

doi: 10.7690/bgzd.2021.01.010

基于复杂网络理论的网络化作战体系结构效能评估

何 榕¹, 王大旌², 崔帅豪³

(1. 航天工程大学航天指挥学院, 北京 101416; 2. 空军指挥学院合同战术系, 北京 100097;
3. 航天工程大学研究生院, 北京 101416)

摘要: 为针对性地优化和改进网络化作战体系, 对基于复杂网络理论的网络化作战体系结构效能进行评估分析。构建网络化作战体系结构, 分析其内涵及特征, 对网络化作战体系进行建模, 借助复杂网络参量对网络化作战体系结构之间的关系构建 4 类符合网络化作战体系的结构效能指标, 从复杂网络的角度将其与传统作战体系效能进行对比分析, 并提出优化改进的方法和策略。结果表明: 网络化作战体系结构能实现网络化的扁平结构, 作战体系的资源共享与协同程度越高, 反馈优化能力越强, 明显优于传统结构。

关键词: 复杂网络; 网络化作战体系; 结构效能

中图分类号: E919 **文献标志码:** A

Structure Effectiveness Evaluation of Network Combat System Based on Complex Network Theory

He Rong¹, Wang Dajing², Cui Shuaihao³

(1. School of Space Command, Space Engineering University, Beijing 101416, China;
2. Contract Tactical Department, Air Force Command College, Beijing 100097, China;
3. College of Graduate, Space Engineering University, Beijing 101416, China)

Abstract: In order to optimize and improve network combat system, evaluates and analyzes the structure effectiveness of network combat system based on the theory and method of complex network. Builds the network combat system and analyzes its connotation and characteristics and then models it. Construct 4 structure effectiveness indexes accordance with the relationship between the complex network statistical parameters and the structure of the network combat system. From the perspective of complex network the paper also analyzes its structure effectiveness comparing with traditional combat system and puts forward the methods and strategies to optimize and improve its structure. The results show that network combat system structure can realize the networked flat structure, they also show the higher degree of resource sharing and coordination, the stronger the ability of feedback optimization and network combat system structure is obviously better than the traditional structure.

Keywords: complex network; network combat system; structure effectiveness

0 引言

网络化作战体系结构和任务功能必须相互适应、相互促进^[1], 因此, 结构效能对于网络化作战体系优化和改进极为重要。采用复杂网络的理论和方法来对结构进行研究, 通过其统计参量平均最短路径, 聚集系数以及度对网络分析具有普遍性。为具备更强的针对性, 笔者借助复杂网络的统计参量对应网络化作战体系结构功能之间的关系, 通过构建针对性较强的 4 类符合网络化作战体系结构评估的网络效能指标, 对其网络特性开展深入分析研究。

1 网络化作战体系结构内涵及特征

1.1 网络化作战体系结构内涵

如图 1 所示, 网络化作战体系结构由多个(种)

侦察预警系统、打击武器系统、不同级别作战指挥机构节点通过分布式网络连接起来, 对目标实施打击作战过程中发挥指挥、作战以及对整体资源的管控功能一体化、灵活高效的体系结构。

1.2 网络化作战体系结构特征

网络化作战体系作为一个复杂系统, 通过构成要素及要素之间的相互作用, 实现其在体系作战过程中指挥、作战以及对整体资源管控的功能。将复杂网络的理论和方法引入网络化作战体系结构研究中, 使得网络化作战体系真正适应新形势新环境下的体系作战样式, 是必然选择和发展趋势。网络化作战体系结构与传统的作战系统结构不同, 有其独有的各种特征。

收稿日期: 2020-08-26; 修回日期: 2020-10-16

作者简介: 何 榕(1983—), 女, 江西人, 博士, 讲师, 从事作战模拟、建模仿真研究。E-mail: Buding1983@qq.com。

性、无尺度性、鲁棒性和脆弱性等。

2.2 基于复杂网络理论网络化作战体系结构建模

2.2.1 网络化作战体系复杂网络节点的抽象

网络化作战体系节点是指具有一定职责权限、完成特定功能、物理上独立存在的网络化作战体系的构成要素。由以上定义可知：1) 节点依附于指挥控制组织实体，履行组织赋予的相关使命任务，具有明确的职责和任务范围；2) 节点具有明确的功能，比如侦察预警、信息处理和指挥控制功能等；3) 节点是一个物理实体，不是一个逻辑的概念，有具体的物理位置和网络地址。

网络化作战体系的节点主要包括 4 类：情报获取(或传感器侦察探测)节点(observer, O)、情报处理节点(processor, P)、指挥控制节点(control, C)、打击武器系统节点(force, F)。将网络化作战体系构成元素抽象成网络中的节点(vertex)，节点集 $V=\{v_1, v_2, \dots, v_N\}$ 是网络化作战体系构成元素的集合； $n=|V|$ 表示网络化作战体系构成要素的总数。

2.2.2 网络化作战体系复杂网络边的抽象

网络化作战体系各个构成要素之间是通过各种关系建立联系和相互作用，共同形成具有作战、指挥和对整体资源统一管控功能，满足网络化体系作战任务需求的体系作战结构^[4]。笔者研究的网络化作战体系构成要素之间的相互关系主要是信息交互关系，代表了作战体系要素之间的连通性、流动的信息内容和业务处理上的先后顺序。

将网络化作战体系中构成元素之间的信息交互关系抽象成网络中的边(edge)，边(连接)集

$E=\{e_1, e_2, \dots, e_M\}$ 是构成元素之间的信息交互关系的集合； $m=|E|$ 表示构成元素之间的信息交互关系的总数。 $\forall e_i \in E$ ，在 v 中节点 (v_i, v_j) 与之对应，且 (v_i, v_j) 与 (v_j, v_i) 不是同一条边。各不同层级的节点之间以指挥关系、信息给予关系和反馈关系为主，而同地区同级之间的节点，往往以信息交互关系为主。在复杂网络所生成的邻接矩阵中，信息给予、单向指挥、反馈都用单向 1 来描述，而信息交互关系以对称的 1 来描述，无任何关系的两节点之间的连接用 0 来描述。

2.2.3 建立网络化作战体系结构复杂网络模型

基于上述对网络化作战体系节点和边的抽象，建立复杂网络模型 $G=(V, E)$ ，又因为网络化作战体系构成要素之间信息交互关系是有方向的，并且决策时延不同、流量承载不同还有权重 q_{ij} 之分；因此，建立网络化作战体系结构有向加权复杂网络模型 $G=(V, E, Q)$ 。

其中：网络化作战体系结构在纵向上是各级体系作战指挥机构以及与打击武器系统之间形成的一种按级别、分层次指挥与被指挥的关系；横向上是网络化体系作战过程中相邻或相关的作战单元之间为完成各自或共同的作战任务，直接构成不具有指挥权的非全面性指挥关系，主要是协同关系，体现了下级对上级的一种信息反馈机制的从下至上的反馈信息，以及各类侦察预警系统与各级网络化体系作战指挥机构和打击武器系统之间的信息关系。基于上述对节点、边的抽象以及对连接边权重的确定，网络化作战体系结构复杂网络模型如图 2 所示。

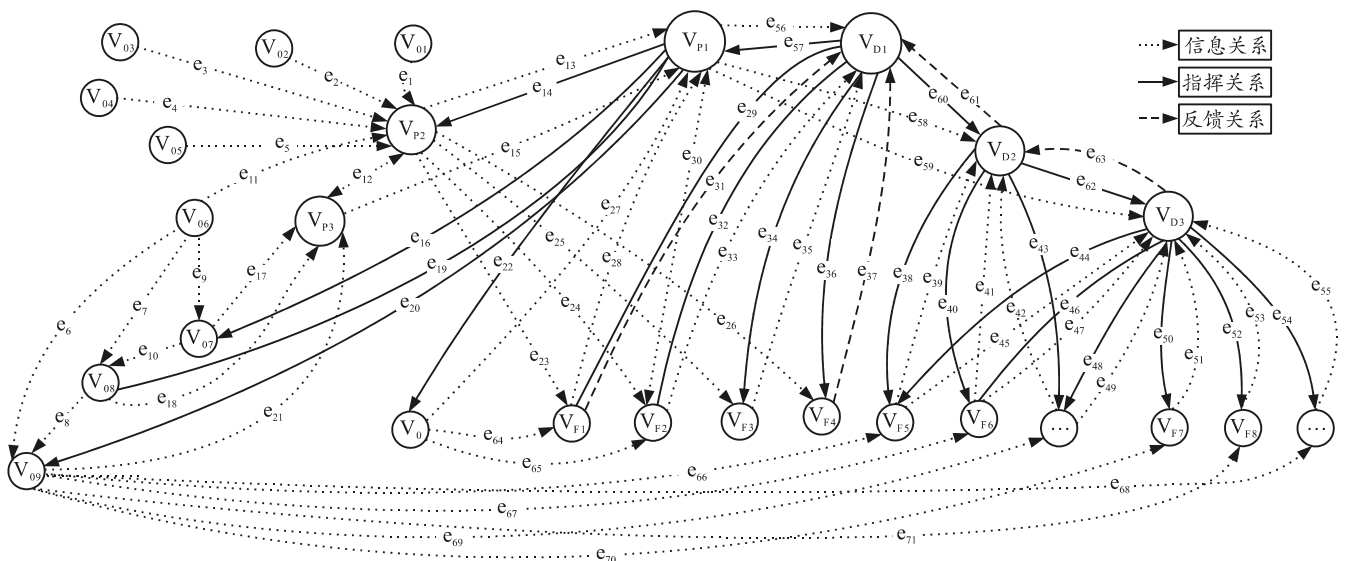


图 2 网络化作战体系结构复杂网络模型

3 网络化作战体系结构效能指标

借助复杂网络的统计参量对应网络化作战体系结构功能之间的关系，通过构造两者之间的函数关系，构建以下 4 类反映网络化作战体系的结构效能指标。其中，各结构效能指标是随网络化体系作战拦截时间 t 变化的函数。

3.1 平均路径长度与信息流转时效性函数

网络中 v_i 和 v_j 之间的距离 d_{ij} 定义为这 2 个节点之间的最短路径长度，网络直径定义为 $D = \max_{i,j} d_{ij}$ 。网络的平均最短路径长度 L 定义为任意 2 个节点之间最短距离的平均值，即

$$L = (1/N(N-1)) \sum_{i \neq j} d_{ij}(t) \quad (1)$$

式中 N 为节点数。平均距离反映了网络的效率。平均距离越大，网络中信息的流动、共享与同步越低效，作战网络为各作战单元提供迅速、准确、有效的共享态势感知越困难，造成作战单元间协同和同步将难以实现。信息流转时效性指标与平均路径长度之间的函数关系表达式为：

$$B = 1/(\mu L(t) + 1) \quad (2)$$

式中 μ 为信息流转时效性指标系数。拟采用信息流转时效性函数来研究网络化作战体系结构的时效性。

3.2 聚类系数与协同性函数

网络中 v_i 的聚类系数 C_i 定义为与该节点连接的 k_i 个节点之间实际存在的边数 E_i 与总的可能存在的边数 C_k^2 之间的比值，即

$$C_i(t) = 2E_i(t)/(k_i(k_i-1)) \quad (3)$$

整个网络的聚类系数 C 就是所有节点聚类系数的平均值，即该统计值 $C = (1/N) \sum_i C_i$ 反映网络的聚集程度。在网络化作战体系内，聚集系数表示各个节点相互协调的能力，以及网络重组时的重组能力。协同性函数与聚类系数之间的函数关系表达式为：

$$S(t) = e^{-1/\theta C(t)} \quad (4)$$

式中 θ 为协同效能指标系数。协同效能指标越高，说明网络化作战体系在网络化体系作战过程中各节点之间的交互能力越强，信息共享、任务协同的能力越强。

3.3 节点度与节点资源关联性函数

网络中 v_i 的度定义为它与其他节点信息交互关

系的数目。网络中所有节点度的平均值称为网络的节点平均度，记为 $\langle k \rangle$ 。数学上用分布函数 $p(k)$ 表示度分布，即 $p(k)$ 为任意选定网络中一个节点，其度为 k 的概率。在网络化作战体系中，不同节点的度表示能够直接与该节点相连接而进行信息传递的其他节点的数量。节点资源关联性指标与平均点强度之间的函数关系表达式为：

$$A = e^{-\alpha/(k(t))} \quad (5)$$

式中 α 为关联效能指标系数。节点资源关联性函数指标决定了网络化作战体系内各构成要素之间的连接关系，在一定程度上也对整个网络化体系作战效能产生直接影响。

3.4 网络结构效能函数

网络化作战体系结构效能函数是用来研究整体网络化作战体系结构效能的指标。其中：信息流转时效性指标 B 用来描述作战过程中信息流转的效率；协同性指标 S 用来描述整个作战体系内各节点之间的协同作战能力；节点资源关联性指标 A 用来描述各节点之间复杂的连接关系，三者互相关联、互相影响，共同决定了网络化作战体系的总体结构效能。笔者用 E 来表示整体的网络结构效能函数，其表达式为：

$$E = B(t)^{\omega_1} \cdot S(t)^{\omega_2} \cdot A(t)^{\omega_3} \quad (6)$$

式中， $\omega_1, \omega_2, \omega_3$ 为权重系数， $\omega_1 + \omega_2 + \omega_3 = 1$ 。当 E 越大时，表示随着作战时间的持续，网络化作战体系内各个节点之间的信息流转速率越快，协同效应越明显，节点资源之间的关联效能也越大，网络化作战体系结构效能也随之增大。

4 网络化作战体系结构效能算例分析

主要通过对网络化作战体系与传统作战体系的结构效能(如图 3 所示)，对上节中构造的网络性能参数变化进行对比分析，得出相关结论。

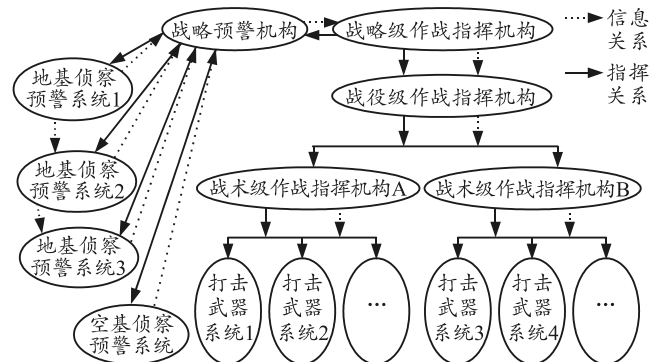


图 3 传统作战体系树状结构

4.1 算例分析中条件设定

1) 战略级作战指挥机构 1 个；2) 战役级作战指挥机构 2 个；3) 战术级作战指挥机构：每个战役级作战指挥机构下设 3 个战术级作战指挥机构 A, 5 个战术级作战指挥机构 B；4) 打击武器系统：每个战术级作战指挥机构 A 下设 4 个打击武器系统, 每个战术级作战指挥机构 B 下设 6 个打击武器系统；5) 越级打击武器系统设 4 类各 1 个；6) 网络化体系作战预警机构 1 个；7) 地基预警信息处理机构 1 个, 地基预警系统设 3 类共 5 个；8) 空基预警系统 1 个；9) 天基信息处理机构设 1 个, 下设 6 类 7 个天基信息支援系统；10) 各不同层级的节点之间以指挥关系、信息给予关系和反馈关系为主, 而同地区同级之间的节点, 往往以信息交互关系为主。在复杂网络所生成的邻接矩阵中, 信息给予、单向指挥、反馈都用单向 1 来描述, 而信息交互关系以对称的 1 来描述, 无任何关系的两节点之间的连接用 0 来描述。

4.2 2 种作战体系结构复杂网络拓扑图

2 种不同作战体系结构的复杂网络拓扑图分别如图 4、图 5。传统树状结构其节点和边都比较少, 作战成本较低, 但是作战的时效性和抗毁性都存在较大的缺陷。如毁掉了节点 2(某战役级作战指挥机构)之后, 它下属的整个战术级作战指挥机构和打击武器系统均会与上级失去联系。同时, 上级的命令想要传达到最底层的打击武器系统, 须通过战役、战术级的机构进行信息中转, 效率较低。为了减少

指挥层次, 提高时效性和抗毁性, 笔者讨论的网状化作战体系与树状结构相比, 网状结构在同级节点之间增加了横向联系, 加强了信息的交互传递; 在低级到高级中, 增加了反馈信息, 加强了信息的流动性, 不再是单一的指挥关系和信息给予关系; 在最高级节点和最低层打击武器系统节点之间设置了一些越级指挥的直接联系, 提高了时效性, 降低了中间战役级作战指挥机构毁坏对整体信息流的影响, 增强了系统的鲁棒性; 各类侦察预警系统不再只与战略级作战指挥机构联系, 而是可以直接与战役、战术、越级打击武器系统节点进行联系, 明显增加了信息的时效性, 实现了从侦察到打击的较链。在拓扑图中, 只能从宏观上对模型进行认识, 而对于复杂网络的更加细致特征, 还需要对复杂网络的特征参数进行定量分析, 才能回答诸如网状结构是否真的提升了网络结构效能等问题。

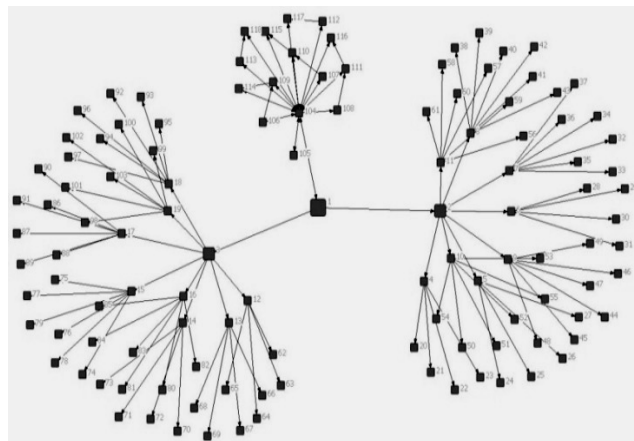


图 4 传统作战体系结构拓扑

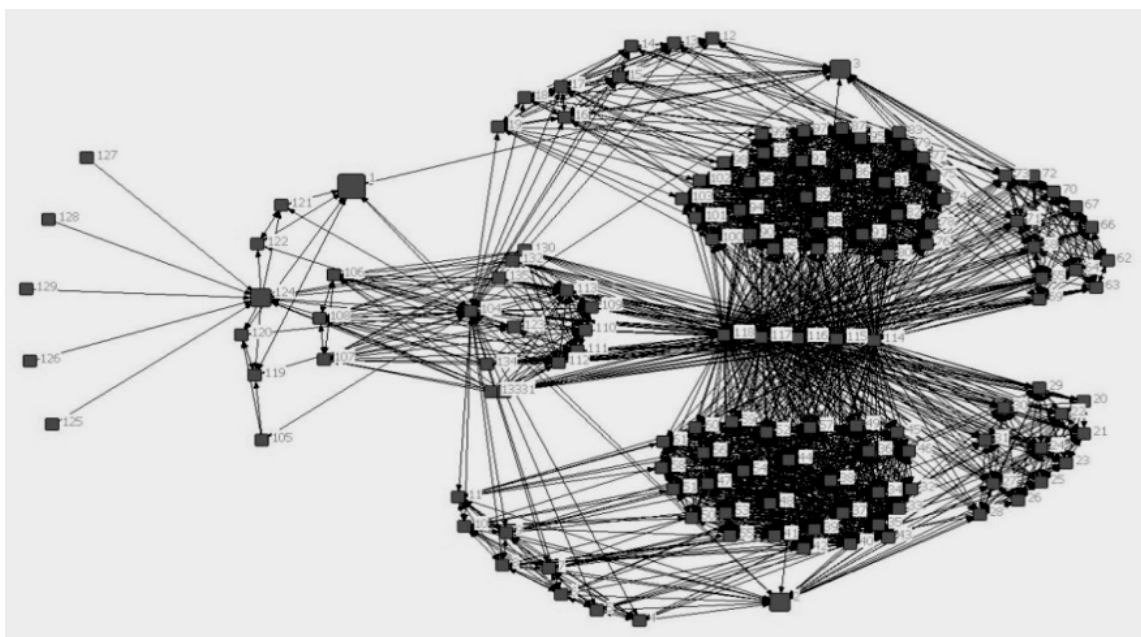


图 5 网络化作战体系结构拓扑

4.3 不同作战体系结构效能分析与结论

设定网络结构效能指标中 3 个子指标的系数分别为： $\mu=0.2$ ， $\theta=0.6$ ， $\alpha=0.4$ 。网络结构效能函数中 3 个函数的权重根据专家打分法依次确定，假定 $\omega_1=0.5$ ， $\omega_2=0.3$ ， $\omega_3=0.2$ 。根据这些参数，能计算出信息流转时效性函数、协同性函数、关联性函数和网络结构效能函数。若与网络结构效能指标联合起来，可以对 2 种不同作战体系的复杂网络特征参数进行分析和比较。各种基本统计特征如表 1 所示。其中， N 为节点数， M 为连边数， L 为平均路径长度， B 为信息流转时效性函数， C 为聚类系数， S 为协同性函数， $\langle k \rangle$ 为节点平均度， A 为关联性函数， E 为网络结构效能函数。

表 1 2 种不同作战体系的复杂网络特征分析参数计算结果

网络模型	传统作战体系树状结构	网络化作战体系结构	网络模型	传统作战体系树状结构	网络化作战体系结构
N	118	135	S	0.010	0.100
M	140	3 062	$\langle k \rangle$	2.119	28.082
L	4.010	2.610	A	0.828	0.986
B	0.553	0.667	E	0.179	0.406
C	0.365	0.721			

由表得到以下结论：

1) 节点和连接边数的比较。网络化作战体系结构比传统结构增加了 17 个节点，增加了 2 922 条边。这是因为在同级节点之间增加了较多的横向信息联系，在上下级之间增加了信息反馈机制，越级也增加了直接联系，各类侦察预警系统和作战体系内各级作战指挥机构以及打击武器系统之间也都有了直接联系。

2) 平均路径长度和信息流转时效性函数的比较。传统作战体系结构的平均路径长度过长，导致信息流转时效函数较小，系统的时效性较差，信息传递的效率较低；网络化作战体系结构的平均路径长度约为传统指挥系统结构的 $L_{\text{网络化}}/L_{\text{传统}} = 2.610/4.010=65.09\%$ ，信息流转时效性函数也相对增加了 $(B_{\text{网络化}} - B_{\text{传统}})/B_{\text{传统}} = (0.667 - 0.553)/0.553 = 20.61\%$ 。这说明在增加横向协同等关系后，网络化作战体系的信息共享水平得到了较大提升，网络化作战体系的反应能力和时效性也得到了增强。

3) 聚类系数和协同性函数的比较。与信息流转时效性的变化不同，传统作战体系结构的聚类系数和协同性函数极其低下，一旦改变成了网状结构，聚类系数和协同性函数都得到了极大的提升，分别提升了 $(C_{\text{网络化}} - C_{\text{传统}})/C_{\text{传统}} = (0.721 - 0.365)/0.365 =$

97.53% 和 $(S_{\text{网络化}} - S_{\text{传统}})/S_{\text{传统}} = (0.100 - 0.010)/0.010 = 900\%$ 。这说明在传统树状结构中各指挥机构的区域集团化水平非常低，信息共享水平较低，而网络化作战体系结构在增加了各种信息反馈和横向联系、越级指挥的情况下，各节点之间的区域集团化水平得到了极大提升，信息共享水平较高，能够更好地进行区域集团化作战，极大地增强了作战体系的协同性。

4) 节点度和关联性函数的比较。系统的鲁棒性和抗毁性与节点平均度以及关联性函数有关。若系统的平均度较低，说明很多节点只与少量相邻节点或者上级节点相连，系统的鲁棒性和抗毁性都较差。传统作战体系结构的节点平均度非常低，而网络化作战体系结构为传统作战体系结构的 13.25 倍；所以传统作战体系结构的鲁棒性和抗毁性都非常差，只需要打击一个关键节点，整个作战体系就将瘫痪。相对而言，网络化作战体系结构的节点平均度较高，而且关联性函数也较高，网络化作战体系整体的鲁棒性和抗毁性都相对较好。然而，真正要判别系统的抗毁性，不能仅仅从节点平均度来判断，还要从节点的度分布来判断。2 种作战体系的复杂网络节点度分布如表 2 所示。从表中可以看出：传统作战体系结构大部分节点的节点度均为 1(概率超过 70%)，而节点度小于 5 的概率也达到了 89%，整个网络具有“无标度网络”的特征，系统对关键节点的依赖很高。如果这些节点中的某些被破坏，整个系统将受到毁灭性打击，即系统的抗毁性较差。网络化作战体系模型的节点度概率分布较为平均，呈现了“小世界网络”的特征，对高节点度的节点依赖很小，网络信息传播速度快，系统时效性和抗毁性都较高，并且有 2 个节点的节点度很高(度为 35 和 101)。原因是它们与所有打击武器系统节点都直接联系，因此，产生了一定的信息浪费，提升了信息成本。可以在不过分影响网络化作战体系作战效能的基础上，去掉这些节点的一些连边，将这些点的信息冗余去掉。

5) 网络结构效能函数的比较。作为评估作战体系时效性、协同性、关联性的综合指标，网络结构效能函数对于整个作战体系而言至关重要。网络结构效能值越大，说明网络化作战体系内各个构成要素之间的共享、协同、指控和反馈等行为越密切，作战体系的资源共享与协同程度越高，反馈优化能力越强。对比 2 种作战体系，传统结构的结构效能

函数值只有网络化作战体系结构效能值的 $E_{\text{传统}}/E_{\text{网络化}} = 0.179/0.406 = 44.09\%$ ，说明网络化作战体系信息交互和反馈控制能力较强，真正体现了网络信息系统对体系作战的重要作用。

表 2 2 种不同作战体系的复杂网络节点度分布

节点度 k	传统作战体系树状结构	网络化作战体系结构	节点度 k	传统作战体系树状结构	网络化作战体系结构
	$p(k)$	$p(k)$		$p(k)$	$p(k)$
1	0.72	0.037	17	—	0.007
2	0.085	—	18	—	0.178
3	0.034	0.007	20	—	0.037
4	—	0.015	23	—	0.015
5	0.051	0.015	35	—	0.444
7	0.085	0.007	37	—	—
8	—	—	39	—	0.007
9	0.017	—	45	—	—
13	—	0.044	94	—	—
14	—	0.044	101	—	0.039
15	0.008	0.104			

5 结论

笔者构建了网络化作战体系结构并且研究其结构内涵，基于复杂网络的理论和方法，对网络化作战体系进行建模，并借助复杂网络的统计参量对应网络化作战体系结构功能之间的关系^[5]，构造了 4 类符合网络化作战体系的结构效能指标，对其结构

效能进行深入分析研究。从上述分析计算结果可以看出：与传统的作战体系结构相比，网络化作战体系结构在信息时效性函数、协同性函数、节点资源关联性函数以及网络结构效能函数上都有大幅度提升。这是因为网络化作战体系结构实现了网络化的扁平结构，作战体系的资源共享与协同程度越高，反馈优化能力越强。

参考文献：

[1] 蓝羽石, 毛少杰, 王珩. 指挥信息系统结构理论与优化方法[M]. 北京: 国防工业出版社, 2015: 94-96.

[2] 孙玺菁, 司守奎. 复杂网络算法与应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2015: 22-28.

[3] 朱智, 雷永林, 朱一凡. 网络化防空反导体系的作战过程建模与仿真[J]. 国防科技大学学报, 2015, 37(3): 179-184.

[4] 何榕, 罗小明, 朱延雷. 基于复杂网络的空天防御作战指挥体系结构优化研究[J]. 装备学院学报, 2016, 27(2): 78-82.

[5] 程建博, 刘德生, 李迎春. 面向能力评估的指挥信息系统本体模型向网络拓扑模型转化的方法[J]. 兵工自动化, 2019, 38(3): 42-48.

[6] 刘鼎. 基于 DSP 的永磁无刷直流电机模糊控制系统的研究与实现[D]. 长沙: 湖南大学, 2010: 18-36.

[7] 诸静. 模糊控制原理与应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 1995: 26-60.

[8] 张晋铭, 彭辉. DSP 的直流调速系统 CMAC 自适应控制[J]. 控制与检测, 2010(8): 48-52.

[9] 刘和平. TMS32LF240xDSP 结构、原理及应用[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2002: 56-71.

[10] 何禹锬, 高强, 侯远龙. 某定深电液伺服系统的粒子群优化神经网络 PID 控制[J]. 兵工自动化, 2019, 38(5): 24-28.

[11] 贾智, 赵岩, 张兵, 等. 基于小波神经网络 PID 的战车自适应巡航算法[J]. 兵器装备工程学报, 2019, 40(3): 161-164.

(上接第 31 页)

参考文献：

[1] 孙建涛. 直流无刷电机数字调速系统的研究[D]. 镇江: 江苏科技大学, 2012: 32-33.

[2] 戴文俊, 范鹏飞, 凌有铸, 等. 模糊自适应 PID 控制器在无刷直流电机控制系统中的应用[J]. 安徽工程大学学报, 2012, 27(1): 64-67.

[3] 陶永华. 新型 PID 控制及其应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 1988: 45-46.

[4] 郭阳宽. 过程控制及仿真—基于 Matlab/Simulink[M]. 北京: 北京电子工业出版社, 2009: 25-28.

[5] 闫时军, 高强, 张建学, 等. 某随动负载模拟器 GM/SN-PID 自适应控制[J]. 兵工自动化, 2019, 38(5): 29-33.