第 51 卷 第 5 期：2285-2299 高电压技术 Vol.51, No.5: 2285-2299
2025 年 5 月 31 日 High Voltage Engineering May 31, 2025
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20240801

电力装备数字孪生运维技术的发展态势、评价体系与前景展望

崔兆仑[1]，郭曼婷[1]，叶泳钦[1]，刘　凯[2]，张梦悦[2]，郝艳捧[1]
（1. 华南理工大学电力学院，广州 510640；2. 南方电网科学研究院有限责任公司，广州 510080）

摘　要：数字孪生凭借强大的数据整合、分析及交互特性，成为我国电力装备数智化升级的重要媒介。该文梳理了发电侧、变电侧以及输配电侧电力装备运维的数字孪生系统架构组成，从感知互动层、数据处理层、建模仿真层和功能应用层分析了支撑各层级的关键设备技术，且讨论了数字孪生技术结合其他数智化技术实现运维应用的融合发展前景。为准确评价数字孪生运维技术的应用特性，该文结合电力装备运维特征与数字孪生应用需求提出了五维评估架构及量化评估体系。最后，在回顾当前国家与行业政策驱动下的工程化应用态势基础上，分析研判了现阶段数字孪生运维面临的挑战，从底层运维技术发展融合、跨领域共享、网络数据安全以及行业变革等方面提出未来发展建议。

关键词：数字孪生；电力装备运维；架构设计；五维评估机制；前景展望

Development Trend, Evaluation System and Prospect Outlook of Digital Twin Operation and Maintenance Technology for Electric Power Equipment

CUI Zhaolun[1], GUO Manting[1], YE Yongqin[1], LIU Kai[2], ZHANG Mengyue[2] , HAO Yanpeng[1]
(1. School of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China;
2. China Southern Power Grid Electric Power Research Institute, Guangzhou 510080, China)

Abstract：Digital twin has become an important medium for digital-intelligent updating of electrical equipment in our country due to its powerful data integration, analysis and interaction characteristics. In this review, the architectural compositions of the digital twin operation and maintenance (O&M) systems for the power generation side, substation side, and transmission and distribution side are sorted out. The key equipment and supporting technologies for each level are analyzed in terms of the layers of perception and interaction, the data processing, the modeling and simulation, and the function and application. The development potentials of the digital twin technology combining with other intelligence technologies to realize the O&M applications are also discussed. According to the operation and maintenance characteristics of power equipment and the application requirements of digital twins, we proposed a five-dimensional assessment architecture and quantitative evaluation scheme. Finally, by reviewing the national and industrial policies on guiding the current digital twin applications, we made a discussion on their critical challenges and development suggestions in terms of the combination of the fundamental O&M technologies, cross-domain sharing, network data security and industry reform.

Key words：digital twin; operation and maintenance of electric power equipment; schema design; five-dimensional evaluation scheme; development outlook

0　引言

电力装备是电网系统的重要组成部分，其运行的可靠性是电力系统安全的关键。如何实时掌握设备运行状态并精准预测健康状态已成为电力装备运维升级变革的一项关键问题。然而，当前电力系统中“发-输-变-配-用-储”各节点协同管理困难，电力装备的及时维护和优化较难实现，导致电力生产效率低，产生能源与经济成本损耗。近年来，我国积极开展以低碳可持续发展为导向的新一轮能源变革[1]，其中电力装备数字化是推动“碳达峰、碳中

基金资助项目：国家自然科学基金(52207155)；广东省基础与应用基础项目(2023A1515010712；2024A1515010746)；输变电装备技术全国重点实验室开放基金(SKLPET-kfkt202308)。
Project supported by National Natural Science Foundation of China (52207155), Guangdong Province Fundamental and Applied Fundamental Research Fund (2023A1515010712, 2024A1515010746), Open Fund Project of State Key Laboratory of Power Transmission Equipment Technology (SKLPET-kfkt202308).

和”目标如期实现的重要一环。2050 年，我国新能源发展占比预计达 70%，电能占终端能源消费结构的比重将由 26%提升至 45%~50%，电力行业正在构建清洁低碳安全高效的能源体系和以新能源为主体的新型电力系统[2-3]。不难推测，电力主导的能源互联网将成为结构复杂、设备繁多、技术庞杂的巨维系统，传统的运维技术难以满足日益复杂的电力装备体系与更高的安全运维需要，亟需发展以数字孪生等数字化方法为主的新型运维技术，以实现电力装备运维的智能化升级。

在大数据、物联网和人工智能不断发展的“工业 4.0”大背景下，制造业向数字化智能化转型，数字孪生技术应运而生。数字孪生的概念始于航天军工领域，最早在 1969 年被美国国家航天局用于构建航天飞行器的数字孪生体，通过工程模拟和数值分析了解设备健康状况，进行物理实体的全生命周期管理。2003 年，数字孪生概念首次由密歇根大学的 Grieves 教授提出[4]，其含义为通过传感器数据、建模技术对某一物理实体进行数字化建模，再依托交互技术实现对该实体的监控与操作。近年来，数字孪生已在航空器设计、工业控制、能源应用等领域涌现了机理描述、异常诊断、风险预测、决策辅助等具体应用[5-9]。对于电力装备运维，数字孪生可以凭借传感器、物联网、大数据、人工智能等技术，在虚拟环境中对设备状态实时建模，实现运维数字化。其“自治、同步、互动、共生”的技术特点与新型电力系统的智能化建设理念十分契合[10-11]。

2019 年，中国南方电网公司印发《公司数字化转型和数字南网建设行动方案》，其中明确提出“数字南网”的建设要求[12]。同年，国家电网公司发布具有类似指导意义的《泛在电力物联网白皮书》[13]。近年来，数字孪生在电力行业，尤其是电力设备运维的诸多关键环节实现了融合应用，并依托电力设备数字化改造、传感器与监测技术发展、诊断算法更新和图像识别软硬件迭代等途径落地[14-15]。数字孪生通过强大算力整合大量数据并提供可视化工具，模拟不同运行情境并提供运维决策支持，优化电网运维策略，提高能效，降低能耗，确保系统的稳定性。此外，数字孪生技术还可用于培训运维人员，在虚拟仿真环境中模拟指导设备操作、故障排除和紧急情况处理，提高相关人员应对实际运维工作的技能[16-18]。

目前，数字孪生已成为电力装备运维智能化升级的重要方向，然而其发展与应用尚处于初级阶段，评估体系与路径规划的研究十分有限。为响应电力装备产业数字化升级与数字孪生运维技术深度融合的发展需要，亟需开展数字孪生运维技术发展态势、评估方法与前景展望相关研究。为此，本文首先从架构设计、关键设备技术与数智化技术融合 3 个角度回顾了当前数字孪生运维技术的发展态势，然后结合数字孪生技术特性探讨了其运维应用的评价量化机制，最终结合目前技术发展面临的主要挑战给出了发展建议。

1 电力装备运维的数字孪生应用现状

在数字孪生技术与电力装备运维融合发展的过程中，具体应用的落地需要依托明确的逻辑架构，并结合关键技术实现其架构中的各项功能，达成孪生体构建与交互的目的。进一步地，数字孪生运维技术可以与其他数智化技术结合以实现优化升级。因此，本章从数字孪生运维应用的架构设计、关键技术及其数智化技术融合 3 个方面介绍电力装备运维的数字孪生应用现状。

1.1 数字孪生应用的架构设计

数字孪生的架构设计是其功能实现的前提，目前已有诸多学者提出了针对电网系统、电气设备以及具体运维场景等不同层次下的数字孪生技术逻辑框架，本文将首先回顾电力设备孪生运维的整体架构逻辑，再依次分析变电、发电、输电与配电具体环节的架构设计。

1）整体架构逻辑

数字孪生运维应用的架构层级一般不低于 3 级，其整体逻辑需涵盖设备传感、数据提取与处理、特征信息感知与诊断等环节。2021 年，华北电力大学齐波等人针对输配电设备状态监测提出具有 5 层架构的数字孪生框架[19]，分别是囊括电力设备实体的物理层，对电力设备进行传感检测的感知层，对传感数据进行评估、清洗与选择的数据层，对电力设备进行状态评价、故障诊断和状态预测的模型层以及提供具体运维策略的应用层。从更宏观的角度，上海交通大学刘亚东等根据电力装备行业数字化转型升级的行业现状，将电力装备数字孪生通用框架分为物理层、通信层、虚拟层和应用层[20]，其中物理层是电力装备全生命周期过程中所涉及所有物理要素的集合；通信层连接了物理层与虚拟层，同时兼具储存、管理与处理数据的功能；虚拟层中形成

电力装备数字孪生体，实现设备数字化全生命周期管理；应用层实现具体场景的数字孪生功能。若将数字孪生运维的应用扩展至发-输-变-配的各个环节，针对具体的电网运维场景，数字孪生架构也将泛化出不同形式，以典型的感知层、数据层、模型层和功能层 4 层架构为例，本文提出了一类针对多种电力装备体系数字孪生运维的逻辑架构，如图 1 所示。其中，最底层均为设备状态的传感监测，实时获取的相关数据汇聚至上一层进行储存、清洗与管理，经处理获得的有效数据进入第 3 层实现孪生体建模与数据分析，最后输入功能层，为不同设备运维下的具体功能实现提供必要数据信息。

2）变电侧架构

现阶段，数字孪生应用与输配电设备的融合主要以变压器和变电站为典型场景[21-25]。刘云鹏等人提出针对电力变压器智能运维的数字孪生架构包括变压器物理实体及变压器智能运维的数字孪生体两大方面，其中数字孪生体包括感知互动层、变压器虚拟体层、运维智慧共享层[26]。类似地，针对变电站巡检模式缺陷、模型精度不够、感知参量单一、缺乏对数据的深度挖掘等问题，张冀等人提出一套涵盖物理实体、孪生模型和交互体验与应用的变电站模型框架[27]。目前普遍地将变电站数字孪生架构划分为物理实体与虚拟体，侧重于变电设备的实时监控与维护，并通过数据映射实现虚实协同。

3）发电侧与输电侧架构

数字孪生技术与发电侧和输电侧相关设备运维过程的融合应用处于起步阶段，目前发电侧与数字孪生技术的融合应用实例包括火电机组数字孪生系统[28]和抽水蓄能电站智能管控及辅助检修应用[29]等。考虑发电侧设备运维的人员操作、经济效益与生态效益等优化诉求，发电站数字孪生运行架构常包含图 1 中所示的 4 层架构，在数字孪生体中融合管控模型、生产效能模型和公司运营模型，以实现发电机组状态透明化和发电过程降耗环保化目标，完成机组智能调控。

输电侧针对输电线路、电力管廊、城市电缆等设备的数字孪生运维架构已被相继提出[30-32]，根据输电系统特点，输电侧的数字孪生应用架构层次可大致归纳为感知采集层、物联网络层、数据计算层、应用服务层和运维交互层。数字孪生系统优异的数据传输能力与信息共享功能可以提供输电线路的实时监控与状态预测，辅助线路规划，提高输电线路运检的时效性与智能化程度，改善线路的可靠性和运行效率。整体上，相较于变电设备，针对发电侧和输电侧的数字孪生框架仍处于发展和细化阶段，其相应功能与数据融合特性有待进一步挖掘。

4）配电侧架构

配电系统是电力系统到用户的最后一个环节，其数字孪生的运维体系目前主要依托“感知层-网络

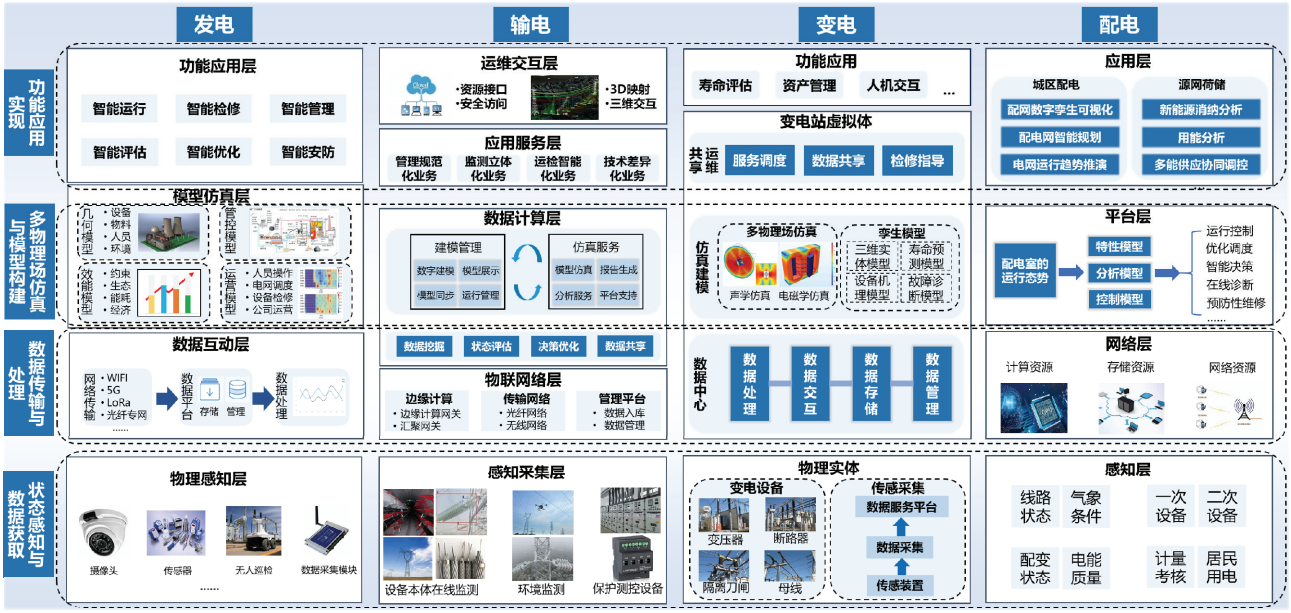


图 1　电力装备的数字孪生运维系统架构

Fig.1　Architecture of digital twin operation and maintenance system for electrical equipment

层-平台层-应用层”的能源互联网架构[33-35]。配电侧的数字孪生平台利用网络层的数据挖掘和边缘计算能力对感知层采集的配电系统数据和状态信息进行分析提取，结合平台层综合掌控配电系统的运行态势，从而实现优化调度、运行控制、定期维护、在线诊断及预防性维修等智能化决策，提升配电网的互动性、开放性、安全性。配电侧的细分场景中也有具体的架构设计，如在配电继保方面，章耀耀等人提出一套数字孪生继电保护方法，其架构包括数字孪生计算单元、数字孪生接口和数字孪生系统后台 3 部分，以实现数字化继保的功能[36]。总体来说，配电侧的孪生应用也处于起步阶段，相关架构体系仍需细化，以满足多样化配电运维需求以及细化的功能升级。

综上所述，电力设备数字孪生运维的总体框架思路均为设备状态感知、数据传输与处理、数字建模和功能应用 4 个层面，之后针对不同的运维场景与功能需要，再实现差异化设计与结构演变。

1.2 数字孪生运维的关键技术

电力装备数字孪生运维 4 层技术架构对应的关键技术如图 2 所示，以下将分别简述主要技术并回顾其发展应用现状。

1.2.1 传感技术

电力装备数字孪生运维在状态感知过程中需要采集多尺度、高精度的实时特征数据[37]。除常规监测电气量外，电力装备运维离不开对物理/化学特征量的监测。在监测物理量方面，发电侧设备主要关注温度、压力和振动等关键物理参数[29]；输电侧更多采用非接触式传感技术，通过图像传感以及电学、磁学和光学信号，检测电气参数以及导体形变等物理参数[38]；变压侧利用脉冲传感器、超声传感器、射频传感器、特高频传感器、红外探测仪及光学传感器来检测电力变压器中局部放电的电、光、热、振动等多种特征[39-40]；配电侧常应用多物理量复合传感技术，通过高集成度、非接触式感知终端检测温度、局放和振动等关键状态参数[41]。在监测化学量方面，主要利用气体传感器对变压器油进行溶解气体分析来评估变压器内部状态[39]。此外，路永鑫等人还提出虚拟传感器在高压设备数字孪生工程应用上的设计要求及其应用方式[42]。

1.2.2 数据处理与交互

数据流的获取、储存、分析和输出是数字孪生体构建的必要前提，数据可靠性、传输稳定性、多源数据同步性、数据采集容错性都将对数字孪生体的质量产生重要影响[43]。随着电力系统数字化转型升级，电力系统的实时处理数据量将达到新的量级，因此需要低时延、高带宽的通信传输技术[44-45]同时辅以各类先进数据处理方法，以完成孪生数据的及时有效汇集。其中，宋亚奇等人认为通过数据压缩可以有效减少网络数据传输量，提高存储效率[46]。蒋建华等人回顾了一类针对输配电设备多源异构数据的边缘侧智能采筛方法，主要包含数据分析、数据预处理以及数据融合等[47]，依托该方法有望解决多源异构数据集的构建与综合处理问题。表 1 展示了数据压缩[48-49]、预处理[50-52]和融合技术[53-54]在输配电数字孪生系统中的应用。此外，相关的数据处理技术还包括数据挖掘[55-56]和关联分析[57-58]等，也可通过深度学习模型[59]和机器学习模型[60]等人工智能模型对电力大数据进行预测优化。可以预见，未来数字孪生运维应用的多样化与智能化发展依赖数据处理技术的发展。

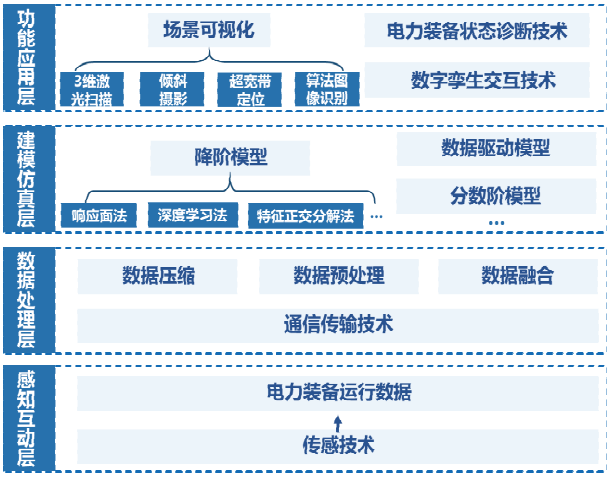


图 2 电力装备数字孪生运维关键技术

Fig.2 Key technologies of digital twin for the operation and maintenance of the electrical equipment

1.2.3 数字孪生体构建及模型更新

数字孪生体的建立需要将设备本体多维信息高精度地映射到数字模型中，从而真实地反映设备各项物理化学特征。近年来，孪生体建模工作多集中于变电设备[61-63]，并在风电设备、输电设备等领域被陆续报道[64-65]。鉴于孪生体构建的多样性与复杂性，目前对应数字化模型的构建需要依托简化模型来处理，表 2 展示了目前数字孪生运维应用中报道的几种主要简化模型，包括降阶模型、数据驱动模型以及分数阶模型。上述模型的使用大幅提高计

表 1 电力装备数字孪生应用的数据处理技术

Table 1 Data processing technology for digital twin application in electrical equipment

技术类型	方法案例	特点
数据压缩	面向边缘计算的电力异步异构数据加速压缩[48]	将多层感知器应用于负荷数据分类，结合形成神经网络模型，构建可应用于智能电网场景的边缘侧数据压缩方法
	基于二维提升小波的火电厂周期性数据压缩算法[49]	将待压缩的火电厂生产运行周期性数据从一维空间转换到二维空间,采用基于二维提升格式的对称双正交小波滤波器组对数据进行压缩和解压缩
数据预处理	基于密度的聚类算法和回声状态网络的变压器状态数据清洗方法[50]	基于噪声应用密度空间聚类对所有历史时刻数据进行聚类，利用回波状态网络对传感器异常引起的状态参数数据进行修复，实现变压器状态数据清洗
	考虑电力传感器时间属性的数据清洗方法[51]	考虑电力传感器数据时间属性，基于 Hadoop 平台给定支持大规模电力传感器数据采集、存储和处理的框架，在 Spark 计算平台中基于时间相关 k 均值聚类算法实现异常值检测和补偿的数据清洗方法
	基于数据仓库技术的数据预处理技术[52]	基于数据仓库技术的电力数据预处理技术，以疏失误差剔除的过程为例描述了处理过程,建立电力远程智能监测系统
数据融合	新型电力系统中的多源异构数据融合[53]	对幂数据进行时间配准，利用改进的局部全局投影提取特征;将数据输入到 Hermite 正交基前馈神经网络中进行建模学习，输出子数据集的融合结果;基于 MapReduce 框架，对数据样本进行并行化处理，并利用 Reduce 机制对子数据集的融合结果进行汇总，得到最终结果
	配电网数字孪生多融合数据模型构建技术[54]	设计了虚实数据融合架构，实现了电力数字孪生结构化和非结构化虚实数据的语义特征提取，同时引入相似度计算方法实现本体映射，根据融合规则完成虚实数据融合

表 2 电力装备数字孪生典型建模方法

Table 2 Digital twin model of electrical equipment

模型类型	应用场景与方法	特点
降阶模型	油浸式变压器绕组温度降阶模型[62]	提出一种基于本征正交分解和包含线性多项式的径向基函数响应面法的降阶计算模型以计算油浸式电力变压器绕组的稳态温度
	110 kV 油浸式变压器三维磁场降阶模型[63]	提出基于本征正交分解法的磁场降阶模型与基于二次多项式的损耗响应面模型，解决三维变压器磁场有限元仿真计算效率低的问题
数据驱动模型	直流电缆轴向温度场的数字孪生模型[65]	使用序列到序列残差神经网络算法进行降阶多物理场耦合建模，建立了基于神经网络学习模型驱动方法的高效数字孪生模型
	火力发电厂汽轮机系统数字孪生建模[66]	采用机理与数据驱动混合的模型构建方法，通过神经网络数据驱动计算给水泵速度和泵涡轮机的蒸汽流量等参数，其他参数采用机理数据混合驱动建模方法进行建模
	配电变压器的数据驱动模型[67]	构建了一个基于人工智能技术的数据驱动模型，以映射物理实体的状态，并根据实际状态和模型预测状态之间的误差来补偿参数偏差
分数阶模型	CCM Boost 变换器的分数阶微积分模型[68]	建立了 CCM Boost 变换器基于分数阶微积分理论的数学模型，推导 CCM Boost 变换器数字孪生参数辨识的方法，辨识出电感、电容、电感阶次和电容阶次等参数，并根据公式计算出串联等效电阻

算速率，以满足数字孪生高效实时的仿真运行需求。降阶模型的本质是将非线性多维层面数据向低维层面转换，保障计算精度并降维减量，以节省仿真计算时间。目前降阶模型主要有响应面法[63]、深度学习法[65]和特征正交分解法[62]等。数据驱动模型[66-67]基于数据分析和机器学习，利用大量数据训练优化以提高模型精度和泛化能力。电力电子元器件存在的电路回路中具备电感电容分数阶特性，因而在建立包含电力电子元器件数字孪生模型时应考虑分数阶模型[68]。

1.2.4 场景重构技术

场景重构技术为电力运维业务场景赋能，实现数字化、规范化作业与监督管理，提高复杂问题解决效率，助力数字化转型升级。场景重构主要基于三维场景重建方法，建立建筑信息模型(building information modeling，BIM)和工程信息模型(engineering information modeling，EIM)，实现外部场景可视化展示。传统三维建模方法耗时长、精度低，难以实现全息复制和数据交互，因此亟需推动实景建模技术与数字孪生的深度融合，常用的实景建模技术方法有三维激光扫描[69-70]、倾斜摄影[71]以及超宽带定位技术[72-73]等，如表 3 所示。

1.2.5 状态诊断与评估

状态诊断与评估是数字孪生运维核心应用之一，其目标是结合数据诊断实现设备状态实时监测、预测性维护和智能决策支持等功能。不同的状态诊断与评估技术要结合特定的数据信息与具体设备场景。例如，许继集团的王伟杰等人根据高压设备数

字孪生体可融合多维度多时间尺度数据的特点，提出基于数字孪生的高压设备状态评估方法[74]。现阶段的故障诊断与状态评估数字孪生研究围绕变电装备[75-77]、新能源电力装备[78-80]以及配网电力装备[81-83]开展，如表 4 所示。

1.3 数智化技术与数字孪生的结合

数字孪生通常与物联网、传感器、数据分析等技术结合使用，受益于人工智能技术的发展与应用，数字孪生在数据分析与预测、实时监控与控制、优化决策、模型更新与学习、虚拟测试与仿真等方面实现深度开发，数字孪生和人工智能的结合可以带来更高效、智能、自适应的系统。以下将简述输配电设备运维相关的数智化技术，并分析其与数字孪生技术结合的可行性。

2023 年，中国电力科学研究院韩笑与蒲天骄等人分析了电力人工智能技术应用范式[84-85]，针对人工智能研究在电力发展中存在的瓶颈，提出意识引导的电力人工智能理念及其自主学习流程。图 3 展示了电力人工智能自主学习中涉及 AI 巡检的流程，并在意识引导的电力人工自主学习框架下，探索其在输电线路巡检的应用。AI 自适应学习可用于模型算法的迭代优化，通过对实时监测数据的感知判断，准确反映物理实体的变化，在运维过程进行管理干预。华北电力大学赵振兵等人针对输电线路螺栓缺陷存在视觉不可分的问题，通过知识表达模块学习各类螺栓的特征判别，提取标签共现信息，进行图

表 3 电力装备数字孪生应用场景重构技术

Table 3 Scenario visualization technology of digital twin application in electrical equipment

技术类型	应用场景	特点
三维激光扫描	基于平面检测的变电站设备三维点云识别[69]	使用三维激光扫描仪获取大量变电站设备表面形状和空间位置的全方位密集点云数据，简化降噪获得特征平面，通过平面检测与点云配准算法相结合，快速识别设备信息
	继电保护装置故障远程 VR 在线诊断系统[70]	通过感知设备、地面激光雷达结合摄像机采集的现实图片，采集继电保护装置电流电压数据与彩色点云数据，形成 VR 视觉成像，从而实现用户侧的虚拟交互
倾斜摄影	基于倾斜摄影和激光雷达融合的电网信息获取方法[71]	基于倾斜摄影和激光雷达融合的电网数字孪生信息获取方法，实时采集、提取大范围输电线路的高分辨率可视化信息，为数字孪生的三维模型构建提供有效视觉信号
超宽带定位技术	数字孪生变电站[72]	基于超宽带定位技术高精度的定位、测距和成像能力，以及融合其他传感器来获取信息，结合变电站三维立体模型，实现对现场作业人员实时定位、实时轨迹跟踪、行为分析告警
	地下变电站通信定位设计[73]	基于超宽带定位技术优异的通信功能，提供丰富的空间信息和精确数据，集成地下变电站通信定位系统

表 4 电力装备数字孪生应用的状态诊断技术

Table 4 State diagnosis technology for digital twin application in electrical equipment

应用场景	类型	特点
变电装备	基于 RIA 模型的电力变压器绝缘远程故障诊断[75]	将超高频局部放电和铁芯接地电流等多种监测方法结合起来，研究变压器放电和绝缘缺陷之间的关系、位置和典型原因，建立了基于富互联网应用程序模型的分布式远程绝缘状态监测与故障诊断系统
	智能变电站健康评估与故障诊断[76]	建立一套基于数字孪生的 GIS 智能变电站健康评估与故障诊断模型，利用故障诊断技术判断设备状态，在发生异常时准确显示预警(故障)的位置和类型，实现 GIS 智能变电站内设备状态的实时感知
	基于溶解气体隶属度的变压器故障诊断[77]	基于变压器状态评价准则，建立了溶解气体的隶属度函数，结合支持向量机自学习和泛化能力，对故障样本进行训练，提高变压器放电故障和过热故障的诊断精度
新能源电力装备	人工智能技术应用于漂浮式风力发电机故障诊断[78]	提出漂浮式风机发电机故障诊断人工神经网络模型和故障诊断推理流程，根据预先构建的数据库和推理框架，对传感数据进行分析和计算，有效提高浮式风发电机系统的故障诊断效率和准确性
	基于机器学习的风力涡轮机预测建模[79]	建立基于 5G-NG-RAN 云服务的数字孪生框架，模拟监控风力涡轮机并形成预测模型，预测风速和发电量
	光伏高比例配电网过载风险预警方法[80]	根据设备过载耐受分析建立载荷安全预警等级，根据配电网运行状态，对配电网未来随机场景快速仿真，计算过载风险指标，评判载荷安全性
配网电力装备	基于数字孪生的 5G 无人机智能电网巡检技术[81]	通过无人机完成数据采集与监控，使用 5G 传输信道，模拟输电线路、变电站及绝缘子等关键部件的无人单元巡检，以及巡检轨迹和预警跟踪，实现数字孪生为动态仿真工具的输电线路智能巡检
	10 kV 配网电力设备运行状态监测[82]	利用无线传感器采集并处理电力设备运行状态信号，构建电力设备运行状态孪生模型，结合关联规则提取设备运行状态特征，实现 10 kV 配网电力设备运行状态监测，降低状态监测的响应时间和漏检率
	低压直流配电网主动检测故障诊断与故障定位技术[83]	提出基于变换器的 LVDC 配电网主动检测故障诊断技术，通过变换器将检测信号注入故障线路，通过计算谐波阻抗来确定故障类型并定位直流侧的故障点

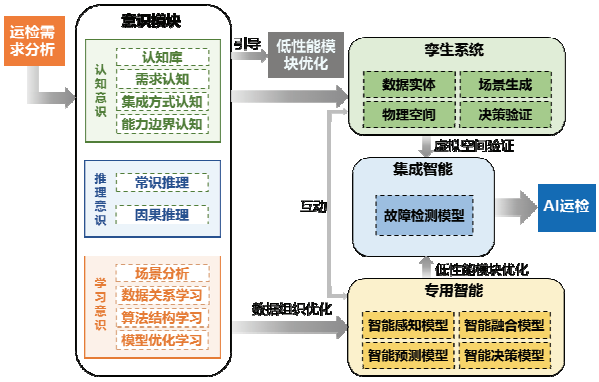


图 3 基于人工智能自主学习的电力 AI 巡检

Fig.3 AI inspection and monitoring of power equipment via artificial intelligence self-learning

知识推理，实现输电线路上螺栓缺陷识别[86]。

目前 AI 在电力设备故障诊断、运维和设备台账管理等领域已存在结合应用的案例[87-88]。但 AI 在电力的跨业务通用性不高，存在“专项专用”现象，结合大规模语义模型技术和大规模视觉模型技术的多模态大模型技术[89]是解决这一问题的关键转机。上海交通大学江秀臣等人分析了近两年以 ChatGPT 为代表的语义型人工智能算法以及电力设备 ChatGPT 类模式所涉及的关键技术[90]，ChatGPT 是一种基于人工智能技术的自然语言处理模型，能够将传统“专用 AI 模型”的单一功能集成于 ChatGPT 类大模型中，使大模型技术投入到电力设备设计、制造、运行、维护、管理等全过程多场景的智能化应用。在数字化运维领域，大模型技术在未来电力设备综合状态评估中突出优势主要体现在多模态数据分析、小样本故障数据智能诊断和设备历史运行数据的修补恢复 3 个方面。大规模语义模型具备学习、理解、识别和生成功能，大规模视觉模型能对包括设备的图像、文本、音频、视频等多模态数据进行学习分析[91]；“类人”推理能力能够支持在零样本或者小样本的情况下理解任务内容，并生成相应的诊断结果[92]；极强的学习和泛化能力可以对设备历史数据进行学习理解并修补恢复[93]。因此，依托大规模技术“类人”的学习推理能力，有望在设备运行数据缺失甚至匮乏的情况下，对电力装备进行状态评估，提高决策的科学性。

除大模型技术外，元宇宙概念也是人工智能领域近些年的热点话题。2022 年，上海交通大学贺兴等人分析了基于数字孪生与元宇宙技术的能源互联网态势感知系统论方法[94]。元宇宙比数字孪生更为庞大、复杂，数字孪生技术建立起物理实体与其虚拟模型之间的连接关系，元宇宙则通过将人类行为与系统运行相结合，形成综合的虚拟环境。因融入了人机协同过程，元宇宙具备更高的算力，其应对不确定性处理能力和计算效率远超数字孪生，能为电力设备运维提供更精准化的智慧型建设。就现阶段而言，数字孪生技术更适用于我国电网设备运维数字化的起步发展与底层软硬件构建，而当数字化升级建立了相对成熟的孪生架构、算法与交互系统后，可以进一步依托元宇宙理论方法，促进电力装备运维融合应用的可视化建模与交互建设，基于扩展现实技术，元宇宙可提供沉浸式体验，实现运维过程的虚实交互，丰富完善控制侧与用户侧的对接，加强设备态势感知的灵敏度与展示性。

人工智能技术与数字孪生运维优化融合存在几类可行方向：1）AI 自适应技术能根据不断更新的学习库，高效解决预见性运维问题；2）ChatGPT 类语义型人工智能技术具有强大的数据恢复能力和多模态数据学习、理解、识别和生成功能，极大地保障运维决策的科学性；3）元宇宙融入人机协同过程，能够模拟现实世界与物理系统，提供丰富的用户体验和交互方式，可增强数字孪生系统虚实交互场景的升级应用。

2 量化评估机制

为确定数字孪生运维技术是否满足预期应用需求，需对其进行量化评估，合理评估数字孪生电力运维具体应用的性能与成本效益，评估结果可确定数字孪生运维应用的发展程度，为管理层提供决策支持，并用于指导优化升级。

目前，有学者提出数字孪生模型评价指标体系[95]、数字孪生成熟度模型[96]等，但针对数字孪生技术在电力装备运维中的具体应用，尚未有明确的评估机制，更不存在针对相关技术的成熟度、优劣性进行量化评估的方法。虽暂未见数字孪生技术在电力装备运维中的具体量化评价体系，但在人工智能项目方面已有相关应用。İrem Otay 团队将层次分析法和模糊评估法应用于评估具有复杂性的数字化转型项目[97]。Felix Zechiel 团队通过文档分析和德尔菲法研究人工智能与可持续发展之间的联系，从而开发了一个确定和分类科技公司人工智能可持续发展战略的架构[98]。结合前面的分析与上述案例，作者认为针对数字孪生技术应用的评价可以从准确

性、时效性、普适性、经济性和交互性 5 个维度展开，如图 4 所示。

其中，1）准确性体现基于数字孪生技术对设备状态或故障的诊断结果与实际情况的一致性比例，用于反映该方法对于某一监测需求的响应准确度，帮助电网、设备厂商判断该技术是否满足实际应用条件和误差要求；2）时效性说明应用该技术获取并生成指定数据或做出相应决策判断所需要的时间，帮助相关人员判断本技术是否满足运维监测或诊断的时效性要求；3）普适性反映某一数字孪生技术适用的设备、场景和模式，应用范围过于小的技术可能带来各方面成本的增加，运维技术应尽量兼容更多设备、场景及运行模型和诊断结果产出；4）经济性表征某一数字孪生技术的前期设备配套和应用过程中产生的投入成本是否能够满足电网与设备厂商的接受要求；5）交互性是指某一数字孪生技术是否便于人员交互和操作。

数字孪生运维技术的发展应匹配相应的量化评价机制，其量化策略应以上述 5 个核心维度为基础，同时还应考虑技术成熟度的评价。一般来说，针对电网层级的应用可以粗略分为概念级、样机级、试点级、推广级和全面级几个阶段，更加细致的分级和评分可以根据具体应用的技术特点以及电网侧的具体需求进行拓展设计。此外需要指出，各评价维度之间具有关联性，例如准确性与时效性、经济性可能存在矛盾，高精度检测可能需要依托精密检测设备与较长的数据积累，导致经济性和时效性的降低。因此，在评价过程中，各维度以及技术成熟度需进行复合加权设计，涵盖包括各指标的权重以及不同指标两两之间的关联描述量，相应的方法设计可依托层次权重决策分析的层次分析法[99-100]实现；同时，对于具有很强主观性的指标设计，例如成熟度的分级和时效性的可接受程度等，可以依托征询专家意见的德尔菲法[101-102]实现，在最大程度上提升客观性，并保留指标设计初衷的评价作用。

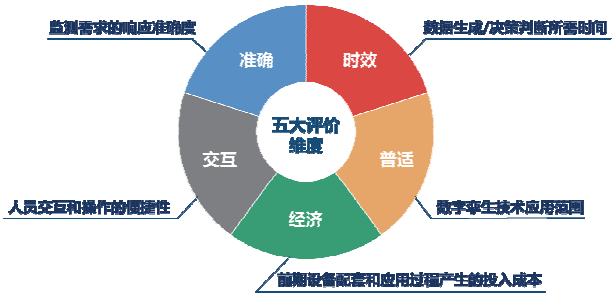


图 4 数字孪生运维技术的五维评估架构

Fig.4 Five-dimensional evaluation framework

对数字孪生运维技术的量化评价需要兼顾客观性与实用性，依托合适的统计学工具，结合实际应用场景、电网运维需求，形成匹配的量化评估框架与指标计算体系，实现各数字孪生方法的准确评价、多维度反馈以及成熟度划分等。

3 工程化现状与发展趋势建议

3.1 政策驱动与工程化应用

3.1.1 相关政策

国家层面，2021 年我国颁布的《中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和 2035 年远景目标纲要》文件指出“探索建设数字孪生城市”，同时提出绿色能源体系的转型建议[103]。同年，国务院颁布《关于加强数字政府建设的指导意见》中提到引领数字社会建设，探索城市信息模型、数字孪生等新技术运用，提升城市治理科学化、精细化、智能化水平[104]。在此之后，我国工业和信息化部连续发布多项政策[105-107]，指导我国工业绿色转型与数字化发展，明确指出数字孪生是智能制造攻关升级的核心技术之一。

行业层面，2021 年 12 月，国家能源局颁布的《“十四五”能源领域科技创新规划》[108]中明确了数字孪生技术为能源系统数字化-智能化建设中的主要发展技术，构建包括设备状态人工智能预测、性能与安全风险智能诊断、人机交互虚拟仿真预测的数字孪生系统，并对光伏系统、发电系统和变电设备开展数字孪生架构设计与运维方法研究。类似地，国家能源局于 2023 年颁布的《关于加快推进能源数字化智能化发展的若干意见》[109]强调发展数字孪生技术在我国能源行业转型中的重要性。

3.1.2 工程化应用

在国家与各部委相关政策的驱动和电网侧与产业界的积极响应下，数字孪生技术在电力装备运维领域已形成多项试点应用[110-111]。国网上海市电力公司浦东供电公司建设的 35 kV 蔡伦智慧变电站和国网四川省电力公司广元供电公司 220 kV 数字孪生袁家坝变电站均能实现变电站三维全景可视化展示及设备全状态感知、检修方案自主生成等功能。国网福州供电公司指挥中心结合数字孪生电网的沙盘指挥场景，研发移动资源调派功能应用，实现了复杂抢修资源的最优调派及可视化管控。国网江苏省电力有限公司泰州供电分公司将自主飞行和数据

智能识别深度融合，单作业任务流转时间缩短 50%。

3.2 面临的主要挑战

数字孪生技术在电力装备运维产业已涌现出大量应用，为运维产业的智能化升级提供了新兴技术方法。然而，目前数字孪生运维技术仍处于相对初级阶段，本节总结了目前发展可能遇到的主要问题与关键挑战。

1）智能传感配套技术不成熟

现阶段数字孪生运维底层的传感技术仍面临诸多挑战。其中，传感器服役的稳定性和数据质量问题将直接影响数字孪生模型的可靠性和精确性。长期运行的传感器可能会出现故障并需要维护；传感器网络的不合理规划与管理会增加系统的能耗和维护成本；部分应用场景要求对实时数据做出快速响应，现有的传输网络可能会存在时延；主要运维场景下传感器的种类单一、现场布置困难、难以可靠运行等现实问题均可能影响数字孪生体底层数据的获取。除此之外，针对各类电气设备重要特征信息高灵敏度与抗干扰的传感器设计与研发也是重要挑战。

2）运维技术与诊断方法局限性

除去对孪生体物理化学参量的直接感知与简单诊断外，当前针对电气设备的数字孪生运维技术与诊断方法存在局限性。究其原因，建模复杂性是一个方面；其次，困难来源于设备大量实时数据的集成和标准化。再者，孪生模型是对实际设备的近似，存在模型误差问题。最后，还有昂贵的成本与操作复杂性等一系列实践问题。目前数字孪生的运维应用以变电设备为典型场景，需要推动传感技术、数据处理技术等方面的方法与标准完善，并逐渐推广至电网设备运维的全领域。

3）运维反馈机制缺失与黑箱问题

数字孪生的运维应用不能简单理解为工程领域数字孪生的应用场景延伸，其提供的多样化决策模拟环境，可以测试各种可能的解决方案并进行整合优化。然而，实际参与者的反馈信息如何有效地用于模型迭代升级将密切关系到模型的应用质量，现阶段缺乏针对这类反馈机制的设计。另外，复杂算法的应用会同时加剧模型的“黑箱”问题，导致孪生体的信息处理与诊断评估过程中可能面临权责不明、扩大决策风险的问题。因此，相比于模型算法的优化更新，提升数字孪生模型的跨维信息识别与反馈迭代能力对完善孪生体功能结构具有更强的实践意义[112]。

4）数据安全与软硬件集成问题

数字孪生运维需要处理大量包含设备运行状态、性能参数等敏感信息的实时数据，确保数据的隐私和安全是当下需要重视的问题[113-114]。此外，数字孪生系统多为网络传输数据，需考虑数据传输的保护、防范网络攻击以及确保通信通道的安全性。再者，数据在传输和存储过程中被篡改、损坏会直接影响到数字孪生模型的准确性和可靠性。物理安全问题也不容忽视，数字孪生模型所依赖的数据可能存储在云端或其他服务器上，需要确保服务器的物理安全性。另外，在数字孪生技术中使用的硬件和软件组件可能来自不同供应商，需确保从供应商获得的硬件和软件经过认证和安全审查，以防止潜在的恶意代码和后门入侵。最后是合规性和法规要求，在数字孪生应用中，需要注意对于敏感信息的处理。遵循相关的数据隐私法规，制定合规的数据管理政策是确保数字孪生数据安全的关键。

5）低碳化运维策略匮乏

“双碳”战略是我国电力系统与能源体系改革的关键政策，然而目前数字孪生技术与电力设备运维的结合对低碳目标的考量相对较少。已报道的研究中，李冬雪等人根据三维电磁场时谐场有限元数值分析方法，对电力变压器在波动负荷工况下空载损耗、负载损耗和杂散损耗进行计算与分析，进而构建电力变压器磁特性数字孪生模型，辅助分析变压器的低碳运行策略[115]。该类技术的方法概念与应用还十分匮乏，实际上，基于数字孪生的设备运维可以有效检测设备碳排状态，实现低碳优化。此外，电力设备运维涉及到供应链的设备制造、运输、安装环节，数字孪生技术在应用时应考虑整个供应链的碳足迹，包括材料的生产、设备的制造和运输等方面，确保整体的碳排放足迹处于可控范围。

3.3 未来发展建议

数字孪生技术的发展可以分成概念研究、初期试点、技术拓展以及泛化应用 4 个阶段，如图 5 所示。2020 年至今，数字孪生技术已经处于技术拓展阶段，但目前电力行业数字孪生的运维技术针对的设备、项目或模型相对单一，获取和处理的数据信息种类一般比较局限，其与可视化技术结合的形式也相对初级，整体上数字孪生运维的功能逻辑与诊断能力均有待提升，以下提出几点可能的发展建议。

1）推动数字孪生运维底层技术发展与融合

数字孪生运维技术发展的根本是多学科领域

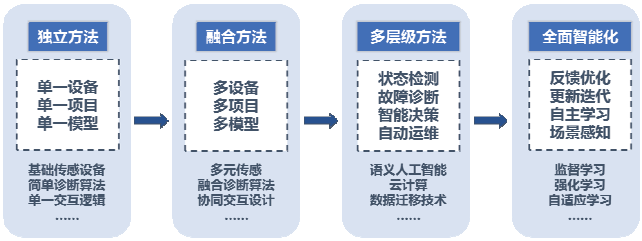


图 5 数字孪生运维应用发展进程

Fig.5 Development process of digital twin operation and maintenance application

关键技术的协同发展与融合。目前亟需大力发展的匹配性底层技术包括智能传感、可视化建模、语义人工智能、信号处理方法、数据驱动分析 5 个方面，前两类技术依托信息采集硬件与后台分析算法的结合[116]，而后三类技术主要依托数据集成、处理、训练以及模型优化[117-118]。因此，在后续数字孪生运维技术的发展中，硬件开发与软件设计需要并行发展，在实现信息可靠获取的基础上，完善数据分析与交互任务。

2）数字孪生跨领域共享与协同机制构建

数字孪生运维技术的发展并不能局限于输配电设备本身，其本质是服务于我国电网设备智能运维体系的升级以及能源侧改革下电网数字化转型的需要。因此，数字孪生运维技术需要与其相关的孪生技术如智能调度[119]、智能制造[120]、智慧储能[121]、智慧城市[122-123]等结合，打通电网侧“发-输-变-用-储”的各个环节，以及设备生产制造-运行使用-退役回收的全生命周期。

3）强化网络安全和隐私保护

随着数字孪生技术在电力设备运维中的广泛应用，网络安全和隐私问题变得尤为重要。未来发展应着力于提升数字孪生系统的网络安全性，确保数据传输和存储的安全[124]。同时，需要考虑用户隐私保护的机制，以维护用户数据的安全性和隐私权。

4）引入市场竞争机制并加强合作引导

国内的数字孪生运维市场具有一定的同质化现象，应用模型主要聚焦变电设备，缺乏发散式拓展，为引导数字孪生运维产业发展、促进行业创新，应尽快创建数字孪生平台市场，引入透明的市场竞争机制，推动行业标准化，建立第三方评估和认证机构，鼓励供应商之间合作，整合各方资源，共同解决电力设备运维面临的共性问题。

在接下来的 10~30 年，随着我国电网架构与运维技术的进一步发展，数字孪生将与电力运维应用实现更深层次的融合。首先，目前基于传感设备、诊断算法与交互逻辑的技术水平，数字孪生运维应用普遍采用针对单一设备或特定运维项目的独立方法体系；其次，随着传感技术、诊断算法与交互应用设计等底层支持技术的更新迭代与协同作用，数字孪生运维技术将发展至适用于多设备、多项目、多模式运维的融合应用体系；最后，新型智能技术的赋能将推动形成具备状态监测-故障诊断-智能决策-自动运维多层级架构与执行逻辑的多层级方法应用体系；最后叠加反馈强化学习与针对运维场景的智能感知，形成具有强反馈与自主学习能力的全面智能化运维与决策方法系统。

4 结论

1）当前电力装备运维需求与数字孪生技术已形成初步融合。研究表明，数字孪生电力运维系统架构设计的具体表达形式总体包含设备状态感知与数据获取、数据处理与传输交互、模型构建和功能应用实现与反馈 4 个方面；支撑各层级的关键技术有传感技术、数据处理技术、数字孪生模型构建技术、场景重构技术以及状态诊断技术；数字孪生运维技术的优化升级需要考虑与大模型和元宇宙等 AI 技术进行有效融合。

2）数字孪生运维技术的发展应匹配相应的量化评价机制，针对电力装备特征与数字孪生运维应用需求，量化评估机制可以从准确性、时效性、普适性、经济性和交互性 5 个维度和技术成熟度评价展开。

3）电力能源领域的政策支持驱动了数字孪生运维技术的工程化，目前该技术的具体应用面临传感配套技术不成熟、运维诊断方法局限性、运维反馈机制缺失、数据安全问题以及低碳优化策略匮乏等挑战，需要考虑从运维底层技术发展融合、跨领域共享、网络数据安全以及市场竞争机制引导方面推动其未来的技术进步，从而助力电力装备智能运维的发展，为我国新型电力系统转型与“双碳”战略目标实现提供有力支持。

参考文献 References

[1] 黄碧斌，张运洲，王彩霞. 中国“十四五”新能源发展研判及需要关注的问题[J]. 中国电力，2020，53(1)：1-9.
HUANG Bibin, ZHANG Yunzhou, WANG Caixia, et al. New energy development and issues in China during the 14th five-year plan[J].

Electric Power, 2020, 53(1): 1-9.

[2] 陈国平，董 昱，梁志峰. 能源转型中的中国特色新能源高质量发展分析与思考[J]. 中国电机工程学报，2020，40(17)：5493-5505.
CHEN Guoping, DONG Yu, LIANG Zhifeng. Analysis and reflection on high-quality development of new energy with Chinese characteristics in energy transition[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(17): 5493-5505.

[3] 江秀臣，许永鹏，李曜丞，等. 新型电力系统背景下的输变电数字化转型[J]. 高电压技术，2022，48(1)：1-10.
JIANG Xiuchen, XU Yongpeng, LI Yaocheng, et al. Digitalization transformation of power transmission and transformation under the back-ground of new power system[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(1): 1-10.

[4] GRIEVES M, VICKERS J. Digital twin: mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems[M]//KAHLEN F J, FLUMERFELT S, Alves A. Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems. Cham, Switzerland: Springer, 2017: 85-113.

[5] 蒲天骄. 陈 盛，赵 琦，等. 能源互联网数字孪生系统框架设计及应用展望[J]. 中国电机工程学报，2021，41(6)：2012-2028.
PU Tianjiao, CHEN Sheng, ZHAO Qi, et al. Framework design and application prospect for digital twins system of energy internet[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(6): 2012-2028.

[6] LEVITSKY D O, ALIEV M K, KUZMIN A V, et al. Isolation of calcium pump system and purification of calcium ion-dependent ATPase from heart muscle[J]. Biochimica et Biophysica Acta (BBA) - Biomembranes, 1976, 443(3): 468-484.

[7] NGUYEN T N, PONCIROLI R, BRUCK P, et al. A digital twin approach to system-level fault detection and diagnosis for improved equipment health monitoring[J]. Annals of Nuclear Energy, 2022, 170: 109002.

[8] PRIYANKA E B, THANGAVEL S, GAO X Z, et al. Digital twin for oil pipeline risk estimation using prognostic and machine learning techniques[J]. Journal of Industrial Information Integration, 2022, 26: 100272.

[9] PIRES F, LEITÃO P, MOREIRA A P, et al. Reinforcement learning based trustworthy recommendation model for digital twin-driven decision-support in manufacturing systems[J]. Computers in Industry, 2023, 148: 103884.

[10] 沈 沉，曹仟妮，贾孟硕，等. 电力系统数字孪生的概念、特点及应用展望[J]. 中国电机工程学报，2022，42(2)：487-498.
SHEN Chen, CAO Qianni, JIA Mengshuo, et al. Concepts, characteristics and prospects of application of digital twin in power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(2): 487-498.

[11] SONG Z, HACKL C M, ANAND A, et al. Digital twins for the future power system: an overview and a future perspective[J]. Sustainability, 2023, 15(6): 5259.

[12] 中国南方电网有限责任公司. 数字化转型和数字南网建设行动方案(2019 年版)[M]. 广州：中国南方电网有限责任公司，2019.
China Southern Power Grid Co., Ltd. Action plan for digital transformation and Digital South network construction (2019 edition)[M]. Guangzhou, China: China Southern Power Grid Co. Ltd., 2019.

[13] 国家电网有限公司. 泛在电力物联网白皮书 2019[M]. 北京：国家电网有限公司，2019.
State Grid Corporation of China. Internet of things in electricity white paper 2019[M]. Beijing, China: State Grid Corporation of China, 2019.

[14] TU Y P, CHEN G, WANG C, et al. Feasibility of C_3F_7CN/CO_2 gas mixtures in high-voltage DC GIL: a review on recent advances[J]. High Voltage, 2020, 5(4): 377-386.

[15] MA G M, WANG Y, QIN W Q, et al. Optical sensors for power transformer monitoring: a review[J]. High Voltage, 2021, 6(3): 367-386.

[16] ZHAO D, LUCAS J. Virtual reality simulation for construction safety promotion[J]. International Journal of Injury Control and Safety Promotion, 2014, 22(1): 57-67.

[17] BOGATINOV D, LAMESKI P, TRAJKOVIK V, et al. Firearms training simulator based on low cost motion tracking sensor[J]. Multimedia Tools and Applications, 2017, 76(1): 1403-1418.

[18] GUAN S Q, HU W S, LEI Z C, et al. Digital twin-based online tools for electric power communication system training: online digital twin power communication system[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2023, 17(1): 146-160.

[19] 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，2021，47(5)：1522-1538.
QI Bo, ZHANG Peng, ZHANG Shuqi, et al. Application status and development prospects of digital twin technology in condition assessment of power transmission and transformation equipment[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(5): 1522-1538.

[20] 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. Key technology and application prospect of digital twin in power equipment industry[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(5): 1539-1554.

[21] LOGGIA R, FLAMINI A. Electrical safety enhanced with BIM, SCADA and digital twin integration: a case study of a MV-LV substation[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2024, 60(2): 2725-2731.

[22] MOUTIS P, ALIZADEH-MOUSAVI O. Digital twin of distribution power transformer for real-time monitoring of medium voltage from low voltage measurements[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2021, 36(4): 1952-1963.

[23] LUO H, CHENG L, YANG L J, et al. A novel approach to building digital twin transformers by combining virtual-real sensing: an example of degree of polymerization distribution[J]. Measurement, 2023, 222: 113714.

[24] WANG C, YUAN H H, BIAN Q F, et al. Multi-camera vision-based synchronous positioning and mapping for green construction of electric substations[J]. Frontiers in Energy Research, 2024, 12: 1370873.

[25] 孙瑞江，池威威，李树荣，等. 雄安新区的数字孪生变电站应用及探索[J]. 现代电力，2024，41(1)：29-35.
SUN Ruijiang, CHI Weiwei, LI Shurong, et al. Application and exploration of digital twin substation in Xiong'an new area[J]. Modern Electric Power, 2024, 41(1): 29-35.

[26] 刘云鹏，刘一瑾，刘 刚，等. 电力变压器智能运维的数字孪生体构想[J]. 中国电机工程学报，2023，43(22)：8636-8651.
LIU Yunpeng, LIU Yijin, LIU Gang, et al. Digital twin conception of intelligent operation and maintenance of power transformer[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(22): 8636-8651.

[27] 张 冀，马 也，张荣华，等. 数字孪生变电站框架设计与关键技术研究[J]. 工程科学与技术，2023，55(6)：15-30.
ZHANG Ji, MA Ye, ZHANG Ronghua, et al. Framework design and key technology research of digital twin substation[J]. Advanced Engineering Sciences, 2023, 55(6): 15-30.

[28] 董 泽，姜 炜，王晓燕，等. 数字孪生在火电机组数字化转型中的应用[J]. 系统仿真学报，2023，35(6)：1144-1156.
DONG Ze, JIANG Wei, WANG Xiaoyan, et al. Application of digital twin in digital transformation of thermal power units[J]. Journal of System Simulation, 2023, 35(6): 1144-1156.

[29] 叶 宏，孙 勇，阎 峻，等. 数字孪生智能抽水蓄能电站研究及其检修应用[J]. 水电能源科学，2022，40(6)：201-206.
YE Hong, SUN Yong, YAN Jun, et al. Research of digital twin intelligent pumped storage station and application of maintenance[J]. Water

Resources and Power, 2022, 40(6): 201-206.

[30] 何 冰，谢天祥. 数字孪生技术在输电线路中的应用研究[J]. 电力信息与通信技术，2021，19(7)：83-89.
HE Bing, XIE Tianxiang. Research on application of digital twin technology in power transmission line[J]. Electric Power Information and Communication Technology, 2021, 19(7): 83-89.

[31] 黄兆鋆，熊 刚，盛 健，等. 基于数字孪生技术的城市电缆智能管理系统研究[J]. 中国设备工程，2022(增刊 2)：116-118.
HUANG Zhaoyun, XIONG Gang, SHENG Jian, et al. Research on urban cable intelligent management system based on digital twin technology[J]. China Plant Engineering, 2022(Supplement2): 116-118.

[32] 马 超，梁 科，李新平，等. 数字孪生技术在高压电缆领域的应用探索[J]. 高压电器，2023，59(1)：70-76，85.
MA Chao, LIANG Ke, LI Xinping, et al. Application exploration of digital twin technology in the field of high voltage cable[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(1): 70-76, 85.

[33] 梁卓识. 基于数字孪生的数字电网建设探究[J]. 科技创新与应用，2023，13(30)：193-196.
LIANG Zhuoshi. Research on digital power grid construction based on digital twin[J]. Technology Innovation and Application, 2023, 13(30): 193-196.

[34] 盛 鹃，吴梓妍，李智勇. 基于数字孪生技术的城市新型电力系统应用架构[J]. 电工技术，2023(6)：100-103.
SHENG Kun, WU Ziyan, LI Zhiyong. Application architecture of new urban power system based on digital twin technology[J]. Electric Engineering, 2023(6): 100-103.

[35] 黄海悦，缪 欣. 基于数字孪生的配电室关键技术研究[J]. 信息技术与信息化，2022(12)：159-162.
HUANG Haiyue, MIAO Xin. Research on key technologies of power distribution room based on digital twin[J]. Information Technology and Informatization, 2022(12): 159-162.

[36] 章耀耀，侯 勇，叶 海，等. 继电保护数字孪生技术应用展望[J]. 电力系统保护与控制，2023，51(12)：178-187.
ZHANG Yaoyao, HOU Yong, YE Hai, et al. Application prospect for relay protection digital twin technology[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(12): 178-187.

[37] 江俊杰，胡 军，马国明，等. 数字化电力装备专用传感应用需求与发展趋势[J]. 高电压技术，2024，50(8)：3271-3302.
JIANG Junjie, HU Jun, MA Guoming, et al. Application requirements and development trend of special sensors in digital electrical equipment[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(8): 3271-3302.

[38] KHAWAJA A H, HUANG Q, KHAN Z H. Monitoring of overhead transmission lines: a review from the perspective of contactless technologies[J]. Sensing and Imaging, 2017, 18(1): 24.

[39] 白雪娇，倪 巍，王 楷，等. 电力变压器监测方法研究进展[J]. 仪器仪表与分析监测，2017(4)：4-7.
BAI Xuejiao, NI Wei, WANG Kai, et al. Research development on monitoring methods of power transformer[J]. Instrumentation Analysis Monitoring, 2017(4): 4-7.

[40] 郝艳捧，梁学致，黄盛龙，等. GIS/GIL 绝缘子超声检测研究进展与展望[J]. 高电压技术，2023，49(9)：3596-3606.
HAO Yanpeng, LIANG Xuezhi, HUANG Shenglong, et al. Status and prospect of ultrasonic detection for GIS/GIL insulators[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(9): 3596-3606.

[41] 苗振林，徐 伟，杨靖玮，等. 基于多物理量的复合传感技术在智慧配电房中的应用研究[J]. 电网与清洁能源，2021，37(3)：78-85.
MIAO Zhenlin, XU Wei, YANG Jingwei, et al. Research on application of multi-physical-based composite sensing technology in smart transformer substation[J]. Power System and Clean Energy, 2021, 37(3): 78-85.

[42] 路永鑫，魏云冰，袁建生，等. 面向高压设备数字孪生的虚拟传感器设计与应用技术[J]. 高压电器，2024，60(4)：72-82.
LU Yongxin, WEI Yunbing, YUAN Jiansheng, et al. Design and application technology of virtual sensor for digital twinning of high voltage equipment[J]. High Voltage Apparatus, 2024, 60(4): 72-82.

[43] 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 method of digital twin in electric equipment[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(5): 1505-1521.

[44] 吴和宇，周自岚，张国栋. 配电自动化通信网接入方式研究[J]. 光源与照明，2024(7)：57-59.
WU Heyu, ZHOU Zilan, ZHANG Guodong. Research on access mode of distribution automation communication network[J]. Lamps & Lighting, 2024(7): 57-59.

[45] QI Q L, TAO F, HU T L, et al. Enabling technologies and tools for digital twin[J]. Journal of Manufacturing Systems, 2021, 58: 3-21.

[46] 宋亚奇，周国亮，朱永利. 智能电网大数据处理技术现状与挑战[J]. 电网技术，2013，37(4)：927-935.
SONG Yaqi, ZHOU Guoliang, ZHU Yongli. Present status and challenges of big data processing in smart grid[J]. Power System Technology, 2013, 37(4): 927-935.

[47] 蒋建华，田月炜，罗显跃，等. 基于数字孪生模型的输变电设备多源异构数据边缘侧智能采筛方法[J]. 电工技术，2022(24)：95-98.
JIANG Jianhua, TIAN Yuewei, LUO Xianyue, et al. Edge side intelligent screening methods for multi-source heterogeneous data of power transmission and transformation equipment based on digital twin model[J]. Electric Engineering, 2022(24): 95-98.

[48] WANG H K, RAO H Y, GONG X G, et al. Electric power asynchronous heterogeneous data accelerated compression for edge computing[C]//Proceedings of the 2022 IEEE 7th International Conference on Smart Cloud. Shanghai, China: IEEE, 2022: 121-126.

[49] 鲍 文，周 瑞，刘金福. 基于二维提升小波的火电厂周期性数据压缩算法[J]. 中国电机工程学报，2007，27(29)：96-101.
BAO Wen, ZHOU Rui, LIU Jinfu. A periodical data compression method based on 2-D lifting wavelet transform in thermal power plant[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(29): 96-101.

[50] LI K, ZHANG Z D, LU B, et al. Transformer state data cleaning method based on DBSCAN and ESN[C]//Proceedings of 2023 IEEE/IAS Industrial and Commercial Power System Asia. Chongqing, China: IEEE, 2023: 1943-1947.

[51] LIU H, CHEN J Q, HUANG F P, et al. An electric power sensor data oriented data cleaning solution[C]//Proceedings of the 2017 14th International Symposium on Pervasive Systems, Algorithms and Networks & 2017 11th International Conference on Frontier of Computer Science and Technology & 2017 Third International Symposium of Creative Computing. Exeter, UK: IEEE, 2017: 430-435.

[52] 吴蓉晖，荣 宏. 数据预处理在电力远程智能监测系统的应用[J]. 高电压技术，2005，31(7)：58-60.
WU Ronghui, RONG Hong. Database preprocessing of electric power remote monitoring system[J]. High Voltage Engineering, 2005, 31(7): 58-60.

[53] YU S, WANG F D, GU H L, et al. A method for multisource heterogeneous data fusion and modeling in new power systems[C]//Proceedings of the 2023 2nd Asian Conference on Frontiers of Power and Energy. Chengdu, China: IEEE, 2023: 124-128.

[54] QIAO J F, PENG L, ZHOU A H, et al. Research and implementation of multi fusion data model construction technology for distribution network digital twins[C]//Proceedings of the 2023 5th International Conference on Decision Science & Management. Changsha, China: IEEE, 2023: 258-262.

[55] DING Y, TENG F, ZHANG P, et al. Research on text information

mining technology of substation inspection based on improved Jieba[C]//Proceedings of 2021 International Conference on Wireless Communications and Smart Grid. Hangzhou, China: IEEE, 2021: 561-564.

[56] ZHOU P, LI J X, GAO T L, et al. Research on mining of transmission grid assets of heterogeneous system based on digital twin[C]//Proceedings of the 2020 IEEE 4th Conference on Energy Internet and Energy System Integration. Wuhan, China: IEEE, 2020: 3051-3056.

[57] SUN Q Q. Enhancing power grid data analysis with fusion algorithms for efficient association rule mining in large-scale datasets[J]. International Journal of Computers Communications & Control, 2024, 19(3): 6232.

[58] 李 黎，张 登，谢龙君，等. 采用关联规则综合分析和变权重系数的电力变压器状态评估方法[J]. 中国电机工程学报，2013，33(24)：152-159.
LI Li, ZHANG Deng, XIE Longjun, et al. A condition assessment method of power transformers based on association rules and variable weight coefficients[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(24): 152-159.

[59] DENG X D, BIAN D S, WANG W K, et al. Deep learning model to detect various synchrophasor data anomalies[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2020, 14(24): 5739-5745.

[60] DANISH M S S, NAZARI Z, SENJYU T. AI-coherent data-driven forecasting model for a combined cycle power plant[J]. Energy Conversion and Management, 2023, 286: 117063.

[61] 邓祥力，朱 慧，刘世明，等. 适用于变压器保护的数字孪生建模技术研究[J]. 电网技术，2022，46(12)：4982-4992.
DENG Xiangli, ZHU Hui, LIU Shiming, et al. Research on digital twin modeling technology suitable for transformer protection[J]. Power System Technology, 2022, 46(12): 4982-4992.

[62] LIU G, HU W J, HAO S Y, et al. A fast computational method for internal temperature field in oil-immersed power transformers[J]. Applied Thermal Engineering, 2024, 236: 121558.

[63] 张重远，刘迪程，高成龙，等. 基于 Twin Builder 的 110 kV 油浸式变压器 3 维磁场降阶模型及损耗分析[J]. 高电压技术，2024，50(3)：941-951.
ZHANG Zhongyuan, LIU Dicheng, GAO Chenglong, et al. Three-dimensional magnetic field model order reduction and loss analysis of 110 kV oil-immersed transformer based on twin builder[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(3): 941-951.

[64] 刘利强，尹彦博，齐咏生，等. 一种多模型融合的风电系统永磁同步发电机数字孪生建模方法[J]. 电机与控制学报，2023，27(11)：149-162.
LIU Liqiang, YIN Yanbo, QI Yongsheng, et al. Digital twin modeling method of wind power system permanent magnet synchronous generator based on multi model fusion[J]. Electric Machines and Control, 2023, 27(11): 149-162.

[65] CHEN X G, WANG H R, ZHANG H, et al. A digital twin model of the axial temperature field of a DC cable for millisecond calculations[J]. Electric Power Systems Research, 2024, 233: 110460.

[66] CHEN C, LIU M, LI M J, et al. Digital twin modeling and operation optimization of the steam turbine system of thermal power plants[J]. Energy, 2024, 290: 129969.

[67] LI Z, WANG Z P, PENG L, et al. A deviation compensation algorithm of distribution transformer digital twin based on data-driven model[C]//Proceedings of the 2023 4th International Conference on Smart Grid and Energy Engineering. Zhengzhou, China: IEEE, 2023: 255-259.

[68] 马铭遥，韩添侠，陈 强，等. 一种基于分数阶微积分的 CCM Boost 变换器准在线无源参数的数字孪生辨识方法[J]. 中国电机工程学报，2024，44(6)：2340-2349.
MA Mingyao, HAN Tianxia, CHEN Qiang, et al. A quasi-online digital twin identification method for passive parameters of CCM boost converters based on fractional calculus[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(6): 2340-2349.

[69] YUAN Q J, LUO Y, WANG H S. 3D point cloud recognition of substation equipment based on plane detection[J]. Results in Engineering, 2022, 15: 100545.

[70] 许 明，平 夏，李配配，等. 数字孪生下的继电保护装置故障远程VR在线诊断系统设计[J]. 计算技术与自动化，2022，41(4)：40-45.
XU Ming, PING Xia, LI Peipei, et al. Design of remote VR online fault diagnosis system for relay protection device under digital twin[J]. Computing Technology and Automation, 2022, 41(4): 40-45.

[71] 刘 奇，赵 平，王远洋. 基于倾斜摄影和 LiDAR 融合的电网数字孪生[J]. 电力勘测设计，2022(8)：65-70.
LIU Qi, ZHAO Ping, WANG Yuanyang, et al. Power grid digital twin based on tilt photography and LiDAR[J]. Electric Power Survey & Design, 2022(8): 65-70.

[72] 方 涛，钱少锋，王 祯，等. UWB 定位技术在数字孪生变电站中的应用[J]. 电工技术，2022(12)：49-52.
FANG Tao, QIAN Shaofeng, WANG Zhen, et al. Application of positioning technology based on UWB in digital twin substation[J]. Electric Engineering, 2022(12): 49-52.

[73] SUN B Y, HUANG R M, XIA Y F, et al. Integrated communication and localization design based on UWB technology for underground substations[C]//Proceedings of the 2023 6th International Conference on Electronics Technology. Chengdu, China: IEEE, 2023: 535-540.

[74] 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.

[75] LIU M J, WANG P, ZHOU Q K, et al. Remote fault diagnosis system for power transformer insulation based on RIA model[C]//Proceedings of 2016 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application. Chengdu, China: IEEE, 2016: 1-4.

[76] SHI K, SHE Y B. Application of digital twin technology in health assessment and fault diagnosis of intelligent substation[C]//Proceedings of 2022 International Conference on Wireless Communications, Electrical Engineering and Automation. Indianapolis, USA: IEEE, 2022: 179-182.

[77] GAO C, GAO E, YANG Z, et al. Transformer fault diagnosis method based on membership degree of dissolved gas[C]//Proceedings of 2022 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Applications. Chongqing, China: IEEE, 2022: 1-4.

[78] HAN H, LIU X W, BIAN J Y. The application of artificial intelligence technology in the fault diagnosis of floating wind turbine generator[C]//Proceedings of the 2020 5th International Conference on Electromechanical Control Technology and Transportation. Nanchang, China: IEEE, 2020: 305-307.

[79] FAHIM M, SHARMA V, CAO T V, et al. Machine learning-based digital twin for predictive modeling in wind turbines[J]. IEEE Access, 2022, 10: 14184-14194.

[80] 杜晓东，赵建利，刘科研，等. 基于数字孪生的光伏高比例配电网过载风险预警方法[J]. 电力系统保护与控制，2022，50(9)：136-144.
DU Xiaodong, ZHAO Jianli, LIU Keyan, et al. Digital twin early warning method study for overload risk of distribution network with a high proportion of photovoltaic access[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(9): 136-144.

[81] XU M. Research on 5G UAV smart grid inspection technology based on digital twin[C]//Proceedings of the 2021 IEEE 7th International

Conference on Cloud Computing and Intelligent Systems. Xi'an, China: IEEE, 2021: 367-370.

[82] 张盈新，冯曜明，蓝　逸. 基于数字孪生技术的 10 kV 配网电力设备运行状态监测方法[J]. 科学技术创新，2022(36)：163-166.
ZHANG Yingxin, FENG Yaoming, LAN Yi. Monitoring method for running state of power equipment in 10 kV distribution network based on digital twin technology[J]. Scientific and Technological Innovation, 2022(36): 163-166.

[83] ZHANG C, WANG H Y, WANG Z M, et al. Active detection fault diagnosis and fault location technology for LVDC distribution networks[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2023, 148: 108921.

[84] 韩　笑，郭剑波，蒲天骄，等. 电力人工智能技术理论基础与发展展望(一)：假设分析与应用范式[J]. 中国电机工程学报，2023，43(8)：2877-2890.
HAN Xiao, GUO Jianbo, PU Tianjiao, et al. Theoretical foundation and directions of electric power artificial intelligence(Ⅰ): hypothesis analysis and application paradigm[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(8): 2877-2890.

[85] 蒲天骄，张中浩，谈元鹏，等. 电力人工智能技术理论基础与发展展望(二)：自主学习与应用初探[J]. 中国电机工程学报，2023，43(10)：3705-3717.
PU Tianjiao, ZHANG Zhonghao, TAN Yuanpeng, et al. Theoretical primer and directions of electric power artificial intelligence (II): self-directed learning and preliminary application[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(10): 3705-3717.

[86] 赵振兵，王　睿，赵文清，等. 基于图知识推理的输电线路缺销螺栓识别方法[J]. 智能系统学报，2023，18(2)：372-380.
ZHAO Zhenbing, WANG Rui, ZHAO Wenqing, et al. Pin-missing bolts recognition method for transmission lines based on graph knowledge reasoning[J]. CAAI Transactions on Intelligent Systems, 2023, 18(2): 372-380.

[87] 李　杨，董元龙，林明晖，等. 基于 AI 视觉技术的电力设备检测方法[J]. 微型电脑应用，2023，39(9)：90-93.
LI Yang, DONG Yuanlong, LIN Minghui, et al. Power equipment detection method based on AI vision technology[J]. Microcomputer Applications, 2023, 39(9): 90-93.

[88] 佘　俊，罗　勇，余少锋，等. 基于语义理解和 AI 的电力设备信息检索方法[J]. 电子设计工程，2022，30(22)：89-92，98.
SHE Jun, LUO Yong, YU Shaofeng, et al. Power equipment information retrieval method based on semantic understanding and AI[J]. Electronic Design Engineering, 2022, 30(22): 89-92, 98.

[89] 李　刚，方　鸿，刘云鹏，等. 新型电力系统中的大模型驱动技术：现状、机遇与挑战[J]. 高电压技术，2024，50(7)：2864-2878.
LI Gang, FANG Hong, LIU Yunpeng, et al. Large-model drive technology in new power system: status, challenges and prospects[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(7): 2864-2878.

[90] 江秀臣，臧奕茗，刘亚东，等. 电力设备 ChatGPT 类模式与关键技术[J]. 高电压技术，2023，49(10)：4033-4045.
JIANG Xiuchen, ZANG Yiming, LIU Yadong, et al. Power equipment ChatGPT-type model and key technologies[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(10): 4033-4045.

[91] WU C F, YIN S M, QI W Z, et al. Visual ChatGPT: talking, drawing and editing with visual foundation models[J]. arXiv: 2303.04671, 2023.

[92] SHEN Y Q, HEACOCK L, ELIAS J, et al. ChatGPT and other large language models are double-edged swords[J]. Radiology, 2023, 307: e230163.

[93] BISWAS S S. Potential use of chat GPT in global warming[J]. Annals of Biomedical Engineering, 2023, 51(6): 1126-1127.

[94] 贺　兴，陈旻昱，唐跃中，等. 基于数字孪生与元宇宙技术的能源互联网态势感知系统论方法研究(一)：概念、挑战与研究框架[J]. 中国电机工程学报，2024，44(2)：547-560.
HE Xin, CHEN Minyu, TANG Yuezhong, et al. System theory study on situation awareness of energy internet of things based on digital twins and metaverse (I): concept, challenge, and framework[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(2): 547-560.

[95] 张辰源，陶　飞. 数字孪生模型评价指标体系[J]. 计算机集成制造系统，2021，27(8)：2171-2186.
ZHANG Chenyuan, TAO Fei. Evaluation index system for digital twin model[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2021, 27(8): 2171-2186.

[96] 陶　飞，张辰源，戚庆林，等. 数字孪生成熟度模型[J]. 计算机集成制造系统，2022，28(5)：1267-1281.
TAO Fei, ZHANG Chenyuan, QI Qinglin, et al. Digital twin maturity model[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2022, 28(5): 1267-1281.

[97] OTAY İ，ÇEVIK ONAR S, ÖZTAYŞI B, et al. A novel interval valued circular intuitionistic fuzzy AHP methodology: application in digital transformation project selection[J]. Information Sciences, 2023, 647: 119407.

[98] ZECHIEL F, BLAUROCK M, WEBER E, et al. How tech companies advance sustainability through artificial intelligence: developing and evaluating an AI x sustainability strategy framework[J]. Industrial Marketing Management, 2024, 119: 75-89.

[99] 曲向华，史雪梅. 基于层次分析法的网络安全态势评估技术研究[J]. 自动化技术与应用，2018，37(11)：43-45，50.
QU Xianghua, SHI Xuemei. Research of network security situation assessment based on AHP[J]. Techniques of Automation and Applications, 2018, 37(11): 43-45, 50.

[100] VAIDYA O S, KUMAR S. Analytic hierarchy process: an overview of applications[J]. European Journal of Operational Research, 2006, 169(1): 1-29.

[101] 刘伟涛，顾　鸿，李春洪. 基于德尔菲法的专家评估方法[J]. 计算机工程，2011，37(增刊 1)：189-191，204.
LIU Weitao, GU Hong, LI Chunhong. Expert evaluation method based on Delphi method[J]. Computer Engineering, 2011, 37(Supplement1): 189-191, 204.

[102] BIRKO S, DOVE E S, ÖZDEMIR V. Evaluation of nine consensus indices in Delphi foresight research and their dependency on Delphi survey characteristics: a simulation study and debate on Delphi design and interpretation[J]. PLoS One, 2015, 10(8): e0135162.

[103] 新华社. 中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和 2035 年远景目标纲要[EB/OL]. 北京：中华人民共和国国家发展和改革委员会 [2024-05-11]. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/ghwb/202103/t20210323_1270124. html.
Xinhua News Agency. The 14th Five-Year Plan for National Economic and Social Development of the People's Republic of Chin-a and the Outline of the Vision Goals for 2035[EB/OL]. Beijing, China: National Development and Reform Commission,[2024-05-11]. https://www.ndrc.gov. cn/xxgk/zcfb/ghwb/202103/t20210323_1270124. html.

[104] 国务院. 国务院关于加强数字政府建设的指导意见[J]. 中华人民共和国国务院公报，2022(19)：12-20.
State Council of the People's Republic of China. Guiding opinions of the State Council on strengthening the construction of digital government[J]. Gazette of the State Council of the People's Republic of China, 2022(19): 12-20.

[105] 工业和信息化部. "十四五"工业绿色发展规划[EB/OL]. 北京：工业和信息化部 [2024-05-11]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2021-12/03/content_5655701. htm.
Ministry of Industry and Information Technology of the People's Republic of China. The 14th five-year plan for industrial green

development[EB/OL]. Beijing, China: Ministry of Industry and Information Technology of the People's Republic of China[2024-05-11]. https://www.gov. cn/zhengce/zhengceku/2021-12/03/content_5655701. htm.

[106] 中华人民共和国工业和信息化部，国家发展和改革委员会，教育部. “十四五”智能制造发展规划[EB/OL]. 北京：工业和信息化部 [2024-05-11]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2021-12/28/content_5664996. htm.
Ministry of Industry and Information Technology of the People's Republic of China, National Development and Reform Commission, Ministry of Education of the People's Republic of China. The 14th five-year plan for intelligent manufacturing development[EB/OL]. Beijing, China: Ministry of Industry and Information Technology of the People's Republic of China[2024-05-11]. https://www.gov. cn/zhengce/zhengceku/2021-12/28/content_5664996. htm.

[107] 工业互联网专项工作组. 工业互联网创新发展行动计划(2021-2023年)[EB/OL]. 北京：工业互联网专项工作组[2024-05-11]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2021-01/13/content_5579519. htm.
Industrial Internet Special Working Group. Industrial internet innovation and development action plan(2021-2023)[EB/OL]. Beijing, China: Industrial Internet Special Working Group[2024-05-11]. https://www. gov.cn/zhengce/zhengceku/2021-01/13/content_5579519. htm.

[108] 国家能源局，科学技术部. “十四五”能源领域科技创新规划[EB/OL]. 北京：国家能源局，科学技术部[2024-05-11]. http://zfxxgk. nea. gov. cn/2021-11/29/c_1310540453. htm.
National Energy Administration, Ministry of Science and Technology of the People's Republic of China. The 14th Five-Year Plan for scientific and technological Innovation in the field of energy[EB/OL]. Beijing, China: National Energy Administration, Ministry of Science and Technology of the People's Republic of China[2024-05-11]. http: //zfxxgk. nea. gov. cn/2021-11/29/c_1310540453. htm.

[109] 国家能源局. 关于加快推进能源数字化智能化发展的若干意见[EB/OL]. 北京：国家能源局[2024-05-11]. https://www. nea. gov. cn/2023-04/07/c_1310709025. htm.
National Energy Administration. Several opinions on accelerating the development of digital and intelligent energy[EB/OL]. Beijing, China: National Energy Administration,[2024-05-11]. https: //www. nea. gov. cn/2023-04/07/c_1310709025. htm.

[110] 搜狐网. 18 个能源电力行业“数字孪生”案例[EB/OL]. (2022-10-11)[2024-05-11]. https://www. sohu.com/a/591859077_121003446.
Sohu. com. 18 cases of “digital twin” in energy and power industry [EB/OL]. (2022-10-11)[2024-05-11]. https://www.sohu.com/a/59185-9077_121003446.

[111] 戴永东，姚建光，李 勇，等. 输电线路无人机巡检自主导航算法研究[J]. 重庆理工大学学报(自然科学)，2023，37(21)：221-228.
DAI Yongdong, YAO Jianguang, LI Yong, et al. Research on autonomous navigation algorithm for transmission line UAV inspection[J]. Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science), 2023, 37(21): 221-228.

[112] 万 励，尹牵懿，汤俊卿，等. 数字孪生在城市规划实践应用中的批判性思考[J]. 上海城市规划，2023(5)：18-23.
WAN Li, YIN Luoyi, TANG Junqing, et al. Digital twins for urban planning: lessons from the past and prospects[J]. Shanghai Urban Planning Review, 2023(5): 18-23.

[113] CRISTINA A, LOPEZ J. Digital twin: a comprehensive survey of security threats[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2022, 24(3): 1475-1503.

[114] OGONJI M M, OKEYO G, WAFULA J M. A survey on privacy and security of internet of things[J]. Computer Science Review, 2020, 38: 100312.

[115] TATEMATSU A, TERAKUCHI S, YANAGI T, et al. Lightning current simulation of 66-kV substation with power cables using the three-dimensional FDTD method[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2021, 63(3): 819-829.

[116] AKIYOSHI T, SHINOBU T, TAKUYA Y, ET AL. Lightning current simulation of 66 kV substation with power cables using the three-dimensional FDTD method[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2021, 63: 819-829.

[117] ZHANG P F, LI T R, WANG G Q, et al. Multi-source information fusion based on rough set theory: a review[J]. Information Fusion, 2021, 68: 85-117.

[118] LI J, CHEN L, CHEN J J. Enabling technologies for low-latency service migration in 5G transport networks[Invited][J]. Journal of Optical Communications and Networking, 2021, 13(2): A200-A210.

[119] 周伟昌，陈 雨，刘军福，等. 电力调度自动化系统中人工智能的应用探析[J]. 电工材料，2023(6)：77-79.
ZHOU Weichang, CHEN Yu, LIU Junfu, et al. Analysis on the application of artificial intelligence in power grid control automation system[J]. Electrical Engineering Materials, 2023(6): 77-79.

[120] MÖLLER D P F, VAKILZADIAN H, HOU W Y. Intelligent manufacturing with digital twin[C]//Proceedings of 2021 IEEE International Conference on Electro Information Technology. Mt. Pleasant, USA: IEEE, 2021: 413-418.

[121] KHARLAMOVA N, TRÆHOLT C, HASHEMI S. A digital twin of battery energy storage systems providing frequency regulation[C]// Proceedings of 2022 IEEE International Systems Conference. Montreal, Canada: IEEE, 2022: 1-7.

[122] 陶 飞，刘蔚然，张 萌，等. 数字孪生五维模型及十大领域应用[J]. 计算机集成制造系统，2019，25(1)：1-18.
TAO Fei, LIU Weiran, ZHANG Meng, et al. Five-dimension digital twin model and its ten applications[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2019, 25(1): 1-18.

[123] LU Q, JIANG H G, CHEN S S, et al. Applications of digital twin system in a smart city system with multi-energy[C]//Proceedings of the 2021 IEEE 1st International Conference on Digital Twins and Parallel Intelligence. Beijing, China: IEEE, 2021: 58-61.

[124] ALJUMAH A, AHANGER T A. Cyber security threats, challenges and defence mechanisms in cloud computing[J]. IET Communications, 2020, 14(7): 1185-1191.



崔兆仑
1993—，男，博士，副教授
主要从事六氟化硫气体环保处理、放电等离子体及其能源环境应用、气体绝缘设备在线监测相关研究
E-mail: zhaoluncui@163.com

CUI Zhaolun
Ph.D.
Associate professor



郝艳捧(通信作者)
1974—，女，博士，教授，博导
主要从事输电设备状态感知技术，污秽、覆冰、雷电下输变电设备外绝缘安全，介质阻挡放电、沿面放电、空气间隙放电、局部放电等气体放电理论的研究工作
E-mail: yphao@scut.edu.cn

HAO Yanpeng
Ph.D., Professor
Corresponding author

收稿日期 2024-05-21 修回日期 2024-10-13 编辑 卫李静