

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.190474

## 基于结构熵的电力骨干通信网抗毁性研究

程紫运<sup>1</sup>, 吕明卉<sup>2</sup>, 田云飞<sup>1</sup>, 余泳<sup>1</sup>, 孙成龙<sup>2</sup>

(1. 国网甘肃省电力公司经济技术研究院, 甘肃 兰州 730050;

2. 华北电力大学电子与通信工程系, 河北 保定 071003)

**摘要:** 电力骨干通信网抗毁性分析对于评价电力通信网络的生存性能, 制定网络的保护策略具有重要的意义。结合复杂网络异构性, 基于电力骨干通信网拓扑结构, 构建了网络节点差异性矩阵。依据电力通信的业务特点, 将链路传输流量作为链路的权重, 构建了网络链路差异性矩阵。融合节点及链路差异性定义了节点重要度及电力骨干通信网的结构熵。以一个实例网络对网络的节点重要度及蓄意攻击下以结构熵为指标的网络抗毁性进行了仿真分析, 结果表明了所提方法的合理性和有效性。

**关键词:** 电力骨干通信网; 抗毁性; 链路传输流量; 网络异构性; 结构熵

### Research on invulnerability for electric power backbone communication network based on structural entropy

CHENG Ziyun<sup>1</sup>, LÜ Minghui<sup>2</sup>, TIAN Yunfei<sup>1</sup>, YU Yong<sup>1</sup>, SUN Chenglong<sup>2</sup>

(1. State Grid Gansu Electric Power Company Economics & Technology Research Institute, Lanzhou 730050, China;

2. Department of Electronic and Communication Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

**Abstract:** It is of great significance to analyze the invulnerability of electric power backbone communication network for evaluating the survivability of electric power communication network and formulating network protection strategies. Based on the heterogeneity of complex networks and the topological structure of electric power backbone communication network, the network node difference matrix is constructed. According to the characteristics of power communication services, the network link difference matrix is constructed with regarding the link traffic as the link weight. Combining the differences of nodes and links, the importance of nodes and the structural entropy of electric power backbone communication network are defined. For a practical network, the simulation analysis of node importance and network invulnerability under intentional attack based on structural entropy is carried out, and the results show that the method proposed in this paper is more accurate and effective for electric power backbone communication network than other comparative methods.

This work is supported by Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (No. 5700-201919238A-0-0-00) and Science and Technology Project of State Grid Gansu Provincial Electric Power Company (No. 271833-KXKJ-034).

**Key words:** electric power backbone communication network; invulnerability; link traffic; network heterogeneity; structure entropy

## 0 引言

随着智能电网建设的大力推进, 合理评估电网

运行面临的攻击威胁变得愈发重要<sup>[1-2]</sup>。电力骨干通信网作为电力通信网的核心网络, 是构建能源互联网的重要支撑网络, 其可靠性对于电网的安全稳定运行有着重要影响<sup>[3-4]</sup>。为保障电网的安全稳定运行, 研究电力骨干通信网的抗毁性, 并依据抗毁性分析结果制定网络的运维策略具有重要意义。

目前常规的网络抗毁性分析一般以连接度<sup>[5-6]</sup>、

基金项目: 国家电网公司科技项目资助(5700-201919238A-0-0-00); 国网甘肃省电力公司科技项目资助(271833-KXKJ-034)

介数中心度<sup>[7-9]</sup>、集聚系数<sup>[10-11]</sup>等为指标, 采用生成树法<sup>[12]</sup>、跳面节点法<sup>[13]</sup>等方法, 在网络节点或链路失效的情况下通过对网络抗毁性演进开展相关研究<sup>[14]</sup>。随着复杂网络研究的深入, 熵作为一种复杂系统异构性的测度指标在网络特性研究中得到应用<sup>[15-17]</sup>, 并成为复杂网络研究的焦点之一。基于网络结构特性, 先后提出了度分布熵<sup>[18]</sup>、网络结构熵<sup>[19-21]</sup>等。在基于结构熵的网络抗毁性研究方面, X. GAO 等人研究了军事异构网络的抗毁性, 得到了较好的研究结果<sup>[22]</sup>。但这些研究均侧重于从网络拓扑结构方面来分析网络的特性。作为一个专用的通信网络, 电力通信网中的业务具有明显的行业特色, 考虑业务因素来研究网络的抗毁性是十分必要的。文献[23]考虑业务传输有效性受多个因素影响, 提出了通过动态更新链路权值实现负载均衡来提高网络抗毁性的分析方法。文献[24]综合考虑网络失效场景下业务的损失给网络造成的风险来衡量网络的性能。文献[25]综合考虑业务与拓扑定义了网络加权自然连通度, 提出了节点融合重要度以更加准确地辨识网络关键节点。文献[26]综合考虑电力通信网节点业务重要度和传输能力作为节点重要度指标用以更加准确地辨识网络关键节点。文献[27]提出了一种基于电力业务重要性的方法识别网络关键节点。

为从网络节点、链路及网络承载业务等多方面综合考虑网络的抗毁性, 本文基于复杂网络结构异构性分析方法, 结合电力骨干通信网的拓扑结构、网络承载的业务流量, 建立了融合网络拓扑及业务承载特性的节点重要度评价指标, 并据此给出反映电力骨干通信网抗毁性的结构熵指标。通过仿真对实例网络的节点重要度进行计算, 并在蓄意攻击下对网络结构熵指标随节点失效的演进过程进行仿真分析。结果表明, 结构熵指标能够较好地适用于电力骨干通信网的抗毁性评价中。

## 1 电力骨干通信网结构熵理论

### 1.1 网络异构性与结构熵概念

熵是热力学中表征物质状态的一个物理量, 在网络中用来表示网络的混乱程度, 也就是无序程度, 即网络的“差异性”, 也称为“异构性”。从网络结构特征来看, 系统中不同连接状态越多, 系统越混乱, 其熵值越小; 反之, 若系统连接状态越趋向于单一化, 表明系统越有序, 其熵值就越大。反映网络连接特征的熵有度分布熵、网络结构熵等。其中度分布熵是关于网络节点度概率分布  $p(k_i)$  的网络异构性测度<sup>[18]</sup>, 其表达式为  $H = -\sum_{i=1}^{N-1} p(k_i) \log p(k_i)$ ,

其中:  $k_i$  为节点  $v_i$  的的度;  $N$  为网络中节点数目。此方法只考虑节点差异性一个因素来描述网络结构熵, 不能全面反映网络异构性。

而网络结构熵同时反映了网络节点和链路的异构性, 因此通过定义网络的节点差异性和链路差异性, 并基于二者加权和来构建网络的差异性并以此定义网络节点重要性。在此基础上以节点重要度为网络的异构性测度来定义网络结构熵。本文在网络结构熵的基础上, 结合网络链路流量来构建网络结构熵指标并以此来研究网络的抗毁性。

### 1.2 电力骨干通信网结构熵

对于一个含有  $N$  个节点、 $M$  条链路的电力骨干通信网, 其网络拓扑图可用图  $G = (V, E)$  来表示, 其中  $V = \{v_1, v_2, \dots, v_N\}$  表示网络节点, 即电力骨干通信网中的电力通信设备;  $E = \{e_1, e_2, \dots, e_M\}$  表示连接通信设备之间的链路。图  $G$  的邻接矩阵  $A(G)$  可表示为

$$A(G) = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1N} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2N} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{N1} & a_{N2} & \cdots & a_{NN} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$A(G)$  中的元素  $a_{ij} (i, j \in \{1, 2, \dots, N\})$  定义为:

$a_{ij} = 0$  表示节点  $v_i$  与节点  $v_j$  间无链路或链路工作状态失效;  $a_{ij} = 1$  表示节点  $v_i$  与节点  $v_j$  间有链路且链路工作状态正常。

根据网络的邻接矩阵可以定义节点差异性矩阵  $S(G)$ , 表示为

$$S(G) = \begin{bmatrix} s_{11} & s_{12} & \cdots & s_{1N} \\ s_{21} & s_{22} & \cdots & s_{2N} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ s_{N1} & s_{N2} & \cdots & s_{NN} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中元素  $s_{ij}$  定义为<sup>[15]</sup>

$$s_{ij} = [1 - p(k_i)] \cdot N \cdot a_{ij} \quad (3)$$

式中,  $p(k_i)$  为节点  $v_i$  连接度分布概率。节点差异性可理解为与节点  $v_i$  连接链路数量不同的节点概率的差异。根据节点差异性的定义<sup>[15]</sup>, 若一个网络中所有节点的连接度均相同, 则该网络为一个规则网络, 其节点异构程度最低; 反之, 若一个网络所有节点的度均不同, 则网络节点的异构程度达到最大。

电力骨干通信网作为电力通信网的核心网络, 承载了保障电网稳定可靠运行的电力生产、管理类业务, 网络的承载的业务量可以通过网络承载的业务数量、业务类型、业务速率等级来反映, 也可以通过网络中链路承载的业务数据流量来体现。在分析电力骨干通信网的网络性能时, 将链路承载的业

务流量作为一个因素加以考虑,更能反映网络的实际情况。

设  $W(G)$  为图  $G$  的流量加权矩阵,  $E_{ij}$  为节点  $v_i$  与  $v_j$  所连链路的链路流量权值,  $W(G)$  中的元素  $w_{ij}$  定义为:  $w_{ij}=0$  表示节点  $v_i$  与节点  $v_j$  间无链路、链路工作状态失效或没有承载业务;  $w_{ij}=E_{ij}$  表示节点  $v_i$  与节点  $v_j$  间有链路且链路工作状态正常并承载业务。

由于网络中不同通信链路承载的业务不同导致链路流量不同,为体现具有相似拓扑连接的链路区分度,以链路流量作为权重来计算链路的差异性是十分必要的,由此定义电力骨干通信网链路差异性矩阵为

$$D(G) = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & \cdots & d_{1N} \\ d_{21} & d_{22} & \cdots & d_{2N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ d_{N1} & d_{N2} & \cdots & d_{NN} \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中,元素  $d_{ij}$  表示为<sup>[15]</sup>

$$d_{ij} = k_i \cdot [1 - p(k_i)] \cdot N \cdot w_{ij} \quad (5)$$

此时的链路差异性可理解为链路所连节点的连接度差异和链路流量差异。

由节点差异性矩阵  $S(G)$  和链路差异性矩阵  $D(G)$ , 可得网络异构性矩阵  $X(G)$ , 表示为

$$X(G) = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1N} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{N1} & x_{N2} & \cdots & x_{NN} \end{bmatrix} \quad (6)$$

其中  $X(G)$  的元素  $x_{ij}$  为

$$x_{ij} = \alpha s_{ij} + \beta d_{ij} = \alpha [1 - p(k_i)] \cdot N \cdot a_{ij} + \beta k_i [1 - p(k_i)] \cdot N \cdot w_{ij} \quad (7)$$

式中:  $\alpha$  为节点差异性的权重;  $\beta$  为链路差异性的权重。二者满足  $\alpha + \beta = 1$ ,  $0 \leq (\alpha, \beta) \leq 1$ 。二者取值反映节点及链路差异对网络整体异构性的影响程度。由于电力骨干通信网中,不同通信链路承载业务的差异性较为明显,因此融合业务流量的链路异构性影响更为明显。本文以链路差异性为主,节点差异性为辅,在设定权重矩阵  $S = [\alpha, \beta] = [1, 2]$  的情况下,用变异系数法<sup>[28]</sup>得系数  $\alpha = 1/3$ 、 $\beta = 2/3$ 。

根据网络异构性矩阵,可求得各节点重要度  $I_i$ , 其表达式为

$$I_i = \frac{\sum_{j=1}^N x_{ij}}{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N x_{ij}} \quad (8)$$

结合信息论中熵的计算方法和式(8)节点重要

度计算方法,可得电力骨干通信网结构熵  $H$ , 其计算公式为

$$H = - \sum_{i=1}^N (I_i \cdot \ln I_i) \quad (9)$$

由熵的定义可知:网络中各节点重要度值差别越小,则网络越“有序”,结构熵越大;网络各节点重要度差别越大,网络越“无序”,结构熵越小。当网络节点或链路受到攻击而失效时,网络差异性 & 结构熵产生变化,进而实现网络抗毁性的分析。

## 2 算例分析

为验证本文方法的合理性及有效性,采用图 1 所示的实例网络进行了仿真对比分析。该网络为一个具有 16 个节点、19 条链路的局部电力骨干通信网络,其节点度分布如图 2 所示。该电力骨干通信网中,各通信链路的业务流量如表 1 所示。同时为了方便计算,所有业务均按统一带宽单位(1 Gbit/s)进行简化折算。

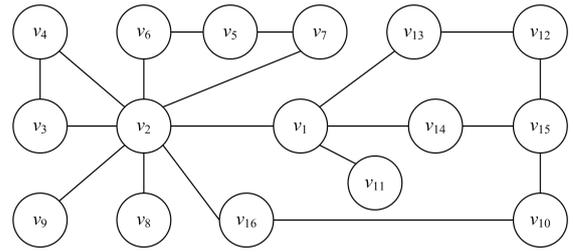


图 1 目标网络拓扑

Fig. 1 Target network topology

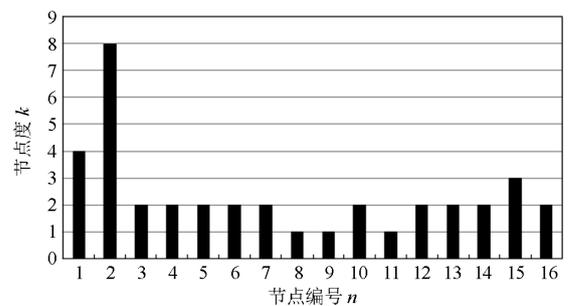


图 2 网络节点度分布

Fig. 2 Network node degree distribution

利用该网络对本文提出的电力骨干通信网节点重要度、结构熵指标进行仿真,并在蓄意攻击方式下分析网络抗毁性的演进过程。

依据式(1)一式(8),可计算目标网络的节点重要度值  $I_i$ 。同时以度分布熵<sup>[18]</sup>、文献[19]中的 Wu 结构熵作为对比算法,对应计算结果如表 2 所示。

表 1 电力骨干通信网链路业务流量  
Table 1 Link service traffic of power backbone communication network

| 序号       | 节点对                  | 业务流量/(Gbit/s) | 计算设置/( $N \times 1$ Gbit/s) |
|----------|----------------------|---------------|-----------------------------|
| $e_1$    | ( $v_1, v_2$ )       | 5.120         | 5                           |
| $e_2$    | ( $v_1, v_{11}$ )    | 1.536         | 2                           |
| $e_3$    | ( $v_1, v_{13}$ )    | 2.122         | 2                           |
| $e_4$    | ( $v_1, v_{14}$ )    | 2.122         | 2                           |
| $e_5$    | ( $v_2, v_3$ )       | 5.120         | 5                           |
| $e_6$    | ( $v_2, v_4$ )       | 4.096         | 4                           |
| $e_7$    | ( $v_2, v_6$ )       | 3.622         | 4                           |
| $e_8$    | ( $v_2, v_7$ )       | 4.096         | 4                           |
| $e_9$    | ( $v_2, v_8$ )       | 4.096         | 4                           |
| $e_{10}$ | ( $v_2, v_9$ )       | 3.584         | 4                           |
| $e_{11}$ | ( $v_2, v_{16}$ )    | 4.096         | 4                           |
| $e_{12}$ | ( $v_3, v_4$ )       | 1.024         | 1                           |
| $e_{13}$ | ( $v_5, v_6$ )       | 1.024         | 1                           |
| $e_{14}$ | ( $v_5, v_7$ )       | 1.024         | 1                           |
| $e_{15}$ | ( $v_{10}, v_{15}$ ) | 1.536         | 2                           |
| $e_{16}$ | ( $v_{10}, v_{16}$ ) | 1.024         | 1                           |
| $e_{17}$ | ( $v_{12}, v_{13}$ ) | 1.024         | 1                           |
| $e_{18}$ | ( $v_{12}, v_{15}$ ) | 1.536         | 2                           |
| $e_{19}$ | ( $v_{14}, v_{15}$ ) | 1.536         | 2                           |

表 2 节点重要度对比  
Table 2 Comparison of node importance

| 节点       | 度分布熵 <sup>[18]</sup> |    | Wu 结构熵 <sup>[19]</sup> |    | 本文方法  |    |
|----------|----------------------|----|------------------------|----|-------|----|
|          | 节点重要度                | 排名 | 节点重要度                  | 排名 | 节点重要度 | 排名 |
| $v_1$    | 0.142                | 2  | 0.105                  | 2  | 0.101 | 2  |
| $v_2$    | 0.258                | 1  | 0.211                  | 1  | 0.218 | 1  |
| $v_3$    | 0.034                | 7  | 0.053                  | 4  | 0.062 | 4  |
| $v_4$    | 0.034                | 7  | 0.053                  | 4  | 0.062 | 4  |
| $v_5$    | 0.034                | 7  | 0.053                  | 4  | 0.034 | 13 |
| $v_6$    | 0.034                | 7  | 0.053                  | 4  | 0.062 | 4  |
| $v_7$    | 0.034                | 7  | 0.053                  | 4  | 0.062 | 4  |
| $v_8$    | 0.049                | 4  | 0.026                  | 14 | 0.029 | 14 |
| $v_9$    | 0.049                | 4  | 0.026                  | 14 | 0.029 | 14 |
| $v_{10}$ | 0.034                | 7  | 0.053                  | 4  | 0.043 | 10 |
| $v_{11}$ | 0.049                | 4  | 0.026                  | 14 | 0.029 | 14 |
| $v_{12}$ | 0.034                | 7  | 0.053                  | 4  | 0.043 | 10 |
| $v_{13}$ | 0.034                | 7  | 0.053                  | 4  | 0.043 | 10 |
| $v_{14}$ | 0.034                | 7  | 0.053                  | 4  | 0.053 | 9  |
| $v_{15}$ | 0.114                | 3  | 0.079                  | 3  | 0.070 | 3  |
| $v_{16}$ | 0.034                | 7  | 0.053                  | 4  | 0.062 | 4  |

由表 2 的仿真结果可得, 本文评价方法得到的节点重要度结果与文献[18]中的度分布熵和文献[19]

所提到的 Wu 结构熵总体上有一定的相似性, 说明了本文评价方法的有效性。但同时也存在差异性, 其中, 文献[18]的度分布熵评估方法仅以网络节点度分布为指标计算节点的重要度, 文献[19]的 Wu 结构熵方法也主要是偏向利用节点度来计算节点的重要度。因此对于考虑网络承载业务时, 这两种方法在实用性方面存在较大不足。本文所提方法不仅考虑了节点的度、度分布对网络的贡献, 同时融合了业务流量, 在一定程度上强化了网络的业务承载特性, 从而使评估更全面, 评估结果更符合实际。

依据本文方法求得的节点重要度的结果, 结合式(9), 可得到图 1 网络的结构熵。以度分布熵<sup>[18]</sup>、Wu 结构熵<sup>[19]</sup>两种方法求得的结构熵为对比, 结果如表 3 所示。

表 3 结构熵值对比

| Table 3 Comparison of structure entropy |                      |                        |       |
|-----------------------------------------|----------------------|------------------------|-------|
|                                         | 度分布熵 <sup>[18]</sup> | Wu 结构熵 <sup>[19]</sup> | 本文方法  |
| 结构熵                                     | 2.470                | 2.602                  | 2.591 |

为分析网络节点对网络整体抗毁性的贡献大小, 按节点序号令节点依次失效, 计算各节点失效后网络结构熵整体的变化。通过分析各节点失效前后结构熵的变化大小从而判定节点对网络的贡献, 仿真结果如表 4 所示, 其中各值表示移除节点后对应结构熵的减少值。

表 4 移除各节点后的网络结构熵变化值

| Table 4 Network structure entropy change value after removing each node |                      |                        |       |
|-------------------------------------------------------------------------|----------------------|------------------------|-------|
| 节点                                                                      | 度分布熵 <sup>[18]</sup> | Wu 结构熵 <sup>[19]</sup> | 本文方法  |
| $v_1$                                                                   | 0.746                | 0.679                  | 0.115 |
| $v_2$                                                                   | 0.807                | 0.782                  | 0.156 |
| $v_3$                                                                   | 0.283                | 0.398                  | 0.021 |
| $v_4$                                                                   | 0.283                | 0.398                  | 0.021 |
| $v_5$                                                                   | 0.283                | 0.398                  | 0.033 |
| $v_6$                                                                   | 0.283                | 0.398                  | 0.030 |
| $v_7$                                                                   | 0.283                | 0.398                  | 0.030 |
| $v_8$                                                                   | 0.465                | 0.239                  | 0.051 |
| $v_9$                                                                   | 0.465                | 0.239                  | 0.051 |
| $v_{10}$                                                                | 0.283                | 0.239                  | 0.059 |
| $v_{11}$                                                                | 0.465                | 0.239                  | 0.072 |
| $v_{12}$                                                                | 0.283                | 0.500                  | 0.064 |
| $v_{13}$                                                                | 0.283                | 0.500                  | 0.047 |
| $v_{14}$                                                                | 0.283                | 0.239                  | 0.082 |
| $v_{15}$                                                                | 0.680                | 0.500                  | 0.095 |
| $v_{16}$                                                                | 0.283                | 0.500                  | 0.027 |

由表 4 的比较结果,可以看出,目标网络在移除各节点后三种结构熵的变化基本遵循了一个基本相同的变化趋势,这表明了本文方法是有效的。同时,由于本文结构熵考虑了网络中的业务流量,与另外两种方法相比,使得不同节点之间对网络的贡献的区分度更加明显,如对于节点  $v_4-v_6$ ,度分布熵和网络结构熵计算所得结果相同,表明这些节点对网络的贡献是相同的,而本文方法计算的结果表现出了明显不同的贡献度。

同时,对于图 1 所示的初始网络拓扑,节点度最大的是节点  $v_2$ 。若按照节点度从大到小的顺序令节点依次失效(节点失效仅删除与失效节点相连的链路而保留失效节点),则首先失效的是节点  $v_2$ 。 $v_2$  失效后,其拓扑图如图 3 所示。此时,节点连接度分布如图 4 所示,由图 2 和图 4 对比可得,原始网络度分布差异性更大,故而原始网络结构熵更大,表 4 中的计算结果与此是一致的。

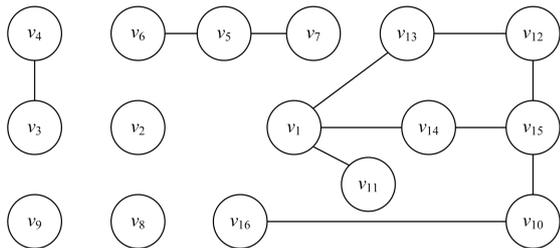


图 3 节点  $v_2$  失效后的网络拓扑

Fig. 3 Network topology after node  $v_2$  invalidated

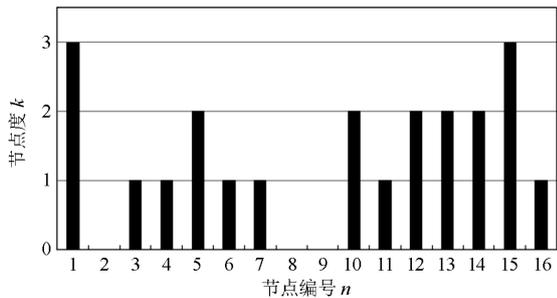


图 4 节点  $v_2$  失效后的度分布

Fig. 4 Degree distribution after node  $v_2$  invalidated

为了模拟网络抗毁性的演进过程,以本文提出的结构熵为评价指标,选择蓄意攻击方式,按照表 4 中网络结构熵减小值由大到小的顺序依次攻击各节点,得到的节点损失率与电力骨干通信网结构熵的关系如图 5 所示。

由图 5 可以看出,在蓄意攻击下,电力骨干通信网的结构熵值的变化整体呈现“快、慢和快”的趋势,也表征了在蓄意攻击下网络毁损性的演进过程。在攻击初始阶段,网络中重要节点被破坏,熵

值迅速下降,对网络造成的损失明显。但由于受到攻击破坏的节点数量较少,网络的性能整体可控,若运维部门及时采取控制措施即可抑制网络性能的继续恶化;在第二阶段中,受攻击的节点为中等重要节点,此时系统基本趋于一种稳定状态,结构熵随节点损失变化趋于稳定,其值下降不明显;在最后一个阶段,由于网络中遭受攻击的节点较多,网络趋于崩溃,因此网络的熵值迅速下降,直至最终崩溃。由此可见,网络结构熵指标较好地表征了系统运行情况。

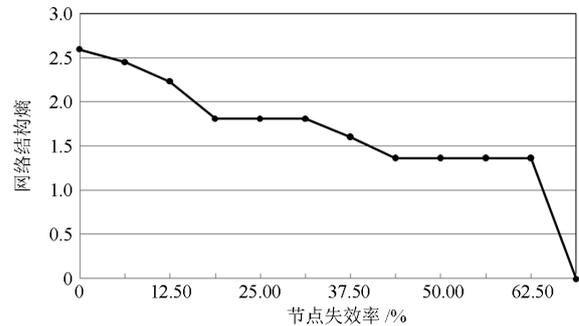


图 5 节点损失率与结构熵关系

Fig. 5 Relationship between node loss rate and structural entropy

### 3 结论

本文首先通过网络邻接矩阵和链路流量加权矩阵,构造节点差异性矩阵和链路差异性矩阵,进而得到表示网络异构性的网络异构性矩阵,并通过异构性矩阵定义了电力骨干通信网的节点重要度计算方法;然后模仿信息论中的信息熵,定义电力骨干通信网的结构熵;最后利用结构熵对实例网络的抗毁性进行了仿真分析,仿真结果表明了算法的有效性。与其他熵值算法相比,本文算法在考虑节点和链路的基础上,综合了链路的业务流量,更全面地考虑了影响电力骨干通信网抗毁性的因素,对电力通信网的抗毁性理论分析及实际运行维护均具有重要的指导意义。

### 参考文献

[1] 周静,孙媛媛,胡紫巍,等. 智能电网信息通信架构演进探讨[J]. 中国电力, 2018, 51(3): 131-135.  
 ZHOU Jing, SUN Yuanyuan, HU Ziwei, et al. Discussion on smart grid information & communication architecture evolution[J]. Electric Power, 2018, 51(3): 131-135.

[2] 田继伟,王布宏,李夏. 智能电网状态维持拓扑攻击及其对经济运行的影响[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(1): 50-56.  
 TIAN Jiwei, WANG Buhong, LI Xia. Maintenance of topology attacks on smart grid status and its impact on

- economic operation[J]. *Power System Protection and Control*, 2018, 46(1): 50-56.
- [3] 陈甜月, 刘逢清, 徐宁. 电力通信网可靠性影响因素的权重分析[J]. *光通信研究*, 2016(6): 30-32.  
CHEN Tianyue, LIU Fengqing, XU Ning. Weight analysis of different influence factors on reliability of power communication networks[J]. *Study on Optical Communications*, 2016(6): 30-32.
- [4] 崔力民, 耿子惠, 舒勤, 等. 考虑电网关联度的电力通信网关键环节识别[J]. *电力建设*, 2017, 38(5): 124-132.  
CUI Limin, GENG Zihui, SHU Qin, et al. Key link identification in electric power communication network considering grid correlation degree[J]. *Electric Power Construction*, 2017, 38(5): 124-132.
- [5] ZHONG Jilong, ZHANG Fengming, LI Zhengxin. Identification of vital nodes in complex network via belief propagation and node reinsertion[J]. *IEEE Access*, 2018, 6: 29200-29210.
- [6] LI Hongbo, ZHAO Yuming, BAI Jinbo, et al. Comparative study in complex network: node degree and topological potential[C] // 2017 2nd International Conference on Image, Vision and Computing (ICIVC), June 2-4, 2017, Chengdu, China: 928-932.
- [7] WANG Chenxu, LIN Ziyuan. An efficient approximation of betweenness centrality for uncertain graphs[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 61259-61272.
- [8] JAMOUR F, SKIADOPOULOS S, KALNIS P. Parallel algorithm for incremental betweenness centrality on large graphs[J]. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, 2017, 29(3): 659-672.
- [9] LEDWOCH A, BRINTRUP A, MEHNEN J, et al. Systemic risk assessment in complex supply networks[J]. *IEEE Systems Journal*, 2016, 12(2): 1826-1837.
- [10] DENG Xiaolong, ZHAI Jiayu, LÜ Tiejun, et al. Efficient vector influence clustering coefficient based directed community detection method[J]. *IEEE Access*, 2017, 5: 17106-17116.
- [11] ZHANG Peixing, YAO Haipeng, LIU Yunjie. Virtual network embedding based on the degree and clustering coefficient information[J]. *IEEE Access*, 2016, 4: 8572-8580.
- [12] MAN Xin, MAO Dun, LIN Xiaohong, et al. Object tracking using sparsity based discriminative minimum-spanning-tree[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 28726-28733.
- [13] 魏德宾, 秦玉帆, 于冉. 一种卫星网络拓扑抗毁性评价方法的研究[J]. *计算机科学*, 2016, 43(增刊 2): 301-303, 310.  
WEI Debin, QIN Yufan, YU Ran. Research on satellite network topologies survivability evaluation method[J]. *Computer Science*, 2016, 43(S2): 301-303, 310.
- [14] 王汪兵, 王先培, 尤泽樟, 等. 电力通信网关键节点辨识方法研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2018, 46(1): 44-49.  
WANG Wangbing, WANG Xianpei, YOU Zezhang, et al. Research on key node identification method in electric power communication network[J]. *Power System Protection and Control*, 2018, 46(1): 44-49.
- [15] 蔡萌, 杜海峰, 任义科, 等. 一种基于点和边差异性的网络结构熵[J]. *物理学报*, 2011, 60(11): 165-173.  
CAI Meng, DU Haifeng, REN Yike, et al. A new network structure entropy based node difference and edge difference[J]. *Acta Physica Sinica*, 2011, 60(11): 165-173.
- [16] 黄丽亚, 霍宥良, 王青, 等. 基于K-阶结构熵的网络异构性研究[J]. *物理学报*, 2019, 68(1): 325-336.  
HUANG Liya, HUO Yuliang, WANG Qing, et al. Network heterogeneity based on K-order structure entropy[J]. *Acta Physica Sinica*, 2019, 68(1): 325-336.
- [17] LI Angsheng, PAN Yicheng. Structural information and dynamical complexity of networks[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2016, 62(6): 3290-3339.
- [18] 朱家明, 蒋沅, 赵平. 复杂网络提高的抗毁性优化设计仿真[J]. *计算机仿真*, 2018, 35(4): 278-282.  
ZHU Jiaming, JIANG Yuan, ZHAO Ping. Optimization design simulation of improved survivability for complex network[J]. *Computer Simulation*, 2018, 35(4): 278-282.
- [19] 蔡萌, 杜海峰, 费尔德曼. Caveman 网络及其在复杂网络熵分析中的应用[J]. *系统工程理论与实践*, 2017, 37(9): 2403-2412.  
CAI Meng, DU Haifeng, FELDMAN. Caveman network and its application in analysis of complex network entropy[J]. *Systems Engineering—Theory & Practice*, 2017, 37(9): 2403-2412.
- [20] 胡春梦. 基于无标度理论的无线传感器网络抗毁性优化方法[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2017.  
HU Chunmeng. Invulnerability optimization method of wireless sensor networks based on the theory of scale-free[D]. Xi'an: Xidian University, 2017.
- [21] 蔡萌, 杜海峰, 费尔德曼. 一种基于最大流的网络结构熵[J]. *物理学报*, 2014, 63(6): 102-112.  
CAI Meng, DU Haifeng, FELDMAN. A new network structure entropy based on maximum flow[J]. *Acta Physica Sinica*, 2014, 63(6): 102-112.
- [22] GAO Xiue, LI Keqiu, CHEN Bo. Invulnerability measure of a military heterogeneous network based on network structure entropy[J]. *IEEE Access*, 2017, 6: 6700-6708.
- [23] 高会生, 王宇佳. 电力调度数据网综合 QoS 模型[J].

- 光通信研究, 2018(2): 26-28.  
GAO Huisheng, WANG Yujia. Comprehensive QoS model of power dispatching data network[J]. Study on Optical Communications, 2018(2): 26-28.
- [24] GAO Huisheng, HE Yujun. Risk assessment modelling for power optical backbone communication network based on MLFSR-oriented sampling Markov technique[J]. International Journal of Industrial and Systems Engineering, 2018, 30(4): 468-485.
- [25] 汪洋, 高晗星, 周生平, 等. 融合拓扑及业务特性的电力通信网关键节点识别[J]. 中国电力, 2018, 51(10): 116-123.  
WANG Yang, GAO Hanxing, ZHOU Shengping, et al. Node identification for electric power communication network based on characteristics of topology and services[J]. Electric Power, 2018, 51(10): 116-123.
- [26] 李莉, 朱正甲, 宋欣桐, 等. 基于业务的电力通信网重要节点辨识[J]. 电力信息与通信技术, 2018, 16(6): 62-66.  
LI Li, ZHU Zhengjia, SONG Xintong, et al. Service-based node identification of power communication network[J]. Electric Power Information and Communication Technology, 2018, 16(6): 62-66.
- [27] 李昌超, 康忠健, 于洪国, 等. 考虑电力业务重要性的电力通信网关键节点识别[J]. 电工技术学报, 2019, 34(11): 2384-2394.  
LI Changchao, KANG Zhongjian, YU Hongguo, et al. Identification of key nodes in power communication network considering the importance of power businesses[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(11): 2384-2394.
- [28] 李明洋, 张利军, 徐宇嘯, 等. 电力通信光传输网综合评估方法研究[J]. 光通信技术, 2016, 40(1): 5-7.  
LI Mingyang, ZHANG Lijun, XU Yuxiao, et al. Research on the comprehensive assessment model of electric power communication optical transmission network[J]. Optical Communication Technology, 2016, 40(1): 5-7.

---

收稿日期: 2019-04-28; 修回日期: 2019-08-24

作者简介:

程紫运(1992—), 女, 硕士, 工程师, 研究方向为通信与智能化规划技术。E-mail: 496443873@qq.com

(编辑 周金梅)