

核电厂主控室组织安全管理绩效评价

张 力,张 杰¹,胡 鸿²,蒋建军²,陈 帅³
(南华大学 经济管理与法学学院,湖南 衡阳 421001)

[摘要] 文章对核电厂主控室组织安全管理绩效进行了评价。首先采用文献研究法,设计调查问卷,计算出指标相对重要度,建立组织安全管理绩效指标评价体系。其次,为避免主观性的影响,将层次分析法与熵权法结合,得到主控室组织安全管理绩效评价体系各指标的权重,进而建立综合评价方法。最后,结合模拟数据利用综合评价方法实现对不同组织安全管理绩效的评价。结果表明,所得组织安全管理绩效评价体系较为全面,该评价方法能够实现对核电厂主控室组织安全管理绩效更为客观有效的评价。

[关键词] 核电厂; 熵权法; 层次分析法(AHP)

[中图分类号] TM623.8;C93-05 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1673-0755(2021)02-0001-07

DOI:10.13967/j.cnki.nhxb.2021.0015

众所周知,核电厂的安全稳定运行是核电行业发展的首要目标,如何保证其平稳运行,是核电厂长期面临的问题。研究发现,系统可靠性问题和操纵员个人因失误已经不再是核电事故的最根本原因。三哩岛核事故后,安全管理从关注设计发展到强调人的表现,并试图通过组织的措施来抵消人因失效的后果。Reason认为:“人因失误是结果,不是原因,人因失误的产生是由其上游的因素——工作环境和组织因素引起的。”^[1]可见组织可靠性对于整个系统尤为重要,而主控室更是核电厂的指挥和调度中心,重要性不言而喻,因而有必要对核电厂主控室组织安全管理因素的指标体系及评价进行研究。

在组织因素分类方面,李永娟(2003)等通过半结构化访谈和核电事件再分析方法,将得到的数据进行聚类分析,得出影响核电系统安全的5类组织因素^[2]。目前我国对于核电厂组织安全管理绩效进行评价的研究较少,李鹏程(2007)建立概念上的组织因素分类框架,并采用模糊决策方法对组织安全管理绩效进行评价^[3]。赵明(2011)对组织因素进行了定义和分类,并用层次分析法分析组织因素

的重要度,构建出组织因素对核电厂可靠性的影响模型^[4]。在国外,Carl Rollenhagen(2000)首次结合了“从上至下”和“从下至上”两种方法,提出了一个评估组织因素及其风险和安全性关系的概念框架^[5]。Karthick(2020)研究了印度核电厂发生的18项人因事件,分析和确定了造成此类事件的人因因素和组织因素,采用模糊层次分析法进行定量分析确定关键影响因素^[6]。上述文献中学者们根据自己的研究目的对组织因素进行了分类,但是在核电厂组织安全管理绩效评价方面,多采用了主观性较强的方法,例如层次分析法等。

为更客观、准确地对核电厂主控室组织安全管理绩效进行评价,本文采用AHP与熵权法结合的方法计算综合权重。在文献调研的基础上制定了组织安全管理绩效影响因素问卷,理论与实际相结合,通过指标的相对重要程度确定最终指标体系,在计算综合权重后,实现对不同组织的评价。

一 组织因素评价指标的识别与确定

在对主控室组织安全管理绩效评价的指标进行收集前,需要对其进行定义。安全指的是一种状态

[收稿日期] 2020-11-13

[基金项目] 国家自然科学基金项目“功率持续快速变化下核电厂操纵员人因可靠性分析方法研究”资助(编号:71771084);国家自然科学基金项目“数字化工业系统人因可靠性分析方法研究”资助(编号:71371070);湖南省研究生科研创新项目“核电厂严重事故下人因可靠性分析方法研究”资助(编号:CX20200908)

[作者简介] 张力(1955—),男,四川中江人,南华大学经济管理与法学学院教授,博士。

1 南华大学经济管理与法学学院硕士研究生。2 湖南工学院人因与安全工程研究院教授。3 南华大学核科学技术学院博士研究生。

或条件,安全管理则是一个过程,此外,安全是避免不可接受的后果,而安全管理则是实现已确定的安全目标的活动^[7]。核电厂主控室组织安全管理是一种通过对人、设备、环境和组织的管理相结合后进行协调控制,以达到特定运行安全目标的系统过程。安全管理绩效评价主要是对安全管理过程的评价,即评价在以实现安全为目标的一系列活动中的管理工作的优秀程度。

为实现核电厂组织安全管理绩效评价,需要建立评价指标体系。部分学者已从不同角度对影响

核电厂绩效的因素做过分类,本文对已有文献中涉及的组织因素进行汇总。在此基础上,为有效反映核电厂的实际情况,将文献调研初步得到的组织因素指标体系基于指标“重要度”进一步优化,获得每个指标的相对重要度,经专家咨询后得到最终组织安全管理绩效指标体系。

(一)组织因素识别

采用文献调研法对经典人因可靠性方法中的组织因素进行统计,初步归纳了以下相关影响因子,见图1。

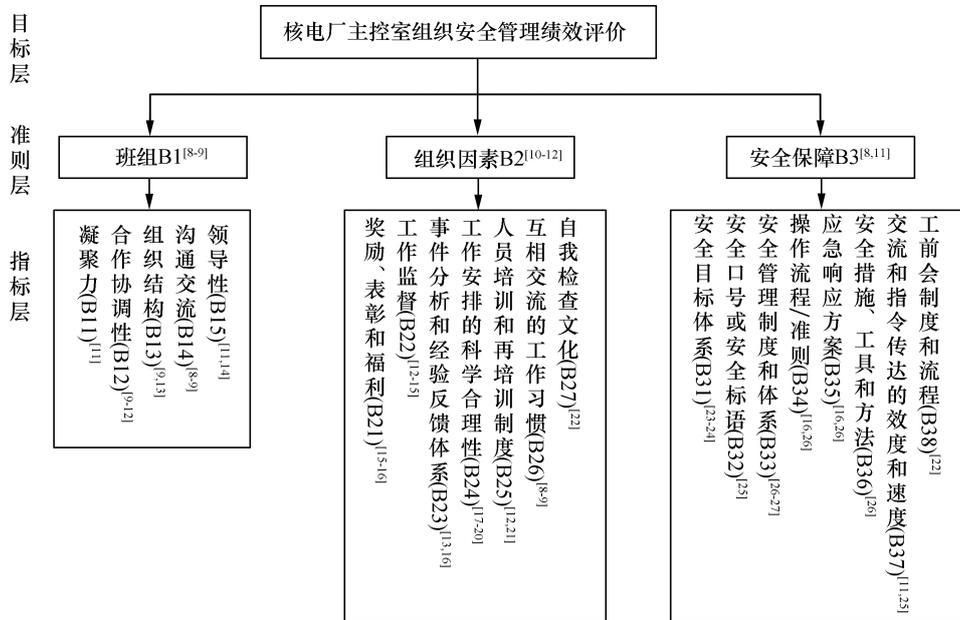


图1 组织安全管理绩效评价指标体系

(二)组织因素指标确定

1. 指标相对重要度

基于图1获得的初始指标体系,经核电厂专业人员打分后回收调查表,对指标的相对重要度进行计算,见式(1)。

$$E_j = \sum_{i=1}^n x_i \times y_i \quad (1)$$

X_i 表示第 i 位专家的熟练程度(专家对评估指标的熟练程度分为低、较低、中、较高、高); y_i 表示指标的影响程度分为低、较低、中、较高、高。

2. 问卷调查

(1)样本数据

针对组织安全管理绩效的影响因素设计问卷,对象为核电厂专业人员,共发放问卷30份,回收30份,其中有效问卷28份。被调查人员基本情况见表1。

表1 样本数据

基本信息		人数	比例 (%)	累积占比 (%)
性别	男	28	100.00	100.00
年龄/岁	21 ~ 30	6	21.43	21.43
	31 ~ 40	22	78.57	100.00
教育水平	大专	1	3.57	3.57
	本科学历	27	96.43	100.00
执照资格	执照操纵员	8	28.57	28.57
	高级操纵员	19	67.86	96.43
	模拟机操纵员	1	3.57	100.00
专业	热动	12	42.86	42.86
	自动化	6	21.43	64.29
	电气工程与自动化	5	17.86	82.12
	电厂热动力工程	1	3.57	85.69
	核工程与核技术	4	14.29	100.00

续表

基本信息		人数	比例 (%)	累积占比 (%)
所在岗位	RO	6	21.43	21.43
	SRO	9	32.14	53.57
	模拟机教员	1	3.57	57.14
	高级操纵员	3	10.71	67.85
	操纵员一级	1	3.57	71.42
	主控操纵员	4	14.29	85.71
	副值长	1	3.57	89.28
	隔离经理	2	7.14	96.42
	运行	1	3.57	100.00
所在部门	FPO	3	10.71	10.71
	运行部	24	85.71	96.42
	培训部	1	3.57	100.00

(2) 问卷检验

其一,信度检验。在以基础研究为目的时,克朗巴哈系数 α 最好在 0.80 以上^[28]。通过 SPSS 22.0 检验本问卷信度,各维度指标克朗巴哈系数 α 均大于 0.8,见表 2,因而该问卷内在信度可以接受。

表 2 各级指标克朗巴哈系数

一级指标	班组因素	组织因素	安全保障
克朗巴哈系数	0.965	0.974	0.978

其二,效度检验。效度检验的主要指标为 KMO 检验统计量,该问卷各维度指标 KMO 值均大于 0.7,达到适中并接近良好的程度,数据具有较高相关性,见表 3。

表 3 各级指标 KMO 数值

一级指标	班组因素	组织因素	安全保障
KMO 值	0.708	0.840	0.771

由问卷采集获得的数据结合式(1),可以得到组织安全管理绩效指标的相对重要度,见表 4 和表 5。

表 4 一级指标相对重要度

指标变量	班组因素	组织因素	安全保障
相对重要度	522	525	507
平均相对重要度	18.64	18.75	18.11

表 5 二级指标相对重要度

一级指标	二级指标	相对重要度	平均相对重要度	
班组因素	凝聚力	491	18.19	
	合作协调性	501	18.56	
	组织结构	475	17.59	
	沟通交流	499	18.48	
组织因素	领导性	450	16.67	
	奖励、表彰和福利	464	16.57	
	工作监督	460	16.43	
	事件分析和经验反馈体系	481	17.18	
	工作安排的科学合理性	514	18.36	
	人员培训和再培训	438	15.64	
	互相交流的工作习惯	482	17.21	
	细致的自我检查文化	486	17.36	
	安全保障	安全目标体系	439	15.68
		安全口号或安全标语	395	14.11
安全保障	安全管理制度和体系	431	15.39	
	规范的操作流程/准则	515	18.39	
	应急响应方案	437	15.61	
	安全措施、工具和方法	469	16.75	
	交流和指令传达的效度和速度	478	17.07	
	工前会制度和流程	481	17.18	

得到各个指标的相对重要度后,结合专家意见,最终确定组织安全管理绩效评价指标体系,见图 2。

二 确定指标权重

为计算指标权重,本文采用层次分析法与熵权法结合计算综合权重,层次分析法在权重计算过程中可以有效利用专家经验,而熵权法依赖于数据的离散型分布,是一种客观的赋权法,能够避免主观性的影响,因而作为两种方法结合的综合权重法,能够充分体现两者的优点。在组织因素指标体系确定后,向专家发放重要度调查问卷,得到 AHP 计算的权重 w 。采用模拟数据来计算熵权法权重 Y_j ,拉格朗日乘法优化得到组合权重。

(一) 综合权重

将层次分析法和熵权法获得的权重相结合,依据最小相对信息熵原理,用拉格朗日乘法优化得到组合权重计算式:

$$W_j = \frac{\sqrt{wY_j}}{\sum_{j=1}^n \sqrt{wY_j}} \quad (2)$$

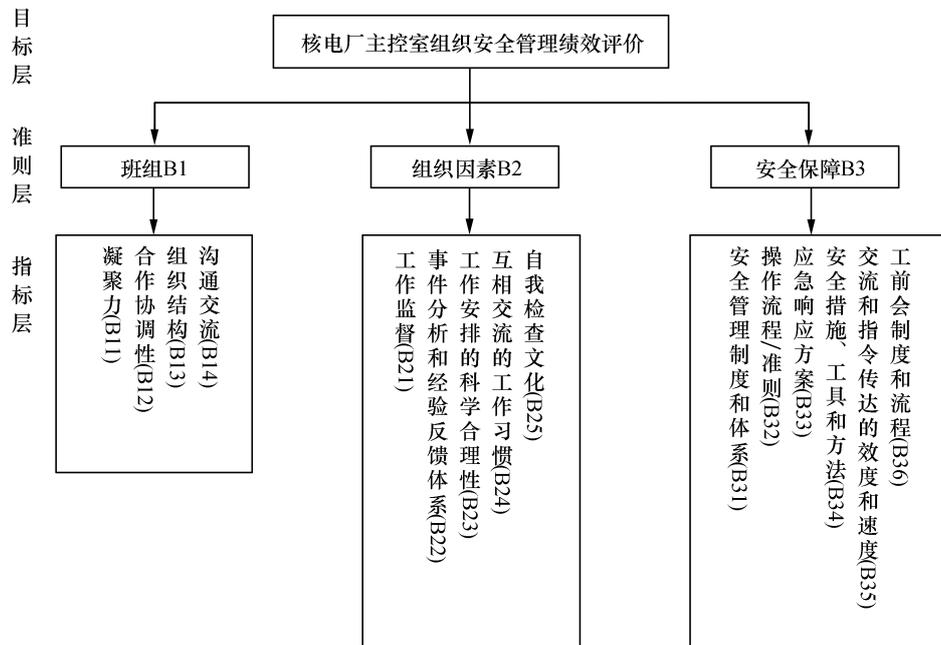


图2 核电厂主控室组织安全管理绩效指标体系

(二) 层次分析法确定主观权重

1. 建立判断矩阵

指标体系建立后,通过构造和填写对比矩阵,确定子要素对父要素的影响度^[29]。

2. 影响因子权重矩阵的归一化处理

计算出判断矩阵的最大特征值,归一化处理后得到组织安全管理绩效指标的权重矩阵: $w = [w_1, w_2, \dots, w_m]$ 。

3. 一致性检验

用判断矩阵的最大特征根 λ_{\max} 来检验一致性,一致性指标 CI 为:

$$CI = (\lambda_{\max} - n) / (n - 1) \quad (3)$$

$$CR = CI / RI \quad (4)$$

若 $CR < 0.10$, 满足一致性, 否则需适当修正判断矩阵。

(三) 熵权法确定客观权重

熵权法是利用信息熵值来确定权重的一种客观方法,可以有效避免人的主观影响^[30]。

1. 数据无量纲化处理

$$Z_{ij} = \frac{X_{ij} - \min X_j}{\max X_j - \min X_j} \quad (5)$$

将式(5)数据无量纲化处理后,出现数值0。为了数据运算有意义,需要对无量纲化后的数据进行整体平移,即 $Z_{ij} = Z_{ij} + \beta$, 但为了不破坏原始数据的原有规律, β 的取值必须尽可能的小, 本文取 $\beta = 0.0001$ 。

2. 计算第 j 个指标下第 i 个样本的比重矩阵

$$P_{ij} = \frac{Z_{ij}}{\sum_{i=1}^m Z_{ij}} \quad (6)$$

3. 计算第 j 个指标的熵值

$$E_j = -\frac{1}{\ln n} \sum_{i=1}^m P_{ij} \ln P_{ij} (0 \leq E_j \leq 1) \quad (7)$$

4. 计算第 j 个指标的熵权

$$Y_j = \frac{1 - E_j}{\sum_{j=1}^n (1 - E_j)} \quad (8)$$

三 综合评价算例计算

在得到组织安全管理绩效评价指标体系与每个指标的权重后,可以对不同组织进行评价。

(一) 数据来源

由于核电厂组织安全管理绩效实际数据不方便获取,本文采用模拟数据进行实例模拟。假设模拟组织1~6,组织4各个指标维度表现较好,组织5在安全保障方面有所欠缺,组织1~3与组织6各有优缺点,其中组织3处于组织初期,各项指标有待提升,模拟指标具体数值见表6。

(二) 综合权重

经层次分析法与熵权法计算后可以得到组织安全管理绩效指标体系中各指标的综合权重,计算值见表7。

表 6 不同组织指标模拟数值

指标名称	组织 1	组织 2	组织 3	组织 4	组织 5	组织 6
B11	68.16	75.93	76.07	94.82	70.67	12.02
B12	41.15	4.6	31.33	87.79	78.05	92.21
B13	44.81	68.12	9.08	79.68	32.33	59.26
B14	17.54	39.43	49.83	93.03	82.8	77.79
B21	9.64	69.47	11.6	97.61	77.67	13.84
B22	21.7	33.34	23.34	93.04	84.45	55.04
B23	67.61	30.68	2.01	85.14	77.6	29.79
B24	12.99	13.47	13.89	85.26	90.6	77.14
B25	85.13	94.64	44.99	68.87	93.11	13.85
B31	11.36	11.23	67.55	70.49	38.64	75.02
B32	59.15	8.93	41.41	67.01	23.17	81.32
B33	28.52	14.79	54.91	74.85	10.23	28.36
B34	71.4	6.68	34.94	77.98	38.1	13.47
B35	89.65	50.38	47.74	76.7	20.88	71.03
B36	94.56	81.85	45.94	68.94	45.17	34.33

表 7 组织安全管理绩效指标综合权重计算值

指标名称	AHP 计算权重值	熵权法计算权重值	综合权重值
B11	0.173 4	0.035 2	0.085 9
B12	0.142 8	0.050 0	0.092 9
B13	0.096 9	0.045 3	0.072 8
B14	0.096 9	0.049 4	0.076 1
B21	0.072 6	0.108 6	0.097 6
B22	0.066 0	0.096 5	0.087 7
B23	0.082 5	0.050 7	0.071 1
B24	0.056 1	0.121 1	0.090 6
B25	0.049 5	0.042 2	0.050 2
B31	0.032 0	0.081 5	0.056 1
B32	0.041 6	0.053 9	0.052 0
B33	0.025 6	0.082 6	0.050 5
B34	0.024 0	0.070 0	0.045 0
B35	0.020 8	0.044 6	0.033 5
B36	0.017 6	0.068 2	0.038 1

(三) 综合评分

在计算得到各个指标的权重后,可以对组织进行评分,评分公式如下:

$$S_i = \sum_{j=1}^n W_j \beta_{ij} \quad (9)$$

其中, β_{ij} 为指标标准化右移后的数值。

各个组织的组织安全管理绩效评分情况如图 3 所示。其中,4 号组织得分(0.936 4)最高,3 号组织得分(0.298 1)最低。4 号组织处于成熟期,在权重较大的班组和组织因素方面均表现优异,但安全保障方面还需要进一步提升。3 号组织安全管理绩效得分最低,部分指标得分尚可,但指标 B23(工作安排科学合理)、B24(互相交流的工作习惯)、B21(合理有效的工作监督)与 B13(组织结构)得分较低,仍需要进行改进。为提升本组织安全管理绩效,需要合理划分本组织中组织层级与管理幅度,科学划分工作,确保各个岗位的职责合理,同时建立工作监督制度,减少人因失误。

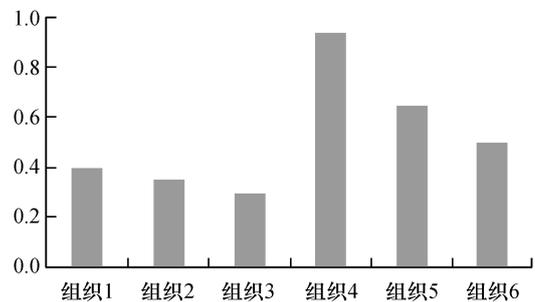


图 3 1~6 号组织安全管理绩效得分情况

四 结 论

组织安全管理绩效评价指标选取的全面性以及权重的恰当性对组织安全管理绩效评价结果会产生很大影响。本文主要得出以下结论:

(一)为建立核电厂组织安全管理绩效评价体系,本文将理论组织安全管理绩效分类与操纵员实际经验相结合,使得评价体系较为全面,有针对性。

(二)为实现对核电厂组织安全管理绩效的客观评价,采用层次分析法与熵权法结合来计算评价指标的综合权重,既可以有效利用核电行业内专业人员的经验,又避免了熵权法对数据过于敏感的缺点。通过实例验证,该评价方法能够更加准确地对核电厂组织安全管理绩效进行评价。

(三)根据权重及组织评价结果,能有效地发现可能对核电厂主控室组织安全管理绩效产生潜在影响的薄弱环节,确保电厂安全稳定运行。其中指标 B11(凝聚力)、B12(合作协调性)、B21(合理有效的工作监督)与 B24(互相交流的工作习惯)权重较

大,这与核电厂的实际是相符的。核电厂在实际运行过程中可以加强对班组以及组织人员合作性的训练,在工作中注重沟通交流,同时建立工作监督制度,依托双重保护来提高系统安全性。

由于研究对象比较特殊,本文选取模拟数据进行实例验证,若能选取实际核电厂组织安全管理绩效数据将更具说服力。指标选取是研究大量文献后,基于核电厂主控室组织的特性和实用性来确定的,因此,理论分析较少。笔者在后期的研究中将解决这些问题。

[参考文献]

- [1] REASON J. Managing the risks of organizational accidents [M]. Birmingham: Ashgate Publishing Limited, 1997: 16-20.
- [2] 李永娟,王二平,李锋,等. 核电组织错误的表现与类型[J]. 核动力工程,2003(4):380-383.
- [3] 李鹏程,肖东生,陈国华,等. 高风险系统组织因素分类与绩效评价[J]. 中国安全科学学报,2009,19(2): 140-147.
- [4] 赵明. 组织因素对核电厂人因可靠性的影响研究[D]. 衡阳:南华大学,2011:2-5.
- [5] ROLLENHAGEN C. A framework for assessment of organizational characteristics and their influences on safety[J]. Safety Science Monitor, 2000, 4(1):1-16.
- [6] KARTHICK M, PAUL ROBERT T, SENTHIL KUMAR C. HFACS-based FAHP implementation to identify critical factors influencing human error occurrence in nuclear plant control room [J]. Soft Computing, 2020, 24 (21): 16577-16591.
- [7] HUANG L J, LIANG D. Development of Safety Regulation and Management System in Energy Industry of China: Comparative and Case Study Perspectives [J]. Procedia Engineering, 2013, 52:165-170.
- [8] DAVID I GERTMAN, HAROLD S BLACKMAN, LON N HANEY, et al. INTENT: A method for estimating human error probabilities for decision based errors[J]. Reliability Engineering and System Safety, 1992, 35(2):127-136.
- [9] Technical Basis and Implementation Guidelines for A Technique for Human Event Analysis (ATHEANA): 20555-0001 [R]. Washington, DC: U S Nuclear Regulatory Commission Office of Nuclear Regulatory,2000:78-90.
- [10] ERIK HOLLNAGEL. Cognitive reliability and error analysis method[M]. ELSEVIER PRESS,1998:345-456.
- [11] CHANG YHJ, A MOSLEH. 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,2006,92(8): 1014-1040.
- [12] 蒋英杰,孙志强,宫二玲,等. 一种系统化的行为形成因子分类方法[J]. 中国安全科学学报,2010,20(10):20-25.
- [13] SWAIN A D, GUTTMANN H E. Handbook of Human-Reliability Analysis with Emphasis on Nuclear Power Plant Applications; NUREG/CR-1278 [R]. Washington DC: U S NUCLEAR REGULATORY COMMISSION, 1983:234-376.
- [14] 赵军,童节娟,刘涛,等. 核电厂传统人员可靠性分析方法中引入班组因素的研究[J]. 原子能科学技术,2011,45(8):966-971.
- [15] 陈愉. 企业职工激励与绩效评估方案设计[D]. 重庆:重庆大学,2003:10-30.
- [16] 梅良伟. 施工安全组织管理系统可靠性评价研究[D]. 武汉:华中科技大学,2016:5-40.
- [17] DAVID E EMBREY. SLIM-MAUD: A Computer-Based Technique for Human Reliability Assessment[M]. London: Brunel University,2015:12-14.
- [18] CHAN YHJ, A MOSLEH. 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):997-1013.
- [19] 李山汀. 组织安全意识及其影响因素与组织安全绩效的关系研究;以海洋石油作业为例[D]. 杭州:浙江大学,2007:1-45.
- [20] 席永涛,胡基平. 海运人因可靠性分析中行为形成因子模型[J]. 中国航海,2012,35(1):66-70.
- [21] GERTMAN D, BLACKMAN H, MARBLE J, et al. The SPAR-H Human Reliability Analysis Method; NUREG/CR-6883[R]. Washington, DC:U. S. Nuclear Regulatory Commission Office of Nuclear Regulatory Research,2005: 34-78.
- [22] 龙安明. 核电厂防人因失误的研究[J]. 科技风,2019(35):170.
- [23] 韩冰. 核电厂运行的安全目标解析[J]. 科技创新与应用,2016(23):129.
- [24] 张永发,丁浩,赵新文,等. 舰船核动力安全目标及其量化技术研究[J]. 核科学与工程,2019,39(1): 125-131.
- [25] 倪玉. 中石油东北化工销售公司安全文化指标体系构建与评价[D]. 阜新:辽宁工程技术大学,2016: 1-38.
- [26] 王瑞. 地铁工程施工安全组织管理评价研究[D]. 武汉:华中科技大学,2011:2-43.
- [27] 宋振. 关于强化班组安全管理工作的探讨[J]. 中国安全生产科学技术,2009(增刊1):114-116.
- [28] HENSON R K. Understanding internal consistency reli-

- bility estimates: a conceptual primer on coefficient alpha [J]. *Measurement and Evaluation in Counseling and Development*, 2001, 34(3) : 177-189.
- [29] EMRE AKYUZ, METIN CELIK, LLKER AKGUN, et al. Prediction of human error probabilities in a critical marine engineering operation on-board chemical tanker ship: The case of ship bunkering [J]. *Safety Science*, 2018, 110:102-109.
- [30] 李莎莎. 基于改进层次分析法和熵权法的采矿方法优选研究[J]. *化工矿物与加工*, 2020, 49(3) :1-4.

Organizational Safety Management Performance Evaluation of Nuclear Power Plant Main Control Room

ZHANG Li, ZHANG Jie, HU Hong, JIANG Jian-jun, CHEN Shuai
(*University of South China, Hengyang 421001, China*)

Abstract: In order to evaluate the organizational safety management performance of the main control room of the nuclear power plant, first based on literature research, design a questionnaire, calculate the relative importance of indicators, and establish an organizational safety management performance indicator system. Secondly, the analytic hierarchy process and the entropy method are combined to effectively avoid the influence of subjectivity and obtain the weight of each index of the main control room's organizational safety management performance evaluation system. Finally, combined with the simulation data, the comprehensive evaluation method is used to evaluate the safety management performance of different organizations. The results show that the obtained organizational safety management performance evaluation system is more comprehensive, and this evaluation method can achieve a more objective evaluation of the organizational safety management performance of the main control room of the nuclear power plant.

Key words: nuclear power plant; entropy method; analytic hierarchy process (AHP)

(本文编辑:魏玮)