

核工程中人工智能技术的应用展望

戈文

卡迪诺科技(北京)有限公司 北京 101500

摘要:核工程与人工智能的融合正重塑行业格局。AI技术通过实时监测与异常检测提升核设施安全,利用机器学习优化反应堆运行参数,实现降本增效;智能机器人替代人工完成高风险作业,强化核燃料循环管理;强化学习推动自主运行策略发展,提升复杂工况适应性。在核聚变领域,AI加速等离子体参数预测与材料研发。未来,随着小样本学习、联邦学习等技术突破数据壁垒,可解释AI与混合建模将增强模型可靠性,推动核工程向智能化、自主化方向迈进,为全球能源转型与可持续发展提供关键支撑。

关键词:核工程;人工智能技术;应用展望

引言:在全球能源转型与“双碳”目标的驱动下,核能作为清洁、高效、稳定的基荷能源,其安全性与经济性提升成为关键。传统核工程面临数据孤岛、复杂系统建模难、实时决策滞后等挑战,而人工智能(AI)技术凭借机器学习、强化学习、知识图谱等能力,正为核设施安全监测、反应堆运行优化、核燃料循环管理及应急决策等领域提供创新解决方案。AI与核工程的深度融合,不仅将推动行业智能化转型,更为全球能源安全与可持续发展注入新动能。

1 核工程与人工智能技术概述

1.1 核工程的核心领域与挑战

(1)在核心应用场景中,核能发电是核工程的核心方向,需通过核反应堆实现核能到电能的高效转化,涵盖压水堆、沸水堆等多种堆型的设计与运维;核燃料循环贯穿核燃料开采、冶炼、加工、使用及后处理全流程,关乎资源利用率与核废料安全;辐射防护聚焦于人员、环境免受辐射危害,涉及辐射剂量监测、防护设备研发等;核安全监管则通过建立法规标准、开展安全评估,保障核设施全生命周期安全,防范核泄漏等风险。

(2)传统技术面临多重瓶颈,数据孤岛问题突出,核设施各系统数据分散存储,难以实现跨部门、跨环节的数据共享与协同分析;复杂系统建模难度大,核反应堆内部物理化学过程复杂,传统模型难以精准刻画动态变化;实时决策困难,面对突发工况,依赖人工经验的决策模式响应滞后,难以快速制定最优应对方案。

1.2 人工智能技术发展现状

(1)主流技术分支不断突破,机器学习是核心,深度学习通过深度神经网络实现复杂数据特征提取,在图像识别、数据预测等领域表现优异;强化学习通过智能体与环境交互试错优化策略,适用于动态决策场景;知

识图谱将分散知识结构化,助力领域知识整合与推理;自然语言处理实现人机语言交互,可用于核工程文献分析、报告生成等。(2)工业领域应用范式逐渐成熟,预测性维护借助AI分析设备运行数据,提前预判故障,降低核电机组停机风险;智能优化通过算法对核燃料装载、反应堆运行参数进行优化,提升发电效率与安全性,推动工业向智能化转型。

2 人工智能在核工程中的典型应用场景

2.1 核设施安全监测与故障诊断

(1)基于传感器数据的异常检测依托人工智能算法构建监测体系,通过部署在核设施关键部位的传感器,实时采集设备振动、温度、压力、流量等多维度运行数据。AI模型可对海量数据进行实时分析与特征提取,建立设备正常运行状态下的数据流模型,当监测数据偏离正常范围时,能快速识别异常信号,精准定位异常发生的设备部件与位置,避免因数据滞后或人工误判导致的安全隐患,为设施安全运行提供实时预警支撑。(2)故障预测与健康管理(PHM)系统整合人工智能与设备运维知识,通过持续采集核设施设备全生命周期运行数据,利用机器学习算法挖掘数据中的故障关联规律,构建设备健康状态评估模型。该系统不仅能实时评估设备当前健康水平,还能预测未来一段时间内设备可能出现的故障类型、故障概率及剩余使用寿命,提前制定维修计划,减少非计划停机时间,降低运维成本,同时保障核设施设备长期稳定运行^[1]。

2.2 核反应堆运行优化

(1)智能控制算法通过对核反应堆运行机制的深度学习建模,优化传统控制逻辑,结合实时采集的反应堆功率、冷却剂温度、中子通量等关键参数,动态调整控制策略。AI驱动的控制算法能快速响应运行工况变化,精

准调节反应堆内各组件运行状态,在维持反应堆运行稳定性的同时,减少能量损耗,提升能源转化效率,实现反应堆在安全边界内的最优运行。(2)强化学习在自主运行策略中的应用探索聚焦于构建反应堆自主决策能力,通过设定反应堆安全运行目标与奖惩机制,让强化学习智能体在模拟运行环境中不断试错与学习。智能体可自主探索不同运行参数组合与操作策略对反应堆运行状态的影响,逐步优化自主运行方案,在复杂工况下实现无需人工干预的运行调整,提升反应堆运行的自主性与适应性。

2.3 核燃料循环与废物管理

(1)核材料性能预测与寿命评估借助人工智能算法整合核材料成分、制备工艺、运行环境等数据,构建材料性能演化模型。通过机器学习算法分析数据中材料性能与影响因素的关联关系,可精准预测核材料在长期使用过程中的力学性能、耐腐蚀性能等关键指标变化趋势,评估材料剩余使用寿命,为核燃料制备、更换周期制定提供科学依据,保障核燃料在循环过程中的安全性与可靠性。(2)放射性废物分类与处理路径优化利用AI技术对放射性废物的类型、放射性强度、物理化学性质等数据进行智能分析,基于预设的分类标准与处理要求,构建废物分类模型,实现放射性废物的自动精准分类。同时,结合不同处理技术的成本、效率与环保要求,通过优化算法规划最优处理路径,提升放射性废物处理效率,降低处理成本,减少对环境的潜在影响^[2]。

2.4 辐射防护与应急决策支持

(1)实时辐射剂量预测与人员路径规划依托人工智能整合辐射监测数据、环境参数与人员位置信息,构建辐射扩散模型,可实时预测不同区域的辐射剂量变化趋势。结合人员作业需求,利用路径优化算法规划出辐射剂量最低、安全性最高的人员移动路径,避免人员暴露于高辐射环境,保障作业人员人身安全。(2)应急场景下的智能决策系统开发基于核事故应急处理知识与历史数据,构建AI决策模型。当发生核泄漏、设备故障等应急事件时,系统能快速分析事件严重程度、影响范围等关键信息,自动生成多种应急处理方案,并对方案的可行性、安全性与有效性进行评估,为应急指挥人员提供决策支持,缩短应急响应时间,降低事故造成的损失。

2.5 核安全监管与合规性检查

(1)基于知识图谱的法规自动匹配与风险评估将核安全相关法规、标准、规范转化为结构化知识图谱,结合核设施运行数据与监管信息,利用AI技术实现法规条款与监管对象的自动匹配。同时,通过分析设施运行数

据与法规要求的差异,识别潜在的合规风险点,评估风险等级,为监管部门制定针对性监管措施提供依据,提升监管精准度与效率^[3]。(2)文档智能审核与报告生成借助自然语言处理与机器学习技术,对核设施提交的运维报告、安全评估报告、合规性申报材料等文档进行智能审核。系统可自动识别文档中的关键信息,检查内容的完整性、准确性与合规性,识别遗漏信息或不合规内容,并基于审核结果与预设模板自动生成监管报告,减少人工审核的工作量与误差,提升监管文档处理效率。

3 人工智能在核工程应用中的技术挑战与关键问题

3.1 数据壁垒与质量限制

(1)核工程数据具有极高敏感性,涉及核设施设计参数、运行工况、核材料信息等核心数据,受安全保密要求限制,数据共享范围极小,形成严重数据壁垒,导致AI模型训练难以获取跨场景、跨设施的多样化数据,制约模型泛化能力。(2)数据稀缺性与标注困难问题突出,核设施故障、事故等极端场景数据极少,难以支撑AI模型对异常情况的精准学习;同时,核工程数据专业性强,需具备深厚核工程知识的人员进行标注,标注成本高、周期长,进一步限制高质量训练数据集的构建。

3.2 模型可解释性与可靠性要求

(1)当前主流AI模型多为“黑箱”模型,其决策过程难以用人类可理解的逻辑解释,在核安全关键场景中,如核反应堆故障诊断、应急决策等,模型无法清晰说明决策依据,导致操作人员与监管部门对模型结果缺乏信任,形成信任危机,阻碍AI技术的深度应用。(2)核工程对AI模型可靠性要求极高,模型预测偏差或误判可能引发严重安全事故,但AI模型易受数据分布变化、噪声干扰影响,在核设施复杂动态运行环境中,模型稳定性与可靠性难以持续保障,无法满足核工程严苛的安全标准^[4]。

3.3 安全与伦理风险

(1)AI系统面临被网络攻击的风险,若核工程中的AI监测、控制等系统遭恶意入侵,可能被篡改数据或操控指令,导致核设施异常运行,引发核泄漏、设备损坏等安全隐患,威胁人员与环境安全。(2)AI系统误操作风险不容忽视,因模型设计缺陷、数据输入错误等问题,AI可能做出错误决策,如误判核设施正常运行状态为异常、错误调整反应堆参数等,此类误操作将直接影响核工程系统稳定性,带来安全风险。

3.4 跨学科人才与标准缺失

(1)核工程与AI交叉领域需兼具核工程专业知识、AI技术能力的复合型人才,但当前教育体系中跨学科培

养机制不完善,人才储备不足,且现有从业人员难以快速掌握双领域核心技能,形成人才培养困境。(2)行业规范与标准严重滞后,AI在核工程应用的技术门槛、安全评估流程、模型验证方法等缺乏统一标准,各机构应用模式混乱,导致AI技术应用质量参差不齐,无法形成规模化、规范化的应用体系,制约行业整体发展。

4 人工智能在核工程应用中的应对策略与展望

4.1 技术层面

(1)针对核工程数据稀缺问题,可通过小样本学习与联邦学习技术突破瓶颈。小样本学习借助迁移学习、元学习等算法,利用少量标注数据实现模型有效训练,减少对大规模数据集的依赖,尤其适用于核设施极端场景数据不足的情况;联邦学习则能在数据不离开本地的前提下,实现多机构跨场景数据协同训练,既打破数据壁垒,又保障数据安全,为AI模型提供更丰富的训练数据支撑,提升模型泛化能力。(2)采用可解释AI(XAI)与混合建模方法提升模型可信度。可解释AI通过特征重要性分析、决策路径可视化等技术,将“黑箱”模型的决策逻辑转化为人类可理解的语言或图表,消除核安全关键场景中的信任危机;混合建模结合物理机理模型与数据驱动模型,利用物理规律约束AI模型输出,减少模型因数据噪声或分布变化导致的偏差,同时通过数据驱动优化物理模型的精度,实现“机理+数据”的双重保障,满足核工程对模型可靠性的严苛要求。

4.2 管理层面

(1)建立核工程AI应用的伦理审查与安全认证机制。伦理审查需明确AI应用的边界与责任归属,防范数据滥用、算法偏见等伦理风险;安全认证则需制定统一的AI系统安全评估标准,对AI模型的稳定性、抗干扰能力、故障应对能力进行全面检测,通过认证的系统方可投入核工程实际应用,从管理层面筑牢AI应用的安全防线。(2)推动国际标准制定与数据共享框架构建。联合全球核工程与AI领域的科研机构、企业及监管部门,共同制定AI在核工程应用的技术规范、测试流程与质量标准,实现行业规范化发展;同时构建跨国界、跨机构的数据共享框架,明确数据分类分级规则与共享权限,在保障数据安全的基础上,促进全球核工程数据资源的高

效利用,加速AI技术落地^[5]。

4.3 生态层面

(1)通过产学研协同模式培养复合型人才。高校需优化课程体系,增设核工程与AI交叉学科课程,强化学生双领域知识储备;科研机构与企业建立联合培养机制,为学生提供实践平台,让学生参与核工程AI实际项目研发,提升技术应用能力,形成“教育-研发-实践”一体化的人才培养体系,缓解人才短缺困境。(2)构建开源工具链与测试验证平台完善产业生态。开发核工程AI专用开源工具,涵盖数据预处理、模型训练、性能评估等功能,降低技术应用门槛;搭建统一的测试验证平台,模拟核设施不同运行工况与应急场景,为AI模型提供真实的测试环境,验证模型可靠性与安全性,推动AI技术在核工程领域的规模化、标准化应用,助力行业高质量发展。

结束语

人工智能正以颠覆性力量重塑核工程领域,从精准监测设施安全、动态优化反应堆运行,到智能管理核燃料循环、高效处置应急事件,AI技术已渗透至核能全产业链。未来,随着可解释AI、联邦学习等技术的突破,数据壁垒与可靠性难题将逐步化解,人机协同的智能化模式将成为主流。这一融合不仅将提升核能系统的安全性、经济性,更将推动全球能源结构向清洁低碳转型。核工程与AI的深度耦合,正为人类探索可持续能源未来开辟崭新路径。

参考文献

- [1]易鑫文,谢芬,冯荣健.核工程中人工智能技术的应用展望[J].当代化工研究,2020,(08):11-12.
- [2]周法清,邬国伟.核工程中人工智能技术的应用与进展[J].原子能科学技术,2022,(05):475-480.
- [3]李远杰.核工程与核技术专业实验教学体系构建[J].教育教学论坛,2021,(18):148-151.
- [4]杨东慧.计算机人工智能技术的应用与发展[J].数字技术与应用,2021,39(11):109-111.
- [5]邓晨曦,蒋一锄.计算机人工智能技术的应用与发展[J].信息记录材料,2020,21(07):65-67.