# 基于数字孪生的电网设备全生命周期状态评估与运维优化研究

朱　波，夏茂钧，戴　星

（眉山多能电力建设有限责任公司，四川 眉山 620020）

**摘　要**　随着电网设备保有量持续增长、新能源并网规模不断扩大，传统运维模式在状态感知时效性、健康评估准确性和决策优化科学性上的短板日益凸显。为此，探索基于数字孪生技术的电网设备全生命周期管理路径，覆盖多源异构数据实时采集与融合、混合驱动健康状态评估等核心技术环节，同时贯通规划设计阶段的方案推演、运维检修阶段的智能预警、退役处置阶段的延寿评估与绿色回收全流程。本文深入探讨数字孪生驱动的状态评估方法与运维优化策略，以期为电网设备资产精益化管理提供参考，推动运维模式实现从被动反应向主动预判和精准决策的转变。

**关键词**　数字孪生；电网设备；全生命周期；状态评估；运维优化

**中图分类号**：TM76；TP399　　**文献标志码**：A　　**DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.27.012

## 0　引言

数字孪生通过集成物理模型、传感器数据与历史信息，在虚拟空间中构建实体装备的全生命周期映射，其核心技术涵盖多源异构数据实时采集与融合、多时空尺度高精度建模以及云边协同超实时仿真与人工智能决策，能够实现“感知—建模—仿真—预测—决策”的闭环运行。在电网设备管理领域，数字孪生为突破传统状态评估滞后、检修决策依赖经验的瓶颈提供了全新路径。因此，深入探索基于数字孪生的电网设备全生命周期状态评估方法与运维优化策略，对于提升电网运行可靠性、降低全生命周期成本具有重要的工程应用价值。

## 1　数字孪生基本概念与关键技术

### 1.1　数字孪生基本概念

数字孪生是一个集成多物理、多尺度、概率模拟的仿真模型，通过使用最优的物理模型、传感器数据和历史信息，可以模拟出真实飞行器或系统的全生命周期状态。它集成了建模与仿真、虚拟现实、物联网、云边协同以及人工智能等技术，通过实测、仿真和数据分析来实时感知、诊断、预测物理实体对象的状态，通过指令来调控物理实体对象的行为，并通过相关数字模型间的相互学习来进化自身[1]。数字孪生是指在数字空间中建立物理电网的镜像系统，该系统利用实时数据来精确反映物理对象，并且可以进行模拟、监控、预测和优化等任务，数字孪生电网建立物理电网的全要素数字化镜像，让实体设备和虚拟模型可以进行实时交互，该系统通过感知、建模、仿真预测决策形成的闭环运行模式，支持源网荷储进行高效互动，并且支持新能源以高比例接入和高水平消纳。

### 1.2　数字孪生关键技术

#### 1.2.1　多源异构数据实时采集与融合技术

电网数据主要来源于SCADA系统、PMU、智能电表、气象卫星、无人机巡检等各个不同的系统[2]。利用部署边缘计算节点的方式，并且使用OPC UA、MQTT、IEC 61850等标准化工业协议，可以达到毫秒级的数据采集和传输。在云端建立统一数据中台，对数据进行清洗和时空对齐，并且实现语义标准化，形成多源数据融合模式，可以把气象数据、用电行为、设备历史记录等超过12类异构数据源整合起来，利用知识图谱技术建立设备全生命周期档案。

#### 1.2.2　多时空尺度高精度建模技术

电网数字孪生建模包括毫秒级电磁暂态和年度规划运行等多时空尺度，并且分为元件级、馈线级、区域级和系统级这四个层次，元件级运用基于物理的有限元建模方法，并且也结合数据驱动残差网络来进行混合建模；系统级应用降阶卡尔曼滤波形成低维状态

作者简介：朱波（1986-），男，本科，工程师，研究方向：电气工程。

空间。通过毫米级激光点云建模可以实现杆塔、线路、变电站等要素的高精度三维还原。

## 2 数字孪生在全生命周期中的作用机制

### 2.1 规划设计阶段的精准推演机制

在电网规划设计阶段，数字孪生基于历史运行数据与地理信息构建多场景规划仿真环境。通过融合负荷预测模型、新能源出力概率模型及电网拓扑约束，对不同网架结构方案进行全时序仿真推演，量化评估供电可靠性、线损率、新能源消纳能力等关键指标[3]。同时，利用孪生体的“预演”能力，对规划方案开展“假设—仿真—评估”闭环迭代，自动推荐最优变电站选址、线路路径及容量配置方案。孪生系统还可叠加极端天气、设备故障等扰动场景，验证规划方案的鲁棒性，从源头规避未来运行风险，降低全生命周期综合成本。

### 2.2 运维检修阶段的智能诊断预测机制

运维阶段运用数字孪生技术实时同步设备状态量，其中包括油色谱、局放和红外测温、环境负荷数据，并以此来建立设备退化和健康度评估模型。并运用长短时记忆网络和物理退化模型相结合的混合驱动方式，对变压器、断路器、电缆等主要设备的剩余寿命及故障概率进行预测。同时，孪生体利用比较实际状态和仿真基准模型之间的差别，来完成早期异常检测和根因溯源，比如分辨套管介损异常是由受潮或者污秽引起的。

## 3 基于数字孪生的电网设备全生命周期状态评估方法

### 3.1 状态感知、数据获取与多源信息融合

电网设备状态感知需要进行多源异构数据的统一采集和融合，数字孪生需要利用多源数据融合来达到虚实双向实时交互的目的，该技术的主要指标规定数据同步精度要达到微秒级[4]。作为国家电网公司 2025 年数字孪生电网九大重点工程之一，设备全过程贯通提升工程覆盖电网核心业务多、贯穿设备资产管理链条长，为设备质量的深度解析与全环节问题追溯提供了有力支撑。

在变电站侧部署智能采集终端，针对变压器、断路器、GIS 等主设备接入油色谱在线监测装置、超高频局放传感器、铁心接地电流监测单元以及分合闸线圈电流波形采集模块。所有传感器通过 RS485 总线汇聚至边缘计算网关，网关运行实时数据清洗算法，剔除明显超出量程的异常点并采用三次样条插值补齐缺失数据。对于红外热像和紫外放电视频流，利用边缘端轻量化卷积神经网络提取热点温度最高值及放电光子计数的时序序列。同时，从站控层获取 SCADA 系统的电压、电流、有功无功等遥测数据，从生产管理系统读取设备台账、出厂试验报告及历史检修记录。在云端建立基于 OPC 统一架构的信息模型，按照国际电工委员会通用信息模型标准将不同来源的数据统一映射为“设备—时间—属性—值”四元组。采用扩展卡尔曼滤波对同一物理量的多个信源进行最优融合估计，消除传感器漂移和随机噪声。

### 3.2 模型构建，全生命周期健康状态评估

全生命周期健康评估的核心是建立融合物理机理与运行数据的混合模型。该模型以设备出厂参数为基准，结合实时感知数据动态构建健康基准曲线，通过多维度特征加权输出健康指数。这种混合建模方式既保留了物理模型的科学解释性，又通过数据驱动方法自适应个体差异，实现对设备从投运到退役全过程的连续量化评估。

以油浸式变压器为例，利用热老化理论形成绝缘纸聚合度随热点温度和时间衰减的机理方程，并且引入电老化修正因子，把局部放电累积效应纳入模型模式中，同时使用设备在投入使用初期进行的出厂试验资料和前三个完整检修周期内稳定的运行记录，通过粒子群优化算法反演模型中与个体设备相关的老化活化能参数，使基准模型贴合该设备的实际老化轨迹。健康基准的建立方法如下：取设备投运后第一个检修周期内的油色谱比值、介质损耗因数、绝缘电阻、铁心接地电流等特征参数，经主成分分析降维后拟合为多维高斯分布，作为健康域的参考标准。实时评估过程提取当前周期内同维度特征向量，计算该向量和健康域之间的马氏距离，然后利用 S 型函数把它转换为介于零和一之间的健康指数。健康指数分为优、良、注意、异常和严重这五个等级。对于频繁承受短时过载的配电变压器，将过载累计时长作为额外的衰减因子嵌入评估模型。

## 4 数字孪生视域下面向全生命周期的电网设备运维优化策略

### 4.1 规划设计预演，方案择优比选

规划设计阶段引入数字孪生，可构建电网规划方案的虚拟推演环境。通过孪生体对多种网架结构、站址选择、容量配置方案进行全时序仿真，量化评估供电可靠性、线损率、新能源消纳能力等关键指标。以孪生预演替代传统经验决策，实现方案比选从定性到定量的转变，从源头降低全生命周期运维成本。

在数字孪生平台中导入待规划区域的地理信息、现有网架拓扑、三年以上负荷历史数据以及新能源并网规划。规划设计人员根据初步设想建立两种至三种备选方案，如新建变电站方案、增容改造方案、分散式布点方案。将各方案的设备参数、线路参数录入孪生模型，设置未来五年至十年的负荷增长预测和多场景新能源出力曲线。孪生系统对每个方案开展逐小时连续仿真运行，自动计算各年度的供电可靠率、综合线损率、设备平均负载率以及N-1通过率。在此基础上，孪生平台内置多目标优化引擎，以全生命周期成本最小化为目标，将建设投资、运行维护费用、预计停电损失三者加权求和，输出各方案的综合评价值。同时，系统可叠加极端天气、设备故障等扰动场景，仿真不同方案在异常工况下的自愈能力和恢复时间。仿真结果以可视化图表展示各方案的优劣分布，规划人员可点击任意时间点查看详细数据[5]。

### 4.2 运维智能预警，精准检修决策

数字孪生驱动的运维策略核心在于将“事后处置”前移至“事前预警”。通过实时镜像设备状态并融合退化规律，构建故障概率的动态推演模型。同时，基于推演结果匹配差异化检修策略，使运维干预时机与设备实际健康水平精准对齐，实现从定期检修向预测性检修的范式转换。

在数字孪生平台上为每台主设备建立专属的健康档案，档案包含设备铭牌参数、出厂试验数据、历年检修记录以及每日更新的油色谱、局部放电、红外测温等实时数据。孪生系统采用时序预测模型对关键状态量进行未来三十天至九十天的趋势计算，当预测值接近标准限值时自动触发预警并推送至运维人员。收到预警后，运维人员在孪生平台点击预警设备，系统立即展示预警原因分析。

### 4.3 退役延寿评估，绿色回收优化

随着社会经济的蓬勃发展，电力已经成为关乎国家经济命脉、保障国计民生发展的重要能源。国家电网公司担负着保障国家能源安全、振兴实体经济、赋能美好生活的重责大任。同时，设备临近寿命末期时，数字孪生可以整合全生命周期运行与检修数据，构建设计寿命、实际老化程度与剩余承载能力的三维评估模型，并基于电－热－力耦合仿真，量化设备继续运行的安全裕度与风险，提出延寿、降级或退役的决策建议。

当设备运行年限接近设计寿命的时候，数字孪生平台自动启动退役评估流程。系统调取该设备从投运至今的全部数据，包括出厂试验值、历次检修报告、过载历史记录、绝缘老化测试结果等。首先基于热老化模型，根据实际负载曲线反演出等效老化年限，与设计寿命进行对比。若等效老化年限明显低于设计寿命，表明设备具备延寿潜力；反之则建议退役。对于具备延寿潜力的设备，孪生系统开展电－热－力耦合仿真，模拟未来三年至五年继续运行时的绝缘强度衰减和热点温度分布，评估在不同负载率约束下的安全裕度。系统输出延寿可行性报告，明确建议的负载率上限、加强巡检的具体项目和频次以及下次全面评估的时间节点。对于需要退役的设备，孪生系统进一步启动绿色回收优化模块。该模块根据设备的结构组成，自动生成最优拆解序列：先排放并检测绝缘油，根据油品检测结果分类为可回收再生油、可降级使用油或危废处置；再拆解铜绕组、铁芯硅钢片、绝缘材料、套管、分接开关等部件，标注每种材料的预估重量和纯度。系统对接物资回收企业的报价数据库，计算每台退役设备的可回收价值，并生成拆解工艺指导书，明确各步骤的安全注意事项和环保处置要求。

## 5 结束语

本文系统梳理了数字孪生的基本概念与关键技术，阐明了其在电网设备规划设计、工程建设及运维检修阶段的作用机制。在此基础上，构建了涵盖数据获取与多源信息融合、全生命周期健康状态评估方法体系，并提出了规划设计预演、运维智能预警、退役延寿评估三项优化策略。实际应用表明，该框架实现了设备健康指数的动态量化、剩余寿命的滚动预测以及检修决策的智能生成，显著降低了非计划停运风险，延长了设备服役周期，为电网资产的全生命周期价值最大化提供了可落地的技术支撑。

## 参考文献：

[1] 黄文德,张晓飞,庞湘萍,等.基于北斗与数字孪生技术的智能电网运维平台研究[J].电子测量技术,2021,44(21):31-35.

[2] 乔玉聪,霍跃钦,姚成功,等.基于数字孪生的连铸设备智能运维平台研究与应用[J].重型机械,2026(01):1-7.

[3] 詹谭,博驰.基于数字孪生的电网数字化转型研究[J].能源与环保,2021(11):43.

[4] 沈超,陈兴东,史清璞,等.数字孪生驱动的变电站智能巡检路径优化与设备健康评估方法[J].信息与电脑,2025(07):38-40.

[5] 王璐,苗淞.基于数字孪生技术的变电站智能管理与运维优化研究[J].电工电气,2024(05):69-73.