

## 基于时频谱融合的加速度计信号分析

朱战辉<sup>1,2</sup>, 汪立新<sup>1</sup>, 张首彦<sup>2</sup>, 刘明珠<sup>1</sup>

(1. 火箭军工程大学, 西安 710025; 2. 中国人民解放军96401部队, 陕西 宝鸡 721006)

**摘要:** 时频谱分析可以提供信号在时间域和频率域的联合分布信息, 针对该方法很难同时保证较高的时间分辨率和频率分辨率的问题, 提出了一种时频聚集性很高的谱融合方法。先用谐波小波包将信号分解到不同频段, 再用高时间分辨率的 Morlet 小波和高频率分辨率的短时傅里叶变换分别对各个频段上的分量进行分析, 得到小波尺度矩阵和短时傅里叶变换时频矩阵, 然后通过算法将二者融合在一个时频谱中。通过仿真和对动态条件下加速度计信号的分析, 证明该算法既能提取出微弱的动态变化, 又具有较高的时频分辨率, 可以直观、全面、精确地对信号进行识别。

**关键词:** 加速度计; 惯性导航系统; 时频谱融合; 谐波小波包; 量测信号处理; 短时傅里叶变换

**中图分类号:** U666.1      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1671-637X(2017)02-0081-04

## Accelerometer Signal Analysis Based on Fusion of Time-Frequency Spectrum

ZHU Zhan-hui<sup>1,2</sup>, WANG Li-xin<sup>1</sup>, ZHANG Shou-yan<sup>2</sup>, LIU Ming-zhu<sup>1</sup>

(1. Rocket Force University of Engineering, Xi'an 710025, China; 2. No.96401 Unit of PLA, Baoji 721006, China)

**Abstract:** Time-frequency spectrum analysis can provide the signal features in time and frequency domains. However, the method is difficult to make a good tradeoff between high time-resolution and high frequency-resolution in the process of signal identification. Therefore, a new algorithm is proposed, which has a good time-frequency concentration. Firstly, the signal is decomposed into different frequency bands by harmonic wavelet packet. Then, Morlet wavelets with high time-resolution, and short-time Fourier transform with high frequency-resolution, are used to analyze the time-frequency distribution of each frequency band. Therefore, Morlet wavelets scale matrix and short-time Fourier time-frequency matrix are obtained. At last, these two matrices are fused into a new matrix with a specific algorithm. Analysis is made to accelerometer dynamic signal under simulation and dynamic condition. The result shows that the fusion algorithm can not only extract the weak dynamic change, but also has high time-frequency resolution, which is an intuitive, comprehensive, and accurate signal identification algorithm.

**Key words:** accelerometer; INS; fusion of time-frequency spectrum; harmonic wavelet packet; measurement signal processing; short time Fourier transform

### 0 引言

加速度计作为惯性导航系统(INS)的核心部件之一,其精度及动态响应特性对系统的输出影响很大。温度、振动、冲击和磁场等环境的变化都会影响其准确性<sup>[1]</sup>。因此,对加速度计信号进行分析具有重要意义,一方面,通过对其实时输出进行在线监测和识别可以为

惯性系统的安全运行提供保证,另一方面,通过对遥测信号(主要来自加速度计)或动态试验的激励响应信号进行分析可以为下一步的结构改进提供依据<sup>[2-3]</sup>。

相对单一的时域分析和频域分析,时频分析通过建立能同时表征信号强度在时间和频率上分布特性的时频谱,可以更为全面地观测到信号的动态变化。文献[4]用短时傅里叶变换(Short Time Fourier Transform, STFT)来对舰船INS的工作状态进行监测,给出了定性和定量的分析;文献[5]通过对加速度计进行 Morlet 小波时频分析,再结合分析结果进行滤波有效地去除了飞机震颤试验中响应信号所包含的非平稳噪声。

收稿日期:2016-02-18

修回日期:2016-03-21

基金项目:二炮装备技术基础项目(EP114054)

作者简介:朱战辉(1978—),男,河南洛阳人,博士生,工程师,研究方向为惯性技术及测试。

本文根据对加速度计信号进行分析过程中频率分辨率和时间分辨率很难兼顾的问题,提出了一种时间分辨率和频率分辨率都很高的频谱融合算法,运用该算法对仿真信号和动态试验中加速度计测量信号进行处理,证明了本文算法的有效性。

## 1 问题描述

### 1.1 加速度计信号特征

加速度计是用来测量线加速度的仪器,实际工作环境比较复杂,尤其在动态条件下,加速度计测量信号频率随时间变化很快,具有典型的非平稳、多分量、宽频带及能量强弱分布不均等特征。因此,只有运用时间和频率分辨率都很高的分析方法才能减小信号失真,并尽可能提取到更多的细节特征。

### 1.2 目前分析方法存在的问题

根据 Heisenberg 测不准原理,时频分析面临的最大问题就是:对于任何一种变换,频率分辨率和时间分辨率不能同时达到最优。也就是说,对于任何一种变换,如果要提高时域分辨率,则频域分辨率必然降低;如果要提高频域分辨率,则时域分辨率必然降低。虽然学者们提出了很多自适应的短时傅里叶变换和小波变换分析方法,但其核心都是根据信号特征在某一个局部取得一个相对较好的、折中的时频分辨率<sup>[6]</sup>。此外,Wigner-Ville 分布(简称 WVD)对于单一分量信号的提取可以取得很好的结果,但该方法在分析多分量信号时会受到交叉项的干扰。文献[7]提出了用 WVD 时频谱与小波尺度谱融合的方法来获得较高的时频聚集性,并用该方法对轴承周期振动信号进行了分析,但 WVD 在分析复杂信号时带来的交叉项虚假信号,对于复杂的加速度计信号辨识来说是不适用的。

## 2 解决方案

针对上述问题,本文提出先用谐波小波包将信号无交叉地分解到不同频带,再用 STFT 时频谱同 Morlet 小波尺度谱互相验证,进而提取真实有用信息的时频谱融合算法。

### 2.1 用谐波小波包提取细节信号

谐波小波包具有极好的“盒形”频谱以及完美的滤波特性,可相当有效地提取微弱特征信号,能根据需要“无限细分”整个频带,在故障诊断领域已取得了广泛的应用<sup>[8]</sup>。因此,本文用谐波小波包来提取有用的细节信号,其频域表达式为

$$\psi_{m,n}(\omega) = \begin{cases} 1/[2\pi(n-m)] & \omega \in [2m\pi, 2n\pi] \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $n = 2^{j+1}$ ;  $m = 2^j$ ,  $j \in \mathbf{Z}^+$ 。

### 2.2 用短时傅里叶变换获得高频率分辨率

短时傅里叶变换是经典的时频分析方法,其定义为

$$S_{\text{STFT},s}(t,f) = \int_{-\infty}^{\infty} s(\tau)h(\tau-t)\exp(j2\pi f\tau) d\tau \quad (2)$$

式中, $h(t)$ 是具有紧支性的窗函数。如果选用高斯函数作为短时傅里叶变换的窗函数,则

$$\phi_T(k) = e^{-\beta k^2/T^2} \quad |k| \leq T \quad (3)$$

式中: $T$ 为窗长; $\beta$ 用来控制高斯函数的尖锐程度。可以用较长的  $T$  来获得较高的频率分辨率<sup>[6]</sup>。文献[9]曾经用 STFT 分析半球谐振陀螺动态信号,取得了理想的效果。

### 2.3 用 Morlet 小波来获得高时间分辨率

Morlet 小波是一种常用的非正交小波,近年来被广泛应用于滚动轴承、地震及加速度计信号的特征提取及辨识<sup>[5,10]</sup>。Morlet 小波时域表达式为

$$m(t) = \exp\left[-(t-t_0)^2 f_m^2 \cdot \ln \frac{2}{k}\right] \cdot \exp[i2\pi f_m(t-t_0)] \quad (4)$$

式中: $k$ 为控制 Morlet 小波带宽的常数,即尺度因子; $t_0$ 为时间延迟; $f_m$ 为主频率。尺度因子  $k$  控制着小波在时间域的宽度和频谱的宽度,调节  $k$  可以获得较高的时间分辨率。

## 3 时频谱融合算法设计

运用谐波小波包对信号进行分解的目的是避免能量相对微弱的信号被湮没,结合加速度计信号特点,一般对信号进行二尺度小波分解,即获得 4 个频率子带便可满足要求。算法流程如图 1 所示。

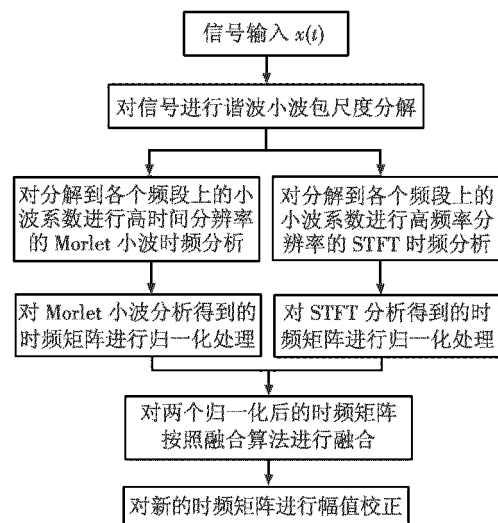


图 1 时频谱融合算法流程图

Fig. 1 Flow chart of time-frequency fusion method

Morlet 小波变换和 STFT 时频分析会得到两个不同的时频矩阵,因此,在融合前要对这两个矩阵的每一

个元素进行归一化处理<sup>[7]</sup>。归一化算式为

$$\phi'(t, f) = \frac{\phi(t, f) - \phi_{\min}}{\phi_{\max} - \phi_{\min}} \quad (5)$$

式中： $\phi_{\max}$ 和 $\phi_{\min}$ 是时频矩阵的最大值与最小值； $\phi'(t, f)$ 是归一化后得到的矩阵。

通常情况下,当设置时间分辨率高时得到的频谱图往往是时间域的聚集性较好,频率域范围很大,聚集性差;而频率分辨率高时得到的频谱图往往是频率域的聚集性很好,辨识精度较高,时间域范围很大,聚集性差。那么可以认为,这两张时频谱图中交叉重叠的部分就是时频聚集性都好的部分。因此提出,用时宽较小的 Morlet 小波对信号进行分析,以取得高时间分辨率的时频矩阵  $X$ ;用频宽较小的 STFT 对信号进行分析,以取得高频率分辨率的时频矩阵  $Y$ 。然后利用式(5)对  $X$  和  $Y$  的归一化时频矩阵  $X'$  和  $Y'$  进行融合,得到  $Z'$ 。

$$z' = \min(\min(x', y') \times (x' + y'), 1) \\ x' \in X'(t, f), y' \in Y'(t, f) \quad (6)$$

式中, $X'(t, f)$ 和 $Y'(t, f)$ 分别是 Morlet 小波和 STFT 计算得到的归一化时频矩阵。从式中可以看出,通过比较两个归一化矩阵同一位置元素的大小,取其中较小一个变换后作为新矩阵该位置的元素,这样就弱化了频率分辨率低或者时间分辨率低所带来的不准确的频谱计算幅值;只有当时间分辨率高、频率分辨率也高时获取的量值才能得以保留。由于进行了归一化,所以时频矩阵元素的幅值发生了变化,为了更准确地还原信号能量的强弱,用下式来进行幅值校正。

$$z = z' \times (|x_{\max} - x_{\min}| + |y_{\max} - y_{\min}|) / 2 \quad (7)$$

这样,最终就得到了新的时频矩阵  $Z$ 。为方便起见,把新方法称为 Morlet and Short-Time Fourier Fusion Transform (MSFT),下面通过仿真信号和加速度计动态试验信号对其进行验证。

### 4 仿真试验验证

仿真信号用文献[8]中包含短时微弱干扰的多载波调幅信号仿真模型来进行分析,信号的数学表达见式(8),对此仿真信号以 1024 的采样率采集 1024 个点。

$$y(t) = \begin{cases} [1+0.3\cos(10\pi t)]\sin(300\pi t) + [1+0.5\cos(10\pi t)]\sin(600\pi t) + \\ [1+0.8\cos(20\pi t)]\sin(800\pi t) & 0 \leq t \leq 1 \text{ s} \\ [1+0.3\cos(10\pi t)]\sin(300\pi t) + [1+0.5\cos(10\pi t)]\sin(600\pi t) + \\ [1+0.8\cos(20\pi t)]\sin(800\pi t) + 0.05\sin(240\pi t) & 0.250 \text{ s} \leq t \leq 0.375 \text{ s} \end{cases} \quad (8)$$

图 2 是仿真信号及其频谱图,可见单一的频谱图可提取出的信息非常有限。

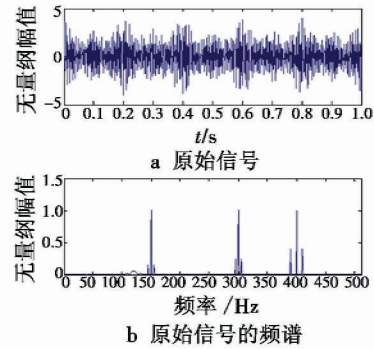


图 2 仿真信号及其频谱图

Fig. 2 The simulation signal and its frequency spectrogram

图 3 是在不进行小波分解的情况下用高时间分辨率的 Morlet 小波变换、高频率分辨率的 STFT 变换和本文提出的谱融合 MSFT 方法对完整的仿真信号进行分析的时频图。可以看到, Morlet 小波时频图的时间聚集性较好,但频率分辨率很低,分布范围大;而 STFT 时频图则恰恰相反,再一次验证了 Heisenberg 测不准原理的正确性;只有基于两种变换方法进行融合的 MSFT 时频图分析法可以把所有的信息都展现出来,甚至包括 5 Hz 和 10 Hz 的多载波调幅信号的调制信号及其能量变化。

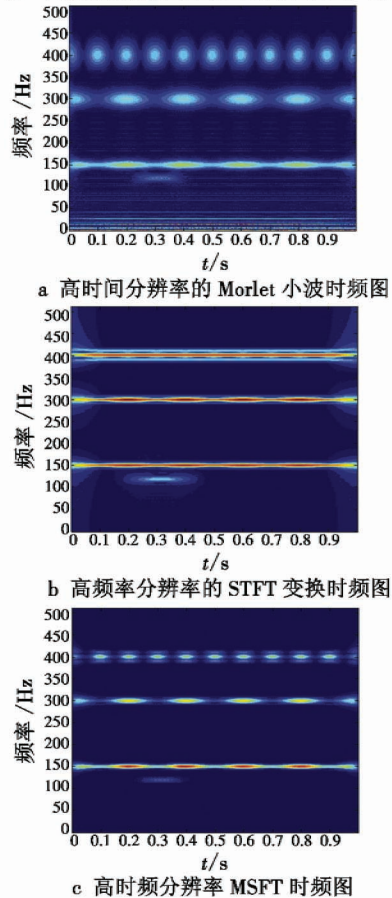


图 3 不同方法仿真信号分析的时频图

Fig. 3 Time and frequency diagram of simulation signal analysis with different methods

然而,由于 MSFT 方法是针对信号整体的频谱分析方法,在同一幅时频图中,较强的信号容易使较弱的信号无法得到清晰表征,因此,要想对微弱信号或复杂信号进行更为细致准确的辨识,用谐波小波包对整体信号进行分解也是十分必要的。

图4~图5为用 db40 小波包+STFT 变换同本文提出的 MSFT 谱融合分析做比较。同样将原始信号进行二尺度分解,用这两种方法对小波尺度系数的第1层进行分析。可以看到,MSFT 分析方法准确地把微弱信号发生的时间定位在 0.250~0.375 s 之间,把信号的频率定位在 120 Hz 左右,而且聚集性非常好;而 STFT 方法引入了虚假的 100 Hz 的信号,时间定位在 0.2~0.4 s,对微弱信号的辨识能力远远小于 MSFT 方法。

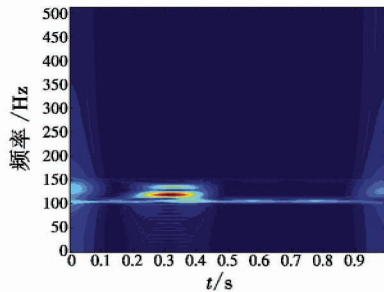


图4 用 STFT 提取微弱信号时频图

Fig. 4 The extraction of weak signal by STFT

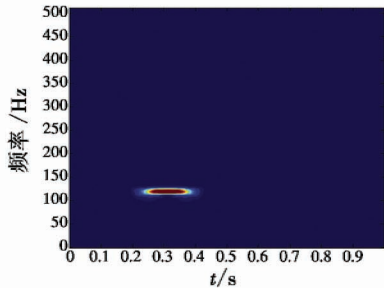


图5 用 MSFT 提取微弱信号时频图

Fig. 5 The extraction of weak signal by MSFT

### 5 加速度计动态试验信号分析

以动态试验中加速度计的输出信号为例,加速度输出信号采样频率 1000 Hz,采集时间约 2 s。对原始信号进行谐波小波包分解,用本文提到的方法对第3层子带进行时频分析。通过比较 Morlet 小波、短时傅里叶变换及本文提出的 MSFT 方法对加速度计输出信号的辨识效果来验证算法的有效性。

从图6中可以看到,在谐波小波分解第3层子带中,信号能量在时间序列上的聚集点约为4个,频率上的聚集点约为5个,但它们是如何对应的却很难被辨识出来。本文算法可以在一幅时频谱图上准确地把聚集点的时频分布特征及能量强弱表征出来。图7为用不同的时频分析方法对该信号进行分析的结果。

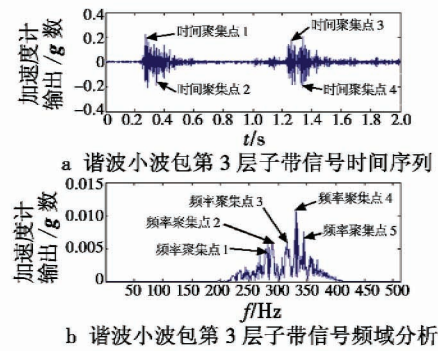


图6 加速度计信号及其频谱图

Fig. 6 The accelerometer signal and its frequency spectrogram

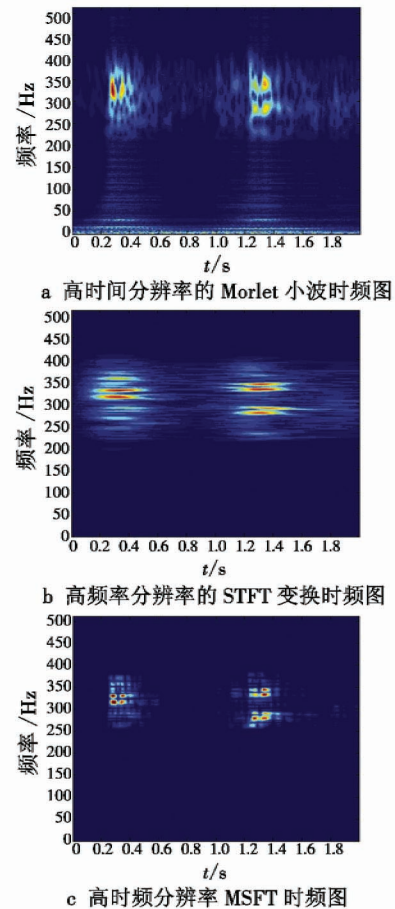


图7 不同方法动态试验信号分析的时频图

Fig. 7 Time and frequency diagram of dynamic test signal analysis with different methods

从图7c中可以看到,各个能量聚集点在时间和频率上的分布都一一对应起来,很容易对其进行定位。MSFT 方法可以及时准确地观测到加速度信号的整体时频分布。

### 6 结束语

本文提出了一种将高时间分辨率的 Morlet 小波尺度谱同高频率分辨率的 STFT 时频谱融合在一起的时  
(下转第94页)

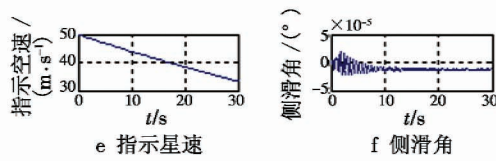


图6 地面模型减速滑跑仿真曲线

Fig. 6 The simulation curves of ground model in decelerated taxiing

由图6可以看出,在关闭发动机、无人机初始速度为50 m/s、无人机起始减速滑跑时,侧向位移 $y$ 和偏航角 $\psi$ 均为零,除指示空速 $V$ 从初始的50 m/s在地面摩擦力的作用下不断减小、侧向位移 $y$ 稍有变化之外,侧向速度 $v_y$ 、偏航角 $\psi$ 、偏航角速度 $r$ 和侧滑角 $\beta$ 在零附近波动。无人机模型对称,初始侧向位移和偏航角为0,在减速滑跑过程中,根据无人机在地面运动的动力学分析,纵向摩擦力的作用使无人机逐渐减速;横侧向轮胎不存在侧偏角,空气动力中的侧力为零,横侧向受力平衡,无人机不会出现侧向位移和侧向偏角;垂直方向无人机在重力、升力和地面支撑力的作用下保持平衡,垂直方向运动为零。通过仿真测试可知,建立的无人机的地面模型能按照动力学分析的物理过程正确完成地面减速滑跑过程。

## 5 结论

本文建立了样例无人机的起落架和轮胎模型,进行了无人机地面滑跑时的动力学分析,通过综合无人机所受的各外力及其相应的力矩,根据牛顿第二定律

最终得到完整的全量非线性模型。设计了六自由度的飞行仿真系统,对模型进行了加速起飞和减速滑跑的自由滑行仿真,仿真结果和动力学分析的物理过程相符,结果表明模型正确。

## 参考文献

- [1] 张华亮. 飞翼无人机地面滑跑建模与航向控制[J]. 系统仿真学报, 2008, 20(24): 6759-6762.
  - [2] 李峰, 曹云峰, 曹善文. 某型无人机着陆过程中地面滑行段的建模与仿真[J]. 指挥控制系统与仿真, 2006, 28(2): 92-94.
  - [3] 袁东. 飞机起落架仿真数学模型研究[J]. 飞行力学, 2002, 20(4): 44-47.
  - [4] 曹荣生. 飞机起落架模型建立及着陆性能仿真分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2014.
  - [5] 陈磊. 飞翼飞行平台地面滑跑建模与航迹纠偏控制研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2009.
  - [6] HANKE C R. The simulation of a large jet transport aircraft[R]. Wichita: The Boeing Company, 1971.
  - [7] 张曾铝, 张江监, 王裕昌. 飞机起落架滑行载荷识别[J]. 航空学报, 1994, 15(1): 18-27.
  - [8] KARIYA Y, YAHAGI H. Modeling and designing aircraft taxiing patterns for a large airport[J]. Advanced Robotics, 2013, 27(14): 1059-1072.
  - [9] 胡浩. 无人机进场着陆/地面滑跑控制与仿真[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2011.
  - [10] SILKOY V, ZIRKA A. Calculation of the characteristics of a UAV launch from a ramp[J]. Aviation, 2014, 18(4): 178-184.
- (上接第84页)
- 频谱分析方法,该方法具有以下几个优点:
- 1) 具有很好的时频聚集性,可以准确地辨识出信号能量的时频分布及能量强弱;
  - 2) 用谐波小波包提取能量较弱的信号,避免弱小的有用信息被忽略掉;
  - 3) 可以快速、全面、直观地对动态条件下加速度计的量测信号进行分析,对于动态环境下惯性仪表输出的实时监控、惯性导航系统遥测数据的在线分析都具有很高的应用价值。
- ### 参考文献
- [1] 于湘涛, 张兰, 郭琳瑞, 等. 基于小波最小二乘支持向量机的加速度计温度建模和补偿[J]. 中国惯性技术学报, 2011, 19(1): 95-98.
  - [2] 崔贵磊, 唐永华. 基于时频分析的运载火箭故障特征提取技术[J]. 北京航空航天大学学报, 2012, 38(6): 741-744.
  - [3] 刘学, 玄志武, 梁红, 等. 基于多尺度峭度谱图的遥测振动信号异常检测[J]. 弹箭与制导学报, 2015, 35(5): 187-190.
  - [4] 王光源, 马海洋, 庞文强. 基于时频分析的陀螺平台工作状态识别方法[J]. 舰船科学技术, 2011, 33(3): 78-81.
  - [5] 唐炜. 颤振试验中加速度计信号的时频滤波方法研究[J]. 传感技术学报, 2009, 22(2): 219-224.
  - [6] PEI S C, HUANG S G. STFT with adaptive window width based on the chirp rate[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2012, 60(8): 4065-4080.
  - [7] 龚海健, 黄伟国, 赵凯, 等. 基于 Wigner-Ville 分布与小波尺度谱融合的时频特征提取方法[J]. 振动与冲击, 2011, 30(12): 35-38.
  - [8] 田福庆, 罗荣. 改进的谐波小波包变换及其在弱故障特征提取中的应用[J]. 振动与冲击, 2013, 32(17): 29-34.
  - [9] 朱战辉, 汪立新. 提升小波变换在 HRG 动态信号处理中的应用[J]. 电光与控制, 2015, 22(8): 29-32.
  - [10] 范兴利, 成谷. 基于 Morlet 小波尺度参数寻优的匹配追踪时频分析[J]. 中山大学学报, 2014, 53(6): 85-92.