

核电厂转动设备常见故障分析及检修策略优化

杜岩松 钟俊 范志岚
浙江省中核浙能能源有限公司 浙江 宁波 315700

摘要: 核电厂转动设备是机组安全稳定运行的核心,其运行环境高风险、高要求。本文梳理典型转动设备及运行特点,分析轴承、密封系统、对中与平衡等常见故障模式及机理。提出检修策略优化方案,包括构建状态监测技术体系、设计基于状态的检修决策流程、优化检修周期与范围、备件与库存管理等,旨在降低故障率、提高可靠性,实现检修资源合理配置,保障机组连续运行。

关键词: 核电厂;转动设备;故障分析;状态检修;检修策略优化

引言: 核电厂转动设备作为保障机组安全稳定运行的关键动力单元,涵盖主设备与辅助设备,在核能发电过程中发挥着不可替代的作用。然而,其运行环境特殊,面临辐射、严苛工况、强腐蚀介质等诸多挑战,故障发生概率较高。传统定期检修模式存在局限性,难以满足核电厂安全、经济运行需求。因此,深入分析转动设备常见故障,优化检修策略具有重要的现实意义。

1 核电厂典型转动设备及运行特点

1.1 典型设备清单与功能

核电厂转动设备是保障机组安全稳定运行的核心动力单元,涵盖主设备及辅助设备,清单及功能明确且具有极强的专业性。主转动设备中,反应堆冷却剂泵(主泵)是核心,负责驱动冷却剂在一回路循环,带走堆芯裂变产生的热量,防止堆芯过热,其运行可靠性直接决定核安全;汽轮机通过利用蒸汽热能转化为机械能,驱动发电机实现电能输出,是能量转换的关键设备;发电机则将汽轮机传递的机械能转化为电能,为电网供电并满足厂内自身用电需求^[1]。辅助转动设备包括凝结水泵、给水泵、循环水泵、风机等,凝结水泵负责将汽轮机排汽凝结后的水输送至除氧器,给水泵将除氧后的给水高压输送至锅炉,循环水泵保障循环水系统稳定运行以实现热量交换,风机则为厂房通风、设备冷却提供保障。所有转动设备协同工作,构成核电厂动力传输与循环的完整体系,是机组连续稳定运行的重要支撑。

1.2 运行环境特点

核电厂转动设备运行环境具有高风险、高要求、强约束的显著特点,与常规工业转动设备相比差异明显。其一,辐射环境特殊,部分转动设备(如主泵)长期处于核辐射区域,设备部件易受辐射老化影响,导致材料性能下降、密封件失效等问题,同时对设备检修人员的防护要求极高。其二,工况参数严苛,多数转动设备需

在高压、高温、高转速条件下长期连续运行,如主泵运行压力可达15~17MPa,温度约300℃,汽轮机转速通常为3000r/min,长期满负荷运行易导致设备磨损、疲劳损伤。其三,介质腐蚀性强,一回路冷却剂含硼、锂等化学物质,二回路蒸汽含微量杂质,易对设备轴承、密封件、管道等造成腐蚀、冲蚀,加速设备老化。其四,运行连续性要求高,核电厂机组一旦启动,转动设备需持续运行,停机检修成本高、影响范围广,因此对设备运行稳定性、可靠性的要求远高于常规工业设备,需具备极强的抗干扰和容错能力。

2 转动设备常见故障模式及机理分析

2.1 轴承类故障

轴承是核电厂转动设备的核心支撑部件,其故障发生率较高,且故障机理复杂,直接影响设备运行稳定性。常见故障模式包括轴承磨损、疲劳剥落、腐蚀、卡涩、过热等,不同故障模式的形成机理存在显著差异。磨损故障主要源于润滑不足、润滑脂变质或含有杂质,导致轴承滚动体与内外圈接触面产生摩擦损耗,长期磨损会使轴承间隙增大,引发振动加剧;疲劳剥落则是由于轴承长期承受周期性载荷,金属表面产生疲劳裂纹,裂纹扩展后导致金属表层剥落,多发生在高转速、重载荷的设备(如汽轮机、主泵)轴承上。腐蚀故障主要受运行介质影响,一回路辐射环境下的冷却剂、二回路蒸汽中的杂质会对轴承金属表面造成化学腐蚀或电化学腐蚀,导致轴承表面点蚀、锈蚀。卡涩和过热多由安装偏差、润滑失效或异物侵入引发,轴承转动受阻后产生大量摩擦热,若未及时处理,会导致轴承烧毁,甚至引发设备停机事故,严重影响核电厂机组安全运行。

2.2 密封系统故障

密封系统是核电厂转动设备防止介质泄漏、保障运行安全的关键组成部分,其故障主要表现为密封泄漏、

密封件磨损、密封失效等,机理与运行环境、工况参数及密封件质量密切相关。密封泄漏是最常见的故障,分为内泄漏和外泄漏,内泄漏主要发生在密封面间隙过大或密封件损坏时,导致介质在设备内部泄漏,影响设备运行效率;外泄漏则可能导致放射性介质或高温高压介质泄漏,引发安全隐患和环境污染^[2]。密封件磨损主要源于介质冲蚀、摩擦加剧或密封件材质不符,如机械密封的动环与静环接触面长期摩擦,或介质中的杂质对密封面造成冲刷,导致密封面磨损、密封性能下降。密封失效的核心机理包括密封件老化、安装偏差、工况波动等,如辐射环境导致密封件材质老化、变硬、开裂,安装时密封面未对齐或螺栓紧固不均,以及设备运行中压力、温度波动过大,均会导致密封系统失去密封功能,严重时需停机检修,影响机组连续运行。

2.3 对中与平衡问题

对中与平衡是核电厂转动设备正常运行的基础,其偏差会导致设备振动加剧、部件磨损加快,甚至引发设备故障,故障机理主要与安装、维护及设备老化相关。对中问题主要表现为设备轴系不对中,分为平行不对中、角度不对中及综合不对中,多由安装时校准偏差、基础沉降、设备运行中部件变形或连接螺栓松动引发。轴系不对中会导致轴承载荷分布不均,转动时产生附加力矩,加剧轴承磨损和轴的弯曲变形,同时引发设备振动,振动频率与转速相关,长期运行会导致密封失效、齿轮磨损等连锁故障。平衡问题主要包括转子不平衡,分为静不平衡和动不平衡,源于转子制造偏差、材质不均、运行中部件磨损或异物附着,导致转子重心与旋转中心偏离。转子不平衡会使设备运行时产生离心力,引发剧烈振动,振动传递至设备各部件,导致轴承过热、密封损坏、管路松动等问题,严重时会导致转子断裂,威胁核电厂运行安全。

2.4 其他典型故障

除轴承、密封、润滑及对中平衡故障外,核电厂转动设备还存在其他典型故障,主要包括转子故障、齿轮故障及电气控制故障,其机理各不相同,对设备运行的影响也存在差异。转子故障主要表现为转子弯曲、裂纹及磨损,转子弯曲多由设备停机后冷却不均、长期高温运行导致材质热变形,或转子受到冲击载荷引发,会导致设备振动加剧、轴承磨损加快;转子裂纹则源于疲劳损伤、腐蚀或制造缺陷,裂纹扩展会导致转子强度下降,严重时引发转子断裂事故。齿轮故障主要发生在齿轮传动类转动设备中,表现为齿轮磨损、齿面胶合、齿根裂纹等,机理包括润滑不足、齿面接触不良、载荷过大或

齿轮材质缺陷,会导致传动效率下降、振动加剧,甚至引发齿轮断裂。电气控制故障主要包括电机故障、控制回路故障等,电机故障源于绕组烧毁、轴承损坏、绝缘老化,控制回路故障则由线路接触不良、传感器失效、控制器故障引发,会导致设备无法正常启动、运行不稳定或停机,影响机组运行连续性。

3 检修策略优化方案设计

3.1 优化总体思路

核电厂转动设备检修策略优化的总体思路,以“安全优先、可靠性为核心、经济性为辅助”,立足核电厂运行特点和设备故障规律,打破传统定期检修模式的局限性,构建科学、高效、精准的检修体系。核心目标是通过优化检修策略,降低设备故障发生率,提高设备运行可靠性,减少非计划停机时间,同时控制检修成本,实现检修资源的合理配置^[3]。优化过程中,需结合核电厂安全法规要求,充分考虑转动设备的运行环境、工况参数及故障机理,整合状态监测数据、检修历史记录、设备老化规律等信息,实现“按需检修、精准检修”。同时,兼顾检修安全性与经济性,避免过度检修造成的资源浪费,也防止检修不足导致的安全隐患,建立“状态监测-故障诊断-检修决策-效果评估”的闭环管理机制,持续优化检修流程和方案,确保转动设备长期安全、稳定、高效运行,为核电厂机组连续运行提供保障。

3.2 状态监测技术体系构建

状态监测技术体系是检修策略优化的核心支撑,构建科学完善的监测体系,可实现对转动设备运行状态的实时监控、故障预警和精准诊断,为检修决策提供数据支撑。体系构建需覆盖所有核心转动设备,明确监测参数、监测方法及监测频率,结合核电厂辐射环境、工况特点,选择适配的监测技术和设备。主要监测参数包括设备振动、温度、转速、润滑介质状态、密封泄漏量、电流电压等,针对不同设备制定差异化监测方案,如主泵重点监测振动、密封泄漏及辐射剂量,汽轮机重点监测振动、温度及转速。监测方法采用在线监测与离线检测相结合,在线监测通过安装传感器、数据采集系统,实现实时数据采集、传输和分析,及时发现设备异常;离线检测定期对设备进行抽样检测、油液分析、超声波检测等,补充在线监测的不足。同时,构建数据管理平台,整合监测数据,运用大数据、人工智能技术进行数据分析和故障诊断,实现故障精准定位和预警,为检修决策提供科学依据。

3.3 基于状态的检修(CBM)决策流程

基于状态的检修(CBM)决策流程,是检修策略优

化的核心内容,其核心是根据设备运行状态监测数据,结合故障机理和设备老化规律,制定精准的检修决策,替代传统定期检修模式,实现“有故障才检修、无故障不检修”。决策流程分为五个核心环节,依次为状态监测数据采集、数据预处理与分析、故障诊断与风险评估、检修决策制定、检修实施与效果评估。首先,通过状态监测体系采集设备运行实时数据,包括振动、温度、润滑等参数;其次,对采集的数据进行预处理,剔除异常数据,运用专业分析方法分析数据变化趋势,识别设备运行异常;然后,结合故障机理,对异常数据进行故障诊断,明确故障类型、严重程度及发展趋势,同时评估故障可能引发的安全风险和经济损失;接着,根据故障诊断结果和风险评估,制定差异化检修方案,明确检修时间、检修范围、检修工艺及所需资源;最后,实施检修作业,检修完成后对检修效果进行评估,更新设备检修历史记录和状态监测基准,优化后续检修决策,形成闭环管理。

3.4 检修周期与范围的优化

检修周期与范围的优化,是降低检修成本、提高检修效率的关键,核心是基于设备状态监测数据、故障规律及运行经验,打破传统固定检修周期的限制,制定动态、精准的检修周期和检修范围。检修周期优化方面,摒弃“一刀切”的定期检修模式,根据设备类型、运行工况、故障发生率及状态监测结果,对不同设备制定差异化检修周期,对运行状态良好、故障风险低的设备,适当延长检修周期;对运行状态不稳定、故障发生率高的设备,缩短检修周期,同时建立检修周期动态调整机制,根据设备运行状态变化及时优化。检修范围优化方面,避免过度检修,根据故障诊断结果,精准确定检修范围,仅对存在故障或存在故障隐患的部件进行检修、更换,无需对设备整体进行拆解检修,减少检修工作量和检修时间。同时,结合设备老化规律,对易损部件、关键部件制定预防性检修计划,提前排查隐患,避免故障扩大,确保检修工作既满足安全要求,又兼顾经济性和高效性。

3.5 备件与库存优化

备件与库存优化是检修策略优化的重要组成部分,核

心目标是保障检修工作顺利开展,同时减少备件库存积压,降低库存成本,实现备件资源的合理配置。优化过程中,首先对核电厂转动设备备件进行分类管理,根据备件重要程度、采购周期、消耗频率,将备件分为关键备件、重要备件和一般备件,关键备件(如主泵轴承、密封件)需保证充足库存,避免因备件短缺导致检修延误;重要备件合理储备,根据检修周期和消耗规律制定储备量;一般备件按需采购,减少库存积压^[4]。其次,建立备件库存动态管理机制,结合检修计划、设备故障记录及状态监测数据,预测备件消耗需求,及时调整库存数量,避免库存过多或短缺。同时,优化备件采购流程,与优质供应商建立长期合作关系,缩短备件采购周期,保障备件质量,同时建立备件复用机制,对检修过程中可修复的备件进行修复、检测,合格后重新投入使用,降低备件采购成本,实现备件资源的高效利用,为检修工作的顺利开展提供保障。

结束语

核电厂转动设备检修策略优化是一项系统且长期的工作。通过构建科学的状态监测技术体系,设计精准的基于状态的检修决策流程,合理优化检修周期与范围以及备件库存管理等措施,能够有效降低设备故障发生率,提高设备运行可靠性,减少非计划停机时间,同时控制检修成本。未来,需持续完善优化方案,适应核电厂发展需求,为核安全与稳定运行提供坚实保障。

参考文献

- [1]谭文界,闵远胜,高颖贤,等.核电厂泵类设备碰摩故障机理研究及仿真分析[J].阀门,2026(1):76-81.
- [2]孙幸光,安洪振.基于机器学习的核电厂设备故障预测研究[J].中国高新科技,2025(15):64-65,68.
- [3]侯建飞,张勋,黄曦,等.基于神经网络的核电厂设备关键指标故障预警系统开发[J].核科学与工程,2024,44(5):1141-1147.
- [4]许金泉,徐颖,张强,等.核电厂应急厂用设备停运故障分析及改进研究[J].自动化仪表,2022,43(9):77-81.