

基于信息流的作战体系结构建模

杨迎辉¹ 李建华¹ 南明莉² 田言涛¹

(空军工程大学信息与导航学院 西安 710077)¹ (中国人民解放军 95881 部队 北京 100095)²

摘要 为综合描述体系作战信息流结构,细致刻画作战活动、作战单元之间复杂动态的信息处理与交互情况,引入信息流分析方法,定义了实体、关系、属性等 3 类信息流要素,解析了实体要素之间的对应关联关系,以信息流为主线,设定了活动→活动、活动→节点、节点→活动和节点→节点 4 种信息映射规则,结合建模基本流程,分别构建了基于信息流的作战活动模型、作战节点模型和信息交互模型。最后,以空中突击作战为例,进行了仿真验证。结果表明,提出的方法和模型是可行、有效的,能够描述作战体系内部复杂多样的信息交互关系,展现信息流贯穿作战活动的动态全过程,为作战体系建模和信息需求分析提供了新的方法和手段。

关键词 信息流,作战,体系结构,映射规则,模型

中图分类号 E82 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2016.2.003

Operational Architecture Modeling Based on Information Flow

YANG Ying-hui¹ LI Jian-hua¹ NAN Ming-li² TIAN Yan-tao¹

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

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

Abstract To depict information flow structure of systematic operations synthetically and describe complex dynamic information disposal and alternation situation among operational activities and units carefully, this paper introduced information flow analysis method. Three information flow factors of entity, relationship and attribute were defined, relationships among entities were analyzed and four information mapping rules of activity→activity, activity→node, node→activity and node→node were given with information flow as main line. According to basic modeling flows, models of operational activity, node and information alternation were built. Finally, an example of aerial assault operation was taken for validation as simulation. The results show that the method and models proposed are feasible and effective, and can describe complex information alternation relationship in operational systems and present dynamic process of information flow impenetrating operational activities, which provide a new method for operational architecture modeling and information requirement analysis.

Keywords Information flow, Operation, Architecture, Mapping rule, Model

作战体系由各种作战系统按照一定的指挥关系、组织关系和运行机制构成,是现代战争的重要支撑,通常具有较为复杂的体系结构^[1]。作战体系结构建模是对作战体系组成部分的结构、相互关系、演化规则与指南的模型化描述,已广泛应用于作战过程推演、军事需求分析等领域,对体系结构优化、作战能力提升具有重要意义。

目前,作战体系结构建模方法已经成为国内外作战建模和体系研究领域的热点。世界各军事强国(组织)先后制定了用于指导军事信息系统开发及作战运用的体系结构框架,如美国国防部的 C4ISR AF 2.0 标准以及 DODAF1.0、1.5、2.0

版^[1],英国国防部的 MODAF V1.0、V1.2 版^[2],北约的互操作性管理计划 NIMP、C3 系统体系结构框架 NAF 3.0 版等^[3]。国内学者也先后提出了基于复杂网络^[4]、基于超网络^[5]、基于功能和联接^[6]、基于元模型^[7]、基于指控链^[8]、基于能力优先^[9]等作战体系建模与优化方法。已有研究成果从不同方面深化了对作战体系建模问题的理论认知,但多数存在以下两方面不足:1)偏重于抽象概念层次,与作战实际结合不够紧密,缺少详细的作战过程分析和规范的信息需求表述;2)分析角度相对单一,通常仅从作战、系统或技术等某个方面孤立地分析作战过程、系统和信息,未能综合、全面、细致地刻

到稿日期:2015-01-21 返修日期:2015-05-28 本文受国家自然科学基金(61401499,61174162),国家社会科学基金(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、军事建模仿真,E-mail:yangyinghui_good@163.com;李建华(1965—),男,博士,教授,博士生导师,主要研究方向为空天信息系统建设与运用,E-mail:KGDJH@163.com;南明莉(1987—),女,助理工程师,主要研究方向为军事建模仿真,E-mail:nanmingli_good@163.com;田言涛(1978—),男,硕士生,主要研究方向为作战信息资源管理,E-mail:tianyt1978@163.com。

画体系作战中作战活动、单元之间复杂动态的信息交互关系。

从系统科学的角度看,信息流描述了作战体系中信息的传递过程及活动特征,是对作战流程的有效反映^[10]。选择信息流作为切入点,研究作战活动过程,分析信息交互关系,厘清信息类型、内容及流向,能够有效降低建模问题的复杂度,较好地解决作战过程分析和信息交互研究中系统性、层次性和针对性不足的问题。为此,本文基于信息流分析方法,通过定义信息流要素,研究信息映射规则,建立作战活动模型、节点模型和信息交互模型,描述作战体系内部复杂多样的信息处理与交互关系,从而为作战体系结构建模、信息需求分析问题提供了一种新的思路和方法。

1 信息流要素

根据信息流分析方法的基本原理,信息在整个交互过程中所表现的特性及变化规律是研究的重点和难点,而厘清信息流要素及其相互关系则是首要任务^[11]。借鉴体系结构开发的一般思路,将信息流要素主要分为实体、关系、属性3类。

1.1 实体

定义 1 实体是特定任务需求牵引下执行信息处理的对象,包括作战信息、节点、活动和任务。用 $CE = \{CE_i | i \in [1, m]\}$ 表示,其中 m 为实体类别^[10]。同类实体的层次和数量受作战视图颗粒度影响。

作战信息是指战场事物的存在方式、运动状态、变化情况,以及对其直接或间接的表述,可表示为 $CE_{info} = \{I_{i,j}^w | i \in [1, X_0], j \in [1, I_0]\}$,其中 w 为作战结构颗粒度, I_0 为信息种类, X_0 为按颗粒度划分的层数。

作战节点是指具有预警、探测、侦察、指挥、控制、通信、毁伤等功能的作战实体,可表示为 $CE_{node} = \{N_{i,j}^n | i \in [1, J_0], j \in [1, N_0]\}$,其中 n 为作战结构颗粒度, N_0 为节点总数, J_0 为按颗粒度划分的层数。

作战活动是由共同作战目的联合起来的、能够完成一定任务的有序作战行为的集合,可表示为 $CE_{acti} = \{A_{i,j}^a | i \in [1, H_0], j \in [1, A_0]\}$,其中 a 为作战结构颗粒度, A_0 为活动总数, H_0 为按颗粒度划分的层数。

作战任务是指作战节点为了达成特定的作战意图组织开展的有序作战活动集合,可表示为 $CE_{task} = \{T_i | i \in [1, T_0]\}$,其中 T_0 为任务总数。对任意任务 T_i ,均有 $T_i = A_{k,1} \cup A_{k,2} \cup \dots \cup A_{k,j}$,其中 $k \in [1, H_0], j \in [1, A_0]$ 。

1.2 关系及属性

定义 2 关系是指不同实体之间的数据或信息流动,使用有向的信息需求线进行标识,可表示为 $CR = \{CR_i | i \in [1, n]\}$,其中 n 为关联关系数量。按照功能特点的不同,关系可划分为情报保障信息关系、作战指挥信息关系和武器控制信息关系3类。

定义 3 属性是指实体和关系所具有的带宽、传输速率、时延等特性,一般由信息交换提供,可表示为 $CP = \{CP_i | i \in [1, t]\}$,其中 t 为属性数量。

信息流要素是进行作战体系结构建模的必备条件,也是确保体系结构满足语法规范性和信息完备性的重要基础,内部关联关系如图1所示。

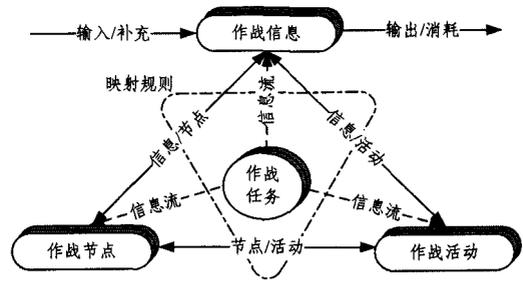


图1 实体之间的关联关系

围绕作战任务,作战活动、节点和信息构成了特殊的三元关系,记为 $CR = \gamma(CE_{acti}, CE_{node}, CE_{info})$,这是作战体系结构建模的关键所在。

2 信息映射规则

定义 4 信息映射规则是指不同实体之间关联信息关系所遵循的基本准则,包括活动→活动信息映射、活动→节点信息映射、节点→活动信息映射和节点→节点信息映射^[10-12],用 $CF = \{CF_i | i \in [1, p]\}$ 表示,其中 p 为规则数量。根据 IDEF0 图的建模基本原理^[10],各信息映射的具体过程如下。

规则 1: 活动→活动信息映射

活动→活动信息映射是作战活动之间进行关联的方式,明确了活动之间的交互信息,反映了作战活动的输入、输出和控制信息,如图2所示。

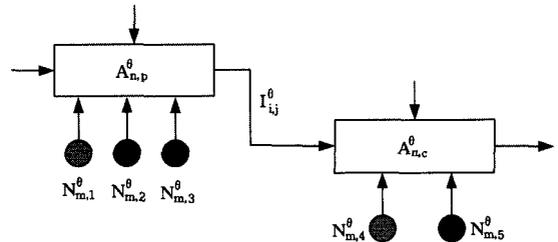


图2 活动→活动信息映射

- 选定作战结构颗粒度为 θ ;
- 选取作战信息 $I_{i,j}^theta$,根据信息流过程,确定其产生在作战活动 $A_{n,p}^theta$ 中,消耗在活动 $A_{n,c}^theta$ 中;
- 将信息 $I_{i,j}^theta$ 作为活动 $A_{n,p}^theta$ 的输出数据约束,作为活动 $A_{n,c}^theta$ 的输入(或控制)数据约束;
- 建立活动 $A_{n,p}^theta$ 与 $A_{n,c}^theta$ 之间的活动→活动信息映射,记为 $CF_1: A_{n,p}^theta \xrightarrow{I_{i,j}^theta} A_{n,c}^theta$ 。

规则 2: 活动→节点信息映射

活动→节点信息映射是作战活动与作战节点之间进行关联的方式,指明了作战活动所涉及的全部节点,明确了活动与节点之间的信息交互情况,如图3所示。

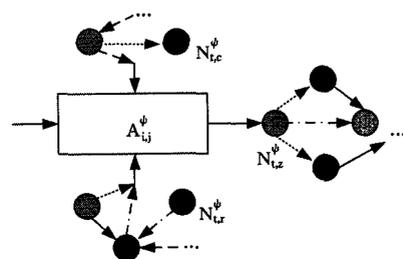


图3 活动→节点信息映射

- 选定作战结构粒度为 ψ ;
- 选取作战活动 $A_{i,j}^\psi$, 按照作战行动过程, 确定触发该活动的作战节点为 $N_{i,1}^\psi, N_{i,2}^\psi, \dots, N_{i,n}^\psi$, 可用集合 $N_{i,r}^\psi$ 进行表示, 即 $N_{i,r}^\psi = N_{i,1}^\psi \cup N_{i,2}^\psi \cup \dots \cup N_{i,n}^\psi$;
- 同理, 确定控制活动 $A_{i,j}^\psi$ 的节点集合为 $N_{i,z}^\psi$, 活动 $A_{i,j}^\psi$ 的输出节点集合为 $N_{i,c}^\psi$;
- 把节点集合 $N_{i,r}^\psi, N_{i,z}^\psi, N_{i,c}^\psi$ 分别作为活动 $A_{i,j}^\psi$ 的输入、控制、输出节点集;
- 建立活动 $A_{i,j}^\psi$ 的活动 \rightarrow 节点信息映射, 记为 $CF_2: A_{i,j}^\psi \rightarrow N_{i,r}^\psi \cup N_{i,z}^\psi \cup N_{i,c}^\psi$.

规则 3: 节点 \rightarrow 活动信息映射

节点 \rightarrow 活动信息映射指明了节点所参与的全部活动, 明确了节点与活动之间的信息交互情况, 如图 4 所示。

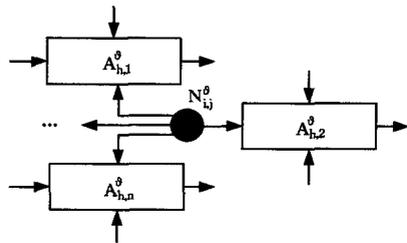


图 4 节点 \rightarrow 活动信息映射

- 选定作战结构粒度为 ϑ ;
- 选取作战节点 $N_{i,j}^\vartheta$, 根据作战力量运用情况, 确定其参与的活动为 $A_{h,1}^\vartheta, A_{h,2}^\vartheta, \dots, A_{h,n}^\vartheta$, 可用集合 $A_{h,i}^\vartheta$ 进行表示, 即 $A_{h,i}^\vartheta = A_{h,1}^\vartheta \cup A_{h,2}^\vartheta \cup \dots \cup A_{h,n}^\vartheta$;
- 将节点 $N_{i,j}^\vartheta$ 与活动集合 $A_{h,i}^\vartheta$ 中的所有元素对应连接;
- 建立节点 $N_{i,j}^\vartheta$ 的节点 \rightarrow 活动信息映射, 记为 $CF_3: N_{i,j}^\vartheta \rightarrow A_{h,1}^\vartheta \cup A_{h,2}^\vartheta \cup \dots \cup A_{h,n}^\vartheta$.

规则 4: 节点 \rightarrow 节点信息映射

节点 \rightarrow 节点信息映射是作战节点之间进行关联的方式, 明确了节点之间的关联关系及交互信息, 如图 5 所示。

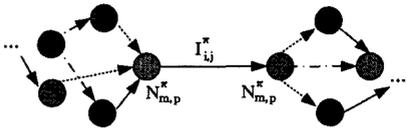


图 5 节点 \rightarrow 节点信息映射

- 选定作战结构粒度为 π ;
- 选取作战信息 $I_{i,j}^\pi$, 根据信息流过程, 确定其由节点 $N_{m,p}^\pi$ 产生, 由节点 $N_{m,c}^\pi$ 消耗;
- 绘制从节点 $N_{m,p}^\pi$ 到 $N_{m,c}^\pi$ 的信息需求线, 并与信息 $I_{i,j}^\pi$ 相对应;
- 建立节点 $N_{m,p}^\pi$ 与 $N_{m,c}^\pi$ 之间的节点 \rightarrow 节点信息映射, 记为 $CF_4: N_{m,p}^\pi \xrightarrow{I_{i,j}^\pi} N_{m,c}^\pi$.

3 基于信息流的作战体系结构模型

3.1 建模流程

按照作战结构粒度, 层次化分解作战活动、节点。根据信息映射规则的基本过程, 分别建立作战活动模型、作战节点模型和信息交互模型, 具体步骤及流程如图 6 所示^[13]。

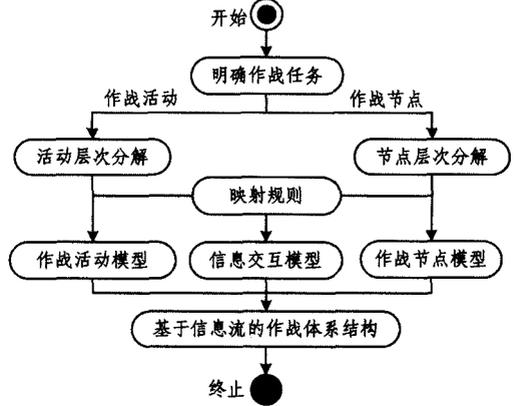
Step 1 明确作战任务, 区分作战过程, 分别对作战活动、节点进行层次化分解;

Step 2 根据信息映射规则 1-3, 确定各活动之间的交互信息, 厘清活动所涉及的全部节点, 明确各节点参与的活动, 构建作战活动模型;

Step 3 根据信息映射规则 4, 确定各节点之间的交互信息, 构建作战节点模型;

Step 4 根据作战活动、作战节点模型, 确定不同作战活动、节点之间相互交织的信息关系, 构建信息交互模型;

Step 5 由作战活动、作战节点和信息交互模型, 设计完成基于信息流的作战体系结构。



3.2 作战活动模型

作战活动模型反映了作战活动之间层次化的信息流交互情况, 可以用作战活动、节点和信息之间的特殊三元函数进行表示, 记为 $OAM = \Theta(CE_{acti}, CE_{info}, CE_{node})$ 。

当选定作战结构粒度为 χ 时, 作战活动可按粒度划分为 ϵ 层, 满足 $\epsilon \leq H_0$, 由此对应的活动集为 $CE_{acti} = \{A_{n,t}^\chi | n \in [1, \epsilon], t \in [1, A_0]\}$, 活动之间的信息集为 $CE_{info} = \{I_{p,q}^\chi | p \in [1, X_0], q \in [1, I_0]\}$, 参与活动的节点集为 $CE_{node} = \{N_{f,l}^\chi | f \in [1, H_0], l \in [1, N_0]\}$ 。

当选定作战结构粒度为 δ 时, 作战活动可按粒度划分为 γ 层, 满足 $\delta < \chi$ 且 $\epsilon < \gamma \leq H_0$, 由此对应的活动集为 $CE_{acti} = \{A_{b,c}^\delta | b \in [1, \gamma], c \in [1, A_0]\}$, 活动间的信息集为 $CE_{info} = \{I_{w,v}^\delta | w \in [1, X_0], v \in [1, I_0]\}$, 参与活动的节点集为 $CE_{node} = \{N_{z,x}^\delta | z \in [1, H_0], x \in [1, N_0]\}$, 所建模型如图 7 所示。

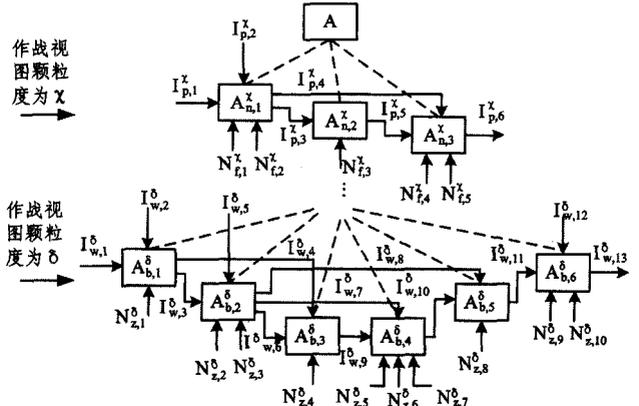


图 7 基于信息流的作战活动模型

3.3 作战节点模型

作战节点模型反映了作战节点之间复杂多样的信息交互关系及层次化的信息需求,可以用作战节点、信息之间的特殊二元函数进行表示,记为 $ONM = \Phi(CE_{node}, CE_{info})$ 。

当选定作战结构粒度为 α 时,作战节点可按粒度划分为 ϕ 层,满足 $\phi \leq J_0$,由此对应的节点集合为 $CE_{node} = \{N_{m,k}^\alpha | m \in [1, \phi], k \in [1, N_0]\}$,节点之间的信息集合为 $CE_{info} = \{I_{i,j}^\alpha | i \in [1, X_0], j \in [1, I_0]\}$ 。

当选定作战结构粒度为 β 时,作战节点可按粒度划分为 φ 层,满足 $\beta < \alpha$ 且 $\phi < \varphi \leq J_0$,由此对应的节点集合为 $CE_{node} = \{N_{e,s}^\beta | e \in [1, \varphi], s \in [1, N_0]\}$,节点间的信息集为 $CE_{info} = \{I_{g,h}^\beta | g \in [1, X_0], h \in [1, I_0]\}$,所建模型如图 8 所示。

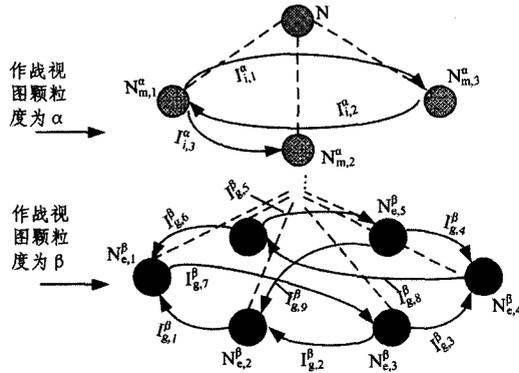


图 8 基于信息流的作战节点模型

3.4 信息交互模型

信息交互模型反映了在作战实施过程中,作战活动内部各节点之间多样化的信息交互关系,可以用作战信息、节点和活动之间的特殊三元函数进行表示,记为 $OIM = \Psi(CE_{info}, CE_{node}, CE_{acti})$ 。

当选定作战结构粒度为 ϵ 时,选取作战信息 $I_{i,j}$,按照信息流转的一般过程,确定其产生于节点集 $N_{m,p}^\epsilon$,消耗于节点集 $N_{m,c}^\epsilon$;产生于活动集 $A_{m,p}^\epsilon$,消耗于活动集 $A_{m,c}^\epsilon$,则对应的信息交互模型可表示为 $\{N_{m,p}^\epsilon \triangleright | A_{m,p}^\epsilon\} \xrightarrow{I_{i,j}} \{N_{m,c}^\epsilon \triangleright | A_{m,c}^\epsilon\}$ 。

同理可以得出,当选定作战结构粒度为 $\xi(\xi < \epsilon)$ 时,对应的信息交互模型可表示为 $\{N_{m,p}^\xi \triangleright | A_{m,p}^\xi\} \xrightarrow{I_{i,j}} \{N_{m,c}^\xi \triangleright | A_{m,c}^\xi\}$,所建模型如图 9 所示。

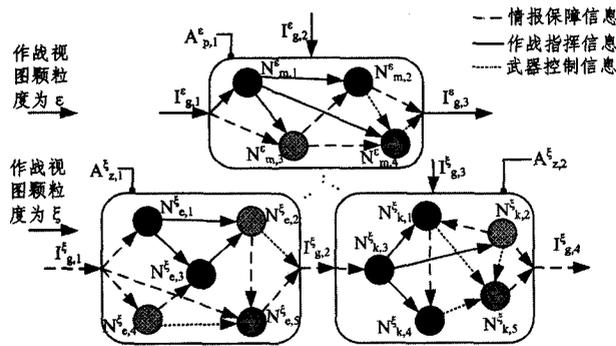


图 9 基于信息流的信息交互模型

4 案例分析

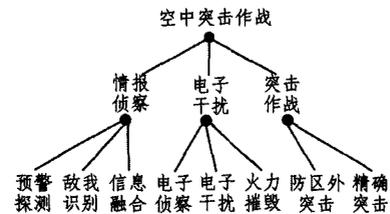
以信息化条件下的空中突击作战为例,仅考虑本级指挥

所、区域指挥所、航空兵师、雷达旅、电子对抗团、预警卫星和情报组网中心参战的情况,进行如下作战体系结构建模。

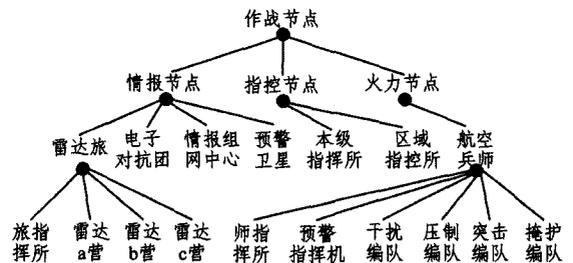
4.1 信息流要素层次化分解

根据空军作战理论^[14],空中突击作战活动分为情报侦察、电子干扰和突击作战 3 个主要阶段;节点分为情报节点、指控节点和火力节点 3 类,其中情报节点包括情报组网中心、雷达旅、预警卫星和电子对抗团,指控节点包括本级指挥所、区域指控所,火力节点为航空兵师。按照功能和用途,将信息分为情报保障信息、作战指挥信息和武器控制信息 3 类。

根据作战具体实施过程,可将情报侦察进一步分解为预警探测、敌我识别和信息融合 3 个底层活动,将电子对抗进一步分解为电子侦察、电子干扰和火力摧毁 3 个底层活动,将突击作战进一步分解为防区外突击和精确突击 2 个底层活动。按照军队编制及作战编组情况,将航空兵师节点分解为师指挥所、预警指挥机、干扰编队、压制编队、突击编队和掩护编队 6 个底层节点,将雷达旅节点分解为旅指挥所、雷达 a、b 和 c 营 4 个底层节点。作战活动和节点的层次化结构如图 10 所示。



(a) 作战活动的层次化结构



(b) 作战节点的层次化结构

图 10 作战活动和作战节点的层次化结构

4.2 作战活动模型

按照活动→活动信息映射规则,建立 2 个情报侦察活动内部信息映射、2 个电子对抗活动内部信息映射、1 个突击作战活动内部信息映射、3 个作战活动之间的跨集信息映射,共计 8 个活动→活动信息映射,具体如表 1 所列。

表 1 作战活动之间的映射关系

源活动	目的活动	信息类型
情报侦察	电子对抗/突击作战	I _{is}
电子对抗	突击作战	I _{is}
预警探测	敌我识别	I _{is}
敌我识别	信息融合	I _{is}
电子侦察	电子干扰	I _{is}
电子干扰	火力摧毁	I _{is}
防区外突击	精确突击	I _{is}

按照活动→节点、节点→活动信息映射规则,建立 11 个活动→节点信息映射、16 个节点→活动信息映射,共计 27 个活动与节点间的信息映射,具体如表 2 所列。

建立空中突击作战活动模型,如图 11 所示。

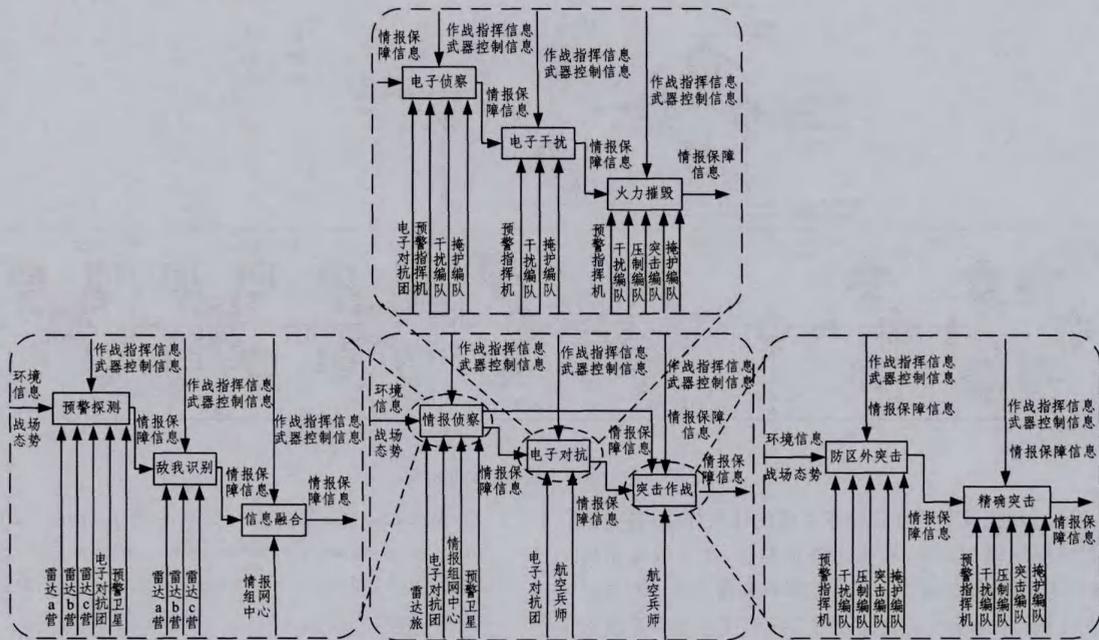


图 11 空中突击作战活动模型

表 2 作战活动与节点之间的映射关系

活动名称	执行节点
情报侦察	雷达旅/电子对抗团/情报组网中心/预警卫星
电子对抗	电子对抗团/航空兵师
突击作战	航空兵师
预警探测	雷达 a、b、c 营/电子对抗团/预警卫星
敌我识别	雷达 a、b、c 营
信息融合	情报组网中心
电子侦察	电子对抗团/预警指挥机/干扰、掩护编队
电子干扰	预警指挥机/干扰、掩护编队
火力摧毁/防区外突击/精确突击	预警指挥机/干扰、压制、突击、掩护编队

表 3 作战节点之间的映射关系

源节点	目的节点	信息类型
本级指挥所	区域指挥所/航空兵师/情报组网中心	Icc
区域指挥所	本级指挥所/航空兵师/雷达旅/情报组网中心	Icc
电子对抗团/预警卫星	电子对抗团/预警卫星	Icc/ Iwc
情报组网中心	情报组网中心/航空兵师	Is
航空兵师	本级、区域指挥所/航空兵师	Is
旅指挥所	雷达 a、b、c 营	Icc/ Iwc
雷达 a、b、c 营	旅指挥所	Is
师指挥所	预警指挥机	Is/ Icc/ Iwc
师指挥所	师指挥所	Is
预警指挥机	干扰/压制/突击/掩护编队	Is/ Icc/ Iwc
干扰/压制/突击/掩护编队	预警指挥机	Is

4.3 作战节点模型

按照节点→节点信息映射规则,建立 23 个火力节点集内部信息映射、14 个情报节点集内部信息映射、2 个指控节点集内部信息映射、21 个作战节点集之间的跨集信息映射,共计 60 个节点→节点信息映射,具体如表 3 所列。

建立空中突击作战节点模型,如图 12 所示。

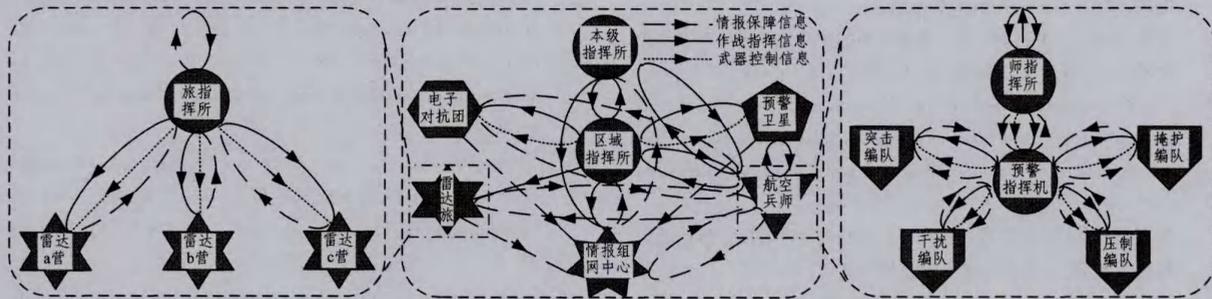


图 12 空中突击作战节点模型

4.4 信息交互模型

按照给定的 4 类信息映射规则,基于已建立的作战活动模型和作战节点模型,根据空中突击作战的组织实施过程,逐次分析不同类别信息的源节点、目的节点、产生活动和消耗活动,厘清作战活动、节点之间的信息传递过程及交互关系,建立信息交互模型,如图 13 所示。

通过本案例可知,与现有的仅从作战、服务、技术或能力等单一视角建立的体系结构相比^[5-9],基于信息流的作战体系结构能在保留原有体系结构要素的基础上,更加清晰地刻画作战体系内部复杂的信息交互关系,更加直观地展现信息流贯穿作战活动的动态全过程,较好地实现了以信息流为中心、面向过程的体系结构开发策略。

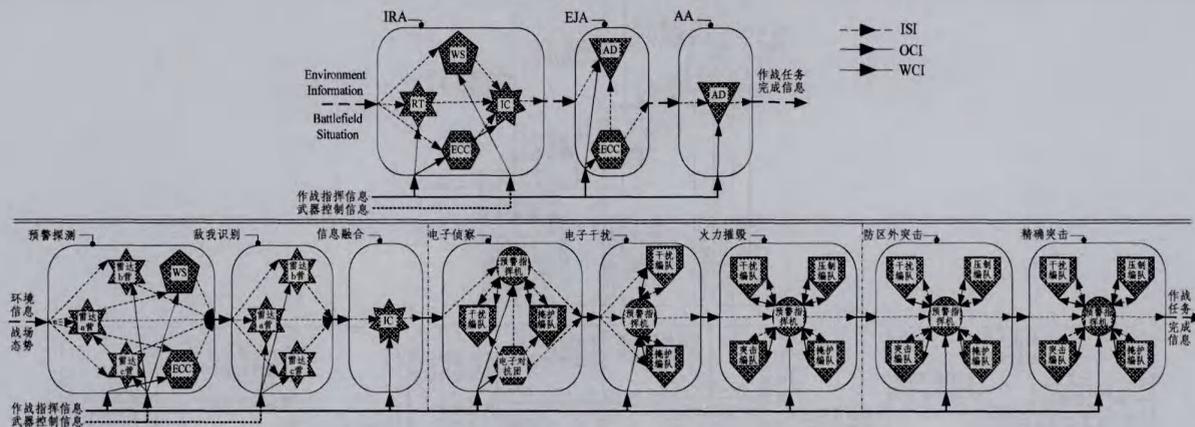


图 13 空中突击作战信息交互模型

结束语 现代战争是基于信息系统的体系作战,各类信息在多维空间纵横交织流转,贯穿作战始终,在作战体系构建、战场资源调控、作战进程同步中发挥着关键作用。本文以信息流为主线,综合考虑作战、信息、系统和技术等因素进行体系结构建模,细化了作战活动过程分析,突显了不同类型信息的重要作用,规范了信息需求表述方法^[15],较好地促进了体系结构信息的重用和交换,为后续作战信息流转模型建立、软件平台研制等奠定了基础。

参考文献

[1] DoD Architecture Framework Working Group. DoD architecture framework version 2.0 [R]. U. S. :Department of defense, 2009

[2] UK Ministry of Defense. UK ministry of defense architectural framework (MODAF) v1. 2. 004[R]. UK Ministry of Defense, 2010

[3] Shi Wei-lai, Lu Min. Development, application and enlightenment of foreign military architecture[J]. Communication Technology, 2010, 43(2): 169-172(in Chinese)
施未来,陆敏. 外军体系结构的发展应用及启示[J]. 通信技术, 2010, 43(2): 169-172

[4] Zhang Qiang, Li Jian-hua, Shen Di, et al. Research on network modeling and optimization of operation system of systems based on complex network [J]. Systems Engineering and Electronics, 2015, 37(5): 1066-1071(in Chinese)
张强,李建华,沈迪,等. 基于复杂网络的作战体系网络建模与优化研究[J]. 系统工程与电子技术, 2015, 37(5): 1066-1071

[5] Zou Zhi-gang, Liu Fu-xian, Sun Shi-man, et al. Extended granular computing-based supernet 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

[6] Pan Xing, Huang Yuan-xing, Yin Bao-shi. Equipment system of systems architecture based on function and connection[J]. Systems Engineering and Electronics, 2012, 34(10): 2052-2057 (in Chinese)
潘星,黄元星,尹宝石. 基于功能和联接的装备体系结构[J]. 系统工程与电子技术, 2012, 34(10): 2052-2057

[7] Xie Wen-cai, Luo Xue-shan, Luo Ai-min. Meta-model based modeling of military information system architecture[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2012, 34(1): 82-87(in Chinese)
谢文才,罗雪山,罗爱民. 基于元模型的军事信息系统体系结构建模方法[J]. 国防科技大学学报, 2012, 34(1): 82-87

[8] Du Wei, Wu Cong-hui, Du Zheng-jun, et al. Operational system network modeling and analysis research based on C2_link[J]. Fire Control & command control, 2014, 39(11): 93-96(in Chinese)
杜伟,吴从晖,杜正军,等. 基于指控链的作战体系网络建模分析[J]. 火力与指挥控制, 2014, 39(11): 93-96

[9] Zhang Feng-qin, Liang Dong, Guan Hua, et al. Research of construction algorithm of weapons and equipment operation model based on ability of node[J]. Application Research of Computers, 2015, 32(5): 1322-1325(in Chinese)
张风琴,梁栋,管桦,等. 基于能力优先的作战体系模型构建方法研究[J]. 计算机应用研究, 2015, 32(5): 1322-1325

[10] Waters J, Ceruti M G. Modeling and simulation of information flow: a study of infodynamic quantities[C]//The 15th International Command and Control Research and Technology Symposium (ICCRTS 2010). 2010: 178-183

[11] Xu Bing-qing, Zhang Li-chen. Multi-dimensional architecture modeling for cyber physical systems [C]//Advances in computer science and its applications 2013(CSA 2013). 2014: 101-105

[12] Kaufmann J R, Hand J R. Integrating Renewable Energy Requirements into Building Energy Codes[R]. National Laboratory, 2011

[13] Thakor S, Chen T, Grant A. Bounds for network information flow with correlated Sources [C] // 12th Annual Australian Communications Theory Workshop (AusCTW 2011). 2011: 43-48

[14] Cai Feng-zhen, Tian An-ping. Operational theory of air-sky integration [M]. Beijing: PLA press, 2006(in Chinese)
蔡凤震,田安平. 空天一体作战学[M]. 北京:解放军出版社, 2006

[15] Alexander M G. Requirement Assurance: A Verification Process [R]. Langley Research Center, Hampton, Virginia, 2011