

文章编号:1007-6735(2012)05-0429-06

基于复杂网络理论的装备保障网络模型研究

张 勇, 杨宏伟, 杨学强, 黄 俊

(装甲兵工程学院 技术保障工程系, 北京 100072)

摘要: 从网络科学的观点出发,对装备保障网络生成机制进行研究,针对其严格的等级结构和一定的随机连接特性,在对树状网络和确定性复杂网络模型研究的基础上,提出了一个装备保障网络演化模型.该模型考虑了网络中节点和边的实际物理属性,引入了随机连接参数,实现了混合生成的装备保障网络演化机制,并仿真分析了模型中迭代步数、子节点数目、随机连接因子这3个参数对装备保障网络整体性能的影响规律,验证了该模型的有效性和适用性.

关键词: 复杂网络; 加权网络; 演化模型; 小世界; 无标度; 幂律分布

中图分类号: E 9; N 94 **文献标志码:** A

Model of Equipment Support Network Based on Theory of Complex Networks

ZHANG Yong, YANG Hong-wei, YANG Xue-qiang, HUANG Jun

(Department of Technology Support Engineering, Academy of Armored Force Engineering, Beijing 100072, China)

Abstract: The analysis model of equipment support network with the typical character of rank structure and random connection was discussed from the view point of network science. A new evolving network model of the architecture which is different from the “tree-like” model and the deterministic complex network model introduced by Chen Mu was established. Considering the physical properties of the nodes and the edges, an influential coefficient showing the randomness in the model was introduced, and the influences of the relevant characteristic parameters on the integrated performance of the network were studied based on the computer simulation, which also verifies that the proposed method is rational and available.

Key words: complex network; weighted network; evolving model; small-world; scale-free; power-law distribution

装备保障网络是以装备保障设施为依托,将各种保障资源按照一定的要求和原则合理部署而最终形成的一个网络化布局的保障体系,是各级保障部门完成保障任务的物质基础^[1].新的历史条件下,随着综合保障、一体化保障模式和模块化编组形式的出现以及信息化技术的推动,可以看作装备保障网

收稿日期: 2012-04-18
基金项目: 军队科研计划资助项目(2010CX02)
作者简介: 张 勇(1984-),男,博士研究生.研究方向:武器系统与运用工程. E-mail: zhywkh@163.com

络节点的装备保障实体数量众多、级别不同、分布各异,如何准确刻画和描述其组织形式并发现其中蕴含的特点规律,是新时期认识网络化装备保障体系复杂性的基础性工作。

本文从整体角度出发,运用复杂网络相关理论^[2-3]来构建装备保障网络的组织结构,将其表示为具有复杂拓扑结构和动力学行为、由大量的节点通过相互之间的作用关系连接而成的网络图,为信息化条件下研究网络化装备保障系统的结构和行为提供一种行之有效的方法和途径。本文主要从两个方面进行研究:一是有别于传统军队编制体制条件下具有严格层次关系的树状网络和文献^[4]提出的具有“越级指挥”特征的确定性网络模型,构建与现实更加符合的装备保障网络演化模型;二是对网络结构参数进行灵敏度分析,对实际装备保障网络的拓扑结构和网络特性提供更加精确和细致的描述。

1 装备保障网络模型

1.1 概念模型

按照复杂网络和装备保障体系建设的相关观点^[5-7],构建装备保障网络拓扑模型过程中有以下几点假设和前提:

a. 节点指在一定的时间、空间范围内,具有发出或接收装备保障资源功能的保障实体。本文中定义为某一战区范围内所有的维修机构、器材保障机构等。

b. 边代表节点(对象)之间的相互作用、相互关联^[8]。原则上,装备保障网络各节点之间可通过公

路、铁路、水路、航线及管道等实体进行支援、协同及资源交换等保障行动,一般认为2个节点之间最多可能有1条边,由于实体之间的联系不考虑边的方向性问题(双向连接),所有节点之间的连接为无向边。

另外,为了区别于公交网络中站点停靠、换乘方式^[9],本文考虑各保障实体之间的业务关系,即部队之间严格的层次结构、上下级支援关系及同级协同关系等,设定以下不同的连接方式:

a. 树状结构。严格的层级关系,即传统的装备保障体系基本按照“军区-军-师-团”的力量配置,呈树状延伸,横向之间联系少,表现为长的平均路径和低的聚合度,产生的结果是信息传递层级多,沟通连接复杂,易被分割破坏,整体保障效率低下。好处是结构简单,易于管理控制,如图1(a)和1(b)所示。

b. 全连通结构。参照层次结构特征,近似于完全连通网络,上级保障实体对所属范围内的保障实体实行完全支援连接,同级之间存在协同关系,其好处是系统鲁棒性强,抗毁性突出,信息传递层级少,体系效率较高。缺点是结构复杂,不利于管理控制,如图1(d)所示。

c. 混合结构。介于上述两种结构之间,具体表现为,上下级别保障实体之间根据隶属关系的不同存在不同概率的支援保障关系,同一级别保障实体根据地域关系的不同存在不同的协同保障概率,不同级别之间存在一定的“越级支援”的保障模式(见图1(c))。该方式一定程度反映了信息化条件下指挥控制的灵活性,又不失军队层次结构特征,能较为真实地反映实际装备保障网络的连接和形成情况。

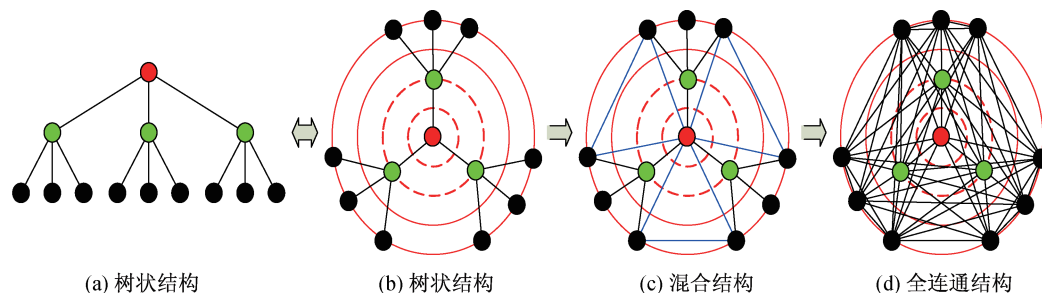


图1 装备保障网络示意图

Fig.1 Equipment support network

1.2 生成机制建模

通过上述分析,借鉴树状网络结构和文献^[4]所论述的确定性模型的思想,并对其适当进行改进,确定装备保障网络生成机制如下:

a. 从迭代步数 $s = 0$ 开始,即从一个节点出发;

b. 当 $s = 1$ 时,在第一个节点下方的两边对称地分布 n 个节点,且使这 n 个节点与第一个节点相连;

c. 当 $s = 2$ 时,按照相同的方法,在新生长出来的 n 个节点的下方分别再对称生长出来 n 个节点,

以一定概率 p 实现不同等级(同级或上下级)节点之间的连接.

依照这种方法不断生长,直到生成预期的网络模型,如图2所示.

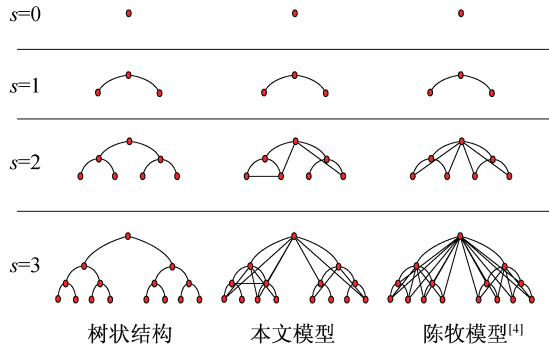


图2 生成机制演示图

Fig.2 Mechanism of evolving model

p 代表网络随机连接概率,文中指装备保障网络中没有直接边相连的节点对 (v_i, v_j) 生成连接边的概率.在此,结合无标度网络的生成机制和装备保障网络的现实背景,从节点和边这2个方面给出连接规则影响因子.

a. 节点层面影响因子 p_n . 节点层面,包括结构属性 p_{ns} 和物理属性 p_{np} , 公式为

$$p_n = (p_{ns} p_{np})^{1/2} = [(k_i + k_j)/(2[k])][(s_i + s_j)/(2[s])]^{1/2} = \frac{1}{2} \left[\frac{(k_i + k_j)(s_i + s_j)}{[k][s]} \right]^{1/2} \quad (1)$$

式中, k_i, k_j 分别表示节点 v_i, v_j 的度; s_i, s_j 分别表示节点 v_i, v_j 的强度(负荷); $[k], [s]$ 为相对应的网络平均值.

b. 边层面影响因子 p_e . 边层面主要表征该节点对之间的距离,与节点类似,包括结构属性 p_{es} 和物理属性 p_{ep} , 公式为

$$p_e = (p_{es} p_{ep})^{1/2} = [(l_i + l_j)/(2[l])][(d_i + d_j)/(2[d])]^{1/2} = \frac{1}{2} \left[\frac{(l_i + l_j)(d_i + d_j)}{[l][d]} \right]^{1/2} \quad (2)$$

式中, l_i, l_j 分别表示节点对 (v_i, v_j) 之间的结构距离; d_i, d_j 分别表示节点对 (v_i, v_j) 之间的现实距离; $[l], [d]$ 为相对应的网络平均值.

定义随机连接概率

$$p = \alpha \left(\frac{p_n}{p_e} \right) \quad (3)$$

式中, α 为随机连接因子.

特别地,当 $\alpha = 0$ 时,本文所提出的模型就演化为树状网络结构模型.另外,当 α 增大到一定程度时,装备保障网络也可以形成全连通网络.

综上,通过引入随机连接概率 p 可以实现装备保障网络在树状层次结构的基础上根据地域、隶属关系及资源拥有量等属性进行择优连接,从而构造出与现实情况更加符合的装备保障演化网络.该模型很好地刻画了真实网络的“择优连接”和“就近就近”的保障原则,即无论从结构层面还是物理属性层面,装备保障网络更加倾向于网络中的“富者”(度、强度大)、距离近(结构距离、实际距离)的节点对相连接,在式(3)中设定连接概率 p 与节点重要度 p_n 成正比,而与节点距离 p_e 成反比关系,为了修正两者之间的关系,引入修正系数 α ,也称随机连接因子,可表征装备保障网络中不同节点对边之间的随机连接程度.

1.3 算法实现

具体算法实现如下:

a. 输入迭代步数 s 和子节点数目 n ,生成对应的树状结构网络 G_t ;

b. 根据不同的规则对网络节点和边相应赋权,如依据统计数据或随机赋权,形成加权初始装备保障网络 G_w ;

c. 计算 G_t 中所有没有边连接的节点对 (v_i, v_j) 集合,根据式(1)~(3)计算连接概率 p ,并依此随机生成连接边,直至生成最终加权装备保障网络 G ;

文中图3(见下页)即是作者根据典型的部队编制体制,分战区(ZQ)-集团军(J)-师(S)-团(T)这4级保障实体节点,上下级别之间采取3:3编制,即战区内辖3个集团军,1个集团军又辖3个编制师,依次类推.取 $s = 3, n = 3, \alpha = 0.2$ 时,基于 Matlab 7.0 和 Netdraw 等相关分析软件生成的装备保障网络拓扑图.

2 模型特征参数分析

2.1 度分布 $P(k)$

度分布表示网络的节点度恰好为 k 的概率.网络中节点 i 的度 k_i 定义为与该节点连接的其它节点的数目,也可视为与这一节点连接的边的数量.节点的度分布反映了网络的整体性质,根据复杂网络无标度特性^[3]:少部分节点的度远远高于绝大多数的节点的度;度分布概率在双对数坐标下显示出了较明显的幂律特征.

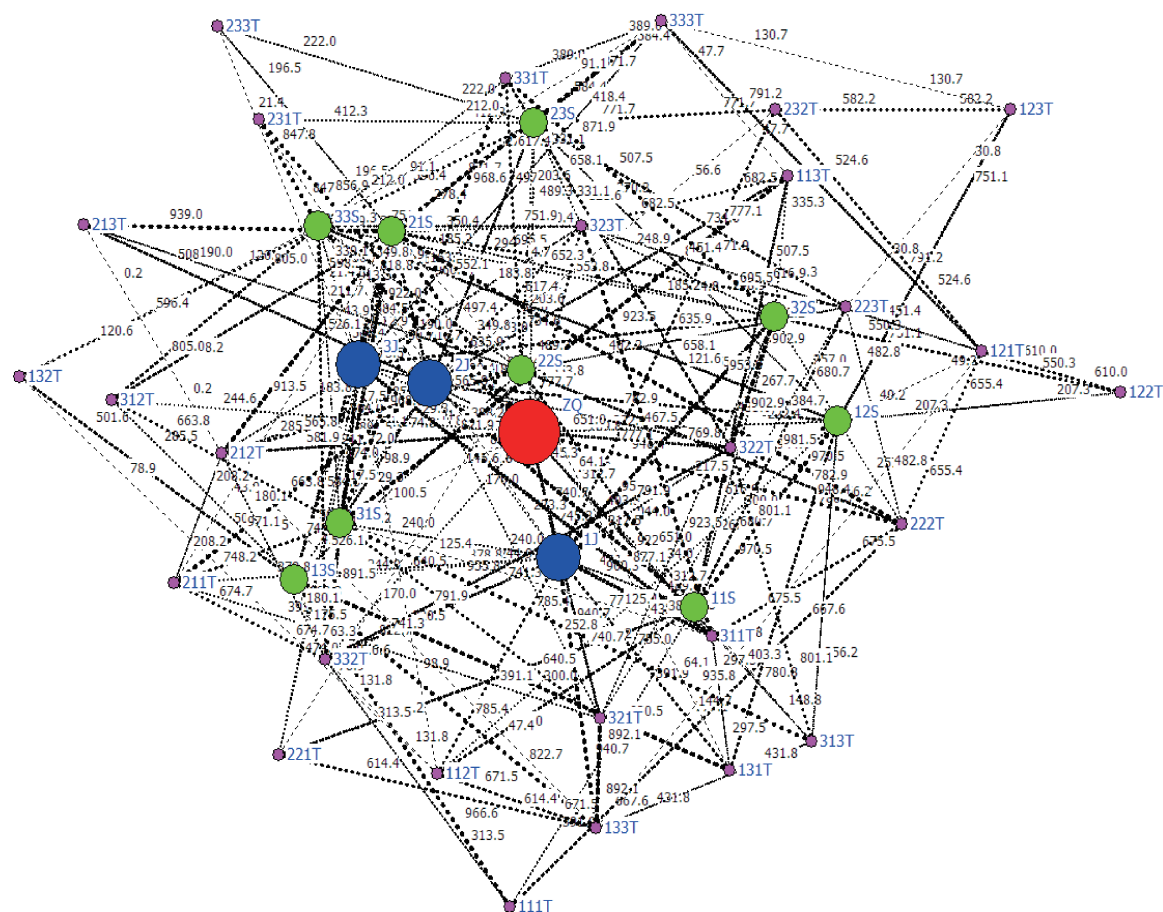


图3 装备保障网络拓扑结构图

Fig.3 Topology of equipment support network

调节文中模型的各个影响参数,得到装备保障网络模型度分布变化图,如图4所示.其中,图4(a)分析了迭代步数 s 不同条件下装备保障网络双对数度分布曲线,不难发现,在子节点数目 $n=3$ 和随机连接因子 $\alpha=0.02$ 的前提下,装备保障网络 $P(k)$ 曲线呈现出较为明显的无标度特征, $P(k) \sim k^{-\gamma}$, $\gamma \approx 1.5$. 与之对应,如果改变子节点数目,当 n 比较小的时候(文中为 $n \leq 5$),装备保障网络尚具有一定的无标度特性,随着子节点数目的进一步增加,无标度特性逐渐减弱,在这种情况下,整体装备保障网络倾向于随机连接,而不是择优连接.另外,这一特性,在图4(c)中表现得更加明显,即随着随机连接因子 α 的增大,装备保障网络无标度特性逐步消失而随机网络特性逐步凸显,这也可以从图4(d)得到更为直观清晰的认识.

值得一提的是,无尺度网络的典型特征是面对随机攻击时具有很高的承受能力(鲁棒性),而对关键节点进行攻击则表现出极大的脆弱性,与之对应的全连通网络具备较高的抗毁性.

2.2 平均聚集系数 C

聚集系数是专门用来衡量网络节点集聚程度的一个重要参数,属局部特征量^[10].一般地,聚集系数越大,表示个体间的联系愈紧密.节点 i 的聚集系数 C_i 定义为节点 i 的邻接点之间实际存在的边数与所有可能的边数的比值.一般地,假设网络中1个节点 i 有 k_i 条边将它与其它节点连接,这 k_i 个节点之间最多可能有 $k_i(k_i-1)/2$ 条边.而这 k_i 个节点之间实际存在的边数 E_i 和总的可能边数 $k_i(k_i-1)/2$ 之比就定义为节点的聚类系数 C_i ,即

$$C_i = 2E_i / k_i(k_i - 1) \quad (4)$$

网络的平均聚集系数 C 指所有节点的聚集系数 C_i 的均值,反映了网络整体的内聚性.

$$C = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N C_i \quad (5)$$

很明显, $0 \leq C \leq 1$. $C=0$ 当且仅当所有的节点为孤立节点; $C=1$ 当且仅当网络是全局耦合的.

如图5所示,装备保障网络的聚集系数随着迭

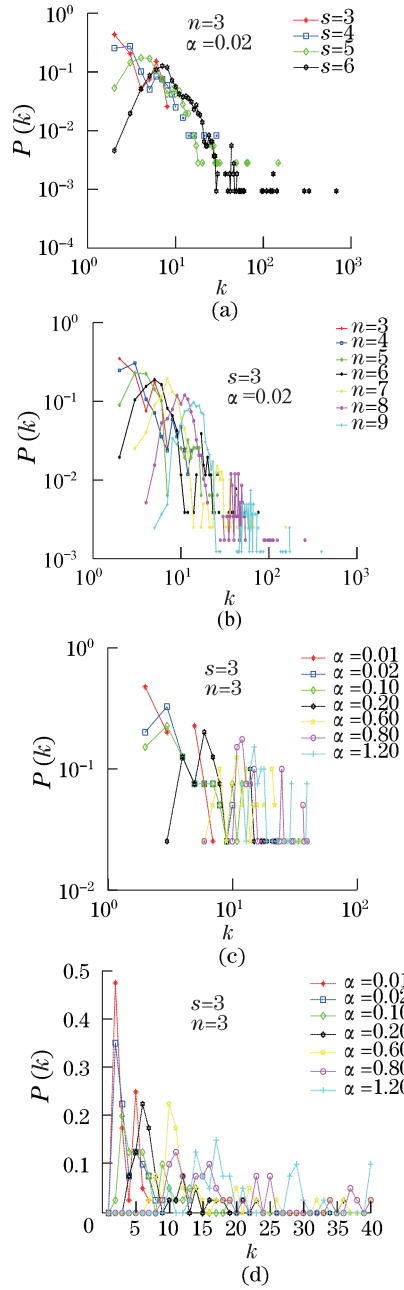


图4 装备保障网络的度分布图

Fig.4 Degree distribution of equipment support network

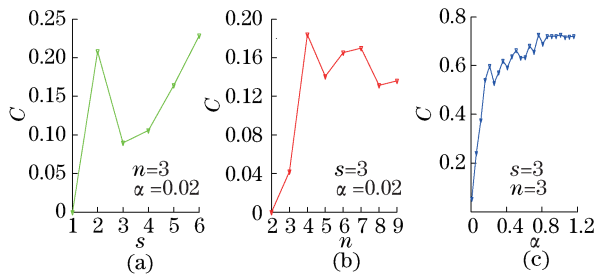


图5 装备保障网络的聚集系数分布

Fig.5 Clustering coefficient of equipment support network

代步数、子节点数目和随机连接因子的增大而增大,意即随着网络中元素(节点和边)的增加,节点之间的联系更加趋于紧密,这符合典型的小世界特征^[2].特别地,在迭代到第3步时,聚集系数曲线出现了较为明显的拐点(见图5(a)),而当子节点数目小于4之前,聚集系数表现出较强的增长趋势,随后趋于平缓(见图5(b)).另外,根据本文中所赋予的权值,当随机连接因子小于0.2时(见图5(c)),聚集系数增长迅速,之后呈现波动式增长.经测算,当 $\alpha \approx 13$, $C \approx 1$,即此时形成全连通图.

2.3 平均路径长度 L

平均路径长度指所有节点之间的最短路径的均值.一般定义节点 i 和 j 之间的距离 d_{ij} 为连接两者所要经历的边的最小数目,网络的平均路径长度是所有节点对之间距离的平均值.从路长的分布可以看出节点间的远近程度,其中任意两点间的最大距离定义为网络的直径 D .

$$D = \max_{i,j} d_{ij} \quad (6)$$

D 描述的是网络节点间的分离程度,也就是说网络有多小,文中装备保障网络的直径为3.

网络的平均路径长度 L 定义为任意2个节点之间的距离的平均值,即

$$L = \frac{1}{N(N-1)/2} \sum_{i>j} d_{ij} \quad (7)$$

式中, N 为网络节点数.

平均路径长度可以衡量装备保障网络中各节点之间的传输特性和连通性,一般当 L 比较小时,信息、物质或能量交换的速度较快.如对器材保障而言,降低网络的网络直径,即降低器材的最大周转次数;降低网络的平均最短距离,即降低整个网络中器材的平均周转次数.通过计算得出,文中图3所示装备保障网络的平均路径长度为1.895,即在该网络中任意2个保障节点之间传输物资的话,平均经过不到2次周转就可到达.图6即为装备保障网络在迭代步数、子节点数目和随机连接因子变化时

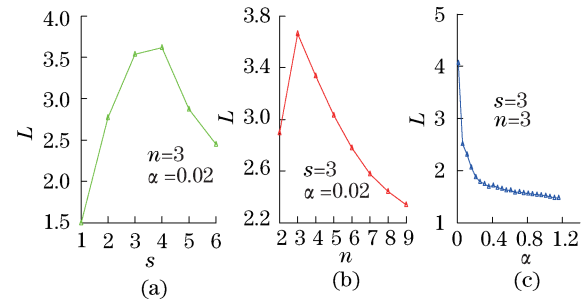


图6 装备保障网络平均最短距离

Fig.6 Average path length of equipment support network

平均路径长度变化情况.

通过图6可以发现,装备保障网络平均路径长度随着影响因子的增加逐步减小,特别地,当迭代步数为3~4,子节点数目为3时, L 均出现下降的趋势,这与图5中的仿真结果基本是一致的,笔者认为出现这种现象主要是节点数目偏少,以及文中节点权值效应不明显所导致.不过整体而言,按照相关定义^[11-12],装备保障网络仍具有一定的小世界特性.

3 结束语

基于本文所提出装备保障网络演化模型及相关分析,得到以下几点结论和认识:

a. 本文所构建模型可以更加真实地描述具有层级结构和随机连接特性的装备保障网络,引入的3个影响因子可以较为精确地控制生成网络规模和节点连接的紧密程度,可以有效地说明所构建网络的层次、跨度及随机连接程度等具有一定现实意义的衡量指标.

b. 通过仿真分析可知,该装备保障网络演化模型反映出一定的无标度和小世界特性,可以作为分析装备保障网络或类似网络结构和动力学研究的基础.

c. 基于复杂网络理论研究装备保障网络具有很强的应用背景,如装备保障网络中战役支撑点的确定、枢纽点的确定、道路基础设施的构建、保障效益与连通规模的关系、枢纽节点的堵塞所导致的保障网络稳定性问题等可以而且有待于进一步分析和研究.

值得说明的是,由于现实数据来源的有限性和保密性要求,本文在研究过程中对装备保障网络节

点和边的权重均作了一定假设和限制,这有待于在今后的研究过程中进行验证和修改.

参考文献:

- [1] 王文峰. 装备保障网络优化设计问题研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2008.
- [2] Watts D J, Strogatz S H. Collective dynamics of "small-world" networks[J]. Nature, 1998, 393(4): 440 - 442.
- [3] Barabási A L, Albert R. Emergence of scaling in random networks[J]. Science, 1999, 286(5439): 509 - 512.
- [4] Chen Mu, Yu Boming, Xu Peng, et al. A new deterministic complex network model with hierarchical structure[J]. Physica A, 2007, 385: 307 - 317.
- [5] 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 - 23.
- [6] 汪晓帆, 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.
- [7] 李勇. 物流保障网络级联失效抗毁性研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2009.
- [8] 张嗣瀛. 复杂网络的演化过程, $n(n-1)$ 律, 自聚律[J]. 复杂系统与复杂性科学, 2005, 2(3): 84 - 90.
- [9] 顾前, 杨旭华, 王万良, 等. 基于复杂网络的城市公共交通网络研究[J]. 计算机工程, 2008, 34(20): 266 - 268.
- [10] Almaas E, Kulkarni R V, Stroud D. Characterizing the structure of small-world networks[J]. Phys Rev Lett, 2002, 88(9): 98 - 101.
- [11] 王建伟, 荣莉莉. 突发事件的连锁反应网络模型研究[J]. 计算机应用研究, 2008, 25(11): 3288 - 3291.
- [12] 刘建国. 复杂网络模型构建及其在知识系统中的应用[D]. 大连: 大连理工大学, 2006.