

- [18] SHAO Liangshan(邵良杉), ZHAO Linlin(赵琳琳). Model for predicting blasting vibration caused damage to residential house [J]. *China Safety Science Journal*(中国安全科学学报), 2014, 24(8): 56-61.
- [19] WANG Shuzhou(王书舟). *Support vector machine and its application*(支持向量机方法及其应用研究) [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2009: 19-24.

RS – LSSVM model for identifying and determining the mining water inrush origin

SHAO Liang-shan, LI Yin-chao, XU Bo

(System Engineering Institute, Liaoning Technical University, Huludao 125105, Liaoning, China)

Abstract: The given paper is aimed to identify and discriminate the mining water bursting inrush source accurately and efficiently. For the research purpose, we have combined two algorithms of rough set and the least square support vector machine so as to build up a mine water inrush identification method. In so doing, we have first of all adopted the continuous attributes discretization method based on the rough set theory to discrete the continuous data from the original samples of the mining water inrush. Then, we have obtained the information of the water inrush from the coal mine to create a decision-making table after discretization based on the RS theory, which can help to simplify and delete some redundant information to contribute to the final decision making and improve the quality of the samples chosen under the premise to keep the classification ability and data integrity unchanged. Afterwards, it would be possible to optimize the parameters of LSSVM by choosing the appropriate kernel function and by K -fold cross validation with the help of the influential factors of the water inrush from the coal seam floor after the RS attribute reduction as the input vectors and sample training due to the LSSVM reduction. And, finally, the model can be used to identify the mine water inrush source. Hence, a comparison of the prediction results can be done with the direct LSSVM, the Fisher discrimination analysis method, with the random forest method being exploited. The experimental results show that it is a nice way to use the method of attribute reduction to eliminate the interference of the redundant information of the original data, and to discriminate the source of mine water inrush promptly and efficiently. In such a case, the false rate of mine water inrush source model should be made to be equal to 0. And, simultaneously, it is also possible to reduce the LSSVM computational complexity by improving the index reduction process and the discrimination efficiency.

Key words: safety engineering; mine water inrush; identification of water source; rough set (RS) theory; least squares support vector machine (LSSVM); attribute reduction

CLC number: X924.4

Document code: A

Article ID: 1009-6094(2017)05-4730-05

文章编号: 1009-6094(2017)05-4734-06

基于网络流理论的矿井通风网络可靠性研究*

范凌云, 谢贤平

(昆明理工大学国土资源工程学院, 昆明 650093)

摘 要: 矿井通风网络是通风系统的重要组成部分, 对其进行可靠性研究具有非常重要的意义。针对矿井通风网络系统的自身属性, 结合网络流理论建立了通风网络可靠性评价模型。对各风路的风量进行动态实时监测, 并运用统计学方法分析了风网中风流的变化趋势及风量分布规律, 得到了通风系统中任一风路风量的分布密度函数, 进而推导出各风路的可靠性指标值。运用简化的邻接终点矩阵法求解通风网络最小路集并基于 MATLAB 编程实现此算法。提出了一种简化的不变化最小路集算法: 对于任一长度为 $m-1$ 的最小路, 只需在其中添加 $n-m+1$ 条该最小路中不出现的分支的逆, 就可直接获得不变化结果, 其余最小路采用 BDD 算法进行不变化运算。通过以上方法可量化分析通风网络的可靠性。最后通过实例解算检验其可行性。

关键词: 安全工程; 通风网络系统; 网络流理论; 可靠性; MATLAB 编程; 不变化最小路集; BDD 算法

中图分类号: X751; TD725

文献标识码: A

DOI: 10.13637/j.issn.1009-6094.2017.05.022

0 引言

矿井通风系统由通风网络、通风机及风流辅助设施组成, 是地下矿山的重要组成部分, 对于矿山生产及井下人员的安全担负着极其重要的责任^[1]。随着矿山服务年限的增长、开采深度的增加及规模的扩大, 通风网络结构相应地会发生日益复杂的动态变化, 一旦某一风路风流达不到要求(不可靠), 就将给矿山经济及人员安全带来严重后果, 因此本文主要研究矿井通风网络的可靠性, 以便掌握整个系统的通风状况, 并及时预防和处理因某些风路的不可靠状态而导致的通风隐患。

通风网络中风路的可靠性与一般网络元件的可靠性有本质区别, 体现在其自身属性与整个网络或其他分支(元件)的关联性上, 这正是矿井通风系统可靠性研究的困难之处^[2]。自 20 世纪 80 年代以来, 国内外学者在矿井通风网络的可靠性研究之路上不断进行着有益的探索。徐瑞龙^[3]结合图论和可靠性理论对矿井通风网络进行了分析研究, 定义了风路和风网的可靠度, 并提出用通路法和半割集法计算风网可靠度, 从定量判别的角度分析了通风网络系统的可靠性。文献[4-6]提出了计算风网可靠度的不交和算法, Fong 等^[4]引入了路径集中独立集的概念, 使复杂、多路径的通风网络解算得以在计算机上实现, 但这些成果仅限于对风网解算的理论研究, 缺乏对风网可靠性的系统的、有效的分析, 因而不具有实际意义。周利华^[7]借鉴可靠性工程原理和不变化最小路集理论, 提出了以最大线性无关的不变化最小路集算法来简化

* 收稿日期: 2016-06-01

作者简介: 范凌云, 硕士研究生, 从事矿井通风研究; 谢贤平(通信作者), 副教授, 从事矿井通风研究, xyping@kmust.edu.cn。

通风网络可靠度的计算过程,利用该法可以大幅简化计算过程并减少计算量,也易于计算机编程实现。王洪德等^[8]运用网络流理论获得了风量分布规律,提出“删去留下”算法^[9-11]对风网最小路集进行不交化处理,求得其可靠度,但文中没有就风网最小路集的求解作详细的介绍,并且对于大型复杂网络,该法的适用性较差。

矿井通风网络是由各风路串联、并联、旁联混合组成的复杂网络,不能用简单的串、并联方法研究其可靠性^[8,12],因此本文以网络流理论为基础,运用统计学方法,对矿井通风网络进行可靠性研究。

1 网络流理论概述

网络流理论是拓扑数学的重要分支之一,也是图论的一个重要内容^[13]。在网络流理论中,图 G 可定义为

$$G = \{V, E\} \quad (1)$$

式中 $V = \{v_1, v_2, \dots, v_i, \dots, v_m\}$ 称为 G 的节点集, $m = |V|$ 是节点数, $E = \{e_1, e_2, \dots, e_i, \dots, e_n\}$ 称为 G 的边集, $n = |E|$ 是分支数,每条边又可表示为 $e_i = \langle v_s, v_t \rangle$ 。如图 1 所示, $V = \{v_1, v_2, v_3, v_4\}$, $E = \{e_1, e_2, \dots, e_5\}$ 。

利用网络流理论研究通风网络可靠度具有非常实际的意义,在风网中各汇交处与各分支的集合组成了风网的所有元素。解算风网中各分支的可靠度,可为进一步分析通风网络系统的可靠性奠定基础。

2 风路的可靠性研究

根据统计分析理论,风网中任一风路 i 的风量分布是指在任一时间段内,所测风量 q_i 的总体变化 $(q_i + \Delta q)$ 中,其处于设定的观测区间内外的风量值百分比。通过观察某一时间段内不同时刻的若干风量检测样本值 $(q_i + \Delta q)$,即可找出风量观测区间与所测样本值之间的关系,从而得到风量分布估计值。

2.1 风路可靠度分布密度函数

由风量统计样本集 $q_{i1}, q_{i2}, \dots, q_{im}$,通过拟合检验估计法近似估计风路 i 的可靠度分布密度函数。一般而言,风网中任一风路可靠度密度函数服从正态分布,即: $f(e_i) \sim N(\mu_i, \sigma_i^2)$ ^[8],列式为

$$f(e_i) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_i} e^{-\frac{(q_i - \mu_i)^2}{2\sigma_i^2}} \quad (2)$$

式中 e_i 为第 i 条风路, q_i 为风量随机观测样本值, μ_i 为正态分布总体均值, σ_i^2 为总体方差, σ_i 为标准差。

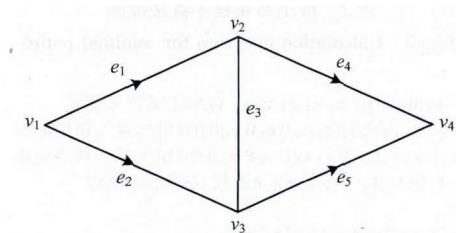


图 1 图的一般形式

Fig. 1 General form of the graph

在风路风量统计分析过程中,由观测所得有限个样本值经计算所得到的结果只是样本均值和方差。但根据数理统计有关知识,对于正态分布函数而言,其样本均值和方差分别是总体均值和方差的无偏估计量,故在实际计算中,可用前者分别代替后者。

2.2 风路可靠度度量指标

风路可靠度定义:在风网结构不变的条件下,风路 i 在各种影响因素作用下,于规定时间内,其风量值保持在合理范围 $[q_{i1}, q_{i2}]$ 内的概率,记作 $R_i(q_i)$ 。用式(3)表示。

$$R_i(e_i) = \int_{q_{i1}}^{q_{i2}} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_i} e^{-\frac{(q_i - \mu_i)^2}{2\sigma_i^2}} dq_i = \Phi(q_{i2}) - \Phi(q_{i1}) \quad (3)$$

式中 q_{i1}, q_{i2} 为风路风量的边界条件,常量,《金属非金属矿山安全规程》中对其有详细的规定。 q_{i1} 和 q_{i2} 可由式(4)求得。

$$q_{i1} = v_{i1} S_i; q_{i2} = v_{i2} S_i \quad (4)$$

式中 v_{i1}, v_{i2} 分别为第 i 条风路风速的上、下限, m/s; S_i 为第 i 条风路断面积, m^2 。

3 风网的可靠性研究

通风网络的可靠度是衡量其可靠性的唯一指标,也是衡量整个通风系统可靠性的重要指标之一。如图 1 所示,风网的可靠度可定义为:在任一时间段内,风流从源节点 v_1 流入,沿着任一条路径正常通风(至少有 1 条路径畅通),最后从汇节点 $v_m (v_4)$ 流出的概率。

3.1 风网可靠度的计算

在计算风网可靠度之前,需确定风网最小路集,最小路集法分析风网可靠度的思路是^[14]:设矿井通风网络系统总源节点到总汇节点之间有 c 条最小路,第 i 条最小路表示为 $L_i (i = 1, 2, \dots, c)$,找出系统中存在的所有最小路构成最小路集 $L = \{L_1, L_2, \dots, L_c\}$,由于每条最小路之间是有可能相交的,须用相容事件的全概率公式表示风网可靠度,即

$$R_s = P\left\{\bigcup_{i=1}^c L_i\right\} = \sum_{i=1}^c P\{L_i\} - \sum_{i < j=2}^c P\{L_i \cap L_j\} + \sum_{i < j < k=3}^c P\{L_i \cap L_j \cap L_k\} + \dots + (-1)^{c-1} P\left\{\bigcap_{i=1}^c L_i\right\} \quad (5)$$

式(5)共有 $2^c - 1$ 个代数求和(差)项,每一项又是其对应的各分支可靠度的连乘积,若当最小路集数 c 达到一定程度时,必出现严重的“组合爆炸”问题^[15]。为简化计算过程,可采用不交化的最小路集算法求得网络系统可靠性指标^[16-17],此法十分有效,目前已被广泛应用。

3.2 风网最小路集的求解

本文采用邻接矩阵算法来求得网络的最小路集。其原理为:设在图 G 中有 m 个节点,从源节点到汇节点依次编号为 $v_1, v_2, \dots, v_i, \dots, v_m$,为了减少矩阵计算复杂度,可设对应的连接 2 节点的 n 个分支分别为 $e_1, e_2, \dots, e_i, \dots, e_n$,用 m 阶方阵表示^[18]。

$$A^1 = (a_{ij}^{(1)})_{m \times m} \quad i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, m \quad (6)$$

称 A^1 为网络图 G 的邻接矩阵,有时为便于处理某些特殊问题(存在多并联分支的邻接矩阵),需把同一分支分解成 2 条(或以上)分支,其分界点也称为节点^[18]。 A^1 中的元素 $a_{ij}^{(1)}$ 有如下定义。

$$a_{ij}^{(1)} =$$

$\begin{cases} e_i & \text{当 } v_i \text{ 至 } v_j \text{ 间有分支 } e_i \text{ 连接时, 且风流方向 } v_i \rightarrow v_j \\ 0 & \text{当 } v_i \text{ 至 } v_j \text{ 间无分支连接或 } v_i = v_j, \text{ 或风流反向 } v_j \rightarrow v_i \end{cases}$

式中 $e_i = v_i v_j$, 又可定义 m 阶方阵。 $R = (r_{jk})_{m \times m}$ 为网络图 G 的终点矩阵, r_{jk} 有以下相似的定义。

$$r_{jk} = \begin{cases} v_k & \text{当 } v_j \text{ 至 } v_k \text{ 间有分支连接时, 且 } v_j \rightarrow v_k \\ 0 & \text{当 } v_j \text{ 至 } v_k \text{ 间无分支连接或 } v_j = v_k, \text{ 或 } v_k \rightarrow v_j \end{cases}$$

矩阵 A^1 包含了图 G 中所有长度为 1 的分支, 而矩阵 R 中的非零元素标示了图 G 中每一条边的终节点。在 A^1 与 R 间定义乘方运算以此产生另一新的矩阵。

$$A^2 = A^1 R = (a_{ik}^{(2)})$$

$$a_{ik}^{(2)} = \{ a_{ij}^{(1)} r_{jk} \mid j = 1, 2, \dots, m \} \quad (7)$$

邻接终点矩阵的乘法与一般矩阵的运算法则类似, 但在按式(7)进行矩阵的行和列元素相乘后, 若某项(新矩阵元素)中有的节点出现不止一次, 令该项取为 0。则 A^2 中的所有非零元素项表示图 G 中的所有长度为 2 的最小路。

以此类推, 邻接终点矩阵的 3 次方乃至高阶次方可表示为

$$A^3 = A^2 R$$

⋮

$$A^s = A^{s-1} \times R = (a_{ik}^{(s)})$$

$$a_{ik}^{(s)} = \{ a_{ij}^{(s-1)} r_{jk} \mid j = 1, 2, \dots, m \} \quad (8)$$

在有 m 个节点的通风网络中, 其任一最小路的长度小于或等于 $m-1$, 因此对于 A^s 而言, 若 $s \geq m$, 则必有 $A^s = 0$ 。根据以上定义, 图 1 含有 4 个节点, 只需列出邻接矩阵 A^1 、终点矩阵 R 及经乘方运算后的 A^2 、 A^3 , 即可求出最小路集。

$$A^1 = \begin{pmatrix} 0 & e_1 & e_2 & 0 \\ 0 & 0 & e_3 & e_4 \\ 0 & e_3 & 0 & e_5 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad R = \begin{pmatrix} 0 & v_2 & v_3 & 0 \\ 0 & 0 & v_3 & v_4 \\ 0 & v_2 & 0 & v_4 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

$$A^2 = \begin{pmatrix} 0 & e_2 v_2 & e_1 v_3 & e_1 v_4 + e_2 v_4 \\ 0 & 0 & 0 & e_3 v_4 \\ 0 & 0 & 0 & e_3 v_4 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

$$A^3 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & e_2 v_2 v_4 + e_1 v_3 v_4 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

从上面所列矩阵 A^2 、 A^3 中可知, 网络图 1 的最小路集为

$$L_c = \{ e_1 v_4, e_2 v_4, e_2 v_2 v_4, e_1 v_3 v_4 \} = \{ e_1 e_4, e_2 e_5, e_2 e_3 e_4, e_1 e_3 e_5 \}$$

3.3 基于 MATLAB 的最小路集算法编程的实现

在研究 3.2 节求解最小路集算法的原理后, 本文基于 MATLAB 平台开发并实现此算法的计算机程序, 可快速求解通风网络最小路集, 提高工作效率。其计算流程见图 2。

用 M 语言编写的代码如下:

```
function L = zxlj(A, R)
% zxlj.m 函数为通风网络最小路集求解;
% A 邻接矩阵;
% R 终点矩阵;
% L 最小路集矩阵;
m = length(A); % 确定 A 的长度
```

$L = \text{cell}(1, m-2);$ % 定义元胞数组矩阵, 用来存放最小路集结果

for $i = 1:(m-2)$

$A = A * R;$ % 计算 $A * R$

$L(i) = \{ A(1, m) \};$

end

$L = \text{subs}(L)$ % 表达式置换并输出 L

end

为了简化计算, 节省程序运行时间, 对于任一网络图 G , 若源节点为 v_1 , 汇节点为 v_m , 在编程计算时, 可以只输入 A^1 中的第一行元素, 接着求出 A^2 、 A^3 、 \dots 、 A^{m-1} 中第 1 行、第 m 列的元素, 即为最小路集。

现以图 1 为例, 经编程计算后, 得到程序运行结果, 见图 3。

3.4 基于改进的 BDD 算法求解风网不变化最小路集

3.4.1 不变化运算的重要定理

对于含有 m 个节点、 n 条边、 c 条最小路的网络图 G 。

定理^[19]: 设 L_1, L_2, \dots, L_c 为图 G 中包含的所有最小路集, L_c 的长度为 $m-1$, 可表示为: $L_c = v_1 v_2 \dots v_m = e_1 e_2 \dots e_{m-1}$, 则

$$\bigcup_{i=1}^c L_i = \bigcup_{i=1}^{c-1} L_i + e_1 e_2 \dots e_{m-1} \overline{e_m} \dots \overline{e_n} \quad (9)$$

式(9)右边两项是不相交的, 对于任一长度为 $m-1$ 的最小路, 只需在其中添加 $n-m+1$ 条该最小路中不出现的分支的逆, 这样所得事件就与其他所有最小路不变化。运用此定理优先对特定的路集进行不变化处理, 使其不参与后续计算, 从而减少运算量。

3.4.2 BDD 算法简介

1) BDD 的基本概念。

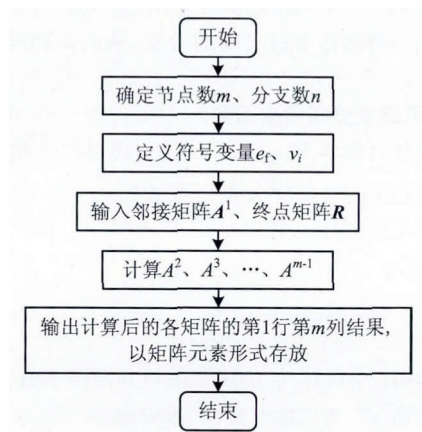


图 2 最小路集程序算法框图

Fig. 2 Calculation program for minimal paths

```
>> syms e1 e2 e3 e4 e5 v2 v3 v4;%定义符号变量
A=[0 e1 e2 0;0 0 e3 e4;0 e3 0 e5;0 0 0 0];%输入邻接矩阵
R=[0 v2 v3 0;0 0 v3 v4;0 v2 0 v4;0 0 0 0];%输入终点矩阵
L=zxlj(A, R) %调用zxlj.m函数,按回车键运行
L=
[e1*v4+e2*v4,e1*v3*v4+e2*v2*v4]
```

图 3 最小路集程序运行结果

Fig. 3 Testing results of minimal path sets

BDD(Binary Decision Diagram, 简称 BDD, 又称二叉决策图) 是采用具有标号的二叉树表示一个布尔逻辑函数^[20]的非循环图形, 图中每个分枝代表节点变量的一次取值(左枝赋值 1, 用实线表示; 右枝赋值 0, 用虚线表示), 叶节点代表布尔变量 e_i 。根节点(第一层变量) 到叶节点的每条分枝表示布尔函数中各变量的一次赋值。用此法解算复杂通风网络不交化最小路集是非常实用的^[16,21]。

2) BDD 算法求解通风网络系统可靠性的步骤。

a. 逻辑结构函数的表示。设风网共有 c 条最小路(L_1, L_2, \dots, L_c), 则系统逻辑结构函数为 $f = \sum_{i=1}^c L_i$ 。

b. 将 f 用 BDD 表示。为了减小 BDD 的子树数目, 对其生成顺序用如下方法化简^[11]。

①定义 f 中各变量 e_i 的长度 $L(e_i)$ 为布尔函数式中包含该变量的所有项的路数的最小值。

②取 $L(e_i)$ 为最小的变量进行 BDD 的 1—0 分枝。若有多个 $L(e_i)$ 相等时, 取在 f 中出现次数最多的变量 e_i 进行 1—0 分枝; 若次数相等, 可任取一变量分枝。

③搜索 BDD 中全部根节点到叶节点为 1 的路径, 即表示所有不交化的最小路集 $Y = \{S_1, S_2, \dots, S_p\}$ 。

④最后可根据相关公式求得矿井通风网络的可靠度 R_w 为:

$$R_w = \sum_{i=1}^p P\{Y\} \quad (10)$$

3.4.3 长度为 $m-1$ 的最小路的不交和优化

在对最小路集进行不交化处理时, 首先把图 G 中所有的最小路路长进行降(升)序排列, 选出长度为 $m-1$ 的最小路, 根据 3.4.1 节定理直接化为不交和。以图 1 为例, 其共有 $c=4$ 条最小路, 长度为 $m-1=3$ 的最小路分别为 $L_3=e_2e_3e_4$ 和 $L_4=e_1e_3e_5$ 。对于 L_3 , 整个图 G 中没有包含在其内的分支分别为 e_1 和 e_5 , 故 L_3 的不交化结果为 $L_{3dis}=e_1e_2e_3e_4e_5$ 。同理, L_4 的不交化结果为 $L_{4dis}=e_1e_2e_3e_4e_5$ 。经优化后, 其余最小路采用 BDD 算法化为不交和, 此方法克服了传统的 BDD 算法将所有最小路集一次性进行不交化所带来的运算量巨大的问题, 且 BDD 图中分枝树较少, 表示逻辑函数表达式中项数更少。通过对图 1 进行 BDD 的 1—0 分枝, 与传统 BDD 算法相比, 前者有 3 项, 后者有 5 项。通风网络系统越复杂, 项数差距越大。

4 风网可靠度实例分析

现以湖南省某铅锌矿某采区等效风网图(见图 4)进行可

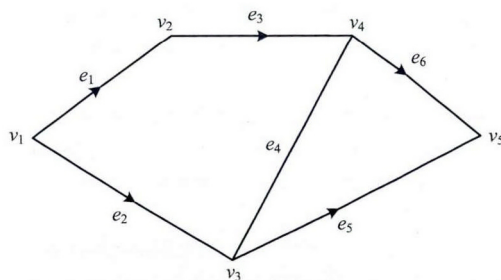


图 4 某采区等效通风网络图

Fig.4 Equivalent ventilation network diagram of a mining area

靠性分析。通过风量实时监测系统获得研究数据: 对各分支风量进行实地观测, 每一观测站每隔 4 min 测一次风量值, 每一分支全天 24 h 共获得 360 组风量监测数据。其中分支 e_1 的数据处理情况见表 1, 为节省篇幅, 其他分支风量数据从略。

1) 根据表 1 数据并通过分布函数的拟合检验可求得风路 e_1 的可靠度分布密度函数为

$$f(e_1) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\hat{\sigma}_1} e^{-\frac{(q_i - \hat{\mu}_1)^2}{2\hat{\sigma}_1^2}} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \times \frac{1}{3.152282} \times e^{-\frac{(q_i - 10.430558)^2}{2 \times 9.936880}}$$

式中 样本均值 $\hat{\mu}_1$ 和样本方差 $\hat{\sigma}_1^2$ 可分别代替总体均值 μ_1 和总体方差 σ_1^2 , 计算公式见式(11)。

$$\hat{\mu}_1 = \mu_1 = \sum_{i=1}^{20} (\bar{q}_i \omega_i) = 10.430558$$

$$\hat{\sigma}_1^2 = \sigma^2 = \sum_{i=1}^{20} [(q_i - \hat{\mu}_1)^2 \omega_i] = 9.936880 \quad (11)$$

2) 由《金属非金属矿山安全规程》中规定的各类型巷道的极限风速求得分支 e_1 的边界条件 q_{11} 和 q_{12} ; 再通过式(12)求得分支 e_1 的可靠度。

$$R_1(e_1) = \Phi(q_{12}) - \Phi(q_{11}) = \Phi(15) - \Phi(3) = 0.9260 - 0.0092 = 0.9168 \quad (12)$$

不可靠度为

$$F_1(e_1) = 1 - R_1(e_1) = 0.0832 \quad (13)$$

3) 其他分支的可靠度也可由同样方法求出, 经计算后列入表 2。

表 1 分支 e_1 的风量数据处理
Table 1 Air volume data processing of branch e_1

组号	组距下界/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	组距上界/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	组距中位数 q_i / ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	频数 M_i / 次	频率 ω_i
1	2	3	2.5	4	0.011 111
2	3	4	3.5	6	0.016 667
3	4	5	4.5	9	0.025 000
4	5	6	5.5	13	0.036 111
5	6	7	6.5	19	0.052 778
6	7	8	7.5	25	0.069 444
7	8	9	8.5	31	0.086 111
8	9	10	9.5	42	0.116 667
9	10	11	10.5	49	0.136 111
10	11	12	11.5	58	0.161 111
11	12	13	12.5	43	0.119 444
12	13	14	13.5	23	0.063 889
13	14	15	14.5	13	0.036 111
14	15	16	15.5	9	0.025 000
15	16	17	16.5	6	0.016 667
16	17	18	17.5	5	0.013 889
17	18	19	18.5	3	0.008 333
18	19	20	19.5	2	0.005 556

表 2 通风网络分支巷道可靠度计算表
Table 2 Reliability calculation table of ventilation network
branch tunnels

分支	e_1	e_2	e_3	e_4	e_5	e_6
$R_i(e_i)$	0.916 8	0.897 3	0.904 2	0.922 5	0.853 1	0.876 4
$F_i(e_i)$	0.083 2	0.102 7	0.095 8	0.077 5	0.146 9	0.123 6

4) 根据邻接终点矩阵法,通过 MATLAB 编程可求得网络图 4 的最小路集为

$$L_c = \{e_2e_5, e_1e_3e_6, e_2e_4e_6, e_1e_3e_4e_5\}$$

5) 预先对长度为 $m-1=4$ 的最小路进行不变化处理:

$$L_{dis} = e_1e_2e_3e_4e_5e_6。$$

6) 运用 BDD 算法求剩余长度小于 4 的最小路集: $L_i = \{e_2e_5, e_1e_3e_6, e_2e_4e_6\}。$

a. 定义通风网络系统的布尔函数: $f = e_2e_5 + e_1e_3e_6 + e_2e_4e_6。$

b. 将 f 用 BDD 表示,按照 3.4.2 节中 BDD 生成顺序的化简法: ①对于 f 中各变量而言, $L(e_1) = 3, L(e_2) = 2, L(e_3) = 3, L(e_4) = 3, L(e_5) = 2$; ②虽然 $L(e_2)$ 和 $L(e_5)$ 最小,但 e_2 出现次数最多,故取变量 e_2 ,对其分别赋值,进行 BDD 的 1—0 分枝,根据布尔函数基本性质

$$f_1^1 = e_5 + e_1e_3e_6 + e_4e_6; f_0^1 = e_1e_3e_6$$

分别重复以上步骤,依次进行 1—0 分解得

$$f_{11}^2 = 1; f_{10}^2 = e_1e_3e_6 + e_4e_6; f_{01}^2 = e_3e_6; f_{00}^2 = 0$$

$$f_{101}^3 = e_1e_3 + e_4; f_{100}^3 = 0; f_{011}^3 = e_6; f_{010}^3 = 0$$

$$f_{1011}^4 = 1; f_{1010}^4 = e_1e_3; f_{0111}^4 = 1; f_{0110}^4 = 0$$

$$f_{10101}^5 = e_3; f_{10100}^5 = 0; f_{101011}^6 = 1; f_{101010}^6 = 0$$

则该通风网络系统的二叉决策图见图 5。

c. 在图 5 搜索从根节点到确定值 1 的叶节点的所有路径,可得不变化逻辑结构函数。

$$f = e_2e_5 + e_2e_4e_5e_6 + e_1e_2e_3e_6 + e_1e_2e_3e_4e_5e_6$$

合并 L_{dis} ,可得到网络图 4 中所有不变化的最小路集 Y 。

$$Y = \{e_2e_5, e_2e_4e_5e_6, e_1e_2e_3e_6, e_1e_2e_3e_4e_5e_6, e_1e_2e_3e_4e_5e_6\}$$

7) 求该风网可靠度。

$$R_w = \sum_{i=1}^5 P\{Y\} = P\{e_2e_5\} + P\{e_2e_4e_5e_6\} + P\{e_1e_2e_3e_6\} + P\{e_1e_2e_3e_4e_5e_6\} + P\{e_1e_2e_3e_4e_5e_6\} = 0.7655 + 0.1066 + 0.0746 + 0.0074 + 0.0083 = 0.9624$$

查阅矿山资料,该可靠度安全级别符合规程要求,也与矿山实际情况相符。

5 结论

1) 以网络流理论为基础,运用统计学原理,在大量的风网风量实时监测数据的基础上,分析了风网中风流的变化趋势及风量分布规律,得到了通风系统中任一风路风量的分布密度函数,并以此推导出各风路的可靠度。

2) 采用终点邻接矩阵法求得风网最小路集并通过 MATLAB 编程实现此法,采用改进的 BDD 算法求解风网不变化最小路集,相比传统的 BDD 法有较大的优势,最后进行了风网可靠度实例验证,验证了该算法的实用性。

3) 当矿井巷道数量较多时,考虑到工作量,不需要对每一条巷道的可靠性指标都通过实地观测与计算来求得。在合理条件下,可将每一类巷道的可靠度认为是近似相等的,因此只需对典型巷道进行实时风量监测即可。

References(参考文献):

- [1] TAN Jialei(谭家磊), LI Chongshan(李崇山), ZHANG Xijun(张习军), et al. Feasibility of mine ventilation system BP network evaluation method [J]. *Journal of Safety and Environment* (安全与环境学报), 2006, 6(S1): 93-96.
- [2] XIE Xianping(谢贤平). *The application for artificial intelligence to the optimization design and control of mine ventilation systems* (人工智能在矿井通风系统优化设计与控制中的应用) [D]. Beijing: Beijing University of Science and Technology, 1997.
- [3] XU Ruilong(徐瑞龙). Reliability determination of ventilation network [J]. *Journal of Fuxin Mining Institute* (阜新矿业学院学报), 1985, 4(3): 31-39.
- [4] FONG C C, BUZACOTT J A. An algorithm for symbolic reliability computation with path-sets or cut-sets [J]. *IEEE Transactions on Reliability*, 1987, 36(1): 34-37.
- [5] HOLL R A, DINESH-MENDE L K, LIPSET M G, et al. Reliability analysis as a tool for evaluation and selection of open pit mining equipments [J]. *Foreign Metal Mining Magazine*, 2002(4): 33-35.
- [6] SIMODE E. Simulation of thermal & aerodynamic effects of a fire in a complex underground ventilation network [C] // *Proceedings of the 2nd Mine Ventilation Congress*, Reno, Nevada, November 5-8, 1979. Anaheim, California: American Society for Industrial Security, 1979: 23-25.
- [7] ZHOU Lihua(周利华). Calculation of system reliability for mine ventilation network based on Boolean manipulation and minimization algorithm in the independence minimal path sets [J]. *Systems Engineering-Theory & Practice* (系统工程理论与实践), 2004, 24(3): 134-138.
- [8] WANG Hongde(王洪德), LIU Zhentang(刘贞堂). Quantitative analysis and evaluation on reliability of mine ventilation network [J]. *Journal of China University of Mining & Technology* (中国矿业大学学报), 2007, 36(3): 371-375.
- [9] AGGARWAL K K, MISRA K B, GUPTA J S. A fast algorithm for reliability evaluation [J]. *IEEE Transactions on Reliability*, 1975, 24(1): 83-85.
- [10] ZHANG Junsheng(张俊生), ZHAO Meiliang(赵美良). Study on reliability of mine ventilation network system based on topological relations [J]. *Shanxi Coal* (山西煤炭), 2009, 29(4): 42-44.
- [11] MENG Xiangyun(孟祥允), CHEN Rihui(陈日辉), WANG Shibin(王时彬). Quantitative reliability analysis of mine ventilation system [J]. *Gold* (黄金), 2014, 35(7): 37-40.
- [12] JIA Jinzhang(贾进章), LIU Jian(刘剑), JIANG Kehan(姜克

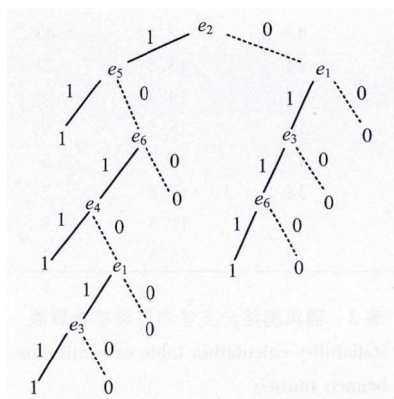


图5 通风网络系统的二叉决策图

Fig. 5 Binary decision diagram of ventilation network system

- 寒). Mathematical model for determination of airway reliability [J]. *Journal of Liaoning Technical University*(辽宁工程技术大学学报), 2005, 24(6): 801-804.
- [13] WANG Hongde(王洪德). Study of airflow control system during mine fire based on fluid network theory [J]. *Journal of Dalian Railway Institute*(大连铁道学院学报), 2005, 26(3): 59-63.
- [14] LOCKS M O. A minimizing algorithm for sum of disjoint [J]. *IEEE Transactions on Reliability*, 2009, 36(4): 445-453.
- [15] LI Yanjun(李艳军). Study on the reliability analysis method of mine ventilation system(矿井通风系统可靠性分析方法研究) [D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2008.
- [16] GAO Huisheng(高会生), ZHAN Jingyu(展敬宇), WANG Bo-ying(王博颖). Review of the path-based algorithm on network reliability [J]. *Netinfo Security*(信息网络安全), 2011(10): 28-31.
- [17] JIA Tinggui(贾廷贵), WANG Shugang(王树刚), QU Guona(曲国娜), et al. Research on the influence of airway sensitivity on the airflow stability of mine ventilation system [J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*(采矿与安全工程学报), 2012, 29(1): 140-143.
- [18] XU Zhuoyun(徐竹云). Optimization principle and design calculation of mine ventilation system(矿井通风系统优化原理与设计计算方法) [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1996.
- [19] CAO Jinhua(曹晋华), CHENG Kan(程侃). Introduction to reliability mathematics(可靠性数学引论) [M]. Beijing: Science Press, 1986: 89-93.
- [20] CAO Jinhua(曹晋华), LI Wei(李伟), LIU Bin(刘斌). Reliability theory, method & application(可靠性理论、方法及应用) [M]. Beijing: China Machine Press, 1994: 98-102.
- [21] SHI Yufang(史玉芳), LU Ning(陆宁), LI Huimin(李慧民). An algorithm of network system reliability based on an improved disjointed minimal path set [J]. *Computer Engineering & Science* (计算机工程与科学), 2011, 33(1): 31-35.

On the reliability of the mining ventilation network based on the network flow theory

FAM Ling-yun, XIE Xian-ping

(Faculty of Land Resource Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China)

Abstract: The present paper is devoted to a study of the reliability of the mining ventilation network based on the network operation theory. Actually, the reliability of such ventilation network should be considered as one of the key subsystems in the mine ventilation system. For this purpose, we have established a reliability evaluation model of ventilation network by joining the Network Flow theory with the actual characteristic features of the said system. And, then, we have also done dynamical monitoring activities in the real time and conducted the measurements of the air volume of every wind path and analyzed the variation trends of the air flow and distribution regularity of the air volume with the statistical method, thus, thus deciding and determining the air vol-

ume distribution density and function of each wind path in the system so as to infer the reliability index values of all the wind paths. Furthermore, we have developed and proposed a simplified adjacent terminal matrix by using the disjointed minimal path set of the network system and encoding it into the MATLAB program. Hence, based on the disjoint theory and the BDD algorithm, we have managed to improve on the minimal path set with different path lengths whereas the algorithm has been presented to build up the disjointed minimal paths in a simplified way in which different disjoint methods can be adopted. And, so, first of all, minimal paths of length should be disjointed so as for them not to be involved in the subsequent calculations and in turn to reduce effectively the amount of computation. Next, the rest of the minimal paths should also be disjointed by the BDD algorithm. Therefore, finally, it is necessary to further analyze the equivalent ventilation network diagram of a mining area in a lead-zinc mine in Hunan and prove the feasibility of the given study by accounting for the data and results. When compared with the traditional BDD algorithm which has to make all the minimal paths disjointed, the renovated method under study is in a position to solve the problem of huge amounts of operational research items involved, we have merely to apply the method to work out the quantitative analysis reliability of the ventilation network. The fewer tree branches in BDD diagram are involved with, the fewer items are involved too in the logic function expression and the ventilation network system, the greater the gap of the items can be seen. Thus, it can be seen that the method we have developed is qualified enough to serve as an appropriate reference to the assessment of the ventilation network system for the ordinary mines.

Key words: safety engineering; ventilation network system; network flow theory; reliability; MATLAB programming; disjointed minimal paths sets; BDD algorithm

CLC number: X751; TD725 **Document code:** A

Article ID: 1009-6094(2017) 05-1734-06