

doi: 10.7690/bgzdh.2020.07.010

基于可拓熵权法的飞机战伤抢修评估应用

刘保军¹, 蔡理², 张爽¹, 罗湘燕¹, 周平¹

(1. 空军工程大学航空机务士官学校, 河南 信阳 464000; 2. 空军工程大学基础部, 西安 710051)

摘要: 为解决飞机战伤抢修效能评估体系中合理量化定性指标的问题, 提出一种确定指标权重的可拓熵权法。根据可拓区间数及其运算规则, 利用可拓理论对熵权法进行改进, 将熵权法和可拓理论有效结合, 通过考虑量化定性指标存在的不确定性, 建立飞机战伤抢修效能评估模型, 基于基准可拓区间来对指标的熵权进行排序, 并在飞机战伤抢修效能评估中进行应用验证。结果证实了该模型的合理性和可行性。

关键词: 战伤抢修; 评估; 可拓; 熵权

中图分类号: TJ07 **文献标志码:** A

Aircraft Battle Damage Repair Efficiency Assessment Application Based on Extension Entropy Weight Method

Liu Baojun¹, Cai Li², Zhang Shuang¹, Luo Xiangyan¹, Zhou Ping¹

(1. Aviation Maintenance Petty Officer Academy, Air Force Engineering University, Xinyang 464000, China;

2. Department of Basic Science, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

Abstract: In order to solve the problem of quantize qualitative indexes in the evaluation system of aircraft battle damage repair (ABDR) efficiency properly, an extension entropy weight method is proposed to achieve scientific and objective indexes' weights. According to extension interval number and its operation rules, the entropy weight method is improved by the extension theory. In view of the shortage of the entropy weight method, combined with extension theory, considering the uncertainty of quantizing qualitative indexes, ABDR efficiency assessment model is proposed. Based on benchmark extension interval, the entropy weight of the indexes is sorted. The proposed model is validated by the application of ABDR efficiency assessment. The results indicate that the model is effective and feasible.

Keywords: battle damage repair; assessment; extension; entropy weight

0 引言

历史统计资料表明, 现代战争中, 飞机的战伤数量与战损数量之比呈上升趋势^[1-2]。通过实施飞机战伤抢修, 可增加飞机出动架次, 弥补战争损耗, 补充战斗实力^[3-5]; 因此, 飞机战伤抢修是高技术局部战争中损伤飞机“再生”的最佳途径, 是现代战争夺取制空权的重要保障^[4-5]。战伤抢修效能评估是飞机进行抢修决策和资源优化配置的基础^[4], 对飞机的抢修性设计、生存力的提升等具有重要意义^[5]。

熵权法^[6-8]是一种根据指标数据提供的信息量对指标进行客观赋权的方式来确定指标的权重, 从而减少了主观因素的影响, 使确定的指标权重更符合实际。熵权法在构建评价矩阵时, 需要对定性指标进行量化, 量化时并没有考虑专家判断的模糊性; 因此, 把定性指标本来就模糊的量明显化, 或者变成毫无弹性的硬指标则不太合理。可拓学^[9-10]能根据事物关于特征的量值来判断事物属于某集合的程

度, 而采用扩展到 $(-\infty, +\infty)$ 的关联函数值能使评价精细化、定量化, 为从变化的角度解决方案评价的问题提供途径。笔者针对熵权法在量化定性指标方面存在的不足, 结合可拓学, 提出一种可拓熵权法来确定指标的权重, 并将其应用于飞机战伤抢修评估指标权重的确定中。

1 可拓区间数及其运算规则^[9-10]

设 $E(U)$ 为给定论域 U 上的全体可拓集合, 且 $a = \langle a^-, a^+ \rangle \in E(U)$, 则 u 关于 a 的简单关联函数 $K_a(u)$ 表示为:

$$K_a(u) = \begin{cases} 2(u - a^-) / (a^+ - a^-), & u < (a^- + a^+) / 2 \\ 2(a^+ - u) / (a^+ - a^-), & u \geq (a^- + a^+) / 2 \end{cases} \quad (1)$$

其中, $a = \langle a^-, a^+ \rangle = \{x | 0 < a^- < x < a^+\}$ 称为可拓区间数, 符号 $\langle a^-, a^+ \rangle$ 可包含端点 a^- 或 a^+ , 也可以不包含端点 a^- 或 a^+ 。

收稿日期: 2020-03-19; 修回日期: 2020-04-17

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11975311; 11405270)

作者简介: 刘保军(1984—), 男, 山西人, 博士, 讲师, 从事战伤抢修、可靠性研究。E-mail: liubaojun102519@sina.com。

可拓区间数的运算法则为：

设 $a = \langle a^-, a^+ \rangle$, $b = \langle b^-, b^+ \rangle$ 为 2 个可拓区间数，则：

- 1) $a \oplus b = \langle a^-, a^+ \rangle \oplus \langle b^-, b^+ \rangle = \langle a^- + b^-, a^+ + b^+ \rangle$;
- 2) $a \otimes b = \langle a^-, a^+ \rangle \otimes \langle b^-, b^+ \rangle = \langle a^- b^-, a^+ b^+ \rangle$;
- 3) $\forall \lambda \in R^+, \lambda a = \lambda \langle a^-, a^+ \rangle = \langle \lambda a^-, \lambda a^+ \rangle$;
- 4) $1/a = \langle 1/a^+, 1/a^- \rangle$ 。

设 $a = \langle a^-, a^+ \rangle$, $b = \langle b^-, b^+ \rangle$ 为 2 个可拓区间数，

$a \geq b$ 的可能性程度定义为：

$$V(a \geq b) = \sup_{u \geq v} (K_a(u) \wedge K_b(v)) = \frac{2(a^+ - b^-)}{(b^+ - b^-) + (a^+ - a^-)} \quad (2)$$

2 可拓熵权法

利用熵权法来确定评价指标权重，可充分利用各指标本身所包含的信息，得到的权重更加客观，然而在定性指标量化的过程中，硬性指定某一具体数值并不合理，实际上，应该是一定范围针对此不足，笔者利用可拓理论对熵权法进行改进，使得到的权重更符合实际。基本思路为：针对定性指标，给出量化的模糊判断范围，利用熵权法处理量化的范围数据，得到熵权的可拓区间，利用对基准区间的可拓排序，给出最终指标的权重值^[11]。具体步骤如下：

1) 构建可拓评价矩阵。针对 m 个待评对象，将 n 个评价指标的定量指标进行归一化处理，定性指标给出模糊判断范围，从而构造一个可拓评价矩阵 A 。

$A = (a_{ij})_{m \times n}$ 中的元素 $a_{ij} = \langle a_{ij}^-, a_{ij}^+ \rangle$ ($i=1, 2, \dots, m$; $j=1, 2, \dots, n$) 是一个可拓区间数。为了形式统一，将定量指标的值表示为 2 个端点值相等的可拓区间数。

2) 计算综合可拓评价矩阵和相对熵。

对于定性指标，通过 T 位专家进行评价，给出可拓区间数 $a_{ij}^t = \langle a_{ij}^{-t}, a_{ij}^{+t} \rangle$ ($i=1, 2, \dots, m$; $j=1, 2, \dots, n$; $t=1, 2, \dots, T$)，综合可拓评价矩阵 $R = (r_{ij})_{m \times n}$ ，其中

$$r_{ij} = \frac{1}{T} (a_{ij}^1 \oplus a_{ij}^2 \oplus \dots \oplus a_{ij}^T) \quad (3)$$

各指标的可拓熵值为

$$E_j = - \sum_{i=1}^m d_{ij} \ln d_{ij} \quad (4)$$

其中

$$d_{ij} = r_{ij} / \sum_{i=1}^m r_{ij} \quad (j=1, 2, \dots, n)。$$

可拓熵值 $E_j = \langle E_j^-, E_j^+ \rangle$ 对应的 2 个端点分别表示为：

$$E_j^- = - \sum_{i=1}^m \left[r_{ij}^- / \sum_{i=1}^m r_{ij}^+ \ln \left(r_{ij}^- / \sum_{i=1}^m r_{ij}^+ \right) \right],$$

$$E_j^+ = - \sum_{i=1}^m \left[r_{ij}^+ / \sum_{i=1}^m r_{ij}^- \ln \left(r_{ij}^+ / \sum_{i=1}^m r_{ij}^- \right) \right]。$$

可拓相对熵值为

$$e_j = \frac{E_j}{\ln n} = \left\langle \frac{E_j^-}{\ln n}, \frac{E_j^+}{\ln n} \right\rangle \quad (5)$$

熵权为

$$\theta_j = \frac{1 - e_j}{n - \sum_{i=1}^n e_i} = \left\langle \frac{1 - e_j^+}{n - \sum_{i=1}^n e_i^-}, \frac{1 - e_j^-}{n - \sum_{i=1}^n e_i^+} \right\rangle \quad (6)$$

3) 计算综合权重值。

文献[7]利用式(2)对可拓区间数进行排序，进而归一化得到指标权重，但此方法针对 2 个不是可拓区间数的定量指标无法使用，因为定量指标的区间宽度均为 0，会导致式(2)的分母为 0。为有效解决此问题，笔者基于基准可拓区间来对指标的熵权进行排序。首先构建基准可拓区间 $\theta_0 = \langle 0, \theta_0^+ \rangle$ ，其中， $\theta_0^+ = \max_{1 \leq j \leq n} \{\theta_j^-\}$ ，利用式(2)计算各指标大于基准可拓区间的可拓可能性程度： $P_j = V(\theta_j \geq \theta_0)$, $j=1, 2, \dots, n$ 。

各指标的综合权重为

$$\omega_j = P_j / \sum_{i=1}^n P_i \quad (7)$$

当所有指标均为定量指标时，此方法等同于原有的熵权法。

3 实例分析

为了验证上述方法的有效性，对文献[12]中关于某型飞机抢修性拟制的 7 种方案进行评价。主要的评价指标包括战伤可达性、战伤可测性、战伤结构模块化程度、战伤结构互换性、战伤结构关键件的余度、战伤抢修人力资源、战伤抢修工具、战伤抢修备件储备及工作环境。这些指标多数属于定性指标，在专家打分的过程中存在模糊的判断，在文献[12]原始数据的基础上，拓展为可拓区间，进行归一化处理，结果如表 1 所示。

表 1 综合可拓评价数据

方案	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆	C ₇	C ₈	C ₉
1	⟨0.905,0.805⟩	⟨0.715,0.615⟩	⟨0.752,0.652⟩	⟨0.816,0.716⟩	⟨0.616,0.516⟩	⟨0.855,0.755⟩	⟨0.802,0.702⟩	⟨0.885,0.785⟩	⟨0.785,0.685⟩
2	⟨0.913,0.813⟩	⟨0.813,0.713⟩	⟨0.613,0.513⟩	⟨0.875,0.775⟩	⟨0.775,0.675⟩	⟨0.915,0.815⟩	⟨0.865,0.765⟩	⟨0.905,0.805⟩	⟨0.805,0.705⟩
3	⟨0.985,0.885⟩	⟨0.875,0.775⟩	⟨0.773,0.673⟩	⟨0.946,0.846⟩	⟨0.805,0.705⟩	⟨0.932,0.832⟩	⟨0.886,0.786⟩	⟨0.922,0.822⟩	⟨0.892,0.792⟩
4	⟨0.866,0.766⟩	⟨0.852,0.752⟩	⟨0.752,0.652⟩	⟨0.737,0.637⟩	⟨0.655,0.555⟩	⟨0.862,0.762⟩	⟨0.852,0.752⟩	⟨0.907,0.807⟩	⟨0.892,0.792⟩
5	⟨0.763,0.663⟩	⟨0.752,0.652⟩	⟨0.552,0.452⟩	⟨0.805,0.705⟩	⟨0.609,0.509⟩	⟨0.753,0.653⟩	⟨0.793,0.693⟩	⟨0.843,0.743⟩	⟨0.802,0.702⟩
6	⟨0.895,0.795⟩	⟨0.862,0.762⟩	⟨0.663,0.563⟩	⟨0.793,0.693⟩	⟨0.696,0.596⟩	⟨0.875,0.775⟩	⟨0.852,0.752⟩	⟨0.908,0.808⟩	⟨0.854,0.754⟩
7	⟨0.965,0.865⟩	⟨0.805,0.705⟩	⟨0.705,0.605⟩	⟨0.857,0.757⟩	⟨0.562,0.462⟩	⟨0.759,0.659⟩	⟨0.752,0.652⟩	⟨0.767,0.667⟩	⟨0.792,0.692⟩

利用式(4)–(6)计算指标的熵权,结果如表 2 所示。

表 2 指标的熵权

指标	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅
熵权 (θ _i)	⟨0.041 9, 0.312 9⟩	⟨0.038, 0.323 5⟩	⟨0.032 4, 0.348 2⟩	⟨0.039 1, 0.320 9⟩	⟨0.032, 0.352 1⟩

指标	C ₆	C ₇	C ₈	C ₉
熵权 (θ _i)	⟨0.04, 0.318 8⟩	⟨0.038 5, 0.320 1⟩	⟨0.040 7, 0.314 4⟩	⟨0.038 6, 0.319 6⟩

选择基准可拓区间数为 ⟨0,0.041 9⟩, 利用式(2)计算各指标大于基准可拓区间的可能性程度, 并通过式(7)计算各指标的综合权重值, 结果如表 3 所示。

表 3 指标的综合权重值

指标	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅
P(θ _i ≥ θ ₀)	2	1.976 3	1.947 2	1.983 1	1.945 3
综合权重(ω _j)	0.112 4	0.111 1	0.109 4	0.111 5	0.109 3

指标	C ₆	C ₇	C ₈	C ₉
P(θ _i ≥ θ ₀)	1.988	1.979 3	1.992 2	1.979 9
综合权重(ω _j)	0.111 7	0.111 3	0.112	0.111 3

最后计算各种抢修方案的评价结果。对可拓评价矩阵进行均值处理: $P=(R^-+R^+)/2$, W 是表 3 中指标权重组成的列向量, 飞机抢修性能为

$$Q = P' \times W \quad (8)$$

通过上式可得到 7 种方案抢修性评价系数依次是: 0.743 0, 0.781 7, 0.841 2, 0.770 0, 0.692 0, 0.772 7, 0.724 5。由结果可见, 上述方案反映的飞机抢修性由优到劣等次序为: 方案 3, 方案 2, 方案 6, 方案 4, 方案 1, 方案 7, 方案 5。此结论与文献[12]和部队决策部门的结论一致, 说明笔者提出的方法是合理、可行的。

4 结束语

笔者将熵权法和可拓理论进行有效结合, 提出一种确定指标权重的可拓熵权法。该方法充分考虑量化定性指标存在的不确定性, 使得计算的指标权

重更加客观、合理。最后将其应用到飞机战伤抢修效能的评估中, 证实该方法是合理、可行的。可拓熵权法具有客观性强、通用性好等特点, 可在教学质量、人力资源评估等方面运用, 是一种可行而有效的决策方法。

参考文献:

- [1] 蔡纪伟, 贾云献, 孙晓, 等. 蚁群算法在战损装备抢修任务指派中的应用研究[J]. 数学的实践与认识, 2012, 42(19): 160–165.
- [2] 王广彦, 胡起伟, 王润生. 基于贝叶斯网络的装备战场损伤评估模型[J]. 兵工学报, 2007, 28(11): 1351–1356.
- [3] 尤志峰, 石全, 熊飞. 基于加权支持向量回归到抢修时间估计模型[J]. 现代防御技术, 2014, 42(4): 160–166.
- [4] 王少华, 郑毅, 吕会强, 等. 战场抢修决策的研究现状与展望[J]. 兵器装备工程学报, 2017, 38(9): 130–135.
- [5] 刘晓山, 秦宇飞. 飞机战伤抢修保障效能及评估研究[J]. 航空维修与工程, 2014(2): 58–61.
- [6] 陈建海, 冯杰. 熵权和灰色关联在舰艇战损装备抢修排序中的应用[J]. 舰船科学技术, 2011, 33(3): 131–134.
- [7] 罗九林, 魏兆磊, 潘洪平. 熵权-集对分析方法在抢修效能评估中的应用[J]. 兵工自动化, 2013, 32(5): 10–13.
- [8] 尤志峰, 李震, 胡起伟, 等. 基于改进信息熵的抢修操作过程复杂性测度模型[J]. 火力与指挥控制, 2016, 41(5): 80–84.
- [9] 高洁, 盛昭瀚. 可拓层次分析法研究[J]. 系统工程, 2002, 20(5): 6–11.
- [10] 高炜, 张庆普, 敦晓彪, 等. 基于改进的可拓层次分析法和动态加权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.
- [11] 郭家豪, 史贤俊, 王康. 基于信息熵的诊断策略优化方法[J]. 兵工自动化, 2019, 38(6): 29–32.
- [12] 张均勇. 飞机战伤抢修性设计及其评价的研究与应用[D]. 沈阳: 东北大学, 2012.