

安全技术及工程

基于子图同构的煤矿通风系统高风险区域识别

闫振国^{1,2},常心坦^{1,2},范京道²,王延平¹,赵鹏翔¹

(1.西安科技大学 安全科学与工程学院,陕西 西安 710054;

2.国家安全生产监督管理总局 煤矿智能化开采技术创新中心,陕西 黄陵 727307)



扫码移动阅读

摘要:为了找出角联巷道因风流不稳定导致的危险性较高区域,提出了一种基于子图同构的煤矿高风险区域自动识别方法。分析了典型高危区域的拓扑结构特性,构建了高风险区域的等效图模型;实现了通风系统的属性图转换、高风险区域的等效图例化,在子图同构算法的基础上建立了识别煤矿中的高风险区域的方法,可根据风网结构和巷道属性在复杂的通风网络中自动识别出其中的风险区域。通过对黄陵二号矿煤层自然发火高风险区域的识别,验证了方法的正确性和有效性。

关键词:矿井通风系统;高危区域识别;等效结构图;子图同构

中图分类号:TD725

文献标志码:A

文章编号:0253-2336(2018)11-0063-06

Recognition on high risk region of mine ventilation system in coal mine based on subgraph isomorphism

YAN Zhenguo^{1,2}, CHANG Xintan^{1,2}, FAN Jingdao², WANG Yanping¹, ZHAO Pengxiang¹

(1. School of Safety Science and Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China;

2. Innovation Center of Intelligent Mining Technology in Coal Mine, State Administration of Work Safety, Huangling 727307, China)

Abstract: In order to find out the high risk area caused by unstable wind flow in the diagonal branches, an automatic recognized method of the high risk region in the coal mine was provided based on the subgraph isomorphism. The paper had an analysis on the topology structure features of the typical high risk region and the equivalent graph model of the high risk region was established. The attributed graph of the ventilation system in the mine and the equivalent specialization of the high risk region were realized. Based on the subgraph isomorphism calculation, the recognition method of the high risk region in the coal mine was established. High risk area in a complex ventilation network could be automatically identified according to both structure and attributes of the roadway. With the recognition of the spontaneous combustion high risk region in the seam of Huangling No.2 Mine, the accuracy and efficiency of the method was approved.

Key words: mine ventilation system; high risk region recognition; equivalent structure graph; subgraph isomorphism

0 引言

随着采煤生产活动和巷道掘进施工的进展,煤矿的通风系统也在不断变化,许多区域的风险程度也在不断变化。特别是角联巷容易出现风流不稳、系统可靠性变差的情况^[1-2],进而导致瓦斯积聚、风

流反向等安全隐患。同时在矿井通风系统稳定性分析和评价中,矿井通风可靠性也是重要的安全指标^[3-5]。角联风路的风流不稳定对通风系统的可靠性影响大,是优化通风网络的主要对象^[6],被普遍认为可能是一种高危区域^[7-8],引起了学者们的注意和研究。

收稿日期:2018-07-08;**责任编辑:**王晓珍 **DOI:**10.13199/j.cnki.cst.2018.11.010

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金资助项目(51604219)

作者简介:闫振国(1975—),男,山西交城人,讲师,博士。E-mail: yzg_wa@163.com

引用格式:闫振国,常心坦,范京道,等.基于子图同构的煤矿通风系统高风险区域识别[J].煤炭科学技术,2018,46(11):63-68.

YAN Zhenguo, CHANG Xintan, FAN Jingdao, et al. Recognition on high risk region of mine ventilation system in coal mine based on subgraph isomorphism[J]. Coal Science and Technology, 2018, 46(11): 63-68.

对角联巷道的自动识别:赵千里等^[9]采用通路集合运算的方法建立了 MVSS 角联风路自动识别算法;刘新等^[10]提出了确定网络全部角联结构的基于无向图的路径集合算法;赵丹^[11]提出了基于并行思想的角联结构自动识别的数学模型及算法;蔡峰^[12]提出了节点位置法,能够避免通路法搜索所有通路耗时过长的问题;范凌云^[13]将具有共同风量的分支分解为若干条具有等值风阻的分支巷道用于简化角联;张浪对节点位置法增加了一项判断准则,避免了算法的一些可能的错误识别现象;司俊鸿等^[14]提出了寻找角联结构的独立不相交通路法,并提出了角联的分级递归识别算法。

上述研究能够对角联结构进行有效识别,但随着通风系统的复杂化,所含风路数量快速增加,如潘一矿的风路数量仅比潘三矿的风路数量增加了 35 条,通路集中的通路数量由潘三矿的 10 625 条增加到 28 505 条^[12]。同时角联等可能的风险区域也大幅增加,大明一矿 213 条风路,角联风路有 196 条,占总风路数量的 92%^[15],但从理论分析和实践可知,其中只有很少一部分具有危险性。因此,既要从复杂的通风网络中找出可能具有高风险的结构,如角联等;也要对这类区域内的一系列巷道的属性信息进行分析,如风量、风压等,这样才能有效辨识出一个区域的风险高低。

1 煤矿高风险区域识别的内涵

为了识别出高风险区域需要先进行准确的描述,包括拓扑结构和属性信息。如图 1 所示, e_5 巷为该结构中的角联巷,只有当节点 v_2 和 v_3 之间风压差比较小, e_1 — e_4 巷道由于通风构筑物或人员、车辆的运行而导致风阻的显著变化时,才会出现风向和风量的不稳定,发生风流反向,并有导致瓦斯异常积聚的可能。而一般情况下 e_5 巷没有危险性且能降低通风阻力,增加局部调风灵活性。

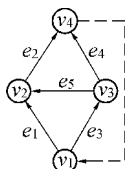


图 1 典型的角联通风区域

Fig.1 Typical diagonal branches area

因此,针对高风险区域识别所需的巷道连接和属性信息,建立基于图论的属性图模型: $G = \{V, E, A\}$, 其中 V 为风网节点集合; E 为巷道的集合; A 为

属性集合,其中 $A_{\text{Type}}(e_i)$ 表示巷道 e_i 的类型、 $A_{\text{Structure}}(e_i)$ 表示巷道 e_i 的构筑物、 $A_P(e_i)$ 表示巷道 e_i 的风压、 $A_Q(e_i)$ 表示巷道 e_i 的风量、 $A_D(e_i)$ 表示巷道 e_i 的风向、 i 表示巷道序号。且有

$$A(e_i) = \{A_{\text{Type}}(e_i), A_{\text{Structure}}(e_i), A_P(e_i), A_Q(e_i), A_D(e_i)\}$$

在高风险区域的识别时,将大量高风险区域抽象为少量的等效图并建立等效图库;然后在识别过程中将等效图转换为具体的属性图;基于子图同构算法和属性匹配构建识别方法,如图 2 所示。

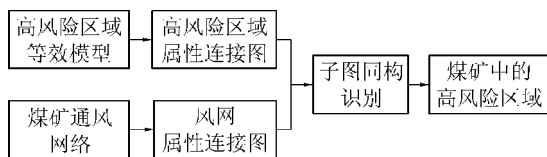


图 2 高风险区域自动识别思路示意

Fig.2 Automatic identification of high risk areas process

2 高风险区域等效图模型

高风险区域种类繁多,每一类高风险区域是具有相同特性高风险区域的代表,但并不是一个固定的结构,为了将一类高风险区域抽象而清晰地表达建立等效图模型。

如图 3 所示的 3 种不同情况都是角联巷道区域,每个图的节点数量和连接形式并不完全相同,但本质上都是角联结构。

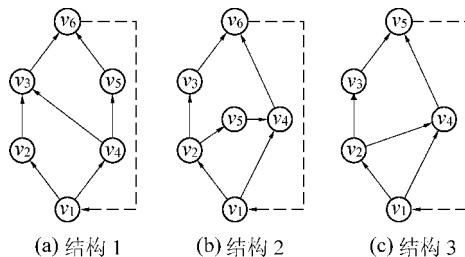


图 3 角联巷道区域的多种情况

Fig.3 Different forms of diagonal branches area

将这些共性结构加以综合,建立能涵盖多种情况的等效图,如图 4 所示。将多类高风险区域抽象为等效图模型,形成典型高风险区域库,用 $G_F = \{G_{f(1)}, G_{f(2)}, \dots, G_{f(m)}\}$ 表示 m 种典型高风险类型,

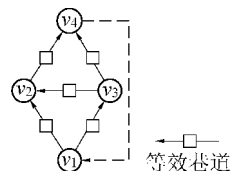


图 4 典型角联巷道的等效图模型

Fig.4 Typical equivalent structure graph of diagonal branches

其中 $G_{f(2)}$ 表示第2种典型高风险类型。既是对煤矿危险性的总结,也可用于后续高风险区域的识别。

如图4所示,一个等效图模型中,在有可能出现变化的位置用等效巷道代表,等效巷道可以是实际中的一条巷道也可以是一个子结构。在实例化的过程中可转变为包含任意多个节点的通路,这样的等效图能表示有相同拓扑特征的多种不同具体形式的区域。在进行巷道属性判断匹配时,将该子图作为一个整体,计算其等效风阻、风量等属性。

3 基于子图同构的高风险区域识别

高风险区域识别包括属性匹配和拓扑同构2种判断。当巷道的属性值在一定范围则认为属性匹配,当巷道所有属性均匹配时,巷道属性匹配。

拓扑结构相同判断以子图同构进行,用属性图表示风网后,图的子图同构即找到一种图中各边(分支)之间的映射,使得节点在该映射下也保持对应。通过子图同构在通风网络中找到了一种高危区域时,且其中对应巷道属性匹配,则说明该通风网络对应的煤矿中有这样的高风险区域。

3.1 高危角联等效图实例化

先将待分析的矿井通风网络转换为属性图 G_T , 作为子图同构分析中的大图,将其中的巷道表示为集合 E_T , 巷道属性信息表示为 $A(e_i)$ 。然后从高风险区域库 G_F 中取出第1种等效图 $G_{f(1)}$, 转换为可对比分析的属性图。由于每种等效图又可实例化为多种具体情况,将 $G_{f(1)}$ 表示的第1种类型的高风险区域转化为属性图实例集合 $\{G_{f(1,1)}, G_{f(1,2)}, \dots, G_{f(1,n)}\}$, $G_{f(1,n)}$ 表示第1种类型高风险区域的第 n 种高风险实例。每个高风险区域实例如 $G_{f(1,1)}$, 其节点集为 $V_{f(1,1)}$, 节点数为 $|V_{f(1,1)}|$, 巷道集为 $E_{f(1,1)}$, 巷道数量为 $|E_{f(1,1)}|$, 如图5、图6所示。

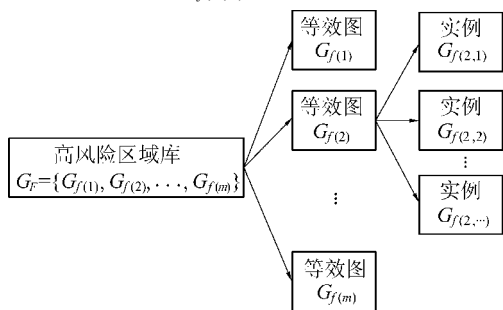


图5 高风险区域库实例化过程

Fig.5 High risk areas instantiation process

通过将等效巷道实例化为子结构来实现。

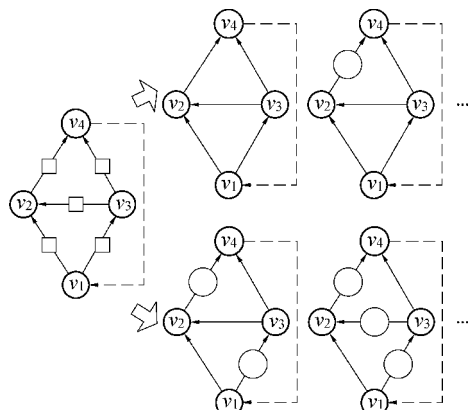


图6 角联区等效图实例化方法

Fig.6 Typical diagonal branches areas instantiation process

需要指出的是,一个典型结构可能对应多种具体的情况。将所有的可能性都列出,既无法做到也没有实际意义。因此,在高风险区域识别过程中,需要对高风险区域进行有限次转换,即对每一条等效巷道增加有限数量的节点。

3.2 高风险区域的巷道属性匹配

高风险区域中巷道的属性匹配包括定性匹配和定量匹配。

定量匹配:巷道属性值处于典型高风险区域的范围之内则认为是匹配的。设巷道属性范围上下限为 $A(e_i)_{\max}$ 和 $A(e_i)_{\min}$, 判断式为

$$\text{Fit}(A_j(e_k), A_j(e_i)) = \begin{cases} 1 & (A_j(e_i)_{\min} \leq A_j(e_k) \leq A_j(e_i)_{\max}) \\ 0 & (\text{其他}) \end{cases} \quad (1)$$

其中, $A_j(e_k)$ 为巷道 e_k 的第 j 个属性,可为巷道类型 $A_{\text{Type}}(e_k)$ 、巷道构筑物 $A_{\text{Structure}}(e_k)$ 、巷道风压 $A_p(e_k)$ 、巷道风量 $A_q(e_k)$ 、巷道风向 $A_d(e_k)$ 中的一种。

定性匹配:巷道定性属性为字符串或布尔值时,在匹配时以是否一致进行比较,如下式所示:

$$\text{Fit}(A_j(e_k), A_j(e_i)) = \begin{cases} 1 & (A_j(e_k) = A_j(e_i)) \\ 0 & (A_j(e_k) \neq A_j(e_i)) \end{cases} \quad (2)$$

3.3 基于 Ullman 同构算法的高风险区域识别

Ullman 算法^[15]是一种经典的子图同构分析方法,应用广泛^[16-17]。基于 Ullman 方法的高风险区域检验过程如下:建立待分析煤矿的通风网络属性图 G_T , 并从高风险区域库实例化一个高风险图 $G_{f(k,l)}$, 以2个图为基础建立子图同构映射布尔矩阵 M 。映射矩阵 M 中一个元素 m_{ij} ($0 \leq i \leq |V_{f(k,l)}|$),

一个角联高风险区的实例化过程如图6所示,

$0 \leq j \leq |V_T|$), $|V_{f(k,l)}|$ 为高风险实例的节点数; $|V_r|$ 为待分析煤矿的通风网络属性图节点数, 取值为 0 或 1。当 $m_{ij} = 1$, 则表示图 $G_{f(k,l)}$ 的第 i 个节点和图 G_r 的第 j 个节点相对应。如果一个映射矩阵 M 满足: ①每行有且只有一个元素为 1; ②每列最多有一个元素为 1。则待分析煤矿的属性图 G_r 和高风险实例图 $G_{f(k,l)}$ 子图同构成立。即该煤矿通风系统中有 $G_{f(k,l)}$ 表示的高危区域。

映射矩阵 M 的构建以节点的度为依据, 如果大图节点所连接的边数小于小图对应节点的连接边数, 则不可能匹配。根据式 (3) 建立映射矩阵 M 初始状态 M^0

$$m_{ij}^0 = \begin{cases} 1 & (\text{节点 } v_j \text{ 的度大于节点 } v_i \text{ 的度}) \\ 0 & (\text{其他}) \end{cases} \quad (3)$$

高风险区域识别算法的输入为: 矿井通风网络图 G_r , 高风险区域实例图 $G_{f(k,l)}$, 初始化矩阵 M^0 。过程为: ①进行初始化, 按公式 (3) 建立初始化映射矩阵 M ; 初始化搜索深度 d 为 1; 初始化当前深度选择的列为空, 回溯 backtrack 设为“真”; 所有选择标示 F_i 设为空; ②选 G_r 中的一个节点 k , 搜索深度 d , 遍历映射矩阵 M^0 中的元素 $m_{d,k}$; ③在映射矩阵 M^0 的第 d 行找值为 1 的元素 $m_{d,k}$, 且当前列还未被遍历过程选中, 则将该行其他元素都变为 0, 回溯标示置为“假”; ④如果所有行都被搜索, 且映射矩阵产生的巷道对应关系满足属性匹配, 则算法停止输出映射矩阵 M ; ⑤如果回溯 backtrack 为“真”则取消当前列的被选中状态, 搜索深度减一, 并重载上次迭代的映射矩阵和选中的列; ⑥如果回溯 backtrack 为“假”, 则对当前行选中的列和映射矩阵进行存储, 深度加一; ⑦重置回溯标示 backtrack 为真; ⑧当 d 为 0 表明识别失败, 没有找到高风险区域, 如 d 不为 0 则返回第 2 步。

3.4 矿井高风险区域识别过程

将高风险区域识别算法与高风险区域等效图实例化过程相结合, 才能够在一个矿井通风网络中无遗漏地识别出各种高风险区域。具体流程如图 7 所示。

4 实例分析

选取黄陵二号煤矿作为实例, 该煤矿采用斜井开拓方式, 单煤层单水平开拓, 分区式通风, 设计生产能力为年产 700 万 t。通过对以往的生产安全状况和灾害情况进行分析, 辨识出一种容易引起煤层自然发火的高风险区域, 其拓扑结构如图 8 所示。

经分析该类型区域容易导致煤层自然发火的原因是: ①由于巷道 e_1 、 e_2 是进风大巷, 而 e_3 、 e_4 是回风大巷, 导致节点 v_2 和 v_5 间的风压差很大; ②巷道 e_5 为煤巷, 有瓦斯涌出; ③巷道 e_5 中有通风构筑物 (密闭墙), 巷道风量很小。

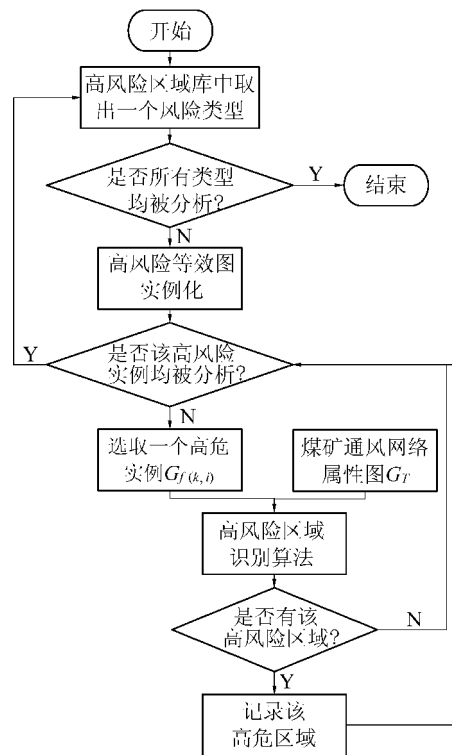
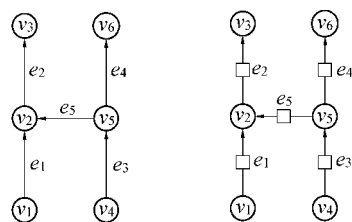


图 7 煤矿高风险区域识别过程

Fig.7 Identification of high risk areas in coal mine



(a) 典型高风险区 (b) 典型高风险区等效图

图 8 一种自然发火高风险区域的典型模型示意

Fig.8 A typical structure of spontaneous combustion risk area

由于矿压的长期作用, 巷道 e_5 的煤壁变酥, 而巷道 e_5 的密闭墙两侧压差很大, 通过密闭墙周边煤壁裂隙的漏风量增大, 在煤壁裂隙深部为煤层创造了微量供风自热的条件; 同时煤壁裂隙的增加也有利于煤壁瓦斯涌出量的增加, 与该巷道风量较小的条件相耦合, 也容易形成局部瓦斯积聚。因此, 该模型代表了一类典型的高风险区域。

根据该矿多年的经验, 总结得出如图 8 所示的等效结构图, 在此基础上以巷道 e_5 的属性为主建立

起高风险原因的属性值,其中:类型 $A_{\text{Type}}(e_i)$ 为煤巷;构筑物 $A_{\text{Structure}}(e_i)$ 为密闭墙或风门;风压 $A_p(e_i)$ 为 800 Pa 以上;风量 $A_Q(e_i)$ 为 $2\text{ m}^3/\text{min}$ 以下。该组属性值在下文中称为“煤巷自然发火高风险模型”。

以该“煤巷自然发火高风险区域”为等效图,采用所提出的识别方法对黄陵二矿进行分析。

1)从拓扑结构角度入手,得出该网络有 13 个类似的高风险结构,见表 1。

表 1 黄陵二矿自然发火高风险巷道属性信息
Table 1 Properties of high spontaneous combustion risk lanes in Huangling No.2 Coal Mine

巷道编号	区域内巷道	巷道类型	构筑物	风压/ Pa	风量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$)
109	104, 107 522, 521	煤巷	风门	1 511	0.550
121	120, 118 522, 521	煤巷	风门	1 475	1.717
134	520, 521 133, 122	煤巷	风墙	1 236	1.572
139	520, 518 133, 138	煤巷	风墙	1 219	1.234
149	148, 143 520, 518	煤巷	风墙	1 210	0.492
166	165, 155 515, 518	煤巷	风墙	1 120	0.473
151	514, 515 153, 138	煤巷	风墙	1 050	1.081
240	512, 513 239, 191	煤巷	风门	777	1.247
268	266, 233 512, 513	煤巷	风门	715	0.387
297	496, 497 296, 282	煤巷	密闭墙	330	1.050
304	495, 496 303, 296	煤巷	风门	310	1.188
377	487, 488 372, 376	煤巷	密闭墙	192	0.619
403	402, 378 479, 480	煤巷	密闭墙	155	1.248

2)根据巷道属性匹配的有 7 个高风险区域,具体为:109、121、134、139、149、166、151 巷道对应的区域。

3)240、268、297、304、377、403 巷道的区域中由于风压等属性不满足匹配要求,将其排除。

由上述实例分析可以看出,笔者所提出的高风

险区域识别方法,从拓扑结构和属性 2 个角度进行辨识,能准确甄别黄陵二号矿通风网络中高自然发火风险的区域,分析所得的高风险区域信息能够显著提高通风安全管理的针对性,为通风安全例行检查、应急预案管理等工作提供依据。

5 结 语

随着通风系统的复杂化,其中所含巷道越来越多,由连接关系而导致的风路数量会以几何速度增加。同时大量的风路之间,出现角联等可能的高风险风路的概率也有所增加,这时以手工的方式从海量的结构中识别高风险区域是不现实的。

笔者提出了等效属性图模型,并基于子图同构方法建立了高风险区域识别算法,该算法在分析和比较风网拓扑结构的同时将巷道属性纳入判断,通过巷道属性与风险的关系,将不具有生产风险性的结构剔除,能在复杂的通风网络中自动识别出其中真正具有风险的区域。通过实例分析可以看出,该算法能准确甄别黄陵二号矿通风网络中高自然发火风险的区域,并具有识别准确,非高风险区域全部被剔除的优势,避免了人工方法进行分析时难免出现的识别不全问题;同时适用范围广,不仅能用于识别角联高风险区域,也适用于各种类型高风险区域的识别。

参考文献(References):

[1] 王洪德,马云东.基于故障统计模型的可修通风系统可靠性指标体系研究[J].煤炭学报,2003,28(6):617-621.
WANG Hongde, MA Yundong. Study on appraising indicator system of repairable mine ventilation system reliability based on faults statistical model[J]. Journal of China Coal Society, 2003, 28(6): 617-621.

[2] 魏连江,周福宝,梁伟,等.矿井通风网络特征参数关联性研究[J].煤炭学报,2016,41(7):1728-1734.
WEI Lianjiang, ZHOU Fubao, LIANG Wei, et al. Correlation of mine ventilation network characteristic parameters[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(7): 1728-1734.

[3] 张庆华.我国煤矿通风技术与装备发展现状及展望[J].煤炭科学技术,2016,44(6):146-151.
ZHANG Qinghua. Development and prospect of mine ventilation technology and equipment[J]. Coal Science & Technology, 2016, 44(6): 146-151.

[4] 程刚,陆卫东,陈志峰,等.基于 FAHP-MODM 的矿井通风系统可靠性综合评价[J].中国安全生产科学技术,2018(2):99-105.
CHENG Gang, LU Weidong, CHEN Zhifeng, et al. Comprehensive

- evaluation on reliability of ventilation system in mine based on FAHP-MODM[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2018(2): 99-105.
- [5] 汪崇鲜, 李绪国, 谭波. 矿井通风系统风量稳定性的影响因素[J]. 煤炭学报, 2008, 33(8): 931-935.
- WANG Chongxian, LI Xuguo, TAN Bo. Influencing factors of air quantity stability of ventilation system in coal mine[J]. Journal of China Coal Society, 2008, 33(8): 931-935.
- [6] 蔡卫. 矿井通风系统安全性评价及其应用[J]. 煤炭学报, 2004, 29(2): 195-198.
- CAI Wei. Safety evaluation and its application on coal mine ventilation system[J]. Journal of China Coal Society, 2004, 29(2): 195-198.
- [7] 于双海, 梁润生. 矿井角联巷道通风系统优化设计[J]. 煤炭工程, 2017(S2): 26-28.
- YU Shuanghai, LIANG Runsheng. Ventilation system optimization design of diagonal roadway in coal mine[J]. Coal Engineering, 2017(S2): 26-28.
- [8] 辛嵩, 曹梦婷, 张庆禹, 等. 角联巷道风流安全评判指标研究[J]. 煤炭技术, 2018, 37(2): 134-136.
- XIN Song, CAO Mengting, ZHANG Qingyu, *et al.* Study on evaluation index of wind safety in diagonal roadway[J]. Coal Technology, 2018, 37(2): 134-136.
- [9] 赵千里, 刘剑. 矿井通风网络角联风路自动识别与分析[J]. 安全与环境学报, 2001, 1(6): 19-21.
- ZHAO Qianli, LIU Jian. A new approach to automatic identification of diagonal branches in a complicated mine ventilation network[J]. Journal of Safety & Environment, 2001, 1(6): 19-21.
- [10] 刘新, 贾进章, 刘剑. 广义角联结构研究[J]. 辽宁工程技术大学学报: 自然科学版, 2003, 22(4): 450-451.
- LIU Xin, JIA Jinzhang, LIU Jian. Study of generalized diagonal structure[J]. Journal of Liaoning Technical University, 2003, 22(4): 450-451.
- [11] 赵丹, 刘剑, 潘竞涛, 等. 基于并行计算的通风网络角联结构识别分析[J]. 煤炭学报, 2009(9): 1208-1211.
- ZHAO Dan, LIU Jian, PAN Jingtiao, *et al.* Analysis of identifying diagonal structure of ventilation network based on parallel computing[J]. Journal of China Coal Society, 2009, 34(9): 1208-1211.
- [12] 蔡峰, 刘泽功. 复杂矿井通风系统角联风路自动识别方法的研究[J]. 中国安全科学学报, 2005, 15(7): 3-6.
- CAI Feng, LIU Zegong. Study on method for automatic identification of diagonal branches of complicated ventilation network in mine[J]. China Safety Science Journal, 2005, 15(7): 3-6.
- [13] 范凌云, 谢贤平. 角-并联变换法解算简单角联网络研究[J]. 安全与环境学报, 2017, 17(4): 1298-1302.
- FAN Lingyun, XIE Xianping. Probe to the algorithm of the diagonal parallel connected counterchange in the simple diagonal network in mining activities[J]. Journal of Safety and Environment, 2017, 17(4): 1298-1302.
- [14] 司俊鸿, 陈开岩. 基于无向图的角联独立不相交通路法[J]. 煤炭学报, 2010, 35(3): 429-433.
- SI Junhong, CHEN Kaiyan. Independent & disjoin path method of diagonal branches in undirected graph[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(3): 429-433.
- [15] 刘剑, 李舒伶, 徐瑞龙. 角联风路的自动识别[J]. 中国安全科学学报, 1996, 6(S1): 139-142.
- LIU Jian, LI Shuling, XU Ruilong. Automatic distinction of angle connection airway[J]. China Safety Science Journal, 1996, 6(S1): 139-142.
- [16] Ullmann J R. An algorithm for subgraph isomorphism[J]. Journal of the Association for Computing Machinery, 1976, 23(1): 31-42.
- [17] Cordella L P, Foggia P, Sansone C, *et al.* A (sub) graph isomorphism algorithm for matching large graphs[J]. Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2004, 26(10): 1367-1372.
- [18] HAN Jiawei, CHENG Hong, XIN Dong, *et al.* Frequent pattern mining: current status and future directions[J]. Data Mining & Knowledge Discovery, 2007, 15(1): 55-86.