

核电安全运行关键设备的维护与监测

李建业

中核运维技术有限公司 浙江杭州 311200

摘要: 核能作为一种高效、清洁的能源,在全球能源结构中占据着重要地位。确保核电安全运行是核能产业可持续发展的核心,而关键设备的维护与监测则是实现这一目标的关键环节。本文深入探讨核电安全运行中关键设备的维护策略与监测技术,分析常见设备故障类型及原因,介绍预防性维护、预测性维护等维护策略,阐述振动监测、温度监测等多种监测技术及其应用,强调维护与监测工作中的人员培训与管理以及未来发展趋势,旨在为提高核电安全运行水平提供有益参考。

关键词: 核电安全; 关键设备; 设备维护; 设备监测

1 引言

全球能源需求持续增长,环境保护愈发受重视,核能因高效、清洁、低碳成为多国能源战略的重要部分。但核电产业的发展始终伴随着对安全问题的高度关注。核电站的运行涉及大量复杂且关键的设备,任何一台关键设备的故障都可能引发严重安全事故,不仅给核电站带来巨大损失,还会影响周边环境和公众健康。因此,确保核电安全运行十分关键,而关键设备的可靠维护与精准监测则是保障核电安全的基石。深入研究和完善核电关键设备的维护与监测体系,对于推动核能产业的安全、可持续发展具有极为重要的现实意义。

2 核电关键设备概述

2.1 核反应堆

核反应堆是核电站的核心设备,其作用是通过可控核裂变反应产生热能。在核反应堆中,核燃料(如铀-235)在特定条件下发生链式裂变反应,释放出大量能量,这些能量以热能形式存在。核反应堆的类型多样,常见的有压水堆、沸水堆、重水堆等。不同类型的反应堆在结构和运行原理上存在一定差异,但都需要严格控制反应过程,确保反应堆的安全稳定运行。

2.2 蒸汽发生器

蒸汽发生器是连接核岛和常规岛的关键设备,其主要功能是将核反应堆产生的热能传递给二次侧的水,使其产生蒸汽,驱动汽轮机发电。在压水堆核电站中,一回路的高温高压冷却剂在蒸汽发生器的传热管内流动,将热量传递给管外的二回路水,二回路水受热蒸发形成蒸汽。蒸汽发生器的

性能直接影响核电站的热效率和安全运行,其传热管的完整性至关重要,一旦传热管发生泄漏,可能导致一回路放射性物质泄漏到二回路,引发严重的安全问题。

2.3 汽轮机

汽轮机是将蒸汽的热能转化为机械能的设备。来自蒸汽发生器的高温高压蒸汽进入汽轮机,推动汽轮机的转子高速旋转,进而带动发电机发电。汽轮机的运行效率和稳定性对核电站的发电能力有着重要影响。汽轮机在运行过程中,需要承受高温、高压蒸汽的冲击以及高速旋转产生的巨大离心力,因此对其材料性能、制造工艺和运行维护要求极高。

2.4 发电机

发电机的作用是将汽轮机输出的机械能转换为电能。它通过电磁感应原理,在转子和定子之间的磁场中,使导体切割磁力线产生感应电动势,从而输出电能。发电机的性能直接关系到核电站输出电能的质量和稳定性。在运行过程中,发电机需要保持良好的绝缘性能,防止电气故障的发生。

3 核电关键设备常见故障类型及原因分析

3.1 磨损故障

磨损是核电关键设备常见的故障类型。如,汽轮机的叶片在长期高速旋转过程中受到蒸汽中微小颗粒的冲刷,导致叶片表面出现磨损痕迹,严重时会影响叶片的气动性能,降低汽轮机的效率。此外,核反应堆中的控制棒驱动机构在频繁动作过程中,其机械部件之间也会发生磨损,影响控制棒的正常动作。磨损故障的主要原因包括设备运行时的机械摩擦、工作介质中的杂质颗粒以及设备的设计和制造缺陷等。

3.2 腐蚀故障

由于核电设备所处的环境较为特殊,许多设备会面临腐蚀问题。例如,蒸汽发生器的传热管长期处于高温高压的水和蒸汽环境中,容易发生腐蚀。腐蚀类型包括均匀腐蚀、点蚀、应力腐蚀开裂等。其中,应力腐蚀开裂是一种较为危险的腐蚀形式,它是在拉应力和特定腐蚀介质共同作用下发生的。蒸汽发生器传热管的材料选择不当、水质控制不佳以及运行过程中的应力集中等因素都可能导致腐蚀故障的发生。

3.3 疲劳故障

核电设备在长期运行过程中,会承受交变载荷的作用,从而引发疲劳故障。以汽轮机转子为例,在启动、停机以及负荷变化过程中,转子会受到温度和压力的交变作用,产生交变应力。当交变应力超过材料的疲劳极限时,经过一定的循环次数后,转子表面就会出现疲劳裂纹。随着裂纹的逐渐扩展,最终可能导致转子断裂,引发严重的安全事故。设备的频繁启停、运行工况的不稳定以及材料的疲劳性能不足等是导致疲劳故障的主要原因。

3.4 电气故障

发电机等电气设备在运行过程中可能出现电气故障。例如,发电机的定子绕组可能因绝缘老化、受潮、过载等原因发生短路故障,导致发电机无法正常发电。此外,电气设备的控制系统也可能出现故障,影响设备的正常运行和控制。电气故障的原因包括电气设备的绝缘性能下降、电气元件的质量问题、运行环境的电磁干扰以及人为操作失误等。

4 核电关键设备的维护策略

4.1 预防性维护

预防性维护是核电关键设备的重要维护策略。依据设备运行时间、工况等参数,按预定计划定期检查、保养和维修,如定期拆解检查核反应堆控制棒驱动机构、更换磨损的零部件,周期性化学清洗蒸汽发生器,去除传热管表面的污垢。这种维护方式能提前排查设备隐患,提升设备的可靠性与安全性,但因基于固定时间或运行参数进行维护,预防性维护也存在一定的局限性,易出现维护过度或不足的情况。

4.2 预测性维护

预测性维护是近年来随着信息技术和数据分析技术的发展而兴起的一种先进维护策略。它通过对设备运行过程中产生的各种数据(如振动、温度、压力等)进行实时监测和分析,利用先进的算法和模型预测设备的剩余使用寿命和故

障发生的可能性。例如,利用振动监测技术对汽轮机的运行状态进行监测,通过分析振动信号的特征参数,预测汽轮机叶片是否存在磨损、裂纹等故障隐患。当预测到设备可能出现故障时,及时安排维护人员进行针对性的维修,避免设备故障的发生。预测性维护能够提高维护的针对性和有效性,减少设备的停机时间,降低维护成本。

4.3 基于可靠性的维护

基于可靠性的维护(Reliability-Centered Maintenance, RCM)是一种以设备可靠性为中心的维护策略。它通过对设备的功能、故障模式及其影响进行分析,确定设备的关键功能部件和重要故障模式,并针对性的制定相应的维护策略。例如,对于核反应堆中对安全运行至关重要的控制棒系统,采用 RCM 方法确定其关键功能部件,如控制棒驱动电机、位置传感器等,并根据这些部件的故障模式和影响,制定详细的维护计划,包括定期检查、测试、更换等维护措施。RCM 方法能够确保维护资源得到合理分配,优先保障对设备可靠性和安全性影响较大的部件的维护需求。

4.4 维护计划的制定与优化

维护计划的制定是设备维护工作的重要环节。维护计划应综合考虑设备的类型、运行工况、历史故障数据、维护资源等因素。在制定维护计划时,首先要对设备进行分类,根据设备的重要性和故障后果的严重程度,确定不同的维护级别。同时,要合理安排维护时间和维护内容,避免维护工作过于集中或冲突。此外,随着设备运行数据的不断积累和维护经验的不断丰富,应及时对维护计划进行优化,提高维护计划的科学性和合理性。

5 核电关键设备的监测技术

5.1 振动监测技术

振动监测广泛应用于汽轮机、发电机等旋转设备。其系统由传感器、信号采集器和数据分析软件构成。传感器安装于轴承座、机壳等关键部位采集振动信号,信号采集器将模拟信号转换为数字信号传输给软件,经时域、频域分析提取幅值、频率、相位等特征参数。当汽轮机叶片磨损或断裂时,振动信号特征改变,借此可及时判断设备故障及类型。

5.2 温度监测技术

温度是设备运行关键参数,过高温度会降低设备性能甚至引发故障。热电偶、热电阻等温度传感器被用于监测,前者利用热电效应,响应快、精度高;后者基于电阻随温

度变化特性。传感器安装在蒸汽发生器传热管、汽轮机轴承等发热部位,当温度超阈值,监测系统报警,防止设备过热损坏。

5.3 压力监测技术

压力监测对核电设备运行意义重大,如核反应堆冷却系统压力影响冷却剂循环与反应堆安全,蒸汽发生器两侧压力异常或预示泄漏故障。压力传感器将压力信号转为电信号传输,监测系统实时分析,压力超出范围即报警,便于运行人员及时处理。

5.4 无损检测技术

无损检测可在不破坏设备的情况下检测内部缺陷。超声波检测利用超声波遇缺陷反射折射特性,能检测裂纹、气孔等,对面积型缺陷敏感;射线检测通过射线穿透材料成像,直观呈现缺陷形状、大小和位置,但有辐射危害;磁粉检测适用于铁磁性材料表面及近表面缺陷,通过磁痕显示缺陷;渗透检测用于非多孔性材料表面开口缺陷,经渗透、显像显示缺陷痕迹,为设备维护提供依据。

5.5 智能监测系统的应用

物联网、大数据、人工智能推动智能监测系统在核电领域广泛应用。该系统结合传感器与物联网实现数据实时采集、传输与共享,大数据技术用于存储分析海量数据挖掘运行规律,人工智能通过机器学习、深度学习训练模型,实现故障自动诊断与预测。如深度学习分析振动数据建立诊断模型,提升故障诊断准确性与效率,实现全方位、实时、智能监测。

6 维护与监测工作中的人员培训与管理

6.1 人员培训的重要性

核电关键设备维护与监测专业性强,要求人员兼具扎实专业知识与先进技术能力。通过培训,可使维护与监测人员及时掌握最新核电技术、设备维护与监测标准及安全法规。如定期组织维护人员学习新型核电设备维护要点与故障诊断方法,为监测人员开展数据分析技术培训。只有经系统、全面培训的人员,才能保障核电关键设备安全运行。

6.2 培训内容与方式

培训内容围绕核电专业知识、设备维护技能、监测技术应用与安全法规展开。核电专业知识培训涵盖核反应堆物理、热工水力等基础内容;设备维护技能培训针对核反应堆、

蒸汽发生器等设备,讲解维护流程与故障处理技巧;监测技术应用培训聚焦振动、温度监测等技术的原理与实操;安全法规培训则强化人员对核电安全法规标准的认知。培训采用多元方式,课堂讲授系统传授理论,现场实操提升动手能力,模拟演练设置故障场景锻炼应急处理能力,在线学习借助网络资源提供灵活学习渠道。

6.3 人员管理与绩效考核

人员管理与绩效考核是保障工作质量的关键。建立完善管理制度,明确岗位职责与工作流程,强化过程监督。制定科学考核指标,从设备维护及时性与质量、故障诊断准确性、监测数据完整性等维度量化考核。通过考核激励机制,对表现优异者给予奖励与晋升,对不达标者进行教育处罚,必要时调整岗位,以此提升人员工作积极性与工作效能。

7 结论与展望

核电安全运行是核能产业发展核心,关键设备维护与监测至关重要。核反应堆、蒸汽发生器等设备易出现磨损、腐蚀等故障,通过预防性、预测性等维护策略,以及振动、温度监测等技术,结合人员培训管理,可提升设备可靠性与安全性。展望未来,科技进步为核电设备维护监测带来新机遇,智能化、自动化维护技术将广泛应用,高灵敏度传感器、多参数融合监测等技术持续发展,大数据、物联网等深度应用将实现更高效的数据管理与远程协同,推动维护监测体系不断完善创新,为核电产业安全可持续发展筑牢根基。

参考文献:

- [1] 郑丽馨,许友龙,邹象,等.基于运行事件的核电厂安全状况评价方法研究及应用[J].核安全,2025,24(01):10-18.
- [2] 坚持以系统思维构建核电维修安全体系[J].企业文明,2025,(04):114-115.
- [3] 沈江飞,张圣,喻昕,等.核电厂核安全设备运行状态监测技术研究[J].价值工程,2024,43(28):14-18.
- [4] 丁凤波.核电厂运行中高风险项目的分析与优化措施研究[J].中国设备工程,2024,(S2):127-129.
- [5] 运行安全评审组成立40年:改进全球核电厂运行安全[J].辐射防护通讯,2024,44(01):40-41.

作者简介:李建业(1981.11—),男,山西省静乐县,大学本科,高级工程师,研究方向:核电厂运行管理、核电厂设备管理、核电厂冷源管理。