

备件保障效能动态评估方法*

董骁雄^{1,2}, 车飞¹, 陈云翔¹, 何桢³, 朱强⁴

(1. 空军工程大学 装备管理与安全工程学院, 陕西 西安 710051;

2. 空军编余飞机储存中心, 河南 平顶山 467300;

3. 空军研究院, 北京 100085; 4. 空军指挥学院, 北京 100089)

摘要:针对目前效能评估方法多重视效能指标的静态观测值,对时序状态数据所蕴含的趋势信息关注较少的缺点,提出基于灰色聚类-粗糙集和集对分析的备件保障效能动态评估方法。针对主客观赋权方法各自的优缺点,引入依赖度和重要度的概念,建立灰色聚类-粗糙集组合赋权模型;将指标权重引入集对理论,提出集对同势、均势和反势的定义,描述备件保障效能的变化规律,构建基于马尔可夫链的集对分析动态模型。实例分析结果表明,该方法可以有效反映备件保障效能的动态变化特征,为决策者制定备件保障长期计划提供科学依据。

关键词:备件;保障效能;动态评估;灰色聚类;粗糙集;集对分析

中图分类号:0227 文献标志码:A 文章编号:1001-2486(2019)01-176-07

Dynamic evaluation methods for spare parts support effectiveness

DONG Xiaoxiong^{1,2}, CHE Fei¹, CHEN Yunxiang¹, HE Zhen³, ZHU Qiang⁴

(1. Equipment Management & Safety Engineering College, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China;

2. Air Force Surplus Aircraft Storage Center, Pingdingshan 467300, China;

3. Air Force Research Institute, Beijing 100085, China; 4. Air Force Command College, Beijing 100089, China)

Abstract: According to the fact that current effectiveness evaluation models lay more emphasis on the static observations of indicators and less on the trend information inherent in sequential observations, a new dynamic evaluation methods for spare parts support effectiveness based on grey clustering-rough set and set pair analysis was proposed. Compared with the subjective and the objective weight-deciding method's virtue and disadvantage, the weight of every index was decided by using grey clustering-rough set combinational method. By establishing the set of spare parts support effectiveness evaluation set pair, the dynamic variation law of the protection of spare parts was described by definition of set pair equal power balance power and opposite power. Based on Markov chain, the dynamic set pair model was analyzed. The results show that the model can reflect the spare parts support effectiveness dynamic characteristics effectively, giving the decision makers a scientific reference to develop a long-term plan for the support of spare parts.

Keywords: spares; support effectiveness; dynamic evaluation; grey clustering; rough set; set pair analysis

备件是部队“两成两力”(成建制、成体系形成作战能力和保障能力)建设的物质基础,对装备平时、战时保障都有深远影响^[1]。在当前武器装备日益复杂、更新换代速度不断加快、备件价格急剧攀升的背景下,备件保障工作直接影响着装备完好率、任务成功性以及寿命周期费用,其重要性毋庸置疑^[2]。

针对备件保障效能评估问题,国内外学者开展了大量研究,主要分为两类:一是对备件保障效能评估指标体系构建的研究,如文献[3-4];二

是采用多种评估方法对备件保障效能进行评估,如数据包络分析(Data Envelopment Analysis, DEA)方法^[5]、层次分析方法^[6]、灰色关联分析方法^[7]、集对理论^[8]、效用函数方法^[9]等,上述方法在对备件效能指标的观测值进行融合的过程中,并未利用效能评估过程所包含的趋势信息,属于静态评估,相应的效能指标只能反映当前的保障态势,无法描述备件保障水平的发展趋势。而保障效能趋势能够较为准确地反映一段时间内的备件保障水平的变化情况,将有助于为决策者制定

* 收稿日期:2018-02-28

基金项目:国家自然科学基金资助项目(71601183)

作者简介:董骁雄(1990—),男,陕西西安人,博士研究生,E-mail:zzz_699699@126.com;

车飞(通信作者),男,讲师,博士,E-mail:chefeil25896@163.com

备件保障长期计划提供科学依据。在备件保障效能评估中引入这一信息,可以提高备件保障效能评估的合理性。目前,对于备件保障效能的动态评估的研究还比较缺乏,在效能评估领域,还没有研究灰色聚类-粗糙集(Grey Clustering-Rough Set, GC-RS)和集对分析(Set Pair Analysis, SPA)方法组合使用的文献。

1 备件保障效能指标体系构建

综合考虑组织管理对备件保障效能的深层次影响,结合航空兵部队备件保障任务要求,将影响备件保障效能的因素划分为任务指标、经费指标和管理指标 3 个一级指标。并参照文献[8,10],在遵循体系化、唯一性、客观性、严格性和前瞻性原则的前提下,采用 Delphi 法得到以下 16 个二级指标,如表 1 所示。

表 1 备件保障效能指标集

Tab.1 Indicator system of spare parts support effectiveness

一级指标	二级指标
任务指标	年度工作时间 D_1
	装备完好率 D_2
	战斗出动强度 D_3
	战斗出动率 D_4
管理指标	备件供应良好率 D_5
	备件供应满足率 D_6
	平均缺件数 D_7
	备件下送率 D_8
	备件供应期限 D_9
	备件消耗率 D_{10}
	备件周转率 D_{11}
经费指标	备件修复品利用率 D_{12}
	备件损耗率 D_{13}
	废旧备件回收率 D_{14}
	备件库存价值总额 D_{15}
	仓库空间利用率 D_{16}

2 备件保障效能动态评估方法

2.1 基于 GC-RS 的属性权重确定方法

确定权重的方法主要包括主观赋权方法和客观赋权方法,主观赋权法有层次分析(Alytic Hierarchy Process, AHP)法、Delphi 法等,客观赋权法有粗糙集方法^[11]、灰色聚类方法^[12]和熵权

法^[13]等。其中:主观赋权法具有一定的主观随意性,影响决策的准确性和可靠性;客观赋权法是充分利用原始数据计算权重的方法,虽避免了赋权的主观随意性,但是在计算权重时存在相应的不足。

灰色聚类方法在处理信息时一般没有系统信息的损失,但无法确定基于客观信息的系统各属性的权重,并且采用灰色评价时通常需要提供先验的权重分配。粗糙集则不需要提供先验信息,并且提供了确定权重的方法,但它在处理数据时采用区间划分方法忽略了较多的系统信息。将二者的优缺点互补,采用灰色聚类-粗糙集组合方法确定各指标的权重。

假设评价对象用 $X_i (i = 1, 2, \dots, n, n$ 为评价指标个数) 表征,其 m 个指标构成的集合为 $F = (p_1, p_2, \dots, p_m)^T$ 。

权重确定的步骤为:

步骤 1: 确定需要处理的样本对象,抽取样本指标数据。

记样本 j 的指标值为 $X_j = (X_{1j}, X_{2j}, \dots, X_{mj})$ ($j = 1, 2, \dots, n$) 可以构造出矩阵 X :

$$X = (X_1, X_2, \dots, X_n) = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \dots & x_{mn} \end{bmatrix}$$

步骤 2: 采用灰色聚类方法分析样本指标聚类。

1) 归一化处理,为了进行聚类分析,需要使数据规格化,即具有统一的量纲和数量级,对指标值 $X_j = (X_{1j}, X_{2j}, \dots, X_{mj})$ ($j = 1, 2, \dots, n$) 归一化处理得到标准化矩阵。

2) 建立灰色关联关系,确定样本之间的灰色关联度 r_{ij} 。对于系统行为序列 $X_j = (X_{1j}, X_{2j}, \dots, X_{mj})$ ($j = 1, 2, \dots, n$), 则 $X_i, X_j (i \leq j)$ 的灰色绝对关联度 r_{ij} ^[7-9] 为:

$$r_{ij} = \frac{1 + |s_i| + |s_j|}{1 + |s_i| + |s_j| + |s_i - s_j|} \quad (1)$$

式中:

$$|s_i| = \left| \sum_{k=2}^{n-1} u_{ki} + \frac{1}{2}u_{ni} \right| \quad (2)$$

$$|s_i - s_j| = \left| \sum_{k=2}^{n-1} (u_{ki} - u_{kj}) + \frac{1}{2}(u_{ni} - u_{nj}) \right| \quad (3)$$

灰色绝对关联度 r_{ij} 具有以下性质^[10]: ① $0 < r_{ij} \leq 1$; ② r_{ij} 只与其 X_i, X_j 的几何形状有关,而与其空间位置无关; ③ 任何两个序列都不是绝对无关

的;④ X_i, X_j 几何上相似程度越大, r_{ij} 越大。

这样就可以得到如下三角矩阵:

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1m} \\ & r_{22} & \cdots & r_{2m} \\ & & \ddots & \vdots \\ & & & r_{mm} \end{bmatrix}$$

称这个矩阵为样本的灰色关联矩阵。采用聚类分析^[7]中的直接聚类法进行聚类,将 R 中除了对角线元素以外的所有互不相同的元素按照从大到小的顺序编排,并表示为:

$$1 = \theta_1 > \theta_2 > \theta_3 \cdots \quad (4)$$

取聚类阈值 $\theta = \theta_k \in [0, 1]$, 当

$$r_{ij} \geq \theta_k \quad (i \neq j) \quad (5)$$

则认为 X_i 和 X_j 具有相同特性并将其分为一类。聚类阈值 θ 的取值不同,分类结果也就不同, θ 越接近 1,分类就越细。

设 B_1, B_2 是聚类阈值为 θ_k 时的两个类,若

$$B_1 \cap B_2 \neq \emptyset \quad (6)$$

则称它们是相似的。将所有相似的类合并成一类,最后得到的分类就是聚类阈值为 θ_k 时的等价分类。

3) 根据灰色关联矩阵确定适当的阈值范围 $a_k (k = 1, 2, \dots, p)$, 在各阈值范围内进行分类,其中 p 为由阈值范围确定的置信水平个数。以阈值范围的高端为标识 $a_k (k$ 根据阈值的大小确定), 记录采用不同阈值范围时各类包含的元素的名称及个数,分别记为 $C_i (i = 1, 2, \dots, k)$ 。

步骤 3: 采用粗糙集方法确定指标 $a_k (k = 1, 2, \dots, p)$ 的综合重要度。

1) 删除指标 $X_i (i = 1, 2, \dots, n)$, 重复步骤 2, 根据在未删除指标时确定的阈值对其重新分类,并将分类结果与原始分类对比,初步判定指标 X_i 对分类的影响。

2) 采用粗糙集理论求得指标值 $X_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 在某一个置信水平 a_k 下的重要度。

定义 1 给定知识库 $K = (U, R)$, 对 $X \neq \emptyset$ 且 $X \subseteq U$, 一个等价关系 $R \in ind(K)$ 。称 $\underline{R}(X) = \cup \{Y \in U/R \mid Y \subseteq X\}$ 为 X 关于 R 的下近似, 称 $POS_C(D) = \cup_{X \in U/D} \underline{R}(X)$ 为等价类 U/D 关于 C 的正域。

定义 2 (信息系统) $S = (U, A, V, f)$, 其中 U 是对象的非空有限集合, $A = C \cup D$ 是属性的非空有限集合, 其中 C 是条件属性的非空有限集, D 是决策属性的非空有限集合, V 是 A 的属性值集合, 且 $C \cap D \neq \emptyset$, 则 C 与 D 的依赖程度为:

$$\gamma_c(D) = \frac{card(POS_c(D))}{card(U)} \quad (7)$$

根据式(3)可得某一置信水平 a_k 下, 指标 l 的重要度:

$$Sig_{CD_{a_k}}(C_l) = \gamma_c(D) - \gamma_{c-c_l}(D) \quad (8)$$

式中: 条件属性 C 为样本指标集合; D 为决策属性集, 指考察样本的灰色聚类标识。

考虑进行灰色聚类时, 不同的阈值水平也是不同的置信水平, 将 p 个置信水平结合起来考虑, 各指标的综合重要度为:

$$Sig(C_l) = \left\{ \sum_{k=1}^p [a_k \times Sig_{CD_{a_k}}(C_l)] \right\} / p \quad (9)$$

根据综合重要度的大小确定指标 l 的权重:

$$w_l = Sig(C_l) / \sum_{l=1}^m Sig(C_l) \quad (10)$$

式中, $0 \leq w_j \leq 1, \sum_{j=1}^n w_j = 1$ 。

2.2 基于动态 SPA 的评估方法

集对分析是从同、异、反三个方面研究两个集合之间的相互关系的系统分析方法。基本思想是将某一问题中的确定和不确定特性作为一个系统, 分析两者之间的关系, 并通过联系度的概念进行数学描述。

对于两个给定集合组成的集对 $\{A, B\}$, 在某个具体问题 W 中进行分析, 共得到 N 个特性, 其中 S 为集对相同特性数, Q 为集对对立特性数, P 为集对中既不对立也不相同的特性数, 那么此集对的联系度通用表达式^[14]为:

$$\mu = a + bi + cj = \frac{S}{N} + \frac{P}{N}i + \frac{Q}{N}j, i \in [-1, 1], j = -1 \quad (11)$$

式中: μ 称为集对 $\{A, B\}$ 在问题 W 中的联系度; $\frac{S}{N}, \frac{P}{N}, \frac{Q}{N}$ 分别称为集对的同一度、差异度和对立度; i 为避免差异度符号或相应系数, 取值为 $[-1, 1]$; j 为对应符号或相应系数, 取值为 -1 。可以看出, 集对分析的优势在于将相对确定的数 $\frac{S}{N}, \frac{Q}{N}j$ 和相对不确定的数 $\frac{P}{N}, i$ 辩证统一于一个数学表达式。因此可以利用该式描述一个特定系统的不确定程度。

SPA 理论用于备件保障效能评估时, 可将保障效能评估指标体系和保障效能状态等级视为一个集对。采用集合 A 表示保障效能评估指标体系, 集合 B 表示保障效能状态等级, 则集合 A 和集合 B 可构成保障效能评估集对 $H = (A, B)$ 。在此基础上, 将 2.1 节确定的指标权重引入 SPA,

依此来描述备件保障效能联系度。

由于备件保障效能具有实时动态性,且各评估指标对备件保障效能的影响具有不确定性。因此,在进行备件保障效能评估时,应充分考虑装备以及各评估指标随时间变化的情况。为方便研究,将备件保障效能的等级分为 Y 、 L 、 C 三级,分别表示优、良、差。按照“均分原则”取值,取 $i = 0, j = -1$, 则联系度 $\mu_{AB}^{(t)} \in [-1, 1]$ 。此时,联系度(数)所对应的保障效能等级见表 2。

表 2 保障效能评估等级

Tab.2 Support effectiveness assessment level

等级	联系度
优(Y)	$0.333 \leq \mu \leq 1$
良(L)	$-0.333 \leq \mu < 0.333$
差(C)	$-1 \leq \mu < -0.333$

由此,假设在 t 时刻,16 个备件保障效能评估指标中有 Y_i 个指标的保障效能等级为优(Y), L_i 个指标的保障效能等级为良(L), C_i 个指标的安全等级为差(C),且满足 $Y_i + L_i + C_i = 16$ 。根据式(4),将 16 个评估指标仍按优(Y)、良(L)、差(C)3 个等级进行排序编号,且各评估指标在 t 时刻重新排序后所对应的权重为 $w_k(t)$,则 t 时刻的保障效能动态联系度可表述为式(12)^[15]。

$$\mu_{AB}^{(t)} = a^{(t)} + b^{(t)}i + c^{(t)}j$$

$$= \sum_{k=1}^{Y_i} w_k^{(t)} + \sum_{k=Y_i+1}^{Y_i+L_i} w_k^{(t)}i + \sum_{k=Y_i+L_i+1}^{13} w_k^{(t)}j \quad (12)$$

式中, $\sum_{k=1}^{Y_i} w_k^{(t)} + \sum_{k=Y_i+1}^{Y_i+L_i} w_k^{(t)} + \sum_{k=Y_i+L_i+1}^{13} w_k^{(t)} = 1$ 。

当联系度 $\mu = a + bi + cj$ 中的 $c \neq 0$ 时,同一度 a 与对立度 c 的比值 a/c 称为所论集对在指定问题背景下的集对势,等价于 Y/C ,即

$$shi(H) = \frac{a}{c} = \frac{Y}{C} \quad (13)$$

进而定义集对同势为:

$$shi(H) = \frac{a}{c} = \frac{Y}{C} > 1 \quad (14)$$

集对反势为:

$$shi(H) = \frac{a}{c} = \frac{Y}{C} < 1 \quad (15)$$

集对均势为:

$$shi(H) = \frac{a}{c} = \frac{Y}{C} = 1 \quad (16)$$

系统的能力状态是动态变化的,从联系度中差异度 i 的不同取值可以看出,系统的态势也是一个动态变化的过程,但在一定条件下会趋于一个

稳态值。随着时间的改变,条件也发生了变化,态势也随之变化。集对势是以 $shi(H) = 1$ 为均势,是同势与反势的分界线。为进一步说明备件保障效能变化趋势,根据评估指标的 3 个等级(Y, L, C)相关信息,按照排列组合的原理,将备件保障效能的动态变化情形进行排序,结果见表 3。

表 3 备件保障效能等级排序

Tab.3 Ranking of spare parts support effectiveness levels

Y, L, C 大小关系	集对势	保障效能等级
$Y > C, Y > L, L > C$	极强同势	优
$Y > C, Y > L, L = C$	强同势	优
$Y > C, Y > L, L < C$	较强同势	优
$Y > C, Y = L, L > C$	较弱同势	优
$Y > C, Y < L, L > C$	弱同势	良
$Y = C, Y > L, L < C$	强均势	良
$Y = C, Y = L, L = C$	等均势	良
$Y = C, Y < L, L > C$	弱均势	良
$Y < C, Y > L, L > C$	弱反势	差
$Y < C, Y = L, L > C$	较弱反势	差
$Y < C, Y < L, L > C$	较强反势	差
$Y < C, Y < L, L = C$	强反势	差
$Y < C, Y < L, L < C$	极强反势	差

根据表 3 中保障效能动态变化趋势特点,备件保障单位可根据不同的变化趋势采取相应的预防对策措施,有针对性地减少和避免对保障效能有影响的危险。

若集对 $\{A, B\}$ 在 $(t, t + \tau)$ 期间(τ 为变化周期)原有指标值的同异反关系发生了变化,有的指标值保持不变,而有的则发生了变化。不妨设在 $t + \tau$ 时刻,集对中原有的 S_i 个相同特性中仍有 S_{i1} 个相同, S_{i2} 个变为既不相同也不对立, S_{i3} 个变为相互对立($S_{i1} + S_{i2} + S_{i3} = S_i$),则 S_i 在 $(t, t + \Delta t)$ 周期内的转移向量(经规范化处理)为:

$$S = (P_{11}, P_{12}, P_{13})$$

$$= \frac{\left(\sum_{k=1}^{S_{i1}} \omega_k^{(t)}, \sum_{k=S_{i1}+1}^{S_{i1}+S_{i2}} \omega_k^{(t)}, \sum_{k=S_{i1}+S_{i2}+1}^{S_i} \omega_k^{(t)} \right)}{\alpha^{(t)}} \quad (17)$$

式中, $P_{11} + P_{12} + P_{13} = 1, \alpha^{(t)} = \sum_{k=1}^{S_i} \omega_k^{(t)}$ 。

同理,可得转移向量 P 和 Q 。

在 $(t, t + \Delta t)$ 期间的转移矩阵为 M ,在 $t + \Delta t$ 时刻,备件保障效能的联系度为:

$$\mu(t + \Delta t) = a^{(t+\Delta t)} + b^{(t+\Delta t)}i + c^{(t+\Delta t)}j$$

$$= (a^{(t+\Delta t)}, b^{(t+\Delta t)}, c^{(t+\Delta t)}) \cdot M \cdot (1, i, j)^T \quad (18)$$

依据马尔可夫链的遍历性可知,随着变化周期 n 的递增, \mathbf{M} 将趋于稳定,因此,备件保障效能最终会达到一个稳态。根据联系度的归一化要求,联立可得备件保障效能评估稳态值。

$$\begin{cases} (\hat{a}, \hat{b}, \hat{c}) \cdot (\mathbf{I} - \mathbf{M}) = 0 \\ \hat{a} + \hat{b} + \hat{c} = 1 \end{cases} \quad (19)$$

其中: $\hat{a}, \hat{b}, \hat{c} \geq 0$; \mathbf{I} 为单位矩阵。

求解此方程便可得到备件保障效能评估稳

$$\mathbf{D} = (d_{kr})_{m \times n} = \begin{pmatrix} 20.698 & 0.744 & 4 & 1 & 0.901 & 4 & 0.914 & 8 & 0.894 & 1 & 0.057 & 1 & 0.867 & 1 & 23 & 1.2 & 1.25 & 0.653 & 5 & 0.032 & 5 & 0.960 & 5 & 30 & 102 & 634 & 0.900 & 6 \\ 18 & 562 & 0.814 & 1 & 0.5 & 0.858 & 4 & 0.843 & 5 & 0.884 & 3 & 0.085 & 3 & 0.852 & 8 & 24 & 1.8 & 1.57 & 0.786 & 2 & 0.010 & 2 & 0.910 & 5 & 25 & 255 & 408 & 0.954 & 5 \\ 19 & 718 & 0.803 & 7 & 0.3 & 0.803 & 0 & 0.978 & 7 & 0.852 & 6 & 0.073 & 7 & 0.756 & 4 & 23 & 1.7 & 1.76 & 0.763 & 6 & 0.011 & 8 & 0.984 & 7 & 22 & 762 & 622 & 0.874 & 2 \\ 21 & 258 & 0.795 & 3 & 1 & 0.833 & 3 & 0.932 & 7 & 0.926 & 3 & 0.056 & 4 & 0.803 & 6 & 22 & 1.6 & 0.98 & 0.667 & 1 & 0.009 & 8 & 0.993 & 3 & 27 & 106 & 049 & 0.850 & 8 \\ 19 & 737 & 0.788 & 6 & 0.25 & 0.805 & 8 & 0.887 & 5 & 0.751 & 5 & 0.076 & 8 & 0.806 & 2 & 28 & 1.6 & 1.49 & 0.705 & 2 & 0.030 & 1 & 0.976 & 3 & 23 & 907 & 467 & 0.887 & 2 \end{pmatrix}$$

对上述原始决策矩阵进行归一化并采用灰色聚类方法对指标值进行聚类分析,得到灰色关联矩阵 \mathbf{F} 。

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} 1 & 0.206 & 8 & 0.736 & 1 & 0.963 & 1 & 0.735 & 4 \\ 0.206 & 8 & 1 & 0.459 & 1 & 0.226 & 7 & 0.443 & 7 \\ 0.736 & 1 & 0.459 & 1 & 1 & 0.745 & 1 & 0.969 & 5 \\ 0.963 & 1 & 0.226 & 7 & 0.745 & 1 & 1 & 0.734 & 7 \\ 0.735 & 4 & 0.443 & 7 & 0.969 & 5 & 0.734 & 7 & 1 \end{bmatrix}$$

设置不同的阈值,得到如表 4 所示的分类结果。

表 4 灰色聚类结果

Tab. 4 Grey clustering results

阈值	聚类结果
$0 \leq \alpha \leq 0.459$	{A, B, C, D, E}
$0.459 \leq \alpha \leq 0.745$	{B}、{A, C, D, E}
$0.745 \leq \alpha \leq 0.963$	{A, D}、{C, E}、{B}
$0.963 \leq \alpha \leq 0.969$	{C, E}、{B}、{A}、{D}
$0.969 \leq \alpha \leq 1$	{A}、{B}、{C}、{D}、{E}

运用粗糙集方法确定指标 $D_i (i = 1, 2, \dots, 16)$ 的综合重要度。

删除指标 D_1 “年度总飞行时间”,重复灰色聚类过程,将聚类结果与原始聚类结果比较,初步确定指标 D_1 对聚类的影响程度。

根据综合重要度的定义,运用式(8)~(10)得到指标 D_1 的权重为 0.092 3,同理可得 D_2 的权重为 0.108 7, D_3 的权重为 0.042 6, D_4 的权重为 0.043 3, D_5 的权重为 0.102 5, D_6 的权重为 0.091 3, D_7 的权重为 0.067 5, D_8 的权重为 0.052 3,

态值:

$$\hat{\mu} = \hat{a} + \hat{b}i + \hat{c}j, i \in [-1, 1], j = -1 \quad (20)$$

3 实例分析

以文献[8]中的算例为例作深入分析,由文献[8]的算例得到 A、B、C、D、E 五个备件保障单位的指标值决策矩阵 \mathbf{D} 。

D_9 的权重为 0.042 8, D_{10} 的权重为 0.042 3, D_{11} 的权重为 0.062 8, D_{12} 的权重为 0.053 4, D_{13} 的权重为 0.072 1, D_{14} 的权重为 0.032 1, D_{15} 的权重为 0.056 4, D_{16} 的权重为 0.037 6。

采集到备件基层保障单位(A)2011—2016 年各年度的备件保障相关数据,如表 5 所示,对该单位备件保障效能进行动态评估。

根据式(12)和表 3 可得出备件保障单位 A 备件保障效能各年度的联系度为。

表 5 备件保障效能评估数据

Tab. 5 Spares support effectiveness evaluation data

指标	权重	年份					
		2011	2012	2013	2014	2015	2016
D_1	0.092 3	Y	Y	L	L	Y	C
D_2	0.108 7	C	Y	L	C	Y	Y
D_3	0.042 6	Y	Y	L	L	L	C
D_4	0.043 3	L	Y	L	Y	C	Y
D_5	0.102 5	C	L	Y	L	C	L
D_6	0.091 3	Y	Y	L	C	L	L
D_7	0.067 5	L	C	L	Y	Y	C
D_8	0.052 3	L	Y	C	L	Y	C
D_9	0.042 8	Y	Y	Y	L	L	Y
D_{10}	0.042 3	L	L	L	C	C	Y
D_{11}	0.062 8	Y	L	C	C	Y	L
D_{12}	0.053 4	Y	Y	L	L	C	C
D_{13}	0.072 1	C	C	L	L	Y	Y
D_{14}	0.032 1	L	Y	Y	L	C	Y
D_{15}	0.056 4	Y	L	C	C	Y	L
D_{16}	0.037 6	Y	Y	L	L	C	C

$$\begin{aligned} \mu_{2011} &= 0.4792 + 0.2375i + 0.2833j \\ \mu_{2012} &= 0.5964 + 0.264i + 0.1396j \\ \mu_{2013} &= 0.1774 + 0.6511i + 0.1715j \\ \mu_{2014} &= 0.1108 + 0.5277i + 0.3615j \\ \mu_{2015} &= 0.5121 + 0.1767i + 0.3112j \\ \mu_{2016} &= 0.3413 + 0.313i + 0.3457j \end{aligned}$$

依据式(13)~(17)可得各年度备件保障效能状态转移矩阵。

$$M_{2011-2012} = \begin{bmatrix} 0.7513 & 0.2487 & 0 \\ 0.2284 & 0.4071 & 0.3645 \\ 0.2545 & 0.3618 & 0.3837 \end{bmatrix}$$

$$M_{2012-2013} = \begin{bmatrix} 0.1256 & 0.7867 & 0.0877 \\ 0.1602 & 0.3883 & 0.4515 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$M_{2013-2014} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0.4577 & 0.1702 & 0.3721 \\ 0.6950 & 0.3050 & 0 \end{bmatrix}$$

$$M_{2014-2015} = \begin{bmatrix} 0.6092 & 0 & 0.3908 \\ 0.1619 & 0.4106 & 0.4275 \\ 0.1170 & 0.2526 & 0.6304 \end{bmatrix}$$

$$M_{2015-2016} = \begin{bmatrix} 0.3531 & 0.2328 & 0.4141 \\ 0.5167 & 0.2422 & 0.2411 \\ 0.2924 & 0.3294 & 0.3782 \end{bmatrix}$$

假设备件保障效能的年转移矩阵权重相同,得到加权平均转移矩阵:

$$G = \begin{bmatrix} 0.3678 & 0.4536 & 0.1786 \\ 0.3050 & 0.3237 & 0.3713 \\ 0.2718 & 0.4497 & 0.2785 \end{bmatrix}$$

依据式(18)可以预测 2017 年的备件保障效能:

$$\begin{aligned} \mu_{2017} &= \mu_{2016} \cdot G \cdot (1, i, j)^T \\ &= 0.3150 + 0.4116i + 0.2735j \end{aligned}$$

一般情况下,通过加强备件保障管理,备件保障效果最后会呈现一个平稳态势。假设平均转移概率矩阵 G 不变,代入式(19)得到备件保障单位 A 的稳态备件保障效能。

$$\mu = 0.287 + 0.397i + 0.316j$$

利用各年及稳态时联系数表达式计算出集对势值。得到各年集对势值、集对势及保障效能等级,如表 6 所示,集对势值的动态变化情况如图 1 所示。

从图 1 和表 6 的结果可以看出,备件保障单位 A 的备件保障水平开始呈现优化态势,随后逐年下降,在势级上发展态势呈现从强同势到强反势的转变,且按照目前的发展趋势最终可以达到集对势水平为 0.91 的较强反势发展稳态。备件

保障单位 A 应当重视备件保障效能降低的危险,结合表 1 构建的指标体系查找原因,及时整改。

表 6 各年度备件保障效能等级

Tab.6 Annual spare parts support effectiveness level

年份	集对势值	集对势	保障效能等级
2011	1.69	较强同势	优
2012	4.29	极强同势	优
2013	1.03	弱同势	良
2014	0.31	较强反势	差
2015	1.65	较强同势	优
2016	0.99	弱反势	差
2017	1.15	弱同势	良
稳态	0.91	较强反势	差

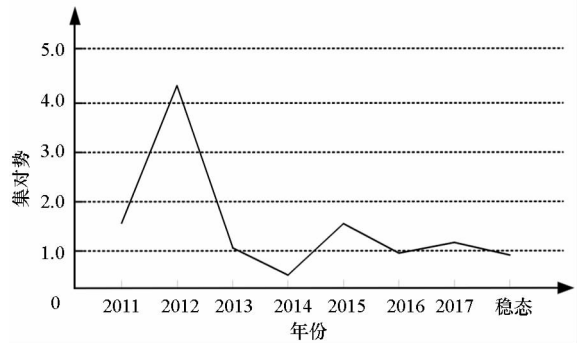


图 1 备件保障效能趋势图

Fig.1 Spare parts support effectiveness trend

通过以上结论得到如下启示和建议:提升备件保障效能是一项艰巨和持续的任务,个别时段的高表现和高增长态势并不能完全反映备件保障效能发展的客观水平,要求备件管理部门要时刻关注备件保障效能,确保备件保障效能处于良好态势。

对比文献[8]只能得到备件保障单位的备件保障效能静态评估结果,根据当前备件保障水平,提出建议。提出的方法可以反映备件保障效能动态变化过程,使决策者能够掌握备件保障单位在评估时段内备件保障水平的发展趋势,为决策者提高备件保障效能提供更加全面灵活的决策依据。

4 结论

1) 针对主观赋权方法和客观赋权方法各自的优缺点,通过引入依赖度和重要度的概念,对指标体系中的指标综合重要性进行了定义,提出基于灰色聚类-粗糙集的指标赋权方法,有效解决

了备件保障效能评估指标赋权问题。

2) 备件保障效能是一个动态变化过程, 将指标权重引入集对分析, 提出集对动态联系度的概念, 将备件保障效能划分为集对同势、均势和反势, 建立基于马尔可夫的集对分析动态模型。该方法可以直接对各时期备件保障效能评估值进行比较, 极大方便了决策者对备件保障单位在评估时段内备件保障水平发展趋势的掌握, 可以为决策者制定备件保障长期计划提供科学依据。

参考文献 (References)

[1] 全军军事术语管理委员会. 中国人民解放军军语[Z]. 北京: 军事科学出版社, 2011.
Army Military Terminology Management Committee. The Chinese people's liberation army troops[Z]. Beijing: Military Science Press, 2011. (in Chinese)

[2] 秦永盛, 肖江海, 段刚, 等. 海军航空兵航材保障能力评估指标体系研究[J]. 价值工程, 2015, 23(3): 210-212.
QIN Yongsheng, XIAO Jianghai, DUAN Gang, et al. Research on the evaluation index system of naval parts support capability[J]. Value Engineering, 2015, 23(3): 210-212. (in Chinese)

[3] 龙军, 康晓明, 程海龙, 等. 航材供应保障评估指标体系研究[J]. 航空维修与工程, 2008(2): 55-57.
LONG Jun, KANG Xiaoming, CHENG Hailong, et al. Study on index system for air materiel supply support assessment[J]. Aviation Maintenance and Engineering, 2008(2): 55-57. (in Chinese)

[4] 刘永红, 谢骏. 基于 DEA 的随船备件保障方案评价方法[J]. 装备制造技术, 2015(11): 222-223, 225.
LIU Yonghong, XIE Jun. Evaluation method for warship spare parts scheme based on DEA method [J]. Equipment Manufacturing Technology, 2015(11): 222-223, 225. (in Chinese)

[5] 王嫣, 韩庆田, 张毅. 基于层次分析法的仓库航材保障能力评估研究[J]. 价值工程, 2015, 15(3): 8-10.
WANG Yan, HAN Qingtian, ZHANG Yi. Study on aerial material support ability evaluation of storage based on AHP[J]. Value Engineering, 2015, 15(3): 8-10. (in Chinese)

[6] 郑瑶, 席泽敏, 许杰. 基于灰色关联分析的备件保障能力评估方法[J]. 四川兵工学报, 2014, 35(3): 62-64.
ZHENG Yao, XI Zemin, XU Jie. Spares support capability evaluation based on the grey correlation analysis[J]. Journal of Sichuan Ordnance, 2014, 35(3): 62-64. (in Chinese)

[7] 车飞, 陈云翔, 王莉莉. 基于集对分析的航材保障效能评估[J]. 火力与指挥控制, 2009, 34(11): 141-143.
CHE Fei, CHEN Yunxiang, WANG Lili. Effectiveness evaluation of air material support based on set pair

analysis[J]. Fire Control & Command Control, 2009, 34(11): 141-143. (in Chinese)

[8] 陈效平, 车飞, 薛如玲. 基于集对理论的航材保障效能分析及评估[J]. 兵工自动化, 2010, 29(5): 50-53.
CHEN Xiaoping, CHE Fei, XUE Ruling. Effectiveness analysis and evaluation of air material support based on set pair theory [J]. Ordnance Industry Automation, 2010, 29(5): 50-53. (in Chinese)

[9] 郑金忠, 陆四海, 李友虎. 基于效用函数的航材保障效能评估[J]. 物流技术, 2007, 26(8): 246-248.
ZHENG Jinzhong, LU Sihai, LI Youhu. Evaluation of air materials support effectiveness based on utility function[J]. Logistics Technology, 2007, 26(8): 246-248. (in Chinese)

[10] 任敏, 陈全庆, 沈震. 备件供应学[M]. 北京: 国防工业出版社, 2013: 179-182.
REN Min, CHEN Quanqing, SHEN Zhen. Spare parts supply [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2013: 179-182. (in Chinese)

[11] 陈鑫彭, 李冠宇, 刘彦含. 基于决策依赖度的粗糙集约简模型研究[J]. 系统工程理论与实践, 2016, 36(2): 505-516.
CHEN Xinying, LI Guanyu, LIU Yanhan. Research on rough set reduction model based on decision dependency degree[J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2016, 36(2): 505-516. (in Chinese)

[12] 潘显俊, 张炜, 赵田, 等. 分数阶离散灰色模型及其在备件需求预测中的应用[J]. 兵工学报, 2017, 38(4): 785-792.
PAN Xianjun, ZHANG Wei, ZHAO Tian, et al. Fractional order discrete grey model and its application in spare parts demand forecasting [J]. Acta Armamentarii, 2017, 38(4): 785-792. (in Chinese)

[13] 陈云翔, 董骁雄, 项华春, 等. 基于信息熵的群组聚类组合赋权法[J]. 中国管理科学, 2015, 23(6): 142-146.
CHEN Yunxiang, DONG Xiaoxiong, XIANG Huachun, et al. Method for combination weighting experts based on information entropy and cluster analysis [J]. Chinese Journal of Management Science, 2015, 23(6): 142-146. (in Chinese)

[14] 张卫, 李仁旺, 石先蔚, 等. 基于集对分析的制造服务需求动态挖掘方法[J]. 计算机集成制造系统, 2016, 22(1): 62-69.
ZHANG Wei, LI Renwang, SHI Xianwei, et al. Dynamic mining method of manufacturing services demand based on set pair[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2016, 22(1): 62-69. (in Chinese)

[15] 徐建中, 吕希深. 基于动态集对分析模型的中国制造业低碳化发展测评研究[J]. 科技管理研究, 2015(5): 49-55.
XU Jianzhong, LYU Xishen. Measurement and evaluation on low-carbon level based development of chinese manufacturing dynamic set pair analysis model[J]. Science and Technology Management Research, 2015(5): 49-55. (in Chinese)