

中文引用格式:李鹏程,许倩,王烨. 核电厂运行阶段安全文化评价指标体系研究[J]. 中国安全科学学报,2024,34(2):60-66.

英文引用格式:LI Pengcheng, XU Qian, WANG Ye. Study on evaluation index system of safety culture in operation phase of nuclear power plant [J]. China Safety Science Journal, 2024,34(2):60-66.

核电厂运行阶段安全文化评价指标体系研究*

李鹏程¹教授,许倩²,王烨²

(1 南华大学 经济管理与法学学院,湖南 衡阳 421001;

2 南华大学 资源环境与安全工程学院,湖南 衡阳 421001)

中图分类号:X945 文献标志码:A DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2024.02.2301

基金项目:国家自然科学基金资助(51674145);湖南省自然科学基金资助(2017JJ2222);湖南省科学技术厅科普专题项目(2020ZK4031);湖南省哲学社会科学一般项目(21YBA104)。

【摘要】 为培育良好的核电厂运行阶段安全文化,通过分析核电厂运行特征,总结已有的核安全文化评价指标体系和评价模型,构建核电厂运行阶段安全文化评价指标体系,划分为价值观、行为、系统和环境4个层次,并细分出13个二级指标和61个三级指标;在此基础上,考虑到指标之间的非独立性和可能存在的相互影响关系,提出一种基于决策试验和评价实验法(DEMATEL)以及网络层次分析法(ANP)相结合的综合方法,确定指标体系的权重。结果表明:该方法结合调研数据,可得到核安全文化评价指标权重,并甄别出改善核安全文化的关键在于决策层的安全意识、以身作则等指标,为核电厂运行阶段安全文化的培育提供指导。

【关键词】 核电厂; 运行阶段; 核安全文化; 决策试验和评价实验法(DEMATEL); 网络层次分析法(ANP); 评价指标

Study on evaluation index system of safety culture in operation phase of nuclear power plant

LI Pengcheng¹, XU Qian², WANG Ye²

(1 School of Economics, Management and Law, University of South China, Hengyang Hunan 421001, China; 2 School of Resource Environment and Safety Engineering, University of South China, Hengyang Hunan 421001, China)

Abstract: In order to cultivate a good safety culture in the operation stage of the nuclear power plant, the evaluation index system of safety culture in the operation stage of the nuclear power plant was constructed by analyzing the operation characteristics of the nuclear power plant and summarizing the existing evaluation index system and evaluation model, which was divided into four levels: values, behavior, system and environment, and subdivided into 13 secondary indicators and 61 tertiary indicators. On this basis, considering the non-independence and possible mutual influence between indicators, a comprehensive method based on DEMATEL and ANP was proposed to determine the weight of the index system. The results show that this method can get the evaluation index weight of nuclear safety culture by combining the survey data, and identify that the key to improving nuclear safety culture lies in the safety

awareness of decision-makers and setting an example, which provides guidance for the cultivation of safety culture in the operation stage of nuclear power plants.

Keywords: nuclear power plant; operational phase; nuclear safety culture; decision-making trial and evaluation laboratory (DEMATEL); analytic network process (ANP); evaluation indicators

0 引言

核能是重要的清洁能源,在双碳目标背景下,发展核能符合国家重大战略需求。在重大核事故原因分析中,核安全文化是引起事故的重要原因之一。核电厂运行阶段的安全是整个核电厂生命周期核安全的重中之重,核电运行包括正常运行和事故处理运行,事故情境下,其安全主要受核电主控室操作班组的控制,是一个复杂的人-系统-环境-组织交互系统,受诸多因素影响。加强核安全文化建设,有利于识别影响核电运行安全文化的重要指标,建立合理的指标体系,对于提高核电厂的安全运行水平至关重要。

从1986年国际原子能机构(International Atomic Energy Agency, IAEA)首次提出安全文化一词^[1]开始,国内外相关部门以及学者就不断研究核安全文化评价指标体系,典型代表有IAEA^[2]、世界核电运营者协会^[3]、美国核管会^[4],这些机构基于所在地的核电厂特征构建了其核安全文化评价指标体系,HAN等^[5]选择了适合核电站运行组评估的36个核电站基本工作单元作为评价指标;CLÁUDIO等^[6]建立了一种能够预测组织安全绩效变化的安全绩效指标体系;GERARD等^[7]基于工艺安全构建了涵盖安全文化和安全绩效2方面的评价指标体系。我国生态环境部核与辐射安全中心制定了中国核设施的核安全文化检查指标^[8]。李鹏程^[9]基于人因理论建立核安全文化评估指标体系;王亦虹^[10]以企业决策层、管理层和执行层为主体,结合外部环境和内部环境因素建立评价指标体系;雷林等^[11]从制度标准化、行为融合和文化同化3个方面,建立具体的评价指标体系。

上述文献均从不同视角研究了安全文化指标体系,但并没有研究我国核电厂全生命周期的核安全文化评价指标体系,确定指标权重的方法没有考虑到指标间的相互影响,无法识别改善核安全文化的关键指标。因此,笔者拟通过分析核电厂运行阶段特征,在现有研究基础上,构建符合核电厂运行阶段安全文化评价的指标体系,运用决策试验和评价实

验法(Decision-Making Trial and Evaluation Laboratory, DEMATEL)-网络层次分析法(Analytic Network Process, ANP)确定指标权重,识别关键指标,以期为未来开展核电站运行阶段的核安全文化评估奠定理论基础。

1 评价指标体系构建

1.1 一级指标的确定

2016年,IAEA的安全报告中提出了安全文化冰山模型(图1)^[12],指出安全文化包括可见的人致表象以及不可见的价值观和基本假设,人致表象主要包含可见的系统和行为,表现为绩效指标和安全结果,价值观主要涉及个人的行为准则、态度与信念。基本假设主要指对现实世界的共同理解,是做出行为响应的基础,如做事的方式、什么是安全的,什么是不安全的、问题解决的方式、看待错误的方式、对自身角色的感知等。冰山模型较好地阐释了安全文化,但安全文化模型中的基本假设难以理解和分解,且可融入长期形成的价值观中,因而不再单独列出。另外,核电厂运行安全涉及人、系统、环境、组织安全。因此,针对核电厂运行阶段的安全文化特点,选取系统、环境、行为和价值观作为一级指标。

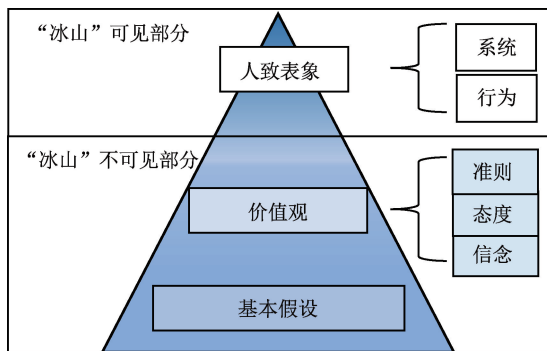


图1 安全文化冰山模型

Fig. 1 Safety culture iceberg model

1.2 具体下级指标的确定

根据文献[12]中的安全文化冰山模型以及文献[13]中的安全文化通用评估模型,结合文献[14-17],以同类合并、抽象地进行具体分解、减少交叉

重复以及尽可能可测量的原则确定下级指标,建立核电厂运行阶段安全文化评价指标体系。一级指标A包括价值观A₁、行为A₂、系统A₃、环境A₄共4个维度;二级指标B由决策层价值观B₁、管理层价值观B₂、执行层价值观B₃、决策层安全行为B₄、管理

层安全行为B₅、执行层安全行为B₆、设备体系B₇、责任体系B₈、培训体系B₉、管理体系B₁₀、审查制度B₁₁、工作环境B₁₂、社会环境B₁₃共13个二级指标组成;三级指标C细分为61个具体指标,是反映核电厂运行安全文化发展水平的主要因素,见表1。

表1 核电厂运行安全文化指标体系

Tab. 1 Index system of Safety culture of nuclear power plant operation

一级指标	二级指标	三级指标	指标解释	指标权重
价值观 A ₁	决策层价值观 B ₁	安全责任 C ₁	决策层明确并强调核安全的重要性, 尽职决策 ^[15]	0.088 235
		安全意识 C ₂	决策层具有核安全意识, 在其他利益破坏核安全时表现出采取行动的意愿 ^[16]	0.077 320
		安全承诺 C ₃	决策层为确保核安全表现出了强烈的个人承诺 ^[13]	0.041 422
		安全思想 C ₄	决策层具有安全第一, 质量第一的思想并重视核安全 ^[17]	0.047 888
	管理层价值观 B ₂	安全管理意识 C ₅	管理层具有核安全意识, 并鼓励核电厂人员形成强烈的核安全意识 ^[18]	0.047 297
		安全承诺 C ₆	管理层对安全的承诺是清晰明确的 ^[19]	0.031 102
		安全理解 C ₇	管理层理解不同组织间在技术能力、经验、价值体系、多元文化观点、安全态度方面存在差异 ^[16]	0.030 911
		安全思想 C ₈	管理层具有核安全第一的思想, 并且在安全管理方面思路清晰 ^[18]	0.028 913
	执行层价值观 B ₃	安全责任 C ₉	管理层在整个组织内传达安全政策, 并确保所有人员了解安全政策及其确保安全的责任 ^[18]	0.024 354
		核风险认知 C ₁₀	员工理解为什么非核环境之下可接受的做法可能不符合核标准 ^[16]	0.018 396
		安全意识 C ₁₁	员工坚信核电厂的安全与自身行为有关, 对核安全始终有主人翁意识 ^[17]	0.018 515
		安全思想 C ₁₂	员工时时注重安全, 确保核电厂在所有运行状态和事故工况下将安全作为压倒一切的首要任务 ^[18]	0.016 658
		质疑态度 C ₁₃	员工对于不确定情况敢于提出质疑和反对意见 ^[20]	0.012 228
	行为 A ₂	决策层安全行为 B ₄	安全责任 C ₁₄	员工都有安全责任为其个人安全和同事的安全做出贡献 ^[13]
以身作则 C ₁₅			决策层以身作则践行核安全, 做核安全的榜样 ^[16]	0.048 676
定期视察 C ₁₆			决策层定期下现场观察指导强化核安全行为 ^[20]	0.025 681
资源投入 C ₁₇			决策层提供充足的人、财、物等资源保证核安全 ^[16]	0.033 988
提供专家支持 C ₁₈			决策层提供安全文化、人力绩效和组织专家以及核辐射防护专家为确保核安全提供技术方法支持 ^[16]	0.019 699
管理层安全行为 B ₅		谨慎决策 C ₁₉	决策层在决策时考虑一般员工的想法, 进行管理决策时谨慎稳重 ^[15]	0.017 108
		传递经验 C ₂₀	管理层与领导、员工相互交流安全经验与信息 ^[21]	0.026 181
		强调安全 C ₂₁	管理层通过各种渠道(安全活动、安全例会)以身作则落实安全管理, 向员工传达安全政策 ^[17]	0.017 863
		重视意见 C ₂₂	管理层尊重不同人员的意见并给予回应 ^[20]	0.015 264
		定期培训 C ₂₃	管理层必须定期接受培训, 持续学习安全文化相关知识和技能, 提高核安全管理水平 ^[16]	0.016 661
执行层安全行为 B ₆	观察指导 C ₂₄	管理层在涉及与核安全相关的重要工作的情况下, 更加直接地参与工作监督 ^[16]	0.009 599	
	安全操作 C ₂₅	员工遇到不确定的事关安全的情况时停止工作, 并对当前风险进行评估, 保证操作安全 ^[20]	0.010 126	
	遵守规章 C ₂₆	员工严格遵守各项安全规章制度的规定, 并及时宣传教育 ^[18]	0.008 757	
	持续学习 C ₂₇	员工积极开展自主学习、互助学习 ^[20]	0.005 815	
	交流沟通 C ₂₈	人员会针对核安全问题进行交流沟通 ^[15]	0.005 451	
	及时报告 C ₂₉	员工会对事关核安全的合理建议和大隐患及时报告 ^[15]	0.005 103	
	经验反馈 C ₃₀	员工将以往安全经验记录成册进行共享反馈, 避免事件重复发生 ^[15]	0.003 763	

续表 1

一级指标	二级指标	三级指标	指标解释	指标权重	
系统 A ₃	设备系统 B ₇	人机界面 C ₃₁	设备设施的设计工艺及管理安全可靠,符合良好人体工学 ^[13]	0.025 288	
		软硬件可靠性 C ₃₂	将设备运行和维持在设计裕量内,必要时可通过系统和严谨的流程进行修改,具有容错性 ^[4]	0.025 288	
	责任体系 B ₈	职责说明 C ₃₃	对职责所需的特征、要执行的任务及所需的属性等进行明确规定和说明 ^[13]	0.017 093	
		资格要求 C ₃₄	明确所需员工的资格要求和能力类型 ^[16]	0.014 956	
		定期审核 C ₃₅	定期对人员的能力进行评估确保符合岗位职责要求 ^[16]	0.010 683	
	培训体系 B ₉	安全培训 C ₃₆	培训不仅包括相关知识技术教育,还有针对核安全的教育 ^[15]	0.006 893	
		案例警示 C ₃₇	培训中运用历史经验教训作为警示教育 ^[17]	0.006 059	
		考核制度 C ₃₈	对培训人员的培训成果进行考核检验 ^[22]	0.005 041	
		知识竞赛 C ₃₉	培训中加入了核安全知识竞赛等趣味活动调动积极性 ^[23]	0.002 019	
		学习平台 C ₄₀	创建线上线下学习平台便于学习 ^[24]	0.002 316	
	管理体系 B ₁₀	安全例会 C ₄₁	定期举办安全例会改善安全措施 ^[17]	0.004 591	
		奖惩制度 C ₄₂	建立奖惩制度鼓励员工对核安全的关注或对不符合规定的员工按照程序处理 ^[17]	0.004 550	
		操作规程 C ₄₃	存在安全运行文件对工作操作流程进行标准化 ^[17]	0.005 193	
		职业规划 C ₄₄	针对不同人员的核安全责任、权限及支持核安全的能力等情况进行发展规划 ^[24]	0.002 911	
		晋升制度 C ₄₅	管理制度规定核安全绩效是晋升渠道 ^[15]	0.002 917	
		报告制度 C ₄₆	制定安全反馈报告制度鼓励公开报告和获取安全相关信息 ^[15]	0.002 294	
		记录系统 C ₄₇	提供文件化的知识库(即具有标准、教育材料、程序、历史文件和操作经验等最先进信息的数据库)以共享信息和支持持续学习 ^[16]	0.001 978	
		事件速递 C ₄₈	存在制度要求人员对事件进行调查和初步分析后在短时间内提供给现场员工借鉴 ^[22]	0.001 665	
	审查制度 B ₁₁	独立审查 C ₄₉	对于所有与安全有关的建议和修改,独立的核安全评估应由执行者以外的人进行 ^[13]	0.003 681	
		监督计划 C ₅₀	存在评估和监督体制完善且能有效执行的监督计划 ^[15]	0.003 196	
		事故调查 C ₅₁	深入分析事故报告并提出纠正和预防措施 ^[13]	0.002 657	
		自我评估 C ₅₂	定期开展自我评估确定安全实绩退步的原因,以使管理层能够发现并解决缺陷和问题 ^[18]	0.001 644	
	环境 A ₄	工作环境 B ₁₂	防护设备 C ₅₄	核电厂内配备安全防护用具 ^[20]	0.017 180
			舒适环境 C ₅₅	核电厂内工作环境干净整洁,符合核安全规范 ^[17]	0.010 555
			信任氛围 C ₅₆	核电厂是一个在情感上使人感到安全信任并且信息丰富的环境 ^[16]	0.012 841
			质疑氛围 C ₅₇	核电厂内允许反对的观点存在,不管发言者在组织中的立场如何 ^[16]	0.010 246
			安全标识 C ₅₈	核电厂内随处可见国际通用的安全标识 ^[16]	0.007 325
		社会环境 B ₁₃	法规健全 C ₅₉	国家法规政策框架中明确规定了有关核安全的相关法律法规 ^[16]	0.010 394
			公众认知 C ₆₀	核电厂向外部团体传达有关安全绩效的信息,帮助培养大众对核安全的信心 ^[13]	0.008 890
			行业会议 C ₆₁	核电厂相关人员定期参与核安全有关的行业及国际会议,以便学习安全经验 ^[13]	0.004 377

2 基于 DEMATEL-ANP 法求权重

不同指标对核安全文化的影响不同,具有不同的重要性。尽管文中尽可能避免指标的交叉重复,

但仍难以避免指标之间存在或多或少的相互影响,DEMATEL 能评估指标之间的相互影响关系,ANP 考虑了各因素之间的相互影响,将 DEMATEL 和 ANP 方法结合,既可识别出指标间的影响关系,又

可考虑指标相互影响关系而获得更加客观的指标权重。因此,采用 DEMATEL-ANP 法计算指标权重。

2.1 基于 DEMATEL 确定指标间的相互影响关系

DEMATEL 法通过定量计算各指标间的影响关系以及影响程度,识别出关键因素,为 ANP 的网络结构模型建立基础逻辑关系^[25]。为获得核电厂运行安全文化评价指标间的相互影响关系,设计核安全文化指标间相互影响程度的调查问卷,包括一、二和三级指标相互影响关系和影响程度的调查内容,邀请有经验的核电厂熟悉核安全文化的相关专家 33 名参与调查,共回收有效问卷 33 份。回收专家评估问卷后,采用自动化统计产品和服务软件 (Statistical Product and Service Software Automatically, SPSSAU) 进行 DEMATEL 分析,得到直接影响矩阵 W 、综合影响矩阵 T 以及各指标的影响度、被影响度、中心度和原因度。一级指标直接影响矩阵和关系图分别见表 2 和图 2。通过计算综合影响矩阵 T ,得到一级指标间的综合影响关系,见表 3。利用综合影响矩阵 T 计算其中中心度 M 值(影响度 D 值+被影响度 C 值)和原因度 R 值($D-C$),并以 M 为横轴, R 为纵轴,绘制因果图,如图 3 所示。图 3 中,第一、二象限中元素为原因因素,第三、四象限中元素为结果因素。 D 、 C 、 R 、 M 及其权重见表 4。

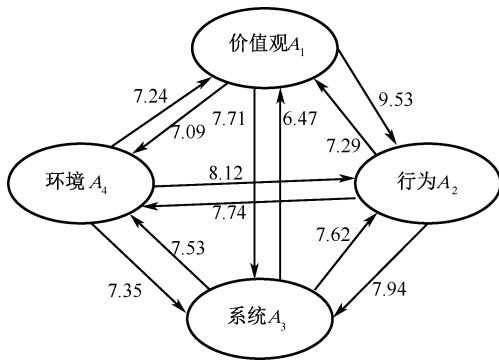


图 2 一级指标影响关系
Fig. 2 Tier 1 indicator impact graph

表 2 一级指标直接影响矩阵

Tab. 2 Tier 1 indicators directly affect the matrix

一级指标	价值观 A_1	行为 A_2	系统 A_3	环境 A_4
A_1	0	9.53	7.71	7.09
A_2	7.29	0	7.94	7.74
A_3	6.47	7.62	0	7.53
A_4	7.24	8.12	7.35	0

的初始直接关系矩阵和因果关系图不在此赘述。接下来,利用 Super Decisions 软件构建核电厂运行阶段安全文化指标网络层次结构模型,如图 4 所示。

表 3 一级指标综合影响矩阵

Tab. 3 Integrated impact matrix for primary indicators

一级指标	价值观 A_1	行为 A_2	系统 A_3	环境 A_4
A_1	3.716	4.549	4.226	4.129
A_2	3.782	4.077	4.055	3.972
A_3	3.600	4.129	3.636	3.797
A_4	3.753	4.296	4.012	3.702

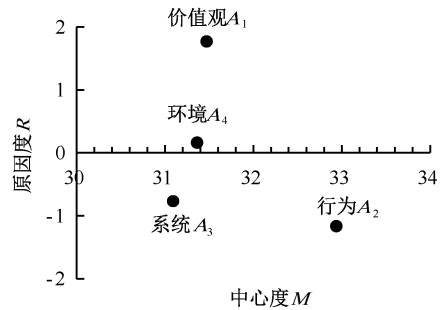


图 3 一级指标因果关系
Fig. 3 Causal diagram of first-level indicators

表 4 DEMATEL 计算指标值

Tab. 4 DEMATEL calculates indicator values

一级指标	D	C	M	R	指标属性
A_1	16.621	14.850	31.471	1.770	原因指标
A_2	15.887	17.051	32.938	-1.165	结果指标
A_3	15.162	15.929	31.091	-0.767	结果指标
A_4	15.762	15.601	31.363	0.161	原因指标

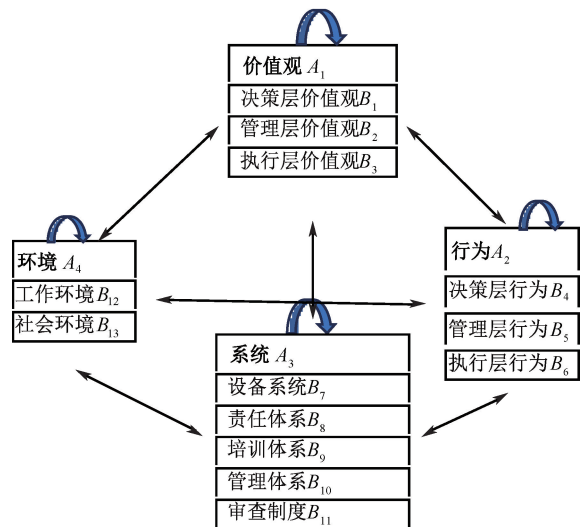


图 4 指标网络层次结构模型
Fig. 4 Indicator network hierarchy model

同理,运用 SPSSAU 计算出二级指标综合矩阵和三级指标综合矩阵。由于篇幅限制,二、三级指标

分析 DEMATEL 的计算结果可知:中心度的意义为某要素在系统中的作用大小,该值越大意味着

该要素越重要。一级指标中,中心度排序为:行为 A_2 >价值观 A_1 >环境 A_4 >系统 A_3 。原因度的意义为某要素对其他要素的影响情况,该值大于0意味着对其他要素影响更多,即原因要素;该值小于0意味着被其他要素影响更多,即结果因素。原因度排序为:价值观 A_1 >环境 A_4 >系统 A_3 >行为 A_2 ,价值观 A_1 和环境 A_4 的原因度为正。由此得出,核安全文化中,行为在所有维度因素中重要程度最大,而价值观影响其他要素的程度最大。价值观 A_1 与环境 A_4 属于原因因素,行为 A_2 和系统 A_3 属于结果因素,价值观和环境影响行为和系统。对于核电厂核安全文化建设而言,价值观和环境建设是主要因素,而改变行为和系统对安全文化提升效果最显著。

在二级指标价值观中,决策层价值观对其他因素影响程度最大,而管理层价值观最为重要;在二级指标行为中,决策层行为对其他人员的行为影响程度最大,并且最为关键;在二级指标系统中,管理体系和责任体系对其他系统的影响程度最大且作用最大;在二级指标环境中,社会环境会影响工作环境,但二者同等重要。

2.2 基于 ANP 指标权重的计算

在 DEMATEL 计算结果基础上,利用 Super Decisions 软件确定各评价指标的权重^[26]。为识别指标间的相对权重,基于 ANP 设计调查问卷,同样分发上述 33 位专家,回收有效问卷 33 份。通过数据分析和计算,最终获得各指标权重结果,见表 1,图 5 和图 6 为二三级指标权重关系图。

由基于 ANP 的计算结果分析可知:一级指标中,核电厂运行阶段的核安全文化评价指标权重由高到低为:价值观 A_1 >行为 A_2 >系统 A_3 >环境 A_4 ,这表明:一级指标价值观对核安全文化最为重要,其次是行为、系统和环境。二级指标中,决策层价值观、管理层价值观、决策层行为、管理层行为等指标的重要性最显著。三级指标中,决策层的安全责任、安全意识、以及以身作则等指标的重要性显著,因此,这些指标在核安全文化评价中起到关键作用,需要优

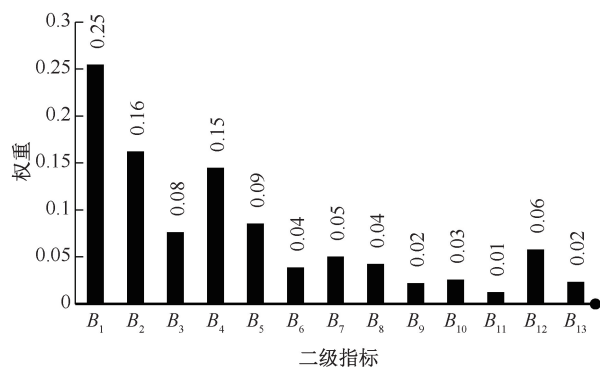


图 5 二级指标权重关系

Fig. 5 Secondary indicator weight graph

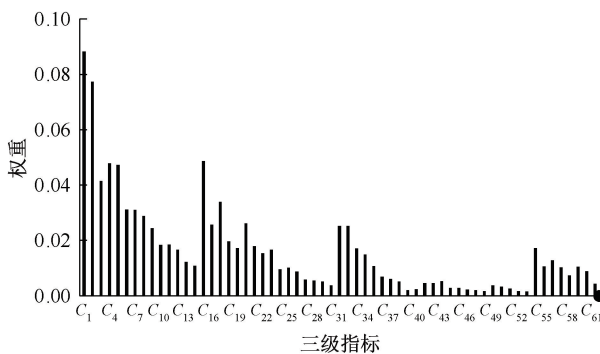


图 6 三级指标权重关系

Fig. 6 Three-level indicator weight graph

先对这些指标进行改善,以提升核安全文化建设水平。

3 结 论

1) 从核电厂运行阶段的角度构建安全文化评价指标体系,有利于全面评价该阶段的核安全文化,但不能完全适用核电厂其他阶段的安全文化评价。

2) 结合 DEMATEL 和 ANP 方法,得到评价指标权重和关键指标,有利于核电厂培育核安全文化,预防事故发生。

3) 下一步将对构建的评价指标体系和识别的指标权重进行实践论证,运用于核电厂运行阶段安全文化评估,以此检验评价指标的实用性。

参 考 文 献

- [1] IAEA. Safety culture [R], 1991.
- [2] IAEA. Application of the management system for facilities and activities [R], 2006.
- [3] WANO. Traits of a healthy nuclear safety culture [R], 2014.
- [4] NRC. Safety culture common language [R], 2013.
- [5] HAN S M, LEE S M, YIM H B, et al. Development of nuclear safety culture evaluation method for an operation team

- based on the probabilistic approach[J]. *Annals of Nuclear Energy*, 2018, 111:317-328.
- [6] DOS S G C H, VIDAL M C R, COSENZA C A N, et al. Safety culture assessment: a fuzzy model for improving safety performance in a radioactive installation [J]. *Progress in Nuclear Energy*, 2014, 70: 71-83.
- [7] ZWETSLOOT G, VAN K J, STELIJN W, et al. Ranking of process safety cultures for risk-based inspections using indicative safety culture assessments[J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2020, 64(3): DOI: 10.1016/j.jlp.2020.104065.
- [8] ZHANG Wei, FEI Chengbo, QI Yuan, et al. Research on nuclear safety culture assessment by China's regulatory body[C]. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2018:DOI:10.1088/1757-899X/394/5/052040.
- [9] 李鹏程, 黄河, 蒋建军, 等. 人因视角下的核安全文化评估指标体系与评估方法研究 [J]. *南华大学学报: 社会科学版*, 2016, 17(1): 1-6.
LI Pengcheng, HUANG He, JIANG Jianjun, et al. Study on assessment index system and assessment method of nuclear safety culture on the perspective of human factors[J]. *Journal of University of South China: Social Science Edition*, 2016, 17(1): 1-6.
- [10] 王亦虹. 企业安全文化评价体系研究 [D]. 天津: 天津大学, 2007.
WANG Yihong. Study on the assessment system of enterprise safety culture[D]. Tianjin: Tianjin University, 2007.
- [11] 雷林, 李向阳, 冯胜阳, 等. 核电企业核安全文化主动涵化评价方法的研究[J]. *南华大学学报: 社会科学版*, 2017, 18(6): 5-10.
LEI Lin, LI Xiangyang, FENG Shengyang, et al. Study on initiative cultivation evaluation method in nuclear safety culture of nuclear power enterprise[J]. *Journal of University of South China: Social Science Edition*, 2017, 18(6): 5-10.
- [12] IAEA. Performing safety culture self-assessments [R], 2016.
- [13] IAEA. Developing safety culture in nuclear activities-practical suggestions to assist progress [R], 1998.
- [14] IAEA. Safety of nuclear power plants: commissioning and operation [R], 2016.
- [15] IAEA. The operating organization for nuclear power plants [R], 2001.
- [16] IAEA. Safety culture in pre-operational phases of nuclear power plant projects [R], 2012.
- [17] IAEA. Safety culture in the maintenance of nuclear power plants [R], 2005.
- [18] 孙学伟, 申森, 贺湘炼, 等. 设计单位核安全文化测评指标体系研究 [C]. *中国核学会核能动力分会核电质量保证专业委员会第十二届年会暨学术报告会论文集*, 2014:242-247.
- [19] 项媛媛, 陈徐坤, 许荣斌. 核电厂安全文化的模糊综合评价方法研究 [J]. *核安全*, 2012(3): 42-47.
XIANG Yuanyuan, CHEN Xukun, XU Rongbin. Research on fuzzy comprehensive assessment method of nuclear power plant safety culture[J]. *Nuclear Safety*, 2012(3): 42-47.
- [20] 徐徐, 金波. 核安全文化评估指标体系研究及建立 [J]. *中国高新技术企业*, 2015(16): 7-8.
- [21] 刘涛. CJ 核电厂安全生产管理研究 [D]. 海口: 海南大学, 2018.
LIU Tao. Research on safety production management of CJ nuclear power plant[D]. Haikou: Hainan University, 2018.
- [22] AQ/T 9005—2008, 企业安全文化建设评价准则[S].
AQ/T 9005-2008, Evaluation criteria of enterprise safety culture construction[S].
- [23] 李林, 曹文华, 毕海普. 基于 SMART 原则的企业安全文化评价体系研究[J]. *中国安全科学学报*, 2007, 17(2): 121-128.
LI Lin, CAO Wenhua, BI Haipu. Evaluation system of organization safety culture based on SMART principles[J]. *China Safety Science Journal*, 2007, 17(2): 121-128.
- [24] 陈纪煌, 尹欣霞. 核电厂运行人员防人因失误管理 [J]. *产业与科技论坛*, 2020, 19(12): 230-231.
- [25] 姚翀, 陈齐清, 姚照红, 等. 核电厂运行人员防人因失误管理 [J]. *中国核电*, 2010, 3(3): 263-269.
YAO Chong, CHEN Qiqing, YAO Zhaohong, et al. Human behavior management in nuclear power plant[J]. *China Nuclear Power*, 2010, 3(3): 263-269.
- [26] GABUS A, FONTELA E. World problems, an invitation to further thought within the framework of DEMATEL[R]. *Battelle Geneva Research Centre*, 1972.
- [27] THAKKAR J J. Decision-Making trial and evaluation laboratory (DEMATEL) [M]. Singapore: Springer Singapore, 2021: 139-159.

作者简介: 李鹏程 (1978—), 男, 湖南邵阳人, 博士, 教授, 主要从事人因工程、系统安全评价和核电厂 HRA 研究。E-mail: lipengcheng0615@163.com。

