

发电系统数字化研究综述

王翔宇¹, 陈武晖^{1*}, 郭小龙², 常喜强²

(1. 太原理工大学电气与动力工程学院, 山西省太原市 030024; 2. 国网新疆电力有限公司, 新疆维吾尔自治区乌鲁木齐市 830000)

Review of Research on the Digitalization of Power Generation System

WANG Xiangyu¹, CHEN Wuhui^{1*}, GUO Xiaolong², CHANG Xiqiang²

(1. College of Electrical and Power Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, Shanxi Province, China;
2. State Grid Xinjiang Electric Power Co., Ltd., Urumqi 830000, Xinjiang Uygur Autonomous Region, China)

摘要: 随着信息革命的发展与演进, 推动新一代数字技术与传统发电系统融合, 推进发电系统的数字化建设是支撑能源转型与数字电网建设的重要途径。从发电系统的数字化业务需求出发, 总结了全生命周期管理、智能运维和智能运行等多类型场景对于数据的业务需求, 从网络结构和数字技术架构两方面阐述了发电系统数字化系统的体系架构, 梳理了发电系统数字化过程中的关键技术与应用, 最后探讨了发电系统数字化过程中亟待解决的问题。

关键词: 发电系统数字化; 业务架构; 协同驱动; 体系架构; 人工智能; 数字孪生

ABSTRACT: With the development and evolution of the information revolution, promoting the integration of a new generation of digital technology with traditional power generation system, and promoting the digital construction of power generation systems is an important way to support energy transformation and digital grid construction. Based on the digital business needs of power generation system, this paper summarized the business needs of data in various scenarios such as the full life cycle management, intelligent operation and maintenance, and intelligent operation. The architecture of power generation system was expounded from the aspects of network structure and digital technology architecture. The key technologies and applications in the process of digitalization of power generation system were sorted out. Finally, the problems that need to be solved in the process of digitalization of power generation system were discussed.

基金项目: 国家自然科学基金项目(51977098); 新疆维吾尔自治区重大科技专项(2022A01007-1)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (51977098); Major Science and Technology Projects in Xinjiang Uygur Autonomous Region (2022A01007-1).

KEY WORDS: digitalization of power generation system; business architecture; collaborative driven; architecture; artificial intelligence; digital twin

0 引言

发电系统数字化就是利用海量传感器、智能设备、电力物联网等手段实现物理电厂的数字化升级^[1], 形成一种集成智能传感与执行、智能控制与优化、智能管理与决策等技术的具备自学习、自适应、自趋优、自恢复、自组织的智能发电运行控制管理模式^[2], 最终建成管控一体化的数字化平台。数字化的发电系统可以利用信息技术进行准确的信息化交换, 实现资源的实时性共享, 从而使得电厂在电力生产的整个过程中产生最大的经济效益^[3-5]。

随着新型电力系统建设的不断推进, 以风电、光伏等为代表的清洁能源发电系统大量并网^[6-7], 其电能生产的随机性、波动性导致系统面临的不确定性进一步增加; 另外, 发电侧兆瓦级发电设备数量日趋庞大^[8-9], 发电侧数据呈现指数级增长。因此, 建立数字化运行和管理的发电体系, 推进发电系统的数字化、智能化建设, 促进物理电厂和数字技术深度融合, 进而实现各类能源的高效利用以及经营管理全过程实时感知、可视可控、精益高效^[10-11], 是助力新型电力系统建设的重要保障。

自从2016年“智能发电”的概念被提出以来^[12], 发电系统的数字化、智能化发展受到行业

和国家主管部门的高度关注。2017年3月,工业和信息化部、国家标准化委员会联合发布《信息物理系统白皮书(2017)》,对信息物理系统的技术内涵做了全面归纳与系统阐释^[13]。2020年9月,国资委印发了《关于加快推进国有企业数字化转型工作的通知》,为电力系统数字化转型指明了方向^[14]。2022年4月,南方电网发布了《数字电网标准框架白皮书》,提出数字电网技术标准框架及重点研制方向,为数字电网企业标准、行业标准、国家标准、国际标准的制定提供了科学依据。

在国家战略及相关政策的引导下,许多专家学者对发电系统数字化的研究和建设开展了有益探索,文献[15-21]从不同的角度阐述智慧电厂、智能发电的概念及体系架构,但是很少涉及到发电系统数字化建设过程中的关键技术及相关应用,发电系统的数字化建设需要以新一代数字技术为依托,进而实现传统发电系统的数字化智能化升级。文献[22-25]结合智能发电、智慧电厂的业务应用与典型研究方向,综述了发电系统数字化建设需要形成的各类关键技术,但是其涉及范围大多局限于数字技术的某一方面,新一代的数字技术应包含感知、融合、应用等多个层面。文献[26-30]从智慧电厂的建设实际出发,探讨了面向新型发电系统的多类型数字业务需求,为发电系统的数字化建设提供了思路与借鉴,但是未能形成通用的业务应用架构。

基于发电系统数字化的研究现状,本文从发电系统的业务需求出发,综述了全生命周期管理、智能运维、智能运行、联合运行及碳排放管理等多种业务类型对于数据的研究现状,梳理了新型发电系统数字化系统的体系架构以及发电系统数字化建设过程中的关键技术应用,指出了发电系统数字化过程中尚待解决的问题。

1 发电系统数字化的业务需求

发电系统数字化首先要探究新型发电系统的数字化业务应用架构,分析面向各类型关键基础业务的发电侧数据需求,对应挖掘出精准描述不同类型电源及相应业务需求的电气量数据和非电

气量数据。

1.1 数字化业务应用架构

目前,我国在发电系统数字化研究领域已经开展了较多探索,许多专家学者对于面向新型发电系统的数字化业务提出了不同的观点。

在水电领域:文献[31]认为智慧水电的建设要构建以态势感知、多维分析、趋势预测、风险预警、远程控制为主要特征的统一平台,最终实现无人值守和智能协同。在风电领域:文献[32]认为海上风电机组有分布广阔、无人值守、运行环境恶劣等特点,必须实现设备状态全息感知,机器代替人工巡检,设备缺陷主动预警和控制策略智能调节等功能;文献[33]则是从智能设备、智能控制、场级管控、集团4个层级阐述了怎样建设海上智慧风电场,涵盖了项目设计、基建、运营的全生命周期过程以及全场设备、资产的数字化监控与管理等多项业务。在光伏发电领域:文献[34]提出要建设一个集约管理、弹性存储、灵活高效、少人或无人值班的光伏电站运维云平台。在核电领域:文献[35]提出了平行核电系统的概念,可以实现生产过程的状态监测、未知情景的智能模拟计算、应急方案的滚动优化分析及运行过程的在线推演评估与优化等功能。在地热、潮汐、波浪发电领域:从目前的研究现状和能源特点来看,智能电站要实现少人、无人值守以及无人巡检、智能诊断、功率最大/平滑控制等各项智能业务^[36-39]。在燃气发电领域:文献[40]研究了燃气热电顶层业务架构模式的设计及应用情况,为新型发电系统的业务应用架构设计提供了借鉴。在火力发电领域:文献[41]指出新型智能燃煤发电厂必须具有深度调峰、快速变负荷、超净排放、高效燃煤发电和碳电市场协同发展的业务功能;文献[42]给出了智慧电厂信息化建设蓝图,规划业务范围覆盖公司组织管控、人力资源管理、财务管理、生产管理等多方面业务。

综合来看,面向新型发电系统的数字化业务需要包括设备全生命周期管理、智能运维、智能运行、联合运行、电碳交易等诸多类型业务,这些业务可以分为高级决策型业务、运行控制型业务及职能型业务,图1为新型发电系统的数字化

业务应用架构。

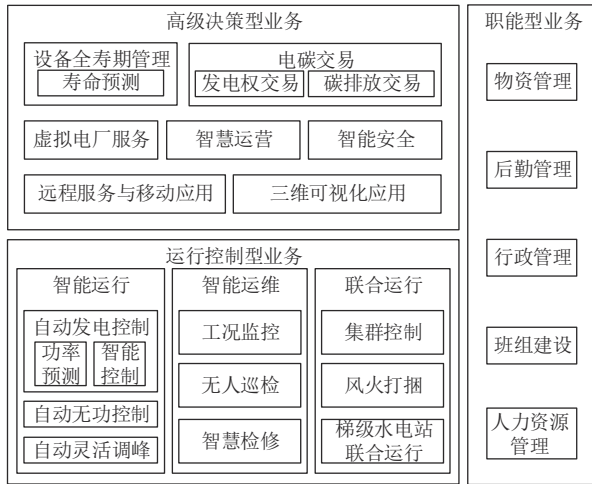


图1 数字化业务应用架构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of digital business application architecture

1.2 关键基础应用

随着科学技术的发展和生产工艺的进步，发电设备日益朝着大型化、复杂化、自动化及智能化方向发展。不同发电形式的发电设备因为其原理的独特性也应有不同侧重方向的业务应用。寿命预测和工况监控是火、水、核、风、光、燃气等各发电类型的共同的关键基础应用，可以保障设备安全可靠运行。功率预测和智能控制针对的是风电、光伏等波动性随机性较强的新能源发电，可以起到提高发电效率和最大能量捕获的作用，实现新能源发电的智能运行。协调控制主要通过电厂/电站之间的联合运行平抑功率波动，提高系统的鲁棒性。碳排放监测针对的是传统燃煤火电厂的碳排放管理问题。

1.2.1 寿命预测

为保障火、水、核、风、光等多种类型发电设备安全性与可靠性，实现设备全生命周期管理，剩余寿命(remaining useful life, RUL)预测技术受到了普遍关注，同时得到了广泛应用^[43]。剩余寿命预测技术主要分为基于机理模型的预测方法和基于统计模型的预测方法。

基于机理模型的方法根据设备的物理运行规律建立起相应的元器件、部件及整机的损耗模型，从而对整个设备的剩余寿命进行预测。文献[44-46]从载荷分析的角度利用有限元分析对风电轴承

进行模拟仿真，从而得到轴承的疲劳寿命。文献[47-48]将光伏逆变器一年内实际运行中的环境数据作为输入，完成了逆变器输出功率到逆变器温度剖面再到器件预测寿命的转换，并通过雨流计数法和Miner累计损伤模型得到了器件的预测寿命值。图2为基于机理模型的风电与光伏关键设备寿命预测流程。

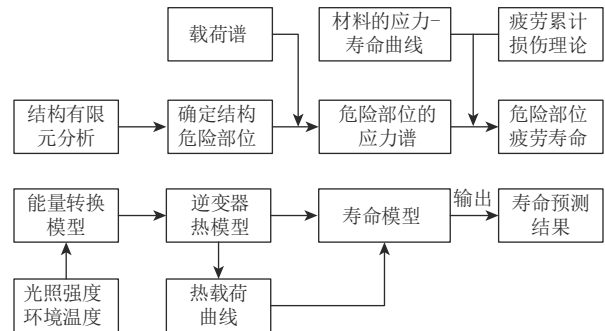


图2 基于机理的寿命预测流程示意图

Fig. 2 Schematic diagram of life prediction process based on mechanism

基于统计模型的预测方法通过学习设备的历史检修数据，建立设备的寿命预测模型，并且该模型可以根据每次设备检修情况不断迭代更新，从而提高预测精度。文献[49]基于改进神经网络方法建立了风力发电机轴承温度预测模型，通过线性回归的分析方法成功对轴承RUL进行了预测。文献[50]通过故障模式、影响和危害性分析得出转子绕组是影响风机装备剩余寿命的关键参数，运用卡尔曼滤波算法，利用观测到的最新实验数据预测了风机装备的剩余寿命。

1.2.2 工况监控

对于各种类型发电设备的工况实时在线监控是实现发电系统智能运维和智能运行的基础条件。从广义上讲，工况监控包括了状态监测和故障诊断^[51]。状态监测是对设备异常状态的识别预警，是故障诊断的基础，故障诊断则是根据状态监测所获得的信息，对设备可能要发生的或已经发生的故障进行事前预报和事后分析^[51]。目前工况监控方法主要分为基于专家知识的解析方法和基于数据驱动的统计方法。

基于专家知识的方法是通过建立发电设备的精确数学模型，将该数学模型的输出信号与测量

到的信号比较之后得到残差信号，从而判断设备目前的运行工况^[51]。文献[52]根据除氧器储罐的输入输出流量和液位的关系，建立了动态控制模型，实现了核电站除氧器液位控制系统的故障检测与诊断。文献[53]对给水加热器进行了建模，并且将模型用于燃煤机组给水加热器的故障诊断。图3为基于专家知识的发电设备工况监控流程示意图。

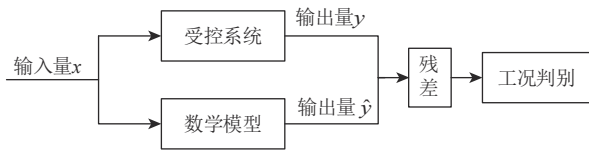


图3 基于专家知识的工况监控流程示意图

Fig. 3 Schematic diagram of working condition monitoring process based on expert knowledge

基于数据驱动的发电设备工况监控技术主要是通过分析和挖掘发电过程历史数据，提取数据内部的隐含信息和关键特征参数，从而利用训练模型判别发电过程的运行状态和追溯故障形成的原因。文献[54]将热电站锅炉的20种运行参数作为输入量，利用人工神经网络方法形成的模型，对热电站锅炉进行了状态监测与故障诊断。文献[55]提出了一种改进的多步向前滑动窗主元分析方法，实现了火电机组双背压凝汽器运行状态的实时监测。

1.2.3 功率预测

实现高精度的风电及光伏功率预测是新能源发电企业实时调度运行、修订合理发电计划和参与电力市场的基础条件^[56]。风电和光伏功率预测都是以数值天气预报 (numerical weather prediction, NWP)数据或/和实测数据为基础，结合电站的地理坐标、具体地域特点以及发电设备信息，建立预测模型及算法，实现对未来一定时间段内风电以及光伏输出功率的预测^[56-57]。功率预测方法主要分为物理方法、统计方法和组合预测方法。

物理方法基于太阳辐照传递方程、光伏组件运行方程或风电机组风速-功率转化方程等物理方程，将NWP数据或/和实测数据转化为风电和光伏的功率预测数据。文献[58]提出了计及风电场

局地效应与风电机组尾流影响的风电场功率预测模型。文献[59]采用 Gauss 混合模型构建实测风速和 NWP 数据之间的映射关系，并以此来修正 NWP 风速，校正后的 NWP 数据及功率预测精度得到了大幅提升。图4为文献[58]提出的基于物理方法的风电功率预测流程图。

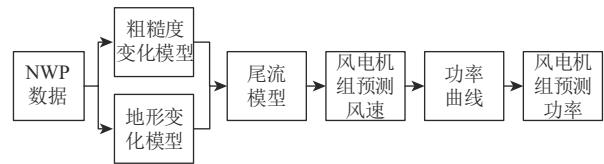


图4 基于物理方法的风电功率预测流程图

Fig. 4 Schematic diagram of wind power prediction based on physical method

统计方法不考虑物理变化过程，而是通过统计方法来学习历史气象、电力数据之间的统计规律，结合实测功率数据或NWP数据预测发电功率。文献[60]总结归纳了统计预测方法的预测思路、数据筛选的评价手段以及目前深度学习算法的最新研究进展。文献[61]构建了一种基于改进灰狼学习算法的脉冲神经网络，并将其应用到光伏出力短期预测中，与传统模型相比，该方法预测性能提升明显。文献[62]提出一种基于多重时空注意力图神经网络的海上风电场出力预测模型，该模型相比传统预测模型在空间、特征、时间多个维度具有合理的可解释性。

光伏和风力发电受多种因素的影响，单一的预测模型不能考虑到所有因素，而组合预测方法可以综合不同预测模型的优点，提高预测精度。文献[63]提出了不同时间断面差异化的组合预测方法，针对各集合成员每日更新结果动态修正各集合单元组合权值，提高预测模型的适应性。文献[64]提出了结合径向基函数 (radial basis function, RBF)神经网络功率预测模型和时间序列模型的组合预测模型，该组合模型可以得到较高的短期发电功率预测准确度。文献[65]提出一种基于 Kalman 滤波和反向传播 (back propagation, BP)神经网络的光伏超短期功率预测模型，实际数据验证了所提出模型的可行性。

1.2.4 智能控制

由于风光等自然资源本身所具有的不确定性，

导致新能源发电设备出力具有随机性与波动性，因此有必要建立风电场和光伏电站的智能运行控制模型，该模型可以通过气象监测预警和新能源出力预测环节实时感知并预测发电量变化数据，结合电场运营评估环节，以延长寿命和提高发电效率为目标，智能切换电源控制策略，实现新能源场站的 AGC/AVC 一体化控制，并对电源运行状态数据进行实时更新，使电源实体和数字化智能运行模型之间形成闭环反馈。

文献[66]提出一种自适应数字动态面智能控制算法，实现了光伏伺服系统对太阳位置的跟踪控制。文献[67]开发了一套基于柔性尾缘襟翼 (deformable trailing edge flap, DTEF) 的载荷智能控制系统，在正常湍流模型和正常海况模型工况条件下的实验证明，在 DTEF 控制下，叶片、传动链和塔架的疲劳载荷得到了有效控制。文献[68]采用人工蜂群算法对大型风电机组的变桨距控制器参数进行优化，有效降低了输出功率和风机转速的波动，减少了传动链疲劳荷载和机组结构反应，增加了风电机组的使用寿命。文献[69]基于经典优先顺序法提出了一种应用于变速恒频风电场的限出力有功控制策略，实现了最大风能利用和避免风电场频繁起停的目标。

1.2.5 协调控制

新能源本身所具有的不确定性使得大规模新能源并入电网时给电力系统带来很大的调峰调频压力，各大新能源基地都出现了不同程度的弃风弃光现象。以多能互补协调控制技术为核心的联合运行是缓解大规模新能源发电与电网消纳矛盾的重要手段之一^[70]。多能互补协调控制技术主要分为单能源电站集群控制、双能源协调控制与多态能源协调控制。

单能源电站集群控制主要有风电场、光伏电站和水电站集群协调控制。文献[71]对梯级水电站群跨电网短期联合运行、经济调度控制建模及求解方法展开深入研究，制定了最佳机组起停机状态组合和最优出力方案，为电力系统能源优化配置、安全高效经济运行提供了指导。文献[72]提出了大型集群风电有功智能控制系统的控制策略，设计了最大出力控制和出力跟踪控制2种风

电场间的协调控制方法，在甘肃电网的实际应用结果证明了该策略的可行性。文献[73]提出一种风电集群有功功率多时间尺度协调调度新方法，有效克服了已有方法在风电集群有功功率控制效果差、跟踪调度计划误差较大的不足。文献[74]研究了一种基于光伏电站集群协调控制的方法，通过大片区域中多个光伏电站的配合实现总体输出功率上的稳定。

双能源协调控制主要分为新能源与常规能源的协调控制、新能源之间的协调控制和新能源与储能的协调控制。新能源与常规能源协调控制方面，文献[75]提出了风火打捆外送的有功控制策略，并且在实际工程应用中证明了该策略能够有效控制风火电打捆外送断面潮流不超过稳定限额，提高了通道利用率和风能利用率。文献[76]提出一种以火电机组调频为主、风电机组调频为辅的一次调频联合控制策略，仿真结果表明，所提策略能够充分利用风电调频容量，有效改善系统频率特性。新能源间协调控制方面，文献[77]研究了风电-抽水蓄能联合日运行的优化方法，提出了电网消纳风电出力的新模式，测试结果表明，抽水蓄能电站与风电场配合可大大降低风电出力随机性对电网运行的负面影响。文献[78]分析了某地区光伏电站和风电站输出功率波动特性，建立了风光联合发电系统，结果表明风光联合发电系统输出功率更加平稳。新能源与储能协调控制方面，文献[79]综述了包含大容量储热的电-热联合系统研究现状及关键技术，提出包含大容量储热的电-热联合系统可以充分利用电力系统和热力系统物理特性的优势，提高能源系统大时空范围优化配置能力。

多态能源协调控制方面，文献[80]提出了一种具有信息松弛的多态能源协调控制策略，通过仿真验证了所提方法的有效性。目前一些新兴的虚拟发电技术如虚拟电厂和产销者也是一种基于多态能源协调控制技术的新型应用。文献[81]指出虚拟电厂可通过协调控制分布式电源、储能系统、可控负荷、电动汽车等分布式能源的聚合优化来作为一个特殊电厂参与电网运行。文献[82]提出了一种含风光水的虚拟电厂与供电公司协调

调度模型,为可再生能源分布式电源的并网提供了可行的方案。能源产销者既是能源的生产者也是能源的售卖者,目前的能源产销者主要有分布式可再生能源发电、电动汽车、新型储能等^[83]。文献[84]提出了基于合作博弈的产销者社区分布式光伏与共享储能容量优化方法,实现了博弈各方利益在均衡意义下的最大化。

1.2.6 碳排放监测

精确监测二氧化碳气体排放是燃煤发电系统碳排放管理工作的基础,可以为碳排放权交易、低碳火电厂经济补偿等方面提供依据。燃煤发电过程中的二氧化碳气体排放源主要包括锅炉中煤炭的燃烧、锅炉启动阶段燃料油的辅助燃烧和石灰石湿法脱硫设施的二氧化碳排放,其中燃煤带来的二氧化碳排放是所有排放中占有最大的比例^[85-86]。目前燃煤产生二氧化碳的量化方法主要可以分为在线监测法、碳平衡法和排放因子法。

在线监测法是指对火电厂利用带二氧化碳测量组分的烟气监测系统实时进行碳排放监测,精确计算火电厂碳排放速率。文献[87]阐述了燃煤排放二氧化碳的3种量化方法的选择依据,指出了在线监测法在实际应用过程中存在测点布置、二氧化碳浓度测量、湿度测量等问题,并针对这些问题提出了改进方法。文献[88]提出了一种燃煤电厂碳排放在线监测和管理系统设计方案,包括碳排放计量、碳排放预警、碳配额管理、数据统计及调度和考核方法,为指导节能发电调度和碳排放考核提供了思路。图5为文献[87]提出的碳排放在线监测系统示意图。

因为技术和资金问题,通过烟气在线监测设备实测火电厂二氧化碳排放目前还不具备推广条件。为解决火电厂二氧化碳排放的实时在线监测问题,文献[89]提出了一种基于碳平衡理论的改进模型,以通过实际运行数据计算得到的实际燃煤量等中间变量代替在线监测方法所使用的误差较大的测量值,实验结果证明了该模型的可靠性。

2 发电系统的数字化系统体系架构

新型发电系统是以传统发电系统为基础,结

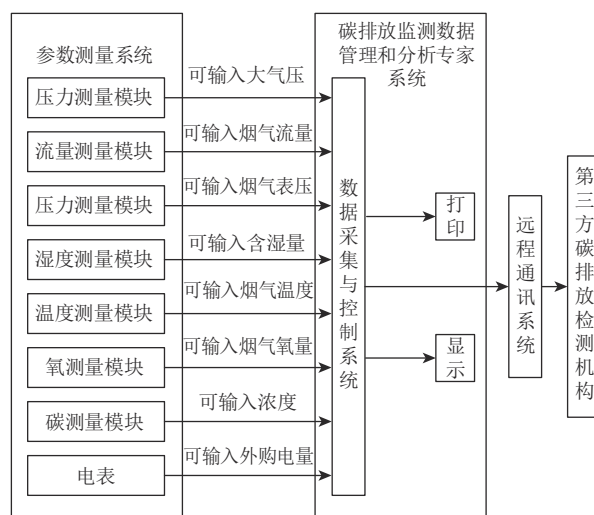


图5 碳排放在线监测系统示意图

Fig. 5 Schematic diagram of carbon emission online monitoring system

合新一代数字技术形成的融合型社会公共设施。新型发电系统的数字化系统体系架构可以从网络结构和数字技术架构2方面来阐述^[90-92]。

2.1 网络结构

目前我国传统发电系统的数字化系统网络结构主要为分布式控制系统(distributed control system, DCS)、厂级监控信息系统(supervisory information system, SIS)和管理信息系统(management information system, MIS)三层架构^[91]。其中DCS为生产过程层,主要完成机组级的实时监控,实现设备实时监控与控制;SIS为监控优化层,集过程实时监测、优化控制及生产过程管理为一体,主要目标是实现生产过程的优化控制和负荷经济分配;MIS为管理服务层,主要为全厂运营、生产和行政的管理工作服务,帮助相关部门人员完成设备和维修管理、生产经营管理、财务管理及办公自动化等工作^[92]。图6是文献[93]提出的传统发电系统数字化系统的网络结构示意图。

传统的网络结构中SIS与DCS之间设置有正向物理隔离装置,这使得SIS中的一些高级应用模块如吹灰优化、负荷优化分配等只能以开环指导系统方式运行,无法与DCS的控制指令结合做闭环控制,从而限制了这些高级应用模块发挥更大的作用^[93-94]。随着互联网、大数据、云平台以

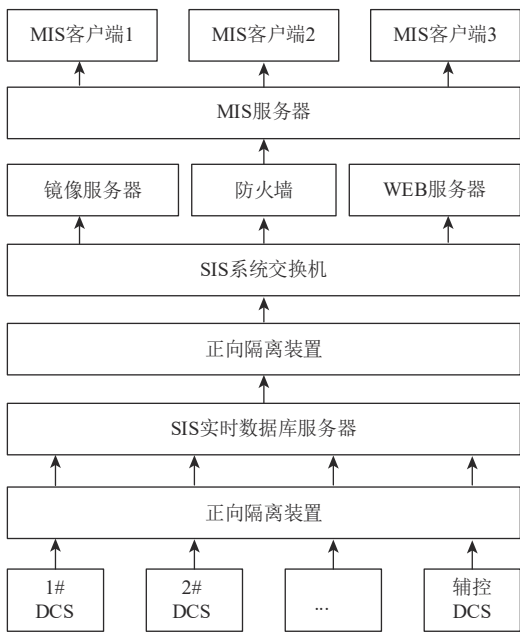


图6 传统发电系统数字化系统网络结构示意图

Fig. 6 Schematic diagram of the network structure of the digital system of the traditional power generation system

及新的安全理念和管理技术的发展，为了适应智能化管控的需求，刘吉臻等人^[2]提出了包括智能发电运行控制系统(intelligent control system, ICS)和智能发电公共服务系统(intelligent service system, ISS)的智能发电系统网络拓扑架构。在此架构中，与生产运行密切相关的生产过程层网络和监控优化层网络被统一在ICS层，具有相同的安全可靠性要求。管理服务层网络属于ISS层，主要提供巡检、设备维护、分析核算、移动应用等功能。图7是文献[2]提出的智能发电系统数字化系统网络结构示意图。

2.2 数字技术架构

发电系统数字化系统的数字技术架构可以分为感知层、融合层、应用层3个层次，图8是发电系统数字化系统的数字技术架构示意图。

2.2.1 感知层

感知层是发电系统数字化的基础环节。感知层的关键任务包括2方面：一是研究面向复杂部署环境的高适应性传感测量技术，提升传感器的自驱能力、抗干扰能力和环境适应能力，以实现覆盖发电系统全范围全方位的高渗透率智能测量感知；二是研究发电侧多物理量的宽量程多尺度传感测量技术，实现对发电侧不同时间尺度的

电气量和非电气量的精准采集^[1]。图9为感知层示意图，在实现发电侧全域高适应性测量感知以及

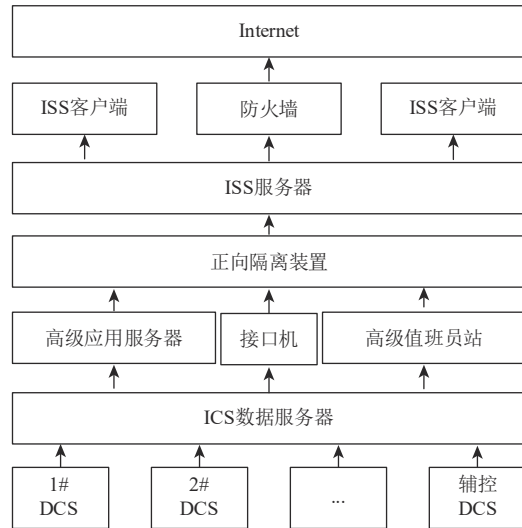


图7 智能发电系统数字化系统网络结构示意图

Fig. 7 Schematic diagram of the network structure of the digital system of the intelligent power generation system

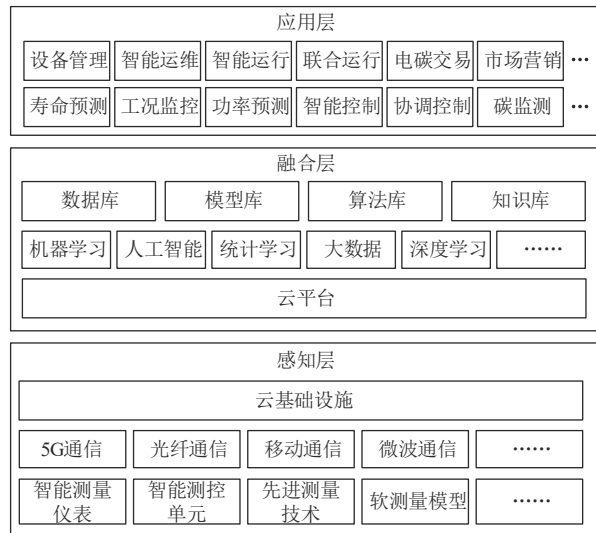


图8 发电系统数字技术架构示意图

Fig. 8 Schematic diagram of the digital technology architecture of the power generation side

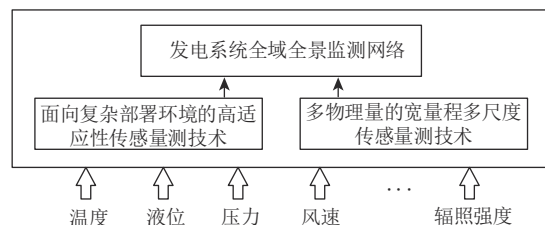


图9 感知层示意图

Fig. 9 Schematic diagram of the reading layer

不同时间尺度物理量精准采集的基础上，数据读取层最终要构建成发电侧网络化传感量测体系，建设各类电源全景监测网络，实现对发电系统物理运行过程的数字化抽象及对各类数据的精准测量与全面感知。

2.2.2 融合层

作为新型智能发电系统的大脑，融合层是发电系统数字化的关键环节。如图 10 所示，融合层的主要任务有 3 部分：一是探究发电系统多模态数据融合方法，统一各类电源业务的技术与数据格式标准，构建面向各类业务场景的数据仓库，实现发电侧全域数据资源的高效利用；二是研究发电侧融合数据多重特征表达方法，构建面向涉网业务的发电侧数据特征提取模型，提取设备的关键特征参数，精准描述各种业务场景下的电源物理形态；三是构建发电系统数据-知识协同发现模型，通过专家知识和数据驱动的融合及对知识的全面评价和动态更新，构建动态更新、协同进化的发电系统知识库、模型库和算法库。

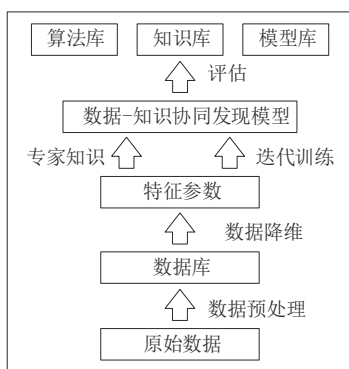


图 10 融合层示意图

Fig. 10 Schematic diagram of the fusion layer

2.2.3 应用层

应用层是发电系统数字化的最终环节。数据应用层的内容有 3 部分：一是要探究基于知识-数据协同驱动的发电侧各类型发电机、发电厂和集群电厂的数字孪生模型构建方法，实现物理实体与虚拟镜像的实时响应与动态更新；二是探究以源网互动场景业务为导向的发电系统数字镜像可视化方法，利用全域全量的数据资源构建发电系统多维数据空间，研究基于建筑信息模型和工程信息模型的发电系统数字画像构建方法，实现发

电侧多类型业务涉网数据的动态展示；三是要以数字画像和数字孪生模型为基础，针对设备全生命周期管理、智能运维、智能运行等业务需求，探究不同场景下的差异化数据服务形态，并形成数据、模型、算法、业务之间相适配相统一的发电系统数字化应用平台，以实现在不同业务中数据资源的灵活运用。图 11 是发电系统应用层示意图。

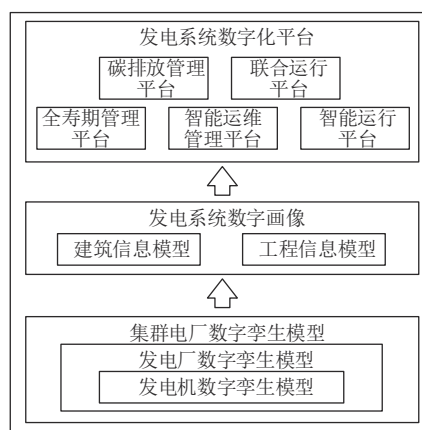


图 11 应用层示意图

Fig. 11 Schematic diagram of the application layer

3 发电系统数字化的特征及关键技术应用

3.1 发电系统数字化的特征

发电系统是电力系统的重要组成部分，因而发电系统数字化与电力系统的数字化具有相似的特征，例如宽频信号特征、多源异构特征和信息化特征，针对这些共性问题，一些应用于其他电力系统数字化的研究方法与技术也可以用在发电系统数字化的建设过程中，而发电系统数字化所独有的是更加复杂的环境特征，因此针对个性问题需要研发一些针对性的方法技术。

1) 复杂环境特征。随着发电系统数字化建设向前推进，需要在发电系统关键节点处安装各类型量测装置，然而发电环境复杂多变，特别是燃煤发电，其发电的工艺过程具有生产流程长、系统规模大、设备结构复杂、空间分布广的特点^[51]，这为量测装置的部署带来了挑战。有些需要测量温度、转速的装置更是需要安装在高温、高压、高速旋转的恶劣环境中，因此亟需研究面向复杂

部署环境的高适应性传感量测技术。

2) 宽频信号特征。目前由于新能源的大规模并网给发电系统引入了大量的电力电子设备, 电力电子设备的高频动作给发电侧注入了大量的间谐波和高次谐波等宽频信号, 而现有的量测设备主要测量的是工频信号, 无法应对宽频信号测量所提出的挑战, 因此亟需能够测量宽频信号的多物理量的宽量程多尺度传感量测技术^[95]。

3) 多源异构特征。随着智能传感技术的不断发展以及无人机、巡检机器人的广泛使用, 发电系统信息采集的范围、种类和频率不断增加, 发电系统中的数据呈现出了海量、多源、异构的特征^[96]。传统的数据挖掘方法已经无法有效应对多源异构特征带来的数据处理问题, 因此亟需能够处理多源数据的多模态数据融合与挖掘技术。

4) 信息化特征。随着无处不在的传感器、高速通信网络以及高性能分布式计算系统的广泛应用, 发电系统正在进入崭新的大数据时代^[97], 如何管理分析这些海量信息并最终指导生产、服务终端用户将是发电系统信息化的重要研究课题。研究基于实时数据交互通信的数字孪生可视化技术将会是进一步提升发电系统生产效率的重要途径。

3.2 发电系统数字化的关键技术应用

3.2.1 数据量测与感知

1) 面向复杂部署环境的高适应性传感量测

面向复杂部署环境的高适应性传感量测技术可以针对不同类型电源部署环境的复杂性和分散性, 将智能检测设备与先进检测技术相结合, 利用自驱动、高抗扰、高适应性的测量仪表和分析仪器, 实现对发电过程中环境、状态、位置等信息的全方位监测、识别与自适应处理^[2]。

智能变送器、智能执行机构、采集一体机等智能测控单元可以为系统提供多维数据^[2]。文献[98]提出一种可以实现测量级电流互感器和保护级电流互感器的自动切换的智能变送装置, 确保了发电机功率自动调节系统和分布式控制系统的可靠运行。文献[99]开发了一款叶片巡检机器人, 实现了风力发电机组叶片无人巡检功能。基于微波、激光、红外、静电、声波等先进测量技术能

够实现发电过程参数的在线检测^[2]。文献[100]设计了基于激光雷达点云数据的光伏电站智能巡检系统。文献[101]将神经网络与红外热图像结合, 实现了光伏电站的智能监测。基于机理模型和可测变量的软测量模型可以实现发电设备不可测关键状态的在线监测^[2]。文献[102]建立了基于热力学原理的燃气轮机关键部件效能软测量模型。文献[103]提出一种基于长短期记忆神经网络的软测量方法对含氮气体排放量进行预测。

当前电网的传统量测手段还是以“互感器+低压回路测控终端”为主, 安装较为复杂, 对于设备的可靠供能要求比较高^[104], 仍需进一步发展面向复杂部署环境的高适应性传感量测技术与应用。

2) 多物理量的宽量程多尺度传感量测

多物理量的宽量程多尺度传感量测技术可以实现对发电侧不同时间尺度的电气量和非电气量的精准采集, 通过先进的传感测量手段及网络通信技术, 实现对电力生产和管理过程中环境、状态等宽频信号的全方位监测、识别和多维感知。

文献[105]分析了现有测量技术的现状, 针对性地提出了宽频测量技术总体方案, 并讨论了具体实现所涉及的宽频信号范围限定、采样频率选择、数据处理机制设计、数据传输协议和同步对时等关键问题。文献[106]针对电力电子化电网电气量的宽频特征, 设计了具有宽频振荡检测、同步相量测量、宽频(间)谐波测量功能的多功能宽频测量装置, 实现了0~2 500 Hz范围内工频、非工频分量和振荡功率的全面检测, 为宽量程多尺度传感量测技术的研究做出了探索。

宽频量测技术的快速发展为一些基于宽频量测的应用提供了有效手段。文献[107]提出了一种基于新能源发电并网点宽频量测间谐波潮流计算的次/超同步振荡溯源方法, 该方法基于次同步振荡频率下间谐波潮流计算的模型和元件模型, 通过间谐波潮流计算得到各个节点的理想间谐波电压电流分布, 再将其与实际各个节点的间谐波宽频量测结果比较, 根据间谐波的潮流分布变化获得新能源发电系统次/超同步振荡的传播路径。

3.2.2 数据融合与挖掘

发电侧多模态数据融合与挖掘方法通过利用

机器学习、深度学习、大数据处理等先进技术,对电力生产与管理过程中的海量数据在数据级、特征级、决策级3个层次上进行深度融合^[101],从而实现发电侧全域数据资源的高效利用。目前的发电侧数据融合与挖掘方法主要有贝叶斯网络、Dempster-Shafer(DS)证据理论、以神经网络为代表的人工智能算法和知识图谱技术等方法。

1) 贝叶斯网络

贝叶斯网络是研究不确定性问题的重要方法之一。由于具有自然的表达方式、强大的推理能力和方便的决策机制等许多优点,贝叶斯网络在许多领域得到了广泛的应用^[108]。

在故障诊断方面,文献[109]构建了一种基于事故树分析方法的3层CME贝叶斯网络模型并解析了贝叶斯网络的故障推理过程,为维修人员的故障检查提出指导性意见。文献[110]将贝叶斯网络的理论与方法应用到水电机组故障诊断中,通过算例证明了基于贝叶斯网络的水电机组故障诊断专家系统比单纯的专家系统具有更高的准确度。在发电预测方面,文献[111]建立了光伏发电预测的DBN模型,综合考虑影响光伏发电量的多种因素来预测未来短期光伏发电量的概率分布。文献[112]提出了一种基于朴素贝叶斯的正态指数平滑法和混合滑动核密度估计的组合风电功率区间预测方法,该方法同时兼顾了功率区间预测的可靠性和准确性。在可靠性评估方面,文献[113]提出了一种基于贝叶斯网络的光伏系统可靠性评估模型,通过诊断推理和因果推理,识别出系统的薄弱环节。文献[114]建立了一种融合故障树、云模型及无标度网络的改进贝叶斯网络,将改进贝叶斯网络与时序分析方法相结合,提出一种基于改进贝叶斯网络的风电机组动态可靠性评估方法。

贝叶斯网络是基于概率框架下的一种理论,其优点是拥有坚实的数学理论基础和强大的可解释性^[108],但是贝叶斯网络的建立需要领域专家和知识工程师共同参与来给出随机变量之间的因果图,这是目前制约该技术发展的主要瓶颈^[115]。

2) DS证据理论

DS证据理论产生自20世纪60年代,DS证据理论作为一种不确定性推理方法,为决策级不确

定信息的表征与融合提供了强有力的工具,在信息融合、模式识别和决策分析等领域得到了广泛应用^[116]。

文献[117]对基于DS方法的融合模型、DS方法的算法实现,以及DS方法的拓展等方面,进行了比较全面的论述。文献[118]提出了基于修改证据源的改进方法,利用该方法对风力发电机组的齿轮箱的故障进行诊断应用,结果验证了此改进方法的有效性。文献[119]提出了一种基于改进DS证据理论的诊断方法,实例分析表明,所提方法可以有效识别机组的振动故障,具有较高的诊断准确率。

DS证据理论的优点是具有较强的理论基础,可以通过证据区间来描述证据的支持程度,对不确定和不完整信息有较好的处理能力^[101]。但是当参与合成的证据之间有较大的冲突时,无法使用该方法^[101],并且基本概率分配函数如何构造也是该方法使用时需要考虑的问题^[115]。

3) 神经网络

人工神经网络是一种通过模仿动物神经网络的行为特征进行分布式并行信息处理的数学模型。人工神经网络按其网络结构主要分为前馈型网络和反馈型网络。

文献[120]建立了风电功率预测的神经网络模型,分析了实测功率数据、不同高度的大气数据对预测结果的影响。文献[121]提出了一种基于粒子群优化BP神经网络风电机组齿轮箱故障诊断方法,测试结果验证了粒子群优化BP神经网络用于风电机组齿轮箱故障诊断的有效性和实用性。

人工神经网络的建立无需领域知识,可以直接通过数据迭代训练得到,其能充分逼近复杂的非线性关系,具有较强的鲁棒性和容错性。但是人工神经网络最大的缺点是可解释性差,目前针对提高神经网络可解释性是重要的一个研究方向^[122]。

4) 知识图谱技术

知识图谱技术是一种基于人工智能技术的知识组织和构建方法,能够从语义层面表示复杂的关联关系,知识图谱能够提供一种更好地管理和理解海量信息的能力^[123]。

文献[124]提出了风电机组故障知识的获取、表达与推理框架，并结合风电机组知识图谱和本体理论，将知识可视化展示，提高了知识查询与推理的效率。文献[125]在故障诊断分析领域引入知识图谱相关技术思想，将故障树诊断方法、故障模式及后果分析法与知识图谱的本体化表示过程和推理功能相结合，为实现知识共享通用型智能化故障诊断技术提供了一种新的可行思路。

知识图谱的优点是能够将不同来源的结构化与非结构化数据转化为统一的知识形式存储，并且实现智能化知识检索与管理，有着较好的可解释性^[93]。但是，目前知识图谱的内涵还不够清晰，已有知识图谱的使用率和重用率不高^[125-126]，这是目前该技术的一个短板。

3.2.3 数字孪生与可视化

数字孪生是一种集成多物理、多尺度、多学科属性，具有实时同步、忠实映射、高保真度特性，能够实现物理世界与信息世界交互与融合的技术手段^[127]。

发电系统数字孪生与可视化技术就是要探究基于知识-数据协同驱动的发电侧各类型发电机、发电厂和集群电厂的数字孪生模型构建方法，文献[128]系统梳理了风力发电机组数字孪生系统应具备的核心能力，研发了一套风电机组数字孪生系统，该系统可以实时、高精度表达风电机组在多种运行工况下各关键部件的动态响应特性。文献[129]利用数字孪生技术将发电厂生产经营要素和过程全息投影到集团级数据中心，构建了包括智能决策、智能监管、智能控制和智能设备的智能电厂体系架构，从而实现了数字电厂全面感知、协同优化、预警预测和科学决策的目标。

构建基于知识-数据协同驱动的发电系统数字孪生模型，能够有效推进电厂运检和管控智能化、数字化，奠定发电系统数字化转型基石，实现“数”与“智”的融合。

4 发电系统数字化亟待解决的问题

随着数据感知层量测设备和数据应用层多类型业务的爆炸式增长，新型发电系统需要对更大规模的异构数据进行采集、传输、存储和处理，

为保证新型发电系统安全、稳定、经济、可靠运行，亟需软硬件相关技术的进一步发展。目前亟待解决的问题主要有数据传输、数据安全、数据存储及数据处理等问题。

4.1 面向低延时需求场景的数据传输问题

一些对于数据有低延时、高可靠性要求的业务场景，如系统紧急切机切负荷、瞬态振荡检测和实时调频等业务，其时间尺度为毫秒级，虽然数据实时处理技术能够提供快速的计算服务，但是网络拥塞、算法复杂、数据量大等问题仍然会导致延迟^[4]。目前，这些低延时需求场景中的通信一般采用电力光纤专网，光纤通信具有低延时和高可靠性的优点，但是经济性差，对于铺设现场环境要求也比较高。相比于光纤通信，5G通信技术似乎是解决数据延迟问题的一种可行方法，其低延时特性可以提供低至1 ms的传输延迟，此外，5G通信还具有大容量和超广域覆盖的特性，这使得发电系统中海量设备的接入成为可能^[130]。因此，研究利用5G通信等相关技术来解决新型发电系统中的数据传输问题将会是发电系统数字化建设过程中的一个重点和难点。

4.2 面向恶意网络攻击的数据安全问题

随着发电系统的数字化进程逐步推进，发电系统对于信息系统的依存度将会越来越高，数据安全的重要性在整个发电系统中将会愈发凸显。数据安全问题主要是由针对发电系统的恶意网络攻击引起的，这些网络攻击具有隐蔽性强、潜伏期长、攻击代价小的特点，虽然其不能直接对发电系统的一次设备造成破坏，但是可以通过影响二次设备从而间接造成一次设备的损坏^[131]。数据安全问题除了造成发电设备的损坏，还会造成发电企业隐私数据的泄露，为企业、社会和国家造成不可挽回的损失。可以说，数据安全问题贯穿发电系统的数据感知、数据融合、数据应用全过程。目前针对分布式发电或用户侧发电资源接入电力系统的信息安全问题方面已有了一些研究^[132-133]，文献[132]分析了基于区块链的能源交易系统面临的保护和隐私保护方面的问题与挑战，并从数据层、网络层、合约层和应用层4个方面总结了现有的解决方案。文献[133]针对分布式微

电网电力交易过程中的交易信息篡改问题,提出了一种分布式微电网直接交易系统及其安全协议。但是目前针对发电侧的整体数据安全防御概念及理论框架方面的研究还有所不足。综上,研究新型发电系统中的数据安全问题以提高发电系统的安全稳定运行能力,是当前重要研究方向之一。

4.3 面向新型数据的数据存储问题

新一代数字技术的应用为数据的存储带来了全新的改变。传统的关系型数据库主要存储的是结构化数据,而随着智能传感设备的多样化,非结构化数据如图片、音视频逐渐成为需要存储的数据的重要组成部分^[134],传统数据库已不能适应新型数据的存储要求。传统数据库数据存储容量有限,关系型数据库可以有效处理TB级的数据,但当数据量从TB级上升到PB、EB级,传统数据库将很难处理。此外,传统关系型数据库还具有可扩展性差、访问耗时长^[135]的缺点。目前采用数据压缩技术可以减少数据传输量及提高存储效率,但是同时也增加了数据处理环节及计算负担,而采用分布式存储要权衡对存储空间及实时性的影响^[136]。综合来看,研究基于多存储介质的分层存储架构和基于闪存及相变存储器的主存架构成为解决数据存储问题的选择之二^[137]。

4.4 面向业务需求的数据处理问题

随着数据规模的不断增大,分析处理的时间相应地越来越长,而大数据条件下对信息处理的时效性要求越来越高^[134]。目前数据实时处理技术一般包括分布式计算技术、流处理技术和内存计算技术等。分布式计算技术是一种基于分布式存储的计算方式,主要用来解决大数据内部分布式预处理的问题^[138-139]。内存计算技术是一种基于主存架构的计算方式,主要用来实现高效的数据读取与处理以及解决在线实时计算问题。流处理是相对于批处理的一种处理模式,批处理是先存储后处理,而流处理是直接处理^[140],适用于处理实时到达、速度和规模不受控制的数据。虽然目前这些处理技术的相关研究很多,但是没有一个通用的大数据实时处理框架,各种工具实现实时处理的方法不一,支持的业务应用类型都相对有限,这导致实际应用中往往需要根据自己的业务需求

和应用场景对现有的这些技术和工具进行改造才能满足要求^[140]。综上所述,研究通用的大数据实时处理框架是解决新型发电系统中数据处理难题的关键。

5 结论

相比于传统发电系统而言,以新一代数字技术构建的新型发电系统将具备更大范围的信息感知能力,更加强大的知识挖掘能力以及更加立体的数据交互能力,发电系统的数字化建设对于支撑能源转型、助力新型电力系统构建具有重大的意义。从发电系统的业务需求出发,梳理了发电系统的数字化系统体系架构,总结了发电系统数字化建设过程中的关键技术与应用以及尚待解决的问题,得出以下结论:

1) 构建新型发电系统的基本要求是要探究面向全生命周期管理、智能运维、智能运行等多类型业务场景中对数据的需求特性,挖掘出精准描述不同类型电源及相应业务需求的电气量数据和非电气量数据。

2) 发电系统的数字技术架构分为数据感知、数据融合、数据应用3方面。感知层中的关键技术主要有高适应性的传感量测技术和宽量程多尺度的传感量测技术,融合层中的关键技术主要有贝叶斯网络、DS证据理论、神经网络和知识图谱等方法,应用层中的关键技术主要是数字孪生技术。

3) 发电系统数字化建设过程中仍然面临着许多难题,数据传输、数据安全、数据存储和数据处理方面的研究仍需进一步完善。随着5G、网络安全防御、大数据存储与实时处理等相关技术的进一步发展,数据传输、数据安全、数据存储和数据处理领域也是未来重要的研究方向。

参考文献

- [1] 李鹏, 习伟, 蔡田田, 等. 数字电网的理念、架构与关键技术[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(14): 5002-5017.
LI P, XI W, CAI T T, et al. Concept, architecture and key technologies of digital power grids[J].

- Proceedings of the CSEE, 2022, 42(14): 5002-5017.
- [2] 刘吉臻, 王庆华, 房方, 等. 数据驱动下的智能发电系统应用架构及关键技术[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(12): 3578-3587.
LIU J Z, WANG Q H, FANG F, et al. Data-driven-based application architecture and technologies of smart power generation[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(12): 3578-3587.
- [3] 白浩, 周长城, 袁智勇, 等. 基于数字孪生的数字电网展望和思考[J]. 南方电网技术, 2020, 14(8): 18-24.
BAI H, ZHOU C C, YUAN Z Y, et al. Prospect and thinking of digital power grid based on digital twin[J]. Southern Power System Technology, 2020, 14(8): 18-24.
- [4] 黄敬志, 冯国平, 黄小强, 等. 广东电网“十四五”数字化建设规划研究[J]. 南方能源建设, 2022, 9(S1): 132-138.
HUANG J Z, FENG G P, HUANG X Q, et al. Research on digital construction planning of guangdong power grid in the 14th Five Year Plan[J]. Southern Energy Construction, 2022, 9(S1): 132-138.
- [5] 陈树勇, 宋书芳, 李兰欣, 等. 智能电网技术综述[J]. 电网技术, 2009, 33(8): 1-7.
CHEN S Y, SONG S F, LI L X, et al. Survey on Smart Grid Technology[J]. Power System Technology, 2009, 33(8): 1-7.
- [6] 王骥, 文坤, 胡凯凯, 等. 新基建时代风电场智能运维技术的发展与展望[J]. 控制与信息技术, 2021(5): 6-11.
WANG D, WEN K, HU K K, et al. Development and prospect of wind power intelligent operation and maintenance technologies in the new infrastructure era [J]. Control and Information Technology, 2021(5): 6-11.
- [7] 惠慧, 李蕊, 朱逸镛, 等. 含高比例分布式光伏的配电网多目标概率规划方法[J]. 电测与仪表, 2023, 60(11): 2-10.
HUI H, LI R, ZHU Y D, et al. Multi-objective probabilistic planning method for distribution network with high proportion of distributed photovoltaic[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2023, 60(11): 2-10.
- [8] 张全斌, 周琼芳. 基于“双碳”目标的中国火力发电技术发展路径研究[J]. 发电技术, 2023, 44(2): 143-154.
ZHANG Q B, ZHOU Q F. Research on the development path of china's thermal power generation technology based on the goal of “carbon peak and carbon neutralization” [J]. Power Generation Technology, 2023, 44(2): 143-154.
- [9] 赵锐, 苏宇琦. 数字化技术在火电厂的应用探讨[J]. 信息通信, 2017(5): 290-291.
ZHAO R, SU Y Q. Discussion on the application of digital technology in thermal power plants[J]. Information & Communications, 2017(5): 290-291.
- [10] 张毅, 王德宽, 刘晓波, 等. 水电站数字化解决方案分析探讨[J]. 水电站机电技术, 2018, 41(2): 13-18.
ZHANG Y, WANG D K, LIU X B, et al. Discussion on the application of digital technology in thermal power plants[J]. Mechanical & Electrical Technique of Hydropower Station, 2018, 41(2): 13-18.
- [11] 罗昊, 王长江, 王建国. 面向数字孪生的电-气综合能源系统可用输电能力计算[J]. 电力建设, 2023, 44(11): 113-127.
LUO H, WANG C J, WANG J G. Calculation of available transmission capacity of electricity-gas integrated energy system for digital twin[J]. Electric Power Construction, 2023, 44(11): 113-127.
- [12] 刘吉臻. 智能发电是第四次工业革命的大趋势[N]. 中国能源报, 2016-07-27.
LIU J Z. Smart power generation is a major trend in the fourth industrial revolution[N]. China Energy News, 2016-07-27.
- [13] 郭楠, 贾超. 《信息物理系统白皮书(2017)》解读(下)[J]. 信息技术与标准化, 2017(5): 42-47.
GUO N, JIA C. Interpretation of “cyber-physical systems white paper(2017)” (part two) [J]. Information Technology & Standardization, 2017(5): 42-47.
- [14] 国务院国资委办公厅. 关于加快推进国有企业数字化转型工作的通知[EB/OL]. (2020-09-21)[2022-12-21]. <http://www.sasac.gov.cn/n2588020/n2588072/n2591148/n2591150/c15517908/content.html>.
General Office of the State-owned Assets Supervision and Administration Commission of the State Council. Notice on accelerating the digital transformation of state-owned enterprises[EB/OL]. (2020-09-21)[2022-12-21]. <http://www.sasac.gov.cn/n2588020/n2588072/n2591148/n2591150/c15517908/content.html>.
- [15] 刘吉臻, 胡勇, 曾德良, 等. 智能发电厂的架构及特征[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(22): 6463-6470.
LIU J Z, HU Y, ZENG D L, et al. Architecture and feature of smart power generation[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(22): 6463-6470.

- [16] 杨新民, 陈丰, 曾卫东, 等. 智能电站的概念及结构[J]. 热力发电, 2015, 44(11): 10-13.
YANG X M, CHEN F, ZENG W D, et al. Concept and structure of intelligent power stations[J]. Thermal Power Generation, 2015, 44(11): 10-13.
- [17] 华志刚, 范佳卿, 郭荣, 等. 人工智能技术在火电行业的应用探讨[J]. 中国电力, 2021, 54(7): 198-207.
HUA Z G, FAN J Q, GUO R, et al. Discussion on application of artificial intelligence technology in thermal power industry[J]. Electric Power, 2021, 54(7): 198-207.
- [18] 肖祥武, 王丰, 王晓辉, 等. 面向工业互联网的智慧电厂仿生体系架构及信息物理系统[J]. 电工技术学报, 2020, 35(23): 4898-4911.
XIAO X W, WANG F, WANG X H, et al. Bionic structure and cyber-physical system for intelligent power plant oriented to the industrial internet[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(23): 4898-4911.
- [19] 冯汉夫, 李希哲, 马力, 等. 智能化水电站体系架构的分析[J]. 西北水电, 2015(6): 76-79.
FENG H F, LI X Z, MA L, et al. Analysis on system structures of intelligent hydropower station[J]. Northwest Hydropower, 2015(6): 76-79.
- [20] 陈霄逸, 宋琳莉, 石发太, 等. 流域梯级水电站电力生产数据中心的架构设计与应用[J]. 水力发电, 2021, 47(12): 110-115.
CHEN X Y, SONG L L, SHI F T, et al. Research on the architecture design of power production data center for cascade hydropower stations[J]. Water Power, 2021, 47(12): 110-115.
- [21] 李维聪, 胡玉涛, 李伟. 基于大数据平台的智能电厂数据及系统集成方案研究[J]. 南方能源建设, 2022, 9(4): 143-149.
LI W C, HU Y T, LI W. Research on data and system integration of intelligent power plant based on big data platform[J]. Southern Energy Construction, 2022, 9(4): 143-149.
- [22] 尹峰, 陈波, 苏焯, 等. 智慧电厂与智能发电典型研究方向及关键技术综述[J]. 浙江电力, 2017, 36(10): 1-6.
YIN F, CHEN B, SU Y, et al. Discussion on typical research directions and key technologies for smart power plants and smart power generation[J]. Zhejiang Electric Power, 2017, 36(10): 1-6.
- [23] 华志刚, 郭荣, 汪勇. 燃煤智能发电的关键技术[J]. 中国电力, 2018, 51(10): 8-16.
HUA Z G, GUO R, WANG Y. Key technologies for intelligent coal-fired power generation[J]. Electric Power, 2018, 51(10): 8-16.
- [24] 房方, 张效宁, 梁栋焯, 等. 面向智能发电的数字孪生技术及其应用模式[J]. 发电技术, 2020, 41(5): 462-470.
FANG F, ZHANG X N, LIANG D Y, et al. Digital twin technology for smart power generation and its application modes[J]. Power Generation Technology, 2020, 41(5): 462-470.
- [25] 钟永洁, 纪陵, 李靖霞, 等. 虚拟电厂智慧运营管控平台系统框架与综合功能[J]. 发电技术, 2023, 44(5): 656-666.
ZHONG Y J, JI L, LI J X, et al. System framework and comprehensive functions of intelligent operation management and control platform for virtual power plant [J]. Power Generation Technology, 2023, 44(5): 656-666.
- [26] 杨新民, 曾卫东, 肖勇. 火电站智能化现状及展望[J]. 热力发电, 2019, 48(9): 1-8.
YANG X M, ZENG W D, XIAO Y. Present situation and prospect of thermal power plant intelligentization[J]. Thermal Power Generation, 2019, 48(9): 1-8.
- [27] 韩华锋, 马玉娟, 黄一志, 等. 1 000 MW级火电机组智慧电厂建设研究[J]. 中国电力, 2018, 51(10): 49-55.
HAN H F, MA Y J, HUANG Y Z, et al. Research on the construction of intelligent power plant of 1 000 MW thermal power unit[J]. Electric Power, 2018, 51(10): 49-55.
- [28] 吴辰璇, 周军, 姜国岩. 智慧风电场的建设及探讨[J]. 自动化博览, 2022, 39(4): 66-71.
WU C X, ZHOU J, JIANG G Y. Discussion on construction scheme of smart wind farms[J]. Automation Panorama, 2022, 39(4): 66-71.
- [29] 屠学伟, 郑亚锋. 智慧电厂建设探讨[J]. 自动化博览, 2019(1): 29-31.
TU X W, ZHENG Y F. Discussion on the construction of smart power plants[J]. Automation Panorama, 2019(1): 29-31.
- [30] 崔青汝, 李庚达, 牛玉广. 电力企业智能发电技术规范体系架构[J]. 中国电力, 2018, 51(10): 32-36.
CUI Q R, LI G D, NIU Y G. Architecture of the intelligent power generation technical specification for electric power enterprises[J]. Electric Power, 2018, 51(10): 32-36.
- [31] 唐勇, 刘鹤, 张力, 等. 瀑布沟电厂智慧水电建设实践[J]. 热力发电, 2019, 48(9): 156-160.
TANG Y, LIU H, ZHANG L, et al. Practice of

- intelligent hydropower construction in Pubugou hydropower plant[J]. Thermal Power Generation, 2019, 48(9): 156-160.
- [32] 卿子龙, 卿良华. 海上风电机组智慧型监控管理系统[J]. 分布式能源, 2022, 7(1): 69-73.
QING Z L, QING L H. Intelligent monitoring and management system for offshore wind turbines[J]. Distributed Energy, 2022, 7(1): 69-73.
- [33] 陈亮, 阳熹, 杨源. 智慧海上风电场的定义、架构体系和建设路径[J]. 南方能源建设, 2020, 7(3): 62-69.
CHEN L, YANG X, YANG Y. Definition, architecture and constructive route of intelligent offshore wind farm[J]. Southern Energy Construction, 2020, 7(3): 62-69.
- [34] 薛午霞. 基于大数据的光伏电站运维云平台构建与评价研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2019.
XUE W X. Research on construction and evaluation of operational and maintenance cloud platform for photovoltaic power station based on big data[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2019.
- [35] 王飞跃, 孙奇, 江国进, 等. 核能5.0: 智能时代的核电工业新形态与体系架构[J]. 自动化学报, 2018, 44(5): 922-934.
WANG F Y, SUN Q, JIANG G J, et al. Nuclear energy 5.0: new formation and system architecture of nuclear power industry in the new IT era[J]. Acta Automatica Sinica, 2018, 44(5): 922-934.
- [36] 温存. 全国首座潮光互补型智能光伏电站实现全容量并网发电[J]. 光源与照明, 2022(8): 71.
WEN C. China's first tidal-solar complementary intelligent photovoltaic power station realizes full-capacity grid-connected power generation[J]. Light Sources and Lighting, 2022(8): 71.
- [37] 黄纬邦. 基于反步滑模控制的直驱式波浪发电系统功率优化[D]. 广州: 广东工业大学, 2022.
HUANG W B. Power optimization of direct-drive wave power generation system based on backstep sliding mode control[D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2022.
- [38] 胡彬彬. 结合储能的直驱式波浪发电控制技术研究[D]. 南京: 东南大学, 2021.
HU B B. Research on direct drive wave power generation control technology combined with energy storage[D]. Nanjing: Southeast University, 2021.
- [39] 巩亮, 韩东旭, 陈峥, 等. 增强型地热系统关键技术研究现状及发展趋势[J]. 天然气工业, 2022, 42(7): 135-159.
GONG L, HAN D X, CHEN Z, et al. Research status and development trend of key technologies of enhanced geothermal systems[J]. Gas Industry, 2022, 42(7): 135-159.
- [40] 赵成澎. 数字电站一体化信息管理整合平台顶层业务架构设计及应用[D]. 北京: 华北电力大学, 2015.
ZHAO C P. Top-level business architecture design and applications of integrated information management platform of digital power plant[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2015.
- [41] 刘吉臻, 李云鹤, 宋子秋, 等. 灵活智能燃煤发电技术及评价体系[J]. 动力工程学报, 2022, 42(11): 993-1004.
LIU J Z, LI Y Z, SONG Z Q, et al. Flexible and intelligent coal-fired power generation technology and its evaluation system[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2022, 42(11): 993-1004.
- [42] 田宁. 智慧电厂顶层设计的研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2016.
Tian Ning. Research on the top level design of intelligent power plant[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2016.
- [43] 裴洪, 胡昌华, 司小胜, 等. 基于机器学习的设备剩余寿命预测方法综述[J]. 机械工程学报, 2019, 55(8): 1-13.
PEI H, HU C H, SI X S, et al. Review of machine learning based remaining useful life prediction methods for equipment[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(8): 1-13.
- [44] 毛俊超, 郑甲红, 马浩然. 2 MW风力发电机低速轴承寿命分析[J]. 机械设计与制造, 2014(2): 206-208.
MAO J C, ZHENG J H, MA H R. Low speed shaft bearing life analysis of the 2 MW wind turbine[J]. Machinery Design & Manufacture, 2014(2): 206-208.
- [45] 梁勇. 风电机组主轴轴承的疲劳寿命预测[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2013.
LIANG Y. Fatigue life prediction for wind turbine main shaft bearings[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2013.
- [46] 尚立龙. 风电机组主轴轴承疲劳寿命分析与数值模拟[D]. 北京: 华北电力大学, 2013.
SHANG L L. Analysis and numerical simulation of fatigue life of main shaft bearing in wind turbine[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2013.
- [47] 刘悦遐. 基于任务剖面的光伏逆变器寿命预测[D]. 武汉: 武汉大学, 2018.
LIU Y X. Life prediction of photovoltaic inverter based on mission profile[D]. Wuhan: Wuhan University,

- 2018.
- [48] 陈冬. 变流器功率器件疲劳失效机理与寿命评估[D]. 天津: 河北工业大学, 2020.
CHEN D. Fatigue failure mechanism and life evaluation of converter power device[D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2020.
- [49] 丁佳煜, 许昌, 葛立超, 等. 基于轴承温度模型的风电机组故障预测研究[J]. 可再生能源, 2018, 36(2): 276-282.
DING J Y, XU C, GE L C, et al. The fault prediction in wind turbine based on temperature model of bearings[J]. Renewable Energy Resources, 2018, 36(2): 276-282.
- [50] BATZEL T D, SWANSON D C. Prognostic health management of aircraft power generators[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2009, 45(2): 473-482.
- [51] 赵春晖, 胡赞响, 郑嘉乐, 等. 数据驱动的燃煤发电装备运行工况监控——现状与展望[J]. 自动化学报, 2022, 48(11): 2611-2633.
ZHAO C H, HU Y Y, ZHENG J L, et al. Data-driven operating monitoring for coal-fired power generation equipment: the state of the art and challenge [J]. Acta Automatica Sinica, 2022, 48(11): 2611-2633.
- [52] KIM K Y, LEE Y J. Fault detection and diagnosis of the deaerator level control system in nuclear power plants [J]. Nuclear Engineering and Technology, 2004, 36(1): 73-82.
- [53] BARSZCZ T, CZOP P. A feedwater heater model intended for model-based diagnostics of power plant installations[J]. Applied Thermal Engineering, 2011, 31(8-9): 1357-1367.
- [54] RAKHSHANI E, SARIRI I, ROUZBEHI K. Application of data mining on fault detection and prediction in boiler of power plant using artificial neural network[C]//2009 International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives. Lisbon, Portugal: IEEE, 2009: 473-478.
- [55] QIU F X. Research and application of operation condition monitoring and fault diagnosis for thermal power units[D]. Nanjing: Southeast University, 2010.
- [56] 孙荣富, 张涛, 和青, 等. 风电功率预测关键技术及应用综述[J]. 高电压技术, 2021, 47(4): 1129-1143.
SUN R F, ZHANG T, HE Q, et al. Review on key technologies and applications in wind power forecasting [J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(4): 1129-1143.
- [57] 龚莺飞, 鲁宗相, 乔颖, 等. 光伏功率预测技术[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(4): 140-151.
GONG Y F, LU Z X, QIAO Y, et al. An overview of photovoltaic energy system output forecasting technology[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(4): 140-151.
- [58] 冯双磊, 王伟胜, 刘纯, 等. 风电场功率预测物理方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(2): 1-6.
FENG S L, WANG W S, LIU C, et al. Study on the physical approach to wind power prediction[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(2): 1-6.
- [59] MEN Z, YEE E, LIEN F S, et al. Short-term wind speed and power forecasting using an ensemble of mixture density neural networks[J]. Renewable Energy, 2016, 87(3): 129-135.
- [60] 杨茂, 张罗宾. 基于数据驱动的超短期风电功率预测综述[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(13): 171-186.
YANG M, ZHANG L B. Review on ultra-short term wind power forecasting based on data-driven approach [J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(13): 171-186.
- [61] 董志强, 郑凌蔚, 苏然, 等. 一种基于 IGWO-SNN 的光伏出力短期预测方法[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(1): 131-138.
DONG Z Q, ZHENG L W, SU R, et al. An IGWO-SNN-based method for short-term forecast of photovoltaic output[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(1): 131-138.
- [62] 苏向敬, 聂良钊, 李超杰, 等. 基于 MSTAGNN 模型的可解释海上风电场多风机出力预测[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(9): 88-98.
SU X J, NIE L Z, LI C J, et al. Power output prediction of multiple wind turbines for interpretable offshore wind farm based on multiple spatiotemporal attention graph neural network model[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(9): 88-98.
- [63] 王铮, RUI Pestana, 冯双磊, 等. 基于加权系数动态修正的短期风电功率组合预测方法[J]. 电网技术, 2017, 41(2): 500-707.
WANG Z, RUI P, FENG L, et al. Short-term wind power combination forecasting method based on dynamic coefficient updating[J]. Power System Technology, 2017, 41(2): 500-707.
- [64] 牛晨光, 游晓科, 赵震云, 等. 风电场发电功率短期预测组合模型研究[J]. 华北电力大学学报, 2012, 39(3): 29-34.

- NIU C G, YOU X K, ZHAO Z Y, et al. Study on the combination model of short-term wind power generation prediction[J]. Journal of North China Electric Power University, 2012, 39(3): 29-34.
- [65] 王雨, 苏适, 严玉廷. 基于 Kalman 滤波和 BP 神经网络的光伏超短期功率预测模型[J]. 电气技术, 2014(1): 42-46.
- WANG Y, SU S, YAN Y T. Very short-term PV power forecasting model based on Kalman filter algorithm and BP neural network[J]. Electrical Engineering, 2014(1): 42-46.
- [66] 祝国强, 朱琳非, 张叶, 等. 光伏发电伺服系统数字动态面智能控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(17): 6347-6357.
- ZHU G Q, ZHU L F, ZHANG Y, et al. Digital dynamic surface intelligent control strategy of photovoltaic power generation servo system[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(17): 6347-6357.
- [67] 李欣, 张明明, 杨洪磊. 张力腿漂浮式风电机组疲劳载荷智能控制研究[J]. 太阳能学报, 2020, 41(9): 278-286.
- LI X, ZHANG M M, YANG H L. Numerical investigation of smart fatigue load control on tension leg platform floating wind turbine[J]. Acta Energetica Sinica, 2020, 41(9): 278-286.
- [68] 苑晨阳, 李静, 陈健云, 等. 大型风电机组变桨距 ABC-PID 控制研究[J]. 太阳能学报, 2019, 40(10): 3002-3008.
- YUAN C Y, LI J, CHEN J Y, et al. Research on abc-pid pitch control of large-scale wind turbines[J]. Acta Energetica Sinica, 2019, 40(10): 3002-3008.
- [69] 林俐, 谢永俊, 朱晨宸, 等. 基于优先顺序法的风电场限出力有功控制策略[J]. 电网技术, 2013, 37(4): 960-966.
- LIN L, XIE Y J, ZHU C C, et al. Priority list-based output-restricted active power control strategy for wind farms[J]. Power System Technology, 2013, 37(4): 960-966.
- [70] 罗剑波, 陈永华, 刘强. 大规模间歇性新能源并网控制技术综述[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(22): 140-146.
- LUO J B, CHEN Y H, LIU Q. Overview of large-scale intermittent new energy grid-connected control technology[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(22): 140-146.
- [71] 卢鹏. 梯级水电站群跨电网短期联合运行及经济调度控制研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2016.
- LU P. Research on short-term optimal operation and economic dispatching of trans-provincial power cascade hydropower stations[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2016.
- [72] 行舟, 陈永华, 陈振寰, 等. 大型集群风电有功智能控制系统控制策略(一): 风电场之间的协调控制[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(20): 20-23.
- XING Z, CHEN Y H, CHEN Z H, et al. A control strategy of active power intelligent control system for large cluster of wind farms part one: coordination control for wind farms[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(20): 20-23.
- [73] 路朋, 叶林, 汤涌, 等. 基于模型预测控制的风电集群多时间尺度有功功率优化调度策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(22): 6572-6583.
- LU P, YE L, TANG Y, et al. Multi-time scale active power optimal dispatch in wind power cluster based on model predictive control[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(22): 6572-6583.
- [74] 王小龙. 光伏电站集群协调控制与监控系统研究[D]. 南京: 东南大学, 2016.
- WANG X L. Study on photovoltaic power station clustercoordination control and its monitoring system [D]. Nanjing: Southeast University, 2016.
- [75] 陈振寰, 陈永华, 行舟, 等. 大型集群风电有功智能控制系统控制策略(二): 风火电“打捆”外送协调控制[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(21): 12-15.
- CHEN Z H, CHEN Y H, XING Z, et al. A control strategy of active power intelligent control system for large cluster of wind farms part two: coordination control for shared transmission of wind power and thermal power[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(21): 12-15.
- [76] 刘吉臻, 姚琦, 柳玉, 等. 风火联合调度的风电场一次调频控制策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(12): 3462-3469.
- LIU J Z, YAO Q, LIU Y, et al. Wind farm primary frequency control strategy based on wind & thermal power joint control[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(12): 3462-3469.
- [77] 胡泽春, 丁华杰, 孔涛. 风电—抽水蓄能联合日运行优化调度模型[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(2): 36-41.
- HU Z C, DING H J, KONG T. A joint daily operational optimization model for wind power and pumped-storage plant[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(2): 36-41.
- [78] 李翠萍, 卓君武, 李军徽, 等. 光伏发电与风光联合

- 发电系统输出特性分析[J]. 电网与清洁能源, 2017, 33(1): 95-102.
- LI C P, ZHUO J W, LI J H, et al. Characteristic analysis of photovoltaic power generation and wind-photovoltaic joint power generation system[J]. Power System and Clean Energy, 2017, 33(1): 95-102.
- [79] 徐飞, 闵勇, 陈磊, 等. 包含大容量储热的电-热联合系统[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(29): 5063-5072.
- XU F, MIN Y, CHEN L, et al. Combined electricity-heat operation system containing large capacity thermal energy storage[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(29): 5063-5072.
- [80] 席磊, 金澄心, 李彦营, 等. 基于信息松弛的多态能源协调控制方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(9): 1-12.
- XI L, JIN C X, LI Y Y, et al. A polymorphic energy coordinated-control strategy based on information relaxation[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(9): 1-12.
- [81] 卫志农, 余爽, 孙国强, 等. 虚拟电厂的概念与发展[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(13): 1-9.
- WEI Z N, YU S, SUN G Q, et al. Concept and development of virtual power plant[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(13): 1-9.
- [82] 董文略, 王群, 杨莉. 含风光水的虚拟电厂与配电公司协调调度模型[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(9): 75-81.
- DONG W L, WANG Q, YANG L. A coordinated dispatching model for a distribution utility and virtual power plants with wind/photovoltaic/hydro generators [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(9): 75-81.
- [83] 刘星. 施耐德电气: 积极拥抱能源“产销者”时代[J]. 电气技术, 2018, 19(8): 12.
- LIU X. Schneider electric: actively embracing the era of energy “producers and sellers” [J]. Electrical Technology, 2018, 19(8): 12.
- [84] 王再闯, 陈来军, 李笑竹, 等. 基于合作博弈的产销者社区分布式光伏与共享储能容量优化[J]. 电工技术学报, 2022, 37(23): 5922-5932.
- WANG Z C, CHEN L J, LI X Z, et al. Cooperative game based on producer and marketing community distributed photovoltaic and shared energy storage capacity optimization[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(23): 5922-5932.
- [85] 段志洁, 张丽欣, 李文波, 等. 燃煤电力企业温室气体排放量量化方法对比分析[J]. 中国电力, 2014, 47(2): 120-125.
- DUAN Z J, ZHANG L X, LI W B, et al. Comparison of GHG emission quantification methods for coal-fired electric power enterprises[J]. Electric Power, 2014, 47(2): 120-125.
- [86] 文明, 胡资斌, 龙乙林, 等. 考虑碳排放惩罚因子的综合能源系统优化规划[J]. 电力科学与技术学报, 2021, 36(3): 11-18.
- WEN M, HU Z B, LONG Y L, et al. Optimal planning of integrated energy system considering carbon emission penalty factor[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2021, 36(3): 11-18.
- [87] 谭超. 燃煤电厂碳排放监测方法研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2018.
- TAN C. Study on monitoring methods of carbon emission in coal fired power plants[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2018.
- [88] 林玥廷, 李世明, 卢建刚, 等. 燃煤电厂碳排放在线监测和管理系统设计[J]. 自动化技术与应用, 2018, 37(4): 139-141.
- LIN Y T, LI S M, LU J G, et al. Design of on-line monitoring and management system for carbon emission of coal-fired power plants[J]. Techniques of Automation and Applications, 2018, 37(4): 139-141.
- [89] 周盟, 熊扬恒, 周建龙. 火电厂碳排放测试平台设计研究[J]. 计算机仿真, 2018, 35(3): 71-75.
- ZHOU M, XIONG Y H, ZHOU J L. Design of carbon emission test platform for thermal power plant [J]. Computer Simulation, 2018, 35(3): 71-75.
- [90] 中国南方电网有限责任公司. 数字电网标准框架白皮书(2022年)[R]. 中国南方电网有限责任公司, 2023.
- China Southern Power Grid Co., Ltd. Digital grid standards framework white paper (2022) [R]. China Southern Power Grid Co., Ltd., 2023.
- [91] 张伦. 数字化发电厂的设计与应用[D]. 北京: 华北电力大学, 2014.
- ZHANG L. Design and application of digital power plant[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2014.
- [92] 张晶. SIS、MIS与DCS的关系[J]. 农业与技术, 2008(1): 71-74.
- ZHANG J. The relationship of the DCS, SIS and MIS [J]. Agriculture & Technology, 2008(1): 71-74.
- [93] 张雄, 肖平, 郭贲佳, 等. 高可用厂级监控信息系统设计和应用[J]. 计算机应用与软件, 2022, 39(10): 35-41.
- ZHANG X, XIAO P, GUO L J, et al. The design and application of the high available network of

- supervisor information system[J]. *Computer Applications and Software*, 2022, 39(10): 35-41.
- [94] 侯子良. 分散控制系统(DCS)正走向衰亡[J]. *自动化博览*, 2019, 36(3): 16-18.
HOU Z L. Distributed control system will be on the wane[J]. *Automation Panorama*, 2019, 36(3): 16-18.
- [95] 樊陈, 姚建国, 常乃超, 等. 面向电力电子化电网的宽频测量技术探讨[J]. *电力系统自动化*, 2019, 43(16): 1-8.
FAN C, YAO J G, CHANG N C, et al. Discussion on wide-frequency measurement technology for power electronized power grid[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2019, 43(16): 1-8.
- [96] 牛哲文. 基于多源异构数据挖掘的电力系统运行态势感知技术研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2021.
NIU Z W. Situation awareness technology of power system operations based on multi-source heterogeneous data mining[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2021.
- [97] 赵云山, 刘焕焕. 大数据技术在电力行业的应用研究[J]. *电信科学*, 2014, 30(1): 57-62.
ZHAO Y S, LIU H H. Research on application of big data technique in electricity power industry[J]. *Telecommunications Science*, 2014, 30(1): 57-62.
- [98] 刘杰. 发电厂智能电力变送装置应用分析[J]. *山西电力*, 2021(5): 27-29.
LIU J. Application analysis of intelligent power transmission devices in power plants[J]. *Shanxi Electric Power*, 2021(5): 27-29.
- [99] 刘涛. 风电机组叶片缺陷检识机器人执行机构的研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2022.
LIU T. Research on robot actuator for wind turbine blade defect detection[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2022.
- [100] 韩虎虎, 祁鑫, 王鹤飞, 等. 基于激光雷达点云数据的光伏电站智能巡检系统[J]. *电子设计工程*, 2023, 31(4): 109-113.
HAN H H, QI X, WANG H F, et al. Intelligent inspection system of photovoltaic power station based on lidar point cloud data[J]. *Electronic Design Engineering*, 2023, 31(4): 109-113.
- [101] 孙海蓉, 周映杰. 基于散点图-AlexNet网络的光伏红外热图像识别方法[J]. *太阳能学报*, 2023, 44(1): 55-61.
SUN H R, ZHOU Y J. Photovoltaic infrared thermal image recognition method based on scatter plot-alexnet network[J]. *ACTA Energetica Solaris Sinica*, 2023, 44(1): 55-61.
- [102] 胡孟起, 肖俊峰, 吴昌兵, 等. 重型燃气轮机关键部件运行效能软测量方法研究[J]. *热力发电*, 2022, 51(7): 80-86.
HU M Q, XIAO J F, WU C B, et al. Research on soft-sensing method of critical components performance indexes for heavy duty gas turbine[J]. *Thermal Power Generation*, 2022, 51(7): 80-86.
- [103] 潘红光, 裴嘉宝, 苏涛, 等. 基于LSTM的燃煤电厂NO_x排量软测量[J]. *西安科技大学学报*, 2022, 42(2): 362-370.
PAN H G, PEI J B, SU T, et al. LSTM-based soft sensor of NO_x emissions from coal-fired power plants[J]. *Journal of Xi'an University of Science and Technology*, 2022, 42(2): 362-370.
- [104] 贺雅琪. 多源异构数据融合关键技术研究及其应用[D]. 成都: 电子科技大学, 2018.
HE Y Q. Research and applications on the key technology of multi-source heterogeneous data fusion[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2018.
- [105] 杨庆, 孙尚鹏, 司马文霞, 等. 面向智能电网的先进电压电流传感方法研究进展[J]. *高电压技术*, 2019, 45(2): 349-367.
YANG Q, SUN S P, SIMA W X, et al. Progress of advanced voltage/current sensing techniques for smart grid[J]. *High Voltage Engineering*, 2019, 45(2): 349-367.
- [106] 吴艳平, 姚建国, 常乃超, 等. 多功能宽频测量装置的设计与实现[J]. *电力系统自动化*, 2020, 44(20): 136-141.
WU Y P, YAO J G, CHANG N C, et al. Design and implementation of multi-functional wide-frequency measurement device[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2020, 44(20): 136-141.
- [107] 金标, 余一平, 樊陈, 等. 基于宽频量测间谐波潮流计算的次/超同步振荡溯源方法[J]. *电力自动化设备*, 2022, 42(8): 221-228.
JIN B, YU Y P, FAN C, et al. Tracing method of sub-/super-synchronous oscillation based on interharmonic power flow calculation of wide frequency measurement[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2022, 42(8): 221-228.
- [108] 黄友平. 贝叶斯网络研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2005.
HUANG Y P. Research on Bayesian network[D]. Beijing: Graduate School of Chinese Academy of Sciences, 2005.

- [109] 周真, 周浩, 马德仲, 等. 风电机组故障诊断中不确定性信息处理的贝叶斯网络方法[J]. 哈尔滨理工大学学报, 2014, 19(1): 64-68.
ZHOU Z, ZHOU H, MA D Z, et al. Method of Bayesian network for uncertainty information processing of wind turbines fault diagnosis[J]. Journal of Harbin University of Science and Technology, 2014, 19(1): 64-68.
- [110] 华斌, 周建中, 喻菁. 贝叶斯网络在水电机组故障诊断中的应用研究[J]. 华北电力大学学报, 2004, 31(5): 33-36.
HUA B, ZHOU J Z, YU J. Application of Bayesian networks in fault diagnosis of hydroelectric unit[J]. Journal of North China Electric Power University, 2004, 31(5): 33-36.
- [111] 董雷, 周文萍, 张沛, 等. 基于动态贝叶斯网络的光伏发电短期概率预测[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(S1): 38-45.
DONG L, ZHOU W P, ZHANG P, et al. Short-term photovoltaic output forecast based on dynamic Bayesian network theory[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(S1): 38-45.
- [112] 杨锡运, 张艳峰, 叶天泽, 等. 基于朴素贝叶斯的风电功率组合概率区间预测[J]. 高电压技术, 2020, 46(3): 1099-1108.
YANG X Y, ZHANG Y F, YE T Z, et al. Prediction of combination probability interval of wind power based on naive Bayes[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(3): 1099-1108.
- [113] 崔家文, 张春茂, 张宏彪, 等. 光伏发电系统可靠性分析的贝叶斯网络模型[J]. 分布式能源, 2016, 1(1): 47-51.
CUI J W, ZHANG C M, ZHANG H B, et al. Bayesian network model for photovoltaic power plant reliability analysis[J]. Distributed Energy, 2016, 1(1): 47-51.
- [114] 符杨, 苗育植, 黄玲玲, 等. 基于改进贝叶斯网络的风电机组动态可靠性评估[J]. 电力自动化设备, 2022, 42(11): 32-39.
FU Y, MIAO Y Z, HUANG L L, et al. Dynamic reliability evaluation of wind turbine based on improved Bayesian network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(11): 32-39.
- [115] 龙霞飞, 杨苹, 郭红霞, 等. 大型风力发电机组故障诊断方法综述[J]. 电网技术, 2017, 41(11): 3480-3491.
LONG X F, YANG P, GUO H X, et al. Review of fault diagnosis methods for large wind turbines[J]. Power System Technology, 2017, 41(11): 3480-3491.
- [116] 韩德强, 杨艺, 韩崇昭. DS证据理论研究进展及相关问题探讨[J]. 控制与决策, 2014, 29(1): 1-11.
HAN D Q, YANG Y, HAN C Z. Advances in DS evidence theory and related discussions[J]. Control and Decision, 2014, 29(1): 1-11.
- [117] 徐从富, 耿卫东, 潘云鹤. 面向数据融合的DS方法综述[J]. 电子学报, 2001, 29(3): 393-396.
XU C F, GENG W D, PAN Y H. Review of Dempster-Shafer method for data fusion[J]. Acta Electronica Sinica, 2001, 29(3): 393-396.
- [118] 陈莹莹. 基于信息融合的风力发电机组故障诊断方法[D]. 上海: 华东理工大学, 2013.
CHEN Y Y. Wind turbine fault diagnosis method based on information fusion[D]. Shanghai: East China University of Science and Technology, 2013.
- [119] 程加堂, 段志梅, 艾莉, 等. 基于QPSO-BP和改进D-S的水电机组振动故障诊断[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(19): 66-71.
CHENG J T, DUAN Z M, AI L, et al. Vibration fault diagnosis for hydroelectric generating unit based on QPSO-BP and modified D-S theory[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(19): 66-71.
- [120] 范高峰, 王伟胜, 刘纯, 等. 基于神经网络的风电功率预测[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(34): 118-123.
FAN G F, WANG W S, LIU C, et al. Wind power prediction based on artificial neural network[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(34): 118-123.
- [121] 龙泉, 刘永前, 杨勇平. 基于粒子群优化BP神经网络的风电机组齿轮箱故障诊断方法[J]. 太阳能学报, 2012, 33(1): 120-125.
LONG Q, LIU Y Q, YANG Y P. Fault diagnosis method of wind turbine gearbox based on BP neural network trained by particle swarm optimization algorithm[J]. Acta Energetica Sinica, 2012, 33(1): 120-125.
- [122] 纪守领, 李进锋, 杜天宇, 等. 机器学习模型可解释性方法、应用与安全研究综述[J]. 计算机研究与发展, 2019, 56(10): 2071-2096.
JI S L, LI J F, DU T Y, et al. Survey on techniques, applications and security of machine learning interpretability[J]. Journal of Computer Research and Development, 2019, 56(10): 2071-2096.
- [123] 乔骥, 王新迎, 闵睿, 等. 面向电网调度故障处理的知识图谱框架与关键技术初探[J]. 中国电机工程

- 学报, 2020, 40(18): 5837-5849.
- QIAO J, WANG X Y, MIN R, et al. Framework and key technologies of knowledge-graph-based fault handling system in power grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(18): 5837-5849.
- [124] 朱俊杰, 任鑫, 郝延, 等. 风电机组故障知识的获取表达与推理框架[J]. 热力发电, 2023, 52(3): 73-80.
- ZHU J J, REN X, HAO Y, et al. Acquisition, expression and reasoning framework of wind turbine fault knowledge[J]. Thermal Power Generation, 2023, 52(3): 73-80.
- [125] 黄恒琪, 于娟, 廖晓, 等. 知识图谱研究综述[J]. 计算机系统应用, 2019, 28(6): 1-12.
- HUANG H Q, YU J, LIAO X, et al. Review on knowledge graphs[J]. Computer Systems & Applications, 2019, 28(6): 1-12.
- [126] 刘鑫. 面向故障分析的知识图谱构建技术研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2019.
- LIU X. Research on knowledge graph construction technology for fault analysis[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2019.
- [127] 陶飞, 刘蔚然, 刘检华, 等. 数字孪生及其应用探索[J]. 计算机集成制造系统, 2018, 24(1): 1-18.
- TAO F, LIU W R, LIU J H, et al. Digital twin and its potential application exploration[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2018, 24(1): 1-18.
- [128] 房方, 姚贵山, 胡阳, 等. 风力发电机组数字孪生系统[J]. 中国科学: 技术科学, 2022, 52(10): 1582-1594.
- FANG F, YAO G S, HU Y, et al. Digital twin system of a wind turbine[J]. Scientia Sinica (Technologica), 2022, 52(10): 1582-1594.
- [129] 范海东. 基于数字孪生的智能电厂体系架构及系统部署研究[J]. 智能科学与技术学报, 2019, 1(3): 241-248.
- FAN H D. Research on architecture and system deployment of intelligent power plant based on digital twin[J]. Chinese Journal of Intelligent Science and Technology, 2019, 1(3): 241-248.
- [130] 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): 4015-4025.
- ZHANG N, YANG J W, WANG Y, 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): 4015-4025.
- [131] 汤奕, 陈倩, 李梦雅, 等. 电力信息物理融合系统环境中的网络攻击研究综述[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(17): 59-69.
- TANG Y, CHEN Q, LI M Y, et al. Overview on cyber-attacks against cyber physical power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(17): 59-69.
- [132] 姜顺荣, 时坤, 周勇. 基于区块链的能源交易系统的安全和隐私保护[J]. 中国矿业大学学报, 2022, 51(5): 1016-1030.
- JIANG S R, SHI K, ZHOU Y. Security and privacy protection of blockchain-based energy trading systems [J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2022, 51(5): 1016-1030.
- [133] 邱帆, 陈兰兰, 左黎明, 等. 分布式微电网直接交易系统及其安全协议[J]. 计算机应用与软件, 2020, 37(5): 327-333.
- QIU F, CHEN L L, ZUO L M, et al. Distributed microgrid direct trading system and its security protocol [J]. Computer Applications and Software, 2020, 37(5): 327-333.
- [134] 陶雪娇, 胡晓峰, 刘洋. 大数据研究综述[J]. 系统仿真学报, 2013, 25(S1): 142-146.
- TAO X J, HU X F, LIU Y. Overview of big data research[J]. Journal of System Simulation, 2013, 25(S1): 142-146.
- [135] 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 Y Q, ZHOU G L, ZHU Y L. Present status and challenges of big data processing in smart grid[J]. Power System Technology, 2013, 37(4): 927-935.
- [136] 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 Y S, LAI Y N. 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.
- [137] 金培权, 郝行军, 岳丽华. 面向新型存储的大数据存储架构与核心算法综述[J]. 计算机工程与科学, 2013, 35(10): 12-24.
- JIN P Q, HAO X J, YUE L H. A survey on storage architectures and core algorithms for big data management on new storages[J]. Computer Engineering & Science, 2013, 35(10): 12-24.
- [138] 谢清玉, 张耀坤, 李经纬. 面向智能电网的电力大

数据关键技术应用[J]. 电网与清洁能源, 2021, 37(12): 39-46.

XIE Q Y, ZHANG Y K, LI J W. Application of key technologies of power big data in smart grids[J]. Power System and Clean Energy, 2021, 37(12): 39-46.

[139] 彭小圣, 邓迪元, 程时杰, 等. 面向智能电网应用的电力大数据关键技术[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(3): 503-511.

PENG X S, DENG D Y, CHENG S J, et al. Key technologies of electric power big data and its application prospects in smart grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(3): 503-511.

[140] 孟小峰, 慈祥. 大数据管理: 概念、技术与挑战[J]. 计算机研究与发展, 2013, 50(1): 146-169.

MENG X F, CI X. Big data management: concepts, techniques and challenges[J]. Journal of Computer Research and Development, 2013, 50(1): 146-169.

收稿日期: 2023-03-13。

作者简介:



王翔宇

王翔宇(1997), 男, 硕士研究生, 研究方向为数字电网、人工智能等, wangxiangyu202202@163.com;



陈武晖

陈武晖(1974), 男, 博士, 教授, 研究方向为电力系统分析与控制, 本文通信作者, chenwuhui@tyut.edu.cn。

(责任编辑 辛培裕)