

基于阶比跟踪与 VMD 的瞬变工况发动机故障特征提取

任 刚¹, 贾继德², 梅检民², 贾翔宇¹, 韩佳佳¹, 尉蓝天³

(1. 陆军军事交通学院 学员五大队, 天津 300161; 2. 陆军军事交通学院 投送装备保障系, 天津 300161;

3. 武汉理工大学 汽车学院, 武汉 430070)

Extraction of Features of Diesel Engine Faults Under Transient Operations Based on Order Tracking and Variational Mode Decomposition

REN Gang¹, JIA Jide², MEI Jianmin², JIA Xiangyu¹, HAN Jiajia¹, WEI Lantian³

(1. Fifth Cadet Brigade, Army Military Transportation University, Tianjin 300161, China; 2. Projection

Equipment Support Department, Army Military Transportation University, Tianjin 300161, China;

3. Auto College, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

Abstract: A method based on the order tracking and variational mode decomposition (VMD) was proposed to solve the problem of non-smoothness of and big background noise in engine vibration signal. For the vibration signals of diesel engine crankshaft bearing fault and gasoline engine connecting rod bearing fault, a non-smooth signal in the time domain was converted into a pseudo smooth signal in the angular domain based on the order tracking. Then the converted signal was decomposed into several components with VMD, and the components that contain fault information were selected. The three dimensional spectral array of order, speed and power spectrum of the selected components was calculated, and the fault feature was extracted. The effectiveness of the proposed method was verified by simulation and experiment.

摘要: 针对发动机加速过程振动信号的非平稳性和存在强背景噪声的特点, 提出阶比跟踪与变分模态分解(VMD)相结合的方法。对于柴油机曲轴轴承故障和汽油机连杆轴承模拟试验振动信号, 利用阶比跟踪技术将时域上的非平稳信号转化为角域上的伪平稳信号, 利用VMD对重采样信号进行分解, 选择包含故障信息的模态分量, 计算其阶比、转速、功率谱所构成的三维阶比谱阵, 提取故障特征。仿真分析和故障模拟试验验证了该方法的有效性。

关键词: 阶比跟踪; 变分模态分解; 瞬变工况; 发动机; 特征提取

Key words: order tracking; variational mode decomposition (VMD); transient operation; engine; feature extraction

DOI: 10.13949/j.cnki.nrjgc.2018.04.009

中图分类号: TK418

文献标识码: A

0 概述

发动机绝大多数时间都在瞬变工况下运转, 如何对瞬变工况下发动机的故障进行诊断一直是研究

的热点^[1]。发动机瞬变工况振动信号蕴含着丰富的故障信息, 能够较为全面地反映发动机的运行状态^[2-5]。发动机的振动激励主要来自于发动机的转频和点火频率, 由于发动机的运行转速在持续变化,

收稿日期: 2017-12-13

修回日期: 2018-02-09

基金项目: 陆军装备部重点项目(WG2015JJ010008)

Fund Project: Key Projects of the Army Equipment Department(WG2015JJ010008)

作者简介: 任 刚(1994—), 男, 硕士生, 主要研究方向为机械故障诊断, E-mail: jixyren gang@163.com。

故振动信号中包含的故障频率也随之变化,通过分析传统时域、频域上的信号很难有效提取故障特征。阶比跟踪技术通过跟踪发动机的运行转速,对采集到的振动信号以等角度的方式重新采样,把时域上的瞬变工况信号转化为角域上的稳定工况信号,以便从发动机振动信号中准确提取与转速相关的故障特征。文献[6]结合阶比跟踪技术与峭度图算法,有效提取出滚动轴承外圈故障特征。文献[7]中将时时变换与阶比跟踪方法相结合,根据时时能量阶比谱的阶次特征实现了滚动轴承故障诊断。然而,上述方法均需要在匀加速条件下才适用,发动机在实际运行过程中很难保证这一点。因此,本文将发动机加速信号按转速分段,对加速信号进行重排,剔除转速重复的信号,得到一段近似于匀加速的重构信号,该方法适用于任意工况的振动信号分析。

发动机具有较为复杂的结构,其振动信号通常具有多分量、调幅调频的特点。文献[8-9]中提出了经验模态分解(empirical mode decomposition, EMD),在各类机械设备故障诊断中被广泛运用。EMD具有完全的自适应性、无监督性,但这种方法在实际运用过程中同时也存在着端点效应、模态混叠等方面的问题^[10]。文献[11]中提出了变分模态分解(variational mode decomposition, VMD),该方法从本质上来讲是由多个自适应维纳滤波器组成的,在信号处理中具有良好的噪声鲁棒性。与EMD方法相比,VMD可以有效克服EMD的若干缺点,并且能够以更高的计算速度对信号进行处理^[12],在工程领域得到了广泛的运用^[13-16]。

经过大量的研究论证工作,本文提出了一种全新的基于阶比跟踪与VMD的瞬变工况发动机故障诊断方法。首先建立多分量、非平稳、非高斯仿真信号,并加入高斯白噪声;运用阶比跟踪技术,对仿真信号以等角度方式重新采样,将时变信号变成角域上的平稳信号;运用VMD将重采样信号分解为若干个模态分量,通过计算相关系数选择含有故障特征的模态分量并计算阶比谱,提取故障信息。将本文提出的方法应用于瞬变工况柴油机曲轴轴承故障和汽油机连杆轴承故障诊断中,成功提取了故障特征,验证了该方法的实用性和有效性。

1 阶比跟踪技术

假设发动机曲轴做匀变速转动,转角与时间满足二项式关系:

$$\theta(t) = b_0 + b_1 t + b_2 t^2 \quad (1)$$

式中, $\theta(t)$ 为曲轴的转角; t 为时间; b_0 、 b_1 、 b_2 分别为多项式系数。

对于振动信号来说,在一个旋转周期内,每段振动信号段的等时采样点与转角存在一定关系。只要每转取恒定的等角度采样点,通过拟合3个连续的等角度采样点的到达时间(t_1, t_2, t_3),便可解出式(1)中的多项式系数。

$$\begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ \theta_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & t_1 & t_1^2 \\ 1 & t_2 & t_2^2 \\ 1 & t_3 & t_3^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中, $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ 为转速信号的角度间隔。利用软件计算式(2),能够获得每一个角度所对应的时刻:

$$t_k = \frac{1}{2b_2} [\sqrt{b_1^2 + 4b_2(\theta_k - b_0)} - b_1] \quad (3)$$

式中, θ_k 为转角位置; t_k 为转角位置对应的时间。利用式(3)可以得到重采样的时间,经过三次样条插值算法可以得到重采样的信号。运用快速傅里叶变换(FFT)对多个分段(每段信号对应某一旋转周期)的重采样信号进行计算,便可得到阶比、转速、功率谱构成的三维谱阵,实现阶比跟踪的目的。

2 变分模态分解基本原理

VMD算法定义本征模态函数为一个非平稳的调幅调频信号,即

$$u_k(t) = A_k(t) \cos(\phi_k(t)) \quad (4)$$

式中,相位 $\phi_k(t)$ 满足 $\phi_k(t)' \geq 0$;包络线 $A_k(t)$ 满足 $A_k(t) \geq 0$ 。瞬时频率 $\omega_k(t) = \phi_k(t)'$ 。 $A_k(t)$ 与 $\omega_k(t)$ 变化缓慢, $\phi_k(t)$ 变化较为迅速。

对每一个模态函数 $u_k(t)$ 进行希尔伯特变换,利用指数修正,得到 K 个模态函数,将模态函数频谱修正到估算的中心频率,利用高斯平滑计算出模态分量的带宽,变分约束问题为:

$$\begin{aligned} \min & \left\{ \sum_{k=1}^K \left\| \partial_t \left\{ \left[(\delta(t) + \frac{j}{\pi t}) * u_k(t) \right] e^{-j\omega_k t} \right\} \right\|_2^2 \right\} \\ \text{s. t. } & \sum_{k=1}^K f(t) = \sum_{k=1}^K u_k(t) \end{aligned} \quad (5)$$

式中, u_k 为模态函数; ∂_t 为对模态函数求时间 t 的偏导数; ω_k 为模态分量的中心频率; $\delta(t)$ 单位脉冲函数;*为卷积符号。

VMD利用二次惩罚因子和拉格朗日乘法算子,引入乘法算子交替方向法,不断更新 u_k^{n+1} 、 ω_k^{n+1} 和 λ^{n+1} ,求解上述变分约束问题的最优解。

模态分量 u_k^{n+1} 的表达式为:

$$u_k^{n+1} = \arg \min_{u_k \in \mathbf{x}} \left\{ a \left\| \partial_t \left\{ \left[(\delta(t) + \frac{j}{\pi t}) * u_k(t) \right] e^{j\omega_k t} \right\} \right\|_2^2 + \left\| f(t) \sum_i u_i(t) + \frac{\lambda(t)}{2} \right\|_2^2 \right\} \quad (6)$$

式中, α 为惩罚因子; λ 为拉格朗日乘子。中心频率 ω_k^{n+1} 的表达式为:

$$\omega_k^{n+1}(\omega) = \frac{\int_0^\infty \omega |\hat{u}_k(\omega)|^2 d\omega}{\int_0^\infty |\hat{u}_k(\omega)|^2 d\omega} \quad (7)$$

迭代的停止条件为:

$$\sum_{k=1}^K \left\| \hat{u}_k^{n+1} - \hat{u}_k^n \right\|_2^2 / \left\| \hat{u}_k^n \right\|_2^2 < \epsilon \quad (8)$$

根据前面的推导, VMD 算法的计算步骤为:

(1) 初始化 $\{\hat{u}_k^1\}$ 、 $\{\hat{\omega}_k^1\}$ 、 $\{\hat{\lambda}^1\}$ 和 n 。(2) 根据式(4)和式(5)更新 u_k 和 ω_k 。(3) 更新拉格朗日乘子 λ , 如式(9)所示。

$$\hat{\lambda}^{n+1}(\omega) \leftarrow \hat{\lambda}^n(\omega) + \beta \left[\hat{f}(\omega) \sum_{k=1}^K \hat{u}_k^{n+1}(\omega) \right] \quad (9)$$

(4) 重复执行步骤(2)和步骤(3), 当满足式(8)条件时结束循环。

VMD 算法是线性变换, 可以对信号进行重构, 重构信号可表示为:

$$\hat{f}(t) = \sum_{k=1}^K \hat{u}_k \quad (10)$$

式中, $\hat{u}_k$ 为迭代停止后最终得到的模态分量。

3 仿真信号分析

由于发动机具有较为复杂的结构, 存在很多振动激励源, 而且振动源信号经过多个零部件的调制。本文参考文献[6]中的仿真信号, 加入了高斯白噪声, 更符合实际的振动信号特征, 仿真信号 s 构成如下:

$$s_1 = 2\sin(2\pi f(t)) \quad (11)$$

$$s_2 = 2\sin(4\pi f(t)) \quad (12)$$

$$s_3 = 2\sin(8\pi f(t)) \quad (13)$$

$$s = s_1 + s_2 + s_3 + \text{randn}(N) \quad (14)$$

式中, N 为采样点数; $\text{randn}(N)$ 为高斯白噪声; 3 个频率 f 随曲轴转速 n 变化, 瞬时频率 $f(t) = t$, 转速 $n(t) = 60f(t)$ 。

从曲轴开始转动时采样, 信号采样频率为 256 Hz, 采样点数为 2 048 点。从转动起始位置每转采 12 个点, 也就是曲轴每旋转 $(\pi/6)$ rad 采 1 个点。仿真信号的构成成分如图 1 所示, 仿真信号的时域波形和

功率谱如图 2 所示。从图 1、图 2 中可以看出: 仿真信号时域采样波形是等时间间隔采样的, 其频率在不断增大; 在仿真信号的功率谱图中, 无法有效提取仿真信号的故障特征。

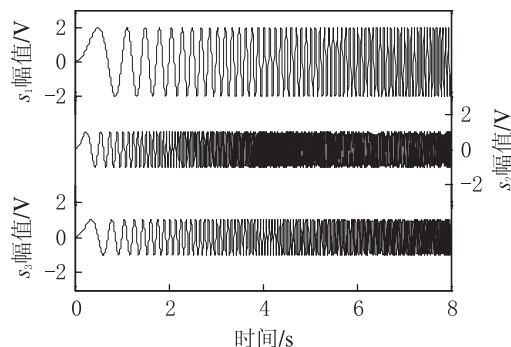
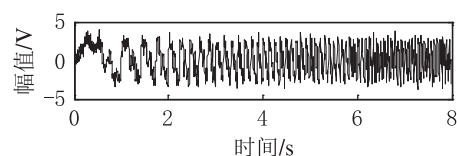
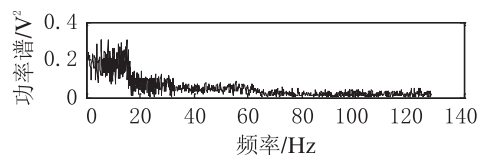


图 1 仿真信号构成成分



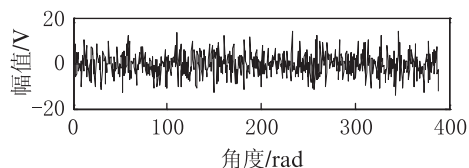
(a) 仿真信号时域波形



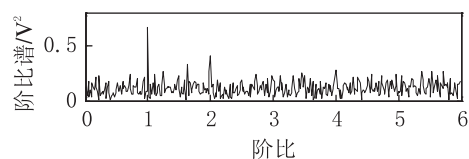
(b) 仿真信号功率谱

图 2 仿真信号时域波形及其功率谱

运用阶比跟踪技术对仿真时域信号进行等角度重采样, 将时域上的非平稳信号转化为角域上的平稳信号, 并计算其阶比谱, 如图 3 所示。从图 3 中可以看出, 仿真信号的阶比谱中出现了 1、2、4 阶的特征阶比, 但是受到背景噪声的影响, 出现了一些与故障无关的阶比, 有必要对信号进行深入分析。



(a) 信号幅值



(b) 阶比

图 3 等角度重采样信号及其阶比谱

为了进一步提取特征分量,利用 VMD 对等角度重采样信号进行分解,设定分解层数为 5 层, VMD 分解获得的模态分量(分别记为 U1~U5)的角域波形及其阶比谱如图 4、图 5 所示。从图 4、图 5 中可以看到,等角度重采样信号被分解为 5 个模态分量,出现了与原仿真信号无关的伪分量。为了进一步提取故障特征,分别计算各个分量与仿真信号的相关系数,如表 1 所示。从表 1 可以看出,分量 U2、U3、U4 的相关系数远大于其余两个分量,均超过了 0.5,与仿真信号显著相关,表明 U2、U3、U4 能够反映仿真信号的故障特征,可以作为故障分量。故障分量 U2、U3、U4 的角域波形与仿真信号构成成分的时域波形相比,重采样信号更稳定,其阶比不随时间的变化而变化,更利于故障特征的提取。因此,运用阶比跟踪技术与 VMD,能够较为真实地对仿真信号进行分解,提取故障特征。

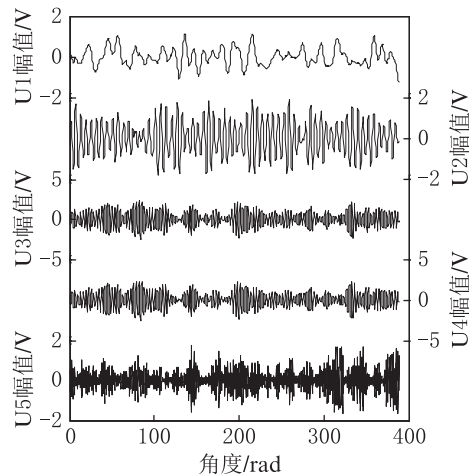


图 4 等角度重采样信号 VMD 分解结果

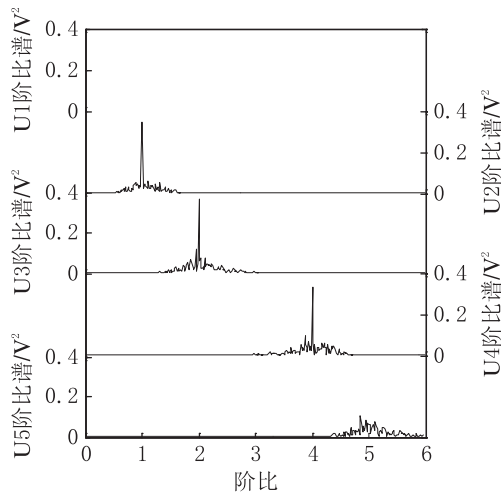


图 5 等角度重采样信号 VMD 分解分量阶比谱

表 1 VMD 分解模态分量与仿真信号的相关系数

模态分量	相关系数
U1	0.097 4
U2	0.576 5
U3	0.575 9
U4	0.569 7
U5	0.210 4

4 实例信号分析

在康明斯 EQ6BT 柴油机第 4 缸曲轴轴承设置不同配合间隙(0.10 mm、0.26 mm、0.40 mm、0.55 mm),模拟该曲轴轴承正常、轻微、中度、严重 4 种磨损状态。考虑到内部激励源和外部缸体振动信号相关特性,在柴油机瞬变工况条件下,选择柴油机油底壳下部正对第 4 道主轴承进行振动信号采集,如图 6 所示,与此同时采集转速传感器信号用来计算柴油机转速。

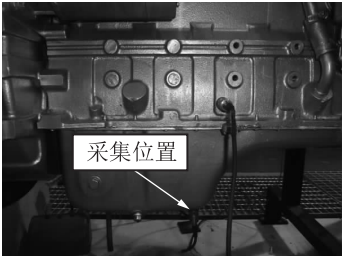


图 6 振动信号采集位置

通常,柴油机在加速时其故障特征较为明显。为了保证信号的重复性和稳定性,本文采用定转速触发的方式进行采集,根据维修专家的经验,设定触发转速为 1 800 r/min,当转速上升到 1 800 r/min 时,开始进行数据采集。采样频率为 20 000 Hz,采样点数为 50 000 点,分别采集 4 种磨损状态下振动信号和转速信号。

对于阶比跟踪技术,转速信号十分重要,只有得到准确的转速信号,才能用来分析瞬变工况的阶比。在试验过程中,转速是人为控制的,存在不可控的因素。以正常磨损状态为例,在图 7(a)中,整个加速过程并不是匀加速,转速起伏较大,势必会对分析结果造成影响。因此,需要先对转速大小进行排序,剔除转速相同的分段,得到一个修正后的转速,即一个相对均匀的加速过程,如图 7(b)所示。

同样,对应的振动信号也要进行适当的修正,通过公式(2)的求解,得到等角度采样对应的时刻,利用三次样条插值得到等角度重采样的振动信号。加速过程(1 800~3 000 r/min)的时域信号如图 8(a)所示,等角度重采样信号如图 8(b)所示。

利用同样的方法,分别对其他磨损状态的振动信

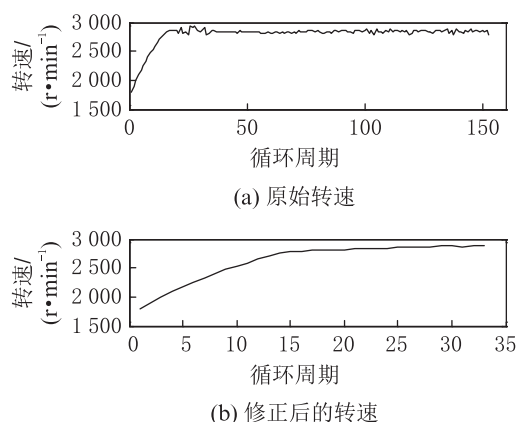


图 7 原始转速曲线与修正后的转速曲线

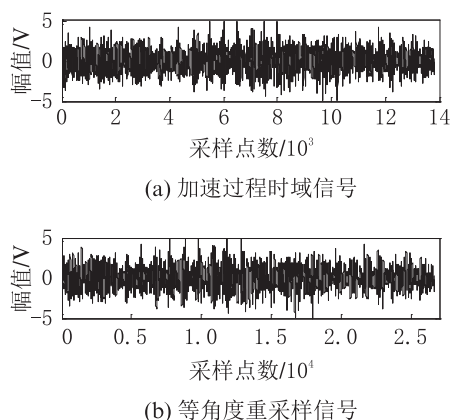


图 8 加速过程时域信号与等角度重采样信号

号进行处理,得到重采样信号。分别计算等角度重采样信号的阶比谱,得到阶比、转速、功率谱密度(PSD)所构成的三维阶比谱阵,如图 9 所示。从图 9 中可以看到,当柴油机转速高于 2 800 r/min 时,在 10 阶附近的冲击能量表现出一定的规律性,但同时存在着大量的干扰阶比。以正常磨损状态为例,进一步利用 VMD 对等角度重采样信号进行分解。在进行 VMD 分解时,模态数 K 和惩罚因子 α 对分解结果影响很大,参考文献[17]中运用遗传算法优化参数的方法,确定模态数 K 为 5,惩罚因子 α 为 846。分别计算每个模态分量与重采样信号的相关系数,如表 2 所示。从表 2 可知,U1 与重采样信号的相关系数远远大于其他模态分量,因此将 U1 作为故障分量。

利用同样的方法,分别对其他磨损状态的振动信号进行处理,得到不同磨损状态下的分量,同样选择 U1 作为故障分量。分别计算不同磨损状态下 U1 分量的阶比谱,得到阶比、转速、功率谱所构成的三维阶比谱阵,如图 10 所示。从图 10 可知,对于不同磨损状态,振动信号的冲击能量主要位于 0~20 阶内。当转速不高于 2 800 r/min 时,随着曲轴轴承配合间隙的增加,在 10 阶附近能量减弱,但并非严格递减。

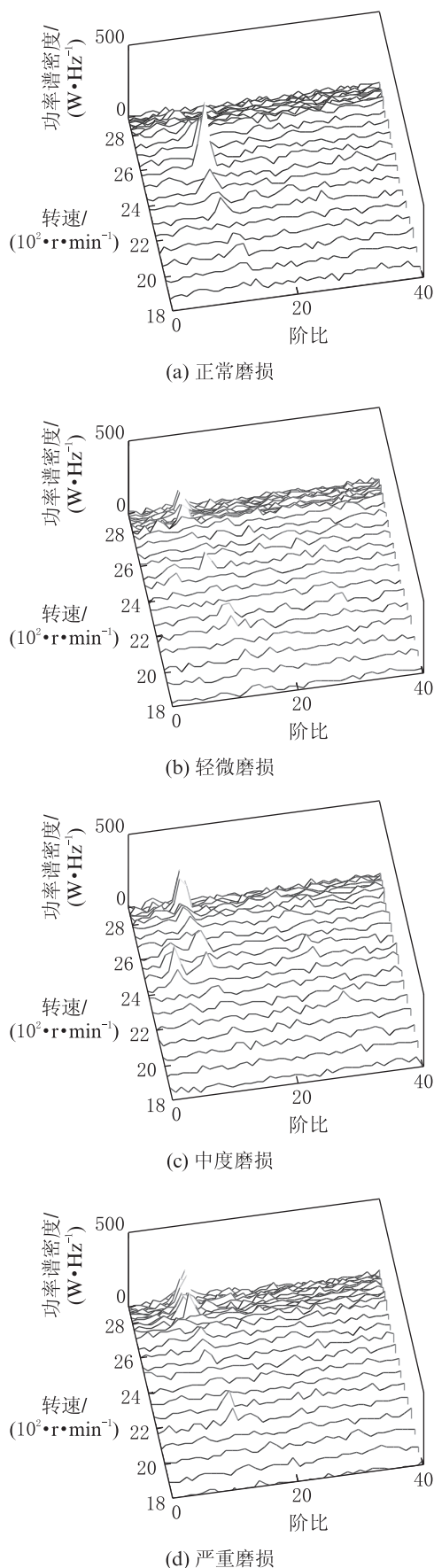


图 9 VMD 分解前不同磨损状态阶比跟踪图

表 2 VMD 分解模态分量与重采样信号的相关系数

模态分量	相关系数
U1	0.803 3
U2	0.386 3
U3	0.294 3
U4	0.187 1
U5	0.057 3

当转速高于 2 800 r/min 时,在 10 阶附近的能量随着曲轴轴磨损程度的增加而增加。为了定量分析冲击能量的变化,分别计算在不同磨损状态下 0~20 阶的能量与峰值,如表 3 所示。

从表 3 中可以看出,当转速不高于 2 800 r/min 时,曲轴轴承发生故障后振动信号的能量与峰值是减小的,但是随着配合间隙的增大并没有依次递减,呈现出的规律性较弱。当转速高于 2 800 r/min 时,随着曲轴轴承磨损程度的增加,振动信号的冲击能量与峰值均依次递增,可以作为判定磨损故障的依据。因此,利用本文提出的方法能够有效提取瞬变工况下柴油机曲轴轴承的故障特征。

为了进一步验证本文方法的普适性,在 EQ6100 型 6 缸汽油发动机上第 5 缸连杆轴承设置不同配合间隙(0.07 mm、0.15 mm、0.30 mm),模拟该连杆轴承正常、轻微、中度 3 种磨损状态。在汽油机瞬变工况条件下,选择缸体中下部主油道附近正对第 5 缸位置进行振动信号采集,采集转速传感器信号用来计算汽油机转速。设定触发转速为 1 600 r/min,当转速上升到 1 600 r/min 时,开始进行数据采集。采样频率为 30 000 Hz,采样点数为 20 480 点,分别采集 3 种磨损状态下振动信号和转速信号。

利用本文提出的方法对振动信号进行处理,得到不同磨损状态下的故障分量,分别计算不同磨损状态下故障分量的阶比谱,得到阶比、转速、功率谱所构成的三维阶比谱阵,如图 11 所示。从图 11 可以看出,在 50~100 阶内,随着磨损状态的恶化,能量逐渐增加,符合故障规律。进一步提取 50~100 阶内的累加能量,如表 4 所示。从表 4 可以看出,随着汽油机连杆轴承配合间隙的增加,能量逐渐增加,可以作为判断故障的依据。因此,利用本文提出的方法可以有效提取汽油机连杆轴承的故障特征。

5 结论

(1) 本文提出了一种阶比跟踪与 VMD 相结合用以分析往复旋转机械故障的新方法,将时域上的非平稳信号转化为角域上的伪平稳信号,进一步计算重采样信号的阶比,抑制了振动信号的噪声,减弱

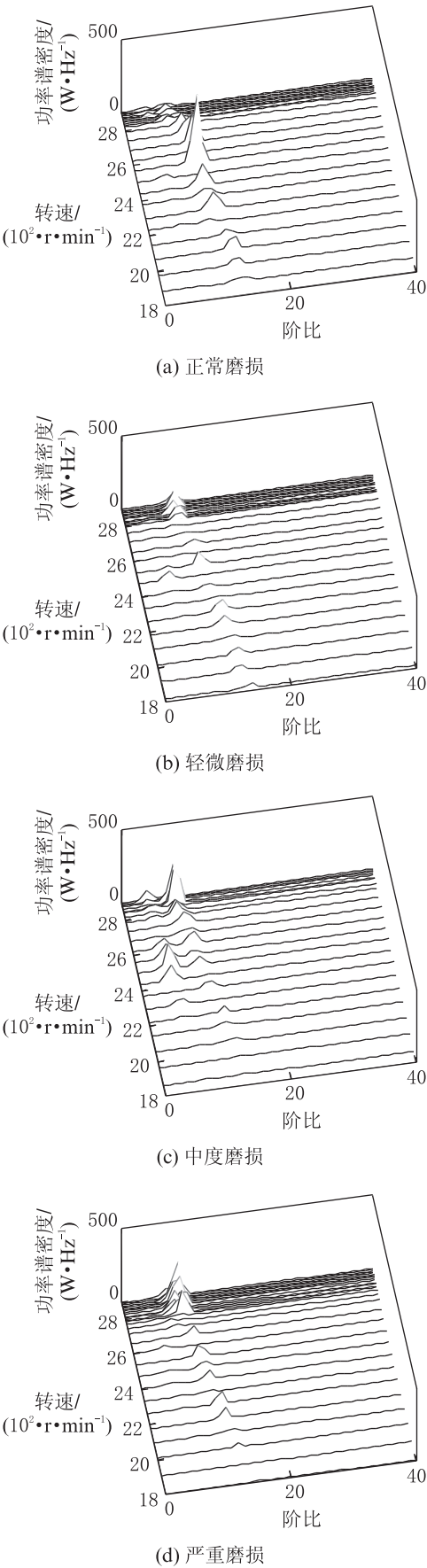
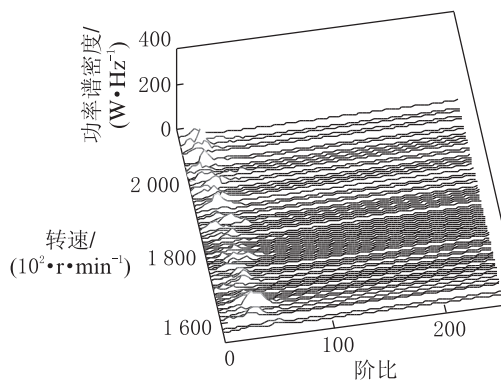


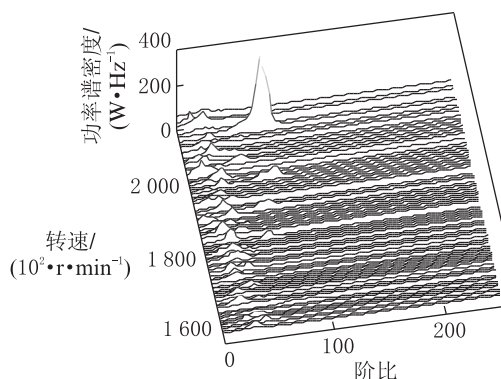
图 10 柴油机不同磨损状态阶比跟踪图

表 3 不同磨损状态 0~20 阶能量比较

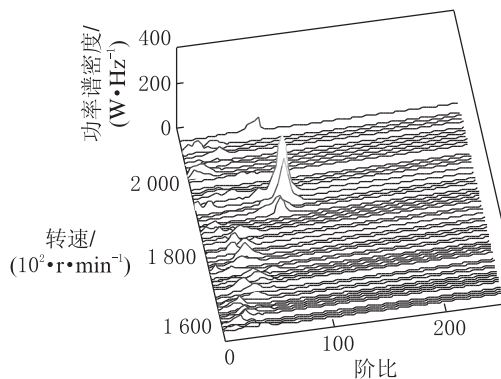
磨损状态	转速不高于 2 800 r/min		转速高于 2 800 r/min	
	能量/ V^2	峰值/V	能量/ V^2	峰值/V
正常状态	3 401.9	468.8	890.1	62.9
轻微磨损	1 420.9	91.9	1 123.6	109.2
中度磨损	2 764.6	167.6	2 122.4	209.1
严重磨损	2 449.5	161.2	2 787.6	234.4



(a) 正常磨损



(b) 轻微磨损



(c) 中度磨损

图 11 汽油机不同磨损状态阶比跟踪图

表 4 不同磨损状态 50~100 阶能量比较

磨损状态	50~100 阶累加能量/ V^2
正常磨损	164.2
轻微磨损	643.5
中度磨损	978.7

了转速波动对振动信号的影响,成功提取出仿真信号中包含的故障信息。

(2) 将该方法应用到瞬变工况柴油机曲轴轴承故障和汽油机连杆轴承故障中,成功提取了不同磨损状态下的故障特征。经过仿真与不同种类发动机的试验验证,证明该方法是切实有效的。

参考文献:

- [1] 杨蓉,楼狄明,谭丕强,等. 重型增压柴油机瞬变工况的燃烧阶段特性研究[J]. 内燃机工程, 2015, 36(4): 41-45.
YANG R, LOU D M, TAN P Q, et al. Research on combustion phase characteristics of a turbocharged heavy duty diesel engine during transient process[J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2015, 36(4): 41-45.
- [2] 吴春志,贾继德,贾翔宇,等. 基于多尺度降维的柴油机信号信息熵增强方法[J]. 振动与冲击, 2018, 37(3): 180-185.
WU C Z, JIA J D, JIA X Y, et al. A method to enhance the information entropy feature of diesel engine signal by multi-scale dimension reduction[J]. Journal of Vibration & Shock, 2018, 37(3): 180-185.
- [3] 周斌,靳世九,梅检民,等. 基于 Teager 算子的柴油机活塞-气缸磨损故障特征增强方法[J]. 振动与冲击, 2017, 36(15): 84-89.
ZHOU B, JIN S J, MEI J M, et al. Feature enhancement of diesel engine's piston-cylinder wear-out faults based on teager energy operator[J]. Journal of Vibration & Shock, 2017, 36(15): 84-89.
- [4] 沈虹,赵红东,梅检民,等. 基于高阶累积量图像特征的柴油机故障诊断研究[J]. 振动与冲击, 2015, 34(11): 133-138.
SHEN H, ZHAO H D, MEI J M, et al. Fault feature extraction of connecting rod bearings of a diesel engine based on angle domain fourth-order cumulant slice spectrum[J]. Journal of Vibration & Shock, 2015, 34(11): 133-138.
- [5] 刘建敏,李晓磊,乔新勇,等. 基于匹配跟踪的柴油机活塞敲击振动特征提取方法[J]. 内燃机工程, 2016, 37(3): 111-116.
LIU J M, LI X L, QIAO X Y, et al. An abstracting method of diesel piston slap vibration characteristics based on matching pursuit[J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2016, 37(3): 111-116.
- [6] 柏林,甄杰,彭畅,等. 变转速下滚动轴承阶比峭度图法故障特征提取[J]. 振动、测试与诊断, 2016, 36(4): 653-658.
- [7] 唐贵基,庞彬. 基于时时能量阶比谱的变转速工况滚动轴承微弱故障诊断研究[J]. 振动工程学报, 2017, 30(5): 856-864.
TANG G J, PANG B. Research on fault diagnosis of rolling bearing's weak fault under variable speed conditions based on time-time energy order spectrum [J]. Journal of Vibration Engineering, 2017, 30(5): 856-864.
- [8] HUANG N E, SHEN Z, LONG S R. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis[J]. Proceedings of the Royal Society A, 1998, 454: 903-995.

(下转第 66 页)