

高海拔矿山掘进通风方式优选

龚剑, 胡乃联, 崔翔, 王孝东

北京科技大学金属矿山高效开采与安全教育部重点实验室, 北京 100083

摘要 为解决高原矿井掘进面通风难题, 以西藏自治区某多金属矿为工程背景, 依据层次分析法(AHP)与逼近理想解排序法(TOPSIS), 建立通风评判模型, 对3种拟定的混合式掘进通风方式进行优选。根据高原矿井负压低氧的特殊环境, 从技术、经济、安全3个方面选取通风系统的评判指标, 运用AHP法客观确定各评判指标的权重向量, 结合TOPSIS法分析贴近度并计算出各通风方式的综合优越度。计算结果表明, 第2种通风方式(长压短抽)优越度最高。通过AHP-TOPSIS优选的结果科学合理且符合生产实际, 可为高原矿井掘进通风方式选择提供理论依据。

关键词 掘进通风; 层次分析法; 逼近理想解排序法; 高海拔矿山

中图分类号 TD724

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2015.04.009

Optimization of drifting ventilation method for high-altitude mine

GONG Jian, HU Nailian, CUI Xiang, WANG Xiaodong

Key Laboratory of High-efficient Mining and Safety of Metal Mines of Ministry of Education, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China

Abstract In order to solve the drifting ventilation problem in high-altitude mines, a comprehensive evaluation model for ventilation is established based on the basic theory of analytic hierarchy process (AHP) and technique for order preference by similarity to ideal solution (TOPSIS). Three kinds of compound drifting ventilation methods are evaluated with a poly-metallic ore in Tibet autonomous region as the engineering background. First, evaluation indexes of ventilation system are selected from three aspects: technology, economy and security, according to the special environment of negative pressure and hypoxia in high-altitude mines. Then, the weight matrix of each evaluation index is determined objectively through the AHP method. Finally, the closeness is analyzed with the combination of TOPSIS method and the superior degree of each ventilation method is calculated. The results show that the second ventilation method, i.e., far-pressing-near-absorption, is the optimal. The optimization results calculated by AHP-TOPSIS method are scientific and reasonable and in line with the actual production, which can provide a theoretical basis for the selection of drifting ventilation method for high-altitude mines.

Keywords drifting ventilation; analytic hierarchy process; technique for order preference by similarity to ideal solution; high-altitude mine

矿山在生产过程中对独头巷道的通风称为掘进通风, 其任务是向掘进面提供质优量足的新鲜空气, 改善劳动环境。掘进通风是矿井通风的重点和难点, 也是整个矿井生产系统的重要组成部分, 对保证掘进面作业人员安全健康具有特别重要的意义。目前多数矿山企业仅采取单一的通风方式, 但相比低海拔地区, 高海拔矿山低氧低压的特殊环境导致设备

及职工的劳动效率大幅降低, 且采用单一的通风方式极易形成缺氧负压区, 对作业人员的生命造成危害, 因此, 高海拔矿山的独特性决定了必须采取混合式通风。

近年来, 国内外众多学者先后运用不同评价方法对通风方式优选进行了分析^[1-4], 研究较多的有模糊数学、灰色关联度分析、人工神经网络等, 但混合式通风涉及到多项技术经济

收稿日期: 2014-08-19; 修回日期: 2014-11-09

基金项目: 国家“十二五”科技支撑计划项目(2012BAB01B04); 长江学者和创新团队发展计划项目(IRT0950)

作者简介: 龚剑, 博士研究生, 研究方向为矿山安全保障技术, 电子信箱: gongdadao@163.com;

引用格式: 龚剑, 胡乃联, 崔翔, 等. 高海拔矿山掘进通风方式优选[J]. 科技导报, 2015, 33(4): 56-60.

指标,是一个多环节、多因素和多层次的复杂系统,单一的评价方法难以全面评价,因此本文将层次分析法(AHP)和逼近理想解排序法(TOPSIS)^[5]相结合应用于高海拔矿山掘进通风方式优选中,构建AHP-TOPSIS综合评判模型。

1 AHP法确定指标权重

1.1 比较标度

依据两两比较的标度和判断原理对同层次的相关指标进行比较赋值^[7],因素 r_i 相对于 r_j 的重要性根据表1进行量化,若 $W_{ij} = r_i/r_j$,则 $1/W_{ij} = r_j/r_i$ ^[8]。

表1 指标分级赋值标准

Table 1 Grade assignment standard for the evaluation indexes

| 标准值 | 定义 | 说明 |
|-----|------|-------------------------|
| 1 | 同等重要 | 因素 r_i 与 r_j 重要性相同 |
| 3 | 稍微重要 | 因素 r_i 比 r_j 重要性稍高 |
| 5 | 比较重要 | 因素 r_i 比 r_j 重要性较高 |
| 7 | 明显重要 | 因素 r_i 比 r_j 重要性明显高 |
| 9 | 绝对重要 | 因素 r_i 比 r_j 重要性绝对高 |

1.2 判断矩阵构造

设判断矩阵为 R ,通过因素间的相互比较可构造判断矩阵

$$R = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & \cdots & A_{1n} \\ A_{21} & A_{22} & \cdots & A_{2n} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ A_{m1} & A_{m2} & \cdots & A_{mn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{A_1}{A_1} & \frac{A_1}{A_2} & \cdots & \frac{A_1}{A_n} \\ \frac{A_2}{A_1} & \frac{A_2}{A_2} & \cdots & \frac{A_2}{A_n} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ \frac{A_n}{A_1} & \frac{A_n}{A_2} & \cdots & \frac{A_n}{A_n} \end{bmatrix} \quad (1)$$

判断矩阵 R 为正定互反矩阵,对于正定互反矩阵,其最大特征根 λ_{\max} 存在且唯一^[9]。为求出最大特征根 λ_{\max} 及特征向量 W ,需对列向量归一化,计算式为

$$\tilde{W}_{ij} = a_{ij} / \sum_{j=1}^n a_{ij} \quad (2)$$

$$W_i = n \sqrt[n]{\prod_{j=1}^n \tilde{W}_{ij}} / \sum_{i=1}^n n \sqrt[n]{\prod_{j=1}^n \tilde{W}_{ij}} \quad (3)$$

$$\lambda_{\max} = \sum_{i=1}^n \frac{(RW)_i}{nW_i} \quad (4)$$

1.3 一致性检验及权重向量计算

由于指标因素的重要性对比受主观因素的影响,为验证权重分配是否合理,需要对判断矩阵进行一致性检验,计算式为

$$C_R = \frac{I_C}{I_R} = \frac{\lambda_{\max} - n}{(n-1)I_R} \quad (5)$$

式中, n 为矩阵阶数, I_C 为一致性检验指标, I_R 为平均随机一致

性指标,根据矩阵的阶数取不同的值(表2)。 C_R 为判断矩阵的一致性比例,只有当 $C_R < 0.1$ 时,判断矩阵的一致性检验才符合条件。

若判断矩阵通过一致性检验,说明判断矩阵的构造符合数学逻辑,即可依据该矩阵计算出权值并求得权重向量。

表2 平均随机一致性指标赋值标准

Table 2 Grade assignment standard for the average stochastic coincidence indicators

| 阶数 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|-------|---|---|------|-----|------|------|------|------|------|------|
| I_R | 0 | 0 | 0.58 | 0.9 | 1.12 | 1.24 | 1.32 | 1.41 | 1.45 | 1.49 |

2 TOPSIS评价模型

TOPSIS法是多目标决策分析中一种常用的有效方法^[10],其中正理想解为虚拟最优解,各指标均为最优,而负理想解指标均为最差,根据与理想解的接近程度评价对象的相对优劣。

2.1 初始评判矩阵

设方案集 $P = \{P_1, P_2, \dots, P_m\}$,评判指标集 $r = \{r_1, r_2, \dots, r_n\}$,评判指标 r_{ij} 为第 i 个方案的第 j 个评判指标,其中 $i \in [1, m]$, $j \in [1, n]$,初始评判矩阵可以表示为

$$P = [r_{ij}]_{m \times n} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2n} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ r_{m1} & r_{m2} & \cdots & r_{mn} \end{bmatrix} \quad (6)$$

2.2 标准化决策矩阵

评判指标通常分为收益性指标和消耗性指标,对于收益性指标,值越大越好,对于消耗性指标,值越小越好。由于评判指标的量纲不同,需要进行无量纲化处理^[11],计算式为

收益性指标

$$b_{ij} = \frac{r_{ij} - \min_j(r_{ij})}{\max_j(r_{ij}) - \min_j(r_{ij})} \quad (7)$$

消耗性指标

$$b_{ij} = \frac{\max_j(r_{ij}) - r_{ij}}{\max_j(r_{ij}) - \min_j(r_{ij})} \quad (8)$$

2.3 加权标准化决策矩阵

将矩阵 B 的列向量与AHP法确定的指标层次总排序权重 W_n 相乘,可得加权标准化决策矩阵 R

$$R = [r_{ij}]_{m \times n} = \begin{bmatrix} w_1 b_{11} & w_2 b_{12} & \cdots & w_n b_{1n} \\ w_1 b_{21} & w_2 b_{22} & \cdots & w_n b_{2n} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ w_1 b_{m1} & w_2 b_{m2} & \cdots & w_n b_{mn} \end{bmatrix} \quad (9)$$

2.4 贴近度分析

收益性指标集 J_1 的正理想解为行向量的最大值,负理想解为行向量的最小值,消耗性指标集 J_2 的取值与之相反,正理想解和负理想解分别以 R^+ 与 R^- 表示。评判对象与理想解的距离为

$$\begin{cases} D_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (r_{ij} - r_j^+)^2} \\ D_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (r_{ij} - r_j^-)^2} \end{cases} \quad (10)$$

式中 D_i^+ 与 D_i^- 分别为评判对象与正理想解和负理想解的距离。贴近度分析的计算式为

$$C_i^+ = D_i^- / (D_i^+ + D_i^-), \quad 0 \leq C_i^+ \leq 1 \quad (11)$$

最优解为正理想解时, $C_i^+ = 1$, 最差解为负理想解时, $C_i^+ = 0$, 一般情况下评判对象贴近度 C_i^+ 取值在 $(0, 1)$ 之间, 反映了评判对象贴近正理想解的程度。

2.5 AHP-TOPSIS 评判模型

由 TOPSIS 法的贴近度分析构造出评判矩阵, 结合 AHP 法计算得到的权重, 综合评判结果向量 Q 为

$$Q = WC \quad (12)$$

式中, C 为贴近度分析形成的评判矩阵, W 为 AHP 法计算得到的准则层权重。

3 高海拔矿山通风优选

3.1 掘进通风综合评判指标体系

通风方式优选是一个系统工程, 评判指标体系的科学合理与否直接决定了评判结果的准确性。评判指标选取的原则是以尽量少的指标, 反映最主要和最全面的信息^[12]。利用层次分析法基本原理建立通风优选综合评判指标体系(目标层 O), 包括 3 个准则层^[13], 分别为技术可行性指标 P_1 、经济合理性指标 P_2 和安全性指标 P_3 。与技术可行性指标相关的因素包括工作面总风量 R_1 、工作面总风阻 R_2 、风量供需比 R_3 和有效风量率 R_4 。与经济合理性指标相关的因素包括通风机功率 R_5 、通风机效率 R_6 和外部漏风率 R_7 。与安全性

指标相关的因素包括风机运转稳定性 R_8 、风流稳定性 R_9 和空气含氧量 R_{10} 。需要说明的是, 由于高海拔矿山的特殊环境, 采用抽出式通风极易导致负压缺氧现象发生, 因此空气含氧量是评价通风方式安全可靠性的一个关键因素。根据 AHP 法建立的评价指标层次结构模型如图 1 所示。

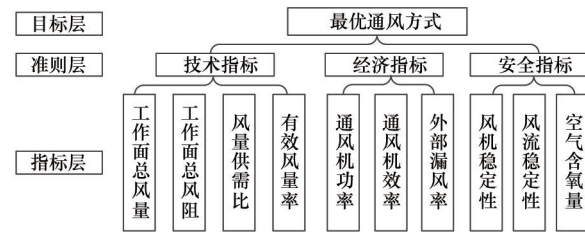


图 1 评价指标层次结构

Fig. 1 Hierarchy structure of comprehensive evaluation indexes

以西藏某铜多金属矿为工程背景进行掘进面混合式通风方式优选。该矿东西长约 8~11 km, 南北宽约 6~11 km, 赋存海拔高度 4400~4720 m, 矿体厚度较大, 矿石、顶底板岩石以砂卡岩和角岩为主, 总体稳固程度为中等稳固以上。矿区海拔高度大, 空气稀薄, 采矿作业环境差, 且由于目前存在大量的掘进巷道, 整个矿区通风系统没有形成, 井下通风情况差, 污染十分严重。

根据局扇与风筒安装位置的不同, 混合式通风方式分短压长抽、长压短抽和长压长抽 3 种, 各通风方式的评判指标数值如表 3 所示。其中指标层因素 R_8 与 R_9 为专家评分值, 选取 10 位现场高级工程师对上述 3 种通风方式下风机与风流的稳定性状况做出评价, 并将其量化, 将量化指标取平均值即为 R_8 与 R_9 的专家评分值。

表 3 通风方式评判指标体系

Table 3 Evaluation index system of ventilation

| 通风参数 | 技术指标 P_1 | | | | 经济指标 P_2 | | | 安全指标 P_3 | | |
|------|----------------------------|------------------------------------|-------|-------|------------|-------|------------|------------|-------|---------------|
| | $R_1 / (m^3 \cdot s^{-1})$ | $R_2 / (N \cdot s^2 \cdot m^{-4})$ | R_3 | R_4 | R_5 / kW | R_6 | $R_7 / \%$ | R_8 | R_9 | $R_{10} / \%$ |
| 短压长抽 | 83.34 | 13.90 | 0.92 | 0.877 | 11 | 0.85 | 2.8 | 9.3 | 9.1 | 17.4 |
| 长压短抽 | 86.26 | 14.58 | 0.96 | 0.894 | 15 | 0.87 | 2.9 | 9.4 | 9.3 | 18.6 |
| 长压长抽 | 89.68 | 16.36 | 1.02 | 0.855 | 22 | 0.82 | 3.4 | 9.0 | 9.4 | 16.5 |

3.2 确定权重分配

合理分配通风方式影响因素的权重是保证 AHP 法准确性的关键, 因此, 对指标进行重要度评价, 构造准则层 P 和指标层 R 各因素的判断矩阵。 $O-P$ 、 P_1-R 、 P_2-R 以及 P_3-R 的重要性程度比较如表 4 所示。

根据表 4 所示的评判指标重要性程度构造出判断矩阵, 依据式(2)~式(5)计算可得 $O-P$ 矩阵最大特征值 $\lambda_{max} = 3.054$, $I_c = 0.027$, $I_r = 0.58$, $C_r = 0.046$, $C_r < 0.1$, 该判断矩阵符合一致性检验条件, 则权重矩阵

$$w = [0.539 \quad 0.164 \quad 0.297]$$

可接受。同理可得

P_1-R 矩阵: $\lambda_{max} = 4.011$, $I_c = 0.003$, $I_r = 0.90$, $C_r = 0.003$, $C_r < 0.1$, $w_1 = [0.351 \quad 0.110 \quad 0.351 \quad 0.188]$;

P_2-R 矩阵: $\lambda_{max} = 3.010$, $I_c = 0.005$, $I_r = 0.58$, $C_r = 0.009$, $C_r < 0.1$, $w_2 = [0.296 \quad 0.538 \quad 0.166]$;

P_3-R 矩阵: $\lambda_{max} = 3.018$, $I_c = 0.009$, $I_r = 0.58$, $C_r = 0.016$, $C_r < 0.1$, $w_3 = [0.238 \quad 0.137 \quad 0.625]$;

层次总排序结果如表 5 所示。

表4 判断矩阵
Table 4 Judgment matrix

| O-P | 指标因素 | | | P ₁ -R | 指标因素 | | | | P ₂ -R | 指标因素 | | | P ₃ -R | 指标因素 | | |
|----------------|----------------|----------------|----------------|-------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-------------------|----------------|----------------|----------------|-------------------|----------------|----------------|-----------------|
| | P ₁ | P ₂ | P ₃ | | R ₁ | R ₂ | R ₃ | R ₄ | | R ₅ | R ₆ | R ₇ | | R ₈ | R ₉ | R ₁₀ |
| P ₁ | 1 | 3 | 2 | R ₁ | 1 | 3 | 1 | 2 | R ₅ | 1 | 1/2 | 2 | R ₈ | 1 | 2 | 1/3 |
| P ₂ | 1/3 | 1 | 1/2 | R ₂ | 1/3 | 1 | 1/3 | 1/2 | R ₆ | 2 | 1 | 3 | R ₉ | 1/2 | 1 | 1/4 |
| P ₃ | 1/2 | 2 | 1 | R ₃ | 1 | 3 | 1 | 2 | R ₇ | 1/2 | 1/3 | 1 | R ₁₀ | 3 | 4 | 1 |
| | | | | R ₄ | 1/2 | 2 | 1/2 | 1 | | | | | | | | |

表5 层次总排序结果
Table 5 Total rank results

| P-R 排序 | O-P排序 | | | 层次总排序权值 |
|-----------------|----------------|----------------|----------------|---------|
| | P ₁ | P ₂ | P ₃ | |
| | 0.539 | 0.164 | 0.297 | |
| r ₁ | 0.351 | | | 0.189 |
| r ₂ | 0.110 | | | 0.059 |
| r ₃ | 0.351 | | | 0.189 |
| r ₄ | 0.188 | | | 0.101 |
| r ₅ | | 0.296 | | 0.049 |
| r ₆ | | 0.538 | | 0.088 |
| r ₇ | | 0.166 | | 0.027 |
| r ₈ | | | 0.238 | 0.071 |
| r ₉ | | | 0.137 | 0.041 |
| r ₁₀ | | | 0.625 | 0.186 |

3.3 TOPSIS法指标综合评判

3.3.1 技术指标评判

根据表3构建技术指标初始判断矩阵

$$P = \begin{bmatrix} 83.34 & 13.9 & 0.92 & 0.877 \\ 86.26 & 14.58 & 0.96 & 0.894 \\ 89.68 & 16.36 & 1.02 & 0.855 \end{bmatrix}$$

其中工作面总风阻属于消耗性指标,值越小越好,其余指标属于收益性指标,因此由式(7)~(9)计算加权标准化决策矩阵

$$R_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0.059 & 0 & 0.044 \\ 0.087 & 0.043 & 0.076 & 0.101 \\ 0.189 & 0 & 0.189 & 0 \end{bmatrix}$$

根据式(10)、(11)可计算得到各通风方式基于技术指标的贴近度。其正理想解与负理想解分别为

$$\begin{cases} R_1^+ = (0.189, 0, 0.189, 0.101) \\ R_1^- = (0, 0.059, 0, 0) \end{cases}$$

计算得到各通风方式与正理想解和负理想解的距离为 $D_1^+ = 0.280, D_1^- = 0.044; D_2^+ = 0.158, D_2^- = 0.154; D_3^+ = 0.101,$

$D_3^- = 0.274$ 。则各通风方式与正理想解的贴近度为 $C_{11}^+ = 0.136, C_{12}^+ = 0.494, C_{13}^+ = 0.731$,因此,在技术指标层面上,长压长抽通风方式效果最好。

3.3.2 经济指标评判

与技术指标评判过程类似,可计算得出经济指标的加权标准化决策矩阵

$$R_2 = \begin{bmatrix} 0.049 & 0.035 & 0.027 \\ 0.031 & 0.088 & 0.022 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

其正理想解与负理想解分别为

$$\begin{cases} R_2^+ = (0, 0.088, 0) \\ R_2^- = (0.049, 0, 0.027) \end{cases}$$

计算得到各通风方式与正理想解和负理想解的距离: $D_1^+ = 0.077, D_1^- = 0.065; D_2^+ = 0.038, D_2^- = 0.09; D_3^+ = 0.088, D_3^- = 0.056$ 。则各通风方式与正理想解的贴近度为 $C_{21}^+ = 0.458, C_{22}^+ = 0.703, C_{23}^+ = 0.388$,因此,在经济指标层面上,长压短抽通风方式效果最好。

3.3.3 安全指标评判

由式(7)~(9)计算安全指标的加权标准化决策矩阵

$$R_3 = \begin{bmatrix} 0.053 & 0 & 0.080 \\ 0.071 & 0.027 & 0.186 \\ 0 & 0.041 & 0 \end{bmatrix}$$

其正理想解与负理想解分别为

$$\begin{cases} R_3^+ = (0.071, 0.041, 0.186) \\ R_3^- = (0, 0, 0) \end{cases}$$

计算得到各通风方式与正理想解和负理想解的距离: $D_1^+ = 0.115, D_1^- = 0.096; D_2^+ = 0.014, D_2^- = 0.201; D_3^+ = 0.199, D_3^- = 0.041$ 。则各通风方式与正理想解的贴近度 $C_{31}^+ = 0.455, C_{32}^+ = 0.935, C_{33}^+ = 0.171$,因此,在安全指标层面上,长压短抽通风方式效果最好。

4 通风方式综合优选

通过AHP法计算得到的准则层各评判指标的权重为

$$W = [0.539 \ 0.164 \ 0.297]$$

根据TOPSIS法得出各评判指标贴近度构造的评判矩阵为

$$C = \begin{bmatrix} 0.136 & 0.494 & 0.731 \\ 0.458 & 0.703 & 0.388 \\ 0.455 & 0.935 & 0.171 \end{bmatrix}$$

将 W 与 C 代入公式(12)可得

$$Q=WC=[0.284 \quad 0.659 \quad 0.508]$$

综上可得通风方式的评判结果优越度分别为 28.4%, 65.9%, 50.8%, 长压短抽的通风方式优越度最高。因此,根据 AHP-TOPSIS 法计算得出,高海拔矿山掘进面应采用长压短抽通风方式可使综合效果最好,该结果与模糊优选分析法^[2]的结果基本相符,但计算过程更为简便,同时能分别得出各通风方式在技术指标、经济指标与安全指标的优劣程度,使通风优选更具针对性。

5 结论

1) 利用 AHP 法的基本原理构建出通风方式优选综合评判指标体系,从技术可行、经济合理与安全可靠 3 个方面选取了通风方式影响因素的 10 种评判指标,并对各层次评判指标的权重进行科学分配,得出合理的权重矩阵。

2) 运用 TOPSIS 法根据各通风方式的评判指标数值计算得出了各评判指标贴近度构造的评判矩阵,建立 AHP-TOPSIS 综合模型计算出 3 种通风方式综合优越度分别为 28.4%, 65.9%, 50.8%, 确定了高海拔矿山掘进面采用长压短抽通风方式最优,同时该方法与模糊数学的评判结果基本一致。

3) AHP 法避免了主观因素对评价结果的影响,同时能在一定程度上有效克服 TOPSIS 法难以分配权重的弊端,二者的结合使用能做出更全面准确的判断。将 AHP-TOPSIS 法运用在高海拔矿山通风方式优选上,优选结果科学合理且符合生产实际,具有一定的理论意义与实际应用价值,可作为高海拔矿山掘进面通风方式决策时的理论依据。

参考文献 (References)

- [1] 谢贤平, 冯长根, 赵梓成. 矿井通风系统模糊优化研究[J]. 煤炭学报, 1999, 24(4): 379-382.
Xie Xianping, Feng Changgen, Zhao Zicheng. Research on fuzzy optimization for mine ventilation systems[J]. Journal of China Coal Society, 1999, 24(4): 379-382.
- [2] 周福宝, 王德明, 李正军. 矿井通风系统优化评判的模糊优选分析法[J]. 中国矿业大学学报, 2002, 31(3): 262-266.
Zhou Fubao, Wang Deming, Li Zhengjun. Fuzzy optimum selection and analysis for optimization and evaluation of mine ventilation systems[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2002, 31(3): 262-266.
- [3] 蔡卫. 矿井通风系统安全性评价及其应用[J]. 煤炭学报, 2004, 29(2): 195-198.
Cai Wei. Safety evaluation and its application on coal mine ventilation system[J]. Journal of China Coal Society, 2004, 29(2): 195-198.
- [4] 程磊, 杨运良, 熊亚选. 基于人工神经网络的矿井通风系统评价研究[J]. 中国安全科学学报, 2005, 15(5): 88-91.
Cheng Lei, Yang Yunliang, Xiong Yaxuan. Study of mine ventilation system assessment based on artificial neural network[J]. China Safety

Science Journal, 2005, 15(5): 88-91.

- [5] Lin Mingyuan, Wang Chencheng, Chen Mingshi, et al. Using AHP and TOPSIS approaches in customer-driven product design process[J]. Computers in Industry, 2008, 59: 17-31.
- [6] 陈婷婷, 宋永发. 基于 AHP-TOPSIS 的地铁车站施工方案比选[J]. 工程管理学报, 2012(4): 33-36.
Chen Tingting, Song Yongfa. Construction planning decision of subway stations based on AHP-TOPSIS method[J]. Journal of Engineering Management, 2012(4): 33-36.
- [7] 黄贯虹, 方刚. 系统工程方法与应用[M]. 广州: 暨南大学出版社, 2005: 45-48.
Huang Guanhong, Fang Gang. System engineering method and application[M]. Guangzhou: Jinan University Press, 2005: 45-48.
- [8] 龚剑, 胡乃联, 张延凯, 等. 基于 AHP-FCE 法的高海拔地区采矿方法优选[J]. 金属矿山, 2013(9): 1-5.
Gong Jian, Hu Nailian, Zhang Yankai, et al. Optimization of mining methods in high-altitude areas based on AHP-FCE[J]. Metal Mine, 2013 (9): 1-5.
- [9] 许宝田, 阎长虹, 许宏发, 等. 基于模糊理论的软岩弹性模型识别及参数反分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(11): 2280-2286.
Xu Baotian, Yan Changhong, Xu Hongfa, et al. Viscidity-elastic model identification and back analysis of parameters of soft rock on FUZZY theory[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(11): 2280-2286.
- [10] 徐玖平, 吴巍. 多属性决策的理论与方法[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006: 66-73.
Xu Jiuping, Wu Wei. Multiple attribute decision making theory and methods[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2006: 66-73.
- [11] 谢本贤, 陈沉江, 史秀志. 深部岩体工程围岩质量评价的 IRMR 法研究[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2007, 38(5): 987-992.
Xie Benxian, Chen Yuanjiang, Shi Xiuzhi. IRMR method for evaluation of surrounding rock quality in deep rock mass engineering [J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2007, 38(5): 987-992.
- [12] 李俊芳, 吴小萍. 基于 AHP-FUZZY 多层次评判的城市轨道交通线网规划方案综合评价[J]. 武汉理工大学学报, 2007, 4(2): 205-208.
Li Junfang, Wu Xiaoping. Synthetic evaluation for urban rail transit line network planning scheme based on AHP-FUZZY method[J]. Journal of Wuhan Engineering University, 2007, 4(2): 205-208.
- [13] 吴立云, 杨玉中, 张强. 矿井通风系统评价的 TOPSIS 方法[J]. 煤炭学报, 2007, 32(4): 407-410.
Wu Liyun, Yang Yuzhong, Zhang Qiang. TOPSIS method for evaluation on mine ventilation system[J]. Journal of China Coal Society, 2007, 32(4): 407-410.

(责任编辑 赵业玲)

《科技导报》“卷首语”栏目征稿

“卷首语”栏目每期邀请一位中国科学院院士和中国工程院院士就重大科技现象、事件,以及学科发展趋势、科学研究热点和前沿问题等,撰文发表个人的见解、意见和评论。本栏目欢迎院士投稿,每篇文章约 2000 字,同时请提供作者学术简历、工作照和签名电子文档。投稿邮箱: kjdbbjb@cast.org.cn。