

基于FRFT的单分量阶比双谱提取微弱故障特征*

梅检民^{1,2}, 肖云魁², 陈祥龙², 乔龙²

(1. 军械工程学院火炮工程系 石家庄, 050003) (2. 军事交通学院汽车工程系 天津, 300161)

摘要 提出了一种基于分数阶傅里叶变换(fractional Fourier transform, 简称FRFT)的单分量阶比双谱分析方法, 消除阶比双谱分析多分量信号时产生的交叉项, 提取变速器齿轮微弱故障特征。根据变速器输入轴转速信号及传动比确定FRFT最佳阶次, 对变速器升速过程振动信号进行最佳阶次FRFT, 在该分数阶域分离目标阶比分量, 对分离出的单分量信号分别进行阶比双谱分析, 并累加各分量阶比双谱结果得到基于FRFT的单分量阶比双谱。试验结果表明, 变速器变速过程振动信号为多阶比分量信号, 直接对其进行阶比双谱分析会产生明显的交叉项, 使阶比双谱阶次和幅值失真。基于FRFT的单分量阶比双谱方法能有效屏蔽其他分量和噪声干扰、消除交叉项, 真实、准确反映被分析信号的阶比双谱, 有效提取变速器齿轮微弱故障特征。

关键词 分数阶傅里叶变换; 单分量; 阶比双谱; 微弱故障; 特征提取

中图分类号 TH165+.3

引言

变速器的早期故障特征十分微弱, 尤其在强噪声背景下更难提取, 而变速器的变速过程使故障信息反映更加明显^[1], 如何有效抑制噪声而突出特征信息成为提取微弱故障特征的关键。阶比双谱^[2]吸收了阶比谱和双谱两者的优点, 既可以分析变频振动信号, 又具有抑制高斯噪声的能力^[3]。双谱计算涉及二次型变换, 直接分析多分量信号时不可避免地产生交叉项^[4]。变速器变速过程信号是与输入轴转频密切相关的多分量线性调频信号(chirp信号), 分数阶傅里叶变换适合处理chirp信号, 利用chirp信号在不同阶次的分数阶傅里叶域呈现出不同能量聚集性的特点, 只要选择最佳的FRFT变换阶次^[5-6]就能将各个阶比分量分离成单分量信号。

笔者根据变速器变速过程信号特点, 提出基于FRFT的单分量阶比双谱方法, 即采用FRFT分离各阶比分量, 对分离后的各单分量信号分别进行阶比双谱分析, 将结果累加得到基于FRFT的单分量阶比双谱, 抑制其他分量和噪声干扰, 消除交叉项。

1 FRFT提取chirp信号分量原理

文献[7]介绍了FRFT的定义及性质, 这里重点

介绍FRFT提取chirp信号分量的原理。两个分量的chirp信号时频分布如图1所示, 其中一个分量的时频分布与时间轴的夹角为 β 。分数阶傅里叶变换可以解释为信号在时频平面内绕原点旋转任意角度后所构成的分数阶域上的表示, 只要分数阶傅里叶变换的旋转角度 α 与 β 正交, 则该chirp信号在分数阶傅里叶域上的投影就聚集在 u_0 点上, 以 u_0 为中心做窄带滤波, 将chirp信号从强噪声背景下滤出或从多分量chirp信号中分离, 再做 $-\alpha$ 角度旋转就实现了chirp信号分量分离与提取。

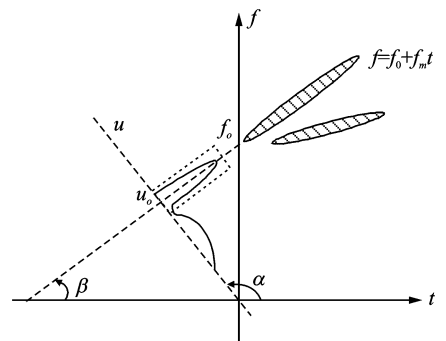


图1 两个分量的chirp信号时频分布

FRFT提取chirp分量的关键在于找到合适的旋转角度, 得到最佳的FRFT变换阶次。从图1可以看出, 最佳角度为 α , FRFT变换阶次 p 与调频率 f_m

* 总后勤部预研资助项目

收稿日期: 2011-09-30; 修改稿收到日期: 2011-10-24

的关系为

$$\begin{cases} \beta = \arctan(f_m) \\ \alpha = \frac{\pi}{2} + \beta = \frac{\pi}{2} + \arctan(f_m) \\ \rho = \alpha \frac{2}{\pi} = 1 + \frac{2}{\pi} \arctan(f_m) \end{cases} \quad (1)$$

2 阶比双谱定义及交叉项问题

2.1 阶比双谱的定义

如果 $\{x(\theta)\}$ 为一个周期性信号, 周期为 N , 即 $x(\theta) = x(\theta + N)$, 则分别定义其在阶域中的 Fourier 序列和双谱^[3], 有关阶比定义和阶域采样见文献[8-9]。

阶域内 Fourier 变换定义为

$$X(O) = \sum_{k=0}^{N-1} x(\theta_k) e^{-j\frac{2\pi k}{N} \theta_k} \quad (2)$$

其中: $O=0, 1, \dots, N-1$; $x(\theta_k)$ 为离散转角序列。

定义阶比双谱为

$$B(O_1, O_2) = \frac{1}{N} X(O_1) X(O_2) X^*(O_1 + O_2) \quad (3)$$

其中: $*$ 表示共轭。

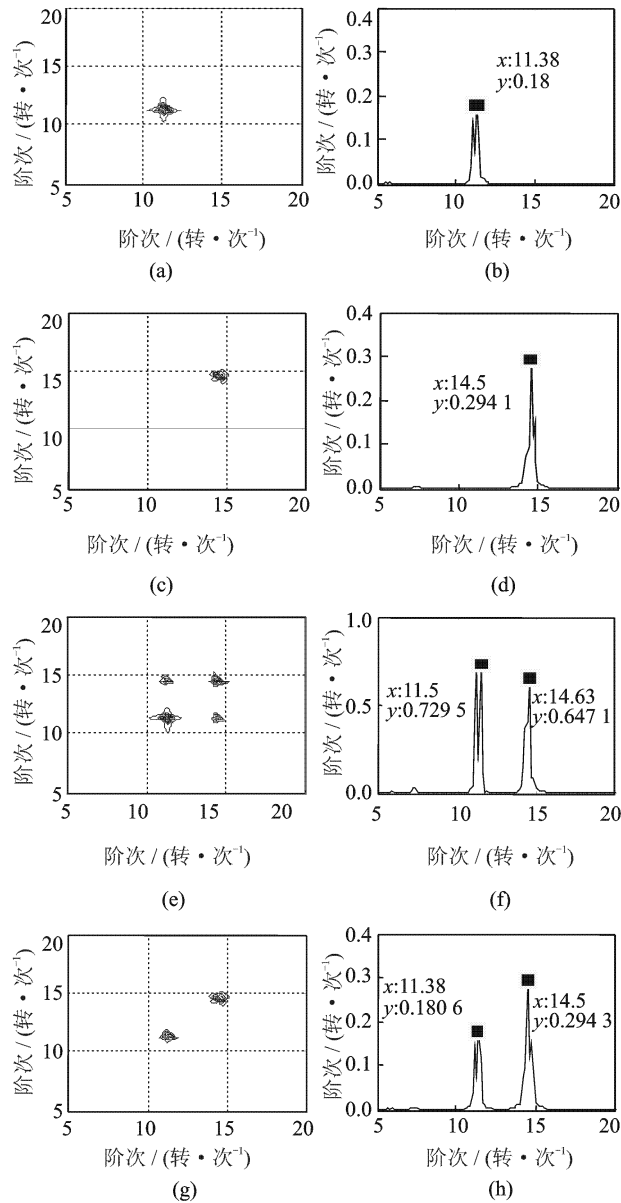
2.2 阶比双谱分析多分量信号的交叉项

阶比双谱估计方法可分为间接法和直接法, 直接法的计算量相对较少^[10], 笔者采用直接法, 具体算法见文献[3, 11-12]。设等角度采样后的多分量信号为

$$\begin{cases} x(\theta) = x_1(\theta) + x_2(\theta) \\ x_1(\theta) = \cos(2\pi o_1 \theta + \psi_1) + r_1(\theta) \\ x_2(\theta) = \cos(2\pi o_2 \theta + \psi_2) + r_2(\theta) \end{cases} \quad (4)$$

其中: 阶比分量 1 阶次 $o_1 = 11.3$, 初始相位 $\psi_1 = \pi/2$; 阶比分量 2 阶次 $o_2 = 14.4$, 初始相位 $\psi_2 = \pi/4$; $r_1(\theta)$, $r_2(\theta)$ 为均值为 0、方差为 1 的白噪声。

分别计算单分量信号 $x_1(\theta)$, $x_2(\theta)$ 和多分量信号 $x(\theta)$ 的双谱 b_1, b_2, b_3 , 并将 $x_1(\theta)$, $x_2(\theta)$ 的双谱结果累加得到 $b_4 = b_1 + b_2$, 阶比双谱图如图 2 所示。图 2(e) 中, 在 (11.5, 11.5) 和 (14.63, 14.63) 处出现了峰值, 分别对应阶比分量 1 和阶比分量 2, 在 (11.5, 14.63) 和 (14.63, 11.5) 出现了明显交叉项。图 2(f) 中阶次 11.5 和阶次 14.63 对应的阶比双谱幅值与图 2(b)、图 2(d) 相比差别较大, 阶次也有差异, 说明产生的交叉项及多分量之间的能量融合, 使得各阶比分量双谱幅值及阶次失真。图 2(g) 明显消除了交叉项。



(a), (c), (e), (g) 为 b_1, b_2, b_3, b_4 等高线图, (b), (d), (g), (h) 为 b_1, b_2, b_3, b_4 对角线切片图

图 2 多分量信号的阶比双谱分析

图 2(h) 中阶次 11.38 和阶次 14.5 对应的双谱幅值与图 2(b)、图 2(d) 基本一致, 阶次准确, 能够真实反映多分量信号的双谱幅值。因此, 将多分量信号分离成单分量信号, 对各单分量信号分别进行双谱计算, 将各双谱结果累加是消除多分量信号双谱交叉项、真实反映多分量信号双谱的有效方法。

3 基于 FRFT 的单分量阶比双谱消除交叉项

变速器变速运行时, 转频及各档位的啮合频率分量按照不同的阶比随输入轴转速变化, 构成不同

的阶比分量,测得的变速器振动信号为多分量 chirp 信号,直接进行阶比双谱分析必然产生交叉项,要消除阶比双谱交叉项,必须对多分量信号进行准确分离,其关键在于FRFT最佳阶次是否准确。笔者提出了一种根据输入轴转速信号精确、快速、自适应确定FRFT变换最佳阶次的方法,具体步骤为:

1) 根据输入轴转速信号计算转频及各档位的啮合频率分量 f_i ,某型变速器5个分量的时频曲线如图3所示;

2) 对转频和各档位的啮合频率分量 f_i 进行最小二乘拟合,计算各分量的调频率 f_{mi} ,图3中示意了对分量 f_3 的最小二乘拟合;

3) 根据 f_{mi} 通过式 $p_i = 1 + \frac{2}{\pi} \arctan(f_{mi})$ 计算得到各分量的FRFT变换最佳阶次 p_i ,如图3所示。

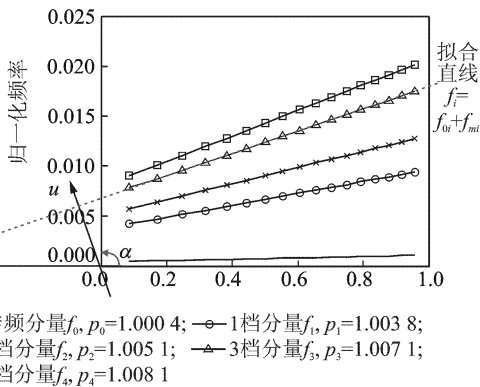


图3 根据输入轴转速信号确定FRFT变换最佳阶次

由于转速信号不受任何振源和噪声的干扰,变速器的传动比又是固定的,因此根据转频得到各档位齿轮啮合频率分量准确,据此计算得到的各分量的调频率和阶次精度高、速度快、鲁棒性好,且根据不同的转速信号能自动得到对应的FRFT最佳阶次,是一种自适应的FRFT最佳阶次确定方法。基于FRFT的单分量阶比双谱消除交叉项的具体步骤如下:

1) 根据转速信号计算各个阶比分量的最佳FRFT阶次 p_i ;

2) 根据要分离的阶比分量选择阶次 p_i ,对振动信号做 p_i 阶FRFT变换,在该最佳阶域通过窄带滤波提取阶比分量,做 p_i 阶逆FRFT变换,得到该阶分量的单分量信号;

3) 对分离后的单分量信号进行等角度采样得到角域平稳信号,做双谱得到单分量阶比双谱;

4) 将各阶比分量的单分量阶比双谱累加得到多分量信号基于FRFT的单分量阶比双谱。

4 基于FRFT的单分量阶比双谱分析变速器齿轮微弱故障

4.1 变速器升速过程信号采集

试验对象为BJ2020S四档变速器,采样频率为20 kHz,采样点数为40 000,调节负载励磁电压为200 V来模拟负载工况,采用霍尔传感器采集变速器输入轴转速信号,振动加速度传感器采集输出轴轴承座径向位置振动信号,研制了变速过程可重复性控制系统,根据预定参数自动完成变速器升速、降速过程,保证了同一工况下多次数据采集的重复性和可靠性,为特征提取和故障诊断提供可靠数据来源。以输入轴为基准,变速器从0开始加速至1.5 kr/min,各档位齿轮啮合频率对应阶次如表1所示。二档齿轮某一轮齿上有轻微点蚀故障,点蚀处外缘最长为2.8 mm,最宽为1.5 mm,最深为0.15 mm。

表1 BJ2020S变速器各档位齿轮啮合频率对应阶次

档 位	一档	二档	三档	常啮合齿轮
阶次/(转·次 ⁻¹)	8.9	12.03	16.47	19

4.2 基于FRFT的单分量阶比双谱分析变速器升速过程信号

4.2.1 原始信号的阶比双谱分析

对变速器置二档和齿轮正常时采集的升速过程振动信号直接进行阶比双谱分析,阶比双谱等高线图和对角线切片图如图4所示。可以看出,在双谱对角线1,2,3处出现明显峰值,分别对应二档分量的阶次12.03,常啮合阶比分量的阶次19和二档分量的2倍阶次,还在4,5,6,7处产生了明显的交叉项,证明了变速器的振动信号是多阶比分量信号,直接对其进行阶比双谱分析必然产生交叉项。

4.2.2 二档阶比分量的单分量阶比双谱分析

根据转速信号按照最佳阶次确定方法求得各分量的FRFT最佳阶次,如图3所示。二档阶比分量的FRFT最佳阶次为 $p=1.0051$,做 p 阶FRFT变换,如图5所示。从图5(a)可以看出,信号在 p 阶分数阶域 $u_0=12.083$ 点位置出现明显峰值,进行带宽为12 070~12 090的带通滤波,如图5(b)所示,再做 p 阶逆FRFT变换提取出二档阶比分量,时域信号如图5(d)所示。

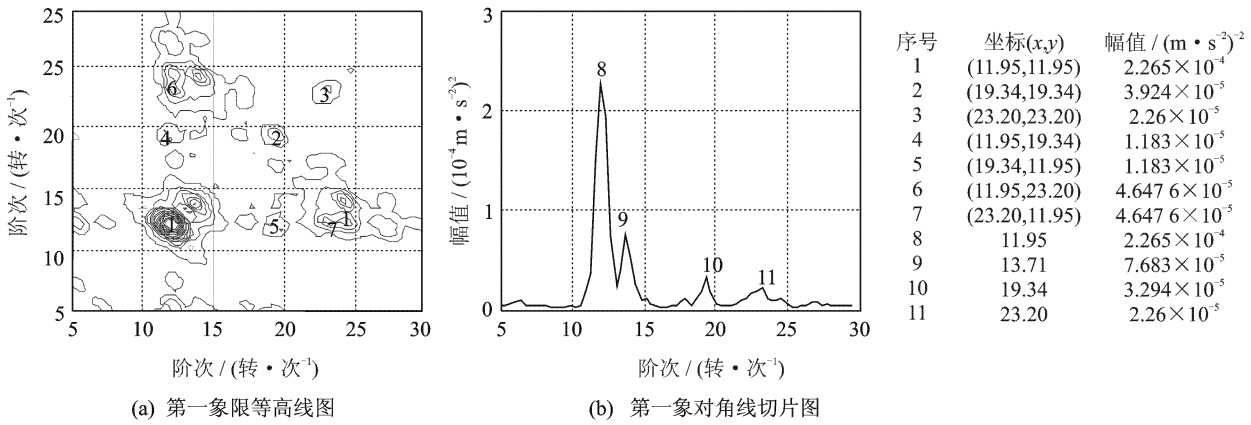
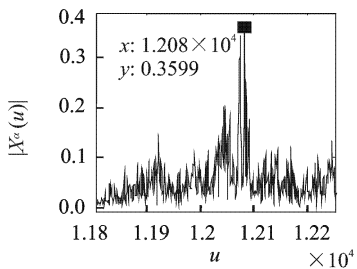
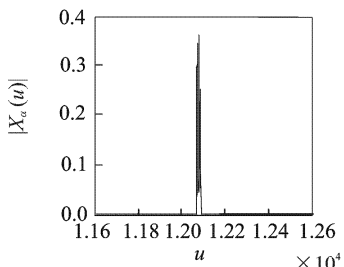


图4 二档原始信号的阶比双谱

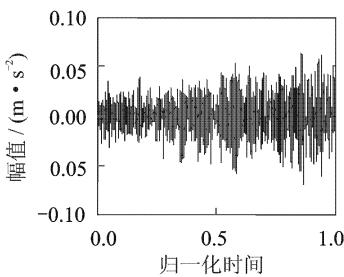


(a) FRFT变换(阶次 $p=1.0051$)

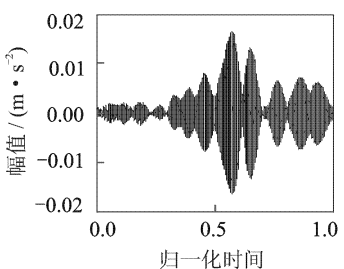


(b) 分数阶域滤波

($u_0=12\ 083$,带宽为12 070~12 090)



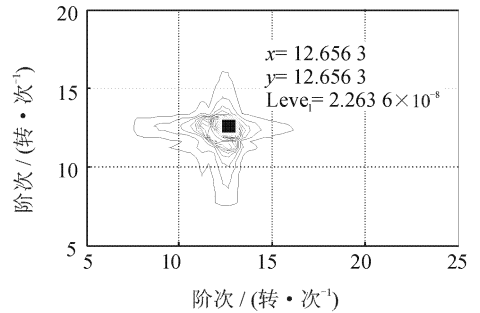
(c) 原始信号时域波形($N=24\ 576$)



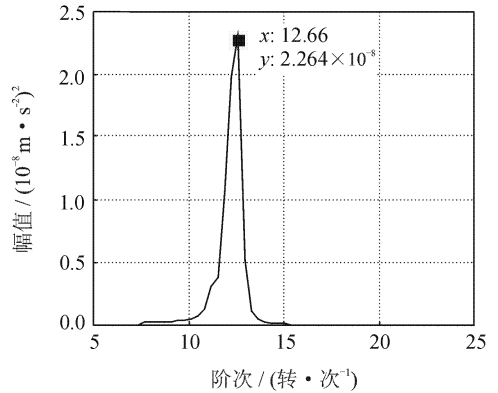
(d) 提取的阶比分量时域波形

图5 FRFT提取二档阶比分量

对FRFT提取的二档阶比分量进行阶比双谱分析如图6所示。图6(a)中,(12.65,12.65)处出现的突出峰值对应二档阶比分量(12.03),其阶比双谱幅值如图6(b)所示。可以看出,等高线图中阶比分量位置清晰,对角线切片图中二档阶次处阶比双谱峰值独立突出,直观反映了二档阶比分量信息。



(a) 第一象限等高线图



(b) 第一象限对角线切片图

图6 二档阶比分量的单分量阶比双谱

4.2.3 常啮合阶比分量的单分量阶比双谱分析

变速器置二档时,常啮合齿轮和二档啮合齿轮同时参与传动,两者的阶比分量的能量变化都反映变速器的技术状态,联合考虑两者的阶比双谱幅值

做判断更准确、可靠。与二档阶比分量的单分量阶比双谱分析步骤一样,常啮合阶比分量的单分量阶比双谱如图7所示。图7(a)中,(18.63,18.63)处出现的突出峰值对应常啮合阶比分量(19),其阶比双谱对角线幅值如图7(b)所示,峰值独立突出,能明显反映常啮合阶比分量。

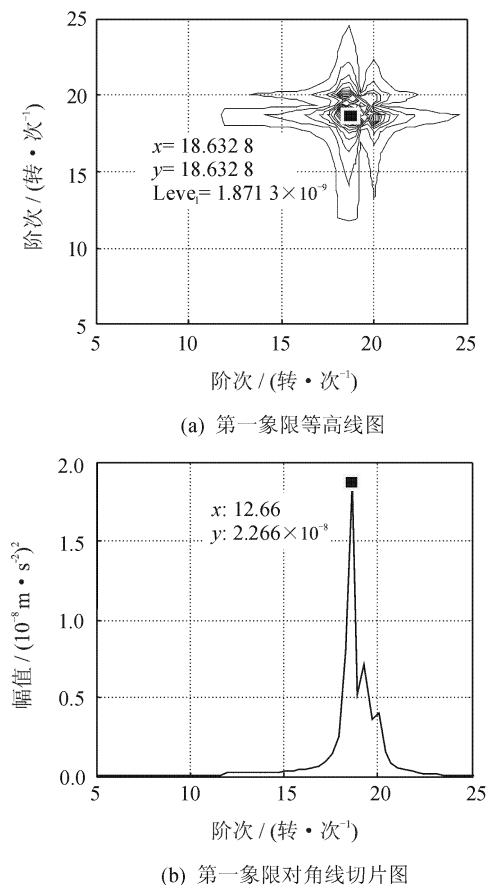


图7 常啮合阶比分量的单分量阶比双谱

4.2.4 累加二档和常啮合阶比分量的单分量阶比双谱

将二档和常啮合阶比分量的单分量阶比双谱结果累加得到新的双谱如图9所示。图9(a)与图4(a)对比看到,图8(a)中只有(12.65,12.65),(18.63,18.63)阶次处出现了明显峰值,分别对应二档阶比分量和常啮合阶比分量,明显消除了交叉项;图8(b)与图4(b)相比,消除了(13.71),(23.20)等其他阶比分量,阶次12.65,18.63处的阶比双谱幅值比图4(b)中8,10处明显小,阶次值也略有变化,说明由于其他分量、交叉项以及噪声之间的互相耦合和干扰,原始信号各阶比分量的阶比双谱幅值和阶次值都偏离了真实值,而单分量的阶比双谱屏蔽了其他分量和噪声,分析对象是单分量信号,不存在分量之间的耦合和干扰,单分量的阶比双谱幅值和阶次

能敏锐地觉察设备技术状态的微弱变化,利于提取微弱故障特征。

另外,故障特征不只分布在对角线上,还可能在角线以外区域,但交叉项都分布在对角线以外区域,在不消除交叉项的情况下,在对角线以外搜索特征很容易受到交叉项的干扰,而消除交叉项后,对角线上没有了其他分量的干扰,对角线以外没有了交叉项的干扰,同时搜索对角线上和对角线以外区域得到的特征信息。

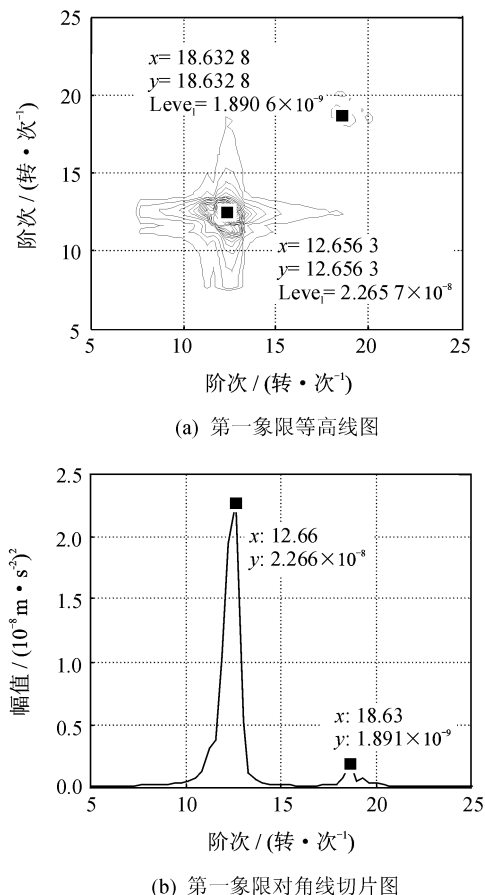


图8 二档阶比分量和常啮合阶比分量的单分量阶比双谱累加

4.3 基于FRFT的单分量阶比双谱提取齿轮微弱故障特征

分别采集变速器置二档、二档齿轮正常和轻微故障时的变速器升速过程信号进行基于FRFT的单分量阶比双谱分析,由于本数据的特征聚集在对角线上,不搜索对角线以外区域,将正常和轻微故障的单分量阶比双谱的对角线切片进行对比,如图9所示。可以看出,轻微故障时二档阶比分量的阶比双谱幅值比正常状态时明显增大,常啮合阶比分量的阶比双谱幅值比正常时小,虽然两个阶次的阶比双谱幅值对故障状态的反映方式不同,但都能清楚区分

正常与轻微故障状态,综合考虑二档阶比分量和常啮合阶比分量的阶比双谱幅值判断变速器齿轮故障技术状态,诊断结果更准确、可靠。

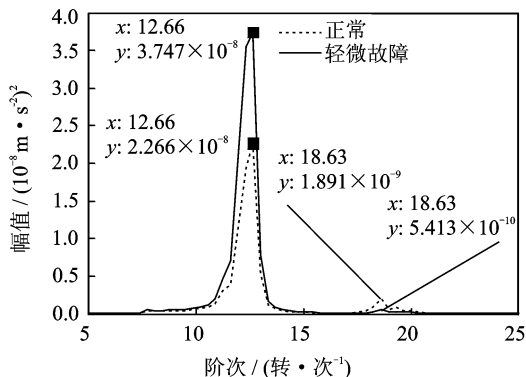


图9 正常与轻微故障时单分量阶比双谱对角线切片对比

5 结论

1) 阶比双谱分析多分量信号时不可避免地要产生交叉项,使各分量阶比双谱阶次和幅值失真,不利于提取微弱故障特征。

2) 基于转速信号确定 FRFT 变换最佳阶次精度高、速度快、鲁棒性好,能根据不同的转速信号自动得到对应的最佳阶次,根据该最佳阶次能准确提取出阶比分量的单分量信号。

3) 基于 FRFT 的单分量阶比双谱能有效屏蔽其他分量和噪声干扰,消除交叉项,突出故障特征,提高了在对角线上和对角线以外区域搜索特征信息的真实性和可靠性,有利于提取微弱故障特征。

参 考 文 献

- [1] 肖云魁. 汽车故障诊断学[M]. 北京:北京理工大学出版社,2006:172-173.
- [2] 贾继德,刘志刚. 基于阶比双谱分析的发动机故障特征提取[J]. 内燃机学报,2004,22(5):462-469.
Jia Jide, Liu Zhigang. Feature extraction and state monitoring of engine faults based on the order bi-spectrum estimation[J]. Transactions of CSICE,2004,22(5):462-469. (in Chinese)
- [3] 韩捷,李军伟. 阶比双谱及其在旋转机械故障诊断中的应用[J]. 机械强度,2006,28(6):791-795.
Han Jie, Li Junwei. Order bispectrum and its application to the fault diagnosis of rotating machine[J]. Journal of Mechanical Strength,2006,28(6):791-795. (in Chinese)
- [4] 夏天. 基于循环平稳理论的柴油发动机振动信号分析及故障诊断研究[D]. 南京:解放军理工大学,2010:77-

97.

- [5] Qi lin, Tao Ran, Zhou Siyong, et al. Detection and parameter estimation of multicomponent LFM signal based on the fractional fourier transform[J]. Science in China,2004,47(2):184-198.
- [6] 梅检民,肖云魁. 基于分数阶傅里叶变换的邻近阶比分离研究[J]. 振动与冲击,2012,31(11):38-41.
Mei Jianmin, Xiao Yunkui. Adjacent order components separation based on fractional fourier transformation[J]. Journal of Vibration and Shock,2012,31(11):38-41. (in Chinese)
- [7] 刘峰,徐会法. 分数阶 Fourier 变换中量纲归一化因子的选取[J]. 系统工程与电子技术,2011,33(2):237-240.
Liu Feng, Xu Huifa. Selection of dimensional normalization parameters in fractional fourier transform[J]. System Engineering and Electronics,2011,33(2):237-240. (in Chinese)
- [8] 梅检民,肖云魁. 基于改进阶比的变速器微弱故障特征提取[J]. 振动工程学报,2012,25(3):317-321.
Mei Jianmin, Xiao Yunkui. Weak fault characteristics extraction for automobile transmission based on improved order analysis[J]. Journal of Vibration Engineering,2012,25(3):317-321. (in Chinese)
- [9] 郭瑜,秦树人,梁玉前. 时频分析阶比跟踪技术[J]. 重庆大学学报:自然科学版,2002,25(5):17-18.
Guo Yu, Qin Shuren, Liang Yuqian. Order tracking technology in time-frequency analysis[J]. Journal of Chongqing University: Nature Science Edition,2002,25(5):17-18. (in Chinese)
- [10] 梅检民. 基于振动分析的柴油发动机机械故障诊断系统研究[D]. 天津:军事交通学院,2009:23-25.
- [11] 李志农,丁启全,吴昭同,等. 转子裂纹的高阶谱分析[J]. 振动与冲击,2002,21(1):60-62.
Li Zhinong, Ding Qiquan, Wu Zhaotong, et al. Higher order spectral analysis of cracked rotor[J]. Journal of Vibration and Shock,2002,21(1):60-62. (in Chinese)
- [12] 张贤达. 现代信号处理[M]. 北京:清华大学出版社,2002:278-281.



第一作者简介:梅检民,男,1983年4月生,博士研究生。主要研究方向为机械故障的信号测试与智能故障诊断。曾发表《基于高阶累积量的轴承并发故障振动信号分析》(《内燃机学报》2011年第29卷第4期)等论文。

E-mail:meijianmin126@126.com