

文章编号:1673-3819(2023)01-0051-05

## 基于自然连通度的指挥信息系统结构网络化效能分析

贺正求, 刘海业, 杨小军, 徐忠富

(中国人民解放军 63892 部队, 河南 洛阳 471003)

**摘要:**以简单有向连通图为基础,建立了指挥信息系统结构的网络模型,对系统结构中各种作战环路的基本原理与作用进行了分析,指出环路是形成系统网络化效能的主要原因。采用可客观刻画不同环路数量加权的自然连通度为主要指标,提出了一种基于自然连通度的系统结构网络化效能评估方法。通过对某区域联合防空指挥信息系统结构效能的仿真实验分析,验证了所提方法的有效性。

**关键词:**指挥信息系统; 结构模型; 自然连通度; 效能分析

中图分类号:E911;TP391.9

文献标志码:A

DOI:10.3969/j.issn.1673-3819.2023.01.009

### Analysis of networked effectiveness for command information system structure based on natural connectivity

HE Zheng-qiu, LIU Hai-ye, YANG Xiao-jun, XU Zhong-fu

(Unit 63892 of PLA, Luoyang 471003, China)

**Abstract:** The networked model of the command information system structure is constructed based on the theory of simple connected digraph. The principles and functions of the information loops in the system structure are analyzed, which shows that these loops have a strong impact on the networked effectiveness. Using the natural connectivity that can exactly measure the weighted sum of the quantities of different loops as the evaluation index, an evaluation method of networked effectiveness for command information system structure is proposed. The validity and feasibility of the proposed method is proved by simulating and analyzing the structure effectiveness of a typical command information system.

**Key words:** command information system; structure model; natural connectivity; effectiveness analysis

在网络中心、信息主导、联合制胜等相关概念推动下,作为形成网络信息作战体系的重要支撑,指挥信息系统(也称 C<sup>4</sup>ISR 系统)的组成要素与规模不断扩大,系统结构变得更加复杂。结构对于功能的发挥往往起着重要作用,指挥信息系统应具备更强适应性和鲁棒性的系统结构,才能满足多样化任务和环境变化的需要<sup>[1-2]</sup>。因此,如何对越来越呈现网络化特征的指挥信息系统结构进行描述建模,进而对其结构特性进行定量的分析评估,是指挥信息系统论证设计和实践中需要重点关注和解决的问题。

将复杂网络相关理论应用于复杂战争体系建模与研究是目前较为流行的方法<sup>[3-4]</sup>。2004 年, Cares 等提出了 IACM 模型(Information Age Combat Model),首次将复杂网络引入作战建模分析领域<sup>[5]</sup>。文献[6]运用 IACM 模型对网络中心战概念进行了建模仿真与定量分析,以验证网络连通性与系统效能间的关系。李德毅提出采用网络拓扑知识表示方法来研究网络化作战,并探讨了网络化作战的拓扑结构演化规律<sup>[7]</sup>。对

于指挥信息系统的结构建模,目前很多研究都借鉴了 IACM 模型的基本思路与方法,并进行了一定的领域约束或扩展优化。文献[8]建立了基于代理的 C2(指挥与控制)网络模型,并对 C2 网络的自适应性进行了分析;王运明等在建立指控网络模型基础上,通过进行节点和边的增减、多属性加权等操作,分析了指控网络在对抗环境下的变化情况<sup>[9-10]</sup>;文献[11-12]采用称为网络效能因子(Coefficient of Networked Effectiveness)的指标来反映指控系统结构的网络化效能,但该指标在衡量统计系统环路方面存在不全面、不精确的问题;文献[13]以联合作战指挥控制体系为对象进行了网络建模分析,扩展了指挥重组能力等网络效能评价参数;文献[14-16]主要针对指挥信息系统结构的灵活性和抗毁性进行研究,这也是系统运用中的研究热点。

本文在构建指挥信息系统结构网络模型基础上,重点对系统结构中的探测环、决策环、指控环、执行环等的基本原理与作用进行了分析,指出这些环路是形成网络化效能和系统能力的重要原因。针对现有方法未对不同长度作战环路进行区分,以及评估指标不精确的问题,提出了系统结构自然连通度的定义及计算方法,作为评估网络化效能的主要指标,自然连通度能客观刻画系统结构中不同作战环路数目的加权和,可由系统结构邻接矩阵的特征谱计算得出,因而

收稿日期:2022-05-31

修回日期:2022-06-23

作者简介:贺正求(1980—),男,博士,副研究员,研究方向为指挥信息系统与体系对抗仿真。

刘海业(1980—),男,硕士,副研究员。

具有更加清晰的实际含义和更好的可计算性。最后通过对某联合防空指挥信息系统结构网络化效能的仿真分析,验证了所提方法的可行性和有效性。

## 1 系统结构网络化模型

本章节首先对指挥信息系统结构及其基本构成单元、系统结构的网络化模型等概念进行阐述,然后对系统结构中的环路进行定义分析,系统各类信息在这些环路之间高效流转与应用,从而确保系统功能的实现和网络化效能的发挥。

### 1.1 基本定义

系统结构是指系统各组成单元以及组成单元之间的相互关系。系统单元是指可完成特定功能,通常进行独立部署但又相互关联的系统构成要素。指挥信息系统组成单元之间的相互关系主要包括情报获取与支持关系、指挥与控制关系、协同与执行关系等。

根据指挥信息系统的功能要素组成和实际运用流程,其系统构成单元可划分并建模为 4 类功能单元,包括传感探测单元、情报处理单元、指挥控制单元、响应执行单元<sup>[1]</sup>。不同层级、不同粒度的系统单元都能由这些基本单元或其组合进行表示。

传感探测单元 S (Sensor): 表示情报获取类功能实体,具备对作战空间进行侦察、探测、监视的能力,获取战场目标的信息,并将其传递给情报处理单元,需要时这些传感探测单元可在情报处理单元的控制下组成协同传感探测网络,例如雷达、光电、信号侦测等各种类型的传感探测器。

情报处理单元 P (Processor): 表示情报信息综合处理类功能实体,主要作用是对传感探测单元获取的目标信息进行融合、关联、识别以及特征提取等处理,为指挥控制单元或响应执行单元提供实时准确的目标情报,并能用于战场态势生成,例如各级情报处理中心。

指挥控制单元 D (Decider): 表示指挥、控制、决策类功能实体,主要功能是根据情报处理单元上报或传感探测单元直接提供的情报进行综合分析和判断,形成作战方案,评估对比后做出决策,对下属指挥控制单元或执行单元下达指令,并对指令执行情况和作战过程进行监控,例如各级指挥中心、指挥平台等。

响应执行单元 A (Actor): 表示具备软硬打击能力的执行类功能实体,主要功能是根据所属指挥控制单元下达的指令,执行指定的作战任务或打击行动,例如作战部(分)队、各类武器平台等。

指挥信息系统结构的网络模型主要是采用复杂网络的形式来描述系统的拓扑结构,即用网络节点表示系统内各种功能组成单元,可用节点之间的连边表示

系统各组成单元之间的交互关系。考虑指挥信息系统单元之间交互关系的有向性、能力属性等特点,可用简单有向加权连通图  $G = (V, E)$  表示其系统结构,其中,节点集  $V = \{v_1, v_2, \dots, v_N\}$  表示系统各类单元的集合,  $N = |V|$  表示系统单元的总数;边集  $E = \{e_1, e_2, \dots, e_M\}$  表示系统单元之间各类交互关系。  $\forall e_i \in E$ , 在节点集  $V$  中都有一对节点  $(v_i, v_j)$  与之对应,且  $(v_i, v_j)$  和  $(v_j, v_i)$  表示不同的边。另外,可以为每个节点和连边设置权值,用来表示系统单元及交互关系的属性或能力,例如,指控节点的决策效率、传感节点的目标发现概率和准确性、执行节点的命中概率、不同节点之间的信息容量、传输时延等。节点和边的权值可根据系统结构网络化模型的具体应用需求进行设置。

当不考虑系统单元和交互关系的能力属性时,可采用 0-1 邻接矩阵来表示系统结构的网络化模型。假设一个系统结构网络模型的节点数为  $N$ ,其 0-1 邻接矩阵  $A(G) = \{a_{ij}\}$  可表示为

$$a_{ij} = \begin{cases} 1, & (v_i, v_j) \in E \\ 0, & (v_i, v_j) \notin E \end{cases}, 1 \leq i \leq N, 1 \leq j \leq N \quad (1)$$

即如果两个系统单元有信息交互关系,则对应矩阵元素取 1,否则取为 0。

### 1.2 系统结构中的环

环可看作复杂网络中由边和节点组成的一种闭合回路。在指挥信息系统结构中,指挥、情报等信息在各功能单元之间的传递将形成各种作战信息环路。根据 OODA 过程模型理论,指挥信息系统中的环路体现了各功能单元之间的有效协作,各种环路的数量越多,说明系统各单元之间的协作能力越强,信息共享及反馈的程度越高,进而在整体上呈现出的网络化效能就更好<sup>[12,17]</sup>。指挥信息系统结构中的各种环路,根据其功能作用可分为探测环、决策环、指控环、执行环等类型。

1) 探测环。探测环的基本原理是指挥信息系统的多源信息融合。通过增加情报处理单元对传感探测单元的反馈控制形成组网,实现多个传感探测单元之间的协同,有利于获得准确的感知信息,提高情报质量,提升系统的网络化效能。

2) 决策环。决策环的基本原理是指挥控制单元之间的决策协同和态势共享机制。通过在相邻或上下级指挥控制单元之间建立共享与反馈的回路,有利于形成统一的战场态势,增强对态势的一致理解,从而提高决策效率与质量。

3) 指控环。指控环的基本原理是指控单元和执行单元的动态编组机制。通过在多个指挥控制单元和响应执行单元之间建立指控与反馈回路,有利于指控权限与结构的动态重组,增强系统适应战场形势变化的

能力。

4) 执行环。执行环的基本原理是响应执行单元之间的协同机制。通过在多个响应执行单元之间建立信息协作回路,有利于各执行单元围绕相同的作战目的,自行开展任务协作与行动同步,从而提高指挥控制的敏捷性和持续性。

探测环、决策环、指控环、执行环共同构成指挥信息系统信息获取—处理—应用—反馈的综合环路,从而确保系统功能的实现和任务的完成。

## 2 网络化效能指标及其计算方法

网络化效能指标主要解决系统结构的网络化效能如何量化的问题。通过上文分析可知,系统结构中的环路数量可用来衡量结构网络化效能以及完成任务能力。文献[18]中提出了自然连通度的概念,它表示的是复杂网络中不同长度环路数目的加权和,在数学形式上为一种特殊形式的平均特征根。

环路数量是复杂网络的一个基本属性,它与网络中的子图直接对应。令  $n_i^k$  表示图  $G$  中起点和终点为  $v_i$  且长度为  $k$  的环路数量,对  $i, k$  求和:

$$S = \sum_{i=1}^N \sum_{k=0}^{\infty} n_i^k = \sum_{k=0}^{\infty} \sum_{i=1}^N n_i^k = \sum_{k=0}^{\infty} n_k \quad (2)$$

其中,  $n_k$  表示目标网络中长度为  $k$  的所有环路数量。因为环路中的节点和边允许存在重复,所以意味着环路的长度可以表示为  $S \rightarrow \infty$ 。为确保  $S$  收敛,可对  $n_k$  进行加权操作:

$$S_E = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{n_k}{k!} \quad (3)$$

这样加权是考虑环路越长,节点或边被重复计算的次数可能越多;从应用层面看,环路越长,信息传输效率越低,对系统能力发挥的作用也越小。根据文献[18],可得到如下引理:

$$n_k = \sum_{i=1}^N \lambda_i^k \quad (4)$$

其中,  $\{\lambda_i | 1 \leq i \leq N\}$  为图  $G$  的邻接矩阵特征谱,将其代入式(3),有:

$$S_E = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{n_k}{k!} = \sum_{k=0}^{\infty} \sum_{i=1}^N \frac{\lambda_i^k}{k!} = \sum_{i=1}^N \sum_{k=0}^{\infty} \frac{\lambda_i^k}{k!} = \sum_{i=1}^N e^{\lambda_i} \quad (5)$$

这表明环路数量的加权和可通过特征谱直接计算得到。对  $S_E$  按节点数取平均值,得

$$\bar{S}_E = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N e^{\lambda_i} \quad (6)$$

$\bar{S}_E$  表示平均每个节点参与的环路数量,在数学表达形式上,  $\bar{S}_E$  是邻接矩阵特征谱自然指数的平均值,因此,一般称  $\bar{S}_E$  为自然连通度。 $\bar{S}_E$  的值越大,说明在节

点规模相同情况下,环路数目越多,各功能实体之间的交互关系越密切,各种环路对提高系统结构网络化效能的作用也越大。

## 3 实验设计与分析

本文以简化的某区域联合防空指挥信息系统为例,主要采用自然连通度为评估指标,对系统的结构模型及其网络化效能评估过程进行分析验证。

该系统针对本区域不同方向执行防空任务,系统的初始结构模型如图 1 所示。系统包括 4 个传感探测单元 ( $S_1, S_2, S_3, S_4$ )、3 个情报处理单元 ( $P_1, P_2, P_3$ )、3 个指挥控制单元 ( $D_1, D_2, D_3$ )、4 个响应执行单元 ( $A_1, A_2, A_3, A_4$ )。目标节点是系统传感探测单元的信息来源,也是响应执行单元的打击目标,是形成系统完整作战环路的组成部分,因此,在进行环路的计算分析时,将两个相关目标节点 ( $T_1, T_2$ ) 纳入模型中,目标节点到传感单元以及执行单元到目标节点之间可认为是一种能量交互。

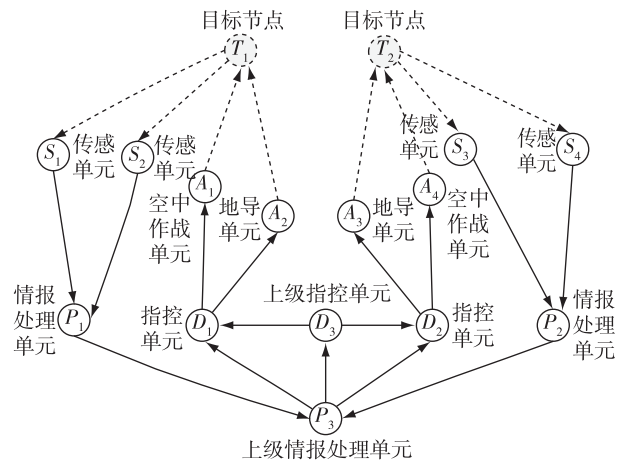


图 1 系统初始结构模型

Fig. 1 Initial structure model of the system

系统初始结构是一种传统的树形结构,其特征是情报信息层层上报,态势、指控命令层层下发,直至执行单元完成对目标节点的攻击。根据系统初始结构的网络模型,获得对应的邻接矩阵及其特征谱,经计算其网络化效能指标即自然连通度值为 1.004 9,表明各系统单元平均只参与了 1 个环路,这与系统树形结构的特性是相符的,此时,系统结构尚缺乏探测、指控等环路,各类系统单元之间的信息共享和协同程度不高,系统网络化效能较低。

下面依次在系统结构中增加探测环、决策环、指控环、执行环,对系统的网络化效能变化情况进行分析。

1) 增加探测环。如图 2a) 所示,增加上级情报处理单元对下级情报处理单元以及情报处理单元对传感



探测单元的管控,对传感探测单元进行目标引导、重新分配任务等控制,从而增强传感探测单元的组网程度和协同探测能力。从表 1 的计算结果可知,增加探测环后,系统结构的网络化效能有所提升,从应用层面来看提高了系统获取情报的效率与质量。

2) 增加决策环。如图 2b) 所示,增加指挥控制单元  $D_1$ 、 $D_2$  到  $D_3$  的协同以及  $D_1$  与  $D_2$  之间的双向协同,使指挥控制单元之间实现完全协同。从表 1 可知,增加决策环后,系统结构的网络化效能进一步提高,从应用层面提升了态势共享和理解一致的程度,进而提升决策质量。

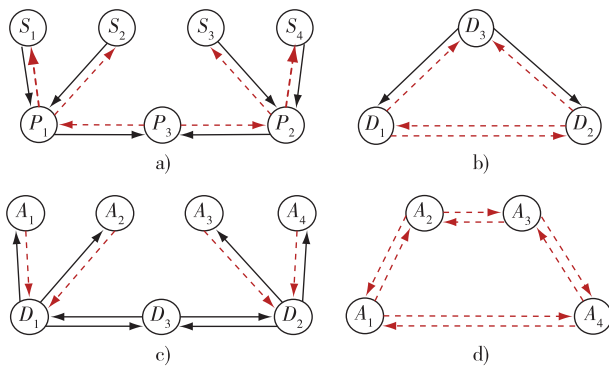


图 2 系统结构变化示意图

Fig. 2 Diagram of the system structure changes

3) 增加指控环。如图 2c) 所示,增加响应执行单元到指挥控制单元的信息反馈,形成反馈—控制的指控环路,从应用层面可提升指挥控制单元指挥的精确性和灵活性。从表 1 的计算结果可知,系统的网络化效能也在持续提升。

表 1 不同系统结构的网络化效能分析

Tab. 1 Networked effectiveness of the different structures

系统结构	$S_E$	自然连通度 $\bar{S}_E$
初始结构	16.077 8	1.004 9
增加探测环	23.966 1	1.497 9
增加决策环	29.111 7	1.819 5
增加指控环	36.011 5	2.250 7
增加执行环	49.471 2	3.092 0

4) 增加执行环。如图 2d) 所示,增加同一任务方向执行单元之间以及同类型执行单元之间的双向协同,使各执行单元能围绕相同目标协调和同步行动,从而提升指挥的敏捷性和系统的能力。从计算结果来看,如表 1 所示,此时,系统结构的网络化效能指标值达到 3.092 0,是系统初始结构网络化效能的 3 倍,表明通过在系统结构中增加各种环路,系统各单元之间的信息共享、指挥协同、反馈优化程度不断增强,系统网络化效能得到很大提高。

从上述实验分析过程可得出:1) 系统结构中的各种环路是系统各类单元之间有效协作的基础,环的数量越多,协作程度越高,网络化效能以及系统应用能力越强;2) 本文采用的自然连通度具有明确的物理意义和良好的可计算性,可作为衡量系统结构网络化效能的重要指标。

## 4 结束语

如何对体系对抗条件下指挥信息系统结构的网络化效能进行描述和定量分析,是指挥信息系统结构设计与应用中需重点分析解决的问题。本文首先建立了指挥信息系统结构的网络模型,对系统功能单元进行了分类抽象,根据其交互关系定义了探测环、决策环、指控环、执行环等概念,指出系统结构中的环路是形成网络化效能的重要原因,同时给出了自然连通度的定义及计算方法,作为衡量系统结构网络化效能的主要指标。实验分析结果验证了本文所提方法的有效性,从而为指挥信息系统结构设计和定量分析提供了一种实用途径。需要指出的是,文中分析结果表明,随着系统环路数量的增加,网络化效能持续提升,但在实际应用中,同时也需要考虑系统建设成本、系统复杂性问题,如何在这几种因素之间取得最佳平衡是后续需深入探讨的问题。

## 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 Y S, MAO S J, WANG H. Theory and optimization of C4ISR system structure[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2015.
- [2] QI Y D, WANG Z X, Dong Q C, et al. Modeling and verifying sos performance requirements of C4ISR systems[J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2017, 26(4): 754-763.
- [3] 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): 217-225.  
MA L, ZHANG M Z. Research progress on war complex system of systems modeling based on complex network[J]. Journal of System Simulation, 2015, 27(2): 217-225.
- [4] 刘德胜,马宝林,葛亚维. 作战体系建模方法与应用[J]. 指挥控制与仿真, 2020, 42(5): 1-6.  
LIU D S, MA B L, GE Y W. Modeling method and application of combat system of systems[J]. Command Control & Simulation, 2020, 42(5): 1-6.
- [5] CARES J R. An information age combat model[C] // Proc. of the 9th International Command and Control Re-

- search and Technology Symposium. Copenhagen: ICCRTS, 2004: 85-90.
- [6] DELLERS, BELL M I, RABADI G, et al. Applying the information age combat model: quantitative analysis of network centric operations[J]. The International C2 Journal, 2009, 3(1): 1-25.
- [7] 李德毅, 王新政, 胡钢锋. 网络化战争与复杂网络[J]. 中国军事科学, 2006, 19(3): 111-119.  
LI D Y, WANG X Z, HU G F. Network warfare and complex network[J]. China Military Science, 2006, 19(3): 111-119.
- [8] HUYT, JEAN C D, DIMITRI N. A Network-based cost comparison of resilient and robust system-of-systems[J]. Procedia Computer Science, 2016, (95): 126-133.
- [9] 张宪. 基于复杂网络的联合作战指挥网络拓扑结构[J]. 指挥控制与仿真, 2014, 36(5): 1-5.  
ZHANG X. Topology Structure of joint operations command based on complex network [J]. Command Control & Simulation, 2014, 36(5): 1-5.
- [10] 王运明, 潘成胜, 陈波, 等. 基于局域世界的加权指控网络演化模型[J]. 系统工程与电子技术, 2017, 39(7): 1596-1603.  
WANG Y M, PAN C S, CHEN B, et al. Evolution model of weighted command and control network based on local world[J]. Systems Engineering and Electronics, 2017, 39(7): 1596-1603.
- [11] 白亮, 肖延东, 侯绿林, 等. 基于控制环的作战网络对抗模型[J]. 国防科技大学学报, 2013, 35(3): 42-47.  
BAI L, XIAO Y D, HOU L L, et al. Operational network combat model based on control loop [J]. Journal of National University of Defense Technology, 2013, 35(3): 42-47.
- [12] 蓝羽石, 王珩, 易侃, 等. 网络中心化 C4ISR 系统结构“五环”及其效能表征研究[J]. 系统工程与电子技术, 2015, 37(1): 93-100.  
LAN Y S, WANG H, YI K, et al. “Five-loop” model and its effectiveness representation for network-centric C4ISR system structure[J]. Systems Engineering and Electronics, 2015, 37(1): 93-100.
- [13] 刘成刚, 王永刚, 刚建勋, 等. 联合作战指挥控制体系网络建模与分析[J]. 指挥控制与仿真, 2018, 40(2): 8-14.  
LIU C G, WANG Y G, GANG J X, et al. Network modeling and analysis of the joint operations command and control system based on networks[J]. Command Control & Simulation, 2018, 40(2): 8-14.
- [14] 张萌萌, 陈洪辉, 罗爱民, 等. 基于动态调整的 C4ISR 系统结构灵活性分析[J]. 系统工程与电子技术, 2016, 38(3): 563-568.  
ZHANG M M, CHEN H H, LUO A M, et al. C4ISR system structure flexibility analysis based on dynamic adjustment[J]. Systems Engineering and Electronics, 2016, 38(3): 563-568.
- [15] 冉溟丹, 李建华, 崔琼, 等. 基于任务流的网络化指挥信息系统抗毁性分析[J]. 火力与指挥控制, 2019, 46(5): 55-60.  
RAN H D, LI J H, CUI Q, et al. Analysis of invulnerability for networked command information system based on task-flow[J]. Fire Control & Command Control, 2019, 46(5): 55-60.
- [16] 李尔玉, 龚建兴, 黄健等. 基于功能链的作战体系复杂网络节点重要性评价方法[J]. 指挥与控制学报, 2018, 4(1): 42-49.  
LI E Y, GONG J X, HUANG J, et al. Node importance analysis of complex networks for combat systems based on function Chain [J]. Journal of Command and Control, 2018, 4(1): 42-49.
- [17] 阳东升, 闫晶晶. 宏观作战体系 C2 活动及过程机理分析[J]. 指挥与控制学报, 2020, 6(4): 393-401.  
YANG D S, YAN J J. Command and control behaviors and mechanism of macro operation systems of system[J]. Journal of Command and Control, 2020, 6(4): 393-401.
- [18] WU J, BARAHONA M, TAN Y J, et al. Spectral measure of structural robustness in complex networks[J]. IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetics, 2011, 41(6): 1244-1252.

(责任编辑:许韦韦)