

基于 ADC 方法的炮射导弹系统效能评估

李春臻¹, 刘婵媛¹, 高文霞², 班伟³, 杨煜¹

(1. 中北大学 机电工程学院, 山西 太原 030051; 2. 新乡航空工业(集团)有限公司, 河南 新乡 453000;
3. 中国船舶重工集团第七一〇研究所, 湖北 宜昌 443003)

摘要: 为研究炮射导弹系统效能, 提高炮射导弹的综合质量特性, 基于 ADC 方法对炮射导弹系统效能进行建模; 首先针对炮射导弹系统较为复杂的特点, 将总炮射导弹系统分为 4 个分功能系统, 通过系统正常与故障状态建立了可用性模型; 其次构建了系统状态转移路径, 将炮射导弹系统可信性分为发射可靠性、飞行可靠性与作用可靠性, 依次建立可信性模型; 接着针对 ADC 方法的不足, 对系统固有进行拓展, 增加了导弹质心参数、导弹射程参数、导弹制导控制力矩参数和导弹破甲深度参数指标, 建立固有模型, 改进了以往效能评估的局限性; 最后确定炮射导弹系统效能。通过实验算例的验证表明了该方法模型可用、适用、准确。

关键词: 炮射导弹; 系统效能; ADC 方法; 效能评估

Effectiveness Evaluation of the Gun-Launched Missile System Based on the ADC Method

LI Chunzhen¹, LIU Chanyuan¹, GAO Wenxia², BAN Wei³, YANG Yu¹

(1. College of Mechatronics Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China;
2. Xinxiang Aviation Industry (Group) Co., Ltd., Xinxiang 453000, China;
3. No. 710 R&D Institute, CSIC, Yichang 443003, China)

Abstract: In order to study the effectiveness of the gun-launched missile system and improve the comprehensive quality characteristics of the gun-launched missile, an availability dependability capability (ADC) method is used to model the effectiveness of the gun-launched missile system. Firstly, according to the complex characteristics of the gun-fired missile system, the total gun-fired missile system is divided into four functional systems, and the availability model is established through the normal and fault state of the system. Secondly, the state transition path of the system is constructed, and the credibility of the gun-launched missile system is divided into the launch reliability, the flight reliability and the operational reliability, and the credibility model is built successively. Then, in view of the shortcomings of the ADC method, the inherent capability of the system is expanded, and the missile's centroid parameters, missile range parameters, missile guidance and control moment parameters and missile armor breaking depth parameters are increased. The inherent capability model is established to improve the limitations of previous performance evaluation. Finally, the effectiveness of the gun-launched missile system is determined. The experimental results show that the method of the model is feasible, applicable and accurate.

Keywords: gun-launched missile system; system efficiency; ADC method; effectiveness evaluation

0 引言

武器系统效能是指在所拟定预定条件下使用某种武器系统, 该武器系统在规定时间内完成规定任务的程度^[1]。它是通过综合描述系统效能中不同属性的多个指标得到的。而且武器系统效能是一种预测的结果、输出、后果或操作, 即正确地做正确的事情, 以达到最终的目的。在武器系统效能评估过程中还需考虑可靠性、维修性、安全性与各种偶然人为因素。由此看出武器系统效能评估具有概率性、相对性、时限性和局限性的特点, 所以采用定性方法对武器系统进行分析、综合、评估和比较是研究武器系统效能与综合质量特性是很有必要的^[2]。而且对武器系统效能进

行评估有利于真实反映武器系统作战能力, 对武器系统的发展具有很重要的现实意义^[3]。

炮射导弹作为一种新型的攻击手段, 是利用坦克或者其他火炮平台发射的一种制导炮弹, 相对于其他常规导弹, 炮射导弹具有射程远、命中精度高、杀伤威力大等优点, 从而极大的增强了坦克装甲车辆的综合作战能力^[4]。考虑炮射导弹系统为许多分系统组成的整套系统, 各个分系统之间既有串联关系, 又有并联关系。也就是说, 炮射导弹分系统无法完成拟定作战任务, 使得整个炮射导弹系统无法进行正常工作; 而有的炮射导弹分系统出现错误, 整体炮射导弹系统依然可以完成拟定任务。本文选择应用最为

收稿日期: 2022-01-11; 修回日期: 2022-03-02。

作者简介: 李春臻(1996-), 男, 山西大同人, 硕士研究生, 主要从事武器系统与控制、机电工程、质量与可靠性工程等方面的研究。

引用格式: 李春臻, 刘婵媛, 高文霞, 等. 基于 ADC 方法的炮射导弹系统效能评估[J]. 计算机测量与控制, 2022, 30(4): 142-148.

广泛的 ADC 法为基础, 根据研究的需要对其各方面做了适应性修改, 形成一种适用于炮射导弹的 ADC 法, 并开发了系统效能评估软件工具。ADC (availability dependability capacity) 方法是美国工业界武器系统效能咨询委员会 (WSEIAC, weapon system effectiveness industry advisory committee) 在系统效能定义的基础上建立的, 其目的在于根据可用性 (availability)、可信性 (dependability) 和能力 (capacity) 三大要素评价装备系统, 把这三大要素组合成一个表示装备系统总性能的单—效能度量^[5]。定义为预算一个系统完成一组特定的任务程度的度量, 是可用性向量 A 、可信性向量 D 和能力向量 C 的乘积, 且规定 ADC 方法并非是一个可以直接应用得数学公式, 它作为一个基本程序需要去建立相应的数学模型, 一般情况是通过马尔可夫假定来确定武器系统状态转移, 特定情况需要确定表征值来表示武器系统状态转移^[6]。

1965 年, 美国工业界武器系统效能咨询委员会 (WSEIAC) 提出了一种方法 ADC 效能评估法^[7], 从综合评估可用度、可靠度和能力等方面考量武器装备对作战效能的具体影响, 从而能较为全面的反映出多项战术技术指标及武器装备作战性能对装备整体影响的综合表现。ADC 方法到现在已经发展了半个多世纪, 其在武器装备效能评估方面的理论研究和实际应用日益完善, 现在梳理 ADC 效能评估法的国内外研究现状, 为日后的工作和改进方向能提供指导。

黄贡献等^[8]基于 ADC 模型, 针对自行火炮营系统的功能特点和组成, 通过可用度向量、可信赖矩阵和能力向量三者的函数建立基本数学计算模型, 对自行火炮营系统的作战效能进行了评价。孟锦等^[9]基于 ADC 模型, 对侦察卫星系统自身特点进行了分析, 并针对系统效能评估不能反映侦察卫星在侦查过程中的动态变化问题建立了动态 ADC 模型。宋朝和^[10]基于 ADC 模型, 根据雷达的侦查定位和数据处理的传输能力, 运用有关的聚合法计算雷达的侦查能力, 从而实现侦查雷达的效能分析。徐皓等^[11]基于 ADC 模型建立了鱼雷作战的效能评估模型。徐晓明等^[12]基于 ADC 模型建立无人布雷系统布雷阶段效能评估指标体系, 突出运行条件和环境适应等因素的影响, 从而建立无人布雷系统布雷阶段效能评估模型。程晓明等^[13]基于 ADC 模型, 从目标显现到雷达散射和目标杀伤建立了多无人机协同编队效能模型, 参考无人机编队协同突防的例子, 建立了地空导弹防御系统雷达探测的数学模型。G. Jiao 等^[14]基于 ADC 模型, 提出了有关舰载导航设备综合效能的理论。李彤岩^[15]等基于 ADC 模型, 针对通信网络性能指标多和效能评估困难的问题, 根据可视化的方法, 提出了基于 ADC 模型的效能评估方法。王君等^[16]基于 ADC 模型, 分析了武器系统的可靠性逻辑结构, 建立了一种低空近程低空带单武器系统效能评估的数学模型。陈强等^[17]基于 ADC 模型, 结合指标体系的选取和确立原则, 从数据链系统的信息支持能力出发, 建立了数据链系

统作战效能指标体系。郑锦等^[18]基于 ADC 模型, 建立了有关影响水面舰艇作战系统效能评估因素的数学模型, 并根据典型水面舰艇的对空作战任务效能的库组, 验证了所提模型的有效性。

1 炮射导弹系统效能评估概念模型

炮射导弹是一种新型运用在坦克等装甲车辆的精准打击武器, 它是由制导部、推进系统、战斗部、电子设备和弹体结构组成, 炮射导弹结构示意图如图 1 所示。

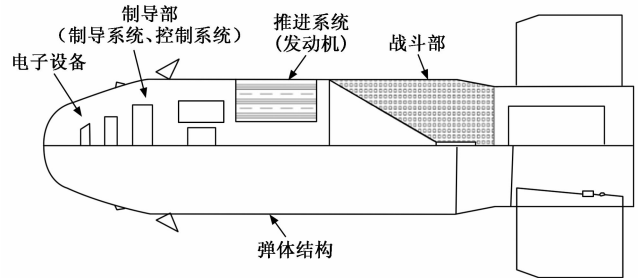


图 1 炮射导弹结构示意图

炮射导弹系统效能评估概念模型包括 3 个分支: 可用性、可信性和固有能。可用性由可靠性和维修性所确定; 可信性由发射可靠度、飞行可靠度和作用可靠度所确定; 能力包括弹体结构系统、制导系统、推进系统和战斗系统 4 个部分, 各分系统按组合逐层展开为基本功能单元。能力是各分系统按规定联合运行而产生的附加能力, 对可用性、可信性无影响。炮射导弹系统效能评估体系如图 2 所示。

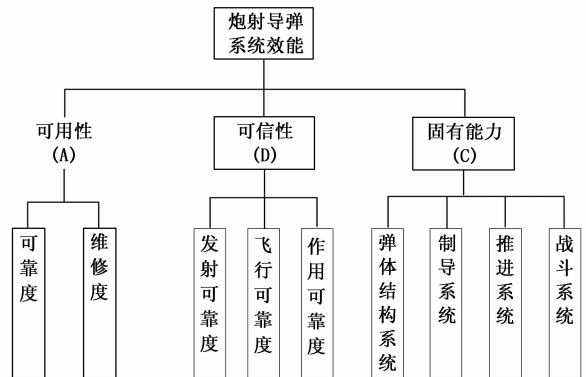


图 2 炮射导弹系统效能组成部分

2 炮射导弹系统效能评估数学模型

2.1 系统效能数学模型

ADC 方法中, 系统效能 E 是预计系统满足一组特定任务要求之程度的度量, 是有效性、可依赖性和能力的函数。可用性 A 是在开始执行任务时系统状态的度量, 是装备、人员、程序三者之间的函数。可信性 D 是在已知开始执行任务时系统状态的情况下, 在执行任务过程中的某一个或某几个时刻系统状态的度量。固有能 C 是在已知执行任务期间的系统状态的情况下, 系统完成任务能力的度量。

其中系统效能 E 可以表示为:

$$E = ADC = AD_1C + AD_2C + \dots AD_iC =$$

$$(a_1, a_2, \dots, a_n) \begin{pmatrix} d_{11} & d_{12} & \dots & d_{1n} \\ d_{21} & d_{22} & \dots & d_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ d_{n1} & d_{n2} & \dots & d_{nm} \end{pmatrix}_1 + \begin{pmatrix} d_{11} & d_{12} & \dots & d_{1n} \\ d_{21} & d_{22} & \dots & d_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ d_{n1} & d_{n2} & \dots & d_{nm} \end{pmatrix}_2 + \dots + \begin{pmatrix} d_{11} & d_{12} & \dots & d_{1n} \\ d_{21} & d_{22} & \dots & d_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ d_{n1} & d_{n2} & \dots & d_{nm} \end{pmatrix}_i \begin{pmatrix} c_1 \\ c_2 \\ \vdots \\ c_n \end{pmatrix}$$

式中, A 表示系统可用性向量, a_n 是系统在初始贮存阶段处于状态 n 时的概率; D 表示系统可信性矩阵, D_i 表示系统各个分系统的可信性矩阵, d_{ni} 是系统在工作阶段状态由 n 变为 n 的概率; C 表示系统固有能力向量, c_n 是系统处于状态 n 中完成所规定任务的能力。

2.2 系统可用性向量数学模型

设弹体结构系统为 M , 制导系统为 N , 推进系统为 P , 战斗系统为 G , 平均故障间隔时间 (MTBF, mean time between failures) 和平均维修时间 (MTTR, mean time to repair) 分别为 T_M, T_N, T_P, T_G , 维修度分别为 t_M, t_N, t_P, t_G 。设定每个系统有正常和故障两种状态: M 代表正常, \bar{M} 代表故障, 其余依次类推。

设系统状态变量为 S , 则由 4 个分系统的不同状态组合的到的系统状态向量为:

$$S = [s_1, s_2, s_3, \dots, s_{16}]$$

其中: $s_1 = MNPG, s_2 = \bar{M}NPG, s_3 = M\bar{N}PG, s_4 = MN\bar{P}G, s_5 = MNPG, s_6 = \bar{M}NPG, s_7 = \bar{M}\bar{N}PG, s_8 = \bar{M}NPG, s_9 = M\bar{N}PG, s_{10} = MN\bar{P}G, s_{11} = MN\bar{P}G, s_{12} = \bar{M}NPG, s_{13} = \bar{M}NPG, s_{14} = \bar{M}\bar{N}PG, s_{15} = MN\bar{P}G, s_{16} = \bar{M}\bar{N}PG。$

设 C_M, C_N, C_P, C_G 分别为 4 个系统分别处于正常状态的概率(可用度), 则有:

$$B(M) = C_M = \frac{T_M}{T_M + t_M}, B(N) = C_N = \frac{T_N}{T_N + t_N},$$

$$B(P) = C_P = \frac{T_P}{T_P + t_P}, B(G) = C_G = \frac{T_G}{T_G + t_G},$$

$$B(\bar{M}) = 1 - C_M, B(\bar{N}) = 1 - C_N, B(\bar{P}) = 1 - C_P,$$

$$B(\bar{G}) = 1 - C_G$$

设 a_i 为系统处于状态 s_i ($i=1, 2, \dots, 16$) 的概率, 并设定 4 个系统在概率上相互独立, 则有:

$$a_1 = B(s_1) = B(MNPG) =$$

$$B(M)B(N)B(P)B(G) = C_M C_N C_P C_G$$

依次类推:

$$a_2 = (1 - C_M)C_N C_P C_G; a_3 = C_M(1 - C_N)C_P C_G;$$

$$a_4 = C_M C_N(1 - C_P)C_G; a_5 = C_M C_N C_P(1 - C_G);$$

$$a_6 = (1 - C_M)(1 - C_N)C_P C_G;$$

$$a_7 = (1 - C_M)C_N(1 - C_P)C_G;$$

$$a_8 = (1 - C_M)C_N C_P(1 - C_G);$$

$$a_9 = C_M(1 - C_N)(1 - C_P)C_G;$$

$$a_{10} = C_M(1 - C_N)C_P(1 - C_G);$$

$$a_{11} = C_M C_N(1 - C_P)(1 - C_G);$$

$$a_{12} = (1 - C_M)(1 - C_N)(1 - C_P)C_G;$$

$$a_{13} = (1 - C_M)C_N(1 - C_P)(1 - C_G);$$

$$a_{14} = (1 - C_M)(1 - C_N)C_P(1 - C_G);$$

$$a_{15} = C_M(1 - C_N)(1 - C_P)(1 - C_G);$$

$$a_{16} = (1 - C_M)(1 - C_N)(1 - C_P)(1 - C_G)$$

显然有 $\sum_{i=1}^{16} a_i = 1$ 。

由此可以得到系统的可用性向量:

$$A = (a_1, a_2, a_3, \dots, a_{16})$$

2.3 系统可信性矩阵数学建模

由建立的炮射导弹系统效能模型可知^[19], 系统可信性由发射可靠度、飞行可靠度和作用可靠度所构成, 因此系统可信性矩阵分为三个分模块矩阵构成。

由建立的系统可用性向量模型可知, 系统共有 16 种状态, 因此系统可信性矩阵为 16 阶方阵。

设 4 个分系统的发射可靠度分别为 R_M, R_N, R_P, R_G , 发射时间为 t , 并设定 $F_{\text{留}}$ 为导弹留膛概率, $F_{\text{膛}}$ 为导弹膛炸概率, 则有:

$$R = 1 - F_{\text{留}} - F_{\text{膛}}$$

假如设定各个系统在执行发射任务时发生故障不予修复, 则各个系统状态转移的概率为:

$$B(M \rightarrow M) = R_M, B(N \rightarrow N) = R_N,$$

$$B(P \rightarrow P) = R_P, B(G \rightarrow G) = R_G;$$

$$B(M \rightarrow \bar{M}) = 1 - R_M, B(N \rightarrow \bar{N}) = 1 - R_N,$$

$$B(P \rightarrow \bar{P}) = 1 - R_P, B(G \rightarrow \bar{G}) = 1 - R_G;$$

$$B(\bar{M} \rightarrow M) = 0, B(\bar{G} \rightarrow G) = 0, B(\bar{P} \rightarrow P) = 0,$$

$$B(\bar{G} \rightarrow G) = 0;$$

$$B(\bar{M} \rightarrow \bar{M}) = 1, B(\bar{N} \rightarrow \bar{N}) = 1, B(\bar{P} \rightarrow \bar{P}) = 1,$$

$$B(\bar{G} \rightarrow \bar{G}) = 1$$

设系统由状态 c_i 到状态 c_j 的概率为 d_{ij} ($i, j=1, 2, \dots, 16$), 设定 3 个系统分别在概率上相互独立, 所以得到:

$$d_{11} = B(s_1 \rightarrow s_1) = B(MNPG \rightarrow MNPG) =$$

$$B(M \rightarrow M)B(N \rightarrow N)B(P \rightarrow P)B(G \rightarrow G) = R_M R_N R_P R_G;$$

$$d_{12} = B(s_1 \rightarrow s_2) = B(MNPG \rightarrow \bar{M}NPG) =$$

$$B(M \rightarrow \bar{M})B(N \rightarrow N)B(P \rightarrow P)B(G \rightarrow G) =$$

$$(1 - R_M)R_N R_P R_G$$

其余依次类推。

显然有 $\sum_{j=1}^{16} d_{ij} = 1$ 。

由此可以得到系统的发射可靠度可信性矩阵为:

$$D_R = \begin{pmatrix} d_{11} & d_{12} & \dots & d_{115} & d_{116} \\ 0 & d_{22} & \dots & d_{215} & d_{216} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & d_{1515} & d_{1516} \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

设 4 个分系统的飞行可靠度分别为 I_M 、 I_N 、 I_P 、 I_G ，飞行时间为 t ，并设定 $F_{\text{失控}}$ 为炮射导弹弹体失控概率， $F_{\text{信息场}}$ 为导弹信息场发生故障概率， $F_{\text{未进入}}$ 为导弹未进入信息场概率， $F_{\text{弹体}}$ 为导弹弹体信号强度低概率， $F_{\text{发动机}}$ 为导弹发动机发生故障概率，则有：

$$I = 1 - F_{\text{失控}}$$

$$F_{\text{失控}} = F_{\text{信息场}} + F_{\text{未进入}} + F_{\text{弹体}} + F_{\text{发动机}}$$

按照上述发射可靠度可信性矩阵类推，由此得到系统的发射可靠度可信性矩阵为：

$$D_I = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & \cdots & d_{115} & d_{116} \\ 0 & d_{22} & \cdots & d_{215} & d_{216} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & d_{1515} & d_{1516} \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

设 4 个分系统的作用可靠度分别为 L_M 、 L_N 、 L_P 、 L_G ，作用时间为 t ，并设定 $F_{\text{瞎火}}$ 为炮射导弹瞎火概率， $F_{\text{引信}}$ 为炮射导弹引信瞎火概率， $F_{\text{定时器}}$ 为炮射导弹定时器发生故障概率， $F_{\text{线路}}$ 为炮射导弹触发线路断路导致故障概率，则有：

$$L = 1 - F_{\text{瞎火}}$$

$$F_{\text{瞎火}} = F_{\text{引信}} + F_{\text{定时器}} + F_{\text{线路}}$$

按照上述发射可靠度可信性矩阵类推，由此得到系统的作用可靠度可信性矩阵为：

$$D_L = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & \cdots & d_{115} & d_{116} \\ 0 & d_{22} & \cdots & d_{215} & d_{216} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & d_{1515} & d_{1516} \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

2.4 系统固有能力矩阵数学建模

系统固有能力由弹体结构系统、制导系统、推进系统和战斗系统 4 个部分组成。各部分主要控制炮射导弹的导弹质心参数、导弹射程参数、导弹制导控制力矩参数和导弹破甲深度参数。根据能力的概念模型，能力矩阵如下：

$$C = (c_1, c_2, c_3, \dots, c_{16})^T$$

$$C_j = X^{\mu_1} S^{\mu_2} M^{\mu_3} P^{\mu_4}$$

式中， C_j 为炮射导弹系统处于状态 j 时所具有的能力参数； M 为炮射导弹质心参数； N 为炮射导弹射程参数； P 为炮射导弹制导控制力矩参数； G 为炮射导弹破甲深度参数。

$\mu_1, \mu_2, \mu_3, \mu_4$ 为各固有能力的权重参数。

2.4.1 炮射导弹质心参数

炮射导弹质心参数是指炮射导弹各系统部件的质心位置，是导弹总体设计单元的重要参数^[20]。合理调整导弹质心位置有利于提高导弹的结构性能，能够提高炮射导弹飞向目标的准确性，炮射导弹质心参数 X 的数学模型为：

$$X = \frac{\sum_{i=1}^n M_i X_i}{M_0} \quad (i = 1, 2, \dots, n, n = \text{零部件总数})$$

式中， M_i 为炮射导弹的各部件质量， X_i 为炮射导弹的各部

件直径， M_0 为炮射导弹各部件总质量。

2.4.2 炮射导弹射程参数

炮射导弹射程参数是指炮射导弹弹体发射位置与最终导弹落点之间的距离^[21]，确定炮射导弹的射程参数有利用提高炮射导弹的命中率且能够提高炮射导弹性能。炮射导弹射程参数 S 的数学模型为：

$$S = \int_{v_0}^{v_1} f_1(t) dt + \int_{v_1}^{v_2} f_2(t) dt + \int_{v_2}^{v_3} f_{23}(t) dt$$

式中， v 为炮弹导弹的各阶段速度值， $f(t)$ 为炮射导弹各阶段的时间与速度的曲线函数。

2.4.3 炮射导弹制导控制力矩参数

对炮射导弹的设定任务是准确命中并有效地毁伤预定目标，设定炮射导弹制导控制力矩参数使得控制力矩能够有效抵消外部干扰力矩，从而使得炮射导弹具有良好的抗干扰能力^[22]。炮射导弹制导控制力矩参数 M 的数字模型为：

$$M = C_M P_s A L$$

式中， L 为炮射导弹制导系统中舵机的力臂长度， C_M 为舵机排气系数，一般取 0.6~0.9， P_s 为舵机活塞进气压力， A 为舵机活塞面积。

2.4.4 炮射导弹破甲深度参数

炮射导弹破甲深度是衡量炮射导弹战斗部威力的一个重要因素，能够体现炮射导弹对目标的毁伤能力，使得炮射导弹能够精确毁伤并完后才能预定任务^[23]。炮射导弹破甲深度参数 P 的数学模型为：

$$P = \beta_1 \left(\frac{0.5 d_k}{\tan \alpha} \right) + H_Y$$

$$H_Y = k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot d_k$$

式中， β_1 为炮射导弹所穿材料的经验系数，本文取值 0.7； d_k 为炮射导弹战斗部药型罩内径； α 为炮射导弹战斗部药型罩半锥角； H_Y 为炮射导弹有利利炸高， k_1 为炸高与药型罩口径之比，本文取值 3.8； k_2 为与炮射导弹临界速度有关的系数，本文取值 1.1； k_3 为炮射导弹战斗部炸药爆炸速度的系数，规定为 1~1.3，本文取值 1。

2.4.5 固有能力各参数归一化处理

导弹固有能力需要对炮弹导弹质心参数、炮射导弹射程参数、炮射导弹制导控制力矩参数和炮射导弹破甲深度参数进行归一化处理，本文采用隶属度函数进行参数归一化。隶属度函数是应用于模糊参数或概念集中处理的一个概念，表示某个样本隶属于某个集合的函数^[24]。炮射导弹质心参数、射程参数、制导控制力矩参数和破甲深度参数隶属度函数如下：

质心参数隶属度函数：

$$C_X = \begin{cases} 1 & x_i \geq 0.4328 \\ (x_i - 0.3328)/0.1000 & 0.3328 < x_i < 0.4328 \\ 0 & x_i \leq 0.3328 \end{cases}$$

射程参数隶属度函数：

$$D_l = \begin{bmatrix} 0.9972 & 6.99 \times 10^{-4} & 6.99 \times 10^{-4} & 4.89 \times 10^{-7} & 4.89 \times 10^{-7} & 4.89 \times 10^{-7} & 3.4276 \times 10^{-10} & 3.4276 \times 10^{-10} \\ 0 & 0.9979 & 0 & 6.99 \times 10^{-4} & 6.99 \times 10^{-4} & 6.99 \times 10^{-4} & 4.8966 \times 10^{-7} & 4.8966 \times 10^{-7} \\ 0 & 0 & 0.9979 & 0 & 6.99 \times 10^{-4} & 0 & 4.8966 \times 10^{-7} & 4.8966 \times 10^{-7} \\ 0 & 0 & 0 & 0.9986 & 0 & 6.99 \times 10^{-4} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.9986 & 0 & 6.9951 \times 10^{-4} & 6.9951 \times 10^{-4} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.9986 & 0 & 6.9951 \times 10^{-4} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.9993 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.9993 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$D_c = \begin{bmatrix} 3.4276 \times 10^{-10} & 2.4010 \times 10^{-13} \\ 0 & 3.4300 \times 10^{-10} \\ 4.8966 \times 10^{-7} & 3.4300 \times 10^{-10} \\ 4.8966 \times 10^{-7} & 3.4300 \times 10^{-10} \\ 0 & 4.9000 \times 10^{-7} \\ 6.9951 \times 10^{-4} & 4.9000 \times 10^{-7} \\ 6.9951 \times 10^{-4} & 4.9000 \times 10^{-7} \\ 0 & 0.0007 \\ 0.9993 & 0.0007 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$D_c =$$

$$\begin{bmatrix} 0.8077 & 0.0443 & 0.0443 & 0.0024 & 0.0024 & 0.0024 & 1.3330 \times 10^{-4} & 1.3330 \times 10^{-4} & 1.3330 \times 10^{-4} & 7.3316 \times 10^{-6} \\ 0 & 0.8520 & 0 & 0.0467 & 0.0467 & 0.0467 & 0.0026 & 0.0026 & 0 & 1.4061 \times 10^{-4} \\ 0 & 0 & 0.8520 & 0 & 0.0467 & 0 & 0.0026 & 0.0026 & 0.0026 & 1.4061 \times 10^{-4} \\ 0 & 0 & 0 & 0.8987 & 0 & 0.0467 & 0 & 0 & 0.0026 & 1.4061 \times 10^{-4} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.8987 & 0 & 0.0493 & 0.0493 & 0 & 0.0027 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.8987 & 0 & 0.0493 & 0.0493 & 0.0027 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.9480 & 0 & 0.0493 & 0.0027 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.9480 & 0 & 0.0520 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.9480 & 0.0520 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

3.3 固有能矩阵计算

根据上述固有能矩阵数学模型以及系统性能指标计算固有能矩阵:

炮射导弹质心参数 $X=0.38$;

炮射导弹射程参数 $S=4\ 358$;

炮射导弹制导控制力矩参数 $M=0.097\ 227$;

炮射导弹破甲深度参数 $P=750.232\ 5$ 。

根据关于炮射导弹固有能文献资料, 从而设置 $\mu_1 = 0.3, \mu_2 = 0.2, \mu_3 = 0.25, \mu_4 = 0.25$ 。

由此可得:

$$C = \begin{bmatrix} 0.134\ 2 & 0.259\ 9 & 0.187\ 4 & 0.185\ 6 & 0.259\ 9 \\ 0.362\ 9 & 0.359\ 4 & 0.517\ 7 & 0.259\ 2 & 0.373\ 3 \\ 0.369\ 7 & 0.502\ 0 & 0.716\ 0 & 0.723\ 0 & 0.516\ 3 & 0 \end{bmatrix}^T$$

3.4 系统效能计算

根据上述系统效能数学模型, 可以得出炮射导弹系统效能, 计算如下:

$$E = ADC = AD_r C + AD_l C + AD_c C = 0.312\ 2 + 0.236\ 0 + 0.264\ 9 = 0.813\ 1$$

通过计算可知炮弹导弹系统效能大约为 0.813 1, 给定系统效能标准, 如优等 (0.85 ~ 1.0)、良好 (0.70 ~ 0.85)、中等 (0.55 ~ 0.70)、差等 (0.20 ~ 0.55) 以及劣等 (0 ~ 0.20)。因此可以确定设计改进后的典型的 APS05 型 125 毫米激光架束炮射导弹系统效能为良好。

4 结束语

ADC 方法可以将可用性、可信性和固有能等通用质量特性综合成单一的系统效能度量, 能够有效地反映炮射

导弹系统的综合质量特性，成为研发与改进炮射导弹性能的重要依据。本文通过建立改进的 ADC 方法对炮射导弹系统进行了分析，使得 ADC 方法能够更精确地、有效地对炮射导弹系统进行全面评估。

参考文献:

[1] 郝玉生, 李斯宇. 基于 ADC 方法的坦克火控系统效能评估 [J]. 火力与指挥控制, 2018, 43 (12): 109-115.

[2] 赵曰强, 安实, 麦强, 等. 基于 ADC 法的防空导弹武器系统效能建模 [J]. 系统工程与电子技术, 2020, 42 (9): 2003-2012.

[3] 初欣阳, 廖学军, 许钦羨, 等. 改进 ADC 法在无人侦察机作战试验阶段作战效能评估应用 [J]. 兵器装备工程学报, 2020, 41 (8): 89-96.

[4] 豆松松, 狄加伟, 聂奎, 等. 采用包覆随行装药提高炮射导弹内弹道性能的数值预测 [J]. 火炮发射与控制学报, 2019, 40 (1): 84-88.

[5] 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.

[6] 周建民, 张臣臣, 王发令, 等. 结合马氏距离与隶属度函数的轴承性能退化研究 [J]. 制造技术与机床, 2019 (5): 62-66.

[7] 金哲, 张金春, 杨学会, 等. 基于 WSEIAC 模型的导弹武器系统效能分析 [J]. 战术导弹技术, 2004 (3): 11-13.

[8] 黄贡献, 张广苏, 田世英. 基于 WSEIAC 模型的自行火炮营系统效能分析模型 [J]. 武器装备自动化, 2008, 27 (1): 28-30.

[9] 孟锦, 李千目, 张宏, 等. 基于 ADC 模型的侦察卫星效能评估研究 [J]. 计算机科学, 2009, 36 (6): 41-43.

[10] 宋朝河. 基于 ADC 模型的雷达侦察效能分析 [J]. 兵器装备工程学报, 2011, 32 (1): 117-119.

[11] 徐皓, 康凤举, 李丹. 反鱼雷鱼雷武器系统作战效能评估方法 [J]. 计算机工程与应用, 2015, 51 (2): 265-270.

[12] 徐晓明, 颜冰, 刘群杰. 基于 ADC 模型的无人布雷系统布雷阶段效能评估 [J]. 水雷战与舰船防护, 2016, 24 (1): 32-38.

[13] 程晓明, 曹东, 李春涛. 多无人机协同航迹规划技术研究 [J]. 航空计算技术, 2014, 44 (4): 71-75.

[14] 郭姣, 李天伟, 钟云海, 等. 基于 ADC-云重心的舰载导航装备综合效能评估 [J]. 现代电子技术, 2015, 38 (8): 58-61.

[15] 李彤岩, 王培国, 张婷. 基于 ADC 模型的通信网络效能评估方法研究 [J]. 电子技术应用, 2015, 41 (9): 18-20.

[16] 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.

[17] 陈强, 陈长兴, 陈婷, 等. 基于 ADC 模型的数据链系统作战效能评估 [J]. 火力与指挥控制, 2016, 41 (1): 72-76.

[18] 郑锦, 杨光. 基于 ADC 模型的水面舰艇作战系统效能评估研究 [J]. 舰船电子工程, 2017, 37 (3): 23-26.

[19] 杨森, 孟晨, 王成. AFSA 优化灰色神经网络的某电源组合故障预测 [J]. 计算机测量与控制, 2012, 20 (10): 2648-2650, 2653.

[20] 吴斌, 李莉. 导弹质心测量方法研究 [J]. 弹箭与制导学报, 2004 (s6): 284-286.

[21] 周立锋, 马海潮. 高精度导弹射程精确计算方法 [J]. 飞行器测控学报, 2013, 32 (2): 173-176.

[22] 丁力, 王萌, 黎玉刚, 等. 导弹姿态自抗扰无源控制器设计 [J]. 弹箭与制导学报, 2019, 39 (2): 60-63.

[23] 贾鑫, 黄正祥, 徐梦雯, 等. 聚能射流对厚壁移动靶的侵彻理论与数值模拟分析 [J]. 兵工学报, 2019, 40 (8): 1553-1561.

[24] 王暉, 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.

（上接第 85 页）

[10] 吴金泉, 史政林, 熊炎, 等. 压水堆核电站硼表自动标定方法 [J]. 电子技术与软件工程, 2018, 3: 146.

[11] 张文杰. 中子吸收法测量硼浓度的技术研究 [D]. 衡阳: 南华大学, 2007.

[12] 郑军伟. 硼表硼浓度算法设计与仿真验证 [J]. 核动力工程, 2021, 42 (2): 137-143.

[13] 杨嗣, 刘臻, 王澄瀚, 等. 10 B 丰度变化对可溶硼浓度监测计算的影响分析 [J]. 强激光与粒子束, 2017, 29 (1): 016022-1-016022-7.

[14] 桂龙刚. 新型硼表一次仪表研制 [D]. 衡阳: 南华大学, 2014.

[15] 王红波, 邓圣, 王璨辉, 等. 硼表探测装置设计与验证 [J]. 核动力工程, 2013, 34 (6): 136-147.

[16] 李红英, 郑文君, 丁洋, 等. 核电站硼表探测装置内中子剂量率分布及对周围剂量场影响的计算分析 [J]. 科技传播, 2016, 16: 212.

[17] 李海. RS-485 在核电站硼表系统就地显示中的设计与实现 [J]. 核电子学与探测技术, 2009, 29 (6): 1428-1431.

[18] 桂龙刚, 李小华, 孙光智, 等. 提高在线式硼浓度测量装置信噪比方法的研究 [J]. 核电子与探测技术, 2013, 33 (9): 1111-1114.

[19] 何鹏. 一种用于核电站硼浓度测量远距离传输快响应前置放大器的研制 [J]. 2015, 35 (12): 1242-1245.

[20] 王芝英. 核电子技术原理 [M]. 北京: 原子能出版社, 1989.

[21] 李誉森, 王代华, 于建军, 等. 多通道存储式坑道冲击波测试系统设计 [J]. 计算机测量与控制, 2021, 29 (3): 114-118.