

12-13-2019

Evaluation Method of Node Importance in Equipment Support Network Based on polymeric degree

Zhang Qiang

1. Academy of Army Armored Force, Beijing 100072, China; ;

Junhai Cao

1. Academy of Army Armored Force, Beijing 100072, China; ;

Tailiang Song

2. Chinese Defense Science and Technology Information Center, Beijing 100072, China;

Yan Xu

1. Academy of Army Armored Force, Beijing 100072, China; ;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Evaluation Method of Node Importance in Equipment Support Network Based on polymeric degree

Abstract

Abstract: Aiming at the problem that the heterogeneity of nodes in equipment support network and the different support relationships leading to the inaccuracy of judging the importance of nodes based on single attributes such as degree value, *this paper puts forward the concept of polymeric degree, and mines the importance information of nodes from the aspects of polymeric degree, betweenness centrality, closeness centrality and Eigenvector centrality. Because of the shortcoming that the Euclidean distance can not reflect the vertical distance in the traditional method of Order Preference by Similarity to an Ideal Solution (TOPSIS), the TOPSIS method is improved.* The centrality index is used to rank the nodes, and the evaluation result of the node importance is obtained, which verifies the effectiveness of the method.

Keywords

equipment support network, polymeric degree, factor analysis, node importance

Recommended Citation

Zhang Qiang, Cao Junhai, Song Tailiang, Yan Xu. Evaluation Method of Node Importance in Equipment Support Network Based on polymeric degree[J]. Journal of System Simulation, 2019, 31(12): 2657-2663.

基于合度的装备保障网络节点重要性评估

张强¹, 曹军海^{1*}, 宋太亮², 闫旭¹

(1.陆军装甲兵学院装备保障与再制造系, 北京 100072; 2.中国国防科技信息中心, 北京 100072)

摘要: 针对装备保障网络中节点的异质性及其保障关系的不同导致依据度值等单一属性判断节点重要性不准确的问题, 提出合度的概念, 从合度、介数值中心性、紧密中心性以及特征向量中心性几个方面挖掘节点的重要性信息。基于传统逼近理想解排序法 (Technique for Order Preference by Similarity to an Ideal Solution, TOPSIS) 中欧氏距离不能体现垂直距离的不足, 对 TOPSIS 方法进行改进。结合中心性指标对节点进行排序, 得出节点的重要性评估结论, 进而证实该改进方法合理且有效。

关键词: 装备保障网络; 合度; 因素分析; 节点重要性

中图分类号: TP391.9

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2019) 12-2657-07

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.19-FZ0247

Evaluation Method of Node Importance in Equipment Support Network Based on polymeric degree

Zhang Qiang¹, Cao Junhai^{1*}, Song Tailiang², Yan Xu¹

(1. Academy of Army Armored Force, Beijing 100072, China;

2. Chinese Defense Science and Technology Information Center, Beijing 100072, China)

Abstract: Aiming at the problem that the heterogeneity of nodes in equipment support network and the different support relationships leading to the inaccuracy of judging the importance of nodes based on single attributes such as degree value, this paper puts forward the concept of polymeric degree, and mines the importance information of nodes from the aspects of polymeric degree, betweenness centrality, closeness centrality and Eigenvector centrality. Because of the shortcoming that the Euclidean distance can not reflect the vertical distance in the traditional method of Order Preference by Similarity to an Ideal Solution (TOPSIS), the TOPSIS method is improved. The centrality index is used to rank the nodes, and the evaluation result of the node importance is obtained, which verifies the effectiveness of the method.

Keywords: equipment support network; polymeric degree; factor analysis; node importance

引言

复杂网络因为其存在非均匀性和异质性, 使

得其不同的节点具有相异的重要性, 那么如何区分重要等级比较高的节点来进行保护就成为研究的热点。研究鉴别出复杂网络中的重要节点, 可以增强网络的可控性与鲁棒性, 提升网络抵御级联失效攻击的能力。装备保障网络从结构上分析也是一种复杂网络。装备保障网络是在特定的局域范围中(战区级别或全军级别), 各级各类装备保



收稿日期: 2019-05-30 修回日期: 2019-06-24;
基金项目: 装备预研领域基金项目(61400010301);
作者简介: 张强(1991-), 男, 河北衡水, 博士生, 研究方向为综合保障体系仿真、复杂网络; 曹军海(通讯作者 1972-), 男, 陕西西安, 博士, 副教授, 博导, 研究方向为综合保障体系仿真。

<http://www.china-simulation.com>

• 2657 •

障力量单元按照规定的保障要求和配置原则, 为达到确定的保障效能, 通过一些合理有效的部署手段而构建出的一个网络化的保障体系, 是完成各类保障任务的结构基础^[1-2]。因此, 确定装备保障网络中的关键性保障节点, 进而对其重要保护, 优化保障网络中的脆弱部分, 提高整体的装备保障能力。

当前, 对于复杂网络中重要节点的分析确定方法大致有 2 种: 一种是从网络节点的显著特点属性考虑, 主要有度值中心性、介数值中心性、K-壳分解法^[3]。另一种是从网络系统动力学角度, 分析其抵抗破坏的能力大小, 包括节点删除法^[4]、节点收缩法^[5-6]。由于单属性评价存在一定局限性, 不少学者提出多属性综合评估方法。邢彪等^[7]从网络局部属性指标、传播属性指标、连接属性指标和全局属性指标出发, 运用 TOPSIS 方法(逼近理想解排序法)对装备保障网络中的重要节点进行评估。周璇等^[8]定义节点效率和节点重要度矩阵来分析鉴别复杂网络的重要节点。杜长江^[9]考虑了位置信息及邻居信息对在线社交网络中的节点重要性进行了研究。胡满玉^[10]受 PageRank 算法启发, 指出用基于链接关系的 DWNoderank 值评价网络节点的重要性。陈谦昱^[11]运用节点失效理论提出过载函数和容限系数等概念对节点重要性进行测度。

综上所述, 目前对于复杂网络中节点重要性评价方法主要存在下列几个方面不足:

- 1) 所用的单一属性方法虽然算法效率较高, 但不能全面地表现节点重要性;
- 2) 一些多属性评价方法大多忽略了不同属性对节点重要性影响的差别, 使得区分度和准确度有限;
- 3) 评价某节点重要性时, 较少考虑其邻居节点带来的影响。

从拓扑结构上来看, 装备保障网络可以视为一种复杂网络, 但又不同于普遍意义上的复杂网络:

- 1) 装备保障网络中保障节点具有明显的层次性, 一般的复杂网络层次性不是很明显;
- 2) 装备保障网络中保障节点由于功能不同, 往往具有较强的异质性, 而一般复杂网络异质性表现不是很明显, 存在较多同类型节点;
- 3) 装备保障网络的生成规律不同于一般复杂网络。

经过对大量实际网络的研究分析表明复杂网络在本质上的异质拓扑结构决定了网络中每个节点的地位不对等、重要性相异^[12]。判断出网络中的关键性节点可以进一步优化资源配置以及采取恰当有效的防御策略。

装备保障网络中的节点主要包含维修节点, 储存供应节点以及指挥节点; 连边关系包括同级保障节点之间的相互支援关系、上下级保障节点之间的指挥与保障关系、维修节点与储存供应节点之间的器材供应与需求反馈关系以及越级保障等关系。由于保障体制机制的存在, 交互关系频次较多的就是同级之间的友邻支援保障关系及上下级之间的指挥关系及器材供应保障关系。这从侧面凸显出一个保障节点的重要性不能单单从该节点的特征属性出发来判别, 而应该联合该保障节点邻居节点的一些特征属性来判别该保障节点的重要性。因此, 本文提出合度的概念, 从节点及其局部影响力角度判别保障节点的重要性次序。

1 节点重要性指标

装备保障网络中的节点主要包含维修节点, 储存供应节点以及指挥节点; 连边关系包括同级保障节点之间的相互支援关系、上下级保障节点之间的指挥与保障关系、维修节点与储存供应节点之间的器材供应与需求反馈关系以及越级保障等关系。

1.1 节点和边

定义装备保障网络中 v_i 为第 i ($i=1, 2, 3, \dots, N$) 个节点, $V=\{v_1, v_2, \dots, v_N\}$ 为保障节点集合, 其中

N 为保障节点的数目。

定义装备保障网络之中相互连接关系 e_l 为第 l ($l=1,2,3,\dots,M$) 条边, $E=\{e_1,e_2,\dots,e_N\}$ 为保障边集合, 其中 M 为连接边数。

1.2 节点重要性指标

1) 合度指标

在以往的节点重要性评估中, 大都采用节点度指标来分析判断节点的重要性, 但是节点的度值只是某一节点的固有属性, 并不能凸显节点及其邻居节点之间相互关系的影响(待评价节点及其邻居节点关系如图 1 所示)。为了避免利用节点度来判断节点重要性的局限性, 定义出合度的概念^[13-14], 将节点重要度的视角提升到局部重要度。

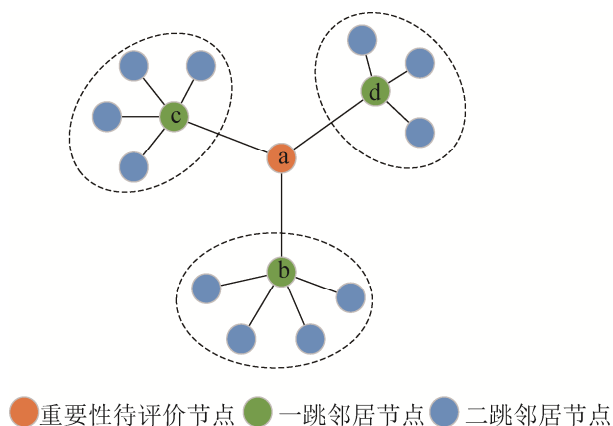


图 1 待评价节点及其邻居节点

Fig. 1 Nodes to be evaluated and their neighbors

定义 1 节点度。 v_i 为网络 G 中的一个节点, v_i 的度是所有与其相连边的数目值, 记为 K_i 。

定义 2 邻度。 v_i 为网络 G 中的一个节点, v_i 的所有邻居节点的度之和为 v_i 的邻度, 记为 K'_i 。

定义 3 合度。 v_i 的邻度 K'_i 与该节点的度值 K_i 的代数加和称为 v_i 的合度, 记为 K_i , 即

$$K_i = K'_i + K_i \quad (1)$$

保障节点的合度概念是考虑到其邻居节点的重要性大小对该节点造成的影响, 从而进一步区分节点的重要性。例如, 两个度值相同的节点 a (邻居节点为 c) 和节点 b (邻居节点为 d), 并且节点 c

的度值大于节点 d 的度值。如果采用度值进行比较, 那么节点 a 和节点 b 重要性相同; 但如果采用合度指标进行比较, 那么节点 a 较节点 b 重要。

2) 介数指标

介数是表征信息和资源经过某节点多少的一种体现, 是一种“桥”属性。

$$C_B(v_i) = \sum_{s < t} \frac{\sigma(v_s, v_t | v_i)}{\sigma(v_s, v_t)} \quad (2)$$

式中: $C_B(v_i)$ 为节点 v_i 的介数值; $\sigma(v_s, v_t | v_i)$ 为节点 v_s 和节点 v_t 之间最短路径经过 v_i 的条数, $\sigma(v_s, v_t)$ 为节点 v_s 和节点 v_t 之间最短路径条数。

在装备保障网络中, 介数指标是指令上传下达保障机制的体现。介数值较高的保障节点往往是供应子网络中的交通运输中转站或者保障资源分拣与配送基地等, 是连接上级节点与下级节点及供应节点与需求节点之间的纽带节点, 具有较重要的保障作用。

3) 接近度指标

某一节点的接近度值是指该节点到网络其他所有节点距离加和的倒数, 表征某节点与网络中心节点的接近程度, 计算公式为:

$$C_C(v_i) = \frac{N-1}{\sum_{v_j \in V} d_{ij}} \quad (3)$$

式中: $C_C(v_i)$ 为节点 v_i 的接近度值; d_{ij} 为节点 v_i 和节点 v_j 之间距离。

4) 特征向量中心性指标

特征向量中心性是节点在网络中影响大小的一种度量。

$$C_T(v_i) = \lambda^{-1} \sum_{j=1}^N w_{ij} t_j \quad (4)$$

式中: λ 为 W_G 的特征值; $(t_1, t_2, \dots, t_N)$ 为特征向量, $W_G = (w_{ij})_{N \times N}$ 。

2 保障节点重要性评价及分析

2.1 算法描述

TOPSIS 算法是一种典型的多属性决策评价算法。基于节点合度的概念, 对传统的 TOPSIS 方法

进行改进, 评估装备保障网络中的重要关键节点, 从而加强建设和保护。

具体步骤如下:

step 1: 计算节点的合度及介数等属性指标。

1) 计算合度。

a 构建保障网络邻接矩阵;

b 依次计算出节点的度值;

c 计算节点的邻度;

d 根据公式(1)计算节点和合度。

2) 计算节点介数值。

3) 计算节点接近度值。

4) 计算节点的特征向量中心性指标。

step 2: 构建决策矩阵并归一化。

把每个节点的属性集合视为一种方案, 评估节点的重要性也就是评估所列方案的优劣。设 $A = \{A_1, A_2, \dots, A_N\}$ 为方案集合, $S = \{S_1, S_2, \dots, S_s\}$ 为属性指标, 那么决策矩阵 X 为:

$$X = (x_{Ns}) = \begin{bmatrix} A_1(S_1) & \cdots & A_1(S_s) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ A_N(S_1) & \cdots & A_N(S_s) \end{bmatrix} \quad (5)$$

归一化后决策矩阵为 $R = (r_{ij})$, 公式如下:

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{j=1}^s x_{ij}^2}}, i=1, 2, \dots, N, j=1, 2, \dots, s. \quad (6)$$

step 3: 求解理想解方案。

设 $L = [l_1, l_2, \dots, l_s]$ 为指标权重, 则加权规范决策矩阵 Y 为:

$$Y = (y_{ij})_{N \times s} = \begin{bmatrix} l_1 r_{11} & \cdots & l_s r_{1s} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ l_1 r_{N1} & \cdots & l_s r_{Ns} \end{bmatrix} \quad (7)$$

进而可以计算出正理想解 Y^+ 和负理想解 Y^- 分别为:

$$Y^+ = [\max(y_{i1}, y_{i2}, \dots, y_{is})] = [y_1^+, y_2^+, \dots, y_s^+] \quad (8)$$

$$Y^- = [\min(y_{i1}, y_{i2}, \dots, y_{is})] = [y_1^-, y_2^-, \dots, y_s^-] \quad (9)$$

step 4: 计算接近度。

采用欧式距离计算每个节点方案 A_i 到正理想解 Y^+ 和负理想解 Y^- 的距离:

$$S_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^s (y_{ij} - y_j^+)^2} \quad (10)$$

$$S_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^s (y_{ij} - y_j^-)^2} \quad (11)$$

但欧式距离不能体现正理想解和负理想解垂线上的节点方案, 所以引入相对欧式距离:

$$S_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^s (y_j^+ \log \frac{y_j^+}{y_{ij}} + (1 - y_j^+) \log \frac{1 - y_j^+}{1 - y_{ij}})} \quad (12)$$

$$S_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^s (y_j^- \log \frac{y_j^-}{y_{ij}} + (1 - y_j^-) \log \frac{1 - y_j^-}{1 - y_{ij}})} \quad (13)$$

那么, 接近度 Z_i 为:

$$Z_i = \frac{S_i^-}{S_i^+ + S_i^-} \quad (14)$$

很明显, Z_i 值越大说明该节点方案越优, 即该节点越重要。当 $Z_i=0$ 时, 说明该节点方案最差; $Z_i=1$ 说明该节点方案最优。

2.2 算法有效性分析

在复杂网络节点重要性评价研究中, 美国 ARPA (Advanced Research Project Agency) 网络是最典型的网络模型^[15]。该模型拓扑结构如图 2 所示, 有 21 个节点, 26 条边, 平均度值约为 2.48。按照 2.1 节的步骤对该网络节点的重要度进行评价, 并对比评价结果(如表 1 所示)。

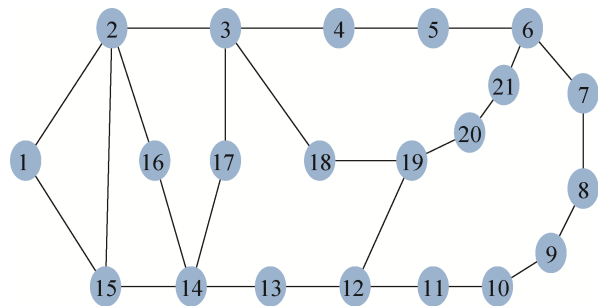


图 2 ARPA 网络拓扑结构
Fig. 2 Network Topology for ARPA

对比分析表 1 中涉及到的几种方法的评价结果, 不难发现, 本文方法和重要度贡献法、节点删除法的节点重要性趋势大致是相同的, 节点 3 重要

度最高, 合度也较大; 节点 1 重要性最低。因此, 利用该算法对节点重要性进行评价能够取得预期效果。

3 修理连装备保障节点重要性评价

本节中, 将研究对象设定为某一集团军所隶属的不同级别的装备保障力量, 分析各级各类保障机构运行流程, 得出军级装备保障体系网络运行机制及指挥流程^[18], 如图 3 所示。对其进行抽象, 可以得到以修理连为中心的装备保障网络^[7], 其拓扑结构如图 4 所示。保障节点的重要度如表 2 所示。

由评价结果知, 保障机构 4 重要性最高, 如果其被地方击毁, 那么保障网络将断裂为两个子网络; 保障机构 6 重要性最差, 其被击毁后对整个网络的保障能力影响不大。如果采用度值对节点进行评价, 显然节点 3 重要性最高, 但实际上这并不合理。

表 1 节点重要度评价结果

Tab. 1 Results node importance evaluation

节点 删除法 ^[16]	重要度 贡献法 ^[17]	效率矩 阵法 ^[15]	本文算法
节点 值	节点 值	节点 值	节点 值
3	0.993 0	3	0.452 6
14	0.956 4	12	0.439 3
6	0.983 6	19	0.363 0
12	0.978 0	6	0.329 4
2	0.972 1	4	0.294 8
19	0.967 1	5	0.277 6
7	0.879 7	11	0.268 4
8	0.879 7	14	0.262 5
9	0.879 7	13	0.246 6
10	0.879 7	18	0.238 3
11	0.879 7	10	0.192 1
15	0.879 7	7	0.189 9
4	0.838 7	2	0.177 0
5	0.838 7	20	0.173 4
20	0.827 9	21	0.162 7
21	0.827 9	17	0.153 0
13	0.805 1	8	0.145 8
18	0.770 7	9	0.139 9
17	0.697 7	15	0.101 8
16	0.663 9	16	0.070 8
1	0.626 2	1	0.035 5
3	0.091 4	3	0.091 4
2	0.085 8	2	0.085 8
14	0.084 2	14	0.084 2
15	0.062 3	15	0.062 3
19	0.061 0	19	0.061 0
12	0.060 2	12	0.060 2
6	0.052 2	6	0.052 2
17	0.042 8	17	0.042 8
18	0.042 4	18	0.042 4
13	0.041 1	13	0.041 1
11	0.040 6	11	0.040 6
16	0.039 8	16	0.039 8
1	0.037 5	1	0.037 5
10	0.035 9	10	0.035 9
20	0.035 7	20	0.035 7
15	0.034 5	15	0.034 5
17	0.034 5	17	0.034 5
21	0.033 5	21	0.033 5
7	0.031 7	7	0.031 7
9	0.031 7	9	0.031 7
10	0.030 4	10	0.030 4
8	0.028 7	8	0.028 7
16	0.028 7	16	0.028 7
9	0.028 5	9	0.028 5
1	0.011 7	1	0.011 7

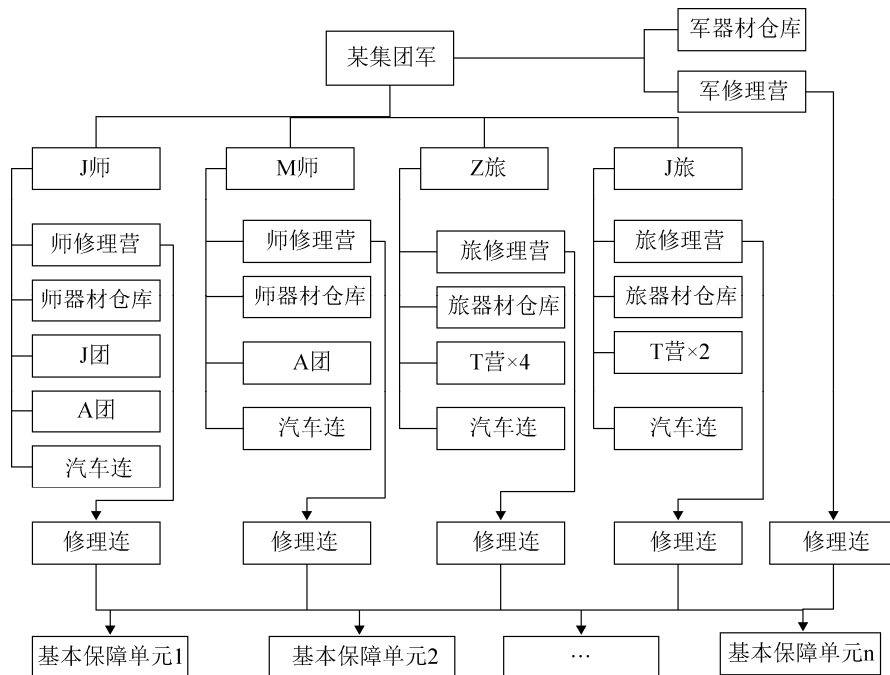


图 3 军级装备保障体系网络的运行机制和指挥流程

Fig. 3 Operation mechanism and command flow of army equipment support system network

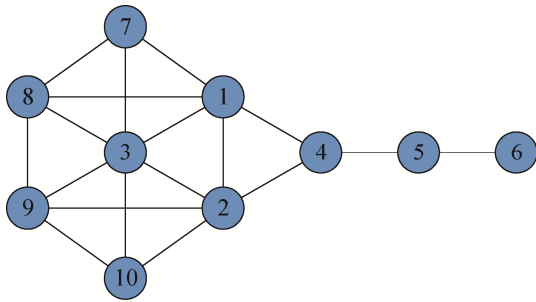


图 4 以修理连为中心的装备保障网络拓扑结构

Fig. 4 Topological structure of equipment support network centered on repair battalion

表 2 节点重要度评价结果

Tab. 2 Results node importance evaluation

节点重要性排序	节点标号	评价值
1	4	0.802 5
2	1	0.642 6
3	2	0.642 6
4	5	0.489 1
5	3	0.428 4
6	8	0.269 6
7	9	0.269 6
8	7	0.213 2
9	10	0.213 2
10	6	0

4 结论

装备保障网络是装备保障体系的一种抽象表达,可以视为现实中的一种复杂网络。运用复杂网络中节点重要性分析方法确定出具有关键性保障作用的保障机构,从而对其进行重点防护,建立快速支援机制,能够有针对性的提升装备保障体系的整体保障能力。

参考文献:

- [1] 赵劲松, 刘亚东, 伊洪冰. 复杂网络在装备保障领域的应用研究[J]. 系统科学学报, 2015, 23(4): 83-86.
Zhao Jinsong, Liu Yadong, Yi Hongbing. Application of Complex Networks in the Field of Equipment Support[J]. Journal of System Science, 2015, 23(4): 83-86.
- [2] 张勇, 杨宏伟, 白勇, 等. 基于复杂网络理论的装备保障网络实证研究[J]. 装备学院学报, 2014, 25(1): 83-87.
Zhang Yong, Yang Hongwei, Bai Yong, et al. An Empirical Study on the Equipment Support Network Based on Complex Networks[J]. Journal of Equipment

Academy, 2014, 25(1): 83-87.

- [3] Kitsak M, Gallos L K, Havlin S, et al. Identifying influential spreaders in complex networks[J]. Nature Physics (S1745-2473), 2010, 6(1): 888-893.
- [4] 李旭源, 罗泽, 阎保平. 一种基于节点删除法的候鸟栖息地重要性评估方法研究与实现[J]. 计算机应用研究, 2015, 32(2): 409-412.
Li Xuyuan, Luo Ze, Yan Baoping. Research and Application of Importance of Habitats of Migratory Bird Based on Node Deletion[J]. Application Research of Computers, 2015, 32(2): 409-412.
- [5] 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]. System Engineering Theory & Practice, 2006, 26(11): 79-83.
- [6] 刘娜, 沈江, 于鲲鹏, 等. 基于改进节点收缩法的加权供应链网络节点重要度评估[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2018, 51(10): 1056-1064.
Liu Na, Shen Jiang, Yu Kunpeng, et al. Weighted Supply Chain Network Node Importance Assessment Based on Improved Node Contraction Method[J]. Journal of Tianjin University (Science and Technology), 2018, 51(10): 1056-1064.
- [7] 邢彪, 曹军海, 宋太亮, 等. 基于 TOPSIS 的装备保障网络节点重要性综合评价方法[J]. 装甲兵工程学院学报, 2017, 31(3): 28-34.
Xing Biao, Cao Junhai, Song Tailiang, et al. Synthesis Evaluation Method for Network Node Importance in Equipment Support Based on TOPSIS[J]. Journal of Academy Force Engineering, 2017, 31(3): 28-34.
- [8] 周璇, 张凤鸣, 李克武, 等. 利用重要度评价矩阵确定复杂网络关键节点[J]. 物理学报, 2012, 61(5): 050201.
Zhou Xuan, Zhang Fengming, Li Kewu, et al. Finding Vital Node by Node Importance Evaluation Matrix in Complex Networks[J]. Acta Physica Sinica, 2012, 61(5): 050201.
- [9] 杜长江. 在线社交网络中节点重要性分析方法研究[D]. 北京: 中国矿业大学, 2018.
Du Changjiang. Research on Node Importance Analysis in Online Social Network[D]. Beijing: China University of Mining and Technology, 2018.
- [10] 胡满玉. 基于链接关系的有向加权复杂网络关键节点识别技术研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2012.
Hu Manyu. Research on Key Node Recognition in

- Directed Weighted Complex Networks Based on Link Relations[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2012.
- [11] 陈谦昱. 基于网络节点失效理论的交通运输网节点重要性评价的研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2012.
- Chen Qianyu. Research on Importance of Road Network Node Based on Key Node Failure[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2012.
- [12] 龚江涛. 复杂网络节点重要性度量模型研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2016.
- Gong Jiangtao. The research of measurement model about complex networks nodes importance[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2016.
- [13] Wang Y Q, Yang X Y. A random walk evolution model of wireless sensor networks and virus spreading[J]. Chinese Physics B (S1674-1056), 2013, 1: 154-160.
- [14] 张玫. 节点重要性评估及其在城市公交网络中的应用[D]. 石家庄: 河北师范大学, 2016.
- Zhang Mei. Node Importance Evaluation and Its Application in Urban Public Transport Network[D]. Shijiazhuang: Hebei Normal University, 2016.
- [15] 范文礼, 刘志刚. 一种基于效率矩阵的网络节点重要度评价算法[J]. 计算物理, 2013, 30(5): 714-719.
- Fan Wenli, Liu Zhigang. An evaluation method for node importance based on efficiency matrix[J]. Chinese Journal of Computational Physics, 2013, 30(5): 714-719.
- [16] 陈勇, 胡爱群, 胡啸. 通信网中节点重要性的评价方法[J]. 通信学报, 2004, 25(8): 129-134.
- Chen Yong, Hu Aiqun, Hu Xiao. Evaluation method for node importance in communication networks[J]. Journal of China Institute Communications, 2004, 25(8): 129-134.
- [17] 赵毅寰, 王祖林, 郑晶. 利用重要性贡献矩阵确定通信网中最重要节点[J]. 北京航空航天大学学报, 2009, 35(9): 1076-1079.
- Zhao Yihuan, Wang Zulin, Zheng Jing, et al. Finding Most Vital Node by Node Importance Contribution Matrix in Communication Networks[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2009, 35(9): 1076-1079.
- [18] 邢彪, 曹军海, 宋太亮, 等. 基于复杂网络的装备保障体系建模方法[J]. 装甲兵工程学院学报, 2016, 30(2): 12-15.
- Xing Biao, Cao Junhai, Song Tailiang, et al. Modeling Method of Equipment Support System Based on Complex Network[J]. Journal of Academy of Armored Forced Engineering, 2016, 30(2): 12-15.