恐怖组织网络的时空演化规律

李本先 [1] 李孟军 [1] 方锦清 [2] 仰璁歆 [3]

摘 要 为了理解恐怖组织网络的时空演化特性及形成机理, 本文运用统计物理学方法, 结合 Multi-agent, 提出了一个恐怖组织网络的时空演化模型, 并对恐怖组织网络的演化规律进行了数值模拟研究. 模拟过程中考虑了恐怖组织网络在时间与空间上节点与边的动态联结变化. 研究发现: 网络演化过程中, 恐怖组织的网络演化不仅兼具小世界、无标度特性和等级结构, 不同级别的中心节点将网络连为一体, 而且存在促进恐怖网络不断演化的主要因素, 即与恐怖分子信念的增加及环境资源的增长有关; 反恐方的选择性打击对网络的增长具有抑制作用和一定的控制效果.

关键词 恐怖组织网络, 时空演化, 小世界, 无标度, 信念及资源

引用格式 李本先, 李孟军, 方锦清, 仰璁歆. 恐怖组织网络的时空演化规律. 自动化学报, 2013, **39**(6): 770−779

DOI 10.3724/SP.J.1004.2013.00770

Empirical Study on Spatiotemporal Evolution of Terrorism Organization Network

LI Ben-Xian[1] LI Meng-Jun[1] FANG Jin-Qing[2] YANG Jin-Xin[3]

Abstract To understand spatiotemporal evolution of terrorism organization network and reveal its information mechanism. In this paper, from the view of network science, statistical physics and multi-agent method are proposed to explore time-space evolution of terrorism organization network. The model of time-space evolution is presented to understand terrorism organization network. In the evolution process, dynamical (correction) changes of nodes and edges with time and space for terrorism organization network are considered by designing algorithm. It is found in numerical simulation that, the evolution of terrorism organization network possess small-world effect and scale-free property at the same time, and the whole network have hierarchical structure with different level centre nodes. Increasing factors of belief and resource can also effect on continuous evolution of network. If government around the world take effectively selected measures to attack the terrorism organization, which can be inhibited to a certain extent or under control. But the counter terrorism is the future still a long-term arduous.

Key words Terrorism organization network, spatiotemporal evolution, small-world, scale-free, belief and resource

Citation Li Ben-Xian, Li Meng-Jun, Fang Jin-Qing, Yang Jin-Xin. Empirical study on spatiotemporal evolution of terrorism organization network. *Acta Automatica Sinica*, 2013, **39**(6): 770−779

战争系统是一个典型的复杂系统. 它是在动态对抗条件下, 受到各种关系网络和时空约束, 以体系与体系对抗形式出现, 群体参与的自适应复杂演化系统[1]. 在诸多的战争系统中, 打击恐怖主义战争是 21 世纪人类面临着的一个难题, 并且在未来很长一段时间内恐怖主义将长期存在并威胁着人类的和平与安全. 为此, 许多国家都在积极寻找消除恐怖主义威胁的途径和方法, 从多个角度来理解和部署反恐怖主义战争. 在这一进程中, 理解与掌握恐怖组织网络的演化规律, 弄清其建立链接的方式和企图, 包括形成自组织网络的前提条件及演化动机、网络绘图的法则, 可以深入地理解恐怖组织网络的演化规律, 以便寻找有效的预防措施与打击策略, 为未来打击恐怖主义战争提供一定的决策指导.

9·11 事件后, 打击恐怖主义问题成为全球关注的一个热点问题, 许多国家及组织都在寻找良策来预防与打击恐怖主义. 在这样的背景下, 网络科学被应用到国家安全领域, 特别是打击恐怖主义, 为查明和消灭恐怖组织的重要头目提供了一种新的研究思路[2−3], 为开展这一战争提供了一种新的武器[4−7]. 在研究过程中, 恐怖组织的网络结构引起了人们的关注, 许多文献对恐怖组织网络进行了研究, 文献 [8] 分析恐怖组织的网络模型, 并认为 AI-Qaeda 这样的恐怖组织是 “一种含有独立智能的网络”, 具有 “蜂群一样的功能”, 因此, 用 “ad-hoc 网络” 和 “非典型的组织” 来形容它们难以破坏的原因. Carley 等应用网络科学的相关理论与方法对恐怖组织网络

收稿日期 2012-10-10 录用日期 2012-10-26
Manuscript received October 10, 2012; accepted October 26, 2012
国家自然科学基金 (61174151, 60874087) 和中国原子能研究院基金 (YZ2011-20) 资助
Supported by National Natural Science Foundation of China (61174151, 60874087) and China Institute of Atomic Energy Science Foundation (YZ2011-20)
本文责任编委 刘德荣
Recommended by Associate Editor LIU De-Rong
1. 国防科学技术大学信息系统与管理学院 长沙 410073 2. 中国科学院原子能科学研究所 北京 102413 3. 安徽师范大学 芜湖 241000
1. School of Information System and Management, National University of Defense Technology, Changsha 410073 2. Institute of Atomic Energy, Chinese Academy of Sciences, Beijing 102413 3. Anhui Normal University, Wuhu 241000

进行了研究, 并提出了扰动恐怖组织网络的方法[9]. Morselli 从网络的安全性与效率角度对加拿大的恐怖组织网络进行了研究, 揭示了恐怖组织网络的安全性是构建网络首要考虑的因素[10]. Barabasi 等则认为恐怖组织的网络不像星状网络那么 “中央化”, 不同级别的中心节点将网络连为一体. 没有处于中央的位置的、控制、监督一切的中央节点, 也没有任何节点能够具有不可或缺的地位, 拿掉任何一个节点都不会导致网络的坍塌. 恐怖组织网络是一种没有蜘蛛的网络[11]. 文献 [12] 搜集了大量的开源信息并对世界上的几十个恐怖组织网络进行了研究, 为理解恐怖组织网络提供了详细的资料. 文献 [13] 对犯罪组织结构的无标度网络、小世界和层次结构网络进行了研究, 并提出了一些打击犯罪网络的建议. 文献 [14−15] 对热点事件与恐怖事件的时空演化进行了研究. 文献 [16−17] 对复杂网络社区结构的时空特点进行了研究. 上述这些文献都从不同角度对恐怖主义的网络进行了探讨, 为理解恐怖组织的网络提供了许多有用的方法. 但是, 在真实的恐怖组织网络中, 组织中的个体具有多样性、自组织性、自适应性. 组织成员在外部环境的干扰下要经历生长(产)、发展和消亡的过程. 此外, 组织中的个体具有自主性的思维能力, 能够根据外部时间和空间的变动与其他的个体建立新关联或取消老的关联. 因此, 在打击恐怖主义的过程中提出了值得研究的一些问题: 恐怖组织网络是如何建立和发展的? 促使恐怖网络建立的主要动机何在? 在多种因素的制约下, 其网络的演化特点是什么? 网络背后有没有什么可循的演化规律? 如何应用这些规律为打击恐怖主义服务?

针对上述问题, 本文利用 Multi-agent 方法, 结合网络科学的相关理论与方法, 提出一个恐怖组织网络的演化模型, 并进行了数字模拟研究, 以期发现恐怖组织网络演化的某些规律, 寻找恐怖组织构建网络的动机及演化规律.

1　基于 Multi-agent 的恐怖组织演化模型

1.1　恐怖组织网络的形式化模型

与普通的刑事犯罪相比, 恐怖分子不仅追求其经济利益, 而且更为重要的是捍卫自己的生活方式和价值取向, 恐怖分子为了自己的事业可以不惜献出生命, 即他们的信念是支撑其网络发展的重要因素[18]. 一般来说, 一个完整的恐怖组织网络由 4 个要素构成[19−20]: 1) 恐怖主体: 实施恐怖攻击的决策人; 2) 恐怖客体: 受恐怖攻击的人或物; 3) 恐怖手段: 恐怖主体攻击恐怖客体的器具、方法和途径, 主要是采取暴力手段, 但不仅限于暴力; 4) 政治或社会目的: 即他们的行为与动机, 欲达到的目的. 这些要素之间的关系网络如图 1 所示.

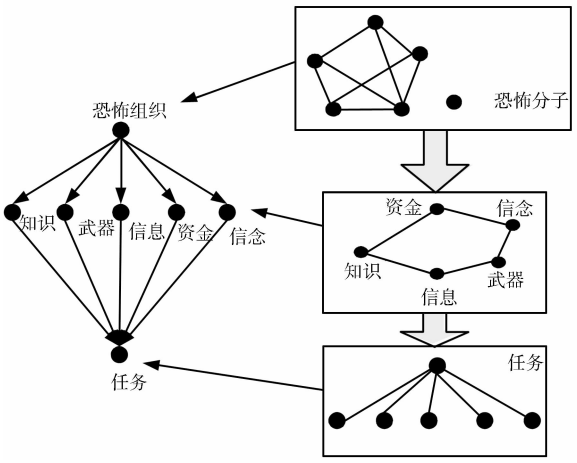


图 1　恐怖组织发动一次恐怖袭击的网络结构

Fig. 1　Network structure of one terrorism attack on terrorist organization

从图 1 可以看出, 恐怖组织策划、实施一次成功的恐怖事件, 包含了一系列的动态事件. 恐怖组织必须建立自己的特殊网络, 对人员进行周密的分工, 获取一定的资源, 如知识、武器、信息、资金、信念. 按照既定的计划与策略, 才有可能去完成某个任务. 这些因素可以抽象为由多个 Agent 构成的网络结构, 他们之间的语义网络可以用一个多元组来描述:

$$\text{MAS} = \langle CA,\ E,\ S,\ \text{Agents},\ \text{Belief},\ \text{Resources(E)},\ \text{Knowledge},\ \text{Task}\rangle$$

其中, CA 是计算 Agent 的集合, 对于每个计算的 Agent, $a \in CA$, 则有

$$a = \langle E_a, S_a,\ \text{Agents}_a,\ \text{Belief}_a,\ \text{Resources}(E)_a,\ \text{Knowledge}_a,\ \text{Task}_a\rangle;$$

其中, E 是计算实体的集合, $E = (e_1, e_2, \cdots, e_n)$; S 是系统的可能状态集, 其状态集为 $S_a = \langle L_a, D_a\rangle$, L_a 表示生存, 其生存状态为 $L_a = \langle$招募, 合成, 其他方式 $\rangle$, $D_a = \langle$分裂, 消亡$\rangle$. Agents: Agent 代表了恐怖组织网络中的节点. 信念 (Belief) 是驱动恐怖分子去完成任务 (Task) 的动力; 资源 (Resources) 是恐怖组织主体去完成任务的必备要素; 知识 (Knowledge) 指恐怖分子具有的某种专长和技能. 这些要素之间相互影响, 形成一个复杂的自适应系统, 其中各 Agent 之间的关系如表 1 所示.

1.2　基于 Multi-agent 的恐怖组织演化模型建模

为了更好地描述恐怖组织内个体与群体之间的交互关系, 本文提出采用自底向上的建模过程来刻画恐怖组织网络的演化过程. 如图 2 所示. 此模型主要由三部分构成: 1) 个体行为的分类描述; 2) 大量个体在外部环境的交互过程中, 形成特殊的群体社会网络及资源网络; 3) 由个体、群体在一定的策

表 1 各主体之间的影响和作用模式

Table 1 Intersubjective effect and function pattern

系统	范围	对其他主体的影响
人 (Agent)	1) 社会网络 (人员之间的关系), 组织的效忠程度 2) 与谁联系, 谁控制资源 3) 谁去完成任务	1) 决定着任务的成功与失败 2) 资源的分配
知识	知识网络 (人员具有的专长和技能)	1) 影响人员的素质; 2) 决定任务完成的效果
资源	1) 资源网络 (人员占有或能够使用的资源) 2) 资金 (支持实施恐怖行动的经费等 3) 信息网络 (获取和沟通信息的渠道)	连接人与任务的中间因素
任务/目标/意图	任务网络 (人员被指派的任务或计划)	受到人、知识、资源的影响

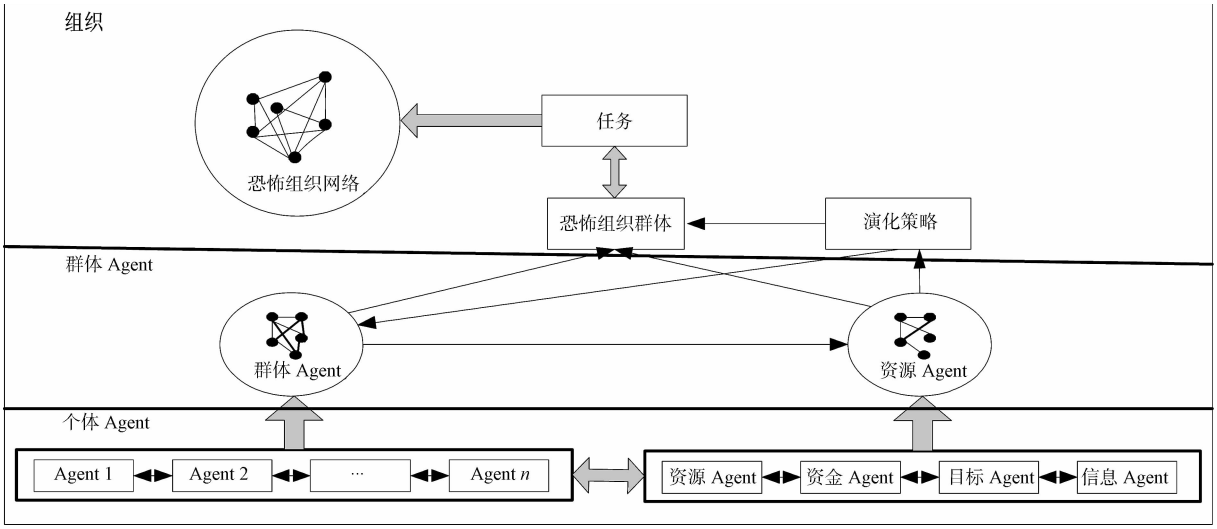


图 2 恐怖组织网络的演化模型的总体架构

Fig. 2 Total framework of terrorist organization evolution

略条件下演化成新的组织群体, 构成更加复杂的网络结构, 并且这一网络结构不同于个体网络也有别于群体网络. 这三部分在外界环境的制约下, 网络不断演化. 它们之间的关系可以用一个三元组来描述, 即 $TO_{\text{Agent}} = \langle \text{Agents}, \text{Relation}, \text{Environment (演化策略)} \rangle$.

1) 个体 Agent 模块: 个体 Agent 是描述恐怖组织网络演化系统中最小可分辨虚拟单元对真实社会系统中恐怖分子个体的映射. 此模块是构成恐怖组织网络的重要因素, 主要由多个恐怖分子、资源、资金、目标、信念所构成, 是构成群体网络的基本单元. 在系统运行时, 自身的行为和内部状态有一定的控制权, 可以不需要人的控制, 具有反应能力和社会能力, 能够与环境或其他 Agent 交换信息, 其行为具有自适应性. 其个体网络关系描述为: $\text{AgentRelation} = \langle \text{Agents}, \text{Node}, \text{Edge}, \text{Linktype}, \text{LinkPro} \rangle$. Agents 表示与该 Agent 连接的其他 Agent 个体组成的节点或边集合, 描述了个体 Agent 之间演化关系. Node, Edge 为该 Agent 与其他 Agent 连接的点或边的集合; Linktype 和 LinkPro 分别为连接类型和连接的概率.

2) 群体网络主要由恐怖分子群体 Agent 及资源 Agent 所构成. 其群体关系网络记为: $\text{GroupNetwork} = \langle \text{Agent}, \text{AgentRole}, \text{Node}, \text{Edge}, \text{Orgtype} \rangle$. Agent 表示恐怖组织网络中个体 Agent, AgentRole 表示恐怖分子、资源、任务、目标在组织中的角色, Node, Edge 表示角色之间的点或边, 描述了个体 Agent 在网络中的关系, Orgtype 表示组织中 Agent 类型, 即组织中的资源 Agent、任务 Agent 等.

3) 演化策略: 主要负责提供给 Agent 在不同环境中的连接策略, 建立个体 Agent、群体 Agent 及资源 Agent 之间的联系. 其调用主要由演化规则来完成, 实现个体、群体选择的多样性.

4) 组织 Agent 模块: 在任务、信念的驱动下, 恐怖组织群体构成新的网络, 通过调用其他模型来输出网络的拓扑模型.

1.3　演化策略

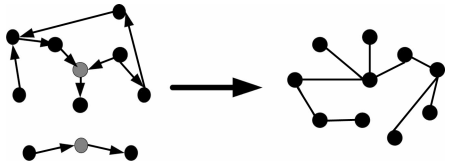
演化策略主要包括节点与网络中其他节点或边建立的连接, 即在相邻 2 个时间步内, 在一定的空间、时间范围内网络节点 (边) 及节点 (边) 之间的连接关系, 节点 (边) 的状态和拓扑都是动态演化, 并且网络间的状态及拓扑是相互影响, 且系统在整个网络中展示出各种各样的集体行为. 演化过程, 与其他网络一样要经历一个混沌到有序, 但其网络演化的背后却遵循一定的规则[21]. 在局部世界里, 网络具有自组织行为, 共同邻居驱动网络不断演化[22−23]. 恐怖组织网络在演化过程中也像其他网络一样遵循两个原则: 增长与优先连接[24−26], 同时恐怖组织网络也遵循一些其他规律.

1) 信念及资源的增长影响网络规模的大小. 在真实的恐怖组织网络中, 恐怖组织与其他犯罪群体最大的区别在于: 制造恐怖事件的目的在于社会目标或政治目的, 这一信念是促进网络快速聚集的重要因素之一, 信念的增加主要通过主动式学习来完成; 在网络增长过程中, 资源模型的大小对网络规模大小具有较强的影响力, 当恐怖组织的资源筹集到一定的阀值时, 恐怖组织将会在信念的驱动下策划与制造恐怖事件, 以实现其特定目标 (目的).

2) 恐怖组织是理性的. 恐怖组织的行动具有隐蔽性, 以防止被打击或消灭, 故恐怖分子的一切行动都是经过周密部署的, 部署过程中, 行动是诡密的, 其组织网络会随着外部环境的变化而不断调整网络, 以适应新的外部环境, 防备被打击恐怖主义方消灭, 这一过程是一个动态变化的过程.

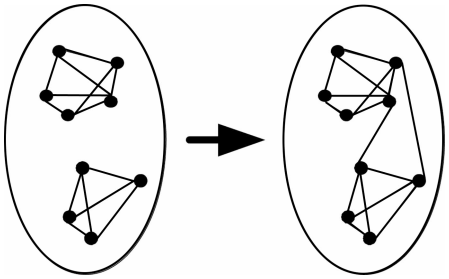
1.3.1　恐怖组织网络中个体成员的增长

在增长过程中, 新成员的加入总是倾向于先与恐怖组织网络中的中心人物交往, 对应于全局中的点权优先选择连接. 当然, 在实际的增长过程中, 恐怖组织的新成员往往通过中间人物联系进而加入恐怖组织网络中. 此后, 随着交往的增多, 新节点所连接的老节点的邻居节点也被介绍, 并且与老节点关系最好的节点被优先介绍和认识, 这对应于邻居节点局域网中的边权优先选择连接, 从而形成了新的网络. 在这一过程中, 新节点也可继续与其他人气旺的老节点连接. 目前, 恐怖组织网络增长的方式主要有三种: 1) 向核心人物靠近; 2) 组织发生聚变; 3) 通过中间人连接网络, 网络与网络之间是弱连接关系, 如图 3 (c) 所示, 图中 P 主要起桥梁作用, 把分裂的结构联合在一起, 并使恐怖组织的成员形成 (产生) 有组织的行为. 网络间个体的增长方式如图 3 所示.



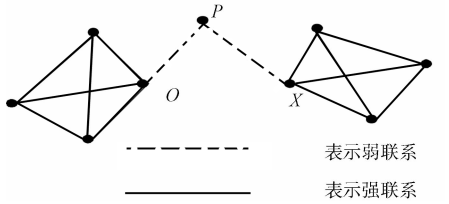
(a) 向核心人物靠近

(a) Near to core member



(b) 组织内部发生分解

(b) Decomposition of inside terrorism organization



(c) 两个组织的弱联系

(c) Faintness relation of two terrorist organization

图 3　恐怖组织网络的增长模式

Fig. 3　Increasing pattern of terrorist organization network

其演化规则为:

1) 节点 i 倾向于与节点度比较大的其他节点建立连接, 即该节点选择与网络中节点 j 建立连接的概率为: $\prod_j \infty k_j$

2) 节点 i 总是倾向于与选择同一类型节点度较大的点或边连接, 其建立连接的概率为

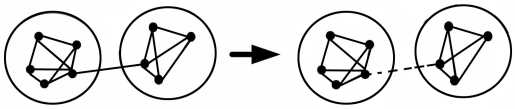
$$\prod_j \infty \frac{\langle k_j \rangle}{\beta \left| t_i - t_j \right|}$$

3) 恐怖组织群体在时间 t 内的增长为 $\mathrm{d}N(t)/\mathrm{d}t = f(N)$, $1/N \times \mathrm{d}N(t)/\mathrm{d}t$ 为相对增长率 ρ, 即个体增长特征和群体生活环境的特征.

1.3.2　恐怖组织网络中个体成员的消亡

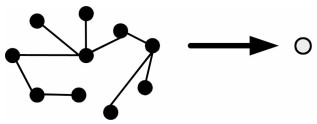
恐怖组织对一个国家的安全与社会稳定构成巨大的威胁, 当威胁达到一定程度时, 打击恐怖主义一方将会采取必要的行动予以打击, 故网络的增长很难达到千人或是上万人, 并且组织的运转必须有庞大的资源作为后盾, 其活动状态经常处于半隐蔽或隐蔽状态. 如果目标过大, 容易暴露自身, 国际社会也会对其采取联合行动, 恐怖组织所在的国家也会进行打击. 恐怖组织内部网络将会发生变动, 变动过

程中主要受到以下因素的影响: 被威胁方的打击、自然消亡和瓦解. 当另一方对恐怖组织网络进行打击时, 领导人物, 即处于网络中心节点的人物是主要被打击的对象. 在网络中通过中心性特征来查找最具威胁的人物, 中心性越高, 其被消灭的概率越高, 并且这一措施从短期效果来看, 对恐怖组织网络的增长具有较为明显的抑制作用[27]. 恐怖组织的死亡或变动, 主要有以下三种方式, 如图 4 所示.



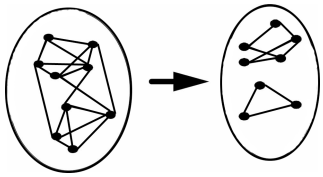
(a) 分裂

(a) Split



(b) 消亡

(b) Death



(c) 瓦解

(c) Collapse

图 4 恐怖组织网络的消亡模式

Fig. 4 Death pattern of terrorist organization network

1) 分裂, 即组织之间的弱连接关系被破坏, 一个组织分裂成两个或多个更小的组织单元.

2) 整个组织消亡. 组织的消亡主要是受到资源的约束, 当资源少于某一个变量并且这个变量无法为组织的运转提供最低保障时, 其网络将会慢慢瓦解或走向消亡; 特别是当威胁到达一定程度时, 被威胁方将会对恐怖组织进行打击, 打击力度的大小将会使网络发生瓦解或消亡.

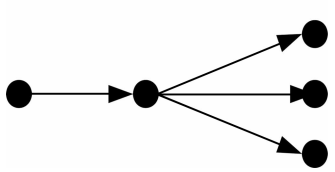
3) 一个大的组织分裂成二个或更多的小组织. 在恐怖组织网络中, 其网络的分裂受到外部环境的变动影响, 从而分裂成更小的小集团, 原来的组织结构发生突变, 走向分散, 彼此间的联系被阻断, 信息无法再在组织群体之间流动. 恐怖组织网络消亡的演化策略为:

a) 中心节点高的节点或边被删除, 即度分布较高的节点被删除;

b) 连接组织之间的重要边被删除, 导致组织内部出现分裂.

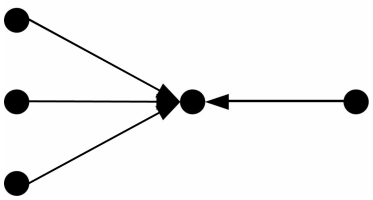
1.3.3 恐怖组织网络中组织的演化

上述分析了恐怖组织成员之间的演化方式, 这些演化方式正是导致组织发生突变或进化的一些规律, 局部的运动将会导致整个组织发生根本性变化. 恐怖组织为了生存和发展, 也会根据环境的变化改变自己的行为 (游戏) 规则, 并且其自身能够与环境以及其他主体进行交互作用. 其成员在持续不断的交互过程中, 不断地 “学习” 和 “积累经验”, 并且根据学到的经验调整自身的结构和行为方式. 在演化过程中, 组织的演化方式主要有两种形式[28], 如图 5 所示.



(a) 分叉

(a) Bifurcation



(b) 集合

(b) Aggregation

图 5 恐怖组织网络的演化模式

Fig. 5 Evolution pattern of terrorist organization network

1) 分叉: 一个恐怖组织的内部个体成员的变动将组织内部解体为两个或两个以上的恐怖组织, 原来的恐怖组织从形式上将不再存在. 其 Agent 控制算子为: $(T \times S \rightarrow C) \cup (T \times I \rightarrow S)$; 动作算子为: $(T \times C \rightarrow H) \cup (T \times C \rightarrow C) \cup (T \times C \rightarrow O)$.

2) 聚合: 数个恐怖组织联合在一起, 组建成一个新的恐怖组织. 这种聚合方式在家庭式或朋友式恐怖分子群体中表现得最为突出. 聚合控制算子为: $(T \times C \times K \rightarrow TK)$; 动作算子为: $(T \times C \rightarrow G) \cup (T \times F \rightarrow LG) \cup (T \times C \times F \rightarrow TG)$.

1.4 算法设计及演化流程

1.4.1 算法设计

在恐怖组织网络中, 每个 Agent 都采用某种演化策略, 动态地与其他 Agent 建立和删除联系, 其算法如下:

1) 初始化网络: 设定仿真时间及环境. 网络的初始节点为 $1 \sim 1\,000$. 初始化网络为 2 个节点, 其

连接度为 1;

2) 网络增长: t 每一时间间隔增添一个新点 i, $t+1$ 时刻新点与 m_t 个不同的已存在系统中的旧点相连接, 产生 M 条边. 每个时间步到达一个新节点, 新节点随机选取上面的演化策略中的一种, 计算其度分布、最短路径 (Dijkstra 算法), 网络中的其他节点根据上述的规则进行演化;

3) 择优连接: 新点 j 连接到旧点 i 的概率 C, 依赖于点 k 的度数 k_i , 即

$$C(k_i)=\frac{k_i}{\sum\limits_j k_j}$$

4) 每个时间步后, 随机为某一个节点增加信念及资源, 其增加规则为 0～20, 节点的能量增加, 当能量增加到一定的阀值时, 根据自身 Agent 和其他主体更新自己的行为并建立新的连接, 消灭的节点被删除并离开网络, 其计算的复杂度为 O(n^3);

5) 经过一段随机时间 T, 计算一次网络的统计属性, 主要统计属性有度、连接度、平均路径长度并输出结果和绘制网络的拓扑结构图.

1.4.2　演化过程

一般来说, 组织网络的演化表现在网络拓扑自身的变动和组织结构内部的不同组合[28]. 恐怖组织网络与一般的网络具有相似性, 但其网络演化却具有一定的特殊性. 其网络演化的过程表现为: 在一定的时间与空间内, 节点随机连接, 再根据其演化策略, 评估其节点重要度, 节点进一步修正连接策略. 在修正时, 节点会选择一个对恐怖组织效率与安全最优的策略. 当最优策略有多个时, 个体 Agent 将会从中随机选择一个进行连接. 当网络演化到一定程度时, 网络被扰动, 网络会根据资源的变动及打击方的打击效率作出调整, 以求得生存. 此时, 如果支撑网络演化的环境发生突变时, 那么整个网络将会消亡. 整个网络演化的流程如图 6 所示,

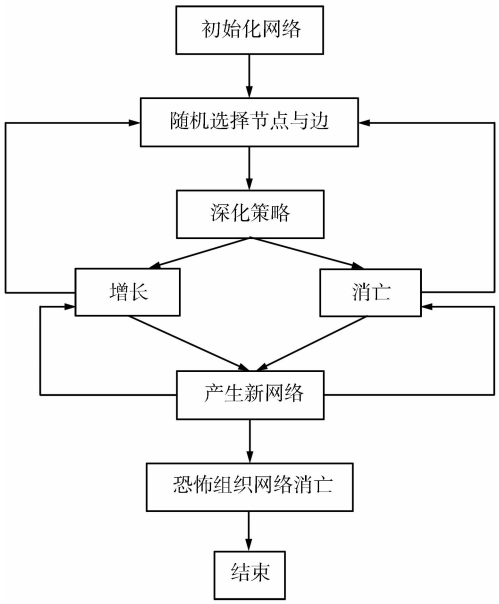


图 6　演化过程

Fig. 6　Evolution flow chart

2　演化的拓扑结构分析

2.1　网络拓扑的特征指标

1) 度分布

度 (Degree) 是描述复杂网络拓扑特征的一个重要概念. 节点 i 的度定义为与该节点连接的其他节点的数目[29]. 度分布是指网络中各节点具有的度的分布, 一般记为 $p(k)$. 其中, $P_k\sim\sum_{k'=k}^{\infty}k^{-\partial}\sim k^{-(\partial-1)}$, 有向网络中一个节点的度分为出度和入度. 节点的出度是指从该节点指向其他节点的边的数目, 节点的入度是指从其他节点指向该节点的边的数目. 一般来说, 一个节点的度越大就意味着这个节点在某种意义上越 “重要”. 在恐怖网络中主要用来衡量谁在这个团体中成为最主要的中心人物, 中心性越高, 在团体中的地位就越重要.

2) 聚类系数

聚类系数表征的是网络的聚类特性. 其定义为假设网络中一个节点 i 有 k_i 条边将它和其他节点相连, 这 k_i 个节点就称为 i 的邻居. 显然, 在这 k_i 个节点之间最多可能有 $k_i(k_i+1)/2$ 条边, 则其聚类系数为[30]: $C_i=2E_i/(k_i(k_i+1))$

在恐怖组织网络中, 聚类系数主要反映的是恐怖组织网络中某人到达其他成员的容易程度, 聚类系数高的行动者在信息传播上具有绝对优势, 能以最快的速度在组织内部传达信息, 但不一定处于网络的核心.

3) 平均最短路径

平均最短路径对网络的连通性进行了较好的描述. 网络中两个节点 i 和 j 之间的距离 d_j 定义为连接这两个节点的最短路径上的边数. 网络中任意两个节点之间的距离的最大直径称为网络的直径, 记为 D, 即 $D=\max_{i,j}d_{ij}$, 则网络的平均路径长度 L 定义为任意两个节点之间的距离的平均值, 即

$$L=\frac{1}{\frac{1}{2}N(N+1)}\sum_{i\geq j}d_{ij}$$

在恐怖组织网络中, 此指标主要用来衡量个体作为媒介者的能力. 在恐怖组织网络演化过程中, 如果某个指标的最短路径越小, 就会有越多的人通过他进行联络, 起这种角色作用的人物称为看门人 (Gatekeepers) 或经纪人 (Brokers). 在网络中看门人在信

息、资源交换等方面的作用尤其突出, 作为打击的重要对象, 除去看门人将使恐怖组织单元间失去联系, 从而起到瓦解恐怖组织网络的作用.

2.2 主要模拟结果与分析

根据上文的分析, 应用 Repast 软件对一个群体为 20、60、100 的恐怖组织分别进行了模拟研究. 演化过程随着节点的增多, 其计算的复杂度成指数级增长, 当节点为 20、60、100 时, 其演化次数分别为: 175、779、1 146. 但一般来说大多数恐怖组织的成员不会超过 60 人[31−32], 例如, 日本的赤军 (JRA) 只有大约 30 到 40 人. 西德的 "红军派" (RAF) 有大约 100 人[33]. 当然也有少数的恐怖组织群体的总人数会超过 60 人, 但是为了防止被打击或消灭, 其组织内部会分裂成 60 以下的更小组织群体[28]. 其模拟计算结果如图 7 所示.

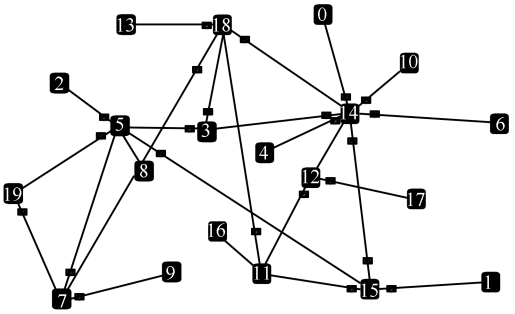
图 7 描述了上述不同的节点数在一定时间和空间上的演化网络, 图中灰色的点表示在某个时间点上, 某一节点的动态变化过程. 在网络演化过程中, 当信念与资源发生改变时, 其网络结构属性也会发生改变. 网络具有等级结构, 不同级别的中心节点将网络连为一体, 形成一张复杂的网络结构图. 从整个模拟的情况来看, 演化过程中网络表现出其独有的拓扑特性, 如图 8 所示. 图 8 描述了恐怖网络演化过程中的三个拓扑特征: 聚类系数、最短路径长和幂律分布.

从图 7 和图 8 可见, 恐怖组织网络具有以下特性:

1) 恐怖组织网络的拓扑结构随时间和空间在不断演化, 由图 7 可知恐怖组织网络不同节点的有向动态演化, 其演化的复杂性程度随网络规模而增加, 反映出恐怖组织网络具有等级结构.

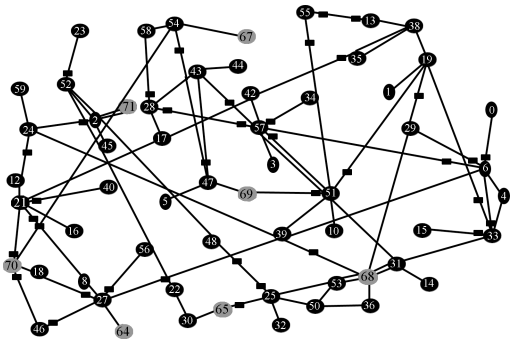
2) 恐怖组织网络具有小世界特征. 聚类系数 C 大和最短路径 L 小. 聚类系数是社会网络的一个重要特性, 既衡量一个复杂网络的集团化 (凝聚度) 程度, 又反映了恐怖组织网络中以最短路径传递信息的速度及威胁度. 从图 8 (a) 可以看出聚类系数随着网络密度的增加而增长, 三组不同成员数为 20 和 60 时, C 都达到 0.5, 而成员 100 时, C 约为 0.3, 即它们在 $C = 0.3 \sim 0.5$ 高值之间; 聚类系数如此高, 表明恐怖组织网络的威胁性很大. 当恐怖组织的成员不断增加时, 其平均路径长度 L 随着链路数目的增加而减少, 甚至最终达到 $L = 1$, 这表明恐怖分子比邻而居, 联系极为紧密. 但是, 当主动打击方对其信念及资源进行干扰后, 恐怖组织的网络出现快速的下降趋势.

3) 恐怖组织网络具有幂律分布. 根据网络的演化规律, 网络节点为 20、60、100 个节点的度分布进行了统计, 如图 8 (c) 所示. 由于本文数值模拟的恐怖组织不多于 100 个成员, 几乎不存在相连总数超过 6 的节点, 故选取特定值 k 的范围为 1 到 6. 我们将所有节点的度的分布进行统计, 选取网络演化平稳时期的节点度值, 依据度值平均值做出度的累计频数统计分布图, 如图 8 (d) 所示, 可以发现度频率随度的增大呈明显的下降趋势, 网络的少数节点的度很大, 连接分布很不均匀, 出现 "幂律分布", 计算得到的无标度特性的幂律指数 γ 在 1.0 ∼ 1.6 之间. 注意到: 这里幂律指数比较小, 通常 γ (小于 3) 越小, 节点 (成员) 之间的关系越密切、合作越好, 因此, 这说明恐怖组织网络成员之间的合作相当紧密.



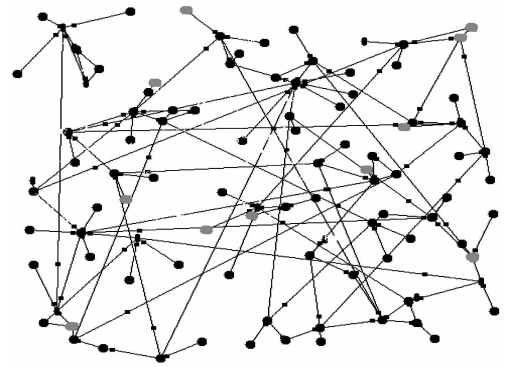
(a) 20 个节点的演化网络

(a) Evolution network of 20 nodes



(b) 60 个节点的演化网络

(b) Evolution network of 60 nodes

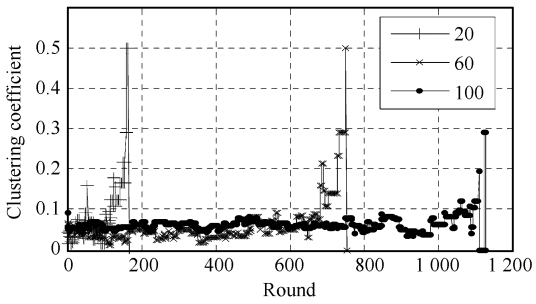


(c) 100 个节点的演化网络

(c) Evolution network of 100 nodes

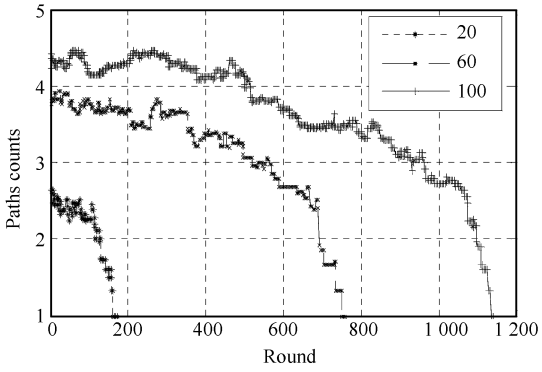
图 7 不同节点的恐怖组织网络的动态演化

Fig. 7 Dynamics evolution networks of different nodes terrorist organization



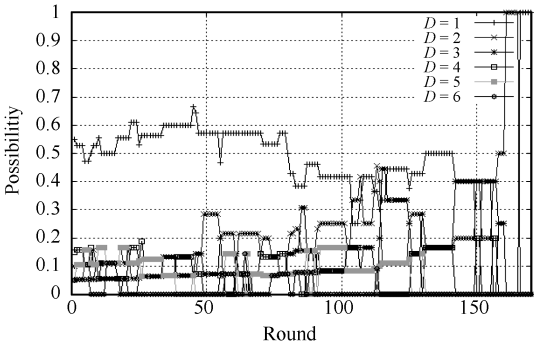
(a) 聚类系数

(a) Clustering coefficient



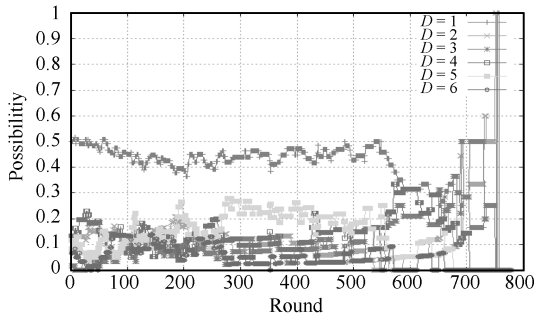
(b) 最短路径

(b) Average shortest paths



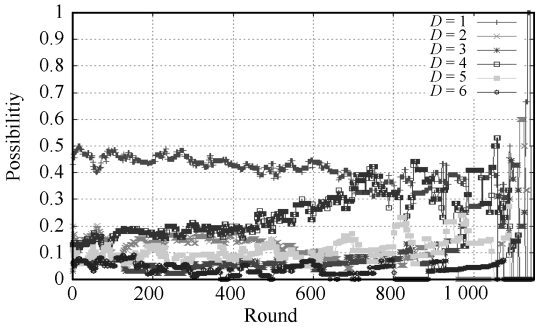
(c) 20 个节点的度分布

(c) Degree distribution of 20 nodes



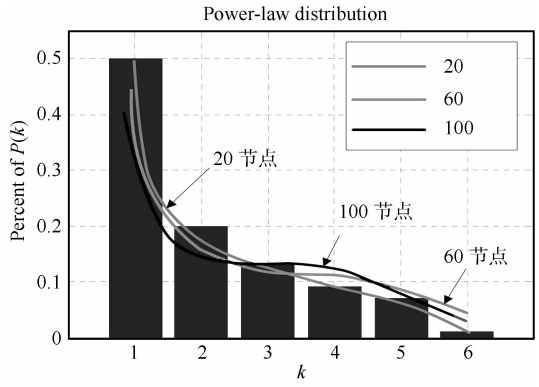
(d) 60 个节点的度分布

(d) Degree distribution of 60 nodes



(e) 100 个节点的度分布

(e) Degree distribution of 100 nodes



(f) 幂律分布

(f) Power-law distribution

图 8　恐怖组织网络的拓扑特性

Fig. 8　Topology characteristics of terrorism network

表 2　9·11 事件恐怖组织成员关系网络的拓扑属性

Table 2　9·11 terrorist incidence topology characteristics of terrorism members relation network

拓扑指标	测试值
平均最短路径 (Average shortest paths)	2.824
聚类系数 (Clustering coefficient)	0.207
度分布 (Degree distribution)	0.098

从图 10 及表 2 可以看出, 9·11 恐怖事件中的组织演化过程遵循分叉及聚合原则, 组织成员从不同地点向其核心人物靠近, 最终涌现出其单一网络所不具有的网络特性. 从表 2 可以看出, 组织的演化过程, 大多数节点的度较小, 少数的节点度较大, 网络的平均最短距离只有 2.8, 网络的聚类系数高达 2.07, 说明恐怖组织成员比邻而居, 合作关系紧密, 善于快速传递信息, 并能够尽量隐蔽自己的行动, 减少成员之间不必要的联系, 以免暴露目标导致行动失败. 因此, 9·11 恐怖组织网络堪称是世界上第一个组织严密、指挥有力、分工明确、高度神秘和行动高效的恐怖组织网络.

3 实例分析

"9·11 恐怖袭击事件" 让全世界看到了恐怖组织的恐怖性, 至今令人刻骨铭心. 本节以 9·11 恐怖事件背后的恐怖组织网络为例, 分析和了解恐怖网络的基本特性. 2002 年 4 月, Valdis E. Krebs 从当时的《纽约时报》、《华尔街日报》、《华盛顿邮报》等报纸上搜集数据并绘制了 9·11 恐怖事件的组织网络图, 如图 9 所示[34]. 图 9 是他绘制的直接参与 "9·11 事件" 的恐怖组织的 19 个主要成员到达美国后一个时期内的关系网络图. 应用本文提出的方法, 从不同侧面对其网络演化及网络拓扑属性进行仿真, 模拟结果如图 10 及表 2 所示.

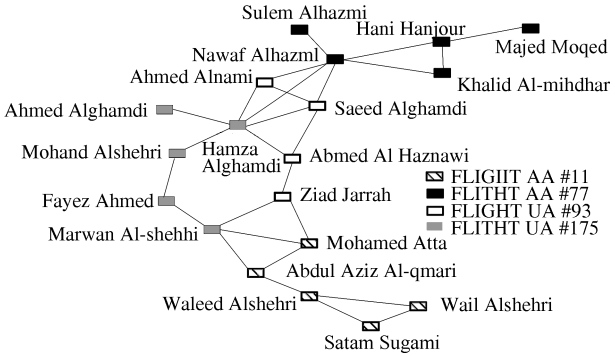


图 9 直接参与 9·11 事件的恐怖组织成员关系网络

Fig. 9 9·11 terrorist incidence of terrorism organization members relation network

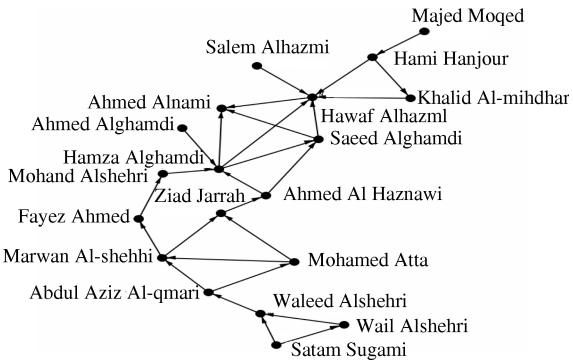


图 10 9·11 事件的恐怖组织成员关系网络演化

Fig. 10 9·11 terrorist incidence of terrorism organization members relation evolution network

4 结论

本文应用统计物理学方法, 结合 Multi-agent, 提出和构建了一个恐怖组织网络时空演化的 Multi-agent (多智能体) 模型, 设计了一个恐怖组织的网络演化算法, 并进行了数值模拟研究. 该模型在演化过程中, 其动态演化策略主要从网络的增长及消亡两方面进行了分析. 网络的演化规律遵循增长及优先连接的原则, 其增长的原动力在于信念的增加及资源的增长, 信念是驱动网络增长的决定性因素, 资源的增长是保证组织运转的必要前提和关键性因素, 这一要素的增长对扩大组织规模具有推动作用, 如招募新组织成员和组织恐怖活动. 当网络增长到一定的阀值时, 即恐怖主义对一国或某地区造成威胁时, 政府和相关部门将必须采取一定必要的行动对其进行打击, 恐怖组织的网络规模将会被消亡或缩减. 演化过程中, 恐怖网络组织及其头目和成员也会随着环境的变动, 不断调整自己的行为以适应环境的变化. 在网络增长过程中, 越老的节点具有越高的度, 这与恐怖组织的实际情况是相符合的. 从短期效果来看, 网络中关键头目的灭亡将会对恐怖组织网络产生巨大影响; 而资源网络的变动对其网络的消亡具有长期效应. 从整个演化过程来看, 恐怖组织网络的演化不仅具有小世界特性, 而且网络的增长具有无标度特性和等级结构. 以 9·11 恐怖事件背后的恐怖组织网络为例, 对本文的方法进行了实验验证, 并分析了其网络演化的时空特征. 本文研究结果对于防止和打击恐怖组织活动具有一定的指导意义和参考价值.

References

1 Hu Xiao-Feng. A brief survey on war complex networks studies. *Complex System and Complexity Science*, 2010, **7**(2): 24−28
(胡晓峰. 战争复杂网络研究概述. 复杂系统与复杂性科学, 2010, **7**(2): 24−28)

2 Krebs V E. Mapping networks of terrorist cells. *Connections*, 2002, **24**(3): 43−52

3 Carley K M. Destabilization of covert networks. *Computational and Mathematical Organization Theory*, 2006, **12**(1): 51−56

4 Xu Xiao-Ke, Fang Jin-Qing. Applications of complex network theory in war on terrorism. *Complex System and Complexity Science*, 2010, **7**(2): 116−119
(许小可, 方锦清. 复杂网络理论在反恐战争中的应用. 复杂系统与复杂性科学, 2010, **7**(2): 116−119)

5 Borgatti S P, Mehra A, Brass D J, Labianca G. Network analysis in the social sciences. *Science*, 2009, **323**(5916): 892−895

6 Bohannon J. Counterterrorism′s new tool: "metanetwork" analysis. *Science*, 2009, **325**(5939): 409−411

7 Weinberger S. Web of war. *Nature*, 2011, **471**: 566−568

8 Carpenter T, Karakostas G, Shallcross D. Practical issues and algorithms for analyzing terrorist networks. In: Proceedings of the 2nd International Workshop on Mobile Commerce (WMC). New York, USA: ACM, 2002. 49

9 Carley K M, Dombroski M, Tsvetovat M, Reminga J, Kamneva N. Destabilizing dynamic covert networks. In: Proceedings of the 8th International Command and Control Defense Research and Technology Symposium. Washington, DC, 2003. 45−89

10 Morselli C, Giguère C, Petit K. The efficiency/security trade-off in criminal networks. *Social Networks*, 2007, **29**(1): 143−153

11 Barabasi A L. *Linked: The New Science of Networks*. Cambridge: Perseus Press, 2002. 222−224

12 Sageman M. *Understanding Terror Networks*. Philadelphia: University of Pennsylvania Press, 2004. 1−147

13 Chen Peng, Yuan Hong-Yong. Social network analysis of crime organization structures. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 2011, **51**(8): 15−25
(陈鹏, 袁宏永. 犯罪组织结构的社会网络分析. 清华大学学报 (自然科学版), 2011, **51**(8): 15−25)

14 Gong Kai, Tang Ming, Shang Ming-Sheng, Zhou Tao. Empirical study on spatiotemporal evolution of online public opinion. *Acta Physica Sinica*, 2012, **61**(9): 526−532
(龚凯, 唐明, 尚明生, 周涛. 在线热点事件的时空演变规律. 物理学报, 2012, **61**(9): 526−532)

15 Zhu J F, Han X P, Wang B H. Statistical property and model for the inter-event time of terrorism attacks. *Chinese Physics Letters*, 2010, **27**(6): 273−276

16 Jin Di, Liu Jie, Yang Bo, He Dong-Xiao, Liu Da-You. Genetic algorithm with local search for community detection in large-scale complex networks. *Acta Automatica Sinica*, 2011, **37**(7): 873−882
(金弟, 刘杰, 杨博, 何东晓, 刘大有. 局部搜索与遗传算法结合的大规模复杂网络社区探测. 自动化学报, 2011, **37**(7): 873−882)

17 Liu Xu, Yi Dong-Yun. Complex network community detection by local similarity. *Acta Automatica Sinica*, 2011, **37**(12): 1520−1529
(刘旭, 易东云. 基于局部相似性的复杂网络社区发现方法. 自动化学报, 2011, **37**(12): 1520−1529)

18 Leweling T A, Nissen M E. Defining and exploring the terrorism field: toward an intertheoretic, agent-based approach. *Technological Forecasting and Social Change*, 2007, **74**(2): 165−192

19 Deng Bi-Bo. Terrorism organization elements, activity and prevention. *Journal of PLA Nanjing Institute of Politics*, 2009, **25**(5): 78−80
(邓碧波. 恐怖主义组织的要素、活动及其预防. 南京政治学院学报, 2009, **25**(5): 78−80)

20 Li Zhi-Hui. *Counter-terrorism Study*. Beijing: People′s Press, 2003. 35−41
(李智慧. 反恐学. 北京: 人民出版社, 2003. 35−41)

21 Crutchfield J P. Between order and chaos. *Nature Physics*, 2002, **8**: 17−24

22 Gan Min, Peng Hui, Huang Yun-Zhi, Dong Xue-Ping. Initial distribution search algorithm for self-organizing state space model. *Acta Automatica Sinica*, 2012, **38**(9): 1538−1543
(甘敏, 彭辉, 黄云志, 董学平. 自组织状态空间模型参数初始分布搜索算法. 自动化学报, 2012, **38**(9): 1538−1543)

23 Cui Ai-Xiang, Fu Yan, Shang Ming-Sheng, Chen Duan-Bing, Zhou Tao. Emergence of local structures in complex network: common neighborhood drives the network evolution. *Acta Physica Sinica*, 2011, **60**(3): 803−808
(崔爱香, 傅彦, 尚明生, 陈端兵, 周涛. 复杂网络局部结构的涌现: 共同邻居驱动网络演化. 物理学报, 2011, **60**(3): 803−808)

24 Barabási A L, Albert R. Emergence of scaling in random networks. *Science*, 1999, **286**(5439): 509−512

25 Albert R, Barabási A L. Topology of evolving networks: local events and universality. *Physical Review Letters*, 2000, **85**(24): 5234−5237

26 Albert R, Barabási A L. Statistical mechanics of complex networks. *Reviews of Modern Physics*, 2002, **74**(1): 76−85

27 Enders W, Su X J. Rational terrorists and optimal network structure. *Journal of Conflict Resolution*, 2007, **51**(1): 33−57

28 Fenstermacher L, Kuznar C L, Rieger T. Protecting the homeland from international and domestic terrorism threats: individual and group mechanisms. *RAND*, 2010: 82−91

29 Kossinets G, Watts D J. Empirical analysis of an evolving social network. *Science*, 2006, **311**(5757): 88−90

30 Wasserman S, Faust K. *Social Network Analysis: Methods and Applications*. England: Cambridge University Press, 1994. 178−179

31 White J R. *Terrorism: An Introduction*. White Californian: Wadsworth Thomson Learning, 2002. 21−135

32 Mei Jian-Ming. *Counterterrorism Intelligence and Crisis Management*. Beijing: Qunzhong Press, 2007. 66−67
(梅建明. 反恐情报与危机管理. 北京: 群众出版社, 2007. 66−67)

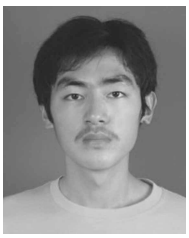
33 Zawodny J K. *Infrastructure of Terrorist Organizations*. In: Freedman L Z, Alexander Y. *Perspectives on Terrorism*. Delaware, Wilmington: Scholarly Resources, 1983

34 Krebs V E. Uncloaking terrorist network. *First Monday*, 2002, **7**(4): 1−4

李本先 国防科学技术大学信息系统与管理学院博士研究生. 主要研究方向为系统优化与综合集成. 本文通信作者.
E-mail: libenxianxian@163.com
(**LI Ben-Xian** Ph. D. candidate at the School of Information System and Management, National University of Defense Technology. His research interest covers system optimization and synthesis integration. Corresponding author of this paper.)

李孟军 国防科学技术大学信息系统与管理学院教授. 主要研究方向为系统优化与综合集成.
E-mail: mjli11260744@sina.com
(**LI Meng-Jun** Professor at the School of Information System and Management, National University of Defense Technology. His research interest covers system optimization and synthesis integration.)

方锦清 中国原子能科学研究院教授. 主要研究方向为非线性科学, 复杂网络.
E-mail: fjq96@126.com
(**FANG Jin-Qing** Professor at Institute of Atomic Energy, Chinese Academy of Sciences. His research interest covers nonlinear science and complexity network.)



仰琏歆 安徽师范大学数学计算机科学学院. 主要研究方向为系可信网络.
E-mail: brianyang@foxmail.com
(**YANG Jin-Xin** Ph. D. candidate at the School of Mathematics and Computer Science, Anhui Normal University. His main research interest is trusted network.)