

作战体系建模方法与应用

刘德胜, 马宝林, 葛亚维

(军事科学院评估论证研究中心, 北京 100091)

摘要: 针对作战体系建模的核心问题, 从建模方法和建模应用两个方面进行了综合概括, 对作战体系建模的主要做法、基本内容、主要步骤、主要特点等进行了系统阐述, 指出基于复杂网络理论的作战体系建模方法和基于实体的作战体系建模方法是当前最主要的两种建模方法, 概括了作战体系建模三方面的应用, 最后, 从整体上对作战体系建模方法和应用的现状及存在的问题进行了总结, 可为更加深入地开展作战体系建模研究提供借鉴。

关键词: 体系; 作战体系; 建模

中图分类号: TP391.9

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1673-3819.2020.05.001

Modeling Method and Application of Combat System of Systems

LIU De-sheng, MA Bao-lin, GE Ya-wei

(Center for Assessment and Demonstration Research of Military Science Institute, Beijing 100091, China)

Abstract: In view of the core problems of combat system of systems modeling, this paper comprehensively summarizes the main methods, basic contents, main steps and main characteristics of current research from two aspects of modeling method and modeling application, and points out that the modeling methods based on complex network theory and the modeling methods based on entities are two main modeling methods, and summarizes the application of combat system of systems modeling in three aspects. At last, the current situation and problems of modeling method and modeling application are summarized. The paper can be used for reference for more in-depth research on modeling of combat system of systems.

Key words: system of systems; combat system of systems; modeling

现代信息化战争是体系作战, 作战双方的作战行动都离不开作战体系的支撑。作战体系建模对于开展作战体系研究, 建立综合、完整、高效的作战体系具有非常重要的意义。自体系作战正式成为信息化战争主要作战样式以来, 学者们对作战体系建模方法与应用问题高度重视, 并开展了大量研究。以美国为代表的西方国家很早就提出了 C⁴ISR AF、DoDAF、MoDAF、NAF 等建模框架, 用于指导军方开展作战体系设计。国内学者也相继提出了基于复杂网络^[1-4]、基于指控链^[5]、基于信息流^[6]、基于能力优先^[7]等作战体系建模方法, 并开展相关应用, 研究对象包括指控体系、反导体系、防空体系、航母编队作战体系等。这些成果对于促进作战体系建模深入研究发挥了重要的作用。但是, 当前研究成果大多针对特定作战体系开展专门研究, 如指控体系、反导体系等, 建模方法和应用也大多针对特定领域。本文力求从整体层面对作战体系建模方法和应用成果进行系统全面的总结, 为更加深入地开展作战体系建模研究提供借鉴, 为实践应用中作战体系设计和评估提供参考。

1 作战体系建模方法

目前常用的作战体系建模方法主要有四种。

1.1 基于多视图体系架构的建模方法

该方法主要从不同的视角使用不同的机制去描述作战体系, 从而形成作战体系结构的全貌, 通常采用体系架构设计工具。典型的主要有 DoDAF、MoDAF 和 UAF, 其中, DoDAF 和 UAF 应用最为广泛。

1.1.1 美国国防部 DoDAF 体系结构框架

DoDAF 是美国国防部对近 20 年军事系统研发经验进行系统总结开发形成的, 当前版本为 DoDAF v2.02。DoDAF v2.02 体现了“以数据为中心”的体系建模思想, 通过组合表示、仪表板、融合表示、图形描述、参考模型等五种常用呈现技术从体系结构信息库中提取数据进行展现, 定义了全视图、项目视图、能力视图、作战视图、服务视图、系统视图、标准视图、数据和信息视图等 8 种视图。基于 DoDAF 作战体系结构描述过程如图 1 所示^[8]。

过程 1: 作战背景描述。结合作战目标, 通过整体构想、层次结构、阶段规划和相互依赖关系为描述作战体系能力提供战略背景和描述范围^[9]。

过程 2: 作战概念描述。结合作战概念数据模型, 以概要图形的形式, 对作战使命、作战节点、作战样式等相关内容进行描述。

收稿日期: 2020-06-03

修回日期: 2020-06-25

作者简介: 刘德胜(1972—), 男, 湖北浠水人, 博士, 副研究员, 研究方向为作战模拟、作战体系评估。
马宝林(1983—), 男, 博士, 助理研究员。

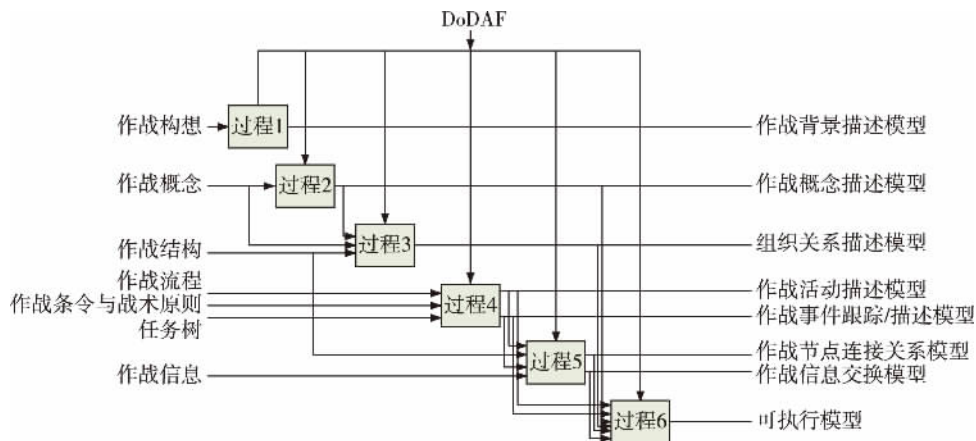


图 1 体系结构描述示意图

过程 3: 组织关系描述。结合高级作战概念图,对作战体系内部结构及其各节点之间关系进行描述。

过程 4: 作战活动描述。结合作战需求,分解宏观、抽象的作战任务,获取具体细化的作战实体任务,通过相应的作战活动来完成,并对不同层次、不同类别的作战活动及其相关内容进行描述。

过程 5: 作战节点连接关系描述。结合作战活动描述模型和作战需求,对作战活动中涉及的不同层次、不同类别的作战节点信息、节点关系等进行描述。

过程 6: 作战体系描述可执行模型。包括构建作战体系作战视点模型和系统视点模型。

1.1.2 北约 UAF 体系结构框架

UAF 是北约体系架构组织 2012 年着手构建的一种满足北约一致需求的体系结构框架。2017 年 11 月, UAF 1.0 正式发布, 主要包含语言、标准规范和体系架构产品设计方法三部分。1) 语言。用于描述复杂体系结构体, 一般采用图形化、可视化的建模语言 UML 以及 SysML 来构建。2) 标准规范。包括 10 个领域 11 个视角的体系框架描述规范, 给出了复杂组织体系的设计与描述模板, 提供了复杂体系需求分析、功能分析、架构设计、需求验证所需的形式化建模方法与执行手段。3) 体系架构产品设计方法。采用面向对象方法, 通过自上而下对问题自然分解, 将复杂问题简单化, 建立问题域模型, 通过自下而上对问题域客观事物进行归纳, 提取共性并抽象为模型的元素, 形成系统的基本构成要素^[10]。基于 UAF 作战体系描述过程, 是基于视图矩阵, 从战略层、业务层、支撑层三个层面来描述, 如图 2 所示。

1) 战略层依次完成作战背景、需求分析、作战能力三方面内容的描述过程, 将需求转化为具体的作战能力需求。2) 业务层依次完成业务、人力、资源过程的描述, 明确所需的作战能力需要由哪些作战活动支撑实

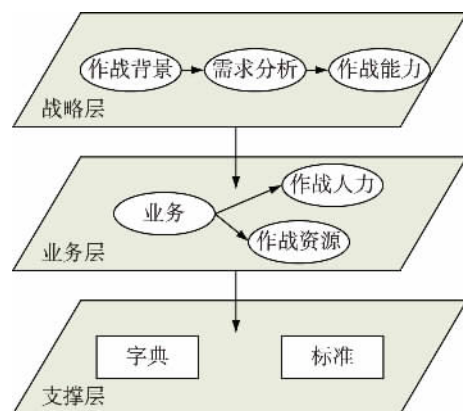


图 2 基于 UAF 的作战体系描述过程示意图

现, 作战活动中由哪些组织/单元负责执行, 描述与作战人员体系配套的软硬件资源。3) 支撑层完成作战体系字典和标准的描述过程。

1.2 基于复杂网络理论的建模方法

1.2.1 基于一般理论的作战体系建模

该方法主要通过特征抽取和算法生成两种途径实现。利用作战体系和复杂网络的共性, 从现实作战体系中提取抽象的复杂网络节点和边, 然后, 利用复杂网络理论构建网络模型, 或利用某种生成算法生成复杂网络模型, 将建立的模型作为作战体系研究的替代物。目前, 主要针对一些特定领域的作战体系, 如指挥控制体系、防空反导体系、空间信息支援体系等。直接利用现实作战体系所具有的复杂网络特点和规律构建形成复杂网络模型是当前建模的主要方法, 相关研究如文献[11-16]。基于算法的作战体系建模主要利用作战体系特点和规律, 相关研究如文献[1, 2, 7, 17-19]。

基于一般复杂网络理论的作战体系建模主要有两个特点。一是直接。利用现实网络具有复杂网络的特征, 直接实现现实作战体系向复杂网络的映射。二是近似。从现实网络中抽取复杂网络模型所需节点和

边,或设计网络生成算法按照一定规则生成节点和边,构造形成复杂网络模型。目前,作战体系建模这方面的研究只讨论复杂网络模型如何生成,至于生成的网络具有何种特征,在研究现实问题时如何应用,不是研究的重点。

1.2.2 基于超网络理论的作战体系建模

超网络是复杂网络理论研究的最新进展,更加突出分析不同网络层间的依赖和关联。目前,人们对于超网络的概念还不统一,通常将网络嵌套网络的多层、多级、具有多属性和多目标的网络称为超网络。超网络有两类:基于超图的超网络(Hypergraph)和基于网络的超网络(Super Networks)。基于超图的超网络主要用于研究复杂系统数据,刻画体系的共同特性和内在本质。基于网络的超网络主要用于研究超网络的特性,描述体系的动态演化与网络增长演化规律。作战体系建模研究属于后一种。

作战体系超网络概念模型由体系物理层网络 G_p 、结构层网络 G_s 、组织层网络 G_o 构成。若设体系层网络集 $V = \{G_p, G_s, G_o\}$, 层间网络超边集 $H = \{E_{p-s}, E_{s-o}, E_{o-p}\}$, 则构建的作战体系超网络是 $C = (V, H)$, 如图3所示。

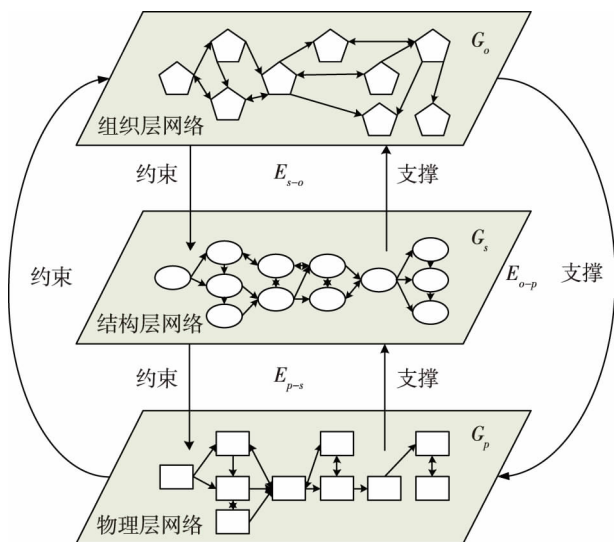


图3 作战体系超网络建模示意图

物理层网络 G_p 包含各物理实体节点,其网络边则表示各物理实体之间的关联;结构层网络 G_s 包含具有逻辑关联性 or 同质功能的节点,其网络边则表示各节点之间的协同关系;组织层网络 G_o 包含体系结构运行关联或具有相应指向性的节点,其网络边一般用于表示组织主体与客体的交互关系,从运行机制层面规范了相互交互的时机、信息量和方向。物理层网络与结构层网络间存在约束与支撑关系 E_{p-s} 。物理层网络是

结构层网络的基础,结构层网络是物理层网络节点的逻辑表达,两者存在一对多的关系。物理层网络支撑结构层网络,提供体系网络所需的物理链路,同时制约结构层网络的协同速度。同理,结构层网络与组织层网络之间存在约束与支撑关系 E_{s-o} ,组织层网络与物理层网络之间存在约束与支撑关系 E_{o-p} 。

基于超网络的作战体系建模主要有三方面特征。一是突出作战体系的信息流与能量流,其中,指控网是关键。二是突出作战体系所包含的实体。体系效能的发挥,依赖于作战体系中各实体、实体间关系、实体活动的相互作用与协同。三是突出作战体系的向心性、层次性。基于超网络的军事建模应用已有一些初步研究^[4,20-24]。总体来说,超网络在军事领域的应用研究刚起步,还不够深入。

1.3 基于结构分解的建模方法

基本做法是将作战体系按照某种方式分解成不同的组成部分,对每一个组成部分根据研究需要进一步分解,直至将作战体系分解到可以满足建模需要;然后,在此基础上,利用已经掌握的知识和技术,对每一个部分分别进行建模,通过建模完成每一部分的研究;最后,在完成每一部分研究的基础上,通过自底向上层层聚合,最终形成对作战体系的整体评估和判断。这种方法操作方便,简单易行,但是,必须紧密结合研究任务和评估目的,根据研究需要进行分解还原。分解后的每一部分,根据现实条件和研究需要选择合适的建模方法建模,可以采用统一的建模方法,也可以采用多样化的建模方法,灵活度相对较大。

对作战体系的结构分解建模可以从不同角度进行。针对问题不同,可以采用不同的方法,常见的方法如层次分析法、模糊综合评判法等。目前,基于结构分解的作战体系建模方法应用较为广泛^[25-27]。建模时也经常多种方法结合使用,目的是充分发挥每种方法优点,可在其中某一步骤或某一环节进行方法结合。这种建模方法思路清晰,条理清楚,通过分解可以将复杂的作战体系分解为若干个容易处理解决的模块或部分,降低了建模和应用的难度,尽管运用时存在较大的局限性,但在实践中仍然得到较为广泛的应用。

1.4 基于实体的建模方法

1.4.1 基于对象实体的作战体系建模

这实际上是一种面向对象的建模方法,把相关的数据和方法组织为一个整体,从更高的层次进行建模,更加贴近事物的自然运行模式。基本思想就是从客观世界固有的事物出发来构造系统,通过识别对象、分析对象间的关系,反映问题域中固有的事物及其相互关系。基本思路是把对象作为系统建模的基本单元,通

过构建具有各自属性和行为或操作的对象,通过不同对象之间的相互作用和联系实现对客观世界的建模。对象的具体化就是实体,可以是具体的物理实体,也可以是抽象的逻辑实体。在仿真系统中,实体可以是人员、武器装备、作战单元、人工设施等。

建模主要包括以下步骤:

1) 确定对象实体的类型。即明确作战体系中需要模拟仿真的对象。模拟仿真的作战体系实体同真实作战体系通常具有一致性,包含作战体系的基本要素类型,如指挥类实体、侦察预警类实体、作战单元实体、综合保障实体、信息作战类实体等。根据建模的具体体系,每一类实体可以进一步定义相应类型的实体。

2) 确定对象实体的属性。属性有静态和动态之分。静态属性主要是实体的基本属性,在系统仿真过程中一般不会发生变化,如实体标识、尺寸、战技指标等。动态属性包括空间属性、行为属性、任务属性等,在仿真过程中随着系统的活动会发生变化。实体属性的定义同传统模拟仿真方法没有实质性的不同。

3) 确定对象实体的行为或操作。实体的行为或操作是实体作用或影响周围环境的原因。实体的行为或操作与实体的类型紧密相关,不同的实体具有不同的行为或操作,如雷达实体可以有开机、关机、旋转等操作。

4) 确定实体间的关系。实体间关系决定了实体交互的类型和方式。实体间关系定义是建模的难点和重点。在体系对抗中,实体间的关系比较复杂,有指挥关系、控制关系、通信关系、协作关系、支持关系、保障关系、对抗关系等,包括内部和外部两个方面。

基于对象实体的作战体系建模目前已经得到广泛运用,并有许多学者开展了相关研究^[28-31]。

1.4.2 基于 Agent 实体的作战体系建模

这是一种自底向上的建模方式,也就是通常所说的多 Agent 建模,核心思想是利用 Agent 技术对作战体系所涉及的仿真实体进行建模,通过对 Agent 个体及其相互之间(包括个体与环境)的行为进行刻画,从而描述作战体系的宏观整体行为。

建模主要包括以下步骤:

1) 确定 Agent 的类型和架构。根据需要确定 Agent 的类型和数量。主要包括:平台型 Agent,用于模拟作战体系中的各类作战平台,如飞机平台、舰艇平台、卫星平台、雷达平台等;机构型 Agent,用于模拟影响作战体系运行的各类指挥机构和保障机构,如指挥所 Agent;管理型 Agent,用于处理模拟仿真的特殊需要,如执行 Agent 间的通信任务、毁伤计算任务等。各类 Agent 根据研究需要选择合适的体系架构。

2) 描述作战体系的微观和宏观行为。Agent 的微

观行为可以通过 Agent 的定义来实现。Agent 的行为定义同传统基于对象实体仿真的方法基本一致,只是处理方式略有不同。作战体系运行的宏观结果取决于数量众多的 Agent 微观行为。基于 Agent 的建模仿真对每个 Agent 进行精细刻画,通过 Agent 之间通信、合作、交流和相互影响,从整体上获得作战体系宏观结果。

3) 描述 Agent 之间以及 Agent 与环境之间的相互作用。Agent 之间以及 Agent 与环境之间的相互作用是驱动基于 Agent 建模仿真系统运行的动力。与传统基于对象实体建模仿真处理实体间相互作用方式不同的是,基于 Agent 的建模仿真系统中,Agent 之间以及 Agent 与环境之间的相互作用是通过 Agent 对外部环境的感知和处理来实现的,具有较高的智能和自治能力。

基于 Agent 的建模技术目前得到了较为广泛的应用,其中,Agent 的类型以刺激-反应型居多,慎思型和混合型由于对人工智能技术要求较高,目前,实际应用相对较少。目前,基于 Agent 的建模技术用于作战体系研究方面的成果不太多^[32-33]。

2 作战体系建模应用

作战体系建模主要包括三方面的应用。

1) 作战体系结构设计。作战体系是体系作战的基础和支撑,世界主要国家都高度重视作战体系的设计工作。美国和北约利用 DoDAF 和 UAF 软件设计可协作、同步、高效的作战体系,相关研究如美国开展的全球信息栅格体系设计、美国空军的指挥控制星座体系结构设计、美国空中作战中心体系结构设计等。我军没有类似成熟的体系结构设计软件,但在这方面也进行了大量的探索和尝试,如国防科技大学开发了 C⁴ISR 系统体系结构设计工具集 ArchDesigner;某研究机构建立了军事电子信息系统体系结构框架 MIDADE,支持某军事电子信息系统的开发等。

2) 作战体系结构优化。开展作战体系结构优化的目的是弥补作战体系的短板弱项,查漏补缺,提升体系作战能力。目前,相关应用主要包括作战体系重心分析、网络抗毁性分析、网络性能分析等。

作战体系重心分析主要是在现实作战体系构成的网络中快速查找关键节点或关键边,通过对己方关键节点或关键边实施加固防护,对敌关键节点和关键边实施精确打击,从而达成补强己方作战体系,提升打击敌作战体系效果的目的^[34-36]。目前,分析采用的度量指标一般是度指标和介数指标,个别学者提出一些自定义指标,如紧密度指标、特征向量指标、功能链指标等。作战体系重心分析在作战目标的选择方面可以发挥较重要的作用。

作战体系网络抗毁性分析主要是分析作战体系网络在发生故障或遭到外界攻击或摧毁时,仍然能够在—个可以接受的范围运行或是系统性能快速恢复到一个可接受程度的能力。目前,相关研究主要集中在利用复杂网络拓扑结构对网络连通度进行静态分析^[37-39]。有的引入时间序列,从动态角度构建网络指标体系研究作战体系网络的抗毁性问题^[40]。也有学者针对随机打击,同时从静态和动态两方面研究复杂网络拓扑结构的抗毁性问题^[41]。目前,抗毁性研究主要通过实施随机性打击和选择性打击,研究作战体系网络拓扑结构保持连通的能力。对于作战体系网络性能快速恢复能力的研究,目前还没有公开文献。

作战体系网络性能分析主要是通过计算描述作战体系网络性能的参数,如链路节点比、度分布、聚合系数、连通度、特征路径长度等分析现实作战体系的作战性能,如灵活性、隐蔽性等^[42-43]。目前,这一类研究总体数量不多,主要根据实际问题的需要选择相应的网络参数或是提出针对性较强的网络参数,通过计算参数值,实现评估作战体系性能的目的。

3) 作战体系效能评估。作战体系效能评估是作战体系评估的重要内容,也是当前人们最关注开展相关研究最多的领域。除基于多视图的体系架构建模方法外,其他几种建模方法都得到较为广泛的运用。

基于结构分解的作战体系建模方法在侦察预警体系、指挥控制体系、C⁴ISR 系统效能评估方面得到较为广泛应用^[44-45]。基于对象实体的作战体系建模通常用于模拟仿真,真实案例由于涉密原因在公开报道中不多见。美军的 JTLS 系统和 JAS 系统,我军开发的兵棋推演系统和联合作战仿真系统实际上都是采用基于实体的建模方法,在实践中已经得到应用。基于复杂网络理论的作战体系建模,针对特定作战体系居多,包括指挥控制网、地空导弹网、网络信息系统、防空体系、军用通信体系等,其中,针对指挥控制体系研究最多,针对通用作战体系的研究相对较少^[46-48]。这种建模方法得出的结果不是很直观,通常还需要结合一定的军事应用分析进行合理研判才能得出评估结论。

3 结束语

在信息化战争时代,体系作战的重要性不断增加,人们对于作战体系建模越来越重视。在建模方法方面,基于多视图体系架构的作战体系建模方法主要面向作战体系设计,其他几种方法主要面向作战体系评估。基于复杂网络理论的作战体系建模方法和基于实体的作战体系建模方法在实践中越来越受到重视,具有较大优势,也得到越来越广泛的应用。在作战体系

建模应用方面,现阶段的作战体系建模主要侧重于作战体系效能评估,特别是针对一些具体作战体系的效能评估。随着人们对作战体系建模研究的深入,未来针对作战体系结构设计的应用会越来越多。

当前作战体系建模方法和应用仍存在以下不足。

1) 基于复杂网络的分析方法作为当前作战体系建模的一种重要方法,在理论和技术层面仍有大量的问题和难点需要进一步研究,如在建模方法上还比较粗放,建模过程中对节点和边的处理过于简化,忽视了作战过程,不能真实地反映作战体系中的作战单元和它们之间的关系,构建的模型不能体现实际作战过程,评估结果在指导作战方面局限性还比较明显等。

2) 基于对象实体的作战体系建模方法作为目前最常用、功能最强大、最有前途的一种建模方法,在当前的建模应用研究方面还有待进一步改进和完善,如在表现作战体系与外部环境的交互中内部作用的流程、反应机理以及作战效果方面仍存在不足,不能综合、全面、细致地刻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等。

3) 作战体系建模应用研究理论成果偏多,实践层面还不够深入。

总之,着眼满足信息化战争需求,现有作战体系建模在科学性、实用性、易用性等方面还有差距,还需要进一步研究和探索。随着大数据和人工智能等新技术的出现和快速发展,以及人们对体系作战理论研究的进一步深入,未来作战体系建模研究会取得更大的进展。

参考文献:

- [1] 董印权,陈春鹏.基于复杂网络的作战体系模型[J].系统仿真学报,2013,25(8):1806-1810.
- [2] 王再奎,马亚平,周华任,等.复杂网络理论体系对抗作战体系建模[J].火力与指挥控制,2011,36(8):40-47.
- [3] 刘明.基于复杂网络的联合作战体系建模与效能评估方法[M].长沙:国防科学技术大学,2012.
- [4] 刘忠,刘俊杰,程光权.基于超网络的作战体系建模方法[J].指挥控制与仿真,2013,35(3):1-5.
- [5] 杜伟,吴丛晖,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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 李剑.基于 DoDAF 的作战体系结构建模方法[J].四川兵工学报,2009,30(7):14-16.

- [9] 李大喜,张强,李小喜,等.基于 DoDAF 的空基反导装备体系结构建模[J].系统工程与电子技术,2017, 39(5): 1036-1041.
- [10] 丁茜,王跃利,沈洋.UAF 的方法论意义[J].军事运筹与系统工程,2018,32(4): 63-67.
- [11] 朱刚,谭贤四,王红,等.复杂信息关系集成的指挥控制模型[J].复杂系统与复杂性科学,2015,12(1): 53-61.
- [12] 卞泓斐,张千宇.基于复杂网络的舰艇编队防空作战模型研究[J].舰船电子工程,2015,35(4): 29-32.
- [13] 崔琼,李建华,冉湔丹,等.基于任务流的指挥信息系统双层网络模型[J].系统仿真学报,2017,29(11): 2865-2873.
- [14] 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.
- [15] 胡晓峰,李志强,贺筱媛,等.复杂网络:战争复杂系统建模仿真新途径[J].装备指挥技术学院学报,2009,20(2): 1-7.
- [16] 张庆军,张明智,张庆娟,等.基于复杂网络理论空间信息支援体系建模研究[J].系统仿真学报,2017,29(9): 1907-1913.
- [17] 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): 1066-1070.
- [18] 张天,张继夫,丁晟.基于有向加权网的空中作战体系对抗模型[J].空军航空大学学报,2016,9(5): 43-46.
- [19] 王庆功,沈寿林,袁昌平.基于复杂网络的作战体系网络模型分析[J].指挥控制与仿真,2013,35(1): 6-10.
- [20] 刚建勋,叶雄兵,于鸿源.基于超网络的航母编队作战体系建模分析[J].指挥控制与仿真,2018,40(5): 6-10.
- [21] 胡晓峰,贺筱媛,饶德虎.基于复杂网络的体系作战能力分析方法研究[J].复杂系统与复杂性科学,2015,12(2): 9-17.
- [22] 司光亚,王艳正,李仁见,等.指挥控制体系网络化建模研究与实践[J].指挥与控制学报,2015,1(1): 19-24.
- [23] 刘胜久,李天瑞,洪西进.超网络模型构建及特征分析[J].计算机科学与探索,2017,11(2): 194-211.
- [24] 朱江,刘大伟,陈俊.作战体系超网络模型及应用[J].指挥控制与仿真,2013,35(2): 13-16.
- [25] 王伟宇,朱连军.基于 AHP-Fuzzy 的装备保障指挥信息系统指挥控制效能评估[J].兵器装备工程学报,2016,37(10): 66-71.
- [26] 瞿丰,黄高明,黎铁冰.基于模糊 AHP 的岸基侦察预警能力评估[J].高技术通讯,2016,26(6): 698-702.
- [27] 赵彬,黄志坚,朱启明,等.基于 AHP-FCE 法的指挥控制能力效能评估[J].火力与指挥控制,2018,43(5): 104-107.
- [28] 秦媛媛.作战实体的行为建模设计与实现[J].系统仿真技术,2016,12(2): 156-159.
- [29] 初阳,季蓓.海上作战体系仿真建模技术[J].指挥控制与仿真,2017,39(1): 73-76.
- [30] 张俊峰,薛青.基于 SOA 的联合作战推演系统与 C⁴ISR 系统链接框架研究[J].军事运筹与系统工程,2017,31(3): 42-46.
- [31] 孙光明,王立志.海上作战方案推演系统仿真模型体系研究[J].舰船电子工程,2016,36(8): 12-15.
- [32] 吴帅,张占月,张海涛,等.基于 Agent 的成像侦察体系建模与仿真技术研究[J].计算机仿真,2019,36(10): 59-64.
- [33] 杜伟,朱江,闻传花,等.基于多 Agent 的作战体系仿真模型构建[J].舰船电子工程,2016,36(10): 73-77.
- [34] 吴忠杰.基于复杂网络理论的岸防作战体系骨干网络研究[J].火力与指挥控制,2016,41(10): 66-69.
- [35] 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估方法[J].指挥控制与仿真,2018,40(1): 42-49.
- [36] 李仁见,司光亚,张昱,等.基于超网的体系效能可视化分析[J].系统仿真学报,2014,26(9): 1944-1955.
- [37] 孙成雨,申卯兴,盛浩,等.防空多传感器网络结构抗毁性优化设计[J].通信学报,2017,38(6): 118-126.
- [38] 石福丽,朱一凡.基于信息功能链的军事通信网络拓扑抗毁性评估方法[J].装备指挥技术学院学报,2011,22(6): 86-90.
- [39] 张强,雷虎民.基于小世界网络的防空反导系统复杂性研究[J].现代防御技术,2010,38(6): 1-11.
- [40] 胡鑫,王刚,马润年.基于动态贝叶斯网络的复杂网络抗毁性[J].火力与指挥控制,2017,42(11): 5-9.
- [41] 王伟,刘付显,邢清华.基于复杂网络的作战同步建模与优化[J].火力与指挥控制,2016,41(12): 91-95.
- [42] 杨哲,李曙林,周莉,等.基于复杂网络空战体系作战网络拓扑模型分析[J].计算机仿真,2013,39(10): 72-75.
- [43] 徐圣良,李旭涌.舰机协同防空作战系统网络复杂特性研究[J].舰船科学技术,2013,35(6): 69-74.
- [44] 姚华飞,赵光磊.基于灰色 AHP 的防空预警探测系统效能评估[J].国外电子测量技术,2013,32(5): 44-48.
- [45] 金琨,刘兆平.基于 AHP 的指挥控制系统效能评估改进方法[J].舰船电子工程,2015,35(1): 131-134.
- [46] 杜伟,沈寿林,徐新伟,等.基于依赖网络的作战体系指挥效能分析[J].兵工自动化,2017,36(10): 75-79.
- [47] 罗承昆,陈云翔,王莉莉,等.基于作战环和改进信息熵的体系效能评估方法[J].系统工程与电子技术,2019,41(1): 73-79.
- [48] 赵丹玲,谭跃进,李际超.基于作战环的武器装备体系贡献度评估[J].系统工程与电子技术,2017,39(10): 2239-2247.

(责任编辑:张培培)