



DOI:10.12404/j.issn.1671-1815.2401646

引用格式:王海勇,苏晓燕,钱虹,等.基于不确定信息融合的多机组核电厂人因事件相关性分析[J].科学技术与工程,2024,24(36):15465-15473.

Wang Haiyong, Su Xiaoyan, Qian Hong, et al. Dependence assessment of human failure events in multi-unit nuclear power plants based on uncertainty information fusion[J]. Science Technology and Engineering, 2024, 24(36): 15465-15473.

原子能技术

基于不确定信息融合的多机组核电厂 人因事件相关性分析

王海勇,苏晓燕*,钱虹,潘晓磊

(上海电力大学自动化工程学院,上海 200090)

摘要 决策树(decision trees, DTs)被广泛用于多机组(multi-unit, MU)核电厂(nuclear power plants, NPPs)的人因相关性分析。然而,DT上的各分支对应的影响因素的状态很少,且专家只能选定其中一种状态,这并不能准确地表达实际情况。为此,在DT的基础上结合D-S证据理论(Dempster-Shafer evidence theory, DSET),提出一种基于不确定信息融合的多机组核电厂人因事件相关性分析方法。首先,通过DSET表达专家意见中的不确定性信息并建立基本概率指派(basic probability assignment, BPA)函数;其次,融合多个BPA函数得到专家群决策结果;最后,根据融合结果及DT得到人因事件的相关性等级并计算联合人误概率。实例分析结果表明:所提方法能够灵活地表达和处理专家评估意见中存在的 uncertainty,得到更为合理的人因可靠性分析(human reliability analysis, HRA)结果。

关键词 多机组核电厂(MU-NPP);相关性分析;决策树(DTs);证据理论;人因可靠性分析(HRA)

中图分类号 TL364+.5; **文献标志码** A

Dependence Assessment of Human Failure Events in Multi-unit Nuclear Power Plants Based on Uncertainty Information Fusion

WANG Hai-yong, SU Xiao-yan*, QIAN Hong, PAN Xiao-lei

(School of Automation Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China)

[Abstract] Decision trees (DTs) are widely used for human dependence assessment in multi-unit (MU) nuclear power plants (NPPs). However, few states of the corresponding influencing factors are provided in DT, and only one state can be selected by experts, which is not confirmed to the actual situation. Thus, the Dempster-Shafer evidence theory (DSET) was used to combine with DT to propose a method for dependence assessment of human failure events (HFEs) in MU-NPP based on uncertainty information fusion. Firstly, the DSET was used to express the uncertain information in experts' judgement, and the basic probability assignment (BPA) was established. Secondly, the group decision result was obtained by fusing the judgment of multiple experts. Finally, the dependence level between HFEs was determined according to DT and fusion judgement, and the joint human error probability could be obtained. The results of case study show that the proposed method can flexibly express and handle uncertainties existing in experts' judgment. It is concluded that the method can achieve more reasonable human reliability analysis (HRA) result.

[Keywords] multi-unit nuclear power plant (MU-NPP); dependence analysis; decision tree (DTs); evidence theory; human reliability analysis (HRA)

核电安全是核电发展的重要前提和基础。随着新建核电厂(nuclear power plants, NPPs)系统的冗余性和设备的可靠性不断提高^[1-2],人因工程已成为核电系统工程的重要组成部分^[3]。数据表明,

在核电厂发生的各类安全事故中,由人因失误导致的安全事故比例高达90%^[4]。有效的人因可靠性分析方法(human reliability analysis, HRA)对于规避人因差错从而提高系统可靠性具有重要作用。

收稿日期:2024-03-09; 修订日期:2024-10-10

基金项目:上海市青年科技启明星计划(21QA1403400)

第一作者:王海勇(1994—),男,蒙古族,黑龙江黑河人,硕士研究生。研究方向:核电厂人因可靠性分析。E-mail:wanghy@mail.shiep.edu.cn。

*通信作者:苏晓燕(1986—),女,汉族,福建厦门人,博士,副教授。研究方向:人因可靠性分析。E-mail:suxiaoyan@shiep.edu.cn。

投稿网址:www.stae.com.cn

与此同时,当今核电厂广泛应用概率安全评估(probabilistic safety assessment, PSA)作为核电厂安全评价的工具。作为 PSA 的重要输入,HRA 分析水平是衡量 PSA 报告水平的关键指标之一^[5]。

人因失误事件(human failure events, HFEs)的相关性分析是 HRA 的重要组成部分,人因事件间的相关性分析主要研究序列过程中前序事件对后序事件的影响,其目的是得到后序事件的条件人误概(conditional human error probability, CHEP)及序列的联合失效概率(joint human error probability, JHEP)。

核电厂人因事件之间的相关性广泛存在于运行、维护等环节中。例如,蒸汽发生器传热管破裂(steam generator tube rupture, SGTR)事故的应急响应需要一、二回路操作员配合完成,前序操作员的失误将导致后序操作员失误概率增加。又如,余热排出系统破口事故的应急响应要求值长指挥并监督操作员启动低压安注并打开所有汽轮机旁路排大气系统(GCTa)阀门^[6],如果操作员发生失误(如未将全部 GCTa 阀门控制器开启至 100% 开度),在时间紧急的情况下,值长与操作员具有较高的相关性,值长将在较大程度上依赖于操作员的执行反馈结果,而未能及时纠正操作员的错误,导致联合失效概率增加。因此,如果不考虑序列任务中人因事件间的相关性,就会低估核电厂的风险水平。此外,通过分析相关性的影响因素,并针对影响因素提出相应的优化措施,能够降低人因事件间的相关性水平,提升人因可靠性,对核电厂人因事故的防控具有重要意义。

综上,人因事件相关性分析受到 HRA 领域专家学者的广泛关注,改进的方法及应用创新也不断涌现^[7-9]。美国机械工程师学会(American Society of Mechanical Engineers, ASME)的概率风险评估(probabilistic risk assessment PRA)标准要求识别同一事故序列或割集中的多个人为行为,评估相关程度,并计算联合失效概率(joint human error probability, JHEP)^[10]。

HRA 通常被用作核电厂单个机组 PSA 的输入。然而,现有的 HRA 相关性分析方法很少有考虑到多机组(multi-unit, MU)的情况。MU 核电厂,是指一个核电厂厂址上建有两个或两个以上反应堆且各反应堆之间的距离小于 5 km^[4]。MU 核电厂占运行中核电厂的比例高达 90.4%^[4]。因此,研究 MU 核电厂 HRA 及人因事件相关性分析将具有重要意义^[11-12]。

虽然以 MU 核电厂为研究背景的 HRA 已有一

些研究成果^[13-14],但针对 MU 核电厂的人因相关性分析研究较少。相比于单机组核电厂中班组人员仅限于主控室及现场操作人员,MU 核电厂可能包括其他机构或设施,如技术支持中心(technical support center, TSC)和应急运营设施(emergency operating facility, EOF),MU 操作人员可能前往不同机组执行任务。因此,应对 MU 情景重新分析班组人员间的相关性关系。文献[15]以韩国某 MU 核电厂为例,定义了影响 MU 核电厂人因相关性的影响因素及其可能的状态,并建立起相关性评估决策树(decision trees, DTs),提出了面向 MU 核电厂的人因相关性等级评估方法,该方法提炼了面向 MU 核电厂的人因相关性影响因素,所建立的决策树能够很好地连接经典的人为错误率预测技术(technique for human error rate prediction, THERP)的相关性处理方法,具有较好的可追溯可重复性。然而,基于的相关规则,决策树上的各个分支对应的影响因素的状态很少(一般仅为 2 个或 3 个),且专家只能选定其中一种状态,这并不能准确地表达实际应用情况和专家意见可能存在的非一致性和不确定性。

针对不确定信息的处理与融合问题,许多理论和方被提出^[16-18],如模糊数^[19]、D 数(Deng-number)^[20]、Z 数(Zadeh-number)^[21]等。但模糊数只能处理模糊不确定性信息,Z 数与 D 数在信息融合方面尚未有公认的方法流程,且处理过程较为繁琐。D-S 证据理论(Dempster-Shafer evidence theory, DSET)能够有效表达处理多种不确定信息并提供相应的融合规则,在信息融合领域有着广泛的应用。

基于此,将采用 DSET 表达及融合多位专家含有不确定性信息的评估意见,结合 MU-HFE 相关性评估决策树,提出一种新的针对 MU 核电厂人因事件相关性的分析方法,并以 MU 核电厂失去厂外电源(MU loss of offsite power, MULOOP)的事件为案例说明所提方法的实用性。

1 理论基础

1.1 THERP

THERP 是 HRA 中一种常用的分析方法 THERP 能为评估 HFE 之间的相关性提供指导,该方法对于 HRA 中相关性分析的主要贡献有^[22]:一是提出 5 个相关性等级,分别为零相关(zero dependence, ZD)、低相关(low dependence, LD)、中相关(moderate dependence, MD)、高相关(high dependence, HD)和完全相关(complete dependence, CD);二是为每个相关性水平提供修正公式[式(1)]

来计算条件人误概率(CHEP),CHEP表示一个任务失败对后续任务失败概率的影响。假设任务 T_B 为任务 T_A 的后续任务,下标 B 和 A 为相应的失效事件。如果 P_A 和 P_B 分别是任务 T_A 和任务 T_B 失败的基本人误概率(basic human error probability, BHEP),那么给定 A 条件下 B 的CHEP确定为

$$P_{XD}(B|A) = \frac{1 + KP_B}{1 + K} \quad (1)$$

式(1)中: XD 为 CD 、 HD 、 MD 、 LD 或 ZD ; K 为对应相关性等级 CD 、 HD 、 MD 、 LD 、 ZD 的系数,取值分别为 0 、 1 、 6 、 19 、 ∞ ; P_A 和 P_B 可通过查表得到。

1.2 Dempster-Shafer 证据理论

DEST是经典概率论的推广,将概率论中的识别框架推广到基本事件的幂集上。与传统概率论相比,它不仅能有效处理随机不确定性,还能表达不完整信息和不确定性信息。以下是DSET的一些基本定义^[23-24]。

定义1 辨识框架(frame of discernment, FOD)

设 $\Theta = \{\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_N\}$ 为有 N 个两两互斥元素组成的非空有限完备集,则称 Θ 为辨识框架,并且定义 $P(\Theta)$ 为 Θ 的幂集且元素个数为 2^N 。

定义2 基本概率指派(basic probability assignment, BPA)

若存在识别框架的幂集 $P(\Theta)$ 到单位区间的映射,即 $m: P(\Theta) \rightarrow [0, 1]$ 满足:

$$m(\emptyset) = 0, \sum_{A' \subseteq \Theta} m(A') = 1 \quad (2)$$

则定义mass函数 $m(A')$ 为命题 A' 基本概率指派,表示对命题 A' 的支持强度。若 $\forall A' \subseteq \Theta$,且满足 $m(A') > 0$,则称 A' 为 m 的焦元。mass函数 $m(\Theta)$ 可以表达证据的不确定性,若 $m(\Theta) = 1$,则表示该证据未提供任何有效的信息。

定义3 Dempster组合规则(Dempster's combination rule, DCR)

X 与 Y 为识别框架 Θ 上的两个独立的证据体, mass函数 m_i 与 m_r 可通过公式融合从而得到一个新的证据体 C ,则新的mass函数经融合后可表示为

$$m(C) = m_i(X) \oplus m_r(Y) = \begin{cases} 0, & X \cap Y = \emptyset \\ (1 - K')^{-1} \sum_{X \cap Y = C, \forall X, Y \subseteq \Theta} m_i(X) m_r(Y), & \\ & X \cap Y \neq \emptyset. \end{cases} \quad (3)$$

式(3)中: K' 为冲突常数,反映两个证据体的冲突程度,其定义为

$$K' = \sum_{X \cap Y = \emptyset, \forall X, Y \subseteq \Theta} m_i(X) m_r(Y) \quad (4)$$

定义4 赌博概率转换公式(pignistic probability transformation, PPT)^[25]。

令 $m(A_{set})$ 为识别框架 Θ 上的BPA,则 Θ 到单位区间的映射 $BetP_m: \Theta \rightarrow [0, 1]$,对应的赌博概率转换表达式为

$$BetP_m(\omega) = \sum_{\substack{A_{set} \subseteq \Theta, \omega \in A_{set} \\ m(\emptyset) \neq 1}} \frac{m(A_{set})}{|A_{set}| [1 - m(\emptyset)]}, \quad (5)$$

式(5)中: ω 为集合 A_{set} 中的元素; $|A_{set}|$ 为集合 A_{set} 的势,即集合中元素的个数。

2 提出方法

基于不确定信息融合的MU-NPP人因事件间相关性分析方法的流程图如图1所示,可以分为5个步骤,具体如下。

步骤1 确定决定HFE间相关性水平的影响因素。

HFE间的相关性评估主要研究一个或多个操纵员执行两个顺序任务之间的关联程度,其目的是获得后一项任务的CHEP结果。

HFE间的相关性大小会受到一些因素的影响,例如,当执行任务的操纵员压力较大时,更依赖其他操纵员的决策结果或值长的命令,因此相关程度更高。针对相关性影响因素已有公开文献报道,本文采用文献[15]的影响因素进行分析,包括“责任组织(responsible organization)”“决策依据(decision-making basis)”“班组成员(crew)”“线索需求时间(cue demand time)”“位置(location)”“动作间隔(interval between actions)”“压力级别(stress level)”7个因素。其中“线索需求时间”有同时(simultaneous)和顺序(sequential)两种状态,“动作间隔”有小于30 min(<30 min)、30~60 min(30~60 min)和大于60 min(>60 min)3个值,“压力水平”有高压(high stress)和低压(low stress)两个值,其他因素分为相同(same)和不同(different)两种状态。各影响因素状态与HFE间的相关性对应关系用DT表达(详见文献[15]),如当“责任组织”“决策依据”“班组成员”状态都为相同时,HFE间的相关性为CD。

步骤2 专家对影响因素状态给出评估意见并表达自信度。

在HRA中,DT所涉及的影响因素的状态很多时候由领域专家根据现场情况给定。在这一过程中,可能产生大量不确定信息。比如,专家无法给定某影响因素的唯一状态(无法明确区分处于哪个状态),或者由于经验不足等无法进行某影响因素

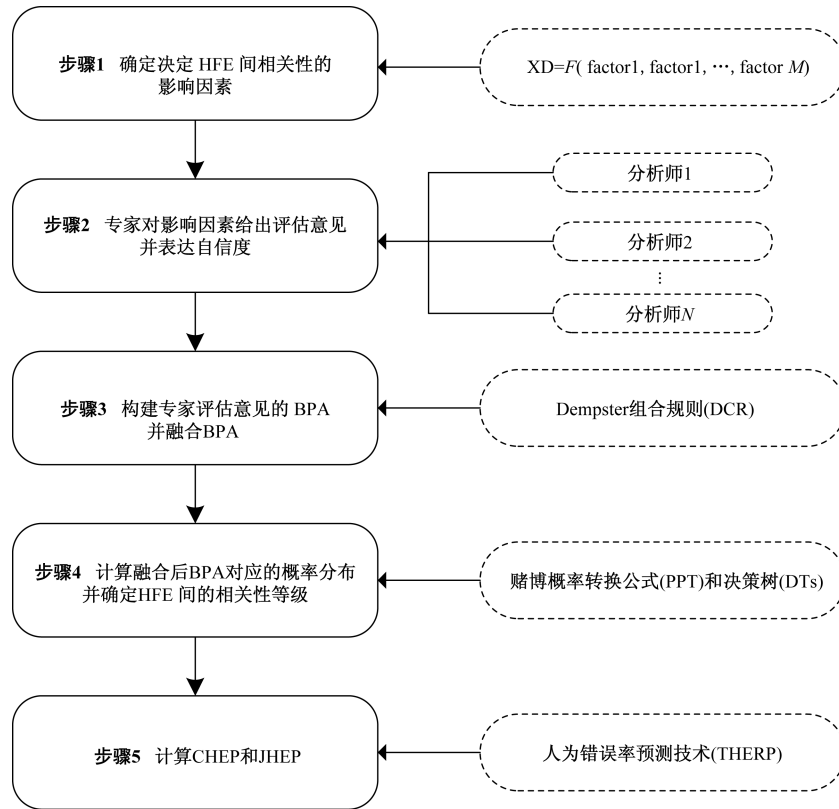


图1 MU-NPP 人因失效事件间相关性分析的流程图

Fig. 1 Flowchart of dependence assessment of HFEs in MU-NPP

状态的判定。专家对自身评价意见的把握程度也可能不同。所提方法可以灵活表达上述情况中的不确定信息。含有不确定性信息的评估意见可以用 D-S 证据理论中的焦元表示(表 1),专家对自己的意见有多大把握可以用自信度 α 表示($\alpha \in [0, 1]$): $\alpha = 0$ 表示专家对自己的意见毫无把握或者没有经验; $\alpha = 1$ 表示专家对自己的意见非常有把握。现举例专家对影响因素“决策依据”评估意见的不同情形如表 1 所示。

在情形 1 中,专家的评估意见为“决策依据”“相同”,且自信度为 0.9;在情形 2 中,专家认为“相同”与“不同”的可能性相同,且自信度为 0.9;在情形 3 中,专家认为“不同”的可能性是“相同”的 4 倍,自信度为 0.8;在情形 4 中,专家认为“决策依据”“相同”,自信度为 0;在情形 5 中,专家认为“决策依据”可能“相同”,也可能“不同”,自信度为 1;情形 4 与情形 5 都表示极端情况,说明专家对该影响因素无法做出判断。

步骤 3 根据专家的评估意见构建 BPA,并采用 DCR 进行融合,得到融合后的 BPA。

首先,根据专家的评估意见,采用式(6)构建 BPA。

$$m(S_i) = \alpha \frac{r_i}{\sum_{j=1}^3 r_j}, \quad m(\Theta) = 1 - \alpha \quad (6)$$

表 1 专家评估意见的不同情形

Table 1 Different cases of experts' judgment

情形	评估意见	自信度 α
情形 1	{相同}	0.9
情形 2	{相同}: {不同} = 1:1	0.9
情形 3	{相同}: {不同} = 1:4	0.8
情形 4	{相同}	0
情形 5	{相同, 不同}	1

式(6)中: S_i 为 Θ 的幂集非空元素,集合的概率比满足: $S_1: S_2: S_3 = r_1: r_2: r_3$; $m(\Theta)$ 为不确定性信息(见定义 2); $1 - \alpha$ 表示专家的不自信度,将 $1 - \alpha$ 赋值给焦元 Θ ,即 $m(\Theta)$ 表示专家评估意见的不确定信息。

在表 1 中情形 2 的计算公式为

$$\begin{cases} m(\{相同\}) = 0.45 \\ m(\{不同\}) = 0.45, \quad m(\Theta) = 0.1 \end{cases} \quad (7)$$

假设 5 位专家的评估意见如表 1 中的 5 种情形所示,则构建的 BPA 如表 2 所示。

使用 Dempster 组合规则[式(3)、式(4)],融合 5 位专家的 BPA。专家 4 和专家 5 提供的意见为无效信息,即 $m(\Theta) = 1$,因此结果等价于融合专家 1、2、3 的 BPA。融合结果如表 3 所示。

表2 根据专家评估意见构建的BPA

Table 2 BPA constructed based on experts' judgment

专家编号	构建的BPA
专家1	$m(\{\text{相同}\}) = 0.9, m(\Theta) = 0.1$
专家2	$m(\{\text{相同}\}) = 0.45, m(\{\text{不同}\}) = 0.45, m(\Theta) = 0.1$
专家3	$m(\{\text{相同}\}) = 0.16, m(\{\text{不同}\}) = 0.64, m(\Theta) = 0.2$
专家4	$m(\Theta) = 1$
专家5	$m(\Theta) = 1$

表3 BPA融合的结果

Table 3 Result of BPA fusion

影响因素	“决策依据”
融合结果	$m(\{\text{相同}\}) = 0.809,$ $m(\{\text{不同}\}) = 0.183, m(\Theta) = 0.008$

步骤4 计算融合后BPA对应的概率分布并结合DT确定HFE间的相关性等级。

使用式(5)中的赌博概率转换公式(PPT)获得融合后BPA对应的概率分布为

$$\text{Bet } P(\text{相同}) = 0.813, \text{Bet } P(\text{不同}) = 0.187.$$

得到BPA的分布后,还需进一步结合相应的DT确定最终的HFE间的相关性等级。

步骤5 计算条件人误概率CHEP和联合人误概率JHEP。

在THERP中的式(1)基础上,结合步骤4的结果,提出改进的条件人误概率CHEP $P(B|A)$ 的表达式为

$$P(B|A) = \sum_{XD} \text{Bet } P(XD) P_{XD}(B|A) \quad (8)$$

式(8)中: $P_{XD}(B|A)$ 为计算CHEP的相关性等级XD的修正公式[式(1)]; $\text{Bet } P(XD)$ 为融合后BPA对应的概率分布结果。

JHEP是将序列过程中人因事件的所有CHEP与其他独立HFE的人误概率(human error probability, HEP)相乘得出。

3 算例分析

3.1 算例背景

厂外电源为MU核电厂关键系统提供电力,当NPP失去厂外电源时,其内部电源系统例如应急柴油发电机(emergency diesel generator, EDG)启动,以确保核电厂(nuclear power plant, NPP)关键系统及设备得到供电。多机组核电厂失去厂外电源(MU-LOOP)可能会影响核反应堆的冷却系统。因此,确保备用电源可靠并能够及时恢复供电是至关重要,以避免核反应堆过热或其他安全问题。

采用韩国某核电厂MULOOP事件^[15]作为算例分析说明本方法的应用流程。在该案例中,两台机

组(4号和5号机组)中的EDG均无法运行,反应堆冷却剂泵(reactor coolant pump, RCP)密封性确认完好。后续对两台机组的手动安全泄压(safety depressurization, SD)操作均失败。这种情况下MU-PSA的序列过程如表4所示。

HFE为基本事件#4与基本事件#6: U4-SDO-PHLATE表示操纵员未能在4号机组执行后期SD和注水与排水(feed and bleed, F&B); U5-SDO-PHLATE表示操纵员未能在5号机组执行后期SD和F&B。

表4 MULOOP事件的序列过程

Table 4 Sequential process of MULOOP accident

事件编号	事件代码
#1	ALL-LOOP
#2	ALL-EGDGK-U45Y
#3	U4-RSF-AFSUC-SB
#4	U4-SDOPHLATE
#5	U5-RSF-AFSUC-SB
#6	U5-SDOPHLATE

注: ALL-LOOP表示所有单元中发生的LOOP启动事件; ALL-EGDGK-U45Y表示所有EDG运行失败; U4-RSF-AFSUC-SB表示4号机组RCP密封性确认完好; U5-RSF-AFSUC-SB表示5号机组RCP密封性确认完好。

3.2 方法应用

将基本事件#4与基本事件#6视为HFE #1与HFE #2,两次HFE都很相似,事件的时间线也接近。因此,任意一个HFE都可以被视为独立的HFE。在这种情况下,序列过程中的第一个HFE被视为独立的HFE(HFE #1),分析HFE #2与HFE #1的相关性步骤如下。

步骤1 确定决定HFE间相关性水平的影响因素。

根据文献[15], HFE间相关性水平的影响因素包括责任组织、决策依据、班组成员、线索需求时间、位置、动作间隔、压力级别7个因素。

步骤2 专家对影响因素给出评估意见并表达自信度。

假设有3位专家对“决策依据”因素的意见如表5所示。

3位专家对其他影响因素的评估意见一致,且自信度均为1,如表6所示。

表5 专家对“决策依据”的评估意见

Table 5 Judgment of experts for “decision-making basis”

专家编号	评估意见	自信度 α
专家1	{相同}	0.9
专家2	{相同}: {不同} = 1:1	0.9
专家3	{相同}: {不同} = 1:4	0.8

步骤3 根据专家评估意见构建 BPA, 并采用 DCR 进行融合, 得到融合后的 BPA。

对于“决策依据”的 BPA 融合结果与方法分析中的情形相同(表 3), 专家对于其他影响因素评估意见的 BPA 融合结果如表 7 所示。

步骤4 计算融合后 BPA 对应的概率分布并结合 DT 获得 HFE 间的相关性等级。

表 6 专家对其他影响因素的评估意见
Table 6 Judgment of experts for other influencing factors

影响因素	评估意见	自信度 α
责任组织	{相同}	1
班组成员	{不同}	1
线索需求时间	{同时}	1
位置	{不同}	1
动作间隙	{小于 30 min}	1
压力水平	{高压}	1

使用 PPT 获得关于“决策依据”融合后 BPA 对应的概率分布为: $Bet P(\text{相同}) = 0.813$, $Bet P(\text{不同}) = 0.187$ 。

根据文献[15]的 DT 得到 HFE #2 与 HFE #1 的相关性等级的过程如图 2 所示。

路径在影响因素“决策依据”处分叉, 其中路线①表示专家组评估“决策依据”相同(same)的概率

表 7 其他影响因素融合后的 BPA
Table 7 Fused BPA for other influencing factors

影响因素	融合结果
责任组织	$m(\{\text{相同}\}) = 1$
班组成员	$m(\{\text{不同}\}) = 1$
线索需求时间	$m(\{\text{同时}\}) = 1$
位置	$m(\{\text{不同}\}) = 1$
动作间隙	$m(\{\text{小于 30 min}\}) = 1$
压力水平	$m(\{\text{高压}\}) = 1$

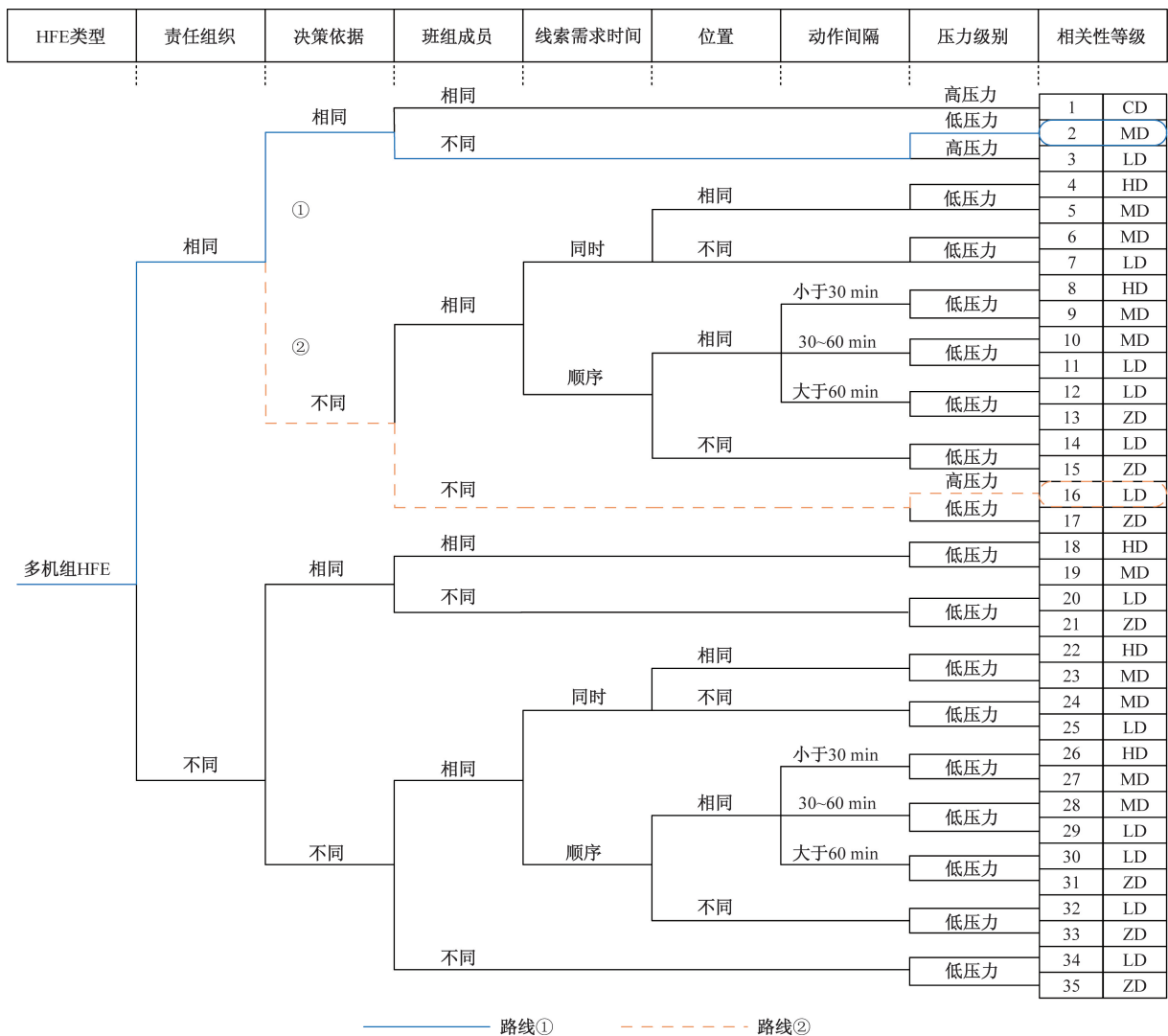


图 2 HFE #2 与 HFE #1 的相关性等级的分析过程

Fig. 2 Procedure of analyzing the dependence level between HFE #2 and HFE #1

为 0.813, 路线 ② 表示专家组评估“决策依据”不同 (different) 的概率为 0.187。则 HFE #2 与 HFE #1 间相关性的概率分布为 $Bet P(MD) = 0.813$, $Bet P(LD) = 0.187$ 。其中, MD 表示中相关, LD 表示低相关。

步骤 5 计算条件人误概率 CHEP 和联合人误概率 JHEP。

手动开启泄压阀门与开启注水与排水阀门的 BHEP 可以通过查阅《NUREG-1278 手册》可得, 根据文献[15]已知 $P(HFE\#1) = 8.3 \times 10^{-4}$, 则 HFE #1 情况下 HFE #2 的条件人误概率 CHEP(HFE#2 | HFE#1) 为

$$\begin{aligned}
 CHEP(HFE\#2 | HFE\#1) &= \sum_{XD} Bet P(XD) P_{XD}(HFE\#2 | HFE\#1) \\
 &= Bet P(LD) P_{LD}(HFE\#2 | HFE\#1) + \\
 &\quad Bet P(MD) P_{MD}(HFE\#2 | HFE\#1) \\
 &= 0.187 \times \frac{1 + 19 \times 8.3 \times 10^{-4}}{20} + \\
 &\quad 0.813 \times \frac{1 + 6 \times 8.3 \times 10^{-4}}{7} \\
 &\approx 1.26 \times 10^{-1} \tag{9}
 \end{aligned}$$

式(9)中: P_{LD} 为低相关的概率; P_{MD} 为中相关的概率。

则 MULOOP 事件的 JHEP 为: $P(JHEP) = HEP(HFE\#1)CHEP(HFE\#2 | HFE\#1)$, 分析结果如表 8 所示, 其中第 2 列为文献[15]中的分析结果, 第 3 列为采用本文方法得到的分析结果。

表 8 MULOOP 事件分析结果

Table 8 Analyzing results for MULOOP accident

方法	文献[15]方法	本文方法
$P(HFE\#1)$	8.30×10^{-4}	8.30×10^{-4}
HFE 间的相关性	$P(MD) = 1$	$Bet P(MD) = 0.813$ $Bet P(LD) = 0.187$
$P(HFE\#2)$	8.30×10^{-4}	8.30×10^{-4}
CHEP	1.44×10^{-1}	1.26×10^{-1}
JHEP	1.19×10^{-4}	1.05×10^{-4}

3.3 设计算例

假设专家对影响因素“决策依据”给出的评估意见与自信度 α 如表 9 第 1、2 列所示(假设对其他影响因素的评估意见与表 6 相同)。由表 9 的第 1、2 列可知, 评估意见从非常确认“决策依据”为“相同”逐步过渡到非常确认“决策依据”为“不同”。根据专家给出的评估意见与自信度, 重复 3.2 节中的步骤 3 ~ 步骤 5, 计算得出相关性等级结果、CHEP 与 JHEP 分别如表 9 第 3、4、5 列所示。

表 9 不同评估意见与自信度对应的分析结果

Table 9 Analyzing results for different judgment and confidence

评估意见	自信度	HFE 间的相关性等级	CHEP	JHEP
{相同}	1	$Bet P(MD) = 1$ $Bet P(LD) = 0$	1.44×10^{-1}	1.19×10^{-4}
{相同}	0.8	$Bet P(MD) = 0.9$ $Bet P(LD) = 0.1$	1.35×10^{-1}	1.12×10^{-4}
{相同}	0.6	$Bet P(MD) = 0.8$ $Bet P(LD) = 0.2$	1.25×10^{-1}	1.04×10^{-4}
{相同}	0.4	$Bet P(MD) = 0.7$ $Bet P(LD) = 0.3$	1.16×10^{-1}	9.64×10^{-5}
{相同}	0.2	$Bet P(MD) = 0.6$ $Bet P(LD) = 0.4$	1.07×10^{-1}	8.86×10^{-5}
{相同}	0	$Bet P(MD) = 0.5$ $Bet P(LD) = 0.5$	9.75×10^{-2}	8.09×10^{-5}
{不同}	0.2	$Bet P(MD) = 0.4$ $Bet P(LD) = 0.6$	8.82×10^{-2}	7.32×10^{-5}
{不同}	0.4	$Bet P(MD) = 0.3$ $Bet P(LD) = 0.7$	7.89×10^{-2}	6.55×10^{-5}
{不同}	0.6	$Bet P(MD) = 0.2$ $Bet P(LD) = 0.8$	6.96×10^{-2}	5.78×10^{-5}
{不同}	0.8	$Bet P(MD) = 0.1$ $Bet P(LD) = 0.9$	6.03×10^{-2}	5.00×10^{-5}
{不同}	1	$Bet P(MD) = 0$ $Bet P(LD) = 1$	5.10×10^{-2}	4.23×10^{-5}

3.4 结果与讨论

由表 8 可知, 根据文献[15]的方法得到的相关性等级结果为 $P(MD) = 1$, 根据本文方法得到的相关性等级结果为 $Bet P(MD) = 0.813$, $Bet P(LD) = 0.187$, 因此计算得出的 CHEP 结果更低, 这是合理的。专家对影响因素“决策基础”的评估意见存在不确定信息, 依照经典的方法专家只能选择一种状态(即评估意见为“相同”), 这导致部分专家评估意见的信息丢失, 而 DSET 允许多位专家评估意见的输入, 并以概率分布的形式输出多个结果, 能够降低专家意见的不确定性并保留完整的多专家评估意见。从以上角度来看, 所提方法能够更全面地反映专家评估决策过程, 得到更加准确的 JHEP 结果。

由表 9 可知, 专家对影响因素的评估意见及其自信度不同, 将导致分析结果产生变化。随着评估意见从非常确认“决策依据”为“相同”(图 2, 决策树对应的相关性等级为 MD) 逐步过渡到非常确认“决策依据”为“不同”(图 2, 决策树对应的相关性等级为 LD), 人因失效事件间的相关性等级逐步降低(概率分布结果的变化趋势为 MD 占比减小, LD

占比增加),这导致 CHEP 与 JHEP 的计算结果减小。当专家对“决策依据”的评估意见为“相同”且自信度 $\alpha = 1$ 时,分析结果与文献[15]中的结果一致,当自信度降低时(表9中第2~5行的情形),按照原方法专家只能给出评估意见为“相同”,分析结果与表9第1行情形相同;当专家对“决策依据”的评估意见为“不同”且自信度 $\alpha = 1$ 时,分析结果如表9第11行情形所示,当自信度降低时(表9中第10~7行的情形),按照原方法专家只能给出评估意见为“不同”,分析结果与表9第11行情形相同;当专家对“决策依据”的评估意见为“相同”且自信度 $\alpha = 0$ 时(表9中第6行情形),说明专家对影响因素“决策依据”无法做出判断,只能认为 HFE 间的相关性等级为 MD 与 LD 的概率相同(即同为 50%)。而采用本文方法可以区分上述不同情形。因此,本文方法能够更灵活有效地处理不确定性信息,具有一定的优越性。

4 结论

所提方法是针对 MU 核电站中的人因事件进行相关性分析,是一种基于不确定信息融合的分析方法,通过案例分析得出如下结论。

(1) DSET 能够灵活地表达专家评估意见中存在的多种不确定性信息,并对其进行融合,融合结果能够有效降低不确定性。

(2) 通过 PPT 获得的各个影响因素状态的概率分布结果,结合多机组核电站人因相关性 DT,得到人因失效事件间的相关性等级,并基于 THERP 得到更符合实际的 HRA 结果。所提方法扩展完善了 MU-NPP 的 HRA 方法,能够为核电安全决策提供参考。

本次研究仅针对 DT 中的影响因素“决策依据”进行不确定信息表达,后续将扩展其他影响因素的综合不确定性评估。此外,针对多影响因素综合评估的计算复杂度问题也是一个未来的研究方向。

参 考 文 献

- [1] 邢尚鹏, 隋阳. 核电站设备冷却水系统动态可靠性评估方法[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(23): 10092-10101.
Xing Shangpeng, Sui Yang. An approach for dynamic reliability assessment of equipment cooling water system for nuclear power plant[J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(23): 10092-10101.
- [2] 刘帼巾, 赵兴洲, 缪建华, 等. 基于退化量分布的剩余电流动作断路器可靠性评估[J]. 电力科学与技术学报, 2023, 38(2): 205-213.
Liu Guojin, Zhao Xingzhou, Miao Jianhua, et al. Reliability evaluation of residual current operated circuit breaker based on degradation distribution[J]. Electric Power Science and Technology, 2023, 38(2): 205-213.
- [3] 张佳佳, 田秀峰, 宫宇, 等. 核电厂 HRA 相关性研究及应用[J]. 核科学与工程, 2021, 41(3): 593-598.
Zhang Jiajia, Tian Xiufeng, Gong Yu, et al. Research and applications of human reliability analysis dependency for nuclear power plants[J]. Nuclear Science and Engineering, 2021, 41(3): 593-598.
- [4] 邹衍华, 张力. 多机组核电站动态人因可靠性分析: 现状与展望[J]. 核科学与工程, 2021, 41(5): 958-965.
Zou Yanhua, Zhang Li. Dynamic human reliability analysis for multi-unit nuclear power plants: current situation and prospects[J]. Nuclear Science and Engineering, 2021, 41(5): 958-965.
- [5] International Atomic Energy Agency (IAEA). Procedures for conducting probabilistic safety assessment of nuclear power plants (level 1): 50-P-4[R]. Vienna: IAEA, 1992.
- [6] 张力, 黄曙东, 杨洪, 等. 岭澳核电站人因可靠性分析[J]. 中国核科技报告, 2000(1): 14-35.
Zhang Li, Huang Shudong, Yang Hong, et al. Human reliability analysis of lingao nuclear power station[J]. China Nuclear Science and Technology Report, 2000(1): 14-35.
- [7] Xu Z H, Shang S W, Su X Y, et al. Handling dependencies among performance shaping factors in SPAR-H through DEMATEL method[J]. Nuclear Engineering and Technology, 2023, 55(8): 2897-2904.
- [8] Podofilini L, Reer B, Dang V N. A traceable process to develop Bayesian networks from scarce data and expert judgment: a human reliability analysis application[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2023, 230: 108903.
- [9] Gao F, Bao S D, Bi W H. Assessing dependence in human reliability analysis using probabilistic linguistic term sets[J]. Annals of Nuclear Energy, 2022, 175: 109261.
- [10] American Society of Mechanical Engineers. Standard for probabilistic risk assessment for nuclear power plant applications; PRA-S-2000[S]. New York: American Society of Mechanical Engineers, 2000.
- [11] He X H. Dependences in HRA: 211900_R001[R]. Sundbyberg: NPSAG, 2016.
- [12] Zhang S, Tong J J, Zhao J. An integrated modeling approach for event sequence development in multi-unit probabilistic risk assessment[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2016, 155: 147-159.
- [13] Le D T D, Vasseur D, Serdet E. Probabilistic safety assessment of twin-unit nuclear sites: methodological elements[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2016, 145: 250-261.
- [14] Jang S, Yamaguchi A. Dynamic approach on multi-unit probabilistic risk assessment using continuous Markov and Monte Carlo method[C]// The Proceedings of International Topical Meeting on Probabilistic Safety Assessment and Analysis. Pittsburgh: American Nuclear Society, 2017: 24-28.
- [15] Arigi A M, Park G, Kim J. Dependency analysis method for human failure events in multi-unit probabilistic safety assessments[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2020, 203: 107112.
- [16] 王小巍, 陈砚桥, 金家善, 等. 备件需求预测中的不确定性问题研究综述[J]. 科学技术与工程, 2024, 24(4): 1338-1346.
Wang Xiaowei, Chen Yanqiao, Jin Jiashan, et al. Spare parts de-

- mand forecasting: a review on uncertainty problems[J]. Science Technology and Engineering, 2024, 24(4): 1338-1346.
- [17] 李红伟, 吴磊, 荆浩婕, 等. 考虑风光不确定性的综合能源系统区间优化调度[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(12): 5076-5083.
- Li Hongwei, Wu Lei, Jing Haojie, et al. Interval optimal scheduling of integrated energy system considering landscape uncertainty [J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(12): 5076-5083.
- [18] 王辉, 王军杰, 王腾飞, 等. 出力不确定下基于 CVaR 的风电供应链优化决策[J]. 电力科学与技术学报, 2023, 38(4): 134-142.
- Wang Hui, Wang Junjie, Wang Tengfei, et al. Optimal decision of wind power supply chain based on CVaR under uncertainty output[J]. Electric Power Science and Technology, 2023, 38(4): 134-142.
- [19] Zadeh L A. Fuzzy set[J]. Information & Control, 1965, 8(3): 338-353.
- [20] Deng X Y, Jiang W. D number theory based on game-theoretic framework in adversarial decision making under a fuzzy environment[J]. Approximate Reasoning, 2019, 106: 194-213.
- [21] Zadeh L A. A note on Z-numbers [J]. Information Science, 2011, 181(14): 2923-2932.
- [22] Swain A, Guttman H. Handbook of human reliability analysis with emphasis on nuclear power plant applications: NUREG/CR-1278 [R]. Washington D.C.: US Nuclear Regulatory Commission, 1983.
- [23] Dempster A P. Upper and lower probabilities induced by a multi-valued mapping[J]. The Annals of Mathematical Statistics, 1967, 38(2): 325-339.
- [24] Shafer G. A mathematical theory of evidence [M]. Princeton: Princeton University Press, 1976.
- [25] Smets P, Kennes R. The transferable belief model[J]. Artificial Intelligence, 1994, 66(2): 191-243.