

doi:10.11918/j.issn.0367-6234.2015.10.023

复杂网络理论的作战网络动态演化模型

张 强, 李建华, 沈 迪, 赵军伟

(空军工程大学 信息与导航学院, 710071 西安)

摘 要: 为动态评估作战组织结构对作战效能的作用影响,采用复杂网络分析了信息化条件下作战组织结构的网络化特性,综合考虑作战组织实体及组织结构关系的异质性,构建了基于多维加权的作战网络模型,定义了刻画作战网络性能的协同增益特征量,以提高作战效能作为网络演化动力,分别设计了择优演化和随机演化两种作战网络动态演化模型,结合协同增益指标提出了分析作战网络动态演化与作战效能之间内在关联及影响规律的方法,仿真结果验证了方法的可行性,可为设计与优化作战组织结构提供理论依据。

关键词: 作战网络;复杂网络;动态演化;加权网络

中图分类号: TP391.9;E917

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2015)10-0122-07

Dynamic evolution model of operational network based on complex network theory

ZHANG Qiang, LI Jianhua, SHEN Di, ZHAO Junwei

(School of Information and Navigation, Air Force Engineering University, 710071 Xi'an, China)

Abstract: In order to assess the influence of combat organizational structure on operational effectiveness dynamically, the network characteristic of combat organizational structure on condition of information was analyzed by using complex network theory. Considering the heterogeneity of combat organizational entity and organizational structure relation, a multi-dimensions weighted operational network model was firstly constructed, and then the characteristic value of cooperative gain, which depicts the performance of operational network, was defined. Under this, to enhance operational effectiveness, two dynamic evolution models of operational network, which are random evolution model and preferred evolution model, were designed, and the internal relation and influence law between operational network dynamic evolution and operational effectiveness was analyzed by using the models along with the characteristic values of cooperative gain. Finally, simulation results show the feasibility of the proposed method, which can be used to provide theoretical basis for designing and optimizing combat organizational structure.

Keywords: operational network; complex network; dynamic evolution; weighted network

分布式网络化作战是信息化战争的典型作战样式,单个作战平台能力的局限性、作战任务使命的多样性以及作战环境的复杂性,对作战能力的要求越来越高。信息化条件下的作战活动依托网络化指挥信息系统通过信息获取、信息传递、信息处理以及信息利用等过程将各作战子系统组成一个复杂的作战网络,作战信息的无缝链接和网络化共享提高了指挥决策与火力打击的质量和效率,使得作战行动具

备了整体作战效能。结构决定功能是系统科学的基本观点,如何建模分析作战组织的拓扑结构和动态演化特性对整体作战效能的作用影响,为现实作战组织结构内部的资源整合和网络结构整体优化提供理论指导,已成为当前军事领域研究的重难点问题。

复杂网络理论以其整体性建模优势逐渐成为研究复杂系统的宏观统计特性、微观形成机理及动力学性质的有力工具^[1-2],也为探索战争系统的复杂性和不确定性等研究提供了新的视角和方法^[3],引起了国内外学者的普遍关注。Dekker^[4]首先引入复杂网络理论并建立了区别于兰彻斯特方程的信息作战模型,仿真分析了网络类型与作战效能之间的关系^[5];随着指挥控制组织结构由金字塔型逐步转向

收稿日期: 2014-08-28.

基金项目: 国家自然科学基金(61174162);全军军事学博士研究生课题(2012JY003-583)。

作者简介: 张 强(1985—),男,博士研究生;
李建华(1965—),男,教授,博士生导师。

通信作者: 李建华, ljh_1965@sina.com.

具有柔性重组和随遇入网等网络化特性,研究人员运用复杂网络理论在指挥控制领域的组织结构建模^[6-10]以及网络抗毁性和鲁棒性^[11-12]等方面开展了较多的研究,并取得了丰硕的研究成果.指挥控制单元及其作用关系属于作战网络的组成部分,从作战网络的整体角度出发,更能深入认识分布式网络化作战的复杂性.文献[13-14]从解释作战网络的统计特性角度出发,构建了静态的作战网络模型,并验证了作战网络具有的复杂网络特性;文献[15]从提高作战效能角度出发,通过网络模型研究作战网络的优化设计问题.目前,作战网络的动态演化特性鲜见有研究,其中温睿^[16-17]等研究了作战体系的网络动力学行为,其探索性研究得出许多有益结论,但网络模型忽略了作战实体及其作用关系的异质性,在刻画作战网络的整体结构和作用关系等现实特性方面仍存在不足.因此,在现有研究的基础上,本文综合考虑作战组织实体及组织结构关系的异质性,构建基于多维加权的作战网络动态演化模型,分析作战网络的动态演化特性对整体作战效能的影响规律.

1 基于多维加权的作战网络模型

1.1 作战组织结构网络分析

伴随作战空间的不断拓展和作战范围的不断扩大,战场上参与作战的大量战场探测感知设备、指挥控制中心和武器平台依托战场信息网络综合集成成为一体化的作战体系,逐渐成为信息化条件下作战组织结构的基本形式.从组织结构的角度看,一体化的作战体系是在作战任务使命的驱动下,由处于“侦查探测—指挥决策—火力打击”等作战过程中作战实体的整体有序行为以及与之相适应的组织结构关系的总和^[18].组织实体和组织结构是一体化作战体系组织的基本元素,其中组织实体包括了作战任务实体、侦查预警实体、指挥决策实体和武器装备实体等,组织结构则是组织实体之间的指挥、控制、协作和共享等信息交互关系的组合,如图 1 所示.从网络结构的角度看,一体化作战体系组织即是不同作战实体之间因作战需求产生信息流、物质流和能量流等关系而形成的作战网络,具有明显的结构复杂性、连接复杂性和演化复杂性等特征.

1.2 作战组织结构网络模型

如果单纯从网络的连通性考虑,作战网络可被看作是无权网络;如果考虑作战实体之间的连接关系强弱和连接属性等,作战网络又可被看作加权网络.本文采用加权网络模型,可比无权网络更加准确和真实地刻画作战网络形成与演化的现实特性.下

面首先介绍网络模型中的相关概念.

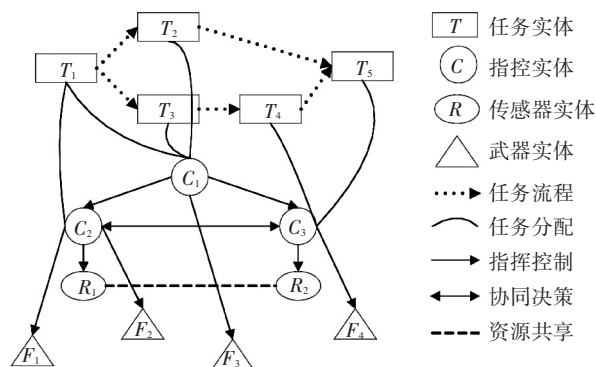


图 1 作战体系组织结构模型

节点集合 $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$. 节点即作战组织结构中的组织实体,是作战活动的载体,包括作战任务实体、作战决策实体、战场态势感知设备和武器装备等作战资源实体.由于基于单一作战要素的网络模型不能较真实地反映作战网络的复杂构成和整体结构,本文重点考虑作战组织中的有形实体,节点包括传感器(R)、指挥控制(C)和火力打击(F)等作战实体^[13-14];

边集合 $E = \{e_1, e_2, \dots, e_m\}$. 边即作战实体之间的结构关系,即信息交互关系.作战实体的异质性必然导致信息交互关系的差异,包括指挥节点与传感器和打击节点之间的指挥控制关系,传感器节点间的情报共享关系、指挥节点间横向的协同决策关系及纵向的指挥控制关系等四类信息交互关系.需要说明的是,协同打击通过指挥实体的指挥协同实现,即打击节点之间不存在直接的信息交互关系.由于所有的信息交互关系都存在双向连接,本文不考虑信息的流向.

邻接矩阵:如果忽略作战网络中节点和边的异质性,仅考虑节点之间连接关系的存在性,则可采用邻接矩阵 $A = \{a_{ij}\}$ 描述作战网络,当节点之间存在信息交互关系时, $a_{ij} = 1$, 否则为 0.

加权矩阵:采用加权矩阵 $W = \{w_{ij}\}$ 不仅可刻画关系的存在性,还可描述关系的强弱程度, w_{ij} 表示作战网络中任意两个节点 v_i 和 v_j 之间信息交互关系的紧密程度,其值可通过统计节点之间收发信息频繁程度的方式获取, $w_{ij} \in [0, 1]$, 属于相似权,其值越大,节点之间的关系越紧密, $w_{ij} = 0$ 表示节点间不存在信息交互关系,特殊的, $w_{ii} = 0$.

与单一类型复杂网络的矩阵表示不同,作战网络共有三类节点和四种信息交互关系,可采用多维矩阵表示节点和边的异质性.以传感器 R ——指挥 C 节点之间的信息交互关系为例,假设传感器和指挥节点数量分别为 N_R, N_C , 关系矩阵则为 $W_{RC} = \{w_{ij}, i = 1, 2, \dots, N_R; j = 1, 2, \dots, N_C\}$, 其中权值 w_{ij} 表示

指控与传感器节点之间指挥控制关系的紧密与频繁程度.其他 3 种关系矩阵同理,四种关系加权矩阵合并即可得到作战网络模型的矩阵表示.如图 2 所示.

$$W = C \begin{bmatrix} R & C & F \\ R & W_{RR} & W_{RC} & - \\ F & W_{RC} & W_{CC} & W_{CF} \\ F & - & W_{CF} & - \end{bmatrix}$$

图 2 作战网络多维矩阵表示

作战网络连接的复杂性不仅体现在信息交互关系种类的多维性,还表现在影响因素的多样性.本文引入任务相关和通信成本等物理属性,用于刻画除网络属性外的因素对作战网络动态演化特性的作用影响.

任务相关属性 a_{ij}^r :表示任意两个作战实体 v_i 和 v_j 之间作战任务使命的相关程度. $a_{ij}^r \in [0,1]$,相关程度与值的大小成正比, $a_{ij}^r = 0$ 表示实体担负的作战任务完全无关,值为 1 表示相同,特殊的, $a_{ii}^r = 1$.由 a_{ij}^r 组成的矩阵 A^r 表示所有作战实体之间的任务相关属性.

通信成本属性 a_{ij}^d :在信息化战争中,作战实体广域分散分布在战场上,任意两个作战实体依托战场信息网络建立信息交互关系.该属性表示任意两个作战实体 v_i 和 v_j 之间建立信息交互关系所需的物理通信链路成本, $a_{ij}^d \in [0, \infty)$,值越大,通信消耗越大,特殊的, $a_{ii}^d = 0$.由 a_{ij}^d 组成的矩阵 A^d 表示所有作战实体之间的通信成本属性.

由上述分析可知,多类节点与多种连接以及多维矩阵与多样属性的组合构成了基于多维加权的作战网络模型,可表示为 $G = \{V, E, A, W, A^r, A^d\}$.

1.3 网络结构与作战效能

传统战争形态下的作战网络即指挥网络,表现为金字塔型的组织结构,在作战任务静态稳定的情况下易于整体的指挥与控制^[19],横向作战单元之间几乎不存在信息交互,作战效能即作战实体数量和性能的线性叠加.信息化条件下的作战网络即依托网络化指挥信息系统将广域分散分布的作战实体根据作战需求进行信息交互连接而构成的复杂网络,作战要素的综合集成及整体配置,使得作战效能产生“整体大于部分之和”的非线性阶跃.研究表明,作战组织结构中各作战实体间联系和相互作用的微观变化,在宏观上对整体作战效能的影响主要表现为极少协同、适度协同和过度协同等^[20-22].本文根据作战网络现实特性,结合复杂网络统计特征量,从网络收益和连接成本等两方面定义了协同增益,作为刻画网络结构与作战效能之间内在关联的性能指

标.

OODA 理论认为,作战活动即观察、调整、决策和行动的循环控制过程.从作战网络结构的角度来看,即是从传感器节点经指控节点到达打击节点的一条链路^[23].假定信息传递速率相同,那么上述节点之间的网络结构距离越小,各作战实体间的战场信息流转效率越高,作战效能也就越高.因此,网络收益可通过作战网络中从任意传感器节点经指控节点到达任意打击节点间的平均路径长度进行表征,其表达式为

$$\begin{cases} d_{ij} = \min \left\{ \sum_{\substack{i \in V_R, \\ j \in V_F}} \frac{1}{w_{ik}} + \sum_{w \in p_{kj}} \frac{1}{w_{kj}} \right\}, \\ L_{RCF} = \sum_{i \in V_R, j \in V_F} d_{ij} / (N_R \times N_F), \\ B(G) = 1 / (\mu L_{RCF} + 1). \end{cases}$$

式中: V_R 、 V_C 和 V_F 分别代表传感器、指控和打击节点集合; N_R 和 N_F 分别表示其节点数量; d_{ij} 是节点 i 和 j 之间的最短路径; p_{ij} 是网络中连接节点 i 和 j 的一条路径; L_{RCF} 即网络中任意传感器到任意打击节点之间的平均最短距离; μ 为调节参数.由于作战网络中边权属于相似权,权重和距离成反比^[24], $d_{ij} = 1/w_{ij}$.收益函数值 $B(G)$ 越大,表明从传感器节点到打击节点之间的信息交互关系越紧密,各类作战实体间的协同效应越明显.

作战实体保持协同的前提是作战网络结构存在冗余,节点之间边的连接程度增加导致网络冗余以及网络建设成本的增加.作战实体之间的通信需求、地理位置和功能作用等差异性使得建设成本不同,本文采用网络边的连接程度^[25] 表征成本,其表达式为:

$$\begin{aligned} C(G) &= \sum_{i \neq j \in G} \theta(w_{ij}) / C_{\max}, \\ \theta(w_{ij}) &= \begin{cases} \alpha \times w_{ij}, & w_{ij} \leq d_{ij}; \\ \beta \times w_{ij}, & d_{ij} < w_{ij} < \infty; \\ 0, & w_{ij} = \infty. \end{cases} \end{aligned}$$

式中 $C_{\max}$ 表示全连通作战网络的连接成本,为成本的最大值.由于网络存在冗余边,式中通过节点间最短距离 d_{ij} 与关系紧密程度 w_{ij} 之间的比值大小区分必要边和冗余边, α 和 β 分别表示网络建立单位长度连接所需成本的调节参数,设定 $\alpha \leq \beta$ 使得冗余边的网络成本高于必需边.

由上述分析可知, $B(G)$ 越大,表明作战网络具有的收益越大,越有利于作战效能的提升;而 $C(G)$ 越大,表明作战实体间的信息交互关系越复杂,网络建设成本越大,属于需要抑制的性能指标.因此,协同增益可定义为 $Z(G) = B(G) \times (1 - C(G))$,当作

战网络具有的收益大于成本时, $Z(G)$ 越大, 作战实体间的协同效应越明显, 其整体作战效能也越大。

2 作战网络动态演化模型

信息化条件下, 作战任务瞬息万变的战场态势呈现出复杂性和动态性, 导致作战实体规模及其实体之间的组织结构关系均会在复杂网络化和高度信息化的战场环境中动态变化, 使得作战网络具有动态演化特性。本文设计作战网络动态演化模型的目标是在复杂动态的战场环境中, 探寻作战网络宏观整体效能与作战实体微观变化之间的本质关联与作用规律, 以提高作战效能(协同增益指标表征)作为网络演化的动力, 通过调整作战网络结构实现作战资源的最优化配置, 增强作战实体之间的共享与协作程度, 实现作战效能的非线性阶跃, 从而为设计与优化作战组织提供理论参考。因此, 演化策略设定为在每个演化时刻确保网络结构都朝着提高协同增益的方向进行, 即为择优演化模型。为对比分析, 同时设计了随机演化模型。

2.1 演化规则

BA 模型通过增长和优先连接等规则较好地刻画了复杂网络的动态演化特性, 而作战网络演化是一个复杂的动态过程, 具有多种演化规则, 不仅包括作战实体的动态增加, 还包括信息交互关系的建立以及实体和关系的删除, 也可能是共同作用的结果^[26]。比如: 边的重连即边的删除和新增共同作用的组合。作战网络的动态演化现实特性映射到网络结构中则表现为节点和边数量的增加或减少。下面详细分析作战网络的四种演化规则。

规则 1 组织实体增加。在分布式网络化作战过程中, 各类作战实体由作战任务使命驱动, 根据作战需要动态加入作战网络。不同作战实体加入网络的概率可参考完成一定任务所需各类作战实体数量的比值, 假定传感器、指控和打击等作战实体的配置比例为 $a:b:c$, 则各节点分别以按照比例值归一化后得到的概率加入网络。

不同作战实体与已有实体间建立信息交互关系的方式也各不相同, 各类节点加入后都会与指控节点产生信息交互关系。为较好地反映作战网络的局域性和自适应性等现实特性, 新实体与已有指控实体之间同时具有局域或全局范围内连接的可能性; 此外, 作战网络的演化复杂性决定了择优连接不仅取决于节点的连接度和强度等网络属性, 还受到包括指控实体自身的能力(如: 信息处理能力和可靠性)、实体之间作战任务使命的相关性以及通信成本等物理属性的影响。

规则 2 组织实体退出。因遭敌损伤或信息系统故障等原因造成作战实体退出网络, 同时该实体所有的邻接边也会随之删除。作战网络中孤立节点对协同增益毫无贡献, 如果节点及其邻接边删除后出现了孤立节点, 则该孤立节点也将退出网络。需要说明的是, 依据网络属性择优选择的节点仅能反映同类节点在网络中的重要程度, 不同类型作战实体退出机制需分类进行。

规则 3 组织结构关系建立。作战实体之间在已有静态交互关系的基础上, 依托战场信息网络根据作战需要动态产生越级、友邻和支援等信息交互关系, 如传感器之间以及指控之间建立的信息共享交互关系能够显著地提升网络化情报保障和协同决策能力。

规则 4 组织结构关系解除。删除关系的类型与规则 3 类似, 当由作战任务驱动的作战需求发生变化时, 动态建立的组织结构关系也会在任务完成后解除。

2.2 演化步骤

Step 1 生成作战网络动态演化的初始网络结构, 节点个数为 N_0 , 并根据不同规则(如: 随机或依统计数据)完成作战网络综合描述模型中的各类参数初始化。

Step 2 作战网络动态演化在每一仿真步长内执行下列 4 种不同情况之一:

1) 以概率 p_1 按规则 1 增加 m_1 个新的节点, 同时为新节点赋予节点能力以及与其他节点之间的任务相关因子和通信成本等参数, 更新属性矩阵 A^r 、 A^d 。对指控节点而言, 新节点自带 m_e 条连接边, 分别以概率 p_a 或 $1 - p_a$ 在局域或全局范围内选择概率值最大的节点进行连接, 其中择优演化模型节点概率计算如式(1)所示, 随机演化模型如式(2)所示; 对传感器节点而言, 节点自带 m_e 条连接边, 新节点首先与已有指控节点进行连接, 连接方式与指控节点相同; 其次选择已有传感器节点进行连接, 择优演化模型概率计算如式(3)所示, 随机演化模型如式(2)所示; 对打击节点而言, 节点自带 1 条连接边, 新节点与已有指控节点进行连接, 连接方式与指控节点相同。所有新节点与已有节点之间的边统一赋予权值 $w_{ij} = 0.5$ 。

$$p = \frac{M}{N_c} \left(\alpha_1 \frac{\lambda_i s_i}{\sum \lambda_i s_i} + \alpha_2 \frac{a_{ij}^r}{\sum a_{ij}^r} + \alpha_3 \frac{1/a_{ij}^d}{\sum (1/a_{ij}^d)} \right), \tag{1}$$

$$p = 1/N_v, \tag{2}$$

$$p = s_i / \sum s_i. \tag{3}$$

式中: N_c 为某演化时间内指控节点的数量; α_1 、 α_2 和 α_3 为调节参数, $\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 = 1$; λ_i 为指控节点的自身能力大小值; s_i 为节点 i 在作战网络中的节点强度, 表征了节点所拥有的作战资源数量以及节点在网络中的重要程度; N_e 为待择优选择的节点总数。

作战网络的局域特性与实体间的地域属性和编制关系密切相关, 因此, 本文采用如下方式建立局域世界: 随机选择一个指控节点, 根据其他指控节点与其之间的通信成本关系, 按照值的大小依次选择 M 个指控节点构成局域世界。

2) 以概率 p_2 按照规则 2 从网络中删除 m_2 个节点. 以概率 p_b 、 p_c 和 $1 - p_b - p_c$ 分别删除指控、传感器和打击节点, 删除节点类型确定后, 在该类型所有节点中依概率值大小选择被删除节点, 择优演化模型按照反择优概率选择, 如式(4)所示, 随机演化模型按式(2)选择。

$$p = \frac{1/(s_i + 1)}{\sum [1/(s_i + 1)]} \quad (4)$$

3) 以概率 p_3 按规则 3 增加 m_3 条新的连接边. 分别以概率 p_d 和 $1 - p_d$ 新增指控节点之间及传感器节点之间的边, 依概率值大小采用双向择优的方式选择边的两端节点, 其中择优演化模型概率计算如(3)所示; 随机演化模型如式(2)所示. 所有新增的边统一赋予权值 $w_{ij} = 0.5$ 。

4) 以概率 $1 - p_1 - p_2 - p_3$ 按照规则 4 从网络中删除 m_4 条边. 分别以概率 p_d 和 $1 - p_d$ 删除指控节点之间和传感器节点之间的边, 择优演化模型按照反择优概率选择删除边, 如式(5)所示, 随机演化模型按式(6)选择删除边。

$$\begin{cases} p = (1/b_e) / (\sum_{e \in E_t} (1/b_e)), \\ b_e = (\sum_{i \neq j \in V} g_{ij}(e) / g_{ij}) / N(N-1). \end{cases} \quad (5)$$

$$p = 1/N_e. \quad (6)$$

式中: b_e 为作战网络邻接矩阵的归一化边介数^[27], 反映了该边在网络中的重要程度; $g_{ij}(e)$ 表示节点 i 和 j 之间最短路径经过边 e 的数目; g_{ij} 表示节点 i 和 j 之间最短路径的总数; N_e 为待选择边的总数。

Step 3 计算演化后得到的作战网络协同增益性能指标, 当仿真步长等于设定值, 动态演化过程结束, 否则返回 Step 2。

3 仿真实例分析

3.1 仿真环境设置

假设初始作战网络为某作战集团在作战准备阶段的组织结构, 如图 3 所示, 其中包括 4 个指控实体, 8 个传感器实体和 9 个打击实体, 实体之间的信

息交互关系即静态的隶属编制关系. 指控节点形状大小反映了节点能力的异质性, 连接上的数值反映了作战实体之间的关系紧密程度, 同时初始化属性矩阵 A^r 、 A^d . 出于保密原因, 上述参数取值不反映现实情况. 其他仿真参数: $p_1 = 0.25$, $p_2 = 0.05$, $p_3 = 0.60$, $m_1 = m_e = 2$, $m_2 = 3$, $m_3 = 1$, $m_4 = 2$, $a = 2$, $b = 1$, $c = 3$, $p_a = 0.4$, $p_b = p_c = 1/3$, $p_d = 0.5$, $\mu = 0.2$, $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3 = 1/3$, $\lambda = [0.5, 0.2, 0.2, 0.2]$, $M = 4$ 。

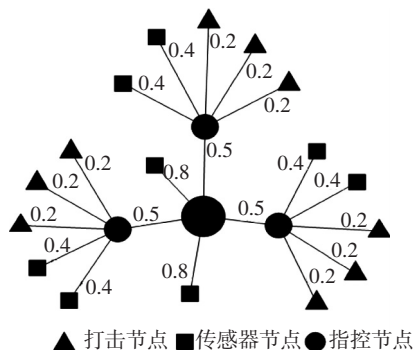


图 3 初始作战网络结构

3.2 实验结果分析

在 MATLAB 环境中仿真分析作战网络的动态演化过程, 仿真演化步长设定为 100, 为避免单次演化存在的随机性, 独立运行 10 次, 取各指标平均值. 图 4~6 分别是作战网络结构性能指标在不同动态演化模型下随网络演化的变化规律, 其中仿真步长为 0 时对应初始作战网络结构, 虽然其网络成本最小, 但其协同增益较差, 说明这样的网络结构不利于作战实体协作与共享, 有待进一步优化. 图 4 中网络收益函数值 $B(G)$ 随网络结构动态演化有增有减, 总体趋势逐渐增大并趋于平稳, 反映了节点或边的增加或减少对协同增益的影响, 说明网络动态演化增加了作战实体之间的协同与共享程度, 使得传感器与打击节点之间的信息交互关系趋于紧密, 信息交互距离变小; 图 5 中连接成本函数值 $C(G)$ 随网络结构动态演化有增有减, 总体趋势逐渐增加, 即网络演化在带来收益的同时也提高了网络建设成本. 两种模型的曲线基本一致, 说明连接成本与网络结构无关, 仅与连接数量的增加或减少相关; 图 6 中协同增益函数值 $Z(G)$ 随网络结构动态演化有增有减, 说明协同增益与演化方式密切相关, 与理论分析的结论相一致. 通过对比分析图 4、图 5、图 6 中不同动态演化模型对作战网络结构性能指标的影响, 在提升网络结构性能方面择优演化模型相比随机演化模型更具优势, 如择优演化模型下最优协同增益分别比随机演化模型提高 111%, 表明择优演化策略能够有效增强作战网络的协同效应, 提升整体作战效能, 从而验证了择优演化模型的合理性和有效性。

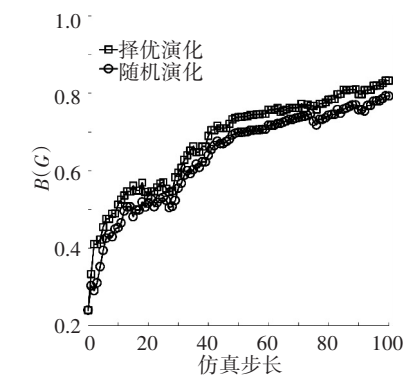


图 4 $B(G)$ 随网络动态演化变化规律

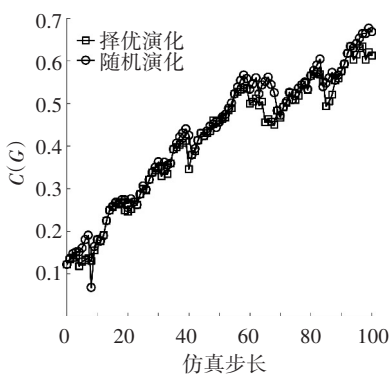


图 5 $C(G)$ 随网络动态演化变化规律

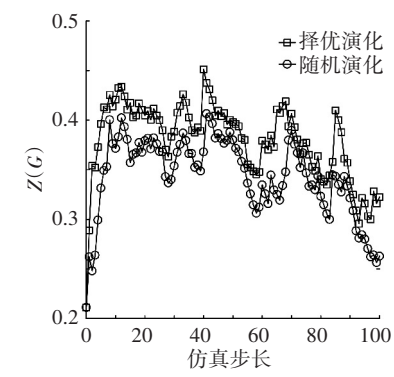


图 6 $Z(G)$ 随网络动态演化变化规律

为揭示微观影响因素与作战网络动态演化宏观特性之间的本质关联,下面对择优演化模型中的主要演化参数进行灵敏度仿真分析.图 7 显示了网络收益 $B(G)$ 随演化参数 p_a 的变化规律, p_a 反映了作战实体加入网络时与已有指控实体之间的连接现实特性,其值从 0 ~ 1 的变化过程,对应于局域连接为主并逐渐弱化,到全局连接得到加强、局域和全局特性同时发挥作用,直至全局连接为主而不存在局域连接.如图所示, $B(G)$ 逐渐减小, $C(G)$ 受到的影响较小,表明各类新增作战实体与指控实体采用局域择优连接的方式收益更为明显.

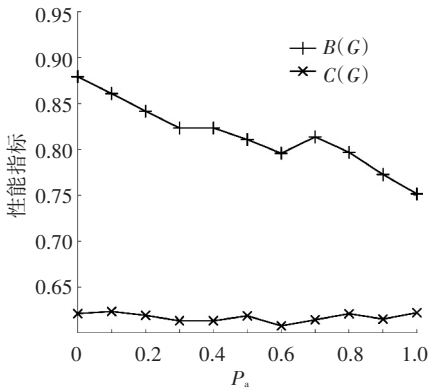


图 7 p_a 对作战网络效能指标的影响

表 1 为其他演化参数固定不变的情况下,网络结构性能指标与演化参数 m_e 之间的变化规律. m_e 刻画了新增作战实体与已有实体间的连接特性,在一定程度上反映了新加入作战实体的重要性(拥有的作战实体连接数量).随着 m_e 的增加,带来的收益 $B(G)$ 逐渐增大,连接成本 $C(G)$ 变化程度不大,协同增益 $Z(G)$ 呈现出先增后减的趋势,结果表明取值适当的 m_e 能够带来作战网络的最佳协同增益.同理, m_3 的增加和 m_4 的减小对协同增益影响类似.

表 1 m_e 对网络动态演化的影响

网络结构性能指标	$m_e = 2$	$m_e = 3$	$m_e = 4$	$m_e = 5$
$B(G)$	0.823 1	0.844 5	0.863 2	0.878 7
$C(G)$	0.613 4	0.612 4	0.613 8	0.625 9
$Z(G)$	0.318 2	0.327 3	0.333 4	0.328 7

表 2 为其他演化参数固定不变的情况下,网络结构性能指标与演化参数 M 之间的变化规律. M 反映了指控实体形成的社团大小. $B(G)$ 、 $C(G)$ 和 $Z(G)$ 变化幅度不大,说明参数 M 对协同增益影响有限.

表 2 M 对网络动态演化的影响

网络结构性能指标	$M = 3$	$M = 4$	$M = 5$	$M = 6$
$B(G)$	0.823 1	0.817 8	0.821 3	0.830 2
$C(G)$	0.613 4	0.617 6	0.610 3	0.611 8
$Z(G)$	0.318 2	0.312 6	0.320 1	0.322 3

4 结 论

- 1)通过分析由信息化战场复杂性和动态性驱动的网络化作战组织结构,并以传感器、指控和打击等作战实体为节点,实体之间的信息交互关系为边,在综合考虑节点和边异质性的情况下,通过引入作战实体间的任务相关和通信成本等物理属性,构建了基于多维加权的作战网络模型;
- 2)通过对比分析不同作战网络结构所具有的作战效能,从作战网络涌现出的协同效应角度出发,将复杂网络统计特征量与作战网络现实特性相结合,并综合考虑网络收益和连接成本,定义了协同增益特征量,仿真分析了作战网络结构与整体作战效能之间的内在关联;
- 3)以提高协同增益特征量作为网络演化的动力,采用混合演化机制刻画作战网络演化过程中的复杂性和多样性,设计了择优演化模型,并与随机演化模型进行对比仿真分析,验证了该模型的有效性.除此之外,还仿真分析了诸多外部微观因素对作战网络协同增益性能指标的影响规律,有助于进一步理解掌握作战组织结构的宏观统计特性及动力学性质,为现实作战组织的设计与优化提供理论参考.

作战网络动态演化是一个复杂的动态过程,本文初步构建了作战网络动态演化模型,网络演化过程中仍有一些现实特性未考虑,如:新边加入会引起

网络权重分布的变化等等.在下一步的研究中,将逐步完善作战网络动态演化模型,更加真实地刻画其现实特性.

参考文献

- [1] WATTS D J, STROGATZ S H. Collective dynamics of small-world networks [J]. Nature, 1998, 393 (6684): 440-442.
- [2] BARABASI A L, ALBERT R. Emergence of scaling in random networks[J].Science, 1999,286 (5439): 509-512.
- [3] 胡晓峰. 战争复杂网络研究概述[J]. 复杂系统与复杂性科学, 2010,7(2/3):24-28.
- [4] DEKKER A H. C4ISR architectures, social network analysis and the FINC methodology: An experiment in military organizational structure [R]. DSTO Electronics and Surveillance Research Laboratory, DSTO-GD-0313, 2002:13-17.
- [5] DEKLKER A H. Network topology and military performance [C]//2005 International Congress on Modeling and Simulation, Modeling and Simulation Society of Australia and New Zealand. Australia: MODSIM, 2005: 2174-2180.
- [6] KALLONIATIS A, MACLEOD I. Formalization and agility in military headquarters planning[J]. The International C2 Journal, 2010, 4(1):11-19.
- [7] ALBERTS D S. Agility, focus and convergence: adapting C2 to the 21st century[J]. The International C2 Journal, 2007,1(1): 1-30.
- [8] 陶九阳,张东戈,赵普山. 适应性指挥控制关系网的度分布[J]. 系统工程理论与实践,2012,32(8): 1808-1813.
- [9] 田旭光,朱元昌,罗坤,等. 基于复杂网络理论的指挥控制系统自适应重构模型[J]. 系统工程与电子技术, 2013, 35(1):91-96.
- [10] WILLIAMS A P. Implications of operationalizing a comprehensive approach: defining what inter-agency interoperability really means [J]. The International C2 Journal, 2010,4(1): 42-53.
- [11] DELLER S, BELL M I, BOWLING S R, et al. Applying the information age combat model: quantitative analysis of network centric operations [J]. The International C2 Journal, 2009, 3(1): 8-18.
- [12] QU Z H. Enhancement of scale-free network attack tolerance[J]. China Physics B, 2010, 19(11): 85-89.
- [13] CARES J R. An information age combat model[R]. Rhode Island Newport: Alidade Incorporated, 2005: 3-8.
- [14] 金伟新,肖田元. 作战体系复杂网络研究[J]. 复杂系统与复杂性科学, 2009, 6(4): 12-25.
- [15] 王步云,赵晓哲,王军. 水面舰艇编队反舰作战中作战网络结构的优化[J]. 系统工程理论与实践, 2013,33(9):2354-2361.
- [16] 温睿,陈小青,马亚平,等. 基于边权拓扑的作战体系演化生长模型[J]. 系统工程学报, 2011, 26(2): 282-290.
- [17] 温睿,马亚平,王峥. 一种作战体系动态演化模型[J]. 系统仿真学报, 2011, 23(7): 1315-1322.
- [18] 阳东升,张维明,刘忠,等. 战场 C2 组织的描述与设计 [J]. 系统工程理论与实践,2005, 25(5):83-88.
- [19] 徐玉国,邱静,刘冠军. 基于多元加权网络的装备维修保障组织结构动态演化模型[J]. 兵工学报, 2012,33(4):488-496.
- [20] WALTER L, PERRY W L, MOFFAT J. Information sharing among military headquarters: the effects on decision-making[R]. Santa Monica: RAND Corporation, MG-226, 2002:41-55.
- [21] 卜先锦. 军事组织协同的建模与分析[M]. 北京:国防工业出版社,2009: 156-176.
- [22] ATKISON S R, MOFFAT J. The agile organization: from informal networks to complex effects and agility [R]. Washington, DC:US Department of Defense, Command and Control Research Program,2007:137-155.
- [23] 白亮,肖延东,侯绿林,等. 基于控制环的作战网络对抗模型[J]. 国防科技大学学报, 2013,35(3): 42-47.
- [24] 田柳,狄增如,姚虹. 权重分布对加权网络效率的影响[J]. 物理学报, 2011,60(2): 1-6.
- [25] 周漩,杨帆,张凤鸣,等. 复杂网络系统拓扑连接优化控制方法[J]. 物理学报, 2013,62 (15):1-7.
- [26] ALBERT R, BARABASI A L. Statistical mechanics of complex network [J]. Reviews of Modern Physics, 2002, 74:47-97.
- [27] 田庆飞,赵淑芝,曹阳. 基于边介数的大城市公交网络优化模型[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2012, 44(10): 144-148.

(编辑 张 宏)