

核电厂主控室数字化人机界面失误模式及原因分析

蒋建军,张 力¹,胡 鸿²,杨 丹³,席钊姿³,唐 范³,江发明³,张 杰⁴
(湖南工学院 人因与安全工程研究院,湖南 衡阳 421002)

[摘 要] 人因失误是核电厂需解决的核心问题,对电厂安全保障起重要作用。为此,文章对人因失误开展了失误模式、原因分析及对策分析。在文献分析和调研基础上,分析了数字化核电厂主控室人机交互每个认知过程中可能存在的失误模式。如,监视过程的失误模式有目标错误、遗漏、误读、听觉失误、时间延迟等。分析了每种失误模式产生的原因,如,监视过程中的目标错误原因有信息负荷过大、紧张、信息显示不醒目、人机界面结构、经验、显示方式的动态变化性。文章基于主要的失误原因,从整体角度分析了预防措施,包括:经验与培训水平、组织管理、人机界面、任务相似性。这些成果对减少核电厂数字化人机界面下的人因失误具有理论和实践指导意义。

[关键词] 数字化人机界面; 失误模式; 影响因子体系; 预防措施

[中图分类号] TM623 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1673-0755(2020)06-0007-06

DOI:10.13967/j.cnki.nhxb.2020.0089

随着计算机技术、信息技术及自动化技术的发展,许多核电厂主控室采用了数字化操控系统。数字化人机界面是操作员与系统交互的“窗口”,操纵员获取人机界面提供的信息后,根据人机界面提供的状态信息进行感知、判断和执行相关的规程^[1]。数字化控制室显示屏提供了多个人机交互界面,这些人机界面在计算机屏幕上没有空间固定连续可见的画面,或者说不能在屏幕上随时连续可见,这改变了操作员的认知过程,给操纵员带来挑战。

目前,由硬件系统、软件系统所引起的事故越来越小,但由人自身因素产生的事故比例却愈来愈高。系统失效中,70%~90%的事故或故障都是由人的失误引发的^[2],如,1979年的三哩岛事故以及1986年的切尔诺贝利事故^[3]。进一步来看,数字化人机界面复杂多变,且有成千上万的参数与画面,参数与画面位置多变或被隐藏,都有可能引发新的人因问题。本研究从操纵员失误模式、失误原因等方面开展研究,为减少操纵员失误、提升失误因子水平提供

方法指导和理论基础。

一 文献回顾

当前,核电厂人机界面的设计与优化方面有许多研究成果。有研究对人机界面设计考虑了功能设计需求,并对每个功能需求设计了状态变化^[4-5],对减少核电厂操纵员的工作负荷做出了贡献。有学者提出人机界面多源信息输入的交互方式,该方式考虑了输入的失误模型、约束模型及用户交互计划,能有效提高性能,减少失误^[6]。为便于核电厂操作人员在严重事故状况下,准确和方便地对人机界面进行操作,有学者基于人因工程对核电站人机界面进行了设计,主要包括:字体设计、颜色设计、图符大小设计、菜单操作方式设计、操作响应方式设计、输入操作方式设计^[7-8]。有研究以人因可靠性分析(Human Reliability Analysis, HRA)为基础对核电厂数字化人机界面的单元数量、布局优化进行了研究,为改进人机交互的可靠性提供参考^[9-10]。有研究利用实验方

[收稿日期] 2020-09-18

[基金项目] 湖南省社会科学成果评审委员会项目“核电厂主控室数字化人机界面对操纵员的影响研究”资助(编号:XSP18YBZ035);湖南省自然科学基金项目“数字化核电厂人机界面管理任务对操纵员的影响分析与建模研究”资助(编号:2019JJ40066);湖南工学院科研启动基金项目“核电厂数字化人机界面二类任务对人因可靠性的影响研究”资助(编号:HQ19009)

[作者简介] 蒋建军(1977—),男,湖南衡阳人,湖南工学院人因与安全工程研究院副教授,南华大学经济管理与法学学院副教授。

1 湖南工学院人因与安全工程研究院教授,南华大学经济管理与法学学院教授。2 湖南工学院人因与安全工程研究院教授。3 湖南工学院安全与环境工程学院讲师。4 南华大学经济管理与法学学院硕士研究生。

法,以移动界面视频游戏及智能手机为背景,以有效性和人的舒适性为目的,以界面加速装置、触屏及手势为依据,通过实验数据对人机界面设计性能进行分析^[11-12]。有研究在工业系统、控制系统设计时考虑了人因工程学理论,强调了人因如何影响工厂运行,在结构系统中的人因知识能很好地减少人的误操作,讨论了人的认知过程与负荷^[13-14]。针对设备交互过程的多样性,有学者基于界面描述语言,提出多目标、多模式的交互界面建模方法,该方法可提高人机界面终端用户交互的可用性^[15]。工业操作过程中,人机界面可帮助操纵员熟悉工厂状态并对意外事件的处理提供帮助,为此,有学者提出了生态界面设计思路,提出了一个动态界面设计优化模型,并得到应用^[16]。这些理论为如何进行人机界面设计,如何从多个方面对促进人机界面以人因工程学为基础的优化设计提供了理论方法和实践指导,对核电

厂人机接口(Human-system interface, HSI)的设计及HRA研究作出了贡献。本文从另一视角,探讨数字化人机界面下的失误模式及原因,为减少操作人员失误提供理论基础和实践指导。

二 核电厂主控室数字化人机界面失误模式及原因分析

(一) 数字化人机界面特征

相对传统的操控系统,数字化人机界面有其自身的特点,主要体现在操纵员通过计算机显示器就可方便、及时地监视电厂运行状态,并可以通过数字化事故规程进行事故恢复和处理,操纵员只要调用数字化画面、参数信息,处理规程就可实现事故的处理。数字化人机界面及传统人机界面的特点^[1,17]如表1所示。

表1 传统人机界面与数字化人机界面中的特征

类别	传统的人机界面	数字化人机界面
信息显示媒体与表达形式	仪表显示、指示灯等实体,表达形式单一	图符、画面、图表、状态指示灯,表达形式多样、丰富
信息量	相对较少	大量的信息,成千幅相关画面
信息冗余编码	单一或没有	多种多样(颜色、字体、闪烁、声音)
搜索/获取信息模式	直接查看仪表、状态指示灯,快捷	直接查看画面信息、或调用画面并查看相关信息
信息布局	以固定布置在仪表盘、控制盘台上,不易改进布局	布置在大屏幕或显示屏上(小空间容纳大量信息),可方便改变布局
控制模式	直接进行实体控制(如开/关按钮)	软控制(鼠标点击)
操作方式	在盘台前巡盘监测状态与进行控制	坐姿操作
界面管理	画面显示空间固定连续可见,较少的界面管理	无空间固定连续可见,需要进行大量的界面管理(配置、导航、画面调整、查询、快捷方式)

(二) 失误模式

从可靠性工程的角度看,人因失误可定义为:在规定的精确性、指令序列或时间内,人执行规定任务时产生的错误,这种错误能够导致预定工作的破坏或引起设备的损坏而使系统的性能降低、退化,从而产生事故或事故隐患^[18]。失误模式划分主要有以下几种分类:(1) Reason 把人因失误分为偏离和疏忽(意图正确但行为失误)以及错误(在行为意图形成阶段的失误)两大类,这个分类如图1所示^[19];(2) Rasmussen 将人的失误分为:知识性失误、技能型失误及规则型失误三种^[20];(3) CREAM 方法将人误事件可观察到的外在表示形式称为失误模式,分为8类:时间(太早,太晚,遗漏)、历程(太长,太

短)、力量(太大,太少)、速度(太快,太慢)、方向(错误方向)、距离(太远,太近)、序列(颠倒,重复,错误动作,插入)和目标(错误目标)^[21]。

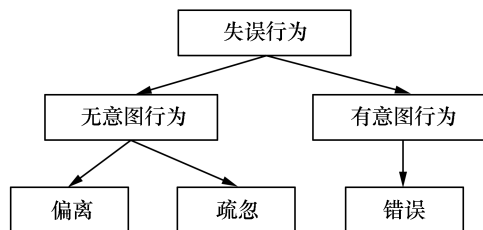


图1 人因失误方式(偏离和疏忽)

通过模拟机观察,操纵员视频分析发现,操纵员

执行任务的大致流程为:观察参数,分析当前运行状态,执行规程,调用/配置画面。这一过程与行为心理学的观点类似,人的行为模式可表示为:S-O-R(刺激-机体-反应),这是一个不断循环的过程,即感知、识别、判断和行为操作过程。在事故处理过程中,人机界面参数或信息等通过感知传入大脑即为监视过程;操纵员依据自己的经验、知识等对所接收信息进行识别即为理解过程;之后操纵员根据自己的理解,进行分析,寻找解决办法,即是决策过程;然后将决策信息由大脑传给手脚,以产生动作进行控制操作即是行为操作过程。针对数字化人机界面,以认知过程为主线,根据数字化系统人机界面模拟机观察,视频分析,总结归纳获得核电厂数字化人机界面失误模式,如表 2 所示。

表 2 核电厂数字化人机界面失误模式

认知过程	失误模式	说明
监视	目标错误	监视了与目标无关的信息或参数
	遗漏	遗漏了监视的相关参数或信息
	误读	读错了信息或参数
	听觉失误	听错了信息
	时间延迟	获取信息或参数的时间滞后
理解	偏差	状态/参数判断偏离了预期目标
	不全面	判断或评估时,遗漏了某个/某些运行状态或参数信息
	时间延迟	判断过程花费的时间相对较长
	班组沟通不充分	参数或状态判断过程中,班组沟通较少
决策	目标错误	未以目标为依据,决策偏离预期目标
	决策不完整	没考虑其他相关因素
	遗漏	没有对有关信息作出决策
	决策错误	选择了错误的决策方案
	时间延迟	决策时间过长,影响了事故的修复
	画面配置/导航错误	参数画面导航顺序不当,画面配置过程中,偏离目标画面
	班组沟通不充分	决策过程中,忽略班组的作用,沟通太少
执行	目标错误	点错对象
	遗漏	对有些目标点未操作
	顺序错误	对串行的事故处理点,执行顺序错误
	无意操作	不小心点错了某个事故软按钮
	连续性执行失误	2 个及以上步骤连续操作错误
	时间延迟	执行时间超过了缓解事故的有效时间
	班组沟通不充分	一回路、二回路操作过程中,任务连续性操作不及时,或操作不一致

(三)原因分析

从失误表征出的特征看,人因失误方式不同,各失误方式有其内在、外在的影响因素,失误影响因子是导致失误的原动力和根本原因。有相关研究把影响因子体系按因子类型进行分类分析,如:个体因素,组织因素,环境因素,硬件设备因素等。本文影响因素归类以失误模式为划分依据,归纳每种失误模式下对应的失误影响因子。数字化人机界面失误模式下的影响因子体系构建主要以文献调研^[18,22-28]及作者经验为基础,经整理获得人机界面失误模式

下的影响因子体系,如表 3 所示。

(四)减少人因失误的策略

从表 3 看出,主要失误原因为:经验与培训水平、组织管理、人机界面、任务相似性。人因失误对电厂运行及安全带来一定的影响,减少人因失误不仅是电厂追求的目标,还是研究人员研究的目的。本文减少人因失误的策略围绕经验与培训水平、组织管理、人机界面、任务相似性方面展开论述,从系统化、整体化的视角讨论核电厂有效预防、减少人因失误的措施。

表 3 数字化人机界面失误模式下的影响因子

认知过程	失误模式	失误模式对应的影响因子
监视	目标错误	①信息负荷过大;②紧张;③信息显示不醒目;④人机界面结构;⑤经验;⑥显示方式的动态变化性
	遗漏	①信息负荷过大;②经验因素;③时间压力;④记忆力
	误读	①自信;②注意力;③态度;④信息相似性;⑤信息显示的模糊性;⑥经验;⑦字符表示区分度不够
	听觉失误	①注意力;②声音的不明确性;③干扰;④疲劳
	时间延迟	①信息负荷过大;②经验因素;③压力;④信息延迟;⑤信息组织不规范
理解	偏差	①粗心;②知识水平;③时间压力
	不全面	①知识水平;②时间压力;③参数/信息量较大;④经验
	时间延迟	①信息量较大;②经验因素;③信息复杂性;④反应能力
	班组沟通不充分	①自信;②组织文化;③组织管理
决策	目标错误	①信息负荷过大;②紧张;③粗心;④任务相似性;⑤责任心
	决策不完整	①经验;②压力;③任务复杂性;④任务数量;⑤任务相关性复杂
	遗漏	①任务过多;②紧张;③任务相似性;④责任心
	决策错误	①经验;②压力;③任务复杂性;④任务数量;⑤培训水平
	时间延迟	①任务量较大;②经验因素;③紧张;④反应能力;⑤信息复杂性
	画面配置/导航错误	①配置的画面较多;②经验因素;③紧张;④反应能力
	班组沟通不充分	①自信;②组织文化;③组织管理
执行	目标错误	①任务负荷过大;②紧张;③任务相似性过多;④目标区分度差;⑤自信;⑥经验
	遗漏	①经验;②压力;③任务数量较多;④培训水平;⑤责任心
	顺序错误	①经验;②压力;③任务数量较多;④培训水平;⑤操作较复杂;⑥缺乏提示标志或标志不醒目;⑦控件布局不合理
	无意操作	①紧张;②经验;③培训水平
	连续性执行失误	①经验;②压力;③培训水平;④缺乏提示标志或标志不醒目;⑤控件布局不合理;⑥功能设计不合理
	时间延迟	①任务量较大;②经验因素;③紧张;④反应能力;⑤执行过程复杂性
	班组沟通不充分	①自信;②组织文化;③组织管理

1. 经验与培训水平。可以加强操纵员模拟机训练,特别是加强任务复杂性,任务多次叠加情景下的训练。加强应变能力、抗压能力的训练,并加强训练过程的分析和总结,寻找原因,不断提升处理事故的能力。

2. 组织管理。核电厂的各个环节都是通过各种流程的分工和协助完成的,核电厂的工作流程包括^[29]:偏差管理、运行操作管理、维修活动管理、技术实施、文件管理、应急准备、工程支持、运行隔离、计量管理、燃料管理、工作过程管理、大修管理等。这些流程的设计必须简单、有效、条理清晰,以确保流程中的工作人员能从容应对。进行合理的工作安排则主要考虑:(1)不同人员的搭配。例如,涉及多种专业背景的工作应安排多专业或多学科人员参

与。(2)时间和进度安排。不仅要考虑操作人员的工作负荷,还要思考各项工作的搭配关系、可用的时间窗口、应尽量防止计划变更。(3)加强班组之间的沟通。沟通包括工作前的沟通、工作期间的沟通与监督和工作后的总结讨论。建立沟通机制、程序规范,优化沟通方式,提高沟通硬件设施的性能、布局。

3. 人机界面。进一步优化人机界面设计,包括:功能布局合理性、字符表示的清晰性、重要信息跳变时间合理性、规程分支合理性与简便性、字符与颜色区分度、报警的准确性等方面,设计后的界面应根据用户体验和意见反馈来不断完善。基于大数据,建立人机界面优化模型,不断学习、训练、结合意见反馈、真实电厂操作数据,用智能手段不断改善模型参

数和人机界面设计。建立优化预警机制,利用人工智能,深度学习,通过训练样本,优化预警,建立明确、清晰的事故预警系统。

4. 任务相似性。因任务较为相似,在参数判断、决策、执行过程中可能存在思维路径依赖性,即操纵员会根据之前的判断和执行流程进行操作,导致任务执行偏差。为防止这种偏差,一方面应对任务相似性参数、执行流程相似性做相应的标识和提示,另一方面,在模拟机培训时,重复设计和加强任务相似性的训练,提高操纵员的敏感度、对任务的区分能力。

三 结 语

人因失误作为事故的主要来源已引起各行业的关注。本文以核电厂数字化人机界面为背景,以减少操纵员与人机界面交互过程中人因失误为目的,分析了传统人机界面与数字化人机界面的特征,构建了失误模式及对应的影响因子,并基于影响因子提出了相应的措施。下一步,将继续对如何减少人因失误的措施进行具体的方案研究和实验验证,以期更能提高人因的可靠性、准确性。

[参考文献]

- [1] 周易川. 核电厂数字化主控室人机界面信息显示特征对操纵员认知行为影响的研究[D]. 衡阳: 南华大学, 2016.
- [2] ROUSE W B, ROUSE S H. Analysis and classification of human error[J]. IEEE Transactions on System Man and Cybernetics, 1983, 13(4): 539-549.
- [3] PAULO V R CARVALHO, ISAAC L DOS SANTOS, MARIO C R VIDAL. Safety implications of cultural and cognitive issues in nuclear power plant operation[J]. Applied Ergonomics, 2006, 37(2): 211-223.
- [4] RUSHAN YAN. The Research of Human-Computer Interface Design based on Vision Communication[J]. Procedia Engineering, 2011, 15: 3114-3118.
- [5] NURASLINDA ANUAR, JONGHYUN KIM. A direct methodology to establish design requirements for human-system interface (HSI) of automatic systems in nuclear power plants[J]. Annals of Nuclear Energy, 2014, 63: 326-338.
- [6] J RAMON NAVARRO-CERDAN, RAFAEL LLOBET, JOAQUIM ARLANDIS, JUAN-CARLOS PEREZ-CORTES. Composition of Constraint, Hypothesis and Error Models to improve interaction in Human-Machine Interfaces[J]. Information Fusion, 2016, 29(3): 1-13.
- [7] 高超, 彭立, 马建新, 傅春霞. 一种严重事故仪控系统人机界面的人因设计[J]. 自动化博览, 2018, 35(8): 78-81.
- [8] 马骏于, 泳 洋. 核电厂疲劳监测系统功能及人机界面设计探讨[J]. 中国仪器仪表, 2018(10): 54-56.
- [9] JIANG JIANJUN, ZHANG LI, XIE TIAN, et al. Optimal Design Methods for a Digital Human-Computer Interface Based on Human Reliability in a Nuclear Power Plant Part2: The optimization design method for component quantity[J]. Annals of Nuclear Energy, 2017, 106(8): 247-255.
- [10] JIANG JIANJUN, ZHANG LI, WANG YIQUN, et al. Optimal design methods for a digital human-computer interface based on human reliability in a nuclear power plant part 1: Optimization method for monitoring unit layout[J]. International Journal of Industrial Ergonomics, 2015, 49(9): 90-96.
- [11] KEVIN BROWNE, CHRISTOPHER ANAND. An empirical evaluation of user interface for mobile video game [J]. Entertainment Computing, 2012, 3(1): 1-10.
- [12] ANA CORREIA DE BARRONS, ROXANNE LEITAO, JORGE RIBEIRO. Design and Evaluation of a Mobile User Interface for Older Adults: Navigation, Interaction and Visual Design Recommendations [J]. Procedia Computer Science, 2014, 27: 369-378.
- [13] M C LEVA, F NAGHDALI, C CIARAPICA ALUNNI. Human Factors Engineering in System Design: A Roadmap for Improvement[J]. Procedia CIRP, 2015, 38: 94-99.
- [14] KATE DOBSON. Human Factors and Ergonomics in transportation control systems[J]. Procedia Manufacturing, 2015, 3: 2913-2920.
- [15] LAMIA GAOUAR, ABDELKRIM BENAMAR, OLIVIER LE GOAER, FRÉDÉRIQUE BIENNIER. HCDL: Human-computer interface description language for multi-target, multimodal, plastic user interfaces[J]. Future Computing and Informatics Journal, 2018, 3(1): 110-130.
- [16] C Lindscheid, P Sakthithasan, S Engell. An Ecological Interface Design Based Visualization of the Energy Balance of Chemical Reactors [J]. IFAC-PapersOnLine, 2019, 51(34): 308-314.
- [17] 杨大新. 核电厂主控室数字化人机界面中信息显示对人因失误的影响及信息布局的实验优化[D]. 衡阳: 南华大学, 2011.
- [18] 赵少刚. 复杂武器系统人因工程设计及 HRA 研究 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2007.
- [19] 廉士乾, 张 力, 王以群, 宋洪涛. 人因失误机理及原因因素研究 [J]. 工业安全与环保, 2007, 33(11): 46-48.
- [20] 李婷婷. 基于人因可靠性分析的钻井作业人误行为研究[D]. 北京: 中国石油大学, 2014.
- [21] Hollnagel E. Cognitive Reliability and Error Analysis

- Method (CREAM)[M]. London: Elsevier Science Ltd Press, 1998.
- [22] 陆莹,王艺琛,阙洁,张星. 地铁运营人因失误影响因素辨识与分析[J]. 中国科技论文, 2015, 10(19): 2276-2280.
- [23] 李鹏程,陈国华,张力,戴立操,蒋建军. 核电厂操纵员人因失误影响因素分析[J]. 中国安全科学学报, 2017, 27(7):42-47.
- [24] DAVID E EMBREY. SLIM-MAUD: A Computer-Based Technique for Human Reliability Assessment[M]. London: Brunel University, 2015:12.
- [25] SEUNG WOO LEE, AR RYUM KIM, JUN SU HA, et al. Development of a qualitative evaluation framework for performance shaping factors (PSFs) in advanced MCR HRA[J]. Annals of Nuclear Energy, 2011, 38(8):1751-1759.
- [26] U. S. Nuclear Regulatory Commission Office of Nuclear Regulatory. Technical Basis and Implementation Guidelines for A Technique for Human Event Analysis (ATHEANA)[R]. Washington DC: 2000.
- [27] CHANG Y H J, MOSLEH A. Cognitive modeling and dynamic probabilistic simulation of operating crew response to complex system accidents. Part 2: IDAC performance influencing factors model[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2007, 92(8):1014-1040.
- [28] CHANG Y H J, MOSLEH A. Cognitive modeling and dynamic probabilistic simulation of operating crew response to complex system accidents: Part 3: IDAC operator response model[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2007, 92(8): 1041-1060.
- [29] 李彬. 核电厂人因失误分析及预防[J]. 广西电业, 2017(7):54-57.

Error Modes and Causes Analysis for Main Control Room Human-Computer Interface in a Nuclear Power Plant

JIANG Jian-jun, ZHANG Li, HU Hong, YANG Dan, XI Liao-zi, TANG fan, JIANG Fa-ming, ZHANG Jie
(Hunan Institute of Technology, HengYang 421002, China)

Abstract: Human error is a core problem to be solved in a nuclear power plant, which has an important role for nuclear power plant safety. For the reason, failure modes, causes and countermeasures were analyzed in the paper. Based on literature analysis and survey, the paper analyzed possible error modes of each cognitive process in human-computer interface of digitization nuclear power plant main control room, for example, error modes in monitoring process are object error, omission, misread, hearing error, time delay; analyzed the reasons caused by each error mode, for example, the reasons of object error in monitoring process are excessive information load, tension, markedness of information display, human-computer interface layout, experience, display way dynamic change; based on main error reasons, analyzed the precautionary measures including experience and training level, organization and management human-computer interface, task similarity from overall view, which provide theoretical direction and practical significance to decrease human error events from nuclear power plant digitization human-computer interface.

Key words: digitization human-computer interface; error modes; influencing factors system; precautionary measures

(本文编辑:刘衍永)