



SPAR-H方法中行为形成因子间的相关性识别

刘建桥, 张 力, 邹衍华, 孙倩琳, 刘雪阳, 陈 帅

Identification of Correlation among Performance Shaping Factors of SPAR-H Method

Liu Jianqiao, Zhang Li, Zou Yanhua, Sun Qianlin, Liu Xueyang, and Chen Shuai

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13832/j.jnpe.2021.04.0144>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

SPAR-H方法在数字化核电厂人因可靠性分析中的应用研究

Application of SPAR-H Method in Human Reliability Analysis of Digital Nuclear Power Plants

核动力工程. 2021, 42(3): 126-132

核电厂人因可靠性分析中的相关性分析方法研究

Research on Dependence Assessment in Human Reliability Analysis of Nuclear Power Plants

核动力工程. 2020, 41(3): 147-152

基于数据挖掘的非能动系统功能可靠性评估方法研究

Research of Functional Reliability Evaluation Method for Passive Systems Based on Data Mining Technology

核动力工程. 2020, 41(2): 78-83

核电厂数字化主控室操纵员的响应执行可靠性评估模型

An Assessment Model of Operator's Response Implementation Reliability in Digital Main Control Rooms of Nuclear Power Plants

核动力工程. 2018, 39(5): 95-100

数字化主控室操纵员人因可靠性研究

Study on Human Reliability of Operator in Digital Main Control Room

核动力工程. 2019, 40(4): 104-107

基于数据挖掘技术的组件核子密度预测研究

Study of Assembly Nuclide Density Prediction Based on Data Mining Technology

核动力工程. 2021, 42(4): 126-132



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

文章编号: 0258-0926(2021)04-0144-07; doi:10.13832/j.jnpe.2021.04.0144

SPAR-H 方法中行为形成因子间的相关性识别

刘建桥¹, 张 力^{1,2*}, 邹衍华², 孙倩琳¹, 刘雪阳², 陈 帅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: 标准化核电站风险分析-人因可靠性分析方法 (SPAR-H) 是目前国际上认可和接受的人因可靠性分析方法, 但其 8 个行为形成因子 (PSFs) 间存在交叉部分, 导致人因失误概率重复计算或高估。为了改进 SPAR-H 的 PSFs 体系, 通过统计 2007 年到 2017 年 219 份国内核电站运行事件报告, 筛选出与主控室操纵员运行有关的 89 份人因事件/事故报告进行 PSFs 相关性的研究, 运用数据挖掘技术 (关联规则分析、探索性因子分析、皮尔森相关性分析) 对统计结果进行分析。结果表明: ①复杂度、压力、职责适宜以及可用时间 4 个 PSFs 之间存在相关性。其中, 复杂度分别与压力和职责适宜相关, 职责适宜与压力、压力与可用时间相关; ②工作过程、规程、人因工程/人机界面和经验/培训之间存在关联。在涉及经验/培训、人因工程/人机界面和规程的事件中, 很大概率还涉及到工作过程。这些结论可以给改进 SPAR-H 的 PSFs 体系提供参考, 为定量研究 PSFs 间的因果关系建立基础。

关键词: 行为形成因子; 相关性; 标准化核电站风险分析-人因可靠性分析方法 (SPAR-H); 数据挖掘
中图分类号: TL364 **文献标志码:** A

Identification of Correlation among Performance Shaping Factors of SPAR-H Method

Liu Jianqiao¹, Zhang Li^{1,2*}, Zou Yanhua², Sun Qianlin¹, Liu Xueyang², Chen Shuai¹

1. School of Nuclear Science and Technology, University of South China, Hengyang, Hunan, 421001, China;
2. Institute of Human Factors & Safety Engineering, Hunan Institute of Technology, Hengyang, Hunan, 421002, China

Abstract: Standardized Plant Analysis of Risk-Human reliability analysis (SPAR-H) is an internationally known and accepted human reliability analysis (HRA) method in nuclear power plants (NPPs). However, the eight performance shaping factors (PSFs) overlap, resulting in the double count or over estimation of the human error probabilities (HEPs). To improve its PSFs system, 89 human error event reports related to the operation of operators in the main control room were collected from 219 operating event reports of Chinese NPPs from 2007 to 2017. The correlation among the PSFs was then studied. Therein, three kinds of data mining methods, i.e., association rule analysis, exploratory factor analysis and Pearson correlation analysis, were used. Results show that: a. there is a significant correlation among complexity, stress/stressor, fitness for duty and available time, in which the c the complexity correlates with stress/stressor and fitness for duty, the fitness for duty correlates with stress/stressor, and the stress/stressor correlates with available time; (2) there also exists correlation among work process, procedure, ergonomics/HMI

收稿日期: 2020-06-18; 修回日期: 2020-08-03

基金项目: 国家自然科学基金 (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 (湘发改高技 [2015]1084 号); 湖南省教育厅科研项目 (18A424); 湖南省自然科学基金 (2020JJ4016); 湖南省级应用特色学科安全与科学工程开放基金 (KFB20017); 湖南省研究生科研创新项目 (CX20200908)

作者简介: 刘建桥 (1992—), 男, 博士研究生, 现从事人因可靠性方面的研究工作, E-mail: 1076218029@qq.com

*通讯作者: 张 力, E-mail: 13807340602@139.com

and experience/training. In the event involving the procedure, ergonomics/HMI or experience/training, work process is involved with a high probability. These findings can be used as the reference in the improvement of the PSFs system of SPAR-H and as the basis in the quantitative study of the cause-and-effect dependences among the PSFs.

Key words: Performance shaping factors, Correlation, Standardized plant analysis of risk-human reliability analysis, Data mining

0 引言

标准化核电站风险分析-人因可靠性分析方法 (SPAR-H) 以其简单实用的特点成为目前国际上认可和接受的人因可靠性分析方法^[1-2], 且已广泛应用于我国核电工程中。其独特、简明的行为形成因子 (PSFs) 体系是该方法最重要的组成部分和特征之一。但研究人员和使用者已经发现该 PSFs 体系存在 2 方面缺陷: ①内容相关: 某些 PSFs 内容存在交叉^[3-6]; ②因果相关: 计算人因失误概率时没有考虑 PSFs 间的因果影响关系^[1, 7-8]。这些缺陷增加了人因可靠性分析的不确定性并且造成人因失误概率的重复计算^[4-7]。为了使人因可靠性分析的结果更为可靠, 需要对 SPAR-H 的 PSFs 体系进行完善, 即解决上述 2 方面的缺陷。基于此, 本研究分以下 3 个步骤对 SPAR-H 的 PSFs 体系进行改进: ①研究内容存在交叉的 PSFs, 识别“问题”PSFs; ②对“问题”PSFs 进行改进并验证; ③建立 PSFs 间因果关系的定量模型。鉴于 SPAR-H 方法针对的是核电站内部事件^[7], 本研究在讨论其 PSFs 体系的缺陷以及进行后续的研究时, 均是针对核电站内部事件分析而言。SPAR-H 方法对核电站外部事件 (如洪水、地震以及海啸等) 的适用性研究是核电站人因可靠性领域的另一研究热点^[2], 不在本文的考虑范围之内。由于篇幅有限, 本文主要针对步骤①进行阐述, 步骤②和步骤③将在后续论文中呈现。

在 SPAR-H 方法中, 每个 PSF 包含许多子因子^[7]。这些子因子用于判断人因事件中涉及的 PSFs 及其相应的水平。内容交叉的 PSFs 主要指不同 PSFs 的子因子存在交叉, 导致专家在选择某一事件的 PSFs 时可能产生差异。例如: 对于 SPAR-H 方法分析蒸汽发生器传热管破裂和丧失蒸汽发生器给水事故, 美国核管会 (NRC) 将“误导指示器”归于复杂度, 而爱达荷国家实验

室则将其归于人因工程/人机界面^[4, 6]。随着人因事件的增多, 这种相关的 PSFs 会通过专家分析的结果表现出一定的规律。通过研究人因事件/事故分析报告, 可以探究这些规律, 进而发现内容存在相关的 PSFs。因此, 本文收集核电站中与人因有关的事件/事故报告, 统计这些报告中涉及的 PSFs; 再运用数据挖掘技术 (关联规则分析方法、探索性因子分析方法以及皮尔森相关分析方法) 对这些 PSFs 出现的规律进行研究, 以识别内容相关的 PSFs。

1 研究方法

本文的研究过程如图 1 所示。SPAR-H 的 8 个 PSFs 分别为复杂度、规程、人因工程/人机界面、经验/培训、可用时间、压力、工作过程、职责适宜^[9]。

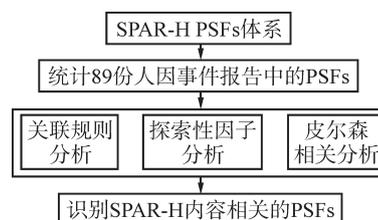


图 1 研究过程

Fig. 1 General Process of Research Approach

2 PSFs 的统计

核电站运行事件报告详细介绍了事件/事故的名称、发生的起止可用时间、发生前机组的状态、事件过程和后果以及原因调查、分析和结论等。在原因分析部分分析了失效来源, 即人因失效、设备失效和管理失效, 并总结了事件的直接原因和根本原因。本研究收集了国家核安全局经验反馈平台所公布的国内 2007 年到 2017 年共 219 份核电站运行事件报告。这些报告涉及的反应堆堆型包括 CNP300、CNP600、CANDU、M310、

CPR1000、WWER 等。从这 219 份报告中筛选出满功率和低功率/停堆工况下与主控室操纵员有关的人因事件/事故报告，共计 89 份。再从 89 份报告中统计 PSFs 出现的百分比（图 2）。

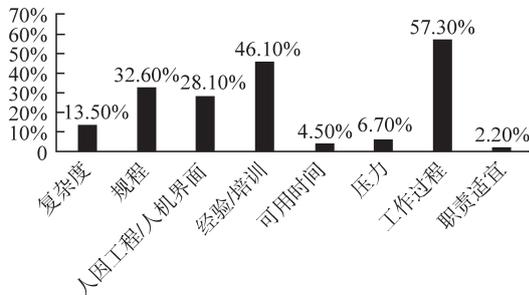


图 2 SPAR-H 方法中 PSFs 出现在报告中的百分比
Fig. 2 Percentage of Contributions to Events by PSFs of SPAR-H

从图 2 可以看出，工作过程、经验/培训和规程 3 个 PSFs 占比较高，分别为 57.3%、46.1% 和 32.6%；其次是人因工程/人机界面和复杂度的占比分别为 28.1% 和 13.5%；压力、可用时间和职责适宜 3 个 PSFs 的占比较低，分别为 6.7%、4.5% 和 2.2%。该结果与 Park^[1] 统计的韩国核电站人因事件报告中 PSFs 的占比结果类似。在 Park 的研究^[1] 中，规程、经验/培训和工作过程 3 者占比较高；压力、可用时间和职责适宜 3 者较低。张力^[10] 分析了 1999 年~2008 年来自世界范围内的 432 份核电站人因事件报告，对事件的根原因和原因因子进行了统计。其研究结论也是工作过程、规程和经验/培训 3 个 PSFs 出现得最多。这表明无论是国外还是国内，核电站人因事件/事故中出现的操纵员 PSFs 的特征基本一致。

3 PSFs 间相关特征的分析

3.1 关联规则分析及结果

关联规则分析是指如果 2 个或多个事物之间存在一定的关联，那么其中一个事物就能通过其他事物进行预测^[11]。其目的是为了挖掘隐藏在数据间的相互关系，属于灰色理论中的一种分析方法。在关联分析算法中，支持度用来衡量某一规则是否具有意义；置信度是通过规则进行推理，用来表明该推理的可靠度；提升度用来衡量关联规则的强弱，当提升度大于 1 时，表明规则的关联性强^[11-12]。运用数据挖掘建模软件 SPSS Modeler

对第 2 节的统计结果进行分析，结果如图 3 所示，节点间线段颜色的深浅代表节点关联性的强弱。可以直观的看到，存在较强关联的是工作过程、经验/培训、规程和人因工程/人机界面。在此基础上进行关联规则建模分析。建模前，需选定前项和后项。前项和后项表示需要进行关联规则挖掘的数据项集^[11]，一般将频率高的项目或项集选为后项^[11, 13]。在本研究中工作过程出现的频率最高，将其作为后项，其余 7 个 PSFs 作为前项。选用 Apriori 算法，该算法是一种最有影响的挖掘布尔关联规则的算法^[11]；将最小规则置信度设为 70%，最低条件支持度设为 5%^[13]。关联规则建模结果如表 1 所示。

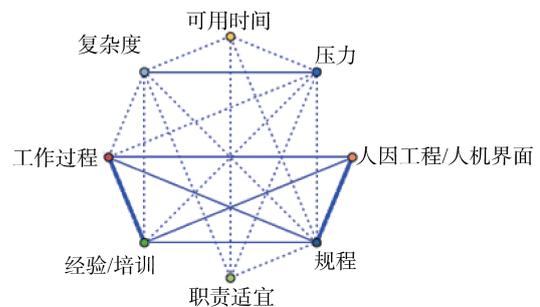


图 3 8 个 PSFs 的关联图
Fig. 3 Association Diagram of Eight PSFs

表 1 关联规则建模结果

Tab. 1 Results of Association Rule Modeler

后项	前项	规则标识	支持度/%	置信度/%	提升度
工作过程	经验/培训	1	46.067	80.488	1.405
	人因工程/人机界面、经验/培训	2	8.989	87.5	1.527
	规程、经验/培训	3	11.236	70.0	1.222

关联性分析是关联规则建模的基础。图 3 直观地显示了两两 PSFs 间关联性的强弱（使用 SPSS Modeler 软件执行分析时选择仅显示真值的结果）。这些结果与后续的皮尔森相关分析的结果基本一致，且皮尔森相关分析的相关系数更能具体反映两两相关 PSFs 间的相关程度，故这里不对这些关联分析结果进行描述。

两个事物存在关联并不保证存在规则，即其中一个事物能预测另一个事物。规则的成立需满足一定的支持度和置信度，通过关联规则建模可

以发现规则。从表 1 可以看出：①规则 1：在此次分析的事件中，同时涉及经验/培训和工作过程的事件占 46.1%。在涉及经验/培训的事件中，涉及工作过程的事件占 80.5%。提升度为 1.405，表明此规则有意义且关联性强；②规则 2：在此次分析的事件中，同时涉及人因工程/人机界面、经验/培训和工作过程的事件约占 9.0%。在同时涉及人因工程/人机界面和经验/培训的事件中，涉及工作过程的事件占 87.5%。提升度为 1.527，表明此规则有意义且关联性强；③规则 3：在此次分析的事件中，同时涉及规程、经验/培训和工作过程的事件约占 11.2%。在同时涉及规程和经验/培训的事件中，涉及工作过程的事件占 70.0%。提升度为 1.222，表明此规则有意义且关联性强。上述 3 个规则可以表明专家在选择经验/培训、人因工程/人机界面和规程时，很大概率还会选择工作过程。

3.2 探索性因子分析及结果

探索性因子分析法是通过研究众多变量之间的内部依赖关系，探求观测数据中的基本结构，并用少数几个假想变量来表示基本数据结构的方法^[14-15]。进行探索性因子分析的前提是原有变量间存在信息重叠，即如果可以进行探索性因子分析，则说明变量间的内容存在重叠。该方法主要分为 2 个阶段：①变量是否适合探索性因子分析：当抽样适合性检验系数 KMO 大于 0.6^[16]，且巴特莱特球体检验具有显著性 ($p < 0.05$) 时，可进行探索性因子分析；②因子提取：一般选取特征值大于 1 的因子作为新的变量^[14]。其中，因子载荷用来表示原有变量与新变量间的相关程度，一般选取因子载荷绝对值大于 0.5 的项^[14]。

采用该方法对第 2 节的统计结果进行分析。分析使用数据统计分析软件 SPSS23，分析结果显示 KMO 系数为 0.656，巴特莱特球体检验显著性值为 0.000，表明可以进行探索性因子分析。探索性因子分析结果见表 2。表 2 中因子 1 和因子 2 为综合后的新变量，其特征值均大于 1；“—”表示无内容。表格中的数据项为因子载荷（仅选取因子载荷绝对值大于 0.5 的 PSFs）。

上述分析表明，SPAR-H 中的 8 个因子存在交叉或重叠，可以归纳为 2 大类：①复杂度、可用时间、压力和职责适宜之间存在交叉或重叠，

表 2 8 个 PSFs 探索性因子分析的结果

Tab. 2 Results of Exploratory Factor Analysis of Eight PSFs

PSFs	因子1	因子2
复杂度	0.762	—
规程	—	-0.693
人因工程/人机界面	—	-0.714
经验/培训	—	0.526
可用时间	0.608	—
压力	0.839	—
工作过程	—	0.690
职责适宜	0.720	—
特征值	2.551	1.882

可归纳为 1 个大类因子；②规程、人因工程/人机界面、经验/培训和工作过程之间存在交叉或重叠，可归纳为另 1 大类因子，这一结果与关联规则分析的结果一致。

3.3 皮尔森相关分析及结果

本研究数据属于布尔类型，故可用皮尔森相关分析来探究 PSFs 之间的相关性^[17-18]。运用 SPSS23 软件进行分析，结果如表 3 所示。

从表 3 可以看到，复杂度分别与压力 ($|R|=0.681$, $p=0.000$, R 表示相关系数; p 表示显著性水平) 和职责适宜 ($|R|=0.384$, $p=0$) 存在相关性，同时职责适宜与压力 ($|R|=0.564$, $p=0.000$)，压力与可用时间 ($|R|=0.374$, $p=0.000$) 相关；工作过程分别与经验/培训 ($|R|=0.433$, $p=0$)、规程 ($|R|=0.321$, $p=0.001$) 和人因工程/人机界面 ($|R|=0.320$, $p=0.001$) 相关；人因工程/人机界面与规程 ($|R|=0.312$, $p=0.001$) 相关。

4 结论与讨论

本研究通过对 89 份人因事件报告进行数据挖掘，运用关联规则分析、探索性因子分析和皮尔森相关分析对 SPAR-H 的 8 个 PSFs 的内容交叉现象进行了探究，得到以下主要结论：

(1) 复杂度、压力、职责适宜以及可用时间之间存在相关关系。其中，复杂度分别与压力和职责适宜相关，职责适宜与压力相关，压力与可用时间相关。

(2) 工作过程、规程、人因工程/人机界面和经验/培训之间存在关联。专家在选择经验/培

表3 8个PSFs的皮尔森相关分析结果

Tab. 3 Results of Pearson Correlation Analysis of Eight PSFs

PSFs	复杂度	规程	人因工程/人机界面	经验/培训	可用时间	压力	工作过程	职责适宜
复杂度	1	—	—	—	—	—	—	—
规程	-0.204 ^①	1	—	—	—	—	—	—
人因工程/人机界面	-0.247 ^①	0.312 ^②	1	—	—	—	—	—
经验/培训	-0.167	-0.162	-0.176 ^①	1	—	—	—	—
可用时间	0.232 ^①	0.081	-0.136	-0.200 ^①	1	—	—	—
压力	0.681 ^②	-0.091	-0.168	-0.159	0.374 ^②	1	—	—
工作过程	-0.191 ^①	-0.321 ^②	-0.320 ^②	0.433 ^②	-0.251 ^②	-0.130	1	—
职责适宜	0.384 ^②	0.056	-0.095	-0.140	0.333 ^②	0.564 ^②	-0.176	1

注：①—在0.05级别（双尾），相关性显著；②—在0.01级别（双尾），相关性显著；“—”—无内容

训、人因工程/人机界面和规程时，很大概率还会选择工作过程。

SPAR-H 虽然对 8 个 PSFs 进行了详细描述，但子因子间依然边界模糊、概念不清晰，这些现象造成了在同一事件中同一子因子可以用多个 PSFs 来表征。同时，各因子间本身存在着复杂的因果关系也会导致 PSFs 的内容交叉重叠。这种关系在定量分析时需要考虑；在定性描述时，也需要对各因子的内容范围进行清晰界定。层次清晰的 PSFs 分类结构可以减少专家判断的不确定性，同时也是分析 PSFs 因果关系的基础^[19]。

在 SPAR-H^[7] 中，复杂度包含“心智计算需求”和“高度记忆需求”，而压力包含有“精神压力”。同时，复杂度中包含了“一个故障遮蔽了其他故障的现象”和“多个任务同时执行”，而在压力中包含了“多个设备和警报同时出现”。此外，在复杂度中，“大量行为需求”和“大量交流需求”的情况也与压力中的“大量的工作负荷”交叉。另外，在压力中有“噪声影响操纵员集中注意力”，与职责适宜中的“分心”重叠。在具体的实践过程中，这些边界模糊、概念不清晰的子因子，即内容存在交叉或重叠的 PSFs，可能就会引起不同专家在同一问题上产生不同的分析结果，正如引言中例子所述。本研究正是通过分析具体的事件报告，识别出了这些“问题”PSFs。“问题”PSFs 会导致 HRA 分析定性结果的不一致，进而影响定量结果的可靠性。同时，定性分析结果的差异也会影响核电厂制定相应的措施和政策。

SPAR-H 中的工作过程也包含了许多因子，主要集中在与组织绩效有关的因子上，如“管理

政策”、“组织”、“监督”和“安全文化”等。工作过程还包含了其他许多潜在影响绩效的因素^[7]。Chang 和 Mosleh^[19] 在描述信息决策执行和班组（IDAC）模型的 PSFs 体系时，将人机界面因素归类于组织因子中。Groth^[20] 和 Hollnagel^[21] 也都将规程因素归类到与组织相关的因子中。此外，操纵员接受培训的周期和频率在很大程度上也取决于组织的管理和政策^[22-23]。因此，人因工程/人机界面、规程和经验/培训与工作过程有很大的关系。在实践中，专家很难根据一些具体因素来评估工作过程^[24]，他们可能会根据与工作过程内容有关的 PSFs 来做判断。正如关联规则分析的结果显示的那样，在涉及规程、人因工程/人机界面和经验/培训的事件中，工作过程也同时被选择。

本研究的结论有助于针对性地对这些内容交叉的 PSFs 进行重新分配和界定。同时，探索性因子分析的结果显示，SPAR-H 的 8 个 PSFs 可以综合为 2 大类，这有助于为 SPAR-H 建立一个层次化的 PSFs 分类框架。复杂度、可用时间、压力和职责适宜这一大类更多地体现着操纵员精神层面^[25] 的因素；规程、人因工程/人机界面、经验/培训和工作过程这一大类则更多地体现着系统情境层面^[25] 的因素。因此，可以将分类框架的顶层分为“精神层面”和“系统情境层面”2 类。当然，这种分类可能不是最佳分类方案，但可以作为参考依据。另外，在统计 PSFs 过程中还发现职责适宜占比最小（图 2），可能是分析的事件数较少，还可能是职责适宜内容本身的原因。NRC 发布的 NUREG-1842 指出，职责适宜似乎

不是特别有用^[26]。Groth 和 Whaley 等人也发现职责适宜中涉及的子因子很少发生,也很少被记录在事件分析报告当中^[19,27]。这些发现带来的思考是:在改进 SPAR-H 的 PSFs 体系时,是否需要选择更合适或更具体的 PSFs 来替换职责适宜。此外,由于 SPAR-H 方法基于传统核电厂建立,而目前数字化技术已普遍用于国内外核电厂^[28],因此也需要针对数字化环境对 SPAR-H 的 PSFs 做相应的改进。

本研究的结论是基于分析 219 份运行事件报告中的 89 份涉及人因失误的事件/事故报告得出的。虽然对因子的统计结果与 Park^[1] 和张力^[10] 的研究大体一致,但可能还需分析更多的事件,并结合操纵员真实的经验反馈,使结论更具一般性。

参考文献:

- [1] PARK J, JUNG W, KIM J. Inter-relationships between performance shaping factors for human reliability analysis of nuclear power plants[J]. *Nuclear Engineering and Technology*, 2020, 52(1): 87-100.
- [2] KANG S, SEONG P H. Performance shaping factor taxonomy for human reliability analysis on mitigating nuclear power plant accidents caused by extreme external hazards[J]. *Annals of Nuclear Energy*, 2020(145): 107533.
- [3] GROTH K M, MOSLEH A. A data-informed PIF hierarchy for model-based human reliability analysis[J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2012(108): 154-174.
- [4] FORESTER J, DANG V N, BYE A, et al. The international HRA empirical study: lessons learned from comparing HRA methods predictions to HAMMLAB simulator data: NUREG-2127[R]. Washington, DC: U.S. Nuclear Regulatory Commission, 2014.
- [5] LIU P, LYU X, QIU Y P, 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.
- [6] FORESTER J, LIAO H F, DANG V N, et al. The U.S. HRA empirical study-assessment of HRA method predictions against operating crew performance on a U.S. nuclear power plant simulator: NUREG-2156[R]. Washington, DC: U.S. Nuclear Regulatory Commission, 2016.
- [7] GERTMAN D I, BLACKMAN H S, MARBLE J L, et al. The SPAR-H human reliability analysis method: NUREG/CR-6883[R]. Washington, DC: U.S. Nuclear Regulatory Commission, 2005.
- [8] GROTH K M, SWILER L P. Bridging the gap between HRA research and HRA practice: a Bayesian network version of SPAR-H[J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2013(115): 33-42.
- [9] 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: 159-164.
- [10] 张力, 邹衍华, 黄卫刚. 核电站运行事件人误因素交互作用分析[J]. *核动力工程*, 2010, 31(6): 41-46.
- [11] 王国平, 郭伟宸, 汪若君. IBM SPSS Modeler 数据与文本挖掘实战[M]. 北京: 清华大学出版社, 2014: 182-193.
- [12] DOELL C, HELD P, MOURA R, et al. Analysis of a major-accident dataset by Association Rule Mining to minimise unsafe interfaces[C]//Proceedings of the 13th International Probabilistic Workshop. Liverpool, UK: Research Publishing, 2015.
- [13] ZOU Y H, XIAO Z, ZHANG L, et al. A data mining framework within the Chinese NPPs operating experience feedback system for identifying intrinsic correlations among human factors[J]. *Annals of Nuclear Energy*, 2018(116): 163-170.
- [14] 薛薇. SPSS 统计分析方法及应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2004: 327-338.
- [15] 郭志刚. 社会统计分析方法: SPSS 软件应用[M]. 北京: 中国人民大学出版社, 1999: 87-114.
- [16] 吴明隆. 问卷统计分析实务[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 2010: 476-477.
- [17] CRAMÉR H. Mathematical methods of statistics (PMS-9)[M]. Princeton: Princeton University Press, 1946: 500.
- [18] GUILFORD J P. Psychometric methods[J]. *Journal of the American Statistical Association*, 1956(51): 413-414.
- [19] 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.
- [20] GROTH K M. A data-informed model of performance shaping factors for use in human reliability analysis[D]. Washington Metropolitan: University of Maryland, College Park, 2009.
- [21] HOLLNAGEL E. Cognitive reliability and error analysis method (CREAM)[M]. Amsterdam: Elsevier, 1998: 107-117.
- [22] MOHAGHEGH-AHMADABADI Z. On the theoretical foundations and principles of organizational safety risk analysis[D]. Washington Metropolitan: University of

- Maryland, College Park, 2007.
- [23] ANGELOPOULOU A, MYKONIATIS K, BOYAPATI N R. Industry 4.0: the use of simulation for human reliability assessment[J]. *Procedia Manufacturing*, 2020(42): 296-301.
- [24] LAUMANN K, RASMUSSEN M. Suggested improvements to the definitions of Standardized Plant Analysis of Risk-Human Reliability Analysis (SPAR-H) performance shaping factors, their levels and multipliers and the nominal tasks[J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2016(145): 287-300.
- [25] WANG W, DI MAIO F, ZIO E. Considering the human operator cognitive process for the interpretation of diagnostic outcomes related to component failures and cyber security attacks[J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2020(202): 107007.
- [26] FORESTER J, KOLACZKOWSKI A, LOIS E, et al. Evaluation of human reliability analysis methods against good practices: NUREG-1842[R]. Washington, DC: U.S. Nuclear Regulatory Commission, 2006.
- [27] WHALEY A M, KELLY D L, BORING R L, et al. SPAR-H step-by-step guidance: INL/CON-12-24693[R]. Washington, DC: Idaho National Laboratory, 2012.
- [28] 张力, 刘建桥, 邹衍华, 等. 核电厂数字化主控室操纵员界面管理任务特征的研究[J]. *核动力工程*, 2019, 40(4): 91-95.

(责任编辑: 孙 凯)