

# 基于 EEMD 的柴油机缸套磨损故障诊断

王凤利<sup>\*1</sup>, 李宏坤<sup>2</sup>

(1. 大连海事大学 轮机工程学院, 辽宁 大连 116026;  
2. 大连理工大学 机械工程学院, 辽宁 大连 116024)

**摘要:** 针对柴油机缸套磨损故障诊断问题, 在实车上测试了柴油机机体振动信号, 应用经验模态分解(EMD)对不同磨损状态下的柴油机机体振动信号进行了分析, 然而, EMD 存在的模态混叠问题使其难以获得准确的基本模式分量(IMF). 为此引入基于总体经验模态分解(EEMD)的改进的局域波分析方法, 利用 EEMD 获取无模式混淆的 IMF, 通过 Hilbert 边际谱分析信号能量随瞬时频率的变化特征. 工程实测分析结果验证了应用该方法进行柴油机缸套磨损故障诊断的有效性.

**关键词:** 总体经验模态分解; 柴油机; 气缸套; 磨损; 故障诊断  
**中图分类号:** TP306; TK428 **文献标志码:** A

## 0 引言

柴油机在船舶、车辆、工程机械等工程领域得到了广泛的应用. 缸套是柴油机的关键部件, 缸套磨损是柴油机工作中的常见故障, 其可导致气缸压力降低、柴油机功率下降、油耗增加和排放污染加剧, 甚至威胁着设备安全稳定的运行. 如果在缸套磨损的轻微阶段能及时发现和预报故障, 并采取相应措施, 对于提高柴油机可靠性和节能、减排极为重要. 因此, 必须对柴油机缸套磨损进行状态监测和故障诊断. 柴油机振动信号包含反映柴油机技术状态的有用信息, 且振动信号易于测量, 为此振动信号分析在柴油机故障诊断中得到了广泛的应用<sup>[1-2]</sup>.

本文针对某型工程车辆柴油机, 在实车上进行柴油机缸套磨损的状态监测和故障诊断, 对不同状态下的机体振动信号进行检测, 利用改进后的局域波分析方法对机体振动信号进行分析, 得出不同磨损状态下机体振动信号特征参数的变化规律, 以期对柴油机缸套磨损的状态监测和故障诊断提供有效的方法.

## 1 柴油机机体振动信号的特点与分析方法

在四冲程柴油机工作过程中, 由于受到方向不断改变的侧推力作用, 活塞在缸套中作往复运动的同时引起活塞对缸套的撞击, 并传递到机体表面, 对机体侧面产生冲击振动. 研究表明, 柴油机机体直接承受活塞-缸套的冲击, 机体振动信号包含缸套磨损状态的信息. 由于柴油机的工作过程是非平稳的, 而且柴油机机体振动是内部各种激励力包括燃气压力、活塞横向撞击等共同作用的结果, 机体振动信号为典型的非平稳信号. 如何准确地处理采集到的机体振动信号是柴油机缸套磨损状态监测和故障诊断研究的关键. 传统的频谱分析、短时傅里叶变换、Wigner-Ville 分布、小波分析等分析方法, 本质上是基于傅里叶变换的, 均严格服从平稳性或分段平稳性假设, 加之受测不准原理的限制, 不能从根本上获得非平稳信号的瞬态特征<sup>[3-4]</sup>.

近年来提出的 Hilbert-Huang 变换(HHT)是一种具有自适应特性的非平稳信号分析方法, 在语音信号、海洋波动信息分析、机械振动响应和

收稿日期: 2011-04-04; 修回日期: 2012-12-04.  
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50805014).  
作者简介: 王凤利\*(1970-), 男, 大连理工大学2003届博士, 副教授, E-mail: wangflsky997@sina.com.

结构分析等领域获得了广泛的研究与应用<sup>[3-6]</sup>.

## 2 Hilbert-Huang 变换 (HHT)

### 2.1 经验模态分解和 Hilbert 变换

HHT 是基于经验模态分解 (EMD) 和 Hilbert 变换之上的非线性非平稳信号分析方法.

EMD 的目的是根据信号的局部时间特征尺度, 把信号分解成一系列 IMF 信号, 使得各个 IMF 满足 Hilbert 变换的要求<sup>[3-4]</sup>, 即

$$x(t) = \sum_{j=1}^n c_j(t) + r_n(t) \quad (1)$$

剩余分量  $r_n(t)$  是一个平均趋势或常数, IMF 分量  $c_1(t), \dots, c_n(t)$  相应包含了信号从高频到低频不同频段的成分. 对分量  $c_j(t)$  进行 Hilbert 变换,

$$H[c_j(t)] = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{x(\tau)}{t-\tau} d\tau \quad (2)$$

于是构成  $x(t)$  解析形式, 可以表示为

$$x(t) = \operatorname{Re} \sum_{j=1}^n a_j(t) e^{i \int \omega_j(t) dt} \quad (3)$$

其中  $\operatorname{Re}$  表示取实部,  $a_j(t)$  为瞬时幅值,  $\omega_j(t)$  为瞬时频率.

为在 Hilbert 空间中将原始信号的幅度表达为时间与瞬时频率的函数, Hilbert 时频谱表示为

$$H(\omega, t) = \operatorname{Re} \sum_{j=1}^n b_j a_j(t) e^{i \int \omega_j(t) dt} \quad (4)$$

当  $\omega_j(t) = \omega$  时,  $b_j = 1$ , 否则  $b_j = 0$ .

### 2.2 Hilbert 边际谱

在 Hilbert 时频谱分析基础上定义边际谱,

$$h(\omega) = \int_0^T H(\omega, t) dt \quad (5)$$

其中  $T$  为信号的整个采样时间.

Hilbert 边际谱表达了信号的每个频率在全局上的幅度或能量上的贡献, 反映了信号的能量在整个频率段上随瞬时频率的变化情况.

### 2.3 总体经验模态分解

HHT 的关键是 EMD, 然而 EMD 的一个主要缺点是在分解过程中存在模态混叠问题, 即单一的 IMF 中包含了频率截然不同的信号成分或同一频率成分被分解到不同的 IMF 中<sup>[7]</sup>. 当信号的时间尺度存在跳跃性变化时, 由于模态混叠, 信号 EMD 分解得到的 IMF 不具有真实物理意义, 不能表征信号的特征, 从而影响 HHT 结果的准确性和有效性.

为了克服上述问题, 借助于一种总体经验模态分解 (EEMD)<sup>[7]</sup>, 每次分解给信号加入有限幅

值的不同高斯白噪声, 利用高斯白噪声在整个时频空间是均匀分布的统计特性, 当信号加在遍布整个时频空间分布一致的高斯白噪声背景上时, 使不同时间尺度的信号自动分布到合适的参考尺度上. 由于每次分解所添加的高斯白噪声不同, 噪声之间不相关, 利用零均值白噪声的特性, 经过多次平均后, 噪声将相互抵消, 把各组分解中对应 IMF 进行整体平均, 这样即可获得准确的 IMF. EEMD 算法归纳如下:

(1) 通过给分析信号  $x(t)$  加上一组白噪声  $N(t)$  来获得一个总体  $X(t)$ :

$$X(t) = x(t) + N(t) \quad (6)$$

(2) 对信号  $X(t)$  进行 EMD 分解, 得到一组 IMF 分量:

$$X(t) = \sum_{j=1}^n c_j(t) + r_n(t) \quad (7)$$

(3) 给分析信号  $x(t)$  加上不同的白噪声  $N_i(t)$ ,  $i = 1, \dots, m$ , 重复以上两步, 共进行  $m$  次:

$$X_i(t) = x(t) + N_i(t) \quad (8)$$

$$X_i(t) = \sum_{j=1}^n c_{ij}(t) + r_m(t) \quad (9)$$

(4) 将相应的  $m$  组 IMF 的均值作为最终的 IMF 分解结果:

$$c_j(t) = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m c_{ij}(t) \quad (10)$$

### 2.4 仿真实验

为了验证 EEMD 算法的有效性, 对图 1 所示的仿真信号运用 EEMD 算法进行分解, 并与 EMD 分解结果进行比较. 仿真信号由一个低频正弦信号和小幅冲击成分的间断信号叠加而成.

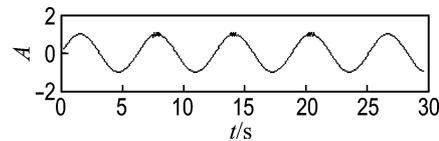


图 1 仿真信号的时域波形

Fig. 1 The time waveform of simulated signal

图 2 是对仿真信号进行 EMD 分解, 得到的 2 个 IMF 分量  $C_1$  和  $C_2$ . 显然 EMD 产生模态混叠, 正弦波和冲击信号被分解到同一个 IMF 分量  $C_1$  之中, 而且正弦波被分解到 2 个 IMF 分量之中, 分量  $C_2$  也包含了正弦波成分, 模态混叠导致 EMD 分解的 2 个 IMF 产生了明显畸变, IMF 不具有真实的物理意义, 难以满足信号特征提取的要求.

应用 EEMD 对仿真信号进行分解,分解的总体平均次数为 100,加入噪声的幅值为信号标准差的 0.01 倍,分解结果如图 3 所示,分量  $C_1$  对应冲击成分,分量  $C_2$  对应正弦波,小幅冲击成分和正弦波信号被准确无误地分解出来. 比较图 2、3 可知,应用 EEMD 解决了模态混叠问题,能够得到有实际物理意义的 IMF.

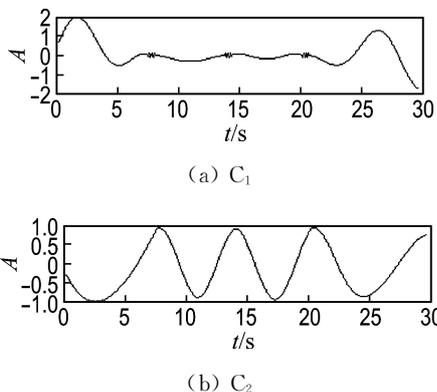


图 2 仿真信号 EMD 分解结果  
Fig. 2 Decomposed results by using EMD for simulated signal

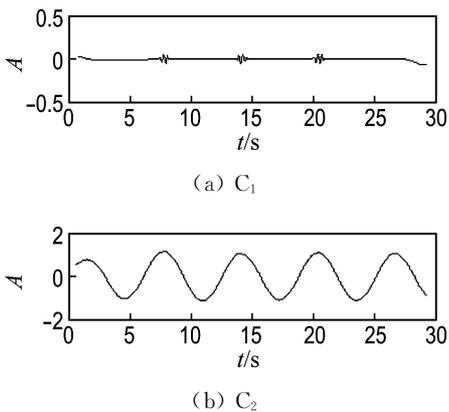


图 3 仿真信号 EEMD 分解结果  
Fig. 3 Decomposed results by using EEMD for simulated signal

### 3 试验分析

在柴油机工作过程中,缸套受活塞的横向和摇摆运动的冲击而产生振动,并传递到机体表面. 缸套的磨损状态可由活塞与缸套的间隙反映出来. 相同的侧推力在不同的间隙状态下使活塞撞击缸套的速度发生变化,相应地撞击能量也发生变化,并且由于间隙改变,活塞在缸套中的横向运动发生变化,机体振动响应的频率分布及其幅值或能量等发生变化. 因此,可以通过机体表面振动

响应的特征变化来诊断缸套的磨损状态.

试验用某型工程车辆发动机为 6 缸四冲程柴油机. 在各缸活塞行程的上、下止点附近的侧推力变化最剧烈,尤其在做功和膨胀行程的上止点附近,撞击力最大,对机体振动的影响最显著,因此在振动响应测试时,测点位置选在柴油机发火上止点附近正对活塞主撞击处的机体侧面. 图 4 为第 3 缸缸套在 3 种不同磨损状态下机体振动响应,测试时柴油机工作转速均为 1 100 r/min,且气缸润滑正常,采样频率为 25.6 kHz,分析频率为 10 kHz.

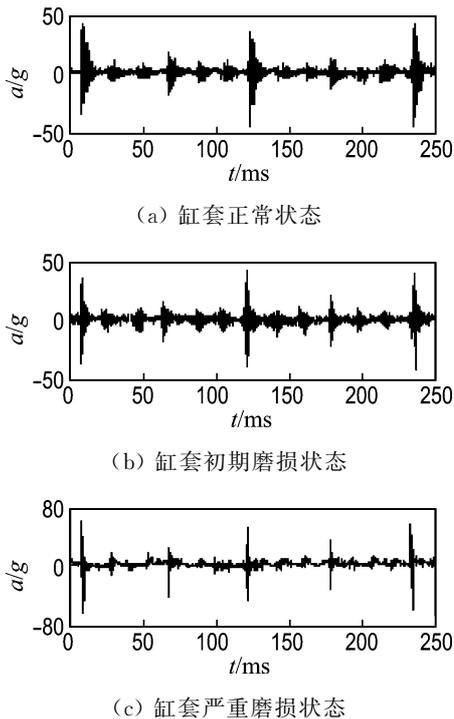


图 4 缸套在 3 种状态下的机体振动信号  
Fig. 4 Vibration signal for the cylinder liner in three states

由于实测机体振动响应包含了柴油机所有振源信息,其中活塞撞击对机体振动的影响非常大,活塞与缸套间隙体现在活塞对缸套的撞击上,尤其在膨胀行程上止点后的撞击最为明显. 这段时期内的机体表面振动主要是由活塞撞击和燃烧激励产生的,激励源少. 因此,选择在膨胀行程上止点附近的振动响应来分析,可避免其他振源的干扰. 对上述 3 种磨损状态下的机体振动响应截取在膨胀冲程上止点附近、采样点数为 1 024 的一段信号来分析.

图 5 和 6 为对图 4 所示信号分别进行 EMD

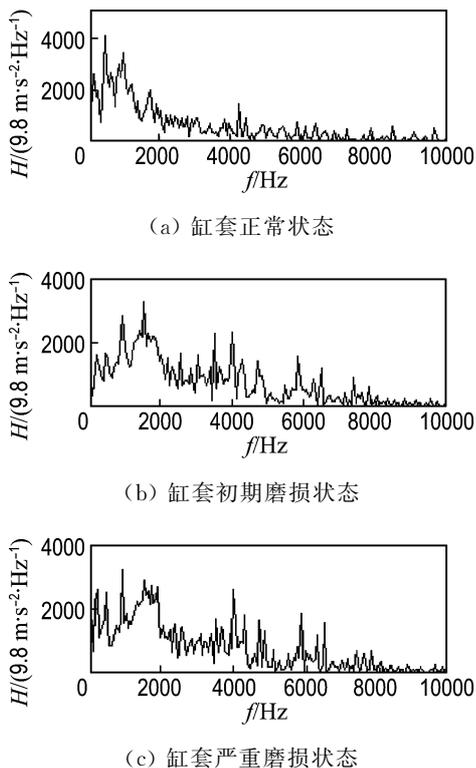


图 5 振动信号基于 EMD 的 Hilbert 边界谱  
Fig. 5 Hilbert boundary-spectrum of vibration signal using EMD

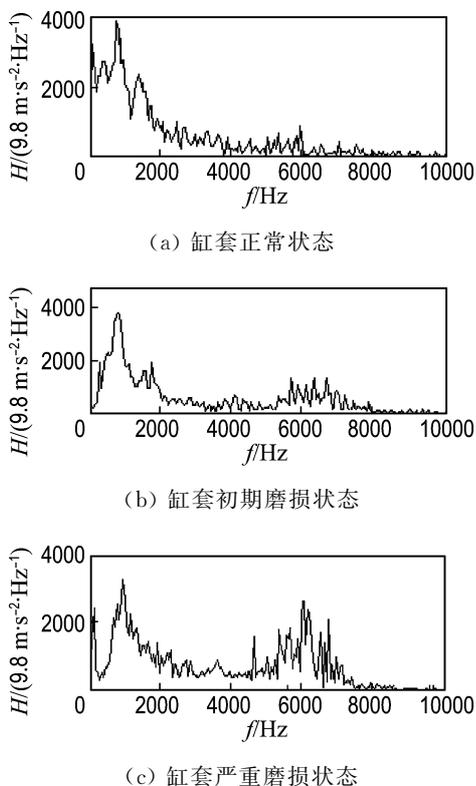


图 6 振动信号基于 EEMD 的 Hilbert 边界谱  
Fig. 6 Hilbert boundary-spectrum of vibration signal using EEMD

和 EEMD 分解,再进行 Hilbert 变换,由式(5)得到的 Hilbert 边界谱.对比图 5 和 6,由于 EEMD 能很好地反映原始信号固有的物理特性,有效地抑制了模态混叠问题,由 EEMD 得到的 Hilbert 边界谱谐波分量比 EMD 的有所减少,谱图特征更加明确、清晰.

活塞撞击为瞬时突加荷载,如同宽带激励,随着缸套磨损加剧,不同程度地激发柴油机各零部件的固有频率及倍频,导致振动响应的能量逐步向整个分析频带扩展.从图 6 所示的 Hilbert 边界谱图可以看出,缸套正常状态下机体振动响应的能量主要集中在低频带,其主要是由气缸内的气体爆发压力产生的,与柴油机工作原理是一致的.随着缸套磨损程度的增加,机体振动响应分布在低频带的能量降低,而分布在高频带的能量显著增加.这是由于随着缸套磨损程度的增加,活塞与缸套配合间隙逐渐增大,气缸的气密性下降,气体爆发压力降低,造成机体振动响应分布在低频带的能量显著降低;随着磨损程度的增加,活塞和缸套之间的撞击加剧,在高频带的能量显著增加并逐渐占主导地位,并且振动响应的总能量显著增加.因此,基于 EEMD 的 Hilbert 边界谱能够反映缸套磨损不同状态下的特征,正常状态下机体振动信号的能量主要集中在低频处,初期磨损状态下的机体振动信号在低频处的能量降低而在高频处的能量增加,严重磨损状态下的机体振动信号在高频处的能量显著增加并占主导地位.表 1 所示为该缸活塞和缸套的原始参数及 3 种状态下的实际测试数据,从而验证了应用 EEMD 在柴油机缸套磨损故障诊断中的有效性和准确性.

表 1 活塞和缸套原始参数及其实测数据

Tab. 1 Original and test data for the piston and liner

状态	活塞与缸套 配合间隙/mm	缸套直径 变化量/mm	活塞直径 变化量/mm
出厂标准	0.182~0.200	0~0.02	-0.025~0
使用极限	0.580	0.200	-0.250
正常阶段	0.205	0.024	-0.028
初期磨损	0.325	0.095	-0.077
严重磨损	0.650	0.258	-0.234

## 4 结 论

(1)应用 EEMD 解决了 EMD 分解信号时的模态混叠问题,能够得到反映原始信号固有特性

的有实际物理意义的 IMF.

(2)通过 Hilbert 边际谱反映出柴油机机体振动响应信号随瞬时频率的变化特征,能够有效揭示柴油机缸套磨损故障特征及其磨损程度.

### 参考文献:

- [1] 杨建国, 王晓武. 船舶柴油机监测与故障诊断技术现状及发展趋势[J]. 中国航海, 1999, **45**(2):41-48.  
YANG Jian-guo, WANG Xiao-wu. Current situation and developing trend of condition monitoring and fault diagnosis technique for marine diesel engine [J]. **Navigation of China**, 1999, **45**(2):41-48. (in Chinese)
- [2] 胡以怀, 杨叔子, 刘永长, 等. 柴油机磨损故障振动诊断机理的研究[J]. 内燃机学报, 1998, **16**(1):50-61.  
HU Yi-huai, YANG Shu-zi, LIU Yong-chang, *et al.* Studies on vibration diagnosis mechanism for diesel engine tribological faults [J]. **Transactions of CSICE**, 1998, **16**(1):50-61. (in Chinese)
- [3] Huang N E, Shen Zheng, Long S R, *et al.* The empirical mode decomposition and Hilbert spectrum for nonlinear and nonstationary time series analysis [J]. **Proceedings of the Royal Society of London, Series A**, 1998, **454**:903-995.
- [4] 盖强. 局域波时频分析方法的理论研究与应 [D]. 大连:大连理工大学, 2001.  
GAI Qiang. Research and application on the theory of local wave time-frequency analysis method [D]. Dalian:Dalian University of Technology, 2001. (in Chinese)
- [5] Huang N E, Wu M L C, Long S R, *et al.* A confidence limit for the empirical mode decomposition and Hilbert spectral analysis [J]. **Proceedings of the Royal Society of London, Series A**, 2003, **459**:2317-2345.
- [6] WU Zhao-hua, Huang N E. A study of the characteristics of white noise using the empirical mode decomposition method [J]. **Proceedings of the Royal Society of London, Series A**, 2004, **460**:1597-1611.
- [7] WU Zhao-hua, Huang N E. Ensemble empirical mode decomposition: a noise assisted data analysis method [J]. **Advances in Adaptive Data Analysis**, 2009, **1**(1):1-41.

## Fault diagnosis of diesel engine cylinder liner wear using EEMD

WANG Feng-li<sup>\*1</sup>, LI Hong-kun<sup>2</sup>

( 1. College of Marine Engineering, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China;

2. School of Mechanical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China )

**Abstract:** Aiming at fault diagnosis of diesel engine cylinder liner wear, the diesel cylinder block surface vibration monitoring in actual vehicle is conducted, and the diesel cylinder block surface vibration signals in different conditions are analyzed by using empirical mode decomposition(EMD). However, EMD sometimes cannot extract intrinsic mode functions(IMFs) accurately because of the mode mixing. Due to this problem, an improved local wave analysis method based on ensemble empirical mode decomposition(EEMD) is introduced, which is used to alleviate the problem of mode mixing, and the instantaneous frequency and the energy distribution of signals can be extracted by Hilbert boundary-spectrum. The measured results indicate that EEMD method is feasible and effective in fault diagnosis of diesel engine cylinder liner wear.

**Key words:** ensemble empirical mode decomposition (EEMD); diesel engine; cylinder liner; wear; fault diagnosis