

基于模体的网络化作战信息流转动态超图模型

杨迎辉¹ 李建华¹ 南明莉^{1,2} 崔琼¹ 王宏¹

(空军工程大学信息与导航学院 西安 710077)¹ (95881 部队 北京 100095)²

摘要 动态准确、直观精细的信息流转模型,是分析作战信息交互关系、探索信息赋能作用机理的重要保证。针对网络化作战信息流转模型构建问题,首先,定义了作战节点、信息流等相关概念,抽象了情报、指控、打击3类基本信息流模体,并讨论了不同的功能组合;其次,阐述了超图相关理论,研究了作战任务的递阶分解方法及超图表示形式,给出了作战信息流转动态超图模型构建的一般流程及步骤;最后,以空中进攻作战为例,验证了模型的可行性与有效性。

关键词 网络化作战,信息流转,模体,动态超图

中图分类号 E967, E824, N945 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2016.8.006

Networked Operational Information Flowing Dynamic Hypergraph Model Based on Motif

YANG Ying-hui¹ LI Jian-hua¹ NAN Ming-li^{1,2} CUI Qiong¹ WANG Hong¹

(Information and Navigation Institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China)¹

(The Unit 95881 of PLA, Beijing 100095, China)²

Abstract Dynamic, exact, direct and elaborate information flowing model is important guarantee for analyzing operational information alternation relationship and exploring information empowerment mechanism. Aiming at the problem of constructing information flowing model for networked operations, firstly, several correlative concepts, such as operational node and information flow, were defined. Three kinds of basic information flow motif for intelligence, command & control and striking were abstracted and different functional combinations were discussed. Secondly, correlative hypergraph theory was expatiated, and the operational task hierarchical decomposition method and hypergraph expression form were studied. And then, general flow and steps for constructing operational information flowing dynamic hypergraph model were given. Finally, taking aviation aggressive operations as an example, feasibility and validity of the model were verified.

Keywords Networked operations, Information flowing, Motif, Dynamic hypergraph

网络化作战是现代战争的基本特征^[1],作战信息流转(Operational Information Flowing, OIF)是战场信息在作战单元之间传播、流通、交互的过程,体现了动态多样的信息交互关系,影响着信息的流向、流速和流量等。信息流转效能的高低,与战场环境、作战力量编配、信息链路性能等因素有关,但主要取决于信息流转策略与作战任务的匹配程度^[2]。探索构建既符合信息运动变化规律又满足网络化作战需要的 OIF 模型,对有效发挥信息赋能作用和加速提升体系作战能力具有重要意义。

目前,关于信息流转模型的研究主要集中在指导理念、建模方法、应用效能等方面。文献[3]为提高信息系统中非授权间接访问的安全性,设计了一种能有效控制访问风险的信息流转模型及规则;文献[4]针对多传感器平台间的分布式信息

传递融合问题,提出一种数据融合、协作决策机制,并给出信息流转路径规划方法;文献[5]在分析武器装备体系内部感知流、情报流、指控流等交互过程的基础上,提出了一种异质分层的武器装备体系超网络模型;文献[6]分析了网络中心化 C4ISR 的系统结构特点,讨论了情报、指控、协同 3 类信息流的交互过程及相互影响关系,提出了基于超图的网络中心化 C4ISR 系统结构模型。

已有成果虽然深化了信息流转模型研究,但多数仍存在以下问题:1)采用线图描述作战单元间的信息交互关系,仅能表示二元的信息交互过程,不能整体、直观地描述多个节点协同进行信息交互的情况;2)与实际作战过程结合不够紧密,未有效实现信息流转与作战任务的匹配耦合;3)所建立的信息流转模型一般仅针对固定时刻,仅是整个过程的一个时间切

到稿日期:2016-01-29 返修日期:2016-03-20 本文受国家自然科学基金(61573017,61401499,61174162),国家社会科学基金(15BGJ007,14GJ003-172,12GJ003-130)资助。

杨迎辉(1988—),男,博士生,主要研究方向为作战信息流转、复杂系统建模;李建华(1965—),男,教授,博士生导师,主要研究方向为空天信息作战;南明莉(1987—),女,硕士生,主要研究方向为复杂军事信息网络设计与优化;崔琼(1990—),女,博士生,主要研究方向为网络化指挥信息系统弹性;王宏(1979—),男,博士生,讲师,主要研究方向为作战模拟与仿真。

片,未能完整展现信息流转的动态时变结构。

由于信息流模体能有效揭示战场信息流的特征组元,超图能直观展示多元复杂的信息交互关系,因此本文首先抽象网络化作战中情报、指控、打击3类基本信息流模体,然后在递阶分解作战任务的基础上引入作战时间因素,构建OIF的动态时变超图模型,最后通过仿真实验验证模型的可行性与有效性。

1 信息流模体

模体是网络内频繁的子图,具有特定的空间构型和功能属性。信息流模体是形成各类OIF的基本单元,是作战信息从微观运动到宏观效果的关键结构,影响着情报保障、指挥控制、协同打击等信息流作用效能的发挥。

1.1 相关概念

定义1 作战节点是具有侦察、探测、指挥、控制、毁伤等功能的实体,能利用战场资源,完成作战任务。按照功能属性以及在作战过程中所发挥的作用,将作战节点分为情报节点 N_I 、指控节点 N_C 和打击节点 N_S 3类。

N_I 是侦察战场态势,并进行处理、分发的节点,包括卫星、侦察机等,记为 $N_I = \{N_{I(i)} | i \in [1, I_0]\}$,其中 I_0 为情报节点数; N_C 是接收信息,并对所属节点的部署、行动做出决策的节点,包括指挥所、指通机等,记为 $N_C = \{N_{C(i)} | i \in [1, C_0]\}$,其中 C_0 为指控节点数; N_S 是接收指令,并能够协同配合,影响其他节点状态的节点,包括歼击机、轰炸机等,记为 $N_S = \{N_{S(i)} | i \in [1, S_0]\}$,其中 S_0 为打击节点数。

作战节点集可表示为 $N = N_I \cup N_C \cup N_S$,且满足 $N_I \cap N_C = \emptyset, N_C \cap N_S = \emptyset, N_I \cap N_S = \emptyset$ 。

定义2 信息流是信息产生、处理及使用的完整功能链路,具有方向性,可用有向连接线将发生交互作用的节点进行关联。按照信息内容,它可分为情报信息流 IF_I 、指控信息流 IF_C 和打击信息流 IF_S 。

定义3 信息流模体是作战过程中反复出现的信息作用模式,由若干信息流按照特定规则组合而成。设 $N_0 - N_k$ 为作战节点, $R_1 - R_k$ 为信息流关系,则信息流模体可记为 $IFM_k = N_1 R_1 \dots N_i R_i \dots R_{k-1} N_k$,它是一条 $N_1 \rightarrow N_k$ 的信息活动路径,且节点不会重复出现。按照信息内容,信息流模体可分为情报信息流模体 IFM_I 、指控信息流模体 IFM_C 和打击信息流模体 IFM_S 。

定义4 作战信息流转模型是若干个情报、指控、打击信息流模体的有序功能组合,记为 $OIFM = \Theta(IFM_I, IFM_C, IFM_S)$ 。

1.2 基本信息流模体

针对情报、指控、打击3类信息的产生、处理和使用过程,总结提炼相应的信息流模体^[2],如表1所列。由于参与节点功能属性的差异,每类信息流模体又包含多种不同的情况。

(1)情报信息流模体 IFM_I 。内容主要是目标参数、状态等,一般由 N_I 产生情报信息,可发送至全部节点。若信息的精度、时延等满足决策或打击需要,可直接提供给相关的 N_C 或 N_S ,记为 $IFM_I = \{IFM_{I(i,j)} | i \in N_I, j \in N\}$,其中 (i, j) 为节点对。

(2)指控信息流模体 IFM_C 。内容主要是指挥、控制等指令,一般由 N_C 产生指令,发送至其他相关的 N_C ,记为 $IFM_C = \{IFM_{C(i,j)} | i, j \in N_C\}$ 。

(3)打击信息流模体 IFM_S 。内容主要是实施交战、毁伤等信息,一般由 N_C 或 N_S 产生反馈控制、任务协作等信息,发送给相关的 N_S ,可经过其他 N_C ,记为 $IF_S = \{IF_{S(i,j)} | i \in N_C \cup N_S, j \in N_S\}$ 。

表1 基本信息流模体

类型	编号	信息流模体	过程描述
IFM_I	①	$N_I \rightarrow N_I^+ \rightarrow N_I$	N_I 的情报直接共享至 N_I ,或经其他 N_I 处理后共享至 N_I
	②	$N_I \rightarrow N_I^+ \rightarrow N_C$	N_I 的情报直接上报至 N_C ,或经其他 N_I 处理后上报至 N_C
	③	$N_I \rightarrow N_I^+ \rightarrow N_S$	N_I 的情报直接发送至 N_S ,或经其他 N_I 处理后发送至 N_S
IFM_C	④	$N_C^+ \rightarrow N_C^* \rightarrow N_C$	N_C 的指令逐级传达至下级 N_C
IFM_S	⑤	$N_C^+ \rightarrow N_S^* \rightarrow N_S$	N_C 的打击信息下发至所属 N_S
	⑥	$N_S^+ \rightarrow N_S$	N_S 的协同需求发送至同级 N_S

注: *表示多于或等于0个;+表示多于或等于1个。

以上3类共6个信息流模体所对应的基本图元如图1所示。

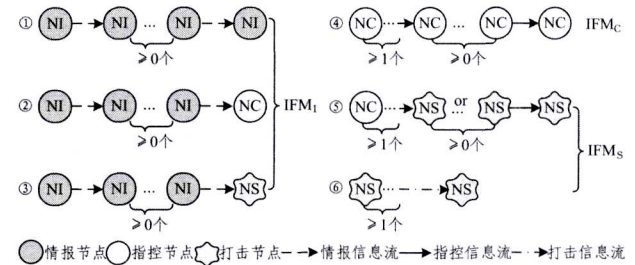


图1 信息流模体的图元表示

同类型的信息流模体聚合在一起,便可构成各自错综复杂的信息层,在共同的基础信息网上彼此交织、协同运行,共同完成情报保障、指挥控制、协同打击等任务。然而,并非任意2个节点之间的信息交互关系都能用信息流模体进行表示,而是应该满足职责权限和地理环境约束^[2,7]。例如, IFM_I 需满足 N_I 具有保障 N_C 的职责和可能性; IFM_C 中的 N_C 要具有指挥其他 N_C 的业务能力; IFM_S 中的作战节点要具有协同完成任务的职责和必要。

1.3 信息流模体的功能组合

作为作战过程的基本信息流,每类信息流模体仅能反映作战体系的特定功能和单项能力,不能体现作战体系的整体能力^[2]。例如, IFM_I 的源头、流量、时序等信息,仅能反映情报保障能力。由于各类信息流模体都是基于底层物理的信息基础设施网进行传输,受物理层信息传输能力的限制,信息流模体相互之间存在通信网络资源竞争,造成彼此相互制约的关系。同时,不同信息流模体之间还存在相互驱动作用,能够通过协调配合,促进作战体系充分发挥整体能力。

基本信息流模体的有序组合,可以构成反映作战体系整体功能的复合信息流,在作战过程中表现为交战程序链。按照担负任务的不同,交战程序链可分为情报保障链 L_I 、指挥控制链 L_C 和协同打击链 L_S ,如表2所列。

表2 信息流模体功能组合

组合方式	信息流模体组合	功能描述
IFM _I + IFM _C	$N_I \rightarrow N_C^* \rightarrow N_C$	战场态势共享(L ₁)
	$N_I \rightarrow N_C^+ \rightarrow N_I$	基于态势的情报搜索(L _C)
	$N_C \rightarrow N_I^* \rightarrow N_I$	辅助指挥决策(L _I /L _C)
IFM _I + IFM _S	$N_I \rightarrow N_S \rightarrow N_C^* \rightarrow N_S$	火力协同打击(L _C /L _S)
	$N_I \rightarrow N_C^+ \rightarrow N_S$	完整交战链(L _I /L _S)
	$N_S \rightarrow N_I^* \rightarrow N_I$	情报信息支援(L _I)
IFM _C + IFM _S	$N_C \rightarrow N_S \rightarrow N_C^* \rightarrow N_S$	交战反馈控制(L _C /L _S)
	$N_S \rightarrow N_C \rightarrow N_I^+$	面向任务的情报搜索(L _S)

注: * 表示多于或等于 0 个; + 表示多于或等于 1 个。

作战体系中存在多种信息流模体组合,它们代表着不同质的信息流在经过特定功能节点时,可能会发生量变和质变,导致信息流的流量以及时序结构发生变化。例如,大量 IF_I 在某些 N_I 处会发生合并,汇聚成少数的 IF_I,继续流经 N_C 时,会进一步转化为 IF_C,IF_I 的聚合体现了多源情报的整合过程,IF_I 到 IF_C 的性质改变反映了 N_C 的指挥决策能力。此外,信息流性质的改变还与流质量有关,优质、稳定的信息流较容易转变为其他类型的信息流,这是因为此类信息流通常不需要同类节点的进一步加工处理,可作为输入信息流直接发送至异类节点。

2 OIF 动态超图模型

由于战场态势的复杂性和作战体系功能的适应性,OIF 在作战过程中是动态变化的,与作战任务、交战进程、打击节奏紧密相关。对某个特定时刻而言,OIF 是相对固定的,可以看作整个作战过程的一个时间切片。从一段时间来看,OIF 结构是不断变化发展的,参战节点构成及信息交互关系都会随着任务转换、时间推进发生适应性演变。

2.1 超图相关理论

Berge 于 1970 年在《Graphs and Hypergraphs》一文中提出了超图概念,并系统地建立了无向超图理论。与普通图不同的是,超图的一条超边可以连接 2 个以上的点,具有更为离散的结构,并兼有图形直观表示和形式化描述的优点,在研究有限集合的多元关系时,具有线图不可比拟的优势^[8]。

定义 5 超图是指满足 $e_i = \emptyset (i=1,2,\dots,m)$,且 $\bigcup_{i=1}^m e_i = N$ 的二元关系 $H=(N,E)$,其中集合 N 的元素 N_1, N_2, \dots, N_n 为超图的顶点,集合 E 的元素 $e_i = \{N_{i1}, N_{i2}, \dots, N_{ij}\} (i=1, 2, \dots, m)$ 为超图的超边。 $|N|$ 为顶点数,即超图 H 的阶。 $|E|$ 为超边数,即超图 H 的规模。 $LH(e_i)$ 为超边长度,即信息作用路径 e_i (信息流模体组合)的所有权值之和。

定义 6 超度是指包含顶点 N_i 的超边个数,记为 $Hd(N_i)$ 。在 OIF 超图模型中,顶点的超度表示对应作战节点参与执行元任务的数量,在一定程度上能够反映该节点在整个作战过程中的重要性。通过统计比较顶点的超度,还有助于辨识作战过程中发挥关键作用的节点。

定义 7 关联系数是指超图中 2 个顶点之间存在共同超边的数量。在 OIF 超图模型中,顶点的关联系数表示作战过程中 2 个节点相互协同执行元任务的次数。通过统计比较关联系数,能看出作战过程中两两节点相互协同的必然性,为作战力量编配与优化提供科学依据。

超图理论能细致地描述网络化作战的功能和特征,不但可以从作战应用出发分析信息流过程,还可以清晰、直观地研究各种业务流的逻辑结构^[9],便于分析作战体系性能。

2.2 作战任务递阶分解

通常作战任务存在多个层次,若要能被具体的作战节点执行,必须对任务进行分解。任务分解程度取决于作战规模和研究问题的深度。分解粒度越细,所包含的信息量越丰富,信息交互关系越复杂。

2.2.1 作战任务递阶分解

按分解粒度差异,作战任务可分为总任务、子任务和元任务,其中元任务是分解的末端,能由若干节点直接执行。当众多子任务、元任务以层级形式聚合时,便形成了具有递阶结构的作战任务树。

对于作战任务 T ,当分解粒度 $G=\alpha$ 时,第 i 个子任务记为 $T_i^?$,当 $G=\beta(\beta<\alpha)$ 时,该子任务的第 j 个元任务记为 $T_{i,j}^?$ 。设 OIT 表示作战任务树,则有

$$OIT = \Theta(\bigcup_{i=1}^m T_i^?, \bigcup_{j=1}^n T_{i,j}^?) \quad (1)$$

其中, Θ 为元任务向上的递阶聚合函数, m 为子任务数, n 为第 i 个子任务可分解的元任务数。

2.2.2 作战元任务描述

对于 $G=\beta$ 时的元任务 $T_{i,j}^?$,设 S_q 为执行顺序, C_a 为具体行动内容, T_t 为任务结束时刻, M_c 为执行程度的量度尺度, R_i 为应达到的标准,由战场环境、作战对象确定, N_e 为参与执行的作战节点,则有

$$T_{i,j}^? = \Omega(S_q, C_a, T_t, M_c, R_i, N_e) \quad (2)$$

其中, Ω 表示组合关系函数。

对元任务的描述应至少包含上述 6 个要素,表 3 采用清单列表的形式给出作战元任务的描述。

表 3 作战元任务的描述方式

编号	内容	时刻	尺度	要求	执行节点
T ₁	元任务内容	t ₁	百分比	比例	N ₁ /N ₂
T ₂	元任务内容	t ₂	分钟	允许时间	N ₃ /N ₄ /N ₅
...

元任务一般都可以看作特定的交战程序链,元任务的转换会引起交战程序链发生结构性变化。不同的交战程序链具有不同的复杂度,最简单的仅为 1 个信息流模体,它包含 2 个节点。相异的交战程序链可能包含相同的节点,并在一定的任务背景下形成“同步”。设 t 时刻元任务 T_i 中具有 k 个信息流模体 IFM_p ,其中 $p \in [1, k]$,则 T_i 对应的信息流模型可表示为 $T_i = \bigcup_{p=1}^k IFM_p$ 。

若作战节点表示超图的顶点,元任务表示超边,信息流模体表示顶点间的连线,则 OIF 可表示为 $OIF = \{N_I, N_C, N_S, IFM_I, IFM_C, IFM_S\}$ 。OIF 超图模型的语义映射如表 4 所列。

表 4 OIF 超图模型的语义映射

超图模型	语义	形式化描述
超图	OIF 模型	$H = (N_1, N_2, \dots, N_m;$ $e_1, e_2, \dots, e_n)$
顶点	作战节点	N_1, N_2, \dots, N_m
超边	作战元任务	e_1, e_2, \dots, e_n
超路径	作战节点间的信息交互关系	$\{N_1, e_1, N_2, e_2, \dots, e_q, N_{q+1}\}$
路径的权	作战节点执行元任务的总和	$q(N_1, e_1, N_2, e_2, \dots, e_q, N_{q+1})$
最短路径	作战节点之间最直接的关系	$\min\{q(N_1, e_1, N_2,$ $e_2, \dots, e_q, N_{q+1})\}$
超链	作战节点执行的多个元任务	$\{N_1, e_1, N_2, e_2, \dots, e_q, N_{q+1}\}$
关键路径	信息流转最关键的节点序列	$\{N_s, e_s, N_{s+1}, e_{s+1}, \dots, e_t, N_t\}$

2.3 OIF 超图模型表示方法

根据作战任务递阶分解结果,可以得到 t 时刻多个并行的元任务与作战节点之间的对应关联关系,用矩阵 B_t 表示,即

$$B_t = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & \cdots & b_{1m} \\ b_{21} & b_{22} & \cdots & b_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ b_{n1} & b_{n2} & \cdots & b_{nm} \end{bmatrix} \quad (3)$$

其中,行集合为作战节点 N_i 与元任务的关联情况, $i \in [1, m]$; 列集合为元任务 T_j 与作战节点的关联情况, $j \in [1, n]$ 。若 $N_i \in e_j$, 即节点 N_i 是超边 e_j 中的节点, 那么 $b_{ij} = 1$; 否则 $b_{ij} = 0$ 。

定理 1 若元任务-作战节点关联矩阵 B_t 、超图模型 H_t 均是针对 t 时刻所构建, 则 B_t 为 H_t 的连接矩阵。

根据 B_t 和 H_t 的定义, 显然可以得到两者之间的关系, 证明过程略。此时, 在超图 H_t 中, 顶点 N_a 和 N_b 之间的关联系数可以表示为 $c'_{ab} = \sum_{j=1}^m (b_{aj} \times b_{bj})$, 其中 b_{aj} 和 b_{bj} 分别为顶点 N_a 、 N_b 在关联矩阵 B_t 中对应的元素。

定理 2 若关联系数矩阵 C_t 的每行和每列都与 H_t 的顶点相关, 则 B_t 和 C_t 满足 $C_t = B_t B_t^T - D$ 。其中 D 为对角线上元素为顶点超度数的对角矩阵^[5]。

证明: 根据 B_t 的定义, 容易得到

$$B_t B_t^T = \begin{bmatrix} c'_{11} & c'_{12} & \cdots & c'_{1n} \\ c'_{21} & c'_{22} & \cdots & c'_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ c'_{n1} & c'_{n2} & \cdots & c'_{nm} \end{bmatrix} \quad (4)$$

对于关联系数矩阵 C_t 中的元素 c'_{ab} , 当 $a=b$ 时, 有 $c'_{aa} = H_t d(N_a)$, 即 c'_{aa} 等于超图 H_t 中顶点 N_a 的超度。按照矩阵运算法则, 可得 $C_t = B_t B_t^T - D$, 其中 $D = \text{diag}(H_t d(N_1), H_t d(N_2), \dots, H_t d(N_n))$ 。

OIF 的作战全程演化矩阵可以看作多个时刻 OIF 关联矩阵的有序拼接。若作战持续总时间为 T , 则演化矩阵可表示为:

$$B_T = [B_{t_1} \quad B_{t_2} \quad \cdots \quad B_{t_k} \quad \cdots \quad B_{t_K}] \quad (5)$$

其中, B_{t_k} 为 t_k 时刻的关联矩阵, $k \in [1, K]$ 。 $B_{t_1} \rightarrow B_{t_K}$ 由左至右逐步推进, 反映了 OIF 结构随任务转换、时间累加而发生的适应性演变过程。

在构建 OIF 动态超图模型时, 首先要通过节点、元任务等建立某个时刻的静态模型, 然后引入时间系数, 对多个时刻的超图模型进行有序排列。为便于理清元任务与作战节点的对应关系, 可先根据关联矩阵 B_t 建立二分图模型 P_t , 如图 2 所示。

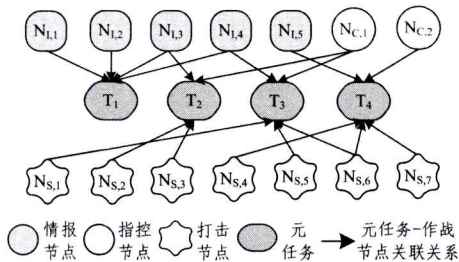


图 2 OIF 二分图模型示意图

然后结合超图定义, 以作战节点为顶点, 以元任务为超边 (用圈表示), 作战节点之间的信息交互关系为顶点间连线, 将二分图模型 P_t 转化成对应的超图模型 H_t , 如图 3 所示。同一圈内的作战节点通过信息流模体相连, 构成了交战程序链。

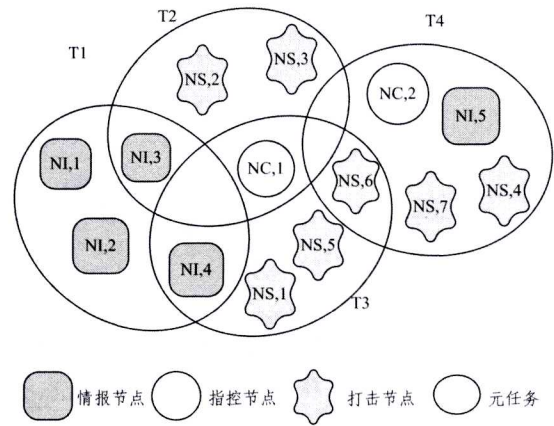


图 3 OIF 超图模型示意图

当作战节点、元任务的数量相对较少, 关联关系不十分复杂时, 可直接根据关联矩阵 B_t 构造超图模型 H_t 。对比图 2、图 3 可以看出, OIF 的超图模型能够较好地克服二分图的节点异质和简单映射图的歧义等问题, 可直观、清晰地展现作战节点之间的任务协作及信息交互关系。

2.4 建模流程及步骤

本文抽象了信息流模体, 分析了信息流模体的功能组合, 结合作战任务分解情况, 讨论了交战程序链的相关问题, 这 3 个层次相当于对 OIF 模型进行不同粒度的分解。以下给出具体的建模流程及步骤, 如图 4 所示。

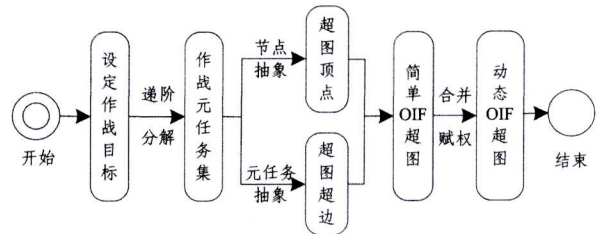


图 4 OIF 动态超图模型构建流程

步骤 1 针对具体作战行动, 分析敌我力量构成、战场环境等因素, 合理设定作战目标。

步骤 2 确定作战总任务, 并自上而下进行递阶分解, 形成相对独立、可直接执行的元任务集合。

步骤 3 将全部作战节点归类, 抽象为超图的 3 类顶点, 并用不同的符号进行表示。

步骤 4 选定某个作战时刻, 将元任务抽象为超边, 根据元任务-作战节点关联矩阵, 用超边将相关顶点进行连接。

步骤 5 在每个超边内, 根据元任务内容、节点类型, 按照信息流模体的结构和规则, 用连线将相关顶点进行关联, 得到静态超图模型。

步骤 6 按照作战时间推进顺序, 将多个时刻的静态超图模型进行有序排列, 得到整个作战过程中动态时变的 OIF 超图模型。

3 实例分析

以空中进攻作战 (Aviation Aggressive Operations, AAO)

为例进行分析。假设红方在某作战地域内设置了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架侦察无人机、2架电子干扰机、4个歼击机编队(共16架)、2个轰炸机编队(共8架),拟对蓝方某岛屿实施空中进

攻作战,企图集中优势兵力,消灭、压制蓝方空中和对空作战力量,突击要害目标和战场设施,为海上作战提供有利条件。以下仅针对红方作战行动建立 AAO 高层作战概念,并给出各节点的属性、编号,如图5所示。

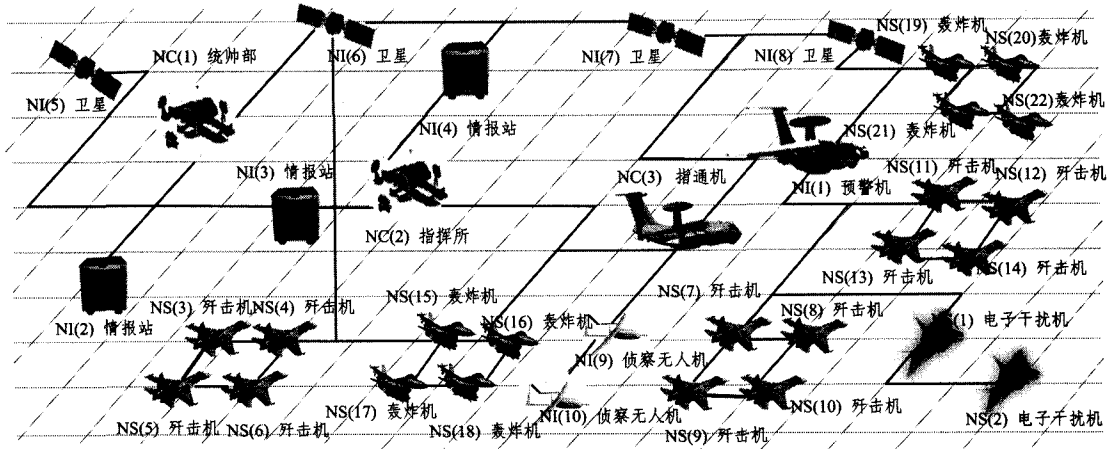


图5 AAO 高层作战概念

需要说明的是,在现代空战中,预警机主要用于搜索、监视空中或海上目标,指挥并引导己方飞机执行作战任务,兼具情报节点和指控节点的功能。由于实例专门设置指通机用于指挥控制空中机群,因此在以下分析中,弱化预警机的指挥引导能力,将其视为情报节点,着重突出搜索预警功能。

3.1 AAO 任务递阶分解

按照作战实施过程,当 G = “空中作战集团”时,AAO 任务 T 可分解为“ T_1 作战准备”、“ T_2 空中突防”和“ T_3 空中突击”3个子任务。

3.1.1 作战准备子任务

主要是判明蓝方目标特性,拟制作战计划,有序部署兵力等,可分解为5个元任务,如表5所列。

表5 作战准备子任务

元任务	内容	时刻	尺度	要求	执行节点
T _{1.1}	判别目标属性	t ₁	百分比	90%	NI(2)/NI(5)/NI(8) - NI(10)
T _{1.2}	精确定位目标	t ₂	百分比	95%	NI(4)/NI(6)/NI(7)/NI(9)
T _{1.3}	搜集最新情报	t ₁	小时	2	NI(7) - NI(9)
T _{1.4}	处理最新情报	t ₂	分钟	30	NI(2) - NI(4)
T _{1.5}	拟制作战计划	t ₃	分钟	45	NC(1)/NC(2)/NI(2) - NI(4)

3.1.2 空中突防子任务

主要是突破蓝方的空中、地面火力封锁,抵达攻击区域等,可分解为7个元任务,如表6所列。

表6 空中突防子任务

元任务	内容	时刻	尺度	要求	执行节点
T _{2.1}	干扰蓝方电子目标	t ₄	百分比	80%	NS(1)/NS(2)
T _{2.2}	识别蓝方重要目标	t ₅	分钟	5	NI(1)/NI(5)/NI(6)
T _{2.3}	持续压制蓝方目标	t ₄	百分比	90%	NI(1)/NC(3)/NS(1) - NS(6)
T _{2.4}	伴攻改变蓝方行动	t ₅	百分比	80%	NI(1)/NC(3)/NS(7) - NS(10)
T _{2.5}	诱导蓝方转变目标	t ₅	百分比	70%	NC(3)/NS(11) - NS(14)
T _{2.6}	侦察己方战场损失	t ₆	分钟	15	NI(1)/NI(7) - NI(9)
T _{2.7}	侦察蓝方转攻时间	t ₆	小时	0.3	NI(1)/NI(5)/NI(6)/NI(10)

3.1.3 空中突击子任务

主要是摧毁破坏蓝方的重要目标、战场设施、作战力量等,可分解为5个元任务,如表7所列。

表7 空中突击子任务

元任务	内容	时刻	尺度	要求	执行节点
T _{3.1}	传达所有作战指令	t ₇	分钟	10	NC(1) - NC(3)
T _{3.2}	准确接收作战指令	t ₇	是/否	是	NC(3)/NS(15)/NS(19)
T _{3.3}	打击指定作战目标	t ₈	小时	1.5	NS(15) - NS(22)
T _{3.4}	侦察目标毁伤效果	t ₉	分钟	20	NI(1)/NI(7) - NI(9)
T _{3.5}	侦察蓝方新增兵力	t ₉	分钟	15	NI(1)/NI(6)/NI(10)

3.2 AAO-OIF 静态超图模型

以 t_4 时刻为例, $T_{2.1}$, $T_{2.3}$ 共2个元任务并行实施,涉及3类共8个作战节点以及3类共4个信息流模体。此时,关联矩阵 B_{t_4} 的转置为:

$$B_{t_4}^T = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

将作战节点抽象为8个顶点,元任务抽象为2条超边,用信息流模体将超边内节点进行关联,得到 t_4 时刻的 AAO-OIF 静态超图模型,如图6所示。

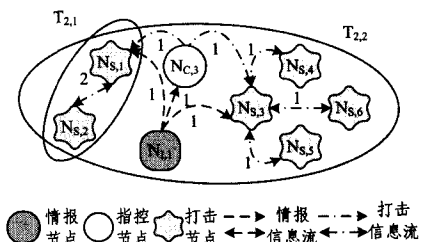


图6 t_4 时刻的 AAO-OIF 静态超图模型

图6中,每个元任务对应1条交战区程序链,由主导信息流的性质可知, $L_{2.1}$, $L_{2.3}$ 均为协同打击链。其中, $L_{2.1}$ 包含1个 IFM_S (即 $NS_{s,1} \leftrightarrow NS_{s,2}$); $L_{2.3}$ 包含3个 IFM_I (即 $NI_{i,1} \rightarrow NC_{c,3}$, $NI_{i,1} \rightarrow NS_{s,1}$, $NI_{i,1} \rightarrow NS_{s,3}$), 2个 IFM_C (即 $NC_{c,3} \rightarrow NS_{s,1}$, $NC_{c,3} \rightarrow NS_{s,3}$), 以及4个 IFM_S (即 $NS_{s,1} \leftrightarrow NS_{s,2}$, $NS_{s,3} \leftrightarrow NS_{s,4}$, $NS_{s,3} \leftrightarrow NS_{s,5}$, $NS_{s,3} \leftrightarrow NS_{s,6}$)。顶点 $NS_{s,1}$ 和 $NS_{s,2}$ 的超度最大,均为2,表明这2个节点是该时刻执行元任务的关键节点。同时,顶点 $NS_{s,1}$ 与 $NS_{s,2}$ 的关联系数最大,达到2,表明信息流 $NS_{s,1} \leftrightarrow NS_{s,2}$ 为该时刻的关键 OIF 路径。

3.3 AAO-OIF 动态超图模型

按照 t_4 时刻的 AAO-OIF 静态超图模型建立方法,分别构

建作战全过程 t_1-t_9 时刻的超图模型, 然后按照时间序列进行排列, 得到动态时变的 AAO-OIF 超图模型, 如图 7 所示。

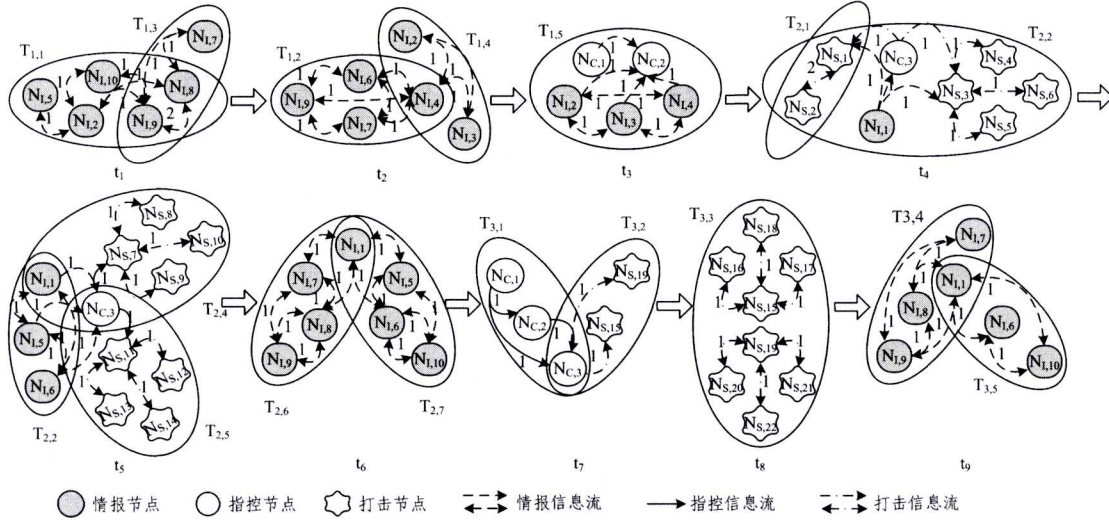


图 7 动态时变的 AAO-OIF 超图模型

3.3.1 顶点超度分析

图 7 不仅直观、准确地描述了 AAO 的作战过程, 还动态展示了整个 AAO-OIF 的具体细节。其共包含 17 条交战程序链, 其中 $L_{1,1}-L_{1,5}, L_{2,2}, L_{2,6}-L_{2,7}, L_{3,4}-L_{3,5}$ 共 10 条为情报保障链, $L_{3,1}$ 为指挥控制链, $L_{2,1}-L_{2,2}, L_{2,4}-L_{2,5}, L_{3,2}-L_{3,3}$ 共 6 条为协同打击链。整个作战过程中, 各个顶点的超度如表 8 所列。

表 8 AAO-OIF 动态超图模型顶点超度

编号	超度	编号	超度	编号	超度	编号	超度	编号	超度	编号	超度
$N_{I,1}$	7	$N_{I,7}$	4	$N_{C,3}$	5	$N_{S,6}$	1	$N_{S,12}$	1	$N_{S,18}$	1
$N_{I,2}$	3	$N_{I,8}$	4	$N_{S,1}$	2	$N_{S,7}$	1	$N_{S,13}$	1	$N_{S,19}$	2
$N_{I,3}$	1	$N_{I,9}$	5	$N_{S,2}$	2	$N_{S,8}$	1	$N_{S,14}$	1	$N_{S,20}$	1
$N_{I,4}$	3	$N_{I,10}$	3	$N_{S,3}$	1	$N_{S,9}$	1	$N_{S,15}$	2	$N_{S,21}$	1
$N_{I,5}$	3	$N_{C,1}$	2	$N_{S,4}$	1	$N_{S,10}$	1	$N_{S,16}$	1	$N_{S,22}$	1
$N_{I,6}$	4	$N_{C,2}$	2	$N_{S,5}$	1	$N_{S,11}$	1	$N_{S,17}$	1		

由表 8 可知, 顶点 $N_{I,1}$ 的超度最大, 达到 7, 表明该节点是整个作战过程中执行元任务的关键节点。进一步分析, 由于 $N_{I,1}$ 对应的作战单元为预警机, 其担负着搜索、监视空中或海上目标以及引导己方飞机作战行动的任务, 是空中作战集群的核心节点之一, 说明理论分析与实际作战情况相符合。

3.3.2 顶点关联系数分析

图 7 中共 58 对顶点具有非零的关联系数, 其中数值大于或等于 2 的顶点组合有 12 对, 如表 9 所列, 其余 46 对顶点的关联系数都是 1。

表 9 AAO-OIF 动态超图模型的顶点关联系数

顶点 A	顶点 B	系数值	顶点 A	顶点 B	系数值	顶点 A	顶点 B	系数值
$N_{I,1}$	$N_{I,5}$	2	$N_{I,2}$	$N_{I,3}$	2	$N_{I,7}$	$N_{I,8}$	3
$N_{I,1}$	$N_{I,6}$	3	$N_{I,2}$	$N_{I,4}$	2	$N_{I,7}$	$N_{I,9}$	4
$N_{I,1}$	$N_{I,8}$	2	$N_{I,3}$	$N_{I,4}$	2	$N_{I,8}$	$N_{I,9}$	4
$N_{I,1}$	$N_{C,3}$	2	$N_{I,5}$	$N_{I,6}$	2	$N_{C,1}$	$N_{C,2}$	2

从表 9 可知, 顶点 $N_{I,7}$ 与 $N_{I,9}, N_{I,8}$ 与 $N_{I,9}$ 的关联系数最大, 均达到 4, 表明信息流 $N_{I,7} \leftrightarrow N_{I,9}$ 及 $N_{I,8} \leftrightarrow N_{I,9}$ 为整个作战过程中的关键信息流转路径。进一步分析, $N_{I,7}$ 及 $N_{I,8}$ 对应的作战单元为卫星, $N_{I,9}$ 对应的作战单元为侦察无人机, 都是空中进攻作战的关键情报节点。在实际作战中, 大量频繁的空情态势、重要目标信息、交战毁伤效果等情报都需要通过这 3 个节点进行处理、共享、上报, 因此包含 $N_{I,7}, N_{I,8}, N_{I,9}$

的信息流在整个信息流过程中具有十分重要的地位和作用。

此外, 通过横向对比不同时刻的 OIF 结构还可以看出, t_5 时刻的作战活动最为密集, 不仅涉及节点的类型、数量多, 而且信息交互频繁、复杂。这是因为 t_5 时刻是空中突防作战的关键阶段, 敌我对抗十分激烈, 对战局发展有着至关重要的影响。

结束语 本文研究了网络化作战中基本的信息流模体及其功能组合, 在递阶分解作战任务的基础上, 建立了动态时变的 OIF 超图模型, 为科学描述与分析作战信息流转问题提供了一种新的思路和方法。有所不足的是, 研究过程中未对作战行动临机转换、节点进入与退出机制、节点间最优信息流转路径等问题进行深入探讨, 后续将重点解决以上问题, 进一步改进完善 OIF 模型构建方法。

参考文献

- [1] Jia Jun, Wu Yuan-li, He Xiao-yuan, et al. Operation cooperative relation modeling based on hypergraphs[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2015, 37(3): 185-190 (in Chinese)
- [2] 贾珺, 吴元立, 贺筱媛, 等. 作战协同关系超图模型[J]. 国防科技大学学报, 2015, 37(3): 185-190
- [3] Lan Yu-shi, Mao Shao-jie, Wang Heng. Theory and optimization of C⁴ISR system structure[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2015 (in Chinese)
- [4] 蓝羽石, 毛少杰, 王珩. 指挥信息系统结构理论与优化方法[M]. 北京: 国防工业出版社, 2015
- [5] Wang Chao, Chen Xing-yuan. An access control mode based on information flow graph[C]// 2011 Seventh International Conference on Computational Intelligence and Security. 2011: 998-1000
- [6] Akselrod D, Abhijit S, Kirubarajan T. Information Flow Control for Collaborative Distributed Data Fusion and Multisensor Multitarget Tracking [J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-part C: Applications and Reviews, 2012, 42(4): 501-517

(下转第 65 页)

与以上的研究工作相比,本文侧重于第二个方面,而且是从一个新的角度即自适应进行迁移算法选择来提高实时迁移整体性能。

结束语 IaaS 云计算平台主要利用多虚拟机实时迁移对资源进行优化、调度与管理。目前的多虚拟机实时迁移采用固定、单一的迁移算法对各虚拟机进行迁移,没有考虑迁移算法对运行不同负载虚拟机的适用性和有效性,进而影响整体迁移性能。本文提出一种根据各虚拟机负载情况自适应选择迁移算法的有效框架,基于模糊聚类方法将虚拟机进行分类,为不同类型的虚拟机选择最适合的迁移算法。实验表明,所提出的方案能够发挥两个基本迁移算法的优点,有效提高多虚拟机实时迁移整体性能。下一步将考虑在实际的云平台(如 Openstack)上部署该框架,在生产环境中进一步对该方案进行评估。

参 考 文 献

- [1] Nelson M, Lim B, Hutchines G. Fast Transparent Migration for Virtual Machines [C] // Proceeding of the USENIX Annual Technical Conference. 2005:391-394
- [2] Yuan Ye, Zhao Hai-yan, Cao Jian, et al. Research on Memory Migration of Virtual Machines[J]. Journal of Chinese Computer Systems, 2014, 35(2): 412-418(in Chinese)
袁野, 赵海燕, 曹健, 等. 虚拟机内存迁移技术研究[J]. 小型微型计算机系统, 2014, 35(2): 412-418
- [3] Clark C, Fraser K, Hand S, et al. Live Migration of Virtual Machines[C] // Proceeding of The 2nd Symposium on Networked Systems Design and Implementation. 2005:273-286
- [4] Hines M R, Deshpande U, Gopalan K. Post-copy Live Migration of Virtual Machines[J]. ACM SIGOPS Operating Systems Review, 2009, 43(3): 14-26
- [5] Zhang X, Huo Z, Ma J, et al. Exploiting Data Deduplication to Accelerate Live Virtual Machine Migration[C] // Proceeding of the 2010 IEEE International Conference on Cluster Computing. 2010:88-96
- [6] Chen Yang, Huai Jin-peng, Hu Chun-ming. Live Migration of Virtual Machines Based on Hybrid Memory Copy Approach[J]. Chinese Journal of Computers, 2011, 34(12): 2278-2291(in Chinese)
- [7] Lempereur B, Merabti M, Qi Shi. Information Flow Monitoring: Model, Policy, and Analysis[C] // Developments in E-systems Engineering. 2011:227-232
- [8] Wang Zhong-jie, Xu Xiao-fei. Service value dependency model based on layered hyper-graph[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2011, 17(8): 1834-1843(in Chinese)
王忠杰, 徐晓飞. 基于分层超图的服务价值依赖模型[J]. 计算机集成制造系统, 2011, 17(8): 1834-1843
- [9] Zou Zhi-gang, Liu Fu-xian, Sun Shi-man, et al. Extended granular computing-based supernetwork model for anti-air operational architecture[J]. Complex Systems and Complexity Science, 2014, 11(2): 24-35(in Chinese)
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
- [7] Ye K, Jiang X, Ma R, et al. VC-Migration: Live Migration of Virtual Clusters in The Cloud[C] // Proceeding of the 13th ACM/IEEE International Conference on Grid Computing. 2012: 209-218
- [8] Deshpande U, Wang X, Gopalan K. Live Gang Migration of Virtual Machines[C] // Proceeding of the 20th ACM International Symposium on High Performance Distributed Computing. 2011: 135-146
- [9] Liu H, He B. VMBuddies: Coordinating Live Migration of Multi-tier Applications in Cloud Environments[J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 2015, 26(4): 1192-1205
- [10] Lu T, Stuart M, Tang K, et al. Clique Migration: Affinity Grouping of Virtual Machines for Inter-cloud Live Migration[C] // Proceeding of the 9th IEEE International Conference on Networking, Architecture, and Storage(NAS). 2014:216-225
- [11] Bezdek J C. Pattern Recognition with Fuzzy Objective Function Algorithms[M]. Plenum Press, New York, 1981
- [12] Zhang Hui-zhe, Wang Jian. Improved Fuzzy C Means Clustering Algorithm Based on Selecting Initial Clustering Centers [J]. Computer Science, 2009, 36(6): 206-209(in Chinese)
张慧哲, 王坚. 基于初始聚类中心选取的改进 FCM 聚类算法[J]. 计算机科学, 2009, 36(6): 206-209
- [13] 张忠平. 指数平滑法[M]. 北京: 中国统计出版社, 1996
- [14] KVM. Kernel Based Virtual Machine[EB/OL]. (2015-07-20). http://www.linux-kvm.org/page/Main_Page
- [15] Intel Corporation. Intel 64 and IA-32 Architectures Software Developer's Manual Volume 1, Basic Architecture[M]. 2011: 35-104
- [16] AMD Corporation. AMD64 Architecture Programmer's Manual Volume 2[M] // System Programming. 2006: 1-124
- [17] Jin H, Deng L, Wu S, et al. MECOM: Live Migration of Virtual Machines by Adaptively Compressing Memory Pages[J]. Future Generation Computer Systems, 2014, 38: 23-35
- [18] Hines M R, Gopalan K. Post-copy Based Live Virtual Machine Migration Using Adaptive Pre-paging and Dynamic Self-ballooning[C] // Proceeding of the 2009 ACM SIGPLAN/SIGOPS International Conference on Virtual Execution Environments. ACM, 2009: 51-60

(上接第 35 页)

- [5] Wang Fei, Si Guang-ya, Rong Ming, et al. Research on network-of-networks model of armament system-of-systems[J]. Systems Engineering and Electronics, 2015, 37(9): 2052-2060 (in Chinese)
王飞, 司光亚, 荣明, 等. 武器装备体系的异质超网络模型[J]. 系统工程与电子技术, 2015, 37(9): 2052-2060
- [6] Zhang Jie-yong, Lan Yu-shi, Yi Kan, et al. Network-centric C4ISR system structure and super-Network model [J]. Command Information System and Technology, 2014, 5(5): 1-12(in Chinese)
张杰勇, 蓝羽石, 易侃, 等. 网络中心化 C4ISR 系统结构与超网络模型[J]. 指挥信息系统与技术, 2014, 5(5): 1-12
- [7] Lempereur B, Merabti M, Qi Shi. Information Flow Monitoring: