第 49 卷 第 5 期：1765-1778 高电压技术 Vol.49, No.5: 1765-1778
2023 年 5 月 31 日 High Voltage Engineering May 31, 2023
**DOI**: 10.13336/j.1003-6520.hve.20230623

# 面向新型电力系统的数字化电力设备关键技术及其发展趋势

盛戈皞，钱　勇，罗林根，宋　辉，刘亚东，江秀臣
（上海交通大学电子信息与电气工程学院，上海 200240）

**摘　要**：新型电力系统对设备状态以及运行环境等信息感知的深度和广度有更高的要求，亟需利用先进的数字化和信息化技术对传统电力设备进行升级，构建新一代的数字化电力设备。因此提出了数字化电力设备的定义、内涵特征和基本架构，详细阐述了电力设备状态智能感知、电力设备物联网平台、数字孪生建模仿真和状态精准评估诊断、复杂多维信息合成与可视化等电力设备数字化关键技术的研究现状和存在的问题，并展望了未来的重点研究方向及技术发展趋势，包括电力设备全景状态感知、多场景数字孪生仿真、数字化测试和试验、智能感知芯片等。

**关键词**：新型电力系统；电力设备；智能运维；数字化技术；数字孪生；数字化电力设备

## Key Technologies and Development Trends of Digital Power Equipment for New Type Power System

SHENG Gehao, QIAN Yong, LUO Lingen, SONG Hui, LIU Yadong, JIANG Xiuchen
(School of Electronic Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

**Abstract**: The new type power system has higher requirements for the depth and breadth of information perception, such as equipment state and operating environment. It is urgent to use advanced digitization and information technology to upgrade traditional power equipment, and to build a new generation of digital power equipment. Firstly, we propose the definition, connotation characteristics and basic architecture of digital power equipment. Then, we elaborate the research status and existing problems of key technologies for power equipment digitization, such as intelligent perception of power equipment, IoT platform of power equipment, digital twin modeling and simulation, accurate state evaluation and diagnosis, and synthesis and visualization of complex multidimensional information. Finally, we put forward the future key research directions and development trends of technologies including panoramic state perception of power equipment, multi-scene digital twin simulation, digital testing and experimentation, intelligent perception chips.

**Key words**: new type power system; power equipment; intelligent operation and maintenance; digital technology; digital twin; digital power equipment

## 0　引言

提高电力设备运行维护水平、保障电力设备安全稳定运行是电网可靠供电的基础。现有电力设备运行维护的主要技术手段包括预防性试验、人工巡检、带电检测、在线监测及机器人/无人机巡检[1-2]。从应用效果来看，这些手段有效地提高了电力设备状态检修水平，但还存在检测效率低、实时性差、设备状态精准评估困难、漏报和误报较多等问题，难以全面、及时、准确地发现设备缺陷和掌握设备状态。

随着新型电力系统的建设和发展，电网将逐步成为结构复杂、设备繁多、技术庞杂的高维信息物理系统，对电力设备的运行维护提出更高的要求[2]，主要体现在：1）传统的电力设备不断增长的同时，海量的新能源、电力电子装置和储能设备接入电网，保证设备安全运行的压力越来越大，实现设备预测性维护、提高运维效率成为必然趋势。2）新型电力系统的强不确定性、波动性会导致电力设备承受更加极端、变化剧烈的运行工况，大量电力电子装置引入的高谐波也会给设备带来附加热效应与绝缘失

**基金资助项目**：国家重点研发计划 (2020YFB1709701)。
Project supported by National Key R&D Program of China (2020YFB1709701).

效等问题，对电力设备可靠性和故障预警的要求越来越高。3）“双碳”目标要求提高能源和设备利用效率、延长设备使用寿命，实现电力设备绿色高效运行，需要更为精准地动态掌握设备过负荷能力和运行寿命等信息。4）柔性直流输电装备、绿色环保设备等各类新型电力设备将获得大量的应用，这些新型电力设备应用时间短，状态感知和运行维护技术亟待提升。总的看来，新型电力系统对设备状态、系统状态以及运行环境等信息感知的深度和广度有更高的要求。利用先进的数字化和信息化技术对传统电力设备进行升级和改造，构建新一代的数字化电力设备，全面、实时、精准感知设备运行状态，是实现电力设备智能化、提高智能运维水平的前提条件，也是新型电力系统背景下电力设备安全、稳定、高效运行的重要保障。

近年来，5G、物联网、大数据、人工智能、数字孪生等数字化技术飞速发展，以网络化、信息化与智能化深度融合为核心的“第四次工业革命”推动全球加速进入数字化时代。我国政府相继发布《中国制造 2025 规划》、《大数据产业发展规划》、《新一代人工智能发展规划》、《关于加快推进国有企业数字化转型工作的通知》等加快数字经济发展的重要战略规划，大力推进先进数字化技术的研究和应用[3]。2021 年 4 月，南方电网公司发布了《数字电网推动构建以新能源为主体的新型电力系统白皮书》，提出“数字电网将成为承载新型电力系统的最佳形态，要加快数字电网建设，提升数字电网运营能力，支撑以海量新能源为主体的新型电力系统运行管理及控制”[4]。2022 年 7 月，国家电网公司发布了《新型电力系统数字化支撑技术体系白皮书》，提出“打造精准反映、状态及时、全域计算、协同联动的新型电力系统数字技术支撑体系，提升电网可观、可测、可调、可控能力，构建形成数字智能电网”[5]。

为解决未来新型电力系统条件下电力设备安全可靠运行的难题，国家能源局在 2023 年 3 月发布《关于加快推进能源数字化智能化发展的若干意见》，提出要以数字化智能化电网支撑新型电力系统建设，推动变电站和换流站智能运检、输电线路线智能巡检、配网智能运维体系建设，加快能源装备智能传感技术的研发以及基于人工智能的能源装备状态识别、可靠性评估及故障诊断技术的发展，提升现场感知、计算和数据传输交互能力[6]。

随着智能电网的建设和发展，在国家科技部和电网企业的支持下，我国在电力设备状态监测、智能巡检、电力物联网和智慧变电站建设等方面已经取得了一些国际领先的进展和成果，电力设备状态大数据分析、人工智能识别诊断以及数字孪生等技术也得到初步的应用[7-10]。电网企业的生产管理系统、设备状态监测系统、智能巡视系统等各类信息系统不断完善，电网云平台、物联管理平台、数据中台、业务中台、人工智能技术中台等新型数字化基础平台逐步建设，为电力设备数字化技术的发展和应用奠定了良好的基础[11]。但是，从现有的应用情况来看，电力设备数字化转型还主要停留在三维建模、状态监测结果可视化展示的初级阶段，仍然存在传感器长期运行可靠性低、状态感知参量不够全面、智能分析水平不高、设备状态精准评估和预测困难等问题，严重制约着设备数字化和智能化技术发展，难以满足新型电力系统下设备状态全面、精准感知及高可靠、高灵活性运行的需求，智能感知、数字孪生等电力设备数字化基础理论和关键技术的研究还亟待深入。

考虑到发展数字化电力设备的迫切性，本文结合新型电力系统的特征、数字化技术的应用现状和电力设备智能运维的需求，系统地阐述数字化电力设备的定义、内涵特征和基本架构，总结和探讨新型电力系统背景下数字化电力设备关键技术的研究现状和存在的问题，并对未来数字化电力设备的发展趋势进行展望。

## 1 数字化电力设备的内涵特征和基本架构

传统的电力设备主要具备电能传输、变换、开断等实现电能分配的基本功能。数字化电力设备是在传统电力设备基础上，利用先进的数字化技术全面、及时、准确地获取电力设备在网运行、服役环境、健康状态等关键信息，以数据为核心将电力设备设计制造、运行维护、退役回收等全生命周期管理各环节深度融合，实现设备的物理实体和数字化虚拟孪生体深度交互的新一代电力设备。数字化电力设备的主要内涵特征包括：

1）利用智能传感、物联网、云计算、大数据、人工智能、数字孪生等先进的数字化和智能化技术实现电力设备在网运行、服役环境和健康状态数据的采集、传输、处理、分析及应用，为设备研发设计和智能运维提供全面支撑。

2）将设计制造、测试试验、状态监测、运行

维护等电力设备全生命周期管理各环节数据深度融合，通过云平台、区块链等技术实现全生命周期数据的安全共享和互通。

3）通过数字化建模、多物理场仿真等手段构建高度保真的电力设备数字孪生体，在设备数字孪生体上全面、动态反映物理设备状态变化，实现设备状态精准感知、推演预测和模拟操作，并可作用于物理实体进行信息交互和优化控制。

数字化电力设备的实现包含设备本身的数字化转型升级和衍生出数字孪生体两个层级。设备数字化转型升级主要是将传统模式下电力设备固有特性和运行状态相关的数据、文件、影像、信息等元素转换成数字化的形式，利用先进的数字化技术进行传输、存储、管理、分析和应用，提高电力设备设计制造、试验测试和运行维护的智能化水平和设备的可靠性。而电力设备数字孪生是数字化电力设备的重要技术手段和高级实现形式，主要以智能传感、物联网、计算仿真等数字化技术为基础，通过在数字空间构建物理设备的全息虚拟孪生模型和实时仿真分析，更为精准地掌控和预测设备状态。

数字化电力设备实现的基本架构和关键技术体系如图 1 所示，主要围绕设备数据的采集、处理、分析和应用分为 4 个层次：(1)数据采集层实现电力设备物理实体三维数字化建模数据以及在网运行、环境、状态数据的采集、汇聚和边缘计算，涉及的关键技术问题是电力设备状态智能感知；(2)数据处理层提供数据通信、管理和支撑服务，主要利用电力设备物联网平台实现数据的传输、清洗、存储、共享以及不同来源数据的集成和融合，涉及的关键技术问题是设备状态数据的安全可靠传输和高效处理；(3)数据分析层通过构建物理机理模型和数据驱动模型支撑电力设备物理实体和数字孪生体的相互映射以及设备状态评估诊断，涉及的关键技术包括数字孪生建模仿真、大数据分析和人工智能机器学习等；(4)数据应用层主要为电力设备智能运维和研发设计提供支撑，可实现的核心功能包括可视化展示、状态评估与故障预测、运行风险和寿命评估、安装维护和操作的虚拟仿真、设备优化设计等，涉及的关键技术问题包括设备状态精准评估与智能诊断、复杂多维信息的合成与可视化等。

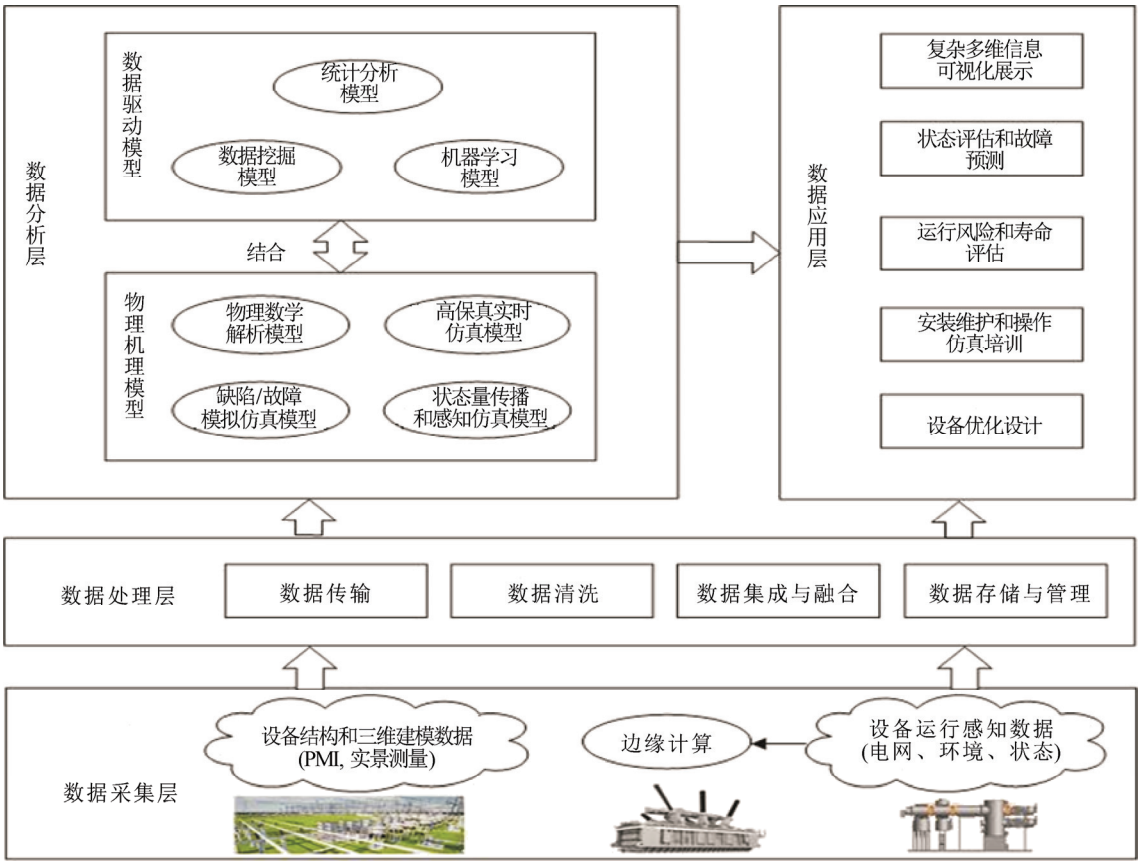



图 1　数字化电力设备的基本架构

Fig.1　Basic architecture of digital power equipment

数字化电力设备的主要目标是利用数字化技术手段实现全生命周期数据的共享利用、设备内部状态的直接感知、智能诊断或数字孪生模型的仿真推演，精准掌握设备内部健康状态，准确预测设备缺陷演变发展趋势，从而提升设备的智能化水平，降低设备的运行风险，延长设备的使用寿命，提高设备的利用效率，推动设备设计制造和运行维护技术的发展，支撑新型电力系统安全可靠和高效稳定运行。与传统电力设备相比，数字化电力设备的主要优势体现在以下几个方面：

1）更精准地感知设备内部缺陷的类型、位置和严重程度，推演预测设备状态的变化趋势，从而优化状态检修策略，实现设备预测性维护与精益化管理，提高智能运维的效率。

2）更及时地完成设备健康状态的实时分析和故障特征的可靠感知，为设备故障预警甚至主动保护提供有力支撑。

3）更准确地评估设备剩余使用寿命和设备的过负荷能力，为设备高效节能运行、动态增容与优化调度提供可靠依据。

4）更全面地掌握设备全生命周期不同工况下电、热、机等不同状态的演变规律，为电力设备高可靠优化设计提供可信参考。

## 2 数字化电力设备的关键技术

数字化电力设备的实现包含数据的采集、处理、分析和应用等环节，涉及多类数字化技术的集成和综合应用，其基础是先进可靠的电力设备状态智能感知，载体是安全高效的电力设备物联网，核心是电力设备数字孪生和精准评估诊断，最终通过多维信息合成和可视化技术进行展示。

### 2.1 数字化电力设备的基础：先进可靠的电力设备状态智能感知

电力设备数字化必然需要大量的传感器和智能感知终端提供全面、精准的设备运行数据和状态信息。先进可靠的电力设备状态智能感知技术是实现电力设备数字化和智能化的基础，需要深入研究的关键技术主要包括电力设备专用传感技术、传感器可靠性保障技术和智能终端边缘计算技术等。

#### 2.1.1 电力设备专用传感技术

近年来，随着智能电网、电力物联网的建设和发展，图像视频、局部放电、温度、振动、声音、气体组分等电力设备状态量传感器获得广泛应用，并取得了较好的应用经验[11-13]。与通用传感器相比，电力设备专用传感器需要适用于电力设备特殊的运行环境和特殊结构，耐受各类暂态强电磁场干扰、高温高湿等恶劣气象条件，安装在设备内部的传感器还需要承受强电磁场、热场和机械应力，对传感系统的绝缘强度也有极高的要求。目前常用的状态监测传感器通常缺乏针对电力设备应用场景的优化设计，尤其是在电网复杂工况下长期运行的可靠性问题突出，传感器寿命和一次设备寿命不匹配，难以满足数字化电力设备的要求。数字化电力设备大规模应用的突破点是从材料、器件、工艺等方面进行技术攻关，研制满足电力设备可靠性、有效性和经济性要求的专用传感器，解决目前绝大部分电力设备传感器可靠性不高、一致性较差、使用寿命较短、运维工作量大、性价比低、在一次设备内部安装困难等问题。

新型电力专用传感器的研究近些年发展较快，应用前景较好的技术包括 MEMS/芯片化传感器、低功耗无源无线传感器及传感网络、光学/光纤集成传感器和基于相关新材料的先进传感技术等[14-19]，这些传感技术的适用场景及主要优势总结如表 1 所示。表 1 中多数技术都适用于研制设备内置传感器，可直接感知设备内部运行状态，是数字化电力设备状态感知重要的研究方向，但需要解决内置传感器取能、信号传输、绝缘以及使用寿命等难题。

#### 2.1.2 传感器可靠性保障技术

从目前电力设备状态传感器的应用情况来看，现有的传感器还存在技术不成熟或其他设计、制造、调试等技术工程方面的问题，导致在实际应用中容

表 1 电力专用传感技术的适用场景和优势

Table 1 Application scenarios and advantages of power specific sensing technology

| 传感技术 | 适用场景 | 主要优势 |
|---|---|---|
| MEMS/芯片化传感器 | 温度、振动、声音、气体组分等相对成熟的状态参量 | 微型化、可内置；一致性和可靠性高；成本低 |
| 低功耗无源无线传感器及传感网络 | 设备高压侧状态参量；其他有源有线部署困难的场景 | 环境自取能、可内置；安装维护成本低、灵活方便 |
| 光学/光纤集成传感器 | 振动、局放、温度、压力、应变等多参量单独或集成监测 | 绝缘强度高、可内置；直接感知设备内部多个状态参量 |
| 新材料先进传感技术 | 巨磁阻宽频电流传感器、柔性材料振动传感器、… | 提升测量性能；减小传感器体积；延长传感器寿命 |

易出现物理量测量不准确、信息量上传不通畅、防护能力不足、稳定性较差等问题，传感器全生命周期运行的有效性和可靠性尚不能完全满足电力设备数字化智能感知的实际需求。亟需开展电力专用传感器高效测试、现场校验和综合性能评估技术的研究，一方面在传感器投入运行前模拟传感器的运行环境对传感器的性能指标、有效性、运行可靠性等进行多维度、全方位综合评估和测试，另一方面在现场应用阶段对传感器进行在线校验，以满足日益增加的传感器现场检测的需求，保障传感器在长期运行和退役全生命周期过程中的有效性。

1）海量传感器的高效测试与检验技术

长期以来，对于电力设备状态传感器的校验主要基于实验室的标准源对测试的准确性和重复性进行检验和测试，在实验室进行离线校验[20]。例如：油中气体组分的校验主要通过配制一定浓度的工作标准油样，由实验室气相色谱仪进行标定；温度测量数据的准确性主要利用调节标准温差黑体进行比对检验；常用的局部放电特高频传感器主要采用GTEM小室配合标准脉冲源和标准天线进行传感器关键性能的校验[20]。

近年来，我国逐步建立了电力设备状态监测传感器性能评估平台，具备对状态监测传感器的校验测试能力，一定程度上保证了传感器入网的质量。但是，现有的传感器检验平台主要对测量准确性和重复性、环境适应性、电磁兼容特性、通信协议等进行检验，缺乏传感器取能能力、运行功耗、干扰和缺陷辨识能力等相关性能的检测手段，难以满足电力设备数字化对传感器测试的要求。此外，目前检测过程需要较多的人工参与，检测效率低，缺乏统一管理和性能评估分析，不利于海量传感器的优化管控。需要研究传感器供能能力、运行功耗、传感性能的综合测试技术以及测试数据智能比对和评估分析的自动化测试方法。针对部分需要高压试验的测试环节，考虑到高压试验周期长、成本高、缺陷设计制作和物理模拟困难，还需进一步研究数字化虚拟测试技术，利用数字技术模拟生成的典型缺陷特征信号检验传感器的有效性，提高传感器感知性能检测和评估效率。

2）传感器现场测试和智能校正技术

现场长期运行过程中传感器受诸多因素影响，如电磁场、振动、温度、湿度、设备内外部冲击信号等，这些因素都可能使传感器性能下降甚至失效，而传统实验室离线校验方法不适用于现场在线校验。针对现场已投运的传感器后续如何开展临时和定期的在线校验和劣化状态评估，是需要着重考虑的问题。

目前围绕传感器的现场测试和在线校验技术已有一些初步的研究，但现有的现场检测装置功能简单、难以实现远程检验比对，无法满足传感器功能和性能测试要求，测试能力和测试效率亟待提高。以局部放电传感器为例，CIGRE TF15工作组提出了现场GIS设备特高频传感器灵敏度检验方法，通过实验室测试确定发射信号的脉冲参数，并在现场GIS设备相邻的传感器之间进行信号的注入和比对检测，实现灵敏度指标的现场检测[21]，但相关方法需人工参与，工作量大、测试效率低，且无法模拟实际的设备缺陷，难以实现对传感器性能的全面测试和远程校验。

考虑到部分测试项目现场实施困难，有研究利用传感器数据进行横向和纵向分析评估监测传感器的性能，如华北电力大学等单位提出了基于数据驱动和多判据融合的油色谱监测传感器有效性评估方法，通过分析特征数据集的分布检测出油色谱监测传感器是否存在异常[22-23]，但相关方法还无法实现劣化传感数据的自动校正。

为了保障传感器长期运行的有效性，需要进一步研究传感器关键性能指标的现场测试和远程校验方法、典型缺陷特征信号的生成及智能校验技术等。同时，还需要深入研究数据驱动的传感器性能评估和自校正方法，通过分析传感器全生命周期历史数据和不同传感器数据变化的规律，建立传感器异常诊断、性能衰退和可靠性评估模型，实现失效传感器的预警和劣化传感器的智能校正。

3）复杂运行环境下传感器可靠性测试技术

开展电磁兼容、环境耐受等传感器运行的可靠性测试是传感器可靠性设计的依据，也是保障传感器可靠运行的重要手段。振动、高低温、电磁干扰等环境下的可靠性试验技术已经广泛开展，具备了较为成熟的测试平台和测试标准[13]。但是现有可靠性测试手段尚不能满足新型电力系统环境以及数字化电力设备的要求。

一方面，新型电力系统环境下部分电力设备投切频繁，大量的电力电子变换装置过电压和高频电磁干扰的产生与传统电力设备有较大的差异，需要分析新型电力系统电磁环境对传感器性能的影响，

研究暂态电磁场环境下传感器可靠性测试技术，提升传感器抗复杂电磁干扰能力和自校正能力。

另一方面，电力设备现场运行环境恶劣，传感器往往同时受到强电磁场、设备振动、极高低温、高湿度、高海拔等复杂环境因素的综合影响，需要研究多因素耦合对传感器运行性能影响的机理和传感器主要部件的劣化规律，研制施加多因素综合影响的可靠性测试试验装置，为传感器高可靠优化设计和全面测试提供依据。

2.1.3 智能终端的边缘计算技术

电力设备智能终端用于接入不同传感器的设备运行数据、环境气象数据和状态监测数据，在数据汇聚、传输的基础上，还可以通过边缘计算来实现数据的实时分析、故障预警、智能控制甚至设备的主动保护。对电力设备智能终端来说，其边缘计算的主要目标包括：

1）快速对设备状态感知数据进行分析诊断，减少数据往返云端等待时间，为设备状态实时分析、故障预警甚至主动保护提供支撑。

2）对海量数据进行筛选，防止无筛选数据上传至云端增加网络带宽成本及大量的云存储造成高昂的成本，有效降低电力设备数字化的系统资源需求。

3）提高终端智能水平，使终端具备自我学习能力，以应对快速变化的运行条件与新问题。

数字化电力设备智能终端的边缘计算主要涉及局部放电、视频、图像、红外热像、声音等设备状态量的实时分析、异常状态的初步辨识和现场干扰的剔除[24-26]。轻量级、低复杂度的人工智能算法是边缘计算的核心关键。目前，基于深度学习模型的电力设备视频图像、红外热像异常检测的边缘计算技术有较多的研究，已经在无人机输电线路巡检以及变电站巡检机器人中得到初步的应用。常用的深度学习目标检测算法主要分为两阶段检测算法和单阶段检测算法。两阶段算法包括 Faster RCNN、Cascade RCNN 等[27]，算法精度较高，但模型复杂度高，推理时间较长。考虑到边缘设备内存小、算力低，难以满足大模型所需要的运行空间，一般采用 YOLO，SSD 等单阶段目标检测算法[28]，具备良好的速度–精度平衡优势，更适用于边缘计算场景下电力设备图像视频的目标检测和缺陷识别。为了减少模型空间占用和识别精度损失，提高模型推理计算的速度，需要研究深度神经网络模型压缩和剪枝等模型轻量化技术以及高性能的神经网络硬件加速技术。另外，综合考虑电力设备智能终端边缘计算的要求，研制和应用低成本、高可靠性、低功耗的电力设备边缘计算专用芯片也是智能终端发展的重要方向之一。

### 2.2 数字化电力设备的载体：安全高效的电力设备物联网平台

数字化电力设备需要通过安全高效的电力物联网平台实现大量传感器和智能感知终端采集数据安全可靠接入和全寿命周期数据有效管理[29-31]。目前，电力系统的核心主干网络早已实现光纤的大容量高速通信，加上 5G、NB-IoT 等先进无线数据传输技术[32]以及云平台、云计算和大数据处理技术[7]近年来高速发展，基本满足数字化电力设备对数据传输和处理的需求，还需要完善的关键技术主要包括适用于电力设备物联网的无线传感网络及其安全防护技术、物联网平台数据高效处理和共享技术等。

2.2.1 适用于电力设备物联网的无线传感网络及其安全防护技术

无线传感网络是实现电力设备传感器数据接入、状态全面感知的重要手段和关键难点。目前，100 m 以内的电力设备物联网近场短距离无线通信主要采用 WiFi、ZigBee、低功耗蓝牙(BLE)等技术：WiFi 的速度快，但功耗相对较大；ZigBee 和 BLE 通信功耗极低，体积小，便于与传感器集成设计。长距离低功耗无线通信主流技术包括 LoRa、WIoTA、ZETA 等，发射功率一般为几十 mW，覆盖范围几百米到几公里，实现现场传感器汇聚节点与网关长距离汇聚连接。国家电网公司结合电力设备的运行环境和 IEEE802.15.4 等无线通信底层标准，自主开发了 470 MHz(长距离)和 2.4 GHz(短距离)频率相结合的微功率无线通信技术，为电力设备物联网的建设提供了统一标准[33]。

总的来看，低功耗无线传感网具有海量连接、低功耗、小体积、低成本等优势，是电力设备状态数据接入的重要手段，但在实际应用中也存在一些难点。输电线路场景应用的难点主要在于供电困难、覆盖距离不足、运行环境恶劣、可靠性要求高等；变电站场景中应用的难点在于存在强烈电磁干扰、金属架构对无线信号的遮挡以及高压侧供电困难等。除此之外，还存在技术体制多、协议差异大、接口规范不统一、技术性能与设备状态感知适配性弱等共性问题。目前尚无单一技术可以解决输变电、

配用电等不同场景、多业务的接入需求。需要重点研究的技术包括：(1)面向电力设备物联网络节点的设备无线组网方法，包括高抗干扰性无线传输调制方式、海量异构数据接入调度方式以及自适应同步机制；(2)综合考虑计算资源、存储资源、耗电量和传输带宽的高并发、高交互终端接入技术；(3)温度、电流等相对量少的状态数据与局部放电、振动、声音等对带宽要求较高的状态数据融合传输的方法。

电力设备物联网呈现感知设备众多且种类繁杂、网络形态多样分布广、数据多方互联、暴露于外部环境等特点，给网络安全防护工作带来新的挑战。传统数据加密及用户身份认证机制难以满足电力无线传感节点计算/存储资源受限、网络拓扑动态变化下的安全需求。需研究适用于电力低功耗无线传感网络的轻量级安全连接技术和数据安全通信芯片技术，实现轻量级身份认证和加密、仿冒接入和空闲端口启用等恶意行为的在线识别和阻断、传感器的指纹识别、安全嵌入式操作系统应用隔离等传感节点安全接入的功能。

2.2.2　电力设备物联网平台数据高效处理和共享技术

电力设备物联网平台主要完成数字化电力设备数据的接入、集成融合和管理。

针对物联网平台系统数据协议多元化接入难题，可采用基于 CTI 的 VoIP 网关驱动等开放式接入网关技术，实现 MQTT、CoAP、Modbus 等主流物联网协议的无缝接入，支撑各类感知装置、传输节点间的数据集成和融合。考虑到数字化电力设备具备建模仿真、数据挖掘分析、评估诊断、故障预测、可视化展示等多种功能，物联网平台需要解决异构数据高效处理和需求多元化的问题，可采用 Stream 和 MapReduce 等大数据处理技术构建高可用、低延迟、高扩展、高吞吐的流式数据分发引擎，基于功能需求自适应调用实时内存计算、离线计算、映射规约计算、流式计算等相应计算引擎，确保系统快速响应海量数据处理需求。

支撑数字化电力设备的物联网云平台应实现电力设备全生命周期数据的管理和共享，为设计制造、安装调试、运行维护以及故障检修等环节应用提供数据交互接口。针对物联网传输的海量、异构、多源数据，需要研究兼顾容量与吞吐效率的海量物联网数据异构存储技术，为相关应用提供统一标准的数据访问接口，同时建立多元身份认证、多主体间数据可信协作以及全生命周期数据溯源等机制，实现不同环节、不同企业、不同平台间数据的高效交互和安全共享。

### 2.3　数字化电力设备的核心：电力设备数字孪生建模仿真和状态精准评估诊断

数字化电力设备的核心需求是利用设备在网运行、健康状态和环境监测数据，结合新型电力系统复杂运行条件下电力设备故障产生机理、演变规律以及失效机制，将人工智能技术与电力设备数字孪生建模仿真相结合，通过仿真、推演、数据分析等手段，精准描述电力设备的内部运行规律和外部运行特性，实现设备内部健康状态精准分析和故障智能诊断预测，为新型电力系统环境下设备的精益化管理和高效维护提供支撑[34-35]。涉及的关键技术主要包括电力设备数字孪生模型高保真实时仿真技术、设备状态精准评估和智能诊断分析技术以及声学影像数据的人工智能分析技术等。

2.3.1　电力设备数字孪生模型高保真实时仿真技术

电力设备数字孪生模型仿真的主要目标是利用数值仿真等手段得到不同运行状态下设备内部的复杂物理场分布和关键状态量值，其本质是求解由单物理场偏微分方程构成的耦合方程组及耦合关系方程组，其中多物理场之间相互作用的耦合机理及相应数学模型是保证物理过程建模及数值求解精度的关键[36]。

目前，在电力设备设计、制造、运维等领域广泛使用电、磁、热等多种单物理场及通用多物理场仿真来解决优化设计、绝缘配合、试验、运行和故障分析中的单物理场和多物理场松散耦合仿真问题[37-44]，应用的软件主要包括 COMSOL、ANSYS、Infolytica、Altair 和 Abaqus 等。但是，这些通用的商业仿真软件未针对电力装备物理结构复杂、介质类型多样、材料特殊、超多物理量紧密耦合等特点，难以满足电力设备数字孪生仿真的要求。与常规的电力设备多物理场仿真计算相比，电力设备数字孪生模型仿真在内涵需求和支撑技术方面都有较大不同，需要解决的技术问题体现在以下几个方面：

1）电力设备全景状态高保真仿真

常规的电力设备优化设计通常是针对设备或部件的局部区域、单一或少量物理场量、单一时间尺度进行仿真，而电力设备数字孪生关注的是电力设备全生命周期、全面的运行特性。电力设备结构复杂，通常包含气体、固体、液体等不同物质形态，设备运行状况受到电场、磁场、力场、温度场、流

体场、声场、光场等多个物理场的综合作用和耦合影响，不同场量的激发和响应惯性时间常数存在量级差别，需要从微观、介观到部件、设备跨空间尺度分析物理现象，是一个不同空间区域、不同时间尺度和不同物质形态之间相互作用的复杂多物理场多尺度耦合仿真问题。要高保真地模拟电力设备运行状态，需要综合考虑电力设备的三维结构、制造工艺、材料物理特性、运行工况等因素，建立跨时间和空间尺度的多物理量耦合仿真模型，需要解决大场域、多介质、超多物理场量、跨时空尺度的统一建模方法以及面向电力设备的大规模并行有限元计算、材料非线性特性等效模拟以及多空间/时间尺度的多物理场耦合求解算法等关键技术问题。另外，电力设备复杂的内部结构导致等效物性参数难以获取，影响仿真模拟的精确性，如何实现电力装备等效物性参数建模也是需要考虑的难点问题。

2）电力设备状态实时动态仿真

常规的电力设备仿真通常采用相对固定的模型结构和参数，与设备物理实体之间没有直接的相互作用和联系，而数字孪生仿真模型需要实时感知设备物理实体的状态，同步跟踪实体状态和运行环境变化，实时动态演变，推演预测结果。高精度的多物理场耦合仿真时间较长，无法满足实时数字孪生的要求，而且新型电力系统应用的一些新型电力装备结构更紧凑、多场耦合更复杂、运行工况更严酷，需借助模型降阶、机器学习等技术来加快模型求解速度，在保证设定精度的前提下，简化模型，减少计算量。

目前常用的模型降阶方法主要包括简化模型法、投影法、数据拟合方法等[35-36]。国外软件已推出一些产品，如 ANSYS 的 Twin Builder、Altair 的 Altair。基于机器学习提高物理场仿真的实时性也是重要的研究方向，主要方法是将离线仿真产生的大量高维物理场数据用深度学习等人工智能模型进行拟合训练，建立基于数据驱动的电力设备物理场仿真模型，可以实现特定场景下的实时仿真，大幅提高仿真计算的速度[45]。需解决的关键技术问题包括高稳定性的降阶模型构建方法、大型非线性方程组的精确快速求解技术、大空间尺度三维实体模型降维建模技术、适用于人工智能模型训练的超高维度数据处理方法等。

3）设备缺陷和故障全过程仿真

借助数值仿真技术对设备内部的典型绝缘缺陷、热缺陷和机械故障进行虚拟仿真，获得从绝缘缺陷到外部宏观监测量的全过程特性，可以更好地建立外部监测量与内部绝缘缺陷的关联关系，实现对设备内部运行状态的精准感知和故障隐患严重程度的准确评估。

目前，电网的故障仿真技术相对成熟，可以通过 EMTP 等离线仿真软件和 RTDS 等实时数字仿真系统实现电网运行状态的评估分析、电网故障的模拟以及保护控制装置的校核，而国内外还缺乏电力设备缺陷和故障的全过程模拟仿真手段，诊断分析主要依赖测试试验和专家经验，难以满足设备状态精准评估预测和精益化管理的要求。

电力设备缺陷和故障的全过程模拟仿真不仅涉及缺陷本身在多物理场综合作用下的产生机理和演变规律建模，还涉及缺陷激发的状态量在设备中的传播特性及感知装置的耦合特性。需要建立局部放电、发热、机械状态异常等设备典型缺陷微观发展过程数值模拟和仿真计算模型、宏观状态参量产生和传播模型以及传感器的状态耦合感知模型，实现典型设备运行工况下缺陷的全过程模拟、仿真复现和缺陷诊断的虚拟试验。目前流注放电等微观过程的仿真计算模型及声、光、电等状态量在设备内部的传播特性等已有不少研究成果，但宏观物理量与微观缺陷状态之间相互作用机理以及典型运行工况下缺陷发展的全过程模拟仿真还亟待研究。需要突破的难点包括多因素作用下电力设备故障演化规律和发生发展过程的数值模拟方法、融合多时间尺度和不同数值计算方法的设备缺陷宏观状态量产生及传播全过程混合仿真技术、设备状态宏观物理特征变化与微观状态演变的映射关系模型构建等。

2.3.2 设备状态精准评估和故障智能诊断预测技术

现有的设备状态评估和故障诊断主要基于专家经验、阈值判断、专家系统、大数据分析和人工智能诊断模型等方法实现[46-50]。数字化电力设备在现有评估诊断方法的基础上，结合数字孪生建模仿真，可实现更为精准的设备内部状态评估，提高故障智能诊断的水平，主要优势体现在以下几个方面：

1）内部状态反演重构和精准映射

现有设备状态监测技术通常难以直接测量电力设备内部的状态参量，无法全面、精准掌握设备内部状态。基于高保真的电力设备数字孪生仿真模型，可对不同来源的状态数据进行多物理场、多参数反演计算[51-52]，构建电力设备内部状态与其可观

测特征参数之间的映射关系，获得设备内部多物理场的耦合分布情况及关键状态参数的量值，实现设备关键状态的精准分析，为设备的精益化管理和预测性维护提供科学依据。

2）设备状态的推演和预测

利用电力设备数字孪生模型的仿真分析，对设备内部物理空间状态量分布和运行过程进行仿真复现，可以获得不同运行工况、不同环境条件下设备关键状态参数的变化情况，实现设备状态的精准预测，为状态维修策略的优化和基于设备状态的电网优化调度提供支撑。另外，通过设备缺陷和故障的推演仿真，掌握缺陷未来的演变规律，还可以实现设备故障隐患的早期预警。

3）机理模型和机器学习融合驱动的设备缺陷智能诊断

近年来，电力设备状态的大数据挖掘分析和人工智能诊断算法获得较多的研究和应用。但是由于实际的设备故障案例和样本较少，而且设备缺陷的物理试验困难，无法通过试验获取足够的故障样本，很多情况下难以满足大数据分析和智能算法要求。基于数字孪生模型和典型故障机理分析，可以开展不同缺陷/故障的全过程模拟仿真[53]，获得不同类型、不同位置、不同严重程度的缺陷数据样本，构建融合机理模型和机器学习的故障隐患诊断和定位模型，获得多个传感参数与缺陷状态的映射关系，结合物理实体状态进行模型验证和参数修正，实现设备故障隐患精准辨识和定位。

总的来看，结合多源传感器数据的融合分析和设备数字孪生建模仿真，可以有效地提升设备状态可观和可测能力，主要难点是复杂多场耦合条件下的多状态参数逆问题建模和反演求解方法、复杂运行条件下设备关键状态演变的量化推演和寿命预测、设备缺陷严重程度的精准识别和故障预测等。

2.3.3　声学影像数据的人工智能分析技术

近年来，视频/图像、红外热像、紫外图像、声学阵列、X 光等视听和成像技术极大地推动了电力设备运维技术的发展，也为数字化电力设备状态的精准评估和故障诊断提供了声学影像依据。

这些声学影像数据量非常庞大，无法依赖人工筛查判断设备缺陷，飞速发展的人工智能技术为电力设备声学影像数据的自动识别提供了有效的技术手段[54-58]。目前，普遍采用各类深度学习模型实现视频/图像、红外热像等影像数据的智能分析，从研究和应用情况来看，识别效果还有较大的提升空间，主要难点包括：(1)电力设备状态检测影像数据采集质量易受天气、环境、拍摄角度等多因素影响，质量良莠不齐；(2)图像背景复杂，部件种类繁多，缺陷种类多、空间跨度大、样本数量较少且分布不均，导致不同缺陷识别的准确性差异较大，小目标缺陷识别难度较大；(3)电力设备运维场景复杂多变，异常图像数据采集难度大、成本高且具有时效性，难以满足智能识别模型的更新需求。电力设备声音识别的主要难点是背景声音复杂、干扰大、异常样本较少。需深入研究的关键技术问题包括数据质量提升的方法、复杂背景下的缺陷辨识、小目标缺陷准确识别、缺陷的自动标注、缺陷虚拟样本生成以及标准样本库的建立等。另一方面，声学影像数据的智能分析目前大多依赖单模态数据建立深度学习模型，考虑到发热、放电、外观、声音等异常状态之间会有一定关联，融合视觉和听觉等多模态数据的综合智能诊断方法也值得研究。

### 2.4　数字化电力设备的展示：复杂多维信息合成与可视化

数字化电力设备需要直观、流畅的可视化展示效果。基于多源状态数据的实时交互和融合计算，利用三维空间重建、3D 渲染、虚拟现实等可视化技术以及多源影像精确配准、传感数据融合分析等信息合成技术，可以直接还原电力设备运行现场的视觉和听觉感受，在高度逼真的前提下呈现多维状态感知和仿真结果，实现电力设备高保真、可视化、多维度、多层次的状态实时监测和虚拟推演预测，并允许与虚拟电力设备进行交互和控制，为仿真模拟设备操作、维护和检修工作提供支撑。

目前可视化技术相对成熟，有较多的商用三维空间建模软件和可视化平台工具软件可以使用[35]。值得关注的是三维模型轻量化技术，可以通过网格简化、纹理压缩、几何压缩等手段提高三维模型的性能和运行效率，更为流畅地实现虚拟电力设备的漫游、观察、分析和决策等基本功能。多维信息合成的难点是红外、可见光、紫外、声振、激光点云等异构影像数据的立体配准和不同来源传感器数据的融合分析，需要解决同源影像之间视角差异问题以及异源影像分辨力、纹理、噪声等差异问题，研究多模态数据的融合方法，实现电力设备多维信息的空间合成和可视化展示。

## 3 数字化电力设备的发展趋势

数字化电力设备的发展需要立足我国电力设备产业的现状，面向新型电力系统的要求，围绕电网企业数字化转型的基本目标，针对数字化电力装备急需的关键技术开展系统研究。构建数字化电力设备的基础理论方法体系，攻克高性能传感器制备与测试、数据安全接入和全寿命周期数据管理、数字孪生建模仿真、设备状态精准评估和智能诊断分析等一系列核心关键技术，研发支撑数字化电力设备的专用传感器、智能感知终端、测试平台核心工业软件以及数字孪生智能分析系统，推动物理实体和数字孪生模型相结合的新一代数字化电力设备在电网各环节中广泛应用，支撑我国新型电力系统的建设和能源电力数字化转型。同时，还需要建立自主的数字化电力设备设计制造、测试试验和运行维护技术标准体系，引领电力设备的产业升级以及电力设备运行维护模式的变革。

目前，电力设备数字化转型离新型电力系统安全可控、灵活高效、智能友好的要求还有较大的差距。结合电力设备数字化技术的应用现状和新型电力系统的需求，数字化电力设备未来的重点研究方向和主要的发展趋势包括：

1）电力设备全景状态感知不断发展

随着电力专用传感器性能的改善，电力设备全景状态感知水平将不断提升，实现电力设备关键运行状态的可靠感知，为数字化电力设备提供全面、精准的基础数据。一方面，无线传感技术、光学/光电/光纤/光栅传感技术、微型传感器等先进传感技术的发展，安装在设备内部的状态传感器将获得较多应用，通过直接感知设备状态和设备运行时多物理量的变化过程，提高设备状态感知的可靠性和有效性。另一方面，传感器与电力设备一体化集成设计和制造将逐步实现，为一、二次深度融合的设备全景状态感知提供支撑。

在未来应用中，还要考虑根据电力设备的类型、经济价值、重要程度、风险等级及可靠性要求等情况，优化选择关键设备的状态参量，制定经济、合理、有效的传感器和智能终端精准部署方案，满足不同场景下数字化电力设备全景状态感知要求。

2）多场景数字孪生建模仿真不断完善

电力设备数字孪生建模仿真的基础理论和关键技术涉及高电压工程、电磁场理论、材料科学、计算数学、计算机科学等多学科交叉融合，当前的水平离数字化电力设备的最终目标还有较大的差距。我国正在开发和完善自主知识产权的电力设备多物理场仿真软件，计算高压工程学也在不断发展[59]，为电力设备数字孪生建模仿真技术的进步提供了有力支撑，未来相关软件和技术将在电力设备设计、制造及运行维护等多场景复杂工程问题计算中得到越来越广泛的研究和应用。

目前，电力设备数字孪生建模仿真着重于几何、物理、行为模型的建模方法与数值计算技术，考虑到电力设备状态变化和缺陷产生还涉及到材料分解、化学反应等多种微观现象，未来研究将扩展建模仿真的时空尺度和应用场景。在空间维度上，往分子层面进行扩展，探究油、气体、纤维等分子动力学、化学方面的仿真方法，可应用于设备状态精准分析和故障预测；在时间维度扩展上，仿真下限可扩展至微秒级甚至纳秒级，可应用于微观放电过程复现、开关多体动作等场景，上限可扩展至天、周甚至月，可应用于设备的风险评估和寿命预测。

3）高压电力设备的数字化测试试验成为可能

目前，高电压工程学科仍以试验为主，辅以经验公式和半物理模型以解释高电压物理现象，解决工程中优化设计、检验测试、状态评估和缺陷诊断分析的问题。但是，电力设备高压试验通常存在以下困难和难以实施的场景：(1)高压设备测试试验的工作量大、时间周期长、成本高，尤其现场高压测试试验的难度比较大；(2)受实验设备的功能和参数的限制，测试试验中电力设备可能承受的极端工况、不同因素的综合影响施加较为困难；(3)进行缺陷诊断分析时，缺陷或故障的物理模拟和推演预测困难；(4)测试过程中部分测量点处于极端环境中或空间限制，不适合放置传感器或测量仪器，难以获得全面的试验数据。

数字化电力设备通过构建高保真的设备数字孪生仿真模型和设置虚拟传感器，可以针对特定场景开展数字化虚拟测试和试验，模拟不同的运行工况和不同缺陷条件下的设备运行情况，实现设备关键状态的精准评估和缺陷的全面诊断分析，也可以为状态感知装置的数字化校验、电力设备的优化设计和制造提供支撑。以变压器为例，准确计算热点温度是动态评估负载能力和使用寿命的关键，变压器负载导则中经验热模型是热点温度在线监测最常用的计算手段，但是模型中绕组指数、油指数、热

常数取值通常按照推荐值粗略选取，准确性不高。需要开展耗时较长的温升试验并内置光纤传感器测温，才能获得更为精准的模型参数。通过建立数字化变压器高保真热状态仿真模型，开展数字化温升和热动态虚拟试验，获得不同负载条件、不同环境温度下的动态热点温度曲线优化热模型参数，可以大幅提高试验效率，减少试验成本。

4）电力设备状态智能感知芯片大规模应用

设备状态智能感知的芯片化可以提高状态感知系统的一致性和可靠性，大幅减小感知装置的体积，降低电力设备数字化升级和建设投资成本，提升感知装置的智能化水平，是数字化电力设备的发展方向之一[60]。一旦目前各类常规智能传感器的模拟电路、数字电路和边缘计算算法成熟，就可以研制电力专用的设备状态传感、数据采集和分析处理芯片，实现电力设备状态智能感知芯片的规模化应用。

从目前应用规模、应用效果和芯片技术的发展趋势来看，未来可在 3 个层面上大量采用智能感知芯片：(1)在传感器层面，结合电力设备传感器在结构设计、安装位置、安全防护等方面的特殊需求，基于 MEMS 和 SoC 技术开发电力专用的温度、局放、振动、声音、光信号等传感芯片及调理芯片，实现低成本、微型化、高集成度、高可靠性的状态数据采集和预处理；(2)在智能感知终端层面，可开发支撑红外图像、视频图像、局部放电、振动、声音等信息实时分析处理的电力专用深度学习芯片，载入电力设备目标检测和缺陷辨识的智能分析模型，实现基于高效边缘计算的设备状态异常检测和预警；(3)在数据通信层面，可开发专用的电力物联网通信安全加密芯片、电力设备信息模型芯片及专用无线传感网络芯片等，实现安全高效的数据传输。

## 4　结论

1）数字化电力设备主要目标是利用数字化技术手段实现全寿命周期设备状态的精准感知和推演预测，精准掌握设备内部健康状态，准确预测设备缺陷演变发展趋势，从而提升设备的智能化水平、降低设备的运行风险、延长设备的使用寿命、提高设备的利用效率，支撑新型电力系统安全可靠和高效稳定运行。

2）数字化电力设备的基础是设备状态智能感知，载体是安全高效的电力设备物联网，核心是电力设备数字孪生建模仿真和精准评估诊断，涉及的关键技术包括电力专用传感器及其可靠性保障技术、适用于电力物联网的无线传感网络及其安全防护技术、数字孪生模型高保真实时仿真技术、设备状态精准评估和故障智能诊断预测技术、声学影像数据的人工智能分析技术、复杂多维信息合成与可视化等。

3）电力设备数字化转型离新型电力系统安全可控、灵活高效、智能友好的要求还有较大的差距，未来的重点研究方向和主要的发展趋势包括：电力设备全景状态感知不断发展、电力设备数字孪生建模仿真不断完善，高压电力设备的数字化测试和试验成为可能、电力设备状态智能感知芯片将获得大规模应用。

## 参考文献　References


[1] 国家电网公司运维检修部. 电网设备带电检测技术[M]. 北京：中国电力出版社，2014：1-10.
Operation and Maintenance Department of State Grid Corporation of China. Online detection technology of power grid equipment[M]. Beijing, China: China Electric Power Press, 2014: 1-10.

[2] 盛戈皞，钱　勇，罗林根，等. 面向新型电力系统的电力设备运行维护关键技术及其应用展望[J]. 高电压技术，2021，47(9)：3072-3084.
SHENG Gehao, QIAN Yong, LUO Lingen, et al. Key technologies and application prospects for operation and maintenance of power equipment in new type power system[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(9): 3072-3084.

[3] 国务院国有资产监督管理委员会.《关于加快推进国有企业数字化转型工作的通知》[EB/OL]. (2020-9-21). [2023-04-16]. http://www.sasac.gov.cn/n2588020/n2588072/n2591148/n2591150/c15517908/content.html.
State-owned Assets Supervision and Administration Commission of the State Council. Notice on Accelerating the Digital transformation of State owned Enterprises[EB/OL]. (2020-9-21). [2023-04-16]. http://www.sasac.gov.cn/n2588020/n2588072/n2591148/n2591150/c15517908/content.html.

[4] 国家电网有限公司. 新型电力系统数字化支撑技术体系白皮书[R]. 北京：国家电网有限公司，2022.
State Grid Corporation of China. The digital support technology system of new type power systems[R]. Beijing, China: State Grid Corporation of China, 2022.

[5] 中国南方电网. 数字电网推动构建以新能源为主体的新型电力系统白皮书[R]. 广州：中国南方电网有限责任公司，2021.
China Southern Power Grid Company Limited. Digital power grid promotes the construction of a new type power system with new energy as the main body[R]. Guangzhou, China: China Southern Power Grid Company Limited, 2021.

[6] 国家能源局. 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]. [2023-03-28]. http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2023-04/02/content_5749758. htm.
National Energy Administration of China. Several opinions of the national energy administration on accelerating the development of digital

and intelligent energy[EB/OL]. [2023-03-28]. http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2023-04/02/content_5749758. htm.

[7] 廖瑞金，王有元，刘 航，等. 输变电设备状态评估方法的研究现状[J]. 高电压技术，2018，44(11)：3454-3464.
LIAO Ruijin, WANG Youyuan, LIU Hang, et al. Research status of condition assessment method for power equipment[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(11): 3454-3464.

[8] 江秀臣，盛戈皞. 电力设备状态大数据分析的研究和应用[J]. 高电压技术，2018，44(4)：1041-1050.
JIANG Xiuchen, SHENG Gehao. Research and application of big data analysis of power equipment condition[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(4): 1041-1050.

[9] 唐文虎，牛哲文，赵柏宁，等. 数据驱动的人工智能技术在电力设备状态分析中的研究与应用[J]. 高电压技术，2020，46(9)：2985-2999.
TANG Wenhu, NIU Zhewen, ZHAO Boning, et al. Research and application of data-driven artificial intelligence technology for condition analysis of power equipment[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(9): 2985-2999.

[10] 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.

[11] 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 background of new power system[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(1): 1-10.

[12] 沈 鑫，曹 敏，薛 武，等. 基于物联网技术的输变电设备智能在线监测研究及应用[J]. 南方电网技术，2016，10(1)：32-41.
SHEN Xin, CAO Min, XUE Wu, et al. Research and application of intelligent online monitoring of power transmission and transformation equipment based on technology of internet of things[J]. Southern Power System Technology, 2016, 10(1): 32-41.

[13] 李 鹏，毕建刚，于 浩，等. 变电设备智能传感与状态感知技术及应用[J]. 高电压技术，2020，46(9)：3097-3113.
LI Peng, BI Jiangang, YU Hao, et al. Technology and application of intelligent sensing and state sensing for transformation equipment[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(9): 3097-3113.

[14] 宋雨轩，陈伟根，张知先，等. 基于光纤迈克尔逊干涉仪的 GIS 内置局部放电超声传感技术[J]. 高电压技术，2022，48(8)：3088-3097.
SONG Yuxuan, CHEN Weigen, ZHANG Zhixian, et al. Ultrasonic sensing technology of partial discharge built into GIS based on fiber optic Michelson interferometry[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(8): 3088-3097.

[15] 张知先，雷嘉丽，陈伟根，等. 基于多参量光纤 F-P 传感的变压器局部放电与油温传感方法[J]. 高电压技术，2022，48(1)：58-65.
ZHANG Zhixian, LEI Jiali, CHEN Weigen, et al. Transformer's partial discharge and oil temperature sensing method based on multi-parameter fiber optic F-P sensing[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(1): 58-65.

[16] 吴诗优，郑书生，钟爱旭. GIS 内光信号传播及传感器布局方式研究[J]. 高电压技术，2022，48(1)：337-347.
WU Shiyou, ZHENG Shusheng, ZHONG Aixu. Research on optical signal propagation and sensor layout in GIS[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(1): 337-347.

[17] 王 霞，樊卓杨，吴 超，等. 外置光纤光栅传感器测量电缆附件界面压力的方法研究[J]. 高电压技术，2022，48(1)：38-46.
WANG Xia, FAN Zhuoyang, WU Chao, et al. External fiber grating sensor used for measurement of interface pressure between cable and accessory[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(1): 38-46.

[18] 马国明，王思涵，秦炜淇，等. 输电线路运行状态光纤感知研究与展望[J]. 高电压技术，2022，48(8)：3032-3047.
MA Guoming, WANG Sihan, QIN Weiqi, et al. Research and prospect in optical fiber sensing of transmission line operating conditions[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(8): 3032-3047.

[19] ZANG Y M, QIAN Y, WANG H, et al. Method of GIL partial discharge localization based on natural neighbour interpolation and ECOC-MLP-SVM using optical simulation technology[J]. High Voltage, 2021, 6(3): 514-524.

[20] 国家电网公司. 变电设备在线监测装置检验规范 第 1 部分：通用检验规范：Q/GDW 540.1—2010[S]. 北京：中国电力出版社，2011.
State Grid Corporation of China. Testing specification for on-line monitoring device of transformation equipment-part 1: general testing specification: Q/GDW 540.1—2010[S]. Beijing, China: China Electric Power Press, 2011.

[21] 唐志国，王海青，何宁辉，等. 局部放电特高频传感器及系统现场校验与评估技术[J]. 高压电器，2018，54(11)：48-54.
TANG Zhiguo, WANG Haiqing, HE Ninghui, et al. Field calibration and evaluation of partial discharge UHF sensors and detection system[J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(11): 48-54.

[22] 齐 波，张 鹏，荣智海，等. 基于数据驱动和多判据融合的油色谱监测传感器有效性评估方法[J]. 电网技术，2017，41(11)：3662-3669.
QI Bo, ZHANG Peng, RONG Zhihai, et al. Validity assessment method of DGA sensors based on data driven and multiple criterion integration[J]. Power System Technology, 2017, 41(11): 3662-3669.

[23] 李 岩，滕 云，冷欧阳，等. 数据驱动的输电线路在线监测装置可靠性评估[J]. 中国电机工程学报，2018，38(15)：4410-4419.
LI Yan, TENG Yun, LENG Ouyang, et al. Reliability evaluation of on-line monitoring device over transmission line based on data driven concept[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(15): 4410-4419.

[24] 苏华权，廖 鹏，周昉昉，等. 基于边缘计算的电网边缘侧设备缺陷智能识别模型研究[J]. 电力信息与通信技术，2021，19(4)：31-37.
SU Huaquan, LIAO Peng, ZHOU Fangfang, et al. Research on intelligent recognition model of grid edge-side equipment defects based on edge computing[J]. Electric Power ICT, 2021, 19(4): 31-37.

[25] 朱鹏宇，蔡新忠，徐士元，等. 面向电力通信网边缘计算的缺陷诊断研究[J]. 电子技术应用，2021，47(4)：30-35，45.
ZHU Pengyu, CAI Xinzhong, XU Shiyuan, et al. Research of fault diagnosis of power communication network in edge cloud computing[J]. Application of Electronic Technique, 2021, 47(4): 30-35, 45.

[26] 李世豪，缪巍巍，曾 锃，等. 面向电力物联的边缘计算框架设计初探[J]. 电力信息与通信技术，2020，18(12)：51-58.
LI Shihao, MIAO Weiwei, ZENG Zeng, et al. Discussion on the design of edge computing framework based on power internet of things[J]. Electric Power ICT, 2020, 18(12): 51-58.

[27] 顾超越，李 喆，史晋涛，等. 基于改进 Faster-RCNN 的无人机巡检架空线路销钉缺陷检测[J]. 高电压技术，2020，46(9)：3089-3096.
GU Chaoyue, LI Zhe, SHI Jintao, et al. Detection for pin defects of overhead lines by UAV patrol image based on improved Faster-RCNN[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(9): 3089-3096.

[28] 颜宏文，陈金鑫. 基于改进 YOLOv3 的绝缘子串定位与状态识别方法[J]. 高电压技术，2020，46(2)：423-431.

YAN Hongwen, CHEN Jinxin. Insulator string positioning and state recognition method based on improved YOLOv3 algorithm[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(2): 423-431.

[29] 江秀臣，刘亚东，傅晓飞，等. 输配电设备泛在电力物联网建设思路与发展趋势[J]. 高电压技术，2019，45(5)：1345-1351.
JIANG Xiuchen, LIU Yadong, FU Xiaofei, et al. Construction ideas and development trends of transmission and distribution equipment of the ubiquitous power internet of things[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(5): 1345-1351.

[30] 齐　波，冀　茂，郑玉平，等. 电力物联网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)：3012-3031.
QI Bo, JI Mao, ZHENG Yuping, et al. Application status and development prospect of power internet of things technology in condition assessment of power transmission and transformation equipment[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(8): 3012-3031.

[31] 何奉禄，陈佳琦，李钦豪，等. 智能电网中的物联网技术应用与发展[J]. 电力系统保护与控制，2020，48(3)：58-69.
HE Fenglu, CHEN Jiaqi, LI Qinhao, et al. Application and development of internet of things in smart grid[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(3): 58-69.

[32] 胡致远，游梓霖，徐　鑫，等. 电力 5G 通信网络可靠性组网及部署技术[J]. 高电压技术，2022，48(8)：3048-3058.
HU Zhiyuan, YOU Zilin, XU Xin, et al. Reliable networking and layout technology of power 5G communication network[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(8): 3048-3058.

[33] 国家电网有限公司. 输变电设备物联网微功率无线网通信协议：Q/GDW 12020—2019[S]，2020.
State Grid Corporation of China. Micro-power wireless network communication protocol for the internet of power transmission and transformation equipment: Q/GDW 12020—2019[S]. 2020.

[34] 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.

[35] 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.

[36] 程书灿，赵彦普，张军飞，等. 电力设备多物理场仿真技术及软件发展现状[J]. 电力系统自动化，2022，46(10)：121-137.
CHENG Shucan, ZHAO Yanpu, ZHANG Junfei, et al. State of the art of multiphysics simulation technology and software development for power equipment[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(10): 121-137.

[37] SONG X G, PICKERT V, JI B, et al. Questionnaire-based discussion of finite element multiphysics simulation software in power electronics[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(8): 7010-7020.

[38] IBRAHIMBEGOVIC A, NIEKAMP R, KASSIOTIS C, et al. Code-coupling strategy for efficient development of computer software in multiscale and multiphysics nonlinear evolution problems in computational mechanics[J]. Advances in Engineering Software, 2014, 72: 8-17.

[39] 刘　刚，荣世昌，武卫革，等. 基于混合有限元法和降阶技术的油浸式变压器绕组 2 维瞬态流–热耦合场分析[J]. 高电压技术，2022，48(5)：1695-1704.
LIU Gang, RONG Shichang, WU Weige, et al. Two-dimensional transient flow-thermal coupling field analysis of oil-immersed transformer windings based on hybrid finite element method and reduced-order technology[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(5): 1695-1704.

[40] 阮江军，张　宇，张宇娇，等. 电气设备电磁多物理场数值仿真研究与应用[J]. 高电压技术，2020，46(3)：739-756.
RUAN Jiangjun, ZHANG Yu, ZHANG Yujiao, et al. Numerical simulation research and applications of electromagnetic multiphysical field for electrical equipment[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(3): 739-756.

[41] 邓永清，阮江军，董旭柱，等. 基于自适应网格控制的 10 kV 油浸式变压器多物理场仿真计算[J]. 高电压技术，2022，48(8)：2924-2933.
DENG Yongqing, RUAN Jiangjun, DONG Xuzhu, et al. Simulation of multi-physical field of 10 kV oil-immersed transformer based on adaptive grid control[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(8): 2924-2933.

[42] 谢裕清，李　琳，宋雅吾，等. 油浸式电力变压器绕组温升的多物理场耦合计算方法[J]. 中国电机工程学报，2016，36(21)：5957-5965.
XIE Yuqing, LI Lin, SONG Yawu, et al. Multi-physical field coupled method for temperature rise of winding in oil-immersed power transformer[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(21): 5957-5965.

[43] 侯国斌，傅明利，邓晓峰，等. GIS 温升的多物理场仿真与实验及热通量分布特性[J]. 高电压技术，2019，45(7)：2322-2328.
HOU Guobin, FU Mingli, DENG Xiaofeng, et al. Multi-physics coupling simulation and experiment of temperature rise in GIS and heat flux distribution characteristics[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(7): 2322-2328.

[44] RUAN J J, WU Y C, LI P, et al. Optimum methods of thermal-fluid numerical simulation for switchgear[J]. IEEE Access, 2019, 7: 32735-32744.

[45] 马鹏程. 基于深度学习的电力设备物理场仿真研究[D]. 成都：电子科技大学，2022.
MA Pengcheng. Simulation of physical field for power equipment based on deep learning[D]. Chengdu, China: University of Electronic Science and Technology of China, 2022.

[46] MA H, SAHA T K, EKANAYAKE C. Statistical learning techniques and their applications for condition assessment of power transformer[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2012, 19(2): 481-489.

[47] 刘云鹏，许自强，李　刚，等. 人工智能驱动的数据分析技术在电力变压器状态检修中的应用综述[J]. 高电压技术，2019，45(2)：337-348.
LIU Yunpeng, XU Ziqiang, LI Gang, et al. Review on applications of artificial intelligence driven data analysis technology in condition based maintenance of power transformers[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(2): 337-348.

[48] 蒲天骄，乔　骥，韩　笑，等. 人工智能技术在电力设备运维检修中的研究及应用[J]. 高电压技术，2020，46(2)：369-383.
PU Tianjiao, QIAO Ji, HAN Xiao, et al. Research and application of artificial intelligence in operation and maintenance for power equipment[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(2): 369-383.

[49] 胡　军，尹立群，李　振，等. 基于大数据挖掘技术的输变电设备故障诊断方法[J]. 高电压技术，2017，43(11)：3690-3697.
HU Jun, YIN Liqun, LI Zhen, et al. Fault diagnosis method of transmission and transformation equipment based on big data mining technology[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(11): 3690-3697.

[50] SHENG G H, HOU H J, JIANG X C, et al. A novel association rule mining method of big data for power transformers state parameters

based on probabilistic graph model[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(2): 695-702.

[51] 刘亚东，严英杰，严　波，等. 电力装备内部状态反演重构研究框架与应用展望[J]. 高电压技术，2022，48(8)：2883-2896.
LIU Yadong, YAN Yingjie, YAN Bo, et al. Framework and application prospect of internal state inversion and reconstruction of power equipment[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(8): 2883-2896.

[52] 骆小满，阮江军，邓永清，等. 基于多物理场计算和模糊神经网络算法的变压器热点温度反演[J]. 高电压技术，2020，46(3)：860-866.
LUO Xiaoman, RUAN Jiangjun, DENG Yongqing, et al. Transformer hot-spot temperature inversion based on multi-physics calculation and fuzzy neural network algorithm[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(3): 860-866.

[53] 王　淼，罗林根，钱　勇，等. 基于模拟故障数据库的 GIS 局部放电反演方法[J]. 高电压技术，2022，48(5)：1663-1672.
WANG Miao, LUO Lingen, QIAN Yong, et al. Partial discharge inversion method for GIS based on simulated fault database[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(5): 1663-1672.

[54] 赵振兵，熊　静，李　冰，等. 基于改进 Cascade R-CNN 的典型金具及其部分缺陷检测方法[J]. 高电压技术，2022，48(3)：1060-1067.
ZHAO Zhenbing, XIONG Jing, LI Bing, et al. Typical fittings and its partial defect detection method based on improved Cascade R-CNN[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(3): 1060-1067.

[55] 黄悦华，刘恒冲，陈　庆，等. 基于 USRNet 与改进 YOLOv5x 的输电线路绝缘子故障检测方法[J]. 高电压技术，2022，48(9)：3437-3446.
HUANG Yuehua, LIU Hengchong, CHEN Qing, et al. Transmission line insulator fault detection method based on USRNet and improved YOLOv5x[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(9): 3437-3446.

[56] 赵洪山，孙京杰，刘秉聪. 基于压缩感知的电力设备红外图像非盲自适应超分辨率方法[J]. 高电压技术，2022，48(8)：3068-3077.
ZHAO Hongshan, SUN Jingjie, LIU Bingcong. Non-blind adaptive super resolution method for infrared image of power equipment based on compressed sensing[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(8): 3068-3077.

[57] 刘国特，伍伟权，郭　芳，等. 基于改进级联 Gentle Adaboost 分类器的支柱绝缘子红外图像 AI 识别[J]. 高电压技术，2022，48(3)：1088-1095.
LIU Guote, WU Weiquan, GUO Fang, et al. AI recognition of post insulator infrared image based on improved cascade Gentle Adaboost classifier[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(3): 1088-1095.

[58] 孙玉伟，罗林根，陈敬德，等. 含噪背景下基于盲源分离与 NSVDD 的断路器机械故障诊断方法[J]. 高电压技术，2022，48(3)：1104-1112.
SUN Yuwei, LUO Lingen, CHEN Jingde, et al. Mechanical fault diagnosis method of circuit breaker based on blind source separation and NSVDD Under Noisy Background[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(3): 1104-1112.

[59] 李立涅，饶　宏，董旭柱，等. 计算高电压工程学的思考与展望[J]. 高电压技术，2018，44(11)：3441-3453.
LI Licheng, RAO Hong, DONG Xuzhu, et al. Prospect of computational high voltage engineering[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(11): 3441-3453.

[60] 董旭柱，谌立坤，王　波，等. 电力定制化芯片应用场景及关键技术展望[J]. 中国电机工程学报，2022，42(14)：5017-5033.
DONG Xuzhu, CHEN Likun, WANG Bo, et al. Application scenario and key technology prospect of power specific integrated circuit[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(14): 5017-5033.



**盛戈皞**(通信作者)
1974—，男，博士，教授，博导
从事电力设备数字化与智能化技术的研究
E-mail: shenghe@sjtu.edu.cn

SHENG Gehao
Ph.D., Professor
Corresponding author



**钱　勇**
1977—，男，博士，副教授
从事输变电设备状态监测与智能化技术的研究
E-mail: qian_yong@sjtu.edu.cn

QIAN Yong
Ph.D.
Associate professor



**江秀臣**
1965—，男，博士，教授，博导
从事电力设备状态监测及高电压技术的研究
E-mail: xcjiang@sjtu.edu.cn

JIANG Xiuchen
Ph.D., Professor

收稿日期　2023-04-10　修回日期　2023-04-24　　编辑　卫李静