

DOI: 10.7667/PSPC162023

电力通信网关键节点辨识方法研究

王汪兵, 王先培, 尤泽樟, 茹文凯

(武汉大学电子信息学院, 湖北 武汉 430072)

摘要: 随着智能电网建设的推进, 作为电力系统通信专网的电力通信网结构日渐复杂, 承载业务量也日益增多。为准确辨识电力通信网的关键节点, 提出多评价指标的关键节点辨识方法。首先按照网络拓扑情况和节点凝聚度计算各节点的静态重要度, 根据节点所承担业务数量和种类计算各节点的业务重要度。然后利用三标度层次分析法确定两个指标的权重。最后根据指标及其权重计算各节点重要度, 完成电力通信网的关键节点辨识。仿真表明, 相对于其他算法, 该算法能够更好地综合电力通信网拓扑特性和节点业务量情况, 全面体现出各节点在电力通信网中的地位和作用, 对电力通信网的运行风险评估具有重要参考价值。

关键词: 节点辨识; 重要度评估; 电力业务; 电力通信网; 智能电网

Research on key node identification method in electric power communication network

WANG Wangbing, WANG Xianpei, YOU Zezhong, RU Wenkai

(School of Electronic Information, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: Along with the advancement of the smart grid construction, the structure of power communication network is becoming more and more complicated, and the business carrying capacity is also increasing. In order to accurately identify the crucial nodes of the power communication network, a new node identification method with multi-evaluation index is proposed. Firstly, the static importance degree of each node is calculated according to the network topology and node cohesion, and the service importance is calculated according to the number and kinds of services borne by the nodes. Then the weights of the two indexes are determined by the three-level analytic hierarchy process. Finally node identification is calculated by the index and its weights. The simulation results show that the proposed algorithm better integrates the topological characteristics of power communication network and node traffic situation compared with other algorithms, fully reflects the position and role of each node in the power communication network, and also has important reference value in power communication network operational risk evaluation.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 50677047) and Natural Science Foundation of Hubei Province (No. 2015CFB563).

Key words: node identification; importance evaluation; electric services; power communication network; smart grid

0 引言

电力通信网是电网二次系统不可或缺的组成部分, 是专门服务于电力系统稳定运行的通信专网, 同时也为电力系统的调度、生产、经营和管理以及保障电力系统的安全运行起到了重要作用^[1-5]。近年来, 随着智能电网建设的不断推进, 电力通信网的网络结构日趋复杂, 同时承载的业务数量以及种类

也日益增多^[6-9]。相关研究表明, 在无标度网络中5%的关键节点受到攻击失效后, 就可以使整个网络系统崩溃进而瘫痪^[10-11]。因此, 对电力通信网关键节点的辨识研究已成为一个重要课题^[12-14]。通过对电力通信网中的节点重要度进行排序, 进而对网络中的关键节点进行保护, 能够有效增强电力通信网抵抗攻击的能力, 降低电网的运行风险, 保障电力系统的安全稳定运行。

在众多复杂网络中, 对具体的电力通信网络关键节点辨识研究尚处于起步阶段, 但对于复杂网络中关键节点的辨识已经取得了较大进展。目前主要

从系统科学和社会网络两个角度分析网络节点的重要程度^[11]。其中系统科学分析方法的核心思想是节点的重要程度等价于该节点或者多个节点被删除后对网络的破坏性,例如,节点收缩法^[16]是通过分析网络中相关节点收缩前后网络凝聚度的变化对节点的重要性进行评估,文献[17]在节点收缩法的基础上考虑了各节点之间相互作用的强弱程度,利用加权网络刻画节点间的作用细节来确定该节点重要程度。节点删除法^[16]通过删除网络中某个节点后,利用网络连通性等指标的变化来确定该节点重要程度。另一类社会网络分析方法的核心思想是重要性等价于显著性,利用节点的度、介数、特征向量等特征属性作为区分节点重要性的评价指标,这些评价指标从不同角度刻画了单个节点在网络中的重要程度。例如,介数法是通过计算网络节点间最短路径经过节点的数目,利用节点的介数来评价节点重要性,但这种方法算法复杂度较高,并不适用于识别电力通信网等复杂网络的关键节点方面。

但是电力通信网作为具体的复杂网络,具有明显的行业特征,上文提到的复杂网络的关键节点辨识方法不能够全面、有效地反映出电力通信网节点在网络中的重要性,具有一定的局限性。因此,在评价电力通信网的节点重要度时,需要考虑实际网络中各节点的具体位置以及承担的业务量情况。针对这一问题,本文考虑电力通信网的具体背景,结合各节点在实际网络拓扑中的位置以及业务量承担情况,利用节点的静态重要度以及业务重要度作为通信网关键节点评价指标,根据这两个评价指标利用层次分析法确定每个指标权重,完成对通信网的关键节点辨识,为加强电力通信网的风险管理和控制提供重要参考。

1 节点重要度衡量指标

电力通信网可以看成许多节点和链路的集合,根据电力通信网静态拓扑结构确定通信网对应的无向网络,确定网络中每个节点承担的负载业务信息,包括所执行业务的类型及数量。复杂网络可以用 $G(V, E)$ 来表示,其中 G 表示一个无向连通图, V 为复杂网络中所有节点的集合, E 为所有边的集合。

1.1 节点静态重要度

将电力通信网抽象为无向连通图,那么可以根据网络拓扑中的节点收缩程度判断节点的凝聚度,而收缩后网络凝聚程度越高的节点越重要,因此可以用凝聚度来判断节点的静态重要性。根据电力骨干网络的基本拓扑图,初始化该无向连通图的链路值,进而得到该无向连通图对应的加权邻接矩阵。

采用加权邻接矩阵根据经典的 Dijkstra 算法^[18]得到节点对之间的最短路径,计算得到最短路径经过的链路个数,进而得到全网中每个节点对之间的最短路径的平均距离。

由于网络的凝聚程度取决于网络中各个节点之间的连通能力,即取决于网络中节点数目 n 和节点间平均路径长度 l ,平均路径长度 l 是所有节点对之间最短距离的算术平均值,将网络凝聚度 $\partial[G]$ 定义为节点数 n 与平均路径长度 l 乘积的倒数,那么

$$\partial[G] = \frac{1}{n \cdot l} = \frac{1}{\sum_{i \neq j \in N} d_{ij}} = \frac{n-1}{\sum_{i \neq j \in N} d_{ij}} \quad (1)$$

式中, d_{ij} 表示电力通信网节点 i 到节点 j 链路间加权路径的最短距离。

那么仅从电力通信网的静态网络拓扑结构得到的节点静态重要度 $I(v_i)$ 为

$$I(v_i) = 1 - \frac{\partial[G_i]}{\partial[G]} \quad (2)$$

式中, $\partial[G_i]$ 表示将节点 v_i 收缩后得到的新网络拓扑图的网络凝聚度,由式(1)和式(2)可以进一步得到

$$I(v_i) = \frac{n \cdot l(G) - (n - k_i) \cdot l(G_i)}{n \cdot l(G)} \quad (3)$$

式(3)中, k_i 表示与节点 v_i 相连节点的个数。可以看出,网络节点 v_i 的静态重要度指标取决于两个因素:1)与节点 v_i 相连接的节点个数 k_i ;2)节点 v_i 在网络中所处的位置。相同条件下,如果与节点 v_i 连接的节点个数(k_i)越多,则将该节点收缩以后网络中节点的数目就越多,网络的凝聚度就越大,说明该节点越重要。如果节点 v_i 处于中心位置,则很多节点对之间的最短路径都要经过该节点,那么当把节点 v_i 收缩以后网络的平均路径长度将大大减小,网络凝聚度就越大,该节点的静态重要度就越高。

1.2 节点业务重要度

静态重要度对节点重要度的衡量是从节点在网络中的位置以及连接情况等方面进行的,然而在实际的电力通信网结构中,节点都承担着关系电网安全的各种业务,包括线路继电保护、调度自动化以及变电站视频监控系统等,节点所承担的业务类型不同,对于电力通信网的安全运行影响也不同。节点业务重要度是指某项业务发生中断或存在缺陷的情况对电网安全稳定运行的影响程度,业务重要度与影响程度成正比,即影响程度越大,所对应的业务重要度越高^[19]。因此提出将节点的业务重要度作为电力通信网节点重要度的衡量指标。

电力通信网节点以及节点所在链路所承担业务的功能各不相同,它们对通信通道的高可靠性和实时性要求也不一样,按照电力系统安全生产及需求特点,结合业务安全性以及传输实时可靠性的要求,需要综合评估业务运行对电力通信网节点重要度的影响,本文采用层次分析法计算不同业务的重要度,其中典型业务的重要度值如表 1 所示。

表 1 典型业务重要度值

Table 1 Typical traffic importance value

标号	电力通信网业务	业务重要度
s_1	500 kV 线路继电保护	0.9672
s_2	220 kV 线路继电保护	0.9561
s_3	安全稳定控制系统	0.9448
s_4	调度电话	0.8550
s_5	调度自动化	0.9161
s_6	保护管理信息系统	0.6480
s_7	广域相量测量系统	0.8236
s_8	雷电定位监测系统	0.4651
s_9	变电站视频监控业务	0.3755
s_{10}	视频会议系统	0.5490
s_{11}	行政电话	0.4739

如表 1 所示,线路继电保护的业务重要度最高,且重要度随电压等级的增大而增高,这与电力通信网的实际情况完全符合;安稳控制系统和调度自动化等业务直接影响电力系统的安全稳定运行,其重要度低于线路继电保护;另外办公自动化是日常行政业务,对电力系统的安全生产和稳定运行造成的影响较小,因此重要度最低。

传统的复杂网络关键节点辨识方法一般只考虑网络的拓扑结构,但对于采用光传输技术的电力通信网,节点所在链路所承担的业务数量和种类才是影响电网安全与稳定的重要因素。电力通信网的节点一般处于多条链路中,每条链路承担着多项电力业务。为了充分考虑各个业务节点与其相邻节点构成链路的连接数以及节点业务承担情况,提出了基于业务的节点重要度计算方法,公式为

$$S'(v_i) = \frac{\sum_{k=1}^{m_j} p_{jk} r_k}{k_i} \quad (4)$$

式中: $S'(v_i)$ 表示节点 v_i 的业务重要度值; k_i 表示与节点 v_i 所连接的链路条数; m_j 表示链路 e_j 上所承担电力业务的类别总数; p_{jk} 表示第 k 类业务在链路 e_j 上运行的数量; r_k 表示第 k 类电力业务的重要度值。由式(4)可知,电力通信网中某个节点发起或转接的业务越多,该节点的业务重要度值就越大,

说明该节点在通信网中的作用越重要。

为了更好地数值化计算结果以及研究的方便,对 $S'(v_i)$ 进行归一化处理,得到节点的业务重要度为

$$S(v_i) = \frac{S'(v_i) - S'_{\min}(v_i)}{S'_{\max}(v_i) - S'_{\min}(v_i)} \quad (5)$$

式中, $S'_{\max}(v_i)$ 和 $S'_{\min}(v_i)$ 分别为 $S'(v_i)$ 的最大值和最小值。

2 关键节点辨识方法

关键节点辨识方法的属性指标包含了节点的静态重要性以及业务重要性。在电力通信网中,某一节点与网络中的其他节点连接的紧密程度越高,即节点的凝聚度越高,说明这个节点属于关键节点;另一方面,节点所在链路承担的业务量种类越多以及业务的重要度值越高,说明该节点越重要。因此,将根据网络凝聚度得到的节点静态重要度、根据节点所承担的业务量种类以及数量所得到的节点业务重要度作为关键节点辨识的指标具有合理性。与传统的复杂网络不同,作为特殊的电力通信网,从主观上可以判断业务重要度的指标权重要大于静态重要度的指标权重。

为了确定两个指标的权重值,采用层次分析法对指标的权重进行确定。首先构造比较矩阵 C ,采用(1,0.5,0)三标度法对两个权重进行比较后确定,再通过一定的变换将比较矩阵 C 转化为判断矩阵 R ,经过一致性检验后得到每个指标对应的权重。

比较矩阵的 C 各元素的定义为

$$C = (c_{ij}) = \begin{cases} 1, & \text{指标 } i \text{ 比指标 } j \text{ 重要} \\ 0.5 & \text{指标 } i \text{ 与指标 } j \text{ 同等重要} \\ 0 & \text{指标 } j \text{ 比指标 } i \text{ 重要} \end{cases} \quad (6)$$

那么

$$C = \begin{bmatrix} 0.5 & 0 \\ 1 & 0.5 \end{bmatrix}$$

再通过极差法构造判断矩阵 R 为

$$R = (r_{ij})_{2 \times 2} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} \\ r_{21} & r_{22} \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中: $r_{ij} = \frac{r_i - r_j}{2n} + 0.5, i, j = 1, 2; r_i = \sum_{j=1}^2 c_{ij}, i = 1, 2。$

计算得到判断矩阵

$$R = \begin{bmatrix} 0.5 & 0.25 \\ 0.75 & 0.5 \end{bmatrix}$$

对判断矩阵进行一致性检验后,利用行向量归一化得到两个评价指标的权重向量。

$$w = \left(\frac{\sum_{j=1}^2 r_{1j}}{\sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 r_{ij}}, \frac{\sum_{j=1}^2 r_{2j}}{\sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 r_{ij}} \right) \quad (8)$$

代入数值可得 $w = (0.375, 0.625)$ 两个指标以及各自的权重, 可以得到电力通信网中各节点的重要度 $D(v_i)$ 为

$$D(v_i) = 0.375I(v_i) + 0.625S(v_i) \quad (9)$$

由式(9)可知, 节点的业务重要度指标权重大于静态重要度指标权重, 这与电力通信网的实际情况是相符合的, 即相对于一般的复杂网络, 电力通信网节点所承载业务量情况相对于节点在网络中的位置, 更能反映出节点的重要度情况。

电力通信网关键节点的辨识流程如图 1 所示。首先根据电力通信网的实际拓扑结构将其抽象为加权网络模型, 再根据网络静态拓扑结构属性及各个节点收缩后凝聚度的变化得到节点的静态重要度, 根据节点以及节点所在链路所承担业务的种类和数量确定节点的业务重要度, 对于两个重要度评价指标的权重采用三标度层次分析法进行确定, 最后根据节点的静态重要度和业务重要度及其对应的权重计算各节点的重要度。节点重要度的值越大说明该节点越重要, 计算得到节点重要度的值按从大到小的顺序排序, 即可完成电力通信网的关键节点的辨识。

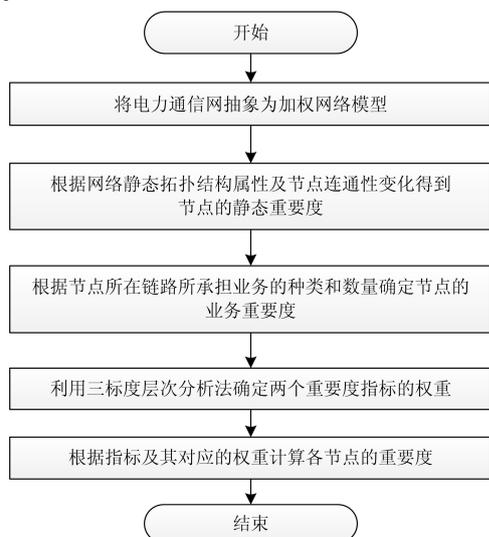


图 1 算法流程图

Fig. 1 Flow chart of algorithm

3 算法验证

为了验证本文提出的关键节点辨识方法的有效性, 以咸宁地区的电力通信网为基础, 构建如图 2

所示的电力通信网络模型架构。

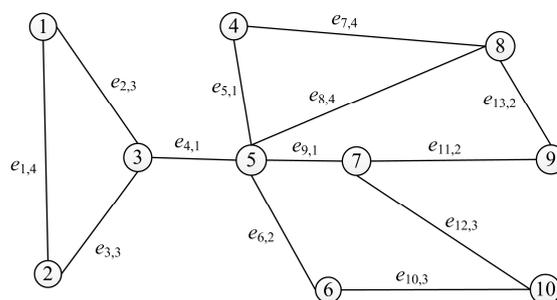


图 2 电力通信网模型

Fig. 2 Model of power communication network

如图 2 所示的网络中包含 10 个节点, 13 条链路。链路序号后面的数字表示为节点间加权路径距离, 其中 5 号节点为地区中调, 10 号节点为 220 kV 变电站, 其余节点均为 500 kV 变电站。每条链路所承担业务的种类以及数量如表 2 所示。

表 2 链路业务量分布

Table 2 Distribution of services on network links

链路	s ₁	s ₂	s ₃	s ₄	s ₅	s ₆	s ₇	s ₈	s ₉	s ₁₀	s ₁₁
e ₁	1	0	1	1	3	0	5	3	7	6	3
e ₂	1	0	0	3	1	3	6	2	2	8	1
e ₃	1	0	1	4	2	10	9	5	3	7	9
e ₄	1	0	1	10	4	8	7	6	8	1	6
e ₅	0	0	2	14	6	20	11	6	5	3	8
e ₆	1	0	0	12	5	14	9	8	4	4	2
e ₇	1	0	1	10	3	14	6	7	7	3	1
e ₈	1	0	0	9	2	9	8	5	2	6	3
e ₉	1	0	1	12	5	8	12	9	3	6	4
e ₁₀	0	1	2	3	4	3	1	5	2	3	3
e ₁₁	1	0	1	2	3	2	8	3	1	6	5
e ₁₂	1	0	2	1	1	4	3	4	7	4	2
e ₁₃	1	0	0	1	2	3	1	6	5	3	2

节点辨识过程按照图 1 的计算流程结合图 2 的拓扑结构、链路业务量分布情况及节点重要度的计算, 由抽象得到的网络拓扑结构以及式(3)得到各节点的静态重要度, 节点重要度向量 $I=[0.187, 0.187, 0.376, 0.321, .384, 0.188, 0.287, 0.265, 0.121, 0.113]$ 。

再根据表 2 中各节点组成链路业务量分布情况以及式(4)、式(5)计算各节点的业务重要度向量, $S=[0.289, 0.257, 0.443, 0.379, 0.627, 0.277, 0.312, 0.299, 0.180, 0.156]$ 。

最后根据式(9)计算出各节点的综合重要度, 按照从大到小的顺序进行排序, 完成重要节点的辨识,

并与节点收缩法进行比较, 对比结果如表 3 所示。

表 3 节点重要度结果比较

Table 3 Comparison results of node importance

节点 编号	节点收缩法		本文算法	
	重要度	排名	重要度	排名
1	0.118	8	0.215	8
2	0.118	8	0.231	7
3	0.321	2	0.418	2
4	0.092	10	0.357	3
5	0.502	1	0.536	1
6	0.217	5	0.244	6
7	0.281	3	0.302	4
8	0.251	4	0.286	5
9	0.134	6	0.158	9
10	0.122	7	0.140	10

由表 3 的计算结果可知, 两种算法都表现出节点 5 作为中调其重要度最高, 与实际情况中其承担业务量和在网络中所处的位置相符合。由于节点 1 和 2 在网络中的拓扑位置相同, 利用节点收缩法的节点重要度均为 0.118, 无法进一步判别相对重要度的排名。由于节点 2 所在链路承担业务量更多, 利用本文的算法可以判断出节点 2 的重要度越高, 克服了只从网络拓扑结构评价节点重要性的局限性。节点 4 和节点 10 在网络中都处于较边缘的位置, 利用节点收缩法得到的节点 10 重要度排名相对于节点 4 要靠前, 但由于其节点 10 变电站的电压等级较低以及所承担业务量较少, 利用本文算法计算出的重要度较低, 比较符合电力通信网的实际情况。由此可知, 本文所提出的算法强调了节点承载业务量对关键节点辨识的突出作用, 能够合理地区分网络中位置相同节点的重要度差别, 弥补了节点收缩法等算法只考虑网络拓扑结构辨识节点重要度的不足, 因此本文提出的算法对电力通信网关键节点的辨识更加合理、全面。

4 结论

对电力通信网的关键节点进行辨识时, 不仅要考虑网络固有的静态拓扑结构, 还应该从节点所承担业务的数量和种类进行评判。本文提出的基于网络静态拓扑结构和节点业务量的电力通信网关键节点辨识方法, 通过 Matlab 仿真实验以及数据分析, 最终证明该方法能够完成对电力通信网的关键节点进行辨识, 该方法能够准确区分网络拓扑中位置相似节点的重要度, 克服一般算法只考虑网络拓扑特性这一单一评价指标的局限性。该算法融合了节点在网络中的拓扑信息以及所承担的业务信息, 能够

充分反映出电力通信网这种特殊复杂网络的业务特性, 适用于电力通信网关键节点的辨识。

参考文献

- [1] 蒋康明, 曾瑛, 邓博仁, 等. 基于业务的电力通信网风险评价方法[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(24): 101-106.
JIANG Kangming, ZENG Ying, DENG Boren, et al. Risk evaluation method of electric power communication network based on services[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(24): 101-106.
- [2] 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.
LIU Dichen, JI Xingpei, WANG Bo, et al. Topological vulnerability analysis and countermeasures of electrical communication network based on complex network theory[J]. Power System Technology, 2015, 39(12): 3615-3621.
- [3] ZHANG Baohui, HAO Zhiguo, BO Zhiqian. New development in relay protection for smart grid[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1(1): 121-127. DOI 10.1186/s41601-016-0025-x.
- [4] 霍雪松, 裴培. 基于调度数据网络技术的调度控制系统地区互备通信模式研究[J]. 电网与清洁能源, 2016, 32(5): 47-50.
HUO Xuesong, PEI Pei. Research on regional mutual backup communication mode of scheduling control system based on scheduling data network technology[J]. Power System and Clean Energy, 2016, 32(5): 47-50.
- [5] 王志强, 吴庆, 张拯, 等. 基于异常分析的电力信息通信系统运维策略[J]. 陕西电力, 2016, 44(4): 84-87.
WANG Zhiqiang, WU Qing, ZHANG Zheng, et al. Maintenance strategy of power grid information and telecommunication system based on abnormal analysis[J]. Shaanxi Electric Power, 2016, 44(4): 84-87.
- [6] 狄立, 郑征, 夏旻, 等. 基于快速密度聚类的电力通信网节点重要性评估[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(13): 90-95.
DI Li, ZHENG Zheng, XIA Min, et al. Node importance evaluation of electric power communication network based on fast density clustering[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(13): 90-95.
- [7] 刘庆时, 赵贺, 庄斌, 等. 多种通信方式的智能小区信息交互方案设计[J]. 陕西电力, 2016, 44(11): 4-8.
LIU Qingshi, ZHAO He, ZHUANG Bin, et al. Information interaction design for intelligent residential district with multi-communication methods[J]. Shaanxi Electric Power,

- 2016, 44(11): 4-8.
- [8] 杨贵, 孙磊, 李力, 等. 区域保护与控制系统网络拓扑方案研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(9): 101-107.
YANG Gui, SUN Lei, LI Li, et al. Research on regional protection and control system network topology[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(9): 101-107.
- [9] 彭东, 孙永亮, 王民川. 电力无线应急通信网络动态组网方法的研究[J]. 电网与清洁能源, 2017, 33(2): 83-87.
PENG Dong, SUN Yongliang, WANG Minchuan. Research on the dynamic networking method for power wireless emergency communications network[J]. Power System and Clean Energy, 2017, 33(2): 83-87.
- [10] 曾瑛, 朱文红, 邓博仁, 等. 基于电网影响因子的电力通信网关键节点识别[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(2): 102-108.
ZENG Ying, ZHU Wenhong, DENG Boren, et al. Crucial node decision algorithm based on power network impact factor in electric power communication network[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(2): 102-108.
- [11] 樊冰, 唐良瑞. 电力通信网脆弱性分析[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(7): 1191-1197.
FAN Bing, TANG Liangrui. Vulnerability analysis of power communication network[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(7): 1191-1197.
- [12] 蔡瑾耀, 吴玲达. 一种通信网络抗毁性评价的改进模型[J]. 计算机工程与应用, 2013, 49(13): 85-88.
CAI Jinyao, WU Lingda. Improved invulnerability evaluation model on communication network[J]. Computer Engineering and Applications, 2013, 49(13): 85-88.
- [13] 谢琼瑶, 邓长虹, 赵红生, 等. 基于有权网络模型的电力网节点重要度评估[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(4): 21-24.
XIE Qiongyao, DENG Changhong, ZHAO Hongsheng, et al. Evaluation method for node importance of power grid based on the weighted network model[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(4): 21-24.
- [14] 赵子岩, 刘建明. 基于业务风险均衡度的电力通信网可靠性评估算法[J]. 电网技术, 2011, 35(10): 209-213.
ZHAO Ziyao, LIU Jianming. A new service risk balancing based method to evaluate reliability of electric power communication network[J]. Power System Technology, 2011, 35(10): 209-213.
- [15] 于会, 刘尊, 李勇军. 基于多属性决策的复杂网络节点重要性综合评价方法[J]. 物理学报, 2013, 62(2): 20204-20204.
YU Hui, LIU Zun, LI Yongjun. Key nodes in complex networks identified by multi-attribute decision-making method[J]. Acta Physica Sinica, 2013, 62(2): 20204-20204.
- [16] 谭跃进, 吴俊, 邓宏钟. 复杂网络中节点重要度评估的节点收缩方法[J]. 系统工程理论与实践, 2006, 26(11): 79-83.
TAN Yuejin, WU Jun, DENG Hongzhong. Evaluation method for node importance based on node contraction in complex networks[J]. Systems Engineering — Theory & Practice, 2006, 26(11): 79-83.
- [17] 朱涛, 张水平. 改进的加权复杂网络节点重要度评估的收缩方法[J]. 系统工程与电子技术, 2009, 31(8): 1902-1905.
ZHU Tao, ZHANG Shuiping. Improved evaluation method for node importance based on node contraction in weighted complex networks[J]. Systems Engineering and Electronics, 2009, 31(8): 1902-1905.
- [18] 王树西, 李安渝. Dijkstra 算法中的多邻接点与多条最短路径问题[J]. 计算机科学, 2014, 41(6): 217-224.
WANG Shuxi, LI Anyu. Multi-adjacent-vertexes and multi-shortest-paths problem of Dijkstra algorithm[J]. Computer Science, 2014, 41(6): 217-224.
- [19] 曾瑛, 汪莹, 董希杰, 等. 电力通信骨干网节点重要度评价方法[J]. 华北电力大学学报(自然科学版), 2013, 40(5): 65-69.
ZENG Ying, WANG Ying, DONG Xijie, et al. Node importance evaluation strategy on electric power communication backbone network[J]. Journal of North China Electric Power University (Science Edition), 2013, 40(5): 65-69.

收稿日期: 2016-12-09; 修回日期: 2017-03-20

作者简介:

王汪兵(1992—), 男, 硕士生在读, 研究方向为系统集成与故障诊断; E-mail: wwb228@whu.edu.cn

王先培(1963—), 男, 通信作者, 博士, 教授, 博导, 研究方向为电气设备状态检修与故障诊断。E-mail: xpwang@whu.edu.cn

(编辑 姜新丽)