

【引用格式】刘钰婷. 以作战仿真评估 UUV 集群作战效能[J]. 数字海洋与水下攻防, 2022, 5(4): 374-380.

以作战仿真评估 UUV 集群作战效能

刘钰婷^{1, 2}

(1. 中国船舶集团有限公司第七一〇研究所, 湖北 宜昌 443003;
(2. 清江创新中心, 湖北 武汉 430076)

摘要 为了准确地对水下无人飞行器 (Unmanned Underwater Vehicle, UUV) 的集群作战能力进行效能评估, 建立效能评估指标体系并将作战仿真结果作为效能评估的数据来源, 获得评估结果。通过对特定想定场景下的 UUV 集群作战仿真进行实例化, 对作战效能评估与作战仿真流程进行了介绍, 得到了符合理论预期的 UUV 集群作战的效能评估结果, 证明了方法的有效性, 为多装备参与下的体系作战效能评估奠定了基础。

关键词 作战仿真; UUV 集群; 作战效能评估

中图分类号 E843: TP391.9 **文献标识码** A **文章编号** 2096-5753(2022)04-0374-07

DOI 10.19838/j.issn.2096-5753.2022.04.014

Evaluation of UUV Cluster Combat Effectiveness Based on Combat Simulation

LIU Yuting^{1, 2}

(1. No.710 R&D Institute, CSSC, Yichang 443003, China;
2. Qingjiang Innovation Center, Wuhan 430076, China)

Abstract In order to accurately evaluate the effectiveness of the cluster combat capability of the unmanned underwater vehicle (UUV), the effectiveness evaluation index system is established, and the combat simulation results are used as the data source of the effectiveness evaluation to obtain the evaluation results. By instantiating the UUV cluster combat simulation under a specific scenario, the combat effectiveness evaluation and combat simulation process are introduced, and the effectiveness evaluation results of the UUV cluster combat that meet the theoretical expectations are obtained, which has proven the effectiveness of this method and laid the foundation for the system combat effectiveness evaluation with the participation of multiple equipment.

Key words combat simulation; UUV cluster; combat effectiveness

0 引言

作战效能是指在规定的作战环境条件下, 运用武器系统及其相应的兵力执行规定的作战任务时, 所能达到的预期目标的程度^[1]。作战效能评估是对作战体系完成作战任务有效程度的评定和计算^[2]。现有的作战效能评估研究大部分针对的是单件武器装备的效能^[3], 对于包含一定数量作战单位的装备系统, 构建

效能评估指标体系后, 如何获得可信度较高的指标值从而完成作战效能评估是一个急需解决的难点。作战仿真则是通过对参战装备的性能、行为规则以及环境条件等进行建模, 进而模拟实际的作战过程, 得到具有一定可信度和客观性的作战仿真结果, 为装备系统作战效能评估提供数据来源。

本文通过构建 UUV 集群作战仿真场景以及效能评估指标体系, 利用计算机进行集群作战仿真,

完成 UUV 集群作战的效能评估。

1 UUV 集群作战效能

本文所建立的 UUV 集群场景下的作战效能可以定义为在规定的作战条件下，UUV 集群通过声呐探测、水声通信以及水下打击完成“击毁目标潜艇”任务程度的量度。要对 UUV 集群的作战效能进行评估，首先需要建立作战效能评估指标体系并选择相应的效能评估方法。

1.1 构建指标体系

常见的指标体系的结构形式主要有层次型和网络型 2 种。层次型评估指标体系构建的指标体系较为清晰，对指标的计算过程易于理解；网络型评估指标体系则主要用于结构关系较为复杂的系统中，用于反映各目标之间的复杂关系，计算过程更为繁琐。本文采用层次型评估指标体系完成对 UUV 集群作战效能指标体系的构建。

在已有的效能评估指标体系构建模式的研究中，主要有如图 1 所示的几种指标构建方案^[4]。一般的作战仿真方式采用 P1 选取效能评估指标，获取的是特定想定场景下的作战效果指标，但指标体系构建不够全面；P4 则从武器装备的性能出发，研究装备的作战效能与作战能力之间的关系，建立的指标体系更为全面有效。因而，本文选用 P4 对 UUV 集群作战的效能评估指标进行选取。



图 1 指标体系构建模式

Fig. 1 Construction mode of index system

通过分析，UUV 集群的作战任务的完成程度主要依赖于单个 UUV 的水下机动效能、UUV 集群对目标的侦察监视效能以及 UUV 集群对目标的打击效能。根据层次性原则以及独立性原则，对各个

效能进行指标分解，得到 UUV 集群反潜作战效能指标体系如图 2 所示。

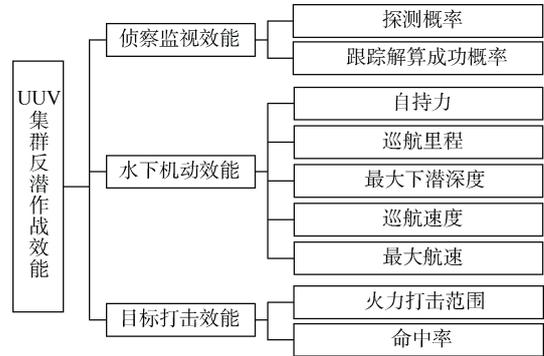


图 2 UUV 集群反潜作战效能评估指标体系

Fig. 2 Combat effectiveness evaluation index system of UUV cluster

在构建的指标体系中，水下机动效能的下层指标及目标打击效能下层中的火力打击范围体现了 UUV 的系统性能；对潜艇的探测概率、跟踪解算成功概率以及命中率则体现了 UUV 集群的作战能力与作战效果，需要通过作战仿真推演后得到指标值。

1.2 效能评估方法

武器装备的效能评估方法和模型种类繁多，根据评估的主客观程度，可以分为主观评估法、客观评估法以及定性和定量相结合的评估方法^[1]。本节将根据各类方法的效能分析侧重点，针对 UUV 集群反潜作战效能的具体要求，选择合适的效能评估方法。

由于构建指标体系时选择的总体框架是层次分析框架，因而选择层次分析法 (AHP 法) 作为作战效能评估的主体方法。

AHP 法根据每一层次指标相对于上一层次指标的重要性，获得底层指标对于次高层指标的重要性权值。将底层指标的评价值和权重值相乘，可得到次高层因素的评价值，经过层层计算，最终得到装备的作战效能。AHP 法中最重要的是获取指标评价值与权重值，一般采用专家打分法来确定指标权重。

专家打分法的本质是聘请数名专家对指标的重要性程度进行等级评估投票，然后根据每个等级所得票数占总票数的比例确定专家投票结果，得到判断矩

阵,通过对判断矩阵的处理得到指标权重。由于指标权重的计算依赖于专家打分法,效能评估的结果容易受到专家的知识结构和经验水平的影响,为了使评估的结果具有更高的可信度和客观性,文献[5]提出基于主观综合评判的可信度评估新方法,对专家打分法进行了改进。即在使用专家打分法计算指标权重之前,首先根据评判专家的综合能力对各位专家的权重进行计算,权重 $E(a,t)$ 可表示为

$$E(a,t) = l^{h(a)r(a,\tau)} \quad (1)$$

式中: $h(a)$ 为专长等级系数,最低层为1,每高一层递增1; $r(a,\tau)$ 为专长关联度,取值范围为[0, 1], $r=1$ 时专长关联度最高; $l>1$, 为组织专长基数,表明组织因专业等级而导致的权利集中程度,一般取为2。

将专家的权重向量与对指标的评分相乘,得到该专家对该指标的最终打分结果。统计所有专家的打分结果,采用扩展的判断矩阵构造方法来构造判断矩阵^[6],得到具有完全一致性的判断矩阵。

1.3 归一化处理

在效能评估中,由于各指标的量纲和数量级不同,需要对指标值进行归一化处理后才能进行后续的效能评估计算;指标的权重向量也需要对判断矩阵归一化处理后才能得到。因而效能评估的归一化处理不仅包括对指标值的归一化,还包括对判断矩阵的归一化。

1) 判断矩阵归一化。

对判断矩阵进行归一化处理是为了得到归一化的权重向量,可归结于通过计算判断矩阵的最大特征值 λ 和特征向量 $M = \{M_i\}$, 得到该层指标的权重向量 $W = \{w_i\}$:

$$\begin{cases} M_B = \sum_{i=1}^n M_i' \\ w_i = \frac{M_i'}{M_B} \end{cases} \quad (2)$$

2) 指标评价价值归一化。

作战效能指标可以分为极大型指标(指标值越大,评价价值也越大)、极小型指标(指标值越小,评价价值也越小)、居中型指标和区间型指标^[7],在本文所建立的 UUV 集群指标体系中,指标类型主要为极大型指标和极小型指标。

对于极大型指标,指标值对评价值的影响关系为正相关,归一化处理为

$$a_{ij}' = \frac{a_{\max} - a}{a_{\max} - a_{\min}} \quad (3)$$

式中: a 为原始指标值; a_{ij}' 为归一化后的指标值; a_{\min} 为可取最小值; a_{\max} 为可取最大值。 a_{\min} 和 a_{\max} 的理论值需要通过查阅文献或询问专家确定。

对于极小型指标,指标值对评价值的影响关系为负相关,归一化处理为

$$a_{ij}' = \frac{a - a_{\min}}{a_{\max} - a_{\min}} \quad (4)$$

1.4 作战效能评估流程

由前文的分析可知,本文以层次分析法为主,改进的专家打分法为辅,对 UUV 集群作战的作战效能进行评估。效能评估的流程如图 3 所示。

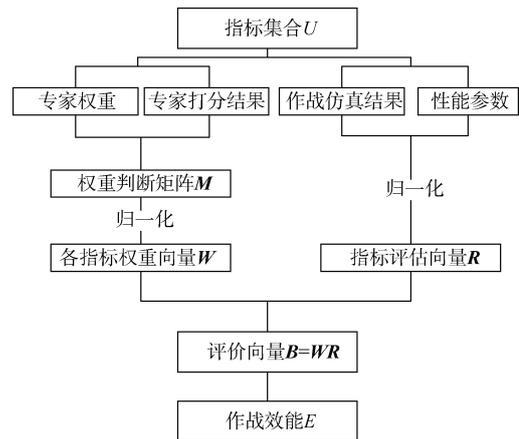


图 3 作战效能评估流程图

Fig. 3 Flow chart of combat effectiveness evaluation

作战效能评估的过程:首先得到作战效能各层指标的集合;根据专家自身的权重以及专家对指标权重的打分结果得到判断矩阵,归一化处理得到每层指标的权重向量;对作战仿真结果或装备性能参数进行归一化处理,聚合得到指标评价向量;同一层的权重向量与指标评价向量相乘得到评价向量 B ,即为上层指标的评价价值;通过不断计算每层的权重向量和评价向量,最终得到顶层评价向量,即为 UUV 集群作战的作战效能 E 。

2 UUV 集群作战仿真

通过作战仿真得到的仿真结果是作战效能评

估的重要数据来源, 本节将介绍作战仿真的流程, 并对 UUV 集群作战进行实例化得到支撑作战效能评估的作战仿真结果数据。

2.1 作战仿真流程

作战试验仿真流程如图 4 所示。首先根据作战目的进行作战试验方案的构建, 主要包括明确作战目的、参战装备、环境条件以及双方的行为规则规定等; 然后根据实验方案, 在仿真软件上细化并建立装备模型、环境模型、行为规则模型等; 接着对想定场景进行设计, 将建立的模型加入想定, 在仿真软件上实现想定; 最后运行仿真试验并统计仿真结果。

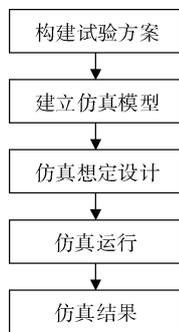


图 4 作战仿真流程图

Fig. 4 Flow chart of combat simulation

2.2 UUV 集群作战仿真实例化

根据作战仿真流程图, 对 UUV 集群作战仿真进行实例化。

2.2.1 构架试验方案

本文中 UUV 集群作战的目的是对敌方潜艇进行跟踪打击, 因而参战装备是 UUV 以及目标潜艇, 设定场景的环境条件为 3 级海况。UUV 的主要行为定义为: 当 UUV 发现目标后, 对目标进行跟踪解算, 解算完成后与其他 UUV 进行通信并在条件允许的情况下完成对目标的打击。

为简化仿真场景, 不考虑目标对 UUV 的探测及打击过程, 主要关注 UUV 对目标的探测概率、跟踪解算成功率以及对目标的命中率。

2.2.2 建立仿真模型

基于一体化建模方法, 从实体层、行为层以及关系层建立仿真模型。^[8]

根据上文构建的试验方案可知, 此次作战仿真

需要构建以下 5 类实体模型:

1) UUV 实体模型。规定 UUV 的最大下潜水深、最大航速等性能参数; 艇长、艇宽、吨位、自持力等固有参数; 以及自噪声功率谱、辐射噪声功率谱和目标强度功率谱等水声特性。

2) 潜艇实体模型。模型构建内容与 UUV 基本相同。

3) 声呐实体模型。此次 UUV 作战仿真中携带的是被动探测声呐, 模型中需要规定声呐的最大探测距离、检测阈、以及声呐在各个方向角上的指向性等性能参数。

4) 鱼雷实体模型。UUV 作战仿真中携带的鱼雷, 模型中主要包含鱼雷的安全打击范围和弹道解算相关的参数与模块。

5) 水文环境模型。基于仿真区域的水文条件数据库, 模拟动态的水文环境, 实时为水下的探测与通信提供环境数据支撑。

UUV 集群作战的行为规则细化设定如下。

每个 UUV 在各自的巡逻区域内沿巡逻线巡逻并同步运动; 当某一个 UUV 探测到目标潜艇时, 立即对潜艇进行跟踪解算, 若潜艇即将进入 UUV 盲区, UUV 进行转向跟踪; 当 UUV 完成对潜艇的跟踪解算后, 将解算出的潜艇可能经过的位置点报告给通信范围内的其他 UUV, 接收到信号的 UUV 向位置点机动并在位置点附近巡逻, 若 UUV 在机动和巡逻过程中探测到潜艇, 则继续进行对目标的跟踪解算和通信任务; 已完成解算过程的 UUV 继续跟踪潜艇, 当潜艇进入鱼雷的安全攻击范围时, 执行对潜艇的打击任务, 命中潜艇后, 将目标丢失的信息传递给通信范围内的 UUV, 完成打击的 UUV 和接收到信号的 UUV 回到初始巡逻区域继续巡逻。

UUV 集群作战的通信模型主要为 UUV 集群作战提供水声通信, 需要确定通信范围, 参与通信的实体。

2.2.3 仿真想定设计

根据构建的试验方案, 为提高仿真速度, 尽快得到试验结果, 将想定场景进行简化, 设计想定场景如图 5 所示。

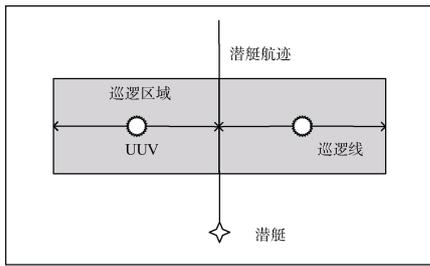


图5 想定场景设计图
Fig. 5 Design diagram of desired scenario

2个UUV在各自的巡逻区域同步巡逻，实现对巡逻区域的封锁。潜艇从2个UUV巡逻区域的中间穿越封锁区域。

2.2.4 仿真运行及仿真结果

对简化后的想定场景进行仿真试验的目的是为了得到不同间隔下的UUV集群的作战效能。通过改变UUV巡逻区域的大小，得到不同间隔下UUV集群对潜艇的探测概率、解算成功率以及命中概率。

运行大样本仿真，通过不断改变潜艇加入仿真的时间，改变潜艇与UUV相遇时的相对位置，可以模拟潜艇从不同航线通过UUV封锁区域的情况，得到更为客观的试验结果，如图6所示。

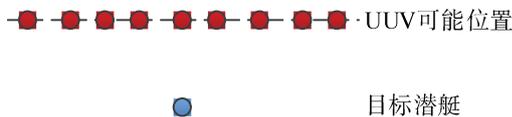


图6 UUV与潜艇不同相对位置的示意图
Fig. 6 Schematic diagram of different relative positions of UUV and submarine

为便于对仿真结果进行分析，将UUV间隔进行归一化处理，若UUV对潜艇理论探测距离为R，则2R为1，其他间隔按照比例进行归一化。经过大样本仿真后，统计得到每种间隔下UUV对潜艇的探测成功概率、跟踪解算成功概率以及打击命中率，将统计结果绘制成曲线，如图7-9所示。

图7是探测成功率曲线，从图7可以看出，当UUV间隔为1时，UUV对潜艇的探测概率为1，此时，相邻2个UUV的探测区域刚好相接，实现了对巡逻区域的完全封锁；当UUV间隔小于1时，相邻2个UUV的探测区域部分重合，UUV对潜艇

的探测概率同样也为1；当UUV间隔大于1时，相邻2个UUV的探测区域之间存在探测盲区，UUV对潜艇的探测概率小于1，随着间隔的增加，探测概率逐渐下降。但是UUV是否探测到潜艇不仅和UUV与目标之间的距离有关，还与潜艇的辐射噪声、UUV的自噪声、海洋环境以及UUV所携带声呐的探测盲区有关。因而UUV对潜艇的探测概率是动态变化的，并不随着UUV间隔的增加而严格下降，在图7中表现为曲线在下降的总体趋势下略有起伏变化。

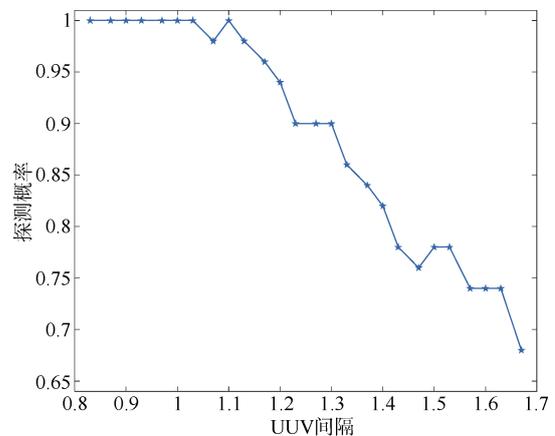


图7 UUV探测概率曲线图
Fig. 7 Probability curve of UUV detection

图8是解算成功率曲线。从图8可以看出，UUV的解算成功率同样随着UUV间隔的增加而逐渐下降，且解算成功率明显小于UUV对潜艇的探测概率，这是因为在仿真设定中，UUV探测到潜艇后才会对潜艇进行跟踪解算，在跟踪解算过程

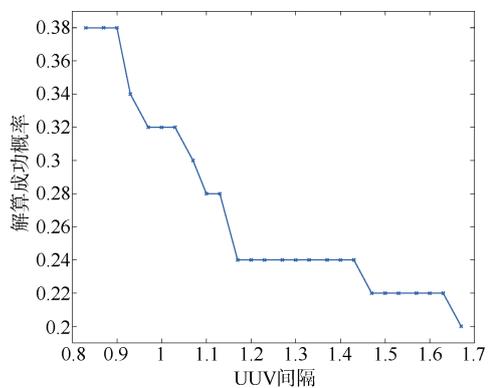


图8 UUV解算成功率曲线图
Fig. 8 Probability curve of UUV solution success

中有可能丢失目标，因而解算成功率小于探测概率。当 UUV 间隔大于等于 1 时，虽然探测概率均为 1，但在间隔为 1 的情况下，UUV 在声呐的探测极限位置附近发现潜艇的概率较高，在跟踪解算过程中丢失目标潜艇的概率较大，因而此时 UUV 的解算成功率要低于 UUV 间隔小于 1 时的概率。

图 9 是命中率曲线。当 UUV 完成对潜艇的解算过程并能够继续跟踪潜艇，且潜艇进入鱼雷的安全打击范围时，UUV 才会发射鱼雷，而鱼雷的弹道解算并不一定能与 UUV 航线重合，存在 UUV 解算成功鱼雷却没有命中潜艇的情况，因而图 9 中 UUV 对潜艇的命中率曲线与解算成功率曲线的整体趋势相似，但略低于相同间隔下 UUV 对潜艇的解算成功率。

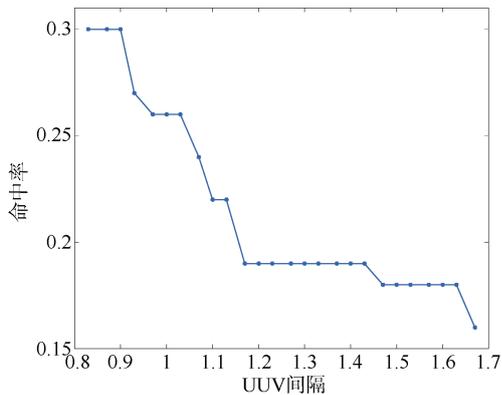


图 9 UUV 命中率曲线图
Fig. 9 UUV hit rate curve

3 效能评估结果

本节将根据第 1 节中构建的 UUV 集群作战指标体系以及第 2 节中的作战仿真结果，得到 UUV 不同布放间隔下打击潜艇的效能评估结果。

通过改进的专家打分法得到各级指标的权重表。

对 UUV 指标值进行归一化处理，得到指标评价值。由于本文建立的仿真场景仅涉及一艘 UUV，指标体系中的性能参数并不随 UUV 间隔的变化而变化，归一化后的指标评价值如表 2 所示，表 2 中“/”表示该值与 UUV 间隔有关，将通过作战仿真来获取结果。

根据第 2 节中不同间隔下 UUV 集群作战仿真结果，按照建立的指标体系，逐级将指标值加权求

和，得到作战效能评估结果。部分 UUV 间隔下作战效能评估结果如表 3 所示。

表 1 指标权重表
Table 1 Weight of indexes

二级指标	权重	一级指标	权重
侦察监视效能	0.28	探测概率	0.36
		跟踪解算成功概率	0.64
水下机动效能	0.31	自持力	0.19
		续航里程	0.12
		最大下潜深度	0.36
		巡航速度	0.15
		最大航速	0.18
目标打击效能	0.41	火力打击范围	0.46
		命中率	0.54

表 2 指标评价价值表
Table 2 Evaluation value of indexes

指标	评价值	指标	评价值
侦察监视效能	0.28	探测概率	/
		解算成功概率	/
水下机动效能	0.31	自持力	0.92
		续航里程	0.78
		最大下潜深度	1.00
		巡航速度	0.74
		最大航速	0.80
目标打击效能	0.41	火力打击范围	0.69
		命中率	/

表 3 作战效能评估结果表
Table 3 Evaluation results of combat effectiveness

UUV 间隔	作战效能
0.9	0.640
1	0.619
1.1	0.605
1.2	0.584
1.3	0.580
1.4	0.572
1.5	0.561
1.6	0.557

UUV 集群作战效能随 UUV 间隔的变化曲线如图 10 所示。从图中可以看出，在本文设计的想定场景下，UUV 集群作战的作战效能随 UUV 间隔的增加呈现下降的趋势。综合考虑所有指标后，UUV 间隔小于 1 时，效能评估结果最好，但此时

要完成对区域的封锁所需要的 UUV 数量也最多，因而，在实际作战中，需要综合考虑效费比等多方面因素，选择最合适的 UUV 间隔。

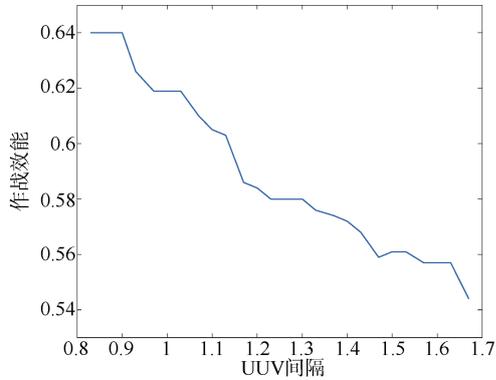


图 10 UUV 效能评估结果曲线图
Fig. 10 Curve of UUV combat effectiveness evaluation results

4 结束语

本文通过将作战仿真融入效能评估过程，以一个较简单的想定场景为实例，对作战仿真与效能评估的流程和方法进行了介绍，得到了符合预期的 UUV 集群作战能力以及作战效能评估结果。通过丰富作战指标体系及作战仿真设计，可以将本文所

介绍的流程和方法应用于更大、更复杂作战场景下的装备体系作战效能评估。

参考文献

- [1] 颜冰, 董理. 水雷作战效能分析 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2018.
- [2] 朱子薇, 朱元武, 范玲瑜, 等. 作战仿真数据在效能评估中的运用[J]. 火力与指挥控制, 2019, 44 (5): 161-164.
- [3] 燕雪峰, 张德平. 面向任务的体系效能评估[M]. 北京: 电子工业出版社, 2020.
- [4] 尹纯, 黄炎焱, 王建宇, 等. 武器装备作战效能评估指标体系指导模式[J]. 南京理工大学学报(自然科学版), 2009, 33 (6): 779-784.
- [5] 查亚兵, 唐见兵. 基于主观综合评判的作战仿真可信度评估方法研究[J]. 国防科技大学学报, 2010, 32 (6): 153-157.
- [6] 孙伟玮. 水雷作战效能评估方法设计[J]. 四川兵工学报, 2011, 32 (12): 46-49.
- [7] 张健, 张德智, 吴玉斌, 等. 论评价指标值的可公度性处理[J]. 兵工学报, 2004, 25 (6): 746-751.
- [8] 张永亮, 曹雷, 潘明聪. 基于一体化建模方法的作战仿真实体建模[J]. 装甲车工程学院学报, 2014, 28 (1): 57-62.

(责任编辑: 肖楚楚)