

DOI: 10.7652/xjtuxb201403017

改进的卷积型小波包分解及在故障诊断中的应用

田福庆, 罗荣, 李万, 丁庆喜
(海军工程大学兵器工程系, 430033, 武汉)

摘要: 针对卷积型小波包分解存在频带错位与频带重叠缺陷, 提出了一种改进的卷积型小波包分解算法。该算法通过交换偶数位置节点小波包分解后的两节点顺序来消除频带错位缺陷, 引入两算子分别从频域除去低、高频子带理想通带范围外的频率成分以消除频带重叠缺陷。由构造的故障信号进行仿真实验, 并使用某直升机中减速器疲劳实验的故障数据进行了验证。结果表明: 由于消除了卷积型小波包和内积型小波包分解算法中广泛存在的频率折叠、频带重叠和频带错位缺陷, 改造的卷积型小波包分解算法能更方便、更有效地提取隐藏在强噪声和其他强干扰背景下的故障特征信息, 从而为机械故障的诊断提供了一种强有力的分析手段。

关键词: 内积型小波包; 卷积型小波包; 频带错位; 频带重叠; 故障诊断

中图分类号: TH113.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2014)03-0089-07

Improved Convolution-Type Wavelet Packet Decomposition with Applications to Fault Diagnosis

TIAN Fuqing, LUO Rong, LI Wan, DING Qingxi

(Department of Weapon Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract: Aiming at frequency band derangement and overlap in convolution-type wavelet packet, an improved one is proposed. Exchanging the order of sub-nodes originated from father nodes sequenced in even serial numbers, the frequency band derangement is removed. Introducing two operators eliminating the frequencies outside the pass bands of low and high frequency sub-bands, the frequency band overlap is forced to be avoided. The simulated fault signals and endurance test datasets of a helicopter intermediate gearbox are respectively collected to certificate the improved convolution-type wavelet packet. The results show that the improved convolution-type wavelet packet enables to expediently and effectively detect the fault features submerged in strong interference owing to the elimination of frequency aliasing, frequency band overlap and derangement.

Keywords: inner product type wavelet packet; convolution-type wavelet packet; frequency band derangement; frequency band overlap; fault diagnosis

小波包分解是比小波分解更加精细的信号分解方法, 可以将振动信号各个故障调制频带分解到各个子带中, 从而凸显故障信息, 便于故障特征提取, 因此小波包分解是机械故障中一种应用非常广的信

号预处理方法^[1-3]。在机械故障诊断领域中, 通常采用基于内积运算的小波包变换, 并利用 Mallat 算法来实现其快速运算^[1-3]。由于 Mallat 算法中的下采样环节以及小波滤波器组为非理想频率特性, 使得

收稿日期: 2013-05-05。 作者简介: 田福庆(1962—), 男, 教授, 博士生导师。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50775218); 国家部委基金资助项目(4010801020202)。

网络出版时间: 2014-01-10

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20140110.1749.007.html>

内积型小波包在机械故障诊断中存在许多缺陷:①下采样环节使得各层频带的点数随分解层数的增加而越来越少,所含的信息量也不断减少,因此导致信号失真,不利于机械故障特征的提取^[4];②下采样环节会使信号采样率不够而产生频率折叠^[5],影响了分析结果的可读性;③下采样环节还会带来频带错位现象,给提取机械故障特征带来了不便^[6-7];④由于分解过程会产生能量泄漏^[8],因此分解结果存在频带重叠现象^[5]。

为了消除上述缺陷,更好地应用小波包进行机械故障诊断,目前的主要研究工作有:文献[9]构造出了滤波性能更为理想的巴特沃斯小波基,并用于信号降噪与内燃机故障诊断;文献[10-11]提出了没有下抽样环节的基于卷积运算的小波包及其快速算法,克服了 Mallat 算法存在频率混叠的固有缺陷。但是,由于小波滤波器组的非理想频率特性,分解过程仍然存在能量泄漏,分解结果依旧存在频带重叠。虽然卷积型小波包不存在下采样环节,但仍然存在频带错位缺陷。基于此,本文提出一种改进的卷积型小波包分解算法,成功地消除了卷积型小波包分解存在的频带重叠与频带交错缺陷。最后,通过仿真实验与实例分析验证了该算法在实际应用中的有效性。

1 卷积型小波包分解算法

设信号 $f(t) \in L^2(R)$, 且 $\{\mu_n(t) | n \in \mathbf{Z}\}$ 为正交小波包, 则 $\{2^{-j/2} \mu_m(2^{-j}t - k) | (k \in \mathbf{Z})\}$ 是小波包子空间 U_j^m 上的规范正交基, 并有小波包子空间 U_j^m 的投影及小波包系数分别为

$$\left. \begin{aligned} P_f(t) &= \sum_{p \in \mathbf{Z}} f_j^m(p) 2^{-j/2} \mu_m(2^{-j}t - p) \\ f_j^m(p) &= \langle P_f(t), 2^{-j/2} \mu_m(2^{-j}t - p) \rangle = \\ &\langle f(t), 2^{-j/2} \mu_m(2^{-j}t - p) \rangle \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式(1)为内积型小波包变换, 其快速算法为 Mallat 算法。由于 Mallat 算法中存在下采样环节, 使各分解序列长度递减, 因此给内积型小波包变换带来了如频率折叠、频带错位等缺陷。将 $f(t)$ 与 $\frac{1}{s} \psi\left(\frac{t}{s}\right)$ (记为 $\psi_s(t)$), 进行卷积运算的连续小波变换记为

$$W_s f(x) = f(t) * \psi_s(t) = \frac{1}{s} \int_R f(t) \psi\left(\frac{x-t}{s}\right) dt \quad (2)$$

文献[10-11]首次将式(2)推广至小波包变换, 并称为卷积型小波包变换。若 $\{2^{-j/2} \mu_m(2^{-j}t - k) |$

$(k \in \mathbf{Z})\}$ 为小波包子空间 U_j^m 上的规范正交基, 则信号 $f(t) \in L^2(R)$ 的卷积型小波包变换为

$$\begin{aligned} f_m^j(p) &= \frac{1}{2^j} \int_R f(t) \mu_m\left(\frac{p-t}{2^j}\right) dt \\ 0 &\leq j \leq S, \quad 0 \leq m \leq 2^S \end{aligned} \quad (3)$$

式中: S 为最大分解层数; m 为小波包节点序号。对式(3)进行傅里叶变换, 并由卷积定理得

$$\hat{f}_m^j(\omega) = \hat{f}(\omega) \hat{\mu}_m(2^j \omega) \quad (4)$$

式中: $\hat{f}(\omega)$ 为 $f(t)$ 的傅里叶变换。由式(4)可推得

$$\hat{f}_{2m}^{j+1}(\omega) = \hat{f}(\omega) \hat{\mu}_{2m}(2^{j+1} \omega) \quad (5)$$

根据小波包的定义有

$$\left. \begin{aligned} \mu_{2m}(t) &= 2^{1/2} \sum_{k \in \mathbf{Z}} h_0(k) \mu_m(2t - k); \quad \mu_m(t) | m \in \mathbf{Z} \\ \mu_{2m+1}(t) &= 2^{1/2} \sum_{k \in \mathbf{Z}} h_1(k) \mu_m(2t - k) \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

式中: $\mu_m(t)$ 为小波包; $h_0(k)$ 与 $h_1(k)$ 为小波滤波器组。由于式(6)中的 $\mu_m(2t - k)$ 实质是指 $\mu_m(2t - t_0)$ 对 t_0 离散取值得到的, 假设取值间隔为 T_s , 因此 $\mu_m(2t - k)$ 即为 $\mu_m(2t - nT_s)$ 。令 $t = 2^{-j}x$, 对式(6)进行傅里叶变换, 可得

$$\left. \begin{aligned} \hat{\mu}_{2m}(2^{j+1} \omega) &= 2^{-1/2} \sum_{n \in \mathbf{Z}} h_0(n) e^{-j2^j \omega n T_s} \hat{\mu}_m(2^j \omega) \\ \hat{\mu}_{2m+1}(2^{j+1} \omega) &= 2^{-1/2} \sum_{n \in \mathbf{Z}} h_1(n) e^{-j2^j \omega n T_s} \hat{\mu}_m(2^j \omega) \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

将式(7)代入式(4)、式(5), 得到

$$\hat{f}_{2m}^{j+1}(\omega) = 2^{-1/2} \sum_n h_0(n) e^{-j2^j \omega n T_s} \hat{f}_m^j(\omega) \quad (8)$$

将式(8)转换到时域, 得到

$$f_{2m}^{j+1}(k) = 2^{-1/2} \sum_n h_0(n) f_m^j(k - 2^j n) \quad (9)$$

同理

$$f_{2m+1}^{j+1}(k) = 2^{-1/2} \sum_n h_1(n) f_m^j(k - 2^j n) \quad (10)$$

式(9)、式(10)即为文献[10-11]推出的卷积小波包变换快速分解算法。从式(9)、式(10)可见, 卷积型小波包变换在迭代运算时并没有进行隔二抽一采样, 而只是对上一尺度的分解结果进行移位, 所以就克服了 Mallat 算法的频率折叠缺陷。

对式(9)、式(10)进行 z 变换, 得

$$\left. \begin{aligned} \hat{f}_{2m}^{j+1}(z) &= 2^{-1/2} \hat{f}_m^j(z) H_0(z^{2^j}) \\ \hat{f}_{2m+1}^{j+1}(z) &= 2^{-1/2} \hat{f}_m^j(z) H_1(z^{2^j}) \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

$\hat{f}_{2m}^{j+1}(z)$ 即为 $\hat{f}_m^j(z)$ 通过滤波器 $2^{-1/2} H_0(z^{2^j})$ 后的输出, $\hat{f}_{2m+1}^{j+1}(z)$ 即为 $\hat{f}_m^j(z)$ 通过滤波器 $2^{-1/2} H_1(z^{2^j})$ 后的输出。

2 改进的卷积型小波包分解算法

由于小波滤波器组的非理想频率特性以及在分解过程中存在隔点采样过程,因此内积型小波包的分解结果中存在频带错位、频带重叠和频率折叠的缺陷。卷积型小波包在分解过程中,由于没有进行隔点采样,因此其分解结果就不会出现频率折叠的缺陷,但卷积型小波包分解仍存频带错位和频带重叠的缺陷。

2.1 频带错位及其消除算法分析

假设对 2^0 尺度进行分解的小波滤波器组为 $2^{-1/2}H_0(\omega)$ 、 $2^{-1/2}H_1(\omega)$,由式(11)可知,对 2^j 尺度分解的小波滤波器组为 $2^{-1/2}H_0(2^j\omega)$ 、 $2^{-1/2}H_1(2^j\omega)$ 。因此,卷积型小波包在对 2^j 尺度分解时使用的滤波器周期是在对 2^0 尺度分解时使用的滤波器周期的 $1/2^j$ 倍。又因为 $|H_0(\omega)|$ 、 $|H_1(\omega)|$ 均是以 2π 为周期的偶函数,因此可得到 $H_0(2^j\omega)$ 和 $H_1(2^j\omega)$ 频率特性如下。

令 $n=0,1,2,\dots,j-1,j\geq 1$,当 $\omega \in \left[\frac{\pi}{2^{j+1}}(4n), \frac{\pi}{2^{j+1}}(4n+1)\right]$ 时, $H_0(2^j\omega)$ 为低通滤波器;当 $\omega \in \left[\frac{\pi}{2^{j+1}}(4n+1), \frac{\pi}{2^{j+1}}(4n+2)\right]$ 时, $H_1(2^j\omega)$ 为高通滤波器;当 $\omega \in \left[\frac{\pi}{2^{j+1}}(4n+2), \frac{\pi}{2^{j+1}}(4n+3)\right]$ 时, $H_1(2^j\omega)$ 为低通滤波器;当 $\omega \in \left[\frac{\pi}{2^{j+1}}(4n+3), \frac{\pi}{2^{j+1}}(4n+4)\right]$ 时, $H_0(2^j\omega)$ 为高通滤波器。

因此,对 2^j 尺度进行分解的小波低通滤波器 $H_0(2^j\omega)$ 在对该尺度偶数节点分解时呈现高通滤波特性,分解得到的子带实为该节点的高频子带,却位于低频子带的位置上。小波高通滤波器 $H_1(2^j\omega)$ 在对该尺度偶数节点分解时呈现低通滤波特性,分解得到的子带实为该节点的低频子带,却位于高频子带的位置上,由此造成了卷积型小波包分解的频带错位现象。所以,卷积型小波包分解发生频带错位的根本原因是滤波器的频率特性在偶数节点小波包分解时发生了改变。由此可见,只需交换偶数节点小波包分解后的两节点的顺序,即可消除卷积型小波包分解中的频带错位现象。因此,本文得到如下的消除卷积型小波包频带错位缺陷的算法:对于第 2^j 尺度的序号为 n (n 从 0 开始)小波包节点 U_j^n ,如果 n 为奇数,将分解后的 U_{j+1}^{2n} 和 U_{j+1}^{2n+1} 交换位置;如

果 n 为偶数, U_{j+1}^{2n} 和 U_{j+1}^{2n+1} 的位置保持不变。

以 db10 小波为例,当尺度 j 为 0、1 和 2 时, $H_0(2^j\omega)$ 与 $H_1(2^j\omega)$ 的频率响应如图 1 所示。从图 1 中可知: $H_0(2\omega)$ 在 $[0, \pi/4]$ 区间表现为低通滤波特性,而在 $[3\pi/4, \pi]$ 频率区间表现为高通滤波特性; $H_1(2\omega)$ 在 $[\pi/4, \pi/2]$ 区间表现为高通滤波特性,而在 $[\pi/2, 3\pi/4]$ 频率区间表现为低通滤波特性。对于 2^1 尺度上的 2 个小波包节点,其通带范围分别是 $[0, \pi/2]$ 和 $[\pi/2, \pi]$,当用 $H_0(2\omega)$ 和 $H_1(2\omega)$ 对通带在 $[0, \pi/2]$ 的小波包节点进行分解时,分解后两个子节点的通带范围分别为 $[0, \pi/4]$ 和 $[\pi/4, \pi/2]$,频带顺序正确。当对通带在 $[\pi/2, \pi]$ 的小波包节点进行分解时,由于 $H_0(2\omega)$ 和 $H_1(2\omega)$ 的滤波特性互换了, $H_0(2\omega)$ 分解得到的子带实为高频子带,其通带范围为 $[3\pi/4, \pi]$,却位于低频子带的位置上, $H_1(2\omega)$ 分解得到的子带实为低频子带,其通带范围为 $[\pi/2, 3\pi/4]$,却位于高频子带的位置上,因此频带发生了错位。

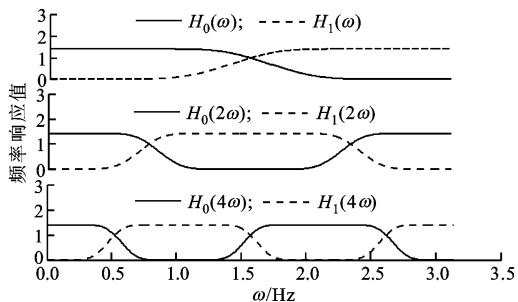


图1 db10 小波滤波器的频率特性

2.2 频带重叠及消除算法分析

由于小波滤波器组为非理想频率特性(见图1),因此卷积型小波包分解过程中也必然会产生能量泄漏。能量泄漏使得分解的各频带含有其相邻频带的部分频率,即为频带重叠现象。频带重叠使得卷积型小波包不能将信号既无交叠又无遗漏地分解到相互正交的频带,有可能会使一些频带内较强的故障特征掩盖其邻近频带的微弱故障特征,不利于微弱故障特征的提取。因此,本文引入 2 个算子 D 和 G ,得到了消除卷积型小波包频带重叠缺陷的算法。设在 2^j 尺度的第 n 个小波包节点为 U_j^n ,分解得到的低频频带为 U_{j+1}^{2n} (理想通带范围为 $[2nf_s/2^{j+2}, (2n+1)f_s/2^{j+2}]$)、高频频带为 U_{j+1}^{2n+1} (理想通带范围为 $[(2n+1)f_s/2^{j+2}, (2n+2)f_s/2^{j+2}]$), $f(n)$ 在 U_{j+1}^{2n} 、 U_{j+1}^{2n+1} 的系数分别为 $f_{2n}^{j+1}(k)$ 、 $f_{2n+1}^{j+1}(k)$,则算子 D 、 G 的输出计算公式分别如下

$$F_{2n}^{j+1}(K) = \begin{cases} 2 \sum_{k=0}^{N-1} f_{2n+1}^{j+1}(k) e^{-\frac{j2\pi kK}{N}}, & \lfloor Nn/2^{j+1} \rfloor \leq K \leq \lfloor N(2n+1)/2^{j+2} \rfloor \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (12a)$$

$$\tilde{f}_{2n}^{j+1}(k) = \text{Re}\left(\frac{1}{N} \sum_{K=0}^{N-1} F_{2n}^{j+1}(K) e^{j2\pi kK/N}\right) \quad (12b)$$

$$F_{2n+1}^{j+1}(K) = \begin{cases} 2 \sum_{k=0}^{N-1} f_{2n+1}^{j+1}(k) e^{-\frac{j2\pi kK}{N}}, & \lfloor N(2n+1)/2^{j+2} \rfloor \leq K \leq \lfloor N(n+1)/2^{j+1} \rfloor \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (13a)$$

$$\tilde{f}_{2n+1}^{j+1}(k) = \text{Re}\left(\frac{1}{N} \sum_{K=0}^{N-1} F_{2n+1}^{j+1}(K) e^{j2\pi kK/N}\right) \quad (13b)$$

式中: N 为 $f(n)$ 和各频带信号的长度; $\tilde{f}_{2n}^{j+1}(k)$ 为算子 D 的输出, 即为消除频带重叠后的低频子带; $\tilde{f}_{2n+1}^{j+1}(k)$ 为算子 G 的输出, 即为消除频带重叠后的高频子带。由式(12)、式(13)可知, 在卷积型小波包每一次分解过程中, 算子 D 从频域除去低频子带理想通带范围外的频率成分, 仅保留理想通带范围内的频率成分, 而算子 G 从频域除去高频子带理想通带范围外的频率成分, 仅保留理想通带范围内的频率成分。因此, 算子 D 、 G 能消除卷积型小波包分解存在的频带重叠缺陷, 成功抑制能量泄漏带来的不利影响。综上所述, 消除频带错位与频带重叠的改进卷积型小波包分解算法如图 2 所示。

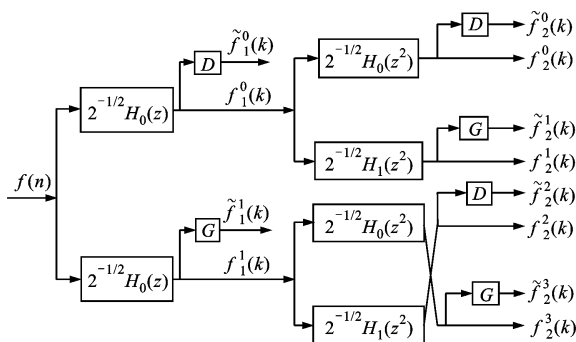


图2 改进的卷积型小波包分解算法

3 仿真实验

为验证改进的卷积型小波包分解算法在实际应用中的优势, 构造的故障仿真信号如下

$$y(t) = 2\sin(10\pi t) + 1.4\sin(20\pi t) + (8 + 1.5\cos(10\pi t) + \cos(20\pi t))\sin(280\pi t) + (5 + \cos(10\pi t) + 0.7\cos(20\pi t))\sin(560\pi t) +$$

$$\sum_{i=0}^9 (0.05e^{-50(t-0.1i)})\sin(920\pi(t-0.1i)) \quad (14)$$

式中用 2 倍频信号模拟低频转速信号(转速为 5 Hz), 用多载波调幅信号模拟齿轮故障信号(啮合频率为 140 Hz), 用等间隔的微弱冲击信号模拟轴承故障信号(故障特征频率为 10 Hz)。对此信号以 1 024 Hz 的采样率采样 1 024 点, 如图 3 所示。

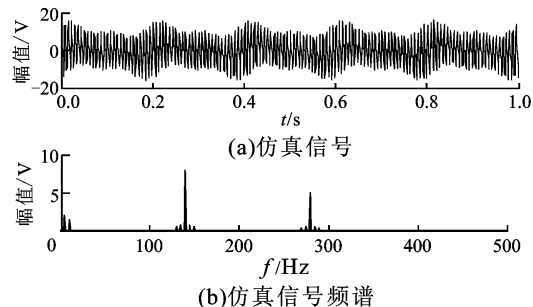


图3 故障的仿真信号及其频谱

由式(14)可以看出, 等间隔的微弱冲击信号幅值小, 对整个信号的能量贡献小, 因此在图 3 中很难发现其存在, 所以傅里叶分析是发现不了此信号的。采用改进的卷积型小波包分解算法对仿真信号进行 2 层分解, 所用小波为 db10 小波, 分解结果如图 4 所示。由图 4 知, 改进的卷积型小波包将模拟转速信号、模拟齿轮故障信号、模拟轴承故障信号无频带错位、无频带重叠、无频率折叠地分解到了相互正交的频带, 清晰完美地提取到了低频段的 2 倍频振动特征, 齿轮故障信号的转频调制 1、2 倍啮合频率振动特征以及轴承故障信号的等间隔冲击振动特征。

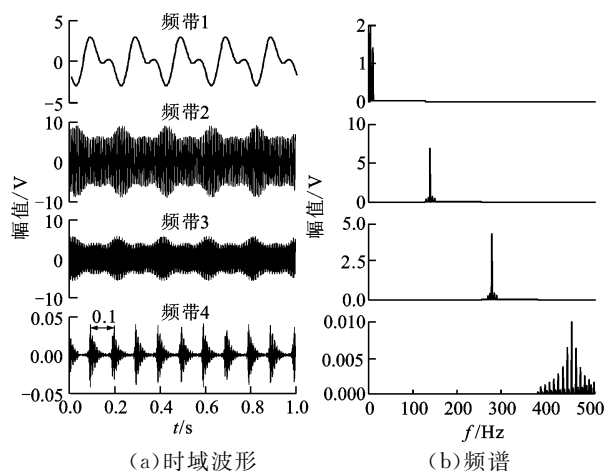


图4 仿真信号改进的卷积型小波包分解结果

改进的卷积型小波包分解得到的频带 2、4 包络及包络谱如图 5 所示。由图 5 可知, 改进的卷积型小波包分解得到的频带 2、4 包络非常完美光滑, 且包络谱中特征频率相当清晰, 表明改进的卷积型小

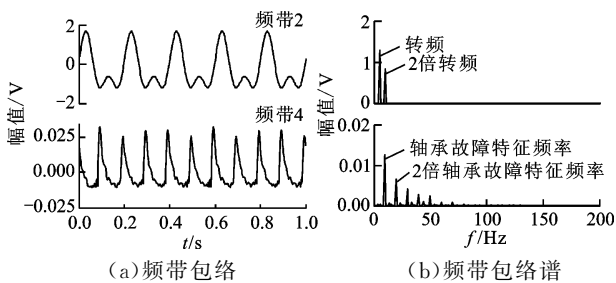


图 5 仿真信号改进的卷积型小波包分解各频带包络及包络谱

波包算法已清晰地提取到了模拟齿轮故障与轴承故障的包络谱特征。

分别采用卷积型小波包和内积型小波包对仿真信号进行 2 层分解,所用小波都为 db10,消除频带错位并重构(重构仅对内积型小波包分解而言)后的分解结果分别如图 6 和图 7 所示(仅显示频带 1、4)。由图 6 可知,卷积型小波包分解结果中同样没有出现频率折叠,但出现了严重的频带重叠现象,导致提取振动特征明显不如图 4 清晰,特别是频带 4 混进了较大的模拟齿轮故障信号,以致完全掩盖了该频带的模拟轴承故障信号,所以卷积型小波包没能成功提取模拟轴承故障的等间隔微弱冲击振动特征。由图 7 可知,内积型小波包分解各频带中不仅出现了频带重叠,还出现了明显的虚假频率,所以内积型小波包各频带提取振动特征同样明显没有图 4 清晰,而且其也同样没有提取到模拟轴承故障的等间隔微弱冲击振动特征。

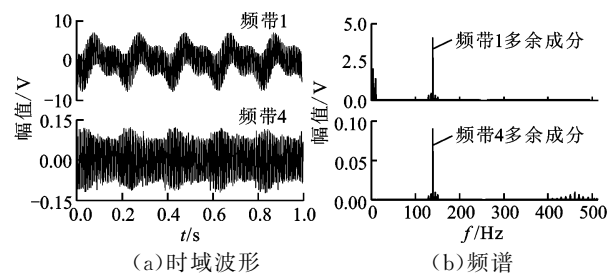


图 6 仿真信号卷积型小波包分解结果

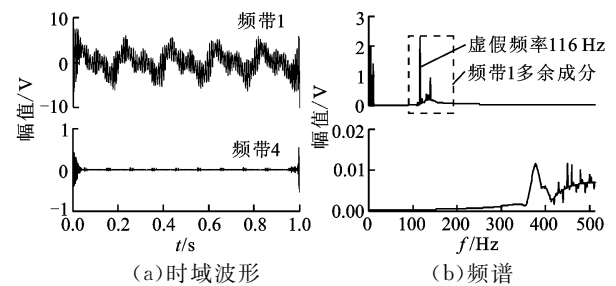


图 7 仿真信号内积型小波包分解结果

卷积型小波包和内积型小波包分解得到的频带

2、4 的包络及包络谱分别如图 8、图 9 所示。对比图 5、图 8 可知,卷积型小波包分解得到的各频带包络较为粗糙,并且频带 4 混入了较多的啮合频率及其边频带,以致该频带的包络谱仅在转频及其 2 倍频存在峰值,因此轴承故障的包络谱特征已完全被齿轮故障的包络谱特征所掩盖。对比图 5、图 9 可知,内积型小波包分解后频带 2、4 包络非常粗糙,并且包络谱出现了明显的虚假谱峰,同样没有在轴承故障特征频率及其倍频处出现明显峰值。

综上所述,改进的卷积型小波包算法提取的时域、频域和包络谱故障特征都明显优于其他两种小波包,所以改进的卷积型小波包应用于故障诊断比其他 2 种小波包更有优势。

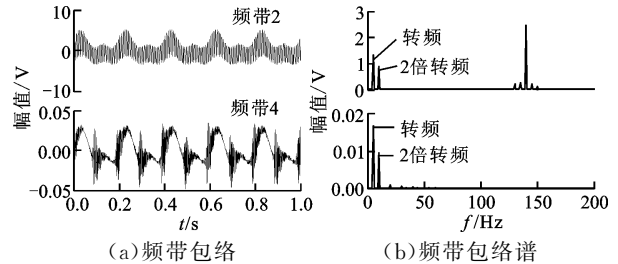


图 8 仿真信号卷积型小波包分解各频带包络及包络谱

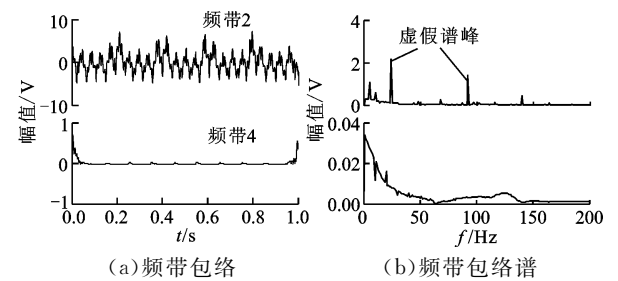


图 9 仿真信号内积型小波包分解各频带包络及包络谱

4 应用实例

故障数据来源于某直升机中减速器的疲劳试验。该中减速器主动轮 25 齿,从动轮 31 齿。试验结束后,发现主动轮上一齿附近出现了疲劳裂纹及剥落。在试验过程中,主动转速为 68.5 Hz,采样率为 100 kHz。这里选用安装在主动轮附近传感器采集的信号进行分析,如图 10a 所示。由于原信号采样率较高,并且从图 10a 可知,原始信号频谱在 10 kHz 的高频分量没有齿轮的啮合频率成分,因此这里首先对原始信号进行 5 倍降采样(见图 10b)。从图 10b 可知,故障信号时域波形出现了故障冲击,但从图中还难以确定冲击发生的周期,其频谱的主要频率成分为啮合频率及其 2、3 倍谐波,且在啮合频率及其 2、3 倍谐波两侧出现了些不对称的边频

带,这些说明齿轮发生了故障。相对于啮合频率及其谐波的幅值,边频带的幅值相当微弱,并且夹杂有一定的噪声,因此从频谱图上难以确定其间隔。

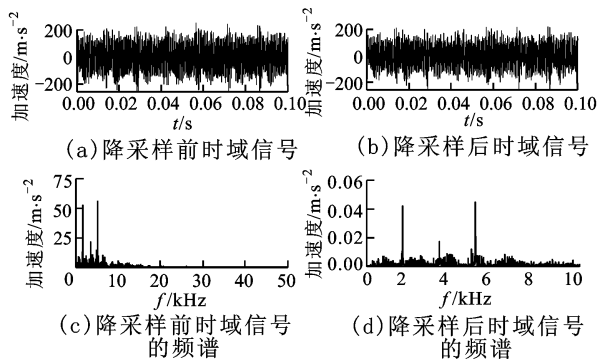


图10 主动轮故障信号

为提取到清晰的故障特征信息,采用改进的卷积型小波包对原始信号进行2层分解,所选小波为db10,分解结果如图11所示。由图11可知,改进的卷积型小波包将齿轮的啮合频率及其2、3倍频连同它们各自的故障调制边频带分离到了相互正交的频带中,且无频带错位、无频带重叠、无频率折叠。因此,频带1~3时域图中均出现了非常明显的间隔 T 为0.015 s(即对应故障齿轮旋转频率68.5 Hz)的等间隔故障冲击。

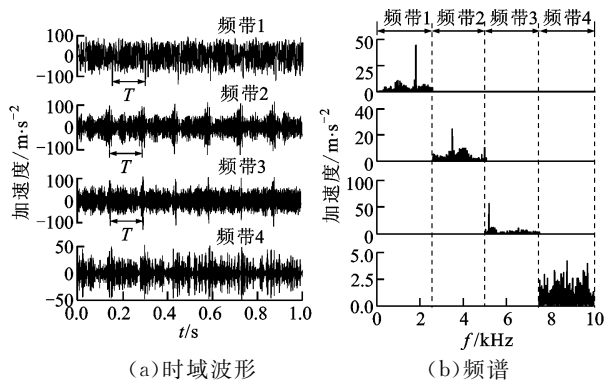


图11 故障信号改进的卷积型小波包分解结果

分别采用卷积型小波包和内积型小波包对原始信号进行2层分解,所用小波仍为db10小波,消除频带错位并重构(重构仅对内积型小波包分解)后的分解结果分别如图12、图13所示(仅显示频带1、2)。由图12可知,卷积型小波包分解结果不存在虚假频率,但卷积型小波包并没有将各个啮合频率及其故障调制边频带完美地剥离开来,各个频带存在一定的频带重叠,造成其提取的故障特征明显没有图11清晰。由图13可知,内积型小波包不仅没有将各个啮合频率及其故障调制边频带完美地剥离开来,而且各个频带还产生了虚假频率,这对故障特征

提取是相当不利的,因此其提取的故障特征同样明显没有图11清晰。

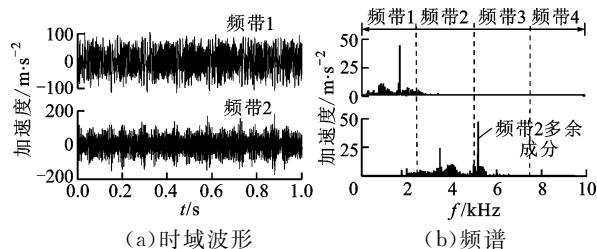


图12 故障信号卷积型小波包分解结果

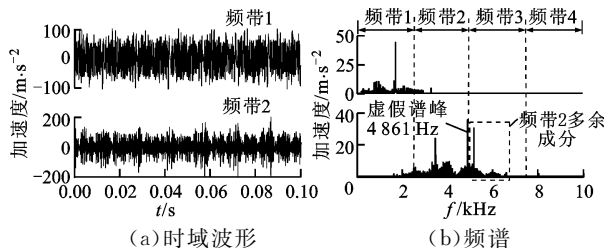


图13 故障信号内积型小波包分解结果

选择3类小波包分解结果的频带2进行解调分析,解调结果如图14所示。对比图14a、图14b和图14c可知,卷积型小波包和内积型小波包分解得到的频带2包络谱在故障齿轮转频及其倍频处也出现明显的峰值,但是图14a在故障齿轮转频及其倍频处的峰值最为清晰,特别是在故障齿轮转频的高次倍频处。这说明改进的卷积型小波包提取的包络谱故障特征好于另外2种小波包。

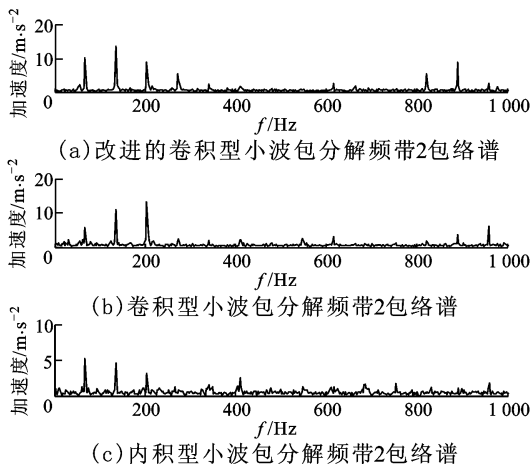


图14 故障信号不同小波包分解结果包络谱比较

5 结论

本文提出了一种改进的卷积型小波包分解算法,该算法通过交换偶数位置节点小波包分解后的两节点顺序来消除频带错位现象,通过引入两算子分别从频域强制性除去低、高频子带理想通带范围

外的频率成分来消除频带重叠现象。因此,本文算法克服了现有小波包分解算法中广泛存在频率折叠、频带重叠以及频带错位等缺陷,能更有效地提取隐藏在强噪声和其他强干扰中的微弱故障特征,在机械故障特征提取中具有显著优势。

参考文献:

- [1] FAN Xianfeng, MING J Z. Gearbox fault detection using Hilbert and wavelet packet transform [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2006, 20(4): 966-982.
- [2] YEN G G, LIN K C. Wavelet packet feature extraction for vibration monitoring [J]. IEEE Transactions on Electronics, 2000, 47(3): 650-667.
- [3] NIKOLAOU N G, ANTONIADIS I A. Rolling element bearing fault diagnosis using wavelet packet [J]. NDT&E International, 2000, 35(3): 197-205.
- [4] 陈敬龙, 张来斌, 段礼祥, 等. 基于提升小波包的往复压缩机活塞-缸套磨损故障诊断 [J]. 中国石油大学学报, 2011, 35(1): 130-145.
CHEN Jinlong, ZHANG Laibing, DUAN Lixiang, et al. Diagnosis of reciprocating compressor piston-cylinder liner wear fault based on lifting scheme packet [J]. Journal of China University of Petroleum, 2011, 35(1): 130-145.
- [5] YANG Jianguo, PARK S T. An anti-aliasing algorithm for discrete wavelet transform [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2003, 17(5): 945-954.
- [6] 傅勤毅, 傅俭毅, 王峰林. 一种无频带错位的小波包算法 [J]. 振动工程学报, 1999, 12(3): 423-428.
FU Qinyi, FU Jianyi, WANG Fenglin. Wavelet pack-

ets algorithm without frequency band derangement [J]. Journal of Vibration Engineering, 1999, 12(3): 423-428.

- [7] 傅勤毅, 章易程, 应力军. 滚动轴承故障特征的小波提取方法 [J]. 机械工程学报, 2001, 37(2): 30-32.
FU Qinyi, ZHANG Yicheng, YING Lijun. Extraction of failure character signal of rolling element bearings by wavelet [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2001, 37(2): 30-32.
- [8] PENG Z K, JACKSON M R, RONGGONG J A. On the energy leakage of discrete wavelet transform [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2009, 23(2): 330-343.
- [9] 李富才, 董丽静, 何正嘉. 巴特沃斯小波构造及其故障诊断应用研究 [J]. 声学学报, 2003, 28(6): 550-554.
LI Fucui, DONG Lijing, HE Zhengjia. Research on construction of Butter Worth wavelet and its application in fault diagnosis [J]. Acta Acustica, 2003, 28(6): 550-554.
- [10] 赵学智, 陈统坚, 彭永红, 等. 卷积型小波包变换及其快速算法 [J]. 信号处理, 2002, 18(6): 543-546.
ZHAO Xuezhi, CHEN Tongjian, PENG Yonghong. The transformation of convolution type of wavelet packet and its fast algorithm [J]. Signal Process, 2002, 18(6): 543-546.
- [11] ZHAO Xuezhi, YE Bangyan. Convolution wavelet packet transform and its applications to signal processing [J]. Digital Signal Processing, 2010, 20(5): 1352-1364.

(编辑 管咏梅)

(上接第 53 页)

- [5] VELRAJ R, SEENIRAJ R V, HAFNER B, et al. Experimental analysis and numerical modeling of inward solidification on a finned vertical tube for a latent heat storage unit [J]. Solar Energy, 1997, 60(5): 281-290.
- [6] FUKAI J, HAMADA Y, MOROZUMI Y, et al. Improvement of thermal characteristics of latent heat thermal energy storage units using carbon-fiber brushes: experiments and modeling [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2003, 46(23): 4513-4525.
- [7] 李文强, 屈治国, 陶文铨. 金属泡沫内固-液相变数值模拟研究 [J]. 工程热物理学报, 2013, 34(1): 141-144.
LI Wenqiang, QU Zhiguo, TAO Wenquan. Numerical study of solid-liquid phase change in metallic foam [J].

Journal of Engineering Thermophysics, 2013, 34(1): 141-144.

- [8] ZHAO C Y, WU Z G. Heat transfer enhancement of high temperature thermal energy storage using metal foams and expanded graphite [J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2011, 95(2): 636-643.
- [9] MICHELS H, PITZ-PAAL R. Cascaded latent heat storage for parabolic trough solar power plants [J]. Solar Energy, 2007, 81(6): 829-837.
- [10] ACEM Z, LOPEZ J, BARRIO E P. $\text{KNO}_3/\text{NaNO}_3$ -graphite materials for thermal energy storage at high temperature: Part I Elaboration methods and thermal properties [J]. Applied Thermal Engineering, 2010, 30(13): 1580-1585.

(编辑 荆树蓉)