## 第 30 卷 第 3 期 石家庄铁道大学学报(自然科学版) Vol. 30 No. 3

2017年9月 Journal of Shijiazhuang Tiedao University(Natural Science Edition) Sep. 2017

# 基于自适应 Morlet 小波变换滚动轴承 声学故障诊断的研究

#### 李静娇, 陈恩利, 刘永强

(石家庄铁道大学 机械工程学院,河北 石家庄 050043)

摘要:基于声音信号的测试与分析是滚动轴承故障检测与诊断的一种新方法,提出了基于 自适应 Morlet 小波变换诊断轴承声学信号故障的新方法。首先利用最小 Shannon 熵对 Morlet 小波的形状参数进行优化,找到与所测声音信号特征成份最匹配的小波,再对小波系数矩阵进 行奇异值分解,通过奇异值与变化尺度的关系曲线得到最佳小波变换尺度,最后对滚动轴承故 障信号进行 Morlet 小波变换进行故障特征提取。结果表明:该方法能有效地从强噪声背景下提 取出轴承声学信号的故障。

关键词:声学信号;小波变换;Shannon 熵;故障诊断

中图分类号:TN911;TH133.33 文献标志码:A 文章编号: 2095 - 0373(2017)03 - 0029 - 05

0 引言

轴承故障是列车行驶中最大的故障源之一。且与其他零部件相比,轴承的显著特点是其寿命离散性 较大<sup>[1]</sup>。目前进行故障诊断的方法很多,但振动信号分析法最为广泛。声学信号分析法具有非接触测 量、无需事先粘贴传感器、信号易于测取、早期发现故障等优点,尤其适合于不易于振动信号测取的场 合<sup>[23]</sup>。但由于实际声场的复杂性造成声学信号信噪比比较低,声学故障诊断技术的发展渐渐地落后于 振动故障诊断技术。

早在 20 世纪 80 年代中期,美国铁路就开始研究轴承的声学早期诊断技术。Servo<sup>[1]</sup>等公司研制了地 面声学探测系统,成功地实现了轴承早期故障诊断与监测。随后 TTCI<sup>[4]</sup>开发了由多个声传感器组成的 传感器阵列,解决了很多关键性问题,进一步提高了诊断的准确性。吴强<sup>[5]</sup>提出了盲源分离和等间隔尺 度小波变换相结合的方法,实现了混合声音信号中的微弱成分提取。张翱<sup>[6]</sup>提出了一种用于列车轴承声 信号故障特征提取的小波尺度方差斜率特征提取方法,该方法具有很好的聚类性和稳定性。本文提出了 一种基于优化的 Morlet 小波滚动轴承声学故障诊断的新方法,通过对实测轴承声音信号的验证,结果表 明该方法能够很好地识别轴承故障。

### 1 Morlet 小波变换理论

设信号  $f(t) \in L^2(R), \phi(t)$ 为母小波函数,将母小波函数进行伸缩、平移得

$$\psi_{a,b}(t) = |a|^{-\frac{1}{2}} \psi(\frac{t-b}{a}) \tag{1}$$

式中, $a \in R - \{0\}$ ,反映函数的尺度; $b \in R$ ,表示沿轴平移位置; $\phi_{a,b}(t)$ 称为小波函数,简称小波。f(t)的连续小波变换为信号与小波函数的内积,即

收稿日期:2016-06-21 责任编辑:刘宪福 DOI:10.13319/j.cnki.sjztddxxbzrb.2017.03.06 基金支持:国家自然科学基金(11227201,11472179,U1534204,11572206,11302137);河北省自然科学基金(A2015210005);河北省教育厅 项目(YQ2014028) 作者简介:李静娇(1990-),女,硕士研究生,研究方向为旋转机械的故障诊断。E-mail:809024520@qq.com 通信作者:陈恩利(1958-),男,硕士,教授,研究方向为非线性振动、振动测试等。E-mail:chenenl@stdu.edu.cn

李静娇,陈恩利,刘永强.基于自适应 Morlet 小波变换滚动轴承声学故障诊断的研究[J].石家庄铁道大学学报:自然科学版,2017,30(3): 29-32.,47

$$Wf(a,b) = CWT(a,b) = \langle f(t), \psi_{a,b}(t) \rangle = |a|^{-\frac{1}{2}} \int f(t)\psi(\frac{t-b}{a}) dt$$
(2)

式中,母小波  $\psi(t)$ 的选择不是随意的,需要满足如下允许条件

$$C_{\psi} = \int_{0}^{+\infty} \frac{|\psi(\hat{\omega})|^{2}}{\omega} d\omega \langle +\infty$$
(3)

声音信号具有快速衰减的特性,从几种常用小波基函数(dbN、Haar、Morlet、sym)的波形可知,Morlet 小波的波形为双边指数衰减的余弦信号,与脉冲振荡的波形非常相似,而且具有指数衰减的性质。因 此本文采用 Morlet 小波作为小波基函数,它是高斯包络下的复指数函数,其表达式为

$$psi(t) = (\pi f_b)^{-\frac{1}{2}} \exp(i2\pi f_c t) \exp(-t^2/f_b)$$
(4)

为了避免复 Morlet 小波在频域滤波时引起相位失真,常采用其实部作为母小波<sup>[7-8]</sup>,数学表达式为

$$psi_1(t) = (\pi f_b)^{-\frac{1}{2}} \cos(2\pi f_c t) \exp(-t^2/f_b)$$
(5)

其对应的傅里叶变换表达式为

$$PSI_{1}(af) = \exp(-\pi^{2} f_{b}(af - f_{c})^{2})$$
(6)

式中,  $f_b$  为形状参数, 决定了波形振荡衰减的快慢程度;  $f_c$  为中心频率, 决定了小波波形的振荡频率。因此, 根据信号自身特点, 可设计一个与特征成分最匹配的母小波, 即优化 Morlet 小波的  $f_b$  和  $f_c$ 。已知  $f_c$  和 a 具有一定的关系, 因此可以通过调节  $f_b$  和 a 来调整 Morlet 小波的时频分辨率, 以适应所要分析的 信号<sup>[9-10]</sup>。

#### 2 自适应 Morlet 小波设计

#### 2.1 Morlet 小波的形状参数优化

在轴承故障特征提取时,往往希望增强信号的特征成分,抑制信号的无关成分。这就需要调整  $f_b$ ,使 Morlet 小波与所测信号的特征成分最相似。而"稀疏性"<sup>[1-12]</sup>常被用来表示信号之间的相似程度。本文 采用最小 Shnnon 熵来作为"稀疏性"的定量描述。即通过计算 Shnnon 熵值来确定最佳形状参数。首先 确定尺度 a 的取值范围,然后由小波变换得到一系列的小波变换系数,再对这些系数进行处理,得到一不 确定的概率分布序列  $p_i$ ,再由  $p_i$  求得 Shnnon 熵值 H(p)。通过改变  $f_b$  的大小,可确定出 H(p)随  $f_b$  代 入值不同而变化的规律。H(p)的表达式为

$$H(p) = -\sum_{i=0}^{n} p_i \log p_i, \quad \sum_{i=1}^{n} p_i = 1$$
(7)

式中, pi 为不确定的概率分布, 其表达式为

$$p_{i} = |w(a_{i},t)| / \sum_{j=1}^{n} |w(a_{j},t)|$$
(8)

通过分析可知,当 H(p) 取最小值时,所得到的 Morlet 小波与信号特征成分相似度最高。即最小值 H(p)所对应的  $f_{i}$  值就是最优的带宽参数。

2.2 Morlet 小波的尺度参数优化

由于尺度参数 a 决定了小波滤波时的频带范围,因此,在选定与特征成份最匹配的小波后,通过选择 合适的尺度参数 a,就可以从含有噪声信号中提取出故障信息。

本文采用奇异值分解技术(SVD)<sup>[13]</sup>,信号各成分奇异值的分布规律不同,利用该不同来检测突变信息。假设一突变型的机械系统故障信号,该测试信号为 $x_1, x_2, \cdots$ ,把它重新构成一个 $m \times n$  维的矩阵 $D_m$ , 其中, $D_m = D + W + V, D$  是光滑信号对应的矩阵,W 是突变信息对应的矩阵,V 是噪声对应轨迹矩阵。对  $D_m$  进行奇异值分解, $D_m = USV, U \in R^{M \times N}, V \in R^{m \times n}, \pm UU' = I, VV' = I$ 。S 是一个 $m \times n$  维的对角矩阵, 而对角线上的元素为 $\lambda_1, \lambda_2, \cdots, \lambda_n$ ,该矩阵的秩为 $p, p = \min(m, n)$ ,通常 $n < < m, \lambda_1 \ge \lambda_2 \ge \cdots \ge \lambda_n$ 为 $D_m$ 的奇异值,U 和 V 表示左右奇异矩阵。其具体计算步骤为:对小波变换后的系数矩阵W(a,b)进行奇异值 分解,得到变换尺度a与奇异值的关系曲线。通过以上的分析可知:系数矩阵的突变信息特征主要由过 渡阶段的奇异值决定,所以,最佳的小波变换尺度范围对应于过渡阶段的奇异值。分析尺度范围的每个 第3期

尺度,对结果进行比较就可得到效果最好的尺度 a,也就是所求的最佳变换尺度 a。

#### **3** 实验验证

#### 3.1 实验系统

实验所用故障模拟实验平台为江苏千鹏诊断 工程有限公司开发研制的 QPZZ-II 型实验台。 QPZZ-II 型实验台可在机械运转时测量出正常工 况信号和有效的故障信号,可以对测得的信号进 行分析处理,实验台如图 1 所示。实验选用 NU205EM 型号的滚动轴承作为实验对象。为了 信号的模拟仿真,用电火花对轴承的外圈进行切 割,模拟点蚀故障。在轴承的外圈内表面加工出 直径为 1 mm 的槽。实验所选的传感器为 M201 的 ICP 声传感器,该传感器内置一个对声音敏感



图 1 旋转机械故障诊断实验系统

的电容式驻极体话筒,声波使话筒内的驻极体薄膜振动,导致电容的变化,而产生与之对应变化的微小电压。这一电压随后被转化为 0~5 V 电压。经过 A/D 转换被数据采集器接受,并传送给计算机。在实验过程中,通过设置不同的采样频率和不同的转速,采集了大量有效的实验数据。

3.2 实验数据分析

图 2 为现场采集的滚动轴承声音信号时域波形图。本实验采用的轴承滚动体个数为 z=13,球直径  $D_w=7.2 \text{ mm}$ ,节圆直径  $D_m=38.5 \text{ mm}$ ,接触角  $a=0^\circ$ ,外圈转速 n=1 180 r/min,采样频率  $f_s=24$  000 Hz。经计算得外圈故障特征频率为 f=103.92 Hz。

由于来自各界噪声的干扰,包括外界环境、回声、电机、试验台等对其均会造成干扰,且声学信号的信 噪比很低,通过观察时域和频域特征可知,该测试信号具有很大的噪声,时域信号几乎观测不到特定的故 障特征。通过分析频谱曲线,发现中心频率及边频带不明显,须作进一步的分析处理。时域图和频谱图 如图 2 和图 3。



对该声音信号做 Morlet 小波变换,尺度  $a \in [0, 1, 30]$ ,取  $f_c = 0.5$ ,得到小波熵与  $f_b$  的关系曲线如图 4 所示。

由图 4 可得,当  $f_b$ =23.63 Hz 时,H(p)有最小值,H(p)=5.049,即这时 Morlet 小波与所测声音信 号的特征成分最相似。

对声音信号进行 Morlet 小波变换得到小波系数矩阵,尺度  $a \in [0.1,30]$ ,  $f_b = 23.63$  Hz,再对小波系数矩阵进行奇异值分解,得到奇异值分布特征图,如图 5。



由图 5 可以得出,过渡区间的奇异值曲线的最佳变换尺度范围为  $a \in [0, 7, 9, 5]$ ,为更快更准确的从 尺度范围内得出最佳尺度,可以先设步长为 0.5,便可进一步得到更小的尺度范围,再接着对尺度参数 a设步长为 0.1,进行分析比较,即可求得最佳的变换尺度 a=5。

对自适应小波变换处理后的最佳尺度的小波系数取 模得到小波实部系数,再对其系数进行包络谱分析,结果 如图 6 所示。

从图 6 可以得出,对应外圈故障的特征频率 101.8 Hz 处轴承出现了故障,与实际理论值基本相符,因此, 采用本方法可对声音信号的故障特征进行提取,且具有 很好的效果。

#### 0.040 0.035 0.030 0.025 0.020 0.015 0.010 0.005 0.010 0.005 0.010 0.005 0.010 0.005 0.010 0.005 0.010 0.005 0.010 0.025 0.010 0.025 0.010 0.025 0.010 0.025 0.010 0.025 0.010 0.025 0.010 0.015 0.010 0.015 0.015 0.010 0.015 0.015 0.015 0.010 0.025 0.015 0.

图6 小波优化功率谱图

基于自适应 Morlet 小波变换法能有效的从强噪声背景 中对轴承声学信号故障特征进行提取,具有一定的工程 应用价值。因此,本方法对滚动轴承声学故障特征提取具有重要意义。

对滚动轴承实测故障声学信号进行分析,结果表明:

参考文献

[1]刘瑞扬,王毓民.铁路货车滚动轴承早期故障轨边声学诊断系统原理及应用[M].北京:中国铁道出版社,2005:16-73. [2]赵佳萌,杨江天.基于声信号小波变换的滚动轴承故障诊断[D].北京:北京交通大学机械与电子控制工程学院,2009. [3]卫耀东.基于声音信号的轴承故障诊断方法研究[D].大连:大连理工大学电子与通信工程学院,2008.

[4]戴光,王美波,于江林,等.滚动轴承故障声学信号小波分析方法研究[J].化工机械,2007(2):249-249.

[5]吴强.基于道旁声学信号的列车滚动轴承故障诊断技术研究[D].合肥:中国科学技术大学精密仪器及机械学院,2013.

[6]张翰.列车轴承故障旁声学诊断关键技术研究[D].合肥:中国科学技术大学精密仪器及机械学院,2014.

[7]马伦,康建设,孟妍,等.基于 Morlet 小波变换的滚动轴承早期故障特征提取研究[J]. 仪器仪表学报,2013,34(4):920-926.

[8]丁彦春,郭瑜,唐先广.基于 Morlet 小波包络分析的滚动轴承多源故障分离[J].中国制造业信息化,2011,40(1):65-70.

[9]牛超,侯新国,杨忠林.一种自适应 Morlet 小波包络解调的弱故障检测方法[J].船电技术,2015,35(10):26-30.

- [10]BRENNER M J. Non-stationary dynamic data analysis with Wavelet-SVD filtering[J]. Mechanical System and Signal Processing ,2003,17(4):765-786.
- [11]Ping He, Pan Li, Huiqi Sun. Feature extraction of acoustic signals based on complex Morlet wavelet[J]. Procedia Engineering, 2011, 15(2011): 464-468.

(下转第47页)

结论

4

# Dynamic Simulation Analysis of Rigid Flexible Coupling Model of High Speed Train

#### Zhao Yiwei<sup>1</sup>, Liu Yongqiang<sup>1</sup>, Liao Yingying<sup>2</sup>

School of Mechanical Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China;
 School of Civil Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China)

Abstract: The effect of the high speed train elastic body on the dynamic performance of the vehicle is studied. To analyze the influence of elastic body, first of all, the FEM model of the body is established, the modal of the body is calculated, then the modal neutral file generated by ANSYS is imported into the VI-Rail software. The flexible body, the front and rear bogie frame subsystems are assembled and rigid flexible coupling vehicle model is built, and its influence is analyzed on motion stability, stable operation and operation safety. By comparing with the rigid multi-body dynamics model, the simulation results show that vehicle with flexible body has better dynamic performances than with rigid body.

Key words: high speed train; rigid flexible coupling; VI-Rail; dynamic simulation

(上接第 32 页)

[12]Yonghua Jiang, Baoping Tang, Yi Qin. Feature extraction method of wind turbine based on adaptive Morlet wavelet and SVD[J]. Renewable Energy, 2011, 46(36):2146-2153.

[13] 耿宇斌,赵学智.基于奇异值能量谱的 Morlet 小波尺度优化[J].振动与冲击,2015,34(15):133-139.

#### Sound Signal Testing of Rolling Bearing Based on Adaptive Morlet Wavelet

#### Li Jingjiao, Chen Enli, Liu Yongqiang

(School of Mechanical Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China)

Abstract: Diagnosis of rolling bearing faults based on sound signal testing and analysis is a new method, a feature extraction method of sound signal of rolling bearing is raise based on adaptive Morlet wavelet. Firstly, minimum Shannon entropy is used to optimize the Morlet wavelet shape factor in order to match with the impact component. Then, an abrupt information detection method based on the transitional stage of singular curve of wavelet coefficient matrix is used to choose the appropriate scale for the wavelet transformation. Finally, the fault feature of the signal can be extracted using this method. The experimental results shows that the method can extract sound signal fault feature more effectively.

Key words: sound signal; wavelet transform; shannon entropy; fault diagnosis