

# 基于解调振动信号特征提取齿轮箱的故障诊断

陈汉新,王庆均,陈绪兵,蔡洪涛,秦襄培

(武汉工程大学机电工程学院,湖北 武汉 430074)

**摘要:**通过振动信号的可调频率成分研究齿轮裂纹尺寸的故障识别,振动信号分析是基于 Hilbert 变换和自适应小波. Hilbert 变换用于获得振动包络,从而从低信噪比的振动信号中解调载波频率,自适应 Morlet 小波建立振动信号模型,从而从解调载波频率中提取特征,以鉴定齿轮箱中齿轮的裂纹尺寸. 该方法用于分析在不同角速度、不同负载转矩和不同裂纹尺寸下的试验振动信号,结果表明,该方法用于鉴定齿轮箱中齿轮的裂纹尺寸是灵敏和有效的.

**关键词:**故障识别;解调振动信号;Hilbert 变换

**中图分类号:**TH165+.3

**文献标识码:**A

**doi:**10.3969/j.issn.1674-2869.2010.09.018

## 0 引言

近几十年来,齿轮箱的故障诊断一直是非常关键和重要的研究课题,齿轮箱故障诊断中一个鲜明的特点是振动信号的振幅和相位调制,这是相关的啮合频率和它们的谐波周围边带组分增多的结果,像轮齿裂纹这样的局部缺陷产生瞬态信号输入到振动信号中,在故障产生的早期阶段,很难从宽频带和背景组分中识别边带组分<sup>[1]</sup>.

对齿轮箱系统的振动分析是用于齿轮箱故障诊断的现代技术,检测早期故障的存在和类型及其发展情况,是为了估计机械的剩余使用寿命,以便合理的安排设备的维护时间表. 基于调制现象的啮合频率及其谐波与边带一起成为齿轮振动频谱中最重要的组分,边带是平均分布在中心频率周围的频率成分,故障状态可以改变边带的数量和振幅. 称为载波频率的中心频率是齿轮啮合频率及其他频率. 一个或几个轮齿上的故障如裂纹和剥落,在故障轮齿的啮合过程中起调制作用,载波频率和啮合频率上的有用信息被损坏,很难通过振动信号的载波频率成分、啮合频率成分和边带诊断齿轮箱<sup>[2]</sup>. 通过故障轮齿的转动频率,大量啮合频率的边带及其低振幅宽波段的谐波将产生并间隔排列. 幅度调制可以看做是齿轮裂纹的一个特征. Ma 和 Li 在文献[3]中建立了宽带解调算法,以便利用宽频齿轮振动信号中的信息,并获得振幅和相位调制信号. 在机械

设备故障诊断中,Cheng 在文献[4]中提出基于 EMD 的解调以得到已调制信号的瞬时频率和振幅,并且已经证明了该方法用 EMD 和算子解调可以有效的提取特征. Zhang 在文献[5]中提出基于局部均值分解的时频分析新方法,以解调信号并提取故障特征. Lin 在文献[6]中通过基于自适应小波滤波的脉冲振动信号分析研究了齿轮箱中齿轮裂纹的故障诊断. 对于有缺陷齿轮的故障诊断,Dalpiaz 在文献[7]中比较了这些技术在功率倒频谱,时钟同步平均数和小波分析的有效性和灵敏性.

时频分析是齿轮箱诊断技术的重大发展,它能够克服传统信号处理方法的局限和缺点,在频率范围内显示时间相关频谱信号. 在齿轮箱故障诊断中,小波分析是所有时频分析方法中应用最广泛的,小波变换可以显示时频局部化特征,这些特征能够展示振动信号的瞬时频率,并且给出频率从一个阶段到另一个阶段的变化过程中能量分布的描述<sup>[9-10]</sup>. 在齿轮故障诊断中,Hilbert 变换是解调振动信号的有效方法<sup>[11]</sup>,Huang 在文献[12]中把 Hilbert 变化应用到固有模式函数(IMF),在用时频表示中得到 Hilbert 波谱,并通过经验模态分解来分解信号得到固有模式函数. 但是,用小波变换和 Hilbert 变换描述肉眼检测的有缺陷齿轮的频率成分的特征频率是很困难的. 本文基于 Hilbert 变换和自适应小波的线性组合,提出一种新方法来解调齿轮振动信号,结果表明了自适应小波的良好性能和诊断有缺陷齿

收稿日期:2010-04-26

基金项目:湖北省自然科学基金(2008CDB300);湖北省教育厅科学技术研究重大项目(Z2010150)

作者简介:陈汉新(1969-),男,湖北武汉人,教授,博士. 研究方向:故障诊断、无损检测和系统状态监控.

轮的显著能力。

## 1 振动的调制机理及分析

齿轮箱中的齿轮有相同和平均的间距齿,在载荷和速度恒定的正常条件下,齿轮箱的振动信号  $y'(t)$  如文献[13]所示:

$$y'(t) = \sum_{k=0}^N Y_k \cos(2\pi k n f_s t + \theta_k) \quad (1)$$

式(1)中,  $y'(t)$  是载波信号,  $Y_k$ 、 $\theta_k$  和  $N$  分别表示振幅、相位和轮齿啮合谐波的数量,  $f_s$  表示轴转动频率,  $n$  表示轮齿的数量, 啮合频率为  $n f_s$ 。振动信号的啮合频率及其谐波是主要的组成部分。

齿轮箱中的故障齿轮通过振幅和相位调制改变了振动信号的频率成分, 由故障齿轮产生的混合调制振动信号  $y(t)$ , 可以表示为

$$y(t) = \sum_{k=1}^N Y_k (1 + \sum_{l=0}^{N'} P_{kl} \cos(2\pi l f_s(t)t + \alpha_{kl}) \times \cos(2\pi k n f_s(t)t + \theta_k + \sum_{l=0}^{N'} Q_{kl} \cos(2\pi l f_s(t)t + \beta_{kl})) \quad (2)$$

式(2)中,  $\alpha_{kl}$  和  $\beta_{kl}$  表示振幅和相位调制信号周围的第  $l$  个边带的相位,  $P_{kl}$  和  $Q_{kl}$  是第  $k$  个啮合谐波周围的振幅和相位调制信号的第  $l$  个边带的振幅, 在变化的速度和转矩的故障条件下, 动态频率成分是复杂和非稳态的, 式(2)显示了在低频率范围内包含齿轮故障特征的调制信号频率, 转轴速度的变化使得调制信号成为非稳态信号。

Hilbert 变换通过时域卷积将一个实值时间序列映射入到另一个时序信号, 表示如下:

$$H[x(t)] = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{x(\tau)}{t - \tau} d\tau \quad (3)$$

式(3)中,  $t$  表示时间,  $x(t)$  是时域振动信号,  $H(x(t))$  是  $x(t)$  的 Hilbert 变换, 因为希尔伯特变换是与频率无关的  $90^\circ$  相位移, Hilbert 变换后调制信号的非稳态频率成分不会改变。Hilbert 变换适合提取振幅和相位调制信号, 该解调被描绘成复数时域信号, 即为解析信号  $A[x(t)]$ 。

$$A[x(t)] = x(t) + iH[x(t)] = a(t) e^{i\theta(t)}, i = \sqrt{-1} \quad (4)$$

$$a(t) = \sqrt{x^2(t) + H^2[x(t)]} \quad (5)$$

式(4)中信号的 Hilbert 变换产生复杂时间序列, 复杂时间序列的数量是信号包络, 代表对信号中边带调制的估计。

复解析小波可以分隔开振幅和相位成分, 常用来侧量频率变化的时间演变, 实解析小波常用

于检测瞬态信号, Morlet 小波是最常用的非正交复小波, 其定义为:

$$\Psi(t, \lambda) = e^{-t^2/2} e^{i\lambda t} \quad (6)$$

式(6)中,  $\lambda_0$  是母小波的频率, 与高斯窗复杂正弦曲线的角频率一致, 通过伸长  $\mu$  和平移  $\tau$  可以得到子小波, 如下式

$$\Psi_{\mu, \tau} = e^{-\frac{(t-\tau)^2}{2\mu^2}} e^{i\lambda_0 \frac{t-\tau}{\mu}} \quad (7)$$

信号模型可以看做是特征提取问题, 目标是在得到的特征空间中找到一组最能代表信号的小波。自适应小波能够自动计算调整小波参数和形状, 从而使能量函数最小化, 固定小波不同点是固定小波是检测固定的一组小波, 将贡献不大的小波去掉, 自适应小波能改变它的形状以适应特殊的信号, 而不是通过改变去适应固定形状小波。信号  $\hat{f}(t)$  可以近似地通过母小波  $\Psi(t)$  的子小波表示如下:

$$\hat{f}(t) = \sum_{k=1}^K W_k \Psi_k\left(\frac{t - \tau_k}{\mu_k}\right) \quad (8)$$

式(8)中,  $W_k$ 、 $\tau_k$  和  $\mu_k$  分别为每个子小波的权系数、位移和伸长量, 参数  $W_k$ 、 $\tau_k$  和  $\mu_k$  可以通过将能量函数最小化得到最优值。

信号模型的最小均方误差(LMS)如下式:

$$E = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^r [f(t) - \hat{f}(t)]^2 \quad (9)$$

该信号模型用来评估小波域内测量的参数。考虑信号  $f(t) = \cos(w_c t)$ , 通过复杂 Morlet 小波进行的连续小波变换如下:

$$W_f(\mu, \tau) = \frac{\sqrt{2\pi\mu}}{2} \exp\left[-\frac{1}{2}(\mu w_c - \lambda_0)^2 + i w_c \tau\right] \quad (10)$$

将尺度谱最大化可以得到  $W_f(\mu, \tau)$  的最大幅度, 母小波的频率  $\lambda_0$  可以通过式  $\lambda_0 = \mu w_c$  得到, 正弦信号的频率可以通过改变关于  $\tau$  的复杂小波变换中相位的速率来测量,  $(W_i, w_i, \theta_i, \tau_i, \sigma_i)$  的相位是  $w_i b$ 。

对于由高斯脉冲组成的特征信号,  $W_f(\mu, \tau)$  的幅值包含很多不同的峰值, 余弦函数的频率和相位以及高斯窗的中心位置和标准偏差可以由各个峰值来估计, 信号可以视为高斯调制余弦函数的总和, 如果一个信号被看成是高斯调制余弦的和, Morlet 小波函数可以应用于它的连续小波变换, 信号的模型可以由 Morlet 小波变换幅度图的峰值信息建立, 这些信息可从下列参数得到, 分别是相对振幅  $W$ 、频率  $w$ 、相位  $\theta$ 、高斯包络的标准偏差  $\sigma$  和中心位置  $\tau$ , 如等式(6)中给出的, 该信号模型建立如下:

$$\hat{f}(t) = \sum_{i=1}^k W_i \cos(w_i t - \theta_i) \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{t - \tau_i}{\sigma_i}\right)^2\right] \quad (11)$$

本文提出了基于 Hilbert 变换和等式(11)中的自适应 Morlet 模型的方法来分析试验信号,步骤如下:(1)Hilbert 变换用于分析信号以得到信号包络;(2)运用 Hilbert 变换分析信号包络;(3)通过遗传算法优化等式(11)中的自适应 Morlet 模型,以分析 Hilbert 变换的信号包络,遗传算法在下一部分讨论;(4)用连续小波变换(CWT)显示时频域内自适应 Morlet 模型的结果。

## 2 遗传算法

遗传算法包括六个基本步骤,即染色体、群体初始化、适应度计算、选择、交叉、变异和终止条件,染色体在复制阶段随机产生,用传统的基因组表述时,二进制编码并不适合实数编码,实数编码具有表示接近问题空间、更好的平均性能和更有效的数值实现的特点,染色体(c)包含该特征的五个实数,用来表示等式(11)中模型的四个参数,如此例: $c = \{c_1, c_2, c_3, c_4, c_5\} = \{0.005, 50, 100, 0.08, 0.005\}$ 。染色体中的值分别代表振幅的实部和虚部、频率和时间的中心以及标准偏差。每个字符串的长度是等式(11)中参数的数目,每个染色体的估计信号可从下式得到:

$$\hat{f}(t) = \sum_i c_i \cos(c_2 t - c_3) \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{t - c_4}{c_5}\right)^2\right] \quad (12)$$

在接下来的复制中,相应的染色体是最佳的候选对象,它显示参数最优化是为了将问题最小化,遗传算法要求适应度是正数,以便能够执行赌轮的选择和复制,因此适应度定义如下:

$$G(x) = E_{\max} - E(x) \quad (13)$$

其中, $E_{\max}$ 是当前总数中目标函数的最大值,由于具有高适应度的染色体在选择中居主导地位,所以遗传算法会产生不理想的早熟收敛现象,该缺点可以通过尺度变换克服,尺度变换前后适应度平均值保持不变,尺度变换由下式定义:

$$T(x) = aG(x) + b$$

$$a = \frac{T_{\max} - T_{\min}}{T_{\max} - T_{\min}}, \quad b = T_{\min} (1 - a) \quad (14)$$

基于适者生存的自然遗传系统的概念,随机普遍选择(SUS)采用比例选择方法选择染色体来构成配对库,以固定概率 $p_c$ 使用单点交叉,在幅度 $[1, l-1]$ 产生长度为 $l$ 的染色体的交叉点,交换染

色体交叉点的右段,从而产生出两个新的个体。

通过变异来产生群体多样性从而防止早熟收敛,每个染色体动态不均匀的变异用于固定概率 $p_m$ 的实值表示,对一个最大数量的迭代,实行计算适应度、选择、交叉、变异的过程,最后阶段的最优染色体就是等式(11)中参数的最优解。

当选择了最佳参数后,通过从原信号 $f(t)$ 减去等式(11)中的最佳估计信号可以得到剩余信号,对不同的信号重复遗传算法以得到下一组最佳参数,因此模拟模型的结果是试验信号的最佳模拟信号。

## 3 齿轮箱测试系统

图1显示弦齿厚,即分度圆处的齿厚,图2显示了侧面、正面、表面宽度和齿根圆,基圆从渐开线开始,齿形在基圆的基础上产生,倒角是侧面和齿根圆的交叉线,裂纹角的基准是图2中连接点 $T_1$ 和 $T_2$ 间的直线,裂纹的深度是倒角到裂纹终端的距离,裂纹宽度是裂纹沿着倒角方向的长度,裂纹的厚度由切削工具的厚度决定。

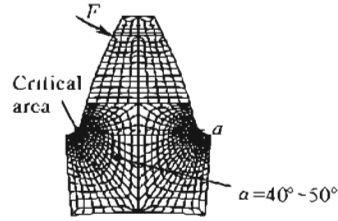


图1 齿轮牙齿的重要区域

Fig.1 Critical area of the gear tooth

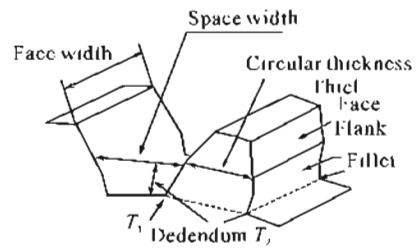


图2 三维齿轮牙齿结构

Fig.2 Three-dimensional the gear tooth

试验目的是检验本文提出的故障诊断方法,研究故障和特征信号之间的关系,齿轮裂纹比例为 $\frac{1}{4b}$ 、 $\frac{1}{2b}$ 、 $\frac{3}{4b}$ 和 $b$ ,齿轮裂纹的厚度是0.4 mm,裂纹深度通常小于弦齿厚 $a$ 的一半,齿轮裂纹深度大于弦齿厚的一半时,轮齿很快就会破裂,裂纹深度的四个等级是 $\frac{1}{4a}$ 、 $\frac{1}{2a}$ 、 $\frac{3}{4a}$ 和 $a$ ,选择深度的四个等级而不是使用固定深度是为了研究裂纹深度和宽

度增加产生的衰退程度对振动数据的影响,断裂角通常从最大压力点开始计算,图2显示裂纹沿着齿根曲线的法线扩展,齿根两边的距离为直线 $a$ ,图1中裂纹的角度在 $40^{\circ} \sim 50^{\circ}$ 范围内变化,实验构造一个 $45^{\circ}$ 角的裂纹,齿轮裂纹的尺寸如表1所示。图3显示在齿轮3和4的垂直方向上的冲击力产生振动,在垂直方向安装的传感器获得这个振动信号,本试验中用第三个齿轮模拟故障。

表1 齿轮箱齿轮3的裂纹几何形状

Table 1 Geometry of the cracks in Gear 3 of the gearbox

Crack fault modes	Geometry of fault			
	Depth /mm	Width /mm	Thickness /mm	Angle /( $^{\circ}$ )
$F_1$	$(1/4)a$	$(1/4)b$	0.4	$45^{\circ}$
$F_2$	$(1/2)a$	$(1/2)b$	0.4	
$F_3$	$(3/4)a$	$(3/4)b$	0.4	
$F_4$	$a$	$b$	0.4	

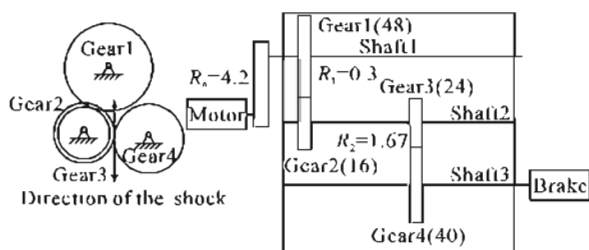


图3 实验系统图

Fig. 3 The diagram of the experimental system

根据主动轮和从动轮齿数间的传动比和发动机的转速,表2给出了每个齿轮的转速和特征频率。从齿轮箱的 SpectraQuest 动态模拟中得到试验振动信号,用来检验本文提出的方法。在齿轮箱的垂直和水平方向装载两个 PCB 352C67 加速器,通过 DSP Siglab 20-42 信号分析器和 Dell Inspiration 7500 笔记本电脑得到振动数据。

表2 齿轮箱旋转速度和特征频率

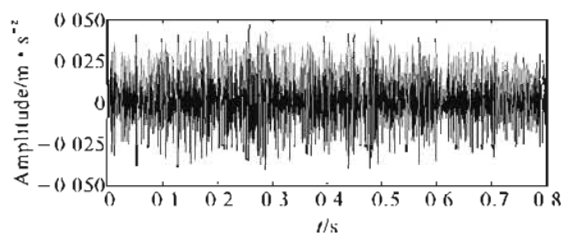
Table 2 Rotational speeds and characteristic frequencies of the gearbox

Motor/ $r \cdot \min^{-1}$	Torque/ $N \cdot m$ less than	$F_1/\text{Hz}$	$F_{12}/\text{Hz}$	$F_2/\text{Hz}$	$F_{34}/\text{Hz}$	$F_3/\text{Hz}$
800	51.77	3.17	152.38	9.52	228.57	5.71
1 000	41.42	3.97	190.48	11.9	285.71	7.14
1 600	25.89	6.35	304.76	19.05	457.14	11.43
2 000	20.71	7.94	380.95	23.81	571.43	14.29
3 000	13.81	11.9	571.43	35.71	857.14	21.43

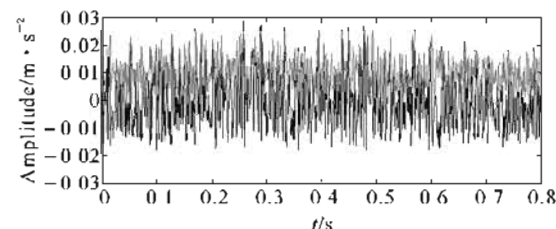
## 4 结果和讨论

本文提出的方法用来分析试验振动信号,当转速是 800 r/min,负载转矩是 100% 时,用 75% 的裂纹长度得到试验振动信号,图 4(a) 显示了试验振动信号(深)和它的 Hilbert 变换(浅),图 5(a) 显示了图 4(a) 试验振动信号频谱,主要频率成分

是 228 Hz 的啮合频率,图 5(b) 显示了图 4(a) 试验振动信号经过 Hilbert 变换得到的信号轮廓的频谱,并且主要频率成分为 228 Hz,使用 Hilbert 变换的目的是解调振动信号中隐藏的频率成分,再一次使用 Hilbert 变换分析图 4(a) (浅) 中的信号包络线得到图 4(b) (浅) 中的包络线,图 5(c) 显示了图 4(b) (浅) 中的信号包络线的频谱,从振动信号中提取包括 228 Hz 和 5.71 Hz 频率成分,综上所述, Hilbert 变换可以有效地解调振动信号,提取出重要的频率成分,但是,如图 5(c) 所示的弱频率成分不足以诊断齿轮箱中的齿轮裂纹。



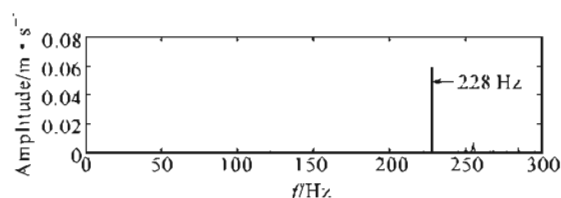
(a) 实验振动信号(深色)和 HT 轮廓(浅色)



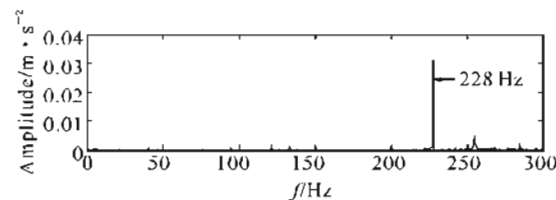
(b) IIT 轮廓(深色)和它的 IIT 信号(浅色)

图4 实验信号的 Hilbert 分析

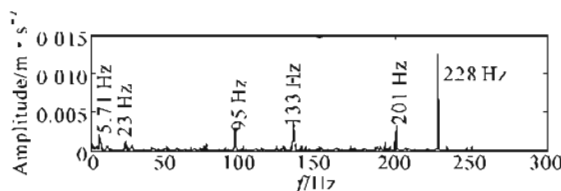
Fig. 4 Hilbert analysis of experimental vibration signal



(a) 实验信号频谱



(b) IIT 变换得到的振动信号轮廓的频谱



(c) 图 4(b) 的振动信号轮廓经过 HT 得到的信号的频谱

图5 振动信号及其 Hilbert 变换的频谱分析

Fig. 5 Frequency analysis of experimental vibration analysis and its Hilbert transform

#### 4.1 齿轮裂纹尺寸的识别

论文的目的在于研究不同裂纹尺寸和振动信号的解调频率成分之间的关系,当转速为800 rpm、负载转矩为满载时的50%,从齿轮箱中得到水平和垂直的振动信号,用本文提出的方法分析五种齿轮状态下的水平振动信号,图6(a)显示了正常状态下的时频表示,可以清晰地提取出频率为3.17 Hz的1号轴和频率为5.71 Hz的3号轴的特征频率,频率为9.52 Hz的2号轴的频率成分没有显示出来。图6(b)显示频率为9.52 Hz的2号轴和5.71 Hz的3号轴的特征频率,没有显示图6(a)中的1号轴的频率成分3.17 Hz,当2号轴上的齿轮有25%的裂纹时,2号轴的频率成分可以被解调和提取。在图6(c)中,齿轮裂纹的长度增加到50%,9.52 Hz的2号轴的频率成分被解调,并且它的振幅在图6(a)、6(b)和6(c)中都是最高的,显示出了频率为5.71 Hz的3号轴的频率成分。当齿轮裂纹是75%时,特征频率成分改变很多,如图6(d)所示,只得到了3号轴的频率成分,其它两根轴的频率成分没有得到。图6(e)显示了齿轮裂纹100%时,振动信号的时频表示,它包括1、2、3号轴的三个频率成分。在图6中,五种齿轮裂纹条件下的特征频率成分是明显不同的。

用本文提出的方法分析了五种齿轮状态下的垂直振动信号,图7(a)显示齿轮裂纹为0%时所得结果的时频表示,它包括频率分别为3.17 Hz、5.71 Hz和9.52 Hz的三根轴的频率成分,当齿轮裂纹是25%时,利用该方法提取频率为3.17 Hz的轴的频率成分,图7(b)显示了当齿轮裂纹为50%时,频率为5.71 Hz的2号轴的频率成分,图7(c)显示了2号轴的频率成分,并且5.71 Hz频率的振幅是五种齿轮裂纹状态下最高的,图7(d)显示了100%齿轮裂纹的结果,显示了频率为9.52 Hz的3号轴的微弱频率。

#### 4.2 转速对齿轮裂纹故障检验的影响

在齿轮箱不同转速的条件下,研究了本文提出的方法的有效性和适用性和齿轮箱的转速与解调频率成分之间的关系,当转速为1 000 r/min、2 000 r/min和3 000 r/min时,得到水平和垂直的试验振动信号,齿轮裂纹长度为0%,负载转矩为满载时的50%。图8显示了用该方法解调信号的时频表示,当齿轮箱的转速是1 000 r/min时,提取频率为7.14 Hz的3号轴的频率成分,如图8(a)所示,图8(b)显示了当齿轮箱的转速是2 000 r/min时,频率是14.29 Hz的3号轴的频率成分,当齿轮箱的转速增长到3 000 r/min时,1

轴、2轴、3轴的频率成分被解调,分别是11.9 Hz、35.71 Hz和21.43 Hz。

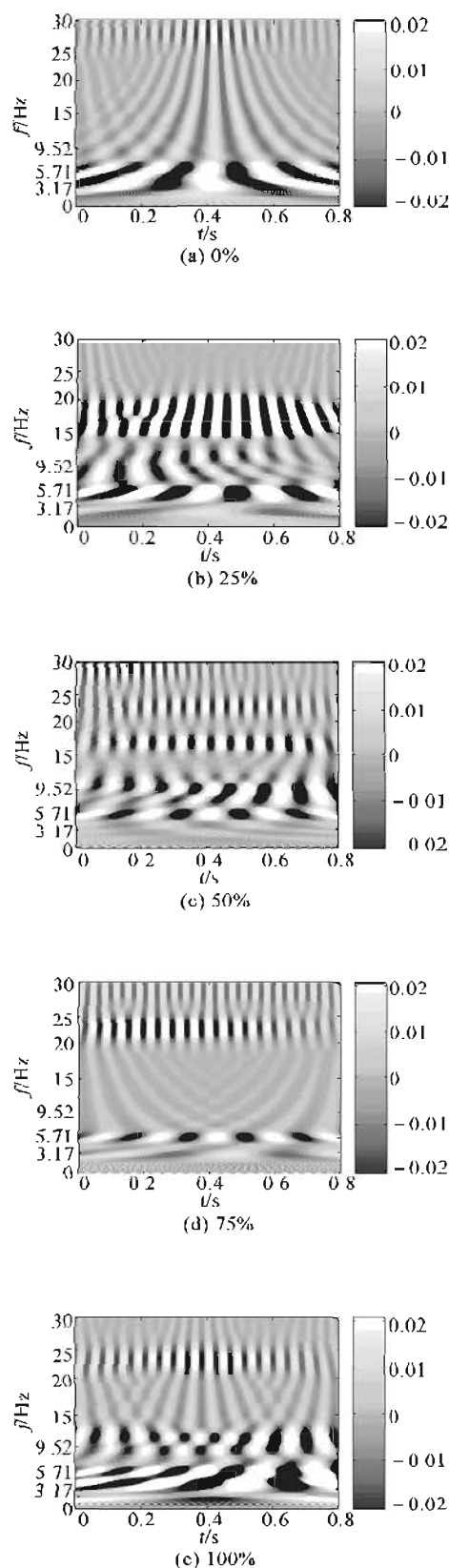


图6 通过提出的方法分析在齿轮裂纹条件下水平振动信号得到的时频显示

Fig. 6 The time-frequency representation of the horizontal vibration analysis by the proposed method under the gear crack

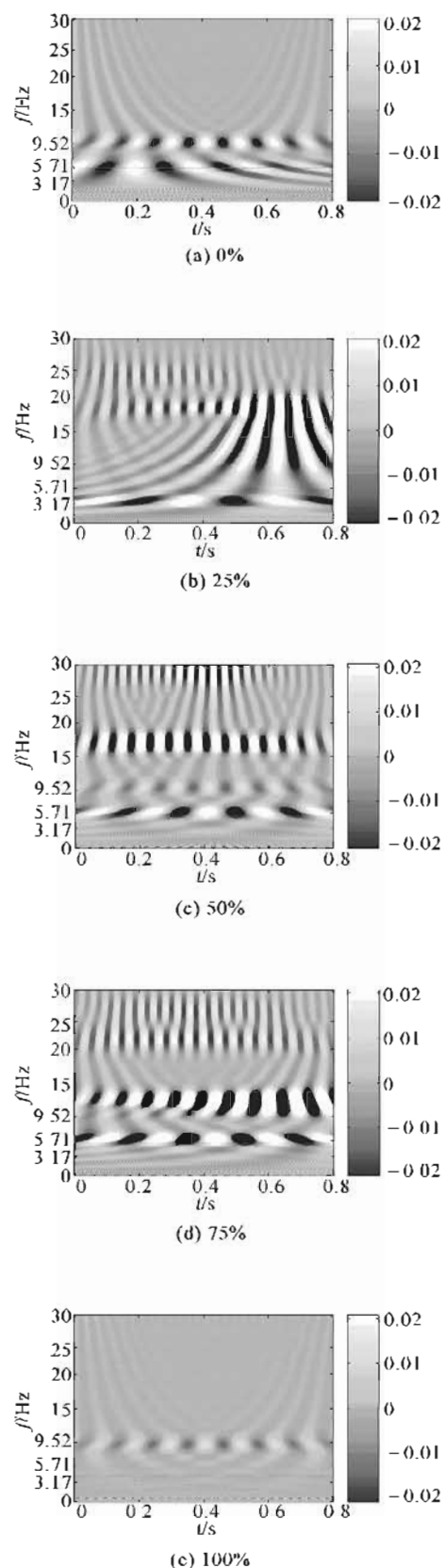


图7 通过提出的方法分析在齿轮裂纹条件下垂直振动信号得到的时频显示

Fig. 7 The time-frequency representation of the vertical vibration analysis by the proposed method under the gear crack

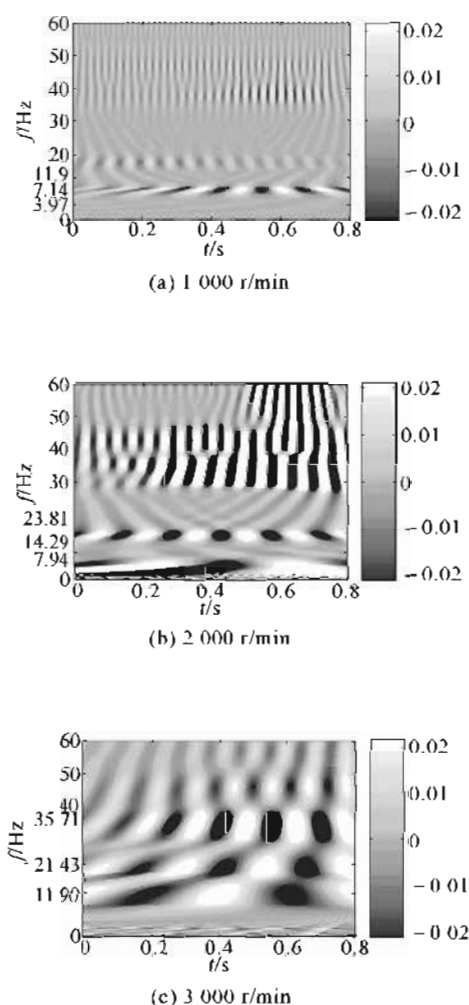


图8 通过提出的方法分析在0%齿轮裂纹和不同转速条件下水平振动信号得到的时频显示

Fig. 8 The time-frequency representation of the horizontal vibration analysis by the proposed method with the 0% gear crack and different speeds

图9 研究转速对轴的解调频率影响,得到25%齿轮裂纹长度的水平试验信号,负载转矩和转速与图(8)中的一样,分析了图8和图9比较的结果.在图9(a)中,提取出频率分别为7.14 Hz和11.9 Hz的1号轴和2号轴频率成分,图8(a)中没有频率为11.9 Hz的频率成分,在图9(b)中,存在包含14.29 Hz和23.81 Hz频率的脉冲振动信号,这与图8(b)中不同,图9(c)显示了频率为35.71 Hz的2号轴的频率成分,没有1号和2号轴的频率成分.

当转速按1 000 r/min、2 000 r/min和3 000 r/min改变时,0%齿轮裂纹解调频率成分的数量和振幅将会增长,随着转速的增加,25%齿轮裂纹的轴的解调频率成分的数量和振幅将会降低,以上的分析是关于转速对齿轮箱中齿轮裂纹故障诊断影响的研究,接下来通过齿轮箱的垂直振动信号来分析齿轮裂纹的故障检测.

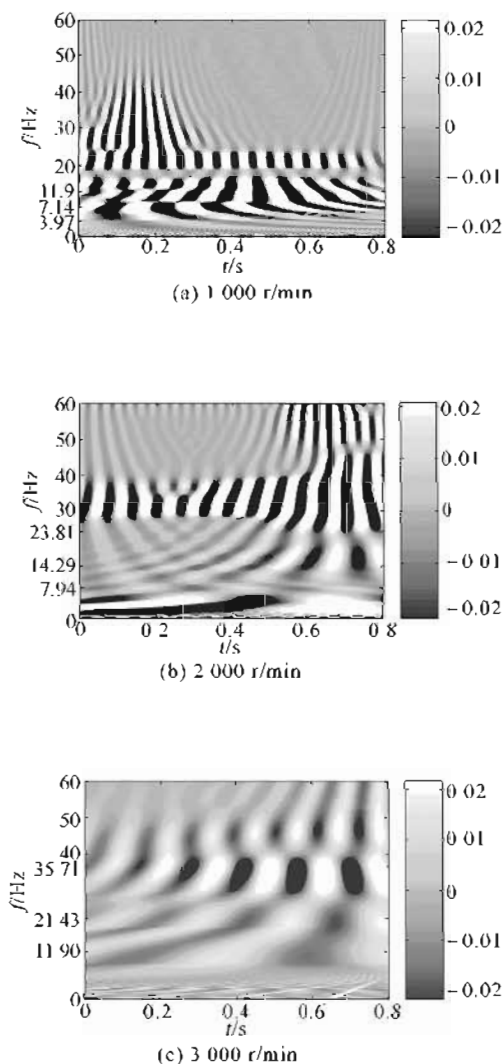


图9 通过提出的方法分析在25%齿轮裂纹和不同转速条件下水平振动信号得到的时频显示

Fig. 9 The time-frequency representation of the horizontal vibration analysis by the proposed method with the 25% gear crack and different speeds

本文提出的方法分析垂直试验振动信号,解调随转速变化的齿轮裂纹故障诊断中三根轴的频率成分,图10显示当负载转矩是50%时,用该方法得到的0%齿轮裂纹的垂直振动信号,在图10(a)中,提取频率为7.14 Hz和11.9 Hz的轴的频率成分,在图10(b)中,解调频率是7.94 Hz的1号轴的频率成分,在图10(c)中,提取频率为35.71 Hz的2号轴的频率成分,已解调的三根轴的频率成分的数量和振幅随着齿轮箱转速的提高而减小。

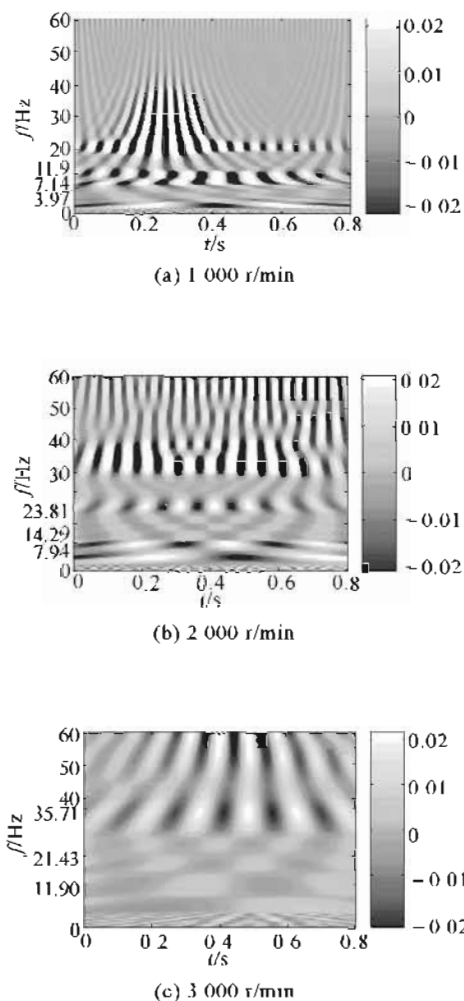


图10 应用提出的方法分析在0%齿轮裂纹和不同转速条件下垂直振动信号得到的时频显示

Fig. 10 The time-frequency representation of the vertical vibration analysis by the proposed method with the 0% gear crack and different speeds

当负载转矩是满载的50%时,用该方法分析25%的齿轮裂纹的垂直振动信号,如图11所示。在图11(a)中,解调了频率分别为3.97 Hz、7.14 Hz和11.9 Hz的三根轴的频率成分,它们的振幅比图10(a)中的高,在图10(a)中没有频率为3.97 Hz的轴的频率成分,在图11(b)中,提取频率为14.29 Hz的3号轴的频率成分,它与图10(b)中的频率为7.94 Hz的1号轴的频率成分不同,图11(c)显示了频率为35.71 Hz的2号轴的频率成分,这与图10(c)中的相同,频率的振幅比图10(c)中的要高,图11中的结果表明,当齿轮箱的转速增加时,已解调的频率成分的振幅和数目会减小。

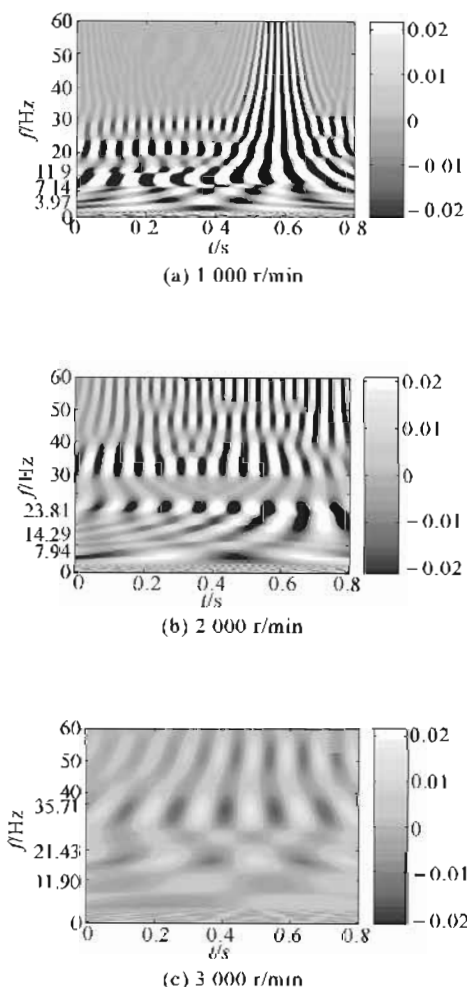


图 11 通过提出的方法分析在 25% 齿轮裂纹和不同转速条件下垂直振动信号得到的时频显示

Fig. 11 The time-frequency representation of the vertical vibration analysis by the proposed method with the 25% gear crack and different speeds

#### 4.3 载荷对齿轮裂纹故障诊断的影响

齿轮箱的载荷对它的振动机构有很大的影响,所以研究负载转矩对齿轮箱故障诊断的影响是十分必要的.当齿轮裂纹是 0% 和 50%、负载转矩是满载转矩的 0%、50% 和 100% 时,得到水平和垂直的试验振动信号.齿轮箱的转速保持恒定,为 1 600 r/min,在 0% 的齿轮裂纹和不同的负载转矩下,通过本文提出的方法得到水平振动信号的时频表示如图 12 所示.在图 12(a)中,当负载转矩是满载的 0% 时,解调了频率为 19.05 Hz 的 2 号轴的频率成分.图 12(b)显示了负载转矩是 50% 时,频率为 19.05 Hz 的 2 号轴的频率成分,还显示了频率为 6.35 Hz 的 1 号轴的频率成分,并且它的振幅很小.在图 12(c)中,负载转矩为 100% 时,频率成分发生了改变,提取了频率分别为 6.35 Hz 和 19.05 Hz 的 1 号和 2 号轴的频率成

分,图 12 说明了随着负载转矩的增加,频率分别为 6.35 Hz 和 19.05 Hz 的轴的频率成分的振幅也逐渐增大,图 12 中没有得到频率为 11.43 Hz 的轴的频率成分.

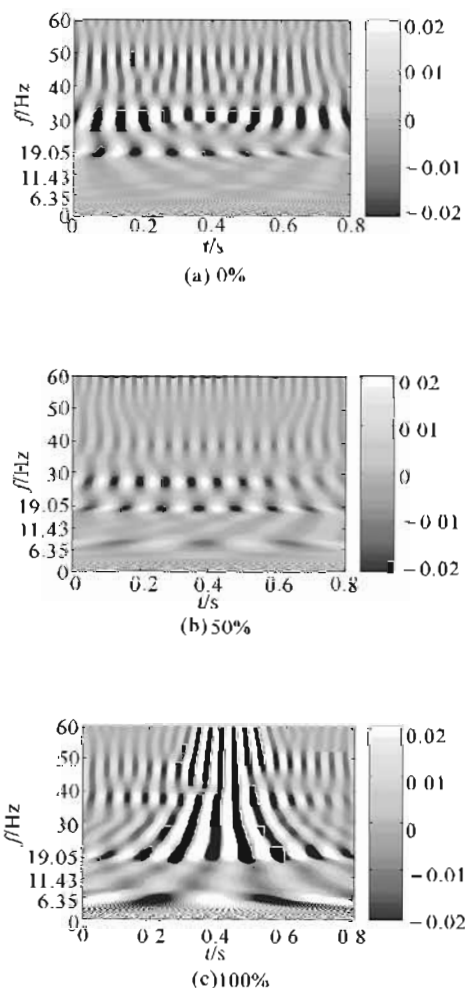
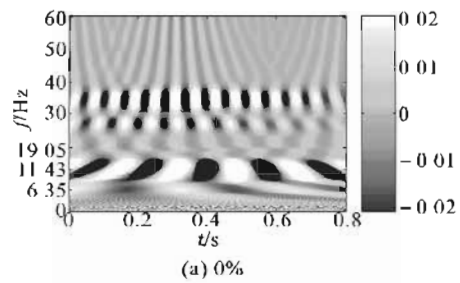
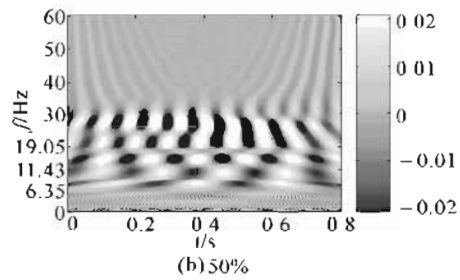


图 12 应用提出的方法分析在 0% 齿轮裂纹和不同负载力矩条件下水平方向振动信号得到的时频显示  
Fig. 12 The time-frequency representation of the horizontal vibration analysis by the proposed method with the 0% gear crack and different load torque

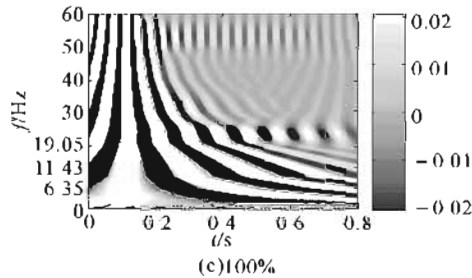
图 13 显示了在 50% 的齿轮裂纹和不同的负载转矩情况下,用该方法分析水平振动信号的时频表示.图 13(a)显示了频率分别为 6.35 Hz 和 11.43 Hz 的轴的频率成分,与图 12(a)中频率为 19.05 Hz 的轴的频率成分不同,图 13(b)显示了三根轴的已解调的频率,它们的振幅要比图 12(b)中的高,在图 13(c)中,有一个脉冲振动信号,包含了频率为 6.35 Hz, 11.43 Hz 和 19.05 Hz 的三根轴的频率成分,与图 12 相比,图 13 中的频率成分发生了改变,并且图 13 中频率成分的振幅比图 12 中相应的要高.



(a) 0%



(b) 50%

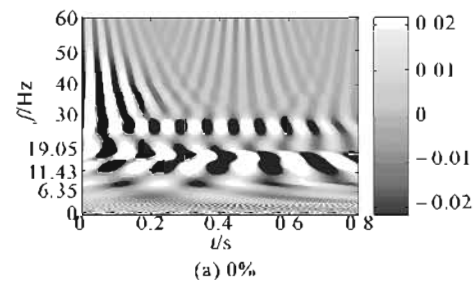


(c) 100%

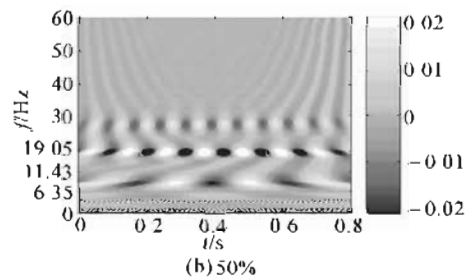
图 13 应用提出的方法分析在 50% 齿轮裂纹和不同负载力矩条件下水平方向振动信号得到的时频显示

Fig. 13 The time-frequency representation of the horizontal vibration analysis by the proposed method with 50% gear crack and different load torques

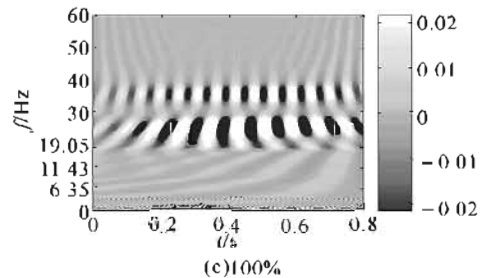
当转速恒定为 1 600 r/min, 负载转矩变化时, 用该方法分析 0% 和 50% 齿轮裂纹的垂直振动信号, 用 0% 齿轮裂纹分析垂直振动的时频表示, 如图 14 所示. 在图 14(a) 中, 解调了频率分别为 11.43 Hz 和 19.05 Hz 的 1 号和 2 号轴的频率成分, 在图 14(b) 中, 得到了频率为 19.05 Hz 的频率成分, 图 12(b) 中频率为 19.05 Hz 的振幅比图 14(a) 中的小, 图 14(c) 中没有显示三根轴的任何频率成分, 随着负载转矩的增加, 三根轴的频率成分逐渐变弱, 直至消失.



(a) 0%



(b) 50%



(c) 100%

图 14 应用提出的方法分析在 0% 齿轮裂纹和不同负载力矩条件下垂直方向振动信号得到的时频显示

Fig. 14 The time-frequency representation of the vertical vibration analysis by the proposed method with 0% gear crack and different load torques

图 15 显示了在 50% 齿轮裂纹和不同负载转矩情况下, 当转速恒定为 1 600 r/min 时, 垂直振动分析的时频表示. 在图 15(a) 中, 提取了频率为 6.35 Hz 的频率成分, 但是很弱. 图 15(b) 中, 解调了频率分别为 6.35 Hz 和 19.05 Hz 的频率成分, 它们的振幅要比图 15(a) 中的高, 图 15(c) 中显示了频率分别为 6.35 Hz 和 19.05 Hz 的频率成分, 它们的振幅比图 15(a) 和 15(b) 中的都高. 随着负载转矩的增加, 已解调频率的振幅越来越高, 而且非常清晰.

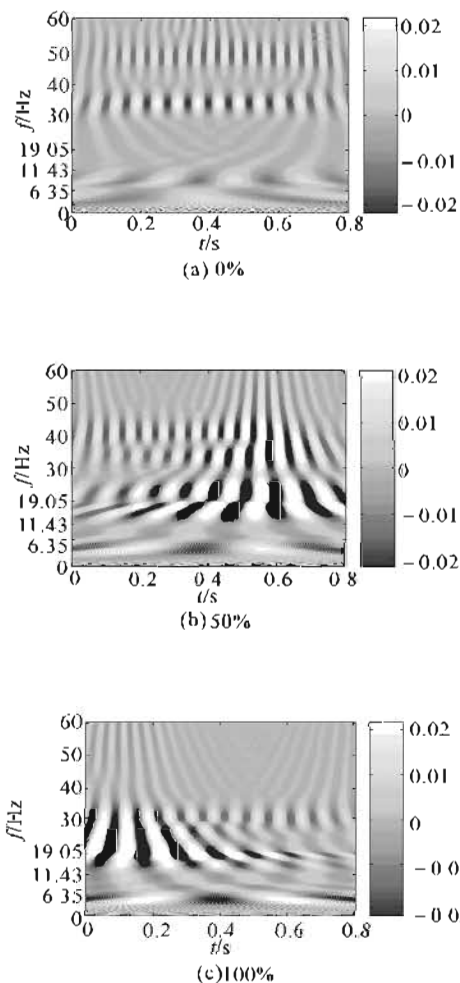


图 15 应用提出的方法分析在 50% 齿轮裂纹和不同负载力矩条件下垂直方向振动信号得到的时频显示  
Fig. 15 The time-frequency representation of the vertical vibration analysis by the proposed method with 50% gear crack and different load torques

## 5 结 语

通过解调三根轴的频率成分,研究了齿轮箱中齿轮裂纹尺寸的故障识别,频率成分是用 Hilbert 变换和自适应小波分析振动信号得到的,用 Hilbert 变换来解调隐藏在振动信号中的频率成分,并从低信噪比的振动信号中得到振动包络,用自适应 Morlet 小波建立振动信号的模型,然后提取三根轴的频率来鉴定齿轮箱中齿轮裂纹的尺寸,用本文提出的方法分析转速和负载转矩对已解调频率成分的影响,从而检验该方法在齿轮箱故障诊断中的有效性和适用性,结果表明该方法对识别齿轮箱中齿轮裂纹尺寸是有效和灵敏的。

致 谢 加拿大 Alberta 大学机械工程学院可靠性研究实验室为此项目提供了试验数据。

## 参考文献:

- [1] Hoseini M, Mandal M K, Zuo M J, et al. Gearbox fault diagnosis using Hilbert transform and segmented regression [A]. Proceedings of the fifth International Conference on Condition Monitoring & Machinery Failure Prevention Technologies [C]. Edinburgh, Scotland UK, 2008; 650 - 656.
- [2] Peng Z K, Chu F L. Application of the wavelet transform in machine condition monitoring and fault diagnostics: a review with bibliography [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2004(18): 199 - 221.
- [3] Ma J, Li C J. Gear defect detection through model-based wideband demodulation of vibrations [J]. Mechanical system and signal processing, 1996; 653 - 665.
- [4] Cheng J S, Yu D J, Yu Y. The application of energy operator demodulation approach based on EMD in machinery fault diagnosis [J]. Mechanical system and signal processing, 2007, 21(2): 668 - 677.
- [5] Zhang J J, Chen B J, Chen X F, et al. Mechanical fault diagnosis based on local mean decomposition method [A]. 2009 international conference on measuring technology and mechatronics automation [C]. 2009; 681 - 684.
- [6] Lin J, Zuo M J. Gearbox fault diagnose using adaptive wavelet filter [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2003; 1259 - 1269.
- [7] Dalpiaz G, Rivola A, Rubini R. Effectiveness and sensitiveness of vibration processing techniques for local fault detection in gears [J]. mechanical systems and signal processing, 2000; 387 - 412.
- [8] Sun W, Chen J, Li J. Decision tree and PCA-based diagnosis of rotating machinery [J]. Mechanical systems and signal processing, 2007, 21(3): 1300 - 1317.
- [9] Ma B, Ma R, Jiang Z, et al. A system of real-time monitoring and fault self-recovering for centrifuge [J]. Journal of Beijing University of Chemical Technology (Natural Science Edition), 2005, 32(3): 2 - 94.
- [10] Chen H X, Chua P S K, Lim G H. Vibration Analysis With Lifting Scheme and Generalized Cross Validation in Machinery Fault Diagnosis [J]. Journal of Sound and Vibration, 2007, 301(3-5): 458 - 480.
- [11] Yu D, Yu Y, Cheng J. Application of time-frequency entropy method based on Hilbert-Huang transform to gear fault diagnosis [J]. Journal of the International Measurement Confederation, 2007, 40(9-10): 823 - 830.
- [12] Huang N E, Shen Z, Long S R, et al. The empirical

- 
- mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis[J]. Proceedings of the Royal Society of London, 1998 ( A 454 ):903 –995.
- [13] Fang X F, Ming J Z. Gearbox fault detection using Hilbert and wavelet packet transform[J]. Mechanical systems and signal processing, 2006(20):966 –982.
- [14] Chen H X, Chua P S K, Lim C H. Adaptive wavelet transform for model of vibration signal and application in fault diagnosis of water hydraulic motor [ J ]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2006(20): 2022 – 2045.

## Fault diagnosis of gearbox with feature extraction from demodulated vibration signal

*CHEN Han-xin, WANG Qing-jun, CHEN Xu-bing, CAI Hong-tao, QING Xiang-pei*

(School of Mechanical and Electrical Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan, 430074, China)

**Abstract:** This paper investigates the fault identification of the gear crack sizes in the gearbox by the demodulated frequency components of the vibration signal, which is based on the Hilbert transform and adaptive wavelet. The Hilbert transform is used to obtain the envelope of the vibration to demodulate the carrier frequency from the vibration signal with low signal-to-noise ratio. The adaptive Morlet wavelet is applied to establish the model of the vibration signal to extract the features from the demodulated carrier frequency to identify the crack sizes of the gears in the gearbox. The proposed method is used to analyze the experimental vibration signals under the different angular speeds, load torques and crack sizes. The results show that the proposed method is effective and sensitive to identify the crack sizes of the gears in gearbox.

**Key words:** fault detection; demodulate vibration signal; hilbert transform

本文编辑:陈小平