

基于有向加权复杂网络的新一代指挥信息系统结构表征方法

王珩¹, 易侃¹, 郭陶², 张金锋¹, 雷鸣¹, 邓克波¹, 毛少杰¹

(1. 信息系统工程重点实验室, 江苏南京, 210007; 2. 南京理工大学计算机科学与工程学院, 江苏南京, 210094)

摘要: 针对网络中心化条件下新一代指挥信息系统结构如何建模表征的问题, 基于复杂网络理论, 建立了新一代指挥信息系统结构的有向加权复杂网络模型, 定义了网络模型的特征参量, 并通过示例分析, 从灵活、高效和鲁棒三个角度有效表征了指挥信息系统结构的特性。

关键词: 指挥信息系统; 系统结构; 复杂网络; 表征方法

0 引言

网络中心战^[1]已成为 21 世纪军事变革的发展目标, 交战双方体系作战能力的较量要求指挥信息系统^[2]能作为纽带和支撑, 融合各种作战力量、作战单元和作战要素, 将实时感知、高效指控、精确打击、快速机动、全面防护、综合保障集成为一个结构合理、协调运行的整体, 并形成具有倍增效应的体系化作战能力, 这也使得新一代指挥信息系统^[3]需要具备适应上述要求的系统结构, 以支持指挥信息系统的灵活部署和动态调整。从结构特性角度, 可以归纳为需要具备灵活、高效和鲁棒的系统结构。如何科学生成满足灵活、高效和鲁棒要求的合理系统结构是新一代指挥信息系统建设和发展过程中的一个崭新而又复杂的问题。与以往指挥信息系统相比, 新一代指挥信息系统结构的内涵发生了巨大变化。系统的组成要素及其关系在网络中心化条件下的内涵扩大了, 具备多粒度、多属性、多变等特点, 而且更加复杂, 且相互影响。因此, 在网络中心化环境下, 如何对指挥信息系统结构的组成要素、组成要素的属性和关系、系统结构呈现的特性等进行建模表征, 从而生成系统组成要素、要素间关系, 形成合理的、符合需求的系统结构, 成为系统结构研究领域的首要问题和难点。本文建立了新一代指挥信息系统结构的复杂网络模型, 通过定义网络模型的七个特征参量, 从灵活、高效和鲁棒三个角度有效表征了指挥信息系统结构的特性。

1 定义及相关工作

定义 1: 新一代指挥信息系统 指综合运用先进的计算机和网络等信息技术, 采用“网络中心化”体制, 适应体系作战能力要求, 基于军事信息基础设施^[4]构建、具有指挥控制、情报侦察监视、战场环境信息保障等功能的、多级多类多域的指挥信息系统。

定义 2: 新一代指挥信息系统结构 指新一代指挥信息系统各组成要素及要素之间的相互关系。需要说明的是: 对于不同阶段的指挥信息系统而言, 其组成要素的内涵由于作战应用需求和技术发展的不同而不尽相同, 组成要素的种类、范畴、内涵都在不断变化。对于新一代指挥信息系统而言, 其组成要素称为系统单元, 它指具有一定职责权限、完成特定功能、物理上独立存在的指挥信息系统组成要素。系统单元之间的关系主要包括: 信息关系、通信关系和组织关系等。

定义 3: 新一代指挥信息系统结构特性 新一代指挥信息系统结构特性包括灵活、高效和鲁棒, 其中, 灵活是对系统结构适应外部环境变化的能力度量; 高效是对系统结构运行效率与费用的综合度量; 鲁棒是对系统结构不确定情况下仍保持原有功能的能力的一种度量。

复杂网络^[5,6]理论作为目前研究复杂大系统的有效途径之一, 在国内外得到了广泛深入的发展。它将复杂大系统简化成一个由节点和边组成的“网络”, 能够从节点、边、及其演化的角度研究体系的拓扑结构及其变化, 因此复杂网络理论在军事领域得到了较大发展, 特别是针对目前网络中心化复杂环境, 比如在指挥信息系统建模与仿真、指挥控制组织结构分析、指挥信息系统节点重要性分析等方面已有不少成果。比

较有代表性的工作包括:美军 Jeffrey R. Cares 的信息时代战斗模型^[7]。该文献将作战网络节点分为传感器、决策者、响应者和目标,运用复杂网络特性参数分析作战网络的效能;而且提出了网络化特性的度量模型、网络自适应性的演进方式,以及作战网络的统计方法,为作战网络结构复杂性的度量奠定了基础。然而该方法只是宏观描述了作战网络,阐述的是一种基础理论,缺乏微观行为的描述;且描述对象是作战网络,与指挥信息系统结构还有很大差别,无法直接用于指挥信息系统结构建模表征和度量分析。澳大利亚国防科技中心的 Anthony Dekker 在 2002 年对传统的社会网络分析法进行了拓展^[8],提出了一种用于 C4ISR 系统结构分析的方法——FINC(兵力、情报、网络和指挥控制)方法。FINC 模型基于计算数学组织理论的思想,将社会网络分析方法引入指挥控制关系研究领域,是描述指挥控制系统的一种模型。FINC 不仅考虑系统的自身结构,而且关注系统与环境的交互作用,提供了一种指挥信息系统建模和分析的有效手段。通过 FINC 方法对指挥信息系统系统建模,可以对系统进行延迟分析、中心分析和情报分析。然而该方法主要是一种线性的分析方法,而作战系统内部单元之间的相互作用是复杂的,战场的态势也是不断变化的,FINC 方法无法描述作战系统的涌现行为。此外,该方法针对的是传统平台中心化 C4ISR 系统,对于面向网络中心化发展的新一代指挥信息系统结构而言还不适用。朱涛等人^[9]基于复杂网络理论和网络中心战思想,通过将指挥控制系统中的实体和关系转换成网络拓扑的形式,建立起指挥控制系统的网络拓扑模型。但他没有给出具体的特征参量,且基于无向无权的复杂网络模型,难以真实和客观地反映了指挥信息系统特点。

2 新一代指挥信息系统结构的复杂网络模型

运用图论理论,从拓扑角度,本文将新一代指挥信息系统的系统单元抽象为图论中的节点(Vertex),将系统单元之间的各类信息关系抽象为图论中的边(Edge),得到新一代指挥信息系统结构的网络模型。考虑到指挥信息系统单元之间信息交互关系的有向性、流量区分等特点,采用有向加权网络来表征新一代指挥信息系统结构。另一方面,由于新一代指挥信息系统是一个庞大的复杂系统^[10],从拓扑角度看,其结构是一个庞大的复杂网络。基于以上两点,本文建立了新一代指挥信息系统结构的有向加权复杂网络模型。

定义 4: 新一代指挥信息系统结构的复杂网络模型 用简单有向加权连通图 $G=(V,E)$ 表示新一代指挥信息系统结构,其中,图中的节点集 $V=\{v_1,v_2,\dots,v_n\}$ 代表系统单元的集合,如传感探测单元、情报处理单元、决策控制单元和响应执行单元等; $n=|V|$ 表示系统单元的总数。图中的边(连接)集 $E=\{e_1,e_2,\dots,e_m\}$ 代表系统单元之间各类信息交互关系,如信息保障、协同、指挥和备份接替等, $m=|E|$ 表示系统单元之间信息交互关系的总数。 $\forall e_i \in E$, 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,\dots,ew_k) 表示对系统单元 v_i 和 v_j 之间信息交互关系的度量,边的权值的数量和代表的物理意义可以根据具体分析而定,增加边权值是对系统单元之间信息交互关系强度的差异的一种反映。例如: $\forall e=(v_i,v_j) \in E,v_i,v_j \in V$, 用正实数的权值 $delay(e)$ 表示系统单元 v_i 和 v_j 之间信息传输的时延大小;用正实数的权值 $content(e)$ 表示系统单元 v_i 和 v_j 之间信息量大小。考虑到指挥信息系统系统单元的类型区别和能力大小,对于每个系统单元 $v_i \in V$, 定义一组节点的权值 (vw_1,vw_2,\dots,vw_l) 表示对系统单元 v_i 属性和能力的度量。例如: $\forall v_i \in V$, 用正实数的权值 $delay(v_i)$ 表示系统单元 v_i 信息处理的时延大小;用正实数权值 $prec(v_i)$ 表示系统单元 v_i 信息处理的精度等等。

3 新一代指挥信息系统结构特性的复杂网络特征参量

灵活性、高效性和鲁棒性是新一代指挥信息系统结构应具备的基本特性,在上节给出的网络模型基础上,本文运用复杂网络特征参量描述方法,通过定义如下网络模型的若干参数,从灵活、高效和鲁棒三个角度表征新一代指挥信息系统结构的基本特性。

定义 5 系统结构度分布。 系统结构的度分布是指系统结构中系统单元度所服从的分布规律,包括系统单元入度分布和系统单元出度分布,分别用分布函数 $P_{in}(k)$ 和 $P_{out}(k)$ 来表示,即分别表示系统结构中任意取一个

系统单元, 其入度和出度刚好等于 k 的概率, 反映了系统单元的连接情况; 其中入度是指系统结构中从其它系统单元指向该系统单元的信息交互关系的数目, 出度是指系统结构中从该系统单元指向其它系统单元的信息交互关系的数目, 对于系统节点 v_i 而言, 其入度 $k_i^{in} = \sum_{j=1}^n a_{ji}$, 出度 $k_i^{out} = \sum_{j=1}^n a_{ij}$, a_{ij} 是系统结构邻接矩阵的元素。

定义 6 系统结构聚集系数。系统结构聚集系数 $C(G)$ 定义为系统结构入聚集系数和系统结构出聚集系数之和, 反映了系统结构集团化程度, 如式 (1) 所示:

$$C(G) = C_{in}(G) + C_{out}(G) = \frac{1}{n} \left(\sum_{\forall v_i \in V} C_i^{out} + \sum_{\forall v_i \in V} C_i^{in} \right) \quad (1)$$

其中, $C_{in}(G)$ 和 $C_{out}(G)$ 分别表示系统结构的入聚集系数和出聚集系数, 即所有系统单元入聚集系数的平均值和所有系统单元出聚集系数的平均值, 如式 (2) 和式 (3) 所示:

$$C_{in}(G) = \frac{1}{n} \sum_{\forall v_i \in V} C_i^{in} = \frac{1}{n} \sum_{\forall v_i \in V} \frac{E_i^{in}}{k_i^{in} \times (k_i^{in} - 1)} \quad (2)$$

$$C_{out}(G) = \frac{1}{n} \sum_{\forall v_i \in V} C_i^{out} = \frac{1}{n} \sum_{\forall v_i \in V} \frac{E_i^{out}}{k_i^{out} \times (k_i^{out} - 1)} \quad (3)$$

其中, C_i^{in} 和 C_i^{out} 分别表示系统单元 v_i 的入聚集系数和出聚集系数; 系统单元入聚集系数定义为系统结构中连向该系统单元即以该系统单元为终点的所有系统单元间聚集的程度, 是这些系统单元之间边的数目占可能的最大边的数目的比例, 如式 (4) 所示; 系统单元出聚集系数定义为系统结构中该系统单元连出即以该系统单元为起点的所有系统单元间聚集的程度, 是这些系统单元之间边的数目占可能的最大边的数目的比例, 如式 (5) 所示:

$$C_i^{in} = \frac{E_i^{in}}{k_i^{in} \times (k_i^{in} - 1)} \quad (4)$$

$$C_i^{out} = \frac{E_i^{out}}{k_i^{out} \times (k_i^{out} - 1)} \quad (5)$$

其中, E_i^{in} 和 E_i^{out} 为这些系统单元之间实际存在的边数, 由于系统单元 v_i 的入度和出度分别为 k_i^{in} 和 k_i^{out} , 则连向该系统单元的 k_i^{in} 个系统单元之间可能存在的最大边数为 $k_i^{in} \times (k_i^{in} - 1)$ 、该系统单元连出的 k_i^{out} 个系统单元之间可能存在的最大边数为 $k_i^{out} \times (k_i^{out} - 1)$;

定义 7 系统结构平均路径长度。系统结构平均路径长度 $L(G)$ 定义为系统中任意两个系统单元之间的最短距离的平均值, 这里的最短距离可以是最短跳数即经历的边上的权值为 1, 也可以是最短时延距离即经历的边上的权值为信息交互的时延大小, 平均路径长度反映了系统的效率, 是衡量高效性的重要指标, 如式 (6) 所示:

$$L(G) = \frac{1}{n(n-1)} \sum_{\forall v_i, v_j \in V, i \neq j} l_{ij} \quad (6)$$

$$l_{ij} = \sum_{\forall v_i, v_j \in V, i \neq j} w_x(sp(v_i, v_j)) = \sum_{e \in sp(v_i, v_j)} w_x(e), \begin{cases} w_x = \text{delay}(\quad), & \text{如果是最短时延距离} \\ w_x = 1, & \text{如果是最短跳数} \end{cases} \quad (7)$$

其中, l_{ij} 表示系统单元 v_i 和 v_j 之间的最短跳数或最小时延距离, 定义为两个系统单元之间的最短路径上跳数或时延的总和, $sp(v_i, v_j)$ 代表系统单元 v_i 和 v_j 之间的最短路径;

定义 8 系统结构直径。 系统结构直径 $D(G)$ 定义为系统结构中所有的最短距离中的最大值, 可以有效反映系统结构整体连通性能和效能, 当最短距离采用最小时延距离, 可有效反映系统结构的整体信息效能, 如式 (8) 所示:

$$D(G) = \max_{\forall v_i, v_j \in V, i \neq j} l_{ij} \quad (8)$$

定义 9 系统结构介数分布。 系统结构介数分布是指系统结构中系统单元点介数所服从的分布规律, 其中, 系统单元点介数是指系统结构中所有最短路径中经过该系统单元的数量比例, 系统单元的点介数体现的是系统结构中某个系统单元在整个信息传递过程中的重要程度, 反映了该系统单元在整个系统结构中的作用和影响力, 如式 (9) 所示:

$$BC_i = \sum_{\forall v_j, v_k \in V, j \neq k} \frac{\sigma_{jk}(i)}{\sigma_{jk}} \quad (9)$$

其中, BC_i 表示系统单元 v_i 的介数, $\sigma_{jk}(i)$ 表示系统单元 v_j 和 v_k 之间最短路径经过系统单元 v_i 的数目, σ_{jk} 表示系统单元 v_j 和 v_k 之间最短路径的总数;

定义 10 系统结构抗毁度。 系统结构抗毁度 $Inv(G)$ 用于描述系统结构中的系统单元及其关系发生失效或遭受攻击条件下, 系统结构保持连通的能力; 系统结构抗毁度值越大, 表示系统的连接程度越好, 即鲁棒性越好^[11], 如式 (10) 所示:

$$Inv(G) = \frac{1}{\omega \sum_{i=1}^{\omega} \left(\frac{N_i}{n} \times L_i \right)} \quad (10)$$

其中, ω 为系统结构包含的连通分支数, N_i 为第 i 个连通分支的节点数目, L_i 表示第 i 个连通分支的平均路径长度;

定义 11 系统结构代价。 系统结构代价 $cost(G)$ 可以通过系统结构中所有信息交互关系的信息量总和来间接反映, 如式 (11) 所示:

$$cost(G) = \sum_{\forall e \in E} \text{content}(e) \quad (11)$$

如果两个系统单元之间交互的信息量越大, 说明连接这两个系统单元所需的通信网络链路的带宽越大, 成本越大, 也反映这两个系统单元连接的代价越大; 系统结构代价可有效反映系统连接总的开销和成本。

通过对上述特征参量物理意义的分析, 结合新一代系统结构灵活、鲁棒、高效等基本特性概念内涵的分析, 建立了系统基本特性同这些参数的对应关系, 如下图所示。

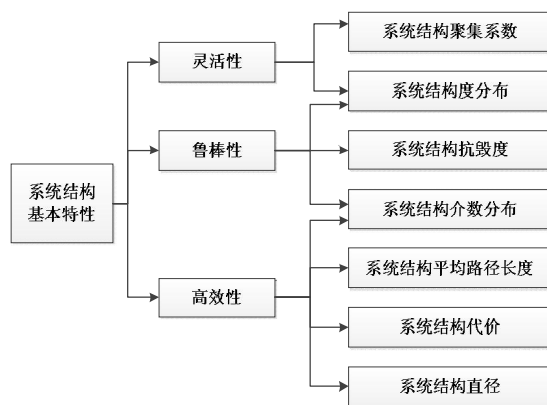


图7 复杂网络模型特征参量与系统结构基本特性的对应关系

4 系统结构示例分析

为了说明对系统结构特性的表征，本文给出了几个指挥信息系统结构示例，其中，示例 1 是一个平台为中心的树型指挥信息系统，其余三个示例均代表了新一代指挥信息系统。首先建立了系统结构加权有向复杂网络模型，利用自研的系统结构复杂网络分析工具生成系统结构，如下图所示。在此基础上，选取了其中的若干参数进行分析，分析的结果如表 1 所示。

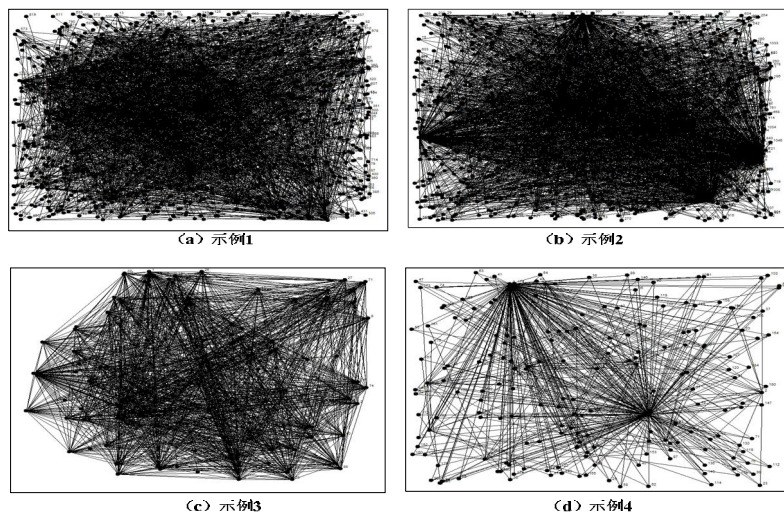


图8 示例指挥信息系统结构复杂网络模型

表 1 指挥信息系统结构部分复杂网络特征参量分析

系统结构	节点数	边数	聚集系数	平均路径长度	直径	介数分布
示例 1	1163	2933	0.3189	4.9731	8	578676、164732、2724、 25069、0
示例 2	1049	3278	0.9601	2.7376	4	411864、221617、16210、 100、0
示例 3	204	2868	0.6774	2.3193	2	1772、12、0
示例 4	194	631	0.9458	1.9662	2	8868、35、0

从分析结果可以看出：(1) 与示例 1 的树形平台中心化指挥信息系统相比，后三个新一代指挥信息系统具有较小的平均路径长度和网络直径，较高的聚集系数，呈现出较好的结果，与事实相符；(2) 指挥信息系统的一些重要节点，如组网中心、级别较高的指挥所等，具有较高的介数，连接数很大，是关键节点，

容易受到攻击，需要加强保护。

5 结束语

通过分析网络中心化条件下新一代指挥信息系统特点，建立了新一代指挥信息系统结构的有向加权复杂网络模型，并给出了表征系统结构灵活、高效和鲁棒等特性的七个特征参量。与现有方法相比，本文提出的方法充分考虑指挥信息系统交互有向性、流量区分特点，能更加真实反映新一代指挥信息系统结构属性和特点，对于探索新一代指挥信息系统结构的客观规律、指导系统构建与研制具有重要意义。

参考文献：

- [1]. Alberts, D. S., Gartska, J. J., and Stein, F. P. Network Centric Warfare: Developing and Leveraging Information Superiority[M]. 2nd Edition (Revised). Washington, DC: CCRP, 1999.
- [2]. 曹雷等. 指挥信息系统[M]. 北京：国防工业出版社，2012
- [3]. 蓝羽石. 对网络为中心指挥信息系统的认识[J]. 指挥信息系统与技术, 2010, 1(1): 1-4.
- [4]. 蓝羽石, 丁峰, 王珩, 等. 信息时代的军事信息基础设施[M]. 北京：军事科学出版社，2011.
- [5]. Ted G. Lewis 著, 陈向阳, 巨修炼 等译. 网络科学原理与应用[M]. 北京：机械工业出版社, 2011.
- [6]. 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.
- [7]. Jefferey R. Cares, Distributed Networked Operations, —The Foundation of Network Centric Warfare[M]. Newport: Alidade Press, 2005.
- [8]. Anthony Dekker, Applying Social Network Analysis Concepts to Military C4ISR Architectures[J], CONNECTIONS, 2002, 24(3): 99-103.
- [9]. 朱涛, 常国岑, 郭戎潇等. 指挥控制系统复杂网络特性研究[J]. 微计算机信息. 2008,24(7): 34-35.
- [10]. 毛少杰, 邓克波, 王珩, 易侃. 网络化和服务化 C4ISR 系统复杂性[J]. 指挥信息系统与技术, 2012,3(4):1-6.
- [11]. 吴俊, 谭跃进. 复杂网络抗毁性测度研究[J]. 系统工程学报 2005,20(2): 128-131