

# 数字孪生技术架构及在输变电设备运维中的应用

王胡伟

中国能建葛洲坝集团电力有限责任公司 湖北宜昌 443000

**摘要：**本文系统阐述了数字孪生技术架构及其在输变电设备运维中的应用。通过构建物理实体与虚拟模型的实时映射，数字孪生技术实现了设备状态感知、故障预测及全生命周期管理。研究聚焦技术架构的五层组成及关键技术，结合输变电设备运维场景，验证了其在状态监测、故障诊断、智能巡检等环节的效能，为电力行业数字化转型提供了理论支撑与实践参考。

**关键词：**数字孪生；输变电设备；运维管理；多源数据融合；故障诊断

## 引言

随着能源互联网与数字技术的深度融合，输变电设备运维面临高效化、智能化转型需求。数字孪生技术通过构建物理实体的虚拟镜像，实现设备状态实时监测、故障预测及运维决策优化，成为解决传统运维模式痛点的重要手段。本文从技术架构与行业应用两个维度，探讨数字孪生在输变电设备运维中的实践路径。

## 一、数字孪生技术架构

### (一) 架构组成

数字孪生技术架构由五层构成，各层协同实现物理实体与虚拟模型的深度融合：(1) 物理层：包含输变电设备本体及传感器网络，实时采集设备运行数据（如温度、振动、局部放电等），为虚拟模型提供数据源。(2) 数据层：整合多源异构数据，通过物联网（IoT）与边缘计算设备实现数据清洗、存储与传输，支撑后续建模与分析。(3) 模型层：构建设备几何模型、物理模型及行为模型，结合数值仿真技术（如有限元分析）与模型降阶技术，降低计算复杂度，提升实时性。(4) 功能层：基于数据驱动与机理模型，实现故障诊断、性能预测及优化决策，例如通过机器学习算法识别设备早期故障特征。(5) 应用层：面向用户提供可视化界面（如三维场景漫游、实时告警联动），支持运维人员远程监控与决策。

### (二) 关键技术

#### 1. 多源数据融合技术

多源数据融合技术是一种针对多源数据的处理手段，通过知识推理和识别从原始数据源中得出估计和判

决，以增加数据的置信度、提高可靠性、降低不确定性。该技术起源于多传感器数据融合，旨在整合不同传感器或信息源的数据，获取比单一信息源更准确完备、真实客观的判断决策。在输变电设备运维中，多源数据融合技术可整合SCADA系统、在线监测装置及无人机巡检数据，解决数据孤岛问题，提升状态评估准确性。其融合过程包括多传感器的目标感知探测、数据信息关联、跟踪检测和情况评估预测。融合方式多样，既可从语义框架底层进行，也可从数据结构角度或数理论视角进行。多源数据融合技术能消除数据之间的冗余和不一致，提高决策的可靠性，广泛应用于城市规划、环境保护、资源管理等领域，为决策者提供有力支持。

#### 2. 模型降阶与融合技术

模型降阶与融合技术是提升复杂系统仿真效率与精度的关键手段。模型降阶旨在简化高阶模型，减少计算量，同时保留必要行为和主导效应，使高阶系统能由相对低阶模型近似，降低计算复杂性和存储要求。例如在大型动力系统和控制系统仿真中，通过减少模型相关状态空间维度或自由度，计算出与原始模型近似结果，实现降阶。模型融合则是将多个模型结果整合，形成更全面准确的模型，可提升模型泛化能力和预测精度。在数字孪生中，降阶模型ROM是高保真静态或动态模型的简化，类型分为基于物理的ROM和基于数据的ROM。基于物理的ROM如Krylov子空间方法、模态分析，适合近似线性模型；基于数据的ROM如POD、Hyperreduction，可处理复杂非线性行为。通过将降阶技术与模型融合结合，能在保证精度的同时，显著提升计算效率，满足实时性需求。

### 3. 云边协同架构

云边协同架构是云计算与边缘计算互补协同的产物，通过云和边缘的紧密协作满足多样化应用场景需求。该架构中，“云”代表传统云计算的中心节点，发挥对边缘计算的管控作用；“边”是云计算的边缘侧，分为基础设施边缘和设备边缘；“端”则是终端设备，如各类传感器和摄像头等。边缘计算将数据处理推向距离数据源更近的边缘设备，减少数据传输到远程数据中心的时间，降低延迟，适用于对实时性要求较高的应用。同时，边缘设备可进行初步数据处理，只将关键数据传输到云端，优化带宽利用率。此外，云边协同还能提升数据隐私和安全性，使关键应用在网络不稳定或断网时仍能正常运行。通过云边协同，云计算的弹性和边缘计算的实时性得以结合，实现资源优化配置和高效利用，满足不断增长的计算需求和提升用户体验质量。

### 4. 人机交互技术

人机交互技术是人与计算机系统间信息交换和互动的过程，涉及计算机硬件、软件设计及用户交互界面设计等。在数字孪生技术架构中，人机交互技术为用户提供了与数字孪生模型交互的接口，使用户能够直观地了解物理实体的状态和行为。通过人机交互界面，用户可以实时监控设备运行状态、获取故障预警信息，并基于这些信息做出决策。人机交互技术不仅提升了用户体验，还增强了数字孪生系统的易用性和可靠性。例如，在输变电设备运维中，运维人员可通过人机交互界面远程查看设备状态、接收故障告警，并利用虚拟现实或增强现实技术进行沉浸式巡检，提高运维效率。此外，人机交互技术还支持用户自定义界面和功能，满足不同用户的个性化需求，推动数字孪生技术在更多领域的广泛应用。

## 二、数字孪生在输变电设备运维中的具体应用

### （一）设备状态监测与预警

设备状态监测与预警是数字孪生技术在输变电设备运维中的核心应用场景之一，其本质是通过构建物理设备与虚拟模型的实时映射，实现对设备健康状态的动态感知与风险预判。在输变电系统中，设备长期运行于高电压、强电磁、复杂工况环境，传统人工巡检与定期检修模式难以捕捉设备早期隐性故障，而数字孪生技术通过多维度数据融合与智能分析，为设备状态评估提供了全新范式。具体而言，该技术依托部署于变压器、GIS开关、输电线路等关键设备的传感器网络，实时采集温度、振动、局部放电、气体成分等多元参数，并利用边缘计

算节点对数据进行初步清洗与特征提取，随后将关键特征上传至云端数字孪生平台。平台基于物理机理模型与数据驱动模型的双模融合机制，一方面通过有限元分析、热电耦合仿真等手段模拟设备内部物理场变化，另一方面利用机器学习算法（如随机森林、深度置信网络）挖掘历史数据中的故障演化规律，最终形成对设备当前状态的精准画像。当监测数据偏离正常阈值或出现异常关联特征时，系统通过动态阈值调整与趋势外推算法，提前识别潜在故障风险，并生成包含故障类型、严重程度、发展速率等信息的预警报告。例如，针对变压器油中溶解气体分析（DGA）数据，数字孪生模型可结合油色谱特征气体浓度变化速率与设备运行工况，区分过热性故障与放电性故障，甚至预测故障发展至临界状态的时间窗口，为运维人员提供精准的检修决策依据。这种基于全生命周期数据驱动的监测与预警机制，不仅将故障发现时间从“事后检修”提前至“事前预防”，更通过风险量化评估优化了检修资源分配，显著提升了输变电系统的运行可靠性与经济性。

### （二）故障诊断与定位

故障诊断与定位是数字孪生技术在输变电设备运维中实现精准运维的关键环节，其核心在于通过虚拟模型与物理实体的实时交互，突破传统故障分析的时空限制，构建起从数据感知到机理推演的闭环诊断体系。在输变电设备运行过程中，局部放电、绝缘老化、机械疲劳等故障往往呈现隐蔽性、瞬时性和多因素耦合特性，传统方法难以快速定位故障根源并预判其演化路径。数字孪生技术通过集成多源异构数据（如振动信号、红外热成像、超声波检测等），在虚拟空间中构建设备全息镜像，并利用物理模型与数据模型的深度融合实现故障的“双模诊断”。物理模型基于电磁场、热力学、流体力学等机理方程，模拟设备在不同工况下的动态响应，揭示故障发生的物理本质；数据模型则通过深度学习算法（如卷积神经网络、图神经网络）挖掘历史故障案例中的非线性关联特征，捕捉早期微弱故障信号。当设备出现异常时，数字孪生系统同步比对物理模型预测值与实时监测数据，通过残差分析快速锁定故障类型，并结合设备三维模型与拓扑结构，利用空间插值算法和传播路径模拟技术，实现故障位置的毫米级定位。例如，针对GIS设备内部放电故障，系统可结合超声波时差定位与电场仿真模型，精确判断放电点在腔体内的三维坐标，并预判电弧发展对相邻绝缘部件的影响范围。此外，数字孪生

技术还支持故障溯源分析，通过回溯设备历史运行数据与检修记录，揭示故障的累积效应与诱因关联，为设备优化设计和运维策略调整提供数据支撑。这种从故障现象到机理本质的穿透式诊断能力，显著缩短了故障处置时间，降低了设备停运损失，推动输变电运维从“被动抢修”向“主动预防”转变。

### （三）智能巡检与检修优化

智能巡检与检修优化是数字孪生技术赋能输变电设备运维的革新性实践，其通过虚实融合的闭环机制，重构了传统运维模式中“人工经验驱动”的局限性，实现了从“粗放巡检”到“精准运维”的跨越。在输变电设备分布广、环境复杂、故障风险隐蔽的场景下，数字孪生技术以设备三维模型为载体，集成无人机、机器人、在线监测装置等多源感知数据，构建起覆盖全域的“数字巡检网络”。通过实时映射设备物理状态，系统可动态生成巡检任务优先级，结合GIS地理信息与设备健康度评估，规划最优巡检路径，例如针对高风险区域自动调整无人机航迹，或对老旧设备增加红外热成像频次，使巡检效率提升40%以上。同时，数字孪生平台利用图像识别、点云匹配等技术，对巡检数据（如红外图像、可见光视频、局部放电谱图）进行实时分析，自动识别螺栓松动、绝缘子破损、油位异常等缺陷，并通过与历史数据对比，判断缺陷发展趋势，例如基于裂纹扩展模型预测绝缘子剩余寿命，将缺陷识别准确率提升至95%以上。在检修优化层面，数字孪生技术通过融合设备状态数据、检修工单与供应链信息，构建检修资源动态调度模型，优化备件库存与人力配置，例如根据设备故障概率预测提前调配检修班组，或通过虚拟调试验证检修方案可行性，减少现场调试时间。此外，系统还可基于设备全生命周期数据，生成“一机一策”的差异化检修策略，例如对关键设备实施状态检修，对非关键设备采用基于可靠性的检修（RBM），在保障安全性的同时降低运维成本。

### （四）全生命周期管理

全生命周期管理是数字孪生技术重塑输变电设备运维范式的核心支撑，通过虚实映射与数据驱动的深度融合，将设备从设计、制造、安装、运行到退役的全过程纳入统一管理框架，实现全流程透明化与价值最大化。在设备设计阶段，数字孪生技术通过构建虚拟原型，模拟不同工况下的电磁场分布、热应力变化及机械振动特

性，优化绝缘结构与散热设计，例如基于多物理场耦合仿真预测变压器局部过热风险，提前调整绕组布局，降低后期运维成本。进入制造环节，数字孪生模型集成供应商数据与工艺参数，对关键部件（如GIS罐体焊接、套管绝缘浇注）进行虚拟质量追溯，通过数字孪生标签记录每一道工序的实时数据，确保质量可追溯性与工艺一致性。设备投运后，数字孪生平台持续整合在线监测数据、巡检记录与历史工单，构建设备健康度指数（HDI），动态评估设备剩余寿命与风险等级，例如结合油色谱分析与局部放电趋势，预测变压器绝缘老化速率，并基于风险矩阵制定差异化运维策略。当设备进入退役阶段，数字孪生技术可模拟拆解过程，评估部件再利用价值，例如通过材料成分分析与剩余强度计算，判断断路器灭弧室是否适合翻新再制造，同时生成环保处置方案，减少废弃物对环境的影响。此外，全生命周期数据沉淀形成的知识图谱，可反向赋能设计迭代，例如将运行中暴露的缺陷数据输入设计模型，优化新一代设备的结构强度与冗余设计。

### 结论

数字孪生技术应用于输变电设备运行维护给产业带来深刻的变化。它通过设备状态监测和预警，故障诊断和定位，智能巡检和检修优化以及全生命周期管理等技术，将数据感知和决策优化贯穿于整个链条。这一技术在提高运维效率和精准度、减少故障风险和运维成本的同时，也促进运维模式由“经验驱动”到“数据驱动”转变。伴随着技术的不断迭代和数据资产的日益累积，数字孪生必将成为推动输变电运维智能化升级发展的核心动力，从而为建设安全、高效、绿色新型电力系统奠定坚实基础，并引领产业向更高发展层次迈进。

### 参考文献

- [1] 陈宏同. 数字孪生技术架构及在输变电设备运维中的应用[J]. 电力设备管理, 2024(23): 186-188.
- [2] 张晓刚, 王策, 龙娜, 田钺, 李建康, 王道. 等. 数字孪生技术架构及在输变电设备运维中的应用[J]. 上海电力大学学报, 2022, 38(5): 507-512.
- [3] 刘云鹏, 刘一瑾, 律方成. 等. 数字孪生技术在输变电设备中的应用前景与关键技术[J]. 高电压技术, 2022, 48(5): 1621-1633.