

文章编号: 1000 8055(2008)09 1628-05

混合数据及未知权值下的维修策略决策方法

李常有¹, 徐敏强¹, 郭 聿², 王日新¹, 高晶波¹

(1. 哈尔滨工业大学 航天学院, 哈尔滨 150001;

2. 哈尔滨工程大学 计算机科学与技术学院, 哈尔滨 150001)

摘 要: 采用模糊偏好规划法从模糊成对比较集中求取各属性的权值, 然后应用基于随机优势和模糊数质心距的 ELECTRE III 方法来对备选维修策略进行排序, 以确定最佳的维修策略. 最后将其应用到航空发动机的维修策略决策中. 结果表明, 提出的方法能有效地解决混合数据及未知权值下的维修策略决策问题.

关 键 词: 维修策略; 混合数据; 权值; 多属性决策; 航空发动机

中图分类号: TH 133 33

文献标识码: A

Decision making method for maintenance strategy with mixed data and unknown priority vector

LI Chang-you¹, XU Min-qiang¹, GUO Song², WANG Ri-xin¹, GAO Jing-bo¹

(1. School of Aerospace, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;

2. School of Computer Science and Technology, Harbin Engineering University,
Harbin 150001, China)

Abstract: The fuzzy preference programming method was employed to calculate the priority vector from the fuzzy pairwise comparison judgments set, and then ELECTRE III based on stochastic dominance and the distance index between the centroid point of a fuzzy number and original point was applied to rank the maintenance strategies in order to select the most appropriate maintenance strategy for a machine. Finally, the proposed method was applied to the maintenance strategy decision making of aeroengine. The result shows that the proposed method is effective.

Key words: maintenance strategy; mixed data; priority vector;
multiple attribute decision making; aeroengine

根据 Bevilacqua 等及 McKone 等的描述, 高昂的维修费用是降低生产成本的一大障碍^[1,2]. 然而, 维修费用的多少严重依赖于设备所采用的维修策略. 故合理选择各个生产设备的维修策略, 可以大大降低生产成本. 此外, 合理的维修策略还可以提高设备的可用性、安全性、可靠性以及产品的质量. 因此, 为设备选择合适的维修策略, 对工业生产具有重大意义.

目前, 已有一些文献为维修策略的决策作出

了贡献. Luce 和 Okumura 等分别于 1999 年、2003 年提出了基于生产损失和维修成本的维修策略决策方法^[3,4]. Bevilacqua 和 Braglia 把层次分析法应用于维修策略的选择中^[1], Chu J 和 Wu J 认为传统的层次分析法很难解决维修策略的选择问题, 提出了模糊层次分析方法^[5]. Al-Najjar 等和 Sharma 等分别于 2003 年和 2005 年把模糊推理理论应用于维修策略决策中^[6,7]. Mechefske C K 和 Wang Z 利用模糊语言为设备选择最合适

的维修策略^[8]. De León Hijes F C G 等根据设备的重要度来确定其维修策略^[9].

上述文献论述的方法都有其实用价值, 但都没有讨论混合数据及权值未知情况下的维修策略决策问题. 所谓的混合数据是指维修策略在所有属性下的评价, 有的是确定的, 有的是随机的, 其他的是模糊的. 未知权值是指决策者没有给定明晰的属性权值, 而是通过的模糊成对比较集来描述. 关于混合数据下的决策问题, Munda 等^[10]、Zara K^[11] 以及 Nowak M^[12] 都论述过, 但都有各自的缺陷, 故文中采用随机优势和模糊数质心距的 ELECTRE III 方法来弥补这些的缺陷. 对于从模糊成对比较集中求取权值的方法很多, 但都有不足的地方, 模糊偏好规划法可以弥补这些缺陷, 文中应用这一方法从设备管理者和维修者给出的模糊成对比较集中求取各属性的权值.

1 问题描述

在大多数情况下, 维修策略决策中, 各个属性权值的判定是一个相当复杂和困难问题. 设备维修者和管理者一般不能直接给出各个属性的权值, 而是定性地描述任何两个属性之间的相对重要程度, 也即给出模糊成对比较集. 故维修策略决策问题首先需要从模糊成对比较集求取属性权值.

此外, 维修策略决策中还会经常遇到混合数据问题. 例如, 每个维修策略的维修费用可以通过历史数据来给出确定的数值, 也即在这一属性下的评价是确定的; 根据可靠性理论, 设备的失效概率遵循一定的统计规律, 即在这一属性下对维修策略的评价可以用符合某一分布的概率密度函数或者分布函数来表示; 另外, 在其他一些属性下, 如可行性, 设备维修者和管理者对维修策略的评价不能定量地描述, 只能用定性语言来表达, 也即评价是模糊的.

因此, 设备维修策略的决策问题, 是一个混合数据及未知权值下的决策问题. 在上述条件下, 如何为设备选择最合适的维修策略是本文的研究内容.

2 混合数据及未知权值下的维修策略决策方法

为了解决第一部分描述的维修策略决策问题, 首先采用模糊偏好规划法从属性的模糊成对比较集中求取明晰的属性权值, 然后应用基于随

机优势和模糊数质心距的 ELECTRE III 方法来对维修策略进行排序, 把排在第一位的维修策略作为设备的最佳维修策略.

2.1 基于模糊偏好规划法的权值求取

Van Laarhoven 等、Wagenknecht 和 Hartmann, Buckley 及 Chang D A 提出过从模糊成对比较集中求取属性权值的方法, 但共同的缺陷: 第一是采用类推法构造出模糊成对比较矩阵导致了求取的权值不一致; 第二是获得的权值是模糊数导致最后的明晰权值因处理方法的不同而不同^[13,14]. 而模糊偏好规划法可以弥补上述缺陷, 故采用这一方法从属性的模糊成对比较集中求取维修策略决策中各属性的权值.

设 $F = \{\tilde{a}_{ij}\}$ 为 n 个属性的模糊成对评价集, 其中 $i = 1, 2, \dots, n-1; j = 2, 3, \dots, n$ 且 $j > i$; $\tilde{a}_{ij}$ 表示属性 E_i 与 E_j 比较时决策者给出的定性评价对应的模糊数, 为正则且凸的; $\mu_{\tilde{a}_{ij}}$ 是 $\tilde{a}_{ij}$ 的隶属度函数; 属性权值 $w = (w_1, w_2, \dots, w_n)^T$. $\tilde{a}_{ij}$ 可以转化 L 个的区间集来表示, 即 $F_l = \{a_{ij}(\alpha)\}$, 其中 $a_{ij}(\alpha) = \{w_i/w_j \in R^+ \mid \mu_{\tilde{a}_{ij}}(w_i/w_j) \geq \alpha\}$ 是 $\tilde{a}_{ij}$ 的 α 截集, $l = 1, 2, \dots, L, 0 = \alpha_1 < \alpha_2 < \dots < \alpha_L = 1$, 因为 $\tilde{a}_{ij}$ 是正则且凸的模糊数, 故 $a_{ij}(\alpha) = [l_{ij}(\alpha), u_{ij}(\alpha)]$, 其中 $l_{ij}(\alpha)$ 和 $u_{ij}(\alpha)$ 是区间的上界和下界. 模糊偏好规划法就是分别从各个区间中找出符合约束条件的最优属性权值 $w(\alpha) = [w_1(\alpha), w_2(\alpha), \dots, w_n(\alpha)]^T$, 然后将他们集结起来得到最终的属性权值 $W = (W_1, W_2, \dots, W_n)^T$. 当模糊成对判断集一致或不一致时, 下式都成立

$$l_{ij}(\alpha) \lesseqgtr \frac{w_i(\alpha)}{w_j(\alpha)} \lesseqgtr u_{ij}(\alpha) \tag{1}$$

式中 $\lesseqgtr$ 表示模糊小于等于. 可将上式表示为

$$\begin{cases} w_i(\alpha) - w_j(\alpha)u_{ij}(\alpha) \lesseqgtr 0 \\ -w_i(\alpha) + w_j(\alpha)l_{ij}(\alpha) \lesseqgtr 0 \end{cases} \tag{2}$$

(2) 式代表模糊线性规划的约束条件, 可以表示为 $R_{q,k}w(\alpha) \lesseqgtr 0, R_{q,k} \in R^{2m \times n}, m$ 表示模糊成对比较集的元素个数. 第 k 个约束条件的隶属度函数定义为

$$\mu(R_{q,k}w) = \begin{cases} 1 - \frac{R_{q,k}w(\alpha)}{d_k}, & R_{q,k}w \lesseqgtr d_k(\alpha) \\ 0, & \text{其它} \end{cases} \tag{3}$$

式中 d_k 为容忍参数. 为了获取可行域中最大的属性权值, 采用最大最小算子, 并引入新变量 λ , 则

线性规划为

$$\begin{aligned} & \max \text{ imise } \lambda \\ & \text{subject to } d_k(\alpha) \lambda + R_{\alpha_p, k} w(\alpha) \leq d_k(\alpha) \quad (4) \\ & \sum_{i=1}^n w_i(\alpha) = 1, w_i(\alpha) > 0 \end{aligned}$$

式中 $i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, 2m$. 则

$$W_j = \sum_{i=1}^L \alpha w_j(\alpha) \setminus \sum_{i=1}^L \alpha \quad (5)$$

2.2 基于随机优势和模糊数质心距的 ELECTRE III方法

针对维修策略在某一属性下的评价为随机的情况,采用随机优势判定任意两个维修策略的优劣关系并建立局部和谐指数和非和谐指数的计算公式;针对维修策略在某一属性下的评价为模糊的情况,应用模糊数“质心”到原点的距离来评比两个模糊数的大小,在此基础上提出局部和谐指数和非和谐指数的计算方法,然后将他们带入 ELECTRE III 中对维修策略进行排序,这就是基于随机优势和模糊质心距的 ELECTRE III 其步骤为

1) 对于评价为随机的情况,首先判定任意两个维修策略的随机优势类型,然后计算局部和谐指数和非和谐指数.

2) 对于评价为模糊的情况,将定性语言转化为相应的模糊数,计算质心距,由此推出局部和谐指数和非和谐指数.

3) 根据 ELECTRE III 中的方法,计算评价为确定时的局部和谐指数和非和谐指数.

4) 利用公式

$$c(a_i, a_j) = \left[\sum_{l=1}^l W_{lcl}(a_i, a_j) + \sum_{k=1}^u W_{kck}(a_i, a_j) + \sum_{s=1}^n W_{scs}(a_i, a_j) \right] \setminus \sum_{m=1}^{t+u+n} W_m \quad (6)$$

计算和谐指数. 其中 c_l, c_k, c_s 为随机评价、模糊评价和确定评价下的局部和谐指数, W 是属性权重.

5) 维修策略的赋值级别高于关系定义为

$$S(a_i, a_j) = \begin{cases} c(a_i, a_j), & \text{若 } \forall h \text{ 有 } d_h(a_i, a_j) \leq c(a_i, a_j) \\ c(a_i, a_j) \prod_{h \in J(a_i, a_j)} \frac{1 - d_h(a_i, a_j)}{1 - c(a_i, a_j)}, & \\ \text{其它} & \end{cases} \quad (7)$$

6) 根据维修策略的排序指标进行排序,值越大,维修策略更适合讨论设备. 排序指标定义为

$$Q(a_i) = \sum_{\substack{j=1, j \neq i \\ S(a_i, a_j) > 0}}^m S(a_i, a_j) - \sum_{\substack{j=1, j \neq i \\ S(a_j, a_i) > 0}}^m S(a_j, a_i) \quad (8)$$

3 应用

航空发动机是航空器的核心,为其提供动力,如果发生故障,不仅会导致整个航空器的失效,而且还将造成人员伤亡. 故对其要求有较高的可靠性,这就造成高昂的维修费用. 故怎样在保证可靠性的基础上最大程度地减少维修成本是整个航空部门面临的重要问题. 合适的维修策略可以满足这一要求. 因此,为发动机选择合理的维修策略具有很重要的意义.

设航空发动机可以采用四类维修策略: 事后维修(Failure based maintenance, FBM), 定期维修(Age based maintenance, ABM), 视情维修(Condition based maintenance, CBM) 以及预测维修(Predictive maintenance, PM). 评价维修策略的属性集有安全性, 维修费用, 维修附加值, 可行性, 失效概率以及使用影响设备寿命相关信息的多少(简称信息). 每个维修策略在维修费用下的评价是确定的, 在安全性、维修附加值、可行性以及信息下的评价是模糊的, 而在失效概率下的评价是随机的, 并且管理者和维修者也只能给出模糊成对比较集来描述属性间的重要程度, 故可以采用本文提出的方法来对航空发动机的维修策略进行抉择.

表1为属性成对比较的定性描述, 表2将其转化为模糊成对比较集. 表3为不同 α 下求得的属性权值. 应用式(5), 得出属性的最终权值 $W = [0.3313, 0.1017, 0.0800, 0.1017, 0.3313, 0.0541]$.

安全性、维修附加值、可行性以及信息分为七个等级标准, 即非常低(少)、低(少)、有点低(少)、一般、有点高(多)、高(多)以及非常高(多). 括号中的等级是针对信息这个属性的. 根据空军第一飞行学院维修人员的意见和历史数据, 航空发动机的维修策略决策矩阵如表4所示. 表中的每个模糊数对应于在安全性、维修附加值、可行性以及信息下对每个维修策略的定性评价的等级. 实施 FBM 时, 航空发动机的失效概率设为威布尔分布

$$F_1(t) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{t - \delta}{\eta} \right)^m \right] \quad (9)$$

则采用 ABM 时的失效概率为

表 1 属性间成对比较的定性描述

Table 1 Qualitative description of pairwise comparison among attributes

	安全性	维修费用	维修附加值	可行性	失效概率	信息
安全性	—	约重要 3 倍	约重要 4 倍	约重要 3 倍	差不多	约重要 4 倍
维修费用	—	—	约重要 1 倍	差不多	约差 3 倍	约重要 2 倍
维修附加值	—	—	—	约差 1 倍	约差 4 倍	差不多
可行性	—	—	—	—	约差 3 倍	约重要 1 倍
失效概率	—	—	—	—	—	约重要 4 倍
信息	—	—	—	—	—	—

表 2 由表 1 转化的模糊成对比较集

Table 2 Fuzzy pairwise comparison set corresponding to Table 1

	安全性	维修费用	维修附加值	可行性	失效概率	信息
安全性	—	(3, 4, 5)	(4, 5, 6)	(3, 4, 5)	(0, 1, 2)	(4, 5, 6)
维修费用	—	—	(1, 2, 3)	(0, 1, 2)	(0, 1/4, 2/4)	(2, 3, 4)
维修附加值	—	—	—	(0, 1/2, 1)	(0, 1/5, 2/5)	(0, 1, 2)
可行性	—	—	—	—	(0, 1/4, 2/4)	(1, 2, 3)
失效概率	—	—	—	—	—	(4, 5, 6)
信息	—	—	—	—	—	—

表 3 不同 α 下的属性权值

Table 3 Priority vectors of attributes under different α

α	w ₁	w ₂	w ₃	w ₄	w ₅	w ₆	λ
0	0.344 4	0.114 8	0.073 0	0.110 1	0.300 2	0.057 4	1.000
0.1	0.325 4	0.107 1	0.081 0	0.107 1	0.325 4	0.054 1	0.993
0.2	0.326 5	0.106 1	0.080 8	0.106 1	0.326 5	0.054 1	0.987
0.3	0.327 5	0.105 1	0.080 7	0.105 1	0.327 5	0.054 1	0.980
0.4	0.328 5	0.104 2	0.080 5	0.104 2	0.328 5	0.054 1	0.974
0.5	0.329 5	0.103 3	0.080 3	0.103 3	0.329 5	0.054 1	0.968
0.6	0.330 4	0.102 4	0.080 2	0.102 4	0.330 4	0.054 1	0.962
0.7	0.331 4	0.101 6	0.080 0	0.101 6	0.331 4	0.054 1	0.956
0.8	0.332 2	0.100 8	0.079 8	0.100 8	0.332 2	0.054 1	0.950
0.9	0.333 1	0.100 0	0.079 6	0.100 0	0.333 1	0.054 1	0.943
1	0.333 9	0.099 3	0.079 4	0.099 3	0.333 9	0.054 2	0.937

表 4 航空发动机维修策略决策表

Table 4 Maintenance strategy decision table of aeroengine

	安全性	维修费用	维修附加值	可行性	信息	失效概率
FBM	(0, 0, 1, 2)	2.75	(0, 0, 1, 2)	(8, 9, 10, 10)	(0, 0, 1, 2)	F ₁ (t)
ABM	(4, 5, 6)	2.25	(2, 3, 4, 5)	(7, 8, 9)	(2, 3, 4, 5)	F ₂ (t)
CBM	(7, 8, 9)	2.50	(7, 8, 9)	(2, 3, 4, 5)	(5, 6, 7, 8)	F ₃ (t)
PM	(8, 9, 10, 10)	2.60	(8, 9, 10, 10)	(0, 0, 1, 2)	(8, 9, 10, 10)	F ₄ (t)

$$F_2(t) = \begin{cases} 1 - \exp\left[-\left(\frac{t - \delta}{\eta}\right)^m\right], & t \leq t_1 \\ 1 - \exp\left[-\left(\frac{t - \delta - \lambda}{\eta}\right)^m\right], & t > t_1 \end{cases} \quad (10)$$

式中 t_1 表示定期维修的时刻, λ 表示维修降低失效概率的程度. 采用 CBM 和 PM 时的失效概率分别表示为

$$F_3(t) = \begin{cases} 1 - \exp\left[-\left(\frac{t - \delta}{\eta}\right)^m\right], & t \leq t_c \\ \frac{F_1(t_n) - F_1(t_c)}{t_n - t_c} \times (t - t_c) + F_1(t_c), & t > t_c \end{cases} \quad (11)$$

$$F_4(t) = \begin{cases} 1 - \exp\left[-\left(\frac{t - t_P}{\eta}\right)^m\right], & t \leq t_P \\ \frac{F_1(t_n) - F_1(t_P)}{t_n - t_P} \times (t - t_P) + F_1(t_P), & t > t_P \end{cases} \quad (12)$$

式中 t_C , t_P , t_n 分别表示为 CBM, PM 降低失效概率的程度以及采用 FBM 时失效概率等于极限值的工作时间长度且有 $t_C > t_P$.

对于失效概率这一属性,任意两个维修策略具有任何一种随机优势且无故障工作时间的期望值相差 10%, 就可以认为两维修策略在这一属性下存在严格优于或严格劣于关系. 对于任何模糊属性 s , 某维修策略 a_i 在该属性下的评价等级高于另一个维修策略 a_j 一个级别, 那么就可以认为 a_i 严格优于 a_j , 故可以把模糊属性的严格优于和严格劣于的门槛值都设置为 1. 根据维修管理者的意见, 维修成本属性下的严格优于、严格劣于以及无差别门槛值分别为 0.2, 0.15 和 0.2.

采用基于随机优势和模糊质心距的 ELECTRE III 方法处理上述决策问题, 得到 FBM, ABM, CBM, PM 的排序指标为: -1.746 0, 0.050 2, 0.582 0, 1.113 8. 故航空发动机采用预测维修更为合适.

航空发动机采用预测维修虽然在维修费用上高于定期维修和视情维修且可行性最低, 但能保证最大的安全性、最高的维修附加值, 使用最多的与发动机寿命相关的信息以及最大程度地降低失效概率, 而这些对于航空发动机来说都至关重要, 故预测维修为航空发动机的最佳维修策略是比较合理的.

上述结果与分析表明, 采用模糊偏好规划法从属性的模糊成对比较集中求取属性权值, 然后采用基于随机优势和模糊质心距的 ELECTRE III 方法为航空发动机选择最佳维修策略是合适的和有效的.

4 结 论

本文针对维修策略决策中出现的属性权值采用模糊成对比较集来描述以及混合数据问题, 提出了模糊偏好规划法和基于随机优势和模糊质心距的 ELECTRE III 方法给予解决. 将此方法应用到航空发动机的维修策略决策中, 结果表明, 模糊偏好规划法和基于随机优势和模糊质心距的 ELECTRE III 方法能有效地解决混合数据和未知权值的维修策略决策问题.

参考文献:

- [1] Bevilacqua M, Braglia M. The analytic hierarchy process applied to maintenance strategy selection[J]. Reliability Engineering and System Safety, 2000, 70: 71-83.
- [2] Mckone K, Wiess E. TPM: planned and autonomous maintenance: bridging the gap between practice and research[J]. Production and Operations Management, 1998, 7(4): 335-351.
- [3] Luce S. Choice criteria in conditional preventive maintenance[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 1999, 13(1): 163-168.
- [4] Okumura S, Okino N. A maintenance policy selection method for a critical single unit item in each workstation composing a FMS with CBM optimization[J]. International Journal of COMADEM, 2003, 6(2): 3-9.
- [5] WANG L, CHU J, WU J. Selection of optimum maintenance strategies based on a fuzzy analytic hierarchy process[J]. Int. J. Production Economics, 2007, 107: 151-163.
- [6] Al Najjar B, Alsyouf I. Selecting the most efficient maintenance approach using fuzzy multiple criteria decision making[J]. International Journal of Production Economics, 2003, 84: 85-100.
- [7] Sharma R K, Kumar D, Kumar P. FLM to select suitable maintenance strategy in process industries using MISO model[J]. Journal of Quality in Maintenance Engineering, 2005, 11(4): 359-374.
- [8] Mechefske C K, WANG Z. Using fuzzy linguistics to select optimum maintenance and condition monitoring strategies[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2003, 17(2): 305-316.
- [9] De León H, F C G, Cartagena J J R. Maintenance strategy based on a multicriterion classification of equipments[J]. Reliability Engineering and System Safety, 2006, 91: 444-451.
- [10] Munda G, Nijkamp P, Rietveld P. Qualitative multicriteria methods for fuzzy evaluation problems: An illustration of economic ecological evaluation[J]. European Journal of Operational Research, 1995, 82: 79-97.
- [11] Zaras K. Rough approximation of a preference relation by a multiattribute dominance for deterministic, stochastic and fuzzy decision problems[J]. European Journal of Operational Research, 2004, 159: 196-206.
- [12] Nowak M. Preference and veto thresholds in multicriteria analysis based on stochastic dominance[J]. European Journal of Operational Research, 2004, 158: 339-350.
- [13] Mikhailov L. A fuzzy approach to deriving priorities from interval pairwise comparison judgements[J]. European Journal of Operational Research, 2004, (159): 687-704.
- [14] Mikhailov L. Deriving priorities from fuzzy pairwise comparison judgements[J]. Fuzzy Sets and Systems, 2003, (134): 365-385.