

DOI:10.19431/j.cnki.1673-0062.2020.05.004

操作任务持续快速变化背景下人因失误分类方法的适用性研究

吴斯扬¹,张力^{1,2*},邹衍华²,刘雪阳¹

(1. 南华大学核科学技术学院,湖南衡阳421001;2. 湖南工学院人因与安全工程研究院,湖南衡阳421002)

摘要:人因失误分类是人因可靠性分析中最重要的问题之一。为了探讨现有人因失误分类方法在操作任务持续快速变化背景下的适用性,基于调峰背景下主控室操纵员操作任务的特性,以人因失误分类法的评估标准为依据,由3位人因专家和7位有主控室运行经验的评估员组成评估小组,采取评估与问卷调查相结合的方法,从全面性、可靠性、理论有效性、背景有效性、实用性、资源效率、易用性7个方面,对现有的人因失误分类方法进行评估打分。统计评估结果得知,在进行操作任务持续快速变化背景下操纵员的人因失误辨识时,现有的人因失误分类方法各自有优势与劣势,没有一种能较好地应用。需要建立新的方法或对原有的方法进行改进来解决操作任务持续快速变化背景下的人因失误辨识问题。

关键词:人因失误分类方法;核电厂;调峰;适用性;人因失误辨识

中图分类号:X946 **文献标志码:**A

文章编号:1673-0062(2020)05-0023-06

A Study on the Applicability of Human Error Taxonomies in the Context of Continuous and Rapid Changes in Operational Tasks

WU Siyang¹, ZHANG Li^{1,2*}, ZOU Yanhua², LIU Xueyang¹

(1. School of Nuclear Science and Technology, University of South China, Hengyang, Hunan 421001, China;

2. Institute of Human Factors Engineering & Safety Management, Hunan Institute of Technology, Hengyang, Hunan 421002, China)

Abstract: Human error classification is one of the most important problems in human factor reliability analysis. In order to explore the applicability of existed human error taxonomies

收稿日期:2020-04-01

基金项目:国家自然科学基金资助项目(71771084;71501068);大型复杂人机系统人因预警技术湖南省工程实验室资助项目(湘发改高技[2015]1084号)

作者简介:吴斯扬(1994-),男,硕士研究生,主要从事核电厂人因可靠性分析方面的研究。E-mail:451889221@qq.com。*通信作者:张力(1955-),男,教授,博士,主要从事人因工程、系统安全分析与评价等方面的研究。E-mail:13807340602@139.com

in the context of continuous and rapid changes in operational tasks, based on the characteristics of the operation tasks of the operator in the main control room under the background of peak shaving and the evaluation criteria of the human error taxonomies, 3 human factors experts and 7 evaluators with experience in the operation of the main control room were formed into an evaluation group. The method of combining evaluation and questionnaire survey was used to evaluate the existed human error taxonomies from the aspects of comprehensiveness, reliability, theoretical validity, contextual validity, usefulness, resource efficiency, and usability. The statistical evaluation results show that the existed human error taxonomies have their own advantages and disadvantages when performing human factor identification of operators under the background of continuous and rapid changes in operating tasks, and none of them can be well applied. So a new method or an improvement of the original method is needed to solve the problem of human error identification in the context of continuous and rapid change of operational tasks.

key words: human error taxonomy; nuclear power plant; peak shaving; applicability; human error identification

0 引言

人因失误辨识是人因可靠性分析和系统风险评估的基础,它有助于在役系统人因失误减少策略的制定,为系统的可靠性设计与再设计提供基础^[1],而有效的人因失误分类是人因失误辨识的关键之一。人因失误模式表现出多样性与复杂性,如果仅依赖分析人员的知识、经验以及主观判断来辨识人因失误,难以保证分类结果的全面性和一致性^[2],因此研究人员基于不同的目的和角度,建立了多种不同的人因失误分类方法,以期规范分类的过程和结果。

随着我国电力需求放缓,负荷峰谷差日益增大,可再生能源发电在电力系统的比例不断提高,北方供暖期保供热压力较大,电力系统调峰形势越来越严峻,部分地区核电机组面临着较为迫切的调峰运行需求。核电厂参与电网调峰运行就是要求核电厂需随电网需求功率变化而能够持续快速变化,这需要通过改变核反应堆控制棒位置或调整冷却剂的硼溶液浓度来实现功率升降。但频繁的功率快速调节可能对反应堆系统产生较大的冲击,加剧反应堆压力容器的辐照脆化和系统某些关键部件的金属疲劳,影响核电厂安全运行且降低机组设备的寿命^[3]。功率持续快速变化反映在核电厂操纵员方面则是需要执行一系列持续快速变化的操控任务,使得操纵员的行为模式、工作特征、工作要求等均发生了变化。因此需要系统评价核电厂参与电网调峰对操纵员人因可靠性带来的影响,而这就需要首先分析评估现有的人

因失误分类方法能否适用于操作任务持续快速变化背景下的人因失误辨识。

1 操作任务持续快速变化背景下核电厂主控室操纵员作业特性

核电厂参与电网调峰要求操纵员在规定时间内,频繁的调节核反应堆输出功率来响应电网目标频率变化。而规定的时间窗口通常远小于正常的启停堆操作的时间窗口,相应的反应堆功率变化速率也更快,反应性控制难度相应增加,其过程与核电厂瞬态事件相似,导致操纵员执行操作任务持续快速变化。“操作任务持续快速变化”定义为操纵人员在一段时间内,持续执行一系列操作任务,响应复杂系统中任务目标即时快速变化或维持系统稳定。具有系统环境变化迅速、人员操作响应时间窗口小、操作强度大、失误后果严重等作业特点。

为研究现有人因失误分类方法在操控任务持续快速变化背景下的适用性,本文以核电厂参与调峰为例,分析该背景下主控室操纵员操作任务作业特性。核电厂参与电网调峰以后,会频繁的升降功率操作,尤其是接到紧急指令需要进行升降负荷时,就需要当班值长进行团队决策,选择合适方案进行升降功率操作,然后操纵员按照所选定的方案进行操作,相对于常规工况下的操作任务,其在操作任务类型、操作方式、行为形成因子(performance shaping factors, PSFs)、工作负荷和工作模式等方面都发生变化^[4]。通过调研、操纵员及模拟机培训教员访谈和现场观察,获得

核电站常规工况与调峰工况下主控室操纵员作业特性的主要区别,见表1。

表1 主控室操纵员作业特性比较

Table 1 Comparison of operating characteristics of operators in main control room

比较维度	常规工况下作业特性	“操作任务持续快速变化”作业特性
行为模式	以规则型为主(操纵员根据固定计划对应的操作规程进行操作)	以规则型+知识型为主(值长根据实际情况制定调峰具体操作策略)
工作特征	主要通过硼酸来调节反应堆升降功率速率,反应缓慢,稳定性好	主要通过控制棒来调节反应堆升降功率速率,升降功率速率快,反应性波动大
工作要求	任务相对简单,提前制定计划进行训练,操作时间窗口大	任务更复杂,突发性调峰只能临时制定操作方案,操作时间窗口小
工作负荷	体力负荷为主,心理负荷、时间负荷和信息负荷较低	心理负荷、时间负荷和信息负荷大幅增加,体力负荷由于频繁操作也相应增加

2 人因失误方法评估标准依据

针对操控任务持续快速变化工况中操纵员的作业特性,本文参考了 E. A. Fleishman 与 M. D. Mumford 的人因失误分类评估标准^[5]3个部分:内部有效性—事件分类术语的可靠性,整体分类的可靠性,术语必须互斥和详尽;外部有效性—普遍性,帮助规划研究项目的能力,预测有效性;实用标准—不同用户的交流,解决应用问题,资源使用。同时,结合 Kirwan 的人因失误辨识评估准则^[6]:全面性、准确性、一致性、理论效度、实用性、资源效率、可审核性。考虑人因失误分析的基本要求,将两者结合,选取出以下7条准则作为本文的操作任务持续快速变化背景下人因失误分类方法的适用性的评估标准。

1)全面性:全面识别和分类给定任务和任务环境中所有可能的人因失误的能力。全面性应该是人因失误分类法评估的最基本标准,在实际应用中,如果一种人因失误分类方法遗漏了重要的或主要的失误,这会导致低估风险从而使方法失去价值,而如果可以准确全面的区分失误类型同时还有很好的潜在失误预测能力则会增加方法的价值。

2)可靠性:不同的评估人员以相同的方式使用该方法以产生相似结果的程度。可靠性的评估可为系统改进提供建议,而不一致的分类会产生不一致的建议,从而会降低方法的价值^[7]。可靠性为L时说明方法结构化较低、相对开放,M说明评估人员在一个详细的框架内具有一定灵活性,H说明该方法是高度结构化的,在给定相同的信息和假设的情况下,可以引导不同的评估人员

沿着相同的路径识别失误。

3)理论有效性:是否基于描述人的行为的模型,具有合理的内部理论结构。方法被评为L表示是一种分级系统,M表示该方法参考了人的行为模型,H表示该方法是对人的行为模型的体现或解释。

4)背景有效性:充分捕获事件发生的环境与背景的程度。针对操控任务持续快速变化工况进行评估。

5)实用性:是否可以给出建议或得出有效的减少或缓解失误的措施。实用性与理论有效性是相互关联的,根据心理失误机制(psychological error mechanisms,PEMs)和PSFs对失误进行准确分类,更深入地考虑失误性质的方法就更能产生有效减少失误的措施。

6)资源效率:熟练使用、收集支持信息和进行分析所需时间。资源效率高代表可以用更少的时间完成以上工作。

7)易用性:该方法容易使用的程度。在具体应用中使用者会偏向使用资源效率高和更方便使用的方法^[6]。人因失误分类方法易用性的提高会影响使用的结果,如果方法更容易使用,那么使用中产生的错误更少,并且会有更好的可靠性。在将人因失误分类方法适应一个新环境时,尝试提高方法的易用性是一种自然的追求^[7]。

3 评估过程与结果

1)评估对象

选取7种现行的人因失误分类方法作为评估对象,分别为:

(1)人误减少和预测系统方法(systematic hu-

man error reduction and prediction approach, SHERPA)^[8]。

(2) 认知可靠性和失误分析方法(cognitive reliability and error analysis method, CREAM)^[9]。

(3) 人因分析和分类系统(human factors analysis and classification system, HFACS)^[10]。

(4) 认知失误的回顾和预测分析技术(technique for the retrospective and predictive analysis of cognitive errors, TRACEr)^[11]。

(5) 预测性人误分析技术(predictive human error analysis, PHEA)^[12]。

(6) 系统理论的事故建模和过程模型(system theoretic accident modeling and processes model, STAMP)^[13]。

(7) 厄运之轮(The “Wheel of Misfortune”, WOM)^[14]。

2) 案例场景

使用国内某核电厂四个不同情境的瞬态事件案例(受制于国内核电技术发展,我国核电厂目前还没有大范围参与调峰,所以以状态相似的瞬态事件替代进行分析),分别为(1)控制棒驱动电源丧失导致反应堆自动停堆;(2)操纵员 R 棒棒位输入错误导致 R 棒异常动作;(3)蒸汽发生器水位低-低引起紧急停堆;(4) T1RGL002 试验期间误操作导致 N1 棒过插。

3) 评估人员组成

评估人员由 3 位人因专家和 7 位有主控室运行经验的评估员组成。3 位人因专家组成专家小组,主要负责详细审查和讨论场景后识别的所有可能失误。7 位熟悉主控室运行的安全评估员组成评估小组,其中 4 位评估员集中完成评估工作,3 位评估员独立完成评估工作。他们的任务是经过简单培训后,分别应用评估对象中列出的 7 种人因失误分类方法对四种案例场景逐一进行分析,识别人因失误。

4) 评估标准量化

总失误池:将四个案例场景中识别出的所有人因失误集合定义为总失误池。总失误池除了专家组确定的失误和事件中实际发生的失误之外,还包括评估人员执行评估任务中发现的专家未识别出的有效且相关的失误。

独立失误池:集体评估员和独立评估员应用同一种人因失误分类法,分析四个案例场景时,识别出的有效失误集合定义为该方法的独立失误池。

某方法的全面性是通过计算该方法的独立失误池中的失误数在总失误池的占比来表示,小于 60% 为 L,60% ~ 80% 为 M,大于 80% 为 H。

方法可靠性(评估者之间的一致性)的评估,首先 3 位独立评估员应用同一种分类法各自识别出的四个案例场景的人因失误,然后选出其中这三位独立评估员相同的失误类及其个数,计算这个同类失误数在独立失误池中的比例,若小于 20% 为 L,20% ~ 40% 为 M,大于 40% 为 H。

方法的资源效率用评估员平均评估完成时间来衡量,用时小说明参考资源丰富,定义小于 1 h 为 H,1 ~ 2 h 为 M,大于 2 h 为 L。

由于理论有效性、背景有效性和实用性主要与方法本身的模型结构和使用方法的评估者有关^[6],因此这三种标准的评估通过问卷由专家组和评估组进行评分,分 1 ~ 5 的 5 个评级。且设置每位专家的权重为 0.2,集体评估员的权重为 0.025,每位独立评估员的权重为 0.1,通过统计加权处理得到最终评分。

方法易用性的评估同样通过问卷的方式,不同的是只收集评估组对方法的偏好与评分,每种方法直接计算评分的平均数。

为了便于比较,将理论有效性、背景有效性、实用性和易用性分值转化与可靠性和资源效率同相的单位,因此,设分值 1 ~ 2 为 L,2 ~ 2.5 为 L-M,2.5 ~ 3.5 为 M,3.5 ~ 4 为 M-H,4 ~ 5 为 H。最后统计结果如表 2。

4 适用性结果分析与讨论

有效的人因失误分类是分析人误的关键问题之一,不同的分类方法取决于不同的具体目的,那么,操作任务持续快速变化背景下,人因失误分类方法如何选择呢?

在考虑方法的全面性时,CREAM、HFACS、TRACEr 和 WOM 这几种方法在全面识别和分类人因失误方面的表现不错。这与其方法结构相符,它们的分类都整体包括了技能型、规则型和知识型行为,而 SHERPA、PHEA 和 STAMP 则没有考虑知识型行为的人因失误。操纵任务持续快速变化背景下的一个显著特征就是与计划决策相关的知识型行为大幅增加,因此缺少这部分的分类法将难以对操纵任务持续快速变化工况中较复杂的个体和组织决策失误进行分类。

在考虑方法的可靠性时,SHERPA 和 PHEA 具有高度结构化的分类流程,这极大提高了评估

者分类时的一致性。CREAM 等方法可靠性一般,是由于失误模式仍然比较宽泛,部分失误具体类型描述模糊不方便区分,针对不同对象辨识的失误模式没有针对性。同时可以发现高度全面且在

类别之间进行细微区分的方法(如 HFACS, WOM)往往会导致消耗更多的资源和更低的可靠性。

表2 操作任务持续快速变化背景下人因失误分类方法的适用性评估结果

Table 2 Evaluation result of applicability of human error taxonomies in the context of continuous and rapid changes in operation tasks

标准	SHERPA	CREAM	HFACS	TRACEr	PHEA	STAMP	WOM
全面性	M	H	H	H	L	L	H
可靠性	H	M	L	M	H	M	L
理论有效性	H	H	M	H	M	M	M
背景有效性	M	M-H	L	M	L-M	L	L-M
实用性	M	H	M	M-H	M	M	L-M
资源效率	M	L	L	M	M	H	L
易用性	M	L-M	M	M	M	M	L

注:L=Low/低;M=Medium/中;H=High/高。

在考虑方法的理论有效性和背景有效性时,虽然现行方法皆基于人的行为模型,理论有效性得到认可,但是大部分方法的背景有效性不佳,难以考虑整个环境和背景条件(如 STAMP、PHEA)。评估人员在使用时无法完整识别操作任务快速变化背景下的 PSFs,这可能导致使用这些方法在该背景下辨识人因失误分类时出现遗漏或者难以正确区分。主要原因是这些分类方法并不是针对本文研究背景开发,其使用的认知行为模型过于简单,或是与操作任务持续快速变化背景下的操纵员认知行为过程不符,无法正确反映连续高强度工作负荷下操纵员对系统动态响应过程中的认知行为。

在考虑方法的实用性时,CREAM 和 TRACEr 的表现更好,减少和缓解失误是它们的主要关注点。通过详细解释失误的产生,可以生成有效的失误减少机制,这同样也是操作任务快速变化背景下的人因失误辨识应该重点关注的领域。

在考虑方法的资源效率时,其与易用性的联系较为紧密,资源效率较高的分类法往往更受使用者的偏爱,而更易学习使用的分类法,其资源消耗也较少。可以很明显的发现人因失误分类方法的全面性越高,往往导致资源效率越低,选取分类法时需要从中寻找到平衡。

在考虑方法的易用性时,这7种方法的易用性都没达到高。易用性低的方法通常是缺乏有效结构、专业术语过多和“解决方案”过多,导致无

法快速可靠地做出分类。

在人因失误分类方法对比评估过程中另外发现:在进行人因失误分类时,经常会使用行业内特定术语,因此将失误分类方法应用到不同的行业背景时需要谨慎处理,还有,选择人因失误分类法不能过于简单,否则可能造成提供的信息不足,但也不能过于庞大而难以处理,导致可靠性较低。本文选取的评估标准也适用于其他行业背景选择失误分类方法时的对比评估。

可见,针对操作任务持续快速变化这一情境下的人因失误辨识,现行的人因失误分类法各自具有优势与劣势,不足以完全满足需求。主要问题有:

1)全面性与可靠性存在相互矛盾的关系,需要更好的平衡;

2)对于操作任务持续快速变化的背景有效性低,现有方法中的认知模型框架无法正确反映连续高强度工作负荷下操纵员对系统动态响应过程中的认知行为;

3)易用性不佳,无法快速可靠地进行分类。

因此有必要开发适用于操作任务持续快速变化背景下人因失误辨识需求的人因失误分类方法。在这些人因失误分类法中,TRACEr 本质是 CREAM 的拓展,开发背景与操作任务持续快速变化背景较为接近,并且回顾分析和预测分析应用同一套结构,这减少了资源消耗同时提高了易用性。TRACEr 方法在认知过程四阶段模型的基础

上,以 Swain 失误分类模式为引导,因此具有不错的理论有效性和实用性,并且其全面性和可靠性相对平衡。但是 TRACEr 对计划决策阶段的人因失误辨识具有一定的困难,针对不同的任务类型,只能给出相对比较泛化的失误模式。通过考虑将操作任务持续快速变化背景下新的操纵员认知行为模型融入 TRACEr 框架以改进,以此提供更全面的解决方案来更好地处理该背景下的人因失误辨识,或许可以适当地解决该问题。

5 结 论

文中研究的操作任务特性和人因失误分类方法评估数据只是建立在文献调研、操纵员访谈以及现场观察的基础上,缺乏调峰对应具体数据或实际案例来验证合理性。后续研究考虑以 TRACEr 方法框架作为主体,与操作任务持续快速变化背景下操纵员认知行为模型具体结合为方向,进行更具体的技术验证和更多的案例研究,以此适用于该背景下的人因失误辨识。期待未来操作任务持续快速变化背景下人因失误辨识方法:

1) 通过确保考虑操作任务持续快速变化背景下主控室操纵员作业相关系统的所有层次,确保系统和全面的分类;

2) 回顾性分析:事件调查数据的收集和分析提供一致和规范的结构,同时也为描述、解释和理解特定事件提供有效的结构,以此提高可靠性;

3) 预测性分析:结合此背景下新的操纵员认知行为模型,关注失误的心理机制和认知原因以识别和分类可能发生的人因失误,从而减少失误产生,提高实用性;

4) 优化人因失误辨识结构,提高资源效率和易用性。

参考文献:

- [1] 赵朝义,丁玉兰,杨中. 人为失误及其辨识技术的研究[J]. 工业安全与环保,2002,28(5):41-44.
- [2] 吴海涛,庄河,罗霞. 一种基于认知过程分析的人因失误辨识方法:应用于高速铁路列车调度系统[J]. 中

国安全生产科学技术,2014,10(2):99-105.

- [3] 马习朋. 大型压水堆核电机组参与电网中间负荷调峰的探讨[J]. 山东电力技术,2007,34(6):35-40.
- [4] 张力,刘雪阳,邹衍华,等. 核电厂操纵员在操作任务持续快速变化下的认知行为特征[J]. 原子能科学技术,2019,53(11):2241-2246.
- [5] FLEISHMAN E A, MUMFORD M D. Evaluating classifications of job behavior: A construct validation of the ability requirement scales[J]. Personnel psychology, 1991, 44(3): 523-575.
- [6] KIRWAN B. Human error identification in human reliability assessment. Part 2: Detailed comparison of techniques [J]. Applied ergonomics, 1992, 23(6): 371-381.
- [7] BAYSARI M T, CAPONECCHIA C, MCINTOSH A S. A reliability and usability study of TRACEr-RAV: The technique for the retrospective analysis of cognitive errors-For rail, Australian version [J]. Applied ergonomics, 2011, 42(6): 852-859.
- [8] EMBREY D. Sherpa: A systematic human error reduction and prediction approach [C] // Proceedings of the international topical meeting on advances in human factors in nuclear power systems. Tennessee, Knoxville, 1986: 184-193.
- [9] HOLLNAGEL E. Cognitive reliability and error analysis method (CREAM) [M]. New York: Elsevier, 1998.
- [10] WIEGMANN D A, SHAPPELL S A. A human error approach to aviation accident analysis: The human factors analysis and classification system [M]. London: Routledge, 2017.
- [11] SHORROCK S T, KIRWAN B. Development and application of a human error identification tool for air traffic control [J]. Applied ergonomics, 2002, 33(4): 319-336.
- [12] KIRWAN B. Human error identification techniques for risk assessment of high risk systems: Part 1: Review and evaluation of techniques [J]. Applied ergonomics, 1998, 29(3): 157-177.
- [13] LEVESON N. A new accident model for engineering safer systems [J]. Safety science, 2004, 42(4): 237-270.
- [14] O'HARE D. The 'wheel of misfortune': A taxonomic approach to human factors in accident investigation and analysis in aviation and other complex systems [J]. Ergonomics, 2000, 43(12): 2001-2019.