

# Research on Intelligent Monitoring and Fault Early Warning Method of Nuclear Power Equipment Operation Status

Haidong Shang

Daya Bay Nuclear Power Operation Management Co., Ltd., Shenzhen, Guangdong, 518000, China

## Abstract

Nuclear power equipment, operating under prolonged exposure to high temperatures, high pressures, and intense radiation, is prone to subtle yet progressive malfunctions. Conventional monitoring and alarm systems, plagued by delayed responses, low detection accuracy, and over-reliance on operator expertise, have become inadequate for modern nuclear plant maintenance. This paper examines the significance of intelligent monitoring and early warning systems in nuclear power equipment, integrating advancements in smart technologies. It reviews current research progress and key limitations, with particular emphasis on intelligent monitoring methodologies, fault pattern extraction techniques, and the design and optimization of early warning models. These efforts aim to enhance equipment safety and drive the industry's transition toward smarter, more refined operational practices.

## Keywords

nuclear power equipment; intelligent monitoring; fault warning; feature extraction; intelligent model

## 核电设备运行状态智能监控与故障预警方法研究

商海东

大亚湾核电运营管理有限责任公司, 中国·广东深圳 518000

## 摘要

核电设备长期处于高温、高压、高辐射环境下, 容易发生一些不易察觉的缓慢发展的故障, 传统的监测报警方式存在着响应延迟、识别率低、过于依赖操作人员的经验等问题, 已不能适应现代化核电站日常维护的要求。本文结合智能技术的发展情况, 对核电设备智能化监控及预警的意义进行了阐述, 总结了目前的研究进展及其存在的主要缺陷, 着重介绍了关于智能化监控技术和故障特征提取的方法、预警模型的设计以及优化的过程等内容, 以期能够给核电设备的安全运行带来一定的帮助并促进核电行业的智能化和精细化运维的发展。

## 关键词

核电设备; 智能监控; 故障预警; 特征提取; 智能模型

## 1 引言

在世界能源结构逐步向清洁化、低碳化的进程中, 核电由于其低排放、大功率、稳定供电的优势成为保障国家能源安全的重要力量。而核电设备作为核电站运行的主要载体, 其中包含着反应堆、主泵、蒸发器、发电机等一系列重要的部件, 它们的工作状况决定了整个核电站的安全程度以及工作效率。相比于一般性的工业设备而言, 核电设备长时间处于高温、高压、强辐射以及介质腐蚀等环境下工作, 所以一旦出现故障就会给机组带来非计划性的停机, 造成巨大的经济损失并给核安全带来挑战。本文从研究意义出发, 对研究进展进行了总结, 并介绍了研究方法的设计及其改进和完善过程, 以期能够给相关的研究人员和工程技术人员带来

一定的帮助。

## 2 核电设备运行状态智能监控与故障预警的研究意义

### 2.1 保障核电站安全运行的现实需求

核电站安全是指为确保核电站运行不对人员、社会及环境造成放射性危害, 而采取的一系列技术与管理措施的综合。其根本目标是保护工作人员、公众健康与环境安全, 防止放射性物质意外释放。安全理念核心是“纵深防御”, 通过燃料包壳、一回路压力边界和安全壳等多重实体屏障, 以及从预防、监控到应急响应的多层次防护体系来保障安全。中国依据《核安全法》等法规, 实行严格的许可与监管制度, 贯彻“安全第一、预防为主”原则, 并持续应用先进技术提升核电站的固有安全性与安保能力。

安全是核电发展生命线, 核电设备安全可靠运行是核电站安全基本保障, 在核电设备运行过程中, 故障发生一般

【作者简介】商海东(1982-), 男, 中国吉林白城人, 高级工程师, 本科, 从事核电运行研究。

都有一定过程,初期故障信号较弱、不易察觉,传统的监测手段很难及时发现这些变化。而智能化监控及故障预警系统可以对设备运行中多个方面信息进行实时收集,并利用智能算法对其进行分析计算,准确判断出设备出现的问题,发出报警提示,给工作人员留有足够的时间来处理问题,避免问题扩大。此外,智能化监控还能实现对高辐射、高危地区设备的远程监控,代替人工巡检,降低运维人员接触危险区域的机会,减少人为因素造成的安全隐患,从根本上提高核电站的安全性,构筑起一道坚固的核能安全屏障。

## 2.2 优化核电设备运维模式的必然选择

传统的核电设备维修方式主要是定期维修的方式,有固定的检修周期、维修费用高、资源浪费严重等缺点。定期维修方式忽视了设备的真实情况,在设备良好的情况下进行不必要的维修增加了维修开支并且缩短了设备寿命;而在设备已经出现隐患的情况下又不能及时处理就会导致更大的损失。智能化监测及报警系统可以随时了解设备的工作状况并准确评估其健康程度,根据具体情况采取相应的维修措施,“按需维修”、“预见性维修”,克服传统定期维修方式的弊端。

## 2.3 推动核电产业健康发展的重要支撑

目前,世界核电行业正处于一个新的发展时期,在中国,核电行业发展也在稳步进行着规模化、智能化进程之中,自主三代核电技术已经实现了规模化应用,新型核电技术层出不穷。核电行业的良好发展需要有良好的设备运维技术支持。智能监控及故障预测技术是核电智能化的重要一环,可以提高核电设备运行可靠性以及稳定性,增强核电行业竞争力;同时开展相关工作还可以促进人工智能、物联网等新技术与核电相结合,丰富和完善核电设备智能化运维技术体系,打破国外的技术封锁,提高我国核电行业自主研发能力。

# 3 核电设备运行状态智能监控与故障预警研究现状

## 3.1 智能监控技术的应用现状

目前,核电设备智能化监控技术已经逐步由实验室的研究走向工程应用,形成多层次、多方面的监测系统,在传感检测上也由原来的单一参数监测发展到现在的多种参数全方位监测,利用各种智能传感器可以对设备温度、压力、振动、位移以及绝缘状况等多种因素进行实时采集,以供后续分析使用。而且无线传感、光纤传感等新技术的应用克服了传统有线传感布线烦琐及不适合高辐射环境的缺点,可实现对高危区域设备的远距离非接触式监控[1]。

## 3.2 故障预警方法的研究现状

对核电设备故障预警技术的研究已经由原来的以阈值为基础的报警转变为以数据驱动、模型驱动为主的智能化报警方式,出现了各种报警方式共存的局面。而基于模型驱动的报警方法是利用设备运行规律建立数学模型来仿真设备

良好的工作状况,然后比较真实的运行情况以及模型计算出的结果之间的差异从而确定设备是否出现异常,在理论上较为严谨并且有较强的可解释性,适合用于结构简单、原理明确的核电机组上。

## 3.3 现有研究的核心不足

虽然核电设备智能化监测及故障预报技术已经有所发展,但是仍然有许多问题亟待解决,阻碍其大规模、标准化的应用。首先是对多种信息源的数据整合不足,各种类型以及来源不同的监控数据之间格式不一致、通信协议不同,无法进行有效的综合分析处理,使得大量的有用的信息被浪费掉了,降低了预报准确性;其次是从这些复杂的环境中提取出有效的特征是非常困难的,在运行过程中会产生大量的干扰信号并且各种类型的故障之间也会有共同点,因此很难准确地找出具体的故障特征特别是微小的变化;最后是预报模型的一般性较差,目前大多数的研究都是针对某一种具体的设备或者是特定条件下的情况来建立模型,对于其他的情况考虑较少,所以很难适应所有的场合;4.模型测试与实际应用相脱离,目前大部分的工作都只是在实验室里面做了一些简单的实验验证,并未经过长时间的真实环境下的考验,因此得到的结果并不稳定可靠,而且报警的结果也不能及时反馈给维修人员以供参考使用,这就不能充分发挥报警的作用了。

# 4 核电设备运行状态智能监控与故障预警方法

## 4.1 核电设备运行状态智能监控技术

核电设备运行状态智能监控技术以“全方位感知、智能化分析、可视化呈现”为目标,建立多层次、多角度的监控系统,包括传感监测层、数据传输层、数据分析层以及可视化展示层。传感监测层是整个监控系统的基石,在充分考虑核电设备自身特性和实际需求的基础上安装各种类型的智能化传感器来获取设备运行的相关信息,在一些特殊的环境下如高辐射、高温、高压等情况下使用抗辐射、耐高温、防腐蚀的专业化传感器保证采集到的数据真实有效;在设备的重要部位上安装高精度的传感器,用于对设备的振动、位移以及其他容易发生故障的地方进行实时监控,从而及时发现隐患[2]。

## 4.2 核电设备故障特征提取方法

首先,对采集到的监测数据进行预处理,在此基础上利用小波变换、傅里叶变换等信号分析方法对原始监测信号进行分解与重构,消除其中噪声的影响,提取出有用的信息。小波变换有较好的时频局部性,可以很好地捕捉到信号中瞬间的变化情况,适合用于获取设备早期微弱故障特征;而傅里叶变换可以把时域信号转化为频域信号,有利于研究其频率特性,发现设备振动或噪声等信号中存在的异常频率成分,从而为后续的故障特征提取做铺垫。

第二,使用特征融合方法,把各种类型以及不同维度

的特征结合起来,形成一个完整有效的故障特征向量。由于单一特征无法充分描述设备发生故障的情况,在此基础上引入时域特征、频域特征及时域—频域联合特征,从设备运行参数中得到均值、方差、峰值、频率峰值等一系列特征量值,经过筛选、降维之后,去掉多余无效的信息,只保留可以明显区分设备处于良好工作状态还是存在异常状况的主要特征信息,从而提高对故障特征识别的准确率和可靠性。

最后,基于深度学习的方法进行故障特征的自动提取以及优化,在此基础上建立了深度卷积神经网络、循环神经网络等模型,对预处理后的监测信号进行训练,让其自行学习并发现其中隐藏的信息,而不需要人为参与进来,从而克服传统的特征提取方式过于依靠人的主观判断并且准确率较低的问题,提高故障特征提取的速度和准确度,为之后建立故障预测模型做好铺垫。

#### 4.3 核电设备智能故障预警模型构建

在模型选取上,根据核电设备发生故障的特点,选择合适的智能化算法建立预警模型。对于设备故障的复杂性和非线性问题,则采用深度学习以及传统的机器学习方法相结合的方式建模,在此过程中,由深度学习方法来发现数据内部的一些深层次的关系,并从中提炼出一些复杂的故障特征,从而提高预警模型准确率;而传统机器学习用于简单的故障识别以保证模型时效性。另外还加入了注意力机制使得该模型更加关注重要的故障特征进而使模型具有更高的准确性及鲁棒性。

在模型训练上,收集核电设备正常运行及异常运行的历史数据,再对这些数据进行预处理以及特征提取之后,形成用于模型训练的数据集和测试数据集。将训练数据集作为预警模型的输入,在不断调节模型参数、改进模型结构的基础上,让其可以很好地掌握设备正常运行以及异常运行之间的区别,从而达到对设备出现故障及时发现并报警的效果。在训练时使用交叉验证防止出现过拟合现象提高模型泛化能力保证该模型适用于各种情况下的各种类型的设备。

#### 4.4 预警方法的验证与优化

在实验室验证环节中,搭建核电设备仿真运行平台,在其上模拟设备正常工作、轻微故障以及严重故障等情况下

的运行情况,收集相应的监测信息,采用本文所提出的一种智能化监控及报警方法来进行报警测试。根据报警结果与真实发生的报警情况进行比较,研究该报警方式的报警准确率、报警延迟时间和误报漏报次数来检验该报警方案的有效性;另外通过改变仿真工况的方式考察报警模型的泛化性能,保证报警模型可以适用于各种不同的工况下设备的工作状况 [3]。

在工程场景测试环节,选择真实的核电站重要设备,在其上应用本文所提出预警方法进行实时监测,获取设备运行数据及故障处理信息,来检验该预警方法的有效性和可靠性。根据实际工程应用中存在的问题:数据噪声影响、工况变动等,改进预警方法;对于数据融合不够的问题,优化数据标准化以及融合算法提高数据利用率;对于故障特征提取不准确的问题,优化特征提取算法加强对早期微小故障特征的识别率;对于模型泛化性能不佳的问题,增加模型训练样本量,改进模型架构使模型具备更好的鲁棒性以应对各种情况下的多种类型的设备。

## 5 结语

本文提出的智能化监控技术,建立了全方位、多层次的监控机制,可以做到对核电设备运行情况全天候、全方位监控;故障特征提取的方法融合信号分析技术和机器学习算法提高了故障特征提取准确率以及速度,可以及时发现设备初期微小故障信息;智能故障预报模型采取了基于数据驱动及基于模型驱动两种方式相结合的方法,在保证预报准确性同时兼顾其鲁棒性,可以做到对设备发生各种类型故障进行提前预报并分级报警;经过实验室及工程应用两方面试验研究改进使得预报方法更加成熟稳健。

## 参考文献

- [1] 苏宏伟,贾林.核电设备在线状态监测与故障预警系统的研究与设计[J].工业技术创新,2015,02(02):216-220.
- [2] 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.D
- [3] 万欣.基于核电设备过程变量的故障预警与诊断技术研究[D].华北电力大学(北京),2023.