

# 核电电机故障处理的快速响应机制构建与实践

王 凯 罗 东 胡 腾

中广核核电运营有限公司 广东 深圳 518000

**摘要:** 本文聚焦核电电机故障处理的快速响应机制,分析了核电电机机械、电气等故障类型及快速响应在安全、时效等方面的核心需求。并阐述机制构建框架,涵盖设计原则及预防性维护、实时监测与诊断等核心模块。介绍数字化监测、智能诊断算法等关键技术实现。以泰山核电站3号机组主给水泵电机故障处理为例,验证机制高效性与可靠性。该机制对保障核电机组安全稳定运行意义重大,为核电行业故障处理提供有益参考。

**关键词:** 核电电机; 故障处理; 快速响应机制; 预测性维护

引言: 在核电领域,核电机组的安全稳定运行关乎重大。核电电机作为机组动力核心,故障发生难以避免,且其故障类型多样、危害巨大,对快速响应提出了严苛要求。构建一套科学有效的快速响应机制,成为保障核电机组安全的关键所在。本文将深入剖析核电电机故障特征与响应需求,阐述快速响应机制的构建框架与关键技术实现,并通过实践案例验证其成效,为核电行业故障处理提供参考。

## 1 核电电机故障特征与响应需求分析

### 1.1 核电电机故障类型

核电电机作为核电机组动力核心,其故障类型与运行工况、结构特性密切相关。机械类故障较为常见,包括轴承磨损、转轴弯曲、叶轮失衡等,其中轴承磨损多因长期高速运转导致润滑失效,表现为运行噪音增大、温度异常升高,严重时会引起轴系卡涩。电气类故障主要涉及定子绕组绝缘老化、转子断条、接线端子松动等,定子绕组绝缘老化受温度、湿度及辐射环境影响,易出现局部放电现象,若未及时处理会发展为相间短路<sup>[1]</sup>。另外,还有密封失效导致的介质泄漏故障,以及因控制系统信号紊乱引发的运行参数漂移故障。不同故障类型呈现不同特征,如机械故障伴随振动频率异常,电气故障常表现为电流、电压波动,这些特征为故障诊断提供关键依据。

### 1.2 快速响应的核心需求

核电电机故障快速响应的核心需求源于核电机组运行的高安全性、高可靠性要求。安全性需求首当其冲,核电机组运行涉及放射性物质,电机故障可能导致机组降负荷、停机甚至引发安全事故,因此响应过程需优先保障辐射防护、设备隔离等安全措施落实,确保人员与环境安全。时效性需求至关重要,电机故障若处理延迟,会扩大故障影响范围,增加维修成本,如主泵电机

故障若超过4小时未控制,可能导致反应堆冷却系统效率下降,触发机组自动停堆。可靠性需求要求响应措施精准有效,避免因误判、误操作导致二次故障,同时需保障故障处理后电机运行参数稳定。合规性需求不可忽视,响应过程需严格遵循《核动力厂运行安全规定》等法规标准,确保每一步操作都有明确依据。

## 2 核电电机故障处理的快速响应机制的构建框架

### 2.1 机制设计原则

核电电机故障处理快速响应机制设计需围绕四大核心原则,以应对复杂故障,实现迅速、有效且安全解决问题。安全优先原则是根本基石,核电安全意义重大,机制流程设计与执行要把保障核安全放首位。响应流程设多重安全校验环节,如启动前严格完成设备断电,防止带电引发二次事故,还要进行辐射剂量检测,确保作业环境安全,杜绝危及核安全的风险,筑牢后续处理安全防线。预防为主原则注重前置管控,构建全生命周期监测体系,用先进数字化监测技术全方位、持续性监测电机运行状态,提前识别潜在故障隐患,将响应关口前移,在故障萌芽时解决,减少突发故障概率,降低对核电运行影响。协同高效原则强调部门紧密联动,明确运行、维修、安全等部门职责边界,避免推诿扯皮。建立跨部门快速沟通渠道,确保故障信息及时准确传递、决策迅速执行、资源合理调配,实现各环节无缝衔接。持续优化原则要求机制自我完善,通过收集故障处理数据、分析案例经验,定期更新故障诊断标准、响应流程和资源配置方案,适应设备变化,保持长期有效性与先进性。

### 2.2 机制核心模块

#### 2.2.1 预防性维护体系

预防性维护体系以“定期检测+状态预警”为核心,构建全周期维护模式。定期检测制定详细计划,针对不

同类型核电电机设定差异化检测周期,如主给水泵电机每3个月进行一次轴承振动检测、每6个月开展定子绕组绝缘电阻测试,采用超声波探伤、红外热成像等技术对关键部件进行无损检测。状态预警系统基于设备运行参数阈值设定,实时采集电机转速、温度、电流等数据,当参数超出正常范围时自动触发预警,如冷却风机电机温度超过85℃时立即推送预警信息至维护人员终端。同时建立维护档案,记录每次检测数据、维护内容及设备运行状态,通过数据对比分析设备老化趋势,为维护计划调整提供依据,确保维护工作精准对接设备实际需求。

### 2.2.2 实时监测与故障诊断系统

实时监测与故障诊断系统由数据采集、传输、分析诊断三大子系统构成。数据采集子系统通过在电机关键部位安装振动传感器、温度传感器、电流互感器等设备,实现对电机运行状态的全方位监测,传感器采样频率不低于100Hz,确保捕捉瞬时故障信号。数据传输采用工业以太网与5G双模通信,保障数据传输的实时性与稳定性,同时通过加密算法防止数据泄露或篡改<sup>[2]</sup>。分析诊断子系统整合历史故障数据与专家经验,建立故障特征数据库,运用数据挖掘技术对实时数据进行分析,当检测到异常信号时,自动与数据库中的故障特征比对,实现故障类型、故障位置及严重程度的精准诊断,诊断准确率不低于90%,并生成诊断报告推送至决策终端。

### 2.2.3 分级响应决策机制

分级响应决策机制根据故障严重程度分为一级、二级、三级三个响应等级,明确不同等级的启动条件、决策流程及处置措施。一级响应针对轻微故障,如电机表面温度略高、轻微异响等,启动条件为故障不影响电机正常运行且无安全风险,由现场运行人员根据操作规程直接处置,处置完成后记录备案。二级响应针对一般故障,如轴承振动超标、局部绝缘下降等,启动条件为故障可能导致电机性能下降但短期内不会停机,由维护班组长组织技术人员制定维修方案,报车间主任审批后实施,处置周期不超过24小时。三级响应针对严重故障,如定子绕组短路、转轴断裂等,启动条件为故障直接威胁机组安全运行或已导致电机停机,立即启动应急指挥部,由厂长牵头,协调运行、维修、安全等多部门制定应急处置方案,同时上报上级主管部门,处置过程全程跟踪记录。

### 2.2.4 资源保障体系

资源保障体系涵盖人员、物资、技术三大核心资源,为故障响应提供坚实支撑。人员保障方面,组建专业响应团队,包括电机维修工程师、电气技术员、安全

监督员等,团队成员需具备5年以上核电电机运维经验并通过专项资质考核,定期开展故障处置模拟演练,提升团队协同作战能力。物资保障实行“定额储备+应急调配”模式,在厂区备件库储备关键备件,如轴承、定子绕组、传感器等,备件储备量满足3台电机同时维修需求,与备件供应商签订应急供货协议,确保特殊备件48小时内到货。技术保障建立专家支撑体系,聘请行业资深专家组成技术顾问组,针对复杂故障提供远程技术指导,同时配备故障诊断专用设备,如便携式振动分析仪、绝缘测试仪等。

### 2.2.5 事后分析与机制优化

事后分析与机制优化模块是提升响应能力的关键环节,采用“故障复盘+数据迭代”的闭环管理模式。故障处置完成后72小时内,组织相关部门开展复盘会议,梳理故障发生原因、响应过程中的问题及处置效果,形成复盘报告,明确责任主体及改进措施。数据迭代方面,将故障信息、诊断结果、处置方案及效果等数据录入系统数据库,定期对数据进行统计分析,挖掘故障发生规律,如针对某一型号电机频繁出现的轴承磨损故障,分析其与运行负荷、润滑方式的关联关系。根据分析结果优化机制,如调整预防性维护周期、更新故障诊断算法参数、完善响应流程等,每半年对机制进行一次全面评估,确保机制始终适应设备运行及技术发展需求。

## 3 核电电机故障处理的快速响应的关键技术实现

### 3.1 数字化监测技术

数字化监测技术以“全域感知+智能传输”作为核心架构,致力于实现对核电电机运行状态的全方位、精准化监测。在具体实施中,采用分布式光纤传感技术,于电机定子绕组、转轴等关键部位精心铺设光纤传感器。这种技术具备诸多显著优势,抗电磁干扰能力强,能在复杂的电磁环境中稳定工作;耐高温、耐腐蚀,可适应核电电机运行环境的严苛要求。借助该技术,可实时监测绕组温度、转轴应变等关键参数,测量精度极高,能达到 $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ 。同时,引入工业互联网平台,搭建电机监测数据中台,将传感器采集的振动、温度、电流、电压等多维度数据进行全面整合处理。通过数据清洗去除噪声数据、去重避免重复信息、标准化统一数据格式等步骤,大幅提升数据质量<sup>[3]</sup>。运用边缘计算技术,在设备端部署边缘计算节点,对实时数据进行本地预处理,筛选出异常数据后再上传至云端平台。这一举措有效减少数据传输量,降低网络负荷,确保监测数据的实时性,异常数据识别延迟不超过50ms,为后续的故障诊断提供及时、准确的数据支撑。

### 3.2 智能诊断算法

智能诊断算法是达成故障精准识别的核心技术，采用“传统算法+深度学习”的融合模式。基于时域、频域分析的传统算法，对电机振动、电流信号展开处理。通过提取峰值、有效值、频谱特征等故障特征参数，深入挖掘电机运行中的潜在问题。例如，借助傅里叶变换将振动时域信号转换为频域信号，精准识别轴承磨损对应的特征频率。在此基础上，引入卷积神经网络（CNN）与长短期记忆网络（LSTM）融合模型。CNN凭借其强大的特征提取能力，能从原始监测数据中深度挖掘深层故障特征；LSTM模型则充分发挥处理时序数据的优势，分析故障发展趋势，为故障预测提供有力依据。采用迁移学习方法，将已训练好的成熟模型迁移至新的电机监测场景。只需通过少量标注数据对模型参数进行微调，即可缩短模型训练周期，显著提升模型在不同型号电机上的适应性。经实践验证，故障诊断准确率能够达到95%以上，为核电机的稳定运行提供了坚实保障。

### 3.3 响应流程优化技术

响应流程优化技术以“流程再造+智能调度”为有力手段，致力于提升故障处置效率。运用业务流程建模与notation（BPMN）技术，对原有故障响应流程进行全面可视化建模。通过细致梳理，精准找出流程中的冗余环节并加以优化。例如，简化二级响应中的审批流程，将原有的三级审批大幅简化为两级审批，有效缩短决策时间，提高响应速度。同时，引入智能调度算法，综合考虑故障等级、故障位置、资源状态等多方面因素，实现维修人员、备件、设备的最优调配。当发生三级故障时，算法能够自动匹配距离故障点最近、具备相应资质的维修团队，并规划出最优出行路线，同时精准锁定备件库中的对应备件，迅速生成调配指令。另外，开发响应流程管理系统，实现对流程节点的实时跟踪与提醒功能。一旦流程节点超时未完成，系统会自动向相关责任人发送提醒信息，确保流程每一步都能按时推进。通过这些措施，成功将平均故障处置时间缩短30%以上，极大提升了故障处理的效率和质量。

### 4 核电机故障处理快速响应机制的实践案例

秦山核电站3号机组（重水堆）主给水泵电机于2023年6月发生异常故障，该机制发挥了关键作用。故障初期，实时监测系统通过振动传感器检测到电机轴承部位振动值达到8.5mm/s，超出正常阈值（ $\leq 4.5\text{mm/s}$ ），同时温度传感器显示温度升至92℃，系统立即触发二级响应预警，诊断算法结合振动频谱分析及历史数据，判定为轴承磨损故障，明确故障位置为驱动端轴承<sup>[4]</sup>。响应启动后，智能调度系统自动匹配维修团队，该团队15分钟内抵达现场，凭借资源保障体系储备的备用轴承，按照优化后的流程开展维修。维修过程中，安全监督员全程监控，确保操作合规。2小时内完成轴承更换，电机重启后运行参数恢复正常。事后复盘分析显示，故障因轴承润滑脂老化导致，后续优化预防性维护体系，将该型号电机轴承润滑周期从6个月缩短至4个月，更新诊断算法中轴承磨损的特征参数阈值，进一步提升故障识别精度，该案例验证了机制的高效性与可靠性。

#### 结束语

核电机故障处理的快速响应机制构建与实践，是保障核电机组安全稳定运行的关键举措。通过明确故障特征与响应需求，构建涵盖多模块的机制框架，运用先进技术实现精准监测与诊断，并不断优化响应流程。实践案例表明，该机制能有效应对电机故障，降低故障影响。未来，随着技术发展，需持续完善机制，提升其适应性与先进性，为核电事业安全发展筑牢根基，推动核电行业迈向更高水平。

#### 参考文献

- [1]操丰,付江永,张婷婷.核电站主给泵组双轴伸电机振动问题的故障研究及处理[J].自动化博览,2025,42(7):82-85.
- [2]何斌,杨璋,李诚.核电汽轮发电机组轴振周期性变化故障分析处理[J].东方汽轮机,2021(3):68-73.
- [3]孙天意.核电厂小型柴油发电机启动马达故障原因分析及其处理措施[J].机械管理开发,2024,39(1):245-246.
- [4]季诚.核电DCS系统故障分析与处理策略探讨[J].电工技术, 2024(16): 70-72,81.