

基于图像分形计算的磨粒定量参数识别研究

江良洲, 龙凤, 杨庆

(第二炮兵工程学院 装备管理工程系, 陕西 西安 710025)

摘要:磨粒分形研究是磨粒分析技术中的热点。为了得到有效的磨粒分形定量特征,介绍了分形原理和磨粒的分形特性,在计算机和图像处理技术基础上,研究了磨粒分形参数提取。通过探寻磨粒边缘轮廓及纹理分形两种分形维数的计算方法,对大量典型磨粒分形维数进行了定量计算和统计分析,得出了相应的分布范围。给出了计算的一般方法和实例,提供磨粒分析的新的定量特征参数,是磨粒识别的一种有效途径,为最终解释磨损的机理提供了前提。

关键词:铁谱分析;磨粒识别;分形维数;图像处理

中图分类号:TH117;TP391

文献标识码:A

文章编号:1673-629X(2010)07-0227-04

Quantitative Analysis and Recognition of Wear Particle Based on Fractal Description

JIANG Liang-zhou, LONG Feng, YANG Qing

(Dept. of Equipment Management Eng., Second Artillery Eng. Ins., Xi'an 710025, China)

Abstract: Fractal dimensions are useful for wear particle recognition. In order to obtain quantitative features of wear particles, fractal characteristics of wear particle are expounded. Then, combining with image processing, this paper compares various methods to calculate profile and surface fractal dimension. Based on statistical analysis, fractal dimension distributing ranges of 6 kinds of typical wear particles are obtained through quantitative calculation. General methods and examples are presented, and the experimental results demonstrate that this method is practical for wear particle analysis.

Key words: ferrography; wear particle recognition; fractal dimension; image processing

0 引言

磨粒分析技术作为机械设备一种有效的状态监测方法目前已在许多领域得到了应用,取得了一定经济和社会效益,在机械装备使用、维修和日常管理中得到了推广。传统磨粒分析技术中磨粒的识别工作主要由人工借助显微镜来完成,磨粒识别的自动化程度不高,严重影响了其潜在技术特点与作用的发挥,也制约着该技术在装备领域的广泛应用。同时,磨粒形态特征具有复杂性和随机性,能够全面描述磨粒特性的定量参数体系的建立依然十分困难^[1]。

而对磨粒观测研究知道,磨粒显示出多尺度分形特征^[2~4]。近年来,人们使用分形几何理论来表征磨粒的特征,在磨粒的边缘轮廓分形特征、磨粒的表面形貌分形特征、磨粒的分形特征与磨损关联性等方面做了一些有益的工作,也取得了一定的进展,但现有的研

究还处于初步探索阶段,距实际应用还有很远的路要走。文中应用计算机和图像处理技术,引入分形理论,研究磨粒分形特性及参数提取,力图得到实用的计算方法,为磨粒分形识别提供有效途径。

1 分形理论和磨粒的分形特性

1.1 分形原理和分形维

分形(fractal)几何的观点认为,自然界一个复杂对象虽然是杂乱无章的,但它是具有无标度性(scale independent)或自相似性(self-similarity)的^[5]。该理论最初的研究对象是欧氏空间的一类复杂子集结构。随着其理论不断完善和算法的改进,分形作为研究一种复杂现象的重要理论在诸多领域中得到了广泛应用。分形在直观上有破碎的和不规则的含义,主要用于描述由许多零碎图形所构成的图案的特征,也可以用于表征一个由许多事件组成的一种行为或现象。该理论作为现代非线性科学研究中的一个数学分支是十分活跃的,自然界和非线性系统中出现的不光滑和不规则的几何形体是它的主要研究对象,其最本质的特

收稿日期:2009-12-06;修回日期:2010-03-28

基金项目:国家自然科学基金(60672108)

作者简介:江良洲(1983-),男,博士,从事设备故障诊断方面的学习研究。

征是自相似性和无标度性,揭示自然界一些复杂图形的这些本质特性,给出其复杂形态的定量描述是分形几何方法的目标。

分形维数是描述分形的参数,与欧氏几何的拓扑维数之间有一定联系,但又不同,其中欧氏几何的维数均是整数,而分形维一般表现为非整数。分数维数描述了自然现象中细小零碎的局部特征构成整体系统行为的相关性。

分形经常用于复杂图像的分析,如对摩擦系统中磨损信息重要载体的磨粒图像的分析计算等。这些分析的计算需要先采集油样,然后用特殊的设备制成能够通过显微镜观察的谱片,此时经显微镜、图像采集系统得到的磨粒图像很难通过直观分析得出磨粒的类型及磨粒反映的磨损信息。结合计算机技术,将这些图像经变换处理分割后得到关于磨粒清晰的轮廓和纹理图像,最后用分形方法计算其分形维并最终得出其特性。

1.2 磨粒的分形

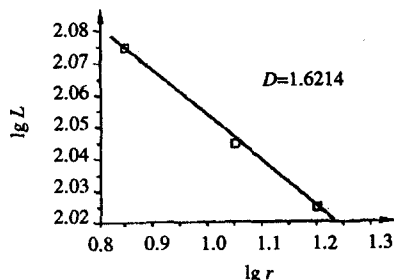
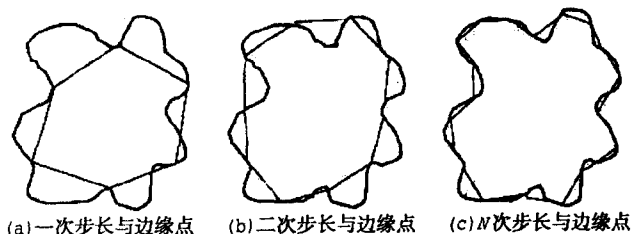
机械摩擦系统中,由于相对运动产生的磨粒在显微镜观测下正表现出这些分形特性,即磨粒并非一个完全欧氏几何体,而是展示出分形特性。研究表明,磨粒的细节特征随着显微镜放大倍数的不同而改变,倍数越大,细节越突出,即具有多尺度性。并且,磨粒的细节在不同尺度上具有自相似性^[6~9]。

1.2.1 磨粒轮廓的分形

在磨损过程中产生的磨粒,其外形轮廓具有复杂不规则性,这种特性与摩擦副的磨损状态有关,因此,对磨粒轮廓形态进行研究有助于揭示磨损规律。研究表明,磨粒的边缘轮廓具有分形特征,这使得人们可以用多尺度测量来分析磨粒特征,用分形维数来提取磨粒不规则外形所隐藏的磨损信息。从微观照片看,磨粒轮廓就像岛屿和海岸线一样,可以用如同分析海岸线分形的方法来进行分析,对不规则的磨粒轮廓和磨粒表面状态进行描述。

传统的磨粒轮廓分形维提取方法是 Richardson 图,该方法取某一特定分辨率下的磨粒,先以很小间隔沿磨粒轮廓取一系列的点,再隔一定点数将轮廓曲线连成封闭折线,如图 1(a)所示。每次取不相同的间隔点重复这一过程,对每个间隔取点都估算出封闭折线的周长,并把所估算的周长与步数之比作为平均步长,如图 1(b)、(c)所示, D 随着步长的减小,较小的细节将被测量到,所包围的封闭折线周长会逐渐增大,将各步的平均步长与周长标在双对数坐标上,得到的 Richardson 图,如图 1(d)所示。根据最小二乘法拟合出直线,该直线的斜率为 $(1 - D)$,其中 D 即为磨粒边

界轮廓的分形维数。



(d) 由步长与周长的双对数拟合直线计算 D 值图

图 1 Richardson 计算方法的原理

按 Richardson 图计算磨粒轮廓的分形维数,存在一个不确定问题,即对于一定的边界轮廓,所计算出的分形维数值可能不惟一。因为该方法除受图像本身质量因素(如噪声、聚焦性、图像感光器件的特性等)的影响外,同时,还受测量时起始点的选取方式、步长的确定方法等计算方法本身因素的影响。例如,对于每一次沿边界轮廓的“行走”测量,存在许多个可能的起始点,这就导致所测得的边界周长值不同,从而使所得分形维数值不惟一。通过对 Richardson 方法的改进,主要有 EXACT、FAENA 和 FAST Hamblin - Stachowiak 方法等几种精度较高的磨粒轮廓分形维数计算方法^[2,3]。

其中,EXACT 法由于采用定步长,与磨粒轮廓交点大多数情况不在磨粒图像像素点上,不适合计算机编程计算。

FAENA 法的步长可以不确定。即对于给定的步长 r ,从当前起点开始,在磨粒轮廓边缘上与所找到的像素点间的距离达到或超过给定步长 r 时,把该点作为新的起点,如此反复,直至把所有边缘点检测完。计算平均步长并将其作为实际步长,该步长由各储存的测量步的步长值之和除以测量次数得到,最后,用周长与平均步长间的双对数值分布图的斜率来计算得到分形维数。该方法适合编程由计算机来完成。

FAST 方法用于表征自然的复杂图形效果较差,但适于表征处处都具有一致的结构的人造分形,如 Koch 曲线等。所以在统计轮廓分形维数的分布时,主要采用 FAENA 法来提取磨粒的分形维。

1.2.2 磨粒纹理的分形

磨粒的纹理结构一定程度上反映了摩擦磨损的过

程,基于纹理特征的统计自相似性,取磨粒的局部进行处理,可以得出磨粒纹理特征参数。图像的纹理分布是指图像的稀疏性、对比度、方向性、邻接性、恒常性、粗糙度等六个方面,针对这些性质,纹理分析有基于统计方法的共生矩阵法、马尔可夫随机场法、分形维数法。

对于特定的磨粒,其表面纹理分形维数是一定的。磨粒表面纹理的分形维数用盒维数方法计算^[10]。考虑大小为 $L_{\max} \times L_{\max}$ 的封闭集,选取 $L = r \times L_{\max}$, 其中 r 是比例因子,用 $L \times L$ 的盒子去覆盖三维空间中磨粒的表面。将磨粒灰度图像中的像素点作为三维空间中的 x, y 坐标,而各像素点的灰度值为另一坐标 z , 对应于不同的 r , 得出不同的盒子数 $N(r)$ 。将得到的这一组数据在双对数坐标上进行最小二乘法线性拟合,即得出纹理的分形维数。令 $X_r = \lg r$, $Y_r = \lg N(r)$, 则分形维计算式为:

$$D = \frac{\sum (X_r - \bar{X})(Y_r - \bar{Y})}{\sum (X_r - \bar{X})^2} \quad (1)$$

式中, \bar{X}, \bar{Y} 是 X_r, Y_r 的均值。

图像纹理的分形维数 D 反映了纹理粗细变化的程度,通过纹理的分形维数来区分不同摩擦磨损机理产生的磨粒。纹理越粗糙,其分形维数越大;相反,纹理结构越精细,则分形维数越小。

2 铁谱磨粒分形参数提取与应用

机械摩擦中产生的主要磨粒包括:正常磨损磨粒,磨合期磨损磨粒,切削磨损磨粒,滚动疲劳磨损磨粒,滚动滑动复合磨损磨粒,严重滑动磨损磨粒,有色金属磨粒,金属氧化物磨粒,腐蚀磨损磨粒,摩擦聚合物,以及其它污染颗粒等。磨粒形成的机理表明,磨损形式决定了磨粒的种类,而这些不同种类的磨粒具有各自的特征属性。

文中主要研究正常磨损磨粒,切削磨粒,疲劳剥落磨粒,球状磨粒,层状磨粒和严重滑动磨粒等6种典型磨粒。

计算磨粒的分形维数,首先要对磨粒图像除噪、压缩、变换、拼接、分割等预处理,目的是将磨粒与背景分离,得到纯磨粒图像^[11-13]。在此基础上,分别计算磨粒的轮廓分形维数和纹理分形维数。

2.1 磨粒轮廓分形维数的计算

以切削磨粒为例,图2(a)为磨粒原图像,(b)是经过各种预处理并分割后的磨粒图像,(c)为其边缘轮廓曲线,(d)为应用 FAENA 法计算得到的 $\lg N / \lg(r)$ 曲线图,其轮廓分形维数 $D = 1.104$ 。

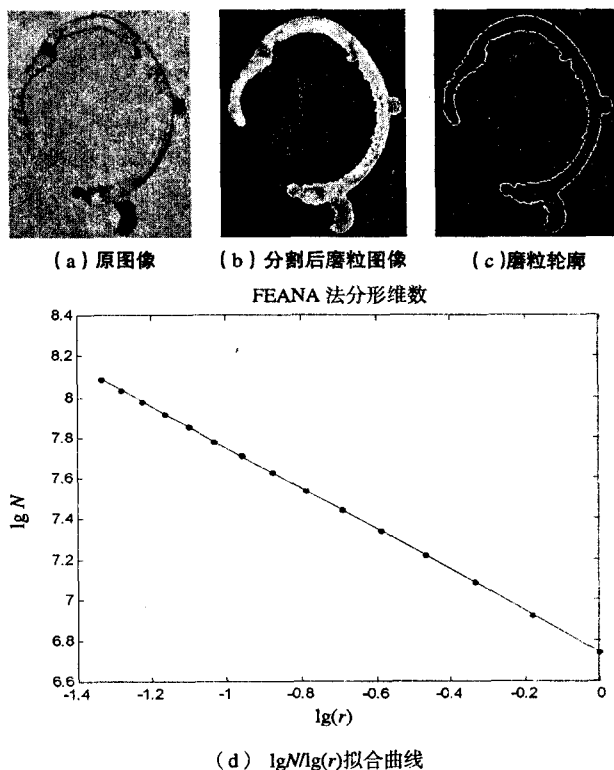


图2 切削磨粒轮廓分形维数计算

为了准确地反映实际情况,尽量避免随机性,文中根据数理统计的原理,对100个磨粒样本进行图像处理,分形计算,把结果用图表直观地表现出来,得到各种磨粒的分形维数范围。图3为其分布图。

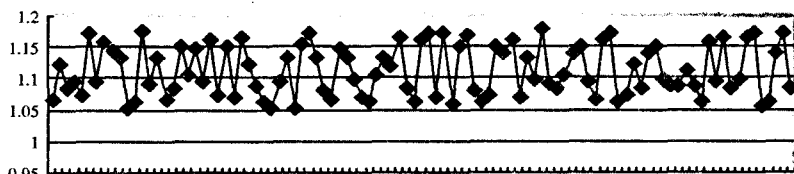


图3 切削磨粒轮廓分形维数分布图

由结果得到:切削磨粒分形维数的范围主要集中在1.05~1.18之间。

2.2 磨粒纹理分形维数的计算

将1.2.2中所述方法简化如下(参照图4):

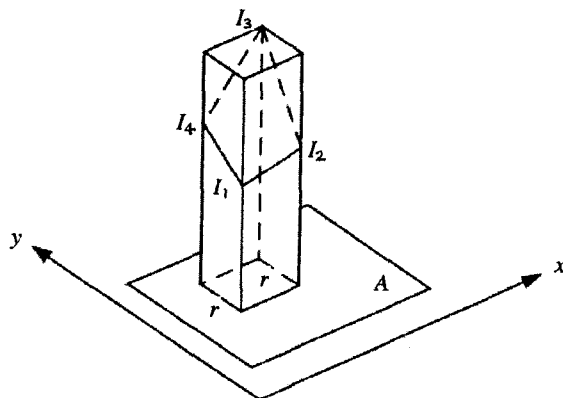


图4 纹理分形维数计算示意图

- (1) 将区域 A 分为 $r \times r$ 的子区;
- (2) 计算边长为 r 的方柱面中包含边界的立方体个数: $n(r) = (\max I_i - \min I_i) / r + 1$;
- (3) 求 $N(r) = \sum_A n(r)$;
- (4) 通过改变 r 的大小, 得到一系列 $N(r)$;
- (5) 在双对数坐标系中, 求 $\lg N(r)$ 对 $\lg(r)$ 的斜率, 即为此曲面的分形维 D 。对图 2(a) 切削磨粒纹理分形维数应用该盒维数法进行计算 $\lg N / \lg(r)$, 得到其纹理分形维数 $D = 2.315$ 。

3 实验结果与分析

用上述方法对大量典型磨粒进行两种分形维数计算, 得到了各种典型磨粒两种分形维数范围, 见表 1。

表 1 边缘轮廓和表面纹理分形维数计算结果

磨粒类型	轮廓分形维数	表面纹理分形维数
正常磨损磨粒	1.180~1.250	2.180~2.250
切削磨粒	1.050~1.176	2.290~2.350
疲劳剥落磨粒	1.132~1.190	2.220~2.290
球状磨粒	1.010~1.042	2.120~2.170
层状磨粒	1.196~1.350	2.320~2.410
严重滑动磨粒	1.060~1.165	2.360~2.430

(1) 不同类型磨粒的边缘轮廓分形维数有其特征范围, 同种类型的磨粒轮廓分形维数比较集中。其中, 由于球状磨粒的边缘轮廓相对最为光滑, 因此计算所得的维数最小; 切削磨粒、疲劳剥落磨粒和严重滑动磨粒三种类型磨粒的轮廓分形维数比较接近, 原因为切削磨粒、疲劳剥落磨粒和严重滑动磨粒边缘轮廓比较相似, 都比较光滑。疲劳剥落磨粒轮廓分形维数相对稍大, 说明其有明显曲折的轮廓; 层状磨粒的轮廓分形维数最大, 说明层状磨粒轮廓最不规则。而分形维数的物理意义是反映该分形图形的复杂程度, 这和实验结果分析是一致的。

(2) 从实验数据可以看出, 球状磨粒表面纹理光滑, 纹理分形维数最小, 且变化范围也小; 严重滑动磨粒纹理分形维数最大; 切削磨粒和层状磨粒纹理

分形维数较大; 正常磨损磨粒分形维数较小。这样的计算结果和磨粒形成机理及理论分析是一致的。

4 结束语

针对铁谱磨粒的特点, 通过研究并应用两种分形维数的计算方法, 对大量典型磨粒分形维数进行计算, 根据数理统计原理, 研究了 6 种典型铁谱磨粒边缘轮廓及纹理分形维, 得出了相应的分布范围, 为磨粒识别提供了新的特征参数。

参考文献:

- [1] 王汉功, 陈桂明. 铁谱图像处理与识别技术[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- [2] Kirk T B, Stachowiak G W. Fractal parameters and computer image analysis applied to wear particles isolated by ferrography[J]. Wear, 1991(145): 347-365.
- [3] Podsiadlo P W, Stachowiak G W. Evaluation of boundary fractal methods for the characterization of wear particles[J]. Wear, 1998(217): 24-34.
- [4] Yuan C Q, Li J, Yan X P, et al. The use of the fractal description to characterize engineering surfaces and wear particles[J]. Wear, 2003(255): 315-326.
- [5] 张济忠. 分形[M]. 北京: 清华大学出版社, 1997.
- [6] 葛世荣, 朱 华. 摩擦学的分形[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005: 283-296.
- [7] 葛世荣, 张晓云. 铜-铜磨损过程中磨粒积聚的分形研究[J]. 摩擦学学报, 2001, 21(3): 123-125.
- [8] Falconer K J. Fractal Geometry: Mathematical Foundation and Application[M]. New York: John Wiley and Sons, 1990.
- [9] 韩 炎. 分形理论及信号检测技术研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2004.
- [10] 陆永耕. 磨粒图像纹理分形特征的研究[J]. 微型电脑应用, 2000, 16(12): 40-41.
- [11] 王 备, 王继承. 图像分割中模糊聚类数目的确定[J]. 计算机技术与发展, 2007, 17(10): 162-164.
- [12] 王 伟, 高 亮, 吴 涛. 一种基于模糊聚类的离散化方法[J]. 计算机技术与发展, 2008, 18(3): 53-55.
- [13] 焦春林, 高满屯, 史仪凯. 基于改进型聚类神经网络的图像分割[J]. 计算机工程与应用, 2007, 43(20): 93-95.
- [10] 严 商, 樟 灿. WCF: Windows 平台新一代通讯基础研究与分析[J]. 计算机与数字工程, 2008(4): 86-89.
- [11] 年福丰, 刘秋让. WCF 的异构数据源集成系统的研究和实现[J]. 科学技术与工程, 2009(11): 3316-3319.
- [12] Klein S. Professional WCF Programming. NET Development with the Windows Communication Foundation[M]. [s. l.]: Wiley Publishing, 2007.

(上接第 226 页)

术大学出版社, 2002.

- [7] Bustamante M L. 学习 WCF[M]. 英文影印版. 南京: 东南大学出版社, 2007.
- [8] 闫 冰. 基于 WCF 的分布式应用开发[J]. 电脑知识与技术, 2008(19): 68-70.
- [9] 吴良清, 黄 黎, 陈建明. 基于 Web Services 的商务智能研究[J]. 计算机与现代化, 2008(1): 33-35.