

基于数字孪生技术的变电站智能运维管理系统设计与实现

曹倩

国网重庆市南供电公司 重庆 401336

摘要:数字孪生技术通过构建物理实体与虚拟模型的实时映射,实现对物理对象全生命周期的动态感知、仿真分析与智能决策,为变电站运维管理模式的革新提供了核心技术支撑。基于数字孪生技术的变电站智能运维管理系统,能够打破传统运维的信息壁垒与时空限制,将变电站的物理状态、运行数据、运维流程全面数字化、可视化,推动运维工作从“被动抢修”向“主动预判”“精准运维”转变。

关键词:数字孪生技术;变电站;智能运维;系统设计

1 基于数字孪生的变电站智能运维管理系统设计

1.1 总体架构设计

结合数字孪生技术特征与变电站运维需求,系统采用“五层架构”设计,从下至上依次为物理感知层、数据传输层、虚拟建模层、智能分析层与应用服务层,各层之间通过标准化接口实现数据交互与功能协同,形成完整的运维管理闭环。

物理感知层是系统的数据采集基础,主要由部署在变电站内的各类传感设备、监测装置与智能终端组成。其中,传感设备包括温度传感器、湿度传感器、振动传感器、局部放电传感器等,用于采集设备运行状态参数与环境参数;监测装置包括视频监控摄像头、红外热成像仪等,用于实现对设备外观状态与现场环境的可视化监测;智能终端包括智能电表、智能继保装置等,用于采集设备运行数据与控制指令反馈。该层的核心功能是实现对变电站物理实体全要素的全面感知与数据采集。

数据传输层是连接物理感知层与上层架构的关键桥梁,负责将物理感知层采集的各类数据实时、稳定地传输至后续处理环节。系统采用“有线+无线”融合的传输方式:对于关键设备的核心运行数据,采用光纤通信方式传输,确保数据传输的稳定性与安全性;对于环境参数、视频监控等非核心数据,采用5G、LoRa等无线通信方式传输,提升系统部署的灵活性。同时,该层设置数据预处理模块,对采集的原始数据进行去噪、滤波、格式转换与数据校验,剔除无效数据,保障后续数据处理的准确性。

虚拟建模层是系统的核心核心,负责构建变电站的数

字孪生模型,实现物理实体的数字化复刻。该层采用“组件化建模”思路,将变电站数字孪生模型拆解为设备级模型、系统级模型与场景级模型三个层级:设备级模型针对变压器、断路器等单个核心设备,精准复刻其几何结构、内部组件与物理参数;系统级模型基于设备级模型,构建设备之间的连接关系与协同运行逻辑,反映变电站的整体运行架构;场景级模型整合系统级模型与变电站周边环境模型,形成完整的变电站数字化场景。建模过程中,通过融合BIM(建筑信息模型)、GIS(地理信息系统)与CAD技术,提升模型的几何精度与可视化效果,同时关联物理感知层采集的实时数据,实现模型与物理实体的动态同步。

智能分析层是系统的决策支撑核心,负责对虚拟建模层传输的实时数据与历史数据进行深度分析,为运维决策提供数据支撑。该层集成数据挖掘、机器学习、仿真分析等智能算法,主要实现三大功能:一是运行状态评估,通过对比实时运行数据与标准参数阈值,判断设备运行状态是否正常;二是故障诊断与预判,基于历史故障数据与实时运行数据,通过算法模型识别设备潜在故障风险,预判故障发生位置与时间,并分析故障原因;三是运维策略优化,结合设备运行状态、故障风险等级与运维资源配置情况,智能生成最优运维计划。

应用服务层是系统的价值输出端,面向运维管理人员提供可视化、智能化的运维管理功能,所有功能均以图形化界面的形式呈现,操作简洁直观。该层主要包含设备管理、状态监测、故障预警、运维调度与报表统计五大核心模块,各模块相互协同,形成完整的运维管理流程。

1.2 核心功能模块设计

(1) 设备管理模块

设备管理模块是系统的基础功能模块，负责实现对变电站内所有设备的全生命周期信息管理。模块内置设备信息数据库，存储设备的基础参数、出厂信息、安装记录、维护记录、检修报告等全要素信息。运维人员可通过该模块快速查询设备信息，更新设备维护记录，管理设备生命周期状态。同时，模块与虚拟建模层关联，点击虚拟模型中的设备，可直接调取该设备的详细信息，实现虚拟模型与设备信息的联动查询。

(2) 状态监测模块

状态监测模块通过整合物理感知层采集的各类数据，实现对设备运行状态与现场环境的实时监测与可视化呈现。模块支持多维度数据展示，包括设备运行参数（如变压器油温、绕组温度、断路器分合闸状态）、环境参数（如站内温度、湿度、风速、降雨量）与视频监控画面。同时，模块设置参数阈值预警功能，当监测数据超过预设阈值时，自动触发预警提示，并在虚拟模型中高亮显示对应的设备或区域，方便运维人员快速定位异常位置。

(3) 故障预警模块

故障预警模块基于智能分析层的故障预判算法，实现对设备潜在故障的提前预警与故障诊断。模块能够实时分析设备运行数据的变化趋势，结合历史故障数据，识别设备的异常运行特征，提前预判可能发生的故障类型（如变压器绝缘老化、断路器接触不良等）、故障位置与故障发生时间，并生成故障预警报告，通过系统弹窗、短信、邮件等多种方式推送至运维人员。对于已发生的故障，模块可通过对比故障数据与历史故障案例，快速分析故障原因，给出初步的故障处理建议。

(4) 运维调度模块

运维调度模块实现对运维流程的自动化调度与运维资源的优化配置。模块基于设备故障预警等级、运维任务优先级与运维人员、物资的分布情况，智能生成运维任务清单，自动分配运维人员与运维物资，并规划最优运维路线。同时，模块支持运维任务的实时跟踪与进度管理，运维人员可通过移动端终端接收运维任务、反馈运维进度，运维管理人员可通过系统实时监控运维任务的执行情况，确保运维工作高效推进。

(5) 报表统计模块

报表统计模块负责对变电站运维管理过程中的各类数据进行统计分析与报表生成。模块支持自定义统计维度，可生成设备运行状态报表、故障预警报表、运维任务完成情况报表、运维成本统计报表等多种类型的报表。报表形式包括表格、折线图、柱状图等，直观呈现运维管理数据的变化趋势与统计结果。运维人员可通过该模块快速获取运维管理数据总结，为后续运维策略的优化提供数据参考，同时支持报表的导出与打印，方便日常工作。

2 系统关键技术实现

2.1 多源数据采集与预处理技术

多源数据采集技术是系统实现的基础，核心是确保对变电站物理实体全要素数据的全面、精准采集。系统采用“通用传感器+专用监测设备+智能终端”的多设备协同采集方案：对于设备运行状态参数，采用高精度传感设备进行实时采集，如采用光纤光栅传感器采集变压器绕组温度，采用超声波传感器采集设备局部放电信号；对于现场环境参数，采用集成化环境监测装置采集温度、湿度、风速等数据；对于设备控制指令与运行状态反馈，通过智能继保装置、智能电表等智能终端实现数据采集。

数据预处理技术是保障数据质量的关键，主要实现对原始采集数据的净化与标准化处理。首先，通过数据去噪算法（如均值滤波、小波去噪等）剔除采集过程中因设备干扰、环境噪声产生的无效数据；其次，通过数据补全算法填补因传输延迟或设备故障导致的数据缺失；最后，对不同来源、不同格式的数据进行标准化转换，将其统一为系统可识别的格式，确保数据在各层架构之间的顺畅传输与交互。

2.2 变电站数字孪生建模技术

变电站数字孪生建模技术的核心是实现物理实体与虚拟模型的精准映射，系统采用“BIM+GIS+实时数据关联”的融合建模方法。首先，基于BIM技术构建变电站的三维几何模型，精准复刻变电站的建筑结构、设备布局、设备几何形态等物理特征，确保模型的几何精度；其次，结合GIS技术添加地理空间信息，明确变电站与周边环境的空间关系，提升模型的空间定位精度；最后，建立模型与实时数据的关联映射，将物理感知层采集的设备运行参数、环境参数实时关联至虚拟模型的对应组件，实现虚拟模型对物理实体运行状态的动态同步更新。

建模过程中，采用组件化建模思路，将变电站模型拆解为多个独立的设备组件模型，每个组件模型均包含几何信息、物理参数、运行规则等完整属性。这种建模方式不仅能够提升建模效率，还便于后续模型的维护与升级，当设备发生更换或新增时，只需修改或添加对应的组件模型，无需重构整个系统模型。

2.3 实时数据传输与通信技术

实时数据传输与通信技术是保障系统实时性的关键，系统采用“有线+无线”融合的通信架构，构建稳定、高效的数据传输通道。对于关键设备的核心运行数据（如变压器核心参数、断路器分合闸信号），采用光纤通信方式传输，光纤通信具有传输速率高、抗干扰能力强、传输距离远等优势，能够确保核心数据的实时、稳定传输；对于环境参数、视频监控等非核心数据，采用5G与LoRa融合的无线通信方式传输，5G技术保障高速率数据传输，LoRa技术保障低功耗、广覆盖的数据传输，提升系统部署的灵活性与经济性。

同时，系统采用MQTT（消息队列遥测传输）通信协议实现数据的传输与交互。MQTT协议具有轻量级、低带宽占用、低功耗等特点，适用于物联网设备之间的实时数据传输。通过在各层架构之间部署MQTT网关，实现数据的转发与路由，确保数据在物理感知层、数据传输层、虚拟建模层等各层之间的顺畅交互，保障虚拟模型与物理实体的实时同步。

2.4 智能分析与决策算法实现

智能分析与决策算法是系统实现智能化运维的核心，系统集成多种简单实用的智能算法，确保算法的实用性和易实现性。在运行状态评估方面，采用阈值对比算法，通过预设设备运行参数的标准阈值，将实时采集的运行数据与标准阈值进行对比，快速判断设备运行状态是否正常；在故障预警与诊断方面，采用基于历史数据的机器学习算法（如决策树算法、支持向量机算法），通过训练历史故障数据与正常运行数据，构建故障识别模型，实现对设备异常状态的识别与故障类型的判断；在运维策略优化方面，采用贪心算法，基于运维任务优先级、运维资源分布情况，快速生成最优的运维任务分配方案与运维路线规划。

算法实现过程中，采用模块化设计思路，将不同的算法封装为独立的功能模块，通过标准化接口与智能分析层、应用服务层进行交互。这种设计方式便于算法的调试、升级与替换，当需要提升算法精度或新增算法功能时，只需修改对应的算法模块，无需重构整个系统。

2.5 可视化呈现与交互技术

可视化呈现与交互技术是提升系统易用性的关键，系统采用WebGL与HTML5技术构建可视化交互界面，实现变电站数字孪生模型的三维可视化呈现与便捷的交互操作。通过WebGL技术，能够在浏览器中直接渲染三维虚拟模型，无需安装额外插件，方便运维人员通过任意终端（电脑、平板、手机）访问系统；通过HTML5技术构建直观、简洁的操作界面，支持对虚拟模型的旋转、缩放、平移等操作，实现对设备的精准定位与信息查询。

同时，系统采用“虚实联动”的交互方式，通过点击虚拟模型中的设备，可直接调取该设备的详细信息、实时运行数据、维护记录等内容；通过在虚拟模型中标记异常位置，可直接关联至现场视频监控画面，实现对异常位置的可视化监测。此外，系统支持多视角展示功能，可通过全局视角查看变电站整体运行状态，通过局部视角查看单个设备的详细运行状态，提升运维人员的操作便捷性。

3 结束语

综上，基于数字孪生技术的变电站智能运维管理系统，通过构建物理实体与虚拟模型的实时映射，实现了变电站运维的精准监测、提前预警、智能调度与科学管理，有效破解了传统运维模式的固有缺陷。系统的设计与实现遵循简洁实用的原则，核心技术成熟可靠，应用价值显著，为变电站运维管理的智能化转型提供了有效的技术方案。未来，随着相关技术的持续发展与应用场景的不断拓展，该系统将在电力行业智能化发展中发挥更大的作用。

参考文献：

- [1] 李志强, 金国胜, 等. 基于数字孪生和VR的变电站巡检路径可视化方法 [J]. 微型电脑应用, 2025, 41(09): 201–205.
- [2] 王梦芝, 钟智栋. 变电站监控系统数字孪生调试技术研究 [J]. 设备管理与维修, 2025, (16): 8–11.
- [3] 孙应春, 顾中一, 等. 基于数字孪生技术的变电站二次回路设计创新 [J]. 粘接, 2025, 52(07): 183–185.
- [4] 高杨, 赵旷怡, 等. 面向智能化变电站的数字孪生技术应用 [J]. 电信科学, 2025, 41(06): 188–196.
- [5] 周亮亮. 基于数字孪生技术的变电站二次设备自动调试系统设计 [J]. 自动化应用, 2025, 66(07): 168–170.
- [6] 汤益飞. 试析变电站数字孪生框架构建与关键技术 [J]. 中国新技术新产品, 2025, (02): 1–3.