

# 基于未确知测度理论的核电项目建造过程风险评价

蒋复量,张 帅<sup>①</sup>,李向阳<sup>②</sup>,康 虔<sup>③</sup>

(南华大学 环境与安全工程学院,湖南 衡阳 421001)

**[摘 要]** 为了提高核电项目建造过程风险评价的准确度,针对其风险评价过程中存在的诸多不确定性因素,应用未确知测度理论,建立核电项目建造过程风险评价模型。选用项目施工因素、进度因素、费用控制因素和环境因素等4个因素作为一级指标,项目质量等13个因素作为二级指标,构建评判要素的未确知测度函数;同时采用信息熵理论确定评价要素权重,最后依据置信度识别准则对核电项目建造过程风险等级进行判定。研究表明:该核电项目建造过程风险性等级为一般级别风险,与实际情况吻合。该方法可为科学评价核电项目建造过程风险提供一种新思路,为类似项目的风险评估提供参考和借鉴。

**[关键词]** 核电项目; 未确知测度; 信息熵; 风险评价

**[中图分类号]** X945 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1673-0755(2017)05-0005-05

为了加大生态环境保护治理力度,2017年我国在政府工作报告中再度提到“安全高效发展核电”。就核能开发利用来说,它越来越被人类视为一种有效保护环境的大型电力能源供应方式。发展中国家核能安全开发利用政策使得可再生能源市场出现了较高增长,导致其能源格局发生改变;截至2016年7月,全球范围内核电总装机容量总计到达390GW,占全球电力供应的比例为11%<sup>[1]</sup>。显然,核能的环保优越性使其充当低碳清洁能源,在世界新一轮的能源战略调整中具备足够的竞争优势,核电建设也因此成为未来发展趋势。然而2011年日本福岛核事故极大的影响了全球的核能发展战略,部分国家甚至出现了“弃核”的现象,广大民众对核能安全出现了疑虑和争论,核能的发展与使用问题不得不回到了重新论证的阶段<sup>[2]</sup>。另外,核电建设项目具有其他建设项目所不具备的特殊性:(1)安全性能高;(2)项目风险多;(3)投资花费大;(4)工程周期长<sup>[3]</sup>。为了确保核能的安全利用,同时针对核能本身固有的高风险以及核电项目建造过程所带来的风险隐患,这些涉及到施工、进度、费用以及环境问

题等,因此对核电项目建造过程进行风险评价具有重要意义<sup>[4-5]</sup>。

风险通常是指某一特定危险情况发生的可能性和严重性的组合。国内外学者对工程项目风险评价分析进行了许多研究,主要运用层次分析法<sup>[6]</sup>、模糊数学法<sup>[7]</sup>、灰色聚类法<sup>[8]</sup>、粗糙集理论<sup>[9]</sup>、集对分析法<sup>[10]</sup>和风险矩阵方法<sup>[11]</sup>等。核电项目建造过程风险需考虑公众接受度以及放射性参数等诸多不确定性因素,各因素彼此间又相互关联、耦合,是一个复杂的系统工程,常规分析方法难以反映真实情况。而王光远提出的未确知数学理论在各领域得到了广泛应用,取得了较好的效果<sup>[12-13]</sup>。鉴于此,本文在前人研究的基础上,引入未确知测度理论构建核电项目建造过程风险评价模型,研究项目质量、施工进度和施工安全等13项指标层对风险的影响。首先采用熵权法确定各指标的权重,然后建立置信度识别准则代替最大隶属度识别准则,最后利用未确知测度理论计算风险综合评价值进行判别评价。该模型在一定程度上可以减少误判,可为核电项目的建设提供科学的决策依据。

**[收稿日期]** 2017-08-31

**[基金项目]** 国家安监总局安全生产重大事故防治关键技术科技项目“铀矿深部开采辐射安全技术与装备研究”资助(编号:hunan-0022-2015AQ);南华大学研究生科研创新项目“循环动载荷作用下铀尾砂充填体氮析出机理研究”资助(编号:2016XCX24)

**[作者简介]** 蒋复量(1978-),男,湖南永州人,南华大学环境与安全工程学院副教授,博士。

①南华大学环境与安全工程学院硕士研究生。②南华大学环境与安全工程学院教授。③南华大学环境与安全工程学院讲师。

## 一 未确知测度理论

设评价对象集  $A = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$ , 评价指标集  $C = \{c_1, c_2, \dots, c_n\}$ 。若  $x_{ij}$  表示第  $i$  个待评价对象  $a_i$  关于第  $j$  个评价指标  $c_j$  的测量值, 得到  $m$  维向量  $a_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{im})$ 。设评价等级空间  $U = \{C_1, C_2, \dots, C_p\}$ , 第  $k$  个评价等级  $C_k$  为  $x_{ij}$  的等级值; 若第  $k$  级影响比第  $k+1$  级小, 记作  $C_k > C_{k+1}$ ; 若  $C_1 > C_2 > \dots > C_p$  或  $C_1 < C_2 < \dots < C_p$ , 则称  $\{C_1, C_2, \dots, C_p\}$  为  $U$  的一个有序分割类。

### (一) 单指标测度矩阵

若  $\mu_{ijk} = \mu(x_{ij} \in C_k)$  为统计值  $x_{ij}$  在第  $k$  个预测等级  $C_k$  的程度, 并满足:

非负有界性:

$$0 \leq \mu(x_{ij} \in C_k) \leq 1, (i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m; k = 1, 2, \dots, p) \quad (1)$$

归一性:

$$\mu(x_{ij} \in U) = 1 (i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m) \quad (2)$$

可加性:

$$\mu | x_{ij} \in \bigcup_{l=1}^k C_l | = \sum_{l=1}^k \mu(x_{ij} \in C_l), (k = 1, 2, \dots, p) \quad (3)$$

$\mu$  即为该指标的测度。

则构造单指标测度函数  $\mu(x_{ij} \in C_k)$  ( $i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m; k = 1, 2, \dots, p$ ), 计算某一评价因素  $x_i$  各指标测度值  $\mu_{ijk}$ , 得到单指标测度评价矩阵:

$$(\mu_{ijk})_{m \times p} = \begin{bmatrix} \mu_{i11} & \mu_{i12} & \dots & \mu_{i1p} \\ \mu_{i21} & \mu_{i22} & \dots & \mu_{i2p} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mu_{im1} & \mu_{im2} & \dots & \mu_{imp} \end{bmatrix} \quad (4)$$

### (二) 指标权重的确定

令  $w_j$  为  $X_j$  的权重,  $w_j$  表示测量指标  $x_{ij}$  与其他指标相比具有的相对重要程度,  $0 \leq w_j \leq 1, \sum_{j=1}^m w_j = 1$ ,

$W = \{W_1, W_2, \dots, W_m\}$  称为指标权重向量。利用信息熵理论确定指标权重, 即:

$$v_j = 1 + \frac{1}{\lg p} \sum_{k=1}^p u_{jk} \lg u_{jk} \quad (5)$$

$$w_j = v_j / \sum_{i=1}^n v_i \quad (6)$$

### (三) 多指标评价矩阵

若有  $\mu_{ik}$  满足  $0 \leq \mu_{ik} \leq 1, \mu_{ik} = \sum_{i=1}^n W_i \cdot \mu_{ijk}$  ( $k = 1,$

$2, \dots, p$ ), 得到预测矩阵:

$$(\mu_{ik})_{n \times p} = \begin{bmatrix} \mu_{11} & \mu_{12} & \dots & \mu_{1p} \\ \mu_{21} & \mu_{22} & \dots & \mu_{2p} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mu_{n1} & \mu_{n2} & \dots & \mu_{np} \end{bmatrix} \quad (7)$$

### (四) 置信度识别及结果评判

利用置信度评价准则来计算某核电项目建造过程风险评价分析结果。取  $\lambda$  为置信度 ( $\lambda \geq 0.5, \lambda$  一般取 0.5 或 0.6), 若  $C_1 > C_2 > \dots > C_p$ , 并有:

$$p_0 = \min \left| p: \sum_{k=1}^p \mu_{ik} > \lambda, i = 1, 2, \dots, n \right| \quad (8)$$

则待评对象等级为第  $p_0$  个评价等级  $C_{p_0}$ 。

## 二 建立核电项目建造过程风险评价指标体系

为了能最大程度地对核电项目建造过程存在的风险进行客观、全面和科学地识别与分析, 结合核电项目的实际情况, 如工程周期长、工程复杂性高、人员流动性大以及技术要求高等相关特殊性, 同时考虑到系统评价指标设置的原则要求, 即整体完备性、客观性、科学性、可操作性以及层次性原则<sup>[4]</sup>。根据上述分析, 本文借鉴吴燕的部分研究成果<sup>[14]</sup>, 以项目施工因素、项目进度因素、项目费用控制因素以及项目环境因素为一级指标, 再对其进行细分为 13 个二级指标, 最终建立了如表 1 所示的核电项目建造过程风险评价指标体系。

表 1 核电项目建造过程风险评价指标体系

目标层(A)	准则层(B)	指标层(C)
核电项目 建造过程 风险评价	项目施工 因素 b <sub>1</sub>	项目质量 C <sub>1</sub> ; 施工进度 C <sub>2</sub> ; 施工安全 C <sub>3</sub>
	项目进度 因素 b <sub>2</sub>	组织人员 C <sub>4</sub> ; 机械设备 C <sub>5</sub> ; 材料 C <sub>6</sub> ; 工艺方法 C <sub>7</sub> ; 环境影响 C <sub>8</sub>
	项目费用 控制因素 b <sub>3</sub>	制定费用的基准计划 C <sub>9</sub> ; 计划的动态管理 C <sub>10</sub> ; 监督计划的执行 C <sub>11</sub>
	项目环境 因素 b <sub>4</sub>	政策环境 C <sub>12</sub> ; 自然环境 C <sub>13</sub>

采用分级标准化法将各指标分为 5 级, 则定义评价等级集  $\{C_1, C_2, C_3, C_4, C_5\}$ , 即 I 级(低级别)、II 级(较低级别)、III 级(一般级别)、IV 级(较高级别)和 V 级(高级别)。通过制定评价指标的评分等级标准来完成从定性指标到定量指标的转化, 原文献中采用灰色理论对核电项目风险进行识别与分析, 在确立指标评分时, 邀请有经验的专家对各个风险级别赋值<sup>[14]</sup>, 考虑到未确知测度理论的运用条

件,将灰色理论中的专家打分赋值区间转化为未确知测度风险级别评判区间。文献[14]中为了便于获取并统计专家的打分值,将评价模型中涉及的指标等级定义为 I 级、II 级、III 级、IV 级和 V 级,则相

应地转化为 1 分、2 分、3 分、4 分和 5 分,如果存在介于两个赋值之间的指标,则表示为 1.5 分、2.5 分、3.5 分和 4.5 分,最终得到 5 个区间对应各自的风险级别。具体如表 2 所示。

表 2 核电项目建造过程风险评价指标风险级别

一级指标	二级指标	高级别风险	较高级别风险	一般级别风险	较低级别风险	低级别风险
项目施工因素 B <sub>1</sub>	项目质量 C <sub>1</sub>	>4~5	>3~4	>2~3	>1~2	>0~1
	施工进度 C <sub>2</sub>	>4~5	>3~4	>2~3	>1~2	>0~1
	施工安全 C <sub>3</sub>	>4~5	>3~4	>2~3	>1~2	>0~1
	组织人员 C <sub>4</sub>	>4~5	>3~4	>2~3	>1~2	>0~1
	机械设备 C <sub>5</sub>	>4~5	>3~4	>2~3	>1~2	>0~1
项目进度因素 B <sub>2</sub>	材料 C <sub>6</sub>	>4~5	>3~4	>2~3	>1~2	>0~1
	工艺方法 C <sub>7</sub>	>4~5	>3~4	>2~3	>1~2	>0~1
	环境影响 C <sub>8</sub>	>4~5	>3~4	>2~3	>1~2	>0~1
	制定费用的基准计划 C <sub>9</sub>	>4~5	>3~4	>2~3	>1~2	>0~1
项目费用控制因素 B <sub>3</sub>	计划的动态管理 C <sub>10</sub>	>4~5	>3~4	>2~3	>1~2	>0~1
	监督计划的执行 C <sub>11</sub>	>4~5	>3~4	>2~3	>1~2	>0~1
项目环境因素 B <sub>4</sub>	政策环境 C <sub>12</sub>	>4~5	>3~4	>2~3	>1~2	>0~1
	自然环境 C <sub>13</sub>	>4~5	>3~4	>2~3	>1~2	>0~1

### 三 基于未确知测度理论的风险评价分析方法构建路径

未确知测度理论风险评价是一个多层次多目标、定性分析与定量分析相结合的评价方法,能全面反映某核电项目建造过程风险评价价值,其构建路径如图 1 所示。

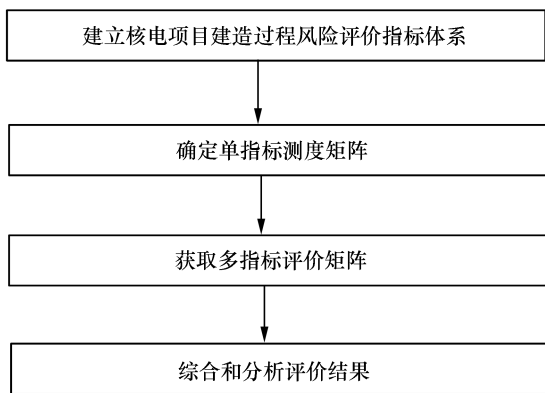


图 1 未确知测度理论风险评价构建路径

### 四 工程应用实例

根据文献[14]中的数据,将 6 名专家的打分值转化为平均值,可减少因专家个人原因对研究结论的影响,具体如表 3 所示,图 2 为构建的未确知测度函数。

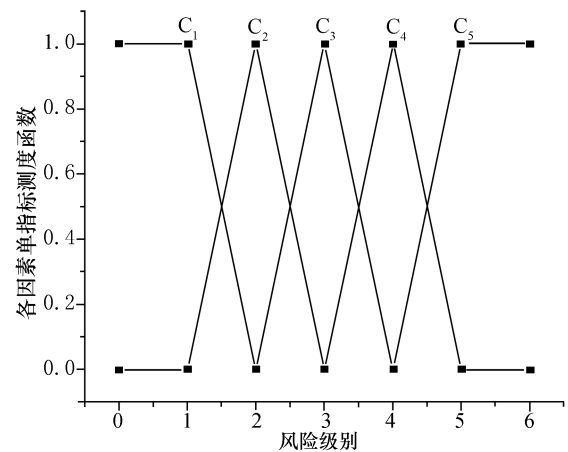


图 2 未确知测度函数

表 3 专家评分指标统计值

评分	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>	C <sub>4</sub>	C <sub>5</sub>	C <sub>6</sub>	C <sub>7</sub>	C <sub>8</sub>	C <sub>9</sub>	C <sub>10</sub>	C <sub>11</sub>	C <sub>12</sub>	C <sub>13</sub>
专家 1	4.0	4.5	2.5	3.5	2.0	2.5	4.0	3.5	2.5	1.5	2.5	3.0	2.0
专家 2	3.5	4.5	1.5	3.0	1.0	1.0	3.0	3.0	3.0	2.5	2.5	2.5	1.0
专家 3	2.5	4.0	2.0	4.0	1.5	1.5	3.5	3.0	3.0	2.5	3.0	2.0	1.5
专家 4	2.5	4.5	2.0	3.0	1.0	1.5	2.5	3.0	3.0	2.0	3.0	2.5	1.5
专家 5	3.0	4.5	1.5	3.5	1.0	1.0	3.0	3.0	2.5	2.0	2.5	2.0	1.0
专家 6	3.0	4.5	2.5	4.0	1.5	2.0	3.5	3.5	3.5	2.0	3.0	2.0	1.5
均值	3.1	4.4	2.0	3.5	1.3	1.6	3.3	3.2	2.9	2.1	2.8	2.3	1.4

### (一) 指标权重确定

运用熵权法确定指标权重,由式(5)和(6)求得核电项目建造过程风险评价指标权重:

$$W = \{0.0892, 0.0650, 0.1118, 0.0636, 0.0694, 0.0650, 0.0693, 0.0770, 0.0892, 0.0892, 0.0770, 0.0693, 0.0650\}$$

### (二) 风险评价

将专家评判指标结果依据未确知测度理论,计算得出单指标测度矩阵:

$$(\mu_{1jk})_{13 \times 5} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0.9 & 0.1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.6 & 0.4 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.5 & 0.5 & 0 \\ 0.7 & 0.3 & 0 & 0 & 0 \\ 0.4 & 0.6 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.7 & 0.3 & 0 \\ 0 & 0 & 0.8 & 0.2 & 0 \\ 0 & 0.1 & 0.9 & 0 & 0 \\ 0 & 0.9 & 0.1 & 0 & 0 \\ 0 & 0.2 & 0.8 & 0 & 0 \\ 0 & 0.7 & 0.3 & 0 & 0 \\ 0.6 & 0.4 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

由式(7)得到多指标未确知测度评价矩阵:

$$(\mu_{ik})_{1 \times 5} = [0.1136 \quad 0.3507 \quad 0.3938 \quad 0.1159 \quad 0.0260] \quad (10)$$

选取置信度  $\lambda = 0.6$ ,由式(10)可得该核电项目建造过程风险性等级为 III 级,即为一般级别风险,对于风险主体是可以接受的,该方法的评价结果与文献[14]的评价结论相符合。

虽然该核电项目建造过程风险评价等级为 III 级(一般),但是,从其测度函数的评价矩阵可知,影响核电项目建造过程风险的指标主要集中在机械设备、材料和自然环境。因此,即使总体风险评价等级为一般,考虑到核电项目的重要性,针对上述 3 个指

标在核电项目建造过程中存在的高风险性,提出以下 2 点要求:(1)核电项目是一个系统性的大工程,在确保自然环境允许的前提下,需要多方面统筹协调确保本质安全。(2)重点考虑建造过程所用的机械设备及所选用的材料,进一步确保核电项目建造过程的可靠性。

## 五 结 论

(一)借鉴相关研究学者在核电建设项目风险评价指标体系方面的研究成果,在对核电项目建造过程风险状况进行分析的基础上,结合实际情况,建立了核电项目建造过程风险评价的多级评价指标体系,由于常规评价信息存在模糊和不确定性的特点,常规评价方法受评价者主观影响因素比较大,因此采用未确知测度理论更加符合客观实际。

(二)所构建的未确知测度评价模型是利用熵权理论来确定各指标的权重,完全依据评价样本自身的相关信息,避免了人为主观因素对评价结果的影响,克服了以往仅依靠专家意见进行方案取舍的局限性,从而提高了评价结果的准确性,使评价结果更具有说服力。

(三)该核电项目建造过程风险评价结论是一般风险级别,与灰色理论综合评价法结论一致,且评价结果优于灰色理论(评价结论无法精准确定,存在区间的干扰)。研究表明:基于未确知测度的评价模型科学有效,其评价结论合理、准确,符合实际情况。

### [参考文献]

- [1] 任德曦,胡泊.世界核电重启与中国的核电大国、核电强国之路[J].中外能源,2017,22(3):24-32.
- [2] 邓理峰,王大鹏.重思邻避困境的风险沟通与治理问题:基于核电的讨论[J].南华大学学报:社会科学版,2017,18(3):5-15.
- [3] 刘元欣.核电建设项目工程伦理风险评估模型与控制

- 研究[D].北京:华北电力大学,2016.
- [4] NB/T 20157-2012,核电工程施工质量保证规定[S].
- [5] NB/T 20048-2011,核电厂建设项目经济评价方法[S].
- [6] 程书波,郭曼丽.基于层次分析法的地铁建设项目社会稳定风险评估[J].河南理工大学学报:社会科学版,2014,15(3):273-278.
- [7] 廖荣.基于模糊评价法的徐大堡核电建设项目风险管理研究[D].衡阳:南华大学,2015.
- [8] 陈伟,容思思,钱振宇,等.基于灰色聚类的太阳能建筑一体化技术风险评价[J].工程经济,2016,26(10):56-60.
- [9] 曾雪琴,陈建国,吕峰.基于模糊数和粗糙集的建设项目风险评估[J].统计与决策,2015(1):80-83.
- [10] 马瑞.基于集对分析的PPP项目成功度评价研究[D].大连:大连理工大学,2016.
- [11] 张岩.浙江三门核电项目建设风险管理研究[D].杭州:浙江工业大学,2013.
- [12] 康度,王新民,蒲浩,等.基于变权-未确知测度理论的岩溶路基稳定性分析[J].东北大学学报:自然科学版,2016,37(3):435-439.
- [13] 彭康,李夕兵,王世鸣,等.基于未确知测度模型的尾矿库溃坝风险评价[J].中南大学学报:自然科学版,2012,43(4):1447-1452.
- [14] 吴燕.基于灰色理论的X核电项目风险评价研究[D].太原:山西大学,2015.

## The Risk Assessment of a Nuclear Power Project Construction Process Based on Uncertainty Measurement Theory

JIANG Fu-liang, ZHANG Shuai, LI Xiang-yang, KANG Qian  
(University of South China, Hengyang 421001, China)

**Abstract:** In order to improve the accuracy of the nuclear power project construction process risk analysis, and in view of the uncertainty factors in the process of risk analysis, a nuclear power project construction process risk analysis model was set up with applying of the uncertainty measurement theory. Four factors, such as project construction factor, schedule factor, cost control factor and environment factor, are selected as the first level indicators, and the 13 factors such as project quality are taken as the second level indicators to construct the unascertained measurement function of the evaluation factors. The weight of evaluation factors were determined by the information entropy theory and the nuclear power project construction process risk level was finally determined on the basis of confidence level recognition criteria. The research results show that nuclear power project construction process's risk level is the general level risk, and it coincides with the actual situation. This method can provide a new idea for the scientific evaluation of the risk of the nuclear power project construction process, and provide reference for the risk assessment of similar projects.

**Key words:** nuclear power project; uncertainty measurement; entropy of information; risk assessment