

\* 1

## 模糊综合理论的镇城底矿复杂通风系统评价

王跃明

(太原理工大学 矿业工程学院,太原 030024)

**摘要:**针对矿井复杂通风系统中存在的通风网络结构复杂、阻力分布不均衡等问题,以矿井复杂通风系统多通路阻力测定数据为依据,建立了影响矿井通风系统安全稳定运行的评价因素指标体系,提出基于模糊综合评价的复杂矿井通风系统安全性评价方法,并在镇城底矿复杂通风系统进行了应用。评价结果表明:矿井进风段通风阻力主要集中在760水平东总轨道巷,回风段主要集中在760水平东总回风巷;28117备用工作面测线的评价结果最好,22603工作面线测线的评价结果最差,通过扩巷、增加并联巷道等方法降低测线上大阻力段的风阻,提高矿井通风系统安全性。该方法为矿井通风管理提供基础理论依据。

**关键词:**复杂通风网络;模糊综合理论;安全性;评价

中图分类号:TD724

文献标识码:A

## Evaluation on Complex Ventilation System in Zhenchengdi Mine Based on Fuzzy Comprehensive Theory

WANG Yueming

(College of Mining Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

**Abstract:** The complex ventilation system in mines has some issues, such as complex ventilation network and uneven resistance distribution. Therefore, based on the multi-channel resistance measurement data of the complex ventilation system, an evaluation index system for the safe and stable operation of ventilation system is established. Furthermore, based on fuzzy comprehensive evaluation, the evaluation on the safety and stability of the complex mine ventilation system is proposed and applied in Zhenchengdi Mine. The results show that the ventilation resistance of the inlet section is concentrated in the 760 horizontal east main roadway, and the resistance of the return air section is concentrated in the 760 horizontal east return airway. While the evaluation result of the 28117 standby working face is optimal, the result of the 22603 working face is the worst. The wind resistance of the large resistance section on the measuring line could be reduced by expanding roadways and increasing parallel roadways in order to improve the safety and stability of the mine ventilation system. This method could provide the theoretical basis for mine ventilation management.

**Key words:** complex ventilation network; fuzzy comprehensive theory; safety and stability; evaluation

矿井通风系统是由通风方式所决定的井巷通风网络、驱动风流的主要通风机以及控制风流的通风

构筑物所组成<sup>[1]</sup>,它是一个有规律而又随机动态非线性变化的复杂系统<sup>[2]</sup>。随着矿井开采开拓布局的

\* 收稿日期:2018-12-13

作者简介:王跃明(1966—),男,山西太原人,硕士,工程师,从事煤矿安全与通风工作。

扩大,矿井通风系统的复杂程度逐渐升高,如何保证矿井通风系统安全稳定运行是复杂通风系统亟待解决的关键问题<sup>[3]</sup>。

矿井通风阻力测定是获得矿井通风参数的唯一途径<sup>[4-5]</sup>,《煤矿安全规程》第156条规定“新井投产前必须进行1次矿井通风阻力测定,以后每3年至少测定1次。生产矿井转入新水平生产、改变一翼或者全矿井通风系统后,必须重新进行矿井通风阻力测定。”掌握矿井通风机的运行状态、矿井通风系统的阻力分布是对矿井通风管理的基本要求。

国内外学者对于矿井通风系统安全稳定性研究主要通过控制通风网络结构中角联分支的风流,提出了敏感性分析方法<sup>[6-9]</sup>,防止角联巷道出现无风、微风现象;研究多风机联合运转相互影响关系,防止多风机同时运转时造成通风网络风量分配失衡问题<sup>[10-12]</sup>。然而对于复杂矿井通风系统,由于网络结构复杂,如何寻找影响矿井通风系统的主要影响因素,快速评价通风系统的运行状态,及时发现通风系统中的大阻力位置,是矿井通风系统管理面临的重要问题。

文章通过对镇城底矿复杂通风系统进行阻力测定分析,建立影响复杂通风系统安全稳定运行的主要影响因素指标体系,模糊优化理论<sup>[13-14]</sup>研究的基础上,提出基于模糊综合评价的复杂矿井通风系统安全稳定性评价方法,为矿井通风管理提供基础理论依据。

## 1 镇城底矿基本概况

镇城底矿位于太原市西北的古交矿区,含煤13层,上部6层煤称为上组煤,下部7层煤称为下组煤,目前矿井主采煤层为2<sup>3</sup>#和8<sup>#</sup>煤层。矿井可采储量12 177.6万t,矿井服务年限45a。2013年通风能力核定为271.98万t/a。矿井采用斜井—立井联合开拓方式,煤层分组联合开采。

矿井采用混合式通风方式,矿井通风网络示意图,见图1。现有7个井口,4个进风井分别为副斜井、主斜井、副立井、南进风井;3个回风井为东风井、西风井和南风井,通风方法为机械抽出式。东风井、西风井分别装备两台离心式风机,电机功率为400kW;南风井安装两台对旋轴流式通风机,电机功率为:2×450kW。工作面目前采用“一进一回”的U型通风方式,采煤方法为走向、倾斜长壁式综合机械化低位放顶煤顶板全部垮落法开采。

矿井属瓦斯矿井,3<sup>#</sup>和8<sup>#</sup>煤层的自燃倾向性

属自燃,煤尘爆炸指数分别为24.80%和23.78%,有煤尘爆炸危险性,未出现过煤和瓦斯突出现象。

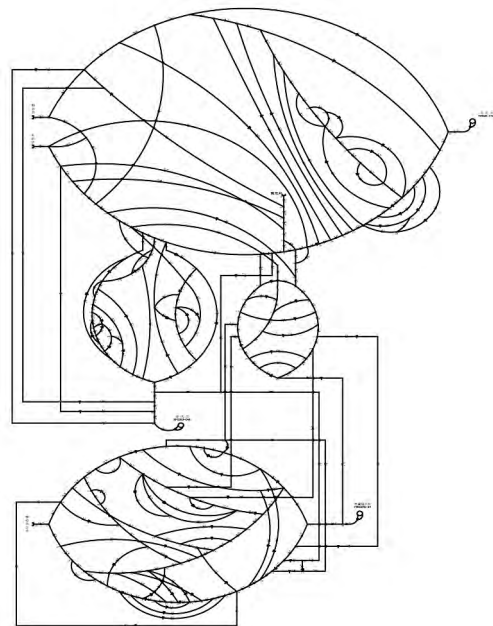


图1 矿井通风网络示意图

Fig. 1 Ventilation network in the mine

## 2 矿井通风阻力多通路测定分析

镇城底矿通风系统较为复杂,在矿井通风阻力测定时,共布置11条测定线路,其中:东风井2条,西风井3条,南风井6条。对所有主要巷道和工作面进行了阻力测定,并进行通风网络闭合(风量、风压)。得出各测线的进风段、用风段和回风段的阻力分布参数如表1所示。

表1 各测线阻力分布情况  
Table 1 Resistance distribution

序号	测线	分类	长度/m	阻力/Pa	占比/%
1	18310 备用 工作面线	进风段	3 756	849.4	45.94
		工作面段	2 750	241.7	13.07
		回风段	1 269	757.5	40.97
2	820 皮带 大巷线	进风段	3 734	1 066	57.84
		回风段	1 269	757.5	41.08
3	28110 工作面线	进风段	2 782	684.8	40.26
		回风段	4 319	890.3	52.34
4	南翼下 组皮带巷线	进风段	3 253	691.7	40.82
		回风段	4 048	1 003	59.17
5	28117 备用工作面	进风段	1 999	645.9	38.03
		回风段	1 331	39.9	2.34
6	南翼皮带巷线	回风段	4 086	1 012	59.61
		进风段	2 748	1 486	64.03
		回风段	743	834.4	35.96

续表 1

序号	测线	分类	长度/m	阻力/Pa	占比/%
7	22207 备用工作面线	进风段	2 920	658.8	28.32
		工作面段	1 314	762.5	32.78
		回风段	1 227	904.5	38.88
8	下组煤大巷线	进风段	4 131	458.6	19.76
		回风段	2 641	1 862	80.23
9	22608 工作面线	进风段	735	299.7	12.90
		工作面段	4 084	684.6	29.47
10	760 东总皮带线	进风段	3 735	667.7	28.79
		回风段	860	1 651	71.20
11	22603 工作面线	进风段	942	372.1	16.00
		工作面段	1 196	228.3	9.81
		回风段	3 682	1 725	74.17

从各段阻力分布情况看,进风段通风阻力主要集中在 760 水平东总轨道巷,主要原因是该轨道巷风量较大而断面偏小。回风段通风阻力主要集中在 760 水平东总回风巷,其主要原因也是风量大,断面偏小,并且回风联络巷安装有调节风窗。各井筒的通风参数,如表 2 所示。

表 2 各井筒通风参数

Table 2 Ventilation parameters

类别	井筒	风量 / $(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	风机负压 /Pa	等积孔 / $\text{m}^2$	总风阻 / $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-7})$	通风难易程度
进风	主斜	40.70				
进风	副斜	79.94				
进风	副立井	71.15				
进风	南翼进风井	126.31				
回风	东风井	63.54	1 950	1.71	0.48	中等
回风	西风井	72.81	1 650	2.13	0.31	容易
回风	南翼回风井	181.75	2 410	4.41	0.073	容易

表 2 中等积孔的计算公式为:

$$A = 1.19 \frac{Q}{\sqrt{h}} \quad (1)$$

式中:  $A$  为等积孔,  $\text{m}^2$ ;  $Q$  为矿井主要通风机风量,  $\text{m}^3/\text{s}$ ;  $h$  为矿井通风总阻力,  $\text{Pa}$ 。

矿井总风阻:

$$R = \frac{h}{Q^2} \quad (2)$$

式中:  $R$  为矿井总风阻,  $\text{kg}/\text{m}^7$ 。

根据矿井等积孔或矿井总风阻,可将矿井按通风难易程度分为 3 级,如表 3 所示。

表 3 矿井通风难易程度分级

Table 3 Ventilation difficulty ranking in mines

通风难易程度	矿井总风阻 / $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-7})$	等积孔 / $\text{m}^2$
容易	$<0.355$	$>2$
中等	$0.355 \sim 1.420$	$1 \sim 2$
困难	$>1.420$	$<1$

### 3 通风系统安全稳定影响因素

根据参数获取方式简便、参数值合理可信、对矿井通风系统安全稳定影响较大的原则,分别从风机、通风网络两个方面,筛选出影响矿井通风系统安全稳定运行的主要影响因素,建立相应的因素指标体系结构模型,见图 2。

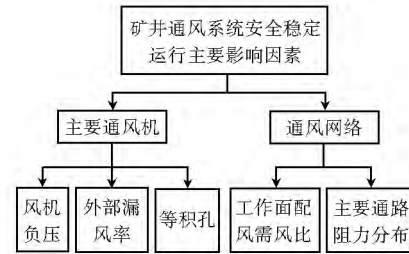


图 2 矿井通风系统影响因素指标体系

Fig. 2 Indicator system of ventilation system in mines

图 2 中第三层各因素指标的意义及取值方法:

1) 风机负压比  $C$ : 主要通风机需运行在合理的范围内,对于轴流式通风机,在当前叶片角度下运行时最小风压  $P_{\min}$  为风机效率为 60% 时对应的负压值,最大负压  $P_{\max}$  为风压特性曲线最高点所对应负压的 0.9 倍。在评价时,取主要通风机当前运行工况时风机负压  $P$  在最小风压与最大风压间的相对位置,即

$$C = \frac{P - P_{\min}}{P_{\max} - P_{\min}} \quad (3)$$

式中:  $C$  为风机负压相对位置;  $P$  为风机负压,  $\text{Pa}$ 。

2) 矿井外部漏风率: 指矿井外部漏风量占通风机风量的百分数,计算公式为:

$$L = \frac{Q_d - Q_s}{Q_d} \quad (4)$$

式中:  $L$  为井外部漏风率;  $Q_d$  为矿井主通风机风量,  $\text{m}^3/\text{s}$ ;  $Q_s$  为矿井总回风量,  $\text{m}^3/\text{s}$ 。

矿井外部漏风率越大越好。

3) 等积孔: 描述矿井通风难易程度的指标,一般而言,等积孔越大越好。

4) 工作面配风需风比: 描述工作面配风强度的参数,配风需风比越大越好,若  $<1$ ,则工作面配风量不足。

5) 主要通路阻力分布: 描述通风网络阻力分布合理性的参数,按巷道用途可分为进风段、用风段和回风段 3 段,一般而言进风和回风段所占比例应越小越好,用风段所占比例应越大越好。取用风段所占比例。

## 4 模糊综合评价

### 4.1 模糊综合评价数学模型

根据矿井通风系统安全稳定运行的因素指标体系,建立基于模糊理论矿井通风系统安全稳定运行评价模型:设  $F = \{F_{ij}\}, i=1, \dots, m, j=1, \dots, 5$  表示  $m$  组通风系统参数对应于 5 个评价因素指标集合,采用相对隶属度的处理方法消除不同量纲引起评价因素的不可公度性。相对隶属度属性值 3 类:

第 1 类指标相对隶属度属性值越大越好,其计算公式为:

$$Fr_{ij} = \frac{F_{ij} - \min_{1 \leq i \leq m} \{F_{ij}\}}{\max_{1 \leq i \leq m} \{F_{ij}\} - \min_{1 \leq i \leq m} \{F_{ij}\}} \quad (5)$$

第 2 类指标相对隶属度属性值越小越好,其计算公式为:

$$Fr_{ij} = \frac{\max_{1 \leq i \leq m} \{F_{ij}\} - F_{ij}}{\max_{1 \leq i \leq m} \{F_{ij}\} - \min_{1 \leq i \leq m} \{F_{ij}\}} \quad (6)$$

第 3 类指标相对隶属度属性值等于 1:

$$Fr_{ij} = 1, (F_{1j} = F_{2j} = \dots = F_{mj}) \quad (7)$$

式中:  $Fr_{ij}$  为集合元素  $F_{ij}$  的相对隶属度,其取值范围  $[0, 1]$ ;  $\max\{\}$  和  $\min\{\}$  分别表示取集合中元素的最大值和最小值。

第 3 类指标相对隶属度应用于某因素指标的属性值相等或者变化较小的情况。

将相对隶属度值组合成指标对模糊概念“优等”的相对隶属度矩阵  $Fr$ :

$$Fr = \begin{bmatrix} Fr_{11} & Fr_{12} & L & Fr_{15} \\ Fr_{21} & Fr_{22} & L & Fr_{25} \\ M & M & L & M \\ Fr_{m1} & Fr_{m2} & L & Fr_{m5} \end{bmatrix} \quad (8)$$

将因素的最优值构成标准优等隶属度向量  $G_R$ , 最差值构成标准劣等隶属度向量  $B_R$ 。

$$\begin{aligned} G_R &= (gr_1, L, gr_9)^T = \left( \bigvee_{i=1}^m Fr_{i1}, L, \bigvee_{i=1}^m Fr_{i9} \right)^T; \\ B_R &= (br_1, L, br_9)^T = \left( \bigwedge_{i=1}^m Fr_{i1}, L, \bigwedge_{i=1}^m Fr_{i9} \right)^T. \end{aligned} \quad (9)$$

式中:“ $\vee$ ”为模糊数取大运算符;“ $\wedge$ ”为取小运算符。

定义模糊分划矩阵:

$$U = \begin{bmatrix} u_{11} & u_{12} & L & u_{1i} \\ u_{21} & u_{22} & L & u_{2i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_{1i} \\ u_{2i} \end{bmatrix} \quad (10)$$

式中:  $u_{1i}$  为优等指标隶属度;  $u_{2i}$  为劣等指标隶属

度,  $\sum_{k=1}^2 u_{ki} = 1, u_{ki} \in [0, 1]$ 。

以  $m$  个风机的权异劣度  $D(R_i, B_R)$  平方与权异优度  $D(R_i, G_R)$  平方之总和最小为目标函数:

$$\min f(u_{1i}) = \sum_{i=1}^m [(D(R_i, G_R))^2 + \{D(R_i, B_R)\}^2] \quad (11)$$

式中:  $D(R_i, G_R) = u_{1i} \sqrt{\sum_{j=1}^9 [\omega_j (gr_j - Fr_{ij})]^2}$ ,

$D(R_i, B_R) = u_{2i} \sqrt{\sum_{j=1}^9 [\omega_j (Fr_{ij} - br_j)]^2}$ ,  $\omega_j$  为各因素的权重。

令  $\frac{df(u_{1i})}{du_{1i}} = 0$ , 计算得出最优模糊分划矩阵元素为:

$$u_{1i} = \left[ 1 + \frac{\sum_{j=1}^9 (\omega_j (gr_j - Fr_{ij}))^2}{\sum_{j=1}^9 (\omega_j (Fr_{ij} - br_j))^2} \right]^{-1} \quad (12)$$

根据式(12),结合矿井通风系统安全稳定运行的因素指标体系,可根据隶属度  $u_{1i}$  大小评价出矿井通风系统当前运行工况的安全稳定性情况。

### 4.2 评价矩阵构建

根据镇城底矿通风系统具体情况,从 11 条主要测线中选取 6 条有工作面的测线通路,构建矿井通风系统评价模型,具体参数如表 4 所示。

表 4 评价矩阵  
Table 4 Evaluation matrix

测线	风机 负压比	外部 漏风率	等积孔 /m <sup>2</sup>	配风 需风比	阻力 占比
1	0.44	0.05	1.71	3.44	13.07
3	0.26	0.05	2.13	1.18	7.40
5	0.26	0.05	2.13	2.42	2.34
7	0.71	0.03	4.41	1.43	32.78
9	0.71	0.03	4.41	1.76	29.47
11	0.71	0.03	4.41	1.38	9.81
权重	0.3	0.1	0.1	0.2	0.3
min	0	0	0	1	0
max	1	1	10	5	1

### 4.3 评价结果分析

根据各因素的情况,取各评价因素权重赋值见表 4 所示,由式(5)~式(7)计算得出各因素的相对隶属度,根据各构建成相对隶属度矩阵  $Fr$ ,由式(9)~式(12)计算得出各测线的隶属度  $u_{1i}$  大小如表 5 所示。

表 5 评价结果  
Table 5 Evaluation results

测线	$u_i$	测线	$u_i$
1	2.817 9	7	0.551 5
3	1.627 7	9	0.637 1
5	3.149 7	11	0.537 3

由表 5 可知,测线 5 的评价结果最好,测线 11 的评价结果最差,评价结果相差近 6 倍。总体而言,东、西风井测线的评价结果较好,由于南风井风机负荷较大,为 1 个备用工作面以及 2 个正采工作面供风,评价结果较差。因此,建议在测线 7 和测线 11 上进行减阻调节,降低通风阻力。

## 5 结论

1)对镇城底矿复杂通风系统进行了阻力测定,

获得了 11 条主要测线的风流参数,矿井进风段通风阻力主要集中在 760 水平东总轨道巷,回风段主要集中在 760 水平东总回风巷。

2)建立了影响矿井通风系统安全稳定运行的评价因素指标体系,提出基于模糊综合评价的复杂矿井通风系统安全性评价方法。

3)评价方法实际应用表明,28117 备用工作面测线的评价结果最好,22603 工作面线测线的评价结果最差。通过扩巷、增加并联巷道等方法来降低测线上大阻力段的风阻,并提高矿井通风系统安全性。

### 参考文献:

- [1] 黄光球,陆秋琴. 矿复杂通风系统分区划分方法及其实现方案研究[J]. 化工矿物与加工,2017,46(7):50-55.  
HUANG Guangqiu,LU Qiuqin. Approach to Sectional Division Method of Complex Ventilation System Method and Its Implementation Scheme[J]. Industrial Minerals and Processing,2017,46(7):50-55.
- [2] 司俊鸿. 矿井通风系统风流参数动态监测及风量调节优化[D]. 徐州:中国矿业大学,2012.
- [3] 王珂. 赵各庄矿通风系统的优化研究[J]. 山西煤炭,2014,34(10):58-60.  
WANG Ke. Optimization Study on Ventilation System in Zhaogezhuang Mine[J]. Shanxi Coal,2014,34(10):58-60.
- [4] 周金祥,王飞,刘红威. 矿井通风阻力测定误差分析及其控制[J]. 山西煤炭,2016,36(1):8-11.  
ZHOU Jinxiang, WANG Fei, LIU Hongwei. Error Analysis and Control of Resistance Measurement of Ventilation in Mines [J]. Shanxi Coal,2016,36(1):8-11.
- [5] 柳忠起. 对用动基点法和定基点法测定矿井通风阻力的比较[J]. 山西煤炭,1999(4):22-25.  
LIU Zhongqi. A Comparison of Moving-base-point Measurement and Fixed-base-point Measurement Determining the Ventilation Resistances in Mine[J]. Shanxi Coal,1999(4):22-25.
- [6] Cheng G, Qi M, Zhang J, et al. Analysis of the Stability of the Ventilation System in Baishan Coalmine[J]. Procedia Engineering,2012,45(5):311-316.
- [7] 李湖生. 矿井通风系统的敏感性和风流稳定性分析[J]. 淮南矿业学院学报,1997,17(3):32-37.
- [8] 黄光球,陆秋琴,郑彦全. 地下矿通风系统风流稳定性分析新方法[J]. 金属矿山,2005(11):63-65.  
HUANG Guangqiu,LU Qiuqin,ZHENG Yanquan. A New Approach to Analyze the Air Flow Stability of Ventilation System in Underground Mines[J]. Metal Mine,2005(11):63-65.
- [9] 李阳,孙峰,李楠. 矿井通风系统安全可靠性的多因素综合评判方法[J]. 科技创新导报,2016,13(34):20-23.
- [10] SI Junhong,CHEN Kaiyan,JIANG Zhongcheng, et al. The Interaction of Multi-fan for the Complex Mine Ventilation System based on Limit Analysis [J]. Journal of the Mine Ventilation Society of South Africa,2011,64(1):10-15.
- [11] 侯国忠. 煤矿多主扇分区并联通风[J]. 煤炭技术,2010,29(3):129-131.  
HOU Guozhong. Multi-master Coal Mine Fan Parallel for Partition Ventilation[J]. Coal Technology,2010,29(3):129-131.
- [12] 郭建伟,陈开岩,司俊鸿,等. 复杂通风网络角联风流安全性评价与控制[J]. 矿业安全与环保,2010,(5):35-38.  
GUO Jianwei,CHEN Kaiyan,SI Junhong, et al. Evaluation and Control of Safety and Stability of Diagonal Branch in Complex Ventilation Network[J]. Mining Safety & Environmental Protection,2010,(5):35-38.
- [13] 邱进伟,张国枢. 基于模糊优选的矿井通风系统决策研究[J]. 煤矿安全,2007(4):1-4.  
QIU Jin wei,ZHANG Guoshu. Study on Mine Ventilation System Decision-making Based on Fuzzy Optimum Selection[J]. Safety in Coal Mines,2007(4):1-4.
- [14] 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(3):49-53.  
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(3):49-53.

(编辑:刘新光)