

核电厂传统人员可靠性分析方法中 引入班组因素的研究

赵 军, 童节娟, 刘 涛, 玉 宇

(清华大学 核能与新能源技术研究院, 北京 100084)

摘要:在核电厂等大型复杂系统中,人员干预行为通常以班组的协作来完成,而目前核电厂概率安全评价(PSA)采用的以人的失误率预测技术(THERP)和人的认知可靠性(HCR)方法为代表的人员可靠性分析(HRA)方法主要关注对个人绩效的影响,它们在评估核电厂主控室班组绩效时存在一定局限。本文定义一种新的绩效形成因子“班组绩效形成因子(TPSF)”,并将其合理地引入 THERP 和 HCR 方法的量化体系中,使它们可在一定程度上体现班组环境对人员绩效的影响。文章提出了 TPSF 等级的评价方法及其引入 THERP 和 HCR 方法的定性实施框架。结果证明,合理地将班组因素引入传统 HRA 方法能改进它们对班组环境下人员绩效模化的合理性。

关键词:班组;绩效形成因子;人的失误率预测技术;人的认知可靠性

中图分类号: TL99

文献标志码: A

文章编号: 1000-6931(2011)08-0966-06

Integrating Team Factor Into Current Human Reliability Analysis of Nuclear Power Plant

ZHAO Jun, TONG Jie-juan, LIU Tao, YU Yu

(Institute of Nuclear and New Energy Technology, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: In large complex systems such as nuclear power plants (NPPs), most people work in teams or groups. However, the current human reliability analysis (HRA) methods used in probability safety assessment (PSA) of NPPs are generally focused on the assessment of individual performance. The technique for human error rate prediction (THERP) and human cognitive reliability (HCR) are the most widely used human reliability analysis methods. Therefore, the limitations will exist consequentially when we use the current HRA methods to quantify the actual human performance situation in the control room of NPPs. In this paper, a new performance shaping factor (PSF) named team performance shaping factor (TPSF) was defined and a qualitative framework used to integrate the TPSF into THERP method and HCR model respectively in accordance with the existing architectures was proposed. The process for evaluating the grade of

TPSF was put forward, and the question that should be solved in order to accomplish the quantitative analysis was discussed. The result shows that integrating team factor into current HRA will enhance the ability and validity in modeling the human performance in team context.

Key words: team; performance shaping factor; THERP; HCR

随着工业系统的大型化和复杂化,复杂技术系统中人的因素对系统可靠性的影响日趋显著,因此人的可靠性研究逐渐成为工业系统可靠性分析中的一重要因素。虽然在很多行业中都开展了人员绩效及可靠性分析的相关研究,但它们绝大多数是针对个人的,然而在核电厂、航空工业系统这类复杂系统中,人员的干预行为通常由一个班组来协作完成,因此对班组失误理论和班组可靠性的研究逐步成为人员可靠性分析(HRA)领域中的一关注点。

所谓班组是指由两个以上相互影响、相互依赖并相互适应,且有共同目标和各自分工的个人构成的团队^[1]。目前人因领域的研究中对于班组的定义、分类及其特性开展了很多研究^[2],但总地来说对班组绩效的研究仍处于探索阶段。根据已有的相关研究,班组绩效的研究大体上有显式构模和隐式构模两种方式。显式构模中最具代表性的方法是 IDAC 模型^[3-7],它通过模拟班组环境中操纵员的感知、决策及行动来评价班组行为中的人员可靠性,期望能预测事故情景下主控室班组的响应概率,以应用于核电厂的概率安全评价(PSA)中。动态流程图法(DFM)模型^[8-9]是显式构模的另一种代表方法,它利用 DFM 模化特定事故情景下操纵员班组与系统之间的动态交互作用,在其构模过程中对班组的影响进行了适当的考虑。所谓隐式构模即对班组成员之间的交互作用不进行明确的模化,而将班组内部的认知决策过程作为一个“黑盒”进行处理,此黑盒可采用神经网络或数学模型等进行表征。例如,日本东京大学的 Furuta 和 Kondo 以马尔科夫模型为基础构建的网络数学模型^[10],此模型假定班组中每个成员在受其他成员和环境影响下,可近似看作是具有两种状态的信息处理器。

一方面,上述分析模型中虽包含了班组相关的多种因素,但在定量化方面仍存在很大困难,很难直接应用于 PSA 分析中。另一方面,

鉴于传统的第一代 HRA 方法发展相对成熟,因此在核电厂的 PSA 分析中得到广泛应用,因而预计在较长的时期内仍将使用第一代 HRA 方法作为主导,它的代表方法有人的失误率预测技术(THERP)和人的认知可靠性(HCR)。然而,由于第一代 HRA 方法中几乎没有或很少考虑班组的因素,因而在模化核电厂控制室班组行为时存在一定局限性。因此,本文拟通过定义班组绩效形成因子(TPSF),并将其尽量合理地引入 THERP 和 HCR 方法中,以使它们能够在一定程度上体现班组特性对人员可靠性的影响。

1 班组绩效形成因子

1.1 TPSF 的定义

传统第一代 HRA 方法中,通常利用多种绩效形成因子(PSF)修正人误事件的基本概率,以得到人误事件的最终定量化结果。绩效形成因子 PSF 是指影响人的绩效行为的任何因素,例如心理压力、时间紧张程度、经验等。PSF 的成功组合可有效降低人的压力,提高人的可靠性,反之则会降低人的可靠性,因此 PSF 的联合效应对人员绩效的影响是人误事件定量化的基础。

传统 HRA 方法中考虑的 PSF 通常局限于对个人绩效的影响,而很少考虑能体现班组特性的 PSF,如班组凝聚力、班组人员构成等。为将班组因素对人员绩效的影响引入传统 HRA 方法中,本文定义一种新的绩效形成因子,即“班组绩效形成因子 TPSF”,它的意义在于表征不同班组环境和氛围对所执行任务的适宜性水平,以体现不同班组环境对班组绩效的影响程度。为定义 TPSF 并评估其对班组绩效的影响程度,需明确可用于表征班组特点的相关属性。

对于班组属性及特点的相关研究已在很多领域中展开,其中上述的 IDAC 模型对影响人

员绩效的各类 PSF 进行了系统的整理,定义了 50 多类 PSF,其中有 6 类是与班组相关的 PSF。IDAC 模型的提出者在定义和归类上述 PSF 的过程中参考了近 30 年来发表的与人因和班组相关的多类文献,其定义的 6 类班组相关 PSF 基本涵盖了班组行为的主要特点,因此,本文暂以此 6 类 PSF 为基础进行研究,在后续工作中将根据需要对班组因素进行更为广泛的调研和细致的划分。这 6 类 PSF 具体如下所述^[4]。

- 1) 班组凝聚力:是班组整体性的表征。班组的团结、和谐、各成员之间和睦相处均属此范畴。
- 2) 班组合作程度:班组作为一个整体执行任务时在时间、空间以及责任、命令、控制分配上的高效性,也指每个成员对班组任务贡献的和谐程度和同步程度。
- 3) 成员交流可达性:班组成员间交流信息的工具、方法和机制的可用性,特别是当班组成员分散在不同的物理方位时。
- 4) 成员交流的质量:接收者收到的信息和发送者发送的信息的一致性。
- 5) 成员的结构组成:班组包含的成员数量及成员类型。

6) 负责人的领导力:指领导者确定班组发展方向,与下属建立和谐关系使他们在工作中能尽职尽责,与他们一起克服困难的能力大小。

上述 6 种班组属性的优劣对班组个体成员的绩效及整个班组的输出绩效均存在一定影响,因此综合这 6 种属性对班组绩效的单独影响后,即可得到 TPSF 对班组绩效影响的总体水平。根据 TPSF 对班组绩效的影响水平将班组的环境和氛围划分为“优、中、差”3 个等级,不同的班组等级对班组绩效的影响水平不同。例如当某班组 TPSF 为“优”时,班组成员的绩效可得到提高,反之,当班组 TPSF 为“差”时,班组成员绩效将会降低。

1.2 TPSF 等级的评价

本文借鉴第 2 代 HRA 方法 CREAM 法^[11]的思想,提出 1 套用于评价 TPSF 等级的方法,此方法具体包括两个步骤。

1) 分别确定 6 种班组属性对班组绩效的影响。针对每个具体属性定义班组在此属性上的表现水平,然后根据班组在各属性上的表现确定每个属性对该班组绩效的期望效应,影响程度分为 3 个层次:改进、不显著或降低。班组属性与班组绩效的对应关系列于表 1。

表 1 班组属性与班组绩效的关系
Table 1 Relation between team property and team performane

班组属性	表现	对绩效的期望效应		
		改进	不显著	降低
班组凝聚力	优秀	√		
	良好		√	
	一般		√	
	差			√
班组合作程度	高效、合理	√		
	满足基本要求		√	
	不满足基本要求			√
成员交流可达性	良好		√	
	不恰当			√
成员交流的质量	高		√	
	低			√
班组成员的结构组成	合理	√		
	满足基本要求		√	
	不满足基本要求			√
班组负责人的领导力	恰当的自信	√		
	一般		√	
	过度自负			√
	过度谦虚			√

2) 根据 6 种班组属性对班组绩效的综合影响来确定 TPSF 等级。根据表 1, 针对某特定班组可得到对班组绩效影响分别为“改进”和“降低”的属性的数量, 即 $\Sigma_{\text{改进}}$ 和 $\Sigma_{\text{降低}}$, 对于影响为“不显著”的属性可忽略, 然后根据 TPSF 等级评价标准(优, $S \geq 2$; 中, $-1 \leq S \leq 1$; 差, $S \leq -2$). 其中, $S = \Sigma_{\text{改进}} - \Sigma_{\text{降低}}$ 来评价 TPSF 的等级。图 1 所示为 TPSF 等级与 $\Sigma_{\text{改进}}$ 和 $\Sigma_{\text{降低}}$ 的关系。

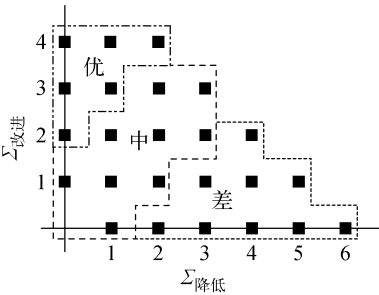


图 1 TPSF 等级评价示意图
Fig. 1 Scheme of grade evaluation for TPSF

2 TPSF 在传统 HRA 方法中的应用

以 THERP 和 HCR 方法为代表的第 1 代 HRA 方法在未来较长时间内仍将是核电厂 PSA 分析的主导方法, 但它们很少或未考虑班组的因素, 本文尝试将 TPSF 引入传统 HRA 方法中。

2.1 传统 HRA 方法对班组效应的考虑

因 THERP 和 HCR 方法是核电厂 PSA 中最为常用的 HRA 方法。THERP 方法^[12]将人误分为诊断失误和执行失误两部分。根据 THERP 使用手册, 操纵员对事故的诊断失误模型中有部分假设是以班组为基础的。THERP 方法中给出的两种诊断模型, 一种是用于初始筛选的诊断模型, 另一种是用于后续分析的名义诊断模型, 均适用于控制室班组。虽然 THERP 在事故的诊断模型方面已考虑了班组的因素, 但对于班组的整体考虑仍存在欠缺, 主要体现在两方面: 1) 诊断模型虽是以班组为基础提出的, 但该班组的构成是具有明确定义的, 若要评价的班组构成与此假定班组不同, 则此诊断模型实际上无法真实反映实际情况; 2) 对于执行失误方面, THERP 只考虑个人

的操作失误, 其他成员对该成员的纠正行为采用相关性公式处理, 这种做法实质上是将两个成员作为两个独立的个人进行分析, 而不是作为 1 个整体进行分析。本文后续内容中将着重在第 2 个方面中引入 TPSF 的概念。对于 HCR 方法, 它仅考虑经验、压力和人机界面 3 个方面的 PSF 对人误的影响, 并未考虑班组的因素。

2.2 TPSF 在 THERP 和 HCR 中的应用

在 THERP 方法中, 核电厂主控室班组中操纵员之间的协作和纠正行为通过相关性公式来处理。简单来说, 在 1 个班组环境优良的班组中, 成员发生错误后被纠正的概率要高; 反之则相反, 因此本文将 TPSF 引入不同成员之间的相关性公式中, 来修正不同班组环境下班组的绩效。HCR 方法^[13]以 Reason 定义的 3 类人员操作(技能型、规则型和知识型)^[14]为基础, 在此方法中各 PSF 对人员行为的影响通过对操纵员中值响应时间 $T_{1/2}$ 名义值进行修正来体现。因此可考虑在 HCR 方法中添加 TPSF 因子对 $T_{1/2}$ 名义值的修正。综上所述, 为适应 THERP 和 HCR 的量化体系, 分别定义两个修正系数 $K_{T-THERP}$ 和 K_{T-HCR} , 这两个系数具体数值的确定方法还需进一步探讨(表 2)。

表 2 TPSF 等级与修正系数		
Table 2 TPSF grade and correction factor		
TPSF 等级	TPSF 修正系数	
	$K_{T-THERP}$	K_{T-HCR}
优	<1	<0
中	1	0
差	>1	>0

1) 对 THERP 相关性公式的修正
针对某班组, 根据其在各属性上的表现确定出 TPSF 等级后, 赋予与之相对应的影响因子 $K_{T-THERP}$, 将该影响因子带入相关性公式。THERP 方法中根据相关程度高低将人员之间的相关性分为完全相关、高相关、中相关、低相关和零相关 5 种情况, 针对每种相关性分别给出了对应的相关性公式。在此仅以两个操纵员之间“中相关”为例进行说明。此时, 第 1 个操纵员操作失误后, 第 2 个操纵员对此失误进行纠正的失误概率可用式(1)计算:

$$B_2 = \frac{1 + 6B_{\text{HEP}}}{7} \times K_{\text{T-THERP}} \tag{1}$$

其中： B_{HEP} 为第2个操纵员失误概率的名义值。

2) 对 HCR 方法的修正

此方法的现有框架中主要考虑了3类PSF对人员绩效的影响,即操作人员经验、心理压力和人机界面。在将TPSF引入后,中值响应时间 $T_{1/2}$ 的修正公式变化为式(2):

$$T_{1/2(\text{修})} = T_{1/2} \times (1 + K_1)(1 + K_2) \cdot (1 + K_3)(1 + K_{\text{T-HCR}}) \tag{2}$$

其中： $T_{1/2}$ 为中值响应时间的名义值; K_1 、 K_2 和 K_3 分别为经验、压力和人机界面的修正系数。

3 班组修正系数确定方法的探讨

上述给出了TPSF等级评价的步骤,并提出了将TPSF引入THERP和HCR方法的框架,然而它们都还处于定性分析的阶段,欲真正将其应用到核电厂PSA分析中,首要解决定量化问题。在利用TPSF修正THERP和HCR方法的定量化过程中需解决如下两个问题。

1) 根据6种班组属性来确定被评价班组的TPSF等级时,如何系统化地评价班组在各属性上的表现。评估班组在各属性上的表现是判定此属性对班组绩效期望效应的基础,这个评估过程必须是系统化的、前后一致的。根据这个要求,可借鉴人因工程领域中常用的问卷调查的方法,这类方法的应用已较为成熟。如果有必要还可对这6类班组属性作进一步地细分。

在采用问卷调查的方法时,首先需针对每个属性分别设计合理的调查问卷,为保证问卷的有效性,问卷的设计须能涵盖每个属性的所有特点,并利用合理的方式将这些特点融合到一起。其次,合理确定班组在各属性上表现的评判准则,即调查问卷的结果满足什么条件时,班组在该属性上的表现达到何种层次。最后,为保证评估结果的正确性与合理性,在调查问卷设计和评判准则确定完成后,需与相关专业人员探讨以确定调查问卷能否真实反映班组的特点,必要时可采用实验的方法对调查问卷的正确性进行验证。

2) 确定出TPSF的等级后,如何确定不同等级所对应的修正系数 $K_{\text{T-THERP}}$ 或 $K_{\text{T-HCR}}$ 的定

量化数值。此问题可尝试借助人因工程领域中人因绩效测量的方法来解决。首先对可能的人员认知行为及操作行为进行分类,如信息感知类、数学推理类、动作执行类等。然后针对每类操作行为设计相应的标准试验,而后采用这些标准试验来测试不同TPSF等级对各类操作行为的影响程度,在收集大量实验数据后可近似给出TPSF等级对应的修正系数。另外,如果由于条件所限不能设计和实施这些实验,可暂时采用专家判断的方法粗略给出参考值,待有条件时再进行细化。

4 讨论

根据上述分析,在目前常用的THERP方法和HCR方法中适当引入班组因素是可行的。本文的工作主要是提出一可将班组因素引入传统HRA方法的思想框架,尚属定性分析的范畴。为使此方法能应用于PSA分析中,仍需对下述方面内容进行更为深入的研究。

1) 对班组的相关属性进行更加全面和深入的分析,即对TPSF的定义和分类进行更为全面和系统的分析,使TPSF对班组绩效影响水平的评估结果更为合理。

2) 利用6种班组属性确定TPSF等级的过程中,仅考虑了对班组绩效影响为“改进”或“降低”的属性的数量,而未考虑不同班组属性对班组绩效的影响权重可能存在不同,这种平衡的处理方法有可能使某些重要因素被忽略。

3) 上述讨论中所涉及的调查问卷和标准实验的设计,是本方法实施的一个难点,问卷和实验设计的合理性与正确性是确保结果合理的基础,因此需进行进一步的研究,使分析结果能够合理体现班组的特点。

5 结论

目前核电厂PSA分析中采用的HRA分析方法仍以传统的THERP和HCR等第1代方法为主,且在较长的一段时间内仍为主流方法,然而由于它们的体系中未对班组因素进行合理的考虑,使它们在模化核电厂主控室团队的班组绩效时存在一定的局限性。本文通过对班组相关因素的调研,提出了班组绩效形成因子TPSF的概念,并给出了TPSF等级的评价

流程。在此基础上本文提出了 1 套将 TPSF 引入到 THERP 方法和 HCR 方法中的实施框架,并对将 TPSF 引入量化分析时需解决的关键问题进行了讨论。在传统的 HRA 方法中引入对班组因素的影响是可行的,并能在一定程度上改进和完善传统 HRA 方法。

参考文献:

- [1] SALAS E, DICKINSON T L, CONVERSE S A, et al. Toward an understanding of team performance and training, in teams: Their training and performance[M]. Norwood, NJ (USA): Ablex Publishing Co., 1992: 3-29.
- [2] SASOUA K, REASON J. Team errors: Definition and taxonomy[J]. Reliability Engineering & System Safety, 1999, 65: 1-9.
- [3] CHANG Y H J, MOSLEH A. Cognitive modeling and dynamic probabilistic simulation of operating crew response to complex system accidents-Part 1: Overview of the IDAC model[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2007, 92(8): 997-1 013.
- [4] 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): 1 014-1 040.
- [5] CHANG Y H J, MOSLEH A. Cognitive modeling and dynamic probabilistic simulation of operating crew response to complex system accidents-Part 3: IDAC operator response model[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2007, 92(8): 1 041-1 060.
- [6] CHANG Y H J, MOSLEH A. Cognitive modeling and dynamic probabilistic simulation of operating crew response to complex system accidents-Part 4: IDAC causal model of operator problem-solving response[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2007, 92(8): 1 061-1 075.
- [7] CHANG Y H J, MOSLEH A. Cognitive modeling and dynamic probabilistic simulation of operating crew response to complex system accidents-Part 5: Dynamic probabilistic simulation of IDAC model[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2007, 92(8): 1 076-1 101.
- [8] US Nuclear Regulatory Commission. NUREG/CR-6710 extending the dynamic flowgraph methodology (DFM) to model human performance and team effects[S]. Washington D. C.: US NRC, 2001.
- [9] YUFEI S, KAZUO F, SHUNSUKE K. Team performance modeling for HRA in dynamic situations[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2002, 78: 111-121.
- [10] KAZUO F, SHUNSUKE K. Group reliability analysis[J]. Reliability Engineering & System Safety, 1992, 35: 159-167.
- [11] HOLLNAGEL E. Cognitive reliability and error analysis method[M]. Oxford, UK: Elsevier Science Ltd., 1998.
- [12] US Nuclear Regulatory Commission. NUREG/CR-1278 handbook of human reliability analysis with emphasis on nuclear power plant applications[S]. Washington D. C.: US NRC, 1983.
- [13] HANNAMAN G W, SPURGIN A J, LUKIC Y D. Human cognitive reliability model for PRA analysis[S]. [S. l.]: [s. n.], 1984.
- [14] RASMUSSEN J. Information processing and human-machine interaction: An approach to cognitive engineering[M]. North-Holland, US: [s. n.], 1986.