

文章编号: 0253-9993(2008)08-0946-05

# 基于监测覆盖范围的瓦斯传感器无盲区布置

孙继平<sup>1</sup>, 唐亮<sup>1</sup>, 陈伟<sup>1</sup>, 张博<sup>2</sup>, 朱宁<sup>2</sup>, 张向阳<sup>3</sup>

(1. 中国矿业大学(北京)煤炭资源与安全开采国家重点实验室, 北京 100083; 2. 中国矿业大学计算机科学与技术学院, 江苏徐州 221008; 3. 中国矿业大学(北京)信息工程研究所, 北京 100083)

**摘要:** 通过建立矿井通风网络的图论模型, 提出将监测范围作为传感器部署的理论依据, 以节点间风流流经时间作为监测等级, 应用覆盖度作为优选最佳测点标准, 基于 Dijkstra 算法和极小支配集算法求得传感器的最佳布点. 以一小型矿井通风网络为例, 求解瓦斯传感器的最优布点, 结果表明监测等级不同对应的安全等级也不同, 布点的数量、位置以及监测覆盖度也不同.

**关键词:** 瓦斯传感器; 图论; Dijkstra 算法; 极小支配集

中图分类号: TD76 文献标识码: A

## No-blind-zone placement of methane sensor based on monitoring coverage

SUN Ji-ping<sup>1</sup>, TANG Liang<sup>1</sup>, CHEN Wei<sup>1</sup>, ZHANG Bo<sup>2</sup>, ZHU Ning<sup>2</sup>, ZHANG Xiang-yang<sup>3</sup>

(1. State Key Laboratory of Coal Resources and Safe Mining, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China; 2. College of Computer Science and Technology, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, China; 3. Research Institute of Information Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China)

**Abstract:** By establishing graph model of mine ventilation network, monitoring scope was applied as the theory base, flowing time between nodes was used as monitoring level, optimum methane sensor placement could be resolved with coverage as the selection standard based on Dijkstra arithmetic and minimal dominant set arithmetic. By using a small mine as an example, methane sensor placement was optimized and the results show that different monitoring level leads to different safety level, number of methane sensors and coverage.

**Key words:** methane sensor; graph theory; Dijkstra arithmetic; minimal dominant set

目前, 安全规程<sup>[1]</sup>提出的传感器布置参数主要依赖于经验, 缺乏理论基础, 而且这些参数都是基于空间布置的, 对于整个矿井通风网络中传感器宏观布置的研究还比较少, 目前仅有对火源探测传感器布置的研究<sup>[2]</sup>. 本文正是基于这一点, 根据矿井通风网络结构, 结合图论的基本原理, 提出有效监测范围等概念, 从而实现了利用少数瓦斯监测点的数据反映整个通风网络瓦斯分布情况的目的, 得到监测点和通风网络各节点之间的瓦斯分布关系, 保证了监测性能和经济成本的统一.

### 1 监测覆盖范围法的基本原理

一般来说, 矿井通风网络中的下游节点能够反应上游节点空气瓦斯分布情况, 但是, 对于高瓦斯矿井或煤与瓦斯突出矿井, 一旦在某个节点处出现瓦斯突出的情况, 该节点就不能准确反应上游节点的瓦斯分布. 监测覆盖范围法首先是建立通风网络的有向正权图<sup>[3]</sup>, 计算相邻节点间的平均风流流经时间, 然后

收稿日期: 2007-10-15 责任编辑: 许书阁

基金项目: 电子信息产业发展基金重点资助项目(财建[2005]688号; 信部运[2005]555号); 国家发改委煤炭行业标准资助项目  
作者简介: 孙继平(1958—), 男, 山西翼城人, 教授, 博士生导师, 工学博士. Tel: 010-51733083, E-mail: sqcmt@163.com

根据相关算法求得网络中任意两节点间的最短流经时间, 建立有效监测矩阵, 通过求解极小支配集<sup>[4]</sup>得到最小全覆盖监测点集合, 若该集合多于一个, 则计算各集合的覆盖度, 覆盖度最大的最小全覆盖监测点集合选作为监测点.

## 2 问题的数学描述

### 2.1 相邻节点时间矩阵

相邻节点总有一个节点处于上游, 一个节点处于下游, 正常情况下两相邻节点之间的风流是稳定的, 因此风流流经相邻节点的时间也是固定的. 相邻节点时间矩阵  $N$  为

$$N = \begin{bmatrix} N(1,1) & N(1,2) & \cdots & N(1,n) \\ N(2,1) & N(2,2) & \cdots & N(2,n) \\ N(3,1) & N(3,2) & \cdots & N(3,n) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ N(n,1) & N(n,2) & \cdots & N(n,n) \end{bmatrix},$$

其中,  $n$  为风网中的节点总数;  $N(i, j)$  ( $i, j \in \{1, \dots, n\}$ ) 为两相邻节点平均风流流经时间, 其中  $i$  为上游节点,  $j$  为下游节点. 若两节点不相邻或没有风流流经, 则  $N(i, j)$  取为  $\infty$ , 否则  $N(i, j) = l(i, j)/u(i, j)$ , 其中,  $l(i, j)$  是两节点之间的长度;  $u(i, j)$  是两节点间的平均风流速度.

### 2.2 任意两节点时间矩阵

这里任意两节点的时间是指风流流经的最短时间. 根据通风网络结构, 以巷道中风流方向为弧的方向, 以上节求出的时间作为弧的权值, 建立有向正权图  $G = (V, E, W)$ , 然后求解任意两节点的风流流经最短时间, 建立时间矩阵  $S$ . 目前求解最短路径的方法有 Dijkstra, Floyd - Warshall, Prim 等方法, 其中 Dijkstra 方法的适用条件为单源最短路径, 所有边权为非负的有向图, 而且 Dijkstra 算法简捷、运算时间短, 因此本文采用 Dijkstra 方法作为求解最短路径的最佳方法.

### 2.3 瓦斯有效监测矩阵

给定监测有效级  $M_s$ , 若  $S(i, j) > M_s$ , 说明节点  $i$  不能及时有效监测节点  $j$  的瓦斯情况, 反之, 若  $S(i, j) < M_s$ , 说明节点  $i$  能及时有效监测节点  $j$  的瓦斯情况. 接着可建立瓦斯有效监测矩阵  $E$ , 矩阵元素  $E(i, j)$  取值: 若  $S(i, j) > M_s$ , 则  $E(i, j) = 1$ ; 若  $S(i, j) < M_s$ , 则  $E(i, j) = 0$ .

### 2.4 最小全覆盖监测点集合<sup>[5]</sup>

根据瓦斯有效监测矩阵  $E$  可以得到任一节点  $i$  的有效监测范围, 是指在给定有效监测级下瓦斯从某处涌出到通风网络中所有节点的集合, 可表示为  $W(i) = \{k \mid E(k, i) = 1, i, k \in V\}$ .

选择瓦斯监测点的集合, 该集合应满足以下 3 个条件<sup>[6-7]</sup>: ① 给定有效监测级  $M_s$  下, 该瓦斯监测点集合所能监测到的节点的集合必须能够覆盖风网中的所有节点, 即  $s_{et} = \{k \mid \sum W(k) = v\}$ ; ② 满足①中条件的集合可能有多个, 应选择瓦斯监测点数量最少的一个集合 (最小全覆盖监测点集合), 即  $s_{etmin} = \min\{s_{et} \mid \sum i\}$ ; ③ 满足②的集合可能有多个, 定义监测覆盖度  $C_{ov} = \sum_{k \in s_{etmin}} \sum_{i=1}^n E(i, k)$ .

监测覆盖度越大, 瓦斯监测的可靠性就越大. 应选取监测度最大时所对应的节点集合作为最小全覆盖监测点.

## 3 算 法

### 3.1 Dijkstra 算法

建立相邻节点时间矩阵后需要求解风路中任意两节点间风流流经的最短时间, 可用 Dijkstra 算法求



根据 Dijkstra 算法求得任意两节点时间矩阵  $S$  为

$$S = \begin{bmatrix} 0 & 1\,525.00 & 1\,938.37 & 2\,173.91 & 2\,206.23 & 2\,720.94 & 2\,560.27 & 3\,030.86 & 3\,182.37 & 2\,662.96 \\ \infty & 0 & 413.27 & 2\,000.00 & 681.13 & 1\,195.84 & 2\,386.36 & 2\,856.95 & 3\,008.46 & 1\,137.86 \\ \infty & \infty & 0 & 3\,809.52 & 267.86 & 782.57 & 4\,195.88 & 806.32 & 957.83 & 724.59 \\ \infty & \infty & \infty & 0 & \infty & 1\,311.09 & 386.36 & 856.95 & 1\,008.46 & 1\,298.32 \\ \infty & \infty & \infty & \infty & 0 & 514.71 & \infty & 538.46 & 689.97 & 979.83 \\ \infty & \infty & \infty & \infty & \infty & 0 & \infty & 311.88 & 463.39 & 753.25 \\ \infty & \infty & \infty & \infty & \infty & 924.37 & 0 & 470.59 & 622.10 & 911.96 \\ \infty & 0 & 151.51 & 441.37 \\ \infty & 0 & 289.86 \\ \infty & 0 \end{bmatrix}$$

若取有效监测级  $M_s = 700S$ ，以节点 8 为例， $S(5, 8)$ ， $S(6, 8)$ ， $S(7, 8)$ ， $S(8, 8)$  小于 700，说明在给定有效监测级  $M_s = 700S$  条件下，节点 8 可以有效监测节点 5, 6, 7, 8。可得瓦斯有效监测矩阵  $E$  为

$$E = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

通风网络中 10 个节点的有效监测范围： $W(1) = \{V_1\}$ ； $W(2) = \{V_2\}$ ； $W(3) = \{V_2, V_3\}$ ； $W(4) = \{V_4\}$ ； $W(5) = \{V_2, V_3, V_5\}$ ； $W(6) = \{V_5, V_6\}$ ； $W(7) = \{V_4, V_7\}$ ； $W(8) = \{V_5, V_6, V_7, V_8\}$ ； $W(9) = \{V_5, V_6, V_7, V_8, V_{10}\}$ ； $W(10) = \{V_8, V_9, V_{10}\}$ 。

因为节点 1 为通风入口，所以在考虑监测点时将该点除去，考虑余下的 9 个节点，根据前述算法，可得最小全覆盖监测点集合： $s_{\text{etmin}}A = W(3) + W(4) + W(9) + W(10)$ ； $s_{\text{etmin}}B = W(3) + W(7) + W(9) + W(10)$ ； $s_{\text{etmin}}C = W(4) + W(5) + W(9) + W(10)$ ； $s_{\text{etmin}}D = W(5) + W(7) + W(9) + W(10)$ 。这 4 个最小全覆盖点集合均能覆盖通风网络中所有节点，因此还应从监测覆盖度来选择： $C_{\text{ov}}(s_{\text{etmin}}A) = 2 + 1 + 5 + 3 = 11$ ； $C_{\text{ov}}(s_{\text{etmin}}B) = 1 + 3 + 5 + 3 = 12$ ； $C_{\text{ov}}(s_{\text{etmin}}C) = 2 + 2 + 5 + 3 = 12$ ； $C_{\text{ov}}(s_{\text{etmin}}D) = 3 + 2 + 5 + 3 = 13$ 。监测覆盖度越大，其监测可靠性也就越大，因此应选择  $s_{\text{etmin}}D$  作为最佳布点集合。取不同监测等级，监测等级为 500 时，布点位置为 3, 5, 7, 8, 10，覆盖度为 12；监测等级为 700 时，布点位置为 5, 7, 9, 10，覆盖度为 14；监测等级为 1 000 时，布点位置为 5, 8, 10，覆盖度为 16。

## 5 结 论

(1) 传统布置传感器都是根据相关安全规程的要求在空间上进行部署，笔者从增加传感器覆盖范围的角度出发，将矿井通风网络及节点为研究对象，以节点间风流流经时间作为监测等级，利用 Dijkstra 算法以及最小支配集算法解得传感器布置的最佳位置。

(2) 监测等级越低，布点监测灵敏度越高，安全性就越高，所需布点即传感器数量越多，但覆盖度相对较低；反之，监测等级越高，布点监测灵敏度越低，安全性就越低，所需布点即传感器数量越少，但覆盖度相对较高。

(3) 在实际的工程应用中, 为了保证更加健全的安全性, 还应在长巷道中按照一定的距离选择备选布点参与优化, 而不是仅仅选择不同巷道的交汇点作为备选布点。

#### 参考文献:

- [1] 孙继平. 矿井安全监控系统 [M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2006: 38 - 39.  
Sun Jiping. The safety monitoring system of mine [M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 2006: 38 - 39.
- [2] 刘 伟, 周心权, 谭文辉, 等. 用分区法优化布置火源探测传感器的研究 [J]. 煤炭工程师, 1998 (4): 4 - 6.  
Liu Wei, Zhou Xinquan, Tan Wenhui, et al. Research on optimized arrangement of sensors for fire source detection by zoning method [J]. Mining Safety & Environmental Protection, 1998 (4): 4 - 6.
- [3] 蒋长浩. 图论与网络流 [M]. 北京: 中国林业出版社, 2001: 154 - 156.  
Jiang Changhao. Graph theory and net flow [M]. Beijing: China Forest Press, 2001: 154 - 156.
- [4] 卢开澄, 卢华明. 图论及其应用 (第二版) [M]. 北京: 清华大学出版社, 1996: 206 - 210.  
Lu Kaicheng, Lu Huaming. Graph theory and its applications [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1996: 206 - 210.
- [5] 周书葵. 城市供水 SCADA 系统管网监测点优化布置的研究 [D]. 长沙: 湖南大学, 2003: 66 - 67.  
Zhou Shukui. Study on optimal location of flow measurement station in urban water system [D]. Changsha: Hunan University, 2003: 66 - 67.
- [6] Harmancioglu N B, Alpaslan N. Basic approaches in design of water quality monitoring networks [J]. Water Science Technology, 1994, 30 (9 - 10): 49 - 56.
- [7] Johannes H Andersen, Roger S Powell. Implicit state-estimation technique for water network monitoring [J]. Urban Water, 2000, 2 (2): 123 - 130.
- [8] 马娜蕊. 求最短道路的改进方法 [J]. 航空计算技术, 2003, 33 (3): 27 - 29.  
Ma Narui. An improving method in the shortest path [J]. Aeronautical Computer Technique, 2003, 33 (3): 27 - 29.
- [9] 苏 芳. 图的支配集的有效算法 [J]. 台州学院学报, 2003, 25 (6): 1 - 3.  
Su Fang. Efficient algorithms of the dominant set of graphs [J]. Journal of Taizhou University, 2003, 25 (6): 1 - 3.
- [10] 王慧宾. 矿井通风网络理论与算法 [M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1996: 142 - 143.  
Wang Huibin. Theory and algorithm of mine ventilation network [M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 1996: 142 - 143.

## 中国首辆新型煤矿专用防爆指挥车生产下线

2008-07-28 中国首辆新型煤矿专用防爆指挥车在湖北省十堰市生产下线。并创下了 3 个国内第 1: 国内第 1 家企业生产出高标准的煤矿专用防爆指挥车; 第 1 次采用无桥式的汽车底盘技术; 第 1 次采用无锁防滑差速传动装置技术。

这种煤矿专用防爆指挥车采用的是防暴发动机、防暴排气管、防暴油箱、防暴供水系统、防暴灯具和防暴线路, 传动方式采取“八字形”无桥式的高通过能力差速分动装置, 悬挂系统采用曲轴式拉杆, 确保了车辆在极其恶劣的环境下平稳行驶。

中国是一个以煤炭为主要能源的国家, 瓦斯爆炸问题长期困扰着所有煤炭企业, 国家安全生产监督管理部门要求煤炭开采企业陆续配备专用的煤矿防爆指挥车, 以备抢险救急之用。这类专用指挥车要求车身高度尽可能低、车辆离地间隙尽可能大、各部件之间的运动摩擦不能产生火花、排气温度极低、通过能力极强。