# 改进EMD结合4th-HEO的客滚船柴油机复杂信号振动特征提取方法

李康强[1,2,3]，王海鹏[2]，孙彦刚[4]，巩庆涛[1,3]，欧书博[4]

（1.鲁东大学蔚山船舶与海洋学院，山东 烟台 264025；2.海军航空大学信息融合研究所，山东 烟台 264001；
3.山东省海上航天装备技术创新中心，山东 烟台 264025；4.招商局金陵船舶威海有限公司，山东 威海 264207）

**摘要：**针对客滚船柴油机机械系统的复杂机构与运转特性，提出一种多分量非线性振动信号分解及振动特征参数提取策略。为提高动力学参数提取鲁棒性，提出采用延拓经验模态分解（extension-EMD）方法分解信号以规避端点效应，利用自相关函数提取包含最大特征的敏感分量，利用四阶能量算子（4th-HEO）幅值解调提取敏感分量的特征频率及其幅值，得到柴油机动力学特征与运行规律的关系；通过仿真信号验证方法的准确性，通过实船测试零负荷和满负荷运行工况下的三向振动信号验证方法的有效性。研究结果表明，垂向信号的表现特征较其他方向信号表现力更佳。对于9缸4冲程柴油机而言，其0.5倍频和4.5倍频的幅值非常突出，且对负载变化影响更加敏感。

**关键词：**故障诊断；柴油机；改进EMD；4th-HEO
**中图分类号：**TH165$^+$.3；TK42 **文献标志码：**A **文章编号：**1004-4523(2025)01-0109-08
DOI：10.16385/j.cnki.issn.1004-4523.2025.01.012

# Analysis of complex vibration signal of diesel engine on RO-RO passenger ship via extension-EMD and 4th-HEO

LI Kangqiang[1,2,3], WANG Haipeng[2], SUN Yangang[4], GONG Qingtao[1,3], OU Shubo[4]

(1.Ulsan Ship and Ocean College, Ludong University, Yantai 264025, China; 2.Information Fusion Research Institute, Naval Aviation University, Yantai 264001, China; 3.Shandong Marine Aerospace Equipment Technological Innovation Center, Yantai 264025, China; 4.Merchants Jinling Shipbuilding Weihai Co., Ltd., Weihai 264207, China)

**Abstract:** Aiming at the complex mechanism and operation characteristics of the mechanical system of diesel engine on RO-RO passenger ship, a multi-component nonlinear vibration signal decomposition method and vibration characteristic parameter extraction strategy are proposed. The signal is decomposed into intrinsic mode function (IMF) components via empirical mode decomposition and restrained the end effects in empirical mode decomposition (EMD) by symmetrical extension. The sensitive component is extracted by the correlation. The characteristic frequencies are matched according to the amplitude demodulation spectrum via 4 order high energy operator (4th-HEO). The proposed method is illustrated by the three-dimensional vibration signals under 0 load and 100 load operation conditions of the RO-RO passenger ship. The results show that the analysis performance of vertical signals are better than other axial signals. And for the 9-cylinder 4-stroke diesel engine, the amplitudes of 0.5 times and 4.5 times are very prominent, and are more sensitive to load changes.

**Keywords:** fault diagnosis; diesel engine; extended-EMD; 4th-HEO

近年来，中国客滚船制造业在全球市场持续活跃，尤其是高端客滚船的订单已位居世界第一。需求量持续走高的同时也对于高端客滚船的稳定性和舒适性提出了更苛刻的要求，特别是振动和噪声的控制技术、减振设备、测试技术等的研发和技术人员的培养，是国内船企当下面临的首要挑战[1]。

柴油机作为船舶主要动力源之一，船用主机大部分时间是在满负荷情况下工作，同时受海况影响

**收稿日期：**2023-01-02；**修订日期：**2023-03-21
**基金项目：**山东省重点研发计划项目（2021CXGC010702）；山东省自然科学基金资助项目（ZR2022QE163）；国家基金委-山东联合基金资助项目（U2006229）；泰山学者青年专家项目（tsqn202211184）；山东省创新能力提升项目（2022TSGC2514，2023TSGC0560）

经常在变负荷情况下运转。传统客滚船船用发动机振动噪声的标准要比其他交通工具的标准低得多，对于高端客滚船来说，振动与噪声控制问题逐渐成为研究的难点与热点。实际工程测试中船用柴油机振动信号不仅包含零部件各自的振动响应，还包含机械、电气和液压等直接的动力学耦合效应以及环境影响[2]，导致信号采集分析困难。在船用柴油机的瞬态动力学分析和振动测试及分析方面国内外学者进行了大量研究。DO等[3]利用多通道振动测量与监测系统(MMMVS)对KN168型机动船主柴油机振动信号进行了测量和分析研究，结果具有较高的参考性。肖斌等[4]通过对多激励源的柴油机分析，建立了广义线性混合模型(GLMM)，并提出振动噪声源识别算法。冯娜等[5]对某艇主机12缸V型高速柴油机进行动力学分析，分析结果表明柴油机振动干扰成分丰富，且频域分布宽泛。李晓博等[6]对柴油机各工况振动信号进行常规特征提取后通过IMS聚类算法进行特征训练，并形成模型库。李胜杨等[7]利用双通道单缸定位对柴油机的噪声进行研究，提出了盲源分离的联合噪声分离方案，结果表明该方案具有良好的实用性。胡以怀等[8]通过对机身侧面振动信号的测试，推断了十字头轴承的磨损状态。上述研究为后续船用柴油机的振动信号特征提取与分析提供了研究思路与分析基础。

船用柴油机由于结构庞大复杂、振源繁多复杂、运行环境多变，振动响应叠加造成振动信号往往表现为复杂多分量非线性特征，为了避免其他频率干扰通常需要解调分析，而传统的单分量解调方法对于分析多分量信号具有很大的局限性，如何采用合适的方法将多分量信号进行精确分离是提取振动特征的关键[9-10]。LEE等[11]研究了柴油机工作时引起的机体振动。ZHAO等[12]利用Mel倒谱(MFC)和振动模式分解(VMD)对不同工况下的柴油机进行特征提取并生成模型库。BI等[13]基于VMD对柴油机信号进行分解，后通过模糊c均值聚类(KFCM)分类提取模态函数的特征参数，提高了识别的准确度。任刚等[14]利用VMD和去趋势波动分析(DFA)对柴油机振动信号进行分解和重构去噪，取得良好的消噪效果。梁仲明等[15]针对船舶柴油机的非平稳信号，利用互补集合经验模态(CEEMD)与参数优化Morlet小波分析提取冲击特征获得不错的效果。诸多研究表明多分量分解方法在柴油机信号分解中表现良好，但是由于柴油机的复杂结构和运行环境造成分解结果存在精度低和自适应性不强等缺点。在动力学特征提取方面，传统方法基于Fourier变换对于处理简单信号效果良好，但是对于处理调幅调频复杂信号存在一定的难度。能量算子算法由于具有追踪能量变化的优势近年来发展迅速[16]，但是对于复杂系统和强噪声背景下的振动信号往往存在特征提取不明显、抗干扰性差的局限性。高阶能量算子[17]在此基础上更具备突出能量和冲击成分的优势，在强噪声背景下的微弱振动特征应用效果良好。

综上所述，为提高船用柴油机复杂振动信号的分解效率及精度，本文发挥经验模式分解(EMD)在复杂信号分解方面的自适应性和高效性，利用对称镜像延拓方法规避常规EMD分解过程易出现的端点效应[18]，最后利用高阶能量算子幅值解调匹配谱图中的特征频率及其幅值，并匹配得到运动规律。

## 1 理论基础

### 1.1 延拓EMD分解

为准确提取客滚船柴油机的振动信号动力学参数，首先需要将复杂多分量信号进行分解。经验模式分解(EMD)可以通过“筛选”将包含多个振荡模式的信号自适应地分解为均值为0的本质模函数，分解过程简便高效。但是常规EMD方法在筛分过程中两端易出现发散造成端点能量异常，因此在拟合包络时易产生端点效应。针对常规EMD方法的局限性，提出利用两端对称延拓，先增加源信号长度，分解之后再去除延拓值恢复原长度，即使产生端点效应，只会影响延拓值，并不会对原信号造成额外影响。

具体流程为：

(1)对长度为$N$的原始信号$\boldsymbol{x}=[x_1,x_2,\cdots,x_N]$进行镜像对称延拓，以信号两端边界为对称向外延伸，得到延拓数据$\widetilde{\boldsymbol{x}}$：

$$\widetilde{\boldsymbol{x}}=[[x_{N_e+1},x_{N_e},\cdots,x_2]\ \boldsymbol{x}\ [x_{N-1},x_{N-2},\cdots,x_{N-N_e}]] \tag{1}$$

式中，$N_e$为延拓值。延拓值取值以参考源信号波动长度的2～3个周期为宜。可以看出，得到的延拓信号比源信号增加了$2N_e$个点。

(2)计算延拓信号$\widetilde{\boldsymbol{x}}$的所有局部极大值与局部极小值，利用三次样条插值函数计算上下包络线。延拓信号减去上下包络线的均值$m_1$可以得到延拓分量$\widetilde{\boldsymbol{h}}_1$：

$$\widetilde{\boldsymbol{h}}_1=\widetilde{\boldsymbol{x}}-m_1 \tag{2}$$

(3)反延拓处理。为保持与源信号长度一致，需要对称剪切$2N_e-2$个点，得到第一个分量$\boldsymbol{h}_1$：

$$\boldsymbol{h}_1=[\widetilde{h}_{N_e},\widetilde{h}_{N_e+1},\cdots,\widetilde{h}_{N_e+N-1}] \tag{3}$$

(4)如果得到的第一个分量满足本质模函数的条件(局部零点数=极点数，且上下包络关于轴线局

部对称），则提取分解出的第一个本质模函数 $IMF_1=\boldsymbol{h}_1$。如果不满足，则令延拓信号 $\tilde{\boldsymbol{x}}$ 重复步骤(2)和(3)，直至计算出的分量满足条件。

(5)延拓信号 $\tilde{\boldsymbol{x}}$ 减去第一个延拓分量 $\tilde{\boldsymbol{h}}_1$ 得到的余量 $\tilde{\boldsymbol{r}}_1=\tilde{\boldsymbol{x}}-\tilde{\boldsymbol{h}}_1$ 作为新的信号，重复步骤(2)～(5)进行再次“筛分”过程，重复循环 $n$ 次。即得到前 $n$ 阶单分量：

$$\boldsymbol{r}_n=\boldsymbol{r}_{n-1}-IMF_n \tag{4}$$

为保证规避端点效应的同时不会对源信号分解造成额外影响，信号延拓取值为源信号的前 $N_e$ 个值与后 $N_e$ 个值，以两端边界对称镜像延伸形成闭合曲线，且取值以2～3个周期为宜，延拓太短增益效果不明显，延拓太长会降低分解效率。

### 1.2　高阶能量算子理论

对于幅值为 $A$、固有频率为 $\omega$、初相位为 $\varphi$ 的简谐振动响应连续信号 $x(t)=A\cos(\omega t+\varphi)$，传统能量算子 $\Psi$ 定义为：

$$\Psi[x(t)]=[\dot{x}(t)]^2-x(t)\ddot{x}(t) \tag{5}$$

式中，$\dot{x}(t)$，$\ddot{x}(t)$ 分别为 $x(t)$ 的第一、第二阶微分。

将连续信号 $x(t)$ 代入式(5)，由数学运算推出能量分离算法：

$$\omega=\sqrt{\frac{\Psi[\dot{x}(t)]}{\Psi[x(t)]}},\ |A|=\frac{\Psi[x(t)]}{\sqrt{\Psi[\dot{x}(t)]}} \tag{6}$$

对于简谐信号的离散形式 $x(n)=A\cos(\Omega n+\theta)$，其中 $\Omega$ 为离散频率，$\theta$ 为初相位。计算可以利用对称差分代替微分，令 $\dot{x}=s(n)=[x(n+1)-x(n-1)]/2$，可以推出二阶离散能量分离算法：

$$\begin{cases}\Omega\approx\dfrac{1}{2}\arccos\left(1-\dfrac{\Psi[x(n+1)-x(n-1)]}{2\Psi[x(n)]}\right)\\ |A|\approx\dfrac{2\Psi[x(n)]}{\sqrt{\Psi[x(n+1)-x(n-1)]}}\end{cases} \tag{7}$$

二阶能量算子在提取低噪声的信号效果良好，但是对于强噪声下的复杂信号，较弱的振动特征易被噪声掩盖而表征不佳，高阶能量算子具备突出能量和冲击成分的优势，可以弥补这种局限。

按照二阶能量算子的形式，高阶能量算子 $\tau$ 定义为：

$$\tau_k(x)=\mathrm{Lie}[x,x^{(k-1)}]=\dot{x}x^{(k-1)}-xx^{(k)},\quad k=0,\pm1,\pm2,\cdots \tag{8}$$

式中，Lie[]代表Lie括号运算映射，$x^{(k)}$ 为信号的 $k$ 阶微分形式。

对于任意阶次的高阶能量算子 $\tau_k$，都满足：

$$\tau_k[A\cos(\omega t+\varphi)]=\begin{cases}0,\ k=\pm1,\pm3,\pm5,\cdots\\ (-1)^{1+\frac{k}{2}}A^2\omega^k,\ k=0,\pm2,\pm4,\cdots\end{cases} \tag{9}$$

不失一般性，幅值和频率相对于载波基频是缓变的，因此瞬时幅值和瞬时频率可以由高阶能量算子计算得到。例如，由二阶能量算子和四阶能量算子可以推出：

$$\omega=\sqrt{\frac{-\tau_4(x)}{\tau_2(x)}},\ |A|=\frac{\tau_2(x)}{\sqrt{-\tau_4(x)}} \tag{10}$$

高阶能量算子的离散形式可以借鉴二阶算子推算出来：

$$\tau_k(x[n])=x[n]x[n+k-2]-x[n-1]x[n+k-1]=A^2\sin\Omega\cdot\sin[(k-1)\Omega],\quad k=0,1,2,\cdots \tag{11}$$

高阶能量算子的能量分离算法也可以由式(11)得到。例如，由二阶能量算子和三阶、四阶能量算子可以推出：

$$\Omega=\arccos\left(\frac{\tau_3}{2\tau_2}\right),\ |A|=\sqrt{\frac{4\tau_2^3}{4\tau_2^2-\tau_3^2}} \tag{12}$$

其他更高阶次能量算法可以依此类推，此处不再赘述。能量算法随着阶次的提高，计算愈加复杂，但在提高精度方面不增反降，因此本文选用四阶能量算子进行特征提取。

## 2　方法流程

为了高效精确地提取柴油机动力学参数，提出一种多分量振动信号分解及其振动特征参数提取方法，图1

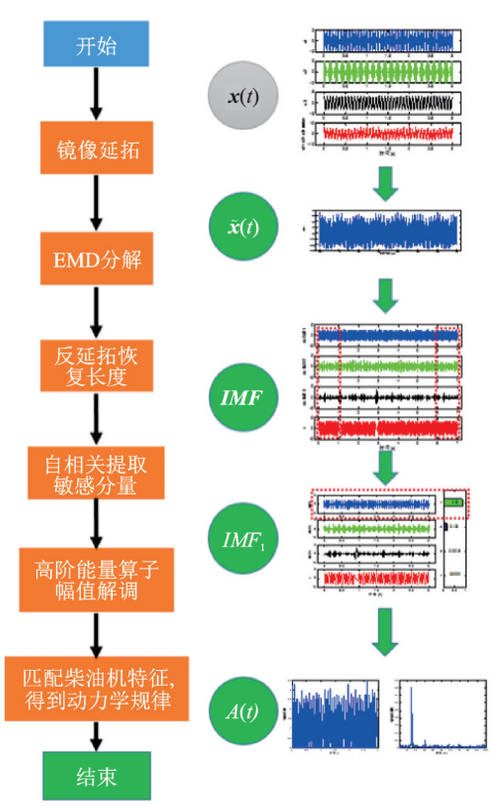



图1　方法流程图

Fig. 1　Flowchart of the method

为该方法的流程图。具体流程步骤如下：

(1)对$x$信号进行延拓值为$N_e$的对称镜像延拓处理得到$\tilde{x}$；

(2)利用EMD分解延拓信号$\tilde{x}$，得到若干个延拓分量$\tilde{h}$；

(3)通过反延拓处理，对各分量$\tilde{h}$对称剪切恢复至原信号$x$长度，得到若干个$IMF$；

(4)计算各个$IMF$与原信号$x$的相关性，提取相关性最大的$IMF$作为敏感分量；

(5)对敏感分量进行高阶能量算子提取得到幅值解调谱；

(6)根据谱图峰值匹配柴油机特征频率及其倍频，得出动力学规律。

## 3 仿真信号验证分析

通过仿真分析对比主要验证两个方面：第一是验证延拓EMD的结果优于常规EMD；第二是验证高阶能量算子的解调表现力。

仿真验证1：构建包含不同形式的多分量仿真信号，包含一个正弦信号和一个调幅调频信号来合成复杂信号，振动信号模型如下：

$$\begin{cases} x_1(t)=\cos(2\pi\cdot 80t) \\ x_2(t)=[1+\sin(2\pi\cdot 7t)]\cdot\cos(2\pi\cdot 30t) \\ x=x_1+x_2 \end{cases} \tag{13}$$

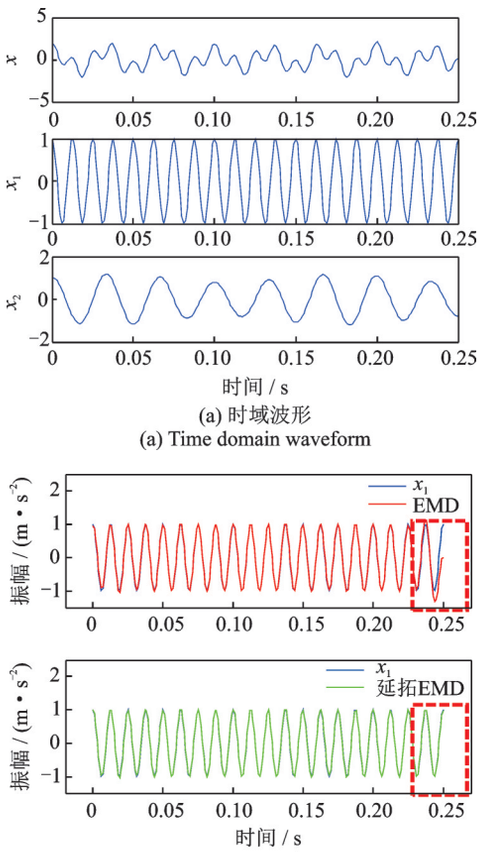
仿真信号如图2(a)所示，利用常规EMD方法与延拓EMD方法进行分解的对比图如2(b)所示。可以很明显地看出，常规EMD方法在首尾两端出现端点的跳动，而且有向内延伸的趋势，而延拓EMD方法分解效果对比良好，很好地消除了端点效应。

仿真验证2：构建包含不同形式的多分量仿真信号，包含一个调幅调频信号、一个调频信号和一个正弦信号来合成复杂信号，振动信号模型如下：

$$\begin{cases} x_1(t)=[1+\cos(2\pi\cdot 15t)]\cdot\cos[2\pi\cdot 155t+\sin(2\pi\cdot 15t)] \\ x_2(t)=[1+\cos(2\pi\cdot 7t)]\cdot\cos(2\pi\cdot 81t) \\ x_3(t)=3\cos(2\pi\cdot 37t) \\ x=x_1+x_2+x_3 \end{cases} \tag{14}$$

加入信噪比为9 dB的高斯白噪声，仿真信号时域波形如图3(a)所示。首先利用常规EMD方法与延拓EMD方法进行分解，提取分解后的第一个分量与原始分量作对比，从图3(b)可以看出，延拓EMD方法分解之后第一个分量与原始分量的相关系数为0.87，优于常规EMD分解的结果0.83；

对第一个分量做幅值解调分析如图3(c)所示。

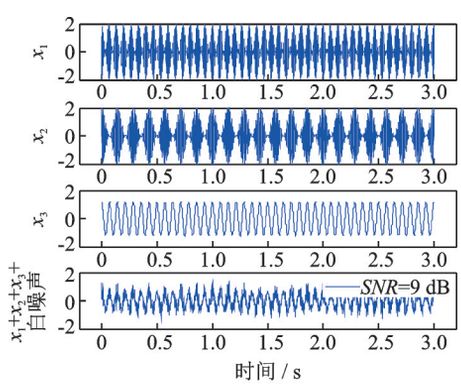



(a) 时域波形
(a) Time domain waveform

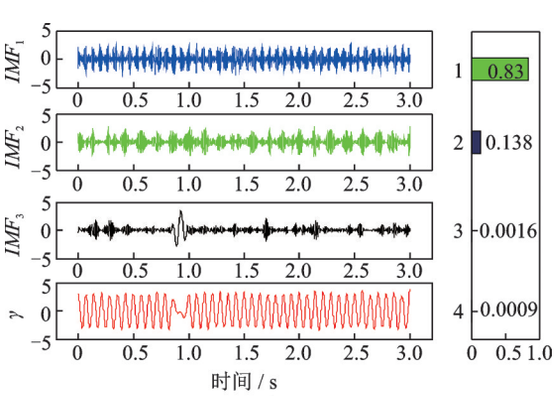
(b) 分解方法对比
(b) Comparison of decomposition

图2 仿真信号1分析

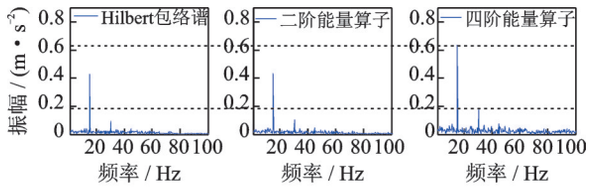
Fig. 2 Simulated signal 1




(a) 时域波形
(a) Time domain waveform




(b) 提取敏感分量
(b) Sensitive component




(c) 解调方法对比
(c) Comparison of demodulation

图 3　仿真信号 2 分析

Fig. 3　Simulated signal 2

利用Hilbert包络谱、二阶能量算子和四阶能量算子解调的结果进行对比，可以看出Hilbert解调和2th-HEO解调结果相差不大，而4th-HEO解调出的调制频率15 Hz及二倍频30 Hz的幅值表现突出，对比结果证明了高阶能量算子的解调能力。

## 4　试验验证

### 4.1　试验设置

本次振动测试的是某型号客滚船的柴油机发动机组，单组发动机是一台4冲程、不可逆、涡轮增压、中冷柴油发动机，通过9个气缸直接喷射燃油输出动力，其额定转速为1200 r/min，最大连续输出额定功率为1665 kW。

根据现场测试需求，测点布置在侧面螺旋管（测点1）、正面机箱中间（测点2）、机箱底角底部（测点3），测量方向分别为水平$X$轴方向、水平$Y$轴方向和垂直$Z$轴方向。测试仪器选用Bruel & KJAER 3505型采集仪，传感器采用PCB加速度传感器，安装方式为磁吸＋胶粘，现场环境为实船内部测试。分别对额定转速下的空载（负载为0%）和满载（100%负载）的两种工况进行测试。测试环境良好无其他振源，测试现场如图4所示。

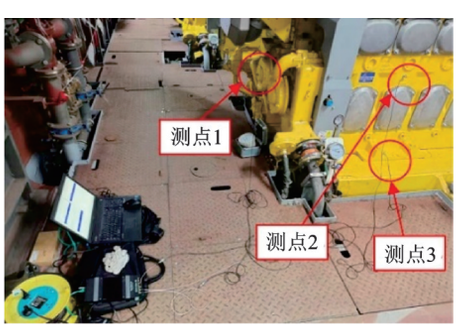



图 4　工程测试图

Fig. 4　Engineering test

### 4.2　空载信号分析

为了对比不同负载工况的振动特征，首先分析空载状态振动信号。空载状态下3个方向振动信号时域波形如图5所示。从图5可以看出$X$轴方向的振动幅值最大，最大值为19 m/s²，这是由于在$X$方向上为测点1的位置，活塞冲击振动最大；$Y$轴方向（测点2位置）和$Z$轴方向（测点3位置）的振动幅值相当，最大幅值约为4.5 m/s²。

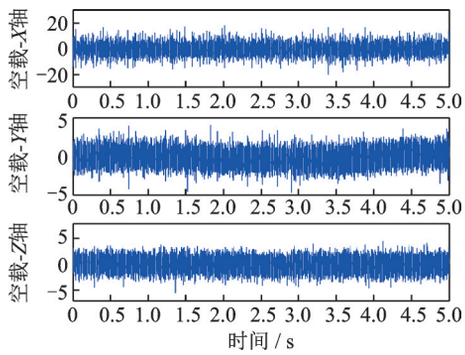



图 5　时域波形图

Fig. 5　Time domain waveform

#### 4.2.1　空载-$X$轴信号分析

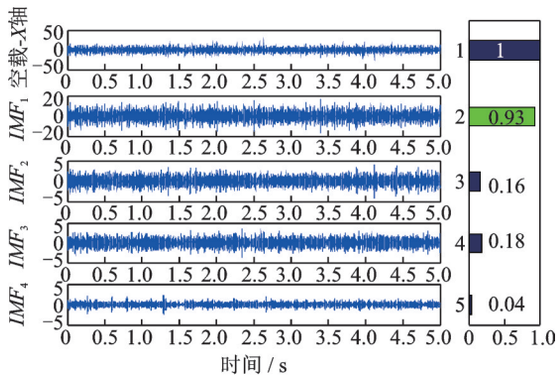
对空载-$X$轴信号进行延拓EMD分解，为减少图例数量，将信号分解为4个分量。为了更好地进行相关性对比分析，图6(a)中第一个信号为原信号，下列4个信号分别是信号分解后的4个分量，残余分量无实际意义，因此并未在图中表示。图6(a)右侧为各个分量与原信号的相关性图示，经过计算可以得出第一个分量与原信号的相关性最大为0.93，因此选择第一个分量作为敏感分量进行下一步分析。

基于4th-HEO幅值解调，得出第一个分量的幅值包络如图6(b)所示。对幅值包络进行Fourier变换得到包络谱如图6(c)所示，可以看出，每0.5倍旋转频率的特征频率的幅值都较为突出，其中$1.5f_0$与$3f_0$非常突出。由于测点1距离气缸传递路径较远，因此$0.5f_0$和$4.5f_0$受干扰较大，相比其他特征幅值表现稍差。

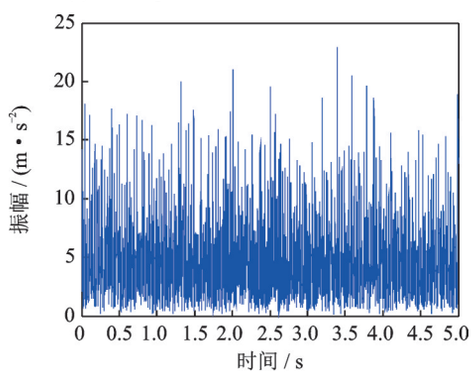
#### 4.2.2　空载其他方向信号分析

对水平$Y$轴方向进行信号分析，4th-HEO谱如图7所示。可以看出，与0.5倍的转频相关的特征频率幅值表现突出，其中$f_0$，$1.5f_0$表现明显，而$4.5f_0$表现尤为突出。其他突出频率如$2f_0$和$4f_0$同样与转频相关，解调效果良好。

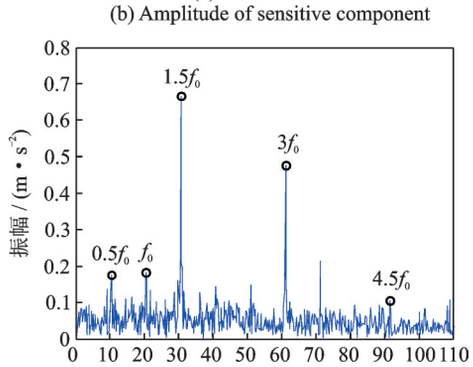
对$Z$轴方向进行信号分解，解调谱如图8所示。可以看出，与0.5倍的转频相关的特征频率幅值表现非常突出，其中$0.5f_0$，$1.5f_0$及$4.5f_0$表现尤为突出。在底角位置，所受气缸振动影响比较唯一，活塞冲击频率及其特征幅值在频谱中叠加表现明显，谱图表明此位置能充分反映出活塞振动动力学特征，在实




(a) 分析结果及相关性
(a) Decomposition and correlation




(b) 敏感分量幅值
(b) Amplitude of sensitive component




(c) HEO解调谱
(c) HEO spectrum

图 6 空载-$X$轴信号分析

Fig. 6 Analysis of $X$-0 load

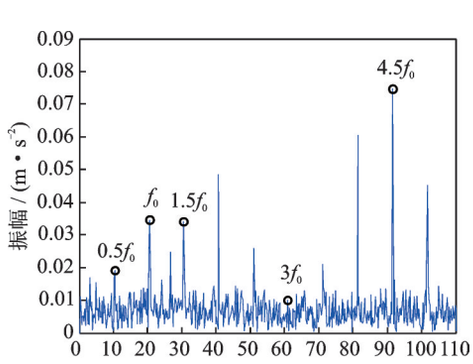



图 7 空载-$Y$轴信号分析

Fig. 7 Analysis of $Y$-0 load

际应用中可以作为第一参考对象。表 1 为空载信号幅值解调谱前 5 阶分析统计。

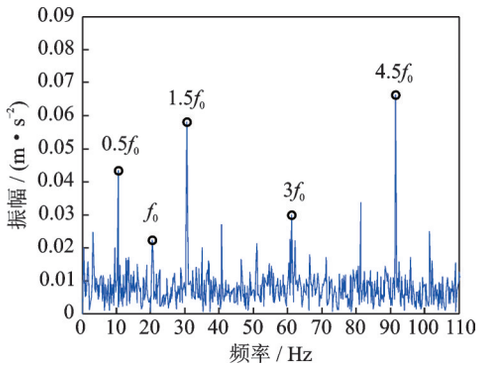



图 8 空载-$Z$轴信号分析

Fig. 8 Analysis of $Z$-0 load

**表 1 空载信号幅值解调统计**

**Tab. 1 Statistics of amplitude demodulation of 0 load**

| 阶次 | 空载-$X$轴 | | 空载-$Y$轴 | | 空载-$Z$轴 | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 频率/Hz | 振幅/(m·s$^{-2}$) | 频率/Hz | 振幅/(m·s$^{-2}$) | 频率/Hz | 振幅/(m·s$^{-2}$) |
| 0.5阶 | 10.4 | 0.18 | 10.4 | 0.02 | 10.4 | 0.04 |
| 1.0阶 | 20.4 | 0.18 | 20.4 | 0.03 | 20.4 | 0.02 |
| 1.5阶 | 30.6 | 0.67 | 30.6 | 0.03 | 30.6 | 0.06 |
| 3.0阶 | 61.2 | 0.48 | 61.2 | 0.01 | 61.2 | 0.03 |
| 4.5阶 | 91.6 | 0.10 | 91.6 | 0.07 | 91.6 | 0.07 |

### 4.3 满载信号分析

满载状态下 3 个方向振动信号时域波形如图 9 所示。对比空载信号可以看出所有波形幅值都有较大提高，说明在满载状态下气缸载荷冲击更加剧烈，这也符合旋转机械的动力学运动特性。

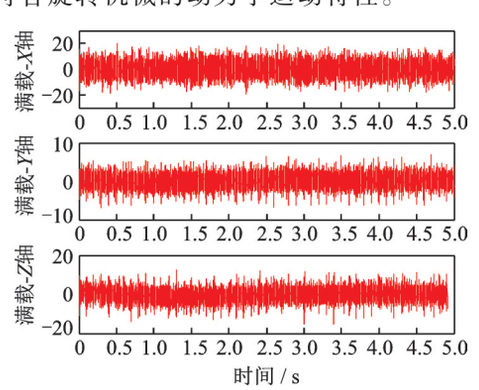


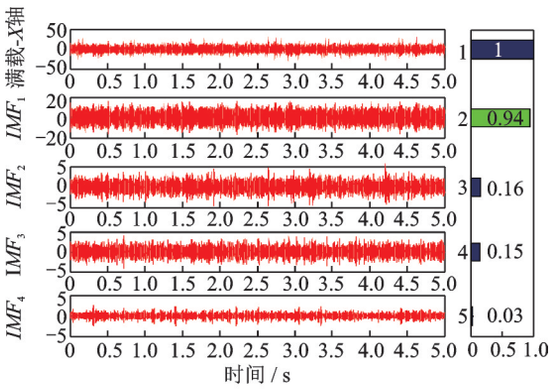

图 9 时域波形图

Fig. 9 Time domain waveform

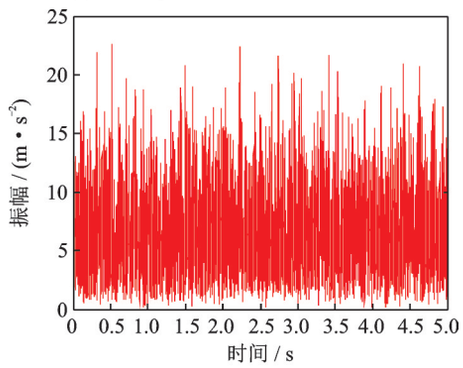
#### 4.3.1 满载-$X$轴信号分析

按照分析流程，首先对满载-$X$轴向信号进行多分量分解，分解结果如图 10(a)所示，同样右侧是单分量与原信号的相关度柱形图，提取第一个分量(相关性=0.94)进行 4th-HEO 计算，得到幅值如图 10(c)所示。

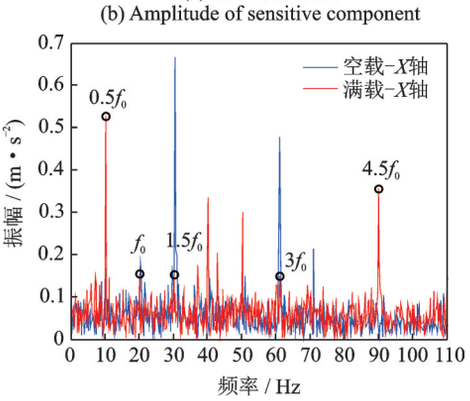
满载-$X$轴信号，与空载-$X$轴向信号(蓝色线条)进行对比，如图 10(c)所示。可以看出，特征频率出现在谱图的相同位置，但是特征幅值有较大差距，




(a) 分解结果及相关性
(a) Decomposition and correlation




(b) 敏感分量幅值
(b) Amplitude of sensitive component




(c) HEO解调谱
(c) HEO spectrum

图 10　满载 $X$ 轴信号分析

Fig. 10　Analysis of $X$-100 load

$0.5f_0$ 和 $4.5f_0$ 较空载分析表现非常突出，充分说明在载荷作用下，对于0.5倍频及9缸特征频率冲击幅值有较大提升。其他与旋转频率的0.5倍频相关的幅值表现显著。

4.3.2　*满载其他方向信号分析*

对满载-$Y$轴信号和空载-$Y$轴信号对比分析，解调谱如图11所示。从图11可以看出，几乎所有与旋转频率相关的特征频率及其倍频在幅值方面都有较大提升，非常符合满载工况的冲击剧烈状态。其中在高阶特征频率位置上稍微有些偏移，这是由于满载状况下，高阶转频受载荷影响会出现时变波动，因此在突出幅值位置出现变化，但是这并不影响工程基础判断。

对满载-$Z$轴信号和空载-$Z$轴信号对比分析，解

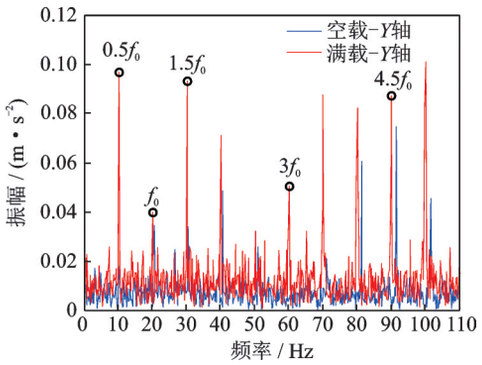



图 11　满载-$Y$轴信号分析

Fig. 11　Analysis of $Y$-100 load

调谱如图12所示。从图12可以看出，Z轴信号的表现特征更加明显，相比蓝色线条的空载信号HEO解调谱，红色的满载信号幅值解调谱在 $0.5f_0$、$1.5f_0$、$3f_0$ 及 $4.5f_0$ 位置都有较大的突出，其他位置的幅值也有较大的提高，充分说明了满载信号的冲击更大，而且表明，在此方向上，进行特征频率提取及故障诊断较其他轴向信号表现力更佳，在柴油机故障诊断中，可以首先选择 $Z$ 轴垂向信号进行分析。表2为满载信号幅值解调谱前5阶分析统计。

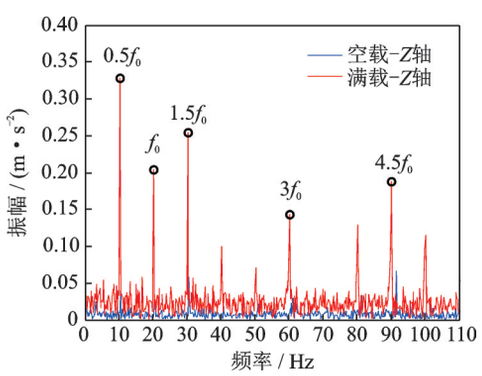



图 12　满载-$Z$轴信号分析

Fig. 12　Analysis of $Z$-100 load

**表 2　满载信号幅值解调统计**

**Tab. 2　Statistics of amplitude demodulation of 100 load**

| 阶次 | 满载-$X$轴 | | 满载-$Y$轴 | | 满载-$Z$轴 | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 频率/Hz | 振幅/(m·s$^{-2}$) | 频率/Hz | 振幅/(m·s$^{-2}$) | 频率/Hz | 振幅/(m·s$^{-2}$) |
| 0.5阶 | 10.2 | 0.53 | 10.2 | 0.10 | 10.2 | 0.33 |
| 1.0阶 | 20.2 | 0.16 | 20.2 | 0.04 | 20.2 | 0.20 |
| 1.5阶 | 30.2 | 0.15 | 30.2 | 0.09 | 30.2 | 0.25 |
| 3.0阶 | 60.2 | 0.15 | 60.2 | 0.05 | 60.2 | 0.14 |
| 4.5阶 | 90.2 | 0.36 | 90.2 | 0.09 | 90.2 | 0.19 |

## 5　结　论

(1)利用延拓EMD分解方法可以高效准确地分解多分量信号，同时避免了常规EMD的端点效应；

(2)利用相关性提取敏感单分量包含了更多振动特征;

(3)利用高阶能量算子解调增强能量和突出冲击的优势,实现振动特征的可视化谱图和各阶特征频率及其幅值的自动提取。

通过船用柴油机的各工况和多方向振动信号的对比分析可以看出,$Z$轴信号表现出的特征较其他轴向信号更佳。且对于9缸4冲程柴油机而言,其0.5倍频和4.5倍频的幅值非常突出,且对负载变化影响更加敏感。

**参考文献:**


[1] 李光日. 船舶的噪声与振动控制[J]. 中国战略新兴产业(理论版), 2019(1):198.

[2] 朱瑞仪. 船舶结构振动传递规律的工程预报及抑制[D]. 上海:上海交通大学, 2014.
ZHU Ruiyi. Engineering prediction and attenuation of structure borne sound on board ships[D]. Shanghai: Shanghai JiaoTong University, 2014.

[3] DO D L, NGUYEN T M, LAI H T, et al. Experimental study in vibration monitoring of main diesel engine installed on motor vessel KN168[J]. International Journal of Modern Physics B, 2020, 34 (22/24): 2040136.

[4] 肖斌,史亮,曹贻鹏,等. 基于自适应广义线性混合模型的柴油机源分析[J]. 哈尔滨工程大学学报,2019,40(12): 2029-2035.
XIAO Bin, SHI Liang, CAO Yipeng, et al. Source analysis of diesel engine vibration based on adaptive generalized linear mixed model[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2019,40(12): 2029-2035.

[5] 冯娜, 周欣, 侯志鹏. 某V型高速柴油机振动测试及动力学分析[J]. 船舶工程, 2021, 43(1):56-60.
FENG Na, ZHOU Xin, HOU Zhipeng. Vibration test and dynamic analysis of a V-type high-speed diesel engine[J]. Ship Engineering, 2021, 43 (1): 56-60.

[6] 李晓博, 江志农, 张沛, 等. 基于IMS聚类算法的柴油发动机故障诊断方法研究[J]. 振动与冲击, 2018, 37(7):193-198.
LI Xiaobo, JIANG Zhinong, ZHANG Pei, et al. Fault diagnosis approach for diesel engine based on IMS clustering algorithm[J]. Journal of Vibration and Shock, 2018, 37 (7): 193-198.

[7] 李胜杨, 向阳, 钱思冲, 等. 基于双通道定位的柴油机辐射噪声盲分离研究[J]. 机械工程学报, 2017, 53(18):138-145.
LI Shengyang, XIANG Yang, QIAN Sichong, et al. Diesel engine radiation noise separation and ideutification based on dual-channel localization and BSS[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53 (18): 138-145.

[8] 胡以怀, MUNYAO Elijah Musango, 韩冰,等. 船用二冲程柴油机机身侧面振动信号的特征分析[J]. 柴油机设计与制造, 2019, 25 (2): 39-43.
HU Yihuai, MUNYAO Elijah Musango, HAN Bing, et al. Features of vibration signals on cylinder block of two-stroke diesel engine[J] Diesel Engine Design and Manufacturing, 2019, 25 (2): 39-43.

[9] 赵昕海, 张术臣, 李志深, 等. 基于VMD的故障特征信号提取方法[J]. 振动、测试与诊断, 2018, 38(1): 11-19.
ZHAO Xinhai, ZHANG Shuchen, LI Zhishen, et al. Application of new denoising method based on VMD in fault feature extraction[J] Journal of Vibration, Measurement and Diagnosis, 2018, 38 (1): 11-19.

[10] BARALDI P, BONFANTI G, ZIO E. Differential evolution-based multi-objective optimization for the definition of a health indicator for fault diagnostics and prognostics[J]. Mechanical Systems & Signal Processing, 2018, 102:382-400.

[11] LEE Y, LEE S, CHOI H, et al. Analysis of vibration on an engine block caused by combustion in a diesel engine[J]. International Journal of Automotive Technology, 2019, 20(1):187-195.

[12] ZHAO H P, ZHANG J J, JIANG Z N, et al. A new fault diagnosis method for a diesel engine based on an optimized vibration Mel frequency under multiple operation conditions[J]. Sensors, 2019, 19(11):2590.

[13] BI X B, LIN J S, TANG D J, et al. VMD-KFCM algorithm for the fault diagnosis of diesel engine vibration signals[J]. Energies, 2020, 13(1):1-20.

[14] 任刚, 贾继德, 梅检民, 等. 基于变分模态分解和去趋势波动分析的柴油机振动信号去噪方法[J]. 内燃机工程, 2019, 40(2):76-81.
REN Gang, JIA Jide, MEI Jianmin, et al. Vibration signal denoising method of diesel engine based on VMD and DFA[J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2019, 40 (2): 76-81.

[15] 梁仲明, 滕宪斌, 杨期江,等. 基于CEEMD-参数优化Morlet小波变换的柴油机振动信号冲击特征提取方法[J]. 船舶工程, 2020, 42 (5):90-96.
LIANG Zhongming, TENG Xianbin, YANG Qijiang, et al. Diesel engine vibration signal impact feature extraction method based on CEEMD-parameter optimized Morlet wavelet transform[J]. Ship Engineering, 2020, 42 (5):90-96.

[16] 裴迪,岳建海,焦静. 基于自相关与能量算子增强的滚动轴承微弱故障特征提取[J]. 振动与冲击,2021,40(11):101-108.
PEI Di, YUE Jianhai, JIAO Jing. Weak fault feature extraction of rolling bearing based on autocorrelation and energy operator enhancement[J]. Journal of Vibration and Shock, 2021,40(11):101-108.

[17] FENG Z P, QIN S F, LIANG M. Time-frequency analysis based on Vold-Kalman filter and higher order energy separation for fault diagnosis of wind turbine planetary gearbox under nonstationary conditions [J]. Renewable Energy, 2016, 85:45-56.

[18] 李康强, 冯志鹏, 孙宏图, 等. 基于延拓EMD和GDE识别瞬时阻尼比的行星齿轮箱故障诊断[J]. 振动与冲击, 2021, 40(24): 29-35.
LI Kangqiang, FENG Zhipeng, SUN Hongtu, et al. Planetary gearbox fault diagnosis via extension EMD and GDE to identify instantaneous damping ratio[J]. Journal of Vibration and Shock, 2021, 40 (24): 29-35.



**第一作者:** 李康强(1987—),男,博士,讲师。
E-mail:likq@ldu.edu.cn

**通信作者:** 巩庆涛(1982—),男,博士,教授。
E-mail: gongqt@ldu.edu.cn