

核电站关键仪表可靠性评估及失效预测模型构建

周福明

辽宁红沿河核电有限公司 辽宁 大连 116000

摘要: 本文探讨核电站关键仪表可靠性评估及失效预测模型构建。阐述可靠性评估指标体系,包括MTBF、故障率等;介绍评估方法分类、流程与关键环节。分析失效预测模型分类、构建关键技术及验证评估方法。提出模型应用策略,如分级预警机制、维护策略优化、系统集成与协同,为核电站关键仪表管理提供参考。

关键词: 核电站;关键仪表;可靠性评估;失效预测模型;维护策略

引言:核电站关键仪表对安全运行至关重要。其可靠性直接影响核电站的稳定性和安全性。随着核电技术发展,对仪表可靠性要求日益提高。准确评估仪表可靠性并构建有效失效预测模型,可提前发现潜在问题,减少非计划停堆,降低运行风险,保障核电站持续稳定供电。

1 核电站关键仪表可靠性评估方法

1.1 可靠性评估指标体系

核电站关键仪表可靠性评估依赖多种核心指标。平均无故障时间(MTBF)衡量仪表在规定条件下,相邻两次故障间的平均工作时长,是评估仪表稳定性的重要依据。MTBF数值越高,表明仪表出现故障的间隔周期越长,系统运行连续性越好。故障率则反映仪表在单位时间内发生故障的概率,与MTBF呈反比关系,故障率越低,意味着仪表可靠性越高^[1]。可用性指仪表在特定时间内正常工作的概率,综合考虑故障修复时间与无故障运行时间,体现仪表对系统持续运行的保障能力。这些指标相互关联,共同影响系统性能。MTBF与故障率直接制约系统的稳定性与维护成本,低MTBF和高故障率会增加维修频率与备件消耗,导致系统停机时间延长。可用性则在MTBF与故障率基础上,进一步体现仪表对核电站整体运行效率的影响。若仪表可用性低,频繁故障或维修耗时过长,将干扰核电站正常发电计划,增加运行风险。各指标间协同反映仪表可靠性状态,为全面评估提供多维视角。

1.2 评估方法分类

静态鉴定聚焦实验室环境下的离线测试。在严格控制的条件下,对仪表准确度进行校准,通过标准信号输入与仪表输出对比,判断测量偏差是否符合要求。稳定性测试则持续监测仪表在一定时间内的输出波动情况,评估其抗干扰能力。响应时间测试通过瞬间改变输入信号,记录仪表输出达到稳定值的时长,检验信号处理速度。此类测试为仪表性能提供基础判定,确保其基本功能

能满足设计要求。动态鉴定在模拟或实际工况下开展。模拟工况通过构建与核电站相似的高温、高压、强辐射环境,测试仪表在极端条件下的响应速度,观察其能否快速准确捕捉参数变化。实际工况测试则将仪表安装于核电站运行现场,验证其在真实环境中的可靠性与环境适应性。面对核电站复杂电磁干扰、剧烈温度变化等因素,动态鉴定可暴露仪表在实际运行中可能出现的问题,如信号传输延迟、数据失真等,为优化改进提供依据。可靠性建模借助历史运行数据构建数学模型。收集仪表以往的故障记录、运行时长、维护情况等数据,运用统计分析方法挖掘数据规律。通过建立寿命分布模型,分析仪表性能随时间的变化趋势,预测潜在故障时间点。利用可靠性增长模型,评估维护措施对仪表可靠性的提升效果,为制定合理的维护策略提供支持,使仪表在全生命周期内保持较高可靠性水平。

1.3 评估流程与关键环节

制定鉴定计划是评估流程的首要任务。明确鉴定目的,如验证新仪表是否满足设计要求,或评估在役仪表性能退化程度。确定鉴定范围,涵盖仪表类型、数量及涉及的系统环节。选择适配的鉴定方法,结合仪表特性与评估目标,合理搭配静态、动态鉴定及可靠性建模。规划详细程序,包括测试步骤、数据采集频率、人员分工等,确保评估工作有序推进。鉴定环境控制是保障结果准确的关键。温度、湿度需维持在仪表设计工作范围内,过高或过低的温度可能影响电子元件性能,潮湿环境易引发电路短路。电磁干扰控制同样重要,核电站内强电磁环境可能干扰仪表信号传输,需在鉴定区域设置电磁屏蔽装置,或采用抗干扰性能强的测试设备,确保仪表在稳定环境下接受评估。严格遵循鉴定程序是结果可靠的基础。测试前对设备进行校准与检查,确保测量工具精度达标。测试过程中规范操作,按预定步骤采集数据,避免人为因素导致的数据偏差。对异常数据进行

复核,分析其产生原因,排除偶然误差影响。完成测试后,对数据进行系统分析,结合评估指标得出客观结论,为核电站关键仪表可靠性评估提供科学依据。

2 失效预测模型构建技术

2.1 失效预测模型分类

基于物理模型的预测方法通过建立设备失效的数学方程,结合实时运行数据预测失效时间。该方法从设备运行的物理规律出发,综合考虑温度、压力、机械应力等因素,将这些物理量的变化与失效关联^[2]。以核电站压力传感器为例,通过分析传感器内部弹性元件在压力作用下的形变规律、材料疲劳特性,构建描述其性能衰退的数学方程,再代入实时压力、作用时长等参数,预测传感器失效时间。数据驱动的智能算法利用机器学习、深度学习技术,从历史数据中挖掘失效模式。无需深入了解设备物理机理,通过对核电站积累的大量仪器仪表运行数据进行学习分析,如神经网络可通过多层计算提取正常与失效数据的特征差异,随机森林能综合多棵决策树判断设备状态,从而发现人为难以察觉的失效规律。混合预测模型结合物理机理与数据算法优势。先基于物理模型确定设备失效的关键因素和大致趋势,构建基础预测框架,再利用数据驱动算法优化物理模型参数,修正因假设简化产生的偏差。如在仪表电子元件老化失效预测中,物理模型描述材料老化过程,数据算法根据历史数据调整模型参数,提高预测精度与适应性。

2.2 模型构建的关键技术

特征提取与选择从原始数据中挖掘并筛选与失效相关的特征。核电站仪器仪表原始数据包含大量冗余信息,通过傅里叶变换、小波变换等方法提取信号频率、能量等特征,利用相关性分析等统计手段计算各特征与失效的关联程度,剔除无关特征,降低数据维度,提升模型训练效率与预测准确性。模型选择与优化依据预测任务挑选合适模型并调整参数。针对线性关系问题可选用线性回归,复杂非线性问题则适合支持向量机或深度学习模型。选定模型后,利用网格搜索、遗传算法等优化参数,如调整神经网络的隐藏层和神经元数量、学习率,同时采用正则化防止过拟合,确保模型泛化能力。多源数据融合整合传感器数据、运行日志、维修记录等信息。将不同类型数据进行时间对齐和格式统一,通过数据拼接、特征融合形成新特征向量。在预测仪表阀门失效时,融合开关次数、压力差、上次维修时间等信息,为模型提供更全面数据,增强预测可靠性。

2.3 模型验证与评估

采用交叉验证、留一法评估模型泛化能力。交叉验

证将数据集划分为多个子集,交替作为测试集和训练集,多次训练测试后取平均结果;留一法每次用一个样本测试,其余训练,重复操作。两种方法可观察模型在不同数据划分下的表现,判断其对新数据的适应能力。使用准确率、召回率、F1分数衡量模型性能。准确率反映正确预测比例,召回率体现正确预测实际失效样本的能力,F1分数平衡两者关系^[3]。通过这些指标可全面评估模型,发现如准确率高但召回率低(漏检)或召回率高准确率低(误报)等性能短板。根据评估结果优化模型。若泛化能力差,分析是否因特征不足或过拟合,针对性改进;若某指标不达标,重新检查特征选择、优化参数或更换模型。通过不断评估优化,确保模型在核电站仪器仪表失效预测中能准确及时发现潜在风险。

3 核电站关键仪表失效预测模型的应用策略

3.1 分级预警机制

核电站关键仪表失效预测结果通过分级预警机制转化为可执行指令。预警等级按失效风险程度分为蓝色、黄色、橙色、红色四级,各等级对应不同的风险状态与响应流程。蓝色预警代表仪表性能出现轻微异常,存在潜在失效可能,但不影响系统正常运行。此阶段启动加密监测程序,增加数据采集频率,实时追踪参数变化趋势,为后续决策提供充足信息。黄色预警表明仪表性能退化加速,失效风险显著上升。此时除持续监测外,需立即启动诊断检查,技术人员利用专业工具对仪表硬件、软件及通信链路进行全面检测,分析异常数据根源,判断失效是否临近。橙色预警意味着仪表已处于临界状态,短期内极有可能发生失效。该等级触发预防性维修准备程序,维修团队集结待命,提前调配所需备件、工具,规划维修步骤,确保在合适时机介入维修。红色预警对应仪表即将失效或已出现部分功能丧失,直接威胁核电站安全运行。此级别立即启动最高响应措施,依据预先制定的应急预案,优先保障机组安全稳定,必要时调整机组运行参数,限制相关系统负荷,同时开展紧急维修,最大限度降低失效对核电站运行的影响。各预警等级的响应措施紧密衔接,形成从风险监测到应急处置的完整链条,确保风险可控。

3.2 维护策略优化

失效预测模型为核电站维护策略优化提供核心依据。基于预测结果制定预防性维护计划,可精准把握仪表维修时机,显著减少非计划停堆时间。传统定期维护模式按固定周期开展工作,易出现过度维护或维护滞后问题,而预测模型依据仪表实际性能退化状态安排维护,避免不必要的拆卸与检修,防止因维护不及时导致

的故障。例如，预测到某关键压力仪表将在特定周期后失效，可提前安排维护窗口，在机组计划停机时段进行维修，将其对发电计划的影响降至最低。结合可靠性评估结果，优化备件库存管理^[4]。通过分析仪表失效概率与历史维修数据，确定各类备件的合理库存水平。对高失效概率且维修关键的仪表备件，适当增加库存；对可靠性高、失效风险低的仪表，减少库存积压，降低资金占用成本。同时建立备件动态管理机制，根据预测模型更新的失效风险数据，实时调整库存策略，实现维护成本与安全保障的平衡。失效预测模型可辅助制定维修资源调配计划。根据预测的失效时间分布，合理安排维修人员培训与调度，避免因人员集中需求导致的资源紧张。通过模拟不同维修方案的效果，评估维修活动对机组运行的影响，选择最优维修时机与方式。例如，在多个仪表可能同时失效的情况下，通过模型分析确定最佳维修顺序，减少停机时间。利用预测结果优化维修流程，提前识别潜在风险点，制定针对性措施，提高维修效率与质量。

3.3 系统集成与协同

将失效预测模型与核电站控制系统、监测系统集成，实现信息共享与协同运作。集成后，监测系统实时采集的仪表运行数据直接传输至失效预测模型，为预测提供数据支撑；预测模型的结果反馈给控制系统，控制系统根据预测信息提前调整运行参数或控制策略，预防仪表失效引发的连锁反应。在反应堆冷却系统中，若预测模型判断某压力仪表即将失效，控制系统自动切换至备用监测通道，同时调整冷却剂流量控制策略，维持系统稳定运行。各系统间通过标准化通信协议实现数据交互，确保信息传输的准确性与及时性。通过人机交互界

面为操作人员提供直观决策支持。界面以可视化图表形式展示仪表运行状态、预测结果与预警信息，操作人员可快速掌握核电站关键仪表整体状况。利用颜色编码区分不同预警等级，用动态曲线呈现仪表参数变化趋势与预测走向。同时提供详细的分析报告与处理建议，包括可能的失效原因、推荐的维修措施、操作注意事项等。操作人员依据这些信息，结合自身经验做出科学决策，如是否需要调整运行模式、启动维修流程等。界面还支持操作人员与系统交互，可手动输入特殊工况信息，优化预测模型结果，增强决策的灵活性与准确性，保障核电站安全高效运行。

结束语

核电站关键仪表可靠性评估与失效预测是保障核安全的重要技术手段。通过建立科学的评估体系，结合先进预测模型，能够有效识别仪表性能退化趋势，提前采取干预措施。分级预警机制与维护策略优化可提升风险应对能力，系统集成则实现数据共享与协同决策。未来需进一步优化模型精度，加强实际应用验证，推动核电站仪表管理向智能化方向发展，为核能安全高效利用提供坚实保障。

参考文献

- [1] 蒋昆,李硕.AP1000核电站非接触式液位仪表应用研究[J].中国仪器仪表,2023(8):17-21.
- [2] 刘瑜,刘建文,潘凯.核电站核岛EM9仪表管安装及焊接质量控制[J].焊接技术,2023,52(9):128-132.
- [3] 张瀚文,王子航,臧小军,等.核电厂仪表压空分配系统分析及改进建议[J].仪器仪表用户,2023,30(9):71-74.
- [4] 王也,刘胜峰,李杰,等.基于摄像头视觉的核电站指针式仪表读数精准识别算法[J].模型世界,2024(28):60-62.