

基于ISM的海上浮动核电站失水事故影响因素分析

邹树梁, 刘 娜¹

(南华大学 资源环境与安全工程学院, 湖南 衡阳 421001)

[摘 要] 为保障海上浮动核电站安全运行,文章以海上浮动核电站失水事故为研究对象,采用文献研究的方法从个体、设备、环境、管理4个维度提取13个影响失水事故的因素,运用解释结构模型(ISM)的方法分析13个因素的层次关系,结果表明:员工心理状态、员工生理状态、管路状况和电磁排放控制线路状况为影响失水事故的直接因素,法律法规为底层因素,其余因素为中间层因素,针对模型结果,提出了浮动核电站失水事故相关预防措施,研究结果可为浮动核电站的设计和应急管理提供参考。

[关键词] 海上浮动核电站; 失水事故; 解释结构模型; 影响因素分析

[中图分类号] TM623 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1673-0755(2022)01-0001-04

DOI:10.13967/j.cnki.nhxb.2022.0001

海上浮动核电站是小型核反应堆和船舶工程有机结合的产物^[1],能解决远海和偏远岛屿开发的能源供应问题^[2],是核能发展的一个新趋势。但海上浮动核电站在海洋条件下运行,环境不确定性更为复杂。此外,浮动核电站平台空间和载荷能力有限,缺乏足够的安全设施,浮动核电站小型堆发生严重事故的概率相对高于陆上小型堆^[3],一旦发生放射性核素的严重事故,将对环境和人员安全造成严重威胁,目前对严重事故方面的研究主要集中在陆上核电站,而浮动核电站所处环境与陆上核电站存在较大差异,需要开展相应研究,因此,开展对浮动核电站严重事故影响因素的研究,对于保障海上浮动核电站安全运行具有重要意义。

解释结构模型(Interpretative Structural Model, ISM)被广泛用于复杂系统风险因素分析领域,可用于分析浮动核电站严重事故主要影响因素并得出清晰的层次关系。姜金贵等通过ISM的方法总结了核电站公众接受性的主要影响因素,并且构建了核电站公众接受性评价指标体系^[4]。Mukeshimana M C等运用ISM—SWOT法评估了影响卢旺达可再生能源发展的策略,得出最有利的四种策略^[5]。裴子

平利用ISM方法确立了影响煤矿员工安全意识的直接原因,并对主要影响因素提出了相对应的预防建议^[6]。

为了保障浮动核电站的安全运行,本文以浮动核电站严重事故——失水事故为研究对象,从个体、设备、工作环境、管理层面建立了海上浮动核电站失水事故影响因素指标体系,运用解释结构模型分析各因素之间的关系,得出影响失水事故的主要影响因素的层次关系,并针对模型结果提出预防建议。

一 解释结构模型

解释结构模型是一种系统结构模型法,依据图论中关联矩阵的原理,通过建立关联矩阵表示系统中各因素间相互联系、相互制约的关系,然后进行拓扑运算得出系统最简层次化的有向拓扑图,据此可将系统单元之间复杂和模糊的关系分解成清晰的递阶结构的形式^[7],是一种应用广泛的结构分析模型方法。

运用解释结构模型的主要步骤包括确定系统要素,运用文献研究、现场调研、专家讨论等方式判断要素是否有直接影响关系,根据要素关系可做出要素间的有向连接图和邻接矩阵,通过邻接矩阵计算

[收稿日期] 2021-07-10

[基金项目] 国防科技工业核动力技术创新中心科研项目“海上核动力平台应急策略研究”资助(编号: HDLCXZX-2018-HB-016);国防科技工业核动力技术创新项目“海上核动力平台核事故气载放射性核素迁移机理研究”资助(编号: HDLCXZX-2020-ZH-013)

[作者简介] 邹树梁(1956—),男,江西安福人,南华大学资源环境与安全工程学院,核设施应急安全技术及装备湖南省重点实验室教授,博士生导师。

¹ 南华大学资源环境与安全工程学院硕士研究生。

出可达矩阵,再对可达矩阵进行层次划分,最后构建系统有向图模型。

二 浮动核电站失水事故影响因素 ISM 分析

(一) 确定影响因素

影响浮动核电站失水事故的因素较多,本文运用文献调研和专家评估法,从个体、设备、环境、管理 4 个维度提取 13 个影响浮动核电站失水事故的因素。其中,个体层面包括员工心理状态、员工安全素质、员工生理状态^[8];设备层面包括操作台状况(主要指人机界面状况)、管路状况(反应堆一回路管路状况)、电磁排放控制线路状况^[9-10];环境层面包括气象自然环境、工作环境、极端环境^[11];管理层面包括法律法规、专业培训、组织规划和组织文化^[12-13],本文将影响因素设为 S_i ,释义见表 1。

表 1 影响因素和释义

变量	影响因素	释义
S_1	员工心理状态	员工的工作情绪、压力水平等
S_2	员工安全素质	员工的学习能力和安全素养
S_3	员工生理状态	身体健康程度及全身各感官灵敏度
S_4	操作台状况	人机界面显示和布局是否简洁、合理、易操作,人机匹配情况等
S_5	管路状况	一回路应力高度集中的三通管道交界处、弯管头、管咀、管路接头和管路支承处状况
S_6	电磁排放控制线路状况	阀门电磁排放控制线路是否失灵
S_7	自然环境	气象条件和海面状况,如海上风速、温度、湿度等能见度状况
S_8	工作环境	船体晃动、船舶噪音(发动机的声音、安全警报的鸣笛声和紧急情况下人员活动发出的声音)等
S_9	极端环境	地震、海啸等极端灾害
S_{10}	法律法规	法律法规和行业标准
S_{11}	专业培训	平台上人员与岗位相关的技能培训
S_{12}	组织规划	人员安排,工作分配,应急处置
S_{13}	组织文化	组织氛围和安全文化

(二) 建立邻接矩阵

两两分析比较影响因素,确定两者之间是否具有直接影响的关系,以资料搜寻、文献分析和专家咨询的方式判断各因素是否具有直接影响的关系建立邻接矩阵,其中 0 表示两因素之间有直接影响关系,1 表示两因素之间没有直接影响关系。如邻接矩阵

A 中, S_{ij} 为 1 表示因素 S_i 对因素 S_j 有直接影响, S_{ij} 为 0 表示表示 S_i 对因素 S_j 没有直接影响,建立表示因素直接关系的邻接矩阵^[4]。针对表 1 列出的影响浮动核电站失水事故的 13 个主要因素,本文通过文献分析和专家咨询的方式构建邻接矩阵 A 。

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

(三) 建立可达矩阵

可达矩阵是表示一个要素到另一个要素之间存在的所有可达路径的矩阵,即可表示要素间直接关系和间接关系,可达矩阵 M 可通过邻接矩阵 A 加上单位矩阵做布尔代数自乘运算,满足式(1)即为可达矩阵,将邻接矩阵 A 做式(1)运算得可达矩阵 M :

$$(A + I)^{K-1} \neq (A + I)^K = (A + I)^{K+1} = M (K \geq 2) \quad (1)$$

式中, A 为邻接矩阵, I 为单位矩阵, M 为可达矩阵。

$$M = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

(四) 划分可达矩阵层级

为了确定各因素间的层次关系,需要对上述可达矩阵 M 进行层次划分,根据影响因素级位划分理论,将系统分成若干个独立、无直接或间接影响的子

系统,通过可达矩阵得出可达集 $R(S_i)$ 和先行集 $P(S_i)$ 以及两者之间的交集 $Q(S_i)$,可达集 $R(S_i)$ 表示的是 S_i 可以到达的所有因素的集合,对应的是可达矩阵 M 中 i 行,先行集 $P(S_i)$ 表示所有可以到达 S_i 的因素集合,对应的是可达矩阵 M 中的 i 列,第一级对应可达集,先行集和两者交集,见表 2。

若满足 $R(S_i) = Q(S_i)$,则 S_i 为第一级因素,从表 2 可知,第一级因素有 S_1, S_3, S_5, S_6 ,然后删除 M 矩阵中以上因素所在的行和列,即第 1 行,第 1 列,第 3 行,第 3 列,第 5 行,第 5 列,第 6 行,第 6 列,再对矩阵 M 列出可达集、先行集和交集,按照上述方法,依次得出剩余层数的因素,最终级数划分的结果为:第一级因素包含 S_1, S_3, S_5, S_6 ,第二级因素包含 S_2, S_4, S_8 ,第三级因素包含 S_7, S_{12} ,第四级因素包括 S_9, S_{11} ,第五级因素为 S_{13} ,第六级因素为 S_{10} 。

(五)绘制多级阶梯有向图

根据上述结果,绘制出影响失水事故的六阶递阶结构图,见图 1。

表 2 第一层级可达集、先行集和交集

影响因素 S_i	可达集 $R(S_i)$	先行集 $P(S_i)$	交集 $Q(S_i)$
S_1	1, 3	1, 3, 4, 7, 8, 9, 10, 11, 13	1, 3
S_2	2, 12	2, 9, 10, 11, 12, 13	2
S_3	1, 3	1, 3, 4, 7, 8, 9, 10, 11, 13	1, 3
S_4	1, 3, 4	4, 10	4
S_5	5	5, 9	5
S_6	6	6, 9	6
S_7	1, 3, 7, 8	7	7
S_8	1, 3, 8	7, 8, 9	8
S_9	1, 2, 3, 5, 6, 8, 9, 12	9	9
S_{10}	1, 2, 3, 4, 10, 11, 12, 13	10	10
S_{11}	1, 2, 3, 11, 12	10, 11, 13	11
S_{12}	2, 12	2, 9, 10, 11, 12, 13	2
S_{13}	1, 2, 3, 11, 12, 13	10, 13	13

三 ISM 模型分析及预防对策

(一)模型分析结果

1. 直接因素:如图 1 所示,影响浮动核电站失水事故的直接因素为模型的第一级,即员工心理状态、员工生理状态、管路状况和电磁排放控制线路状况。

2. 中间层因素:影响浮动核电站失水事故的中间层因素为模型第二级、第三级、第四级和第五级中

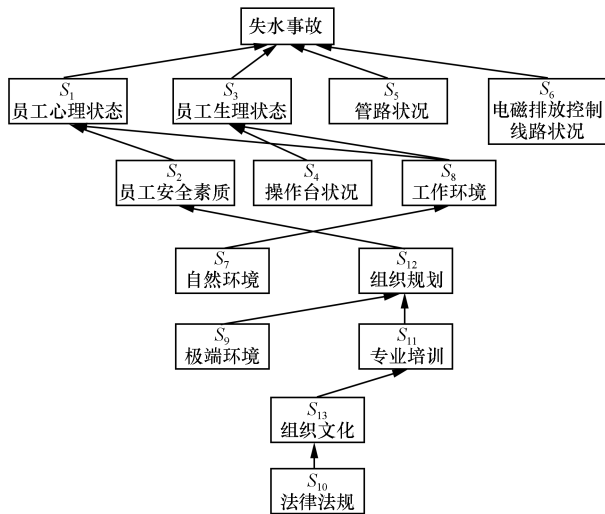


图 1 浮动核电站失水事故影响因素解释结构模型

的因素。第二级中员工安全素质和工作环境主要影响第一级的员工心理状态,操作台状况和工作环境主要影响员工生理状态。第三级中自然环境主要影响工作环境,组织规划主要影响员工安全素质。第四级中极端环境和专业培训主要影响第三级中的组织规划。第五级的组织文化主要影响第四级的专业培训。

3. 底层因素:影响浮动核电站失水事故的底层因素为法律法规,也是影响失水事故的根本因素,法律法规通过影响中间层因素间接影响直接因素。

(二)失水事故预防对策

1. 根据上述分析结果,影响浮动核电站失水事故的底层因素为法律法规。浮动核电站在复杂的海洋环境下运行,所处环境和陆上核电站完全不同,另外,浮动核电站反应堆为一体化小型反应堆,其布局、作业人员、安全设施等和陆上核电站相比具有较大差异,而目前除了《不扩散核武器条约》和《联合国海洋法公约》这些通用性国际公约外,国际上尚未针对浮动核电站的相关政策和标准规范^[14],因此,建议根据其作业的场所和装置的特点制定相关法律法规和标准,相关法律法规和标准可以参考小型反应堆、核动力船舶等指导说明和条例。

2. 由于浮动核电站处于颠簸的海洋环境中,浮动核电站可供工作人员的生活空间和工作区域狭小,和外界沟通交流的机会也较少,还需面对可能发生的极端灾害,心理方面和生理方面面临的困难相比陆上核电站更大,因此,要重视创建积极向上的组织文化,重视工作人员的情绪状态,尽可能改善工作人员的生活环境,如平台舱室的设计要符合人机工程的要求,优化舱室内的视觉环境^[15]。此外,对于海上浮动核电站工作人员的培训,除了要进行岗位

要求内的全面的系统培训外,还需进行应对极端灾害的教育和演练,提高平台上工作人员应对突发状况的应急能力。

四 结 论

第一,本文运用文献调研法从个体、设备、环境、管理4个维度归纳了13个影响浮动核电站失水事故的因素,并应用解释结构模型的方法建立了影响因素间的递阶结构,得出了各因素间的层次关系,为判定失水事故影响因素提供了理论依据。

第二,根据解释结构模型结果,针对法律法规和组织文化等底层因素提出了相关预防对策,可为浮动核电站设计和应急管理提供参考。

[参考文献]

- [1] 李佳佳,刘峰,赵芳. 国外海上浮动核电站的产业发展现状[J]. 船舶工程,2017,39(4):7-11.
- [2] 陈艳霞,朱成华,郭健,等. 海上浮动核电站总体设计初探[J]. 核动力工程,2021,42(3):171-176.
- [3] QIU J, LI L, TAI Y, et al. MELCOR simulation of the SBLOCA induced severe accident for the SMR in a floating nuclear power plant[J]. Progress in Nuclear Energy, 2020, 129(3): 103509.
- [4] 姜金贵,刘显铭. 基于ISM的核电站公众接受性模糊层次综合评价[J]. 工业工程,2014,17(2):136-142.
- [5] MUKESHIMANA M C, ZHAO ZHEN-YU, NSHIMIYIMANA J P. Evaluating strategies for renewable energy development in Rwanda: An integrated SWOT-ISM analysis[J]. Renewable Energy, 2021, 176: 402-414.
- [6] 裴子平,赵鹏飞,贺阿红. 基于ISM的煤矿员工安全意识影响因素研究[J]. 煤炭技术,2021,40(3):174-177.
- [7] 邹长城. 基于ISM的中国核电产业自主化发展影响因素分析[J]. 系统工程,2011,29(4):117-122.
- [8] 李鹏程,陈国华,张力,等. 核电厂操纵员人因失误影响因素分析[J]. 中国安全科学学报,2017,27(7):42-47.
- [9] YOU X M, SHAO G, TONG L L, et al. Analysis on Cooling Capacity of Passive Core Cooling System during LOCA Scenarios[J]. 2016, 50(1): 105-112.
- [10] 蒋建军,张力,胡鸿,等. 核电厂主控室数字化人机界面失误模式及原因分析[J]. 南华大学学报(社会科学版),2020,21(6):7-12.
- [11] 邹树梁,周轶,黄斌海,等. 基于HFACS的海上浮动核电站人因失误影响因素研究[J]. 南华大学学报(社会科学版),2020,21(2):1-8.
- [12] 张力,陈帅,青涛,等. 基于认知模型与故障树的核电厂严重事故下人因失误分析[J]. 核动力工程,2020,41(3):137-142.
- [13] 张力,李智明,胡鸿,等. 核电厂主控室人员作业绩效综合评价方法应用研究[J]. 安全与环境学报,2020,20(2):569-575.
- [14] 刘峰,李佳佳,刘丽红,等. 国外海上浮动核电站政策和标准规范[J]. 船舶工程,2017,39(4):12-15.
- [15] 余曼,陈艳霞,郭健,等. 基于人因工程的海上核能平台舱室视觉环境设计[J]. 船舶标准化工程师,2021,54(1):94-98.

Analysis of Influencing Factors of Loss of Coolant Accident in Offshore Floating Nuclear Power Plant Based on ISM

ZOU Shu-liang, LIU Na

(University of South China, Hengyang 421001, China)

Abstract: In order to ensure the safe operation of offshore floating nuclear power plants, this paper takes the loss of coolant accidents in offshore floating nuclear power plant as the research object, uses the method of literature research to extract 13 factors affecting the loss of coolant accidents from the four dimensions of individual, equipment, environment, and management and analyzes the hierarchical relationship of 13 factors using the Interpretive Structure Model (ISM) method. The results show that the psychological state of employees, the physiological state of the employees, the pipeline conditions and the electromagnetic emission control line conditions are the factors that directly affect the loss of water accidents, laws and regulations are the bottom factors, and the rest are middle-level factors. Based on the model results, relevant suggestions are made for the prevention of loss of coolant accident in floating nuclear power plants. The research results can provide references for the design and emergency management of floating nuclear power plants.

Key words: offshore floating nuclear power plant; loss of coolant accident; interpretive structure model; analysis of influencing factors

(本文编辑:魏玮)