

核电厂设备可靠性管理平台建设研究

文/朱术超
核电运行研究（上海）有限公司

摘要：核电厂关键敏感设备的管理是核电设备可靠性管理的重点和难点。开发一套具有精益化设备失效分析方法的国产化智能软件，实现标准管理由分散式向集中化管理转型，智能监控由静态式向动态化监测转型，分级管理由被动式向差异化管理转型，寿命预测由经验型向科学型管理转型。本平台在行业内为首创，为复杂、精益化设备分析提供了标准化、高效的工具，同时对企业开发高质量的行业数据资产及数字化转型具有推广应用价值。

关键词：关键敏感设备；设备可靠性；智慧核电；机理模型

传统模式下，维修管理人员依据经验定期对设备进行更新维护，存在检修工作量大、设备监测不及时及运维管理难度大等问题，对快速故障定位有一定的难度。随着传感技术、大数据技术的进步和发展，核电设备数字化、智能化趋势明显，数字技术与核电设备管理相融合，成为提升核电机组安全性和可靠性、减少非停和维修工作、降低核电运营成本的重要路径。

研究意义与目标

ERMS旨在通过一整套管理体系、方法、流程的数字化，提升设备的可靠性水平，降低设备故障率或失效概率，提升机组安全、稳定和经济运行水平。其核心思想是围绕设备可靠性管理关键环节，从目标、组织、职责、流程、方法及改进等关键管理要素入手，根据实际需要确定并不断细化完善每个要素的管理内容，确保设备可靠性管理工作目标明确、组织完善、责任清晰、流程规范及技术先进，并能在系统的建设和运作过程中不断改进和完善。为此，新一代的ERMS围绕以下两个主要目标持续优化。

一是持续提升EQP指标。在确保安全的前提下，努力追求“无非停”卓越运行目标，力争将由设备原因导致的非停率控制在0.20次/机组年，持续提升机组EQP指标水平。

二是降低机组运营成本。在确保安全的前提下，以“能力因子96%，年度大修平均工期24天内”为长期目标，合理优化维修工作和备件库存，降低电站运营成本，持续提升机组安全、稳定和经济运行能力。

核电关键与敏感设备智慧管理平台的研究

1. 功能定位

我国核电不断摸索改进、总结发展，逐渐形成一套契合管理与发展需要、适应多基地群堆运营的设备可靠性管理系统，在实践中取得了卓越成效。ERMS是一套集成设备分级、性能监测、纠正行动、持续改进、预防性维修及生命周期管理六大流程，实现设备分级、热力性能及系统监督等九大功能的管理系统。同时，持续推进设备管理流程化和标准化，形成“ERMS+SPV管理+智能在线监测+标准化推广机制”的设备管理体系。其中，设备可靠

性管理与先进在线监测（AOM）是系统重点建设的两大服务功能。

经过设备分级分类，ERMS识别出对核电厂运行重要性高的关键设备和影响停机停堆的关键敏感设备（SPV）。基于设备类型设定设备管理策略，将更有价值的资源分配给SPV设备并建立完整的设备性能监测、纠正行动、预防性维修等标准流程，对关键敏感设备进行状态跟踪，持续提升可靠性。

2. 由分散式向集中化管理转型

加强标准建设，实现了各电厂设备数据的统一管理。过去，由于各电厂各自建设设备相关信息化系统，相同设备在不同电厂的信息系统有不同的业务与数据描述，因此设备管理的标准不统一。随着ERMS开展标准化管理，统一了设备可靠性的数据管理，包括数据标准、数据模型和数据库等，避免了设备数据的重复性建设，保障了相同设备一致性的业务与数据描述。并且，ERMS采用DHP“云边协同”架构，中心侧运行设备管理业务模块，厂侧运行设备及系统的监督模块。同时为各级电厂提供设备数据服务，通过ERMS统一收集、汇聚集团以及各电厂、各机组设备的可靠性数据，实现一体化、集约化管理。打通了ERMS与各生产管理系统的数据集成，实现了管理层对设备的可视化、可预测的智能管理，实现了洞察决策水平和统筹规划能力。提升了集团、各电厂、设备管理部门对设备可靠性监管、评估与管理的闭环，同时实现了标准化的管理。

加强对标提升，构建了领先的设备可靠性管理模型。借鉴国际公认的设备可靠性管理标准，并结合国内行业标准，构建了高于国家标准和行业标准的国内首个设备可靠性管理标准与管理模型。基于设备可靠性管理模型，ERMS开展了数字化升级，覆盖了设备可靠性管理的全流程、全生命周期，填补了核电行业设备可靠性闭环数字化管控的空白。ERMS构建了一系列严谨完整的标准化、精细化设备管理制度与体系，保障设备可靠性管理体系的闭环管理与持续优化。如果缺少对设备管理的长效监督机制，对标准化管理的流程、机制缺乏严格规范，那么系统管理往往半途而废。因此，ERMS从系统层面进行监督和制约，实现了从设备分级、性能监测及预防性维修到系统监督、健康评价、指标

考核及改进行动的闭环，构建了一整套标准化、规范化和精细化管理体系。通过全流程持续改进，促进技术进步、质量提升及管理创新，从而有利于标准的迭代升级。

ERMS标准化将发挥行业引领作用，在核电行业的设备管理领域处于“领跑”地位。我国核电引领行业趋势，固化沉淀了30多年设备管理知识与经验，深入开展标准化升级，将设备可靠性标准、技术与ERMS同步。将创新与标准相结合、协同联动，发挥数字化创新驱动的作用，产生的“乘数效应”能更好地推动创新成果向产业的转化，助推核电行业的发展。

3. 由被动式向差异化管理转型

分级管理是设备标准化管理的起点。设备数量巨大且复杂性不同，从安全和价值的角度考虑，并非所有设备都具有同等重要性。传统模式下，设备出现故障就安排维修，即被动式维修管理策略，给设备的维护工作量、成本与效率带来巨大的挑战。通过设备标准化分级、分类、分工排序，对设备进行差异化管理，优先管理影响停机停堆的关键设备，减少了不必要的成本与工单。分级管理对每个设备定义了设备零部件清单（BOM）、SPV分析、性能标准、影响系统功能的故障模式、故障与风险管理级别等，以最可靠的维护策略达到最佳的成本效益。

基于失效模式及后果分析（FMEA）和故障树分析，进行设备分级、识别SPV设备。ERMS借鉴了我国核电约200堆年的设备管理经验，建立了标准设备类型的FMEA库，辅助工程人员快速准确地进行关键度分级。此外，还整理了典型设备的故障树，可以快速便捷地进行调用和修改适配，大大提升了设备分级的准确性和便捷性。ERMS设备分级工具根据设备故障后果对核电站的影响，建立了标准的关键度判断准则。对设备进行FMEA与故障树分析，识别故障后果，对设备关键度判断分级，同时进行工作环境和工作频度分级。特别是识别出单个设备故障导致电厂停堆、停机、降功率、功率大幅度波动的SPV设备。

根据设备分级，采取差异化、精细化的管理策略。对于不同等级的设备，制定不同的维护策略，采取不同的备品备件、文档、维修监督、质量控制

等管理要求。对于同等级同类设备，制定适合的预防性维修项目，以及开展性能监测、可靠性提升等工作。所有过程均由ERMS自动实现，对分级过程、甄选条件进行自动识别与跟踪记录，实现有据可查的精细化管理。

4. 由静态式向动态化监测转型

智能监控消除了单一静态阈值监测无法识别隐藏故障的缺陷。常规的核电静态阈值监测数据单一，缺乏与时间、工况等因素的关联，也缺乏对多个阈值的综合考虑。因此，当设备的状态监测发出预警时，实际健康状态、部件损坏程度已经很严重，此时的被动性维修对安全、时间、成本都有很大影响。实际上，设备发生故障是缓慢变化且有早期征兆的。如果对设备运行状态、工况的物理变化过程进行多样化、动态化、智能化的监控跟踪，实现及时的早期预测预警，将隐性问题显性化，提高设备可靠性，规避安全隐患，实现降本增效提质。

作为ERMS之“眼”，设备监控更加智能化，实现实时监控、远程诊断、故障预测、及时预警、设备维护和综合分析六大环节一体化管控。通过7×24 h无间断实时监控设备，接收传感器与设备信号传递的状态数据。当设备出现故障时，根据实时设备数据进行静态、动态、趋势阈值分析，从而更好地进行智能故障诊断。甚至在故障发生前，通过设备运行情况的数据诊断，提前进行故障预测，将设备可能出现的故障进行预警，使维修人员在故障未发生时就实施预防性维修，提高设备的可靠性。并且通过大数据对设备状态进行综合分析，更好地了解设备工况趋势，对运维进行优化。

通过十年耕耘、图精求专、坚持自主创新，ERMS发挥了在线监控“赋能、赋智、赋值”的作用。

1) 赋能。通过边缘计算、物联网、大数据及人工智能等技术探索，挖掘在线监测更多潜力，实现数字化转型。结合“云边协同”技术，对转机类设备接入非介入式传感器进行振动分析，实现设备状态数据的振动特征计算、数据高效传输，对设备出现不平衡、动静摩擦等故障进行实时监测与诊断分析。

2) 赋智。持续丰富各类故障知识库，突破了人工智能的技术壁垒。基于“因果关系”的机理模

型、“相关关系”的数据驱动模型，建立了设备故障案例库、失效模式库及专家经验数据库等故障相关知识库。结合动态阈值、趋势阈值等技术，不断优化与训练故障诊断与预警算法模型，实现先进在线监测（针对振动、红外、超声、润滑等）、智能监测和诊断及动态阈值报警等功能。

3) 赋值。持续为核电运营创造集约化管理的价值。ERMS实现了海量在线数据的处理，每个机组可同时监控10万~20万台设备，实现了设备的全方位远程监控，每台机组每年减少的运维任务按300项计算，每年25台机组节省人力成本超3 750万元。

5. 由经验型向科学型管理转型

利用数据建模开展设备寿命预测，为核电设备运维决策与全生命周期管理提供可靠依据。核电厂部署了众多高价值设备，准确预测剩余寿命是提高运维效率的关键和前提。过去的设备寿命预测方式主要依靠出厂建议、专家经验与使用经验等经验知识判断，缺乏定量数据支撑，与实际情况可能有误差。ERMS创新核电设备寿命管理方法，通过传感器、大数据及人工智能等先进技术手段，对设备的实际运行状况进行连续监控，构建自适应退化模型并进行大数据分析，准确预测设备剩余正常工况使用时间。通过准确可靠的寿命预测，合理指导维护与检修计划，安排及时的预防性维修，实现高效安全运行。此外，可有效地提升设备全生命周期的健康状态，延长设备的经济寿命。ERMS寿命预测模块包括健康评估和寿命预测两大功能，已成功部署在核电泵体，效果显著。

依托健康评估模块，实现设备运行健康状态和风险态势的全面感知与预警。通过设备的在线监控，采集设备运行中的多维度特征信号数据，如振动、压力、转速、温度及超声等，利用数据分析算法筛选特征信号并加权重，获取表征设备运行状况的综合健康指数。该综合指标用于量化设备的实际运行状态，实现准确的设备健康评估。同时，对出现的随机故障进行预警，以便提前准备维修计划。

构建设备退化模型，通过实时寿命预测有效支撑设备维修计划与备件计划。采用大数据、人工智能等数字技术，利用设备海量的历史运行数据与在线监控数据，结合退化推理机制，构建适应性的设备退化模型。将综合健康指数序列输入构建的退化

模型，进行计算分析，实现剩余寿命的预测，并得到设备状态的变化趋势。同时，依据设备健康状态分级规则，对设备的运行健康状况进行分级量化。寿命预测为设备可靠性管理提供重要依据，根据设备运行退化趋势，指导设备维护的关键节点与方案，进行相应的预防性维修。因此，能有效规避安全隐患，最大化提升设备可靠性，延长设备的经济寿命。此外，实时寿命预测可有效地支撑设备的备件计划，通知备件系统提前安排备件。

结束语

管理平台的研究与应用有助于实现智慧智能设备管理。通过对关键敏感设备失效故障机理的分析，形成一套先进的设备失效系统化分析方法和支撑智慧设备管理的数据体系，还形成自主可控的核电智慧管理工业软件。目前，ERMS已经在我国核电5家运行的电厂上线，覆盖6种堆型、25台机组，管理超过2 000个系统、200万台设备；对超过15 000台大中型或关键敏感设备进行实时在线监测，监测点数量超过30 000个；每月新编制或升版分级报告、系统运维大纲、健康评价报告等文件2 000多份；管理25台机组4 000余份大纲文件，大纲项目超60万条。更重要的是，ERMS实现了上述

所有数据的互联互通和共建共享，同时实现了所有流程的标准化、规范化和信息化。2018—2021年，ERMS极大地提升了所有机组的设备可靠性，取得显著成效。

1) 机组非停次数呈逐年下降趋势，由14次减少到4次，平均0.16次/堆年，达到世界卓越水平。

2) 设备原因导致的非停率由0.6次/堆年下降到0.13次/堆年，处于国际领先地位。

3) 机组能力因子呈逐年上升趋势，由87.66%提升至92.49%。

4) 我国核电WANO满分机组数量由5台逐年增加至19台，满分机组占比从19%直线提升至82.6%，位居全球之首。**EA**

参考文献

- [1] 张威. 中国核电设备可靠性标准体系需求分析[J]. 装备维修技术, 2019(2): 53.
- [2] 王静, 孙雪平. 核电设备可靠性数据库建立的分析与研究[J]. 设备管理与维修, 2016(S1): 7-9.
- [3] 吴泽豫, 孙博, 王自力, 等. 基于模糊危害性矩阵FMECA的闸阀可靠性分析方法[J]. 机械设计, 2021, 38(4): 9-15.