

基于互信息的通信网络节点重要性度量方法

马润年¹, 王 班^{1,3}, 王 刚¹, 郭晓成¹, 刘文斌²

(1. 空军工程大学信息与导航学院, 陕西西安 710077;

2. 温州大学物理与电子信息工程学院, 浙江温州 325035; 3. 解放军 95007 部队, 广东广州 510410)

摘 要: 信息化条件下的复杂网络对节点的蓄意攻击非常脆弱, 因此准确发掘出网络中的核心节点并进行重点保护对提高网络抗毁性至关重要. 在分析特殊条件下通信网络特征属性的基础上, 借鉴通信系统中关于“信息量”的定义方法, 提出了改进的适用于有向加权网络的节点重要性评估方法. 在小规模混合加权网络中对该方法和已有方法进行了对比分析, 验证了本文方法的有效性和优势性. 构建了一种基于 BBV (Barrat-Barthelemy-Vespignani) 的混合加权网络演化模型, 并对生成的大规模通信网络进行了节点重要性评估仿真, 实验结果表明: 与现有评估方法相比, 本文方法能够更加简单、有效地评估网络节点的重要性.

关键词: 通信网络; 节点重要性; 互信息; 混合加权网络

中图分类号: TP393 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2017)03-0747-06

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2017.03.035

Evaluation Method for Node Importance in Communication Network Based on Mutual Information

MA Run-nian¹, WANG Ban^{1,3}, WANG Gang¹, GUO Xiao-cheng¹, LIU Wen-bin²

(1. Information and Navigation Institute, Air Force Engineering University, Xi'an, Shaanxi 710077, China;

2. Department of Physics and Electronic Information Engineering, Wenzhou University, Wenzhou, Zhejiang 325035, China;

3. Unit 95007 of PLA, Guangzhou, Guangdong 510410, China)

Abstract: The intentional attacks on the nodes makes the complex network very fragile under information condition, so it is very important to explore accurately and then protect these core nodes in the network. Based on analyzing the characteristics of communication network under the special condition, and taking the definition method of “amount of information” in the information communication system for reference, this paper propose a new evaluation method that are suitable for the directed-weighted networks. Through the comparative analysis of this method and the existing methods in small-scale mixed weighted network, the validity and advantage of this method is verified. The mixed weighted network evolution model based on BBV (Barrat-Barthelemy-Vespignani) is established, and the simulation which to evaluate the node importance in the generated large-scale communication network is performed. The experiment analysis results show that the proposed method may evaluate the node importance more easily and effectively than that of the state of the evaluation method.

Key words: communication network; node importance; mutual information; mixed weighted network

1 引言

随着信息技术的快速发展, 通信网络在承载信息传输方面的作用已日益突出. 通信网络是指由多个交换节点用传输链路以一定的拓扑结构互联构成的用于特定功能的复杂网络^[1], 而各个通信节点由于其功能作用、网络位置和组织关系的不同, 其在网络中表现出不同的重要程度^[2], 如现代军事战争中斩首行动就是要在繁杂的目标中寻找最最重要或最核心的部位进行打击, 以起到意

想不到的效果^[3]. 因此, 对通信网络中各通信节点进行重要性评估, 准确发掘出网络中的核心节点, 可以为网络抗毁性方面的研究提供重要的理论帮助.

目前, 通信网络节点重要性评估方面的研究主要基于复杂网络理论, 且主要集中在无向无权复杂网络上^[4,5]. 现有的无向加权网络节点重要性评估方法很有限, 其中节点强度(节点近邻边权和)法^[6]具有片面性, 忽略了一些潜在关键节点的重要性; 节点介数(通过节点的最短路径比例)法^[7]计算复杂度高; 节点收缩方

法^[8]定义的加权网络凝聚度指标也是基于网络最短路径的计算,不适用于大规模网络.对于有向加权网络节点重要性评估方面的研究更加有限,文献[9]借鉴 PageRank 算法思想提出了新的评估指标及方法,但新算法对节点相对重要性的评估精度和算法收敛速度却不能同时兼顾.

上述复杂网络节点重要性评估方法的研究都比较单一^[10,11],或者针对无向网络,或者针对全部为有向边的有向网络,而现实生活中的一些通信网络因其特定的条件限制和功能要求等,可能会存在同时具有双向通信链路和单向通信链路的情况,因此上述方法对此类通信网络并不完全适用.文献[12]利用节点的信息量来评估节点重要性的方法为解决上述问题提供了一定思路.因此,本文首先介绍将混合加权网络转化为有向加权网络的方法,继而从分析特定条件下的通信网络结构入手,参考通信系统中对信息量的定义,提出了改进的基于互信息的网络节点重要性评估方法,并对改进方法的优势进行了验证,最后构建了混合加权网络模型并对大规模网络进行了节点重要性评估,以期特殊条件下通信网络的中心性评估提供新思路.

2 通信网络及其节点重要性

通信网络作为各通信实体之间进行传输信息的人工功能网络^[13,14],可能会遭受到来自自身的随机故障和来自外部的蓄意攻击,所以准确发掘网络的核心节点并进行重点保护对提高网络抗毁性至关重要.在一些特殊的通信网络中,如在一场军事演习构建的通信网络中,要求网络中的某些特定通信节点之间只进行单向通信,以避免过多形式的通信而遭到信息泄露,而且双向通信中两个通信节点之间传递的信息流有可能是不对等的.这样构建的通信网络中既有双向通信链路又有单向通信链路,将双向通信链路抽象为无向边,单向通信链路抽象为有向边,就可以将此类网络抽象为同时具有无向边和有向边的混合加权网络进行研究,而判断此类网络的节点重要性是本文要重点考虑的问题.

为便于研究,本文将此类通信网络中的双向通信链路转化为两条方向相反的单向链路来进行分析,其中每条单向链路有各自对应的信息流量,且不一定相等.对于抽象出的混合加权网络,即是把无向边转化为两条方向相反的有向边,转化后的两条有向边的权值与原来的无向边权值相等,有向边则保持不变,这样就将混合加权网络转化为了有向加权网络.在此基础上,以有向加权网络节点重要性评估方法对其进行评估来寻找核心节点,从而为关键部位的重点防护提供参考依据^[2].

这里给出转化后的有向加权网络模型 $G = (V, E, W)$,其中 $V = \{v_1, v_2, \dots, v_N\}$ 为节点集合, $E = \{e_1, e_2, \dots,$

$e_M\}$ 为有向边集合, $W = \{w_{e_1}, w_{e_2}, \dots, w_{e_M}\}$ 为有向边的权重集合. $(i, j) \in E$ 表示节点 i 到节点 j 的一条有向边, $w(i, j) \in W$ 表示有向边 (i, j) 的权值,类似的, $w(j, i)$ 表示有向边 (j, i) 的权值,其中 $w(i, j)$ 并不一定等于 $w(j, i)$. 节点强度可分为入强度和出强度, $S_{in}(i)$ 表示节点 i 的入强度: $S_{in}(i) = \sum_{k \in V_{in}(i)} w(k, i)$, 其中 $V_{in}(i)$ 表示指向节点 i 的所有节点集合; $S_{out}(i)$ 表示节点 i 的出强度: $S_{out}(i) = \sum_{k \in V_{out}(i)} w(i, k)$, 其中 $V_{out}(i)$ 表示节点 i 所指向的所有节点集合,入强度与出强度之和即为节点 i 的总强度 $S(i) = S_{in}(i) + S_{out}(i)$.

3 复杂网络节点重要性评估方法

文献[12]将无向无权复杂网络中的边看作数据流,运用通信系统模型中信息论的相关知识,以每个节点所包含的信息量来代表节点的重要程度,方法直观准确.本节在此基础上,结合特殊通信网络的结构特点,提出了改进的适用于有向加权网络的节点重要性评估算法,并在小规模混合加权网络中对改进方法进行验证.

3.1 基于互信息的节点重要性评估方法

对无向无权网络,节点信息量的计算为^[12]:先计算节点与其相连节点之间的互信息量,然后对互信息求和计算该节点所包含的信息总量.

定义 1^[12] 设节点 i 到节点 j 的互信息为 $I(i, j)$, 定义为:

$$I(i, j) = \begin{cases} \ln \frac{1}{p_{ij}} - \ln \frac{1}{p_{ji}}, & i \text{ 与 } j \text{ 直接相连} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (1)$$

式中, p_{ij} 表示对于节点 i 的所有连边而言,边 (i, j) 所占的概率, p_{ji} 表示对于节点 j 的所有连边而言,边 (j, i) 所占的概率.对于无向无权网络,同一节点的每条边的概率分布视为等概率分布,即 $p_{ij} = 1/k_i, p_{ji} = 1/k_j, k_i$ 为节点 i 的度.所以上式可以简化为:

$$I(i, j) = \begin{cases} \ln \frac{k_i}{k_j}, & i \text{ 与 } j \text{ 直接相连} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (2)$$

定义 2^[12] 节点 i 的信息量是节点 i 与其他节点的互信息之和,设为 $I(i)$:

$$I(i) = \sum_{j=1}^N I(i, j) \quad (3)$$

由以上定义可知, $I(i, j) + I(j, i) = 0$, 对于整个网络,信息量之和 $\sum_{i=1}^N I(i)$ 为零.在计算出所有节点的信息量之后按照从大到小进行排序,信息量越大的节点重要性越强.

3.2 改进的节点重要性评估方法

对于有向加权网络,节点之间的连边具有方向和权重双重特性,有向加权边表示该边的两个端节点以一定数据流量进行单向通信.此时,同一节点的每条边的概率分布将有所不同,节点的边的概率将与该节点的出入强度、该边的方向和权值有关,因为一个节点有可能同时既输出信息又接收信息,这里定义节点的出边概率和入边概率,如有从节点 i 指向节点 j 的有向边 (i,j) ,则定义节点 i 的出边 (i,j) 的概率为:

$$P_{i \rightarrow j} = \frac{w(i,j)}{S_{\text{out}}(i)} \quad (4)$$

定义节点 j 的入边 (i,j) 的概率为:

$$P_{j \leftarrow i} = \frac{w(i,j)}{S_{\text{in}}(j)} \quad (5)$$

定义 3 设节点 i 到节点 j 的互信息为 $I(i,j)$,定义如下:

$$I(i,j) = \begin{cases} \ln \frac{1}{P_{i \rightarrow j}} - \ln \frac{1}{P_{j \leftarrow i}} \\ 0 \end{cases} \\ = \begin{cases} \ln \frac{S_{\text{out}}(i)}{w(i,j)} - \ln \frac{S_{\text{in}}(j)}{w(i,j)} \\ 0 \end{cases} \\ = \begin{cases} \ln \frac{S_{\text{out}}(i)}{S_{\text{in}}(j)}, & i \text{ 到 } j \text{ 的连边} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (6)$$

定义 4 节点 i 的信息量是节点 i 到所有 i 指向节点的互信息之和减去所有指向 i 的节点到节点 i 的互信息之和,即

$$I(i) = \sum_{j \in V_{\text{out}}(i)} I(i,j) - \sum_{k \in V_{\text{in}}(i)} I(k,i) \quad (7)$$

其中, $V_{\text{out}}(i)$ 表示节点 i 所指向的所有节点集合, $V_{\text{in}}(i)$ 表示指向节点 i 的所有节点集合. 根据式(6)和(7)不难证明这里的信息量之和 $\sum_{i=1}^N I(i)$ 也为零. 同样在计算出所有节点的信息量之后按照从大到小进行排序,信息量越大的节点重要性越强.

对于有向加权网络,公式(6)和(7)隐含两个基本事实:(1)对于节点 i ,当自身的出强度 $S_{\text{out}}(i)$ 和入强度 $S_{\text{in}}(i)$ 越大, $I(i)$ 越大,表明这个节点越重要,这符合一般直观认识;(2)对于节点 i 所指向的相邻节点 j ,当边权重 $w(i,j)$ 确定时,节点 j 的入强度 $S_{\text{in}}(j)$ 越小,表明指向节点 j 的所有节点中,节点 i 与其之间的信息传递相对越多,即节点 i 相对越重要,对于指向节点 i 的相邻节点 k 分析可以得到相似结果.

3.3 改进方法的评估验证

如图 1 所示为具有 10 个节点的混合加权网络,利用上节所提方法可以将其转化为全部为有向边的有向

加权网络.将无向加权网络节点强度法^[15]推广到有向加权网络中,以总强度作为有向加权网络节点重要性评估的一个度量指标;文献[9]借鉴 PageRank 算法思想,也提出了一个有向加权网络节点重要性评估指标:

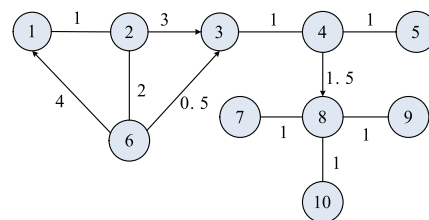


图1 具有10个节点的混合加权网络模型

$$NR(k) = \frac{(1-\sigma)}{N} + \sigma \cdot \sum_{i \in V_{\text{in}}(k)} \left(\frac{w(i,k)}{S_{\text{out}}(i)} NR(i) \right) \quad (8)$$

其中, $NR(k)$ ($k=1,2,\dots,N$) 表示节点 k 的 NWCN-NodeRank 值(简称 NWCN-NR 值),即为节点的重要性度量值; σ ($0 < \sigma < 1$) 为阻尼系数,表示在任意时刻,数据流到达某节点后继续向后传输的概率,阻尼系数越大,节点的重要性收益越大.

利用总强度法、文献[9]方法($\sigma=0.85$)和本文改进方法对转化后的网络进行节点重要性评估,表 1 统计了三种方法所计算出的排序在前 6 位的节点重要性度量值和对应节点编号.从表 1 可以看出:一方面,节点总强度法和文献[9]方法可能会因为某些节点的重要性度量值相同而无法将这些节点区分,如节点 3 和 4 的节点总强度都为 5.5,节点 7、9 和 10 的 NWCN-NR 值都为 0.109,而互信息方法则充分考虑了节点自身的强度、相邻节点的强度、节点连边权重和权重比例系数,使得细致刻画出了这些节点的重要性差异;另一方面,节点总强度法过于片面,对一些潜在关键节点不能准确评估,从图 1 的拓扑结构可以看出,网络中的节点 3、4 和 8 任何一个一旦被破坏,整个网络就不连通了,所以直观上这三个节点都非常重要,但总强度法中这几个节点的排序都比较靠后,而在互信息方法中节点 4 和 8 的重要性排序比较靠前,凸显出了这些节点的关键性.文献[9]方法中节点 4 的排序也比较靠后,评估结果亦考虑的不够全面,而且与 NWCN-NR 值的计算相比,互信息方法仅通过互信息计算就接收了邻居的反馈信息,算法更加简单有效.

表 1 排序前 6 的各方法度量值及节点编号

排序	总强度	编号	NWCN-NR 值	编号	信息量	编号
1	9	2	0.3319	8	8.0594	8
2	8.5	6	0.1090	7	2.1364	4
3	7.5	8	0.1090	9	1.8940	2
4	6	1	0.1090	10	0.3047	6
5	5.5	3	0.1066	4	-1.0972	3
6	5.5	4	0.0669	3	-1.5433	1

4 网络的构建及节点重要性评估仿真实验

4.1 通信网络的构建

研究者们考虑真实网络的一些实际特性,对加权网络进行实证研究,提出了边权值和节点强度都动态演化的 BBV 模型^[16]和网络中所有边都为有向边的有向加权网络模型^[17],但上述模型不能描述既有单向通信链路又有双向通信链路的特殊通信网络.因此,本文提出一种基于 BBV 的混合加权网络演化模型.模型的演化算法为:

Step1 初始设定:首先建立一个具有 m_0 个节点的全连通网络,每条边的初始权值为 w_0 .

Step2 增长:每个时间步加入一个新节点 t ,并引出 $m \leq m_0$ 条连边与之前网络的 m 个节点相连,这 m 条边中既有无向边又有有向边,其中:

(1) 无向边数服从二项分布 $B(m, q)$, $q \in [0, 1]$,

(2) m 条边中除去无向边剩下的则为有向边,设有向边的总数为 $m(t)$,则出边数服从二项分布 $B(m(t), p)$, $p \in [0, 1]$,有向边中除去出边剩下的则为入边,此处出入边均针对新节点 t 而言.

Step3 择优连接:连接节点的选择按照权重优先原则选择进行,其中,

(1) 若引出边为无向边时,选择老节点 i 作为新边连接节点的概率为:

$$\prod_i = \frac{S(i)}{\sum_j S(j)} \quad (9)$$

(2) 若引出边为出边时,选择节点 i 作为新边入节点的概率为:

$$\prod_i = \frac{S_{in}(i)}{\sum_j S_{in}(j)} \quad (10)$$

(3) 若引出边为入边时,选择节点 i 作为新边出节点的概率为:

$$\prod_i = \frac{S_{out}(i)}{\sum_j S_{out}(j)} \quad (11)$$

Step4 边权值的动态演化:每次新加入的边赋权值 w_0 ,简单起见,认为新加入的边只会局部引起节点 i 和它的邻居节点 $j \in V(i)$ 之间连边的权值作重新调整:

(1) 对于步骤 3 中情况(1),即新加入的边为无向边时,则节点 i 和它的邻居节点之间连边权值调整为:

$$\begin{cases} S(i) = S(i) + 2w_0 + \delta_1 \\ w(i, j) \rightarrow w(i, j) + \delta_1 \cdot w(i, j) / S(i) \\ w(k, i) \rightarrow w(k, i) + \delta_1 \cdot w(k, i) / S(i) \end{cases} \quad (12)$$

δ_1 为给 i 新增加一条无向边时给 i 带来的额外总流量负担.

(2) 对于步骤 3 中情况(2),即新加入的边为 $\langle t, i \rangle$ 时,则节点 i 和它的原出边邻居节点 j 之间连边权值调整为:

$$\begin{cases} S(i) = S(i) + w_0 + \delta_2 \\ w(i, j) \rightarrow w(i, j) + \delta_2 \cdot w(i, j) / S_{out}(i) \end{cases} \quad (13)$$

δ_2 为给 i 新增加一条入边时给 i 带来的额外出流量负担.

(3) 对于步骤 3 中情况(3),即新加入的边为 $\langle i, t \rangle$ 时,则节点 i 和它的原入边邻居节点 k 之间连边权值调整为:

$$\begin{cases} S(i) = S(i) + w_0 + \delta_3 \\ w(k, i) \rightarrow w(k, i) + \delta_3 \cdot w(k, i) / S_{in}(i) \end{cases} \quad (14)$$

δ_3 为给 i 新增加一条出边时给 i 带来的额外入流量负担.

4.2 实例分析

取上述网络演化模型中的参数 $m_0 = 8$, $w_0 = 2$, $m = 4$, $q = 0.7$, $p = 0.5$,增加无向边所带来的额外流量负担 $\delta_1 = 2$,增加有向边所带来的额外流量负担 $\delta_2 = \delta_3 = 1$,由此生成节点数 $N = 500$ 的通信网络作为评估对象,并由改进的节点重要性评估算法、总强度法和文献[9]方法对网络中的各节点进行重要性指标计算.

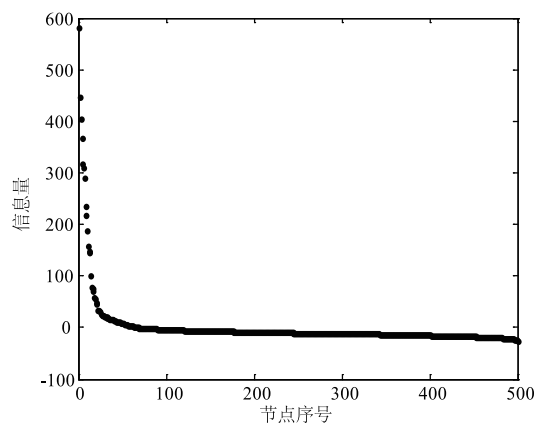


图2 通信网络节点信息量分布

表2 不同 n 取值下相同节点个数所占比例值

n 取值	20	40	60	80	100
与总强度比较	1	0.95	0.90	0.812	0.83
与 NWCN-NR 值比较	1	0.90	0.883	0.812	0.80

图 2 给出了通信网络各节点信息量由大到小进行排序的分布图,纵坐标为节点信息量,横坐标节点序号.根据以信息量排序后的节点序号为统计顺序,图 3 和图 4 分别为统计出的对应节点的总强度分布图和 NWCN-NR 值分布图,其中各图中针对序号前 100 的节点也进行了更细致地绘制.因为本文提出的通信网络演化模型在网络规模的不断演化过程中,连接节点的选择是

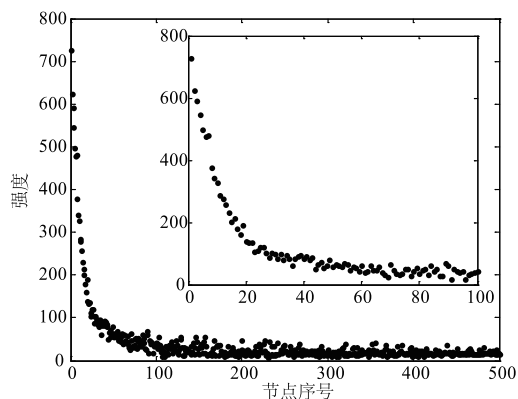


图3 通信网络对应节点强度分布

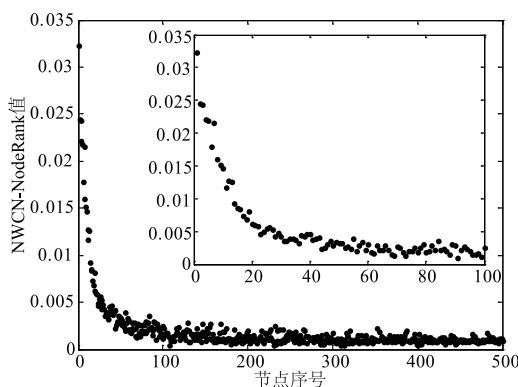


图4 通信网络对应节点的NWCN-NodeRank分布

按照权重优先原则进行的,其是基于“节点强度越大则其在网络中越重要,越容易吸引新增节点与其进行连接”的一种思想,所以该网络演化模型中是以节点总强度来刻画节点重要性的.而从图3、图4分别与图2的对比中可以看出,强度分布和NWCN-NR值分布与信息量分布是大体相似的,所以以信息量为指标来度量节点重要性具有一定的参考价值,这也进一步验证了本文改进算法在大规模通信网络中的有效性.

分别以信息量排序和以总强度(或NWCN-NR值)排序的前 n 个节点中出现的相同节点个数与 n 的比值可以进一步比较本文方法与已有方法发掘核心节点的能力,表2给出了 n 取不同值时,统计出的相同节点个数所占比例值.可以看出,三种方法评估出的前20个最重要的节点是完全相同的,随着 n 的增大,评估出的排序靠前的节点将出现不同,且随着考虑范围的增大,即 n 取值的增大,相同节点个数所占比例值都有所下降,但下降程度不是很大.对于大规模网络,我们只关心网络中相对重要的一部分节点,可以看出互信息方法能够准确评估出这些节点.而且根据上一节的分析可知,相比于以节点强度和NWCN-NR值作为节点重要性的评估指标,基于互信息的方法评估更加全面,算法更加简单.这样,通过对各节点信息量的排序,找出网络中的

核心节点并对其进行重点保护,可以有效预防信息泄露和应对打击破坏,保障信息的安全顺利传递.

5 结论

随着网络化、信息化的快速发展,通信网络呈现的复杂性、多变性要求我们必须及时准确掌握网络中的核心部位,以便对其进行重点保护来提高网络的抗毁性.本文首先分析了特殊条件下通信网络的特性,借鉴基于互信息的节点重要性评估方法,提出了改进的适用于有向加权网络的节点重要性评估方法,并在同时具有双向边和单向边的混合加权网络中对该改进方法进行了优势分析.对由基于BBV的混合加权网络演化模型构建的大型网络进行评估分析,结果表明该方法能够简单、准确、有效地评估网络节点的重要性,对网络的中心性评估具有十分重要的理论意义.今后应针对具体的网络要求,对特定通信网络的模型构建不断完善,使得评估结果更加全面可靠.

参考文献

- [1] Liu Jin-xing, Chen Shao-dong, Wang Yan-gao. Study on node importance of complex network based military command control networks [A]. Proceedings of International Conference on Machine Learning and Cybernetics [C]. Xian: IEEE Press, 2012. 920 - 923.
- [2] 朱涛,常国岑,郭戎潇,等. 网络化指挥控制中心性建模评估研究[J]. 系统仿真学报, 2010, 22(1): 201 - 204. Zhu Tao, Chang Guo-cen, Guo Rong-xiao, et al. Research on centrality model and evaluation of networked command and control [J]. Journal of System Simulation, 2010, 22(1): 201 - 204. (in Chinese)
- [3] Ernesto E, Juan A, Rodriguez V. Subgraph centrality in complex networks [J]. Physical Review E, 2005, 71(5): 122 - 133.
- [4] Hu Jun, Han Yan-ni, Hu Jie. Topological potential: modeling node importance with activity and local effect in complex networks [A]. Proceedings of International Conference on Computer Modeling and Simulation [C]. Sanya: IEEE Computer Society Press, 2010. 411 - 415.
- [5] Martín G A M, Dalsgaard, B, Olesen, J M. Centrality measures and the importance of generalist species in pollination networks [J]. Ecol Complexity, 2010, 7(1): 36 - 43.
- [6] Darli A A, Helio W, Gustavo S. Interval availability estimation for protected connections in optical networks [J]. Computer Networks, 2011, 55(1): 193 - 204.
- [7] Brandes U. On variants of shortest-path betweenness centrality and their generic computation [J]. Social Networks, 2008, 30(2): 136 - 145
- [8] 朱涛,张水平,郭戎潇,等. 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, 3(8): 1902 - 1905.
- Zhu Tao, Zhang Shui-ping, Guo Rong-xiao, et al. Improved evaluation method for node importance based on node contraction in weighted complex networks[J]. Systems Engineering and Electronics, 2009, 3(8): 1902 - 1905. (in Chinese)
- [9] 张琨, 李配配, 朱保平, 等. 基于 PageRank 的有向加权复杂网络节点重要性评估方法[J]. 南京航空航天大学学报, 2013, 45(3): 429 - 434.
- Zhang Kun, Li Pei-pei, Zhu Bao-ping, et al. Evaluation method for node importance in directed-weighted complex networks based on PageRank[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2013, 45(3): 429 - 434. (in Chinese)
- [10] Zhao D, Liu J, Zhang Y. Study on node importance of networks security defense based on complex network[J]. Information Technology Journal, 2013, 12(22): 6623 - 6626.
- [11] Jin J, Xu K, Xiong N, et al. Multi-index evaluation algorithm based on principal component analysis for node importance in complex networks[J]. The Institution of Engineering and Technology, 2012, 1(3): 108 - 115.
- [12] 张翼, 刘玉华, 许凯华, 等. 一种基于互信息的复杂网络节点重要性评估方法[J]. 计算机科学, 2011, 38(6): 88 - 89.
- Zhang Yi, Liu Yu-hua, Xu Kai-hua, et al. Evaluation method for node importance based on mutual information in complex networks[J]. Computer Science, 2011, 38(6): 88 - 89. (in Chinese)
- [13] 石福丽, 朱一凡. 基于超网络理论的军事通信网络复杂性度量方法[J]. 通信学报, 2011, 32(12): 51 - 59.
- Shi Fu-li, Zhu Yi-fan. Measuring the complexity of military communication networks based on supernetwork theory[J]. Journal on Communication, 2011, 32(12): 51 - 59. (in Chinese)
- [14] Lin Jian, Dai Fei, Li Bai-chao, et al. Electromagnetic compatibility supernetwork modeling and node importance evaluation[A]. Proceedings of International Conference on Intelligent Human-Machine Systems and Cybernetics[C]. Hangzhou: IEEE Computer Society Press, 2013. 306 - 309.
- [15] Bollobás B, Riordan O, Spencer J, et al. The degree sequence of a scale-free random graph process[J]. Journal of Random Structures and Algorithms, 2011, 18(3): 279 - 290.
- [16] Barrat A, Barthelemy M, Vespignani A. Modeling the evolution of weighted networks[J]. Physical Review E, 2004, 70(6): 1 - 13.
- [17] 王桂英, 周健, 谢颺. 基于 BBV 的有向加权网络模型[J]. 计算机工程, 2010, 36(12): 141 - 143.
- Wang Gui-ying, Zhou Jian, Xie Yang. Directed weighted network model based on BBV[J]. Computer Engineering, 2010, 36(12): 141 - 143. (in Chinese)

作者简介



马润年 男, 1963 年出生, 陕西绥德人. 博士后, 教授, 主要研究方向为生物计算、神经网络.
E-mail: m314@163.com



王班 男, 1992 年出生, 陕西渭南人. 现为在读硕士研究生, 主要研究方向为复杂网络抗毁性.
E-mail: wangb1751@163.com



王刚 男, 1977 年出生, 湖北武汉人. 博士, 副教授. 主要研究方向为信息网络系统建设与规划.
E-mail: wglxl@nudit.edu.cn



郭晓成 男, 1990 年出生, 山东烟台人. 现为在读硕士研究生, 主要研究方向为网络系统规划与评估.
E-mail: 840307903@qq.com