

文章编号:1671-251X(2013)11-0098-05

DOI:

方刚,迪明,刘韩勇,等.基于模糊层次分析法的煤矿安全生产预警系统[J].工矿自动化,2013,39(11):98-102.

基于模糊层次分析法的煤矿安全生产预警系统

方刚, 迪明, 刘韩勇, 党春才, 兰巍

(陕煤集团 神木张家峁矿业有限公司, 陕西 神木 719316)

摘要:针对煤矿安全生产预警评价指标多,且各指标受很多因素影响的问题,构建了基于模糊层次分析法的煤矿安全生产预警系统。该系统将层次分析法与模糊综合评判相结合,利用层次分析法确定各评价指标的权重,通过模糊评判矩阵进行模糊综合评判,最后将评价指标权重与模糊综合评判结果进行合成运算,从而确定煤矿安全等级和预警结果。实际应用结果验证了该系统的可行性和有效性。

关键词:煤矿安全;预警;模糊综合评价;层次分析法

中图分类号:TD76 文献标志码:B 网络出版时间:

网络出版地址:

Early warning system for coal mine safety production based on
fuzzy-analytical hierarchy process

FANG Gang, DI Ming, LIU Han-yong, DANG Chun-cai, LAN Wei

(Shenmu Zhangjiamao Mining Co., Ltd., Shaanxi Coal Group, Shenmu 719316, China)

Abstract:In view of problem that early warning of coal mine safety production has many evaluation indexes which affected by many factors, an early warning system for coal mine safety production based on fuzzy-analytical hierarchy process was constructed. The system combines analytical hierarchy process with fuzzy comprehensive evaluation, uses analytical hierarchy process to determine the evaluation index weights, uses fuzzy evaluation matrix for fuzzy comprehensive evaluation, and finally uses the evaluation index weights and fuzzy comprehensive evaluation result to make synthesis of computing, so as to determine mine safety level and warning result. The practical application result demonstrates feasibility and effectiveness of the system.

Key words: coal mine safety; early warning; fuzzy comprehensive evaluation; analytical hierarchy process

0 引言

保证煤矿生产系统的安全运行对于改善劳动环境、减少生产中的危险因素、避免伤亡事故的发生等具有重要意义。为保证煤矿企业的安全、高产与高效,对生产系统各环节建立集监测与监控一体化的预警系统显得尤为重要^[1]。预警是指对生产系统中可能发生的各类事故进行合理评价,预估该类事件

可能引发的危机及影响,以便设计相应的对策和预案,同时可以进一步探索该类事件的发展规律,从而控制或利用该类事件^[2]。预警系统是能够监测、诊断、评价与控制各类事故发生的管理系统。煤矿安全生产预警系统可以实现矿井安全生产信息的远程数据传输,使管理机构实时掌握煤矿安全生产的状况,减少或避免事故发生^[3]。

煤矿安全生产预警中的评价指标很多,各指标

收稿日期:2013-07-25。

作者简介:方刚(1962—),男,陕西韩城人,高级工程师,硕士,长期从事煤矿安全、矿井整体规划及发展、煤矿开采、矿山压力工程及矿山设计等方面的管理工作,E-mail:fg1026@sina.com。

受很多因素影响,而这些影响因素大多很难通过数学关系来描述,对系统模型的评价存在一定程度上的模糊性。模糊层次分析法(Fuzzy-Analytical Hierarchy Process, Fuzzy-AHP)是解决该问题的有效方法。本文首先利用 Fuzzy-AHP 深入研究了影响煤矿安全生产的众因素,理清了各因素之间的相互关系,并建立了安全生产影响因素的集合,即{地质,人员,设备,环境,管理};然后,构建了预警指标的合理、科学的评判体系,在 Fuzzy-AHP 的基础上建立了煤矿安全生产预警系统;最后,结合陕西煤业化工集团某矿业公司的实际生产状况对该系统进行了现场应用,应用结果验证了该系统的可行性和有效性。

1 系统建立

1.1 系统原理

基于 Fuzzy-AHP 的煤矿安全生产预警系统原理如图 1 所示。

1.2 系统结构及其影响因素

为了对煤矿安全生产状况作定性描述,引入安

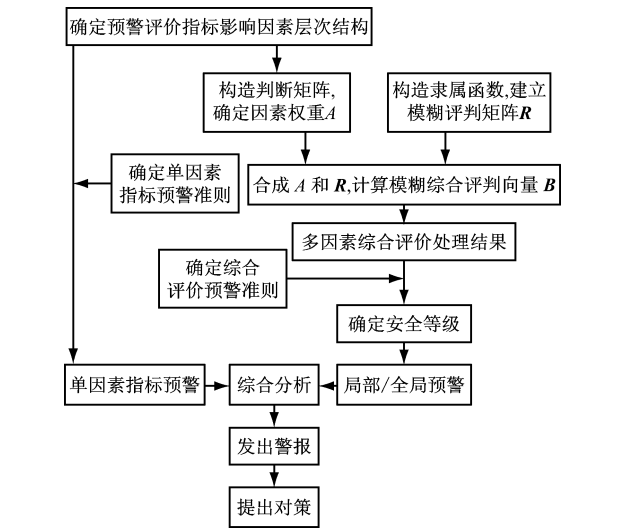


图 1 基于 Fuzzy-AHP 的煤矿安全生产预警系统原理

全评价等级的概念, 设与评价等级相对应的集合为 $V = \{v_1, v_2, v_3, v_4, v_5\} = \{\text{安全, 较安全, 一般安全, 较危险, 危险}\}^{[4]}$ 。图 2 为煤矿安全生产预警评价指标体系。该体系由 2 个层次构成, 第 1 层的监测指标集合为 $U_i (i=1, 2, \dots, m)$, U_i 分别由第 2 层影响因素 j 构成, 即 $U_i = \{U_{ij}\} (j=1, 2, \dots, n)$ 。

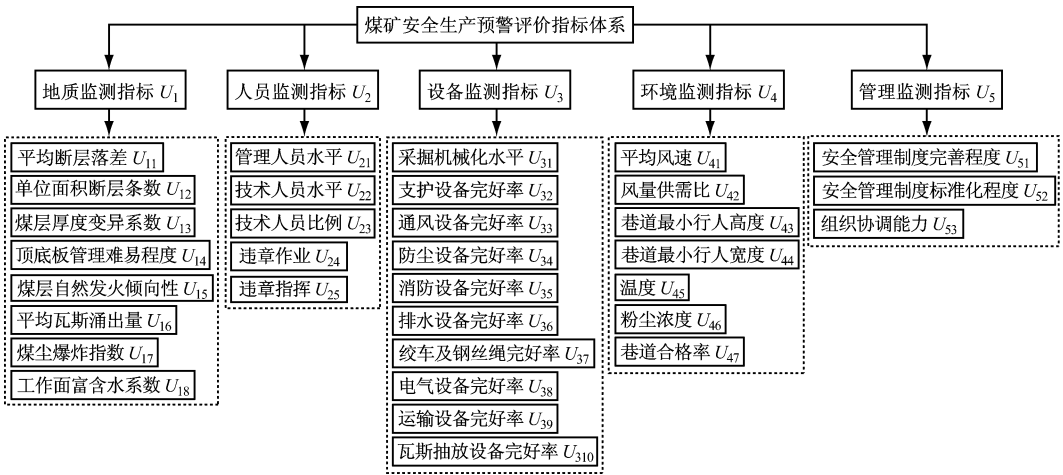


图 2 煤矿安全生产预警评价指标体系

1.3 安全评价过程

1.3.1 影响因素权值的确定

鉴于各影响因素对评判结果的重要程度不一样,按重要性大小给不同因素 u_i 赋以权值 a_i , 则影响因素的权值可表示为 $A = (a_1, a_2, \dots, a_m)$ 。

采用层次分析法来确定影响因素的权值系数, 其流程如图 3 所示。

(1) 构造判断矩阵。将元素两两比较得到判断矩阵 $C = (C_{ij})_{n \times n}$, 其中 C_{ij} 表示因素 i 和 j 相比较, 相对于目标的重要程度, 这里采用 1~9 标度法将判断定量化^[5]。

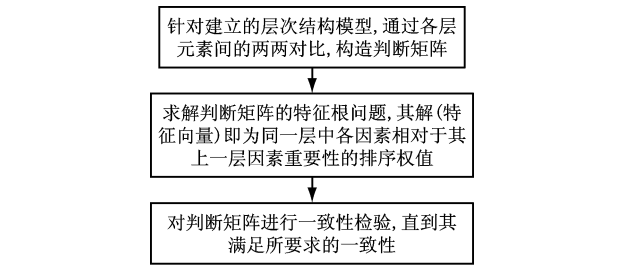


图 3 权值系数的确定流程

(2) 计算权重。将判断矩阵每行的元素作乘积得 M_i :

$$M_i = \prod_{j=1}^n a_{ij} (i = 1, 2, \cdots, n)$$

计算 M_i 的 n 次方根 $\bar{W}_i$:

$$\bar{W}_i = \sqrt[n]{M_i}$$

将向量 $\bar{W}=[\bar{W}_1, \bar{W}_2, \cdots, \bar{W}_n]^T$ 正规化:

$$W_i = \bar{W}_i / \sum_{j=1}^n \bar{W}_j$$

则 $W=[W_1, W_2, \cdots, W_n]^T$ 即为所求特征向量。

计算判断矩阵的最大特征根 $\lambda_{\max}$:

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

(3) 一致性检验。矩阵的一致性检验采用随机一致性比率 CR 来衡量:

$$CR = CI/RI$$

式中:CI 表示一致性评价指标,可通过式(6)计算;RI 表示平均随机的一致性指标,其值见表 1。

$$CI = (\lambda_{\max} - n)/(n - 1)$$

表 1 RI 的值

阶数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
RI 值	0	0	0.58	0.9	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49	1.51

当随机一致性比率 $CR<0.1$ 时,认为层次排序结构具有满意的一致性,否则,要对判断矩阵作进一步计算与调整。

1.3.2 模糊评判矩阵的建立

采用钟型隶属函数:

$$f(x) = \frac{1}{1 + \left| \frac{x - c}{a} \right|^{2b}}$$

式中: $a=5, b=4; c$ 为函数曲线中心, c 的取值见表 2。

表 2 c 的取值

c	97.5	87.5	77.5	67.5	57.5
等级	安全	较安全	一般安全	较危险	危险

模糊评判矩阵可表示如下:

$$R = \begin{bmatrix} R_1 \\ R_2 \\ \vdots \\ R_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1m} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ r_{n1} & r_{n2} & \cdots & r_{nm} \end{bmatrix}$$

式中: r_{ij} 表示 u_i 对 v_j 的隶属度; n 为影响因素的数目; m 为安全等级评价集中的元素数目, $m=5$ 。

1.3.3 模糊综合评判过程

模糊综合评判向量可按式(9)计算^[6]:

$$B=AR=(a_1, a_2, \cdots, a_n) \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1m} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ r_{n1} & r_{n2} & \cdots & r_{nm} \end{bmatrix} = (b_1, b_2, \cdots, b_n)$$

式中: b_n 为评判指标,表示评判对象对评价集合 V 中第 n 个元素的隶属度。

第 2 层次的模糊评价集合可由 A_i 和 R_i 计算:

$$B_i = A_i R_i = (b_{i1}, b_{i2}, b_{i3}, b_{i4}, b_{i5})$$

式中: $b_{ik} = \bigvee_{j=1}^n (a_{ij} \wedge r_{ijk}) (i = 1, 2, \cdots, 5; k = 1, 2, \cdots, 5)$ 。

第 1 层次的模糊评判可通过式(11)、式(12)进行计算:

$$R = \begin{bmatrix} R_1 \\ R_2 \\ R_3 \\ R_4 \\ R_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1 \cdot R_1 \\ A_2 \cdot R_2 \\ A_3 \cdot R_3 \\ A_4 \cdot R_4 \\ A_5 \cdot R_5 \end{bmatrix} = [B_{ij}]_{5 \times 5}$$

$$B = AR = A \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ B_3 \\ B_4 \\ B_5 \end{bmatrix} = (b_1, b_2, b_3, b_4, b_5)$$

式中: $b_k = \bigvee_{j=1}^n (a_{ij} \wedge b_{ijk}) (k=1, 2, \cdots, 5)$ 。

1.3.4 安全等级的确定

首先确定与安全等级评价集合相对应的加权向量 γ_v , 然后将其与上述综合评价结果进行合成运算, 得到确定的综合值, 综合值 Z 可用式(13)计算:

$$Z = \gamma_v B_k^T = \gamma_v \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \\ b_4 \\ b_5 \end{bmatrix}$$

2 系统应用

2.1 影响因素权值的确定

以陕西煤业化工集团某矿业公司的实际生产状况为基础, 根据 1~9 标度法, 确定安全生产预警评价体系中各影响因素的权值系数, 并对判断矩阵进行一致性检验, 结果可以满足要求。

第 2 层次影响因素权重:

$$A_1 = (0.265\ 5, 0.265\ 5, 0.177\ 0, 0.119\ 2, 0.041\ 3, 0.081\ 3, 0.021\ 0, 0.029\ 1)$$

$A_2=(0.195\ 2,0.113\ 6,0.049\ 7,0.320\ 8,0.320\ 8)$
 $A_3=(0.182\ 5,0.182\ 5,0.123\ 9,0.261\ 1,0.085\ 3,$
 $0.028\ 9,0.059\ 0,0.041\ 0,0.015\ 3,0.020\ 7)$
 $A_4=(0.355\ 5,0.247\ 0,0.166\ 6,0.054\ 8,0.112\ 1,$
 $0.026\ 4,0.037\ 6)$

$A_5=(0.200\ 0,0.200\ 0,0.600\ 0)$
第 1 层次影响因素权重:
 $A=(0.058\ 4,0.420\ 0,0.170\ 8,0.106\ 4,0.244\ 4)$
地质因素判断矩阵的计算结果见表 3,其他各
影响因素及总评价的判断矩阵同理可得。

表 3 地质因素判断矩阵

U_1	U_{11}	U_{12}	U_{13}	U_{14}	U_{15}	U_{16}	U_{17}	U_{18}	M_j	$\bar{W}_j$	W_j
U_{11}	1	1	2	3	6	4	8	7	8\ 064	3.078\ 4	0.265\ 5
U_{12}	1	1	2	3	6	4	8	7	8\ 064	3.078\ 4	0.265\ 5
U_{13}	1/2	1/2	1	2	5	3	7	6	315	2.052\ 5	0.177\ 0
U_{14}	1/3	1/3	1/2	1	4	2	6	5	13.33	1.382\ 3	0.119\ 2
U_{15}	1/6	1/6	1/5	1/4	1	1/3	3	2	0.002\ 8	0.479\ 1	0.041\ 3
U_{16}	1/4	1/4	1/3	1/2	3	1	5	4	0.625	0.942\ 9	0.081\ 3
U_{17}	1/8	1/8	1/7	1/6	1/3	1/5	1	1/2	0.000\ 012	0.243\ 6	0.021\ 0
U_{18}	1/7	1/7	1/6	1/5	1/2	1/4	2	1	0.000\ 2	0.337\ 9	0.029\ 1
$\lambda_{\max}=8.29$ CI=0.041 RI=1.41 CR=0.029<0.10										11.595\ 0	1.000\ 0

2.2 模糊评判矩阵的建立

按照所设计的评价指标体系,根据工作面的实

际生产情况采集了各影响因素的监测值,见表 4。

表 4 各影响因素监测值

指标名称	监测值	指标名称	监测值	指标名称	监测值
平均断层落差	0.92	采掘机械化水平	98	违章指挥	87
单位面积断层条数	0.78	支护设备完好率	88	技术人员比例	2.62
煤层厚度变异系数	0.28	通风设备完好率	87	管理制度完善程度	88
顶底板管理难易程度	14	防尘设备完好率	91	管理制度标准化程度	91
煤层自然发火倾向性	4.20	消防设备完好率	97	组织协调能力	89
平均瓦斯涌出量	18.89	排水设备完好率	96	风量供需比	1.08
煤尘爆炸指数	9.18	绞车及钢丝绳完好率	88	巷道最小行人高度	1.62
工作面富含水系数	9.34	电气设备完好率	89	巷道最小行人宽度	1.08
管理人员水平	85	瓦斯抽放设备完好率	96	温度	22.2
技术人员水平	86	运输设备完好率	92	粉尘浓度	4.89
违章作业	88	平均风速	2.46	巷道合格率	92.6

根据隶属函数分别计算各影响因素的隶属度，

$R_2=\begin{bmatrix}0.195\ 2\ 0.000\ 7\ 0.996\ 1\ 0.037\ 6\ 0\ 0\\0.113\ 6\ 0.001\ 3\ 0.999\ 9\ 0.014\ 1\ 0\ 0\\0.049\ 7\ 0.005\ 9\ 1\ 0.002\ 6\ 0\ 0\\0.320\ 8\ 0.002\ 6\ 1\ 0.005\ 9\ 0\ 0\\0.320\ 8\ 0.003\ 6\ 1\ 0.004\ 2\ 0\ 0\end{bmatrix};$

$R_5=\begin{bmatrix}0.005\ 9\ 1\ 0.002\ 6\ 0\ 0\\0.109\ 2\ 0.945\ 5\ 0.000\ 4\ 0\ 0\\0.014\ 1\ 0.999\ 9\ 0.001\ 3\ 0\ 0\end{bmatrix};$

得到相应的模糊评判矩阵：

$R_1=\begin{bmatrix}0.014\ 1\ 0.999\ 9\ 0.000\ 1\ 0\ 0\\0.020\ 6\ 0.999\ 6\ 0.001\ 0\ 0\ 0\\0.002\ 6\ 1\ 0.005\ 9\ 0\ 0\\0.002\ 6\ 1\ 0.005\ 9\ 0\ 0\\0\ 0.000\ 1\ 0.109\ 2\ 0.945\ 5\ 0.000\ 4\\1\ 0\ 0\ 0\ 0\\0.029\ 6\ 0\ 0\ 0\ 0\\0\ 0\ 0.007\ 6\ 1\ 0.002\ 1\end{bmatrix};$

$$\mathbf{R}_3 = \begin{bmatrix} 0.182\ 5 & 1 & 0.002\ 6 & 0 & 0\ 0 \\ 0.182\ 5 & 0.005\ 9 & 1 & 0.002\ 6 & 0\ 0 \\ 0.123\ 9 & 0.002\ 6 & 1 & 0.005\ 9 & 0\ 0 \\ 0.261\ 1 & 0.109\ 2 & 0.945\ 5 & 0.000\ 4 & 0\ 0 \\ 0.085\ 3 & 1 & 0.005\ 9 & 0 & 0\ 0 \\ 0.028\ 9 & 0.999\ 9 & 0.014\ 1 & 0 & 0\ 0 \\ 0.059\ 0 & 0.005\ 9 & 1 & 0.002\ 6 & 0\ 0 \\ 0.041\ 0 & 0.014\ 1 & 0.999\ 9 & 0.001\ 3 & 0\ 0 \\ 0.015\ 3 & 0.999\ 9 & 0.014\ 1 & 0 & 0\ 0 \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{R}_4 = \begin{bmatrix} 0.965\ 2 & 0.087\ 8 & 0.000\ 1 & 0 & 0 \\ 0.000\ 4 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.001\ 3 & 0.999\ 9 & 0.014\ 1 & 0 & 0 \\ 0.000\ 1 & 0.063\ 5 & 0.983\ 5 & 0.000\ 5 & 0 \\ 0.945\ 5 & 0.109\ 2 & 0.000\ 1 & 0 & 0 \\ 0.067\ 0 & 0.981\ 2 & 0.000\ 5 & 0 & 0 \\ 0.540\ 3 & 0.460\ 5 & 0.000\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}。$$

2.3 安全评价等级的确定

根据 $\mathbf{A}_i$ 及 $\mathbf{R}_i$ 计算第 2 层次的模糊综合评价集:

$$\mathbf{B}_1 = \mathbf{A}_1 \mathbf{R}_1 = (0.021\ 0 \quad 0.265\ 5 \quad 0.041\ 3 \quad 0.041\ 3 \quad 0.002\ 1)$$

$$\mathbf{B}_2 = \mathbf{A}_2 \mathbf{R}_2 = (0.005\ 9 \quad 0.320\ 8 \quad 0.037\ 6 \quad 0 \quad 0)$$

$$\mathbf{B}_3 = \mathbf{A}_3 \mathbf{R}_3 = (0.182\ 5 \quad 0.261\ 5 \quad 0.005\ 9 \quad 0 \quad 0)$$

$$\mathbf{B}_4 = \mathbf{A}_4 \mathbf{R}_4 = (0.355\ 5 \quad 0.166\ 6 \quad 0.054\ 8 \quad 0.000\ 5 \quad 0)$$

$$\mathbf{B}_5 = \mathbf{A}_5 \mathbf{R}_5 = (0.109\ 2 \quad 0.600\ 0 \quad 0.002\ 6 \quad 0 \quad 0)$$

根据第 2 层次的评判矩阵,可得第 1 层次的评判矩阵:

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} 0.021\ 0 & 0.265\ 5 & 0.041\ 3 & 0.041\ 3 & 0.002\ 1 \\ 0.005\ 9 & 0.320\ 8 & 0.037\ 6 & 0 & 0 \\ 0.182\ 5 & 0.261\ 1 & 0.005\ 9 & 0 & 0 \\ 0.355\ 5 & 0.166\ 6 & 0.054\ 8 & 0.000\ 5 & 0 \\ 0.109\ 2 & 0.600\ 0 & 0.002\ 6 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

则第 1 层次的模糊综合评价集为

$$\mathbf{B} = \mathbf{A} \mathbf{R} = (0.170\ 8 \quad 0.244\ 4 \quad 0.054\ 8 \quad 0.000\ 5 \quad 0)$$

$\mathbf{B}$ 中元素表示 U (预警指标)的总体评判结果对各评价等级的隶属度。

设煤矿安全生产预警的 5 个等级对应的加权向量为 $\gamma_v = (0.95, 0.85, 0.75, 0.65, 0.55)$, 相应综合值的预警区间为 $[1, 0.9]$, $(0.9, 0.8]$, $(0.8, 0.7]$, $(0.7, 0.6]$, $(0.6, 0]$ 。计算综合值前需先将评价向量 $\mathbf{B}$ 进行归一化处理:

$$\mathbf{B}'_1 = (0.056\ 6 \quad 0.715\ 2 \quad 0.111\ 3 \quad 0.111\ 3 \quad 0.005\ 7)^T$$

$$\mathbf{B}'_2 = (0.016\ 2 \quad 0.880\ 6 \quad 0.103\ 2 \quad 0 \quad 0)^T$$

$$\mathbf{B}'_3 = (0.406\ 0 \quad 0.580\ 9 \quad 0.013\ 1 \quad 0 \quad 0)^T$$

$$\mathbf{B}'_4 = (0.615\ 7 \quad 0.288\ 5 \quad 0.094\ 9 \quad 0.000\ 9 \quad 0)^T$$

$$\mathbf{B}'_5 = (0.153\ 4 \quad 0.842\ 9 \quad 0.003\ 7 \quad 0 \quad 0)^T$$

$$\mathbf{B}' = (0.406\ 0 \quad 0.580\ 9 \quad 0.013\ 1 \quad 0 \quad 0)^T$$

由 $Z = \gamma_v \mathbf{B}'_k$ 得 $Z_1 = 0.821, Z_2 = 0.841, Z_3 = 0.902, Z_4 = 0.889, Z_5 = 0.865, Z = 0.855$ 。

根据综合值的预警准则可得到预警结果,见表 5。

表 5 安全生产预警结果

影响因素	预警值	预警等级	影响因素	预警值	预警等级
地质	0.821	较安全	设备	0.889	较安全
人员	0.841	较安全	管理	0.865	较安全
环境	0.902	安全	总体	0.855	较安全

在实际应用中,可结合预警结果,选择关键因素,制定相应的改进对策,从管理和技术等各方面做好相应的防范措施,从而提高煤矿生产系统的整体安全水平。

3 结语

通过将影响煤矿安全生产的各因素进行合理分类,建立了安全生产预警评价指标体系,并构建了基于 Fuzzy-AHP 的煤矿安全生产预警系统。利用层次分析法确定了安全生产预警系统各评价指标的权重,采用模糊综合评判对安全生产预警信息进行了处理。通过预警结果可以及时掌握生产过程中的动态规律,以便采取相应的预防保护措施,从而避免重大事故的发生。

参考文献:

[1] 邵长安,李贺,关欣.煤矿安全预警系统的构建研究[J].煤炭技术,2007,26(5):63-65.

[2] 孟凡荣,赵芳.煤矿安全预警系统体系构建[J].微计算机信息,2008,24(30):60-61.

[3] 郭佳,杨洋.基于远程监测模式的煤矿安全生产预警系统研究[J].中国煤炭,2007,33(9):69-71.

[4] 杨玉中,冯长根,吴立云.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,2008,18(1):40-45.

[5] 陈希祥,邱静,刘冠军.基于层次分析法与模糊综合评判的测试设备选择方法研究[J].兵工学报,2010,31(1):68-73.

[6] 王化吉,宗长富,管欣,等.基于模糊层次分析法的汽车操纵稳定性主观评价指标权重确定方法[J].机械工程学报,2011,47(24):83-90.