

6-4-2020

Dynamic Evolvement and Emergence Modeling for Distributed Operational Systems Capability

Yinghui Yang

1. Information and Navigation College, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China;;;

Jianhua Li

1. Information and Navigation College, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China;;;

Mingli Nan

1. Information and Navigation College, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China;;;2. The Unit 95881 of PLA, Beijing 100095, China;;

Chen Qiang

3. The Unit 94285 of PLA, Zhucheng 261200, China;;

See next page for additional authors

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Dynamic Evolvement and Emergence Modeling for Distributed Operational Systems Capability

Abstract

Abstract: Aiming at dynamic characteristic of battlefield environment, particularity of operational systems, function heterogeneity and nonlinear effect of operational units, *a new dynamic evolvement and emergence modeling method for distributed operational systems capability was proposed. Operational systems super-network model composing of unit layer and network & system layer was built based on super-network theory, and relationship between two layers was analyzed. Concepts of unit capability, network & system capability, systematic capability and fire procedure link were defined. Unit to capability mapping relationship and capability to capability relationship were researched respectively. Affects of unit self-effect, units' inter-effect, network promotion and battlefield environment on unit capability were studied, and unit capability evolvement model and systematic capability emergence model were built accordingly.* Taking aviation assault operations as an example, simulation results validate feasibility and validity of the method and model.

Keywords

operational systems, capability, evolvement, emergence, super-network, fire procedure link

Authors

Yinghui Yang, Jianhua Li, Mingli Nan, Chen Qiang, and Jifang Wen

Recommended Citation

Yang Yinghui, Li Jianhua, Nan Mingli, Chen Qiang, Wen Jifang. Dynamic Evolvement and Emergence Modeling for Distributed Operational Systems Capability[J]. Journal of System Simulation, 2016, 28(7): 1497-1505.

分布式作战体系能力动态演化涌现建模

杨迎辉¹, 李建华¹, 南明莉^{1,2}, 陈强³, 温己方⁴

(1. 空军工程大学信息与导航学院, 西安 710077; 2. 95881 部队, 北京 100095; 3. 94285 部队, 诸城 261200; 4. 94789 部队, 南京 210018)

摘要: 针对战场环境的动态性、作战体系的层次性、作战单元的异质性及交互作用的非线性, 提出一种分布式作战体系能力演化涌现建模方法。基于超网络理论, 构建由单元层、网系层组成的分布式作战体系超网络模型, 分析了层级网络间的关系; 定义单元能力、网系能力、体系能力、交战程序链等概念, 研究了单元—能力映射关系和能力—能力关联关系、作战单元自作用、作战单元相互作用、作战网系促进作用、战场环境等因素对单元能力的影响, 建立单元能力演化模型和体系能力涌现模型。以空中突击作战为例进行仿真分析, 结果验证了方法与模型的可行性和有效性。

关键词: 作战体系; 能力; 演化; 涌现; 超网络; 交战程序链

中图分类号: E917; N945 文献标识码: A 文章编号: 1004-731X (2016) 07-1497-09

Dynamic Evolvement and Emergence Modeling for Distributed Operational Systems Capability

Yang Yinghui¹, Li Jianhua¹, Nan Mingli^{1,2}, Chen Qiang³, Wen Jifang⁴

(1. Information and Navigation College, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China; 2. The Unit 95881 of PLA, Beijing 100095, China; 3. The Unit 94285 of PLA, Zhucheng 261200, China; 4. The Unit 94789 of PLA, Nanjing 210018, China)

Abstract: Aiming at dynamic characteristic of battlefield environment, particularity of operational systems, function heterogeneity and nonlinear effect of operational units, a new dynamic evolvement and emergence modeling method for distributed operational systems capability was proposed. Operational systems super-network model composing of unit layer and network & system layer was built based on super-network theory, and relationship between two layers was analyzed. Concepts of unit capability, network & system capability, systematic capability and fire procedure link were defined. Unit to capability mapping relationship and capability to capability relationship were researched respectively. Affects of unit self-effect, units' inter-effect, network promotion and battlefield environment on unit capability were studied, and unit capability evolvement model and systematic capability emergence model were built accordingly. Taking aviation assault operations as an example, simulation results validate feasibility and validity of the method and model.

Keywords: operational systems; capability; evolvement; emergence; super-network; fire procedure link

引言

分布式网络化作战是现代战争的基本特征, 其



收稿日期: 2015-07-31 修回日期: 2015-10-18;
基金项目: 国家自然科学基金(61401499, 61174162),
国家社会科学基金(14GJ003-172, 12GJ003-130);
作者简介: 杨迎辉(1988-), 男, 河南洛阳, 博士生,
研究方向为作战信息流转、复杂系统建模。

作战体系是由众多分散配置, 具有自主特性和适应能力的作战单元所构成的动态、开放复杂巨系统^[1]。作战体系能力是作战单元功能属性及其在动态演化中所呈现特性的统称, 具有层次性、突变性、非线性、动态关联性特征, 可伴随作战进程演化涌现出更高层级的作战能力。研究分布式体系作战能力动态演化涌现原理及一般过程, 建立相应的能力演化涌现模型, 对探索现代战争制胜机理, 促进战

斗力生成提高具有重要意义。

目前,演化涌现已成为互联网、交通网、科研合作网等研究焦点,常用建模方法有多 Agent 系统、非线性动力学、随机方程等。John Holland 提出复杂适应系统理论,其中的信息涌现理论,奠定了信息自组织和涌现现象的研究基础^[2]; Chai Lei 等针对社会多 Agent 系统,提出一种在没有完全信息的环境中,有效描述系统演化动力学行为的马尔科夫链模型^[3]; Fatihcan M Atay 提出非扩散耦合和时间延迟是复杂系统的演化机理,并认为简单个体通过机理作用,可在复杂系统中达成同步,在全局层面涌现出复杂动力学特性^[4]; 杨克巍等借鉴平行执行方法,将其与系统交互行为及关系分析结合在一起,提出一种装备体系能力导向涌现的可行方法,有效支撑体系能力的生成与发展^[5]; 谭文堂等采用狄利克雷组合多项式模型,分析文本集之间话题的差异,进而对文本集中词的涌现现象进行建模^[6]。

已有研究深化了对演化涌现建模的理论认知,但多数存在以下不足:(1)偏重经验总结式的定性描述,对影响因素之间的关联关系及变化规律研究,缺乏必要的建模仿真支撑;(2)对作战领域关注较少,尤其是结合具体作战行动,研究演化涌现机理还不够深入。为此,本文在描述分析作战体系、能力构成、关联关系、作用过程等基础上,探索建立一种分布式作战体系(Distributed Operational Systems, DOS)能力动态演化涌现模型,并以空中突击作战为例,进行仿真分析。

1 DOS 超网络模型

超网络(Super-network)概念最早由美国科学家 A.Nagurney 提出,通常指规模巨大、连接复杂、节点异质的网络,具有多层、多级、多维流量、多种属性/准则等特征^[7],主要用于描述“高于而又超于现存网络”的网络、分析多层网络结构相互间的作用与影响、研究网络均衡性等,目前已广泛应用在 Internet、交通网、物流网等领域。

1.1 DOS 超网络概念

由于 DOS 具有网络嵌套网络、结构多层、节点异质、链路多级、流量多维等特点,符合超网络基本特征^[8],可运用超网络理论进行描述分析。

定义 1 分布式作战体系超网络(Super-network of Distributed Operational Systems, SN_DOS)是为适应分布式作战需要,由单元层、网系层构成的分层异构复杂网络,包括情报、指控、火力 3 种单元属性和信息连边类型,可表示为网系层 L^N 和单元层 L^U 组成的二元函数,即 $SN_DOS = \Theta(L^N, L^U)$ 。

1.2 DOS 超网络结构

1.2.1 单元层

本文的单元层是由大量不同功能属性的作战单元,及相互间信息连边组成,记为 $L^U = (V^U, E^U)$ 。其中, V^U 为单元集合,按照功能属性,可分为情报单元 V_I^U 、指控单元 V_C^U 和火力单元 V_F^U , 表示为 $V^U = V_I^U \cup V_C^U \cup V_F^U$; E^U 为信息连边集合,分为情报信息连边 E_I^U 、指控信息连边 E_C^U 和火力信息连边 E_F^U , 表示为 $E^U = E_I^U \cup E_C^U \cup E_F^U$ 。

1.2.2 网系层

本文的网系层是通过信息连边,将作战单元按功能属性有序连接所构建的功能网络,包括情报网系 L_I^N 、指控网系 L_C^N 和火力网系 L_F^N , 满足 $L^N = L_I^N \cup L_C^N \cup L_F^N$ 。其中, L_I^N 由卫星、雷达等具有探测、侦察能力的情报单元及情报信息连边组成,记为 $L_I^N = (V_I^U, E_I^U)$; L_C^N 由指挥所、指通机等具有指挥、决策能力的指控单元及指控信息连边组成,记为 $L_C^N = (V_C^U, E_C^U)$; L_F^N 由飞机、导弹等具有攻击、毁伤能力的火力单元及火力信息连边组成,记为 $L_F^N = (V_F^U, E_F^U)$ 。各网系通过作战单元间的信息连边进行连接,如 L_I^N 和 L_C^N 通过 E_I^U 或 E_C^U 连接。

1.2.3 网络层级之间的关系

单元层 L^U 是 DOS 的基础,网系层 L^N 是作战单元功能属性的集中体现。网络层级之间是线性叠

加的传递关系, 但对 DOS 能力而言, 层与层之间并非都是线性叠加关系, 还可能存在大量的非线性作用关系。单元层 L^U 中单元数量、类型、关联关系的变化, 会直接影响网系层 L^N 的功能结构及内部信息连边, 进而影响到 DOS 能力的有效发挥。SN_DOS 结构如图 1 所示。

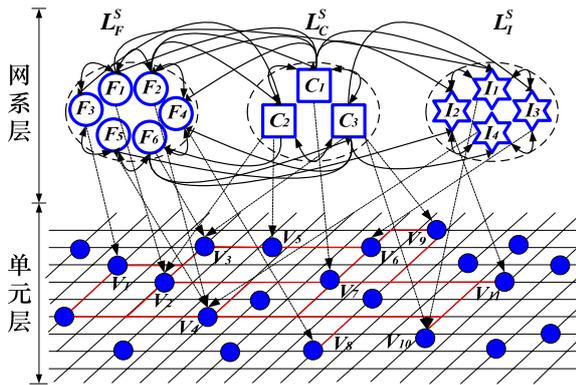


图 1 SN_DOS 结构示意图

2 DOS 能力及其关系描述

2.1 基本定义

定义 2 单元能力是反映单个作战单元物理特性的固有属性, 记为 C^U , 如通信能力、干扰能力、侦察能力等。

定义 3 网系能力是反映若干作战单元由于相近功能组合所形成的固有属性, 记为 C^N , 属单元能力的上一层级, 如预警探测能力、指挥控制能力等。

定义 4 体系能力是反映作战单元由于异质功能聚合所形成的固有属性, 记为 C^S , 是由单元能力相互作用、相互影响而涌现出的更高层级能力属性, 属网系能力的上一层级。

定义 5 交战程序链是一条由特定的情报单元集 $\{V_{I-i}^U\}$ 、指控单元集 $\{V_{C-j}^U\}$ 、火力单元集 $\{V_{F-k}^U\}$ 组合而成, 能够协同感知、探测、跟踪、决策及毁伤敌来袭目标, 完成特定作战任务的杀伤链, 可表示为 $FPC = \{V_{I-i}^U\} \rightarrow \{V_{C-j}^U\} \rightarrow \{V_{F-k}^U\}$ 。每条交战程序链至少关联 3 个单元, 且情报、指控和火力 3 种类型的作战单元缺一不可。

2.2 DOS 能力关系

现代战争中, 完成一个特定的作战任务, 需要诸多作战能力共同参与并相互支持, 这些能力之间往往存在协同配合关系, 并非孤立地存在^[9]。

2.2.1 单元—能力映射关系

网系能力和体系能力均建立在单元能力基础之上, 每个单元能力都对应于具体的作战单元。通过单元—能力映射关系, 可将作战体系结构映射到作战能力结构中。某个单元可具备多项能力, 而某项能力也可归属于多个单元, 故单元与能力之间并非一一对应。设单元—能力映射矩阵为

$$M_{U-C} = [m_{V_i^U-C_j^U}]_{|V^U| \times |C^U|} \quad (1)$$

其中: $m_{V_i^U-C_j^U}$ 为单元 V_i^U 与能力 C_j^U 之间的映射关系, 如果二者存在关联映射, $m_{V_i^U-C_j^U} = 1$, 反之, $m_{V_i^U-C_j^U} = 0$; $|V^U|$ 为作战单元的数量, $i \in [1, |V^U|]$; $|C^U|$ 为单元能力的数量, $j \in [1, |C^U|]$ 。

当 M_{U-C} 为单位阵, $L_{FPC}(i, i+1) = 1$, $i \in [1, |V^U|]$ 时, 则称该 FPC 为 DOS 的基本交战程序链。

2.2.2 能力—能力关联关系

按照作战能力类型不同, 能力—能力关联关系可分为同层能力关联关系和层间能力关联关系。

(1) 同层能力关联关系

同层能力关联关系是用来描述同一层级作战能力之间相互影响、相互作用的关系类型。网系能力关联关系由单元能力关联关系引发, 为此本文主要分析单元能力关联关系。

规则 1 交战依赖关系

交战依赖关系是指在 t 时刻, 按照交战程序链的先后顺序, 单元 V_i^U 能力 C_i^U 与单元 V_j^U 能力 C_j^U 之间的相互关系。若 V_i^U , V_j^U 同属于 1 个交战程序链, 且顺序相邻, 则二者的交战依赖关系为 $R_{ij} = 1$, 否则 $R_{ij} = 0$ 。表示为

$$R_{ij} = \begin{cases} 1 & V_i^U, V_j^U \in FPC \text{ 且 } j = i+1 \\ 0 & \text{其他} \end{cases}$$

交战依赖关系 R 至少包含 2 类连边, 即情报信息连边 E_{I-FPC}^U 和指控信息连边 E_{C-FPC}^U , 故有 $R \supseteq \{E_{I-FPC}^U \cup E_{C-FPC}^U\}$, $E_{I-FPC}^U \subseteq E_I^U$, $E_{C-FPC}^U \subseteq E_C^U$ 。

(2) 层间能力关联关系

层间能力关联关系是用来描述单元能力、网系能力、体系能力之间聚合作用关系类型, 包括加权和组合、加权积聚合 2 种。设 t 时刻, 影响上层能力 C_i^T 的下层能力 C_{ij}^L 共有 n 个, 权重为 δ_{ij}^L , 则层间能力关联关系可表示为

$$C_i^T = \Phi(C_{i1}^L, C_{i2}^L, \dots, C_{im}^L; \delta_{i1}^L, \delta_{i2}^L, \dots, \delta_{im}^L) \quad (2)$$

规则 2 加权和组合关系

加权和组合关系是下层能力按一定权重以合作、互补的方式组合到上层能力中, 下层能力相互间是平等、独立的。任意下层能力的改变都会引起上层能力发生线性变化, 能有效突显权重较大下层能力的作用。该关系可表示为

$$C_i^T = \sum_{j=1}^n C_{ij}^{Lj} \cdot \delta_{ij}^L \quad (3)$$

规则 3 加权积聚合关系

加权积聚合关系适用于下层能力相互间关联性强、重要性各异, 但对上层能力都不可或缺的情况。任何一个下层能力为零, 都将导致上层能力为零, 能有效突显数值虽小, 但重要性较大的下层能力作用。该关系可描述为

$$C_i^T = \prod_{j=1}^n (C_{ij}^{Lj})^{\delta_{ij}^L} \quad (4)$$

在上述 3 种关系的共同作用下, 通过作战单元之间的局域非线性作用、作战体系与战场环境之间的耦合交互作用^[10], 经多次演化, 单元能力逐渐组合形成网系能力, 进而涌现形成体系能力, 如图 2 所示。此时, 作战体系与外部环境也达到相对稳定有序的平衡状态, 具有显著的动态性和鲁棒性。在此过程中, 一般只是作战能力在形态、结构、属性等方面的创新, 并非底层单元能力的改变。

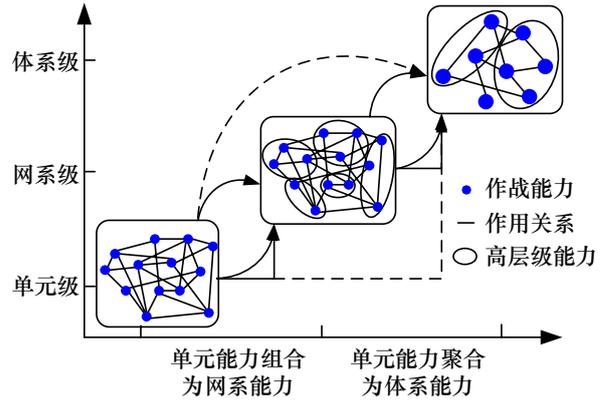


图 2 DOS 能力演化涌现过程

3 DOS 能力动态演化涌现模型

DOS 能力的演化涌现过程是动态而复杂的, 其单元能力主要受作战单元自作用、作战单元相互作用、作战网系促进作用及战场环境等因素影响。

3.1 作战单元自作用

每个作战单元都有独立的行为目标和规则, 能通过学习作战理论、开展军事训练、熟练装备操作、改进后勤保障等自作用, 提高作战能力^[11]。 t 时刻, 对作战单元 V_i^U , ρ_i^{Ut} 为自作用对单元能力的影响因子, 可描述为

$$\rho_i^{Ut} = (O_{it}^t)^{\omega_o} \cdot (T_{it}^t)^{\omega_r} \cdot (E_{dt}^t)^{\omega_e} \cdot (L_{bt}^t)^{\omega_l} \quad (5)$$

其中: O_{it}^t , T_{it}^t , E_{dt}^t , L_{bt}^t 分别为 t 时刻作战单元 V_i^U 的作战理论认知层次、军事训练时间、装备操作运用熟练程度、后勤保障水平; ω_o , ω_r , ω_e , ω_l 分别为上述四者对单元能力的贡献度, 满足 $\omega_o + \omega_r + \omega_e + \omega_l = 1$ 。

仅考虑作战单元自作用的影响, 则有

$$\frac{dC_i^{Ut}}{dt} = 1 + \rho_i^{Ut} \quad (6)$$

将式(5)代入, 则有

$$\frac{dC_i^{Ut}}{dt} = 1 + (O_{it}^t)^{\omega_o} \cdot (T_{it}^t)^{\omega_r} \cdot (E_{dt}^t)^{\omega_e} \cdot (L_{bt}^t)^{\omega_l} \quad (7)$$

3.2 作战单元相互作用

作战单元之间存在信息交互、协同合作、经验共享等形式的非线性作用, 加快了作战、装备、后

勤等局域信息传递速度, 促使各单元达成协同决策、有序整合, 有利于在更高层次上涌现出整体性功能^[12]。t 时刻, 作战单元 V_i^U , V_j^U 的单元能力分别为 C_i^{Ut} , C_j^{Ut} , 相互作用程度为 ξ_{ij}^t , 则作战单元 $V_j^U \rightarrow V_i^U$ 影响因子为

$$\sigma_{ji}^t = \xi_{ij}^t \cdot (C_j^{Ut} - C_i^{Ut})^{|C_j^{Ut} - C_i^{Ut}|} \quad (8)$$

仅考虑作战单元相互作用的影响, 则有

$$\frac{dC_i^{Ut}}{dt} = 1 + \sum_{j=1, j \neq i}^{K^t} \sigma_{ji}^t \quad (9)$$

其中, K^t 为与 V_i^U 产生相互作用的其他作战单元数量。将式(8)代入, 则有

$$\frac{dC_i^{Ut}}{dt} = 1 + \sum_{j=1, j \neq i}^{K^t} \left[\xi_{ij}^t \cdot (C_j^{Ut} - C_i^{Ut})^{|C_j^{Ut} - C_i^{Ut}|} \right] \quad (10)$$

3.3 作战网系促进作用

每个作战单元均从属特定作战网系, 参加联合军事演习, 接受装备更新、考核评价, 参与后勤保障业务训练及办公平台培训等^[13]。t 时刻, 作战网系 L^N 对所属单元 V_i^U 的单元能力促进作用描述为

$$\psi_i^{Nt} = \sum_{j=1}^{|L_i^{Nt}|} \left(\xi_{ij}^t \cdot \frac{|L_i^{Nt}|}{|L^{Nt}|} \right) \quad (11)$$

其中: $|L^{Nt}|$ 为作战网系 L^N 包含的作战单元数量; $|L_i^{Nt}|$ 为与 V_i^U 具有相同作战能力值的单元数量。

仅考虑作战网系促进作用的影响, 则有

$$\frac{dC_i^{Ut}}{dt} = 1 + \psi_i^{Nt} \quad (12)$$

将式(11)代入, 则有

$$\frac{dC_i^{Ut}}{dt} = 1 + \sum_{j=1}^{|L_i^{Nt}|} \left(\xi_{ij}^t \cdot \frac{|L_i^{Nt}|}{|L^{Nt}|} \right) \quad (13)$$

3.4 战场环境影响

DOS 存在于特定战场环境, 并与之发生物质、能量、信息交互, 外部有利因素(先进作战理论、军事改革、充足后勤资源等)、不利因素(虚假态势、错误情报、敌方干扰破坏等)同时作用于 DOS, 通过与体系内部的耦合作用, 影响作战单元性能发

挥^[14]。每次作用仅完成部分质变, 经多次部分质变后完成总质变, 使 DOS 成为介于有序与无序之间的具有涌现性的特殊状态。t 时刻, 对作战单元 V_i^U , 设 α_i^t 为战场有利因素影响因子, β_i^t 为不利因素影响因子, $\tau_i^{\alpha t}$, $\tau_i^{\beta t}$ 分别为有利、不利因素的权重, 则外部环境的综合影响因子为

$$\lambda_i^t = \tau_i^{\alpha t} \cdot \alpha_i^t - \tau_i^{\beta t} \cdot \beta_i^t \quad (14)$$

仅考虑战场环境的影响, 则有

$$\frac{dC_i^{Ut}}{dt} = 1 + \lambda_i^t \quad (15)$$

将式(18)代入, 则有

$$\frac{dC_i^{Ut}}{dt} = 1 + \tau_i^{\alpha t} \cdot \alpha_i^t - \tau_i^{\beta t} \cdot \beta_i^t \quad (16)$$

3.5 DOS 单元能力演化模型

设 μ_i^1 , μ_i^2 , μ_i^3 , μ_i^4 分别为作战单元自作用、相互作用, 作战网系促进作用, 及战场环境的权重, 满足 $\sum_{r=1}^4 \mu_i^r = 1$ 。t 时刻, 由式(6)(9)(12)(15), 可得作战单元 V_i^U 的单元能力演化模型为

$$\begin{aligned} \frac{dC_i^{Ut}}{dt} = & 1 + \mu_i^1 \cdot \rho_i^{Ut} + \mu_i^2 \cdot \sum_{j=1, j \neq i}^{K^t} \sigma_{ji}^t + \mu_i^3 \cdot \psi_i^{Nt} + \mu_i^4 \cdot \lambda_i^t \\ \text{即 } \frac{dC_i^{Ut}}{dt} = & 1 + \mu_i^1 \cdot (O_{it}^t)^{\omega_o} \cdot (T_{it}^t)^{\omega_r} \cdot (E_{dt}^t)^{\omega_E} \cdot (L_{bt}^t)^{\omega_L} + \\ & \mu_i^2 \cdot \sum_{j=1, j \neq i}^{K^t} [\xi_{ij}^t \cdot (C_j^{Ut} - C_i^{Ut})^{|C_j^{Ut} - C_i^{Ut}|}] + \mu_i^3 \cdot \sum_{j=1}^{|L_i^{Nt}|} \left(\xi_{ij}^t \cdot \frac{|L_i^{Nt}|}{|L^{Nt}|} \right) + \mu_i^4 \cdot (\tau_i^{\alpha t} \cdot \alpha_i^t - \tau_i^{\beta t} \cdot \beta_i^t) \quad (17) \end{aligned}$$

3.6 DOS 体系能力涌现模型

由于触发体系能力涌现的作战单元及能力事先并非完全可以预知, 只能先根据交战程序链确定参战单元, 再根据参战单元所具有的能力属性, 确定涌现为体系能力的单元能力范围^[13,15]。根据涌现性的一般原理, 涌现只能通过异质作战能力的聚合作用产生, 同质作战能力之间不能产生出涌现性, 只能通过组合作用, 进一步强化同质作战能力。

(1) 同质单元能力组合

设交战程序链中, 有 k 个作战单元共同具有相同的某个单元能力 C_i^U , 在 t 时刻, 则有

$$C_i^{Ut} = \sum_{j=1}^k C_{i-j}^{Ut} \quad (18)$$

(2) 异质单元能力聚合

根据交战程序链, 得出影响体系能力 C^S 且存在交战依赖关系的单元能力 C_i^U 共有 m 个, 权重为 δ_i^U 。 δ_i^U 只与 DOS 结构特性相关, 是固定值, 不随时间变化而改变。在 t 时刻, 体系能力 C^{St} 的涌现模型为

$$C^{St} = \prod_{i=1}^m [C_i^{Ut}]^{\delta_i^U} \quad (19)$$

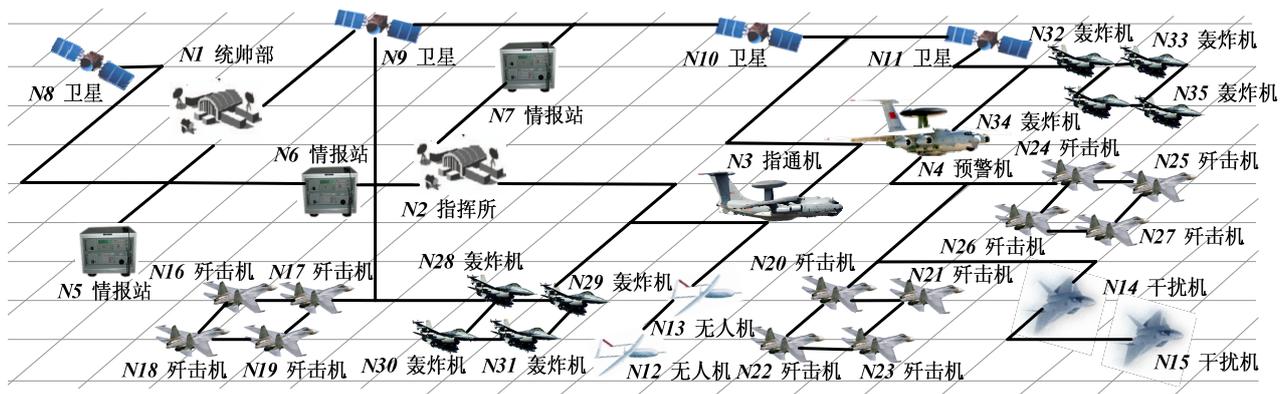


图 3 AAO 高层作战概念

4.1 AAO 交战程序链

$N_1 \sim N_4$ 为指控单元, 连同内部的指控信息连边, 构成指控网系 L_C^N ; $N_5 \sim N_{13}$ 为情报单元, 连同内部的情报信息连边, 构成情报网系 L_I^N ; $N_{14} \sim N_{35}$ 为火力单元, 连同内部的火力信息连边, 构成火力网系 L_F^N 。假设某次突击行动的作战流程为:

第 1 步 N_1 受领作战任务后, 向 $N_6 \sim N_9$, N_{13} 下达反映其情报需求的指挥信息。

第 2 步 N_6 , N_7 整理上报已有情报, N_8 , N_9 临空收集敌机场、力量部署、后勤资源分布等情报并回传, N_{13} 深入敌境收集地面布防、兵力机动、物资调配等情报并回传。

带入式(18), 则有

$$C^{St} = \prod_{i=1}^m \left[\sum_{j=1}^{i_k} C_{i-j}^{Ut} \right]^{\delta_i^U} \quad (20)$$

其中, i_k 为具有相同单元能力 C_i^U 的作战单元数量。

4 仿真实验

以信息化条件下的空中突击作战(Aviation Assault Operations, AAO)为例, 仅考虑 1 个统帅部、1 个指挥所、1 架指通机、1 架预警机、3 个情报站、4 颗卫星、2 架无人机、2 架干扰机、4 个歼击机编队(共 12 架)、2 个轰炸机编队(共 8 架), 共 35 个作战单元参战的情况, 建立高层作战概念如图 3 所示。保密原因, 文中仿真参数取值均不反映现实情况。

第 3 步 N_1 分析多源情报, 结合装备、后勤保障能力, 定下作战决心, 制定作战计划, 下达给 N_2 ; N_2 将作战计划细化为各作战单元行动的实施方案、协同规定、保障方法等, 下达给 N_4 。

第 4 步 N_4 根据战场情况, 优化调整计划方案, 向 N_8 , N_9 , N_{13} 下达情报侦察指令; N_8 , N_9 , N_{13} 侦察敌空中兵力出动、地防火力调整、后勤物资运输等情况, 并回传至 N_1 , N_2 , N_4 , N_6 , N_7 。

第 5 步 N_4 指挥 N_{14} , $N_{16} \sim N_{23}$, $N_{28} \sim N_{31}$ 灵活机动, 突破敌空中、地面阻击力量, 对敌重要机场、防空武器阵地、战略物资保障中心等实施火力打击, 将机动、交战情况及时回传; N_1 综合国内外形势变化情况, 做出突击停止或继续攻击的指令,

下达给 N_2, N_4 。

第 6 步 N_2 根据指令, 及时调整、制定作战方案, 组织各类情报、装备、后勤保障; N_4 根据指令, 指导空中兵力做进一步机动或作战。

对照上述作战流程, 得出 AAO 交战程序链如

图 4 所示, 可表示为

$$FPC_{AAO} = \{N_6 \sim N_9, N_{13}\} \rightarrow \{N_1, N_2, N_4\} \\ \rightarrow \{N_{14}, N_{16} \sim N_{23}, N_{28} \sim N_{31}\}$$

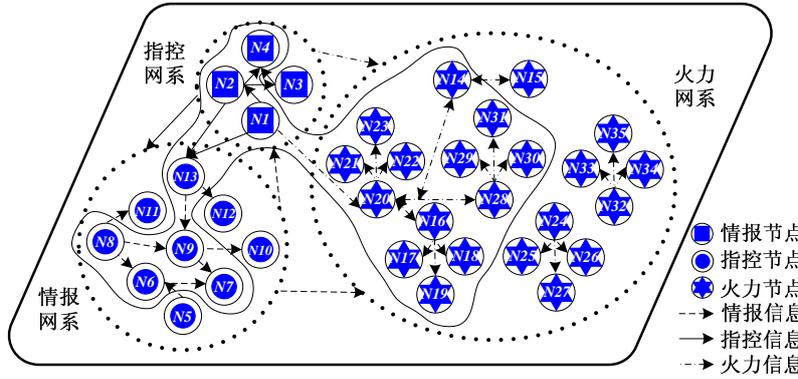


图 4 AAO 交战程序链

4.2 AAO 单元—能力映射矩阵

AAO 体系能力 C^S 由情报保障能力 C^I 、指挥控制能力 C^C 和火力打击能力 C^F 构成。其中, 情报保障能力 C^I 包括态势感知能力 C_A^I 、捕获跟踪能力 C_T^I 、目标识别能力 C_R^I ; 指挥控制能力 C^C 包括数据融合能力 C_D^C 、指挥决策能力 C_C^C 、武器控制能力 C_W^C 、信息分发能力 C_I^C ; 火力打击能力 C^F 包括快速反应能力 C_R^F 、精确打击能力 C_S^F 、目标毁伤能力 C_D^F 。对照 FPC_{AAO} , 结合参战单元功能属性, 可得单元—能力映射矩阵及能力初值如表 1 所示。

表 1 FPC_{AAO} 单元—能力映射矩阵及能力初值

编号	能力	初值	编号	能力	初值	编号	能力	初值
N_1	C_C^C	0.8	N_4	C_I^C	0.7	N_{14}	C_R^F	0.4
	C_I^C	0.3		C_R^I	0.9		C_S^F	0.5
	C_D^C	0.7		C_A^I	0.8		C_R^F	0.8
N_2	C_C^C	0.6	$N_{6\sim N_7}$	C_T^I	0.6	$N_{16\sim N_{23}}$	C_S^F	0.7
	C_I^C	0.5		C_A^I	0.6		C_D^F	0.8
	C_D^C	0.5		N_{13}	C_T^I		0.5	C_R^F
N_4	C_C^C	0.4	N_{13}	C_R^I	0.6	$N_{28\sim N_{31}}$	C_D^F	0.7
	C_C^C	0.4						
	C_W^C	0.6						

4.3 AAO 体系能力涌现模型

(1) 单元能力组合

FPC_{AAO} 包含 22 个作战单元, 其对应的单元能力按作战流程形成交战依赖关系, 共同构成 AAO 体系能力演化涌现的基本能力单元。在 t 时刻, 有

$$C_A^{It} = \sum_{i=8}^9 C_{A-i}^{It} + C_{A-13}^{It}, \quad C_T^{It} = \sum_{i=8}^9 C_{T-i}^{It} + C_{T-13}^{It}, \\ C_R^{It} = \sum_{i=6}^7 C_{R-i}^{It} + C_{R-13}^{It}, \quad C_D^{Ct} = C_{D-2}^{Ct} + C_{D-4}^{Ct}, \\ C_C^{Ct} = \sum_{i=1}^2 C_{C-i}^{Ct} + C_{C-4}^{Ct}, \quad C_I^{Ct} = \sum_{i=1}^2 C_{I-i}^{Ct} + C_{I-4}^{Ct}, \\ C_W^{Ct} = C_{W-4}^{Ct}, \quad C_R^{Ft} = C_{R-14}^{Ft} + \sum_{i=16}^{23} C_{R-i}^{Ft} + \sum_{j=28}^{31} C_{R-j}^{Ft}, \\ C_S^{Ft} = C_{S-14}^{Ft} + \sum_{i=16}^{23} C_{S-i}^{Ft}, \quad C_D^{Ft} = \sum_{i=16}^{23} C_{D-i}^{Ft} + \sum_{j=28}^{31} C_{D-j}^{Ft}.$$

其中, 每个作战单元的能力值根据单元能力演化模型确定, i, j 均为作战单元编号。

(2) 体系能力聚合

FPC_{AAO} 中作战单元的能力包含了全部的单元能力类型, 这些单元能力经过非线性聚合作用, 共同涌现出 AAO 体系能力。在 t 时刻, 有

$$C^{St} = (C_A^I)^{\delta_A^I} \cdot (C_T^I)^{\delta_T^I} \cdot (C_R^I)^{\delta_R^I} \cdot (C_D^C)^{\delta_D^C} \cdot (C_C^C)^{\delta_C^C} \cdot (C_W^C)^{\delta_W^C} \cdot (C_I^C)^{\delta_I^C} \cdot (C_R^F)^{\delta_R^F} \cdot (C_S^F)^{\delta_S^F} \cdot (C_D^F)^{\delta_D^F}$$

其中, $\delta_A^I, \delta_T^I, \dots, \delta_D^F$ 为单元能力对体系能力的权重。

4.4 仿真分析

4.4.1 参数设置

假设演化涌现过程中, 单位时刻各类影响因子、权重均保持不变。FPC_{AAO} 包含的参战单元数量、能力属性较多, 受篇幅所限, 本文仅以指挥所 (N_2) 的指挥决策能力 C_C^C 为例, 对初始时刻的仿真参数进行设置, 具体如表 2 所示。

表 2 初始仿真参数设置

参数	数值	参数	数值	参数	数值
O_{it}^0	0.8	L_{bt}^0	0.7	ω_E	0.2
T_{it}^0	0.6	ω_o	0.2	ω_L	0.2
E_{it}^0	0.7	ω_T	0.4	ζ^0	0.5
参数	数值	参数	数值	参数	数值
α^0	0.8	$t^{\beta 0}$	0.3	μ^3	0.2
β^0	0.4	μ^1	0.3	μ^4	0.2
$\tau^{\alpha 0}$	0.7	μ^2	0.3		

演化过程中, 其他作战单元及其单元能力的仿真参数, 可参照表 2 进行设置。

4.4.2 单元能力演化仿真

按照单元能力演化模型, 计算 FPC_{AAO} 中每个作战单元的单元能力值, 再根据单元能力组合关系, 得出每种单元能力的演化结果。设置演化步长 $\Delta t = 1$, 演化结束时刻 $T=30$ 。单元能力随时间演化的变化趋势如图 5 所示。

由图 5 可知, 尽管各个单元能力初值各不相同, 但均随演化时间的增加而逐渐增长, 在演化结

束前基本达到相对稳定状态。其中, 目标毁伤能力 C_D^F 的增长速率最快, 然后是指挥决策能力 C_C^C 、快速反应能力 C_R^F 和精确打击能力 C_S^F 。初值较大的单元能力, 如目标毁伤能力 C_D^F , 在演化过程中增长的幅度也相对较大。总体而言, 情报保障类单元能力变化较为平缓, 这是因为随着演化的推进, 战场态势日益复杂多变, 各类虚假、错误信息充斥战场信息环境, 增大了情报保障难度, 同时受情报单元设备、性能、配置等限制, 情报保障效果未发生显著变化。

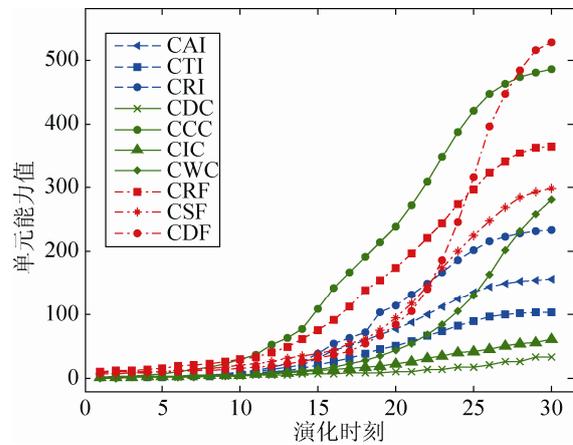


图 5 各单元能力随时间的演化曲线

4.4.3 体系能力涌现仿真

为进一步确定影响体系能力涌现的关键单元能力范围, 针对全部单元能力, 给出 4 种权重方案, 如表 3 所示。

方案 A 着重突显情报保障类单元能力, 方案 B 着重突显指挥控制类单元能力, 方案 C 着重突显火力打击类单元能力, 方案 D 着重突显演化过程中单元能力值较大者。4 种权重方案的体系能力涌现仿真结果如图 6 所示。

表 3 单元能力权重设置方案

方案	C_A^I	C_T^I	C_R^I	C_D^C	C_C^C	C_W^C	C_I^C	C_R^F	C_S^F	C_D^F
A	0.15	0.15	0.15	0.05	0.10	0.05	0.05	0.05	0.05	0.10
B	0.05	0.10	0.05	0.15	0.15	0.15	0.15	0.05	0.10	0.05
C	0.10	0.05	0.10	0.05	0.10	0.10	0.05	0.15	0.15	0.15
D	0.05	0.05	0.15	0.05	0.15	0.05	0.05	0.15	0.15	0.15

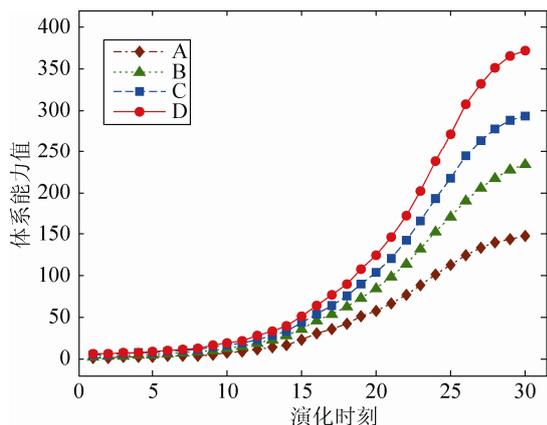


图 6 体系能力随时间的演化曲线

由图可知, 在 A, B, C 三种权重方案对应的体系能力涌现值中, 方案 C 最大, 方案 A 最小, 表明火力打击类单元能力对体系能力涌现的总体贡献度最大, 情报保障类单元能力的总体贡献度最小。同时, 方案 D 对应的体系能力涌现值均高于其他三种仅侧重某一类网系能力的方案, 表明三类网系能力中均包含若干单元能力, 能够对体系能力涌现产生较大影响。通过进一步分析方案 D 的权重设置情况, 可以确定其中权重较大的 5 种单元能力, 即目标识别能力 C_R^I 、指挥决策能力 C_C^C 、快速反应能力 C_R^F 、精确打击能力 C_S^F 和目标毁伤能力 C_D^F , 是影响体系能力涌现的关键单元能力。因此, 有针对性地提高上述 5 种单元能力, 能够快速、有效地促进 AAO 体系能力的生成与提高。

5 结论

研究分布式作战体系能力的动态演化涌现机理, 是破解现代战争信息主导、体系制胜规律的关键。针对分布式作战体系, 探索建立了一种能力动态演化涌现模型, 为作战演化涌现建模提供有益参考。出于对方法普适性的考虑, 建模中仅考虑节点运动状态、耦合强度和作战体系结构均保持不变的情况, 下一步将紧密结合作战单元的适应性和动态性, 综合考虑装备、后勤保障等因素影响, 深入研究基于 Agent 涌现性仿真、作战涌现引导与控制等问题, 加强与其他仿真实验的对比分析, 更加真实地分析作战体系能力的演化涌现特性及作用过程。

参考文献:

- [1] 胡晓峰. 战争复杂网络研究概述 [J]. 复杂系统与复杂性科学, 2010, 7(2/3): 24-28.
- [2] Barabasi A L, Albert R. Emergence of Scaling in Random Networks [J]. Science (S0036-8075), 1999, 286: 509-512.
- [3] Lei Chai, Jiawei Chen, Zhangan Han, et al. Emergence of Specialization from Global Optimizing Evolution in a Multi-agent System [C]// ICCS 2007. Germany: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2007: 98-105.
- [4] Fatihcan M Atay. Synchronization and Emergence in Complex Systems [J]. Pramana-J. Phys. Science (S0304-4289), 2011, 77(5): 855-863.
- [5] 杨克巍, 李明浩, 鲁延京, 等. 基于平行执行的单元体系涌现行为导向性方法 [J]. 系统工程与电子技术, 2013, 35(6): 1218-1225.
- [6] 谭文堂, 王楨文, 殷风景, 等. 一种面向涌现的比较性话题模型 [J]. 国防科技大学学报, 2013, 35(4): 146-155.
- [7] Liu Qiang, Fang Jinqing, LI Yong. Analysis of Layer Cross-degree on Super-network Models [R]// Annual Report of China Institute of Atomic Energy. Beijing, China: China Institute of Atomic Energy, 2013.
- [8] 邹志刚, 刘付显, 孙施曼, 等. 基于扩展粒度计算的防空体系结构超网络模型 [J]. 复杂系统与复杂性科学, 2014, 11(2): 24-35.
- [9] 杨耀华, 王维平, 包战. 面向作战网络的层次化涌现建模方法 [J]. 系统仿真学报, 2011, 23(12): 2777-2782.
- [10] 黄吉平. 复杂系统中基于场与结构耦合效应的一些涌现特性及其物理机制 [J]. 上海理工大学学报, 2011, 33(5): 418-424.
- [11] Radosław Michalski, Sebastian Palus, Piotr Bródka, et al. Modelling Social Network Evolution [C]// SocInfo 2011. Germany: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2011: 283-286.
- [12] Dirk Aeyels, Filip De Smet. Emergence and Evolution of Multiple Clusters of Attracting Agents [J]. Physica D (S0167-2789), 2010, 239 (12): 1026-1037.
- [13] Zhenwu Tao, Renbin Xiao, Lei Wang. Structure Emergence in the Evolution of Social Networks and its Case Study [J]. Procedia Computer Science (S1877-0509), 2013, 17(01): 981-988.
- [14] Rushed Kanawati. Empirical Evaluation of Applying Ensemble Methods to Ego-centered Community Identification in Complex Networks [J]. Neurocomputing (S0925-2312), 2015, 150(2): 417-427.
- [15] Mark W Jackwood, David Hall, Andreas Handel. Molecular Evolution and Emergence of Avian Gammacoronaviruses [J]. Infection Genetics and Evolution (S1567-1348), 2012, 12(6): 1305-1311.