

矿井通风系统可靠性评价指标体系的构建与实施

范红伟

(山西工程职业学院,太原 030032)

摘要:基于人-机-环境-管理的原理,建立了矿井通风系统评价指标体系,该体系包括系统环境可靠性、设备及设施可靠性、人员可靠性、基础管理4个准则层指标和20个因素层指标,能比较全面地反映矿井通风系统的可靠性;同时运用改进层次分析法(AHP)确定评价指标的权重,建立了矿井通风系统可靠性评价模型。通过对山西某矿井通风系统的可靠性进行评价,取得了良好的应用效果,验证了该指标体系的实际应用价值。

关键词:人-机-环境-管理;通风系统;可靠性;评价指标体系

中图分类号:TD441

文献标识码:A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Construction and Implementation of Reliability Evaluation Index System for Mine Ventilation System

FAN Hongwei

(Shanxi Engineering Vocational College, Taiyuan 030032, China)

Abstract: Based on the principle of man-machine-environment-management, the evaluation index system of mine ventilation system is established. The system includes 4 first-level indicators, including system environmental reliability, equipment and facility reliability, personnel reliability, and basic management, and 20 second-level indicators, which can fully reflect the reliability of the mine ventilation system. At the same time, the improved analytic hierarchy process(AHP) is used to determine the weight of the evaluation index to establish a reliability evaluation model for the mine ventilation system. The reliability evaluation on some mine ventilation system in Shanxi Province proves the good application effect of the model.

Key words: man-machine-environment-management; ventilation system; reliability; index system

煤矿安全生产是一个系统工程,而矿井通风系统是保障煤矿安全生产的基础。许多特别重大事故都与通风系统的不完善、不可靠有关。因此,矿井通风系统的可靠性直接影响到矿井的安全生产。

评价指标是全面、客观的衡量矿井通风系统可靠性的基础和关键。以往评价指标的选择更关注设备、设施、环境因素的影响,对于人和管理两个因素关注度不够。本文从影响事故发生的4M因素(人、机、环境、管理)出发,构建矿井通风系统可靠性评价

指标体系,利用模糊数学确定评价指标隶属函数,应用改进的层次分析法(AHP)确定评价指标权重值,力求更全面、更系统、更趋于实际地完成矿井通风系统可靠性评价,对保证矿井通风系统的可靠运转具有重要的理论和现实意义。

1 评价指标体系的构建

1.1 构建评价指标体系

本文基于安全系统工程学原理,结合《煤矿安全

收稿日期:2020-05-07

作者简介:范红伟(1981-),男,山西大同人,硕士,讲师,从事矿井通风及煤矿安全技术的教学与科研工作,E-mail:happy603@126.com

规程》、AQ 1028-2006《煤矿井工开采通风技术条件》和《煤矿安全生产质量标准化》，参考国内专家学者相关文献^[1-8]，根据影响矿井通风系统的因素进行分析，构建人-机-环境-管理可靠性评价指标体系，如表 1 所示，包括 4 个准则层指标和 20 个因素层指标。

表 1 矿井通风系统可靠性评价指标体系
Table 1 The reliability evaluation index system for the mine ventilation system

准则层指标	因素层指标	权重
系统环境 可靠性	完整的独立通风系统	一票否决
	矿井风量供需比	一票否决
	矿井通风网路复杂度	0.263 4
	矿井通风网络通过能力可靠度	0.097 5
	通风阻力分布可靠性	0.061 5
	采掘面风量可靠性	0.417 4
	矿井各巷道风速可靠性	0.160 2
设备及设施 可靠性	主要通风机负压	0.326 6
	主要通风机工况稳定性	0.326 6
	主要通风机运行状况	0.179 4
	局部通风可靠性	0.060 8
	通风设施质量可靠性	0.106 6
人员可靠性	组织保障	0.484 5
	人员配备完整性	0.296 7
	员工培训	0.109 4
	员工素质	0.109 4
基础管理	安全投入合理性	0.455 0
	工作制度完整性	0.141 2
	资料管理	0.141 2
	岗位规范性	0.262 6

1.2 构建隶属函数

在矿井通风系统可靠性指标体系中，评价指标隶属函数的确定至关重要。在模糊数学中，隶属函数的种类很多，本文综合考虑各评价指标的分布特征，以通风设备及设施准则层为例建立了矿井通风系统可靠性的隶属函数。

1) 主要通风机负压。主要通风机负压越大，表明消耗的能量就越多，漏风的几率和漏风量也越大，越易引起煤炭自燃，矿井通风管理难度越大。按照矿井通风阻力不超过 2 940 Pa 的要求，得出

$$f_1 = \begin{cases} 1 & p \leq p_0 \\ 1 - \frac{p - p_0}{p_0} & p > p_0 \end{cases} \quad (1)$$

式中： p_0 为矿井风压的阈值，取 2 940 Pa； p 为矿井的实际风压值，Pa。

2) 主要通风机工况稳定性。主要通风机承担全矿或一翼的通风任务，其运转工况稳定与否对矿井通风系统的安全可靠程度具有重要的意义。根据矿井主要通风机风压与其最高风压的比值，得出：

①一台通风机的矿井

$$f_2 = \begin{cases} 0 & K_2 \geq 0.9 \text{ 或 } K_2 < 0.2 \\ \frac{K_2 - 0.2}{0.3} & 0.2 \leq K_2 < 0.5 \\ 1 & 0.5 \leq K_2 < 0.9 \end{cases} \quad (2)$$

式中： $K_2 = p_s / p_{s,max}$ ； p_s 为主要通风机风压，Pa； $p_{s,max}$ 为主要通风机最高风压，Pa。

②多台通风机的矿井

$$f_{2i} = \begin{cases} 0 & K_{2i} \geq 0.9 \text{ 或 } K_{2i} < 0.2 \\ \frac{K_{2i} - 0.2}{0.3} & 0.2 \leq K_{2i} < 0.5 \\ 1 & 0.5 \leq K_{2i} < 0.9 \end{cases} \quad (3)$$

对于多台通风机工作的矿井，取通风机风量加权平均值 f_2 作为主要通风机工况的稳定性：

$$f_2 = \frac{\sum f_{2i} \cdot Q_i}{\sum Q_i} \quad (4)$$

式中： Q_i 为矿井各主要通风机风量， m^3/s 。

3) 主要通风机运行状况。由于对风机故障缺乏概率统计，因而只能根据风机的服务年限、检修保养时间间隔、性能鉴定时间间隔等按经验计算风机运行的可靠度 f_3 ：

$$f_3 = (100\% - 2\%N) - (t - 1) \times 2\% - (T - 5) \times 2\% - m \times 2\% \quad (5)$$

式中： N 为风机的服务年限，年； t 为风机的平均检修保养间隔时间，月，当检修保养间隔时间小于 1 个月时，取 $t = 1$ ； T 为主要通风机性能测定的平均间隔时间，年，当平均间隔时间小于 5 年时，取 $T = 5$ ； m 为上一年度风机故障次数，次/年。

4) 局部通风可靠性。

$$f_4 = 1 - 1 \times n_1 - n_2 \times 20\% - n_3 \times 2\% - n_4 \times 2\% - n_5 \times 2\% - n_6 \times 3\% \quad (6)$$

式中： n_1 为出现循环风的次数，当出现循环风 1 次及以上时，取 $n_1 = 1$ ，此项不得分； n_2 为无计划停风的次数； n_3 为风筒接头破口的次数（末端 20 m 除外）； n_4 为风筒缺环的个数； n_5 为风筒摩擦、挤压的次数； n_6 为风筒拐死弯的个数。

5) 通风设施质量可靠性。井下密闭、风门、风窗、风桥的质量要可靠，否则会形成内部漏风和通风系统紊乱，引起瓦斯超限、煤炭自燃等事故发生。因此，质量合格率越高越好，由此可知：

$$f_5 = 0.3S_1 + 0.2S_2 + 0.2S_3 + 0.3S_4 \quad (7)$$

式中： S_1 为密闭合格率，%； S_2 为风门合格率，%； S_3 为风窗合格率，%； S_4 为风桥合格率，%。

2 评价指标的权重值

采用改进的 AHP 全面分析准则层的 4 个评价指标和因素层的 20 个评价指标对通风系统可靠性的影响程度,再确定各自的权重值^[9-10]。

在矿井通风系统评价指标体系中,参照《煤矿重大生产安全事故隐患判定标准》,完整的独立通风系统和矿井风量供需比,这 2 项评价指标具有一票否决权。只有在这两项都合格的前提下,权重值的确定才有意义,才能对矿井通风系统进行评价。

2.1 构造判断矩阵

按照表 2 各因素的比较准则,依据 10 位相关专家对系统环境可靠性、设备及设施可靠性、人员可靠性、基础管理 4 个指标相对重要性的打分结果,取其平均值,构成准则层评价指标判断矩阵,如表 3 所示。

表 2 比较准则

Table 2 The comparison criteria

分值	含义
1	<i>i, j</i> 两元素同样重要
3	<i>i</i> 元素比 <i>j</i> 元素稍重要
5	<i>i</i> 元素比 <i>j</i> 元素明显重要
7	<i>i</i> 元素比 <i>j</i> 元素很重要
9	<i>i</i> 元素比 <i>j</i> 元素极重要
2,4,6,8	两个元素重要性介于上述分值之间
倒数	若元素 <i>i</i> 与元素 <i>j</i> 的重要性之比为 a_{ij} , 则元素 <i>j</i> 与元素 <i>i</i> 的重要性之比为 $a_{ji} = 1/a_{ij}$

表 3 准则层评价指标判断矩阵

Table 3 Judgment matrix of standard layer evaluation index

判断矩阵	A_1	A_2	A_3	A_4
A_1	1	3	5	4
A_2	1/3	1	4	3
A_3	1/5	1/4	1	1/2
A_4	1/4	1/3	2	1

2.2 权重值的计算

应用改进的 AHP,不需要一致性检验就能自然满足一致性要求,直接求出权重值。准则层评价指标权重值计算如下:

1) 构造判断矩阵 $A = [a_{ij}] \in R^{n \times n}$, 如表 3 所示。

2) 计算传递矩阵 $B, b_{ij} = \lg a_{ij} (i, j = 1, 2, \dots, n)$

$$B = \begin{bmatrix} 0 & 0.4771 & 0.6990 & 0.6021 \\ -0.4771 & 0 & 0.6021 & 0.4771 \\ -0.6990 & -0.6021 & 0 & -0.3010 \\ -0.6021 & -0.4771 & 0.3010 & 0 \end{bmatrix}$$

3) 计算 B 的最优传递矩阵 C 满足 $c_{ij} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (b_{ik} - b_{jk})$

$-b_{jk})$

$$C = \begin{bmatrix} 0 & 0.2940 & 0.8451 & 0.6391 \\ -0.2940 & 0 & 0.5511 & 0.3451 \\ -0.8451 & -0.5511 & 0 & -0.2060 \\ -0.6391 & -0.3451 & 0.2060 & 0 \end{bmatrix}$$

4) 计算 A 的一个拟优一致阵 A^* 满足 $a_{ij}^* = 10^{c_{ij}}$;

$$A^* = \begin{bmatrix} 1 & 1.9680 & 6.9996 & 4.3561 \\ 0.5081 & 1 & 3.5567 & 2.2135 \\ 0.1429 & 0.2812 & 1 & 0.6223 \\ 0.2296 & 0.4518 & 1.6068 & 1 \end{bmatrix}$$

5) 用方根法求 A 特征向量

$$\overline{M}_1 = 2.7832, \overline{M}_2 = 1.4142, \overline{M}_3 = 0.3976, \overline{M}_4 = 0.6389$$

$$6) \text{ 规一化 } M_i = \frac{\overline{M}_i}{\sum_{i=1}^n \overline{M}_i} \quad (i=1, 2, \dots, n)$$

即准则层评价指标权重值为:

$$M = [M_1, M_2, M_3, M_4]^T = [0.5317, 0.2702, 0.0760, 0.1221]^T$$

同理构造出因素层的判断矩阵,用相同的方法计算出各指标权重值,计算结果如表 1 所示。

3 构建评价模型

在完整的独立通风系统和矿井风量供需比这 2 项指标都满足的前提下进行评价,其评价模型为:

$$S = \sum_{i=1}^4 M_i \times \left(\sum_{j=1}^j M_{ij} \times F_{ij} \right) \quad (8)$$

式中: S 为矿井通风系统综合分值; M_i 为准则层指标的权重; M_{ij} 为因素层评价指标的权重; F_{ij} 为因素层评价指标的隶属度。

最后,把计算结果换算成百分制分值 $S' = INT(100S + 0.5)$ 。根据评价值的大小按表 4 确定矿井通风系统可靠性的等级。

表 4 矿井通风系统可靠性的等级

Table 4 The reliability grade of the mine ventilation system

等级	评分区间	结论	采取措施
A	[95,100]	矿井通风系统很可靠	继续保持
B	[85,95)	矿井通风系统可靠	注意预防
C	[75,85)	矿井通风系统比较可靠,但存在一些问题	查明原因,采取措施
D	[60,75)	矿井通风系统基本可靠,系统存在风险	针对风险,及时整改
E	[0,60)	矿井通风系统不可靠	立即停产,全面整改

4 实例分析

山西某煤矿,矿井通风方式为中央并列式,通风方法为机械抽出式。该矿现有5个井筒,分别为:主斜井、副斜井、行人斜井、进风立井和回风立井,矿井总回风量为 $11\ 050\ \text{m}^3/\text{min}$ 。该矿为高瓦斯矿井,矿井绝对瓦斯涌出量为 $37.46\ \text{m}^3/\text{min}$,回采面最大绝对瓦斯涌出量为 $23.73\ \text{m}^3/\text{min}$,掘进面最大绝对瓦斯涌出量为 $2.87\ \text{m}^3/\text{min}$ 。

特邀请有关专家、煤矿管理人员确定了该矿井通风系统评价指标的值。通过在矿井通风系统可靠性软件中,输入相应的指标值,会自动制作出矿井通风系统可靠性评价书。该矿综合评价结果得分为:91.22,煤矿安全等级属于B级,即矿井通风系统可靠,存在少量小问题,应注意预防。评价结果反映了该矿的实际状况,并提出了改进措施:1)井下通风调节设施较多,应适当加以控制,保证质量,加强管理;

2)掘进工作面出现风筒摩擦、挤压,应加强局部通风的管理。

5 结论

1)以安全系统工程学原理为基础,结合煤矿通风特点,从“人-机-环境-管理”4个方面构建煤矿通风系统可靠性评价指标体系,由4个准则层指标,20个因素层评价指标构成。

2)根据矿井通风模糊属性的特点,确定了评价指标的隶属函数,并采用改进的层次分析法确定各评价指标的权重。其中,矿井风量供需比和完整的独立通风系统具有一票否决权限。

3)构建了矿井通风系统可靠性评价模型,对山西某矿的通风系统现状做出综合评价,形成矿井通风系统可靠性评价书。从评价结果来看,该矿通风系统可靠性安全等级为B级,与矿井实际相符。

参考文献:

- [1] 陆刚,韩可琦,肖桂彬. 矿井通风系统可靠性的模糊综合评价[J]. 采矿与安全工程学报,2008,25(2):244-247.
LU Gang, HAN Keqi, XIAO Guibin. Fuzzy integrated evaluation for reliability of mine ventilating system[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2008, 25(2): 244-247.
- [2] 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 coalmine ventilation system[J]. Journal of China Coal Society, 2004, 29(2): 195-198.
- [3] 邢玉忠,范红伟,王彦凯,等. 基于瓦斯监测数据的矿井通风系统合理性评价[J]. 采矿与安全工程学报,2010,27(4):522-526.
XING Yuzhong, FAN Hongwei, WANG Yankai, et al. Rationality evaluation of coal mine ventilation system based on gas monitoring data[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2010, 27(4): 522-526.
- [4] 罗霄. 基于人-机-环境的煤矿通风系统安全性模糊评价[J]. 煤炭技术,2014,33(3):7-9.
LUO Xiao. Fuzzy comprehensive evaluation of mine ventilation system security based on human-machine-environment[J]. Coal Technology, 2014, 33(3): 7-9.
- [5] 丁厚成,黄新杰. 基于AHP-FCE的煤矿通风系统可靠性评价研究[J]. 自然灾害学报,2013,22(3):153-159.
DING Houcheng, HUANG Xinjie. AHP-FCE based reliability assessment of coal mine ventilation system[J]. Journal of Natural Disasters, 2013, 22(3): 153-159.
- [6] 罗永豪,赵阳升. 煤矿井下通风系统的研究现状及发展趋势[J]. 煤炭技术,2015,34(3):123-125.
LUO Yonghao, ZHAO Yangsheng. Current situation of research and development trend for mine ventilation system[J]. Coal Technology, 2015, 34(3): 123-125.
- [7] 韩成功,周鲁洁,李艺昕. 矿井通风系统安全性综合评价及优化实践[J]. 煤炭技术,2016,35(1):213-215.
HAN Chenggong, ZHOU Lujie, LI Yixin. Mine ventilation system comprehensive safety evaluation and optimization practice[J]. Coal Technology, 2016, 35(1): 213-215.
- [8] 李雨成,郑义,高建军,等. 基于因子分析的矿井通风系统优化指标体系建立[J]. 矿业安全与环保,2019,46(1):91-94.
LI Yucheng, ZHENG Yi, GAO Junjun, et al. Establishment of optimization index system of mine ventilation system based on factor analysis method[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2019, 46(1): 91-94.
- [9] 谭跃进,陈英武,易进先. 系统工程原理[M]. 长沙:国防科技大学出版社,1999.
- [10] 刘瑞军,宋玉泉,胡平,等. 基于改进层次分析法的冲压方向优化函数权重研究[J]. 塑性工程学报,2009,16(1):1-5.
LIU Ruijun, SONG Yuquan, HU Ping, et al. Weight value of stamping direction optimization function research based on improved analytic hierarchy process[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2009, 16(1): 1-5.

(编辑:安娜)