

## 改进 ADC 方法及其在武器装备系统效能评估中的应用\*

刘仕雷<sup>1</sup>, 李昊<sup>2,3</sup>

(1. 装甲兵工程学院, 北京 100072; 2. 中国航天员科研训练中心 人因工程重点实验室, 北京 100094;  
3. 清华大学 航天航空学院, 北京 100084)

**摘要:**在分析武器装备系统效能特点的基础上, 针对装备定型试验的应用需求, 提出一种改进可用性-可信性-能力法, 以解决传统方法在系统状态划分上无法准确全面描述武器装备实际可用性的问题。提出增加中间状态的策略, 对效能综合计算模式、状态描述与计算方法、状态转移计算方法和能力计算方法做整体改进, 在此基础上开发了支撑软件 SEEK。并以某型主战坦克系统效能评估为例, 验证了该方法的可行性和有效性。

**关键词:**武器装备; 定型试验; 系统效能; 评估; 主战坦克

中图分类号: E917 文献标志码: A 文章编号: 1001-2486(2017)03-130-06

## Modified ADC method and its application for weapon system effectiveness evaluation

LIU Shilei<sup>1</sup>, LI Hao<sup>2,3</sup>

(1. Academy of Armored Force Engineering, Beijing 100072, China;

2. National Key Laboratory of Human Factors Engineering, China Astronaut Research and Training Center, Beijing 100094, China;

3. School of Aerospace Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** Based on analyses about system effectiveness of the weapon and aiming at application requirements from the weapon type approval tests, a modified ADC (availability-dependability-capability) method was put forward in order to solve the problem that the actual usability of the weapon cannot be presented accurately and entirely by dividing system conditions using the traditional ADC method. Comprehensive modifications were performed, such as putting forward the strategy of adding the medial conditions in the model. As the results showed, functions for integrating the sub-system effectiveness, for describing and computing the conditions, for transfers between conditions, and for capabilities were all improved. A software platform SEEK was developed based on these modifications. System effectiveness evaluation of a main tank was selected as an example for demonstrate feasibility and validity of the method.

**Key words:** weapon; type approval test; system effectiveness; evaluation; main tank

系统效能是随着系统结构和功能日益复杂、系统试验数据资源仍然相对缺乏和系统应用要求跨越式提高的综合作用的产物, 是建立在系统科学基础上的应用研究领域<sup>[1]</sup>。

武器装备作为一类典型的复杂系统, 其系统效能的研究非常具有代表性<sup>[2]</sup>。首先, 武器装备不论在结构还是功能上, 其复杂程度均呈现加速增长的趋势。先进的武器装备往往由多个功能各异又相互关联的分系统组成, 分系统又可划分为子系统, 子系统仍可继续划分, 从而形成结构上逐步分解、功能上相互关联的层次化体系结构。其次, 由于武器装备的应用环境是战场, 系统试验特

别是热试验往往难以实现, 从而导致在系统研发各生命阶段所需的数据资源都远远不能满足论证、研究和评估的需求。再次, 随着信息化和工业 4.0 时代的到来, 对战争的形态和内涵都将引发巨大变化, 由此带来对武器装备在应用要求方面的跨越式提高, 武器系统将不仅仅作为一种战争工具而独立存在。因此, 开展武器装备系统效能研究对理论方法和应用对象均具有重要意义<sup>[3]</sup>。现阶段, 武器装备的定型试验是武器装备全生命周期的一个关键节点, 标志着武器装备由研发阶段进入应用阶段。因此本文选择这一阶段的武器装备作为研究对象。

\* 收稿日期: 2016-01-19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51375492, 51575527); 国家部委基金资助项目(SYFD130061815)

作者简介: 刘仕雷(1976—), 男, 山东平度人, 博士研究生, E-mail: zzblsl@163.com;

李昊(通信作者), 男, 副研究员, 博士, E-mail: li-hao@tsinghua.edu.cn

目前,已有多种武器装备系统效能评估方法:按评估数据来源,可分为实装试验法、仿真模拟法、综合试验法、实战试验法等;按效能评估计算形式,可分为线性加权法、模糊综合评判法、层次分析法、概率综合法、灰色评估法等;按效能评估的模型,可以分为可用性-可信性-能力(Availability-Dependability-Capability, ADC)法、系统效能分析(System Effectiveness Analysis, SEA)法以及在传统方法基础上所做出的改进和扩展等。在实际应用中,往往需要根据评估的对象和目的,结合武器装备及其使用对象,在可行性和有效性等方面权衡,选择合适的评估方法<sup>[4-5]</sup>。根据武器装备定型试验的应用需求,本文选择应用最为广泛的 ADC 法<sup>[6]</sup>作为基础,根据研究的需要对其各方面做了适应性修改,形成一种新的改进 ADC 法,并开发了软件工具 SEEK。

### 1 相关概念和方法

#### 1.1 系统生命周期与效能评估

几乎所有人工系统都是根据需求反馈构想出的。系统全生命周期由四个串行且相互重叠的阶段构成,如图 1 所示,通过需求反馈将各阶段联成闭合回路<sup>[7]</sup>。其中,测试过程是连接系统从研发到应用的重要环节。对武器装备来说,定型试验是整个测试过程的核心环节。

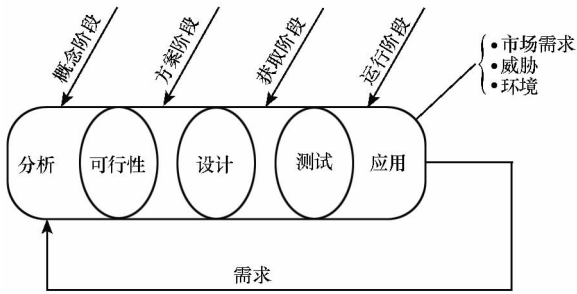


图 1 系统全生命周期的各阶段  
Fig. 1 Phases of system life

图 2 给出了武器装备定型试验与研发、测评和应用三大回路之间的关系。

所谓系统的任务可靠性,是指系统凭借其功能,完成特定任务的能力。如主战坦克的火分系统,其任务可靠性是指在特定环境实现其任务(发射、将弹药到达目标并将其摧毁)的概率。系统的运行可靠性,则是指系统实现某种特定功能的能力,因此系统并非在所有运行时刻都打开。如主战坦克的信息分系统,只有在通信过程中才发挥作用。对于复杂的武器装备,如主战坦克,其

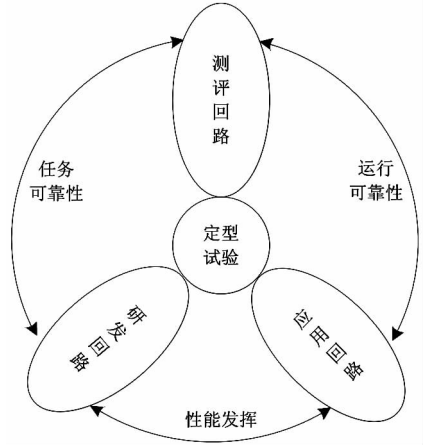


图 2 定型试验与三大回路的关系  
Fig. 2 Relationship between type approval test & 3 main loops

中既涉及任务可靠性,又涉及运行可靠性。因此在研究中,将综合考虑这两类因素。

#### 1.2 系统效能的定义及其特点分析

工程领域对系统效能的通用认识是:效能是一种预期的结果、输出、后果或操作,即正确地做正确的事情,以达到目的。系统效能是对系统完成其目标的能力的度量,是在系统预期能够完成的一组特定目标中的度量,也可被认为是系统能够实现其目标的概率。系统效能的要素包括:就绪状态(readiness)、设计完备度(design adequacy)和可靠性(reliability)<sup>[1]</sup>。

在军事应用领域,被广泛认可的是美国武器系统效能咨询委员会(Weapon System Effectiveness Industry Advisory Committee, WSEIAC)于 1965 年提出的定义<sup>[8]</sup>:系统效能是指系统能够完成一组给定任务的能力的度量,它是可用性、可信性和能力的函数。我国的 GJB 1394—1992 则将装备的效能定义为:在规定的条件下达到规定使用目标的能力。

上述两方面对系统效能要素的定义具有关联关系,如图 3 所示。

#### 1.3 ADC 法的基本思想和应用局限

ADC 法是 WSEIAC 在其提出的系统效能定义的基础上建立的,其核心为系统效能模型。

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

其中,  $E$  表示系统效能,  $A$  表示系统可用性,  $D$  表示系统可信性,  $C$  表示系统能力。

ADC 法本质上是对武器装备系统主客观因素的综合,将系统效能与系统可用性、可信性和能力之间的关系用数学形式表示,在一定程度上简

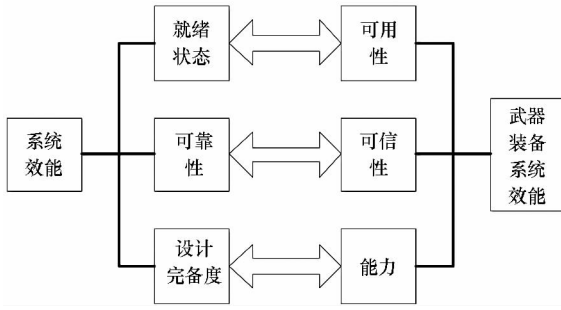


图 3 系统效能的要素

Fig. 3 Components of system effectiveness

化了评估的复杂程度;但在具体应用中,如何以简单的向量和矩阵形式完全描述系统各方面属性,对该方法提出了挑战。

传统的 ADC 法在本质上更适用于效能分析而非效能评估,也就是说,该方法更适用于武器装备的论证和设计阶段,而非装备的定型试验,原因如下。

1) 状态确定。在传统 ADC 法中,并没有对系统可用性向量  $A = [a_1 \ a_2 \ \dots \ a_i \ \dots \ a_n]$  的中间状态给出确定方法,往往通过主观给出,或者进一步简化为省略中间状态的形式。另一方面,当将整个系统划分为多个层次后,系统状态数量将呈指数级增长,使得问题过于复杂而难以计算。

2) 状态转移。由于定型试验次数的限制,往往无法通过试验数据统计计算执行任务过程状态转移的概率,影响对系统可信性矩阵  $D$  的构建。此外,系统分层所导致的组合状态的增加,将增加计算复杂性。

3) 能力计算。对系统能力向量  $C$  的确定往往采用线性函数,这与装备实际情况并不符合;且当系统状态超过 2 个时,需要建立中间状态与能力之间的关系。

## 2 改进 ADC 法

### 2.1 综合计算模式的改进

传统 ADC 法对系统状态参数的确定,往往是在将武器装备看作一个大系统的假设下,主观给出的,随着系统复杂程度的增高,对状态的描述缺乏科学性。本文对综合计算模式的改进,在于解决系统效能的层次划分与聚合计算的问题。

#### 2.1.1 系统效能层次划分

武器装备系统往往都是由很多结构和功能相对独立的成分构成,以这些独立成分单独作为研究对象时,其效能是可计算的。因此,在层次化和量子化思想的指导下,对武器装备做一定层次划

分(如图 4 所示),能够降低计算复杂度,并使得评估原始数据的准确性大大提升。



图 4 武器装备系统效能的层次划分

Fig. 4 Decomposition of weapon system effectiveness

层次划分须遵循以下原则:一是保持划分的成分在结构和功能上的完整性,能够独立开展效能计算;二是划分层次不宜过多。

#### 2.1.2 基于塌陷效应的聚合计算方法

武器装备系统效能经过层次划分以后,每一层次上需要对所有成分的效能进行聚合计算,以获得上一层的系统效能。传统的聚合计算方法往往采用加权求和方法,该方法能够综合体现各成分效能对整体效能的影响,却无法描述系统效能的短板效应,即某一成分对系统整体效能具有很大影响的情况。为此,提出一种简单算法——基于塌陷效应的聚合计算方法,以解决短板效应问题。

基本思想:当聚合计算的分项值都“较高”(高于“临界值”)时,仍然按照传统的加权和的方式进行聚合计算;当聚合计算的某个或某几个分项低于“临界值”时,需要考虑这种低值对整个系统效能或者系统能力的负面影响。

术语定义:所谓“塌陷效应”,其含义就是将各个分项效能看作是支撑整个系统效能的“支柱”,如果某个“支柱”的高度明显偏低,那么它将“拖累”或者“拖垮”与此相关的其他分项效能,同时也对整个系统的效能造成影响。

算法描述如下。

步骤 1:加权求和。按传统加权求和方法计

算系统效能:  $E = \sum_{i=1}^n (W_i \cdot E_i)$ , 其中,  $n$  为子系统数,  $E_i$  为第  $i$  个分系统的效能,  $W_i$  为相应权值。对权值的设置是历史信息、专家经验和实测结果的综合。例如,可使用文献[9]中提出的群体可拓层次分析法得到。

步骤 2:确定临界值。根据试验结果与计算结果的比对,结合专家经验,为每个分系统效能设置临界值  $K_i$ ,当分系统效能值低于该临界值时,对系统效能影响呈现剧烈变化。

步骤 3:塌陷效应计算。若分系统效能满足  $E_i < K_i$ ,则认为该分系统需进行塌陷效应计算。若有  $m$  个分系统需进行塌陷效应计算,则:

$$\begin{aligned} \bar{E} &= E \times \prod_{j=1}^m [1 - (K_j - E_j)] \\ &= \sum_{i=1}^n (W_i \cdot E_i) \times \prod_{j=1}^m [1 - (K_j - E_j)] \end{aligned} \quad (2)$$

得到的  $\bar{E}$  为系统效能值。

### 2.2 状态描述与计算方法的改进

为了建立系统故障模式与可识别状态之间的对应关系,引入故障模式群的概念。故障模式群由一定数量的故障模式组成,与可识别状态构成一一对应关系。如图5所示,由系统的  $n$  个故障模式计算  $m$  个可识别状态的概率值。显然,有:  $Q_i = \emptyset$  且  $\sum_{i=2}^m q_i = n$ 。需要说明的是:对由多个分系统构成的系统来说,虽然故障模式与出故障的分系统之间往往是“多对多”的关系,为了研究方便,通常会做一些简化处理,使二者为简单的“一对多”关系。

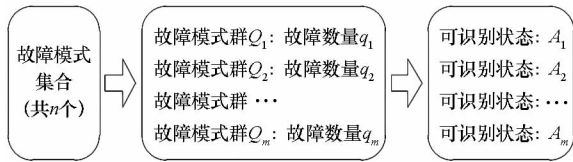


图5 故障模式到可识别状态的转化

Fig.5 Transition from failure patterns to identifiable states

令故障模式群  $Q_i$  中故障模式对应的平均故障间隔时间和平均故障修复时间,分别为  $MTBF_1, MTBF_2, \dots, MTBF_{q_i}$  和  $MTTR_1, MTTR_2, \dots, MTTR_{q_i}$ ,

$$D = \begin{bmatrix} P(Q_2 + Q_3, t_i \geq T_1) & P(Q_2, t_i < T_1) & 1 - d_{11} - d_{12} \\ P(Q_2, t'_i < T_2) & 1 - d_{21} - d_{23} & \frac{MTBF_{Q_3} - MTBF_{Q_2} \cdot P(Q_3, t_i < T_1)}{MTBF_{Q_3}} \\ P(Q_3, t'_i < T_2) & 1 - d_{31} - d_{33} & P(Q_3, t'_i \geq T_2) \end{bmatrix} \quad (7)$$

其中:  $t_i$  表示对每次故障时间的记录;  $t'_i$  表示对每次维修时间的记录;  $P(Q_2, t_i < T_1)$  表示故障模式群  $Q_2$  中故障间隔时间小于规定时间  $T_1$  的比率,以此类推。

### 2.4 能力计算方法的改进

采用品质效用函数的方法进行能力指标的计算。武器装备常具备多个品质因素(性能),有的品质因素要求越大越好,有的要求越小越好,还有的要求在一定范围之内,而且不同的品质因素在装备中所发挥的作用也有差异。

对效用函数值做归一化处理。若武器装备有  $m$  个品质因素(性能),即  $d = (d_1, d_2, \dots, d_m)$ , 性能指标最大值点  $d_{\max} = (d_{\max 1}, d_{\max 2}, \dots, d_{\max m})$ , 最小值点  $d_{\min} = (d_{\min 1}, d_{\min 2}, \dots, d_{\min m})$ 。

若要求品质因素越大越好,则采用如式(8)

则故障模式群  $Q_i$  中所有故障模式的平均故障间隔时间与平均故障修复时间的加权平均值分别为:

$$\begin{cases} MTBF_{Q_i} = \frac{MTBF_1 + MTBF_2 + \dots + MTBF_{q_i}}{q_i} \\ MTTR_{Q_i} = \frac{MTTR_1 + MTTR_2 + \dots + MTTR_{q_i}}{q_i} \end{cases} \quad (3)$$

分以下三种情况计算系统状态概率。

1) 当系统处于故障状态时,  $i = m$ , 有:

$$A_m = \frac{MTTR_{Q_i}}{\sum MTBF_{Q_i} + \sum MTTR_{Q_i}} \quad (4)$$

2) 当系统处于中间状态时,  $1 < i < m$ , 有:

$$A_i = \frac{MTBF_{Q_i}}{\sum MTBF_{Q_i} + \sum MTTR_{Q_i}} \quad (5)$$

3) 当系统处于正常状态时,  $i = 1$ , 有:

$$A_1 = 1 - \sum_{i=2}^m A_i \quad (6)$$

### 2.3 状态转移计算方法的改进

在系统具有中间状态的情况下,系统状态共有  $m$  个,可信度矩阵(即状态转移矩阵)变为  $m$  阶矩阵。为了简化,仅考虑  $m = 3$  的情况。

令  $T_1$  表示完成任务的时间(即状态转移参考量),  $T_2$  表示允许维修的时间。根据对各故障模式的试验观测值,可以计算得到可信度矩阵中各元素的估值。

所示的效用函数。

$$\mu_k = d_k / d_{\max k} \quad (8)$$

若要求品质因素越小越好,则采用如式(9)所示的效用函数。

$$\mu_k = 1 + (d_{\min k} - d_k) / d_{\max k} \quad (9)$$

若要求品质因素在  $[r_1, r_2]$  区间为宜,则采用如式(10)所示的效用函数。

$$\mu_k = \begin{cases} d_k / r_1 & d_k \in [d_{\min k}, r_1] \\ 1 & d_k \in [r_1, r_2] \\ 1 + (r_2 - d_k) / d_{\max k} & d_k \in [r_2, d_{\max k}] \end{cases} \quad (10)$$

得到品质因素效用函数值的计算结果为  $\mu = (\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_m)$ 。通过对  $\mu$  中各元素的加权求和,结合基于塌陷效应的聚合计算方法,可以得到正常状态的能力值  $c_1$ 。显然有故障状态能力值

$c_m = 0$ 。通过专家经验,得到降额系数  $\phi_i$ ,以计算中间状态的能力值  $c_i = \phi_i \cdot c_1$ 。

### 2.5 支撑软件工具 SEEK

在前述四个方面算法改进基础上,应用通用程序开发平台研制了武器装备系统效能评估支撑软件工具 SEEK,其主要功能如图 6 所示,主要包括四个部分:基本功能模块提供了软件运行和使用的基本功能和界面,并预留了其他功能模块(如仿真模块)的接口;模板模块提供了研究对象,即各类武器装备的层次化结构模板,并允许用户根据需要自定义新模板和修改已有模板;算法模块是软件的核心部分,分别实现了改进 ADC 法的所有功能;数据库模块是软件的基础,包含了定型试验数据、武器装备系统各组成部分的设计数据以及相关的专家经验和历史数据。

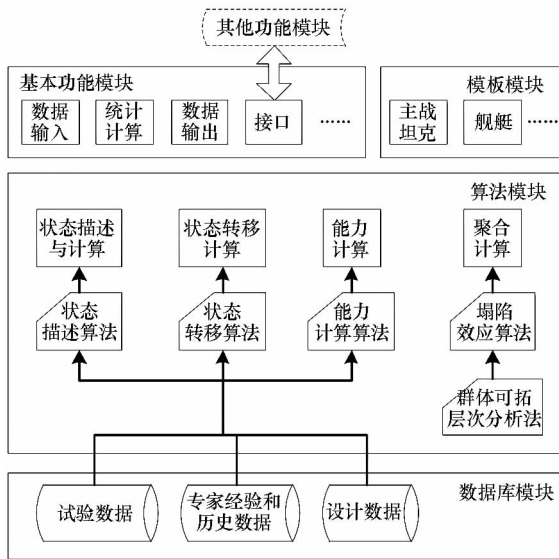


图 6 SEEK 的主要功能组成

Fig.6 Main functional components of SEEK

### 3 主战坦克系统效能评估

为了演示验证改进 ADC 法的应用情况,本节选择某型主战坦克作为系统效能评估研究的研究案例<sup>[10-11]</sup>。

#### 3.1 系统描述与基本假设

SEEK 软件从效能评估的角度,将主战坦克看作由火力分系统、机动分系统、防护分系统、信息分系统、电气分系统构成的综合系统,并考虑人因工程影响。因此,主战坦克的整体效能为:

$$E_T = (W_f E_f + W_m E_m + W_p E_p + W_c E_c + W_e E_e) C_h \quad (11)$$

其中,  $E_f$ 、 $E_m$ 、 $E_p$ 、 $E_c$  和  $E_e$  分别是火力分系统、机动分系统、防护分系统、信息分系统、电气分系统

的效能,  $W_f$ 、 $W_m$ 、 $W_p$ 、 $W_c$  和  $W_e$  分别是各分系统对应的权值,  $C_h$  表示人因工程影响。

主战坦克火力分系统继续分解,又可分为火控子系统、火炮子系统、自动装弹子系统和辅助武器子系统。其中,火控子系统由火控计算机、各种传感器、瞄准镜、激光测距仪、微夜视装置、火炮稳定装置、火炮控制装置组成。

主战坦克系统效能评估是结合其设计定型基地试验进行的,其数据来源包括定型试验数据和经验数据,这些数据都被存入 SEEK 中。

#### 3.2 火控子系统效能评估

下面以主战坦克的火控子系统为代表,介绍系统效能评估的分析过程。

根据改进 ADC 法,火控子系统效能计算模型为:

$$E_{fa} = A_{fa} \cdot D_{fa} \cdot C_{fa} \quad (12)$$

根据改进 ADC 法的步骤,开展系统效能评估计算。

火控子系统可用性矩阵  $A_{fa} = [A_{fa1} \ A_{fa2} \ A_{fa3}]$ 。为了简化,仅考虑三种状态,即:

- 1) 完好状态概率  $A_{fa1}$ ,描述无故障模式;
- 2) 中间状态概率  $A_{fa2}$ ,描述轻微故障模式,与火控计算机、各种传感器、瞄准镜、激光测距仪四类装置的失效相关,构成故障模式群  $Q_2$ ;
- 3) 故障状态概率  $A_{fa3}$ ,描述故障状态模式,与微夜视装置、火炮稳定装置、火炮控制装置三类装置的失效相关,构成故障模式群  $Q_3$ 。

根据火控子系统七类装置的故障时间和故障维修时间的试验结果,使用式(3)~(6),计算得到:

$$A_{fa} = [A_{fa1} \ A_{fa2} \ A_{fa3}] = [0.656 \ 0.263 \ 0.081] \quad (13)$$

在对火控子系统可信度矩阵计算中,令任务时间  $T_1 = 4$  h,允许维修时间  $T_2 = 1$  h。根据试验观测结果,使用式(7),在 SEEK 支持下计算得到:

$$D_{fa} = \begin{bmatrix} 0.78 & 0.12 & 0.10 \\ 0.90 & 0.04 & 0.06 \\ 0.84 & 0.00 & 0.16 \end{bmatrix} \quad (14)$$

使用式(8)~(10),利用专家经验,在 SEEK 支持下计算得到:

$$C_{fa} = [0.731 \ 9 \ 0.292 \ 8 \ 0]^T \quad (15)$$

将结果代入式(12)中,得到  $E_{fa} = 0.626 \ 3$ 。

#### 3.3 主战坦克系统效能计算

表 1 给出火力分系统中各子系统的效能值和权值。其中:各子系统效能值是根据 3.2 节的过程分别计算得到的;权值是使用 SEEK 中群体可

拓层次分析法模块,根据历史信息、专家经验和实测结果的综合计算得出的。此外,根据专家经验,得到每个子系统的临界值  $K_i$  均为 0.6,因此对自动装弹子系统和辅助武器子系统需要启动基于塌陷效应的聚合计算,根据式(2),使用 SEEK 计算得到火力分系统的效能值  $E_f = 0.479 1$ 。

表 1 火力分系统中各子系统的效能计算数据

Tab.1 Data for calculating MOE of elements of firepower subsystem

|     | 子系统     |         |         |         |
|-----|---------|---------|---------|---------|
|     | 火控子系统   | 火炮子系统   | 自动装弹子系统 | 辅助武器子系统 |
| 效能值 | 0.626 3 | 0.738 1 | 0.525 6 | 0.508 3 |
| 权值  | 0.25    | 0.12    | 0.26    | 0.37    |

同理,针对其他分系统,根据火力分系统的计算步骤计算其效能值,并仍使用群体可拓层次分析法计算相应权值,结果如表 2 所列。另有  $C_h = 0.943 7$ ,使用式(11),在 SEEK 中最终得到主战坦克系统效能值  $E_T = 0.569 0$ 。

表 2 主战坦克各分系统的效能计算数据

Tab.2 Data for calculating MOE of subsystems of main tank

|     | 分系统     |         |         |         |         |
|-----|---------|---------|---------|---------|---------|
|     | 火力分系统   | 机动分系统   | 防护分系统   | 信息分系统   | 电气分系统   |
| 效能值 | 0.479 1 | 0.678 2 | 0.737 2 | 0.639 2 | 0.508 2 |
| 权值  | 0.257 3 | 0.269 6 | 0.139 4 | 0.186 7 | 0.147 0 |

为进一步验证方法及其应用的可信性,利用 SEEK 平台,将研究结果与研究对象的热试验数据进行对比,可以发现二者间具有相似规律。从而也进一步验证了该方法的有效性。

## 4 结论

改进 ADC 方法通过在武器装备的正常状态和故障状态之间增加中间状态的策略,提高了对系统状态描述的准确性;同时,通过对效能综合计算模式、状态描述与计算方法、状态转移计算方法和能力计算方法的整体改进,一定程度上解决了传统方法过于依赖专家主观评价的困难,有效提升了效能评估应用的适应性和准确性。该方法在对某型主战坦克系统效能评估应用中得到了验证。

改进 ADC 方法尚未全面考虑武器装备使用

者对武器装备系统效能发挥的作用和影响,也未涉及实际作战想定,特别是对抗情况下武器装备系统效能的评估,这两方面的问题有待在后续研究中解决。

## 参考文献(References)

- [1] Habayeb A R. System effectiveness [M]. UK: Pergamon Press, 1987.
- [2] 杨峰,王维平. 武器装备作战效能仿真与评估[M]. 北京: 电子工业出版社, 2014.  
YANG Feng, WANG Weiping. Weapons and equipment operational effectiveness simulation and evaluation [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2014. (in Chinese)
- [3] Li Z H, Zhang S, Wang J Y, et al. Research on description method of operational task oriented to operational effectiveness evaluation [C] //Proceedings of AsiaSim, Communications in Computer and Information Science, 2012, 3: 313-321.
- [4] 梁金登,李东旭. 空间武器系统效能分析研究[J]. 火力与指挥控制, 2009, 34(5): 47-50.  
LIANG Jindeng, LI Dongxu. Study on effectiveness evaluation method of space weapon system[J]. Fire Control & Command Control, 2009, 34(5): 47-50. (in Chinese)
- [5] 郭齐胜,张磊. 武器装备系统效能评估方法研究综述[J]. 计算机仿真, 2013, 30(8): 1-4.  
GUO Qisheng, ZHANG Lei. Research summary of weapons equipment systems effectiveness evaluation methods [J]. Computer Simulation, 2013, 30(8): 1-4. (in Chinese)
- [6] 侯立峰,熊哲,盛景军. 基于 ADC 方法的飞行保障系统效能评估模型[J]. 火力与指挥控制, 2010, 35(10): 123-126.  
HOU Lifeng, XIONG Zhe, SHENG Jingjun. Model of efficiency evaluation on flight support system based on ADC method [J]. Fire Control & Command Control, 2010, 35(10): 123-126. (in Chinese)
- [7] Zacks S. Introduction to reliability analysis: probability models and statistical methods [M]. US: Springer-Verlag New York Inc., 1992.
- [8] Weapon System Effectiveness Industry Advisory Committee. Final report of task group 2: prediction measurement; AFSC TR-65-2[R]. US: Weapon System Effectiveness Industry Advisory Committee, 1965: 1-3.
- [9] 孟庆均,宋爱斌,朱立民. 群体可拓层次分析法在 C<sup>4</sup>ISR 系统效能指标赋权中的应用[J]. 装甲兵工程学院学报, 2008, 22(2): 25-29.  
MENG Qingjun, SONG Aibin, ZHU Limin. GEHP and application in determining the effectiveness targets weight of C<sup>4</sup>ISR system [J]. Journal of Academy of Armored Force Engineering, 2008, 22(2): 25-29. (in Chinese)
- [10] 罗来科,蒋宝唐,宣益民. 主战坦克作战效能分析与模糊综合评价[J]. 火力与指挥控制, 2003, 28(6): 39-41.  
LUO Laike, JIANG Baotang, XUAN Yimin. The efficiency analysis of the main battle tank and its fuzzy synthetic evaluation [J]. Fire Control & Command Control, 2003, 28(6): 39-41. (in Chinese)
- [11] 王正元,刘靖旭,谭跃进,等. 基于仿真的主战坦克作战效能评估方法[J]. 计算机仿真, 2005, 22(1): 29-32.  
WANG Zhengyuan, LIU Jingxu, TAN Yuejin, et al. Combat effectiveness evaluation to armor based on combat simulation[J]. Computer Simulation, 2005, 22(1): 29-32. (in Chinese)