

# 面向能源互联网数字孪生的 电力物联网关键技术及展望

赵鹏, 蒲天骄, 王新迎, 韩笑\*

(中国电力科学研究院有限公司, 北京市 海淀区 100192)

## Key Technologies and Perspectives of Power Internet of Things Facing With Digital Twins of the Energy Internet

ZHAO Peng, PU Tianjiao, WANG Xinying, HAN Xiao\*

(China Electric Power Research Institute, Haidian District, Beijing 100192, China)

**ABSTRACT:** With the goal of "Peak Emission and Carbon Neutrality" and building new power system with renewable energy as main body, energy technology and digital technology are further integrated, and the power grid is accelerating its evolution towards the energy internet. The construction of the energy internet and its digital twin system has put forward higher requirements for the IoT technology, and greatly expanded the connotation and extension of the IoT. This paper focused on how to build a power IoT for the digital twin system of energy internet, analyzed two major scientific problems: physical-digital fusion modelling and collaborative interaction of grid resources, proposed a power IoT architecture and security defense mechanism, and investigated the key support technologies at multiple levels. The key supporting technologies were studied, including accurate sensing and efficient communication, high concurrent access and massive data management, fusion modelling and evolutionary convergence, etc. Finally, the typical applications of power business intelligence supported by power IoT were prospected from three aspects: equipment, grid and users.

**KEY WORDS:** energy internet; digital twins; power internet of things; architecture design; sensor network; internet of things platform; intelligent application

**摘要:** 随着“碳达峰、碳中和”目标与以新能源为主体的新型电力系统的提出, 能源技术与数字技术进一步深度融合, 电网加速向能源互联网演进。构建能源互联网及其数字孪生系统对电力物联网技术提出了更高要求, 也极大拓展了电力物联网的内涵和外延。该文主要围绕如何构建面向能源互联网数字孪生系统的电力物联网, 分析其面临的两大科学问

题: 物理数字融合建模与电网资源协同互动, 提出电力物联网体系架构和安全防御机制, 研究“端-边-管-云-智”等多层级的关键支撑技术, 包括精准感知与高效通信、高并发接入与海量数据管理、融合建模与趋优进化等技术, 最后从设备、电网与用户三方面展望电力物联网支撑下的电网业务智能化典型应用。

**关键词:** 能源互联网; 数字孪生; 电力物联网; 架构设计; 感知网络; 物联平台; 智能应用

## 0 引言

2020年9月, 习近平主席在第七十五届联合国大会上提出我国二氧化碳排放力争于2030年前达到峰值, 努力争取在2060年前实现碳中和。能源电力领域碳排放总量大, 是实现碳减排目标的关键和重点领域, 2021年3月召开的中央财经委员会第九次会议上进一步提出构建以新能源为主体的新型电力系统。

推动构建新型电力系统的过程, 就是推动电网向能源互联网升级的过程, 二者是一个问题、两个视角<sup>[1-4]</sup>。以电力为核心的能源互联网包括多种能量生产、传输、存储和消费网络, 结构复杂、设备繁多、技术庞杂, 具有典型的非线性随机特征与多尺度动态特征, 传统机理模型分析和优化控制方法已经难以满足能源互联网规划设计、监测分析和运行优化的要求<sup>[5]</sup>。而数字孪生系统可提供为机理模型提供海量模拟的试验与评估环境, 并结合数据驱动的方式, 从态势预测、参数辨识、非线性拟合等方面对机理模型进行补充。数字孪生系统可实现能源互联网从物理实体到虚拟空间的实时完整映射, 通

基金项目: 国家重点研发计划项目(2020YFB0905900)。  
National Key R&D Program of China (2020YFB0905900)。

过智能实体开展仿真、计算、分析及决策等对物理系统进行反馈优化,最终实现可再生能源的高比例消纳及能源利用效率的提升,减少能源系统低碳、清洁、高效、经济运行,助力建成以新能源为主体的新型电力系统,促进“碳达峰、碳中和”目标的实现。

电力物联网是构建能源互联网数字孪生系统的重要支撑技术,为在虚拟空间中精确构建能源互联网的数字孪生系统提供了数字化与智能化基础,是互联网技术在能源电力领域的具体实践<sup>[6-9]</sup>。通过构建连接全社会用户、各环节设备的智慧电力物联网体系,实现电网、设备、用户状态的动态采集、实时感知和在线监测,推进网源协调发展与运行优化,推动现有能源体系下,各类不同能源形式、种类和企业的融合,最终提升能源整体利用效率。

然而,随着新能源大规模并网,电动汽车保有量增加,新型用能设施大量接入,当前电力物联网进一步发展仍然存在诸多技术挑战:在感知能力上,电网的源、荷不确定性日益突出,为实现对电网状态的精准态势感知,对电力物联网的精准感知提出了更高要求;在传输能力上,网络连接的广泛性和实时性不够;在数据处理能力上,海量高并发终端接入能力不足;在协同互动能力上,源网荷各要素协调调控手段较为单一、且与用户资源的互动能力不足,难以实现新能源的高效消纳、电动汽车的即插即用。

为应对上述挑战,本文将首先分析支撑能源互联网数字孪生系统的电力物联网所面临的科学问题,提出支撑电网状态高性能精准感知与立体化高效传输网络,支持亿级终端接入、千万级并行连接和PB级数据存储计算的融合共享物联支撑平台和电力业务场景智能应用的关键技术,给出电力物联网关键技术落地实施的技术路线,为电力物联网建设提供理论指导和路径参考。

## 1 面向能源互联网数字孪生的电力物联网核心科学问题

能源互联网具备多能流相互耦合、信息物理融合等复杂性,具有典型的非线性随机特征与多尺度动态特征,传统基于机理物理模型的方法难以满足其监测分析及优化运行的要求。能源互联网的数字孪生系统一般认为是充分利用能源互联网的物理模型、先进计量基础设施的在线量测数据、能源

互联网的历史运行数据,并集成电气、流体、热力、计算机、通信、气候、经济等多学科知识,进行的多物理量、多时空尺度、多概率的仿真过程,通过在虚拟空间中完成对能源互联网的映射,反映能源互联网的全生命周期过程,是实现能源互联网实时感知、运行优化及自主进化的理想途径之一。能源互联网及其数字孪生系统的构建主要需要以下几种技术能力<sup>[10-12]</sup>:

1) 深度精准感知。随着新能源大规模并网,电动汽车保有量增加,新型用能设施大量接入,导致电网的源、荷的不确定性日益突出,现有电网感知深度和广度不足。

2) 海量接入管理。目前海量物联终端和数据难以实现高效接入与管理,同时所采集的数据并未得到充分处理和应用。

3) 智能辅助决策。传统的能源电力安全稳定运行理论与运行优化技术已经无法满足未来新型电力系统调度控制需求。

面向以上需求,电力物联网技术可提供数字化、网络化和智能化基础载体,通过传感、网络、平台和人工智能等技术,将电力物理系统实时完整映射为数据和算法定义的数字系统,并有效利用数据的双向流动与融合共享,实现电力系统各个环节网架、设备、人员的万物互联、人机交互,促进电网全面感知、泛在互联、信息融合和智能应用。目前,如图1所示,构建能源互联网数字孪生系统存在两个核心科学问题。



图1 面临的核心科学问题

Fig.1 Key scientific issues of the power internet of things

1) 在物理世界向虚拟世界映射方面,如何形成能源互联网的动态多维、多时空尺度高保真模型,实现物理数字融合建模。针对能源互联网具有随机性和不确定性、难以单纯通过物理机理进行描述或求解的问题,基于电力物联网感知层和边缘层的数据资源,利用数据驱动建模方法从参数辨识、场景拟合、行为预测等方面对物理机理模型进行补充和提升,在保证信息安全的前提下,形成实时完整映射的数字虚拟系统,支撑电力业务场景智

能应用。

2) 在虚拟世界向物理世界反馈方面，如何进行能源互联网双系统的迭代交互与动态演化，实现资源协同互动。有效利用数据的双向流动与价值挖掘，通过数据与知识融合的人工智能等先进数字技术，赋智业务场景应用，实现虚拟数字空间与真实物理空间的协同互动与反馈优化。

## 2 面向能源互联网数字孪生的电力物联网技术架构

围绕构建能源互联网数字孪生系统的两个核心科学问题，需要突破以下 3 项电力物联网关键技术：1) 精准感知与高效通信技术；2) 高并发接入与海量数据管理技术；3) 融合建模与趋优进化技术。通过这 3 项关键技术来构建图 2 中所示的电力物联网“端-边-管-云-智”分层架构。

关键技术 1 为端层和边层提供数字化感知与边缘计算能力基础，为管层提供数字传输渠道；关键技术 2 为云层提供物联终端与海量数据管控、存储、共享基础；关键技术 3 则在“端-边-管-云”数字化基础之上，为能源互联网数字孪生提供物理数字融合建模与支撑更高阶业务场景智能应用能力，是智层支撑技术；最终在这 3 项关键技术与数字化基础上，再进一步地开展基于电力物联网的电力业务场景智能应用，实现对电力物联网的智能感知诊断、优化决策与数据增值。

图 2 分层“端-边-管-云-智”中的“端”指基于机-电-磁-光敏感机理表征、微纳结构优化及器件制备封装的高性能传感器，加大感知覆盖力度；“边”指利用边缘计算技术实现数据的就地处理、现场判决，减轻后续环节的通信与数据处理压力；“管”指基于多跳自组网、5G 与北斗等融合通信技术，实现各类传感器即插即用、本地和广域灵活接入；“云”指为数据存储、计算、共享等提供弹性资源保障的物联管理平台；“智”指基于深度学习、强化学习、知识引导及群智优化等技术，面向电网、设备与用户提供多种智能业务应用。此外，在端、边、管、云、智分层引入“零信任机制”，利用可信认证、信任评估、态势感知、协同防御等安全技术，形成面向电力物联网的“设备联动-局部自治-全局协同”安全防御架构<sup>[13]</sup>。

区别于传统电网自上而下分为应用层-网络层-终端层三层，“端-边-管-云-智”分层架构在感知层实现全面感知，感知的覆盖力度加大；增加了边缘层，实现数据的就地处理局部判决，加快系统响应速度；在管道层，实现多种通信方式异构协同通信；在云平台上实现了亿级设备接入和千万级并行连接的终端，接入数量与并发数显著增多；增加了智能应用层，基于深度学习、强化学习、知识引导及群智优化等技术实现多种电力业务的应用；在安全方面，设计了全层级的安全防护架构，安全防护力度更强。

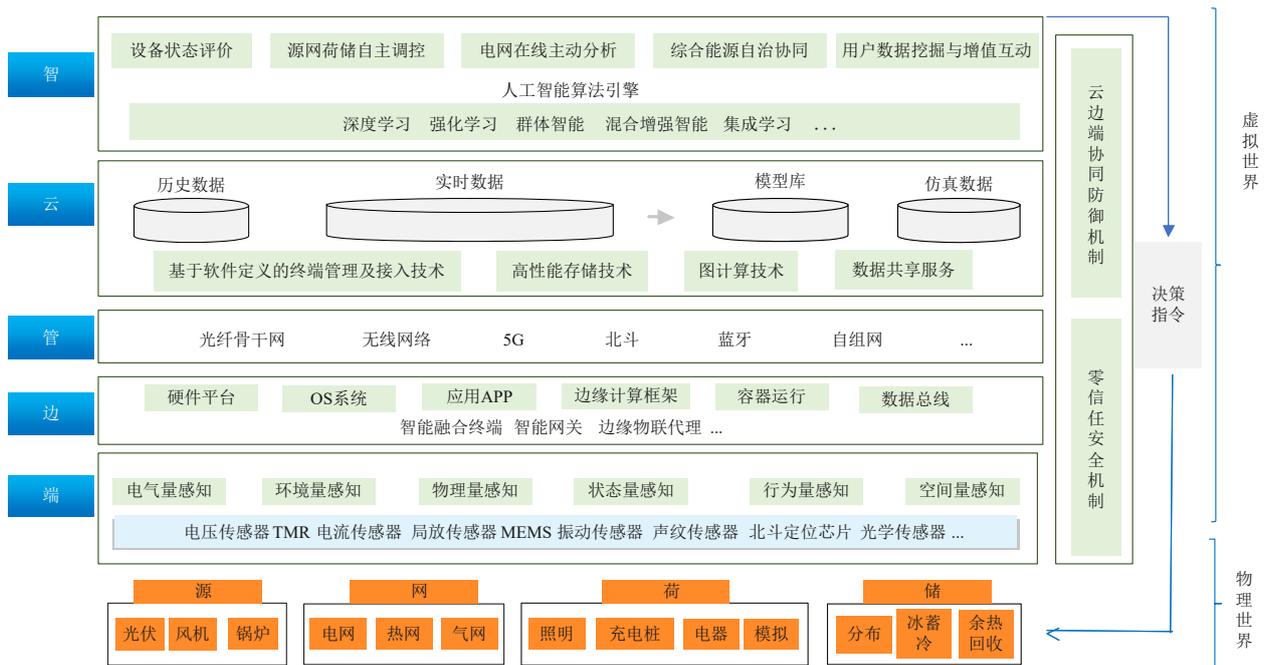


图 2 电力物联网体系架构

Fig. 2 Architecture of power internet of things

### 3 面向能源互联网的电力物联网关键技术

#### 3.1 精准感知与高效通信技术

针对当前电力设备状态感知不全面、不充分,连接广泛性与实时性不高等问题<sup>[14-15]</sup>,需要重点研究以下基础技术:精准感知技术与多跳自组织网络技术,满足感知层全面海量数据获取需求,实现数据高效可靠传输。

##### 3.1.1 精准感知技术

应用于能源互联网的智能感知技术需充分考虑其“点多面广、业务庞杂”的特点,对能源领域各个环节的实时监测提供有效数据支撑,并从本征层面促进能量流与信息流的深度融合<sup>[16]</sup>。从精准传感监测与轻量化便捷认知两方面来看,针对能源互联网的数字化精准感知技术研究需从新型传感机理、微纳器件制备、高效供电方法、边缘计算技术、自主可控人工智能芯片5个层面分别开展<sup>[17]</sup>。

1) 新型传感机理。为满足新型电力系统的高传感能力要求,需要研究基于新型材料的传感机理及其在新型环境中的应用,进一步提升传感器灵敏度,包括针对新型磁性材料、液态金属、光声光谱、分布式光纤等传感技术的研究。

2) 微纳器件制备。随着传感器的探测功能越来越精细化与多样化,传感器的微型化与模块化成为必然趋势,微纳加工工艺的发展为传感器模块化设计提供了可能,其敏感元件尺寸可达微米级,重点需在制备工艺、标准接口、标准片上集成等方面开展研究。

3) 高效供电方法。低功耗设计及电磁场、振动、摩擦、温差、光照等环境自取能技术促进传感器功耗及续航能力达到更优水平,不仅节约了取电成本,还可以提高传感系统的工作寿命,为传感器的规模应用提供有力支撑。

4) 边缘计算技术。边缘计算技术包括对人工智能算法与模型的边缘侧处理和适配。基于深度学习架构下的模型及机器学习算法,对人工智能模型及算法在边缘侧进行剪枝、量化、压缩,通过软件定义的轻量化容器技术,实现物理资源的边缘侧应用,通过多参量物联代理实现多种传感接入、业务分发、边缘计算及区域自治,最终实现高性能、低成本、高灵活性的人工智能技术边缘侧下沉<sup>[18]</sup>。

5) 自主可控人工智能芯片。嵌入式AI芯片是边缘智能技术的核心载体,相比于传统ARM架构

芯片,自主可控RISC-V芯片具有开源、稳定、易于硬件实现等优势,研究重点包括指令集扩展、工具链开发、多核异构微架构设计以及软硬件平台移植等。通过硬件加速、模型移植等方法,为边缘节点提供面向能源互联网业务需求的技术支撑。

##### 3.1.2 多跳自组织网络技术

面对电力业务传输需求与接入能力不匹配问题,需通过多跳定向自组织传输、快速资源调配与控制、多层次自组网及协议层安全性设计等技术,解决高可靠超多跳安全接入问题难点,实现电力业务高频次、高质量数据采集,以及全场景感知和广泛接入要求,从而提升网络灵活性和效率<sup>[19]</sup>。

1) 宽带高可靠超多跳自组网技术。采用物理层多维双层并行通信机制,并结合网络层环境感知分布计算方法,以及电网场景下超多跳自组网的拓扑结构、传输模式、资源配给实时优化技术,通过协议内部各要素的跨层优化,构建高可靠高效率超多跳无线链路。

2) 窄带多层次大规模自组网技术。采用大规模节点调度和干扰规避技术、分布式网络节点的态势感知与自主计算技术、计及服务质量和资源开销的大规模多层次自组网技术,突破大规模自组网的海量节点与资源开销的限制,实现物理空间虚拟化与网络空间智能化。

#### 3.2 高并发接入与海量数据管理技术

针对电力物联网中海量物联设备接入和多源异构数据融合共享等问题,需要重点研究以下基础技术:高并发异构物联终端接入管控技术、海量数据存储共享技术<sup>[20-21]</sup>,实现电力物联网海量异构终端高并发接入及智能管控、多模态数据融合与共享。

##### 3.2.1 高并发异构物联终端接入管控技术

电力物联网高并发接入管控技术需充分考虑物联终端“海量、异构、智能、新型”的特点,对终端管理的多环节云边协同提供有效的技术支撑。应在终端模型、通信和功能层面,针对电力物联网异构终端高并发接入管控研究需从软件定义终端模型技术、异构通信技术和终端代理服务3个方面分别开展,形成电力物联网海量终端接入管控的软硬件协作架构体系。

1) 软件定义终端模型技术。软件定义终端是指利用软件定义技术在物理、逻辑层面对物联终端组成的分维描述。采用软件定义技术将海量异构物联终端分解成柔性统一的结构模型、信息模型和

传感器执行器模型。终端产生的变动通过模型的柔性适配来保持功能的恒定性，在不影响电力物联网正常运行的情况，实现新型异构终端多维物模型的统一构建、维护与扩展。

2) 异构通信网络技术。在物理通信网络旁路构建“工业互联网四层交换+分布式全异步架构”的异构通信层，以硬解方式实现异构终端多协议适配、消息路由、流量和拥塞控制，通信连接信道基于硬件堆叠方式扩展，与云端主站/物联管理平台建立前置分布式消息队列集群映射连通，实现云端与边缘终端的千万级并发通信能力。

3) 终端代理服务。由云端下发至智能终端的远端微服务，提供可编程配置化采集、可编程设备管理规约、边缘应用、统一下行语义控制通道和设备影子等管理功能，用于保持电力物联网云端软件对智能终端的全方位映射与控制，实现智能终端运行、功能和应用的数字化编程与定义。

### 3.2.2 海量数据存储共享技术

电力物联网海量数据存储共享的关键在于实现多源异构数据立体化聚合和全域数据网贯通，其作为面向能源互联网数据集约处理的交互新模式，具有通用、高效、易解释等特点。针对海量数据存储共享技术的研究需从分布式数据立方体技术、“物联网一张图”<sup>[22-23]</sup>技术和多元数据融合共享技术3个方面分别展开。

1) 分布式数据立方体技术。针对电网核心数据，通过基于分布式计算框架逐层算法、逐段算法灵活快速构建面向应用的分布式列存储数据立方体，基于预先实例化的数据预处理、多路数组聚集的完全立方体计算、动态分片的数据在线聚集合并等技术，实现快速解析分布式列式存储立方体数据。采用多源异构参数融合、网络旁路报文解析和数据关联关系自动解析技术，实现多源异构数据资源融合和数据资源目录自动化构建。

2) “物联网一张图”技术。采用基于图谱理论和知识工程理论的知识表示与推理、语义网等技术，结合电力物联网具有的天然网络特征，建立电力全域数据与图数据的结构映射，贯通“云边端+关联领域”全景数据，可根据业务维度自动划分网格式层次化的子图拓扑。通过提供跨时空数据集集成、数据知识融合、高效查询引擎与互动数据接口技术，实现电力物联网数据的高效查询、时序数据流访问和互动可视化。

3) 多元数据融合共享技术。采用全链路多维数据集框架和数据知识的统一表达机制，建立电力物联网图数据与分布式数据立方体的映射关联。针对电力物联网融合数据，采用基于开放性算法引擎的多模态协同和多计算模式框架协同机制，实现面向电力复杂应用场景的按需数据共享和定制化智能分析服务。

## 3.3 融合建模与趋优进化技术

针对电力物联网中数字孪生系统融合建模与资源智能协同等问题，需要重点研究以下基础技术：电网物理数字融合建模技术、电网资源协同趋优技术，实现电网状态的全面感知、精准评估与稳定控制。

### 3.3.1 电网物理数字融合建模技术

引入先验知识改善机器学习模型的可解释性、鲁棒性与可泛化性，是突破目前人工智能在电力系统应用瓶颈的一个重要研究方向<sup>[24-25]</sup>。电力系统在长期的生产实践中积累了大量逻辑规则、代数方程、物理模型等，将上述系统机理知识引入数据驱动的分析方法中，可降低对训练样本数量及质量的要求、使机器学习模型具有应对动态环境的能力。针对不同场景下模型的获取难度，物理机理与数据驱动融合建模的方法可分为数据模型对机理模型的改进、机理模型对数据模型的指导、以及构建混合模型三大类<sup>[26]</sup>。

1) 数据驱动方法对机理模型的改进方面，针对由于假设简化导致精度不足的问题，通常可以结合数据驱动方法迭代优化模型参数及修正误差，增强机理模型适应性。此外，数据驱动方法可辅助进行机理模型的筛选，或评估、完善机理模型构成。

2) 知识机理驱动方法的指导作用可在机器学习过程的不同阶段引入。例如，在特征构建/筛选阶段，可通过增加一致性损失函数，引导数据模型选择人类可理解的特征作为决策依据；在模型构建/训练阶段，可以加入逻辑规则或公式等作为约束条件嵌入模型，使模型更加符合物理规律；决策阶段可基于技术标准、历史故障处置案例等，结合数据模型的判断结果进行协同决策，避免做出不符合常识或不符合业务逻辑的决策。

3) 混合建模方面，针对电力系统稳定分析、紧急控制策略选取等由于不确定因素多、计算复杂度高而难以建立物理模型的情况，可利用知识驱动方法表示易描述的、确定性的部分，通过数据驱动

方法表示非线性的、随机性的部分,从而替代部分不精确的机理模型,形成混合模型。

### 3.3.2 电网资源协同趋优技术

面对能源互联网源网荷储多种资源协同难点,需要逐步深化感知、认知到决策层面的智能,实现对设备、电网与用户等资源的智能协调与发展,重点支撑技术包括:

1) 计算机视觉理解感知。电力领域图像中各部分存在逻辑关联,针对二维图像与视频,通过联合嵌入、注意机制、知识库协同等方式关联图像与语义信息、聚焦高价值密度区域、推理分析图像中视觉概念逻辑,实现视觉推理与智能理解。最终结合神经反馈机制划分图像多层次关系,实现海量亿级像素图像的主动视觉<sup>[27-28]</sup>。针对三维图像,通过三维感知、位姿估计、三维重建、三维理解等获取处理三维点云数据、构建视觉同步定位和制图(simultaneous localization and mapping, SLAM)、进行动态三维重建以及三维物体的识别分割等<sup>[29]</sup>。

2) 知识图谱多模认知推理。设计知识引导与数据驱动相结合的算法,从数据、特征、算法等不同层级,挖掘物理信号、图像、音频、视频、文本等多模态数据语义信息,从数据、特征、算法多层次进行跨模态融合分析。研究逻辑推理、自主感知、类脑认知等机制,构建多模知识图谱与图计算应用<sup>[30-31]</sup>,进行多模认知推理,实现数据抽象、深度理解、推理决策、动机思考等类人的认知能力。

3) 混合增强智能。针对传统决策严重依赖人工经验、效率低、可解释性差等问题,重点研究以人机知识构建与推理、人工智能可解释性机制、人机双向学习与协同决策为核心的混合增强智能技术<sup>[32]</sup>,通过知识与数据协同驱动的方式来增强调度决策对外部环境不确定性的适应能力<sup>[33]</sup>,保证和提升电力人工智能应用的可信性、鲁棒性与安全性。

4) 群体智能。针对可再生能源比例不断上升,优化变量和约束增加,计算时间和收敛难度都会呈现显著加大等问题,重点研究以群体进化机制与多智能体协同控制为核心的群体智能技术,该技术与传统直控类发电机等调控对象可建模直接控制相比,适应电网对源网荷储泛在资源的控制不具有强制性、需要考虑泛在资源的多主体意愿等特性,在自主决策基础上,引入群体智能引导趋优更贴合实际需求<sup>[34-35]</sup>。

## 4 基于电力物联网的电力业务场景智能应用

电力物联网智能应用场景广泛,然而目前电力设备存在信息多源、状态评价困难、故障诊断率低等技术瓶颈<sup>[36]</sup>;能源互联网中源网荷储要素多样、源荷双侧不确定性突出,导致新能源消纳能力不足<sup>[37]</sup>;综合能源由于多能互补潜力挖掘不够充分,使得能源利用效率不高<sup>[38-39]</sup>等问题。

本文将从设备、电网和用户三方面选取典型应用,进行技术应用架构探讨,并在电力物联网海量数据采集的基础上,以模型驱动与数据驱动相结合,利用大数据技术和人工智能技术充分挖掘数据内在价值,有效提升电力系统运行经济性和安全性。

### 4.1 电力设备故障智能感知与诊断

随着电力系统中物联传感终端数量的不断增加,电力设备传感监测数据呈现信号多源异构、样本质量不均衡、故障样本较少等特点,为全面刻画设备运行状态,可通过多源数据协同感知与压缩感知、多模态数据融合、知识图谱认知推理等技术,研发电力设备状态评价、故障诊断预警与检修辅助决策等智能应用,确保电力系统安全可靠运行。技术路线如图3所示。

电力设备协同感知与压缩感知重构技术方面,针对多源监测信号的差异性与互补性特点,研究声光电化多模态传感参量的融合技术。针对监测精度要求高与传感设备成本高的问题,通过优化传感布局与采样策略、建立稀疏字典与观测矩阵,在保证数据采集精度的同时减小传感监测数据存储传输压力。

电力设备多源异构数据融合技术方面,针对设备传感数据类型多、数据间关联性弱等问题,研究面向图像、传感监测、文本等数据信息的特征抽取及语义转换技术,提出不同类型数据间关联性挖掘方法,实现各类监测数据的融合分析。

电力设备知识图谱与知识推理技术方面,针对电力设备文本语料数据,构建电力语料基础库。通过实体关系抽取等技术,构建电力设备知识图谱。针对电力设备文本数据规模大、体系杂的特点,提出基于义项的词和实体联合表示学习模型,实现知识图谱构建与融合更新。进而研究知识图谱的知识检索与路径推理等技术,提出知识图谱信息推荐与故障溯源技术,实现电力设备故障辅助决策与故障推理诊断。

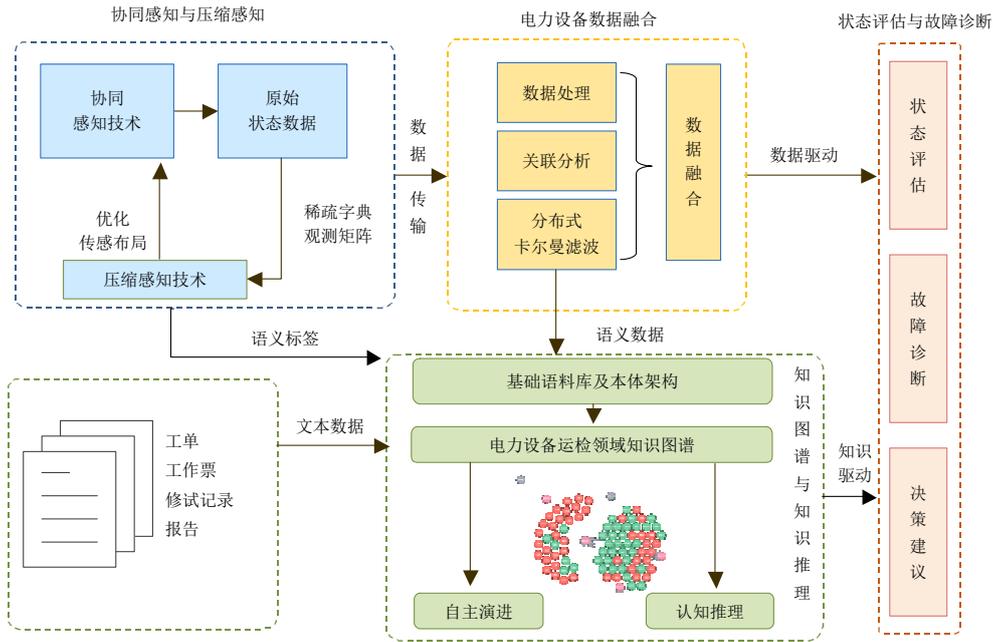


图 3 电力设备故障感知与诊断应用技术路线

Fig. 3 Research scheme of power equipment fault diagnosis

电力设备的状态评估与故障诊断方面，针对电网运维检修环节中产生的各种结构化、非结构化数据，根据样本规模提出机器学习与专家经验判断结合与自适应深度学习的设备故障诊断算法，实现适应电力业务特性的设备故障智能诊断应用。针对经过进一步压缩感知及多源融合后的设备感知数据，研究集成智能评估与认知推理技术，提出状态评价、故障诊断、决策建议等模型，实现输电、变电、配电、继保设备状态评估与故障诊断。

电力设备的数字孪生分析方面，针对电力设备动态实时变化的物理实体，构建与之空间范围、时间尺度全面映射的虚拟数字模型，结合电力设备的多源监测数据，使虚拟数字模型能全景模拟动态变化的大规模电力设备、实时趋近电力设备实体的运行状态、预演及预判电力设备在突发情况下的异常状态使设备智能运维的展示交互、风险预测、辅助决策能力得到提升。

#### 4.2 源网荷储自主智能调控

地区电网源网荷储面临利益主体多样、源荷双侧不确定性突出的难点，可通过强化学习、模型/数据交互驱动、群体智能等方法，采用源网荷储广泛感知与预测、多元协同调度、分布式自主控制，提高分布式可再生能源利用率，实现源网荷储泛在资源的自主智能调控。

如图 4 所示，面向多利益主体、海量异构群体、灵活广泛接入，应对可调资源的自主智能调控架构

进行分析，基于模型/数据交互驱动理论，研究面向海量异构调控数据的分层分布式深度学习方法，并且根据多主体多目标调控需求，利用面向电网分布式自主控制的群体智能理论，研究分布式控制智能体的自趋优和群智进化策略。

优化前的准备方面，需要掌握源网荷储运行状态的智能感知方法，包含量测设备的优化配置方法、高冗余量测数据的降维方法。针对分布式电源和负荷的出力不确定性与波动性，可通过考虑网络和储能动态特性的源网荷储概率预测方法和源网荷储运行场景集智能生成与约减方法，为调控策略研究提供基础数据。

多元协同调度方面，可基于可行域降维投影的泛在异构资源自主聚合的统一模型和数据模型驱动的电网调度方法，通过海量数据的输入和深度学习形成隐性知识，在大数据基础上通过训练和拟合形成自动化的电网调度决策模型，研究仿真模型/数据驱动模型间的虚实交互方法，使仿真模型中的参数在与实际系统的互动中不断进化，形成了面向源网荷储调控的数字孪生体系，在物理实体提供的全面感知数据基础上，在虚拟世界对抗博弈式生成系统运行状态与调控决策，并通过与仿真环境甚至物理环境的不断交互，自主学习获取最优的策略，与传统基于简化、假设方式所构建的电网仿真决策模型相比，可增强能源互联网的适应性，可更好地提升源网荷储的匹配度，促进可再生能源消纳。

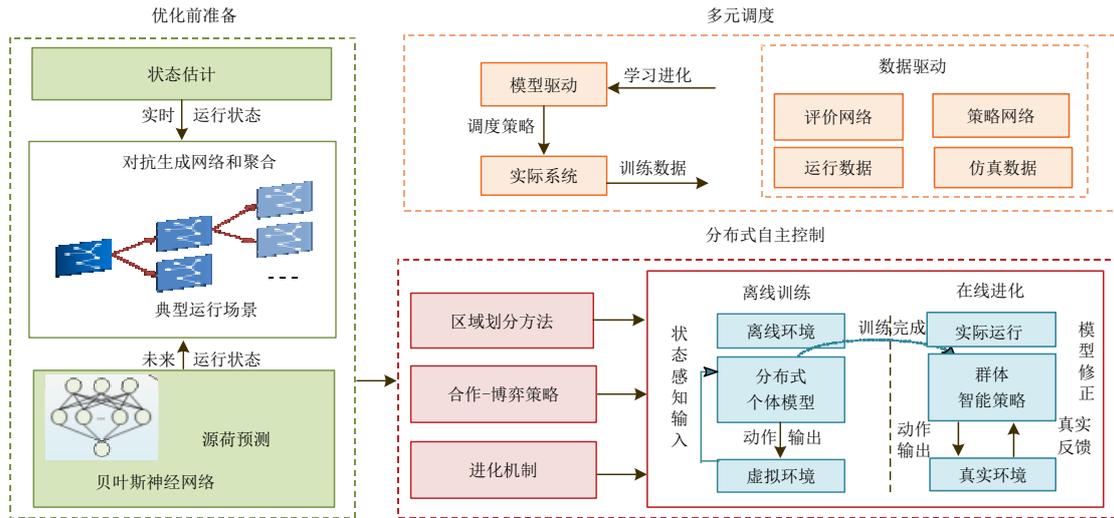


图4 基于深度强化学习的电网自主智能调控应用技术路线

Fig. 4 Research scheme of power network autonomous intelligent control based on deep reinforcement learning

此外，针对分布式广泛资源节点数量多、信息交互复杂等问题，可根据可控资源合理配置原则，结合自治区域动态划分方法，考虑广泛资源的耦合特性和群体协同特性，研究面向多利益主体区域内的泛在资源超前控制策略；针对多主体多目标控制需求，制定多区域间合作-博弈策略与群体进化机制，基于强化学习的泛在资源群智进化模型与算法，通过控制目标的闭环修正方法，实现多元资源的分布式自主控制。

### 4.3 综合能源自治协同与多元服务

电力物联网电/气/热多能复杂耦合与强随机性带来的运行难题，可基于多能源感知数据，开展多能流时空特性分析与运行模式推演、多能流分布自治控制、综合能源集群协同优化及综合能源定制化

多元服务技术研究，提高综合能源服务精准匹配度与满意度，具体技术路线如图5所示。

基于多能源海量物联感知信息开展多能流时空特性分析，对多能流网络广义电路模型的源荷自适应集成建模，通过基于多能源荷多元互补特性的综合能源系统动态分区方法，基于用户服务响应特性提供了具备系统运行模式推演能力的数字孪生体系基础，在此基础上可进一步扩展能源协同优化与多元服务等智能应用，在用户服务领域构建数字孪生系统的优势在于可更加精准直观地展示当前用户侧需求模型、综合能源分布与利用等情况，有助于用户高效获取能源市场动态资讯，积极主动参与多元应用服务。

通过采集的综合能源系统环境状态参数构建

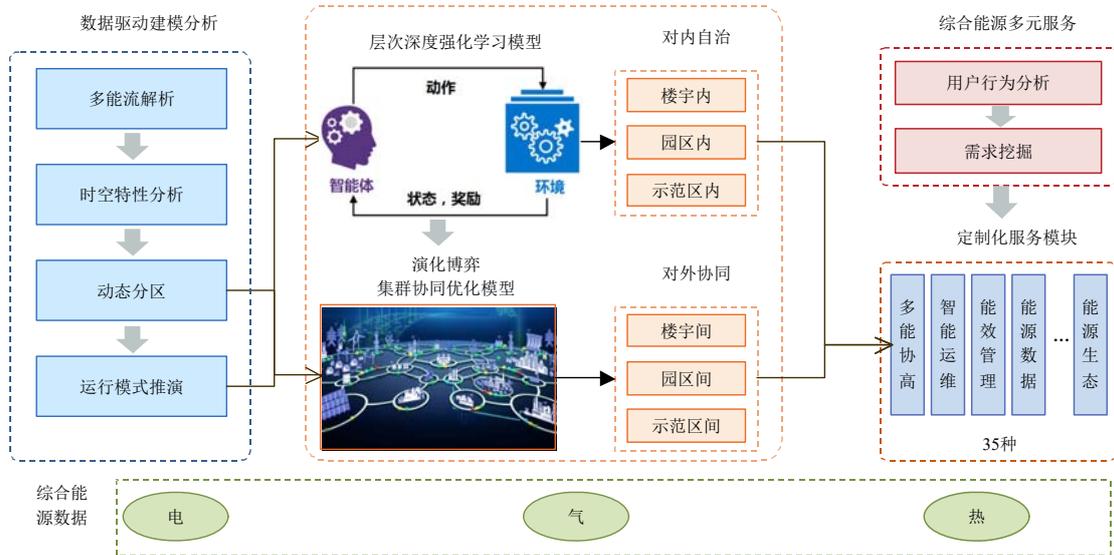


图5 综合能源自治协同与多元服务应用技术路线

Fig. 5 Research scheme of integrated energy autonomous collaboration and multiple services

环境状态空间,以综合能源系统可控制设备策略为动作策略空间,根据系统局部优化目标设计分层奖励措施,构建层次深度强化学习开展训练学习,建立综合能源系统分布自治控制模型。然后基于演化博弈的集群协同优化方法,结合综合能源系统多主体行为模式,利用信息非对称情况下的信息交互方法,探索非理性合作下多主体博弈机制及演化规律,根据分区特性并综合考虑成本、能效等优化目标开展集群协同优化,实现综合能源系统的多能互补与能效提升。

利用综合能源系统多维场景划分技术,以及数据挖掘分析的综合能源用户画像和需求挖掘技术,实现针对政府、工业用户等五类主体的定制化需求挖掘,通过研究综合能源多元服务标准与定制化组件开发,形成综合能源系统多元服务模块,提供多种多元服务。

## 5 结论与展望

本文主要分析了电力物联网及其数字孪生系统所面临的核心科学挑战,并据此提出了一种面向能源互联网的电力物联网体系架构,分析了架构中各层级的关键组成技术与典型应用方案,为后续电力物联网建设提供了明确的研究方向。目前电力物联网建设仍处于初级阶段,正在向以下方向发展:

1) 全景感知方面:传感器本体将向微型化、低功耗、多参量、网络化方向发展,边缘智能将向轻量级、嵌入式、软件定义、自主芯片替代技术、工控级操作系统开发、端边云协同技术方向发展。

2) 高效传输方面:将向协议统一化、5G 大连技术、空天地一体化、电力定制化发展,使电力系统具备网络化、在线化、泛在化特征。

3) 融合平台方面:将向泛物联模型柔性定义、云边端智能协同、多模态数据自融合、可信计算和动态安全防护与追踪技术等方向发展。

4) 智能应用方面:将从浅层特征分析发展至深度逻辑分析,从环境感知发展至自主认知与行为决策,从电力系统业务辅助决策发展至核心业务决策。具体来说,在设备方向重点发展基于多模态信息与知识推理的电力设备状态分析与运维决策,在电网方向重点发展基于混合增强智能与群体智能的源网荷储资源优化协调,在用户方向重点发展基于联邦学习与大数据分析的用电特性分析与数据增值服务,最终实现机器助人、机器代人,直至机

器超人。

未来,电力物联网将有效提升系统可观、可测、可控能力,加快电网信息采集、感知、处理、应用等全环节数字化、智能化能力,成为连接全社会用户、各环节设备的物联体系,为打造数字孪生电网,推进电网向能源互联网升级提供关键技术支撑,助力构建新型电力系统,推进双碳目标的实现。

## 参考文献

- [1] 孙宏斌. 能源互联网[M]. 北京: 科学出版社, 2020. SUN Hongbin. Energy internet[M]. Beijing: Science Press, 2020(in Chinese).
- [2] 周孝信, 曾嵘, 高峰, 等. 能源互联网的发展现状与展望[J]. 中国科学: 信息科学, 2017, 47(2): 149-170. ZHOU Xiaoxin, ZENG Rong, GAO Feng, et al. Development status and prospects of the Energy Internet[J]. Scientia Sinica Informationis, 2017, 47(2): 149-170(in Chinese).
- [3] 陈国平, 董昱, 梁志峰, 等. 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, et al. 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(in Chinese).
- [4] 丁涛, 牟晨璐, 别朝红, 等. 能源互联网及其优化运行研究现状综述[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(15): 4318-4328. DING Tao, MU Chenlu, BIE Zhaohong, et al. Review of energy internet and its operation[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(15): 4318-4328(in Chinese).
- [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(in Chinese).
- [6] 曹军威. 电力物联网概论[M]. 北京: 中国电力出版社, 2020. CAO Junwei. Introduction to power Internet of things[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2020(in Chinese).
- [7] CHEN Shan, XU Hui, LIU Dake, et al. A vision of IoT: applications, challenges, and opportunities with china perspective[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2014, 1(4): 349-359.
- [8] BEDI G, VENAYAGAMOORTHY G K, SINGH R, et al. Review of internet of things(IoT) in electric power and energy systems[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2018, 5(2): 847-870.

- [9] 司羽飞, 谭阳红, 汪泓, 等. 面向电力物联网的云边协同结构模型[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(24): 7973-7979.  
SI Yufei, TAN Yanghong, WANG Feng, et al. Cloud-edge collaborative structure model for power internet of things[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(24): 7973-7979(in Chinese).
- [10] 王晓辉, 季知祥, 周扬, 等. 城市能源互联网综合服务平台架构及关键技术[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(7): 2310-2320.  
WANG Xiaohui, JI Zhixiang, ZHOU Yang, et al. Comprehensive service platform architecture and key technologies of urban energy internet[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(7): 2310-2320(in Chinese).
- [11] 秦博雅, 刘东. 电网信息物理系统分析与控制的研究进展与展望[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(18): 5816-5826.  
QIN Boya, LIU Dong. Research progresses and prospects on analysis and control of cyber-physical system for power grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(18): 5816-5826(in Chinese).
- [12] MENEGHELLO F, CALORE M, ZUCCHETTO D, et al. IoT: INTERNET of threats? A survey of practical security vulnerabilities in real IoT devices[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2019, 6(5): 8182-8201.
- [13] 张宇, 张妍. 零信任研究综述[J]. 信息安全研究, 2020, 6(7): 608-614.  
ZHANG Yu, ZHANG Yan. A survey of zero trust research[J]. Journal of Information Security Research, 2020, 6(7): 608-614(in Chinese).
- [14] 陈伟根, 张知先, 李剑, 等. 电气设备状态参量智能传感技术[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(S1): 323-342.  
CHEN Weigen, ZHANG Zhixian, LI Jian, et al. Intelligent sensing technology for power equipment state parameters [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(S1): 323-342(in Chinese).
- [15] QIU Jing, LIU Xin, CHEN Hengjia, et al. A low-frequency resonant electromagnetic vibration energy harvester employing the halbach arrays for intelligent wireless sensor networks[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2015, 51(11): 8600604.
- [16] 周峰, 周晖, 刁赢龙. 泛在电力物联网智能感知关键技术发展思路[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(1): 70-82.  
ZHOU Feng, ZHOU Hui, DIAO Yinglong. Development of intelligent perception key technology in the ubiquitous internet of things in electricity[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(1): 70-82(in Chinese).
- [17] 王继业, 蒲天骄, 仝杰, 等. 能源互联网智能感知技术框架与应用布局[J]. 电力信息与通信技术, 2020, 18(4): 1-14.  
WANG Jiye, PU Tianjiao, TONG Jie, et al. Intelligent perception technology framework and application layout of energy internet[J]. Electric Power Information and Communication Technology, 2020, 18(4): 1-14(in Chinese).
- [18] 张树华, 仝杰, 张鋆, 等. 面向能源互联网智能感知的边缘计算技术研究[J]. 电力信息与通信技术, 2020, 18(4): 42-50.  
ZHANG Shuhua, TONG Jie, ZHANG Jun, et al. Research on edge computing technology for intelligent sensing layer of energy interconnection[J]. Electric Power Information and Communication Technology, 2020, 18(4): 42-50(in Chinese).
- [19] 张宁, 杨经纬, 王毅, 等. 面向泛在电力物联网的 5G 通信: 技术原理与典型应用[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(14): 4015-4024.  
ZHANG Ning, YANG Jingwei, WANG Yi, et al. 5G communication for the ubiquitous internet of things in electricity: technical principles and typical applications [J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(14): 4015-4024(in Chinese).
- [20] HUANG Xinyi, LIU J K, TANG Shaohua, et al. Cost-effective authentic and anonymous data sharing with forward security[J]. IEEE Transactions on Computers, 2015, 64(4): 971-983.
- [21] RAHMAN M S, AL OMAR A, BHUIYAN M Z A, et al. Accountable cross-border data sharing using blockchain under relaxed trust assumption[J]. IEEE Transactions on Engineering Management, 2020, 67(4): 1476-1486.
- [22] 刘广一, 王继业, 李洋, 等. “电网一张图”时空信息管理系统[J]. 电力信息与通信技术, 2020, 18(1): 7-17.  
LIU Guangyi, WANG Jiye, LI Yang, et al. "One Graph of Power Grid" Spatio-temporal information management system[J]. Electric Power ICt, 2020, 18(1): 7-17(in Chinese).
- [23] 刘广一, 戴仁昶, 路轶, 等. 电力图计算平台及其在能源互联网中的应用[J]. 电网技术, 2021, 45(6): 2051-2063.  
LIU Guangyi, DAI Renchang, LU Yi, et al. Electric power graph computing platform and its application in energy internet[J]. Power System Technology, 2021, 45(6): 2051-2063(in Chinese).
- [24] 薛禹胜, 赖业宁. 大能源思维与大数据思维的融合(一): 大数据与电力大数据[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(1): 1-8.  
XUE Yusheng, LAI Yening. Integration of macro energy thinking and big data thinking part one big data and power big data[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(1): 1-8(in Chinese).
- [25] YI Jun, LIN Weifan, HU Jianxiong, et al. An integrated model-driven and data-driven method for on-line prediction of transient stability of power system with wind power generation[J]. IEEE Access, 2020, 8: 83472-83482.
- [26] 尚宇炜, 马钊, 彭晨阳, 等. 内嵌专业知识和经验的机器学习方法探索(一): 引导学习的提出与理论基础[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(19): 5560-5571.  
SHANG Yuwei, MA Zhao, PENG Chenyang, et al. Study of a novel machine learning method embedding expertise

- part I: proposals and fundamentals of guiding learning[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(19): 5560-5571(in Chinese).
- [27] AGRAWAL A, LU Jiasen, ANTOL S, et al. VQA: visual question answering[J]. International Journal of Computer Vision, 2017, 123(1): 4-31.
- [28] GORDO A, ALMAZÁN J, REVAUD J, et al. End-to-end learning of deep visual representations for image retrieval[J]. International Journal of Computer Vision, 2017, 124(2): 237-254.
- [29] 赵波, 廖坤, 邓春宇, 等. 基于卷积神经网络的光伏板积灰状态识别与分析[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(23): 6981-6989.  
ZHAO Bo, LIAO Kun, DENG Chunyu, et al. Image convolutional neural learning based image recognition and analysis method for dust on photovoltaic panel[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(23): 6981-6989(in Chinese).
- [30] SAITO S, SIMON T, SARAGIH J, et al. PIFuHD: multi-level pixel-aligned implicit function for high-resolution 3D human digitization[C]//2020 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Seattle, WA, USA: IEEE, 2020.
- [31] LIU Ye, LI Hui, GARCIA-DURAN A, et al. MMKG: multi-modal knowledge graphs[C]//16th European Semantic Web Conference. Portorož, Slovenia: Springer, 2019.
- [32] 王国政, 郭剑波, 马士聪, 等. 电力系统增强智能分析初探[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(16): 5079-5087.  
WANG Guozheng, GUO Jianbo, MA Shicong, et al. Preliminary study of power system enhanced intelligence analysis[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(16): 5079-5087(in Chinese).
- [33] 尚宇炜, 郭剑波, 吴文传, 等. 数据-知识融合的机器学习(2): 泛化风险[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(16): 4641-4649.  
SHANG Yuwei, GUO Jianbo, WU Wenchuan, et al. Machine learning methods embedded with domain knowledge(Part II): generalization risk[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(16): 4641-4649(in Chinese).
- [34] 徐熙林, 宋依群, 姚良忠, 等. 主动配电网源-荷-储分布式协调优化运行(一): 基于一致性理论的分布式协调控制系统建模[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(10): 2841-2848.  
XU Xilin, SONG Yiqun, YAO Liangzhong, et al. Source-load-storage distributed coordinative optimization of AND(Part I): consensus based distributed coordination system modeling[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(10): 2841-2848(in Chinese).
- [35] 高扬, 贺兴, 艾芊. 基于数字孪生驱动的智慧微电网多智能体协调优化控制策略[J]. 电网技术, 2021, 45(7): 2483-2491.  
GAO Yang, HE Xing, AI Qian. Multi agent coordinated optimal control strategy for smart microgrid based on digital twin drive[J]. Power System Technology, 2021, 45(7): 2483-2491(in Chinese).
- [36] 李峰, 王琦, 胡健雄, 等. 数据与知识联合驱动方法研究进展及其在电力系统中应用展望[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(13): 4377-4389.  
LI Feng, WANG Qi, HU Jianxiong, et al. Combined data-driven and knowledge-driven methodology research advances and its applied prospect in power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(13): 4377-4389(in Chinese).
- [37] 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 Wenhui, 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(in Chinese).
- [38] 权然, 金国彬, 陈庆, 等. 源网荷储互动的直流配电网优化调度[J]. 电力系统及其自动化学报, 2021, 33(2): 41-50.  
QUAN Ran, JIN Guobin, CHEN Qing, et al. Optimal dispatching of DC distribution network based on source-grid-load-storage interactions[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2021, 33(2): 41-50(in Chinese).
- [39] 龚萍, 朱永强, 蔡钦钦, 等. 基于广义多能流模型的综合能源系统多阶段规划[J/OL]. 电网技术, 2021 [2021-06-18]. <https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2021.0756>.  
GONG Ping, ZHU Yongqiang, CAI Qinqin, et al. Multi-stage planning based on generalized multi-energy flow model for integrated energy system[J/OL]. Power System Technology, 2021[2021-06-18]. <https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2021.0756>(in Chinese).



赵鹏

在线出版日期: 2021-11-15。

收稿日期: 2021-08-16。

作者简介:

赵鹏(1963), 男, 教授级高级工程师, 主要研究方向为能源互联网、电力物联网等, [zhaopeng1@epri.sgcc.com.cn](mailto:zhaopeng1@epri.sgcc.com.cn);

蒲天骄(1970), 男, 教授级高级工程师, 主要研究方向为电力系统优化运行、电力人工智能等, [tjpu@epri.sgcc.com.cn](mailto:tjpu@epri.sgcc.com.cn);

王新迎(1987), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为电力人工智能、数字孪生等, [wangxinying@epri.sgcc.com.cn](mailto:wangxinying@epri.sgcc.com.cn);

\*通信作者: 韩笑(1989), 女, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为电力人工智能, [hanxiao@epri.sgcc.com.cn](mailto:hanxiao@epri.sgcc.com.cn)。

(责任编辑 乔宝榆)

## Key Technologies and Perspectives of Power Internet of Things Facing With Digital Twins of the Energy Internet

ZHAO Peng, PU Tianjiao, WANG Xinying, HAN Xiao\*  
(China Electric Power Research Institute)

**KEY WORDS:** energy internet; digital twins; power internet of things; architecture design; sensor network; internet of things platform; intelligent application

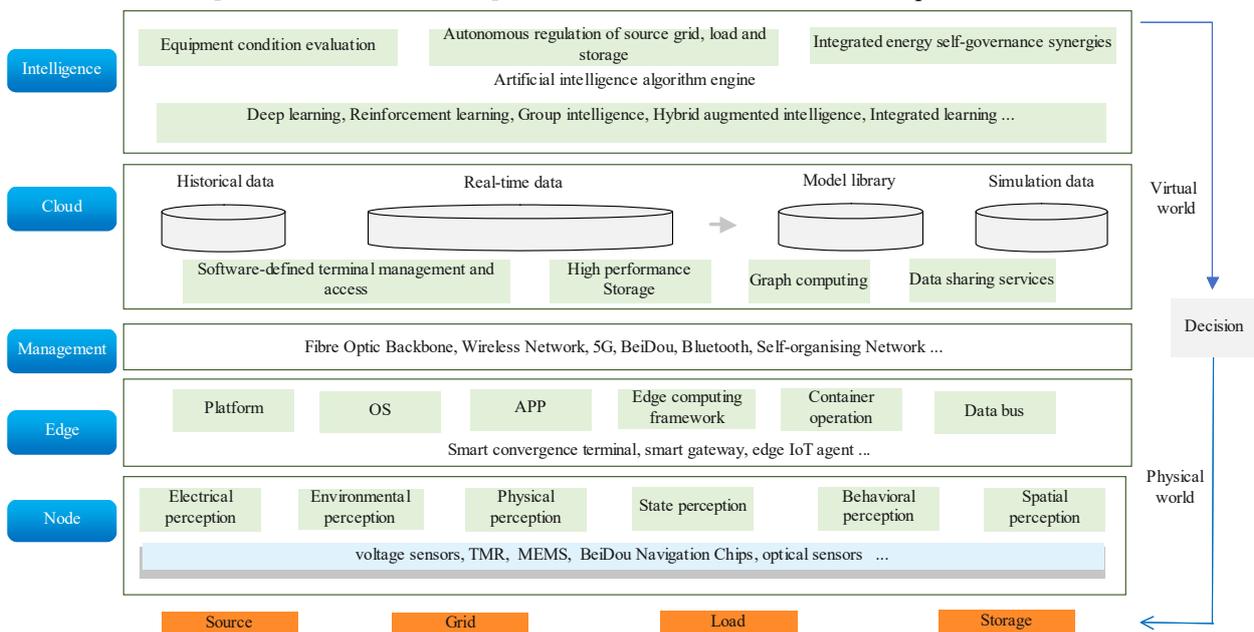
With the goal of "Peak Emission and Carbon Neutrality" and building new power system with renewable energy as the main body, energy technology and digital technology are further integrated, and the power grid is accelerating its evolution towards the energy internet. The energy internet, with electricity as its core, includes a variety of energy production, transmission, storage and consumption networks, with complex structures, a wide range of equipment and complex technologies, and has typical non-linear stochastic characteristics and multi-scale dynamic features. The digital twin system can provide a massive simulation and evaluation environment for the mechanism model, and combine with a data-driven approach to complement the mechanism model in terms of situation prediction, parameter identification and non-linear fitting.

The power IoT is an important supporting technology for building the digital twin system of the energy Internet, providing a digital and intelligent basis for precisely building the digital twin system of the energy Internet in virtual space, and is a concrete practice of

Internet technology in the field of energy and electricity.

However, with the large-scale grid connection of new energy sources, the increase of electric vehicle ownership and the massive access of new energy-using facilities, there are still many technical challenges to the further development of the Internet of Things for electricity.

To address these challenges, this paper analyses the two major scientific issues facing the IoT: physical-digital fusion modelling and grid resource interaction, proposes an architecture and security defense mechanism for the IoT, and investigates the multi-level "end-edge-management-cloud-intelligence", as shown in Fig.1. The key supporting technologies, including accurate sensing and efficient communication, high concurrent access and massive data management, fusion modeling and convergent evolution are studied. Finally, the typical applications of grid business intelligence under the support of IoT from three aspects: equipment, grid and users, providing theoretical guidance and path reference for the construction of power IoT.



**Fig. 1 Architecture of power internet of things**