

基于 ADC 法装备试验多指标 评估方法研究

颜世刚¹, 李泽²

(1. 中国人民解放军 92941 部队, 辽宁 葫芦岛 125001;

2. 国防科技大学 系统工程学院, 长沙 410000)

摘要: 针对军民融合装备试验评估, 以模拟构建的某装备系统为研究对象, 提出了基于 ADC 法的多指标试验评估方法; 文章首先对装备试验主要评估指标进行了分析, 再对 ADC 法特点、数学模型和参数矩阵设置进行了研究; 最后以虚拟构建的某装备为例, 对试验评估方法的具体运用进行详细论述, 通过构建装备体系, 解析体系作战逻辑模型, 给出了基于 ADC 法作战效能评估的具体过程和方法, 给出了作战适用性、体系适用性评估的具体模型和方法; 文中示例重点对评估模型、过程和方法进行了详细论述, 省略了过程数据和结果数据演示计算; 该评估方法在多型装备试验中得到了初步的应用和检验, 取得较好的效果。

关键词: 试验; 模型; 评估; 体系

Research on Multi Indicator Evaluation Method of Equipment Test Based on ADC Method

YAN Shigang¹, LI Ze²

(1. Unit. 92941 of PLA, Huludao 125001, China;

2. College of Systems Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410000, China)

Abstract: Aimed at the evaluation of military-civilian integration equipment tests, a multi indicator evaluation method based on availability and dependability and capability (ADC) method is proposed for the research object of an equipment system constructed by simulation. Firstly, the paper analyzes main evaluation indicators of the test. Secondly, it studies the characteristics, mathematic model and matrix setting of ADC method. Finally, taking a certain type of virtual equipment as an example, it discusses the concrete application of the equipment test evaluation method in detail. By constructing the equipment system and analyzing the system operational logic model, it presents the concrete process and method of operational effectiveness evaluation based on the ADC method, it describes the concrete model and evaluation methods for operational applicability and system applicability. As an example, the evaluation model, process and method are focused on discussion in detail, and the process data and result data demonstration calculation is omitted. The evaluation method is preliminarily applied and verified, and achieves good results in various equipment tests.

Keywords: test; model; evaluation; system

0 引言

目前, 各类技术及装备军民融合使用范围越来越广泛, 对装备试验和评估的要求越来越高。试验评估作为质量把关的重要手段, 意义重大。世界主要军事强国武器装备、军民融合军事用途装备的研制和列装, 都必须经过严格的试验和评估, 试验评估一般划分为研制试验和作战试验两类。美军试验评估主要考核装备作战效能、作战适用性和生存性等指标, 美军装备的试验评估是贯穿装备研发和采购的全过程, 在装备发展的不同阶段以不同的形式展开。当前, 我国军事装备试验评估内容和要求发生了重要变化, 在借鉴欧美经验的基础上, 凸显了自己的特色, 在过去性能试验评估的基础上突出了作战能力试验评估。因此, 军民融合应用于军事用途的装备试验鉴定越来越强调对装备

作战效能、保障效能、适用性、作战任务满足度以及质量稳定性等指标等的考核, 针对以上评估需求, 目前还缺少成熟有效的评估模型和方法, 在实施层面存在很大困难。在装备试验评估中, 通过试验设计和组织实施获取了大量的试验数据, 如何进行评估, 采用什么方法评估和评估结果是否科学, 是决定试验成败重要因素^[1-2]。有效的模型和合理方法, 是装备评估的基础, 只有正确鉴定和评估出装备的性能, 才能为装备使用提供可靠的依据。笔者以 ADC 法为基础, 结合专家打分评估等方法, 对装备多指标试验评估方法进行了初步的研究。

1 试验评估的主要指标

用于军事用途的军民融合装备的试验指标主要结合其功能和军事用途而定, 目前重点评估的指标包括效能指标

收稿日期: 2023-10-25; 修回日期: 2024-01-25。

作者简介: 颜世刚(1972-), 男, 硕士, 高级工程师。

引用格式: 颜世刚, 李泽. 基于 ADC 法装备试验多指标评估方法研究[J]. 计算机测量与控制, 2024, 32(6): 313-318, 333.

和适用性指标等^[3-4]。

1.1 效能指标

用于军事用途的军民融合装备效能指标重点要考核装备的作战效能,装备作战效能基本含义是装备满足特定作战需求的度量,体现了装备在完成作战任务时发挥出来的有效作用程度。作战效能考核应当置于特定的作战条件之下,通过设定的演练和试验科目考核其能力,既可以给定目标值检验达到目标要求的程度,又可以通过与同类装备比较得出作战效能;作战效能可包括了装备的指挥控制能力、火力打击能力等指标^[5-8]。

1.2 适用性指标

用于军事用途的军民融合装备适用性指标一般包括作战适用性和体系适用性。作战适用性的基本含义是针对装备在适应作战环境的前提下满足部队作战使用要求的程度,体现了装备在作战使用过程中能够保持可用的程度。作战适用性考核的重点是装备对作战环境、部队训练和作战使用的适用性;作战使用适用性考核的重点是装备作战可靠性、使用安全性、人机结合和维修保障性等方面能力。体系适用性是针对装备融入特定作战体系的度量,也是装备在体系中发挥作用的度量。体系适用性考核应当把被试装备融入特定的作战体系,与相关参试装备之间进行信息融合、体系融合、体制融合以及互通复用等;在体系中,被试装备通过发挥自身能力不断作用于其他装备,最终影响整个作战体系,体系适用性的指标主要体现在体系融合度和体系贡献率上^[9]。装备体系融合度主要体现在装备各分系统功能的体系融合度上,是装备各分项指标能力融合度的总体体现。

2 ADC 分析法模型

试验评估方法多种多样,常用的有主观评定法、统计分析法、数学解析法、仿真模拟法和多指标综合评估法。ADC 分析法是数学解析法的一种,是美国工业界武器系统效能委员会评价武器系统用的模型和方法,ADC 分析法是目前国内常用的一种军事装备系统效能评估方法。ADC 分析法根据装备的可用度(Availability)、可信度(Dependability)和固有Capability)等三大元素评价装备系统,并把三大元素合成一个单一的效能度量来检验装备总的性能。ADC 模型以系统总体结构为对象,以完成任务为前提,对系统效能进行评估。ADC 分析法是一个基于过程的动态的系统概念,适合评估装备随时间变化的多项能力指标,可较为全面地反映被评估装备的状态^[10-12]。ADC 模型表达式为:

$$E = A \cdot D \cdot C \quad (1)$$

式中, E 为系统效能(System Effectiveness), $E = [e_1, e_2, \dots, e_m], e_i (i = 1, 2, \dots, m)$ 是对应于装备第 i 项效能指标。 A (Availability) 为装备可用度,在开始执行任务时装备状态的度量,与装备的可靠性、维修性等水平因素有关。 $A = [a_1, a_2, \dots, a_n], n$ 为装备在开始执行任务时的状态数目, $a_j (j = 1, 2, \dots, n)$ 装备开始执行任务时处于状态 j 的概率。若装

备系统由 i 个分系统组成,则第 i 个分系统处于正常工作的概率(装备的有效性)通过下式计算。

$$\alpha_i = \frac{MTBF_i}{MTBF_i + MTTR_i}$$

α_i 为第 i 分系统处于正常工作的概率, $MTBF_i$ 为第 i 个分系统平均无故障工作时间, $MTTR_i$ 为第 i 分系统平均维修时间。 D 为装备可信度(Dependability)矩阵,在执行任务的过程中,某一个或几个时刻系统状态的度量,表示系统完成某项任务时即将进入或处于它任一有效的状态,且完成与这些状态有关的所有任务的概率。

$$D = \begin{pmatrix} d_{11} & d_{12} & \dots & d_{1n} \\ d_{21} & d_{22} & \dots & d_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ d_{n1} & d_{n2} & \dots & d_{nm} \end{pmatrix}$$

其中: $d_{ij} (i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, n)$ 是系统由初始状态 i 历经任务过程直到任务结束转移到系统状态 j 的转移概率。 C 为装备固有Capability),在已知系统任务期间系统状态的情况下,系统完成任务的能力。系统固有Capability C 是一个 $n \times m$ 维矩阵, n 为装备状态数目, m 为装备要考核的效能指标数。

$$C = \begin{pmatrix} c_{11} & c_{12} & \dots & c_{1m} \\ c_{21} & c_{22} & \dots & c_{2m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ c_{n1} & c_{n2} & \dots & c_{nm} \end{pmatrix}$$

其中: $c_{ij} (i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m)$ 表示系统在可能状态 i 的条件下,第 j 个效能指标的概率。

3 装备多指标试验评估应用

3.1 应用实例场景构建

为了更清晰地理解基于 ADC 法的多指标评估方法的应用,通过具体构建某装备的应用实例,来分析和研究其具体的应用过程。

3.1.1 装备实例构建

构建某军民融合装备 W_{s1} 分别由模块 CV、模块 MV 和模块 GV 组成。CV 为总体指挥模块,可直接控制 MV 和 GV 工作, MV 和 GV 为任务动作具体执行模块,在 CV 故障前提下, MV 也可以控制 GV 工作,若 CV 和 MV 同时故障,则 GV 也无法独立工作,若 CV 和 GV 故障, MV 可以独立工作。

3.1.2 场景实例构建

装备 W_{s1} 在某次防空作战任务中,装备 W_{s1} 和另一个装备 W_{s2} 组成新的防空体系 W_{s3} 进行防空作战,时间为 60 min,原装备 W_{s2} 主要由 4 个单元模块组成,两个装备通过系统单元 1 和模块 CV 在体系内进行互联互通。通过试验,评估系统 W_{s1} 的作战效能、作战适用性和体系适用性,装备体系结构如图 1 所示。

3.2 作战效能评估

采用 ADC 法对系统作战效能进行评估,首先建立总体效能数值模型,按照 ADC 法分别求取下一级效能指标,再

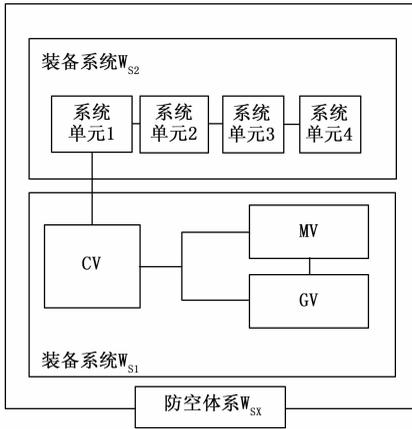


图 1 装备体系结构示意图

进行聚合^[13]。装备 W_{s1} 体系作战效能分解为装备能力 S 效能、装备能力 F 效能、装备能力 Z 效能、装备能力 T 效能等一级指标, 体系作战效能评估模型采用 ADC 模型公式 (1) 所示。装备能力的可用度 A 主要决定于装备故障率和维修率; 可信度 D 主要由装备各部分的可靠性组成; 能力 C 主要从装备各项能力状态来度量。

3.2.1 构建数据逻辑模型

根据装备 W_{s1} 的作战逻辑关系和系统组成, 在 CV 正常的情况下, CV 可直接指挥引导 MV 和 GV, CV 故障时, MV 可直接指挥引导 GV 作战, 装备 W_{s1} 系统结构逻辑如图 1 所示, 各单元设备的可靠性和维修性数值如表 1 所示。

表 1 W_{s1} 装备各组成模块可靠性和维修性数据表

	可靠性规定值 $MTBF/h$	维修性规定值 $MTTR/h$
CV	50	1
MV	40	1
GV	40	1

3.2.2 可用度矩阵 A 的构建

MV、GV 初始状态一般情况下可分为正常和故障两种状态, 装备 W_{s1} 可以简化为 6 种状态, 其有效向量 A 为:

$$A = [a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6] \quad (2)$$

式中, a_1 为 CV 正常、MV、GV 全部正常的概率; a_2 为 CV 正常、MV 正常、GV 故障的概率; a_3 为 CV 正常、MV 故障、GV 正常的概率; a_4 为 CV 故障、MV 正常、GV 正常的概率; a_5 为 CV 故障、MV 正常、GV 故障的概率; a_6 为系统不能正常工作的其它情况, 包括 CV 故障、MV 故障、GV 故障的概率, CV 故障、MV 故障、GV 正常的概率, CV 正常、MV 故障、GV 故障的概率等其它状态。设 CV 的正常工作的概率 a_s , MV 正常工作的概率 a_f , GV 正常工作的概率 a_p , 有效性向量 A 的各元素计算如下:

$$\begin{aligned} a_1 &= a_s a_f a_p \\ a_2 &= a_s a_f (1 - a_p) \\ a_3 &= a_s (1 - a_f) a_p \\ a_4 &= (1 - a_s) a_f a_p \end{aligned}$$

$$a_5 = (1 - a_s) a_f (1 - a_p)$$

$$a_6 = 1 - a_1 - a_2 - a_3 - a_4 - a_5$$

设备正常工作的概率计算模型为公式 (3), 系统 CV、GV、MV 可靠性和维修性规定值见表 1。

$$\alpha = MTBF / (MTBF + MTTR) = \mu / (\lambda + \mu) \quad (3)$$

其中: λ 为失效率, μ 为修复率。

经过计算装备 W_{s1} 可用度指标 A 为: $A = [0.934, 0.023, 0.023, 0.019, 0, 0.01]$ 。

3.2.3 可信度矩阵 D 的构建

装备系统的可信度取决于装备系统的可靠性、维修性等, 也取决于使用装备人员的素质、指挥等因素。装备 W_{s1} 在开始执行任务时的可信度矩阵为^[14]:

$$D = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & d_{13} & d_{14} & d_{15} & d_{16} \\ d_{21} & d_{22} & d_{23} & d_{24} & d_{25} & d_{26} \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} & d_{34} & d_{35} & d_{36} \\ d_{41} & d_{42} & d_{43} & d_{44} & d_{45} & d_{46} \\ d_{51} & d_{52} & d_{53} & d_{54} & d_{55} & d_{56} \\ d_{61} & d_{62} & d_{63} & d_{64} & d_{65} & d_{66} \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中: d_{ij} 为开始执行任务时系统处于 d_i 状态, 任务完成时系统处于 d_j 状态的概率。

由于装备系统自身不可修复, 如果开始执行任务时发生了故障, 则执行任务过程中必然处于故障而不可能正常工作。设装备系统执行任务时故障率服从指数分布, 各单元设备可信度计算模型为:

$$R = e^{-\lambda t}, \lambda = \frac{1}{MTBF} \quad (5)$$

其中: $t = 1 h$, $MTBF$ 取值见表 1, 则矩阵计算过程方法如下:

$$\begin{aligned} d_{11} &= R_s R_f R_p = e^{-\lambda_s t} e^{-\lambda_f t} e^{-\lambda_p t} = e^{-(\lambda_s + \lambda_f + \lambda_p) t} \\ d_{12} &= R_s R_f (1 - R_p) = e^{-\lambda_s t} e^{-\lambda_f t} (1 - e^{-\lambda_p t}) \\ d_{13} &= R_s (1 - R_f) R_p = e^{-\lambda_s t} (1 - e^{-\lambda_f t}) e^{-\lambda_p t} \\ d_{14} &= (1 - R_s) R_f R_p = (1 - e^{-\lambda_s t}) e^{-\lambda_f t} e^{-\lambda_p t} \\ d_{15} &= (1 - R_s) R_f (1 - R_p) = (1 - e^{-\lambda_s t}) e^{-\lambda_f t} (1 - e^{-\lambda_p t}) \\ d_{16} &= 1 - d_{11} - d_{12} - d_{13} - d_{14} - d_{15} \\ d_{21} &= 0 \\ d_{22} &= R_s R_f (1 - R_p) = e^{-\lambda_s t} e^{-\lambda_f t} (1 - e^{-\lambda_p t}) \\ d_{23} &= d_{24} = 0 \\ d_{25} &= (1 - R_s) R_f (1 - R_p) = (1 - e^{-\lambda_s t}) e^{-\lambda_f t} (1 - e^{-\lambda_p t}) \\ d_{26} &= 1 - d_{21} - d_{22} - d_{23} - d_{24} - d_{25} = 1 - d_{22} - d_{25} \\ d_{31} &= d_{32} = 0 \\ d_{33} &= R_s (1 - R_f) R_p = e^{-\lambda_s t} (1 - e^{-\lambda_f t}) e^{-\lambda_p t} \\ d_{34} &= d_{35} = 0 \\ d_{36} &= 1 - d_{31} - d_{32} - d_{33} - d_{34} - d_{35} = 1 - d_{33} \\ d_{41} &= d_{42} = d_{43} = 0 \\ d_{44} &= (1 - R_s) R_f R_p = (1 - e^{-\lambda_s t}) e^{-\lambda_f t} e^{-\lambda_p t} \\ d_{45} &= (1 - R_s) R_f (1 - R_p) = (1 - e^{-\lambda_s t}) e^{-\lambda_f t} (1 - e^{-\lambda_p t}) \\ d_{46} &= 1 - d_{41} - d_{42} - d_{43} - d_{44} - d_{45} = 1 - d_{44} - d_{45} \\ d_{51} &= d_{52} = d_{53} = d_{54} = 0 \end{aligned}$$

$$d_{55} = (1 - R_s)R_f(1 - R_p) = (1 - e^{-\lambda_s t})e^{-\lambda_f t}(1 - e^{-\lambda_p t})$$

$$d_{56} = 1 - d_{51} - d_{52} - d_{53} - d_{54} - d_{55} = 1 - d_{55}$$

$$d_{61} = d_{62} = d_{63} = d_{64} = d_{65} = 0$$

$$d_{66} = 1$$

经过上述计算，系统装备 W_{s1} 可信度矩阵 D 为：

$$D = \begin{pmatrix} 0.93 & 0.024 & 0.024 & 0.019 & 0 & 0.003 \\ 0 & 0.024 & 0 & 0 & 0 & 0.976 \\ 0 & 0 & 0.024 & 0 & 0 & 0.976 \\ 0 & 0 & 0 & 0.019 & 0 & 0.981 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

3.2.4 能力矩阵 C 的构建

3.2.4.1 矩阵能力指标构建和计算

装备系统在实际任务中的能力矩阵要根据系统应用的具体任务和目的来确定，假设任务时间为 60 min，分析装备 W_{s1} 在图 1 的配置下系统能力矩阵 C 的构建，设矩阵因素为 C_{ij} ，系统有 6 种状态，包括：

- 状态 1，CV 正常、MV、GV 全部正常的概率；
- 状态 2，CV 正常、MV 正常，GV 故障的概率；
- 状态 3，CV 正常、MV 故障，GV 正常的概率；
- 状态 4，CV 故障、MV 正常，GV 正常的概率；
- 状态 5，CV 故障、MV 正常，GV 故障的概率；

状态 6，系统不能正常工作的其它情况，包括 CV 故障、MV 故障、GV 故障的概率，CV 故障、MV 故障、GV 正常的概率，CV 正常、MV 故障、GV 故障的概率等其它状态。

文中对装备 W_{s1} 的试验评估研究，仅考虑装备的 S 能力 C_{i1} 、F 能力 C_{i2} 、Z 能力 C_{i3} 和 T 能力 C_{i4} 等几个关键指标，其中 $i \in [1, 6]$ ，能力矩阵模型为公式 (6) 所示：

$$C = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & C_{24} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & C_{34} \\ C_{41} & C_{42} & C_{43} & C_{44} \\ C_{51} & C_{52} & C_{53} & C_{54} \\ C_{61} & C_{62} & C_{63} & C_{64} \end{bmatrix} \quad (6)$$

装备能力 S 计算公式：

$$C_{i1} = \omega_i [1 - (1 - p_f)(1 - p_m)] \quad (7)$$

装备能力 F 计算公式：

$$C_{i2} = \omega_i (1 - p_{dm} p_{dh}) \quad (8)$$

装备能力 Z 计算公式：

$$C_{i3} = \omega_i [1 - (1 - p_{zw})(1 - p_{zc})(1 - p_{ztl})] \quad (9)$$

装备能力 T 计算公式：

$$C_{i4} = \omega_i [1 - (1 - p_{tz})(1 - p_{tk})] \quad (10)$$

通过 AHP 分析法和指标聚合方法分析各分项能力指标和其能力因子。 ω_i 是不同状态下因子系数； p_f 为能力 S 指标 1 的概率， p_m 为能力 S 指标 2 的概率； p_{dm} 为能力 F 指标 1 的概率， p_{dh} 为能力 F 指标 2 的概率； p_{zw} 为能力 Z 指标 1 的概

率， p_{zc} 为能力 Z 指标 2 的概率， p_{ztl} 为能力 Z 指标 3 的概率； p_{tz} 为能力 T 指标 1 的概率， p_{tk} 为能力 T 指标 2 的概率。根据试验和仿真数据计算出装备分项能力指标： $p_f = 0.8, p_m = 0.65, p_{dm} = 0.45, p_{dh} = 0.35, p_{zw} = 0.8, p_{zc} = 0.8, p_{ztl} = 0.85, p_{tz} = 0.75, p_{tk} = 0.7$ 。

能力因子计算公式：

$$\omega_i = \omega_s + \omega_f + \omega_p \quad (11)$$

ω_s 为 CV 因子权重、 ω_f 为 MV 因子权重、 ω_p 为 GV 因子权重，通过分析各设备能力及专家综合评估，得出装备能力 S、F、Z、T 的因子权重，见表 2 (示例数据)。

表 2 能力矩阵因子权重表

	CV 权重 ω_s	MV 权重 ω_f	GV 权重 ω_p
指标 S 因子权重	0.2	0.75	0.05
指标 F 因子权重	0.2	0.75	0.05
指标 Z 因子权重	0.8	0.15	0.05
指标 T 因子权重	0.5	0.4	0.1

根据能力计算公式、因子计算公式和权重系数得出，装备能力 S、F、Z、T 在各状下的因子系数值，见表 3。

表 3 能力矩阵状态因子系数计算表

	装备能力 SC_{i1}	装备能力 FC_{i2}	装备能力 ZC_{i3}	装备能力 TC_{i4}	系统状态
状态 1 因子系数 ω_1	1	1	1	1	系统全部正常
状态 2 因子系数 ω_2	0.2+	0.2+	0.8+	0.5+	CV、MV 正常，GV 故障
状态 3 因子系数 ω_3	0.2+	0.2+	0.8+	0.5+	CV、GV 正常，MV 故障
状态 4 因子系数 ω_4	0.75+	0.75+	0.15+	0.4+0.1	MV、GV 正常，CV 故障
状态 5 因子系数 ω_5	0.75	0.75	0.15	0.4	MV 正常，CV、GV 故障
状态 6 因子系数 ω_6	0	0	0	0	系统不能正常工作

系统不能正常工作按照上述模型和方法计算，可得出系统装备 W_{s1} 能力矩阵 C 为：

$$C = \begin{bmatrix} 0.930 & 0.843 & 0.994 & 0.925 \\ 0.884 & 0.800 & 0.944 & 0.833 \\ 0.233 & 0.211 & 0.845 & 0.555 \\ 0.744 & 0.674 & 0.199 & 0.463 \\ 0.698 & 0.632 & 0.149 & 0.370 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

3.2.4.2 能力矩阵构建的基本方法

在 ADC 分析方法中，选定装备状态后可用度矩阵 A 和可信度矩阵 D 可由解析方法较为容易获得，而能力矩阵 C 的获得比较困难，这是使用 ADC 法面临的困难。C 中的元素在很大程度上取决于被试验装备的能力和评估要求，

应根据具体应用和所评估的系统来建立能力矩阵 C 。ADC 方法运用的关键就在于能力矩阵 C 的构建和计算。常用构建能力矩阵 C 的方法有概率乘法法、综合评估法和仿真法等^[15-16]。

1) 概率乘法法: 能力矩阵元素的计算采用几项概率的乘积, 这是评估中常用的一种方法。如本文装备能力 S 、 F 等元素的计算方法, 就是采用概率乘积的方法。

2) 综合评估法: 能力矩阵元素采用装备性能指标的综合评价价值来定义和计算。任何装备都包含有许多性能指标, 首先统一各项性能指标的量纲。其次还要通过分析各项性能指标的相对重要性, 确定它的加权系数, 最后采用加权求和的方法计算各项性能指标的综合评价价值, 作为能力矩阵元素值。本文装备能力 S 、 F 等元素的计算方法中也运用了综合评估法。

3) 仿真法: 在评估装备能力时, 可以通过建立数字模型, 构建仿真环境, 采用计算机仿真模拟得到。按照被评估装备军事应用中的实际使用流程, 在仿真环境中仿真计算出各项能力元素值。

3.2.5 作战效能计算

根据公式 (1) 计算作战效能 E : $E = A \cdot D \cdot C = |0.847 \ 0.768 \ 0.909 \ 0.844|$ 。

从而评估得出装备各项作战效能: S 效能为 0.847, F 效能 0.768, Z 效能为 0.909, T 效能为 0.844。

3.3 作战适用性评估

作战适用性评估重点评估装备作战环境适用性和作战使用适用性等能力指标^[17]。

3.3.1 作战环境适用性

3.3.1.1 自然环境适用性评估

记录作战试验阶段自然环境数据, 对 CV 、 MV 和 GV 待机、作战环境下的适应性进行定性评估。在实际使用自然环境条件下, 若 CV 、 MV 、 GV 工作正常, 则自然环境适用性评估结论为“良”, 否则为“差”。根据实际试验数据, 各分系统在实际使用环境下工作正常, 自然环境适用性评估为“良”。

3.3.1.2 电磁环境适用性评估

记录试验阶段电磁环境数据, 包括背景电磁环境和威胁电磁环境的数据, 对装备系统现场和试验过程中的电磁环境适用性进行定性评估。在实际电磁环境条件下, 若装备工作正常, 装备 W_{s1} 不对装备 W_{s2} 的电子设备造成影响, 则电磁环境适用性评估结论为“良”, 否则为“差”。根据实际试验数据, 各分系统在电磁环境条件下工作正常, 电磁环境适用性评估为“良”。

3.3.2 作战使用适用性

3.3.2.1 安全性评估

利用试验数据, 对装备使用安全性进行定性评估。若未发生由于装备本身引起的安全事故, 安全性评估结论为“良”, 否则为“差”。根据实际试验数据, 装备在试验期间

未发生由装备本身引起的安全事故, 安全性评估为“良”。

3.3.2.2 可靠性评估

1) 装备分系统可靠度置信度评估: 采用二项分布经典方法对各装备系统可靠度进行置信下限评估, 若评估结果达到 C_2 (试验给定值) 以上, 评价为“良”, 否则为“差”。

利用 W_{s1} 武器装备各试验阶段收集的试验数据, 对 CV 、 MV 和 GV 的 MTBF 进行置信下限评估:

若 CV 评估结果达到 t_1 小时以上, CV 评价为“良”, 否则为“差”;

若 MV 评估结果达到 t_2 小时以上, MV 评价为“良”, 否则为“差”;

若 GV 评估结果达到 t_3 小时以上, GV 评价为“良”, 否则为“差”;

若 CV 、 MV 、 GV 全部为良, 则全系统为良, 其中 t_1 、 t_2 和 t_3 具体数值由装备指标明确。

2) 装备系统可靠性计算: 装备系统可靠性采用任务可靠性方法计算。其中任务剖面为装备 W_{s1} 从执行任务开始至任务结束的全过程。统计试验期间装备出现影响装备作战能力的故障, 可靠性试验结果低于 90% 为差, 90%~93% 为低, 93%~95% 以上为中, 95%~100% 以上为良。

根据试验可靠性试验数据计算 (计算方法本文不再详述), 装备 W_{s1} 各分系统和系统可靠性为“良”。

3.4 体系适用性评估

体系适用性评估主要包括体系贡献率和体系融合度评估两个方面。

3.4.1 体系贡献率评估

原装备 W_{s2} 增加装备 W_{s1} 后, 形成新的作战体系 W_{sx} , 体系贡献率的评估, 采用基于增量或比值计算方法, 计算增加 W_{s1} 新装备后, 新装备对作战体系 W_{sx} 的贡献度, 装备体系逻辑关系如图 1 所示。

3.4.1.1 基于增量的体系贡献率计算方法

把增加新装备后的装备体系称为新装备体系, 把增加新增装备前的装备体系称为原装备体系, 基于增量的体系贡献率度量就是将新老装备体系进行对比, 新装备体系作战能力或作战效能的增加就是贡献率。

设新的装备体系作战效能为, 原装备体系作战效能为, 通过仿真结合实际试验数据计算出为 0.89, 为 0.71。

$$\Delta E = E_1 - E_2 = 0.18 \quad (12)$$

ΔE 可能为正值, 说明采用新装备后体系效能得到了提高, 即该型装备对体系有贡献; ΔE 也可能为负值, 说明使用该型装备后, 体系整体作战效能下降, 该型装备对体系作战能力提升起到反作用; $\Delta E = 0$ 说明, 说明新型装备对体系没有贡献^[19]。

3.4.1.2 基于比值的体系贡献率计算方法

将任务完成概率作为装备体系完成规定使命任务的指标, 采用比值的方法进行体系贡献率计算和评估时, 基于原来老装备体系, 以增加新装备或者替换掉某些装备等方

式, 形成新装备体系, 增加的新装备在新体系中基于比值的体系贡献率可用完成任务概率相对变化的比例进行衡量^[20]。

设新的装备体系作战效能为, 原装备体系作战效能为, W_{s1} 发挥的作战效能为 $E_{W_{s1}}$ 。

$$C = \frac{E_{W_{s1}}}{E_1} \times 100\% = 20.2\% \quad (13)$$

实际上 4.3.1.1 和 4.3.1.2 两种方法是有关联的, 其中 $E_{W_{s1}} = \Delta E$ 。

3.4.1.3 体系贡献率评估说明

1) 体系贡献率评估主要通过仿真评估实现, 通过构建不同装备体系分别进行对抗仿真, 利用仿真数据进行统一计算, 计算出 E_1 、 E_2 、 $E_{W_{s1}}$ 。

2) 装备实际使用数据可作为重要数据来源融入评估数据中, 权重可适当加重, 仿真的数据可适当降低权重, 具体权重采用专家打分法和实际数据质量对比分析结合确定。

3.4.2 体系融合度评估

装备 W_{s1} 体系融合度评估, 在仅考虑装备 4 项功能方面的融合度情况下, 计算方法如下:

$$P_{W_{s1}} = 1 - \sqrt{\frac{1}{4}(1 - P_S)^2 + \frac{1}{4}(1 - P_F)^2 + \frac{1}{4}(1 - P_T)^2 + \frac{1}{4}(1 - P_Z)^2} \quad (14)$$

其中: $P_{W_{s1}}$ 为装备体系融合度, P_S 为装备功能 S 体系融合度, P_F 为装备功能 F 体系融合度, P_T 装备功能 T 体系融合度, P_Z 为装备功能 Z 体系融合度。

P_S 、 P_S 、 P_F 、 P_Z 体系融合度计算方法如下:

$$P = \frac{N_{SUC}}{N_{ALL}} \quad (15)$$

其中: N_{ALL} 为装备 W_{s1} 在新装备体系进行试验的总次数, N_{SUC} 为装备 W_{s1} 试验未出现任何问题的试验次数。

装备 W_{s1} 体系融合度试验数据如表 4 所示。

表 4 体系融合度计算表装备功能

装备功能	试验总次数	试验有效次数	体系融合度
装备功能 S	20	18	0.9
装备功能 F	24	20	0.83
装备功能 Z	18	10	0.55
装备功能 T	16	12	0.75

根据公式 (14) 计算得出装备 W_{s1} 的装备体系融合度 $P_{W_{s1}}$:

$$P_{W_{s1}} = 1 - \sqrt{\frac{1}{4}(1 - P_S)^2 + \frac{1}{4}(1 - P_F)^2 + \frac{1}{4}(1 - P_T)^2 + \frac{1}{4}(1 - P_Z)^2} = 0.724。$$

3.5 装备评估结果

根据试验数据, 采用基于 ADC 法的多指标评估方法对装备 W_{s1} 能力指标进行评估, 综合评估结果如下:

装备 W_{s1} 作战效能: S 效能为 0.847, F 效能 0.768, Z 效能为 0.909, T 效能为 0.844, 满足各分项效能指标要求 (假定各分项指标要求为 0.75)。

装备 W_{s1} 作战适用性: 自然环境适用性和电磁环境适用性为“良”, 安全性为“良”, 装备分系统和系统可靠性为“良”。

装备 W_{s1} 体系适应性: 装备 W_{s1} 体系贡献率为 20.2%, 体系融合度为 0.724。

4 结束语

装备试验评估是一个非常复杂的过程, 许多数据很难直接获取或者量化, 很多指标只能采取定性评估的方式。目前, 装备试验评估方式多种多样, 还没有形成统一的模型和方法, 评估只能根据装备具体特点和试验方式采取相应的模型和方法。在装备评估具体应用中, 要坚持定性与定量相结合, 实装试验数据与仿真推演结果相结合的方式, 军事应用装备评估的重点要集中在作战效能、作战适用性和体系适用性等指标评估上。限于文章篇幅, 本文只针对评估的模型、过程和方法进行了详细论述, 省略了过程数据和结果数据计算过程, 对于体系贡献率等指标需结合仿真数据进行计算, 文章未对仿真部分展开论述。基于 ADC 结合专家打分等多指标试验评估是装备试验评估的一次探索性理论研究, 在多型装备试验评估中得到了初步应用和检验, 取得较好的效果, 具有一定的推广和应用价值。

参考文献:

- [1] 毛翔. 美军作战评估理论与实践 [M]. 北京: 知识产权出版社, 2021.
- [2] 王凯, 赵定海, 闫耀东, 等. 武器装备作战试验 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2012.
- [3] 王亮. 武器装备作战试验评估方法研究 [J]. 装备学院学报, 2016, 27 (2): 117-122.
- [4] 王正明. 导弹试验的设计与评估 [M]. 北京: 科学出版社, 2022.
- [5] 吴玲. 舰载武器系统效能分析 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2020.
- [6] 郭齐胜. 装备效能评估概论 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2005.
- [7] 斗计华, 郭锐, 杨兴宝. 舰空导弹武器系统作战效能评估 [M]. 北京: 海潮出版社, 2010.
- [8] 时维科, 刘乔, 李绍隆. 基于舰载平台的近程反导武器系统作战能力评估方法研究 [J]. 计算机测量与控制, 2022, 30 (1): 282-287.
- [9] 胡剑文. 武器装备体系能力指标的探索性分析与设计 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2009.
- [10] 夏维, 刘新学, 孟少飞. ADC 改进模型评估导弹武器系统效能 [J]. 现代防御技术, 2017, 45 (1): 28-35.
- [11] 王亮. 基于 SCA 和改进 ADC 的装备作战效能试验方案研究 [J]. 装备学院学报, 2015, 26 (3): 105-109.

(下转第 333 页)