

文章编号: 1673-3363-(2012)01-0140-04

# 风路敏感特性对通风系统风流稳定性的影响

贾廷贵<sup>1,2</sup>, 王树刚<sup>1</sup>, 曲国娜<sup>2</sup>, 贾宝山<sup>2</sup>

(1. 大连理工大学建设工程学部, 辽宁 大连 116024; 2. 辽宁工程技术大学安全科学与工程学院, 辽宁 阜新 123000)

**摘要** 为了明确影响矿井通风系统主要需风风路风流稳定和主要通风机运行稳定的高敏感风路, 采用多元回归分析法对通风网络中高敏感风路进行识别, 确定主要需风风路的风量  $Q_j$  与各风路风阻自变量  $R_i$  间的最优回归方程, 并通过网络解算进行实验验证。对比发现: 多元回归分析结果与试验结果吻合, 表明风路的敏感性是通风网络结构特性的一种体现, 与其自身的风阻特性无关; 高敏感风路特性的改变是影响矿井通风系统风流稳定的关键; 同时, 采用多元回归分析法可避开传统的角联结构分析中推导风向判别式的繁琐, 对某一待研究的重点风路而言, 可将矿井其它风路对其风流稳定性的影响作出定性分析与评价。

**关键词** 通风网络; 敏感性; 稳定性; 角联结构

**中国分类号** TD 72      **文献标识码** A

## Research on the Influence of Airway Sensitivity on the Airflow Stability of Mine Ventilation System

JIA Ting-gui<sup>1,2</sup>, WANG Shu-gang<sup>1</sup>, QU Guo-na<sup>2</sup>, JIA Bao-shan<sup>2</sup>

(1. The Faculty of Infrastructure Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024, China;

2. School of Safety Science & Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin, Liaoning 123000, China)

**Abstract** To definite the high sensitive airway which affects the airflow stability of main airway and stable operation of main fan in mine ventilation system, the multiple regression analysis method is applied to recognize the high sensitive airway in mine ventilation network, while the optimum regression equation between the air quantity ( $Q_j$ ) of main airway and independent value of ventilation resistance ( $R_i$ ) in each airway is established, and the results are verified by network calculation. The comparison shows that the multiple regression results are consistent well with the test results, which means the airway sensitivity is an embodiment of the structure property of ventilation network, and is independent of the airflow resistance. Meanwhile, the change of high sensitive airway is the key to affect the airflow stability in mine ventilation system. Moreover, using the multiple regression analysis can avoid the difficulties in derivation of airflow directional discriminant in the traditional diagonal structure analysis, and can give qualitative analysis and evaluation on the airflow stabilities of other airways in mine.

**Key words** ventilation network; sensitivity; stability; diagonal structure

合理、可靠的通风系统是搞好矿井通风管理、保障矿井安全生产的前提, 对于矿井通风系统风流

稳定性的研究不仅要考虑主要扇风机、风路、通风构筑物之间静态稳定, 更要考虑在采运过程中主要

收稿日期: 2011-04-07

基金项目: 国家自然科学基金项目 (61772159)

作者简介: 贾廷贵 (1979-), 男, 内蒙古自治区化德县人, 讲师, 博士, 从事矿井通风、防灭火及矿井热害防治方面的研究。

E-mail: jtg2000@126.com

Tel: 0418-6768039

扇风机、需风风路、通风构筑物间由受采动或系统调整等影响产生的动态稳定，而且动态影响对矿井生产实践影响更为直接与多变。目前，对矿井通风系统风流稳定性的研究较多，但侧重点略有不同。刘剑、贾进章等从通风网络角联结构出发阐述通风系统的稳定性，采用对角联结构的识别以推导角联结构判别式为主，控制则侧重于角联风路风流逆转的条件<sup>[1]</sup>；王树刚则引入微分灵敏度和大变化灵敏度来分析<sup>[2-3]</sup>；焦海朋等则采用图形的形式确立通风网络敏感区域<sup>[4]</sup>；陈开岩、陆刚等则采用模糊评价的方法<sup>[5-6]</sup>；谭允祯、李中华等采用从网络结构可靠性入手，引入风压、风量敏感度概念，采用结构划分的方法<sup>[7]</sup>；李湘生则采用风量敏感度分支法研究角联风路风流的稳定。然而，对于生产矿井的通风系统而言，采用模糊评价受评价指标风路权值选取的影响较大，如何准确为各巷道的权重赋值，无统一规范，受人为影响较大，进而在实践应用上受到制约。以引入巷道灵敏性分析、风量灵敏度、管网灵敏度等的方法，也主要以采用风流风路与通风网络可靠性的概念，那么可靠度的分析也同样存在权重的赋值问题。对于以角联结构分析矿井通风系统稳定性分析，则存在通风网络复杂时，角联结构的识别计算相当复杂，即使在计算机的帮助下，耗时也较长。另外，求出的角联结构繁多，而其中绝大部分结构对于通风系统的稳定性分析帮助不大，对于角联风路风流逆转的控制也常受现场生产与空间的制约；同时，角联结构对通风系统稳定性的影响是一个两面性问题。其中，大部分角联结构对通风网络稳定性是有益的，并对提高矿井抗灾变能力有积极意义<sup>[8]</sup>，而在实践应用中，我们关注更多的是其对通风网络稳定性有害的部分，如何从大量的角联结构中区分它们利害，同样是个庞大的工程。

结合上述的特点，采用以多元回归分析法确定对某待研究风路与矿井其它风路间的最优回归影响方程；同时，引入敏感特性系数，就矿井各风路对待研风路的影响程度与方向作出定性、定量地分析与评价，并依据风路的敏感特性将通风系统中各风路进行敏感特性分类管理，有效地避开了传统的角联结构分析中推导风向判别式的繁琐和模糊评价法、可靠度分析法、灵敏度分析法中风路特性权值的不确定性和随意性。

就矿井通风系统稳定性而言，每个风路特性的改变必然影响网络结构中各风路流量的分配，只是

鉴于其在网络结构中的位置，影响强度不一而已<sup>[9]</sup>。也就是说，在网络结构中各风路的敏感性是不同的。强敏感性风路特性的改变对其它风路（特别是需风分路）流量的影响要大的多。因此，保持矿井各风路风流稳定性只需重点控制对其具有强敏感风路的特性即可，进行井巷的敏感性分类管理对保持通风系统风流稳定性和主要通风机的稳定性均具有现实意义。

### 1 敏感风路的确定

矿井通风网络  $G=(v, e)$ ,  $|v|=m$ ,  $|e|=n$ , 如图 1。由于风路固有的相互关系、风路的空气动力学特征即风路风阻的变化，必将引起通风系统内其它风路风量的变化，这种关系用式 (1) 表示<sup>[10]</sup>。

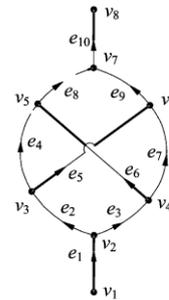


图1 矿井通风网络  
Fig.1 Mine ventilation network

$$Q_j = Q_{j0} + A_i(9.8R_i - 10)\exp(-4.307R_i^{0.14}) \quad (1)$$

式中： $Q_{j0}$  为与第  $i$  条风路原始风阻相对应的第  $j$  条风路的风量； $Q_j$  为与第  $i$  条风路改变风阻后相对应的第  $j$  条风路的风量； $A_i$  为敏感性系数，符号表示其敏感方向。

$$\text{令 } B = Q_{j0}$$

$$X_i = (9.8R_i - 10)\exp(-4.307R_i^{0.14})$$

$$\text{则有 } Q_j = B + A_i \cdot X_i \quad (2)$$

对于  $k$  次试验结果，且每次试验有  $l$  个数据，即  $(Q_{kj}, Q_{k1}, Q_{k2}, \dots, Q_{k(l-1)})$ ，有式 (3) 成立

$$Q_j = B + \sum_{i=1}^{n-1} A_i \cdot X_i + \varepsilon \quad (3)$$

式中： $\varepsilon$  为随机变量，表示其它的随机因素对  $Q_j$  影响的总和。

据敏感性参数  $A_i$  可判定通风网络中各风路特性对需风风路流量和主要通风机运行稳定性影响的程度与方向。

### 2 需风风路风流稳定性分析

在图 1 的通风网络中，设  $e_4$  为主要需风风路。

各分路特性初值相同,即  $R_{0i}=0.005 \text{ (Ns}^2\text{m}^{-8}\text{)}$ ,  $i=1, 2, \dots, 10$ 。然后分别将每个分路特性以  $R_i=0.007, 0.009, 0.012, 0.014, 0.016, 0.018, 0.02 \text{ (Ns}^2\text{m}^{-8}\text{)}$   $i=1, 2, \dots, 10$ , 依次赋值, 在给某一风路赋值时, 其它各风路保持  $R_i=0.005 \text{ (Ns}^2\text{m}^{-8}\text{)}$  不变; 以固定风量  $Q_f=80 \text{ (m}^3\text{s}^{-1}\text{)}$  形式进行网络解算。

以风路  $e_4$  作为主要研究对象, 得各风路特性改变对主需风风路  $e_4$  的影响规律, 如图 2。

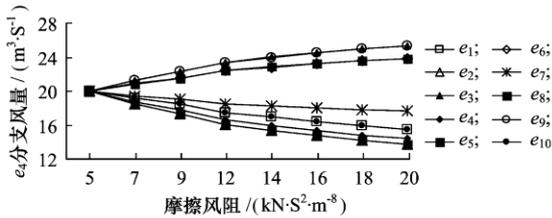


图 2 各风路特性变化对  $e_4$  风路流量的影响规律  
Fig.2 Influence of the change of each branch characteristic on airflow of ventilation circuit  $e_4$

从图 2 中可以看出: 各风路特性改变对风路  $e_4$  的影响在程度和方向上是不同的。其中:  $e_2, e_8$  和  $e_3, e_9$  对  $e_4$  影响程度最大, 但其影响方向相反; 随着  $e_2, e_8$  风路风阻的增加, 而  $e_4$  风路流量在逐渐减小, 而  $e_3, e_9$  风路风阻的增加则  $e_4$  风路流量也在增大。其次对  $e_4$  影响较明显的就是  $e_5, e_6, e_7$  风路。这里需要特别指出的是风路  $e_1, e_{10}$ , 由于采用固定风量形式解算, 所以其风阻的改变不会对  $e_4$  的流量产生影响。

从各风路特性改变对  $e_4$  风路流量的影响规律来看, 可将各风路的敏感性大致分为 3 类: 强敏感性, 如  $e_2, e_8$  和  $e_3, e_9$ ; 一般敏感性, 如  $e_5, e_6$  和  $e_7$ ; 弱敏感性或不敏感性, 如  $e_1$  和  $e_{10}$ 。

另外, 将通风网络的试验结果, 利用式 (1~3), 将  $e_4$  风路的流量作为因变量, 以  $R_i(i=1, 2, 3, 4, \dots, 10)$  作为自变量进行多元回归分析<sup>[9-10]</sup>, 回归方程相关参数见表 1。

表 1 多元回归方程参数  
Table 1 Multiple regression function parameters

模型	非标准化系数		标准系数	t	Sig.	共线性统计量	
	$A_i$	标准误差				容差	VIF
截矩	35.087	0.480	/	73.171	0	/	/
$X_2$	-12.371	0.101	-0.429	-122.836	0	0.898	1.114
$X_3$	12.467	0.101	0.431	123.791	0	0.898	1.114
$X_5$	8.228	0.101	0.284	81.703	0	0.898	1.114
$X_6$	8.236	0.101	0.285	81.784	0	0.898	1.114
$X_7$	-4.807	0.101	-0.166	-47.727	0	0.898	1.114
$X_8$	-12.403	0.101	-0.429	-123.153	0	0.898	1.114
$X_9$	12.450	0.101	0.430	123.625	0	0.898	1.114

从表 1 中可以发现: 敏感性系数  $A_i$  的表征含义与图 2 完全吻合。

### 3 主要通风机稳定性分析

通风系统的稳定不但要使主要用风风路风流流量和流向的稳定, 主要通风运行的稳定同样也是关键。在图 1 的通风网络中, 设  $e_{10}$  为主要扇风机所在分支, 且主要扇风机  $H-Q$  特性曲线采用二次方程拟合曲线, 方程为:  $H = -0.01Q^2 - 13Q + 146$ 。

同样采用上述实验方法, 得出巷道特性变化对通风系统总阻力的影响趋势, 如图 3。从图 3 中可以看出: 各风路特性改变对系统总阻力的影响在程度上表现差异性较大, 但在方向上是一致的, 即无论在通风网络中增加任意一条风路的风阻, 系统总阻力总是增加的, 只是增加幅度不同而已。其中对

系统总阻力影响最为明显的风路是  $e_1, e_{10}$ , 次明显的风路是  $e_2, e_3, e_8, e_9$ , 最不明显的风路是  $e_4, e_5, e_6, e_7$ 。

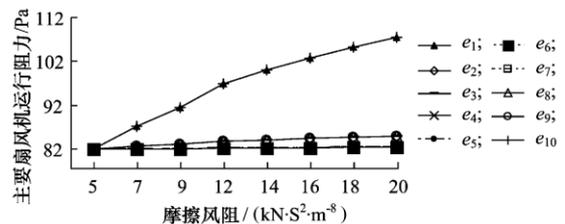


图 3 各风路特性变化对通风系统总阻力的影响规律  
Fig.3 Influence of the change of each branch characteristic on total ventilation resistance

对比图 2, 3: 通风网络中风路所处的位置不同, 所表现出的特性也不同, 即风路的敏感性只与其位置有关, 而与其自身风阻特性无关。

## 4 结 论

1) 通风系统中风路的敏感性是由其在网络中所处位置决定, 也就是说, 风路敏感性是网络结构特性的一种体现, 与其自身的风阻特性无关。

2) 采用多元回归分析法是可以做为识别影响矿井通风系统风流稳定性关键风路的一种有效手段; 可由  $A_i$  直观地了解矿井各风路特性参数的改变对待研究需风风路和矿井主扇风机运行状态的影响程度与大小; 就敏感性较差的风路而言, 并不意味着其风路特性的变化对系统的稳定性没有影响, 只是影响较小而已。

3) 角联结构并不总是对通风系统的稳定性有害, 在图 1 通风系统中巷道  $e_4, e_5, e_6, e_7$  均互为角联结构, 但同样具有低敏感特性, 无论对主要需风风路  $e_4$  还是对主要扇风机的安全运行影响均小; 正确地处理角联结构可提高整个矿井的稳定性或抗灾变能力。

4) 风路敏感性识别有助于深入了解重点风路在网络结构中的位置及其受制约的因素, 如对图 1 中需风风路  $e_4$  的调节, 可根据矿井实际需要将重点位置选择在  $e_2, e_8$  或  $e_3, e_9$ , 对各风路进行敏感性分类对矿井通风管理具有实践指导意义。

### 参考文献:

- [1] 刘剑, 贾进章, 郑丹. 流体网络理论[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2002: 138-149.
- [2] 王树刚, 孙金鹏. 用增量网络法计算稳态流体网络的微分灵敏度[J]. 建筑热能通风空调, 2007, 26(2): 55-58.  
WANG Shu-gang, SUN Jin-peng. An incremental network approach for the differential sensitivity of steady fluid piping networks[J]. Building Energy & Environment, 2007, 26(2): 55-58.
- [3] 王树刚, 蒋爽, 王宗山, 等. 稳态流体管网的灵敏度[J]. 大连理工大学学报, 2006, 46(5): 720-724.  
WANG Shu-gang, JIANG Shuang, WANG Zong-shan, et al. Sensitivity of steady fluid piping networks[J]. Journal of Dalian university of Technology, 2006, 46(5): 720-724.
- [4] 焦海朋, 李明, 李艳军. 矿井通风网络系统敏感度的研究[J]. 工业安全与环保, 2008, 34(2): 35-37.  
JIAO Hai-peng, LI Ming, LI Yan-jun. Study on the sensitivity in mine ventilation network system[J]. Industrial Safety and Environmental Protection, 2008, 34(2): 35-37.
- [5] 陈开岩, 王超. 矿井通风系统可靠性变权综合评价的研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2007, 24(1): 37-41.  
CHEN Kai-yan, WANG Chao. Variable weight comprehensive evaluation for mine ventilation system reliability[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2007, 24(1): 37-41.
- [6] 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 Ke-qi, XIAO Gui-bin. Fuzzy integrated evaluation for reliability of mine ventilating system[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2008, 25(2): 244-247.
- [7] 李中华. 矿井通风网络结构可靠性的研究[D]. 济南: 山东科技大学资源与环境工程学院, 2004.
- [8] JIA Ting-gui, LIU Jian. Stability of mine ventilation system based on multiple regression analysis[J]. Mining Science and Technology, 2009, 19(4): 463-466.
- [9] 刘良季. 多元回归及变量筛选表(LLJ)的内涵及应用[J]. 沈阳建筑大学学报, 2008, 24(5): 904-909.  
LIU Liang-ji. Connotation and application of the multiple regression and variables screening table of LLJ[J]. Journal of Shenyang Jianzhu University, 2008, 24(5): 904-909.
- [10] 杜强, 贾丽艳. SPSS 统计分析从入门到精通[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2009: 150-216.