

基于超网络的水面舰艇编队体系演化模型

刚建勋^{1,2}, 叶雄兵², 张颖³

1. 中国人民解放军军事科学院研究生院, 北京 100091

2. 中国人民解放军军事科学院联合作战实验中心, 北京 100091

3. 中国人民解放军 66410 部队, 北京 100042

摘要 动态演化是研究编队体系(SoS)结构优化和效能评估的认知根基。针对编队实体的异质性、系统的耦合性和体系的涌现性,从信息驱动性、功能涌现性、结构时变性、整体关联性4方面归纳水面舰艇编队的演化特征。分析了编队体系作战要素,将水面舰艇编队体系作战分成战前编队体系张成、战中编队体系对抗两阶段进行体系结构抽象。建立了编队体系的超网络模型,从不同的视角建立超网络概念模型和结构超网络模型。提出了基于超网络的任务驱动渐进演化模型和信息驱动激进演化模型,并给出演化模型的计算方法。通过编队体系作战的计算示例可知,演化模型能有效地动态描述编队体系对抗过程,可为编队结构优化和效能评估提供有力支撑。

关键词 水面舰艇编队;超网络;演化模型

随着信息技术的快速发展,水面舰艇编队武器系统的信息化程度大幅提升,与编队各型指控系统组成战场信息网络,成为新军事变革催生的新作战形态,推动现代海上方向战争逐渐演变为网络化编队体系对抗。作战体系从传统的平台中心体系转换为网络中心作战体系,其确定性更少而涌现性更多,强调行动而非实体,更多地关注相互关系而非具体事物^[1]。演化模型是编队作战体系结构动态构建的一项核心内容,用以揭示体系宏观特性和作战实体微观变化间的关联关系和本质规律。

复杂网络理论作为研究作战体系演化的有力工具,广泛应用于社会^[2]、经济^[3]、交通^[4-5]等领域。而超网络是复杂网络理论的最新研究成果,是不同性质的网

络组成的“网络的网络”,用来描述不同类型节点、关系构成的复杂系统,用以体现节点多类、信息多维、网络多层等特征,有效弥补一般复杂网络方法的不足,已成功应用于武器装备体系^[6]、军事通信网络^[7]、作战体系^[8]等军事领域的模型构建。温睿等^[9]提出一种动态演化模型代替真实的作战体系作为实验对象进行研究分析;张强等^[10]结合作战组织实体及组织结构关系的异质性,提出多维加权的作战网络演化模型;刘刚等^[11]引入复杂网络空间概念,提出基于复杂网络空间的网络演化模型;杨迎辉等^[12]针对性质不同、相互融合的复杂网络演变过程时变非均衡现象,提出一个多重边融合的复杂网络演化模型。以上研究从不同的视角描述了体系演化模型,但存在以下不足:一是针对实际网络特性

收稿日期:2018-11-07;修回日期:2018-12-13

作者简介:刚建勋,博士研究生,研究方向为联合作战实验仿真,电子信箱:gangjianxun@163.com;叶雄兵(通信作者),研究员,研究方向为联合作战实验模拟、军事运筹与系统工程,电子信箱:yxb1123@sina.com

引用格式:刚建勋,叶雄兵,张颖.基于超网络的水面舰艇编队体系演化模型[J].科技导报,2018,36(24):13-25;doi:10.3981/j.issn.1000-7857.2018.24.002

提出的网络演化模型,没有充分考虑网络生长形成的实际因素,使得作战体系和演化模型不完全匹配;二是通常用单参数表示节点能力,不能完全分析作战实体的多项能力对演化结果的作用;三是没有引入使命任务需求因素,构建的模型不能体现作战任务变化对体系演化的影响。因此,本研究针对水面舰艇编队结构特征和信息作用机理,综合编队作战实体的类型、功能,使命任务以及编队指挥流程,提出基于超网络的任务驱动渐进演化模型和信息驱动激进演化模型,并给出演化模型的计算方法,通过示例分析体系对抗内在的关联机理和动态演化规律。

1 水面舰艇编队作战体系演化特征分析

基于信息系统的编队作战体系,指以综合电子信息系统为基础支撑,由功能上互联的作战系统构成的有机整体。水面舰艇编队作战体系,不仅具有一般体系演化的基本特征,还具有编队体系自身的演化特征。

1) 信息驱动性。编队作战体系是多个信息化舰艇平台的综合体,信息是编队体系演化的外部主导因素,信息的获取、流转、存贮、分发制约着编队体系演化的时机,各类信息流的加载和融入作战系统,影响着体系演化精度和体系效能的高低。

2) 功能涌现性。编队体系演化是不同功能网络按照一定的组织机制、逻辑关系进行的综合集成,是不同功能网络融合的暂态平衡过程,每个状态都会在信息系统和体系结构的支撑下涌现出不同功能和特性。

3) 结构时变性。随着演化时间的推进,编队体系的节点增加和移除,网络边连接和删除,都会引起体系结构的动态变化,从而导致编队体系时刻处在演化进程之中。

4) 整体关联性。各类作战实体、作战系统融合成为完整的编队作战体系,各要素间相互依赖度增加,体系演化中单要素功能的发挥需要其它要素甚至整个体系的支撑,作战系统的局部调整也会对相关要素形成关联影响。

2 水面舰艇编队作战体系要素抽象

参战双方的编队体系可以抽象为探测节点、通信节点、指挥节点、行动节点等4类节点和相互关系组成

的网络。为更好地研究编队体系作战,本研究考虑的是对称模型结构,即假设参战双方都是由4类节点构成,并且互为对方的目标节点,因此编队体系作战是一个 S 、 C 、 D 、 I 、 T 等节点组成的复杂作战网络。按照作战进程将作战指挥流程分为两个阶段:组织作战阶段的指挥流程和作战实施阶段的指挥流程^[13]。组织作战阶段指挥的时间划分是从指挥员受领作战任务开始,到发起作战行动的时刻。作战实施阶段指挥的时间划分是从作战发起时刻开始,到作战行动结束为止。本研究将编队体系结构研究也相应地分为两个阶段:战前编队体系张成、战中编队体系对抗。

2.1 战前编队体系张成

编队指挥平台计划组织作战的主要工作包括^[14]:一是指挥所了解任务、判断情况、定下决心、拟制作战计划,传达作战命令;二是保障机构组织作战保障,确保作战实体、舰艇平台正常运转,物资油料按需供应;三是各兵种按时启用指挥平台,进行相关的兵力部署和战前训练工作。

按照战前编队体系的作战指挥流程,并对编队体系结构特性进行分析,其演化概念模型如图1所示,是在特定时间条件下抽取编队体系结构的拓扑信息,为研究体系动态演化提供一个直观印象。

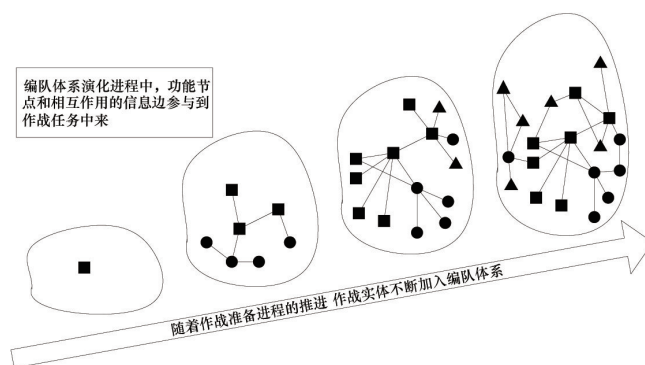


图1 编队体系张成示意

Fig. 1 Schematic diagram of formation SoS

编队体系张成的过程可分为以下3点。

1) 编队指挥控制节点 D_0 受领作战任务,并组织适当的探测节点 S_i 参与到编队作战体系中,掌握作战海域初期的战场态势。

2) 各级指挥控制节点 D_i 、通信节点 C_i 有序地纳入编队作战体系结构内,明确编队作战指挥关系,完成体系核心架构工作。

3) 编队的各型武器系统也就是行动节点 I_k 融入指

定的作战网路内,建立探测、流转、决策、打击的有效信息链路,从而使编队作战体系具备完整的海上方向作战能力。

2.2 战中编队体系对抗

信息化战争中的编队体系对抗,是在各自的信息系统和体系结构支撑下互相进行对抗性演化(图2)。体系交战过程实质是双方不断相互毁伤的过程,以红、蓝双方对抗毁伤为例说明交战过程。黑线代表红、蓝双方作战体系内部的信息流,虚线箭头代表红、蓝行动响应节点对另一方进行的对抗毁伤。红、蓝箭头指向并不是某一个固定的节点,而是以一定的概率指向对方体系的任意一个对抗节点,作战网络中的所有节点都是对方对抗毁伤的目标。双方被毁伤部分节点后,原来的体系裂解、结构凝聚、体系重组,然后再进行下一轮对抗,直到其中一方达到体系的坍塌点。

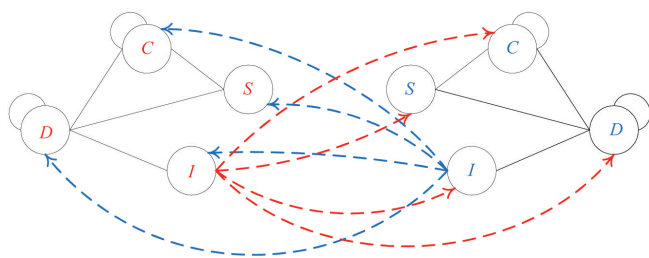


图2 编队体系交战示意

Fig. 2 Schematic of formation SoS engagement

体系交战中对敌方进行对抗毁伤过程可分为5点。

1) 探测节点 S 发现敌方目标,就是在网络中对应于根据己方获取目标的能力选出敌方网络中的若干节点作为备选节点。

2) 通信节点 C 将感知的态势信息进行区域态势信息共享,将指挥控制节点的协同信息进行区域传递。

3) 指挥控制节点 D_n 接收态势、目标信息,在备选目标中选择重要目标并进行火力分配。选择重要目标进行火力分配,在网络模型中对应于将备选节点进行重要性排序。

4) 行动节点 I_n 对网络目标对象进行毁伤。按照己方的对抗毁伤能力,毁伤敌方体系中的节点,在网络模型中对应删除敌方体系的网络节点。

5) 体系结构重组。被毁伤目标如果是指指挥控制节点,其所属的通信节点和行动节点重新配属兄弟单位

的指挥控制节点,在网络模型中对应于节点 D_i 被删除后,与其相连的节点 C_i 、 I_i 重新与其他节点 D_j 连接。

3 水面舰艇编队作战体系超网络概念生成

3.1 编队体系超网络概念模型

传统的水面舰艇编队研究主要以作战任务为视角,如编队防空作战、反潜作战等牵引相关的作战能力的需求分析,进而对编队在特定作战任务下的体系作战能力进行建模分析,但水面舰艇编队在执勤备战中是多种作战任务的复合体,需要从编队体系作战的视角,分析信息和体系结构对体系作战能力的助增影响,进而研究编队作战体系对作战任务的执行程度。从研究的范围来看,航母编队的体系结构可以分为作战实体层(物理层)、逻辑结构层(结构层)、机理牵引层(组织层)(图3)。

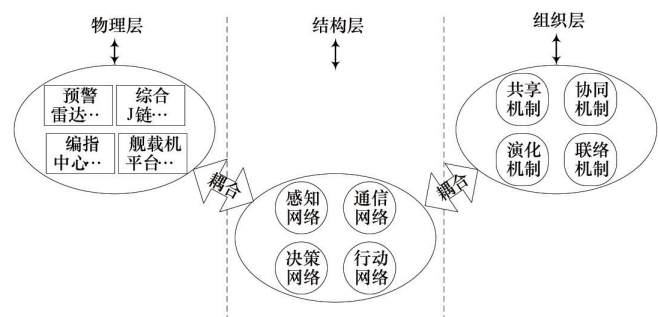


图3 编队作战体系的结构分类

Fig. 3 Structural classification of formation combat SoS

根据水面舰艇编队作战体系的特点,从体系运行机理和信息作用视角,由编队体系物理层网络 G_p 、结构层网络 G_s 、组织层网络 G_o 这3层网络构建编队作战体系超网络概念模型(surface ship formation hyper-network concept model, SSFHCM),编队体系层网络集 $V = \{G_p, G_s, G_o\}$,层间网络超边集 $H = \{E_{p-s}, E_{s-o}, E_{p-o}\}$,则构建的编队体系超网络为 $C = (V, H)$,如图4所示。

3.2 编队体系结构超网络模型

编队实体根据其功能不同抽象为异质网络节点,其关联关系可以抽象为网络超边。超网络概念模型中,结构层网络是多种异质逻辑节点和其相互关系构

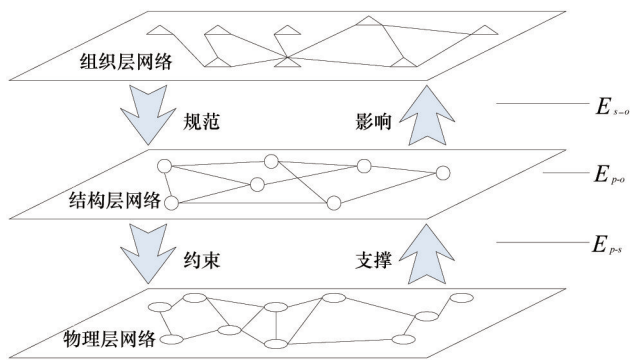


图4 编队体系超网络概念模型

Fig. 4 Hypernetwork concept model of formation SoS

成的多边异构网络,网络中的节点对应物理层的各种作战实体,如发现感知节点 S 、信息流转节点 C 、指挥决策节点 D 、以及信息响应节点 I ,按其功能区分为:感知网络、通信网络、响应网络、指挥决策网络(图5)。

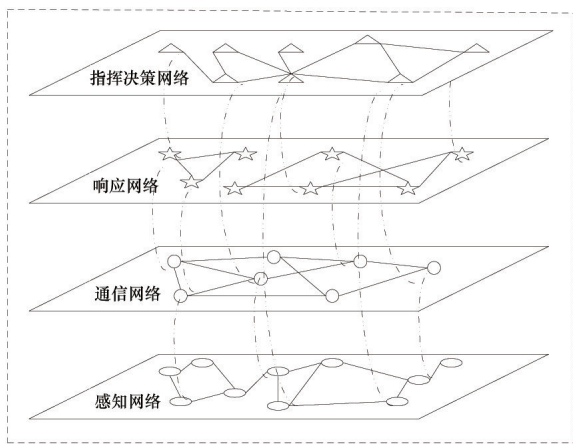


图5 编队体系结构超网络模型

Fig. 5 Hypernetwork model of formation architecture

对编队体系构建4层超网络结构,对任一层网络 $a, b \in \{1, 2, \dots, 4\}$, 其层网络节点数量为 N_a, N_b , a, b 网络的节点集 $X_a = \{x_1^a, x_2^a, \dots, x_{N_a}^a\}$, $X_b = \{x_1^b, x_2^b, \dots, x_{N_b}^b\}$ 。 a 网络边集合 $E_a = \{(x_i, x_j) | x_i, x_j \in a; i \neq j\}$ 。则 $G_a = (X_a, E_a)$ 可以用来描述一组功能网络的超图,网络层间的超边 $E_{ab} = \{(x_p, x_q) | x_p \in a, x_q \in b; p \in N, q \in N_b\}$, 记 $H = \{E_{ab} \subset X_a \times X_b, a \neq b\}$ 用来描述 a, b 层网络间存在的关联关系集合, $V = \{G_a | a \in \{1, 2, \dots, 4\}\}$ 用来描述层网络集合, 则水面舰艇编队体系结构网络集 $V = \{G_{ss}, G_{sc}, G_{sd}, G_{si}\}$ 层间网络超边集 $H = \{E_{ss-sc}, E_{ss-sd}, E_{ss-si}, E_{sc-sd}, E_{sc-si}, E_{sd-si}\}$, 编队体系结构超网络(formation architecture hyper-network model,

FAHM)表示为 $C = (V, H)$ 。

4 水面舰艇编队体系演化超网络建模

4.1 演化模型分类

编队体系演化是采用建模的手段对现有的水面舰艇编队体系的分析和改进过程,可以根据作战时刻分为战前渐进演化、战中激进演化^[15-16]。

渐进演化,是编队体系在特定作战环境中适应使命任务的变化而进行的自我调整和修正行为。它是在不改变原有体系的结构、过程等根本框架的平台上进行的适应性完善,体现了编队体系的自适应性特征。通常渐进演化的触发条件是问题研究的难点。

激进演化,是编队体系面临冲突性危机或者体系作战中进行的根本上的重构和重塑。它改变原有体系根本特征,体现了编队体系的复杂性、涌现性特征。通常激进演化是在有效性和时效性之间进行平衡,快速适应战场变化就得牺牲最佳有效性,而最佳有效性又需要降低时效性要求。

4.2 渐进演化模型构建

1) 使命任务分解。根据上级下达给编队的使命任务,总的任务目标可以采用作战规划分解为若干项可执行的具体作战任务如作战部署、情报探测、防空反导、对地打击、反潜作战等作战任务^[17],进而生成作战任务集 $OT = \{OT_1, OT_2, \dots, OT_0\}$ 。设起始时刻为 t_0 ,起始任务为 OT_1 ,按照编队作战任务时序和逻辑关系获取体系动态任务流,如 t_i 时刻编队需要执行 f 项作战任务,则该时刻任务集表示为: $OT^i = \{OT_1^i, OT_2^i, \dots, OT_f^i\}$ 。以编队防空作战为例,列出作战任务清单,主要任务有:筹划部署A、电子侦察B、防区外空中打击C、防区内防空反导D、近程防御系统攻击E,根据各具体作战任务的时序和逻辑关系,生成编队防空作战任务流(图6)。

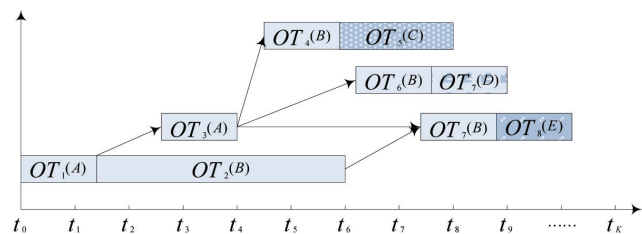


图6 编队防空作战任务时序和逻辑关系

Fig. 6 Timing and logic relations of formation air defense combat mission

2) 任务驱动的动态体系建模。根据 t_i 时刻编队体系作战任务的推进, 编队的作战任务集也发生相应的变化, 由 $OT(t)$ 变化至 $OT(t')$, 对应应在 SSFHCM 中组织层的逻辑节点和其关联关系的网络边的动态规划过程。通过物理层作战实体具体执行作战任务, 将作战任务

影响反馈到 FAHM 模型中, 表示作战任务期望的编队体系能力需求 $A(t) \rightarrow A(t')$, 驱动编队超网络结构 $C(t)$ 按照连接规则进行动态演化 $C(t) \rightarrow C(t')$, 如图 7 所示。其中红色标注的功能节点和网络边是每一阶段编队体系张成的体系增量。

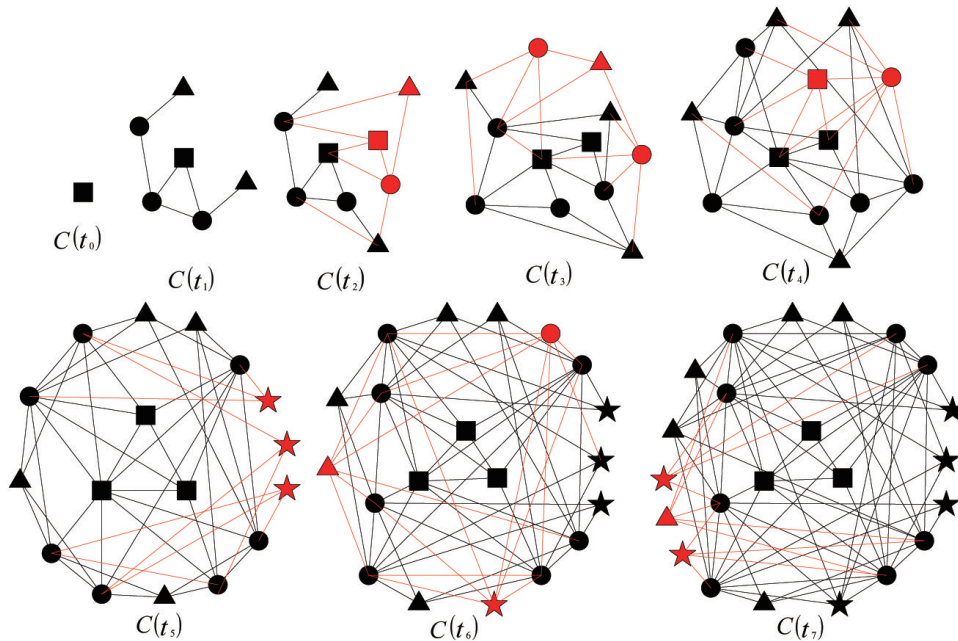


图 7 编队体系结构超网络演化

Fig. 7 Hypernetwork evolution diagram of formation architecture

3) 渐进演化模型构建流程。将任务驱动的动态编队体系建模过程细化, 得到编队渐进演化模型的建模流程(图 8)。

编队体系渐进演化建模流程以受领任务为初始状态, 通过任务分解模块, 理清起始时间、起始任务、以及各作战任务的逻辑关系, 通过 SSFHCM 模块, 分析作战任务的体系能力需求; 通过 FAHM 模块, 将体系能力需求转化为编队体系逻辑节点拓扑结构; 通过战前编队体系渐进演化, 使得编队作战潜力聚合成为体系作战能力。

4.3 激进演化模型构建

1) 信息链路分析。

现代作战循环理论认为, 作战指挥是观察(observation)、定位(orientation)、决策(decision)、行动(action)组成的闭环回路来描述 OODA^[18]。借鉴这种指挥环的思路, 结合作战实体抽象建模, 提出了 OODA 作战环概念^[19]。OODA 作战环实质上是体系作战目标信息从发

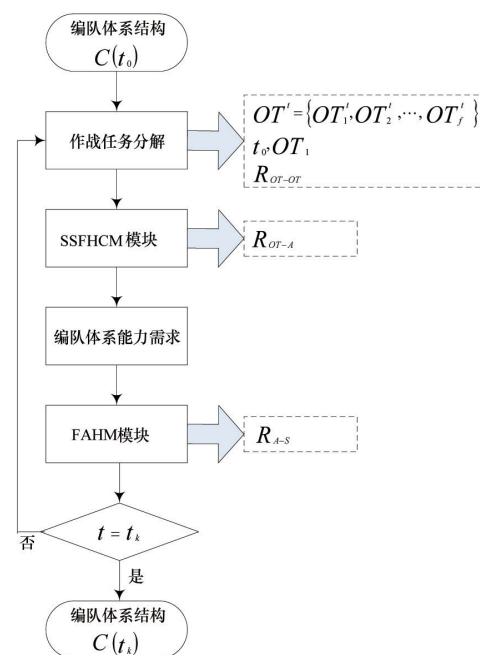


图 8 编队体系渐进演化建模流程

Fig. 8 Flow Chart of Formation SoS Progressive Evolution Modeling

现感知、信息流转、信息决策到信息响应一系列过程的有效信息链路循环,其节点为体系结构的异质功能节点,分别表示信息感知节点、信息流转节点、信息决策节点、信息响应节点,网络边代表每一路信息链路的信息交互关系。

编队体系信息链路网络的节点和网络边可以视为编队体系超网络节点和超边的相关映射,网络节点 $\nu_i, \nu_j \in V_s, 1 < i, j < |V_s|$, 是编队结构超网络节点在链路网络的映射;网边 e_{ij} 是编队结构网络超边在链路网络的映射,表示 ν_i, ν_j 两节点的信息关联关系,若 $e_{ij} \neq 0$, 表示两个节点在同一信息链路上,否则 $e_{ij} = 0$ (图9)。

2) 信息驱动的动态体系建模。

信息流依托信息链路在发现感知节点 S_i 、信息流转节点 C_i 、信息决策节点 D_i 、信息响应节点 I_i 以及作战目标节点 T_i 之间游走,链路的每个功能节点的稳定性和作战效能对下一个功能节点的作战效能的发挥形成制约,并影响整个信息链的作战效能。对于信息链路时效性来说,从发现感知节点到信息响应节点的信息链

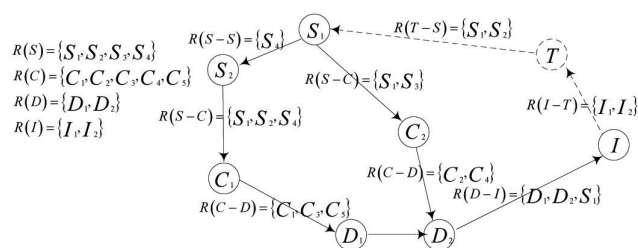


图9 编队体系信息链路

Fig. 9 Information link diagram of formation SoS

路越短,体现了作战体系的反应速度越快,其作战效能也就越高;编队结构的信息链路越多,达成预期作战目的的手段越多,体系抗毁性越强。

信息驱动编队体系新节点通过功能网络加入信息链路网络、网络内定向增加或删除连边以及删除功能失效节点(图10)。体系动态演化以自回避随机游走^[20]进行信息传播过程, $L(1 < L < A)$ 次跳动没有完成前,如果当前功能节点无可游走的邻居节点时便开始新一轮的游走。

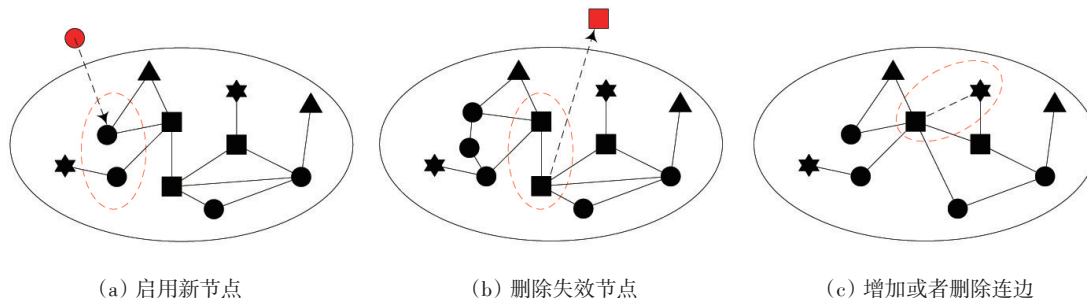


图10 信息驱动体系演化示意

Fig. 10 Schematic diagram of information driven SoS evolution

3) 激进演化模型构建流程。

以OODA作战环信息需求为目标,通过以功能节点复合度和能力值相关的择优连接规则,并设置功能节点连接上限值作为满负荷条件,从信息传播驱动网络功能节点和网络边演化的视角,建立动态激进演化模型的建模流程(图11)。编队体系激进演化现实特性反映在结构网络中表现为功能节点和网络边的增加/减少,功能节点加入信息链路网络的先后顺序和其能否作为核心节点无关。为了分析择优演化特性,设计随机演化进行同步对比。

以编队体系激进演化初始结构 $C(t_{i0})$ 为基础,在每个时间步长 t_{hi} 内执行以下4种操作之一:一是以概率

$p_1(0 \leq p_1 < 1)$ 启用 m_1 个新功能节点,赋予节点效能和连接概率,并加入相应的功能网络;二是以概率 $p_2(0 \leq p_2 < 1)$ 删除信息链路网络 m_2 个功能节点,并更新节点网络矩阵;三是在原来信息链路网络中以概率 $p_3(0 \leq p_3 < 1)$ 增加 m_3 条新网络边,以复合度优先选择功能节点的信息传播,通过自回避游走跳到下一个异质节点,生成新的网络连边;四是以概率 $1 - p_1 - p_2 - p_3$ 删除失效的 m_4 条信息链路连边,若删除过程中出现孤立的功能节点,对信息增益不起任何作用,可以从信息链路网络一并删除,但其仍然是体系超网络结构的有效功能节点。随后依据相关矩阵和指标参数更新编队体系超网络结构模型,完成步长 t_{hi} 下的体系动态演化。当

信息链路作战效能低于设定值 θ 或出现“断崖式骤降”，则激进演化过程终结，否则进入新一轮动态演化。

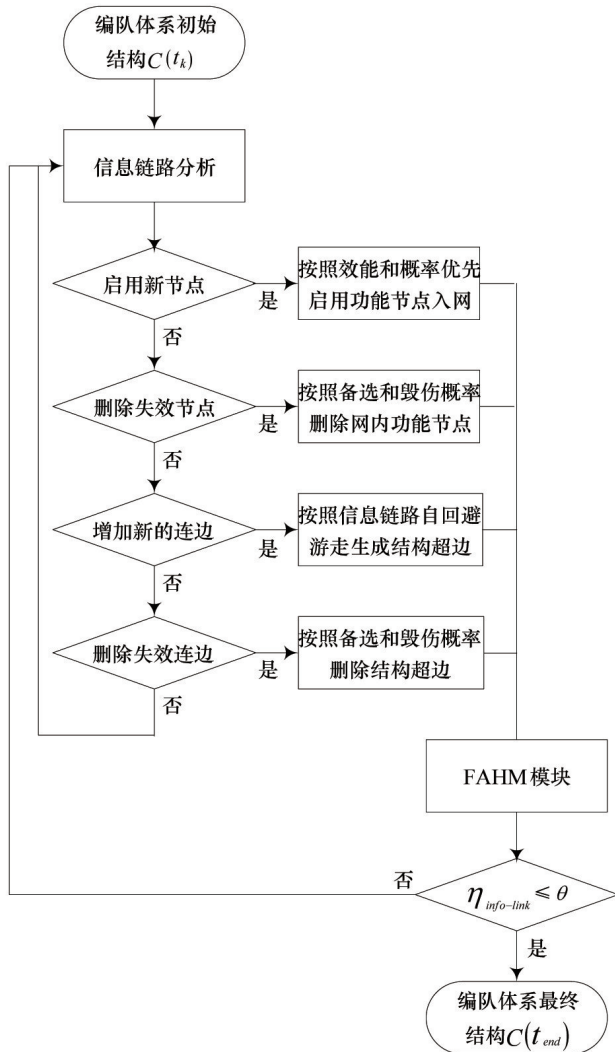


图 11 编队激进演化建模流程

Fig. 11 Flow chart of formation radical evolution modeling

5 编队作战体系演化模型计算

5.1 渐进演化算法

设编队作战任务的时序和逻辑关系组成SSFHCM组织层的演化机制,采用多元集合表示 $OTS = \langle OT, T_s, T_c, Z \rangle$, 其中 $OT = \{OT_1^t, OT_2^t, \dots, OT_l^t\}$ 代表 t_i 时刻具体作战任务集合; T_s 代表作战任务启动时刻,有最早开始时间 $t_{early-s}^{(i)}$ 和最晚开始时间 $t_{late-s}^{(i)}$ 之分; T_c 代表作战任务持续时间; z 代表编队特定作战任务需求的作战能力,在 t_i 时刻作战能力需求为 $Z_i^t = \{z_{i1}^t, z_{i2}^t, \dots, z_{ik}^t\}$ 。SSFHCM结构层的多元集合表示 $SS = \langle V_s, E_s, M_{s-node}, M_{s-link} \rangle$, 其中 $V_s = \{v_{s1}, v_{s2}, \dots, v_{sN}\}$ 代表同质功能节点集合, $E_s = \{e_{s1}, e_{s2}, \dots, e_{sl}\}$ 代表功能节点的关联关系, M_{s-node} 代表功能节点的属性矩阵, M_{s-link} 是网络边的连接属性矩阵。SSFHCM物理层的多元集合表示 $PS = \langle V_p, E_p, M_{p-node}, M_{p-link} \rangle$, 其中 $V_p = \{v_{p1}, v_{p2}, \dots, v_{pN}\}$ 代表编队作战实体的集合, $E_p = \{e_{p1}, e_{p2}, \dots, e_{pl}\}$ 代表作战实体之间的关联关系, M_{p-node} 代表作战实体的属性矩阵, M_{p-link} 是网络边的连接属性矩阵。演化计算侧重作战任务时序逻辑分析、任务和实体映射关系分析、实体和结构映射关系分析3个部分。

1) 作战任务的时序逻辑分析。

将水面舰艇编队总体作战任务分解为可执行的任务集 $OT(t_i) = \{OT_1^t, OT_2^t, \dots, OT_l^t\}$, l 是具体可执行子任务的数量,并且绘制主要任务流程图和扩展任务流程图(图12)。设置仅有子任务的节点为任务起点 OT_0 、终止子任务的节点为任务终点 OT_l ,任务集中的其它子任务用流程图中的节点表示,作战任务的时序逻辑关系

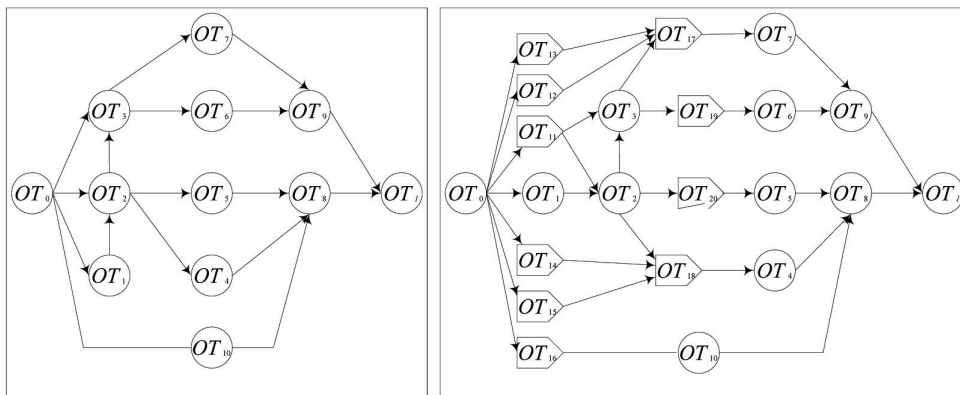


图 12 任务流程

Fig. 12 Task flow chart of carrier formation

用流程图的有向边表示,从流程图中可以获取子任务 OT_i 的依赖和影响关系。

在任务流程图的基础上,分析子任务的相互关系,并定义影响矩阵 $M_{or}(I \times I)$,体现作战子任务间的关联关系, $a_{ij} = r_{ij}(OT_j)$ 代表子任务 OT_j 对子任务 OT_i 的影响参数。

$$M_{or}(I \times I) = \begin{bmatrix} 0 & r_{12}(OT_2) & \cdots & r_{1l}(OT_l) \\ r_{21}(OT_1) & 0 & \cdots & \cdots \\ \cdots & \cdots & \cdots & r_{(l-1)l}(OT_l) \\ r_{l1}(OT_1) & \cdots & r_{l(l-1)}(OT_{l-1}) & 0 \end{bmatrix}$$

2) 任务和实体映射关系分析。

作战任务对 SSFHCM 的物理层和结构层有同样的约束和指导作用,但作战任务流程图的子任务首先是被 SSFHCM 的作战实体节点执行,然后反馈给 SSFHCM 功能节点^[21]。设任务和实体映射函数关系为 R_{or-p} ,则通过元任务和作战活动的一一对应关系,可以得到:

$$M_{or}(I \times I) \xrightarrow{f(x \rightarrow y)} R_{or-p}(N_l \times N_p) = \left\{ r_{or-p}^{(i,w)} \right\}$$

$$r_{or-p}^{(i,w)} = \begin{cases} 1 & \text{作战任务 } i \text{ 对应的作战活动需要} \\ & \text{启动作战实体 } w \\ 0 & \text{作战任务 } i \text{ 对应的作战活动不需要} \\ & \text{启动作战实体 } w \end{cases}$$

$$i \in \{1, 2, \dots, l\}, w \in \{1, 2, \dots, N_p\}$$

根据 R_{or-p} 关系矩阵,可以生成满足作战任务的 SSFHCM 作战实体矩阵 M_{or-p} 。

3) 实体和结构映射关系分析。

SSFHCM 的物理层和结构层相互影响和制约,作战实体节点是功能节点存在的依托,其属性决定了功能节点的性能;功能节点是作战实体节点的逻辑抽象,其功能和实体节点存在多对一的关系。设 $v_i \in V_p$, $v_j \in V_s$,用 $\varphi(v_i, v_j)$ 表示节点间的相关性, $\varphi(v_i, v_j) = 0$ 表示两节点无关,否则 $\varphi(v_i, v_j) = 1$ 。则可以得到实体和结构的映射关系矩阵 $R_{p-s}(N_p \times N_s)$,并生成结构层功能节点矩阵 $M_{p-s}(N_s \times N_s)$ 。分析编队体系作战能力需求是否满足作战任务需要,并根据需求调整功能节点连接矩阵 $M_{p-s}(N_s \times N_s) \rightarrow M'_{p-s}(N_s \times N_s)$ 。

综上所述,编队体系对于特定的作战任务需要与之相匹配的编队体系结构,所以任务驱动 FAHM 网络结构处在变化之中,某时刻的体系网络结构是 FAHM 在时间维度的切片,也是异质功能网络构成的超网络

暂态结构。

5.2 激进演化算法

设编队体系结构网络 $C(t_0)$ 初始状态时,信息链路网络的功能节点数量为 m_0 ,网络边数为 e_0 ,并且无方向限制。功能节点 $v_i = \{a_i, \omega_i, b_i, l_i, n_{i\max}, n_{i\min}\}$,其中 a_i 代表功能节点的类型; ω_i 代表功能节点的属性值; b_i 代表功能节点的当前连接数; $n_{i\max}$ 代表功能节点连接的上限值; $n_{i\min}$ 代表功能节点连接的下限值,主要是为了发挥节点性能而设置的最小连接数。用 V 代表体系结构层网络集, H 代表体系结构网络的超边集, T 代表演化时间,则动态演化的结构网络可以表示为 $C(t) = (V(t), H(t), T)$ 。演化计算侧重信息链路分析、功能节点启用、失效节点消退、增加新的连边、删除失效连边等 5 部分。

1) 信息链路分析。

对于编队特定的作战任务,网络结构的信息链路越多,编队体系达成预期作战目的手段越多,体系抗毁性越强;同样,体系结构聚合的作战效能越强,也能较好地完成任务。因而采用信息链路数 N_L 和作战效能 E_{TL} 对编队体系作战能力进行分析。当信息链路网络存在信息共享、指控协同关系、并且有 N_L 条信息链路,则编队体系信息链路效能 E_{TL} 为:

$$E_{TL} = \frac{1}{N_L} \sum_{i=1}^{N_L} P'_{s-c} \times P_{c-d} \times P'_{d-l} \quad (1)$$

其中, P'_{s-c} 代表存在信息共享的等效效能, $P'_{s-c} = 1 - (1 - P_{s-c}) \times \prod_{i=0}^L (1 - P_{s-s}^i)$, P_{s-s}^i 是环节 i 信息共享的效能, $P_{s-s}^i = N_{s-s} / P_{N_s}^2$, P_{N_s} 表示 N_s 个功能节点中任两个节点的可能有序组合数, L 是信息共享环节数,当 $L=0$ 时表示该信息链无信息共享能力,则 $P_{s-s}^0 = 0$; $P_{c-d} = N_{c-d} / (N_c \times N_d)$, N_{c-d} 是 C, D 功能网络间的超边数量, N_c, N_d 是 C, D 功能节点的数目; P'_{d-l} 是存在指挥协同的等效指挥效果, $P'_{d-l} = 1 - (1 - P_{d-l}) \times \prod_{i=0}^K (1 - P_{d-d}^i)$, P_{d-d}^i 是指控环节 i 的协同效能, $P_{d-d}^i = N_{d-d} / P_{N_d}^2$, P_{N_d} 表示 N_d 个功能节点中任两个节点的可能有序组合数, K 是指控协同环节数, $P_{d-d}^0 = 0$ 表示该信息链没有指控协同能力。

基于信息链路网络分析,将作战需求和体系结构的功能节点、网络边进行对应映射,形成体系结构超网络邻接矩阵 $M_{info-link}$ 、链路依赖矩阵 $M_{node-node}$ 、作战需求向

量 $V_{info-de}$ 、功能节点效能列表 $T_{node-ne}$, 从而进一步研究信息传播对编队体系演化的影响程度。

2) 功能节点启用。

设 t_{ki} 时刻在信息链路网络 $N(t_{ki})$ 中增加新功能节点 ν_q , 新节点的能力值决定它可以连接的已存在功能节点的数量, 同时链路网络节点对新功能节点的吸引力大小决定其是否相互建立连接。新功能节点 ν_q 的连接概率有相同功能节点连接概率和异质功能节点连接概率, 引入调节参数 β 进行区分。

信息链路网络存在节点对新功能节点的吸引力 $F_{qi}^{[22]}$, 表征两个节点可能相互关联的程度。

$$F_{qi} = \frac{k_q^\alpha \times k_i^\alpha}{d_{qi}^\beta}, \quad d_{qi} \geq 1 \quad (2)$$

其中, k_q, k_i 代表 ν_q, ν_i 功能节点的复合度, α 代表复合度的调节参数, d_{qi} 代表信息链路上功能节点 ν_q, ν_i 间的跳数, β 代表距离的调节参数。则新功能节点 ν_q 与信息链路上原功能节点 ν_i 的连接概率。

$$\psi(k_q) = \frac{F_{qi}}{\sum_{r \in I} F_{rj}} = \frac{k_q^\alpha \times d_{qi}^{-\beta}}{\sum_{r \in I} k_r^\alpha \times d_{rj}^{-\beta}} \quad (3)$$

其中 I 代表一条信息链路上功能节点 ν_j 的邻居节点集合, 通过参数 β 的取值, 分析信息链路上功能节点的连接对网络演化的影响。 $\psi(k_q)$ 仅表示两个功能节点间存在信息传输连边的概率, 若一个功能节点已经达到连接上限, 则不会再有新的连边产生。

3) 失效节点消退。

功能节点从当前信息链路网络 $N(t_{ki})$ 中消退与否主要取决于敌方体系的杀伤概率和己方体系的生存概率影响。当面对同等强度的打击时生存概率大的功能节点得以保存、生存概率小的功能节点较早消退, 功能节点的生存概率 l_i :

$$l_i = \frac{\gamma}{e^{-(\theta l_i + \omega_i)}} \quad (4)$$

其中, γ 代表概率范围调节参数, θ 代表连接数 b_i 和能力值 ω_i 的平衡参数。失效节点的消退不仅仅是功能节点的退出, 而且受其影响的网络边也一并消退, 其邻居节点将会重新选择功能节点。

4) 增加新的连边。

当前信息链路网络 $N(t_{ki})$ 增加新的信息传输连边, 采取双向择优的方式选取网络边的两端节点, 取决于功能节点的连接数大小, 其择优演化概率、随机演化概

率分别为:

$$p = \frac{b_i}{\sum b_i} \quad (5)$$

$$p = \frac{1}{N_r(t_{ki})} \quad (6)$$

其中, $N_r(t_{ki})$ 代表信息链路网络在 t_{ki} 时刻的功能节点数量, 新的信息传输连边可以在新旧功能节点或者旧功能节点间产生, 从而使信息链路更加优化。

5) 删除失效连边。

当前信息链路网络 $N(t_{ki})$ 从已有的网络内删除信息传输连边, 按照反择优的方式被选择, 有因效能较低己方体系主动删除的网络边和因敌方体系压制阻断被动删除的网络边之分, 连边 e_{ij} 删除的反择优概率、随机概率分别为:

$$p = \frac{1/b_e}{\sum_{e \in E_i} 1/b_e} \quad (7)$$

$$p = \frac{1}{E(t_{ki})} \quad (8)$$

其中, $E(t_{ki})$ 代表 t_{ki} 时刻信息链路网络存在连边的总和; b_e 代表信息链路网络边介数归一化^[23],

$$b_e = \left(\sum_{i \neq j \in V} g_{ij}(e) / g_{ij} \right) / N(N-1),$$

体现网络边在信息链路网络的重要度, $g_{ij}(e)$ 代表 ν_i, ν_j 两个功能节点间最短路径的跳数, g_{ij} 代表 ν_i, ν_j 两个功能节点间最短路径的总跳数。

综上所述, 基于信息传播的体系结构动态演化, 通过信息链路分析与功能节点的启用和消退、网络边的增加和删除, 体系结构最终趋于稳定状态, 贴近编队作战实际, 具备显著的鲁棒特性。

5.3 特征参数分析

1) 平均最短路径。

平均最短路径是网络中任意两个功能节点最短距离的平均值。当结构网络的平均最短路径越大, 功能节点的信息和复合度越集中, 体系的凝聚力和紧密度越弱, 功能节点相互依赖程度高, 不利于信息传递, 信息交换的效率也不高。设体系超网络结构 $C(t)$ 中功能节点 ν_i 通过最短距离到达功能节点 ν_j 的跳数 d_{ij} , 其出现概率为 $F(d_{ij})$, 则平均最短路径 d 表示为:

$$d = \sum_{i \neq j} d_{ij} \times \frac{F(d_{ij})}{\sum_{i \neq j} F(d_{ij})} \quad (9)$$

2) 聚类系数。

聚类系数用来描述结构网络功能节点和邻居节点相互关联的紧密程度,体现了网络内部集团化程度,其平均聚类系数是所有功能节点聚类系数的平均值。设 $Con(k)$ 是局部聚类系数, $P(k)$ 是结构网络的度分布概率,则聚类系数 CC 表示为:

$$CC = \sum P(k) \times Con(k) \quad (10)$$

$$Con(k) = \frac{2\langle e_k \rangle}{k(k-1)}$$

$$P(k) = \frac{1}{A} (m + \theta) \frac{1}{A} \times (k + \theta) \left[\frac{1}{A} + 1 \right]$$

其中功能节点 v_i 的复合度为 k ; 其邻居节点的连接边数为 $\langle e_k \rangle$; 网络边连接数为 m , A 是 $A(p, m, M)$ 的复合函数, B 是 $B(p, M)$ 的复合函数, $\theta = B/A$, 服从漂移幂律 $\lambda = 1 + 1/A$ 的概率分布。

6 水面舰艇编队建模与分析示例

假设水面舰艇编队接到上级命令:从近海备战执勤状态转入一等防空作战状态,并听令对敌空中编队实施打击。初步获取敌方兵力规模:P3C电子侦察机4架、F/A-18战斗机6架,需要启用对空雷达8型、数据链设备10型、指挥平台3所、综合抗击7型等共计28个作战实体,其中舰载预警机、舰载战斗机各一架为复合节点。对己方编队体系进行有效抽象: $N_s=8$,分别是 $S_1, S_2, S_3, S_4, S_5, S_6, S_7, S_8$; $N_c=10$,分别是 $C_1, C_2, C_3, C_4, C_5, C_6, C_7, C_8, C_9, C_{10}$; $N_b=5$,分别是 D_1, D_2, D_3, D_4, D_5 ; $N_l=7$,分别是 $I_1, I_2, I_3, I_4, I_5, I_6, I_7$ 。

在编队防空作战任务的驱动下,如图7所示,不同时刻 FAHM 的功能节点、网络边、平均最短路径、聚类系数各有不同,统计分析结果如表1所示,并对统计数据进行分析,其变化趋势如图13所示。

表1 不同时刻渐进演化模型指标统计

Table 1 Index statistics of progressive evolution model at different time

时刻	t_1	t_2	t_3	t_4	t_5	t_6	t_7	t_8	t_9
$N_{node-total}$	6	9	12	14	17	20	23	25	28
$N_{link-total}$	6	14	26	38	48	64	76	84	92
d	1.933	1.750	1.773	1.637	1.735	1.732	1.730	1.715	1.676
CC	0.417	0.271	0.496	1.602	0.325	0.453	0.712	1.335	1.583

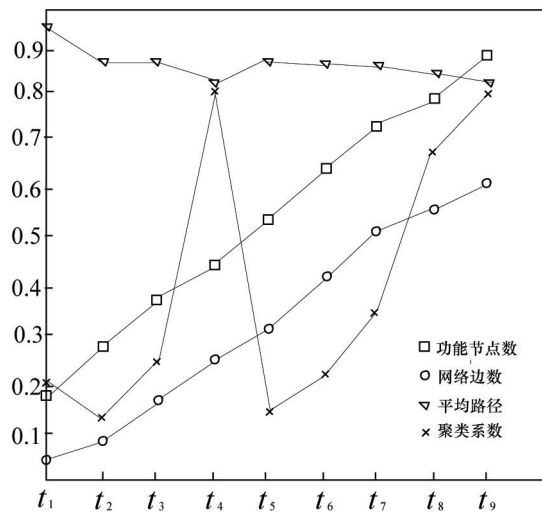


图13 渐进演化体系结构变化趋势

Fig. 13 Trends in progressive evolution architecture

针对任务驱动的渐进演化模型,各型功能节点和超边随着作战任务阶段的变化而不断增加, t_5-t_7 区间斜率较大,增速明显,结合作战任务分解可知,主要是按

照敌方空中编队进入我方防空火力抗击范围的部署,需要更多的行动响应节点和探测节点参与到作战任务中,并且功能节点数曲线和网络边数曲线的变化规律基本一致,说明渐进演化阶段编队体系侧重于体系的张成,对于信息共享和指控协同的信息增值优势表现不突出,编队体系的涌现性效果较差。平均最短路径 d 、聚类系数 CC 的变化有升有降,尤其是聚类系数表现的更为突出。随着功能节点的增多,节点间的链接关系越发复杂, t_1-t_4 阶段主要是根据任务需求建立指挥系统,将指控节点和探测节点逐步纳入编队体系,功能节点的平均最短路径变小,信息传输效率增大,聚类系数程指数级增长,体现出功能节点间的协同性能增强,编队体系的鲁棒性较好; t_5 时刻将响应节点纳入编队体系,形成发现-决策-打击的作战系统,平均最短距离和聚类系数发生突变,说明了编队体系内部的结构和功能发生了本质的变化; t_5-t_9 阶段随着更多的响应节点、探测节点、通信节点纳入编队体系,平均最短路径近似

直线下滑趋势,聚类系数近似二次曲线上涨,说明编队体系的功能节点在不断地进行优化调整,提高了作战体系的作战效率和信息协同能力,使得编队体系的作战潜力最大程度地发挥出来。

设渐渐演化 t_i 时刻的体系结构就是激进演化 t_{i0} 时刻的初始网络结构,演化参数: $p_1=0.3, p_2=0.05, p_3=0.56, m_1=2, m_2=3, m_3=1, m_4=2, \alpha=1, \beta=0, \gamma=1.5, \theta=0.62$ 己方编队可对8批目标中的4个对象进行毁伤,毁伤概率为 $p_a=0.85$;敌方编队可对10个目标中的5个对象进行毁伤,毁伤概率为 $p_b=0.87$ 。激进演化步长为200,单次演化独立运行20次取其指标的平均值,择优和随机不同模式下己方编队体系结构变化规律如图14所示。

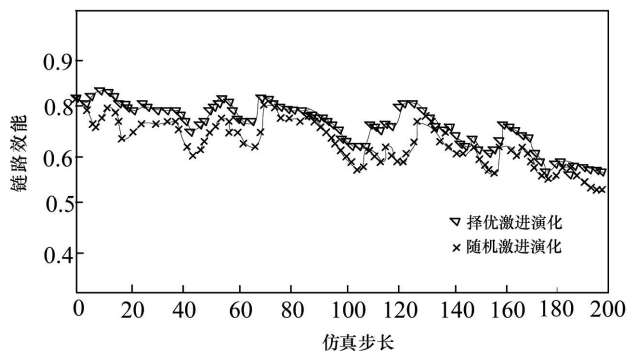


图14 激进演化体系结构变化规律

Fig. 14 Change rule of radical evolution architecture

信息链路效能随着激进演化有增有减,但整体上趋于下降趋势,反映了功能节点、网络边的加入、删除对信息传播有较大的影响。择优演化的链路效能比随机演化效能提升明显,说明择优演化策略优化编队信息链路网络结构,增强功能节点间的信息共享和指控协同,实现链路效能的非线性提升;随机演化策略比较简单、周期长,并且导向性不明显。通过理论分析可知:择优激进演化能有效描述编队体系对抗过程,更为精确地刻画体系演化过程中信息链路效能的变化趋势,有效地显现信息共享和指挥协同对编队体系效能的作用。

7 结论

针对编队体系结构特征和信息流转机理,综合编队作战实体的类型、功能,使命任务以及编队指挥流程,提出基于超网络的任务驱动渐进演化模型和信息驱动激进演化模型,并给出演化模型的计算表示方

法。通过建模与分析示例可知,演化模型可以体现编队体系对抗过程中体系结构多维、异质、时变特性,同时可以描述编队作战体系内在的运行机理和演化规律,弥补了现有基于复杂网络的编队体系演化模型的不足,对动态构建航母编队体系结构有一定的指导意义。后续需要逐步细化敌我编队激进演化模型,研究选择概率、毁伤概率对编队体系功能节点和网络边的作用机理,有效地刻画编队体系的动态演化特性。

参考文献(References)

- [1] 刘亚东,张春润,张爱民.运用体系工程研究装备保障问题的思考[J].系统科学学报,2013,21(1):54-57.
Liu Yadong, Zhang Chunrun, Zhang Aimin. Application of system engineering to research equipment support issues thinking [J]. Journal of Systems Science, 2013, 21(1): 54-57.
- [2] Adamic L A, Lento T M, Adar E, et al. Information evolution in social networks[C]//Proceedings of the Ninth Acm International Conference on Web Search and Data Mining. San Francisco, USA: Association for Computing Machinery, 2016: 473-482.
- [3] An F, Gao X Y, Guan J H, et al. An evolution analysis of executive-based listed company relationships using complex networks[J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2016, 447(1): 276-285.
- [4] Long X Q, Wang J J, Zhou B. Evolution mechanism of roads network[J]. Procedia Engineering, 2016, 137(1): 506-512.
- [5] Wang J W, Rong L L, Deng Q H, et al. Evolving hypernetwork model[J]. The European Physical Journal B, 2010, 77(4): 493-498.
- [6] 王飞,司光亚,荣明,等.武器装备体系的异质超网络模型[J].复杂工程与电子技术,2015,37(9):2052-2060.
Wang Fei, Si Guangya, Rong Min, et al. Research on network of networks model of armament system of systems[J]. Systems Engineering and Electronics, 2015, 37(9): 2052-2060.
- [7] Shi F L, Lei Y L, Zhu Y F. A military communication supernetwork structure model for net-centric environment[C]//International Conference on Computational and Information Science. Wuhan: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2010: 33-36.
- [8] Zou Z G, Liu F X, Sun S M. Ripple effect analysis for operational architecture of air defense systems with supernetwork modeling[J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2014, 25(2): 240-263.
- [9] 温睿,马亚平,王峥.一种作战体系动态演化模型[J].系统仿真学报,2011,23(7):1315-1322.

- Wen Rui, Ma Yaping, Wang Zheng. Dynamic evolutionary model of complex operational forces system[J]. Journal of System Simulation, 2011, 23(7): 1315-1322.
- [10] 张强, 李建华, 沈迪. 复杂网络理论的作战网络动态演化模型[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2015, 47(10): 106-112.
Zhang Qiang, Li Jianhua, Shen Di. Dynamic evolution model of operational network based on complex network theory[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2015, 47(10): 106-112.
- [11] 刘刚, 李永树. 复杂网络空间模式下的网络演化过程及特性研究[J]. 计算机应用研究, 2015, 32(12): 3657-3659.
Liu Gang, Li Yongshu. Network evolution process based on complex network space and characteristics analysis[J]. Application Research of Computers, 2015, 32(12): 3657-3659.
- [12] 杨迎辉, 李建华, 沈迪. 多重边融合复杂网络动态演化模型[J]. 西安交通大学学报, 2016, 50(9): 132-139.
Yang Yinghui, Li Jianhua, Shen Di. Dynamic evolution model of united complex networks with multi-links[J]. Journal of Xi'an Jiao Tong University, 2016, 50(9): 132-139.
- [13] 夏文军. 军队指挥学教程[M]. 北京: 军事科学院出版社, 2012: 107-124.
Xia Wenjun. Military command course[M]. Beijing: Academy of Military Sciences Press, 2012: 107-124.
- [14] 孙儒凌. 作战指挥基础概论[M]. 北京: 国防大学出版社, 2011: 238-252.
Sun Ruling. General introduction to operational command[M]. Beijing: National Defense University Press, 2011: 238-252.
- [15] 游光荣, 初军田, 吕少卿. 关于武器装备体系研究[J]. 军事运筹与系统工程, 2010, 24(4): 15-22.
You Guangrong, Chu Juntian, Lv Shaoqing. Research on weapon and equioment systems[J]. Military Operation Research and System Engineering, 2010, 24(4): 15-22.
- [16] 王寿彪, 李新明, 杨凡德. 武器装备体系演化研究[J]. 火力与指挥控制, 2017, 42(3): 1-7.
Wang Shoubiao, Li Xinming, Yang Fande. Research progress on evolution of weapon equipment system of systems[J]. Fire Control & Command Control, 2017, 42(3): 1-7.
- [17] 崔琼, 李建华, 冉溟丹. 任务流驱动的指挥信息系统动态超网络模型[J]. 复杂系统与复杂性科学, 2017, 14(3): 58-67.
Cui Qiong, Li Jianhua, Ran Haodan. A dynamic supernetwork model of command information system driven by task flow[J]. Complex System and Complexity Science, 2017, 14(3): 58-67.
- [18] 李大亮, 王付明, 高志同. 基于OODA环的信息化战场信息安全保障SD建模分析[J]. 指挥控制与仿真, 2016, 38(3): 33-38.
Li Daliang, Wang Fuming, Gao Zhitong. SD modeling analysis in information security assurance process of information battlefield based on OODA loop[J]. Command Control & Simulation, 2016, 38(3): 33-38.
- [19] 王斌, 谭东风, 凌云翔. 基于复杂网络的作战描述模型研究[J]. 指挥控制与仿真, 2007, 29(4): 12-16.
Wang Bin, Tan Dongfeng, Ling Yunxiang. Research on combat description model based on complex networks[J]. Command Control & Simulation, 2007, 29(4): 12-16.
- [20] 刘树新, 季新生, 刘彩霞. 一种信息传播促进网络增长的网络演化模型[J]. 物理学报, 2014, 63(15): 1-11.
Liu Shuxin, Ji Xinsheng, Liu Caixia. A complex network evolution model for network growth promoted by information transmission[J]. Acta Physica Sinica, 2014, 63(15): 1-11.
- [21] 刚建勋, 叶雄兵, 于鸿源. 基于超网络的航母编队作战体系建模分析研究[J]. 指挥控制与仿真, 2018, 40(5): 6-10, 78.
Gang Jianxun, Ye Xiongbing, Yu Hongyuan. Modeling and analysis of carrier formation combat SoS based on hypernetworks[J]. Command Control & Simulation, 2018, 40(5): 6-10, 78.
- [22] 张凤琴, 梁栋, 管桦. 基于装备能力优先的复杂网络演化模型研究[J]. 系统仿真学报, 2015, 27(4): 843-850.
Zhang Fengqin, Liang Dong, Guan Hua. Research on evolution modeling of complex network based on priority of equipment capability[J]. Journal of System Simulation, 2015, 27(4): 843-850.
- [23] 田庆飞, 赵淑芝, 曹阳. 基于边介数的大城市公交网络优化模型[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2012, 44(10): 144-148.
Tian Qingfei, Zhao Shuzhi, Cao Yang. Optimization model of bus network in large cities based on side numbers[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2012, 44(10): 144-148.

The evolution model of surface ship formation system based on hypernetwork

GANG Jianxun^{1,2}, YE Xiongbing², ZHANG Ying³

1. Graduate College of Academy of Military Sciences PLA China, Beijing 100091, China
2. Joint Operations Experimental Center of Academy of Military Sciences PLA China, Beijing 100091, China
3. No. 66410 Unit of PLA, Beijing 100042, China

Abstract System dynamic evolution is a cognitive foundation of structure optimization and effectiveness evaluation for formation system of systems (SoS). In view of entity heterogeneity of the formation, coupling of the system, and emergence of combat SoS, the paper firstly summarizes the evolution characteristics of surface ship formation. The evolution features are summarized from four aspects: information drive, function emergence, structural time change and overall correlation. Secondly, the elements of formation SoS are abstractly analyzed. The battle of surface ship formation is divided into two stages, prewar growth and war confrontation, for architecture abstraction. Thirdly, a hypernetwork model of formation SoS is established, and the conceptual model and structure model of the hypernetwork are established from different perspectives. Lastly, task driven progressive evolution modeling and information driven radical evolution modeling based on hypernetwork are proposed. The evolution model is given calculation method of formation SoS. According to calculation example of formation combat, the evolution model can effectively describe the process of formation SoS combat dynamically and provide strong support for formation structure optimization and effectiveness evaluation.

Keywords surface ship formation; hypernetwork; evolution model ●



(责任编辑 徐丽娇)