

doi: 10.7690/bgzd.2021.11.019

## 基于相似性的战场网络攻击策略

闫坤<sup>1</sup>, 陈楚湘<sup>1</sup>, 刘鹏<sup>2</sup>

(1. 战略支援部队信息工程大学信息作战指挥系, 郑州 450001;

2. 中国人民解放军 71625 部队, 江苏 徐州 221416)

**摘要:** 针对战场网络的复杂性结构特点, 分析作战单元的个体属性及网络属性, 提出一种相似性计算方法, 创建基于节点相似性的战场网络模型。通过计算作战单元之间的相似性值, 求解战场网络链路重要性排序, 提出基于节点相似性的战场网络攻击策略, 为战场指挥员作战指挥提供辅助决策支撑。基于仿真实例数据, 运用基于节点相似性的攻击策略与基于边介数和基于度乘积的攻击策略进行攻击效能对比。实验结果表明, 该攻击策略具有有效性和实用性。

**关键词:** 战场网络; 相似性; 攻击策略; 边介数

**中图分类号:** TJ0 **文献标志码:** A

## Battlefield Network Attack Strategy Based on Similarity

Yan Kun<sup>1</sup>, Chen Chuxiang<sup>1</sup>, Liu Peng<sup>2</sup>

(1. Department of Information Operations Command, PLA Strategic Support Force Information Engineering University, Zhengzhou 450001, China; 2. No. 71652 Unit of PLA, Xuzhou 221416, China)

**Abstract:** Aiming at the complex structure characteristics of the battlefield network, the individual attributes and network attributes of the combat unit are analyzed, and a similarity calculation method is proposed to create a battlefield network model based on node similarity. By calculating the similarity values among combat units and solving the order of the importance of battlefield network links, a battlefield network attack strategy based on node similarity is proposed to provide auxiliary decision-making support for battlefield commanders. Finally, based on simulation example data, the attack strategy based on node similarity is compared with the attack strategy based on edge betweenness and degree product. The experiment shows that the proposed attack strategy is effective and practical.

**Keywords:** battlefield network; similarity; attack strategy; edge-betweenness

### 0 引言

现代战争是体系与体系之间对抗的战争, 在现代战争中, 各个作战单元都不是孤立地发挥作用, 而是相互链接形成一个高度复杂的作战体系, 共同实现作战任务<sup>[1]</sup>。如何制定有效的体系攻击策略瓦解敌方战场网络是现代战争急需解决的核心问题之一<sup>[2]</sup>。攻击策略问题可以看作是一类特殊的“关键节点(边)识别问题”, 基于复杂网络的相似性思想, 计算网络中节点对的相似性, 评价对应链路的重要性, 制定基于节点相似性的攻击策略, 为作战指挥提供辅助决策支撑。

在军事作战领域中, 指挥员一般根据作战的任务将作战集团划分为不同功能的作战集群, 各作战集群内部作战单元之间个体属性相似、作战任务相同, 各作战单元之间联系较为紧密, 而作战集群之间作战单元个体属性差异较大, 彼此之间联系较为

稀疏<sup>[3]</sup>。这些作战集群之间的相互关系是整个战场网络涌现出网络化作战效能的核心和关键, 是战场网络作战效能的倍增器<sup>[4]</sup>。在复杂网络中, 节点对相似性越大, 对应链路重要性越小; 节点对相似性越小, 对应链路重要性越大。战场网络是一个复杂网络, 将各个作战单元抽象为作战节点, 作战集群就是作战节点的集合, 作战集群之间的相互关系抽象为作战节点之间的关键链路, 然后利用作战平台的相似性计算战场网络的关键链路, 从而建立战场网络攻击策略。

目前, 国内外的专家学者在复杂网络节点相似性方面开展了很多研究: P. JACCARD<sup>[5]</sup>和 G. SALTON 等<sup>[6]</sup>提出了基于公共邻居的节点相似性度量方法, 认为 2 个节点的共同邻居越多, 则这 2 个节点越相似; L. KATZ<sup>[7]</sup>提出了基于路径的节点相似性度量方法, 其思想是利用网络中节点间不同长度的路径数来量化节点间的相似性; V. MARTINEZ

收稿日期: 2021-07-09; 修回日期: 2021-08-20

基金项目: 研究生资助课题(JY2019C229)

作者简介: 闫坤(1986—), 男, 河南人, 硕士, 从事复杂网络、计算机仿真研究。E-mail: yankun\_0207@126.com。

等<sup>[8]</sup>和 K. PEARSON<sup>[9]</sup>提出了基于随机游走的节点相似性计算方法, 利用一个随机粒子从随机选中的相邻边进行多步游走的转移概率来确定节点之间的相似性; Zhang Q 等<sup>[10]</sup>研究了基于信息论的节点相似性度量方法, 利用相对熵和节点的局部结构计算节点相似性; 苏醒<sup>[11]</sup>基于节点相似性的静态复杂网络和动态复杂网络, 利用节点的度信息计算节点相似性; 刘韶倩<sup>[12]</sup>利用 2 个节点的随机游走转移概率分布的差异性计算节点相似性。然而, 以上对节点相似性研究关注的重点是网络群体属性和网络拓扑属性, 没有考虑节点个体内在属性对节点相似性的影响, 笔者探索把节点个体内在属性作为相似性计算的一个重要因素, 提出一种基于相似性的战场网络攻击策略。

## 1 战场网络模型构建

笔者将战场网络抽象为由节点集和边集组成的图, 作战单元抽象为节点, 每个节点具有多类属性; 作战单元与作战单元之间的相互关系抽象为边, 存在相互关系则生成一条边, 不存在相互关系则不生成边, 具体描述如下。

### 1.1 敌方作战单元个体属性描述

在战场网络中, 每个作战单元都具有一系列个体属性, 是作战目标之间相互区别的直接依据。为减少计算复杂度和仿真实验基本需求, 笔者将作战单元个体属性刻画为类型、坐标、运动方向、运动速度、组织结构和作战能力 6 类, 具体形式化描述如下:  $IA(Ty, Co, Or, Ve, Su, Ca)$ , 其中,  $Ty$  为类型;  $Co$  为坐标;  $Or$  为运动方向;  $Ve$  为运动速度;  $Su$  为隶属关系;  $Ca$  为作战能力。具体说明如表 1 所示。

表 1 作战单元个体属性

个体属性	说明
类型	作战单元区别于其他作战单元的个体本质
坐标	作战单元的位置信息 $(X, Y, Z)$
运动方向	作战单元运动的 3 维方向向量
运动速度	作战单元的运动速度
隶属关系	作战单元的上级下级隶属情况
作战能力	作战单元完成指定作战任务的能力

在个体属性数据的形式化描述中包含定性描述和定量描述 2 种数据类型, 定量描述可以直接用于作战计算, 而定性描述需要经过数据预处理, 将其转化为可以直接计算的数据类型。

#### 1.1.1 定性数据预处理

上表中共有 2 类定性数据: 1) 作战单元本质类

型个体属性, 如类型; 2) 作战单元程度类型个体属性, 如作战能力。针对第一类本质类型数据, 笔者采用二进制编码对本质类型数据进行描述, 使作战单元彼此之间能够互相区分; 针对第二类程度类型数据, 根据作战程度描述具有的梯度性, 将数据分为若干等级, 按照从低到高的顺序利用 0~1 之间的十进制数值梯级表示。

#### 1.1.2 数值型数据标准化

为进行统一量化计算, 需要对作战单元个体属性的定量类数据和预处理后的程度类型数据进行统一标准化处理。对数值型数据的统一化处理采用线性变换方法, 标准化公式如式(1)所示,  $D_{\max}$  为作战单元的某一个体属性的最大值;  $D_{\min}$  为作战单元的某一个体属性的最小值;  $D_{\text{org}}$  为作战单元的某一个体属性的原始值;  $D_{\text{std}}$  为作战单元的某一个体属性的标准值。

$$D_{\text{std}} = (D_{\text{org}} - D_{\min}) / (D_{\max} - D_{\min}) \quad (1)$$

## 1.2 敌方作战单元网络属性描述

采用复杂网络建模思想对敌方战场网络进行分析, 运用图论的方法将敌方战场网络中的作战单元抽象为节点, 作战单元之间的指挥、控制、通信关系抽象为边; 因此, 敌方战场网络可以用一个三元组表示:  $G = (V, E, H)$ ,  $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ ,  $E = \{e_1, e_2, \dots, e_m\}$ ,  $H = \{h_1, h_2, \dots, h_l\}$ 。其中,  $G$  为敌方战场网络;  $V$  为敌方战场网络中的节点集;  $E$  为敌方战场网络中的边集;  $H$  为敌方战场网络中的节点属性集;  $n$  和  $m$  为敌方战场网络中节点的个数和边的条数;  $l$  为节点属性的个数。战场网络  $G$  的邻接矩阵  $A = (a_{ij})_{n \times n}$  定义为:

$$a_{ij} = \begin{cases} 1, (v_i, v_j) \in E \\ 0, (v_i, v_j) \notin E \end{cases} \quad (2)$$

根据 1.1 节中作战单元个体属性形式化描述, 节点  $v_i$  的属性  $h_i = IA_i(Ty_i, Co_i, Or_i, Ve_i, Su_i, Ca_i)$ 。

## 2 作战单元相似性计算

### 2.1 作战单元个体属性相似性计算

作战单元的个体属性经过数据类型预处理后, 个体属性的数据类型被标准化为二进制数据和十进制数据。作战单元相似性计算采用欧几里得距离计算两点间“普通”(直线)距离, 即计算作战单元相似性的逆向指标。针对二进制数据类型, 采用式(3)计算二进制数据节点相异性指标:

$$d_{ij}^b = \begin{cases} 1, v_{ik} \neq v_{jk} \\ 0, v_{ik} = v_{jk} \end{cases} \quad (3)$$

其中： $d_{ij}^b$ 为节点  $v_i$  和  $v_j$  之间的二进制数据相异度； $v_{i_k}$  和  $v_{j_k}$  为节点  $v_i$  和  $v_j$  的第  $k$  维个体属性。作战单元相异性可按照式(4)进行计算：

$$d_{ij} = \sqrt{\frac{w_1 d_{ij}^1 + \dots + w_l d_{ij}^l + w_{l+1} (v_{j_1} - v_{i_1})^2 + \dots + w_l (v_{j_l} - v_{i_l})^2}{n}} \quad (4)$$

其中： $d_{ij}$ 为节点  $v_i$  和  $v_j$  之间的相异性； $\omega$ 为节点属性的权重； $l'$ 为二进制数据维数； $l$ 为节点个体属性总维数。因此，作战单元个体属性相似性  $s'_{ij} = -d_{ij}$ 。

### 2.2 作战单元网络属性相似性计算

2.1 节对作战单元的个体属性相似性进行了计算，但是并没有考虑战场网络中作战单元的拓扑结构关系，个体属性相似性还不能完全反映作战单元之间的相似性。现有文献在节点拓扑结构的研究中通常采取紧密中心性<sup>[13-14]</sup>、介数中心性<sup>[15]</sup>、Katz中心性<sup>[15]</sup>和特征向量中心性<sup>[16]</sup>思想进行定量计算评估，其中紧密中心性即结构等价思想，该理论认为：在一个网络中，如果一个节点与其他所有节点的网络连接方式和另外一个节点与其他所有节点的连接方式相同或相近，则认为这 2 个节点是地位相同，在网络结构上是等价的<sup>[17]</sup>；因此，结合欧几里得距离和网络结构等价思想，定义作战单元  $v_i$  和  $v_j$  的相似性  $s_{ij}$  为：

$$s_{ij} = -\frac{\sqrt{\sum_{k \neq i, j}^n \{[(1-\sigma)a_{ik} - \sigma d_{ik}] - [(1-\sigma)a_{jk} - \sigma d_{jk}]\}^2}}{(n-2)} \quad (5)$$

$$S_{ij} = [(1-\sigma)a_{ij} - \sigma d_{ij}] \quad (6)$$

其中  $\sigma$  为作战单元个体属性相异度权重。式(5)在计算节点  $v_i$  和  $v_j$  相似性时，同时考虑了节点的个体属性和网络属性相似性，比单独考虑节点个体属性或网络属性，相似性计算值更加精确合理。如网络中仅有 2 个节点，则按照式(6)计算节点相似性值。

### 2.3 链路评价价值计算

根据 2.2 节可以计算出战场网络中任意节点对的相似性，从而计算出连边重要性，相似性值越小，链路重要性越大，反之亦然。因相似性计算值是负值，不便于图形表示，在链路重要性定量评价中，运用社团划分模块度<sup>[18]</sup>的概念进行计算，其复杂网络模块度函数表达式为：

$$Q = \frac{1}{2M} \sum_{ij} \left[ a_{ij} - \frac{k_i k_j}{2M} \right] \delta(c_i, c_j) \quad (7)$$

其中： $a_{ij}$ 为邻接矩阵中的元素； $M$ 为网络中的总边数； $k_i$ 为节点  $v_i$  的度值； $c_i$ 和  $c_j$ 为节点  $v_i$  和  $v_j$  所属的社团，即在连边删除过程中所属的联通子图，当  $v_i$  和  $v_j$  属于同一个社团，则  $\delta(c_i, c_j)=1$ ，否则为 0。 $Q$  值越大，被删除链路重要性越大，反之亦然。

### 3 网络毁伤评价指标

复杂网络中一般采用最大连通子图衡量网络被毁伤的程度，最大连通子图是指在一个图中当删除部分节点以及与之相连的边时，图将分解为多个连通分支，其中各连通分支中包含节点最多的分支称为最大连通子图<sup>[19]</sup>。借鉴最大连通子图的定义，笔者定义战场网络毁伤评价指标为：

$$EI = N'/N \quad (8)$$

其中： $N'$ 为最大连通子图的节点数； $N$ 为原网络中总节点数，可以看出  $EI$  的取值范围为[0,1]。

### 4 基于相似性的战场网络攻击策略算法

在计算战场网络连边重要性时，首先利用节点个体属性和网络属性计算节点间的相似性值，而后找出相似性值最小的对应链路，最后，删除该节点对应的链路并计算模块度值。按照敌方战场网络空间构建模型，基于相似性的攻击策略具体算法为：

输入作战单元个体属性和战场网络；输出战场网络连边重要性排序，步骤如下：

1) 根据敌方战场网络实际情况，抽象映射出作战单元的个体属性和战场网络属性，并设置作战单元个体属性向量权重及个体属性相异度权重。

2) 对作战单元本质类型个体属性进行二进制编码，对程度类型个体属性利用 0~1 之间的十进制数值梯级表示，而后利用式(1)对所有的十进制数据进行标准化无量纲化。

3) 对每一个战场网络利用式(3)和(4)计算作战单元个体属性相异度，如果连通分支中包含 2 个节点按照式(6)计算相似性值，如果连通分支中包含 3 个以上的节点则按照式(5)计算相似性值。

4) 从计算出的相似性矩阵中找出相似性最小的值并删除对应的连边，而后按照式(7)计算并记录战场网络模块度值。删除连边之后更新战场网络。

5) 重复执行步骤 3)和 4)，直至删除所有的连边为止。记录删除连边顺序，形成基于相似性值的连边重要性攻击策略。

## 5 实例仿真分析

### 5.1 实例说明

为验证基于相似性攻击策略的合理性和可行性，采用某作战案例为背景进行定量研究。敌方战场网络空间共 21 个作战单元  $v_0-v_{20}$ 。为简化计算，笔者将作战单元的个体属性  $h_i$  划分为如表 2 所示的 3 大类。

表 2 作战单元个体属性

作战目标	个体属性 1	个体属性 2	个体属性 3	作战目标	个体属性 1	个体属性 2	个体属性 3
$v_0$	A	较强	53	$v_{11}$	D	强	122
$v_1$	B	弱	80	$v_{12}$	C	中	56
$v_2$	C	中	58	$v_{13}$	D	强	116
$v_3$	D	强	113	$v_{14}$	A	较强	78
$v_4$	B	弱	78	$v_{15}$	A	较强	118
$v_5$	B	弱	83	$v_{16}$	A	较强	150
$v_6$	C	中	61	$v_{17}$	E	很强	141
$v_7$	C	中	49	$v_{18}$	E	很强	153
$v_8$	B	弱	89	$v_{19}$	E	很强	139
$v_9$	C	中	62	$v_{20}$	E	很强	157
$v_{10}$	D	强	120				

作战单元之间的相互关系如图 1 所示。

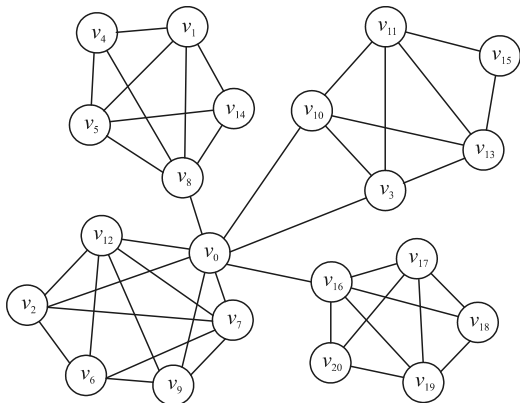


图 1 作战单元网络结构关系

按照 1.1 节中的方法对节点的个体属性进行预处理，对个体属性 1 进行二进制编码：000、001、010、011、100；对个体属性 2 中的弱、中、较强、强、很强 5 个等级，按照 0.2、0.4、0.6、0.8、1.0 进行十进制数值梯级表示，然后利用式(1)进行标准化处理；对个体属性 3 直接利用式(1)进行标准化处理。

### 5.2 实验结果及对比分析

笔者将基于相似性的攻击策略与基于边介数的攻击策略、基于度乘积的攻击策略<sup>[20]</sup>进行对比分析，验证文中所提攻击策略的有效性和实用性。边介数和度乘积的计算公式分别如式(9)和式(10)：

$$c_B(v) = \sum_{s,t \in V} (\sigma(s,t|e)/\sigma(s,t)); \quad (9)$$

$$DP(s,t)=D_s D_t. \quad (10)$$

其中： $\sigma(s,t)$ 为节点  $s$  和  $t$  之间最短路径的数量； $\sigma(s,t|e)$  为节点  $s$  和  $t$  之间最短路径中通过边  $e$  的最短路径的数量； $D_s$  和  $D_t$  为节点  $s$  和  $t$  的度。

#### 5.2.1 连边重要性排序对比

依据 5.1 节中的实例说明，对节点相似性、边介数和度乘积 3 种攻击策略方法进行仿真分析，求解出的连边重要性排序如图 2—4 所示。图中横坐标代表按照边重要性依次删除的边，纵坐标代表删除连边后对应的连边重要性评价值。其中，作战单元个体属性权重分别为 0.4、0.3、0.3，作战单元个体属性相异度权重为 0.5。

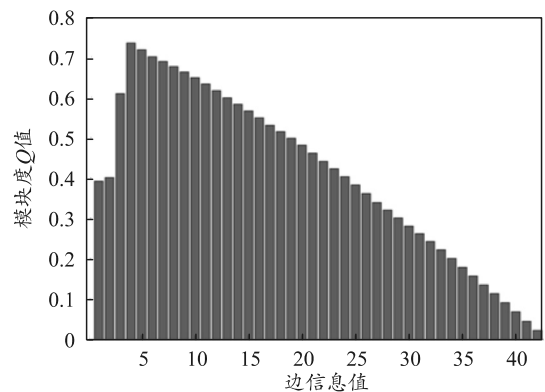


图 2 基于节点相似性的连边重要性排序

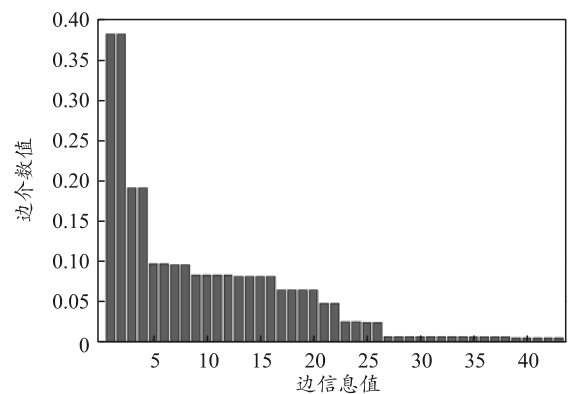


图 3 基于边介数的连边重要性排序

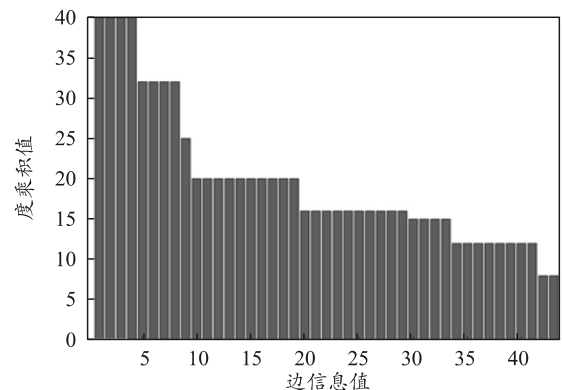


图 4 基于度乘积的连边重要性排序

分析仿真实验数据可知：从连边重要性排序图和作战单元网络结构图可以看出，3 种攻击策略均能求解出战场网络核心连边集  $\{(v_0, v_3)、(v_0, v_8)、(v_0, v_{10})、(v_0, v_{16})\}$ 。同时，模块度  $Q$  值在删除战场网络核心连边集后达到最大值 0.733 9，作战网络被割裂为 4 个作战群体，这与实际作战案例中作战群体的划分相一致。在对边重要度的排序上，3 种攻击策略整体排序基本一致，但是基于节点相似性的攻击策略对边重要性排序较为精细，能够区分每条边的重要性，基于边介数的攻击策略次之，基于度乘积的攻击策略排序能力最差。分析出现不同结果原因，3 种攻击策略在评价边重要性时考虑的战场网络信息不同，基于节点相似性的攻击策略综合考虑了节点本身属性和网络全局属性，基于边介数的攻击策略仅仅考虑了网络全局属性，而基于度乘积的攻击策略仅仅计算了网络局部属性信息。

5.2.2 攻击策略性能对比

图 5 描述了在边删除顺序和边删除比例不同的情况下，网络被攻击后的连通性能。横坐标表示网络中的边被删除的百分比，纵坐标表示最大连通子图节点集与原始图节点集的比值。

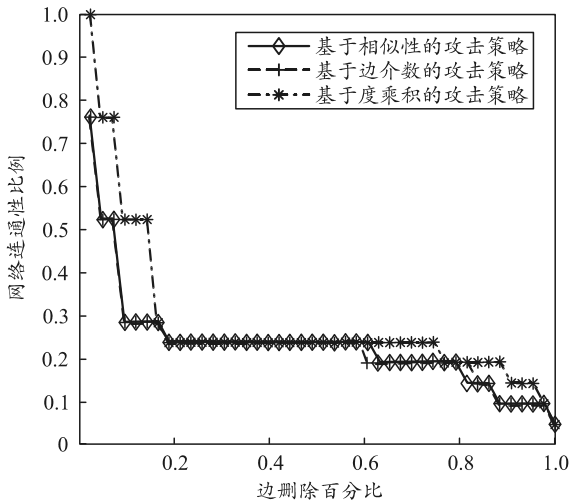


图 5 攻击策略对比

从上图可以看出：基于相似性的攻击策略与基于边介数的攻击策略的网络攻击效能基本一致，上述 2 种攻击策略要优于基于度乘积的攻击策略。当边删除比例达到 0.093 02 时，网络的连通比例为 0.285 7，图 1 分裂为 4 个子图，对应删除的边集为  $\{(v_0, v_3)、(v_0, v_8)、(v_0, v_{10})、(v_0, v_{16})\}$ ，与 5.2.1 节中的分析相一致。4 个子图对应实际案例中的 4 个作战群体，与作战案例对作战单元的群体划分相一致。另外，当边删除比例为 0.093 02 时，网络处于分解

状态，各作战群体能够完成相应的作战功能，但是作战群体之间没有信息共享，不能实时交互局部信息，瘫痪了敌方战场网络体系，达到了网络攻击的目的。

6 结论

笔者综合考虑节点个体属性和网络属性 2 个战场网络特征，提出一种基于相似性计算方法的攻击策略。通过与基于边介数和基于度乘积的攻击策略进行对比分析，应用作战案例分析验证了所提攻击策略的有效性和实用性，为战场网络攻击策略和方案的制定提供了模型和方法支撑，可为指挥员作战筹划和指挥提供辅助决策支持。下一步的研究方向是在面向链接重要性节点相似性的基础上，探索节点间的交换信息流量问题，使节点相似性计算更加全面合理。

参考文献：

- [1] 司光亚, 王艳正. 网络空间作战建模仿真[M]. 北京: 科学出版社, 2019.
- [2] 李亚鹏. 复杂网络上的攻防博弈建模与分析研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2018.
- [3] 马平, 杨功坤. 联合作战研究[M]. 北京: 国防大学出版社, 2013.
- [4] 胡晓峰. 战争科学论[M]. 北京: 科学出版社, 2018.
- [5] JACCARD P. Etude comparative de la distribution florale dans une portion des Alpes et des Jura[J]. bulletin del la societie vaudoise des sciences naturelles, 1901, 37(142): 547-579.
- [6] SAKTON G, MCGILL M J. Introduction to modern information retrieval[M]. Mcgraw-Hill Book Co, 1983: 120-127.
- [7] KATZ L. A new status index derived from sociometric analysis[J]. Psychometrika, 1953, 18(1): 39-43.
- [8] MARTINEZ V, BERZAL F, Cubero J C. A Survey of Link Prediction in Complex Networks[J]. ACM Computing Surveys, 2016, 49(4): 1-69.
- [9] PEARSON K. The Problem of the Random Walk[J]. Nature, 1905, 72(1865): 294-294.
- [10] ZHANG Q, LI M Z, DENG Y. Measure the structure similarity of nodes in complex networks based on relative entropy[J]. Physica A:Statistical Mechanics and its Applications, 2018, 491: 749-763.
- [11] 苏醒. 复杂网络中基于节点相似性的社团检测算法研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2020.
- [12] 刘韶倩. 基于相对熵的网络节点相似性度量研究[D]. 太原: 山西大学, 2020.
- [13] ZHOU H. Distance, dissimilarity index, and network community structure[J]. Physical Review E, 2003, 67(6)

- Pt 1): 061901.
- [14] MITTAL R, BHATIA M P S. Cross-Layer Closeness Centrality in Multiplex Social Networks[C]//2018 9th International Conference on Computing, Communication and Networking Technologies (ICCCNT). Bangalore, India: IEEE Press, 2018: 1-5.
- [15] ZHANG Y, BAO Y, ZHAO S, et al. Identifying Node Importance by Combining Betweenness Centrality and Katz Centrality[C]//International Conference on Cloud Computing and Big Data. Shanghai, China: IEEE Press, 2016: 354-357.
- [16] BOF N, BAGGIO G, ZAMPIERI S. On the Role of Network Centrality in the Controllability of Complex Networks[J]. IEEE Transactions on Control of Network Systems, 2017, 4(3): 643-653.
- [17] ZHOU H. Distance, dissimilarity index, and network community structure[J]. Physical Review E, 2003, 67(6 Pt 1): 061901.
- [18] 郁静. 基于模块度优化的重叠社团检测算法研究与应用[D]. 兰州: 兰州大学, 2020.
- [19] 郭征. 复杂网络的攻击策略研究[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2015.
- [20] 刘同林, 杨芷柔, 张虎, 等. 基于复杂网络的军事通信网络建模与性能分析[J]. 系统工程与电子技术, 2020, 42(12): 2892-2898.

\*\*\*\*\*

(上接第 82 页)

2) 在油罐内同一时刻氧气浓度略有不同, 排气口处的氧气浓度均略大于罐内其他区域, 表明油罐氮气惰化并不是均匀进行, 在惰化过程中必须要考虑惰化死角以及必要安全余量, 否则极易引发安全事故。

3) 油罐内相同位置随着流量不断增加, 达到设定氧气浓度所需时间越短, 惰化效率越高。

## 参考文献:

- [1] 蒋新生, 谢威, 赵亚东, 等. 不同长径比的狭长管道油气爆炸实验[J]. 油气储运, 2020, 39(8): 879-884.
- [2] BLAIR B D, MCKENZIE L M, ALLSHOUSE W B, et al. Is reporting “ significant damage ” transparent? Assessing fire and explosion risk at oil and gas operations in the United States[J]. Energy Research & Social Science, 2017, 29(1): 36-43.
- [3] DOBASHI R. The Eighth International Symposium on Hazards, Prevention, and Mitigation of Industrial Explosions; Fourteenth International Colloquium on Dust Explosions. Ninth Colloquium on Gas, Vapor, Hybrid and Fuel - Air Explosions[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2013, 26(2): 281-282.
- [4] FOMIN P A, CHEN J. Explosion Safety Aspects of Shock Wave-Induced Condensation in Fuel-Rich Gaseous Mixtures[J]. Combustion Science and Technology, 2008, 180(7): 1317-1333.
- [5] 邵垒. 飞机燃油箱耗氧型惰化技术理论与实验研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2018.
- [6] 周福宝, 王德明, 章永久, 等. 浅地表大漏风火区的三相泡沫惰化技术[J]. 煤矿安全, 2005, 36(5): 9-11.
- [7] 李伟用. 氮气惰化技术在煤矿灭火中的应用[J]. 内蒙古煤炭经济, 1996(2): 51.
- [8] 郑中平. 置换通风在数控加工中心油雾净化技术应用[J]. 洁净与空调技术, 2017(3): 115-120.
- [9] XIN S, LI N R, ZHAO S B, et al. Corrosion Behavior for Casing in Producing Well with Water Injection Technology during Long-Term Service[J]. Materials Science Forum, 2020, 993: 1168-1173.
- [10] LI A, ZHENG Z, PENG T. Effect of water injection on the knock, combustion, and emissions of a direct injection gasoline engine[J]. Fuel, 2020, 268(10): 117376.
- [11] 刘瑞, 王冬, 张培理, 等. 某退役油罐氮气惰化数值模拟[J]. 当代化工, 2020, 49(9): 2050-2054.
- [12] NYLAND B, LEE T, LUND M, et al. Prevent Combustible Dust Explosions with N sub 2 Inerting[J]. Chemical Engineering, 2015, 122(3): 64-69.
- [13] CHEN C, WANG T, LIAW H, et al. Nitrogen dilution effect on the flammability limits for hydrocarbons[J]. Journal of Hazardous Materials, 2008, 166(2): 880-890.
- [14] 黄磊, 付啟贵, 侯鹏, 等. PSA 制取氮气的高度纯化[J]. 低温与特气, 2012, 30(2): 19-22.
- [15] 周光华, 钱钧, 刘洪刚, 等. 氮气与液氮防火技术及成本分析[J]. 煤炭技术, 2015, 34(1): 212-214.
- [16] 刘类刚, 姚东升, 刘倩, 等. 浅谈油田污水处理技术在注水工艺中的应用[J]. 河北企业, 2016(6): 190-191.
- [17] 刘文辉, 蒋新生, 何标, 等. 氧气体积分数对油气爆炸特性的影响[J]. 后勤工程学院学报, 2014, 30(5): 47-52.
- [18] SINING C. Application of Inherent safety Explosion-Proof Technology in Oil Storage & Transportation Device[J]. Procedia Engineering, 2011, 15: 4814-4818.
- [19] 董韬, 赵磊. 浅谈油库安全管理[J]. 科技创新导报, 2019, 27(16): 167-169.
- [20] 黄佳林. 油气储运设施安全的重要性[J]. 化工设计通讯, 2020, 46(5): 43-44.