

# 体系实验工程的探索与实践

杨镜宇

国防大学联合作战学院,北京 100091

**摘要** 体系(SoS)是“系统的系统、网络的网络”,是一个典型的多网铰链、跨域联动的复杂系统,贯穿物理、赛博、认知乃至社会等多个空间。体系实验作为体系研究的工程化解决途径和方法,需要明确整体、关联、弹性、博弈等体系化思维理念。通过总结大数据分析、模型辅助、行动仿真、对抗推演等基本实验方法,提出了“人机协同多重聚焦框架”“多域网信融合体系背景”“能力指标动态实时监测”“基于基线多维比对评估”等4个体系实验工程需要关注的重点问题,展望了体系实验工程未来可能的发展方向。

**关键词** 体系工程;体系实验;仿真

体系(SoS)作为典型的复杂系统,具有自主性、去中心化、关联性、多样性、涌现性等特征,由于环境、对手的不确定性,体系的研究需要采用数据分析、模型研讨、行动仿真、兵棋推演等多种方法手段综合施效,才能逐步解决。作为体系研究的工程化解决途径和方法,需要将体系的复杂性对抗性特征和实验方法相结合,一方面用复杂性理念来研究体系,采用体系化思维;另一方面,将工程化思想融入到体系研究过程中,创新体系实验工程方法。体系化思维是指导体系深入研究、量化研究、创新研究的方法论,体系实验工程是实施体系实验研究的一套实验分析流程方法。

## 1 体系化思维

体系工程的目标是体系能力生成,通过体系工程方法,找到体系能力生成的方案和途径。要形成新的能力,就要针对复杂适应性体系的解决方案,形成超越

原有的新框架、新秩序和新能力的途径。一是结构创新,通过设计体系的运作机制或者整体结构调整,打破原有体系的均衡,形成超越原有框架和秩序的新能力;二是局部替换,维持原有结构,针对局部节点/关系进行替换或者更新,是在原有均衡基础上的重塑。要研究体系,首要之举就是要形成体系化的思维模式。

### 1.1 体系的整体性思维,追求全局视角

作为典型的复杂系统,涌现性是体系的主要特征,通过局部的复杂交互呈现出宏观的、崭新的性质和效果。体系的整体能力不是来源于各组分之间的线性叠加,而是依赖于合理的体系结构和有效的运行机制形成的整体跃迁,只有通过网络将各作战单元功能互补、耦合增效,才能涌现出跨空间、跨级别、跨业务领域的体系作战能力,它比单个行为的简单累加要复杂得多。美军转型办公室指出:军事革命的本质就是体系的形成,就是涌现出新的具有整体性特点的作战能力。也就是所谓的战斗力生成,其目标是如何把组分

收稿日期:2018-11-11;修回日期:2018-12-01

基金项目:国防科技创新特区项目(17-163-11-ZT-001-02-01;18-163-11-ZT-001-020-01)

作者简介:杨镜宇,高级工程师,研究方向为战争模拟与体系仿真实验,电子信箱:yangjingyu\_ndu@163.com

引用格式:杨镜宇.体系实验工程的探索与实践[J].科技导报,2018,36(24):6-12;doi:10.3981/j.issn.1000-7857.2018.24.001

系统组合成一个整体,体现“1+1>2”的整体效果。

局部与整体的体系贡献是整体性关注的焦点。对体系中组分的变化对体系整体能力变化贡献大小的度量,是科学设计体系建设的需求和指标,建立体系宏观行为、整体能力与组分微观行为、个体能力之间的联系,对于体系分析有着重要的价值。例如,在论证发展某型重大武器装备或者设计某个重要项目时,要有整体性思维,着眼体系全局、总体筹划,克服目前单项建设中的本位思想,将建设的目标更加明确的定位于提升基于网络信息体系的联合作战能力和全域作战能力中,这样才能从宏观上把控体系的整体特征。

### 1.2 体系的关联性思维,强调网络链接

体系是“系统的系统”,更是“网络的网络”,体系本质上是一个物理信息系统(cyber physics system, CPS),是由物理、cyber和认知域各部分链接起来的网络,而这些关系描述了体系的构成和交互。当体系网络上的无数“点”与“链”连接起来以后,就可以减少冗余,实现配系的优化;可以减少迂回,加快信息流转的速度,从而带来体系的“倍增”作用;脆弱的链接关系,一旦被破坏就会产生级联失效连锁反应。因此,体系的链接比节点更重要,是一个体系之间形成整体的重要桥梁和途径,改变信息系统、变革编制体制,可能比增加武器提高效率更快。

网络化是关联思维的基础。体系中每个空间、每个领域,每个视角之间都可以通过网络关联。这种跨网络、跨空间、跨领域的关联关系,不同于传统因果关系,具有一定隐秩序、隐关联特征,需要通过相关性发现,超越因果直接去追求真相,利用相关关系,解决很多用传统方法很难解决的复杂性问题。美国国防高级研究计划局(Defense Advanced Research Projects Agency, DARPA)十分重视利用关联思维集成创新作战概念,最近提出的面向未来的马赛克战、蜂群作战、分布式作战概念等都不强调武器系统平台的性能提升,更强调通过对各种传感器、多域指控节点、有人与无人平台的快速拼装和灵活有效集成,实现大量低成本、单一功能系统的动态组合、密切协作和自主规划,在整体涌现出新质效果。另外,特别关注开发聚焦已知实体之间可靠连接,实现向后兼容并及时创建所需任何连接点,进而促成针对不同系统的快速智能组装与拆解,形成一个按需集成、极具弹性的体系,实现网络化作战以

生成非线性的“效果网”。

### 1.3 体系的弹性化思维,追求敏捷适应

体系的弹性是指体系在任务变化,面临攻击、失效或偶然故障条件下仍具有完成关键任务能力,强调通过自适应调整机制来应对任务变化、系统故障、威胁,保障任务的完成。这取决于体系的“活生”“适应”特征。一般来讲,体系随着时间的推移不断演进,组分系统不断通过适应环境学习成长,每个个体会随着环境变化而变化,因而会导致系统的整体结构随之改变。作战体系在初期即具有基本的功能,在使命牵引下,在人及软因素的参与下,体系在不同阶段形成了不同的能力。同时,体系结构在学习进化并不断成长,适应环境的变化不断改变连接关系和运作模式,使其更加敏捷,一般都是“边建边用,逐步完善”的。

DARPA十分关注未来弹性军事能力和作战概念设计,发布了远征城市作战弹性试验原型(PROTEUS)<sup>[1]</sup>,设计未来城市作战敏捷的指挥控制和战场管理(BMC2)能力。该项目通过构造弹性虚拟试验床环境(virtual tested environment),开发敏捷的决策辅助算法能力(弹性作战工具链),具备实时决策辅助,提升在线动态决策能力,特别是跨域指挥和实时态势认知能力,指挥员能够动态调配跨域资源并能虚拟化在线评估可能的效果。

### 1.4 体系的博弈性思维,关注对抗竞争

体系具有针对性,是动态变化的,战斗力只存在于体系之中,通过各要素运动产生,通过对抗展现<sup>[2]</sup>。因此,体系能力与运用环境和时刻、对抗对手有关,而不存在绝对能力。只有在相对于条件和敌人能力时,战斗力才有意义。体系能力评估要有特定环境和对手,不同对手和不同使命任务,能力是不一样的,具有“相生相克”的现象,必须有对手、有对抗、有博弈、有竞争才能够客观评价体系的能力。

体系能力的生成,必须强调“对抗”磨合,要突出对手,避免“红方思维”,通过与蓝军对抗激发出本方的潜能和创造性。按照对手决策习惯、文化以及作战方式出牌,避免按照本方的常规和常理来理解对手,这样可以为体系研究设置险局、危局。美陆军提出了“Deep Red Futures”项目,专门建立司令部红队,装备、编制、作战思想都是模仿俄军,目的是深刻模仿对手来提升自身能力<sup>[3]</sup>。

## 2 体系实验

体系实验是基于数据、模型、仿真、推演等进行体系能力的探索工程化方法、流程和手段。通过一个人机协同、虚实结合的综合体系实验环境,支撑作战体系设计和作战问题研究,用于分析论证新型装备对复杂战场环境的适应能力,新概念、新机理装备的作战体系融入能力,即将列装装备以及成体系装备的作战运用能力等。体系实验可以帮助理解体系中的各种可能性,发现体系运作方案中存在的结构缺陷、短板弱项、能力不足等问题,从而更好地把握和管理体系的不确定性,提高对体系运作机理的“深度认知”。

### 2.1 体系实验的应用模式

一般来讲,作战实验包括发现(discovery experiment)、假言(hypothesis testing experiment)、演示(demonstration experiment)这3种基本模式<sup>[2-4]</sup>。在作战实验基本模式基础上,体系实验可以进一步按照体系研究的需求归纳为体系能力生成、体系概念开发和体系方案评估等3种应用模式。

一是体系能力生成。主要从整体上回答组分系统数量规模以及整体结构的改变对体系产生的影响。包括新研组分系统对体系产生什么影响,能力有什么变化?目前体系能力在应对新威胁时的长处和短板分别是什么,影响全局的胜负手在哪里?对手体系发展变化时,对我方作战体系又会产生什么影响等。可以基于体系实验进行各种探索性分析,主要采用what-if这种假言式的实验模式,探索体系能力生成的效果和途径<sup>[5-7]</sup>。

二是体系概念开发。探索未来体系运作的模式、流程和方法。通过实验环境和实验数据,深入分析体系能力的动态演化,探索类似于联合作战体系中“全域作战”等新概念。可以基于人在回路的仿真推演进行概念细化和多视角分析,人不在回路的仿真试验发现能力边界,探索可能运用模式,不断循环迭代,开发出具有一定能力支撑的体系运作概念。

三是体系方案评估。采用“切片式”和“约束性”相结合的“探索性实验+多方案比对”运用模式。所谓“切片式”,就是针对体系运用进程的某些重要阶段,在时间维度将其切成若干“帧”;所谓“约束性”,就是在空间维度与运用构想保持大致一致,使其探索实验范围约束在其大致范围内。针对某一“切片”、对手某一方案

框架“约束”下进行体系空间的探索性实验分析,之后通过调整关键力量部署形成新的部署方案或者对手方案的调整,再进行相应体系空间的探索分析实验,形成某一切片、多个约束的多方案比对效果。这样就可以围绕核心作战运用问题,进行反复推演和仿真试验,通过循环迭代、逐步聚焦的过程,最终实现对问题的深入理解和洞察,为优化调整体系运用方案提供支持。

### 2.2 体系实验的基本方法

#### 2.2.1 大数据分析方法

体系是一种复杂系统,具有整体性、不确定性等特征,在研究体系运行规律时,无法预知哪些数据是真正有价值的。所以先进行全部采集,再基于数据进行分析研究。这不是简单地进行数据统计分析,而是采用复杂网络、机器学习、数据挖掘等模型,对体系实验的全过程数据进行重新组织,挖掘数据中隐含的各种价值。

#### 2.2.2 基于模型的研讨方法

体系实验是一个定性定量相结合的综合集成活动,需要利用分析人员的经验知识以及实验的计算能力,这就需要利用模型进行分析辅助。对作战场景进行不断变换条件,研究各种可能性,产生新结果,比较输入输出,最终得出所要结论。总体以定性方法为主,一般邀请领域专家采用研讨方式,综合各方意见形成评估要点,但同时也要采用头脑风暴法、德尔菲法、组合赋权法、模糊综合层次分析法、群体SWOT分析法等模型辅助,对实验目标、实验背景、实验指标的过程中体系构想等问题进行了综合研讨。

#### 2.2.3 探索性实验方法

探索性实验强调通过大量样本的仿真处理体系能力的不确定性,最典型的案例是“恐怖的海峡”<sup>[8]</sup>,恐怖的海峡I中探索了7个关键变量,每个变量分为3~5个水平,共1700个仿真样本,恐怖的海峡II<sup>[9]</sup>中将探索变量增加为10个。在体系实验的实践过程中专门开发探索性仿真实验模块,通过多个螺旋嵌套式大样本的探索性仿真实验,可逐步缩小参数空间,快速逼近结果,解决体系问题研究中面临的“体系大”“因果缺”“动态变”以及“不确定”等难题。

#### 2.2.4 对抗推演方法

对抗推演的关键在于参与推演的“人”,它强调“人”在回路,因为体系运用首先是人与人之间的对抗和博弈,制胜关键在于决策者。因此,体系实验需要在

红蓝博弈下进行研讨与推演,而非仅单方对抗、红红对抗。利用对抗推演组织体系能力评估,与一般的对抗训练不同,不需要进行全要素、全流程的推演,可以简化编组。同时采取背对背对抗与面对面研讨相结合的方式,双方可以面对面研讨双方的力量编成、阶段划分等内容,可以按照一个想定多个方案、一个方案多轮推演的方式,可以围绕一个或者相关联的几个问题设计行动计划,采取按计划推演与自由对抗相结合的方式

### 3 体系实验工程

体系实验作为研究复杂体系问题的科学范式,是一个非单项、非局部和非一次性的复杂实验活动(experimentation campaign)<sup>[4,8]</sup>。实验活动需要不断“试验探索”和“循环聚焦”,通过多个螺旋嵌套探索性试验,逐步缩小参数空间,快速逼近结果,达成实验目的,从而解决体系关系复杂、参数空间巨大的难题。体系实验活动涉及了不断循环的实验过程,涵盖了一系列相

关研究方法和实验手段,由多组不同领域的专业团队参与其中,为了更好地创新联合作战概念和联合作战能力,需要对这样一系列相关实验活动进行适当的设计和规划,对参与实验的领域专家和实验机构进行组织和协调,对体系实验活动中的实验方法设计和规划,对体系实验过程管理和控制,以及对实验团队组织和协调。

#### 3.1 人机协同多重聚焦框架

体系是复杂系统,因果关系不明确,体系实验必须突破传统牛顿科学体系下针对简单系统的从“对象”到“因素”到“实验”到“结果”再到“结论”的单向流程,需要构建支持“人机协同、循环聚焦”的体系实验活动框架。复杂体系实验活动管理遵循“多重聚焦”规律,宏观流程包括体系实验策划、编制体系实验大纲、早期实验评估、初级体系实验与评价、高级体系实验与评价等活动。而这些活动在微观流程都包括任务准备环、想定生成环、方案实施环、数据分析环和能力评估环和聚焦试验环6个环节。“多重循环聚焦”的复杂体系实验活动框架如图1所示。

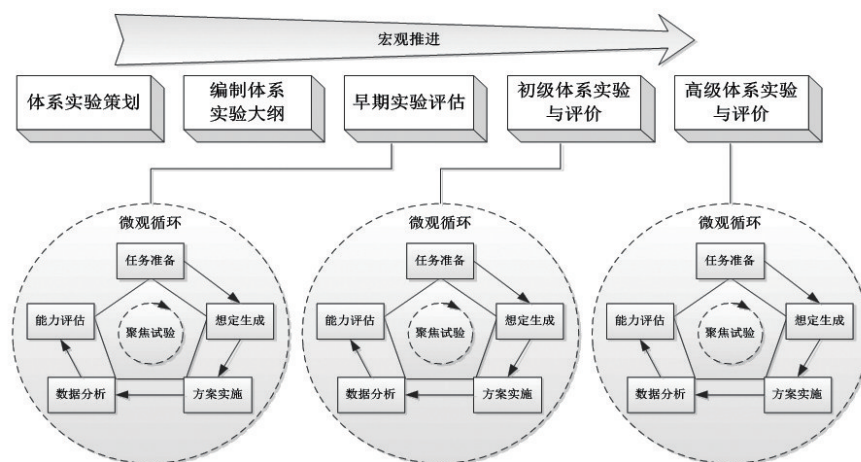


图1 “多重聚焦”的复杂体系实验活动框架

Fig. 1 “Multiple focus” complex SoS experimentation campaign framework

#### 3.2 多域网信融合实验背景

体系实验一定要在体系的背景下进行实验,因此需要装入我方及对手全部体系,以及相应的长周期体系行动,需要构建一个既定的对抗双方的“背景体系”,这个背景体系要反映联合作战行动特别是多域、全域作战行动背景,以及网络信息体系背景,为体系实验提

供全域作战和网络信息体系基础的实验条件。这样,任何测试对象都是逐步加入体系的,体系实验是从“已有体系”开始的,得到的是与现有体系的“变化差”。因此,它评估的是整个体系,而非某一局部的行动或系统。这样可以分析论证行动部署、组分系统等某一局部的改变会对全局体系产生怎样的整体影响,反映出

局部与整体之间的关系,从而辅助进行高层决策。实验背景特别强调全域和网信。全域指的是体系实验的背景要涵盖多个领域,要涵盖物理、网电、认知和社会空间,比如在作战体系实验中,就应该涵盖陆、海、空、天、电、网甚至是社会;网信指的是体系实验涉及的多个领域是一个通过网络信息体系关联起来的,一个真正的“网络的网络”,多网络链接起来的超级网络,比如作战体系,就应该涵盖基础的通信网络,以及在它基础上的传感器网络、指挥控制网络、交战交火网络、保障补给网络等。通过“网信”将“多域”链接起来形成了一个全域网信融合的体系实验背景,才能形成“放进去试验的是组分,看到的是体系的影响”的体系实验效果。

### 3.3 能力状态动态实时监测

体系实验活动必须全程动态测量体系能力,对体系的评估过程是在动态中完成的,这样更能反映实际对立双方的对抗博弈,能够分析出整个体系能力在对抗过程中的演变过程。对抗双方在仿真过程中不断地交互,以对手策略和决策思想为条件,不断按照当前态势和对手情况改变自己的状态,体系随着敌我双方的交战而动态变化。另外,体系是“活”的,能力不会一成不变。只有监测体系特定状态,才能判断当前体系能力水平。测量结果反映的是“某时刻、某条件、完成某任务、针对某对手”的体系状态,表达出来应该是动态

曲线,或多维空间中离散的点,而非单一值。其结果集将组成体系运行多维全时的数据仓库,成为对体系进行能力及效能评估的数据基础。比如对探测体系关键节点的判断是从几百万条探测数据分析出几万条首次探测数据,再对探测网中的关键节点进行判定,当发现异常或者关联后,再利用数理统计、OLAP分析、可视化分析、演化分析、回溯分析等方法进一步基于模型实现动态交互的再推、复推和回溯分析。就可以通过监测、回溯发现问题,而不完全是评价“好坏”,从而发现体系结构、能力和效能的问题,达成辅助体系研究目的。

### 3.4 基于基线多维比对评估

体系能力都是相对的,最常用的体系评估是采用“对比式”评估法,不设绝对值,而是需要根据评估需求进行不同方案、指标和约束条件的能力比较。这样就可以面向体系研究者和决策者,对实验过程和结果数据进行“多维比对”分析,最终得出体系的相对能力综合效果。从多视角直观展示体系整体效果,包括多维度、多视角、多空间;探索体系能力变化,反映体系重心及异常、脆弱性、相对性等,形成一种多维指标比对、相对能力综合分析的支持能力。因此,体系分析与评估首先要确定参照标准,这就是基线(baseline)。为规范比对实验对象和实验目标,规范了涵盖“背景想定-基线方案-焦点对象”的比对框架(图2)。

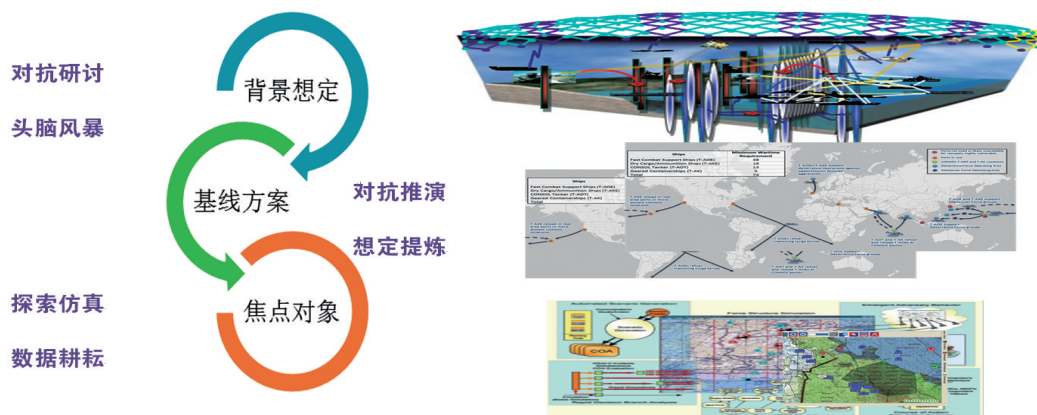


图2 背景想定、基线方案、焦点对象和聚焦实验

Fig. 2 Background scenario, baseline scenario, focus experimental object and focus experiment

背景想定是体系实验需要明确的特定边界,真实反映某个项目或者某种能力对体系的整体能力影响。比如作战实验就是要明确联合作战时空环境,包括:特定作战背景,突出战略指导、作战思想、作战地域和对

手;战区指挥体制,突出战区指挥机构设置、指挥流程等。双方兵力编成:敌我双方兵力编组、力量配置,以及双方作战概念等。背景想定的形成一般也是需要通过对抗研讨、头脑风暴聚汇专家经验知识形成。

基线方案是作为实验的“对象体系”而设计的面向特定使命任务的体系行动集合。在作战实验中,特定使命任务是指敌我双方基于一定战役企图和作战目的,因此需要明确两部分内容:一是网状兵力结构和指挥关系,体系对象需要按照网络化的指挥关系和作战编成将物理域、信息域和认知域中不同作战要素形成的复杂体系结构;二是双方对抗行动方案,行动方案(COA)中包含了对抗双方的作战思想和作战样式,双方的决策是为相关和决策文化,双方的作战概念和作战理念。因此,要形成合理的兵力部署和结构,需要采用想定提炼优化技术,通过静态计算和局部预先试验,避免“硬性”方面的不合理性,达到优化兵力部署、完善指挥关系的目的;要形成合理的兵力行动方案,需要采用对抗推演的方法,避免“软性”方面的非理性,达到完善想定预案、优化作战方案的目的。

焦点对象是预期对体系能够产生一定影响的关注对象,包括装备、部队等,既可以是新质力量、新型装备,也可以是遗留系统的改进和更新。基于“基线方案”通过对焦点对象的增、减、改可以得到一组焦点方案。针对“焦点对象”对体系能力影响进行的螺旋式递进聚焦实验,比对得到与“基线方案”的“变化差”,最终可以比对评估在不同条件下,完成不同任务的能力,并以一种谱系族的形式计算,展现出在多个侧面多个维度的体系能力分布。聚焦实验一般是采用探索性实验或者数据耕耘的形式进行多线索探索性实验,通过数万次仿真实验,在海量仿真空间中形成体系能力谱,与基线相比分析体系能力的短板缺项。

## 4 结论

基于体系化思维和体系实验工程的方法,开发了一个体系仿真试验床系统原型,积累了一套体系仿真试验床所需的基础数据和模型,取得了较好的效果。随着战争形态的急剧变化,智能化战争即将到来,传统

的OODA作战逻辑有可能被打破,体系实验将会面临新的问题和全新的挑战,诸如人机混合强化学习的实验设计、数据驱动体系实验引擎、智能实验数据分析、新领域新机理作战模型等,这些都需要进一步创新体系实验的方法与理论。

## 参考文献(References)

- [1] Paschkewitz J. Prototype resilient operations testbed for expeditionary urban scenarios (PROTEUS) [EB/OL]. (2017-06-15) [2018-09-22]. [https://www.darpa.mil/attachments/PROTEUS\\_Proposers\\_Day\\_DISTAR](https://www.darpa.mil/attachments/PROTEUS_Proposers_Day_DISTAR).
- [2] 杨镜宇, 胡晓峰. 基于体系仿真试验床的新质作战能力评估 [M]. 北京: 军事运筹与系统工程, 2016(6): 5-9.
- [3] Arney C, Coronges K, Fletcher H, et al. Using rare event modeling & networking to build scenarios and forecast the future [C]//Network Science Workshop (NSW), 2013 IEEE 2nd. New York, USA: IEEE, 2013: 31-36.
- [4] 杨镜宇. 战争分析仿真实验系统 [M]. 北京: 国防大学出版社, 2014: 78-89.
- [5] Duong D, Brown R, Schubert J, et al. Strategic data farming of military and complex adaptive simulations for COA optimization [C]//International Data Farming Workshop. Monterey, US: ID-FW, 2010: 1-7.
- [6] Horne G, Åkesson B, Anderson S, et al. MSG-088 data farming in support of NATO, final report [R]. Paris, France: NATO Science and Technology Office, 2014.
- [7] Gary E, Horne G. Data farming and quantitative analysis of cyber defense technologies and measures [J]. Modsim, 2016(33): 1-14.
- [8] Shlapak D A. Military aspects of the China-Taiwan confrontation and options for US policy [EB/OL]. (2000-07-04) [2018-06-27]. [https://www.rand.org/content/dam/rand/pubs/monograph\\_reports/2007/MR1217.pdf](https://www.rand.org/content/dam/rand/pubs/monograph_reports/2007/MR1217.pdf).
- [9] David A. A question of balance political context and military aspects of the China-Taiwan dispute [EB/OL]. (2009-02-22) [2018-04-25]. [https://www.rand.org/content/dam/rand/pubs/monographs/2009/RAND\\_MG888.pdf](https://www.rand.org/content/dam/rand/pubs/monographs/2009/RAND_MG888.pdf).

## Exploration and practice of SoS experiment engineering

YANG Jingyu

College of Joint Operations, National Defense University, Beijing 100091, China

**Abstract** As a "system of systems (SoS)" and "network of networks", SoS is a typical multi-network and cross-domain linkage complex system, involving physical, cyber, cognition and even social domains. SoS experiments are the ways and methods to solve the SoS engineering research problem. Firstly, the SoS' thinking concepts such as wholly thinking, connected thinking, relicense thinking, and gaming thinking are identified in this paper. Secondly, the basic experimental methods such as big data analysis, model assistance, action simulation, and war gaming are summarized. Thirdly, four key issues are put forward which need more attention, namely "multi-focus experimental framework for human-machine synergy", "multi-domain network communication system of systems experimental background", "dynamic real-time monitoring of system of systems capability indicators", and "baseline experimental for multidimensional comparison evaluation". Finally, the possible future development direction of SoS experimental engineering is discussed.

**Keywords** system of systems engineering; system of systems experiment; simulation ●



(责任编辑 徐丽娇)