

DOI: 10.3901/JME.2015.01.090

强抗噪时频分析方法及其在滚动轴承故障诊断中的应用*

王宏超¹ 陈进¹ 霍柏琦² 胡旭钢³ 王冉¹ 周海韬¹ 朱森⁴

(1. 上海交通大学机械系统与振动国家重点实验室 上海 200240;

2. 92537 部队 北京 100161;

3. 中国船舶重工集团公司第七一一研究所 上海 200090;

4. 长治清华机械厂计划处 长治 046012)

摘要: 根据滚动轴承发生故障时呈现出循环平稳的特征, 将基于二阶循环统计量的谱相关或谱相关密度分析方法加以改进, 提出一种新的时频分析方法。经仿真验证, 所述方法相对于谱相关分析方法具有很强的抗噪能力; 针对轴承发生故障时的调制特征, 往往只需要提取出故障频率即循环调制频率而不必提取调制现象的载频, 在所述方法的基础上, 将其加以改进, 改进后的谱分析方法只提取出调制频率, 通过滚动轴承三种故障试验(内、外圈故障及滚动体故障)验证了其具有更清晰的表达效果和更好的故障特征提取效果。

关键词: 强抗噪; 时频分析; 滚动轴承; 故障诊断

中图分类号: TP206

Noise-resistant Time-frequency Analysis Method and Its Application in Fault Diagnosis of Rolling Bearing

WANG Hongchao¹ CHEN Jin¹ HUO Baiqi² HU Xugang³ WANG Ran¹
ZHOU Haitao¹ ZHU Miao⁴

(1. The State Key Laboratory of Mechanical System and Vibration, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240;

2. The 92537 Troop, Beijing 100161;

3. 711 Institute, Shanghai Marine Diesel Engine Research Institute, Shanghai 200090;

4. Planning Department, Changzhi Qinghua Machinery Factory, Changzhi 046012)

Abstract: Based on the property of cyclostationarity when fault arises in rolling bearing, The spectrum correlation (SC) or spectrum correlation density (SCD) based on second order cyclic statistic is improved and a new time-frequency analysis method naming improving spectrum correlation (ISC) is proposed. The improved method has the advantages of higher noise-resistant advantages over SC. It usually takes on modulation phenomenon when fault arises in rolling bearing, and the aim of fault diagnosis is to extract the fault characteristic frequency or cyclic modulation frequency only and neglect the modulated frequency or carrier frequency, so the ISC method is improved further and the integrated improving spectrum correlation (IISC) is proposed. The IISC extract the modulation frequency only which has the advantages of clearer expression effect and much better extraction effect. The above stated is verified through rolling bearing's three fault types (inner race fault, outer race fault and ball fault).

Key words: noise-resistant; time-frequency analysis; rolling bearing; fault diagnosis

0 前言

滚动轴承发生故障时由于其周期性的运转方

式使其非平稳振动信号呈现出循环平稳的特点。循环平稳信号是一类特殊的非平稳信号, 其统计特征呈周期时变, 根据统计特征的不同, 循环平稳信号可分为一阶、二阶及高阶循环平稳信号。本文的工作围绕二阶循环平稳展开。基于循环平稳理论的分析方法在旋转机械的故障诊断已取得了一定的应

* 国家自然科学基金资助项目(51035007, 51105243)。20140215 收到初稿, 20141008 收到修改稿

用。文献[1]介绍了循环平稳的理论基础并将其用于齿轮的早期故障诊断; 此外, 还证明了齿轮箱信号的二阶循环平稳特性; 针对滚动轴承振动信号的随机循环平稳特性, 文献[2]对最适用于滚动轴承故障特征提取的循环谱分析方法进行了研究, 得出了循环相关分析方法是最佳分析方法: 不仅能提取强背景噪声下的滚动轴承故障特征, 而且在一定程度上还能反映故障的严重程度; 文献[3]在循环平稳的理论基础上, 定义了新的循环平稳参数, 并将其用于齿轮的故障诊断中。文献[4]提出一种基于循环谱密度的魏格娜威利时频分析方法并将其用于强背景噪声下的滚动轴承早期微弱故障特征提取, 通过仿真和试验验证了所述方法不仅能提取出故障信号的循环特性, 而且还有很强的噪声抑制能力。文献[5]将循环自相关、小波分析及支持向量机相结合用于滚动轴承的故障诊断: 将循环相关与小波分析相结合用于特征提取, 将提取后的特征作为支持向量机的输入取得好的诊断结果。文献[6]将循环平稳分析方法与时频重分配方法相结合用于轴承的故障检测取得了不错的效果。

时频分析方法是旋转机械故障诊断的常用方法之一。文献[7]是关于旋转机械故障诊断时频分析方法的综述, 对旋转机械故障诊断时频分析方法的了解有很好的指导意义。循环平稳分析方法是分析旋转机械故障信号调制现象的主要用途之一, 最常用的方法为谱相关(Spectrum correlation, SC)或谱相关密度(Spectrum correlation density, SCD)。本文将 SC 加以改进, 提出改进的 SC 方法(Improving spectrum correlation, ISC), 经仿真和试验验证, 其不仅具有和谱相关密度相似的分析结果, 还具有很强的噪声干扰能力。针对轴承发生故障时的调制特征, 往往只需要提取出故障频率即循环调制频率而不必提取调制现象的载频, 在 ISC 基础上, 将其加以改进, 提出集成 ISC 谱分析方法, 改进后的谱分析方法只提取出调制频率, 通过滚动轴承三种故障验证了其具有更清晰的表达效果和更好的故障特征提取效果。

1 二阶循环统计量理论

1.1 谱相关密度

对于非平稳信号 $x(t)$, 当其自相关函数周期时变时, 称该信号为二阶循环平稳信号^[8]

$$R_x(t, \tau) = E[x(t + \tau/2) \cdot x^*(t - \tau/2)] = E[x(t + nT_0 + \tau/2) \cdot x^*(t + nT_0 - \tau/2)] \quad (1)$$

可以用样本平均估计集总平均

$$\hat{R}_x(t, \tau) = \frac{1}{2N+1} \lim_{N \rightarrow \infty} \sum_{n=-N}^N x\left(t + nT_0 + \frac{\tau}{2}\right) x^*\left(t + nT_0 - \frac{\tau}{2}\right) \quad (2)$$

式中, $\hat{R}_x(t, \tau)$ 表示 $R_x(t, \tau)$ 的估计。

由于 $R_x(t, \tau)$ 为周期函数, 其 Fourier 系数可以表示为

$$R_x^\alpha(\tau) = \frac{1}{T_0} \int_0^{T_0} R_x(t, \tau) \exp(-j2\pi\alpha t) dt \quad (3)$$

$R_x^\alpha(\tau)$ 被称作循环自相关(Cyclic autocorrelation, CA)函数, α 为循环频率(Cyclic frequency, CF)。当滚动轴承发生故障时, 故障特征频率即为循环频率。

定义 CA 关于时延 τ 的 Fourier 变换为谱相关(Spectral correlation, SC)或谱相关密度(Spectral correlation density, SCD)函数

$$SC_x^\alpha(f) = \int_{-\infty}^{\infty} R_x^\alpha(\tau) \exp(-j2\pi f \tau) d\tau \quad (4)$$

1.2 改进的谱相关

首先考虑一个频率为 f 的正弦信号被频率为 α 的正弦信号及其谐波调制, 如式(5)所示

$$x(t) = \sin(2\pi f t) [1 + A_1 \sin(2\pi\alpha t) + A_2 \sin(2\pi 2\alpha t) + \dots + A_m \sin(2\pi n\alpha t)] + n(t) \quad (5)$$

$n = 1, 2, \dots, N \quad m = 1, 2, \dots, M$

式中, $n(t)$ 为随机白噪声。式(5)所示信号的频谱图如图 1 所示, 中心频率 f 为载波信号的频率, 与中心频率间距为循环频率 α 的两个旁瓣为调制信号的频率。利用一个边带滤波器提取出载波信号及其调制信号, 边带滤波器的思想如图 1 所示。

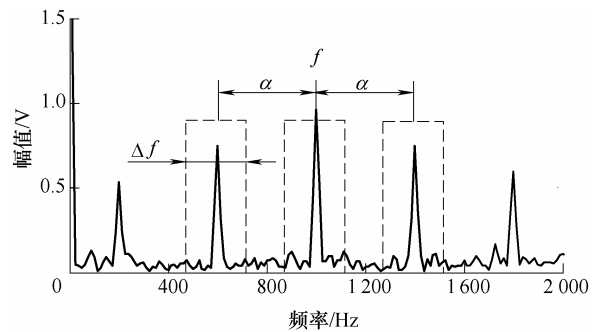


图 1 边带滤波器示意图

理想情况下, 信号通过上述边带滤波器后只包含特定成分及少量的噪声信号, 可表示为

$$x_i = x_{\Delta f}(t, f - i\alpha) \quad i = -1, 0, 1 \quad (6)$$

式中, $x_{\Delta f}(t, f)$ 代表信号 $x(t)$ 在窄频带 $[f - \Delta f/2; f + \Delta f/2]$ 滤波后的信号。滤波器的输出可以用来计算三种谱成分的关系以用来作为反映调

制现象的一种指标。SC 或者 SCD 作为常用的指标定义为

$$X_{1/\Delta f}(t, f) = \int_{t-1/2\Delta f}^{t+1/2\Delta f} \exp(-j2\pi ft) dt \quad (7)$$

式中, $X_{1/\Delta f}(t, f)$ 代表信号 $x(t)$ 在窄频带 $[f - \Delta f/2; f + \Delta f/2]$ 滤波后信号的复包络

$$X_{1/\Delta f}(t, f) = \int_{t-1/2\Delta f}^{t+1/2\Delta f} \exp(-j2\pi ft) dt \quad (8)$$

它可以理解为一个时域方窗内的短时傅里叶变换, $X_{1/\Delta f}(t, f)$ 和 $X_{\Delta f}(t, f)$ 的关系可以表示为

$$X_{\Delta f}(t, f) = X_{1/\Delta f}(t, f) \exp(j2\pi ft) \quad (9)$$

作为式(7)的替换, 同式(1)、(2), SC 可以用循环周期的时间平均表示为如下

$$SC_{x\Delta f}^{\alpha}(t, f) = \frac{1}{\Delta f} x_{\Delta f} \left(t, f + \frac{\alpha}{2} \right) x_{\Delta f}^* \left(t, f - \frac{\alpha}{2} \right) \exp(-j2\pi \alpha t) \quad (10)$$

据此, SC 可以表示为如下

$$SC_x^{\alpha}(t, f) = \lim_{\Delta f \rightarrow 0} \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T\Delta f} \int_T x_{\Delta f}(t, f + \frac{\alpha}{2}) x_{\Delta f}^*(t, f - \frac{\alpha}{2}) \times \exp(-j2\pi \alpha t) dt \quad (11)$$

根据边带滤波器(图 1)及式(11), $x_{\Delta f}(t, f + \alpha)$ 与 $x_{\Delta f}(t, f)$ 之间的谱相关密度可以表示为

$$SC_x^{\alpha} \left(f + \frac{\alpha}{2} \right) = \lim_{\Delta f \rightarrow 0} \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T\Delta f} \int_T x_{\Delta f}(t, f) x_{\Delta f}^*(t, f + \alpha) \times \exp(-j2\pi \alpha t) dt \quad (12)$$

类推, $x_{\Delta f}(t, f + \alpha)$ 与 $x_{\Delta f}(t, f)$ 之间的谱相关密度可以表示为

$$SC_x^{\alpha} \left(f - \frac{\alpha}{2} \right) = \lim_{\Delta f \rightarrow 0} \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T\Delta f} \int_T x_{\Delta f}(t, f) x_{\Delta f}^*(t, f - \alpha) \times \exp(j2\pi \alpha t) dt \quad (13)$$

注意式(12)、(13)的频移将会使频率 f 成为两种滤出成分的中心频率。

为了检查间距为循环频率 α 三种谱成分的关系, 这里将式(12)、(13)相乘, 对于一个特定的 Δf , 关于参数 f 和 α 的方程成为改进的谱相关分布, 可表示为

$$ISC_{\Delta f}^{PSC}(f, \alpha) = SC_x^{\alpha} \left(f + \frac{\alpha}{2} \right) SC_x^{\alpha} \left(f - \frac{\alpha}{2} \right)^* \quad (14)$$

式中, PSC 表示谱相关内积。

取调制密度分布的绝对值, 将其表示在关于 f 和 α 的二维平面上将会得到 ISC 图, 它表示了载频 f 和调制频率 α 的关系。

1.3 集成改进谱相关

由上述可知 ISC 分布为关于载频 f 和调制频率 α 的函数。然而, 在某些情况下, 我们只关心调制频率而不用关心载频。集成 ISC 分布被提出, 其公式可表示为如下

$$IISC_{f_1}^{f_2}(\alpha, \Delta f) = \int_{f_1}^{f_2} ISC_{\Delta f}(f, \alpha) df \quad (15)$$

2 仿真

用如式(16)所示的信号表示滚动轴承故障信号, 其中两个载频分布为 3 000 Hz 和 8 000 Hz, 相对应的调频分别为 100 Hz 和 80 Hz。

$$x = \exp(-800t_1) \sin(2\pi \times 3\,000kT) + \exp(-800t_2) \sin(2\pi \times 8\,000kT) \quad (16)$$

$$T = 1/25\,000 \quad k = 1:25\,000$$

$$t_1 = \text{mod}(kT, 1/100) \quad t_2 = \text{mod}(kT, 1/80)$$

信号所对应的时域图、频域图及包络解调谱图如图 2a、2b、2c 所示。SC 及 ISC 时频图如图 3a、3b 所示。IISC 图如图 4 所示。从图 3 可以看出, 在无噪声干扰情况下, 两种时频分析方法均可以提取出仿真信号的两个调制频率(相邻频线的间隔)。IISC 也能提取出仿真故障信号的两个调制频率, 而且更为直观。

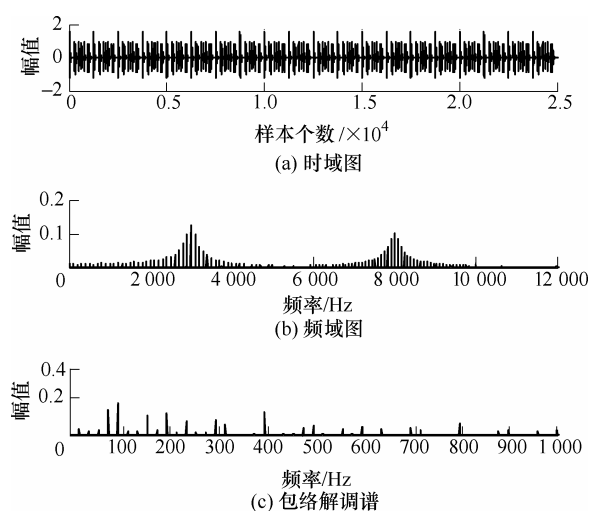
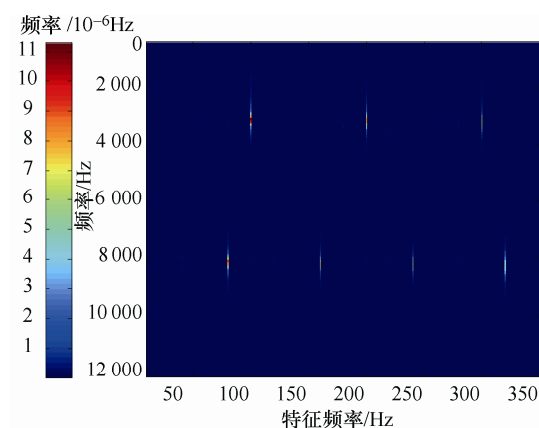
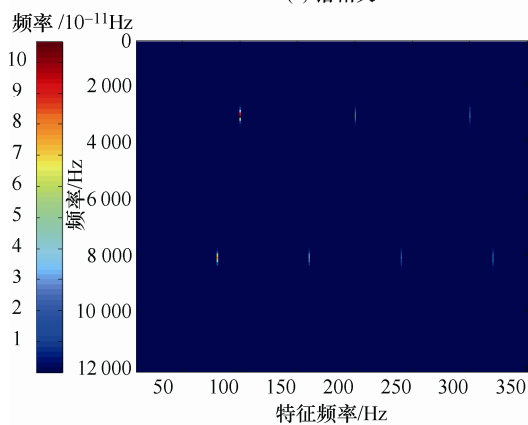


图 2 仿真信号

对式(16)的仿真信号加入随机强噪声, 加入噪声后信号的时域、频域及包络解调谱分别如图 5a、5b、5c 所示。



(a) 谱相关



(b) 改进谱相关

图 3 仿真信号的两种时频图

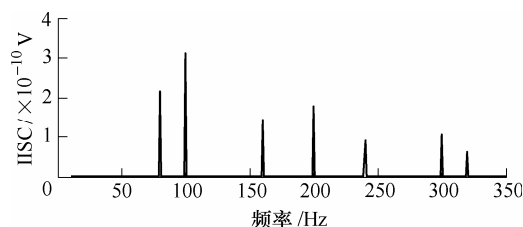
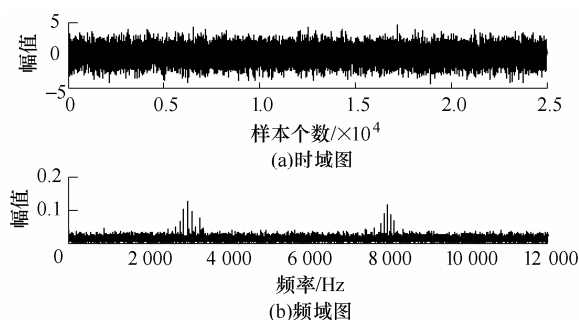
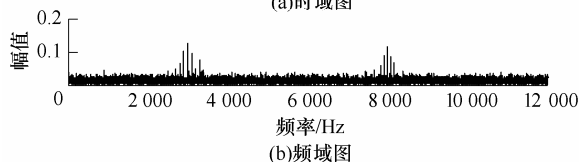


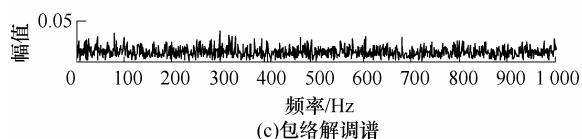
图 4 仿真信号的集成 ISC



(a) 时域图



(b) 频域图

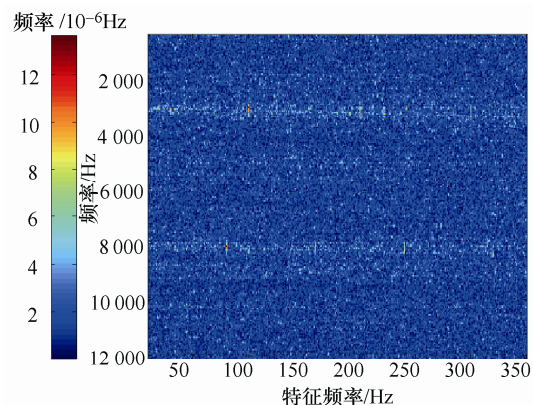


(c) 包络解调谱

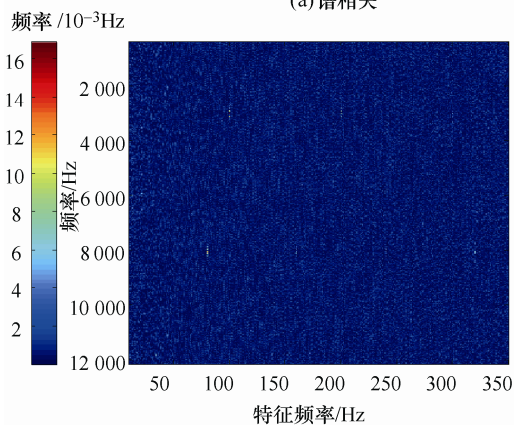
图 5 加噪仿真信号

从图 5c 的包络解调谱中可以看出受强噪声的影响, 两种调制频率用包络解调的方法已经不能被

提取出来。加噪仿真信号的 SC 及 ISC 时频图如图 6a、6b 所示。从图 6 可以看出受强噪声影响, SC 时频分布已经不能提取出两种调制频率, 然而 ISC 仍可提取出两种调制频率。IISC 图如图 7 所示, 其中峰值点坐标为 $(80, 7.321 \times 10^{-16})$, 由图 7 可以看出, 虽受强噪声影响, IISC 仍可成功提取出两种调制频率。



(a) 谱相关



(b) 改进谱相关

图 6 加噪仿真信号的两种时频图

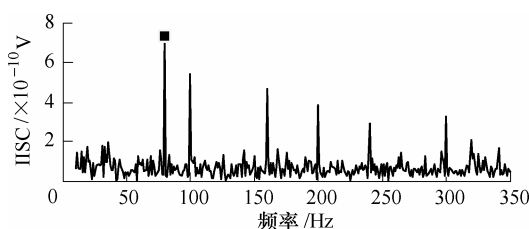


图 7 加噪仿真信号的集成 ISC

3 试验

滚动轴承实际振动信号来自实验室的滚动轴承振动测试台, 试验台实景图如图 8 所示。其中转子两端分别由支撑装置和试验轴承支撑。试验台自带液压定位与夹紧装置, 用于固定轴承试件的外圈。

该试验台由交流电动机驱动,通过联轴器带动转子运转。在测试过程中,滚动轴承的外圈固定在试验台台架上,内圈随工作轴同步转动,工作轴的转速为 720 r/min。选取 GB203 单列深沟球轴承为试验轴承,采用电火花技术分别在试验轴承的内圈、外圈及滚动体上加工点蚀故障分别模拟轴承的三种工作状态,即内圈故障、外圈故障及滚动体故障。采样频率为 $f_s=25.6$ kHz。轴承参数与理论故障特征频率计算公式及结果如表 1 及表 2 所示。

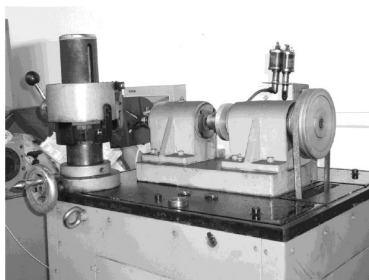


图 8 试验台实景图

表 1 轴承参数

型号	节径 D/mm	滚动体直径 d/mm	滚动体数目 $Z/\text{个}$	接触角 $\alpha/(\text{°})$
GB203	28.5	6.747	7	0

表 2 轴承理论故障特征频率(n 为转速) Hz

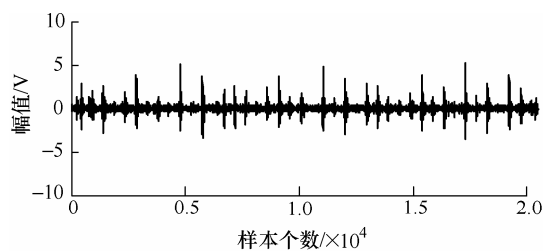
特征频率	计算公式	计算结果
内圈旋转频率	$f_r = \frac{n}{60}$	12.0
滚动体通过频率	$f_{bp} = \left[\frac{D}{d} \left(1 - \left(\frac{d}{D} \cos \alpha \right)^2 \right) \right] f_r$	47.8
内圈通过频率	$f_{ip} = \frac{Z}{2} \left(1 + \frac{d}{D} \cos \alpha \right) f_r$	51.9
外圈通过频率	$f_{op} = \frac{Z}{2} \left(1 - \frac{d}{D} \cos \alpha \right) f_r$	32.1
保持架旋转频率	$f_{cp} = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{d}{D} \cos \alpha \right) f_r$	4.6

三种运行状态的时域图及相应的包络解调谱图如图 9a~9e 所示。

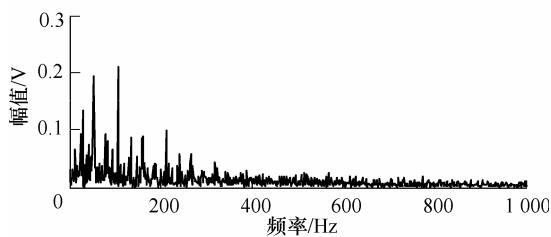
从图 9 可以看出,内、外圈故障特征频率均可以被包络解调方法提取出来;滚动体发生故障时由于同时受保持架频率及转频的影响,信号比较复杂,传统的包络解调分析方法不能提取出其故障通过频率。

三种运行状态的 ISC 时频图如图 10 所示。从图 10a、10b 可以看出 ISC 方法均可提取出内、外圈故障特征频率,但已经不能提取出滚动体故障特征频率(图 10c)。三种运行状态的 IISC 谱图如图 11 所示。由图 11 可以看出, IISC 方法均可提取出三种

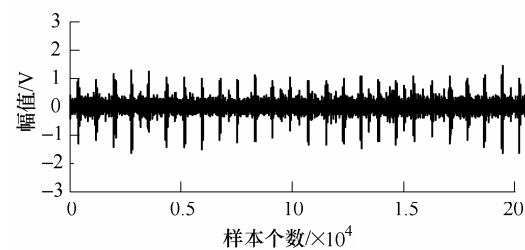
故障特征频率,验证了本文所述方法的优越性。



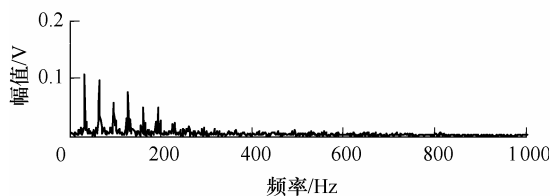
(a) 内圈故障时域图



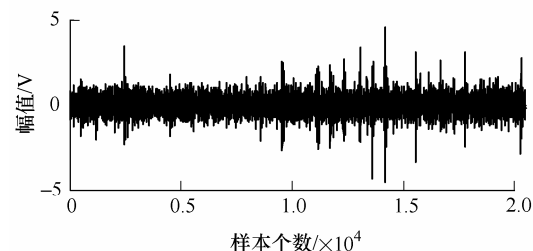
(b) 图 9a 的包络解调谱



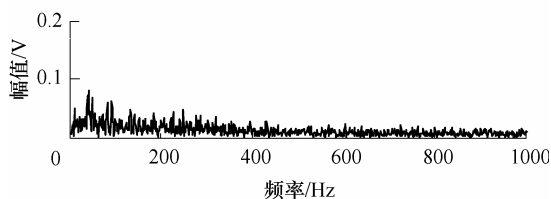
(c) 外圈故障时域图



(d) 图 9c 的包络解调谱



(e) 滚动体故障时域图



(f) 图 9e 的包络解调谱

图 9 三种故障状态的时域及相应的包络解调谱

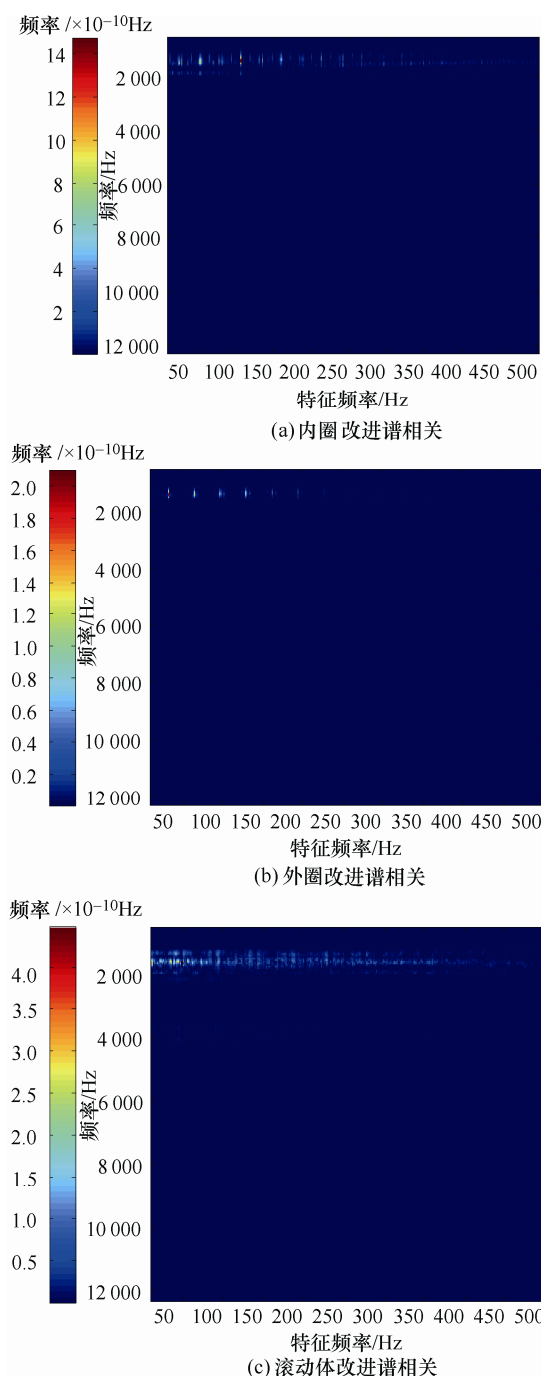


图 10 三种运行状态的改进谱相关时频图

4 结论

基于二阶循环统计量的 SC 是常用的谱分析方法, 本文将其加以改进提出了 ISC 方法。相对于 SC, ISC 具有更强的抗噪能力; 针对轴承发生故障时特征提取的特点: 只需要提取调制频率而忽略载频, 将 ISC 方法进一步改进提出 IISC 谱分析方法, IISC 只提取出调制频率, 不仅具有更直观的表达效果, 而且相对于 ISC 由于能量求和集中的原因, 具有更强的抗噪能力, 通过滚动轴承滚动体故障验证了 IISC 相对于 ISC 的优势。

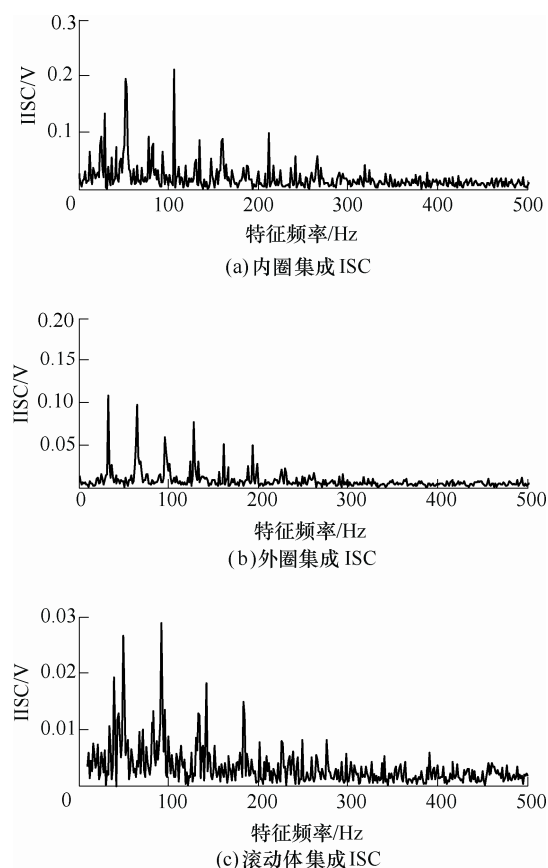


图 11 三种运行状态的集成 ISC 时频图

参 考 文 献

- [1] CAPDESSUS C, SIDAHEM M, LACOUME J L. Cyclostationary processes: Application in gear faults early diagnosis[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2000, 14: 371-385.
- [2] ANTONI J. Cyclic spectral analysis of rolling-element bearing signals: Facts and fictions[J]. Journal of Sound and Vibration, 2007, 304: 497-529.
- [3] RAAD A, ANTONI J, SIDAHEM M. Indicators of cyclostationarity: Theory and application to gear fault monitoring[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2008, 22: 574-587.
- [4] DONG G M, CHEN J. Noise resistant time frequency analysis and application in fault diagnosis of rolling element bearings[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2012, 33: 212-236.
- [5] KANKAR P K, SHARMA S C, HARSHA S P. Fault diagnosis of rolling bearing using cyclic autocorrelation and wavelet transform[J]. Neurocomputing, 2013, 110: 9-17.
- [6] GIRONDIN V, PEKPE K M, MOREL H. Bearings fault detection in helicopters using frequency readjustment and

- cyclostationary analysis[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2013, 38: 499-514.
- [7] FENG Z P, LIANG M, CHU F L. Recent advances in time-frequency analysis methods for machinery fault diagnosis: A review with application examples[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2013, 38: 165-205.
- [8] 毕果, 陈进, 周福昌, 等. 调幅信号谱相关密度分析中白噪声影响的研究[J]. 振动与冲击, 2006, 25(2): 75-78.
- BI Guo, CHEN Jin, ZHOU Fuchang, et al. Influence of the noise on spectral correlation density analysis of AM signal[J]. Journal of vibration and shock, 2006, 25(2): 75-78.
- 作者简介: 王宏超(通信作者), 男, 1983 年出生, 博士研究生。主要研究方向为旋转机械故障诊断与信号处理。
E-mail: hongchao1983@126.com

国家自然科学基金委员会机械工程学科 2012/2013 年度结题项目简介

随机突变载荷下的 TBM 刀具布置与刀盘盘体结构耦合设计方法*

项目负责人: 霍军周(E-mail: huojunzhou@dlut.edu.cn)

依托单位: 大连理工大学

项目批准号: 51005033

1. 项目简介

全断面岩石掘进机(TBM)刀盘拓扑结构适应性设计直接关系掘进效率和可靠性。刀盘拓扑结构设计的关键在于复杂岩石边界下刀具适应性布置设计与刀盘盘体结构设计,二者相互耦合,相互影响。本课题采用仿真和实验相结合策略,研究多滚刀顺次作用下刀间距优化设计方法;综合考虑复杂岩石边界的随机载荷分布特性、滚刀布置和刀盘盘体结构设计多种性能要求,研究星型、螺旋线型等不同刀具布置规则与刀盘盘体结构的耦合关系,建立刀具布置与刀盘盘体结构耦合模型,研究双子系统协同进化的刀具适应性布置与刀盘盘体结构耦合设计方法,最终依托合作单位的实际工程(引洮等工程)进行相关理论方法的验证与完善,为我国 TBM 刀盘设计提供一定的理论方法支撑。

2. 主要创新点及其主要研究进展

(1) 建立了带性能约束的非线性多目标刀具布置与刀盘盘体结构的系统耦合模型,提出了基于多螺旋线型、米字型和随机型的遗传进化和协同进化解耦设计方法,探讨了复杂性能约束下的不同布置规则与刀具布置多目标及盘体结构强刚度之间的耦合规律。

(2) 建立了空间多点弯-扭-轴向冲击激励下 TBM 刀盘系统动力学模型,揭示了刀盘转动惯量、主轴承刚度、驱动轴刚度、多电机的转动惯量及布置方式等复杂因素对刀盘系统振动的影响规律。

(3) 开发了全断面岩石掘进机刀盘地质适应性系统,实现刀盘的设计-分析-仿真一体化。

(4) 基于理论研究成果,受企业委托独立设计了国际上规模最大的多功能全断面 $\phi 3.24$ m 盾构机刀盘及 $\phi 8.53$ m TBM 刀盘现场掘进刀盘振动和损伤检测系统。

* 此项目在“第十一届设计与制造前沿国际会议(ICFDM2014)”上作为候选项目推荐参加“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”的评选。