

# 核电厂冷源系统可靠性提升技术研究

吴锐鸿 高帆 王超

大亚湾核电运营管理有限责任公司

DOI:10.12238/pe.v2i4.8402

**[摘要]** 核电厂冷源系统在保持反应堆温度稳定性和确保核电站安全、高效运行方面发挥着不可或缺的重要作用。但是现有的冷源系统在设备老化、操作不当等几个关键领域也面临很多的问题与难题。本文针对一些问题讨论增强冷源系统稳定性的多种技术与方法,通过设备检测与监控技术、预防性维护技术、故障诊断与处理技术以及人员培训与管理技术,希望通过提升冷源系统的可靠性和安全性水平,从而提升核电站的运营效能以及应急响应能力。

**[关键词]** 核电厂; 冷源系统; 可靠性; 预防性维护; 故障诊断

**中图分类号:** TL48 **文献标识码:** A

## Research on the reliability improvement technology of cold source system in nuclear power plant

Ruihong Wu Fan Gao Chao Wang

Daya Bay Nuclear Power Operation Management Co., LTD

**[Abstract]** The cold source system of nuclear power plants plays an indispensable role in maintaining the reactor temperature stability and ensuring the safe and efficient operation of nuclear power plants. However, the existing cold source system also faces many problems and difficult problems in several key areas such as equipment aging and improper operation. This paper discusses a variety of technologies and methods of enhancing cold source system stability, through equipment detection and monitoring technology, preventive maintenance technology, fault diagnosis and processing technology and personnel training and management technology, hope to improve the reliability and safety level of cold source system, so as to improve the operation efficiency of nuclear power plant and emergency response ability.

**[Key words]** nuclear power plant; cold source system; reliability; preventative maintenance; fault diagnosis

### 引言

冷源系统是电站循环水系统的简称。它的主要功能是向核岛的安全工厂用水提供冷却水,并向常规岛的冷凝器和辅助设备冷却器提供冷却水。它是电站运行的冷端系统。但是有时海带等杂物会暂时堵塞过滤器,导致出口被关闭和堵塞。冷源事件的发生频率会影响发电厂的安全性和可靠性。本文综合当前的科研和实际运行经验构建了若干旨在提高核电厂冷源系统可靠性的技术方案,本研究旨在通过深入系统的探索与研究,为核电站冷源系统可靠性的提升提供坚实的科学理论支撑和可行性建议,确保核电厂的安全,高效运行,已经成为既定目标。

### 1 核电厂冷源系统概述

#### 1.1 核电厂冷源系统的作用

核电站冷源系统在确保反应堆温度稳定方面发挥了至关重要的作用,同时也确保了电厂的运行安全和效率。冷却系统由若干核心部件和子部件组成,其中以冷凝器、冷凝泵、热交换器为

主,它们之间互相配合以确保热能得到高效利用。核反应堆中的核燃料在产热之后会经过一回路循环系统传输到蒸汽发生器中,并经过二回路的给水系统传输到外部环境中。在应急情况下,采用冷源系统可使反应堆温度快速下降,避免燃料棒开始融化和放射性物质的外泄。除上述外,冷源系统向核电站其他辅助设备供应所需热水。核电厂可以通过整合冷源系统的各种功能来进行高效能源转换和利用,这不仅可以进行高效能源转换,还能在最大程度上保障环境和操作人员的安全。核电站的整体运营效能及紧急反应能力受系统的可靠性及性能的直接影响。

#### 1.2 冷源系统的组成部分

核电站的冷源系统一般包括一回路冷却系统、二回路主给水循环系统、辅助冷却水系统、核岛设备冷却水系统、常规岛冷却系统等几个主要部分。一回路冷却系统主要是通过将核反应堆产生的热量通过主泵的强近循环带往蒸汽发生器;二回路主给水循环系统由蒸汽发生器、凝结水泵、主给水泵、加热器

组成,主要负责把核反应堆产出的热转变为汽轮机做功的蒸汽,并将这些热量释放至冷凝器中。当主给水系统失效时,辅助给水系统能够提供后备的冷却手段,从而确保核反应堆能够平稳地过渡到安全状态。

### 1.3 辅助冷源系统的工作原理

辅助冷却系统的组成通常涉及辅助给水泵、大气排放系统、辅助给水水箱等组成,这对主给水系统的故障或紧急状况起着关键性的作用。辅助冷却泵正常处于备用状态,在主给水发生故障或无法正常工作的情况下维持冷却介质循环以避免核反应堆温度过高的功能。辅助冷却系统常被视为核电站面对严重事故或突发状况时,为了快速降低反应堆的运行温度,避免核反应堆内部燃料熔化和核泄漏事件,所采用的终极防护措施。

### 1.4 冷源系统的运行特点

核电站冷源系统的运行是建立在热力学的理论基础之上的,也就是说核反应器内的核燃料在裂变时释放出巨大的热能,从而提高反应堆的温度。为了避免核反应堆内温度过高,一回路冷却系统内的冷却媒介被泵入核反应堆内,吸热后通过蒸汽发生器散发出去,这些热量被进一步转移到二回路循环介质上,从而蒸发成为高温高压蒸汽。这种高温高压的蒸汽驱动汽轮机旋转,产生机械动力,并将其转换成电能供给电力系统。冷却后的冷却液经过换热器的再循环,通过冷凝器进行散热,最终热量经海水进行冷却。这个系统主要依靠循环液体,换热器和其他流动设备来实现核反应堆所产生热能的平稳传递和使用,以确保核电站的顺利运行、高效运行以及其中冷源系统是否能够持续稳定工作对于整个核电站的安全可靠性至关重要。

## 2 核电厂冷源系统存在的问题与挑战

### 2.1 故障频发问题分析

核电站冷源设备经常发生故障的现象是绝对不可低估的。首先要清楚地认识到设备老化的确是诱发设备发生故障的一个关键因素。当装置的使用时长增加时,冷却泵和换热器等核心设备可能会遭受摩擦和腐蚀的作用,进一步可能会损害它们的功能和稳定表现<sup>[1]</sup>。再者,不恰当的操作方式是引发故障的重要原因。可能因人为操作失误或维护不当造成系统压力异常和冷却介质的泄漏,最严重的是造成安全事故。进一步地海洋温度、盐分等外界环境因素的涨落可能会扰动冷源系统稳定工作,进而使系统失效。

### 2.2 安全隐患分析

核电站冷源系统中可能存在的安全性问题,是不可小视的。系统的堵塞是个潜在的安全风险问题,海水中的杂质和生物污染可能会阻塞冷却系统中的管路和热交换器,影响系统的工作效能甚至诱发系统失效。此外地震和海啸等灾难也可能对冷源设施产生不良影响,从而对核电站的安全运行产生不利的影

### 2.3 可靠性指标分析

核电站冷源系统可靠性标准被视为评估冷源系统功能及安全特性的主要参考依据。但是当前冷源系统在可靠性方面仍有很多问题急需解决。首先是某些设备的稳定性没有达到预设标

准而造成系统频繁故障,扰乱核电站的正常工作。再者,由于我们拥有有效的监测和维护手段,可能会导致某些安全风险无法得到迅速发现和应对,这就可能会使系统可靠性下降。此外,冷源系统在设计和操作管理上存在很多不完善的地方,比如设备布置的不合理和操作规程的不全面,这将对系统的可靠性和安全性产生负面影响。对这一冷源系统的可靠性和改良方法进行更深入的研究,显得尤为关键。采取如优化系统设计、改善设备品质、加强监控、持续维护等措施,可显著增强冷源系统的稳定性指标,确保核能发电站的平稳、安全运行。与此同时,构建一套完善的可靠性评价体系将是未来重点研究的方向,从而更细致和更精确地评估冷源系统的运行性能和安全性能。此举能够帮助及时发现和解决存在的问题,继而推动核电站运行效果和安全级别不断提升。

## 3 核电厂冷源系统可靠性提升技术研究

### 3.1 设备检测与监控技术

设备的检测与监测技术是强化核电站冷源系统平稳运行的主要策略之一。通过在冷却泵、蒸汽发生器等关键零件上装置先进传感器和监测设备进行研究,可进行包括温度、压力、流量和振动等许多重要参数被实时监测。这种在线传感器具有全时段实时在线监测的功能,能够迅速捕捉异常状态并预防可能发生的故障问题。以红外线热像仪技术为例,该技术能够有效探测出设备表面温度异常波动情况,以便于预先发现设备中可能出现的温度过高或者泄漏现象。另外,可以借助声学检测技术来分析和检测设备在工作过程中所产生的声波频率和振幅等参数,以此来判断设备是否发生了内部故障<sup>[2]</sup>。为使冷源系统的检测精度和响应速度达到最优,完全可以采用智能监控体系和大数据分析相结合的方式进行实时分析和处理,进而精准定位故障的具体部位和触发原因,进而为之后的修复工作打下了坚实的基础。

### 3.2 预防性维护技术

预防性维修技术是确保核电站冷源系统可靠性最重要的方法。通过早期制定并执行适当的维护方案,有可能在设备出现故障之前采取有效防范措施以避免系统停机以及一切可能出现的意外状况。为了保证设备始终工作在最佳状态下,预防性维修包括定期检查、定期试验、润滑处理、清洁和部件替换等工作。随着预防性维护技术的不断进步,更多的核电站开始采纳状态基础维护(Condition-Based Maintenance CBM)这一策略。CBM实时检测设备的工作状态,并借助大数据的深度分析与健康状况的评价动态微调维护策略。与传统预防性维护方式相比较,CBM具有更高的精度,能够预测设备故障发生的特定时刻,并针对这些时刻进行特定维护,尽可能地延长设备的使用年限。为了有效地执行预防性维护,必须构建一个详尽的维护管理框架和标准化的操作程序,其中包括建立设备综合维护方案、维护文档和质量评估准则。操作人员在操作过程中必须严格遵守相关规定,从而确保每次维护工作能够起到高效作用并达到所需效果。

### 3.3 故障诊断与处理技术

对于改善核电站冷源系统的运行稳定性和安全性来说,问题的诊断和应对方法至关重要。故障处理过程中采用了先进的诊断工具及算法来辅助问题部位的快速确定与锁定。举例来说,依托于机器学习和人工智能的故障诊断系统能够通过分析大规模历史数据和连续监控数据,预估可能出现故障的位置和模式,实施预警措施。一旦系统发生异常将立即触发告警,并对可能出现的问题提供原因及应对策略<sup>[3]</sup>。另外,在故障检测的场景中,除了常规的技术之外,振动分析、红外热成像、电流波形分析等非入侵的检测方法也被广泛使用。在故障处理过程中,快速的反馈机制和高效的解决策略是确保系统能够连续稳定工作的关键所在。故障发生后,应立即启动应急预案及处理机制,确保故障对整个系统的不良影响最小。处理手段主要有故障隔离技术、快速系统修复、备用系统的快速切换等多种措施。以此为例,当设备出现故障后,可以选择启动备用水泵或者备用冷却系统,以避免系统的突然中断运行,通过系统和设备的冗余设计来保证,同时确保备用配件有足够的库存,能够以最短的时间对故障设备进行替换和修复。

### 3.4 人员培训与管理技术

为了确保核电厂冷源系统的平稳运行,不仅要靠先进技术装置,还要求操作者具备卓越的技术专长和管理才能。因而,人员的培训以及管理的持续优化是提高系统可靠性的必要条件。一方面,应定时对操作者进行全面、系统的知识训练、设备使用技巧和维修能力培训,以确保操作者不仅能够熟练运用最新的操作准则,同时具备出色的维护技巧,让他们的综合素养和应对应急状况的能力得到提高。课程内容中可能涉及设备的操作理念、经常发生的故障以及相应的修复手段、应急响应等,并通过将理论知识与实际操作融合在一起,让操作团队更深入地掌握和应用这些技能。从这一视角出发,核电厂需制定科学、适用的人员管理体系和奖励策略。明确职责、考核绩效、制定适当的奖惩制度等都有助于激发员工的工作热情和责任感。并且,定时

安排技术的互相分享和经验交流,使得操作成员能在彼此间学习,互补优势,携手进步。以此为基础,操作团队的综合技能和水平也可采取聘用外部专家或者联合进行培训活动的多种途径来进行综合提高。就管理层面而言,必须强化岗位轮换与交叉技能培训,让每一位操作者掌握更多的技能,以确保任何职位空缺时的能力,其他员工可以迅速接替,确保系统持续、稳定地工作。

## 4 结论与展望

核电站冷源系统工作的稳定性和安全程度对于整个核电站的运行起着至关重要的作用。在对当前系统存在的各种问题进行深入讨论后,研究并提出旨在加强冷源系统运行稳定性、对设备进行检测和监督、防止维修等措施,故障检测和处理及人员培训和管理是核心技术方案。利用高端先进的传感器和监测工具进行实时在线监测活动可显著增强系统的故障预警能力;以状态为基础的预防性维修措施能够延长设备的使用时限,并优化整个系统的运作效率;运用机器学习、人工智能等先进技术对故障进行诊断处理,能够更及时地发现并处理问题,减轻故障对整个系统运行所造成的负面效应;从人力资源学角度来看,强化操作者技能培训和科学管理是确保系统平稳运行的核心措施。有了这些多方面的辅助,核电站制冷系统的稳定性与安全性有望获得显著提升。

### [参考文献]

- [1]俞毅,刘珍,张青,等.连续运行冷源系统的优化设计——可靠性及节能问题研究(2)[J].制冷技术,2010,30(03):34-38.
- [2]周璇,闫学成,闫军威.基于BOA-SVM的冷源系统温度传感器偏差故障检测[J/OL].控制理论与应用:1-9[2024-07-01].
- [3]周璇,闫学成,闫军威,等.温度传感器偏差故障对冷源系统的影响分析[J].低温与超导,2022,50(11):55-61.

### 作者简介:

吴锐鸿(1988--),男,汉族,广东省汕头市人,本科,工程师,大亚湾核电运营管理有限责任公司,核电运行方向。