

doi: 10.7690/bgzdh.2020.08.002

基于作战环-可拓云模型的反舰导弹装备体系作战效能评估

宋贵宝, 宋佳明, 周荣基

(海军航空大学岸防兵学院, 山东 烟台 264001)

摘要: 为提高现代反舰导弹武器装备体系评估的准确性, 提出基于作战环-可拓云模型的评估方法。在作战环理论基础上, 构建全面的反舰导弹体系作战效能评估指标体系, 采用 G-1 序关系法对评估指标体系进行权重赋值, 利用可拓云模型方法对反舰导弹体系作战效能进行评估, 并对某打击大型水面舰艇部队的反舰导弹体系进行实例验证。仿真结果表明, 该方法具有较好的客观性、准确性和全面性。

关键词: 作战环; 作战效能; 可拓云; 装备体系; 效能评估

中图分类号: TJ761.1⁺4 **文献标志码:** A

Operational Effectiveness Evaluation of Anti-ship Missile Equipment System Based on Combat Ring-extension Cloud Model

Song Guibao, Song Jiaming, Zhou Rongji

(College of Shore Defense, Navy Aviation University, Yantai 264001, China)

Abstract: In order to improve the accuracy of modern anti-ship missile weapon system evaluation, an evaluation method based on the combat ring-extension cloud model is proposed. Based on the theory of combat ring, a comprehensive anti-ship missile system operational effectiveness evaluation index system is constructed. The G-1 order relationship method is used to assign weights to the evaluation index system. The extension cloud model method is used to evaluate the operational effectiveness of the anti-ship missile system. And an example verification of an anti-ship missile system against a large surface warship is carried out. The simulation results show that the method has objectivity, accuracy and comprehensiveness.

Keywords: operation loop; operational effectiveness; extension cloud; equipment system; effectiveness evaluation

0 引言

武器装备体系是系统的集合, 组成元素众多、结构复杂。武器装备体系自身复杂的特点也决定了需要全面的评估方法对其作战效能进行评估。体系评估对武器装备体系结构的优化、作战效果的增强都至关重要。反舰导弹武器既是海上战争战略威慑的主要力量, 又是高科技战争的基本毁伤手段, 反舰导弹武器体系化发展也备受关注; 因此, 选择合理的评估方法对反舰导弹体系进行评估, 对提高反舰导弹体系作战能力至关重要。

1 作战效能评估过程

基于作战环-可拓云模型反舰导弹武器装备体系作战效能评估流程概括如下:

1) 根据作战环的思想与反舰导弹武器装备体系一般作战流程, 确定反舰导弹体系作战过程活动实体节点和边, 根据不同实体节点系统的功能和边的组成, 确定影响体系的能力指标, 从而建立反舰

导弹武器装备体系作战效能评估指标体系。

2) 根据指标体系不同的评价指标值, 通过 G-1 序关系方法确定指标重要度, 对指标权重进行赋值。

3) 通过可拓云评估方法, 对体系进行评估, 得到效能值。

2 基于作战环思想的评估指标体系构建^[1]

现代战争循环理论认为, 完整的作战过程是集观察、调整、决策和行动(observe, orient, decide, act, OODA)于一体的循环过程^[2]。基于 OODA 循环理论, 国防科技大学谭跃进等^[3]提出了用来描述武器装备体系的作战环建模思想。作战环建模思想将武器装备体系中执行不同功能的作战单元分为侦察类、指控类和攻击类 3 类^[4]。考虑到作战过程中武器装备的可靠度和可用度, 将我方保障类作战单元和敌方目标单元引入作战环模型中, 使得作战过程更符合实际。如图 1 所示, 完整的作战环包含侦察、指控、攻击、保障和敌方目标 5 类节点。

收稿日期: 2020-04-11; 修回日期: 2020-05-17

作者简介: 宋贵宝(1964—), 男, 江苏人, 硕士, 教授, 从事导弹武器系统工程、管理科学与工程研究。E-mail: songgb101@sina.com。

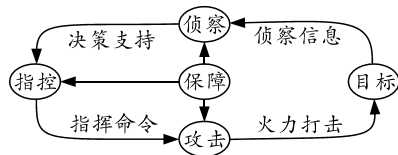


图 1 作战环流程

根据作战环思想以及文献[5-9]对反舰导弹作战过程的描述,反舰导弹体系作战流程如图 2 所示。

根据作战环思想,把上述作战过程中的实体抽象为 5 类节点,即

$$V_{NodeType} \in [T, O, D, A, G]$$

式中: T 为敌方目标系统; O 为目标探测系统; D 为指挥控制系统; A 为作战攻击系统; G 为维修保养系统。各种系统功能如表 1 所示。

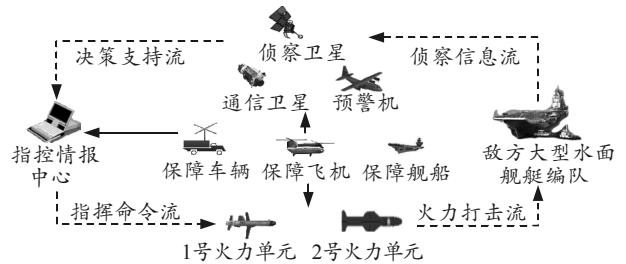


图 2 反舰导弹体系一般作战流程

表 1 作战环实体节点描述

节点类别	系统名称	系统描述
T 类节点	敌方目标系统	我方体系打击的对象。可以对我方实施火力拦截和电子干扰
O 类节点	目标侦察系统	该系统是体系作战的“眼睛”。职能是对水面舰艇等敌方信息进行探测、识别、发现,将情报进行收集。并为指挥决策系统提供信息支持的我方装备实体,包括侦察卫星、雷达、预警机等
D 类节点	指挥决策系统	该系统是体系作战的“头脑”。职能是对目标侦察系统传输来的信息进行分析处理,然后将指令传送给作战打击系统
A 类节点	作战打击系统	该系统是体系作战的“拳脚”。其职能是对敌方水面舰艇等装备实体进行打击,使其放弃作战或者丧失作战能力
G 类节点	维修保养系统	该系统是体系作战的“营养”。职能是对体系参战装备进行维修保养,保证各类参战装备可以有效的参战

不同节点系统里武器装备具有不同的能力,能力指标描述可用能力向量 $C_{NodeType}$ 表示,即 $C_{NodeType}=(c_1, c_2, \dots, c_n)$ 。由于篇幅限制,文中仅列举作战打击能力系统目标向量表示结果。

作战打击系统主要是各类攻击敌方舰船、潜艇和飞机等物体的反舰导弹的集合,其装备可以对敌方进行打击,其能力指标分为火力打击能力和火力突防能力:火力打击能力可用命中概率、命中条件下毁伤概率表示;火力突防能力可用突防舰空导弹拦截概率、突防近防拦截系统概率、突防有源干扰能力和突防无源干扰能力表示。

作战打击系统能力指标向量表示为

$$C_{NodeType-A}=(c_{A1}, c_{A2}, c_{A4}, c_{A5}, c_{A6})$$

其中: c_{A1} 为命中概率; c_{A2} 为命中条件下毁伤概率; c_{A3} 为突防舰空导弹拦截概率; c_{A4} 为突防近防拦截系统概率; c_{A5} 为突防有源干扰概率; c_{A6} 为突防无源干扰概率。

作战打击系统能力指标层次结构如图 3 所示。

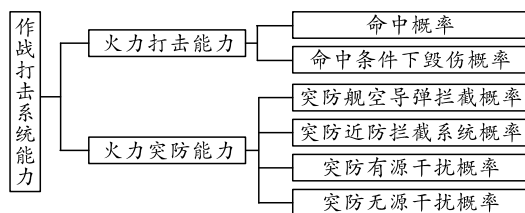


图 3 作战打击系统能力指标层次结构

完整的作战环由节点和边构成。由于作战分工

不同,不同的系统被抽象为作战网络中不同的节点。节点之间相互连接关系通过“边”来体现,“边”体现节点与节点之间的联系,体现的是体系结构内部之间的关系。

作战环的思想实现了从“武器装备集合”到“武器装备体系”的探索。上述 5 类节点之间的联系通过“边”相互联系在一起,共有 10 种联系链路:侦查关系 ($T \rightarrow O$)、决策关系 ($D \rightarrow D$)、指挥关系 ($D \rightarrow A$ 、 $D \rightarrow O$)、打击关系 ($A \rightarrow T$)、保障关系 ($G \rightarrow O$ 、 $G \rightarrow D$ 、 $G \rightarrow A$)、信息共享关系 ($O \rightarrow O$)、协同关系 ($D \rightarrow D$)。作战环中联系链路基本含义如表 2 所示。

表 2 作战环中联系链路基本含义

联系链路	基本含义
$T \rightarrow O$	目标侦察系统侦察敌方目标信息的过程
$O \rightarrow D$	目标侦察系统向指挥决策系统提供信息的过程
$D \rightarrow A$	指挥决策系统向作战打击系统下达火力打击命令的过程
$D \rightarrow O$	指挥决策系统向目标侦察系统下达侦察命令的过程
$A \rightarrow T$	作战打击系统向目标进行火力打击的过程
$G \rightarrow O$	维修保养系统对目标侦察系统进行保障
$G \rightarrow D$	维修保养系统对指挥决策系统进行保障
$G \rightarrow A$	维修保养系统对作战打击系统进行保障
$O \rightarrow O$	2 个侦察节点之间实现信息共享
$D \rightarrow D$	2 个决策指挥节点进行协作

上述“边”关系体现在作战过程中主要是信息的传输,链接“边”两边端点都需要有信息传输能力。关于“边”的能力指标向量表述为 $C_{EdgeType-G}=(C_{E1}, C_{E2}, C_{E3})$, C_{E1} 为通信传输速度, C_{E2} 为通信传输容量, C_{E3} 为通信传输抗干扰能力。

基于作战环思想的作战过程建模，将作战打击系统能力指标与敌方目标信息系统能力指标进行整合，将“节点”能力指标与“边”能力指标融合，

通过攻防对抗仿真来体现体系的作战打击效能。反舰导弹武装装备体系作战效能评估指标体系的层次结构如图 4 所示。

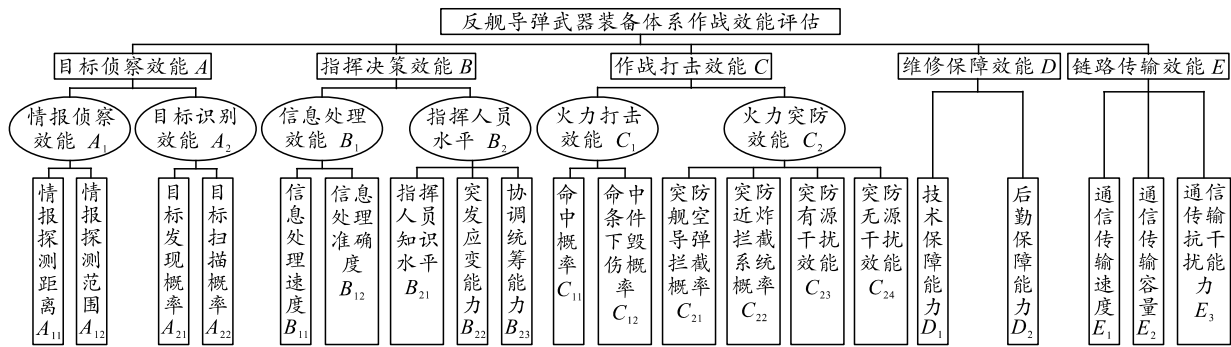


图 4 舰导弹武装装备体系作战效能评估指标体系层次结构

3 作战效能评估方法描述

3.1 G-1 序关系法

序关系是指标之间一种重要的二元关系。当评价指标个数超过 9 时，序关系法有效降低特征值法重要度对比的冗杂计算量^[10]。序关系法的一般步骤如下：

1) 确定序关系。建立评估指标体系序关系集 x_1, x_2, \dots, x_n ，由专家根据指标重要度评判原则依次筛选出重要度指标，确立初始序关系集，记为 $x_1^* > x_2^* > \dots > x_n^*$ 。

2) 相对重要度等级判断赋值。根据序关系集，确定序关系相邻的评估指标相对重要度，设相邻评估指标 x_k^* 与 x_{k-1}^* 的重要度比例关系 $\omega_k^* / \omega_{k-1}^*$ 为：

$$\omega_k^* / \omega_{k-1}^* = r_k, k = n, n-1, n-2, \dots, 3, 2. \quad (1)$$

式中 r_k 为比例关系，需满足

$$r_{k-1} > 1 / r_k, k = n, n-1, \dots, 3, 2. \quad (2)$$

r_k 的赋值如表 3 所示。

表 3 r_k 判断赋值

r_k	含义
1.0	指标 r_{k-1} 与 r_k 同等重要
1.2	指标 r_{k-1} 与 r_k 稍微重要
1.4	指标 r_{k-1} 与 r_k 明显重要
1.6	指标 r_{k-1} 与 r_k 强烈重要
1.8	指标 r_{k-1} 与 r_k 极端重要
中间值	以上相邻判断中间值

3) 计算权重系数 ω_k^* 。

参考 r_k 赋值表，根据相邻指标的重要度之比，则第 r_k 个指标的权重 $\omega_1^*, \omega_2^*, \dots, \omega_n^*$ 为：

$$\omega_k^* = (1 + \sum_{i=2}^n \prod_{i=k}^n r_i)^{-1}; \quad (3)$$

$$\omega_{k-1}^* = r_k \omega_k^*, k = n, n-1, \dots, 3, 2. \quad (4)$$

4) 基于群组判断的权重融合。

由于不同专家对评估指标理解的不同，会造成对指标序关系排列或者 r_k 赋值的差异性。考虑主观因素干扰，对专家群组判断权重进行融合，融合权重 $\omega_k'' (k=1, 2, \dots, n)$ 分以下 2 种情况：

① 专家初始序关系判别一致的情况。

专家 $j (j \in [1, J])$ 关于相邻评价指标 $x_{k,j}^*$ 与 $x_{k-1,j}^*$ 的重要度比例关系 $\omega_{k,j}^* / \omega_{k-1,j}^*$ 为 r_{kj} ，则：

$$\omega_k'' = (1 + \sum_{j=2}^N \prod_{i=j}^N r_i^*)^{-1}; \quad (5)$$

$$\omega_{k-1}'' = r_k^* \omega_k'', k = n, n-1, \dots, 3, 2; \quad (6)$$

$$r_k^* = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N r_{k,j}, k = 2, 3, \dots, n. \quad (7)$$

② 专家初始序关系判别不一致情况。

设有 J_0 位专家对指标 x_1, x_2, \dots, x_n 的序关系判断一致，此时由式(3)分别求得权重系数依次为 $\omega_1^*, \omega_2^*, \dots, \omega_n^*$ 。

设有 $J - J_0$ 位专家的初始序关系判别是不一致的，分别为： $x_{1,j}^* > x_{2,j}^* > \dots > x_{k,j}^*$, $j = 1, 2, \dots, J - J_0$ 。

式中 $x_{k,j}^*$ 表示第 j 个专家对隶属于序集 $\{x_k\}$ 中的第 k 个元素的排序^[10]。

由于序集 $\{x_k\}$ 与专家评价集 $\{x_{k,j}^*\}$ 存在映射关系，因此，对于每一位专家 $j (1 \leq j \leq J - J_0)$ 所确定的初始序关系，均可由式(3)求得指标 $x_{k,j}^*$ 的权重系数，记为 $\omega'_{k,j} (k=1, 2, \dots, n)$ ，取其算术平均值作为 $J - J_0$ 位专家的融合权重值并记为 ω_k' 。

$$\omega_k' = \frac{1}{J - J_0} \sum_j^{J - J_0} \omega_{k,j}', k = 1, 2, \dots, n. \quad (8)$$

专家初始序关系不一致时，求得的融合权重为

$$\omega_k^n = (J_0/J)\omega_k^* + ((J - J_0)/J)\omega_k^i \quad (9)$$

3.2 基于改进的可拓云综合评价方法

把可拓学的基本原理事物名称 N 、事物特征 c 和事物特征值 v 统一起来，当成基本元来研究，用可拓集合的关联函数值——关联度描述各种特征参数与所研究对象的从属关系，从而把定性描述转化为定量描述^[11]。云模型^[12]有效集成了客观事物或者是人类知识中的随机性和模糊性，并将定性信息不确定性转化为定量信息的模型，可用 (E_x, E_n, H_e) 表示。其中：期望 E_x 表示云模型的分布中心；熵 E_n 表示是对属性概念不确定性的量度，反映了可被概念所接受的数值范围；超熵 H_e 是对熵不确定性的量度^[13]。现将特性值可拓模型 $R=(N, C, v)$ 中特征值 v 用正态云模型 (E_x, E_n, H_e) 代替，得到云物元：

$$R_{\text{cloud}} = \begin{bmatrix} N, & C_1 & (E_{x1}, E_{n1}, H_{e1}) \\ & C_2 & (E_{x2}, E_{n2}, H_{e2}) \\ & \vdots & \vdots \\ & C_n & (E_{xn}, E_{nn}, H_{en}) \end{bmatrix} \quad (10)$$

1) 确定作战效能等级界限云模型。

在反舰导弹武器装备体系作战效能评估问题中，将效能评估等级划分为 5 个 (1~5) 等级，即优、良、中、一般、差。确定各指标的等级界限值；其次考虑到指标等级界限随机性和模糊性，将等级界限值 $[C_{\min}, C_{\max}]$ 进行适度扩展，通过正态云模型转化关系式转化成作战效能等级界限云模型， C_{\max} 为界线上界， C_{\min} 为下界， H_e 为指标信息不确定性大小，可根据实际情况灵活调整，一般为小于 1 的常数。

$$\left. \begin{aligned} E_x &= (C_{\max} + C_{\min})/2 \\ E_n &= (C_{\max} - C_{\min})/6 \\ H_e &= s \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

2) 确定可拓云模型关联度。

根据反舰导弹武器装备体系作战效能评估的特点，运用正态云模型，将待评估的各项指标值 x 视为一个云滴，则云关联度公式计算指标值与可拓云模型之间的关联度为

$$K = \exp\left[-(x - E_x)^2 / 2(E_n')^2\right] \quad (12)$$

式中： E_n' 是满足期望值 E_n 、标准差 H_e 等条件的正态随机数；由云关联度 K 得到综合评判矩阵 K^{cloud} ，即

$$K^{\text{cloud}} = \begin{bmatrix} k_{11}^{\text{cloud}} & k_{12}^{\text{cloud}} & k_{13}^{\text{cloud}} & k_{14}^{\text{cloud}} & k_{15}^{\text{cloud}} \\ k_{21}^{\text{cloud}} & k_{22}^{\text{cloud}} & k_{23}^{\text{cloud}} & k_{24}^{\text{cloud}} & k_{25}^{\text{cloud}} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ k_{n1}^{\text{cloud}} & k_{n2}^{\text{cloud}} & k_{n3}^{\text{cloud}} & k_{n4}^{\text{cloud}} & k_{n5}^{\text{cloud}} \end{bmatrix} \quad (13)$$

式中： n 为评价指标个数，文中取 16； j 为评估 1~5 个等级。

3) 确定作战效能评价等级。

首先求得综合评判向量，由指标综合权重向量 W 与综合评判矩阵 K^{cloud} 相乘得，即 $B_i = WK_i$ 。然后通过综合评判向量求得评判模糊等级特征值 r ， $r = B_i \max_i$ ，其中 $B_i \max_i$ 为综合评判向量最大分量。

为了确保结果可信度减少随机性的影响，需要对结果进行多次运算，引入置信度因子 g ，定义 $g = E_{n,r} / E_{x,r}$ ，当 g 越小，表明结果越收敛，置信度越高。式中， h 为运行的次数，文中取 200 次，模糊等级特征期望值 $E_{x,r}$ 、模糊等级特征熵值 $E_{n,r}$ 分别为：

$$\left. \begin{aligned} E_{x,r} &= \sum_{q=1}^h r_q(x) / h, (q=1, 2, \dots, h) \\ E_{n,r} &= \sqrt{\frac{1}{h} \sum_{q=1}^h (r_q(x) - E_{x,r})^2}, (q=1, 2, \dots, h) \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

4 案例分析

选取打击大型水面舰艇编队的某反舰导弹武器装备体系作为评估对象，作战流程如图 5 所示。

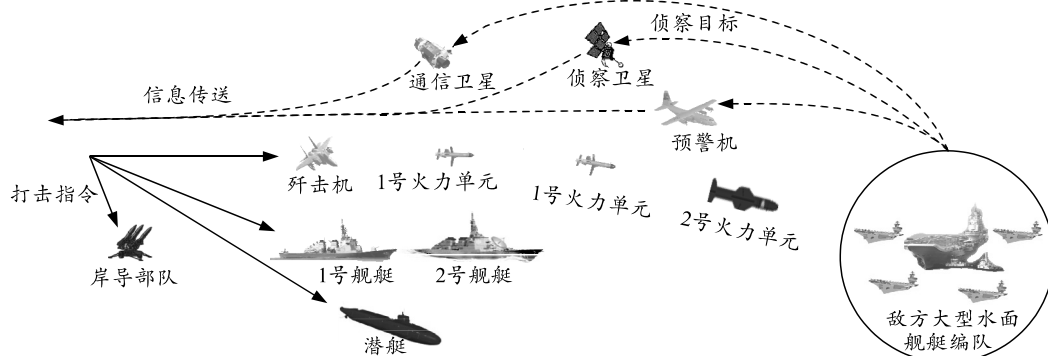


图 5 某反舰导弹体系打击大型水面舰艇编队作战流程

用序关系法对指标权重进行确定,邀请 5 位专家对上述指标进行序关系优先级排序,得到权重指标如图 6 所示。

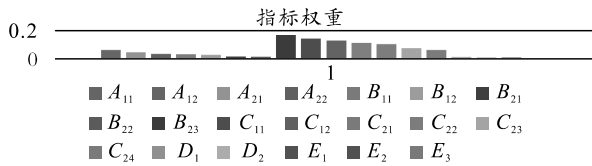


图 6 反舰导弹武器装备体系作战效能指标值及权重

确定指标权重后,划分指标等级界限,由于指

表 5 作战效能等级界限云模型

指标	等级 1	等级 2	等级 3	等级 4	等级 5
A_{11}	(22.5,7.5,0.5)	(50,1.67,0.4)	(65,3.33,0.3)	(80,1.67,0.2)	(92.5,2.5,0.2)
B_{11}	(20,6.67,0.1)	(50,3.33,0.2)	(67.5,2.5,0.2)	(82.5,2.5,0.2)	(95,1.67,0.2)
C_{11}	(30,10,0.4)	(65,1.67,0.5)	(75,1.67,0.2)	(85,1.67,0.2)	(95,1.67,0.3)
D_1	(25,8.33,0.3)	(55,1.67,0.2)	(65,1.67,0.02)	(75,1.67,0.02)	(90,3.33,0.02)
E_1	(25,8.33,0.3)	(55,1.67,0.2)	(65,1.67,0.02)	(75,1.67,0.02)	(90,3.33,0.02)

根据正态云模型算法,结合表 5 作战效能等级界限云模型图,给出评价云图,之后计算待评估数值与云模型的关联度,由 Matlab 进行仿真,得到的结果如下:

1) 某反舰导弹武器装备体系作战效能评估云关联度结果,如表 6 所示。

2) 综合权重向量 $B_i = [0.207\ 004\ 0.264\ 169\ 0.264\ 201\ 0.207\ 597\ 0.154\ 062]$,这 5 组数字分别对

表 6 某反舰导弹武器装备体系作战效能评估云关联度结果

指标	等级 1	等级 2	等级 3	等级 4	等级 5
A_{11}	0.044 684	0.114 457	0.139 252	0.041 921	0.006 171
A_{12}	0.002 553	0.013 019	0.018 453	0.002 259	0.000 088
A_{21}	0.006 109	0.025 581	0.028 210	0.005 502	0.000 318
A_{22}	0.233 388	0.399 928	0.409 826	0.222 258	0.077 115
B_{11}	0.017 565	0.057 610	0.062 167	0.015 336	0.002 141
B_{12}	0.000 002	0.000 048	0.000 063	0.000 001	0.000 000
B_{21}	0.000 008	0.000 135	0.000 172	0.000 005	0.000 000
B_{22}	0.000 003	0.000 068	0.000 088	0.000 002	0.000 000
B_{23}	0.000 008	0.000 135	0.000 172	0.000 005	0.000 000
C_{11}	0.000 000	0.000 002	0.000 002	0.000 000	0.000 000
C_{12}	0.000 003	0.000 068	0.000 088	0.000 002	0.000 000
C_{21}	0.000 008	0.000 135	0.000 172	0.000 005	0.000 000
C_{22}	0.000 018	0.000 262	0.000 326	0.000 012	0.000 000
C_{23}	0.000 178	0.001 626	0.001 930	0.000 133	0.000 004
C_{24}	0.000 717	0.004 840	0.005 580	0.000 562	0.000 024
D_1	0.000 000	0.000 011	0.000 015	0.000 000	0.000 000
D_2	0.000 003	0.000 068	0.000 088	0.000 002	0.000 000
E_1	0.000 178	0.001 626	0.001 930	0.000 133	0.000 004
E_2	0.000 178	0.001 626	0.001 930	0.000 133	0.000 004
E_3	0.000 005	0.000 096	0.000 123	0.000 003	0.000 000
B_i	0.207 004	0.264 169	0.264 201	0.207 597	0.154 062

5 结束语

笔者有效运用作战环和可拓云模型的优点,提出了基于作战环—可拓云模型体系效能评估的综合评估模型。基于作战环的理论确定了影响体系作战效能的相关指标,自上而下构建了合理的粒度作战效能评估指标体系;运用 G-1 序关系法

标较多,每个效能下选取一个代表性指标划分等级界限,如表 4 所示。根据式(12)确定等级云模型,如表 5 所示。

表 4 反舰导弹装备体系作战效能评估部分指标等级界限

指标	差 (1级)	合格 (2级)	中 (3级)	良 (4级)	优秀 (5级)
A_{11}	(0, 45)	[45, 55]	[55, 75]	[75, 85]	[85, 100]
B_{11}	(0, 40)	[40, 60]	[60, 75]	[75, 90]	[90, 100]
C_{11}	(0, 60)	[60, 70]	[70, 80]	[80, 90]	[90, 100]
D_1	(0, 50)	[50, 60]	[60, 70]	[70, 80]	[80, 100]
E_1	(0, 50)	[50, 60]	[60, 70]	[70, 80]	[80, 100]

应等级 1~5,可以得到 $\max B_i = 0.264\ 201$,说明该体系作战效能属于等级 3。

3) 置信因子为 $\rho = 0.006\ 2$,说明该结果可信。由云关联度分析得出该体系作战效能弱项制度指标为 B_{22} 、 D_2 、 E_1 、 E_2 等,表明该对抗装备体系在指挥人员突发应变能力、后勤保障能力、通信传输速度和通信传输容量等方面有待加强和提高。

对指标进行多组别的排序打分,赋予指标权重值,降低了主观程度;利用可拓云模型对效能进行评估。由实例仿真验证结果可知:该综合评估方法能有效评估体系作战效能的整体情况,可为反舰导弹体系作战效能的评估与体系优化提供合理化参考。

参考文献:

- [1] 高炜. 基于改进的可拓层次分析法和动态加权的航天高技术综合评价研究[J]. 系统工程与电子技术, 2016, 38(1): 102-109.
- [2] BRYANT D J. Rethinking OODA: Toward a Modern Cognitive Framework of Command Decision Making[J]. *Military Psychology*, 2006, 18(18): 183-206.
- [3] 谭跃进, 张小可, 杨克巍. 武器装备体系网络化描述与建模方法[J]. 系统管理学报, 2012, 21(6): 781-786.
- [4] 梁家林, 熊伟. 基于作战环的武器装备体系能力评估方法[J]. 系统工程与电子技术, 2019, 41(8): 1810-1819.
- [5] 肖阳, 吕卫民, 江式伟. 某型反舰导弹作战效能评估及仿真分析[J]. 兵工自动化, 2017, 36(1): 83-87.
- [6] 赵晶, 刘义, 来庆福, 等. 反舰导弹攻防对抗仿真系统[J]. 系统仿真学报, 2012, 24(10): 74-78, 96.
- [7] 赵季阳. 反舰导弹体系攻防对抗的仿真研究[D]. 太原: 中北大学, 2014: 30-35.
- [8] 李进军, 熊吉光. 反舰导弹武器系统攻防对抗作战效能评估模型[J]. 火力与指挥控制, 2003, 28(1): 26-28, 32.
- [9] 孙建彬. 基于作战环的反导装备体系形式化建模与能力评估方法[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2014: 50-53.
- [10] 夏国清, 梁添添, 孙明晓. 基于主成分约简和突变级数的舰载机出动能力综合评估方法[J]. 系统工程与电子技术, 2018, 40(2): 330-337.
- [11] 高松, 韩建立, 陈健, 等. 基于可拓学的武器装备体系效能评估[J]. 海军航空工程学院学报, 2018, 33(6): 546-552.
- [12] LI D, CHEUNG D, SHI X, et al. Uncertainty reasoning based on cloud models in controllers[J]. *Computers & Mathematics with Applications*, 1998, 35(3): 99-123.
- [13] 刘云鹏, 许自强, 付浩川, 等. 采用最优云熵改进可拓云理论的变压器本体绝缘状态评估方法[J/OL]. 高电压技术, 2019-9[2019-10-15]. <https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.20190215004>

(上接第 3 页)

4 结束语

针对以太网、CAN 总线与多路串口通信的需求, 笔者设计一种基于 DSP+FPGA 的多路串口和以太网通信系统。为提高系统可靠性和可扩展性, 系统选用成熟技术和电路, 并预留了软硬件资源。由实际样机验证结果可知, 系统运行性能稳定可靠, 满足项目研制需求。

参考文献:

- [1] TMS320C6672 Multicore Fixed and Floating-Point Digital Signal Processor[Z]. TI, 2007.
- [2] 李银海, 王民钢, 孙传新. 基于 DSP+FPGA 的数字导弹飞控计算机设计[J]. 电子设计工程, 2014, 22(8): 21-24.
- [3] 董言治, 娄树理, 刘松涛. TMS320C6000 系列 DSPs 系统结构原理与应用教程[M]. 北京: 清华大学出版社, 2014: 218-226.
- [4] 徐文波, 田耘. Xilinx FPGA 开发实用教程[M]. 北京: 清华大学出版社, 2012: 4-5.
- [5] 李波, 李亚南, 李健. 基于 FPGA+DSP 架构异步 FIFO 视频图像数据采集实现[J]. 兵工自动化, 2016, 35(9): 382-385.
- [6] 李军辉. 基于 DSP 和 FPGA 的 UART 系统设计[J]. 苏州科技学院学报(自然科学版), 2009, 26(2): 55-59.
- [7] 周云波. 串行通信技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2019: 7-8.
- [8] 徐云. 基于 FPGA 的多路高速串口[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2010.