

文章编号:1000-6893(2000)05-0453-14

## 航空发动机滑油光谱专家系统知识库建立

宋兰琪, 汤道宇, 陈立波, 毛美娟

(北京航空工程技术研究中心, 北京 100076)

KNOWLEDGE BASE BUILDING IN THE EXPERT SYSTEM OF  
AIRCRAFT ENGINE SPECTROMETRIC OIL ANALYSIS

SONG Lan-qi, TANG Dao-yu, CHEN Li-bo, MAO Mei-juan

(Beijing Aeronautical Technology Research Center, Beijing 100076, China)

**摘要:**从理论和实际应用两方面对滑油光谱分析故障诊断专家系统知识库的建立进行了较深入的研究和探讨。提出了知识库建立的方法,应用磨损元素浓度与浓度增长率模糊综合评判、模糊聚类的方法定量研究,结合专家经验,较好地解决了故障诊断准确度问题。

**关键词:**航空发动机; 滑油光谱监控; 专家系统; 知识库

**中图分类号:** V249.1 **文献标识码:** A

**Abstract:** A systematic research on the knowledge base building in the expert system of spectrometric oil analysis (SOA) and fault diagnosis is carried out theoretically as well as practically. The knowledge building is the core of an expert system. A comparative research about the theory and method of knowledge building is carried out. Through the investigation, knowledge collect and scene test, fuzzy logic and fuzzy cluster methods are adopted in explaining the data from different aspects. Good accuracy and applicability can be improved by combining these useful methods and expert knowledge. The method of knowledge establishing specially suitable for the condition is summarized.

**Key words:** aircraft engine; SOA; expert system; knowledge base

滑油光谱监控需要制定发动机磨损元素界限值,更深一步的就是开发故障诊断专家系统<sup>[1]</sup>,准确确定发动机磨损故障类型、原因、部位并采取相应措施,提高故障诊断准确率。目前国际上已见商品化的几种滑油检测专家系统提供的仅是一个框架和管理系统,其核心知识库要用户自己去开发,另外还需用户提供所监控对象的磨损元素界限值<sup>[2-4]</sup>。而专家系统开发最困难的就是知识库的建立,对此,本文提出了一套方法,除获取专家知识和经验,还应用磨损元素浓度与浓度增长率模糊综合评判、模糊聚类的方法定量研究,提高了故障诊断准确率,有较强实用性。

## 1 专家系统基本构成

所研制的诊断型专家系统由知识库、数据库、推理机、解释系统和知识获取系统组成<sup>[5]</sup>。关键在于知识库的知识获取、知识分类、分层,建立判别准则,及解决知识库的管理系统。发动机滑油光谱故障诊断专家系统研究了动态制定界限值的方法,制定了发动机磨损元素浓度和浓度增长率界

限值,开发了包括正向、反向和不精确推理(采用(1-10)的系统)的推理机,设计了知识库编辑和维护系统等。其构成如图1所示。

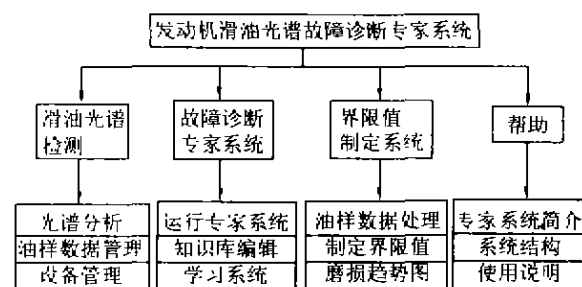


图1 专家系统功能构成

## 2 知识库的建立

着重对知识库建立的方法、步骤进行了系统深入的研究,提出了一套切实可行、易操作的方法。包括确定监控对象和任务然后进行详细调研;设计知识组织的结构;形成表达知识的规则和对知识库检验等4个主要步骤。

知识库的建立采用的是基于规则的知识表示方法。规则的三要素包括前提(条件)、结论(行动)、置信度(先验概率)。规则的表示形式可写为:

<规则>::=<规则><规则个数>

如果<前提组>

则<结论组><置信度因子CF>

否则<结论组><置信度因子CF>

注释

参考

很明显,知识库的建立就是要根据航空发动机滑油系统磨损特点、针对故障采取的措施等,确定前提和结论,形成有效的规则。

(1) 知识库结构 将有关专家知识提炼、整理条理化,设计、建立规范化前提和结论,针对每种机型分别编制。前提主要有12种监控元素(Fe, Al, Cu, Cr, Zn, Cd, Si, Ag, Pb, Ti, Sn, Mg)可能出现的情况、可能来源(如铁元素浓度值异常、浓度增长率正常、是非铁合金等)、发动机故障现象(如:发动机振动大、有杂音)等组成;结论主要是故障的可能情况、故障可能发生的部位、建议措施等(如:铜来自轴承保持架;结论和建议:油样分析结果正常,继续常规取样)。如对某型飞机制定了20多个前提,150多条结论。

(2) 形成规则 为了很好地形成规则,对发动机磨损元素浓度值、浓度增长率的变化及对应采取的措施等着重进行了研究,据此确定的某型飞机发动机状况主要判断依据结果,见表1。这为建立规则,奠定了良好的基础。

表1 某型飞机发动机磨损元素变化故障诊断判断表<sup>1)</sup>

浓度值	浓度增长率	结论和建议
正常	无	油样分析结果正常,继续常规取样
	正常	油样分析结果正常,继续常规取样
	异常	不换油,立即重新取样分析 <sup>2)</sup>
警告	无	注意发动机状况,缩短取样期监控
	正常	注意发动机状况,缩短取样期监控
	异常	不换油,每个飞行日后取样分析
异常	无	不换油,地面试车后重新取样分析 <sup>3)</sup>
	正常	不换油,地面试车后重新取样分析
	异常	不能飞行或工作,查找原因将处理意见上报

注1:对某些元素如硅不能完全按此表执行,详见规则。主要有:确认有污染,清洗系统,地面试车后取样直到分析结果正常为止;  
2:若重新取样分析确认后,仍然浓度值正常、浓度增长率异常,则结论和建议为:注意发动机状况,不换油,每个飞行日后取样分析。

3:若地面试车后取样分析,仍然是浓度值异常、浓度增长率正常,则结论和建议为:检查发动机状况,若没有问题,监控使用,不换油,每次飞行后取样分析。

规则的建立基本上按专家诊断故障的思路以及系统工作的原理将已制定出的前提和结论按一

定顺序组合排列。该项工作中,特别注意了知识库的一致性和完整性,经反复验证,建立了专家系统知识库的原型。知识库中规则大致分3类:①据发动机磨损元素浓度值和浓度增长率确定发动机磨损程度;②据发动机及磨损元素异常情况确定可能的磨损部位、故障原因;③据发动机磨损程度、故障现象等确定需采取的措施,完成知识库的建造,然后进行完善修改和检验。每种机型专家系统建立规则200多条,应用知识库这些规则能较好地进行滑油光谱故障诊断。知识库中的规则以及前提和结论都可以通过菜单很方便地进行增删和修改。

(3) 规则编程 规则的程序结构简明,用C语言描述,其基本格式如下:

(规则名) [( [前提1] [前提2] ... [前提n] )  
[置信度]] → [( [结论1] [结论2] ... [结论m] )  
[置信度]]

规则的编程如下例所示:

规则序号:86

如果:Fe 高于警告值

和 [Fe] > [Fe HLR] (HLR—异常值)

和 Fe 浓度增长率大于异常值

和 Fe 为非铁合金

和 发动机没发现明显症状

则:HLR Fe, ([FE])<sup>10/6</sup>, Lim[[FE HLR]]

和 注意:Fe 浓度超出异常值

和 HLR Fe T, [[FE T]], Lim[[FE T HLR]]

和 注意:Fe 浓度急剧增长

和 铁来自于主轴承滚珠、滚棒、内外钢套—置信度 8/10

和 铁来自主轴承涨圈、轴承衬套、涡轮轴—置信度 8/10

和 铁来自滑油泵齿轮、回油泵传动轴、附件传动装置齿轮—置信度 7/10

和 铁来自铁锈—置信度 4/10

和 结论和建议:不能飞行或工作,查找原因,检查油滤和磁塞并将结果和处理意见上报—置信度 10/10

### 3 浓度与浓度增长率的模糊综合评判

专家系统知识库应用发动机磨损元素浓度和浓度增长率界限值进行故障预报,仅给出定性考虑是不够的,为提高故障诊断准确率还需定量研究浓度和浓度增长率的综合变化,进行全面分析。为此本文提出了浓度和浓度增长率的模糊综合评

判法,预报发动机磨损状态。

(1) 主要考虑因素集 对模糊变换:  $B=A \circ R$ , 本文采用的算法为加权平均型, 即

$$b_j = \min(1, \sum_{i=1}^n a_i r_{ij}) \quad (1)$$

主要考虑因素集为

$$U = \{U_1, U_2\},$$

式中:  $U_1$  为磨损元素浓度;  $U_2$  为磨损元素浓度增长率; 因素集  $U_1, U_2$  由若干基本因素确定, 即

$$U_1 = \{u_1^1, u_2^1, \dots, u_n^1\},$$

$$U_2 = \{u_1^2, u_2^2, \dots, u_n^2\},$$

式中:  $u_n^1$  为滑油中第  $n$  个磨损元素浓度值;  $u_n^2$  为滑油中第  $n$  个磨损元素浓度增长率; 对应评语集为:  $V = \{V_1, V_2\}$ 。

$V_1 = \{\text{浓度正常, 浓度警告, 浓度异常}\}; V_2 =$

$$\mu_{i,j=1}^k = \begin{cases} 1 & x \leq a_1/2 \\ 1 - 2[(x - a_1/2)/a_1]^2 & a_1/2 < x \leq a_1 \\ 2[x - (a_1 + a_2)/2]/(a_2 - a_1) & a_1 < x \leq (a_1 + a_2)/2 \\ 0 & x > (a_1 + a_2)/2 \end{cases}$$

$$\mu_{i,j=2}^k = \begin{cases} 0 & x \leq a_1/2 \\ 2[(x - a_1/2)/a_1]^2 & a_1/2 < x \leq a_1 \\ 1 - 2[x - (a_1 + a_2)/2]/(a_2 - a_1) & a_1 < x \leq (a_1 + a_2)/2 \\ 2[(x - a_2 - a_1/2)/a_1] & (a_1 + a_2)/2 < x \leq a_2 \\ 0 & x > a_2 + a_1/2 \end{cases}$$

$$\mu_{i,j=3}^k = \begin{cases} 0 & x \leq (a_1 + a_2)/2 \\ 2[x - (a_1 + a_2)/2]/(a_2 - a_1) & (a_1 + a_2)/2 < x \leq a_2 \\ 1 - 2[(x - a_2 - a_1/2)/a_1]^2 & a_2 < x \leq a_2 + a_1/2 \\ 1 & x > a_2 + a_1/2 \end{cases}$$

式中:  $k$  为各因素集编号,  $k=1, 2$ ;  $i$  为各考虑基本因素,  $i=1, 2, 3, \dots, n$ ; ( $n=12$ );  $j$  为评语等级,  $j=1, 2, 3$ ;  $a_1$  为各磨损元素浓度(浓度增长率)警告值;  $a_2$  为各磨损元素浓度(浓度增长率)异常值。

①一级评判 一级评判矩阵由式(3)中各  $r_{ij}^k$  组成,  $r_{ij}^k$  由式(2)计算所得。

$$R^k = \begin{bmatrix} r_{1,1}^k & r_{1,2}^k & r_{1,3}^k \\ r_{2,1}^k & r_{2,2}^k & r_{2,3}^k \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ r_{n,1}^k & r_{n,2}^k & r_{n,3}^k \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中:  $k=1, 2, 3; n=12$ 。

每一单因素  $\mu_i^k$  对  $U_k$  的评判所起的影响大小, 可认为是权重, 同样以隶属函数的形式考虑, 即

{浓度增长率正常, 浓度增长率警告, 浓度增长率异常}。

(2) 单因素评语等级的隶属函数和评判矩阵的确定 对滑油光谱检测某一磨损元素测量值  $x_i$ , 其隶属函数为  $\mu(x_i)$ , 取“S”型经验分布型隶属函数, 各考虑因素获得第  $j$  种评语的隶属函数如图 2。

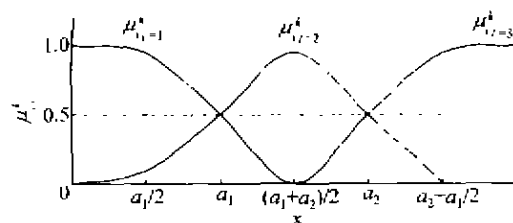


图 2 隶属函数示意图

图 2 中:

$$\begin{aligned} & x \leq a_1/2 \\ & a_1/2 < x \leq a_1 \\ & a_1 < x \leq (a_1 + a_2)/2 \\ & x > (a_1 + a_2)/2 \\ & x \leq a_1/2 \\ & a_1/2 < x \leq a_1 \\ & a_1 < x \leq a_2 \\ & a_2 < x \leq a_2 + a_1/2 \\ & x > a_2 + a_1/2 \\ & x \leq (a_1 + a_2)/2 \\ & (a_1 + a_2)/2 < x \leq a_2 \\ & a_2 < x \leq a_2 + a_1/2 \\ & x > a_2 + a_1/2 \end{aligned}$$

(2)

$$A_k = (a_1^k \ a_2^k \ \dots a_n^k) \quad (4)$$

式中:

$$a_i^k = \begin{cases} 0 & x \leq a \\ 2[(x - a)/(c - a)]^2 & a < x \leq b \\ 1 - 2[(x - c)/(c - a)]^2 & b < x \leq c \\ 1 & x > c \end{cases} \quad (5)$$

其中:  $a=a_1, b=a_2, c=a_3$ 。

一级综合评判是综合  $U_k$  集中基本因素  $\mu_i^k$  的评判作出的, 即磨损元素分析数据由式(3)得到评判矩阵  $R_k$ , 由式(4)得各基本因素影响作用的大小的  $A_k$ , 并归一化后, 由加权平均模型计算

$$B_k = A_k^* \circ R^k \quad (6)$$

式中:  $k=1, 2$ ;  $A_k^*$  为归一化后的权重。

②二级评判 二级评判矩阵为

$$R = \begin{Bmatrix} B_1 \\ B_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} \end{Bmatrix} \quad (7)$$

(3) 磨损状态模糊综合评判 发动机磨损元素浓度与浓度增长率的综合评判是个二级评判模型。

二级评判是综合  $B_1, B_2$  的评判作出的, 各因素  $U_1, U_2$  的权重, 根据对浓度和浓度增长率因素考虑的轻重给出, 应用加权平均型模型, 按最大隶属准则作出评判。

因此二级评判为

$$B = A^* \cdot R = (\alpha_n \quad \alpha_l) \begin{Bmatrix} B_1 \\ B_2 \end{Bmatrix} \quad (8)$$

式中:  $\alpha_n$  为浓度权系数;  $\alpha_l$  为浓度增长率权系数。

#### 4 磨损元素的模糊聚类分析

研究滑油光谱故障诊断专家系统, 其中一个目的就是要判断发动机磨损故障的部位, 这需要在知识库领域专家这方面的经验规则, 作为补充, 本文还应用磨损聚类方法对指标(主要摩擦副元素)进行聚类定量分析。主要基于发动机主要摩擦副大多有两种以上的材料组成, 当某一摩擦副发生故障时, 将有一种以上元素的光谱分析数据发生异常, 如果经聚类分析发现几种元素聚为一类, 并且是某一摩擦副的组分, 则可判断该摩擦副可能出现异常磨损或故障。本文采用系统聚类方法, 为提高分类的效果, 需选择有代表性的主要摩擦副元素进行聚类(有 Fe, Cu, Cr, Zn, Ag, Pb, Ti)。对数据归一化后, 选相关系数作为统计量, 然后对给定的  $\lambda \in [0, 1]$  进行分类。具体计算不再详述。

#### 5 应用情况

研制的“发动机滑油光谱故障诊断专家系统”经过两年多的应用, 建立的知识库经历考核, 专家经验规则和定量分析互相补充, 提高了故障诊断的准确度。监控发现 20 多起发动机故障, 效果明显, 很好的保证了飞机飞行安全。下面用实例说明。

1998 年 7 月, 专家系统预报了某型飞机 23 号右发主轴磨损的故障。其滑油光谱检测数据见表 2。

(1) 应用界限值判断 铁、铜、银的含量超过浓度异常值, 铁元素超过浓度增长率异常值。

(2) 浓度和浓度增长率综合评判 按照第 3 节浓度与浓度增长率的模糊综合评判计算方法进

表 2 23 右侧发动机浓度和浓度增长率值

浓度值	Fe	Al	Cu	Cr
	12.50	1.54	6.20	1.32
	Zn	Cd	Si	Ag
浓度增长率	0.22	0.79	9.67	7.40
	Fet	Alt	Cut	Crt
	2.40	0.30	1.19	0.30
浓度增长率	Znt	Cdt	Sit	Agf
	1.30	0.16	4.45	0.73
	Pbt	Tit	Sut	Mgt
浓度增长率	0.01	0.15	1.86	1.42

注: 浓度单位:  $\mu\text{g/g}$ , 增长率为 10h 浓度增长值。

行计算。因素集  $U_1$  为该油样中 Fe, Al 等 12 种监控元素的浓度值;  $U_2$  为该油样中 Fe, Al 等 12 种监控元素的浓度增长率值。

各考虑因素(12 种)如  $u_1^i$  (铁元素浓度值),  $u_2^i$  (铁元素浓度增长率值)的等级划分见表 3。

表 3 各考虑因素等级划分

$\mu^j$	$V_j \quad (j=1)$	$V_j \quad (j=2)$	$V_j \quad (j=3)$
	正常	警告	异常
	$0 \sim a_1$	$a_1 \sim a_2$	$a_2 \sim$
$u_1^i$	$0 \sim 6$	$6 \sim 8$	$8 \sim$
$u_2^i$	$0 \sim 1.5$	$1.5 \sim 2.0$	$2.0 \sim$

$\mu^j$  得到后按照隶属函数(式 2)求得  $\mu_{ij}^j$ , 然后由第 3 节所述计算公式得到该油样浓度和浓度增长率综合评判的一级矩阵和二级矩阵。

计算得到该油样一级评判, 浓度  $B_1 = \{0.025, 0.137, 0.566\}$ , 按最大隶属原则看  $B_1$  的评价, 异常的评价最高(0.566), 说明该发动机总的磨损异常; 浓度增长率  $B_2 = \{0.136, 0.387, 0.368\}$ , 磨损增长率较高。浓度和浓度增长率权系数分别取 0.4 和 0.6 (浓度的变化趋势能较好地说明磨损程度), 综合分析得到二级评判结果:  $B = \{0.0916, 0.287, 0.447\}$ , 结论是有异常磨损。

(3) 聚类分析 应用系统聚类法, 对该油样中 7 种磨损元素(Fe, Cu, Cr, Zn, Ag, Pb, Ti)进行聚类。对 7 种磨损元素浓度值数据归一化后, 选相关系数作为统计量, 然后对给定的  $\lambda \in [0, 1]$  进行分类。聚类分析结果为:

$$\lambda=1 \quad \{\text{Fe}\} \{\text{Cu}\} \{\text{Cr}\} \{\text{Zn}\} \{\text{Ag}\} \{\text{Pb}\} \{\text{Ti}\}$$

$$\lambda=0.9985 \quad \{\text{Fe}, \text{Cu}, \text{Ag}\} \{\text{Cr}\} \{\text{Zn}\} \{\text{Pb}\} \{\text{Ti}\}$$

$$\lambda=0.8845 \quad \{\text{Fe}, \text{Cu}, \text{Ag}, \text{Cr}, \text{Ti}\} \{\text{Zn}\} \{\text{Pb}\}$$

$$\lambda=0.7074 \quad \{\text{Fe}, \text{Cu}, \text{Cr}, \text{Zn}, \text{Ag}, \text{Pb}, \text{Ti}\}$$

说明有故障的摩擦副含 Fe, Cu, Ag 等元素, 相应部位是主轴承保持架、滚动体等。