

9-18-2020

## Combat Effectiveness Simulation Evaluation Framework of Complex Weapon System

Yonglin Lei

*1. College of Systems Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China; ;*

Zhu Zhi

*1. College of Systems Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China; ;*

bin Gan

*2. Unit 32179, PLA, Beijing 100012, China;*

Lei Sen

*1. College of Systems Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China; ;*

*See next page for additional authors*

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

---

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

---

# Combat Effectiveness Simulation Evaluation Framework of Complex Weapon System

## Abstract

**Abstract:** Combat effectiveness evaluation of complex weapon system is a scientific issue both military departments and defense industry concern. Current researches on simulation-based weapon system combat effectiveness evaluation lack the specificity to complex weapon system and a simulation-based formal combat effectiveness evaluation framework is especially desired. *A framework is created and formalized on three measure layers of performance-outcome-effectiveness.* Within the framework, simulation inputs are classified into different categories different outcome measure layers and different effectiveness measure layers are considered. An example of combat effectiveness evaluation framework for typical ballistic missiles is presented to demonstrate the proposed framework.

## Keywords

complex weapon system, effectiveness evaluation, combat simulation, formal measure framework

## Authors

Yonglin Lei, Zhu Zhi, bin Gan, Lei Sen, and Chen Yong

## Recommended Citation

Lei Yonglin, Zhu Zhi, Gan bin, Lei Sen, Chen Yong. Combat Effectiveness Simulation Evaluation Framework of Complex Weapon System[J]. Journal of System Simulation, 2020, 32(9): 1654-1663.

# 基于仿真的复杂武器系统作战效能评估框架研究

雷永林<sup>1</sup>, 朱智<sup>1</sup>, 甘斌<sup>2</sup>, 雷森<sup>1</sup>, 陈永<sup>1</sup>

(1. 国防科技大学系统工程学院, 湖南 长沙 410073; 2. 中国人民解放军 32179 部队, 北京 100012)

**摘要:** 复杂武器系统作战效能评估是军方和工业方共同关心的科学问题。指出了现有武器装备作战效能仿真评估缺乏面向复杂武器系统的针对性、缺乏以仿真方法为主导的形式化评估框架等问题。采用“性能-效果-效能”分层的思路搭建了基于仿真的复杂武器系统作战效能评估指标体系框架, 并进行了形式化研究。该框架综合考虑不同种类的仿真输入、效果指标和效能指标, 能够一体化地指导复杂武器系统的作战效能仿真评估工作。结合弹道导弹的作战效能评估进行了案例研究。

**关键词:** 复杂武器系统; 效能评估; 作战仿真; 形式化指标体系框架

中图分类号: TP391      文献标识码: A      文章编号: 1004-731X (2020) 09-1654-10

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.20-0373

## Combat Effectiveness Simulation Evaluation Framework of Complex Weapon System

Lei Yonglin<sup>1</sup>, Zhu Zhi<sup>1</sup>, Gan bin<sup>2</sup>, Lei Sen<sup>1</sup>, Chen Yong<sup>1</sup>

(1. College of Systems Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;

2. Unit 32179, PLA, Beijing 100012, China)

**Abstract:** Combat effectiveness evaluation of complex weapon system is a scientific issue both military departments and defense industry concern. Current researches on simulation-based weapon system combat effectiveness evaluation lack the specificity to complex weapon system and a simulation-based formal combat effectiveness evaluation framework is especially desired. A framework is created and formalized on three measure layers of performance-outcome-effectiveness. Within the framework, simulation inputs are classified into different categories different outcome measure layers and different effectiveness measure layers are considered. An example of combat effectiveness evaluation framework for typical ballistic missiles is presented to demonstrate the proposed framework.

**Keywords:** complex weapon system; effectiveness evaluation; combat simulation; formal measure framework

## 引言

复杂武器系统一般由多个相对独立、紧密联系的单件武器装备组成, 被设计用来完成特定使命任务, 是军方进行装备采办的基本单位。典型的复杂

武器系统包括战斗机、预警机、大型水面舰艇、潜艇、弹道导弹等。从功能上看, 复杂武器系统一般包括平台、探测、侦查、指控、火力、电抗、通信、保障等多个有机联系的子系统。复杂武器系统是构成现代战争的基本单元, 可以独立部署, 也可以和其它武器系统互连形成武器装备体系或作战体系。

作战效能是对武器装备在规定的时间内、规定的作战条件下, 完成规定作战使命任务程度的度量。作战效能集中反映了武器装备的军事价值,



收稿日期: 2020-06-17      修回日期: 2020-06-29;  
基金项目: 国家自然科学基金(61273198);  
作者简介: 雷永林(1978-), 男, 陕西大荔, 博士, 副教授, 研究方向为装备体系论证与仿真评估; 朱智(1989-), 男, 贵州安顺, 博士, 讲师, 研究方向为智能建模与仿真评估。

<http://www.china-simulation.com>

• 1654 •

是军方进行复杂武器系统全寿命周期采办活动(需求论证、试验鉴定、使用维护等)的主要抓手,也是工业方总体部门进行复杂武器系统有关系统工程活动(方案论证、优化设计、定型改型等)的主要依据。

单件装备一般不具备独立完成使命任务的能力,对其进行效能评价更多地是采用反映作战潜能的性能指标,一般由工业方通过靶场试验开展;装备体系作战效能评估的主要目的是解决复杂作战任务条件下武器装备的规模配比和体系架构优化问题,一般军方装备研究部门通过作战运筹方法或体系仿真实验方法开展。复杂武器系统的作战效能则介于二者之间,属于军方和工业方共同关注的问题,一般涉及多类型的作战使命任务、不确定的作战对手和复杂的作战环境条件,传统的运筹学方法(解析法、指数法等)和实际作战试验的方法均面临较大局限,基于作战仿真的方法在实际工作中发挥的作用越来越大。

学术界在基于仿真的武器装备作战效能评估方法和应用框架方面取得了不少研究进展。文献[1]总结了武器装备作战效能评估分析的 4 类模式,给出了基于仿真的武器装备作战效能评估分析框架。文献[2]指出了作战效能评估与对抗仿真数据脱节的问题,提出了以整体评估、信息效能分析、灵敏度分析、贡献度分析、因果追溯分析为核心的对抗仿真作战效能评估内容和评估流程。文献[3]提出了武器装备效能仿真评估的形式化描述,提出了武器装备的“装备层-想定层-使命层-体系层”4 层效能结构。文献[4]研究了以仿真方法为主导,多源数据融合条件下的导弹作战效能评估问题。结合复杂武器系统的作战效能评估实际,现有的武器装备作战效能仿真评估研究仍然存在以下几方面亟待进一步研究的问题:

(1) 缺乏面向复杂武器系统的针对性和一般性:当前关于武器装备作战效能仿真评估的一般性研究中<sup>[1-6]</sup>,研究对象颗粒度不明确,有些到装备体系,有些到单件装备,有些涵盖部队兵力,缺乏

针对复杂武器系统的聚焦性研究。有关具体复杂武器系统类型的作战效能仿真评估研究中<sup>[7-10]</sup>,有关研究成果一般性不足,难以有效指导其它复杂武器系统的效能评估工作。

(2) 缺乏以仿真为主导的作战效能评估指标体系框架:现有复杂武器系统作战效能评估指标体系大多以解析法为主导,主要关注能力指标,没有充分考虑作战使命任务和作战对手,难以有效反映作战效能的动态性。部分指标体系虽然包含作战效能(作为下层或叶节点层指标),但这些指标与其余部分的能力指标之间往往存在因果关系,存在重复考虑问题。部分以仿真为主导的具体武器系统作战效能评估方法中,重点关注的是最终战果,对作战中间环节战果的关注不足,而这些指标对于武器装备作战方案的变化更敏感,更能作为复杂武器系统总体方案优选的依据。随着仿真方法的日趋成熟,迫切需要以仿真为主导的评估指标体系框架。

(3) 缺乏支持作战效能仿真评估的一体化、形式化框架:由于缺乏以仿真方法为主导的作战效能评估框架,存在评估与仿真“两张皮”现象;尚未就作战效能仿真评估问题达成对数字化共识,迫切需要将作战效能评估和作战仿真工作有机联系起来的一体化、形式化的参考框架。文献[3]就作战效能仿真评估问题进行了形式化研究,但还不够聚焦,有待于进一步深入,以便一体化地指导评估指标体系建立、仿真建模、评估分析、探索优化等工作,并支持有关工具平台的开发。

## 1 复杂武器系统作战效能仿真评估的基本概念

### (1) 装备性能指标与作战效能指标

装备性能指标反映的是复杂武器系统各子系统(单件装备)的潜能,是武器装备在典型环境条件下的一组力量量化表征,具有物理单位(如时长、距离、速度、重量、频率等)。在支持作战试验鉴定时一般通过性能试验得到,在支持总体方案论证时属于军方装备研究部门和工业方总体部门优化

作战效能的对象,优化后形成的总体方案则下达给单件装备的研制部门。在武器装备定型列装后,执行不同的作战使命任务时其性能指标一般保持不变。作战效能指标是刻画武器装备在给定时间和作战环境条件下遂行指定作战使命任务满足使命任务需求程度的一组量化指标,一般表达为概率类指标(比率、比例、概率等)。复杂武器系统作战效能不仅取决于装备性能指标,而且与对复杂武器系统的作战使用策略、使命任务所涉及的作战威胁环境等因素密切相关,还受武器装备在作战环境中的可用性和可靠性指标的影响,是一个高维度综合性指标。

### (2) 作战威胁环境与作战使用策略

对于给定的复杂武器系统总体方案,其装备性能指标已经确定,在假定武器装备可用、可靠的条件下,影响作战效能的因素主要是作战威胁环境和作战使用策略。作战威胁环境是对作战任务场景的描述,包括作战环境和作战对手两个方面,作战对手又包括敌方兵力的部署、武器系统的性能指标以及作战使用策略等方面。作战使用策略指复杂武器系统在作战使用中与作战任务有关的控制量。如弹道导弹的突防飞行程序、战斗机的航路规划、空空导弹的发射决策距离比、防空反导系统的拦截策略等。在给定作战威胁环境条件下,作战效能的发挥与对复杂武器系统的作战使用策略密切相关。在复杂武器系统的论证设计阶段,作战效能评估一般是在给定作战使用策略的条件下进行的,但随着复杂武器系统总体方案的逐步确定,给出在不同作战条件下的优化使用策略逐步成为作战效能评估工作的目标,特别是在作战试验鉴定阶段。

### (3) 想定作战效能与任务作战效能

从分析的角度,可将作战效能指标分为想定作战效能和任务作战效能 2 个层次。想定作战效能重点表达武器装备在执行给定使命任务的某一具体场景想定中的表现,主要依赖于作战效果和作战代价两个方面的战果统计。想定作战效能评估主要基于仿真的方法,思路是以复杂武器系统性能指标、

作战使用策略和作战威胁环境为输入,以作战效果为评估基本数据,应用综合评估方法进行想定作战效能评估。任务作战效能是对复杂武器系统完成某一使命任务的能力表征,是对执行该任务的多样化场景态势条件下不同想定作战效能的综合。任务作战效能的评估主要采用综合评估方法,在想定作战效能评估结果的基础上综合计算。常用的综合评估方法有德尔菲法、专家赋权法、层次分析法 AHP、网络层次分析法 ANP、模糊综合评判、理想点法等。

## 2 复杂武器系统作战效能仿真评估指标体系框架

### 2.1 复杂武器系统作战效能仿真评估指标体系设计需求

同一个源模型可以有多种形式的模型转换,不同的模型转换显然具有不一样的评价标准,如何选择合适的模型转换是 MDD 中至关重要的环节。寻求统一的向导式规则以供选择最佳的模型转换方式显然是不现实的,但可以借鉴软件工程中一些基本评价标准。

(1) 反映装备性能指标与作战效能之间的因果关系机理:一方面,传统依赖于专家经验或解析关联方法的局限性需要在仿真技术的支撑下予以克服,避免主观或黑箱定性描述,专家经验可以用于校验这种因果关系机理。另一方面,为有效处理装备性能指标与战果指标之间影响关系的间接性和非线性,需要在传统主要关注最终战果指标的基础上,进一步针对每一项性能指标设置反映其对作战进程的贡献和影响的中间效果指标,例如感知效果指标、电抗效果指标、生存效果指标、打击效果指标等,以便对各项性能指标进行设计权衡,支持复杂武器系统总体方案设计。

(2) 指导并牵引作战效能仿真模型框架的建立:传统的作战仿真与效能评估是相对脱节的,并不是基于效能评估指标体系来构建仿真模型框架,而是基于作战仿真可用的数据来进行效能评估,效

能评估具有被动性, 处于从属地位。仿真建模实际上是目的驱动的, 对于效能评估这一大类的, 评估指标体系即是对建模目的的规范描述, 不同的效能评估指标决定了不同的仿真建模需求, 也在很大程度上决定了模型的颗粒度。为此, 指标体系框架应该能够体现作战效能仿真模型框架的设计需求, 包括输入因素和输出指标 2 大类。

(3) 支持一体化形式化作战效能计算框架的建立: 复杂武器系统作战效能想定的计算复杂性决定了只能进行一定数量的想定实验, 而对于作战效能仿真中涉及的过程随机性、指标连续性等涉及大量想定实现需求的情况, 需要通过敏感性分析、回归分析、探索性分析等技术进行处理。为此指标体系框架应该能够覆盖所有作战效能有关的因素和响应集合, 以便在此基础上进行基于作战仿真数据的形式化计算框架研究。

## 2.2 以效果指标为中心的作战效能仿真评估指标体系框架

基于上述设计需求, 提出了以效果指标为中心的复杂武器系统作战效能仿真评估指标体系参考框架, 如图 1 所示。该框架自底向上分为 3 个层次: 性能指标层、效果指标层、效能指标层。

### (1) 性能指标层

作战效能仿真的输入, 由组成复杂武器系统的各个单件装备的性能指标组成, 包括平台性能、传感器性能、武器性能、电抗性能、通信导航性能、指挥控制性能、综合保障性能等。同样作为作战效能仿真输入的因素还包括复杂武器系统的作战使用策略和作战威胁环境, 只是就以总体方案论证为目的的作战效能仿真评估而言, 这二者一般是给定的约束条件, 而不是优化探索的对象。如果作战效能评估的目的是进行作战试验鉴定, 则这二者将会成为优化探索的对象, 而性能指标则是装备性能试验的输出, 并作为作战效能仿真的给定条件。

### (2) 效果指标层

作战效能仿真的输出, 分为作战效果和作战代价 2 类指标。二者都是站在复杂武器系统所属作战方的立场进行的统计, 前者进一步区分最终战果(任务完成效果指标)和中间环节战果(感知、电抗、生存、打击效果指标); 后者则是对红蓝双方作战代价的统计。效果指标层的指标除叶节点指标为仿真输出指标的统计外, 非叶节点指标都是综合性指标, 是对下层效果指标的综合, 综合计算的方法采用前述综合评估方法。

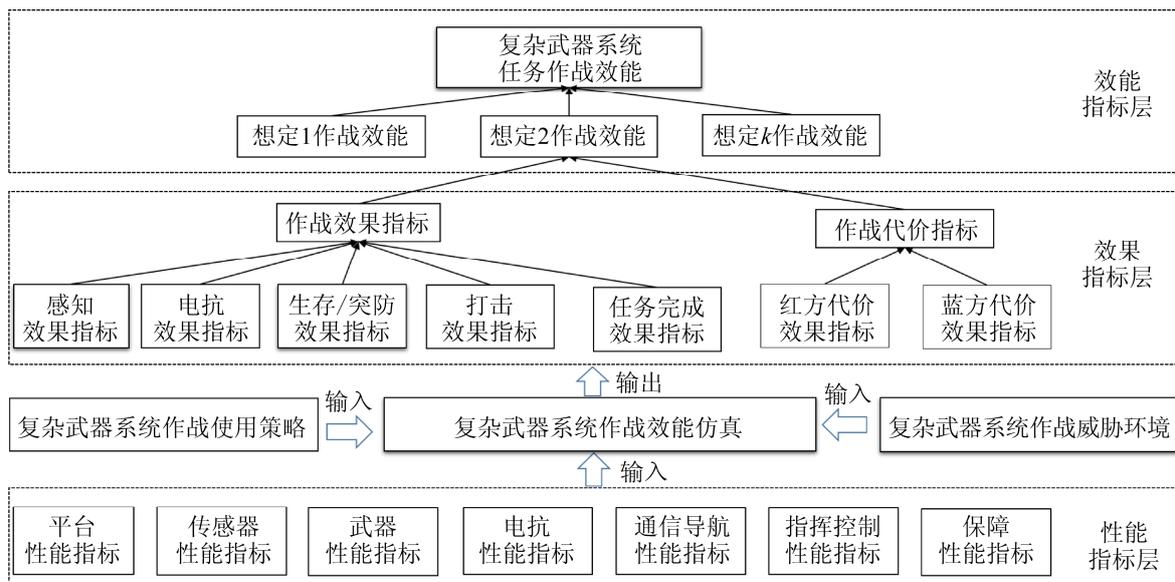


图 1 以效果指标为中心的作战效能仿真评估指标体系参考框架

Fig. 1 Reference frame of combat effectiveness simulation evaluation measure system centered on effect measure

### (3) 效能指标层

效能指标是对效果指标的进一步综合, 其中不同的想定具有不同的性能指标层和效果指标层, 可以单独构成一个想定作战效能指标体系, 并基于仿真进行评估分析; 任务作战效能则是复杂武器系统遂行该任务的各种典型想定的想定作战效能的综合, 采用合适的综合评估方法进行评估。

## 2.3 作战效果指标的分析设计

作战效果指标是上述 3 层指标体系的核心和关键, 可以有很多种细分设计方法, 下面给出一种细分设计。

### (1) 感知效果指标

用于描述复杂武器系统所属作战方(假定为红方)的态势感知效果类指标, 按照在作战中发挥的功能作用可以进一步分为侦查预警效果指标、定位识别效果指标、锁定跟踪效果指标等。

### (2) 电抗效果指标

用于描述电抗手段对敌方态势感知相关能力减低的效果类指标, 主要包括因电抗手段而导致敌方感知效果降低类指标(如敌方首次预警时刻的早晚)、导致敌方打击效果降低类指标(如敌拦截弹拦截假目标数量)、导致敌方协同类效果降低类指标(如敌防空导弹防区外发射次数)等。

### (3) 生存效果指标

用于描述红方作战平台和高价值资产在作战过程中的生存效果, 包括平台抗毁效果、武器抗拦效果 2 类。平台抗毁效果是指作战平台在作战过程中是否遭受打击, 以及遭受打击后能够继续发挥功能的有关指标; 武器抗拦效果是指进攻性武器装备成功突破敌方火力拦截进入预定战位的效果类指标。

### (4) 打击效果指标

红方发射武器对敌方目标造成的软硬杀伤效果, 包括武器发射效果、命中效果、目标软硬杀伤效果等指标。

### (5) 任务完成效果指标

表征任务是否完成的指标, 对于防御性使命任务, 一般是在任务结束时所防卫资产是否保全; 对于进攻性使命任务, 一般是拟打击目标是否全部毁伤。

## 3 作战效能仿真评估的形式化计算框架

形式化研究有助于把握效能评估问题和方法的计算本质, 消除歧义性, 并有效牵引有关的计算模型和软件工具的设计工作。下面对上述指标体系框架自顶向下进行形式化计算框架研究。

(1) 复杂武器系统任务作战效能指标  $MOE^{task}$  的计算框架为:

$$MOE^{task} = f^{task}(MOE_1^{scen}, MOE_2^{scen}, \dots)$$

式中:  $f^{task}$  为复杂武器系统的任务作战效能综合计算函数;  $MOE_i^{scen}$  为第  $i$  个想定的作战效能。

(2) 想定作战效能指标  $MOE_i^{scen}$  可以形式化表示为:

$$MOE_i^{scen} = f^{scen}(E, C)$$

式中:  $f^{scen}$  为复杂武器系统的想定效能综合计算函数;  $E$  为作战效果综合指标;  $C$  为作战代价综合指标。

(3) 作战效果指标  $E$  可以表示为:

$$E = f^e(E^s, E^c, E^l, E^a, E^m)$$

式中:  $f^e$  为作战效果综合计算函数;  $E^s$  为感知效果综合指标;  $E^c$  为电抗效果综合指标;  $E^l$  为生存效果综合指标;  $E^a$  为打击效果综合指标;  $E^m$  为使命完成效果指标。作战效果指标的形式化计算框架如图 2 所示。

(4) 作战代价指标  $C$  可以表示为:

$$C = f^c(C^r, C^b)$$

式中:  $f^c$  为作战代价综合计算函数;  $C^r$  为红方代价综合指标;  $C^b$  为蓝方代价综合指标。

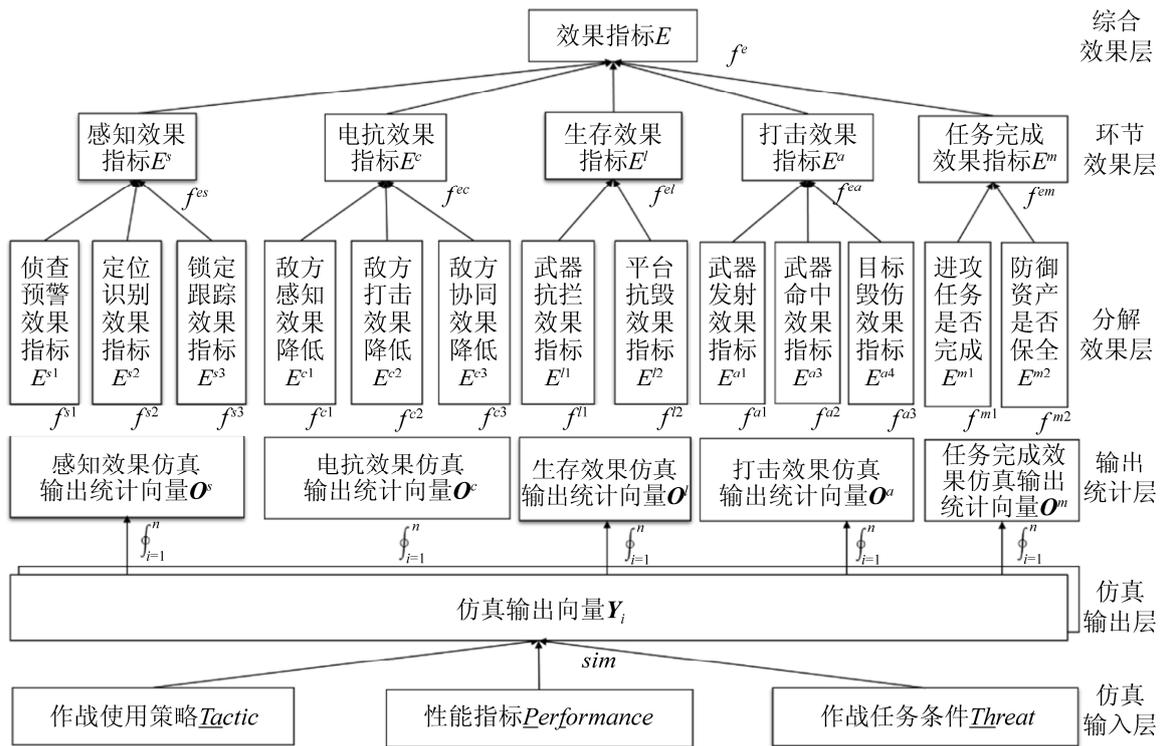


图 2 基于仿真的作战效果指标形式化计算框架

Fig. 2 Formal calculation framework of combat effect measure based on simulation

(5) 感知效果综合指标  $E^s$  可以表示为:

$$E^s = f^{es}(E^{s1}, E^{s2}, E^{s3})$$

式中:  $f^{es}$  为感知效果综合计算函数;  $E^{s1}, E^{s2}, E^{s3}$  分别为侦查预警、定位识别、锁定跟踪效果综合指标。

(6) 电抗效果综合指标  $E^c$  可以表示为:

$$E^c = f^{ec}(E^{c1}, E^{c2}, E^{c3})$$

式中:  $f^{ec}$  为感知效果综合计算函数;  $E^{c1}, E^{c2}, E^{c3}$  分别为敌感知效果降低、敌打击效果降低、敌协同效果降低综合指标。

(7) 生存效果综合指标  $E^l$  可以表示为:

$$E^l = f^{el}(E^{l1}, E^{l2})$$

式中:  $f^{el}$  为生存效果综合计算函数;  $E^{l1}, E^{l2}$  分别为平台抗毁、武器抗拦效果综合指标。

(8) 打击效果综合指标  $E^a$  可以表示为:

$$E^a = f^{ea}(E^{a1}, E^{a2}, E^{a3}, E^{a4})$$

式中:  $f^{ea}$  为打击效果综合计算函数;  $E^{a1}, E^{a2}, E^{a3}, E^{a4}$  分别为武器发射、制导武器捕获、

武器命中、目标毁伤效果综合指标。

(9) 任务完成效果综合指标  $E^m$  可以表示为:

$$E^m = f^{em}(E^{m1}, E^{m2})$$

式中:  $f^{em}$  为任务完成效果综合计算函数;  $E^{m1}, E^{m2}$  分别为进攻任务是否完成、防御资产是否保全效果综合指标。

(10) 上述每一个具体的作战效果指标 ( $E^{s1}, E^{s2}, E^{s3}, E^{c1}, E^{c2}, E^{c3}, E^{l1}, E^{l2}, E^{a1}, E^{a2}, E^{a3}, E^{a4}; E^{m1}, E^{m2}$ ) 和作战代价指标 ( $C^r, C^b$ ) 都对应一组仿真输出指标, 在后者基础上进行综合计算, 即:

$$E^{si} = f^{si}(\mathbf{O}^{si}), i = 1, 2, 3$$

$$E^{li} = f^{li}(\mathbf{O}^{li}), i = 1, 2$$

$$E^{mi} = f^{mi}(\mathbf{O}^{mi}), i = 1, 2$$

$$E^{ci} = f^{ci}(\mathbf{O}^{ci}), i = 1, 2, 3$$

$$E^{ai} = f^{ai}(\mathbf{O}^{ai}), i = 1, 2, 3, 4$$

$$C^i = f^{ci}(\mathbf{O}^{ci}), i = r, b$$

式中:  $\mathbf{O}^{si}, \mathbf{O}^{ci}, \mathbf{O}^{ai}, \mathbf{O}^{mi}, \mathbf{O}^{ci}$  分别为有关的仿真输出指标向量在多次运行采样基础上的统计向量,

共同构成了作战效果指标体系的叶节点向量  $\mathbf{O}$ ，即：

$$\mathbf{O} = (\mathbf{O}^{si}, \mathbf{O}^{ci}, \mathbf{O}^{li}, \mathbf{O}^{ai}, \mathbf{O}^{mi}, \mathbf{O}^{ci})$$

(11) 令  $\mathbf{Pf}$  为复杂武器系统的装备性能指标向量， $\mathbf{Th}$  为给定想定场景中的作战威胁环境向量， $\mathbf{Ta}$  为复杂武器系统的作战使用策略向量， $sim_i$  代表给定输入  $\mathbf{Pf}$ 、 $\mathbf{Th}$ 、 $\mathbf{Ta}$  条件下的第  $i$  次仿真运行， $n$  为处理作战效能仿真模型中的随机因素所需的蒙特卡洛重复运行次数， $\mathbf{Y}_i$  为  $sim_i$  的有关仿真输出向量，则：

$$\mathbf{Y}_i = sim_i(\mathbf{Pf}, \mathbf{Th}, \mathbf{Ta}), i = 1, 2, \dots, n$$

一般地，作战效果指标体系叶节点向量  $\mathbf{O}$  是对有关仿真输出向量  $\mathbf{Y}_i$  的统计，令  $\oint$  为统计处理函数，则：

$$\mathbf{O} = \oint_{i=1}^n \mathbf{Y}_i = \oint_{i=1}^n m_i(\mathbf{Pf}, \mathbf{Th}, \mathbf{Ta})$$

则上述  $\mathbf{O}$  的 6 个子集中每一个都对应向量  $\mathbf{Y}_i$  的一个子集。

(12) 在以上定义的基础上，同一想定具有相同的输入维度  $(\mathbf{Pf}, \mathbf{Th}, \mathbf{Ta})$ ，可以自底向上抽象建立基于仿真的复杂武器系统想定作战效能的综合计算框架：

$$MOE^{scen} = F^{scen}(\mathbf{O}) = F^{scen}\left(\oint_{i=1}^n sim_i(\mathbf{Pf}, \mathbf{Th}, \mathbf{Ta})\right)$$

式中： $F^{scen}$  为想定作战效能综合评估等效计算函数。

(13) 复杂武器系统的任务作战效能的计算框架为：

$$MOE^{task} = f^{task}\left(F_i^{scen}(\mathbf{O})\right), i = 1, 2, \dots, m$$

式中： $m$  为使命任务的典型想定的数量。

图 2 给出了基于仿真的作战效果指标体系的形式化计算框架，其中节点为指标或指标向量，箭头代表为评估计算函数。

## 4 导弹作战效能仿真评估框架应用示范

弹道导弹是一种典型的复杂武器系统，对其

进行作战效能评估是开展新一代弹道导弹创新设计的重要工作内容。应用本文提出的仿真评估框架，可以建立弹道导弹的作战效能仿真评估指标体系框架。首先要明确弹道导弹的使命任务，不同的作战任务一般威胁环境不同，所参与的作战体系条件不同，作战使用策略也不同。为每种任务设想多种典型作战想定，以适应敌方兵力数量、部署位置、装备能力界定等变化。对于每个作战想定，则需要具体评估其想定作战效能。

在图 1 的作战效果层中，作战代价指标的设计相对简单，因此应用本文所提的仿真评估框架设计作战效能指标体系主要是设计作战效果指标体系。

图 3 是结合某弹道导弹作战想定设计出的一个作战效果指标体系，参照图 2 分为综合效果层、环节效果层、分解效果层、输出统计层和仿真输出层 5 个指标。

仿真输入层的指标体系设计如表 1 所示，分为作战使用策略、装备性能指标、作战威胁条件 3 大类输入，其中性能指标中列出了影响作战任务完成的主要指标。

按照上述仿真输入指标体系和仿真输出层指标可以建立有关仿真模型的数学框架，能够有效牵引弹道导弹作战效能仿真建模和仿真系统建设工作。尽管上述指标体系主要用于支撑弹道导弹特定想定作战效能的评估，对于其它想定乃至其它任务而言，其中大量指标是可以重用的。在牵引弹道导弹作战效能仿真建模时，可以给出一个弹道导弹作战效能评估的输入输出指标全集，以便仿真模型框架进行一体化、通用化设计，实现仿真系统对多类使命任务和作战场景想定的支持。进一步，通过对各类复杂武器系统作战效能评估指标全集进行综合，据此设计通用化的作战效能仿真模型框架，可以实现同一仿真系统对多类复杂武器系统的作战效能评估支持。

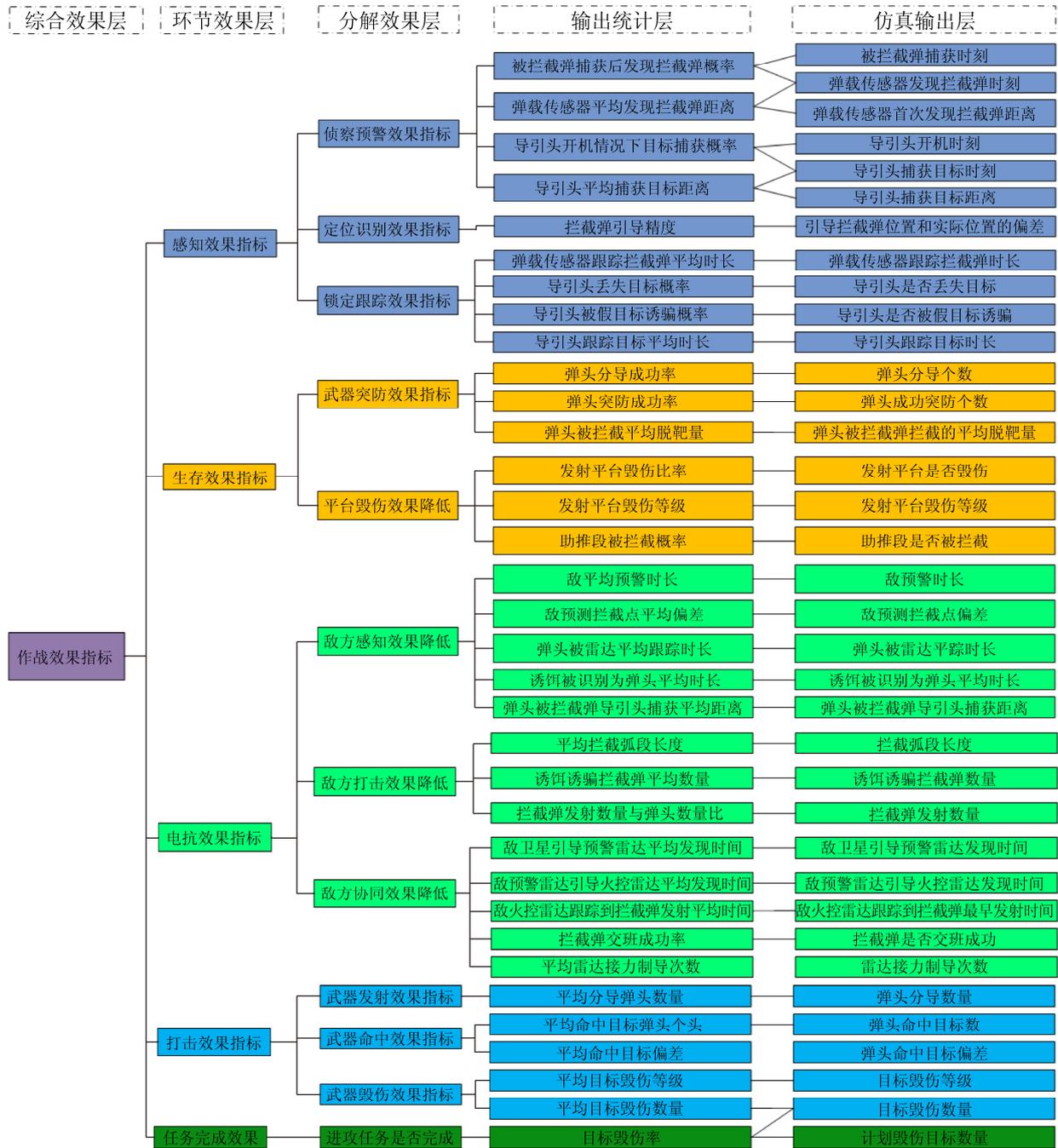


图 3 弹道导弹单弹作战效果指标体系  
Fig. 3 Measure system of single ballistic missile combat effect

表 1 弹道导弹仿真输入指标体系  
Tab. 1 Ballistic missile simulation input measure system

输入指标类别	输入指标(组)
作战使用策略 Tactic	弹道导弹发射诸元、突防飞行预定程序、中段突防是否接收外部引导信息、是否采用智能突防策略等
平台性能指标	目标特性与隐身性能：助推级各级红外辐射强度、各级雷达反射面积 平台动力性能：导弹质量、助推发动机各级推力、燃料质量、秒耗量 导弹平台最大、最小射程 中段、末段制导策略
传感器性能指标	弹载传感器最大探测距离、探测误差 弹载传感器框架角、瞬时视场角 弹载传感器搜索周期、跟踪周期
复杂武器系统装备性能指标 Performance	携带弹头数量、威力当量 脉冲发动机推力、燃料质量、秒耗量、作用时间 弹头机动策略、机动时间、机动时机、最大机动过载
武器性能指标	弹头红外辐射强度、雷达反射面积 导引头最大探测距离、探测误差 导引头框架角、瞬时视场角 导引头搜索周期、跟踪周期 导引头开机距离、导引方法
电抗性能指标	干扰机数量、干扰模式、干扰时间 诱饵数量：雷达诱饵、红外诱饵等
作战威胁条件 Threat	蓝方导弹防御系统 20XX 状态：拦截武器型号更新、拦截策略设定、拦截阵地部署情况、预警卫星、预警雷达等部署及型号更新情况等

## 5 结论

作战仿真已成为进行复杂武器系统作战效能评估的主要方法，然而当前的作战效能评估指标体系的设计仍然以传统解析法为主导，仿真方法处于被“兼顾”的从属地位，这同近年来作战仿真的快速发展不相适应，迫切需要以仿真为主导的规范化作战效能指标体系设计方法。本文提出的方法以作战效果指标为中心，不仅能够反映作战仿真在作战效能评估方面的核心作用，而且将性能指标直接作为作战效能仿真的输入间接影响作战效能，不再显式引入能力指标，避免了传统作战效能评估方法中基于能力指标对性能指标进行直接聚合，效果指标和能力指标存在因果关系，性能指标的贡献被多重考虑的情况。针对复杂武器系统提出的作战效能仿真评估形式化计算框架对于支撑作战效能评估牵引

约束作战效能仿真系统建设也具有现实意义。下一步将在本文所提框架的基础上进行扩展研究，以进一步支持武器装备体系作战效能评估与体系贡献率评估，并结合自主研发的通用化作战效能仿真系统 WESS<sup>[1]</sup>，进行深化应用研究。

### 参考文献:

[1] 杨峰, 王维平, 朱一凡, 等. 武器装备作战效能仿真与评估[M]. 北京: 电子工业出版社, 2010.  
Yang Feng, Wang Weiping, Zhu Yifan, et al. Weapon and Equipment Operational Effectiveness Simulation and Evaluation[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2010.

[2] 孙明, 黄俊卿, 马亚龙. 基于对抗仿真数据的作战效能评估方法论研究[J]. 系统仿真学报, 2013, 25(增 1): 366-371.  
Sun Ming, Huang Junqing, Ma Yalong. Research on Methodology of Operational Efficiency Evaluation Based on Combat Simulation Data[J]. Journal of System

- Simulation, 2013, 25(S1): 366-371.
- [3] 刘志钊. 武器装备效能仿真评估与优化方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.  
Liu Zhizhao. Research on Simulation Evaluation and Optimization Methods of Weapon Effectiveness[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017.
- [4] 郑晓龙, 张大巧, 李邦杰. 基于仿真试验的弹道导弹突防效能评估[J]. 弹箭与制导学报, 2019, 39(4): 127-130.  
Zhen Xiaolong, Zhang Daqiao, Li Bangjie. Effectiveness Evaluation of Ballistic Missile Penetration Based on Simulation Test[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2019, 39(4): 127-130.
- [5] 李志猛, 徐培德, 刘进, 等. 武器系统效能评估理论及应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2013.  
Li Zhimeng, Xu Peide, Liu Jin, et al. Theory and application of weapon system effectiveness evaluation[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2013.
- [6] 韦宏强, 宋晓辉, 姜兆义, 等. 武器装备作战效能评估技术研究[J]. 兵器试验, 2015, 4(2): 10-15.  
Wei Hongqiang, Song Xiaohui, Jiang Zhaoyi, et al. Research on the evaluation technology of operational effectiveness of weapon equipment [J]. Weapon Test, 2015, 4(2): 10-15.
- [7] 曲长文, 李廷军, 苏峰, 等. 机载反辐射导弹效能评估[M]. 北京: 国防工业出版社, 2013.  
Qu Changwen, Li Tingjun, Su Feng, et al. Effectiveness evaluation of airborne anti-radiation missile[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2013.
- [8] 王君, 雷虎民, 周林, 等. 中远程地空导弹武器系统作战效能仿真[J]. 系统仿真学报, 2010, 22(2): 510-515.  
Wang Jun, Lei Humin, Zhou Lin, et al. Medium and Far Range Ground-to-Air Missile Weapon System Combat Effectiveness Simulation[J]. Journal of System Simulation, 2010, 22(2): 510-515.
- [9] 陈国际, 姜长生, 吴庆宪. 战斗机对空作战效能评估[J]. 电光与控制, 2014, 21(9): 16-25.  
Chen Guoji, Jiang Changsheng, Wu Qingxian. Operational Effectiveness Evaluation of Fighter Aircrafts in Air Combat[J]. Electronics Optics & Control, 2014, 21(9): 16-25.
- [10] 董小龙, 孙金标, 焉彬. 基于 HLA 仿真的空战动态效能评估研究[J]. 电光与控制, 2009, 16(3): 17-20.  
Dong Xiaolong, Sun Jinbiao, Yan Bin. Dynamic Evaluation of Fighter Aircraft Effectiveness in Air-Combat Based on HLA Simulation[J]. Electronics Optics & Control, 2009, 16(3): 17-20.
- [11] 雷永林, 姚剑, 朱宁, 等. 武器装备作战效能仿真系统 WESS[J]. 系统仿真学报, 2017, 29(6): 1244-1252.  
Lei Yonglin, Yao Jian, Zhu Ning, et al. Weapon Effectiveness Simulation System (WESS)[J]. Journal of System Simulation, 2017, 29(6): 1244-1252.