

现代轮机工程系列讲座(十三)

## 油液检测技术及其应用(2)

魏海军 孙培廷

【中图分类号】U664

【文献标识码】A

【文章编号】1006-7728(2004)02-0051-02

### 1 铁谱技术简介

铁谱分析技术是目前使用最广泛、最有发展前途的油样分析方法。

铁谱技术(Ferrography)又称铁相学,它是使带有磨屑的润滑油流过一个高强度、高梯度的磁场,利用磁场力把磁性磨屑从润滑油中分离出来,而且按照磨屑颗粒的大小依次沉淀在基片上制成谱片,供观察和分析用。可以用铁谱显微镜进行观察和用光密度计对磨屑的分布状况进行定量的测定;也可以用电子显微镜进行观察和用X射线能谱仪或X射线波谱仪对磨屑中各种元素进行准确的测定。测定的内容包括:

(1)磨屑的浓度和颗粒大小。它们可以反映磨损的严重程度;

(2)磨屑的大小和外形。它反映了磨屑产生的原因;

(3)磨屑的成分。它反映磨屑产生的部位。

可见对谱片上沉积的磨屑颗粒情况的分析可以掌握机器运行时的实际磨损情况,这正是铁谱技术可以用来对运行中的机器设备进行监测的原因。

铁谱技术的定量分析法,是利用光密度计来测定谱片上不同部位的磨屑沉积的光密度或者说测定磨屑覆盖面积的百分数来实现。如果假设所有磨屑颗粒都不透光并且磨屑微粒不堆积,则磨屑沉积的光密度为:

$$D = \lg(I_0 / I_p) \quad (1)$$

式中

$I_0$ ——覆盖面积为零的清洁玻璃谱片的光亮度;

$I_p$ ——带磨屑沉积物的谱片的光亮度。

由于光亮度与透光面积成正比,因此可以根据仪器上的光密度计读出光密度值 $D$ ;从而算出此处磨屑的百分覆盖面积为:

$$A = 1 - \frac{1}{10^D} \quad (2)$$

铁谱分析是油液监控技术中比较复杂的一种,但它有许多油料分析技术所不具备的优势,光谱分析的不足就在于其

所能检测的磨粒尺寸范围较小( $<5 \mu\text{m}$ )以及不能确定磨粒的形貌特征。而油液中磨粒的尺寸在5至15 $\mu\text{m}$ 向几十甚至上百 $\mu\text{m}$ 的过渡期,一般正是设备从稳定磨损向严重磨损转化的标志。铁谱分析技术正好可以弥补油料发射光谱分析技术这一缺陷,它通过对磨粒的形貌分析,确定设备的主要磨损类型、故障原因等,同时像腐蚀磨损这种磨粒细化的磨损形式,在直读铁谱中也有特殊的表现形式。

比较起来,分析式铁谱技术可以获得的信息量是最大的,也是技术性要求最高的。它不仅可以通过磨粒的形貌和尺寸的分布能对诸如严重滑动磨损、磨粒磨损、接触疲劳磨损和腐蚀磨损等异常磨损做出准确的判断分析,而且还可以利用磨粒在不同温度下的颜色变化以及磨粒在谱片上的沉积特点,对部分磨粒的材料特性进行分析判断。但是,在分析过程中需要技术人员具有机械学、摩擦学、材料学、金属处理学等多门学科的综合知识,技术要求较高。

目前,应用铁谱技术来分析机器的磨损状态,主要是从以下几个方面来进行的:

(1)主要磨粒的类型、形态、颜色和尺寸等特征,根据它们来判定设备及有关零部件所处的磨损阶段以及相应阶段发生的磨损类别(如黏着、切削、疲劳、剥落、腐蚀等磨损)及其磨损的程度;

(2)磨损量即磨损曲线,根据对磨粒数量的检测和分析,给设备及有关零部件的磨损进度以量的判断;

(3)磨损严重性,即根据对磨粒尺寸的相对关系的检测结果,确定设备及有关零部件磨损发生的剧烈程度;

(4)磨粒的材质成分,即通过它们来确定磨粒的来源,进而判断出设备磨损的具体部位及磨损零件。

由此可见,铁谱技术是一种技术性较高、涉及面较广的磨损分析与状态监测技术。通过对沉积磨粒的分析,可以掌握机器运行时的实际磨损情况,判断磨损状态和失效机理。因此,铁谱分析的实质是根据润滑油中磨粒的形貌、尺寸、数量、成分等指标的分析,识别磨损零件、磨损的类型、磨损的程度以及磨损的机理。在不同的磨损机理下会产生不同尺寸范围和形状的磨粒,根据这一个原理,利用图像分析可

[收稿日期] 2004-02-06

[作者简介] 魏海军(1971-),男,浙江上虞人,大连海事大学副教授,从事现代轮机工程的教学与研究。

以对不同材料的磨粒的周长、面积、截矩及数量进行定量的统计分析,这进一步扩展了铁谱定量分析的内容,有助于确定机器设备主要零件的磨损状态。自从计算机技术引入到铁谱分析以来,促进了铁谱技术的发展和运用。目前计算机技术应用于铁谱数据的存储与处理、铁谱趋势分析以及磨粒模式识别与图像处理等各个方面,为铁谱技术实用化提供了强有力的手段。

根据机械学和摩擦学原理,处于相似工作环境下的机械设备一般具有相似的磨损机制;同时,磨粒记录着脱落瞬间设备的状态信息。因此,可根据磨的成分判断磨损部件或部位,可根据磨粒的形状、尺寸及其分布等特征信息来推测磨损机理。

油液分析技术存在两级决策:一是判断磨损是否正常,一是故障定位。实际上一些调查研究已经指出铁谱分析识别接触区域磨损机制的有效性,但是对磨损过程及其趋势分析更加完整,综合评价依赖于从铁谱分析中得到的磨粒的密度、尺寸分布与实际磨损情况的线性关系。必须指出这种关系受铁谱分析方法的极大影响,故务必仔细以得到可靠的结果。

## 2 铁谱技术的线性回归模型

直读式铁谱分析仪的工作原理是让润滑油中的铁系磨粒在直读铁谱沉积管中按照尺寸的大小来沉积,一般大尺寸(>5 μm)的铁系磨粒都沉积在管的入口处区域,这也就是所取得的  $D_L$  读数,而在取得  $D_S$  读数的地方则是一些尺寸较小的铁系磨粒。因此,直读铁谱分析描述机器磨损状态的方法是基于大磨粒读数  $D_L$  和小磨粒读数  $D_S$  等参数值是随时间变化的状态曲线。在这方面的研究已经开始,直读铁谱分析线性回归模型也已经实现了对机器磨损状态的识别。下面讨论将这种线性模型应用于柴油机的台架磨合质量评价。

以往的研究成果已经表明,大磨粒读数  $D_L$  和小磨粒读数  $D_S$  之间具有下列更为一般的线性关系:

$$D_L = kD_S + C \quad (3)$$

式中

$k, C$ ——是取决于油样中磨粒尺寸分布的两个系数,是油样中磨粒尺寸分布的函数,只要油样中的磨粒尺寸分布不变,即磨损状态不变,则这两个系数的值保持不变。

当  $k, C$  值不变时,则磨损状态不变,可以在磨损状态不变条件下取  $N$  个油样的  $D_L, D_S$  值由线性回归理论得到  $k, C$  的估计值。对于下一个油样,应当可以由测得的  $D_S$  估计其  $D_L$  值,记为  $D_L^*$ 。如果磨损状态不变,应该有实测值  $D_L$  与估计值  $D_L^*$  满足等式  $D_L = D_L^*$ , 其中实测值  $D_L$  应该为与  $D_S$  同时测得的油样的大磨粒读数。如果  $D_L > D_L^*$ , 实际的大磨粒浓度大于模型的估计值,则说明磨损状态恶化;反之,则说明磨损状态好转。

误差在实际的测量中是不可避免的,因此该模型还应该引入一个误差项  $d = a \cdot s$ 。因而得到磨损状态的线性回归模型为:

$$D_L = kD_S + C + d \quad (4)$$

其中,在误差项中,  $s$  是  $d$  的标准差,它由服从零均值正态分布假设从前  $N$  个油样的读数求出;  $a$  是识别和诊断对象重要程度的加权系数,对于柴油机的磨合过程,  $a$  值可在 1.5~3 内选取。于是当

$$|d| = |D_L - D_L^*| \leq as \quad (5)$$

时,说明模型所描述的状态不变。若  $D_L > D_S + as$ , 则说明柴油机磨合过程磨损状态恶化;若  $D_L < D_S - as$ , 则说明磨合过程磨损状态好转。

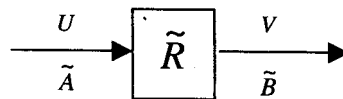
## 3 铁谱技术的模糊评判法

模糊综合评判方法是利用模糊推理手段,综合考虑各参考变量的变化趋势,分析柴油机总的磨损状态,从而对柴油机的磨合质量做出评价。其数学模型如下所述。

设  $U, V$  为两个论域,  $U = \{u_1, u_2, \dots, u_n\}$ ,  $V = \{v_1, v_2, \dots, v_m\}$ 。 $\tilde{A}, \tilde{B}$  分别为定义在论域  $U$  和  $V$  上的模糊子集,记作:  $\tilde{A} = (a_1, a_2, \dots, a_n) \quad 0 \leq a_i \leq 1$ ;  $\tilde{B} = (b_1, b_2, \dots, b_m) \quad 0 \leq b_j \leq 1$ 。当论域  $U, V$  为有限集时,从  $U$  到  $V$  的模糊关系  $\tilde{R}$  可以表达成矩形,称为模糊矩阵,即:

$$\tilde{R} = (r_{i,j}) = \begin{bmatrix} r_{1,1} & r_{1,2} & \cdots & r_{1,m} \\ r_{2,1} & r_{2,2} & \cdots & r_{2,m} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ r_{n,1} & r_{n,2} & \cdots & r_{n,m} \end{bmatrix} \quad (6)$$

上式中,  $0 \leq r_{i,j} \leq 1, i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, m$ 。并由  $\tilde{R}$  确定了一个变换,任给论域  $U$  上一个模糊子集  $\tilde{A}$ , 便可确定  $V$  上的一个模糊子集  $\tilde{B}$ , 表示为:



或者写成模糊变换:  $\tilde{B} = \tilde{A} \circ \tilde{R}$

在综合评价时,取  $U$  为考虑因素的集合,取  $V$  为评语集合,  $\tilde{R}$  是  $U$  到  $V$  的模糊关系,  $r_{i,j}$  则表示从第  $i$  个因素考虑,对被评对象做出第  $j$  种评语的可能程度。通过模糊变换计算可得到抉择集  $\tilde{B}$ ,  $\tilde{B}$  表示各种评判抉择的可能性系数,如果要选择一个抉择,则可按最大原则选择最大的  $b_j$  所对应的评语  $v_j$  作为评判结论。模糊变化式有多种算法,不同的算法可得到各种不同的数学模型,常用的算法有:

(1) 主因素决定型：即  $b_j = \max\{\min(a_i \cdot r_{ij})\}$

(2) 主因素突出型：即  $b_j = \max\{a_i \cdot r_{ij}\}$

(3) 加权平均型：即  $b_j = \min\left(1, \sum_{i=1}^N a_i r_{ij}\right)$

其中  $\sum_{i=1}^n a_i = 1$ 。

这是因为加权平均反映了各因素的综合作用，因此  $a_i$  具有“权重”的意义。本文采用的算法为主因素决定型。

根据制定的取样规范对台架磨合柴油机取样，对所取油样做了直读铁谱分析，得到油样中大、小磨粒数。为了从大小磨粒数的综合变化中推断柴油机的磨合质量，参考光谱分析浓度和浓度梯度综合分析法，提出了直读铁谱数据综合分析法，其数学模型如下所述。

在综合评价时，同样取  $U$  为考虑因素的集合，取  $V$  为评语集合， $\tilde{R}$  是  $U$  到  $V$  的模糊关系。通过模糊变换计算可得到抉择集  $\tilde{B}$ ， $\tilde{B}$  表示各种评判抉择的可能性系数，如果要选择一个抉择，则可按最大原则选择最大的  $b_j$  所对应的评语  $v_i$  作为评判结论。

表1 磨粒因素与磨损状态

| 磨粒因素                           | 正常 | 较正常 | 不正常   | 磨合    |
|--------------------------------|----|-----|-------|-------|
| 正常磨损颗粒                         | 浓密 | 浓密  | 少量    | 混合型   |
| 球状磨损颗粒<br>( $L=1\sim 5\mu m$ ) | 无  | 少量  | 中量    | 一般无   |
| 剥块磨损颗粒                         | 无  | 少量  | 中量    | 无(少量) |
| 层状磨损颗粒                         | 少量 | 少量  | 浓密    | 无(少量) |
| 切削磨损颗粒                         | 无  | 无   | 少量    | 无(少量) |
| 腐蚀磨损颗粒                         | 无  | 少量  | 中量    | 无     |
| 暗金属-氧化物                        | 无  | 无   | 少量    | 无(少量) |
| 严重磨损颗粒                         | 无  | 无   | 少量    | 无(少量) |
| 摩擦聚合物                          | 无  | 无   | 无(中量) | 无     |

注：表中  $L$  为球状磨损颗粒半径。

运动副磨损状况由上表所示各因素决定，所以评判因素论域为：

$U = \{\text{正常磨损颗粒}(U_1); \text{球状磨损颗粒}(U_2); \text{剥块磨损颗粒}(U_3); \text{层状磨损颗粒}(U_4); \text{切削磨损颗粒}(U_5); \text{腐蚀磨损颗粒}(U_6); \text{暗金属-氧化物}(U_7); \text{严重磨损颗粒}(U_8); \text{摩擦聚合物}(U_9)\}$ 。

其对应的评语集为：

$V = \{\text{正常磨损}(V_1); \text{较正常磨损}(V_2); \text{不正常磨损}(V_3); \text{磨合磨损}(V_4)\}$ 。

所以，模糊方程可写为：

$$(A_1, A_2, \dots, A_9) \circ \begin{bmatrix} r_{1,1} & r_{1,2} & r_{1,3} & r_{1,4} \\ r_{2,1} & r_{2,2} & \dots & r_{2,4} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ r_{9,1} & r_{9,2} & \dots & r_{9,4} \end{bmatrix} = (B_1, B_2, B_3, B_4) \quad (7)$$

式中权系数  $(A_1, A_2, \dots, A_9)$  是经过多次试验，用统计平均的方法获得，为  $(0.15, 0.07, 0.13, 0.05, 0.12, 0.05, 0.22, 0.11, 0.10)$ 。变换因子  $r_{n,n}$  对于磨损颗粒浓密时( $r_{n,1}$ )为 0.25，磨损颗粒中量时( $r_{n,2}$ )为 0.15，磨损颗粒少量时( $r_{n,3}$ )为 0.05，混合型磨损颗粒时( $r_{n,4}$ )为 0.55。进行极值计算，得到最大值和最小值，即可判别运动副磨损状态。

该过程可以利用计算机进行计算，其程序框图如下图所示。

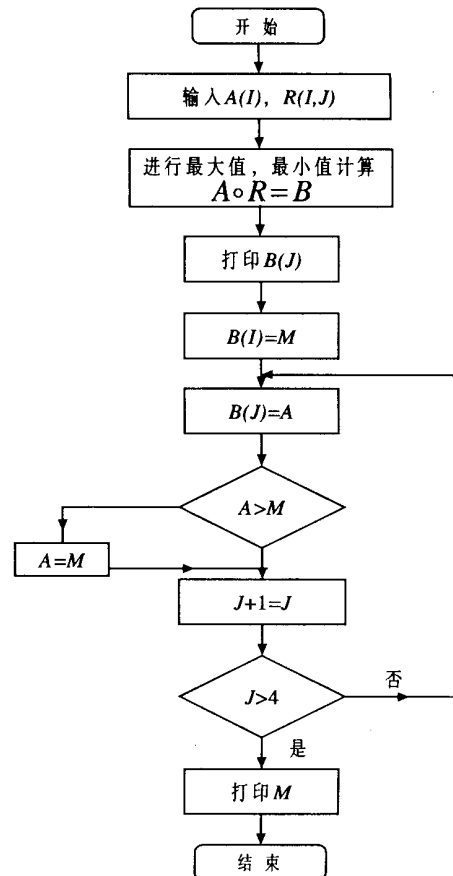


图1 模糊评判法的计算机程序框图

这里需要指出的是模糊评判法同样能应用于光谱分析中。