

AI 与量子技术在未来电网中的融合模式与应用展望

臧奕茗¹, 李卓潇¹, 张少春², 闫云凤³, 许永鹏¹, 刘亚东¹, 江秀臣¹

(1. 上海交通大学电气工程学院, 上海 200240; 2. 中国科学技术大学, 合肥 230026;

3. 浙江大学电气工程学院, 杭州 310027)

摘要: 人工智能(AI)与量子技术是目前战略性科技发展方向, 两种技术的结合在高精度探测、加速计算、安全通信和新型材料设计等领域有巨大发展优势, 在电力系统中展现出了广阔的应用前景。该文首先介绍了 AI 在电力系统中的应用现状, 包括电力设备监测与运维、电力系统控制与规划、电力交易与市场管理、电力电子系统和电力设备设计与制造等应用场景, 分析了 AI 技术具有的优势。然后, 从量子测量、量子计算、量子通信和量子材料 4 个方面详细阐述了量子技术在电力系统中的应用现状, 探讨了量子技术在电力参量高精度测量、电力系统快速规划与控制、电力系统安全通信和电力设备优化改进中的重要作用。接着, 从“AI+量子测量”、“AI+量子计算”、“AI+量子通信”、“AI+量子材料”4 个角度展望了 AI 与量子技术紧密融合在电力系统中的应用前景。最后, 总结了 AI 与量子技术在电力系统中结合应用所面临的挑战和未来发展方向。

关键词: 人工智能; 量子技术; 电网运行控制; 电力设备状态监测; 电力系统规划; 电力市场; 电力电子技术

Integration Mode and Application Prospects of AI and Quantum Technology in Future Power Systems

ZANG Yiming¹, LI Zhuoxiao¹, ZHANG Shaochun², YAN Yunfeng³, XU Yongpeng¹, LIU Yadong¹,
JIANG Xiuchen¹

(1. School of Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China; 2. University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China; 3. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: Artificial Intelligence (AI) and quantum technology are currently strategic scientific and technological development directions at home and abroad. Combining these two fields offers significant technical advantages in high-precision detection, accelerated computation, secure communication, and new material design, demonstrating broad application prospects in power systems. We first introduce the current applications of AI in power systems, including scenarios such as monitor and maintenance of power equipment, power system control and planning, power trading and market management, power electronics systems, and the design and manufacture of power equipment. Moreover, we analyze the advantages of AI technology. Then, we elaborate the current applications of quantum technology in power systems from four aspects: quantum measurement, quantum computing, quantum communication, and quantum materials. We explore the crucial roles of quantum technology in high-precision measurement of power parameters, rapid planning and control of power systems, secure communication in power systems, and optimization and improvement of power equipment. Next, we put forward the application prospects in the integration of AI and quantum technology in power systems from four perspectives: “AI + quantum measurement”, “AI + quantum computing”, “AI + quantum communication”, and “AI + quantum materials”. Finally, we summarize the challenges and development directions faced by the combined application of AI and quantum technology in power systems.

Key words: artificial intelligence; quantum technology; power grid operation control; power equipment condition monitoring; power system planning; electricity market; power electronics technology

0 引言

电力系统作为现代社会的重要基础能源设施,

其稳定性和效率对社会的发展至关重要。人工智能(AI)技术与量子技术是目前工业界、学术界研究的两个热点方向, 在社会生活和工业领域都展现出广阔的应用前景。但目前关于 AI 技术和量子技术在能源电力方面的结合应用研究仍然相对较少。AI 技术具备强大的数据处理和学习能力, 结合量子技

术的高精度探测、高速度运算与高保密度通信的优势,将在电力系统的多个领域展现出巨大的学术和工程价值,推动电力系统向更高效、更智能、更安全的方向发展。

AI 技术近年来取得了长足进展,特别是在数据处理、模式识别、预测分析和决策支持等方面。它通过模拟人类的思维过程、学习能力和决策机制,能够处理复杂的电力系统数据,进行精确的需求预测、故障检测以及优化调度。AI 的应用不仅提高了电力系统的运行效率,还为系统的智能化发展奠定了基础。

量子技术,基于量子力学原理,具备能突破经典技术基础物理极限的潜力,可实现极高的测量精度、计算速度和信息安全性。量子测量技术能够实现电磁场、电流、电压等物理量的高精度检测,适用于复杂的电力环境。量子计算则通过并行处理能力解决了传统计算在大规模优化问题中的局限性,显著加快了复杂问题的求解速度。量子通信以其理论无条件安全性为电力系统提供了前所未有的信息保密性,尤其是在面对日益复杂的网络安全威胁时,其安全性相比于传统加密方法具有独特优势。

在电力行业中,随着电网规模的不断扩大,目前电力系统面临着诸多挑战,包括电力需求波动、量测水平受限、信息安全威胁和设备性能要求高等,而 AI 与量子技术的结合为解决这些问题提供了创新的解决方案。

在数据计算方面,AI 通过深度学习和大数据分析技术,可以精确预测电力需求,结合量子计算的强大并行处理能力,可进一步优化电力调度,提高电网的运行效率和稳定性。在传感量测方面,量子传感技术利用其高灵敏度,实现对电力设备的超高精度监测,结合 AI 的故障预测模型,可以早期发现设备潜在问题,进行预防性维护,降低维护成本,提高电力系统的可靠性。在信息安全方面,量子通信技术确保了电力系统状态与控制信息的“绝对”安全传输,通过整合 AI 与量子技术,电力系统将变得更加高效、安全和智能,为未来的能源管理和电力供应提供坚实的保障。在材料设计方面,通过 AI 辅助能够提高量子材料的设计效率和准确性,促进新型量子材料在电力系统中的创新应用。

本文主要从电力 AI 技术、电力量子技术、AI+量子技术、未来挑战与展望等方面对 AI 与量子技术在电力系统中的应用提供思路和展望。

1 电力 AI 技术

AI 是一门研究如何使计算机系统表现出类似于人类智能行为的学科,其涉及深度学习和强化学习等多个领域,通过模拟人类思维过程、推理和学习能力,来实现自动化和智能化的任务执行。近年来,随着计算能力的提升和大数据的普及,AI 技术取得了显著进展,并逐步在电力系统中得到推广应用,其应用概况如图 1 所示。

深度学习是 AI 的重要分支,其通过构建多层神经网络,实现对复杂数据的处理和分析。深度学习在计算机视觉(computer vision, CV)和自然语言处理(natural language processing, NLP)领域表现尤为突出。计算机视觉主要涉及图像识别、图像分割、目标检测和图像生成等应用。计算机视觉通过模拟人类视觉系统,利用深度学习算法对图像和视频数据进行处理和分析,实现对图像内容的理解和识别。例如,卷积神经网络(convolutional neural network, CNN)作为一种基础的网络结构在图像分类、物体检测和面部识别等任务中表现出色^[1]。而最近出现的分割一切模型^[2](segment anything model, SAM)基于大规模图像语义分割数据集进行训练,在图像分割任务上,尤其是零样本分割任务上取得了令人瞩目的优异表现。

自然语言处理旨在使计算机能够理解、处理和生成人类语言。近年来,大语言模型(large language models, LLMs)的发展显著提升了 NLP 的能力。以 GPT 系列模型^[3]和 BERT^[4]为代表的大语言模型,通过大规模预训练和微调,能够处理复杂的自然语言任务,如文本生成、机器翻译和情感分析。这些模型不仅在语言理解和生成上表现优异,还在多模态数据分析和生成方面展现出广阔的应用前景。

强化学习(reinforcement learning, RL)是 AI 的另一重要分支,通过让智能体在环境中通过试错获得经验,逐步改进决策策略,以实现预定目标。强化学习在游戏、机器人控制和自动驾驶等领域取得了重要突破^[5]。深度强化学习通过结合深度神经网络进一步提升感知与决策能力^[6],使得智能体能够在复杂环境中自主学习和优化策略,实现更高效的任务执行和决策支持。下面将详细解释 AI 技术在电力系统中的应用场景。

1.1 电力设备监测与运维

随着电力系统的复杂性和规模不断增加,传统

以人为主导的电力设备监测与维护方法已难以满足现代电力系统的需求。通过引入先进的 AI 技术，尤其是计算机视觉和数据智能处理技术，电力设备监测与运维的效率与准确性得到了显著提升，其主要应用场景如图 2 所示。

1.1.1.1 计算机视觉

基于计算机视觉的智能图像识别技术在电力设备监测中起到关键作用^[7]。利用高分辨率摄像头和无人机巡检，可以对输电线路^[8]和设备^[9]进行全面的图像采集和实时监控。图像识别算法通过分析图像数据，能够准确识别输电线路上的异物^[10]与覆冰等情况^[11]。此外，图像识别技术还可以用于识别输电线路^[12]和设备的缺陷^[13]，例如导线松弛、绝缘子破损与销钉缺陷等。通过识别红外图像的热点区域，能够及时掌握设备的异常发热情况，预防因过热引起的设备故障^[14]。这些技术手段可以显著提高设备监测的精度和效率，减少因设备故障导致的电力系统运行不稳定风险。

此外，电力作业环境复杂，作业人员的行为是否规范直接关系到作业的安全性和效率，计算机视觉技术可以实现对作业人员的全方位监控和行为分析。目标检测、人体姿态估计和视频跟踪是实现这一功能的核心技术。目标检测技术可以精准识别作

业人员的安全帽、安全带等关键物体，确保作业人员符合安全着装规范^[15]。人体姿态估计技术通过识别人类的关键点，如头部、躯干、四肢等，可以分析作业人员的动作和姿态，判断是否存在危险的行为^[16]。例如，作业人员在高空作业时是否系好了安全带，是否处于不安全的姿态等。视频跟踪技术能够实现对多个作业人员的同时跟踪，记录他们的行为轨迹和相互之间的交互，分析团队协作情况，预防群体性违章行为^[17]。

基于计算机视觉的行为分析还能够预测作业人员的未来行为，通过视频理解与时空预测技术，计算机视觉系统能够分析视频序列中的时空关系，预测作业人员可能发生的危险行为，进一步提升安全管理的智能化水平^[18]。例如，通过分析作业人员的动作轨迹，系统可以预测是否会出现意外跌落、碰撞等危险情况，从而提前采取措施进行干预，预防事故发生。

三维计算机视觉技术在电力设备的数字孪生方面也展现出显著的应用潜力。通过三维重建技术，可以生成电力设备的高精度三维模型^[19]。结合计算机视觉技术，这些三维模型可以实时更新并监测设备的运行状态。例如，利用位姿估计算法处理实时采集的设备图像，可以获取电力设备实时的位置与

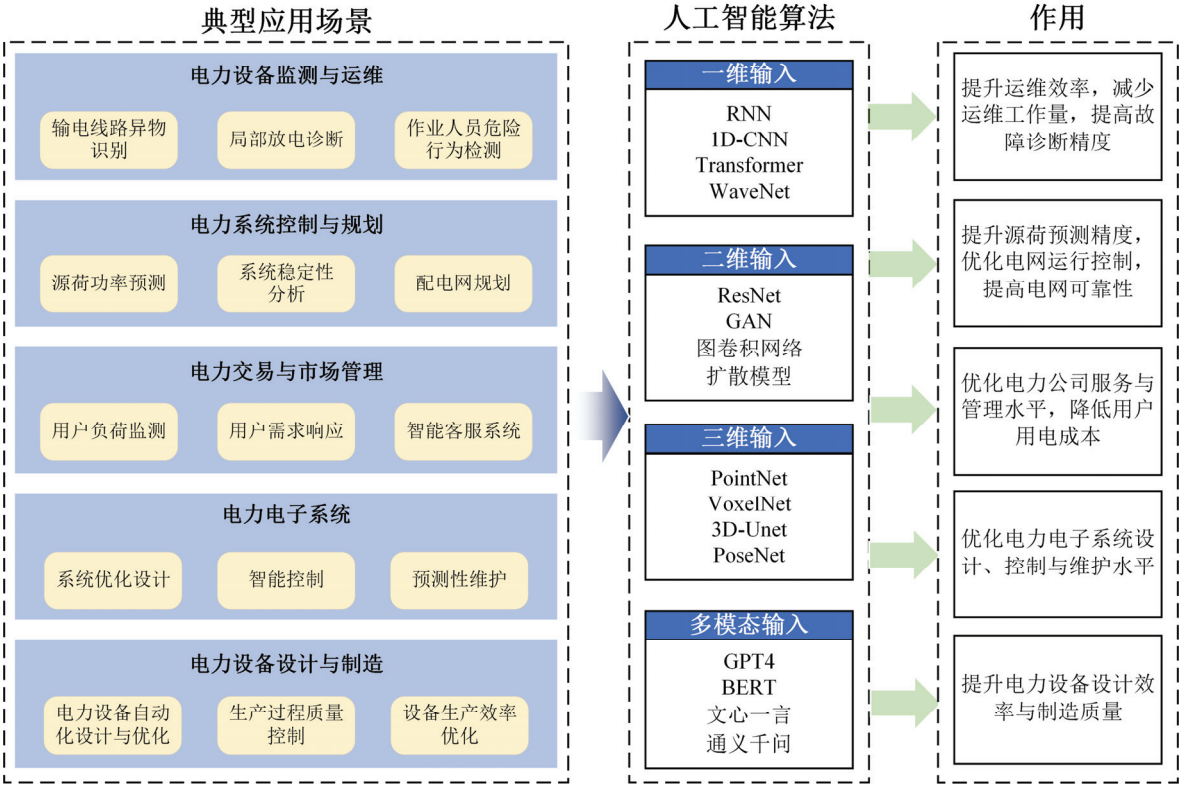


图 1 电力 AI 应用场景

Fig.1 Application scenarios of electrical artificial intelligence

姿态数据^[20], 通过与三维模型进行匹配和比对, 检测出设备的形变和位移。

随着视觉大模型(large vision models, LVMs)的兴起^[21], 电力图像的处理和分析能力得到了显著提升。与传统的小模型相比, LVMs 具有更强的特征提取和泛化能力, 能够处理更复杂和多样的图像数据, 使其逐步取代传统深度学习模型, 成为电力设备监测和维护的新基石。传统的小模型在处理输电线路和电力设备巡检图像时, 往往需要针对特定任务设计模型, 泛化性较低。相比之下, LVMs 借助其强大的泛化能力, 仅使用单个模型即可胜任大多数电力图像处理分析任务, 减少反复设计与训练模型所带来的成本。

1.1.2 数据智能处理

AI 技术在电力设备故障诊断中同样具有重要应用。电力设备在运行过程中会产生声、光、电、磁等各类信号, 传统方法难以有效建立设备运行状态与设备辐射信号的关系, 从而难以实现精准的故障诊断^[22]。而通过 AI 技术对大量故障数据进行学习和分析, 能够智能识别设备故障产生的各类状态信号。例如, 利用 AI 算法^[23], 可以在早期阶段诊断变压器、气体绝缘开关(gas-insulated switchgear, GIS)等设备内部的局部放电和异常振动现象, 从而提前预警, 避免设备损坏和停电事故的发生。此外, 利用 AI 技术分析振动信号^[24], 可以识别电动机和发电机的机械故障, 如轴承磨损、不平衡等问题, 实现设备的预防性维护。

在电力设备故障诊断领域, 电力大模型展示了其强大的应用潜力。电力大模型能够有效处理和分析来自多种模态的数据, 如图像、文本、音频等, 从而实现对设备状态的精确评估与故障诊断^[25]。通过对大量电力设备运行数据的学习和理解, 电力大模型不仅具备较高的泛化能力和逻辑推理能力, 还能在小样本数据下进行智能诊断, 有效弥补传统 AI 技术在泛化复用性和决策准确性上的不足。

1.2 电力系统控制与规划

AI 技术同样在电力系统控制与规划中展现出显著的优势和广阔的应用前景, 尤其在源荷功率预测、电网运行控制和电力系统规划等方面取得了重要进展, 概况如图 3 所示。

1.2.1 源荷功率预测

源荷功率预测是电力系统调控的关键任务之一, 包含负荷预测和新能源发电功率预测。基于长

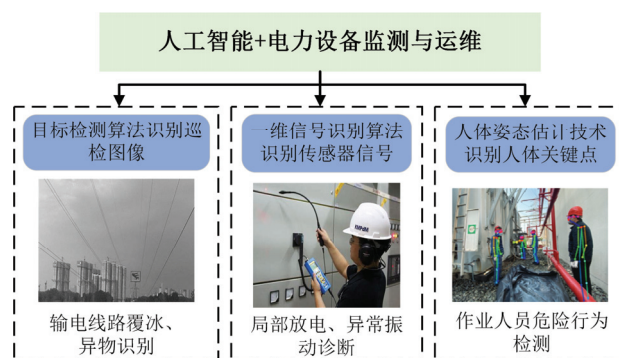


图2 AI 在电力设备监测与运维中的应用

Fig.2 Application of artificial intelligence in monitor and maintenance of electric power equipment

短时记忆网络^[26]和循环神经网络^[27]等算法, AI 模型可有效学习时序数据中的相关性特征, 从而提供精确的负荷预测。当历史数据不具参考价值时^[28], 多任务学习框架的集成智能方法可以有效应对这一挑战^[29], 通过利用多地区数据和引入用户行为轨迹等多源数据, 提高负荷预测模型的迁移泛化能力, 保障预测的准确性和可靠性。

此外, AI 技术还可通过综合分析历史数据、天气数据和其他相关信息, 准确预测未来的风电、光伏等新能源发电量^[30], 大大降低新能源发电的随机性和波动性对电网系统稳定性的影响, 有利于电网均衡运行和优化调度, 降低运行成本。

1.2.2 电网运行控制

在电网运行控制方面, AI 技术的应用主要体现在系统稳定分析上。系统稳定分析是一项代价敏感的任务, 任何不稳定状态的错判都可能导致严重后果。通过采用卷积神经网络^[31]和深度置信网络^[32]等深度学习算法, AI 技术能够高效识别电网运行中的潜在风险并进行实时预警。决定这些模型性能的关键在于故障特征量的选取与构建, 通过优化特征集, 能够显著提升模型的准确性和可靠性^[33]。

此外, AI 技术还可以通过优化无功补偿设备配置, 有效管理电力系统中的无功功率, 提高系统的电压稳定性, 降低功率损耗。例如, 模糊逻辑控制和人工神经网络结合^[34]被用来确定变压器抽头和电容器的控制策略, 优化电力系统的无功电压控制。粒子群优化算法和人工神经网络相结合的方法^[35]可以在大规模电力系统找到最优无功功率分配方案, 从而提高电力系统的效率和可靠性。此外, 还可以利用双种群遗传算法^[36]等先进优化算法, 解决

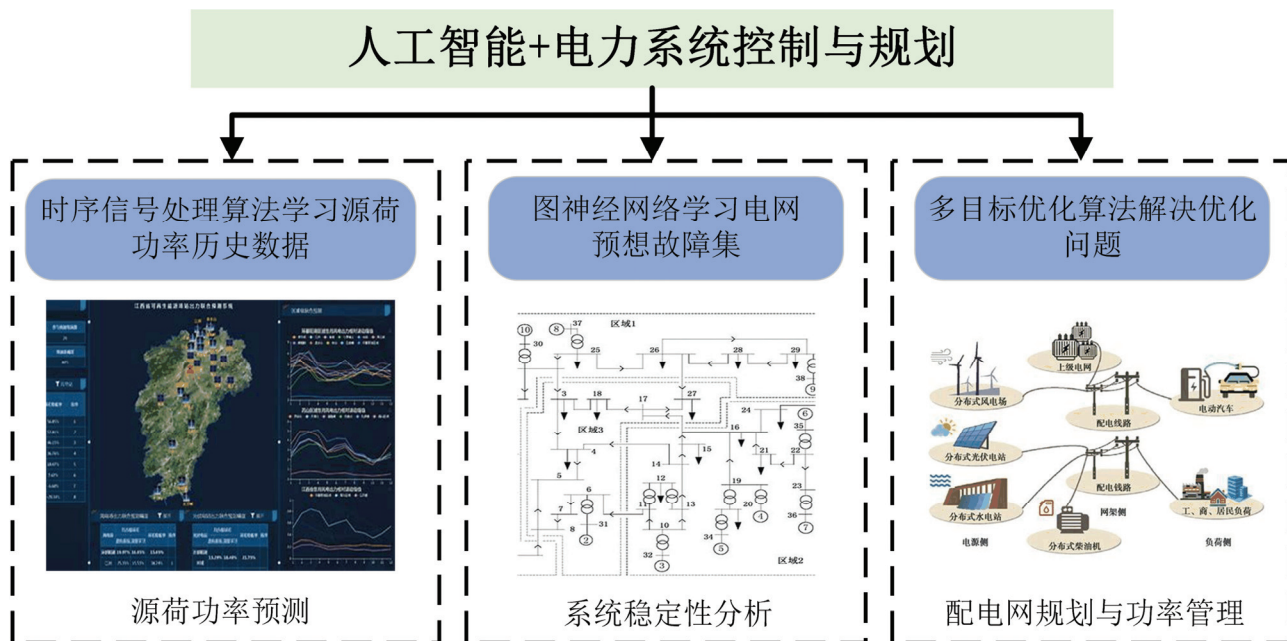


图3 AI在电力系统规划与控制中的应用

Fig.3 Application of artificial intelligence in power system planning and control

电力系统中的无功功率优化问题。传统机器学习算法如自适应萤火虫算法^[37]也被用于解决电容器优化配置问题,从而提高系统的能效和电压稳定性。此外,强化学习在电网运行控制过程中也逐渐应用并得到重视。电网运行控制是一种分级决策过程,传统的运行规则制定往往依赖于专家的经验,难以应对未来电网规模扩大、电源波动性增强和极端灾害频率增加等挑战^[38]。通过强化学习,AI系统可自主学习和优化控制策略,快速适应电网运行方式的动态变化,从而提供高效的运行方式生成方案^[39]。在标准节点电网和测试环境中,深度强化学习已取得一定成效^[40],但在真实电网中仍面临收敛速度过慢和状态空间复杂等挑战^[41],需要进一步引入知识引导等方法,提高智能体的训练效率,确保系统的安全性和可靠性。

电力大模型在电力系统运行控制中同样具有巨大的应用前景,该技术的应用正在逐步改变电力系统的传统调控模式,特别是在应对新能源接入带来的不确定性和复杂性方面。通过融合多源异构数据,电力大模型能够实现对电力系统运行状态的全局感知和智能化调控,从而提高系统的可靠性和运行效率^[42]。

1.2.3 电力系统规划

在电力系统规划方面,AI技术也展现了其技术优势,其应用范围主要包括配电网规划和无功功率

优化配置等。

人工神经网络可以对配电网中的潮流数据进行深入分析^[43],生成最优的网络设计和运行方案。此外,多目标优化算法,如遗传算法^[44]和粒子群优化^[45],能够在考虑多个优化目标的情况下,选择最优的路径和设备配置,从而降低能量损失和运行成本,提高系统的效率和稳定性。

1.3 电力交易与市场管理

AI技术在电力交易与市场管理中的应用极大地提升了电力用户的体验和电力系统的效率。通过智能化的手段,电力公司能够更加精准地监测用户负荷,并提供高效的智能客服问答服务,满足用户多样化的需求。电力需求侧也可借助AI技术优化需求响应,降低用电成本。其应用概况如图4所示。

用户负荷监测是用电管理服务中的重要环节,为电能高效调度与电网结构优化提供了重要参考依据^[46]。同时,负荷监测的结果可以帮助用户掌握用电器的运行情况与功耗等信息,为用户的合理用电提供了重要参考。AI技术通过对时序数据的处理和分析,能够实现对用户负荷的非侵入式监测^[47]。利用深度学习算法,如卷积神经网络^[48],可以准确识别用户用电设备的负荷构成和用电模式。这些算法通过分析电力消耗的时序数据^[49],能够检测到不同电器的开启和关闭状态,识别出具体设备的用电行为。相较于传统的随机森林^[50]和聚类算法^[51],深度

学习技术在处理复杂和大规模数据时具有显著优势, 能够提供更高的识别准确度和响应速度。

AI 技术在优化用户需求响应中同样发挥了重要作用, 通过深度学习和强化学习等先进算法, AI 系统可以实时分析用户的用电行为和外部激励信号, 制定最优的响应策略^[52]。例如, 多智能体强化学习算法^[53]可以模拟多个用户的交互行为, 优化电力需求分配, 提高电网的运行稳定性并降低用电成本。这些算法不仅提高了响应决策的精确性和及时性, 还能够实现分布式协同决策, 充分利用电力资源, 降低电网运行与用户用电的成本。

基于 AI 的智能客服系统^[54]可以高效识别用户的意图, 并提供准确及时的响应, 不仅大大减轻了人工客服的负担, 还显著提升了服务效率和用户满意度。通过自然语言处理技术, 智能客服系统能够理解用户的询问, 提供相关的电力服务信息和解决方案^[55]。大语言模型在这一领域表现尤为突出^[56], 能够通过大规模预训练和微调, 处理复杂的语言任务, 提供流畅的对话体验。

1.4 电力电子系统

电力电子系统广泛应用于能源转换、传输和利用中, 其性能和可靠性直接影响整个电力系统的运行效率和稳定性。AI 在电力电子技术中的应用主要涉及设计优化、智能控制和预测性维护 3 个方面, 概况如图 5 所示。

在设计优化方面, AI 技术通过其强大的数据处理和优化能力, 为电力电子系统的设计提供了新方法。传统设计方法依赖于经验和试错, 效率较低且难以应对复杂的系统需求。AI 技术通过机器学习算法, 可以对大量历史数据和模拟结果进行分析, 自动生成最优的设计方案^[57]。此外, 基于遗传算法^[58]和粒子群^[59]等算法的电力电子系统设计优化方案, 已经在散热器设计、功率模块参数优化等方面取得了显著成果。这些算法通过模拟生物进化和群体行为, 能够在广阔的搜索空间中高效地找到最优解, 显著提升了设计效率和质量。

在智能控制方面, AI 技术的引入提升了电力电子系统的控制性能和响应速度。传统的控制方法, 如 PID 控制, 虽然简单实用, 但在处理复杂的非线性系统时, 往往难以达到理想的控制效果。AI 技术, 尤其是神经网络和模糊逻辑控制^[60], 通过学习和适应系统的动态变化, 可以实现更精准和稳定的控制。例如, 循环神经网络在电力电子变换器的控制中表

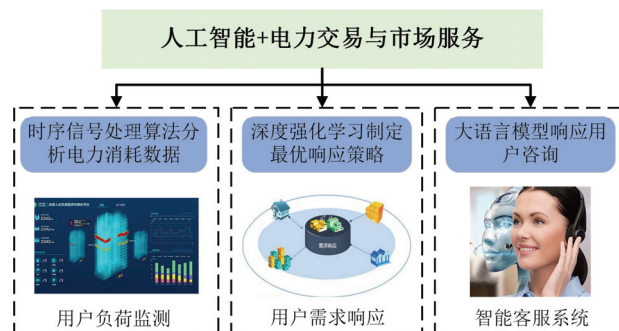


图 4 AI 在电力交易与市场管理中的应用

Fig.4 Application of artificial intelligence in power trading and market services

现出色^[61], 可以根据时序数据实时调整控制策略, 以应对负载和环境的变化。此外, 深度强化学习通过与环境的交互不断学习, 能够自适应地优化控制策略, 进一步提升了系统的鲁棒性和效率, 也在电力电子系统控制中得到广泛应用^[62]。

在预测性维护方面, AI 技术通过数据驱动的方法, 实现了对电力电子设备运行状态的实时监测和故障预测。故障诊断方面, 神经网络模型例如卷积神经网络^[63]能够有效地处理电力电子设备的高维度和复杂数据, 识别设备运行中的异常模式。除了基于神经网络的方法外, 支持向量机^[64]和关联向量机^[65]等也被用于异常检测和故障诊断。故障预测方面, 回声状态网络^[66]能够捕捉设备运行数据中的时间序列特征, 提高对设备老化趋势和潜在故障的预测能力。

1.5 电力设备设计与制造

电力设备的智能设计与制造是确保电力系统高效、安全运行的关键, AI 技术正在革命性地改变这一领域。这些技术通过优化设计方案、提高设计速度、优化生产效率、提升产品质量, 为电力设备的智能化设计与制造带来了新的进展, 概况见图 6。

首先, AI 在电力设备设计中的应用主要体现在自动化设计和优化方面。传统的电力设备设计依赖于大量的工程经验和手工操作, 容易出现设计周期长、效率低等问题。通过引入 AI 技术, 可以实现设计过程的自动化和智能化。利用机器学习算法, 设计师可以从海量的历史设计数据中提取有价值的知识和规律, 自动生成设计方案并进行优化。例如, 基于人工神经网络的设计生成模型^[67], 可以根据特定的设计要求, 寻找符合规范的电力设备结构参数, 显著提高设计效率。此外, 深度学习算法还可以对

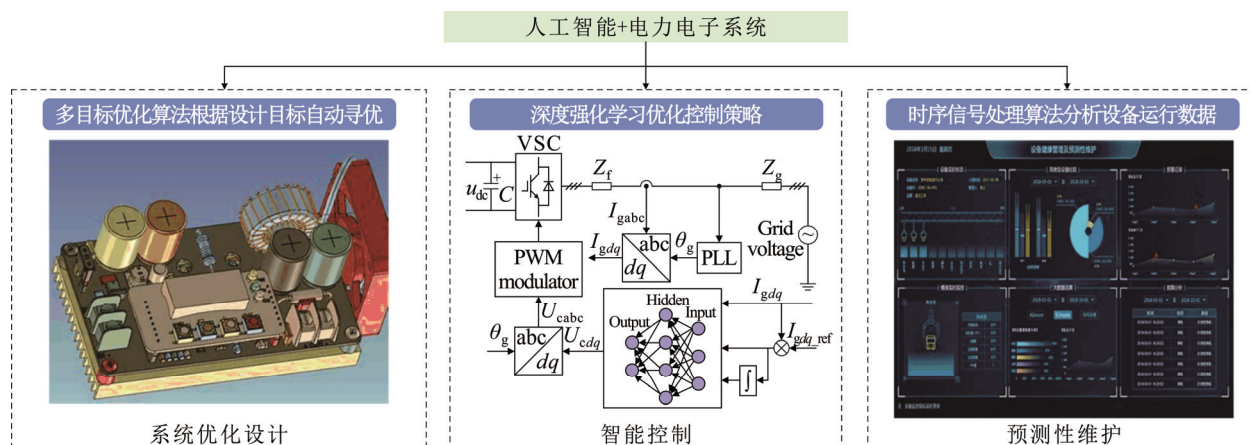


图5 AI在电力电子系统中的应用

Fig.5 Application of artificial intelligence in power electronics systems

设备的电磁场、热力学等物理场进行快速仿真和优化^[68], 确保设计的科学性和合理性。

在制造方面, AI技术同样发挥着重要作用。智能制造是实现电力设备高质量和高效生产的关键。通过引入计算机视觉技术^[69], 可以实现对制造过程的实时监控和质量控制, 及时发现和纠正制造中的缺陷。例如, 机器视觉系统可以实时检测电力设备的焊接质量、表面缺陷和装配精度, 确保每一个生产环节都符合标准。AI技术还在优化制造流程和提高生产效率方面发挥着重要作用。通过对生产数据的分析和挖掘, AI算法可以提出优化生产效率的关键建议。例如, 利用深度强化学习算法^[70], 可以优化生产线的调度和资源分配, 提高生产线的整体效率。此外, AI技术还可以应用于供应链管理^[71], 通过对供应链数据的实时分析和预测, 优化电力设备原材料的采购和库存管理, 降低生产成本。

2 电力量子技术

量子技术基于量子力学原理, 是近年来迅速发展的新兴技术, 主要包括量子测量、量子计算和量子通信、量子材料等领域。量子技术凭借其独特的量子态特性, 展现了巨大的潜力和技术优势。量子技术在电力系统中的应用概况如图7所示。

量子测量通过量子态的叠加和纠缠等特性, 可以实现对电磁场、重力场、磁场、电流电压等物理量的极高精度测量^[72]。例如, 金刚石氮空位(NV)色心作为一种新型量子传感器, 能够在纳米尺度上进行高精度的磁场和温度测量, 广泛应用于基础物理研究和高精度计量领域^[73]。

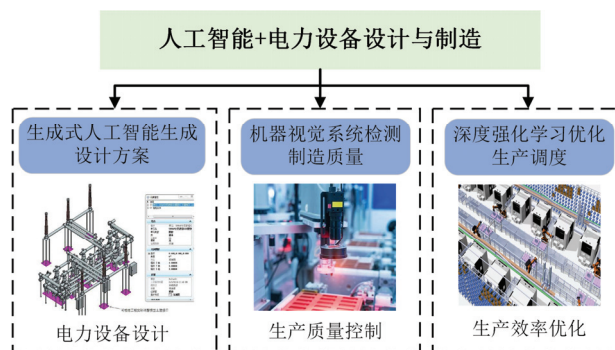


图6 AI在电力设备设计与制造中的应用

Fig.6 Application of artificial intelligence in the design and manufacture of power equipment

量子计算技术利用量子比特的叠加和纠缠特性, 在特定问题上能实现对经典计算机的指数级加速^[74]。其强大的并行计算能力能够高效解决复杂的优化问题和大规模数据处理任务, 例如 Shor 算法^[75]和 Grover 算法^[76]分别在素数分解和数据库搜索中展示了显著的速度优势。尽管量子计算机的规模和稳定性仍待发展, 但其在密码学破解、材料科学和复杂系统模拟等领域的潜力不容忽视。

量子通信技术利用量子纠缠和量子态不可克隆性, 实现无条件安全的信息传输^[77]。量子密钥分发(quantum key distribution, QKD)是其核心技术, 该技术通过量子态传输和经典信道比对生成安全密钥, 有效防止信息窃听和篡改。量子通信还包括量子中继和量子网络, 通过量子纠缠实现长距离和多节点的量子信息传输, 增强通信系统的安全性和稳定性。

量子材料是凝聚态物理领域的一大类材料, 其具有量子效应或量子关联特性, 例如超导电性能、

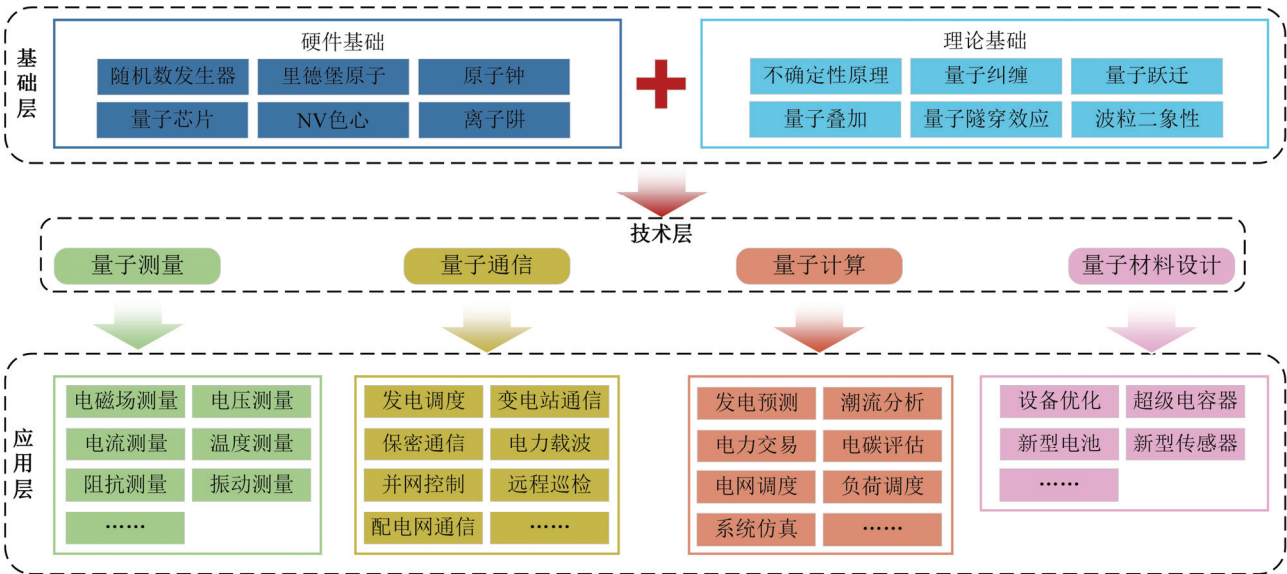


图 7 电力量子技术应用场景与技术架构

Fig.7 Application scenarios and technical architecture of power quantum technology

拓扑绝缘性等特殊属性和控制能力, 这些材料属性无法通过经典物理理论进行研究和解释, 需要通过量子力学的相关理论去支撑和了解, 对未来设备制造、传感器感知和信息处理等领域具有变革性意义。下面将详细介绍各项技术的具体内容。

2.1 量子测量

如图 8 所示, 量子传感技术在电力系统中的应用正在迅速发展, 其主要优势在于利用量子效应实现超高精度的物理量测量。传统的电力测量技术依赖于电磁原理, 已接近其物理极限。相比之下, 量子传感技术通过将物理量溯源至基本物理常数, 提供了高准确度和理论上不抵抗环境影响的测量方法。

量子传感技术在测量电气量方面展现了巨大的潜力, 电流的量子计量是其中一个重要的研究领域, 利用单电子隧道效应和电子加速器技术可实现电流量的精确测量。单电子隧道效应利用库仑岛上的单电子隧穿现象, 通过控制栅压来实现单电子传输^[78]。基于这种效应的量子电流装置能够在极低温环境下实现高精度的电流测量, 德国联邦物理技术研究院^[79]在 GaAs 异质结构中动态量子点的单电子泵中已经实现了 100 pA 量级的电流, 测量不确定性优于 2×10^{-7} 。然而, 这种技术仍需解决准确性验证和高电流强度的挑战。另一方面, 随着电子加速器控制电子束流的强度和稳定性不断提高, 也为量子电流的实现提供了新的途径^[80]。

量子电压的测量技术也在不断进步, 通过约瑟夫森效应建立的量子电压标准^[81], 实现了电压计量

从实物基准到自然基准的转变。约瑟夫森量子电压标准不仅在直流电压测量中表现出色, 还在交流电压测量中展现了广阔的应用前景^[82]。脉冲驱动型量子电压标准^[83]和可编程约瑟夫森交流量子电压标准^[84]是目前主要的两种方案, 这两种方案分别通过改变微波的频率或驱动脉冲, 合成所需的电压波形。美国 NIST^[85]、德国 PTB^[86]和中国计量科学研究院^[87]在这一领域取得了显著成果, 成功实现了高精度的交流电压合成和测量。

量子传感技术在电力设备的检测和评估中也具有重要应用。例如, 基于量子精密磁测量的新型电流传感技术能够实现对电力设备微小振动^[88]、异常发热^[89]和电磁信号^[90]的高精度检测, 及时发现设备潜在故障。使用金刚石氮空位(NV)色心体系作为量子传感器, 具有超高的磁场测量灵敏度和稳定性, 适用于电力系统复杂环境中的磁场测量^[73]。金刚石探针量子传感器在磁场探测中的灵敏度达到 $9 \times 10^{-13} \text{ T/Hz}^{1/2}$, 最高工作温度可达 600 K, 体积小、可靠性高, 尤其适用于电力系统的应用场景^[91]。

2.2 量子通信

量子通信技术, 特别是量子密钥分发(quantum key distribution, QKD), 在保障电力系统信息传输的安全性方面具有巨大潜力。量子通信技术基于量子力学的基本原理, 如测量坍缩^[92]和不可克隆性^[93], 能够提供无条件安全的通信保障, 防止信息泄露和网络攻击, 提升电力系统的信息安全性, 该技术在电力系统中的应用概况如图 9 所示。

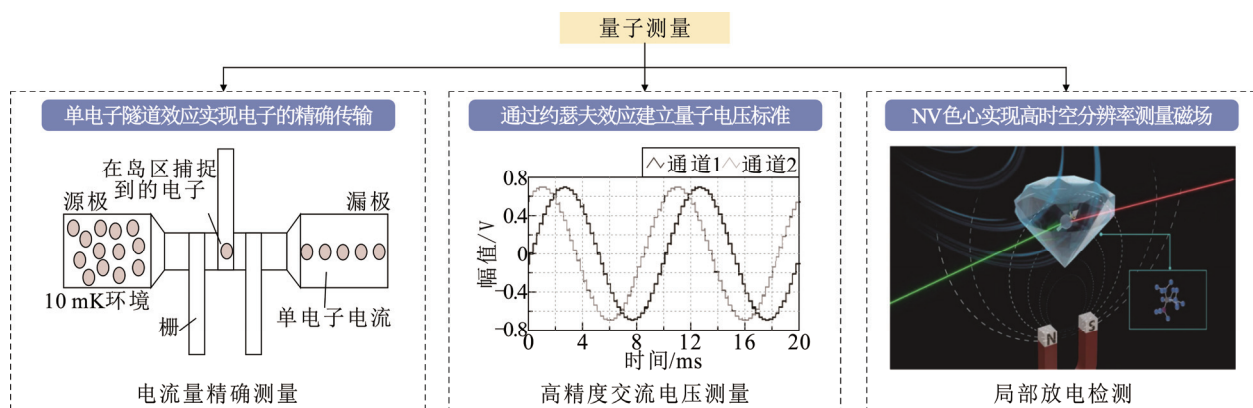


图8 量子测量在电力系统中的应用

Fig.8 Application of quantum measurement in power system

量子通信的核心在于量子密钥分发技术, QKD 通过量子态的不可克隆性和测量坍缩特性, 实现了密钥的安全生成和分发。以 BB84 协议^[94]为例, 通信双方通过量子信道传输单光子量子态, 并在经典信道上进行比对和纠错, 从而生成共享的密钥。由于量子态具有测量坍缩、不可克隆性以及量子叠加态等特性, 使得量子态在传输过程中一旦被窃听, 量子态会发生改变, 从而导致窃听行为失败, 这一特性使得 QKD 能够在理论层面提供无条件安全性。在电力系统中, QKD 可以用于加密关键数据传输, 如调度指令、监控数据和控制信号^[95], 确保这些重要信息在传输过程中的安全性。

量子通信技术在电力系统中的具体应用场景主要包括变电站、配电网和综合能源管理系统。以变电站为例^[96], 量子通信技术可以用来保障变电站监控系统的数据传输安全。传统的变电站通常采用非对称式加密等传统加密技术进行通信, 存在信息被窃取和篡改的风险。通过引入量子密钥分发技术, 变电站的控制和监控数据可以实现高安全性加密传输, 防止未经授权的访问和攻击。

在配电网领域, 量子通信技术的应用也同样重要。配电网系统需要处理大量的实时数据^[97], 包括电力负荷数据、设备状态数据和故障信息等。这些数据的安全性直接关系到电力系统的稳定运行。通过量子密钥分发技术, 配电网的数据通信可以实现高安全性的加密传输, 防止数据在传输过程中被窃取和篡改^[98]。此外, 量子通信技术还可以用于增强分布式能源系统的通信安全^[99], 确保光伏、风电等新能源设备的数据传输安全, 提升分布式能源接入电网的安全性和可靠性。

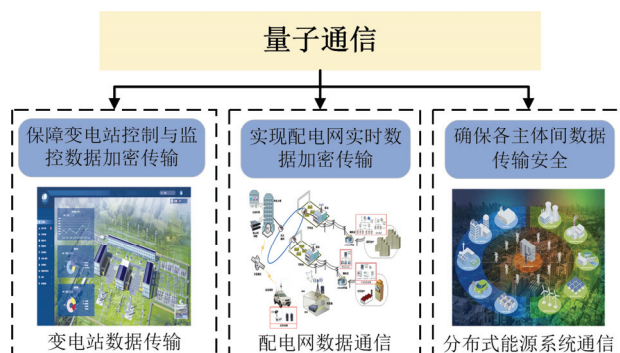


图9 量子通信在电力系统中的应用

Fig.9 Application of quantum communication in power system

量子通信技术, 尤其是量子密钥分发技术, 在信息安全领域已经实现商业化应用。近年来, 多个国家和地区已经部署了量子通信网络, 用于金融、电信和政府部门等对信息安全要求极高的领域。例如, 中国建设了全球首个覆盖较大区域的量子通信干线“京沪干线”^[100], 并正在探索将该技术应用于电力系统的信息传输和控制网络中。尽管目前的应用主要集中在高安全性领域, 但随着技术成熟和成本降低, 量子通信技术有望在电力系统中得到更广泛的应用, 确保电力调度和控制信息的高度安全性。

2.3 量子计算

如图 10 所示, 量子计算技术作为一种新兴的计算范式, 具有巨大的潜力来解决电力系统中的规划与运行控制中的计算问题。通过利用量子位计算、量子门操作和量子并行计算等量子计算特性, 可以加速电力系统中的优化问题求解、大规模数据处理和复杂模型仿真等计算任务, 为电力系统的高效运行和智能化管理提供支持。

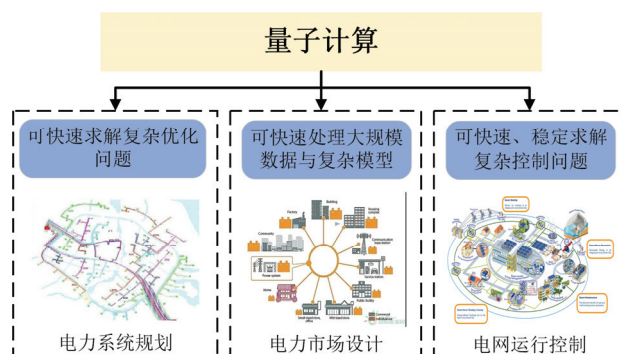


图 10 量子计算在电力系统中的应用

Fig.10 Applications of quantum computing in power systems

在电力系统中,规划与运行控制涉及到复杂的优化问题,包括电网规划、电力市场设计、能源调度和智能运行控制等方面。这些问题通常涉及到大规模线性方程组求解和复杂的计算模型,传统的计算方法往往面临着计算量大、计算时间长和解空间搜索困难等挑战。而量子计算技术的并行计算特性和量子优化算法的高效性,可以显著提升计算效率,加速问题求解过程,为电力系统的规划与运行控制提供更快速、更精确的决策支持。

量子计算技术可以用于加速电力系统的电网规划问题。电网规划涉及到电网结构设计、输电线路布局、电力设备配置等方面,需要考虑多种约束条件和优化目标,如供电可靠性、经济性和环境友好性等。传统的电网规划方法通常采用启发式算法或基于经验的优化算法,存在局部最优解和计算复杂度高的问题^[101]。而量子优化算法,如量子遗传算法^[102]、量子模拟退火算法^[103]和量子粒子群优化算法^[104]等,可以利用量子计算的并行性和量子态的高维空间搜索能力,快速寻找到全局最优解或近似最优解,提高了电网规划的效率和准确性。

量子计算技术还可以应用于加速电力系统的电力市场设计与能源调度问题。电力市场设计涉及到电力价格形成、市场交易机制设计和市场参与者行为建模等方面,需要考虑到市场的公平性、效率性和稳定性等因素。能源调度则是根据市场需求和能源供给情况,合理调配电力资源,保障电网运行的安全稳定。这些问题的求解需要大规模的数据处理和复杂的优化计算。量子计算技术可以快速高效地处理大规模数据和复杂模型,加速电力市场设计的决策过程,优化能源调度方案,提高电力系统的资源利用效率和经济性^[105]。

此外,量子计算技术还被用于加速电力系统的

智能运行控制问题。智能运行控制涉及到电网状态估计、故障检测、安全控制等方面,需要实时监测电网状态和快速响应异常情况,保障电网的安全稳定运行。传统的运行控制方法通常基于经验规则或数学建模,对实时数据处理能力和计算效率存在较高要求。随着大量新能源接入电网及海量设备的加入,电力系统规模急剧扩展,系统运行控制变得愈加复杂。而量子计算技术可以通过量子并行计算和量子优化算法快速求解电力系统控制问题^[106],有望实现电力系统的高效智能化运行控制,提高系统的实时响应能力和智能化管理水平。

量子计算的商业化进程正在加速推进,尽管目前尚处于初期阶段,但一些全球领先的科技公司已经在推动量子计算的实际应用。例如,IBM、Google 和 D-Wave 等公司已推出了商用量子计算平台^[107],允许研究人员和企业用户通过云服务访问量子计算资源。这些平台目前主要用于解决复杂的优化问题、材料科学研究以及新药研发等领域^[108]。在电力系统中,尽管大规模商业化应用尚未成熟,但初步的研究和试点项目已经显示出其巨大潜力。

2.4 量子材料

量子材料在电力系统中的应用为提升系统性能和效率提供了新的路径。基于量子反常霍尔效应的拓扑绝缘材料正处于快速发展阶段^[109],一旦该技术成熟并得到广泛应用,电力系统的诸多性能指标将产生质的飞跃。目前,集成电路芯片散热问题已成为阻碍摩尔定律持续发展的瓶颈,大量电子产品如手机、笔记本电脑甚至超级计算机,都因发热而浪费了大量电能。量子材料特别是基于量子反常霍尔效应的拓扑绝缘材料,已在研究过程中展现出显著的优势。拓扑绝缘材料^[110]由于其独特的电子态结构,可以显著降低电力电子器件的能量损耗与发热,将其应用在电力系统中可对高能耗的电力设备产生重大效益。例如,未来可通过在变压器和换流器等高功率设备中应用拓扑绝缘材料,显著降低设备运行过程中的电磁损耗,大幅度减少电能的浪费,同时提升电力设备的效率和可靠性。

此外,应用量子材料还可以显著改善电力系统的设备投资与运行寿命。电力系统能耗和发热的大幅度降低,减少了大量冷却系统或设备的安装需求,从而减少了电力系统的建设投资费用。更重要的是,量子材料的应用提高了设备的运行寿命,减少了因设备热老化导致的维护和更换的频率。这不仅降低

了运营成本，还提升了电力系统的整体经济效益。新型量子材料还在电力系统的储能设备中展现出巨大潜力。例如，基于量子点和其他纳米材料的新型电池^[11]和超级电容器^[12]，具有更高的能量密度和更快的充放电速度。这些储能设备可以显著提升电力系统的灵活性和响应速度，满足现代电网对高效、稳定储能的需求。

3 “AI+量子技术”在电力系统中的应用模式

在当今快速发展的电力系统中，AI 与量子技术的结合被认为是实现下一代智能电网的关键驱动力。这两种技术各自具有独特的技术优势和局限性，彼此之间的技术互补性使得它们的结合具有巨大的潜力。如表 1 所示，量子技术以其高精度的测量能力、强大的计算能力和无条件安全的信息传输著称，但在数据处理和实时决策方面存在挑战。另一方面，AI 技术具备强大的分析、识别和预测能力，但依赖于大规模的数据和强大的计算能力，这在面对复杂的物理系统和高维度数据时可能会面临瓶颈。

将 AI 与量子技术结合，能够充分发挥量子技术在精确测量、快速计算和安全通信中的优势，同时利用 AI 的高效数据处理和智能预测能力来解决量子技术在实际应用中的一些挑战。这种结合不仅提高了电力系统的测量精度、计算速度和通信安全性，还为电力系统的故障诊断、智能调度、设备管理等应用提供了创新的解决方案。“AI+量子技术”的结合方式与应用场景如表 2 与图 11 所示。

3.1 AI+量子测量

AI+量子测量的结合应用模式能够提高电力系统的整体测量水平。例如，精准测量局部放电现象并研究其特性对于保障电力系统的安全和可靠运行至关重要，传统的测量方法存在时空分辨率低、抗干扰能力差等问题，AI 和量子测量技术的结合为局部放电的精准测量与特性研究提供了全新的解决方案。在具体应用中，量子传感器阵列布置在电力设备关键部位，实时监测局部放电产生的信号，数据经放大和数字化处理后，传输至 AI 分析平台。平台通过深度学习算法，实时分析信号，提取局部放电特征参数，并生成诊断报告和预警信息。量子测量技术提供的高质量数据与 AI 的强大分析能力相结合，不仅提高了局部放电检测的灵敏度和准确度，还实现了对电力设备的智能化监测和维护。

通过 AI 和量子测量技术的结合，还可以实现

表 1 4 种典型量子技术发展现状概述

Table 1 Overview of the development status of 4 typical quantum technologies			
技术类别	技术路线	技术原理	技术优劣势
量子测量	金刚石 NV 色心测量磁场	利用 NV 色心在金刚石中的电子自旋状态对外部磁场变化的高敏感性，实现高精度磁场测量	优势：高灵敏度、高稳定性，适用于复杂环境 劣势：成本高，需要特殊工作环境
	单电子隧道效应测量电流	利用单电子在库仑岛上的隧穿现象，通过精确控制栅压，实现精确电流测量	优势：高精度，可测量极小电流 劣势：需要极低温环境，应用范围有限
	约瑟夫森效应测量交流电压	通过约瑟夫森结在超导体中的电子隧穿现象，实现量子化的电压基准	优势：高精度，不受环境影响 劣势：实现复杂，需要低温环境
量子通信	量子密钥分发	利用量子态不可克隆性和测量坍缩特性实现密钥的安全生成和分发，进而确保通信安全	优势：无条件安全，防止信息窃听 劣势：设备成本高，传输距离和稳定性受限
	量子并行计算	利用量子叠加和纠缠特性进行并行计算	优势：处理速度快，可解决大规模计算问题 劣势：技术尚不成熟，硬件实现困难
量子计算	量子优化算法	利用量子计算可大规模并行的特性实现优化问题的快速求解	优势：高效求解复杂优化问题 劣势：依赖于量子硬件的发展和稳定性
	量子神经网络	将量子计算与神经网络相结合，提升计算效率和模型精度	优势：学习效率高，精度高 劣势：实现复杂，依赖量子计算资源
量子材料	拓扑绝缘材料	利用拓扑绝缘材料的电子态结构降低电力设备能量损耗和发热	优势：能量损耗低，提升设备效率 劣势：材料制备复杂，开发成本高
	量子点材料	利用量子点材料的高能量密度和快速充放电特性开发新型电池	优势：能量密度高，充放电速度快 劣势：制备工艺复杂，稳定性和寿命有待提升

对局部放电微观发展过程的机理研究。量子测量技术提供高时空分辨率的放电数据，AI 技术对这些数据进行全面分析和建模，进而揭示局部放电的微观机制和宏观特征。

此外，AI 与量子测量技术的结合在其他电力系统应用场景中也具有广泛前景。例如：在智能电网中，量子传感器可以用于监测变压器和断路器的健康状态，检测早期故障迹象，进行预防性维护。AI 算法可以分析历史和实时数据，预测潜在问题，推

表2 “AI+量子技术”融合方式

Table 2 The integration method of “AI + quantum technology”

技术类别	量子技术优劣势	AI 技术优劣势	融合后的技术优势	与融合相关的核心技术
量子计算	优势: 高效并行处理, 解决复杂优化问题 劣势: 对大规模数据处理能力有限	优势: 优化算法、深度学习在大规模数据处理上表现突出 劣势: 计算效率有限	通过量子计算加速 AI 的深度学习、优化算法, 提升大规模数据处理速度, 可改善电力调度、故障诊断等复杂任务的计算效率	量子计算加速的神经网络与优化算法
量子测量	优势: 高精度物理量测量 劣势: 稳定性弱、易受外部干扰	优势: 可通过强大的数据分析和模式识别能力消除测量数据干扰噪声	结合量子传感器生成的高精度数据与 AI 去噪算法, 提高量子测量系统的稳定性与抗干扰能力	量子传感器与 AI 去噪模型的结合, 提升量子测量稳定性
量子通信	优势: 提供无条件安全的信息传输能力 劣势: 效率和实时网络优化能力有限	优势: 具有强大的实时数据处理、流量预测和网络优化能力	通过 AI 优化量子通信网络的资源调度、流量管理, 提升量子密钥分发的效率和稳定性, 预防网络攻击	AI 驱动的量子通信网络优化, 量子密钥分发与 AI 通信安全检测融合
量子材料	优势: 提供如超导、拓扑绝缘等独特的性质 劣势: 材料设计过程缓慢	优势: 利用机器学习可实现快速预测和筛选材料性能, 设计效率高	通过 AI 加速量子材料设计, 提高材料性能预测的精度和研发效率, 支持电力系统中的新型材料开发	AI 辅助的材料性能预测模型, 量子材料数据库的构建与分析

荐最佳维护方案, 从而降低意外停电的风险。另一个潜在应用是电能质量扰动的检测与缓解, 量子传感器以其高灵敏度和高精度, 能够识别电压暂降、暂升和谐波失真等电能质量问题。AI 系统可以分析这些数据, 快速定位扰动源并实时采取纠正措施, 确保电网的稳定和高效运行。在可再生能源的集成方面, AI 与量子测量技术可以优化光伏电池和风力发电机的性能。通过量子测量技术精确测量电力输出和环境条件, AI 算法可以调整运行参数以最大化效率, 并预测维护需求, 从而提高可再生能源系统

的可靠性和效率。

3.2 AI+量子计算

量子计算加速的 AI 技术结合了量子计算的高算力和 AI 的强大学习能力的优势, 在电力系统中实现快速故障诊断方面展现了巨大的潜力。传统的电网故障诊断方法通常依赖于大量的数据处理和复杂的计算模型, 面临着计算时间长、精度不足等挑战。量子计算加速的 AI 技术借助量子计算的并行处理能力和 AI 的高效数据分析能力, 可显著提升电网故障诊断的速度和准确性。

例如, 量子神经网络可以显著提高电网故障诊断模型的学习效率和诊断精度, 通过对电流、电压等传感器数据的实时分析, 量子计算加速的 AI 系统可以快速识别电力系统的异常状态, 及时发现并定位故障, 从而实现快速响应和修复, 减少因电网故障导致的停电风险。

此外, 量子计算加速的 AI 技术在电力系统调度中的应用也具有广阔的前景。电力系统调度涉及多种复杂的优化问题, 包括电力负荷预测、发电计划编制和输电网络的优化运行。传统调度方法在处理这些问题时, 往往面临计算量大、响应时间长等问题。量子计算加速的 AI 算法通过量子计算的高速并行处理能力, 能够在极短时间内处理和优化复杂的调度任务。例如, 量子计算加速的 AI 系统可以实时分析电力负荷数据和发电数据, 结合天气、市场需求等外部因素, 快速生成最优的调度方案, 确保电力系统的经济性和可靠性。此外, 量子计算加速的 AI 技术还可以用于电力系统的应急调度, 通过实时分析和预测电网状态, 快速制定应急调度方案, 确保电力供应的稳定性和可靠性。

在需求响应管理中, 量子计算加速的 AI 算法可以实时监控和分析用户的用电行为, 优化需求响应策略, 实现电力资源的高效利用和平衡调度。例如, 利用量子计算加速的深度学习算法, 可以在复杂的电力市场环境中快速找到最优的需求响应策略, 提高电网的运行稳定性并降低用户用电成本。

在电力系统的长期规划中, 量子计算加速的 AI 技术也展现出重要应用。例如, 在电力系统扩展规划中, 利用量子计算的强大并行处理能力, 可以高效解决涉及大量变量和复杂约束条件的优化问题, 如发电厂选址、输电线路规划等。结合深度强化学习算法, 可以通过模拟电力系统的长期运行, 优化系统规划策略, 提高规划的准确性和可行性。

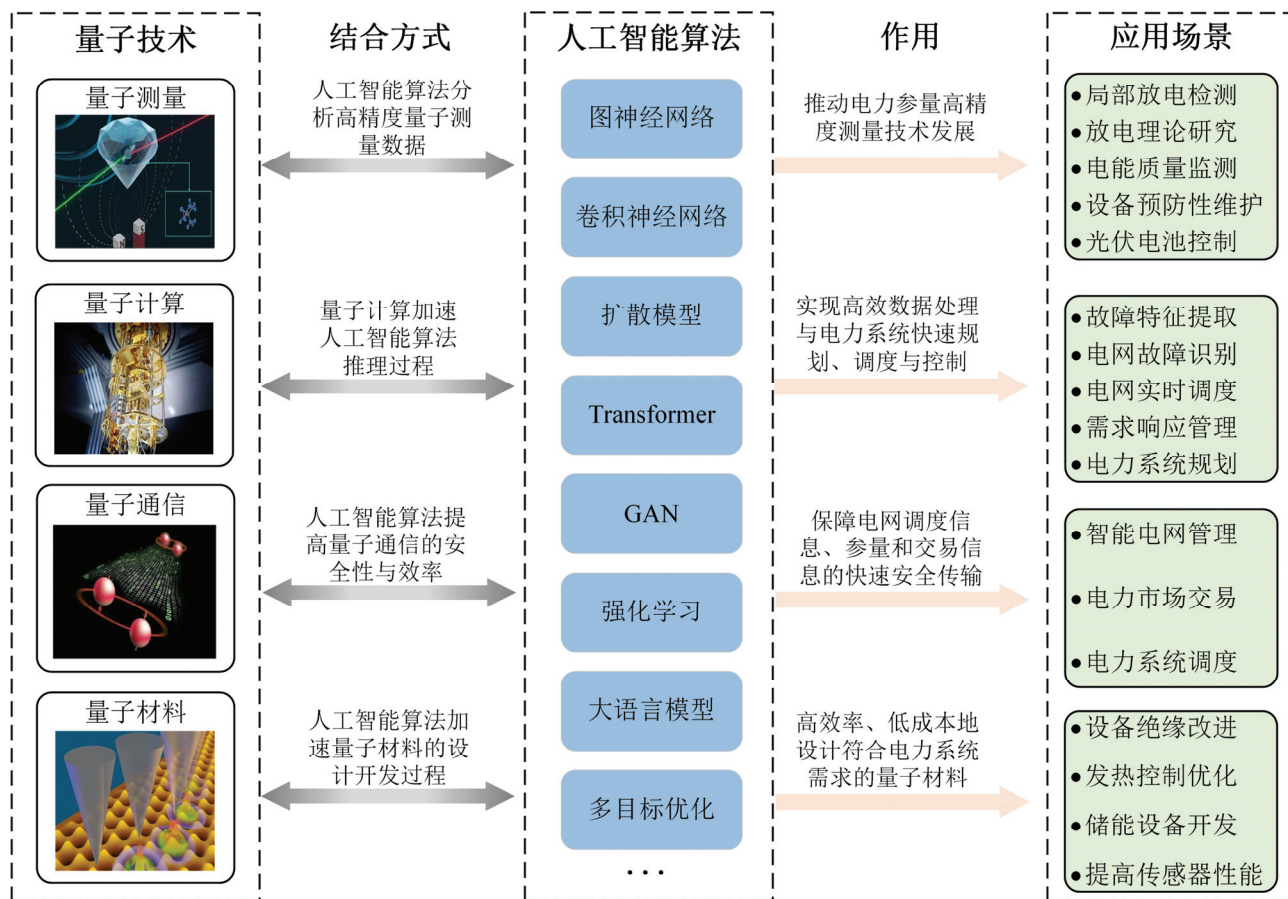


图 11 “AI+量子技术” 应用场景

Fig.11 Application scenarios of “AI + quantum technology”

量子计算加速的 AI 技术还可以应用于电力系统的设备管理和维护。通过对电力设备海量的运行数据进行实时监测和分析,结合量子计算的高速处理能力和 AI 的预测模型,可以提前发现设备的潜在故障,实现预防性维护。例如,量子计算加速的深度学习算法可以对变压器、发电机等关键设备进行健康状态评估,预测其剩余使用寿命,优化设备的检修和更换计划,降低设备故障率和维护成本。

3.3 AI+量子通信

AI 与量子通信技术的结合在电力系统中具有巨大的应用潜力,特别是在提高信息传输的安全性和效率方面,能够有效应用于电力信息传输和大数据管理等领域。量子通信利用量子力学的基本原理,能够实现无条件安全的信息传输,而通过结合 AI 技术,可以进一步提升量子通信的效率和可靠性,保证电力市场交易的安全。AI 算法可以实时监控量子通信网络的状态,检测并预防潜在的网络攻击和故障。AI 算法还能够分析历史通信数据,优化量子密钥分发的流程和策略,提高密钥生成和分发的效

率。此外, AI 算法具备预测和管理量子通信网络的流量负载的能力,通过动态调整网络资源,确保电力信息传输的稳定性和高效性。

3.4 AI+量子材料

量子材料与 AI 的结合,为设计和优化满足电力系统需求的量子材料带来了新的创新机遇和突破。机器学习与深度学习算法能够大幅加速量子材料的发现和开发过程,提高材料设计的效率和精度,从而更好地服务于电力系统的各种应用场景。

量子材料具有独特的电子态结构和物理性质,如低发热性和拓扑绝缘特性,这些特性使得量子材料在电力系统中具有广泛的应用前景。然而,传统的材料设计方法通常依赖于实验和理论计算,过程缓慢且成本高昂。AI 技术的引入,显著提升了量子材料设计的效率。AI 算法能够从大量已有的材料数据中学习材料结构与材料性能间的联系,进而实现基于新材料的结构预测新材料的性能。例如,在量子材料的具体设计过程中,可利用扩散模型生成大量候选的量子材料结构,接着通过卷积神经网络对

生成的量子材料进行快速筛选, 最终找到最符合电力系统需求的量子材料。

此外, AI 还可以用于优化量子材料的制造工艺和应用过程。通过对实验数据和工艺参数进行分析, AI 算法能够在避免大量实验的前提下找到最优的制造条件和工艺流程, 提升材料的质量和一致性。在电力系统应用中, 量子材料的高效利用也离不开 AI 的支持。通过实时监测和数据分析, AI 能够优化量子材料在电力设备中的应用策略, 最大化其性能和寿命。

4 面临挑战

4.1 量子硬件制造难

如表 3 所示, 目前量子技术的发展与应用还面临诸多困难, 例如, 量子计算和量子传感器件的硬件制造难度极高。现有的量子硬件技术依赖于极低温度和高真空环境, 制造成本和维护成本均非常高。同时, 量子比特的稳定性和相干时间也是制约量子计算性能的重要因素, 目前还难以实现长时间的稳定运行。例如, 超导量子比特需要在接近绝对零度的环境下才能保持较长的相干时间, 这对硬件设备的制造和维护提出了极高的要求。此外, 量子硬件的复杂性和脆弱性也增加了实际应用的难度。

4.2 量子传感器在电网环境中易受干扰

电力系统运行环境复杂, 电磁干扰、温度变化和机械振动等因素都会对量子传感器的稳定性和测量精度产生影响。尤其是高压电力设备中强烈的电磁场, 可能会干扰量子传感器的正常工作, 导致测量数据的不准确和系统运行的不稳定。量子传感器在这样的环境中需要具备较强的抗干扰能力, 但目前的量子传感技术还难以完全克服这些干扰问题。此外, 电力系统的运行环境变化多端, 对量子传感器的适应性提出了更高的要求。

4.3 量子计算加速的 AI 算法不成熟

量子计算加速的 AI 算法虽然在理论上展现了强大的学习与计算能力, 但在实际应用中仍然面临许多挑战。算法的稳定性、收敛性和可扩展性尚未得到充分验证, 量子计算加速的 AI 算法在大规模电力系统中的应用还需进一步研究和测试。此外, 量子计算资源的有限性也限制了这些算法在实际应用中的广泛推广。目前, 量子计算机的量子比特数和纠错能力仍处于初级阶段, 量子计算资源稀缺。现有量子计算机无法稳定地处理复杂和大规模

表 3 量子技术发展面临的困难以及发展前景

Table 3 Difficulties and prospects for the development of quantum technology

技术难点	发展前景
量子硬件制造需要极低温和高真空环境, 制造维护成本高	通过材料科学和制造工艺的突破, 逐步降低成本和环境要求, 提升制造和维护效率
量子传感器易受电磁干扰和环境变化等影响, 稳定性不足	提高抗干扰能力和环境适应性, 通过优化量子传感器设计方式和改进配套的数据处理算法, 实现更稳定的测量
量子计算资源有限, 量子计算加速的 AI 算法稳定性和收敛性有待验证	通过改进量子算法和开发经典-量子混合计算方法, 提高算法的稳定性
量子通信网络建设和维护成本高, 传输距离和稳定性需提升	通过技术创新降低建设和维护成本, 提升量子密钥分发的传输距离和稳定性, 实现量子通信广泛应用

的电力系统数据, 量子比特数的限制和相干时间的短暂性使得实际应用中可能出现计算中断和结果不准确的情况。此外, 量子计算机的高成本和维护难度也限制了其在电力系统中的广泛应用, 只有在量子计算资源进一步发展和普及的情况下, 量子计算加速的 AI 算法才能在电力系统中发挥更大作用。

4.4 量子通信网络建设与维护困难

量子通信网络需要专门的基础设施, 包括量子中继器和量子密钥分发设备等。这些设备的建设和维护成本高昂, 且在现有电力系统中部署和集成也面临诸多困难。此外, 量子通信网络的实际传输距离和稳定性仍需进一步提升, 以满足电力系统大规模应用的需求。例如, 现有的量子密钥分发设备在长距离传输中会受到信道损耗的影响, 导致密钥生成速率和传输稳定性下降。因此, 如何降低量子通信的成本、提升其传输距离和稳定性, 是迫切需要解决的重要问题。

5 结论

本文对 AI 与量子技术在未来电网中的融合模式和应用展望进行了分析, 探讨了 AI 和量子技术在电网中应用可能会面临的主要机遇和挑战, 得到以下主要结论。

1) AI 技术已经在电力领域得到广泛应用, 量子技术也已经在电力系统中得到初步验证。其中, AI 技术凭借其强大的数据处理和学习能力, 已经在电力设备监测、故障诊断、负荷预测和智能调度等方面取得显著成效。量子技术在量子测量、量子计算、量子通信和量子材料技术方面也展现出其独特

的性能优势,特别是在提高电力系统测量精度、提升电力系统调度计算速度、信息传输安全性和装备本体材料性能等方面具有出色的应用潜力。

2) AI 与量子技术的结合在电力系统中展现了广阔的应用前景。量子测量技术能够实现对电力设备的高精度检测,结合 AI 的数据处理、学习和分析能力,可以精准检测和诊断设备运行状态,提高电网运行的可靠性;量子计算技术通过其强大的并行计算能力,加快了 AI 算法的计算速度,提升了 AI 算法在电网中的运行效率和智能化水平;量子通信技术则为电力系统提供了无条件安全的信息传输手段,结合 AI 的优化策略,进一步提升了通信网络的安全性和传输效率;量子材料的研究为电力装备设计制造和电力专用传感元件制备提供了新的技术路径,将 AI 赋能量子材料的设计与研制能够加速新型量子材料的发现,提升量子材料的综合性能,加速电力装备和传感器的迭代升级。未来通过将 AI 和量子技术进一步融合,可以为电网的智能化和数字化运行提供更强大的技术支撑。

3) AI 与量子技术在未来电网中展现出了巨大潜力,但仍面临着诸多挑战。参数规模较大的 AI 算法仍存在对硬件算力的依赖,且对电力行业的适应性仍需加强;量子硬件的制造和维护难度大,成本高昂,且对电力系统复杂环境的适应性还存在提升空间;量子计算加速的 AI 算法在处理大规模电力系统数据时,还需进一步验证其稳定性、收敛性和可扩展性;量子通信网络的建设与维护成本高,实际应用中传输距离和稳定性也需进一步提升;量子材料对结构参数的设计精度要求较高,高可靠、批量化制备工艺仍需完善。综上,AI 与量子技术的结合能够互相弥补两者自身的部分劣势,提升其在电网相关领域的应用效果,是未来电网的重要发展趋势之一。

参考文献 References

- [1] LI Z W, LIU F, YANG W J, et al. A survey of convolutional neural networks: analysis, applications, and prospects[J]. IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems, 2022, 33(12): 6999-7019.
- [2] KIRILLOV A, MINTUN E, RAVI N, et al. Segment anything[C]//Proceedings of 2023 IEEE/CVF International Conference on Computer Vision. Paris, France: IEEE, 2023: 3992-4003.
- [3] OpenAI, ACHIAM J, ADLER S, et al. GPT-4 technical report[J]. arXiv preprint arXiv: 2303.08774, 2023.
- [4] DEVLIN J, CHANG M W, LEE K, et al. BERT: pre-training of deep bidirectional transformers for language understanding[C]//Proceedings of the 2019 Conference of the North American Chapter of the Association for Computational Linguistics: Human Language Technologies. Minneapolis, USA: ACL, 2018: 4171-4186.
- [5] SHAKYA A K, PILLAI G, CHAKRABARTY S. Reinforcement learning algorithms: a brief survey[J]. Expert Systems with Applications, 2023, 231: 120495.
- [6] LI S E. Deep reinforcement learning[M]//LI S E. Reinforcement Learning for Sequential Decision and Optimal Control. Singapore, Singapore: Springer, 2023: 365-402.
- [7] 周文青, 刘刚. 基于深度学习和无人机图像的架空线路缺陷巡检综述[J]. 电力工程技术, 2024, 43(2): 73-82.
ZHOU Wenqing, LIU Gang. Review of overhead line defect inspection based on deep learning and UAV images[J]. Electric Power Engineering Technology, 2024, 43(2): 73-82.
- [8] LUO Y H, YU X, YANG D S, et al. A survey of intelligent transmission line inspection based on unmanned aerial vehicle[J]. Artificial Intelligence Review, 2023, 56(1): 173-201.
- [9] LANGAKER H A, KJERKREIT H, SYVERSEN C L, et al. An autonomous drone-based system for inspection of electrical substations[J]. International Journal of Advanced Robotic Systems, 2021, 18(2): 17298814211002973.
- [10] ZHU J G, GUO Y, YUE F D, et al. A deep learning method to detect foreign objects for inspecting power transmission lines[J]. IEEE Access, 2020, 8: 94065-94075.
- [11] 马富齐, 王波, 董旭柱, 等. 面向输电线路覆冰厚度辨识的多感受野视觉边缘智能识别方法研究[J]. 电网技术, 2021, 45(6): 2161-2169.
MA Fuqi, WANG Bo, DONG Xuzhu, et al. Receptive field vision edge intelligent recognition for ice thickness identification of transmission line[J]. Power System Technology, 2021, 45(6): 2161-2169.
- [12] SOUZA B J, STEFENON S F, SINGH G, et al. Hybrid-YOLO for classification of insulators defects in transmission lines based on UAV[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2023, 148: 108982.
- [13] ULLAH I, KHAN R U, YANG F, et al. Deep learning image-based defect detection in high voltage electrical equipment[J]. Energies, 2020, 13(2): 392.
- [14] ZHOU S J, LIU J F, FAN X H, et al. Thermal fault diagnosis of electrical equipment in substations using lightweight convolutional neural network[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2023, 72: 5005709.
- [15] 王波, 张迎晨, 齐冬莲, 等. 数字化安全管控视角下的全息影像: 定义、基本框架及关键技术[J]. 高电压技术, 2023, 49(8): 3335-3345.
WANG Bo, ZHANG Yingchen, QI Donglian, et al. Holographic images for digital security control: definition, basic framework and key technologies[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(8): 3335-3345.
- [16] 李杰, 董林杰, 汤小兵, 等. 变电站二次设备全向巡检机器人精确定位与作业辨识[J]. 电力工程技术, 2024, 43(3): 234-243.
LI Jie, DONG Linjie, TANG Xiaobing, et al. Precise positioning and identification of omnidirectional inspection robot for substation secondary equipment[J]. Electric Power Engineering Technology, 2024, 43(3): 234-243.
- [17] RABBI A B K, JEELANI I. AI integration in construction safety: current state, challenges, and future opportunities in text, vision, and audio based applications[J]. Automation in Construction, 2024, 164: 105443.
- [18] NIE X S, CHEN X, JIN H Y, et al. Triplet attention transformer for spatiotemporal predictive learning[C]//Proceedings of 2024 IEEE/CVF Winter Conference on Applications of Computer Vision. Waikoloa, USA: IEEE, 2024: 7021-7030.

- [19] 姜 骞, 刘亚东, 严英杰, 等. 电力设备多源异构数据空间合成与立体展示方法[J]. 高电压技术, 2022, 48(1): 66-74.
JIANG Qian, LIU Yadong, YAN Yingjie, et al. Spatial synthesis and stereoscopic display method for multi-source heterogeneous data of power equipment[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(1): 66-74.
- [20] LUO H, WANG M Z, WONG P K Y, et al. Full body pose estimation of construction equipment using computer vision and deep learning techniques[J]. Automation in Construction, 2020, 110: 103016.
- [21] 赵振兵, 冯 烁, 席 悦, 等. 大模型时代: 电力视觉技术新起点[J]. 高电压技术, 2024, 50(5): 1813-1825.
ZHAO Zhenbing, FENG Shuo, XI Yue, et al. The era of large models: a new starting point for electric power vision technology[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(5): 1813-1825.
- [22] KRANZ H G. Diagnosis of partial discharge signals using neural networks and minimum distance classification[J]. IEEE Transactions on Electrical Insulation, 1993, 28(6): 1016-1024.
- [23] 臧奕茗, 钱 勇, 陈孝信, 等. 基于非下采样 Contourlet 变换的光电图像融合方法在 GIL 局放检测中的应用[J]. 高电压技术, 2021, 47(2): 519-528.
ZANG Yiming, QIAN Yong, CHEN Xiaoxin, et al. Application of photoelectric image fusion method based on non-subsampled Contourlet transform in GIL partial discharge detection[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(2): 519-528.
- [24] CHOUDHARY A, MISHRA R K, FATIMA S, et al. Multi-input CNN based vibro-acoustic fusion for accurate fault diagnosis of induction motor[J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2023, 120: 105872.
- [25] 江秀臣, 臧奕茗, 刘亚东, 等. 电力设备 ChatGPT 类模式与关键技术[J]. 高电压技术, 2023, 49(10): 4033-4045.
JIANG Xiuchen, ZANG Yiming, LIU Yadong, et al. Power equipment ChatGPT-type model and key technologies[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(10): 4033-4045.
- [26] KONG W C, DONG Z Y, JIA Y W, et al. Short-term residential load forecasting based on LSTM recurrent neural network[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(1): 841-851.
- [27] ABUMOHSEN M, OWDA A Y, OWDA M. Electrical load forecasting using LSTM, GRU, and RNN algorithms[J]. Energies, 2023, 16(5): 2283.
- [28] ZHONG H W, TAN Z F, HE Y L, et al. Implications of COVID-19 for the electricity industry: a comprehensive review[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2020, 6(3): 489-495.
- [29] CHEN Y Z, YANG W W, ZHANG B S. Using mobility for electrical load forecasting during the COVID-19 pandemic[J]. arXiv preprint arXiv: 2006.08826, 2020.
- [30] ZHENG J Q, DU J, WANG B H, et al. A hybrid framework for forecasting power generation of multiple renewable energy sources[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2023, 172: 113046.
- [31] 张若愚. 基于卷积神经网络的电力系统暂态稳定评估[D]. 北京: 北京交通大学, 2020.
ZHANG Ruoyu. Power system transient stability assessment based on convolutional neural networks[D]. Beijing, China: Beijing Jiaotong University, 2020.
- [32] 朱乔木, 党 杰, 陈金富, 等. 基于深度置信网络的电力系统暂态稳定评估方法[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(3): 735-743.
ZHU Qiaomu, DANG Jie, CHEN Jinfu, et al. A method for power system transient stability assessment based on deep belief networks[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(3): 735-743.
- [33] 汤 奕, 崔 晗, 李 峰, 等. 人工智能在电力系统暂态问题中的应用综述[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(1): 2-13.
TANG Yi, CUI Han, LI Feng, et al. Review on artificial intelligence in power system transient stability analysis[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(1): 2-13.
- [34] HSU Y Y, LU F C. A combined artificial neural network-fuzzy dynamic programming approach to reactive power/voltage control in a distribution substation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1998, 13(4): 1265-1271.
- [35] KANATA S, SIANIPAR G H M, MAULIDEVI N U. Optimization of reactive power and voltage control in power system using hybrid artificial neural network and particle swarm optimization[C]// Proceedings of 2018 2nd International Conference on Applied Electromagnetic Technology. Lombok, Indonesia: IEEE, 2018: 67-72.
- [36] WANG Z Y, XU Y J. A golden section-based double population genetic algorithm applied to reactive power optimization[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2021, 645(1): 012074.
- [37] OLAMAEI J, MORADI M, KABOODI T. A new adaptive modified firefly algorithm to solve optimal capacitor placement problem[C]// Proceedings of the 18th Electric Power Distribution Conference. Kermanshah, Iran: IEEE, 2013: 1-6.
- [38] 刘家庆, 徐 峥. 大电网运行控制面临的形势、问题与挑战[J]. 发电技术, 2018, 39(6): 493-498.
LIU Jiaqing, XU Zheng. The situation, problems and challenges of large power grid operation and control[J]. Power Generation Technology, 2018, 39(6): 493-498.
- [39] 孙宏斌, 黄天恩, 郭庆来, 等. 面向调度决策的智能机器调度员研制与应用[J]. 电网技术, 2020, 44(1): 1-8.
SUN Hongbin, HUANG Tianen, GUO Qinglai, et al. Automatic operator for decision-making in dispatch: research and applications[J]. Power System Technology, 2020, 44(1): 1-8.
- [40] LI Y Z, YU C F, SHAHIDEHPOUR M, et al. Deep reinforcement learning for smart grid operations: algorithms, applications, and prospects[J]. Proceedings of the IEEE, 2023, 111(9): 1055-1096.
- [41] MASSAOUDI M S, ABU-RUB H, GHAYEB A. Navigating the landscape of deep reinforcement learning for power system stability control: a review[J]. IEEE Access, 2023, 11: 134298-134317.
- [42] 张 俊, 徐 箭, 许沛东, 等. 人工智能大模型在电力系统运行控制中的应用综述及展望[J]. 武汉大学学报(工学版), 2023, 56(11): 1368-1379.
ZHANG Jun, XU Jian, XU Peidong, et al. Overview and prospect of application of artificial intelligence large model in power system operation control[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2023, 56(11): 1368-1379.
- [43] SURESH M, SIRISH T S, SUBHASHINI T V, et al. Load flow analysis of distribution system using artificial neural networks[M]. SATAPATHY S C, BHATEJA V, UDGATA S K, et al. Proceedings of the 5th International Conference on Frontiers in Intelligent Computing: Theory and Applications. Singapore, Singapore: Springer, 2017: 515-524.
- [44] GHADIRI A, HAGHIFAM M R, MIRI LARIMI S M. Comprehensive approach for hybrid AC/DC distribution network planning using genetic algorithm[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2017, 11(16): 3892-3902.
- [45] KUMARI M, SINGH V R, RANJAN R, et al. Optimal power distribution planning using improved particle swarm optimization[J]. International Journal of Intelligent Systems and Applications in Engineering, 2018, 6(3): 170-177.
- [46] HART G W. Nonintrusive appliance load monitoring[J]. Proceedings of the IEEE, 1992, 80(12): 1870-1891.

- [47] 赵 成, 宋彦辛, 周 赣, 等. 基于先验统计模型的非侵入负荷辨识算法[J]. 电力工程技术, 2024, 43(1): 165-173, 211.
ZHAO Cheng, SONG Yanxin, ZHOU Gan, et al. Resident non-invasive load identification algorithm based on prior statistical model[J]. Electric Power Engineering Technology, 2024, 43(1): 165-173, 211.
- [48] MORADZADEH A, MOHAMMADI-IVATLOO B, ABAPOUR M, et al. A practical solution based on convolutional neural network for non-intrusive load monitoring[J]. Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing, 2021, 12(10): 9775-9789.
- [49] VERMA S, SINGH S, MAJUMDAR A. Multi-label LSTM autoencoder for non-intrusive appliance load monitoring[J]. Electric Power Systems Research, 2021, 199: 107414.
- [50] WU X, GAO Y C, JIAO D. Multi-label classification based on random forest algorithm for non-intrusive load monitoring system[J]. Processes, 2019, 7(6): 337.
- [51] BARSIM K S, STREUBEL R, YANG B. An approach for unsupervised non-intrusive load monitoring of residential appliances[C]//Proceedings of the 2nd International Workshop on Non-Intrusive Load Monitoring. [S.l.]: [s.n.], 2014: 1-5.
- [52] 张 虹, 申 鑫, 穆昊源, 等. 基于 Multi-Agent 异步深度强化学习的居民住宅能耗在线优化调度研究[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(1): 117-127.
ZHANG Hong, SHEN Xin, MU Haoyuan, et al. Research on online optimal dispatching of residential energy consumption based on multi-agent asynchronous deep reinforcement learning[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(1): 117-127.
- [53] LI Q, LIAO Y X, WU K M, et al. Parallel and distributed optimization method with constraint decomposition for energy management of microgrids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2021, 12(6): 4627-4640.
- [54] 钱 奇, 张晓慧, 闫海峰. 人工智能在电力服务领域中的应用前景[J]. 能源与环保, 2021, 43(2): 83-88.
QIAN Qi, ZHANG Xiaohui, YAN Haifeng. Analysis of application prospect of artificial intelligence in power customer service center[J]. China Energy and Environmental Protection, 2021, 43(2): 83-88.
- [55] 李 刚, 张曦月, 杨 维. 基于改进 Seq2Seq 模型的电力智能客服系统设计方法研究[J]. 电力信息与通信技术, 2023, 21(8): 68-74.
LI Gang, ZHANG Xiyue, YANG Wei. Research on design method of electric power smart customer service system based on improved Seq2Seq model[J]. Electric Power Information and Communication Technology, 2023, 21(8): 68-74.
- [56] DO P, PHAN T H V. Developing a BERT based triple classification model using knowledge graph embedding for question answering system[J]. Applied Intelligence, 2022, 52(1): 636-651.
- [57] DRAGIČEVIĆ T, WHEELER P, BLAABJERG F. Artificial intelligence aided automated design for reliability of power electronic systems[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(8): 7161-7171.
- [58] WU T, WANG Z Q, OZPINECI B, et al. Automated heatsink optimization for air-cooled power semiconductor modules[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(6): 5027-5031.
- [59] ZHANG J, SHI Y, ZHAN Z H. Power electronic circuits design: a particle swarm optimization approach[C]//Proceedings of the 7th International Conference on Simulated Evolution and Learning. Melbourne, Australia: Springer, 2008: 605-614.
- [60] WAI R J, SHIH L C. Adaptive fuzzy-neural-network design for voltage tracking control of a DC-DC boost converter[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 27(4): 2104-2115.
- [61] FU X G, LI S H. Control of single-phase grid-connected converters with LCL filters using recurrent neural network and conventional control methods[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(7): 5354-5364.
- [62] WEI C, ZHANG Z, QIAO W, et al. An adaptive network-based reinforcement learning method for MPPT control of PMSG wind energy conversion systems[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(11): 7837-7848.
- [63] KIRANYAZ S, GASTLI A, BEN-BRAHIM L, et al. Real-time fault detection and identification for MMC using 1-D convolutional neural networks[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(11): 8760-8771.
- [64] BANDYOPADHYAY I, PURKAIT P, KOLEY C. Performance of a classifier based on time-domain features for incipient fault detection in inverter drives[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2019, 15(1): 3-14.
- [65] WANG T Z, XU H, HAN J G, et al. Cascaded H-bridge multilevel inverter system fault diagnosis using a PCA and multiclass relevance vector machine approach[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(12): 7006-7018.
- [66] LI Z, ZHENG Z, OUTBIB R. A prognostic methodology for power MOSFETs under thermal stress using echo state network and particle filter[J]. Microelectronics Reliability, 2018, 88/90: 350-354.
- [67] ASHRAF W M, UDDIN G M, TARIQ R, et al. Artificial intelligence modeling-based optimization of an industrial-scale steam turbine for moving toward net-zero in the energy sector[J]. ACS Omega, 2023, 8(24): 21709-21725.
- [68] HENNIGH O, NARASIMHAN S, NABIAN M A, et al. NVIDIA SimNet™: an AI-accelerated multi-physics simulation framework[C]//Proceedings of the 21st International Conference on Computational Science. Krakow, Poland: Springer, 2021: 447-461.
- [69] ZHOU L F, ZHANG L, KONZ N. Computer vision techniques in manufacturing[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2023, 53(1): 105-117.
- [70] SHI D M, FAN W H, XIAO Y Y, et al. Intelligent scheduling of discrete automated production line via deep reinforcement learning[J]. International Journal of Production Research, 2020, 58(11): 3362-3380.
- [71] CHIEN C F, DAUZÈRE-PÉRÈS S, HUH W T, et al. Artificial intelligence in manufacturing and logistics systems: algorithms, applications, and case studies[J]. International Journal of Production Research, 2020, 58(9): 2730-2731.
- [72] DEGEN C L, REINHARD F, CAPPELLARO P. Quantum sensing[J]. Reviews of Modern Physics, 2017, 89(3): 035002.
- [73] TAYLOR J M, CAPPELLARO P, CHILDRESS L, et al. High-sensitivity diamond magnetometer with nanoscale resolution[J]. Nature Physics, 2008, 4(10): 810-816.
- [74] RIEFFEL E, POLAK W. An introduction to quantum computing for non-physicists[J]. ACM Computing Surveys (CSUR), 2000, 32(3): 300-335.
- [75] BHATIA V, RAMKUMAR K R. An efficient quantum computing technique for cracking RSA using Shor's algorithm[C]//Proceedings of 2020 IEEE 5th International Conference on Computing Communication and Automation. Greater Noida, India: IEEE, 2020: 89-94.
- [76] LONG G L. Grover algorithm with zero theoretical failure rate[J]. Physical Review A, 2001, 64(2): 022307.
- [77] GISIN N, THEW R. Quantum communication[J]. Nature Photonics, 2007, 1(3): 165-171.
- [78] 刘玲玲. 二氧化钒纳米颗粒薄膜的金属-半导体相变[D]. 南京: 南

- 京大学, 2011.
- LIU Lingling. Semiconductor-to-metal phase transition in vanadium dioxide nanoparticle films[D]. Nanjing, China: Nanjing University, 2011.
- [79] KAESTNER B, KASHCHEYEV V. Non-adiabatic quantized charge pumping with tunable-barrier quantum dots: a review of current progress[J]. Reports on Progress in Physics, 2015, 78(10): 103901.
- [80] 焦强, 周峰, 李云飞, 等. 基于电子束团调控的 μA 级量子电流源研究[J]. 高电压技术, 2023, 49(2): 651-659.
- JIAO Qiang, ZHOU Feng, LI Xiaofei, et al. Research on μA level quantum current source based on electron beam cluster regulation[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(2): 651-659.
- [81] HAMILTON C A. Josephson voltage standards[J]. Review of Scientific Instruments, 2000, 71(10): 3611-3623.
- [82] 高原, 李红晖, 沈雪梅. 我国的 1 V 及 10 V 约瑟夫森量子电压基准装置[J]. 现代测量与实验室管理, 2005, 13(3): 3-6.
- GAO Yuan, LI Honghui, SHEN Xuecha. 1 V and 10 V Josephson voltage standard in NIM[J]. Modern Measurement and Test, 2005, 13(3): 3-6.
- [83] 王曾敏, 高原, 李红晖. 交流约瑟夫森电压合成装置的研究[J]. 计量学报, 2012, 33(2): 154-157.
- WANG Zengmin, GAO Yuan, LI Honghui. Research of Josephson arbitrary waveform synthesizer[J]. Acta Metrologica Sinica, 2012, 33(2): 154-157.
- [84] 周庚如, 胡毅飞, 赵桂芬, 等. Josephson 阵列电压标准及对标准电池的自动化检定[J]. 宇航计测技术, 1995, 15(5): 48-56.
- ZHOU Gengru, HU Yifei, ZHAO Guifen, et al. Josephson array voltage standard and automated calibration of standard cells[J]. Journal of Astronautic Metrology and Measurement, 1995, 15(5): 48-56.
- [85] LANDIM R P, BENZ S P, DRESSELHAUS P D, et al. Systematic-error signals in the ac Josephson voltage standard: measurement and reduction[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2008, 57(6): 1215-1220.
- [86] KOHLMANN J, MÜLLER F, BEHR R, et al. Development of Josephson junction series arrays for synthesis of AC voltages and arbitrary waveforms[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2006, 43(1): 1385-1388.
- [87] 王曾敏, 高原, 李红晖. 建立新一代约瑟夫森电压基准——正弦量子电压信号的合成[J]. 仪器仪表学报, 2010, 31(9): 1965-1971.
- WANG Zengmin, GAO Yuan, LI Honghui. Establishment of new type Josephson voltage standard in China——synthesis of AC quantum voltage[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2010, 31(9): 1965-1971.
- [88] 陈骊颖, 黄堃, 王琪, 等. 基于金刚石 NV 色心集成振动检测模块的设计[J]. 量子电子学报, 2023, 40(4): 500-509.
- CHEN Liying, HUANG Kun, WANG Qi, et al. Design of an integrated vibration detection module based on diamond NV color centers[J]. Chinese Journal of Quantum Electronics, 2023, 40(4): 500-509.
- [89] KUCSKO G, MAURER P C, YAO N Y, et al. Nanometre-scale thermometry in a living cell[J]. Nature, 2013, 500(7460): 54-58.
- [90] CLEVENSON H, TRUSHEIM M E, TEALE C, et al. Broadband magnetometry and temperature sensing with a light-trapping diamond waveguide[J]. Nature Physics, 2015, 11(5): 393-397.
- [91] DEGEN C. Microscopy with single spins[J]. Nature Nanotechnology, 2008, 3(11): 643-644.
- [92] EINSTEIN A, PODOLSKY B, ROSEN N. Can quantum-mechanical description of physical reality be considered complete?[J]. Physical Review, 1935, 47(10): 777-780.
- [93] WOOTTERS W K, ZUREK W H. A single quantum cannot be cloned[J]. Nature, 1982, 299(5886): 802-803.
- [94] BENNETT C H, BRASSARD G. Quantum cryptography: public key distribution and coin tossing[J]. Theoretical Computer Science, 2014, 560: 7-11.
- [95] 卞宇翔, 李勇, 张国志, 等. 电力量子保密通信关键技术及未来展望[J]. 信息通信技术与政策, 2019(10): 26-32.
- BIAN Yuxiang, LI Yong, ZHANG Guozhi, et al. Key technologies and future prospects of power quantum secure communication[J]. Information and Communications Technology and Policy, 2019(10): 26-32.
- [96] 李心宇, 王松, 阮黎翔, 等. 量子通信技术在变电站领域的应用展望[J]. 浙江电力, 2024, 43(2): 34-39.
- LI Xinyu, WANG Song, RUAN Lixiang, et al. The prospects for the application of quantum communication technologies in substations[J]. Zhejiang Electric Power, 2024, 43(2): 34-39.
- [97] KONG P Y. Optimal configuration of interdependence between communication network and power grid[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2019, 15(7): 4054-4065.
- [98] ALSHOWKAN M, EVANS P G, STARKE M, et al. Authentication of smart grid communications using quantum key distribution[J]. Scientific Reports, 2022, 12(1): 12731.
- [99] KONG P Y. A review of quantum key distribution protocols in the perspective of smart grid communication security[J]. IEEE Systems Journal, 2022, 16(1): 41-54.
- [100] 中央电视台. 中国科学院: 世界首条量子通信干线“京沪干线”正式开通[J]. 移动通信, 2017, 41(19): 45.
- China Central Television. Chinese Academy of Sciences: the world's first quantum communication trunk line "Beijing-Shanghai Trunk Line" officially opened[J]. Mobile Communications, 2017, 41(19): 45.
- [101] 房珂, 周明, 武昭原, 等. 面向低碳电力系统的长期储能优化规划与成本效益分析[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(21): 8282-8294.
- FANG Ke, ZHOU Ming, WU Zhaoyuan, et al. Optimal planning and cost-benefit analysis of long-duration energy storage for low-carbon electric power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(21): 8282-8294.
- [102] 黄小庆, 杨奔, 陈颀, 等. 基于 LCC 和量子遗传算法的电动汽车充电站优化规划[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(17): 176-182.
- HUANG Xiaoqing, YANG Hang, CHEN Jie, et al. Optimal planning of electric vehicle charging stations based on life cycle cost and quantum genetic algorithm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(17): 176-182.
- [103] NIKMEHR N, ZHANG P, ZHENG H H, et al. Quantum annealing-infused microgrids formation: distribution system restoration and resilience enhancement[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2025, 40(1): 463-475.
- [104] 吴小珊, 张步涵, 袁小明, 等. 求解含风电场的电力系统机组组合问题的改进量子离散粒子群优化方法[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(4): 45-52.
- WU Xiaoshan, ZHANG Buhan, YUAN Xiaoming, et al. Solutions to unit commitment problems in power systems with wind farms using advanced quantum-inspired binary PSO[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(4): 45-52.
- [105] MAHDI F P, VASANT P, ABDULLAH-AL-WADUD M, et al. Quantum-behaved bat algorithm for many-objective combined economic emission dispatch problem using cubic criterion function[J]. Neural Computing and Applications, 2019, 31(10): 5857-5869.
- [106] YANG X Y, YANG Y W, LIU Y Q, et al. A reliability assessment approach for electric power systems considering wind power uncertainty[J]. IEEE Access, 2020, 8: 12467-12478.

- [107] KUMAR K, SHARMA N A, PRASAD R, et al. A survey on quantum computing with main focus on the methods of implementation and commercialization gaps[C]//Proceedings of 2015 2nd Asia-Pacific World Congress on Computer Science and Engineering. Nadi, Fiji: IEEE, 2015: 1-7.
- [108] BOVA F, GOLDFARB A, MELKO R G. Commercial applications of quantum computing[J]. EPJ Quantum Technology, 2021, 8(1): 2.
- [109] 张颖, 胡国静, 向斌. 量子反常霍尔效应研究进展[J]. 低温物理学报, 2021, 43(2): 69-88.
- ZHANG Ying, HU Guojing, XIANG Bin. Research progress of quantum anomalous hall effect[J]. Low Temperature Physical Letters, 2021, 43(2): 69-88.
- [110] 刘正. 磁性体系中量子反常霍尔效应和高阶拓扑态的理论研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2023.
- LIU Zheng. Theoretical study of quantum anomalous hall effect and higher-order topological states in magnetic systems[D]. Hefei, China: University of Science and Technology of China, 2023.
- [111] 孙自强. 环保型银金硒量子点太阳能电池性能研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2023.
- SUN Ziqiang. Study on the performance of eco-friendly silver gold selenide quantum dot solar cells[D]. Hefei, China: University of Science and Technology of China, 2023.
- [112] 陈晓杰. 若干二维电极材料的电子结构和量子电容特性的第一性原理计算研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2022.
- CHEN Xiaojie. First-principles calculation of electronic structure and

quantum capacitance of several two-dimensional electrode materials[D]. Hangzhou, China: Zhejiang University, 2022.



ZANG Yiming
Ph.D.

臧奕茗

1996—, 男, 博士, 助理研究员
主要从事电力设备状态智能诊断、新型传感技术方面的研究工作
E-mail: zangyiming@sjtu.edu.cn



JIANG Xiuchen
Ph.D., Professor
Corresponding author

江秀臣(通信作者)

1965—, 男, 博士, 教授, 博导
主要从事电力设备的数字化智能化状态检测相关研究
E-mail: xcjiang@sjtu.edu.cn

收稿日期 2024-07-19 修回日期 2025-02-24 编辑 卫李静