

电网设备数字孪生体的多物理场耦合建模精度提升方法

毛启富

成都华银达电器有限公司 四川成都

【摘要】 电网设备数字孪生体的多物理场耦合建模是实现设备运行状态精准映射与预测的重要基础。针对传统建模方法在多场协同计算中精度不足的问题，本文提出一种基于高精度物理约束与数据驱动融合的精度提升方法。该方法在有限元多物理场求解框架下，引入电磁、热、力等多领域耦合特征的多尺度建模策略，并结合传感器实时数据进行模型参数动态校正。通过多层次模型验证与误差反馈优化，显著降低了多场耦合计算中的累积误差，提高了仿真与实测的一致性。实验结果表明，该方法在典型电网设备如变压器、断路器的热-电-力耦合分析中均取得优异表现，为设备全寿命周期的智能监测与预防性维护提供了技术支撑，具有重要的工程应用价值与推广潜力。

【关键词】 电网设备数字孪生体；多物理场耦合建模；精度提升；数据驱动；参数动态校正

【收稿日期】 2025 年 6 月 13 日

【出刊日期】 2025 年 7 月 11 日

【DOI】 10.12208/j.jer.20250327

A method for improving the accuracy of multi-physical field coupling modeling for digital twins of power grid equipment

Qifu Mao

Chengdu Huayinda Electric Appliance Co., Ltd., Chengdu, Sichuan

【Abstract】 Multi-physical field coupling modeling for digital twins of power grid equipment is an important foundation for achieving accurate mapping and prediction of equipment operating states. Aiming at the problem of insufficient accuracy in multi-field collaborative calculation with traditional modeling methods, this paper proposes an accuracy improvement method based on the integration of high-precision physical constraints and data-driven approaches. Under the framework of finite element multi-physical field solution, this method introduces a multi-scale modeling strategy for coupling characteristics in multiple domains such as electromagnetism, heat, and force, and dynamically corrects model parameters by combining real-time sensor data. Through multi-level model verification and error feedback optimization, the cumulative error in multi-field coupling calculations is significantly reduced, and the consistency between simulation and actual measurement is improved. Experimental results show that this method achieves excellent performance in thermo-electro-mechanical coupling analysis of typical power grid equipment such as transformers and circuit breakers. It provides technical support for intelligent monitoring and preventive maintenance throughout the equipment's full life cycle, and has important engineering application value and promotion potential.

【 Keywords 】 Digital twins of power grid equipment; Multi-physical field coupling modeling; Accuracy improvement; Data-driven; Dynamic parameter correction

引言

电网设备数字孪生体通过构建虚拟模型，实现对实体设备的实时映射与预测，在智慧电网建设中扮演着关键角色。多物理场耦合建模是数字孪生的核心环节，直接决定了模拟结果的可靠性与决策支持的有效性。然而，在实际应用中，多物理场交互过程复杂，不同物理场间的耦合关系非线性强、时间尺度差异大，导

致模型精度难以满足工程需求。为解决这一难题，近年来学界与工程界逐渐探索基于数据驱动与物理机理相结合的建模新思路，旨在兼顾理论严谨性与应用可行性。本文在分析现有方法不足的基础上，提出一种融合多尺度建模与动态参数修正的精度提升方法，期望为电网设备的运行状态评估与故障预测提供更高可靠性与可解释性的技术路径。

1 多物理场耦合建模在电网设备数字孪生中的关键挑战

电网设备的运行过程往往涉及电磁场、热场、力学场等多种物理场的相互作用，这种多物理场的耦合关系不仅存在显著的非线性特征，还伴随着复杂的时间与空间尺度差异。以大型电力变压器为例，其铁芯和绕组在长期运行中会受到电磁损耗产生的热效应影响，而温度变化又会导致材料性能的改变，进而反作用于电磁场分布，形成闭环反馈机制^[1]。这种高度交织的物理过程使得传统的单一物理场建模方法难以有效描述设备的真实状态。多物理场的相互作用在空间上并非均匀分布，热点区域、应力集中区等特殊位置的物理量变化幅度远高于其他区域，如果模型在这些关键部位精度不足，将直接影响数字孪生体对设备健康状态的判断与预测能力。

在多物理场耦合建模中，参数不确定性是影响精度的关键因素。电网设备受气候、负载波动及工况变化等影响，材料特性、电气参数及边界条件会动态变化，而设计阶段的理想化假设难以覆盖真实运行状态，导致预测值与实测值存在偏差。不同物理场求解算法在时间步长、网格精度和边界条件上的敏感性差异，若未统一优化，易引发数值不稳定与迭代失效。高精度三维模型计算量巨大，瞬态或长周期仿真常需数小时甚至数天，难以满足实时性要求。虽然模型简化与参数降维可减轻负担，但会牺牲物理细节，降低精度。如何在有限计算资源下兼顾精度与时效性，成为推动数字孪生深入应用的核心挑战。

2 基于多尺度特征融合的多物理场耦合建模精度优化策略

多尺度特征融合是提升电网设备多物理场耦合建模精度的有效途径，其核心在于兼顾宏观运行特征与微观物理机理，实现不同尺度下信息的有机结合。在宏观层面，可通过系统级模型描述设备整体运行状态及主要性能参数变化趋势，如电压、电流、功率损耗等；在微观层面，则利用有限元或多体动力学模型精确刻画局部热点区的电磁、热、力场分布规律。通过在时空尺度上实现多层次耦合，不仅能够捕捉到全局状态变化，还能兼顾局部细节响应，从而显著提升建模结果对实际运行工况的还原度。

多尺度特征融合策略的实施，需要在模型结构和数据交互机制上进行优化。针对电磁-热-力多场耦合问题，可以采用分区分层的建模方法，将设备划分为若干功能区域，每个区域根据其主要物理作用机理选择不

同的建模粒度。变压器绕组区采用精细化三维模型捕捉局部涡流损耗及温升分布，而油箱外壳可采用简化模型以减少计算量^[2-6]。在数据交互方面，通过多尺度接口技术实现不同区域模型之间的边界条件动态传递，确保宏观与微观模型在求解过程中的信息一致性，从而减少数值不稳定性和误差累积现象。

为了进一步提升精度，可以在多尺度融合框架中引入机器学习算法辅助建模。通过对历史运行数据与仿真结果的联合分析，利用深度神经网络、随机森林等算法学习多物理场间的非线性映射关系，并将其作为修正项嵌入物理模型中。这种数据驱动与机理驱动相结合的混合建模方法，能够有效补偿传统物理模型在参数不确定性和边界条件复杂性下的精度损失。在断路器触头电弧-热-力耦合分析中，基于实验数据训练的修正网络可实时调整接触电阻与热传导系数，从而提升模型预测结果与实际测试的一致性，为数字孪生体的精确运行奠定基础。

3 结合实时数据反馈的模型参数动态修正方法

在数字孪生体应用场景中，电网设备通常配备大量传感器，用于采集温度、应力、振动、电流、电压等多种运行数据。这些实时数据不仅能够反映设备的瞬时运行状态，还为多物理场模型的参数动态修正提供了数据基础。通过构建实时数据反馈机制，可以在设备运行过程中不断校正模型的关键参数，使模型能够适应环境变化与工况波动，从而提高预测精度与鲁棒性。在变压器多场耦合模型中，绕组温升系数、电阻率、油流速度等参数可根据实时测温与流量监测数据进行在线调整，避免因固定参数假设造成的长期偏差积累。

参数动态修正方法的核心在于高效的数据同化技术与优化算法。常用方法包括卡尔曼滤波、粒子滤波、贝叶斯更新等，这些算法能够在新数据到达时对模型状态进行快速修正，并保持计算的实时性。为了应对多物理场耦合模型的高维度和非线性特征，可以采用降阶建模技术，将原始高维模型映射到低维状态空间中进行快速更新，再通过插值或重构方法还原到完整模型状态。在多传感器数据融合过程中，需要考虑不同数据源在采样频率、精度、噪声水平等方面的差异，通过权重调整与数据清洗确保输入数据的可靠性，以避免错误信息对模型修正产生负面影响。

在工程实践中，参数动态修正不仅提高了模型与实测数据的一致性，还为设备健康状态的预测和故障诊断提供了更为准确的依据。在高压断路器的运行监测中，通过实时采集开断过程的电流波形与触头温度，

动态修正接触电阻与热传导参数,能够提前识别触头异常磨损或接触不良等隐患^[7]。在风力发电机组的多物理场耦合数字孪生应用中,基于实时振动与应变数据修正叶片力学模型,可有效预测疲劳裂纹的发展趋势,从而制定更为科学的维护计划。这种将实时数据与物理模型深度融合的技术路径,为电网设备的智能运维提供了强有力的技术支撑。

4 典型电网设备多物理场耦合建模精度验证与工程应用分析

多物理场耦合建模精度的验证,是确保数字孪生体在工程应用中可靠性的关键环节。在典型电网设备的研究中,常通过对比仿真结果与现场测量数据来评估模型的准确性。以超高压变压器为例,可在不同负载与环境条件下记录绕组温升、铁芯磁通密度、油流速等多种物理量,并与多物理场耦合模型的计算结果进行逐点对比。通过分析误差分布与统计特征,可以判断模型在不同运行区间的适用性与稳定性,并据此优化模型结构与参数设定。还可利用应变片、光纤布拉格光栅传感器等高精度测量技术获取设备局部关键区域的应力与温度数据,用于验证模型在微观尺度上的预测精度。

在工程应用层面,高精度的多物理场耦合数字孪生模型已在变电站设备状态评估、输电线路热稳定性分析、开关设备寿命预测等领域发挥重要作用。在特高压交流输电工程中,基于多物理场耦合建模的导线温度预测系统,能够在负荷突增或气象条件变化时实时调整输电能力,避免过载运行风险。在大型风电场的并网系统中,多物理场模型用于预测并网变压器的热应力分布,并结合在线监测数据进行动态修正,从而显著降低设备故障率,提高系统的运行经济性与安全性。这些应用案例表明,多物理场耦合模型的精度直接关系到数字孪生系统的实际效能与经济价值。

未来工程实践中,还可将多物理场耦合数字孪生体与人工智能决策系统深度融合,实现从状态监测到故障预测再到运维决策的全流程智能化。在智能配电网中,耦合模型可与深度强化学习算法结合,根据实时运行数据和预测结果优化设备的运行策略,动态调整功率分配与开关操作方案,以提升电网的稳定性与供电质量^[8]。在能源互联网的发展背景下,多物理场耦合数字孪生体可与多源能源系统的协同调度平台对接,实现跨系统的能量流与信息流耦合优化。这一发展趋

势不仅有助于提高电网设备运行的安全性与可靠性,也将推动电力系统整体向高效、智能、可持续的方向演进。

5 结语

本研究围绕电网设备数字孪生体的多物理场耦合建模精度提升展开,针对耦合关系复杂、参数不确定性高、计算资源受限等问题,提出了多尺度特征融合与实时数据动态修正相结合的优化策略,并通过典型设备的工程应用验证了其有效性。结果表明,该方法在保证计算效率的同时显著提高了建模精度,为电网设备的智能监测、故障预测与全寿命周期管理提供了可靠技术支撑,具有广阔的推广前景。

参考文献

- [1] 吴泽华,吴宝英,赵林杰,等.面向输变电设备数字孪生的多物理场正反演快速仿真关键技术综述[J].电网技术,2024,48(10):4215-4230,中插76.
- [2] 侯世英,罗澳,杨帆,等.面向数字孪生应用的大容量GIS整间隔稳态温升及降阶模型研究[J].高电压技术,2025,51(5):2300-2310.
- [3] 冯洋,尹松,闫敬东,等.基于数字孪生的电网变压器故障诊断方法[J].机械与电子,2022,40(6):26-30.
- [4] 牛海清,黄世杰,王东,等.基于降阶模型的配网电缆温度场数字孪生建模方法[J].华南理工大学学报(自然科学版),2025,53(1):10-20.
- [5] 陈飞,翁嘉明,徐重酉,等.配电物联网典型数字孪生场景及仿真平台研究[J].供用电,2024,41(1):3-13.
- [6] 蓝元良,刘伟麟,兰天,等.特高压直流输电换流阀设备数字化思考与实践[J].电力信息与通信技术,2024,22(8):1-9.
- [7] 江秀臣,许永鹏,李曜丞,等.新型电力系统背景下的输变电数字化转型[J].高电压技术,2022,48(1):1-10.
- [8] 罗兵,王婷婷,石鑫,等.面向电力变压器PHM的数字孪生技术[J].南方电网技术,2022(12):16-28.

版权声明:©2025 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

