

武器装备体系评估理论与方法的探索与实践

胡晓峰, 杨镜宇, 张 昱

(国防大学, 北京 100091)

摘要: 针对武器装备体系评估的需要, 围绕体系仿真试验床, 提出了基于复杂系统的体系理解、面向整个武器装备体系、坚持联合作战背景、重在体系贡献度量、采用复杂科学方法手段、依托积累的模型和实演的数据、建立全新的体系实验框架、达成辅助高层决策目的等 8 条新理念, 讨论了多重循环实验、体系指标挖掘、网状指标体系、能力状态测量、动态体系模型、焦点接入、基线实验评估、方案智能对接、大数据超网分析、结果多维比对、体系贡献度量、洞察辅助决策等 12 项关键技术。

关键词: 武器装备体系; 能力评估; 仿真试验床; 体系贡献度

中图分类号: V448.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-4080 (2018) 01-001-11

Exploration and Practice to the Theory and Method of Evaluating Weapon System of Systems

HU Xiao-feng, YANG Jing-yu, ZHANG Yu

(National Defence University of PLA China, Beijing 100091, China)

Abstract: For the needs of Evaluating Weapon System of Systems (WSoS), we put forward 8 new ideas about the System of Systems Simulation Test Bed (SSTB) as following: understanding System of Systems (SoS) based on complex system theory, facing the whole WSoS, taking joint operations as background, focusing on the measures of contribution degree of SoS, utilizing novel means of complexity science, relying on the accumulated models and live data, building a new simulation experiment framework, and achieving the goal of assisting the seniors making decision. In addition, we discussed 12 key technologies. They are multiple cycles experiment, data mining for the indexes of SoS, reticular index system, the measure of capability and status of SoS, dynamical models of SoS, fast access and simulation of the focused weapons, evaluation based on baseline, intelligent battle plans input, analysis based on big data and network of networks, multi-dimension comparison for the results, measure of contribution degree of SoS, and insight and assistant making decision.

Key words: Weapon system of systems; Capability evaluating; Simulation test bed; Degree of contribution for WSOS

0 引言

现代战争是体系和体系的对抗, 一体化联合

作战成为基本作战形式, 平台作战、体系支撑、战术行动、战略保障成为现代战争的显著特点。武器装备体系是作战体系在装备视角的反映, 研

收稿日期: 2017-08-22; 修订日期: 2017-10-08

作者简介: 胡晓峰 (1957-), 教授, 博士生导师, 主要从事体系作战与指挥训练研究。

究武器装备体系的能力和效能,以及各武器装备对体系的贡献,对于规划和建设武器装备体系,提升体系作战能力具有重要的现实意义^[1-2]

研究武器装备体系,首先要回答两个关键性问题。第一,武器装备体系的整体性评估问题,必须回答诸如“体系存在哪些结构性的缺陷和弱点?”“对手武器装备的发展对我方体系带来什么样的影响?”“未来的武器装备建设应该发展和淘汰哪些装备?”“在体系配置和规模设置上应该如何进行优化,以实现最佳的效费比?”等涉及全局性的问题。第二,具体武器装备的体系贡献度评估问题,必须回答诸如“某武器装备对作战体系的贡献度有多大?”“应不应该发展某种武器装备?”等问题。但是,众所周知,作战体系是典型的复杂系统,性质上具有涌现性,结构上具有进化性,能力上具有相对性^[3-4],必须基于“整体、动态、对抗”的方式才能评估。过去,很多体系评估方法将武器平台的评估方法平移到体系评估领域,但由于只适应于“局部、静态、单方”这样的简单系统,得到的结果往往经不起推敲,更经不起验证。这就使得传统基于数学分析、基于数据统计以及基于系统仿真的方法在体系评估上集体失效,体系能力评估方法正面临着理论、方法和平台三重挑战^[5]。

针对这些挑战,提出了体系仿真试验床的概念。体系仿真试验床,就是建立一个综合性体系对抗仿真环境,并将已有的作战体系模型作为基本背景放入,然后将需要进行评估影响的武器装备放入其中,并通过快速试验得出相关体系性效果,以达成支持决策的目的。换句话说,就是构建一个体系对抗仿真环境开展仿真实验,对武器装备体系中的重点装备、焦点装备进行加、减、改,来观察和分析会对体系带来什么影响。例如,己方增加或减少某种装备对体系能力有何影响,敌方增加或减少某种装备对我方体系有何影响,装备性能指标的改变会对双方的体系有何影响?

本文将简要介绍体系仿真试验床的设计理念,以及主要的关键技术和方法,探讨武器装备能力评估的有关理论、技术与平台方面的问题。

1 体系仿真试验床的设计理念

体系仿真试验床是一种新的研究武器装备体系的平台系统,蕴含了一系列研究武器装备体系

能力评估的新理念,而这些理念就是设计和研发体系试验床系统的基本指南。

1.1 基于复杂系统的体系理解

战争是典型的复杂系统,具有适应性、不确定性、涌现性和非线性等特点。将战争中对抗的体系当成复杂系统理解,更符合其性质,也是体系评估理念的核心转变。武器装备体系是装备与人相结合的有机整体,而不仅仅只是一些装备的简单组合。复杂系统思想颠覆了传统简单系统思想,将体系看成是由网络的网络构成的整体系统,因而必须从整体、动态、对抗的角度加以研究。对于简单和、单一结果、树状指标等概念,必须重新加以审视。复杂系统思想的引入,标志着体系评估理念的根本性变革。

1.2 面向整个武器装备体系

因为体系具有不可分解、不断演化等性质,所以必须从体系整体上进行评估,而不能采用先拆成局部再汇总的方式进行评估,因而体系实验必须面向整个武器装备体系。任何涉及体系的因素都尽可能地加入,才能准确地反映出体系的真实结果。与传统武器装备仿真最大的不同之处,就在于体系才是主角,评估的对象是体系而不是那些要加入体系的装备。虽然放进去的是某个装备,但研究的却是整个体系及其受到的影响。正是由于体系规模庞大,对体系的仿真平台提出了很高的要求。

1.3 坚持联合作战背景

体系作战能力牵引武器装备发展,坚持联合作战背景就是要将武器装备放到联合作战时空环境中评估,只有这样才能真实地反映出装备对体系、体系对作战的贡献和影响。武器装备发展归根到底是为作战服务的,作战需求就是武器装备发展的最终需求。因此,为作战服务才是体系评估的终极目标,作战概念的开发是武器装备发展的首要前提。另外,武器装备的发展不能“一厢情愿”,对抗才是评价武器装备能力的基本条件,只有通过对抗才能检验其是否合理。所以,单方评估不属于体系评估的范畴。

1.4 重在体系贡献度量

任何武器装备的发展都必须对体系整体能力有所贡献,但这并不是必然的结果。有些武器装备反而会对方体系产生不利的影

以从 4 个方面衡量体系贡献：一是是否增加能力类型，二是是否改进战技短板，三是是否提高运行效率，四是是否降低整体成本。这 4 个方面任何一个方面改变，都会被认为对体系产生贡献。体系贡献评价可通过体系作战综合效能和费效变化来表达体现，体系仿真试验床就是通过接入新装备进行实验，测量观察体系效能发生的变化，从而得知增、减、改及规模化某装备后体系发生的变化，即常说的体系贡献率和体系影响度。需要注意的是，敌方武器装备的发展也会对我方的体系产生影响，而体系贡献度量是相对于对抗整体而言的。

1.5 采用复杂科学方法手段

现代科学的进步为体系研究提供了更合适、更有效的理论方法和手段，其中最关键的是复杂网络理论^[5]、大数据方法和深度学习方法。这三者既可以反映复杂系统的 3 个侧面，也是解决复杂系统问题的 3 个不同手段，为体系评估提供了新的方法和途径。武器装备体系可以看成是各类武器装备系统组成网络的综合集成，是网络的网络，这样，复杂网络理论就成为研究体系的天然理论基础。大数据方法的出现，为避开体系仿真中最难的因果建模提供了条件，而采用深度学习方法，可以为理解和处理体系演化的不确定过程奠定基础。

1.6 依托积累的模型和实演的数据

所有装备都是逐步加入到体系之中，并影响体系发生演化，因此，多年积累的大量模型和实演数据，为建立基本体系模型和开展体系研究奠定了坚实基础。体系研究不能仅仅是几辆坦克、几架飞机的对抗，只有构建相对完整的体系模型，才是体系试验床成立的基础。人是体系中重要的组成部分，研究体系，特别强调真人参与的演习，只有这样才能贴近作战而非仿真。并尽可能将军事理论专家、作战参谋、一线作战人员和装备技术专家等都纳入体系之中，充分考虑参与人的数量、层次、角色。多年来大量仿真对抗演习活动积累并仍不断增加的模型和数据，充分反映了人的因素，正是研究体系问题重要而宝贵的资源。

1.7 建立全新的体系实验框架

体系是复杂系统，因果关系不明确，因而体系实验也就不能照搬传统实验的单向流程，而需要建立起符合整体、动态、对抗体系实验特点的全新实验框架。传统牛顿科学体系下的实验流程

针对的是简单系统，是一个从对象到因素到实验到结果再到结论的单向流程，而体系实验则必须解决体系大、因果缺、动态变以及不确定等难题，需要全新的体系实验框架，而这个框架往往以多重循环方式逼近结果。

1.8 达成辅助高层决策目的

体系仿真试验床最终要达成为高层决策服务的目的，所得出的结论要为高层所接受，就必须满足问题重要、结论可信、操作简易、领导明白等基本要求。这些，不仅只是需要简单的可视化，而是需要构建一个综合集成的研讨环境来为高层进行辅助决策，并能对体系评估结果进行因果因素的解释。

以上 8 个理念是设计体系仿真试验床的基本思想，也是对于体系评估新思想的简要概括和阐述，是指导构建体系仿真试验床的基础理论和根本出发点。

2 体系仿真试验床的关键技术

“理念只是思路，方法才是王道。”构建体系仿真试验床，有了基本理念作指导，还需要落实到具体的实现方法上，具体表现为以下 12 项关键技术。

2.1 多重循环实验

为开展整体、动态、对抗的体系评估，体系实验设计改变了传统实验单向流程方式，引入了人在回路、动态协同的多重循环实验框架。

多重循环框架由想定准备、想定提炼、仿真实验、数据分析 4 个小环和聚焦实验 1 个大环组成，如图 1 所示。想定准备环是在既定背景体系的基础之上，根据实验关注的内容对背景体系进行裁剪，并将需要实验的焦点装备接入背景体系，为仿真实验准备基础的想定数据。想定提炼环是在想定准备的基础之上，对想定数据做进一步检查、调整和优化，使得想定部署更为合理，想定空间更聚焦。仿真实验环是基于想定准备和想定提炼生成的基本想定，采用更改实体性能、更改实体数量、更改网络结构以及更改对抗行动等多种操纵变量的方法生成多个仿真方案，并对方案分别进行仿真运行。数据分析环是基于仿真实验的结果，制定分析所需的指标体系，收集数据并对数据进行对比分析和因果关系回溯，评价体系能力，研究体系能力形成的根本机理。聚焦实验环是试验床应用的整个周期，由前面提到的想定准备环、想定提炼环、仿真实验环、数据分析环 4

个基本环组成，它们构成了聚焦实验环的一个基本周期。聚焦实验环是从实验整体上逐步逼近结果的过程，研究人员可以根据实验的目标以及每

一次实验周期的结果进行判断，决定是否进行下一个周期的实验。通过这种螺旋上升、逐步逼近的方式，实现对问题的深入研究。

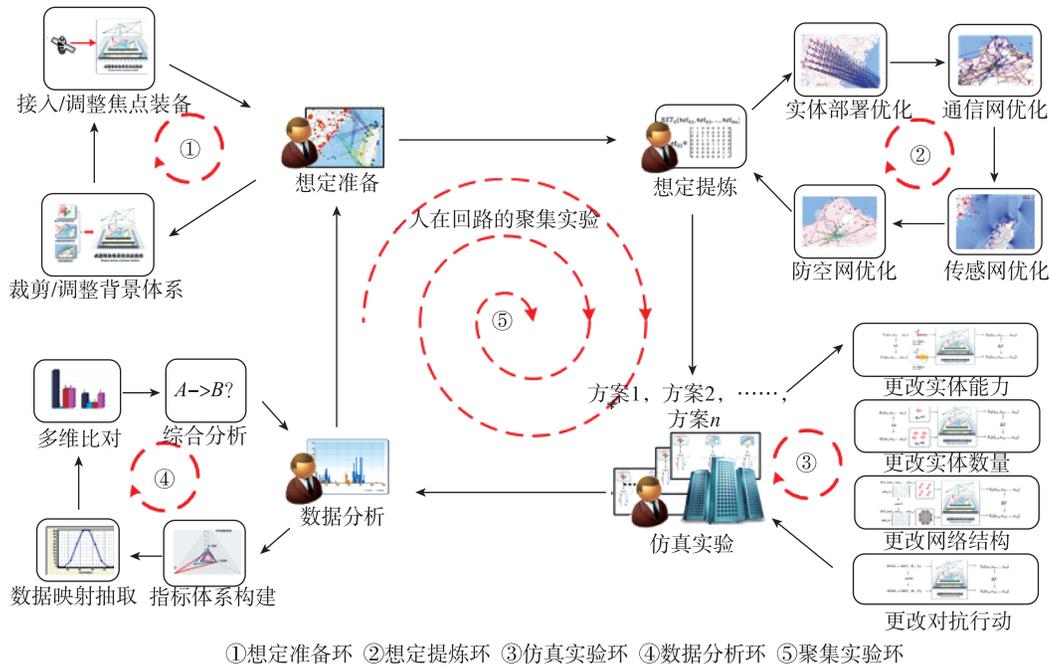


图1 多重循环实验框架

Fig. 1 Multiple cycles experiment frame

2.2 体系指标挖掘

体系评估既要用指标表示实验变量，也要用指标表达评估结果。过去选择指标时往往蕴含了一个假设，即所有指标都显而易见，并符合体系实际。但是，事实恰恰相反。

对体系能力的评估需要找到相应的指标，而要做到这一点并不容易。评价体系的指标有静态和动态两类。静态指标衡量体系静态、常态下的状态和能力，如多少架飞机、多少辆坦克等；动态指标衡量体系动态、对抗条件下的状态和效能，如人员伤亡多少、目标摧毁多少、任务完成多少等。

对体系指标的选取有两种途径：一是用户特别指定，也就是用户根据研究问题所想出的一些指标，特别指定的一些指标，如战损、战果、作战消耗等；二是通过实验数据挖掘，从大量的实验数据中找出具有代表性的指标。相比之下，后者更为重要。

如何得到这类挖掘的指标？体系仿真试验床给出了一种方法过程：首先概念建模，然后通过演习数据抽取相应的数据，得出一个初步的指标，

然后通过数据的分析来观察指标的敏感程度，挖掘关键指标并修正指标体系，再通过多次演习数据对指标进行校验和证实，并修正概念模型，得出较为完整的指标体系。根据得到的指标体系，就可以选定相应的指标获取系统特征测量值，对实际系统进行监控分析，对体系的能力和效能进行评估，最终得到分析结果。体系指标挖掘流程如图2所示。

2.3 网状指标体系

有了指标之后，还要看指标之间的关系。传统进行体系能力评估，一般是先建立树状指标体系，然后进行单项评估，最后再进行综合评估。确定树状效能指标体系需要以下几个原则：针对性、独立性、完备性、可测性、客观性、简明性等。其中最核心的是独立性和完备性，但这两个原则只能在系统静态或弱动态条件下才能做到，一旦体系处于动态对抗条件下，这些指标将会相互影响，很难做到完全独立。过去经常忽视这一点。因此，构建体系能力指标要实行3个转变^[5]：

1) 抛弃能力指标独立性假设，将指标树转为指标网。在复杂体系评估中，既然做不到指标的

独立性和完备性，就应该把它抛弃掉。各指标之间实质是网状结构而非树状关系，因为体系本身

就具有非还原的复杂性特点。图 3 为网状作战效能评估指标体系示意图。

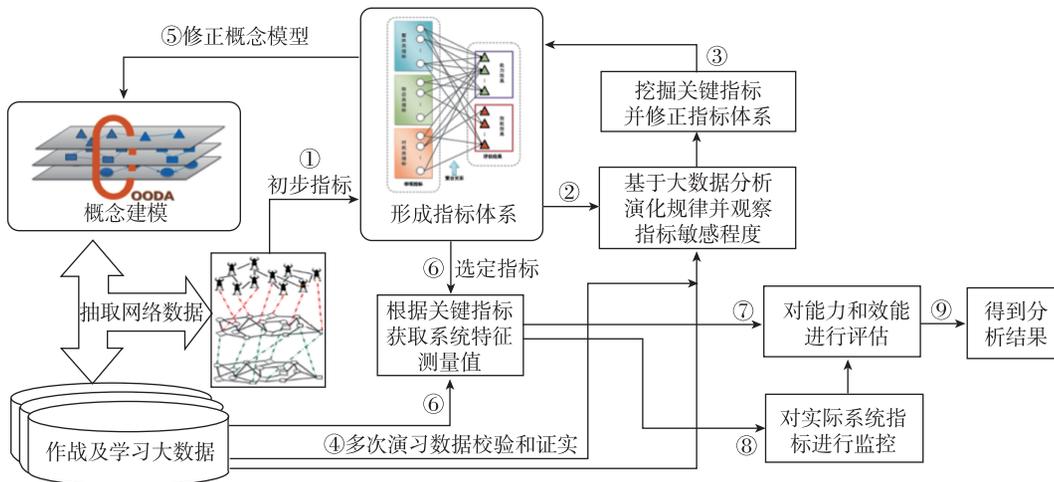


图 2 体系指标挖掘流程

Fig. 2 Process of data mining for the indexes of SoS

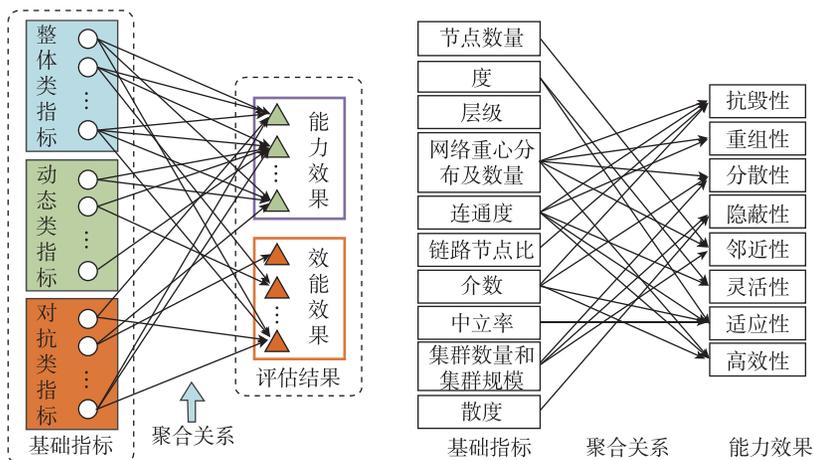


图 3 网状作战效能评估指标体系

Fig. 3 Reticular index system of capability evaluating

2) 抛弃能力可分解合并假设，将简单和转为涌现和。对于复杂系统来说，系统性质不可简单分解，不能用局部指标简单求和来得到整体效能，1 加 1 不等于 2。综合效能应该是涌现出的网络化整体性相变效果，这些效果会产生新性质。因此，下级指标需要在整体条件向上涌现综合出上级指标效果，而不能只是简单求和。

结果会多种多样，需要在多次仿真基础上才能做到。因此，需要的不是一次性的试验，而应该是不断动态的测量，换句话说，体系的状态也是时高时低，有起有伏的。

3) 抛弃能力结果单一性假设，将单一值转为结果云。体系能力的结果不会只有一个，而应该是一组结果，这组结果就称为结果云。在复杂体系能力评估中，结果与决策是相关多值变化的，

总体上看，网状的指标体系可以分为 3 个层面。第 1 层面，体系结构及演化类指标，即基于复杂网络参数的体系结构指标，如凯尔斯提出的节点及链数^[7]、路径水平、中立率、敏感度等；第 2 层面，体系任务对抗效能类指标，即按作战行动任务划分的相应指标，例如：感知类（如定位准确率等）、攻击类（如突防率等）、防御类（如主

动/被动拦截率、迟滞率等)；第3层面，体系能力整体类效能指标，即反映体系层面整体性能力指标，例如：体系OODA(Observation-Orientation-Decision-Action)时长，体系自同步及适应能力、体系结构脆弱性、装备的体系贡献率、影响率等。上述指标有些是我们挖掘寻找出来的，有些还是猜想，还没得到最后的证实，正在开展相关工作^[10-15]。

2.4 能力状态测量

用状态测量取代单值计算是全新的体系评估概念。因为体系是活的，能力不会一成不变。只有测量体系特定状态，才能判断某一时刻体系的能力水平。

对于体系能力可以采用两种测量方法。一种是静态测量，即通过获取体系静态、常态条件下的单元属性和状态来进行评估。例如用体系中有多少门炮、多少架飞机等来评估体系能力。另一种是动态测量，即通过获取对抗条件下的结果来进行评估。例如用对抗中损失了多少装备、伤亡了多少人员、任务完成了多少等来评估体系能力，反映的是体系某时刻的实际能力。

对于武器装备体系研究来说，不仅需要测量作战体系中兵力多少、装备多少等一些静态的、资源性的指标数据，同时更应该测量收集诸如单位时间探测次数、打击效果率、OODA环反应时间等动态的和深层次的指标数据，只有对这些指标全面收集掌握，才能为发现和掌握体系运行的规律和揭示体系能力形成与演化机理创造基本条件。

如何得到这些测量数据？这就需要标识世界。可以把标识世界看作一把量化体系的尺子。现代信息技术的普及发展，为标识社会、战争或体系等复杂系统数据，提供了必要的条件和基础。传统标识依靠人工录入信息，而现代标识则依靠各式各样的传感器、移动终端、手机、穿戴设备等。未来如果每个武器装备都配备采集器的话，就可以为数据测量提供丰富的物质手段，当前美国国防部就规定所有的装备平台甚至民船都必须安装数据采集器。对于体系仿真试验床来说，可以为体系中的每一个武器装备构建一个仿真数据标识代理，来不断地测量获取这些武器装备的位置、状态、行为等实时数据信息。

体系测量的结果是什么？有两个初步的判断：一是结果云，二是幂律分布。体系测量结果反映

的一定是某时刻、某条件、完成某任务、针对某对手的体系状态，当所有测量的数据组合起来时就会形成一个多维的全时数据仓库，表现出来就应该是一个散布的结果云，而非单一值。此外，结果云中的散布不是一种简单系统的散布，即不是高斯分布或者泊松分布，而是一个和人密切相关的散布，是人的行为分布，也就是幂率分布。当得到这些测量值的分布后，就可以知道体系的能力最高值能到多少，最低值能到多少，中值是多少，平均值是多少，就有了评估体系的能力的范围和标准。

2.5 动态体系模型

体系试验床的模型应该是动态的，指的是模型本身可以随着环境变化而变化，因为只有这样才能符合复杂系统的特点，这在原理上是平行系统的概念。所有的真实世界的建模最后都要通过现实世界进行修正的一个过程，那么这种修正是导致模型在演化过程，在仿真过程中间它也不断变化，而不是一成不变^[8]，如图4所示。具体实现上来说，对于实体行动模型，可以依托动态参数调整，来适应作战实体变化；对于组分系统模型，可以依托不同接入方式，改变或扩充新型作战系统；对于体系网络模型，可以依托动态作战编成和有人任务交互，适应体系变化。所有的这些变化都会导致动态体系模型的成立。

体系模型的构建包括3个方面：背景体系、对象体系和焦点装备。背景体系又分为环境体系和对手体系，环境体系描述整个作战仿真对抗的地理环境、气象环境、电磁环境等基础环境；对手体系是所要研究的对象体系的对手方所拥有的作战体系。对象体系则是要关注和研究我方或敌方的体系。焦点装备是在仿真实验中加、减、改的具体装备。因此，背景体系和焦点装备最后都对对象体系施加影响，对象体系及其组成和演化过程才是研究的目标和重点。

2.6 焦点接入

焦点装备是对体系能够产生一定影响的关键装备。焦点装备既可以是全新装备，也可以是改进装备，或者附属装备，具体来说，可以是新型飞机，也可以是装备改型或升级以及吊舱或弹药等。在利用体系仿真试验床开展仿真实验时，需要根据不同情况对焦点装备进行快速建模和接入，然后开展仿真，如图5所示。

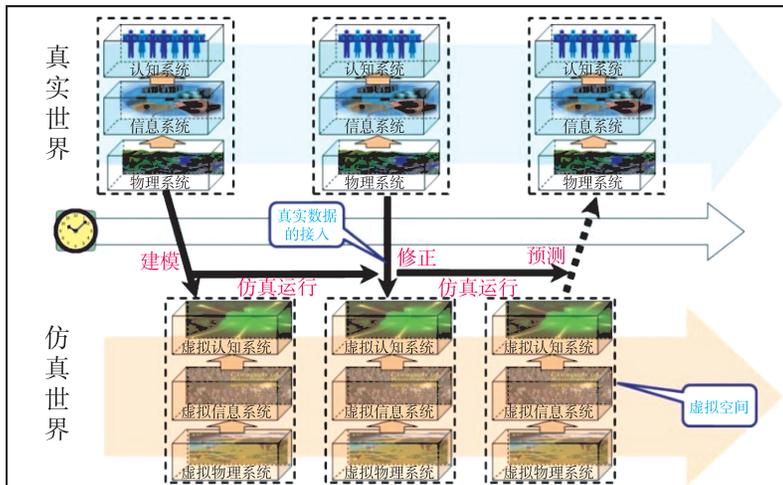


图 4 不断修正的真实世界与仿真世界的平行系统

Fig. 4 Continuously improved parallel systems of real and simulated scenarios

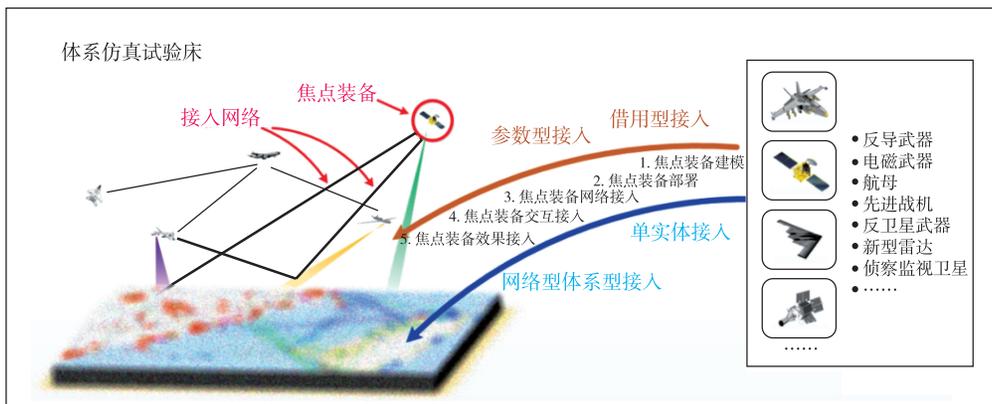


图 5 焦点接入快仿示意图

Fig. 5 Simulation schematic of focused weapons

焦点装备的接入有 4 种类型。一是参数型接入，就是通过将已有的武器装备模型更换参数，然后重新放入仿真模型中运行；二是借用型接入，就是借用原有的模型生成新的装备模型；三是新型单实体接入，就是从新模型库中选择一个原来没有的模型放入体系之中进行仿真；四是网络型、体系型接入，就是通过将外部的仿真模型或系统通过互联仿真运行的方式接入到体系仿真之中。

此外，模型互联的方法有数据交换、主从跟随、并行互联 3 种方法。数据交换系统间通过数据交换同步实现；主从跟随通过某一模型单向随动另一模型同步实现；并行互联通过严格事件交互进行同步，一般依托仿真中间件实现。

2.7 基线实验评估

体系能力是相对的，所以体系评估首先要确定参照标准，这就是基线（Baseline）。

首先要明确 3 个概念。一是背景想定，是描述作战区域、任务和对手的基本战争环境条件，也就是体系对抗仿真中的基础环境；二是基线想定，是基准条件下完成基准作战任务的想定，也就是参照标准；三是焦点想定，是针对特定问题评估的特殊行动想定描述，也就是测量的对象。

在背景想定固定情况下，基线想定和焦点想定的设计是关键。一般来说，在体系仿真实验设计阶段，会设计一组实验方案。其中背景想定和基线想定构成一个基本方案，通过仿真分析会得到一系列的任务效能值，这些值就是后面比对分析要用到的标准值；在基本方案的基础上，可以通过增加不同的焦点装备组合来形成其他方案，通过仿真可以得到其他方案的任务效能值。然后，可以将不同方案仿真所获取的任务效能值与基本方案的任务效能值进行比较，去分析体系产生的变化，从而评估体系的能力。基线实验评估方法如图 6 所示。

方案	试验体系的组成	任务1	...	任务 m	综合效能
背景想定+基线想定 (Baseline)	背景体系+对象体系	x_{11}	...	x_{1m}	z_1
背景想定+基线想定1	Baseline + A(焦点A)	...	-	...	z_2
背景想定+基线想定2	Baseline - B(焦点B)	...	-
背景想定+基线想定3	Baseline + A + B + ...	x_{n1}/y_{n1}	...	x_{nm}/y_{nm}	z_n/ρ_n

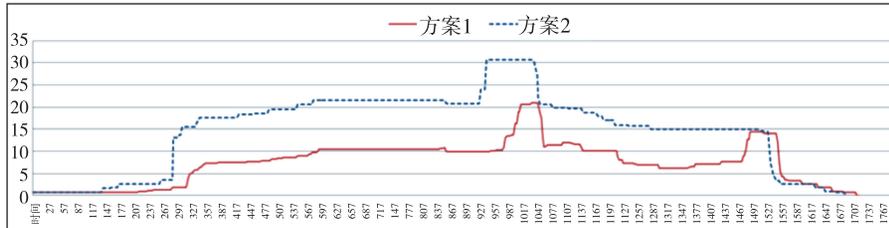


图6 基线实验评估

Fig. 6 Baseline experiment evaluation

可以看出，基线想定的集合本身就是宝贵的资源。基线想定越多，体系仿真试验床可仿真实验的范围就越大，适应能力也就越强。

2.8 方案智能对接

体系试验中最大难题在于作战方案的形成和运行。因为作战行动及结果有不确定性，会导致行动偏离预想，对抗各方不能有效对接，还会出现组合爆炸的现象。也就是说，随着作战仿真时间的推移，初始制定的作战计划会演化出多种情况，而这些新的情况会继续演化出更多的情况，很快就会出现非常复杂的混沌现象。因此，在仿真实验中难以预测未来完整的作战行动分支。目前，对于单方行动或者低对抗条件下或者短时间内的行动，以及低层次或者低复杂度的行动组合还可以沿用传统的方法，例如像单方火力打击行动的效能评估，导弹只要打出去就行，可以不考虑对抗过程；但是对于再复杂一些的行动，特别是对抗行动发生时就需要采用新的方法。

作战方案的形成与运行难题，难点在于如何正确判断战场态势、如何正确理解作战意图以及如何正确处置情况。解决的途径有两种：一是采用演习式推演方式，以人在回路避开智能难题；二是强化系统人工智能水平，从根本上解决自动对抗问题。对于后一种途径来说，深度学习技术的快速发展为其提供了可能。2013年，Google Deepmind团队展示了基于深度学习网络与强化学习模型，实现了游戏的自主学习和经验的累积，达到或远远超过专业游戏人类玩家水平^[16]。因此，基于

深度学习的态势理解、博弈网络成为解决自动对抗问题的可能途径，我们也正在开展相关的研究工作。

2.9 大数据超网分析

超网 (Super Networks)，也称为网络的网络 (Network of Networks, NON/NetONets)，是由不同结构、不同功能的网络通过某种关系进一步连接形成的更高层次的网络。超网的概念源于国家关键基础设施安全的研究，是复杂网络理论的新发展，对应到军事领域中，可以将武器装备体系看作是由各传感网、指控网、通信网、火力网、保障网在一定的作战规则流程下形成的更高层次的网络，这些网络在战时协同运行，相互关联，相互影响，相互制约，共同形成体系作战能力。将体系看成超网，将不同性质的网络区分对待，既能反映出体系各功能网络的内部结构，又能反映出不同网络之间的依赖关系和级联关系，可以更加精细地描述体系内部的组成以及运作流程，更有利于揭示一些体系内在的机理。

根据超网模型可以对试验床产生的大数据进行深度的分析和挖掘。基于大数据进行体系分析，基础在数据，重点在结构，核心在行为，目的是挖掘出体系的动态运行规律，因此需要重点关注作战行为规律、大数据的积累、超网模型指导以及整体动态分析。按照这种思路，依托仿真演习大数据，利用相应工具进行了一些探索性研究，并得出了一些很好的结果。例如，在体系结构分析方面，我们发现作战体系的扁平化趋势、体系脆弱性节点等；在体系运行分析方面，我们发现

了体系指挥周期变化、自同步协同效果；在体系人因分析方面，发现态势感知影响评估、态势认知影响评估等^[9,12,15]。

2.10 结果多维比对

实验结果分析主要采用多维比对方式，从各个维度以可视化方法进行。多维比对是对测量获取的指标数据，按照不同的仿真实验方案、不同的指标、不同的时间空间进行多角度比较的过程。多维比对是对仿真结果的观察和研究，通过多维比对，可以分析不同指标之间的关联关系，可以查找体系对抗演化过程中的异常点，可以比对展示不同方案对体系能力的影响。

我们提出了方案-指标-时空多维比对模型 (Scenario-Measure-Time/Space Multidimensional Contrast Model, SMT-MCM)，并以此引申出方案-时空 (Scenario-Time/Space Mode, STM)、方案-指标 (Scenario-Measure Mode, SMM)、时空-指标 (Time/Space-Measure Mode, TMM) 3 种比对模式，如图 7 所示。SMT-MCM 从方案维、指标维、时空维 3 个维度对仿真结果和过程进行比对。方案维是指将不同仿真方案作为区分的维度。一般来说，在仿真实验会准备一个基本案，也就是一个基本仿真想定输入方案，以此为基础，对装备实体的性能、数量、体系网络、作战行动等进

行更改而形成不同的仿真方案，分别进行仿真实验并收集数据，可用于不同仿真实验结果和过程的对比。指标维是指将不同的指标变量作为区分的维度。在图 7 中，MOM1、MOM2、MOM3 等分别表示不同的指标，这些指标由分析人员根据不同的实验目的和仿真内容确定，并由这些指标共同组成了指标集合形成指标维。时空维是指将仿真过程中时间和空间组合作为区分的维度。时空维描述了仿真从开始时间到结束时间的所有空间的组合。

方案-时空模式是从方案维和时空维进行切片形成的一种比对模式，即固定某一方案和某一时空，对同一方案同一时空下的不同指标进行比对。当空间固定时，方案-时空模式可以用于不同时间指标序列之间的关联分析，可以通过这种比对发现不同时间序列指标之间的同向、反向、滞后等关系。

时空-指标模式是从时空维和指标维切片形成的一种比对模式，即固定时空和指标，比对同一时空同一指标不同方案下的变化情况。时空-指标模式一般用于不同方案之间的对比分析，通过这种比对发现不同方案造成的指标的差异，是最为常用的一种模式，也可以用于不同指标之间的关联性分析，发现不同指标之间的同向、反向、滞后等关系。

方案-指标模式模式是从方案维和指标维切片形成的一种比对模式，即固定方案和指标，比对同一方案同一指标在不同时间或空间中的变化情况。方案-指标模式一般用于仿真过程中一段时间内指标的变化分析或者不同空间下的指标变化分析，通过这种分析可以查找体系指标的异常点，从而进行进一步深入分析和因果回溯。

2.11 体系贡献度量

构建体系仿真试验床开展体系仿真实验和进行体系能力评估，目的是为高层决策服务。体系贡献率和影响度都是针对战略需求的度量指标，需要由试验床测量数据综合而来。以下分别是体系贡献率和影响度的计算公式：

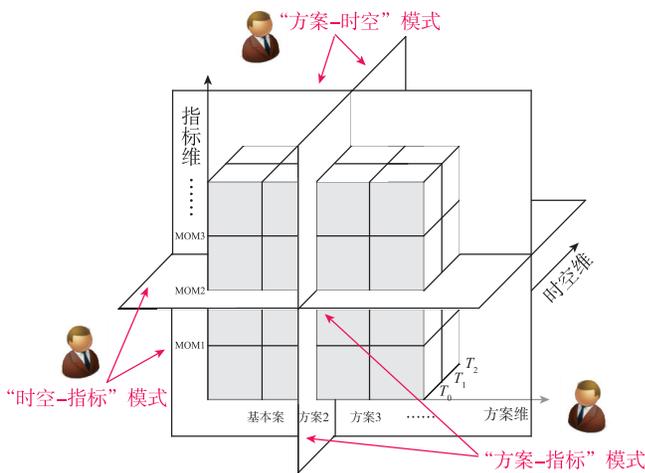


图 7 多维比对模式

Fig. 7 Multidimensional comparison mode

$$\text{组分系统 A 的贡献率} = \frac{\text{体系能力}_{\text{包括组分系统A}} - \text{体系能力}_{\text{不包括组分系统A}}}{\text{体系能力}_{\text{不包括组分系统A}}} \times 100\%$$

$$\text{组分系统 A 的影响度} = \frac{\text{体系能力}_{\text{包括组分系统A}} - \text{体系能力}_{\text{不包括组分系统A}}}{\text{体系能力}_{\text{包括组分系统A}}} \times 100\%$$

贡献率模式有多种，如关键作用模式、固定作用模式、比例非线性模式等。关键作用模式，又称为脉冲模式，就是某一件装备的加入会对体系能力产生重大影响，极大程度提升体系的作战能力，如核武器、航空母舰等对体系的影响效果；固定作用模式，又称为线性模式，就是随着装备

数量的增加，体系能力几乎呈线性增长，如常规导弹、主战飞机、主战坦克等对体系的影响效果；比例非线性模式，又称为非线性模式，就是某系统的加入和数量增加对体系能力的影响呈非线性增长，如指挥控制系统对体系能力的影响效果。贡献率模式如图8所示。

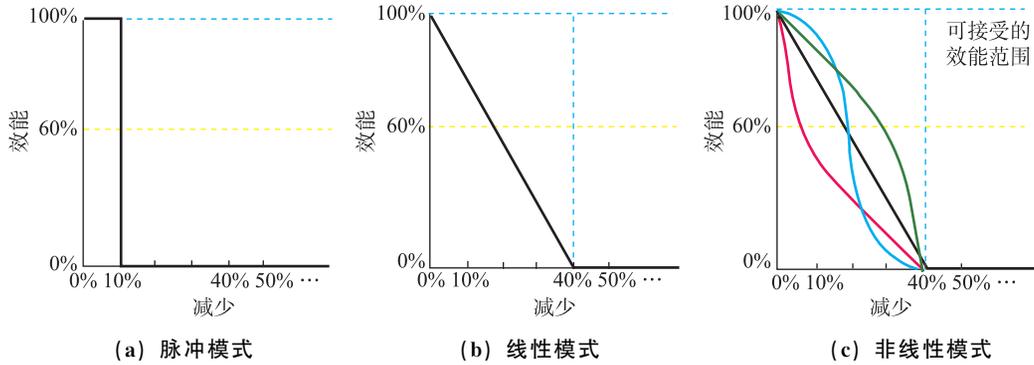


图8 3种贡献率模式

Fig. 8 Three contribution degree modes

2.12 洞察辅助决策

体系评估结果最重要的不是好坏，而是发现。发现体系结构、能力和效能上的问题，提高对体系的认知，是辅助体系建设决策的最终目的。这是一种洞察力和顿悟，将对武器装备体系发展战略产生重大影响。体系试验床就是一个为高层决策提供可操控的综合集成研讨环境，是钱学森综合集成研讨厅思想的一种具体实现，研究者可以在这个环境中根据需要开展研讨规划实验方案、改变参数、增加减少装备、快速仿真、多维比对

等活动，评估分析体系能力。

研究武器装备体系，关键是要弄清楚体系能力形成的根本机理，找到影响体系能力形成和变化的关键因素。这就需要对体系仿真过程中出现的异常情况、关键行动进行重点分析和因果回溯分析，从而实现对体系能力形成与变化机理等深层次问题的研究，如图9所示。例如通过对作战体系结构演化发现，指挥网络呈严格树状结构，但交战开始后，其作战网络呈现扁平化，并出现抱团特性，发现军旅营制、按作战任务编组可能更为合理^[9]。

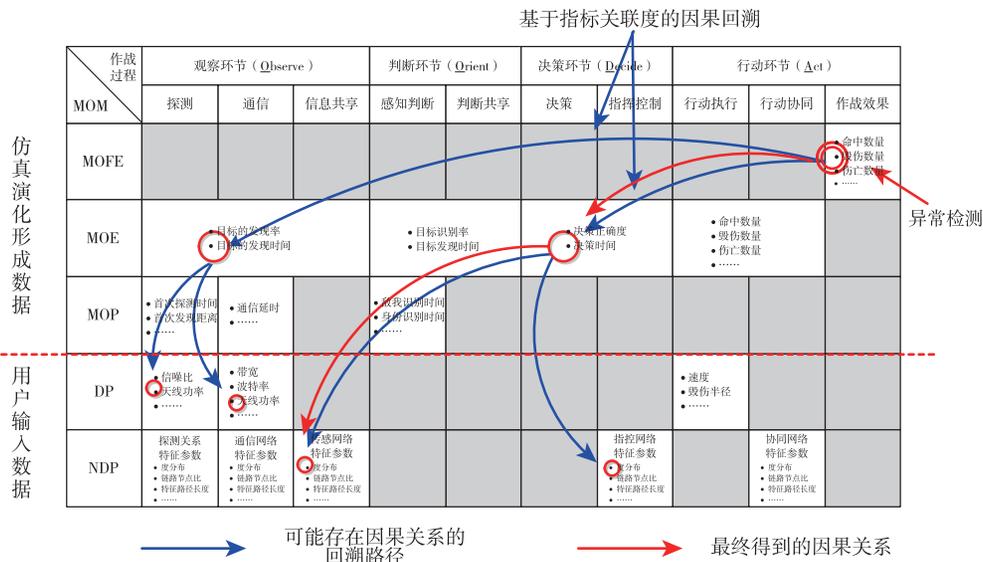


图9 因果回溯分析

Fig. 9 Cause-result retrospect analysis

3 结束语

在相关课题的资助下, 经过近 5 年的艰苦攻关, 我们基本完成了体系仿真试验床系统的建设, 并基于该系统开展了一系列的典型应用仿真实验, 得出了一些有价值的开创性成果和结论。本文提到的 8 条设计理念和 12 个关键技术是构建仿真试验床过程中的成果之一, 也是仿真体系试验床特有的创新性和代表性观点^[17-21]。

武器装备体系能力评估是当前的热点和难点, 面临理论、方法和平台的三重挑战, 体系仿真试验床的提出是应对挑战的一次重要探索和尝试。换句话说, 弄清楚体系能力评估到底如何做, 就是很大的进步。体系试验床的设计必须理念更新先行, 有正确的理念才会找到正确的途径, 才会找到最合适的方法。用复杂系统思想看待体系的性质, 是理念最核心的变化, 在整体、动态、对抗条件下评估, 是方法最本质的内容。体系试验床的实现需要关键概念和技术的创新, 才能保证理念落到实处, 得出正确的评估结果。只有核心概念和技术形成闭环, 才能构建满足体系仿真实验要求的原型系统。

最后做 3 点说明。1) 体系仿真试验床不是要取代武器系统的研发仿真, 前者在于为体系论证提供辅助, 帮助决策, 而后者是为了武器装备研发, 注重装备技术和工程。2) 体系仿真试验床的方法有其特定的应用要求和范围, 不能简单地推广到任何武器装备系统仿真中, 但是它的理论、方法和技术可以为其他仿真系统设计作参考。3) 体系试验床研发还有很多难题, 比如基于深度学习的指标挖掘、结果分析和态势理解等问题, 还需要我们付出更艰苦的努力。

参考文献

- [1] 胡晓峰. 战争工程论——走向信息时代的战争方法学 [M]. 北京: 国防大学出版社, 2012.
- [2] 胡晓峰, 杨镜宇, 司光亚, 等. 战争复杂系统仿真分析与实验 [M]. 北京: 国防大学出版社, 2008.
- [3] 胡晓峰. 战争复杂性与信息化战争模拟 [J]. 系统仿真学报, 2006, 18 (12): 3572-3580.
- [4] 约翰·霍兰. 涌现——从混沌到有序 [M]. 陈禹, 等, 译. 上海: 上海科学技术出版社, 2001.
- [5] 胡晓峰, 张昱, 李仁见, 等. 网络化体系能力评估问题 [J]. 系统工程理论与实践, 2015, 35 (5): 1317-1323.
- [6] Albert R, Barabási A L. Statistical mechanics of complex networks [J]. Reviews of Modern Physics, 2002, 74 (1): 47-97.
- [7] 杰夫·凯尔斯. 分布式网络化作战——网络中心战基础 [M]. 于全, 译. 北京: 北京邮电大学出版社, 2006.
- [8] 胡晓峰. 战争复杂性与复杂体系仿真问题 [J]. 军事运筹与系统工程, 2010, 24 (3): 27-34.
- [9] Liu Y, Hu X F, Wu L. Evolutionary analysis of operation System-of-Systems (SoS) network based on simulated data [C]. Web Information Systems and Applications Conference (WISA), IEEE, 2012: 176-179.
- [10] 胡晓峰, 贺筱媛, 饶德虎. 基于复杂网络的体系作战协同能力分析研究方法研究 [J]. 复杂系统与复杂性科学, 2015, 12 (2): 9-17.
- [11] 胡晓峰, 许相莉, 杨镜宇. 基于体系视角的赛博空间作战效能评估 [J]. 军事运筹与系统工程, 2013, 27 (1): 5-9.
- [12] 饶德虎, 胡晓峰, 吴琳. 基于复杂网络的体系作战指挥周期研究 [J]. 电光与控制, 2014, 21 (10): 15-19.
- [13] 许相莉, 胡晓峰. 一种基于复杂网络理论的网络空间作战效能评估指标体系框架 [J]. 军事运筹与系统工程, 2014, 28 (1): 33-41.
- [14] 季明, 马力. 面向体系效能评估的仿真实验因素与指标选择研究 [J]. 军事运筹与系统工程, 2014, 28 (3): 61-65.
- [15] 马力, 张明智. 作战体系网络化效能仿真分析方法 [J]. 系统仿真学报, 2013, 25 (S): 301-305.
- [16] Mnih V, Kavukcuoglu K, Silver D, et al. Human-level control through deep reinforcement learning [J]. Nature, 2015, 518 (7540): 529-533.
- [17] 张昱. 武器装备体系仿真实验床方法与关键技术研究 [D]. 北京: 国防大学, 2013.
- [18] 马力. 赛博空间背景下网络化体系能力仿真评估模型研究 [D]. 北京: 国防大学, 2014.
- [19] 饶德虎. 基于复杂网络理论的体系作战指挥与协同机理研究 [D]. 北京: 国防大学, 2014.
- [20] 季明. 面向体系能力仿真实验的试验床实验设计研究 [D]. 北京: 国防大学, 2015.
- [21] 王飞. 基于 PRI 超网络模型的体系能力仿真实验分析方法研究 [D]. 北京: 国防大学, 2015.