

滚动轴承局部故障的声发射信号 解析模型与频域特征

李法忠¹, 何增水², 张林³, 明安波⁴, 杨永生⁵

(1.火箭军装备部 装备项目管理中心, 北京 100086; 2.火箭军驻某军代室, 陕西 西安 710025; 3.96761 部队, 河南 灵宝 472500; 4.西北工业大学 力学与土木建筑学院, 陕西 西安 710072; 5.陕西省行政学院, 陕西 西安 710068)

摘要:准确描述故障信号是进行滚动轴承故障特征提取与分析的基础。深入分析了滚动体通过轴承内、外圈局部故障时产生声发射信号的机理,建立了含双冲击响应的声发射信号解析模型,并探讨了声发射信号的频域特征。采用仿真信号与试验信号验证了解析模型的正确性。结果表明:滚动体通过局部故障时会产生与进、出故障相关的2个声发射事件,且2个事件的响应能量均集中在传感器共振频率附近;声发射信号功率谱由低频段的离散谱和高频段的连续谱共同组成。

关键词:滚动轴承;局部故障;声发射;解析模型

中图分类号:TH165.3

文献标志码:A

文章编号:1000-2758(2021)04-0831-08

滚动轴承是旋转机械中的常用支承部件之一,其性能状态对机械设备的性能具有重要的影响。因此,滚动轴承的状态监测与故障诊断研究受到国内外学者的普遍重视^[1-14]。通常,找出测试信号中的故障特征是实现故障诊断的关键点,而对测试信号的准确表征则是进行故障特征提取的前提条件,是进行后继分析的基础。

1984年,Macfadden和Smith^[15]建立了单点轴承故障振动信号的解析模型用于表征点蚀、剥落等故障产生的振动信号。该模型有效地描述了测试信号的离散谱特征以及离散谱与轴承参数之间的联系,为轴承故障振动信号的特征分析奠定了理论基础。在此基础上,Antoni和Randall^[16]采用独立增量过程表征测试信号中故障冲击在时域的到达时刻,为滚动体在内、外圈滚道上打滑现象的表征提供了有效手段。该模型揭示了故障测试信号频谱上的频率模糊现象,对真实的振动测试信号具有更好的表

征能力。但这2个模型都含有一个共同的假设:滚动体通过内、外圈局部故障时只有一个冲击响应产生。事实上,Epps和McCallion^[17]通过试验发现滚动体通过内、外圈局部故障时产生的冲击响应现象包含2个冲击响应过程。第一个冲击响应是由滚动体进入故障时的去应力过程产生的,而第二个冲击响应则对应滚动体离开故障时的回复应力过程。受到该成果的启发,Sawalhi和Randall^[18]对滚动体通过内、外圈故障缺陷时的冲击响应特征进行了深入研究,结果发现:2个冲击响应过程的幅值和频率都具有较大的差别。因此,他们采用阶跃响应和冲击响应分别表征这2个过程产生的振动信号,建立了含双冲击响应的振动信号模型。该模型中阶跃响应的振动频率要明显低于冲击响应的振动频率。但是,该模型并不能有效地表征测试信号的频域特征。

鉴于此,本文在现有研究成果的基础上,采用声发射信号对滚动体通过内、外圈故障时产生的故障

收稿日期:2020-12-02

基金项目:国家自然科学基金(51505486,61703410,61873175)与陕西省高校科协青年人才托举项目(20170511)资助

作者简介:李法忠(1973—),火箭军装备部工程师,主要从事人工智能和导航制导研究。

通信作者:明安波(1986—),西北工业大学副教授,主要从事信号处理、故障诊断等研究。e-mail:anboming@nwpu.edu.cn

特征开展深入研究,提出含双冲击响应的声发射信号解析模型,为滚动轴承故障声发射信号的准确描述提供有效途径,为基于声发射信号的特征分析与故障诊断奠定理论基础。

1 轴承故障声发射现象机理分析

1.1 机理分析

对于外圈固定内圈转动的轴承,由于径向载荷分布不均,内圈故障冲击存在显著的幅值调制特征。因此,不失一般性,以外圈故障为例。如图 1a) 所示,假设轴承外圈上存在槽形故障,外圈滚道直径为 D_o ,内圈转速恒定(不为 0),滚动体公转速度为 v_c ;在包含故障的一个微小区域(图 1b)中 AE 段内,如果没有故障,滚动体通过该区域时的径向载荷假设不变;当该区域出现周向长度为 L 的故障(图 1b)中 BD 段)时,滚动体与滚道之间的应力会发生相应的变化。当滚动体进入故障时,由于材料缺失,滚动体与滚道之间会产生一个去应力过程。随后,当滚动体中心到达故障中点(点 C)时,滚动体前沿与故障的另一边相撞产生一个回复应力过程。

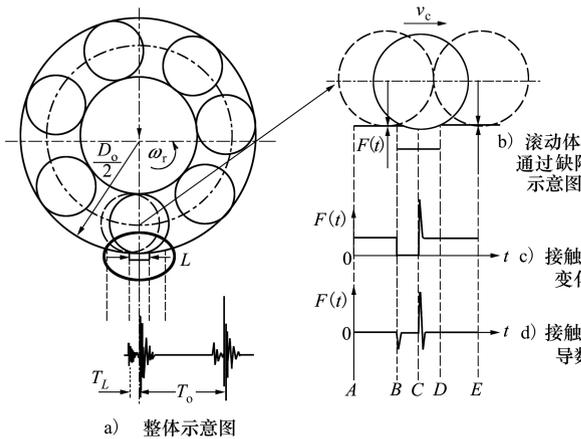


图 1 滚动体通过外圈故障时产生声发射信号示意图

图 1c) 为滚动体对滚道的反作用力变化示意图。由图可知,滚动体与滚道之间的作用力在滚动体进入与离开时会发生剧烈变化(见图 1d))。根据突发型声发射信号的定义:材料中局部位置发生快速的能量释放而产生的瞬态弹性波^[19],因此,当滚动体通过故障时,在进入与离开故障的时刻均会产生突发型的声发射信号,即产生含 2 个冲击响应的声发射现象。为便于分析,将该现象命名为双冲击响应

现象。

1.2 解析模型

如图 2 所示,假设第一个冲击响应对应滚动体进入故障时产生的去应力过程;第二个冲击响应对应滚动体离开故障时产生的回复应力过程。令 $A_{1,k}$ 和 $A_{2,k}$ 分别表示第 k 个双冲击响应的前一个和后一个冲击响应的幅值, T_k 和 $T_{L,k}$ 表示第 k 个双冲击响应的到达时间与双冲击响应时间间隔。由于声发射传感器是基于高频响应原理发明的,声发射信号为材料中瞬态弹性波激励声发射传感器产生的振动响应。因此,由滚动轴承故障产生的声发射信号可表示为

$$x(t) = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} [A_{1,k}h(t - T_k) + A_{2,k}h(t - T_k - T_{L,k})] + n(t) \quad (1)$$

$$\Delta T_k = T_k - T_{k-1} \quad (2)$$

式中: $h(t)$ 表示声发射传感器的单位脉冲响应函数; $n(t)$ 表示附加噪声。

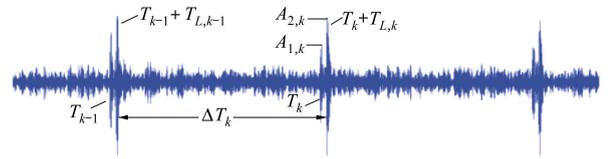


图 2 含双冲击响应声发射信号示意图

为便于分析,假设: $\{n(t)\}_{t \in \mathbf{R}}$ 是一个零均值的平稳随机过程; $\{T_k\}_{k \in \mathbf{Z}}$ 是一个独立增量过程,其概率密度函数为 $\phi_T(T_k)$,即 $\{\Delta T_k\}_{k \in \mathbf{Z}}$ 是一个服从概率密度函数为 $\phi_T(\Delta T_k)$ 的随机点过程;而 $\{T_{L,k}\}_{k \in \mathbf{Z}}$ 为服从概率密度函数为 $\psi_{T_L}(T_{L,k})$ 的随机点过程; $\{A_{1,k}\}_{k \in \mathbf{Z}}$ 和 $\{A_{2,k}\}_{k \in \mathbf{Z}}$ 均为周期的 Dirac 相关点过程。基于上述假设,如下公式成立

$$E\{T_k\} = kE\{\Delta T_k\} = kT \quad (3)$$

$$E\{T_{L,k}\} = T_L = \beta T \quad (4)$$

式中: $E\{\cdot\}$ 表示集合平均算符; T 表示相邻滚动体通过故障时消耗的平均时间; T_L 表示信号中双冲击响应的平均时间间隔; $\beta = T_L/T$,表示平均的双冲击响应时间间隔与滚动体通过故障的平均周期之间的比值。为了实现幅值调制现象的描述,进一步假设 $\{A_{1,k}\}_{k \in \mathbf{Z}}$ 和 $\{A_{2,k}\}_{k \in \mathbf{Z}}$ 相关的周期都为 Q ,且 $Q > T$ 。即

$$E\{A_{1,k}\} = E\{A_{1,k+Q}\} = \overline{A_{1,k}} \quad (5)$$

$$E\{A_{1,k}; A_{1,m}\} = E\{A_{1,k+Q}; A_{1,m+Q}\} = [\overline{A_{1,k}^2} - \overline{A_{1,k}^2}] \delta_{km} \quad (6)$$

$$E\{A_{2,k}\} = E\{A_{2,k+Q}\} = \overline{A_{2,k}} \quad (7)$$

$$E\{A_{2,k}; A_{2,m}\} = E\{A_{2,k+Q}; A_{2,m+Q}\} = \overline{A_{2,k} A_{2,m}} \quad (8)$$

$$A_{2,m+Q}\} = [\overline{A_{2,k}^2} - \overline{A_{2,k}^2}] \delta_{km}$$

由此,该模型即可实现对轴承外圈、内圈以及滚动体故障产生的声发射信号的描述。值得注意的是,当双冲击现象不显著时,只需修改相应参数,该模型仍然适用。虽然这些假设与真实的物理过程相比还非常的理想化,但这些假设可以使我们通过简单的计算即可窥探轴承故障的声发射信号特征。

2 功率谱分析

显然,当忽略双冲击响应声发射信号模型中的某一个响应或者双冲击响应不可分时,(1)式表示的模型即退化为文献[17-18]中研究的单冲击响应解析模型。与之类似,双冲击响应声发射信号模型也可分解为确定性部分与随机部分之和,即

$$x(t) = x_H(t) + x_R(t) \quad (9)$$

式中, $x_H(t)$ 表示信号的确定性部分;而 $x_R(t)$ 表示信号的随机部分。

2.1 确定性部分

虽然模型(1)是随机的,但其集合平均具有一定的确定性。模型的集合平均为

$$m_x(t) = E\{x(t)\} = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} [E\{A_{1,k}\} E\{h(t - T_k)\} + E\{A_{2,k}\} E\{h(t - T_k - T_{L,k})\}] = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} [\overline{A_{1,k}} \int_R h(t - T_k) \phi_T(T_k) dT_k + \overline{A_{2,k}} \iint_R h(t - T_k - T_{L,k}) \phi_T(T_k) \psi_{T_L}(T_{L,k}) dT_k dT_{L,k}] \quad (10)$$

联立(3)式和(4)式并将(10)式中的积分等效为卷积,则模型的集合平均可表示为

$$m_x(t) = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} [\overline{A_{1,k}} [h(t - T_k) * \phi_T(t - T_k)] + \overline{A_{2,k}} [h(t - (k + \beta)T) * \phi_T(t - (k + \beta)T) * \psi_{T_L}(t - (k + \beta)T)]] \quad (11)$$

令

$$\tilde{h}_1(t) = h(t) * \phi_T(t) \quad (12)$$

$$\tilde{h}_2(t) = h(t) * \phi_T(t) * \psi_{T_L}(t) \quad (13)$$

则 $m_x(t)$ 可进一步表示为

$$m_x(t) = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} [\overline{A_{1,k}} \tilde{h}_1(t - T_k) + \overline{A_{2,k}} \tilde{h}_2(t - (k + \beta)T)] \quad (14)$$

由此可得, $m_x(t)$ 的 Fourier 变换为

$$M_x(f) = \lim_{W \rightarrow \infty} \frac{1}{W} \int_{-W/2}^{W/2} m_x(t) \exp(-j2\pi ft) dt = \lim_{W \rightarrow \infty} \left\{ \sum_{k=-\infty}^{+\infty} [\overline{A_{1,k}} + \overline{A_{2,k}} \exp(-j2\pi kTf)] \Psi_{T_L}(f) \cdot \exp(-j2\pi kTf) H(f) \Phi_T(f) \right\} * \text{sinc}(\pi Wf) \quad (15)$$

式中, $\Phi_T(f)$ 和 $\Psi_{T_L}(f)$ 分别表示 $\phi_T(t)$ 和 $\psi_{T_L}(t)$ 的 Fourier 变换,函数 $\text{sinc}(x) = \sin(x)/x$ 。根据假设 $\overline{A_{1,k}}$ 和 $\overline{A_{2,k}}$ 均为周期为 Q 的函数,将其表示为 Fourier 级数形式

$$\overline{A_{1,k}} = \sum_{q=-\infty}^{+\infty} a_{1,q} \exp\left(j2\pi kT \frac{q}{Q}\right) \quad (16)$$

$$\overline{A_{2,k}} = \sum_{q=-\infty}^{+\infty} a_{2,q} \exp\left(j2\pi kT \frac{q}{Q}\right) \quad (17)$$

结合泊松公式

$$T \sum_{k=-\infty}^{+\infty} \exp\left(j2\pi kT \left(\frac{q}{Q} - f\right)\right) = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} \delta\left(f - \frac{k}{T} - \frac{q}{Q}\right) \quad (18)$$

则 $M_x(f)$ 可表示为

$$M_x(f) = \lim_{W \rightarrow \infty} \left\{ \sum_{k,q=-\infty}^{+\infty} \left[\frac{1}{T} [a_{1,q} + a_{2,q} \cdot \exp(-j2\pi\beta T f)] \Psi_{T_L}(f) \cdot H(f) \Phi_T(f) \delta\left(f - \frac{k}{T} - \frac{q}{Q}\right) \right] \right\} * \text{sinc}(\pi Wf) \quad (19)$$

对(19)式中的 sinc 函数进行无穷积分,即令 $W \rightarrow \infty$, (19) 式则变形为

$$M_x(f) = \frac{1}{T} H(f) \Phi_T(f) \sum_{k,q=-\infty}^{+\infty} \left\{ [a_{1,q} + a_{2,q} \cdot \exp(-j2\pi\beta T f)] \Psi_{T_L}(f) \delta\left(f - \frac{k}{T} - \frac{q}{Q}\right) \right\} \quad (20)$$

令

$$P_1 = \sum_{k,q=-\infty}^{+\infty} \left\{ [a_{1,q} + a_{2,q} \cdot \exp(-j2\pi\beta T f)] \Psi_{T_L}(f) \delta\left(f - \frac{k}{T} - \frac{q}{Q}\right) \right\} \quad (21)$$

式中, P_1 表现为离散谱形式。值得注意的是:由于双冲击响应现象的存在, P_1 的幅值呈周期衰减的趋势,调制周期为 $1/\Delta T$, 衰减趋势为 $S_{H1}(f)$ 。整体上,

信号的集合平均还受到 $S_{H1}(f)$ 的调制作用, 其中 $H(f)$ 相当于具有高通滤波作用的传递函数, $\Phi_T(f)$ 相当于具有低通滤波作用的传递函数。因此, $H(f)$ 和 $\Phi_T(f)$ 的乘积对离散谱线产生抑制作用。该结果表明: 双冲击响应信号的离散谱线处于低频区, 但幅

值较小, 易被噪声淹没。

信号的功率谱与自相关函数互为 Fourier 变换对, 因此, 要得到信号的功率谱可先得到 $m_x(t)$ 的自相关函数, 即

$$R_{m_x}(\tau) = E\{m_x(t + \tau/2)m_x(t - \tau/2)^*\} = E\left\{\sum_{k=-\infty}^{+\infty} [\overline{A_{1,k}}\overline{h_1}(t - kT + \tau/2) + \overline{A_{2,k}}\overline{h_2}(t - (k + \beta)T + \tau/2)] \cdot \sum_{l=-\infty}^{+\infty} [\overline{A_{1,l}}\overline{h_1}(t - lT - \tau/2) + \overline{A_{2,l}}\overline{h_2}(t - (l + \beta)T - \tau/2)]^*\right\} = E\left\{\sum_{r,l=-\infty}^{+\infty} [\overline{A_{1,r}}\overline{h_1}(t - rT + \tau/2) \cdot \overline{A_{1,l}}\overline{h_1}(t - lT - \tau/2)^* + \overline{A_{1,r}}\overline{h_1}(t - rT + \tau/2) \overline{A_{2,l}}\overline{h_2}(t - (l + \beta)T - \tau/2)^* + \overline{A_{2,r}}\overline{h_2}(t - (r + \beta)T + \tau/2) \cdot \overline{A_{1,l}}\overline{h_1}(t - lT - \tau/2)^* + \overline{A_{2,r}}\overline{h_2}(t - (r + \beta)T + \tau/2) \overline{A_{2,l}}\overline{h_2}(t - (l + \beta)T - \tau/2)^*]\right\} = E\left\{\sum_{r,l=-\infty}^{+\infty} [\overline{A_{1,r}}\overline{A_{1,l}}\overline{R_{h_{11}}}((l - r)T + \tau) + \overline{A_{2,r}}\overline{A_{2,l}}\overline{R_{h_{22}}}((l - r)T + \tau) + \overline{A_{1,r}}\overline{A_{2,l}}\overline{R_{h_{12}}}((l - r + \beta)T + \tau) + \overline{A_{2,r}}\overline{A_{1,l}}\overline{R_{h_{12}}}((l - r - \beta)T + \tau)]\right\} \quad (22)$$

令 $u = l - r$, 则有

$$R_{m_x}(\tau) = \sum_{u=-\infty}^{+\infty} [r_{11,u}R_{h_{11}}(uT + \tau) + r_{22,u}R_{h_{22}}(uT + \tau) + r_{12,u}R_{h_{12}}((u + \beta)T + \tau) + r_{21,u}R_{h_{21}}((u - \beta)T + \tau)] \quad (23)$$

式中

$$r_{11,u} = E\left(\sum_{r=-\infty}^{+\infty} \overline{A_{1,r}}\overline{A_{1,r+u}}\right) = \sum_{q=-\infty}^{+\infty} \tilde{r}_{11,q} \exp\left(j2\pi kT \frac{q}{Q}\right) \quad (24)$$

$$r_{22,u} = E\left(\sum_{r=-\infty}^{+\infty} \overline{A_{2,r}}\overline{A_{2,r+u}}\right) = \sum_{q=-\infty}^{+\infty} \tilde{r}_{22,q} \exp\left(j2\pi kT \frac{q}{Q}\right) \quad (25)$$

$$r_{12,u} = E\left(\sum_{r=-\infty}^{+\infty} \overline{A_{1,r}}\overline{A_{2,r+u}}\right) = \sum_{q=-\infty}^{+\infty} \tilde{r}_{12,q} \exp\left(j2\pi kT \frac{q}{Q}\right) \quad (26)$$

$$r_{21,u} = E\left(\sum_{r=-\infty}^{+\infty} \overline{A_{2,r}}\overline{A_{1,r+u}}\right) = \sum_{q=-\infty}^{+\infty} \tilde{r}_{21,q} \exp\left(j2\pi kT \frac{q}{Q}\right) \quad (27)$$

此处利用了 $\{\overline{A_{1,k}}\}_{k \in \mathbb{Z}}$ 和 $\{\overline{A_{2,k}}\}_{k \in \mathbb{Z}}$ 是周期函数的性质。对自相关函数 $R_{m_x}(\tau)$ 进行 Fourier 变换, 可得信号 $x(t)$ 中确定性部分的功率谱密度函数为

$$S_{x_H}(f) = \lim_{W \rightarrow \infty} \left\{ \frac{1}{W} \int_{-W/2}^{W/2} R_{m_x}(\tau) \exp(-j2\pi\tau f) d\tau \right\} = \lim_{W \rightarrow \infty} \left\{ \sum_{u=-\infty}^{+\infty} [(r_{11,u} + r_{22,u}) |\Psi_{T_L}(f)|^2 + \right.$$

$$r_{12,u} \exp(j2\pi\beta T f) \Psi_{T_L}(f) + r_{21,u} \exp(-j2\pi\beta T f) \Psi_{T_L}(f)] \cdot \exp(-j2\pi u T f) |H(f)|^2 |\Phi_T(f)|^2 \Big\} * \text{sinc}(\pi W f) \quad (28)$$

对 sinc 函数进行积分, 则有

$$S_{x_H}(f) = \frac{1}{T} |H(f)|^2 |\Phi_T(f)|^2 \cdot \sum_{k,q=-\infty}^{+\infty} [\tilde{r}_{11,q} + \tilde{r}_{22,q} |\Psi_{T_L}(f)|^2 + \tilde{r}_{12,q} \exp(j2\pi\beta T f) \Psi_{T_L}(f) + \tilde{r}_{21,q} \exp(-j2\pi\beta T f) \Psi_{T_L}(f)] \delta\left(f - \frac{k}{T} - \frac{q}{Q}\right) \quad (29)$$

令

$$S_{H1}(f) = \sum_{k,q=-\infty}^{+\infty} [\tilde{r}_{11,q} + \tilde{r}_{22,q} |\Psi_{T_L}(f)|^2] \delta\left(f - \frac{k}{T} - \frac{q}{Q}\right) \quad (30)$$

$$S_{H2}(f) = \sum_{k,q=-\infty}^{+\infty} [\tilde{r}_{12,q} \exp(j2\pi\beta T f) \Psi_{T_L}(f) + \tilde{r}_{21,q} \exp(-j2\pi\beta T f) \Psi_{T_L}(f)] \delta\left(f - \frac{k}{T} - \frac{q}{Q}\right) \quad (31)$$

通过功率谱的表达式可以看出, $S_{H1}(f)$ 和 $S_{H2}(f)$ 均为离散谱。 $\Psi_{T_L}(f)$ 相当于一个具有低通滤波作用的传递函数, 因此, $S_{H1}(f)$ 的幅值呈衰减趋势, 且变化趋势由 $\Psi_{T_L}(f)$ 的平方决定; $S_{H2}(f)$ 的幅值表现为周期波动的衰减形式, 衰减趋势由 $\Psi_{T_L}(f)$ 决定, 波动周期为 $1/\beta T$ 。而且 $S_{H1}(f)$ 和 $S_{H2}(f)$ 的能量

均主要集中在低频区。与函数 $\Psi_{T_L}(f)$ 类似, $\Phi_T(f)$ 也相当于一个具有低通滤波作用的传递函数, 但 $H(f)$ 相当于一个高通滤波器, 因此, 乘积 $|H(f)|$ 和 $|\Phi_T(f)|$ 乘积的平方会极大地削弱离散谱线的幅值。该结果表明: 虽然功率谱的确定性部分在低频区, 但幅值较小, 易被噪声淹没。

2.2 随机部分

随机部分的功率谱密度可通过自协方差函数求解。信号的自协方差函数为

$$C_{xx}(t, \tau) = E \{ [x(t + \tau/2) - m_x(t + \tau/2)] \cdot [x(t - \tau/2) - m_x(t - \tau/2)]^* \} = E \{ x(t + \tau/2)x(t - \tau/2)^* \} - m_x(t + \tau/2)m_x(t - \tau/2)^* \quad (32)$$

将(1)式代入(32)式则有

$$C_{xx}(t, \tau) = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} \{ \overline{A_{1,k}^2} E[h(t - T_k + \tau/2) \cdot h(t - T_k - \tau/2)^*] + \overline{A_{2,k}^2} E[h(t - T_k - T_{L,k} + \tau/2) \cdot h(t - T_k - T_{L,k} - \tau/2)^*] \} - \sum_{k=-\infty}^{+\infty} [\overline{A_{1,k}^2} \tilde{h}_1(t - kT + \tau/2) \cdot \tilde{h}_1(t - kT - \tau/2)^* + \overline{A_{2,k}^2} \tilde{h}_2(t - (k + \beta)T + \tau/2) \cdot \tilde{h}_2(t - (k + \beta)T - \tau/2)^*] + C_{nn}(\tau) \quad (33)$$

根据文献[15], 功率谱密度可按(34)式进行计算

$$S_{xx}(f) = \lim_{W \rightarrow \infty} \frac{1}{W} \int_{-W/2}^{W/2} \int_{-R}^R C_{xx}(t, \tau) \exp(-j2\pi f\tau) d\tau dt \quad (34)$$

联立(33)和(34)式, 可得随机部分的功率谱密度为

$$S_{x_R}(f) = \frac{1}{T} |H(f)|^2 [\overline{A_{1,k}^2} + \overline{A_{2,k}^2} - \overline{A_{1,k}^2} |\Phi_T(f)|^2 - \overline{A_{2,k}^2} |\Phi_T(f)|^2 |\Psi_{T_L}(f)|^2] + S_{nn}(f) \quad (35)$$

令

$$P_H = \overline{A_{1,k}^2} + \overline{A_{2,k}^2} - \overline{A_{1,k}^2} |\Phi_T(f)|^2 - \overline{A_{2,k}^2} |\Phi_T(f)|^2 |\Psi_{T_L}(f)|^2 \quad (36)$$

$\Phi_T(f)$ 和 $\Psi_{T_L}(f)$ 均表现为具有低通滤波作用的传递函数, 因此, (36) 式表现为高通滤波器。与(29)式相比, (36) 式表示的是一个权重为高通滤波器形式的连续谱。结合 $H(f)$ 的高通滤波作用, 随

机部分表现为高频区的连续谱。

3 仿真研究

为了验证模型的正确性以及方法的有效性, 本节采用仿真信号进行分析。工程实际中, 大约 90% 的轴承失效都是由于内圈或者外圈故障引起的^[20], 因此, 仿真分析只涉及内圈和外圈故障。为简化分析, 将声发射传感器简化为一个单自由度时不变系统, 其单位脉冲响应函数为

$$h(t) = \exp(-2\pi\zeta f_n t) \cdot \sin(2\pi f_n t), \quad 0 \leq t < \infty \quad (37)$$

式中: ζ 为相对阻尼系数; f_n 为声发射传感器的固有频率。图 3 为根据(1) 式得到的内圈和外圈故障声发射仿真信号, 其中: $f_n = 3 \text{ kHz}$; $\zeta = 0.05$; 双冲击响应中前一个冲击响应的平均幅值 $\{\overline{A_{1,k}}\}_{k \in \mathbf{Z}} = \{1\}$, 后一个冲击响应的平均幅值 $\{\overline{A_{1,k}}\}_{k \in \mathbf{Z}} = \{2\}$; 双冲击响应的平均时间间隔 $T = 0.1 \text{ s}$; $\{A_{1,k}\}_{k \in \mathbf{Z}}$ 服从 $N(\overline{A_{1,k}}, 0.0025 \overline{A_{1,k}})$ 的正态分布; $\{A_{2,k}\}_{k \in \mathbf{Z}}$ 服从 $N(\overline{A_{2,k}}, 0.0025 \overline{A_{2,k}})$ 的正态分布; $\{\Delta T_k\}_{k \in \mathbf{Z}}$ 服从 $N(T, 0.0025T)$ 的正态分布。为了说明双冲击响应间隔的影响, 内外圈故障信号的双冲击响应间隔分别为 0.015 s 和 0.01 s, 即 $\beta_i = 0.15, \beta_o = 0.1$ 。内圈故障仿真信号中双冲击响应还具有 $a(t) = \cos(4\pi t) + 1$ 的幅值调制。信号的采样频率为 30 kHz。为使仿真信号更接近实际测试信号且不淹没双冲击现象, 内、外圈仿真信号中均加入了 10 dB 的白噪声。

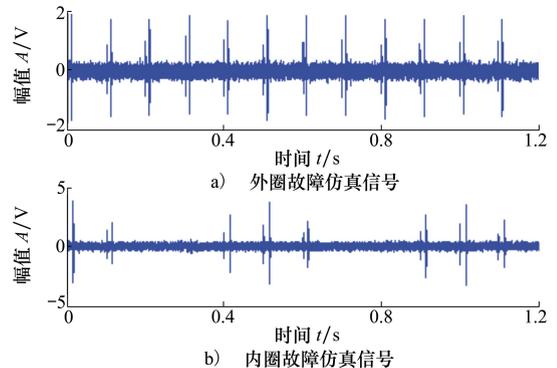


图 3 内、外圈故障仿真信号的时域波形

图 4 为内、外圈故障仿真信号的频域特征。由图可知, 由于传递函数 $H(f)$ 等效为高通滤波器, 2 种情况下频谱的能量均主要集中在共振频段。由于

冲击间隔存在随机波动,共振区的频谱表现为连续谱;但在低频段,信号仍呈现明显的离散谱线特征。

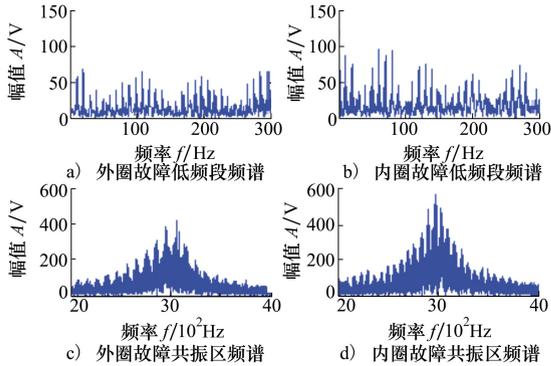


图 4 内、外圈故障仿真信号的频域特征

4 实验研究

4.1 实验设置

图 5 为对应的轴承实验台、声发射信号采集器以及含不同故障的滚动轴承。实验过程中,转轴采用三相异步电机通过 \tilde{V} 型皮带驱动。驱动端由 1 个圆柱滚子轴承支撑,测试端由 2 个相对安装的圆锥滚子轴承共同支撑。测试用的 6220 型轴承安装于测试端,节圆直径为 140 mm,滚动体直径为 25.4 mm,总数为 10 个。实验过程中通过轴承实验台下端的两级加力杠杆对测试轴承实施 11.76 kN 的径向载荷,方向竖直向下,即轴承的载荷区位于最上方。内圈故障为一个宽度约 1.42 mm 的槽型缺陷;外圈故障分别为周向宽度约 3.14 mm 的点蚀故障。测试过程中,将型号为 $\alpha 30$ 的声发射传感器安置于轴承正上方的载荷区中间。为了消除传递路径的影响,声发射传感器直接置于轴承外圈上,中间加上耦合剂,使传感器能更好地采集到故障产生的声发射信号。测试信号经 40 dB 的前置放大器后,以 2 MHz 的采样频率持续采集 5 s。

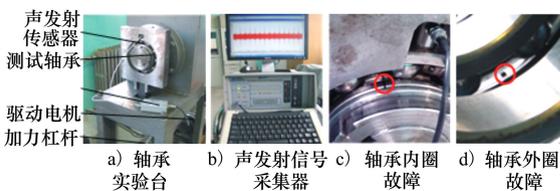


图 5 实验与采集设备

4.2 外圈故障分析

图 6 为外圈故障测试信号的时域波形。由图可

知:滚动体每次通过外圈故障时产生的冲击响应都包含两部分。每个冲击响应成分的幅值均呈现出小

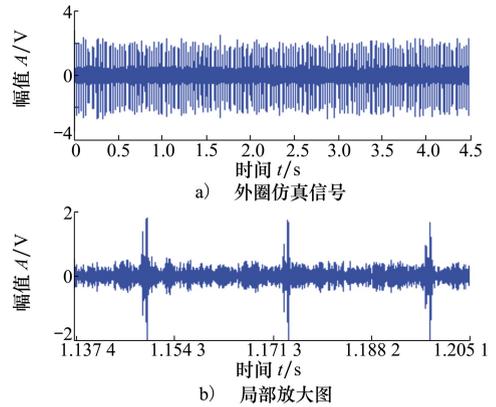


图 6 外圈故障测试信号的时域波形

图 7 为外圈故障测试信号的短时 Fourier 变换结果。由图可知,双冲击响应的能量主要集中在 350 kHz 附近,虽然故障冲击的能量分布非常集中,但该频段的频谱表现为连续谱。

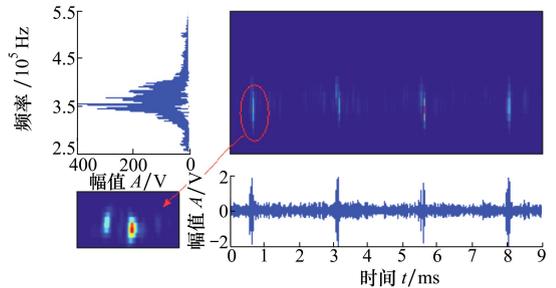


图 7 外圈故障测试信号的 STFT

4.3 内圈故障分析

图 8 为内圈故障测试信号的时域波形。由图可知:时域信号中含有非常明显的循环冲击响应现象,冲击间隔比较均匀。每个冲击响应都包含 2 个部

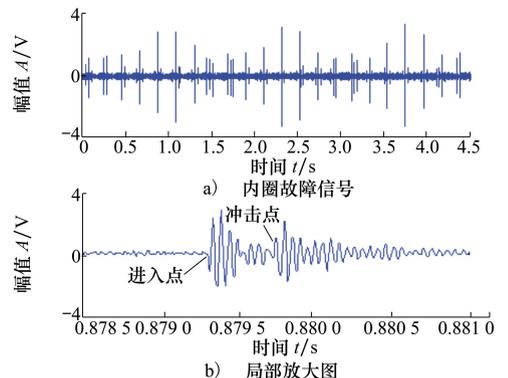


图 8 内圈故障测试信号的时域波形

分,其中前一个冲击响应的起始端存在明显的去应力特征;后一个冲击响应的起始端存在显著的回复应力特征。该现象表明:滚动体通过轴承缺陷时会产生双冲击响应现象,其中第一个冲击响应对应着滚动体进入缺陷时的去应力过程,而第二个冲击响应对应着滚动体离开缺陷时的回复应力过程。常用的单冲击响应模型不能描述该现象。

图9为内圈故障测试信号的短时 Fourier 变换。由图可知,声发射信号在频域表现出显著的连续谱特征,能量主要集中在 $[100, 300]$ kHz 频段内,非常接近声发射传感器的固有频率。从时频面上可以发现,去应力过程产生的声发射信号与回复应力产生

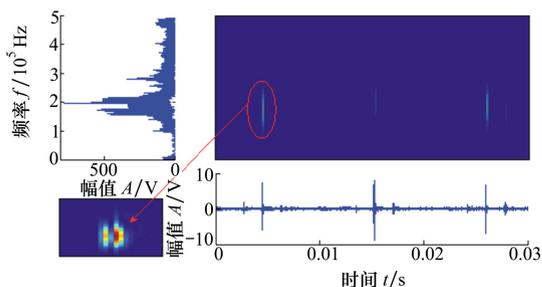


图9 内圈故障测试信号的 STFT

的声发射信号的载波频率相差不大,该现象与文献[18]结论相差较大。该结果表明:与振动信号中的双冲击现象相比,声发射信号中双冲击现象的能量更集中,更有利于故障特征的提取。

5 结论

本文通过对轴承故障声发射信号产生机理的深入分析,提出了含双冲击响应的声发射信号解析模型,揭示了声发射信号的时域与频域特征,为滚动轴承的故障测试信号的准确描述提供了新手段,对轴承故障诊断的应用与发展具有较高的理论与实用价值。主要结论如下:

1) 当滚动体通过内圈或外圈故障时会产生双冲击响应现象。其中第一个冲击响应现象对应滚动体进入故障时产生的去应力过程;第二个冲击响应现象对应滚动体离开故障时产生的回复应力过程。这两个过程都会释放出突发型的声发射信号。

2) 在频域,故障信号的功率谱由低频段的离散谱和高频段的连续谱共同组成。双冲击响应的能量均集中在声发射传感器的共振频率附近。

参考文献:

- [1] HARMOUCHE J, DELPHA C, DIALLO D. Improved fault diagnosis of ball bearings based on the global spectrum of vibration signals[J]. IEEE Trans on Energy Convers, 2015, 30(1): 376-383
- [2] LEITE V, BORGES J, VELOSO G, et al. Detection of localized bearing faults in induction machines by spectral kurtosis and envelope analysis of stator current[J]. IEEE Trans on Industrial Electronics Electron, 2015, 62(3): 1855-1865
- [3] WANG J, HE Q, KONG F. Adaptive multiscale noise tuning stochastic resonance for health diagnosis of rolling element bearings [J]. IEEE Trans on Instrum Meas, 2015, 64(2): 564-577
- [4] SESHADRINATH J, SINGH B, PANIGRAHI B. Investigation of vibration signatures for multiple fault diagnosis in variable frequency drives using complex wavelets[J]. IEEE Trans on Power Electron, 2014, 29(2): 936-945
- [5] JIN X, ZHAO M, CHOW T, et al. Motor bearing fault diagnosis using trace ratio linear discriminant analysis[J]. IEEE Trans on Ind Electron, 2014, 61(5): 2441-2451
- [6] IMMOVILLI F, BIANCHINI C, COCCONCELLI M, et al. Bearing fault model for induction motor with externally induced vibration[J]. IEEE Trans on Ind Electron, 2013, 60(8): 3408-3418
- [7] TORREGROSSA D, KHOOBROO A, FAHIMI B. Prediction of acoustic noise and torque pulsation in PM synchronous machines with static eccentricity and partial demagnetization using field reconstruction method[J]. IEEE Trans on Ind Electron, 2012, 59(2): 934-944
- [8] STACK J, HABETLER T, HARLEY R. Fault-signature modeling and detection of inner-race bearing faults[J]. IEEE Trans on Industry Applications Appl, 2006, 42(1): 61-68
- [9] SINGLETON R, STRANGAS E, AVIYENTE S. Extended Kalman filtering for remaining-useful-life estimation of bearings[J]. IEEE Trans on Ind Electron, 2015, 62(3): 1781-1790
- [10] RANDALL R B, ANTONI J, CHOBSAARD S. The relationship between spectral correlation and envelope analysis in the diagnostics of bearing faults and other cyclostationary machine signals[J]. Mech Syst Signal Process, 2001, 15(5): 945-962
- [11] BARSZCZ T, JABLÓNSKI A. A novel method for the optimal band selection for vibration signal demodulation and comparison with the kurtogram[J]. Mech Syst Signal Process, 2011, 25(1): 431-451
- [12] KANG M, KIM J, KIM J M. High-performance and energy efficient fault diagnosis using effective envelope analysis and denoising on a general-purpose graphics processing unit[J]. IEEE Trans on Power Electron, 2015, 30(5): 2763-2776
- [13] ANTONI J. Cyclic spectral analysis of rolling-element bearing signals: Facts and fictions[J]. Journal of Sound and Vibration,

2007, 304(3/4/5): 497-529

- [14] URBANEK J, ANTONI J, BARSZCZ T. Detection of signal component modulations using modulation intensity distribution[J]. Mech Syst Signal Process, 2012, 28: 399-413
- [15] MCFADDEN P D, SMITH J D. Model for the vibration produced by a single point defect in a rolling element bearing[J]. Journal of Sound and Vibration, 1984, 96(1): 69-82
- [16] ANTONI J, RANDALL R B. A stochastic model for simulation and diagnostics of rolling element bearings with localized faults [J]. Journal of Vibration & Acoustics Transactions of the ASME, 2003, 125(3): 282-289
- [17] EPPS I, MCCALLION H. An investigation into the characteristics of vibration excited by discrete faults in rolling element bearings[C]//4th Annual Conference of Vibration Association of New Zealand, Christchurch, 1994
- [18] SAWALHI N, RANDALL R B. Vibration response of spalled rolling element bearings observations, simulations and signal processing techniques to track the spall size[J]. Mech Syst Signal Process, 2011, 25(3): 846-870
- [19] ELFORJANI M, MBA D. Accelerated natural fault diagnosis in slow speed bearings with acoustic emission[J]. Eng Fract Mech, 2010, 77(1): 112-127
- [20] SANDY J. Monitoring and diagnostics for rolling element bearings[J]. Sound and Vibration, 1988, 20(6): 1-20

Analytical model and spectral characteristics of acoustic emission signal produced by localized fault of rolling element bearing

LI Fazhong¹, HE Zengshui², ZHANG Lin³, MING Anbo⁴, YANG Yongsheng⁵

(1.Equipment Project Management Center, Department of Rocket Force's Equipment, Beijing 100086, China;
2.Department of Rocket Force, Xi'an 710025, China;3. The 96761th Army, Lingbao 472500, China;
4.School of Mechanics, Civil Engineering and Architecture, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;
5.Shaanxi Academy of Governance, Xi'an 710068, China)

Abstract: The accurate description of acoustic emission signals produced by the localized fault of a rolling element bearing plays an important role in its feature extraction and analysis. This paper analyzes the excitation mechanisms and develops the analytical model of acoustic emission signals produced when the rolling element bearing passes across the localized fault on the inner or outer race. Based on the analytical model, the spectral characteristics are discussed substantially. Simulations and experiments are carried out to validate the efficacy of the model developed in the paper. The experimental results show that the response signal thus produced has two parts. The first one is produced by the entry of the rolling element bearing, while the other is produced by the departure of the rolling element bearing. The energy of both parts is concentrated around the resonance frequency of the acoustic emission transducer. Generally, the interval of adjacent acoustic emission events is not equivalent to each other and the corresponding spectrum is continuous in the high frequency band.

Keywords: rolling element bearing; localized fault; acoustic emission; analytical model

引用格式: 李法忠, 何增水, 张林, 等. 滚动轴承局部故障的声发射信号解析模型与频域特征[J]. 西北工业大学学报, 2021, 39(4): 831-838

LI Fazhong, HE Zengshui, ZHANG Lin, et al. Analytical model and spectral characteristics of acoustic emission signal produced by localized fault of rolling element bearing[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2021, 39(4): 831-838 (in Chinese)