

# 航空发动机磨损故障的智能融合诊断

陈 果

南京航空航天大学,南京,210016

**摘要:**提出了航空发动机磨损故障的智能融合诊断方法。对油样分析中多种数据源信息的特点进行分析,根据不同的诊断目的对多种分析方法进行了相应的组合;利用基于规则的专家系统诊断技术,分别实现发动机磨损故障的定位、定性及定因的单项诊断;在此基础上,利用D—S证据理论,实现了发动机磨损故障的融合诊断;最后用算例验证了方法的正确性和有效性。

**关键词:**航空发动机;磨损;专家系统;数据融合;D—S证据理论

**中图分类号:**V23 **文章编号:**1004-132 (2005)04-0299-04

## Intelligent Fusion Diagnosis of Aeroengine Wear Faults

Chen Guo

Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, 210016

**Abstract:** Aiming at aeroengine wear faults diagnosis, a new method, intelligent fusion diagnosis of aeroengine wear faults was put forward. Firstly, the characteristics of manifold data sources from oil analysis were analyzed, and they were combined according to various diagnosis objective. Secondly, they are used respectively to diagnose engine wear faults' parts, properties, and reasons by Expert System (ES) method based on knowledge rule. On these basis, fusion diagnosis of aeroengine wear faults' parts and reasons was carried out by D-S evidence theory. Finally, an example is given to show that the presented method is corrective and effective.

**Key words:** aeroengine; wear; expert system (ES); data fusion; D-S evidence theory

## 0 引言

随着机械工业和航空技术的不断发展,军用飞机的关键部件——航空发动机的结构日益复杂,在追求高性能低成本发动机的同时,其润滑系统中各摩擦副零组件更趋于高载荷、高温、高速及轻质量,因此容易发生各种磨损故障,从而严重影响发动机的安全性和可靠性,进而影响军队战斗力。因此基于油样分析的发动机状态监测与故障诊断具有极其重要的意义。

根据工作原理和检测手段的不同,目前油样分析方法可分为铁谱分析法、光谱分析法、颗粒计数分析法及理化分析法等。文献[1]指出,单一油样分析技术的诊断准确率均有限,铁谱为55%,光谱为36%,油品理化分析为21%,基于颗粒计数的污染分析为33%,但如果综合各种油样分析技术,则可以使它们相互补充、相互验证,从而大大提高故障诊断准确率。综合诊断方法可以使诊断准确率达到70%以上。由此可见,融合诊断有利于提高诊断精度。

目前,国内外学者对多种油样分析方法的融合诊断进行了深入的研究<sup>[2-4]</sup>。本文以某型军用导弹发动机试车台试验中磨损故障诊断为例,对多种诊断方法的特点进行分析,充分利用多种分析方法的优点,对它们进行不同的组合。首先利用基于规则的专家系统方法<sup>[5,6]</sup>实现磨损故障的定位、定性及定因单项诊断,在此基础上,利用D—S证据理论实现磨损故障的融合诊断。

## 1 发动机故障诊断的原始数据源

某型军用导弹发动机在试车过程中产生的原始数据的主要来源如下:通过安装在试车台上的各种传感器测试的试车台监测数据;通过在发动机的取油口取油,并对采集的油样进行各种分析而得到的实验数据。这些原始数据可以分为取样部位、铁谱数据、光谱数据、颗粒计数数据、理化分析数据。

表1为各种原始数据对故障定位、定性、定因诊断的有效性。从表中可以看出:对于定位诊断,光谱诊断的有效性最高,铁谱诊断次之,取样部位也能提供一定的定位信息,因此,可以利用铁谱、光谱及取样部位三种信息以实现定位融合诊断;对于定性诊断,除铁谱数据外,其他原始数据能提供的信息均很少,因此,只有利用铁谱数据来实现

收稿日期:2004-04-13

基金项目:南京航空航天大学人才基金资助项目(S0293-071);南京航空航天大学民航科研基金资助项目(Y0202-MH)

故障的定性诊断;对于定因诊断,铁谱分析数据的有效性最高,理化分析能提供一定的信息,因此,可以利用铁谱数据和理化分析数据来实现故障的定因融合诊断。颗粒计数分析对磨损故障的定位、定性及定因诊断有效性较低,可以不予考虑。

表 1 各种原始数据对定位、定性、定因诊断的特点分析

	取样部位	铁谱数据	光谱数据	颗粒计数数据	理化分析数据
定位诊断	*	*	***	—	—
定性诊断	—	***	—	—	—
定因诊断	—	***	—	—	**

注:“\*\*\*”为最高的有效性;“\*\*”为中等的有效性;“\*”为较差的有效性;“—”为无效。

## 2 发动机磨损故障的定位诊断

该型发动机的油路简图见图 1,其过油部件的摩擦副组成如下:前轴承腔为高低压轴前支点轴承,电机轴承,低压中支点轴承,附件传动轴承,中心传动轴承;高压轴齿轮螺母,电机齿轮螺母,附件传动齿轮,中心传动齿轮。后轴承箱为高低压轴后支点轴承。润滑油泵齿轮为回油泵齿轮,增压泵齿轮。

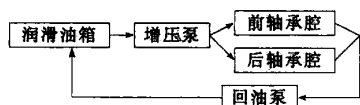


图 1 某军用发动机的油路简图

拟定故障诊断部位如下:增压泵齿轮  $P_1$ ;回油泵齿轮  $P_2$ ;前腔齿轮  $P_3$ ;前腔高低压轴前中支点轴承  $P_4$ ;前腔电机轴承  $P_5$ ;附件传动轴承  $P_6$ ;中心传动轴承  $P_7$ ;后腔高低压轴后支点轴承  $P_8$ 。

### 2.1 取样部位定位诊断法

取样部位能提供一定的故障部位信息,根据该发动机的油路图,可以用规则表述如下:

Rule1:if 前腔取样 then 增压泵齿轮  $P_1$  (1.0/6) or 前腔齿轮  $P_3$  (1.0/6) or 前腔高低压轴前中支点轴承  $P_4$  (1.0/6) or 前腔电机轴承  $P_5$  (1.0/6) or 附件传动轴承  $P_6$  (1.0/6) or 中心传动轴承  $P_7$  (1.0/6)。

Rule2:if 后腔取样 then 增压泵齿轮  $P_1$  (1.0/2) or 后腔高低压轴后支点轴承  $P_8$  (1.0/2)。

Rule3:if 滑油箱取样 then 增压泵齿轮  $P_1$  (1.0/8) or 回油泵齿轮  $P_2$  (1.0/8) 前腔齿轮  $P_3$  (1.0/8) or 前腔高低压轴前中支点轴承  $P_4$  (1.0/8) or 前腔电机轴承  $P_5$  (1.0/8) or 附件传动轴承  $P_6$  (1.0/8) or 中心传动轴承  $P_7$  (1.0/8) or 后腔高低压轴后支点轴承  $P_8$  (1.0/8)。

### 2.2 光谱定位诊断法

光谱诊断通常根据检测出的金属类型及其浓度,并依据其是否超过磨损界限值来判别含该类金属的摩擦副是否磨损过量。但是合适的磨损界限值应该根据实际的机器摩擦副结构及类型,并且需要通过大量的实验来确定,通常比较困难。根据该型发动机的具体结构和摩擦副的材质,选择 Fe、Cr、Ni、Mo、V、Cu、Zn、Al 及 Ti 九种元素作为诊断依据(见表 2)。

表 2 某型发动机摩擦副材料的元素质量分数比较

单位: %

元素	Fe	Cr	Ni	Mo	V	Cu	Zn	Al	Ti
Cr4Mo4V (轴承滚道及滚珠)	88.80 (0.93)	4.00 (0.22)	0.20 (0.02)	4.25 (1.00)	1.00 (1.00)	0.20 (0.00)	0.00 (0.00)	0.00 (0.00)	0.00 (0.00)
2Cr3WMoV-1 (齿轮)	94.20 (1.00)	3.00 (0.17)	0.30 (0.03)	0.45 (0.11)	0.75 (0.75)	0.00 (0.00)	0.00 (0.00)	0.00 (0.00)	0.00 (0.00)
1Cr18Ni9Ti (附件及中心传动 轴承保持架)	68.90 (0.72)	18.00 (1.00)	9.50 (1.00)	0.00 (0.00)	0.00 (0.00)	0.00 (0.00)	0.00 (0.00)	0.00 (0.00)	0.65 (1)
H62 (附件传动轴承保持架)	0.15 (0.00)	0.00 (0.00)	0.00 (0.00)	0.00 (0.00)	0.00 (0.00)	62.00 (0.73)	37.20 (1.00)	0.00 (0.00)	0.00 (0.00)
QA10 (高低压支点、电机及 中心传动轴承保持架)	3.00 (0.00)	0.00 (0.00)	0.00 (0.00)	0.00 (0.00)	0.00 (0.00)	84.50 (1.00)	0.50 (0.00)	9.50 (1.00)	0.00 (0.00)

注:括号中为归一化后的值

光谱诊断知识规则总结如下:

Rule1: if 各金属含量均正常 then 系统磨损正常 (1.0);

Rule 2: if Fe 含量不正常 then 轴承滚道及滚珠 ( $P_4$ 、 $P_5$ 、 $P_6$ 、 $P_7$ 、 $P_8$ ) 严重磨损 (0.93/5);

Rule 3: if Fe 含量不正常 then 齿轮 ( $P_1$ 、 $P_2$ 、 $P_3$ ) 严

重磨损 (1.0/3);

Rule 4: if Cr 含量不正常 then 附件及中心传动轴承保持架 ( $P_6$ 、 $P_7$ ) 严重磨损 (1.0/2);

Rule 5: if Ni 含量不正常 then 附件及中心传动轴承保持架 ( $P_6$ 、 $P_7$ ) 严重磨损 (1.0/2);

Rule 6: if Mo 含量不正常 then 轴承滚道及滚珠

( $P_4, P_5, P_6, P_7, P_8$ ) 严重磨损 (1.0/5);

Rule 7: if V 含量不正常 then 轴承滚道及滚珠 ( $P_4, P_5, P_6, P_7, P_8$ ) 严重磨损 (1.0/5);

Rule 8: if V 含量不正常 then 齿轮 ( $P_1, P_2, P_3$ ) 严重磨损 (0.75/3);

Rule 9: if Cu 含量不正常 then 附件传动轴承保持架 ( $P_6$ ) 严重磨损 (0.73);

Rule 10: if Cu 含量不正常 then 高低压支点、电机及中心传动轴承保持架 ( $P_4, P_5, P_7$ ) 严重磨损 (1.0/3);

Rule 11: if Zn 含量不正常 then 附件传动轴承保持架 ( $P_6$ ) 严重磨损 (1.0);

Rule 12: if Al 含量不正常 then 高低压支点、电机及中心传动轴承保持架 ( $P_4, P_5, P_7$ ) 严重磨损 (1.0/3);

Rule 13: if Ti 含量不正常 then 附件及中心传动轴承保持架 ( $P_6, P_7$ ) 严重磨损 (1.0/2)。

规则中的置信度为表 2 中归一化后的数值除以包含的诊断部位数量得到,它反映了当某种或某几种元素不正常时,诊断出发生严重磨损部位的相对可信性,其中元素含量是否正常需要与各元素的磨损界限值相比较得到,而磨损界限值需要通过大量的检测实验才能得到。

### 2.3 铁谱定位诊断法

铁谱定位诊断主要通过对各类磨粒的含量分析,根据文献[7]可以得到铁谱故障定位诊断的知识规则:

Rule 1: if 各类磨粒均少量 then 系统正常 (置信度 1.0);

Rule 2: if 球状磨粒大量 then 滚动轴承 ( $P_4, P_5, P_6, P_7, P_8$ ) 疲劳 (0.5/5);

Rule 3: if 层状磨粒大量 then 滚动轴承 ( $P_4, P_5, P_6, P_7, P_8$ ) 疲劳 (0.6/5);

Rule 4: if 疲劳剥块大量 then 滚动轴承 ( $P_4, P_5, P_6, P_7, P_8$ ) 疲劳 (0.8/5);

Rule 5: if 球状磨粒大量 and 层状磨粒大量 then 滚动轴承 ( $P_4, P_5, P_6, P_7, P_8$ ) 疲劳 (0.7/5);

Rule 6: if 球状磨粒大量 and 疲劳剥块大量 then 滚动轴承 ( $P_4, P_5, P_6, P_7, P_8$ ) 疲劳 (0.85/5);

Rule 7: if 层状磨粒大量 and 疲劳剥块大量 then 滚动轴承 ( $P_4, P_5, P_6, P_7, P_8$ ) 疲劳 (0.9/5);

Rule 8: if 球状磨粒大量 and 层状磨粒大量 and 疲劳剥块大量 then 滚动轴承 ( $P_4, P_5, P_6, P_7, P_8$ ) 疲劳 (0.95/5);

Rule 9: if 疲劳剥块大量 then 齿轮 ( $P_1, P_2, P_3$ ) 过载疲劳 (0.8/3);

Rule 10: if 严重滑动磨粒大量 then 齿轮 ( $P_1, P_2, P_3$ ) 胶合 (0.8/3);

Rule 11: if 严重滑动磨粒大量 and 切削磨粒大量 then 齿轮 ( $P_1, P_2, P_3$ ) 擦伤 (0.8/3)。

## 3 发动机磨损故障的定性诊断

在各种数据中,仅铁谱数据能实现磨损故障的定性信息。这主要通过铁谱分析得到的各类特征磨粒的百分比来实现磨损性质的判断<sup>[7]</sup>。设故障征兆为球状磨粒大量  $S_1$ ,层状磨粒大量  $S_2$ ,疲劳剥块大量  $S_3$ ,切削磨粒大量  $S_4$ ,严重滑动磨粒大量  $S_5$ ,红色氧化物  $S_6$ ;磨损故障性质为疲劳磨损  $Q_1$ ,粘着磨损  $Q_2$ ,磨料磨损  $Q_3$ ,腐蚀磨损  $Q_4$ 。根据文献[7]得到具体诊断规则如下:

Rule 1: if 球状磨粒大量  $S_1$  or 层状磨粒大量  $S_2$  or 疲劳剥块大量  $S_3$  then 疲劳磨损  $Q_1$  (0.55);

Rule 2: if 严重滑动磨粒大量  $S_5$  then 粘着磨损  $Q_2$  (0.55);

Rule 3: if 切削磨粒大量  $S_4$  then 磨料磨损  $Q_3$  (0.55);

Rule 4: if 红色氧化物  $S_6$  then 腐蚀磨损  $Q_4$  (0.55)。

## 4 发动机磨损故障的定因诊断

确定该发动机磨损故障产生的原因有润滑油粘度低  $R_1$ ,润滑油含杂质  $R_2$ ,润滑油含水  $R_3$ ,润滑油供应不足  $R_4$ ,超速或过载  $R_5$ ,通过理化分析和铁谱分析实现定因诊断。

(1) 理化分析诊断 故障征兆为运动粘度偏低  $S_1$ ,杂质含量偏高  $S_2$ ,水份含量偏高  $S_3$ ,具体诊断规则如下:

Rule 1: if 运动粘度偏低  $S_1$  then 润滑油粘度低  $R_1$  (1.0);

Rule 2: if 杂质含量偏高  $S_2$  then 润滑油含杂质  $R_2$  (1.0);

Rule 3: if 水份含量偏高  $S_3$  then 润滑油含水  $R_3$  (1.0)。

(2) 铁谱诊断 故障征兆为球状磨粒大量  $S_1$ ,层状磨粒大量  $S_2$ ,疲劳剥块大量  $S_3$ ,切削磨粒大量  $S_4$ ,严重滑动磨粒大量  $S_5$ ,红色氧化物  $S_6$ ,黑色氧化物  $S_7$ ,具体诊断规则<sup>[7]</sup>如下:

Rule 1: if 球状磨粒大量  $S_1$  or 层状磨粒大量  $S_2$  or 疲劳剥块大量  $S_3$  then 润滑油粘度低  $R_1$  (0.55);

Rule 2: if 红色氧化物  $S_6$  then 润滑油含水  $R_3$  (0.55);

Rule 3: if 严重滑动磨粒大量  $S_5$  or 黑色氧化物  $S_7$  then 润滑油粘度低  $R_1$  (0.55) or 润滑油供应不足  $R_4$  (0.55) or 超速或过载  $R_5$  (0.55);

Rule 4: if 切削磨粒大量  $S_4$  then 润滑油含杂质  $R_2$  (0.55)。

## 5 D—S 证据理论融合诊断

Dempster—Shafer (D—S) 证据理论<sup>[8-10]</sup>是目前决策层融合中最常用的一种方法,它建立了广义 Bayes 理论,根据人的推理模式,采用与概率

区间或不确定区间来决定多证据下假设的似然函数。

对于两重假设问题,设每个陈述对假设 A 的支持程度分别为  $m_1(A), m_2(A), \dots, m_n(A)$  以及  $m_1(\bar{A}), m_2(\bar{A}), \dots, m_n(\bar{A})$ , 且有

$$\left. \begin{aligned} m_1(\bar{A}) &= 1 - m_1(A) \\ m_2(\bar{A}) &= 1 - m_2(A) \\ \dots \\ m_n(\bar{A}) &= 1 - m_n(A) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

由数学归纳法可以证明得到:

$$m^n(A) = 1 - \prod_{i=1}^n m_i(\bar{A}) \quad (2)$$

由此可见,针对该型军用发动机,假设其故障模式均为两重假设,则可以将定位、定性和定因诊断结果作为各种诊断方法对该假设的支持程度,从而实现融合诊断。

### 6 算例

为验证本文提出的发动机磨损故障智能融合诊断方法的有效性,现列举一算例来进行解释。

对该发动机某次试车台试验后,从其前腔取出油样进行铁谱、光谱及理化分析,表 3 为各种油样分析方法结果的原始数据,表 4 为发动机磨损故障定位、定性及定因的单项诊断和融合诊断结果。

表 3 各种分析方法的原始数据

	原始征兆
取样位置	前腔
铁谱分析	切削磨粒和严重滑动磨粒超标,其他磨粒含量正常
光谱分析	Fe 元素超标,其他元素含量正常
理化指标	运动粘度偏低,其他指标均正常

下面以对故障部位“增压泵齿轮  $P_1$ ”为例来说明融合诊断的过程。

(1) 根据取样部位信息为“前腔”,激活取样部位定位诊断的知识规则 1 (Rule1),得到表 4 所示的诊断结果:“增压泵齿轮  $P_1$  (1.0/6)”。

(2) 根据光谱分析数据“Fe 元素超标,其他元素含量正常”,激活“光谱定位诊断的知识规则 (Rule 3),得到表 4 所示的诊断结果:“增压泵齿轮  $P_1$  (1.0/3)”。

(3) 根据铁谱分析数据“切削磨粒和严重滑动磨粒超标,其他磨粒含量正常”,激活铁谱定位诊断的知识规则 11 (Rule 11),得到表 4 所示的诊断结果:“增压泵齿轮  $P_1$  (0.8/3)”。

表 4 发动机磨损故障综合诊断结果

		诊断结果
定位 诊断	取样位置	增压泵齿轮 $P_1$ (1.0/6), 回油泵齿轮 $P_2$ (0), 前腔齿轮 $P_3$ (1.0/6), 前腔高低压轴前中支点轴承 $P_4$ (1.0/6), 前腔电机轴承 $P_5$ (1.0/6), 附件传动轴承 $P_6$ (1.0/6), 中心传动轴承 $P_7$ (1.0/6), 后腔高低压轴后支点轴承 $P_8$ (0)。
	光谱分析	增压泵齿轮 $P_1$ (1.0/3), 回油泵齿轮 $P_2$ (1.0/3), 前腔齿轮 $P_3$ (1.0/3), 前腔高低压轴前中支点轴承 $P_4$ (0.93/5), 前腔电机轴承 $P_5$ (0.93/5), 附件传动轴承 $P_6$ (0.93/5), 中心传动轴承 $P_7$ (0.93/5), 后腔高低压轴后支点轴承 $P_8$ (0.93/5)。
	铁谱分析	增压泵齿轮 $P_1$ (0.8/3), 回油泵齿轮 $P_2$ (0.8/3), 前腔齿轮 $P_3$ (0.8/3), 前腔高低压轴前中支点轴承 $P_4$ (0), 前腔电机轴承 $P_5$ (0), 附件传动轴承 $P_6$ (0), 中心传动轴承 $P_7$ (0), 后腔高低压轴后支点轴承 $P_8$ (0)。
	融合诊断	$P_1$ (0.59), $P_2$ (0.51), $P_3$ (0.59), $P_4$ (0.32), $P_5$ (0.32), $P_6$ (0.32), $P_7$ (0.32), $P_8$ (0.19)。
定性 诊断	铁谱分析	疲劳磨损 $Q_1$ (0), 粘着磨损 $Q_2$ (0.55), 磨料磨损 $Q_3$ (0.55), 腐蚀磨损 $Q_4$ (0)。
定因 诊断	理化分析	润滑油粘度偏低 $R_1$ (1.0), 润滑油含杂质 $R_2$ (0), 润滑油含水 $R_3$ (0), 润滑油供应不足 $R_4$ (0), 超速或过载 $R_5$ (0)。
	铁谱分析	润滑油粘度低 $R_1$ (0.55), 润滑油含杂质 $R_2$ (0.55), 润滑油含水 $R_3$ (0), 润滑油供应不足 $R_4$ (0.55), 超速或过载 $R_5$ (0.55)。
	融合结果	$R_1$ (1.0), $R_2$ (0.55), $R_3$ (0), $R_4$ (0.55)。

(4) 将各种诊断方法定位诊断结果作为各种方法对假设的支持程度,从而实现融合诊断。设假设 A 为故障部位“增压泵齿轮  $P_1$ ”,显然,取样位置对假设 A 的支持程度  $m_1(A) = 1.0/6$ ,光谱诊断为  $m_2(A) = 1.0/3$ ,铁谱诊断为  $m_3(A) = 0.8/3$ ,所以融合诊断结果为  $m^3(A) = 1 - [1 - m_1(A)] [1 - m_2(A)] [1 - m_3(A)] = 1 - (1 - 1.0/6) (1 - 1.0/3) (1 - 0.8/3) = 0.59$  得到表 4 所示的诊断结果:“增压泵齿轮  $P_1$  (0.59)”。

从上述的诊断过程可以看出,融合诊断方法提高了发动机故障诊断的精度和可靠性。表 4 的其他融合诊断结果也表明了相同的规律。

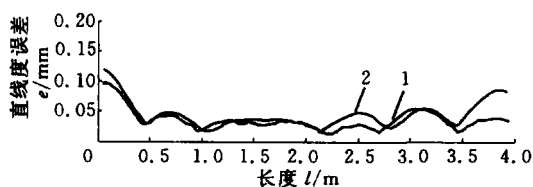
### 7 结论

本文将三种最常用的润滑油分析技术——铁谱分析、光谱分析及理化指标分析的分析结果,并

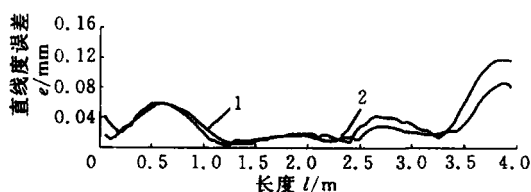
(下转第 306 页)

系统误差后,所得结果与激光干涉仪所测结果进行比较,激光干涉仪为 Renishaw ML10,导轨随机抽取。按顶面直线度的定义,即每 1m 长,偏离首尾两点连线的最大值。相当与用一个 1m 长的直尺去测量,每 5cm 移动直尺并获得一个偏差值,5m 长的导轨可获得 79 个这样的点。

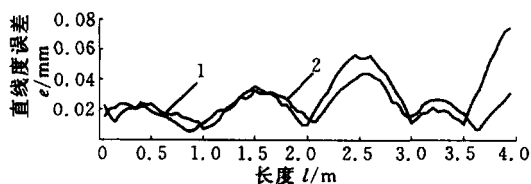
图 7 为测量系统所测的顶面直线度数据与激光干涉仪所测的顶面直线度数据的比较图。从图



(a) 被测导轨编号为 23079108 的激光和仪器所测结果  
(最大误差为 0.04424mm)



(b) 被测导轨编号为 23079112 的激光和仪器所测结果  
(最大误差为 0.046595mm)



(c) 导轨编号为 23077132 的激光和仪器所测结果  
(最大误差为 0.045241mm)

1. 仪器所测结果 2. 激光干涉仪所测结果

图 7 顶面直线度

中可以看出,最大偏差不超过 0.05mm。从前面系统运动误差的标定得出,标定精度为 0.01mm,顶面测量精度降低的原因,是导轨的实际挠度曲线与有限元分析得出的曲线有一定误差,从测量结果看,这种误差对测量系统的影响不大。

#### 参考文献:

- [1] 李建平. 电梯振动机理分析. 中国电梯, 2000, 11(1): 21 ~ 22
- [2] 刘连昆. 电梯实用技术手册. 北京: 中国纺织出版社, 1995
- [3] 薛实福, 李庆祥. 精密仪器设计. 北京: 清华大学出版社, 1991
- [4] 成大先. 机械设计手册 (1 - 5 卷). 北京: 化学工业出版社, 1997

(编辑 马尧发)

作者简介:李醒飞男,1967 年生。天津大学精密测试技术及仪器国家重点实验室副教授、博士。主要研究方向为光电超声检测、基于生物机理的微系统和嵌入式集成系统。获国家科技进步一等奖 1 项。发表论文 44 篇。张晨阳,男,1967 年生。天津商学院工学院教授。张国雄,男,1936 年生。天津大学精密测试技术及仪器国家重点实验室教授、博士研究生导师。郭敬滨,男,1959 年生。天津大学精密测试技术及仪器国家重点实验室副教授。

(上接第 302 页)

结合取样位置信息,一起作为故障诊断的征兆。在分析各种征兆数据特点的基础上,对各种数据源进行组合,运用基于规则的诊断方法,分别对发动机磨损故障进行了定位、定性及定因的单项诊断和融合诊断。算例表明,本文融合诊断方法能够提高发动机定位和定因诊断的精度和准确率。本文方法能为综合评估发动机试车状态提供可靠而全面的信息。

#### 参考文献:

- [1] 虞和济,韩庆大,李沈,等. 设备故障诊断工程. 北京: 冶金工业出版社, 2001
- [2] 赵方,谢友柏,柏子游. 油液分析多技术集成的特征与信息融合. 摩擦学学报, 1998, 18(1): 45 ~ 52
- [3] 严新平,谢友柏,萧汉梁. 摩擦学故障种类诊断的 D - S 信息融合研究. 摩擦学学报, 1999, 19(2): 145 ~ 150
- [4] Kai G. Architecture and Design of a Diagnostic Information Fusion System. Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing, 2001, 15: 335 ~ 338
- [5] 吴今培,肖建华. 智能故障诊断与专家系统. 北京: 科学出版社, 1997
- [6] 关惠玲,韩捷. 设备故障诊断专家系统原理及实践. 北京: 机械工业出版社, 2000
- [7] Anderson D P. 磨粒图谱. 金元生,杨其明译. 北京: 机械工业出版社, 1987
- [8] Dempster A P. Upper and Lower Probabilities Induced by a Multi - valued Mapping. Annals of Mathematical Statistics, 1967, 38: 325 ~ 339
- [9] Shafer G. A Mathematical Theory of Evidence. New Jersey: Princeton University Press, 1976
- [10] 权太范. 信息融合神经网络 - 模糊推理理论与应用. 北京: 国防工业出版社, 2002

(编辑 苏卫国)

作者简介:陈果,男,1972 年生。南京航空航天大学民航学院副教授、博士。研究方向为航空发动机磨损状态监测与故障智能诊断、数据融合、神经网络与遗传算法、图像处理及模式识别。发表论文 30 余篇。