

文章编号:0253-9993(2012)06-0994-05

# 基于 Tikhonov 正则化的矿井通风网络测风求阻法

司俊鸿,陈开岩

(中国矿业大学 安全工程学院,江苏 徐州 221008)

**摘要:**针对矿井通风系统动态性和复杂性的特点,提出了测风求阻法所需最少调节次数时的最优回路选择算法,结合矿井巷道风量的实时动态监测数据,建立了基于监测数据的矿井通风网络测风求阻模型。针对复杂通风网络易构造病态测风求阻模型的问题,提出了基于贪婪进化算法的 Tikhonov 正则化参数求解方法,对模型进行修正处理。应用结果表明,该方法可以减轻模型病态的严重程度,求解复杂通风网络分支风阻,并能发挥监测系统的实时动态监测功能,为矿井通风系统动态模拟提供基础数据。

**关键词:**测风求阻;Tikhonov 正则化;矿井通风网络;贪婪进化算法;广义交叉检验准则

**中图分类号:**TD722 **文献标志码:**A

## Measuring airflow & evaluating resistance model of the mine ventilation network based on Tikhonov regularization

SI Jun-hong, CHEN Kai-yan

(Faculty of Safety Engineering, China University of Mining & Technology, Xuzhou 221008, China)

**Abstract:** According to the dynamic and complex characteristics of the mine ventilation system, the algorithm of choosing the optimum circuit for the minimum regulation number of measuring airflow and evaluating resistance model was put forward. Combining with the real-time dynamic monitoring data of the air volume, the paper established the measuring airflow & evaluating resistance model of the mine ventilation network based on the monitoring data. Because it easily constructed the ill-posed coefficient matrix while the model applied to the complex network, the solving method of parameters of the Tikhonov regularization based on the greedy algorithm was proposed to revise the model. The application shows that this method can reduce the severity of ill-posed matrix and moderately solve the resistance of the complex ventilation network. It exerts the real-time dynamic monitoring function of the monitoring system and provides the basic data to the dynamic simulation of mine ventilation system.

**Key words:** measuring airflow and evaluating resistance; Tikhonov regularization; the mine ventilation network; greedy evolution method; generalized cross-validation

巷道风阻是矿井通风系统模拟的基本参数之一,一般通过通风阻力测定获得。然而,矿井通风系统是一个有规律而又随机动态变化的复杂系统,即使使用多功能风阻参数检测仪<sup>[1]</sup>,也很难实时获得所有巷道风阻。有学者根据巷道风阻与常数的特点,通过测量矿井不同状态下的风量分配,建立了求解巷道风阻的测风求阻模型<sup>[2-3]</sup>,编制了相应的计算机程序<sup>[4]</sup>。

然而,对于复杂通风网络,由于受到风流安全稳定性的影响,很难找到合理的调节方案,使得通风网络中各分支的风量均有较大幅度的变化,因此,容易构造出病态的模型,使该方法受到很大的局限。

本文利用矿井巷道风量的实时动态监测数据,在监测数据满足精度要求的前提下,建立测风求阻模型,针对模型在复杂网络易构造病态测风求阻模型的

问题,提出了基于贪婪进化算法的 Tikhonov 正则化<sup>[5-7]</sup>参数求解方法,对模型进行修正处理,使得测风求阻模型能更好地应用于复杂矿井通风系统中。

### 1 测风求阻基本模型

测风求阻法是以分支风量和主要通风机工况点作为基础数据,通过改变通风网络中某一条或几条分支的风阻,获得不同状态下通风网络的风量分配,从而增加求解分支风阻方程的数目,达到求解目的。

设通风网络中有  $n$  个节点,  $b$  条分支,  $m$  个独立回路,测风求阻法的数学模型为

$$\sum_{j=1}^b C_{ij}^r \text{diag}(Q_j^r | Q_j^r) R_j^r = \sum_{j=1}^b C_{ij}^r H_{pj}^r \quad (1)$$

式中,  $C_{ij}^r$  为第  $r$  次调风时的回路矩阵,  $i$  为回路编号,  $j$  为分支编号;  $Q_j^r$  为第  $r$  次调风时的分支风量,  $\text{m}^3/\text{s}$ , 负值表示该分支的风流反向;  $R_j^r$  为第  $r$  次调风时的分支风阻,  $\text{kg}/\text{m}^7$ ;  $H_{pj}^r$  为第  $r$  次调风时风机分支的压力,  $\text{Pa}$ 。

### 2 最优回路与最少调节次数的确定

测风求阻法需调节次数与分支的个数密切相关。假设通风网络中有  $x$  条分支的风阻未知,则可通过式(1)构建  $x$  个独立方程,若已知通风网络中各分支的风量、主要通风机的压力以及调节分支的风阻,则最多需调节次数为含未知量最多回路中未知量的数目。然而矿井通风网络回路中的未知量可能存在重复的情况,如果某回路中过多地选择了独立的未知量,则会增大通风网络的需调节次数。因此,合理选择回路可以有效地降低需调节次数。测风求阻法所需最少调节次数时最优的回路选择算法流程如图1所示。

步骤1:随机给定分支的权重,确定该权重下的1组回路。

步骤2:计算每个回路的待求未知量个数,选择个数最多的回路,确定其中的1条分支,若该分支仍包含在其他回路中,并且其他回路当前的未知量个数小于该回路,则将其他回路的该分支选为未知量,其余回路中出现的该分支看作常量;若其他回路的未知量个数均大于当前回路,则将当前回路中的该分支风阻认为是未知量。

步骤3:重新计算各回路中未遍历的未知量个数,若遍历所有未知量,则执行下一步,否则返回步骤2。

步骤4:记录各回路的未知量分支,确定需要的最少调节次数  $r$ ,若该次数  $r_{\min} = [(x - m) / m] + 1$  ( $[\cdot]$ 表示取整运算),则结束,否则返回步骤1。

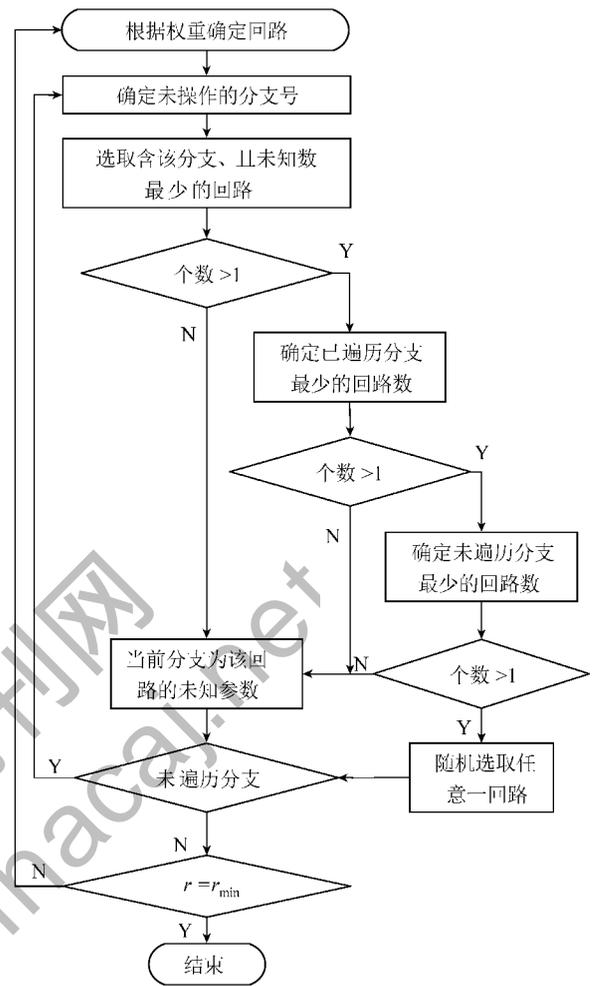


图1 测风求阻模型最优回路选择流程

Fig. 1 Flowchart of choosing the optimum circuit of measuring airflow and evaluating resistance model

### 3 模型系数矩阵病态性判断

对于线性模型,如果原始数据有微小扰动时,引起解发生较大的变化,则称该方程组是病态方程组,系数矩阵称为关于解方程组或矩阵求逆的病态矩阵<sup>[8]</sup>。通常采用矩阵  $A$  的条件数  $K(A)$  判定病态程度。

$$K(A) = \|A^{-1}\| \|A\| \quad (2)$$

式中,  $A^{-1}$  为矩阵  $A$  的逆阵;  $\|\cdot\|$  为矩阵的范数。

当  $K(A) \gg 1$  时,称  $A$  为病态矩阵,否则称为良态。矩阵病态(或良态)是矩阵固有的性质,  $K(A)$  愈大,  $A$  的病态程度就愈严重,它反映了原始数据振动的敏感程度。

### 4 解病态矩阵的 Tikhonov 正则化方法

#### 4.1 Tikhonov 正则化

Tikhonov 正则化方法<sup>[9]</sup>是常见的处理病态矩阵的方法之一,它是通过增加全部或部分参数(或参数

改正数)加权平方和极小的条件,来增加病态方程的约束,用相邻的适定问题的解去逼近原问题的解,从而达到减小条件数,减轻方程病态的严重程度,使解稳定且唯一的目的。

对于线性模型  $AX=L$ , 根据 Tikhonov 正则化的思想,在约束条件  $\|AX-L\| \leq \varepsilon$  下求解方程

$$A\hat{X} = L + \varepsilon \quad (3)$$

式中,  $\hat{X}$  为正则解;  $L$  为常数向量;  $\varepsilon$  为求解精度。

为了得出式(3)中接近真值的最小范数解,定义光滑泛函:

$$J_\alpha(X) = \|AX-L\|_P^2 + \alpha\Omega(X) \quad (4)$$

式中,  $\|\cdot\|_P^2$  为加权 2 范数;  $P$  为加权矩阵;  $\Omega(X)$  为稳定泛函;  $\alpha$  为正则化参数,  $\alpha > 0$ 。

$\Omega(X)$  是将不适定问题转化为适定问题,不同的稳定泛函有不同的准则函数,一般选  $\Omega(X) = \|X\|_H^2$ ,  $H$  为正则化矩阵,反映了参数向量间的内在关系。正则参数  $\alpha$  起着平衡  $J_\alpha(X)$  右边两项的作用,适当地选取  $\alpha$ , 极小化  $J_\alpha(X)$  在  $X$  上可求得唯一的极小  $X(\alpha)$ , 令  $\frac{d(J_\alpha(X))}{dX} = 0$ , 求得

$$(A^T P A + \alpha H) \hat{X} = A^T P L \quad (5)$$

式中,  $A^T$  为矩阵  $A$  的转置。

#### 4.2 正则化参数的求解

Tikhonov 正则化的效果主要取决于正则参数  $\alpha$  的选取。确定正则参数  $\alpha$  的主要方法有 Morzov 偏差法、 $L$  曲线法、广义交叉检验 (GCV) 法等。Morzov 偏差法具有较好的稳定性<sup>[10]</sup>;  $L$  曲线法具有较强的适应性和准确性,但它依赖于拟合曲线的光滑度,并且不一定收敛于最优参数<sup>[11-12]</sup>; GCV 法被证明具有良好的稳健性<sup>[13-14]</sup>。

GCV 函数的表达式为

$$GCV(\alpha) = \frac{\| [I - A(\alpha)] L \| / m}{\{ \text{tr} [I - A(\alpha)] / m \}^2} \quad (6)$$

式中,  $I$  为单位对角阵;  $A(\alpha) = A(A^T A + \alpha I)^{-1} A^T$ ;  $m$  为向量  $L$  的长度;  $\text{tr}$  表示矩阵的迹;  $\|\cdot\|$  一般取向量的 2 范数。

本文提出采用贪婪进化 (GE) 算法<sup>[15]</sup>, 取函数  $\min \{ GCV(\alpha) \}$  对应的  $\alpha$  作为正则参数。

GE 算法按照适应度值由优到劣的顺序对种群中的矢量进行分类: 最优矢量是种群中最好的矢量, 即适应度值最小矢量的组合; 较差矢量是指种群中排序较后的矢量的组合, 其规模由选择概率  $sp$  确定; 比较优矢量是指种群中除最优矢量和较差矢量之外其他矢量的组合。

GE 算法的基本流程如图 2 所示。

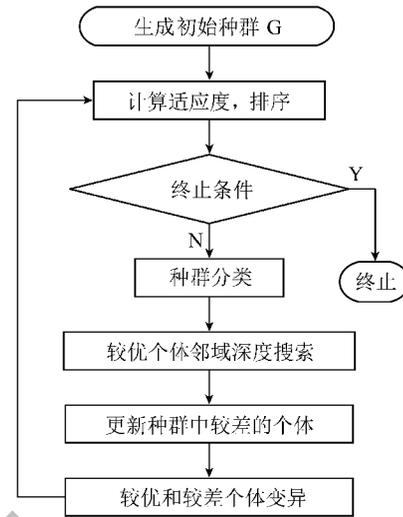


图 2 GE 算法流程

Fig. 2 Flowchart of the GE algorithm

步骤 1: 随机产生初始种群  $G$ , 规模为  $np$ , 计算矢量的适应度, 并根据适应度值由优到劣的顺序对种群进行排序、分类。

步骤 2: 对于较优矢量, 在其参数的邻域  $\delta$  内随机生成邻域种群  $G_1$ , 规模为  $snp$ 。计算  $G_1$  中矢量的适应度, 若存在比原来更优的矢量, 则直接将最优矢量替代原始矢量。

步骤 3: 对于较差矢量, 使用随机生成的更优新矢量替换原来矢量。

步骤 4: 新种群重新排序后, 对较优和较差矢量进行变异操作, 若变异后的矢量优于原矢量, 则用其替代原来种群中的矢量。

步骤 5: 当最优以及比较优矢量之间的适应度差值达到精度要求, 或者种群的进化代数达到最大迭代次数时, 退出迭代程序。

#### 5 实例分析

图 3 为 3 台风机抽出式复杂通风网络示意, 该通风网络中共 20 条分支, 14 个节点, 7 个独立回路, 各分支的风阻值见表 1, 其中 1, 2, 3 为风机分支。

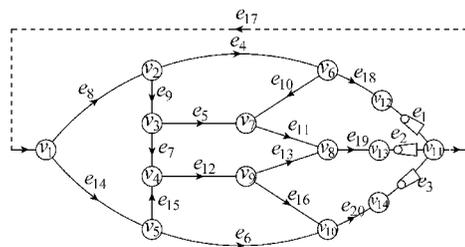


图 3 多风机通风网络示意

Fig. 3 Schematic diagram of mine ventilation network with multi-fan

利用测风求阻法最少调节次数化简方法,找出各回路中不相关参数的最少情况。经计算,该例子中的回路参数最少数为3,即只需要进行3次调节,便可计算出所有分支的风阻。分别调节分支10的风阻值为 $R_{10}=0.3, 1.3$ 和 $2.3 \text{ kg/m}^7$ ,3种不同状态下的通风网络分支风量分配见表1,通风机压力见表2,选出的回路见表3。

表1 通风网络调节基础参数

Table 1 Parameters of ventilation network regulation

分支	原始风阻/ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-7}$ )	风量/( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ )		
		调节1	调节2	调节3
1	0	25.000 0	25.000 0	25.000 0
2	0	60.000 0	60.000 0	60.000 0
3	0	35.000 0	35.000 0	35.000 0
4	1.020	29.782 9	29.599 8	29.441 1
5	1.00	28.967 9	29.070 1	29.158 6
6	1.20	30.275 6	30.313 7	30.346 9
7	0.65	5.101 5	5.121 8	5.139 3
8	0.08	63.852 3	63.791 7	63.739 0
9	0.20	34.069 5	34.191 9	34.297 9
10	0.30	4.783 0	4.599 9	4.441 1
11	0.32	33.750 8	33.669 9	33.599 7
12	1.00	30.973 6	31.016 3	31.053 4
13	0.33	26.249 2	26.330 1	26.400 3
14	0.14	56.147 7	56.208 3	56.261 0
15	0.20	25.872 1	25.894 6	25.914 1
16	0.30	4.724 4	4.686 3	4.653 2
17	0	120.000 0	120.000 0	120.000 0
18	0.80	25.000 0	25.000 0	25.000 0
19	0.12	60.000 0	60.000 0	60.000 0
20	0.34	35.000 0	35.000 0	35.000 0

表2 通风机压力

Table 2 Air pressure of main fans

风机压力/Pa	调节1	调节2	调节3
风机1	1 890.593	1 876.931	1 865.145
风机2	2 193.973	2 199.210	2 203.769
风机3	1 957.792	1 961.519	1 964.761

表3 通风网络回路

Table 3 Circuit of the ventilation network

回路号	余树分支	回路分支
1	1	4,8,17,18
2	2	5,8,9,11,17,19
3	3	5,8,9,11,-13,16,17,20
4	6	-5,7,-11,13,-15,-16
5	10	4,-5,-9
6	12	-5,7,-11,13
7	14	-7,-8,-9,15

由于虚拟大气连通分支以及风机分支的风阻值为0,并且调节分支10的风阻值为已知,因此该通风网络只需要求解15个分支的风阻值。根据式(1),选择出1组独立方程,包括调节1中的1,3,4,5,6,7回路,调节2中的3,6回路,以及调节3中的1~7回路。方程组的系数矩阵 $A$ 为 $15 \times 15$ 阶矩阵, $K(A) = 5.46 \times 10^8$ ,因此,矩阵 $A$ 具有严重的病态性。

根据 $L$ 列向量(表4),利用 $X = A^{-1}L$ 求出直接解。另外,采用GE算法,求出式(6)的最小值所对应的Tikhonov正则参数 $\alpha = 1.025 \times 10^{-7}$ ,利用正则化公式(5),求出正则解 $\hat{X}$ 见表4,其中 $P$ 和 $H$ 均取单位方阵;GE算法的基本参数设置为:精度 $\varepsilon = 10^{-5}$ ,放缩因子 $F = 0.7, sp = 0.5, np = 50, snp = 100, \delta = 0.1$ 。

表4 直接解与正则解的相对误差

Table 4 Relative error of the direct solution and regularization solution

分支	$L$	$X$	$\hat{X}$	相对误差/%	
				$X$	$\hat{X}$
4	1 890.593 00	1.202 4	1.199 91	0.20	0.01
5	1 957.792 00	1.377 2	0.986 68	37.72	1.33
6	0	1.347 7	1.298 26	12.31	8.19
7	-6.862 98	10.540 3	0.012 30	1 521.58	98.11
8	0	0.076 6	0.080 12	4.25	0.15
9	0	-0.070 9	0.209 56	135.45	4.78
11	1 961.519 00	0.320 0	0.319 95	0	0.02
12	0	1.053 4	0.993 90	5.34	0.61
13	1 865.145 00	0.341 5	0.346 30	3.48	4.94
14	2 203.769 00	0.089 8	0.106 61	35.86	23.85
15	1 964.761 00	0.330 3	0.349 77	65.15	74.89
16	0	0.164 3	0.106 81	45.23	64.40
18	-45.363 10	0.818 8	0.799 33	2.35	0.08
19	0	0.123 3	0.119 90	2.75	0.08
20	0	0.358 6	0.352 39	5.47	3.65

解算出的风阻值与实际值的相对误差见表4。根据方差计算公式

$$D(X) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (7)$$

计算出直接解的风阻变量相对误差方差 $D(X) = 14.05$ ,正则解的方差 $D(\hat{X}) = 0.09$ ,因此,正则解明显优于直接解。

## 6 结 论

(1)研究了通过测风求阻法最少调节次数选择回路的算法,编制了相应的计算机应用程序。

(2)研究了测风求阻模型的病态特性,利用矿井

巷道风量的实时动态监测数据,建立了矿井通风网络测风求阻模型。提出了基于贪婪进化算法的 Tikhonov 正则化参数求解方法,对模型进行修正处理,增强了模型的稳健性能,使其能更好地应用于实际矿井复杂通风系统。

### 参考文献:

- [1] 崔 峰. 风阻参数综合检测仪的研制[J]. 鸡西大学学报, 2011, 11(3): 63-65.  
Cui Feng. Development of measuring instrument for the parameters of air resistance[J]. Journal of Jixi University, 2011, 11(3): 63-65.
- [2] 刘泽功. 测风求阻法解算矿井复杂通风网络[J]. 淮南矿业学院学报, 1992, 12(3): 45-54.  
Liu Zegong. Method of measuring airflow and evaluating resistance for calculating a complicated mine ventilation networks[J]. Journal of Anhui University of Science and Technology, 1992, 12(3): 45-54.
- [3] 刘泽功. 通风安全工程计算机模拟与预测[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1995.  
Liu Zegong. Computer simulation and prediction of ventilation of safety engineering [M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 1995.
- [4] 周丽红, 吕 军, 刘小军. 测风求阻法的原理及实现[J]. 西安科技学院学报, 2004, 24(2): 148-150, 165.  
Zhou Lihong, Lü Jun, Liu Xiaojun. The principle and implementation of calculating resistance through surveying airflow quantity[J]. Journal of Xi'an University of Science & Technology, 2004, 24(2): 148-150, 165.
- [5] 李 浩. 病态方程 Tikhonov 正则化方法的最优正则化参数[J]. 科学通报, 1992, 37(11): 968-971.  
Li Hao. The optimum regularization parameters of Tikhonov regularization method for ill-posed equations[J]. Chinese Science Bulletin, 1992, 37(11): 968-971.
- [6] 王 贵, 韩 旭. 基于遗传算法的一种 Tikhonov 正则化改进方法[J]. 固体力学学报, 2006(S1): 33-37.  
Wang Gui, Han Xu. A kind of modified Tikhonov regularization method based on genetic algorithms[J]. Acta Mechnica Solida Sinica, 2006(S1): 33-37.
- [7] 韩保民, 曲国庆. 基于 Tikhonov 正则化的白化滤波快速解算模糊度方法[J]. 煤炭学报, 2006, 31(5): 589-593.  
Han Baomin, Qu Guoqing. An improved whitening filter algorithm for GPS rapid ambiguity resolution based on Tikhonov regularization principle[J]. Journal of China Coal Society, 2006, 31(5): 589-593.
- [8] 冯遵德, 卢秀山, 郭 英. GPS 定位中几何精度因子的病态性诊断及其递推计算[J]. 煤炭学报, 2006, 31(5): 581-584.  
Feng Zunde, Lu Xiushan, Guo Ying. Ill conditioning diagnostics of geometric dilution of precision and its substitution calculation in GPS [J]. Journal of China Coal Society, 2006, 31(5): 581-584.
- [9] Tikhonov A N, Arsenin VY. Solutions of ill-posed problems [M]. New York: Wiley, 1977, 1: 30-40.
- [10] Kamyshan A N, Luzhnov A M, Makhon'kov A S, et al. Use of detectors external to reactor to determine the reactor power and the mean energy distribution over the height of the active zone[J]. Soviet Atomic Energy, 1984, 57(4): 443-448.
- [11] Hansen P C. Analysis of discrete ill-posed problems by means of the L-curve[J]. SIAM Review, 1992, 34(4): 561-580.
- [12] Engl H W, Grever W. Using the L-curve for determining optimal regularization parameters[J]. Numerische Mathematik, 1994, 69: 25-31.
- [13] Stanley J R. Blur identification by the method of generalized cross-validation[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1992, 1: 301-311.
- [14] 肖庭延, 于慎根, 王颜飞. 反问题的数值解法[M]. 北京: 科学出版社, 2003.  
Xiao Tingyan, Yu Shengen, Wang Yanfei. Mathematic solution of the inverse problems[M]. Beijing: Science Press, 2003.
- [15] Si Junhong, Chen Kaiyan, Zhang Sen, et al. Solving the constrained nonlinear optimization based on greedy evolution algorithm [A]. 2011 Seventh International Conference on Natural Computation [C]. 2011: 1147-1151.