

IDHEAS 方法应用研究

卓钰铨, 仇永萍, 胡军涛, 雷文静

(上海核工程研究设计院有限公司, 上海 200233)

摘要: 人员可靠性分析(HRA)作为核电厂概率安全评价(PSA)中的重要组成要素,一直是影响 PSA 分析质量和风险见解的关键内容。目前业界中已有的 HRA 方法众多,不同的 HRA 方法各有优缺点且存在基础数据过老的问题,为此,美国核管理委员会联合 HRA 领域权威专家开发了一种综合性的 HRA 方法——人员失误事件综合分析系统,简称 IDHEAS 方法。本文对 IDHEAS 方法进行了系统性的研究,对相关实施流程和要点进行归纳,并运用 IDHEAS 方法进行了实例分析。理论研究和实例分析表明,IDHEAS 方法在工程应用上具备可操作性,能较好弥补其他 HRA 方法的局限性。同时,IDHEAS 方法亦存在对时间参数不敏感、部分分析内容依赖于分析人员经验等特点。

关键词: 人员失误事件综合分析系统;人员可靠性分析;核电厂概率安全评价

中图分类号: TL364.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-6931(2021)04-0678-07

doi: 10.7538/yzk.2020.youxian.0455

Study on Application of IDHEAS Method

ZHUO Yucheng, QIU Yongping, HU Juntao, LEI Wenjing
(Shanghai Nuclear Engineering Research and Design Institute Co., Ltd., Shanghai 200233, China)

Abstract: Human reliability analysis (HRA), as an important element of probability safety assessment (PSA) of nuclear power plant, has always been the key content that affects the quality and risk insight of PSA. Up to now, there are many HRA methods and each method has its disadvantages, and the HRA database is always too old. So a new HRA method which called IDHEAS (integrated human event analysis system) method was developed by the U. S. NRC. The IDHEAS method was studied systematically and the case analysis was carried out in the paper. Theoretical research and case analysis results indicate that IDHEAS method is feasible for engineering project and it can solve the limits of other HRA methods. At the same time, IDHEAS method is insensitive to time parameters and some contents of this method depend on the experience of the analyst.

Key words: IDHEAS; human reliability analysis; probability safety assessment of nuclear power plant

人员可靠性分析(HRA)作为核电厂概率安全评价(PSA)的1个重要组成要素^[1],其分析质量对整个PSA的分析结果和风险见解具有重大影响。同时,由于HRA结果具有较大的不确定性,因此HRA也一直是PSA中的1个难点。在导致HRA结果不确定性的众多来源中,其中1项主要的不确定性来源是HRA的量化方法本身,因此对HRA方法的研究和选择就显得尤为重要。

目前在国际范围内虽然HRA方法众多^[2],但均有着一些局限性,导致不同的HRA方法、不同的HRA人员对相同人员失误事件(HFE)的分析结果不一致。这些局限性包括:1)缺乏足够的理论基础,特别是在复杂情形下的认知活动方面;2)在评价绩效影响因子(PSF)对人员失误的贡献时,对于应包括哪些PSF和如何评价PSF存在较大的差异;3)人员失误的基础数据库不够完善,缺乏持续更新。

为解决已有HRA量化方法众多和其他的固有缺陷问题^[3],由美国核管理委员会(NRC)、美国电力研究院(EPRI)、桑地亚国家实验室(SNL)、爱达荷国家实验室(INL)、瑞士保罗谢尔研究所(PSI)等多个机构人员组成的团队,研发了1种新的HRA方法,致力于吸收现有HRA方法的优点,并在处理已有HRA方法的局限性上有所突破,并可借助SACADA数据库对相关的人员失误基础数据进行不断更新。该HRA方法为人员失误事件综合分析系统,简称IDHEAS方法。

整个IDHEAS研究项目包含三大部分。第1部分是人员失误分析的认知学基础,研究人员基于大量的文献调研,对人员可靠性的认知理论和基础进行研究和归纳,并对新的HRA方法的理论框架提供支持。第2部分是开发一通用性的HRA方法,该方法能适用于任意的HRA应用领域。第3部分是在开发更为简便的、适用于特定应用场景的HRA方法。目前该项目已完成众多研究内容,包括:建立人员可靠性分析的心理学基础,这部分研究成果体现在了NUREG-2114^[4]中;建立IDHEAS的一般性方法,这部分研究成果体现在了NUREG-2198中。针对功率运行内部事件人员可靠性分析的IDHEAS方法,这部分研究成

果体现在了NUREG-2199 Vol.1^[5]中,本文重点对NUREG-2199中的功率运行内部事件IDHEAS方法进行深入研究和实例分析,并与其他方法的分析结果进行比较,对IDHEAS方法的优缺点及工程适用性进行评价,旨为我国人员可靠性分析领域的后续发展方向和技术路线选取提供参考。

1 IDHEAS方法的实施步骤和分析流程

基于已有文献和最新研究成果^[4],IDHEAS方法体系认为人员失误是源于宏观认知功能的失效,同一宏观认知功能的失效存在多个可能的认知失效模式,各认知失效模式又可能源于多种潜在的失误机制,而不同的绩效影响因子可能激活这些机制。IDHEAS方法包含了5种宏观认知功能的总共15种班组失效模式和数十种失误机制。

IDHEAS方法分析示意图如图1所示。其中,CRD表示班组响应图,CFM表示班组失效模式,DT表示决策树,HEP表示人员失误概率。IDHEAS方法分析流程的主要步骤包括:1)人员失误事件的识别和定义;2)任务分析,建立班组响应图;3)应用量化数学模型进行定量计算;4)模型整合。

1.1 人员失误事件的识别和定义

1) 人员失误事件的识别

人员失误事件是PSA场景的一部分,指相关人员在特定电厂状态时未成功执行预期的操作。HRA团队应具有多学科背景,并和PSA团队一起对人员失误事件进行最初的选择。识别人员失误事件的信息来源包括:电厂相关的规程和导则(主要来源);实际经验和历史数据;对电厂操纵员和培训人员的访谈、模拟机演练的情况。

2) 人员失误事件的定义

人员失误事件一般在识别的同时进行定义,并且随着PSA的进行,定义会不断修订。1个人人员失误事件的定义至少应包括:PSA场景的描述、预期的人员动作描述、预期操作所涉及的对象及操作方式等。

3) 可行性分析

HRA中的可行性分析用于评估预期人员动作是否能完成。对于不可信的动作,直接将

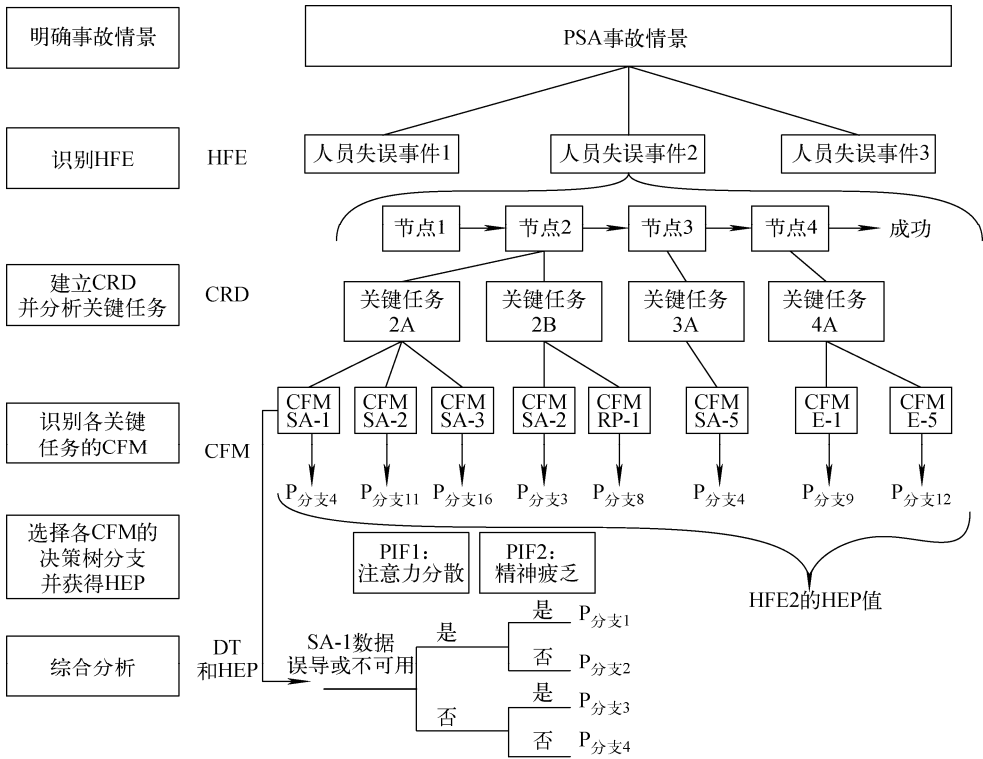


图 1 IDHEAS 方法分析示意图

Fig. 1 Analysis process of IDHEAS method

人员失误概率赋值 1.0 或不在 PSA 中包括该人员失误事件。对于可信的动作,再进行定量分析以确定人员失误概率。可行性评估的准则包括:(1) 足够的时间可用;(2) 足够的人手可用;(3) 足够的提示信号可用,可用的规程和相关培训;(4) 执行地点可达;(5) 动作执行所需的设备及可能的工具均可用。

1.2 任务分析和建立班组响应图

任务分析和班组响应图的建立是 IDHEAS 方法定性分析中的关键内容。任务分析包含如下 3 个主要步骤。

- 1) 描述期望的成功路径。通过确定该场景适用的规程、确定相关的信息和出现时间以及确认成功路径相关的班组受过训练的响应,建立对场景随时间的变化、规程中的决策点的正确路径以及规程间的转移的描述。
- 2) 识别和定义关键子任务。关键子任务指完成关键任务所必需的信息处理和执行活动,如果发生错误就会导致响应失败。建议将关键子任务定义为较高层级的任务,例如进入 1 个规程、转移到另 1 个规程、跳到规程中的另

- 1 步、开始某项响应或执行某项响应。
 - 3) 识别可能的恢复机会。恢复机会的来源可能有:进入其他的成功路径、额外的提示信号、新的报警或参数变化等。
- 通过任务分析,可逐步建立班组响应图(CRD),班组响应图中对于各关键子任务和可能的恢复操作能进行形象的展示,图 2 示出了 1 个完全丧失热阱后需要运行班组进行充水-排气操作的班组响应图示例。
- 1.3 HEP 定量计算

IDHEAS 通用方法中,量化模型与 CBDTM 方法^[6]的思路比较相似。根据梳理人员失误事件为什么可能发生来评估人员失误概率。将这些可能因素称作班组失效场景,其按照班组失效模式(CFM)归类。每个班组失效模式均对应 1 棵决策树,该决策树的各节点是可能影响该班组失效模式发生概率的绩效影响因子的情况,每条分支路径均被赋予 1 个人员失误概率。各班组失效模式列于表 1,各班组失效模式对应的决策树详见参考文献[5]。

应用量化模型的一般步骤为:1) 整理和

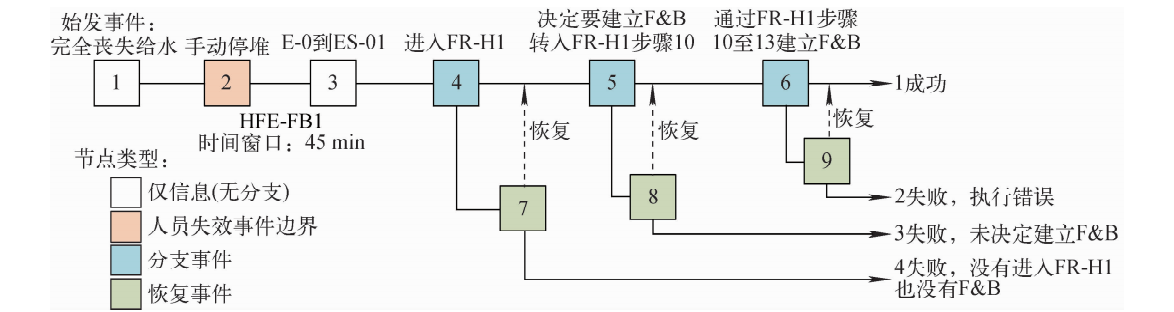


图 2 班组响应图示例

Fig. 2 Example of CRD

表 1 班组失效模式清单

Table 1 List of CFM

CFM 编码	CFM 描述	CFM 编码	CFM 描述
AR	未注意关键报警	E-1	执行延迟
SA-1	数据误导或不可用	E-2	关键数据未按合适的频率检查
SA-2	注意到错误的数据源	E-3	未开始响应
SA-3	关键数据被误解	E-4	未正确执行简单响应
SA-4	关键数据被忽略或轻视	E-5	未正确执行复杂响应
SA-5	关键数据的搜集过早结束	AP-1	误读或遗漏规程的关键步骤
RP-1	规程理解错误	C-1	交流错误
RP-2	选择不合适的策略		

组织定性分析的结果,包括人员失误事件的定义,对应的班组响应树的成功和失败路径以及各相应节点的定义,时间轴和可行性分析;

2) 根据班组响应树的各节点的定义,选择适用的班组失效模式;

3) 对于每个选中的班组失效模式,根据分支评估问题确定决策树的路径;

4) 计算人员失误事件的概率,公式如下:

HEP(HFE|S) =

$$\sum_{\text{CRTsequence}} \sum_{\text{CFM}} \text{Prob}(\text{CFM}|\text{CRTsequence}, \text{S}) \quad (1)$$

其中: $\sum_{\text{CRTsequence}}$ 为所有可能导致人员失误发生的班组响应树的失误概率之和; $\sum_{\text{CFM}}$ 为与 CRT 相关的各班组失效模式的失误概率之和。

1.4 模型整合

这一步骤是将单个的人员失误事件的 HRA 整合到 PSA 模型中。基本内容包括:1) 结果检查与合理性检验;2) 恢复动作分析,本文恢复动作指恢复功能、系统或部件的可用性的动作,而不是人员失误事件中纠正失误的动作。前者需作为 PSA 中新的基本事件对待,而后者

则包括在决策树的分支点中;

3) 相关性分析;

4) 不确定性分析。

2 IDHEAS 方法实例分析与结果比较

2.1 人员失误事件定义

分析基于某电厂的蒸汽发生器传热管破裂(SGTR)事故,涉及的人员失误事件定义列于表 2。

2.2 定性分析

建立的班组响应树如图 3 所示。其中,预期的成功路径为 1-2-3-4-5,节点 3、4、5 为关键步骤,而节点 6、7 分别是它们的恢复步骤。

本文人员失误事件有 60 min 的时间窗口,假设班组响应总时间为 15 min,则约有 45 min 可用于节点 3、4 的恢复操作和延迟。

2.3 定量分析

定性分析给出了班组响应树、关键任务的描述以及时间进程等结果。本节对示例的人员失误事件进行定量分析。按照定量分析流程,需给出该人员动作对应的关键子任务和对应的班组失效模式,分析结果列于表 3。

表 2 人员失误事件定义

Table 2 Definition of HFE

分项	人员失误事件内容
标识	Example-MAN01
简述	SGTR 事故场景中未能诊断出 SGTR 或隔离破损 SG
PSA 情景	SGTR 事故发生,稳压器低压力自动触发停堆或操纵员执行手动停堆,化学和容积控制系统(CVS)、启动给水系统(SFW)投入运行
必须完成响应的电厂状态/时间窗口	该场景中,班组成员必须在破损 SG 水位达到高-3 水位前隔离破损 SG,时间窗口假设为 60 min
成功响应所必须的操作	隔离破损 SG 的主蒸汽管道和流量、隔离给水
实现功能目标所用的设备	关闭主蒸汽隔离阀(MSIV)、SG 排污管隔离阀、给水隔离阀等

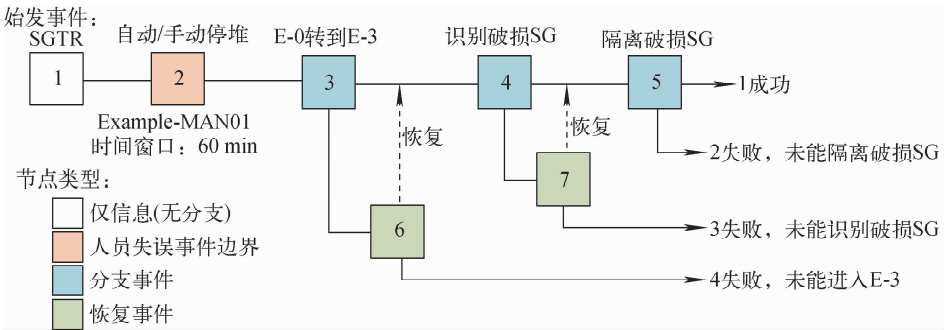


图 3 班组响应树

Fig. 3 Crew response diagram

表 3 适用的班组失效模式及恢复可能性

Table 3 Possible CFM and recovery potential

班组失效路径	关键子任务或活动	重要的班组失效模式适用性和理由	恢复可能性
节点 3“E-0 转到 E-3”失效 (关键任务)	检查二次侧放射性 正常与否	可能适用:AR“未注意到关键报警”。该任务的主要提示信号是放射性报警	节点 6: 如果班组未通过 E-0 步骤 11. a. RNO 转到 E-3, 则班组还可能通过 E-0 步骤 11. b. RNO 发现 1 台 SG 窄量程液位不可控地上升, 转到 E-3, 存在恢复的可能
节点 4“识别 破损 SG”失效 (关键任务)	破损 SG 窄量程液位 不可控地上升	可能适用:SA-2“注意到错误的数据源”, 可能注意了宽量程液位而不是窄量程液位, 前者会显示更大的百分数数值;SA-3“关键数据被误解”(对 SG 的窄量程液位), 用百分数表示的液位值可能被误解	节点 7: 如果班组成员在步骤 2 中未能通过 SG 窄量程液位识别破损 SG, 还可通过破损 SG 取样放射性异常或蒸汽管道放射性异常识别破破损 SG, 存在恢复可能
节点 5“隔离 破损 SG”失效 (关键任务)	执行 E-3 步骤 3、4、14, 即隔离破损 SG 的主蒸汽管道和流量、隔离给水	可能适用:E-5“未正确执行复杂响应”。认为这是一复杂响应, 因班组需确认和关闭较多的阀门, 即隔离破损 SG 的主蒸汽管道和流量、隔离给水	E-3 步骤 3、4、14 之后没有步骤再进行确认, 认为无恢复可能

对于每个可能的班组失效模式, 评估各自的决策树路径, 获得相应分支的人员失误概率, 最终获得该人员失误事件的总 HEP, 分析结果列于表 4。由表 4 可得该人员失误事件的总

HEP 为 4.83×10^{-3} 。

同时,本文采用 HCR/ORE+CBDTM+THERP 的组合型方法^[7](HCR/ORE+CBDTM 用于诊断失误概率的模化,THERP 方法用于

执行失误概率的模化)以及 SPAR-H 方法^[8]对该示例人员失误事件也进行了定量分析,各方法的分析结果对比列于表 5。

表 4 人员失误概率计算表
Table 4 Calculation table of HEP

班组失效路径	班组失效模式	失误修正	决策树分支	班组失效模式概率	班组失效路径概率
# 1 关键任务节点 3 失败	AR	节点 6	# 4	4.4×10^{-3}	4.4×10^{-3}
# 2 关键任务节点 4 失败	SA-2	节点 7	# 12	3.2×10^{-4}	3.54×10^{-4}
	SA-3		# 12	3.4×10^{-5}	
# 3 关键任务节点 5 失败	E-5	无	# 15	8.0×10^{-5}	8.0×10^{-5}
人员失误事件概率,点估计(总概率)					4.83×10^{-3}

表 5 不同 HRA 方法分析结果对比
Table 5 Comparison of different HRA method results

人员失误事件	HRA 方法	定量分析结果
Example-MAN01	IDHEAS	4.83×10^{-3}
Example-MAN01	HCR/ORE+CBDTM+THERP	3.73×10^{-3}
Example-MAN01	SPAR-H	2.05×10^{-3}

2.4 结果分析和 IDHEAS 方法评价

与国内其他常用 HRA 方法的定量分析结果的对比表明,IDHEAS 方法在整体分析结果上与当前已有的 HRA 方法具有可比性,由于数据以及分析框架的差异,定量化结果略有增大。同时,通过对 IDHEAS 方法的理论研究、实例分析过程研究及与其他方法的理论对比,本文得出了如下评价结论。

1) IDHEAS 方法相对于传统 HRA 方法(THERP、HCR/ORE、SPAR-H 等)有如下优点。(1) IDHEAS 方法具备更为全面和严谨的理论基础。IDHEAS 方法基于最新的心理学及行为学等理论基础,吸取了众多 HRA 方法的优点和数据,通过对 5 大宏观认知功能、15 种班组失效模式和众多失误机制的考虑和模化,采用决策树评估的方式,对人员动作进行定性分析和定量评价,考虑的绩效影响因子相对而言非常全面,并且具备工程可操作性。(2) IDHEAS 方法有更为完备的基础数据,能一定程度上解决其他 HRA 方法中数据

过老的问题。IDHEAS 的人误数据基于已有数据库和最新研究成果,更能代表最新的人员行为可靠性水平,同时该方法在研发时即计划能依托于 SACADA 数据库的数据而不断更新,能从方法层面较好地解决人员基础失误数据的质量问题。(3) IDHEAS 方法作为美国核管理委员会联合行业内专家推出的新 HRA 方法,后续将在此基础上进行持续性的优化和更新,其适用范围和使用领域将不断扩大和完善。

2) IDHEAS 方法虽有众多优点,但在初步应用尝试中也发现有如下问题需要注意:采用 IDHEAS 方法进行定量分析时,班组响应事件树的绘制较为复杂,对于单个人员失误事件下的关键子任务的选取以及 CFM 的选择需要一定的分析经验,不同分析人员有可能有不同的考虑。另外 IDHEAS 方法对于时间参数的具体数值缺乏敏感度,虽然方法论中给出了基于时间参数的计算考虑,但未给出可操作的计算方法。

3 结论

本文对 IDHEAS 方法进行了深入研究和实例分析,研究和分析结果表明,IDHEAS 方法具备较完善的理论框架和基础数据,具备工程应用的可操作性,该方法为 HRA 方法的基础数据问题提供了解决思路亦是一大亮点,同时,IDHEAS 方法已存在对时间参数不敏感、班组响应事件树绘制较为复杂以及需要分析人员具备较高分析经验等特点。总体而言,IDHEAS方法是 HRA 领域未来的发展方向,我国 HRA 行业相关人员应加大对该方法的研究和应用尝试。

参考文献:

[1] NB/T 20037.1 应用于核电厂的概率安全评价第 1 部分:功率运行内部事件一级 PSA[S]. 北京:国家核安全局,2011.

[2] 何旭红,黄瑞祥. 工业系统中的人的可靠性分析:原理、方法与应用[M]. 北京:清华大学出版社,2007.

[3] 张力,王以群. 人因分析:需要,问题和发展趋势

[J]. 系统工程理论与实践,2001(6):13-19.

ZHANG Li, WANG Yiqun. Human factors analysis: Need, problems and trends[J]. Systems Engineering Theory Practice, 2001(6): 13-19(in Chinese).

[4] APRIL M, WHALE Y, XING J, et al. Building a psychological foundation for humana reliability analysis, NUREG-2114[R]. US: NRC, 2016.

[5] JING X, PARRY G, PRESLEY M, et al. An integrated human event analysis system (IDHEAS) for nuclear power plant intenal event at power application, NUREG-2199[R]. US: NRC, 2017.

[6] PARRY G W. An approach to the analysis of operator actions in probabilistic risk assessment, EPRI 100259[R]. US: EPRI, 1992.

[7] COOPER S. EPRI/NRC-RES fire human reliability analysis guidelines, NUREG-1921[R]. US: NRC, 2012.

[8] ERTMAN D, BLACKMAN H, MARBLE J, et al. The SPAR-H human reliability analysis method, NUREG/CR-6883[R]. US: NRC, 2005.