

数字孪生技术在电力系统自动化运维中的应用

郭大强

江西省水投能源发展有限公司新能源运维分公司 江西南昌 330000

摘 要：本文系统研究了数字孪生技术在电力系统自动化运维中的应用。研究首先阐述了电力系统数字孪生的构建基础，包括其四层体系架构、多源异构数据融合处理技术以及物理实体与虚拟模型的实时映射机理，为技术应用奠定了理论基础。在此基础上，文章深入剖析了数字孪生在设备状态实时监测与故障诊断、运行状态评估与风险预警以及检修决策支持与方案优化三大核心应用场景中的价值，揭示了其推动运维模式向精准化、前瞻化转变的潜力。进而，提出了构建全要素数字孪生平台、建立数据驱动的闭环运维流程以及培养复合型运维技术人才三条具体实现路径，旨在确保技术有效落地并持续创造价值。该研究旨在为电力系统构建一个虚实融合、智能闭环的自动化运维新范式，以提升电网的安全可靠性与运行效率。

关键词：数字孪生；电力系统；自动化运维；故障诊断

引言

随着能源转型与电网复杂性的日益提升，传统依赖周期性巡检和事后处理的电力系统运维模式已难以满足现代电网对安全、可靠、高效运行的严苛要求。数字孪生技术通过构建与物理系统实时映射的虚拟模型，为实现对电力系统状态的深度感知、精准分析和智能决策提供了全新的技术路径。因此，深入研究数字孪生技术在电力系统自动化运维中的应用场景、核心价值与实现路径，对于推动运维模式从被动响应向主动预防、从经验驱动向数据智能的深刻变革，具有重大的理论价值和紧迫的现实意义。

一、电力系统数字孪生的构建基础

（一）电力系统数字孪生的体系架构

电力系统数字孪生体系架构是实现功能的理论框架与技术蓝图，定义了从物理世界到虚拟空间再到决策反馈的完整信息流与控制流。成熟架构通常分四层，形成闭环演进系统。底层是物理实体层，含电力系统真实设备、设施和环境，是数据来源与指令执行者。其上是数据采集与传输层，通过传感器和通信网络捕获物理实体状态等信息，转化为数字信号供上层。再往上是虚拟模型与仿真层，是核心，利用多种建模技术构建与物理实体高度一致的虚拟模型集合，能基于实时数据动态仿真。最高层是应用与服务层，面向运维需求开发智能化应用，分析结果和决策反馈到物理实体层，形成闭环。分层架构为系统设计等提供指导，支撑电力系统自动化运维。

（二）多源异构数据的融合与处理

多源异构数据融合与处理是构建电力系统数字孪生的数据基石，目标是解决数据集成的“信息孤岛”和“数据冲突”问题，为虚拟模型提供驱动数据。电力系统数据多源异构，来源广泛、格式多样、时空尺度不同。融合处理需建立统一数据模型与标准，如采用CIM；具备强大数据预处理能力，包括清洗、对齐、标准化；关键是数据融合技术，有特征层和决策层融合；海量数据依托分布式存储与计算框架处理。其价值是将分散数据转化为高价值信息资产，为数字孪生提供多维度数据视图^[1]。

（三）物理实体与虚拟模型的实时映射机理

物理实体与虚拟模型实时映射机理是数字孪生区别于传统的根本特征，确保虚拟模型反映物理实体真实状态。实现依赖闭环信息交互过程。从物理到虚拟是数据驱动更新，基于模型校准与状态估计技术，对数据实时映射要求高传输和处理速度。从虚拟到物理是控制指令反馈，虚拟模型预测风险或生成策略后，指令下发改变物理系统状态，新状态数据再反馈到虚拟模型。建立实时映射机理需解决关键技术，其价值是构建物理与虚拟世界双向实时信息通道，提升自动化运维实时性、准确性和前瞻性。

二、数字孪生在电力系统自动化运维中的核心应用

（一）设备状态实时监测与故障诊断

设备状态实时监测与故障诊断是数字孪生技术在电力系统自动化运维中最基础且最直接的应用，其核心价

值在于将传统的基于周期性巡检和事后分析的模式,转变为基于实时数据驱动的、高精度的状态感知与智能故障定位。传统设备监测依赖有限传感器数据和定期人工检查,难捕捉设备内部细微变化与突发故障征兆。数字孪生构建与物理设备对应的高保真虚拟模型,实现对设备状态的深度、透明化感知。实时监测时,数字孪生体接收展示设备表面量测数据,还利用物理机理模型推算内部关键状态参数,如通过变压器相关数据计算绕组热点温度等核心指标,助运维人员全面掌握设备运行状态。故障诊断方面,数字孪生优势突出。设备异常或故障时,其平台捕捉传感器数据变化,启动诊断模块,对比虚拟模型与物理系统响应精确识别故障特征,如发电机振动异常时判断故障类型,复杂电网故障时复现电磁暂态过程定位故障点、分析机理。该基于模型驱动的诊断方法克服了数据驱动方法的缺点,准确性和可解释性更高。因此,数字孪生让设备监测深入“机理”,故障诊断提升到“科学推演”,为设备预测性维护和故障快速处理提供技术支撑^[2]。

(二) 运行状态评估与风险预警

运行状态评估与风险预警是数字孪生技术从关注单体设备上升到关注整个系统层面的核心应用,其根本目的在于超越对当前状态的简单描述,实现对系统未来安全态势的量化评估与前瞻性预警。传统电网安全评估多依赖离线确定性计算,如N-1校验,计算工况有限,难反映实时运行的不确定性与动态风险。数字孪生凭借与物理系统实时同步和高保真仿真能力,为电网运行状态评估提供新范式。在状态评估上,数字孪生体融合多源数据,构建全面、动态的系统安全指标体系。它既计算传统静态安全指标,也利用实时数据动态评估系统暂态稳定水平等。例如,实时计算发电机功角稳定裕度、评估负荷节点电压恢复能力,给出反映电网“强壮程度”的综合健康指数,且持续评估,捕捉运行方式变化对系统安全的细微影响。在风险预警方面,数字孪生核心在于“预测”能力,能回答“未来可能发生什么,风险多大”。其基于当前运行状态和相关预测,快速进行大量蒙特卡洛仿真,模拟故障场景,统计系统失稳或越限概率,量化评估未来电网风险水平。当区域风险指标超阈值,系统自动预警,并反向推演找出关键因素。这种预警机制让运维人员关注风险管理,提升电网主动安全防护能力^[3]。

(三) 检修决策支持与方案优化

检修决策支持与方案优化是数字孪生技术在电力系

统自动化运维中实现价值闭环的关键应用,它旨在将状态监测和风险评估的结果转化为科学、经济、高效的检修行动,推动运维模式从“计划性检修”向“状态修”和“预测性维护”的深度转变。传统检修决策多依赖固定周期或制造商建议,易致“过度维修”或“维修不足”,浪费资源且有安全隐患。数字孪生为检修决策提供精准量化的设备健康状态和系统风险数据支持与分析能力。在检修决策支持上,数字孪生体为每台设备建动态“健康档案”,含实时更新的寿命消耗与故障概率模型。制定检修计划时,系统依设备健康指数、故障概率、电网重要性及检修成本综合排序,如关键位置但健康指数尚可的变压器,检修优先级或高于次要位置但健康指数差的设备,确保检修资源合理利用。在检修方案优化方面,数字孪生仿真能力作用大。检修前,运维人员可在数字孪生环境模拟推演不同方案,如变压器停运检修模拟负荷转移方案,选风险最低、操作简便的;复杂检修作业可在虚拟空间模拟,优化操作流程、人员配合和工器具使用,制定最优作业指导书。检修后,可通过数字孪生模型验证效果,量化评估检修质量。数字孪生使检修决策从经验定性判断转变为数据模型定量优化,提升检修精准性、经济性和安全性,是实现电力资产全生命周期效益最大化的核心技术手段^[4]。

三、数字孪生驱动的电力系统自动化运维实现路径

(一) 构建全要素的数字孪生平台

构建全要素的数字孪生平台是实现数字孪生驱动的自动化运维的先决条件和核心载体,其本质是创建一个能够全面、精确、动态映射电力系统物理世界的数字化基础设施。这里的“全要素”是关键,意味着平台不能局限于单一设备或局部系统,须覆盖发电、输电、变电、配电到用电的完整链条及相关所有要素。构建该平台,首先要建立统一技术架构和标准体系,包括统一数据接入标准、采用统一建模语言、构建统一时空基准。其次,平台需具备多尺度、多物理场的建模与仿真能力,融合多尺度模型,可进行系统宏观态势感知和设备微观机理分析。再者,平台要有强大的数据处理与计算能力,依托相关技术构建弹性可伸缩计算资源池。最后,平台应具备开放性和可扩展性,提供标准化API形成应用生态。构建全要素数字孪生平台的价值在于打破传统电力系统壁垒,形成统一、完整、动态的数字底座,为后续运维和人才培养提供技术基础。

(二) 建立数据驱动的闭环运维流程

建立数据驱动的闭环运维流程是将数字孪生平台从

静态的“数字镜像”转变为动态的“智能决策中枢”的关键步骤，其核心是构建一个“感知-分析-决策-执行-反馈”的持续优化循环。传统的运维流程多为开环或半开环，即人工分析、人工决策、人工执行，信息反馈链条长且效率低下。数据驱动的闭环流程使过程高度自动化和智能化。流程始于“感知”，通过全要素数字孪生平台全面、实时、精准感知物理系统运行状态。接着是“分析”，平台内置智能分析引擎自动处理感知数据，识别异常、评估状态、预测趋势。然后是“决策”，系统基于分析结果自动生成运维建议或决策方案，决策可人机协同或全自动。随后是“执行”，决策指令通过平台下发到相关系统，指导自动控制调整或通知运维人员执行。最后是“反馈”，执行结果产生的新数据被平台再次感知，形成闭环。此闭环实现了运维知识的实时转化和应用，产生的新数据和经验可优化数字孪生模型和智能分析算法，使运维系统具备自学习、自优化能力。该闭环流程提升了运维的响应速度、决策质量和执行效率，是电力系统自动化、智能化运维的核心机制^[5]。

（三）培养复合型运维技术人才

培养复合型运维技术人才是确保数字孪生技术在电力系统自动化运维中成功落地并持续发挥价值的根本保障。数字孪生技术的引入，彻底改变了传统运维的工作内容、技能要求和思维模式，对运维人员提出了全新的挑战。传统运维人员通常专注于某一特定领域，如电气一次、二次继保或通信，其知识结构相对单一。而数字孪生驱动的运维，则需要人才具备跨学科的知识体系和综合能力。这种复合型人才首先需要掌握扎实的电力系统专业知识，深刻理解电网的运行原理、设备特性和安全规程，这是判断数字孪生分析结果是否合理、决策是否可行的基础。其次，他们需要具备较强的信息技术素养，熟悉数据科学的基本原理，了解传感器技术、通信网络、数据库、云计算和人工智能的基本概念和应用，能够理解数字孪生平台的数据流和模型逻辑。更重要的是，他们需要具备数据思维和建模能力，能够将实际工程问题抽象为数学模型或数据问题，并利用数字孪生工具进行分析和求解。此外，他们还需要具备系统思维，能够从全局视角理解各子系统之间的相互影响和耦合关系，而不仅仅是局限于单一设备或环节。培养这样的人才，需要建立系统性的培训体系和职业发展路径。这包

括对现有运维人员进行大规模的数字化技能转型培训，更新其知识结构；在高等院校和职业院校中设置交叉学科专业，培养既懂电力又懂信息的后备力量；建立基于数字孪生平台的模拟实训环境，让运维人员在虚拟场景中进行反复演练，积累处理复杂故障和优化运行的经验。

结语

数字孪生技术为电力系统自动化运维带来了革命性的变革，它不仅重构了传统运维的技术体系，更推动了运维模式从被动响应向主动预防、从经验驱动向数据智能的深度转型。通过构建全要素的数字孪生平台，电力系统实现了物理世界与数字空间的深度融合，使得设备状态监测、风险评估和检修决策等关键环节具备了前所未有的精准性和前瞻性。数据驱动的闭环运维流程，则将运维活动转化为一个持续优化的智能循环，每一次的感知、分析、决策和执行都在不断提升系统的自愈能力和安全韧性。而复合型运维技术人才的培养，更为这一技术变革提供了坚实的人才支撑，确保了数字孪生技术能够真正落地生根，发挥其最大价值。展望未来，随着数字孪生技术与5G、物联网、人工智能等新一代信息技术的深度融合，电力系统自动化运维将迈向更高水平的智能化阶段，为构建新型电力系统、实现“双碳”目标提供强有力的技术保障。

参考文献

- [1] 王浩, 贺倩筠, 贺子洋, 等. 基于数字孪生技术的“四线一库”自动运维系统建设及应用[J]. 工业计量, 2021(6): 51-55. DOI: 10.13228/j.boyuan.issn1002-1183.2021.0156.
- [2] 陈华鹏, 鹿守山, 雷晓燕, 等. 数字孪生研究进展及在铁路智能运维中的应用[J]. 华东交通大学学报, 2021.
- [3] 黄鑫, 汤蕾, 朱涛, 等. 数字孪生在变电设备运行维护中的应用探索[J]. 电力信息化, 2021(012): 019.
- [4] 齐波, 张鹏, 张书琦, 等. 数字孪生技术在输变电设备状态评估中的应用现状与发展展望[J]. 高压技术, 2022, 48(8): 20. DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20210093.
- [5] 马建新. 基于数字孪生技术的机车智能运维研究[C]//2020轨道交通装备技术高层论坛. 中国铁道学会; 大连交通大学; 中国中车集团有限公司, 2020.