

8-20-2020

Modeling and Analyzing of Battlefield Information Sharing Effectiveness Based on Complex Networks

Zhang Qiang

School of Information and Navigation Air Force Engineering University, Xi'an710071, China;

Jianhua Li

School of Information and Navigation Air Force Engineering University, Xi'an710071, China;

Shen Di

School of Information and Navigation Air Force Engineering University, Xi'an710071, 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.

Modeling and Analyzing of Battlefield Information Sharing Effectiveness Based on Complex Networks

Abstract

Abstract: Battlefield information sharing is the basis of acquiring information superiority to get decision and action superiority in information war. Aiming at the influence of information sharing on operational effectiveness, internal essence of the information sharing activity in information warfare was qualitatively described. By using operational network model which clearly reflects node's function and edge's type, the operational network with different information sharing degree was constructed, and the characteristic which depicts information sharing effectiveness was defined, and the influence law of information sharing degree on sharing effectiveness measurement indexes of operational network with simulation was analyzed. The simulation result validates that information sharing has positive effectiveness on improving operational effectiveness.

Keywords

information warfare, complex networks, information sharing, operational network

Recommended Citation

Zhang Qiang, Li Jianhua, Shen Di. Modeling and Analyzing of Battlefield Information Sharing Effectiveness Based on Complex Networks[J]. Journal of System Simulation, 2015, 27(4): 875-880.

基于复杂网络的战场信息共享效能建模与分析

张强, 李建华, 沈迪

(空军工程大学信息与导航学院, 西安 710071)

摘要: 在信息化战争中, 战场信息共享是夺取信息优势进而转化为决策和行动优势的基础。针对如何量化信息共享对作战效能的影响, 定性描述了信息化战争中信息共享活动的内在本质, 采用可清晰反映节点功能和链路类型的作战网络模型生成了不同信息共享程度的作战网络结构, 并定义了信息共享效能特征量, 仿真分析了信息共享程度对作战网络共享效能指标的影响规律。仿真结果验证了信息共享对提升作战效能的积极影响。

关键词: 信息化战争; 复杂网络; 信息共享; 作战网络

中图分类号: TP391.9; N45

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2015) 04-0875-06

Modeling and Analyzing of Battlefield Information Sharing Effectiveness Based on Complex Networks

Zhang Qiang, Li Jianhua, Shen Di

(School of Information and Navigation Air Force Engineering University, Xi'an 710071, China)

Abstract: Battlefield information sharing is the basis of acquiring information superiority to get decision and action superiority in information war. Aiming at the influence of information sharing on operational effectiveness, internal essence of the information sharing activity in information warfare was qualitatively described. By using operational network model which clearly reflects node's function and edge's type, the operational network with different information sharing degree was constructed, and the characteristic which depicts information sharing effectiveness was defined, and the influence law of information sharing degree on sharing effectiveness measurement indexes of operational network with simulation was analyzed. The simulation result validates that information sharing has positive effectiveness on improving operational effectiveness.

Keywords: information warfare; complex networks; information sharing; operational network

引言

随着信息技术的快速发展及在军事领域的普及应用, 战争形态逐步从“以平台为中心”的机械化战争转向“以网络为中心”的信息化战争, 提升作战

效能的方式也由火力优势转变为信息优势。作为夺取信息优势的基础, 战场信息共享是连接预警探测、指挥控制和火力打击等系统的基本纽带, 也是各作战要素充分发挥作战效能、同步遂行作战任务的重要保障。然而, 如何定量评估信息共享对作战效能的作用影响是深化认识信息化战争需要解决的全新问题。

近年来, 网络结构分析理论的兴起, 为认识把握网络化作战提供了全新的方法和视角。从网络科学的角度看, 信息化条件下的军事行动即通过网络



收稿日期: 2014-03-19 修回日期: 2014-06-06;

基金项目: 国家自然科学基金(61174162); 全军军事学博士研究生课题(2012JY003-583);

作者简介: 张强(1985-), 男, 四川绵阳, 博士生, 研究方向为战场信息共享; 李建华(1965-), 男, 陕西白水, 博士, 教授, 博导, 研究方向为空天信息系统规划与建设; 沈迪(1986-), 男, 浙江德清, 博士生, 研究方向为军事信息栅格鲁棒性。

化信息系统将信息获取、信息传递、信息处理以及信息利用等作战过程把广域分散分布的各作战单元构成一个具有复杂网络特征的作战网络^[1,2]。战场信息共享活动是作战要素间因作战需求驱动产生的信息交互行为，贯穿于作战行动的始终，是网络化的作战组织结构涌现出体系作战效能的关键。在作战要素节点数量和功能一定的情况下，作战要素间的共享关系和共享程度不同，构成的作战网络结构也会有不同的特征表现，从而对作战效能产生不同的影响。基于此思想，本文将量化评估信息共享对作战效能的作用影响问题研究转化为信息共享交互关系对作战网络结构特性的影响规律问题。

1 战场信息共享概念模型

战场信息共享是指在作战中不同层级、不同军兵种部队、不同武器平台之间共享作战信息，达成对战场态势的共同认知和整体联动作战^[1]。从军事组织作战领域的划分来看，战场信息的共享形式在信息域和认知域内分别表现为信息共享、知识共享和态势共享。如图 1 所示，信息域是双方争夺信息优势的基础，通过网络化指挥信息系统将物理域内获取到的各类战场监测数据实现作战单元间的信息共享；在认知域中，各级各类作战指挥人员通过对战场信息的分析、判断、理解和推理等加工处理，形成对战场环境的感知认识，依靠网络在分布式的各作战指挥单元间进行知识交互、共享，形成共识，最终由上级部门决策形成统一的作战计划，确保各作战单元按照计划展开军事行动，提高作战力量打击速度与精度^[1]。如果没有详细的作战计划，各作战单元则利用共享的态势感知进行协同，最终形成统一的作战意图，在认知域中取得决策优势；物理域是部队实现打击、防护等作战行动的领域，网络化的作战单元可使广域分散分布的火力打击资源实现共享，即通过协同作战，实现联合火力打击，达到作战同步^[3]。从军事行动的作战环节来看，战场信息共享使得作战方式具有了网络化作战的特点，一是战场上广域分散分布的传感器间

通过信息网络形成网络化的情报保障能力；二是不同作战单元的指挥控制中心通过网络化指挥信息系统实现决策共享与指挥协同作战。

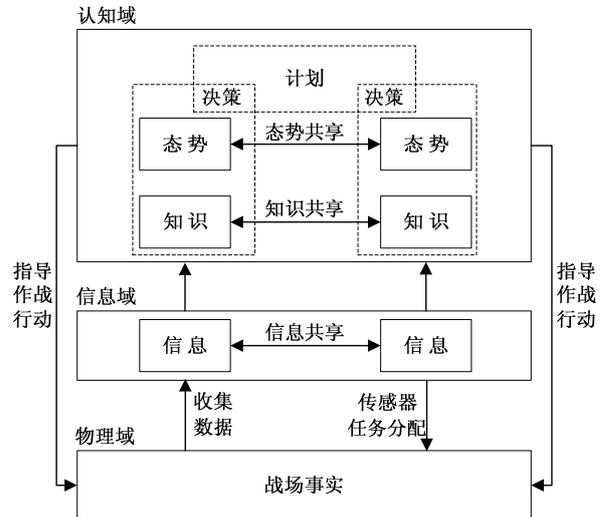


图 1 战场信息共享概念模型

2 战场信息共享效能度量

战场信息共享大大提高了战场态势探测感知能力、指挥决策能力和火力打击能力，从而保证整个作战系统可以在各作战单元自主发展的基础上通过信息共享形成体系作战能力。本文从网络科学的角度定量研究战场信息共享对作战效能的影响。

2.1 作战网络模型构建

作战要素以及作战要素之间的信息交互关系即形成了作战网络的组织结构，构建其网络模型首先需要抽象出各作战要素及作战要素间的作战信息交互行为，即定义作战网络模型中的节点和边。

(1) 网络节点模型

网络模型中的节点即是对各作战要素的抽象，为了更好地反映网络化作战过程中的情报探测、指挥决策和火力打击等作战活动，按照作战功能划分，作战网络可抽象出 3 类节点，分别是传感器、指控和火力打击节点^[2,4]。其中传感器节点 R 包括战场空间内所有能够提供态势感知的实体，如雷达、预警机等，主要负责战场情报侦察和预警探测，为作战提供战场态势信息，并将收集到的信息传至

指控节点; 指控节点 C 接收传感器和打击节点的信息进行处理与决策, 并通过命令发布控制传感器和打击节点, 如各级各类指挥所、预警机等; 打击节点 F 是指担负火力打击等作战任务的武器装备, 接收指控节点的控制信息对敌方目标实施软、硬等火力打击, 如战斗机、舰艇等。

(2) 网络边模型

作战网络中的边即传感器、指控和打击等节点之间因作战需求而产生的信息交互关系, 通过有线或无线通信等方式实现作战信息支援、协同及指挥控制等作战行动, 本文假定 2 个节点之间最多存在 1 条边。不同作战要素之间的信息交互关系也不同, 边的连接类型主要包括^[5-6]:

1) 节点 R 之间的连接, 表示传感器节点间的情报信息交互关系, 网络化的连接方式实现了“一点探测, 全网感知”式的情报保障, 节点间存在连接的概率即代表情报信息共享的程度;

2) 节点 R 与节点 C 间的连接, 表示情报信息上报和探测任务下达等信息传输关系, 由于节点间存在信息共享, 节点 C 不仅与所隶属的节点 R 存在直接连接关系, 还可通过节点 R 之间的连接与其它节点 R 之间进行信息间接交互;

3) 节点 C 间的连接, 表示指控节点间的作战指挥决策交互关系, 包括同层次指控节点间的协同关系及纵向指控节点间的组织指挥关系, 节点间存在连接的概率即指挥决策共享程度;

4) 节点 C 与节点 F 间的连接, 表示武器控制信息和状态信息的交互关系, 武器装备的火力打击命令只能通过其上级指控节点下达, 即使在协同作战中, 其它指控节点也只能通过本级指控节点与打击节点进行作战信息交互。因此, 一个节点 F 只能与一个节点 C 存在直接连接, 表示其隶属关系, 与其他节点 C 之间的协同打击交互则是通过节点 C 之间的共享连接实现。

(3) 网络模型生成

信息化条件下的作战网络组织结构是在传统基础上的继承和发展, 必然具有传统的层次性和规

则性等特点。如指控组织之间严格的树状层次结构, 可通过节点的层次和跨度等属性体现。传统作战网络模型生成算法^[1]如下:

1) 给定作战网络指控层次为 H , 每个节点指控跨度为 M ;

2) 生成最高级别的指控节点, 个数为 1, 置层次属性标志;

3) 生成第 h 层每个节点的 M 个下级节点, 并与直接上级节点连边, 置 $h=h+1$;

4) 重复第 3 步, 直至 $h=H$, 生成标准的指挥控制网络;

5) 生成 N_R 个传感器节点, 按指数分布与各指控节点连边, 构成组织隶属关系;

6) 生成 N_F 个打击节点, 按指数分布与各指控节点连边, 构成组织隶属关系。

传统作战网络组织结构仅反映了作战要素之间的隶属编制和业务关系等静态连接特性。然而信息化战场态势瞬息万变, 作战要素之间因作战需求驱动产生的信息共享交互关系也将动态变化。由于受到任务使命和战场环境等多种动态因素影响, 作战要素间的信息共享主要体现在节点 R 或节点 C 之间, 网络模型构建时可采用随机连接的方式来反映这种动态交互性。节点 R 之间的边连接概率^[1]主要指传感器节点间实际存在的边数与可能存在的边数之比其表达式为:

$$P_{RR} = \frac{e_{RR}}{C_{n_r}^2}$$

式中, e_{RR} 为实际存在的边数; $C_{n_r}^2$ 为所有节点 R 中的可能存在的边数, 节点 C 之间边的连接概率 P_{CC} 计算同理。

因此, 本文用于度量战场信息共享效能的作战网络模型即是由传统作战网络组织结构加入随机动态产生的信息共享交互关系构成。需要说明的是, 网络中的边都存在双向连接, 所以假定作战网络中边都为无向边。与单一类型复杂网络的矩阵表示不同, 作战网络共有 3 类节点和 4 种信息交互关系, 可采用多维矩阵表示节点和边的异质性。以情

报--指控节点之间的信息交互关系为例, 假设传感器和指控节点数量分别为 N_R , N_C , 关系矩阵则为 $A_{RC}=\{a_{ij}, i=1,2,\dots,N_R; j=1,2,\dots,N_C\}$, 当节点之间存在信息交互关系时, $a_{ij}=1$, 否则为 0。其它 3 种关系矩阵同理, 4 种关系矩阵合并后即作战网络模型的矩阵表示。

2.2 信息共享效能评价

本文在复杂网络结构统计特性的基础上, 结合作战过程中信息共享作用影响的实际情况, 采用以下指标衡量信息共享效能。

(1) 平均路径长度

平均路径长度^[2]是指网络中任意 2 个节点之间距离的平均值, 可反映作战网络中节点间连接紧密程度和共享交互通信代价, 其表达式为:

$$L = \frac{2}{N(N+1)} \sum_{i \geq j} d_{ij}$$

式中 d_{ij} 表示网络中节点 i 和 j 之间最短路径上的边数, N 表示网络节点数。

(2) 聚类系数

聚类系数^[10-11]是指节点 i 的邻居节点之间也互为邻居的比值, 其表达式为:

$$C_i = \frac{2E_i}{k_i(k_i-1)}$$

式中, k_i 是节点 i 的邻居节点个数, E_i 为 k_i 个节点间实际存在的边数。整个网络的聚类系数 C 是所有节点 C_i 的平均值, 可反映作战网络中各节点间的信息协作程度。

(3) 打击链数量

根据“观察-调整-决策-行动”(OODA)作战规则^[2], 作战过程是一个从传感器获取战场信息开始, 而后将信息传至指控节点进行处理形成决策信息, 然后下达给打击节点执行的信息传递过程。从网络结构的角度看, 即形成了 $R \rightarrow C \rightarrow F$ 的标准打击链(Standard strike link, SSL)^[12], 标识一次攻击过程的完成。其中, 从节点 R 到节点 C 的情报信息流因节点 R 间的信息共享存在直接或间接的连接, 从节点 C 到节点 F 的指挥控制流同理, 从而形成

广义的打击链(General strike link, GSL)。因此, 作战网络中的打击链可反映参与作战的节点数量及节点间的信息交互关系, 其数量与信息共享程度密切相关。

(4) 共享效能

战场信息共享对作战效能的影响体现在 3 个层次: 极少共享、适度共享和过度共享^[7-9]。在传统的作战网络组织结构中增加信息共享交互连接能够减小网络平均路径长度及增强节点间的协作关系, 由此获得网络收益。然而, 信息共享交互关系的增加在带来收益的同时也提高了网络连接成本, 并可能引起单个节点处理过载和过量的信息连接, 造成网络连接成本增加而降低网络连接增益。为分析信息共享交互关系对作战网络整体效能的影响规律, 采用网络成本与网络收益共同定义共享效能。其中网络成本与网络中边的数量和路径长度呈线性关系, 网络收益可通过平均路径长度的变化来衡量, 其表达式分别为:

$$\begin{cases} C(G) = aN_e + b \sum_{i \geq j \in G} d_{ij}; \\ B(G) = kL \\ E(G) = B(G) \times C(G) \end{cases}$$

式中 $C(G)$ 为网络成本函数; N_e 为网络边的数量; $B(G)$ 为网络收益函数; a, b, k 为调节参数; $E(G)$ 为信息共享效能函数, 其值越小, 信息共享效能影响越好。

3 仿真实验分析

3.1 仿真环境设置

仿真实验主要分析不同信息共享程度下的作战网络结构对信息共享效能指标的影响规律。即作战网络组织结构中作战要素节点的数量和功能不变, 设定参数 P_{RR} 和 P_{CC} 分别反映作战网络中传感器节点间和指控节点间信息的共享程度, 其值从 0-1 的变化过程分别对应于信息极少共享、适度共享和过度共享。根据网络模型生成算法生成的传统

作战网络组织结构如图 2 所示, 其中传感器节点间以自我保障为主, 基本不存在信息共享, 即 $P_{RR}=0$, 指控节点间表现为树状的层次结构, 同层指控节点间基本不存在指挥协同, 即 $P_{CC}=0$ 。图 3 所示为 $P_{RR}=P_{CC}=40\%$ 时的作战网络模型。各个参数取值为: $H=3, M=3, n_R=26, n_F=39, k=100, a=10, b=1$ 。

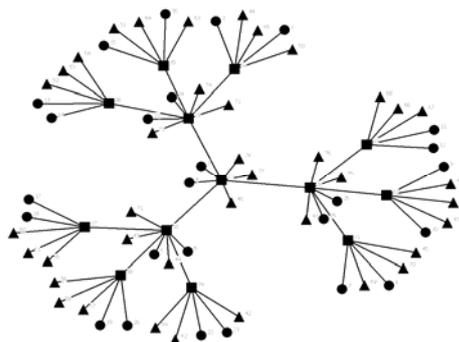


图 2 传统作战网络模型

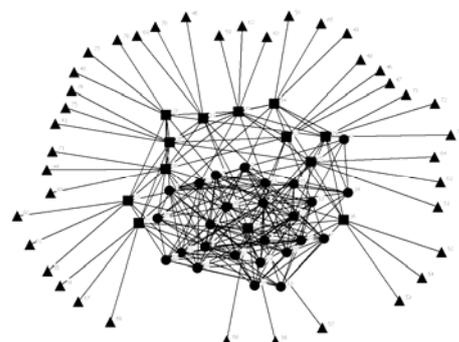


图 3 信息化条件下的作战网络模型

3.2 仿真结果分析

基于 Matlab 对作战网络模型的统计特性进行仿真计算, 在传统作战网络组织结构模型中, $L=4.256, C=0, SSL=78, GSL=582$ 。较大的平均路径长度和最小的聚类系数是因为作战信息严格按照树状层次结构进行交互, 信息流动和共享能力有限, 单个作战平台的火力打击范围受到传感器探测感知范围的制约, 影响了作战能力的提升。而部分指控节点间存在纵向的指挥连接关系, 使得节点间的信息交互路径增多, 所以广义打击链的数量大于标准打击链。

而在以网络为中心的信息化作战网络模型中, 如图 4、5 所示, 在不考虑网络成本的情况下, 平均路径长度和聚类系数随着信息共享程度的提高分别地减小和增大, 较传统作战网络模型有明显的改善, 这是因为随着共享交互关系的变化, 作战网络结构也发生了变化, 从每个作战要素仅在其隶属的作战单元内发生作用, 到所有传感器、指控节点形成情报保障网络和指控网络, 形成由单个作战平台效能发挥向体系作战效能转变。由于网络结构变化未涉及指控节点与传感器或打击节点之间的隶属连接, 所以标准作战环的数量未发生变化; 考虑到网络节点较多, 仿真实验中只统计同类节点数目不超过 3 个的广义打击链数量。随着信息共享程度的增加, 广义打击链的数量明显增多, 如图 6 所示。

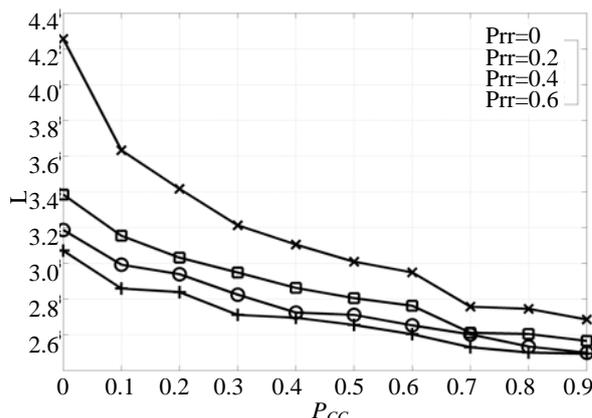


图 4 网络平均路径长度变化图

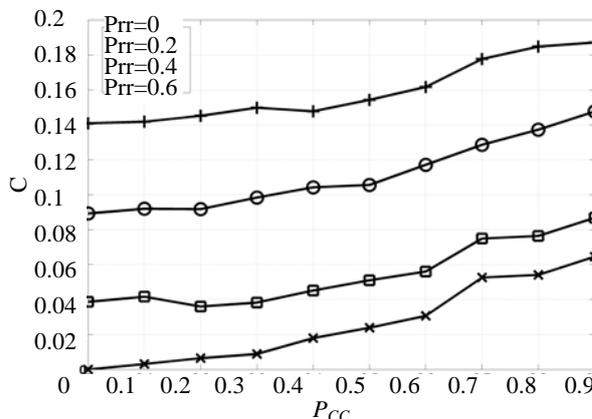


图 5 网络聚类系数变化图

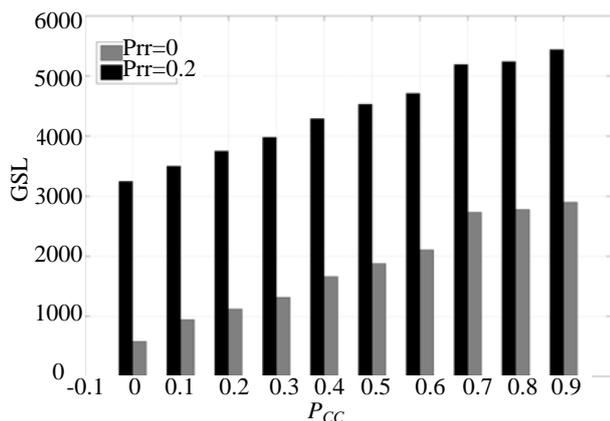


图 6 广义打击链数量变化图

图 7 表示了考虑网络成本的情况下共享效能与信息共享程度之间的变化规律。随着信息共享程度的逐渐增大, $E(G)$ 呈现明显下降趋势, 说明信息共享带来收益大于网络成本, 信息共享效能逐渐增加。而当达到一定共享程度以后, 网络中传感器子网和指控子网逐渐接近于全连通图, 新增网络连接带来的网络成本不断增加, 而共享收益并没有得到相应的提升, 导致共享效能呈现边际递减趋势。仿真结果表明, 战场信息共享程度不是越高越好, 作战网络组织结构需在适度信息共享的条件下才能形成最佳的作战效能。

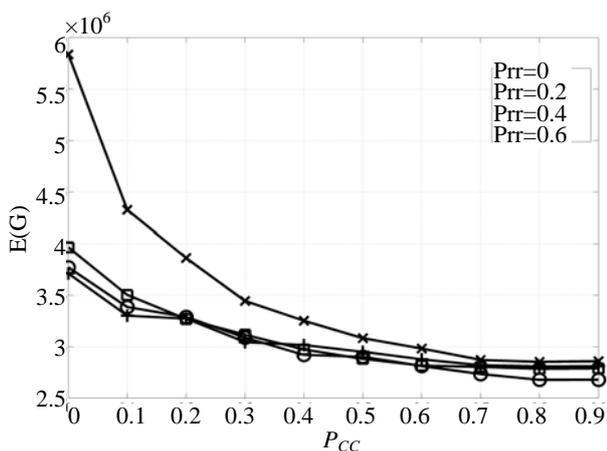


图 7 信息共享效能变化图

4 结论

结构决定功能是系统科学的基本观点, 本文从网络科学的角度量化评估了战场信息共享对作战效能的影响规律, 采用在树状层次作战组织结构的

基础上依概率添加信息共享交互关系的方式, 构建作战网络模型, 控制概率参数生成具有不同信息共享程度的作战网络组织结构, 对比分析基于网络结构统计特性的共享效能指标的变化规律, 验证了战场信息共享提升作战效能的定性分析结论, 仿真结果表明适度的信息共享才能获得最佳的作战效能, 为量化评估信息共享效能提供了新的研究方法和视角。当然, 文中的作战网络模型是在假设、简化信息化战争的基础上构建生成, 下一步研究将继续深入完善作战网络模型, 通过网络演化的方式模拟仿真作战要素间的动态信息交互行为, 更加准确地反映现实作战特性。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] David A, Hayes R E. Understanding command and control [M]. Washington DC, USA: CCRP Publication Series, 2006: 35-38.
- [3] 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.
- [4] 朱涛, 常国岑, 施笑安. 基于复杂网络的指挥信息系统拓扑模型研究 [J]. 系统仿真学报, 2008, 20(6): 1574-1581.
- [5] 卜先锦. 军事组织协同的建模与分析 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2009: 5-6.
- [6] 朱涛, 常国岑, 张水平, 等. 基于复杂网络的指挥控制信息协同模型研究 [J]. 系统仿真学报, 2008, 20(22): 6058-6065.
- [7] 金伟新, 肖田元. 作战体系复杂网络研究 [J]. 复杂系统与复杂性科学, 2009, 6(4): 12-25.
- [8] 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.
- [9] 汪小帆, 李翔, 陈关荣. 复杂网络理论及其应用 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2006: 9-12.
- [10] David A, Hayes R E. Understanding command and control [M]. Washington DC, USA: CCRP Publication Series, 2006: 35-38.
- [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]. 国防科学技术大学学报, 2013, 35(3): 42-47.
- [12] 徐玉国, 邱静, 刘冠军. 基于复杂网络的装备维修保障协同效能优化设计 [J]. 兵工学报, 2012, 33(2): 244-251.