

文章编号: 1000-8055(2001) 04-0316-07

磨粒分析技术及其在发动机故障诊断中的应用

吴振锋, 左洪福, 孙有朝
(南京航空航天大学 民航学院, 江苏 南京 210016)

摘要: 基于显微形态学方法的磨损微粒显微分析技术是近年来出现的解决发动机磨损故障诊断问题的新方法之一。应用形态学分析方法建立一套磨粒显微特征描述体系提取磨粒特征信息, 作为磨粒识别的信息基础, 可以准确地完成磨粒自动识别。基于发动机润滑系统磨粒分析的结果和颗粒摩擦学理论, 比较准确地评估出发动机接触磨损部件的磨损状态, 进而诊断或预测此类磨损故障; 另外, 此项分析诊断技术在发动机气路磨损故障诊断中也具有潜在的应用前景。

关键词: 发动机; 故障诊断; 磨粒; 磨损; 显微形态学
中图分类号: V 233. 4 文献标识码: A

1 磨粒分析技术简介

航空发动机结构复杂, 而且工作在高温、高速等恶劣条件下, 为保障其可靠、高效运转, 已经提出多种状态监测与故障诊断技术^[1]。航空发动机中普遍存在两类磨损问题, 第一, 发动机中油液润滑零部件存在磨损失效问题, 如转子轴承、齿轮等; 第二, 发动机气路中存在叶片冲蚀、烧蚀、机匣相磨、外物损伤等磨损类故障。对于这两类磨损故障, 可以对其磨损产生的微粒进行显微形态学特征分析, 分类统计之后深入探讨每类磨粒的产生机理及形成过程, 从而对相应的磨损故障进行诊断^[2]。

磨粒分析与诊断技术对于发动机中容易发生磨损故障的油液润滑零部件监测诊断极为有效, 它不但可预报零、部件的磨损类故障, 防止更严重事故的发生, 而且可以监测故障的产生与发展, 在保障安全的前提下为制定维修计划争取更多的时间, 能将故障或故障征兆隔离到部件组一级, 方便维修。而在发动机气路磨损监测领域, 虽然基本原理相同, 但是由于存在磨粒采样的难题, 严重限制了磨粒分析诊断技术的应用。应用磨损微粒的显微形态学特征分析方法, 正确解读磨粒所蕴涵的故障或故障征兆信息是此项技术的关键^[2]。

2 磨粒分析及诊断技术原理

2.1 颗粒摩擦学基本原理

研究磨损问题时, 磨粒是重要的依据, 它是揭示摩擦学表面的磨损机理、监测磨损过程以及诊断磨损失效类型的最为直接的信息元。我们可以根据磨粒特征, 基本上推断出摩擦学表面发生的磨损过程及其失效类型, 这一思想可以概括为颗粒摩擦学, 包括以下几点: (1) 不同摩擦副的结构特点决定了其可能产生的磨损形式, 如滚动轴承会产生滚动疲劳磨损, 齿轮传动会产生滚—滑复合磨损等; (2) 不同的磨损形式, 产生的磨粒亦有不同的特征; (3) 磨粒的形态特征(尺寸、形状、表面形貌和纹理结构)与磨损的破坏机理密切相关, 是判断摩擦学系统的工作是否正常的重要信号; (4) 磨粒的物理性能、机械性能蕴藏了摩擦接触处破坏之前的温度和组织变化的信息; (5) 磨粒的成分和颜色信息, 可以揭示磨粒的来源, 是故障定位的主要依据。表 1 归纳出了典型机械零件其磨损机理、损伤模式及其磨粒特征等三者之间的内在联系, 这种联系正是应用磨粒分析技术进行磨损故障诊断的理论基础^[1]。

磨粒尺寸很小, 一般只有数微米, 需要在高倍显微镜下才能看清楚。磨粒的光学信息, 无论是其

本文系 2000 年 10 月中国航空学会第十届航空发动机结构、强度、振动会议推荐文章; 2000 年 4 月 26 日修改稿。
作者简介: 吴振锋(1975-), 男, 南京航空航天大学民航学院博士研究生

形态方面的,还是成份方面的,都具有模糊性、随机性和有限性等特点,往往需要借助复杂的专业经验才能得以识别。计算机视觉和人工智能(AI)的发展,使得人们可以利用计算机来完成以前必须依靠人的视觉和智慧才能完成的工作。

2.2 磨粒的形态学特征分析

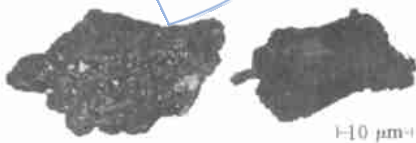
对于各种机械设备,其工作原理虽有所不同,但是其零部件之间的磨损模式都可归结为表 1 所示的 4 种,相应地,同类磨损故障机理所产生的磨损微粒也具有相似的形态特征^[3]。我们根据机械设备的磨损模式、磨损故障机理以及磨粒的形态

特征不同,可以将磨损故障产生的磨粒划分为 7 大类:正常滑动磨粒、严重滑动磨粒、切削磨粒、疲劳剥块、层状磨粒、球状磨粒以及氧化物磨粒。

图 1 是我们收集到的部分磨损失效颗粒的图像,正如颗粒摩擦学理论所指出的那样,各类磨粒都具有明显的形态特征。磨料磨损产生的切削磨粒类似于切削时的小碎片,其形状通常呈收缩的螺旋状、碎片状和弯线状态,平均宽度为 2~5 μm,长度为 25~100 μm,厚度小的只有 0.5 μm。疲劳磨损会产生疲劳剥块、球状颗粒或层状颗粒。疲劳剥块通常具有一个光滑的表面和不规则的外

表 1 典型零件的磨损类型、损伤模式及其产生的特征磨粒

接触性质	典型零件	关系	损伤模式	关系	磨损类型	关系	特征磨粒	
低副接触	滑动轴承		微缓磨损		粘着磨损		正常滑动	
	活塞环、缸				磨料磨损		严重滑动	
	滑阀类		严重磨损				切削磨粒	
	制动器、离合器							
高副接触	滚动轴承		点蚀		疲劳磨损		疲劳剥块	
	渐开线齿轮						层状磨粒	
	螺旋齿轮						球状磨粒	
	凸轮挺杆机构		胶合		腐蚀磨损			
	摩擦传动							
	机车轮、轨						氧化物微粒	



(a) 红色氧化物和黑色氧化物磨粒



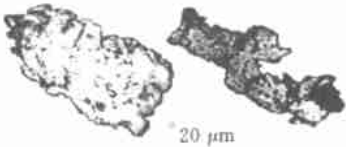
(b) 严重滑动磨粒



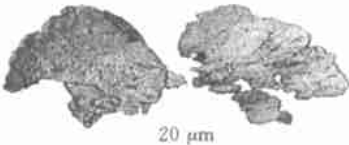
(c) 切削磨粒



(d) 球状磨粒(SEM)



(e) 疲劳剥块



(f) 层状磨粒

图 1 部分磨粒样本图

形, 齿轮的疲劳剥块尺寸较大, 往往超过了 10 μm , 彼此互相垂直的尺寸很接近。轴承的疲劳剥块尺寸要小一些。球状颗粒尺寸一般在 5 μm 以下。层状颗粒是厚度极薄的薄片, 通常有一些孔洞。

为了对磨粒的各种形态特征进行定量分析,

本文在计算机图像分析的基础上^[4], 运用形态学分析方法, 综合建立了磨粒的形态学特征参数描述体系, 用于提取磨粒的各种分类特征。表 2 给出了部分参数的定义或说明。

图 2 给出了部分形态参数的分布情况, 图中横轴编号与磨粒类型对照关系为: 1- 正常滑动磨

表 2 磨粒形态学参数描述器

类型	方 法	参 数	定 义
尺寸	结构运算	面积 A	$A = \iint x \cdot dy$ 或 $A = H(0)$
	形式	等效圆直径 D	$D = \sqrt{4 \cdot A / \pi}$
	矩变换	长轴长度 a 短轴长度 b	$\begin{cases} a = (4/\pi)^{1/4} I_{\eta}^{3/8} I_{\xi}^{1/8} \\ b = (4/\pi)^{1/4} I_{\xi}^{3/8} I_{\eta}^{1/8} \end{cases}$ 其中: I_{ξ} I_{η} 为绕主轴的二阶矩
形状	内部空间域分析	圆度 R_d	$R_d = P_{\epsilon}^2 / 4\pi A$ 式中: P_{ϵ} 为颗粒的周长
		长/短轴比 R_t	$R_t = a/b$
		凹度 C_v	$C_v = L/Z$ 其中: Z 磨粒区域的最小突包周长
结构	欧拉	磨粒孔隙率 E''	$E'' = n(0)/n(1)$ 其中: $n(0)$ 为白点数; $n(1)$ 为黑点数
灰度	统计	均值 G_m , 方差 G_v	在磨粒区域内, 按概率统计法计算
边缘	结构	在零点展开的结构圆函数 $H(r)$	$H(r) = S(A - B) = H(0) + H'(0)r + H''(0)\frac{r^2}{2} + \dots$
	运算	周长 P_{ϵ}	$P_{\epsilon} = H'(0)$
		边界转折度 A_n	$A_n = H''(0)$ 或 $A_n = H'''(0) = 2 \sum_{k=1}^n \lg \alpha_k \quad \left(-\frac{\pi}{2} < \alpha_k < \frac{\pi}{2}\right)$
分维	分维分析	灰度纹理 F_{gt}	$F_{gt} = 1 - D_{g1}$
		灰度结构 F_{gs}	$F_{gs} = 1 - D_{g2}$
		边缘纹理 F_{pt}	$F_{pt} = 1 - D_{p1}$
		边缘结构 F_{ps}	$F_{ps} = 1 - D_{p2}$
相位	矩变换	相对磁场的相位角 φ	$\varphi = \frac{1}{2} \lg^{-1} \left(\frac{\bar{m}_{1,1}}{\bar{m}_{0,2} - \bar{m}_{2,0}} \right)$ 其中: $\bar{m}_{1,1}, \bar{m}_{0,2}, \bar{m}_{2,0}$ 为二阶矩

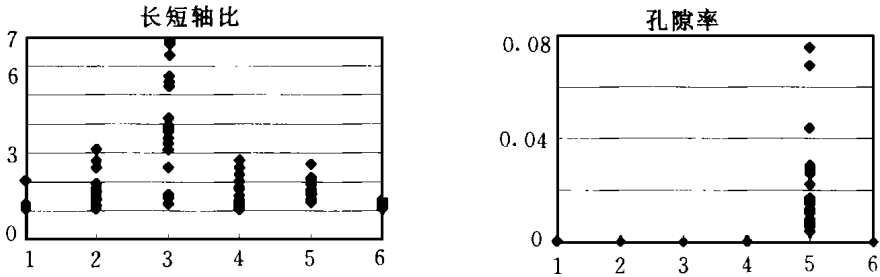


图 2 标准库磨粒部分特征参数的分布图

粒; 2- 严重滑动磨粒; 3- 切削磨粒; 4- 疲劳剥块; 5- 层状磨粒; 6- 球状磨粒。从这种 XY 散点图可以看出: 磨粒与磨损失效之间有着非常直接的联系, 各种特征磨粒之间的形态参数差异显著。综合各种特征选择方法, 我们从所有特征参数中选择 40 多个参数用于后面的磨粒分类, 其中包括“显著性”参数 20 多个, 如圆形体、细长度、纹理相关系数等等。

对磨粒形态学特征参数进行全面、深入的分析后, 不难看出:

(1) 等效面积圆直径 D 、等效椭圆长轴 a 以及综合直径 D_0 是表征磨粒粒度的量, 三者在分布形式上基本相同, 但在幅值上有较大差异(一般有 $D < D_0 < a$)。其中, 正常滑动磨粒和球状磨粒的粒度较小, 且各种形式的计算结果基本相同, 说明对这两类磨粒采用何种形式的粒度表示均可。

(2) 傅氏圆形体 F_1 中, 球状磨粒均值 > 0.8 , 标准差明显小于其它磨粒, 说明这一特征对于球状磨粒是显著的; 切削磨粒的均值偏小, 但较集中(方差较小); 层状磨粒的分布也较集中, 均值在 0.6 左右; 疲劳剥块则接近均匀分布。

(3) 傅氏细长度 F_2 对于切削磨粒非常显著, 因此该参数是判断切削磨粒的主要特征; 对于球状磨粒, F_2 很小接近 0; 而正常滑动磨粒较集中且偏小。

(4) 傅氏散射度 F_3 中对于球状磨粒也很显著, 其均值 > 0.9 , 可以方便地从 2~5 类磨粒中分离出来。

(5) 在傅氏凹度 F_4 中, 严重滑动磨粒、层状磨粒和球状磨粒的均值、方差均较小, 说明这 3 类磨粒通常是凸的。切削磨粒则近似于均匀分布。

(6) 在长短轴比 R_t 中, 正常滑动和球状磨粒均值、方差较小, 而切削磨粒的均值 > 4 , 因此基本

可以判定 $R_t > 4$ 的磨粒为切削磨粒。

(7) 孔隙率 E 中, 层状磨粒一般 > 0 , 而其它种类磨粒基本为 0。因此, 孔隙率是确定层状磨粒的重要特征参数。

(8) 由 4 个纹理相关系数可以看到, 层状磨粒的均值明显大于其它磨粒, 而且方差极小, 这是因为层状磨粒往往是由滚动接触并经零件反复碾压而形成的, 其表面没有十分显著的纹理走向, 因此这些参数也是层状磨粒的重要特征。

(9) 在其它分布图中, 形心偏心度、标准中心矩 0、标准中心矩 4、不变矩 0、灰度能量、灰度均匀度等对于各类磨粒(尤其是严重滑动、疲劳剥块和层状磨粒) 一般不太敏感。而实际上, 大多数特征参数均如此, 不一一列举。

除此以外, 体态比对切削磨粒较敏感; 边界折度对正常滑动、层状磨粒和球状磨粒有一定的显著性, 等等。

2.3 磨粒的综合识别

所谓“综合识别”, 是指针对不同的磨粒采取不同的识别方法, 并将这些方法统一在一起, 形成层次性的识别流程^[5]。首先根据相位角和沉积位置等, 将有色金属磨粒分离出来; 接着通过模糊规则模板将氧化物磨粒区别开来; 然后根据尺度参数将正常磨损颗粒与严重磨损颗粒分开; 最后采用双 BP 网络分别对 1, 3, 5, 6 类磨粒和 2, 4 类磨粒进行自动分类。表 3 是采用综合识别方法对测试库 1 和测试库 2 的磨粒分别进行识别的结果。

氧化物磨粒是腐蚀磨损的产物, 铁的氧化物磨粒通常分为红色氧化物微粒和黑色氧化物微粒, 它们与 1~6 类金属磨粒的显著区别在于颜色。设有颜色 C , 它包含 3 个特征分量 R, G, B 。这些特征在相同的论域 $U = \{ 0, 1, \cdots, 255 \}$ 上, 可用

表 3 采用综合识别方法的测试库磨粒识别结果

磨粒种类	测试库 1				测试库 2			
	正确	误分出	误分入	不能	正确	误分出	误分入	不能
正常滑动	1	0	0	0	0.93	0.07	0.03	0
严重滑动	0.90	0.10	0.10	0	0.80	0.15	0.16	0.05
切削磨粒	0.95	0.05	0	0	0.90	0.05	0	0.05
疲劳剥块	0.90	0.10	0.10	0	0.80	0.13	0.20	0.07
层状磨粒	1	0	0.05	0	0.93	0.07	0.07	0
球状磨粒	1	0	0	0	0.93	0.07	0.13	0

3 个模糊集 R, G, B 分别表示, 每一个模糊集的隶属度可用梯形函数来构造。对应 16 种常用颜色可以构造 16 条模糊规则形成匹配识别的模板, 根据“择近原理”取 16 个被匹配的规则中综合信度最大者为最佳匹配。将 2 个测试库中的红色氧化物微粒和黑色氧化物微粒综合起来(共 30 颗), 并从 1~6 类磨粒的标准库中随机抽取 40 颗其它磨粒(SEM 扫描的除外), 一起送入模糊规则模板进行识别, 其结果见表 4。

表 4 氧化物磨粒的模糊规则识别结果(颗)

磨粒种类	红色氧化物微粒	黑色氧化物微粒
总数	17	13
正确	15	12
误分入	0	1
不能	1	1
其它磨粒误分入	4	3

2. 4 磨损状态检测与诊断

对于一个存在摩擦学过程的机械系统, 两个运动表面的磨损过程一般将不可避免地导致材料的损耗。从现象上看, 这种材料的损耗可分为“磨合”阶段、“正常运行”即所谓的“微缓磨损”阶段、以及“故障”阶段等 3 个阶段。

在传统的铁谱诊断技术中, 一般采用磨损烈度指数:

$$I_s = (D_L + D_s)(D_L - D_s) \tag{1}$$

或
$$I_s = D_L(D_L - D_s) \tag{2}$$

来标志磨损状态的变化。式中: D_L 为大颗粒的读数, D_s 为小颗粒的读数。类比铁谱诊断技术定量分析所采用的磨损烈度指数 I_s , 作为故障预报的参数之一, 当然也可采用磨损烈度指数 I_s 这个参数, 而 D_L, D_s 代之以样本中对应沉积区颗粒的二值图像面积占样本总视场面积的百分比。但实践表明, 这种指标信息量低, 误诊率较高, 不能充分利用和发挥图像分析系统的作用。

早期的摩擦学研究也注意到了磨损过程和其产生的磨损颗粒尺寸之间的相互关系。并用 D 来描述平均磨粒直径(E 为弹性模量; H 为压痕硬度)。

$$D \leq 15 (E/H)^2 \tag{3}$$

对于齿轮传动和滚动轴承, 尺寸 $D = 15 \mu\text{m}$ 是一个临界值。一般 $D \geq 15 \mu\text{m}$ 的为异常磨损磨粒(层状磨粒除外), $D < 15 \mu\text{m}$ 的为正常磨损即

微缓磨损磨粒(球状磨粒除外)。表 5 是几类典型磨粒的尺寸分布范围。

表 5 典型磨粒的尺寸分布范围

磨粒种类	尺寸/ μm
球状颗粒	< 5
微缓磨粒	< 15
疲劳剥块	$< 10 \sim 100$
胶合磨粒	> 20
严重滑动磨粒	> 15
切削状磨粒	> 50
层状磨粒	$> 20 \sim 50$

根据磨屑尺寸参数监测诊断发动机磨损过程分为两个阶段: 第一阶段为异常(故障)信息检测阶段。此阶段设定一个发动机的基准磨损状态(一般为最近的正常工作状态)作为监测的标准, 通过统计检验判断发动机的当前磨损状态是否和标准状态属于同一总体, 由此确定发动机的运行情况是否偏离了基准磨损状态。第二阶段为故障诊断阶段。当系统检测到发动机的异常信息后, 诊断出发动机的具体故障形式即模式。

2. 4. 1 异常检测

求得样本的估计量 α 和 β 值后, 就可以推断出摩擦学系统中危险的大磨粒所占的相对百分比数量:

$$PM = P(X > D_M) = 1 - P(\alpha, \beta) \tag{4}$$

式中: D_M 为正常磨粒的临界尺寸。根据对发动机监测所作的大量研究, 正常磨粒的临界尺寸 $D_M = 10 \sim 15 \mu\text{m}$ 。当 $P(X > D_M)$ 超过了正常运行的标准, 监测系统就视发动机的运行状态为异常磨损状态。

PM 量用作监测指标比较客观, 反应了样本的总体特性, 可减少主观误差的影响。对于某典型航空发动机, 由图 5 中可以看出: 正常磨损的 PM 值小于 5% ($D_M = 15 \mu\text{m}$ 时) 或 20% ($D_M = 10 \mu\text{m}$ 时)。

2. 4. 2 模式识别(故障诊断)

在故障诊断阶段, 本文采用 J 散度指标作为模式识别的依据。 J 散度是度量两个向量(模式)之间相似程度的一种距离指标。当前待检模式 T 和标准模式 S 之间的 J 散度可表示为:

$$J(S, T) = \frac{1}{2}k \sum_{i=1}^k \left[\frac{S_i}{T_i} + \frac{T_i}{S_i} \right] - 1$$

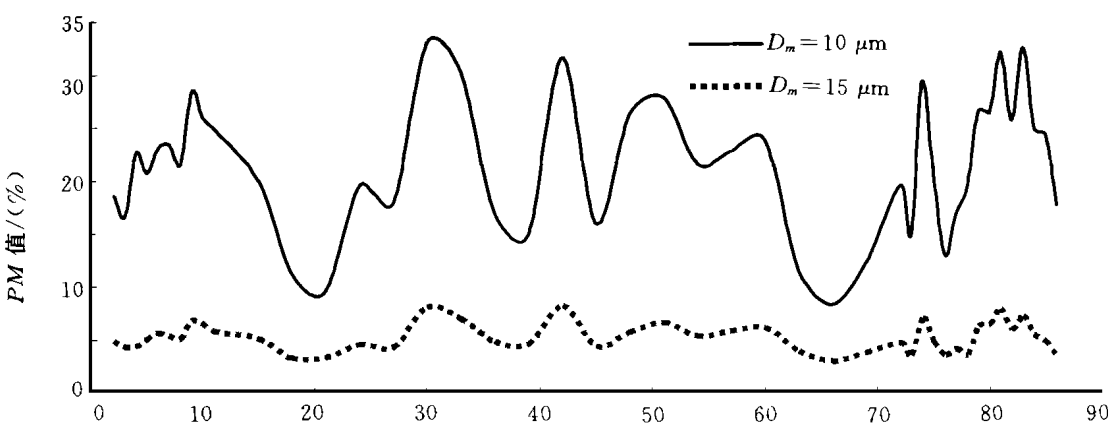


图 3 某典型航空发动机的 PM 值变化趋势图

式中: s_i 作为标准模式的磨屑样本的第 i 个特征量; T_i 为待检油样中磨屑样本的第 i 个特征量。

本文取磨屑尺寸分布的估计参数 α 和 β 作为样本的特征量。考虑标准模式库中有 R 个参考样本。当:

$$J(S, T) = J(r, T) =$$
$$\text{MIN} \{J(1, T), J(2, T), \cdots, J(r, T), \cdots, J(R, T)\}$$

(6)

且 $J(r, T) \leq$ 限定值时, 则将该待检模式 T 归入第 r 个标准模式类中, 即发动机当前的磨损状态和第 r 个标准油样所对应的磨损状态相同。而当 $J(r, T) >$ 限定值时, 则将该待检模式 T 作为一个新的模式, 累加到标准模式库中。

3 DMAS 智能化磨粒分析系统简介

一般机械设备都有良好的润滑系统。机械零部件发生磨损时, 产生的磨粒经过润滑油的冲刷

后, 要进入润滑系统中。润滑油是机器的“血液”, 它流经机器的各个摩擦接触部位, 携带了大量反映这些零部件健康与否的信息元——磨粒。而要将这些磨粒提取出来, 首要的工作便是给机器“抽血”并从中将磨粒正确地分离出来。本项目研制成功了一种全自动颗粒制谱仪, 它可以将油样中的不溶颗粒自动地分离出来, 并使其按一定的规律(粒度、形状和成份)排列在玻璃基片或微孔光学膜上, 形成一种包括大颗粒沉积圈、小颗粒沉积圈以及非铁磁颗粒沉积圈等排列 3 圈颗粒的谱片。

在此基础上, 作者开发了一套磨粒分析的专用设备——DMAS 先进铁谱分析系统, 它包括全自动颗粒制谱仪和一个计算机显微视觉系统。计算机显微视觉系统包括了一个三坐标控制的自动扫描显微镜和微机图像采集系统, 可以从谱片上获得清晰的磨粒显微图像并对其进行解读。图 4 是 DMAS 铁谱分析系统的组成示意图。

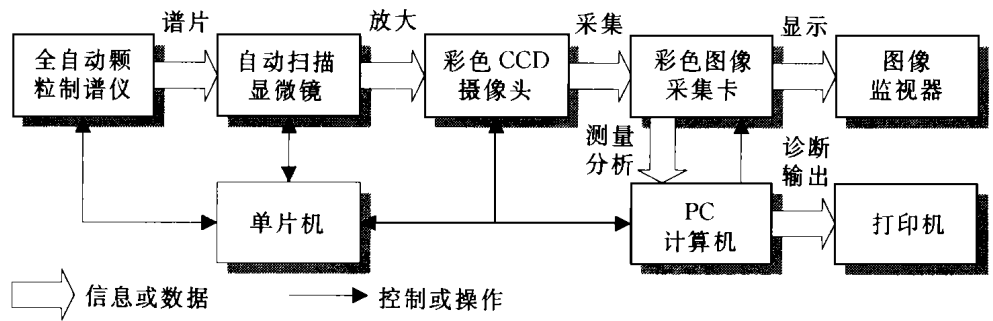


图 4 DMAS 的铁谱系统组成

4 结论与展望

发动机磨损类故障一直是威胁发动机安全运

行的主要故障原因之一, 对其一直缺乏有效的监测与诊断方法。本文所介绍的技术正是解决这一问题的一条有效途径。其中, 我们基于磨粒分析技

术研制的 *DMAS* 先进铁谱分析系统, 已经基本解决了油液润滑零部件的磨损故障诊断与预测问题, 经过了民航总局和航空工业总公司联合专家组的技术鉴定, 并且已经在东航山西分公司、常州航空动力有限公司等多个相关部门投入实际的发动机状态监控和故障诊断工作中, 取得了良好的应用效果。

另外, 我们正在积极拓展将磨粒分析技术应用到发动机气路磨损的监测诊断中去, 正在与某研究所联合开展某小型涡扇发动机磨损监测研究, 其中一项就是高温尾气采样以及采样装置对发动机工作状态影响研究, 在不久的将来一定可以解决采样这个气路磨损监测的难题, 从而大大拓展磨粒分析技术的应用。

参考文献:

- [1] 左洪福. 发动机磨损状态监测与故障诊断技术[M]. 北京: 航空工业出版社, 1995: 63– 114.
- [2] 杨忠. 发动机磨损故障智能诊断技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学机电工程学院, 1998.
- [3] Anderson D P, 金元生, 杨其明译. 磨粒图谱[M]. 北京: 机械工业出版社, 1987: 1– 14.
- [4] 徐建华. 图象分析与处理[M]. 北京: 科学出版社, 1992: 45 – 79.
- [5] 吴振锋等. 因子模糊化 BP 神经网络在磨粒识别中的应用[D]. 摩擦学报, 2000, 20(2): 143– 146.

(责任编辑 王震华)

Debris Analysis Technology and its Application to Aeroengine Fault Diagnosis Field

WU Zhen-feng, ZUO Hong-fu, SUN You-chao

(Civil Aviation College, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: The debris microanalysis technology based on the micromorphology and artificial intelligence techniques is one of the new feasible measure of aeroengine wearing faults diagnosis in recent years. By means of morphological analysis, a set of micro-characteristic parameters of wear particles is put forward. By taking this as the basic information, the wear particles can be identified automatically and truly in virtue of the BP neural network and the other AI techniques. Based on the Particle Tribology theory and the analytical results of the debris sampled in the aeroengine lubricating oil, it is easy to evaluate the wear state of contacting parts and components in aeroengine well and truly, thereby the wear faults of aeroengine are diagnosed or predicted. In addition, this analytical technology has the potential application to the field of wear faults diagnosis of aeroengine gas pass.

Key words: debris; wear; fault diagnosis; micro-morphology