

doi: 10.7690/bgzd.2018.11.005

基于粗糙集的天空远程作战信息对抗能力评估

冉湫丹^{1,2}, 李建华¹, 崔琼¹

(1. 空军工程大学信息与导航学院, 西安 710077; 2. 国防科技大学信息通信学院, 西安 710106)

摘要: 为提高空中远程作战信息对抗能力评估的高效性, 在合理构建评估指标体系的基础上, 提出一种基于粗糙集的能力评估模型。利用粗糙集理论分析测试数据, 约简指标体系, 确定指标权重, 实现了对空中远程作战信息对抗能力的评估, 并对算例进行评估与分析。评估结果表明: 该方法减少了评估计算量, 提高了评估速率, 能够使评估结果更具客观性和真实性, 对空中远程作战信息对抗能力的评估具有重要借鉴意义。

关键词: 粗糙集; 空中远程作战; 信息对抗能力; 评估

中图分类号: TJ02 **文献标志码:** A

Evaluation of Information Confrontation Capability of Long-range Air Combat Based on Rough Set Theory

Ran Handan^{1,2}, Li Jianhua¹, Cui Qiong¹

(1. School of Information & Navigation, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China;

2. School of Information & Communication, National University of Defense Technology, Xi'an 710106, China)

Abstract: In order to improve the efficiency of the evaluation of information confrontation capability of long-range air combat, based on the rational construction of evaluation index system, put forward the rough set capability evaluation model. Use rough set theory to analyze test data, carry out reduction of index system, ensure index weighting, realize evaluation on information confrontation capability of long-range air combat, and evaluate and analyze the example. The evaluation results show that the method reduce the evaluation calculation, improve the evaluation efficiency, and make the evaluation more objectively and real, and has important reference significance for the evaluation of long-range air combat information confrontation capability.

Keywords: rough set; long-range air combat; information confrontation capability; evaluation

0 引言

空中远程作战信息对抗能力是空中远程作战能力的重要组成部分。空中远程作战是指航程远、作战范围广、打击精度高的作战总称^[1-2]。空中远程作战信息对抗能力是空中远程作战力量发挥其体系对抗能力的基础, 信息对抗贯穿空中远程作战全程。目前, 关于空中远程作战信息对抗能力评估问题的研究多集中于定性描述^[3-4], 缺少对其进行定量分析和计算的研究。为此, 笔者建立空中远程作战信息对抗能力评估模型, 为科学部署兵力和合理运用武器装备提供重要依据。

评估空中远程作战信息对抗能力所涉及到的指标数较多。指标的重要程度不同, 指标之间关系复杂。使用一般评估方法, 不仅无法客观区分指标的重要度, 而且容易增加计算复杂度。例如: 文献[5]中采用专家打分的方法, 能够快速确定指标权重, 但存在评估客观性不足的问题; 文献[6]中使用指数

分析法, 通过层层聚合评估数据, 得到综合评估值, 该方法能够解决指标层次较少、关系清晰的评估问题, 但对于解决评估指标体系层级多、指标数量多、量纲复杂的评估问题, 计算过程繁琐。一些可以用来评估作战能力的方法, 各有优点, 但都存在一定的局限性。粗糙集评估法是一种处理含糊性和不确定性的数据分析工具, 其特点是能够从原始数据中挖掘出有价值的信息, 通过属性约简大大降低计算复杂度, 根据数据本身的规律计算指标权重^[7-9]。综上所述, 笔者首先根据空中远程作战特点, 以遂行空中远程作战任务的空中编队为研究对象, 建立空中远程作战信息对抗能力评估指标体系, 采用粗糙集的方法对该能力进行评估。

1 评估指标体系建立

信息对抗能力是空中编队遂行远程作战任务应该具备的作战能力, 是空中远程作战中不可缺少的重要力量。空中远程信息对抗能力主要取决于空中

收稿日期: 2018-08-28; 修回日期: 2018-09-22

作者简介: 冉湫丹(1990—), 女, 甘肃人, 硕士, 助教, 从事空军信息网络系统建设与运用研究。

编队中的各种作战机型和信息武器装备，由编队的战术技术性能、武器装备作战效能及各种保障因素决定。为赢得战场信息优势，有效应对敌信息武器的进攻，空中远程作战信息对抗必须具备多维信息支援能力、空中信息进攻能力和全程信息防护能力。

1.1 多维信息支援能力

空中远程作战信息对抗过程中，需要空天地网电全域覆盖的多维信息支援能力，为空中远程作战行动提供快速机动的信息保障。多维信息支援能力包括电子侦察能力、预警探测能力和信息传输能力。

1) 电子侦察能力。空中远程作战中，空中编队综合运用电子侦察机和机载电子侦察装备，对敌信息系统和电子战飞机所辐射的电磁信号进行获取、识别、分析，同时依靠海基、陆基、天基多维侦察系统的支持。电子侦察能力主要包括侦察距离、侦察频段和侦察设备数量 3 个效能指标，分别用 c_1 、 c_2 、 c_3 表示。

2) 预警探测能力。空中编队担负远程作战任务时，面临的作战空间更为广阔，情况复杂多变，需要空中预警机与其他预警平台融合，为作战行动提供可靠预警信息。预警探测能力主要包括预警机数量、预警时间和漏警率 3 个效能指标，分别用 c_4 、 c_5 、 c_6 表示。

3) 信息传输能力。空中远程作战，编队中各战斗机型之间，以及编队与陆、海、空、天信息系统之间进行作战信息远程传输，需要能够远距、及时、准确地传送作战过程中所需各类信息的能力。信息传输能力主要包括误码率、传输时延和吞吐量 3 个效能指标，分别用 c_7 、 c_8 、 c_9 表示。

1.2 空中信息进攻能力

空中远程作战行动具有较强的机动性和灵活性，空中编队全程运用网电结合的攻击形式，在空中发动压制性的信息进攻。空中信息进攻能力包括电磁侵扰能力、网络渗透能力和空中反辐射摧毁能力。

1) 电子侵扰能力指利用机载电子设备在空中对敌作战信息系统进行干扰、压制，破坏其使用效

能，以掩护空中编队其他作战力量的能力。包括电子战飞机数量、机载设备干扰功率和微波武器数量 3 个效能指标，分别用 c_{10} 、 c_{11} 、 c_{12} 表示。

2) 网络渗透能力是空中远程作战信息对抗能力中不可缺少的组成部分。空中远程作战以网络化作战体系为基础，空中编队必须具备网络攻击能力，确保各作战单元实时在线。网络攻击能力主要包括病毒注入速率和系统入侵速率 2 个指标，分别用 c_{13} 和 c_{14} 表示。

3) 空中反辐射摧毁能力是利用反辐射优势，对敌指控系统和武器装备进行远程精确摧毁的能力。在空中远程作战中，空中编队以“发现即摧毁”为目标，反辐射武器数量和反辐射导弹精确制导能力是构成反辐射打击能力的核心要素。空中反辐射打击能力包括武器系统响应时延、反辐射导弹数量和攻击范围 3 个指标，分别用 c_{15} 、 c_{16} 、 c_{17} 表示。

1.3 全程信息防护能力

空中远程作战远离大陆本土，空中编队自身具备全程信息防护能力，确保信息系统免遭破坏、正常运行。全程信息防护能力包括电子防护能力和网络防护能力^[10]。

1) 电子防护能力是指反敌电子侦察、抗敌电子压制，免遭敌电子战破坏的能力。空中远程作战航程远，空中编队需要通过电子伪装、抗电子干扰和辐射控制等措施，构筑空中电子防护网，确保作战行动的隐蔽性。电子防护能力包括信息辐射时间、信息辐射距离和反电子干扰设备数量 3 个指标，分别用 c_{18} 、 c_{19} 、 c_{20} 表示。

2) 网络防护能力是指空中编队运用技术手段，防止敌方对我方网系的入侵破坏的能力。空中编队的网络防护能力取决于作战节点抗毁性和系统安全性，确保指控网络和信息系统全程正常运行。网络防护能力包括病毒查杀速率、信息加密程度和访问控制强度 3 个指标，分别用 c_{21} 、 c_{22} 、 c_{23} 表示。

综上所述，笔者构建空中远程作战信息对抗能力评估指标体系，如图 1 所示。



图 1 空中远程作战信息对抗能力评估指标体系

2 评估方法

空军远程作战信息对抗能力评估指标体系层级较多，能力指标的模糊性和不确定性较大，各指标要素之间具有不可忽略的关联性。首先，对指标数值进行离散化处理，建立评估决策表。需要说明的是，评估决策表建立在测试数据和专家打分的基础上，即根据已有专家打分结果确定。考虑到在实际演习或作战过程中，有些指标受环境等因素影响较大，测试数据要具有一定的代表性和针对性。然后，根据粗糙集理论，通过不可分辨关系和属性依赖度确定核心指标，进行指标体系的约简。最后，依据指标重要程度确定指标权重，建立决策规则。

2.1 基本概念

运用粗糙集理论，空中远程作战信息对抗能力评估问题可用一个四元组 $S = (U, A, V, f)$ 来描述。其中：论域 $U = \{u_1, u_2, u_3, \dots, u_n\}$ 代表空中远程作战编队的集合； $A = C \cup D$ 是空中远程作战信息对抗能力指标体系中第 4 层能力指标的集合； C 为条件属性集，

$C = \{c_1, c_2, c_3, \dots, c_{23}\}$ ； $D = \{d\}$ 为决策属性集； $V = \bigcup_{a_i \in A} V_{a_i}$ 是 A 中指标属性值的集合； $f: U \times A \rightarrow V$ 是一个信息函数，它指定 U 中每个对象 u 的 a_i 值。

定义 1 任意 $P \subseteq A$ 决定一个二元不可分辨关系 $\text{ind}(P): \text{ind}(P) = \{(x_i, x_j) \in U \times U \mid \forall a \in P, f(x_i, a) = f(x_j, a)\}$ ，记 $U \mid \text{ind}(P)$ 为论域 U 的一个划分。

定义 2 设 P 和 Q 是论域 U 中的 2 个等价关系， Q 的 P 正域记为 $\text{POS}_P(Q)$ ，即 $\text{POS}_P(Q) = \bigcup_{x \in U/Q} PX$ 。

定义 3 设 P 和 Q 是论域 U 中的等价关系族， $R \in P$ 若 $\text{POS}_{\text{ind}(P)}(\text{ind}(Q)) = \text{POS}_{\text{ind}(P-\{R\}}(\text{ind}(Q))$ ，简记为 $\text{POS}_P(Q) = \text{POS}_{P-\{R\}}(Q)$ ，则属性 R 冗余，可约去。

2.2 评估决策表的建立

在使用粗糙集进行评估之前，首先需要对连续型指标数据进行离散化处理。指标的模糊等级由一个函数确定，称其为隶属度函数 $f_i(x)$ ， $i = 1, 2, 3, \dots, n$ 。隶属度函数^[7]可根据指标特点选择，

由该领域专家给出。为方便计算，文中的隶属度函数均选择梯形分布。评估指标可分为越小越好型、越大越好型和中间型 3 种类型。在此以指标漏警率（越小越好型）为例，设其模糊级别有 $\{a, b, c\}$ ，设对应的等级为： $\{优, 良, 差\}$ 。相应的隶属度函数形式如下：

$$f_1(x) = \begin{cases} 1 & (0 \leq x \leq \alpha_1) \\ \frac{\beta_1 - x}{\beta_1 - \alpha_1} & (\alpha_1 \leq x \leq \beta_1), \\ 0 & (x \geq \beta_1) \end{cases}$$

$$f_2(x) = \begin{cases} 0 & (x \leq \alpha_1) \\ \frac{x - \alpha_1}{\beta_1 - \alpha_1} & (\alpha_1 < x < \beta_1) \\ 1 & (\beta_1 \leq x \leq \alpha_2), \\ \frac{\beta_2 - x}{\beta_2 - \alpha_2} & (\alpha_2 < x < \beta_2) \\ 0 & (x \geq \beta_2) \end{cases}$$

$$f_3(x) = \begin{cases} 0 & (0 \leq x \leq \alpha_2) \\ \frac{x - \alpha_2}{\beta_2 - \alpha_2} & (\alpha_2 \leq x \leq \beta_2) \\ 1 & (x \geq \beta_2) \end{cases} \quad (1)$$

越小越好型指标的满意度等级隶属度函数如图 2 所示。

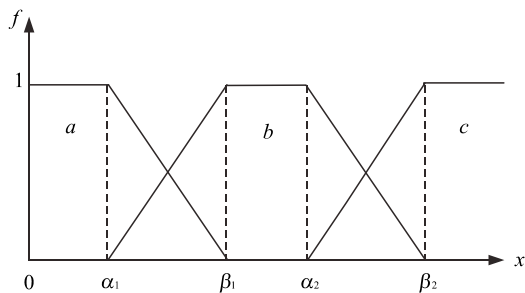


图 2 越小越好型指标的满意度等级隶属度函数

由专家给出 α_i 、 β_i 的取值，即可得到指标的等级隶属度函数，用同样的方法可以给出越大越好型和中间型的满意度等级及其隶属度函数，这比直接给出定量数值更加可信。指标数值经离散化处理后，得出评估决策表 $T = \langle U, A \rangle$ 。

2.3 指标权重的确定

根据所得决策表，可确定各指标权重。由于该评估指标体系中指标个数较多，所要评估的数据量较大；因此，在确定指标权重之前，首先要对评估指标体系化简，使得更加容易控制评估过程，节约评估时间。具体确定指标权重的步骤如下：

1) 观察决策表 $T = \langle U, A \rangle$ ，对于论域 U ，若指标 $x \in A, y \in A$ 对应的评估对象的指标值相同，则认为指标 x 、 y 具有相同的分辨力，只需保留一个，从决策表中删除相关行。重复上述步骤，完成对应的初始指标体系的缩减。

2) 计算不可分辨关系：

$$U / \text{IND}(A - \{a_i\}) \quad (2)$$

3) 计算指标依赖度：

$$r_{a_i} = \frac{|\text{POS}_{A - \{a_i\}}(D)|}{|U|} \quad (3)$$

其中： $\text{POS}_{A - \{a_i\}}$ 为指标 a_i 的正域；算子 $|*|$ 表示求集合中元素的个数。

4) 计算指标重要度：

$$I_{a_i} = r_c - r_{a_i} \quad (4)$$

若指标重要度为 0，从指标体系中约去该指标。

5) 将指标重要度归一化处理，得指标权重：

$$W_i = \frac{I_i}{\sum_{i=1}^n I_i} \quad (5)$$

根据建立好的决策表和已确定的指标权重值，综合决策规则，即可对评估对象的空中远程作战信息对抗能力进行评估。评估值

$$Q_i = \sum_{i=1}^n W_i a_i \quad (6)$$

3 评估实例

根据作战想定，目前需要对 5 组空中编队的空中远程作战信息对抗能力进行评估。首先，在数据库中选择 10 组具有代表性的空中编队指标数据，对数据进行离散化和规范化处理，在专家打分的基础上，建立初始评估决策表。通过化简指标体系，确定指标权重，建立决策规则，再利用该规则对需要评估的 5 组空中编队进行能力评估。

3.1 建立评估决策表

论域 $U = \{u_1, u_2, u_3, \dots, u_{10}\}$ ；条件属性 $C = \{c_1, c_2, c_3, \dots, c_{23}\}$ ；决策属性 $D = \{d\}$ ； d 为专家打分。将 10 组空中编队的空中远程作战任务信息对抗能力指标数据代入式(1)，得到每个指标值对应的模糊等级。再按照分级评分的方式，将 a, b, c 3 个等级依次赋值 3 分、2 分、1 分，建立初始决策表，如表 1 所示。

表 1 方案性能指标初始决策

U	c_1	c_2	c_3	c_4	c_5	c_6	c_7	c_8	c_9	c_{10}	c_{11}	c_{12}	c_{13}	c_{14}	c_{15}	c_{16}	c_{17}	c_{18}	c_{19}	c_{20}	c_{21}	c_{22}	c_{23}	d
u_1	3	3	2	3	2	3	3	2	2	3	3	2	3	3	2	3	3	3	3	1	2	2	3	3
u_2	2	3	2	2	2	3	3	2	2	2	3	2	3	2	2	3	3	2	3	1	2	2	3	2
u_3	2	3	2	2	1	2	3	2	2	2	2	2	2	2	2	2	3	2	2	1	2	2	2	2
u_4	2	3	2	2	1	1	3	2	2	2	1	2	1	2	2	1	3	2	1	1	2	2	1	1
u_5	3	3	1	3	2	3	3	2	1	3	3	1	3	3	1	3	3	3	3	1	1	2	3	1
u_6	3	3	2	3	2	3	3	2	2	3	3	2	3	3	2	3	3	3	3	1	2	1	3	1
u_7	1	3	2	1	2	3	3	2	2	1	3	2	3	1	2	3	3	1	3	1	2	2	3	2
u_8	1	2	2	1	2	3	3	2	2	1	3	2	3	1	2	3	3	1	3	1	2	2	3	2
u_9	1	1	2	1	2	3	3	2	2	1	3	2	3	1	2	3	3	1	3	1	2	2	3	2
u_{10}	2	3	2	2	2	3	3	2	2	2	3	2	3	2	2	3	3	2	3	3	2	2	3	3

3.2 确立指标权重

1) 通过观察表 1, 发现对于 U , 属性 $c_1, c_4, c_{10}, c_{14}, c_{18}$ 具有相同的分辨能力, 只保留其中一个属性即可, 在此保留 c_4 ; 属性 $c_3, c_9, c_{12}, c_{15}, c_{21}$ 具有相同的分辨能力, 保留 c_9 ; 属性 $c_6, c_{11}, c_{13}, c_{16}, c_{19}, c_{23}$ 具有相同的分辨能力, 保留 c_{13} 。简化后见表 2。

表 2 方案性能指标化简决策

U	c_2	c_4	c_5	c_7	c_8	c_9	c_{13}	c_{17}	c_{20}	c_{22}	d
u_1	3	3	2	3	2	2	3	3	1	2	3
u_2	3	2	2	3	2	2	3	3	1	2	2
u_3	3	2	1	3	2	2	2	3	1	2	2
u_4	3	2	1	3	2	2	1	3	1	2	1
u_5	3	3	2	3	2	1	3	3	1	2	1
u_6	3	3	2	3	2	2	3	3	1	1	1
u_7	3	1	2	3	2	2	3	3	1	2	2
u_8	2	1	2	3	2	2	3	3	1	2	2
u_9	1	1	2	3	2	2	3	3	1	2	2
u_{10}	3	2	2	3	2	2	3	3	3	2	3

2) 对于决策表 $T = \langle U, A \rangle, A' = C \cup D$, 其中 $U = \{u_1, u_2, u_3, \dots, u_{10}\}, D = \{d\}$ 。

计算属性的不可分辨关系:

$$\begin{aligned}
 U / \text{IND}(C) &= \{\{u_1\}, \{u_2\}, \{u_3\}, \{u_4\}, \{u_5\}, \{u_6\}, \{u_7\}, \{u_8\}, \{u_9\}, \{u_{10}\}\}; \\
 U / \text{IND}(D) &= \{\{u_1, u_{10}\}, \{u_2, u_3, u_7, u_8, u_9\}, \{u_4, u_5, u_6\}\}; \\
 U / \text{IND}(C' - \{c_2\}) &= \{\{u_1\}, \{u_2\}, \{u_3\}, \{u_4\}, \{u_5\}, \{u_6\}, \{u_7, u_8, u_9\}, \{u_{10}\}\}; \\
 U / \text{IND}(C' - \{c_4\}) &= \{\{u_1, u_2, u_7\}, \{u_3\}, \{u_4\}, \{u_5\}, \{u_6\}, \{u_8\}, \{u_9\}, \{u_{10}\}\}; \\
 U / \text{IND}(C' - \{c_5\}) &= \{\{u_1\}, \{u_2, u_4\}, \{u_3\}, \{u_5\}, \{u_6\}, \{u_7\}, \{u_8\}, \{u_9\}, \{u_{10}\}\}; \\
 U / \text{IND}(C' - \{c_7\}) &= \{\{u_1\}, \{u_2\}, \{u_3\}, \{u_4\}, \{u_5\}, \{u_6\}, \{u_7\}, \{u_8\}, \{u_9\}, \{u_{10}\}\}; \\
 U / \text{IND}(C' - \{c_8\}) &= \{\{u_1\}, \{u_2\}, \{u_3\}, \{u_4\}, \{u_5\}, \{u_6\}, \{u_7\}, \{u_8\}, \{u_9\}, \{u_{10}\}\}; \\
 U / \text{IND}(C' - \{c_9\}) &= \{\{u_1, u_5\}, \{u_2\}, \{u_3\}, \{u_4\}, \{u_6\}, \{u_7\}, \{u_8\}, \{u_9\}, \{u_{10}\}\}; \\
 U / \text{IND}(C' - \{c_{13}\}) &= \{\{u_1\}, \{u_2\}, \{u_3, u_4\}, \{u_5\}, \{u_6\}, \{u_7\}, \{u_8\}, \{u_9\}, \{u_{10}\}\};
 \end{aligned}$$

$$U / \text{IND}(C' - \{c_{17}\}) = \{\{u_1\}, \{u_2\}, \{u_3\}, \{u_4\}, \{u_5\}, \{u_6\}, \{u_7\}, \{u_8\}, \{u_9\}, \{u_{10}\}\};$$

$$U / \text{IND}(C' - \{c_{20}\}) = \{\{u_1\}, \{u_2, u_{10}\}, \{u_3\}, \{u_4\}, \{u_5\}, \{u_6\}, \{u_7\}, \{u_8\}, \{u_9\}\};$$

$$U / \text{IND}(C' - \{c_{22}\}) = \{\{u_1\}, \{u_2\}, \{u_3\}, \{u_4\}, \{u_5, u_6\}, \{u_7\}, \{u_8\}, \{u_9\}, \{u_{10}\}\}。$$

3) 计算属性依赖度:

$$\text{POS}_{C'}(D) = \{\{u_1\}, \{u_2\}, \{u_3\}, \{u_4\}, \{u_5\}, \{u_6\}, \{u_7\}, \{u_8\}, \{u_9\}, \{u_{10}\}\};$$

$$\text{POS}_{C' - \{c_2\}}(D) = \{\{u_1\}, \{u_2\}, \{u_3\}, \{u_4\}, \{u_5\}, \{u_6\}, \{u_{10}\}\};$$

$$\text{POS}_{C' - \{c_4\}}(D) = \{\{u_3\}, \{u_4\}, \{u_5\}, \{u_6\}, \{u_8\}, \{u_9\}, \{u_{10}\}\};$$

$$\text{POS}_{C' - \{c_5\}}(D) = \{\{u_1\}, \{u_3\}, \{u_5\}, \{u_6\}, \{u_7\}, \{u_8\}, \{u_9\}, \{u_{10}\}\};$$

$$\text{POS}_{C' - \{c_7\}}(D) = \{\{u_1\}, \{u_2\}, \{u_3\}, \{u_4\}, \{u_5\}, \{u_6\}, \{u_7\}, \{u_8\}, \{u_9\}, \{u_{10}\}\};$$

$$\text{POS}_{C' - \{c_8\}}(D) = \{\{u_1\}, \{u_2\}, \{u_3\}, \{u_4\}, \{u_5\}, \{u_6\}, \{u_7\}, \{u_8\}, \{u_9\}, \{u_{10}\}\};$$

$$\text{POS}_{C' - \{c_9\}}(D) = \{\{u_2\}, \{u_3\}, \{u_4\}, \{u_6\}, \{u_7\}, \{u_8\}, \{u_9\}, \{u_{10}\}\};$$

$$\text{POS}_{C' - \{c_{13}\}}(D) = \{\{u_1\}, \{u_2\}, \{u_5\}, \{u_6\}, \{u_7\}, \{u_8\}, \{u_9\}, \{u_{10}\}\};$$

$$\text{POS}_{C' - \{c_{17}\}}(D) = \{\{u_1\}, \{u_2\}, \{u_3\}, \{u_4\}, \{u_5\}, \{u_6\}, \{u_7\}, \{u_8\}, \{u_9\}, \{u_{10}\}\};$$

$$\text{POS}_{C' - \{c_{20}\}}(D) = \{\{u_1\}, \{u_3\}, \{u_4\}, \{u_5\}, \{u_6\}, \{u_7\}, \{u_8\}, \{u_9\}\};$$

$$\text{POS}_{C' - \{c_{22}\}}(D) = \{\{u_1\}, \{u_2\}, \{u_3\}, \{u_4\}, \{u_7\}, \{u_8\}, \{u_9\}, \{u_{10}\}\}。$$

由式(3)可得各属性的依赖度分别为:

$$r_d = r_{c_7} = r_{c_8} = r_{c_{17}} = 1, r_{c_2} = r_{c_4} = 0.7,$$

$$r_{c_5} = r_{c_9} = r_{c_{13}} = r_{c_{20}} = r_{c_{22}} = 0.8。$$

4) 由式(4)可得属性重要度分别为:

$$I_{c_2} = I_{c_4} = 0.3, I_{c_5} = I_{c_9} = I_{c_{13}} = I_{c_{20}} = I_{c_{22}} = 0.2,$$

$I_{c_7} = I_{c_8} = I_{c_{17}} = 0$ 。由此可知, 属性 c_7, c_8, c_{17} 为冗余属性。

由式(5)可得指标权重分别为:

$$w_{c_2} = w_{c_4} = 0.1875, w_{c_5} = w_{c_9} = w_{c_{13}} = w_{c_{20}} = w_{c_{22}} = 0.125。$$

3.3 综合评估

通过以上指标体系约简和指标权重确定, 保留

指标 c_2 、 c_4 、 c_5 、 c_9 、 c_{13} 、 c_{20} 、 c_{22} ，对 5 个编队的空中远程作战信息对抗能力进行评估。

评估数据处理以属性 c_5 为例，5 个编队属性 c_5 原始评估数据如表 3 所示。

表 3 c_5 原始数据数据

U	u_1	u_2	u_3	u_4	u_5
$c_5/\%$	35.1	63.2	47.8	9.2	71.5

已知属性 c_5 的隶属度函数如图 3 所示。

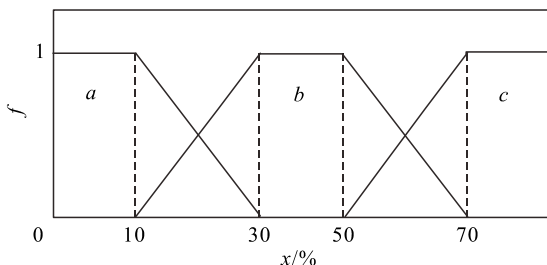


图 3 属性 c_5 的隶属度函数

根据隶属度函数，判定模糊等级，并用相应的分值代表，得到处理后的属性 c_5 的评估数据，如表 4 所示。

表 4 c_5 评估数据

U	u_1	u_2	u_3	u_4	u_5
$c_5/\%$	2	3	2	1	3

同理，得到处理后的评估数据，如表 5 所示。

表 5 评估数据

U	c_2	c_4	c_5	c_9	c_{13}	c_{20}	c_{22}
u_1	2	3	1	2	3	1	2
u_2	3	2	2	3	3	3	2
u_3	2	2	1	2	1	3	1
u_4	1	2	1	2	1	1	2
u_5	3	3	3	2	3	2	2

经各编队空中远程作战信息对抗能力评估值进行计算，对表 3 中 5 组数据进行评估，由式(6)得评估值如下：

$$Q_1 = 2.0625, \quad Q_2 = 2.5625, \quad Q_3 = 1.625,$$

$$Q_4 = 1.4375, \quad Q_5 = 2.625.$$

可知 5 个空中编队中，编队 5 的空中远程信息对抗能力最佳，其次是编队 2、编队 1、编队 3，编队 4 的空中远程信息作战能力较差。分析表 3 可知，编队 5 各项指标均达良好以上， c_2 和 c_4 指标达优，由 3.2 节的计算结果可知， c_2 和 c_4 指标的重要度均比其他指标重要度高；因此，该编队的综合能力最佳。编队 4 指标优良率最低，其中 c_2 和 c_4 指标等级均低于其他编队指标，因此其综合能力最低。编队

5 和编队 2 指标的优良率相同，但由于编队 5 的 c_4 指标优于编队 2，使得编队 5 的综合能力更优。为了提高空中远程作战信息对抗能力，需要重点关注侦察频段和预警时间 2 项指标，此外提高漏警率、吞吐量等指标也是关键。

4 结束语

笔者对空中远程作战信息对抗能力评估问题进行了研究，提出一种基于粗糙集的空中远程作战信息对抗能力评估方法，并对具体的实例进行了评估与分析。该方法能够在分析现有数据的基础上，结合专家的知识经验判断进行评估，使评估结果更具客观性和真实性。同时，约简指标体系减少了评估计算量，提高了评估速率。文中的数据均为实验数据，对空中远程作战信息对抗能力评估具有一定的参考价值。在实际演习或者作战过程中，往往会出现指标数据不能及时采集的情况，无法保证指标属性集的数据完备性。下一步的研究将重点解决指标数据缺失情况下的空中远程作战信息对抗能力评估问题。

参考文献：

- [1] 胡建生, 刘进军. 谈信息化战争与加强空中远程进攻力量建设[J]. 空军军事学术, 2009, 51(1): 6-7.
- [2] 华宏敏, 阳钊训. 空中远程作战力量远海联合作战运用研究[J]. 空军军事学术, 2013, 55(1): 32-33.
- [3] 任富国, 杨镜宇, 杨瑞. 构建基于信息系统的空中远程体系作战能力的构想[J]. 国防大学学报, 2012, 27(4): 22-23.
- [4] 张西山, 陈钦碧, 赵天宫, 等. 基于模糊不确定性加权的测试性专家经验信息预处理[J]. 兵工自动化, 2017, 36(8): 62-64.
- [5] 肖栋林, 张强, 刘森. 基于 AGA-AHP 的信息火力一体作战能力评估[J]. 舰船电子工程, 2013, 33(8): 30-32.
- [6] 王运栋, 周海燕. 海上联合机动编队信息对抗能力分析[J]. 火力与指挥控制, 2015, 40(3): 60-63.
- [7] 马亚龙, 邵秋峰, 孙明, 等. 评估理论和方法及其军事应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2013: 121-125.
- [8] YAO Y Y. On Generalizing Rough Set Theory. Rough Sets, Fuzzy Sets, Data Mining, and Granular Computing[M]. Berlin, Germany: Springer, 2003: 44-51.
- [9] 孟蕾, 许爱强, 宋鹏菊. 基于区间值的变精度双论域粗糙集的机载电子设备故障诊断方法[J]. 兵工自动化, 2017, 36(6): 60-64.
- [10] 许贵君, 王晖, 赵凯. 基于信息系统的装备保障指挥流程分析[J]. 兵器装备工程学报, 2017(3): 104-107.