

矿井复杂风网灵敏度求解及其稳定性分析

吴奉亮

西安科技大学能源学院;教育部西部矿井开采及灾害防治重点实验室,西安 710054

摘要 为便于计算复杂风网的灵敏度,分析了矿井风网灵敏度和基于灵敏度的风网稳定性的概念,给出了用解析法求解灵敏度的公式,并使用 Microsoft Visual C++编制灵敏度计算程序。引入分支风阻易变性系数,优化了基于灵敏度的稳定性计算方法。采用实例分析了灵敏度衰减规律,得出通风构筑物越多系统稳定性越强的结论,这与经验明显不符。针对此矛盾结论,阐明了基于通风构筑物分析与基于灵敏度的稳定性是从风阻的突变与波动两个级别对通风系统稳定性的不同定义,并明确了两种稳定性的重要程度。研究结果有利于正确使用基于灵敏度的风网稳定性进行通风方案优选。

关键词 通风构筑物;灵敏度;矿井通风网络;稳定性

中图分类号 TD722

文献标识码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2011.19.009

Sensibility Calculation and Stability Analysis on a Complicated Mine Ventilation Network

WU Fengliang

Key Laboratory of Western Mine & Hazard Prevention, China Ministry of Education; College of Energy Science and Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China

Abstract In order to make sensibility calculation for a complicated mine ventilation net work easier, the concept of sensibility and stability of a ventilation network were analyzed. An analytic formula to determine the sensibility was put forward. Furthermore, Microsoft Visual C++ software was employed to generate a sensibility calculation program. By introducing mutability coefficient of branches, the calculation method of stability based on the sensibility was optimized. A case was adopted to analyze the attenuation rule of sensibility. And the conclusion is that the more the ventilation constructs are, the more stable the ventilation system is, and it obviously disagrees with the experiences. Aiming at this contradict conclusion, it is pointed out that the definitions of stability in a ventilation system are different while based on the ventilation constructs or on the sensibility. The ventilation constructs are always resulted in the sudden change of air resistance, however, the sensibility always aims at a little change of air resistance. It is also pointed out that ventilation constructs play an even more important role in the ventilation stability. The research result is propitious to optimal choice of projects during the coal mine's ventilation design and reformation.

Keywords ventilation construct; sensibility; mine ventilation network; stability

0 引言

通风系统的稳定性是指风流保持稳定的能力,风网结构与分支风阻变化是影响风网稳定性的主要因素。生产过程中,风阻变化更加频繁,分析新风阻下风网的状态可采用网络解算,文献[1]通过对复杂风网进行大量网络解算研究了分支风阻的可调性。对于已知风网状态的通风网络,当某分支的风阻 R_j 发生一个 ΔR_j 的变化时,网络中任一支 i 的流量

将发生相应的变化 ΔQ_{ij} ,当 $\Delta R_j \rightarrow 0$ 时, $d_{ij} = \lim_{\Delta R_j \rightarrow 0} \Delta Q_{ij} / \Delta R_j = \partial Q_i / \partial R_j$

称为分支 j 对分支 i 的灵敏度,整个风网的灵敏度是一个维数等于网络分支数的方阵。相关文献主要以简单风网为例对灵敏度在风量调节^[2]、风量异常值分析^[3-4]以及角联分支识别^[5]等方面进行研究。特别是将基于灵敏度的风网稳定性用于优选通风设计方案时^[6-8],往往需要计算复杂风网的灵敏度,而灵敏度的计算比较复杂,一般需借助其他数学工具软件(如

收稿日期:2011-04-22;修回日期:2011-05-23

基金项目:教育部科学技术研究重点项目(201112);陕西省教育厅科学研究计划项目(11JK0777);西安科技大学博士科研启动金项目(2010DJ003)

作者简介:吴奉亮,讲师,研究方向为矿井通风与安全,电子邮箱:wufengli@sohu.com

Matlab)^[9],大大限制了其应用。另一种优选通风设计方案的原则是取通风构筑物少的方案,这样可使通风系统简单。因此为便于在通风设计以及通风系统优化中方便、正确地使用基于灵敏度的风网稳定性进行方案优选,本文对灵敏度的求解方法进行分析,并编制相应的计算程序,用实例分析了通风构筑物数量对基于灵敏度风网稳定性的影响。

1 灵敏度计算方法

对于有 n 条边, m 个节点的风网,其回路风压平衡方程、节点风量平衡方程为

$$f_i = \sum_{j=1}^n c_{ij} R_j q_j^2 - \sum_{j=1}^n c_{ij} P_j = 0 \quad (i=1, 2, \dots, n-m+1) \quad (1)$$

$$\varphi_i = \sum_{j=1}^n b_{ij} q_j = 0 \quad (i=1, 2, \dots, m-1) \quad (2)$$

其中, c_{ij} 为回路的方向系数,取 1、-1,表示分支 j 在回路 i 中,取 1 表示与回路同向,取 -1 表示与回路反向,取 0 表示分支 j 不在回路 i 中。 $P_j = P_{fj} + P_{gj} + P_{hj}$, 为 j 分支的风机风压 P_{fj} 、自然风压 P_{gj} 及火风压 P_{hj} 的代数和,若无该项则取 0。 b_{ij} 为基本关联矩阵系数, q_j 为分支 j 风量, $b_{ij}=0$ 表示节点 i 与分支 j 不相连, $b_{ij}=1$ 表示分支 j 风流流入 i 节点, $b_{ij}=-1$ 表示 j 分支风流出 i 节点。

分别就式(1)、式(2)对任一分支风阻 $R_k (1 \leq k \leq n)$ 求偏导得式(3)、式(4),两式构成了 k 分支风阻对所有分支风量灵敏度的偏微分方程组。

$$2 \sum_{j=1}^n c_{ij} R_j \frac{\partial q_j}{\partial R_k} - \sum_{j=1}^n P'_j(q_j) \frac{\partial q_j}{\partial R_k} = -c_{ik} q_k^2 \quad (i=1, 2, \dots, n-m+1) \quad (3)$$

$$\sum_{j=1}^n b_{ij} \frac{\partial q_j}{\partial R_k} = 0 \quad (i=n-m+2, n-m+3, \dots, n) \quad (4)$$

令向量 $X_k = (\frac{\partial q_1}{\partial R_k}, \frac{\partial q_2}{\partial R_k}, \dots, \frac{\partial q_n}{\partial R_k})$, $b_k = (-c_{1k} q_k^2, -c_{2k} q_k^2, \dots, -c_{(n-m+1)k} q_k^2, 0, \dots, 0)$, 则式(3)、式(4)可写成线性方程组形式

$$AX_k = b_k \quad (5)$$

系数矩阵 A 的元素为

$$\begin{cases} a_{ij} = 2c_{ij} R_j Q_j - P'_j(q_j) & (1 \leq i \leq n-m+1, 1 \leq j \leq n) \\ a_{ij} = b_{ij} & (n-m+1 < i \leq n, 1 \leq j \leq n) \end{cases} \quad (6)$$

设矩阵 $D = (X_1, X_2, \dots, X_n)$, 矩阵 $B = (b_1, b_2, \dots, b_n)$, 其中 D 为灵敏度矩阵, 根据式(5)可得 $AD=B$, 则整个风网灵敏度的

计算式为

$$D = A^{-1}B \quad (7)$$

若要一次求解灵敏度矩阵可用式(7), 只需计算某分支风阻相对于其他所有分支风量的灵敏度时可采用式(5)。

2 基于灵敏度的风网稳定性表达式

灵敏度反映了分支风量对其他分支风阻变化的敏感程度, 由于运输、行人等因素的影响, 分支风阻总是有小幅动态变化, 因此可用灵敏度矩阵每一行元素的绝对值之和 U 表示分支风量对风阻变化的敏感性大小, 敏感性越小说明分支风量越稳定。据此, 文献[6-8]给出了整个通风网络的风流处于更稳定状态的表达式

$$\alpha = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n |d_{ij}|}{n^2} \rightarrow \min \quad (8)$$

当所有分支风阻具有相同的易变性时采用式(8)是合理的。但不同的设计方案中对运输系统、人员行走路线等的不同组织方式将会使风网风阻实际波动程度不同, 式(8)的计算结果并没有考虑这一因素。因此本文引入风阻易变性系数 c 表示这一性质, 用 c_i 表示分支 i 的风阻易变性系数, 式(8)变为

$$\alpha = \sum_{i=1}^n c_i \sum_{j=1}^n \frac{|d_{ij}|}{n^2} \rightarrow \min \quad (9)$$

对于行车巷道 c 可取为 0.8, 皮带巷取 0.5, 仅行人的巷道取 0.3, 专用回风巷和其他仅通风的巷道取 0.1。若 A 方案的风流比 B 方案稳定, 则应符合

$$\alpha_A < \alpha_B \quad (10)$$

系数 c 的取值标准虽依据经验确定, 但其标准对不同的方案是统一的, 式(9)相对于式(8)而言是对风阻易变性的一种合理考虑。

3 通风构筑物对基于灵敏度稳定性的影响

3.1 实例参数

本文基于已有的网络解算软件^[9], 在 AutoCAD 下实现了灵敏度的两种计算方法, 采用全选主元 Gauss 消去法求解式(5), 全选主元 Gauss-Jordan 法求解式(7) A 的逆矩阵。表 1 为某实例风网分支风阻, 如图 1 所示, 使用软件建立某矿的风网结构, 图中数字是采用式(5)计算的选定分支 1-2 对其他

表 1 实例风网分支风阻

Table 1 Resistance of branches in the sample ventilation network

分支	1-6	20-21	1-3	5-7	7-25	3-5	26-28	25-26	1-2	1-2	2-3
风阻/(kg·m ⁻⁷)	0.1000	0.0022	1.0000	0.0096	3.000	0.0008	0.050	0.0500	0.1500	0.1500	0.0008
分支	6-8	7-9	9-23	22-23	13-22	11-13	13-18	18-19	20-24	23-24	24-25
风阻/(kg·m ⁻⁷)	0.0571	0.0300	3.000	0.0918	2.0011	0.0003	0.5	0.0550	5000.0	0.0023	0.0218
分支	9-11	3-4	18-22	6-20	21-27	4-26	4-21	8-11	19-20	8-19	3-6
风阻/(kg·m ⁻⁷)	0.0706	0.0003	100.00	2.0000	0.1440	5.0000	3.0000	0.0347	0.0465	2.0000	0.0211

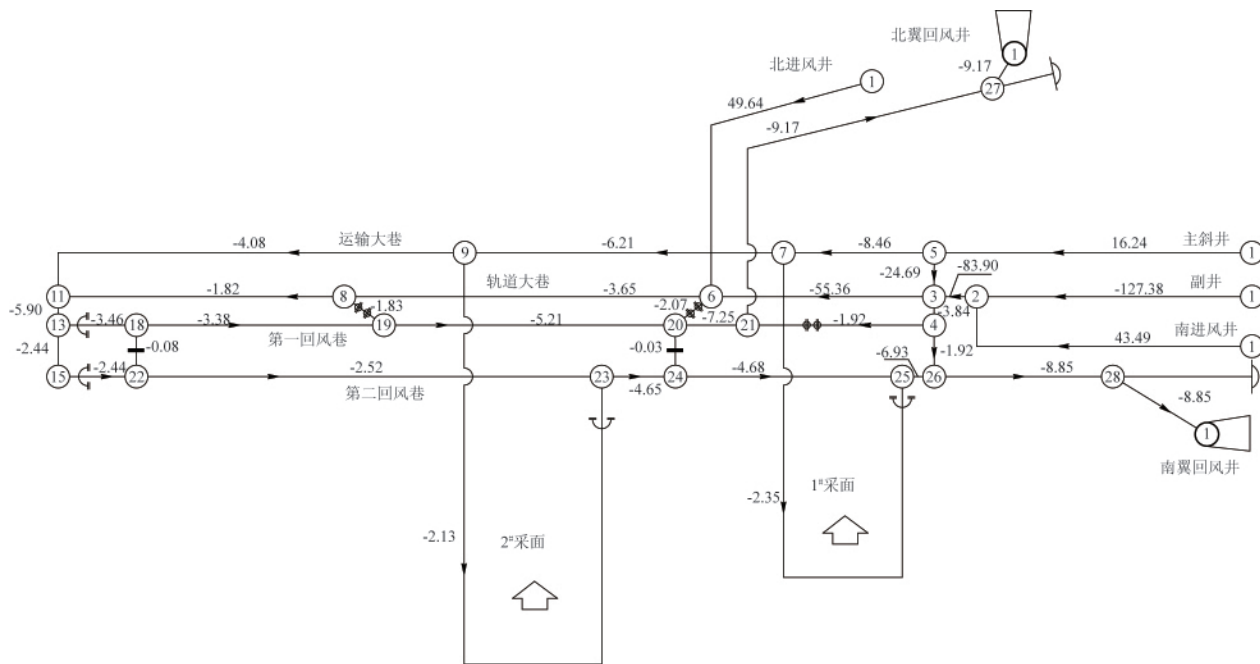


图 1 通风系统示意与网络结构

Fig. 1 Illustration of ventilation system and network structure

分支的灵敏度,分支 27-1、28-1 中有风机,性能函数分别为 $p=2897.9+19.0383q-0.2524q^2+0.0003q^3$, $p=7446.3-106.9752q+0.9145q^2-0.0033q^3$ 。改变当前选定分支软件可即时将新的灵敏度显示在图中,整个风网灵敏度数据量大,这种方式既减少了一次的计算量,又便于将灵敏度在网络图中与分支对应查看。

3.2 灵敏度变化规律

灵敏度变化规律是指灵敏度随风阻的变化情况。矿井通风网络风路 j 在不同风阻 R_j 下,采用式(5)求解 i 风路风量相对于 R_j 情况下的灵敏度,从而可得到大量统计数据。表 2 为图 1 网络在分支 1-2 取不同风阻情况下对分支 9-23、26-28

表 2 分支 1-2 在不同风阻情况下的灵敏度统计值
Table 2 sensitivity statistics under the condition of different wind resistance of branch 1-2

R_{1-2}	对分支 9-23 的灵敏度绝对值	对分支 26-28 的灵敏度绝对值	R_{1-2}	对分支 9-23 的灵敏度绝对值	对分支 26-28 的灵敏度绝对值
0.0100	22.59	94.23	0.4000	0.66	2.74
0.0300	10.39	43.27	0.5000	0.50	2.06
0.0600	5.57	23.19	0.6000	0.39	1.63
0.0900	3.70	15.42	0.7000	0.32	1.34
0.1000	3.31	13.80	0.8000	0.27	1.12
0.2000	1.53	6.36	0.9000	0.23	0.96
0.3000	0.94	3.91	1.0000	0.20	0.83

灵敏度的绝对值。图 2 显示了 9-23、26-28 分支灵敏度绝对值随分支 1-2 风阻 R_{1-2} 的变化关系:随着风阻的增大,灵敏度绝对值逐渐减小,当 R_{1-2} 很大时,灵敏度趋于 0。使用软件对其他复杂风网进行计算与统计分析后,可确定图 2 所示的大阻分支对其他分支风量灵敏度绝对值总是很小的特性具有普遍性。

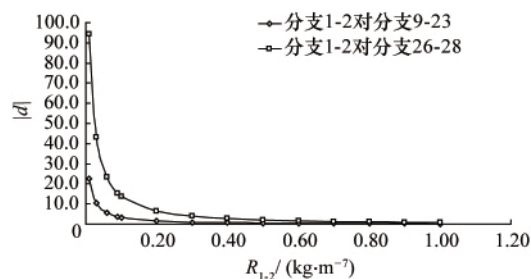


图 2 R_{1-2} 取不同值时对分支 9-23 与 26-28 的灵敏度统计规律

Fig. 2 Statistical rule of sensitivity to the branch 9-23 and 26-28 for the branch 1-2 with different resistance

3.3 通风构筑物对基于灵敏度稳定性的影响

对于有通风构筑物的分支,其风阻远大于普通分支风阻,因此它对其他分支的灵敏度总是很小,通风构筑物越多,由式(9)计算的系统敏感性越小,即通风系统越稳定。一般而言,通风构筑物越多,风门、风窗等异常开启的可能性越大,由此认为通风系统稳定性也越差,因此在方案优选时往往选

择通风构筑物少的通风方案。当用式(9)比较两个风网的稳定性时,包含较多构筑物的系统往往得出越稳定的结论,这与构筑物越多系统越不稳定的常规经验矛盾。从概念分析,灵敏度反映的是在风阻波动情况下分支风量的变化情况。对通风构筑物而言,系统稳定性是指在风窗、风门等设施异常开启时对系统造成的影响,此时分支风阻发生突变,这种变化往往造成系统紊乱或某些分支风流停滞,其影响远大于风阻波动对风流影响,可见两种稳定性是不同的;通风构筑物的增加也增加了通风管理的难度,降低井巷的通行能力,因此在方案优选时,应首先考虑通风构筑物对风网稳定性的影响,在通风构筑物数量相同或相差不大的情况下,再采用基于灵敏度的风网稳定性进行方案优选。

4 结论

(1) 通过分析灵敏度概念得到两种灵敏度的解析求解法,形成了与网络解算集成的灵敏度计算程序,方便了对复杂网络灵敏度进行计算与查看。

(2) 基于灵敏度的风网稳定性反映的是风网在分支风阻波动时的风流的动态特性,对同一个矿井的不同设计方案,其运输、行人路线往往不同,即风阻发生波动的分支分布也不相同,引入分支风阻易变性系数考虑了这一因素,优化了基于灵敏度的风网稳定性表达式。

(3) 用软件对一实例风网灵敏度进行了求解,分析了灵敏度随着风阻增大而减小的衰变规律,得出高阻分支灵敏度总是很小的结论,基于此,得出通风构筑物越多基于灵敏度的风网稳定性越好的结论。指出应在通风构筑物数量相同的情况下采用基于灵敏度的风网稳定性进行方案优选。

参考文献 (References)

- [1] 王从陆, 吴超, 李树清. 复杂矿井通风系统分支阻力可调性数值研究[J]. 中国安全科学学报, 2004, 14(5): 21-23.
Wang Conglu, Wu Chao, Li Shuqing. *China Safety Science Journal*,

- 2004, 14(5): 21-23.
[2] 吴勇华. 通风系统灵敏度分析[J]. 西安矿业学院学报, 1992, 12(3): 207-221.
Wu Yonghua. *Journal of Xi'an University of Science & Technology*, 1992, 12(3): 207-221.
[3] 张强, 常心坦, 许晋源. 矿井风量监测异常值研究的模型与算法[J]. 西安矿业学院学报, 1998, 18(4): 301-303.
Zhang Qiang, Chang Xintan, Xu Jinyuan. *Journal of Xi'an University of Science & Technology*, 1998, 18(4): 301-303.
[4] 吴奉亮, 常心坦, 李学文. 安全管控数据联机分析模式研究[J]. 西安科技学院学报, 2002, 22(4): 392-394.
Wu Fengliang, Chang Xintan, Li Xuewen. *Journal of Xi'an University of Science and Technology*, 2002, 22(4): 392-394.
[5] 李湖生. 矿井通风系统敏感性与风流稳定性[J]. 淮南矿业学院学报, 1997, 17(3): 32-37.
Li Husheng. *Journal of Huainan Mine Institute*, 1997, 17(3): 32-37.
[6] 贾进章, 马恒, 刘剑. 基于灵敏度的通风系统稳定性分析[J]. 辽宁工程技术大学学报: 自然科学版, 2002, 21(4): 428-429.
Jia Jinzhang, Ma Heng, Liu Jian. *Journal of Liaoning Technical University: Natural Science*, 2002, 21(4): 428-429.
[7] 陈钊. 基于灵敏度的通风系统稳定性分析[J]. 中国煤炭, 2007, 33(11): 46-47.
Chen Zhao. *China Coal*, 2007, 33(11): 46-47.
[8] 赵永生, 许文兴, 王跃明. 通风网络灵敏度及衰减率的应用[J]. 山西矿业学院学报, 1993, 11(4): 342-349.
Zhao Yongsheng, Xu Wenxing, Wang Yueming. *Shanxi mining institute learned journal*, 1993, 11(4): 342-349.
[9] 贾进章, 刘剑, 宋寿森. 通风系统稳定性数值分析[J]. 矿业安全与环保, 2003, 30(6): 10-11.
Jia Jinzhang, Liu Jian, Song Shousen. *Mine Safety & Environmental Protection*, 2003, 30(6): 10-11.
[10] 吴奉亮, 周澎, 李晖, 等. 基于智能对象的通风CAD模型研究[J]. 煤炭科学技术, 2009, 37(5): 54-57.
Wu Fengliang, Zhou Peng, Li Hui, et al. *Coal Science and Technology*, 2009, 37(5): 54-57.

(责任编辑 刘志远)



《科技导报》“研究论文”栏目征稿

“研究论文”栏目专门发表自然科学、工程技术领域具有创新性的研究论文,要求学术价值显著、实验数据完整、具有原始性和创造性,同时应重点突出、文字精炼、引证及数据准确、图表清晰,并附中、英文摘要以及作者姓名、所在单位、通信地址、关键词等信息。在线投稿:www.kjdb.org。