

基于冲击信号的滑动轴承摩擦故障 监测方法

张峻宁¹, 张培林¹, 王向东², 陈彦龙³, 武禹陶⁴

(1. 军械工程学院 车辆与电气工程系, 石家庄 050003;

2. 中国白城兵器试验中心, 吉林 白城 137001;

3. 中国人民解放军 32146 部队, 河南 焦作 454150;

4. 中国人民解放军 65185 部队, 辽宁 铁岭 112611)

摘 要: 针对滑动轴承声发射(AE)信号干扰严重、故障信号难分离、轴承摩擦故障监测难的问题,从不同信号的激励源作用形式出发,根据冲击信号的工作脉冲特征,建立了分离相对容易的干扰信号与轴承摩擦故障的联系,提出一种基于干扰信号监测滑动轴承故障的方法。首先,依靠K均值奇异值分解(K-SVD)字典对冲击特征的捕捉能力,确定冲击脉冲产生的时刻;为了锐化和增强冲击信号,通过Hilbert包络解调出冲击包络信号。其次,引入钟形脉冲参数,通过钟形脉冲拟合单个冲击包络信号,并进一步推导出冲击包络信号的强度简化计算公式,用于滑动轴承接触摩擦故障识别。最后通过实验模拟了滑动轴承切断供油后的轴瓦摩擦过程,与AE传统特征相比,所提特征更容易识别轴承的早期摩擦故障,能够完整描述轴承的摩擦的全过程,且计算效率更高,为滑动轴承接触摩擦故障诊断提供了一种新的途径。

关 键 词: 滑动轴承; 摩擦故障; 声发射; 冲击信号; K均值奇异值分解; 钟形脉冲

中图分类号: V229.2; TH117.2

文献标志码: A

Friction fault detection methods based on impact signal for plain bearing

ZHANG Junning¹, ZHANG Peilin¹, WANG Xiangdong²,

CHEN Yanlong³, WU Yutao⁴

(1. Department of Vehicle and Electric Engineering,

Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050003, China;

2. Baicheng Ordnance Test Center of China, Baicheng Jilin 137001, China;

3. Unit 32146, the Chinese People's Liberation Army, Jiaozuo Henan 454150, China;

4. Unit 65185, the Chinese People's Liberation Army, Tieling Liaoning 112611, China)

Abstract: Aiming at the problem of plain bearing acoustic emission (AE) signal interference seriously, fault signal separation difficulty, friction fault monitoring difficulty, based on the pulse characteristic of impact signal, a method based on shock signals to monitor plain bearing faults was proposed, which established the relation between impulse signal and bearing friction fault. Firstly, the K-means singular value decomposition (K-SVD) dictionary

收稿日期: 2016-03-24

基金项目: 国家自然科学基金(51205405, 51305454)

作者简介: 张峻宁(1992—), 男, 硕士生, 从事机械设备状态监测与故障诊断研究。

通讯作者: 张培林(1955—), 男, 教授、博士生导师, 博士, 从事机械设备状态监测与故障诊断研究。E-mail: zhangpeilin@163.com

引用格式: 张峻宁, 张培林, 王向东, 等. 基于冲击信号的滑动轴承摩擦故障监测方法[J]. 航空动力学报, 2017, 32(9): 2230-2237.
ZHANG Junning, ZHANG Peilin, WANG Xiangdong, et al. Friction fault detection methods based on impact signal for plain bearing[J]. Journal of Aerospace Power, 2017, 32(9): 2230-2237.

was used to capture impact characteristics, and the time of impact pulse generation was determined. In order to sharpen and enhance impact signal, the impact envelope signal was demodulated by the Hilbert envelope. Secondly, the bell pulse parameter was introduced to fit the single impact envelope signal, and the simplified formula of the strength of the impact envelope signal was further deduced, which was applied to the contact friction fault identification of the plain bearing. Finally, the friction fault of plain bearing was simulated by cutting off oil supply channels. Comparing with the traditional characteristics of AE, the proposed algorithm were easier to identify early friction fault and higher computational efficiency and can completely describe bearing friction process. So, the proposed algorithm provides a new way for the plain bearing contact friction fault diagnosis.

Key words: plain bearing; friction fault; acoustic emission; impact signal;
K-means singular value decomposition; bell-shaped pulse

滑动轴承是旋转机械如柴油机的重要支撑部件,其工作条件恶劣,载荷大,结构复杂,容易引发轴瓦间的接触摩擦故障。为了避免因轴承故障造成机械设备停工、工厂停产的事故,实时监测轴承的运行状况将具有重要的意义。但是滑动轴承不同于滚动轴承,没有特定的频率指向轴承故障,因此滑动轴承摩擦故障诊断方法发展缓慢。声发射(AE)技术频率范围广、响应速度快,是无损检测材料状态的常用技术,已广泛应用于航空航天、交通运输、材料实验等领域^[1-2]。近几年,不少学者将 AE 技术应用到滑动轴承的摩擦故障检测中,如卡尔斯鲁厄大学的 Hall 等、Albers 等^[3-4]通过实验研究 AE 技术监测滑动轴承的早期摩擦故障。西南交通大学的秦萍等^[5]将 AE 技术应用于柴油机曲轴端轴承摩擦故障的研究。王晓伟等^[6]用 AE 技术监测径向可倾瓦轴承瓦块与转轴的碰摩故障等都取得一定的效果,但是摩擦监测效果不明显。分析原因,主要是轴承 AE 信号激励源多,干扰信号复杂,提取故障信号困难。不仅有与摩擦故障直接相关的,由轴瓦摩擦力诱发的 AE 摩擦信号(本文简称为摩擦信号);还有由冲击性载荷对滑动轴承机座的冲击引发的,具有工作特征脉冲的干扰信号^[7](本文简称为冲击信号 $X(n)$)。其次,轴承中的冲击信号不同于常规干扰噪声,普通噪声随机性强,分离相对容易,而轴承冲击信号包含轴承工况中动载荷状况、轴承间隙、润滑等对研究其他问题有用的信息,具有工作特征脉冲明显、周期性强,能量大的特点,属强干扰弱信号的信号类型。

因此,针对轴承干扰信号复杂、分离困难问题,本文尝试研究干扰信号强度与不同轴承工况的关系,提出一种利用强干扰信号快速监测轴承

故障的方法。首先,通过 K 均值奇异值分解(K-SVD)字典捕捉冲击信号的发生时刻;为了提取信号中的冲击信息,采用 Hilbert 包络锐化冲击信号和抑制摩擦信号的干扰。然后建立冲击包络信号与轴承工况的联系,通过冲击包络信号强度变化识别轴承的摩擦故障。最后引入钟形脉冲,通过曲线拟合简化冲击性载荷对轴承机座激发的脉冲信号,进一步推导冲击包络信号的能量简化计算公式,简化了计算过程,并在滑动轴承静载荷实验台验证。实验结果表明,所提方法相比于传统的能量参数监测方法,完整地描述了轴瓦在早期摩擦过程中的变化,提高了监测滑动轴承早期摩擦故障的效率。

1 滑动轴承冲击特征的提取

常理讲,研究滑动轴承接触摩擦故障必须有效抑制干扰的冲击信号,突出有用的摩擦信号才能更好检测轴承故障诊断,但在轴承信号中,干扰信号工作特征明显、能量强,相反摩擦信号能量弱,呈现随机性的特点,使得摩擦信号分离困难。为此,本文提出从轴承信号中提取相对容易的干扰(冲击)特征,通过分析冲击包络信号的强度与轴承摩擦故障之间的关系,诊断滑动轴承故障。

1.1 基于 K-SVD 的冲击脉冲时刻捕捉

依据冲击信号具有工作脉冲特征的特点,尝试利用 K-SVD 算法,通过其强大的字典学习能力,激活字典中基函数模仿信号的周期性,捕捉产生冲击脉冲的时刻。

K-SVD 字典模型定义为

$$\hat{a} = \min \|a\|_0$$
$$\text{s. t. } \|y - Da\|_2^2 \leq \zeta \tag{1}$$

式中 $\mathbf{a} \in \mathbf{R}^m$ 是对应 K-SVD 字典矩阵的稀疏向量, $\mathbf{y}$ 是输入信号, 伪范数 $\|\mathbf{a}\|_0$ 表示系数非零项的个数, $\mathbf{D} \in \mathbf{R}^{n \times m}$ 为 K-SVD 字典矩阵, $\mathbf{D}\mathbf{a}$ 为输入信号 $\mathbf{y}$ 的稀疏表示, ζ 为容差极限。

为了求解信号 $\mathbf{y}$ 的最优稀疏向量表示, 稀疏编码需要通过字典学习和系数编码, 具体步骤如下:

1) 系数编码, 运用正交匹配追踪算法 (orthonormal matching pursuit, OMP)^[8-10], 对 $\mathbf{y}$ 信号的分块列向量 $\mathbf{b}_i \mathbf{y}$ 进行稀疏编码向量 $\mathbf{a}_i$ 的求解

$$\mathbf{a}_i = f_{\text{omp}}(\mathbf{D}, \mathbf{b}_i \mathbf{y}, \zeta) \quad (2)$$

2) 字典学习, 逐步更新字典原子 $\mathbf{d}_l, l=1, 2, 3, \dots, m$, 其中 m 为更新的字典原子数目。

提取第 k 列的 $\mathbf{d}_k$ 原子稀疏表示的信号子集, $\mathbf{w}_k = \{(i, j) | a_{ij}(k) \neq 0\}$ 计算与信号 $\mathbf{y}$ 的残差

$$\mathbf{e}_i^k = \mathbf{b}_i \mathbf{y} - \sum_{l \neq k} \mathbf{d}_l \mathbf{a}_l(l) \quad (3)$$

设 $\mathbf{E}_l$ 是满足 $\{e_{i,j}(l)\}_{(i,j)} \in \mathbf{w}_l$ 的矩阵, 用 SVD 分解矩阵 $\mathbf{E}_l = \mathbf{P}\Delta\mathbf{V}^T$, 再将 $\mathbf{P}$ 的第 1 列替换为字典的更新的原子, $\Delta(1, 1)\mathbf{V}$ 更新信号块的系数。

从信号的处理角度讲, 信号的稀疏性通过字典学习获得。在字典学习过程中, 信号的特征模式被基函数捕捉, 通过稀疏系数求解, 将一段时间序列的特征模式用一个系数表示^[11-12]。基于字典的特征捕捉能力, 本文利用字典学习确定冲击信号的产生时刻, 方便下一步从轴承信号中提取冲击信息的目的。下面以在西南交通大学静载荷滑动轴承实验台获得的滑动轴承磨损信号为例(具体实验见文中第 3.2 节), 介绍本文算法的可行性。

利用 K-SVD 字典训练实验信号, 捕捉信号工作脉冲特征, 提取信号编码系数, 并在纵轴方向统计编码系数绝对值, 其中编码系数大于零对应的时间点, 即是轴瓦摩擦发生的时刻。图 1 是通过 K-SVD 字典训练的稀疏系数结果。易见, 在图 1(b)中横轴上的尖峰时刻对应到图 1(a)中的 AE 信号(图中 U 代表电压), 正好是幅值较高的 AE 信号, 冲击信息明显, 符合冲击信号的描述。

1.2 基于 Hilbert 变换的冲击信息提取

根据确定的冲击信号发生时刻, 提取该时段的冲击信号, 但脉冲信号中持续时间 Δt 较短(数量级为 0.1 ms 左右), 一般来说测量困难, 如果主观设定阈值, 容易过大估计持续时间 Δt , 造成提取的冲击信号中混合摩擦信号及其他调制信号。图 2 是对图 1(a)中冲击信号的主观提取结果(设定脉冲持续时间 $\Delta t=4\text{ms}$)。可以发现, 提取的冲

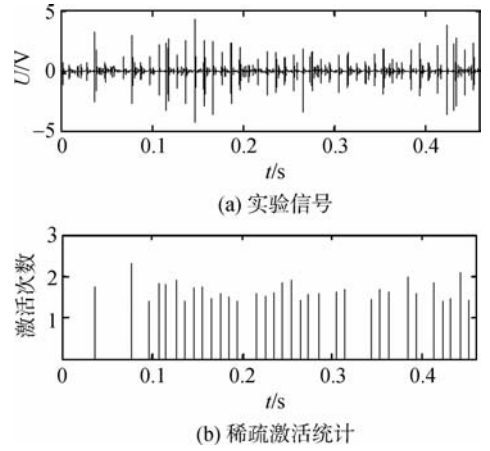


图 1 稀疏激活的 AE 信号

Fig. 1 AE signal based sparse activations

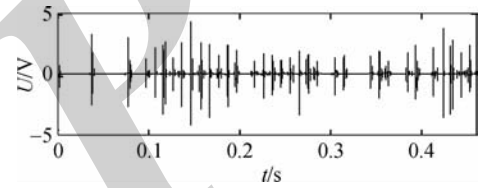


图 2 冲击信号提取结果 ($\Delta t=4\text{ms}$)

Fig. 2 Results of the impact signal extraction ($\Delta t=4\text{ms}$)

击信号混合有包含摩擦信号等其他干扰信号。为此, 根据冲击信号易受到固有轴承信号调制的特点, 本文通过 Hilbert 变换锐化冲击信号和抑制摩擦信号^[13], 实现轴承信号冲击信息的提取。同时为了简化计算量, 在 Hilbert 变换步骤之前, 选取主轴转动每圈的能量最大的一圈 AE 信号作为研究滑动轴承摩擦工况的信号, 本文称其为轴圈信号 $r_{\text{max}}(n)$ 。图 3(a)是对图 1 中的轴圈信号选取, 再对其 Hilbert 包络, 得到冲击包络信号见图 3(b)

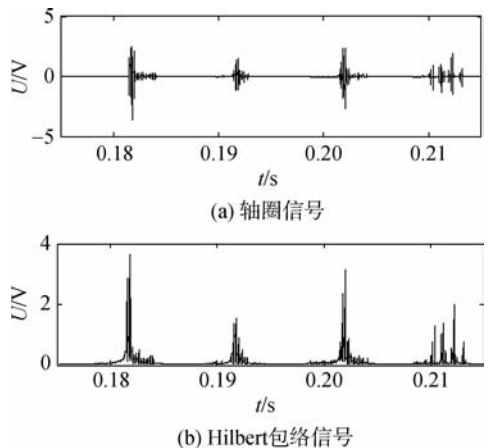


图 3 轴圈信号及其 Hilbert 包络

Fig. 3 Axis circle signal and Hilbert envelope

所示。易见,信号冲击特征被锐化和增强,冲击信号周围的残余摩擦信号被抑制成毛刺,较好地突显了冲击脉冲。如此,通过 K-SVD 和 Hilbert 变换完成了从轴承信号中对冲击信息的提取。

2 冲击强度计算简化模型

在正常的轴承运转工况中,当轴承受到冲击性载荷的冲击时,由于轴瓦间润滑油的存在,轴承座及设备机体所受到振动的弹性波会被缓冲或抵消一部分,进而诱发的 AE 冲击信号能量稳定且幅值较小;而当轴承处于接触摩擦故障时,轴瓦间润滑油的逐渐缺失导致轴承缓冲弹性波的作用逐渐削弱,进而激发的 AE 冲击信号能量较大且平稳性差。因此本文尝试提取冲击包络信号强度,通过分析冲击包络信号的能量变化检测滑动轴承的摩擦故障。

在滑动轴承 AE 信号中,冲击信号多是由冲击性载荷对轴承和轴承座激发的突发型 AE 脉冲,则冲击信号可线性表示

$$\mathbf{X}(n) = \begin{cases} \mathbf{S}(n_1) & n_1 \in (t_1, t_1 + \Delta t_1] \\ \mathbf{S}(n_2) & n_2 \in (t_2, t_2 + \Delta t_2] \\ \vdots & \vdots \\ \mathbf{S}(n_N) & n_N \in (t_N, t_N + \Delta t_N] \end{cases} \quad (4)$$

其中 $\mathbf{S}(n_i)$ 是在 Δt_i 时段的冲击脉冲信号, $t_i, t(i) + \Delta t_i$ 分别为脉冲的起止时刻, N 为脉冲信号总数。

为了简化信号强度的计算,方便实时监测,本文引入钟形脉冲^[14-15],通过钟形脉冲参数快速求取信号的强度。钟形脉冲常由 3 个参数确定:幅值 A ,信号腰宽 c ,幅值极大值时刻 t_0 ,设定脉冲形式为

$$\mathbf{S}(\Delta t_i) = A \times \exp\left[-\frac{(t-t_i)^2}{c^2}\right] \cdot \sin[2\pi w_i(t-t_i)]w(t) \quad (5)$$

其中 $w(t) = \begin{cases} 1 & t(i-1) \leq t \leq t(i) \\ 0 & t(i-1) \leq t, t \geq t(i) \end{cases}$ 为窗函数, t_i 是第 i 个脉冲幅值最高点对应的时刻。

选取冲击包络信号的方均根值 X_{rms} ,表征冲击信号的强度^[16],其公式为

$$X_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{1}{|t(i) - t(i-1)|} \int_{t(i)}^{t(i-1)} S^2(t) dt} \quad (6)$$

根据帕什瓦定理,则有

$$S_u = \int_{-\infty}^{+\infty} S^2(t-t_i) dt = \int_{-\infty}^{+\infty} F^2(f-f_i) df \quad (7)$$

其中 S_u 是信号能量, $F(f-f_i)$ 为 $S(t-t_i)$ 的傅里叶变换。

又因 $F(f-f_i) = \frac{1}{2} \pi A c \left\{ \exp\left[-\frac{(\omega-\omega_i)\tau}{2}\right]^2 + \exp\left[-\frac{(\omega+\omega_i)\tau}{2}\right]^2 \right\}$, 故冲击包络信号能量 S_u 简化为

$$S_u = 2 \int_{f_1}^{f_2} \left\{ \frac{1}{4} (t_1 - t_2)^2 \pi A^2 c^2 \cdot \left\{ \exp\left[-\frac{(\omega-\omega_0)\tau}{2}\right]^4 \right\} \cdot \sin^2[(t_1 - t_2)(f - f_0)] \right\} df \quad (8)$$

因

$$\int_{f_1}^{f_2} \frac{\sin^2[\pi(t_1 - t_2)(f - f_0)]}{\pi^2 (f - f_0)^2} df^2 < \int_0^{+\infty} \frac{\sin^2[\pi(t_1 - t_2)(f - f_0)]}{\pi^2 (f - f_0)^2} df^2 = \frac{1}{2} |t_2 - t_1|$$

则有

$$S_u < \frac{1}{2} A^2 (t_1 - t_2) \pi c^2 \int_{f_1+\omega_0}^{f_2+\omega_0} \exp\left[-\left(\frac{\omega\tau}{2}\right)^4\right] d\omega \quad (9)$$

当 $f_2 - f_1 \rightarrow \infty$, 可得

$$\int_{f_1+\omega_0}^{f_2+\omega_0} \exp\left[-\left(\frac{\omega\tau}{2}\right)^4\right] d\omega \rightarrow 1, S_u \text{ 近似表示为 } S_u \approx \frac{1}{2} A^2 (t_1 - t_2) \pi c^2, \text{ 再将 } S_u \text{ 代入式(6), 得到}$$

$$X_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{S_u}{|t_1 - t_2|}} \approx \sqrt{\frac{1}{2} A^2 \pi c^2} \quad (10)$$

因此,轴承冲击包络信号的方均根值 X_{rms} 为

$$X_{\text{rms}} \approx 1.253 \sum_{i=1}^N A_i c_i \quad (11)$$

如此,冲击包络信号的方均根值计算,只需要求解腰宽 c 和幅值 A ,简化了冲击信号强度计算模型,提高了计算效率。

本文滑动轴承接触摩擦故障算法流程(见图 4)如下:

1) 按照文中第 1.1 节所述,利用 K-SVD 字典捕捉 AE 信号的工作脉冲特征,确定 AE 信号中冲击脉冲发生时刻;通过 Hilbert 变换得到冲击包络信号,锐化冲击信息和抑制残余摩擦信号;

2) 再拟合冲击包络信号,通过钟形脉冲函数参数识别轴圈信号的冲击包络信号,得到相关参数(幅值 A 和腰宽 c);

3) 最后将相关参数代入式(11),计算冲击包络信号的方均根值 X_{rms} ,根据 X_{rms} 的变化实时监测滑动轴承的摩擦工况。

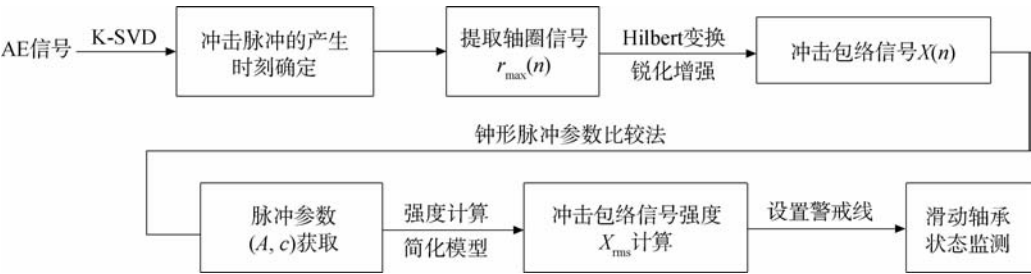


图 4 滑动轴承接触摩擦故障算法的流程图

Fig. 4 Flowchart of the contact friction fault algorithm of plain bearing

3 实验验证

3.1 实验装置

实验在西南交通大学滑动轴承静载荷实验台上进行,采用电动机—无级变速箱—弹性联轴节驱动轴,实验轴承为 S-195 型柴油机连杆轴承,安置在旋转轴中间。通过轴承下部拉杆加载砝码模拟滑动轴承加载,轴的两端采用 6310 型滚动轴承支撑。RNT-200 型的声发射传感器放置于轴承盖上部平面,500 kHz 的采样频率时采集滑动轴承 AE 信号。此外设置轴承背面温度的测量通道(将热电偶穿过轴承盖瓦孔测量轴承温度)监测滑动轴承的工作状态,实验装置如图 5 所示。

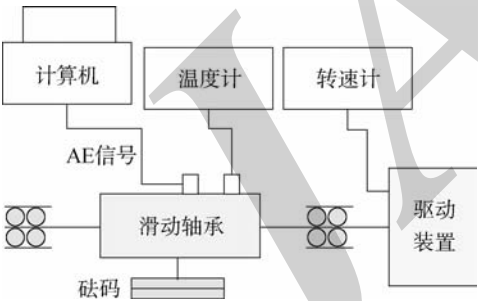


图 5 实验系统示意图

Fig. 5 Diagram of experimental system

3.2 实验方法及过程

3.2.1 轴瓦摩擦的间接测量

为了监测轴瓦之间的状况,在轴瓦间建立监测电路见图 6 所示。其中, R_1 为油膜电阻, R_2 为平衡电阻,当轴瓦间为液体润滑时, R_1 趋于无穷大, U_{R2} 近似为零,此时电路成断路,当轴瓦间为完全接触干摩擦时, R_1 趋于零, U_{R2} 值较高,灯泡呈亮光状态。 U_{R2} 值越高,则轴承接触越严重。因此在摩擦的发展过程中, U_{R2} 值的将呈升高振荡趋势,此外还通过轴承盖瓦孔测量轴承温度,作为辅助判定摩擦状态的依据。

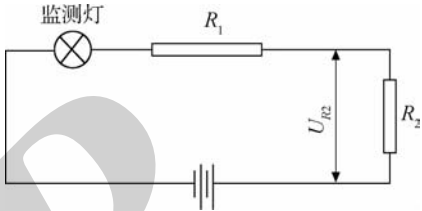


图 6 监测电路

Fig. 6 Monitoring circuit

3.2.2 滑动轴承摩擦模拟过程

主轴转速平稳后,切断轴瓦的供油,模拟滑动轴承断油摩擦的故障:当主轴转速稳定在 1 500 r/min 左右时,切断润滑油油路,同时测量轴承的温度和 AE 信号。首次测量在切断油路 7 min 后,以后每隔 5 min 测量一次,直至最后转速下降,排烟变黑,此时停止实验,再向坏瓦的轴承供油后又断油,再次以每隔 5 min 测量滑动轴承的 AE 信号,当轴瓦再冒黑烟时,停止实验。具体工况见表 1 所示。

表 1 切断润滑前后滑动轴承的工况

Table 1 Operating conditions of plain bearing under cutting off the oil supply

状态	序号	工况时刻/min	载荷/(N·m)	功率/kW	温度/℃
正常	1	—15	294	4.62	61
	2	—10	294	4.62	57
	3	7	294	4.62	77
	4	12	294	4.62	78
切断油路	5	17	294	4.62	79
	6	22	294	4.62	81
	7	27	294	4.62	82
	8	32	294	4.62	83
	9	37	294	4.62	84

续表

状态	序号	工况 时刻/min	载荷/ (N·m)	功率/ kW	温度/ ℃
切断 油路	10	47	294	4.62	102
	11	52	294	4.62	115
	12	57	294	4.62	120
	13	62	294	4.62	128
	14	67	294	4.62	137

4 轴承摩擦故障状态监测

图 7 是实验中采集的 AE 信号。分析发现，滑动轴承的特征不明显，无法描述工况中轴瓦之间的摩擦变化。

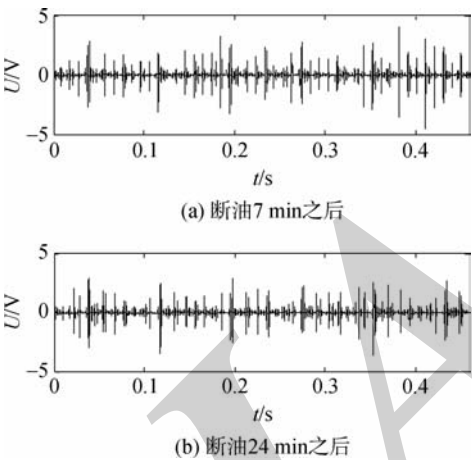


图 7 不同工况时的 AE 信号

Fig. 7 AE signal under different operating conditions

按照本文所提算法监测滑动轴承摩擦故障工况。图 8 是对图 2 轴圈包络信号的钟形脉冲拟合，具体脉冲函数关系式见式(12)。分析式(12)易见，本文通过采用钟形脉冲拟合冲击包络信号，能够快速获取该信号的幅值最高点 A 以及最高点产生时刻 t_i ，同时获取的腰宽 c 解决了脉冲信号持续时间难测量问题。再将脉冲信号的参数

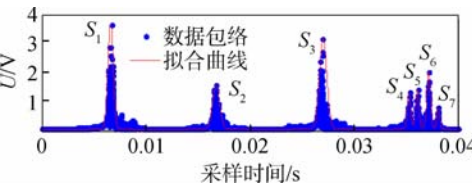


图 8 轴圈信号及其拟合函数曲线

Fig. 8 Axis circle signal and fitting curve

(n, A_i, c_i) 代入式(13),求取冲击包络信号方均根值 X_{rms} ,实时监测滑动轴承不同程度摩擦故障工况变化,如图 9 所示。

$$S_1 = 3.671 \exp \left[\frac{-(t - 0.17985)^2}{0.00036^2} \right]$$
$$S_2 = 1.546 \exp \left[\frac{-(t - 0.19177)^2}{0.00048^2} \right]$$
$$S_3 = 3.18 \exp \left[\frac{-(t - 0.20206)^2}{0.0005^2} \right]$$
$$S_4 = 1.315 \exp \left[\frac{-(t - 0.2103)^2}{0.00023^2} \right]$$
$$S_5 = 1.393 \exp \left[\frac{-(t - 0.21107)^2}{0.00024^2} \right]$$
$$S_6 = 1.994 \exp \left[\frac{-(t - 0.2122)^2}{0.00026^2} \right]$$
$$S_7 = 0.7749 \exp \left[\frac{-(t - 0.21312)^2}{0.0002^2} \right]$$

(12)

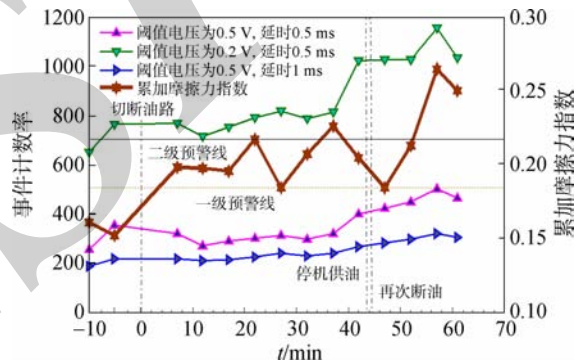


图 9 切断油路后轴承状态监测

Fig. 9 Bearing condition monitoring after cutting off the oil

图 9 是利用不同特征监测滑动轴承全部摩擦过程的曲线。分析事件计数率,曲线平缓的变化,很难分清正常与早期摩擦之间的界限,无法实时描述轴瓦之间的摩擦变化过程,且监测效果的好坏还与阈值电压和延时选择十分相关,因此监测效果不理想。相比事件计数率,本文所提特征 X_{rms} 对早期摩擦故障敏感性较好,能较好描述了轴瓦的摩擦发展过程。切断油路后,摩擦首先发生在轴瓦凹凸处的点接触式摩擦,产生弹性波 AE 信号,因此在前 7 min 内, X_{rms} 开始增大;之后凹凸被磨平而趋于平滑,对应到曲线中 X_{rms} 增加平缓或略有降低;至切断油路第 16 min 时, X_{rms} 开始增大,表明轴瓦间的摩擦进一步加剧;之后又趋于平滑,再到 38 min 时,轴瓦开始冒烟,轴承已严重磨损,此时停机。如此,根据所提特征描述轴承

摩擦过程,符合滑动轴承的摩擦故障由早期的点对点到点对面到面对面接触,逐步往复、逐渐摩擦加重的摩擦学规律^[17-18],验证了本文所提特征对轴承摩擦故障具有较好的敏感性,可应用于滑动轴承摩擦故障监测中。

再分析实验后期,轴承停机并再次供油后的轴承工况变化。可以发现, X_{rms} 爆发式的增长,说明轴承损坏后,即使供油正常,轴瓦间油膜难以建立或稳定性差,轴承在短期内就冒烟损坏。因此,设立一级、二级预警线监测滑动轴承状态,一旦达到一级预警线立即停机检修或润滑,否则达到二级预警线时,则有可能造成生产安全事故。

5 结 论

1) 针对滑动轴承 AE 信号属强干扰弱信号类型,本文建立冲击信号与轴承摩擦故障之间的联系,通过提取信号中的冲击信息和计算冲击包络信号的方均根值监测轴承故障变化,为滑动轴承接触摩擦故障监测提供了一种新的途径。

2) 引入钟形脉冲拟合,通过钟形脉冲参数简化了冲击包络信号方均根值 X_{rms} 的计算,解决了 AE 脉冲持续时间难估计的问题,提高了计算效率,方便实时监测滑动轴承摩擦故障。

参考文献:

- [1] 王祖荫. 声发射技术基础[M]. 济南: 山东科学技术出版社, 1990.
- [2] 孙丹, 张楚, 郭瑞, 等. 基于两相流理论滑动轴承动力特性求解[J]. 航空动力学报, 2012, 27(12): 2822-2828.
SUN Dan, ZHANG Chu, GUO Rui, et al. Solution of dynamic characteristics of journal bearing based on two phase flow theory [J]. Journal of Aerospace Power, 2012, 27(12): 2822-2828. (in Chinese)
- [3] HALL L D, MBA D. Diagnosis of continuous rotor-stator rubbing in large seale turbine unit using acoustic emissions[J]. Ultrasonics, 2004, 41(9): 765-773.
- [4] ALBERS A, BURGER W, SOVINO R, et al. Monitoring lubrication regimes in sliding bearings using aeoustic emission analysis[J]. Practicing Oil Analysis Magazine, 2006, 10(5): 856-885.
- [5] 秦萍, 阎兵, 谭达明. 利用声发射诊断滑动轴承接触摩擦故障的研究[J]. 西南交通大学学报, 2001, 36(3): 272-275.
QIN Ping, YAN Bing, TAN Daming. Study on fault diagnosis of sliding bearings using AE signals[J]. Journal of Southwest Jiao Tong University, 2001, 36(3): 272-275. (in Chinese)
- [6] 王晓伟, 刘占生, 张广辉, 等. 基于声发射的可倾瓦径向滑动轴承碰摩故障诊断[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(8): 64-65.
WANG Xiaowei, LIU Zhansheng, ZHANG Guanghui, et al. Rubbing fault diagnose of tilting pad journal bearing by acoustic emission[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(8): 64-65. (in Chinese)
- [7] 秦萍, 阎兵, 李辉. 小波分析在柴油机滑动轴承接触摩擦故障的应用[J]. 内燃机工程, 2003, 24(3): 57-59.
QIN Ping, YAN Bing, LI Hui. The application of wavelet analysis in the fault diagnosis for the plain bearings contact friction of diesel engine[J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2003, 24(3): 57-59. (in Chinese)
- [8] ELAD M, ABARON M. Image denoising via sparse and redundant representations over learned dictionaries[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2006, 15(12): 3736-3745.
- [9] MIAO Z H, ZHOU G X, LIU H N, et al. Tests and feature extraction algorithm of vibration signals based on sparse coding[J]. Journal of Vibration and Shock, 2014, 33(15): 76-79.
- [10] NEEDELL D, VERSHYNIN R. Signal recovery from incomplete and inaccurate measurements via regularized orthogonal matching pursuit[J]. Journal of Selected Topics in Signal Processing, 2010, 4(2): 310-316.
- [11] 陈向民, 于德介, 罗洁思. 基于信号共振稀疏的包络解调方法及其在轴承故障诊断中的应用[J]. 振动工程学报, 2012, 24(6): 57-59.
CHEN Xiangmin, YU Dejie, LUO Jiesi. Envelope demodulation method based on resonance-based sparse signal decomposition and its application in roller bearing fault diagnosis[J]. Journal of Vibration Engineering, 2012, 24(6): 57-59. (in Chinese)
- [12] 王海涛, 谢寿生, 武卫, 等. 基于稀疏最小二乘支持向量机的航空发动机动态过程辨识[J]. 航空动力学报, 2010, 25(9): 2140-2146.
WANG Haitao, XIE Shousheng, WU Wei, et al. Dynamic process identification of aircraft engine based on a novel sparse least square support vector machines[J]. Journal of Aerospace Power, 2010, 25(9): 2140-2146. (in Chinese)
- [13] 马波, 魏强, 徐春林, 等. 基于 Hilbert 变换的包络分析及其在滚动轴承故障诊断中的应用[J]. 北京化工大学学报, 2004, 31(6): 95-98.
MA Bo, WEI Qiang, XU Chunlin, et al. Envelope analysis based on Hilbert transformation and its application in ball bearing fault diagnosis[J]. Journal of Beijing University of Chemical Technology, 2004, 31(6): 95-98. (in Chinese)
- [14] 陈彬强, 吕舒, 姚斌, 等. 鱼雷电磁引信的水中目标高精度实时识别方法[J]. 兵工学报, 2015, 36(1): 123-125.
CHEN Binqiang, LÜ Shu, YAO Bin, et al. Study of underwater target recognition for torpedo electromagnetic fuse high detecting precision[J]. Acta Armamentarii, 2015, 36(1): 123-125. (in Chinese)
- [15] 周克宁, 吴飞飞. 钟形脉冲源的 DDS 实现技术[J]. 自动化

仪表,2006,27(1):72-73.

ZHOU Kening, WU Feifei. Implementing technology for bell-shapled pulse source by using DSS[J]. Process Automation Instrum Entation,2006,27(1):72-73. (in Chinese)

[16] 方杰. 基于采样技术的非正弦周期信号方均根值测量方法[J]. 机电技术,2013(5):141-143.

FANG Jie. Study on fault diagnosis of sliding bearings using ae signals[J]. Mechanical and Electrical Technology, 2013(5):141-143. (in Chinese)

[17] 沈燕,张德坤,王大刚,等. 接触载荷对钢丝微动磨损行为影响的研究[J]. 摩擦学学报,2010,30(4):404-408.

SHEN Yan,ZHANG Dekun,WANG Dagang,et al. Effect of contact load on the fretting wear behavior of steel wire [J]. Tribology,2010,30(4):404-408. (in Chinese)

[18] 周仲荣,朱旻昊. 复合微动磨损[M]. 上海:上海交通大学出版社,2004.

(编辑:陈 越)