

1-8-2019

Progress and Challenge on Military System Analysis and Modeling

Mingzhi Zhang

Department of Information Operation and Command Training , NDU of PLA, Beijing 100091, China;

Peng Jun

Department of Information Operation and Command Training , NDU of PLA, Beijing 100091, 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.

Progress and Challenge on Military System Analysis and Modeling

Abstract

Abstract: Based on the data of openly published related research papers from 2001 to September 2016, the research progresses on military system analysis and modeling were summarized. The concerning theory and method, research contents, annual developing stage, researchers and institutes, and related journals were analyzed, which contributed to making a knowledge map of the area. A series of challenging issues in the research area was discussed to prompt further research on military system analysis and modeling.

Keywords

military system, analysis and modeling, research progress, challenging issues

Recommended Citation

Zhang Mingzhi, Peng Jun. Progress and Challenge on Military System Analysis and Modeling[J]. Journal of System Simulation, 2018, 30(8): 2848-2857.

军事系统分析与建模的进展及挑战

张明智, 彭军

(国防大学信息作战与指挥训练教研部, 北京 100091)

摘要: 根据 2001-2016 年 9 月间国内外公开发表的相关文献, 综述了军事系统分析与建模领域取得的若干进展。对该领域研究的理论方法、研究内容、年度趋势、机构学者、期刊分布等进行梳理, 构建了军事系统分析与建模研究较为完整的知识图谱。提出了领域研究面临的一系列挑战性课题, 为军事系统分析与建模的进一步研究提供支持。

关键词: 军事系统; 分析与建模; 研究进展; 挑战性课题

中图分类号: TP391.9

文献标识码: B

文章编号: 1004-731X(2018)08-2848-10

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201808005

Progress and Challenge on Military System Analysis and Modeling

Zhang Mingzhi, Peng Jun

(Department of Information Operation and Command Training, NDU of PLA, Beijing 100091, China)

Abstract: Based on the data of openly published related research papers from 2001 to September 2016, the research progresses on military system analysis and modeling were summarized. The concerning theory and method, research contents, annual developing stage, researchers and institutes, and related journals were analyzed, which contributed to making a knowledge map of the area. A series of challenging issues in the research area was discussed to prompt further research on military system analysis and modeling.

Keywords: military system; analysis and modeling; research progress; challenging issues

引言

军事系统是指与军事指挥和作战保障相关的综合电子信息系统集合。随着网络中心战(network-centric warfare, NCW)、信息化战争、体系对抗等概念提出, 军事系统分析与建模, 即从系统设计、功能分析和仿真建模的角度研究军事系统内部运行机理, 也越来越受到国内外学者的广泛关注和深入研究。美、澳、荷、瑞典将体系结构

(architecture framework, AF)、网络科学(network science, NetSci)、多主体系统(multi-agent system, MAS)、指挥控制(command & control, C2)等引入该领域研究, 并在军事实践中得到成功应用和检验。国内军事系统研究起步晚, 发展快, 在作战体系、武器装备体系和 C4ISR 系统的理论方法、建模仿真、效能评估等方面取得了一些重要进展。本文对近年来国内外公开文献进行整理, 借鉴文献计量法挖掘军事系统研究的结构、特征和规律, 总结发展情况和研究现状, 介绍代表性成果, 分析目前研究趋势, 划定具有影响力的期刊, 以期构建军事系统分析与建模较为完整的知识图谱。提出领域研究的一系列挑战性课题, 为进一步探索军事系统分析与建模提供支持。



收稿日期: 2016-11-17 修回日期: 2017-01-08;
基金项目: 国家自然科学基金(61374179);
作者简介: 张明智(1962-), 男, 陕西凤翔, 博士后, 教授, 博导, 研究方向为战略战役模拟、武器装备体系论证、军事运筹理论与方法; 彭军(1985-), 男, 湖南常德, 博士, 工程师, 研究方向为军事体系分析与建模。

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

• 2848 •

1 国外研究进展

1.1 体系结构

从 C4ISR1.0 到 DoDAF2.0^[1], 美国国防部定期发布指导国防指挥控制系统结构设计的指南。英国、北约、澳大利亚、加拿大等国紧随其后, 在美军 AF 的基础上, 结合自身特点, 开发各自的体系结构框架。如英国国防部 MoDAF1.2, 北约 C3 系统体系结构框架 3.0。AF 是适应信息化联合作战, 用于体系规划计划、建设发展、顶层设计、验证评估等的总体技术规范, 从多视图和多产品角度描述了体系结构设计的原则。体系结构是论证军事系统需求、指导军事系统建设、搞好军事系统规划的顶层指导文件。

1.2 网络科学

美国科学院陆军科技委员会撰写了《网络科学》报告^[2], 以期用多领域交叉的 NetSci 提高陆军 NCW 能力。Cares^[3]用复杂网络理论定义推导了信息时代战斗模型(information age combat model, IACM)。后来学者的研究大多继承 Cares, 如: Deller^[4]对 IACM 模型进行改进, 采用探索性方法统计分析了不同 NCW 结构下敌我对抗的胜负情况; Deller^[5]又研究了 NCW 中实体间 C2 效率与网络拓扑结构之间的关系。文献[6]构建了一个 NPA (Networks of Planning Agents) 军事组织模型。仿真结果表明, 网络拓扑、通信延迟和信息共享对军事组织行为和效率有较大影响。Lee^[7]运用 CN&MAS 方法分析了两类系统结构(离散化、网络化)下直火攻击的作战效能。Furman^[8]采用社会网络分析(SNA)和图论方法研究了军事系统的重心、关键胜负手、战略控制和目标清单等问题。上述研究的共同点是从网络科学(图论、复杂网络、社会网络分析)角度提出了军事系统拓扑结构的一种仿真建模方法, 既有宏观指标(平均直径、聚集系数、无尺度、小世界、社团等)的分析, 也有微观指标(度、介数、OODA 环等)的度量, 还有静态拓扑和动态演化的仿真, 给后来开展军事系统分析与建模做了

开创性工作。

1.3 指挥控制

澳大利亚国防部 DSTO 的 Dekker 采用 SNA 和 MAS 方法持续研究 C4ISR 的 C2 问题。文献[9-10]采用 SNA 研究了海湾战争中多国部队的 C2, 并用 CAVALIFER 进行了演示验证, 指出多层 C2 是制约信息流传递延迟的瓶颈, 需改进通信机制和工作流程, 加快 OODA 环速度; 文献[11-12]中 Dekker 提出一种 FINC 方法分析了空战和陆战的 C4ISR, 指出对于快节奏、小规模的空战, 具有协商结构、信息共享的 NA&IS 效率更高; 对于慢节奏、大规模的陆战, 具有网络结构、自同步特征的 SN&IS 作战效能更高。2013 年瑞典国防大学的 Jensen 提出一种地理嵌入式网络模型, 研究了 C2 的数据搜集、分析和规划等功能在网络中的表示。Grant^[13]研究了影响体系效能的五层因素(地理层、物理层、信息层、认知层和组织层), 他使用逻辑本体将 C2 建模为分层网络, 使用概念本体描述层内和层间关系。Grant 等^[14]阐述了 C2 研究现状(军事运筹、网络赋能、SNA 等)、局限性(C2 理论、NetSci 应用)、结论和未来研究方向(MAS、机器学习、自组织、赛博防御、多层网络等), 有很高的参考价值。上述研究从军事系统内部运行的角度, 研究了作战指挥流程、制约作战效果的因素、信息流的传播、NCW 三域的逻辑关系等内容, 挖掘体系能力涌现效果的内在机理。将军事系统的军事特征、运行过程与特殊性, 与一般系统区别开来。

2 国内研究进展

2.1 作战体系

文献[15]基于 NCW-PIC 视角构建了作战体系超网模型和基于作战环的同步模型, 分析度量了作战同步能力和协同效果, 并利用演习数据进行了实证。文献[16]对演习仿真数据分析发现, 扁平化网络 C2 结构的作战效能更高。文献[17]从作战要素的功能类型及其隶属连接关系提出了作战体系网

络生成算法,发现它是由 δ 分布、指数分布与幂律尾分布构成的混合分布。文献[18]分析了作战体系的超网络特征,提出一种结构层和属性层相统一的作战体系超网络模型。文献[19]提出一种基于行为的改进 IACM 模型,很好解决了 IACM 中边的歧义性问题。文献[20]在对 Lancaster 扩展和网络化的基础上构造了体系对抗演化网络模型,仿真实验表明,拥有同等资源的无标度网络对随机网络的胜率更高。文献[21]对 BA 网络算法进行扩展,构建了一种更贴近实战部署的作战体系模型。文献[22]提出一种装备能力优先的作战体系复杂网络演化模型。文献[23]将作战体系结构按粒度层次分解为作战活动模型、作战节点模型和信息交互模型;文献[24]建立了作战信息流转多目标规划模型。文献[25]建立了区域反导体系结构超网络模型框架及该框架的物理层、逻辑层和效用层超网络模型。文献[26]建立了反映真实作战体系特性的网络化描述模型,以增加网络收益和减少网络成本为优化目标,提出一种作战体系网络连接优化控制方法;文献[27]将战场信息共享程度对作战网络效能的影响规律转化为信息共享交互关系对作战网络结构特性的量化评估。文献[28]提出一种防空体系分层粒度下的“二层四网”超网络模型,对体系运行机理的量化分析具有很好的借鉴价值;文献[29]提出的区域防空作战体系结构超网络模型很好的解决了体系结构建模难以描述其内部运行机理的问题。上述研究从军事系统与作战指挥对应的角度,基于不同的建模理论和建模方法,对作战指挥的层级结构、连接模式、指控效率、网络优化等展开研究,提出的一些模型方法能较为相似地描述真实的指挥结构和指挥流程,是对作战体系结构的有益探索。

2.2 武器装备体系

文献[30]提出一种武器装备体系的网络化概念模型,通过动态“测量”研究了体系异质网络间的关联关系,分析了体系能力生成和跃迁的机理。文献[31]基于 EBI 思想提出武器装备体系对抗仿真

中 C2 建模的一般框架,阐述了 C2 的实体、行为和交互模型。文献[32]结合 OODA 环和 EBI 思想,采用“实体-网络-体系”流程构建了网络化武器装备体系模型,这种 CN&MAS 方法既能描述实体的自主行为,又能描述实体间的复杂网络关系和整体涌现效应。文献[33]基于 OODA 环建立了一种空间信息时效网关键节点分析模型,构建了网络拓扑结构的关键节点分析指标。文献[34]从体系网络化描述、CN 建模算法规则、基于 CN 的体系测度,以及 CN&MAS 相结合的研究等 4 个方面,综述了基于 CN 的战争复杂体系建模最新进展。上述研究从军事系统与武器装备对应的角度,基于节点(装备)和连边(信息流)构成的复杂网络,对武器装备体系从观察、到判断、到决策、再到行动的 OODA 环过程(observation-orientation-decision-action)进行分析建模,研究了网络化效应、整体涌现效应、体系能力可视化和测量等内容,是对基于军事系统的武器装备体系信息域效果的定性定量分析。

2.3 C4ISR 系统

文献[35]将超网络引入网络中心化 C4ISR 系统结构的表征和建模,分析了系统结构超网络特征。文献[36]提出一种考虑级联失效的 C4ISR 系统结构动态鲁棒性度量方法,设计了 C4ISR 系统结构级联失效过程和动态鲁棒性值的计算方法。文献[37]建立 C4ISR 系统结构“五环”概念,采用网络化效能因子衡量系统结构的网络化效能,构建了系统结构“五环”效能表征模型。文献[38]研究了 C4ISR 系统结构中指挥控制关系的适应性演化问题。文献[39]是一本介绍指挥信息系统结构理论与优化方法较为系统全面的专著。文献[40]基于信息流方法研究了 C4ISR 系统结构的抗毁性问题。文献[41]研究了 C4ISR 系统结构的关键节点挖掘问题。文献[42]建立了军事通信超网络描述模型;文献[43]提出一种超网络模体熵,能有效度量军事通信网的功能复杂性。文献[44]对某指控网络横向与纵向随机互构建了一种 C2 网络化模型。文献[45]提出了兵力组织

扁平化 C2 结构的数学描述方法,建立了扁平化 C2 结构设计优化模型;文献[46]研究了 C2 组织中的效能评估问题;文献[47]分析了不同情形下兵力组织 C2 结构适应性调整问题。文献[48]构建了指挥信息系统拓扑模型,并验证了小世界和无尺度特性的存在;文献[49]建立了指挥控制级联失效模型并进行了定量分析;文献[50]提出应用于中心性评估的节点收缩改进方法,用于评估指挥控制核心节点。上述研究从军事系统与 C4ISR 系统对应的角度,研究了军事系统的软件(如指挥信息系统、情报系统、综合保障系统、通信系统等)在作战过程中的信息流转作用,更多的是考虑 C4ISR 系统的容量负载、高效鲁棒、抗毁优化、级联影响、效能评估等内容,也是军事系统研究的一个重难点和热点问题。

3 军事系统分析知识图谱

3.1 理论方法

(1) 传统理论方法。传统方法如 Lancaster 方程、Monte Carlo 法、Dupuy 指数法以及效能评估理论,主要围绕火力损耗、单一兵种展开,模型简单理想,不考虑人、网络和信息等因素,也体现不出整体涌现的思想。(2) 新理论方法。近年来 Petri 网、MAS、复杂网络、超网络及多理论的综合,将复杂性和网络有机结合,通过结构建模、动力学演化和仿真模拟等途径揭示了体系整体、动态、对抗的本质,为体系研究提供了新的方法论和技术手段。(3) 优缺点分析。Lancaster 方程从整体描述物理域的火力毁伤,忽略了信息域的信息交互和认知域的指挥控制,模型粒度较粗,不足以体现信息化对抗特征。Dupuy 指数法通过分析历史战例,总结作战规律,反映了军事人员的作战经验,但同样模型粗糙,难以反映细节。Petri 网能够描述系统的静态结构和功能,以及系统执行、交互等动态行为,是一种可行的建模方法,但无法刻画大规模作战体系的复杂性。MAS 系统基于 Agent 自底向上描述了系统的

涌现性质,成为一种主流建模方法,但对个体间的网络交互描述较为困难。NetSci 理论既能刻画系统个体的动力学行为,又对网络演化的整体涌现进行描述,通过解析计算、物理统计和仿真分析探索体系复杂性机理,给体系建模带来新的视角和理论方法。超网络理论在体系复杂性描述、体系属性信息和网络拓扑之间相互影响机理挖掘等方面具有优势。

3.2 研究内容

3.2.1 体系结构建模

(1) 明确建模需求。根据研究问题确定体系的层次、粒度和边界,如军事系统可分为战略、战役、战术 3 个层次,层次不同,模型粒度也不同。与系统关联的事物构成了系统的边界。

(2) 界定组成要素及要素间关系。组成要素包括 ISR、C2、通信、武器、综合保障等系统。其中,ISR 系统由各类传感器构成战场感知网;C2 系统由各级指控系统构成指挥决策网;通信系统将各种通信/计算机、数据存储、安防运维等构成信息栅格网;武器系统将各类网络化武器构成武器控制网;综合保障系统将各种气象水文、地理信息、导航等构成综合保障网。组间关系包括物理域的网络连接、信息域的信息处理和认知域的组织行为等关系。

(3) 组分特征及属性。一是实体,指组成系统的具体对象。如,一个战术级指挥所中的实体有作战、通信、指挥等席位。二是属性,指实体所具有的特性。如天基侦察系统的属性有探测范围、精度、传输速度等。三是行为,指随时间推移,系统内外发生的变化过程。如临时指挥、交替指挥等。

(4) 建立定量描述模型。主要有三种途径:一是基于体系结构理论,采用面向对象的多视图定性描述系统结构。二是基于 MAS 理论,通过仿真 Agent 实体及其之间的交互,刻画系统的微观行为和宏观涌现现象。三是基于 NetSci 理论,采用节点和节点间逻辑关系描述系统拓扑形态。

3.2.2 系统特性分析

(1) 拓扑特性。指的是体系的网络拓扑结构性，目前主要集中在重要节点(边)挖掘、小世界、无标度、社团结构、同质异质网络和网络含权有向时效性的研究等方面。但军事系统(网络)是不同于一般网络的军事特征网络，其拓扑结构基于作战阶段和作战任务，以及对抗条件时效演化，且具有层级性、跨级性、方向性和局部抱团性等特征，战略节点位于最高层级，战术节点位于叶节点位置，战役节点按照作战模块集成，对外连接呈现稀疏网络特征，对内连接呈现密集网络特征，不同节点(边)具有不同标识、权重和方向，网络有自环和多重边。

(2) 高效性。指的是体系运行效率的度量。从时效性看，系统要在规定时间内完成作战任务；从协同性看，不同系统之间要达到作战协同和自同步；从共享性看，作战单元之间共享信息和资源；从平衡性看，系统资源要均衡配置，避免高负载节点影响系统效率。

(3) 抗毁性。指的是体系发生故障或遭敌攻击时，提供持续稳定 C4ISR 服务的能力。从结构和业务角度可划分为静态抗毁性、动态抗毁性、关联抗毁性和级联抗毁性研究四个方面。

(4) 灵活性。指的是体系结构适应环境变化或对抗条件下的能力度量。结构决定功能，系统结构的灵活性是实现“随遇接入、即插即用、柔性重组”的基础。

3.2.3 指标与效能研究

(1) 指标体系研究。体系评价指标一般借鉴图论和复杂网络的统计参量。如图论指标有连通度、粘连度、坚韧度、离散度、完整度等；复杂网络指标有度、介数、最短路径、聚类系数、自然连通度、PFE 特征值等。指标是建立体系结构与体系效能之间映射的桥梁，将结构特性对作战效能的影响转化为指标测度对网络结构的量化评估。然而，虽然目前评估指标较多，但尚无一个完整通用的军事系统指标体系，且这些参数的有效性和可信性还有待进

一步验证。我们在评价军事系统效果时，是否可以设计或引入一些具有典型军事意义的新指标测度，如分类节点度、作战介数、网络化效能、信息流模体、信息熵、作战环等，且要从军事作战的角度说明这些指标的内涵意义。

(2) 体系效能评估。就是针对体系实现的目标建立定量测度指标，以及计算这些指标的方法和模型，评估体系在某方面的能力：是体系重构能力还是对抗能力，是协同能力还是抗毁能力，等等。体系效能评估能够帮助设计人员判断系统结构好坏，是分析与优化系统的前提。目前关于体系效能的研究较为零散，也没有一个完整通用的评估流程，需进一步发展。

3.2.4 系统优化设计

该问题是军事系统研究的目的。从系统结构和体系效能两个角度出发，以减小体系复杂度和增加体系效能为优化目标，对系统结构进行优化调整，确保结构特性和体系效能最优。由于优化设计的约束条件多、优化目标多，且之间相互依赖、相互影响。因此，在优化过程中如何确保优化效果和效率的平衡，如何在复杂性、精确性、高效性、抗毁性、灵活性和成本之间折中等都是系统优化设计的难题。

3.3 年度趋势

以体系对抗、作战体系、武器装备体系、C4ISR、体系结构、体系建模、复杂网络、超网络、MAS 等作为关键词组合，根据 CNKI 数据库按年度统计 2001-01-01-2016-09-30 期间(此期间军事系统已发展到第四代网络中心化系统，且是网络中心战概念提出及应用，几场局部信息化战争发生，以及军事系统理论及分析与建模研究的热点阶段)军事系统领域相关文献(涵盖学术期刊、学位论文、学术会议等)，如图 1 所示。从文献数量来看，军事系统研究在 2009 年以前论文数量较少，成果较为零散，统计特征不明显；自 2010 年起，论文发表呈集中爆发式增长，且研究连续性明显。分析认

为这与信息化战争引起较多国内学者的关注和自然基金、社科基金、预研基金等的大力资助有关。未来军事系统研究的成果将会更加丰硕。

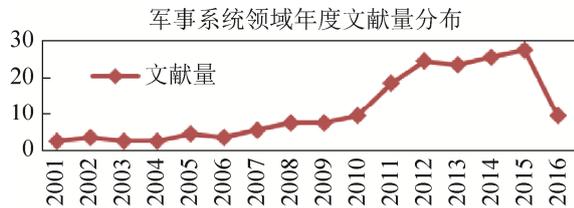


图 1 发表文献量年度趋势分布

Fig. 1 Publication of literature annual trend distribution

3.4 机构学者

从统计来看,国外开展相关研究的机构主要有美、英、北约等国的国防部,美国科学院、美国、瑞典、荷兰等国的国防大学,美国空军大学、美国兰德公司、澳大利亚 DSTO 中心等,代表学者有 Cares、Deller、Dekker、Lee、Furman、Grant 等,具体研究内容可参考文献[1-14]。从可查阅的文献可以看出,国外从事军事系统分析与建模的主要以国防部、军事院校、重要的咨询机构和研究中心为主,且具有持续性和跟踪性。Cares、Deller、Dekker 关于军事系统的研究具有开创性,后来学者大都基于他们的成果展开研究, Furman 的关于军事系统构建和运用的博士论文结合了美军近几场战争情况,具有很强的战争实践性和科学指导性, Grant 撰写的网络科学在军事指挥控制中的应用,从复杂网络和复杂系统的角度揭示了战争迷雾。由于保密原因,近几年来外军关于军事系统研究的文献不对外公开,因此很难获取到。国内从事军事系统分析的机构主要形成军事院校、研究所和地方高校三个阵营。其中军事院校较有影响力的是国防大学、国防科技大学和空军工程大学,其它如军事科学院、海军工程大学、解放军理工大学、装备学院等也有突出贡献;其次是以中电 28 所、北京系统所为代表的军工研究所,他们开展的工作各有侧重和特点,且长期进行跟踪研究;第三阵营是以西安电子科技大学、西北工业大学等为代表的地方院

校,也有一些研究成果。总体来看,军事院校和研究所是领域研究的主体,地方高校稍有涉及。具有代表性的领域专家有李德毅、胡晓峰、谭东风、张维明、蓝羽石、沈寿林等,国内代表性研究机构和学者分布图如图 2 所示。高产作者和主要研究机构之间有明显的正相关性,空军工程大学是高产作者最多的研究机构。

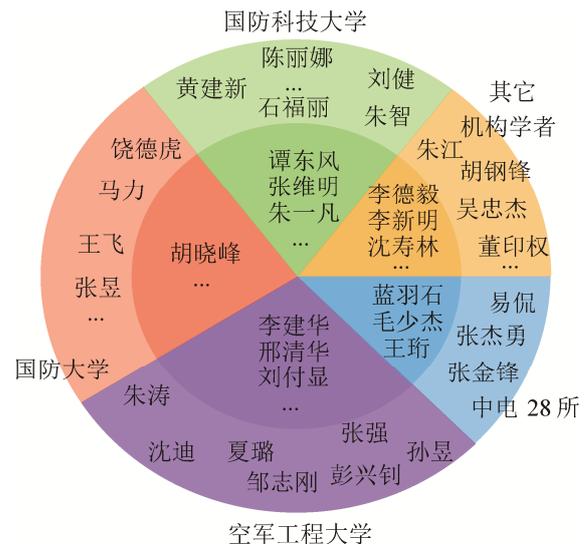


图 2 代表性研究机构和学者

Fig. 2 Representative research institutions and scholars

3.5 期刊分布

从期刊来看,军事系统分析研究属多学科交叉领域,涉刊种类和数量多。除系统方面的期刊外,军事科技、指挥控制、计算机应用和大学学报等都有相关刊载。统计近年来文献,以影响因子和载文量相乘进行综合评价,国内军事系统领域较有影响力的期刊排名前几位的是《系统仿真学报》、《系统工程与电子技术》、《复杂系统与复杂性科学》、《指挥控制与仿真》、《火力与指挥控制》等刊物。国外主要是以国际会议、学术专著、咨询报告或博士论文的形式出版,如国际指挥控制大会、国际计算智能大会、美国科学出版社、Hershey 出版社、美国国防部研究报告等,具体可参考文献[1-14]。

4 军事系统研究挑战性课题

(1) 系统复杂性机理。军事系统是一个复杂巨系统，其复杂性存在于组分系统的适应性、不确定性和演化性，以及组分系统之间的涌现性和对抗性上，它既是促成“1+1>2”整体效能的根源，又是引发体系坍塌和级联效应的动因。要洞悉其基本特征和运行机理，可能需要综合运用系统论、网络科学和复杂性科学的观点，同时也给支撑理论、建模方法和仿真平台带来极大的挑战。

(2) 系统合理性模型。如何对系统和实体进行分解？采用什么样的建模粒度？基于多大的相似性？如何描述不同阶段的作战演化过程？这些直接影响到体系模型的合理性和可信度。对同一问题采用不同粒度模型，结果会不同。细粒度模型能抓住事物细节，粗粒度模型能更好揭示事物宏观属性。所以，模型粒度既不能太粗，否则丢失有效信息和细节；也不能太细，否则增加系统负担和计算复杂度，也会使实体间的涌现性难以表达。基于指挥员角度和技术人员角度，系统评估和分析可能存在差异。因此，系统模型的合理描述也是一个巨大挑战。

(3) 系统有效性评估。体系效能评估内容涉及包括：体系指标的挖掘、分析、设计，网状指标体系的构建，体系能力的动态测量和可视化分析，体系贡献度，系统结构鲁棒性、高效性、灵活性度量，体系重心，体系抗毁性分析等。基于体系实验床构建合理的想定并开展仿真实验，对体系能力进行分析评估，尚缺乏好用管用的手段。

(4) 系统高效性计算。目前关于军事系统效能评估主要是针对中小规模、静态网络结构进行的，对于大规模、动态网络模型，一方面缺乏相应的案例实证研究；另一方面对超大稀疏矩阵进行多次数据处理，计算效率和数值分析需要较大的时间和成本开销。如何改进计算方法，寻求更为高效的分析手段也是我们面临的一大难题。

5 结论

以体系对抗为核心的信息化战争，具有网络化、信息化、体系化、不确定性、适应性、对抗性等特征，战争形态发生了质变和量变，需要新的理论方法予以支撑，因此军事系统分析与建模也成为了当前战争系统研究的前沿课题。总体来看，外军研究时间较长，形成了一套成熟的理论体系、数学模型和仿真平台，并在实践中得到应用；我军虽起步稍晚，但也发展迅猛。本文归纳总结了近期军事系统分析与建模取得的阶段成果。从理论方法、研究内容、年度趋势、机构学者、期刊分布等方面梳理了较为完整的知识图谱，提出了领域研究面临的挑战性课题，需下一步深入探索。

参考文献：

- [1] DOD Architecture Framework Working Group. DOD Architecture Framework Version 2.0 Volume I, II, III [M]. U.S.: Department of Defense, 2009.
- [2] National Research Council. Network Science: Report of the Committee on Network Science for Future Army Applications[R]. Washington DC: The National Academies Press, 2005.
- [3] Jeffery R Cares. Distributed networked operations[M]. New York, USA: iUniverse, 2005.
- [4] Sean Deller, M I Bell, G A, et al. Applying the Information Age Combat Model: Quantitative Analysis of Network Centric Operation[J]. The International C2 Journal (S1938-6044), 2009, 3(1):1-25.
- [5] Sean Deller, Ghaith Rabadi, Andrea Tolk, et al. Organizing for Improved Effectiveness in Networked Operations[J]. Military Operations Research (S1082-5983), 2012, 17(1): 5-16.
- [6] A H Dekker, L Silva. Investigating Organizational Structures with Networks of Planning Agents[C]// International Conference on Computational Intelligence for Modeling Control and Automation, and International Conference on Intelligent Agents, Web Technologies and Internet Commerce (CIMCA-IAWTIC'06). 2006.
- [7] Youngwoo Lee, Taesik Lee. Network-based Metric for Measuring Combat Effectiveness[J]. Defence Science Journal, 2014, 64(2):115-122.
- [8] Thomas S Furman. An Application of Social Network Analysis on Military Strategy, System Networks and the

- Phase of War[D]. AIR FORCE INSTITUTE OF TECHNOLOGY, 2015.
- [9] A H Dekker. Applying Social Network Analysis Concepts to Military C4ISR Architectures[J]. Connections, 2001, 24(3): 93-103.
- [10] A H. Dekker. A Category-Theoretic Approach to Social Network Analysis[J]. Elsevier, 2002, 61(2): 21-33.
- [11] A H Dekker. C4ISR Architectures, Social Network Analysis and the FINC Methodology: An Experiment in Military Organizational Structure [R]. DSTO-GD-0313, 2002.
- [12] A H Dekker. Applying the FINC (Force, Intelligence, Networking and C2) Methodology to the Land Environment[R]. DSTO-GD-0341, 2003.
- [13] Tim Grant. Advancing the State of the Art in Applying Network Science to C2[C]//19th International Command & Control Research & Technology Symposium (ICCRTS), 2014.
- [14] Grant T J, Janssen R H P, Monsuur H. Network Topology in Command & Control: Organization, operation & evolution[M]. Hershey PA, IGI Global, 2014.
- [15] 胡晓峰, 贺筱媛, 饶德虎. 基于复杂网络的体系协同能力分析研究方法[J]. 复杂系统与复杂性科学, 2015, 12(6): 9-18.
Hu Xiaofeng, He Xiaoyuan, Rao Dehu. A Methodology for Inversting the Capabilities of Command and Coordination for System of Systems Operation Based on Complex Network Theory[J]. COMPLEX SYSTEMS AND COMPLEXITY SCIENCE, 2015, 12(6): 9-18.
- [16] 刘洋, 胡晓峰. 基于仿真数据的作战体系结构层次分析[J]. 军事运筹与系统工程, 2014, 28(3): 65-69.
Liu Yang, Hu Xiaofeng. Hierarchical analysis of operational architecture based on simulation data[J]. Military Operations Research and Systems Engineering, 2014, 28(3): 65-69.
- [17] 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.
JIN Wei-xin, Xiao Tian-yuan. Research on the Combat SoS Complex Network [J]. COMPLEX SYSTEMS AND COMPLEXITY SCIENCE, 2009, 6(4): 12-25.
- [18] 刘忠, 刘俊杰, 程光权. 基于超网络的作战体系建模方法[J]. 指挥控制与技术, 2013, 35(3): 1-5.
Liu Zhong, Liu Jun-jie, Cheng Guang-quan. Operation System of Systems Modeling Based on Super Network[J]. Comand Control & Simulation, 2013, 35(3): 1-5.
- [19] 刘健, 刘宝宏, 张云. 基于行为的网络化作战复杂网络模型研究[J]. 系统仿真学报, 2013, 25(1): 68-73.
LIU Jian, LIU Bao-hong, ZHANG Yun. Research on Behavior-based Complex Network Model of Networked Operations[J]. Journal of System Simulation, 2013, 25(1): 68-73.
- [20] 谭东风. 基于演化网络的体系对抗效能模型[J]. 国防科技大学学报, 2007, 29(6): 93-97.
TAN Dong-feng. An Evolving Network Model for Effectiveness of Combat between SoSs[J]. JOURNAL OF NATIONAL UNIVERSITY OF DEFENSE TECHNOLOGY, 2007, 29(6): 93-97.
- [21] 张凤琴, 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.
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.
- [22] 张凤琴, 梁栋, 管桦, 等. 基于装备能力优先的复杂网络演化模型研究[J]. 系统仿真学报, 2015, 27(4): 843-850.
ZHANG Feng-qin, LIANG Dong, GUAN Hua, et al. Research on Evolution Modeling of Complex Network Based on Priority of Equipment Capability[J]. Journal of System Simulation, 2015, 27(4): 843-850.
- [23] 杨迎辉, 李建华, 南明莉, 等. 基于信息流的作战体系结构建模[J]. 计算机科学, 2016, 43(2): 13-18.
YANG Ying-hui, LI Jian-hua, NAN Ming-li, et al. Operational architecture modeling based on information flow[J]. Computer Science, 2016, 43(2): 13-18.
- [24] 杨迎辉, 李建华, 沈迪, 等. 体系作战信息流转超网络结构优化[J]. 系统工程与电子技术, 2016, 43(2): 13-18.
YANG Ying-hui, LI Jian-hua, SHEN Di, et al. Structure optimization of systematic operational information flow super-network[J]. Systems Engineering and Electronics, 2016, 43(2): 13-18.
- [25] 夏璐, 邢清华, 范海雄. 区域反导体系结构超网络建模研究[J]. 现代防御技术, 2014, 42(6): 12-19.
XIA Lu, XING Qing-hua, FAN Hai-xiong. Supernetwork Modeling of Area Missile Defense System-of-Systems Architeceture[J]. MODERN DEFENCE TECHNOLOGY, 2014, 42(6): 12-19.
- [26] 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.
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.
- [27] 张强, 李建华, 沈迪. 基于复杂网络的战场信息共享效能建模与分析[J]. *系统仿真学报*, 2015, 27(4): 875-880.
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.
- [28] 邹志刚, 刘付显, 孙施曼. 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(6): 24-35.
ZOU Zhi-gang, LIU Fu-xian, SUN Shi-man. Extended Granular Computing-Based Supernetwork Model for Air Operational Architecture[J]. *Complex Systems and Complexity Science*, 2014, 11(6): 24-35.
- [29] 邹志刚, 刘付显, 任俊亮. 区域防空作战体系结构超网络建模方法[J]. *现代防御技术*, 2014, 42(2): 25-33.
ZOU Zhi-gang LIU Fu-xian, REN Jun-liang. Supernetwork-Based Modeling Approach for Networked Operating Architecture of Zone Air Defence [J]. *Modern Defense Technology*, 2014, 42(2): 25-33.
- [30] 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.
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.
- [31] 赵焯, 张明智, 胡晓峰, 等. 武器装备体系对抗仿真中的C2建模研究[J]. *计算机仿真*, 2009, 26(2): 18-22.
ZHAO Ye, ZHANG Ming-Zhi, HU Xiao-Feng, et al. Research on the C2 Modeling in Weapon and Equipment System-of-Systems Warfare Simulation[J]. *COMPUTER SIMULATION*, 2009, 26(2): 18-22.
- [32] 张昱, 张明智, 杨镜宇, 等. 一种基于OODA环的武器装备体系建模方法[J]. *系统仿真学报*, 2013, 25(增 1): 6-11.
ZHANG Yu, ZHANG Ming-zhi, YANG jing-yu, et al. Modeling Method for Weapon System of Systems Based on OODA Loop[J]. *Journal of System Simulation*, 2013, 25(S1): 6-11.
- [33] 罗凯, 张明智, 吴曦, 等. 基于作战环的空间信息时效网关键节点分析模型研究[J]. *系统工程与电子技术*, 2016, 38(7): 1572-1576.
LUO Kai, ZHANG Ming-zhi, WU Xi, et al. Key nodes analysis model for space information temporal network based on operation loop[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2016, 38(7): 1572-1576.
- [34] 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): 217-226.
Ma Li, Zhang Ming-zhi. Research Progress on War Complex System of Systems Modeling Based on Complex Network[J]. *Journal of System Simulation*, 2015, 27(2): 217-226.
- [35] 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(10): 1-6.
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(10): 1-6.
- [36] 张杰勇, 易侃, 王珩, 等. 考虑级联失效的C4ISR系统结构动态鲁棒性度量方法研究[J]. *系统工程与电子技术*, 2016, 38(9): 2072-2079.
ZHANG Jie-yong, YI Kan, WANG Heng, et al. Dynamic robustness measure method considering cascading failure for C4ISR system structure[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2016, 38(9): 2072-2079.
- [37] 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, 1(1): 93-100.
LAN Yu-shi, WANG Heng, YI Kan, et al. “Five-loop” model and its effectiveness representation for network-centric C4ISR system structure[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2015, 1(1): 93-100.
- [38] 张杰勇, 蓝羽石, 易侃, 等. C4ISR系统指挥控制关系适应性演化模型和方法研究[J]. *系统工程与电子技术*, 2015, 7(7): 1543-1550.
ZHANG Jie-yong, LAN Yu-shi, YI Kan, et al. Model and solving method for adaptive evolution of command and control relationship in C4ISR system[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2015, 7(7): 1543-1550.
- [39] 蓝羽石, 毛少杰, 王珩, 等. 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 Yu-shi, MAO Shao-jie, WANG Heng, et al. Structure theory and optimization method of command information system[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2015.
- [40] 易侃, 王珩, 毛少杰, 等. 基于信息流的网络化C4ISR系统结构抗毁性分析方法[J]. *系统工程与电子技术*, 2014, 36(8): 1544-1550.
YI Kan, WANG Heng, MAO Shao-jie, et al. Information flow based survivability assessment method for

- networked C4ISR system structure[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2014, 36(8): 1544-1550.
- [41] 张金锋, 易侃, 王珩. 基于信息流的网络化C⁴ISR系统结构关键节点挖掘方法[J]. *火力与指挥控制*, 2014, 8(39): 61-64.
ZHANG Jin-feng, YI Kan, WANG Heng. Mining Method of Key Nodes in C⁴ISR Network System Structure Based on Information Flow[J]. *Fire Control & Command Control*, 2014, 8(39): 61-64.
- [42] 朱一凡, 石福丽, 雷永林. 网络中心环境下的军事通信超网络结构模型[J]. *火力与指挥控制*, 2012, 37(4): 9-13.
ZHU Yi-fan, SHI Fu-li, LEI Yong-lin. A Military Communication Supernetwork Structure Model in Network-centric Environment[J]. *Fire Control & Command Control*, 2012, 37(4): 9-13.
- [43] 石福丽, 朱一凡. 基于超网络理论的军事通信网络复杂性度量方法[J]. *通信学报*, 2011, 32(12): 51-60.
SHI Fu-li, ZHU Yi-fan. Measuring the complexity of military communication network based on supernetwork theory[J]. *Journal on Communication*, 2011, 32(12): 51-60.
- [44] 陈丽娜, 黄金才, 张维明. 网络化战争中复杂网络拓扑结构模型研究[J]. *电光与控制*, 2008, 15(6): 4-6.
CHEN Li-na, HUANG Jin-cai, ZHANG Wei-ming. Research on complex network topology model of network warfare[J]. *Electronics Optics & Control*, 2008, 15(6): 4-6.
- [45] 孙昱, 姚佩阳, 吴吉祥, 等. 兵力组织扁平化指挥控制结构设计方法[J]. *系统工程与电子技术*, 2016, 38(8): 1833-1839.
SUN Yu, YAO Pei-yang, WU Ji-xiang, et al. The design method of flat command and control structure for military organization[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2016, 38(8): 1833-1839.
- [46] 孙昱, 姚佩阳, 张杰勇. C2组织信息结构效能测度及综合评估[J]. *系统工程与电子技术*, 2015, 6(6): 1313-1318.
SUN Yu, YAO Pei-yang, ZHANG Jie-yong. Measurement and comprehensive evaluation of C2 organizational information structure efficiency[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2015, 6(6): 1313-1318.
- [47] 孙昱, 姚佩阳, 李明辉, 等. 兵力组织指挥控制结构适应性调整方法[J]. *系统工程与电子技术*, 2016, 38(9): 2086-2092.
SUN Yu, YAO Pei-yang, LI Ming-hui, et al. Adaptive adjusting method of command and control structure of army organization[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2016, 38(9): 2086-2092.
- [48] 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): 1574-1576.
ZHU Tao, CHANG Guo-cen, SHI Xiao-an. Research on Topology Model of Command Information System Based on Complex Networks[J]. *Journal of System Simulation*, 2008, 20(6): 1574-1576.
- [49] 朱涛, 常国岑, 张水平, 等. 基于复杂网络的指挥控制级联失效模型研究[J]. *系统仿真学报*, 2010, 22(8): 1817-1820.
ZHU Tao, CHANG Guo-cen, ZHANG Shui-pin, et al. Research on Model of Cascading Failure in Command and Control Based on Complex Networks[J]. *Journal of System Simulation*, 2010, 22(8): 1817-1820.
- [50] 朱涛, 常国岑, 郭戎潇, 等. 网络化指挥控制中心性建模评估研究[J]. *系统仿真学报*, 2010, 22(1): 201-204.
ZHU Tao, CHANG Guo-cen, GUO Rong-xiao, et al. Research on Centrality Model and Evaluation of Networked Command and Control[J]. *Journal of System Simulation*, 2010, 22(1): 201-204.