

基于数字孪生的氧化铝供配电系统故障预测与健康管理的

乔建安

中铝山东有限公司热电力厂 山东 淄博 255000

摘要: 本文聚焦基于数字孪生的氧化铝供配电系统故障预测与健康管理的, 先阐述了数字孪生技术及氧化铝供配电系统特性, 接着从建模框架、核心设备与系统建模等方面构建数字孪生模型。并且设计故障预测与健康管理系统, 涵盖总体架构、感知网络、虚拟模型、数据处理融合、故障预测及健康管理及运维决策模块, 旨在实现该系统故障的精准预测与高效健康管理。

关键词: 数字孪生; 氧化铝供配电系统; 故障预测; 健康管理

引言: 在氧化铝生产过程中, 供配电系统的稳定运行至关重要, 其一旦出现故障, 将严重影响生产连续性, 造成巨大经济损失。传统运维方式多依赖人工定期巡检与经验判断, 难以精准预测故障并实现高效健康管理。数字孪生技术凭借虚实映射、实时交互等优势, 为供配电系统运维带来新契机。本文聚焦于此, 探讨基于数字孪生的氧化铝供配电系统故障预测与健康管理的, 以提升系统可靠性与运维效率。

1 数字孪生与氧化铝供配电系统基础理论

1.1 数字孪生技术概述

数字孪生技术借助数字化手段, 构建与供电系统实体在几何、物理属性及行为特征上高度一致的虚拟模型, 实现二者实时映射、数据交互与全生命周期管理。它融合多学科理论, 涉及三维建模、传感器检测、数据通讯传输、大数据分析、人工智能等核心技术, 核心特征为虚实同源、实时交互、动态分析保护与闭环优化。在工业领域, 该技术打破物理与信息系统壁垒, 通过虚拟模型实时监控、模拟分析及预测优化供电系统实体运行状态, 为工业智能化升级提供关键支撑^[1]。从技术架构上, 数字孪生包含供电系统实体、数据检测传输、虚拟模型、数据分析及应用服务五层, 各层协同, 形成从物理数据采集到虚拟仿真优化, 再到物理系统调控的完整闭环, 在智能制造、能源电力、交通运输等领域应用价值显著。

1.2 氧化铝供配电系统特性分析

氧化铝供配电系统是保障氧化铝生产连续运行的核心能源系统, 其稳定性决定生产稳定性、效率与产品质量。该系统负荷类型多样且波动剧烈, 关键工序对应不同负荷, 工艺切换会使负荷大幅波动, 对供电稳定性要求极高。系统结构呈多层次网状拓扑, 含多个层级, 通过多种设备紧密连接成复杂网络。此外, 系统对可靠性

和安全性要求高, 故障会造成重大损失, 且存在多种安全风险。

2 基于数字孪生的氧化铝供配电系统建模

2.1 数字孪生建模框架设计

基于数字孪生的氧化铝供配电系统建模框架采用“供电系统实体-数据链路-虚拟模型-应用服务”四层架构, 各层既相互独立又协同联动, 构建覆盖山铝电网系统全生命周期的建模体系。供电系统实体层以氧化铝各电压等级变配电系统的实际设备和网络架构为基础, 明确变压器、开关柜、电缆线路、保护装置等核心设备的物理参数、结构特征和运行规范, 为建模提供真实物理依据。数据链路层承担数据采集与传输功能, 部署电压、电流、频率、温度、湿度、局放等多类型传感器, 通过工业以太网、5G等通信技术, 实现设备运行数据、环境数据的实时采集与高速传输, 同时构建数据质量检测模块, 保障数据完整性和准确性。虚拟模型层是框架核心, 采用多尺度建模方法, 分别构建设备级、系统级和场景级虚拟模型, 设备级模型精确复现单台设备的几何结构和物理特性, 系统级模型实现各设备间的拓扑连接和协同仿真, 场景级模型融合生产环境因素实现全景仿真。应用服务层提供模型管理、仿真分析、可视化监控等功能, 为后续故障预测和运维决策提供支撑, 各层通过标准化接口实现数据互通, 确保框架的扩展性和兼容性。

2.2 核心设备与系统建模实现

核心设备建模以氧化铝供配电系统中的变压器、高压开关柜、电缆线路为重点, 采用多物理场建模方法实现精准建模。变压器建模通过SolidWorks构建三维几何模型, 导入Ansys软件建立高压电网架构、具体站点综合测控耦合模型, 录入额定容量、变比、短路阻抗等参数, 模拟不同负荷下的电流分布、温度场变化和损耗特性,

同时集成油中溶解气体、电缆在线测温、局部放电等在线监测数据，实现绝缘状态的可视化呈现。高压开关柜建模聚焦开关动作特性和绝缘性能，利用UG建立柜体和内部元器件三维模型，通过Saber软件搭建电气仿真模型，模拟断路器分合闸过程中的电弧特性和操作机构动力学行为，结合柜内温度、局部放电传感器数据，实现运行状态实时映射^[2]。系统级建模基于设备级模型，采用Graphviz构建供配电网络拓扑模型，明确各设备的连接关系和信号流向，通过MATLAB/Simulink搭建系统仿真平台，集成负荷预测模块和电网扰动模拟模块，实现不同生产工况下的系统潮流计算、短路故障仿真等功能，同时采用轻量化建模技术优化模型渲染效率，确保虚拟系统与物理系统的实时同步。

2.3 数据链路与时交互系统构建

数据链路与时交互系统构建以“数据采集全面化、传输实时化、处理高效精准化”为目标，构建覆盖供配电系统的全链路数据传输与处理体系。数据采集环节采用“有线+无线”混合采集模式，在变压器、开关柜等关键设备上部署无源温度传感器、霍尔电流传感器、局部放电传感器等，采集设备运行参数；在生产工区部署温湿度、粉尘传感器采集环境数据；通过智能电表、保护装置的通信接口采集电能、故障录波等数据，实现采集点覆盖率100%。数据传输环节构建“工业以太网+5G”双链路传输网络，关键设备运行数据通过工业以太网实现毫秒级传输，环境数据等非实时数据通过5G网络传输，同时搭建数据传输冗余机制，当主链路故障时自动切换至备用链路，保障数据传输连续性。数据处理环节部署边缘计算节点和云计算平台，边缘节点对采集数据进行实时滤波、降噪和格式转换，剔除异常数据；云计算平台采用Hadoop架构实现海量历史数据存储，通过Spark框架进行数据关联分析，构建数据交互标准协议，实现物理系统与虚拟模型之间数据的双向实时交互，确保虚拟模型能够精准反映物理系统运行状态。

2.4 模型校验与精度提升

模型校验与精度提升采用“分阶段校验+持续优化”的策略，通过多维度校验方法保障虚拟模型与物理系统的一致性，同时建立动态优化机制提升模型精度。分阶段校验分为静态校验和动态校验两个阶段，静态校验在模型构建完成后开展，对比虚拟模型与物理设备的结构参数、额定性能等静态指标，与模型参数进行偏差分析，确保精度误差小于0.5%。动态校验在系统运行过程中进行，选取典型生产工况，实时采集物理系统的电压、电流、温度等运行数据，与虚拟模型的仿真输出数

据进行同步对比，构建偏差评价指标体系，包括幅值偏差、相位偏差和趋势偏差，当偏差超过阈值时触发校验流程。精度提升机制通过建立模型参数迭代优化模型，结合机器学习算法分析偏差产生原因，自动调整模型中的材料属性、边界条件等参数；定期采集设备检修数据和故障数据，更新模型故障特征库，同时结合生产工艺变更情况调整模型负荷特性参数，实现模型精度的持续提升。

3 基于数字孪生的故障预测与健康管理系统设计

3.1 系统总体架构设计

系统采用“感知-传输-建模-分析-决策”五层架构，实现氧化铝供配电系统故障预测与健康健康管理。感知层部署多类型传感器网络，全面采集运行参数、环境因素和拓扑结构数据。传输层采用“边缘节点+骨干网络+云平台”架构，边缘节点就近采集并初步处理数据，经工业以太网和5G骨干网络高速传输，延迟控制在100毫秒内。建模层基于数字孪生构建动态虚拟模型，集成健康参数，实现与物理系统实时同步。分析层是核心，含数据融合、故障预测和健康评估模块，提升数据可靠性并实现预测评估。决策层依分析结果生成维护计划等，构建可视化界面展示状态，各层通过标准化协议互通，保障架构稳定与扩展^[3]。

3.2 物理实体与感知网络构建

以氧化铝供配电系统物理设备和环境为对象，构建“设备级-网络级-环境级”三级感知体系。设备级针对核心设备部署专用传感器，如变压器装油中溶解气体等传感器，开关柜内装局部放电等传感器，电缆线路部署分布式光纤传感器。网络级部署网络状态监测装置和拓扑识别传感器，采集运行参数并监测设备连接状态。环境级在车间和变电站内部署温湿度等传感器，分析环境对设备影响。感知网络分布式部署，传感器节点模块化、支持热插拔，构建故障自诊断模块，确保感知数据可靠。

3.3 数字孪生虚拟模型构建

采用“多维度融合+动态更新”方法构建虚拟模型。模型构建分几何、物理、行为和健康建模四个维度。几何建模用3DMax和SolidWorks软件，依设计图纸和扫描数据构建设备等三维模型，几何偏差控制在0.3%以内。物理建模基于多物理场仿真技术，建立耦合模型，模拟设备物理特性。行为建模采集历史数据和操作记录，构建行为规则库，精准复现设备行为。健康建模融入健康指标和故障参数，实时展示设备健康状况，建立动态更新机制，依感知数据和检修信息修正模型参数，确保与物理系统一致。

3.4 数据处理与融合模块设计

采用“边缘预处理+云端融合”架构,实现多源数据处理融合。边缘预处理在边缘计算节点,针对不同类型传感器数据采用差异化策略,连续型数据用卡尔曼滤波去噪,离散型数据用孤立森林算法剔除异常值,布尔型数据用逻辑校验确保一致。数据同步模块用时间戳对齐技术统一数据时间维度。云端融合采用三级策略,一级数据层融合,标准化处理异构数据;二级特征层融合,提取特征并降维;三级决策层融合,结合贝叶斯推理和D-S证据理论融合分析,生成综合特征,提升数据可靠性和有效性,融合后数据准确率达98%以上。

3.5 故障预测模块设计

故障预测模块设计以“多算法融合预测+全类型故障覆盖”为目标,构建涵盖氧化铝供配电系统常见故障的预测模型,实现故障类型、发生时间和严重程度的精准预测。模块首先构建故障特征库,通过分析历史故障数据、设备检修记录和仿真试验数据,提取变压器绝缘老化、开关柜局部放电、电缆过热等12类典型故障的特征参数,建立故障特征与故障类型的映射关系。预测模型采用“传统算法+深度学习”融合架构,针对不同故障类型选择适配算法:对于变压器油中溶解气体故障,采用改良型三比值法结合神经网络进行预测;对于开关柜局部放电故障,采用小波分析提取特征后结合支持向量机进行预测;对于电缆过热故障,采用长短期记忆神经网络(LSTM)基于历史温度数据进行趋势预测。模块设置故障等级划分机制,根据故障严重程度划分为轻微、一般、严重三个等级,结合生产工况和设备重要性,采用风险评估算法计算故障影响范围和经济损失。模块构建预测结果验证机制,通过虚拟模型仿真复现预测故障,验证预测准确性,当预测误差超过阈值时自动调整模型参数,提升预测精度。

3.6 健康管理及运维决策模块设计

健康管理及运维决策模块设计围绕“健康评估-运维计划-决策执行-效果反馈”闭环流程,实现氧化铝供配电系统的全生命周期健康管理和智能化运维决策。健康管理环节构建多维度健康评估指标体系,包括设备性能指

标、运行状态指标、环境影响指标和历史故障指标,采用层次分析法确定各指标权重,通过模糊综合评价法计算设备健康指数,将健康状态划分为健康、亚健康、预警、故障四个等级,在虚拟模型和可视化界面上实时展示^[4]。运维计划生成环节基于健康评估结果和故障预测信息,结合设备维护规程和生产计划,采用遗传算法优化运维时间和资源分配,生成预防性维护计划、故障抢修计划和定期检修计划,明确维护内容、时间、人员和工具。决策执行环节通过系统接口将运维计划推送至运维管理平台,实现工单自动生成和派发,同时集成移动运维终端,支持运维人员现场扫码查看任务、记录维护信息。效果反馈环节收集运维执行结果和设备后续运行数据,分析运维计划的有效性,修正健康评估指标权重和运维优化算法参数,形成运维决策的持续优化闭环,提升运维效率和系统运行可靠性。

结束语

基于数字孪生的氧化铝供配电系统故障预测与健康研究,通过构建多层次模型与系统架构,实现了对系统运行状态的全面感知、精准预测与智能决策。研究在提升系统可靠性、降低运维成本方面成效显著。未来,可进一步融合新兴技术,优化模型算法,拓展应用场景,为氧化铝生产及其他工业领域的供配电系统智能化管理提供更坚实的技术支撑与借鉴。

参考文献

- [1]艾凤明;梁兴壮;董润;李伟林;军用飞机供配电系统故障预测与健康研究关键技术[J].航空科学技术,2023(02):89-98.
- [2]张雷;温建民;王天兵;吕文利;余盛灿;余涛;.基于多源数据的牵引供电设备故障预测与健康运行维护管理平台[J].电力信息与通信技术,2022(06):108-118.
- [3]周方.自备电氧化铝厂的供配电系统设计[J].光源与照明,2023(7):246-248.
- [4]杨宗政.氧化铝高压配电网供电系统风险评估及综合优化策略分析[J].工程建设与发展,2024,3(10):196-198. DOI:10.12417/2811-0722.24.10.064.