

6-5-2020

Bi-Layered Network Model of Command Information System Based on Task Flow

Cui Qiong

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;;

Haodan Ran

1. Information and Navigation College, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China;;2. Xi'an Communication Institute, Xi'an 710106, China;

Mingli Nan

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

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.

Bi-Layered Network Model of Command Information System Based on Task Flow

Abstract

Abstract: As the monolayer and static network model can not reflect the hierarchy and task property of command information system, a *bi-layered network model of command information system based on task flow* is established. *The dynamic operation mechanism and layered network structure* are described on the basis of task structure and function of the system. *The bi-layered network consisting of communication network and function network is defined based on the task property and layered network theory.* The simulation takes the joint air defense operation command information system as an example and the results demonstrate the effectiveness of the model. The proposed model can provide guidance for describing the dynamic command information system.

Keywords

command information system, multi-field structure space, task-flow, bi-layered network

Recommended Citation

Cui Qiong, Li Jianhua, Ran Haodan, Nan Mingli. Bi-Layered Network Model of Command Information System Based on Task Flow[J]. Journal of System Simulation, 2017, 29(11): 2865-2874.

基于任务流的指挥信息系统双层网络模型

崔琼¹, 李建华¹, 冉湫丹^{1,2}, 南明莉¹

(1.空军工程大学信息与导航学院, 西安 710077; 2.西安通信学院, 西安 710106)

摘要: 针对目前单层、静态网络难以有效反映指挥信息系统层级结构和任务属性的问题, 构建了基于任务流的指挥信息系统双层网络模型。首先从指挥信息系统的任务、结构和功能入手, 描述了系统的动态运行机理和层级网络结构, 在此基础上, 根据指挥信息系统的任务属性和层级网络理论, 定义了由通信网络和功能网络构成的双层网络, 并构建了基于任务流的指挥信息系统双层网络模型。最后以某区域联合防空作战指挥信息系统为例进行仿真分析, 验证了模型的有效性, 该模型能够为指挥信息系统结构建模提供参考。

关键词: 指挥信息系统; 多作用域结构空间; 任务流; 双层网络

中图分类号: TP391.9 文献标识码: A 文章编号: 1004-731X (2017) 11-2865-10

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201711036

Bi-Layered Network Model of Command Information System Based on Task Flow

Cui Qiong¹, Li Jianhua¹, Ran Haodan^{1,2}, Nan Mingli¹

(1. Information and Navigation College, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China; 2. Xi'an Communication Institute, Xi'an 710106, China)

Abstract: As the monolayer and static network model can not reflect the hierarchy and task property of command information system, a bi-layered network model of command information system based on task flow is established. The dynamic operation mechanism and layered network structure are described on the basis of task, structure and function of the system. The bi-layered network consisting of communication network and function network is defined based on the task property and layered network theory. The simulation takes the joint air defense operation command information system as an example and the results demonstrate the effectiveness of the model. The proposed model can provide guidance for describing the dynamic command information system.

Keywords: command information system; multi-field structure space; task-flow; bi-layered network

引言

新一代指挥信息系统基于军事信息栅格构建, 由情报侦察系统、指挥控制系统和武器装备系统构成, 是集承载网与各功能网于一体, 融合多种

通信网系、集成多类业务系统的复杂系统^[1]。对指挥信息系统进行建模是进一步分析系统运行规律和内在机理的关键。复杂网络是军事体系建模重要工具^[2], 如文献[3]将社会网络分析法用于指挥信息系统建模, 构建了 FINC 模型; 文献[4]基于复杂网络理论, 对指挥控制网络的成本、时延、鲁棒性和吞吐量等进行了研究; 这种直接将指挥信息系统抽象成单层网络的方法, 存在系统要素同质化和功能单一化等不足, 为此, 文献[5-6]将超网络引入指挥信息系统建模, 较好地反映了系统节点异质和连边



收稿日期: 2017-01-09 修回日期: 2017-03-21;
基金项目: 国家自然科学基金(61401499, 61174162);
作者简介: 崔琼(1990-), 女, 河南林州, 博士生,
研究方向为网络化指挥信息系统弹性; 李建华
(1965-), 男, 陕西白水, 教授, 博导, 研究方向为
空天信息作战。

<http://www.china-simulation.com>

• 2865 •

多重等特性,但该模型仅从业务关联层面讨论指挥信息系统的网络结构,并未考虑系统在基础联通层面的通信连接情况。

以上研究为指挥信息系统建模提供了有益借鉴,但大多存在两方面问题:一是在对系统进行抽象时,仅关注系统某个层面的结构,如通信连接层面或信息交互层面,没有考虑系统的整体性;二是在描述系统的动态性时,没有考虑其任务属性,无法刻画系统结构随作战任务进行动态变化的过程,割裂了指挥信息系统作战任务、组成结构和功能特性之间的关联关系^[7]。鉴于此,本文提出了基于任务流的指挥信息系统双层网络建模方法,该方法借鉴体系结构建模^[8-9]中的多视图思想,从任务、结构和功能等多个角度考虑指挥信息系统建模问题,不仅能够反映指挥信息系统结构和功能特性,还能描述指挥信息系统在作战过程中的动态演化规律,为研究指挥信息系统的动态特性奠定了基础。

1 基础知识

1.1 动态运行机理

作战任务是驱动指挥信息系统进行动态变化的关键因素,指挥信息系统各单元应根据任务需求,通过实时通信实现信息交互和相互协作。作战任务的完成依赖于指挥信息系统各单元之间的信息交互,并通过各作战单元的信息功能得以实现。在作战任务的驱动下,各系统单元参与作战,进行不同类型的信息交互,而这种信息交互又依赖于单元间的相互通信能力。

为描述这一动态运行过程,首先建立多作用域结构空间(multi-field space structure, MFSS),即在多作用域视角下指挥信息系统各种可能结构所张成的空间,如图1所示, MFSS由作战任务空间、逻辑功能空间和物理实体空间构成。作战任务空间由作战任务和任务之间的时序逻辑关系构成,逻辑功能空间由信息功能和功能之间的信息交互关系

构成,物理实体空间由作战单元与单元之间的通信连接关系构成。其中,作战任务是指挥信息系统为实现特定作战目标应完成的一系列活动。作战任务由作战目标降阶分解得到,分解粒度视情而定,本文仅考虑统一粒度任务分解的情况。多个作战任务按照一定的时序和逻辑关系前后相接,形成驱动指挥信息系统进行动态变化的任务流。作战单元是指指挥信息系统进行有效通信、侦察监视、指挥控制和火力打击等活动需要的物理实体资源,如雷达、指挥所、导弹发射车和歼击机等。信息功能是指挥信息系统作战单元所能提供的信息服务和业务,如雷达可提供情报信息获取功能。

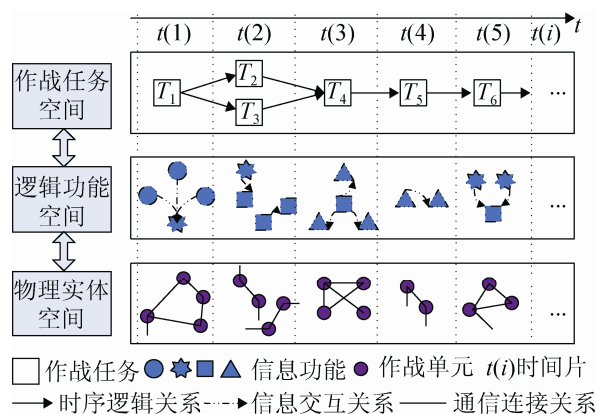


图1 指挥信息系统多作用域结构空间

Fig. 1 Multi-field structure space of CIS

分析知,物理实体空间是逻辑功能空间的物理基础,提供通信连接资源,而逻辑功能空间中信息交互关系,能够为通信网络的路由、带宽等的动态配置提供依据。随着作战进程的推进,逻辑功能空间中的情报、指控、协同等信息交互关系,需按照作战任务的需求进行动态调整变化,具体过程为:作战任务空间中的任务提出能力需求,映射为逻辑功能空间中的多个信息功能,基于该映射关系,由多个作战任务形成的动态任务流,能够驱动作战单元之间进行信息交互,促进作战体系的信息流转,生成动态网络。

1.2 层级网络结构

传统基于单层网络对指挥信息系统进行建模

的方法,通常针对底层通信栅格或上层信息功能,前者仅考虑了作战单元端到端的通信需求,忽略了作战单元的功能属性,后者则仅考虑了作战单元的信息功能类型和信息流特性,忽略了通信带宽和容量约束。相比单层复杂网络,层级复杂网络理论能够解决具有耦合关系的多层网络相关问题,更真实地反映指挥信息系统层级结构特征^[10-11]。双层复杂网络是层状复杂网络的典型网络模型^[12-13],构建指挥信息系统双层网络模型,不仅能够全面反映指挥信息系统的通信连接属性和信息功能属性,而且能够将通信和功能两个层面的网络相关联,更清晰地描述系统动态运行过程。指挥信息系统层级网络结构如图 2 所示,底层是网络化的通信基础设施,能够为各类传感器、指控系统和武器平台提供随遇入网、即插即用的网络,满足情报侦察、指挥控制和武器协同信息的实时传输需求,称为通信网络层;上层由担负情报侦察、信息处理、协同指挥和武器控制等功能的节点及信息交互关系构成,称为功能网络层,系统通过各节点的最优组织运用,使网络化体系作战发挥最大效能。

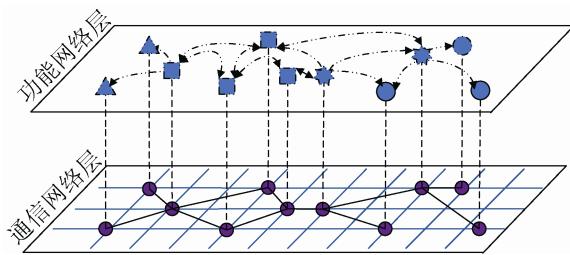


图 2 指挥信息系统层级网络结构
Fig. 2 Layered network structure of CIS

某阶段(时刻)的网络结构是动态网络在时间维度上的一个切片^[14],特定的作战任务需要与之相适应的指挥信息系统网络结构,动态任务流可驱动网络结构进行不断变化,据此构建任务流驱动的指挥信息系统动态双层网络模型。

2 模型构建

2.1 双层网络建模

定义 1 指挥信息系统双层网络 由指挥信息系统物理实体空间的通信网络和逻辑功能空间的功能网络构成的双层复杂网络,具有节点异质、连边多重和动态时变等特征。

(1) 通信网络是指由作战单元节点及其之间的通信连接关系构成的网络,记为 $G_P = (V_P, L)$ 。通信网络的节点为物理实体平台,节点之间的通信连接关系受到战场空间地理位置和约束。其中, $V_P = \{v_i | 1 \leq i \leq N\}$ 表示通信网络节点的集合, N 为节点个数, $L = \{l_{ij} = (v_i, v_j) | v_i, v_j \in V_P\}$ 表示通信链路的集合。由于作战单元之间只要存在通信连接关系则具备通信能力,因此通信网络为无向网络。

(2) 功能网络是指由信息功能节点及其之间的信息交互关系构成的网络,记为 $G_F = (V_F, E)$ 。根据指挥信息系统功能属性,物理实体平台分别具有情报获取、情报处理、作战指挥和武器控制功能,对应以下四类功能节点:情报获取节点 I 、情报处理节点 O 、作战指挥节点 C 和武器控制节点 A ,即 $V_F = IUOCUA$; $E = \{e_{ij} = (v_i, v_j) | v_i, v_j \in V_F\}$ 为信息连边集合, e_{ij} 表示信息交互关系,为有向连边。

(3) 映射关系是指平台节点与功能节点间的对应关系,记为 R_{P-F} 。已知任意信息功能均依托于某个作战单元,因此,可用 $r_{ij} = \{\phi(v_i, v_j) | v_i \in V_P, v_j \in V_F\}$ 表示任意平台节点和功能节点之间的对应关系, $\phi(v_i, v_j) = 1$ 表示平台节点 v_i 具有 v_j 功能,否则为 0; 则 R_{P-F} 可用矩阵 $A_R = [r_{ij}]_{V_P \times V_F}$ 表示。

综合通信网络 G_P 、功能网络 G_F 和耦合关系 R_{P-F} , 得到指挥信息系统双层网络模型 $G_{P-F} = \{G_P, G_F, R_{P-F}\}$, 用邻接矩阵可表示为:

$$A_G = \begin{matrix} & G_P & G_F \\ G_P & A_P & A_R \\ G_F & A_R & A_F \end{matrix} \quad (1)$$

其中: $A_P = \{a_{ij}^P\}, A_F = \{a_{ij}^F\}$, 且

$$a_{ij}^{P/F} = \begin{cases} 1 & (v_i, v_j) \in L \text{ 或 } (v_i, v_j) \in E \\ 0 & \text{否则} \end{cases} \quad (2)$$

2.2 任务流驱动建模

作战任务是指指挥信息系统进行所有活动的依据和目的,作战任务的实现依赖于系统特定信息功能,能够驱动功能网络结构进行动态变化。用三元组 $TFlow = \langle T, R_{T-T}, R_{T-F} \rangle$ 表示任务流驱动模型,其中, $T = \{T_1, T_2, \dots, T_W\}$ 表示作战任务的集合, W 为任务数; R_{T-T} 表示特定作战任务及任务间的时序/逻辑关系,根据 R_{T-T} 可得指挥信息系统为实现某作战目标而生成的动态任务流; R_{T-F} 表示作战任务与信息功能之间的映射关系,即完成特定作战任务所需的信息功能,根据 R_{T-F} 得到不同任务阶段指挥信息系统的网络结构。

(1) 时序/逻辑关系 R_{T-T}

根据指挥信息系统的使命目标和降阶要求,将其分解为作战任务集 $T = \{T_1, T_2, \dots, T_W\}$, 对应作战任务的时间属性集用 $t = \{t_w(t_b^w, t_e^w) | 1 \leq w \leq W\}$ 表示, t_b^w 为任务 T_w 的开始时刻, t_e^w 为结束时刻; 将每个作战任务看作一个节点, 则任务流由 W 个任务节点按时间和逻辑顺序构成, 令 $r_{T-T}(i, j)$ 表示任务 T_i 和 T_j 的关系, 则 $R_{T-T} = \{r_{T-T}(i, j) | i, j \in \{1, 2, \dots, W\}\}$, 其中:

$$r_{T-T}(i, j) = \begin{cases} 1 & T_i \text{ 是 } T_j \text{ 直接前导任务} \\ 0 & \text{否则} \end{cases} \quad (3)$$

(2) 任务/功能映射关系 R_{T-F}

任务/功能映射关系 R_{T-F} 反映了特定作战任务对系统信息功能的需求,是任务流驱动指挥信息系统进行动态变化的关键。设 C_w 表示执行作战任务 T_w 所需信息功能,假设需 K 项功能,则 $C_w = \{c_{w1}, c_{w2}, \dots, c_{wK}\}$ 。已知 $E = \{e_{ij}\}$, 若 $\forall c_{wk} \in C_w, \exists e_{ij} \in E$, 使 $e_{ij} = c_{wk}$, 则 $r_{wk} = 1$, 否则 $r_{wk} = 0$, 则 $R_{T-F} = \{r_{wk}\}, 1 \leq w \leq W, 1 \leq k \leq K$ 。

2.3 基于任务流的双层网络模型

在指挥信息系统双层网络模型和任务流驱动模型的基础上,对双层网络随作战任务动态变化的过程进行建模。根据特定作战任务信息功能需求,

将网络节点进行动态、有序连接,得到基于任务流的双层网络模型(Bi-layered Network Model Based on Task Flow, TF-BNM), TF-BNM 可表示为由时间和双层网络构成的二元组, 即 $TF_BNM = (t_{b-e}, G)$, 其中, 时间范围 $t_{b-e} = [t_b, t_e] = \{t(1), t(2), \dots, t(S)\}$ 表示任务流驱动系统结构进行变化的时间段, t_b, t_e 分别表示作战任务的总起始时刻和总结束时刻, $t(S)$ 表示该时间范围由 S 个时间片构成, 与之对应, G 是 S 个时间片的双层网络结构的集合, 即 $G = \{G_1, G_2, \dots, G_S\}$, 其中, G_i 表示与第 i 个时间片作战任务相对应的双层网络结构, 用矩阵可表示为 $A_G(i)$ 。因此, TF-BNM 也可看作一系列与时间相关的邻接矩阵 $A_G(i) (i=1, 2, \dots, S)$ 的集合, 可表示为 $A_G(1) \rightarrow \dots \rightarrow A_G(S)$ 。

为描述指挥信息系统双层网络在任务流驱动下的动态变化过程, 应建立指标对其进行度量。单层网络中, 节点度、聚类系数、介数和平均距离等指标^[15-16], 是度量网络连通性、紧密性和均匀性的重要参数。考虑到双层网络的特殊性, 应从通信网络和功能网络两个层面确立模型指标。

(1) 节点度 对节点度指标进行扩展, 节点 v_i 的度是指与 v_i 直接相连的其他节点的个数, 与 v_i 在网络中的重要性紧密相关。对于双层网络 G_{P-F} 而言, 节点 v_i 的度可表示为

$$d(v_i) = (d(v_i)^P, d(v_i)^F), i \in \{1, \dots, N\} \quad (4)$$

其中, $d(v_i)^P$ 为通信网络层节点 v_i 的度, $d(v_i)^P = \sum_j a_{ij}^P$, 对应 $d(v_i)^F$ 为功能网络层节点 v_i 的度, 考虑到信息连边的有向性, 根据连边的指向定义指向节点的连边为节点入度, 记为 $d(v_i)_{in}^F$, 由节点发出的信息连边为节点出度, 记为 $d(v_i)_{out}^F$, 则 $d(v_i)^F = [d(v_i)_{in}^F + d(v_i)_{out}^F] / 2$ 。

(2) 节点介数 是指网络中节点对最短路径中经过节点 v_i 的个数占有所有最短路径数的比例, 反映了节点对网络中信息流动的影响力, 其一般表达式为:

$$C_b(v_i) = \frac{2 * \sum_{s < t} g_i^{(st)} / n^{(st)}}{n(n-1)} \quad (5)$$

其中: $g_i^{(st)}$ 为节点 v_s 和 v_t 最短路径经过节点 v_i 的

个数, $n^{(st)}$ 为 v_s 和 v_t 间存在的所有最短路径数, 介数 $C_b(v_i) \in [0,1]$ 。 $C_b(v_i)$ 越大, 表明节点 v_i 位于较多节点对之间的信息传输路由上, 从通信网络层面看, 介数越大的节点对网络通信能力的影响越大, 从功能网络层面看, 介数越大的节点对整体信息流转发效能影响越大。

(3) 聚集系数 对于通信网络而言, 节点 v_i 的聚集系数 $Q(v_i)$ 是网络中与该节点相连的所有节点聚集的程度, 即节点间连边数目占可能的最大边数目的比例, 平均聚集系数 $Q(G_p)$ 是所有节点聚集系数的平均值。

$$Q(v_i)^P = \frac{L(v_i)}{d(v_i) \times (d(v_i) - 1)} \tag{6}$$

$$Q(G_p) = \frac{1}{N} \sum_{\forall v_i \in V_p} Q(v_i)^P$$

对于功能网络而言, 聚集系数根据连边方向可分为入聚集系数 $Q(v_i)_{in}$ 和出聚集系数 $Q(v_i)_{out}$ 。功

能网络的聚集系数 $Q(G_F)_{in/out}$ 是所有功能节点聚集系数的平均值。

$$Q(v_i)^F_{in/out} = \frac{E(v_i)_{in/out}}{d(v_i)_{in/out} \times (d(v_i)_{in/out} - 1)} \tag{7}$$

$$Q(G_F)_{in/out} = \frac{1}{N} \sum_{\forall v_i \in V_F} Q(v_i)^F_{in/out}$$

3 仿真分析

假定某区域联合防空作战指挥信息系统如图 3 所示, V_1 为指控中心(UC), V_2 、 V_3 为战术指控中心(TC), V_4 - V_9 为地防旅团单元(GC), V_{40} - V_{45} 为导弹发射单元(GA), V_{14} - V_{18} 为雷达旅团单元(RP), V_{19} - V_{31} 为雷达单元(RI), V_{11} 、 V_{12} 为高炮旅团单元(CC), V_{32} - V_{39} 为高炮单元(CA), V_{13} 为情报处理中心(IP), V_{10} 为接替指控单元(RC), 通信节点数为 45, 通信节点之间的连线为栅格通信网链路。

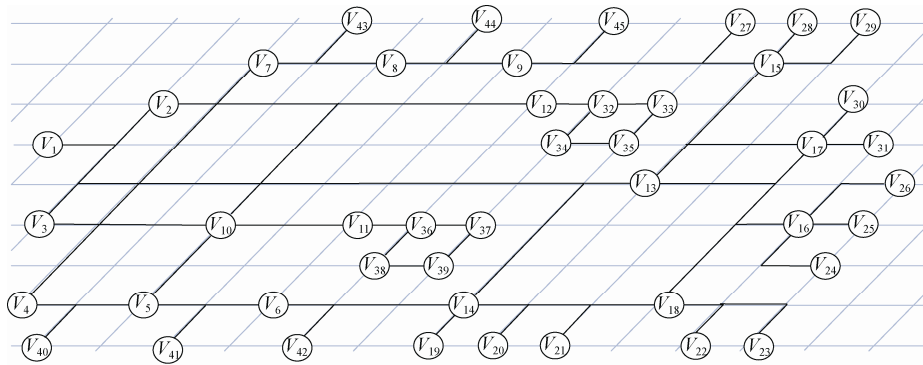


图 3 联合防空指挥信息系统示意图
Fig. 3 Sketch map of the joint air-defence CIS

各通信节点均为单功能节点, 包括情报获取节点 I 、情报处理节点 O 、作战指挥节点 C 和武器控制节点 A , 分别用符号 \bullet 、 \star 、 \blacksquare 、 \blacktriangle 表示, 与通信节点对应的功能节点的编号见表 1。

表 1 节点编号

Tab. 1 Serial number of the platform notes and function notes							
平台	编号	功能	编号	平台	编号	功能	编号
UC	V_1	\blacksquare	C_1	IP	V_{13}	\star	O_1
TC	V_2V_3	\blacksquare	C_2C_3	RP	$V_{14}-V_{18}$	\star	O_2-O_6
GC	V_4-V_9	\blacksquare	C_4-C_9	RI	$V_{19}-V_{31}$	\bullet	I_1-I_{13}
RC	V_{10}	\blacksquare	C_{10}	CA	$V_{32}-V_{39}$	\blacktriangle	A_1-A_8
CC	$V_{11}V_{12}$	\blacksquare	$C_{11}C_{12}$	GA	$V_{40}-V_{45}$	\blacktriangle	A_9-A_{14}

假设敌方机群入侵我方领土, 我方承担防空任务的雷达旅团发现并识别目标, 地导和高炮部队联合行动, 对敌方机群进行拦截。以典型联合防空作战指挥信息系统任务执行过程为例, 任务执行时间 $t = [t_0, t_6] = \{t(1), \dots, t(6)\}$, 其中 $t(i) = [t_{i-1}, t_i]$, 共需完成联合预警、信息融合、态势生成、指挥决策、响应控制和反馈评估 6 项子任务, 各任务名称、编号、内容和执行时间见表 2。为完成各任务所需的指挥信息系统网络结构不同, 以联合预警子任务 T_1 为例, 指挥信息系统双层网络结构如图 4 所示。

表 2 任务相关属性
Tab. 2 Attributes of tasks

任务名称及编号	任务内容	执行时间
联合预警子任务 T ₁	由 I ₁ -I ₁₃ 对区域内不同范围的战场目标进行探测和监视, 实时获取空中目标情报信息, 并将情报信息分别传输至 O ₂ -O ₆	t ₁ = [t ₀ , t ₆]
信息融合子任务 T ₂	由 O ₂ -O ₆ 对探测目标数据进行融合处理和分析, 通过数据共享、信息交互和补充印证等方式实现信息融合, 并将信息及时传递至 O ₁	t ₂ = [t ₁ , t ₆]
态势生成子任务 T ₃	由 C ₁ -C ₃ 对来自情报处理节点的情报信息进行综合研判, 得到实时战场态势	t ₃ = [t ₂ , t ₆]
指挥决策子任务 T ₄	由 C ₁ 根据战场态势信息制定联合防空作战计划, 并实施上级作战指挥节点向下级作战指挥节点下达指令信息, 下级作战指挥之间进行相互协同	t ₄ = [t ₃ , t ₆]
响应控制子任务 T ₅	由 C ₄ -C ₉ 和 C ₁₁ C ₁₂ 下达指令信息至 A ₁ -A ₁₄ , 由 A ₁ -A ₁₄ 协同执行范围内的拦截打击任务	t ₅ = [t ₄ , t ₆]
反馈评估子任务 T ₆	由 A ₁ -A ₁₄ 将打击结果实时反馈至作战指挥节点 C ₄ -C ₉ 和 C ₁₁ C ₁₂ , 各级作战指挥节点对各自区域内的打击效果进行综合分析并上报至上级作战指挥节点	t ₆ = [t ₅ , t ₆]

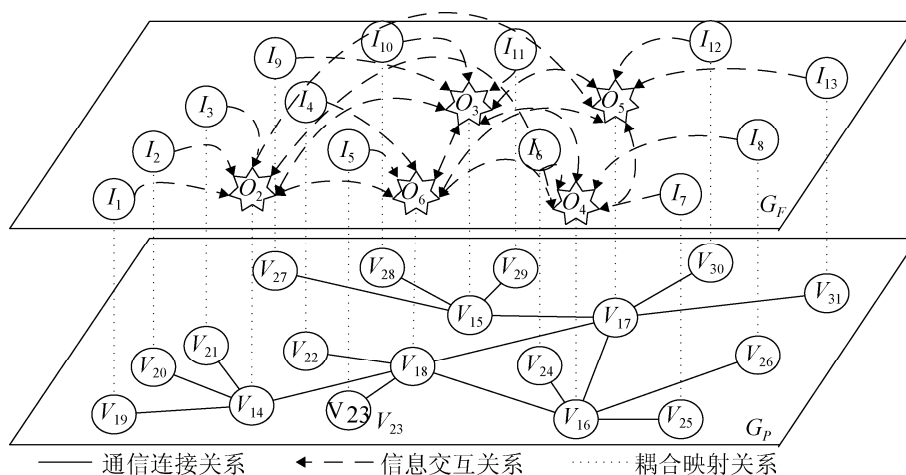


图 4 指挥信息系统执行 T1 时的双层网络结构
Fig. 4 Bi-layered network structure of CIS under T1

从图 4 中可以看出, 在通信网络 G_P 中, 节点 V₁₄ 虽然没有与节点 V₁₅-V₁₇ 直接相连, 但由于任务 T₁ 对信息融合分析处理的需要, 节点 V₁₄ 需要经过节点 V₁₈ 与节点 V₁₆ V₁₇ 发生信息交互, 并经过 V₁₇ 和与节点 V₁₅ 发生信息交互, 在这样的信息交互关系下, 要求节点 V₁₇ 和节点 V₁₈ 承担较大的转发信息流量, 并对与该两个节点相连的通信链路提出较高的带宽要求。为进一步对指挥信息系统在任务流驱动下的动态变化过程进行描述, 需计算各时间片通信网络和功能网络的指标参数。

(1) 节点度计算结果如图 5 所示, 黑色圆形表示通信节点的度, 蓝色星形表示功能节点的度, 红色线形为两者的比值, 称为容量度, 通信节点度越

大, 功能节点度越小, 容量度越大, 表示该节点的可用信息容量越大。从图 5 可看出, 随着作战过程的不断推进, 参战单元越来越多, 节点和连边逐渐增加, 节点度中存在少量拥有较大度的节点和大量度值较小的节点, 这一点在通信网络中的表现更为明显, 符合现实情况中的无标度特征。在 t₁ 阶段, 通信网络和功能网络节点度分布较为均衡, 通信负载压力小, 节点容量度均 ≥ 2; 在 t₂ 和 t₃ 阶段, 节点 V₁₄-V₁₈ 容量度有所下降, 除节点 V₁₄V₁₅ 的容量度下降到 0.8 外, 其余节点容量度均大于 1, 通信负载压力适中, 说明指挥信息系统能够较好地支撑节点间的信息交互; 在 t₄ 阶段, 大部分节点容量度在 [0.8, 5] 之间波动, 只有节点 V₁₂ 容量度达到 16,

根据该阶段作战任务分析可知, 这是由于节点 V_{12} 与节点 V_2 、 V_3 、 V_4 、 V_7 、 V_{10} 、 V_{13} 相连, 通信资源丰富, 但节点 V_{12} 只需接收来自上级指挥节点的指令信息, 信息交互需求小, 容量大; 在 t_4 和 t_5 阶段, 大部分节点容量度适中, 但节点 V_{33} - V_{35} 和 V_{37} - V_{39} 容量度仅为 0.6 和 0.5, 通信负载压力大, 分析可知这些节点为高炮武器单元, 在 t_5 和 t_6 阶段需要协同作战和上报战况, 信息交互量大, 但通信链路少(每个节点只有 2 条), 故节点容量度较小。

(2) 通信网络的介数和聚集系数计算结果如图 6 所示。从图中可以看出, 节点介数随作战进程出现“转移”现象, 节点 V_{14} - V_{18} 的介数逐渐下降, 而节点 V_4 - V_{13} 的介数逐渐上升, 说明节点在信息传递中的重要性发生变化, 以介数增长较为明显的节点 V_4 、 V_7 、 V_{10} 和 V_{13} 为例, 在 t_4 - t_6 阶段, 这些节点作为重要的通信枢纽, 在信息传递中发挥重要作用。此外, 从图 6(右下)可以看出, 通信网络的聚集系数一开始较小, 此后逐渐增加, 并在 t_3 阶段达到峰值, 据计算为 0.497, 此后保持较高聚集系数水平, 对比图 6(左下)可知, 在 t_3 阶段, 作战指挥节点 V_1 - V_3 加入, 具有较高聚集系数, 随后 V_4 、 V_7 、 V_{10} 、 V_{12} 等节点参与作战, 具有较高的聚合性, 结合图 3 分析可知, 距离中心节点越近的部分, 聚合性越明显, 为作战协同提供了支撑。介数和聚集系数分别从传递特性和聚集特性, 描述了通信网络随任务流变化而产生的演化过程。

(3) 功能网络的介数和聚集系数计算结果如图 7 所示, 在功能网络中, 节点介数在不同的任务阶段具有一致性, 如节点 C_2 、 C_3 和节点 O_1 的介数值在在 t_4 - t_6 阶段均较大, 分析可知, 这是由于在功能网络中, 节点的介数值由节点担负的使命任务决定, 节点 C_2 、 C_3 和 O_1 分别在指令信息上传下达和情报信息收集共享中发挥重要作用, 因此这些节点介数值较大。在功能网络中, 只要节点的任务属性不发生变化, 即使有越来越多的节点参与作战, 其介数值的分布保持不变, 这与通信网络存在较大差别。此外, 功能网络节点的聚集系数与通信网络节点的聚集系数相

比, 分布也更为均衡, 分析可知, 这是由于在任务属性方面一致的功能节点, 具有相同的聚集系数, 如节点 C_2 和 C_3 、节点 C_{11} 和 C_{12} 、节点 C_4 - C_9 等, 而在通信网络中, 节点聚集系数由节点在网络中的位置决定, 节点位置不同其聚集系数也不相同, 对比节点 V_{10} 和 C_{10} 可以看出, 在通信网络中, 该节点担负重要的通信中转作用, 因此节点介数和聚集系数均较高, 但在功能网络中, 该节点没有与其他节点进行信息交互, 因此介数值和聚集系数均为 0。

指挥信息系统双层网络结构受任务流驱动进行不断变化, 不同任务条件下参战节点和网络结构不同, 在演化过程中, 通信网络和功能网络呈现出不同的网络结构特性。与单层、静态网络模型相比, 本文模型从通信支撑和信息功能两方面描述系统的动态运行过程, 通过网络间的比较更有效地反映系统的运行机理。此外, 为进一步优化指挥信息系统网络结构, 提高作战效能, 应采取以下措施:

一是在部分节点间增加通信链路, 缓解通信负载压力。根据图 5 可以看出, 两层网络的节点度不匹配, 大部分节点容量度大于 1(完全匹配时节点容量度为 1), 通信负载压力较小, 但少数武器控制节点的容量度小于 1, 应考虑增加这些节点之间的通信链路, 缓解通信网络的负载压力。

二是加强对重要节点的保护和备份, 确保安全抗毁。对比图 6(上)和图 7(上), 通信网络中高介数节点随任务流发生变化, 而功能网络中高介数节点较为固定, 但无论是通信网络还是功能网络, 高介数节点通常在信息流过程中发挥着重要的传递作用, 一旦受损后果严重, 需要进行重点保护, 必要时冗余备份。

三是对通信网络结构进行优化, 分散通信枢纽的风险。对比图 6(下)和图 7(下), 通信网络中存在个别聚集系数较大的节点, 这些节点由于处于通信枢纽的位置, 聚合性强, 受敌方攻击的风险大, 除了应加强对这些节点的保护, 还可考虑对通信网络结构进行优化, 使节点聚合性更加均衡, 实现降低风险的目的。

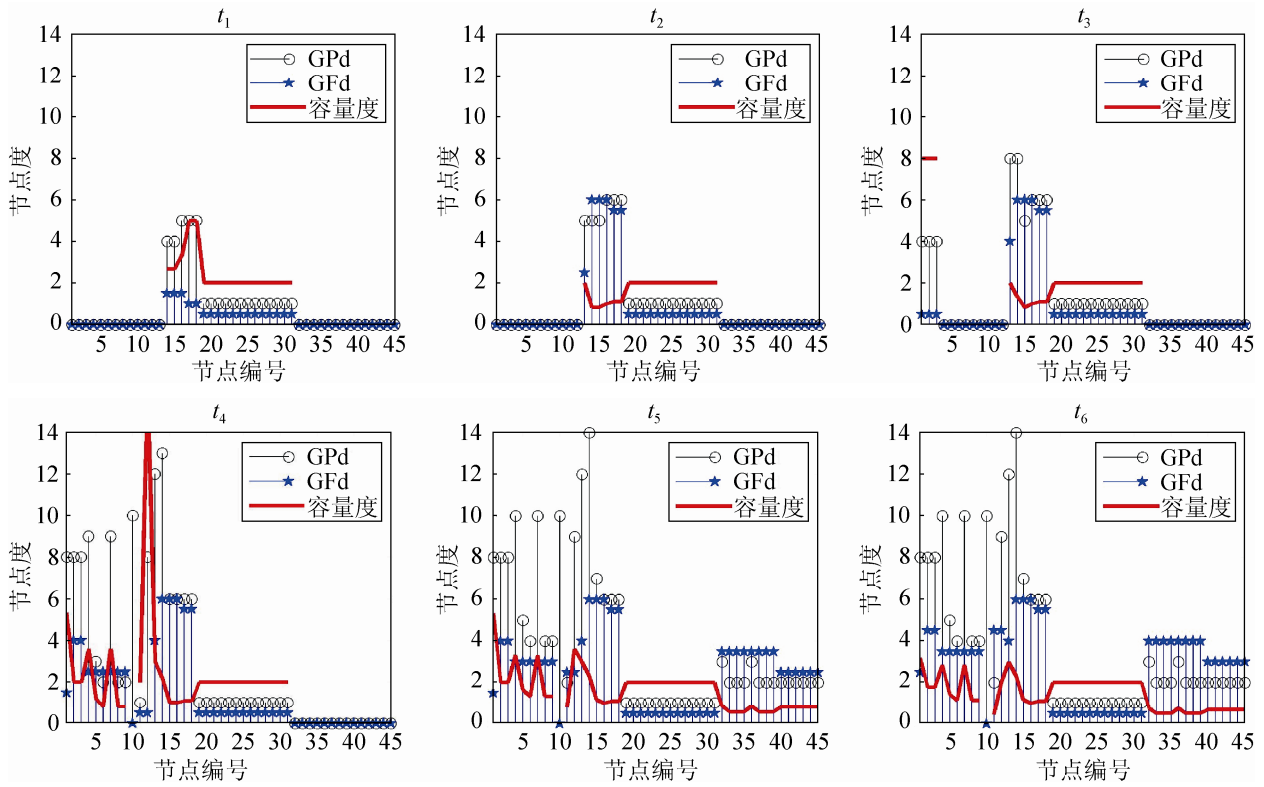


图5 节点度演化图

Fig. 5 Evolvement map of node degree

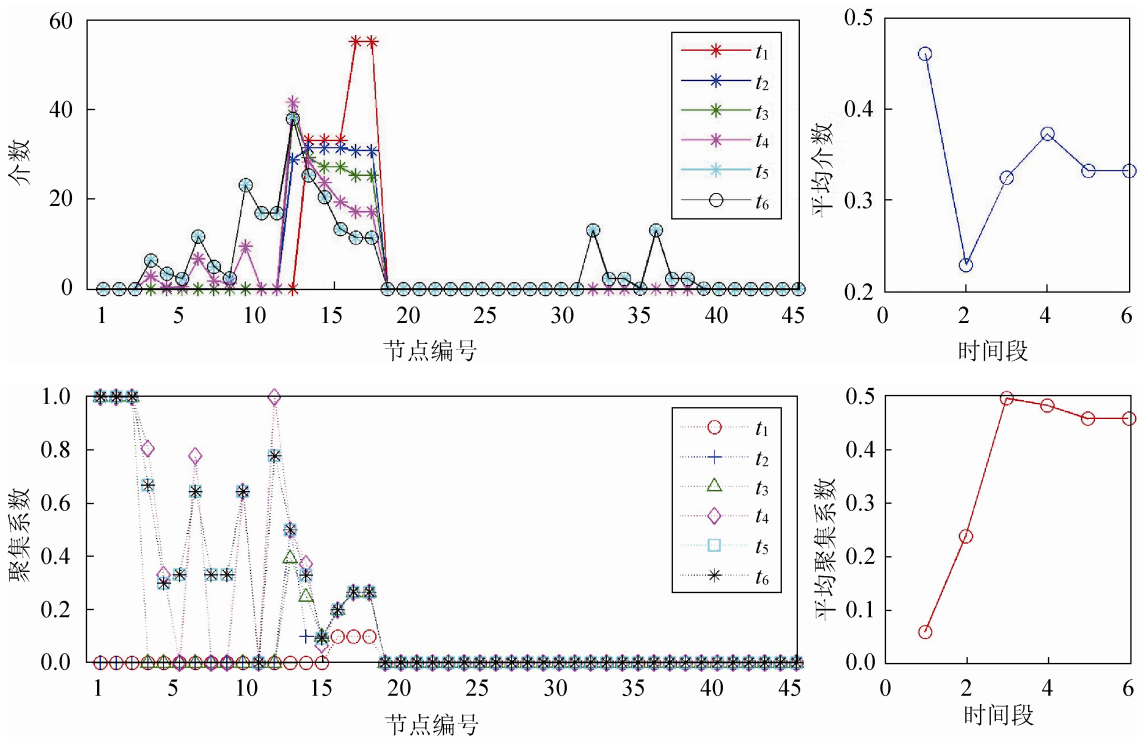


图6 通信网络介数和聚集系数

Fig. 6 Node betweenness and clustering coefficient of communication network

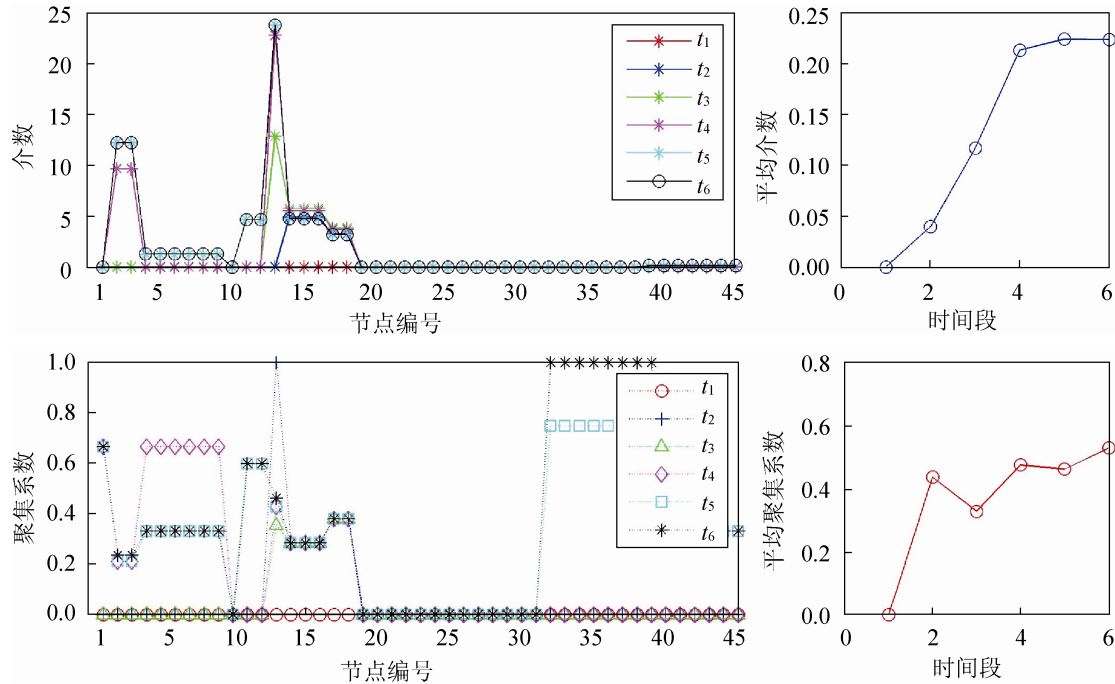


图 7 功能网络介数和聚集系数
Fig. 7 Node betweenness and clustering coefficient of function network

4 结论

本文针对单层、静态网络模型的不足, 提出将双层网络用于指挥信息系统结构建模, 并由任务流进行驱动以反映系统动态运行过程的建模思路, 建立了基于任务流的指挥信息系统双层网络模型。论文首先描述了指挥信息系统的动态运行机理和层级网络结构, 然后根据层级复杂网络理论和任务流驱动原理, 构建了基于任务流的指挥信息系统双层网络模型, 最后以某联合防空作战指挥信息系统为例进行仿真, 通过对比分析可以看出, 所提模型不仅能够动态反映系统通信负载压力的变化情况, 而且能够分析出在通信传输和信息流转中发挥重要作用的节点, 相比单层、静态网络而言具有优势。由于在真实作战过程中, 指挥信息系统的动态变化不仅受到任务流的驱动, 还面临外部攻击等风险, 建模时除了应考虑任务流驱动因素之外, 还应考虑赛博攻击、实体打击和级联失效等因素。因此, 下一步工作重点是研究指挥信息系统双层网络面临风险后的动态变化情况, 以及通信网络和功能网络之间相互作用对作战任务的影响。

参考文献:

- [1] 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.
Lan Yushi, Mao Shaojie, Wang Heng. Theory and optimization of C⁴ISR system structure[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2015.
- [2] 马力, 张明智. 基于复杂网络的战争复杂体系建模研究进展[J]. 系统仿真学报, 2015, 27(2): 217-224.
Ma Li, Zhang Mingzhi. Research progress on war complex system of systems modeling based on complex network [J]. Journal of System Simulations, 2015, 27(2): 217-224.
- [3] Dekker A. Applying social network analysis concepts to military C4ISR architectures [J]. Connections (S1440-2076), 2002, 24(3): 93-103.
- [4] 杨海涛, 何宇. 基于复杂网络的指控系统信息网络拓扑结构研究[J]. 指挥与控制学报, 2015, 1(2): 198-202.
Yang Haitao, He Yu. A survey on topology of command and control information networks based on complex networks theory[J]. Journal of Command and Control, 2015, 1(2): 198-202.
- [5] 蓝羽石, 张杰勇. 基于超网络理论的网络中心化 C⁴ISR 系统结构模型和分析方法[J]. 系统工程理论与实践, 2016, 36(5): 1239-1251.
LAN Yushi, ZHANG Jieyong. The model and the analysis method of network-centric C4ISR structure

