

文章编号: 1001- 2486(2010) 05- 0143- 04

模拟体系对抗价值链的网络同步模型*

谭东风¹, 鲍鲜赜¹, 胡定磊²

(1. 国防科技大学 信息系统与管理学院, 湖南 长沙 410073;

2. 国防科技大学 人文与社会科学学院, 湖南 长沙 410073)

摘要: 描述战斗毁伤“规模效应”的 Lanchester 模型默认作战体系内部是“完美的”。本文扬弃此假设, 首次从作战体系内部“共识”涌现的视角提出了一个模拟体系对抗价值链的网络“同步效应”模型, 研究了战场变化、个体/群体认知、自同步与对抗均衡等概念的网络拓扑和权值演化形式, 并发现对抗均衡条件下无标度网络具有“同步脆弱性”。

关键词: 体系对抗; 价值链; 意见形成; 自同步; 均衡

中图分类号: E072 **文献标识码:** A

A Model of Network Synchronization for Value Chain of Combat of SoSs

TAN Dong-feng, BAO Xian-kun, HU Ding-lei

(1. College of Information System and Management, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China;

2. College of Humanity and Social Science, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Lanchester equations that describe the “size effect” of casualties assume that the intra-structure of a force is perfect, which is sublated in this article. It puts forwards firstly an opinion fomation dynamic model expressing the “synchronization effect” for value chain of combat of systems of systems (SoSs). It is a topological and characterized attributes-based methodology for presenting conceptions, such as battlefield variation, individual/shared cognition, self-synchronization and equilibrium in combat of SoSs, and the “synchronization fragility” of scale-free network under equilibrium is found in simulation of combat of SoSs.

Key words: combat of SoSs; value chain; opinion formation; self-synchronization; equilibrium

传统的 Lanchester 类战斗聚合模型揭示毁伤的规模效应, 模型假设作战体系内部的组织协调不成问题, 对于简单的部队或战场这是有效的, 但对于复杂的体系对抗就显得过于简化。基于信息系统的体系对抗是在物理、信息、认知和社会诸领域展开的传统或非传统作战^[1-2], 各个参战单元/系统之间是紧密联系的, 启发人们引入网络模型^[3]。不仅如此, 不同作战领域之间是相互影响的, “网络之网络”^[4]模型也顺乎自然, 并应成为重要的研究方向之一^[5], 尽管目前复杂网络研究主要集中在“单域”模型。此外, 许多体系对抗定量模型多关注于兵力/网络毁伤等对抗“价值链”的末端, 而对于复杂体系中多个单元/系统的信息、认知和行动过程的整个价值链对体系对抗行为的影响等问题, 由于种种原因研究很少^[6], 因此, 在体系对抗建模理念和方法上, 应该适应研究对象, 采用多学科交叉、联合的方式, 定性定量结合地研究体系对抗中“感知”、“沟通”、“自同步”和“效能”等重要基础概念。

本文在构建模拟体系对抗多领域超网络模型的基础上, 结合意见形成理论^[7-8]建立网络意见沟通模型以及同步定量评价指标, 并重点讨论体系对抗价值链中认知域同步与物理域毁伤的联系。

1 多层次体系对抗模型系统

首先, 采用超网络模型^[4]描述物理域、信息域和认知域中体系对抗的基本概念^[1-2]如下:

* 收稿日期: 2010- 05- 25

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (70571084; 61074121); 湖南省自然科学基金资助项目 (07JJ5095); 国家部委资助项目 (513040104- 2)

作者简介: 谭东风 (1958-), 男, 教授。

定义1 对物理域, *Lanchester* 聚合模型^[9]假设作战体系是二元组, 即兵力总数 N 和聚合火力毁伤效能系数 $\alpha > 0$

$$F_N^L = \text{Lanchester}(N, \alpha) \quad (1)$$

定义2 *Lanchester* 单元层(解聚)模型^[10]的作战体系为二元组

$$F_N^{IL} = \text{individual_Lanchester}(N, f_N: N \rightarrow [0, 1]) \quad (2)$$

其中, N 是有限单元集, 点权映射 f_N 是单元射击效能向量, 若 $f_N = \alpha \in [0, 1]$, 则与聚合模型(1)等价。

定义3 对信息域, 假设单元是全能的, 即能够接收、传递信息和实施攻击, 作战体系网络模型是单元(点)、通信链路(边)构成的布尔图^[11]

$$F_N^{Net} = \text{network_force}(F_N^L; L_N: N \times N \rightarrow \{0, 1\}) \quad (3)$$

其中, L_N 是网络 N 的布尔邻接矩阵。

定义4 对认知域, 由具有认知水平的单元构成的网络作战体系是多重点权图^[12]

$$F_N^{OF} = \text{opinion_formation}(F_N^{Net}; I_N: N \rightarrow [0, 1], d_N: N \times N \rightarrow [0, 1], u_N: N \times N \rightarrow [0, 1]) \quad (4)$$

其中, 点权 I_N 反映单元认知的“意见”水平, 向量点权 d_N, u_N 分别表示单元 i 对相邻同伴 j “意见”的包容度 d_{ij} 和接受度 u_{ij} 。

上述基于不同建模观点的作战体系模型构成模拟作战体系价值链的模型系统框架。

2 基于意见形成的作战体系价值链模型

作战体系中各自主单元之间通过网络相互沟通、协商, 在整体层次上会涌现统一意识——群体认知, 从而实现个体的自由灵活行动与体系整体效能之间的“自同步”。

2.1 单元认知的表示

定义4中, 单元“意见”值反映单元对战场态势、作战使命和行动方案等的了解和理解水平, 由于单元、部队在战场上所处位置的差异等原因, 对战场态势的认知会存在差异。如果单元对战场态势的理解可以用二进制序列表示 $x_1x_2 \dots x_s$ ($x_i = 0, 1$), 则该单元的“意见”水平可表示为小数 $0.x_1x_2 \dots x_s$ 。因此, 可用区间 $[0, 1]$ 中精度足够的数值(意见值)抽象单元“大脑”中的战场认知。

2.2 战场态势变化及其度量

定义5 战场态势的变化会使相应单元意见值随之改变, 因此, 可以间接地用单元意见值被战场环境改变的频率模拟战场变化程度

$$c_rate_t = \frac{cn_t}{|N_t|} \quad (5)$$

其中, cn_t 为 t 时刻网络中被强制改变意见值的单元数目。

假设在体系对抗的过程中, 战场变化程度在时间上是均匀的, 即在单位时间内, 可以固定概率 c_rate_t 随机选取体系中的单元, 并重新赋予其新的意见值。

2.3 体系中的认知扩散

设网络体系 F_N 中单元 i 在 t_k 个沟通轮次后的“意见”为 $I_i(t_k) \in [0, 1]$ 。当 i, j 相邻 $L_{ij} \neq 0$, 并相互直接沟通时, 如果“意见相似性”^① 差距 ϕ 大于包容度

$$\Phi(I_i(t_k), I_j(t_k)) = |I_i(t_k) - I_j(t_k)| > u_{ij}, \quad L_{ij} \neq 0 \quad (6)$$

各自维持原有意见值不变; 反之, 则相互“沟通和调整”各自意见

$$I_i(t_k + 1) = I_i(t_k) - u_{ij}\Phi(I_i(t_k), I_j(t_k)) \quad (7)$$

$$I_j(t_k + 1) = I_j(t_k) - u_{ji}\Phi(I_j(t_k), I_i(t_k))$$

① 即两个意见值的距离, 此处简化为算术差, 一般而言, 可采用基于集合代数的意见变量(如果视为概念向量的话)相似性算法。

为叙述简便, 假定网络所有单元具有相同的意见包容度和接受度, 即 $d_{ij} = d, u_{ij} = u$ 。

一般地, 每个单元与其邻接单元的“聚合意见”^① 进行“沟通和调整”

$$I_i(t_k + 1) = I_i(t_k) - u\phi(I_i(t_k)), \frac{1}{\sum_{\phi(I_i(t_k), I_j(t_k)) \leq d} L_{ij}} \sum_{\phi(I_i(t_k), I_j(t_k)) \leq d} L_{ij} I_j(t_k) \quad (8)$$

假定所有单元之间同时按(8)进行意见交流与融合, 这称为一个沟通轮次。

2.4 体系的群体认知涌现与同步

同步指单元行为效果在目的、时空等方面所达到的“无冲突”水平^[1]。体系中各单元意见越接近, 形成一致意见模式的群体认知时间越短, 意味着网络的同步性能越好。

定义6 令 t_k 个沟通轮次后, 与单元 i 的意见水平相似的单元集合为

$$Y_i(t_k) = \{j | \phi(I_i(t_k), I_j(t_k)) < \varepsilon\} \quad (9)$$

其中, $\varepsilon > 0$ 为给定的一致意见差异阈值。

定义7 在 t_k 个沟通轮次后, 网络同步率为

$$syn(t_k) = \frac{\max_i |Y_i(t_k)|}{|N|} \quad (10)$$

定义8 需要沟通 t_k 轮次才能攻击行动的作战体系 F_N 的整体效能

$$OE_t^N = |N_t| syn_t(t_k) t_k^{-\kappa} \quad (11)$$

其中, t 为交战时刻(即回合), $syn_t(t_k)$ 是网络体系 F_N 在 t 时刻沟通 t_k 次的同步率, $\kappa (> 0)$ 为时间重要性参数, 整体效能是对具有统一意识的有效兵力数量的估计。

2.5 体系对抗网络演化算法

定义9 一个体系对抗的交战回合是双方有效兵力相互进行一轮攻击的过程, 一个交战回合包括两个阶段:(1)内部协同期, 各单元感知态势, 沟通/协商, 达到统一意识;(2)外部交战期, 具有统一意识的有效兵力各单元无重复地随机攻击对方单元。

定义10 $A_R^i = E^{[i]}$ 是 R 攻击 B 的第 i 个单元的攻击矩阵, 其中 $E^{[i]}$ 是将 b_0 阶单位矩阵 E 的第 i 个对角元素置为 0, B 攻击 R 单元的第 j 个单元的攻击矩阵 A_B^j 类似定义, $r_0 = |R|, b_0 = |B|$ 。

算法1 在一个交战回合 t 中, 通过内部协同达成共识, R 方的有效兵力 OE_t^R 实施攻击并杀伤 B 方的 $n_t = \lfloor f_R OE_t^R \rfloor$ 个不同单元 i_1, i_2, \dots, i_{n_t} , 其中 $f_R > 0$ 是 R 方各单元的攻击成功期望(假定均相同), B 攻击 R 类似, 并更新各自的整体效能, 其毁伤效果可用矩阵形式的 Albert“去点”^[13] 操作表示

$$\begin{aligned} B_{t+1} &= B_t - \{i_1, i_2, \dots, i_{n_t}\}, & B_0 &= B \\ R_{t+1} &= R_t - \{j_1, j_2, \dots, j_{m_t}\}, & R_0 &= R \\ L_B^{t+1} &= A_{R_t}^{[i_1, i_2, \dots, i_{n_t}]} L_{B_t}^{[i_1, i_2, \dots, i_{n_t}]}, & L_B^0 &= L_B \\ L_R^{t+1} &= A_{B_t}^{[j_1, j_2, \dots, j_{m_t}]} L_{R_t}^{[j_1, j_2, \dots, j_{m_t}]}, & L_R^0 &= L_R \end{aligned}, \quad t = 0, 1, 2, 3, \dots \quad (12)$$

其中, $A_{R_t}^{[i_1, i_2, \dots, i_{n_t}]} = A_{R_t}^{i_1} A_{R_t}^{i_2} \dots A_{R_t}^{i_{n_t}}$ 是回合 t 的 R 攻击矩阵, 相应 B 攻击矩阵类似。体系对抗过程中交战回合依次反复进行, 直到一方的 $OE_t < 1$, 此方败北, 对抗结束。

3 体系对抗演化试验

对于红蓝双方拥有相同数量的作战资源, 但网络拓扑结构不同的对抗, 即 R 为 ER 随机网络^[16], B 为 BA 无标度网络^[17], 且 $|R| = |B| = 100, |L_R| = |L_B| = 196, f_R = f_B \equiv 0.2, u_R = u_B = d_R = d_B = 0.5, \kappa_R = \kappa_B, \varepsilon = 0.01$, 依文献[14]生成初始网络, 双方各单元的初始意见值服从区间 $[0, 1]$ 上的均匀分布, 同一方

① 即该组意见的(模糊)聚类中心, 此处简化为算术平均值, 对应现实中的数据融合。

内部协同期中单元沟通轮次、时间重要性参数不变,考虑如下两种对抗情况。

3.1 战场不变情况下体系对抗沟通策略的确定

所谓战场不变,依据定义 5,即 $c_rate^{(R)} = c_rate^{(B)} = 0$ 。

当 $\kappa_R = \kappa_B = 1$,各方以每个回合内部协同期中的沟通轮次数目为策略^[15],即取 $t^{(R)}$ 和 $t^{(B)}$ 在区间 $[1, 5]$ 内变化,经 500 次对抗试验得无标度网络 B 的胜率 $v^{(B)}$,见图 1。

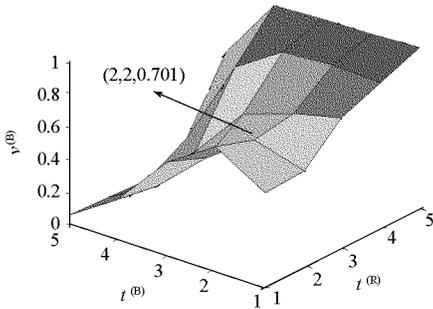


图 1 R、B 方沟通轮次与无标度网络 B 胜率

Fig. 1 The probability of scale-free network BLUE win for numbers of opinion exchange of both BLUE and RED

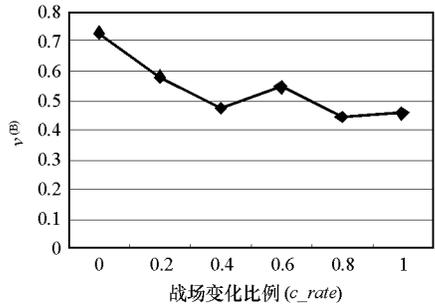


图 2 无标度网络 B 胜率随 c_rate 的变化

Fig. 2 The probability of scale-free network BLUE win for the battlefield variant c_rate

由图 1 可知, $(2, 2, 0.701)$ 处存在“鞍点”,即 $t^{(R)} = t^{(B)} = 2$ 时,双方达到一种对抗均衡,说明在对抗条件下,“运筹”时间与“出手”火力规模之间需要某种权衡;另外,蓝方胜率为 $0.701 > 0.5$,显然,无标度网络比随机网络具有较高作战效能。

3.2 战场变化情况下随机网络与无标度网络的对抗

所谓战场变化,依据定义 5,指以概率 $c_rate^{(R)} = c_rate^{(B)} \neq 0$ 随机地改变体系中单元的意见水平。

设时间重要性参数 $\kappa^{(R)} = \kappa^{(B)} = 1$,在无标度网络 B 对随机网络 R 的 100 次对抗试验中,发现无标度网络 B 的胜率 $v^{(B)}$ 随 c_rate 的增长下降,见图 2。

由图 2 可知,当战场的变化程度增大时,作战单元意见值的随机变化频繁,“折腾”(z_turn)效应增加,无标度网络的累积同步效应减小,无标度网络 B 的对抗优势逐渐减小,胜率由 72% 减小到 48%,于是,我们发现无标度网络的另外一种脆弱性,即对于战场环境剧烈变化的“同步脆弱性”。

综上所述,在对抗均衡条件下,当战场变化不大时,结构优势使无标度网络较随机网络更具对抗优势;但随着战场变化剧烈,无标度网络的“敏捷”转变为“同步脆弱”。

4 结论

根据现代体系对抗多领域相互影响的特点,对应地提出模拟体系对抗价值链的多层次超网络模型系统,以及体系对抗毁伤演化的矩阵形式,体系对抗模型中网络拓扑影响网络权值,权值演化又反过来影响网络拓扑,进而影响对抗效能,具体地,网络拓扑依次影响信息扩散、体系“共识”涌现、体系“自同步”,进而影响体系对抗的物理效应——毁伤,而兵力毁伤又反过来产生结构破损等网络拓扑灾变,上述体系对抗价值链循环往复,直至对抗结束。因此,体系对抗可视为一个社会系统跨域“自组织”与“它破击”的竞争过程。

本文重点研究了网络化体系对抗价值链中认知、同步与毁伤的定性定量关系,发现了无标度网络比随机网络“有效、鲁棒但脆弱”^[11]的新形式——“同步脆弱性”:在对抗均衡条件下,无标度结构的同步性在战场环境变化弱时好,而在变化强时差。

如何改进无标度网络的“同步脆弱性”,这是一个新问题。

针对区域目标的应急重调度问题。为提高区域目标的观测效率,有效发挥卫星的性能,提出区域目标的动态分解算法,该算法较传统的静态划分,性能有很大的提高,并且充分考虑卫星的差异。在区域目标划分基础上,文章又提出了基于启发式的动态调度算法,构建任务动态插入的启发式规则,提出了前向的约束检查机制和后向的约束冲突消解机制,以保证所生成的重调度方案合理、可行。

最后,文章通过具体算例证明了算法求解的有效性,尤其区域目标的动态划分算法显示了极大的优越性,但是也应看到,双向的解修复机制在保证解性能的同时,也降低了算法的求解效率,实际中 CHARTER 机制下的卫星多达几十颗,问题规模将远大于文中算例,因此求解速度将成为制约算法的瓶颈,下一步的研究中就是寻找一种更好的机制,在保证解效能的同时,提高求解速度。

参考文献:

- [1] 空间和重大灾害宪章[EB]. 国家空间技术减灾网. <http://www.ndrcc.gov.cn>.
- [2] Babulescu L, Howe A E, Whitley L D, et al. Trading Places: How to Schedule More in a Multi-resource Oversubscribed Scheduling Problem [C]// International Conference on Automated Planning and Scheduling (ICAPS-04). Whistler, British Columbia, CA: 2004.
- [3] Potts C H, Kovalyov M Y. Scheduling with Batching: A Review [J]. European Journal of Operational Research, 2000, 120 (2): 228-249.
- [4] 贺仁杰. 成像侦察卫星调度问题研究 [D]. 长沙: 国防科技大学, 2004.
- [5] Bianchessi N, Righini G. Planning and Scheduling Algorithms for the COSMO-SkyMed Constellation [J]. Aerospace Science and Technology, 2008, 12(7): 535-544.
- [6] Bianchessi N. Planning and Scheduling Problems for Earth Observation Satellites: Models and Algorithms [D]. Italy: Universit degli Studi di Milano, 2006.
- [7] Bensana E, Verfaillie G, Agnese J C, et al. Exact and Approximate Methods for the Daily Management of an Earth Observing Satellite [C]// Symposium on Space Mission Operations and Ground Data Systems. Munich, Germany: 1996.
- [8] 阮启明, 谭跃进, 李永太, 等. 基于约束满足的多星对区域目标观测活动协同 [J]. 宇航学报, 2007, 28(1): 238-242.
- [9] 白保存, 贺仁杰, 李菊芳, 等. 面向点及区域目标的遥感卫星任务调度 [J]. 国防科技大学学报, 2009, 31(2): 59-64.
- [10] 白保存. 考虑任务合成的成像卫星调度模型与优化算法研究 [D]. 长沙: 国防科技大学, 2008.
- [11] Tan Y J, Wang P. Joint Scheduling of Heterogeneous Earth Observing Satellite for Different Stakeholders [C]// SpaceOps 2008 Conference. Heidelberg, Germany: 2008.
- [12] 王沛. 面向点目标的多星联合侦察调度问题及启发式算法研究 [D]. 长沙: 国防科技大学, 2006.

(上接第 146 页)

参考文献:

- [1] Garstka J, Alberts D. Network Centric Operations Conceptual Framework Version 1.0[M]. Evidence Based Research Inc., 2003.
- [2] Alberts D S, Garstka J J, Stein F P. Network Centric Warfare-developing and Leveraging Information Superiority [M]. 2nd Edition (Revised), Washington: CCRP Publication Series, 2001.
- [3] Barabási A L. Linked: The New Science of Networks [M]. Massachusetts: Perseus Publishing, 2002.
- [4] Nagumey A, Dong J. Supernetworks: Decision-making for the Information Age[M]. Cheltenham: Edward Elgar Publishing, 2002.
- [5] Ameral L A N, et al. Virtual Round Table on Ten Leading Questions for Network Research[J]. Eur. Phys. 38, 143-145, 2004.
- [6] Kalloniatis A. A New Paradigm for Dynamical Modelling of Networked C2 Processes[C]// 13th ICCRTS, 2008.
- [7] Weisbuch G, Nadal J P. Interacting Agents and Continuous Opinions Dynamics [R]. SFI WP 2001-11-072: 1-21.
- [8] 刘洪, 张龙. 群体沟通意见模式涌现的因素影响分析[J]. 复杂系统与复杂性科学, 2004, 1(4): 45-52.
- [9] Lanchester F W. Aircraft in Warfare: The Dawn of the Fourth Arm[J]. Engineering, 1914, 98, also in Newman J R eds. the World of Mathematics [C]// Redmond: Microsoft Press, 1988: 2113-2131.
- [10] 谭东风. 一种基于随机映射的战斗效能模型[J]. 国防科技大学学报, 2006, 28(6): 102-107.
- [11] 谭东风. 基于演化网络的体系对抗效能模型[J]. 国防科技大学学报, 2007, 29(6): 93-97.
- [12] 鲍鲜鲲. 基于复杂网络的作战同步建模与分析[D]. 长沙: 国防科技大学, 2009.
- [13] Albert R, Jeong H, Barabási A L. Attack and Error Tolerance of Complex Networks [J]. Nature, 406, 378-382, 2000.
- [14] Batagelj V. Efficient Generation of Large Random Networks [C]// XXIV Social Network Conference, 2004, 3: 12-16.
- [15] Fudenberg D, Tirole J. 博弈论[M]. 北京: 中国人民大学出版社, 2002.
- [16] Erdős P, Rényi A. On the Evolution of Random Graphs[R]. Publications of the Mathematical Institute of the Hungarian Academy of Sciences, 1960, 5: 17-61.
- [17] Barabási A L, Albert R. Emergence of Scaling in Random Networks [J]. Science, 1999, 286: 509-512.