实现智能监测面临的关键难题。利用多源数据预处理与时空对齐技术后,借助贝叶斯推理、D-S 证据理论及深度神经网络构建出能够真实反映设备状态的信息模型<sup>[3]</sup>。各项数据在预处理阶段经过统一处理,分层融合策略将原本分散的信息整合成连续而全局的运行图谱;与此同时,深度学习算法对隐含特征及内在联系的捕捉更加精准,从而显著提高了数据融合的准确性与系统稳定性。在数字孪生平台的支撑下,虚

拟空间与现实世界之间实现了高效互动,单一的数据采集模式逐渐演化为全局智能决策体系,构成了支撑设备维护与故障定位的科学信息架构。

## 3 基于数字孪生的故障诊断与维护优化

### 3.1 故障诊断模型与方法

在设备运维管理领域,故障诊断技术的精准性及实时反应直接关系到设备安全与生产效率。基于数字孪生构建的诊断模型涵盖物理建模、数据分析及混合模式。物理驱动模型依托设备运行原理及数学表达,适用于结构明晰的设备;而数据驱动模型利用大量历史数据,通过机器学习及深度神经网络实现异常模式的自动识别。混合模式将两种方法的优点综合,既确保物理模型的科学性,又借助数据挖掘技术进一步提升了诊断准确率。虚拟模型与实时数据对比分析过程中,潜在故障能够在极短时间内被捕捉;自适应算法在应对非线性工况方面的表现亦已得到充分验证,整体故障诊断体系的稳定性与准确性得到了显著提升。

### 3.2 维护策略与优化决策

设备日常管理中,维护策略及优化决策在降低成本、提升可靠性方面发挥着举足轻重的作用。传统的定期检修与事后维修模式常难以兼顾经济效益与设备稳定性,现有智能维护策略的推广标志着主动预防与精细调度模式的成功实现。经过系统性数据处理后,监控数据与预测分析结果被用于识别设备潜在风险,从而推动针对性维护方案的制定;精密的成本效益与风险评估确保了维护决策在实践中不断优化。虚拟仿真平台用于验证各项维护措施及应急预案,其成果使实际运行中的维护计划能够实现自动调整,进而使预防性维护与即时响应协同运作。智能算法及优化方法的引入令设备运行参数得以实时调控,整个系统的经济效益及稳定性显著提升,设备全生命周期管理获得科学有效的支撑。

### 3.3 预测性维护与寿命管理

设备实现高效运行并延长服役期限的重要措施在于预测性维护与寿命管理。利用数字孪生技术,将历史数据与实时信息整合以构建健康状态模型,使得剩余寿命的精确预测成为可能。先进的机器学习及深度神经网络技术对关键指标进行动态分析,使设备运行趋势得以全面捕捉;同时,不同工况下设备衰退规律的虚拟仿真同步开展,为个性化维护计划提供了精确数据支持<sup>[4]</sup>。潜在风险在故障显现之前即被识别,预防措施随之迅速启动,从而大幅降低了非计划停机率与维修成本。实时反馈机制不断修正设备参数,促使维护策略灵活调整,进而延长了设备整体服役期。虚拟模型在状态映射及效果验证过程中发挥着不可替代的作用,为工业生产系统的安全稳定运行提供了坚实保障。

### 3.4 维护决策支持系统设计

伴随智能制造及工业自动化技术的不断演进,基于数字孪生的维护决策支持系统正逐步成为设备管理的关键工具。该系统融合了大数据分析、智能算法及人机交互技

术,实现数据采集、状态评估及维护决策各环节的无缝对接。构建的决策平台具有高效、稳定及良好扩展性的特点,借助实时数据及深度建模技术,能够对设备健康状态进行精准预测,同时实现故障风险的快速预警。系统自动生成的维护建议与调度方案通过直观界面展现,使决策过程科学而操作便捷。远程监控、数据回溯及多维综合分析功能得到了全面整合,促使系统性能不断升级;在人工智能及物联网技术推动下,设备状态监控与智能调度水平明显提升,传统运维模式正逐步转型为更加智能、网络化及协同化的新模式。

### 3.5 故障预警与应急响应机制

突发故障在设备运行过程中可能对生产安全及经济效益造成严重冲击,建立高效的故障预警与应急响应机制显得尤为关键。借助数字孪生技术构建的健康评估模型,可对各项关键参数实施实时监测,并利用模式识别及数据挖掘手段对设备状态进行动态解析,潜在风险在故障显现前便得以捕捉。当异常情况出现时,报警信号会迅速触发,预先制定的应急方案立即投入执行。虚拟仿真技术被用于模拟故障发展轨迹,为后续响应措施提供量化依据;不断优化数据处理算法使预警阈值及响应策略得以灵活适应各种工况与环境变化,从而确保预警过程具有极高准确性与快速反应能力。该机制不仅大幅降低设备非计划停机率,还为企业构建了一种具推广意义的智能运维模式,进而筑起牢固的安全屏障,确保设备在全生命周期内保持平稳、可靠运行。

## 4 数字孪生技术的智能优化与自适应控制

### 4.1 自适应控制原理与方法

在机电系统运行过程中,自适应控制技术的应用日益广泛,其主要目标是根据设备运行状态的动态变化,自动调整控制参数,以适应复杂环境以及运行条件的波动。借助数字孪生技术构建的高精度虚拟模型,物理系统的动态特征能够得到精准映射,并结合数据驱动方法建立预测模型,使控制器参数得以动态优化。自适应控制策略涵盖模型预测控制、鲁棒自适应调节以及基于机器学习的自调节方法,使传统固定参数控制方式逐渐被更具智能化的动态优化方案替代。设备运行时,传感器采集的数据经过处理后输入控制算法,参数随运行状态的变化而实时调整,确保虚拟模型与物理设备始终保持高度一致。随着数据流不断优化,控制策略持续迭代,使得设备即便在复杂运行环境下仍能维持稳定状态,并具备更高的响应速度。

### 4.2 优化算法在机电设备监测中的应用

优化算法的不断发展推动了机电设备运行监测智能化水平的提升。数字孪生技术与优化算法相结合,使设备状态监测的准确性进一步增强,同时提升了传感数据的优化能力。基于数学建模与统计学习的优化策略,广泛采用遗传算法、粒子群优化、蚁群算法等技术,实现运行参数的全局搜索与局部调整,从而提升监测系统在故障预警、数据处理及维护调度等方面的适应性。监测过程中,数据经过特征提取与模式识别后,由优化模型动态调整关键参数,提高

监测精度及响应效率。物理设备与虚拟模型之间的双向数据交互为优化算法的持续训练提供反馈,使其不断适应复杂工况,并在运行过程中不断修正优化策略。多种优化算法相互配合,使系统不仅能够实现智能调节与高效资源分配,在设备健康管理及故障预防方面也展现出更强的决策能力。

### 4.3 实时反馈与智能决策机制

机电设备运行状态的智能优化,依赖于实时反馈系统与智能决策机制的紧密结合。传感器采集的运行数据被实时传输至虚拟模型,经计算分析后生成状态评估报告,为决策模块提供科学依据。设备监测系统接收到数据后,将其与历史信息进行比对,并通过建立精确模型识别异常趋势,提前预测潜在故障风险。智能决策机制通过数据挖掘技术与知识图谱,实现优化调度,并逐步形成具备自主学习能力的决策体系。实时反馈系统与智能决策模块的深度融合,使设备能够根据运行状态的变化自动优化关键参数,以适应复杂环境,同时有效降低故障发生概率,提高运行稳定性。基于虚拟与现实相结合的交互模式,设备管理的精准度得到提升,运维效率也显著优化。与此同时,该技术的发展为机电设备向更智能化的管理模式演进奠定了坚实基础,使未来的设备运行更具自主性与适应性。

## 5 结语

随着数字孪生技术的不断发展,其在机电设备智能化运维中的应用展现了显著的前景。通过将虚拟模型与实时数据融合,数字孪生不仅提升了设备的监控精度,还加强了故障预测和性能优化,从而大幅度提高了设备的运行效率与可靠性。在人工智能、边缘计算等技术的支持下,数字孪生技术逐步扩展至更广泛的领域,推动了设备管理方法的创新与进步。未来,数字孪生技术将在更多行业领域中发挥更大的作用,助力设备管理进入更加高效、智能的时代。

### [参考文献]

- [1]孙艺凌.基于数字孪生与混合现实技术的机电设备辅助维修方法研究[J].中国新技术新产品,2024(2):36-38.
- [2]刘加利,焦锋利.基于数字孪生技术的机电一体化虚拟实训设备设计与开发[J].科技创新与应用,2024,14(9):42-45.
- [3]李志强,金国胜,杜王特.基于数字孪生技术的变电站机电设备状态检测系统[J].自动化技术与应用,2024,43(11):43-47.
- [4]李志强,金国胜,杜王特.基于数字孪生技术的变电站机电设备状态检测系统[J].自动化技术与应用,2024(11):43-47.

作者简介:张荣飞(1979.4—),女,毕业院校:湖北黄冈职业技术学院,所学专业:计算机科学与技术,毕业院校:中国地质大学(武汉),所学专业:机械设计制造及其自动化,毕业院校:济南大学,所学专业:工商管理,当前工作单位:滨州市安全评价中心有限公司,职务:职工,职称级别:中级职称。