

DOI:10.19431/j.cnki.1673-0062.2022.04.015

基于 TOPSIS 的复杂电网节点重要性评估

戴剑勇^{1,2}, 王雯雯^{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: 本文利用复杂网络理论构建了江西电网拓扑模型, 对其网络特性进行分析, 通过 TOPSIS (technique for order preference by similarity to ideal solution) 算法评估电网中的重要节点, 并利用 SIR (susceptible infected recovered model) 模型对重要节点的传播影响力进行仿真分析。结果表明江西电网节点度分布服从幂律分布, 网络呈现出无标度和小世界特性。网络中的重要度排名前 10 的节点分别为罗坊、抚州、梦山、鹰潭、乐平、永修、南昌、文山、赣州和红都。SIR 仿真结果说明重要节点对网络的传播影响力极大, 其中 TOPSIS 方法下的最终节点感染规模相比单一指标至少有 5% 的增幅。

关键词: 安全工程; 复杂网络; 电力网络; TOPSIS

中图分类号: X93 **文献标志码:** A

文章编号: 1673-0062(2022)04-0094-07

Importance Evaluation of Complex Power Network Nodes Based on TOPSIS

DAI Jianyong^{1,2}, WANG Wenwen^{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 this paper, the complex network theory is used to construct the topology model of Jiangxi power grid, and the network characteristics are analyzed. The important nodes in the power network are evaluated by TOPSIS (technique for order preference by similarity to ideal solution) algorithm, and the propagation influence of important nodes is simulated and analyzed by SIR (susceptible infected recovered model) model. The results show that the node degree distribution of Jiangxi power network follows the power-law distribution, and the network presents scale-free and small-world characteristics. The top 10

收稿日期: 2022-03-01

基金项目: 湖南省教育厅科研项目重点项目(18A235)

作者简介: 戴剑勇(1969—), 男, 教授, 博士, 主要从事安全系统工程与风险管理方面的研究。E-mail: daijy@163.com

important nodes in the network are Luofang, Fuzhou, Mengshan, Yingtan, Leping, Yongxiu, Nanchang, Wenshan, Ganzhou and Hongdu. SIR simulation results show that important nodes have great influence on network propagation, and the final node infection scale under TOPSIS method is at least 5% higher than that of single index.

key words: safety engineering; complex network; power network; TOPSIS

0 引言

随着社会经济的发展,各行各业的用电需求快速增长,导致电力系统的规模越来越大,因此对电力系统的稳定性和安全性的要求也越来越高。电力系统是具有复杂性特征的非线性动态系统,电力系统的大规模互联在提高运行效率的同时也增加了电力网络结构的复杂性。由于电网间的互联,当电力网络中的站点、线路或其他部位发生故障时,可能会使局部故障扩大至整个电网^[1],产生连锁故障而造成大停电事故,如英国“8·9”大停电事故的直接原因是雷击造成线路故障^[2];美国得州“2·15”大停电事故是由于极寒天气下电力取暖负荷过大导致大量机组停运^[3]。大停电事故不仅严重影响人们的日常生活和社会的生产活动,还给国家带来了巨大的经济损失^[4-5]。因此,有必要对电网中的关键节点进行辨识,重要节点发生故障时会对整个网络造成极大的影响。

许多学者提出了多种节点重要性评估方法。卢鹏丽^[6]、Y. Z. Yang^[7]和 D. B. Chen^[8]等考虑邻居节点的影响,分别提出了基于介度熵、DCC和半局部中心性的重要节点评估方法。周丽娜等^[9]结合超度和K-Shell对网络中的关键节点进行识别。C. Salavati等^[10]利用节点的局部结构提高亲密度中心性,提出考虑社区间关系的节点重要性评估方法。M. M. TuLu等^[11]提出了基于社区CbM的节点重要性识别方法,发现该方法可以引入其他方法无法识别的重要节点。由于电力网络的复杂性,部分学者有针对性地提出了电网重要节点识别方法。徐敬友等^[12]构建了基于距离度、能力度、枢纽介数、距离介数和能力介数的电网重要节点评价指标集。刘垒等^[13]构建了电力通信网络拓扑结构、电力业务和电网影响因素的指标评价体系,结合熵权和层次分析法评估节点重要性。刘志强^[14]利用K-阶结构熵模型研究电力网络结构分布,结合高度数节点和高区间电气介数节点评估网络中的脆弱节点群。樊冰等^[15]从局部信息指标、全局信息指标和节点承载的业

务重要度三个方面综合评估节点的重要性,利用信息熵权和肯德尔系数确定指标的权重,攻击多个电网后发现所提方法能合理评估节点的重要性。选取不同的评估指标,节点重要性评估结果也会有不同。因此,如何选取合适、准确的评估指标是评估电网节点重要性的突出问题。

本文以复杂网络理论为基础,构建电力网络拓扑模型进行网络特性分析,为了从不同角度综合评估节点的重要性,综合考虑节点度中心性、介数中心性、接近中心性和PageRank指标,结合TOPSIS方法对电力网络中的节点重要性进行评估,并利用SIR模型模拟重要节点的传播影响过程。

1 复杂电力网络基本特性

1.1 电力网络拓扑建模原则

要通过复杂网络理论相关知识对电力网络进行分析,首先要构建电力网络的拓扑模型,为了分析的简便,需要对电力网络进行简化,简化原则如下:

1)将电源点、负荷点以及传输点看作是拓扑网络中的节点,点与点之间的线路则是网络中的边,节点和边不存在权重;

2)不考虑节点内部接线情况,忽略节点自身内部与节点间的不同,以及输电线路中物理电气特性对网络的影响;

3)合并同杆并架的输电线路,达到去除自环和多重边的目的;

4)忽略电力网络中的接地线。

1.2 网络基本特征指标

复杂网络可以表示为图 $G=(V,E)$,其中 V 表示网络中所有节点的集合; E 表示所有连边的集合。

1)节点度

节点 v_i 的度 k_i 定义为与该节点连接的边的数量。显而易见,节点度越大,这个节点在某种意义上就越重要。

对度数进行归一化处理可以得到度中心性 K_i , 即

$$K_i = \frac{k_i}{N-1} \quad (1)$$

2) 平均路径长度

网络中两个节点之间的所需要通过的最少的边数为最短路径长度,反映了节点与节点间的距离。平均路径长度 L 则是网络中所有节点间距离的平均值,即

$$L = \frac{1}{N(N-1)/2} \sum_{i,j \in V} d_{ij} \quad (2)$$

式中: d_{ij} 为节点 v_i 和节点 v_j 之间的最短路径长度; N 为网络中所有节点的数量。

3) 聚类系数

如果网络中某个节点 v_i 的度为 d_i , 即该节点的邻居节点数量为 d_i , 而这些邻居节点之间至多存在 $d_i(d_i-1)/2$ 条连边, 那么节点 v_i 的聚类系数 C_i 可用如下公式表示:

$$C_i = \frac{X_i}{d_i(d_i-1)/2} \quad (3)$$

式中: X_i 为节点 v_i 的 d_i 个邻居节点之间存在的连边数量。特殊情况下, 节点若为孤立节点, 不存在邻居节点, 其聚类系数为 0。整个网络的聚类系数 C 描述为所有节点聚类系数的平均值, 即

$$C = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N C_i \quad (4)$$

4) 介数

节点介数表示经过该节点的最短路径数量占网络中所有最短路径数量的比例, 介数可以用来描述网络中节点对网络的负载能力。

节点介数的公式为

$$B_i = \sum_{j \neq l \neq i} \frac{N_{jl}(i)}{N_{jl}} \quad (5)$$

式中: N_{jl} 为通过节点 v_j 和 v_l 之间的最短路径数量; $N_{jl}(i)$ 为节点 v_j 和 v_l 之间的最短路径通过节点 v_i 的数量。

归一化后得到节点介数中心性公式为

$$E_i = \frac{2}{(N-1)(N-2)} \sum_{j \neq l \neq i} \frac{N_{jl}(i)}{N_{jl}} \quad (6)$$

5) 接近中心性

接近中心性能够刻画某个节点距离网络拓扑中心的远近程度, 接近中心性表示为一个节点到其余所有节点的最短路径长度和的倒数, 计算公式如下:

$$C(u_i) = \frac{1}{\sum_{i \neq j \in G} d_{ij}} \quad (7)$$

式中: u_i 为网络 G 中待计算接近中心性的节点; d_{ij} 为节点 i 和节点 j 之间的最短距离。

将接近中心性进行归一化处理, 归一化公式为

$$CC_i = \frac{N-1}{\sum_{i \neq j \in G} d_{ij}} \quad (8)$$

6) PageRank

PageRank 算法最先是运用在互联网网页的重要度排序工作中, 网页的重要度判定标准是根据指向目标网页的其他网页数量以及网页质量高低进行综合判断, 高质量网页通常会指向重要性更高的网页。PageRank 计算公式为

$$R(v) = \frac{1-\sigma}{N} + \sigma \sum_{i=1}^N \frac{R(Y_i)}{C_{out}(Y_i)} \quad (9)$$

式中: $R(v)$ 为网页 v 的 PageRank 值; $R(Y_i)$ 为网页 Y_i 对网页产生的 PageRank 值; $C_{out}(Y_i)$ 为网页 Y_i 指向的其他网页的数量; σ 为随机跳转概率参数; N 为网页总数。

2 基于 TOPSIS 的节点重要性评估方法

传统节点重要度排序方法大多是利用单一指标来计算复杂网络中的节点重要度, 应用不同的指标对节点重要度评估时结果容易出现偏差。所以本文采取 TOPSIS 算法研究电力网络的节点重要度。TOPSIS 算法是 Hwang 和 Yoon 于 1981 年提出的一种逼近理想解的多属性决策方法, 可以结合多种节点重要度评估指标, 这使节点重要度评估结果更加科学、合理。

利用 TOPSIS 算法研究网络节点重要度的思路是: 将复杂网络中的每一个节点都当作是 TOPSIS 中的一种决策方案, 评估节点重要度的指标则是 TOPSIS 中方案的一种属性, 多个评估指标则是多个属性, 通过 TOPSIS 对网络节点重要度进行多属性决策, 计算结果越大则节点越重要。TOPSIS 算法的具体计算过程如下:

1) 构建决策矩阵

若网络中的总节点数量为 n , 则决策方案有 n 个, 节点重要度评估指标的数量为 m , 则方案的属性为 m 种。网络中每个节点各自的指标值为 x_{ij} ($i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, m$), 然后构建的初始决

策矩阵 X 如下:

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1m} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2m} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ x_{n1} & x_{n2} & \cdots & x_{nm} \end{bmatrix} \quad (10)$$

2) 对决策矩阵中的指标值 x_{ij} 进行归一化处理

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n x_{ij}^2}} \quad (11)$$

式中: r_{ij} 为指标值 x_{ij} 归一化处理结果。归一化后得到的归一化矩阵 R 如下:

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1m} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2m} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ r_{n1} & r_{n2} & \cdots & r_{nm} \end{bmatrix} \quad (12)$$

3) 如果各项指标有权重,则继续构建加权矩阵

在实际应用中,用于评估网络节点重要度的各个指标的重要程度通常是不相同的,因此需要对各个指标进行赋权。本文引入基尼系数对 TOPSIS 中的各个指标进行客观赋权。基尼系数是意大利著名经济学家 Gini 于 1922 年基于洛伦兹曲线提出的,可以用于衡量国民收入分配是否均衡以及均衡程度。因此,基尼系数可以定量刻画出 TOPSIS 中各个指标分布的均衡性,基尼系数越大,则表示指标值分布差异程度越大,即该指标权重越大;相反,基尼系数越小,则指标值分布越均衡,即该指标权重越小。与其他赋权方法相比,如熵权法赋权,虽然两者都能进行客观赋权,但是熵权法的原理是通过熵值反映出指标的信息含量,熵值越大则数据差异越小,即指标数据差异越小的权重越大,这与电力网络指标性质是不相符的。

基尼系数定义如下:

假设将人们的收入按从低到高的顺序进行排列,并且平均分成人数相同的 n 个小组,其中从第 1 组到第 i 组的累积收入与所有人口的总收入的比值为 F_i ,所以基尼系数 G 的计算公式为

$$G = 1 - \frac{1}{n} \left[2 \sum_{i=1}^{n-1} F_i + 1 \right] \quad (13)$$

所以构建的加权矩阵 Z 为

$$Z = \begin{bmatrix} G_1 r_{11} & G_2 r_{12} & \cdots & G_m r_{1m} \\ G_1 r_{21} & G_2 r_{22} & \cdots & G_m r_{2m} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ G_1 r_{n1} & G_2 r_{n2} & \cdots & G_m r_{nm} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_{11} & z_{12} & \cdots & z_{1m} \\ z_{21} & z_{22} & \cdots & z_{2m} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ z_{n1} & z_{n2} & \cdots & z_{nm} \end{bmatrix} \quad (14)$$

其中, $G_j (j=1, 2, \dots, m)$ 表示第 j 个指标的权重。

4) 确定理想最优解和最劣解

理想最优解表示的是各个指标中最大的值的组合,理想最劣解则表示各个指标中最小的值的组合。令最优解为 Z^+ , 最劣解为 Z^- , 则

$$Z^+ = \left\{ \max_{i \in [1, n]} \{ z_{i1}, z_{i2}, \dots, z_{im} \} \right\} = \{ Z_1^+, Z_2^+, \dots, Z_m^+ \} \quad (15)$$

$$Z^- = \left\{ \min_{i \in [1, n]} \{ z_{i1}, z_{i2}, \dots, z_{im} \} \right\} = \{ Z_1^-, Z_2^-, \dots, Z_m^- \} \quad (16)$$

5) 计算各个方案到理想最优解和最劣解的距离 D_i^+ 和 D_i^-

$$D_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^m (Z_j^+ - z_{ij})^2} \quad (17)$$

$$D_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^m (Z_j^- - z_{ij})^2} \quad (18)$$

6) 计算各个方案与理想最优解和最劣解的贴适度 S_i

$$S_i = \frac{D_i^-}{D_i^+ + D_i^-} \quad (19)$$

其中, $0 \leq S_i \leq 1$, 根据贴适度 S_i 的大小对各个方案进行排序, 值越大则方案越重要。

3 实例分析

以江西电网为例, 对其进行网络特性分析和节点重要度评估, 结合简化原则, 将江西电网中的 220 kV 变电站、220 kV 开关站、500 kV 变电站、500 kV 开关站、火电厂和水电厂看作是网络中的节点, 站点之间的 220 kV 和 500 kV 线路则是网络中的边, 构建的电网拓扑模型见图 1, 江西电网具有 202 个节点和 317 条边。

3.1 电网特性分析

根据所构建的江西电网拓扑模型, 可以得到相关电网特征参数, 结果见表 1。江西电网有较

大的聚类系数 C 和较小的平均路径长度 L , 根据小世界判别方法可知^[16], 江西电网符合小世界网络模型, 具有小世界特性, 该特性使电网相比对应的随机网络更容易发生连锁故障。

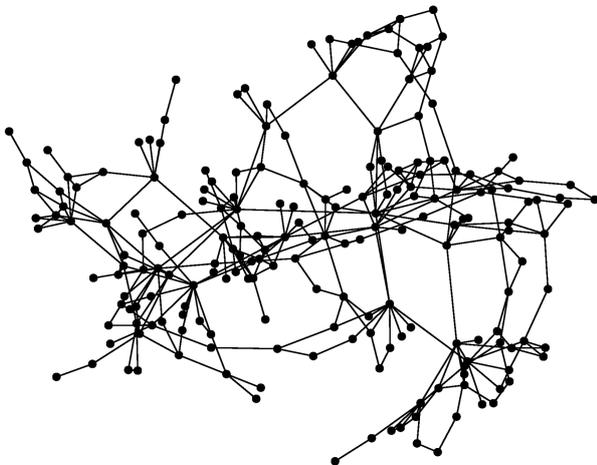


图1 江西电网拓扑模型

Fig.1 Topology model of Jiangxi power network

表1 江西电网特征参数

Table 1 Characteristic parameters of Jiangxi network

节点数 N	边数 E	平均度 $\langle k \rangle$	聚类系数 C	平均路径长度 L	直径 D
202	317	3.139	0.246	5.511	12

为了进一步分析江西电网的特性, 对网络进行节点度分布分析。本文采用累积度分布研究网络度分布情况, $P(k)$ 表示在随机选择下, 节点度大于或等于 k 的概率, 节点度分布在双对数坐标下的累积度分布和拟合情况如图2所示。江西电网节点度分布拟合结果较好, 基本呈现为一条直线, 服从幂律分布, 说明江西电网具有无标度特性, 网络中存在大量的低度数节点, 而高度数节点却很少, 因此仅有少数节点在网络中起到重要连接作用。

3.2 节点重要性评估

由于电网的节点具有传输电力的作用, 考虑节点和其邻居节点的联络能力和供电效率, 选取度中心性、介数中心性、接近中心性和 PageRank 指标作为网络节点重要度评估指标, 并根据公式(1)、(6)、(8)、(9)计算各指标值, 然后构建初始决策矩阵并利用公式(13)计算各个指标的权重值, 基尼系数权重计算结果如表2所示。

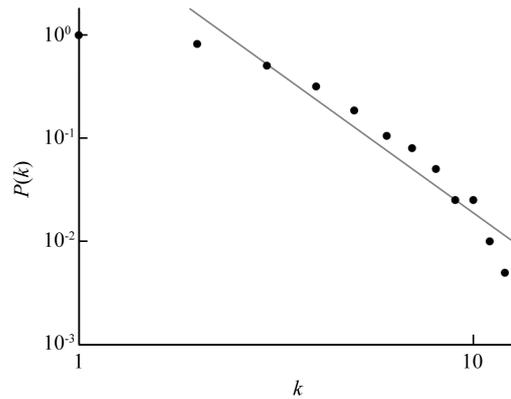


图2 双对数坐标系下江西电网累积度分布

Fig.2 Cumulative degree distribution of Jiangxi network under log-log coordinate

然后利用公式(15)~公式(16)计算得到理想最优解和最劣解, 最后通过公式(17)~公式(19)得到各个节点与理想最优解和最劣解的贴近度 S_i 。 S_i 越大则节点越重要, 结果见表3, 篇幅有限, 仅列出重要度排名前10的节点。

表2 各个指标的基尼系数值

Table 2 Gini coefficient value of the indicator

评估指标	度中心性	介数中心性	接近中心性	PageRank
指标权重	0.230 2	0.565 8	0.098 1	0.203 6

表3 重要度排名前10的节点

Table 3 The top 10 nodes in importance

排序	贴近度 S_i	节点名称
1	0.951 4	罗坊
2	0.805 0	抚州
3	0.764 3	梦山
4	0.669 8	鹰潭
5	0.629 0	乐平
6	0.556 1	永修
7	0.551 7	南昌
8	0.416 9	文山
9	0.382 7	赣州
10	0.347 1	红都

根据表3可知, 这10个重要节点均为500 kV 变电站, 是电力网络的枢纽站点, 比如重要度最大的节点54为罗坊500 kV 变电站, 其连接着孔目江、梦山、抚州和文山4个500 kV 变电站, 位于电

力传输中的关键位置,该节点的状态变化对电力输送的影响极大。

3.3 仿真分析

一个节点在网络中的重要性可以通过其传播影响的程度来衡量,利用 SIR (susceptible infected recovered model) 模型模拟节点影响传播过程。在 SIR 仿真实验中,需要进行多次数据迭代,每次迭代都会选取一个节点作为已感染节点,可以根据网络中现有的感染节点数量和已经恢复的节点数量得到网络在 t 时刻下的感染规模,其计算公式为:

$$F(t) = \frac{N_I(t) + N_R(t)}{N} \quad (20)$$

式中: $F(t)$ 为感染规模; $N_I(t)$ 、 $N_R(t)$ 分别表示 t 时刻网络中的感染节点数和恢复节点数; N 为网络所有节点数量。本文设置的传染率 β 值为 0.6,恢复率 γ 值为 0.3。

为便于对比分析,利用度中心性、介数中心性、接近中心性和 PageRank 作为评估指标评估节点重要性,将单一指标和 TOPSIS 评估结果中重要度排名前 10 的节点作为初始感染源进行传播,并计算相同时间内的感染规模,仿真结果见图 3。

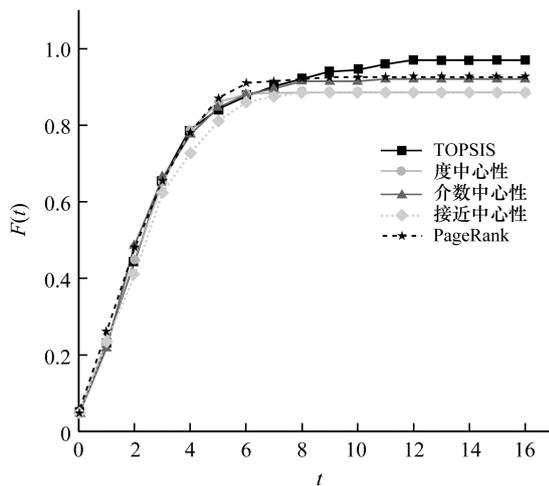


图3 江西电网感染规模增长图

Fig. 3 Growth of infection scale in Jiangxi power network

根据图 3 可以看出,在感染初期,江西电网中的感染规模增长速度极快,基本是线性增长,说明网络中的重要节点对网络的传播影响力极大。TOPSIS 方法和各个单一指标评估得到的重要度排名前 10 的节点在 $t=8$ 之前的感染规模差别不大, $t=9$ 之后, TOPSIS 方法与其他指标的差别变

大,感染规模明显大于其他指标,且达到稳态时, TOPSIS 方法下的感染规模相比单一指标至少有 5% 的增幅。结果表明,当传播时间较长时, TOPSIS 方法评估的重要度排名前 10 的节点作为感染源感染其他节点具有更大的优势。

4 结论

1) 基于复杂网络理论构建了江西电网拓扑模型,并对网络特性进行了分析。江西电网除了具有小世界特性外,其累积度分布服从幂律分布,因此还具有无标度网络的特征。

2) 利用 TOPSIS 算法评估江西电网中的重要节点,发现重要度排名前 10 的节点均为 500 kV 变电站,分别为罗坊、抚州、梦山、鹰潭、乐平、永修、南昌、文山、赣州和红都,属于电力网络的枢纽站点。因此,在电网的运行中,加强重要节点的识别和保护尤为重要。

3) 通过 SIR 模型模拟重要节点的感染传播过程,结果表明,重要节点能够极大影响网络的传播能力,并且当传播时间较长时, TOPSIS 评估的重要节点相比单一指标更具影响力。

参考文献:

- [1] 薛禹胜,谢云云,文福拴,等. 关于电力系统相继故障研究的评述[J]. 电力系统自动化,2013,37(19):1-9;40.
- [2] 孙华东,许涛,郭强,等. 英国“8·9”大停电事故分析及对中国电网的启示[J]. 中国电机工程学报,2019,39(21):6183-6192.
- [3] 张玥,谢光龙,张全,等. 美国德州 2·15 大停电事故分析及对中国电力发展的启示[J]. 中国电力,2021,54(4):192-198;206.
- [4] 刘自发,张在宝,杨滨,等. 电网大停电社会综合损失评估[J]. 电网技术,2017,41(9):2928-2940.
- [5] 易俊,卜广全,郭强,等. 巴西“3·21”大停电事故分析及对中国电网的启示[J]. 电力系统自动化,2019,43(2):1-6.
- [6] 卢鹏丽,郭旭东,董璐,等. 基于介度熵的复杂网络节点重要性识别方法[J]. 兰州理工大学学报,2020,46(2):111-115.
- [7] YANG Y Z, WANG X, CHEN Y, et al. A novel centrality of influential nodes identification in complex networks [J]. IEEE access,2020,8:58742-58751.
- [8] CHEN D B, LV L Y, SHANG M S, et al. Identifying influential nodes in complex networks[J]. Physica A: Statistical mechanics and it's applications,2012,391(4):1777-1787.

- [9] 周丽娜,李发旭,巩云超,等. 基于 K-shell 的超网络关键节点识别方法[J]. 复杂系统与复杂性科学,2021,18(3):15-22.
- [10] SALAVATI C, ABDOLLAHPOURI A, MANBRI Z. Ranking nodes in complex networks based on local structure and improving closeness centrality[J]. Neurocomputing,2019,336:36-45.
- [11] TULU M M, HOU R, YOUNAS T. Identifying influential nodes based on community structure to speed up the dissemination of information in complex network[J]. IEEE access,2018,6:7390-7401.
- [12] 徐敬友,陈冲,罗纯坚,等. 基于改进复杂网络模型的电网关键环节辨识[J]. 电力系统自动化,2016,40(10):53-61.
- [13] 刘垒,谭阳红,金家瑶,等. 电力通信网的关键节点辨识[J]. 电力系统及其自动化学报,2020,32(2):28-34.
- [14] 刘志强. 融合 K-阶结构熵与区间电气介数的含风电电网脆弱性评估[D]. 湘潭:湘潭大学,2020:26-42.
- [15] 樊冰,郑陈熹,唐良瑞,等. 基于多属性决策的电力通信网的节点重要度计算方法[J]. 电力系统保护与控制,2020,48(9):68-76.
- [16] 陈志鹏,谢宁,王承民,等. 基于分形机理的复杂电力网络脆弱性评估及鲁棒性提升策略研究[J]. 电网技术,2021,45(2):657-665.

(上接第81页)

- [11] KHAN A H, CAO X, LI S, et al. BAS-ADAM: An ADAM based approach to improve the performance of beetle antennae search optimizer[J]. IEEE/CAA journal of automatica sinica,2020,7(2):461-471.
- [12] 陈晓亮,赵守智. 基于广义最小二乘法原理的中子能谱解谱程序开发及验证[J]. 原子能科学技术,2015,49(12):2195-2200.
- [13] 罗琼. 低本底 γ 能谱分析软件的开发[D]. 成都:成都理工大学,2019:11-21.
- [14] 喻涛舸,吴华瑞,彭程. 基于 Lasso 回归和 BP 神经网络的蔬菜短期价格预测组合模型研究[J]. 智慧农业(中英文),2020,2(3):108-117.
- [15] QI S, WANG S Q, CHEN Y, et al. Radionuclide identification method for NaI low-count gamma-ray spectra using artificial neural network[J]. Nuclear engineering and technology,2022,54(1):269-274.