

# 基于直觉模糊层次分析的特种设备事故应急预案评价

郑耿峰

福建省特种设备检验研究院 福州 350008

**摘要** 针对现有特种设备事故应急预案大多未经实践证明,且缺乏科学、合理的评价体系的问题,文中提出一种基于直觉模糊层次分析的特种设备应急预案评价方法。首先,从预案实施前的准备、实施中的执行、实施后的完善3个角度构建了应急预案的绩效评价指标体系;其次,考虑到应急过程中的不确定性和评价过程的主观性,利用直觉模糊层次分析计算各指标权重,并结合专家小组对应急仿真的打分确定各指标表现,计算各方案的综合绩效,确定最优方案;最后,与人工评判结果进行比较,证明了该方法的可行性和有效性。

**关键词:** 特种设备; 应急仿真; 直觉模糊层次分析; 应急预案评价

中图分类号 TE319

## Emergency Plan Evaluation of Special Equipment Accident Based on Intuitionistic Fuzzy Analytic Hierarchy Process

ZHENG Geng-feng

Fujian Special Equipment Inspection and Research Institute, Fuzhou 350008, China

**Abstract** In view of the problems that most of the existing emergency plans for special equipment accidents have not been proved by practice and lack of scientific and reasonable evaluation system, this paper proposed an evaluation method of emergency plan for special equipment based on intuitionistic fuzzy AHP. Firstly, the performance evaluation index system of the emergency plan is constructed from three aspects: preparation before implementation, execution in implementation and improvement after implementation. Secondly, considering the uncertainty in the emergency process and the subjectivity of the evaluation process, the weights of each index are calculated by intuitionistic fuzzy AHP, and the performance of each index is determined by combining the scores of the expert group on the emergency simulation. Finally, the feasibility and effectiveness of this method are proved by comparing with the results of artificial evaluation.

**Keywords** Special equipment, Emergency simulation, Intuitionistic fuzzy analytic hierarchy process, Emergency plan evaluation

### 1 引言

截至2015年底,全国特种设备总量达1100.13万台,比2014年底上升6.14%<sup>[1]</sup>。随着特种设备数量和种类的增多,因为管理不善、操作不当而产生的安全事故也随之增加。2015年,全国共发生特种设备事故和相关事故257起,死亡278人,受伤320人。总结257起事故,其中既有因为管理不善导致的违章作业、操作不当,也有因为安全保障工作缺乏导致的设备缺陷、安全附件失效,更有因为应急救援不当导致的人员伤亡事故。但是,由于我国对应急预案的研究时间不长,现有应急预案大多未经实践证明,且缺乏科学、合理的评价体系,其效果难以得到保障。因此,建立一套行之有效的特种设备应急预案评价系统,既是规范预案设计、提高预案效果的实际需要,也是进一步推进特种设备高效管理、推进安全生产全

面执行的必然诉求。

关于如何建立一套应急预案评价体系,并给出评价结果,国内外学者已有不少相关研究。张<sup>[2]</sup>将多层次灰色评价方法引入应急预案的实施效果评价中,建立基于灰色多层次评价的危化品泄漏事故应急预案实施效果评价模型。张等<sup>[3]</sup>在相关文献基础上总结归纳出66种可用于应急预案评价的指标要素,并利用因子分析多元统计分析方法对指标进行筛选以及确认权重。汤等<sup>[4]</sup>从全面性、实用性、可操作性、可扩展性4个角度出发,选取大量评价指标因子,然后利用聚类法对评价指标因子进行分析并归类,确认16个有效评价指标,并利用改进的模糊层次分析法提出了铁路应急预案综合评估模型。程等<sup>[5]</sup>基于应急预案内在特点及相关应急预案规定尽可能详细地罗列指标,再进行指标筛选,并利用指标序号法和专家咨询确定权重,最后使用线性加权模型得出预案可行性评

基金项目:国家工信部2018年智能制造综合标准化与新模式专项项目(GXSP20181001);福建省质量技术监督局科技项目(FJQI2018029);国家科技部质检公益性行业科研专项项目(201410139)

This work was supported by the 2018 Intelligent Manufacturing Comprehensive Standardization Project of Ministry of Industry and Information Technology(GXSP20181001), Science and Technology Project of Fujian Quality Supervision Bureau(FJQI2018029), National key Research and Development Program(2019YFB1310704) and Research Project of Quality Inspection Public Welfare Industry of the Ministry of Science and Technology(201410139).

通信作者:郑耿峰(214871134@qq.com)

分。陕等<sup>[6]</sup>通过直觉模糊集决策方法和TOPSIS方法的组合使用,定义了直觉模糊集的正理想解和负理想解,构建了基于直觉模糊集的突发事件应急预案综合评价模型。承等<sup>[7]</sup>从经济性、环保型、安全性、协调度和迅捷度5个方面构建了化工事故应急演练评价指标,并用层次分析法确定权重,利用模糊综合评价法对应急演练的结果给出评价。Taber等<sup>[8]</sup>在静态、动态环境下,以应急准确度和应急速度为参考结果,考察了ERFB对离岸油气紧急事故的应急效率。Sharma等<sup>[9]</sup>构建e-ICS电子事故指挥系统,以印度石油有限公司IOCL为例子,演示了其应急响应机制并进行了评价。

但在现有研究中,关于化工事故、自然灾害的应急预案研究较多,缺乏以特种设备为核心的应急预案的评价研究;另外,这些文献中的指标体系构建依据主要集中在应急预案的文本内容上,缺乏结构和逻辑上的科学性;而且,虽然少数学者将评价体系用于实际演练,但是由于演练次数较少以及演练过程简易,评价体系的可靠性并不能得到充分证明。国内学者对于特种设备的风险评价,多采用层次分析法来确定指标权重<sup>[10-12]</sup>。然而,层次分析法过分依赖于专家的主观性,而且在判断矩阵一致性检验不达标时,专家需要进行二次打分。在应急救援过程中,不确定因素较多,由于专家知识水平的局限性,对指标的评判存在不确定性;当判断矩阵一致性不能通过时,二次打分会造成应急预案评价效率低与信息失真的可能性。因此,本文拟从特种设备事故应急预案的结构出发,使用仿真软件对应急预案的整个流程进行仿真分析,找到影响应急过程的关键因子,以此构建特种设备事故应急预案评价体系;其次,综合直觉模糊层次分析法的特点,提出特种设备事故应急预案的效果评价方法;最后,通过实例分析证明了该指标体系和评价方法的有效性。本文对评价体系的构建具有独创意义,且为工业事故应急系统评价带来一个新的方法和思路,对特种设备领域的评价研究有一定的参考价值。

## 2 特种设备事故应急预案评价指标体系的构建

### (1) 预案结构分析

应急预案评价对安全生产的外部监管和事故处理等方面

有着重大作用。但现有研究尚未建立能科学反映特种设备事故应急预案评价的指标体系。本文在构建指标体系时,首先考虑预案的文本和结构合理问题。根据特种设备应急救援预案指南,可以得知救援预案的结构如表1所列。

表1 特种设备应急救援预案构成

Table 1 Composition of emergency rescue plan for special equipment

特种设备应急救援预案
总则
应急救援组织机构及职责
单位资源和安全状况分析
危险源辨识与灾害后果预测
预防和预警机制
应急响应
应急技术和现场处置措施
保障措施
预案编制管理和更新
事故调查

### (2) 指标选取

在分析预案指南结构的基础上,本文以预案实施前准备、实施中处理、实施后完善的进行流程为主线,利用EDS软件对预案进行仿真后,将影响预案的关键因子归纳为应急准备的完备性( $B_1$ )、辨识预警的精确性( $B_2$ )、应急处理的有效性( $B_3$ )、应急作业的高效性( $B_4$ )、后期处理的完善性( $B_5$ )共5个方面,并细分为21个二级指标,构建成整个评价指标体系。本文将保障措施、应急救援组织机构及职责、单位资源和安全状况分析归纳为预案实施准备部分,采用5个二级指标对此部分所有流程进行评估;将危险源辨识与灾害后果预测、预防和预警机制归纳为预防预警部分,采用3个二级指标对此部分所有流程进行评估;将应急响应、应急技术和现场处置措施归纳为应急处理和应急作业两个部分,各采用5个二级指标对这两个部分所有流程进行评估;将预案编制管理和更新以及事故调查归纳为后期处置部分,采用3个二级指标对此部分所有流程进行评估。特种设备事故应急指标体系的逻辑结构如图1所示。表2为完整的特种设备事故应急预案评估指标体系。

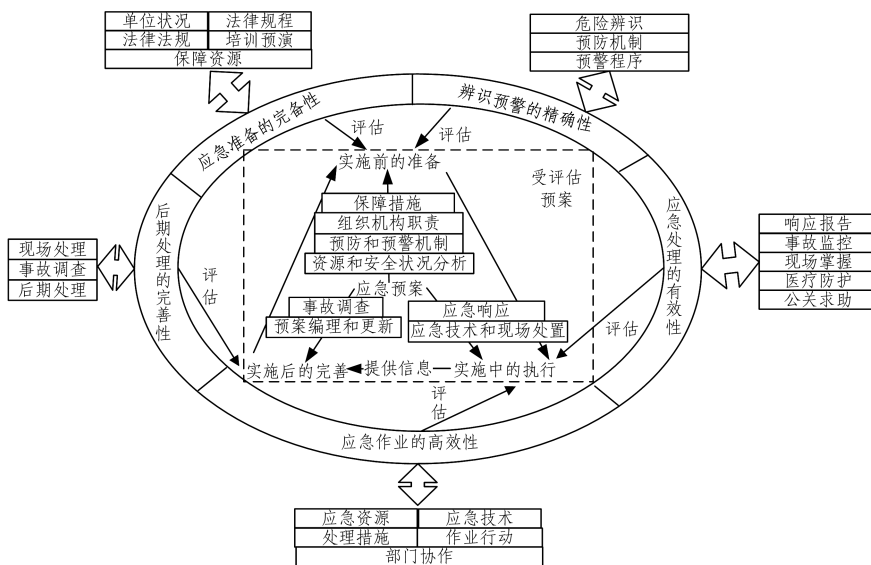


图1 特种设备事故应急预案评价指标逻辑结构图

Fig. 1 Logic structure of evaluation index of emergency plan for special equipment accident

表2 应急预案各级评估指标及编号

Table 2 Evaluation index and no. of emergency plan at all levels

一级指标	二级指标
应急准备的完备性 B <sub>1</sub>	法律规程的完备性 C <sub>11</sub>
	培训预演的针对性 C <sub>12</sub>
	组织机构设置合理性 C <sub>13</sub>
	单位状况的安全性 C <sub>14</sub>
	保障资源的完备性 C <sub>15</sub>
辨识预警的精确性 B <sub>2</sub>	危险辨识的严密性 C <sub>26</sub>
	预防机制的针对性 C <sub>27</sub>
	预警程序的高效性 C <sub>28</sub>
	响应报告的高效性 C <sub>31</sub>
应急处理的有效性 B <sub>3</sub>	事故监控的有效性 C <sub>32</sub>
	现场掌控的全面性 C <sub>33</sub>
	医疗卫生及安全防护的完备性 C <sub>34</sub>
应急作业的高效性 B <sub>4</sub>	公关和求助的及时性 C <sub>35</sub>
	应急资源的易得性 C <sub>41</sub>
	应急技术的针对性 C <sub>42</sub>
	处理措施的准确性 C <sub>43</sub>
	作业行动的速效性 C <sub>44</sub>
后期处理的完善性 B <sub>5</sub>	部门协作的协调性 C <sub>45</sub>
	现场处理的完整性 C <sub>51</sub>
	事故调查的全面性 C <sub>52</sub>
	后期处理的合理性 C <sub>53</sub>

### 3 基于直觉模糊层次分析法的特种设备事故应急预案效果评价

本方案在计算时采用直觉模糊层次分析法,该方法能够较好、较完整地反映决策主体对被评价事物的不确定性,使决策时拥有更多的信息,同时能将定量和定性指标更好地统一起来;而且在判断矩阵一致性不通过时,能够通过参数的调整,得到符合要求的直觉模糊判断矩阵,使用一手的数据,避免信息的失真。具体的计算流程如下。

#### (1) 构造直觉模糊判断矩阵

该步骤旨在收集专家小组对各项指标重要程度的偏好意见,以确立评分计算权重。首先针对指标体系中的5个一级指标进行偏好设定,按表3标准建立直觉模糊判断矩阵,即对5个一级指标进行两两对比和打分,构建一个  $\mathbf{R} = (r_{ij})_{n \times n}$  方阵,其中  $i, j$  代表判断矩阵中的行和列,  $r_{ij} = (\mu_{ij}, \nu_{ij})$  ( $i, j = 1, 2, \dots, n$ ),  $\mu_{ji} = \nu_{ij}$ ,  $\nu_{ji} = \mu_{ij}$ ,  $\mu_{ii} = \nu_{ii} = 0.5$ ,  $\mu_{ij} + \nu_{ij} \leq 1$ 。  $\mu_{ij}$  表示第  $i$  个指标优于第  $j$  个指标的程度;  $\nu_{ij}$  表示第  $i$  个指标劣于第  $j$  个指标的程度,  $\pi_{ij} = 1 - \mu_{ij} - \nu_{ij}$ , 表示决策者的犹豫度<sup>[13]</sup> 或不确定性。本文直觉模糊判断矩阵的构建依据为特种设备领域专家的打分意见,对于定性指标之间的对比(见表3),专家偏好与直觉模糊数的对应(评语均为  $i$  指标比较  $j$  指标的偏好),中间数则代表处于两个评价语之间的偏好程度。在得到以模糊数存在的偏好意见后,构建直觉模糊判断矩阵,以便能够直观得到各项指标的相对重要程度,同时为一致性检验提供数据。

表3 专家偏好与直觉模糊数对应表

Table 3 Corresponding table of expert preference and intuitionistic fuzzy number

偏好评价语	直觉模糊数	偏好评价语	直觉模糊数
极端重要	(0.90, 0.10, 0.00)	较不重要	(0.40, 0.45, 0.15)
很重要	(0.80, 0.15, 0.05)	不重要	(0.30, 0.60, 0.10)
重要	(0.70, 0.20, 0.10)	很不重要	(0.20, 0.75, 0.05)
较重要	(0.60, 0.25, 0.15)	极端不重要	(0.10, 0.90, 0.00)
同等重要	(0.50, 0.30, 0.20)		

#### (2) 一致性检验

该步骤旨在对收集到的专家偏好进行逻辑上的检验,如果在一致性检验上未能满足要求,说明专家对各指标相对重要程度的判断存在冲突。在使用层次分析法时,出现此类情况需要专家小组重新对相对重要程度进行打分,然而在使用直觉模糊层次分析法时,可利用迭代公式,设置参数进行迭代,避免再次打分。

首先,需要构造直觉模糊判断矩阵的一致性检验公式<sup>[14]</sup>:

$$d(\bar{\mathbf{R}}, \mathbf{R}) = \frac{1}{2(n-1)(n-2)} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (|\bar{\mu}_{ij} - \mu_{ij}| + |\bar{\nu}_{ij} - \nu_{ij}| + |\bar{\pi}_{ij} - \pi_{ij}|) \quad (1)$$

其中,  $\mathbf{R}$  为各级指标间进行直觉模糊偏好判断得到的直觉模糊判断矩阵,  $\bar{\mathbf{R}}$  为下列计算公式得到的直觉模糊一致性判断矩阵,  $\bar{\mathbf{R}} = (\bar{r}_{ij})_{n \times n}$ , 计算公式<sup>[14]</sup> 如下:

(1) 当  $j > i + 1$  时, 令  $\bar{\mathbf{R}} = (\bar{\mu}_{ij}, \bar{\nu}_{ij})$ , 其中:

$$\bar{\mu}_{ij} = \frac{\sqrt[j-i-1]{\prod_{t=i+1}^{j-1} \mu_{it} \mu_{tj}}}{\sqrt[j-i-1]{\prod_{t=i+1}^{j-1} \mu_{it} \mu_{tj}} + \sqrt[j-i-1]{\prod_{t=i+1}^{j-1} (1 - \mu_{it})(1 - \mu_{tj})}}, \quad j > i + 1 \quad (2)$$

$$\bar{\nu}_{ij} = \frac{\sqrt[j-i-1]{\prod_{t=i+1}^{j-1} \nu_{it} \nu_{tj}}}{\sqrt[j-i-1]{\prod_{t=i+1}^{j-1} \nu_{it} \nu_{tj}} + \sqrt[j-i-1]{\prod_{t=i+1}^{j-1} (1 - \nu_{it})(1 - \nu_{tj})}}, \quad j > i + 1 \quad (3)$$

(2) 当  $j = i + 1$  时, 令  $\bar{r}_{ij} = r_{ij}$ ;

(3) 当  $j < i + 1$  时, 令  $\bar{r}_{ij} = (\bar{\nu}_{ij}, \bar{\mu}_{ij})$ 。

按式(2)~式(3)得到判断矩阵  $\bar{\mathbf{R}} = (\bar{r}_{ij})_{n \times n}$ , 并代入式(1)进行一致性检验。若  $d(\bar{\mathbf{R}}, \mathbf{R}) < 0.1$ , 则通过一致性检验, 否则未通过一致性检验。

当一致性检验未通过时, 引入参数  $\sigma$  进行调整和变换一致性判断矩阵。当一致性检验未通过时, 不同于层次分析法的是, 直觉模糊层次分析法可以通过设置和调整参数  $\sigma \in [0, 1]$  进行迭代, 直至直觉模糊一致性判断矩阵能够通过一致性检验。

具体计算公式<sup>[14]</sup> 如下:

$$\tilde{\mu} = \frac{(\mu_{ij})^{1-\sigma} (\bar{\mu}_{ij})^{\sigma}}{(\mu_{ij})^{1-\sigma} (\bar{\mu}_{ij})^{\sigma} + (1 - \mu_{ij})^{1-\sigma} (1 - \bar{\mu}_{ij})^{\sigma}}, \quad i, j = 1, 2, \dots, n \quad (4)$$

$$\tilde{\nu} = \frac{(\nu_{ij})^{1-\sigma} (\bar{\nu}_{ij})^{\sigma}}{(\nu_{ij})^{1-\sigma} (\bar{\nu}_{ij})^{\sigma} + (1 - \nu_{ij})^{1-\sigma} (1 - \bar{\nu}_{ij})^{\sigma}}, \quad i, j = 1, 2, \dots, n \quad (5)$$

经以上步骤, 得到迭代后的直觉模糊一致性判断矩阵  $\tilde{\mathbf{R}} = (\tilde{r}_{ij})_{n \times n}$ , 其中  $\tilde{r}_{ij} = (\tilde{\mu}_{ij}, \tilde{\nu}_{ij})$ 。在此矩阵基础上再次进行一致性检验:

$$d(\tilde{\mathbf{R}}, \mathbf{R}) = \frac{1}{2(n-1)(n-2)} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (|\tilde{\mu}_{ij} - \mu_{ij}| + |\tilde{\nu}_{ij} - \nu_{ij}| + |\tilde{\pi}_{ij} - \pi_{ij}|) \quad (6)$$

直到判断矩阵通过一致性检验后, 迭代停止。

得到满足一致性检验的直觉模糊判断矩阵之后, 意味着各指标的相对重要程度已经符合逻辑且满足要求, 可以利用其计算指标权重。

#### (3) 权重计算

得到通过一致性检验的直觉判断矩阵后, 计算各指标权

重,以确定打分时各指标所占比重。同层指标相对上一层指标的权重计算公式<sup>[14]</sup>为:

$$\omega_i = \left( \frac{\sum_{j=1}^n \mu_{ij}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (1-\nu_{ij})}, 1 - \frac{\sum_{j=1}^n (1-\mu_{ij})}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \nu_{ij}} \right), i=1, 2, \dots, n \quad (7)$$

由表 2 可知,本评价体系共有 5 个一级指标,21 个二级指标。设一级指标的权重为  $\omega_k (k=1, 2, \dots, 5)$ , 二级指标相对于一级指标的权重为  $\omega_{kl} (k, l=1, 2, \dots, 5)$ , 二级指标相对于预案总评分的综合权重为  $W_{kl}$ , 一级指标  $B_i$  下具有的二级指标个数为  $n_i$ 。由于  $\omega_k$  和  $\omega_{kl}$  都为直觉模糊数, 因此其计算需利用直觉模糊数的运算法则<sup>[15]</sup>:

$$\alpha_1 \oplus \alpha_2 = (\mu_{\alpha_1} + \mu_{\alpha_2} - \mu_{\alpha_1} \cdot \mu_{\alpha_2}, \nu_{\alpha_1} \cdot \nu_{\alpha_2}) \quad (8)$$

$$\alpha_1 \otimes \alpha_2 = (\mu_{\alpha_1} \cdot \mu_{\alpha_2}, \nu_{\alpha_1} + \nu_{\alpha_2} - \nu_{\alpha_1} \cdot \nu_{\alpha_2}) \quad (9)$$

$$\lambda \otimes \alpha_1 = (1 - (1 - \mu)^\lambda, \nu^\lambda), \lambda \text{ 为常数} \quad (10)$$

因此有

$$W_{kl} = \omega_k \otimes \omega_{kl} \quad (11)$$

利用以上步骤得到各指标相对于方案选择的总权重以及相对于各上层指标的权重,在专家打分后可根据需求使用,既可以得到最终方案选择的得分,也可以计算方案下各项一级指标的分项得分。

(4) 基于 EDS 仿真和专家评价的模糊综合评价

得到二级指标综合权重以后,召集专家小组使用 EDS 应急仿真软件,对预案进行模拟和评分,对评分使用模糊综合评

价进行处理,得到针对每一项二级指标的评分  $G_{kl}$ 。

(5) 特种设备事故应急预案评分

在集结每一层的权重,并得到所有二级指标的表现  $G_{kl}$  后,利用式(12)求得预案各一级指标的评分:

$$F_k = \bigoplus_{l=1}^{n_k} (G_{kl} \otimes W_{kl}), k=1, 2, \dots, 5 \quad (12)$$

利用式(13)求得预案的总效率值:

$$F = \bigoplus_{k=1}^5 (F_k \otimes \omega_k) \quad (13)$$

此时求得的总效率值  $F$  仍然表现为直觉模糊数。使用直觉模糊数的排序函数<sup>[14]</sup>进行绩效评价,其数学表达式为:

$$\rho(\alpha) = 1 - 0.5(1 + \pi_\alpha)(1 - \mu_\alpha) \quad (14)$$

得到最后的预案评价价值  $\rho(F)$ , 与其他预案评价价值进行比较以判断预案优劣。

## 4 实例分析

(1) 构造直觉模糊偏好关系判断矩阵

福建省特种设备检验研究院现有两套特种设备事故应急预案可供选择,分别用  $A, B$  表示。两个预案以《福建省特种设备检验研究院特种设备事故应急与调查处理总体预案》为基础,根据当地具体情况以及锅炉生产环境进行增添和修改,并配套资源。

评价体系建立了 6 个直觉模糊偏好关系判断矩阵,并邀请该院专家进行偏好打分,其中一级指标偏好判断矩阵结果如表 4 所列。

表 4 一级指标偏好判断矩阵

Table 4 Level I indicator preference judgment matrix

一级指标	应急准备的完备性 B1	辨识预警的精确性 B2	应急处理的有效性 B3	应急作业的高效性 B4	后期处理的完善性 B5
应急准备的完备性 B1	(0.5, 0.5)	(0.35, 0.6)	(0.4, 0.5)	(0.45, 0.55)	(0.65, 0.25)
辨识预警的精确性 B2	(0.6, 0.35)	(0.5, 0.5)	(0.6, 0.3)	(0.65, 0.25)	(0.8, 0.2)
应急处理的有效性 B3	(0.5, 0.4)	(0.3, 0.6)	(0.5, 0.5)	(0.5, 0.4)	(0.7, 0.25)
应急作业的高效性 B4	(0.55, 0.45)	(0.25, 0.65)	(0.4, 0.5)	(0.5, 0.5)	(0.65, 0.2)
后期处理的完善性 B5	(0.25, 0.65)	(0.2, 0.8)	(0.25, 0.7)	(0.2, 0.65)	(0.5, 0.5)

该偏好判断矩阵说明,辨识预警精确性对于专家组偏好较强;另 4 项一级指标中,应急准备完备性偏好最弱;应急作业高效性和后期处理完善性相比较时,犹豫度较高,说明该项指标专家偏好具有一定的不确定性。

(2) 一致性检验

对表 4 使用式(2)一式(3)进行变换,得到直觉模糊一致性判断矩阵,如表 5 所列,其他偏好矩阵同理。

得到表 5 后,利用式(1)对所有直觉模糊一致性判断矩阵进行一致性检验。结果如下:

$$d(\bar{\mathbf{R}}, \mathbf{R})_B = 0.06805 < 0.1$$

同理,得到二级指标直觉模糊判断矩阵的一致性检验结果为:

$$d(\bar{\mathbf{R}}, \mathbf{R})_{B_1} = 0.05709 < 0.1$$

$$d(\bar{\mathbf{R}}, \mathbf{R})_{B_2} = 0.05 < 0.1$$

$$d(\bar{\mathbf{R}}, \mathbf{R})_{B_3} = 0.03591 < 0.1$$

$$d(\bar{\mathbf{R}}, \mathbf{R})_{B_4} = 0.04919 < 0.1$$

$$d(\bar{\mathbf{R}}, \mathbf{R})_{B_5} = 0.06665 < 0.1$$

由以上结果可知,所有直觉模糊判断矩阵均通过一致性检验。

表 5 一级指标一致性判断矩阵

Table 5 Level I indicator consistency judgment matrix

一级指标	应急准备的完备性 B1	辨识预警的精确性 B2	应急处理的有效性 B3	应急作业的高效性 B4	后期处理的完善性 B5
应急准备的完备性 B1	(0.5, 0.5)	(0.35, 0.6)	(0.4468, 0.3913)	(0.4232, 0.3956)	(0.4833, 0.3368)
辨识预警的精确性 B2	(0.6, 0.35)	(0.5, 0.5)	(0.6, 0.3)	(0.6, 0.2222)	(0.7765, 0.0984)
应急处理的有效性 B3	(0.3913, 0.4468)	(0.3, 0.6)	(0.5, 0.5)	(0.5, 0.4)	(0.65, 0.1429)
应急作业的高效性 B4	(0.3956, 0.4232)	(0.2222, 0.6)	(0.4, 0.5)	(0.5, 0.5)	(0.65, 0.2)
后期处理的完善性 B5	(0.3368, 0.4833)	(0.0984, 0.7765)	(0.1429, 0.65)	(0.2, 0.65)	(0.5, 0.5)

(3) 权重计算

由以上结果可知,所有直觉模糊判断矩阵通过一致性检

验。将通过检验的所有  $\bar{\mathbf{R}}$  代入式(7)得到一级指标和二级指标的权重为:

- $\omega_1 = (0.1581, 0.7473), \omega_2 = (0.2208, 0.8262)$
- $\omega_3 = (0.1680, 0.7598), \omega_4 = (0.1556, 0.7441)$
- $\omega_5 = (0.0917, 0.6637), \omega_{11} = (0.1308, 0.7135)$
- $\omega_{12} = (0.1964, 0.7955), \omega_{13} = (0.1674, 0.7593)$
- $\omega_{14} = (0.1200, 0.7000), \omega_{15} = (0.1851, 0.7814)$
- $\omega_{21} = (0.3551, 0.6915), \omega_{22} = (0.2502, 0.5718)$
- $\omega_{23} = (0.2710, 0.5955), \omega_{31} = (0.2156, 0.8196)$
- $\omega_{32} = (0.1934, 0.7916), \omega_{33} = (0.1690, 0.7610)$
- $\omega_{34} = (0.1248, 0.7052), \omega_{35} = (0.0903, 0.6617)$
- $\omega_{41} = (0.1801, 0.7775), \omega_{42} = (0.1751, 0.7718)$
- $\omega_{43} = (0.2144, 0.8163), \omega_{44} = (0.1672, 0.7629)$
- $\omega_{45} = (0.1461, 0.7389), \omega_{51} = (0.3730, 0.7102)$
- $\omega_{52} = (0.2336, 0.5571), \omega_{53} = (0.3043, 0.6348)$

将一级指标和二级指标的权重代入式(11)得到总权重  $W_{kl}$ , 如表 6 所列。

表 6 总权重表  
Table 6 Total weight table

一级指标	二级指标	总权重
(0.1581, 0.7473)	(0.1308, 0.7135)	(0.0207, 0.9276)
	(0.1964, 0.7955)	(0.0311, 0.9483)
	(0.1674, 0.7593)	(0.0265, 0.9392)
	(0.1200, 0.7000)	(0.0190, 0.9242)
	(0.1851, 0.7814)	(0.0293, 0.9448)
(0.2208, 0.8262)	(0.3551, 0.6915)	(0.0784, 0.9464)
	(0.2502, 0.5718)	(0.0552, 0.9256)
	(0.2710, 0.5955)	(0.0598, 0.9297)
(0.1680, 0.7598)	(0.2156, 0.8196)	(0.0362, 0.9567)
	(0.1934, 0.7916)	(0.0325, 0.9499)
	(0.1690, 0.761)	(0.0284, 0.9426)
	(0.1248, 0.7052)	(0.0210, 0.9292)
	(0.0903, 0.6617)	(0.0152, 0.9187)
(0.1556, 0.7441)	(0.1801, 0.7775)	(0.0288, 0.9431)
	(0.1751, 0.7718)	(0.0272, 0.9416)
	(0.2144, 0.8163)	(0.0334, 0.9530)
	(0.1672, 0.7629)	(0.0260, 0.9393)
	(0.1461, 0.7389)	(0.0227, 0.9332)
(0.0917, 0.6637)	(0.3730, 0.7102)	(0.0342, 0.9025)
	(0.2336, 0.5571)	(0.0214, 0.8511)
	(0.3043, 0.6348)	(0.0279, 0.8772)

(4) 基于流程仿真的模糊综合评价

1) 流程仿真

利用 EDS 软件, 对预案 A 进行仿真。通过仿真来确认预案 A 执行的效果, 并根据效果对预案进行模糊综合评价。仿真过程如图 2 所示。



图 2 应急响应流程仿真

Fig. 2 Emergency response process simulation

2) 模糊综合评价

在对预案 A 进行仿真后, 专家组对预案执行效果进行评

价, 给出评语集  $V = \{V_1, V_2, V_3, V_4\} = \{\text{优, 良, 中, 差}\}$ , 评价等级分为 4 级, 对应百分制区间, 如表 7 所列。

表 7 评级等级换算表

Table 7 Rating scale conversion table

评价等级	优	良	中	差
百分制区间	90~100	70~90	50~75	0~50
中位数	95	80	62.5	25

10 人专家小组对预案 A 评价如下所示:

$$R_1 = \begin{pmatrix} B_1 & V_1 & V_2 & V_3 & V_4 \\ C_{11} & 0.4 & 0.2 & 0.2 & 0.2 \\ C_{12} & 0.3 & 0.4 & 0.2 & 0.1 \\ C_{13} & 0.5 & 0.3 & 0.1 & 0.1 \\ C_{14} & 0.4 & 0.4 & 0.1 & 0.1 \\ C_{15} & 0.6 & 0.3 & 0.1 & 0 \end{pmatrix}$$

$$R_2 = \begin{pmatrix} B_2 & V_1 & V_2 & V_3 & V_4 \\ C_{21} & 0.4 & 0.2 & 0.3 & 0.1 \\ C_{22} & 0.5 & 0.3 & 0.1 & 0.1 \\ C_{23} & 0.3 & 0.3 & 0.3 & 0.1 \end{pmatrix}$$

$$R_3 = \begin{pmatrix} B_3 & V_1 & V_2 & V_3 & V_4 \\ C_{31} & 0.5 & 0.1 & 0.2 & 0.2 \\ C_{32} & 0.4 & 0.3 & 0.2 & 0.1 \\ C_{33} & 0.5 & 0.3 & 0.2 & 0 \\ C_{34} & 0.6 & 0.2 & 0.1 & 0.1 \\ C_{35} & 0.3 & 0.3 & 0.1 & 0.3 \end{pmatrix}$$

$$R_4 = \begin{pmatrix} B_4 & V_1 & V_2 & V_3 & V_4 \\ C_{41} & 0.7 & 0.1 & 0.2 & 0 \\ C_{42} & 0.5 & 0.3 & 0.2 & 0 \\ C_{43} & 0.5 & 0.3 & 0.1 & 0.1 \\ C_{44} & 0.4 & 0.2 & 0.3 & 0.1 \\ C_{45} & 0.3 & 0.2 & 0.2 & 0.3 \end{pmatrix}$$

$$R_5 = \begin{pmatrix} B_5 & V_1 & V_2 & V_3 & V_4 \\ C_{51} & 0.6 & 0.2 & 0.1 & 0.1 \\ C_{52} & 0.7 & 0.2 & 0 & 0.1 \\ C_{53} & 0.8 & 0 & 0.1 & 0.1 \end{pmatrix}$$

计算得各二级指标模糊综合评分:

$$G_{11} = 71.5, G_{12} = 75.5, G_{13} = 80.25, G_{14} = 78.75, G_{15} = 87.25;$$

$$G_{21} = 75.25, G_{22} = 80.25, G_{23} = 73.75;$$

$$G_{31} = 73, G_{32} = 77, G_{33} = 84, G_{34} = 81.75, G_{35} = 66.25;$$

$$G_{41} = 87, G_{42} = 84, G_{43} = 80.25, G_{44} = 75.25, G_{45} = 64.5;$$

$$G_{51} = 81.75, G_{52} = 85, G_{53} = 84.75.$$

(5) 指标得分计算

首先使  $G_{kl}' = \frac{G_{kl}}{100}$ , 使直觉模糊数乘算子中的  $\lambda$  满足  $0 <$

$\lambda < 1$ 。将所得代入式(12)得:

$$F_1 = \bigoplus_{l=1}^5 (G_{1l} \otimes W_{1l}) = (0.4992, 0.3227)$$

$$F_2 = \bigoplus_{l=1}^3 (G_{2l} \otimes W_{2l}) = (0.5481, 0.3301)$$

$$F_3 = \bigoplus_{l=1}^5 (G_{3l} \otimes W_{3l}) = (0.5663, 0.2743)$$

$$F_4 = \bigoplus_{l=1}^5 (G_{4l} \otimes W_{4l}) = (0.6052, 0.2965)$$

$$F_5 = \bigoplus_{i=1}^5 (G_{5i} \otimes W_{5i}) = (0.5996, 0.3128)$$

将以上结果代入式(13)得  $F_A = \bigoplus_{k=1}^5 (F_k \otimes \omega_k) = (0.3729, 0.3812)$ 。

同理,对于预案 B 有:

$$F_B = \bigoplus_{k=1}^5 (F_k \otimes \omega_k) = (0.3672, 0.3879)$$

将预案 A 与预案 B 所得直觉模糊数代入式(14)得:

$$\rho(A) = 1 - 0.5(1 + \pi_A)(1 - \mu_A) = 0.6093$$

$$\rho(B) = 1 - 0.5(1 + \pi_B)(1 - \mu_B) = 0.6061$$

对比 A, B 两个工业锅炉事故应急预案, A, B 预案应急准备的得分无明显差异,说明两个预案都充分做好了法律法规的参考以及平时的演练、预防工作。在仿真过程中,专家组对预案 A 的执行效果评分高于预案 B,说明预案 A 在应急过程中的有效性和高效性皆优于预案 B。最后关于后期处理,预案 B 评分仍低于预案 A,说明应急处理的差距也会进一步导致后期处理的难易差别。相较于仿真后的专家评判,该方法在保证结果一致的同时,也保证了判断过程中的逻辑性和科学性,将一些定性指标采取了量化处理,各指标的相对重要程度也得到了数理上的计算结果支持。同时,与层次分析法相比,本文方法不仅增加了对专家意见的犹豫度的考量,在一致性检验未通过时也能通过计算进行修正,节约了宝贵的评价时间,保留一手的评价信息。

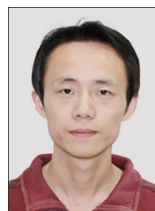
**结束语** 特种设备事故应急预案是规范工业生产,保障人身和资产安全,加强特种设备管理的重要文件之一。虽然近年来我国对于工业生产的管力度愈加增大,但就不同的企业和单位具体状况而言,安全生产管理水平仍然十分参差不齐。为了进一步促进各单位特种设备事故应急预案设立,建立一套高效科学的适应于我国工业生产情况的特种设备事故应急预案评价体系已经是工业工程领域的迫切要求。在此基础上,本文首次从特种设备事故应急预案结构出发,结合预案内容,从应急准备、辨识预警、应急处理、应急作业和后期处理 5 个维度构建了特种设备事故应急预案评价体系;其次,结合应急预案本身使用环境和特点,创新性地直觉模糊层次法引入特种设备事故评价体系当中;最后,利用福建省特种设备检验研究院提供的两套具体预案,结合 EDS 仿真软件和直觉模糊层次分析法,展示了评价过程。因此,在评价体系构建上,本文率先对预案结构本身进行研究,具有创新意义,且为特种设备事故应急系统评价带来一个新的方法和思路。

## 参考文献

[1] 质检总局关于 2015 年全国特种设备安全状况情况的通报[J].

中国特种设备安全,2016(4):15-18,37.

- [2] 张英菊. 基于灰色多层次评价方法的应急预案实施效果评价模型研究[J]. 计算机应用研究,2012(9):3312-3315,3319.
- [3] 张素丽,康泉胜,方元. 浙江省突发事件应急预案评价指标体系研究[J]. 中国安全科学学报,2012(10):164-169.
- [4] 汤兆平,刘欢,孙剑萍. 基于改进 FAHP 法的铁路应急预案评价研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版),2016(10):1-7.
- [5] 程翠云,钱新,万玉秋,等. 水库大坝突发事件应急预案可行性评价方法初探[J]. 水利水运工程学报,2009(1):71-75.
- [6] 陕振沛,张转周,宁宝权. 基于直觉模糊集 TOPSIS 决策方法的应急预案综合评价研究[J]. 数学的实践与认识,2016(3):160-166.
- [7] 承奇,张礼敬,邢培育,等. 基于层次分析法的化工事故应急演练模糊综合评估[J]. 南京工业大学学报(自然科学版),2009(4):98-102.
- [8] TABER M J, MCCABE J, KLEIN R M, et al. Development and evaluation of an offshore oil and gas Emergency Response Focus Board[J]. International Journal of Industrial Ergonomics,2013,43(1):40-51.
- [9] SHARMA R K, GURJAR B R, SINGHAL A V, et al. Automation of emergency response for petroleum oil storage terminals [J]. Safety Science,2015(72):262-273.
- [10] 崔文,罗云,曾殊,等. 机电类特种设备典型事故风险分级预警预控方法研究[J]. 工业安全与环保,2014(5):59-62.
- [11] 杨振林,刘金兰. 基于层次分析法的特种设备风险评价体系研究[J]. 压力容器,2008,25(9):28-33.
- [12] 江书军,郝素俐,丁日佳. 基于层次分析法的特种设备使用单位风险评价体系研究[J]. 工业安全与环保,2012,38(11):1-4.
- [13] XU Z. Intuitionistic preference relations and their application in group decision making[J]. Information Sciences,2007,177(11):2363-2379.
- [14] XU Z, LIAO H. Intuitionistic fuzzy analytic hierarchy process [J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems,2014,22(4):749-761.
- [15] XU Z. Intuitionistic fuzzy aggregation operators [J]. IEEE Transactions on fuzzy Systems,2007,15(6):1179-1187



**ZHENG Geng-feng**, born in 1983, doctor. His main research direction include robot and intelligent algorithm.