

基于负载流的点加权复杂网络节点重要性 评估方法研究*

杨宏伟¹, 张勇¹, 王焕坤¹, 刘艺²

(1. 装甲兵工程学院 技术保障工程系, 北京 100072; 2. 总装驻沈阳地区军代室, 沈阳 110004)

摘要: 基于目前节点重要度评估方法大多针对静态无权网络拓扑结构的研究现状, 考虑实际加权网络节点之间负载流动情况, 从事理层面提出了一种基于网络贡献度的节点重要性评估方法。该方法基于典型加权复杂网络拓扑结构, 从节点间负载流动和网络系统运行的角度出发, 定义了流出负载量、流入负载量和流经负载量三个特征参数, 并给出了具有一定现实意义的评价方法。该方法有助于更准确地发现复杂网络中的关键节点。最后的实验分析验证了该方法的有效性和可行性。

关键词: 复杂网络; 网络权; 负载流; 介数; 最短路径; 节点重要度

中图分类号: TP302.7 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3695(2013)01-0134-04

doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2013.01.033

New measure of node importance based on load flow in node-weighted complex networks

YANG Hong-wei¹, ZHANG Yong¹, WANG Huan-kun¹, LIU Yi²

(1. Dept. of Technology Support Engineering, Academy of Armored Force Engineering, Beijing 100072, China; 2. Military Representative Office of General Armament Department in Shenyang, Shenyang 110004, China)

Abstract: At present, most of research on node importance evaluation is concentrated on static un-weighted network. For weighted networks, this paper presented a new evaluation method of node importance based on load flow in the node-weighted network, and it was based on the contribution of the nodes for the whole network in the view of microscopic and macroscopic. The most important node was the one which was determined by the outputting load, inputting load and crossing load between the different nodes. The improved evaluation method could help exactly to find some critical nodes which were sensitive to the efficiency of networks. Final, example verifies its efficiency and feasibility

Key words: complex networks; weight of networks; load flow; betweenness; shortest path; node importance

0 引言

现实中的许多复杂系统都可以用网络形式来描述, 一个典型的网络是由许多节点与连接节点之间的一些边组成, 其中节点代表真实系统中的相对独立个体, 而边则代表个体之间的关系。自1999年美国科学家Barabási等人^[1]提出网络中的无标度特征之后, 复杂网络理论发展迅速且应用广泛。其中, 无标度特征表征网络中每个节点的重要程度是不同的, 即网络结构的异质性; 与之对应的网络节点重要性评估是一项基础性而又非常有意义的研究工作, 如确定恐怖组织头目^[2], 发现交通网络堵塞节点, 阻止SARS、AIDS等流行疾病的传播等。

目前, 有关复杂网络中节点重要性的评估方法很多, 最典型也最简单的评价方法是基于节点的度^[3]。例如星型网络中中心节点的重要度肯定大于边缘节点, 该方法的优点是形象直观, 且计算复杂度不高, 缺点是有时不能准确表达网络中节点的重要程度。例如: a) 一个节点的度值虽然很高, 但连接它的其他节点并不重要, 则这个节点并不一定非常重要; b) 通过定

义中心度衡量指标, 如果节点的中心度越大, 表明其越居于网络的中心, 因而越重要, 该方法计算较为方便, 但由于中心度对网络的拓扑结构依赖性很大, 则使得其对于民主式的正则图、ER随机图并不合适; c) 引入节点介数的评价方法^[4], 对应网络中某些典型的桥节点, 表现特征为这些节点度值在整个网络中虽然不是最大的, 但它在维持整个网络体系连接的过程中却有着非常重要的作用。一般来说, 节点的介数越高, 该节点就越有影响力, 也就意味着这个节点重要。但是介数的计算复杂度也非常大, 为 $O(N^3)$, 其中 N 为节点数目。不难发现, 上述研究基本依据网络拓扑的形式化描述, 属于社会网络分析范畴, 即认为节点的重要性等价于其显著性。除此之外, 还有系统科学分析方法(重要性等价于该节点被删除后对网络的破坏性)、信息搜索领域分析方法(重要性等价于自身和邻居节点的重要性)和节点相对重要性等若干不同的研究角度, 详见参考文献[5]。

目前网络节点重要度评估的研究大多集中于无权无向之结构网络, 但就本质而言, 复杂网络具有结构/关系二相性, 结

收稿日期: 2012-04-24; 修回日期: 2012-06-13 基金项目: 军队科研计划资助项目(2010CX02)

作者简介: 杨宏伟(1960-), 男, 北京人, 教授, 博士, 主要研究方向为复杂管理系统建模与优化、装备保障系统运行与优化(zhywkh@163.com); 张勇(1984-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为复杂管理系统建模与优化; 王焕坤(1987-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为复杂管理系统建模与优化; 刘艺(1960-), 男, 高级工程师, 本科, 主要研究方向为装备保障理论。

构强调该关系强度之非0,即关系存在性,关系则强调该关系强度到底是多少,当前研究多注重结构而忽略了关系^[6,7]。本文认为尽管纯粹的结构特征固然重要,但关系强度宏观分布特征也是非常重要而有较强现实意义的。目前,加权网络的研究大多集中在通过对边赋权,按线性关系或引入介数的方式求算点权^[8],具有一定的合理性和应用范围。而通过调研发现,现实世界中网络中节点与边之间往往并不一定存在必然联系,这是因为网络中节点的权往往代表该节点的处理能力、资源拥有量等;而连接节点之间的边往往具有较大的承载能力或通行能力,存在一定的资源冗余,也就是说往往节点表现出很大的功能差异性,而与边没有多大的联系。基于这种思考,本文尝试从负载流动属性的角度来评估点加权复杂网络中节点的重要性。具体包括以下几个方面的研究内容:a)定义了点加权复杂网络,并分析了其负载流动特性;b)从网络贡献值的角度,建立复杂网络节点重要度评估模型;c)进行实例分析。

1 构建加权复杂网络模型^[9,10]

1.1 符号及假设

1) 复杂网络 用图 $G=(V,E)$ 表示,其中: V 是网络中 N 个顶点的集合, $V=\{v_i|i=1,2,\dots,N\}$; E 是网络中所有边的集合, $E=\{e_k|e_k=(v_i,v_j),k=1,2,\dots,m\}$ 。这里仅考虑无向、单边和不自环的图,也就是说,所有的边有相同的权重并且是双向的,任何邻接顶点对之间最多有一条边,并且没有连接到自身的边。如果用 $w_{i,j}$ 表示节点 v_i,v_j 连接情况,则

$$w_{i,j} = \begin{cases} 1 & (v_i,v_j) \in E, i \neq j \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad i, j = 1, 2, \dots, N$$

称 $[w_{i,j}]_{N \times N}$ 为图 G 的邻接矩阵。

2) 节点赋权 点权代表节点的处理能力或资源拥有量,用 σ_i 表示,点权重集 $\sigma = \{\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_N\}$ 。具体点权赋值可以参照实际网络中对各节点的负载情况或设定服从某种分布。实际网络中节点的权重大小也可根据不同的研究背景赋予不同的含义,如在经济网络中可以是货币或商品,在物流网络代表器材仓库的储备量,在电力网络中可代表电站的发电量,在交通网络中可以是客运站的吞吐量,在 Internet 网络中代表节点处理信息包的能力。负载是指在某一时刻,网络上的节点或者边上运输物资的量,分别称为节点负载或边负载^[11]。如当物质(能量)在网络中流动时,一个节点上的负载会不断地流向其相邻节点,同时,它也会不断地从其相邻节点接收它们输送过来的物质,如此,原则上物质就可以从任何一个节点传递到其他节点上,这种物质流动普遍存在于各种各样的网络中^[12]。本文以文献[13]中所给出的简单网络进行说明(图1),并作出如下假设:

假设1 网络中任意节点权重或者负载可以进行流通、互换。

假设2 点加权复杂网络为同质异构网络。

1.2 负载流动

借鉴文献[7]知识流动的观点,文中定义负载流动为负载从一个节点(主体)流到另一节点的过程。从微观层面进行分析,负载流动分为交易模型和广播模型两种。其中,典型的信息(通信)网络中,节点之间通过广播的方式进行传播信息,其前提和基本假设为:在 N 个节点的复杂网络中,网络中的每一

个节点定期向网络中的其他节点发送一个数据包,而且数据包的路线总是沿网络中的最短路径,这从某种程度上反映的是无权网络的结构特征,即不考虑流入和流出节点负载量的差异性,从而由此引申出依据节点的介数(最短距离通过该节点的次数)来定义节点的容量具有一定的可信性和适用性。

本文中所考虑的负载流动,正是区别于以往广播型的传播方式,定义负载的流动与节点负载、连接强度、最短路径的选择和负载流动的策略等均有很大的关系,即交易型的负载流动模式,节点在输出负载的同时,也接收负载,接收负载根据不同节点的负载大小、分配策略的不同而不同。为了研究问题的统一和可行性,在此对文中复杂网络中负载流动作如下假设:

- a) 复杂网络为全连通网络;
- b) 不考虑时间属性问题;
- c) 沿最短路径,不考虑路由问题。

具体网络中节点之间负载流动的方向性、权值等问题可以根据实际情况而赋予不同的值。

文中节点负载全部按度偏好分成若干份向其他节点流去,分配策略为全局分配,给度大的节点分配更多的份额^[12],即从节点 j 流向节点 i 的物质量为

$$Q_{j \rightarrow i} = k_i \sigma_j / \sum_{l \in V, l \neq j} k_l \quad (1)$$

其中: k_i 为节点 i 的度, $\sigma_j(t)$ 为节点 j 所拥有的物质质量。

同时,每个节点也接收来自网络中其他节点发送过来的负载,则节点 j 所拥有的量就变为

$$\sigma_j = \sum_{i \in V, i \neq j} Q_{i \rightarrow j} = \sum_{i \in V, i \neq j} (k_j \sigma_i / \sum_{l \in V, l \neq i} k_l) \quad (2)$$

从式(2)也可以看出,这个机制也可以从相反的角度去考虑,即每个节点都按它们自身度的大小去获取其邻居所拥有的物质。但无论是从哪个角度去理解,数学上没有本质区别。

网络中节点间负载流动情况可表示为如下矩阵:

$$F = \begin{pmatrix} 0 & k_2 \sigma_1 / \sum_{l \in V, l \neq 1} k_l & k_3 \sigma_1 / \sum_{l \in V, l \neq 1} k_l & \cdots & k_n \sigma_1 / \sum_{l \in V, l \neq 1} k_l \\ k_1 \sigma_2 / \sum_{l \in V, l \neq 2} k_l & 0 & k_3 \sigma_2 / \sum_{l \in V, l \neq 2} k_l & \cdots & k_n \sigma_2 / \sum_{l \in V, l \neq 2} k_l \\ k_1 \sigma_3 / \sum_{l \in V, l \neq 3} k_l & k_2 \sigma_3 / \sum_{l \in V, l \neq 3} k_l & 0 & \cdots & k_n \sigma_3 / \sum_{l \in V, l \neq 3} k_l \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ k_1 \sigma_n / \sum_{l \in V, l \neq n} k_l & k_2 \sigma_n / \sum_{l \in V, l \neq n} k_l & k_3 \sigma_n / \sum_{l \in V, l \neq n} k_l & \cdots & 0 \end{pmatrix}$$

其中,行元素相加为节点流出负载总量,列元素相加为节点流入负载总量。特别地,对于无权无向网络而言,两者相等,表示从负载流动性的角度看,网络中节点属性相同。

2 节点重要度评估模型

2.1 基于负载流的节点重要性评估方法

如上文所述,文中定义节点的重要性与其流出负载量、流入负载量以及流经负载量的大小来综合评价网络中节点的重要度,如图2所示。具体节点的重要性与这三者之间关系的不同而可分别赋予不同的评价权值来综合评定,如对于具有服务特性的物流保障网络而言,若一个流出的负载量越大、流入的负载量较小,再加上流经负载也比较大的话,认为该节点比较重要,即该节点对网络的贡献度比较大。

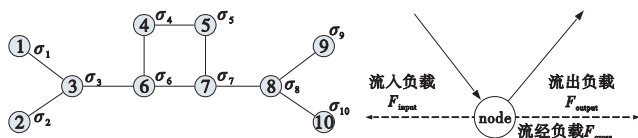


图1 点加权网络示意图

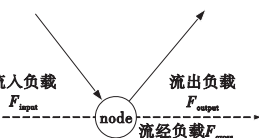


图2 负载流动情况示意

定义1 流出负载量 $F_{\text{output}}(i)$, 对矩阵 F 的行向量进行加和, 即为流出节点 i 的负载量

$$F_{\text{output}}(i) = \sum_{j \in V, j \neq i} k_j \cdot \sigma_i / \sum_{l \in V, l \neq 3} k_l = \sigma_i = \varepsilon \cdot L_i \quad (3)$$

其中: ε 为节点负载供应系数, $0 \leq \varepsilon \leq 1$; L_i 为初始节点负荷, 也称总负荷。

定义2 流入负载量 $F_{\text{input}}(i)$, 流入节点 i 的负载

$$F_{\text{input}}(i) = k_i \sigma_1 / \sum_{l \in V, l \neq 1} k_l + k_i \sigma_{i-1} / \sum_{l \in V, l \neq i-1} k_l + k_i \sigma_{i+1} / \sum_{l \in V, l \neq i+1} k_l + \dots + k_i \sigma_n / \sum_{l \in V, l \neq n} k_l \quad (4)$$

定义3 流经负载量 $F_{\text{cross}}(i)$, 以介数为依托, 计算流经节点 i 的负载

$$F_{\text{cross}}(i) = \sum_{j, k \in V, j \neq i, k \neq i} (k_j \sigma_k / \sum_{l \in V, l \neq k} k_l) \quad (5)$$

式(5)表示节点 j 与 k 的最短路径经过节点 i 所交换(输出和输入)负载量的大小。文中为研究问题的方便, 定义矩阵 F 中节点的平均负载流动量为

$$\bar{Q} = (\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n F_{ij}) / (n \times (n-1)) \quad (6)$$

其中, F_{ij} 为网络中节点 i 流向节点 j 的负载量。从而, 定义

$$F_{\text{cross}}(i) = \bar{Q} \cdot B(i) \quad (7)$$

其中, $B(i)$ 为节点 i 的介数或最短路径通过的次数。

在此基础上, 从网络贡献性的角度定义网络中节点 i 的重要度为

$$I_{\text{node}}(i) = -\alpha \cdot F_{\text{input}}(i) + \beta \cdot F_{\text{output}}(i) + \gamma \cdot F_{\text{cross}}(i) \quad (8)$$

其中: α, β, γ 为修正系数, 取值为 $[0, 1]$, 一般地, 设定为 $\alpha + \beta + \gamma = 1$ 。

另外, 从负载流动和节点建设的角度而言, 由于不考虑时间的约束和影响, 节点的容量 $C(i)$ 至少应该大于三者之和。文中定义节点的最小容量 $C_{\min}(i)$ 为

$$C_{\min}(i) = F_{\text{input}}(i) + F_{\text{output}}(i) + F_{\text{cross}}(i) \quad (9)$$

2.2 算法实现

根据以上定义, 关键负载节点取决于节点之间连接的强弱、多少和流经节点的负载量, 因此, 这种计算方法相对于其他一些评价方法更符合实际。

a) 输入网络 G 的点集 σ 和结构邻接矩阵, 根据式(3)和(4)计算各节点的流出和流入负载量。

b) 针对某一负载节点, 结合实际情况, 求算 $B(i)$, 利用式(6)和(7)计算该负载节点的流经负载量。

c) 利用式(8)和(9)计算节点 i 的重要度 $I_{\text{node}}(i)$ 和 $C_{\min}(i)$ 。

d) 如果 $i < N$, 返回 b) 计算节点 $i+1$ 的信息。

e) 根据计算出的各节点信息量从大到小排序, 即为节点重要性顺序。

3 实验分析

3.1 应用到人工网络

文中依据无标度网络性质, 生成一包含 20 个节点、28 条边的简单网络(图3)进行评价。为了研究问题的方便, 赋予网络中每一个节点的共享负载为 1, 按照 1.2 节所提出的节点负载流动办法, 在 $\alpha = 0.3, \beta = 0.35, \gamma = 0.35$ 的情况下, 对该无标度网络中的各节点进行重要度评价研究, 结果如表 1 所示。

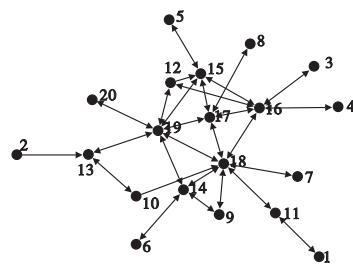


图3 无标度网络示意图

表1 节点重要度评估结果

节点编号	$F_{\text{input}}(i)$	$F_{\text{output}}(i)$	$F_{\text{cross}}(i)$	$C_{\min}(i)$	$I_{\text{node}}(i)$
18	2.846 3	1	8.691 2	12.537 5	2.538 0
19	2.493 5	1	6.189 5	9.682 9	1.768 3
16	2.139 7	1	4.421 1	7.560 7	1.255 5
11	0.716 2	1	1.894 7	3.610 9	0.798 3
13	1.073 2	1	2.087 7	4.161 0	0.758 7
17	1.785 0	1	2.564 9	5.350 0	0.712 2
14	1.429 5	1	2.157 9	4.587 4	0.676 4
15	1.785 0	1	2.249 1	5.034 2	0.601 7
10	0.716 2	1	0.617 5	2.333 7	0.351 3
1	0.358 4	1	0.000 0	1.358 4	0.242 5
2	0.358 4	1	0.000 0	1.358 4	0.242 5
3	0.358 4	1	0.000 0	1.358 4	0.242 5
4	0.358 4	1	0.000 0	1.358 4	0.242 5
5	0.358 4	1	0.000 0	1.358 4	0.242 5
6	0.358 4	1	0.000 0	1.358 4	0.242 5
7	0.358 4	1	0.000 0	1.358 4	0.242 5
8	0.358 4	1	0.000 0	1.358 4	0.242 5
20	0.358 4	1	0.000 0	1.358 4	0.242 5
9	0.716 2	1	0.000 0	1.716 2	0.135 1
12	1.073 2	1	0.284 2	2.357 5	0.127 5

分析结果可以发现, 基于负载流动的角度评估网络中节点重要度与单纯的依据网络的拓扑结构进行评估还是存在很大的差距, 最典型的例子就是对于节点 12。这是因为, 如果不考虑网络中节点负载的流动性, 无论从节点度、中心度还是介数的角度, 至少该节点不会成为所有节点中最不重要的一个。

3.2 应用到真实网络

按照复杂网络和装备保障的相关知识, 装备保障网络可以抽象为以基地、兵站、器材仓库等保障实体为节点, 以连接这些节点的公路、铁路、水路等为边的网络, 网络中各节点通过边来完成装备保障器材、人员、信息等保障资源的流动和交换, 即装备保障支援行动。

通过调研、部队实践等方式, 笔者进行了较为完善的资料信息的整理和处理工作, 得到的信息主要包括如下基本特征: 保障单位的名称、规模、主要业务、具体的地理位置、主要业务关系等。结合保密性要求, 对这些信息整理分析后, 得到了一个包括 40 个节点(文中分战区(ZQ)—集团军(J)—师(S)—团(T)四级保障实体节点, 上下级别之间采取 3:3 编制)和 96 条边的装备保障网络。图 4 即是利用 Netdraw 软件绘制出某战区范围内装备保障网络的拓扑结构图。

具体仿真评估过程中, 各节点共享负载的大小可根据其所属级别分别赋予不同的权值, 如文中按战区—集团军—师—团的顺序分别赋予 4:3:2:1 等单位权值。负载流动策略和影响系数与 3.1 节所示人工网络仿真相同, 以图 5 为评估结果。

分析上述结果, 笔者认为可以得出如下结论:

a) 相比于节点流经负载, 节点的流入负载与流出负载表现出很大的相关性, 在团级以下保障单位节点的流经负载明显低于节点的流入和流出负载, 而在团级以上单位则恰恰相反。

这也从另外一个方面说明,装备网络中节点的介数随着度的增加呈增长趋势,即网络中中心化趋势明显,不存在明显的社团结构特征。

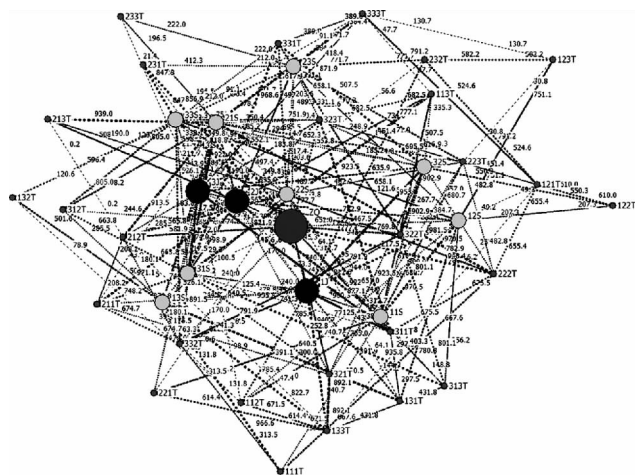


图4 装备保障网络拓扑示意图

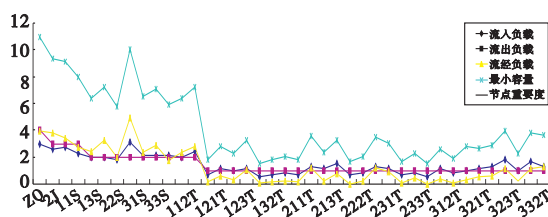


图5 装备保障网络节点重要度评估结果

b)文中节点按照4:3:2:1的赋值方式一定程度上实现了节点流入和流出负载的平衡,这在一定程度上实现了装备保障网络中各种物资的快速周转,可有效提高装备保障效益。

c)该评估方法相比较于单纯从结构出发评估节点的重要性具有更强的现实背景和意义。如文中可根据节点最小容量指导网络中各装备保障节点库房、基本储备器材及保障设备等建设和准备情况,还有利于发现网络中的瓶颈环节;如文中的21S,由于其承担着较重的物资中转任务,因此,平时要对其加强建设,战时也要有准备地进行重点保护。

4 结束语

网络的目的在于联合,联合的目的在于资源共享,包括物

资、能量、信息等。本文从节点赋权出发,通过定义节点之间负载流动,确定了一套与实际情况更加符合、较为完善的节点重要度评估方法,具有一定的创新性。但是,该方法也存在不尽完美和有待改善的地方,如文中节点的赋权方式以及节点之间负载的流动策略等均有待于进一步研究和修正。另外,关于现实网络边权的赋予及最短路径的求算问题也是非常值得深入研究的问题。

参考文献:

- [1] BARABÁSI A-L, ALBERT R. Emergence of scaling in random networks[J]. Science, 1999, 286(5439): 509-512.
- [2] XU J, CHEN H C. Criminal networks analysis and visualization[J]. Communication of IEEE, 2005, 48(6): 100-107.
- [3] CALLAWAY D S, NEWMAN M E J, STROGATZ S H, et al. Network robustness and fragility: percolation on random graphs[J]. Phys Rev Lett, 2000, 85(25): 5468-5471.
- [4] BARTHELEMY M. Betweenness centrality in large complex networks[J]. Euro Phys J B, 2004, 38(2): 163-168.
- [5] 赫南, 李德毅, 涂文燕, 等. 复杂网络中重要节点发掘综述[J]. 计算机科学, 2007, 34(12): 1-5.
- [6] ZHANG Bing, WANG Wen-ping. Small world of knowledge flowing: from a relation strength point of view[J]. Studies in Science of Science, 2009, 27(9): 1312-1321.
- [7] 张兵. 复杂网络上知识流动的小世界现象[J]. 广西师范大学学报: 自然科学版, 2010, 28(4): 15-20.
- [8] 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.
- [9] 方锦清, 汪小帆, 郑志刚, 等. 一门崭新的交叉科学: 网络科学(下)[J]. 物理学进展, 2007, 27(4): 361-448.
- [10] 吴金闪, 狄增如. 从统计物理学看复杂网络研究[J]. 物理学进展, 2004, 24(1): 18-46.
- [11] 李勇, 吕欣, 谭跃进. 基于级联失效的战域保障网络节点容量优化[J]. 复杂系统与复杂性科学, 2009, 6(1): 69-76.
- [12] 欧晴, 殷保群, 奚安生. 基于动态平衡流的网络赋权[J]. 中国科学技术大学学报, 2006, 36(11): 1196-1201.
- [13] 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.

(上接第 116 页)

参考文献:

- [1] 张雪英. 数字语音处理及 MATLAB 仿真[M]. 北京: 电子工业出版社, 2010: 207.
- [2] 刘佳林. 基于小波变换和听觉掩蔽特性的语音增强算法的研究[D]. 桂林: 桂林理工大学, 2010.
- [3] 陶红艳, 秦华峰, 余成波. 基于改进阈值函数的小波域去噪算法的研究[J]. 压电与声光, 2008, 30(1): 93-95.
- [4] 段其昌, 邓玉娟, 应泽贵. 基于改进阈值函数的小波包语音增强算法的研究[J]. 通信技术, 2009, 42(5): 86-88.
- [5] GHANBARI Y, KARAMI-MOLLAEI M R. A new approach for speech enhancement based on the adaptive thresholding of the wavelet packets[J]. Speech Communication, 2006, 48(8): 927-940.
- [6] 洪淑月, 施晓钟, 徐皓. 改进的小波变换 HMM 语言识别算法[J]. 浙江师范大学学报: 自然科学版, 2011, 34(4): 398-403.

- [7] 胡广书. 现代信号处理教程[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004: 353.
- [8] 苑津莎, 张冬雪, 李中. 基于改进阈值法的小波去噪算法研究[J]. 华北电力大学学报, 2010, 37(5): 92-97.
- [9] DONOHO D L, JOHNSTONE J M. Ideal spatial adaptation by wavelet shrinkage[J]. Biometrika, 1994, 81(3): 425-455.
- [10] 叶重元, 黄永东. 小波阈值去噪算法的新改进[J]. 计算机工程与应用, 2011, 47(12): 141-145.
- [11] 新晨升. 语音增强算法的研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2010.
- [12] 陶智, 赵鹤鸣, 龚呈卉. 基于听觉掩蔽效应和 Bark 子波变换的语音增强[J]. 声学学报, 2005, 30(4): 367-372.
- [13] 田玉静, 左红伟, 董玉民, 等. Bark 子带小波包自适应阈值语音去噪方法[J]. 计算机应用, 2010, 30(11): 3111-3114.
- [14] COHEN I. Enhancement of speech using Bark-scaled wavelet packet decomposition[C]//Proc of the 7th European Conference on Speech Communication and Technology. 2001: 1933-1936.