

DOI:10.3969/j.issn.1671-0673.2021.04.019

基于加权灰色关联度分析与集对分析组合推理模型的航材消耗预测

袁福帅¹, 崔崇立², 朱 臣², 邵 帅¹, 赵 磊³

(1. 空军勤务学院 研究生大队, 江苏 徐州 221000; 2. 空军勤务学院 航材四站系, 江苏 徐州 221000;
3. 空军洛阳器材仓库, 河南 洛阳 471000)

摘要: 为了改善传统预测方法在航材消耗预测问题上的不适应性, 基于案例推理方法, 结合加权灰色关联与集对分析方法分别构建出案例推理模型, 并利用熵值法与改进层级分析法确定灰色关联系数权重与案例集对特征因素权重。最后构建航材消耗组合推理模型, 再依据推理结果对航材消耗数量进行预测, 其结果具有一定的准确性和可靠性。

关键词: 灰色关联分析; 集对分析; 案例推理; 航材; 消耗预测

中图分类号: E92

文献标识码: A

文章编号: 1671-0673(2021)04-0502-06

Air Material Consumption Forecast Based on Grey Relevance and Set Pair Analysis

YUAN Fushuai¹, CUI Chongli², ZHU Chen², SHAO Shuai¹, ZHAO Lei³

(1. Brigade of Postgraduate, Air Force Logistics College, XuZhou 221000, China;

2. Department of Air Material and Four Station, Air Force Logistics College, XuZhou 221000, China;

3. Air Force Luoyang Equipment Warehouse, LuoYang 471000, China)

Abstract: In order to improve the inadaptability of the traditional prediction methods on air material consumption forecast, based on the case-based reasoning method, two models are established on the basis of the weighted grey relevance analysis and set pair analysis method respectively. Entropy method and improved analytic hierarchy process are used to determine the weight of grey relevance number and characteristic factor weight of case set pair. Finally, a combined reasoning model of air material consumption is constructed, and the air material consumption quantity is predicted by the result of reasoning, with certain accuracy and reliability.

Key words: grey relational analysis; set pair analysis; case-based reasoning; air material; consumption forecast

0 引言

航材是确保飞机遂行飞行任务的物质基

础^[1]。航材消耗预测是航材保障人员进行决策时的重难点, 其结果的可信度与准确度, 是完成航材保障任务的关键, 对部队开展军事行动也具有重要的意义。

收稿日期: 2021-03-22; 修回日期: 2021-04-18

基金项目: 科研基金资助项目

作者简介: 袁福帅(1998-), 男, 硕士生, 主要研究方向为航材保障决策与信息化;
崔崇立(1975-), 男, 副教授, 硕士, 主要研究方向为航材管理工程。

目前学者们对于航材消耗预测的方法研究包括神经网络、灰色预测、指数平滑法、主成分分析与支持向量机方法,以及其中两三种方法的组合预测方法^[2-6]。相较于单一的预测方法,组合预测方法的准确度无疑更高。但飞行任务中突发状况多,战场环境变幻莫测,历史航材消耗的波动较大,保障数据的规律性较弱,上述预测方法的准确度就大打折扣。基于案例的推理(CBR)适用于解决因素关联不明确、无法公式化,不确定因素强的问题,常用于应急物资需求预测领域^[7]。灰色关联度分析(GRA)是度量系统中因素间关联程度的一种方法,可用于案例推理过程中案例之间的相似度表示^[8]。集对分析(SPA)是从整体上研究确定性于不确定性,将集对分析与CBR结合,能更好地在处理案例中的不确定因素。通过以上分析,构建基于加权GRA和集对分析的推理模型来预测飞行任务中的航材消耗具有可行性。

1 基于加权GRA的案例推理模型

CBR是1982年由文献[9]提出的一种利用历史事例或经验的一种推理方法,将当前的情况与过去的曾成功解决的案例相匹配,从中获取经验或启发。GRA是一种研究少数数据、贫数据不确定问题的方法,其基本思想是:依据参考数据与比较数据,分析各因素发展趋势的异似情况来判断特征因素间的关联程度^[10]。因此,案例的相似程度可通过灰色关联度来计算。

本文结合案例分析方法与灰色系统思想,利用特征因素集合来表示案例,即 $Case = \{Factor\ 1, Factor\ 2, \dots, Factor\ m\}$ 。设案例库中有 n 个相似案例,每个案例中有 m 个特征因素,目标案例表示为 $X_c = (x_c(1), x_c(2), \dots, x_c(m))$, 相似案例表示为

$$\begin{aligned} X_1 &= (x_1(1), x_1(2), \dots, x_1(m)) \\ X_2 &= (x_2(1), x_2(2), \dots, x_2(m)) \\ &\dots \\ X_i &= (x_i(1), x_i(2), \dots, x_i(m)) \\ &\dots \\ X_n &= (x_n(1), x_n(2), \dots, x_n(m)) \end{aligned} \quad (1)$$

根据经典邓氏关联度计算模型,目标案例与相似案例在第 k 个特征因素上的灰色关联系数为^[7]

$$\varepsilon(x_0(k), x_i(k)) = \frac{\min_i \min_k |x_0(k) - x_i(k)| + \rho \max_i \max_k |x_0(k) - x_i(k)|}{|x_0(k) - x_i(k)| + \rho \max_i \max_k |x_0(k) - x_i(k)|} \quad (2)$$

式中, ρ 为分辨系数,来减弱数据对系数的影响,可

提高关联系数间的分辨率, $\rho \in (0, 1)$, 通常取值为 0.5。则案例的灰色关联度为

$$\varepsilon'(X_c, X_i) = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m \varepsilon(x_c(k), x_i(k)) \quad (3)$$

特征因素对案例的重要程度不同,对于某个特征因素来说案例关联度受关联系数的影响也不同。可设 ω_k 为第 k 个特征因素上的案例间灰色关联系数权重, $\sum_{k=1}^m \omega_k = 1, (0 < \omega_k < 1)$ 。案例的加权关联度为

$$\varepsilon(X_c, X_i) = \sum_{k=1}^m \omega_k \varepsilon(x_c(k), x_i(k)) \quad (4)$$

2 基于集对分析的案例推理模型

集对分析(SPA)是文献[11]提出的一种处理不确定性问题的方法。其核心思想是利用联系度对研究对象间确定与不确定性关系以及二者的相互作用进行数学分析,从系统层面研究问题的确定与不确定性。

为将集对分析引入案件推理方法中,结合CBR的特点以及SPA的思想,可定义出案例之间的集对联系度:假设提取出的 N 个特征因素,有 S 个在特性上具有同一性,有 P 个在特性上表现对立,剩余的 $F = N - S - P$ 个在特性上表现为不确定性,则: S/M 为集对同一度; F/M 为集对差异度; P/M 为集对相反度。案例集对的联系度为

$$\mu = \frac{S}{M} + \frac{F}{M}l + \frac{P}{M}j \quad (5)$$

式中, l 为差异度标记符号,根据具体情况在区间 $(-1, 1)$ 取值; j 为对立度标记符号,通常为 -1 。为方便表述,集对联系度可简写为

$$\mu = a + bl + cj, (a + b + c = 1) \quad (6)$$

相似案例 X_i 与目标案例 X_c 可构建案例集对 (X_c, X_i) , 二者关于同一个特征因素可构建特征因素集对。即案例集对 (X_c, X_i) 关于 m 个特征因素的因素值分别为 $x_c(1), x_c(2), \dots, x_c(m)$ 与 $x_i(1), x_i(2), \dots, x_i(m)$, $(x_c(1), x_i(1)), (x_c(2), x_i(2)), \dots, (x_c(m), x_i(m))$ 为案例集对 (X_c, X_i) 的因素集对。

则案例集对 (X_c, X_i) 关于第 k 个因素的因素集对联系度可表示为

$$\begin{aligned} \mu_k(X_c, X_i) &= a_k + b_k l + c_k j, l \in (-1, 1), j = -1, \\ &k = 1, 2, \dots, m \end{aligned} \quad (7)$$

由于特征因素值只有一个,所以表达式也只有

一项,即若两案例在第 k 个特征因素上表现为同一性,则联系度为 $\mu_k = a_k = 1$;若表现为对立性,则 $\mu_k = -c_k = -1$;若表现为差异性,则 $\mu_k = b_k l_k$,且 $b_k = 1$ 。对于 l 值的确定,可以将案例库中特征因素值的上下限作为区间进行四等分,对于不同区间分别赋值。

3 基于组合推理模型的航材消耗预测方法

影响航材消耗的不确定因素太多,仅靠客观数据或是主观判断均会存在误差。因此,本文结合以上两种方法,建立了组合推理模型,充分吸收两种方法的长处,结合客观数据与主观赋值方法对案件之间的相似度进行计算,能够更好地反应案例间的相似水平。在构建组合推理模型时,先要求出上述两种方法的相似度序列与最优序列,再应用灰色关联理论进行结合,得到组合相似度序列,从而对航材消耗量进行预测对于加权灰色关联度推理,关联系数权重的确定可以采用熵值法,其认为:案例的熵值取决于特征因素的离散程度,其数值大小表示该因素对案例评价的影响程度^[12]。

首先对第 k 个特征因素进行非负数化处理:

$$X_i(k) = \frac{\max x_i(k) - x_i(k)}{\max x_i(k) - \min x_i(k)} + 1 \quad (8)$$

$$i = 1, 2, \dots, n; k = 1, 2, \dots, m$$

再计算各特征因素标准差 $\sigma_k =$

$$\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i(k) - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i(k))^2}$$

最后确定特征因素权重:

$$\omega_k = \frac{\sigma_k}{\sum_{i=1}^m \sigma_k} \quad (k = 1, 2, \dots, m) \quad (9)$$

依此可得到目标案例与相似案例的加权灰色关联度序列: $S_{GRA} = (\varepsilon(X_C, X_1), \varepsilon(X_C, X_2), L, \varepsilon(X_C, X_n))$ ($i = 1, 2, \dots, n$), $\max \varepsilon(X_C, X_i)$ 对应的案例在 n 个案例中与目标案例相似度最高。

在集对分析推理模型中,特征因素对案例的重要程度不同,需引入特征因素权重的概念,特征因素权重分别记为 $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_m$,则相似案例 X_i 与目标案例 X_C 的案例相似度为

$$\mu(X_C, X_i) = \sum_{k=1}^m a_k \lambda_k + \sum_{k=1}^m b_k \lambda_k l + \sum_{k=1}^m c_k \lambda_k j$$

$$l \in (-1, 1), j = -1, k = 1, 2, \dots, m = A + Bl + Cj \quad (10)$$

式中, $A = \sum_{k=1}^m a_k \lambda_k$, $B = \sum_{k=1}^m b_k \lambda_k$, $C = \sum_{k=1}^m c_k \lambda_k$ 。

对于特征因素权重 λ 的确定,采用改进 AHP 法,其具体步骤如下:

①通过专家给出的重要度排序表得到判断矩阵,表示为

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1j} & \dots & a_{1m} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2j} & \dots & a_{2m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{i1} & a_{i2} & \dots & a_{ij} & \dots & a_{im} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{m1} & a_{m2} & \dots & a_{mj} & \dots & a_{mm} \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$\text{式中: } a_{ij} = \begin{cases} 1 & i \text{ 比 } j \text{ 重要} \\ 0 & i \text{ 和 } j \text{ 同样重要} \\ -1 & j \text{ 比 } i \text{ 重要} \end{cases} \quad (12)$$

②通过计算得到传递矩阵 B ,其元素为: $b_{ij} = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m (a_{ik} + a_{kj})$ 。

③对传递矩阵中元素进行处理,得到一致性矩阵 C ,其元素为: $c_{ij} = e^{b_{ij}}$ 。

④计算得到矩阵 C 的特征值与特征向量,对最大特征值对应的特征向量进行归一化处理,得到特征因素权重值向量。

依此可得到相似度序列 $S_{SPA} = (\mu(X_C, X_1), \mu(X_C, X_2), \dots, \mu(X_C, X_n))$ ($i = 1, 2, \dots, n$), $\max \mu(X_C, X_i)$ 对应的案例在 n 个案例中与目标案例相似度最高。

然后进行组合模型构建:

首先将 S_{SPA} 按照 S_{GRA} 水平进行归一化处理^[13],得到新的序列 S'_{SPA} ,序列中元素为

$$\mu'(X_C, X_i) = (\max \varepsilon(X_C, X_i) - \min \varepsilon(X_C, X_i)) \times \frac{\mu(X_C, X_i) - \min \mu(X_C, X_i)}{\max \mu(X_C, X_i) - \min \mu(X_C, X_i)} + \min \varepsilon(X_C, X_i)$$

$$i = 1, 2, \dots, n \quad (13)$$

令最优序列为 S_{MAX} ,其元素:

$$s_{\max}(X_C, X_i) = \max(\varepsilon(X_C, X_i), \mu(X_C, X_i)),$$

$$i = 1, 2, \dots, n \quad (14)$$

即为同一特征因素上关联度与相似度的较大值。

根据式(3)可以分别计算出序列 S_{GRA} 、 S'_{SPA} 与 S_{MAX} 的灰色关联度 $\varepsilon'(S_{MAX}, S_{GRA})$, $\varepsilon'(S_{MAX}, S'_{SPA})$,从而得到组合相似度:

$$\gamma(X_C, X_i) = \frac{\varepsilon'(S_{MAX}, S_{GRA})}{\varepsilon'(S_{MAX}, S_{GRA}) + \varepsilon'(S_{MAX}, S'_{SPA})}$$

$$\varepsilon(X_G, X_i) + \frac{\varepsilon'(S_{MAX}, S'_{SPA})}{\varepsilon'(S_{MAX}, S_{GRA}) + \varepsilon'(S_{MAX}, S'_{SPA})} \cdot \mu(X_G, X_i) \quad i=1, 2, \dots, n \quad (15)$$

从而得到组合相似度序列: $S_{COM} = (\gamma(X_G, X_1), \gamma(X_G, X_2), \dots, \gamma(X_G, X_n))$ ($i = 1, 2, \dots, n$) $\max_i \gamma(X_G, X_i)$ 对应的案例在 n 个案例中与目标案例相似度最高。

通过组合推理模型可得到与目标案例最相似的案例,进而预测出航材消耗量。设最佳相似案例中航材消耗量为 C , 关键特征向量值为 K_s , 目标案例中关键特征向量值为 K_G , 则目标案例的航材消耗量为

$$C_G = \frac{K_G}{K_s} \cdot C \quad (16)$$

基于灰色集对推理模型的航材消耗预测方法的具体步骤如图 1 所示。

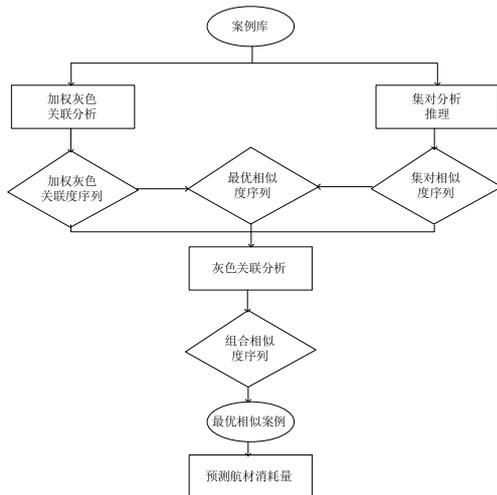


图 1 基于灰色集对推理模型的航材消耗预测流程图

4 案例分析

飞机遂行飞行任务时对航材消耗量造成影响的因素有很多,如表 1 所示,从中筛选出 6 个主要影响因素作为飞行任务案例中的特征因素。其中,任务样式的因素赋值不存在相互关联,为无序枚举型;任务强度与地理状况为有序枚举型因素值,飞行时间、飞机起落架次、单机装备数量、航材损耗率为数字型因素值^[14-15]。

表 1 飞行任务案例特征因素表

序号	特征因素	因素赋值
1	任务样式	跨区机动(0)、进攻作战演习(1)、防御作战演习(2)、非战争军事行动(3)
2	任务强度	非常强(1)、强(2)、中(3)、低(4)
3	地理状况	山地(1)、高原(2)、丘陵(3)、平原(4)
4	飞行时间	飞机飞行总时间(h)
5	飞机起落架次	飞起落总架次(次)
6	单机装备数量	单机装备航材数量(个)
7	航材损耗率	因保管运输造成的航材损耗(%)

现将 XX 战区空军第 X 集团军航空兵第 X 旅遂行某飞行任务作为目标案例 G, 进行实例分析。已知基于飞行任务的航材保障案例库中有 6 个相似案例, 记为: $C_1, C_2, C_3, C_4, C_5, C_6$, 案例的 7 个特征因素记为: $f_1, f_2, f_3, f_4, f_5, f_6, f_7$, 案例特征因素值如表 2 所示。

采用具有丰富航材保障经验的工作人员和指挥人员的讨论结果, 建立案例集对间因素联系度赋值标准表与特征因素权重排序表。如表 3、表 4 所示, 这是求解相似度序列的基础。

表 2 飞行任务的特征因素值

案例	f_1	f_2	f_3	f_4	f_5	f_6	f_7	消耗量
C_1	1	2	4	150.6	76	3	0.8	30
C_2	1	3	2	157.3	80	4	1.5	25
C_3	2	3	3	160.7	79	2	0.7	32
C_4	0	2	1	166.1	84	5	0.7	23
C_5	1	4	3	154.5	82	3	1.2	19
C_6	2	2	2	170.5	87	6	0.9	30
G	1	2	3	175.4	77	4	1.1	

表 3 案例集对间因素联系度赋值标准表

特征因素	-1	0.2	0.4	0.6	0.8	1
f_1	-	0	3	-	2	1
f_2	-	-	4	3	1	2
f_3	-	-	2	4	1	3
f_4	-	-	[140, 145) \cup (165, 170]	[145, 150) \cup (160, 165]	[150, 155) \cup (155, 160]	155
f_5	-	-	[65, 69) \cup (85, 89]	[69, 73) \cup (81, 85]	[73, 77) \cup (77, 81]	77
f_6	-	-	1, 7	2, 6	3, 5	4
f_7	-	-	[0.5, 0.7) \cup (1.5, 1.7]	[0.7, 0.9) \cup (1.3, 1.5]	[0.9, 1.1) \cup (1.1, 1.3]	1.1

表4 特征因素重要度排序表

特征因素	排序
f_1	2
f_2	1
f_3	3
f_4	5
f_5	4
f_6	6
f_7	7

4.1 案例组合推理

①案例关联度序列求解。在无序枚举型因素上,因素值相同时案例关联系数为1,不同则为0;有序枚举型因素与数字型因素依据原始数据表2,再通过式(2)、式(4)、式(9)计算出关联度序列:

$$S_{GRA} = (0.80262, 0.73122, 0.54510, 0.47814, 0.72734, 0.49002).$$

②案例相似度序列求解。通过改进 AHP 法、式(10)以及表3、表4,可计算出相似度序列:

$$S_{SPA} = (0.85787, 0.72422, 0.75085, 0.65647, 0.73629, 0.69333).$$

③相似度序列归一化处理。通过式(13)和步骤①、步骤②结果,可得到新的相似度序列:

$$S'_{SPA} = (0.80262, 0.58729, 0.63018, 0.47814, 0.60673, 0.53751),$$

④案例组合相似度序列求解。通过式(14)、式(15)和步骤③结果,可计算出组合相似度序列:

$$S_{COM} = (0.83201, 0.72750, 0.65454, 0.57300, 0.73210, 0.59816)$$

将序列 S_{GRA} 、 S_{SPA} 、 S'_{SPA} 、 S_{COM} 绘于图2中,通过分析可以得出以下结论:

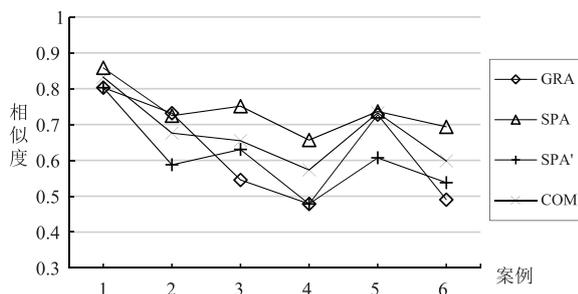


图2 案例推理结果对比

①由于采用的方法不同,数据的量纲不同, S_{GRA} 与 S_{SPA} 的结果差异较大,因此要将 S_{SPA} 在 S_{GRA} 水平进行归一化处理,再将两种方法得出的结果进行比较才更具有参考价值。

②3种推理模型得出的结果基本表现一致,即案例1与目标案例最为相似。但同样存在差异,加权 GRA 推理模型得出在与目标案例的相似度比较

中,案例3比案例2低;集对分析推理模型则得出案例3比案例2高;组合案例推理模型得出案例2、3与目标案例相似度基本相同,组合推理模型的推理结果是两种单一推理模型结果的结合。

4.2 消耗量预测与结果对比

上文得出案例1与目标案例的相似度最高,选取飞行时间作为飞行任务航材消耗的关键特征因素,从表2可得案例1的航材消耗量 $C=30$,飞行时间 $K_s=150.6$ h,目标案例的飞行时间 $K_c=175.4$ h,通过式(15)即可求得目标案例的航材消耗量:

$$C_c = \frac{K_c}{K_s} \cdot C = 35 \quad (17)$$

为了直观地观察几种方法的预测准确率,将神经网络、灰色预测、指数平滑法、灰色神经网络、主成分分析与支持向量机方法与本文方法的预测准确率共同列于图3中进行对比。

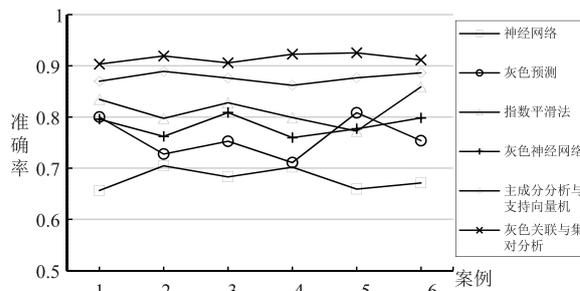


图3 预测结果对比

经过对比分析,可以得出以下结论:

①基于灰色关联与集对分析推理模型的预测方法准确程度更高。

②传统预测方法中,组合预测模型的准确率普遍比单一方法模型要高。

③传统预测方法的准确率波动程度更大,主要是因为保障的历史数据较少、保障过程中影响因素难以把控,随机性较强。

5 结束语

灰色关联理论与集对分析方法在处理因素间不确定关系上均具有优势。基于加权 GRA 的案例推理模型是依据保障任务数据,通过案例关联度进行推理。基于集对分析的案例推理模型是结合客观数据与主观经验,以案例相似度为基础进行推理。本文结合了两种推理模型的长处,构建了组合推理模型,并综合3种推理结果,得到与目标案例相似度最高的案例,最终预测出航材消耗量。充分考虑了主客观因素对预测结果的影响,控制调节二

者比例,并将3种推理结果相互印证,提高案例推理的精度,确保预测结果的可靠性与准确性。

参考文献:

- [1] 何亚群,柏林,赵福军,等. 航材供应学[M]. 徐州:空军勤务学院,2007.
- [2] 陈博,徐常凯,任佳成. 基于灰色神经网络的携行航材消耗预测[J]. 指挥信息系统与技术,2018,9(5):86-90.
- [3] 刘旭,周丽华,朱臣. 基于PCA-SVM的航材需求预测方法研究[J]. 舰船电子工程,2017,37(7):105-109.
- [4] 郭峰,刘臣宇,李卫灵. 基于指数平滑法的航材消耗定额预测研究[J]. 计算机与现代化,2012(9):163-165.
- [5] 张扬,胡勇,王红. 基于改进灰色预测模型的航材消耗预测[J]. 南方农机,2020,51(1):60-62.
- [6] 王艳艳,刘金波,孙志红. 基于B样条神经网络的新机航材备件消耗预测[J]. 舰船电子工程,2020,40(11):125-127,140.
- [7] 胡文倩,莫翠琼. 电子对抗装备物资需求预测模型研究[J]. 舰船电子对抗,2019,42(6):35-37,41.
- [8] 廖志文. 基于CBR与灰色关联度的财务危机预警

- [J]. 计算机工程,2012,38(1):174-176,179.
- [9] FDEZ-RIVEROLA F, CORCHADO J M. CBR based system for forecasting red tides[J]. Knowledge-Based Systems,2003,16(5/6):321-328.
- [10] 邓聚龙. 灰理论基础[M]. 武汉:华中科技大学出版社,2002.
- [11] 任耕饶. 基于集对分析的水资源系统预测方法及其应用[D]. 合肥:合肥工业大学,2017.
- [12] 王正新,党耀国,曹明霞. 基于灰熵优化的加权灰色关联度[J]. 系统工程与电子技术,2010,32(4):774-776,783.
- [13] 吴书金,汪涛,全琪,等. 基于灰色模糊推理的油料消耗预测[J]. 计算机测量与控制,2019,27(9):18-22.
- [14] 吴书金,汪涛,全琪. 基于模糊聚类和直觉模糊推理的合成旅油料需求预测[J]. 计算机系统应用,2019,28(12):205-211.
- [15] 邵雨晗,辛后居,崔阳,等. 基于粗糙集的航空装备作战消耗分析与预测[J]. 火力与指挥控制,2019,44(1):151-155.

(编辑:高明霞)

(上接第461页)

- [5] 全青,张铮,张为华,等. 拟态防御Web服务器设计与实现[J]. 软件学报,2017,28(4):883-897.
- [6] 王祺鹏,扈红超,程国振. 一种基于拟态安全防御的DNS框架设计[J]. 电子学报,2017,45(11):2705-2714.
- [7] 马海龙,伊鹏,江逸茗,等. 基于动态异构冗余机制的路由器拟态防御体系结构[J]. 信息安全学报,2017,2(1):29-42.
- [8] 魏帅,于洪,顾泽宇,等. 面向工控领域的拟态安全处理机架构[J]. 信息安全学报,2017,2(1):54-73.
- [9] 宋克,刘勤让,魏帅,等. 基于拟态防御的以太网交换机内生安全体系结构[J]. 通信学报,2020,41(5):18-26.
- [10] SHANNON C E, WEAVER W. The mathematical theory of communication[M]. Urbana: University of Illinois Press,1949.
- [11] 邬江兴. 网络空间内生安全-拟态防御与广义鲁棒控

制[M]. 北京:中国科学出版社,2020.

- [12] 苏昆仑,张铮,全青,等. 一种数据库离线表决与同步方案的设计和实现[J]. 信息工程大学学报,2018,19(1):114-117.
- [13] WANG Y W, WU J X, GUO Y F, et al. Scientific workflow execution system based on mimic defense in the cloud environment[J]. Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering,2018,19(12):1522-1536.
- [14] 刘彩霞,季新生,邬江兴. 一种基于MSISDN虚拟化的移动通信用户数据拟态防御机制[J]. 计算机学报,2018,41(2):275-287.
- [15] 徐蜜雪,苑超,王永娟,等. 拟态区块链——区块链安全解决方案[J]. 软件学报,2019,30(6):1681-1691.
- [16] LIN Z, LI K, HOU H, et al. MDFS: A mimic defense theory based architecture for distributed file system[C]//2017 IEEE International Conference on Big Data (Big Data),2017:2670-2675.

(编辑:李志豪)