

数字孪生技术在特高压直流系统中的应用实践

吕金壮¹, 廖毅^{1,2}, 石延辉^{1,2}, 李昭扬³, 章芳情³

(1. 中国南方电网有限责任公司超高压输电公司, 广州 510663; 2. 中国南方电网有限责任公司超高压输电公司广州局, 广州 510700; 3. 武汉大学动力与机械学院, 武汉 430072)

摘要: 针对现有数字孪生在特高压直流系统中的应用, 分析了数字孪生技术在解决特高压直流系统规模、数据、应用等方面存在的挑战与问题, 并且在基础管理、设备管理、安全管理和业务运营等方面, 系统地展示了数字孪生技术的应用场景与功能特点。根据业务需求构建了数字孪生场景以及数字孪生技术为关键节点的数字电网创新应用技术体系。以电网数字孪生转型为基础, 从数据感知、模型构建、模型应用角度探索其应用场景, 提高了系统在虚拟世界中的感知预测能力, 同时支撑变电站智能化应用和新型电力系统的数字化服务需求, 为电力行业的数字化转型提供了具体有效的路径与参考, 提升了电网互动性、安全性, 逐步实现电网业务的自动化、智能化、无人化。

关键词: 数字孪生技术; 特高压直流系统; 智能化管理与运维

Application of Digital Twin Technology in the Ultra-High Voltage DC System

LÜ Jinzhuang¹, LIAO Yi^{1,2}, SHI Yanhui^{1,2}, LI Zhaoyang³, ZHANG Fangqing³

(1. EHV Power Transmission Company of CSG, Guangzhou 510663, China; 2. Guangzhou Bureau EHV Power Transmission Company of CSG, Guangzhou 510700, China; 3. School of Power and Machinery, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: Focuses on the application of digital twin technology in ultra-high voltage DC system, this paper analyzes the challenges and problems of digital twin technology in solving the scale, data, and application of ultra-high voltage DC systems, and systematically demonstrates the application scenarios and functional characteristics of digital twin technology in basic management, equipment management, safety management, and business operations. Based on business needs, a digital twin scenario and the innovative application technology system of digital power grid with digital twin technology as the key node are constructed. Based on the digital twin transformation of the power grid, its application scenarios are explored from the perspectives of data perception, model construction, and model application, improving the system's perception and prediction capabilities in the virtual world. At the same time, it supports the intelligent application of the substations and the digital service demand of the new power system, provides specific and effective paths and references for the digital transformation of the power industry, and enhances the interactivity and security of the power grid, gradually achieves automation, intelligence, and unmanned operation of power grid business.

Key words: digital twin technology; ultra-high voltage DC system; intelligent management and operation and maintenance

0 引言

我国特高压直流输电技术正迅速发展, 与数字技术的融合创新不断加快。数字孪生的引入推动了特高压直流输电行业的系统建设与运行^[1-2]。数字孪生技术是一种全新的数字化建模手段, 可视为一

个或多个重要的、彼此依赖的装备系统的数字映射系统, 可以实时反映物理实体的状态行为^[3], 将物理世界与网络世界虚实之间双向映射、动态交互, 将物理实体和系统的属性、结构、状态、性能、功能映射到虚拟世界, 并基于此进行模拟、分析与预测, 能够实现贯通复杂产品设计、制造、维护等全生命周期业务过程的数字空间和物理空间信息的双向共享交互^[4], 电网的数字孪生是新型电力系统数字化服务体系发展的关键支撑和重要研究方向^[5], 为特高压直流系统等复杂电网设施的运维与管理提

基金项目: 国家重点研发计划资助项目“高安全装备智能运维服务关键技术研究及支撑软件开发应用”(2020YFB1709700)。

Foundation item: Supported by the National Key Research and Development Program of China(2020YFB1709700)。

供了重要支持^[6]。与传统基于物理模型的电力系统分析不同,数字孪生在电力系统运行状态分析领域中更侧重于数据与机理的交互融合驱动^[7]。

近年来,电力系统迎来数字化转型浪潮,国内外数字孪生技术在电力领域的研究和应用逐渐成为研究的热点,欧美等发达国家将数字孪生技术应用于电网建设和运维管理中。美国的智能电网拨款项目(smart grid investment grant, SGIG)通过数字孪生技术和控制技术对工业领域设备建模仿真,开展电网状态实时监测和动态优化^[8-10]。我国相关大型电力企业也相继提出数字化转型战略^[11-12]。南方电网公司提出建设具备“电网状态全感知、企业管理全在线、运营数据全管控、客户服务全新体验、能源发展合作共赢”特征的数字南网,支撑数字运营和数字能源生态。然而目前数字孪生在特高压直流系统的应用工程还相对较少,对于特高压直流系统的数字化建模、实时监测与精准分析等方面的实际应用案例仍存在较大的空白。本文以南方电网超高压输电公司直流输电系统数字孪生建设项目为研究对象,以数字孪生作为技术手段,归纳该项目从框架体系构建到以数字孪生为基础的输变电设备状态感知、模型构建和智能运维综合性场景应用的实践过程,为探索数字孪生技术在特高压直流输电系统项目建设中的应用提供参考。

1 数字孪生理论基础

数字孪生技术基于物理实体的精确数字化模型实现物理实体与其数字化虚拟模型的实时同步更新,形成“物理实体-数字模型”的孪生关系,以实时、动态地模拟和复制现实物理系统的运行状态为核心,实现物理实体与数字化虚拟模型的紧密结合^[13],为系统的管理、优化和决策提供支持,数字孪生技术包含以下5个要素。

1)物理实体:物理实体是数字孪生技术的载体,是被数字孪生体系所描述、感知、理解和控制的客观对象。

2)虚拟模型:虚拟模型是数字孪生技术的引擎,是物理实体结构在数字世界的抽象表示;依托统一模型,产品全生命周期的数据贯通和持续优化才成为可能。

3)孪生数据:孪生数据是数字孪生技术的驱动,是物理实体状态在数字世界的实时反映;数据

的有序、高效流动持续推动产品优化闭环、生产提质增效闭环的持续运转。

4)实时连接:实时连接是数字孪生技术的动脉,是承载孪生数据的高速公路,通过多维虚拟模型和融合数据双驱动,将物理对象的数据和虚拟模型进行动态的交互^[14],将物理实体、虚拟模型、服务系统连接为有机整体。

5)服务系统:服务系统是人机交互界面,将数字孪生以应用的形式提供,从而实现人与数字孪生体系的深度融合和协调发展。

数字孪生技术基本原理在于实现物理实体与数字模型之间的动态同步更新。通过各类传感器和监测设备采集物理实体的数据信息,输入到数字模型中,再由数字模型根据实时获取的数据进行更新和修正,确保与物理实体状态保持一致^[15]。数字模型基于实时数据进行仿真和预测,反馈实体的运行状态,同时将模拟结果用于优化和决策形成闭环反馈,如图1所示。

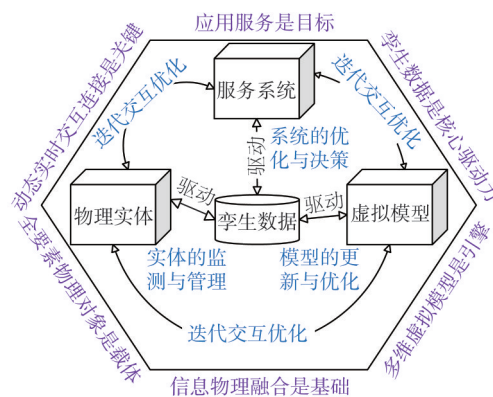


图1 数字孪生闭环反馈示意图

Fig. 1 Schematic diagram of digital twin closed-loop feedback

2 特高压直流系统数字孪生建设目标与路径

2.1 特高压直流系统的数字孪生建设目标

特高压直流系统是电力传输的重要部分,在建设过程中数字孪生技术的应用是提高特高压直流系统智能化、可视化的关键^[16-18],数字孪生作为电网数字化转型核心技术之一,在特高压直流系统中具有突出的应用价值^[19-20]。

特高压直流系统具有跨区域广、工况复杂、设备结构精密等特点,电力设备的内部状态不够透

明,电力设备的内部状态不能在数字空间全面、准确、实时更新^[21]。在特高压直流输电系统的建设中,借助数字孪生技术实现系统的智能化、可视化和场景化管控。通过规模化集成应用智能装备等先进技术,建立特高压混合直流三维全息孪生模型。深度融合空间视觉信息、智能装备信息以及设备运行信息,使得运维现场全要素、全过程地自动感知、实时分析和自适应优化决策。

在此基础上,形成以数字孪生和智能装备为支撑的智能运维体系,提高特高压混合直流工程的安全管控水平,提升智能运维效率、防灾应急能力以及综合运营水平,为电力系统提供更为精准和全面的运维支持,推动运维决策更科学、高效,电力系统更可靠、更智能。

2.2 特高压直流系统的数字孪生建设路径

特高压直流输电系统数字孪生建设过程中感知是基础,模型是核心,应用是关键。

2.2.1 强化感知能力,巩固数据基础

通过安装智能装备广泛采集各类与特高压设备相关的电气和环境数据。对数据进行清洗和预处理,结构化规范数据。建立融合互通的数据底座,在数据层打破信息孤岛,实现多源异构数据的协同融合。这一步骤旨在构建强大的数字基础,为数字孪生体系的全面发展提供支持。

2.2.2 构建孪生模型,实现虚实映射

构建具有拓展性和开放性的特高压直流系统数字模型实现虚实映射^[22]。精细化建模涵盖设备部件和内部结构,并结合设备原理与大数据分析技术开展设备状态感知算法研究。通过模拟测试验证模型的准确性和可靠性,并根据测试结果迭代优化模型。建立系统级模型,将设备状态数据、现场实景情况、全息地理信息以及运行信息进行融合,实现全景展示,使“设备状况一目了然”。最终将设备感知信息与各级模型融合,实现物理电网在虚拟世界的映射。这一步骤旨在实现对特高压设备更全面、准确的虚拟呈现,为数字孪生体系的发展提供基础。

2.2.3 创建高级应用,支撑智能运维

创建高级应用以支撑智能运维。该步骤的核心在于实时监测特高压直流系统状态,模拟预测发展趋势,通过将模型工程化应用辅助判断潜在风险。依托智能输变电平台,将数字应用与设备运行状态

相连,构建特高压直流输电系统的数字化映射。这一映射不仅是物理电网的孪生体和试验田,更是实现业务数字化的基础资源。在高级应用阶段,迭代完善设备感知能力及三维模型精细程度,提升物理电网在虚拟世界深层次感知预判能力^[23]。这一步骤的实施旨在为智能运维提供强大支持,推动数字孪生技术在电力系统领域的深度应用,其建设路径如图2所示。

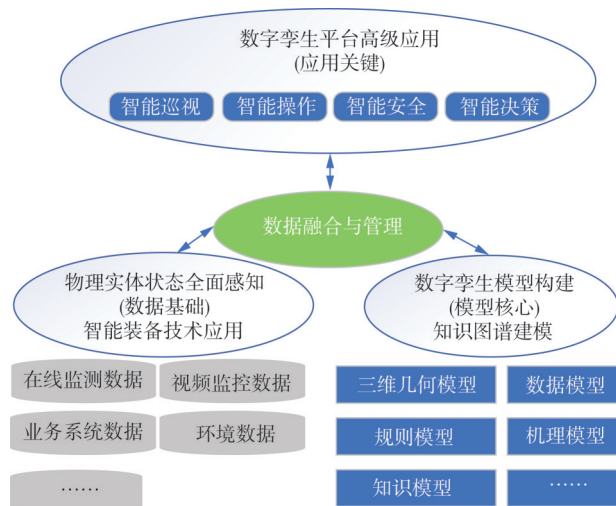


图2 特高压直流输电系统数字孪生建设路径

Fig. 2 Digital twin construction path of the ultra-high voltage direct current (UHVDC) transmission system

3 特高压直流系统数字孪生建设应用实践

在特高压直流输电系统的数字孪生建设过程中,先充分采集设备数据、业务系统数据、人员行为数据以及点云数据等多源信息。其次搭建大数据建模、三维建模、仿真建模和AI建模平台,支持三维几何模型、数据模型、规则模型、AI模型等多类模型构建,形成数字孪生体模型。最后整合三维模型,建设可视化系统,构建开发支撑各项业务的高级应用。总体框架如图3所示。

3.1 感知层

数据感知层是通过高性能传感器收集特高压直流系统对应物理实体的电气量、与接入范围相关的环境量、电网状态量、物理量等,实现对聚合物理对象的状态感知、数据传输、环境监测以及行为追踪等,使得相关基础数据可视化^[24]。

3.1.1 基础数据感知

利用可见光、红外摄像头、机器人(无人机)、



图3 特高压直流输电系统数字孪生总体框架

Fig. 3 Digital twin overall framework of the ultra-high voltage direct current (UHV-DC) transmission system

声音振动传感器等技术对站点和线路设备状态部件级覆盖、多维度综合感知(具体如图4所示),结合多维度结构化数据基础(具体如表1所示),通过边缘状态感知、缓存算法等方法预处理构建基础数据框架。通过部件级感知和建模解决特高压柔直阀、滤波器电容器等密集设备状态感知问题,建立细化至设备部件级的全域多源数据融合模型。



图4 多维度设备状态的综合感知

Fig. 4 Comprehensive perception of multi-dimensional device status

3.1.2 数据可视化

感知层上应用信号监测、设备状态监测、可见光视频、红外图像、环境监测等技术,搭建设备、

表1 部分多维度数据基础

Tab. 1 Part of the multi-dimensional data base

数据分类	数据来源	数据数量	采集频率
设备台账	业务系统	8 523 条	实时
设备缺陷	业务系统	2 432 条	实时
设备参数	现场抄录	13 768 条	每月
试验数据	试验报告	11 份	每年
在线监测	在线监测系统	23 231 条	每 4 h
SER 数据	SCADA 系统	189 万条	实时
红外测温	红外测温系统	15 742 条	实时
声音/振动数据	在线监测系统	70 万个	每 10 min
遥信	远动系统	约 5 000 万条	每 10 min
遥测	远动系统	约 2 000 万条	每 10 min

建构筑物外观三维建模,接入特高压直流系统电气量数据和监测信号数据,将设备监测数据、台账数据的可视化。结合电网的台账数据以及量测类数据建立数字孪生电网机理模型,计算仿真特高压直流系统的物理状态,如图5所示。

以无人机、机器人、在线监测传感终端等技术装备为载体,针对性配置“移动式+固定式”智能终端,利用气象、遥感卫星技术打造“空天地”立体巡视及环境感知体系采取输电基础数据(具体如图6



图5 变电基础数据可视化

Fig. 5 Transmission infrastructure data visualization

所示), 提升输电线路设备状况感知和环境灾害监测水平。

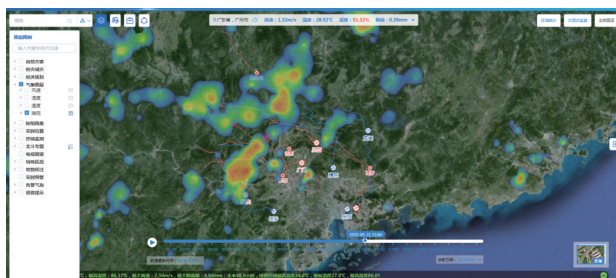


图6 输电线路的气象基础数据可视化

Fig. 6 Visualization of meteorological basic data for transmission lines

3.1.3 多维数据融合

将基础数据与三维模型融合, 构建特高压直流系统设备的数字孪生模型, 利用虚拟现实技术进行可视化呈现, 实现在虚拟环境中对设备进行检测、诊断和预测, 及时发现潜在问题并采取相应措施, 有效提高设备的可靠性和安全性。

3.2 模型层

模型驱动建模方法从物理机理和过程上反映物理实体, 需构建特高压直流设备的三维几何模型结合实景数据实现出实景化的数字孪生模型(具体如图7所示), 并融合实体的物理参数, 以及对物理

实体的行为与规则进行表征, 实现特高压直流系统的全尺度多物理场数字孪生模型^[25]。

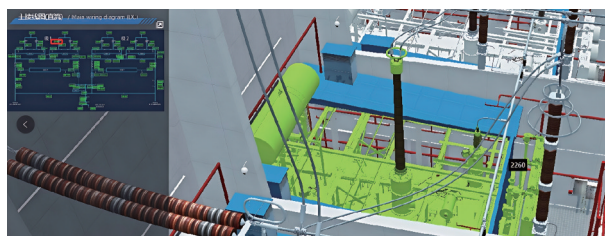


图7 输变电数据三维融合的可视化

Fig. 7 Visualization of three-dimensional fusion of transmission and transformation data

3.2.1 特高压直流系统数字孪生模型组成

在特高压直流系统中, 数字孪生模型包括三维几何模型、数据模型、规则模型、机理模型和知识模型等, 实现对电网的全方位数字化映射仿真。数字孪生模型包括线路、换流站以及接地极等各组成元素的三维模型, 以及区域内地形地貌、建筑的三维模型^[26], 如图8所示。

3.2.2 三维几何模型

通过三维激光扫描技术获取激光点云数据, 基于3D绘图协议(web graphics library, WebGL)的技术整合影像数据、数字高程地面模型模型(digital elevation model, DEM)、三维模型数据等, 通过空

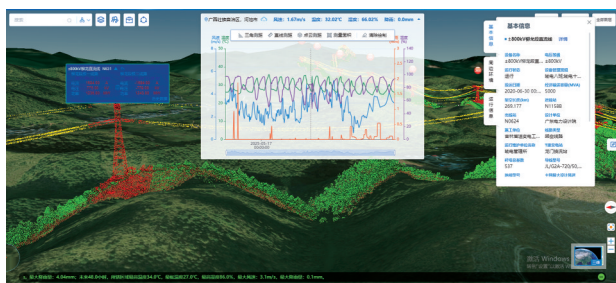


图8 三维点云模型

Fig. 8 3D point cloud model

间信息技术和三维可视化技术形成直流输电系统BIM模型,提供直观的特高压直流系统信息展示。在监测电力设备的运行状况、定位潜在故障点,以及进行电网规划和优化时凭借系统提供的直观数据作出迅速而准确的决策,为业务管理提供支持,如图9所示。

3.2.3 数据模型

数据模型是智能电网服务的基础数据文件,详细描述了电力系统中涉及智能电网相关设备的全局运行状态,并反映了整个电网的物理实体的行为和规则表征。该数据模型广泛涵盖了各方面的信息,包括设备数据、业务系统数据、人员行为数据以及点云数据等多源信息。

3.2.4 规则模型和机理模型

规则模型描述特高压相关电力生产业务处理的

过程,机理模型揭示系统间的关联和约束关系。这两者为数字孪生的建立提供实时参考和决策支持。采用多判据特征融合技术,本文构建了电气、热、机械等多模态的数字孪生算法模型,以实现综合决策。通过特高压直流输电的关键设备状态诊断算法,智能诊断设备状态异常,评价多系统设备的多维状态,解决业务数据内在关联分析的难题。在此基础上形成状态检修决策(具体如图10所示),基于设备和场景管控因素,实现跨区域输电网的综合评价体系。

例如针对换流阀冷却系统冷却裕度评估方面,由于换流阀冷却负载无法直接监测,定义了入水温度、高位水箱水位、电导率、冷却塔风机运行情况、主循环泵投运情况5类评估指标,通过多指标加权方式综合评估阀冷系统冷却裕度。训练流程如图11所示。在构建换流阀冷却系统冷却裕度指标量化评估方法的基础上,建立了基于长短期记忆网络(long short-term memory, LSTM)的换流阀冷却裕度预测方法,实现了换流阀冷却系统冷却能力的量化评估,智能诊断冷却塔元件老化、喷淋水管道内部结垢等隐蔽缺陷,为冷却系统裕度不足缺陷处理提供决策支撑(具体如图12所示)。

3.2.5 知识模型

知识模型是确保系统具有深度理解和智能决策

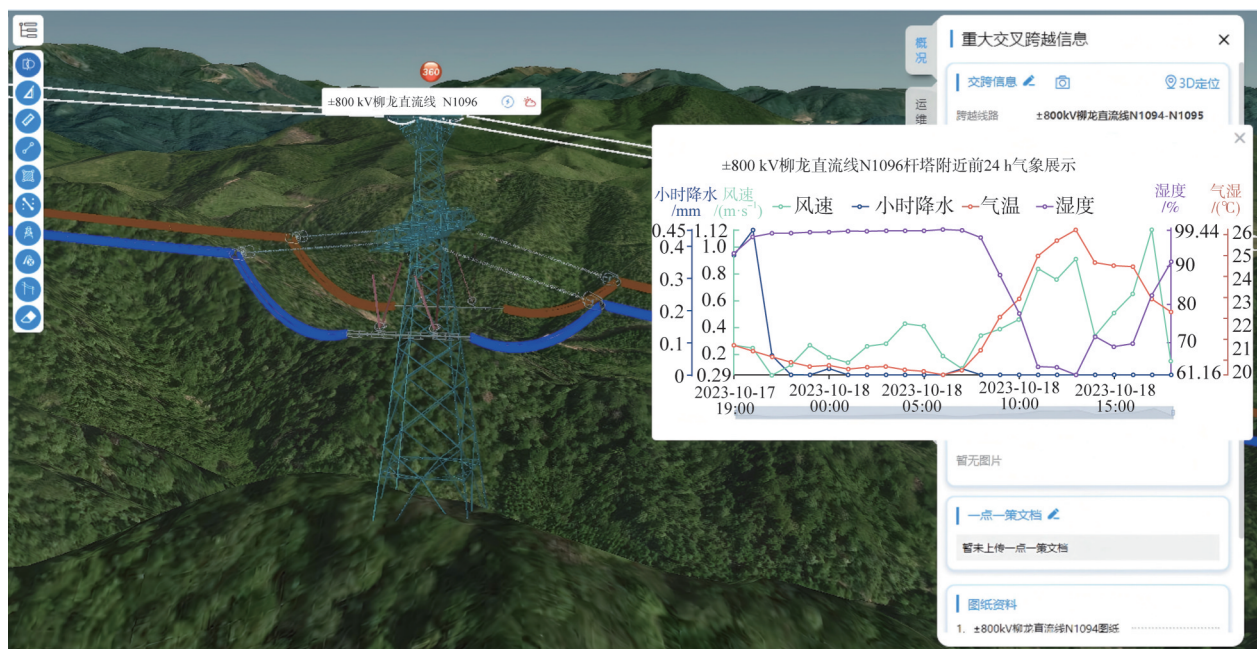


图9 逆向参数化建模

Fig. 9 Reverse parameterized modeling

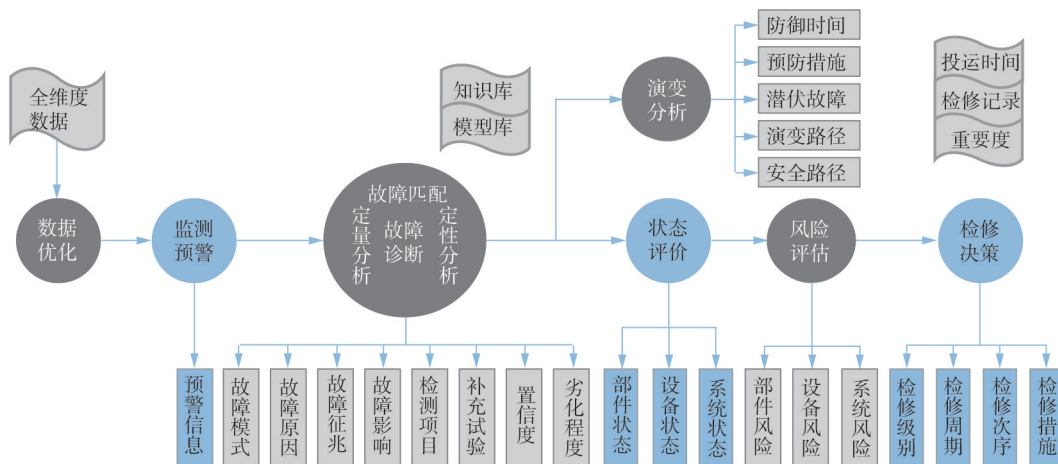


图 10 基于规则和机理模型的分析流程图

Fig. 10 Analysis flowchart based on rules and mechanism models

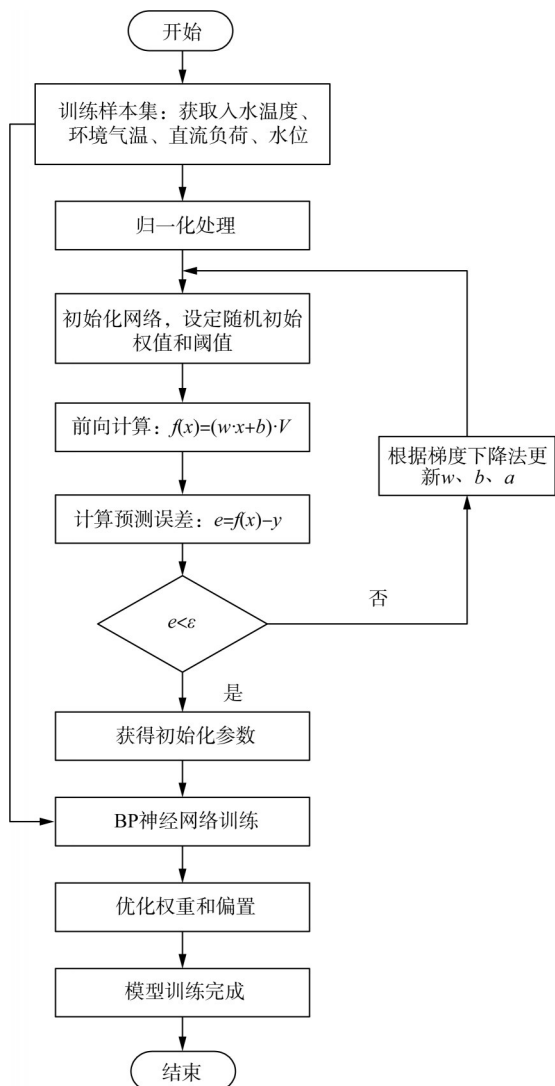


图 11 基于LSTM的换流阀冷却裕度预测模型训练流程

Fig. 11 LSTM-based training process of converter valve cooling margin prediction model

能力的关键环节。知识模型旨在融合特高压直流输电系统领域的专业知识，以促进对系统行为的准确把握和智能决策的实现。知识模型是知识抽象和结构化的结果，将电力系统中的专家知识或统计知识进行形式化和结构化的抽象表达。

专业知识库构建，涵盖特高压直流输电系统的运行规范、设备特性、电力传输原理等方面的专业知识。基于行业标准和领域专家的经验，确保系统对于特高压直流输电的基础知识有全面而深入地理解。例如，针对设备故障诊断的知识模型是对设备故障诊断专家知识的抽象表达。

3.3 应用层

基于数字孪生体的高级应用为智能输电系统业务应用提供可靠的数字驱动基础底座。本文依托对多站点、多直流系统的数据全面采集融合，分析发掘了局部数据无法观测出的、多站点多直流间的直流大系统数据关联变化规律。从设备、站(线)和系统3个层级开发高级应用，涵盖了应急影响、作业安全、人员培训、生产运营等方面的应用。这些高级应用在特高压直流系统全域数据综合分析评价、状态评估、事故智能预警分析以及业务应用方面提供支持。

3.3.1 应急响应

1) 故障高效响应功能

数字孪生系统可以提前预知电力设备运行风险并对检修计划进行安排，提升调度运行的监控效率及检修^[27-30]。本应用通过物联网平台与电网管理平台等业务系统在数据库层面连接，使设备台账与设

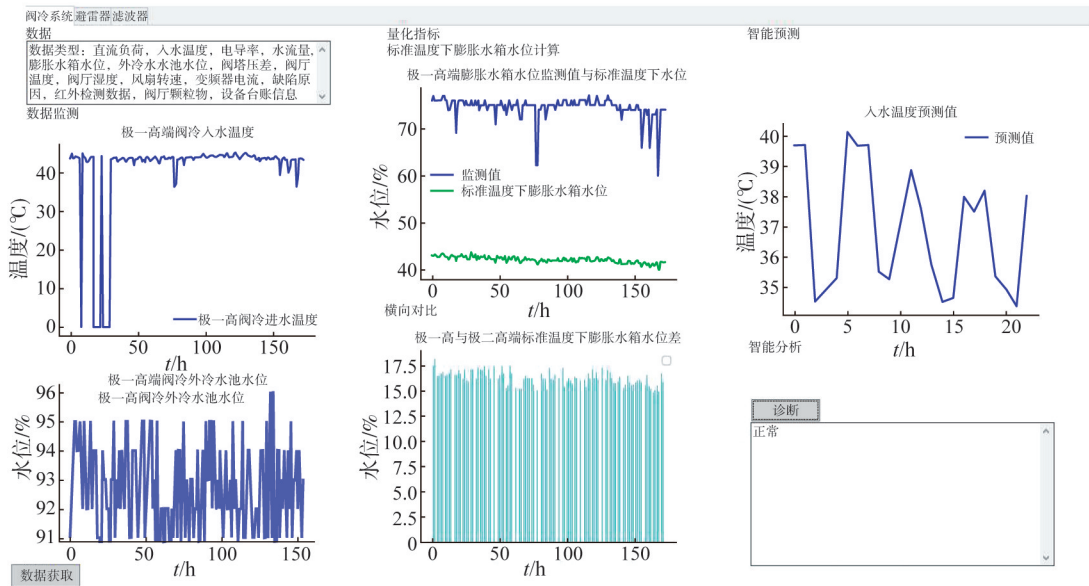


图 12 换流阀冷却能力异常识别应用测试

Fig. 12 Application tests of converter valve cooling capacity anomaly identification

备状态、基础数据、高级应用、工作流程与数据流转的充分融合, 实现中台业务的高速响应与智能诊断, 并通过防冰、防山火、防风防汛、设备跳闸等典型业务处置模型, 快速精准决策处置故障。如图 13 所示, 通过线路信息的自动化、中心化融合, 将线路故障定位由小时级降至分钟级, 平均故障排查时间由 3 d 下降为 0.8 d。

2)故障快速分析功能

本文特高压直流系统的数字孪生平台建立了事

故分析模型, 实现了生产业务与生产告警事件(顺序事件记录)的实时交互, 针对事故信号的快速分析流程如图 14 所示。

如图 14 所示, 平台根据信号自动启动动态巡视, 并获取巡视结果, 提升事故处理响应速度。根据跳闸信息自动推送详细图纸信息, 缩短处理时间, 使数字化图纸查询效率提升 90% 以上, 同时推送故障时刻设备监测信息和相关支撑材料, 实现事故信息收集自动化, 将信息搜集时间从小时级降低

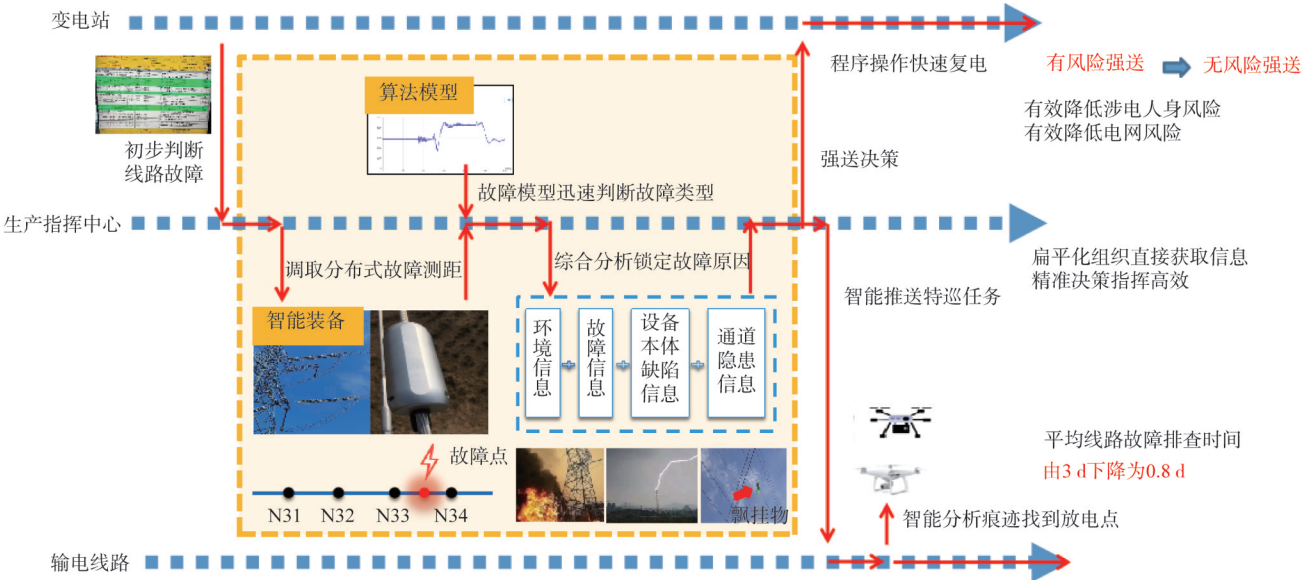


图 13 典型线路故障处置模型

Fig. 13 Model of typical line fault handling

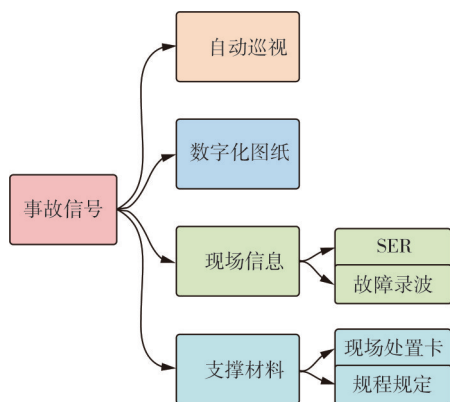


图 14 数字孪生平台的故障快速分析流程

Fig. 14 Rapid fault analysis process of digital twin platform

至分钟级，事故处理整体效率提升 70%，如图 15 所示。

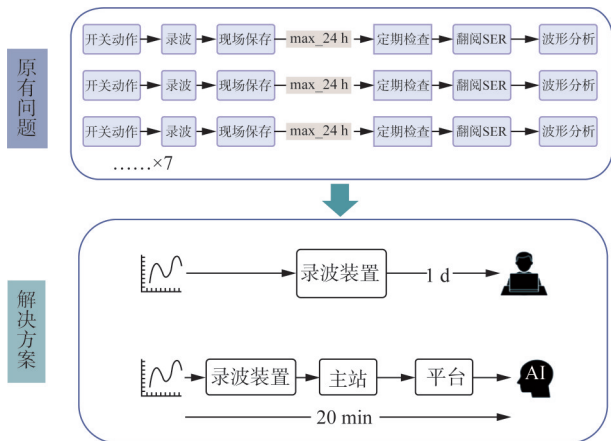


图 15 数字孪生平台针对事故处理响应流程的提升

Fig. 15 Improvement of accident handling response process on digital twin platform

3) 山火辅助决策

在树障的辅助决策中，本文提出特高压直流系统依托三维模型中杆塔单元，调取通道实时监控、实时负荷、树冠对地距离等台账信息，并结合巡视记录、联动信息、树障等隐患信息，模拟出树木生长趋势与线路间的相对位置，如表 2 所示树木树障模拟信息。

树障模拟边界条件中，筛选树木生长年限为 5 a，预警距离为 14 m，树木类型为刺桐，参考模拟结果(因实际生长位置不同，同参数的树线距离存在差异)，将结果中树木尽早修剪，或针对对应位置线路加强保护，提升杆塔单元稳定性。

此外，通过山火卫星、图像告警、联动告知等方式掌握山火情况，并可以及时应对山火应急场

表 2 三维模型内树障模拟生长预测

Tab. 2 Prediction of simulated growth of tree obstacles within a three-dimensional model

杆塔区段	树木类型	隐患类型	生长高度 /m	树木年龄/a	树线距离 /m
2611 号-2612 号	刺桐	树木	11.43	10	13.94
2611 号-2612 号	刺桐	树木	10.17	11	13.59
2611 号-2612 号	刺桐	树木	11.43	10	13.16
2611 号-2612 号	刺桐	树木	11.43	10	13.10
2611 号-2612 号	刺桐	树木	12.44	9	12.91
2611 号-2612 号	刺桐	树木	10.17	11	11.91
2611 号-2612 号	刺桐	树木	7.48	13	12.74
2611 号-2612 号	刺桐	树木	11.43	10	11.90
2611 号-2612 号	刺桐	树木	8.81	12	12.54
2611 号-2612 号	刺桐	树木	11.43	10	12.82

景，实现处置所需数据的“分钟级”调拨，为高效决策及处置山火提供保障，如图 16 为山火辅助决策相关操作界面。

3.3.2 作业安全

1) 人员和车辆安全位置

利用室外定位技术对人员的精确定位，并与三维场景模型同步，准确显示其实时位置。结合电子围栏技术，根据工作票内容生成工作范围，结合三维模型和北斗定位实现实时监测与告警。应用图像识别技术识别人员行为和穿戴，对作业人员穿戴及安全帽佩戴等行为^[31]进行实时识别和告警。利用智能定位终端和北斗系统记录人员/车辆的作业轨迹，并在三维场景中展示。整合上述功能，系统实现对人员/车辆的安全监控。

2) 安全距离测量预警

数据孪生技术提供电气设备空间测距、高度测量、间距测量以及面积测量等手段，系统实现对设备设计参数与实际参数的校验和比对，在现场安全作业中提供了有效的辅助。如在吊车施工场景中进行预演，自动识别安全距离不足隐患并及时预警，辅助方案编制校核，为作业安全提供支持。

3.3.3 人员培训

1) 场景化培训评估和作业辅助

该模块为特高压直流输电系统提供基于增强现实的场景化培训功能，实时收集特高压直流输电系统数据，构建更新数字模型，为培训提供身临其境的环境，使受训人员能够在模拟真实环境中操作并

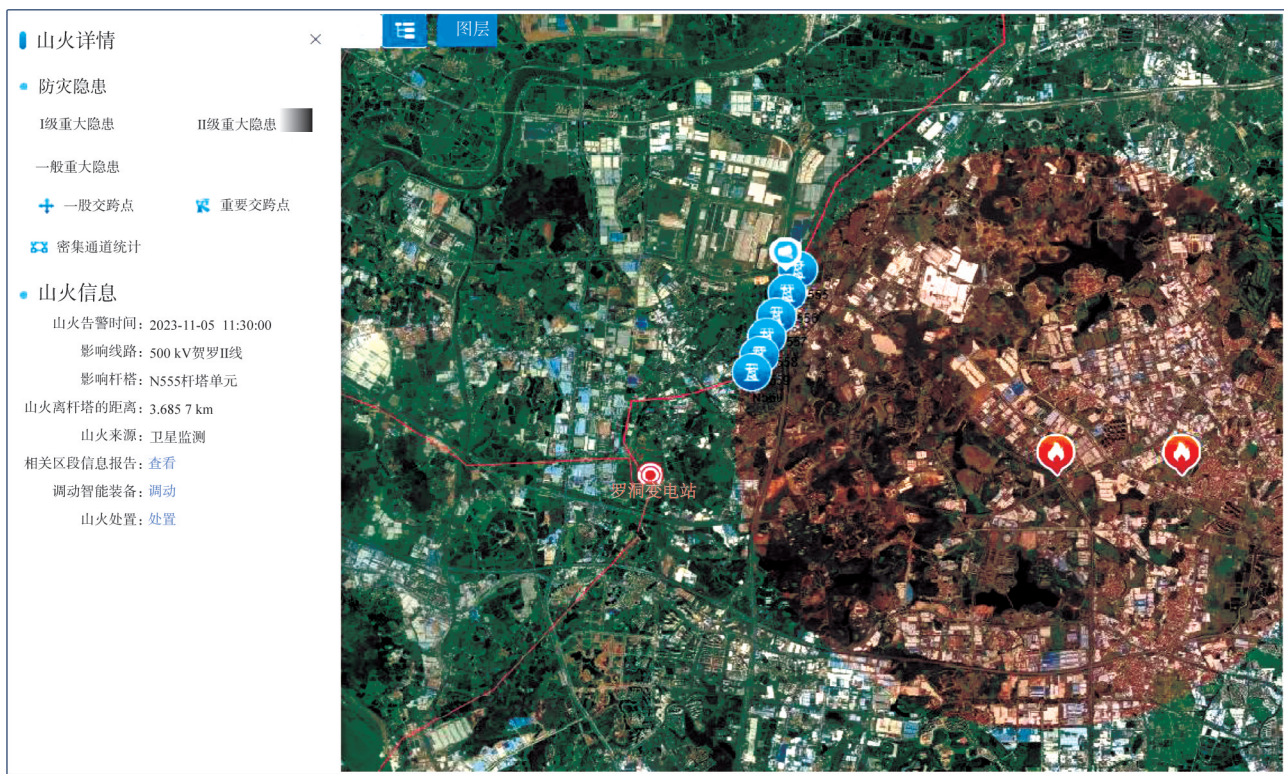


图16 山火辅助决策应急场景界面

Fig. 16 Emergency scene interface for mountain fire assisted decision-making

更好地理解 and 掌握相关技能。

通过对实际作业现场的数字建模,系统提供实时安全提示和操作指导。当工作人员接近危险区域或进行危险操作时,系统发出警报,提供正确的操作建议,降低错误操作风险,提高作业安全性。

2) 仿真拆解装配培训

通过使用仿真设备展示拆解和装配过程,呈现可交互的部件模型、功能说明、操作规程、安全参数和工作职能等资料,培训受训人员在模拟的真实工作环境中进行实践操作,以提升其实际操作技能。通过深入解析设备的工作原理和操作方法,使受训人员更全面地掌握相关技能。实景化仿真培训和方案模拟预演为培训提供了更具体、更直观的教学手段,有助于培养受训人员在实际工作中的应对能力。

4 结论

本文对数字孪生技术在特高压直流系统中的应用进行了研究剖析,展示了在具体业务场景中应用成效,为特高压直流系统的运维与技术管理提供支撑和实践经验。结论如下。

1) 通过系统梳理特高压直流输电数字孪生及智

能装备支撑的智能运维体系,归纳了数字孪生在特高压直流系统中的建设方法、路径。实践表明,数字孪生在提升特高压直流系统设备感知、分析与决策能力方面发挥了重要作用,为智能运维提供基础。

2) 通过融合物联网、大数据、人工智能等前沿技术,构建与特高压直流输电系统相一致的数字化模型,实时接收系统运行数据,能够实时监测系统状态。以此为基础,数字孪生技术可以为设备状态感知、评价、应急处置和安全管理等环节提供更为快速、高效和差异化的决策依据。

3) 特高压直流系统作为一个复杂的电力装备体系,数字孪生技术为其管理和运维带来了更多的创新和可能性。本文探讨了数字孪生系统在实际应用中的成果,未来数字孪生技术可进一步向预防性维护、智能决策支持系统方向发展。

参考文献

- [1] 王军华,李富强,胡晓华,等.变电站电气设备运行状态自动化预测方法[J].自动化与仪表,2023,38(11):17-20,93.
WANG Junhua, LI Fuqiang, HU Xiaohua, et al. Automation prediction method of substation electrical equipment operating

- state[J]. Automation and Instrumentation, 2023, 38(11): 17 – 20, 93.
- [2] 任乾坤, 熊鑫立, 刘京菊, 等. 网络空间安全中的数字孪生技术研究[J]. 系统仿真学报, 2024, 36(8): 1944 – 1957.
REN Qiankun, XIONG Xinli, LIU Jingju, et al. Research on digital twin technology in cybersecurity[J]. Journal of Systems Simulation, 2024, 36(8): 1944 – 1957.
- [3] 白浩, 周长城, 袁智勇, 等. 基于数字孪生的数字电网展望和思考[J]. 南方电网技术, 2020, 14(8): 18 – 24, 40.
BAI Hao, ZHOU Changcheng, YUAN Zhiyong, et al. Prospects and thoughts on digital power grid based on digital twin[J]. Southern Power System Technology, 2020, 14(8): 18 – 24, 40.
- [4] 刘育权, 宋禹飞, 梁锦照, 等. 电力设备数字化标准一体化支撑智能制造[J]. 南方电网技术, 2022, 16(12): 46 – 53.
LIU Yuquan, SONG Yufei, LIANG Jinzhao, et al. Integrated support for intelligent manufacturing of digitalized standards for power equipment[J]. Southern Power System Technology, 2022, 16(12): 46 – 53.
- [5] 俞小勇, 秦丽文, 桂海涛, 等. 新一代人工智能在配电网智能感知与故障诊断中的应用[J]. 南方电网技术, 2022, 16(5): 34 – 43.
YU Xiaoyong, QIN Liwen, GUI Haitao, et al. Application of next-generation artificial intelligence in intelligent perception and fault diagnosis of distribution network[J]. Southern Power System Technology, 2022, 16(5): 34 – 43.
- [6] 和敬涵, 张佳宝, 李猛, 等. 基于孪生模型的模块化多电平换流器保护[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(21): 119 – 126.
HE Jinghan, ZHANG Jiabao, LI Meng, et al. Modular multi-level converter protection based on twin model[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(21): 119 – 126.
- [7] 贺兴, 艾芊, 朱天怡, 等. 数字孪生在电力系统应用中的机遇和挑战[J]. 电网技术, 2020, 44(6): 2009 – 2019.
HE Xing, AI Qian, ZHU Tianyi, et al. Opportunities and challenges of digital twin in power system applications[J]. Power System Technology, 2020, 44(6): 2009 – 2019.
- [8] 陈龙, 韩中洋, 赵珺, 等. 数据驱动的综合能源系统运行优化方法研究综述[J]. 控制与决策, 2021, 36(2): 283 – 294.
CHEN Long, HAN Zhongyang, ZHAO Jun, et al. A review of data-driven comprehensive energy system operation optimization methods[J]. Control and Decision, 2021, 36(2): 283 – 294.
- [9] ROSEN R, VON W G, LO G, et al. About the importance of autonomy and digital twins for the future of manufacturing[J]. IFAC-Papers OnLine, 2015, 48(3): 567 – 572.
- [10] SCHLEICH B, ANWER N, MATHIEU L, et al. Shaping the digital twin for design and production engineering[J]. CIRP Annals Manufacturing Technology, 2017, 66(1): 1 – 9.
- [11] 姚娟, 张晓文, 宋嘉, 等. 基于数字孪生的多能互补微型能源网络的构建[J]. 电力大数据, 2022, 25(3): 43 – 50.
YAO Juan, ZHANG Xiaowen, SONG Jia, et al. Construction of multi-energy complementary micro energy network based on digital twin[J]. Electric Power Big Data, 2022, 25(3): 43 – 50.
- [12] 钱少锋, 方涛, 王祯, 等. 基于LightGBM的变压器故障预测在数字孪生变电站中的应用[J]. 电工技术, 2022, (12): 85 – 87, 90.
QIAN Shaofeng, FANG Tao, WANG Zhen, et al. Application of transformer fault prediction based on lightGBM in digital twin substation[J]. Electrical Engineering Technology, 2022, (12): 85 – 87, 90.
- [13] 潘美琪, 贺兴, 艾芊, 等. 新型配电系统分布式资源调度研究现状与展望[J]. 电网技术, 2024, 48(3): 933 – 948.
PAN Meiqi, HE Xing, AI Qian, et al. Research status and prospects of new generation distribution system distributed resource scheduling[J]. Power System Technology, 2024, 48(3): 933 – 948.
- [14] 龙玉江, 卫薇, 舒彧, 等. 基于遗传算法的输变电设备数据补全[J]. 电子技术应用, 2023, 46(9): 74 – 79.
LONG Yujian, WEI Wei, SHU Yu. Data completion of power transmission and transformation equipment based on genetic algorithm[J]. Application of Electronic Technique, 2023, 46(9): 74 – 79.
- [15] 陶然, 沈培峰, 陈挺, 等. 数字化模型下的GIS特高频信号反演实际放电方法[J/OL]. 上海交通大学学报, 1 – 23[2023 – 12 – 01]. <https://doi.org/10.16183/j.cnki.jsjtu>. 2023. 374.
TAO Ran, SHEN Peifeng, CHEN Ting, et al. Method for inverting actual discharge quantity of gis high-frequency signals under digital model[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 1 – 23[2023 – 12 – 01]. <https://doi.org/10.16183/j.cnki.jsjtu>. 2023. 374.
- [16] 吴昊. 基于数字技术的电力系统继电保护测试研究[J]. 电气技术与经济, 2023(7): 28 – 30.
WU Hao. Research on power system relay protection test based on digital technology[J]. Electrical Technology and Economy, 2023(7): 28 – 30.
- [17] 刘云鹏, 高艺倩, 刘刚, 等. 基于U-net神经网络的35 kV油浸式变压器绕组温度快速计算[J]. 高电压技术, 2024, 50(6): 2716 – 2725.
LIU Yunpeng, GAO Yiqian, LIU Gang, et al. Rapid calculation of winding temperature of 35 kV oil-immersed transformer based on U-net neural network[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(6): 2716 – 2725.
- [18] 李凡, 董臣, 韩利群, 等. 智能变电站关键技术及功能研究[J]. 电力勘测设计, 2023(8): 63 – 66.
LI Fan, DONG Chen, HAN Liqun, et al. Research on key technologies and functions of intelligent substation[J]. Power Survey and Design, 2023(8): 63 – 66.
- [19] 刘亚东, 陈思, 丛子涵, 等. 电力装备行业数字孪生关键技术与应用展望[J]. 高电压技术, 2021, 47(5): 1539 – 1554.
LIU Yadong, CHEN Si, CONG Zihan, et al. Prospects for key technologies and applications of digital twin in power equipment industry[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(5): 1539 – 1554.
- [20] 唐学用, 梁焱, 孙斌, 等. 数字孪生技术在区域多能源系统中的应用展望[J]. 南方电网技术, 2021, 15(5): 104 – 114.
TANG Xueyong, LIANG Yao, SUN Bin, et al. Prospect of digital twin technology application in regional multi-energy system[J]. Southern Power System Technology, 2021, 15(5): 104 – 114.
- [21] 彭在兴, 王颂, 陈佳莉, 等. 基于数字孪生的数字电力设备思考与展望[J]. 南方电网技术, 2022, 16(12): 9 – 15.
PENG Zaixing, WANG Song, CHEN Jiali, et al. Thoughts and prospects on digital twin of digital power equipment[J]. Southern Power System Technology, 2022, 16(12): 9 – 15.
- [22] 彭道刚, 税纪钧, 王丹豪, 等. “双碳”背景下虚拟电厂研究综述[J]. 发电技术, 2023, 44(5): 602 – 615.
PENG Daogang, SHUI Jijun, WANG Danhao, et al. A review

- of virtual power plant research under the background of "dual carbon"[J]. Power Generation Technology, 2023, 44(5): 602 – 615.
- [23] 汤蕾, 田锋, 陆兴海, 等. 面向"共智"的配电网数字孪生评价系统[J]. 中国电业, 2020(11): 101 – 102.
TANG Lei, TIAN Feng, LU Xinghai, et al. Evaluation system of distribution network digital twin towards "common wisdom" [J]. China Electric Power, 2020(11): 101 – 102.
- [24] 严兴煜, 高赐威, 陈涛, 等. 数字孪生虚拟电厂系统框架设计及其实践展望[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(2): 604 – 619.
YAN Xingyu, GAO Ciwei, CHEN Tao, et al. Framework design and practical prospects of digital twin virtual power plant system [J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(2): 604 – 619.
- [25] 杨帆, 吴涛, 廖瑞金, 等. 数字孪生在电力装备领域中的应用与实现方法[J]. 高电压技术, 2021, 47(5): 1505 – 1521.
YANG Fan, WU Tao, LIAO Ruijin, et al. Application and implementation methods of digital twin technology in the field of power equipment [J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(5): 1505 – 1521.
- [26] 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): 262 – 266.
ZHAN Tan, BO Chi. Research on digital transformation of power grid based on digital twins [J]. Energy and Environmental Protection, 2021(11): 262 – 266.
- [27] 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]. 高电压技术, 2022, 48(8): 1522 – 1538.
QI Bo, ZHANG Peng, ZHANG Shuqi, et al. Application status and development prospect of digital twin technology in state estimation of transmission and transformation equipment [J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(8): 1522 – 1538.
- [28] 罗兵, 王婷婷, 石鑫, 等. 面向电力变压器PHM的数字孪生技术[J]. 南方电网技术, 2022, 16(12): 16 – 28.
LUO Bing, WANG Tingting, SHI Xin, et al. Digital twin technology for power transformer PHM [J]. Southern Power System Technology, 2022, 16(12): 16 – 28.
- [29] 王伟杰, 雍明超, 黄金魁, 等. 高压设备数字孪生体构建及状态分析技术研究[J]. 高压电器, 2023, 59(11): 119 – 128.
WANG Weijie, YONG Mingchao, HUANG Jinkui, et al. Research on construction of condition analysis technology of digital twin for high voltage equipment [J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(11): 119 – 128.
- [30] 刘翌, 孙庆凯, 许泽凯, 等. 能源互联网中的数字孪生技术体系、应用与挑战[J]. 中国电力, 2024, 57(1): 230 – 243.
LIU Zhao, SUN Qingkai, XU Zekai, et al. System, applications and challenges of digital twin technology in energy internet [J]. Electric Power, 2024, 57(1): 230 – 243.
- [31] 吴田, 万亚旭, 王申华, 等. 基于改进ST-GCN的10 kV带电作业人员视频异常行为识别方法[J]. 南方电网技术, 2024, 18(10): 31 – 39, 72.
WU Tian, WAN Yaxu, WANG Shenhua, et al. Video abnormal behavior recognition method for 10 kV live workers based on improved ST-GCN [J]. Southern Power System Technology, 2024, 18(10): 31 – 39, 72.

收稿日期: 2023-12-05; 网络首发日期: 2024-06-30

作者简介:

吕金壮(1974), 男, 高级工程师(教授级), 博士, 研究方向为特高压直流主设备自主化及智能化监测系统在电网领域的研发与推广、新型电力系统主网架直流设备关键技术自主研发;

廖毅(1987), 男, 通信作者, 高级工程师, 硕士, 研究方向为电力系统分析运行和电力系统智能技术, liaoyi_hn@foxmail.com;

石延辉(1981), 男, 高级工程师, 硕士, 研究方向为高压直流输电技术。