

人工智能在燃煤电厂安全生产领域的应用与实践

薛隽 陈程 张铃灵 朱伟男

华能国际电力江苏能源开发有限公司南京电厂 江苏 南京 210035

摘要: 随着新一代信息技术与能源产业深度融合,人工智能(AI)技术凭借其强大的数据处理、模式识别与自主决策能力,成为推动燃煤电厂安全生产转型升级的核心驱动力。本文围绕燃煤电厂安全生产的核心痛点,系统分析了人工智能技术在设备状态监测与故障诊断、燃烧优化控制、安全风险预警与应急管理、人员行为规范监管等关键领域的应用原理与实践案例。通过梳理当前AI技术在电厂应用中面临的数据质量、算法泛化性、安全可靠性及人才体系等挑战,提出了“数据—算法—场景—人才”四位一体的发展路径,为燃煤电厂借助AI技术构建“预测性维护、智能化控制、全方位预警”的安全生产新模式,提供了一定的理论参考与实践借鉴。

关键词: 人工智能; 燃煤电厂; 安全生产; 设备诊断; 燃烧优化; 风险预警

引言

燃煤发电作为我国能源结构的重要组成部分,在保障能源供应稳定性与安全性方面有着不可替代的作用。截至2024年底,全国煤电装机11.9亿千瓦,占总发电装机容量容量的比重为35.7%。受2021年出现全国性电力供应紧张的影响,“十四五”期间加大了煤电发展步伐,彻底扭转了“十三五”期间严控新增煤电的势头,同时“十五五”期间煤电装机仍有一定的增长空间,煤电的能源基础支撑和兜底保障作用在短期内无法替代。然而,燃煤电厂生产流程复杂,安全风险点多、面广、关联性强,传统安全生产管理模式依赖人工巡检、定期维护及经验驱动的决策方式,存在监测滞后、诊断精度低、风险预判能力不足等问题,难以满足新形势下“本质安全、高效低碳”的发展要求。

人工智能(AI)技术的突破性发展为解决上述痛点提供了全新思路。不同于PLC、DCS系统等传统自动化控制,AI技术通过对海量数据的深度学习,挖掘背后隐藏的设备状态特征、运行规律及风险演化趋势,实现从“被动应对”向“主动预防”的转变。近年来,国内外燃煤电厂积极部署AI技术应用,取得了显著成效。某电厂通过基于深度学习的设备诊断系统,将关键设备故障检出率提升至95%以上,机组非计划停运时间减少30%;某电厂采用强化学习优化锅炉燃烧控制,氮氧化物(NO_x)排放降低了15%,同时锅炉效率提升了0.8%。燃煤电厂可根据安全生产的实际需求,全面剖析AI技术在安全生产领域的应用价值与实现路径,在智能化转型的同时,推动安全生产管理水平向更高质量发展^[1]。

1 人工智能的核心技术

燃煤电厂的AI技术应用以数据为基础、以算法为核

心、以场景为载体,涉及深度学习、计算机视觉、自然语言处理等多种技术分支。不同场景对技术需求存在差异,但核心逻辑主要围绕“数据采集—特征提取—模型训练—决策输出”的流程展开。

1.1 机器学习技术

机器学习作为AI技术应用的基础,通过构建数学模型从历史数据中学习规律,实现对未知数据的预测与分类。在安全生产领域,常用的机器学习算法包括:

1.1.1 监督学习算法:适用于设备故障诊断、参数预测等有标签数据场景。例如,利用历史故障数据训练随机森林模型,可根据实时采集的设备振动、温度、压力等参数,判断设备是否存在异常及故障类型。

1.1.2 无监督学习算法:适用于异常检测场景,无需人工标注即可从正常运行数据中识别出偏离模式的异常样本。例如,通过孤立森林算法对汽轮机轴系振动数据进行分析,可早期发现轴系不平衡、不对中等潜在故障。

1.1.3 强化学习算法:通过“智能体—环境—奖励”的互动机制,让模型在动态环境中自主学习最优决策策略,适用于燃烧优化、负荷调度等实时动态调整的场景。例如,强化学习智能体可根据锅炉出口温度、蒸汽压力、 NO_x 排放等实时参数,动态调整煤量、风量、喷氨量等控制变量,实现多目标优化。

1.2 深度学习技术

深度学习通过构建多层神经网络,解决传统机器学习在处理高维、非线性数据时的局限性,尤其在处理图像、时序数据方面表现突出:

1.2.1 卷积神经网络(CNN):擅长提取数据的空间特征,主要用于计算机视觉相关应用,如设备外观缺陷检测(如管道裂纹、阀门磨损)、人员安全帽佩戴识别

等。通过CNN对巡检机器人拍摄的设备图像进行处理，自动识别设备的细微缺陷，精度远超人工肉眼判断。

1.2.1 循环神经网络（RNN）与长短期记忆网络（LSTM）：适用于处理时序数据（如设备运行参数随时间的变化曲线），能够捕捉数据的时间依赖性。在设备状态预测中，LSTM模型可通过分析过去几小时或几天的振动、温度时序数据，预测未来一段时间内设备的状态趋势，提前预警潜在故障。

1.2.2 生成对抗网络（GAN）：通过生成器与判别器的对抗训练，生成与真实数据分布一致的合成数据，可解决电厂某些故障数据样本稀缺的问题。例如，利用GAN生成更多设备故障数据，辅助训练故障诊断模型，提升模型的泛化能力^[2]。

1.3 计算机视觉技术

计算机视觉技术模拟人类视觉系统，通过摄像头等设备采集图像或视频数据，结合图像处理与深度学习算法，实现对目标的检测、识别与跟踪，主要应用于：

1.3.1 设备状态监测：通过工业相机拍摄锅炉水冷壁、汽轮机叶片、管道阀门等关键设备的图像，利用CNN算法检测设备是否存在裂纹、腐蚀、结焦等缺陷。

1.3.2 人员行为监管：通过厂区监控摄像头，识别人员是否佩戴安全帽、反光背心等防护用品，是否进入危险区域（如煤仓附近），是否存在违规操作（如攀爬设备、吸烟）。

1.3.3 环境安全监测：通过图像识别技术检测厂区是否存在火灾（火焰识别）、泄漏（如氨气泄漏的烟雾识别）等安全隐患，实现事故的早期发现。

1.4 自然语言处理技术

自然语言处理技术用于处理和理解人类语言，将非结构化的文本数据转化为结构化信息，为安全生产管理提供支持：

1.4.1 故障报告分析：通过文本分类、实体识别等技术，对历史设备故障报告、检修记录进行分析，提取故障原因、处理措施、涉及设备等关键信息，构建故障知识库，为后续故障诊断提供参考。

1.4.2 安全规程智能检索：将电厂安全操作规程、应急预案等文本资料转化为结构化知识库，通过语义理解技术，实现基于自然语言的智能检索。例如，运行人员可通过语音或文字提问“锅炉满水事故如何处理”，系统自动返回对应的应急处置步骤。

1.4.3 风险信息提取：从外部行业报告、事故通报、设备厂家手册等文本中提取与电厂安全生产相关的风险信息（如某型号阀门的常见故障、同类电厂的事故案

例），辅助电厂开展风险预判与隐患排查。

2 人工智能的应用实践

2.1 设备状态监测与故障诊断

燃煤电厂的核心设备长期处于高温、高压、高负荷工况下，易发生磨损、腐蚀等故障，若未及时发现可能导致设备损坏甚至停机事故。传统的设备维护以定期检修为主，存在过度维护或维护不足的问题。AI技术通过对设备运行数据的实时分析，实现预测性维护，可大幅提升设备可靠性与维护效率。设备状态监测与故障诊断的核心是通过传感器采集设备的运行参数，利用机器学习或深度学习算法对数据进行分析，实现三个层级的诊断：一是状态监测，判断设备是否处于正常运行状态，识别异常数据；二是故障诊断，确定异常原因及故障类型；三是寿命预测，预测设备剩余使用寿命，为检修维护计划制定提供依据。

典型案例：汽轮机轴系故障预警系统。某电厂300MW机组为汽轮机部署了基于LSTM的轴系故障预警系统，通过安装在汽轮机各轴承座上的振动和温度传感器，实时采集轴系振动位移、振动加速度、轴承温度等16个参数。经过数据预处理和模型训练，利用机组过去5年的正常运行数据和20次历史故障数据，预测未来1小时内的振动变化趋势，系统上线后多次成功预警潜在故障，其中某次系统提前48小时预警汽轮机轴承振动异常，经检修发现轴承间隙超标，避免了机组非计划停运，减少经济损失约200万元，同时系统将汽轮机故障检出率从传统人工巡检的65%提升至98%。

2.2 锅炉燃烧优化控制

锅炉是燃煤电厂的核心热力设备，其燃烧效率直接影响机组经济性与环保性。传统的锅炉燃烧控制依赖PID控制器，根据设定值调整给煤量、风量、配风比等参数，由于锅炉燃烧过程是一个复杂的非线性、多变量耦合系统，PID控制难以实现全局最优，易导致燃烧效率低、NO_x排放超标等问题。AI技术可对燃烧过程的动态建模优化，实现智能化控制并兼顾效率、环保与安全。锅炉燃烧优化的核心是通过DCS系统采集燃烧相关参数，利用强化学习或深度学习算法构建燃烧优化模型，动态调整控制变量，实现多目标优化，最终确保不同煤种、负荷及工况下均能达到最优的燃烧控制方案。

典型案例：基于深度强化学习（DRL）的锅炉燃烧优化系统。某电厂600MW超临界燃煤机组为解决锅炉燃烧效率低、NO_x排放高等问题，部署了基于DRL的燃烧优化系统，通过DCS系统实时采集超200项燃烧相关参数，采用深度确定性策略梯度（DDPG）算法构建DRL模型，

利用历史运行数据（10万条样本）进行离线训练，然后在仿真环境中进行强化学习训练（100万步迭代），系统上线6个月后，机组在300-600MW范围内，锅炉效率平均提升0.8%，NO_x排放浓度平均降幅15%，炉膛温度波动范围从±50℃缩小至±20℃，避免了局部过热导致的水冷壁结焦风险。

2.3 安全风险预警与应急管理

燃煤电厂的安全生产风险具有复杂性、关联性、突发性等特点，如煤粉泄漏可能引发爆炸、人员误操作可能引发电气事故等。传统的风险管控模式以“事后处置”为主，缺乏对风险的动态感知与预判能力。AI技术通过整合“设备、系统、人员、环境”多维度数据，构建风险预警模型，实现风险的早期识别与分级处置，完善应急预案的制定与执行。安全风险预警与应急管理的AI应用分为两个阶段：一是风险预警阶段，通过采集设备运行、环境及人员行为数据，利用机器学习算法构建风险评估模型，对风险发生的概率与后果进行量化评估，根据评估结果发出不同等级的预警；二是应急管理阶段，利用自然语言处理技术构建应急预案知识库，结合故障诊断结果，为应急处置提供智能决策支持；利用计算机视觉技术实时监测事故现场情况，辅助指挥人员制定救援方案。

典型案例：电厂智能安全风险预警平台。某发电集团联合高校开发了智能安全风险预警平台，整合了基层10家发电企业的生产数据，实现跨厂风险协同预警与应急联动。通过数据整合（设备层、环境层、人员层、外部数据）并构建风险评估模型，将安全风险划分为“设备、操作、环境、管理”四大类，结合历史事故数据与专家经验确定各风险因子的先验概率，利用实时数据更新后验概率，计算风险等级，同时具备智能预警推送、应急预案匹配、应急模拟推演等应急管理功能。平台上线后，该发电集团安全隐患排查效率提升60%，重大风险预警准确率达到90%，应急处置响应时间从平均30分钟缩短至10分钟^[3]。

2.4 人员行为规范监管

人员是燃煤电厂安全生产的核心要素，大部分电力

生产事故与人员违规操作或不安全行为相关。传统的人员行为监管以“人工巡检+视频监控”为主，存在监管范围有限、实时性差、易遗漏等问题。AI技术利用计算机视觉与人员定位，实现对人员行为的实时监测与智能识别，及时纠正不安全行为，降低人为事故风险。

典型案例：基于计算机视觉的人员行为智能监管系统。某新建2×1000MW超超临界燃煤电厂部署了人员行为智能监管系统，在主厂房、升压站、制粉车间、燃料堆场等厂区关键位置安装了300余台支持AI推理的高清智能摄像头，实现全覆盖、无死角监管。系统采用“边缘计算+云端协同”架构，结合先进算法实现人员跟踪、行为分析等，系统运行12个月期间识别人员违规行为1200余次，并及时纠正违规行为，电厂人为事故发生率同比下降75%，安全管理成效显著。

结束语

人工智能技术为燃煤电厂安全生产带来了革命性的变革，通过设备状态监测与故障诊断、燃烧优化控制、安全风险预警与应急管理、人员行为规范监管等领域的应用，实现了从“被动应对”向“主动预防”、从“经验驱动”向“数据驱动”的转变，大幅提升了电厂的安全性、经济性与环保性。但实际推广过程中，仍面临数据、算法、安全、人才等多方面的挑战，制约了AI技术应用的深度与广度，需要通过技术创新、管理优化与人才培养逐步解决。燃煤电厂要充分抓住技术发展机遇，结合实际需求逐步推进AI技术多领域应用，构建“本质安全、高效低碳、智能协同”的安全生产体系，为能源安全与可持续发展提供有力支撑^[4]。

参考文献

- [1]中国电力企业联合会，中国电力行业年度发展报告2025，中国电力企业联合会，2025。
- [2]李建林，惠东，许洪华，人工智能在电力系统中的应用综述，中国电机工程学报，2020。
- [3]王广军，刘吉臻，牛玉广，基于深度学习的火电机组锅炉燃烧优化研究，中国电机工程学报，2019。
- [4]张宏宇，李铁，王建国，基于机器学习的汽轮机故障诊断方法研究，动力工程学报，2021。