

文章编号:1672-058X(2013)06-0061-08

基于层次分析法及可拓理论的露天采石场安全评价

王 俊^a, 谢晓佳^{a,b}

(重庆大学 a. 资源及环境科学学院; b. 煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室, 重庆 400044)

摘 要:通过对露天采石场安全评价的深入研究,从安全管理和安全生产系统进行分析,构建露天采石场安全评价体系;基于物元理论、可拓集合论和关联度函数建立可拓综合评价模型,利用层次分析法确定其权重,计算评价对象的综合关联度,从而评定其安全等级;采用定性和定量评价相结合的方法可以避免评价的主观性,并且能够更准确地评价露天采石场的安全等级及其倾向性;通过实例分析表明该方法的评价结果与实际情况符合较好,计算简单,具有较好的实用性。

关键词:层次分析法;可拓理论;露天采石场;安全评价

中图分类号:XP-65

文献标志码:A

随着各地基础设施建设的加快,许多重点工程项目相继开工,给建材行业特别是采石场的发展带来重大机遇^[1]。但从全国范围来看,目前的大多数采石场规模小、起点低、分布广,普遍存在较大危险及有害因素^[2]。因此,针对露天采石场常见危险事故进行分析研究,提出了基于层次分析法(AHP)及可拓理论的露天采石场安全评价方法,以综合关联度为评价准则评定其安全等级,根据评价结果有针对性地采取防治措施,提高露天采石场的安全作业水平。

1 可拓理论的物元模型

可拓学是由中国学者于1983年提出的一门原创性横断学科,它以形式化的模型,探讨事物拓展的可能性以及开拓创新的规律与方法,并用于解决矛盾问题^[3]。在可拓学中,把物 N ,特征 c 及 N 关于 c 的量值 v 构成的有序三元组 $R = (N, c, v)$ 作为描述物的基本单元,称为一维物元^[3]。把物 N , n 个特征 c_1, c_2, \dots, c_n 及 N 关于 $c_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 对应的量值 $v_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 所构成的阵列

$$R = \begin{bmatrix} N, & c_1, & v \\ & c_2, & v_2 \\ & \dots & \dots \\ & c_n, & v_n \end{bmatrix} = (N, C, V) \text{ 称为 } n \text{ 维物元。在物元 } R = (N, c, v) \text{ 中,若 } N, v \text{ 是参数 } t \text{ 的函数,称 } R \text{ 为}$$

参变量物元,记着 $R(t) = (N(t), c, v(t))$ 。

收稿日期:2013-02-26;修回日期:2013-03-09.

作者简介:王俊(1993-),男,贵州瓮安人,硕士研究生,从事采矿工程和安全监测与监控研究.

2 可拓综合评价模型

2.1 确定经典域、节域和待评物元

(1) 经典域

$$R_{0i} = (N_{0i}, C_j, V_{0j}) = \begin{bmatrix} N_{0i}, & c_1, & v_{01} \\ & c_2, & v_{02} \\ & \dots & \dots \\ & c_n, & v_{0n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N_{0i}, & c_1, & \langle a_{01}, b_{01} \rangle \\ & c_2, & \langle a_{02}, b_{02} \rangle \\ & \dots & \dots \\ & c_n, & \langle a_{0n}, b_{0n} \rangle \end{bmatrix}$$

式中, N_{0i} 表示第 i 个等级, C_j 表示第 i 个等级的特征, V_{0j} 表示第 i 个等级关于特征 C_j 的取值范围。

(2) 节域

$$R_D = (D, C_j, V_{Dj}) = \begin{bmatrix} D, & c_1, & v_{D1} \\ & c_2, & v_{D2} \\ & \dots & \dots \\ & c_n, & v_{Dn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D, & c_1, & \langle a_{D1}, b_{D1} \rangle \\ & c_2, & \langle a_{D2}, b_{D2} \rangle \\ & \dots & \dots \\ & c_n, & \langle a_{Dn}, b_{Dn} \rangle \end{bmatrix}$$

式中, D 表示评价等级的全体, V_{Dj} 表示 D 关于特征 C_j 的取值范围。

(3) 确定待评物元

$$R_i = (p_i, C_j, V_j) = \begin{bmatrix} p_i, & c_1, & v_1 \\ & c_2, & v_2 \\ & \dots & \dots \\ & c_n, & v_n \end{bmatrix}$$

式中, p_i 为待评对象, C_j 为第 i 个待评对象的特征, V_j 为待评价对象 p_i 关于特征 C_j 的取值。

2.2 确定各特征的权重

目前确定权重的方法很多,如专家评分法、德尔菲法、商权法、层次分析法等,每种方法有各自的特点,有不同的适用条件^[4]。现采用层次分析法确定各指标的权重。

2.3 确定评价对象关于各评价等级的关联度

建立关联函数

$$k_i(v_j) = \frac{\rho(v_j, V_{0j})}{\rho(v_j, V_{Dj}) - \rho(v_j, V_{0j})} \quad (1)$$

式中, $\rho(v_j, V_{0j})$ 为点 v_j 与区间 V_{0j} 的距,

$$\rho(v_j, V_{0j}) = \left| v_j - \frac{a_{0j} + b_{0j}}{2} \right| - \frac{1}{2}(b_{0j} - a_{0j}) \quad (2)$$

2.4 确定综合关联度

考虑各特征 C_j 的权重 α_j , 将关联度和权系数合成为综合关联度。

$$K_i(p_i) = \sum_{j=1}^n \alpha_j K_i(v_j) \quad (3)$$

式中 p_i 为待评对象, α_j 为各特征的权重, $K_i(v_j)$ 为各评价对象关于评价等级的关联度。

2.5 评价等级评定及评价等级细化^[7]

若

$$K_k(p_i) = \max_{k \in (1,2,\dots,m)} K_i(p_i) \tag{4}$$

则评价对象 p_i 的等级为 $k^{[8]}$ 。

令

$$\bar{K}_k(p_i) = \frac{K_k(p_i) - \min_{k \in (1,2,\dots,m)} K_k(p_i)}{\max_{k \in (1,2,\dots,m)} K_k(p_i) - \min_{k \in (1,2,\dots,m)} K_k(p_i)} \tag{5}$$

$$K^* = \frac{\sum_{k=1}^m k \bar{K}_k(p_i)}{\sum_{k=1}^m \bar{K}_k(p_i)} \tag{6}$$

则 K^* 为细化后的评价等级,可以进一步表示评价等级的倾向。

3 层次分析法确定权重

层次分析法(简称 AHP)是美国匹兹堡大学教授 A. L. saaty 于 20 世纪 70 年代提出的一种系统分析方法^[5]。它是一种多层次权重系数解析法,方法以定性与定量相结合的方式处理各种决策因素,将人的主观判定以数量形式表达和处理,系统性强、适用灵活简便^[6]。

3.1 构造判别矩阵

假设 A 层次中元素 A_k 与下一层次 $B = (B_1, B_2, \dots, B_n)$ 的 n 个元素有关,以 b_{ij} 表示对元素 A_k 而言元素 B_i 对元素 B_j 的相对重要性,全部比较结果可列成矩阵 $B = (b_{ij})_{n \times n}$,矩阵称为对 A_k 的影响元素判别矩阵^[6]。采用标度法用数值 1-9 来表示相对重要程度,标度法的含义如表 1 所示。

表 1 Saaty 标度法^[6]

B_i/B_j	一样重要	稍微重要	明显重要	强烈重要	极端重要
b_{ij}	1	3	5	7	9

判断两个指标相对重要程度介于两者之间的, b_{ij} 可取 2, 4, 6, 8。对于判别矩阵有 $b_{ii} = 1, b_{ij} = 1/b_{ji}$ 。

3.2 层次单排序

层次单排序就是根据判断矩阵计算相对上一层次某因素而言,本层次与之有联系的因素的重要性次序的权值,层次单排序问题可归结为计算判断矩阵的特征根和特征向量问题^[5]。

(1) 正规化判别矩阵的每一列

$$\bar{b}_{ij} = b_{ij} / \sum_{k=1}^n b_{kj}, i, j = 1, 2, \dots, n$$

(2) 将每一列经正规化后的判定矩阵按行相加

$$\bar{W}_i = \sum_{j=1}^n \bar{b}_{ij}, j = 1, 2, \dots, n$$

(3) 对向量 $\bar{W} = [\bar{W}_1, \bar{W}_2, \dots, \bar{W}_n]^T$ 正规化

$W_i = \bar{W}_i / \sum_{j=1}^n \bar{W}_j, i = 1, 2, \dots, n$, 所得向量 $W = [W_1, W_2, \dots, W_n]^T$ 即为判定矩阵的特征向量。

(4) 计算判定矩阵的最大特征根 λ_{\max}

$$\lambda_{\max} = \sum_{i=1}^n \frac{(AW)_i}{nW_i}, \text{式中 } (AW)_i \text{ 表示向量 } AW \text{ 的第 } i \text{ 个分量。}$$

3.3 判断矩阵的一致性检验

计算一致性指标 $CI = (\lambda_{\max} - n) / (n - 1)$ 。为了检验判断矩阵是否具有满意的一致性,需要将 RI 与平均随即一致性指标 RI 进行比较,对于 1~8 阶矩阵, RI 如表 2 所示。

表 2 1~8 阶矩阵的平均随机一致性指标

阶数	1	2	3	4	5	6	7	8
RI	0.00	0.00	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41

判断矩阵的随即一致性比例 $CR = CI/RI$,当 $CR < 0.1$ 时,判断矩阵具有满意的一致性,否则就需要对判断矩阵进行调整。

3.4 层次总排序的一致性检验

假设 A 层次的 m 个因素的层次总排序权值分别为 a_1, a_2, \dots, a_m ,对于 B 层中判断矩阵的一致性指标为 CI_i ,评价随机一致性指标 RI ,则 B 层次总排序随机一致性比例为

$$CR = \frac{\sum_{i=1}^m a_i CI_i}{\sum_{i=1}^m a_i RI_i}, \text{当 } CR \leq 0.1 \text{ 时,认为该层次总排序具有满意的一致性,否则需要对 } B \text{ 层的判断矩阵进行}$$

调整,并再次进行分析。

4 实例分析

结合在广西玉林市做过部分露天采石场开采设计和安全评价项目,以广西玉林市某露天采石场安全评价为例进行可拓综合评价分析。石场是私营独资企业,现开采矿区面积 0.1989 km^2 ,露天开采花岗岩矿,生产规模为每年 26 万 t。矿体开采深度为 $+438.1 \sim +245 \text{ m}$ 。自然坡度 $25^\circ \sim 45^\circ$,长约 720 m,宽约 380 m。矿体与围岩均属于华力西期花岗岩,矿体内无夹石层及软弱夹层,厚度稳定。

4.1 建立安全评价体系

采石场主要生产花岗岩矿,生产工艺简单。根据安全评价需要,结合矿山的实际情况,综合考虑几位专家和有工作经验的技术员的意见,按矿山系统将评价项目划分为安全管理及生产系统两个大的评价单元。安全管理及生产系统再分别划分为技术资料、安全生产管理机构、安全生产管理、安全教育和培训、事故预防及采场、机电设备、爆破、装运作业、防排水、防灭火等项目。安全评价体系如图 1 所示。

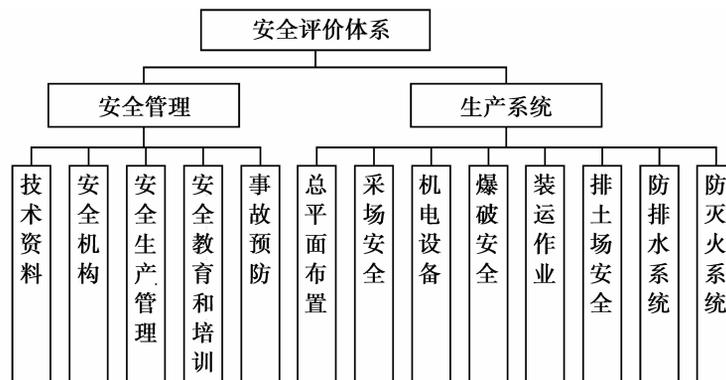


图 1 露天采石场安全评价体系

表3 各评价指标的分值及权重

一级评价指标	二级评价指标	得分	标准分	权重
安全管理	技术资料	12	15	0.12
	安全机构	9	10	0.13
	安全生产管理	23	28	0.30
	安全教育和培训	20	25	0.21
	事故预防	15	22	0.24
生产系统	总平面布置	7	8	0.12
	采场安全	16	19	0.16
	机电设备	9	16	0.15
	爆破安全	16	20	0.17
	装运作业	9	15	0.12
	排土场安全	7	10	0.11
	防排水系统	4	6	0.09
	防灭火系统	5	6	0.08

4.2 建立可拓综合评价模型

4.2.1 确定经典域、节域和待评物元

将露天采石场的安全等级划分为较安全、一般、较危险和危险4个等级,即 $D = (D_1 \text{ 较安全}, D_2 \text{ 一般}, D_3 \text{ 较危险}, D_4 \text{ 危险})$ 。将管理安全的5个评价指标(技术资料、安全机构、安全生产管理、安全教育和培训、事故预防)分别记作 c_1, c_2, c_3, c_4, c_5 ,根据专家意见可得各评价等级的经典域,如表4所示。

表4 安全管理各评价指标关于各评价等级的取值范围

评价指标 C_j	较安全 D_1	一般 D_2	较危险 D_3	危险 D_4
技术资料	<13,15>	<10,13>	<9,10>	<0,9>
安全机构	<9,10>	<7,9>	<6,7>	<0,6>
安全生产管理	<25,28>	<19,25>	<16,19>	<0,19>
安全教育和培训	<22,25>	<17,23>	<15,17>	<0,15>
事故预防	<19,22>	<15,19>	<13,15>	<0,13>

安全管理各评价等级的经典域:

$$R_{01} = \begin{bmatrix} N_{01}, & c_1, & \langle 13, 15 \rangle \\ & c_2, & \langle 9, 10 \rangle \\ & & c_3, \\ c_4, & \langle 25, 28 \rangle & \\ \langle 22, 25 \rangle & & \\ & c_5, & \langle 19, 22 \rangle \end{bmatrix}, R_{02} = \begin{bmatrix} N_{02}, & c_1, & \langle 10, 13 \rangle \\ & c_2, & \langle 7, 9 \rangle \\ & & c_3, \\ c_4, & \langle 19, 25 \rangle & \\ \langle 17, 23 \rangle & & \\ & c_5, & \langle 15, 19 \rangle \end{bmatrix}$$

$$R_{03} = \begin{bmatrix} N_{03}, & c_1, & \langle 9, 10 \rangle \\ & c_2, & \langle 6, 7 \rangle \\ & & c_3, \\ c_4, & \langle 16, 19 \rangle & \\ \langle 15, 17 \rangle & & \\ & c_5, & \langle 13, 15 \rangle \end{bmatrix}, R_{04} = \begin{bmatrix} N_{04}, & c_1, & \langle 0, 9 \rangle \\ & c_2, & \langle 0, 6 \rangle \\ & & c_3, \\ c_4, & \langle 0, 19 \rangle & \\ \langle 0, 15 \rangle & & \\ & c_5, & \langle 0, 13 \rangle \end{bmatrix}$$

各评价指标的标准分值,即评价等级的全体的取值范围构成节域:

$$R_D = \begin{bmatrix} D, & c_1, & \langle 0, 15 \rangle \\ & c_2, & \langle 0, 10 \rangle \\ & & c_3, \\ c_4, & \langle 0, 28 \rangle & \\ \langle 0, 25 \rangle & & \\ & c_5, & \langle 0, 22 \rangle \end{bmatrix}$$

用检查表法对该矿山打分,确定待评物元为:

$$R_1 = \begin{bmatrix} p_1, & c_1, & 12 \\ & c_2, & 9 \\ & c_3, & 23 \\ & c_4, & 20 \\ & c_5, & 15 \end{bmatrix}$$

4.2.2 计算关联度

由式(1)式(2)可得“安全管理”各指标的关联度为:

$$K_1(v) = \begin{bmatrix} -0.25 & 0.50 & -0.50 & -0.4 \\ 0.00 & 0.00 & -0.67 & -0.75 \\ -0.28 & 0.67 & -0.44 & -0.44 \\ -0.28 & 1.5 & -0.37 & -0.5 \\ -0.36 & 0.00 & 0.00 & -0.22 \end{bmatrix},$$

由层次分析法计算其权重为 $A_1 = (0.12, 0.13, 0.30, 0.21, 0.24)$, 由式(3)可得综合关联度为 $K_1 = (-0.26, 0.58, -0.24, -0.44)$ 。

同理可得“生产系统”各指标关联度为:

$$K_2(v) = \begin{bmatrix} 0.00 & 0.00 & -0.33 & -0.75 \\ -0.25 & 0.50 & -0.50 & -0.63 \\ -0.42 & -0.22 & 0.00 & 0.00 \\ -0.33 & 1.00 & -0.33 & -0.50 \\ -0.14 & -0.14 & 0.00 & 0.00 \\ -0.40 & 0.00 & 0.00 & -0.25 \\ -0.33 & 0.00 & 0.00 & -0.33 \\ 0.00 & 0.00 & -0.50 & -0.67 \end{bmatrix}$$

由层次分析法确定其权重为 $A_2 = (0.12, 0.16, 0.15, 0.17, 0.12, 0.11, 0.09, 0.08)$, 则可得综合关联度 $K_2 = (-0.25, 0.20, -0.22, -0.39)$ 。

4.2.3 确定评价等级及细化等级

由式(4)可知“安全管理”和“生产系统”的评价等级均为2级,即“一般”。再由式(5)、(6)可得“安全管理”细化后的评价等级为2.01;“生产系统”细化后的评价等级为2.03。评价结果如表5所示。

表5 安全评价结果

评价对象	关联度	评价等级	细化后等级	得分
安全管理	(-0.26, 0.58, -0.24, -0.44)	2	2.01	79
生产系统	(-0.25, 0.20, -0.22, -0.39)	2	2.03	73
综合评价	(-0.25 0.34 -0.23 -0.41)	2	2.02	76

4.2.4 综合评价

令 $K_0 = \begin{pmatrix} -0.26 & 0.58 & -0.24 & -0.44 \\ -0.25 & 0.20 & -0.22 & -0.39 \end{pmatrix}$, 由层次分析法得到一级评价指标的权重为 $A_0 = (0.38 \ 0.62)$, 则综合评价 $K = A_0 \cdot K_0 = (-0.25 \ 0.34 \ -0.23 \ -0.41)$, 其评价等级如表5所示。

4.3 评价结果分析

如表5所示,安全管理、生产系统和综合评价等级均为2级,即安全评价结果为“一般”,从细化后的评价等级分别为2.01、2.03、2.02可以看出,该露天采石场的安全等级介于“较安全”与“一般”之间,但更倾向于“一般”级。

由安全评价结果可知,采石场的安全管理和生产系统的安全状况都有待提高。在安全管理方面,矿山应注重从业人员的安全教育和培训,定期进行生产安全事故应急救援预案演练,对于技术资料不全的应及时补上。在生产系统方面,应加强对爆破、台阶边坡、机电设备等的安全管理,对不符合安全要求的项目应按要求进行整改。

5 结 论

(1) 应用可拓理论对露天采石场进行安全评价,通过计算综合关联度确定评价等级,并对评价等级进行细化进一步了解其安全等级的倾向性,相比其他定性和定量安全评价方法更为准确,实用性更强。

(2) 由于权重的确定在整个安全评价中非常重要,因此在确定权重时需要收集相关专家和有工作经验的技术员的意见,采用层次分析法确定其权重。

(3) 根据不同采石场的条件不一样,各评价指标及其权重可作适当调整。

(4) 方法应用于露天采石场安全评价,相关计算可通过计算机软件编程进行计算,使评价更简单易懂,可以推广使用。

参考文献:

- [1] 黎展平. 采石场安全生产的主要问题与对策[J]. 采矿技术 2005(2):115-116
- [2] 周春平. 露天石料场开采过程中的危险性分析[J]. 安全,2012(2):41-44
- [3] 杨春燕,蔡文著. 可拓工程[M]. 北京:科学出版社,2007
- [4] 杨玉中. 煤矿瓦斯重大灾害预警理论及应用[M]. 北京:北京师范大学出版社,2010
- [5] 谭跃进. 系统工程原理[M]. 长沙:国防科技大学出版社,1999
- [6] 胡保生,彭勤科. 系统工程原理与应用[M]. 北京:化学工业出版社,2007
- [7] 吴凯,赵兴超. 基于可拓理论的矿井灾害应急保障能力评价研究[J]. 矿业工程研究,2010(9):49-53
- [8] 杨玉中. 基于可拓理论的煤矿安全预警模型研究[J]. 中国安全科学学报,2008(1):102-105

Safety Assessment of Open Quarry Based on Analytic Hierarchy Process and Extension Theory

WANG Jun¹, XIE Xiao-jia^{1,2}

(1. School of Resources and Environmental Science, Chongqing University, Chongqing 400044, China;
2. State Key Laboratory of Coal Mine Disaster Dynamics and Control,
Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: Through in-depth study of the quarry safety evaluation and analysis from security management and production system, a quarry safety evaluation system is built. Extension comprehensive evaluation model is set up based on matter element theory, extension set theory and the associated function. By using AHP to determine the weight and calculate evaluation object associated degrees, the level of security is assessed. By a combination of qualitative and quantitative evaluation, this method can avoid the subjectivity and can more accurately evaluate the level of safety of the quarry and its orientation. A case study shows that the evaluation results by this method are consistent with the actual situation better, the calculation is simple and with good practicability.

Key words: Analytic Hierarchy Process(AHP); Extension Theory; open quarry; safety assessment

责任编辑:田 静