

核电厂 SPAR-H 方法中的绩效形成因子优化研究

卓钰铖¹, 仇永萍^{1,*}, 刘 鹏², 李志忠³, 雷文静¹, 谭 笑¹, 邱益民¹

(1. 上海核工程研究设计院股份有限公司, 上海 200233; 2. 浙江大学, 浙江 杭州 310058; 3. 清华大学, 北京 100084)

摘要: 核电厂概率安全评价(PSA)结果作为核电厂执照文件的组成部分, 对核电厂的执照申请和安全运行有着重要作用。核电厂人员可靠性分析(HRA)作为核电厂 PSA 中的关键要素, 对 PSA 的分析结果和风险见解有着重要影响。核电厂 HRA 方法众多, 标准化电厂风险分析 HRA(SPAR-H)方法由于使用便利等特点, 在我国得到了极其广泛的应用。但同时 SPAR-H 方法可能导致结果的阶跃性问题、所考虑的绩效形成因子(PSF)的合理性、PSF 不同级别的选取标准模糊等问题也越来越受到关注。本文结合多年的工程实践经验、理论研究和对核电厂众多操纵员的调查走访, 对 SPAR-H 方法的 PSF 类别、各 PSF 的分级颗粒度和评价准则、各 PSF 级别的修正因子等内容进行了优化尝试, 并结合实证数据进行了方法的效度验证。分析结果表明, PSF 优化后的 SPAR-H 方法在人员可靠性定量分析中表现出较好的效度, 且具备工程上的可实施性。本文方法可为核电厂人员可靠性分析领域的办法开发和工程应用提供参考。

关键词: 人员可靠性分析; 概率安全评价; SPAR-H 方法

中图分类号: TL364.5 文献标志码: A 文章编号: 1000-6931(2025)04-0911-09

doi: [10.7538/yzk.2024.youxian.0650](https://doi.org/10.7538/yzk.2024.youxian.0650)

Optimization of Performance Shaping Factor in SPAR-H Method for Nuclear Power Plant

ZHUO Yucheng¹, QIU Yongping^{1,*}, LIU Peng², LI Zhizhong³,
LEI Wenjing¹, TAN Xiao¹, QIU Yimin¹

(1. Shanghai Nuclear Engineering Research & Design Institute Co., Ltd., Shanghai 200233, China;
2. Zhejiang University, Hangzhou 310058, China; 3. Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Probabilistic safety assessment (PSA), as a component of the nuclear power plant (NPP) license document, plays an important role in the license application and safety operation of nuclear power plants. Human reliability analysis (HRA), as a key element of PSA in NPP, has an important impact on PSA analysis results and risk insights. There are many HRA methods, among which the standardized plant analysis risk HRA (SPAR-H) method has been widely used in China because of its ease to use. However, the step change of analysis result, the rationality of performance shaping factors (PSFs) considered, and the ambiguity of the selection criteria of different levels of a PSF are also received more and more concern. Based on engineering practice experience, theoretical research findings, and interviews with a group NPP operators, this paper attempted to optimize the SPAR-H method in terms of PSF categories, grading granularity and evaluation criteria of each PSF, and multiple

factor of each PSF level. The PSFs in the optimized SPAR-H method included 9 PSFs: time pressure, stress, complexity, experience/training, procedures, human-machine interface, fatigue, working conditions and team cooperation. At the same time, the grades, definitions and evaluation criteria of each PSF were refined and clarified to improve the implementability. In addition, the multiple factors of each PSF level were further optimized to overcome the step change problem of the current SPAR-H method, and examine the validity of the improved method with data from an international HRA empirical study. The results show that the new SPAR-H method after PSF being improved has certain reliability and engineering feasibility in perform the quantitative analysis of human reliability. The optimized SPAR-H method presented in this paper can provide reference for the development of HRA method and the engineering application of the new method.

Key words: human reliability analysis; probabilistic safety assessment; SPAR-H method

核电厂概率安全评价(PSA)的结论作为核电厂安全分析报告(SAR)的必要组成部分,在确保核电厂的安全性方面起着重要作用。核电厂人员可靠性分析(HRA)作为核电厂PSA的关键要素,对PSA的分析结果和风险见解有着重要影响。

由于人员行为的复杂性和不确定性,定量的人员可靠性分析技术一直是核电厂人员可靠性分析领域的重点、难点和热点^[1]。国际上已有的人员可靠性分析方法众多^[2],且还在不断发展中^[3-4]。在众多核电厂人员可靠性分析方法中,标准化电厂风险分析HRA(SPAR-H)方法^[5]由于使用便利等特点,在我国的核电工程项目中得到了极其广泛的应用。但同时,随着SPAR-H方法的广泛应用和分析人员分析经验的不断积累,该方法的不足之处也逐渐显现。

本文在多年的核电厂人员可靠性分析工程实践基础上,对SPAR-H方法的优缺点进行梳理和总结,并针对其中的绩效形成因子(PSF)开展针对性的优化,同时开展优化后方法的效度验证和应用尝试,旨在为后续核电厂HRA领域提供参考。

1 SPAR-H 方法简介

1994年,美国核管会(NRC)和美国爱达荷国家实验室(INL)合作开发了SPAR-H方法,用于核电厂人员可靠性分析。之后NRC等对该方法进行完善,并于2005年发布了对应的方法论文献(NUREG/CR-6883)^[5]。

SPAR-H方法将核电厂人员任务的实施分为两部分:诊断和动作执行,并将人员失误概率(HEP)近似为诊断失误概率和动作执行失误概率

之和。SPAR-H方法提供了诊断的名义HEP(1.0×10^{-2})和动作执行的名义HEP(1.0×10^{-3})。同时,通过8个PSF对以上两部分人误概率进行修正以反映任务、环境和个体对HEP的影响。这8个PSF分别为:可用时间、压力/应激、复杂度、经验/培训、规程、工效学/人-机界面、职责适宜性和工序(工作过程)。

SPAR-H的定量化过程如下:1)确定人员缓解操作的诊断和执行部分,明确基本HEP;2)确定8个PSF对基本HEP的影响;3)8个PSF的调整因子乘以基本HEP;4)根据是否出现3个或3个以上的负面PSF修正HEP,得到最终的HEP;5)对事故序列中的第2个及之后人误事件考虑人误事件间的相关性。

同时,对于满功率运行和停堆/低功率两类工况,PSF的影响有少数差异。SPAR-H方法所考虑的部分PSF的定义、判断标准及对应的修正因子列于表1。关于SPAR-H的详细方法参考文献[5],本文不再赘述。

2 SPAR-H 方法应用效果评价

开发SPAR-H方法的目的最早是用于NRC的监管支持。由于该方法的显著优点,目前在国际范围内得到了十分广泛的使用,在国内核电厂PSA工程领域更是如此。

通过工程实践和总结,SPAR-H方法的主要优点包括:1)方法简单易操作,上手迅速;2)考虑的PSF较多,对影响人员可靠性的影响因素考虑得相对全面;3)部分基础数据来源于早期被广泛接受和应用的人员失误率预测技术(THERP)^[6],

表 1 SPAR-H 方法中 PSF 的定义及修正因子
Table 1 Definition and multiplier factor of PSF in SPAR-H method

PSF	PSF 级别	定义	诊断部分 修正因子	执行部分 修正因子
时间	时间不足	可用时间远远小于名义时间	HEP=1.0	HEP=1.0
	时间刚好	对于诊断部分,可用时间约为 2/3 倍名义时间;对于动作执行部分,可用时间略小于名义时间	10	10
可用时间	名义时间	可用时间≈名义时间	1	1
	额外时间	对于诊断部分,可用时间约为 1~2 倍名义时间且>30 min;对于动作执行部分,可用时间≥5 倍名义时间	0.1	0.1
	大量时间	对于诊断部分,可用时间>2 倍名义时间且>30 min;对于动作执行部分,可用时间≥50 倍所需时间	0.01	0.01
复杂度	高复杂	很难完成,需要诊断和执行的任务很不明确,包含许多变量,如需要较高的技能水平来完成不熟悉的维修任务	5	5
	中等复杂	存在一些难度,需要诊断和执行的任务有些不明确,包含少量变量,如通过周期性的重复操作步骤来完成某一进程	2	2
	名义级别	执行无难度、诊断或操作行为相对清晰,只包括单个或很少量的变量	1	1
	明显诊断	时间充裕,诊断所需信息充分,诊断很简单	0.1	
职责	不适宜	由于疾病、其他身体或精神因素导致个人无法完成要求的任务	HEP=1.0	HEP=1.0
适宜性	较差的	个人能够完成任务,尽管人员绩效有负面影响,如过于自信、长时间工作疲劳、药后昏睡等	5	5
	适宜性	个人能够完成任务,无降低人员绩效的因素	1	1
工序	差	绩效受电厂工序的负面影响,如换班时信息交流不充分、性能指标不明确	2	5
	名义级别	绩效受电厂工序的影响较小,如班组整体绩效充分、信息可用	1	1
	良好	电厂工序可提高绩效,并会产生更为成功的结果,如良好的通信手段、易于理解和得到较好的支持政策	0.8	0.5

故推广过程中接受程度较高。

但同时,SPAR-H 方法也有一定的不足和局限。

1) SPAR-H 结果的阶跃性问题

由于部分 PSF 的不同级别修正因子有着量级上的差异(如可用时间 PSF 等),当前方法论下,有可能时间参数的微小变化(如可用时间相差 1 min)就将导致 HEP 结果相差 1 个量级以上。

2) 部分 PSF 级别的选取标准模糊,判定困难

以复杂度 PSF 为例,已有 SPAR-H 方法中,高复杂度被定义为“很难完成,需要诊断和执行的任务很不明确,包含许多变量”。但多难算难,多少个变量算许多变量这些关键问题均未给出具体说明,导致不同分析人员的分析结果差异较大。

3) 部分 PSF 的合理性问题

以职责适宜性和工序两个 PSF 为例,由于其定义的宽泛性、很难区分不同事故情景等问题,导致工程应用中往往取值单一,无法充分体现方法设计初衷。Laumann 等^[7]认为应该将工序 PSF 换

为更加明确的因素。同时,疲劳等影响因素在当前 SPAR-H 方法的 PSF 中并未明确体现,而研究表明疲劳是影响班组行为和可靠性的重要因素^[8]。

4) 部分 PSF 的重叠性问题

重叠性指的是 PSF 之间是相关的、耦合的。重叠性会导致部分 PSF 的效应被重复考虑和重复计算。导致 PSF 重叠性的原因很多。对于 SPAR-H 方法,一个问题在于 PSF 本身缺少明确定义,即缺少明确指征。如在美国 HRA 实证研究中,一个 HRA 分析团队将“缺少电厂指示”作为复杂度 PSF 的一部分,而另一个团队将其作为工效学/人机交互 PSF 的一部分^[9]。除了重叠性外,SPAR-H 方法的 PSF 之间还存在相关性。Boring^[10]通过分析美国核电厂的 82 个事件,发现可用时间 PSF 与压力/应激 PSF 的相关系数在诊断任务中为 0.67,在执行任务中为 0.50,存在严重的重叠。即这两个 PSF 存在共同的因子,会导致重复考虑和计算共同因子对 HEP 的效应。

但需指出的是, PSF 的重叠性或者非正交性不仅是 SPAR-H 方法的问题, 是多数 HRA 方法的共性问题, 且要完全避免和解决难度很大, SPAR-H 当前的 PSF 重叠性更多的是导致偏保守的结果。

3 SPAR-H 方法中的 PSF 优化

3.1 优化方向及思路

针对 SPAR-H 方法的特点, 本文拟对 SPAR-H 方法中考虑的 PSF 类别、PSF 分级及具体评价准则、PSF 各级别的修正因子三大方面进行优化。

本文通过人因工程试验和人员失误机理、心理学等基础理论研究, 在现代核电厂主控室的人-机交互模式基础上, 提出如图 1 所示的金字塔型 PSF 概念体系^[11], 充分调研当前国际上对于人员行为及可靠性的相关研究成果^[12-18], 开发高效度的 PSF 系列问卷, 收集我国核电厂主控室的实际数据和操纵员反馈信息, 利用风险矩阵方法识别主控室的重要 PSF 集。之后, 结合工程实践经验和专家研讨, 梳理和提炼出新的 PSF 类别, 并在原有 SPAR-H 方法级别的基础上, 结合工程实践总结和操纵员访谈, 进一步细化 PSF 级别, 重新进行各 PSF 级别的划分及定义。通过对众多资深操纵员的调查问卷、专家研讨以及综合对比评估, 确定修正因子。

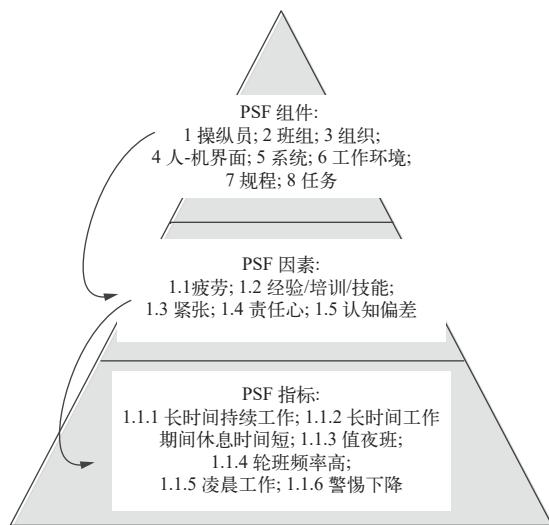


图 1 金字塔型 PSF 概念构建体系
Fig. 1 Pyramidal concept construction system of PSF

理论上, 各类 PSF 对 HRA 有不同的影响权重, 先确定各 PSF 类别的权重, 再结合 PSF 的不同等级来给修正因子赋值为一个可选的技术方案,

但考虑到 PSF 权重的确定难度及不确定性, 本文仍采用传统 SPAR-H 方法的思路, 直接对各 PSF 级别对应的修正因子进行研究和确定, 在 PSF 级别的修正因子中对 PSF 的权重进行包络考虑。

最后, 通过优化后 SPAR-H 方法的应用尝试和效度验证, 来进行方法验证和必要迭代, 完成方法优化。

3.2 优化后的 PSF 及修正因子

本文最终建议将 SPAR-H 方法中考虑的 PSF 调整为: 时间压力、紧张程度、复杂度、经验/培训、规程、人-机界面、疲劳、工作条件、团队合作。

3.2.1 时间压力 PSF 时间压力 PSF 指的是特定事故情景下班组执行预期任务的可用时间与所需时间之差, 对应原方法的可用时间 PSF。新的时间压力 PSF 级别和修正因子如下。

1) 极高时间压力: 可用时间小于所需时间的 0.5 倍。对应的修正因子为 15。

2) 很高时间压力: 可用时间为所需时间的 0.5~1.0 倍之间。对应的修正因子为 10。

3) 高时间压力: 可用时间为所需时间的 1 倍以上, 但未到 1.5 倍。对应的修正因子为 2。

4) 正常水平: 可用时间约为 1.5 倍所需时间。对应的修正因子为 1。

5) 时间较多: 可用时间为所需时间的 1.5~2 倍之间, 可用时间大于 30 min。对应的修正因子为 0.2。

时间很多: 可用时间大于 2 倍所需时间, 且可用时间大于 30 min。对应的修正因子为 0.05。

3.2.2 紧张程度 PSF 紧张程度 PSF 对应原方法的压力 PSF, 指的是该事故情景下的紧张程度和压力。紧张程度 PSF 级别和修正因子如下。

1) 极其紧张: 感到个人生命受到威胁, 适用于可能导致工作场所有放射性物质释放的事故工况。对应修正因子为 15。

2) 高度紧张: 适用于若失败, 可能会对个人和他人的生命和财产造成威胁的事故工况。对应修正因子为 5。

3) 中等紧张: 有一定压力, 适用于如果失败, 会对公司和个人造成一定负面影响的事故工况。对应修正因子为 2。

4) 正常水平: 不紧张, 比较轻松, 适用于其他一般的事故, 如停堆前的人员响应。对应修正因

子为 1。

3.2.3 复杂度 PSF 复杂度 PSF 指的是在给定场景下执行任务的困难程度。新的复杂度 PSF 级别和修正因子如下。

1) 极其复杂: 超过 10 个复杂度因素。对应的修正因子为 25。

2) 很复杂: 7~10 个复杂度因素。对应的修正因子为 10。

3) 比较复杂: 5~6 个复杂度因素。对应的修正因子为 5。

4) 有点复杂: 3~4 个复杂度因素。对应的修正因子为 2。

5) 不复杂: 1~2 个复杂度因素。对应的修正因子为 1。

6) 非常简单: 没有复杂因素。诊断非常简单、明了, 班组难以做出误判断。跟诊断相关的关键信息非常明显, 或者是问题很简化、明显、直接, 执行类似于检测到单个报警或获取单个信息的活动。对应的修正因子为 0.5。

其中复杂度因素具体清单列于表 2。

表 2 复杂度因素清单

Table 2 List of complexity factor

序号	复杂度因素描述	序号	复杂度因素描述
1	为稳定机组不得不立刻进行紧急干预(来不及继续诊断)	14	故障初始评估不是故障, 但后续发现确实是故障
2	3 个以上报警同时发生	15	难以优先处理最重要的故障
3	迫于时间压力必须迅速对系统进行响应	16	时间太少, 难以完成规定任务
4	需同时处理多项任务(2 项以上)	17	大量出现在告警屏幕上的报警是不相干的、无助于预期操作引导的和让人分心
5	很多额外的干扰(如受到打扰, 电话进主控室)	18	显示器或面板上呈现了大量信息
6	需要大量信息(3 个以上)才能对故障进行诊断	19	需要从多个不同的诊断中选择 1 个, 过程中的征兆可能由不同的故障所引起
7	需要同时执行多个规程(2 个以上)	20	同时出现 2 个或 2 个以上的故障
8	一个故障的征兆被另一个故障的征兆所掩盖, 彼此难以区分	21	在执行规程的过程中, 系统发生了显著变化
9	难以预测未来电厂状态	22	难以区分由故障直接引起的变化和由于自动化系统为了稳定电厂而引起的变化
10	需要与其他相关人员(包括班组成员和现场操纵员)进行大量的协作	23	在故障诊断的过程中, 系统缺乏足够的可用信息对当前情况做出必要的评估
11	难以识别故障最为重要的征兆	24	故障导致系统的多个部分发生变化
12	在故障诊断的过程中, 系统发生了很多变化	25	一些报警意义不明, 难以理解它们的实际含义
13	难以识别问题发生的先后顺序		

3.2.4 经验/培训 PSF 经验/培训 PSF 是指操纵员对任务或事故工况的经验、培训程度, 反映了操纵员处理任务或事故工况的熟练程度。新的经验/培训 PSF 级别和修正因子如下。

1) 已有经验/培训误导: 经验/培训跟任务或者事故工况的正确处理不匹配, 会产生误导。对应的修正因子为 100。

2) 无经验/培训: 对该任务或事故工况没有经验/培训。对应的修正因子为 25。

3) 低水平: 对任务或事故工况有少数经验/培训(如平均而言, 每年针对该事故工况的复训低于 1 次)。对应的修正因子为 10。

4) 正常水平: 对任务或事故工况有好的经验/培训(如 10 年内培训次数超过 15 次或 1 年针对该事故工况的复训不低于 1 次)。对应的修正因子为 1。

5) 高水平: 对任务或事故工况有好的经验/培训(如近 5 年内已经在实际当中成功处理过类似任务或事故工况, 或者对类似事故工况的模拟机复训次数不低于每年 2 次)。对应的修正因子为 0.5。

3.2.5 规程 PSF 规程 PSF 指的是规程(包括计算机化操作规程、纸质操作规程和检查表等)的可用性和质量。新的规程 PSF 级别和修正因子如下。

- 1) 规程错误: 规程错误, 误导操纵员/班组。对应的修正因子为 100。
- 2) 没有规程: 没有规程支持, 需要操纵员临时发挥。对应的修正因子为 40。
- 3) 规程不完整: 部分程序/步骤信息缺失。对应的修正因子为 15。
- 4) 规程可用但差: 如格式问题、文本内容不明确或缺乏一致性。对应的修正因子为 5。
- 5) 正常水平: 规程良好, 经过人因工程验证与确认。对应的修正因子为 1。
- 6) 良好的征兆导向规程系统/先进系统: 所采用的规程体系为征兆导向规程系统/先进系统, 且质量较高(无上述负面 PSF 的所述问题), 有利于班组正确、快速做出诊断和执行操作。对应的修正因子为 0.5。

3.2.6 人-机界面 PSF 人-机界面 PSF 对应原来的工效学/人-机界面 PSF, 指的是任务执行所需的人-机交互界面和信息的可用性和质量水平。新的人-机界面 PSF 级别和修正因子如下。

- 1) 关键信息错误: 个别关键信息不正确, 误导操纵员。对应的修正因子为 50。
- 2) 关键信息缺失: 缺失个别关键信息。对应的修正因子为 10。
- 3) 正常水平: 人-机界面良好, 符合相关导则。对应的修正因子为 1。
- 4) 先进设计: 人-机界面设计采用先进设计方法, 非常优秀, 优于当前行业平均水平。对应的修正因子为 0.5。

3.2.7 疲劳 PSF 新增疲劳 PSF, 替代原方法的职责适宜性 PSF。疲劳 PSF 指的是倒班机制和工作模式导致的与睡眠稳态和生理节律相关的疲劳因素。疲劳 PSF 级别和修正因子如下。

- 1) 高疲劳水平: 现有的倒班机制和工作模式容易使班组和人员处于高疲劳状态, 如经常长时间工作(超过 20 h 没有休息或连续工作超过 20 h)。对应修正因子为 5。
- 2) 中等疲劳水平: 现有的倒班机制和工作模式容易使班组和人员处于一定的疲劳状态, 如会连续值班(各班组年平均连续值班次数超过 2 次)。对应的修正因子为 2。
- 3) 正常水平: 当前倒班机制和工作模式下班组感到疲劳感较低, 个体能够较好执行任务, 受到

疲劳的影响可忽略。对应的修正因子为 1。

3.2.8 工作条件 PSF 工作条件 PSF 指的是噪声、干扰、炎热、辐射等物理环境。在量化分析中主要考虑主控室最可能存在的噪声和干扰。新增的工作条件 PSF 级别和修正因子如下。

- 1) 工作条件差: 工作场所内有超出设计规定的噪声和干扰。对应的修正因子为 5。
- 2) 正常水平: 工作场所内的噪声和干扰符合相关主控室规定。对应的修正因子为 1。

3.2.9 团队合作 PSF 团队合作 PSF 指的是班组的信息共享、决策、沟通、协调和合作等水平。团队合作 PSF 的级别和修正因子如下。

- 1) 差: 包括如下任意一种或多种情况, 对应的修正因子为 5。
 - (1) 沟通不畅: 没有按照三段式进行交流, 没有共享关键信息。
 - (2) 缺乏检查: 过于相信团队其他成员的操作和决定, 没有进行检查与核实, 缺乏质疑精神。
 - (3) 凝聚力缺陷: 班组成员存在对抗心理, 班组成员内部关系不佳。
 - (4) 领导力缺陷: 值长的指挥和控制存在问题; 过于自信; 权威等级严重, 值长忽视来自于其他组员的正确意见; 过多参与具体任务。
- 2) 正常水平: 团队合作顺畅, 按照规定顺利进行, 不影响绩效执行过程。对应的修正因子为 1。

- 3) 良好: 团队合作良好, 在一般的行业要求和水平基础上更进一步, 且有 3 年以上的配合默契程度, 有利于提高团队绩效。对应的修正因子为 0.8。

对于总人员失误概率的计算流程, 参照已有 SPAR-H 方法保持不变。

4 优化后的 SPAR-H 方法效度验证

本文在方法优化调整后进一步进行了方法的效度、可实施性和有效性验证。由于复杂事故情景下的人员失误概率真实值的未知性, HRA 方法的有效性验证一直是一个难点问题。本次效度验证的基准值尽量寻找真实数据而非理论分析结果, 最终所采用的数据来自于国际 HRA 的实证研究^[19-20]。

该 HRA 实证研究是经济合作与发展组织(OECD)、NRC、瑞士联邦核安全监察局(ENSI)和

美国电力研究院(EPRI)的联合项目,由美国等近十个国家的HRA研究团队参与。在该国际HRA实证研究中,14个操纵员班组响应预定义的、不同难度等级的应急任务,获取实证数据;同时,14个HRA分析团队对应急任务的HEP进行定性和定量预测;最后,比较实证数据和预测数据,分析HRA方法的效度。这14个班组在数字化全范围模拟机上响应蒸汽发生器传热管破裂(SGTR)和丧失主给水(LOFW)事故。本文对SGTR事故场景中的HEP数据进行对比分析。

SGTR事故场景下设计了两种类型:基本情景(用后缀字母A表示)和复杂情景(多重失效,用后缀字母B表示)。实验中,潜在人员失误事件有9个,分别如下:1) HFE-1A 和 HFE-1B,识别和隔

离破裂蒸汽发生器(注:1B叠加主蒸汽管道破裂事故);2) HFE-2A 和 HFE-2B,反应堆冷却剂系统(RCS)快速冷却;3) HFE-3A 和 HFE-3B, RCS 快速降压;4) HFE-4A,停止安注(SI);5) HFE-5B1,关闭电动卸压阀(PORV)(注:PORV部分打开,但PORV状态指示器显示为“关闭”);6) HFE-5B2,关闭PORV(注:PORV部分打开,PORV状态指示器显示为“打开”)。

其中HFE-4A只在基本情景中出现,HFE-5B1和HFE-5B2只在复杂情景中出现,且7个班组执行HFE-5B1情景,另外7个班组执行HFE-5B2情景。相关实证研究的实验结果如表3所列。表3中,LB、UB分别表示HEP下边界取值和上边界取值,对应第5百分位数和第95百分位数。

表3 国际HRA实证研究结果
Table 3 Result of international HRA empirical study

失误事件编号	失效班组数	总班组数	HEP点估计值	LB	UB
HFE-5B1	7	7	1.00×10^0	4.30×10^{-1}	9.80×10^{-1}
HFE-1B	7	14	5.00×10^{-1}	2.00×10^{-1}	8.00×10^{-1}
HFE-3B	2	14	1.43×10^{-1}	1.80×10^{-2}	3.00×10^{-1}
HFE-3A	1	14	7.14×10^{-2}	3.00×10^{-2}	1.80×10^{-1}
HFE-1A	1	14	7.14×10^{-2}	3.00×10^{-3}	1.80×10^{-1}
HFE-2A	1	14	7.14×10^{-2}	3.00×10^{-3}	1.80×10^{-1}
HFE-2B	0	14	9.00×10^{-5}	9.00×10^{-5}	5.00×10^{-2}
HFE-5B2	0	7	9.00×10^{-5}	1.00×10^{-4}	7.40×10^{-2}
HFE-4A	0	14	9.00×10^{-5}	9.00×10^{-5}	5.00×10^{-2}

利用实证研究文献[19-20]中提供的相关事故情景及HRA团队分析时采用的PSF描述,本文采用优化后的SPAR-H方法对6个人员失误事件进行了分析。分析过程中,对于各事故情景,针对同一客观情景信息,采用优化前和优化后的PSF定义分别进行PSF等级划分和对应修正因子的修正,分别进行HEP取值的计算。例如,当情景响应数据中可用时间与实际测得的所需时间比值为1.6且大于30 min的情况下,在原SPAR-H方法中,时间参数PSF选择“额外时间”级别,修正因子取0.1,在新方法中,则根据新的PSF分级定义选择时间参数中的“时间较多”级别,修正因子取0.2;其他PSF的级别和修正因子确定过程类似。分析之后,并与原SPAR-H方法的分析结果、实证数据的点估计值进行了对比,如图2所示。

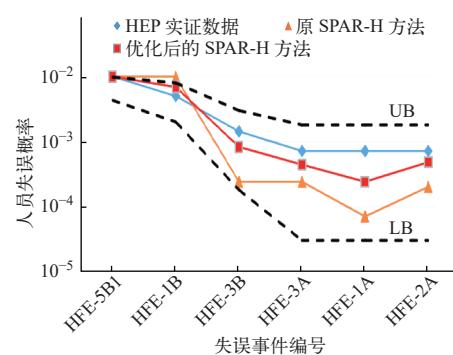


图2 效度验证结果示意图
Fig. 2 Schematic diagram of validity verification result

对比结果表明,与实证数据结果相比,优化后的SPAR-H方法在多数情景的分析结果中相对原SPAR-H方法有着更为良好的预测结果。

需指出的是,由于实证数据样本量的局限性,

实证数据结果仍有着很大的不确定性。同时,优化后、原 SPAR-H 方法在使用过程中也受限于分析输入的完整性和准确性等因素影响,亦存在较大的不确定性。故图 2 所示的相关分析重点旨在表明优化后的 SPAR-H 方法首先具备分析的可实施性,同时分析结果上有较好的可取之处,而不对具体的点值大小进行过分关注。

5 小结

本文对 SPAR-H 方法进行了优化研究,对 SPAR-H 方法的 PSF 类别、各 PSF 的分级颗粒度和评价准则、各 PSF 级别的修正因子等内容进行了优化尝试,并结合实证数据进行了方法的效度验证。分析结果表明,优化后的 SPAR-H 方法能够用于人员可靠性定量分析,分析结果具有较好的效度,且具备工程上的可实施性,能够为后续核电厂 HRA 领域提供参考。

需指出的是,本文提出的优化后的 SPAR-H 方法虽然解决了原方法的部分局限性,但对于部分 PSF 的重叠性等 HRA 共性难点问题亦未能很好解决,新方法的有效性和准确性也有待开展更多的持续论证,相关优化过程及结果可供我国行业相关人员参考。

参考文献:

- [1] 李鹏程,陈国华,张力,等.人因可靠性分析技术的研究进展与发展趋势[J].*原子能科学技术*,2011,45(3): 329-340.
LI Pengcheng, CHEN Guohua, ZHANG Li, et al. Research review and development trends of human reliability analysis techniques[J]. *Atomic Energy Science and Technology*, 2011, 45(3): 329-340(in Chinese).
- [2] 何旭洪,黄祥瑞.工业系统中人的可靠性分析:原理、方法与应用[M].北京:清华大学出版社,2007.
- [3] 赵军,童节娟,刘涛,等.核电厂传统人员可靠性分析方法中引入班组因素的研究[J].*原子能科学技术*,2011,45(8): 966-971.
ZHAO Jun, TONG Jiejuan, LIU Tao, et al. Integrating team factor into current human reliability analysis of nuclear power plant[J]. *Atomic Energy Science and Technology*, 2011, 45(8): 966-971(in Chinese).
- [4] 张力,戴立操,胡鸿,等.数字化核电厂人因可靠性[M].北京:国防工业出版社,2019.
- [5] GERTMAN D I, BLACKMAN H, MARBLE J, et al. The SPAR-H human reliability analysis method, NUREG/CR-6883[R]. US: Nuclear Regulatory Commission, 2005.
- [6] SWAIN A D, GUTTMANN H E. Handbook of human reliability analysis with emphasis on nuclear power plant applications, NUREG/CR-1278[R]. US: Nuclear Regulatory Commission, 1983.
- [7] LAUMANN K, RASMUSSEN M. Suggestions for improvements to the definitions of SPAR-H performance shaping factors, to the definitions of the levels, and suggestions for changes in the multipliers[C]//Probabilistic Safety Assessment and Management PSAM 12. Honolulu, Hawaii: [s. n.], 2014.
- [8] WILLIAMSON A, LOMBARDI D A, FOLKARD S, et al. The link between fatigue and safety[J]. *Accident Analysis & Prevention*, 2011, 43(2): 498-515.
- [9] MARBLE J, LIAO H, FORESTER J, et al. Results and insights derived from the intra-method comparisons of the US empirical HRA study[C]//Proceedings of the 11th International Probabilistic Safety Assessment and Management Conference (PSAM11) and the Annual European Safety and Reliability Conference (ESREL 2012). Helsinki, Finland: [s. n.], 2012.
- [10] BORING R L. How many performance shaping factors are necessary for human reliability analysis? [C]//Proceedings of the 10th International Probabilistic Safety Assessment & Management Conference (PSAM10). Seattle, WA: [s. n.], 2010.
- [11] LIU P, LYU X, QIU Y, et al. Identifying key performance shaping factors in digital main control rooms of nuclear power plants: A risk-based approach[J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2017, 167: 264-275.
- [12] SCHREUDER E J A, MIOCH T. The effect of time pressure and task completion on the occurrence of cognitive lockup[C]//Proceedings 4th Workshop HCP Human Centered Processes. Genoa, Italy: [s. n.], 2011.
- [13] MUSE L A, HARRIS S G, FEILD H S. Has the inverted-U theory of stress and job performance had a fair test? [J]. *Human Performance*, 2003, 16(4): 349-364.
- [14] SZALMA J L, HANCOCK P A. Noise effects on human performance: A meta-analytic synthesis[J]. *Psychological Bulletin*, 2011, 137(4): 682-707.
- [15] STRATER O. Cognition and safety: An integrated approach to systems design and assessment[R]. Burlington:

- [s. n.], 2005.
- [16] LIU P, LI Z. Task complexity: A review and conceptualization framework[J]. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 2012, 42(6): 553-568.
- [17] FOLKARD S, LOMBARDI D A. Modeling the impact of the components of long work hours on injuries and “accidents”[J]. *American Journal of Industrial Medicine*, 2006, 49(11): 953-963.
- [18] BRAARUD P Ø, KIRWAN B. Task complexity: What challenges the crew and how do they cope[M]// SKJERVE A B, BYE A, eds. Simulator-based Human Factors Studies Across 25 Years: The History of the Halden Man-machine Laboratory. London: Springer, 2010: 233-251.
- [19] LOIS E, DANG V N, FORESTER J, et al. International HRA empirical study, Phase 1 report: Description of overall approach and pilot phase results from comparing HRA methods to simulator performance data[R]. US: Nuclear Regulatory Commission, 2009.
- [20] BYE A, LOIS E, DANG V N, et al. International HRA empirical study, Phase 2 report: Results from comparing HRA method predictions to simulator data from SGTR scenarios[R]. US: Nuclear Regulatory Commission, 2011.