

旋转机械振动信号压缩小波基优化选取方法*

翁 浩¹, 高金吉²

(1. 北京化工大学信息学院 北京, 100029) (2. 北京化工大学机电学院 北京, 100029)

摘要 旋转机械在线状态监测和故障诊断系统中振动数据的实时存储和远程传输对数据压缩提出了较高的要求。小波分析做为数据处理的常用方法, 已被广泛地应用于数据压缩并取得了良好的效果。给出了振动信号的小波通用压缩方法, 通过分析旋转机械振动信号的特点和小波函数几种重要属性对小波压缩的影响, 提出了旋转机械振动信号压缩过程中最优小波基的选择方法, 并根据旋转机械实际故障信号比较了相应小波的压缩效果。结果表明, 通过选择合适的小波基函数, 可以有效提高重构信号的信噪比。对于旋转机械复杂突变类故障信号应选择低分解消失矩, 高重构正则性的双正交小波进行压缩。本研究方法和结论对旋转机械振动信号小波压缩的进一步研究有一定的参考作用。

关键词 旋转机械; 振动信号; 小波压缩; 小波属性; 最优小波基

中图分类号 TN911.4; TH165.3

引 言

随着计算机网络的发展及企业设备管理水平的提高, 大型旋转机械振动信号的在线监测和诊断系统正朝着多机网络化和远程诊断的方向发展^[1]。由于振动信号的数据量非常大, 会对网络传输构成很大的压力, 所以在传输前对旋转机械振动信号进行数据压缩, 无论对减少传输时所用的带宽或减少存储容量, 还是减少传输和存储时的出错, 都具有重要意义。对于旋转机械振动信号的压缩, 目前常用的压缩方法主要有数据稀化、正交变换和预测编码等^[2-3]。其中, 因为小波变换具有非常好的刻画时频局部特征的能力, 所以特别适用于旋转机械振动信号的压缩。但是, 可以用于小波变换的小波基有很多, 旋转机械故障信号也是多种多样的, 特别是复杂的突变类信号, 含有丰富的高频分量。如何通过选择一个合适的小波基, 在保证一定压缩比的前提下, 尽可能保留原始振动信号中完备的故障特征信息就非常关键。紧支撑、消失矩、正则性、对称性及正交性是小波的重要属性, 也是进行小波基选取所参考的基本要素^[4]。因此, 笔者将首先给出小波压缩的通用方法, 然后分析旋转机械振动信号的特点及小波基的几个重要属性。通过以上分析, 给出旋转机

械振动信号压缩过程中小波基的选取方法。

1 基于小波的阈值压缩方法

信号压缩编码的通用流程分为以下 3 步: 采样、量化、编码。其中如果采样满足乃奎斯特定理, 则每秒取样数已确定, 那么数据率或信噪比将主要取决于每个样值的量化过程。通过小波变换, 最大化地去除时域信号的相关性, 并根据信号在不同子带内的能量特点, 分配不同比特以达到压缩总比特的目的。

20 世纪 90 年代初, Donoho 提出了非线性小波阈值的概念^[5], 其中中心思想是在含噪信号小波分解后的各层系数中, 对大于和小于某一阈值的小波系数分别进行处理, 然后再利用处理后得到的小波系数重构原信号。阈值主要包括硬阈值和软阈值, 其中阈值函数的选择十分关键, 大量的文献给出了阈值函数的选择方法^[6-9], 主要可分成以下 4 种^[10]: a. 固定阈值; b. Stein 无偏似然估计阈值; c. 启发式阈值; d. 极大极小阈值。

近年来, 随着小波理论不断发展, 又出现了很多创新性的阈值压缩思想, 如 Birge-Massart 策略^[11]、均衡稀疏标准^[12]、去近零值^[13]、保留特定能量阈值法等^[14]、能量相关性阈值^[15]以及分层阈

* 国家自然科学基金资助项目(51135001)

收稿日期: 2011-09-20; 修改稿收到日期: 2011-12-23

值^[16]和梯度阈值^[17]等。这极大地丰富了小波的阈值压缩理论,使阈值压缩方法成为了现在小波信号压缩的主流方法。

2 旋转机械振动信号的特点

转子系统是一个多自由度振动系统,转子的强迫振动和自激振动可能产生不同的故障特征信号。但是振动信号的整体特征总可用其工频及主要倍频和分频来表征,设旋转机械振动信号经过数据采集后形成的离散化时间序列为 $F(n\Delta t)$, Δt 为采样周期,则为

$$F(n\Delta t) = \sum_{i=1}^N A_i \cos(\omega_i n \Delta t + \theta_i) \quad (1)$$

还有一些特殊故障,如碰摩、轴固有缺陷和一些齿轮箱的故障,其在时域波形上的反映会有所不同。这些故障会在时间波形上产生突变类信号 $F_i(n\Delta t)$,另外若考虑噪声信号 $F_s(n\Delta t)$,则一个振动信号的完整描述为

$$F(n\Delta t) = \sum_{i=1}^N A_i \cos(\omega_i n \Delta t + \theta_i) + F_i(n\Delta t) + F_s(n\Delta t) \quad (2)$$

由式(2)可以看出,在满足一定压缩比的情况下,为了不引起误诊断,必须完整保留突变类信号成分 $F_i(n\Delta t)$,这是人们进行小波选取时的重要参考。

3 小波基的几种重要属性及其对信号压缩的影响

在基于小波变换的旋转机械振动信号的压缩过程中,对于小波基选择,主要考虑以下 5 个因素^[18]: a. 紧支撑长度; b. 消失矩; c. 正则性; d. 对称性; e. 正交性。

3.1 紧支撑长度

紧支撑小波能满足空间局部性要求,按照紧支撑特性可以将小波分为两类:一类是频域紧支撑的,对应于滤波器组中的 IIR 型滤波器,称为 Meyer 型小波;另一类是时域紧支撑的,对应于滤波器组中的 FIR 型滤波器,称为 Daubechies 型小波。由滤波器特点可知,除非截断为有限长,否则 Meyer 型小波无法用于离散小波变换,为了避免截断误差,一般要求采用时域紧支撑的 Daubechies 型小波。

此外,如果信号在紧支撑小波的内部有一孤立奇点,那么可能会产生大幅值的小波系数。表征旋

转机械故障(如碰摩、轴划痕)的突变类信号往往是周期性的,必须尽量减小小波的紧支撑长度,以减少大幅值小波系数的数量。

3.2 消失矩

小波消失矩与信号压缩编码效率有很大关系,本文称小波 $\psi(t)$ 具有 N 阶消失矩,当对于一切正整数 $k < N$,有

$$\int_{-\infty}^{\infty} x^k \psi(t) dx = 0 \quad (3)$$

Ingrid Daubechies 指出^[19],当所选用小波的消失矩高于一个函数 $f(t)$ 在一个区间上的一致 Lipschitz 指数时,随着小波分解尺度的增加,小波幅值按如下关系变化。

定理 设 $f(x) \in L^2(R)$ 在点 x_0 上为 Lipschitz α ,若小波消失矩 N 满足 $N \geq \alpha$,则存在常数 $A > 0$,使得对于 x_0 的一个邻域内的所有点 x 和任意尺度 $s > 0$,有

$$|Wf(u, s)| \leq A(s^\alpha + |x - x_0|^\alpha) \quad (4)$$

由此可见,随着小波分解尺度的增加,高消失矩的小波能在更迅速的衰减小波系数的同时,改变同一子带内振动信号正则性不同的组成部分的幅值对比。但是,如果一个小波的消失矩 R ,则它对应的滤波器长度不少于 $2R$ 。这说明消失矩越高也意味着小波函数紧支撑区间越大,越不利于局部化分析。根据被处理信号的特点选择具有适当消失矩的小波,文献[20]在这方面做了广泛的研究。

3.3 正则性

尺度函数正则性与小波的消失矩具有很强的相关性,对于一般的尺度函数,高的正则性对应于相应小波函数高的消失矩^[21]。

设尺度函数 $\varphi(t)$ 的 N 阶导数存在,对于任意 t , $\beta \in R$,若有

$$|\varphi^N(t + \beta) - \varphi^N(t)| < c |\beta|^\alpha \quad (5)$$

其中: $0 < \alpha < 1$; c 为常数,那么称 $\varphi(t)$ 具有 $N + \alpha$ 阶正则性。

根据上面的定义可以看出,具有 $N + \alpha$ 阶正则性的尺度函数 $\varphi(t)$ 一定是 N 阶连续可微的,这说明正则性可以有效地表征尺度函数 $\varphi(t)$ 在时域中的光滑度及在频域中的能量集中程度。由上面对于旋转机械振动信号的分析,其整体特征函数可以表征为若干三角函数基的线性组合,具有无穷的正则性。也就是说在其他条件相同的情况下,选用的尺度函数正则性越高,对应的压缩重构信号的误差越小。

文献[22-24]给出了尺度函数正则性的评估和构造方法。

3.4 对称性

具有对称性的小波基因其具有线性相位的特点,可以提高信号处理和压缩重构的质量。小波函数 $\varphi(t)$ 如果满足:a. $\varphi(a+t) = \varphi(a-t), t, a \in R$, 则称小波是对称(偶对称)的;b. $\varphi(a+t) = -\varphi(a-t), t, a \in R$, 则称小波是反对称(奇对称)的。

对称或反对称小波可以由具有线性相位的完全重构滤波器生成^[25]。可以证明,如果有限长滤波器 h 和 \tilde{h} 有奇数个非零样点且关于 $n=0$ 对称,那么尺度函数 φ 和 $\tilde{\varphi}$ 关于 $t=0$ 对称,而小波函数 ψ 和 $\tilde{\psi}$ 关于移位后的中心对称。如果 h 和 \tilde{h} 有偶数个非零样点且关于 $n=1/2$ 对称,那么 φ 和 $\tilde{\varphi}$ 关于 $t=1/2$ 对称,而 ψ 和 $\tilde{\psi}$ 关于移位后的中心反对称。

对于旋转机械振动信号压缩而言,小波基的对称性主要影响振动信号突变类的信号成分^[26]。使用非对称小波基进行分解后,突变类信号形成方向相反,大小不等的两个峰值。如果采用软硬阈值压缩的方法,如果阈值选取不适当,其中一个峰值极有可能被滤掉,从而产生重构失真。此外,非对称性小波在分析突变信号时,会产生同一突变点在不同尺度上的位移现象,若使用完全阈值压缩的方法,一部分非噪声的突变点也很有可能被滤掉,从而引起比较大的重构失真。

3.5 正交性

正交小波基是由一个小波母函数经过伸缩和平移

$$\psi_{m,n}(t) = 2^{m/2} \psi_{m,n}(2^m t - n) \quad (m, n \in Z) \quad (6)$$

构成的 L^2 的一个标准正交基^[27]。由此构成不同尺度的小波子空间也是原空间 $L^2(R)$ 的正交子空间。而双正交小波由于将满足尺度空间的平移正交性和小波空间的分解正交性条件放宽,故存在一个尺度函数和小波函数与原空间对应的小波函数和尺度函数分别正交的对偶空间,所以在滤波器的设计上有更大的自由度。

正交小波和双正交小波的相互关系如下。

1) 因为非紧支撑的小波无法用于离散小波变换,所以振动信号的压缩要求使用紧支撑的小波。从这一点来说,正交小波和双正交小波都是满足要求的。

2) 可以在双正交空间里构造正反对称的尺度函数和小波函数从而得到线性相位的分解和重构滤波器。而 Ingrid Daubechies 已经严格证明了在紧支撑正交小波中除了 haar 小波外,其余小波是不可能同时具有对称性和紧支撑特性的。

3) 双正交小波由于不是对于 $L^2(R)$ 的正交分解,相同消失矩条件下往往具有更长的支撑,且不同子带之间存在着相关冗余,这将导致更大的小波系数和更长的子带长度。

4 最优小波基的选择

基于以上的分析,可以得出基于小波的旋转机械振动信号压缩的一般要求:

- 1) 减小原始信号的时域相关性,使变换以后的小波系数尽可能少,幅值尽可能小;
- 2) 提高重构信号的信噪比的同时,特别注意保留与系统故障有关的信息。

4.1 相同消失矩情况下不同类型小波的横向比较

4.1.1 正交小波

紧支撑正交小波分解能够满足去除各子带数据相关性的要求,但是由于不具备线性相位,可能减小重构信噪比,所以,可以通过选择具有近似线性相位的小波来优化小波基的选择。Daubechies 型小波是最为经典的紧支撑正交小波,其构造公式为

$$|H(\omega)|^2 = \left(\cos \frac{\omega}{2}\right)^{2N} P_N \left(1 - \cos^2 \frac{\omega}{2}\right) \quad (7)$$

其中: $H(\omega)$ 为尺度函数共轭镜像滤波器的频域形式; P_N 为一个多项式,满足: $P_N(y) = \sum_{k=0}^{N-1} \binom{N-1+k}{k} y^k$ 。

通过选择多项式 P_N 中关于单位圆对称的复根(实根)对来构造长度为 n 的滤波器 h_n 可以得到最接近于线性相位的滤波器

$$|H(\omega)|^2 = {}_N U(z) {}_N U(1/z) \quad (8)$$

其中: ${}_N U(z)$ 满足 $|{}_N U(z)|^2 = P_N \left(\sin^2 \left(\frac{\omega}{2}\right)\right)$ 的最低次数多项式的根。

若 ${}_N U(z)$ 根的模平方小于 1, 就是 Daubechies 小波;若大于 1, 这就是 Symlets 小波。

另外,根据 R Coifman 对于小波函数的要求,即小波函数 $2N$ 阶矩为零,尺度函数 $2N-1$ 阶矩为零, Daubechies 构建了 Coiflets 小波,其具有更好的

对称性和更大的消失矩,但是代价是增加了紧支撑长度。

4.1.2 双正交小波

双正交条件相对于正交条件有所宽松,因此在小波基的构造上表现出更大的灵活性^[28]。可以构造出对称或反对称的小波,从而提高信号的重构精度。在双正交小波中,性能最好的是 Cohen、Daubechies 和 Feauveau 基于样条函数构建的 CDF(Cohen-Daubechies-Feauveau)双正交小波(bior),其具有以下 4 个特点^[29]:a. 滤波器的个数有限;b. 系数全为有理数;c. 对称性;d. 线性相位。

但是 CDF 小波分解由于不是对原信号的正交分解,所以分解后各个子带的小波系数仍存在相关性冗余;另外在 CDF 小波中,分解滤波器的长度 L 是由分析小波的消失矩 N 和重构小波的正则性 \tilde{N} 共同决定的

$$L = 2N + \tilde{N} - 1 \quad (9)$$

所以在相同消失矩的情况下,CDF 小波至少有 2 倍的紧支撑长度。典型正交与双正交小波的时域波形如图 1 所示。

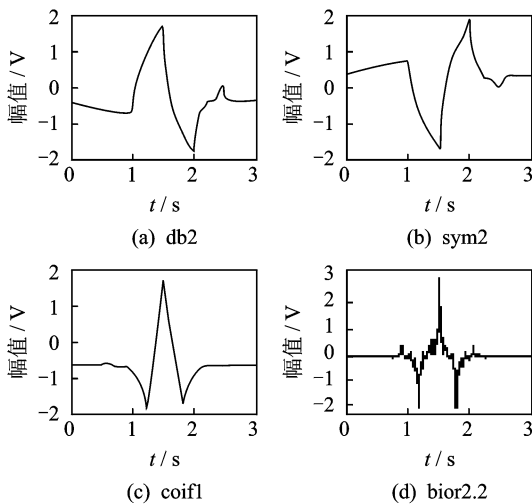


图 1 典型正交与双正交小波的时域波形

4.2 小波的消失矩与支撑长度的折衷

由上面的分析可知,一个振动信号可由整体特征信号、突变类信号和噪声信号构成。对于整体特征信号,由于其具有无穷可微性,所以高消失矩的小波函数在细尺度下会有效地衰减小波系数。另外文献^[17]证明,小波函数正则性阶数 r 越高,信号压缩后重建的效果越好,只是重构效果的改善速度还与构造滤波器 $h(n)$ 的长度有关,随着 $h(n)$ 的长度的增大,重构效果改善趋于不明显。

为了取得更大的压缩比,一个直观的方法是提

高处理小波系数的阈值,让尽可能多的连续小波系数为零,为以后的编码创造条件。那么根据上面的分析,需要小波根据原信号的正则性特点满足一定的消失矩要求,使突变类信号随着尺度的增加而增大,噪声信号随尺度的增加而减小。

5 实验

5.1 实验 I:选择适当的小波消失矩

5.1.1 实验设计

现用一个实例来详细比较不同种类的小波,在不同消失矩的情况下,用于旋转机械振动信号压缩的效果。2008 年 12 月 25 日,中国石油东北某大型炼化公司某化工厂 EC301 透平压缩机组工作出现异常,经诊断为气流激振与轴表面划痕组合故障。图 2 为压缩机轴振动的时域波形图和频谱,采样频率为 5 120 Hz,采样点数为 1 024。

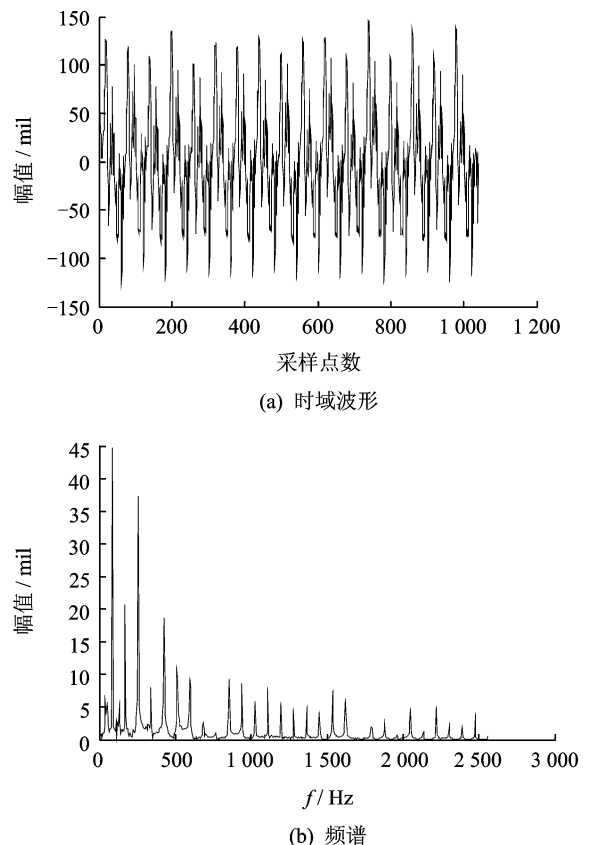


图 2 压缩机轴振动的时域波形和频谱

对图 2 所示振动信号进行小波压缩编码,具体过程如下。

1) 选择小波函数

在讨论最优小波的选择方法中,由于只有有限

支撑的小波可用于离散小波变换。所以,为了简化问题,只考虑 haar,db,sym 及 coif 四种紧支撑正交小波,一种双正交小波 biorNr. Nd 和一种非紧支撑截断小波 dmey。

2) 小波分解

对图 2 所示的轴振动信号进行小波分解,分解层数为 3 层,得到完整的子带小波系数。

3) 阈值压缩

选择阈值确定不同类型的小波系数,分配不同的比特量化。为了简单起见,考虑不分配比特给小于阈值的小波系数,即将幅值小于阈值的小波系数置零。阈值函数为 Donoho-Johnstone 提出的一致阈值确定模型^[7],如式(10)所示

$$T = \sigma \sqrt{2 \log_e n} \tag{10}$$

其中: σ 为噪声信号的均方差; n 为离散信号长度。

4) 系数编码

对剩余系数进行熵编码来降低数码率,实验采用 Huffman 编码。

5) 信号重构

信号重构过程为压缩过程的逆过程,并求出重构信号的频谱。

5.1.2 实验分析

从信号压缩的角度考虑,直观的想法当然希望选择的小波函数能在产生高压缩比的同时,保证信号高的重构信噪比。但同时也应该看到,在以图 2 为代表的复杂组合故障中,信号的高频部分包含了丰富的突变类信息。如何通过选择适当的小波消失矩,在满足一定压缩比的同时,完整地保留这些突变类故障信息,是首先要考虑的问题。

上述 6 种小波所得的不同峰值信噪比如表 1 所示,信噪比(Signal-to-noise ratio,简称 SNR)定义如下

$$SNR = 10 \times \log_{10} \frac{\sigma^2}{D} \tag{11}$$

其中: $\sigma^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N-1} (x_i - \bar{x})^2$; $D = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N-1} (x_i - \tilde{x}_i)^2$; $\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N-1} x_i$; x_i 为原始信号的离散值; \tilde{x}_i 为重构信号的离散值; \bar{x} 为原始信号的平均值。

重构的频谱如图 3~6 所示。

由上面 6 种不同小波在真实复杂故障振动信号压缩中实验比较发现,高消失矩对于振动信号高频部分的衰减是非常明显的。对于 db 和 sym 两种正交小波,高的消失矩可以使信号能量更多地集中于

表 1 一致阈值模型中各种小波的峰值信噪比表

小波消失矩	haar	db	sym	coif	dmey	biorNr. Nd
1	38.412			46.073		38.412
2		45.681	45.681	48.759		38.526
3		47.935	47.935	51.573		34.100
4		50.514	49.419	51.910		46.944
5		49.992	50.547	53.559		49.298
6		50.434	50.364		52.467	
7		52.038	51.927		53.678	
m					56.097	54.498

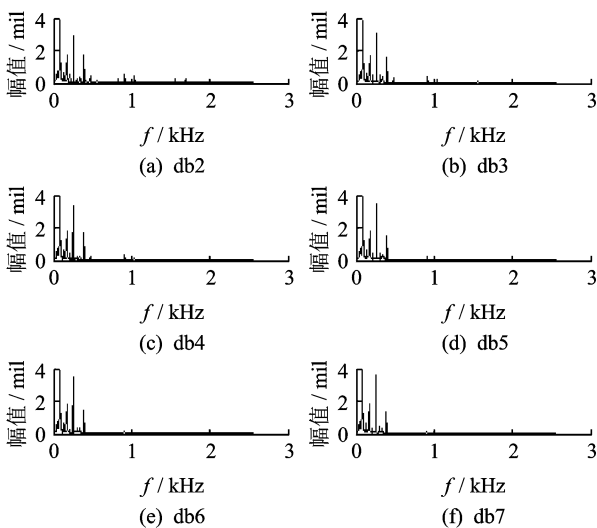


图 3 常用小波压缩重构频谱(db2~db7)

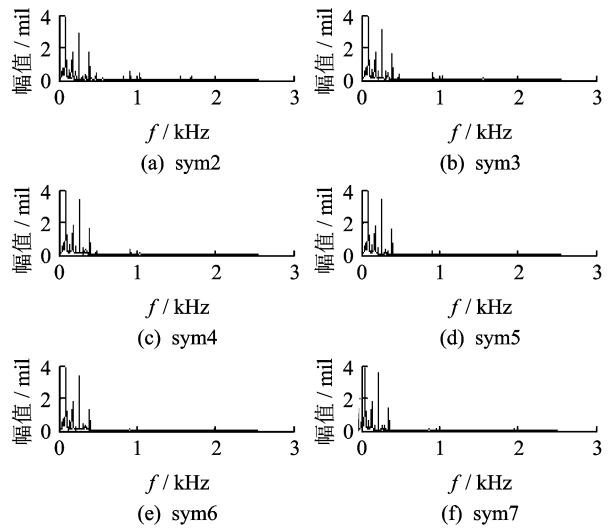


图 4 常用小波压缩重构频谱(sym2~sym7)

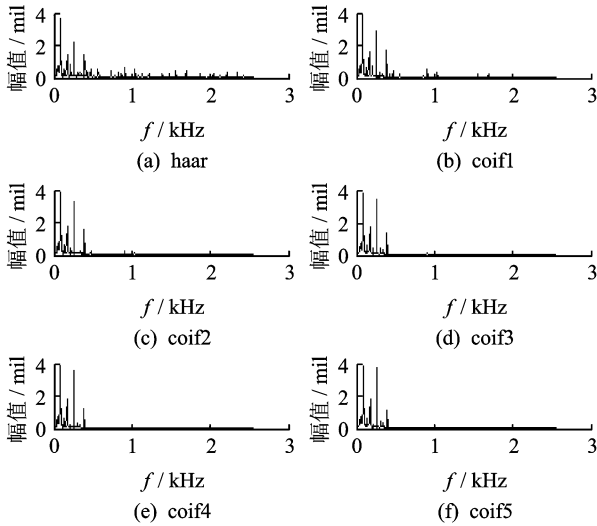


图5 常用小波压缩重构频谱(haar,coif1~coif5)

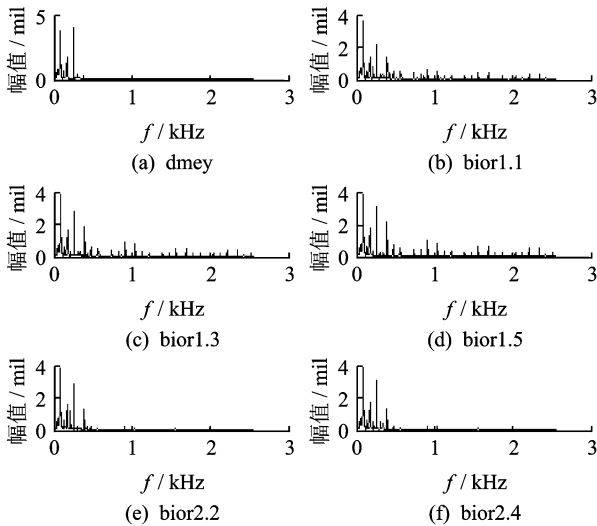


图6 常用小波压缩重构频谱(dmey,bior1.1~bior2.4)

小波分解的低频部分。此外对于正交情况,分解和重构的小波函数是完全相同的,高消失矩的小波同时也具有高的正则性,时域函数更加光滑,从而有效地提升了信号重构的信噪比。对于 coif 小波,虽然构建的方式与以上两种小波相同,但是其具有更宽的支撑长度,时域波形也更接近于对称,所以在相同消失矩的情况下具有更高的重构信噪比。同理,具有完全对称性的双正交小波具有更高的信噪比。但值得一提的是,对于双正交小波而言,选择高正则性的对偶重构小波同样有助于提高信噪比。

观察不同小波在不同消失矩情况下重构波形的频谱发现,高消失矩小波有效衰减高尺度系数的能力会使重构信号的高频分量损失严重(如 dmey 小波),这会使突变类信号所表征的故障无法识别,从而引起误诊断。所以不能片面地仅凭信噪比来选择高消失矩小波,从全面的表征旋转机械故障信息的

角度考虑,恰恰应该采用低消失矩的小波。

5.2 实验 II:选择适当的小波

从频谱图上看 haar,db2,sym2,coif1,bior1.1 和 bior1.3 六种低消失矩小波能够有效地保留振动信号的高频信息。通过使用不同的置零阈值来确定在使用以上小波进行振动信号压缩过程中,压缩比与重构信噪比之间的关系,进一步横向比较 6 种小波的压缩性能。

5.2.1 实验设计

仍然选用实验 I 的故障振动信号进行压缩,通过不断提高阈值,减少压缩后的剩余小波系数。对于压缩信号进行重构,并给出应用不同小波函数进行压缩后压缩比与重构信噪比之间的关系,绘制了关系曲线。文中采用的压缩比与信噪比定义如下。

压缩比为压缩后数据比特数占原始信号比特数的百分比。

信噪比(SNR)为

$$\text{SNR} = 10 \times \log_{10} \frac{\sigma^2}{D} \quad (12)$$

其中: $\sigma^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N-1} (x_i - \bar{x})^2$; $D = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N-1} (x_i - \tilde{x}_i)^2$; $\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N-1} x_i$; x_i 为原始信号的离散值; \tilde{x}_i 为重构信号的离散值; \bar{x} 为原始信号的平均值。

5.2.2 实验分析

图 7 给出了应用不同小波函数进行压缩后,压缩比与重构信噪比(SNR)之间的关系曲线。

由图 7 可以看出,在高压缩比的情况下(压缩比 > 45%),压缩阈值比较大,由于双正交小波同时具有对称性和线性相位,所以可在相同压缩比的情况下取得更大的信噪比。在双正交小波中,重构滤波器的长度对应着尺度函数的正则性,由本研究对于正则性的分析可知,高正则性的重构尺度函数能

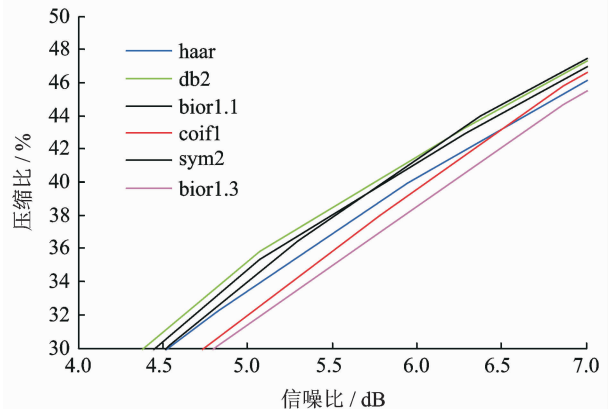


图7 典型低消失矩小波压缩比与重构信噪比关系曲线

在相同条件下减小重构误差,所以在高压缩比的情况下,bior1.3小波的效果最好。

随着压缩比的不断升高,haar小波因为同时具有正交性和对称性,所以取得了很好的重构信噪比。但是由于haar小波完全不具备光滑性,所以无法用于实际实际信号压缩,只能作为理论研究参考。双正交小波虽然子带信号之间有一定的相关冗余,但是总体效果依然与haar小波相近,所以综上所述,在复杂旋转机械振动信号的压缩过程中,应该尽量选择低分解消失矩、高重构正则性的双正交小波。

6 结束语

通过以上分析可以看出,恰当地选择小波基确实有助提高旋转机械振动信号的压缩性能。而小波基的选择需要从小波自身特点和振动信号特点两方面来考虑。小波函数的属性包括消失矩、正则性、正交性、对称性及紧支撑性等。离散小波变换要求小波具备紧支撑特性,而消失矩、正则性及对称性均有助于提高重构信噪比,正交性有助于提高压缩比。从旋转机械振动信号特点来分析,以周期信号为主的故障信号,应该选择高消失矩的小波,有助于在相同信噪比要求下,提高压缩比。以突变类信号为主的故障信号,应该选择低消失矩的小波,有助于保留完备的故障信息,而其中低分解消失矩,高重构正则性的双正交小波是相对适合的。

参 考 文 献

- [1] 徐敏强,张嘉钟,张国斌,等.基于小波变换的旋转机械振动信号数据压缩方法的研究[J].振动工程学报,2000,13(4):39-44.
Xu Mingqiang, Zhang Jiazhong, Zhang Guobin, et al. Method of data compressing for rotating machinery vibration signal based on wavelet transform[J]. Journal of Vibration Engineering, 2000,13(4):39-44. (in Chinese)
- [2] 吴长奇,于玉海,萧丽萍.结合矢量量化与远间隔预测的振动遥测信号压缩方法[J].传感技术学报,2002,6(2):120-123.
Wu Changqi, Yu Yuhai, Xiao Liping. Vibration telemetry signal compression method based on vector quantization and distant gap prediction[J]. Journal of Translucation Technology, 2002,6(2):120-123. (in Chinese)
- [3] 唐贵基,张杏娟,杜必强.旋转机械故障诊断中的振动

信号自适应分形压缩算法[J].振动、测试与诊断,2009,29(3):278-281.

Tang Guiji, Zhang Xingjuan, Du Biqiang. Adaptive fractal data compression algorithm for vibration signal of rotating machinery[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2009,29(3):278-281. (in Chinese)

- [4] 田慕玲,王晓玲.电机故障诊断中的小波分析方法及小波基选取[J].煤矿机械,2007(5):176-178.
Tian Muling, Wang Xiaoling. Wavelet analysis method applied in fault diagnosis of motor and selection of wavelet base[J]. Coal Mine Machinery, 2007(5):176-178. (in Chinese)
- [5] Donoho D L. Denoising by soft-thresholding[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1995,41(3):613-627.
- [6] 杨建国.小波分析及其工程应用[M].北京:机械工业出版社,2005:139-141.
- [7] Donoho D L, Johnstone J M. Ideal spatial adaptation by wavelet shrinkage[J]. Biometrika, 1994,81(3):425-428.
- [8] 潘泉.小波滤波方法及应用[M].北京:清华大学出版社,2005:125-127.
- [9] 侯新国,刘开培,魏建华.最佳小波包基改进软阈值的消噪方法及应用[J].振动、测试与诊断,2008,28(4):366-368.
Hou Xingguo, Liu Kaipei, Wei Jianhua. Application of improved soft threshold noise eliminating method based on optimal wavelet packet[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2008,28(4):366-368. (in Chinese)
- [10] 王新,朱高中.一种新型小波阈值法在信号消噪中的应用研究[J].高电压技术,2008,34(2):342-345.
Wang Xin, Zhu Gaozhong. Application of an improved wavelet threshold method in de-noising reduction[J]. High Voltage Engineering, 2008,34(2):342-345.
- [11] He Qiuyu, Quan Yusheng, Ma Yanwei. Anti-interference of PD using binary wavelet transform combined with birge massart strategy[J]. Proceedings of the Chinese Society of Universities for Electric Power System and Automation, 2007,34(4):115-117.
- [12] 郭彬彬,黄纯.基于小波包变换的电能质量扰动数据压缩[J].电力自动化设备,2005(11):34-37.
Guo Binbin, Huang Chun. Power quality disturbance data compression based on wavelet packet transform [J]. Electric Power Automation Equipment, 2005(11):34-37. (in Chinese)
- [13] Grgic S, Grgic M, Zovko-Cihlar B. Performance analysis of image compression using wavelets[J]. Industri-

- al Electronics, 2001,48(3):682-695.
- [14] Feng Y, Thanagasundram S, Schlindwein F S. Discrete wavelet-based thresholding study on acoustic emission signals to detect bearing defect on a rotating machine[C] // ICSV13-thirteenth International Congress on Sound and Vibration. Austria, Vienna: Thirteenth International Congress on Sound and Vibration Publisher, 2006:87-91.
- [15] 张国华. 小波分析与应用基础[M]. 西安:西北工业大学出版社,2006:120-122.
- [16] 臧玉萍,张德江,王维正. 小波分层阈值降噪法及其在发动机振动信号分析中的应用[J]. 振动与冲击,2009,28(8):57-60.
Zang Yuping, Zhang Dejiang, Wang Weizheng. Per-level threshold de-noising method using wavelet and its application in engine vibration analysis[J]. Journal of Vibration and Shock, 2009,28(8):57-60. (in Chinese)
- [17] 段礼祥,张来斌,王朝晖. 基于梯度阈值的往复压缩机振动信号小波包奇异值降噪[J]. 机械强度,2010,32(3):353-357.
Duan Lixiang, Zhang Laibin, Wang Zhaohui. Denoising of reciprocating compressor vibration signal using wavelet packet and singular value based on gradient threshold[J]. Journal of Mechanical Strength, 2010,32(3):353-357. (in Chinese)
- [18] 赵学智,林颖,陈文戈,等. 奇异性信号检测时小波基的选择[J]. 华南理工大学学报:自然科学版,2000,28(11):75-80.
Zhao Xuezhi, Lin Ying, Chen Wenge, et al. The choice of wavelet bases for singular signal detection [J]. Journal of South China University of Technology: Natural Science, 2000,28(11):75-80. (in Chinese)
- [19] Daubechies I. Ten lectures on wavelets[M]. Philadelphia: SIAM, 1992:232-233.
- [20] 简涛,何友,苏峰,等. 奇异信号消噪中小波消失矩的选取[J]. 雷达科学与技术,2006,4(1):3-7.
Jian Tao, He You, Su Feng, et al. Selection of vanishing moments of wavelet in denoising the signal with singularity[J]. Radar Science and Technology, 2006,4(1):3-7. (in Chinese)
- [21] Zhou Xiaobo. About some problems on wavelet regularity[J]. Acta Mathematica Sinica, 2002,45(6):1069-1078.
- [22] 周建鹏,杨义先. 任意阶正则线性相位小波滤波器的特征滤波器设计方法[J]. 通信学报,1998,19(2):27-32.
Zhou Jianpeng, Yang Yixian. Eigenfilter design method of arbitrary regular wavelet filters with linear phase [J]. Journal of China Institute of Communications, 1998,19(2):27-32. (in Chinese)
- [23] 赵海燕,应益容. 一类紧支小波的正则性的研究[J]. 空军工程大学学报:自然科学版,2000,1(4):59-62.
Zhao Haiyan, Ying Yirong. On the regularity of a kind of compactly supported wavelet [J]. Journal of Air Force Engineering University: Natural Science Edition, 2000,1(4):59-62. (in Chinese)
- [24] 屈稳太,诸静. 图像小波变换中的两个关键技术——滤波器的正则性与信号的边界处理[J]. 浙江大学学报:工学版,2003,37(2):59-63.
Qu Wentai, Zhu Jing. Two key technologies for image wavelet transform: the regularity of filters and the process of signal boundary [J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2003,37(2):59-63. (in Chinese)
- [25] 杨守志,何永滔. 高维紧支撑正交对称的小波[J]. 数学物理学报,2010,23(2):375-385.
Yang Shouzhi, He Yongtao. Multidimensional compactly supported orthogonal symmetric wavelets [J]. Acta Mathematica Scientia, 2010,23(02):375-385. (in Chinese)
- [26] 杨玉东,金魁. 对称小波变换用于非平稳信号检测和去噪[J]. 淮阴工学院学报,2007,16(3):44-48.
Yang Yudong, Jin Kui. On symmetry wavelet transformation applied to examine non-stable signal and remove noise [J]. Journal of Huaiyin Institute of Technology, 2007,16(3):44-48. (in Chinese)
- [27] 陈基明. 小波分析基础[M]. 上海:上海大学出版社,2002:51-52.
- [28] 刘鲁源,李士心,杨晔,等. 双正交小波在陀螺信号去噪中的应用[J]. 信号处理,2002,18(4):386-388.
Liu Luyuan, Li Shixin, Yang Yi, et al. The gyro signal processing through biorthogonal wavelet transform [J]. Signal Processing, 2002,18(4):386-388. (in Chinese)
- [29] 李弼程. 小波分析及其应用[M]. 北京:电子工业出版社,2003:55-60.



第一作者简介:翁浩,男,1984年6月生,博士研究生。主要研究方向为大型工业装备无线监测与诊断。曾发表《The research of optimal selection method for wavelet packet basis in compressing vibration signal of rolling bearing in fans and pumps》(《25th International Congress on Condition Monitoring and Diagnostic Engineering》2012)等论文。
E-mail:yyxyxt@sina.com