

DOI : 10.3901/JME.2014.17.077

机械故障诊断的衍生增强离散解析小波分析框架*

陈彬强¹ 张周锁² 訾艳阳² 何正嘉^{2,3}

(1. 厦门大学物理与机电工程学院 厦门 361005;

2. 西安交通大学机械工程学院 西安 710049;

3. 西安交通大学机械集成制造系统国家重点实验室 西安 710049)

摘要：小波变换被称为“数学显微镜”，它对机械信号的多尺度分析在机械设备状态监测和故障诊断领域发挥着重要的作用。然而传统二进小波变换在工程应用中存在一些显著的不足，如平移敏感性、小波尺度能量泄漏、固定的二进“频率-尺度”划分网格等。尤其是后者使得经典小波变换对处于二进网格过渡带的特征分析中产生不可避免的“盲区”。基于此，提出一种基于过完备小波紧框架的新式“时间-尺度”分析方法-衍生增强离散解析小波分析框架。该小波分析框架基于双树复小波变换进行构造，通过合理地选择双树复小波基函数，并将之应用于增广树形迭代滤波器组中生成近似解析小波包变换，通过对近似解析小波包变换的分析结果进行子空间重排和小波包尺度空间交叉结合，构造伪二进小波包隐框架。在多尺度分解的意义下，所提出的衍生增强离散解析小波分析框架(近似解析小波框架和伪二进小波包隐框架)很好地改进了经典小波存在时频表达能力方面的限制，有效地移动了小波尺度的中心频率，实现了自顶向下、多中心连续细化的“频率-尺度”分析网格。将之应用于的带钢精轧机的微弱故障特征提取中，验证了所提出方法对于经典小波分析方法的优越性。

关键词：机械故障诊断；双树复小波变换；解析小波框架；增广树形滤波器组；平移不变性

中图分类号：TH17

Novel Ensemble Analytic Discrete Framelet Expansion for Machinery Fault Diagnosis

CHEN Binqiang¹ ZHANG Zhousuo² ZI Yanyang² HE Zhengjia^{2,3}

(1. School of Physics and Mechanical & Electrical Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005;

2. School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049;

3. State Key Laboratory for Manufacturing Systems Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049)

Abstract : As the celebrated “mathematical scope”, the multi-resolution analyzing capacity of wavelet transform (WT) plays an important role in condition monitoring and fault diagnosis of mechanical equipment. However, it has proven that the effectiveness of WT is hampered by several negative factors, such as shift-sensitiveness, significant energy leakage, and the fixed dyadic “frequency-scale” paving. Especially, the dyadic “frequency-scale” paving creates inevitable deficiency in identifying mechanical signatures located in transition areas of adjacent wavelet scales. A novel “time-scale” analysis methodology, named as derived ensemble analytic framelet (DEAF), based on overcomplete wavelet tight frame, is proposed. The DEAF is developed based on the existing dual tree complex wavelet transform (DTCWT). The DEAF starts from a selected DTCWT basis, and combines it with a hybrid augmented tree-structured filter-bank, which results in quasi analytic wavelet packet decomposition (QAWPD). With the results of QAWPD, an ensemble wavelet packet generating strategy is applied such that an unprecedented implicit wavelet packet tight frame (IWPTF) containing pseudo dyadic wavelet packets is obtained. With the combination of QAWPD and IWPTF, the proposed DEAF can be derived which possesses the “frequency-scale” paving characterized by continued time-frequency refinement of analysis centers. The proposed technique is applied to the mechanical signature analysis of an engineering application to validate its superiority compared with the existing methods.

* 国家自然科学基金(51275382)和国家科技重大专项(2010ZX04014-016, 2011ZX04003-021)资助项目。20130908 收到初稿, 20140418 收到修改稿

Key words : mechanical fault diagnosis ; dual-tree complex wavelet transform ; analytic framelet expansion ; augmented tree-structured filter-bank ; translation invariance

0 前言

小波分析理论的创立是对经典傅里叶分析理论的突破式进展,引领了信号处理领域中“时间-频率分析”向“时间-尺度分析”的理念革新^[1-3]。离散小波变换(Discrete wavelet transform, DWT)在小波分析理论中的地位恰似快速傅里叶变换(Fast Fourier transform, FFT)之于经典傅里叶分析理论^[1,3]。在工程应用方面,DWT 的出现使得机械设备的故障诊断、健康监测和可靠性评估领域能够有效且快速地处理动态响应信号中非平稳和暂态性的早期和微弱故障特征,提高了相关领域的工程实用性和普适性。

过去二十年中,离散小波变换已经成功地应用于复杂机电设备的齿轮、轴承、转子、电动机、液压马达等关键机械零部件的异常状态监测与故障特征提取中,并取得杰出成就^[2,4-7]。然而工程实践也不断考验着以 Daubechies(DB)规范正交基为代表的 DWT 在机械故障诊断一般应用和特定领域的适用程度。为了改进小波基在正交性、线性相位特性、正则行、平移不变性和能量泄漏效应^[8-9]的问题,先后出现了 DB 正交、Symmelet、Coiflet、第二代小波簇(提升实现)^[10]、小波包变换、多小波(MW)^[11]和双树复小波(Dual tree complex wavelet transform, DTCWT)等构造实例^[12-13]。然而这些方法任没有彻底解决 DWT 中存在的问题,尤其在改善 DWT 中的固定“二进制频率-尺度”划分网格(Dyadic frequency-scale paving, DFSP)方面乏善可陈。最近出现了双密度小波变换、高密度小波变换、双密度双树复小波变换、分数尺度伸缩小波变换等新进展,但它们实质上只是将 DFSP 转换为其他特定的非二进制网格,难以适应于灵活刻画机械信号中复杂时频特征的关键问题^[5-6,14]。虽然如此,可以发现其中蕴含的转机:这些小波变换实际上放弃了正交性和临界采样等强制约束,通过结合基于内积相似匹配原理的框架理论和基于时频局部化原理的小波多分辨分析理论构造新型的小波紧框架展开方法。

基于这种启发,本文研究了衍生增强离散解析小波分析框架(Derived ensemble analytic framelet, DEAF)及其构造实例。该实例的构造理论着眼于系统且整体地移动二进小波包尺度的中心频率,使其定位于 DFSP 的过渡带中心位置,从而构造伪二进制小波包隐框架,以有效弥补经典小波包在 DEAF

过渡带区特征提取能力的不足。为了兼顾构造结果的小波基本性质(正交性、平移不变性、时频局部化能力)和框架冗余度(时间和空间)复杂度,采用双树复小波变换作为 DEAF 的构造原型。

在 DEAF 的构造流程中,首先对 DTCWT 的双分支二进滤波器组结构进行增广混合滤波器组改造,以模块化分离设计方法获得近似解析的双树复小波包变换(Quasi analytic wavelet packet transform, QAWPT);其次进行隐小波包尺度的生成,通过 QAWPT 分解、小波包尺度重排和子空间交叉组合等三步骤构造伪二进制小波包隐框架(Implicit wavelet packet tight frame, IWPTF),最后结合所构造的 QAWPT 和 IWPTF,形成最终的 DEAF。

DEAF 不仅继承了 DTCWT 的诸多优良性质,同时对信号的“频率-尺度”平面形成了自顶向下,全面渐进的,多中心细化的规则。将 DEAF 与峭度最指标大化目标结合对钢铁冶炼行业的重要工艺设备进行振动状态监测与诊断,提取了其中的微弱故障特征。在分析案例中,将所提出方法的结果与快速谱峭度进行对比,表明 DEAF 的理论正确性和工程实用性。

1 近似解析复小波变换

离散信号的近似解析小波变换(Quasi analytic wavelet transform, QAWT)是一种特殊的过完备框架展开方法,由两个在时频特性上相互联系的小波紧框架构成(实部 ψ^{Re} 和虚部 ψ^{Im} 两个分支)。双树复小波变换是 QAWT 中构成分支都是规范正交基(或双正交基)的特例。广义的 QAWT 具有更高的设计自由度,因为基底 $\psi^{(\cdot)}$ 具有多个复值的小波函数

$$\psi^{(\cdot)} = \{\phi_1^{(\cdot)}(t), \psi_1^{(\cdot)}(t), \dots, \psi_r^{(\cdot)}(t)\} \quad (1)$$

式中,上标 (\cdot) 可以为“Re”或“Im”。即每个分支都是由一个尺度函数以及 r 个小波函数构成。近似解析小波变换在理论上要求

$$\psi_i^{\text{Im}}(t) = \mathcal{H}\{\psi_i^{\text{Re}}(t)\} \quad (2)$$

式中, $i \in \{1, 2, \dots, r\}$, $\mathcal{H}\{\cdot\}$ 为 Hilbert 变换算子。在 Fourier 域中, $\mathcal{H}\{\cdot\}$ 可以定义为

$$\hat{\psi}_i^{\text{Im}}(\omega) = \begin{cases} -j \cdot \hat{\psi}_i^{\text{Re}}(\omega) & \omega > 0 \\ j \cdot \hat{\psi}_i^{\text{Re}}(\omega) & \omega < 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中,虚数单位 $j = \sqrt{-1}$, $\omega \in [-\pi, \pi]$ 为标准化圆周频率。各构成分支在相邻尺度上满足

$$\phi^{(i)}(t) = \sqrt{2} \sum_{k \in \mathbb{Z}} h_0^{(i)}(n) \phi_h^{(i)}(2t - n) \quad (4)$$

$$\phi^{(i)}(t) = \sqrt{2} \sum_{k \in \mathbb{Z}} h_i^{(i)}(n) \phi_h^{(i)}(2t - n) \quad (5)$$

式中 $h_0^{(i)}(n)$ ——所在分支的尺度函数滤波器，是有限冲击响应滤波器；
 $h_i^{(i)}(n)$ ——所在分支的第 i 个小波函数所对应滤波器。

目前已经对 $r=1, 2$ 的构造实例进行了深入的研究^[12-14]。KINGSBURY 构造了最初的 DTCWT 基函数($r=1$)的实例^[12]，SELESNICK 等^[13]推导了广义 QAWT 构造的一般性约束条件。陈彬强等^[14]基于分析尺度独立设计的思想研究了 $r=2$ 时的双密度双树复小波变换，将小波尺度的中心频率移至 DFSP 的过渡带中央。理论上说，当 r 为奇数时才能产生非 DFSP 的划分网格。但必须指出，小波包变换是小波变换的推广，对高频小波尺度进行了再细分，而在广义 QAWT($r=2$)的情况中，由于仍采用基于 Mallat 树形迭代算法的增广滤波器组 (Augmented tree-structured filter-bank, ATSFb)，变采样率为 2，高频小波尺度实际上无法再细分(细分后的尺度不具有有效的时频局部化能力)。即使 QAWT 弥补 DFSP 划分网格在过渡带分析能力的不足，实际上还将产生新的“盲区”，即仅仅通过改进小波基的途径还无法有效地解决 DWT 中存在的问题。

2 近似解析小波包变换

近似解析小波包变换(Quasi analytic wavelet packet transform, QAWPT)特指对 QAWT 中 $r=1$ 特例的推广，是建立在 DTCWT 基础之上的改进二进小波包分析方法。图 1 为双树复小波变换的分析滤波器组结构。我们将采用基函数融合、混合增广树形滤波器组的方法设计具有近似解析特性的 QAWPT。在 QAWPT 的设计中，构造的目标为提高基函数的时频局部化分析能力。

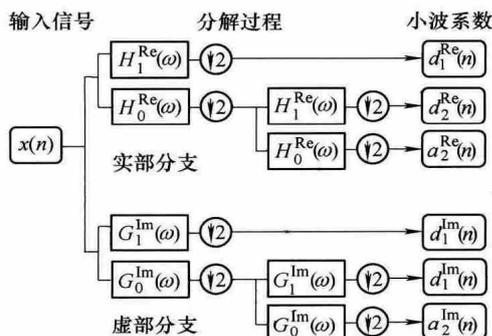


图 1 双树复小波变换的分析滤波器组结构

2.1 双树复小波基函数优选

双树复小波变换是最早被研究的双框架近似解析小波变换，滤波器组的两个滤波分支独立对输入数据进行分解和重构，二者之间没有数据流动。SELESNICK 推导出构造 DTCWT 的核心约束-半采样延迟条件，即要求 $\phi^{Re}(t)$ 、 $\phi^{Im}(t)$ 对应的滤波器 $h_0(n)$ 、 $g_0(n)$ 满足

$$g_0(n) = h_0(n - 0.5) \quad (6)$$

而式(6)在 Fourier 域上可以等价地表示为

$$G_0(\omega) \approx -j \cdot \text{sgn}(\omega) \cdot H_0(\omega) \quad (7)$$

式中 $H_0(\omega)$ —— $h_0(n)$ 的 Z 变换；

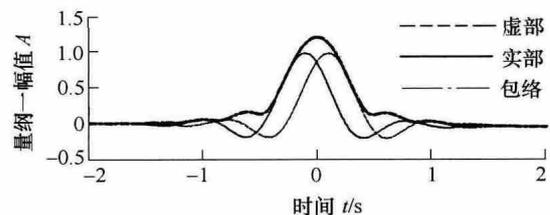
$G_0(\omega)$ —— $g_0(n)$ 的 Z 变换。

$H_0(\omega)$ 、 $G_0(\omega)$ 与 $\{h_0(n)\}$ 、 $\{g_0(n)\}$ 的联系为

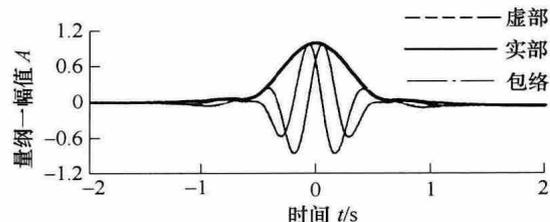
$$H_0(\omega) = \sum_{k \in \mathbb{Z}} h_0(k) \exp(-jk\omega) \quad (8)$$

$$G_0(\omega) = \sum_{k \in \mathbb{Z}} g_0(k) \exp(-jk\omega) \quad (9)$$

目前文献中具有共同因子法、最大消失矩、时频域联合设计方法等，可以设计出正交、双正交的 DTCWT 基函数。为了保证 QAWPT 的优良分析性质，作为“胚体”的 DTCWT 基函数的选择至关重要。笔者在文献[15]中研究了 DTCWT 的时频域联合设计方法，并论述了这种设计方法在小波尺度能量泄漏抑制方面的优势，现将之与其他设计方法得到的 DTCWT 基函数(构造实例见图 2)对多分量复合谐波信号的分析结果进行对比。对比对象除了文献[15]中的“DB9”、“MV8”基函数外，还包括共同因子设计法(Common factorization, CF)的“CF18”基函数^[16]。两种用于对比的复小波基都具有 8 阶消失矩。



(a) 复值尺度函数及其包络图



(b) 复值小波函数及其包络图

图 2 文献[15]所构造长度为 18 的 DTCWT 小波基函数

构造多分量复合谐波信号 $s(t)$ ，数学表达式为

$$s(t) = 0.5 \cos(2\pi 30t) + \cos(2\pi 85t) + 1.5 \cos(2\pi 170t) + \cos(2\pi 340t) + 0.5 \cos(2\pi 700t) \quad t \in [0, 1.024]$$

该信号的采样 $f_s = 2\ 000\ \text{Hz}$ ，长度 $L = 2\ 048$ 。其中 85 Hz、170 Hz、340 Hz 分别为 4 层小波分解后小波尺度 D_2 、 D_3 、 D_4 的中心频率，对应的原始简谐成分为

$$s_i(t) = \cos(2\pi f_i t) \quad t \in [0, 1.024] \quad (10)$$

利用复小波基对 $s(t)$ 分解结果 D_i 与原始简谐成分之间的归一化互相关系数 $C\{d_i, s_i\}$ 、 D_i 中非中心频率成分泄漏的强度对不同小波基的分解结果有效性进行定量分析

$$C\{d_i, s_i\} = \frac{\sum_{k \in \mathbb{Z}} (d_i(k) - \bar{d}_i) \cdot (s_i(k) - \bar{s}_i)}{\sqrt{\sum_{k \in \mathbb{Z}} [d_i(k) - \bar{d}_i]^2} \sqrt{\sum_{k \in \mathbb{Z}} [s_i(k) - \bar{s}_i]^2}} \quad (11)$$

$$E\{D_i\} = \int_0^{f_i^-} |\hat{D}_i(f)|^2 df + \int_{f_i^+}^{f_s/2} |\hat{D}_i(f)|^2 df \quad (12)$$

根据式(11)和式(12)中的评价指标，各小波基得到的分解信号评价结果见表 1 和表 2。

表 1 各小波基分解结果与原始简谐成分归一化相关系数

小波尺度	归一化互相关系数			
	Q-Shift18	DB9	MV8	CF18
2	0.999 0	0.970 2	0.995 4	0.995 8
3	0.999 4	0.983 1	0.988 3	0.997 8
4	0.998 7	0.977 8	0.974 6	0.997 3

表 2 各小波基分解结果的非中心频率成分泄漏系数

小波尺度	归一化互相关系数			
	Q-Shift18	DB9	MV8	CF18
2	0.002 1	0.059 0	0.007 0	0.008 9
3	0.002 4	0.074 3	0.049 1	0.005 1
4	0.001 5	0.039 6	0.047 2	0.007 3

由表 1 和表 2 可知，Q-Shift18 小波基(文献[15]中第 2、3 节)的分解结果与原始简谐波成分之间互相关系数最高，并且各小波尺度的非中心频率成分泄漏系数最小，因此具有最好的小波尺度抗混叠特性，因此以之为基础构建复小波包变换。

2.2 近似解析小波包滤波器组结构

可以注意到，DTCWT 和文献[14]中的双密度双树复小波变换的滤波器组在第一尺度和其余尺度是不同的，原因在于各分析尺度变采样率的差异。本文 QAWPT 的设计将沿用这一思想，但同时推广高频尺度的再细分策略。所提出的混合推广树形滤波器组可由图 1~3 共同表示，其中整个滤波器组被分为 4 个显著不同的功能区域。对于一个 J ($J \geq 2$) 层 QAWPT 分解而言，这些功能模块分别如下：

第一分析尺度分析模块：可以视为对输入信号的预处理，选则具有近似现行相位特性的规范正交基“Symmlet-18”。在实部分支上 $h_{10}^{\text{Re}}(n)$ 、 $h_{11}^{\text{Re}}(n)$ 选为“Symmlet-18”的尺度函数和小波函数滤波器，而在虚部分支上 $h_{01}^{\text{Im}}(n)$ 、 $h_{11}^{\text{Im}}(n)$ 定义为

$$h_{10}^{\text{Im}}(n) = h_{01}^{\text{Re}}(n-1) \quad (13)$$

$$h_{11}^{\text{Im}}(n) = h_{11}^{\text{Re}}(n-1) \quad (14)$$

标准 DTCWT 分析模块：DTCWT 沿用了二进小波变换的分析策略，在相关的节点上采用时频域联合构造的“Q-Shift18”小波基的滤波器集合 $\{h_0^{\text{Re}}(n), h_1^{\text{Re}}(n), h_0^{\text{Im}}(n), h_1^{\text{Im}}(n)\}$ ，其复值尺度函数和复值小波函数的时频特性如图 2 所示。

延伸的 DTCWT 分析模块：针对各分支第一尺度逼近序列再细分过程中低通滤波器总用的节点。DTCWT 对逼近尺度不再细分，但在 QAWPT 中则是必须的，考虑到最初两个尺度的过渡问题，令相关的作用节点采用“Q-Shift18”小波基的滤波器对。如图 3 所示，在两个滤波分支中，凡第一尺度低通分支使用 $\{h_0^{\text{Re}}(n), h_1^{\text{Re}}(n), h_0^{\text{Im}}(n), h_1^{\text{Im}}(n)\}$ 的结点，则在高通分支的对应结点使用相同滤波器对。

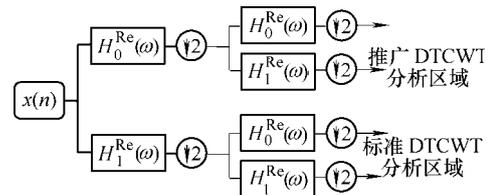


图 3 实部分支的扩展 DTCWT 分解部分

高频小波尺度再细分模块：针对不属于标准 DTCWT 分析区域的高频小波尺度再细分结点。在这些节点上的实部分支和虚部分支中使用一致的滤波器对 $\{f_0(n), f_1(n)\}$

$$f_0(n) = h_0^{\text{Re}}(n) \quad (15)$$

$$f_1(n) = h_1^{\text{Re}}(n) \quad (16)$$

两个滤波器的 Z 变换为 $F_0(\omega)$ 、 $F_1(\omega)$ 。该区域的滤波组结构如图 4 所示。

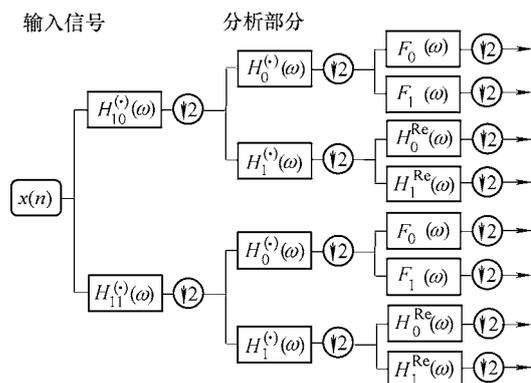


图 4 QAWPT 的高频小波尺度再细分区域

以上所论述的都是 QAWPT 分析部分采用的滤波器，而在综合部分所用的滤波器与分析部分逐一对应，不同之处在于后者是前者在时序上的反转。

2.3 近似解析小波包变换的性质

由图 1~3 可知 QAWPT 的冗余系数为 2，与 DTCWT 是相同的。以下验证结合这种冗余程度的滤波器结构和滤波器的 QAWPT 的时频分析性质。

(1) 小波分析时频原子。作为示例，图 5 给出了 3 层 QAWPT 分解时各小波包尺度上的复值小波函数(或尺度函数)的时域波形及其包络，可知小波包尺度的时频分析原子都是紧支撑的，并且具有光滑的包络曲线并几乎精确地满足半采样延迟条件。另外观察到部分尺度包络出现了“旁瓣效应”，这是由于这些尺度上由小波函数出现次数较多，如图 4 所示，因而振荡性较强。

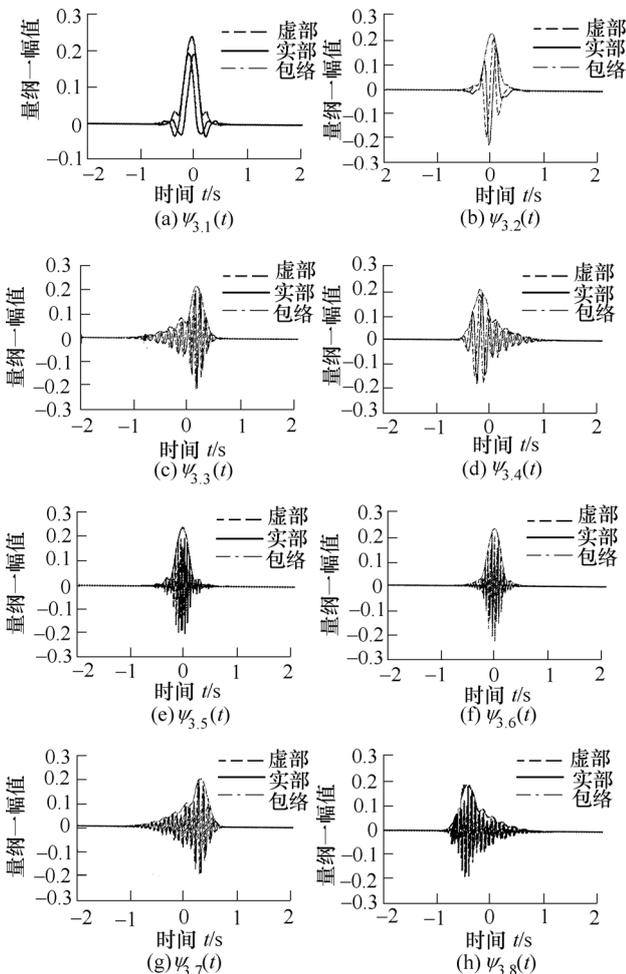


图 5 3 层 QAWPT 分解的小波包尺度时频分析波形图

(2) 增强的近似解析性。近似解析性是指复值小波函数频响特性曲线的幅值谱在负半轴区域的取值应当几乎为零，图 6 给出了相同分解层数情况下(以 3 层分解为例)QAWPT 与 DTCWT 的近似解析特

性分析对比。可知二者的最强泄漏部分都发生在高频小波尺度，然而 QAWPT 的泄漏比 DTCWT 显著减小，对机械故障的微弱特征分离和提取能力进一步提高。

(3) 近似的平移不变性。近似的平移不变性是指当输入信号发生平移后，各小波尺度的分解结果保持相对稳定，这对保持信号中的周期性。在连续移动的单位脉冲激励作用下，DTCWT 各小波尺度的响应曲线见文献[12]。将 DTCWT 推广至 QAWPT 后，各小波包尺度的响应曲线如图 7 所示。由图 7 可知，虽然 QAWPT 的采样密度远低于 DTCWT，但并没有降低平移不变性。

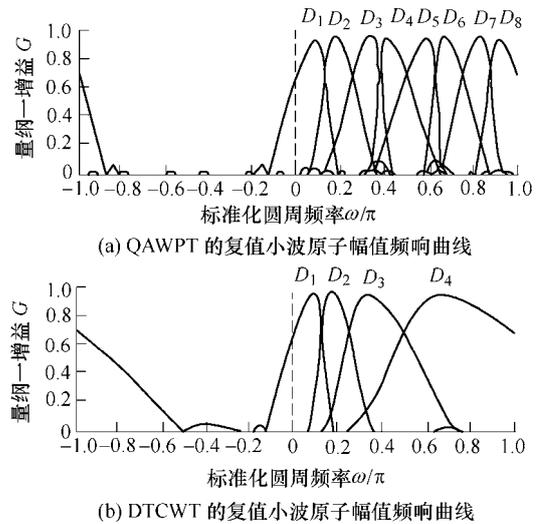


图 6 相同分解层数 QAWPT 和 DTCWT 时频原子特性对比

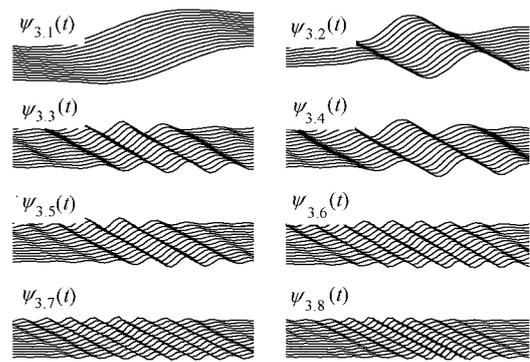


图 7 QAWPT 在各小波包尺度的平移不变性

3 增强离散小波分析框架构造方法

由第 2 节的相关分析可知，除去沿袭了经典小波变换中的 DFSP 特性外，QAWPT 的近似解析性、近似评论不变性、线性相位特性等都有了显著的增强。为了进一步地革新其中的 DFSP，解决过渡带特征提取的问题，本文提出了伪二进制小波框架的生成方法，分为如下 3 个步骤。

(1) QAWPT 分解: 采用 QAWPT 对输入信号 $\{x(n)\}$ 进行分解, 并对每个小波尺度序列(逼近信号和细节信号)进行单支重构。令 QAWPT 对 $x(n)$ 进行 J 层分解后的 2^J 个重构小波尺度信号为

$$P_j(x) = \{D_j^k | 1 \leq k \leq 2^j\} \quad (17)$$

式中, k 为索引, 其顺序按照图 4 右侧所示自上而下进行顺序递增排列。

(2) 小波包子尺度空间重排: 对步骤(1)中集合 $P_j(x)$ 的元素按期中心频率的递增顺序进行重排列。重排列的算法如下。

1) 将 D_j^k 的索引 k 写成二进制编码形式

$$B_k = \{n_0, n_1, \dots, n_{m-2}, n_{m-1} | m = \lfloor \log_2 k \rfloor + 1\} \quad (18)$$

使得集合 B_k 中的元素满足关系

$$k-1 = \sum_{i=0}^{m-1} 2^{m-1-i} n_i \quad (19)$$

2) 对 k 的二进制编码按照格雷码的方式进行映射, 映射后 k 的二进制编码为

$$B'_k = \{n'_0, n'_1, \dots, n'_{m-2}, n'_{m-1} | m = \lfloor \log_2 k \rfloor + 1\} \quad (20)$$

并且两个集合 B_k 与 B'_k 的元素之间的映射关系为

$$n'_m = \begin{cases} n_m & i = m-1 \\ \text{mod}(n_m + n_{m+1}, 2) & i = 0, 1, \dots, k-2 \end{cases} \quad (21)$$

3) 根据集合 B'_k 对小波包顺序进行重排

$$P'_j(x) = \{\tilde{D}_j^{k'} | 1 \leq k' \leq 2^j\} \quad (22)$$

式中 k' ——小波包重排序集合的索引, 定义为

$$k'-1 = \sum_{i=0}^{m-1} 2^{m-1-i} n'_i \quad (23)$$

以上小波包重排序步骤的必要性在于高通滤波器在多尺度分解过程中自然出现了逆序现象。

(3) 小波包子空间的交叉结合。舍弃 $P'_j(x)$ 中的端点元素 \tilde{D}_j^1 、 $\tilde{D}_j^{2^j}$ 。对剩余的真子集

$$P''_j(x) = \{\tilde{D}_j^k | 2 \leq k \leq 2^j - 1\} \quad (24)$$

从 $k=2$ 开始进行相邻元素组合, 组合过程中无重叠, 产生的联合 $2^{j-1} - 1$ 个隐小波包尺度(Implicit wavelet packet, IWP)

$$I_j^k(n) = \tilde{D}_j^{2k-1}(n) + \tilde{D}_j^{2k}(n) \quad (25)$$

其对应的集合为

$$I_j(x) = \{I_j^k(n) | 1 \leq k \leq 2^{j-2} - 1\} \quad (26)$$

表 3 给出了 J 层多尺度分解意义下, IWPTF 与 QAWPT 的中心频率和理论带通区间的对比, 可知 IWPTF 实际上成功移动了小波变换这一“数学显微镜”的“焦点”和“焦距”, 能够有效地提取 DFSP

划分网格的过渡带特征。

表 3 IWPTF 与 QAWPT 的中心频率和理论带通区间对比

	IWPTF	QAWPT
中心频率	$\frac{k}{2^j} f_s$	$\frac{k+0.5}{2^{j+1}} f_s$
理论带通区间	$\frac{1}{2^j} f_s$	$\frac{1}{2^{j+1}} f_s$

为了验证 IWPTF 的频率响应特性, 图 8 绘制出了 2~5 层 QAWPT 之下蕴藏的小波包隐框架的幅值谱响应曲线, 可知集合 $I_j(x)$ 中各元素都具有优良的带通滤波特性, 并且在其理论通带上具有平坦的“盒性”特性。

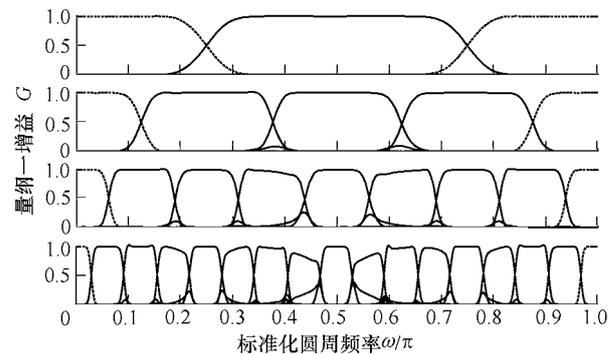


图 8 IWPTF(2~5 层分解)的“频率-尺度”划分网格

4 增强离散小波分析框架特性

本文第 3 节所述的 IWP 生成方法实际上是对信号的 QAWPT 处理结果进行后处理交叉结合, 所以是一种衍生的小波紧框架展开方式。从“输入-输出”的角度观察 IWPTF 并没有显式的分析函数集合(分解基底)和综合基函数集合(重构基底)。IWPT 满足如下的性质。

(1) 完美重构性。由 QAWPT 的完美重构性可知

$$\begin{aligned} x(n) &= D_j^1(n) + D_j^2(n) + \dots + D_j^{2^j-1}(n) + D_j^{2^j}(n) = \\ &= \tilde{D}_j^1(n) + \tilde{D}_j^2(n) + \dots + \tilde{D}_j^{2^j-1}(n) + \tilde{D}_j^{2^j}(n) = \\ &= D_j^1(n) + \left[\tilde{D}_j^2(n) + \dots + \tilde{D}_j^{2^j-1}(n) \right] + \tilde{D}_j^{2^j}(n) = \\ &= \tilde{D}_j^1(n) + \left[\tilde{D}_j^2(n) + \dots + \tilde{D}_j^{2^j-1}(n) \right] + \tilde{D}_j^{2^j}(n) = \end{aligned}$$

$$\tilde{D}_j^1(n) + \sum_{k=1}^{2^{j-2}-1} I_j^k(n) + \tilde{D}_j^{2^j}(n) \quad (27)$$

IWPTF 的完美重构性在于它只对 QAWPT 对信号的分解结果进行子空间重排和交叉结合, 并未改变其分析特性, 依然为此对信号的无疏漏多尺度分析。

(2) 近似平移不变性和近似线性相位特性。图 9 为 3 层 IWPTF 中各 IWP 尺度上的近似平移不变性示意图，其中 $\psi_{k,i}^e(t)$ 代表各 IWP 尺度的时频分析原子。可知 IWPTF 继承了 DTCWT 与 QAWPT 的平移不变性。

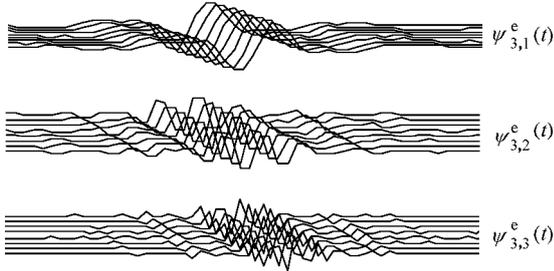


图 9 IWPTF 的近似平移不变性(3 层分解)

(3) 伪二进的“频率-尺度”分析网格。以 4 层 QAWPT 分解而言，它所对应的隐小波包尺度所张成的“频率-尺度”分析网格如图 10 中的尺度“ kl ”所示。图 10 集成了 QAWPT 和 IWPTF 两种信号展开，以实现子空间分析特性的优势互补。但是仍然可以注意到 QAWPT 与 IWPTF 这两种多尺度分析方法存在如下的显著差异。

1) IWPTF 是有中心细化，QAWPT 是无中心细化。如图 10 所示，QAWPT 对小波包的细化是简单地提高分辨率，而没有固定的细化中心频率；而在 IWPTF，形成了一种有固定中心，而分辨率逐层提高并嵌套的分析子空间，如 IWP 子空间集合

$$\{I_{2,1}, I_{3,2}, I_{4,4}, \dots, I_{k,2^{k-2}}, \dots\} \quad (28)$$

的中心频率都是 $f_s/4$ ，且频率分辨率逐层提高。

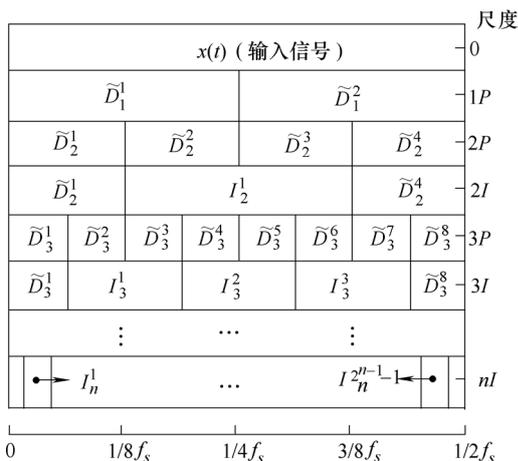


图 10 DEAF 的“频率-尺度”划分网格

2) IWPTF 的中心细化频率随着分析尺度的增加也不短增加。随着分析尺度“ kl ”中存在 $2^{k-1} - 1$ 个细化中心频率。分析尺度由“ kl ”增加至“ $(k+1)l$ ”，将相应地产生 2^k 个新的细化中心频率。

因此 IWPTF 实际上提供了一种“自顶向下、多中心分裂细化”的多分辨分析架构，能够全面而细致地将信号映射到小波分析域中。

本文提出的增强离散解析小波分析框架实际上揭示了如下重要发现：离散二进小波包分析(二进小波基)背后实际上隐藏着一种具有伪二进制多分辨分析特性的离散小波紧框架。通过滤波器组的结构改进我们成功地得到了其具体构造实例。

5 工程应用

5.1 工程应用背景

国内某 2050 带钢精轧级架驱动链的结构如图 11 所示。该精轧机架由两台电动机串联以增大转矩，电动机的动力通过减速齿轮箱(减速比 65/22)进行减速增距，而后由分配齿轮箱传递给 4 辊机架的上、下工作辊对红热状态下的带钢进行精轧加工。

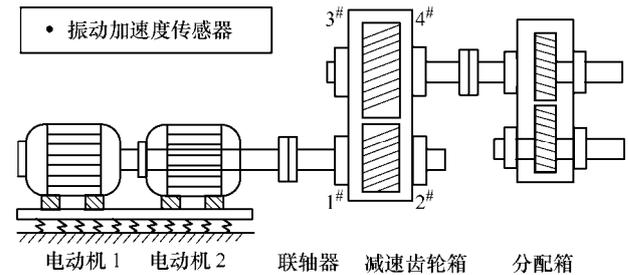


图 11 精轧机架驱动链结构示意图

在该精轧机架的工作过程中，现场工作人员察觉除尘风机中存在轻微的异音，但不能确定异音的原因，因此采用振动测试的方法采集机组轴承座上布置了 4 侧振动加速度传感器(图 11 中编号 1~4)采集信号进行进一步分析，测得此时电动机的转速为 281.3 r/min(4.688 Hz)。振动加速度信号通过一次硬件积分后转变为振动速度信号。所记录振动信号的采集频率和长度分别为 5 120 Hz 和 4 096 点，此时电动机的转速为。减速齿轮箱高速段输入测点的振动信号及其频谱如图 12 所示，其中波形复杂，没有显著的特征信息，无法得到直接的诊断结论。

5.2 本文提出 DEAF 分析方法处理结果

采用本文提出的 DEAF 对图 12 中的振动速度信号进行多尺度分解，采用峭度图的思想对小波尺度进行优选，结果见图 13，所采用峭度优选指标为

$$K[x] = \frac{\sum_{n=[0.05L]}^{[0.95L]} (x(n) - \mu_x)^4}{(L-1)\sigma_x^4} - 3 \quad (29)$$

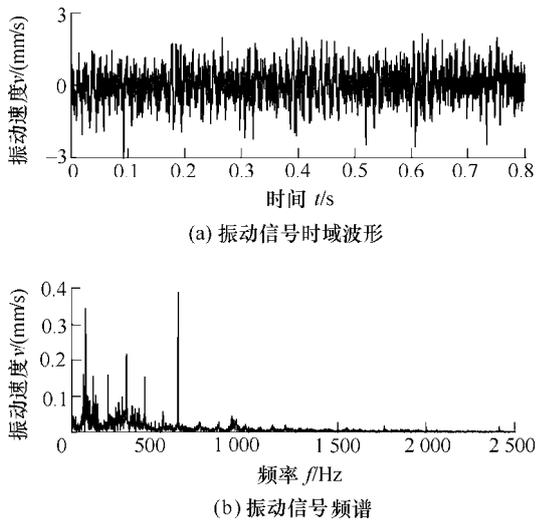


图 12 减速齿轮箱高速端输入侧振动信号及其频谱

式中 L ——输入信号 x 的长度；
 μ_x ——输入信号 x 的平均值；
 σ_x ——输入信号 x 的标准差。

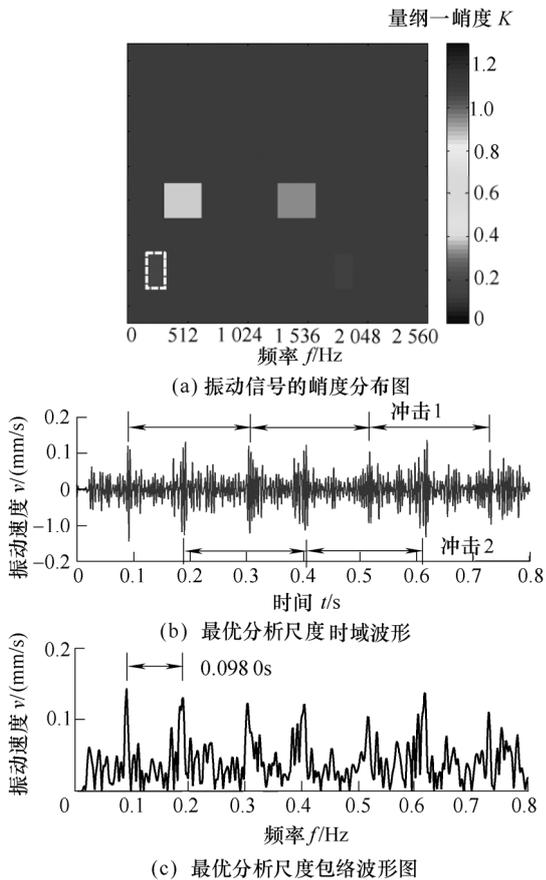


图 13 DEAF 对振动信号的分析结果

根据图 13a 所示的峭度分布图，可以选择出中心频率和理论带宽为 240 Hz 和 160 Hz。因此可以得到信号的最优分析尺度时域波形和包络图，如图 13b 和图 13c 所示。其中出现了两组出现间隔同为 0.213 s 的规律性冲击，与高速段齿轮的转频接

近。同时两组特征的相邻冲击间隔为 0.098 s。

在之后的定期检修中对减速齿轮箱进行拆箱检查，果然发现高速端齿轮在两处齿面上存在显著的损伤故障，两齿面相距 10 个齿，如图 14 所示。根据减速箱的转速可以计算两组冲击特征理论间隔

$$\tau = \frac{Z_{\text{interval}}}{Z_{\text{pinion}}} \cdot \frac{1}{f_{\text{pinion}}} = \frac{10}{22} \cdot \frac{1}{4.688} = 0.0969 \text{ (s)} \quad (30)$$

这与振动信号的分析结果十分接近。

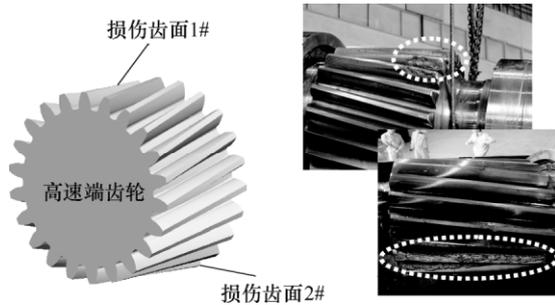


图 14 高速端齿轮上的两处齿面损伤故障

5.3 对比分析方法处理结果

采用法国学者 ANTONI 等^[17-18]提出的快速谱峭度图方法对该信号进行分析，结果如图 15 所示。

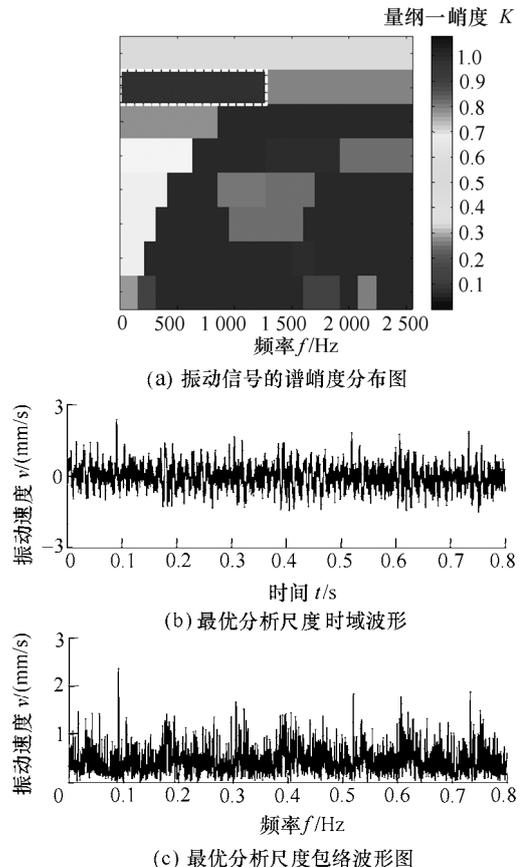


图 15 快速谱峭度分析对振动信号的分析结果

图 15 中，最优分析尺度的中心频率和理论带宽为 640 Hz 和 1 280 Hz 的尺度被选为最优分析尺

度，但在其对应的时域波形和包络图上冲击特征都不突出。对比图 14和图 15的分析结果可知，本文所提出方法的分析结果更优。

6 结论

(1) 近似解析复小波变换的基函数中集成了多个复值小波函数，并且执行滤波器组的设计更为灵活，可以为小波基的设计提供更高的自由度。

(2) 以时频域联合方法构造的 DTCWT 基函数为基础，构造了 QAWPT，并进一步推导出一种全新的伪二进制多分辨分析实例 IWPTF。IWPTF 是对经典二进小波包变换的重要创新，对信号进行“自顶向下、多中心分裂细化”的多分辨分析。IWPTF 不仅继承了 DTCWT 的近似评议不变性，还能够有效解决经典二进离散小波分析方法对二进“频率-尺度”划分网格过渡带特征提取能力上之不足。

(3) 将 QAWPT 与 IWPTF 结合得到 DEAF，从而综合了两种多分辨分析架构的优点，对机械信号进行全面而细致的特征分析和提取。将 DEAF 应用于钢铁冶炼行业的精轧机架齿轮箱故障微弱特征提取中，成功地诊断出高速端齿轮上存在的两处齿面损伤故障，其分析结果优于目前的主流诊断方法——快速峭度图方法的分析结果，验证了所构造 QAWPT 与 IWPTF 的有效性和工程实用性。

参 考 文 献

- [1] 何正嘉, 訾艳阳, 张西宁. 现代信号处理及工程实例[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2007.
HE Zhengjia, ZI Yanyang, ZHANG Xining. Modern signal processing and engineering application[M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2007.
- [2] GAO R X, YAN R Q. Wavelets: Theory and applications for manufacturing[M]. Heidelberg, London: Springer, 2011.
- [3] MALLAT S G. A wavelet tour of signal processing[M]. Massachusetts: Academic Press, 1999.
- [4] WANG S B, HUANG W G, ZHU Z K, Transient modeling and parameter identification based on wavelet and correlation filtering for rotating machine fault diagnosis[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2011, 25(4): 1299-1320.
- [5] CHEN B Q, ZHANG Z S, SUN C, et al. Fault feature extraction of gearbox by using overcomplete rational dilation discrete wavelet transform on signals measured from vibration sensors[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2012, 33: 275-298.
- [6] HE W P, ZI Y Y, HE Z J, et al. Tunable Q-factor wavelet transform denoising with neighboring coefficients and its application to rotating machinery fault diagnosis[M]. Science China Technological Sciences, 2013, 56(8): 1956-1965.
- [7] WANG J J, GAO R X, YAN R Q, et al. Current envelope analysis for defect identification and diagnosis in induction motors[M]. Journal of Manufacturing Systems, 2012, 31(4): 380-387.
- [8] PENG Z K, JACKSON R R, CHU F L, et al. On the energy leakage of discrete wavelet transform[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2009, 23(2): 330-343.
- [9] WANG Y X, HE Z J, ZI Y Y. Enhancement of signal denoising and multiple fault signatures detecting in rotating machinery using dual-tree complex wavelet transform[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2010, 24(1): 119-137.
- [10] SWDLDENS W. The lifting scheme: A construction of second generation wavelets[J]. SIAM Journal on Mathematical Analysis, 1996, 29(2): 511-546.
- [11] STRELA V, HELLER P N, STRANG G, et al. The application of multiwavelet filterbanks of image processing[J]. IEEE Trans. Signal Processing, 1999, 8(4): 548-563.
- [12] KINGSBURY N G. Complex wavelets for shift invariant analysis and filtering of signals[J]. Applied and Computational Harmonic Analysis, 2001, 10: 234-253.
- [13] SELESNICK I W, BRARNIUK R G, KINGBURY N G. The dual tree complex wavelet transform[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2005, 22(6): 123-151.
- [14] 陈彬强, 张周锁, 何正嘉. 双密度双树复小波变换及其在机械故障微弱特征提取中的应用[J]. 机械工程学报, 2012, 48(9): 56-63.
CHEN Binqiang, ZHANG Zhousuo, HE Zhengjia. Enhancement of weak feature extraction in machinery fault diagnosis by using double density dual tree complex wavelet transform[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(9): 56-63.
- [15] 陈彬强, 张周锁, 郭婷, 等. 双树复小波时频构造在齿轮系装配间隙检测的应用[J]. 西安交通大学学报, 2013, 47(3): 7-12.
CHEN Binqiang, ZHANG Zhousuo, GUO Ting, et al. Time-frequency domain construction of dual tree complex wavelets for assembly clearance detection of gear

- chains[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2013, 47(3): 7-12.
- [16] SELESNICK I W. The design of approximate Hilbert transform pairs of wavelet bases[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2002, 50(5): 1144-1152.
- [17] ANTONI J. Fast computation of the kurtogram for the detection of transient faults[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2007, 21(1): 108-124.
- [18] WANG D, PETER T W, TSUI K L. An enhanced kurtogram method for fault diagnosis of rolling element bearings[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2013, 35(1-2): 176-199.

作者简介:陈彬强(通信作者),男,1986年出生。主要研究方向为机械信号分析和机械故障诊断、数字化加工与制造。

E-mail: mung.cbq@stu.xjtu.edu.cn

张周锁,男,1964年出生,博士,教授,博士研究生导师。主要研究方向为机械状态监测、机械故障智能诊断与预示、机械动态分析。

E-mail: zzs@mail.xjtu.edu.cn



国家自然科学基金委员会机械工程学科 2012/2013 年度优秀结题项目简介

失稳临界区域汽车动力学状态实时观测与稳定性控制方法研究*

项目负责人:李亮(E-mail: liangl@tsinghua.edu.cn)

依托单位:清华大学

项目批准号:50905092

1. 项目简介

汽车稳定性控制系统(ESP)是当前国际汽车动力学领域前沿技术。它可降低 30%交通事故率,自 2012 年起欧、美等立法要求新车装备 ESP。目前 ESP 技术被国际企业垄断,但是即使装备 ESP 仍有近 70%汽车瞬态失稳难以避免,因此亟需发展稳定性控制理论,研制新一代稳定性控制技术。本项目针对汽车瞬态失稳 ESP 失效问题,提出失稳临界区域概念,建立汽车失稳过程关键动力学状态变量解耦观测体系;基于多传感器融合的解耦观测机制设计了变结构扩展卡尔曼滤波方法(VSEKF),解决了轮胎力、附着系数、汽车侧偏角等参量的非线性观测难题。进而开发了实时控制用非线性失稳过程的动力学模型,系统地揭示出汽车临界失稳特征。在此基础上,采用预测控制方法将稳定性控制有效拓展到瞬态强非线性的失稳临界。自主研制出 ESP 系统,应用到东风猛士军车上,提升了军车装备安全控制水平。

2. 主要创新点及其主要研究进展

(1) 提出失稳临界区域概念,建立了失稳过程关键动力学状态变量解耦观测体系,开发了实时控制用非线性失稳过程的动力学模型,系统地揭示出汽车临界失稳特征。研制出高精度汽车极限工况动力学量测平台,为研究汽车动力学问题提供了先进有效的技术手段。

(2) 提出了基于驾驶意图识别的稳定性预测判据,建立了抑制系统强非线性与瞬态迟滞难题的稳定性预测控制新方法,将稳定性控制边界从准线性的欠稳定区域有效拓展到瞬态强非线性的失稳临界区域。自主研制了适应越野路况的 ESP 系统,并匹配到东风猛士军车上,填补了国内空白。

* 此项目在“第十一届设计与制造前沿国际会议(ICFDM2014)”上被评为优秀结题项目。