

铁谱磨粒图像的计算机纹理分析*

王 峰 吕植勇 何晓昀 陈庆虎 阙大顺 严新平

(武汉理工大学可靠性研究所 武汉 430063)

摘要: 利用计算机图像处理技术, 采用灰度共生矩阵方法提取典型磨粒图像的纹理特征参数, 作为判断机械设备故障机理的判据之一。通过正常、滑动、切削、疲劳磨粒灰度共生矩阵纹理分析, 得到熵、能量、惯性矩等参数的范围。

关键词: 铁谱; 磨粒图像; 纹理; 灰度共生矩阵

中图分类号: TP391.41; TK418 **文献标识码:** A **文章编号:** 0254-0150(2005)2-017-3

Computer Texture Analysis of Ferrography Wear Particles Images

Wang Feng Lv Zhiyong He Xiaoyun Chen Qinghu Que Dashun Yan Xinping

(Reliability Engineering Institute, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China)

Abstract: Texture analysis method for wear particles images was presented for judging mechanical equipment fault mechanism. The rubbing, sliding, cutting and fatigue wear particles images were analyzed, and the range of several texture characteristic parameters to distinguish them based on gray level co-occurrence matrix were found.

Keywords: ferrography; wear particles images; texture; gray level co-occurrence matrix

铁谱分析技术是以磨损磨粒识别为基础的诊断技术, 它是机械设备磨损监测与故障诊断最为有效的方法之一。磨粒识别是铁谱分析的核心环节, 识别的正确与否, 直接关系到机器磨损状态诊断的正确性。磨粒是在机械运转过程中, 经受长时间表面间的相对摩擦运动产生的, 不同的磨损型式会产生不同类型的磨粒; 不同类型的磨粒具有其自身的特征。研究结果表明: 在磨粒的数量、尺寸、表面特征与磨损速率和严重程度之间、磨粒形态与磨损类型之间、磨粒成分与系统摩擦副之间存在着对应关系。从磨粒表面可以发现大量的有用信息, 借助于磨粒表面的纹理特征在一定程度上可分析和预测磨损情况。

纹理是对于图像各像元灰度空间分布的一种描述。Hawkins曾对纹理做过比较详细的描述。他认为纹理有 3 个主要标志:

某种局部的序列性在比该序列更大的区域内不断重复;

序列是由基本部分非随机排列组成的;

各部分大致都是均匀的统一体, 在纹理区域内任何地方都有大致相同的结构尺寸。

纹理特征就是图像局部性质(灰度)分布函数的统计, 粗糙性和方向性是区分纹理所常用的两个最

主要特征。纹理分析的任务是通过对图像的分析获得关于图像纹理特征、结构和模型分析方法。针对纹理不太规则的图像, 一般采用统计分析方法。统计分析是从图像有关属性的统计分析出发的方法。磨粒的纹理具有统计特征, 适宜用统计方法对其结构、粗细程度及其方向性进行描述。磨粒的纹理结构在一定程度上反映了零部件的磨损过程, 取磨粒的局部进行处理, 可以得出统计意义上的结论, 从而达到通过获得纹理特征参数, 对磨粒进行检测、分析和识别, 实现机械设备的工况监测和故障诊断。在统计分析方法中, 应用比较广泛的是灰度共生矩阵法, 本文作者应用这种方法对磨粒图像进行纹理分析。

1 灰度共生矩阵

在纹理图像中, 在某个方向相隔一定距离的一对像元灰度出现的统计规律能具体反映这个图像的纹理特性。灰度共生矩阵是建立在估计灰度的二阶组合条件概率密度函数基础上的纹理分析方法。灰度共生矩阵反映的是图像关于方向、相邻间隔、变化幅度的综合信息。分析灰度共生矩阵可以分析图像的局部模式和排列规则, 从灰度共生矩阵中可以提取出很多图像的纹理特征, 如能量、熵、对比度、相关、方差等等。灰度共生矩阵分析有很广泛的应用, 在遥感、航片影像纹理、海浪图像分析、胸透 X 射线图像分析等领域都有成功的应用。本文作者将灰度共生矩阵引入到机械运转过程中形成的磨损颗粒表面形态的分析中, 利用灰度共生矩阵参数评价磨粒的形态。

灰度共生矩阵描述的是: 在某方向上间隔一定距

*基金项目: 教育部重点项目(重点 02052 教); 国家自然科学基金项目(50275111)。

收稿日期: 2004-05-09

作者简介: 王峰(1979-), 男, 硕士研究生, 研究方向为模式识别、信号处理。E-mail: wmail@126.com.

离的一对像素点灰度出现的统计规律。灰度共生矩阵的元素可以表示为 $P(i, j|d, \theta)$ ，其中 i, j 表示这对像素点的灰度值， d 是这对像素点的距离， θ 表示连接这对像素点的平面方向。不同的 d, θ 对应不同的矩阵，通常情况下，小的 d 值可以提供比较好的结果。当 d, θ 选定的时候，也简记为 P_{ij} ， P_{ij} 表示一对图像点的灰度分别是 i 和 j 的出现概率。在给定方向和距离时，常通过计算灰度 i 和 j 的像元对数来表示 $P(i, j|d, \theta)$ 。距离为 d ，方向 $0, 90^\circ, 45$ 和 135 的灰度共生矩阵的公式分别为：

$$P(i, j|d, 0) = \#\{[(k, l), (m, n)] \in (L_x \times L_y) \mid k - m = 0, |l - n| = d, f(k, l) = i, f(m, n) = j\}$$

$$P(i, j|d, 90) = \#\{[(k, l), (m, n)] \in (L_x \times L_y) \mid |k - m| = d, l - n = 0, f(k, l) = i, f(m, n) = j\}$$

$$P(i, j|d, 45) = \#\{[(k, l), (m, n)] \in (L_x \times L_y) \mid (k - m = d, l - n = -d) \text{ or } (k - m = -d, l - n = d), f(k, l) = i, f(m, n) = j\}$$

$$P(i, j|d, 135) = \#\{[(k, l), (m, n)] \in (L_x \times L_y) \mid (k - m = d, l - n = d) \text{ or } (k - m = -d, l - n = -d), f(k, l) = i, f(m, n) = j\}$$

式中： k, m 和 l, n 分别在 $L_x \times L_y$ 大小的窗口中变动， $\#\{ \}$ 表示使大括号成立的像元对数。

显然，灰度共生矩阵是一个对称矩阵，其阶数由图像的灰度层数决定。在实际的应用过程中为避免 $P(i, j|d, \theta)$ 的计算量过大，通常图像的灰度级数 L 最大取 16 级。一般来说，在图像的灰度共生矩阵上，如果被检测的区域呈现出细纹理，并且所选得的 d 与图像灰度幅度相比较小，那么灰度共生矩阵中的数值元素趋向分散在矩阵的对角线两边。这是因为对细纹理，即使是相距较小的像素点，它们之间的灰度变化还是比较频繁的，灰度差较大。相反，如果被检测的区域呈现出粗纹理，且 d 很小，那么两点之间的灰度相似，因而灰度共生矩阵中的数值元素趋向集中在对角线附近。此外，通过比较不同的方向、距离 d 的灰度共生矩阵的数值分布还可以检测纹理的方向性。

总之，由灰度共生矩阵可以计算出一组二次统计参数，用来定量描述纹理图像的属性。下面是几种从纹理的均匀性上描述图像的灰度特征的特征参数。

- (1) 能量： $f_1 = \sum_{i,j} \{P(i, j|d, \theta)\}^2$
- (2) 熵： $f_2 = - \sum_{i,j} \{P(i, j|d, \theta)\} \cdot \lg\{P(i, j|d, \theta)\}$
- (3) 惯性矩： $f_3 = \sum_{i,j} (i - j)^2 P(i, j|d, \theta)$
- (4) 局部平稳： $f_4 = \frac{1}{\sum_{i,j} 1 + (i - j)^2} P(i, j|d, \theta)$

- (5) 相关： $f_5 = \frac{\sum_{i,j} (i - \mu_x)(j - \mu_y) P(i, j|d, \theta)}{\sigma_x \sigma_y}$
- (6) 最大概率： $f_6 = \max P(i, j|d, \theta) / (L \times L)$
- (7) 方差： $f_7 = \sum_{i,j} (i - \mu)^2 P(i, j|d, \theta)$

式中： $\mu_x = \sum_i i P(i, j|d, \theta)$
 $\mu_y = \sum_j j P(i, j|d, \theta)$
 $\sigma_x = \sqrt{\sum_i (i - \mu_x)^2 P(i, j|d, \theta)}$
 $\sigma_y = \sqrt{\sum_j (j - \mu_y)^2 P(i, j|d, \theta)}$
 μ 为灰度共生矩阵的均值。

2 试验与讨论

2.1 磨粒图像特征

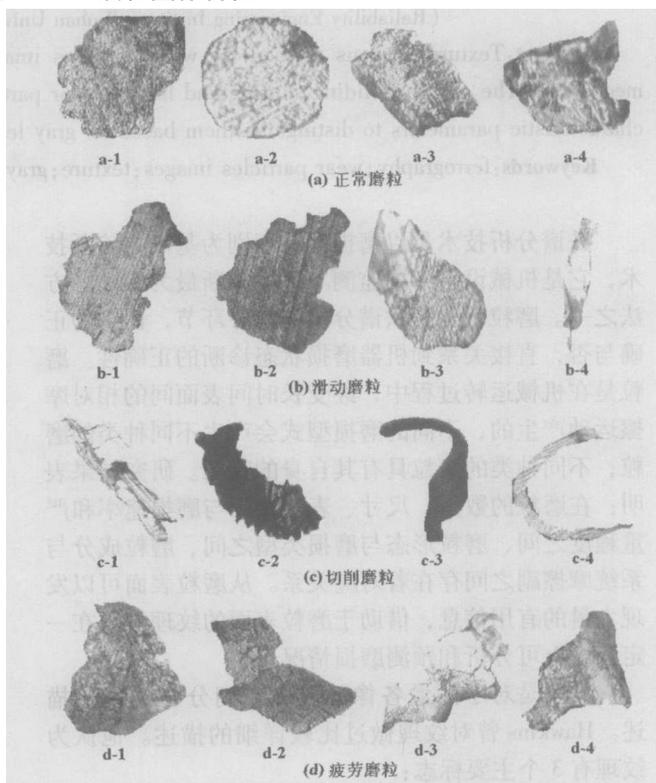


图 1 典型磨粒图片

机械零件的磨损磨性按其磨损状况可分为正常磨粒、滑动磨粒、切削磨粒、疲劳磨粒等，如图 1 所示。正常磨粒是齿轮中金属摩擦副正常磨损的结果；滑动磨粒是在高应力下的正常磨损磨粒通过一些小的旋转缝隙而形成的严重磨损磨粒。这种高应力的滑动磨损形式使得产生的磨粒在形状和表面上都跟正常的滑动磨损磨粒有着很大的不同，形状更为拉长，边缘不光滑，表面有着深而平行的条纹；切削磨粒是一种活性磨损状态的指示。这些磨粒通过一个表面穿过、犁沟或切削另一个表面而产生；疲劳磨损磨粒为一种更严重的磨损形式。疲劳磨损磨粒可以分成两个大的

类别，来自齿轮磨损过程中的通常为圆盘样的疲劳磨粒和疲劳磨块，来自于滚动接触轴承磨损过程中的疲劳碎片磨粒、剥片状疲劳磨粒和球状磨粒。

本文作者选用的正常、滑动、切削和疲劳等典型的磨粒图片来自于武汉材料保护研究所，由通过连接在铁谱显微镜上的 SONY3CCD 彩色摄像机采集。

2.2 实验设计

- (1) 将磨粒图像分成若干个子图像。
- (2) 分别计算出各个子图像的灰度共生矩阵。
- (3) 对各个子图像的灰度共生矩阵进行归一化处理。

$$\hat{P}(i, j|d, \theta) = P(i, j|d, \theta) / \sum_i \sum_j P(i, j|d, \theta)$$

表 1 典型磨粒图像的灰度共生矩阵 4 方向特征参数均值

磨粒编号	能量	熵	惯性矩	局部平稳性	相关	最大概率	方差
1-1	0.231 119	2.209 669	1.056 307	0.692 445	0.518 061	0.313 293	0.417 209
1-2	0.196 917	2.104 775	1.046 505	0.697 927	0.403 056	0.304 267	0.603 862
1-3	0.349 404	1.842 826	0.977 457	0.749 125	0.796 489	0.430 295	0.525 724
1-4	0.333 109	1.996 724	1.138 526	0.744 321	0.470 562	0.427 819	0.497 423
2-1	0.543 641	1.158 962	0.478 056	0.852 421	1.144 534	0.617 182	0.549 842
2-2	0.446 349	1.369 208	0.587 621	0.825 383	0.621 843	0.54 6282	0.366 091
2-3	0.410 706	1.549 472	0.675 524	0.799 301	0.628 561	0.498 206	0.589 252
2-4	0.527 484	1.200 533	0.444 551	0.862 819	1.038 740	0.632 964	0.665 350
3-1	0.719 669	0.746 584	0.328 801	0.908 548	0.583 291	0.783 415	0.704 641
3-2	0.669 115	0.826 061	0.413 848	0.909 242	0.726 712	0.752 046	0.435 496
3-3	0.748 607	0.616 839	0.593 390	0.930 978	1.028 648	0.818 061	0.512 179
3-4	0.759 690	0.638 723	0.364 987	0.918 857	0.491 430	0.810 186	0.708 124
4-1	0.418 184	1.474 242	0.502 420	0.825 073	0.719 657	0.518 104	0.448 214
4-2	0.488 962	1.304 061	0.617 092	0.832 874	0.474 478	0.595 467	0.458 472
4-3	0.536 685	1.190 396	0.553 470	0.850 214	0.652 208	0.630 932	0.658 554
4-4	0.484 592	1.395 192	0.688 726	0.830 107	0.432 718	0.581 370	0.544 746

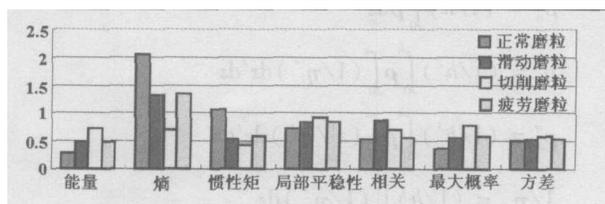


图 2 典型磨粒图像灰度共生矩阵特征参数均值比较

表 1 和图 2 的结果表明，正常磨粒的能量明显小于滑动、切削、疲劳磨粒，其值在 0.18 ~ 0.35 之间。切削磨粒的能量最大，一般在 0.65 ~ 0.75 之间。能量表征了纹理的全局均一性程度，正常磨粒较光滑，其能量值较小，其余几种磨粒表面纹理相对粗糙，能量值较大。

正常磨粒的熵和惯性矩在几类典型磨粒中最大，切削磨粒的熵和惯性矩最小。熵表征了图像空间的均匀性，用来描述区域间灰度变化的总体性质，并对不

(4) 根据对象特性，选取 $d=5$ ，取 4 个方向即 0、90°、45 和 135°；计算每个子图像的灰度共生矩阵的能量、熵、惯性矩等特征参数，累加每个子图像的特征参数，求出平均值作为磨粒图像的灰度共生矩阵特征参数。

(5) 统计分析正常、滑动、切削和疲劳等磨粒图像的灰度共生矩阵特征参数。

2.3 试验结果讨论

在运用灰度共生矩阵特征参数来分析纹理时，为体现纹理的各向同性，使得所求得的纹理特征参数与方向无关，采用 0、45°、90 和 135 四个方向上的共生矩阵特征量均值进行综合分析。

同图像空间的纹理反应比较敏感。当灰度共生矩阵中的值均相等时，熵最大，说明图像局部范围内具有各种各样的灰度变化组合，图像表现为较精细的纹理。反之，值较小，图像表现为粗纹理。正常磨粒纹理比较细致，熵相对较大，一般为 1.80 ~ 2.20。切削磨粒的熵处于 0.60 ~ 0.80 之间，在 4 类磨粒中最小，这说明切削磨粒外形一般细长，纹理表面特征不明显。惯性矩表征图像平均灰度与其周围背景的差别程度，局部变化大，其值也较大。当灰度共生矩阵的值集中在对角线附近， $|i - j|$ 的值会很小，惯性矩的值也小，图像表面为较粗的纹理。相反，图像表面为较细的纹理。正常磨粒的惯性矩最大，处于 0.80 ~ 1.40 之间。切削磨粒的惯性矩最小，一般为 0.30 ~ 0.60。

切削磨粒图像在局部范围内的灰 (下转第 74 页)

增加了极性基团在金属表面的吸附,从而增加了防锈性能(见图 2、3)。

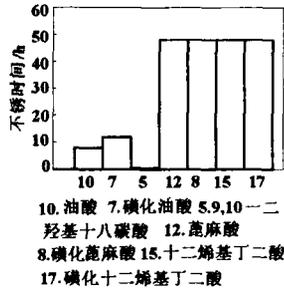


图 2 极性基团对防锈性能的影响(1%水溶液)

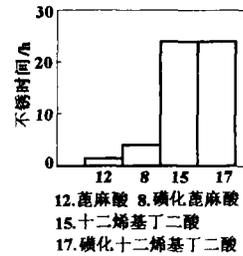


图 3 极性基团对防锈性能的影响(0.5%水溶液)

2.3 羧基的个数对防锈性能的影响

从图 4 可见碳原子数相近的二元羧酸烷醇铵盐的防锈性能比一元羧酸的好,可见极性的羧基个数多的防锈性能好。

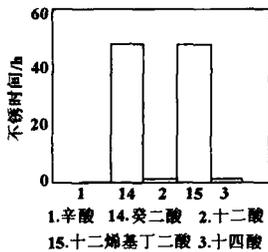


图 4 羧基的个数对防锈性能的影响(1%水溶液)

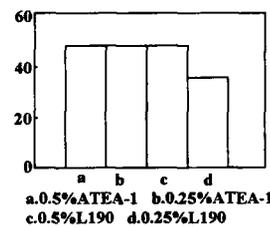


图 5 ATEA-1 与 Ciba 公司 L190 防锈性能的比较

2.4 ATEA-1 新型防锈剂的合成。

根据上述防锈性能与基团之间的关系,以最佳分子结构组合,按 1.3 节方法合成并经提纯和特殊处理,得到了有机羧酸醇铵盐 $(\text{CH}_2 - \text{CHG})_x [\text{COO}^- \text{N}^+$

(上接第 19 页)度反差较小,反差特征参量值也相对较小,局部平稳值较大。正常磨粒的最大概率小于正常、滑动和疲劳磨粒,一般不超过 0.45。相关描述 $P(i, j|d,)$ 中行或列元素的相似程度,与纹理的方向有关,方差对这 4 类磨粒图像没有显著差异,这两项指标不适合作为这些种类磨粒图像纹理的特征参数。

3 结束语

运用计算机图像处理技术,通过对磨粒图像的灰度共生矩阵进行纹理分析,初步得出正常磨粒的能量、熵、惯性矩、局部平稳性和最大概率的数值范围分别为 0.18~0.35, 1.80~2.20, 0.80~1.40, 0.65~0.75 和 0.30~0.45; 切削磨粒的能量、熵、惯性矩、局部平稳性和最大概率的数值范围分别为 0.65~0.75, 0.60~0.85, 0.30~0.60, 0.90~0.95 和 0.70~0.85, 可以作为磨粒的种类分类依据之一, 进而进行机械设备故障诊断。

$(\text{CH}_2\text{CH}_2\text{OH})_3]_y$, 简称 ATEA-1, 其防锈性能 0.5% 和 0.25% 的水溶液 48 h 不锈)。与 Ciba 公司的产品 L190 的防锈性能相当 (0.5% 和 0.25% 的水溶液 48 h 不锈); 上海产脂肪酸异丙醇铵盐 (市售) 1% 的水溶液 48 h 已锈。实验证明新合成的 ATEA-1 具有优越的防锈性能。

3 结论

(1) 防锈性随碳链的增长 ($\text{C}_8 \sim \text{C}_{17}$), 防锈性能变好; 但碳链过长, 防锈性能反而降低; 防锈性与极性基团有关。

(2) 有机分子在水中的溶解性与烷基链的长度和亲水性极性基团的多少有关。当分子中同时含有多个极性基团且有适当长度疏水性烃基时, 分子能有效吸附在金属的表面, 且能形成致密的保护层, 表现出较好的防锈性能。

(3) 按最佳分子结构组合设计并合成了有机羧酸醇铵盐 ATEA-1, 其防锈性能优良 (0.5% 和 0.25% 的水溶液 48 h 不锈), 与 Ciba 公司的同类产品的防锈性能相当。

参考文献

- [1] 张自卫. 非亚硝酸钠水溶性缓蚀剂. 腐蚀与防护, 1988 (6).
- [2] Fukutani, *et al*. Rust preventive, US 6 488 749 2002.
- [3] Watanab S, Fujita T. New additives derived from fatty acids for water-based cutting fluids. J. Am. Oil Chem. Soc., 1985, 62 (1): 125~127.
- [4] Tomoda, Hideyuki, *et al*. Characteristic properties of cutting fluid additives derived from the reaction products of hydroxyl fatty acids with some acid anhydrides. J. Surfactants Deterg., 1998, 1 (14): 533~537.
- [5] Julian W, Hill. Preparation for azelaic acid. Organic Syntheses, Vol., 53~55.

本文讨论的是对单一磨粒的形状纹理分析, 如果对磨粒图像进行有效分割, 可以实现对磨粒群的形状纹理的分析, 计算出磨粒群的纹理以及流动的磨粒纹理统计参数, 将有更好的判断效果。

参考文献

- [1] Hawkins J K. Textural Properties for Pattern Recognition, in Picture Processing and Psychopictorics [M]. B S Lipkin, A Rosenfeld Eds. Academic Press, New York, 1980. 347~370.
- [2] Laghari M S. Recognition of texture types of wear particles [J]. Neural Comput & Appic, 2003 (12): 18~25.
- [3] 赵荣椿. 数字图像处理导论. 西安: 西北工业大学出版社, 1999.
- [4] 章毓晋. 图像处理与分析. 北京: 清华大学出版社, 1999.
- [5] 萧汉梁. 铁谱技术及其在机械检测诊断中的应用. 北京: 人民交通出版社, 1993.