

人因视角下的核安全文化评估指标体系与评估方法研究

李鹏程,黄 河^①,蒋建军^②,戴立操^③,张 力^④,姜 瑜^⑤
(南华大学 人因研究所,湖南 衡阳 421001)

[摘 要] 为了建立核安全文化的评估指标体系与评估方法,文章通过实地调查与访谈,基于人因视角从决策层、管理层和执行层建立更为详细和具体的核安全文化评估指标体系。另外,为克服专家判断带来的不足,基于 Z-number 方法建立核安全文化评价技术,考虑了指标评估的复杂性、模糊性和不确定性,使评价结果更为客观真实。建立的核安全文化评估指标体系和评估方法对于加强核电厂人因失误管理、核安全文化建设以及提升核电厂的安全水平提供了理论支持。

[关键词] 人因; 核安全文化; 评估指标体系; 评估方法
[中图分类号]X913.4 [文献标识码] A [文章编号] 1673-0755(2016)01-0001-06

安全是核电企业的生命,构建优秀的核安全文化是核电企业最坚固的“安全屏障”^[1]。1986 年,前苏联切尔诺贝利核事故发生之后,国际原子能机构(IAEA)首次提出了“安全文化”一词。1993 年,核设施安全咨询委员会(ACSNI)将安全文化定义为:“能确定一个组织的健康和安全管理义务以及类型、熟练程度的个体和群体价值、态度、感知、能力以及行为模式的产物。”^[2]随后,安全文化得到各种高风险企业的高度重视,特别是针对安全文化评价指标体系的构建与评价开展了大量的研究^[3-7],但是上述研究没有系统地和具体地从人因视角对核安全评价指标体系进行构建。研究发现,核电站事故中绝大部分(约为 80%,各国情况不尽相同)不是因设备故障,而是人因失误直接或间接导致的^[8]。因此,为了提升核电厂的人因失误管理与安全文化建设水平,本文从人因的视角对核安全文化评价指标体系进行构建并提出合理的评价方法。

一 安全文化评价指标体系

安全文化从理论上都是根据价值、信心、态度、社会风俗、标准/规范、规则、实践、能力和行为来进行描述的。安全文化是整个组织共同的问题,涉及

诸多层次,如决策层、管理层以及操作层。国际原子能机构的国际核安全咨询组对安全文化体制中的三个不同层次(决策、管理层和个体)就他们在安全上所承担的不同责任和义务进行了明确而具体的划分,见图 1 所示^[8]。但上述安全文化指标体系只涉及主要的问题,没有详细阐述安全文化在三个层次不同人员的行为和态度。为此,本文通过实地调研和访谈,对核电厂安全文化的评价指标体系进行扩展。各个指标的建立是在与安全文化有关的文献研究的基础上,制定问卷,通过问卷调查并不断的修订补充,最终与专家讨论共同建立起来的。

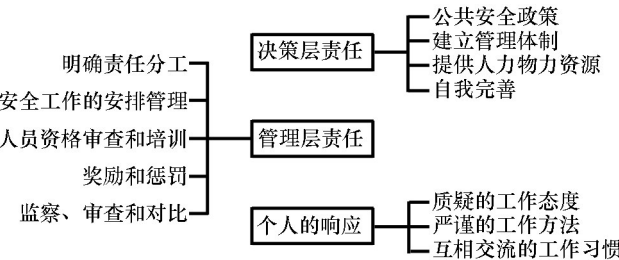


图 1 安全文化对组织和个体的要求

(一) 决策层的安全文化评价指标体系

由于安全文化主要涉及不同层次人员的安全态

[收稿日期] 2015-12-16
[基金项目] 国家自然科学基金项目“大规模数字化控制系统中人的认知行为研究”资助(编号:71071051);国家自然科学基金“数字化工业系统人因可靠性分析方法研究”资助(编号:71371070);国家自然科学基金“核电厂数字化主控室操作员的情景意识可靠性研究”资助(编号:71301069);岭东核电公司科研项目(编号:KR70543);湖南省战略性新兴产业产学研创新平台创新能力建设项目(编号:2012GK4101);湖南管理科学与工程重点学科
[作者简介] 李鹏程(1978-),男,湖南邵阳人,南华大学人因研究所副教授,博士。
①南华大学人因研究所硕士研究生。②南华大学经济管理学院讲师,工学博士。③南华大学人因研究所教授、博士。④湖南工学院教授、博士生导师。⑤南华大学人因研究所讲师。

度与行为,由组织事故因果关系可知,处于上层的决策层在事故因果中显得更为重要,是人因失误的根本原因。为了更好地和具体地诠释决策层在安全文化建设中的具体方面,本文从安全目标、安全价值观、安全态度、安全政策与制度、安全管理、安全形式、安全措施、安全资源、安全响应等方面建立更为全面具体的安全文化评价指标体系,见表 1 所示。

表 1 决策层安全文化指标

一级 指标	二级 指标	三级 指标
决策层 A 1	1. 安全目标 B11	(1)组织存在明确的安全目标 C111 (2)组织存在详细具体的安全目标体系 C112
	2. 安全价值观 B12	(3)在决策程序、规章和会议议程中,安全是第一考虑事项 C121 (4)企业成立了安全部门并明确生产安全主要责任人 C122 (5)重要安全会议有决策层领导参与 C131 (6)安全文化培训有决策层领导参与 C132 (7)积极参与安全实践并指导 C133
	3. 安全态度 B13	(8)制定详细具体的安全方针、政策和制度 C141 (9)建立详细具体的安全管理制度、规范和体系 C142 (10)严格的供应商审查和管理制度 C151 (11)系统上线前有详细有效的风险评估技术 C152
	4. 安全政策与制度 B14	(12)健全的系统设备管理、检查和测试制度和流程 C153 (13)积极主动推进学习型组织建设,并不断完善 C154 (14)给员工提供充分到外企业交流、学习和培训和机会 C155
	5. 安全管理 B15	(15)企业有醒目和安全口号或安全标语 C161 (16)确定安全操作的榜样人物 C162
	6. 安全形式 B16	(17)组织的安全措施、工具和方法充足 C171 (18)组织安全措施、工具和方法的可操作性强 C172
	7. 安全措施 B17	(19)提供足够的人力资源保证安全 C181 (20)提供足够的资金资源保证安全 C182 (21)提供足够的物力资源保证安全 C183
	8. 安全资源 B18	(22)组织应急响应方案非常完善 C191
	9. 安全响应 B19	(23)交流和指令传达的有效性和快速性好 C192 (24)对下级问题提出的响应和能快速解决 C193

(二)管理层的安全文化评价指标体系

管理层是核电厂实际管理工作的制定者、安排者、管理者和参与者,除了管理者需具有对安全生产的高度重视之外,还需对各种安全管理工作形成制度、规范、标准和方法,为营造安全的工作环境提供支持,还需对各种操作者提供各种安全保证措施等。本文从安全态度、安全流程与标准、安全培训与监管、作业设计与安排、安全人-机系统、安全记录与学习、安全措施等 7 个方面建立更为全面和具体的安全文化评价指标体系,见表 2 所示。

表 2 管理层安全文化指标

一级 指标	二级 指标	三级 指标
管理层 A 2	1. 安全态度 B21	(1)制定和修订政策、制度、规范时员工参与程度高 C211 (2)经常提示员工注意工作中的安全问题 C212 (3)对实际工作中员工碰到的问题能及时快速做出响应和解决对策 C213 (4)提倡个人在疑惑时,停下来去寻求建议和收集信息 C214
		(5)制定详尽有效的操作规范和流程,作业标准化 C221 (6)建立合理有效的操作行为规范要求 C222
		(7)规范和流程中有必要的风险提示项 C223 (8)建立开放有效的工前会制度和流程 C224 (9)有效的组内和组间交流和合作的规范或要求 C225
		(10)科学有效的人员培训和再培训 C231 (11)合理有效的工作监督和审查 C232
	2. 安全流程与标准 B22	(12)工作安排科学合理 C241 (13)合理的任务设计,减轻工作负荷 C242 (14)制定明确的人员责任和分工 C243 (15)合理有效的授权和权限分配 C244 (16)严格的作业审批 C245
		(17)提供舒适宜人的工作环境 C251 (18)严格细致的人员资格审查 C252 (19)提供可靠的、便于操作和发现故障以及防失误的系统和人机界面,如明确提示当前所操作完的任务 C253 (20)系统建设中非常重视故障发觉、原因自动辨识和作业自动化处理的建设 C254
	3. 安全培训与监管 B23	
	4. 作业设计与安排 B24	
	5. 安全人-机系统 B25	

续表

一级 指标	二级 指标	三级 指标
管理层 A 2	6. 安全记录与学习 B26	(21) 详细的文档记录, 便于追溯分析 C261 (22) 建立有效规范的事件分析和经验反馈体系 C262
	7. 安全措施 B27	(23) 严格的制度、流程审核和执行实施 C271 (24) 提供有效的防人因失误方法、工具和手段 C272 (25) 非常鼓励同事之间分享安全操作经验, 信息共享程度高 C273 (26) 合理有效的奖励和惩罚 C274

(三) 执行层的安全文化评价指标体系

执行层是具体工作的实施者, 为了保证操作安全, 操作人员在各种规范、流程、制度、管理工作的指导下, 自身需具有一些安全意识、安全技能、安全行为, 才能更好地保证操作安全。因此, 操作层安全文化评价指标体系主要从上述三个方面来进行更为全面具体的分类, 见表 3 所示。

表 3 操作层安全文化指标

一级 指标	二级 指标	三级 指标
操作层 A 3	1. 安全意识 B31	(1) 具有强烈的风险意识 C311
		(2) 时常具有质疑的工作态度 C312
	2. 安全技能 B32	(3) 积极主动的知识和安全技能学习 C321
		(4) 丰富有效的安全实践 C322
		(5) 具有从系统的角度来思考和解决问题的思想 C323
		(6) 充分理解自己的角色和责任 C324
		(7) 严谨审慎的工作方法 C331
		(8) 操作员严格遵守操作程序 C332
	3. 安全行为 B33	(9) 细致的自我检查 C333
		(10) 发现问题, 积极主动及时反馈和汇报 C334
		(11) 认真的工前会议 C335
		(12) 互相交流的工作习惯 C336

二 安全文化评价方法

由于安全文化不仅涉及到组织的状态, 而且涉及个体的态度等难以测量的复杂因素。因此, 对核安全文化的评估是一个复杂的问题。K. Øien^[9]对因素建立 5 个等级标准(极差、差、中、高、极高)来测定风险指标因子的重要程度。由于指标量化过程的复杂性和不确定, 以及专家经验、知识和水平的限制, 使得专家无法准确评估指标因素的确切值, 因此, 导致专家可能用模糊的描述性语言来进行表达式, 如“最多不超过 9”、“最少不低于 7”、“最有可能为 8”, 笔者将该描述结果用三角模糊数(7, 8, 9)来表示。在实际分析研究中, 决策者认为, 模糊判断比确切值判断更可信, 更符合人们的真实思维。为此, 本文基于 Z-number 方法建立核安全文化评估的具体步骤如下:

(一) 建立专家组

不同的专家由于实践经验和知识水平不同, 对风险指标的评价结果也不同。因此需要对不同专家分配不同的权重系数, 组建专家组来消除这方面的不足。假设有 n 个专家, 且第 x 个专家分配的权重系数为 $f_x, f_x \in [0, 1], \sum_{x=1}^n f_x = 1$ 。

(二) 确定 Z-number 方法下的指标模糊评价等级

由于人的模糊分析存在较大的主观性, 为了更好地消除这方面的影响, Zadeh^[10]提出了分析模糊信息的 Z-number 方法, 该方法是建立在一组有序模糊实数集 $Z = (\tilde{A}, \tilde{B})$ 的基础上, 其中第一个元素是指标因子的量化模糊值, 第二个元素是对第一个元素重要程度的可靠性分析。譬如有专家对指标打分为(4, 5, 6), 并且他认为自己评估的可信度很高。结合 Z-number, 可以将其表示成((4, 5, 6), 很高)。为更好区分可信度以及组织最终安全文化的状态等级, 笔者通过三角隶属度函数将其分为 10 级, 隶属度函数见图 2 所示。

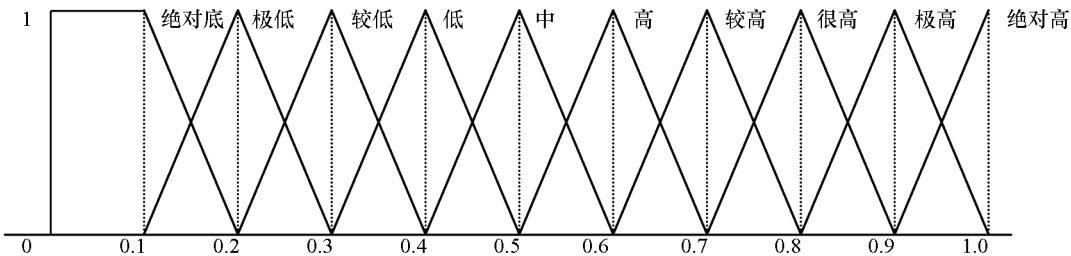


图 2 评估指标的等级划分

(三)计算各指标因子的综合模糊值

根据 CH. -CH. CHOU^[11] 的模糊逻辑运算规则, Z-number 方法的运算过程如公式 1 所示,从而计算出各个指标因子 $(\tilde{A}, \tilde{B}) = ((a_1, a_2, a_3), (b_1, b_2, b_3))$ 的模糊值 $Z_i (i = 1, 2, \cdots, m)$, 式中 a_2, b_2 分别表示可能性最大的值, a_1, b_1 则表示最少不低于的值, a_3, b_3 则表示最大不超过的值, 其中 $a_1, a_2, a_3, b_1, b_2, b_3$ 取值范围在 0-1。

$$Z_i = P(\tilde{A} \otimes \tilde{B}) = P(\tilde{A}) \otimes P(\tilde{B}) = P(\tilde{A}) \times P(\tilde{B})$$
$$= \frac{1}{6}(a_1 + 4 \times a_2 + a_3) \times \frac{1}{6}(b_1 + 4 \times b_2 + b_3)$$
$$(1)$$

依据专家权重来确定指标因子的最后评价结果,有公式 2:

$$P_{Z_i} = P_{Z_{i1}}^1 \times f_1 + P_{Z_{i1}}^2 \times f_2 + P_{Z_{i1}}^3 \times f_3 + \cdots + P_{Z_{in}}^i \times f_n$$
$$(2)$$

式中, P_{Z_i} 是指第 i 个指标因子的最后综合模糊得分。

(四)获取考虑指标权重的综合评估值

由于各个指标的重要性不一样,因此,还需考虑各具体指标的权重,根据具体指标的权重值 $W_i (W_i$ 可用层次分析法等方法获取) 和模糊综合值 P_{Z_i} , 可计算出考虑指标权重的安全文化评价指标的综合评估值 R , 见公式 3 所示:

$$R = \sum W_i P_{Z_i} \quad (3)$$

表 5 各二级指标权重

	B11	B12	B13	B14	B145	B16	B17	B18	B19
A1	0.0588	0.0588	0.1176	0.1176	0.1764	0.1176	0.1176	0.1176	0.1180
A2	B21	B22	B23	B24	B25	B26	B27		
	0.0714	0.2857	0.2143	0.1429	0.1429	0.0714	0.0714		
A3	B31	B32	B33						
	0.25	0.25	0.50						

表 6 各专家权重

专家	专家 1	专家 2	专家 3	专家 4	专家 5	专家 6
权重	0.1	0.1	0.15	0.15	0.25	0.25

(二)调查数据分析

通过发放问卷,针对某核电厂的安全文化现状进行调查,获得调查数据,对数据进行处理,比如针对安全目标(B11),分别对子项“组织存在明确的安全目标(C111)”、“组织存在详细具体的安全目标体系(C112)”进行评估,评估结果见表 7 所示。将置信度或评估的可靠性转化为三角模糊数,然后采用

因此,通过上述方法的应用评价,可识别核电站安全文化各指标体系的具体分值,进而识别安全文化方面可能存在的弱点,针对分值较低的指标体系,需提出具体的对策进行改进,提升安全文化水平和核电站安全水平。

三 应用实例分析

为了说明该方法的具体应用,由于三级指标太多太详细,故经专家讨论,假设三级指标的重要性一致,对二级指标与一级指标进行权重分析。

(一)确定专家与各指标的权重

针对安全文化评价的一级指标,采用层次分析法对决策层、管理层与操作层进行两两比较,得判断矩阵见表 4 所示。最大特征值 $\lambda_{\max} = 3.0184$, $CI = 0.092$, $CR = 0.0159 < 0.1$, 由此可知该矩阵通过一致性检验,算得权重分别为 0.21、0.24、0.55。同理求解各二级指标的权重系数,具体结果见表 5 所示,根据专家的知识 and 经验评估(两位执照操纵员、两位教员、两位运行管理人员)的权重见表 6 所示。

表 4 安全文化评估一级指标的两两判断矩阵及权重

安全文化	A1	A2	A3	Wi
A1	1	1/2	1/3	0.21
A2	2	1	1	0.24
A3	3	1	1	0.55

公式(1)求得具体的 Z 值:

$$Z_{111} = P(\tilde{A} \otimes \tilde{B}) = P(\tilde{A}) \otimes P(\tilde{B}) = P(\tilde{A}) \times P(\tilde{B})$$
$$= \frac{1}{6}(a_1 + 4 \times a_2 + a_3) \times \frac{1}{6}(b_1 + 4 \times b_2 + b_3)$$
$$= \frac{1}{6}(0.8 + 4 \times 0.9 + 1.0) \times \frac{1}{6}(0.8 + 4 \times 0.9 + 1.0)$$
$$= 0.9 \times 0.9 = 0.81$$

同理可算得其他专家的 Z 值,从专家 2 到专家

6 分别为 0.72、0.64、0.64、0.63、0.63。因此, 根据公式 2 可得:

$$\begin{aligned} P_{Z_{111}} &= Z_{111}^1 \times f_1 + Z_{111}^2 \times f_2 + Z_{111}^3 \times f_3 + \cdots + Z_{111}^6 \times f_6 \\ &= 0.1 \times 0.81 + 0.1 \times 0.72 + 0.15 \times 0.64 + 0.15 \\ &\quad \times 0.64 + 0.25 \times 0.63 + 0.25 \times 0.63 \\ &= 0.66 \end{aligned}$$

同理可算得 $P_{Z_{112}} = 0.6215$, 由于 C111 与 C112 的权重假设一样, 则 B11 的模糊值为: $P_{Z_{11}} = 0.5 \times 0.66 + 0.5 \times 0.6215 = 0.64075 \approx 0.64$ 。同理可算得其他评估指标的模糊值见表 8 所示。结合各指标的权重, 得 A1、A2、A3 的模糊综合值分别为: 0.708、0.786、0.805。因此, 根据公式(3)可得最终某核电厂安全文化综合评估值为:

$$\begin{aligned} R &= 0.708 \times 0.21 + 0.786 \times 0.24 + 0.805 \times 0.55 \\ &= 0.78 \end{aligned}$$

表 7 C111 与 C112 的评估结果

	专家 1(0.1)	专家 2(0.1)	专家 3(0.15)	专家 4(0.15)	专家 5(0.25)	专家 6(0.25)	模糊综合得分
C111	(0.8,0.9,1.0), 极高	(0.7,0.8,0.9) 极高	(0.7,0.8,0.9) 很高	(0.7,0.8,0.9) 很高	(0.6,0.7,0.8), 极高	(0.6,0.7,0.8), 极高	0.66
C112	(0.7,0.8,0.9), 很高	(0.7,0.8,0.9) 很高	(0.7,0.8,0.9) 极高	(0.7,0.8,0.9) 极高	(0.5,0.6,0.7), 很高	(0.6,0.7,0.8), 极高	0.6215

表 8 其他评估指标的模糊综合值

指标	模糊值	子项指标与模糊值								
A1	0.708	B11	B12	B13	B14	B15	B16	B17	B18	B19
		0.64	0.72	0.75	0.86	0.88	0.67	0.73	0.75	0.70
A2	0.786	B21	B22	B23	B24	B25	B26	B27		
		0.72	0.78	0.86	0.71	0.76	0.83	0.82		
A3	0.805	B31	B32	B33						
		0.77	0.85	0.80						

四 结论与讨论

核安全文化建设对提升核电站安全水平至关重要, 随着硬件水平的提升, 当前存在的核安全问题主要是人因问题, 因此, 本文从人因的视角来建立核安全文化评价指标体系和建立评估方法, 得到如下结论:

(一) 从人因的视角来建立核安全文化评价指标体系, 对核电厂人因失误管理及核安全水平的提升, 有着重要的指导和促进作用。

(二) 分别从决策层、管理层、执行层建立更为详细具体的核安全文化评价指标体系, 丰富了核安全文化的内容与理论, 并对核电厂各级人员在核安全文化建设方面明确各级人员的责任和分工, 具有很强的指导性作用。

由最大隶属度原则可知, 该核电厂的安全文化等级水平属于“很高”。

由于核电厂属于高风险系统, 决策层、管理层和执行层人员, 都非常重视核电厂的人因与安全管理。因此, 相对来说, 核电厂的核安全文化的等级水平较高。尽管该核电厂在决策层的“安全政策与制度”、“安全管理”方面、管理层的“安全培训与监管”、“安全记录与学习”、“安全措施”方面以及在执行层的“安全技能”方面做得比较优秀, 但是, 也在诸多方面还需加强核安全文化建设, 如决策层的“安全目标(0.64)”、“安全形式(0.67)”等、管理层的“安全态度(0.72)”、“作业设计与安排(0.71)”等, 执行层的“安全意识(0.77)”等得分较低, 还需加强建设, 以期建立更高水平的核安全文化, 保证核电运行安全。

(三) 建立基于 Z-number 方法的核安全文化评价方法, 可克服专家判断带来的不足, 为更为客观地评价核安全文化提供理论指导。

总之, 核安全文化评价指标体系的构建是一项复杂的工作, 尽管本文提出的指标体系较为全面和合理, 但是还需在以后的工作实践中不断地提炼和完善。

[参考文献]

[1] 钟英强. 核电安全文化的三重构建之策[J]. 中国核工业, 2012(9):56-57.

[2] Advisory Committee on the Safety of Nuclear Installations (ACSNI). Study Group on Human Factors, Organising for Safety: Third Report [R]. London:1993.

[3] Lee T. Assessment of safety culture at a nuclear repro-

- cessing plant[J]. *Work & Stress*, 1998, 12(3): 217-237.
- [4] 王亦虹, 夏立明. 基于人因失误理论构建企业安全文化评价体系[J]. *武汉理工大学学报*, 2008, 30(12): 177-180.
- [5] 焦晓佑, 宋守信, 吴俊勇. 基于 BP 神经网络的核安全文化星级评价体系[J]. *核动力工程*, 2007, 28(1): 105-109.
- [6] 李京喜, 任 欧. 从组织和个体文化角度谈谈核安全文化[J]. *核安全*, 2005(3): 43-46.
- [7] 张 力, 邓志良, 王以群, 黄卫刚. 安全评价中的人因问题: 安全文化的评价[J]. *中南工学院学报*, 1996, 10(1): 1-5.
- [8] International Nuclear Safety Advisory Group. *Safety Culture* [R]. Vienna: IAEA Safety Series 75-INSAG-4, 1991.
- [9] K Øien. A framework for the establishment of organizational risk indicators[J]. *Reliability Engineering and System Safety*, 2001(74): 147-167.
- [10] L A Zadeh. A Note on Z-numbers[J]. *Information Sciences*, 2011(181): 2 923-2 932.
- [11] CH-CHCHOU. The Canonical Representation of Multiplication Operation on Triangular Fuzzy Numbers[J]. *Computers and Mathematics with Application*, 2003(45): 1601-1610.

Study on Assessment Index System and Assessment Method of Nuclear Safety Culture on the Perspective of Human Factors

LI Peng-cheng, HUANG He, JIANG Jian-jun, DAI Li-cai, ZHANG Li, JIANG Yu
(*University of South China, Hengyang 421001, China*)

Abstract: In order to establish evaluation index system and evaluation method of nuclear safety culture, a more detailed and specific assessment index system of nuclear safety culture is established from decision-making, management and execution level by field investigation and interviews. Furthermore, in order to overcome the shortcomings of expert judgment, the nuclear safety culture assessment technique is established based on Z-number method, which considers the complexity, fuzziness and uncertainty of indicator assessment. It makes the evaluation results more objective and real. The established assessment index system and evaluation method of nuclear safety culture provide theoretical support for strengthening human error management, the construction of nuclear safety culture and promoting the safety level of nuclear power plants.

Key words: Human factors; nuclear safety culture; assessment index system; assessment method