

# HHT 和马氏距离融合的船用空压机故障诊断

胡欢欢, 王永坚, 邱 晨

(集美大学轮机工程学院, 福建 厦门 361021)

[摘要] 为了诊断船用二级往复式空压机最常见的活塞环断裂故障, 提出一种将 HHT(hilbert-huang transform) 边际谱和马氏距离相融合的方法。通过空压机正常状态和人为模拟一、二级活塞环断环的实验, 采集正常和故障状态下的一、二级缸套和缸盖振动信号。利用 HHT 算法处理采集的数据, 获取 HHT 边际谱, 以空压机固有频段能量值为特征值和马氏距离为分类器, 识别其故障类型。实验表明: 该方法可以准确、有效地诊断出船用二级往复式空压机活塞断环故障。

[关键词] 船用往复式二级空压机; 故障诊断; HHT 边际谱; 马氏距离

[中图分类号] U 664.1

## Research of Fault Diagnosis of Ship's Air Compressor with HHT Marginal Spectrum and Mahalanobis Distance

HU Huanhuan, WANG Yongjian, QIU Chen

(School of Marine Engineering, Jimei University, Xiamen 361021, China)

**Abstract:** In order to solve the nonlinear and non-stationary problems of the fault signals of cylinder-piston ring groups of ship's reciprocating double stage air compressors, based on the HHT(hilbert-huang transform) having the ability of processing such signals, a fault diagnosis method for ship's air compressors with HHT marginal spectrum and Mahalanobis distance was proposed in this paper to diagnose the most common faults on piston fractures. Through experiments on the normal state and artificial simulations of the first and second pistons breaking rings of the compressor, the vibration signals of the first-second cylinder sleeves and cylinder sleeves and cylinder heads were collected under the normal and fault conditions. Through HHT marginal spectrum were obtained by employing HHT algorithm on processing the collected data. The natural frequency band and the Mahalanobis distance was respectively introduced to as the characterized energy value and the classifier for diagnose faults. The experiments show that the method can identify and diagnose the fault on ship's reciprocating double stage air compressors accurately and effectively, which to some extent provides a theoretical basis and practical reference for the most common fault identification and diagnosis of the ship compressor.

**Keywords:** ship reciprocating double stage air compressor; fault diagnosis; HHT marginal spectrum; Mahalanobis distance

[收稿日期] 2019-09-06

[基金项目] 国家自然科学基金资助项目(51879118); 福建省自然科学基金资助项目(2019J01706)

[作者简介] 胡欢欢(1986—), 男, 硕士生, 主要从事船舶船舶动力装置故障分析与智能故障诊断研究。通信作者: 王永坚(1972—), 男, 教授/高级轮机长, 主要从事轮机仿真技术与船舶动力装置故障分析研究。E-mail: wyongjian55@qq.com

0 引言

船用二级往复式空压机是船舶压缩空气系统的关键设备, 其工作性能的好坏对船舶正常营运将产生影响, 开展船用空压机故障类型的有效识别和故障诊断具有良好的现实意义。船用二级往复式空气压缩机最常见的故障是一、二级缸套-活塞组发生断环, 依靠空压机性能参数很难及时、准确地查找故障问题, 本文提出一种基于振动信号分析的船用二级往复式空气压缩机活塞断环故障诊断方法。由于空压机振源多且机械结构复杂, 振动信号是非线性非平稳的, 如何从此类信号中提取故障特征将是一件十分关键的工作。传统的振动信号处理方法在处理非线性非平衡信号时存在缺陷, 如短时傅里叶变换因高低频要求不同的窗函数, 合适的窗函数不易选取, Wigner 分布会产生二次混叠, Cohen 类很难选择合适的核函数, 小波变换不具有自适应性, 难以选择小波基<sup>[1-2]</sup>。希尔伯特-黄变换 (hilbert-uuang transform, HHT) 使用经验模态分解算法, 将信号分解成一组本征模态函数<sup>[3-5]</sup>, 此类函数具有单量自适应性, 高时频分辨率和良好的时频聚集性的优点, 故可以处理非线性非平稳信号。对重构后的信号进行希尔伯特变换, 可以得到信号瞬时时频分布, 进而可以得到 Hilbert 边际谱<sup>[6-7]</sup>, 它可以准确地反映出信号幅值和频率之间的关系。马氏距离依据数据的协方差距离, 具有良好的小样本分类特性, 可以准确地反映两个样本的相似程度<sup>[8]</sup>, 因此在机械故障识别领域得到广泛应用。

综上, 本文提出一种把希尔伯特-黄边际谱和马氏距离融合的船用二级往复式空压机断环故障诊断方法, 通过搭建实验平台 (以船用应急空压机为实验对象), 人为模拟空压机三种状态类型 (正常状态、一级活塞断环、二级活塞断环) 进行实验, 验证所提方法的有效性和故障识别的准确性。

1 信号分析方法

经验模态分解和希尔伯特变换及谱分析两个部分组成希尔伯特-黄变换 (HHT)。经验模态分解 (EMD) 算法得到本征模态函数 (IMF) 必须满足一下两个条件: 1) 极值点和零点的个数相差不多于一个; 2) 极大值和极小值点的包络线的平均值等于零<sup>[5]</sup>。

EMD 分解实测信号  $x(t)$  的步骤如下。

**步骤一** 应用三次样条算法求振动信号  $x(t)$  所有的局部极大值、极小值点的包络线, 即上、下包络线, 然后求取这两个包络线的平均值, 记为  $m_1$ , 将  $x(t)$  减去  $m_1$ , 得到  $h_1 = x(t) - m_1$ 。

**步骤二** 如果  $h_1$  满足上述的条件, 那么  $h_1$  就是第一个本征模态函数 (IMF1); 如果  $h_1$  不满足条件, 则把  $h_1$  作为原始数据, 重复步骤一, 即先得到上、下包络线的平均值  $m_{11}$ ,  $h_1$  减去  $m_{11}$  得到  $h_{11}$ , 再判断是否满足条件, 如果不满足, 则重复循环  $k$  次, 直到  $h_{1k}$  满足条件, 并记  $c_1 = h_{1k}$  为第一个本征模态函数,  $h_{1k} = h_{1(k-1)} - m_{1k}$ 。

**步骤三** 把第一个本征模态函数  $c_1$  从原始信号  $x(t)$  中分离出来, 从而得到  $r_1 = x(t) - c_1$ 。

**步骤四** 将  $r_1$  当作原始数据, 重复上面的三个步骤, 得出  $x(t)$  的第 2 个满足条件的 IMF 分量  $c_2$  (IMF2)。如此重复  $n$  次, 得出  $x(t)$  的  $n$  个 IMF 分量, 这样就有如下式子:

$$\begin{cases} r_2 = r_1 - c_1, \\ r_3 = r_2 - c_2, \\ \vdots \\ r_n = r_{n-1} - c_n. \end{cases}$$

当余下的信号函数不再满足提取 IMF 分量的条件时, 循环结束, 余下的信号函数称为残余项  $r_n$ 。于是原始信号  $x(t)$  可以表示为  $n$  个 IMF 分量和一个残余项  $r_n$  之和, 这样就重构了原始信号, 即为:

$$x(t) = \sum_{i=1}^n c_i(t) + r_n(t)。$$

对上述求得的每一个 IMF 分量进行希尔伯特变换, 得到解析函数:  $H[c_i(t)] = [\int_{-\infty}^{\infty} c_i(\tau)/(t - \tau)]$

$\tau) d\tau] / \pi$ 。

于是求得每一个 IMF 分量的幅值和相位函数分别为:

$$a_i(t) = \sqrt{c_i^2(t) + (H[c_i(t)])^2};$$

$$\varphi_i(t) = \arctan [H[c_i(t)]/c_i(t)]。$$

进而求得瞬时频率  $\omega_i(t) = (1/2\pi) d\varphi_i(t)/dt$ 。

由于残余项  $r_n$  对重构原始信号影响较小, 故省略不计, 从而得到重构的原始信号为:

$$x(t) = \text{Re} \sum_{i=1}^n a_i(t) \exp[i\int \omega_i(t) dt]。$$

Re 为实部,  $n$  为 IMF 分量的个数。由此式可以看出幅值  $a_i(t)$  和频率  $\omega_i(t)$  都是时间  $t$  的函数, 从而得到 Hilbert 谱, 记为:

$$H(\omega, t) = \text{Re} \sum_{i=1}^n a_i(t) \exp[i\int \omega_i(t) dt]。 \quad (1)$$

对式 (1) 作时间  $t$  的积分运算, 便得到 Hilbert 边际谱:  $h(\omega) = \int_0^T H(\omega, t) dt$ 。

进而得在某一频段  $\omega_1 \sim \omega_2$  的能量函数  $S$  为:

$$S = \int_{\omega_1}^{\omega_2} h^2(\omega) d\omega。 \quad (2)$$

## 2 实验数据采集

本实验台选用应急船用往二级复式空压机, 额定转速为 2800 r/min, 额定功率为 7.5 kW, 额定压力 12.5 MPa; 储气罐额定压力为 12.5 MPa; 采用东华测试公司的信号采集仪 DH-5922, 以及相关的 DHDAS 信号测试分析系统软件; 传感器采用加速度传感器, 最大可测加速度为  $50g \text{ m/s}^2$ , 灵敏度为 100.8, 激励电压为 24 V, 谐振频率为 30 kHz。

将 4 个加速度传感器分别安装于一、二级气缸盖顶端和一、二级缸套侧面中间的位置。搭建的实验平台如下图 1 所示。本次采用人为模拟故障问题实验, 设正常状态、一级活塞断环、二级活塞断环 3 种故障, 如图 2 所示。

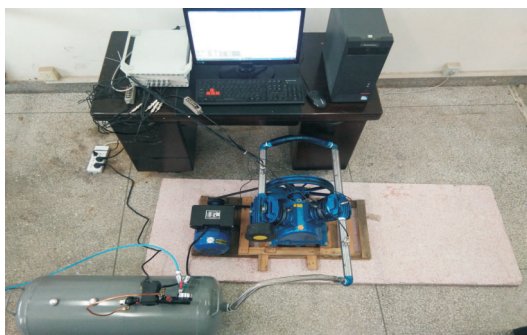


图 1 试验平台

Fig.1 Test rig

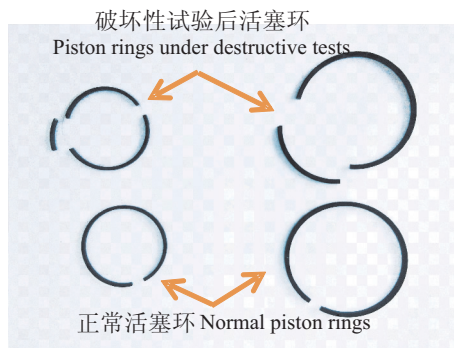


图 2 正常与破坏性试验后活塞环

Fig.2 Piston rings under normal and destructive tests

采集正常状态下的振动信号, 具体过程如下: 开启 DH-5922 信号采集仪, 再打开 DHDAS 信号测试分析系统软件, 将采集频率调节到 12 kHz, 采样点数为 25 600 个, 数据格式为 TXT, 后启动空压机, 当空压机处于工作状态时, 按下信号采集仪采集信号键, 直到信号采集点数完成, 停止采集信号, 得到正常状态振动信号。将一级断裂的活塞环安装于对应的活塞上, 重复上述采集信号的步骤, 得到一级活塞断环的故障振动信号数据; 同样可得二级活塞断环状态下的振动信号数据。本次实验每种状态各采集 10 组数据, 共 40 组数据, 三种状态共 120 组数据。

3 数据分析

将采集到的数据使用 MATLAB2013b 软件进行处理, 得到三种状态下信号原始图, 如图 3 所示。

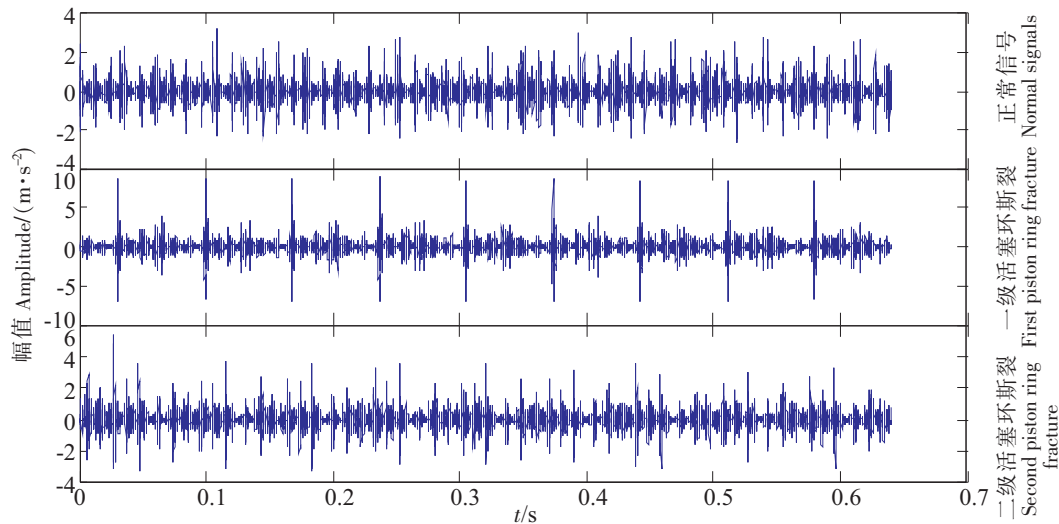


图 3 三种状态下原始信号图  
Fig.3 Original signals in three states

由图 3 能够得出, 由于背景噪声和环境等因素的影响, 所获取的三种状态下的信号存在着较多的干扰, 这将严重影响故障诊断识别的准确性。因此, 本文采用一维离散小波降噪方法对三种信号进行处理, 小波降噪参数为: sqtwolog 小波阈值, db6 小波, 6 层分解<sup>[9-10]</sup>。降噪后的信号如图 4 所示。对比这两幅图片可以发现降噪后的信号混叠较小, 故降噪后的信号噪声被明显抑制。

分别将正常状态, 一级活塞断环, 二级活塞断环三种状态下降噪后的信号数据使用 EMD 分解。列出三种状态下的前 6 个 IMF 分量函数图, 正常状态如图 5 所示。

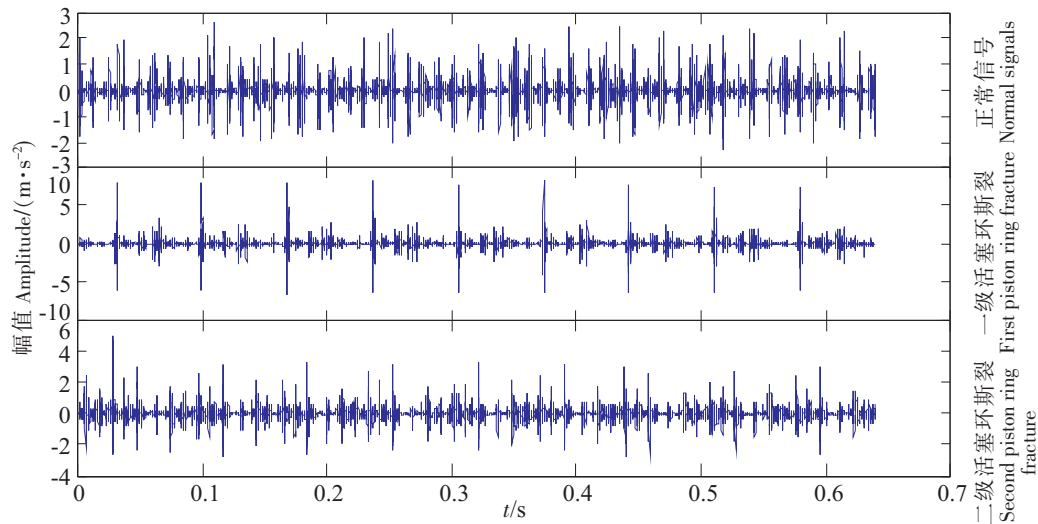


图 4 三种状态下降噪后信号图  
Fig.4 Post-noise reduction signals in three states

由于 EMD 算法的特性, 不可避免地会出现虚假的 IMF 或者与原始信号关系不大的 IMF 分量, 如何剔除这些分量关系着故障识别和诊断的准确性。由于每一个 IMF 分量都正交于原始信号, 故可得每一个 IMF 分量与原始信号的相关性, 这里用相关系数  $\rho$  来表示相关性,  $\rho$  越大表示  $\rho$  所对应的 IMF 分量与原始信号相关性越大。由概率论相关系数计算公式可得  $\rho$  :



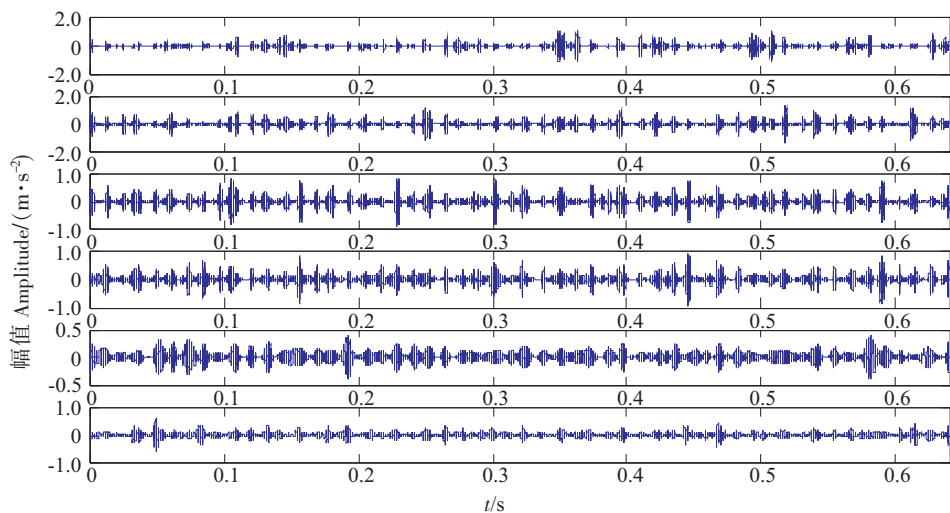


图 5 正常状态下 EMD 分解后信号图谱

Fig.5 Signals under EMD decomposition in normal conditions

$$\rho_i = \sum_{k=1}^p \sum_{t=0}^{\infty} c_{ik}(t)x(t) / \sqrt{\sum_{k=1}^p \sum_{t=0}^{\infty} c_{ik}^2(t)x^2(t)} .$$

其中  $i$  表示第  $i$  个 IMF 分量。

表 1 列出了三种状态下的前 6 个 IMF 分量与原函数的相关系数。由表 1 可知三种状态下的前 5 个 IMF 分量与各自原信号相关度较高，第 6 个相关度较低。由此可知第 6 及其以后的 IMF 函数由于相关度很低，故可以舍弃不计，于是得到 5 个敏感的 IMF 分量。

表 1 前 6 个 IMF 分量的相关系数

Tab.1 Correlation coefficients of the first six IMF components

状态 State	$\rho_1$	$\rho_2$	$\rho_3$	$\rho_4$	$\rho_5$	$\rho_6$
正常状态 Normal signals	0.825 2	0.552 0	0.423 4	0.396 5	0.126 3	0.041 2
一级活塞环断裂 First piston fracture	0.913 1	0.572 9	0.452 1	0.243 0	0.180 1	0.021 0
二级活塞环断裂 Second piston fracture	0.823 3	0.665 4	0.365 9	0.254 5	0.210 2	0.096 7

对每种状态各个 IMF 分量使用希尔伯特变换重构原函数后得到其时间 – 频率 – 幅值三者间关系的希尔伯特谱，其时频三维图如图 6 所示。从图 6 可得原函数频率幅值较大的部分分布在 0 ~ 5 000 Hz 之间，故信号的能量也是大部分分布在这个频率区间之中。

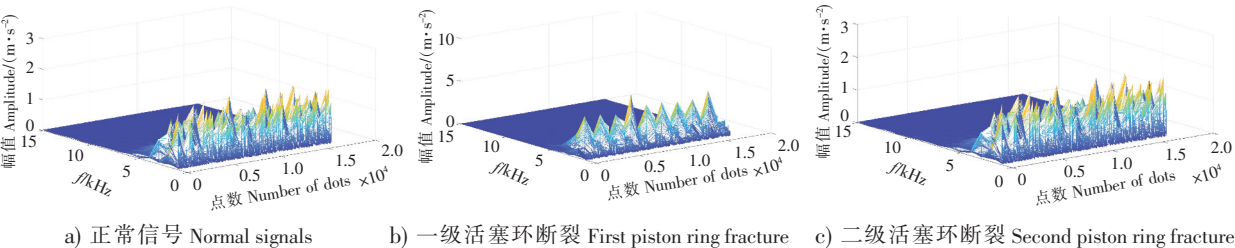


图 6 三种状态下 HHT 谱三维时频图

Fig.6 Three-dimensional time-frequency graphs of HHT spectrum in three states

时频图所反映的频率能量分布，当空压机活塞环断裂时会激起船舶空压机系统的固有频率，此时形成共振，故幅值较大，能量较多，因此幅值较大的频段为固有频段 ( $f$ )，且固有频段是 0 ~ 5 000 Hz。不同的故障激起固有频段幅值不同，即能量不同，因此可以将空压机固有频段的能量值作为故障诊断的特征。由式 (2) 对希尔伯特谱进行时间 (点数) 积分便得到的希尔伯特边际谱，它能准确地反映信号幅值随频率变化的规律。

根据式 (2) 可以求出各个状态每个采集样本的 0 ~ 5 000 Hz 的希尔伯特边际谱能量值, 即得到各种状态下固有频段的能量值。

4 马氏距离

马氏距离是多元数理统计理论中常用的判别方法之一, 用于表示数据的协方差距离。该方法的计算是建立在总体样本的基础上, 排除了变量之间相关性的干扰, 是一种衡量两个未知样本集相似程度的有效方法<sup>[6]</sup>。由于算法简单, 不受量纲的影响, 计算速度快, 并适用于小样本问题的处理, 因此, 被广泛应用于故障诊断领域。

使用 HHT 算法将采集到的振动信号进行分解, 并得到希尔伯特边际谱, 然后得到固有频段的能量值, 以固有频段的能量值为特征值。选取每种状态下每个加速度传感器的 5 组共 20 组样本进行训练, 其余 20 组进行测试。计算出每种状态下的 20 组样本的能量值的均值和方差, 记为标准特征值  $S_i$  和标准方差  $\text{var}(s_i)$ 。三种状态下的标准特征值和标准方差如表 2 所示。

待检信号的固有频段能量特征值与三种状态下的标准特征值之间的马氏距离由式 (3) 计算得到。式 (3) 可以判断出两个样本之间的相似性, 马氏距离越小, 相似性越大。

$$d_i = |s_x - \bar{s}_i|/\text{var}(s_i), (i = 1, 2, 3)$$

(3)

其中:  $s_x$  是待测样本数据的能量特征值;  $s_i$  和  $\text{var}(s_i)$  为标准特征值和标准方差;  $d_i$  是求得的马氏距离,  $d_1$  表示正常状态,  $d_2$  表示一级活塞断环,  $d_3$  表示二级活塞断环。

表 2 标准特征值及其标准方差  
Tab.2 Standard eigenvalues and standard variances

状态 States	标准特征值 Standard eigenvalues	标准方差 Standard variance
正常状态 Normal signals	4.325 2	0.152 0
一级活塞环断裂 First piston fracture	8.013 1	1.872 9
二级活塞环断裂 Second piston fracture	6.221 3	0.965 4

判断过程如下: 取某一个测试样本的固有频段的能量值  $s_x$ , 然后分别代入三种状态下所对应的标准特征值和标准方差, 求得三种状态下所对应的三个马氏距离 (  $d_1, d_2, d_3$  ), 比较这三个马氏距离的大小, 其中最小的数值所对应的状态为此样本所对应的状态 ( 即: 当  $d_1$  最小时对应正常状态, 当  $d_2$  最小时对应的故障是一级活塞环断裂; 当  $d_3$  最小时对应的故障是二级活塞环断裂), 故而识别出该样本所对应的船用空压机的状态, 达到故障诊断的目的。依照 HHT 边际谱和马氏距离判别方法的各个步骤, 对三种不同状态下的空压机 60 组振动信号进行故障诊断研究, 诊断结果表明: 在正常状态下全部诊断正确, 一级活塞断环有一处出现误判, 二级活塞断环出现两处错误, 故整体诊断正确率为 95%。结果表明该方法可以进行船舶二级往复式空压机故障诊断, 且诊断准确率较高。出现误判的原因可能是测量引起误差。部分诊断结果如表 3 所示。

表 3 部分马氏距离诊断结果  
Tab.3 Partial Markov distance diagnosis

状态 States	$d_1$	$d_2$	$d_3$	诊断结果 Results
正常状态 Normal signals	1.201 0	3.452 1	3.698 2	正常状态 Normal signals
正常状态 Normal signals	1.869 5	3.230 4	7.368 0	正常状态 Normal signals
正常状态 Normal signals	1.263 5	3.444 0	5.362 4	正常状态 Normal signals
正常状态 Normal signals	1.963 2	3.578 2	5.221 0	正常状态 Normal signals
正常状态 Normal signals	1.857 0	3.986 2	2.452 3	正常状态 Normal signals
一级活塞环断裂 First piston fracture	9.365 0	1.325 6	4.235 7	一级活塞环断裂 First piston fracture
一级活塞环断裂 First piston fracture	9.425 5	1.986 0	4.956 3	一级活塞环断裂 First piston fracture

续表

状态 States	$d_1$	$d_2$	$d_3$	诊断结果 Results
一级活塞环断裂 First piston fracture	7.358 1	1.535 5	7.259 8	一级活塞环断裂 First piston fracture
一级活塞环断裂 First piston fracture	7.368 0	1.852 3	8.562 9	一级活塞环断裂 First piston fracture
一级活塞环断裂 First piston fracture	8.996 4	1.526 1	7.333 0	一级活塞环断裂 First piston fracture
二级活塞环断裂 Second piston fracture	32.120 3	10.231 7	1.365 8	二级活塞环断裂 Second piston fracture
二级活塞环断裂 Second piston fracture	29.356 2	11.893 5	1.986 5	二级活塞环断裂 Second piston fracture
二级活塞环断裂 Second piston fracture	33.235 0	9.200 1	2.425 0	二级活塞环断裂 Second piston fracture
二级活塞环断裂 Second piston fracture	29.556 1	10.222 4	3.658 9	二级活塞环断裂 Second piston fracture
二级活塞环断裂 Second piston fracture	34.207 0	8.362 4	1.520 3	二级活塞环断裂 Second piston fracture

5 结论

1) 对于船舶二级往复式空压机振动信号的非线性非平稳性，采用 EMD 将其分解成若干个 IMF 分量，求出敏感 IMF 分量，进而对每个敏感 IMF 分量进行希尔伯特变换，再重构信号，得出希尔伯特边际谱，利用空压机固有频段的能量值作为信号的特征值，以此为判别马氏距离的依据。实验表明，该方法识别正确率在 95%，可以有效进行故障识别。

2) 一维离散小波降噪可以明显降低环境背景噪声干扰对振动信号的影响，提高了故障诊断的准确性。

3) 在船舶往复式二级空压机断环故障诊断过程中，存在误判是因为存在测量误差和系统误差。本文的研究结果是基于小样本实验，要建立完善的空压机活塞环断裂的 HHT 边际谱的故障诊断还需要大数据进一步分析。

[ 参 考 文 献 ]

[1] 于德介, 程军圣, 杨宇. 机械故障诊断的 Hilbert – Huang 变换方法 [M]. 北京: 科学技术出版社, 2006: 154-166.

[2] 程军圣, 杨宇, 于德介. 局部均值分解方法及其在齿轮故障诊断中的应用 [J]. 振动工程学报, 2009, 22(1): 76-84.

[3] 周小龙. 希尔伯特 – 黄在故障诊断中的应用 [D]. 长春: 长春工业大学, 2014.

[4] XU B, YUAN S, WANG M, et al. Determining impact induced damage by lamb wave mode extracted by EMD method [J]. Measurement, 2015, 65: 120-128.

[5] COLOMINAS M A, SCHLOTTHAUER G, TORRES M E. Improved complete ensemble EMD: a suitable tool-for-biomedical-signal-processing [J]. Biomedical-Signal-Processing & Control, 2014, 14(1): 19-29.

[6] 王醇涛, 陆金铭. 运用 HHT 边际谱的柴油机故障诊断 [J]. 振动、测试与诊断, 2010, 26(4): 465-468.

[7] 刘昱, 张俊红, 毕凤荣, 等. 基于 LMD 边际谱的柴油机气门故障诊断 [J]. 内燃机学报, 2014, 35(6): 96-100.

[8] 骆志高, 李旭东, 赵俊丽, 等. 利用马氏距离判别法准确实现对裂纹的识别 [J]. 振动与冲击, 2013, 32(21): 186-188.

[9] 赵国庆. 基于小波降噪与 HHT 方法的齿轮故障诊断方法 [D]. 武汉: 武汉科技大学, 2007.

[10] 褚福磊, 彭志科, 冯志鹏, 等. 机械故障诊断中的现代信号处理方法 [M]. 北京: 科学技术出版社, 2009: 159-160.

(责任编辑 陈 敏 英文审校 郑青榕)