DOI: 10.19718/j.issn.1005-2992.2019-01-0035-06

基于多重分形谱参数的刀具磨损状态特征提取

宋伟杰[1], 庞弘阳[2], 关 山[1], 康振兴[1]

(1. 东北电力大学机械工程学院, 吉林 吉林 132012; 2. 中国兵器集团内蒙古北方重工业集团有限公司, 内蒙古 包头 014033)

摘 要: 鉴于多重分形理论在精细刻画系统非线性现象和过程方面具有独特优势, 提出了基于多重分形理论的刀具磨损状态特征提取方法. 首先估计去噪后的刀具磨损声发射信号多重分形谱, 验证其标度不变性和自相似性; 然后在此基础上研究了刀具磨损多重分形谱参数 α_0、$\Delta\alpha$ 和 $f(\alpha_{\min})$ 随磨损量变化情况, 并通过散点图描述三种特征参数表征刀具磨损阶段的有效性; 最后结合切削条件讨论特征 $f(\alpha_{\min})$ 与切削速度的关联性. 研究结果表明: 多重分形谱参数与磨损阶段之间具有较强的关联性, 进而提出了基于多重分形谱参数进行刀具磨损状态特征提取的新方法.

关 键 词: 刀具磨损; 声发射信号; 多重分形理论; 特征提取; 标度不变性

中图分类号: TH165+.3; TP206 **文献标识码:** A

切削是机械加工中的重要工序, 为提高机械加工的自动化和智能化水平, 提高生产效率和质量, 迫切要求对刀具磨损状态进行可靠监测, 磨损状态特征提取是实现刀具磨损状态监测的关键[1]. 刀具磨损过程中发出的声发射(Acoustic Emission, AE)信号受到刀具磨损, 材料晶格滑移, 刀具与工件摩擦以及刀具破损影响, 呈现出随机性、非线性和耗散性的特点, 传统线性信号处理方法难以精确提取磨损阶段特征[2~3]. 因此, 为达到刀具磨损状态监测和磨损量预测的目的, 需要寻求一种能定量描述刀具磨损阶段的有效特征提取手段. 分形理论描述了自然界大量存在的偶然性和不规则性, 近年来随着研究的深入, 它在故障诊断领域得到了一定的应用[4]. 文献[5~8]以振动信号、AE 信号以及刀口形貌图像等为研究对象, 利用广义分形维数作为特征量, 实现了对机械设备故障特征的提取, 在整体反映非线性信号的分形特性上取得了一定效果, 然而仅采用单分形方法很难准确反映刀具磨损过程中复杂的内在动力学特性. Mandelbrot[9]在单分形的基础上, 提出了多重分形方法, 它既可以反映非线性信号的整体分形特性, 也具有较强的局部分析能力, 能够准确描述信号的局部动特性. 目前多重分形理论在刀具磨损状态监测领域很少应用, 在信号处理领域取得了一定的进展[10~12]. 文献[10]分析了多重分形谱参数对液化泵不同退化状态的反映能力. 文献[11]估计分形谱参数作为齿轮箱故障特征量, 为齿轮箱故障特征提取提供了一种新方法. 文献[12]采用多重分形理论分析了风电场风速时间序列波动, 实现了风速变化趋势的预测.

本文针对简单分形维数不足以对分形体的局部特征进行精细描述的问题, 提出基于多重分形理论的刀具磨损 AE 信号特征提取方法, 研究结果表明: 多重分形谱可描述刀具磨损 AE 信号不均匀程度及其不同层次的几何结构特征, 并在分析多重分形谱各特征量的物理意义基础上, 提取表征刀具磨损特征的分形谱特征量.

收稿日期: 2018-03-01

基金项目: 吉林省科技厅科技公关计划(20170520099JH)

第一作者: 宋伟杰(1991-), 男, 硕士, 助理实验师, 主要研究方向: 机械设计、信号处理与故障诊断

电子邮箱: 1540279370@qq.com(宋伟杰); 756784325@qq.com(庞弘阳); guanshan1970@163.com(关山); 1138163054@qq.com(康振兴)

1 试验系统

1.1 刀具磨损试验系统

刀具磨损切削试验在 CA6140 车床进行,刀片为 YT15 硬质合金涂层刀片,试验使用的材料为退火态高碳钢 T10,硬度≤197HB. 试验过程中采用 R15-ALPHA 谐振式 AE 传感器、PXPA Ⅱ 宽带前置 AE 放大器、PXI-6366 数据采集卡、计算机等构建了一个数据采集系统,如图 1 所示. AE 传感器依靠磁力紧紧吸附在刀柄近刀头而不干扰切削的位置. 采样频率为 2 MHz,采用工具显微镜测量刀具磨损量的大小,测量精度为 0.01 mm.

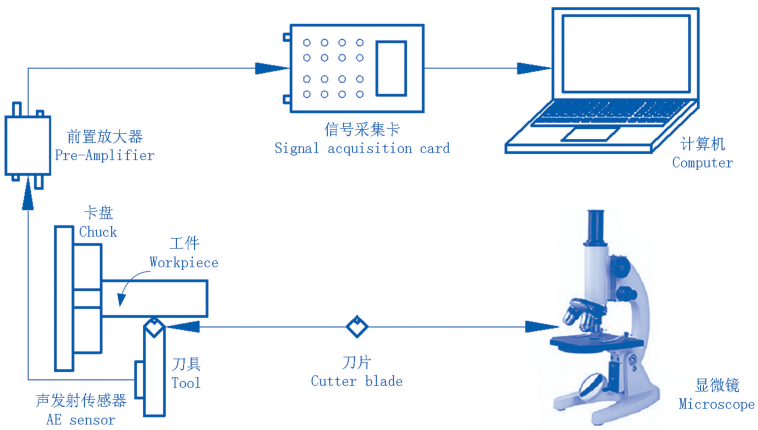


图 1 刀具磨损试验系统

1.2 刀具磨损 AE 信号的采集

综合考虑切削条件、试验材料、所选刀具等试验因素,根据刀具磨损量的大小确定了切削时间和采集数据的时段,并界定刀具三种磨损状态:磨损量在 0.15 mm 以下为初期磨损阶段,磨损量在 0.15 ~ 0.30 mm 之间为正常磨损阶段,磨损量高于 0.30 mm 为急剧磨损阶段. 本文采用日本统计学家田口玄一提出的正交试验法,设计全面的试验方案,进行切削实验.

信号采集过程具体如下:切削 180 s,仅记录后 5 s 的数据,停车测量磨损量;换新刀片,切削 360 s,记录最后 5 s 信号,停车测量磨损量;试验过程重复进行,停车前切削时间为 $180n(n=1,2,\cdots,n)$,直到刀片磨损为止. 仅记录每次切削过程最后 5 s 的数据是为了使信号更好地反映刀具当前的磨损状态,同时减少了数据采集量;更换新刀片的目的在于更精准的模拟刀具连续切削的过程.

2 磨损信号的多重分形谱分析

2.1 多重分形谱计算方法

多重分形定义在分形结构上由多个标度指数的奇异测度构成的无限集合,用多重分形谱进行描述. 多重分形谱的计算方法如下:

(1) 计算概率测度 $P_i(\varepsilon)$

将信号时间序列按时间划分为许多尺寸为 $\varepsilon(\varepsilon<1)$ 的一维小盒子,$S_i(\varepsilon)$ 为盒子尺寸为 ε 时第 i 个小盒子内所有信号的幅值之和,$\sum S_i(\varepsilon)$ 为全部信号幅值之和,则概率测度

$$P_i(\varepsilon)=\frac{S_i(\varepsilon)}{\sum S_i(\varepsilon)}. \tag{1}$$

(2) 定义奇异强度 α

在无标度区域内,概率测度 $P_i(\varepsilon)$ 组成的集可按 $P_i(\varepsilon)$ 的大小划分成满足以下条件的幂函数列子集

$$P_i(\varepsilon) \propto \varepsilon^{\alpha}. \tag{2}$$

(3) 构造配分函数$\chi_q(\varepsilon)$

对 $P_i(\varepsilon)$ 的 q 次方加权求和得到配分函数$\chi_q(\varepsilon)$

$$\chi_q(\varepsilon) \equiv \sum P_i(\varepsilon)^q = \varepsilon^{\tau(q)}, \tag{3}$$

式中:q 为权重因子.

(4) 估计质量指数 $\tau(q)$

$\chi_q(\varepsilon)$ 还可以建立与 ε 在无标度区内的关系,即公式(3) 后端的等式成立,则可以从 $\ln\chi_q(\varepsilon) \sim \ln\varepsilon$ 曲线的斜率得到

$$\tau(q) = \frac{\chi_q(\varepsilon)}{\varepsilon}. \tag{4}$$

如果 $q >> 1$ 时, $\sum P_{iq}$ 的求和中大概率子集将起主要作用;$q << 1$ 时, $\sum P_{iq}$ 求和中小概率子集将起主要作用. 所以通过加权处理,可以对一个分形集内部的结构进行精细的研究. q 的取值范围本应在 $[-\infty, +\infty]$ 之间,但为便于计算,在 α 随 q 的变化较小情况下尽可能的取大. 本文 q 取 $-10 \sim 10$.

(5) 计算多重分形谱$f(\alpha)$

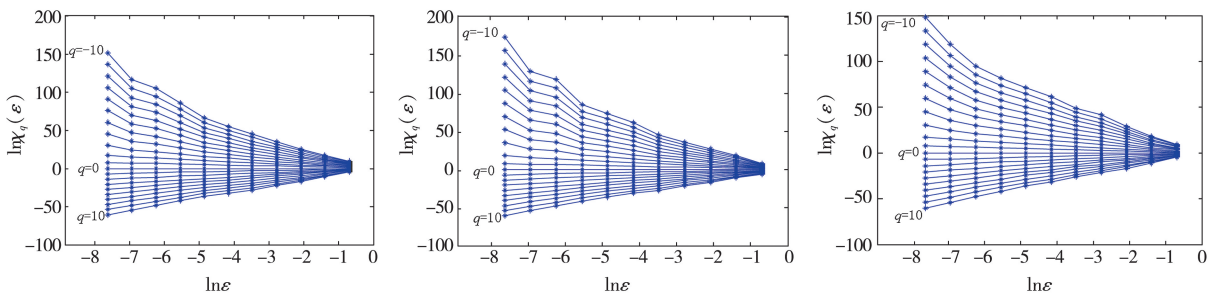
α、$f(\alpha)$、$\tau(q)$ 三个参数均用于表达相同的对象,并且三者之间存在如下 Legendre 变换关系

$$\begin{cases} \tau(q) = \alpha q - (\alpha), \\ \alpha = \dfrac{d\tau(q)}{dq}. \end{cases} \tag{5}$$

通过上式计算出 α 值及$f(\alpha)$ 值,然后绘制$f(\alpha) - \alpha$ 的关系曲线图,就能得到信号的多重分形谱图.

2.2　磨损 AE 信号的多重分形几何特性

三组曲线分别为不同磨损阶段 q 取不同值时配分函数 $\ln\chi_q(\varepsilon)$ 随 $\ln\varepsilon$ 的变化,如图 2 所示. 可见,无论是 $q > 0$ 还是 $q < 0$,所有 ε 区间上的曲线都是直线,这些直线可以向更小的 ε 无限延伸下去,表现出理想的标度不变性,标度不变性是多重分形谱最典型的几何特性,这说明不同切削条件下的刀具磨损 AE 信号都具有多重分形特性,满足标度不变性,可以用多重分形理论研究.

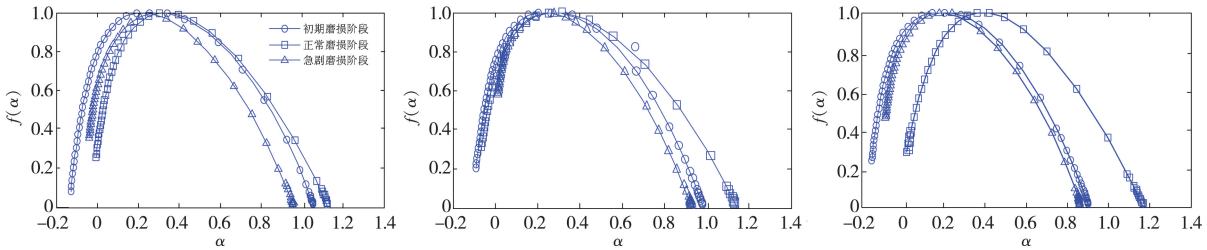


(a) 初期磨损阶段　　(b) 正常磨损阶段　　(c) 急剧磨损阶段

图 2　不同切削条件配分函数 $\ln\chi_q(\varepsilon) - \ln\varepsilon$ 曲线

刀具处于不同磨损阶段的多重分形谱,如图 3 所示. 可见多重分形谱均呈现向左的钩状,说明磨损过程中最大概率子集中单元数目超过最小概率子集的单元数目,也就是 AE 信号处于高振幅的机会比处于低振幅的机会要大,即磨损信号多为大波动. 图中显示 α 值不是单一的标度指数,而是一个标度范围,这不但说明了磨损信号具有长记忆性的分形特征, 而且还刻画了不同幅度波动下的自相似

特征[13~16].



(a)切削条件 1　(b)切削条件 2　(c)切削条件 3

图 3　不同切削条件的多重分形谱

2.3　基于多重分形谱参数的磨损特征提取

为了将多重分形理论应用于刀具磨损状态特征提取、识别等应用,需从多重分形谱中提取一组表征多重分形谱特征的参数. 多重分形谱包含奇异强度 α 和多重分形谱 $f(\alpha)$ 两个参量[17],如图 4 所示. 多重分形谱参数有:α_{max}、α_{min}、$f(\alpha_{min})$、$f(\alpha_{max})$、α_0、$\Delta\alpha$、Δf 和 $|B|$[17~18],其中 $\Delta\alpha$ 为多重分形谱谱宽,Δf 为多重分形谱维度,参数 $|B|$ 表示单峰曲线的对称系数.

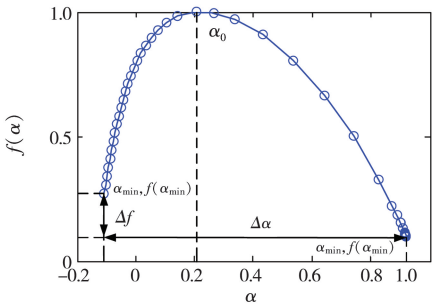


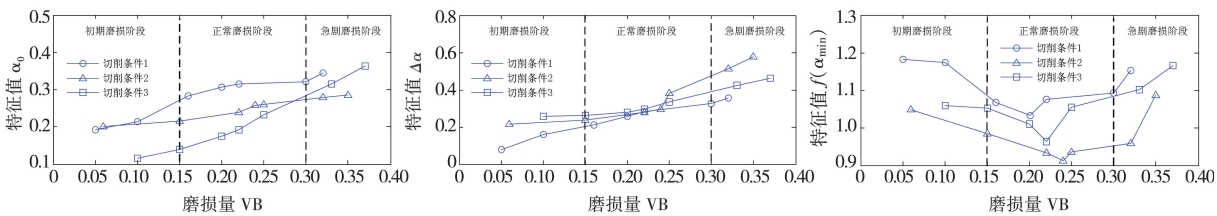
图 4　多重分形谱参数几何表示

α_{max} 和 α_{min} 表示给定 q 条件下概率奇异性的最小值和最大值,宽度 $\Delta\alpha$ 度量了整个奇异性分布的宽度. α_0 为多重分形谱 $f(\alpha)$ 最大值点对应的奇异强度,反映了分形谱的对称性和不规则性,α_0 越大,表明信号越不规则,波动越随机. $f(\alpha_{min})$ 为奇异强度最小值的波段子集分形维数、描述大波动特征,$f(\alpha_{max})$ 为最大值的波段子集分形维数、描述了小波动特征. 刀具采样信号的峰和谷特征为大波动特征,要准确的度量磨损状态特征应该选用 $f(\alpha_{min})$,$f(\alpha_{min})$ 值越大,表明整个分形结构上信号的波动越激烈,工件和刀具相互作用增强,切削能量变大. 综上本文选择参数 α_0、$\Delta\alpha$ 和 $f(\alpha_{min})$ 作为特征参数进行研究,计算公式如表 1 所示.

表 1　多重分形谱参数及其表达式

参数	表达式
α_0	$\alpha_0 = \alpha_{max(f(\alpha))}$
$f(\alpha_{min})$	$f(\alpha_{min}) = f(\min(\alpha))$
$\Delta\alpha$	$\Delta\alpha = \max(\alpha) - \min(\alpha)$

对应三组不同的切削条件,在刀具磨损的初期、正常和急剧磨损阶段分别选取 2 组、3 组和 2 组数据,每组数据取 2 048 个点分别求多重分形谱参数特征值 α_0、$f(\alpha_{min})$ 和 $\Delta\alpha$,三种特征随磨损量变化曲线,如图 5 所示.



(a)特征值 α_0 随磨损量变化　(b)特征值 $\Delta\alpha$ 随磨损量变化　(c)特征值 $f(\alpha_{min})$ 随磨损量变化

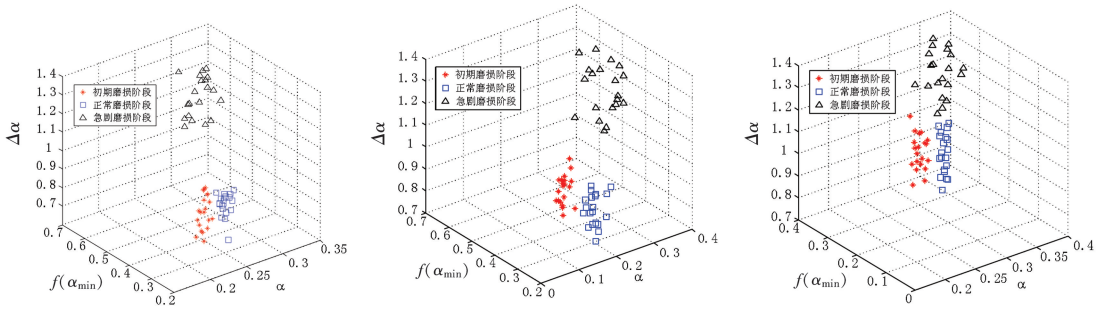
图 5　参数 α_0、$\Delta\alpha$ 和 $f(\alpha_{min})$ 随磨损量变化

从图 5(a) 可知,随着磨损量的增加,α_0 呈逐渐增大的趋势,表明信号越不规则,波动越随机;从图 5(b) 可知,$\Delta\alpha$ 也随着刀具磨损量的增大呈增大趋势,说明磨损信号的大波动特征发生的概率越来越大,信号幅值变大,信号的能量增强;从图 5(c) 可知,谱宽 $f(\alpha_{min})$ 的值先减小后增大,这种特性与刀具磨损速率有关. 刀具在初期和剧烈磨损阶段磨损速率快,反映 $f(\alpha_{min})$ 较大,而在中期磨损平稳 $f(\alpha_{min})$ 较小.

综上所述,构造基于多重分形谱参数的 3 维特征向量

$$M = [\alpha_0, \Delta\alpha, f(\alpha_{\min})]. \tag{6}$$

将 α_0、$\Delta\alpha$ 和 $f(\alpha_{\min})$ 的三维分布绘成散点图,如图 6 所示. 可以看出参数 α_0、$\Delta\alpha$ 及 $f(\alpha_{\min})$ 可以很好的表征刀具不同的磨损阶段,相同磨损阶段样本的类内聚类性较好,不同磨损阶段样本被较好地区分开. 同时,所提取特征参数在不同切削条件下均具有较好分类能力,说明本文所提方法具有普适性.

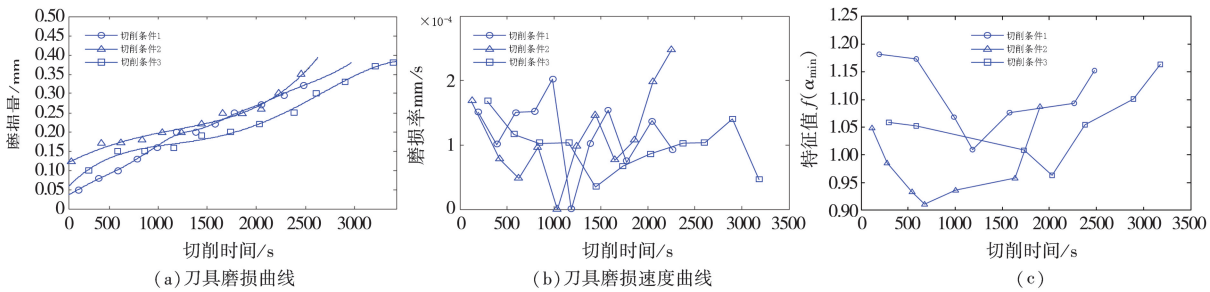


(a)切削条件 1　　(b)切削条件 2　　(c)切削条件 3

图 6　特征 α_0、$\Delta\alpha$ 和 $f(\alpha_{\min})$ 三维分布散点图

3　特征参数 $f(\alpha_{\min})$ 与磨损速度的关联性讨论

(1) 根据实验数据所绘制的刀具磨损曲线,如图 7(a) 所示;对刀具磨损量曲线求导得到图 7(b),其物理意义为刀具磨损速度,$f(\alpha_{\min})$ 与切削时间的关系曲线,如图 7(c) 所示;图 7(b) 和图 8(c) 基本变化趋势相同,验证了参数 $f(\alpha_{\min})$ 与磨损速度的关联性.



(a)刀具磨损曲线　　(b)刀具磨损速度曲线　　(c)

图 7　时间变化下的磨损和特征值曲线

表 2　刀具使用状态时间表

组别	v_c/(r·min^{-1})	f/(mm·r^{-1})	a_p/(mm)	正常磨损时间 t/(s)	刀具寿命 t/(s)
切削条件 1	390	0.176	0.3	1 184	2 694
切削条件 2	520	0.176	0.3	675	1 905
切削条件 3	390	0.088	0.4	2 029	3 395

(2) 三组切削条件和刀具处于正常磨损阶段的时间和刀具使用寿命,如表 2 所示. 对比切削条件 1 和切削条件 2,由于切削条件 2 切削速度较大,所以磨损时间和刀具寿命较小、磨损速度较快,验证了切削速度是切削要素中的主要影响因素,间接验证了 $f(\alpha_{\min})$ 与磨损速度的关联性.

(3) 对比切削条件 1 和切削条件 3,切削条件 1 中 f 较大,切削条件 3 中 a_p 较大,对比磨损时间和刀具寿命切削条件 1 较小、磨损速度较快,进而验证进给量对金属切削磨损的影响比背吃刀量对磨损的影响略大.

4　结　　论

(1) 刀具磨损 AE 信号不是一个单分形结构,其波动特性呈现多重分形特性,具有标度不变性和自

相似性;利用多重分形方法可以较准确地对非线性 AE 信号提取特征.

(2) 多重分形谱特征量 α_0、$\Delta\alpha$ 和 $f(\alpha_{min})$ 在不同磨损状态下有较明显规律,能够表征刀具磨损状态的多重分形谱主要特征;参数 $f(\alpha_{min})$ 的变化趋势与刀具磨损速度之间具有较强的关联性;不同切削条件下 $f(\alpha_{min})$ 的变化规律表明,$f(\alpha_{min})$ 与切削速度也有密切的对应关系.

参 考 文 献

[1] J. Yu. Machine tool condition monitoring based on an adaptive gaussian mixture model[J]. Journal of Manufacturing Science & Engineering, 2012,134(3):1013-1020.

[2] 关山. 基于奇异分解与最小二乘支持向量机的刀具磨损识别方法研究[J]. 东北电力大学学报,2013,33(3):5-9.

[3] 彭昶. 基于混沌理论的刀具磨损识别研究[D]. 吉林:东北电力大学,2016.

[4] M. Bolgorian, R. Raei. A multifractal detrended fluctuation analysis of trading behavior of individual and institutional traders in Tehran stock market[J]. Physica A Statistical Mechanics & Its Applications,2011,390(21/22):3815-3825.

[5] 张亢,程军圣,杨宇. 基于局部均值分解与形态学分形维数的滚动轴承故障诊断方法[J]. 振动与冲击,2013,32(9):90-94.

[6] J. H. Lim, E. J. Khang, T. H. Lee, et al. Detrended fluctuation analysis and kolmogorov - sinai entropy of electroencephalogram signals[J]. Physics Letters A,2013,377(38):2542-2545.

[7] 刘国华,黄平捷,龚翔,等. 基于分形维和独立分量分析的声发射特征提取[J]. 华南理工大学学报:自然科学版,2008,36(1):76-80.

[8] 郑光明,赵军,徐汝锋,等. 陶瓷刀具材料断口形貌及裂纹扩展的分形特征[J]. 功能材料,2015,46(21):21133-21136.

[9] W. Jan Kantelhardt, A. Stephan Zschiegner, Eva Koscielny-Bunde, et al. Multifractal detrended fluctuation analysis of nonstationary time series[J]. Physica A:Statistical Mechanics and its Applications,2002,316(1):87-114.

[10] 田再克,李洪儒,孙健,等. 基于改进 MF-DFA 和 SSM-FCM 的液压泵退化状态识别方法[J]. 仪器仪表学报,2016,37(8):1851-1860.

[11] 林近山,陈前. 基于多重分形去趋势波动分析的齿轮箱故障特征提取方法[J]. 振动与冲击,2013,32(2):97-101.

[12] 孙斌,姚海涛. 风电场风速时间序列的多重分形去趋势波动分析[J]. 电工技术学报,2014,29(6):204-210.

[13] 王卓,王天然,苑明哲,等. 基于多重分形的水泥回转窑工况识别研究[J]. 仪器仪表学报,2009,30(4):711-716.

[14] Zhou Yu, Leung Yee, Yu Zu-Guo. Relationships of exponents in multifractal detrended fluctuation analysis and conventional multifractal analysis[J]. Chinese Physics B,2011,87(9):98-106.

[15] J. Lin, Q. Chen. Fault diagnosis of rolling bearings based on multifractal detrended fluctuation analysis and Mahalanobis distance criterion [J]. Mechanical Systems & Signal Processing,2012,38(2):515-533.

[16] X. Chen, G. Yao, J. Cai, et al. Fractal and multifractal analysis of different hydraulic flow units based on micro-CT images[J]. Journal of Natural Gas Science & Engineering,2017,48(1):145-156.

[17] P. Pavón-Domínguez, A. B. Ariza-Villaverde, A. Rincón-Casado, et al. Fractal and multifractal characterization of the scaling geometry of an urban bus-transport network[J]. Computers Environment & Urban Systems,2017,64(1):229-238.

[18] Lin Min, Ya Shuang-Xi, Zhao Gang, et al. Multifractal detrended fluctuation analysis of interevent time series in a modified OFC model[J]. Communications in Theoretical Physics,2013,59(1):1-6.

Feature Extraction of Tool Wear State Based On Multifractal Spectrum Parameters

Song Weijie[1], Pang Hongyang[2], Guan Shan[1], Kang Zhenxing[1]

(1. School of Mechanical Engineering, Northeast Electric Power University, Jilin Jilin 132012; 2. Inner Mongolia North Heavy Industries Group Corp. Ltd., Baotou Inner Mongolia 014033)

Abstract: Considering the unique advantages of multifractal theory in depicting the phenomena and processes of nonlinear systems, a method of feature extraction based on multifractal theory is proposed. To estimate the noise of the acoustic emission signal of tool wear, the multifractal spectrum, verify the scale invariance and self similarity; on the basis of the research on tool wear multifractal spectrum parameters of α_0, $f(\alpha_{min})$ and $\Delta\alpha$ with wear volume changes, and the effectiveness of the scatter diagram to describe three kinds of characteristics parameters of tool wear stage; finally, discuss the correlation characteristics of cutting conditions and cutting speed of the $\Delta\alpha$. The results show that there is a strong correlation between multifractal spectrum parameters and wear stages. A new method for feature extraction of tool wear based on multifractal spectral parameters is proposed.

Key words: Tool wear; Acoustic emission signal; Multi-fractal theory; Feature extraction; Scaling invariance