

文章编号:1000-8055(2013)02-0283-07

航空发动机健康评估变精度粗糙集决策方法

杨 洲¹, 景 博¹, 张 劼²

- (1. 空军工程大学 航空航天工程学院, 西安 710038;
2. 中国人民解放军空军 驻甘肃地区军事代表室, 兰州 730050)

摘 要: 针对航空发动机健康评估过程中存在的多工况、非线性和小子样问题,提出了一种基于相似性度量的发动机健康评估的变精度粗糙集决策方法。首先给出了变精度粗糙集中正确分类率的确定原则和方法,提取了决策规则;其次,提出了基于交叉信息熵的属性相对重要度计算方法,并给出了属性的客观权重,结合专家经验和运行工况形成了属性的综合权重;最后,提出了基于属性综合权重的加权相似性度量方法,通过比较当前对象与约简后的决策系统中所有对象的相似程度,给出决策结果,完成对发动机的健康评估。实例表明,在结合专家经验和运行环境对评估结果进行修正后,该方法对发动机的健康评估更贴近实际,方法具有一定的普适性。

关 键 词: 健康评估; 航空发动机; 变精度粗糙集; 交叉信息熵; 相似性度量

中图分类号: V23; TP277

文献标志码: A

Variable precision rough set decision-making method for health assessment of aero-engine

YANG Zhou¹, JING Bo¹, ZHANG Jie²

- (1. Aeronautics and Astronautics Engineering College,
Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China;
2. Military Representative Office in Gansu Area, Air Force of People's Liberation Army,
Lanzhou 730050, China)

Abstract: In order to solve the problems of variable working condition, non-linear and small sub-sample in the process of aero-engine health assessment, a variable precision rough set decision-making method based on the similarity measurement was proposed. Firstly, the principle and method of choosing value was given, and the decision-making rules were extracted. Secondly, the method of calculating attributes' relative importance based on cross-entropy was proposed and attributes' objective weights were given. Taking the expert experience and working experience into account, overall weights were formed. Finally, a weighted similarity measurement based on the overall weight of attributes was developed. By comparing the similarity degrees between the current object and other objects from the reduced decision-making system, the decision results were given. Simulation results show that the method is effective to aero-engine's health assessment with the help of expertise and running environment. In addition, the proposed method can be applied to other regions.

收稿日期: 2012-03-22

网络出版地址: http://www.cnki.net/kcms/detail/11.2297.V.20130131.0829.201302.283_007.html

基金项目: 航空科学基金(20101996012); 预研基金

作者简介: 杨洲(1985—),男,甘肃兰州人,博士生,主要从事专业研究方向为故障预测与健康管理。

Key words: health assessment; aero-engine; variable precision rough sets; cross-entropy; similarity measurement

故障预测与健康管理技术作为实现视情维修和自主保障的重要手段,已经在航空航天领域开展了广泛的研究.从本质上讲,健康评估作为连接故障诊断和故障预测的桥梁,它与健康管理相结合,对产品或系统在实际应用条件下进行可靠性评估^[1-2].健康评估作为故障诊断的系统性延伸,根据飞机的各类监测信息,不仅能够对当前状态进行健康辨识,而且能根据系统故障传播特性来评估系统的性能退化与剩余寿命情况^[3].

由于健康评估的研究对象是未来的不确定性事件,主要面临多工况、非线性和小子样数据等问题,使健康评估相对于故障诊断和故障预测更具有挑战性.机载系统健康评估属于多目标决策问题,为了解决该问题,学者们提出了多种方法^[4-7],如贝叶斯网络^[4]、模糊系统^[5]等.但上述方法存在建模与推理的计算、存储和时间复杂度高等缺陷,无法满足解算能力有限的机载系统的健康评估过程.

本文以航空发动机为例开展机载系统健康评估方法研究.航空发动机健康评估需要借助发动机参数记录器连续监测发动机在不同工况下运行中的多个参数值,挖掘参数之间的变化关系来对应发动机的诸多状态,进行航空发动机健康评估.该对应关系具有很强的非线性和不确定性,样本数据量小,很难用函数关系描述.因此,对于航空发动机的多数故障而言,属于典型的多工况、非线性和小样本问题^[8].

本文采用变精度粗糙集理论,在确定正确分类率 β 值的基础上,实现了对决策规则的提取,利用交叉信息熵计算条件属性和决策属性以及条件属性之间的相对重要度,充分考虑专家经验和运行工况,通过动态加权相似性度量的方法完成健康评估,给出决策结果.

1 基本概念

粗糙集理论是由波兰学者 Pawlak 于 1982 年提出的一种有关数据分析和处理的理论,具有很强的定性分析能力,能够有效表达不确定的知识,善于从数据中获取知识,并能利用不确定知识、不完整数据进行推理.但是它所处理的信息必须是完全正确或错误的,而对模糊信息处理能力不强,容错型不高.为此, Ziarko 通过引入误差精度,提

出了一种变精度粗糙集来克服上述问题^[9].

1.1 变精度粗糙集

变精度粗糙集模型通过引入分类误差参数 $1-\beta(0 \leq \beta \leq 0.5)$,即允许相对错误分类率存在,产生具有不确定性的近似分类,实现全局优化的信息处理能力.当 $\beta=0$ 时,变精度粗糙集模型就是基本粗糙集模型了.

定义 1 对于不完备信息系统 $S=(U, R, V, f)$.这里, U 是对象的集合,也称为论域, R 是属性集合, $V = \bigcup_{r \in R} V_r$, V_r 表示属性 r 的值域, $f: U \times R \rightarrow V$ 是一个信息函数,它指定 U 中的每一个对象 x 的属性值,即对 $x \in U, r \in R$, 有 $f(x, r) \in V_r$. 属性集 R 进一步分为条件属性集 C 和决策属性集 D , 满足: $R = C \cup D, C \cap D = \emptyset, D \neq \emptyset$.

定义 2 决策类的粗糙隶属函数为

$$\mu_d(x) = \begin{cases} |I(x) \cap d_j| / |I(x)| & I(x) \neq \emptyset \\ 0 & I(x) = \emptyset \end{cases} \quad (1)$$

式中 $j=1, 2, \dots, n$; $|\cdot|$ 表示集合的基数.等价类 $I(x)=U/C, C \subseteq R$ 用概率 $P_r(d_j | I(x))$ 表示,即 x 属于 d_j 的置信度.

定义 3 对于 $P \subseteq C, x \subseteq U$, 给定阈值 $0.5 < \beta \leq 1$, d_j 的 β 下近似和 β 上近似分别为

$$\begin{aligned} \underline{P}_{-\beta}(d_j) &= \bigcup \{x \in U/P \mid \mu_{d_j}(x) \geq \beta\} \\ \overline{P}_{-\beta}(d_j) &= \bigcup \{x \in U/P \mid \mu_{d_j}(x) > 1 - \beta\} \end{aligned} \quad (2)$$

定义 4 设信息系统 $S=(U, R), C, D \subseteq R$ 分别表示条件属性和决策属性, C 对 D 的分类质量为

$$\gamma^\beta(C, D) = \frac{\sum_{j=1}^n |C_{-\beta}(d_j)|}{|U|} \quad (3)$$

其中近似约简 $\gamma^\beta(C, D)$ 表示为给定 β 值条件下保证正确分类的最小约简条件属性子集,且该子集不改变系统原有的相容性.且满足:

- 1) $0 \leq \gamma^\beta(C, D) \leq 1$;
- 2) $\gamma^\beta(C, D) = \gamma^\beta[\gamma^\beta(C, D), D]$;
- 3) $\gamma[\gamma^\beta(C, D)]$ 子集不具有同样的分类质量.

1.2 β 值的确定

由文献^[9]可知,近似分类程度 $\alpha(r, -\beta, d_j) =$

$r_{-\beta}(d_j)/\overline{r_{-\beta}}(d_j)$, 若满足 $\alpha(r, -\beta, d_j) = 1$, 则称决策类 d_j 为 β 可辨别, 否则为 β 不可辨别. 决策类边界的可辨别概念是相对的, 如果在变精度粗糙集中允许一个较小的错误分类率, 则决策类可能有较大的可辨别性.

对于决策的可辨别性有以下定理^[10]:

定理 1 若 d_j 在 $0.5 < \beta \leq 1$ 上是可辨别的, 则 d_j 在任意 $0.5 < \beta_1 < \beta$ 也是可辨别的.

定理 2 若 d_j 在 $0.5 < \beta \leq 1$ 上是不可辨别的, 则 d_j 在任意 $\beta < \beta_2 \leq 1$ 也是不可辨别的.

由此可知, 与可分辨决策类 d_j 相关的是 β 值的上界, 等于或小于 β 值上界时可分辨, 大于 β 值上界时不可分辨.

对每一个相对粗糙集 d_j , 都存在一个阈值 β , 使得 d_j 在这个阈值水平上是可辨别的. 令

$$ndis = (I, d_j) =$$

$$\{0.5 < \beta \leq 1 \mid r_{-\beta}(d_j) \neq \overline{r_{-\beta}}(d_j)\} \quad (4)$$

式中 $ndis = (I, d_j)$ 为满足决策类 d_j 不可分辨的 β 值的集合. 满足 d_j 为可分辨的 β 的最大值称为可辨别的阈值. 根据给出的定理可知, 该阈值等于 $ndis = (I, d_j)$ 的最小上界^[11], 即

$$\xi(I, D) = \inf ndis = (I, d_j) \quad (5)$$

$$\beta = \xi(I, D) = \min(m_1, m_2) \quad (6)$$

$$m_1 =$$

$$1 - \max\{P_r(d_j | c_k) \mid P_r(d_j | c_k) < 0.5\}$$

$$m_2 = \min\{P_r(d_j | c_k) \mid P_r(d_j | c_k) > 0.5\} \quad (7)$$

2 基于交叉信息熵的变精度粗决策方法

2.1 基于交叉信息熵的非线性属性相对重要度计算方法

交叉信息熵^[12]的方法表征了 2 个信息源在一种信息划分下信号所包含信息量的相似性, 能够在故障动态检测技术中表征出新信号相对于旧信号是否有本质上的变化而检测出故障, 体现了粗糙集所需处理信息的不确定度.

对于决策信息系统 $S = (U, R)$, 属性集 $P \subseteq C$, $U/P = \{c_1^p, c_2^p, \dots, c_l^p\}$, $l = |U/P|$, P 的概率分布估计为 $p_i = |c_i^p|/|U|$ ($i = 1, 2, \dots, l$). P 的信息熵为 $H(P) = -\sum_{i=1}^l |c_i^p|/|U| \log_2(|c_i^p|/|U|)$; 条件属性集 P 已知时, 决策属性集 D 的条件熵为

$$H(D/P) = -\sum_{i=1}^l \frac{|c_i^p|}{|U|} \sum_{j=1}^n \frac{|d_j \cap c_i^p|}{|c_i^p|} \log_2 \frac{|d_j \cap c_i^p|}{|c_i^p|} \quad (8)$$

决策属性集 D 已知时, 条件属性集 P 的条件熵为

$$H(P/D) = -\sum_{j=1}^n \frac{|d_j \cap c_i^p|}{|c_i^p|} \sum_{i=1}^l \frac{|c_i^p|}{|U|} \log_2 \frac{|c_i^p|}{|U|} \quad (9)$$

因此, 条件属性集 P 与决策属性集 D 的交叉信息熵为 $H(P, D) = H(P/D) - H(D/P)$, 当属性集进行约简时, 即删除 1 个属性 a 后, 交叉信息熵的变化量为

$$\Delta H = H(P, D) - H(P - \{a\}, D) \quad (10)$$

则属性 a 对于决策属性集 D 的重要度为 $Q = \Delta H = |H(P, D) - H(P - \{a\}, D)|$. 它的值越大, 说明在已知条件属性 P 的情况下, 删除属性 a 使得交叉信息熵的变化量越大, 即属性 a 对决策属性集 D 越重要.

对于 $\forall a_p, a_q \in A$, a_p 与 a_q 的相对重要度为

$$Q_{pq} = Q(a_p, P, D) / Q(a_q, P, D) \quad (11)$$

2.2 基于属性综合权重的多工况动态加权

相似性度量方法

相似性度量用于描述 2 个集合的相似性程度, 是度量 2 个集合相似度的有效方法. 一般分为 3 种: 基于数值属性的、基于符号属性的和基于两者混合型的^[13]. 多属性决策过程中的相似性度量属于第一种情况, 由于不同属性自身的重要度及对相似程度的影响有所不同, 通常采用加权相似性度量方法, 在属性重要度的基础上, 为每个属性赋予合适的权值. 本文综合主、客观属性权重和运行工况权重, 给出了一种基于属性重要度的动态加权相似性度量方法. 以约简后的属性集为算法处理对象, 不但降低了计算量, 更可以避免属性重要度为 0 时造成的计算结果的不合理性.

设条件属性约简集 $B = \{b_1, b_2, \dots, b_{|B|}\}$, 对于 $\forall b_p, b_q \in B$ ($p, q = 1, 2, \dots, |B|$), 由几何均值法有

$$\omega_{b_p} = \left(\prod_{q=1}^{|B|} Q_{pq} \right)^{1/|B|}, \quad \omega_B = \sum_{p=1}^{|B|} \omega_{b_p} \quad (12)$$

对其进行归一化处理, 得属性 b_p 的权重为 $\omega_{b_p}^p = \omega_{b_p} / \omega_B$. 该权重为客观权重, 则属性 b_p 的综合权重为

$$\omega_p = a_1 \omega_{b_p}^p + a_2 \omega_p' + a_3 \omega_c \quad (13)$$

式中 $a_1 + a_2 + a_3 = 1$; ω_p' 为主观权重, ω_c 为运行工况权重. 为了讨论方便, 将 a_3 设为 0.2. 当 $a_1 > a_2$ 时, 说明决策者重视客观权重; 当 $a_1 < a_2$ 时, 说

明决策者重视专家的经验知识. 在确定综合权重时, 可以根据实际情况, 设置主观权重、客观权重和运行工况权重.

设对象 $u'_m, u'_n \in U$, 两者在属性 b_p 上的相似度^[14]为

$$L(u'_m, u'_n) = 1 - \frac{|v'_m - v'_n|}{|b_{p\max} - b_{p\min}|} \quad (14)$$

其中 v'_m, v'_n 为 u'_m, u'_n 在约简后的集合中的取值, 而 $b_{p\max}, b_{p\min}$ 为属性 b_p 在值域的最大值和最小值. 在约简后的所有属性上两者之间的相似度:

$$L(u'_m, u'_n) = \frac{1}{|B|} \sum_{p=1}^{|B|} \omega_p L_p(u'_m, u'_n) \quad (15)$$

3 实例分析与验证

航空润滑油用在航空发动机上, 起着润滑、冷却、防锈、清洁和密封等多重作用. 航空发动机磨损故障一般通过以下形式表现出来: 包括出现“减小转速”信号、滑油变黑、发动机振动大、出现杂音等, 其故障原因主要有: 轴承磨损、滑油泵磨损、离心通风器偏磨、附件机匣内齿轮磨损等^[15]. 表 1 给出了某型发动机易损材料表, 指明了滑油中磨损元素与磨损材料的对照关系.

表 1 某型发动机易磨损材料表

Table 1 Wearing material sheet of a engine

磨损元素	易磨损件
铁	轴承滚动体、衬套、涡轮轴、滑油泵、回油泵齿轮、附件传动装置齿轮
铝	离心通风器叶轮、回油泵壳体、附件机匣轴承衬套
铜	主轴承保持架、附件机匣轴承保持架、离合器保持架、滤网
铬	镀铬钢片、不锈钢部件
锌	镀锌油滤、导管
镉	镀镉卡环、导管、堵头、封严衬套
银	镀银主轴承保持架
铅	燃滑油散热器银铅焊料
钛	钛合金导管、燃油泵转接座
锡	滑油滤、离心通风器等处的锡焊料
镁	附件机匣、外置机匣、离心通风器壳体

滑油系统作为航空发动机的重要系统, 其故障严重威胁着飞行安全和作战训练任务的完成, 同时加速了航空发动机的性能退化, 缩短了发动

机的剩余寿命. 因此, 实行滑油消耗量及滑油中金属元素分析与磨损状态趋势监控, 可实现对发动机关键部件的健康状态监控, 对提高飞机的可靠性、确保飞行安全有着重要意义.

本文以某航空发动机的油液故障诊断为例, 运用基于交叉信息熵的变精度粗糙集决策方法进行健康评估. 依据 24 组专家诊断样本建立基于粗糙集的某航空发动机的油液故障特征模型库, 如表 2 所示.

表 2 某型发动机故障决策表^[8]

Table 2 Decision-making sheet of a engine fault

	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>e</i>	<i>f</i>	<i>g</i>	<i>h</i>	<i>i</i>	<i>J</i>	<i>S</i>
1	2	1	1	1	1	1	1	2	1	J_0	1
2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	J_0	2
3	1	1	1	1	2	1	1	1	1	J_0	4
4	1	1	1	1	2	1	1	1	1	J_1	1
5	1	1	2	1	1	2	2	1	1	J_1	9
6	2	2	3	2	2	3	3	2	2	J_1	1
7	1	1	2	1	1	2	2	1	1	J_2	1
8	3	3	2	2	1	1	2	2	1	J_2	1
9	2	1	1	1	1	1	1	2	1	J_2	4

其中, 将该航空发动机油液分析指标作为粗糙集的属性集 $\{a, b, c, d, e, f, g, h\}$, 分别为铁、镁、铝、铜在正常滑动和严重滑动下的磨粒以及油液微粒的铁谱数量等级. S 为具有相同属性的对象数量. 为便于粗糙集处理, 已采用 Naive Scaler 算法将其离散化为 3 种状态: 1(少量)、2(中量)、3(大量). 诊断结果作为目标属性 J 取值 J_1, J_2, J_3 分别对应发动机正常工作、轻微故障、严重故障^[8].

3.1 确定 β 值

根据表 1 所示, 可以得出其条件属性集为

$$U/C = \{\{x_1, x_{21} \sim x_{24}\}, \{x_2, x_3\}, \{x_4 \sim x_8\}, \{x_9, x_{11} \sim x_{19}\}, \{x_{10}\}, \{x_{20}\}\}$$

决策属性集为

$$U/D = \{\{x_1 \sim x_7\}, \{x_8 \sim x_{18}\}, \{x_{19} \sim x_{24}\}\}$$

$$P_r(d_1 | c_1) = 0.2, P_r(d_1 | c_2) = 1$$

$$P_r(d_1 | c_3) = 0.8, P_r(d_1 | c_4) = 0$$

$$P_r(d_1 | c_5) = 0, P_r(d_1 | c_6) = 0$$

$$P_r(d_2 | c_1) = 0, P_r(d_2 | c_2) = 0$$

$$P_r(d_2 | c_3) = 0.2, P_r(d_2 | c_4) = 0.9$$

$$P_r(d_2 | c_5) = 1, P_r(d_2 | c_6) = 0$$

$$P_r(d_3 | c_1) = 0.8, P_r(d_3 | c_2) = 0$$

$$P_r(d_3 | c_3) = 0, P_r(d_3 | c_4) = 0.1$$

$$P_r(d_3 | c_5) = 0, P_r(d_3 | c_6) = 1$$

根据式(7)

$$m_{1d_1} = 1 -$$

$$\max\{P_r(d_1 | c_k) | P_r(d_1 | c_k) < 0.5\} = 0.8$$

$$m_{2d_1} =$$

$$\min\{P_r(d_1 | c_k) | P_r(d_1 | c_k) > 0.5\} = 0.8$$

于是

$$\beta_{d_1} = \xi(I, d_1) = \min(m_{1d_1}, m_{2d_1}) = 0.8$$

同理可得 $\beta_{d_2} = 0.8; \beta_{d_3} = 0.8$. 则 β 的可辨别阈值上界为 0.8, 该阈值上界将 β 取值范围划分为 2 个区间 $(0.5, 0.8]$ 和 $(0.8, 1]$, 根据式计算 2 个区间的分类质量得 $\gamma^{(0.5, 0.8]}(C, D) = 1; \gamma^{(0.8, 1]}(C, D) = 0.17$.

根据 β 的确定原则得到 $\beta = 0.8$.

3.2 近似约简集 B 求解

按照本文描述的方法求取近似约简集 B , 使得 $\gamma^{0.8}(V, D) = \gamma^{0.8}(B, D)$. 由于步骤较多, 在此省略具体过程, 求得故障决策表的核为 $\{e\}$, 选择属性最少的子集之一 $\{a, c, e\}$, 得到决策规则如表 3 所示.

表 3 以 $B = \{a, c, e\}$ 为约简集的决策规则

Tabel 3 Decision rules of reduced unitized $B = \{a, c, e\}$

决策规则	确定性因子	决策规则	确定性因子
1 $a2c1e1 \rightarrow J_0$	0.2	5 $a1c2e1 \rightarrow J_1$	0.9
2 $a2c1e1 \rightarrow J_2$	0.8	6 $a1c2e1 \rightarrow J_2$	0.1
3 $a12c1e2 \rightarrow J_0$	0.86	7 $a2c3e2 \rightarrow J_1$	1.0
4 $a1c1e1 \rightarrow J_1$	0.14	8 $a3c2e1 \rightarrow J_2$	1.0

3.3 属性相对重要度计算

根据不同属性集完成对象空间划分, 可得

$$B = \{a, c, e\}, U/B = \{\{x_1, x_{21} \sim x_{24}\}, \{x_2, x_3\}, \{x_4 \sim x_8\}, \{x_9, x_{11} \sim x_{19}\}, \{x_{10}\}, \{x_{20}\}\}$$

$$U/(B - \{a\}) = \{\{x_1, x_{21} \sim x_{24}\}, \{x_2, x_3\}, \{x_{10}\}, \{x_4 \sim x_8\}, \{x_9, x_{11} \sim x_{20}\}\}$$

$$U/(B - \{c\}) = \{\{x_1, x_{21} \sim x_{24}\}, \{x_2, x_3, x_9, x_{11} \sim x_{19}\}, \{x_{20}\}, \{x_{10}\}, \{x_4 \sim x_8\}\}$$

$$U/(B - \{e\}) = \{\{x_1, x_{21} \sim x_{24}\}, \{x_2 \sim x_8\}, \{x_{20}\}, \{x_{10}\}, \{x_9, x_{11} \sim x_{19}\}\}$$

$$U/D = \{\{x_1 \sim x_7\}, \{x_8 \sim x_{18}\}, \{x_{19} \sim x_{24}\}\}$$

于是根据式(8)~式(10), 得

$$H(D/B) = 0.4962$$

$$H(B/D) = 2.4853$$

$$H(D/B - \{a\}) = 0.7512$$

$$H(B - \{a\}/D) = 1.7569$$

$$H(D/B - \{c\}) = 0.4962$$

$$H(B - \{c\}/D) = 2.15$$

$$H(D/B - \{e\}) = 0.5184$$

$$H(B - \{e\}/D) = 1.8983$$

则它们的交叉信息熵为

$$H(B, D) = H(B/D) - H(D/B) = 1.9891$$

$$|H(B, D) - H(B - \{a\}, D)| = 0.9834$$

$$|H(B, D) - H(B - \{c\}, D)| = 0.3353$$

$$|H(B, D) - H(B - \{e\}, D)| = 0.6092$$

由式(11)得到相对重要度矩阵为

$$V_Q = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & Q_{13} \\ Q_{21} & Q_{22} & Q_{23} \\ Q_{31} & Q_{32} & Q_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 2.9328 & 1.6142 \\ 0.3410 & 1 & 0.5503 \\ 0.6195 & 1.8167 & 1 \end{bmatrix}$$

3.4 属性综合权重计算

由式(12)和式(13)得

$$\omega_{a_1} = (Q_{11} \times Q_{12} \times Q_{13})^{1/3} = 1.6791$$

$$\omega_{a_2} = (Q_{21} \times Q_{22} \times Q_{23})^{1/3} = 0.5725$$

$$\omega_{a_3} = (Q_{31} \times Q_{32} \times Q_{33})^{1/3} = 1.0402$$

$$\omega_B = \omega_{a_1} + \omega_{a_2} + \omega_{a_3} = 3.2918$$

进行归一化处理, 得各属性的客观权重为

$$\omega_B^{a_1} = 0.5101; \omega_B^{a_2} = 0.1739; \omega_B^{a_3} = 0.3160$$

依据专家经验, 在发动机油液监控中, 铁和铝的含量对发动机本身的影响比较大, 给出相对的主观权重为 $\omega'_1 = 0.4; \omega'_2 = 0.3; \omega'_3 = 0.3$. 而运行工况权重为 $\omega_c = 0.2$.

设 $a_1 = 0.3; a_2 = 0.5; a_3 = 0.2$, 意味着本例中较为看重专家经验, 于是有综合权重为

$$\omega_1 = a_1 \omega_B^{a_1} + a_2 \omega'_1 + a_3 \omega_c = 0.4130$$

$$\omega_2 = a_1 \omega_B^{a_2} + a_2 \omega'_2 + a_3 \omega_c = 0.3122$$

$$\omega_3 = a_1 \omega_B^{a_3} + a_2 \omega'_3 + a_3 \omega_c = 0.3548$$

3.5 实例验证

从某型发动机滑油监测数据中提取 1 组数据, 采用与前述数据相同的处理方法, 得到样本为 $u_8 = \{2 \ 1 \ 2 \ 1 \ 1 \ 1 \ 2 \ 1\}$; 其约简集为 $u'_8 = \{2 \ 2 \ 1\}$. 经过约简后的近似约简集如表 4 所示.

表4 约简后的故障决策表
Table 4 Reduced fault decision-making sheet

	a	c	e	J	S
1	2	1	1	J_0	1
2	1	1	1	J_0	2
3	1	1	2	J_1	5
4	1	2	1	J_2	10
5	2	3	2	J_1	1
6	3	2	1	J_2	1
7	2	1	1	J_2	4

运用变精度粗糙集决策算法^[8]无法对该组样本数据进行判断。因此,根据式(14)和式(15)对其进行相似度计算,得

$$\begin{aligned} L(u_1, u_8) &= 0.308, L(u_2, u_8) = 0.2391 \\ L(u_3, u_8) &= 0.1209, L(u_4, u_8) = 0.2391 \\ L(u_5, u_8) &= 0.308, L(u_6, u_8) = 0.2391 \\ L(u_7, u_8) &= 0.308 \end{aligned}$$

由于 $L(u_1, u_8) = L(u_3, u_8) = L(u_7, u_8)$ 值最大,进一步比较在未约简的故障决策表中它的权值,得出 $L(u_3, u_8)$ 最大,所以 u_8 和 u_3 最相似,于是给出 u_8 的决策为 J_1 ,即发动机处于轻微故障状态,需要对其进行维护,使其处于良好状态。

在本例中,若仅根据客观权重计算进行相似性度量,得出 $L(u_6, u_8)$ 值最大,所以 u_8 和 u_6 最相似,于是给出 u_8 的决策为 J_2 ,即发动机处于严重故障状态。

上述分析说明,由于本实例为小样本计算,需要结合专家经验和运行环境对由客观权重给出的结果进行修正,得出此时的发动机处于故障性能退化状态,从而使决策结果更符合实际情况。

4 结 论

本文提出了一种基于交叉信息熵的相似度量度的航空发动机健康评估变精度粗糙集决策方法,通过对决策规则的属性进行相对重要度计算,得到属性综合权重,实现了系统的健康评估。

在航空发动机健康评估过程中,机载系统只需在空中完成健康评估,并将结果告知地面,由地面根据决策结果,布置相关任务,方法较为简单,比较适合机载系统。由于航空发动机类型的不同,可获取的数据信息大小也有所不同。一般来说,在决策信息中,数据越多,决策规则就越多,能够找

到相似性规则的可能性也就越大,使用本方法的正确率也越高。因此,该方法在航空发动机中具有一定的普适性。相对于文献[8]中的方法仅给出了简单的理论推导,本文的方法在对变精度粗糙集进行深入讨论的基础上,进一步给出了健康评估的适用范围,扩展了方法的适用性,使得决策过程更加完整、可信。

参考文献:

- [1] 彭宇,刘大同,彭喜元.故障预测与健康管理工作综述[J].电子测量与仪器学报,2010,24(1):1-9.
PENG Yu, LIU Datong, PENG Xiyuan. A review: prognostics and health management[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2010, 24(1): 1-9. (in Chinese)
- [2] Hatzfeldt J, Fannie G. Disparities in U. S. Air Force preventive health assessments and medical deployability[J]. Military Medicine, 2010, 175(1): 25-32.
- [3] Pendse R, Thanthry N. Aircraft health management network: a user interface[C] // Proceedings of IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, New York: IEEE, 2009.
- [4] 代京,张平,李行善,等.综合运载器健康管理健康评估技术研究[J].宇航学报,2009,30(4):1711-1721.
DAI Jing, ZHANG Ping, LI Xingshan, et al. Research on health assessment of integrated vehicle health management [J]. Journal of Astronautics, 2009, 30(4): 1711-1721. (in Chinese)
- [5] 王俨劼,廖明夫.航空发动机健康等级评价方法[J].航空动力学报,2008,23(5):939-945.
WANG Yankai, LIAO Mingfu. Study on grading of health condition of aerospace propulsion system[J]. Journal of Aerospace Power, 2008, 23(5): 939-945. (in Chinese)
- [6] Al-Atat H, Siegf D, Lee J. A systematic methodology for gearbox health assessment and fault classification[J]. International Journal of Prognostics and Health Management, 2009, 2(1): 1-16.
- [7] LIANG Tang, Roemer M, Bharadwaj S. An integrated health assessment and fault contingency management system for aircraft[R]. AIAA 2008-6505, 2008.
- [8] 索中英,朱林户,吴华,等.基于变精度粗糙集的航空发动机故障诊断[J].航空动力学报,2008,23(10):1842-1846.
SUO Zhongying, ZHU Linhu, WU Hua, et al. Aeroengine fault diagnosis based on variable precision rough set[J]. Journal of Aerospace Power, 2008, 23(10): 1842-1846. (in Chinese)
- [9] Ziarko W. Variable precision rough set model[J]. Journal of Computer and System Science, 1993, 46(1): 39-59.
- [10] 陆秋琴,和涛,黄光球.多重变精度粗糙集模型[J].计算机应用,2011,31(6):1636-1640.
LU Qiuqin, HE Tao, HUANG Guangqiu. Multiple variable precision rough set model[J]. Journal of Computer Application, 2011, 31(6): 1636-1640. (in Chinese)

- [11] Beynon M. Reduct within the variable precision rough sets model:a further investigation[J]. European Journal of Operational Research,2001,134(3):592-605.
- [12] Brink A D,Pendock N E. Minimum cross-entropy threshold selection[J]. Pattern Recognition,1996,29(1):179-188.
- [13] 杨艳春,孟祥武. 基于关键词的对等网络节点群相似性度量模型研究[J]. 武汉大学学报:理学版,2011,57(6):489-493.
YANG Yanchun,MENG Xiangwu. A keyword-based model of similarity measurement on peer groups in peer-to-peer networks[J]. Journal of Wuhan University: Natural Science Edition,2011,57(6):489-493. (in Chinese)
- [14] 盛步云,林志军,丁毓峰,等. 基于粗糙集的协同设计冲突
消解事例推理技术[J]. 计算机集成制造系统,2006,12(12):1952-1956.
SHENG Buyun,LIN Zhijun,DING Yufeng, et al. Rough set-based conflict resolution case reasoning in collaborative design[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2006,12(12):1952-1956. (in Chinese)
- [15] 陈立波,宋兰琪,陈果. 航空发动机滑油综合监控中的磨损故障融合诊断研究[J]. 航空动力学报,2009,24(1):169-175.
CHEN Libo,SONG Lanqi,CHEN Guo. Study on fusion diagnosis techniques of wear faults in synthesized monitoring of aero-engine[J]. Journal of Aerospace Power,2009,24(1):169-175. (in Chinese)