

原创技术策源地

# 基于改进模糊层次分析法的煤矿 一通三防系统安全评价

Assessment on Ventilation-and-Three-Preventions Safety System of Coal Mine Based on  
Improved Fuzzy Analytic Hierarchy Process

张学群(山西古县金谷煤业有限公司,山西 临汾 042400)

**摘要:**为提高煤矿一通三防系统的安全可靠性,本文将煤矿一通三防系统安全评价分成A、B、C三层指标,建立起煤矿一通三防系统安全评价体系,并规定煤矿一通三防系统安全评价等级的划分。针对山西某矿工程概况,利用改进模糊层次分析法对体系各层指标权重进行计算,按照隶属关系计算出最低层指标相对于一通三防安全系统安全指标的相对权重,结合专家打分法,定性、定量地对煤矿一通三防系统进行了安全等级的评定,并提出了建议。结果表明:通过改进模糊层次分析法对煤矿一通三防系统安全的评定等级为较安全,可优先针对性地对相对权重大但评分相对低的指标进行改善;通过这种方法能够更加简洁、精确地对煤矿一通三防系统进行定量安全评价,为煤矿一通三防系统安全评价提供了一个较好的评价思路。

**关键词:**一通三防;安全评价;评价等级;改进模糊层次分析法

中图分类号:TD722 文献标志码:A 文章编号:1672-609X(2022)02-0008-05

**Abstract:** In order to improve the safety reliability of the ventilation-and-three-preventions system of coal mines, in this article, the safety assessment of the ventilation-and-three-preventions system of coal mine is divided into three hierarchies of A, B and C to establish the safety assessment system of ventilation-and-three-preventions system, and to prescribe the division of safety assessment hierarchies of ventilation-and-three-preventions system of coal mine. Aiming at the project status of a certain mine in Shanxi Province, calculation is conducted for the indicator weight of various hierarchies of system by using the improved fuzzy analytic hierarchy process, according to affiliation, the relative weight of the lowest layer indicators relative to the safety indicators of ventilation-and-three-preventions is calculated out, by combining with the expert scoring method, the assessment is carried out qualitatively and quantitatively for the safety level of the ventilation-and-three-preventions system of the mine, with suggestions being given. The results show that by using the improved fuzzy analytic hierarchy process to assess the safety system of ventilation-and-three-preventions of the mine, the rating is that the system is relatively safe, and improvement can be preferentially made for the indicators that have relatively large weight and have lower rating; by using this method, the safety assessment can be quantitatively made for the ventilation-and-three-preventions system of coal mine in a simple and accurate way, which has provided a good train of thought for the safety assessment of ventilation-and-three-preventions of coal mine.

**Key words:** ventilation-and-three-preventions; safety assessment; rating; improved fuzzy analytic hierarchy process

## 1 前言

“一通三防”是煤矿安全生产过程中矿井通风、防治瓦斯、防治煤尘、防治火灾的简称<sup>[1-2]</sup>,据统计,2009—2016年全国煤矿重大及重大以上的事故中,大部分事故是由瓦斯、煤尘、火灾所致<sup>[3]</sup>,而这三种

矿井灾害又都与矿井通风有着紧密的联系,因此对“一通三防”系统进行安全评价是煤矿安全评价中的重中之重<sup>[4]</sup>。目前常用煤矿安全评价方法主要有专家打分法、层次分析法、模糊综合评价法、功效系数法、风险矩阵法等,在常用的这些评价方法中,层次分析法是相对较为简单的一种评价方法,在此方法上建立起来的煤矿安全评价案例有很多。曹凯等<sup>[5]</sup>基于层次分析法建立了煤矿通风系统安全评价模型,对矿井通风系统安全进行了评价。在此方法上也延伸出了改进后的方法,如区间层次分析法、

[作者简介] 张学群(1989-),男,本科,工程师,从事“一通三防”技术管理工作。

[引用格式] 张学群. 基于改进模糊层次分析法的煤矿一通三防系统安全评价[J]. 中国矿山工程, 2022, 51(2): 8-12.

改进模糊层次分析法等。区间层次分析法是从传统层次分析法上优化而来的,该方法采用区间代替点的方法,降低了层次分析法因主观因素导致的不确定性,目前应用比较多。刘芮葭<sup>[6]</sup>通过区间层次分析与灰色理论相结合的安全评价方法,对煤矿瓦斯爆炸危险性进行了分析评价。改进模糊层次分析法也是对传统层次分析法的改良,通过运用不同的数学方法使得该方法相比传统的计算结果更加精确,方法也更加简洁,应用范围也比较广泛。张梦雅等<sup>[7]</sup>基于改进模糊层次分析法建立煤矿煤尘爆炸危险性评价指标体系,对煤矿煤尘爆炸危险性进行了评价。

综上,专家学者大多都将这些评价方法应用于一通三防系统中各个子系统的安全评价中,但对于一通三防系统整体安全评价的研究很少。因此,本文基于改进模糊层次分析法,建立煤矿一通三防系统安全评价体系,并将该方法应用到山西省某矿,对该矿一通三防系统安全进行了评价,并提出了针对性改善意见,为煤矿一通三防系统安全评价提供了一个较好的评价思路。

## 2 改进模糊层次分析法模型在一通三防安全评价中的应用

### 2.1 建立改进模糊层次分析法模型确定权重

(1)建立层次结构体系,将结构体系分为A层指标、B层指标、C层指标,并对各层指标标号,建立系统评价体系。

(2)通过0.1~0.9的5标度法<sup>[8]</sup>(见表1),根据各指标之间的相对重要程度,构造优先判断矩阵 $F = (f_{ij})_{n \times n}, i, j = 1, 2, \dots, n$ ,其中 $f_{ij}$ 与 $f_{ji}$ 互补,可知 $f_{ij} < 1, f_{ij} + f_{ji} = 1, f_{ii} = 0.5$ 。该矩阵为模糊互补矩阵。

表1 0.1~0.9的5标度法

标度	含义	标度	含义
0.5	A与B同样重要	0.8	A比B尤为重要
0.6	A比B略微重要	0.9	A比B极端重要
0.7	A比B明显重要	0.1, 0.2, 0.3, 0.4	反比较, $f_{ji} = 1 - f_{ij}$

(3)对上面求得的模糊互补矩阵的行进行求和,即 $r_i = \sum_j^n f_{ij}$ ,再通过公式 $r_{ij} = \frac{r_i - r_j}{2n} + 0.5$ 得到模糊一致矩阵 $R = (r_{ij})_{n \times n}$ 。

(4)通过公式 $e_{ij} = \frac{r_{ij}}{r_{ji}}$ ,将矩阵R改为互反型矩

阵 $E = (e_{ij})_{n \times n}$ 。

(5)进行和行归一求得排序向量。

$$W^{(0)} = (w_1, w_2, \dots, w_n)^T =$$

$$\left( \frac{\sum_{j=1}^n e_{1j}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n e_{ij}}, \frac{\sum_{j=1}^n e_{2j}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n e_{ij}}, \dots, \frac{\sum_{j=1}^n e_{nj}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n e_{ij}} \right)^T$$

(6)将求得的排序向量 $W^{(0)}$ 作为特征值法的迭代初值 $V^{(0)}$ ,即 $V^{(0)} = (v_1^{(0)}, v_2^{(0)}, \dots, v_n^{(0)})^T = W^{(0)}$ ,设置迭代精度 $\varepsilon$ 并引入向量的无穷范数的概念,即 $\|V^{(k)}\|_\infty$ ,通过迭代公式求得特征向量 $V^{(k+1)}$ ,判断 $\|V^{(k+1)}\|_\infty - \|V^{(k)}\|_\infty$ 是否小于或等于迭代精度 $\varepsilon$ ,若是,则对特征向量 $V^{(k+1)}$ 进行归一化处理得到权重向量W,即 $W = V^{(k+1)} = \left( \frac{v_1^{(k+1)}}{\sum_{i=1}^n v_i^{(k+1)}}, \frac{v_2^{(k+1)}}{\sum_{i=1}^n v_i^{(k+1)}}, \dots, \frac{v_n^{(k+1)}}{\sum_{i=1}^n v_i^{(k+1)}} \right)^T$ ,迭代结束;若否,则继续重复上面的迭代过程,直至满足迭代精度的要求,迭代结束。

### 2.2 建立煤矿一通三防系统安全评价体系

针对不同的系统安全评价体系,改进模糊层次分析法计算出的结果都是权重向量,而其起始步骤则是构建针对某一具体系统的层次结构体系。煤矿一通三防系统包括通风系统、防尘系统、防瓦斯系统和防火系统<sup>[9]</sup>,可将对这些子系统的评价作为一级指标,将各个子系统的影响因子水平或情况作为二级指标,如通风系统情况、瓦斯情况等<sup>[10]</sup>,将通风分为3个评价指标,防尘分为7个评价指标,防瓦斯分为3个评价指标,防火分为2个评价指标,建立起煤矿一通三防系统安全评价体系,具体见表2。

## 3 煤矿一通三防系统安全评价等级的确定

### 3.1 规定煤矿一通三防系统安全评价等级划分

要对煤矿一通三防系统安全进行评价,还要明确其安全评价等级。依据煤矿设计规范,结合煤矿一通三防系统安全评价体系中各指标的情况和水平,采用百分制对煤矿一通三防系统安全评价水平进行综合评分,可将一通三防安全评价等级划分成五个等级,分别是非常危险、较危险、一般、较安全、非常安全。其中非常危险与较危险的评分区间较大,各为30分;一般与较安全的评分区间较小,各为15分;非常安全的评分区间最小,为10分。这种划

表2 煤矿一通三防系统安全评价体系

A层指标	B层指标	C层指标
煤矿 一通 三防 系统 安全 评价A	通风安全评价 B <sub>1</sub>	通风系统情况 C <sub>1</sub>
		局部通风情况 C <sub>2</sub>
		通风设施情况 C <sub>3</sub>
		综合防尘措施水平 C <sub>4</sub>
		防爆隔爆措施水平 C <sub>5</sub>
	防尘安全评价 B <sub>2</sub>	测尘合格点数情况 C <sub>6</sub>
		掘进工作面综合防尘情况 C <sub>7</sub>
		回采工作面综合防尘情况 C <sub>8</sub>
		定期冲刷巷道情况 C <sub>9</sub>
		防尘洒水管路系统情况 C <sub>10</sub>
	防瓦斯安全评价 B <sub>3</sub>	瓦斯情况 C <sub>11</sub>
		突出情况 C <sub>12</sub>
		安全监控情况 C <sub>13</sub>
	防火安全评价 B <sub>4</sub>	灭火系统情况 C <sub>14</sub>
		火区管理水平 C <sub>15</sub>

分虽然不是等区间划分,但在将专家对影响因子的评分转化为对整个一通三防系统安全评价的过程中该划分法更具有科学性,具体划分情况见表3。

表3 煤矿一通三防系统安全评价等级划分

安全等级	非常危险	较危险	一般	较安全	非常安全
综合评分	0~30	30~60	60~75	75~90	90~100

### 3.2 确定煤矿一通三防系统安全评价等级

由于以上方法计算出来的权重是下一层指标相对于本层指标的权重,无法直接通过通风系统情况、局部通风情况、综合防尘措施水平等影响因子水平对矿井整体的一通三防系统安全进行评价,因此,要想通过定性-定量的方法评价煤矿一通三防系统安全,还需要将其转化成最底层指标相对于整个一通三防系统安全指标的相对权重。通过改进模糊层次分析法确定B层指标相对于A层指标的权重、C层指标相对于B层指标的权重以后,根据其隶属关系,可得到C层各指标相对于A层指标的相对权重 $Q_i$ ,由于对具体系统安全评价中定性的评价方法是不可或缺的,故需要结合具体矿井一通三防系统的情况,根据专家对C层各指标情况或水平的打分 $F_i$ ,通过式(1)综合计算得出该矿井一通三防系统安全评分 $F$ ,然后根据表2评定其安全等级。

$$F = \sum_{i=1}^m Q_i F_i \tag{1}$$

## 4 应用实例

### 4.1 矿井概况

以山西省某矿为例,该矿井田面积8.5062 km<sup>2</sup>,设计生产能力60万t/a,核定生产能力90万t/a,矿井设计可采储量2553万t,目前剩余储量2334万t,批准开采2~11号煤层,现开采9+10号、11号煤层。矿井通风方式为中央并列式,通风方法为机械抽出式。由主斜井、副斜井进风,回风斜井回风。回风斜井现安装2台同等能力的FBCDZ No21/2×220型对旋防爆抽出式轴流通风机,1台工作,1台备用。矿井水文地质类型为中等,低瓦斯矿井,煤尘具有爆炸性,煤层自燃倾向性等级为Ⅱ级,自燃煤层。

### 4.2 改进模糊层次分析法计算评价体系权重

首先,结合经验与专家的分析<sup>[11]</sup>,利用0.1~0.9的5标度法,根据各指标之间的相对重要程度列出各层指标之间的优先判断矩阵,A-B、B<sub>1</sub>-C、B<sub>2</sub>-C、B<sub>3</sub>-C优先判断矩阵如下:

A-B 优先判断矩阵:  $F_{A-B} = \begin{pmatrix} 0.5 & 0.8 & 0.5 & 0.8 \\ 0.2 & 0.5 & 0.2 & 0.5 \\ 0.5 & 0.8 & 0.5 & 0.8 \\ 0.2 & 0.5 & 0.2 & 0.5 \end{pmatrix};$

B<sub>1</sub>-C 优先判断矩阵:  $F_{B_1-C} = \begin{pmatrix} 0.5 & 0.7 & 0.9 \\ 0.3 & 0.5 & 0.7 \\ 0.1 & 0.3 & 0.5 \end{pmatrix};$

B<sub>2</sub>-C 优先判断矩阵:  $F_{B_2-C} = \begin{pmatrix} 0.5 & 0.7 & 0.7 & 0.7 & 0.7 & 0.7 & 0.9 \\ 0.3 & 0.5 & 0.5 & 0.5 & 0.5 & 0.5 & 0.7 \\ 0.3 & 0.5 & 0.5 & 0.5 & 0.5 & 0.5 & 0.7 \\ 0.3 & 0.5 & 0.5 & 0.5 & 0.5 & 0.5 & 0.7 \\ 0.3 & 0.5 & 0.5 & 0.5 & 0.5 & 0.5 & 0.7 \\ 0.3 & 0.5 & 0.5 & 0.5 & 0.5 & 0.5 & 0.7 \\ 0.1 & 0.3 & 0.3 & 0.3 & 0.3 & 0.3 & 0.5 \end{pmatrix};$

B<sub>3</sub>-C 优先判断矩阵:  $F_{B_3-C} = \begin{pmatrix} 0.5 & 0.7 & 0.7 \\ 0.3 & 0.5 & 0.5 \\ 0.3 & 0.5 & 0.5 \end{pmatrix};$

B<sub>4</sub>-C 优先判断矩阵:  $F_{B_4-C} = \begin{pmatrix} 0.5 & 0.7 \\ 0.3 & 0.5 \end{pmatrix}。$

对上面各优先判断矩阵的行进行求和,再通过

公式  $r_{ij} = \frac{r_i - r_j}{2n} + 0.5$  得到各矩阵的模糊一致矩阵,

这里只以  $F_{A-B}$  为例,其转换后的模糊一致矩阵为

$$R_{A-B} = \begin{pmatrix} 0.5 & 0.65 & 0.5 & 0.65 \\ 0.35 & 0.5 & 0.35 & 0.5 \\ 0.5 & 0.65 & 0.5 & 0.65 \\ 0.35 & 0.5 & 0.35 & 0.5 \end{pmatrix}, \text{在通过公式 } e_{ij} =$$

$\frac{r_{ij}}{r_{ji}}$  转换得到互反型矩阵  $E_{A-B} =$

$$\begin{pmatrix} 1 & 1.8571 & 1 & 1.8571 \\ 0.5385 & 1 & 0.5385 & 1 \\ 1 & 1.8571 & 1 & 1.8571 \\ 0.5385 & 1 & 0.5385 & 1 \end{pmatrix}, \text{通过和行}$$

归一法得到排序向量  $W_{A-B}^{(0)} = (0.3250, 0.1750, 0.3250, 0.1750)^T$ , 将其作为特征值法的迭代初值  $V_{A-B}^{(0)} = (0.3250, 0.1750, 0.3250, 0.1750)^T$ , 其无穷范数为  $\|V_{A-B}^{(0)}\|_{\infty} = 0.3250$ , 取迭代计算精度为  $0.0001$ , 利用迭代公式迭代3次后得到  $V_{A-B}^{(3)} = V_{A-B}^{(2)} = (4.00006, 2.15398, 4.00006, 2.15398)^T$ , 此时

$\|V_{A-B}^{(3)}\|_{\infty} - \|V_{A-B}^{(2)}\|_{\infty} < 0.0001$ , 迭代结束, 对其进行归一化处理之后, 得到 A-B 权重向量为  $W_{A-B} = (0.32499, 0.17501, 0.32499, 0.17501)^T$ 。

重复上述步骤, 同理可得:

$B_1$ -C 权重向量:  $W_{B_1-C} = (0.47791, 0.31477, 0.20732)^T$

$B_2$ -C 权重向量:  $W_{B_2-C} = (0.21027, 0.13945, 0.13945, 0.13945, 0.13945, 0.09249)^T$

$B_3$ -C 权重向量:  $W_{B_3-C} = (0.42857, 0.28572, 0.28572)^T$

$B_4$ -C 权重向量:  $W_{B_4-C} = (0.60000, 0.40000)^T$

### 4.3 定量计算煤矿一通三防系统安全评价等级

通过改进模糊层次分析法计算出各层指标相对上层指标的权重向量后, 根据隶属关系, 通过计算可以得到 C 层指标相对 A 层指标的权重, 以  $C_1$  指标为例, 其相对 A 层指标的相对权重为  $C_1$  相对  $B_1$  的权重与  $B_1$  相对 A 的权重的乘积, 即  $Q_1 = 0.47791 \times 0.32499 = 0.15532$ 。

C 层各指标相对权重计算结果见表 4。

表 4 C 层指标相对权重

C 层指标 $C_i$	$C_1$	$C_2$	$C_3$	$C_4$	$C_5$	$C_6$	$C_7$	$C_8$
相对权重 $Q_i$	0.15532	0.10230	0.06738	0.03680	0.02440	0.02440	0.02440	0.02440
C 层指标 $C_i$	$C_9$	$C_{10}$	$C_{11}$	$C_{12}$	$C_{13}$	$C_{14}$	$C_{15}$	
相对权重 $Q_i$	0.02440	0.01619	0.13928	0.09286	0.09286	0.10501	0.07000	

由于使用改进模糊层次分析法, 其计算出来的权重向量结果转化后变成各个影响因子的相对权重, 该结果要结合现场工作人员或者专家的打分才能给出定量的评价结果。结合表 3 中对煤矿一通三

防系统安全评价等级的划分, 通过 10 位专家以及 10 位现场工作人员对该矿一通三防各个子系统的影响因子指标进行逐一打分, 并对这些分值取平均值作为各影响因子指标的评分, 评分情况见表 5。

表 5 该矿一通三防系统安全评价体系 C 层指标打分情况 (百分制)

C 层指标 $C_i$	$C_1$	$C_2$	$C_3$	$C_4$	$C_5$	$C_6$	$C_7$	$C_8$
分数 $F_i$	78	84	81	72	78	87	70	74
C 层指标 $C_i$	$C_9$	$C_{10}$	$C_{11}$	$C_{12}$	$C_{13}$	$C_{14}$	$C_{15}$	
分数 $F_i$	74	80	85	80	76	70	73	

通过专家对各个影响因子水平和情况进行打分, 将 C 层每一个指标的相对权重与专家打分相乘

可得出 C 层各指标的相对权重分值, 各指标相对权重分值见表 6。

表 6 C 层各指标相对权重分值

C 层指标 $C_i$	$C_1$	$C_2$	$C_3$	$C_4$	$C_5$	$C_6$	$C_7$	$C_8$
相对权重分值 $Q_i F_i$	12.11496	8.59320	5.45778	2.64960	1.90320	2.12280	1.70800	1.80560
C 层指标 $C_i$	$C_9$	$C_{10}$	$C_{11}$	$C_{12}$	$C_{13}$	$C_{14}$	$C_{15}$	
相对权重分值 $Q_i F_i$	1.80560	1.29520	11.83880	7.42880	7.05736	7.35070	5.11000	

累加求和后得到 A 层指标的最后分数为

$$F = \sum_{i=1}^{15} Q_i F_i = 78.24160。$$

结合表 2 可知,78.2416 所在评分区间为 75 ~ 90,更靠近 75 分,因此该矿“一通三防”系统安全评价等级为较安全,且更偏向于一般的评价等级,说明在某些指标上还存在一定的不足,可以优先对相对权重较大且评分相对较低的指标进行针对性的改善,如灭火系统情况( $C_{14}$ )相对权重为 0.10501,其专家打分为 70,安全监控情况( $C_{13}$ )相对权重为 0.09286,其专家打分为 76,二者均为权重相对较大,但其评分低于整体评分水平,因此可对其进行优化处理,从而能够更快地提高矿井“一通三防”系统安全水平。

## 5 结论

(1)改进模糊层次分析法相比传统层次分析法,由于其所用到的数学方法有所不同,在方法简洁的优点基础上,通过改进模糊层次分析法计算出来的评价体系各指标的权重会更加准确,有利于提高后续对煤矿“一通三防”系统的安全评价的准确性。

(2)采用模糊层次分析法也是要结合专家打分的方法,在定性的基础上进行定量的计算,将计算结果再进行定性,经过“定性—定量—定性”的过程之后,降低了主观因素造成的不确定性,所得的结果更加符合实际。

(3)将该方法应用于山西省某矿,计算出各指标相对整个煤矿“一通三防”系统安全的相对权重,结合专家对这些指标所给的分数,定量计算出该矿“一通三防”系统最后的安全评分为 78.2416,根据

划分的系统安全评价等级,该矿“一通三防”系统安全等级最后评定为较安全。结合上面计算出的指标相对权重与其所得分值,若要提高该矿“一通三防”系统安全,可对权重较高但评分相对较低的指标进行针对性的改善。

### [参考文献]

- [1] 韦兴胜. 煤矿生产过程中“一通三防”的事故特点及防治措施[J]. 科技与企业,2011(13):126.
- [2] 林磊. 煤矿一通三防工作中的危险源分析[J]. 能源与节能,2019(4):36-37.
- [3] 李闯. 基于 HSE 的贵州某矿一通三防系统风险评估研究[D]. 贵阳:贵州大学,2018.
- [4] 朱金子. 煤矿一通三防安全管理评价系统研究与应用[D]. 西安:西安科技大学,2012.
- [5] 曹凯,王德明. 基于层次分析法的矿井通风系统安全评价指标[J]. 煤矿安全,2010,41(5):43-46.
- [6] 刘芮霞. 煤矿瓦斯爆炸危险性的灰类-IAHP 评价[J]. 中国安全科学学报,2016,26(5):99-104.
- [7] 张梦雅,龙祖根,唐志鹏. 基于改进 FAHP 模型的煤尘爆炸危险性评价研究[J]. 工业安全与环保,2017,43(10):47-50.
- [8] 刘征,胡汉华,崔田田,等. 基于改进的模糊层次分析法的矿井通风系统安全评价[J]. 矿业研究与开发,2011,31(3):81-84.
- [9] 王改明,张俊涛,吴永利. 煤矿“一通三防”安全信息管理系统的开发探析[J]. 黑龙江科技信息,2012(11):128.
- [10] 贺永玺. 基于模糊综合评价机制的煤矿一通三防安全问题分析[J]. 能源与节能,2016(10):21-22+24.
- [11] 孙佳,孙殿阁,李莉莉,等. 煤矿“一通三防”安全状况的模糊综合评价[J]. 矿业安全与环保,2005(6):74-75+78.