

有向加权复杂网络仿真平台的设计与实现

张 琨,陈李慧,刘 健,王 羽,陈 旋
(南京理工大学 计算机科学与工程学院,江苏 南京 210094)

摘 要:随着复杂网络研究热潮的日益增加,复杂网络仿真平台已成为研究复杂网络的必不可少的基础性工作。针对无向无权复杂网络有时还无法准确反映真实世界中网络系统的问题,文中以 VC++6.0 为开发工具,通过对总体框架和各主要功能模块进行详细的设计实现了一个具有一定可扩展性的有向加权复杂网络仿真平台(DWCNS)。该平台能对有向加权复杂网络进行拓扑生成且能进行相关统计特性的分析研究。最后通过一个节点重要性评价方法的仿真实例证明了该平台在有向加权网络研究方面的有效性。

关键词:复杂网络;有向加权;仿真平台

中图分类号:TP393

文献标识码:A

文章编号:1673-629X(2014)10-0202-04

doi:10.3969/j.issn.1673-629X.2014.10.049

Design and Implementation of Directed Weighted Complex Network Simulation Platform

ZHANG Kun, CHEN Li-hui, LIU Jian, WANG Yu, CHEN Xuan

(School of Computer Science and Technology, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: Along with the upsurge of increasingly researching complex network, complex network simulation platform has become an essential basis work of complex network. For the problem that undirected and unweighted complex network sometimes could not reflect the network system in the real world, in this paper using VC++6.0 as development tools, implement an extensible directed-weighted complex network simulation platform (DWCNS) by designing the general framework and main function modules in detail. The platform can generate the topology of directed and weighted complex network and can analyze and research the related statistical properties. Finally, the effectiveness of the platform is verified in the directed-weighted network research by a simulation example for node importance evaluation.

Key words: complex network; directed-weighted; simulation platform

0 引言

近年来,复杂网络^[1-2]理论作为一门新兴的交叉学科,得到了国内外研究者的广泛关注,在众多学科中掀起了研究和应用热潮。随着复杂网络应用的飞速发展,复杂网络的研究需求也从最初的小规模网络到目前成千上万甚至上亿节点规模的网络系统,计算量的剧增迫切需要研究人员能通过计算机仿真软件,来模拟实际网络的拓扑结构以及复杂网络行为。复杂网络仿真平台^[3]将成为研究复杂网络的基础和必不可少的重要工具。目前,国外已经开发了一些复杂网络仿真和分析软件,如 pajek、netdraw、cytoscape、Matlab 等等,为研究人员研究复杂网络提供了较好的支持。然而,现有复杂网络仿真软件大多针对无向无权网络,现实

世界中大多数复杂网络有方向性、且边上有权值。因此,如何设计并实现一种性能良好、界面友好的有向加权复杂网络^[4]仿真平台具有特殊的实用价值。文中设计并实现了一个有向加权复杂网络仿真平台,给出了仿真平台的总体框架和主要功能模块的具体实现,最后结合一个节点重要性评价方法实例,对仿真平台的有效性进行验证。

1 有向加权复杂网络仿真平台(DWCNS)的设计

1.1 总体框架

设计一个实用的复杂网络仿真平台,应遵循正确性、真实性、易用性和可视性的原则。因此,为了便于

收稿日期:2013-11-20

修回日期:2014-02-24

网络出版时间:2014-07-28

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61003210);江苏省“六大人才高峰”资助项目(11-C-028)

作者简介:张 琨(1977-),女,教授,博士生导师,CCF 高级会员,研究方向为复杂网络理论与应用、可信计算与信息安全。

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1450.TP.20140728.1221.005.html>

用户进行有向加权复杂网络的相关研究,同时兼顾上述设计原则,文中设计并实现了一个实用、简单的有向加权复杂网络仿真平台(Directed Weighted Complex Network Simulator,DWCNS)。

DWCNS 的总体框架如图 1 所示,具体包括五大功能模块:仿真平台配置模块、复杂网络拓扑生成模块、复杂网络参数计算模块、节点重要性评价模块和仿真结果表现模块。

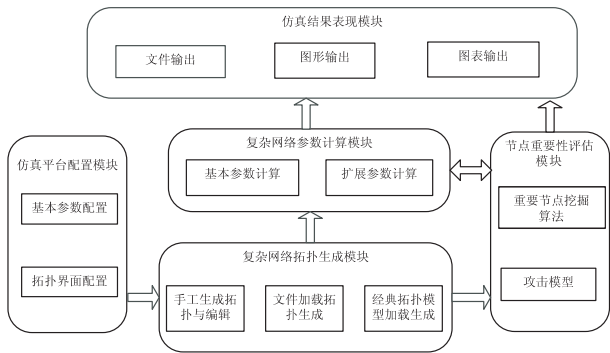


图 1 DWCNS 总体框架

仿真平台配置模块是为整个复杂网络仿真进行参数配置,包括基本参数配置和拓扑界面配置。复杂网络拓扑生成模块负责生成有向加权的复杂网络拓扑,具体有三种方式:一是通过用户手工生成和编辑拓扑;二是从文件中加载已有的复杂网络拓扑;三是直接生成经典拓扑,如随机网络^[5]、小世界网络^[6]和无尺度网络^[7]等等。复杂网络参数计算模块负责计算有向加权复杂网络的各种参数,包括度分布、聚集系数、平均路径长度、介数等基本参数,还包括接近度、网络效率、凝聚度等扩展参数。节点重要性评价模块是对有向加权复杂网络的节点进行重要性评价,包括重要节点(关键节点)的挖掘算法和攻击模型。仿真结果表现模块采用三种输出方式输出整个仿真结果,即将结果输出至指定的文件、在可视化图形界面显示结果(如重要节点、被攻击后的网络等)以及将各种分析数据制成图表的形式显示。

1.2 有向加权复杂网络的拓扑生成设计

生成有向加权复杂网络的拓扑是 DWCNS 的基础,如何生成复杂网络拓扑是设计该仿真平台的首要问题。

定义 1:有向加权复杂网络基本模型。有向加权复杂网络用简单有向加权连通图 $G=(V,E)$ 表示,其中,图中的节点集 $V=\{v_1,v_2,\cdots,v_n\}$ 代表节点集合; $n=|V|$ 表示节点的总数。复杂网络的边(连接)集为 $E=\{e_1,e_2,\cdots,e_m\}$, $m=|E|$ 表示整个复杂网络的边的总数。 $\forall e_i \in E$,在 V 中有一对节点 (v_i,v_j) 与之对应,且 (v_i,v_j) 和 (v_j,v_i) 不是同一条边。对于每条边 $(v_i,v_j) \in E$,定义一组权值 $\{ew_1,ew_2,\cdots,ew_k\}$ 表示对节点 v_i

和 v_j 之间边的度量,边的权值的大小和代表的物理意义可以根据具体情况设定。

根据上述定义,无向复杂网络或者无权复杂网络可以作为有向加权复杂网络的特例,因此文中的 DWCNS 仿真平台也支持无向复杂网络或者无权复杂网络的仿真分析。

(1) 基本数据结构设计。

根据定义 1,在 DWCNS 仿真平台中,对基本的复杂网络拓扑以及拓扑中的节点和边的数据结构进行了如下设计:

```
typedef struct
{
    int iVexNum; //vertex number
    int iEdgeNum; //edged number
    int * pi01AM; //0-1 adj matrix represent
    complex network
    AREA Area; //topo generating scaling area
    VEXCOD * pVexCod; //vertex coordinate
    float * pfWeight; //weight adj matrix
} DWCN_GRAPH; /* 有向加权复杂网络定义 */

typedef struct
{
    VEXCOD VexCod; // vertex coordination
    EDGENODE * pFirstEdge; //pointer tofirst
    edge in list
} VNODE; /* 有向加权复杂网络节点及相邻边的定义
*/

typedef struct
{
    int iAdjNode; //vertex edge goes to
    struct EDGENODE * pNextEdge; /* pointer
    to next edge in list */
    float * pfWeight; //weight adj matrix
} EDGENODE; /* 有向加权复杂网络节点边的定义
*/
```

(2) 复杂网络拓扑生成区域设置。

复杂网络拓扑中的节点将随机分布在一个可变的矩形区域上,因此在规定大小的平面上构造一个笛卡尔坐标系,分别产生随机整数作为各个节点的坐标。作为横坐标的随机数在 0 到 X_{\max} 之间产生,作为纵坐标的随机数在 0 到 Y_{\max} 之间产生。例如,如果 $X_{\max}=500,Y_{\max}=300$,即采用 500×300 大小的笛卡尔坐标系。

(3) 复杂网络拓扑生成流程。

复杂网络拓扑生成的具体流程如图 2 所示。首先设定复杂网络节点的分布区域,并在分布区域内产生节点;然后加载具体的复杂网络拓扑生成算法(如无尺度网络、小世界网络、随机网络等);根据不同的拓扑生成算法,判断算法是否结束,如果没有结束,则一

直循环生成节点之间的边,并且产生边的权值,否则将生成好的拓扑进行界面输出和日志输出,整个复杂网络拓扑生成流程结束。

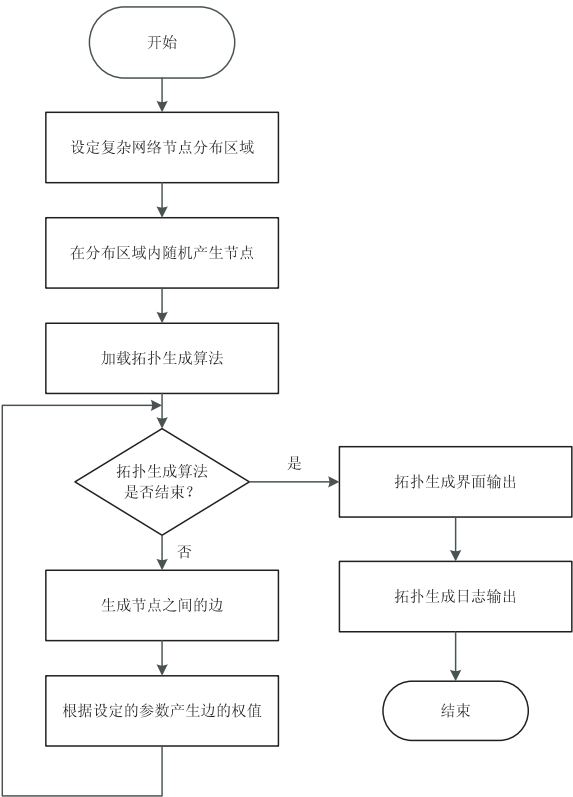


图 2 复杂网络拓扑生成流程

2 有向加权复杂网络仿真平台 (DWCNS) 的实现

2.1 仿真平台配置模块

仿真平台配置模块是在 DWCNS 仿真平台启动后,为整个复杂网络仿真进行参数配置,包括基本参数的配置和拓扑界面配置。

基本参数配置主要包括:节点数和边权值设置,通常包括随机产生和指定两种;复杂网络拓扑生成区域设置,用户可以设置区域的大小;典型复杂网络参数设置,对无尺度、小世界、随机网络等典型复杂网络的基本参数进行设置;统计参数设置,对计算的统计参数中的一些常量、变量进行设置;其他参数设置,包括出入度、权值同步长度选择等。

拓扑界面配置主要是对图形显示界面的一些功能进行配置,包括:拓扑中节点大小和颜色、边的颜色、节点标号字体和颜色、边的权值显示等,目的是为用户提供方便、友好的界面对复杂网络拓扑进行配置。

2.2 复杂网络拓扑生成模块

复杂网络拓扑生成模块根据 1.1 节的设计思路,负责生成有向加权的复杂网络拓扑。目前,DWCNS 仿真平台提供了三种复杂网络拓扑生成方式:

1)通过用户手工生成和编辑拓扑:用户可以直接在拓扑生成窗口中对拓扑进行编辑生成,包括:节点的增加、删除和移动,边的增加和删除,边权值大小的编辑等。

2)从文件中加载已有的复杂网络拓扑:DWCNS 仿真平台可以随时将当前的复杂网络拓扑按照自定义格式和 0-1 矩阵两种形式保存成文件,用户可以从这些保存的拓扑文件中加载复杂网络拓扑。

3)直接生成经典复杂网络拓扑:仿真平台内置了典型复杂网络拓扑生成模型,如随机网络、无尺度网络和小世界网络等等,用户可以通过选择生成相应特性的复杂网络拓扑。

此外,DWCNS 仿真平台还支持按照一定格式导入拓扑的功能,即其他试验平台生成的复杂网络拓扑或者一些常用的复杂网络实例拓扑(如,互联网实例拓扑、北美航空网实例拓扑、网络科学实例拓扑等),这些拓扑往往是一些自定义格式的拓扑文件,可以通过文件的简单处理,再通过格式的导入到仿真平台中,从而提供了一种与其他平台互操作的能力,增加了 DWCNS 仿真平台的互操作性和可扩展性。

2.3 复杂网络参数设计模块

复杂网络参数计算模块负责计算有向加权复杂网络的各种参数,在实现时具体分为两类参数。一类是复杂网络基本参数,包括度分布、聚集系数、平均路径长度、介数等;另一类是一些用于复杂网络节点重要性、演化等内容研究所涉及的扩展参数,例如,接近度、偏心度、最大连通片尺寸、网络效率、凝聚度等^[8]。由于基本参数比较明确,仿真平台中已经根据计算公式内置。扩展参数来自一些研究学者的成果中,是不断增加到平台中的。为了进行复杂网络的分析研究,甚至同一扩展参数的计算方法可以来自于不同的文献,通过分别计算进行比较分析。用户也可以根据自己的研究工作,自定义一些扩展参数,加载到仿真平台中。

2.4 节点重要性评价模块

复杂网络节点重要性评价已成为复杂研究领域的一个重要分支。之前的成果大多基于无权无向复杂网络,近几年关于有向加权复杂网络中节点重要性评价的研究越来越广泛。本仿真平台结合研究需要,将节点重要性评价单独作为一个模块进行实现,对有向加权复杂网络的节点进行重要性评价,具体包括重要节点(关键节点)的挖掘算法和攻击模型两部分。

重要节点的挖掘算法模块内置了一些经典的基于度数、基于介数的重要节点挖掘算法,同时也可以导入项目研究团队提出的基于灰色关联分析^[9]、基于 PageRank^[10]的重要节点挖掘算法等,还可以扩展支持其他的挖掘算法。

攻击模型是复杂网络节点重要性评价的关键内容,不同特性复杂网络对于不同的攻击方式,其节点的重要性和拓扑性能不同。大多研究基于随机失效^[11]和蓄意攻击^[12]的条件,从攻击信息角度来看,就是零信息攻击和完全信息攻击,是两种极端情况。而在节点重要性评价中,多数情况下复杂网络面临的应该是不完全信息攻击,即部分信息已知、部分信息未知。因此,DWCNS 仿真平台采取文献[13]中的不完全信息攻击模型,通过设置攻击信息的广度和攻击信息的精度,确定攻击者获得的复杂网络拓扑的已知区域,这也是一个不等概率抽样问题。

2.5 仿真结果表现模块

仿真结果表现模块是对整个仿真平台输出结果表现方式的确定,目前采用了三种输出方式表现整个仿真结果。

1)将结果输出至指定的文件:这种表现方式是将一些计算的参数结果和仿真过程中的信息保存至指定的文件,便于用户的研究分析和事后处理;

2)在可视化图形界面表现结果:在仿真结束后,可在复杂网络拓扑窗口中直接显示一些结构,例如,标出重要节点、显示被攻击后的网络等,给用户一种直观的效果;

3)将各种分析数据制成图表的形式表现:当用户在进行了大量的仿真之后,可以将统计结果制成图表的形式进行分析和比较。用户只需要选定图表的数据和标志,仿真平台就可以根据图表类型的设置制作图表,显示给用户。图 3 给出了某次仿真实验的统计结果,该实验对三种不同特性复杂网络邻接矩阵最大特征值进行了比较。

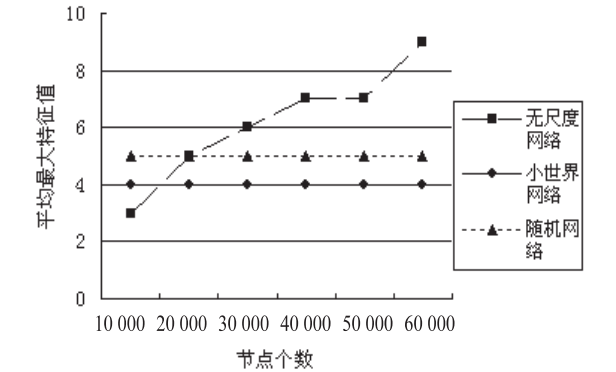


图 3 仿真平台数据图表显示示例

3 有向加权复杂网络节点重要性评价方法仿真实例

本节通过研究团队提出的一种有向加权复杂网络节点重要性评价方法^[14]的仿真实例对 DWNR,DWCNS 仿真平台的有效性进行说明。仿真平台中内置了文献

[14]中提出的 DWNR 节点重要性评价方法,对由 40 个艾滋病患者的性关系组成的复杂网络进行节点重要性评价。很多复杂网络的研究学者包括 Poulin,Boily,Masse,Stephenson,Zelen 等人都曾用该网络进行过重要节点识别指标的计算和比较。

图 4 是生成的拥有 40 个节点的复杂网络拓扑图。

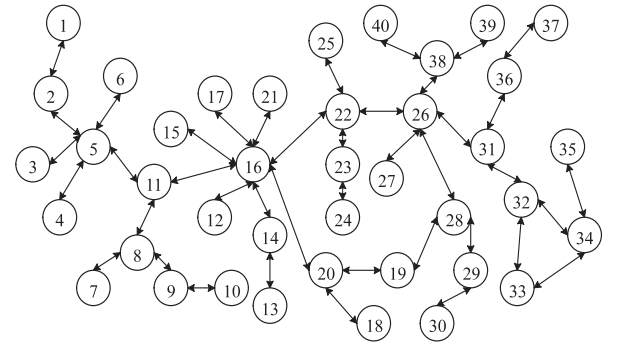


图 4 40 名艾滋病患者感染关系图

对该网络采用 DWNR 方法对关键节点进行识别后所得到的按关键度排序的结果(以前 10 个节点为例)如表 1 所示。

表 1 节点关键性排名结果

排名	节点号	测度值
Rank ₁	16	0.166 199 03
Rank ₂	5	0.129 529 28
Rank ₃	22	0.063 709 386
Rank ₄	26	0.051 690 668
Rank ₅	8	0.041 399 777
Rank ₆	38	0.033 300 437
Rank ₇	20	0.031 961 598
Rank ₈	11	0.029 182 741
Rank ₉	33	0.027 176 507
Rank ₁₀	34	0.025 582 144

按 DWNR 方法所识别出的最关键的节点为 16 号节点,这一结果与用文中提到的其他识别方法的识别结果相吻合。

4 结束语

复杂网络仿真平台是复杂网络研究的重要基础工作。文中针对目前有向加权复杂网络这一研究热点,设计并实现了一个有向加权复杂网络仿真平台(DWCNS),能够生成各种复杂网络拓扑,并进行统计参数的计算以及节点重要性评价等研究。该仿真平台结构简单、通用、实用、界面友好,并且具有一定的开放性和可扩展性,对于复杂网络仿真平台的未来研究具有一定意义。下一步的工作聚焦在要支持有向加权复杂网络中的动力学、传播、同步和演化等内容的分析和研究。

参考文献:

- [1] Guan M J, Liao W H. On the efficiencies of piezoelectric energy harvesting circuits towards storage device voltages [J]. Smart Materials and Structures, 2007, 16(2): 498–505.
- [2] Glynne-Jones P, Tudor M J, Beeby S P, et al. An electromagnetic vibration-powered generator for intelligent sensor systems[J]. Sensors and Actuators A, 2004, 110: 344–349.
- [3] Micheson P D, Miao P, Stark B H, et al. MEMS electrostatic micro power generator for low frequency operation[J]. Sensors and Actuators A, 2004, 115: 523–529.
- [4] 程光明, 庞建志, 唐可洪, 等. 压电陶瓷发电能力测试系统的研制[J]. 吉林大学学报: 工学版, 2007, 37(2): 367–371.
- [5] Ammar Y, Buhrig A, Marzencki M, et al. Wireless sensor network node with asynchronous architecture and vibration harvesting micro-power generator[C]//Proc of 2005 joint conference on smart objects and ambient intelligence: innovative context-aware services: usages and technologies. [s. l.]: [s. n.], 2005: 287–292.
- [6] Shen D, Park J H, Ajitsaria J, et al. The design, fabrication and evaluation of a MEMS PZT cantilever with an integrated Si proof mass for vibration energy harvesting[J]. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2008, 18(5): 055017.
- [7] Liu Jingquan, Fang Huabin, Xu Zhengyi, et al. A MEMS-based piezoelectric power generator array for vibration energy harvesting[J]. Microelectronics Journal, 2008, 39(5): 802–806.
- [8] 胡洪平, 高发荣, 薛欢, 等. 低频螺旋状压电俘能器结构性能分析[J]. 固体力学学报, 2007, 28(1): 87–92.
- [9] Baker J, Roundy S, Wright P. Alternative geometries for increasing power density in vibration energy scavenging for wireless sensor networks[C]//Proc of international energy conversion engineering conference. [s. l.]: [s. n.], 2005.
- [10] Chen Z S, Yang Y M, Deng G Q. Analytical and experimental study on vibration energy harvesting behaviors of piezoelectric cantilevers with different geometries[C]//Proc of conference on sustainable power generation and supply. Nanjing: IEEE, 2009: 1–6.
- [11] Lefeuvre E, Badel A, Richard C, et al. A comparison between several vibration-powered piezoelectric generators for standalone systems[J]. Sensors and Actuators A, 2006, 126: 405–416.
- [12] Roundy S, Leland E S, Baker J, et al. Improving power output for vibration-based energy scavengers[J]. IEEE Pervasive Computing, 2005, 4(1): 28–36.
- [13] Hibbeler R C. 材料力学[M]. 汪越胜, 译. 北京: 电子工业出版社, 2006.
- [14] 张红松, 胡仁喜, 康士廷, 等. ANSYS12.0 有限元分析从入门到精通[M]. 北京: 机械工业出版社, 2010.
- [15] Jiang Shunong, Hu Yuantai. Analysis of a piezoelectric bimorph plate with a central-attached mass as an energy harvester[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2007, 54(7): 1463–1469.
- [16] 周长城, 胡仁喜, 熊文波. ANSYS 11.0 基础与典型范例[M]. 北京: 电子工业出版社, 2007.

+++++
(上接第 205 页)

参考文献:

- [1] 汪小帆, 李翔, 陈关荣. 复杂网络理论及其应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006.
- [2] 郭世泽, 陆哲明. 复杂网络基础理论[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- [3] 刘娟娟. 复杂网络仿真平台的研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2009.
- [4] Barrat A, Barthelemy M, Vespignani A. Modeling the evolution of weighted networks[J]. Physical Review E, 2004, 70(6–2): 1–13.
- [5] Erdos P, Renyi A. On the evolution of random graphs[J]. Publication of the Mathematical Institute of The Hungarian Academy of Sciences, 1960, 5: 17–61.
- [6] Watts D J, Strogatz S H. Collective dynamics of small world networks[J]. Nature, 1998, 393: 440–442.
- [7] Barabasi A L, Albert R. Emergence of scaling in random networks[J]. Science, 1999, 286: 509–512.
- [8] 杨汀依. 复杂网络关键节点识别技术研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2011.
- [9] 张琨, 沈海波, 张宏, 等. 基于灰色关联分析的复杂网络节点重要性综合评价方法[J]. 南京理工大学学报(自然科学版), 2012, 36(4): 579–586.
- [10] 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.
- [11] Cohen R, Frez K, Ben-Avraham D, et al. Attack vulnerability of the Internet to random break downs[J]. Physical Review Letters, 2000, 85(21): 4626–4628.
- [12] Holme P. Edge overload breakdown in evolving networks[J]. Physical Review E, 2002, 66(3): 036119.
- [13] 吴俊. 复杂网络拓扑结构抗毁性研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2008.
- [14] 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.

有向加权复杂网络仿真平台的设计与实现

作者：[张琨](#)，[陈李慧](#)，[刘健](#)，[王羽](#)，[陈旋](#)，[ZHANG Kun](#)，[CHEN Li-hui](#)，[LIU Jian](#)，[WANG Yu](#)，[CHEN Xuan](#)

作者单位：[南京理工大学 计算机科学与工程学院, 江苏 南京, 210094](#)

刊名：[计算机技术与发展](#)

英文刊名：[Computer Technology and Development](#)

年，卷(期)：2014(10)

引用本文格式：[张琨](#).[陈李慧](#).[刘健](#).[王羽](#).[陈旋](#).[ZHANG Kun](#).[CHEN Li-hui](#).[LIU Jian](#).[WANG Yu](#).[CHEN Xuan](#) [有向加权复杂网络仿真平台的设计与实现](#)[期刊论文]-[计算机技术与发展](#) 2014(10)