

Human Reliability Verification Method for Digital Interface of Main Control Room

Wei Zheng

Daya Bay Nuclear Power Operation Management Co., Ltd., Shenzhen, Guangdong, 518000, China

Abstract

To address operational inefficiencies and increased error risks caused by inadequate human factor adaptation during digital interface transformation in control rooms, this study focuses on the core logic and implementation approaches of human factor reliability verification. It systematically analyzes three key influencing factors: interface design, operator cognition, and operational scenarios, establishing a hierarchical verification framework structured as “basic elements → operational workflows → extreme scenarios → iterative optimization.” By validating the compatibility of fundamental interface elements to solidify human factor foundations, assessing complex operational workflows to ensure routine task reliability, and testing emergency responses in extreme scenarios to enhance risk prevention capabilities, the study achieves a closed-loop optimization cycle through verification results. This research provides a scientific human factor reliability verification solution for digital interface transformation in control rooms, reducing the likelihood of human errors while improving overall operational safety and efficiency.

Keywords

Main Control Room; Digital Interface Renovation; Human Factors Reliability; Validation Method; Interface Optimization

主控室数字化界面改造的人因可靠性验证方法

郑伟

大亚湾核电运营管理有限责任公司，中国·广东 深圳 518000

摘 要

为了处理主控室数字化界面改造当中，因为人因适配不够而造成的操作效率不高、误操作风险提高等状况，本文把注意力集中在人因可靠性验证的核心逻辑以及实施途径上，系统地分析界面设计、人员认知、作业场景这三个核心影响要素，构建出“基础元素-操作流程-极端场景-优化迭代”这样的分层验证方法体系。通过对基础界面元素适配性进行验证来筑牢人因基础，对复杂操作流程进行验证来保障常规作业可靠性，对极端场景应急进行验证来强化风险防控能力，结合验证结果达成界面优化迭代的闭环。该研究能够为主控室数字化界面改造提供科学的人因可靠性验证方案，降低人因失误的可能性，提升主控室整体运行的安全性与高效性。

关键词

主控室；数字化界面改造；人因可靠性；验证方法；界面优化

1 引言

随着工业 4.0 以及数字化转型的深入推进，传统主控室正在逐渐完成从模拟界面到数字化界面的迭代升级。数字化界面依靠信息集成度高、操作便捷性强、数据可视化好的优势，大幅提升了主控室作业的自动化程度以及决策效率，被广泛应用于电力、化工、核电、轨道交通等关键工业领域。然而，界面数字化改造并非简单的技术替换，它的核心是实现“人-机-环境”系统的协同适配，人因可靠性作为衡量界面改造成效的核心指标，直接决定着主控室运行的安全性与稳定性。当前，部分主控室数字化界面改造由于忽略人因

工程原理，存在界面布局不合理、信息层级混乱、操作逻辑和人员习惯相反等问题，导致操作人员认知负担增加、误操作风险提高，反而限制了数字化技术的应用价值。人因可靠性强调在特定作业场景之下，操作人员准确、高效地完成预期任务的能力，其验证工作贯穿界面改造的整个流程，是识别适配缺陷、优化界面设计的关键环节。

2 主控室数字化界面改造人因可靠性验证的核心影响因素

2.1 界面设计特性对人因可靠性验证的基础影响

界面设计特性是对人因可靠性产生影响的基础因素，其合理性直接决定着操作人员的交互体验以及任务完成质量。数字化界面的设计要素包含布局结构、信息呈现、操作逻辑这三个核心维度。在布局结构方面，如果界面功能分区

【作者简介】郑伟（1983—），男，中国山东烟台人，本科，工程师，从事核电工程与技术研究。

混乱、关键操作按钮位置隐蔽,会增加操作人员的搜索时间以及认知成本,导致操作效率降低;在信息呈现方面,信息过多、层级模糊、可视化效果不好等问题,容易引发操作人员错误解读数据,尤其是在高负荷作业场景下,误操作概率明显提高;在操作逻辑方面,如果界面操作流程和行业通用习惯不相符、反馈机制不明确,会打破操作人员的行为惯性,增加决策与执行的犹豫时间,影响人因可靠性。

除此之外,界面具备的兼容性以及可扩展性同样会对验证工作产生间接的影响^[1]。要是兼容性不够充足,就可能造成不同系统之间的数据交互出现异常状况,进而增加操作人员进行适配的困难程度;要是可扩展性存在欠缺,就会对界面后续能够进行优化的空间形成限制,从而使得验证结果所具有的时效性出现缩短。所以,界面设计所具有的特性不只是界面改造当中的核心内容,更是人因可靠性验证方面的基础考量维度。

2.2 操作人员认知与行为习惯对验证成效的关键作用

操作人员身为进行人-机交互的主体,其具备的认知能力以及行为习惯是决定人因可靠性的核心变量,会直接对验证方法具有的适用性以及结果具有的真实性产生影响。在认知能力这一方面,不同的操作人员在注意力分配能力、信息处理速度、记忆力水平这些方面存在着差异,对于数字化界面所具有的适应能力也并不相同。老年操作人员也许会因为数字化技能存在不足,对于复杂界面进行操作的熟练程度比较低;年轻操作人员虽然适应能力比较强,但是容易因为注意力出现分散而导致细节方面出现失误。这些认知方面存在的差异会造成同一个界面在不同的操作人员手中呈现出不同的可靠性水平,从而增加验证工作具有的复杂性。在行为习惯这一方面,操作人员在长期进行作业的过程中形成的固定操作模式,对于数字化界面具有接受度以及适配度起到关键作用。要是界面改造打破了原本合理的行为习惯,并且没有提供足够的适应引导,就会造成操作人员产生抵触的情绪,降低操作的积极性以及准确性。同时,操作人员具有的培训水平、应急处置能力也会对验证成效产生影响,培训不够充足会造成操作人员对界面功能掌握得不够全面,没有办法充分暴露验证过程当中存在的潜在问题,影响验证结果具有的客观性^[2]。

2.3 复杂作业场景与环境干扰对验证过程的干扰影响

主控室作业场景具有的复杂性以及环境干扰所包含的因素,会对人因可靠性验证过程产生明显的干扰,影响验证结果具有的准确性以及代表性。在作业场景这一方面,主控室存在多任务同时并行、高负荷进行作业、进行应急处置等复杂的场景。在多任务并行的时候,操作人员需要同时去处理多项任务,注意力出现分散就容易导致操作出现失误;在高负荷作业的场景之下,长时间进行高强度的工作会引发操作人员出现疲劳,使得认知能力以及反应速度出现下降;应急处置场景具有突发性、紧迫性这些特点,操作人员需要在

短时间之内做出准确的决策,对于界面具有的便捷性以及信息具有的准确性有着极高的要求。不同场景的作业需求存在差异,要求验证方法具有针对性,避免单一场景进行验证导致结果具有片面性。

3 主控室数字化界面改造的人因可靠性分层验证方法

3.1 基础界面元素的人因适配性验证方法

基础界面元素属于数字化界面当中的核心组成部分,它的适配性会直接决定操作人员的基础操作感受体验,这是开展后续验证工作的前提条件。该层级验证把“降低认知负担、提高操作方便性”当作核心目标,重点关注界面布局、信息呈现、操作控件这三个核心元素,采用“主观评价和客观测试”相互结合的验证方式。在进行界面布局验证时,挑选不同年龄以及技能水平的操作人员组成测试群体,让他们去完成基础操作任务,通过客观地记录操作时间以及搜索次数,来评估布局的合理程度;同时运用问卷调查的方法,收集操作人员对于功能分区以及关键元素位置的主观评价,结合人因工程学里的“黄金视野区”原则,判断布局是否符合人体视觉习惯。信息呈现验证主要关注信息的可读程度与层级状况。通过视力测试挑选符合行业标准的操作人员,在不同光照条件之下,让他们读取界面数据、识别警示信息,记录误读比例与读取时间;针对信息层级,采用眼动追踪技术,分析操作人员的视觉焦点分布情况,验证核心信息是否处在视觉优先区域,次要信息是否不会对核心信息产生干扰。同时,验证信息编码的统一状况,比如颜色、符号的使用是否符合行业规范,避免因为编码混乱而导致错误判断。

3.2 复杂操作流程的人因可靠性验证方法

构建标准化操作流程场景,结合行业作业规范,梳理出核心操作流程,明确各个步骤的操作要求、判断标准以及时间节点。选择具备丰富作业经验的操作人员,按照界面设计的操作流程去完成任务,客观记录任务完成的时间、操作失误的次数、流程卡顿的次数,评估流程的连贯程度与方便程度。主控室操作人员常常需要同时处理多项任务,例如在调节参数的同时监控设备运行状态、接收指令信息。通过设置多任务场景,让操作人员在完成主任务的同时,处理次要任务,记录操作人员的任务完成质量、注意力分配状况,分析界面是否能够支持多任务高效切换,是否存在因为界面设计缺陷而导致的任务冲突或者操作遗漏情况。最后,采用团队协作进行验证。

3.3 极端场景下的人因应急可靠性验证方法

在场景构建方面,结合主控室所在行业的风险特点,梳理出典型极端场景,例如电力主控室的线路短路故障、化工主控室的泄漏事故、核电主控室的系统异常等,明确场景的突发条件、发展趋势、应急处置流程以及核心目标。采用仿真技术搭建高保真极端场景模拟系统,还原场景中的声光

报警、数据异常波动、界面状态变化等细节内容,确保模拟场景的真实程度与针对状况。

在进行验证的这个过程中,挑选那些拥有应急处置方面经验的操作人员出来,在没有提前去告知他们的这种情况之下,开启模拟出来的场景,把操作人员的应急响应所花费的时间、做决策的准确程度、操作出现失误的比率、界面应急功能被使用的具体情况记录下来。重点去验证界面应急功能是不是有效,就好像报警信息是不是清楚明显、应急操作的按钮是不是方便能够触及、故障排查的指引是不是明确、数据备份以及系统切换是不是快速稳定。与此同时,观察操作人员在高压环境之下的心理状态以及操作的稳定状况,分析界面设计能不能缓解操作人员的紧张情绪,能不能为应急决策提供足够的支撑。

3.4 验证结果导向的界面优化迭代方法

把各层级验证当中的客观数据(像操作所花的时间、失误的比率、读取的速度等)以及主观反馈(操作人员给出的评价、提出的建议)进行梳理,采用统计分析的方法(例如方差分析、相关性分析),识别出界面设计的核心问题以及优先级别。举个例子来说,要是在基础元素验证当中信息被误读的比率比较高,就需要优先对信息呈现的方式进行优化;要是在极端场景验证当中应急响应的时间过长,就需要重点去简化应急操作的流程。同时,分析问题产生的根本原因,区分到底是界面设计存在缺陷、操作人员适配不够还是场景模拟不充分所导致的问题,保证优化的方向精准。针对定位到的问题,结合人因工程学的原理以及行业最佳的实践做法,制定出具体的优化措施。对于界面布局方面的问题,对功能模块的位置进行调整,把高频操作的元素放到黄金视野的区域;对于信息呈现方面的问题,对信息的层级进行优化,把编码规则统一起来,把冗余的信息删减掉;对于操作流程方面的问题,把复杂的步骤简化,对操作的逻辑进行优化,增加流程的指引;对于应急功能方面的问题,强化报警的提示,对应急模块的设计进行优化。在优化的过程当中,需要充分征求操作人员的意见,保证方案能够贴合实际作业的需求。把优化之后的界面应用到测试的场景当中,重复

上面所说的分层验证的流程,对比优化之前和之后的验证数据,评估优化所产生的效果。要是优化之后操作失误的比率明显降低、任务完成的时间缩短、操作人员的满意程度提高,那就说明优化方案是有效的;要是仍然存在问题,就需要回到结果分析的环节,重新去定位问题,调整优化的方案,一直到界面人因可靠性达到预期的目标。通过闭环迭代,实现界面设计和操作人员、作业场景的深度适配^[3]。

4 结语

主控室数字化界面开展改造的核心之处是要达成人一机—环境系统进行协同优化,人因可靠性开展验证作为保障改造成效的关键重要环节,需要充分去考量界面开展设计、人员进行认知、作业出现场景这三大核心会产生影响的因素,进而构建起科学的分层开展验证的体系。本文所提出的“基础界面具备的元素—复杂操作存在的流程—极端场景遇到的应急—优化进行迭代”这种分层开展验证的方法,兼顾了基础性以及针对性、常规性以及特殊性,能够全面地识别出界面开展改造当中的人因适配存在的缺陷。基础界面具备的元素开展验证筑牢了人因可靠性的基础部分,复杂操作存在的流程开展验证保障了常规作业的高效并且稳定,极端场景遇到的应急开展验证强化了高压环境之下的风险控制具备的能力,闭环优化进行迭代的机制则确保了验证结果的有效得到转化,持续不断地提升界面的人因适配具备的特性。该方法形成的体系能够为电力、化工、核电等相关领域的主控室数字化界面开展改造提供具有实操性的指导,有效降低人员出现失误的概率,提升主控室运行的安全以及高效的特性。

参考文献

- [1] 刘涛,梁尘逸,李邵男,等.核电厂主控室人因失误分析技术研究[J].核安全,2025,24(04):13-20.
- [2] 王方恒,邓越睿,梁杰恒.核电厂数字化主控室人因失误分析方法探究[J].仪器仪表用户,2019,26(12):73-75+32.
- [3] 张洁.核电厂人因失误分析与预防控制研究[J].现代职业安全,2023,(07):66-68.