

DOI:10.19431/j.cnki.1673-0062.2021.05.005

矿井通风网络系统复杂性特征及其抗毁性研究

戴剑勇^{1,2}, 汪恒浩^{1,2}

(1. 南华大学 资源环境与安全工程学院, 湖南 衡阳 421001; 2. 核设施应急安全作业技术与装备湖南省重点实验室, 湖南 衡阳 421001)

摘要:针对通风网络拓扑结构对通风系统安全可靠性的影响,利用复杂网络理论构建矿井通风系统有向网络模型,研究通风网络的基本拓扑性质。针对兴隆庄煤矿,通风网络节点的入度和出度都呈现幂律分布,网络呈现无标度网络特性。在此基础上将强连通分量、弱连通分量和网络效率作为度量指标分析网络抗毁性能,以攻击节点和边的方式进行随机攻击和选择性攻击,结果表明有向通风网络在随机攻击下具有较强的鲁棒性,但对选择性攻击十分脆弱。

关键词:安全工程;矿井通风系统;有向复杂网络;拓扑分析;抗毁性分析

中图分类号:X513 **文献标志码:**A

文章编号:1673-0062(2021)05-0028-07

Complexity Characteristics and Invulnerability of Mine Ventilation Network System

DAI Jianyong^{1,2}, WANG Henghao^{1,2}

(1. School of Resources Environment and Safety Engineering, University of South China, Hengyang, Hunan 421001, China; 2. Hunan Provincial Key Laboratory of Emergency Safety Technology and Equipment for Nuclear Facilities, Hengyang, Hunan 421001, China)

Abstract:In order to analyze the safety and reliability of the ventilation system from the perspective of network topology, complex network theory was applied to the mine ventilation system. A mine ventilation system directed network topology model was built, based on the complexity and network structure of mine ventilation system. For Xinglong-zhuang Coal Mine, the node-degree of mine ventilation system network showed a power-law distribution, showing the characteristics of scale-free network. The two attack strategies of

收稿日期:2021-03-22

基金项目:湖南省教育厅重点资助科研项目(18A235);铀矿冶放射性控制技术湖南省工程研究中心 & 湖南省铀尾矿库退役治理技术工程技术研究中心联合开放重点课题(2018YKZX1001)

作者简介:戴剑勇(1969—),男,教授,博士,主要从事公共应急安全方面的研究。E-mail:79417049@qq.com

mine ventilation system network random attack and edge-degree and node-degree selective attack were formulated, and strongly connected component, weakly connected component and network efficiency were used as the invulnerability performance index. Results showed that the mine ventilation system network had strong robustness under random attack and was very vulnerable to edge-degree and node-degree selective attack.

key words: safety engineering; mine ventilation system; directed complex network; topological analysis; invulnerability analysis

0 引言

矿井通风系统对于煤矿安全生产至关重要。根据各用风地点的需要供给新鲜风流是各国职业健康安全生产法规中规定的矿井通风系统的主要任务之一,矿井通风系统的另一个主要任务是在紧急情况下如堵塞、火灾和爆炸,为了确保矿工安全到达地面,矿井巷道必须保证持续通风^[1]。在通风机作用下,通风系统持续为井下工作提供空气,新鲜空气沿各巷道流经整个通风系统稀释并排出有害污染物,保证健康和安全的作业环境。

通风系统的安全可靠性与通风网络的拓扑结构和抗毁性直接相关。目前,在众多用于评价矿井通风系统可靠性的研究中,从通风网络拓扑结构的角度对矿井通风系统进行研究较少。传统的研究方法主要集中在构建数学评价模型和提高通风设备可靠性^[2-5]。张水^[6]等应用未确定测度理论建立矿井通风安全评价模型。卢国斌^[7]等利用BP神经网络映射评价指标体系和可靠性等级之间的非线性关系建立评价模型。范凌云^[8]等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。尽管矿井通风网络的概念提出已有多年^[9],但对拓扑结构的研究还不够深入。张娜^[10]等通过优化遗传算法,通过节点拓扑数据实现自动绘制通风网络图。魏连江^[11-12]等基于矿井通风网络实际参数,研究通风网络特征参数的相关性,构建了网络结构复杂性评价模型。杨应迪^[13]等针对矿井灾害在通风网络中传播范围的有效控制,研究通风网络的社团结构特征及社团间的连接关系,为确定灾害传播的关键节点和分支提供新的方法。

近年来,利用复杂网络研究实际系统的抗毁性被广泛应用到各领域大规模网络中。2000年,R. Albert^[14]等首次分析了在随机攻击下无标度网络良好的抗毁性,即使大部分节点受到攻击失效

无标度网络的连通能力也不受影响,但删除连通性能方面起关键作用的几个节点,网络便迅速崩溃。刘涤尘^[15]、L. N. Wang^[16]、W. Wang^[17]等对电力通信网、铁路网和城市公交网进行建模、拓扑特性分析,从连通性和网络效率的角度评估网络的抗毁性。矿井通风系统与电力输运、交通系统等类似都是典型复杂系统,但研究通风网络的抗毁性的研究鲜有。

基于此,本文以复杂网络理论为基础,针对矿井通风系统的复杂性和网络化结构特点,从分析通风网络拓扑结构的角度出发,构建有向通风网络模型,研究拓扑结构特征参数和网络抗毁性。对于矿井通风系统优化与改造效果评价、提高通风系统安全可靠性方面研究工作提供相应的支持。

1 矿井通风网络拓扑统计特征

1.1 有向矿井通风复杂网络建模

矿井通风系统是一个关联程度很高的复杂系统,由几十条甚至上百条巷道连接而成的。将巷道抽象而成网络的边,巷道两端视为节点,节点与巷道的关联矩阵决定整个系统的拓扑关系。一条巷道只和两个节点相关联,任何一个节点都不能孤立存在,多条巷道可以共有一个节点。如果两条巷道共有一个节点则表示这两条巷道在共有节点处连接。所有巷道的风流按其分叉和汇合的结构形式构成一个有向的连通体系。为了更好地展开对矿井通风网络的静态拓扑特征及抗毁性的研究,本文不讨论基于多约束条件下的矿井通风网络建模,而主要从拓扑结构的角度出发建立相应的网络模型。根据矿井通风系统图,在建立模型之前特作如下假设:

- 1) 不考虑各风流交汇点的实际位置;
- 2) 以用风、通风巷道为分析对象,不考虑长期密闭风门后的通风巷道忽略通风系统中存在的

少量漏风情况;

3) 将所有进风处合并为一处,即所有进风节点与虚拟总进风节点相连接,回风处同理,并通过大气将进风回风点相连接;

4) 通风巷道作为通风网络的边,不同通风巷道的位置、长度、形状和断面以及风量、风速等参数存在极大差异,忽略巷道间的差异,即矿井通风网络为无权边;

5) 稳定的通风系统拥有固定的方向,新鲜空气经进风巷到用风工作面,后通过回风巷排除,认

为矿井通风网络是有向的。

基于以上假设,矿井通风网可以表示为一个有向复杂网络 $G=(V,E)$, $V=\{1,2,\dots,m\}$ 是矿井通风网络 G 的节点集合,代表巷道风流相交汇的地点。 $E=\{e_{ij}\}$ 是矿井通风网络 G 的边集合,代表连接交汇地点之间巷道的集合,包括进风巷、回风巷、采掘工作面、井底车场等。抛开风机、风门等具体矿井通风问题,只考虑井巷的连接关系,矿井通风系统与对应的有向矿井通风复杂网络简单示意图见图 1。

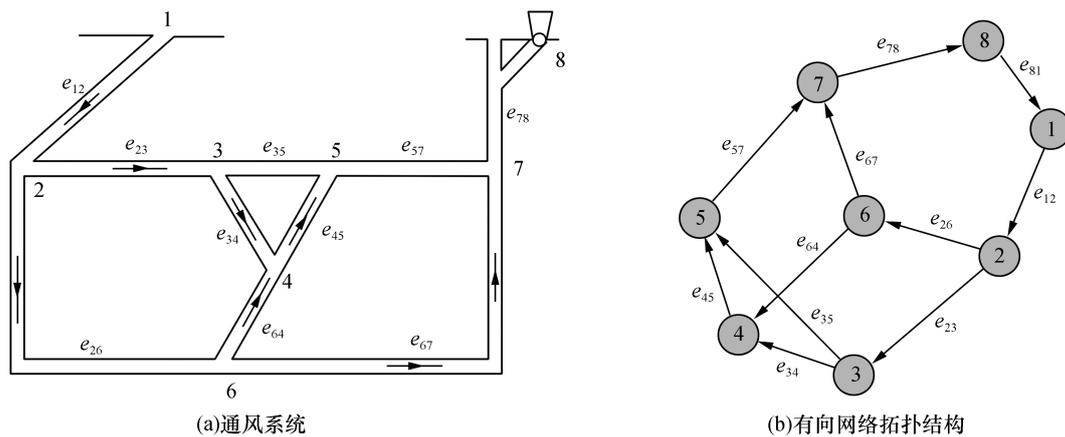


图 1 通风系统有向网络示意图

Fig. 1 Directed network of ventilation system

1.2 通风网络的拓扑参数

节点和边是矿井通风网络的基本组成部分,记节点数 M ,边数 N 。节点度 k_i 是描述和衡量单个节点特性的重要概念之一,表示与节点 i 直接相连的节点数量。

$$k_i = \sum_{j=1}^M e_{ij} \quad (1)$$

式中, e_{ij} 为邻接矩阵的元素,当节点 i 和 j 有边直接相连时, $e_{ij}=1$; 否则 $e_{ij}=0$ 。对于有向网络,节点的度 k_i 分为入度 k_i^{in} 和出度 k_i^{out} ,分别表示以点 i 为终点和起点的节点数量。网络的平均度 \bar{k} 定义为网络中所有节点度的平均值,用于评价节点紧密性大小。平均度越大,节点之间关系越密切,网络越密集。度值为 k 的节点的出现网络中概率称为节点的度分布,表示为 $p(k)$ 。

聚类系数 c_i 描述节点 i 的任何两个相邻节点也与彼此相连的概率,反映节点聚集程度:

$$c_i = 2e_i / [k_i(k_i - 1)] \quad (2)$$

式中, e_i 是节点 i 所有邻接节点之间的实际存在的边数。网络的聚类系数 C 定义为网络中所有节点的平均聚类系数:

$$C = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M c_i \quad (3)$$

在有向复杂网络中,考虑到连边的方向性,两点之间的最短路径长度 d_{ij} 是指从节点 i 到节点 j 所有通路中有向边的最小值。网络的平均最短路径长度 L 是网络中任意两个节点之间最短路径长度的平均值:

$$L = \frac{1}{M(M-1)} \sum_{i \neq j=1}^M d_{ij} \quad (4)$$

节点介数为经过该节点的最短路径数目与网络所有最短路径数目的比值,若该节点被经过的概率较大,则该节点在整个网络中有较重要的地位:

$$B_i = \sum_j \sum_{k \neq j} n_{jk}^i / n_{jk} \quad (5)$$

式中, n_{jk} 表示节点 j 和 k 之间最短路径的数目; d_{jk}^i

表示节点 j 和 k 间经过 i 的最短路径的数目。

1.3 矿井通风网络的复杂特性分析

本文对兴隆庄煤矿通风系统的网络特性进行实证分析,构建具有 120 个节点,209 条有向边的通风系统网络,分析得到拓扑结构基本参数,见表 1。并以节点度大小为区分绘制通风网络图,

见图 2。在矿井通风网络中,节点度指由该节点连接的巷道数量即巷道间的连接情况。节点度最大值为 10,最小值为 2。通风网络的平均度 \bar{k} 为 3.483,每个巷道交叉点约与其他 2 条或 3 条巷道直接相连。

表 1 矿井通风网络拓扑参数

Table 1 Topological parameters of mine ventilation network

M (节点数)	N (边数)	\bar{k} (平均度)	C (聚类系数)	L (平均最短路径长度)	D (直径)
120	209	3.483	0.029	9.392	23

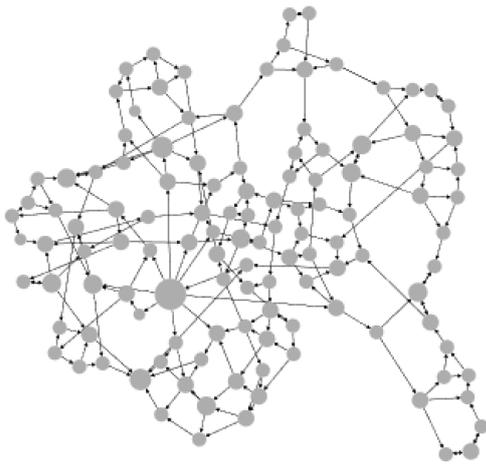


图 2 通风系统有向网络拓扑结构

Fig.2 Directed network topology of ventilation systems

通风系统网络的网络直径为 23,平均最短路径长度 9.392,即网络中任意两个节点之间连接平均需要通过 9 个节点。与网络的总边数 209 相比,平均最短路径仍是较大的,这与通风网络节点之间特殊的连接方式和网络规模有关。节点的聚类系数和介数分布见图 3。网络的平均聚类系数为 0.029,只有少部分节点的聚类系数不为 0,表明这类节点在网络中呈现局部集团,反映在实际矿井中为采掘工作面部分的通风系统。节点的聚类系数和介数并没有表现出相关关系,说明通风网络中节点不能同时承担局部和整体的连通作用。聚类系数表明通风网络的相邻节点密集程度,当聚类系数较大时,说明节点的相邻节点之间联系密切,即使某些边遭到攻击时,对网络的连通性影响较低,通风系统仍然能维持正常功能,也间接反映网络的抗毁性。当数值较低时相邻节点密集程度较低,网络抗毁性较差。

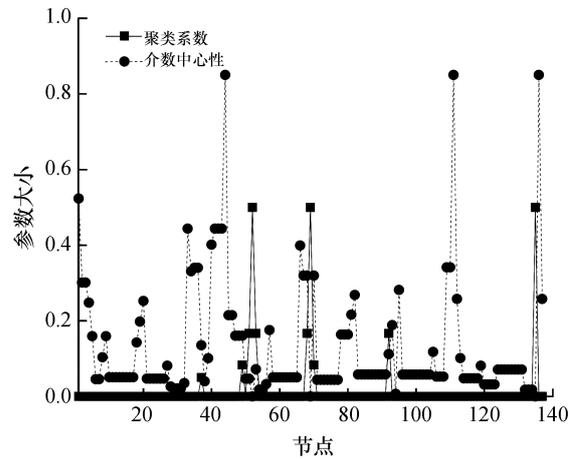


图 3 通风网络节点聚类系数和介数分布

Fig.3 Clustering coefficient and betweenness distribution of mine ventilation network

矿井通风系统担任井下通风任务,受地质、开采等众多因素影响,其网络的节点度分布与其他运输网络相比具有独特的分布规律,见图 4。节点的出度和入度在大小和分布上几乎相等,出度和入度为 1 或 2 的节点占比都达到 40%,而在节点度分布中 $k=2$ 的节点占比为 2.5%, $k=3$ 的节点占比为 61%,说明通风网络中大部分节点至少与三条巷道具有连接关系,与实际巷道布置结构相符合。在矿井通风网络中节点度普遍较小,大部分节点的度 $k=3$,少有节点度大于 5 的节点,这表明通风巷道间相互交叉较少,连通性较差。 $k=1$ 的节点在矿井通风系统中指进回风井,通常数目为 1; $k=2$ 的节点连接串联巷道,受串联巷道简化处理的影响,在各通风系统中占不同; $k=3$ 的节点为风流汇集和分散处,在通风网络节点中最为常见; $k=4$ 的节点为巷道间的十字路口,多

为两个巷道平面相交的点,数量较少; $k \geq 5$ 的节点在实际通风网络中很少见,多为合并通风网络节点造成的。本文由于将进风井和回风井与虚拟节点相连并通过大气连接,因此不存在 $k=1$ 的节点,也导致进风处节点度过大。

节点度分布是分析网络拓扑特性的重要一环。本文采用累计度分布研究通风网络度分布, $P(K)$ 被定义为随机选择的度大于或等于 k 的节点的概率,即在双对数坐标下的对度 k 和累计度分布概率 $P(K)$ 进行拟合,见图5。在复杂网络拓扑模型下通风系统网络拟合结果较好,节点度分布呈现明显幂律分布关系,说明该通风系统网络具备无标度网络特性,大部分节点的度较小,仅有少数节点在网络中起到重要连接作用。

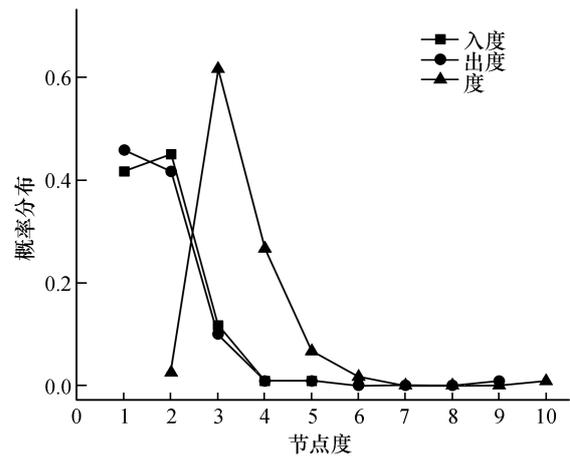


图4 矿井通风网络节点度分布

Fig. 4 Degree distribution of mine ventilation network

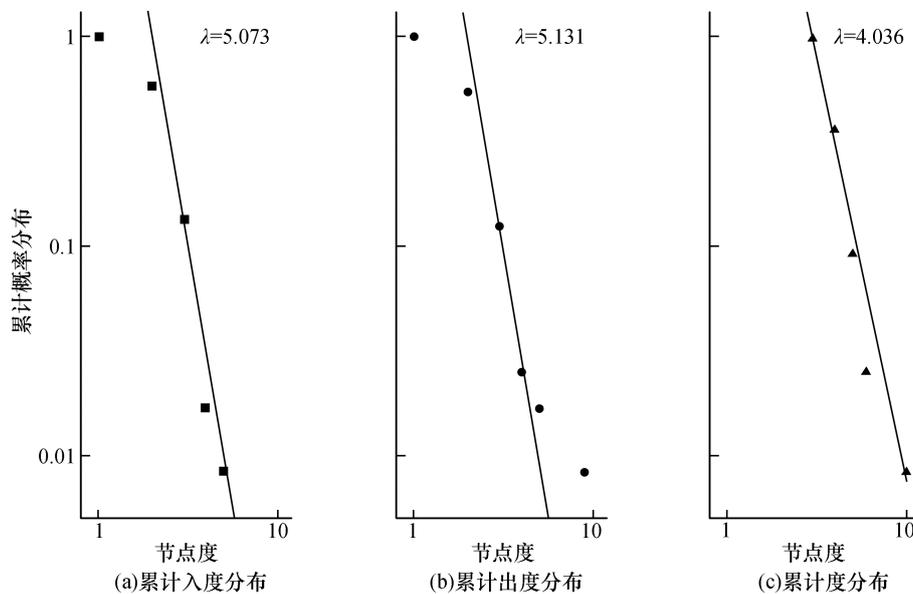


图5 双对数坐标系下通风网络节点度累计度分布

Fig. 5 Cumulative degree distribution of mine ventilation network under log-log coordinate

2 通风网络的抗毁性分析

2.1 攻击策略及抗毁性指标

网络攻击策略包括攻击目标和攻击方式。本文对节点和边分别进行攻击。删除节点时,以该节点为始节点的边同时被删除;删除边时,如果节点成为孤立节点,则节点将被删除。常见的网络攻击方式为随机攻击和选择性攻击。随机攻击(random attack, RA)是指无确定目标的攻击,攻击具有随机性。在通风系统网络中,巷道内风量不足、污染物浓度突增等情况是随机发生并且难

以预测,网络的边以某种概率被随机移除。选择性攻击(selective attack, SA)是指按照边的强度从高到低的顺序攻击强度较高的边,具有很强的目的性。本文选择节点度和边度作为强度参数进行实时边度攻击,在有向网络中边度为源节点 i 的入度和目标节点 j 的出度的乘积

$$ED = k_i^{\text{in}} \times k_j^{\text{out}} \quad (6)$$

为了从整体上了解删除边对网络连通性的影响,选择强连通分量(strongly connected component, SCC)和弱连通分量(weakly connected component, WCC)的节点数量和网络效率 E 作为抗毁性评价

指标。有向图中任意节点对存在有向通路满足两点的相互连通, 构成的有向图称为强连通分量; 无向图所有节点对之间存在无向路径的节点集合为弱连通分量。强连通分量和弱连通分量的研究有助于理解网络中的大规模组织, 强连通分量反映了通风系统中能维持正常功能的巷道数量, 而弱连通分量则反映通风系统中相互连通的巷道数量。网络相对效率 E 评估通风系统网络在遭受攻击后各节点之间的运输效率, 当边受到攻击后, 网络效率会发生改变, 尤其网络被分割后, 网络效率会明显下降:

$$E = \frac{1}{E_0 N(N-1)} \sum_{i \neq j=1}^N d_{ij}^{-1} \quad (7)$$

式中, E_0 为网络初始效率; N 为网络边的数目; d_{ij} 表示节点 i 到节点 j 所经过的节点的数目。

2.2 抗毁性分析

根据网络攻击策略以及通风网络的评价指标, 对矿井通风网络拓扑结构模型在随机攻击和选择性攻击下抗毁性进行模拟。无论在随机攻击还是选择性攻击下, 随着边和节点删除比例的增加, 强连通分量、弱连通分量和网络相对效率都呈下降趋势, 见图 6。

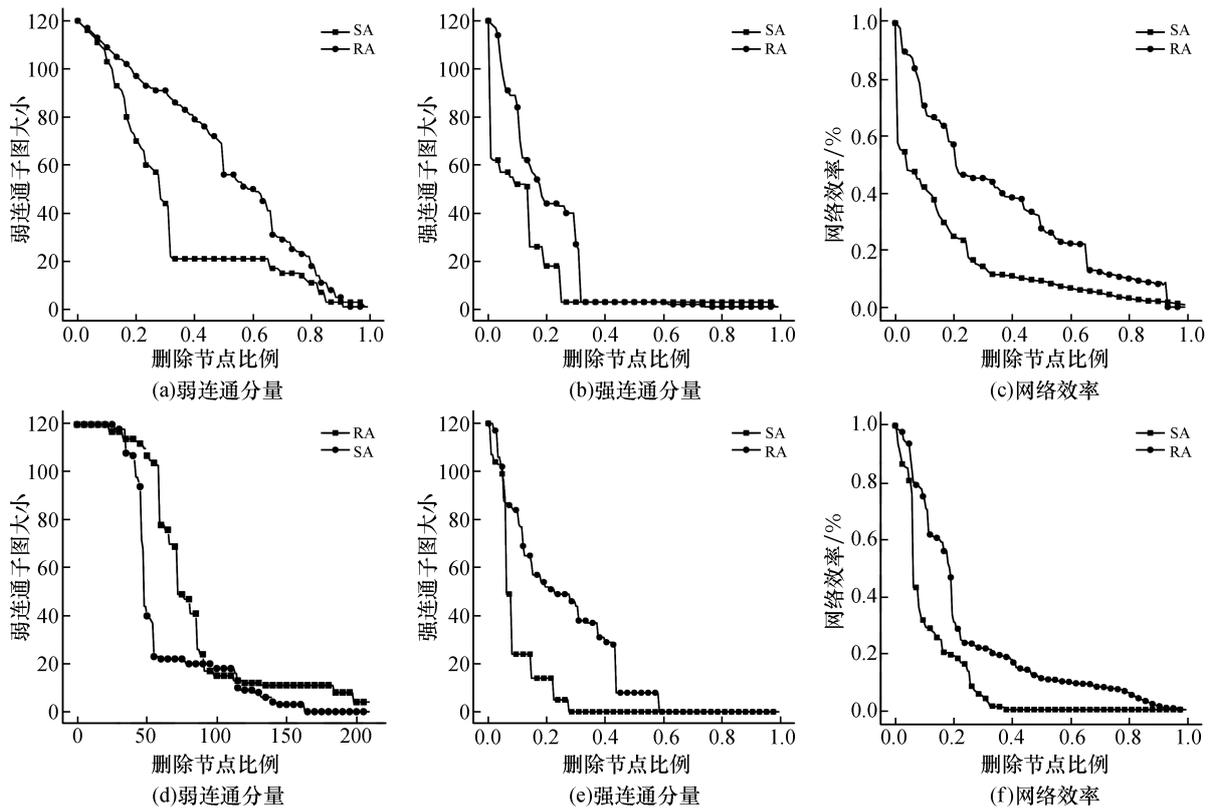


图 6 强连通分量、弱连通分量和网络效率与边、节点删除比例的关系

Fig. 6 Relation between SCC, WCC and E and link-deletion and node-deletion ratio

强连通分量对随机攻击和选择性攻击的反应不同。在选择性攻击下强连通分量变的十分脆弱, 删除前 10% 的边和节点时, 出现陡降的现象, 但在随机攻击下强连通分量呈线性缓慢下降趋势。从开始对边进行攻击到强连通分量崩溃, 在选择性攻击下攻击边的比例为 30%, 而在随机攻击下达到相同效果攻击比例为 60%。弱连通分量的大小对两种攻击方式都表现出较好的抗毁性。攻击少量边对弱连通分量的影响较小, 其大小保持接近初始网络的。直到删除 20% 的边弱

连通分量开始缓慢下降, 但选择性攻击下的下降速率明显快于随机攻击。此外, 在边和节点的随机删除过程中, 弱连通分量呈现平稳而连续的下降趋势, 而选择性攻击下弱连通分量存在明显的阈值现象。

在随机攻击期间, 网络效率从一开始就经历缓慢而持续的崩溃, 并在删除的后期变得更慢。在选择性攻击期间网络效率迅速下降, 直到删除约 40% 的边或节点效率降至 0。攻击前期, 当度最大的边和节点被删除时, 网络在很大程度上保

持连接,但效率逐渐降低。随着攻击比例的增加,网络效率最终减小为零,且随机攻击下的网络效率普遍高于选择性攻击的。

通风网络中存在大量出度和入度都为1或2的节点,当这些连边和孤立节点被删除后,有向网络被分为多个子网络,通风网络的有向性使得节点对之间难以连通。尤其是选择性攻击总是选择网络中强度最大的边删除,它们对通风运输网络的网络连通性起着至关重要的作用,一旦这些边被删除,网络拓扑结构会发生剧烈变化,强连通分量和网络效率都会迅速减小。通过对上述模拟结果分析可知,通风系统网络对随机攻击具有较好的抗毁性,但是对选择性攻击表现出脆弱性。因此,在通风系统的日常管理中,对通风网络中边度较大的巷道应加强安全检查力度,以最大限度地维持整个通风系统的安全可靠性。

3 结 论

1) 基于复杂网络理论理论构建了矿井通风系统有向网络拓扑模型,并统计分析该网络的特征参数。有向矿井通风网络具有小世界特性。通风网络的节点出度和入度都呈现较为明显的幂律分布形式,具有无标度网络的特征且节点度一般不大于5。

2) 有向通风网络对于随机攻击表现出较强的抗毁性,对选择性攻击表现处较差的抗毁性。通风网络的抗毁性是由少量边和节点维系的,选择性攻击对网络的抗毁性指标的影响比随机攻击的更大,因此,加强关键边和节点的识别和防护尤为重要,尽量防止关键边和节点被攻击的现象发生,适量增加通风网络的冗余性,可提高网络抗毁性。

3) 矿井通风系统的网络拓扑结构、巷道的属性用途不同,将通风系统的物理特征融入复杂网络中进行抗毁性分析,对通风系统优化有更重要的参考作用。

参考文献:

[1] SEMIN M A, LEVIN L Y. Stability of air flows in mine ventilation networks[J]. Process safety and environmental protection, 2019(124):167-171.
[2] 贾进章,宋磊,冯路阳. 广宁阳晖煤矿通风系统稳定性

分析[J]. 矿业安全与环保, 2018, 45(1):86-89.

- [3] KURNIA J C, XU P, SASMITO A P. A novel concept of enhanced gas recovery strategy from ventilation air methane in underground coal mines: A computational investigation[J]. Journal of natural gas science & engineering, 2016, 35:661-672.
[4] ZHOU A T, WANG K, WU L G, et al. Influence of gas ventilation pressure on the stability of airways airflow [J]. International journal of mining science and technology, 2018, 28(2):297-301.
[5] 谢宏,董媛媛. 安全生产水平预测与评价的系统动力学模型[J]. 中国安全科学学报, 2016, 26(9):35-39.
[6] 张水,曹庆贵,俞凯. 基于未确知测度理论的矿井通风安全评价[J]. 矿业安全与环保, 2016, 43(5):32-35.
[7] 卢国斌,陈鹏,张俊武. BP神经网络的通风系统可靠性评价[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2014, 33(1):23-27.
[8] 范凌云,谢贤平. 基于网络流理论的矿井通风网络可靠性研究[J]. 安全与环境学报, 2017, 17(5):1734-1739.
[9] 吴超,王从陆. 复杂矿井通风网络分析的参数调节度数字实验[J]. 煤炭学报, 2003, 28(5):477-481.
[10] 张娜,邓立军,宋莹. 基于GA的矿井通风网络图节点排序的优化[J]. 安全与环境学报, 2014, 14(6):43-46.
[11] 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.
[12] WEI L J, ZHOU F B, CHENG J, et al. Classification of structural complexity for mine ventilation networks[J]. Complexity, 2015, 21(1):21-34.
[13] 杨应迪,张国枢,秦汝祥. 矿井通风网络的社团结构及灾害控制研究[J]. 中国安全科学学报, 2012, 22(3):109-114.
[14] ALBERT R, JEONG H, BARABÁSI A L. Error and attack tolerance of complex networks [J]. Nature, 2000, 406(6794):378-382.
[15] 刘涤尘,冀星沛,王波,等. 基于复杂网络理论的电力通信网拓扑脆弱性分析及对策[J]. 电网技术, 2015, 39(12):3615-3621.
[16] WANG L N, WANG K, SHEN J L. Weighted complex networks in urban public transportation: Modeling and testing[J]. Physica A, 2020, 545:122759.
[17] WANG W, CAI K Q, DU W B, et al. Analysis of the Chinese railway system as a complex network [J]. Chaos, solitons and fractals, 2020, 130:109408.