

界面管理任务对核电厂操纵员的认知行为影响分析

戴立操,陆文捷¹

(南华大学 经济管理与法学学院,湖南 衡阳 421001)

[摘要] 为了识别界面管理任务对核电厂操纵员的认知行为的影响,首先对核电厂数字化主控室人机界面特征进行分析,并识别操纵员的主要认知行为特征,然后分别从监视检测、状态评估、计划响应、计划执行4种主要的认知行为进行分析,识别界面管理任务对其的影响。结果显示,界面管理任务对认知行为产生的不利影响主要表现为操纵员的认知负荷和操作负荷的增加。针对上述的不利影响,提出了相应的人因失误预防对策。

[关键词] 核电厂; 数字化主控室; 认知行为; 界面管理任务

[中图分类号] TM623 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1673-0755(2019)01-008-06

越来越多的核电厂主控室已采用先进的数字化控制系统(Digital Control System, DCS)。DCS中,操纵员对电厂状态的监视和对电厂系统的控制主要是在计算机屏幕上完成的。基于计算机的控制替代了传统控制室中盘台、仪表盘、信号灯、按钮、开关等设备^[1]。人机界面数字化会引起操纵员认知行为的改变,导致新的人因失误产生,影响核电厂的安全运行。

基于计算机界面的控制操纵中,操纵员主要涉及两类任务,主任务和界面管理任务^[2]。操纵员执行界面管理任务是为了保证主任务的顺利完成,因此,界面管理任务在核电厂运行中的作用尤为重要。

随着DCS在核电厂主控室的应用,许多研究人员致力于研究界面管理任务对人因可靠性的影响^[3-5]。Hara等人^[6]提出了资源有限效应(Resource Limited Effect)和数据有限效应(Data Limited Effect)两种基本的界面管理任务的影响模型,认为与界面管理任务密切相关的人机界面特征包括信息量、显示区域和界面的灵活性。Lee等人^[7]通过观察操纵员在DCS上的行为,对模拟机数据进行分析,发现执行界面管理任务会增加人因失误的可能性。尽管上述文献描述了界面管理任务的构成要素以及人因失误的影响等方面,但未从认知理论的角度深入分析界面管理任务对各认知行为的影响。而

本文系统地从操纵员4种主要的认知行为分析界面管理任务对其的影响,为控制和减少数字化核电厂人因失误提供理论支持。

一 数字化人机界面的特征与界面管理任务

传统控制室拥有非常大的工作空间,具有空间专用的人机接口,其功能包括报警、显示和控制,单个的人机接口组件拥有各自专属易见的空间位置。而DCS上的人机接口往往缺少物理空间感,它们存在于虚拟的工作空间中,为了成功执行主任务,需从DCS上获取电厂的状态信息,操纵员必须与系统界面进行交互,执行界面管理任务来寻找信息或执行操作。数字化主控室的界面管理任务一般包括配置、导航、画面调整、查询、快捷方式^[2]。

配置是指按照所需的画面配置计算机工作站的人机界面。如在不同的运行阶段,操纵员需配置不同的屏幕画面。

导航是指人机界面的操作主页画面与子画面的进入与返回。如进入反应堆冷却剂系统的特定画面,操纵员在DCS中基于对当前画面位置的理解,开发一条导航路径达到反应堆冷却剂系统的画面,当操作完成时又可通过原导航路径返回主页画面。

画面调整是指操纵员对系统画面进行调整,调整画面的信息显示,使其适合操纵员获取信息和操作。

[收稿日期] 2019-01-02

[基金项目] 湖南省研究生科研创新项目“基于事故模拟的核电厂数字化控制系统操纵员可靠性研究”资助(编号: CX2018B587);南华大学研究生科研创新项目资助(编号:2018KYZ029)

[作者简介] 戴立操(1969-),男,湖南衡阳人,南华大学经济管理与法学学院教授,博士生导师。

¹ 南华大学经济管理与法学学院硕士研究生。

查询是指当操纵员对与任务相关的人机界面产生质疑时通过查询以确定电厂信息状态的行为,包括帮助系统的使用,如安全参数显示系统。

快捷方式是指为使界面管理任务更容易执行而设置快捷方式以简化操作。例如,操纵员指定某一功能键对应特定的信息显示以减少检索时间和工作负荷。对于频繁执行的任务,可以使用快捷方式功能减少鼠标点击的次数。

二 界面管理任务对认知行为的影响分析

主任务是操纵员为实现核电厂功能目标而执行的任务,即 4 种主要的认知任务,分别为监视检测、状态评估、响应计划和响应执行^[2]。操纵员在 DCS 上执行主任务时需要执行相应的界面管理任务以获取信息。而界面管理任务的执行情况会影响主任务的绩效,下面将从操纵员 4 种主要的认知任务分析界面管理任务对操纵员的影响。

(一) 监视检测

核电厂数字化主控室中,监视是指操纵员从 DCS 人机界面中获取信息所涉及的活动,确定各系统的状态以判断电厂是否正常运行,包括主控室 DCS 界面上的一二回路总体监视画面以及报警画面等。检测是指操纵员通过规程来识别系统参数是否正常。

监视检测的认知行为主要是指通过执行界面管理任务从人机界面获取信息,操纵员利用自身的知识经验来理解电厂的状态进行操作。信息的获取受环境特征和操纵员注意力的影响。Wickens 的 SEEV 模型^[8]提出 4 个注意的影响因素:显著性 (Salience)、努力 (Effort)、期望 (Expectancy) 和价值

(Value),即 DCS 界面信息对操纵员的吸引,操纵员注意到信息所需的努力,操纵员倾向于关注的信息以及信息的有用性或重要性。在监视检测的过程中,繁复的界面管理任务会削弱信息对操纵员注意力的吸引,影响操纵员对于界面信息的准确获取。Sweller 提出的认知负荷理论^[9-10],包括资源有限理论和图式理论,认为人的认知资源是有限的,主要表现包括注意资源、工作记忆容量以及图式构建所消耗的资源。在数字化主控室中,操纵员通过 DCS 上的显示屏在任何时候只能查看到部分信息,有限的观看区域这一特征被称为“锁孔效应”^[11],通过“锁孔”访问信息,操纵员执行的任务通常是连续的任务,而显示的信息通常是离散的,因而,操纵员进行监视检测时需要不断地执行界面管理任务来获得完整的、连续的信息,由此增加了操纵员的认知负荷和记忆负荷,消耗了认知资源,增加了人因失误的可能性。

(二) 状态评估

状态评估涉及心智模型 (Mental Model) 和情景模型 (Situation Model) 两个因素,心智模型是指经验丰富的操纵员对系统的物理功能特性及其操作的内在表征,这是通过知识获取、系统培训和操纵经验建立起来的^[12]。准确的心智模型对于电厂事故处理非常重要,操纵员使用心智模型驱动技能级行为,使用认知努力控制规则型行为和知识型行为^[13]。

当核电厂出现事故征兆时,操纵员通过监视检测获得信息,并利用构建好的心智模型来理解核电厂当前的状态以进行评估,而当情景模型与操纵员的心智模型无法匹配时,操纵员会做出错误的响应,其认知行为过程如图 1 所示。

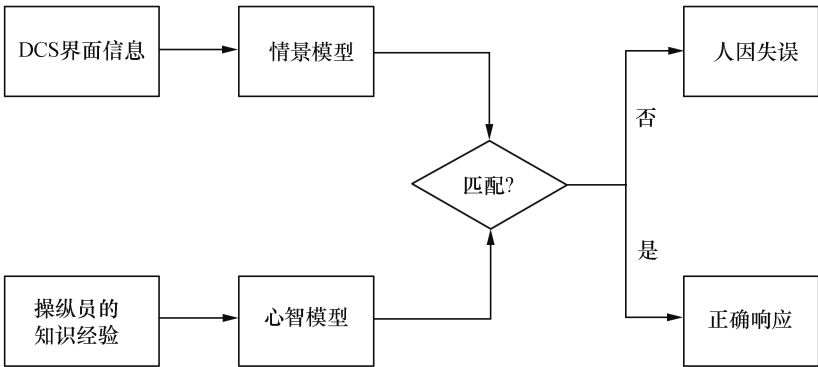


图 1 数字化主控室人机交互的认知行为过程

当 DCS 人机界面提供易于映射到操作员心智模型中的知识信息时,操纵员能够形成准确的情景模型。在事故情景下,系统状态判定相对复杂,需要

对众多的信息进行综合分析,以确定系统的状态。此时,操纵员的心智模型与状态模型进行匹配的难度较高,状态评估会需要耗费更多的工作记忆和注

意力,从而消耗更多的认知资源。状态评估除了消耗工作记忆中认知资源之外,执行界面管理任务也会消耗相对应的认知资源,如果认知资源消耗过高,会阻碍情景模型的建立,最终影响状态评估的结果。

(三)响应计划

响应计划是指决定处理事故的行动方案。核电厂操纵员的操作主要依照事件导向法事故规程(Event-oriented Procedure, EOP)和状态导向法事故规程(State-oriented Procedure, SOP)^[14]。响应计划可以选择现有的规程,或者当规程不适用时,需要重新制定执行计划。为了实现功能目标,操纵员生成响应计划,对其进行评估,选择适合当前情景模型的计划。

在响应计划的过程中,操纵员需要执行界面管理任务以确定合适的电子化规程及其执行的路径选择。在规程不可用的复杂工况下,操纵员承受巨大的认知负荷,并且严重依赖工作记忆、长期记忆和注意力资源。而人的工作记忆能力非常有限,注意力很难持久,界面管理任务的干扰会使操纵员获得信息和处理信息的能力迅速衰减。电子化规程的离散化,使得操纵员需要执行界面管理任务在规程之间进行复杂的切换和跳转,容易使操纵员迷失在规程中,不利于形成整体思维,容易导致响应计划失误。

(四)响应执行

响应执行是对响应计划中确定操作的执行情况,这些操作可以是离散的(例如,开启或停运泵)也可以是连续的(例如,隔离事故蒸发器)。简单的操作,耗费的认知资源或认知努力较少,但是,对于复杂的操作,操纵员在执行任务时需要耗费较多的认知资源,由于认知负荷会影响人的认知可靠性,一旦认知负荷过重,则会导致操纵员的认知过程出现失误。随着需要使用的认知资源的增加,任务绩效会维持在一个高的水平。但如果超过某一临界点时,任务绩效需要更多的资源,超出了人的能力范围,任务绩效就会开始下降。界面管理任务给操纵员带来的工作负荷过重会干扰主任务的执行过程,例如氙平衡中,目标操作是将R棒组稳定在调节带内以及设置好硼浓度,操纵员需要执行大量的界面管理任务并在多个画面的不同控件中反复操作,从而加重操纵员的认知负荷,导致可能的操作失误。

操纵员响应执行过程中的一个或多个界面管理任务失败后,如果及时恢复,最终的主任务仍可以成功。如果界面管理任务失败的恢复操作不成功,则会导致主任务失败。对界面的不熟悉或者执行错误的界面管理任务会导致信息获取的延迟,妨碍操纵

员的操作。例如复归安注中,操纵员选择错误的系统画面和控件,导致没有及时复归安注,最终影响主任务的操作。

三 实例分析

(一)目的

为了能更好地理解界面管理任务对核电厂操纵员的认知行为影响,本文以操纵员实现机组热备用状态正常升功率至机组低功率运行的过程为例,基于南华大学人因研究所的压水堆核电厂模拟机平台对界面管理任务和主任务进行数据统计分析,以识别界面管理任务对主任务的影响。

(二)实例描述

在大多数时间里,机组处于正常功率运行状态。而在更换燃料组件或是检修某个设备时,需要使机组处于停机状态。当换料或设备检修完成后,操纵员将机组启动升功率至满负荷状态运行,这一过程称为上行。在机组启动时操纵员要先将机组稳定在热备用状态,再手动提堆功率从热备用过渡到低功率运行,接着进行汽机发电机冲转、并网至最小负荷50MW,再升功率到830MW,最后平衡氙后升功率至满负荷状态。

在本文的实例中,操纵员的功能目标是要将机组从热备用状态正常升功率至机组低功率运行,为满足这一目标,操纵员需要执行主任务和相应的界面管理任务。在监视检测的过程中,操纵员需要配置屏幕:一、二号屏分别配置总体监视画面、报警画面,其余三到六号屏根据需要自行设定,并通过导航不断切换屏幕画面,或直接查询检索的信息,以获取核电厂机组热备用状态下系统的主要运行参数。在监视检测之后,操纵员利用构建好的心智模型和情景模型来理解核电厂初始工况以进行评估,情景模型的建立依赖于操纵员对信息的准确获取,在这个过程中,操纵员仍需要通过导航、查询、画面调整等界面管理任务来获取电厂信息。当准确评估了机组正常升功率的初始条件,操纵员需要在计算机屏幕上查询相应操作的电子化规程,形成准确的响应计划。最后,操纵员根据规程执行好每一步操作,以完成机组升功率至低功率运行的操作目标。

(三)任务分析

任务分析有助于分析人员理解和表示特定任务和场景下的人员和系统绩效^[15]。本实例主要对操纵员响应执行过程中的主任务和界面管理任务任务进行分析。例如,选取手动逐步调整功率补偿棒组G的棒位这一操作进行任务分析。从DCS屏幕中

进入 RGL004YCD 棒控系统画面(界面管理任务),选择 G 棒组的 RGL004KC 控件(界面管理任务),置于手动方式(主任务);选择 G 棒组的 RGL003KU 控件(界面管理任务),输入整定值(主任务);选择 G 棒组的 RGL005KC 控件(界面管理任务),置于 START 状态(主任务);切换至 GCT002YCD 画面

(界面管理任务),选择 GCT402KU 控件(界面管理任务),调整 GCT402KU 控件(主任务)。其操纵过程如图 2 所示。

通过对整个操作过程进行数据统计,得到任务分布情况,如表 1 所示。

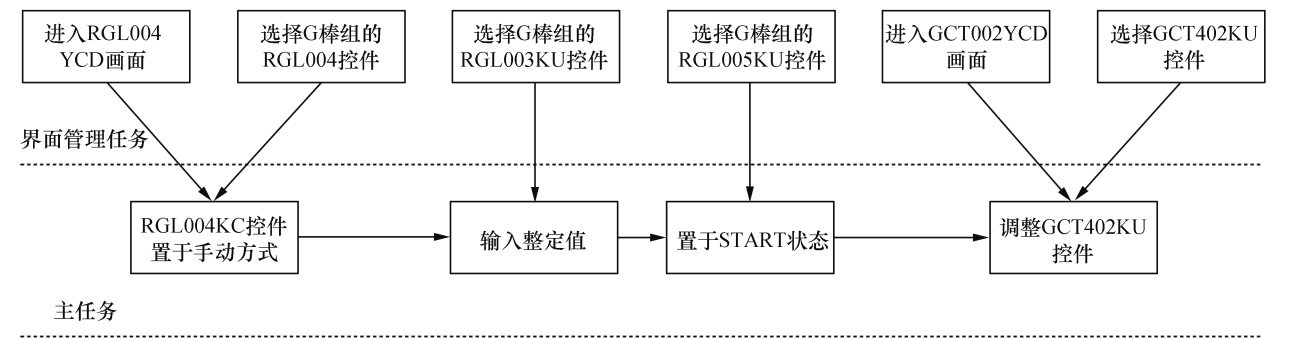


图 2 调整 G 棒组棒位的任务分析

表 1 机组热备用状态正常升功率至机组低功率运行的任务分布情况

操作	具体操作	界面管理任务	主任务
初始状态检查	反应堆临界,功率 $\leq 2\%$ FP	2	1
	功率补偿棒组 G 和温度控制棒组 R 处于手动方式	4	2
	通向凝汽器的蒸汽旁路处于压力模式	3	2
蒸汽发生器水位保持零负荷整定值	旁路给水控制阀自动地保持零负荷整定值		7
主给水电动隔离阀/控制阀处于关闭状态	关闭状态主给水电动隔离阀/控制阀		7
功率提升到 10% FP	手动提升功率补偿棒组 G	5	4
	核对 G1、G2、N1、N2 棒组没有插到低于标定曲线所确定的棒位	3	2
	P10 许可出现	6	4
	闭锁中间量程高通量反应堆保护停堆信号	3	2
	闭锁功率量程高通量低阈值反应堆保护停堆信号	3	2
	P7 许可出现	5	4
	C20 闭锁消失	2	1
	禁止手动闭锁 C21 和 C22 信号	3	2
调整温度偏差,温度控制棒组 R 由手动转为自动方式	当反应堆功率稍高于 C20 时,观察一回路温度偏差	4	3
	通过手动降低蒸汽压力整定值来减小测量的平均温度和参考温度之差	2	1
	当从指示器上读出的温度偏差小于 0.8℃ 时,将温度控制棒组 R 由手动方式切换到自动方式	4	3
调整功率补偿棒组 G 处于与二回路系统负荷对应的棒位	手动逐步调整功率补偿棒组 G 的棒位	6	4
	注意观察 R 棒组的移动,它必须保持在操作带内	3	2
	当需求棒位与叠步计数棒位相等时,停止移动棒位	2	1
	将功率补偿棒组 G 的控制方式由手动切换到自动	2	1
主给水控制阀投运	核对主给水控制阀处于 SG 水位控制之下并完全关闭	7	6
	打开主给水控制阀的电动隔离阀	4	3
	观察给水流量的变化	7	6
合计		94	68

在此操作过程中,界面管理任务包括操纵员配置 DCS 上的目标画面,通过导航找到目标控件,根据需要不断调整画面,以便准确获取信息。操纵员主任务的认知行为就是对电厂信息的监视获取,通过心智模型对当前的电厂状态进行评估,再根据规程执行正常升功率至机组低功率运行的操作。从表 1 可以看出,该操作过程中界面管理任务为 94 项,主任务为 68 项,界面管理任务的数量远大于主任务的数量。操纵员利用注意力资源对电厂的信息进行监视检测,信息通过感觉系统进行输入,通过工作记忆调用长时记忆的知识对信息进行加工输出,触发响应计划和响应执行。其基本过程是信息编码,短期记忆存储,从长时记忆中提取信息,信息比对和决策。过多的界面管理任务对操纵员的认知行为产生不利影响,包括:(1)界面管理任务该任务侵占了操纵员的注意力资源和记忆力资源,加重操纵员的认知负荷;(2)界面管理任务给操作员带来额外的工作负荷,使操纵员不愿意在高工作负荷的情况下执行界面管理任务;(3)界面管理任务绩效降低会影响主任务的绩效;(4)界面管理任务中的人因失误会影响主任务的完成,进而影响核电厂的安全运行。

(四) 预防对策

界面管理任务影响操纵员执行主任务的认知行为。因此,在满足核电厂功能的同时,需要预防和减轻界面管理任务对人因失误的影响应该采取的策略:(1)在监视监测方面,对人机界面进行优化,使数字化人机界面的设计遵循人因工程的设计思想,画面、控件的布局更加合理,尽可能减少界面管理任务的执行。(2)在状态评估方面,通过良好的培训帮助操纵员更好地熟悉核电厂的系统知识、专业技能以及 DCS 人机界面,从而使操纵员建立更加稳固的心智模型和准确的情景模型。(3)在响应计划方面,优化 SOP/EOP 电子化规程,使操纵员准确有效地进行电厂操作,降低界面管理任务带来的干扰;(4)在响应执行方面,通过有效的班组合作与交流帮助操纵员执行好每一步操作,降低操作的复杂性,减少界面管理任务带来的人因失误,提高失误恢复的可能性。

四 结束语

核电厂数字化主控室相较于传统主控室的改变,引起了操纵员认知行为的变化,可能导致新的人因失误产生,从而对人因可靠性产生影响,并且新的人因失误会对系统带来风险。尽管本文定性地分析

了界面管理任务对操纵员四种主要的认知行为的影响,并为人因失误的预防及控制提供了技术对策,以降低风险和提高核电厂安全水平。但是,以后需要基于模拟机实验进一步定量地分析界面管理任务对操纵员可靠性的影响。

[参考文献]

- [1] LEE S J, KIM J H, JANG S. Human Error Mode Identification for NPP Main Control Room Operations Using Soft Controls[J]. Journal of Nuclear Science and Technology, 2011, 48(6): 902-910.
- [2] O'HARA J M, BROWN W S. The effects of interface management tasks on crew performance and safety in complex, computer-based systems: detailed analysis[R]. U.S. NRC, NUREG/CR-6690, 2002(2): 11-22.
- [3] 李鹏程,张 力,戴立操,黄卫刚. 核电厂数字化人-机界面特征对人因失误的影响研究[J]. 核动力工程, 2011, 32(1): 48-52.
- [4] 刘素娟. 核电厂数字化控制室界面管理任务对控制室运行人员的影响[J]. 中国核电, 2008(2): 162-167.
- [5] 顾玲玲,张 力,李鹏程. 数字化主控室界面管理任务对操纵员的影响研究[J]. 南华大学学报(社会科学版), 2011, 12(1): 55-57.
- [6] HARA J O, STUBLER W, WACHTEL J, et al. The Effects of Interface Management Tasks on Operator Performance in Complex Systems [J]. Human Factors & Ergonomics Society Annual Meeting Proceedings, 1998, 42 (23): 1635-1635.
- [7] LEE S J, JUNG W. Task Analysis of Soft Control Operations Using Simulation Data in Nuclear Power Plants [C]//International Conference on Human Interface and the Management of Information. Springer, Berlin, Heidelberg, 2013(8017): 524-529.
- [8] WICKENS C D, GOH J, HELLEBURG J, HORREY W J, TALLEUR D A. Attentional models of multi-pilot performance using advanced displayed technology[J]. Human Factors, 2003, 45(3): 360-380.
- [9] 许远理,李亦菲,朱新明. 评价问题难度的一种新方法-认知负荷测量模型[J]. 心理学动态, 1998(2): 7-11.
- [10] 汪海波,薛澄波,黄剑伟,宋广丽. 基于认知负荷的人机交互数字界面设计和评价[J]. 电子机械工程, 2013, 29(5): 57-60.
- [11] JOHANNESAN L J, COOK R I, WOODS D D. Cooperative Communications in Dynamic Fault Management [J]. Human Factors & Ergonomics Society Annual Meeting Proceedings, 1994, 38(4): 225-229.
- [12] VAN V L J. Engineering Psychology and Human Performance [J]. SA Journal of Industrial Psychology,

1987,13(1):305-330.

[13] RASMUSSEN J. Skills, rules, knowledge: Signals, signs, and symbols and other distinctions in human performance models[J]. IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetics,1983,SMC-13(3):257-267.

[14] HUSSEINY A A, SABRI Z A, PACKER D, et al. Operating procedure automation to enhance safety of nuclear

power plants[J]. Nuclear Engineering & Design, 1989, 110(3):277-297.

[15] JANG I, PARK J, SEONG P. An empirical study on the relationships between functional performance measure and task performance measure in NPP MCR[J]. Annals of Nuclear Energy,2012,42(none):96-103.

Analysis of the Impact of Interface Management Tasks on

Cognitive Behavior of Nuclear Power Plant Operators

DAI Li-cao, LU Wen-jie

(University of South China, Hengyang 421001, China)

Abstract: In order to identify the impact of interface management tasks on the cognitive behavior of nuclear power plant operators, this paper analyzes the human-machine interface characteristics of the digital control room, identifies the main cognitive behavior characteristics of the operator, and then analyzes the four main cognitive behaviors from monitoring and detection, state assessment, plan response and plan execution to identify the impact of the interface management task. The results show that the adverse effects of interface management tasks on cognitive behavior are mainly manifested by the operator's cognitive load and operational load increase. In response to the above adverse effects, the corresponding countermeasures for human error prevention were proposed.

Key words: nuclear power plant; digital main control room; cognitive behavior; interface management task