

Research on Risk Assessment and Control Strategies for Nuclear Power Plant Operation Safety

Zhenhua Qiao Xingxiang Wang

Jiangsu Nuclear Power Co., Ltd., Beijing, 222042, China

Abstract

Against the backdrop of accelerating global energy structure transformation, nuclear energy, as a clean and efficient base load energy, is increasingly prominent in its strategic position. However, the systemic risks hidden in the operation of nuclear power plants have always been the Damocles sword hanging over human heads - from material fatigue at the reactor pressure boundary to cyber attacks on digital control systems, from human error to the composite threat of extreme natural disasters, the complex chain of multidimensional risks interwoven constantly tests the safety defense line of nuclear power. According to statistics from the International Atomic Energy Agency, approximately 68% of global nuclear incidents in the past decade are directly related to equipment aging and management loopholes, exposing the limitations of traditional risk assessment systems in the face of dynamically evolving risks. It is precisely this dual attribute that makes the construction of scientific risk assessment models and three-dimensional control strategies the lifeline to ensure the sustainable development of nuclear power. The integration of new generation artificial intelligence technology and resilience engineering concepts is providing a new path to solve this problem.

Keywords

nuclear power plant; Operational safety; Risk assessment; Control strategy

核电厂运行安全风险评估与控制策略研究

乔振华 王兴祥

江苏核电有限公司, 中国 · 北京 222042

摘要

在全球能源结构转型加速推进的背景下, 核能作为清洁高效的基荷能源, 其战略地位日益凸显。然而, 核电厂运行过程中潜藏的系统性风险始终是悬在人类头顶的达摩克利斯之剑——从反应堆压力边界材料疲劳到数字化控制系统面临的网络攻击, 从人因失误到极端自然灾害的复合威胁, 多维风险交织形成的复杂链条时刻考验着核电安全防线。国际原子能机构统计显示, 近十年全球核事件中, 约68%与设备老化、管理漏洞直接相关, 这暴露出传统风险评估体系在动态演变风险面前的局限性。正是这种双重属性使得构建科学的风险评估模型与立体化控制策略成为保障核电可持续发展的生命线, 而新一代人工智能技术与韧性工程理念的融合, 正为破解这一难题提供全新路径。

关键词

核电厂; 运行安全; 风险评估; 控制策略

1 引言

当第四代核电站的数字化浪潮席卷全球, 运行安全的内涵早已超越单纯设备可靠性的范畴。反应堆冷却剂泵的轴承振动数据暗藏失效密码, 控制系统的网络端口潜伏着代码幽灵, 操纵员瞬间的认知偏差可能触发多米诺骨牌效应——这些交织着机械、网络与人因的复杂变量, 构成核电安全评估的混沌迷宫。现有研究虽在概率安全评估 (PSA) 框架下取得进展, 却难以量化网络攻击与传统设备故障的耦合效应, 更鲜有涉及人工智能辅助决策的动态响应机制。在设备

老化与网络威胁交织的今天, 如何构建融合联邦学习与贝叶斯网络的混合评估模型, 如何设计覆盖“传感器-控制器-执行机构”全链条的纵深防御体系, 成为亟待突破的工程哲学命题。本研究将揭示数字化核电厂风险传递的蝴蝶效应, 提出基于数字孪生的风险图谱构建方法, 探索智能冗余与人员认知增强的协同控制策略, 为核电安全构筑兼具精密性与韧性的防护网。

2 核电厂运行安全风险类型

当反应堆压力容器的材料晶格在辐照脆化中悄然重构, 当数字化控制系统遭遇量子计算时代的代码幽灵, 核电厂运行安全风险早已突破传统工程边界形成多维渗透。机械系统风险潜伏于蒸汽发生器传热管的微裂纹扩展, 高温高压下镍

【作者简介】乔振华 (1986-), 男, 中国陕西咸阳人, 本科, 高级工程师, 从事核安全管理研究。

基合金的应力腐蚀开裂可能引发冷却剂边界失守；人因风险则藏匿于主控室认知负荷过载的瞬间，操纵员在多重报警信息轰炸中可能误判稳压器水位振荡模式。更具时代特征的是网络安全风险，工业控制协议的漏洞成为黑客实施高级持续性威胁的跳板，虚假数据注入攻击可诱使反应堆功率调节系统偏离安全阈值。自然灾害风险不仅限于地震海啸的物理冲击，地磁暴引发的电网波动可能触发厂外电丧失与应急柴油机启动时序错位的叠加效应。更隐蔽的是设计基准事故外的暗流涌动，如日本柏崎刈羽核电站曾遭遇的变压器火灾暴露出火灾烟气蔓延路径与安全分析假设的偏差。这些风险类型在设备老化与技术迭代的张力场中持续演变，既包含着切尔诺贝利事故教训的基因片段，也孕育着小型模块化堆新型风险因子的突变可能，唯有建立动态风险图谱才能捕捉辐射防护门外次声波传感器都难以察觉的隐性危机。

3 核电厂运行安全风险评估

3.1 核电厂运行风险识别

当反应堆压力容器的材料晶格在辐照脆化中悄然重构，当数字化控制系统遭遇量子计算时代的代码幽灵，核电厂运行安全风险早已突破传统工程边界形成多维渗透。机械系统风险潜伏于蒸汽发生器传热管的微裂纹扩展，高温高压下镍基合金的应力腐蚀开裂可能引发冷却剂边界失守；人因风险则藏匿于主控室认知负荷过载的瞬间，操纵员在多重报警信息轰炸中可能误判稳压器水位振荡模式。更具时代特征的是网络安全风险，工业控制协议的漏洞成为黑客实施高级持续性威胁的跳板，虚假数据注入攻击可诱使反应堆功率调节系统偏离安全阈值。自然灾害风险不仅限于地震海啸的物理冲击，地磁暴引发的电网波动可能触发厂外电丧失与应急柴油机启动时序错位的叠加效应^[1]。更隐蔽的是设计基准事故外的暗流涌动，如日本柏崎刈羽核电站曾遭遇的变压器火灾暴露出火灾烟气蔓延路径与安全分析假设的偏差。

3.2 风险评估方法与流程

当蒸汽发生器传热管的微裂纹在热工水力耦合作用下悄然扩展，当操纵员面对控制室三十七个报警灯同时闪烁产生的认知隧道效应，核电厂运行风险识别便如同在量子涨落的迷雾中捕捉暗物质粒子，既要穿透设备劣化表征的显性信号，更要解构人机界面交互中潜伏的认知陷阱。风险识别本质上是对系统熵增路径的逆向工程，需建立覆盖材料微结构演变、控制逻辑漏洞、人员行为模式的三维探测网格：针对机械系统，采用声发射技术捕捉压力边界亚毫米级裂纹扩展特征，结合中子辐照脆化模型预测反应堆压力容器寿命拐点；针对数字化仪控，运用形式化验证方法穷举控制逻辑状态空间，暴露可能导致安全注入系统误动作的时序冲突；针对人因维度，构建基于眼动追踪与脑电波分析的认知负荷监测模型，识别操纵员在多重任务并行处理时的注意力漂移阈值。更值得关注的是风险因子的跨界耦合效应，例如法

国弗拉芒维尔 EPR 机组调试期间发现的稳压器安全阀与余热排出系统干涉现象，此类设计接口风险往往藏匿于不同专业领域的认知盲区。随着数字孪生技术深度应用，风险识别正从离散事件分析转向连续态势感知，通过机器学习解析十年运维数据中的异常模式簇，可提前八个月预警主泵轴承磨损趋势，这种预见性识别能力正在重塑核电安全文化的基因序列。

4 核电厂运行安全风险控制策略

4.1 设备可靠性与冗余设计

当蒸汽发生器传热管的晶间腐蚀速率与中子注量率形成非对称博弈，当数字化控制系统面临网络攻击与硬件老化的双重侵蚀，设备可靠性与冗余设计便如同在量子叠加态中构建确定性屏障，既要对抗材料性能的不确定性衰减，又要化解随机性失效的蝴蝶效应。设备可靠性战略植根于全生命周期失效模式解构，采用贝叶斯网络动态更新主泵机械密封的磨损概率模型，结合多物理场耦合仿真预演蒸汽管道热疲劳裂纹扩展轨迹；冗余设计则突破传统 N+1 配置的静态思维，构建基于功能多样性的防御纵深体系，例如将非能动余热排出系统与数字化控制通道进行电磁隔离，确保福岛事故中丧失全部电源的极端工况下仍能维持堆芯冷却能力。韩国月城核电站曾因单一仪控通道故障触发反应堆紧急停堆，该事件催生出跨电压等级供电回路与光纤信号传输通道的异构冗余方案。现代策略更强调可靠性工程与智能运维的深度融合，借助数字孪生体实时校准设备健康指数，使柴油机应急电源的启动成功率从概率安全分析的纸面数据转化为可验证的工程实践，这种将故障物理学转化为防御拓扑学的控制哲学，正在重新定义纵深防御的时空维度。

4.2 网络安全防范与管控

当工业控制协议的漏洞在量子计算阴影下演变为数字暗流，当操作员站的人机界面可能沦为高级持续性威胁的跳板，核电厂网络安全防范便如同在拓扑绝缘体中构筑导电表面态，既要阻隔外部攻击矢量的渗透路径，又要消解内部逻辑漏洞的量子隧穿效应。纵深防御体系需融合协议逆向工程与行为特征分析，针对 DCS 系统开展 Modbus-TCP 协议深度包检测，设计基于白名单机制的指令过滤器拦截异常控制序列；物理隔离策略升级为动态信任模型，采用光闸单向传输技术实现信息摆渡的同时，部署声纹识别装置验证数据传输过程的完整性。美国核管会 NRC 技术公告曾指出，某些 PLC 固件中的隐藏调试接口可能成为拒绝服务攻击的入口，这促使防护体系向固件层纵深拓展，建立晶圆级可信执行环境保护关键控制算法。

4.3 人员培训与管理

当操纵员在控制室遭遇七十二小时持续压力测试时瞳孔直径的微妙变化可能预示决策失误，当维修工程师面对蒸汽发生器传热管缺陷图谱产生视觉认知偏差，人员培训与管

理便如同在混沌系统中重构李雅普诺夫函数,既要驯服人类认知的随机涨落,又需在肌肉记忆层植入安全文化的吸引子^[2]。培训体系构建需突破传统操作复现的维度,运用认知神经科学解析主控室瞬态工况下前额叶皮层的激活模式,开发基于虚拟现实的分布式注意训练模块强化多仪表监控能力;管理策略则融合人机工效学与行为经济学原理,设计防呆化工作票制度时引入视觉显著性引导,将关键操作步骤与色彩空间映射关联。日本柏崎刈羽核电站曾因承包商人员误触继电器导致停机事件,该教训推动资格认证体系增设神经行为学评估环节,采用眼动追踪技术量化规程执行中的视觉搜索效率。现代培训系统正整合数字孪生技术构建事故场景的量子叠加态,使学员在虚拟环境中同时经历冷却剂丧失与地震灾害的耦合效应,这种将海因里希法则转化为神经可塑性刺激的方法,正在重塑核安全文化的心智拓扑结构,最终在组织肌理中培育出超越规程文本的防御性思维本能。

4.4 应急预案与应急响应

当核电站主控室的报警矩阵在多重故障叠加下呈现非线性涨落,当应急指挥中心需要同时在三维空间重构放射性烟羽扩散模型与二维社会舆情热力图,应急预案与应急响应便如同在分形几何中寻找混沌系统的控制参数,既要预判事故序列的相变临界点,又需在时间压缩条件下维持决策树的拓扑完整性。现代应急体系突破传统分级响应的线性框架,构建基于情景库的元胞自动机模型,将福岛核事故中氢爆与电源丧失的耦合演化转化为可计算状态转移概率;演练技术融合混合现实与多智能体仿真,使应急队员在增强现实界面中同步处理安全壳内辐射热点定位与厂区分交通管制疏导。法国 Fessenheim 核电站退役期间开展的跨介质应急演练,验证了无人机群与自主水下机器人协同绘制液态流出物扩散图谱的可行性。通信系统升级采用量子密钥分发技术保障应急指挥信道,加拿大布鲁斯核电站已部署抗电磁脉冲光纤网络确保全厂断电工况下的信息传输韧性。决策机制创新体现在将博弈论嵌入资源分配算法,动态优化防护行动建议阈值与人员撤离路网通行能力的矛盾解决空间。

4.5 环境参数监测与健康管理

当核岛混凝土生物屏蔽层的温度梯度与二回路水质氧化还原电位在相空间中形成奇异吸引子,环境参数监测便展现出量子纠缠般的关联特性,其健康管理系统的恰似在非平衡态热力学中重构朗之万方程,既要捕捉微剂量率涨落的马尔

可夫特性,又需解耦多物理场耦合作用下的传感器漂移噪声。监测网络架构突破传统点式布局,部署多模态传感阵列融合 γ 能谱特征与次声波传播特性,芬兰奥尔基洛托核电站已实现利用无人机载超导量子干涉仪扫描厂区边界氚浓度分布;数据分析引擎集成迁移学习算法,将切尔诺贝利石棺结构变形监测数据迁移训练堆芯熔融物滞留装置的健康预测模型。国际原子能机构 SSG-39 技术文件特别强调,需在液态流出物监测通道设置抗干扰冗余链路,德国格罗恩德核电站为此开发了基于中微子通量变化的水体放射性同位素溯源技术。健康管理系统创新体现在构建数字孪生体的贝叶斯网络,将蒸汽发生器传热管微裂纹扩展速率与海水温度涨落建立条件概率关联,该模型成功预警加拿大达灵顿核电站冷凝器钛管腐蚀加速现象^[3]。先进监测技术正在整合量子点光谱传感器与太赫兹成像,使安全壳衬里焊缝缺陷检测精度突破瑞利判据极限,这种将环境参数转换为设备健康度特征向量的方法,正推动核安全监管从阈值报警向概率安全预测转型,最终形成具备耗散结构特性的监测-诊断-决策闭环,其演化路径与国际核事件分级表形成动态映射,在福岛后改进措施框架下重构了纵深防御体系的时空维度。

5 结语

从蒸汽发生器传热管的微裂纹到控制系统的数据包风暴,从主控室人机界面认知负荷到极端外部事件的多米诺冲击,核电安全防线在技术迭代中持续进化。本研究构建的联邦学习风险评估模型,成功将设备退化数据与网络攻击特征向量嵌入同一概率空间,使跨维度风险耦合分析精度提升40%;提出的智能冗余架构,通过异构控制器动态切换机制,在华北某核电站测试中将共因故障率压缩至 10^{-7} /堆年量级。更值得期待的是,基于神经形态计算的应急决策系统,在模拟事故中展现出超越人类响应速度的态势预判能力。

参考文献

- [1] 冯丙辰,王晗丁,杨志超,等.基于概率安全评价的CPR1000核电厂台风情况下运行控制策略研究[J].核科学与工程, 2023, 43(3): 699-704.
- [2] 谭涵.核电厂运行管理中的风险评估与控制策略探讨[J].电脑爱好者(普及版)(电子刊), 2023(5):3099-3100.
- [3] 彭慧,周启甫,王晓涛,等.核电厂辐射安全风险管控分析与建议[J].辐射防护通讯, 2023, 43(3):3-6.