

作战超网络多 Agent 模型

朱江¹ 刘大伟² 李翼鹏³

(南京陆军指挥学院 南京 210045)¹ (重庆通信学院军事信息工程系 重庆 400035)²

(国防科学技术大学训练部 长沙 410072)³

摘要 运用网络化作战的思想,分析了军事网络的性质,将复杂适应系统理论多 Agent 建模和超网络建模相结合,提出一种超网络多 Agent 模型。该模型使用超网络表示军事网络;在微观层面,扩展实体的网络属性;宏观层面考虑了网络的演化行为。模型结合实体关系对网络的涌现和整体网络对实体行为的驱动实现网络状态机,规定和反映网络的交互关系和发展变化,以更好地反映信息化作战条件下的体系对抗特征。使用该模型建立的仿真平台比较适合进行指挥、控制方面的实验。

关键词 超网络,多智能体,建模与仿真

中图分类号 E0 TP391.9 **文献标识码** A

Combat Super Network Multi Agent Model

ZHU Jiang¹ LIU Da-wei² LI Yi-peng³

(Army Command College, Nanjing 210045, China)¹

(Engineering Department, Chongqing Communication Institute, Chongqing 400035, China)²

(Training Department, National University of Defense Technology, Changsha 410072, China)³

Abstract After analyzing the properties of military network under network-centric war idea, combat super network modeling method was naturally and necessarily used to expressing the military network. By combing this method with CAS(complex adaptive system) theory and MAS(multi-agent system) modeling method, a super network agent model was proposed. In this model, at the micro level, the network properties are extended into entity properties, and at the macro level, the evolution behavior of overall network is taken into account by super network. The model regulates and reflects the interaction and dynamics of network with combination of emerge behavior from entity relationship to network, and driving efficiency from overall network characteristic to entity. Simulation platform by this model is very fit for command and control testing experiment.

Keywords Super network, Multi agent, Modeling and simulation

信息化条件下的作战具有明显的复杂性特征,作战系统是一个典型的复杂系统。对于作战复杂系统网络的建模,美国的 Jeffrey^[1]和澳大利亚的 Dekker^[2]运用复杂网络理论和方法,对 C2(Command and Control, 指挥控制)网络进行分析,证明了 C2 网络的一些小世界、无尺度性质,给出了基于复杂网络的 C2 网络效能度量方法。美军的 Einstein 系统使用复杂网络的邻接矩阵表示 C2 网络。但上述研究都是从宏观上通过统计方法来获得复杂网络模型参数,忽略了网络中实体的适应性以及网络中时时刻刻的涌现性。其构建的网络结构,只能是某种作战情况下的切片,而不能反映作战中 C2 网络的动态性以及随任务变化作战网络的适应性。另外,信息化作战的复杂性很大程度上源于实体相互关系所形成的网络复杂性,运用复杂网络方法研究作战网络时,把作战网络中的节点看作同一类型节点,节点间关系统一用 0,1 表示,不关心网络中节点的性质、位置等属性。但作战网络不能仅仅看

成一般的单一网络,而是由指挥、控制、协同、侦察、打击等相互关系和节点相互作用形成的多层次、不同功能的叠加网络^[3],其网络与网络相连,节点与节点相交,具有规模巨大、层次聚集、组分异质、整体涌现等特征。运用一般的复杂网络方法描述军事网络时,难以描述一些网络嵌套网络、网络驱动网络的系统,并会因为过度简化而使模型失真^[6]。所以该方法有较大的局限性。

为描述作战中实体的适应性和交互的涌现性,目前有一些研究尝试使用复杂适应系统多 Agent 建模方法描述网络实体。比如 WISDOM/WISDOM II 系统^[4]考虑到未来信息化作战的网络化特性,将作战网络分解成侦察网络、打击网络、指挥网络、目标网络,并将各个作战实体作为网络的一部分进行基于 Agent 的建模。但其对作战 Agent 模型做了很大程度的简化,其实体和它们之间的交互放在同一模型中,对实体通过交互产生的整体行为和实体自身行为没有作显著的区别,虽

到稿日期:2011-11-02 返修日期:2012-01-05 本文受自然科学基金项目(70771112)资助。

朱江(1981-),男,博士,讲师,主要研究方向为复杂适应系统建模、复杂网络, E-mail:pearlriver_1981@163.com;刘大伟(1981-),男,硕士,助教,主要研究方向为军事通信、信息系统;李翼鹏(1984-),男,硕士,助教,主要研究方向为复杂系统、建模仿真。

然可以从微观上规定实体的行为方式,但难以从宏观上把握网络整体行为。

作战复杂系统建模,需要更富军事含义的网络描述,以及更为成熟的网络模型。本文将超网络和多 Agent 方法相结合,以解决现有方法的不足。本文第 1 节引入超网络的网络表示方法;第 2 节阐述模型的主要原理;第 3 节分析了网络状态机的关键技术;第 4 节以网络结构性变化概念验证试验为例说明模型应用方法;最后是简单小结。

1 作战超网络描述

1985 年,美国科学家 Nagurney 把一些网络套着网络的多层级、多属性、多目标的网络称为超网络。作战网络具有超网络特征^[7,8]。作战超网络指用多种连接方式将多种类型节点连接起来构成的强调整体功能的多重异构网络。使用超网络描述和表示作战诸网络之间的相互影响和作用,可以处理一般复杂网络难以描述的军事网络表示问题。

超网络方法中,超网络的节点表示给定集合的网络,而边或弧表示给定集合中的结合移动和结合偏好。为了更好地描述作战超网络,对其形式化如下:

定义 1 作战超网络(静态) 表示为四元组, $G = \{V, L, A_v, A_L\}$

其中 $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ 是一个节点集,表示作战网络 G 的作战实体节点, k 是作战网络中的实体个数,下标 $i = 1, \dots, k$ 是节点的标记, $L = [l_{ij}]$ 是作战网络中表示节点之间的交互关系的矩阵, l_{ij} 是作战网络中表示两个节点 n_i 和 n_j 之间的指挥、控制、协同、侦察、打击等联系和关系。 $A_v = \{A_v^1, A_v^2, \dots, A_v^k\}$ 是节点集 V 的属性集, $A_v^i = [A_i^{(1)}, A_i^{(2)}, \dots, A_i^{(m)}]$ 是节点 n_i 的当前状态, $A_i^{(j)}$ 是节点 n_i 的第 j ($j \in \{1, 2, \dots, m\}$) 个属性值。 $A_L = \{A_L^1, \dots, A_L^f, \dots, A_L^k\}$ 是关系边集 L 的属性集, $A_L^r = [A_r^{(1)}, A_r^{(2)}, \dots, A_r^{(f)}]$ 是边 l_{ij} 的当前状态, $A_r^{(j)}$ 是边 l_{ij} 的第 r ($r \in \{1, 2, \dots, f\}$) 个属性值。属性是本身固有的一些性质。作战超网络中,节点属性主要涉及标识、时空属性、物理属性、品质属性等。边属性主要涉及处理信息时延、准确率、出错率、链路带宽、链路可靠性、链路类型、网络特征的各种参数。

定义 2 超网络加权连接矩阵

设用 n_k^k 表示网络 G 的边类型数,构造一个矩阵 $A_c = [a_{ij}^k]_{n \times n}$, 其中 $n = |V|$, $a_{ij}^k = [a_{ij}^{k1}, \dots, a_{ij}^{kf}]$, $0 \leq a_{ij}^{kr} \leq 1$, $k = 1, \dots, n_k^k$, 称矩阵 A_c 是超网络 G 的加权邻接矩阵。使用加权连接矩阵,通过权重取值反映节点间的相互作用的强度差异。

在作战体系中,节点之间相互关系往往有强弱,比如对于某一节点,直接上级节点的作用往往比同级节点的作用大。

定义 3 随任务演化动态作战超网络

作战中的关系网络实时变化,除了对那种基本固定、不变的静态关系进行描述,更需重视网络的演化和新特性的涌现,即对网络中动态关系进行描述。如图 1 所示,顶层动态网络是由任务自组织形成的。作战任务不同时,网络的结构会产生动态变化,一群个体为完成某项特定任务而聚集在一起,节点之间根据军事任务重构指挥、控制、协同关系,形成自组织群,群中包括关键节点和一般节点,关键节点是具有核心作用的节点,如指挥控制中心、通信中心。

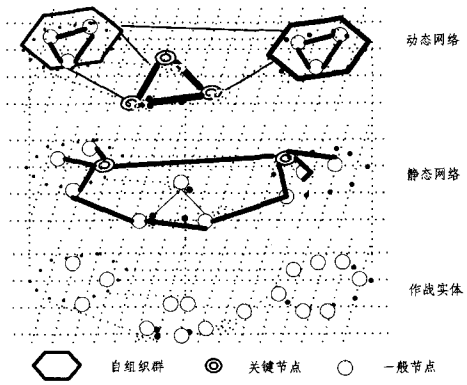


图 1 动态超网络

随任务演化动态作战超网络表示为时间的函数:

$$G(t) = \{V(Task_j), L(v_i, Task_j), A_v(t), A_L(t)\}$$

式中, $Task = \{Task_1, Task_2, \dots, Task_n\}$ 为所有作战任务项的集合,一项任务由多个实体完成, $l(v_i, Task_j)$ 表示作战实体与作战任务节点之间的关联关系, $V(Task_j) = f(Task_j, V) = \{v_i | v_i \in V, l(v_i, Task_j) > 0\}$ 表示参与完成任务项的作战实体。若作战实体 v_i 参与完成作战任务 $Task_j$, 则 $l(v_i, Task_j) > 0$, 其数值反映实体在任务中起的作用的强弱。

2 超网络多 Agent 模型

超网络多 Agent 模型围绕网络的概念构建,在宏观层面,利用超网络技术表示关系网络,规定和反映实体之间的交互关系及变化情况;在微观层面,实体基于关系网络相互联系,并根据环境做出相应的决策。模型中主要概念包括微观层面实体模型、微观层面网络实体模型、宏观层面网络演化表征、网络演化对实体的影响 4 个方面^[7]。

(1) 微观层面实体模型

实体模型描述了其感知并选择性地接收环境信息(战场感应器),根据规则分析做出相应的反应(行动效应器),并且实体能根据反馈调整自己的行为 and 规则。这种实体往往比较简单,一般使用刺激-反应 Agent 构建。

(2) 微观层面网络实体模型

网络实体模型是当实体内部是一个网络或将一个子网络看作一实体时,对实体模型的扩展。2002 年 Milo 提出网络模体(motif)^[8],其表示一种在真实网络中反复大量出现的网络连接模式。网络模体内,节点连接非常紧密,而模体间节点连接比较稀疏。

在作战网络中,尽管网络规模宏大、交互关系复杂,但在局部常常会出现固定的模式。任务共同体具有抱团结构,基于任务形成的网络内各实体的信息交互图常常是固定结构、反复出现,其中每一个节点都沿着一定的路径行使自己的功能,其可以看作信息化作战的基本网络实体。实践中,任务共同体由军事人员根据经验所制定的指挥规则所确定。

网络实体往往比较复杂,一般使用带有内部状态机的 Agent 构建。

(3) 宏观层面网络演化表征

网络演化是指网络自发的对网络节点和信息链路进行的结构重置。作战中,以任务为目标,节点进行自主的观察、判断、联结、变换、协调、选择和行动,以不断变化、演进的网络结构来适应外界环境的不确定性和复杂性。网络演化行为表征

指由微观层面实体交互产生、从宏观上能够加以观察的网络演化现象,表1列出部分典型网络演化表征。

表1 网络演化表征

分类	表征的释义
网络生成、消亡演化	随着实体生成、死亡产生的一种拓扑演化。随着实体的生成、死亡,网络拓扑会发生巨大的变化和调整,其结构的选择需要权衡拓扑结构变迁的风险和收益,以维持其运作效率。这种演化行为与战争中的增援、歼灭行动相关。
网络扩散演化	这是随着网络资源扩散形成一种拓扑演化。资源由一个节点传播到另外的节点,得到资源的节点成为新的传播源。这种演化行为可反映舆论战中谣言传播行动。
网络划分演化	这是模拟任务划分的一种拓扑演化。作战中将任务划分为若干子任务,每一子任务关联节点所形成的子网络客观上对完成整体任务的网络进行了一次划分。

(4)网络演化对实体的影响

作战中,实体遭受火力打击,网络中某条链路的状况由连通变为断开,这些都属于实体之间的直接作用,对实体的影响仅是单个的、孤立的。而网络演化对实体的影响通常是成群的、连续的。网络演化一般作为系统扰动,对实体影响不大。但其达到临界阈值时,网络扰动将通过局部的协同演化的传播影响到整个系统,产生量变到质变,影响到很多实体。

3 网络状态机构建

网络状态机是构建超网络多 Agent 模型的引擎,网络状态机为网络实体所有。状态机控制状态转化,使网络和实体的当前状态在外部环境作用下,根据价值体系选择激发内部动作而转变到另一个状态。

与一般实体状态机仅考虑实体状态的变化相区别,网络状态机更加突出网络演化对实体的影响。如图2所示, $s(I, J, t)$ 表示某一时刻的状态,包括实体的状态 I 和网络的状态 J ,其中网络的状态 J 是动态超网络 $G(t)$ 演化过程中的一个“暂态”。在一个模拟时间步长内,敌我双方 Agent 相互作用,引起其自身状态及网络表征的改变,网络表征的变化又对实体行为产生影响。这个过程在新的态势下不断循环进行。

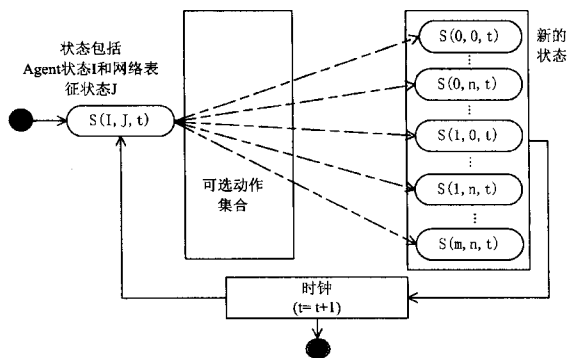


图2 网络状态机原理

价值体系选择激发内部动作的具体过程是基于每个时间步长采集的实体和网络状态,进行网络量算、网络分析及网络推理,以获得统计描述量来判定网络的表征性质,推导网络下一步的行为。

①网络量算:通过计算及使用工具来测试或验证网络的性能指标,所有的网络在每一个时间段或在固定时间长度 t 内得到测量。根据测量内容分为实体测量、拓扑测量和性能测量。实体测量,指对网络中实体的损伤、消耗等内容进行量

算;拓扑测量,指对超网络性质的统计描述量进行测量,可以使用联通度、聚集度、聚类系数、超网络类型同配指数、网络模体熵等统计描述量,它们均有对应的军事含义^[5];性能测量,指针对丢包率、时延、带宽、传输距离、信息完整率、信息有效质量、信息容量等内容进行测量。

②网络分析:主要通过分析大量数据空间来获得一些实用的规则,了解网络的动态特性,以进行网络推理。分析手段有时间序列分析、相关性分析等。通过时间序列分析,分析者可以在仿真过程中捕捉到随时间变化的动力学特点。通过相关性分析,可以理解哪种交互在战场上起何种作用。

③网络推理:是提供表征状态影响实体和所处网络的规则、表征状态相互转化的规则,以及网络演化,演变,网络中结点加入、离开,网络中边生成、消亡的规则进行根据条件到结果的因果推理。

基于网络量算、网络分析和网络推理,整个网络状态机就可以顺利运作。

4 网络结构变化适应性概念验证实验

所谓网络结构变化适应性概念验证实验,指当环境和对手发生大的变化时,网络结构产生的效果就会与作战任务不相适应,通过网络的设计、实验、验证以及网络结构的调整,使其能够满足作战的需要。

基于超网络多 Agent 模型构建仿真平台,以网络结构变化概念验证实验为例说明模型的应用。

(1)根据实际网络的真实数据构建超网络矩阵。

实际网络是在“演化”中暂时不变的一个“稳态”。通过“拍照”方式抓取实际作战网络,并进行统计分析,获取规律,使用加权邻接矩阵表达。

(2)使用基于模型的战斗仿真平台进行红蓝对抗交战,给出作战效果的度量指标。

传统作战,通常给出作战损伤、人员消耗等毁伤指标,但对于体系作战,还需要引入一些对应有军事含义的网络评估指标。例如:本实验使用网络化效能系数比较网络的效能潜力,衡量的是一次作战中平均每个节点参与任务的数量。

(3)获取交战中的“暂态”数据,进行数据测量和网络分析。

实际的交战关系网络是一个实时动态变化的网络,根据任务兵力组合后形成的动态网络对网络在对抗中某些时间点获取网络 and 实体的“暂态”数据,进行数据测量和网络分析。

表2是我们对某作战背景下4种网络及所获得的网络化效能参数的测量值和分析结果^[7]。

表2 4种网络“战初”和“战终”的网络化效能比较

网络“暂态”	T1 时刻网络化效能系数	T2 时刻网络化效能参数
信息与火力集中使用的网络	0.1472	0.1490
部分信息力量下配的网络	0.1546	0.1656
部分火力力量下配的网络	0.1680	0.1689
部分信息与火力下配的网络	0.1883	0.1926

通过网络分析可知,部分信息与火力下配置的网络结构,在此任务中最为合适。

(4)形成一种具有代表性质的“稳态”,依据新组织结构构建超网络,重复(2)~(4)。

通过实验证实,最优的网络拓扑结构往往是网络自适应

调整的目标,据此进行大量概念验证实验和实兵检验,以促进我军组织结构调整。寻求到下一“稳态”的最小耗费的调整路线,并给出调整路线图。

结束语 本文将多 Agent 建模方法和超网络建模方法结合,为信息化条件下模拟仿真提供了新的思路和途径,对信息化我军进行体系作战条件下的指挥控制实验研究具有重要的理论意义和应用价值。

参 考 文 献

[1] Cares, Jeffrey R, Raymond Christian and Rober Manke, Fundamentals of Distributed, networked Forces and the Engineering of Distributed Systems[M]. USA: NUWC-NPT Technical Report 11, 2002

[2] Dekker A H. Network Topology and Military Performance[C]// International Congress on Modelling and Simulation, Modeling and Simulation Society of Australia and New Zealand(MODSIM 2005). 2005;2174-2180

[3] Shi F L, Lei Y L, Zhu Y F. A military communication super network structure model for net centric environment[C]// Proceedings of 2010 International Conference on Computational and Information Sciences (ICCIS2010). Wuhan, 2010; 33-36

[4] Yang A, Hussein H A, Sarker R. Wisdom-II: A Network Centric Model for Warfare[C]// KES2005. Berlin: Springer, 2005; 3683-3688

[5] 张国宁, 沈寿林, 朱江, 等. 联合战斗的复杂网络多 Agent 建模仿真研究[J]. 计算机仿真, 2010, 6: 212-216

[6] 詹姆斯. 复杂理论与网络中心战[M]. 郁军, 译. 北京: 军事科学出版社, 2006; 1-25

[7] 沈寿林, 朱江, 等. 作战复杂系统实验关键技术及应用[R]. 南京: 军队科技进步一等奖, 2011

[8] Milo R, Shen-Orr S, Itzkovitz S, et al. Network motifs: simple building blocks of complex networks [J]. Science, 2002, 298: 824-827

[9] 王志平, 王众托. 超网络理论及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2008; 10-20

(上接第 31 页)

由

$$\begin{cases} \Pi P = \Pi \\ \sum_{i=1}^r \pi_i = 1 \end{cases}$$

式中, r 为可达状态的个数, π_i 是第 i 个可达状态的稳态概率, 计算出稳态概率矩阵为:

$$\Pi = (0.991672, 4.89436e-009, 0.00242559, 0.00590281, 2.74693e-008, 1.72739e-008)$$

$$\text{即 } P(M_0) = 0.991672, P(M_1) = 4.89436e-009, P(M_2) = 0.00242559, P(M_3) = 0.00590281, P(M_4) = 2.74693e-008, P(M_5) = 1.72739e-008.$$

也即我们要考察的系统处于正常状态、传输出错状态及挂起状态的概率如表 1、表 2 所列。

表 1 性能分析结果 1

实态	稳态概率
M ₀	0.99167
M ₂	2.4256 * 10 ⁻³
M ₃	5.9028 * 10 ⁻³

表 2 性能分析结果 2

实态	稳态概率
M ₀	0.996589
M ₂	1.97538 * 10 ⁻³
M ₃	2.43517 * 10 ⁻³

经对比,该结果远远达不到理论要求的 99.5%。通过观察不难发现系统处于挂起(C)状态的概率比较大。也就是说,由于无线信号覆盖不足,造成移动台无法登录网络,从而不能接收寻呼消息。为了避免挂起对通信的影响,主要依靠工程增加基站或直放站解决。增加了基站数目后,通信重新建立所需最多时延减少到 200ms。经稳态分析,得到系统处于挂起状态的概率大大减小,而状态 A 的概率为 99.6589%,达到了实际要求。因此增加基站数目的方法是可行的,今后我们会进行更多的优化实验研究。

结束语 本文对基于 UML 实时状态机的定量分析给出了初步的转化方法,建立了实时状态机中基本组成元素所对应的标号随机 Petri 网模型。状态机中各类活动在时间上的限制也被考虑在建模的元素中,这种间接的分析方法将实时

UML 状态机图的直观易懂和随机 Petri 网成熟的性能分析能力有机地结合在一起,对进一步的定量分析具有重要的意义。今后作者会继续探究如何用本文算法实现实际系统的性能分析。

参 考 文 献

[1] 李日新. GSM 网络测试仪器及其测试方法[J]. 电子质量, 2004 (12): 6-7

[2] 张冬艳, 胡铭曾, 张宏莉. 基于测量的网络性能评价方法研究[J]. 通信学报, 2006, 27(10): 74-85

[3] 陈南阳. 简述 GSM 移动通信系统与移动电话性能测试[J]. 移动通信, 2004(S2): 73-75

[4] 雷擎, 王行刚. 应用网络仿真技术进行网络性能评价[J]. 计算机应用, 2001, 21(12): 11-14

[5] 徐海东, 李治文, 江峰, 等. 3G 无线网络性能评价 KPI 体系研究[J]. 电信科学, 2008(4): 16-19

[6] 许建华, 朱小刚, 戎蒙恬, 等. 运用系统仿真方法对 GSM/GPRS 网络性能的分析[J]. 通信技术, 2001(8): 50-52

[7] 林闯. 随机 Petri 网及系统性能评价 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2005

[8] Zimmermann A, Freiheit J, German R, et al. Petri net modelling and performability evaluation with TimeNET 3. 0[C]// LNCS 1786. 2009; 188-202

[9] Bernardi S, Donatelli S, Merseguer J. From UML sequence diagrams and statecharts to analysable Petri net models[C]// Proceedings of the Third International Workshop on Software and Performance (WOSP2002). Rome, Italy, ACM, July 2008; 35-45

[10] 沙静, 蒋昌俊. 基于 UML 实时状态图的定量分析[J]. 系统仿真学报, 2008, 20(8): 1957-1960

[11] 3rd Generation Partnership Project, GSM 04. 08 v6. 13. 0[S]. Mobile Radio Interface Signaling Layer 3 Specification

[12] Ciardo G, Lindemann C. Analysis of deterministic and stochastic Petri nets[J]. Performance Evaluation, 1993, 8(8): 160-169