

Research on condition monitoring and fault warning system for nuclear power equipment under the background of digital transformation

Haiping Chao Jian Zhu

Taishan Nuclear Power Joint Venture Co., Ltd. Taishan, Guangdong, 529200, China

Abstract

Amid the digital transformation trend, the nuclear power industry faces new opportunities and challenges. The safe and stable operation of nuclear power equipment is crucial for ensuring the safety and efficiency of power supply in nuclear plants, making effective monitoring and potential failure prediction essential. This paper first analyzes the global energy landscape and the strategic positioning of nuclear power, explores the drivers behind its digital transformation, and discusses the critical importance of equipment condition monitoring and fault prediction. It designs a system architecture for real-time condition monitoring and fault early warning in nuclear power operations, while analyzing the functionalities of modules including real-time status monitoring, fault diagnosis and analysis, early warning mechanisms, and graded response protocols. The study aims to provide practical references for industry development.

Keywords

Digital transformation; Nuclear power equipment; Condition monitoring; Fault prediction

数字化转型背景下核电运行设备状态监测与故障预警系统研究

巢海平 朱健

台山核电合营有限公司 中国·广东 台山 529200

摘要

在数字化转型这一大趋势之下，核电行业遇到了新的发展机遇和挑战，核电运行设备的安全、稳定运转是核电站安全高效的供电的关键所在，所以对其进行有效监测并预知其可能发生的故障十分重要。本文首先分析全球的能源形势与核电的位置，分析核电的数字化转型的原因，再论述核电设备状态监测与故障预警的重要性，设计整个核电运行设备的状态监测与故障预警的系统结构，并对整个系统的实时状态监测、故障诊断和分析、预警、预警分级响应等模块的功能进行分析，希望提供参考作用。

关键词

数字化转型；核电设备；状态监测；故障预警

1 引言

核电是一种清洁、高效的能源，在全球能源供应中起着重要的作用。但是，核电的运行环境复杂多变，设备长期在高温、高压、强辐射等恶劣环境下工作，容易发生故障，一旦发生故障，就可能引发严重的安全事故和巨大的经济损失。对核电运行设备进行实时的状态监测和准确的故障预警，对保证核电站的安全稳定运行、提高发电效率、降低运维成本具有重要意义。本文主要研究数字化转型背景下核电

运行设备状态监测与故障预警系统，希望对核电行业的数字化发展起到一定的借鉴作用。

2 数字化转型与核电发展现状

2.1 全球能源格局与核电地位

当下，全球能源格局正处在剧烈的调整时期，传统化石能源被大量使用，造成了严重的环境污染和气候问题，各国都加快了能源结构转型的速度，大力推动清洁能源的发展，核电属于低碳又高效的清洁能源，有着能量密度高，运行稳定，不会受到自然资源分布限制等优点，在全球能源供应当中所起的作用越来越关键。

【作者简介】巢海平（1982-），男，中国江苏常州人，工程师，本科，从事核电运行研究。

2.2 核电数字化转型的驱动因素

首先,提升核电站的安全性与可靠性是核电数字化转型的主要驱动力,利用数字化技术,可以做到对核电运行设备进行全面而即时的监测,及时察觉设备潜藏的故障风险,预先采取手段加以解决,进而缩减事故发生的可能性。其次提升核电站的运行效能与经济性,数字化技术对核电站的运作管理起到改进的作用,它能够使设备得到智能化调度和维护,削减人力操作失误,进而达成高效发电并缩减营运支出。满足监管要求日趋严格的核电也是一大原因。随着核电业的发展,监管部门对核电站的安全运营提出了更高的标准。进行核电数字化转型,能够做到即时的采集核电站运行的数据信息并进行分析与报告,便于监管部门进行有效的监管。最后,技术的不断进步给核电数字化转型给予了有力的支持,传感器技术,大数据与云计算,人工智能与机器学习,物联网等技术的飞速发展,给核电运行设备的状态监测,数据处理以及故障预警供应了更为先进,高效的方法^[1]。

2.3 核电运行设备状态监测与故障预警的重要性

核电运行设备属于核电站的重点构成部分,其状况和核电站的安全稳定运作直接关联起来,核电运行环境存在一些特别之处,致使设备会遭到诸多因素所造成的损害情况,譬如高温现象,高压状况,腐蚀问题,震动等,一旦这些设备发生故障就会牵动核电站不能正常供电,而且也存在造成极其严重安全事故的危险可能,并且会对人们的生命财产以及环境带来极大伤害。对核电运行设备实施有效状态监测与故障预警很有意义,借助状态监测可以随时了解设备的运行状况,尽早察觉设备出现的异常情况,利用故障预警可以在设备故障产生之前发出预警信号,促使工作人员采取相应举措应对,从而防止故障进一步恶化。

3 关键技术剖析

3.1 传感器技术在设备状态监测中的应用

传感器技术是核电运行设备状态监测的基础,它可以把设备的物理量,化学量等转变成电信号,给后面的数据处理和分析给予原始数据,在核电这个领域,因为运行环境很恶劣,所以对传感器的要求比较高,要有耐高温,耐高压,耐腐蚀,抗辐射这些特点。现在常用的一些核电设备状态检测的传感器有温度传感器、压力传感器、振动传感器、流量传感器、湿度传感器等等。温度传感器可对设备的温度实时监测,及时发现问题是否有过热现象,压力传感器对设备内压力情况进行检测,防止因压力过大或者过小导致设备损坏,振动传感器对设备的振动信号进行检测,通过振动信号的分析,判断出设备是否存在问题。流量传感器对设备介质流量进行检测,确保设备正常运行,湿度传感器对设备的工作环境湿度进行检测,避免环境湿度过大,导致设备不能正常使用。随着技术的进步,像光纤传感器、无线传感器这类新型传感器也越来越多地应用于核电领域,光纤传感器具有

抗电磁干扰能力强,耐腐蚀,灵敏度高,适应性强等特点,并且能够适应强辐射、高温等恶劣的环境条件;而无线传感器可以做到设备状态的数据无线传输,避免了线路铺设带来的复杂度,使得监测系统更灵活,更可靠。

3.2 大数据与云计算助力数据处理与分析

核电运行设备状态监测会产生很多的数据,其中包含设备的运行参数,传感器收集到的数据,设备维修记录等等,传统的方法很难处理这么多的数据,大数据和云计算技术的出现就解决了这个问题。大数据技术能对海量的数据实施采集、清洗、存储及分析,从中找出有价值的信息,通过对核电设备运作数据加以剖析,就可以知晓设备的运作规律,找出设备的异常状况,从而给故障预估给予依照,云计算技术给大数据处理给予了很强的运算能力和存储资源,它可以将数据处理任务分散到诸多节点上执行并行处理,进而提升数据处理的效率,而且,云计算平台还能做到数据的共享与协同处理,利于不同部门之间开展信息交流和合作。在核电领域,大数据、云计算技术的应用可以对核电设备运行数据进行实时的分析处理,及时发现核电设备的潜在故障。

3.3 人工智能与机器学习实现精准故障预测

人工智能和机器学习技术是实现核电运行设备精准故障预测的重要技术,人工智能和机器学习技术可以对大量的设备运行数据和故障数据进行学习,建立故障预测模型,从而实现对设备故障的提前预测。人工智能技术中的专家系统能够模仿人类专家的思维模式,对设备的故障进行诊断和分析,它可以把专家的经验 and 知识转变为计算机程序,当设备发生故障的时候,专家系统就能凭借输入的故障现象,推理出故障的原因以及解决办法,机器学习技术可以通过对数据的学习,自动调整模型的参数,从而提升故障预测的精确度,依靠神经网络的故障预测模型,通过对设备运作数据的训练,可以做到对设备故障的准确预测。在核电方面,人工智能以及机器学习技术的应用能够提升故障预测的精确度和时效性,通过对设备运作数据展开即时监测并加以分析,机器学习模型就能持续改善自身效能,从而增强对复杂故障的识别水平,而且,人工智能同机器学习技术还能同其他技术融合起来,传感器技术,大数据技术等等,进而形成起一个完备的故障警报体系,给核电站的安全运转赋予更为全面的保障。

3.4 物联网实现设备互联互通

物联网技术能够使核电运行设备之间相互连通,把设备、传感器以及控制系统等联系在一起,从而形成一个有机整体,做到信息及时共享并协同工作,在核电领域当中,物联网技术的应用有助于提升设备的管理效率与运行可靠性。通过物联网技术,能够对核电设备实施远程监视与经营,工作人员可通过网络随时知晓设备运作状况,及时察觉设备的异常情况,并予以远程操控与调整,而且,物联网技术还能做到设备的智能保养,通过剖析设备运作数据,预估设备的

保养需求,预先规划保养方案,削减设备的停机时延。除了以上功能外,物联网技术还可以使核电站内部各个系统之间实现信息共享以及相互协作^[2]。

4 系统架构与功能设计

4.1 监测与预警系统的整体架构

核电运行设备状态监测及故障预警系统的整体架构主要分为感知层、网络层、数据层、应用层、用户层。感知层是系统的根基,主要是各种传感器,用来采集核电运行设备的各种状态数据,比如温度、压力、振动、流量等等,这些传感器遍布核电站各个重要设备上,可以随时、准确地收集到设备的运行状况。网络层是将感知层所收集到的数据传送到数据层,网络层使用有线与无线相结合的通信方式,保证数据传输的稳定可靠。有线通信主要传输大量实时数据,例如光纤通信;无线通信主要应用于一些不方便布线的地方,例如无线传感器网络。数据层属于系统的数据中心,主要承担数据的存储,管理以及处理工作,数据层会利用大数据技术和云计算技术,把大量的设备运作数据予以存储并加以分析,数据层还具备数据备份和恢复的功能,从而保证数据的安全性与完备性。应用层属于系统的重点部分,主要达成设备状况监测,毛病诊断剖析,预警以及分层回应这些功能,凭借数据层给予的数据,通过人工智能,机器学习等手段,针对设备的运转状况展开剖析与判断,尽快察觉设备的毛病隐患,然后发出警报信息。用户层是系统与用户交互的界面,主要包含监控终端、移动终端等,用户可以借助这些终端随时查看设备运行情况、故障预警信息等,还能实施相关操作并加以管理^[2]。

4.2 实时状态监测功能模块

实时状态监测功能模块属于系统的关键部分,主要任务是对核电运行设备的状态实施即时监测并采集数据,此模块依靠感知层的传感器及时采集设备的温度,压力,振动,流量等参数,然后把这些参数传送给数据层做处理和储存。数据采集时,此模块要具有数据过滤和预处理能力,剔除掉噪声和干扰数据,保证数据准确可靠,而且它还能把搜集到的数据当即表现出来并做趋势分析,这样用户就能清楚看见设备的运行状况,比如用曲线图或者柱状图之类的图形表现设备参数变化的趋势,从而让用户及时察觉到设备的异常情况。实时状态监测功能模块还能设置参数阈值,当设备参数超过阈值时,立即发出报警信号,提醒用户及时处理。

4.3 故障诊断与分析功能模块

故障诊断与分析功能模块主要是依靠数据层提供的设备运行数据以及历史故障数据,采用人工智能、机器学习等技术,对设备故障进行诊断和分析,能够对设备的常见故障进行自动诊断,给出故障原因和解决建议。

首先是这个模块会对采集来的设备运行的数据进行分析,从中提取出特征参数,建立起设备的故障特征模型,然后把实时采集到的特征参数同故障特征模型做比较,来判断设备是否有故障,要是有故障,就会进一步分析故障的种类,所在的位置以及严重程度,再依照以往的故障数据和专家的经验,给出相应的解决办法。

4.4 预警功能模块与分级响应机制

预警功能模块主要是根据故障诊断与分析功能模块的结论,及时发出预警信号,可以发出声音、灯光、短信、邮件等多种方式发出预警,以便用户能够及时收到预警信息。为了提高预警的有效性与针对性,系统采取分级响应制度。依据故障的严重程度,预警被划分为一级预警、二级预警以及三级预警。一级预警表示设备有小故障,但是不影响设备正常工作,需要注意,此时系统会发出提示预警信号,提醒用户注意。二级预警表示设备出现较为严重的故障,会影响设备的正常使用,需要及时处理,系统会发出较重的预警信号并自动通知相关工作人员。三级预警代表设备出现严重的故障,随时可能停机或者出现事故,要马上停机处理。系统会发出紧急的预警信号,而且会自动开始应急预案,保证人的安全以及设备的安全。

5 结语

综上,从数字化转型下的核电运行设备状态监测及故障预警系统进行了探讨,通过对当前全球能源格局和核电地位的分析,阐述了数字化转型背景下核电设备状态监测以及故障预警的重要性和意义,对传感器技术、大数据与云计算技术、人工智能与机器学习、物联网等方面的技术在该领域的应用进行了剖析,设计了系统的整体架构以及功能模块。

参考文献

- [1] 张维进.电力设备状态大数据分析的研究和应用[J].现代制造技术与装备,2021,57(03):157-158.
- [2] 谢天.核电设备运输风险评价指标体系的实际应用[J].东方电气评论,2025,39(03):36-40+61.
- [3] 谢天.浅析核电设备陆运风险评价指标体系[J].东方电气评论,2024,38(04):78-82.