

人因工程视角下核电运行操作可靠性优化研究

关祖佳

台山核电合营有限公司

DOI:10.32629/pe.v4i3.21087

[摘要] 核电是清洁能源的重要组成部分,核电系统的稳定运行对于保证全球核安全、能源供应起着关键的作用。国际原子能机构统计数据显示,核电站异常事件中超过一半是由于人为原因,说明了人因工程学对于提高操作可靠性的重大意义。本文以人因工程学为理论基础,对核电运行操作可靠性研究的价值展开论述,提出具体的改进措施,努力创建以人性化设计为理念的战略架构,削减人为失误的风险,加强安全保障的程度,推进核电行业的可持续发展。同时研究成果也会给完善人因风险管理机制、制定标准规范提供重要的理论支持和实践借鉴。

[关键词] 人因工程; 核电运行; 操作可靠性

中图分类号: TL48 **文献标识码:** A

Research on the Optimization of Nuclear Power Operation Reliability from a Human Factors Engineering Perspective

Zujia Guan

Taishan Nuclear Power Joint Venture Co., Ltd.

[Abstract] Nuclear power systems constitute a vital component of clean energy infrastructure, and their stable operation plays a critical role in ensuring global nuclear safety and energy supply. Statistics from the International Atomic Energy Agency (IAEA) indicate that over half of abnormal events in nuclear power plants are caused by human factors, highlighting the paramount importance of human factors engineering in enhancing operational reliability. Grounded in human factors engineering theory, this study explores the value of operational reliability research in nuclear power operations, proposes concrete improvement measures, and advocates for establishing a strategic framework centered on human-centered design. These efforts aim to reduce risks of human errors, strengthen safety safeguards, and promote sustainable development in the nuclear industry. The research findings will also provide essential theoretical support and practical references for refining human factor risk management mechanisms and developing standardized protocols.

[Key words] Ergonomics; Nuclear power operation; Operational reliability

引言

在“双碳”目标的引领之下,核电规模化发展成了能源结构转型的重要途径。核安全是核能产业的核心要素,也是核能产业发展的首要前提。核电运行系统是复杂的,包含人机协同、环境适应和管理控制等诸多方面,操作人员的状态、交互效率和工作环境都会影响到系统的可靠性。人因工程是研究人类与机械设备、自然环境、管理体系等各方面的相互作用机制,从而减少人为因素所造成安全风险,提高工作效率的一种技术手段,也是核电领域解决人因问题的主要技术途径。虽然我国核电运行中的人因安全管理取得了初步的成效,但是仍然存在着理论同实践相脱离、设备和人员匹配度不高、培训效果差等现象。本文根据人因工程原理,对核电运行操作可

靠性优化方法进行研究,以提高核电站安全水平和能源供应的稳定性为目的。

1 核电运行操作可靠性优化的研究意义

1.1 筑牢核电安全生产底线,防范重大安全风险

核电站属于具有高危性、复杂性以及不确定性的重要基础设施,其运行特性使得任何细微的操作失误都会造成设备出现故障、机组停运或者核安全事件的发生,进而造成巨大的经济损失和社会影响。按照国际核安全管理共识,人为因素是造成核设施运行异常的主要原因,因此实施人因风险管理成为保证核安全的重要手段之一。通过人因工程技术来改善操作的可靠性,一方面可以避免由于误操作或者决策失误而造成的风险,另一方面也可以弥补人类行为中可能存在的安全漏洞,使核安全在

全生命周期内得到系统的管理,减少重大核事故发生的几率,保障公共安全和社会稳定^[1]。

1.2 提升核电运行效率,保障能源稳定供应

核电机组连续稳定的工作是保证电网安全和供电可靠的基本条件,操作可靠对设备运行性能、可用率及功能发挥有重要的作用。操作人员的专业技能水平、人机交互系统的好坏、作业流程是否合理都会影响到任务的完成速度和应急反应能力。提高运行操作的可靠度,降低非计划停机次数,缩短故障处理时间,提高系统的稳定水平。在此形势之下,加强核电机组操作可靠性研究既对应对全球能源紧缺问题有积极作用,也推动了传统能源向清洁能源转变,给可持续发展战略提供主要支持,创建起稳定可靠的低碳绿色能源体系。

1.3 推动核电行业标准化,助力产业高质量发展

在全球核能产业由规模扩张转向高质量运营的历史阶段,人因工程的标准化建设成了促使行业升级的主要推动力。目前核电领域对于人因管理并没有形成统一、细致化的操作标准和评价体系,各个电站以及岗位的人因事件发生率存在较大差别。基于系统化的方法创建的人因工程管理体系,致力于创建标准化的作业流程,改善人机交互的效果,健全从业人员的培训和发展体系,促使技术同实践有机地融合起来,创建起全行业统一的安全标准。借鉴成熟管控模式不但可以提高新建项目和现有设施的安全管理水准,而且能明显加强我国核工业在全世界的中心地位和影响力。

1.4 保障从业人员职业健康,构建人性化作业场景

核电领域工作人员经常处于高强度、高压力的工作环境之中,存在连续值班、繁杂的信息处理以及轮班制度等诸多方面,很容易造成身体疲劳和心理上的紧张不安,进而对操作的准确性造成较大的不良影响。人因工程学以“以人为本”为根本思想,从作业人员的生理特异性、心理状态、实际工作要求等各方面出发,改善作业环境布局、缩减操作程序、合理安排工作任务、创建健全的心理干预体系,从而减少外部环境给个体带来的影响,提高工作舒适度和满意度。此举不但可以保证从业人员职业健康权益,而且可以调动员工的工作积极性,促进人性化、高效化核电运行体系的建立,实现人员安全和发展的双目标。

2 核电运行操作可靠性的研究与应用现状

2.1 人因工程理论研究逐步深化,但实践转化不足

近些年来,我国核能领域的人工智能研究越来越深入,在人因失效剖析、可靠性评价建模以及行为认识机理探究方面也有了诸多重要的发现。以SPAR-H、IDHEAS-ECA为代表的评价方法被应用到实际的生产过程中,形成了比较完整的学术体系和技术标准。从应用角度来讲,目前的研究成果同具体的运营实践有着明显的距离,一方面,很多依靠实验室数据开展的研究结论不能够立刻变成可以执行的管理手段,另一方面,有关特定岗位属性或者作业特点的本地化研究较少,致使已有的通用理论框架在复杂工况中所具有的适用性有所削弱。

2.2 人机界面持续升级,但适配性仍存在短板

随着核电领域数字化、智能化技术的不断深入应用,主控室人机交互系统也在不断更新升级,其显示终端、操控平台、告警模块等各方面的性能也得到了不断的改善,使信息呈现更加准确,操作执行更加高效。目前人机界面设计还存在着诸多的适配性问题,界面元素过多会造成视觉干扰,增加信息遗漏或者错误判断的风险,报警分类不清、优先级设置不合理,在紧急情况下容易造成决策混乱,物理按键和开关布局没有考虑到人体工程学的要求,长期使用会引发操作疲劳,交互逻辑复杂、跨系统协调困难,使误操的概率进一步增大,不能很好地满足使用者的认知模式和操作习惯。

2.3 人员培训体系不断完善,但针对性与实效性欠缺

核电领域重视操作人员的专业化培养,已经建立起了包括资格认证、仿真训练、周期性复训等环节的全流程培训体系,大大提高了从业人员的专业素质。现有的培训体系还存在着很多不足之处,一方面由于课程内容大多集中在理论知识以及标准化的操作规程上,缺少对异常工况、突发事件的实景模拟训练,从而使得应急处理能力的培养受到限制;另一方面是线下授课和单一的模拟器教学方式占主导地位,新兴技术,特别是VR、AR的运用较少,造成学员的实践参与度以及技能转化速度受到影响。考核环节过分依靠纸笔测试,缺少对实际操作规范性、心理适应力和团队协作能力等各方面的综合评价指标,不能全面体现受训者的实际水平。

2.4 管理机制逐步健全,但全流程人因管控存在漏洞

我国核电领域虽然已经建立起比较完善的人员因素(人因)安全管理体系,但是在任务分解、界面交互分析以及执行过程中行为的监控等各方面还存在着很大的不足。前期风险评估阶段一般比较表面,没有很好地发现关键岗位操作失误的隐患;在实施过程中对员工的生理和心理状况重视不够,导致疲劳效应、违规操作等问题不能得到及时的处理;在事后总结阶段过分依赖责任追究机制,缺少对根本原因的深入探究以及经验教训的知识沉淀,造成同类事件重复出现。跨部门协作机制不健全,运维、技术支持和培训教育等环节之间存在信息壁垒,整体人因管理体系缺少系统性与可持续性,亟需创建起涵盖全生命周期的风险控制闭环体系来改善运行效能^[2]。

3 人因工程视角下核电运行操作可靠性优化策略

3.1 强化人员全周期培育,提升核心操作素养

创建起涵盖选拔、培训、考核和激励等各个环节的全生命周期人才培育体系,为提高操作可靠性的人员储备打下良好的基础。在人员选拔阶段,根据核电运营岗位的专业要求,从知识结构、生理机能、心理素质、应急处理能力等各方面进行综合评价,科学地选择出符合岗位要求的候选人。根据目前员工队伍的特点,设计出包含理论讲授、仿真训练、虚拟现实模拟和实战演练的多种培训方式,主要提高应对各种特殊工况的能力,根据不同新入职员工、老员工、班组长的特点制定不同的培训计划,达到精准化教学的目的。健全考核制度,把实际操作规范性、突发情况应急反应速度、风险防控成效等当作重要评价标准,创建

个人技术档案, 定时开展技能竞赛及资格认证复审活动, 从而达到闭环式管理。

3.2 优化人机交互设计, 实现人-机高效协同

按照人体工学原理和认知心理学规律, 在核电运行操作过程中, 对人机交互进行全方位的改善, 从而有效地减少操作失误。第一, 改善界面布局, 缩短信息展示层次结构, 依照重要程度将关键参数进行分类并加以强调, 使用颜色、图标等方式来提升重要信息的表现力, 减少视觉上的障碍因素; 改进报警系统, 按照严重程度制订分层提示准则, 采用声音、灯光和文字相结合的方式防止误报现象发生。第二, 在控制面板的设计上将使用者的行为模式和生理特征相结合, 合理地安排按键、旋钮、显示屏的位置分布, 保证操作的高效性、舒适性, 统一整体的操作逻辑, 简化操作步骤, 防止出现跨模块重复输入指令的情况。第三, 使用智能化的技术手段, 使用人工智能算法来预测用户的意图, 并给用户提供风险预警的服务, 提高决策支持的能力; 创建统一的人机协作平台, 使设备的状态实时同步, 指令快速传递, 从而提高人机协作的效率。最后实施人机匹配性评价, 邀请实际使用者参加方案评审, 根据使用反馈不断改进设计方案, 使人机交互体验达到最好水平。

3.3 改善作业环境条件, 降低外部干扰因素

按照人因工程学原理, 创建出符合人体工效学标准的核电站作业环境, 保证操作人员处于良好的生理和心理状态。从物理环境角度来说, 需要科学调节主控室的温湿度和照明条件, 通过合理配置工作椅、控制台高度, 使人体姿态趋于自然, 从而有效减轻长时间值守造成的身心压力, 在管理上要重视规范现场秩序, 合理划分功能区, 明确各职能区的职责范围, 避免人员过于集中或者职能交叉造成效率降低, 采用科学排班制度控制连续工作时间, 设置定时休息节点, 严格限制非必要加班, 给员工提供充足的恢复期, 减少疲劳引发的操作失误风险^[3]。

3.4 完善全流程管理体系, 构建闭环管控机制

建立事前预测、事中控制、事后总结的全过程闭环管理体系, 达到人为因素风险系统化管理的目的。前期要重视风险识别

工作, 依靠专项数据库对作业任务、人机交互场景、人员生理心理状态做深入剖析并制定出相应的应对措施, 而且还要创建起标准化的操作程序(SOP), 对每一个步骤的具体要求和注意事项加以明确, 从而保证执行标准的一致性。中期控制时要用到智能监控技术(视频记录、行为分析、数据分析), 对核电操作的合规性进行实时的监测, 发现并纠正任何异常行为, 实行双人交叉验证或者监护制度, 对重要环节实施全程监督, 减少由于个人失误造成的风险。后期复盘阶段, 就要从人的角度出发对事故原因进行深入的分析, 制定出相应的改进措施并加以监督; 创建案例分享体系, 把典型的失误事例当作培训资料, 防止类似的情况再发生。

4 结束语

综上所述, 核电站运行操作的可靠性是核安全保障体系的重要组成部分, 人因工程技术是提高系统抗风险能力的重要手段, 在核设施全生命周期管理中起着不可替代的作用。虽然我国在核电领域的人因工程实践已经有了初步的成果, 但是其理论与实践的融合、人机交互界面的优化、培训效果的评价、风险控制机制的完善等各方面还存在许多问题。根据以人为本的思想, 未来要集中于人员培训、设备设计、工作环境改善和管理体系改进这四个方向, 使人因工程技术深入到更深的层次, 从而提高核电站的安全性和运行效率。

[参考文献]

- [1] 汲耀举, 倪昊, 侯昭辉, 等. 核电站运行操作人因失误风险分级管理[J]. 设备管理与维修, 2024, (13): 1-3.
- [2] 张平, 李红波, 耿波, 等. 核电站人因工程运行经验判定准则研究[J]. 科技视界, 2019, (34): 34-37.
- [3] 冯燕, 张云波, 王忠秋, 等. 核电站数字化控制室和人因工程标准体系构建[J]. 核电子学与探测技术, 2018, 38(01): 36-42.

作者简介:

关祖佳(1992--), 男, 汉族, 四川省德阳市人, 工程师, 大学本科, 核电运行。