

基于敏感 IMF 的再制造发动机振动状态研究*

陈成法^{1,2}, 白云川¹, 张英锋¹, 焦宇飞¹, 李树珉¹

(1. 军事交通学院军用车辆系 天津,300161) (2. 天津大学精密测试技术及仪器国家重点实验室 天津,300072)

摘要 为了提高再制造发动机质量,将总体平均经验模态分解方法(ensemble empirical mode decomposition,简称 EEMD)及敏感 IMF 选择算法引入再制造发动机性能研究中。在对再制造发动机非稳态振动信号进行 EEMD 分解的基础上,首先,将相关系数引入到 IMF 研究中,分析各 IMF 分量与原始信号的相关性,并计算原始信号各 IMF 分量的敏感因子;然后,利用敏感 IMF 进行 Hilbert 变换,并对再制造发动机的振动状态进行分析。研究表明,采用 EEMD 分解算法及敏感 IMF 的边际谱能反映再制造发动机不同部位的振动状态,缸壁、缸盖、曲轴三处对振动的敏感频率是存在差异的,通过对发动机各主要部位振动情况的研究,可以有针对性地采用再制造工艺,从而提高发动机再制造水平提供技术支持。

关键词 敏感 IMF; 振动状态; 再制造发动机; 边际谱

中图分类号 TK426

引言

振动监测技术已成为对发动机主要运动部件监测和故障诊断的主要技术手段之一^[1-2]。但是,由于振动信号中包含有各种频率的振动信号以及噪声等信息,如何提取出有关发动机运行状态的特征信息是研究的重点。经验模态分解方法(empirical mode decomposition,简称 EMD)通过把复杂的信号数据分解为本征模函数(intrinsic mode function,简称 IMF)之和,能够将反映真实状态的物理信息从振动信号中提取出来。

再制造工程为实现循环经济战略需求提供了技术支撑,大力开展再制造工程是实现循环经济、节能减排和可持续发展的主要途径之一,因此,得到了很多国家的重视^[3-5]。但是,由于发动机运动部件众多、结构复杂,且再制造工艺复杂,使部件再制造水平不确定性加大^[6-7],因此,发动机的再制造质量很难保证。现将总体平均经验模态分解方法引入到再制造发动机振动数据处理中,并采用敏感 IMF 分量分析方法,研究再制造发动机运行状态,从而提高发动机再制造水平提供技术支持。

1 EMD 与 EEMD

EMD 分解是解决机械运转过程中非平稳振动信息的一种有效方法^[8],该方法的本质是通过对振动数据进行分解,获得振动信号基于时间尺度的本征波动模式,并找到本征模函数(IMF)^[9],通过对 IMF 分量的 Hilbert 变换,提取到振动信息的内在特征,故 EMD 方法及 Hilbert 变换在机械设备状态监测领域得到了广泛的应用^[10-11]。

但是,EMD 分解方法也存在不足之处,主要有:
a. 模式混淆问题,即同一频率成分被分解到完全不同的 IMF 中^[12-13]或一个 IMF 中含有不同的信号成分;当模式混淆产生时,经验模态分解方法不能将表征振动特征、具有具体物理意义的本征模态函数从振动信号中提取出来。
b. 在故障诊断中,除了部分 IMF 能反映故障特征,其他 IMF 都是噪声或干扰成分。因此,利用 Hilbert 变换处理所有的 IMF 而得到的 Hilbert-Huang 谱故障特征不显著,从而导致诊断精度较低。为了解决以上问题,Wu 等^[13]在 EMD 分解中引入噪声,提出了一种总体平均经验模态分解方法,解决了问题 a。针对问题 b,文献^[14]提出了敏感本征模态函数选择算法,通过计算振动

* 国家高技术研究发展计划(“八六三”计划)特大功率动力总成资助项目(2012AA112101)

收稿日期:2015-03-19;修回日期:2015-08-31

信号与其相对应 IMF 的相似性来选择反映故障特征的敏感 IMF, 然后对敏感的 IMF 进行 Hilbert 变换, 得到振动特征信息的边际谱。

1.1 EEMD 分解

高斯白噪声具有频率均匀分布的统计特征, EEMD 利用该特征解决模式混淆问题。

将高斯白噪声加入信号中进行多次 EMD 分解, 并将多次分解的 IMF 总体平均定义为最终的 IMF。EEMD 的算法^[15-16]归纳如图 1 所示。

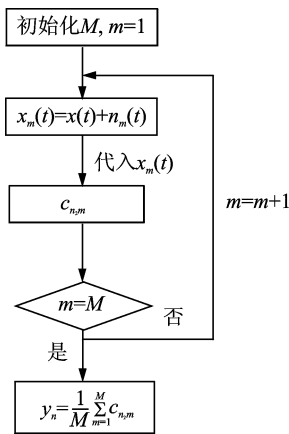


图 1 EEMD 分解过程

Fig. 1 Decomposition process of EEMD

1.2 敏感 IMF 选择算法

一部分是与对应振动状态相关的敏感分量, 而其他则是无关分量或干扰成分。因此, 分析之前, 需要将振动模式的敏感 IMF 选择出来, 而忽略其他不相关的 IMF 以提高 Hilbert-Huang 谱的特征提取精度。

为了将振动信号中包含的敏感 IMF 提取出来, 分析振动信号与 IMF 分量之间的相关系数, 并定义 IMF 敏感因子。IMF 选择算法如下。

1) 计算信号 $x(t)$ 与其对应的 IMF $y_n (n=1, 2, \dots, N)$ 之间的相关系数。

令 IMF 分量与振动信号的相关系数^[17]为

$$\rho_i = \left| \frac{E[(C_i(t) - \mu_i)(S(t) - \mu)]}{\sigma_i \sigma} \right| \quad (1)$$

其中: μ_i 为分量 $C_i(t)$ 的平均值; μ 为振动信号 $S(t)$ 的平均值; σ_i 为分量 $C_i(t)$ 的标准差; σ 为振动信号 $S(t)$ 的标准差。

由于: $\sigma_i^2 = E[(C_i(t) - \mu_i)^2]$, $\sigma^2 = E[(S(t) - \mu)^2]$, 根据 Cauchy-Schwarz 不等式可知

$$\begin{aligned} E[(C_i(t) - \mu_i)(S - \mu)]^2 &\leq \\ E[(C_i(t) - \mu_i)^2] * E[(S(t) - \mu)^2] &\leq \sigma_i^2 \sigma^2 \end{aligned} \quad (2)$$

因此, $0 \leq \rho \leq 1$ 。

2) 计算 IMF 敏感因子。

信号 $x(t)$ 的 IMF 敏感因子, 计算公式如下

$$\lambda_n = \frac{\rho_n - \min(\rho)}{\max(\rho) - \min(\rho)} \quad (n=1, 2, \dots, N) \quad (3)$$

3) 选择敏感的 IMF。

根据敏感因子的大小对 IMF 进行排序, 得到 IMF 序列 $\{y'_n\}$ 和敏感因子序列 $\{\lambda'_n\}$, $n=1, 2, \dots, N$, 计算相邻两个 IMF 的敏感因子的差

$$d_n = \lambda'_{n+1} - \lambda'_n \quad (4)$$

找出对应于最大差值的下标 n , 那么前 n 个 IMF ($y'_1 \sim y'_n$) 就是该振动信号下的敏感 IMF。

敏感因子反映了各 IMF 分量与振动信号的相关性, 强化隐藏在振动信号中的特征信息、消除与振动特征无关的信息, 从而提取出振动特征。

2 试验分析

对 EQ6100 型发动机进行再制造分析, 主要对曲轴、气缸、活塞、气门等部件进行再制造, 故发动机的性能与这些部件的再制造水平有着重要联系。为研究主要部件的再制造性能, 在发动机性能测试中, 重点监测曲轴外侧、气缸壁、气缸盖等振动情况, 分别采集 800, 1 000, 1 300, 1 600 和 1 800 r/min 发动机转速下的振动信号, 传感器采样频率为 12.8 kHz。

图 2 所示为 800 r/min 时再制造发动机气缸盖处振动数据及 EMD 分解结果。振动数据经 EMD 分解后, 获得 11 个 IMF 分量及残差 $r_n(t)$ 。由图 2 可以看出, 各 IMF 分量包含了不同的振动频率, 使振动特征在时频特性中体现出来。由 IMF 分量得到的边际谱如图 3 所示。为了使振动冲击成分更为直观, 将图 3 局部放大, 如图 4 所示。从图 4 中可以看出, 除了图 3 中存在的振动幅值较大的冲击成分外, 还存在一个幅值较小的冲击成分, 其频率分别为 $f_1=72$ Hz, $f_2=40$ Hz。但是, 由发动机点火引起的其他谐振频率没有显示出来, 只是存在一些幅值较小的振动噪声, 这是由于 EMD 分量提取过程中, 反映部件振动状况的振动信息没有在各 IMF 分量中表现出来。

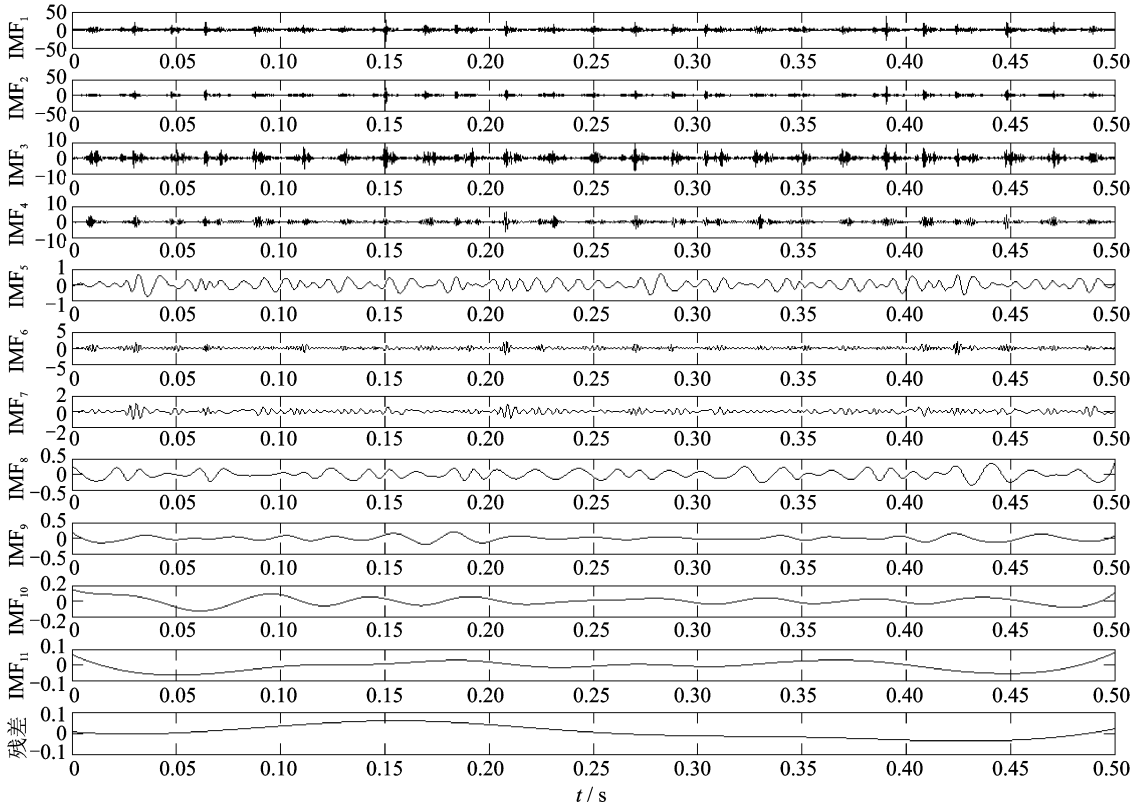


图 2 振动信号 EMD 分解结果

Fig. 2 EMD decomposition results of vibration signal

为了研究再制造发动机工作过程中的振动状态,采集主要振动部位的振动信号,利用 EEMD 进行分解,并采用敏感 IMF 算法进行敏感 IMF 分量提取。由 EEMD 分解及敏感 IMF 得到的缸壁处边际谱(800 r/min)如图 5 所示,并得到局部振动频率如图 6 所示。从图 6 中可以看出,主要存在 4 个冲击成分,其频率分别为, $f_1 = 40$ Hz, $f_2 = 72$ Hz,

$f_3 = 216$ Hz, $f_4 = 296$ Hz。

图 7 所示为缸壁处低频边际谱,低频冲击成分集中于 10, 20, 40, 60 Hz 左右,其中 10, 20, 60 Hz 的振动是由发动机进排气门开启与关闭引起的,此时发动机的压燃频率在 40 Hz 左右。从图中可以看出,其振幅较小,这也说明在怠速状态,缸壁处的低频振动主要是由进排气门的振动及二次谐波。

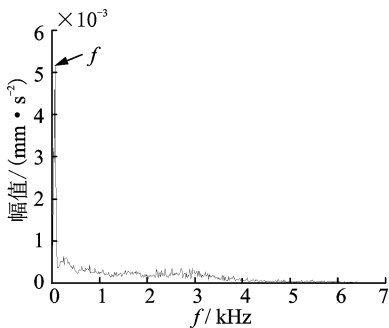


图 3 基于 EMD 分解边际谱 (800 r/min)

Fig. 3 Marginal spectrum based on EMD decomposition(800 r/min)

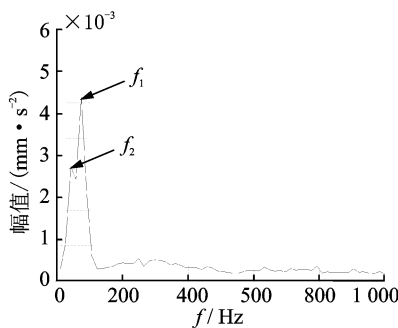


图 4 基于 EMD 分解边际谱 (800 r/min,局部放大)

Fig. 4 Marginal Spectrum based on EMD decomposition(800 r/min, local amplification)

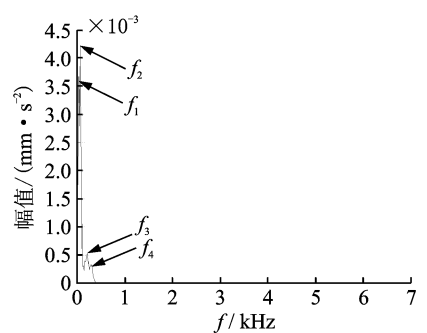


图 5 基于敏感 IMF 的缸壁处边际谱 (800 r/min)

Fig. 5 Marginal spectrum on the cylinder wall based on sensitive IMF 800 r/min)

图 8~图 11 是转速 800 r/min 时,缸盖及曲轴外侧的边际谱和低频区域边际谱。从图 8 和图 9 中可以看出,缸盖及曲轴处的振动情况基本类似,主要有两个较为明显的冲击成分。但低频振动却不同,图 9 和图 11 分别为缸盖和曲轴处低频边际谱。从图 9 可以看出,振幅最大的频率集中于 80 Hz 左右,是发动机点火激振频率的二倍频,这正好和进排气

门的振动频率相同,而发动机的点火激振频率(40 Hz 左右)的振幅较小,这说明怠速状态时,缸盖处的振动以气门振动为主。从图 11 可以看出,曲轴处低频振动冲击较多,主要集中于 10, 20, 35 Hz 以及 70 Hz 左右,其中 35 Hz 的冲击是由发动机点火激振引起的,其他冲击成分是由点火激振、连杆振动等引起的。

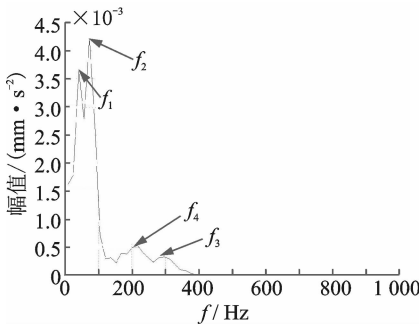


图 6 基于敏感 IMF 的缸壁处边际谱 (800 r/min,局部放大)
Fig. 6 Marginal spectrum on the cylinder wall based on sensitive IMF (800 r/min, local amplification)

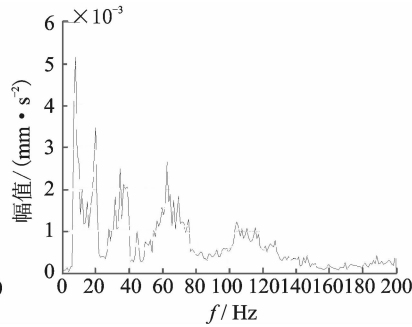


图 7 基于敏感 IMF 的缸壁低频边际谱(800 r/min)
Fig. 7 Low marginal spectrum on cylinder wall based on sensitive IMF (800 r/min)

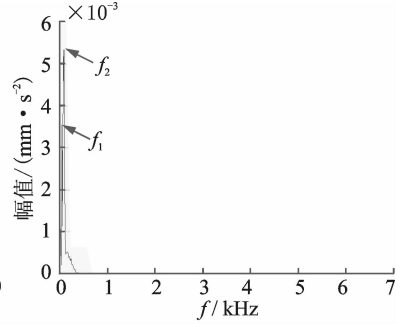


图 8 基于敏感 IMF 的缸盖处边际谱(800 r/min)
Fig. 8 Marginal spectrum on cylinder head based on sensitive IMF (800 r/min)

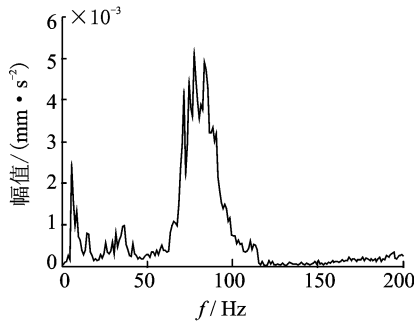


图 9 基于敏感 IMF 的缸盖处低频边际谱(800 r/min)
Fig. 9 Low marginal spectrum on cylinder head based on sensitive IMF (800 r/min)

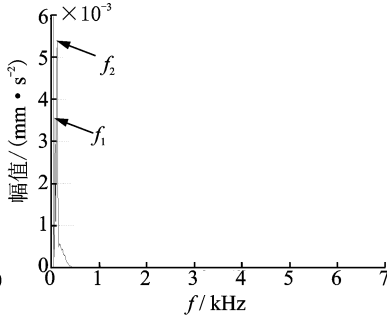


图 10 基于敏感 IMF 的曲轴处边际谱(800 r/min)
Fig. 10 Marginal spectrum on Crankshaft based on sensitive IMF (800 r/min)

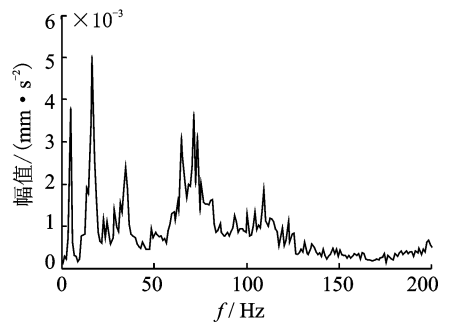


图 11 基于敏感 IMF 的曲轴处低频边际谱(800 r/min)
Fig. 11 Low marginal spectrum on Crankshaft based on sensitive IMF(800 r/min)

为了更为直观地分析再制造发动机各部位的振动情况,对其他转速下的边际谱进行对比分析。图 11~14 所示为转速 1600 r/min 时,缸壁、缸盖和曲轴处的边际谱。从图 12 中可以看出,缸壁处有 3 个幅值较大的冲击成分,其冲击频率分别为 $f_1 = 24$ Hz, $f_2 = 88$ Hz, $f_3 = 136$ Hz,其他幅值较小的冲击成分频率分布范围很广,从低频到 6 000 Hz 的高频,这说明缸壁对任何频率的冲击都较为敏感。缸盖处有两个幅值较大的冲击成分,如图 13 所示,

其频率分别为 $f_1 = 40$ Hz, $f_2 = 88$ Hz,其他冲击频率主要集中于 300~2 000 Hz,且在高频 1 000 Hz 处幅值较大,这说明缸盖对 2 000 Hz 以下的冲击成分较为敏感。图 14 所示为曲轴处的振动冲击情况,从图中可以看出,在低频处存在三个较大的冲击成分,其频率分别为 $f_1 = 24$ Hz, $f_2 = 88$ Hz, $f_3 = 216$ Hz。从图 14 中还可以看出,曲轴主要对 2 000~5 000 Hz 的高频成分敏感,并在 $f_4 = 3 192$ Hz 左右出现峰值。

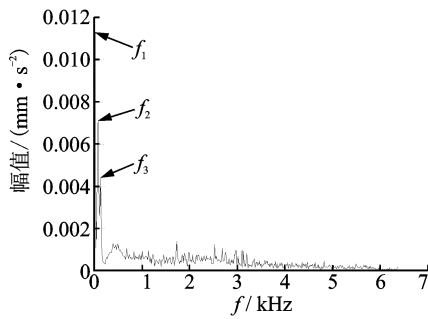


图12 基于敏感 IMF 的缸壁处
边际谱(1 600 r/min)

Fig. 12 Marginal spectrum on the cylinder
wall based on sensitive IMF
(1 600 r/min)

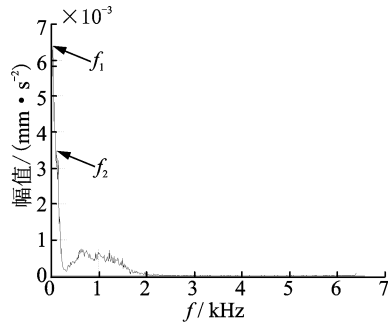


图13 基于敏感 IMF 的缸盖处
边际谱(1 600 r/min)

Fig. 13 Marginal spectrum on cylinder
head based on sensitive IMF
(1 600 r/min)

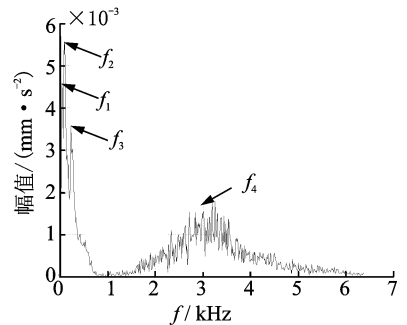


图14 基于敏感 IMF 的曲轴处
边际谱(1 600 r/min)

Fig. 14 Marginal spectrum on
Crankshaft based on sensitive
IMF (1 600 r/min)

从上面的分析可以看出,在同一转速下,缸壁、缸盖、曲轴处的振动状态是不同的,在 1 000, 1 300, 1 800 r/min 等转速下,也存在相同的情况,也就是说只要转速高于 800 r/min,振动对于这三处的影响是不同的。根据缸壁、缸盖、曲轴对敏感振动频率的差异,可以确定部件的振动特点,从而有针对性地采用再制造工艺,为提高再制造水平奠定基础。

3 结束语

笔者利用 EEMD 方法分析再制造发动机的振动数据,建立了基于敏感 IMF 分量的再制造发动机振动信息处理方法。分析了 EEMD 分解方法的优点,研究结果表明采用敏感 IMF 分析方法能更好地提取振动特征。

对 EQ6100 型发动机缸盖、缸壁、曲轴等主要部件振动数据的研究表明,当转速大于 800 r/min 时,缸壁处低频冲击成分较多且幅值较大,高频冲击成分分布范围较广;缸盖处在低频处有几个振幅较大的冲击成分,且对 300~2 000 Hz 的低中频率冲击成分较为敏感;而曲轴处的冲击成分除集中于低频外,在 2 000~5 000 Hz 的高频区域振动也较为明显。

参 考 文 献

- [1] Bo Lin, Qin Shuren, Liu Xiaofeng. Theory and application of wavelet analysis instrument library[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering: English Edition, 2007, 19(3): 464-467.
- [2] Smith C, Akujuobi C M, Hamory P, et al. An ap-

proach to vibration analysis using wavelets in an application of aircraft health monitoring[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2007, 21(3): 1255-1272.

- [3] Jr Guide V D R, Souza G C, van der Laan E. Performance of static priority rules for shared facilities in a remanufacturing shop with disassembly and reassembly[J]. European Journal of Operational Research, 2005, 164(2): 341-353.
- [4] 徐滨士. 再制造工程的现状与前沿[J]. 材料热处理学报, 2010, 31(1): 10-14.
Xu Binshi. State of the art and future development in remanufacturing engineering[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2010, 31(1): 10-14. (in Chinese)
- [5] 陆宇衡, 黄德. 发动机再制造技术及产业发展[J]. 装备制造技术, 2010, 192(12): 99-102.
Lu Yuheng, Huang De. Engine remanufacturing technology and industrial development[J]. Equipment Manufacturing Technology, 2010, 192(12): 99-102. (in Chinese)
- [6] Liu Mingzhou, Liu Conghu, Xing Lingling, et al. Study on a tolerance grading allocation method under uncertainty and quality oriented for remanufactured parts[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013, 87(5): 1-8.
- [7] 姜大海, 王虎, 安相璧, 等. 车用再制造发动机验收检验台架磨合规范试验研究[J]. 装甲兵工程学院学报, 2011, 25(1): 83-87.
Jiang Dahai, Wang Hu, An Xiangbi, et al. Research on run-in standard of vehicle remanufacturing engine in check-accept test[J]. Journal of Academy of Armored Force Engineering, 2011, 25(1): 83-87.
- [8] 王祝平, 王为, 李小昱, 等. 基于 EMD 与神经网络的

- 内燃机气门间隙故障诊断[J]. 农业机械学报, 2008, 38(12): 133-136.
- Wang Zhuping, Wang Wei, Li Xiaoyu, et al. Fault diagnosis of engine valve based on EMD and artificial neural network[J]. Agricultural Machinery, 2008, 38(12):133-136. (in Chinese)
- [9] 程军圣,于德介,杨宇. 基于支持矢量回归机的 Hilbert-Huang 变换端点效应问题的处理方法[J]. 机械工程学报, 2006, 42(4): 23-31.
- Cheng Junsheng, Yu Dejie, Yang Yu. Hilbert-Huang end effects transformation approach base on support vector regression [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2006, 42(4): 23-31. (in Chinese)
- [10] 张德祥,汪萍,吴小培,等. 基于 EMD 和非线性峭度的齿轮故障诊断[J]. 振动、测试与诊断, 2012, 32(1): 56-61.
- Zhang Dexiang, Wang Ping, Wu Xiaopei, et al. Fault diagnosis of gear based on EEMD and nonlinear kurtosis [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2012, 32(1): 56-61. (in Chinese)
- [11] 蔡艳平,李艾华,石林锁,等. 基于 EMD-WVD 振动谱时频图像 SVM 识别的内燃机故障诊断[J]. 内燃机工程, 2012, 33(2): 72-78.
- Cai Yanping, Li Aihua, Shi Linsuo, et al. IC engine fault diagnosis method based on EMD-WVD vibration spectrum time-frequency image recognition by SVM [J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2012, 33(2): 72-78. (in Chinese)
- [12] 刘涛,黄其柏. 基于 EEMD 和 HT 的轴流泵压力脉动特征信息提取[J]. 机电工程, 2012, 29(3): 278-281.
- Liu Tao, Huang Qibai. Characteristic information extraction of pressure pulsation signal in axis-flow pump based on EEMD and HT [J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2012, 29(3): 278-281. (in Chinese)
- [13] Wu Zhaohua, Huang N E. Ensemble empirical mode decomposition; a noise-assisted data analysis method [J]. Advances in Adaptive Data Analysis, 2009, 1(1): 1-41.
- [14] 雷亚国. 基于改进 Hilbert-Huang 变换的机械故障诊断[J]. 机械工程学报, 2011, 47(5): 71-77.
- Lei Yaguo. Machinery fault diagnosis based on improved Hilbert-Huang [J]. Transaction Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(5): 71-77. (in Chinese)
- [15] 郑旭,郝志勇. 基于 MEEMD 的内燃机机体活塞敲击激励与燃烧爆发激励分离研究[J]. 振动与冲击, 2012, 31(6): 109-113.
- Zheng Xu, Hao Zhiyong. Separation of piston-slap and combustion shock excitations via MEEMD method [J]. Journal of Vibration and Shock, 2012, 31(6): 109-113. (in Chinese)
- [16] 李辉,郑海起. 基于 EEMD 和 THT 的齿轮故障诊断方法[J]. 振动、测试与诊断, 2011, 31(4): 496-500.
- Li Hui, Zheng Haiqi. Fault diagnosis based on EEMD and THT [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2011, 31(4): 496-500. (in Chinese)
- [17] 蔡艳平,李艾华,王涛,等. 基于 EMD-Wigner-Ville 的内燃机振动时频分析[J]. 振动工程学报, 2010, 23(4): 430-437.
- Cai Yanping, Li Aihua, Wang Tao, et al. Internal combustion engine vibration frequency analysis Based on EMD-Wigner-Ville [J]. Journal of Vibration Engineering, 2010, 23(4): 430-437. (in Chinese)



第一作者简介:陈成法,男,1978年7月生,博士、副教授。主要研究方向为汽车试验与检测,仪器科学与技术等。曾发表《基于 EEMD 及敏感 IMF 的再制造发动机振动模式研究》(《振动与冲击》2014年第33卷第2期)等论文。
E-mail:76868126@qq.com