

文章编号: 2095-4980(2023)03-0325-07

电子信息装备体系贡献率综合集成法评估

周 波, 孔德培, 王建路, 王雷钢, 戴幻尧

(63892 部队, 河南 洛阳 471003)

摘 要: 体系贡献率是电子信息装备体系效能评估的一项重要指标。以一个典型的电子信息装备体系为例, 研究电子装备体系的基本内涵, 分析电子装备体系的开放性、动态演化性等基本特性, 提出运用系统论的方法来研究电子信息装备体系贡献率评估的问题。基于系统论的综合集成方法, 以雷达装备为例研究了典型电子信息装备体系贡献率评估的综合集成法流程, 详细给出流程中的 3 个重要步骤, 主要包括电子信息装备体系贡献率的内涵、本质特点、作用模式等的定性综合集成形成初步判断和认识, 体系贡献率定性定量相结合评估指标选取与评估, 以及体系贡献率评估指标分析验证实现从定性到定量的综合集成方法论, 为电子装备试验体系贡献率试验与评估提供借鉴和参考。

关键词: 体系; 体系对抗; 装备试验; 体系贡献率; 综合集成方法

中图分类号: TN97

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2020152

Meta-synthesis method of SoS contribution rate for electronic information equipment

ZHOU Bo, KONG Depei, WANG Jianlu, WANG Leigang, DAI Huanyao

(63892 Unit of PLA, Luoyang Henan 471003, China)

Abstract: The evaluation of System of Systems(SoS) contribution rate is an important index for the effectiveness assessment of electronic information equipment SoS. Taking a typical electronic information equipment for example, the essence of electronic information equipment SoS is investigated, and its complexity such as openness and dynamic property are analyzed. It is pointed out that the contribution rate of electronic equipment SoS should be evaluated by systematic theory. Based on the meta-synthesis method, the integrated method process of contribution rate evaluation of typical electronic information equipment SoS is studied by taking radar equipment as an example, and three important steps of the process are given, including the qualitative integrated judgment and understanding of the connotation, essential characteristics and function mode of contribution rate of electronic information equipment SoS, the indexes selection and evaluation combined with qualitative and quantitative evaluation of SoS contribution rate, as well as the comprehensive integration methodology from qualitative to quantitative analysis and verification of system contribution rate evaluation indexes, which provides reference for contribution rate test and evaluation of electronic equipment test system.

Keywords: System of Systems; SoS combat; equipment testing; SoS contribution rate; meta-synthesis method

随着电子信息装备体系化、系统化的发展趋势日益明显^[1], 构成电子信息装备体系的各组分系统或装备之间的相互关联越来越强, 而大量实践表明在体系对抗条件下, 很多经过鉴定的电子信息装备单独工作时性能良好, 但是成体系工作的时候作用发挥有限甚至性能下降很多^[2]。这说明对于某一型装备来说, 不仅要要看其是否达到技术性能指标, 还要考核它对整个体系的贡献程度^[3]。有的电子信息装备可能本身的技术水平不低, 但是如果它对整个体系对抗能力的提升没有太大作用, 并且费用还不低, 这样的装备是否还有必要发展, 就需要进行深入的

收稿日期: 2020-04-07; 修回日期: 2020-06-02

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61301236); 国家社科基金资助项目(16QJ003-093)

研究，即需要把电子信息装备放入体系对抗的环境中，全面摸清其体系贡献率等效能底数。

关于贡献率这个概念及其评估方法，过去国内的研究主要集中在经济领域的金融和企业项目管理中，成果较为零散，且应用领域差距较大。关于装备体系贡献率的评估，国内有部分学者开展了初步的研究工作^[4-5]，提出了一些对某些类型武器装备体系贡献率的评估方法^[5-7]，但是到目前为止还没有形成一套成熟、可靠的理论和方法，而且有些方法有其特定的应用要求和范围，不能进行简单的推广和应用。关于电子信息装备体系贡献率，目前国内的相关研究很少，特别是对于电子信息装备体系在复杂电磁环境对抗博弈中的复杂性，体系贡献率是什么，有什么特点，该采用什么理论和方法进行评估等诸多问题都还未考虑。本文针对这些基本问题，在研究电子装备体系本质内涵的基础上，从方法论层面将综合集成方法应用于电子信息装备体系贡献率的评估。

1 电子信息装备体系内涵

装备体系是由功能上相互关联的各种类、各系列装备构成的整体，通常由综合电子信息系统、保障设备构成。电子信息装备体系是体系概念运用于电子装备领域的产物，从系统科学角度来看，电子信息装备体系是由多种电子信息装备和电子装备系统相互联系、相互制约而构成，并按照一定的信息流转机理实施运行的一个整体^[3]，以俄罗斯 S-500 防空系统的组成为例，采用对象过程方法(Object Process Methodology, OPM)建模的层次关系如图 1 所示^[8]。

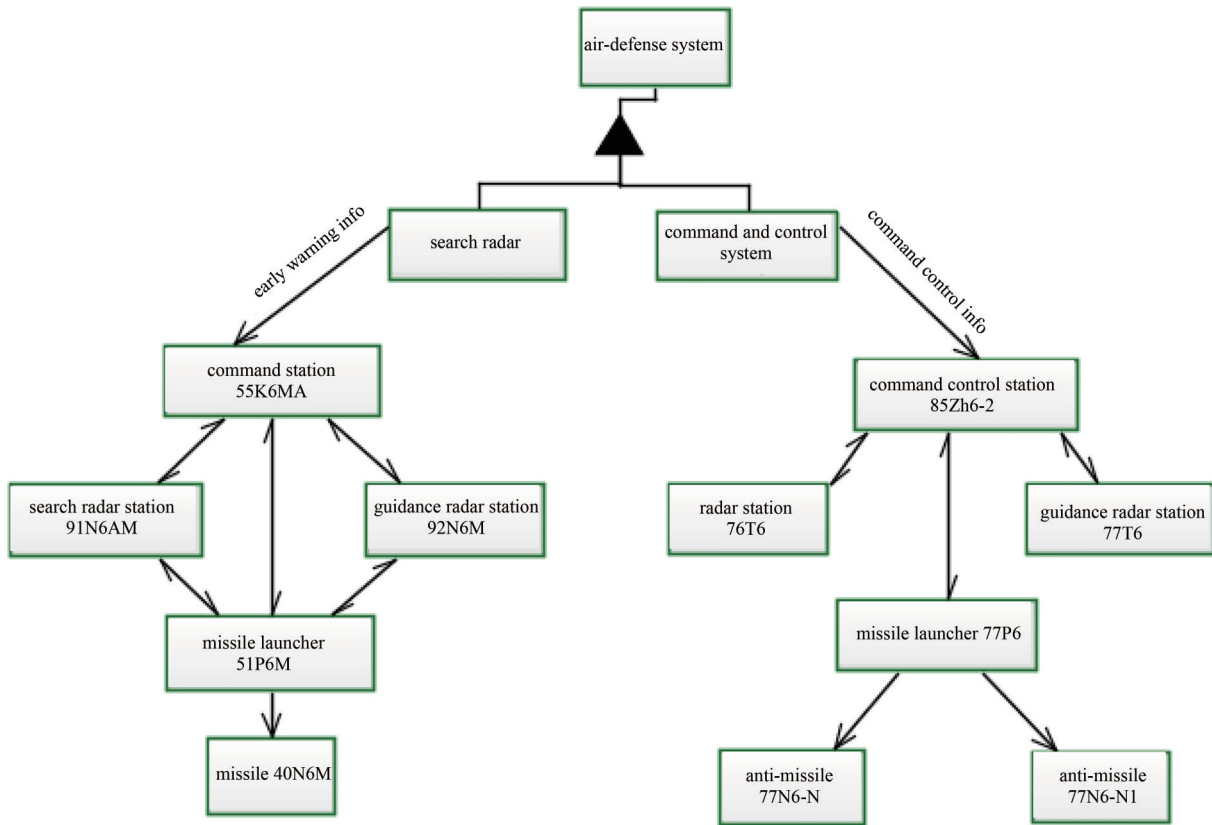


Fig.1 Diagram of the hierarchy structure of the composition system
图 1 组成某体系各层次结构示意图

如图 1 所示的 S-500 防空系统各层次结构示意图，根据装备体系的含义，该防空系统是一个典型的电子信息装备体系。图 1 所示的电子装备体系主要是由雷达系统和指挥控制系统等相互关联的电子信息装备系统构成，其中，雷达系统或指挥控制系统又是由一定数量的电子信息装备平台组成，而这每个电子信息装备的平台上可能又具有一个或多个电子信息设备单元^[9]。当图 1 所示的防空系统和其他系统由信息连在一起，如与通信网络系统、火力打击系统等结合起来就会形成更高层级的防空体系。然而，虽然体系由多个系统组成，但是多个系统在一起不一定形成体系，电子信息装备体系和多个电子信息装备系统组成的系统群之间的关系如图 2 所示^[10]。

如图 2 所示，以其中的通信系统为例，当多个通信系统组成在一起时，所组成的新系统群依旧具有相同的功能，它没有出现新的区别于原有通信系统的功能和属性。然而，当预警探测系统与导弹发射系统等在通信系统

的支持下连接在一起就会形成新的对抗能力，这个对抗能力是原有系统所不具有的能力，这就形成了一个可以完成一定任务的体系。所以，从这个意义上说，电子信息装备体系与系统群之间的区别就在于体系是否能够得到进一步的涌现。因此，体系是能够得到进一步涌现性质的关联或联结的独立系统的集合或综合，属于复杂系统范畴^[10]。

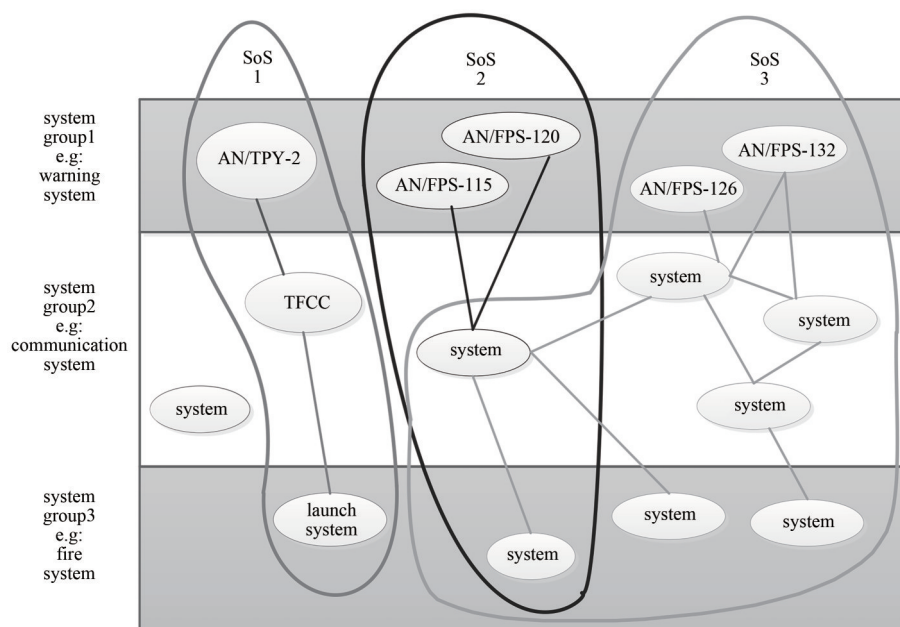


Fig.2 Connotation of SoS and system group
图2 体系和系统群的内涵

2 电子装备体系对抗复杂性

电子信息装备体系作为复杂系统具有复杂性^[3]，电子信息装备体系对抗也具有复杂性，除了一般的非线性、涌现性等特点外^[11]，还具有开放性、动态演化性等特点。

电子信息装备体系对抗的开放性是指电子信息装备体系与所处的复杂电磁环境存在着持续不断的物质、信息和能量的交换^[12]，并以此保持体系结构和功能的相对完善和稳定。电子信息装备体系在体系对抗过程中，根据一定的任务需求，持续地从所处的复杂电磁环境中搜集各种电磁信号，例如我方的通信信号、对方的通信信号等，然后对这些信号进行分析、处理和加工，并进一步形成可供指挥控制决策的信息。在这个过程中，既有电子信息装备体系中各种预警探测系统等传感器的信息资源输入，又有体系组成中指挥控制系统的信息输出，所以电子信息装备体系对抗具有开放性的特点。

电子信息装备体系对抗的动态演化性是指电子信息装备体系的结构、行为、功能等随着时间的推移而发生变化，这种动态演化性主要表现在3个方面：a) 电子信息装备体系自身的动态演化，主要表现在面对新的不同的任务需求，电子信息装备体系通过面向新任务的开发和体系组分系统的组合集成而引起整个体系结构的改进；b) 联合动态演化，主要表现为多个电子信息装备体系通过体系集成以完成联合对抗任务等；c) 涌现演化，主要表现为电子信息装备体系在体系对抗过程的不同阶段，根据不同的任务而形成不同的体系结构进而涌现出不同的体系能力。虽然组成电子信息装备体系的各组分系统或要素没有发生太大的变化，但是当对体系的观察视角发生变化时，体系的组分系统就会产生较大变化，即体系的动态演化性，这种动态演化性为体系完成使命带来稳定性^[12]。

所以，电子信息装备体系对抗的非线性、涌现性、开放性、动态演化性等特点，使得电子信息装备体系贡献率评估问题必须要考虑这些复杂性特点，而对于这些属于复杂系统研究的问题，需要采用系统论方法来解决^[3]。

3 体系贡献率综合集成法评估

3.1 综合集成法评估流程

综合集成方法是在研究开放复杂系统问题实践基础上提炼、概括和抽象出来的一种从定性到定量的系统方法论^[11]，它已经在很多领域得到了成功的应用，是一种从整体上考虑并解决问题的方法论，它从感性上升到理性，能够从定性到定量解决复杂系统问题^[13-14]。对于体系贡献率评估的复杂系统问题，可以采用综合集成方法来解决，采用综合集成方法评估体系贡献率的主要流程如图 3 所示。

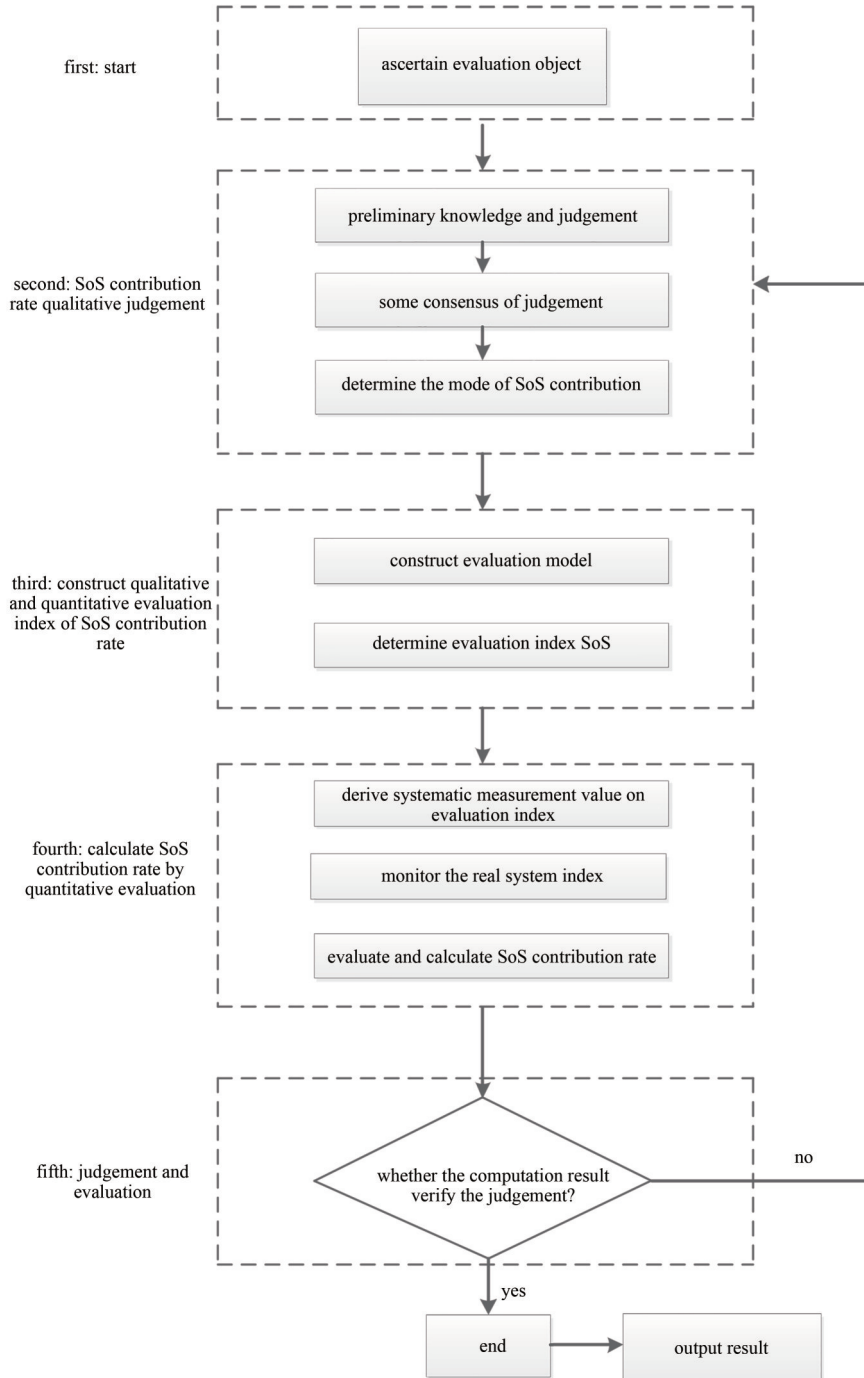


Fig.3 Meta-synthesis method flow of SoS contribution rate evaluation

图3 体系贡献率评估的综合集成法流程

如图 3 所示的评估流程，以图 1 所示体系组成中雷达装备的体系贡献率评估为例，主要有以下 5 个步骤：

- 1) 确定体系中要进行贡献率评估的系统或装备：譬如以图 1 所示体系构成中的搜索雷达系统为待评估的装备；

2) 对某装备体系贡献率的定性认识和判断：从雷达系统对整个体系的贡献的不同认识、对雷达体系贡献率判断形成共识、及确定雷达系统对体系的贡献模式3个方面形成对体系贡献率的定性综合集成；

3) 构建对某装备定性定量相结合的体系贡献率指标体系：先建立评估模型，并从先验知识、试验或仿真数据获得初步指标，然后分析指标间关联关系修正指标体系，结合以往数据进行仿真试验获得最终指标体系，选取相应指标获取系统特征变量、观测变量和环境变量；

4) 实现从定性到定量的体系贡献率评估计算：根据系统特征变量、观测变量和环境变量，对实际系统进行监控测量和分析，获取相应的指标测量值，对雷达系统体系贡献率进行评估计算；

5) 判断体系贡献率评估结果是否证实定性判断：将体系贡献率的计算结果与前面第2)步的定性判断进行对比，如果证明了初步判断或者是可信的，就得到了满意的结果；假如所得的结果与第2)步的定性认识和判断不一致，则继续上述第2)到第4)个步骤。

综上，按照综合集成方法的一般处理过程，在上述贡献率评估流程的几个步骤中，比较重要的是其中的第2)、第3)和第4)步，以下讨论其具体实施过程。

3.2 体系贡献率定性综合集成

3.2.1 体系贡献率基本理解

贡献率，通俗地讲就是一个事物A(称为贡献者)对另一个事物B(称为受益者)贡献程度的度量^[7]，也叫贡献度，这里统一称作贡献率。不同的人对体系贡献率有不同的认识和理解，以下就是几种对体系贡献率的不同认识 and 定义：

1) 体系贡献率是待评估对象对体系内各系统对抗能力及整个体系对抗能力的影响作用或涌现效应的度量^[5]。

2) 如果把某个装备(或作战系统)作为贡献者，把与其有关的某个对抗体系(包含体系中的其他系统)作为受益者，把它们置于某种体系对抗环境下，使体系对抗能力发生变化的程度即为武器装备体系贡献率^[6]。

3) 装备的体系贡献率是装备在一定时期内对体系对抗能力(或对抗效能)、体系结构、技术先进性、建设效益等方面贡献程度的综合量度^[7]。

4) 装备贡献率是在给定条件下，单个装备在体系完成使命过程中发挥的作用和价值，即装备体系在有无该装备的作战效果之差除以有该装备的作战效果^[15]。

5) 装备系统对体系的贡献率是在体系完成使命任务的前提下，某一型装备系统的增、减、改、替对现有体系的体系编成方式和体系能力生成机制的影响程度^[16]。

3.2.2 电子信息装备体系贡献率

根据上述这些认识和定义，以雷达装备为例，其体系贡献率是根据雷达装备承担的预警探测使命任务，将搜索雷达装备置于近似真实的对抗条件下，考虑雷达装备所面临的干扰机等真实对抗系统、复杂电磁环境，检验评估使用雷达装备后对己方整个体系对抗能力提升(或者蓝方整个体系对抗能力下降)的贡献程度。这样，由不同学科、不同领域专家构成的专家体系，根据评估问题，深入研究，反复研讨，从上述这些理解中逐步形成共识后，就会初步形成经验性假设、判断，即：电子信息装备体系贡献率是将电子装备体系中的电子信息装备对抗效能与体系对抗效能进行对比，对比的结果就是体系贡献率^[9]。

3.2.3 待评估装备的体系贡献模式分析

贡献率模式有多种，如关键作用模式、固定作用模式、非线性模式等^[17]。根据电子信息装备体系中各种装备的性能特点，可将电子信息装备体系组分中各类装备的体系贡献率模式总结为以下4种：

$$\{y_1|y_1=f_1(x), \quad \text{装备A加入体系}\} \quad (1)$$

$$\{y_2|y_2=f_2(x), \quad \text{装备A的数量}x\text{增加或减少}\} \quad (2)$$

$$\{y_3|y_3=f_3(x), \quad \text{装备A的参数}x\text{变化}\} \quad (3)$$

$$\{y_4|y_4=f_4(x), \quad \text{装备A所在体系结构发生变化}\} \quad (4)$$

关键作用模式 y_1 ，又称为脉冲模式，就是某一装备的加入会对体系能力产生重大影响，极大提升体系的作战能力，反之如果体系中没有该装备系统，整个体系的作战能力将急剧下降，如通信网络系统等对体系的影响效果；固定作用模式 y_2 ，又称为线性模式，即体系能力随着装备数量的增加几乎呈线性增长，如火力打击系统

等对体系的影响效果；模式 y_3 和 y_4 ，称为非线性模式，其中 y_3 为装备参数发生变化所产生的贡献，如预警探测系统在干扰条件下对效能产生影响^[18]； y_4 为体系结构发生变化对体系的影响，如指挥控制系统的加入或退出会对体系结构产生重要的作用，进而影响整个体系的能力^[9]。

3.3 体系贡献率定性与定量相结合的综合集成

为了验证或证明雷达装备体系贡献率定性综合集成形成的经验认识或定性判断，需要把定性描述转化为对雷达装备整体的定量描述，这可以通过定性定量相结合综合集成获得。

3.3.1 体系贡献率的计算

衡量体系贡献率，一般来说，可以从是否增加能力类型、是否改进战技短板、是否提高运行效率、是否降低整体成本等方面来衡量体系贡献率。其中任何一个方面发生变化，都认为对体系产生了贡献。体系贡献率评价可以通过体系对抗综合效能和费效变化来表达体现，通过接入新装备进行试验，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^[17]。体系贡献率需要通过系统综合试验并获得试验数据再进行计算得到，文献[19]给出了体系贡献率的计算公式为^[19]：

$$\text{系统A的贡献率} = \frac{\text{体系能力}_{\text{包括组分系统A}} - \text{体系能力}_{\text{不包括组分系统A}}}{\text{体系能力}_{\text{不包括组分系统A}}} \times 100\% \quad (5)$$

根据式(5)，只要评估出式中分子和分母中包含或者不包含组分系统 A 的体系能力，就可以计算出体系贡献率，这个体系贡献率就是对系统或体系的定量描述。

3.3.2 定性与定量相结合的体系贡献率评估指标

为了评估体系能力，就要选取合适的定性和定量指标。体系能力指标的选取首先要确定指标选取的原则，以往性能试验评估大多基于传统“分解可加”的还原论思想，未充分考虑电子信息装备体系的复杂性，所以在选择原则、方法上都存在一些不足^[20]。电子信息装备体系对抗的复杂性决定了对于体系能力评估必须从体系整体效果产生机理考虑，根据复杂系统的特点，通过系统仿真试验，并对试验数据进行挖掘，从大量试验数据中找出具有代表性的指标，具体可参照如下步骤：

- 1) 概念建模，通过试验、训练及仿真数据得到初步的指标；
- 2) 数据分析，观察指标的敏感程度，挖掘关键指标并修正指标体系；
- 3) 采用仿真数据或通过多次试验对指标体系进行分析校验，进一步完善整个指标体系；
- 4) 根据所获得的指标体系选定相应的指标获取系统特征变量、观测变量、环境变量等。

经过上述几个步骤，即可得到对体系贡献率评估的指标体系，其中既有对体系能力评估数量关系指标，还有对体系的描述性指标，如系统特征变量、观测变量等。这样，通过多次的系统仿真试验，对之前第2)步的经验性认识或者判断就有了一个整体的定量描述，然后再用所建立的指标体系就增加了对搜索雷达系统新的定量信息。

3.4 从定性到定量的体系贡献率评估

经过对体系贡献率定性定量相结合综合集成获得了对体系贡献率的评估指标，需要再进一步综合集成，该过程如下：

- 1) 选择代表性指标，如能力涌现性、体系结构优化等；
- 2) 分析验证。针对每个指标，寻找可能影响的原因，进行筛选与合并。然后对原因进行细化，逐步细化到仿真可以对其进行操控的粒度，形成指标集。通过仿真实验分析其关联程度，再根据分析结果修正或调整指标集，或重新进行指标和因素选择过程，得出较为合理完整的指标体系^[19]；
- 3) 按照获得的完整指标体系，选择相应的指标并得到对整个系统特征的测量值；
- 4) 对实际仿真系统进行监控分析；
- 5) 结合所选用指标及对实际系统的监测值，评估装备体系的效能，代入式(5)，得出体系贡献率的计算结果。

在指标选取和因素选择的整个过程中，必须充分利用专家领域知识，分析人员和专业人员要充分交流和协作，就是定性到定量综合集成的过程，这个过程不是一次就能完成，往往要反复多次。如果得到的定量结果不足以证明之前的定性判断和认识，就再提出新的修正意见和试验方案，重复上述过程。

4 结论

针对电子信息装备体系贡献率评估难题,通过对典型电子信息装备体系内涵的分析,总结了电子信息装备体系的开放性、动态演化性等属于复杂系统的复杂性,这些复杂性使得电子信息装备体系贡献率评估问题须采用系统论方法来解决。根据系统论综合集成方法的一般过程,以电子信息装备体系中的雷达装备为例研究了电子装备体系贡献率评估的综合集成方法,重点对于包括贡献率定性判断和认识综合集成、对贡献率定性与定量相结合的指标体系描述和从定性到定量的贡献率指标分析验证3个步骤进行了详细分析,可以为电子信息装备体系对抗试验提供重要参考。

参考文献:

- [1] 曹延华,任昊利. 基于DDS技术的指挥控制系统研究[J]. 指挥与控制学报, 2015,1(2):192-197. (CAO Yanhua,REN Haoli. Research on command and control system based on DDS[J]. Journal of Command and Control, 2015,1(2):192-197.)
- [2] 周波,戴幻尧,孔德培. 电子信息装备体系对抗试验方法论[J]. 强激光与粒子束, 2017,29(11):113207-1-6. (ZHOU Bo,DAI Huanyao,KONG Depei. Methodology of SoS combat test for electronic information equipment[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2017,29(11):113207-1-6.)
- [3] 柯宏发,陈永光,赵继广. 电子装备体系效能评估理论及应用[M]. 北京:国防工业出版社, 2018. (KE Hongfa,CHEN Yongguang,ZHAO Jiguang. Effectiveness evaluation theory and application of electronic equipment system of systems[J]. Beijing:National Defense Industry Press, 2018.)
- [4] 罗小明,朱延雷,何榕. 基于SEM的武器装备作战体系贡献度评估方法[J]. 装备学院学报, 2015,26(5):1-6. (LUO Xiaoming,ZHU Yanlei,HE Rong. SEM-based evaluation method of contribution to system warfighting for weapon and equipments[J]. Journal of Equipment Academy, 2015,26(5):1-6.)
- [5] 管清波,于小红. 新型武器装备体系贡献度评估问题探析[J]. 装备学院学报, 2015,26(3):1-5. (GUAN Qingbo,YU Xiaohong. Research on evaluation of equipment's contribution to system warfighting[J]. Journal of Equipment Academy, 2015,26(3):1-5.)
- [6] 李怡勇,李智,管清波. 武器装备体系贡献度评估刍议[J]. 装备学院学报, 2015,26(4):5-10. (LI Yiyong,LI Zhi,GUAN Qingbo. Discussion and demonstration on contribution evaluation of weapon equipment system[J]. Journal of Equipment Academy, 2015, 26(4):5-10.)
- [7] 吴朝晖,赵海江. 装备体系贡献度概念及评价方法初探[J]. 论证与研究, 2015,31(4):5-7. (WU Zhaohui,ZHAO Haijiang. Concept and evaluation method of equipment contribution degree[J]. Demonstration and Research, 2015,31(4):5-7.)
- [8] 周波,孔德培,耿宏峰. 基于OPM的电子信息装备体系复杂性建模[J]. 强激光与粒子束, 2019,31(6):47-53. (ZHOU Bo, KONG Depei,GENG Hongfeng. Methodology of SoS combat test for electronic information equipment[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2019,31(6):47-53.)
- [9] 周波,孔德培,乔会东. 电子信息装备体系贡献度评估方法[J]. 航天电子对抗, 2019,35(1):19-23. (ZHOU Bo,KONG Depei, QIAO Huidong. Evaluation method of SoS contribution degree for electronic information equipment[J]. Aerospace Electronic Warfare, 2019,35(1):19-23.)
- [10] 胡晓峰,张斌. 体系复杂性与体系工程[J]. 中国电子科学研究院学报, 2011,6(5):446-450. (HU Xiaofeng,ZHANG Bin. SoS complexity and SoS engineering[J]. Journal of CAEIT, 2011,6(5):446-450.)
- [11] 周波,孔德培,乔会东. 电子装备试验复杂性与综合集成方法应用[J]. 系统科学学报, 2017,25(4):101-104. (ZHOU Bo,KONG Depei,QIAO Huidong. Complexity of electronic equipment test and application of meta-synthetic method[J]. Journal of Chinese Institute of the Systems Science, 2017,25(4):101-104.)
- [12] 杨克巍,葛冰峰,李明浩. 装备体系建模、分析理论与应用[M]. 长沙:国防科技大学出版社, 2016. (YANG Kewei,GE Bingfeng,LI Minghao. Simulation and analysis theory and application for equipment system of systems[M]. Changsha,China: National University of Defense Technology Press, 2016.)
- [13] 周波,戴幻尧,崔建岭,等. 复杂电磁环境下电子信息装备试验的综合集成方法分析[J]. 强激光与粒子束, 2015,27(10):230-234. (ZHOU Bo, DAI Huanyao, CUI Jianling, et al. Meta-synthesis method of electronic information equipment in complex electromagnetic environment[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2015,27(10):230-234.)
- [14] 于景元,刘毅,马昌超. 关于复杂性研究[J]. 系统仿真学报, 2002,14(11):1417-1424. (YU Jingyuan,LIU Yi,MA Changchao. Complexity study and system science[J]. Journal of System Simulation, 2002,14(11):1417-1424.)