

联合作战背景下的体系效能评估方法

杨建¹, 董岩², 边月奎³, 姚桐³, 耿修堂³

1. 中国兵器科学研究院, 北京 100089

2. 北方科技信息研究所, 北京 100089

3. 西北机电工程研究所, 咸阳 712099

摘要 针对复杂作战环境下的体系对抗问题, 对联合作战背景下的体系效能评估方法进行了梳理, 阐述了联合作战体系效能评估的重要意义。总结了评估方法的研究现状和典型方法, 阐明了其优缺点; 归纳了现有方法存在的问题及挑战, 提出了未来可能的发展方向。

关键词 协同作战; 效能评估; 体系对抗; 仿真推演

随着武器装备信息化进程的不断推进, 面对联合作战、跨域作战等复杂作战环境下体系对抗的任务需求, 最大限度地利用好分布在不同区域的信息、火力平台以及跨兵种作战资源是联合制胜的关键所在^[1-4]。因此在装备建设、资源规划、力量编成、体系构建以及任务协同等规划与设计过程中, 就需要充分借助系统工程思想, 通过计算、评估、模拟、推演、仿真等手段对体系效能进行评估, 确定出影响体系效能发挥的薄弱环节, 从而进行相应调整以达到体系效能的最优化。同时, 如何基于体系作战效能进行装备编成、配置构建, 如何根据在体系中的定位牵引具体装备的性能指标, 如何评价体系配置、作战任务完成率、装备对体系的贡献率等, 在工业设计和装备应用中变得愈来愈重要^[3, 5-9]。然而, 由于体系组成复杂、各种影响因素交织, 作战环境的复杂性、多样性、瞬变性和难以预测性等对体

系建设和评估带来了极大的困难。因此, 对现有的各种体系效能评估方法进行梳理与总结, 分析各方法的优缺点以及在体系效能评估中的具体应用, 进而为体系效能评估策略的选择和设计提供依据是非常必要的。

1 联合作战体系效能评估的主要方法

1914年, 英国工程师 Lanchester^[10-11]首次比较系统的对作战效能评估问题进行了研究, 建立了相应的数学模型, 动态的揭示了交战双方兵力的变化; 1965年, 水本雅晴^[12]将模糊集理论推广到决策科学领域, 为模糊系统评估理论的发展起到了推动作用; 20世纪70年代, Satty通过构造判断矩阵, 由上至下逐层综合, 得到了评估属性相对于目标结果的层次分析法^[13-14]; 同一时期, 美国运筹学家 Chae-

收稿日期: 2019-10-31; 修回日期: 2021-10-20

作者简介: 杨建, 研究员, 研究方向为体系效能评估, 电子信箱: buaayangjian@126.com

引用格式: 杨建, 董岩, 边月奎, 等. 联合作战背景下的体系效能评估方法[J]. 科技导报, 2022, 40(4): 106-117; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2022.04.011

ns等^[15]提出了基于凸分析和线性规划的数据包络分析法(DEA),为复杂决策问题与评价科学的发展奠定了基础。随着计算机技术的发展,美国军方从20世纪80年代开始采用体系对抗仿真方法研究体系效能评估问题。进入20世纪90年代,由于原有的作战模型已不能满足联合作战对装备、兵力和作战分析的需求,1995年美国国防部实施了联合作战系统(JWARS)研究和开发计划^[16-18]。兰德公司

也对微分对策、兰彻斯特方程等数理战术学的方法进行研究^[19-21],并在不同的局部冲突和重大事件决策中得到应用。目前,较有影响的联合作战效能仿真评估架构有美国国防部体系结构框架DoDAF^[22-25],以及英军国防部体系结构框架MoDAF^[26]等。总体概括而言,当前主流的体系效能评估方法有:解析法、专家评估法、作战模拟法以及基于仿真的体系效能评估法,如图1所示。

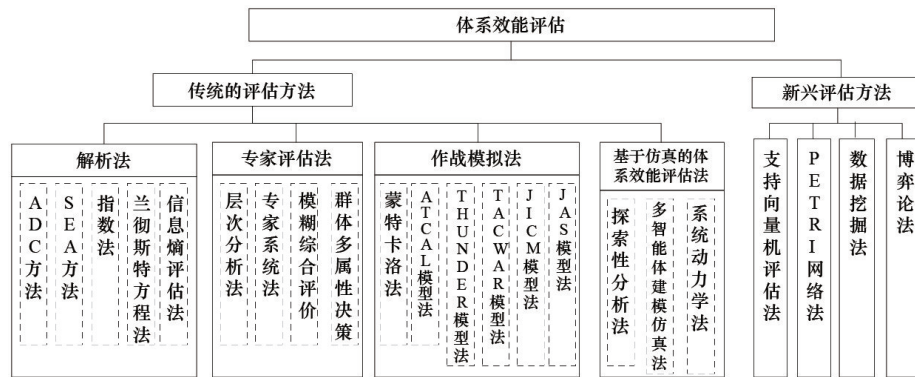


图1 体系效能评估方法分类

1.1 基于解析法的效能评估

解析法在武器装备体系效能评估中的应用十分广泛,该方法通过建立效能指标与影响因素之间的函数关系,并应用数学方法或者运筹学理论对效能方程进行求解,得到评价指标的定量解^[27-28]。当前应用最多的解析法有兰彻斯特方程法^[29-32]、ADC方法^[33-37]、SEA方法^[38-42]、指数法^[43-45]、信息熵评估法^[46-49]等。

英国工程师 Lanchester 从使用冷兵器和枪炮作战的不同特点出发,建立了相应的微分方程组,揭示了交战过程中双方战斗单位数变化对战争结局影响的定量关系。近来的研究表明:随着信息化、一体化作战技术与编制的不断发展,影响作战效能的因素远不止参战人数和武器装备的火力效能^[31,50]。因此当前对兰彻斯特法的研究大都集中在:1)对兰彻斯特模型做相应的修改或补充;2)结合典型作战应用增加相应的效能影响因素;3)结合其他评估方法联合使用。例如:陈行勇等^[51]和曹海航等^[52]应用兰彻斯特方法对特定因素对战争

的影响进行了分析;陆凡等^[53]和杨立勋^[54]分别建立了基于指数的战损预测模型和基于聚合级实战战损模型,对兵力和装备的战损量进行了预测;黄一斌等^[55]从信息获取、装备作战、兵力机动、作战防护、后勤补给能力等不同视角出发,利用协同系数方法建立兰彻斯特作战模型,对联合军兵种的协作效能进行评估;从日红等则运用兰彻斯特方程对兵力增援方案、军队调遣方案、火力分配方案等进行了优化^[31,56]。

美国工业武器效能咨询委员会提出的 ADC 模型是一种系统效能指标计算模型。该模型将决定武器系统效能的要素分为:可用性 A、可信性 D 和固有能力 C,并以这 3 要素乘积作为单一效能度量^[35]。ADC 方法的应用难点在于如何获得上述 3 项要素,在实际中通常需要结合系统本身和目标任务等综合分析得到。由于在设计之初就未考虑对抗因素,因此 ADC 方法主要用于单个或同类武器装备的效能,难以适应体系对抗效能评估问题。针对这些问题,张国熊等^[57]通过引入了抗干扰因子,

推导出了适用于火控雷达系统作战效能评估的 ADC 模型;王世学等^[58]对实战条件下坦克作战效能进行了初步分析,引入了对抗效能的概念,提出了一种改进的 ADC 模型;陈辉等^[36]通过增加战场环境对雷达阵地现场优化效能的影响,对传统 ADC 模型进行了完善,并通过实例分析验证了提出方法的正确性和有效性。

SEA 方法是麻省理工学院信息与决策系统实验室在 20 世纪 80 年代提出的系统效能分析框架。当系统在一定环境下运行时,运行状态可以由一组原始参数值描述,受不确定因素影响,实际系统的运行状态可能存在多个。在这个状态组成的集合中,系统落入可完成预定任务的状态的概率反映了系统完成预定任务的可能性,即系统效能^[40]。SEA 方法仅提供系统效能分析的方法过程,实际的系统效能建模则需根据具体的系统、环境和使命进行具体分析,其难点和创造性工作主要集中在如何选择与系统使命贴近的性能度量,如何建立符合系统运行规律的系统映射,以及如何计算多维性能度量的系统效能指标 3 个方面^[38, 40]。

指数法是用相对值表示对象特性的量化方法。指数法根据武器装备的性能指标、目标特性、战场环境和实战使用经验,建立定量判定模型,对系统的各种能力进行分析和综合,从而获得单一指数度量,评估战斗伤亡和武器装备毁伤效果、预测战斗结果。从本质上讲,指数法的是一种“等效”方法,其模型的准确性取决于使用人员的作战经验和分析能力,对于作战中的随机因素衡量较少^[43, 60]。目前, Dupuy 建立的定量判断模型作为一个较完善的指数模型^[61],在陆军作战模拟中颇受重视,各国军队都把该指数法作为评估陆军部队实力的实用方法。但该指数模型对空中实力的评估过于简单粗糙,结果并不理想,在使用时需结合作战飞机的具体构造、使用特点,对相应模型进行进一步完善^[44]。

根据信息论构建的信息熵评估法利用信息熵衡量系统的有序程度,通过概率分布中的平均信息量描述系统的不确定性,能够充分考虑作战过程中的随机因素和不确定性,适用于多对象多指标体系

的综合评估。然而,目前基于信息熵的效能评估方法在作战影响因素选取时一般只考虑关键因素的影响,缺乏对其他未知影响因素的考虑,作战效能评估结果的可信度较低。针对此问题,罗承昆等^[48]结合作战环的概念,在通过多指标对边的效能发挥进行度量时,考虑了未知因素的影响,提出一种基于改进信息熵的作战环效能评估方法;唐鑫^[49]则通过重新定义节点影响因素的隶属度概念,引入未知因素对于节点效能发挥影响,对信息熵评估模型进行了完善,并对其在装备体系作战效能评估中的适应性进行了评估。

1.2 基于专家评估法的效能评估

专家评估法是出现较早且应用较广的一种体系效能评估方法。它是在定量和定性分析的基础上,以打分等方式作出定量评价,其结果具有数理统计特性^[62-63]。专家评估法最大的优点在于可以在缺乏足够统计数据和原始资料的情况下做出定量估计。其主要步骤是:首先根据评价对象的具体情况选定评估指标,对每个指标确定出评价等级并用分值表示;然后以此为基准,由专家对评估对象进行打分,进而采用加法评分法、乘法评分法或加乘评分法等求取评估对象的总分值,得到评估结果。专家评估法的准确程度,主要取决于专家的阅历经验以及知识的广度和深度。因此,专家评分法具有使用简单、直观性强的特点,但其理论性和系统性尚有欠缺,如何客观准确地确定专家的权重直接关系到体系效能评估结果的客观性和准确性^[64-68]。基于专家评估的体系效能评估方法可细分为层次分析法(AHP)^[65, 69-71]、模糊综合评价^[64]以及群体多属性决策方法^[67-68]等,其中层次分析法是最为典型也是当前应用最为广泛的一种专家评估方法。因此,本文以层次分析法为例对专家评估法进行剖析。

层次分析法将评价者对复杂系统的评价思维过程数学化,通过将复杂问题按照相互依赖关系分解为若干层次和若干要素,并在同一层次的各要素之间简单地进行比较、判断和计算,得出不同方案的重要度排序,从而为体系效能评估提供决策依据^[13, 65]。层次分析法弱点在于所构建的层次结构

模型只反映了层级间的支撑与反馈作用,无法对层次内部的其他关系进行描述。在联合作战场景中,各单体彼此之间、总体与单体之间存在海量信息交互,判断指标多且存在驳杂的内在联系,导致相应的层次划分难度增加,所构建的层次结构模型规模过大,从而会影响体系效能评估的最终结果。

针对上述问题,联合作战体系更适合用网络层次分析法(ANP)进行效能评估。网络层次分析法是对传统层次分析法的改进和拓展,主要解决层次内部元素间的相互作用以及下层元素对上层元素的反馈影响问题^[72-73]。汪彦明等^[74]针对指挥控制系统构建评估指标集合,建立了的网络层次分析法的控制层和网络层模型。吕游等^[75]等采用网络层次分析法建立了指挥控制效能评估模型,通过SD软件得到模型各元素之间的相互影响和相互作用,有助于更好的评估整个指控系统的效能。此外,王海滨等^[76]则将灰色关联分析法和网络层次分析法结合,通过计算指标间的关联度对指标间的相互作用进行了客观分析,提高了评估结果的可信度。

1.3 基于作战模拟法的效能评估

作战模拟是军事运筹研究的基本手段,对于武器系统作战效能的评估具有不可替代的重要作用。这是因为,武器系统的作战效能只有在对抗条件下,以具体作战环境和一定兵力编成为背景,在作战的全过程中才能体现出来^[77]。作战模拟法的实质是以计算机作战模拟模型为实验手段,通过在给定数值条件下运行模型来进行作战仿真试验,依靠模型的仿真结果来评估作战效能^[78-80]。作战模拟法能较详细的考虑影响实际作战过程的诸因素,特别适合于武器系统或作战方案作战效能指标的预测评估。目前,作战模拟体系效能评估方法主要包括蒙特卡洛法^[81-82]和基于AAR(After—action review)的作战模拟方法^[17, 83-84]。

蒙特卡洛法是一种基于统计实验的评估方法,其原理是通过随机数生成来模拟作战过程中的随机因素,如目标发现、射弹散布等,再利用与待解问题具有相同概率的算法进行实验,通过对实验结果进行分析得到作战行动状态的改变和这些随机因素对作战过程发展的影响,继而评估其对系统效能

产生的影响^[82, 85]。现代作战仿真系统中的很多模型都是基于此方法建立的,例如目标发现、命中与毁伤、射弹散布等。蒙特卡洛法的局限性在于,生成模拟随机数时,都是通过对已选好的随机种子编写逻辑算法,因此得到的随机数不可能是完全随机的。

基于AAR的作战模拟方法主要为美军所采用,其典型的作战模拟分析模型有ATCAL模型、THUNDER模型、TACWAR模型、JICM模型以及JAS模型等^[83]。

美军陆军分析中心于20世纪80年代建立的ATCAL模型主要用来评估陆军作战损失,其流程分为两个阶段:第一阶段通过高分辨率蒙特卡洛仿真的输出结果估计兰彻斯特方程的毁伤系数,第二阶段在一个合适的参数分析模型中,使用兰彻斯特方程和兰彻斯特方程毁伤系数来模拟部队的整体毁伤。

THUNDER是一个大规模双方对抗型仿真系统,主要用于模拟战役级的联合军事行动和评估分析空中和太空力量的使用效果,能够高精度的模拟27种不同的空中作战任务,在使用CEM模型和ATCAL模型条件下,能够低精度的模拟地面作战行动。

TACWAR是一个确定性的战区级作战仿真系统,用于评估作战方针、人员装备、作战过程和战斗支援情况^[86]。使用的效能指标包括人员武器的损耗、资源的消耗、控制的前沿地域的面积等。整个系统分为陆海空常规作战子模型、核武器作战子模型、化学武器作战子模型、目标获取子模型和后勤子模型,使用兰彻斯特平方律和线性律计算毁伤,再采用指数法对指标进行综合。

JICM是一个支持探索性分析的作战模拟和分析系统,用于战略层次的战争分析评估,采用ATCAL模型和态势化兵力指数法评估陆战,采用概率方法评估空战的交战率和损耗等。

JAS的前身美国国防部部长办公室开发的联合作战仿真系统JWARS^[16-17]。JAS使用概率方法计算陆地和空中的火力打击毁伤,通过蒙特卡洛法模拟空对地打击、海上作战等,使用兰彻斯特方程计

算陆战损耗。JAS能够通过作战仿真支持作战计划的制定与执行、作战能力的评估分析、武器系统效能评估、系统权衡分析、新的概念和条令的开发。

由于作战模拟法的评估效果依赖于有效的基础数据和原始资料的数量,由此带来的劣势也比较明显:(1)其仿真模型的建立复杂,而构建过程直接影响着评估进程;(2)实际的作战环境复杂多变,干扰环境带来的不确定性更直接影响着仿真精度,其仿真结果的可信度难以校验;(3)作战仿真过程要消耗较多的计算资源,要获得大量资料也需要有计划地长期进行收集,时效性也受到严格考验。

1.4 基于仿真的体系效能评估

基于仿真的体系评估方法利用建模仿真技术构造体系评估仿真试验环境,通过对仿真结果数据的综合分析来评价体系效能。区别于作战模拟法,仿真法以计算机模拟体系对抗、战场环境,通过仿真试验得到作战进程相关数据,进而得出联合作战体系效能^[87-88]。在缺乏基础数据的前提下,可通过事先设定好的对抗准则对体系效能进行对抗评估,最终通过对抗仿真给出适应于联合作战的体系效能评估结果。实际应用中可通过已有基础数据进行作战装备或小规模系统的作战模拟,从中发现系统演化规律及模型,然后通过仿真对抗推演实现时变及不确定条件下的大规模体系效能评估,因此该方法可视为作战模拟法的拓展和扩充。主要有探索性分析(EA)法、多智能体建模仿真(ABMS)法和系统动力学(SD)法等^[87-89]。

体系效能评估涉及的要素众多,存在大量的不确定性要素,探索性分析方法是分析参数不确定性和结构不确定性问题的有效方法^[87]。2000年美国兰德公司采用EA法建立了联合一体化应急模型(JICM),并通过该方法对台湾海峡可能发生的军事冲突进行推演,由此EA方法在网络中心战、信息优势评价等战略评估中也得到了广泛的应用^[90-91]。该方法在对系统进行整体认识的基础上,全面考虑各种因素对模型的影响,从而给出不确定条件下能够达到的作战效果。基于探索性分析的体系建模仿真,首先应明确研究决策目标、理清相关要素、构

造探索要素集、通过对问题的定性分析,得出探索因子间的追溯影响关系,理出探索要素的解释层级;其次,基于探索因子,建立多分辨率的探索性体系仿真模型;再次,要根据探索因子间的解释层级,从底层要素的探索空间构造开始,逐层获取中间变量探索要素的探索范围,在保证探索过程逻辑合理性的同时,优化探索求解的过程,在确保结果可信度的基础上能有效地降低探索规模^[90-91]。

ABMS方法通过多智能体行为、相互关系、智能体与环境的交互关系来描述复杂系统行为,被认为是研究复杂系统最具活力的仿真方法^[87]。该方法可以通过对Agent的行为及其之间的相互关系、Agent与环境的交互关系等进行刻画,来描述复杂系统的行为,为复杂系统的分析评估提供有效的支撑。由于武器装备体系中各要素的独立性、自治性和复杂的交互性,以及体系宏观层次所表现的涌现特征更适于采用ABMS方法进行研究^[92-93]。为此,由美国海军陆战队作战实验室发起,新西兰国防科技中心、澳大利亚新南威尔士大学国家防务学院有关研究人员共同参与了Project Albert项目,相继采用基于Agent的建模仿真方法开发了EINST ein、MANA、WISDOM、SEAS等系统^[94-97],目标是共同探索当面临不确定战场环境时决策者的内在潜力,这些系统在网络中心战建模、美陆军对空间装备的需求分析和评价、网络中心战的数据融合和天基传感器作战效能分析等方面得到了应用。当前,采用ABMS方法开展武器装备体系仿真评估仍处于探索研究中,特别是对武器装备体系中Agent的理解、Agent建模、Agent之间交互关系等问题的描述还不尽一致,对基于ABMS的体系效能仿真开发和应用过程也不统一,这些都会影响基于ABMS的体系效能评估应用的有效性。

SD方法由美国麻省理工学院福雷斯特提出用于研究系统动态行为的一种计算机仿真技术^[89]。它综合应用控制论、信息论和决策论等有关理论和方法来建立系统动力学模型,以电子计算机为工具进行仿真试验。其所获得的信息被用来分析和研究系统的结构和行为,为正确决策提供科学依据^[89, 98]。系统动力学又被誉为“战略与策略试验

室”。系统动力学作为一种仿真技术具有以下特点^[98-99]:(1) 能够容纳大量变量。一般可达数千个以上;适合大系统研究的需要。(2) 描述清楚,模型具有很好的透明性。系统动力学模型,既有描述系统各要素之间因果关系的结构模型,又有专门形式表现的数学模型,是一种定性分析和定量分析相结合的仿真技术。(3) 模型可以反复运行。模型所含因素和规模可不断扩展,能起到实际系统实验室的作用。通过人机的结合,既能发挥人(系统分析人员和决策人员)对所研究系统的了解、分析、推理、评价、创造的优势,又具有利用计算机高速计算和迅速跟踪的功能来试验和剖析实际系统,从而获得丰富和深层次信息,为选择最优或满意的决策提供有力依据。(4) 系统动力学能做定量分析。通过模型进行仿真计算,可预测未来一定时期各变量随时间而变化的曲线和数值的变化情况。也就是说,系统动力学能做长期的、动态的、战略的定量分析研究,特别适用于处理高阶次、非线性、多重反馈的复杂时变系统的有关问题。

1.5 基于新兴评估方法的体系效能评估

Vapnik 等 1995 年提出支持向量机(SVM)回归机模型,能够很好地解决武器装备体系效能评估中所面临的数据少、非线性和模型维数高等问题。不同于传统的基于经验风险最小化的学习理论,SVM 服从统计学习理论中的结构风险最小化原则,具有拟合精度高、训练时间短、选择参数少、泛化能力好等优势^[100]。SVM 评估模型主要根据获取的系统数据,通过学习和训练找出输入与输出之间的内在联系,并不依赖对所求解问题的经验和规则,因而具有自适应功能,有利于弱化人为因素。SVM 的核心是构造一个最优分类超平面,进而能够将两类待分样本集准确地分开。在求解最优分类超平面所对应的二次规划问题时,惩罚因子是决定 SVM 学习能力和经验风险协调的一个关键因素。若惩罚因子过大,就会引起过学习,致使分类器的泛化能力降低;反之,则会导致分类器的分类正确率过低,甚至使整个分类器模型失效^[101]。由于体系效能受作战环境要素影响显著且不同的要素影响程度不同,因此在应用 SVM 时,对惩罚因子的选取需

格外注意,应充分利用环境要素的重要性差异,提高评估性能。

PETRI 网是描述具有同步、并发、冲突特征的离散事件动态系统的有效工具^[101]。PETRI 网既是一种图形化模型但又有严格准确的数学描述,因此其具有 2 个显著的优势:(1) 作为图形化模型,它能形象地描述和分析系统资源的行为特征,建立的模型直观易懂;(2) 借助相应的数学工具,PETRI 网能在各种抽象级别上描述系统,具有比较完善的结构分析方法和技术,方便人们对 PETRI 网模型进行静态的结构分析和动态的行为分析,如系统的有界性、活性、可达性、冲突、死锁等。鉴于以上优点,Petri 网已成为武器装备体系效能评估领域的研究热点之一。芦珊珊等^[103]基于扩展 PETRI 网对雷达组网系统的体系效能进行了评估分析,验证了采用 PETRI 对雷达系统建模与分析的有效性。沈楠等^[104]利用 PETRI 网技术解决了雷达对抗仿真过程中对并行、异步和随机时间等复杂离散事件的描述问题。浓如松等^[105]则通过 PETRI 网将功能模型、物理模型和作战效能模型结合起来,建立了航天装备体系作战效能模型,并进一步对航天装备体系作战效能进行了评估。

武器装备在设计、试验与应用过程中积累了大量的数据,可以梳理出量化的装备体系效能指标及其影响因素的集合,数据挖掘技术便有了用武之地。数据挖掘方法利用装备实验或使用阶段获得的海量数据作为评估依据,对影响因素和体系效能指标之间的关系进行探索性分析或验证,一方面去芜存菁,保留值得关注的因素,另一方面也有助于发现是否存在被忽视的隐含因素或因素之间的交叉作用^[106]。通过对大数据的持续利用,数据挖掘方法可得到不断细化装备的效能评估模型。然而,如何选择数据挖掘策略是采用数据挖掘方法进行体系效能评估所存在的难点。同时,由于在性能验证过程中需要依赖非线性回归或神经网络训练等手段,该方法应用难度也较高。目前,基于数据挖掘的体系效能方法仍处于探索阶段,实践范例不多。

博弈论是研究具有对抗性或竞争性问题的数

学理论和方法,是运筹学的一个重要学科分支。在博弈现象中,参加竞争或对抗的各方具有不同的利益和目标。为了达到各自的利益和目标,各方必须考虑对手的各种可能的行动方案,并力图选择对自己最有利或最合理的方案,从而形成了对抗双方动态的对抗过程。博弈论被广泛应用于雷达系统的抗干扰性能评估中。黄玉川等^[107]运用博弈论的相关理论,研究了雷达对抗过程中干扰机干扰能力的动态的评估问题。张永顺^[108]应用博弈论模型分析了雷达对抗系统的动态博弈过程。何俊^[109]独创性地采用信号博弈分析模型研究了雷达对抗问题中存在的各种复杂的技术因素和人为因素。近期,博弈论方法也已被用于通信装备电子防御系统和测控系统的作战效能评估中^[110-111]。

1.6 典型体系效能评估方法优缺点分析

虽然经过多年的体系效能评估已经取得了较大的发展,但是各种方法仅在特定场景下能够取得较好的结果。针对实际应用各种方法表现出不同的适应性。解析法的优点是使用简单、计算高效,其缺点也相对明显,即通常只能解决比较明确、简单、便于抽象的问题。该方法通常用于对作战体系的静态能力进行评估,有时也将解析分析模型作为其他模型的子模型用于动态能力评估。

以层次分析法为代表的专家评估法对作战体系的要求不高,操作实现比较容易,直观性强,不仅可以得到效能指标的评估值,也能展示装备性能、作战规则等因素对效能指标的影响。然而,专家评估法的准确度取决于专家的经验以及知识积累,且在联合作战背景下,容易忽略各单体之间、总体与单体之间的信息交互。因此,该方法在体系效能评估中的精确性与适用性易受到制约。

作战模拟法的优点是直观、真实、说服力强,可实现大规模作战问题的研究分析。该方法可以通过改变作战模拟的条件,观察分析联合作战体系在不同作战条件下的作战状况和结果,并分析作战体系存在的问题。其缺点是实现比较复杂,建设周期长,对作战模型和作战数据的要求也相对较高。

基于仿真的体系效能评估法可视为作战模拟法的拓展和扩充。该方法可以更有效地实现和分

析大规模的、复杂的联合作战体系的体系效能评估工作,获得比作战模拟法更高的分析能力,并能够从更高层的系统观解释体系中每个独立系统之间的性能和交互关系。但是,相比于作战模拟法,该方法对计算机仿真平台的要求也更高,因而实现相对困难。

新兴的评估方法作为近年来新兴的体系效能评估方法,在非线性、不确定系统中的应用具有较明显的优势,然而由于缺乏实际数据,同时其可解释性较差,因此也限制了这些方法的应用。

2 联合作战体系效能评估存在的问题与挑战

联合作战背景下的体系效能评估一直是装备论证、体系规划以及作战指挥中需要解决的核心问题之一,对装备建设与发展、作战指挥与决策具有重要的影响。其主要是在对敌我态势、兵力、装备、部署进行全部或部分掌握的前提下,以可行性、费效比、时效性、风险等因素为约束,通过计算、推演等方法评价作战结果的影响,以支持管理和指挥人员对体系方案的作战效果进行评价,从而调整体系结构、力量编成及作战指挥方案。传统以定性分析为主的效能评估方法,在过去也产生了许多研究成果,但是对于复杂体系来说,仅仅依靠定性方法很难对实际产生较准确的指导作用。由于联合作战体系的复杂性、影响作战效果因素的多样性、作战环境态势感知的不完备性等因素,往往导致体系效能评估应用过程存在一定的实际问题,其主要表现在以下2个方面。

1) 缺乏有效的实验手段和实验方法。由于联合作战体系是由情报系统、指挥控制系统、通信网络系统、火力系统以及后勤保障系统等组成的复杂体系(图2),一次典型作战任务可能需要协调陆、海、空、天、电磁、网络等多域作战资源,因此随着作战规模以及任务复杂性的提升,带来作战区域跨度大、装备资源分布广、体系组成多样等现状,造成系统交联关系复杂、相互制约多、相互影响大导致联合作战体系建立困难。同时,要进行准确体系效能

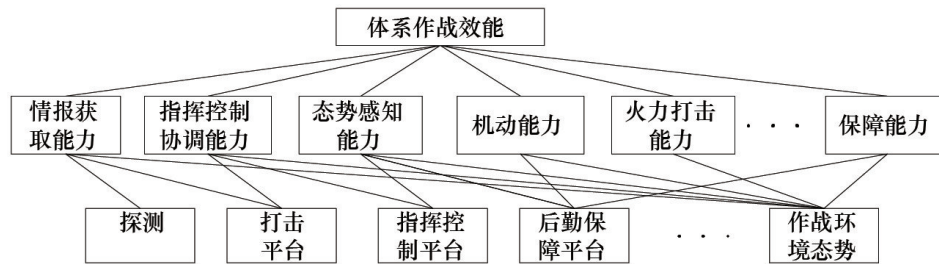


图2 联合作战背景下层次分析模型示例

评估,还需要借助情报系统进行战场态势感知、以获取关于作战对手的兵力部署、可能的体系支撑、战场环境态势、指挥员作战意图等情报信息,然而这些信息往往具有隐蔽性、不确定性和不完备性等特征,因此,难以构建逼真的作战环境。因此,现有的大多数体系效能评估方法都是将复杂体系进行要素简化,同时建立在一定假设的基础上或者将复杂作战体系人为分解成若干子系统,虽然这些处理方法在一定程度上具有技术支撑作用,但这些方法还与实际作战应用存在较大差距。

2) 评估指标体系建立、参数量化描述以及准确的评估模型建立困难。要全面描述和刻画复杂系统,就必须建立全面体系评价指标体系,最终依据指标体系进行多目标优化,然而在联合作战背景下,不仅需要考虑单个装备效能,情报的获取、要素间的融合等要素都要纳入体系评估指标,每个要素都要结合作战场景构建对应评估指标集,因此建立全面客观的体系评估指标体系是首先要解决的问题;经验驱动的传统评估方法由专家凭借经验和知识给出评估指标值,然而专家的偏好往往不同难免存在不客观的因素,同时以往的经验往往是针对某一特定条件,随着外部条件的变化,参数具体数值也可能发生变化,由此得到的效能评估结果具有强烈的主观性和不确定性,近年来兴起的机器学习方法在一定程度上改善了这部分问题,但这方面研究还处于起步阶段,需要进一步研究和发展;体系评估的关键在于所建立的模型是否能够描述体系变化规律,然而影响体系运行的因素错综复杂,彼此之间相互影响,传统的模型结构难以对指标间的关联以及指标和效能间的关系准确描述,作战模拟

法虽然能够一定程度上改善,但随着体系复杂度的增加,建立仿真模型的难度也直线上升,因此怎样建立合理的复杂体系效能评估模型,得到可信的评估结果是必须解决的问题。

3 联合作战体系效能评估未来发展方向

总体来看,面向联合作战的体系效能评估还处于探索阶段,还有很多方面的问题需要进行深入研究,其主要表现在以下3个方面。(1) 指标体系建立:要全面描述和刻画复杂系统,就必须建立全面体系评价指标体系,最终依据指标体系进行多目标优化,然而在联合作战背景下,不仅需要考虑单个装备效能,情报数据的获取、多个装备间的协同等要素的效能都要纳入体系评估指标加以研究,每个要素都要结合作战场景构建对应评估指标集。例如在基于解析法的效能评估中如何建立适应于联合作战效能评估的复杂目标以及全面覆盖可用性、可信性和固有能力的指标体系,是决定算法成功应用的关键。因此建立全面客观的体系评估指标体系是首先要解决的问题。(2) 评估体系参数量化描述:经验驱动的传统评估方法由专家凭借经验和知识给出评估指标值,然而专家的偏好往往不同难免存在不客观的因素,同时以往的经验往往是针对某一特定条件,随着外部条件的变化,参数具体数值也可能发生变化,由此得到的效能评估结果具有强烈的主观性和不确定性。例如如何使解析法确定的参数,如何通过模拟法能够适应时变系统对效能评估的需求,如何更加客观地获取专家评估参数

等。近年来兴起的机器学习方法在一定程度上改善了这部分问题,但这方面研究还处于起步阶段,需要进一步研究和发展。(3) 评估模型的建立:体系评估的关键在于所建立的模型是否能够描述体系变化规律,然而影响体系运行的因素错综复杂,彼此之间相互影响,传统的模型结构难以对指标间的关联以及指标和效能间的关系准确描述,作战模拟法虽然能够一定程度上改善,但随着体系复杂度的增加,建立仿真模型的难度也直线上升,因此怎样建立合理的复杂体系效能评估模型,得到可信的评估结果是必须解决的问题。随着人们逐渐意识到数据的重要性,训练、演习和实战的数据将被大量采集和存储,而数据挖掘和机器学习的快速发展,给了深入探索这些数据的可能性。运用这些新技术分析评估指标和作战效能之间的复杂关系,建立有效的联合作战体系效能评估模型,是未来值得研究的一个方向。关于体系效能评估方法的研究逐渐由数值计算向模拟仿真过渡,同时确定性计算向不确定推理过渡,同时由于复杂系统存在的非线性、时变性、不确定性等,因此将传统方法与新兴评估方法进行组合使传统方法具备适应复杂系统的能力也是系统效能评估方法的一个重要发展方向。

4 结论

体系效能评估是提升武器装备论证、作战资源规划以及联合作战效能的关键和基础,由于体系的复杂性,导致效能评估手段多样,至今还没有一种方法能够完全适应复杂体系的评估问题,各种方法仅能适用于特定应用场景。因此本文对现有的主流评估方法进行了综述,指出了各种方法在应用中的优势和不足,在此基础上对联合作战效能评估过程存在的问题与挑战进行了总结,最后对一体化联合作战体系效能评估未来发展方向进行了展望。

参考文献(References)

- [1] 柯加山, 江敬灼, 许仁杰, 等. 联合作战体系对抗效能评估探索性分析框架[J]. 军事运筹与系统工程, 2005, 19(4): 58-61.
- [2] 肖利辉, 黄玉章. 一种基于系统论思想的作战体系效能评估方法[J]. 军事运筹与系统工程, 2016, 30(1): 18-22.
- [3] 胡晓峰. 战争工程论: 走向信息时代的战争方法学[M]. 北京: 科学出版社, 2017.
- [4] 罗宇. 防空导弹武器系统效能评估研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2016.
- [5] 齐晓光. 技术对武器装备体系的贡献度评估方法研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2015.
- [6] 李登峰, 孙涛, 王永春. 舰艇编队信息战火力分配微分对策模型及求解[J]. 控制理论与应用, 2008, 25(6): 1163-1166.
- [7] 李飞, 胡荣, 胡剑波, 等. 空天云作战指挥控制效能评估[C]//第六届中国指挥控制大会. 北京: 电子工业出版社, 2018, 904-909.
- [8] 李翼鹏, 鲁赢, 王旭. 空天环境对作战效能的影响——基于云模型的评估方法[J]. 国防科技, 2017, 38(2): 28-32.
- [9] 叶雄兵, 侯跃伟. 信息化战争火力毁伤效能评估方法初探[J]. 军事运筹与系统工程, 2016, 30(2): 5-8.
- [10] Helmbold R L. A Modification of Lanchester's Equations[J]. Operations Research, 1965, 13(5): 857-859.
- [11] Taylor J G. Lanchester-type models of warfare and optimal control[J]. Naval Research Logistics Quarterly, 1974, 21(1): 79-106.
- [12] 水本雅晴. 模糊数学及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 1988.
- [13] Saaty T L. Axiomatic foundation of the analytic hierarchy process[J]. Management Science, 1986, 32(7): 841-855.
- [14] Saaty T L. Decision making with the analytic hierarchy process[J]. International Journal of Services Sciences, 2008, 1(1): 83-98.
- [15] Charnes A, Cooper W W, Rhodes E. Measuring the efficiency of decision making units[J]. European Journal of Operational Research, 1978, 2(6): 429-444.
- [16] 杨镜宇, 胡晓峰, 张昱, 等. 基于体系仿真实验的联合作战能力评估技术[J]. 指挥信息系统与技术, 2017, 8(4): 1-9.
- [17] Stone III G F, McIntyre G A. JWARS: the joint warfare system (JWARS): A modeling and analysis tool for the defense department[C]//Proceedings of the 33rd Conference on Winter Simulation. IEEE Computer Society, 2001: 691-696.
- [18] Metz M L. Joint Warfare System(JWARS) verification and validation lessons learned[C]//2000 Winter Simulation Conference. Washington: IEEE, 2000, 1: 855-858.
- [19] Davis P K, Hillestad R. Exploratory analysis for strategic problems with massive uncertainty[R]. Santa Monica-

- CA: Rand Corporation, 2001.
- [20] Davis P K, Bigelow J, McEver J. Exploratory analysis and a case history of multiresolution, multiperspective modeling[M]. Santa Monica CA: Rand Corporation, 2000.
- [21] Davis P K, McEver J, Wilson B. Measuring interdiction capabilities in the presence of anti-Access Strategies: Exploratory analysis to inform adaptive strategy for the Persian Gulf[R]. Santa Monica CA: Rand Corporation, 2002.
- [22] 芮平亮, 傅军. 面向网络中心化信息系统的体系结构描述框架[J]. 指挥信息系统与技术, 2012, 3(3): 6-10.
- [23] Hause M. The Unified Profile for DoDAF/MODAF (UPDM) enabling systems of systems on many levels[C]// 2010 IEEE International Systems Conference. IEEE, 2010: 426-431.
- [24] Hamilton Jr J A. DoDAF-based information assurance architectures[J]. CrossTalk, 2006, 19: 4-7.
- [25] Hause M. The Unified Profile for DoDAF/MODAF (UPDM) enabling systems of systems on many levels[C]// 2010 IEEE International Systems Conference. IEEE, 2010: 426-431.
- [26] Bailey I. Brief introduction to MODAF with v1. 2 updates[C]//2008 IET Seminar on Enterprise Architecture Frameworks. IET, 2008: 1-18.
- [27] Xia Z J, Zhang X H, Fan W T, et al. Evaluation of underwater acoustic warfare operational effectiveness for surface ship based on IAHP[J]. Journal of Information & Computational Science, 2012, 9(1): 247-255.
- [28] Tomaszek H, Kaleta R, Zieja M. How to formulate rates to assess operational effectiveness of military aircraft—an introduction[J]. Journal of KONES Powertrain and Transport, 2012, 19: 525-530.
- [29] Chen X, Jiang N, Jing Y, et al. Differential game model and its solutions for force resource complementary via Lanchester square law equation[J]. IFAC Proceedings Volumes, 2011, 44(1): 14229-14233.
- [30] 唐铁军, 徐浩军. 应用兰彻斯特法进行体系对抗效能评估[J]. 火力与指挥控制, 2007, 32(8): 52-54.
- [31] 丛红日, 褚政, 丁光强. 基于兰彻斯特方程的体系对抗过程分析与评估方法[J]. 海军航空工程学院学报, 2016, 31(6): 666-670.
- [32] 王威, 闵绍荣, 谢红胜, 等. 用于舰艇效能评估的兰彻斯特方程改进研究[J]. 中国舰船研究, 2013, 8(1): 98-101, 122.
- [33] 郑玉军, 张金林, 李跃华. 基于改进 ADC 方法的某型特种装备作战效能评估[J]. 空军雷达学院学报, 2012, 26(3): 202-204.
- [34] 刘仕雷, 李昊. 改进 ADC 方法及其在武器装备系统效能评估中的应用[J]. 国防科技大学学报, 2017, 39(3): 130-135.
- [35] 王君, 赵杰, 邵雷, 等. 基于 ADC 方法的地空导弹系统效能评估模型[J]. 现代防御技术, 2015, 43(6): 13-20.
- [36] 陈辉, 林强, 付世奇. 基于改进 ADC 法的雷达阵地现场优化效能评估[J]. 航天电子对抗, 2012(4): 49-52.
- [37] 王暄, 陶禹, 樊丹瑛. 基于 ADC 方法的复杂武器系统效能评估方法[J]. 火力与指挥控制, 2016, 41(2): 113-116.
- [38] 吴晓锋, 周智超. SEA 方法及其在 C3 I 系统效能分析中的应用(I)——概念与方法[J]. 系统工程理论与实践, 1998, 18(11): 66-69.
- [39] 吴晓锋, 周智超. SEA 方法及其在 C3I 系统效能分析中的应用(IV)——系统效能分析[J]. 系统工程理论与实践, 1999, 19(2): 44-49.
- [40] 许桂明, 赵树林, 武攀. SEA 方法对指挥信息系统的效能分析[J]. 指挥信息系统与技术, 2011, 2(4): 31-35.
- [41] 程浩, 王雪琴, 谢鹏翔. 基于 SEA 方法的远程火箭炮系统效能对比分析[J]. 舰船电子工程, 2010(1): 49-52.
- [42] 张弛, 殷璐嘉. 指挥信息系统的 SEA 效能评估方法[J]. 信息化研究, 2016(2): 13-16.
- [43] 黄孝鹏, 吴少鹏. 基于改进指数法的海用雷达综合效能概念及建模技术[J]. 雷达与对抗, 2017, 37(4): 1-6.
- [44] 刘晓荷, 朱汉东, 赵虹. 利用指数法评估作战飞机的作战效能[J]. 军事运筹与系统工程, 2004(2): 59-65.
- [45] 彭维仕. 防暴发射武器系统作战效能评估[J]. 火力与指挥控制, 2015, 40(11): 142-144.
- [46] 张涛, 周中良, 苟新禹, 等. 基于信息熵和 TOPSIS 法的目标威胁评估及排序[J]. 电光与控制, 2012, 19(11): 35-38.
- [47] 徐敬, 张生. 基于信息熵的反导系统综合作战效能评估研究[J]. 指挥控制与仿真, 2010, 32(5): 63-66.
- [48] 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): 73-80.
- [49] 唐鑫, 杨建军, 张磊. 改进信息熵的新装备体系作战效能评估方法研究[J]. 舰船电子工程, 2016, 36(7): 128-133.
- [50] 郑治国, 魏建永, 肖伟, 等. 从历史发展的角度看战斗力生成模式转变的必然性[J]. 军事交通学院学报, 2012, 14(4): 65-68.
- [51] 陈行勇, 张殿宗, 雷国强. 基于战场电磁环境影响度的兰彻斯特战斗模型[J]. 电子信息对抗技术, 2014(2): 62-66.
- [52] 曹海航, 田森平, 张友强. 结合兰彻斯特方程分析心理因素对战争的影响[J]. 火力与指挥控制, 2018, 43(3): 58-62.
- [53] 陆凡, 郑怀洲, 刘志勤. 兰彻斯特方程的装备战损量预计方法[J]. 火力与指挥控制, 2008, 33(5): 144-147.
- [54] 杨立功, 郭齐胜, 潘高田. 聚合级实体仿真中损耗模型参数校准方法的研究[J]. 系统仿真学报, 2006, 18(4):

- 1023-1025.
- [55] 黄一斌, 周电杰, 潘高田, 等. 反映作战协同的兵力损耗微分方程[J]. 火力与指挥控制, 2009, 34(6): 94-95.
- [56] 丛红日, 吴福初, 陈邓安. 基于兰彻斯特方程的防御作战效能分析[J]. 海军航空工程学院学报, 2015, 30(2): 187-190.
- [57] 张国熊, 朱宏, 张建科, 等. ADC 模型在火控雷达作战效能分析中的应用[J]. 舰船电子工程, 2009, 29(9): 105-107.
- [58] 王世学, 李兆耿. 基于改进 ADC 模型的坦克作战效能评估[J]. 兵工自动化, 2009(7): 18-20.
- [59] 陈辉, 林强, 付世奇. 基于改进 ADC 法的雷达阵地现场优化效能评估[J]. 航天电子对抗, 2012(4): 49-52.
- [60] 辛永平, 李军, 刘晨. 指数法在防空系统效能评价中的运用[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2002, 3(2): 56-58.
- [61] Dupuy T N. Numbers, predictions and war: Using history to evaluate combat factors and predict the outcome of battles[M]. Indianapolis, IN: Bobbs-Merrill, 1979.
- [62] 贾利军, 薛青, 王文悦. 灰色层次分析决策方法在坦克评估中的应用[J]. 装甲兵工程学院学报, 2003, 17(2): 42-45.
- [63] 张立, 肖丁. 鱼雷武器系统作战效能评估研究[J]. 舰船电子工程, 2012, 32(7): 31-34.
- [64] 柳李鹏, 曹菲, 毋凡. 基于专家集成赋权-灰色聚类法的引信抗干扰效能评估[J]. 探测与控制学报, 2018, 40(6): 7-13.
- [65] Ramanathan R, Ganesh L S. Group preference aggregation methods employed in AHP: An evaluation and an intrinsic process for deriving members' weightages[J]. European Journal of Operational Research, 1994, 79(2): 249-265.
- [66] Yue Z. Developing a straightforward approach for group decision making based on determining weights of decision makers[J]. Applied Mathematical Modelling, 2012, 36(9): 4106-4117.
- [67] Xu Z, Cai X. Minimizing group discordance optimization model for deriving expert weights[J]. Group Decision and Negotiation, 2012, 21(6): 863-875.
- [68] 闫书丽, 刘思峰, 方志耕, 等. 区间灰数群决策中决策者和属性权重确定方法[J]. 系统工程理论与实践, 2014, 34(9): 2372-2378.
- [69] 邵建军. 一种爆破型鱼雷战斗部对舰船毁伤效能评估方法[J]. 水下无人系统学报, 2017, 25(4): 272-277.
- [70] 杨仁宝, 蔡远文. 运载火箭效能评估体系研究[J]. 装备指挥技术学院学报, 2002, 13(1): 50-52.
- [71] 唐政, 孙超, 刘宗伟, 等. 基于灰色层次分析法的水声对抗系统效能评估[J]. 兵工学报, 2012, 33(4): 432-436.
- [72] Saaty T L. Decision making with dependence and feedback[M]. Pittsburgh: RWS Publication, 1996.
- [73] Saaty T L. The analytic network process[M]. Pittsburgh: RWS Publication, 1996.
- [74] 汪彦明, 徐培德. ANP 的指挥控制系统作战效能评估[J]. 火力与指挥控制, 2007(11): 79-82.
- [75] 吕游, 李正军, 付晓, 等. ANP 在依托 C4ISR 的指挥控制效能评估中的应用研究[J]. 指挥控制与仿真, 2016, 38(3): 79-82.
- [76] 王海滨, 吴魁, 陈海东. 基于灰色关联分析改进的 ANP 效能评估方法[J]. 导弹与航天运载技术, 2013, 5: 69-72.
- [77] 李敬. 反舰导弹主动雷达导引头抗干扰性能评估方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2013.
- [78] 周经伦, 穆富岭, 罗鹏程, 等. 空军对地攻击战役解析模拟系统[J]. 电光与控制, 2007, 14(4): 49-52.
- [79] 穆富岭, 罗鹏程, 周经伦. 基于解析模型的空军战役作战模拟系统研究[J]. 系统仿真学报, 2007, 19(8): 1723-1726.
- [80] 李艳丽. 作战模拟方法的水面舰艇反导作战效能评估[J]. 计算机仿真, 2007, 24(6): 38-41.
- [81] 王少华, 张仕新, 董原生, 等. 装甲装备保障效能评估建模和仿真方法研究[J]. 兵器装备工程学报, 2018, 19(9): 101-106.
- [82] 赵晓东, 顾鸿, 熊艳晔. 水面舰艇反导作战指挥流程仿真及效能评估[J]. 火力与指挥控制, 2014, 39(8): 43-46.
- [83] 李传方, 许瑞明, 麦群伟. 作战能力分析方法研究综述[J]. 军事运筹与系统工程, 2009, 23(3): 72-77.
- [84] Bednar E M. Feasability study of variance reduction in the thunder campaign-level model[D]. Air University, 2005.
- [85] 董良东, 陈晓, 曾兴善. 武器装备体系效能评估方法研究[J]. 兵工自动化, 2008, 27(2): 30-31.
- [86] Atwell R J, McBryde D G. Theater-level ground combat analyses and the TACWAR submodels[R]. Institute For Defense Analyses Alexandria VA, 1991.
- [87] 黄建新. 基于 ABMS 的体系效能仿真评估方法研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2011.
- [88] 黄建新, 李群, 贾全, 等. 基于 ABMS 的体系效能评估框架研究[J]. 系统工程与电子技术, 2011, 33(8): 23-26.
- [89] 周威, 常显奇. 系统动力学方法在武器装备体系效能评估中的应用研究[J]. 指挥技术学院学报, 2001, 12(6): 28-31.
- [90] Davis P K, Hillestad R. Exploratory analysis for strategy problems with massive uncertainty[R]. Santa Monica, CA: Rand Corporation, 2001.
- [91] Davis Paul K, Mc Ever Jimmie, Wilson Barry. Measur-

- ing interdiction capabilities in the presence of anti-access strategies: Exploratory analysis to inform adaptive strategy for the persian gulf[R]. Santa Monica, CA: Rand Corporation, 2002.
- [92] US Marine Corps, Project Albert Website[EB/OL]. [2021-09-20]. <http://www.projectalbert.org>.
- [93] Anthony H Dekker. Social network analysis in military headquarters using CAVALIER[C]//Proceedings of 5th International Command and Control Research and Technology Symposium, Australian War Memorial, Canberra ACT, Australia, 2000.
- [94] James M, Josephine S, Susan W. Emergent behaviour: Theory and experimentation using the MANA Model[C]//Proceedings of 9th International Command and Control Research and Technology Symposium, Denmark, 2004.
- [95] Galligan D P, Anderson M A, Lauren M K. MANA: Map aware non-uniform automata version 3.0.37 User's Manual[A]. Auckland, New Zealand: New Zealand Defense Technology Agency, 2004.
- [96] Lauren M K, Stephen R T. Map-aware non-uniform automata (mana)—A New Zealand approach to scenario modelling[J]. Journal of Battlefield Technology, 2002, 5: 1-13.
- [97] James M, Josephine S, Susan W. Emergent behaviour: Theory and experimentation using the MANA model[J]. Journal of Applied Mathematics and Decision Sciences, 2006, doi: 10.1155/jamds/2006/54846.
- [98] 周威, 常显奇. 系统动力学基本理论仿真平台的开发与应用[J]. 指挥技术学院学报, 2001, 12(3): 33-37.
- [99] 李明, 刘澎. 武器装备系统论证方法与应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2000: 208-209.
- [100] 杨欣. 武器效能评估模型及其自学习的研究与实现[D]. 南京: 东南大学, 2015.
- [101] 王玉鑫, 李东生, 高杨. 目标识别对抗系统效能评估模型建立与仿真[J]. 舰船电子对抗, 2017, 40(6): 48-53.
- [102] 郭业波. 基于DoDAF和Petri网预警雷达系统建模及效能评估研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2018.
- [103] 芦珊珊, 邵锡军. 基于扩展Petri网的雷达组网系统的建模与分析[J]. 现代雷达, 2007(11): 32-36.
- [104] 沈楠, 何俊, 齐锋, 等. 基于Petri网的雷达对抗仿真建模研究[J]. 现代防御技术, 2011, 39(2): 167-171.
- [105] 沈如松, 张育林. 基于Petri网的航天装备体系作战效能评估方法[J]. 系统仿真学报, 2005(3): 538-540+551.
- [106] 汪洲, 胡会东. 基于数据挖掘的装备效能验证与评估方法[C]//第18届中国系统仿真技术及其应用学术年会论文集. 合肥: 中国科学技术大学出版社.
- [107] 黄玉川, 饶妮妮, 刘永红, 等. 博弈论应用于干扰效果动态评估的研究[J]. 电子科技大学学报, 2007(5): 876-879.
- [108] 张永顺. 复杂电磁环境下基于博弈论的机载雷达对抗仿真研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2011.
- [109] 何俊. 基于博弈论的雷达抗干扰评估研究[D]. 南昌: 南昌航空大学, 2014.
- [110] 杨米, 陈建忠, 牛英滔. 基于博弈论的跳频通信装备电子防御效能评估[J]. 电讯技术, 2017, 57(3): 362-368.
- [111] 李俭, 秦国领, 张开才, 等. 基于博弈论的测控系统作战效能评估[J]. 火力与指挥控制, 2019, 44(1): 105-109.

Effectiveness evaluation for system-of-systems: A review of the state of the art

YANG Jian¹, DONG Yan², BIAN Yuekui³, YAO Tong³, GENG Xiutang³

1. China Research and Development Academy of Machinery Equipment, Beijing 100089, China

2. North Institute for Scientific and Technical Information, Beijing 100089, China

3. Northwest Institute of Mechanical and Electrical Engineering, Xianyang 712099, China

Abstract The effectiveness evaluation of the joint combat system has important significance. In order to solve the problem of the confrontation effectiveness evaluation of the system-of-systems in the complex combat background, the typical effectiveness evaluation methods are reviewed. The proposed methods can provide a methodological support for the effectiveness evaluation of the operation system-of-systems. Their advantages and disadvantages are illustrated. The problems involved in the existing methods are discussed.

Keywords cooperative warfare; effectiveness evaluation; confrontation for system-of-systems; simulation and deduction ●



(责任编辑 祝叶华)