

基于谐波小波的磨削砂轮状态特征提取^{*}

李德广, 刘淑琴

(山东大学电气工程学院 济南, 250061)

摘要 探寻一种通过对动态磨削力进行时频能量分布分析来提取磨削砂轮状态特征的方法。由磁悬浮轴承机械电气参数求得动态磨削力,通过对磨削力进行谐波小波包分解,得到无频谱混叠的磨削力的时频分布图,分析了通过时频分布图提取砂轮状态特征的可行性。通过求不同磨削状态下的时频分布矩阵的能量方差,定义了短时峰频带,求取能量最大的32个峰频带的能量组成了砂轮磨削状态的特征向量。对特征向量的离散度分析和磨削状态分类实验证明了该方法的有效性。

关键词 砂轮钝化; 磨削力; 特征提取; 谐波小波分析; 磁悬浮轴承

中图分类号 TG580.6

引言

磨削砂轮状态的在线检测和故障预报是提高磨削效率和精度必须要解决的问题。由于对砂轮的磨钝周期缺少良好的度量方法,在实际磨削操作中为避免出现残次品,大多对砂轮采用定时修锐,即在砂轮尚未达到磨钝周期极限时提前对其进行修锐,这是一种无奈的机械修整方式,频繁修整砂轮降低了加工效率并加快了砂轮的损耗,特别是使用CBN(Cubic Boron Nitride)之类昂贵砂轮时此问题尤为突出。反之,如果延误了修整周期,又会影响工件的尺寸精度和表面质量,造成废品。因此,在线监测砂轮的钝化状态,在砂轮磨钝之前给出修整报警信息,可以最大限度地利用砂轮的磨钝周期。这是提高磨削加工生产率、保证磨削质量的重要前提。

国内外学者在磨削砂轮状态的监测方面做了大量的研究工作。Stephane等^[1]建立了磨削砂轮磨损状态的在线智能检测系统。Mani等^[2]建立了基于磁悬浮轴承的磨削状态故障诊断方法。巩亚东等^[3]利用超景深显微镜观测砂轮磨料层的微观结构,通过磨粒的分布预测加工后的表面形貌,仿真了砂轮的磨损趋势。林献坤等^[4]提出了一种基于混合粒子群算法与支持向量回归机的磨削状态预测方法。林峰等^[5]利用贝叶斯网络建立平面磨削状态监测模型,在获取磨削用量和工件材料的基础上在线提取

磨削声发射信号的峭度系数,预测工件的粗糙度并识别了砂轮的钝化状态。刘贵杰等^[6]采集磨削声发射信号,利用声发射信号的幅值增量累加对磨削砂轮的状态进行评价。程文涛^[7]利用人工神经网络技术进行磨削状态的检测。以上这些方法有些是离线的,大多需要外接传感器的支持。磨削砂轮的钝化能直接引起磨削力的变化。有些学者通过检测磨削力来评价砂轮的钝化状态,在系统中埋设力传感器来检测磨削力,并通过对磨削力进行时域分析或快速傅里叶变换分析提取磨削特征。这种介入式的方法会影响原系统的动力学特性。文献^[1]分析发现,法向磨削力的特征与磨削砂轮状态有着鲜明的对应关系。利用磁悬浮轴承电主轴检测法向磨削力不用增加任何其他检测装置,磁悬浮轴承本身就是智能系统,应用磁悬浮轴承电主轴的一些机械电气参数得到磨削力^[2,8],无须外加传感器,响应速度快、频带宽,对磨削系统没有影响,增加的只是软件开销。

笔者在对磁悬浮轴承电主轴法向磨削力的频谱分析的基础上,提出一种改进的适用于磨削力特征分析的谐波小波包分解算法,通过对磨削力信号进行谐波小波包变换提取砂轮的状态特征。实验发现,该方法稳定可靠,不同状态特征间的离散度大,满足磨削砂轮状态分类器分类识别的要求。

1 磁悬浮轴承电主轴的磨削力检测

在磁悬浮轴承电主轴中,磨削力由电磁力提供,

* 国家自然科学基金资助项目(编号:50775129);山东省优秀中青年科学家科研奖励基金资助项目(编号:BS2011ZZ009);山东大学自主创新基金资助项目(编号:2012JC011)

收稿日期:2012-03-03;修改稿收到日期:2012-05-16

实时检测磨削力的主要任务是求磁悬浮轴承的电磁力。很多文献给出了求电磁力的公式,但这些公式都是经过线性化的近似模型,把铁心的磁化特性线性化,使由励磁电流得到的气隙磁密存在误差。由于电磁力与气隙磁密的平方成正比,所以得到的电磁力误差较大,不能用于磨削状态的特征提取。

根据虚位移公式,在磁悬浮轴承中铁磁体转子受到的电磁铁磁极施加的电磁力为

$$F_M = \frac{dW_G}{ds} = BH A_P = \frac{B^2 A_P}{\mu_0} \quad (1)$$

其中: B 为气隙磁密; A_P 为磁极面积; μ_0 为真空中的介电常数。

根据磁路理论,把磁悬浮轴承的磁路看成为铁芯和气隙两段磁阻的串联。气隙的磁阻为线性的,铁芯的磁阻为非线性的,它们的特安特性即 B 与磁动势的关系分别为一条直线和一条曲线。

根据安培环路定理可得

$$B = \frac{NI - H_{\text{iron}} l_{\text{iron}}}{\frac{2s}{\mu_0}} \quad (2)$$

其中: N 为励磁线圈匝数; I 为励磁偏置电流; H_{iron} 为铁心磁场强度; l_{iron} 为铁心磁路长度; s 为气隙宽度; μ_0 为真空中的介电常数。

式(2)在 $Hl-B$ 平面内为一直线,该直线与铁芯的特安曲线的交点即为所求的工作点,即磁通密度 B 。在实际工作中,转子在平衡位置附近做小幅振动,则 B 的工作点在图1的交点附近沿磁化曲线做小幅移动。经交点做磁化曲线的切线,设此切线方程为

$$B = aF_m + c \quad (3)$$

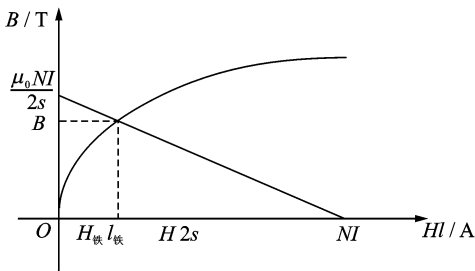


图1 B的图解法

式(2),(3)联立求解得到气隙的磁通密度为

$$B = \frac{a\mu_0 Ni + \mu_0 c}{2as + \mu_0} \quad (4)$$

把式(4)代入式(1)得到电磁力,在磁悬浮轴承差动方式下,上、下电磁铁作用在转子上的合力为

$$F_M = \left(\frac{(a_1 \mu_0 N i_1 + \mu_0 c_1)^2}{(2a_1 s + \mu_0)^2} - \frac{(a_2 \mu_0 N i_2 + \mu_0 c_2)^2}{(2a_2 s + \mu_0)^2} \right) \frac{A_P}{\mu_0} \quad (5)$$

根据式(5),只要实时检测上、下电磁铁中的励磁电流 i_1, i_2 和气隙宽度 s ,即可求得实时电磁力 F_M 。

根据牛顿运动定律得到法向磨削力为

$$F_N = F_M - M_N a_w \quad (6)$$

其中: M_N 为砂轮在法向上的当量质量; a_w 为砂轮的法向加速度。

$$\begin{cases} M_N = \frac{mL_b^2 + J}{L^2} \\ a_w = \frac{d_{N3} - 2d_{N2} + d_{N1}}{T_0^2} \end{cases} \quad (7)$$

其中: m 为转子质量; L_b 为转子质心到后磁轴承的距离; L 为砂轮到后轴承的距离; $d_{N1} \sim d_{N3}$ 为砂轮在以 T_0 为采样周期的3个连续采样点上的法向位移,该位移可由4个径向位移传感器的输出 d_{11}, d_{12}, d_{21} 和 d_{22} 以及砂轮到前、后位移传感器距离 L_1 和 L_2 的线性组合得到。

2 磨削力信号的谐波小波分析

2.1 改进的谐波小波分析

磨削力是一种典型的随机信号,很多重要的特征都体现在其中的一些瞬变的细节小信号上,对这样的信号进行分析,时域和频域的方法都显得无能为力。小波分析是在傅里叶分析和短时傅里叶分析的基础上发展起来的一种信号时频域分析方法,它将信号在时、频域同时展开来提取信号的瞬态特征,特别适合对随机信号进行特征分析。普通小波函数在频域虽然是紧支的,但其频域特性并不是理想的盒形。对信号进行多尺度分析时,相邻尺度间的势必相互混叠,造成了特定频带信号提取和分析的困难。谐波小波是一种复小波^[9],在频域具有严格的盒形特性,这使得分解生成的各子空间之间的频谱无泄漏和混叠,保持了各自的独立性,方便信号特征的提取,特别适合于随机信号子空间特征分析。其频谱如图2所示,谐波小波母函数的时域表达式为

$$\psi(t) = \frac{\exp(i4\pi t) - \exp(i2\pi t)}{i2\pi t} \quad (8)$$

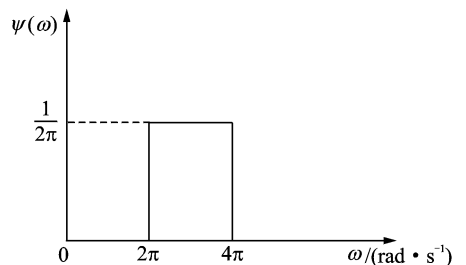


图2 谐波小波母函数的频谱

定义谐波小波的尺度为 $m, n \in R^+$ 且 $m < n$, 平移为 k , 则谐波小波的伸缩平移系列函数为

$$\psi(m, n, k) = \frac{\exp\left[i2n\pi\left(t - \frac{k}{n-m}\right)\right] - \exp\left[i2m\pi\left(t - \frac{k}{n-m}\right)\right]}{i2\pi(n-m)\left(t - \frac{k}{n-m}\right)} \quad (9)$$

对于时间序列信号 $f(r), r=1, 2, \dots, N-1$, 其离散谐波小波变换表达式为

$$W_d(m, n, k) = \frac{n-m}{N} \sum_{r=0}^{N-1} f(r) \bar{\psi}_{m,n}\left(r - \frac{k}{n-m}\right) \quad (10)$$

传统的谐波小波包算法是二分频递进分割频带^[10], 在采样频率一定的情况下, 其频带的分割方式固定。为了把信号分解到需要的任一尺度, 需要对谐波小波包算法进行改进。定义 Hilbert 空间 $\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_\infty$, 其中, ϕ_j 由 $\psi(m_j, n_j, k)$ 的平移系列构成 ($1 \leq j < \infty$), 且 $n_j = m_{j+1}$ 。令 $n_j - m_j = n_{j+1} - m_{j+1}$, 则 $\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_\infty$ 把整个频带等分, 每一函数空间占有频带宽度为 $2\pi(n_j - m_j)$ 。可以证明^[6]: a. 同一尺度下的各平移函数 $\psi(m_j, n_j, k)$ 是相互正交的; b. 不同尺度下的函数 $\psi(m_{j_1}, n_{j_1}, k)$ 和 $\psi(m_{j_2}, n_{j_2}, k)$ ($j_1 \neq j_2$) 是相互正交的。因此, 当 $b = n_j - m_j$ 从小到大变化时, 把时间离散信号按式(10)进行分解构成一种不同分辨率的谐波小波包分析。这种小波包分析可以根据需要把信号分解到任意的尺度。

2.2 磨削力信号的谐波小波展开

从一个磨削堵转周期(砂轮从修整到堵转)中选取一些磨削力信号段进行频谱分析, 可以发现某些

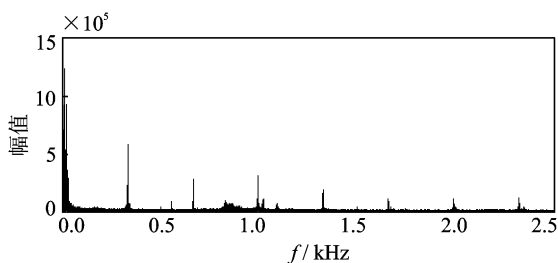


图3 磨削力信号频谱图

共性, 其中的一段频谱如图3所示。可以看出, 在砂轮转速对应的频率点(333 Hz)及其高次谐波频率点上, 频谱图中有窄而高的峰, 这主要是磁悬浮轴承为抑制砂轮的同频振动而给转子施加的电磁力。除去这几个峰可以发现, 磨削力的频谱主要集中在低频段的100 Hz以内, 在高频段还有几个波峰, 主要集

中在1.5 kHz以内。

图4为一段磨削力信号及其谐波小波包分解时频图。由于信号有效频带主要集中在1.5 kHz以内, 频率展开范围为0~1.5 kHz。

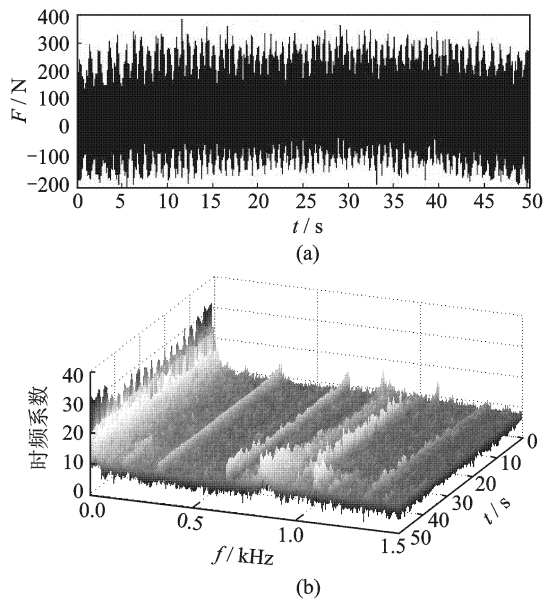


图4 磨削力时域信号与谐波小波包分解时频图

时频图中的低频部分, 即0 Hz附近沿时间轴的波形为分析信号的概貌, 信号和磨削力的变化趋势可以从该部分清晰看到。时频展开图中的高频部分代表信号在不同时刻和频率上的振动强度。因此, 谐波小波包分析在时、频域都有很好的定位能力, 能将信号的瞬态变化特征展现出来。

3 砂轮钝化状态特征提取

3.1 磨削力时频分布模式与砂轮状态关系

砂轮的一个磨钝周期从修锐到磨钝经历初始磨钝阶段、稳定磨钝阶段和剧烈磨钝阶段^[11], 如图5所示。砂轮径向磨损量在初始磨钝阶段增长较快, 主要表现为磨粒的破碎和整体脱落。其原因是由于砂轮刚刚修整, 砂轮表面的磨粒受修整工具的冲击而产生裂纹, 甚至整个磨粒都已松动。在磨削力作用下磨粒会出现大块碎裂, 松动的磨粒会整体脱落。图6为

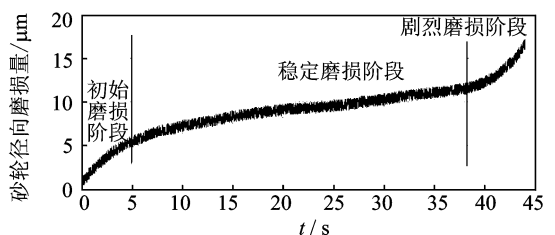


图5 砂轮径向磨损图

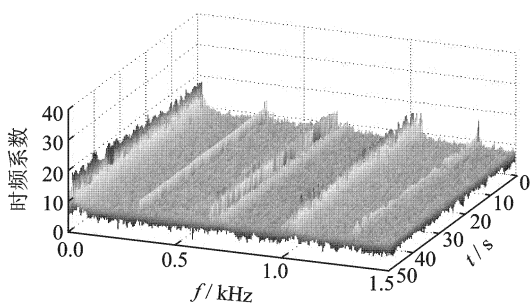


图6 初始磨损阶段磨削力时频展开图

该阶段的一段时频展开图。可见,在该阶段磨削力包络线幅值较小,除转子同频振动及其谐波外,整个时频展开图比较平稳,但整体幅值略高。

随着磨削过程的继续进行,进入缓慢增长的稳定磨损阶段。在该阶段主要是磨粒切削刃的钝化,即磨耗磨损,该阶段砂轮的磨损变缓。砂轮的有效工作时段就集中在这一段。图7为该阶段的一段时频图,可见,磨削力的低频包络线比初始磨损阶段有明显增大,但整体变化比较平稳。在低频段的50 Hz以内、0.7~1.0 kHz 一直呈现比较明显且频带相对稳定的峰。

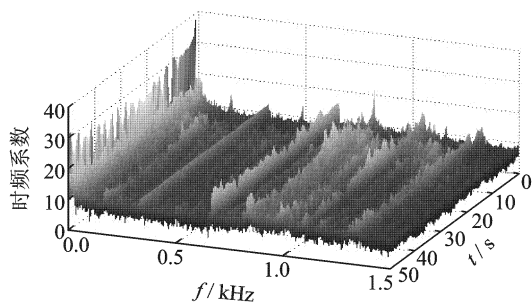


图7 稳定磨损阶段磨削力时频展开图

到某一时刻,磨损量开始急剧增长形成剧烈磨损阶段。在该阶段,由于磨粒切削刃的进一步钝化,作用在磨粒上的力急剧增大,导致磨粒产生大块碎裂、粘合剂断裂以及整个磨粒脱落。该阶段的一段时频图如图8所示。可见,进入该阶段磨削力的时频图发生了显著变化,在不同的频率段都出现了宽而高的峰,低频段磨削力包络线显著增大。

在砂轮进入剧烈磨损阶段时,各指标值均有明显变化。若继续磨削,则经过很短时间后就会因磨削力过高、磨削颤振严重及磨削表面质量恶化而无法进行下去。因此,可将剧烈磨损阶段的开始时刻定为砂轮磨钝的时刻。当砂轮从初始磨损阶段经稳定磨损阶段向剧烈磨损阶段过渡的过程中,会伴随磨削力振幅和时频分布的明显变化,因此可从其中提取砂轮磨损的特征。

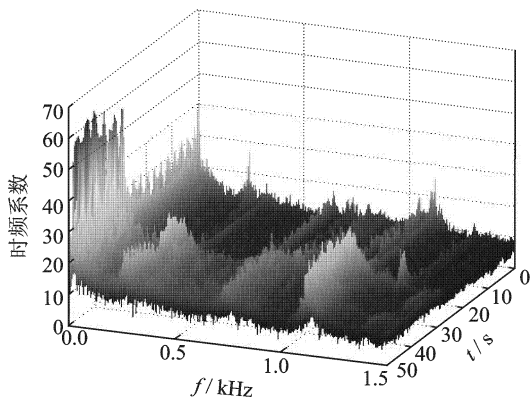


图8 剧烈磨损阶段磨削力时频展开图

3.2 特征的提取方法

特征提取的任务是完成磨削力时频分布模式和3种磨削状态的映射。为了尽可能精细提取磨削力信号的时频特征,频率分辨率和时间分辨率应尽可能地高,但这两个分辨率是相互制约的,在采样频率一定的情况下,增加采样序列的长度可以提高公共分辨率。为了保证特征提取的实时性,必须限制序列的采样长度。考虑到磨削力信号主要集中在中、低频段,频率分辨率确定为5 Hz。另外,受实时性和处理器运算速度的制约,时间分辨率确定为0.2 s。在系统采样频率为5 kHz的情况下,每一次特征提取的周期为1 s。

1) 分别对法向磨削力在3种磨削状态下进行K次采样和谐波小波包变换,分别得到K个系数矩阵 C_{ka} , $k=1, 2, \dots, K$; $a=1, 2, 3$ 。

2) 对每一类工况的K个系数矩阵作如下处理:把K个矩阵中同一位置的元素取出,组成一离散序列 $\{(c_{ij})_1, (c_{ij})_2, \dots, (c_{ij})_K\}$, 用公式 $E_{ij} = \sqrt{(c_{ij})_1^2 + (c_{ij})_2^2 + \dots + (c_{ij})_K^2}$ 求各离散序列的能量。用 E_{ij} 构造矩阵,3类系数分别得到一个与 C_{ka} 同阶的矩阵 E_a 。 E_a 由K个在不同工况下得到的小波系数矩阵合成得到,具有该类磨削力样本抽样信号小波系数矩阵的统计特性,在特征提取中可以用它来表征磨削力信息。

3) 对3个能量矩阵作如下处理:把3个矩阵中同一位置的元素取出,分别组成一离散序列 $\{(E_{ij})_1, (E_{ij})_2, (E_{ij})_3\}$ 。对各离散序列中的元素求方差 $D_{ij} = E\{[E_{ij} - E(E_{ij})]^2\}$ 。其中:函数 $E()$ 为求数学期望。用 D_{ij} 构造矩阵,得到与 E_a 同阶的方差矩阵 D 。方差矩阵 D 表示的是3种磨削状态下磨削力信号的小波系数的差异程度。 D 中某一位置的元素 D_{ij} 值越大,表示3种磨削状态的小波系数矩阵在该位置的离散

度越大,即差别越明显。反之,若 D_{ij} 值越小,说明3种小波系数矩阵在该位置上的差别越小。

4) 寻找方差矩阵中元素的“峰频带”。把矩阵 D 的每一行元素相加 $D_i = \sum D_{ij}$,把 D_i 由大到小排序,取出前32个 D_i 对应的行,记作 B_1, B_2, \dots, B_{32} 。峰频带凸现了3类磨削力信号中差别明显的时频段而抑制了差别较少的时频段,使特征量压缩而识别信息得以保留。求出每一个峰频带对应的小波系数的平方和 $\{u_i\}$ 作为其能量,把该能量与总能量的比值 $\{e_i\}$ 定义为信号的特征。这样,信号特征向量的维数等于峰频带的数目。

每个特征代表了一组小波系数,表达了磨削力信号的时域与频域信息,而在不同尺度下的小波系数还描述了一定频域范围上的特征。因此,一个特征向量可以用来表征原信号,且不同类别的特征向量有较大差别,可以用它完成磨削状态的分类识别。

在不同工况下进行磨削,磨削力大小是有差别的,因此能量向量 u_i 虽能表征信号,但不同能量的特征向量之间没有可比性。为了使识别成为可能,对信号的能量特征进行归一化处理得到特征向量 e_i 。该向量的每一个元素不是能量,而是一个比值,它表示的是该特征的能量在总能量中所占的比重。

4 实验及结论

为了验证谐波小波子空间能量作为砂轮磨钝信号特征的有效性,进行了基于磨削实验的砂轮状态特征提取和特征分析及分类钝化预报实验。磨削实验在装配磁悬浮轴承主轴的MK2110型内圆磨床上进行。分别用白刚玉砂轮磨削45号钢,用棕白两混砂轮磨削40Cr和40MnSi钢。砂轮转速为20 kr/min,采样频率为5 kHz。采集并截取不同磨削状态下的各100段磨削力信号作为样本数据,对这些样本数据进行预处理,分别计算它们的32个小波变换子空间能量特征。图9为对其中的一组磨削力数据进行特征提取后得到的特征向量直方图。可见,各特征向量之间有明显差异。

如表1所示,利用类内、类间离散度矩阵对特征的离散度进行分析^[12],其中:类内离散度 $J_w = \text{tr}(S_w)$;类间离散度 $J_b = \text{tr}(S_b)$; S_w 为类内离散度矩阵; S_b 为类间离散度矩阵^[12]。采用判据 $J = \frac{\text{tr}(S_b + S_w)}{\text{tr}(S_w)}$ 对特征可分性量度进行分析,结果如表2所示。

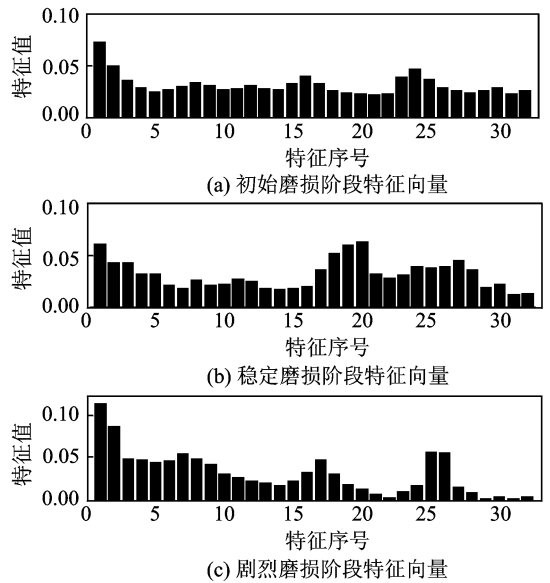


图9 3种磨削状态下的磨削力特征向量的直方图比较

表1 类内、类间离散度

状态	初始磨削阶段	稳定磨削阶段	剧烈磨削阶段
初始磨削阶段	1.735 6	12.148 3	31.937 4
稳定磨削阶段	12.148 3	2.264 8	21.374 1
剧烈磨削阶段	31.937 4	21.374 1	5.724 3

表2 类间可分性

状态	初始磨削阶段	稳定磨削阶段	剧烈磨削阶段
初始磨削阶段		6.364 0	18.401 4
稳定磨削阶段	7.999 5		4.733 9
剧烈磨削阶段	19.401 4	10.437 5	

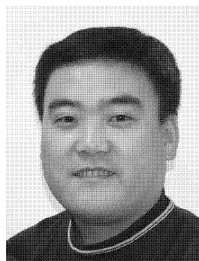
可见,初始磨削阶段和稳定磨削阶段的类内离散度较小,剧烈磨削阶段类内离散度较大,这说明在剧烈磨削阶段不同磨削力样本的时频分布相似性差一些,这是由该阶段磨削力的复杂性引起的;各类之间的类间离散度较大。由表2可见,从剧烈磨削阶段区分出初始磨削阶段的可分性最好,从稳定磨削阶段区分剧烈磨削阶段的可分性最差,为4.733 9,可分性远大于1,这说明用于分类特征的可分性很好,选择的特征完全可以用于砂轮磨钝状态的识别。

分别磨削3种不同材质45号钢、40Cr和40MnSi钢各20轮次,实时提取磨削砂轮状态特征并输入粒子神经网络磨削状态分类器^[13]对磨削状态进行分类,在磨削状态由稳定磨削阶段向剧烈磨削阶段转变时发出砂轮磨钝报警信号。每一轮次由砂轮修整开始到系统发出报警信号结束,在每一轮次结束后检测砂轮和工件状态验证预报的准确性。实验结果发现,用白刚玉砂轮磨削45号钢,预报正确率为

100%;用棕白两混砂轮磨削40Cr和40MnKi工件,预报正确率分别为100%和95%。实验结果证明了基于谐波小波包分析的砂轮状态特征提取的有效性和对不同工况的适应性。

参 考 文 献

- [1] Stephane L, Andrew W, Robert B. Development of an automated system for measuring grinding wheel wear flats [J]. *Journal of Manufacturing Systems*, 2003,22:130-135.
- [2] Mani D, Quinn D, Kasarda M. Active health monitoring in a rotating cracked shaft using active magnetic bearings as force actuators[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2006,294:454-465.
- [3] 巩亚东,刘月明,韩廷超,等.超高速点磨削砂轮的设计与磨损仿真[J].*超硬材料工程*,2010,22:37-42. Gong Yadong, Liu Yueming, Han Tingchao, et al. Design and wear simulation of the grinding wheel used in super-high speed point grinding[J]. *Superhard Material Engineering*, 2010,22:37-42. (in Chinese)
- [4] 林献坤,李郝林,袁博.基于PSO-SVR的数控平面磨削表面粗糙度智能控制研究[J].*系统仿真学报*,2009,21(4):7805-7808. Lin Xiankun, Li Haolin, Yuan Bo. Research on intelligent control of CNC surface grinding roughness based on PSO-SVR [J]. *Journal of System Simulation*, 2009,21(4):7805-7808. (in Chinese)
- [5] 林峰,焦慧锋,傅建中.基于贝叶斯网络的平面磨削状态智能监测技术研究[J].*中国机械工程*,2011,22:1269-1273. Lin Feng, Jiao Huifeng, Fu Jianzhong. Research on intelligent monitoring technique of machining state for surface grinder based on Bayesian network [J]. *Chinese Mechanical Engineering*, 2011,22:1269-1273. (in Chinese)
- [6] 刘贵杰,巩亚东,王宛山.基于神经网络的磨削砂轮状态的在线监测[J].*东北大学学报*,2002,10:984-987. Liu Guijie, Gong Yadong, Wang Wanshan. On-line monitoring for grinding wheel states based on neural network [J]. *Journal of Northeastern University*, 2002,10:984-987. (in Chinese)
- [7] 程文涛.基于神经网络的成形磨削表面粗糙度研究[D].长沙:湖南大学,2006.
- [8] Kasarda E, Marshall J, Prins R. Active magnetic bearing based force measurement using the multi-point technique [J]. *Mechanics Research Communications*, 2007(34):44-53.
- [9] Newland D E. Harmonic wavelet analysis [J]. *Proceedings of the Royal Society of London*, 1993, 448: 203-225.
- [10] 李舜铭.谐波小波包方法及其对转子亚频轴心轨迹的提取[J].*机械工程学报*,2004,4(9):133-137. Li Shunming. Harmonic wavelet packets method and used on accurate obtaining the orbit of rotor sub-frequency signal [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2004,4(9):133-137. (in Chinese)
- [11] 庄司克雄(日).磨削加工技术[M].郭隐彪,王振忠,译.北京:机械工业出版社,2007:143-144.
- [12] 边肇祺,张学工.模式识别[M].北京:清华大学出版社,2002:186-189.
- [13] 吕俊,高慧萍,杨慧.递阶遗传粒子群算法在神经网络设计中的应用[J].*计算机工程与应用*,2010,33:227-243. Lü Jun, Gao Huiping, Yang Hui. Hierarchical genetic particle swarm optimization algorithm in neural network design [J]. *Computer Engineering and Application*, 2010,33:227-243. (in Chinese)



第一作者简介:李德广,男,1971年9月生,博士后、讲师。主要研究方向为磁悬浮轴承技术,信号处理技术。曾发表《磁悬浮轴承数字控制的稳定性分析及预补偿控制算法》(《电工技术学报》2011年第6期)等论文。

E-mail:zxning@sdu.edu.cn

通信作者:刘淑琴,女,1958年9月生,教授、博士生导师。主要研究方向为磁悬浮轴承理论及应用,垂直轴风力发电技术。曾发表《基于磁路分析的轴向混合磁轴承径向承载力解析计算》(《电工技术学报》2012年第5期)等论文。

E-mail:lshuqin@sdu.edu.cn