

Research and application of intelligent inspection technology for power equipment based on digital twin

Xinyu Guo

Xishuangbanna Power Supply Bureau, Xishuangbanna, Yunnan, 666100, China

Abstract

With the expansion of power systems and increasing operational complexity, traditional inspection methods face significant limitations in efficiency and safety. Digital twin technology provides a new approach for intelligent equipment inspection by enabling real-time virtual mapping of physical assets to achieve precise operational monitoring, dynamic prediction, and smart decision-making. This paper examines three key aspects: system architecture, core technologies, and practical applications. It covers multi-source sensing and data fusion, virtual modeling with real-time interaction, and intelligent diagnostics with predictive maintenance, while analyzing typical implementation cases in substations, transmission lines, and distribution networks. Challenges such as data security, modeling accuracy, and platform compatibility are identified, along with optimization strategies. The study demonstrates that digital twin-driven intelligent inspection significantly enhances equipment reliability and management efficiency, providing robust support for smart energy system development and the digital transformation of the power industry.

Keywords

Digital twin; Power equipment; Intelligent inspection; Virtual modeling; Predictive maintenance

基于数字孪生的电力设备智能化巡检技术研究与应用

郭欣宇

西双版纳供电局, 中国·云南 西双版纳 666100

摘要

随着电力系统规模扩展与运行环境复杂化,传统巡检方式在效率与安全性方面局限突出。数字孪生通过对物理对象的实时虚拟映射,实现运行状态的精准感知、动态预测与智能决策,为电力设备智能巡检提供新路径。本文从体系结构、关键技术与应用实践三个方面展开研究,涵盖多源感知与数据融合、虚拟建模与实时交互、智能诊断与预测性维护等内容,并分析了其在变电站设备、输电线路和配电环节的典型应用案例。同时指出数据安全、建模精度与平台兼容性等挑战,提出优化路径。研究表明,数字孪生驱动的智能巡检模式可显著提升电力设备运行可靠性与管理效率,为智慧能源体系建设和电力行业数字化转型提供有力支撑。

关键词

数字孪生; 电力设备; 智能巡检; 虚拟建模; 预测性维护

1 引言

电力系统作为国家能源基础设施的重要组成部分,其运行的安全性与可靠性直接关系到社会经济的稳定发展。随着新能源接入比例的提升和电网运行的复杂化,电力设备的运行压力显著增加,设备故障与安全隐患频发。传统人工巡检与半自动化检测模式已难以满足现代电力系统对高效率、高精度和全覆盖巡检的需求。近年来,人工智能、大数据、物联网与数字孪生等新兴技术的快速发展,为电力设备巡检提供了新的解决方案。数字孪生通过建立物理设备的虚拟模型,利用实时数据驱动,实现对设备状态的动态监测、风险

预判与优化控制。本文旨在系统研究基于数字孪生的电力设备智能巡检技术,从理论框架、关键技术到应用实践进行深入分析,提出适合我国电力行业发展的优化路径。

2 数字孪生技术的理论基础与发展趋势

2.1 数字孪生的概念与特征

数字孪生是物理实体与其虚拟模型之间的动态映射关系,其核心在于通过实时数据驱动,实现虚拟世界与现实世界的交互。数字孪生具有实时性、预测性、可视化与智能化等特征,为电力设备运行监测和智能诊断提供了理论支撑。与传统建模方式相比,数字孪生不仅能够反映设备的静态特征,还能呈现动态演化过程。

2.2 数字孪生与电力巡检的契合性

电力设备运行过程中涉及大量多源异构数据,如电压、

【作者简介】郭欣宇(1995-),男,中国四川西充人,本科,助理工程师,从事数字化转型与智能化巡检研究。

电流、温度、振动及环境参数。数字孪生通过数据融合与智能分析，能够实现对设备全生命周期的监控与优化。此外，数字孪生模型的预测性与可视化特征，能够在巡检中提前识别潜在风险，辅助管理人员制定维护决策。

2.3 国内外发展现状

国外电力公司如 GE、西门子已将数字孪生应用于设备运维，实现预测性维护与优化调度。国内国家电网与南方电网等企业也积极推动数字孪生在输变电设备巡检中的应用，探索构建智能运维体系。未来趋势表现为：模型精度提升、实时交互增强以及跨平台互联。

3 基于数字孪生的电力设备智能巡检体系架构

3.1 多源感知与数据采集

巡检系统需依托传感器、无人机、视频监控及机器人等多种感知设备，实时采集电力设备运行数据。通过物联网平台实现数据汇聚，解决信息孤岛问题。传感器布局应结合关键部位，如变压器绕组温度、输电线路覆冰厚度等，实现全方位监测。

3.2 虚拟建模与实时交互

基于采集数据建立电力设备的数字孪生模型，利用三维建模与有限元分析模拟设备运行状态。模型与实际数据实时同步，保证虚拟空间与物理设备的一致性。通过交互界面，巡检人员可在虚拟环境中直观掌握设备状态。

3.3 智能诊断与预测维护

依托机器学习与深度学习算法，对设备历史数据进行分析，实现故障模式识别与趋势预测。数字孪生能够模拟不同工况下的设备响应，提前预测故障发生概率。结合预测性维护策略，动态调整检修计划，实现从“事后维修”向“事前预防”的转变。

4 关键技术研究

4.1 数据融合与智能感知

在基于数字孪生的电力设备智能巡检体系中，多源异构数据的融合是核心环节。电力设备在运行过程中会产生大量多维度数据，包括振动、温度、电流、电压、局放信号及图像信息等，这些数据之间存在时空差异和噪声干扰。通过多传感器融合算法，可以实现不同来源数据的同步采集与统一处理，构建全景式的设备运行画像。大数据分析方法能够对长期运行信息进行模式挖掘和趋势预测，而深度学习模型在特征提取和异常识别方面表现突出，可自动发现潜在的早期故障特征。例如，卷积神经网络（CNN）可用于图像化巡检数据的缺陷检测，循环神经网络（RNN）则适合捕捉时间序列数据的动态变化。多源融合与智能感知的结合，使巡检系统具备更强的鲁棒性与自适应能力，为后续预测性维护提供坚实的数据支撑。

4.2 高精度建模与仿真

数字孪生技术的核心价值在于虚拟模型对实际设备的

高度还原与实时映射，而模型精度直接决定巡检与预测的可靠性。单纯依赖数据驱动模型或物理机理模型都存在一定局限，因此需采用“物理机理+数据驱动”的混合型建模方法。在电力设备巡检中，可以结合有限元仿真技术对设备受力分布、温度场演化、电磁场特性等进行精细建模，并结合运行数据不断修正模型参数，实现动态校正。与此同时，热流分析与绝缘老化机理的引入，可以提高模型对复杂工况和极端环境下设备状态的预测能力。高精度建模不仅能够支持对设备寿命的评估与故障机理的揭示，还为多场耦合条件下的仿真计算提供依据，提升巡检系统的适应性与科学性，实现虚实一体化的动态映射。

4.3 人机交互与可视化技术

在数字孪生驱动的巡检过程中，人机交互与可视化是实现信息价值转化和辅助决策的重要环节。由于电力设备运行数据往往复杂且维度多，仅依赖数值呈现难以为运维人员提供直观参考。借助虚拟现实（VR）与增强现实（AR）技术，可以将设备的虚拟模型与真实环境进行叠加，运维人员能够在沉浸式虚拟场景中进行设备检查、状态分析及操作演练。这种交互方式不仅提升了巡检效率，也增强了对复杂设备状态的理解与把控。与此同时，可视化界面能够将高维数据转化为动态图形、三维模型及趋势曲线，直观呈现设备健康指数与风险等级。通过交互式可视化平台，决策者可以快速定位问题源头，制定针对性维护方案，实现巡检信息向管理决策的有效转化，推动巡检体系智能化与科学化发展。

5 应用实践与典型案例

5.1 变电站设备巡检

在电力系统中，变电站作为电能转换与分配的重要枢纽，其运行稳定性直接影响整个电网的安全。传统的人工巡检与定期维护方式存在效率低、隐患排查不及时的问题。基于数字孪生的变电站设备巡检系统，能够构建断路器、变压器、电容器等关键设备的虚拟模型，并通过多源传感器实时采集运行数据，如油温变化、气体溶解度及局部放电信号。数字孪生模型将这些动态参数与历史工况进行比对，结合智能算法实现潜在故障的预测与诊断。相比传统巡检，这种方法可大幅降低设备突发故障率，减少非计划停电事件。更重要的是，数字孪生能够模拟不同运行条件和负荷状态下设备的应力与寿命演化，为设备全生命周期管理提供科学依据，实现从“事后维修”向“预测性维护”的转型，提升变电站运行的安全性与经济性。

5.2 输电线路巡检

输电线路分布范围广、运行环境复杂，是电力系统最易受到自然灾害和外部因素影响的环节。传统巡检依赖人工巡视与直升机拍摄，存在覆盖不足、成本高昂和实时性差的缺陷。数字孪生技术结合无人机巡检和图像识别算法，可以在虚拟空间中实时还原输电线路状态，实现覆冰厚度、异物

侵入和线路弧垂等隐患的自动识别。通过引入气象数据,模型能够模拟风速、湿度、温度等环境因素对线路运行的影响,从而预测极端天气下线路的可靠性与风险点。这种方法不仅提高了监测的精度和时效,还能支持大范围线路的自动化、可视化巡检,显著减轻人工压力。未来,随着数字孪生与人工智能的深度融合,输电线路巡检将逐步实现全天候、全方位、智能化的运行监测,为电力系统的稳定供电提供强有力保障。

5.3 配电环节应用

配电网是直接面向用户的电力供应环节,其安全性和可靠性对社会生产与居民生活有着直接影响。传统配电设备巡检主要依赖人工抄表和定点检测,存在信息滞后与异常识别不及时等问题。通过构建基于数字孪生的配电网虚拟模型,可以实现对开关设备、电缆线路及智能终端的实时监测与自动化巡检。数字孪生系统能够对配电环节的电压、电流、温升等运行参数进行动态追踪,并与虚拟模型中的标准工况进行对比,一旦发现偏离即可触发预警并定位异常点。例如,在电缆过载或局部绝缘老化时,系统能在早期阶段检测并提供维护建议,避免事故扩散。该方法不仅提升了配电环节的供电可靠性,还为负荷调控、故障隔离和快速恢复提供支持,推动配电网由传统的被动管理向主动智能化管理转型。

6 面临的挑战与优化路径

6.1 数据安全与隐私保护

在基于数字孪生的电力设备智能巡检系统中,大规模、多维度的数据采集与传输是其核心支撑,但也带来了数据安全与隐私保护的严峻挑战。电力行业数据不仅包含设备运行参数,还涉及国家能源调度与关键基础设施信息,一旦泄露或遭受攻击,将对国家和社会稳定造成严重威胁。因此,在技术层面必须构建完善的数据加密与安全传输机制,确保从边缘端采集到云端存储全过程的安全性。同时,还需引入多级访问控制与权限管理,避免非授权用户对敏感数据的非法使用。在制度层面,应建立健全的数据安全管理规范和责任追溯体系,确保数据使用合规透明。未来,随着人工智能与区块链技术的发展,利用分布式存储、智能合约等手段实现数据共享与保护的平衡,将成为电力行业数字孪生应用的重要发展方向。

6.2 建模精度与系统兼容性

数字孪生技术在电力巡检中的应用依赖于高精度建模,其虚拟模型的真实性和动态性决定了系统监测与预测的有效性。然而,电力设备运行环境复杂,影响因素多样,模型构建需要兼顾电磁、热力、机械等多学科参数,这对建模精度提出了更高要求。同时,过于复杂的模型会增加计算负荷,

降低实时性,影响巡检的效率。因此,如何在模型精度与计算效率之间实现平衡,是当前研究与应用的焦点难题。此外,不同厂商、不同平台间的数据接口标准不统一,导致系统兼容性差,影响了跨区域、跨设备的互联互通。为此,应加快行业标准体系的建设,推动数据接口与建模方法的统一。通过模块化设计与混合建模策略,实现虚拟模型的灵活调用与快速更新,将有效提升数字孪生系统在实际电力巡检中的可操作性与扩展性。

6.3 政策支持与人才培养

数字孪生在电力行业的推广不仅是技术问题,更需要政策与人才的双重保障。从政策层面看,政府应加快制定电力行业数字孪生的技术规范与应用标准,推动产业链上下游协同发展。同时,要加大资金与项目支持力度,鼓励企业、高校与科研机构开展联合攻关和成果转化。特别是在电网智能化与能源转型的大背景下,政策的顶层设计对数字孪生技术的应用普及具有决定性作用。从人才培养角度看,数字孪生应用涉及电力工程、计算机科学、人工智能、数据分析等多学科交叉,迫切需要具备综合能力的复合型人才。因此,高校应优化课程体系,加强产学研合作,培养兼具理论基础与工程实践能力的人才队伍。同时,企业也应通过在岗培训与国际交流,提升员工的数字化运维与智能巡检能力。只有形成技术、政策、人才三位一体的支撑格局,数字孪生在电力行业的应用才能实现可持续发展。

7 结语

基于数字孪生的电力设备智能巡检技术,突破了传统巡检模式的局限,能够实现设备运行状态的精准感知与预测性维护,为电力行业的数字化转型提供了新思路。通过多源数据融合、虚拟建模、智能诊断与应用实践,数字孪生在变电站、输电线路与配电环节均展现出显著优势。然而,其发展仍面临数据安全、模型精度与平台兼容性等挑战。未来应在政策引导、技术创新与人才培养的共同作用下,不断优化数字孪生巡检体系,推动电力行业向智慧化与高质量发展迈进。

参考文献

- [1] 俞玲,张阳,王思泽,等.基于数字孪生的电力设施智能巡检系统研究[J].智能城市,2025,11(08):52-55.
- [2] 朱逸筱.基于数字孪生的电力设备调控及自动化运维一体化平台设计[C]//《中国招标》期刊有限公司.新质生产力驱动第二产业发展与招标采购创新论坛论文集(二)。国网常州市金坛区供电公司:2025:62-63.
- [3] 江友华,宋文敏,陈江伟,等.基于数字孪生的电力设备实验教学及在人才培养的应用[J].实验室研究与探索,2025,44(01):100-105+116.