

人的认知失误事件定量分析法的进展及应用

廖可兵¹, 刘爱群¹, 童节娟², 熊立新³

(1. 湖南工学院 安全与环境工程系, 湖南 衡阳 421002;

2. 清华大学 核能与新能源技术研究院, 北京 100084; 3. 中科华核电技术研究院, 北京 100086)

摘要: 认知可靠性与人误分析法(即认知失误分析法, CREAM)是具有代表性的第2代可靠性分析(HRA)方法, 它可从回顾式和预测式进行班组人误事件概率的定量分析。本工作除描述了通用的CREAM方法外, 还建立了用环境影响指数 β 与共同绩效条件(CPC)因子关系的人误事件概率简化的定量化公式, 可用于计算核电厂人误事故中班组的人误事件概率。并假想以秦山一期蒸汽发生器传热管破裂(SGTR)事故为例, 说明人的认知失误事件概率的计算过程及结果, 为核电厂概率安全评价(PSA)的班组人因分析提供了另一种有效的途径, 使核电厂的风险的概率估计值更为客观、更有参考价值。

关键词: 人的认知失误; 失误心理学; 共同绩效条件

中图分类号: X912.9

文献标志码: A

文章编号: 1000-6931(2009)04-0322-06

Development and Application for Quantification of Cognitive Reliability and Error Analysis Method

LIAO Ke-bing¹, LIU Ai-qun¹, TONG Jie-juan², XIONG Li-xin³

(1. Department of Safety and Environment Engineering, Hunan Institute of Technology, Hengyang 421002, China; 2. Institute of Nuclear and New Energy Technology, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

3. China Nuclear Power Technology Research Institute, Beijing 100086, China)

Abstract: Cognitive reliability and error analysis method (CREAM) is a representative method of the so-called second generation human reliability analysis (HRA) method and can be used in both retrospective and prospective analysis. Not only the general CREAM was described, but also using the context effect factor β and common performance condition (CPC) factor, the formula was obtained for calculation of cognitive error probability in probability safety assessment (PSA)/HRA of nuclear power plant and to provide a simplified CREAM quantification process. One example was provided in the steam generator tube rupture (SGTR) event of Qinshan I Nuclear Power Plant. The results give a more validated information for future application of PSA/HRA.

Key words: human cognitive error; error psychology; common performance condition

收稿日期: 2008-02-09; 修回日期: 2008-04-26

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(70771054); 湖南省自然科学基金资助项目(06JJ50136); 湖南省教育厅资助项目(08C233)

作者简介: 廖可兵(1964—), 男, 湖南常德人, 教授, 硕士, 安全工程及管理专业

目前概率安全评价(PSA)中的人误事件定量计算一般采用 THERP+HCR(人的失误预测技术+人的认知可靠性)方法,其基本原理是通过人的任务分析,将人的任务操作事件树将其分解为一系列的由系统功能或规程所规定的子任务或步骤,并分别对各种子任务给出专家判断的人误概率值(HEPs),同时用绩效形成因子(PSFs)在误差范围内进行修正。对于人的行为有时间约束要求的子任务则采用HCR 模型计算^[1-2]。

1979 年,美国三哩岛核电厂堆芯熔化事件发生之后,人们认识到电厂运行中的系统与人在某种环境下(尤其在事故进程中)的交互作用对于事故的缓解或恶化起着至关重要的作用,正在发展和研究的第 2 代人误事件定量计算方法,更加强调情景环境对人为行为的影响。认知失误分析法(CREAM)是一代表性的第 2 代人的可靠性分析(HRA)方法,它强调人在生产活动中的绩效输出不是孤立的随机性行为,而是依赖于人完成任务时所处的工作环境或工作条件,它们通过影响人的认知控制模式和其在不同认知活动中的效应,最终决定人的响应行为。

CREAM 法是 1998 年瑞典 Hollnagel^[3] 首先提出的,以后又有不少专家继续研究与应用,日本 Fujita 等^[4] 提出了由共同绩效条件(CPC)因子的 $\Sigma_{\text{降低}}$ 和 $\Sigma_{\text{改进}}$ 确定认知失误概率的改进方法,王遥^[5] 进一步深入研究了 CREAM 方法,提出并定义了环境影响指数 β 和它的计算方法,给出了人的认知失误事件概率量化的公式。本工作介绍和叙述这一方法的原理及进展,着重研究在特定情景环境下,在人的观察、诊断、决策到执行操作的整个认知过程中发生人的认知失误事件的概率的计算,而不探究行为的内在历程,并将 CREAM 法应用于秦山核电厂的蒸汽发生器传热管破裂(SGTR)人误事件分析之中。

1 CREAM 法的基本原理及其进展

1.1 CREAM 法的基本原理^[3]

任何一种行为产生都不可缺少其发生的环境,因此,行为的环境影响是必须考虑的,事实上,在环境与行为之间是相互耦合、相互有关

的。Hollnagel 首先提出的 CREAM 法的核心内容主要有以下 3 个方面。

1) 共同绩效条件因子

为描述人的行为受环境影响,提出影响人为行为的 9 大因素,统称 CPC,每个 CPC 因子有 3 个水平等级,分别为改进、降低和不显著^[3],在定量化的过程中可给它们赋值(表 1)。

表 1 CPC 水平和对绩效的影响

Table 1 Common performance condition level and it's effect on performances

因素	水平	对绩效的期望效应
组织的完善性	非常有效	改进
	有效	不显著
	无效	降低
	效果差	降低
工作条件	优越	改进
	匹配	不显著
	不匹配	降低
人机界面与运行支持的完善性	支持	改进
	充分	不显著
	可容忍	不显著
	不适当	降低
规程/计划的可用性	适当	改进
	可接受	不显著
	不适当	降低
同时出现的目标数量	低于人的处理能力	不显著
	与人的当前能力匹配	不显著
	高于人的处理能力	降低
可用时间	充分	改进
	暂时不充分	不显著
	连续不充分	降低
值班时间区(生理节奏)	白天(调整)	不显著
	夜间(未调整)	降低
培训和经验的充分性	充分,经验丰富	改进
	充分,经验有限	不显著
	不充分	降低
班组成员的合作质量	非常有效	改进
	有效	不显著
	无效	不显著
	效果差	降低

2) 可观察性失误和不可观察性失误

Hollnagel 认为传统的 HRA 中对于失误的分类不科学,因为它在不同的分析场合,有时可被当作异常事件,有时可被当作原因,有时又可被当作后果。为建立一种用于事故分析的循环式的追溯方法,CREAM 法将失误分为可观察性失误和不可观察性失误。可观察性失误是指具有外在表现形式的失误,即失误模式,在循环链中一般作为分析的起点;不可观察性失误是指不具备外在的表现形式,即人的思维过程中的错误,如诊断、评价、决策计划等认知活动,这类失误在循环链中形成事故追溯的驱动力。这些中间环节构成前因-后果链,最终的输出是事故分析的根原因。

3) 人的认知控制模式

人的认知控制模式分为 4 类,即混乱型、机会型、战术型和战略型,其相应发生的认知失误概率区间分别为: $1.0 \times 10^{-1} < P < 1.0$; $1.0 \times 10^{-2} < P < 0.5$; $1.0 \times 10^{-3} < P < 1.0 \times 10^{-1}$; $0.5 \times 10^{-5} < P < 1.0 \times 10^{-2}$ 。

1.2 CREAM 方法的进展与人误事件定量化的程序^[5]

1) 环境影响指数 β 的定义及其与 CPC 因子的关系

为了对人误事件情景环境的分析与评价,将人的绩效期望值分为不同等级,一般分为降低、不显著和改进 3 个等级。每个 CPC 因子有 3 个等级,对代表所处情景的 9 个 CPC 因子的 3 种等级的个数分别求和,得到该情景的量化值 $\Sigma_{\text{降低}}$ 、 $\Sigma_{\text{不显著}}$ 和 $\Sigma_{\text{改进}}$ 。定义环境影响指数 β 为: $\beta = X - Y = \Sigma_{\text{降低}} - \Sigma_{\text{改进}}$,它表示情景环境对绩效影响为降低的 CPC 因子数 $\Sigma_{\text{降低}}$ 和绩效影响为改进的 CPC 因子数 $\Sigma_{\text{改进}}$ 之差。环境影响指数 β 为 0 时,表示绩效影响为降低和改进的 CPC 因子数相等,或所有 CPC 因子的绩效影响均不显著,即无情景环境影响,此时的认知失误概率为基本失误概率,记作 CFP_0 。图 1 示出了环境影响指数和认知控制模式图之间的关系,环境影响指数增加表示绩效影响为降低的 CPC 因子数增多,迫使人的认知失误概率增加;反之,环境影响指数减小,人的认知失误概率随之减小。因此,认知失误概率 CFP 和环境影响指数 β 的关系可表示为:

$$\lg(CFP/CFP_0) = k\beta$$

该式中的系数 k 可由认知失误概率及环境影响指数的最大值和最小值确定。

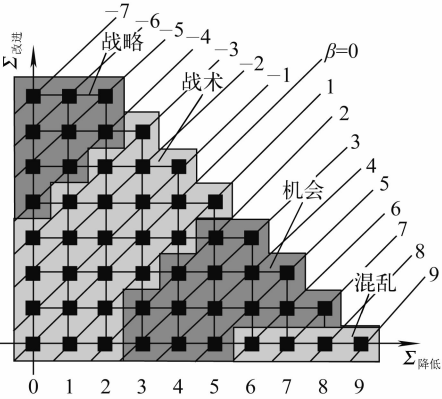


图 1 控制模式的划分和环境影响指数图
Fig. 1 Control mode plot and context effect factor

最大认知失误概率和最小认知失误概率的表达式分别为:

$$\lg(CFP_{\max}/CFP_0) = k\beta_{\max},$$
$$\lg(CFP_{\min}/CFP_0) = k\beta_{\min}.$$

以上两式相减,得到计算 k 和 CFP_0 的表达式分别为:

$$k = \lg(CFP_{\max}/CFP_{\min})/(\beta_{\max} - \beta_{\min}),$$
$$CFP_0 = CFP_{\max}/10^{k\beta_{\max}}.$$

CREAM 给出表示情景环境的 9 个 CPC 因子,最大降低数为 9,最大改进数为 7,因此, $\beta_{\max} = 9$ 和 $\beta_{\min} = -7$ 。取混乱型时的最大失误概率为 1, $CFP_{\max} = 1.0$;取战略型时最小失误概率为 0.000 1, $CFP_{\min} = 0.000 1$ 。计算得到 $k = 0.25$, $CEP_0 = 0.005 6$ 。因此,得到由于情景环境影响的认知失误概率计算公式为:

$$CFP = CFP_0 \times 10^{0.25\beta},$$
$$CFP_0 = 0.005 6.$$

2) 人的认知失误事件概率估算方法

以上认知失误概率计算公式中的基本认知失误概率 CFP_0 是环境影响指数 β 为 0 及不考虑 CPC 因子期望效应的认知失误概率。给出的 CFP_0 值是表示人的认知活动发生失误的 1 个基本概率的平均值。认知活动可分为 15 种类型,归纳为观察、解释、计划和执行 4 类认知功能,有 13 类失效模式和不同的基本认知失效概率值(表 2)。

表 2 认知功能失效模式名称和失效概率基本值^[3]

Table 2 Cognitive error mode and basic value of error probability^[3]

认知功能	失效模式	基本值
观察	观察目标错误	0.001
	错误辨识	0.007
	观察没有进行	0.007
解释	诊断失败	0.02
	决策失误	0.01
	延迟解释	0.01
计划	优先权错误	0.01
	不适当的计划	0.01
执行	动作方式错误	0.003
	动作时间错误	0.003
	动作目标错误	0.000 5
	动作顺序错误	0.003
	动作遗漏	0.003

发生人误事件的情景环境用 9 个 CPC 因子来描述,CPC 因子的水平表示对人的绩效影响的期望效应,可分为:降低、不显著和改进。对 CPC 因子的期望效应进行量化,定义效应量化值 m 。对于改进的期望效应, m 为 -1;对于不显著的期望效应, m 为 0;对于降低的期望效应, m 为 1。

以上定义的环境影响指数 β 表示情景环境对绩效影响为降低的 CPC 因子数 $\Sigma_{\text{降低}}$ 和绩效影响为改进的 CPC 因子数 $\Sigma_{\text{改进}}$ 之差,通过量化,环境影响指数的定量数学表达式为:

$$\beta = \sum_{i=1}^9 m_i$$

其中: $m_i(i=1,2,\cdots,9)$ 分别为 9 种 CPC 因子的效应量化值。

人的认知失误概率估算分 2 步进行:第 1 步分析发生人误事件的认知活动,确定认知功能和失效模式,按表 2 选取相应的失效概率基本值作为 CFP₀;第 2 步分析认知活动所处的情景环境,确定 9 个 CPC 因子的水平,按效应量化值计算环境影响指数 β ,然后,即可按公式估算该认知活动中人误事件的发生概率。

2 认知人误事件定量化方法在核电厂事故中的应用^[6-7]

核电厂发生蒸汽发生器传热管断裂(SGTR)事故后,稳压器低压力信号触发反应堆紧急停堆,一回路压力进一步降低,导致安注自动投入,并隔离主给水。核电厂制定有相应的安全规程指导事故的后续处理,以确保核电厂的安全,SGTR 事件树用于表述事故后的处理,其中包含若干人因事件。本工作以秦山核电厂 SGTR 事故后的识别并隔离破管蒸汽发生器人因事件为例(图 2),说明人误概率定量化方法的应用。

以下对识别隔离破管蒸汽发生器(RSGI)和早期冷却与降压(ECD)的认知事件,分 3 步定量估计班组人误事件的发生概率。

1) 确定班组人误事件的认知活动所处的情景环境的 CPC 因子

根据秦山核电厂处理 SGTR 事故的 E3 规

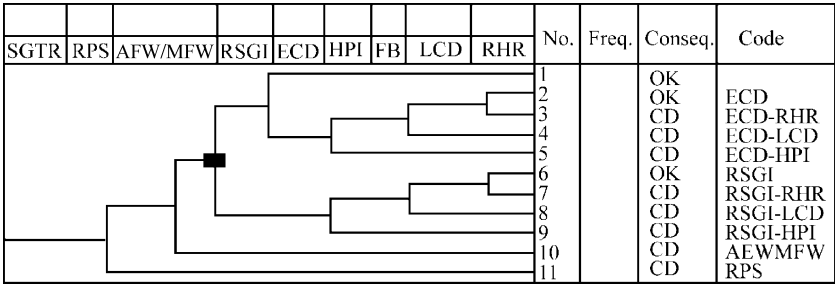


图 2 秦山核电厂 SGTR 事件树^[6]

Fig. 2 SGTR event tree of Qinshan I Nuclear Power Plant^[6]

在事件树中的 8 个功能题头中,RPS 为反应堆关闭;AFW/MFW 为给水系统;RSGI 为隔离破管蒸汽发生器;ECD 为早期冷却与降压;HPI 为高压注入;FB 为充排;LCD 为长时间冷却;RHR 为余热冷却

No. 为事件序列号;Freq. 为事件发生频率;Conseq. 为事件发生后果;Code 为事件编写代码

程第 2~4 步:识别破管蒸汽发生器、隔离破管蒸汽发生器和检查破管蒸汽发生器的水位等人员操作步骤,按规程中的 5 个子步,分析操纵员的认知活动和认知功能,确定最可能发生的认知失误模式,从操纵员的认知活动,根据有关该事件的调查和访谈记录,经过专家分析得到 RSGI 和 ECD 事件序列的 CPC 因子和效应影响指数,结果列于表 3。

表 3 RSGI 和 ECD 事件序列的
CPC 因子的影响指数 β

Table 3 Performance influence index values
of CPC for RSGI and ECD sequence

CPC 因子	β	
	RSGI 序列	ECD 序列
组织的合理性	0	0
程序与计划的有效性	-1.2	-1.2
人机界面与运行支持条件	0	0
可用有效时间	1.0	1.0
培训的预备充分	-1.4	-1.4
班组合作质量	0	0

2) 计算人误事件认知活动的失误概率
认知活动分析后,得到了表示情景环境的 6 个 CPC 因子的描述,其他 CPC 因子没有特别的描述,可以认为它们对认知失误无显著影响,其效应影响指数值取零。“识别并隔离破管蒸汽发生器(SG)”人因事件的认知活动在较短时间内进行,因此,情景环境基本相同,均采用表 3 列出的 CPC 因子效应影响指数。将 CPC 因子效应影响指数相加,得到环境影响指数 $\beta = \sum_{i=1}^9 m_i = -1.6$,则班组认知失误概率 $CFP = CFP_0 \times 10^{-0.4}$,结果列于表 4。

3) 班组人误事件的总失误概率分析

E3 第 2 步的 5 个认知活动中,任何 1 个认知活动成功完成,即可使得该步成功。考虑到这些活动的强相关性,该步认知失误概率取其中的最小失误概率为 $CPF_2 = 4 \times 10^{-4}$ 。

E3 第 3 步的 5 个认知活动中,任何 1 个认知活动失误,必将导致该步失误。考虑到这些活动的强相关性,该步认知失误概率取其中的最大失误概率为 $CPF_3 = 1.2 \times 10^{-3}$ 。

E3 第 4 步的 2 个认知活动中,任何 1 个认

表 4 “识别并隔离破损管 SG”人因事件中认知失误概率

Table 4 Cognitive failure probability of human event for identification and isolating ruptured SG

规程 E3 中步骤	认知活动	类别	认知功能	失误类型	CFP ₀	CFP
2	识别破管蒸汽发生器					
2a	蒸汽发生器窄程水位失控上升	检验	观察,解释	观察目标错误	1.0×10^{-3}	4.0×10^{-4}
2b	主蒸汽管道 N-16 仪放射性高	检验	观察,解释	观察目标错误	1.0×10^{-3}	4.0×10^{-4}
2c	蒸汽发生器排污水放射性高	检验	观察,解释	观察目标错误	1.0×10^{-3}	4.0×10^{-4}
2d	蒸汽发生器取样放射性高	检验	观察,解释	观察目标错误	1.0×10^{-3}	4.0×10^{-4}
2e	抽气器排汽放射性高	检验	观察,解释	观察目标错误	1.0×10^{-3}	4.0×10^{-4}
3	隔离破管蒸汽发生器的出口					
3a	调整大气释放阀开启设定值至 7.0 MPa	调整	观察,执行	动作方式错误	3.0×10^{-3}	1.2×10^{-3}
3b	确认大气释放阀关闭	检验	观察,解释	观察目标错误	1.0×10^{-3}	4.0×10^{-4}
3c	关闭主蒸汽隔离阀及其旁路阀	执行	执行	动作目标错误	5.0×10^{-4}	2.0×10^{-4}
3d	隔离破管蒸汽发生器的排污	执行	执行	动作目标错误	5.0×10^{-4}	2.0×10^{-4}
3e	关闭主蒸汽隔离阀前疏水阀	执行	执行	动作目标错误	5.0×10^{-4}	2.0×10^{-4}
4	检查破管蒸汽发生器的水位					
4a	确认窄量程水位大于 9.1 m	检验	观察,解释	错误辨识	7.0×10^{-3}	2.8×10^{-3}
4b	隔离给水	执行	执行	动作目标错误	5.0×10^{-4}	2.0×10^{-4}

知活动失误,必将导致该步失误。考虑到这些活动的强相关性,该步认知失误概率取其中的最大失误概率 $CPF_4 = 2.8 \times 10^{-3}$ 。

“识别并隔离破损 SG”人因事件包含 E3 规程的 3 步,任何一步失误,必将导致整个事件的失误,并考虑到这些规程步的弱相关性,因此,该人因事件的失误概率近似为 3 步的认知失误概率之和,为 4.4×10^{-3} 。

类似的可计算 ECD 事件主系统开始冷却认知失误概率为 5.6×10^{-3} 。

3 结论

本文描述了 CREAM 认知失误概率预测分析方法,并提出了环境影响指数,用于情景环境对失误概率影响的定量化,包含了注重情景环境对班组人误的影响和班组在认知活动中的认知失误两方面的综合考虑,更具有科学性。给出了简洁的认知失误估算公式,通过应用于秦山核电厂的人因事件概率分析实例,在假想发生秦山核电厂发生蒸汽发生器传热管断裂(SGTR)事故后,按规程 E3 的第 2、3、4 步进行了两个认知人因事件分析,由情景环境分析得到 CPC 因子水平,并对效应影响指数量化,得到环境影响指数,显示了实际应用的概率定量化过程,得到了定量的班组失误概率结果。通

过分析,有利于发现情景环境中的不足,为提出改进措施,以提高人因可靠性和核电厂安全性,对核电厂 PSA 的人因分析提供了另一种更精细、更有效的途径。

参考文献:

- [1] SWAIN A D, GUTTMANN H E. Handbook of human reliability analysis with emphasis on nuclear power plant applications[M]. Washington, USA: NRC, 1983.
- [2] 黄祥瑞. 可靠性工程[M]. 北京:清华大学出版社,1990.
- [3] HOLLNAGEL E. Cognitive reliability and error analysis method[M]. Oxford: Elsevier, 1998.
- [4] FUJITA Y, HOLLNAGEL E. Failures without errors: Quantification of context in HRA[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2004, 83: 145-151.
- [5] 王遥. 人的认知失误事件分析方法及应用研究[D]. 北京:清华大学, 2005.
- [6] HE Xuhong, WANG Yao, SHEN Zupei, et al. A simplified CREAM prospective quantification process and its application[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2008, 93: 298-306.
- [7] 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.