铁谱磨粒形态特征提取的新进展与适用范围①

卜英勇 张怀亮 秦雅琴
(中南工业大学机电工程学院, 长沙 410083)

摘 要 将计算机图像处理技术应用于铁谱磨粒分析, 其磨粒形态特征提取是关键。通过系统地介绍提取磨粒形态特征的最新进展, 着重讨论了分形维数及 Spike 参数在磨粒分析中的应用, 并指出了几种分析方法的适用范围, 这对进一步研究铁谱磨粒识别有一定理论和实用意义。

关键词 图像处理 铁谱 磨粒分析 特征提取
中图法分类号 TH117

机器运转, 不可避免要磨损, 同时, 磨损物以磨粒的形式释放到机器的润滑油液中。运用铁谱技术将磨粒制备成铁谱片, 可以通过铁谱显微镜观察磨粒的形态, 而磨粒的形态与接触表面的磨损信息有关, 据此可以进行机器的状态监测和故障诊断。然而, 磨粒分析并未得到广泛的应用, 究其原因在于进行磨粒分析时过多依赖专家知识以及主观估计, 同时, 磨粒分析不仅费时、成本高, 而且分析精度低。目前, 由于计算机自动图像处理技术的发展, 可利用计算机铁谱磨粒图像进行分类和识别, 因而磨粒分析越来越受到人们的关注。通过计算机图像处理技术对铁谱图像进行分割和轮廓的边缘检测, 可以提取出单个磨粒的几何形状[1]。然而, 要对磨粒进行有效的分类和识别, 为计算机自动分类与识别建立简便且客观的机器状态监测与故障诊断系统, 关键是对磨粒的形态进行特征提取, 建立起数学描述。

1 傅里叶描绘子磨粒分析法

由于磨粒的边界是一条封闭的曲线, 曲线坐标必然是周期性函数, 对其进行傅里叶级数展开后的傅里叶系数一定与边界曲线的形状有直接的对应关系, 因此可以作为开头形状的描述, 称之为傅里叶描绘子[2]。

磨粒在计算机内以数字方式存储, 其数字图像用方向链码 $c_1, c_2, \cdots, c_m (m = 1, 2, \cdots, M)$ 来表示边界轮廓线, 经傅里叶展开, 可得用方向链码表示的傅里叶系数为

$$P_n = \frac{1}{2\pi nj}\sum_{m=1}^{M}\alpha_m \exp\left[j\left(\frac{\pi}{4}c_m - 2n\pi\sum_{k=1}^{m}\frac{\alpha_k}{L}\right)\right],\quad n = \pm 1, \pm 2, \cdots \tag{1}$$

式中 $L = \sum_{k=1}^{m}\alpha_k$, L 表示轮廓曲线的周长; α_k 的值为: k 为偶数时, $\alpha_k = 1$; k 为奇数时, $\alpha_k = \sqrt{2}$, $k = 1, 2, \cdots$。

一般地, 在磨粒分析中可以应用傅里叶系数来提取磨粒形状特征, 即不变量、区域周长、区域面积、圆形度、细长度、散射度、凹度、粒度等[2], 如磨粒圆形度 F 可表示为

$$F = \frac{|p_1|}{\sum_{n=1}^{\infty}(|p_n| + |p_{-n}|)} \tag{2}$$

当 $F = 1$ 时, 磨粒轮廓为一个圆, $0 < F < 1$ 时, 不为圆。

然而, 应用傅里叶系数只适用边界轮廓完整清晰的磨粒, 这使得磨粒图像的预处理过程更为精细和复杂, 另外, 磨粒的表面纹理也不能用傅里叶系数反映出来。目前, 国内国外均

① 收稿日期: 1997- 12- 09; 修回日期: 1998- 05- 21 卜英勇, 男, 53 岁, 教授

有应用傅里叶系数来描绘磨粒轮廓的试验研究，但使用的都是可靠度不高的方法。

2 分形维几何磨粒分析法

分形维几何是近几十年发展起来的一个数学新分支。它最初来自于 Richarson 的论文中，主要用来描述海岸的不规则性。后来由 Mandelbrot 和 Kaye 发展成为一个数学新分支。如同 Richardson 在分析海岸线时的方法一样，人们可将分形维几何应用到磨粒分析中，对不规则的磨粒轮廓和磨粒表面状态进行描述[3]。

(1) 磨粒轮廓的分形维数

磨粒轮廓的分形维数的求法如下：取某一特定分辨率下磨粒，如图 1 所示先以测径器沿磨粒轮廓取一系列的点，再隔若干点将轮廓曲线连成封闭折线，每次取不相同的间隔点重复此过程，并将折线总和的对数与步长的对数作为坐标轴，标出各不同步长下的坐标点，运用线性回归作出直线，该直线的斜率为 $(1-D)$，其中 D 就是此磨粒轮廓的分形维数(图 1)。

磨粒轮廓的分形维数可以用来描述磨粒的不光滑不规则程度，磨粒轮廓的分形维数越大，磨粒越不规整。

(2) 磨粒表面的分形维数

某些磨粒可能具有相似的轮廓和整体形状，但却具有不同的表面纹理，此时磨粒表面的分形维数就反映不出来，于是就产生了分析磨粒表面的分形维数的方法。

磨粒表面的分形维数可利用磨粒图像的灰度信息来估计，磨粒图像的各个方向均可形成该方向上的分形维数。先在磨粒图像上取一直线(水平线或竖直线均可)，将这条直线段按某一步长分成等分线段。计算分割点邻近两点的灰度值差的绝对值的和，该总和与邻近点的距离有关，即该总和的对数与步长有关，改变步长可作出关系曲线，运用线性回归作出直线，其斜率为 d，可得该方向上的分形维数为 $D=1-d$。

与傅里叶系数相比，分形维数不仅能更为

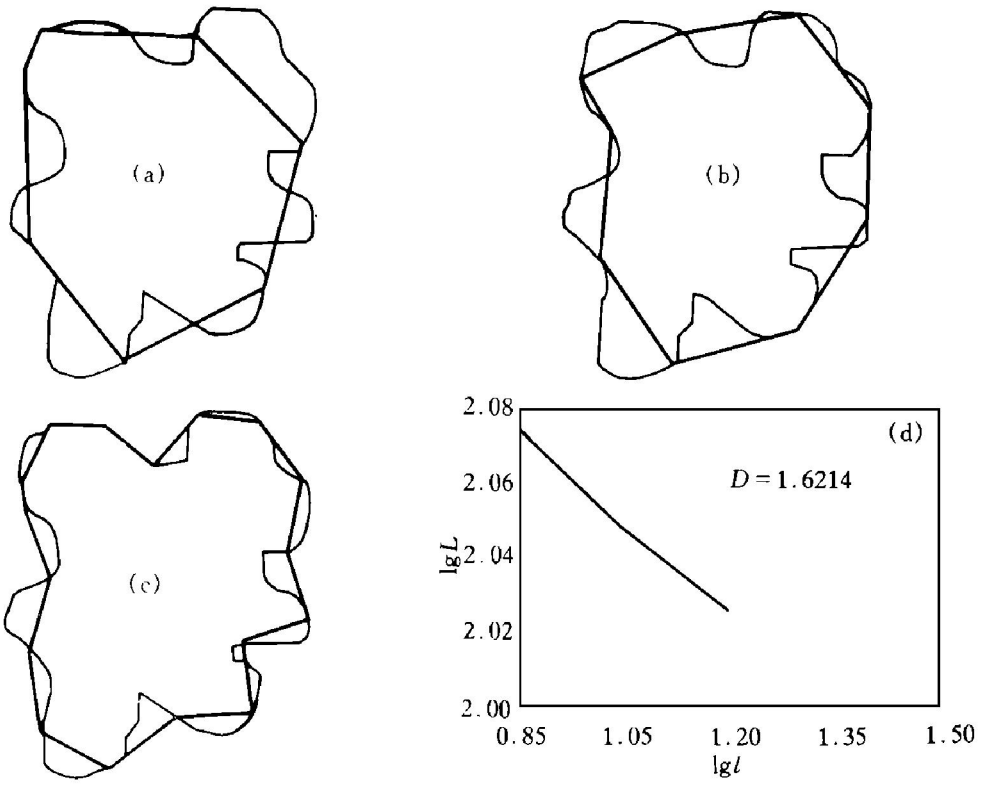

图 1 磨粒轮廓及分形维数

Fig. 1 Outline and fractal dimensions of wear particle

L —Perimeter; l —Step length

简单容易地描绘磨粒轮廓, 而且也能应用于磨粒表面纹理的描绘。另外, 求磨粒轮廓和表面的分形维数时也不要求完整的磨粒边界, 对于边界的任一部分也能求出其分形维数来进行磨粒分析。某一磨粒的分形维数在任何分辨率下都是唯一的。

在应用方面, 国外早于 80 年代就开始了分形维数在磨粒分析中的应用, 并取得了一系列的成果, 如 Mandelbrot 和 Oxford 等等, 国内有些研究机构也开始了分形维数在磨粒分析中的应用。实际上, 分形维数并不仅限于磨粒分析中的应用, 它还应用于医学等各个方面。

3　Spike 参数磨粒分析法

计算磨粒轮廓的 Spike 参数的方法与分形维数的求法相似[4], 但步长定义为边界轮廓上像素点的个数, 步长的始终两点间不是直线段而是一箭状物, 即在始终两点间另寻一点形成一个三角形(如图 2 所示)。由直觉可知, 轮廓上三角形越锐利(较小的顶角)越大(高越大),

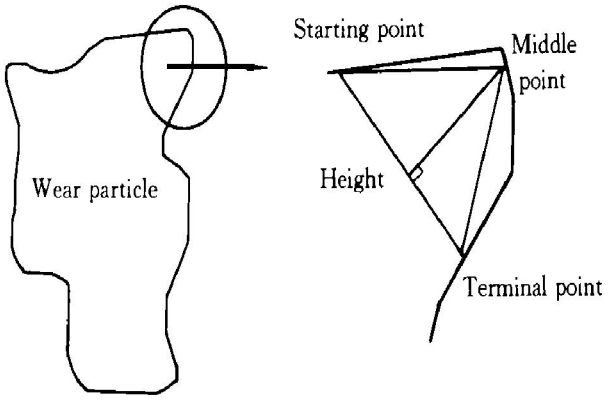

图 2　边界三角形的构造

Fig. 2　Construction of boundary triangle

磨损就越严重。为反映三角形的锐利程度和尺寸大小, 可用"箭"值 Sv 来表示

$$Sv = \cos(\theta/2)h \tag{3}$$

式中　θ 为顶角, h 为三角形的垂直高。

Spike 参数(Sp) 的值可按下式计算:

$$Sp = \frac{\Sigma(\Sigma(\frac{Sv_{\max}}{h_{\max}})/m)}{n} \tag{4}$$

式中　$Sv_{\max} = \max(\cos(\frac{\theta}{2})h)$; $h_{\max}$ 为 $Sv_{\max}$ 最大时的高度; m 为给定步长时 Sv 的数目; n 为使用的不同步长数。

$\cos(\theta/2)h$ 表明每个三角形的锐利度, 可利用计算机程序选择一个三角形, 其锐利度与尺寸都较大而不仅仅是锐利, 如图 3 所示, 三角形 A 具有比三角形 B 较小的顶角, 但三角形 B 的尺寸(高) 比三角形 A 的尺寸大, 综合考虑后发现三角形 B 的磨损比三角形 A 的磨损大(具有较大的 Spike 值)。如果三角形接近扁平或为凹, 当 $\theta \geqslant 2.9$ 时, $Sv = 0$。Spike 值还可以通过除以最大 $h_{\max}$ 来标准化。

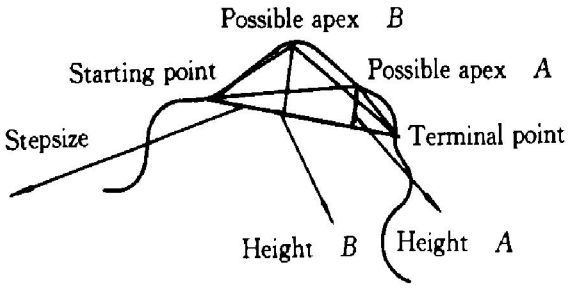

图 3　磨粒轮廓上最优三角形的建立

Fig. 3　Construction of optimum triangle on the outline of wear particle

单个磨粒的 Spike 值的计算步骤如下:

①给定一步长计算该步长下的各个三角形的 $Sv_{\max}$ 和 $h_{\max}$;

②按公式(4) 计算各个 Spike 值;

③将 Spike 值标准化;

④改变步长, 重复步骤 ①, ②, ③, 直至达到给定的最大步长为止;

⑤该磨粒的 Spike 值为各步长下 Spike 值的平均值。

Spike 参数的提出与应用为磨粒分析提供了一种更为优越的方法。国外的研究表明, Spike 参数不仅与不同形状磨粒的磨损率有关, 而且能有效地描绘具有欧几里得性质、理想和非理想分形维几何的磨粒的磨损。

在磨粒表现出非单一值的分形维数时, 如磨粒存在欧几里得性质的区域或磨粒的磨损等级发生改变时, 磨粒的分形维数就不是单一

的，而 Spike 参数却能效地解决这个问题，它比分形维数更明显的优点在于其测量的是磨粒凸出的严重程度而忽略凹下的“山谷”部分，并且，由于非理想分形维几何(如欧几里得形状)磨粒的 Spike 值的不变性，使得磨粒形状测量具有鲁棒性。另外，Spike 参数对磨粒预处理过程中的数字化误差的敏感性要比轮廓分形维数小得多。

自从 1995 年 Hamblin 和 Stachowiak 提出这种新方法以来，Spike 参数在国内外还未得到很好的应用，但是从其优越性来看，Spike 参数是磨粒分析中一种先进有效的方法。

4 适用范围

根据我们的计算实践，上述的几种磨粒特征提取方法有其适应范围，否则分析精度低，误差大。对于不同的磨粒应采用不同的形态特征提取方法:

(1) 对于轮廓完整、清晰的磨粒可利用傅里叶描绘子磨粒分析法来提取几何特征参数作为其形态特征值，对于轮廓不完整的磨粒，其分析精度较低;

(2) 对于轮廓不完整的磨粒可采用分形维数法来提取其形态特征值，并且可运用分形维数法来提取轮廓相似但表面纹理不一样的磨粒形态特征值;

(3) Spike 参数法适应于普遍磨粒的形态特征提取，尤其适用于表现出非单一性分形维数值的磨粒，如具有欧几里得形状的磨粒等。

REFERENCES

1 Ling Ling(凌 铃), Chen Darong(陈大融), Kong Xianmei(孔宪梅) *et al*. Journal of Wuhan Transportation(武汉交通科技大学学报), 1994, 18(9): 175- 178.

2 Zhang Song(张 松), Kong Xianmei(孔宪梅), Ling Ling(凌 铃) *et al*. Lubrication Engineering(润滑与密封), 1996, 5: 34- 36.

3 Kirk T B, Stachowiak G W *et al*. Wear, 1991, 145: 347- 365.

4 Hamblin M G and Stachowiak G W. Wear, 1995, 185: 225- 233.

NEW DEVELOPMENT AND APPLICATION OF CHARACTERISTIC MORPHOLOGY EXTRACTION OF FERROGRAPHY WEAR PARTICLE

Bu Yingyong, Zhang Huailiang and Qin Yaqin

College of Mechanical and Electrical Engineering,

Central South University of Technology, Changsha 410083, P. R. China

ABSTRACT The key problem for applying the technique of computer image treatment to analysis of ferrography wear particle is how to extract the morphology characteristics of wear particle. Through the introduction of the newest development of morphology characteristics extraction of wear particle, the applications of fractal dimension and Spike parameter in analysis of wear particle have been discussed emphatically, and the applying ranges of several analysis methods were pointed out. All those are available for further research of identification of ferrography wear particle in theory and practice.

Key words image treatment ferrography wear particle analysis characteristic extraction

(编辑 何学锋)