

王佩,王靖瑶,杨斌. 基于 AHP-Fuzzy 的矿井供水管网可靠性评价[J]. 矿业安全与环保, 2017, 44(3): 69-72.  
文章编号: 1008-4495(2017)03-0069-04

## 基于 AHP-Fuzzy 的矿井供水管网可靠性评价

王佩<sup>1</sup>, 王靖瑶<sup>2</sup>, 杨斌<sup>3</sup>

(1. 首都经济贸易大学 安全与环境工程学院, 北京 100070; 2. 中国船舶工业综合技术经济研究院, 北京 100081;  
3. 中国安全生产科学研究院, 北京 100029)

**摘要:** 矿井供水管网的可靠运行是矿井防尘设施有效运行的保障。为了提高矿井供水管网的运行可靠性, 通过全面分析影响矿井供水管网可靠性的因素, 建立了可靠性评价指标体系。结合层次分析法(AHP)确定各级评价指标的权重, 再采用模糊综合评价法对矿井供水管网可靠性进行评价。以开滦集团林南矿供水管网为工程实例进行应用评价, 结果显示为中等危害, 符合目前供水管网的实际情况。

**关键词:** 矿井; 供水管网; AHP-Fuzzy; 可靠性评价; 粉尘防治

**中图分类号:** TD714<sup>+</sup>.41; TD218 **文献标志码:** B **网络出版时间:** 2017-06-05 14:14

**网络出版地址:** <http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1062.TD.20170605.1414.020.html>

## Reliability Evaluation of Mine Water Supply Network Based on AHP-Fuzzy

WANG Pei<sup>1</sup>, WANG Jingyao<sup>2</sup>, YANG Bin<sup>3</sup>

(1. School of Safety and Environment Engineering, Capital University of Economics and Business, Beijing 100070, China;  
2. China Institute of Marine Technology and Economy, Beijing 100081, China;  
3. China Academy of Safety Science and Technology, Beijing 100029, China)

**Abstract:** The reliable operation of the mine water supply network is the guarantee of the effective implementation of mine dust prevention facilities. In this paper, a reliability evaluation indicator system was established by comprehensively analyzing the factors affecting the reliability of the mine water supply network in order to improve its operation reliability. The analytic hierarchy process (AHP) was applied for determining the weights of the evaluation indicators at all levels, and then the fuzzy comprehensive evaluation method was used to evaluate the reliability of the mine water supply network. The water supply network of Linnan Mine of Kailuan Group was taken as an engineering example for evaluation. The evaluation results showed the moderate hazard and conformed to the present situation of the mine water supply network.

**Keywords:** mine; water supply network; AHP-Fuzzy; reliability evaluation; dust prevention and control

据统计, 2014 年全国共通报职业病 29 972 例, 其中尘肺病 26 873 例, 约占到职业病总数的 90%, 比 2013 年增加了 3 721 例。从行业分布来看, 煤炭开采业职业病有 11 396 例。可以看到, 我国尘肺病例数呈现上升趋势, 而煤炭行业又是主要患尘肺病的行业。为了保护职工健康, 就要通过除尘和降尘为矿工提供良好的作业环境, 而矿井供水管网的可

靠运行为除尘设施的有效运行提供保障。为了研究矿井供水管网的可靠性, 笔者广泛参考资料和结合矿井实际情况, 建立了矿井供水管网可靠性<sup>[1-3]</sup>评价指标体系, 并拟采用合适的评价方法对其进行评价。

建立的指标体系有 3 层结构, 即目标层、一级指标层和二级指标层。因此, 考虑用多层模糊综合评价法进行评价。我国对模糊综合评价方法的应用较为广泛<sup>[4-6]</sup>, 但在供水管网领域的应用较少<sup>[7-11]</sup>。模糊综合评价方法中重要的一部分工作是确定指标权重, 确定权重的方法较多, 有专家排序法<sup>[12]</sup>、模糊聚类分析法、熵值确定法<sup>[13]</sup>、相关系数法和因子分析法等。各种方法均有其优缺点, 有些方法主观因素大, 有些方法属于客观赋值, 如何选择对指标进行赋权的最佳方法, 是综合评价的关键。层次分析

**收稿日期:** 2016-11-26; 2017-04-26 修订

**基金项目:** 2015 年提高定额—青年教师科研启动基金项目(00891554410203); 2017 年首都经济贸易大学校级科研项目(00891762790924); 中国安全生产科学研究院基本科研业务费专项资金项目(2016JBKY01, 2016JBKY18)

**作者简介:** 王佩(1987—), 女, 湖北武汉人, 博士, 讲师, 主要从事供水管网可靠性、工业通风除尘领域的研究工作。

法(AHP)<sup>[14-15]</sup>既含有专家的主观打分,又含有指标的客观因素,因此根据各指标权重确定方法的特点以及供水管网实际情况,本着简单、可操作和准确的原则,使用层次分析法来进行权重的分配。

## 1 评价指标体系的建立

### 1.1 评价指标的确定

通过对矿井供水管网的可靠性进行分析,结合现行《煤矿安全规程》等相关规程中对供水系统的要求,以及广泛参考国内外相关文献,从而选取最重要的影响因素,建立了矿井供水管网可靠性评价指标体系,见表1。该体系包含了1个目标指标,5个一级指标,14个二级指标。

### 1.2 评价指标分析及量化

由于有些指标不是直观的定量指标,因此这些

指标在进行评价时要进行转化,其中以钢管使用率,即钢管总管长占管网总管长百分比来衡量管材指标,用公式表示为:钢管使用率 =  $\frac{\text{钢管总管长}}{\text{管网总管长}} \times 100\%$ 。由于整个管网的主管和支管的管径有所不同,引入平均管径的概念来衡量管径指标,用公式表示为:平均管径 =  $\text{管径}1 \times \frac{\text{管径}1 \text{ 管长和}}{\text{管网总管长}} + \text{管径}2 \times \frac{\text{管径}2 \text{ 管长和}}{\text{管网总管长}} + \dots + \text{管径}n \times \frac{\text{管径}n \text{ 管长和}}{\text{管网总管长}}$ 。以球墨管、混凝土胶圈占整个管网接口使用率作为定量评价指标来评价接口形式。以管网维护投入资金占管网建设总投资的比例来定量评价维护投入,以巡检周期作为检修力度的评价标准。水的pH值、管网施工质量、突发事故破坏为定性指标,需将其定性结果对应成百分制的数值,如表1所示。

表1 矿井供水管网可靠性评价指标体系

目标指标	一级指标(权重)	二级指标(权重)	$u_1$	$u_2$	$u_3$	$u_4$	调查结果	隶属集
矿井供水管网可靠性	管道属性(0.22)	管材(0.28)	95	80	70	50	钢管使用率98%	{1,0,0,0}
		管径(0.49)	DN200	DN150	DN100	DN60	73 mm	{0,0,0.32,0.68}
		服务年限(0.15)	5	10	15	20	6 a	{0.8,0.2,0,0}
		接口形式(0.07)	90	80	70	60	95%	{1,0,0,0}
	水力因素(0.22)	水压(0.67)	1.0	1.5	2.0	3.0	2.2 MPa	{0,0,0.8,0.2}
		流速(0.33)	2.5	1.5	1.0	0.6	1.1 m/s	{0,0.25,0.75,0}
	水质因素(0.41)	悬浮物含量(0.25)	10	30	60	100	35 mg/L	{0,0.83,0.17,0}
		悬浮物粒度(0.25)	0.1	0.3	0.6	1.0	0.8 mm	{0,0,0.5,0.5}
		水的pH值(0.25)	100	90	70	50	6.9	{0,1,0,0}
		水的硬度(0.25)	1.4	2.8	4.0	5.3	3.0 mmol/L	{0,0.83,0.17,0}
	外部因素(0.06)	管网施工质量(0.75)	80	60	40	20	好	{0,1,0,0}
		突发事故破坏(0.25)	80	60	40	20	稍有影响	{0,1,0,0}
	管理因素(0.11)	维护投入(0.5)	10	8	5	2	6%	{0,0.33,0.67,0}
		检修力度(0.5)	1	3	7	15	3 d	{0,1,0,0}

## 2 矿井供水管网可靠性评价方法

### 2.1 指标权重的计算

根据各评价指标权重确定方法的特点,以及矿井供水管网的实际情况,本着简单、可操作和准确的原则,使用层次分析法(AHP)来进行评价指标权重的分配。

#### 2.1.1 一级指标层的权重计算

用P、H、Q、E、M代表管道属性、水力因素、水质因素、外部因素、管理因素,用层次分析法的1~9重要度标度来构造判断矩阵 $R_c$ :

$$R_c = \begin{bmatrix} R_c & P & H & Q & E & M \\ P & 1 & 1 & \frac{1}{2} & 4 & 2 \\ H & 1 & 1 & \frac{1}{2} & 4 & 2 \\ Q & 2 & 2 & 1 & 6 & 4 \\ E & \frac{1}{4} & \frac{1}{4} & \frac{1}{6} & 1 & \frac{1}{2} \\ M & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{4} & 2 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

用“和积法”对判断矩阵 $R_c$ 进行转化,计算结果保留2位小数,得到一级指标层的权重向量 $A = [0.22, 0.22, 0.41, 0.06, 0.11]^T$ 。

### 2.1.2 一致性检验

由式(2)计算最大特征值( $n=5$ ):

$$\lambda_{\max} = \sum_{i=1}^n \frac{(R_c A)_i}{n A_i} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{(R_c A)_i}{A_i} = \frac{1}{5} \times \left( \frac{1.10}{0.22} + \frac{1.10}{0.22} + \frac{2.09}{0.41} + \frac{0.29}{0.06} + \frac{0.55}{0.11} \right) = 4.99 \quad (2)$$

$$CI = \left| \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \right| = \left| \frac{4.99 - 5}{4} \right| = 0.0025$$

由一致性检验表可知  $n=5$  时,平均一致性指标  $RI=1.12$ ,则一致性比率:

$$CR = \frac{CI}{RI} = \frac{0.0025}{1.12} = 0.0022 < 0.1$$

当  $CR < 0.1$  时,可得出矩阵具有满意一致性的结论,所以判断矩阵的结果可以接受,求得的权重值可以使用。其他各级指标的具体权重均同理计算,并进行一致性检验,将合理分配结果列于表1中。

### 2.2 评价指标隶属函数的确定

构造二级指标的隶属函数,首先要确定模糊集合为  $V = \{v_A, v_B, v_C, v_D\}$ , 对应的评价等级是 {IV级危险, III级危险, II级危险, I级危险}。同时,为了确定隶属函数,还要确定各个指标的升势、降势临界点,待确定好定义域后在每一段区间中使用一次函数写隶属函数(在这里设定实际情况数值与隶属度是一次函数的关系)。

综上所述,构造形式如下的隶属函数:

$$f_A(c_i) = \begin{cases} 1 & c_i < u_1 \\ \frac{u_2 - c_i}{u_2 - u_1} & u_1 \leq c_i \leq u_2 \\ 0 & c_i > u_2 \end{cases}$$

$$f_B(c_i) = \begin{cases} 0 & c_i < u_1 \\ \frac{c_i - u_1}{u_2 - u_1} & u_1 \leq c_i < u_2 \\ \frac{u_3 - c_i}{u_3 - u_2} & u_2 \leq c_i < u_3 \\ 0 & c_i \geq u_3 \end{cases}$$

$$f_C(c_i) = \begin{cases} 0 & c_i < u_2 \\ \frac{u_3 - c_i}{u_3 - u_2} & u_2 \leq c_i < u_3 \\ \frac{u_4 - c_i}{u_4 - u_3} & u_3 \leq c_i < u_4 \\ 0 & c_i \geq u_4 \end{cases}$$

$$f_D(c_i) = \begin{cases} 0 & c_i < u_3 \\ \frac{c_i - u_3}{u_4 - u_3} & u_3 \leq c_i \leq u_4 \\ 1 & c_i > u_4 \end{cases} \quad (3)$$

式中: $c_i$  为指标的调查实际取值; $u_1, u_2, u_3, u_4$  为指标  $c_i$  对应的分界临界值。

如果评价指标属于上限效果测定,那么用以上公式构造该指标的隶属函数时需要对自变量与分界值之间的位置做相应调整。

确定因素集是模糊综合评价的基础,本次评价确定矿井供水管网可靠性评价指标体系为3层结构,第一层为评价目标1个,第二层为一级评价指标5个,第三层为二级评价指标14个,评价目标结果的评价集为:  $V = \{IV级危险, III级危险, II级危险, I级危险\}$ , 相应的分值为  $\{0 \sim 49, 50 \sim 69, 70 \sim 79, 80 \sim 100\}$ 。要进行综合评价,关键的问题是如何构造评价矩阵  $R_i$ , 即如何确定隶属度,以及如何得出各因素对矿井供水管网机械可靠性影响的重要程度,即权重向量  $A$ 。其中各指标的权重已在2.1中计算,具体结果见表1。

矿井供水管网机械可靠性评价中的各项指标的取值由风险隶属度表示,风险隶属度为0~1之间的值,取各指标分级界定值对应{IV级危险, III级危险, II级危险, I级危险},其他值的风险性介于上述风险之间。

前面已经对矿井供水管网机械可靠性评价指标进行了量化,进而就可以建立所有评价指标的分级隶属函数,得到指标  $c_i$  的隶属度集合:  $\{f_A(c_i), f_B(c_i), f_C(c_i), f_D(c_i)\}$ , 构造出评价矩阵  $R_i$ 。

根据大量实际统计数据、现场经验和理论分析,对各项指标确定分级界定标准。

以上14个指标的风险分级界定值见表1。

### 2.3 评价指标多层次模糊综合评价

#### 2.3.1 二级模糊综合评价

第二级模糊综合评价是指第二层指标对包含的第三层指标的评价。如管道属性对其所包含的4个指标的评价。所以本文中第二级模糊评价包括5个矩阵相乘的计算。

一级指标构成因素集  $U = \{u_1, u_2, u_3, u_4, u_5\}$ , 对于  $U_i$  进行综合评价,设因素权重分配为  $A_i$ 。一级指标  $U_i$  的模糊评价矩阵为  $R_i$ , 则得到:

$$B_i = A_i \times R_i = (a_1 \quad a_2 \quad \cdots \quad a_m) \times \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & r_{14} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & r_{24} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ r_{m1} & r_{m2} & r_{m3} & r_{m4} \end{bmatrix} \quad (4)$$

其中,  $m$  指上述各子集包含的指标个数。如对

于一级指标管道属性来说,此处  $m=4$ 。

### 2.3.2 一级模糊综合评价

第一级模糊综合评价是指目标层指标对第二层指标的评价,通过第一级模糊综合评价可以得到最终的评价结果。将第二级模糊评价求出的5个结果组合成一个5行4列的矩阵  $R$ ,将管道属性、水力因素、水质因素、外部因素、管理因素的权重组成一个1行5列的行矩阵,通过以下公式计算:

$$B = A \times R \quad (5)$$

另外,根据矿井供水管网可靠性评价集对应的风险分级表确定出分级参数列向量为:  $L = \{90, 74.5, 59.5, 24.5\}^T$ ,则分级分数  $S$  为:

$$S = B \times L \quad (6)$$

此为对矿井供水管网机械可靠性风险分级的模糊综合评价模型,该模型评价指标选取全面,反映出的矿井供水管网机械可靠性的风险程度真实可靠。

## 3 工程实例应用

本文的算例采用开滦集团林南矿的供水管网,该管网以地面静压水池为主水源,-320 m 蓄水池为辅助水源。基本数据调查结果见表1。

### 3.1 各指标隶属度

以管材指标为例,其分级隶属函数用式(3)计算,其中  $u_1 = 95\%$ ,  $u_2 = 80\%$ ,  $u_3 = 70\%$ ,  $u_4 = 50\%$ ,本例中  $c_1 = 98\%$ ,代入式(3)中可得  $f_A(c_1) = 1$ ,  $f_B(c_1) = 0$ ,  $f_C(c_1) = 0$ ,  $f_D(c_1) = 0$ ,得隶属集为  $\{1, 0, 0, 0\}$ 。同理求得其他各指标隶属集,结果见表1。由此得管道属性的评价矩阵:

$$R_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.32 & 0.68 \\ 0.8 & 0.2 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

同理,求得其余一级指标评价矩阵。

### 3.2 二级模糊综合评价

目标层对应的权重向量记为  $A$ ,一级指标对应的权重向量记为  $A_i$ 。根据式(4),对二级指标管道属性进行模糊综合评价:

$$B_1 = A_1 \times R_1 = (0.4 \quad 0.03 \quad 0.16 \quad 0.05)$$

同理,求得其余同层指标的评价矩阵  $B_i$ 。

### 3.3 一级模糊综合评价

将二级模糊评价求出的5个结果组合成一个5行4列的矩阵  $R$ ,则根据式(5):

$$B = A \times R = (0.09 \quad 0.43 \quad 0.33 \quad 0.09)$$

在得到评判向量  $B$  后结合矿井供水管网机械可靠性评价区间划分,根据式(6)得出评价结果:

$$S = B \times L = 62$$

对照评价集,此矿井供水管网可靠性等级为Ⅲ级风险(中等危害)。

## 4 结论

1)建立了矿井供水管网可靠性评价指标体系,通过广泛查阅资料,结合矿井实际情况对指标进行了量化,并确定了每个指标的风险界限。

2)将层次分析法和模糊评价法结合起来,用AHP法确定了各级指标权重,用Fuzzy法进行多层模糊综合评价。

3)结合工程实例,对该方法进行了应用,得到林南矿供水管网可靠性风险等级为中等危害,符合目前矿井实际情况,表明该评价方法切实可行。

## 参考文献:

- [1] TABESH M, TANYIMBOH T T, BURROWS R. Pressure dependent stochastic reliability analysis of water distribution networks [J]. Water Science and Technology: Water Supply, 2004, 4(3): 81-90.
- [2] FARMANI RAZIYEH, WALTERS GODFREY A, SAVIC DRAGAN A. Trade-off between total cost and reliability for anytown water distribution network [J]. Water Resources Planning and Management, 2005, 131(3): 161-171.
- [3] AGRAWAL MAGAN LAL, GUPTA RAJESH, BHAVE P R. Reliability-based strengthening and expansion of water distribution networks [J]. Water Resources Planning and Management, 2007, 133(6): 531-541.
- [4] 任颖. 模糊综合评价在实验室安全管理评价中的应用 [J]. 中国安全生产科学技术, 2015, 11(1): 186-190.
- [5] 陈炜, 路世昌, 崔铁军. 基于AHP可拓综合方法的公路隧道安全等级判定研究 [J]. 中国安全生产科学技术, 2014, 10(7): 158-163.
- [6] 田冬梅. 粉尘作业场所风险评价及预测系统的研究与应用 [D]. 北京: 北京科技大学, 2009.
- [7] 张舒, 史秀志, 古德生, 等. 基于ISM和AHP以及模糊评判的矿山安全管理能力分析 [J]. 中南大学学报(自然科学版), 2011, 42(8): 2406-2415.
- [8] 孙多斌, 王树刚, 解茂昭. 流体管网中模糊最小树的算法与分析 [J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2007, 23(1): 126-129.

(下转第76页)

2#钻孔内的CO浓度随着时间的变化不大,这说明朱家沟煤矿有害气体仍然大量存在,通过与1#检测钻孔中的CO浓度进行对比,可以说明火区隔离墙有一定的隔离效果。3#采空区钻孔内的CO浓度在注浆施工期间波动较大,但随着时间的变化总体呈下降趋势,CO体积分数从 $684 \times 10^{-6}$ 降至 $238 \times 10^{-6}$ 。

#### 4 结语

1)通过施工地面钻孔,灌注塑性水玻璃凝胶和天固充填材料,在井田边界成功构筑了隔离墙,隔离区域内的1#检测钻孔温度由 $66\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下降至 $36\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,CO体积分数从 $593 \times 10^{-6}$ 下降至 $34 \times 10^{-6}$ ,阻止了火区向板定梁塔煤矿蔓延,达到了隔离工程的预期目标。

2)采用三维激光扫描技术对 $1^{-2\#}$ 煤层采空区和钻孔的垮落情况进行监测,为顺利构筑隔离墙提供了可靠的技术参数;分析钻孔内的温度和CO气体浓度变化情况,为钻孔布置及注浆参数的调整提供了依据。

#### 参考文献:

[1] 齐俊德.宁夏煤田火灾的危害及综合治理研究[J]. 能源环境保护,2007,21(2):36-39.  
[2] 徐俊,李金亮,吴康华.上覆煤层房柱式采空区高体积分数CO威胁的综合措施防治[J]. 中国煤炭,2013,39(7):105-108.  
[3] 李相泽.东胜煤田剥离方式灭火设计思路[J]. 内蒙古煤炭经济,2010(5):83-85.  
[4] 杜凯.地面钻孔复合材料防灭火技术在柴里矿的应

用[J]. 煤,2016,25(5):30-32.  
[5] 刘安兵,张军.利用水泥砂浆防治已封闭采空区发火的实践[J]. 矿业安全与环保,2007,34(5):51-52.  
[6] 王伟,胡海峰,孙勇,等.地面预注浆技术在煤矿防灭火中的应用[J]. 煤炭科学技术,2014(S1):129-131.  
[7] 胡成名.神华布尔台煤矿地面灌浆防灭火系统研究[J]. 煤炭技术,2016,35(6):209-210.  
[8] 陈明河,熊云威,郭雄宝,等.新型防灭火胶体材料在文明矿的应用[J]. 矿业安全与环保,2010,37(2):37-40.  
[9] 冯良兵,徐超,高星星,等.胶体防灭火技术在深井综放工作面的应用[J]. 煤矿安全,2016,47(9):79-81.  
[10] 闫赞.高分子胶体防灭火技术在黄陵二矿的应用[J]. 江西煤炭科技,2015(3):45-47.  
[11] 吕瑜.水玻璃凝胶技术在矿井防灭火中的应用[J]. 矿业安全与环保,2004,31(2):42.  
[12] 李方磊,贾玉威,鲁义.防治煤自燃的新型高水稠化剂研制及应用[J]. 矿业安全与环保,2014,41(2):9-12.  
[13] 张廷会,贺卫中,崔邦军,等.煤田火区成因机理及注浆固化灭火技术[J]. 兰州大学学报,2015,51(6):904-907.  
[14] 柴晓东.三相阻化泡沫灭火技术在宏达煤矿火区治理的应用[J]. 内蒙古煤炭经济,2010(5):83-85.  
[15] 钱钧,周光化,刘洪刚,等.地面钻孔液氮直注式防灭火技术在灵新煤矿的应用[J]. 煤矿安全,2015,46(9):137-140.  
[16] 安世岗,张立辉,秦清河.液氮和液态CO<sub>2</sub>防灭火技术在补连塔煤矿的应用[J]. 煤矿安全,2015,46(S1):59-62.

(责任编辑:陈玉涛)

=====  
(上接第72页)

[9] 袁海峰,桑海涛,孟稚松.GO法定量分析矿井防尘供水管网系统可靠性[J]. 重庆科技学院学报(自然科学版),2011,13(4):147-149.  
[10] 伍悦滨,袁一星,高金良.给水管网系统性能的评价方法[J]. 中国给水排水,2003,19(4):23-25.  
[11] 伍悦滨,土芳,田海.基于信息熵的给水管网可靠性分析[J]. 哈尔滨工业大学学报,2007,39(2):251-254.  
[12] 赵新华,刘英梅,乔宇.城市给水管网可靠度的计算[J]. 中国给水排水,2002,18(4):53-55.

[13] 王圃,龙腾锐,王力,等.城市给水管网可靠性分析与应用[J]. 给水排水,2006,31(6):107-110.  
[14] 邓雪,李家铭,曾浩健,等.层次分析法权重计算方法分析及其应用研究[J]. 数学的实践与认识,2012,42(7):93-100.  
[15] 张森,陈开岩,郭一鹏,等.模糊层次分析法在汝箕沟煤矿通风系统评价中的应用[J]. 煤矿安全,2012,43(1):183-186.

(责任编辑:陈玉涛)