

基于复杂网络的体系作战指挥周期研究

饶德虎^{1,2}, 胡晓峰¹, 吴琳¹

(1. 国防大学, 北京 100091; 2. 海军工程大学电子工程学院, 武汉 430033)

摘要: 信息化战争本质特征是基于信息的体系对抗, 从作战信息的角度结合 OODA 指挥过程环的概念, 利用探测节点、情报节点、决策节点、通信节点、火力打击节点和信息对抗节点构建体系作战的网络化模型。以体系作战网络化模型为基础, 通过扩展复杂网络平均路径等结构特征参数提出了作战网络的特征信息距离与网络信息交互节奏。最后, 通过实验分析了不同拓扑结构和作战能力分布对体系作战网络信息交互节奏的影响, 为进一步研究体系作战指挥效率提供了依据。

关键词: 复杂网络; 体系作战; 信息交互节奏; 作战指挥节奏

中图分类号: V271.4; TP273 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2014)10-0015-05

Command Cycle of SoS Operation Based on Complex Network

RAO De-hu^{1,2}, HU Xiao-feng¹, WU Lin¹

(1. National Defense University, Beijing 100091, China; 2. Navy University of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract: Information warfare is characterized by System of System (SoS) operation based on information. From the viewpoint of operation information and combined with the OODA command and control loop concept, the network centric model of SoS operation was established by utilizing sensor node, information station node, decision node, communication node, lethality node and information jammer node. Based on the network centric model, the characteristic parameters of complex network were extended, and the information distance and interaction tempo of operation network were proposed. The effect of different topology and operation capability distribution on the interaction tempo was analyzed through experiment, which can be used in the research of SoS operation efficiency.

Key words: complex network; System of System (SoS) operation; information interaction tempo; operational command tempo

0 引言

信息化战争作为新军事变革催生的新的战争形态, 一个突出的时代特征就是日益呈现为体系对抗, 其作战体系也从传统的平台中心体系转换为网络中心作战体系^[1]。从作战行动上, 信息化战争的作战优势日益体现为以信息为先导, 以网络为纽带, 各种不同的作战单元、要素, 通过共享战场信息和感知战场态势, 达成指挥控制与作战行动高度一致, 在信息系统的无

缝链接下形成整体联动, 以实现整体效能的快速融合与释放。而“网络中心战的基本概念是非线性、复杂性和混沌的, 它的不确定性更少而涌现性更多; 它更多地强调行动而非实体, 它更多地强调相互关系而非具体事物”^[2]。因而从复杂系统理论出发, 研究信息化战争是不可缺少的也是十分重要的。

网络科学作为研究复杂系统的跨学科产物, 其兴起与发展, 改变了世人以往审视和理解世界时的“还原论”单一视角^[3-4]。复杂网络研究的开拓者之一巴拉巴西指出, “在我们弄清楚系统各组成部分的连接关系之前, 我们不可能完全理解复杂系统”^[5]。当前复杂网络在军事领域的研究工作主要集中在对作战模型的研究上, 如将复杂网络理论用于体系对抗仿真中, 模拟作战中武器装备的关系, 制定网络模型生成规则, 建立仿

收稿日期: 2013-11-18

修回日期: 2013-12-04

基金项目: 国家自然科学基金(61174035, 61374179); 全军军事类研究生课题(2012JY003-063); 海军工程大学社科基金(HGDSK2012E48)

作者简介: 饶德虎(1982-), 男, 湖北荆州人, 博士生, 研究方向为体系作战指挥、信息对抗。

真分析模型,分析网络的度分布、介数、平均距离等指标,赋予这些指标在军事领域的物理意义并得出结论。相对而言,对体系作战指挥问题的研究大部分都是定性分析,进行定量研究的相对较少。因此,结合复杂网络理论对指挥周期进行量化分析对体系作战具有重要指导意义。

1 体系作战的网络化模型

1.1 体系作战中作战实体抽象

美国陆军上校约翰·博伊德提出的OODA环是对体系作战行动整个过程的一种高度抽象,能较为清晰地描述整个体系作战行动中“观察(Observe)—判断(Orient)—决策(Decide)—行动(Act)”全过程。大部分文献据此将网络化体系作战中作战单元抽象为“传感器(S)、决策者(D)、响应者(I)”3类作战节点,分别对应OODA环的逻辑功能且通过作战单元间的链路来描述网络化作战过程^[6]。但从C⁴ISR中信息利用角度来看,作战节点中尚缺表征信息流路径的通信节点、网络化信息共享转换为情报优势的情报节点和压制信息链路的信息对抗节点等逻辑功能的作战单元。因此,作战单元的抽象应体现网络化作战体系中信息的使能能力;从功能上讲,网络节点是作战体系中作战要素的集合,主要包括目标探测、情报融合、指挥控制、火力打击和信息对抗等要素。具体如表1所示。

表1 体系作战中网络节点类型

Table 1 Node type in SoS operation

网络节点类型	符号	功能描述
探测节点	S	获取战场环境相关信息
情报节点	I	融合战场信息,形成综合作战态势
决策节点	D	依据态势做出指挥决策
通信节点	C	从一个节点传递信息到另一节点
火力打击节点	L	能够对其他节点构成物理毁伤
信息对抗节点	J	能够对其他节点形成软杀伤

各节点对应的作战单元的逻辑功能如下所述。

探测节点(Sensor Node):也可称为传感器节点,主要功能是接收来自其他节点的可观测信息,并将这些信息通过网络化通信链路传递给其他节点。

情报节点(Information Station Node):也可称为情报中心节点,主要功能是接收许多同质或异质探测节点的探测信息,进行处理和融合后形成局部感知态势或通用作战态势图等知识。

决策节点(Decision Node):主要功能是接收来自探测节点或情报节点的信息与感知态势,并就当前或将来其他节点的部署做出决策。

通信节点(Communication Node):主要功能是为网络化信息共享提供可靠的物理链路。

火力打击节点(Lethality Node):主要功能是接收决策节点的指令,对其他各类节点实施物理上的毁伤,降低或压制作战节点对应作战能力的发挥。

信息对抗节点(Information Jammer Node):主要功能是接收决策节点的指令,对通信节点之间或通信节点与其他节点间的信息链路进行压制,削弱网络化信息共享能力。

1.2 体系作战中信息交互抽象

复杂系统理论认为个体之间的交互才是整体的基础,交互描述了实体间综合的“多对多”关系,包括各种相互关系和关联,所有可能的“相互作用结果”。因此,关注信息化战争中信息的交互,才能正确反映作战过程的动力学本质^[7-8]。信息化战争中,不同作战单元间交互的是各种信息流。从信息采集、处理、传输和应用等流程上看,体系作战中信息交互主要包括目标信息流、态势信息流、指控信息流和协同信息流等。具体如表2所示。

表2 体系作战中信息交互类型

Table 2 Interaction information type in SoS operation

信息交互类型	符号	功能描述
目标信息流	S→I	特定节点的状态信息
态势信息流	I→D	特定区域的态势信息
指控信息流	D→(L,J)	特定行动的命令信息
交战信息流	L→(S,I,D,C)	降低其他节点功能的信息
干扰信息流	J→(S,I,D,C)	压制其他信息交互的信息
协同信息流	I→I, D→D, (L,J)→(L,J)	要素节点之间实现的功能互补

各信息交互对应的物理逻辑功能阐述如下。

目标信息流:包含作战空间中特定目标状态信息的链路;而只有探测节点具备产生目标特征信息的能力,因此链路的一端必是探测节点。

态势信息流:包含战场空间特定区域内作战态势信息的链路;而只有情报节点才具备信息融合的能力,因此链路的一端必是情报节点。

指控信息流:包含作战过程中具体处置指令信息的链路;而显然只有决策节点才具备决策的能力,因此链路的一端必是决策节点。

交战信息流:包含阻止或降低其他作战节点功能正常发挥的链路;而显然只有毁伤节点才具备破坏其他节点作战功能的能力,因此,链路的始端必是毁伤节点。

干扰信息流:包含具备压制其他正常信息交互链路能力的链路;而显然只有信息对抗节点才具备信息干扰的能力,因此,链路的始端必是信息对抗节点。

协同信息流:包含情报节点之间、决策节点之间、火力毁伤节点之间和信息对抗节点之间为完成特定作战任务时相互配合的链路;一般而言,协同主要针对同

质节点,因此,链路的两端必是同类型的作战实体。

在上述体系作战中作战实体与信息交互抽象描述的基础上,利用兵棋演习的海量数据构建体系作战网络,已然成为深入研究体系作战指挥的必经之路和重要手段。

2 体系作战的网络化指挥周期

信息化条件下,体系作战的制胜法则是“快吃慢”,作战指挥的快节奏将有助于掌控战场主动权。美军提出“快速决定性作战”的理论,其核心就是通过大幅度提高己方的指挥速度,能够在针对敌方策略更快地做出有效反应方面拥有优势,从而最有可能获取作战行动的最终胜利^[9]。

2.1 作战网络的特征信息路径距离^[10]

跨域、异质信息网络的信息交互为体系作战的网络化效能发挥提供基础,通过扩展复杂网络中平均路径长度特征参数来度量作战体系的信息共享程度。

特征信息路径距离定义为信息网络中任意两个作战节点之间信息连通能力的平均值,即

$$C_M(t) = \sum_{\mu=1}^{N_T} K_{\mu}(t) \sum_{\nu=1}^{N_{\mu}} L^{\mu\nu}(t) \sum_{\gamma=1}^{N_{\mu\nu}} \frac{F_{\gamma}^{\mu\nu}(t)}{d_{\gamma}} \quad (1)$$

式中:节点 μ 与节点 ν 之间的信息链路为 γ ; N_T 为整个信息网络中的节点数量; N_{μ} 表示网络中与节点 μ 连通的所有节点数量; $N_{\mu\nu}$ 表示网络中节点 μ 到节点 ν 之间所有可能链路的数量; d_{γ} 表示链路 γ 上的节点数量; K_{μ} 表示节点的信息处理能力; $L^{\mu\nu}$ 为链路 γ 上的信息流通能力; $F_{\gamma}^{\mu\nu}(t)$ 为链路 γ 的效率因子。

将体系作战中作战实体的信息能力进行归一化,即 $0 \leq K_{\mu} \leq 1$;同时,任意两个作战实体间的直接信息链路用通信节点等效,从而简化链路信息流通能力;显然,链路的效率因子满足 $0 \leq F_{\gamma}^{\mu\nu} \leq 1$ 。因此,体系作战中跨域、异质信息网络的特征信息路径距离为

$$C_M(t) = \sum_{\mu=1}^{N_T} K_{\mu}(t) \sum_{\nu=1}^{N_{\mu}} \sum_{\gamma=1}^{N_{\mu\nu}} \frac{F_{\gamma}^{\mu\nu}(t)}{d_{\gamma}} \quad (2)$$

显然,全联通网络具有最便捷的信息共享模式,其信息特征路径距离应为最小。假设由 N_T 个节点构成的全连通网络中所有节点的信息能力相同且 $K_{\mu} = 1$,同时,所有信息流通链路效率相同且 $F_{\gamma}^{\mu\nu} = 1$ 。此时, N_T 个节点组成网络的最大特征信息路径距离为

$$C_M^R(t) = N_T(N_T - 1) \left[1 + \frac{N_T - 2}{2} + \dots + \frac{(N_T - 2)(N_T - 3) \times \dots \times 2 \times 1}{2} \right] \quad (3)$$

因此,定义作战网络的信息流通度为

$$I_R = C_M / C_M^R \quad (4)$$

2.2 作战网络的信息熵

基于香农的熵理论,作战体系中任一作战实体必须能够在限定时间范围内对接收到的信息进行加工、处理,进而产生知识的临界点;否则,信息的利用价值将丧失。假设 t_{μ}^{\max} 是允许作战节点 μ 处理信息的最大时延,定义 $\lambda_{\mu}(t) = 1/t_{\mu}(t)$ 为作战节点在 t 时刻加工信息的速率,则作战节点此时能够利用信息产生知识为

$$Q(\lambda_{\mu}) = \begin{cases} 0, & t_{\mu} > t_{\mu}^{\max} \\ \ln(t_{\mu}^{\max}/t_{\mu}), & t_{\mu}^{\max}/e < t_{\mu} < t_{\mu}^{\max} \\ \ln(e \cdot t_{\mu}^{\max}/t_{\mu}^{\max}) = 1, & t_{\mu} < t_{\mu}^{\max}/e \end{cases} = \begin{cases} 0, & \lambda_{\mu} < \lambda_{\mu}^{\min} \\ \ln(\lambda_{\mu}/\lambda_{\mu}^{\min}), & \lambda_{\mu}^{\min} < \lambda_{\mu} < e \cdot \lambda_{\mu}^{\min} \\ \ln(e \cdot \lambda_{\mu}^{\min}/\lambda_{\mu}^{\min}) = 1, & \lambda_{\mu} > e \cdot \lambda_{\mu}^{\min} \end{cases} \quad (5)$$

网络信息熵定义为作战网络中所有作战实体生成知识的平均值。

$$R_Q = \frac{1}{N_T} \sum_{\mu=1}^{N_T} \lambda_{\mu} Q(\lambda_{\mu}) \quad (6)$$

从上述定义可以看出,如果一个作战实体产生知识的能力 $\lambda_{\mu} Q(\lambda_{\mu})$ 不能达到作战网络的平均值,其加入作战网络后虽然能增加作战网络的知识总量,但会降低整个作战网络的网络信息熵,进而影响整体作战效能。

2.3 网络信息交互节奏

信息化战争中体系作战的根基在于基于网络化信息交互的效能发挥,任一作战网络中信息交互周期主要取决于网络中作战实体数量、交互关系和信息处理能力等要素。因此,每个具体的作战网络都与一个网络化信息交互的特征节奏相对应,反映了当前作战网络的拓扑结构和信息技术水平。为评估体系作战中的网络信息交互周期,将网络信息交互节奏定义为体系作战中网络信息流通度和信息熵的乘积。

$$\lambda_T = I_R R_Q = \frac{C_M}{C_M^R} \cdot \frac{1}{N_T} \sum_{\mu=1}^{N_T} \lambda_{\mu} Q(\lambda_{\mu}) \quad (7)$$

因此, λ_T 反映了体系作战中通过网络化交互带来知识共享的程度。

2.4 体系作战的指挥节奏

信息化战争的一个显著特征就是其信息网络结构,各作战单元之间能够相互直接共享信息,这可极大缩短作战过程;假定作战体系的信息交互速率、决策速率、部署速率和交战速率分别为 $\lambda_T, \lambda_{c2}, \lambda_d$ 和 λ_{f0} 。基于OODA环的整个体系作战过程呈现出一定周期性,可

用这个周期性来度量体系作战节奏。在 OODA 环中,“O-O”(侦)、“O-D”(控)、“D-A”(打)和“A-O”(评)等阶段所需平均时间满足: $\Delta t_1 \geq 1/\lambda_T$, $\Delta t_2 \geq 1/\lambda_{C2}$, $\Delta t_3 \geq 1/\lambda_T + 1/\lambda_d$ 和 $\Delta t_4 \geq 1/\lambda_T + 1/\lambda_f$ 。体系作战指挥节奏定义为完成 OODA 作战过程环所需平均时间的倒数^[11]。

$$A_{OODA} = \frac{1}{\Delta t_1 + \Delta t_2 + \Delta t_3 + \Delta t_4} \leq \frac{1}{\frac{3}{\lambda_T} + \frac{1}{\lambda_{C2}} + \frac{1}{\lambda_d} + \frac{1}{\lambda_f}} \quad (8)$$

显然,实际体系作战指挥节奏不会是一个常量,而是随着作战进程的推进而变化。在体系作战网络化模型框架下计算指挥节奏就充分考虑了作战实体间能力差异及指挥结构的影响。

3 实验分析

为分析不同体系作战指挥网络的时效性,将体系作战中作战实体划分为联指指挥员(Head Quarters, HQ)、集群指挥员(Team Leaders, TL)和作战任务单元(Team Members, TM)3类;以集中指挥与协同指挥两类指挥方式下体系作战实体间构成的指挥网络为研究对象,量化分析指挥方式对指挥时效性的影响。假设不同指挥方式下同一作战集群内的任务单元之间能够满足全联通的信息共享。在集中指挥方式下,联指指挥员负责所有作战集群的统一指挥且不同作战集群之间没有协同指挥关系,具体如图1所示。而在协同指挥方式中,根据协同指挥的层次数又可细分为两类:1) 集群协同指挥方式,除联指指挥员统一指挥所有作战集群外,不同作战集群之间通过集群指挥员实现作战协同,具体如图1所示;2) 集群-任务协同指挥方式,此时作战集群之间不仅可以通过集群指挥员实现作战协同,而且不同集群间的任务单元也可实现作战协同,具体如图1所示。

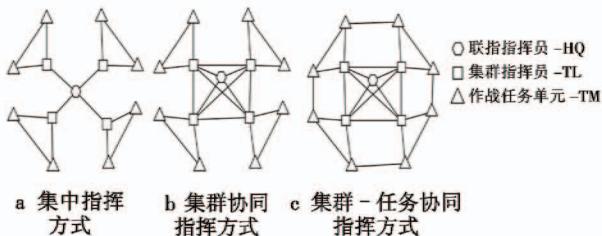


图1 3种指挥方式的网络结构示意图

Fig.1 Network topology of the three kinds of command styles

从指挥方式的网络结构图可以看出,3种指挥方式下网络节点数相同,但节点间交互连边呈递增趋势。利用复杂网络软件 CytoScape2.8.3对3种指挥模式下体系作战网络的主要特征参数进行统计计算,结果如表3所示。

表3 3种指挥模式的网络特征参数

Table 3 Network characteristic parameters of the three kinds of command styles

指挥方式	平均路径长度	聚集系数	网络密度
集中指挥	2.718	0.718	0.205
集群协同指挥	2.026	0.836	0.282
集群-任务协同	1.821	0.426	0.333

从网络特征参数可以看出,3种指挥方式下按照集中指挥、集群协同指挥和集群-任务协同指挥的顺序,平均路径长度和网络密度分别呈线性递减或递增关系,表明协同指挥方式相对集中指挥方式而言增强了指挥网络的信息交互程度。

假设作战体系中各作战节点信息处理能力是同质的且满足高斯分布,在 Windows XP + SP3 系统环境下,利用 Python2.7 + NetworkX1.8 仿真软件,通过蒙特卡罗仿真得出不同指挥模式下的信息交互节奏能力与节点信息能力之间的关系,如图2和图3所示。

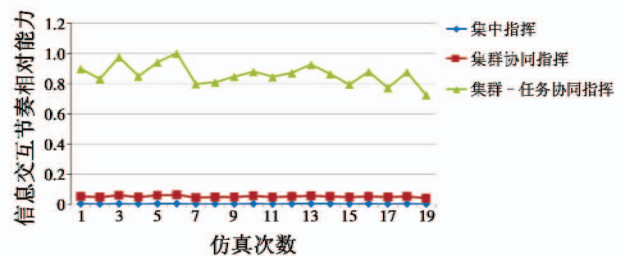


图2 同样节点信息能力下的信息交互节奏能力

Fig.2 Information interaction tempo with the same information capability distribution

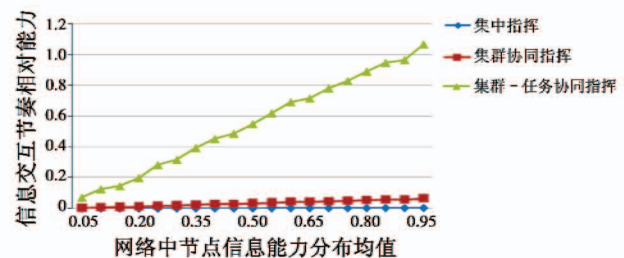


图3 不同信息能力分布下的信息交互节奏能力

Fig.3 Information interaction tempo with different information capability distribution

图2为节点信息能力在均值为0.5的高斯分布时,3种作战体系网络信息交互节奏能力的对比图。通过实验结果分析可知,在集群-任务协同指挥方式下信息交互节奏最快,且远大于其他两种模式;随后依次为集群协同指挥和集中指挥方式。图3为3种不同作战体系网络随节点信息处理能力变化的对比图,可以看出,3种指挥模式的信息交互节奏能力与节点信息能力均呈现出线性正相关特性,但集群-任务协同指挥方式下节点信息能力对信息交互节奏能力的放大程度更大。

4 结论

体系作战指挥的时效性问题是影响信息化战争进程的关键要素,研究体系作战的节奏问题就显得尤为重要。本文在构建基于信息的体系作战网络化模型基础上,依据作战节点改变战场信息流与信息质量的能力,利用复杂网络的结构特征参数提出了特征信息距离与信息熵来计算网络的整体信息交互节奏,进而基于 OODA 环计算体系作战的指挥节奏。研究表明,充分的网络化交互与均匀的信息能力分布可缩短体系作战指挥周期,同时为下一步深入研究体系作战指挥的同步问题奠定了基础。

参考文献

- [1] 李德毅,王新政,胡钢锋. 网络化战争与复杂网络[J]. 中国军事科学, 2006, 19(3): 111-119.
LI D Y, WANG X Z, HU G F. Network warfare and complex network[J]. Military Science of China, 2006, 19(3): 111-119.
- [2] 胡晓峰,司光亚. 战争模拟原理与系统[M]. 北京:国防大学出版社, 2009.
HU X F, SI G Y. War gaming & simulation principle and system[M]. Beijing: National Defense University Press, 2009.
- [3] WATTS D J, STROGATZ S H. Collective dynamics of small-world networks[J]. Nature, 1998, 393: 440-442.
- [4] ALBERT R, BARABÁSI A L. Topology of evolving networks: Local events and universality[J]. Physical Review Letters, 2000, 85(24): 5234-5237.
- [5] ALBERT R, BARABÁSI A L. Statistical mechanics of complex networks[J]. Reviews of Modern Physics, 2002, 74(1): 47-97.
- [6] CARES J R. Distributed networked operations; The foundations of network centric warfare[M]. Bloomington: Luni-universe Inc, 2005.
- [7] 金伟新. 体系对抗复杂网络建模与仿真[M]. 北京: 电子工业出版社, 2010.
JIN W X. SoS-Ops M & S based on the complex network[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2010.
- [8] 王庆功,沈寿林,袁昌平. 基于复杂网络的作战体系网络模型分析[J]. 指挥控制与仿真, 2013, 35(1): 6-10.
WANG Q G, SHEN S L, YUAN C P. Combat system network model analysis based on complex network[J]. Command Control & Simulation, 2013, 35(1): 6-10.
- [9] 江林. 军队指挥的科学[M]. 2 版. 北京: 军事科学出版社, 2011.
JIANG L. Military-cybernetics[M]. 2nd ed. Beijing: Military Science Press, 2011.
- [10] LING F M, MOON T, KRUIZINS E. Proposed network centric warfare metrics; From connectivity to the OODA cycle[J]. Military Operations Research, 2005, 10: 5-13.
- [11] CHEN Y Q, PACE P E. Simulation of information metrics to assess the value of networking in a general battlespace topology[C]//IEEE International Conference on System of Systems Engineering, 2008: 1-6.
- (上接第 14 页)
- [4] 任国军. 美军联合作战情报支援研究[M]. 北京: 军事科学出版社, 2010: 1-18.
REN G J. US army combined operation intelligence support research[M]. Beijing: Military Science Publishing Press, 2010: 1-18.
- [5] VINCENT P, RUBIN I. A framework and analysis for cooperative search using UAV swarms[C]//ACM Symposium on Applied Computing, Nicosia, Cyprus, 2004: 79-86.
- [6] O'ROURKE K P, CARLTON W B, BAILEY T G, et al. Dynamic routing of unmanned aerial vehicles using reactive tabu search[J]. Military Operations Research Journal, 2001, 6(1): 5-30.
- [7] SUJIT P B, BEARD R W. Distributed sequential auctions for multiple UAV task allocation[C]//Proceedings of the American Control Conference, 2007: 3955-3960.
- [8] SCHUMACHER C, CHANDLER P, PACHTER M, et al. UAV task assignment with timing constraints via mixed-integer linear programming[C]//AIAA 3rd Unmanned-Unlimited Technical Conference, 2004: 238-252.
- [9] 刘亚威,黄俊. 微型固定翼飞行器的最新发展动态研究[J]. 航空兵器, 2008(1): 12-16.
LIU Y W, HUANG J. Research of the latest development trends of fixed-wing micro aerial vehicles[J]. Aero Weaponry, 2008(1): 12-16.