

Fault diagnosis and prediction of nuclear power plant control system based on AI

Xiaoliang Liu Lei Hou

State Nuclear Demonstration Power Station Co., Ltd., Weihai, Shandong, 264300, China

Abstract

This paper deeply discusses and analyzes the fault diagnosis and prediction technology of nuclear power plant control system based on artificial intelligence (AI). By integrating advanced AI algorithms and models, the technology aims to significantly improve the accuracy of fault diagnosis and the prediction ability of fault trends, so that nuclear power plants can maintain a high degree of safety and stability in a complex and changeable operating environment. This technology can not only effectively reduce the probability of failure occurrence, but also quickly locate and take corresponding treatment measures when the failure occurs, so as to minimize the impact of the failure on the operation of the nuclear power plant and ensure the long-term safe operation of the nuclear power plant.

Keywords

AI; nuclear power plant; control system; fault diagnosis; prediction

基于 AI 的核电厂控制系统故障诊断与预测

刘晓亮 侯磊

国核示范电站有限责任公司, 中国·山东 威海 264300

摘要

本文深入探讨并分析了基于人工智能 (AI) 的核电厂控制系统故障诊断与预测技术。通过集成先进的 AI 算法与模型, 该技术旨在显著提升故障诊断的精度与故障趋势的预测能力, 从而确保核电厂在复杂多变的运行环境中能够保持高度的安全性和稳定性。该技术不仅能够有效降低故障发生的概率, 还能在故障发生时迅速定位并采取相应的处理措施, 从而最大程度地减少故障对核电厂运行的影响, 保障核电厂的长期安全运行。

关键词

AI; 核电厂; 控制系统; 故障诊断; 预测

1 引言

核电厂的安全运行对控制系统依赖极高, 因为控制系统负责监控和调节核反应过程, 确保反应堆的稳定运行和辐射安全。任何控制系统的故障都可能导致严重的后果, 包括反应堆停机、设备损坏甚至更严重的安全事故。因此, 故障及时诊断与预测对于核电厂来说至关重要。为了应对这一挑战, 本文引入了人工智能技术 (AI), 以期通过智能化的手段提升故障诊断的效率与预测的准确性。AI 技术能够利用大数据和先进算法, 实现对控制系统故障的快速识别与未来趋势的精准预测, 从而有效保障核电厂的安全运行。

2 AI 在核电厂控制系统故障诊断中的应用

2.1 数据驱动模型构建

在核电厂控制系统故障诊断中, AI 技术的首要应用是

构建数据驱动模型。核电厂运行过程中会产生大量的监控数据, 这些数据包含了控制系统运行的各种参数和状态信息。通过利用 AI 技术, 如机器学习算法, 可以高效地处理和解析这些历史数据, 从中挖掘出故障的特征和规律。基于这些特征和规律, 可以构建出精准的故障识别模型。这种模型能够自动识别控制系统中的异常情况, 快速定位故障点, 并给出相应的诊断结果。数据驱动模型的构建不仅提高了故障诊断的准确性和效率, 还为后续的故障预测提供了坚实的基础。

2.2 特征智能提取

与此同时, 在核电厂控制系统故障诊断的过程中, 特征提取也是至关重要的一步。传统的特征提取方法往往依赖于人工经验和专业知识, 不仅耗时耗力, 而且可能遗漏一些关键信息。而 AI 技术的引入, 使得特征提取过程变得更加智能化和自动化。通过 AI 算法, 可以自动筛选和提取出与故障紧密相关的关键特征。这些特征能够更准确地反映控制系统的运行状态和故障情况。AI 算法的智能提取能力大大

【作者简介】 刘晓亮 (1994-), 男, 中国山东荣成人, 硕士, 助理工程师, 从事核电厂仪控专业研究。

提高了特征提取的效率和准确性，从而进一步提升了故障诊断的精度。同时，智能提取的特征还可以作为后续故障预测模型的重要输入，为预测结果的可靠性提供了有力保障^[1]。这种智能化的特征提取方法，为核电厂控制系统故障诊断带来了新的突破和进展。

2.3 实时在线诊断

在核电厂的实际运行中，故障的快速响应和及时处理至关重要。AI技术在控制系统故障诊断中的应用，使得实时在线诊断成为可能。通过集成先进的AI算法和实时监测技术，可以实现对控制系统运行状态的持续监控和快速诊断。一旦系统检测到异常情况或潜在故障，AI算法能够立即进行分析和判断，给出准确的诊断结果。这种实时在线诊断的能力，大大缩短了故障响应时间，降低了因故障导致的停机时间^[2]。同时，实时在线诊断还可以为运维人员提供及时的故障预警和维修指导，帮助他们迅速定位并解决问题，从而确保核电厂的安全稳定运行。这种高效、实时的故障诊断方式，对于提升核电厂的运行效率和安全性具有重要意义。

3 AI在核电厂控制系统故障预测中的优势

3.1 预测精度高

AI技术在核电厂控制系统故障预测中的一大显著优势在于其预测精度高。借助深度学习等先进技术，AI能够从海量的历史数据中挖掘出故障发展的潜在规律和趋势。通过构建复杂的神经网络模型，AI能够学习到故障特征与时间序列之间的关联关系，从而实现对未来故障发展趋势的精准预测。这种高精度的预测能力，使得运维人员能够在故障发生之前，提前采取相应的预防措施，避免故障对核电厂运行造成严重影响^[3]。与传统的预测方法相比，AI预测不仅准确性更高，而且能够处理更加复杂和多变的故障情况，为核电厂的安全运行提供了更加可靠的保障。这种高精度的预测能力，是AI在核电厂故障预测领域的重要优势之一。

3.2 提前预警

AI技术在核电厂控制系统故障预测中的另一大优势在于其强大的提前预警能力。通过构建先进的AI预测模型，可以实时监测控制系统的运行状态，并对潜在故障进行早期识别和预警^[4]。AI模型能够分析系统中的微小变化和异常信号，及时捕捉到可能引发故障的先兆，从而在故障发生之前发出预警信号。这种提前预警的能力，为运维人员提供了宝贵的时间窗口，使他们能够在故障尚未造成严重后果之前，提前安排维修和检查工作，及时消除故障隐患。这种预防性的维护策略，不仅能够有效降低故障发生的概率，还能减少因故障导致的停机时间和经济损失，为核电厂的安全、稳定运行提供了有力的支持。

3.3 动态适应性强

AI技术在核电厂控制系统故障预测中的第三个显著优

势是其强大的动态适应性。随着核电厂运行时间的增长和外部环境的变化，控制系统的运行状态和故障模式可能会发生变化。传统的预测方法往往难以适应这种动态变化，导致预测准确性下降。而AI算法，特别是深度学习等先进技术，具有强大的学习能力和自适应能力。它们能够不断学习新的数据和信息，自动调整和优化预测模型，以适应控制系统的变化。这种动态适应性使得AI预测模型能够始终保持较高的预测准确性，即使在系统状态发生变化的情况下也能提供可靠的预测结果。这种强大的动态适应性，是AI在核电厂故障预测领域中的又一重要优势，为核电厂的长期安全运行提供了有力保障^[5]。

4 AI故障诊断与预测系统的设计与实现

4.1 系统架构设计

在设计和实现AI故障诊断与预测系统时，系统架构的设计是首要考虑的关键环节。结合核电厂的实际需求和运行特点，需要构建一个高效、稳定且易于扩展的系统架构。该架构能够集成数据处理、特征提取、模型训练、实时诊断与预测等多个功能模块，实现各模块之间的无缝协同工作。同时，系统架构还需考虑数据的安全性和隐私保护，确保核电厂敏感数据不被泄露。为了提升系统的可靠性和稳定性，可以采用分布式部署和冗余设计等技术手段。此外，系统架构还应具备良好的用户接口和可视化功能，方便运维人员实时监控系统的运行状态和诊断预测结果^[6]。通过精心设计的系统架构，可以确保AI故障诊断与预测系统在核电厂中发挥出最大的效用。

4.2 数据处理与集成

与此同时，在AI故障诊断与预测系统的设计与实现过程中，数据处理与集成是至关重要的一环。由于核电厂控制系统产生的数据量庞大且来源多样，包括传感器数据、运行日志、维护记录等，因此，确保数据的质量和完整性至关重要。系统需要采用先进的数据清洗和预处理技术，去除噪声和异常值，填补缺失数据，以提高后续分析的准确性。同时，为了实现多源数据的高效集成，系统应支持多种数据格式和通信协议，确保不同来源的数据能够无缝接入并进行统一管理。此外，系统还需具备数据校验和验证机制，确保数据的准确性和一致性，为后续的诊断与预测提供可靠的数据基础。通过有效的数据处理与集成，可以显著提升AI系统的诊断与预测能力。

4.3 用户界面友好

除此之外，在AI故障诊断与预测系统的设计中，用户界面友好性是一个不可忽视的关键因素。为了确保运维人员能够轻松上手并高效操作该系统，需要设计一个直观、简洁且功能完善的用户界面^[7]。该界面能够实时展示控制系统的运行状态、故障诊断结果以及故障预测趋势，方便运维人员快速了解系统情况。同时，界面还需提供丰富的交互功能，

如数据查询、报表生成、预警通知等，以满足运维人员的多样化需求。为了提升用户体验，界面设计应注重色彩搭配、布局合理以及响应速度等方面，确保运维人员在使用过程中感到舒适和便捷。通过设计直观友好的用户界面，可以显著提高运维人员的工作效率，确保核电站的安全稳定运行。

5 AI 故障诊断与预测系统的展望

5.1 技术融合创新

随着科技的飞速发展，AI 故障诊断与预测系统正面临着技术融合创新的新机遇。为了进一步提升系统的性能和准确性，可以探索将 AI 与其他先进技术进行有机结合。例如，可以结合物联网 (IoT) 技术，实现核电站设备的远程监控和实时数据采集，为 AI 系统提供更加全面和准确的数据支持。同时，也可以考虑将 AI 与边缘计算相结合，利用边缘设备的计算能力对数据进行初步处理和分析，减轻中心服务器的负担，提高系统的响应速度和实时性^[8]。此外，还可以探索将 AI 与区块链技术结合，用于确保数据的安全性和不可篡改性，增强系统的安全性和可信度。通过技术融合创新，可以不断拓展 AI 故障诊断与预测系统的应用场景和功能，为核电站的安全运行提供更加全面和高效的保障。

5.2 智能化水平提升

在未来，AI 故障诊断与预测系统的发展趋势将是向更高层次的智能化迈进。这意味着系统不仅需要具备精准的故障诊断和预测能力，还需要拥有更强的自主学习和优化能力。通过引入更先进的 AI 算法和模型，如强化学习、自适应神经网络等，可以使系统在不断运行和反馈中自我优化，逐步提升诊断与预测的准确性和效率。同时，系统还应具备更强的自适应性和鲁棒性，能够应对核电站运行中的各种不确定性和复杂性^[9]。此外，随着人工智能技术的不断进步，未来 AI 故障诊断与预测系统还可能融入更多的智能化功能，如智能决策支持、自动化维修建议等，为核电站的运维管理提供更加全面和智能化的解决方案。这种向更高层次智能化发展的趋势，将极大地提升核电站的安全运行水平和运维效率。

5.3 应用领域拓展

AI 故障诊断与预测技术的成功应用，不仅为核电站的安全运行提供了有力保障，也为其他工业领域带来了广阔的应用前景。随着技术的不断成熟和经验的积累，可以将 AI 诊断预测技术拓展至电力、石油、化工、航空航天等高风险、高复杂性的工业领域。这些领域同样面临着设备故障频发、运维成本高昂等挑战，AI 技术的引入将有效提升故障诊断

的准确性和预测能力，降低运维成本，提高生产效率^[10]。同时，针对不同工业领域的特点和需求，可以对 AI 系统进行定制化开发和优化，以更好地适应各种复杂环境和应用场景。通过应用领域的拓展，AI 故障诊断与预测技术将为更多行业的安全生产和高效运行提供有力支持，推动工业智能化的发展进程。

6 结论

基于人工智能 (AI) 的核电站控制系统故障诊断与预测技术展现出了显著的优势和巨大的潜力。通过集成先进的 AI 算法和模型，该技术能够实现对核电站控制系统故障的高效诊断与精准预测，显著提高了故障响应速度和维修效率，有效降低了因故障导致的停机时间和安全风险。同时，AI 技术还具备强大的数据处理能力和动态适应性，能够应对核电站运行中的各种复杂性和不确定性，为核电站的长期安全运行提供了可靠的保障。此外，随着技术的不断进步和应用领域的拓展，AI 故障诊断与预测技术将为更多工业领域的安全生产和高效运行贡献力量，推动工业智能化的发展迈上新的台阶。因此，可以预见，基于 AI 的核电站控制系统故障诊断与预测技术将在未来发挥更加重要的作用。

参考文献

- [1] 郭永飞,张荣彬,姚植元,等.基于ESO-MPC的核电站协调系统优化控制研究[J].核动力工程,2024,45(06):178-184.DOI:10.13832/j.jnpe.2024.06.0178.
- [2] 高敏,李建锁.核电站电动主给水泵系统控制设计优化[J].产业与科技论坛,2024,23(21):31-34.
- [3] 刘伟,杨文泉.核电站1E级直流和UPS系统旁路稳压器的新控制策略及实现[J].核科学与工程,2024,44(05):1100-1105.
- [4] 何超,张鹏,刘双金,等.核电站控制系统逻辑验证方案改进研究[J].自动化仪表,2024,45(09):20-26.
- [5] 卢净.核电站蒸汽发生器密封堵板控制系统的开发[J].设备管理与维修,2024,(17):179-181.
- [6] 李楠,王铭昌,王兆明,等.核电站化学和容积控制系统阀门气动杆断裂原因探究[J].阀门,2024,(08):1022-1026.
- [7] 刘燕.核电站反应堆功率控制系统接口问题解析[J].中国核电,2024,17(04):585-592.
- [8] 姜明月,何庆镭.核电站数字化控制系统设计质量提升探索[J].科技视界,2024,14(20):47-49.
- [9] 陈波,曹中才,姚祥英,等.核电站化学控制异常检测与故障诊断系统研究与实现[J].核动力工程,2024,45(S1):13-18.
- [10] 王琳娜,陈楚琦,曾文杰,等.小型压水堆核电站蒸汽排放控制系统仿真研究[J].核动力工程,2024,45(02):178-182.