

Fault Diagnosis and of Aero-Engine Hydraulic Pipeline Vibration Signals Based on Hilbert Huang Transforms

Tiancheng Li, Rui Zhu, Chenchen Li, Qingpeng Han*

College of Energy and Mechanical Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai
Email: *han1011@163.com

Received: Mar. 10th, 2017; accepted: Mar. 28th, 2017; published: Mar. 31st, 2017

Abstract

The objective in this paper is to present HHT method and FBG technology to analyze the aero-engine hydraulic pipeline vibration signal under fault states. Fault diagnosis and location of aero-engine hydraulic pipeline vibration signals based on HHT method and FBG method are applied through HYPERLINK electromagnetic vibration table simulating wide frequency band under clamp loosening and trip state. The results tested in aero-engine hydraulic pipe show that HHT method can clearly reflect the real vibration characteristics of hydraulic pipe under different states. This method overcomes the disadvantage of the traditional Fourier transform (FFT) which cannot obtain the instantaneous frequency of aero-engines, and provides a new idea for the non-stationary vibration information of hydraulic pipe under different states. Fault diagnosis and location of the aero-engine hydraulic pipeline are confirmed by HHT and FBG method.

Keywords

Aero-Engine Hydraulic Pipeline, FBG, Fault Diagnosis, Vibration, Hilbert-Huang Transform (HHT), Empirical Mode Decomposition (EMD)

基于HHT的航空发动机液压管路系统管路故障诊断研究

李天成, 朱 瑞, 李晨晨, 韩清鹏*

上海电力学院能源与机械工程学院, 上海
Email: *han1011@163.com

*通讯作者。

文章引用: 李天成, 朱瑞, 李晨晨, 韩清鹏. 基于 HHT 的航空发动机液压管路系统管路故障诊断研究[J]. 国际航空航天科学, 2017, 5(1): 37-44. <https://doi.org/10.12677/jast.2017.51005>

收稿日期：2017年3月10日；录用日期：2017年3月28日；发布日期：2017年3月31日

摘要

针对航空发动机液压管路系统在实际工作中由于振动过大产生的卡箍松脱故障，通过电磁振动台模拟宽频域液压管路基础激励环境，采用光纤光栅分步式监测系统，利用HHT方法可以对航空发动机液压管路系统振动信号中的突变信号进行有效的侦测。HHT分析方法能够反映航空发动机液压管路系统的故障振动响应的不同状态，由此进行航空发动机液压管路系统振动信号的检测具体实施步骤。最后结果表明，采用HHT方法与光纤光栅监测系统能够实现航空发动机液压管路故障的定位和判定。

关键词

航空发动机液压管路系统，光纤光栅，故障诊断，振动，希尔伯特黄转换，经验模态分解法

Copyright © 2017 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

航空发动机液压管路系统是飞机发动机液压系统的重要组成部分，与高压力柱塞泵、阀或活门、作动器等联接，以实现飞机的起落架、襟翼和减速板的收放等不同操控任务。航空发动机液压管路系统在机体环境振动载荷和宽频域流体强脉动冲击载荷的作用下，会产生大位移幅值的强迫振动，当机体产生的基础激励频率、或者液压泵产生的脉动频率与液压管路接近时，会产生结构共振或者流固耦合共振，直接导致管路连接和固定部位的配合面产生大的相对位移，发生与相邻管路或物体的碰撞，卡箍支撑刚度的下降或与连接接头脱离等；长时间工作在流体强脉动和基础激励条件下，特别是存在可能的结构共振时，由于高振动应力作用形成累积损伤，然后经一定循环次数导致裂纹扩展直至断裂。工程中常见的航空发动机液压管路系统振动失效主要表现为：管体碰撞、管体磨伤、管体裂纹、卡箍支撑失效、箍带断裂、橡胶老化、接头松脱、卡套裂纹、支架松动等[1] [2]。

在航空发动机液压管路系统的振动信号中蕴含着丰富的运行状态信息，通过对振动信号的分析处理，可以得到蕴含在信号中反映航空发动机液压管路系统运行状态的各种特征量[3]。不同状态下液压管路振动信号[4]具有时变特征和周期脉冲等特点，本文的研究内容包括不同工况下的航空发动机液压管路系统振动信号的检测，采用经验模态分解法(Empirical Mode Decomposition, EMD)与希尔伯特-黄变换(Hilbert-Huang Transform, HHT)方法[5] [6]，希尔伯特-黄变换理论自提出以来，已成为近几年来相关研究与应用的热门主题，其优点在于可以有效克服信号分析时存在已久的关于分析灵敏度与时间尺度的问题，可以大幅提升信号分析领域的准确性与真实性[7] [8]。

本文在此基础上，提出利用HHT方法来进行航空发动机液压管路系统发生故障的预测方法。通过在航空发动机液压管路系统的多个敏感节点上布置光纤光栅传感器，进行管路系统应变、温度等参数的机载分布式实时测量，通过实时测得的管路系统多个节点的振动或应变、温度等变化数据，再利用HHT方法分析与特征提取、故障诊断和故障预警算法，实现航空发动机液压管路系统的故障定位和判定。

2. Hilbert-Huang 变换的理论和方法

对于任意时间序列 $x(t)$ 经过 EMD 分解, 可以得到一系列 IMF (Intrinsic Mode Function) 分量[9], 其表达式如下:

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

式中, 本征模式函数 $c_1(t)$ 、 $c_2(t)$ 、 \dots 、 $c_n(t)$ 分别表示原始信号中所有频率下由高频到低频的信号成分, 余量 $r_n(t)$ 表示信号的趋势项或漂移。

在任意的某一时间序列 $x(t)$ 时, Hilbert 变换 $y(t)$ 可表示为:

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

构造解析函数

$$z(t) = x(t) + iy(t) = a(t)e^{i\theta(t)} \quad (3)$$

式中, $a(t)$ 和 $\theta(t)$ 分别称为信号 $x(t)$ 的瞬时振幅和瞬时相位, 其中:

$$a(t) = \sqrt{x^2(t) + y^2(t)} \quad (4a)$$

$$\theta(t) = \arctan \frac{y(t)}{x(t)} \quad (4b)$$

由瞬时相位可得信号的瞬时频率:

$$\omega(t) = d\theta(t)/dt \quad (5)$$

在进行 Hilbert 变换[10]之后, 各 IMF 分量可以转化为信号对应的以时间为变量的瞬时振幅和瞬时频率。由于 Hilbert 变换对局部特性要求较高, 所以应去除所分析信号在频域中的虚假成分。以时间和频率为自变量, 振幅为因变量, 就能得到 Hilbert 幅值谱 $H(\omega, t)$, 即:

$$H(\omega, t) = \operatorname{Re} \sum_{j=1}^n a_j(t) e^{i\omega_j(t)t} \quad (6)$$

Hilbert 边际谱 $h(\omega)$ 定义为:

$$h(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} H(\omega, t) dt \quad (7)$$

Hilbert 瞬时能量定义为:

$$IE(t) = \int_{\omega} H^2(\omega, t) d\omega \quad (8)$$

Hilbert 能量谱定义为:

$$ES(\omega) = \int_0^T H^2(\omega, t) dt \quad (9)$$

上述过程即为希尔伯特-黄变换(HHT), 其中边际谱提供每一个频率值所对应的总幅值, 其意义为整个时间跨度内信号在每个频率点上能量累积的分布情况。

$$x(t) = \sum_{r=1}^p a_r x(t-r) + e(t) \quad (10)$$

3. 基于光纤光栅的管路系统健康监测及故障诊断

本文中针对航空发动机液压管路系统健康监测的光纤光栅分布式测试系统主要由光纤光栅传感器、光纤光栅解调模块、信号采集控制器以及 PC 终端四部分组成。测试系统核心部件-数据采集模块采用 NI 公司生产的光纤光栅解调模块, 光纤光栅解调模块型号为 PXIe-4844。光纤光栅传感器将液压管路的振动和温度信息转化为相应的传感信号; 光纤光栅解调模块负责发出宽带光、实时扫描反射光波长以及光/电信号的转换; 数据采集机箱(PXIe-1073)通过控制总线将各模块的数字信号输入至计算机中, 实现数据的同步采集。

将两段相同材料、长度管路用管接头连接, 并通过四个卡箍固定在安装壁板上, 管路安装壁板固定在振动台台面前端, 用频率范围 30~3000 Hz、功率谱密度为 $0.0001 \text{ g}^2/\text{Hz}$ 随机激励模拟管路振动环境。

针对监测管路结构特点, 将四个点的光纤光栅传感器沿管路走向均布在管路上用以监测管路、卡箍的健康状态。根据管路测试条件要求, 将光纤光栅传感器的光栅部分直接采用高强度胶贴附在管路本体上, 并将光纤部分用普通胶布固定。在航空发动机液压管路系统健康状态监测模拟试验中, 模拟卡箍松动、管体碰撞等故障状态以验证光纤光栅传感技术在管路系统健康监测的作用和可行性。

4. HHT 用于液压管路系统故障诊断

4.1. 卡箍松脱 HHT 分析

选取航空发动机液压管路的 2 号卡箍为对象进行调整, 调整其拧紧程度以模拟卡箍失效与断裂故障。在随机基础激励环境下, 管路卡箍的两种故障工况, 分别为松动与完全脱落失效。光纤光栅传感器沿管路走向均布在管路上用以监测管路、卡箍的健康状态。图 1 即为模拟卡箍松动与卡箍脱落示意图, 在 30 s 时刻, 2 号卡箍出现松动故障; 在 80 s 左右, 2 号卡箍出现脱落故障。

在随机基础激励作用下, 模拟的卡箍松动与卡箍脱落所获得的振动信号含有多种噪声信息, 而对航空液压管路故障点位的诊断必须正确选择所要研究的频段。图 2 和图 3 为 0~120 s 内光纤光栅测量结果和加速传感器测试结果, 从图 2 和图 3 可以明显看出当卡箍松动和脱落时, 光纤光栅传感器测点 2 能够迅速监测到卡箍故障出现的位置, 而加速度传感器无法获得管体的碰撞位置。

图 4 为测点 2 处的卡箍出现故障时, 4 个不同光纤光栅测点的振动时域图, 由图 4 明显看到测点 2 处的振动特征最明显。

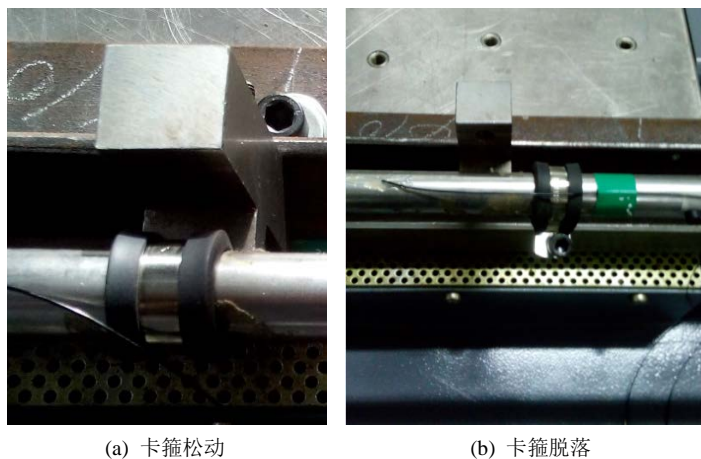


Figure 1. Simulating the fault state of clamp failure.

图 1. 模拟卡箍失效故障

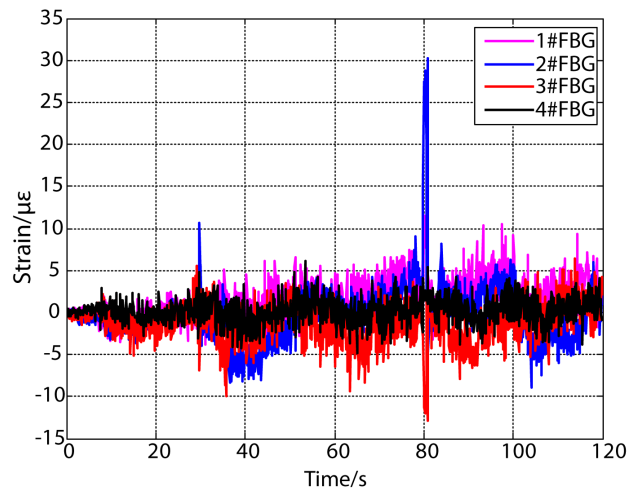


Figure 2. FBG measurement results

图 2. 光纤光栅测量结果

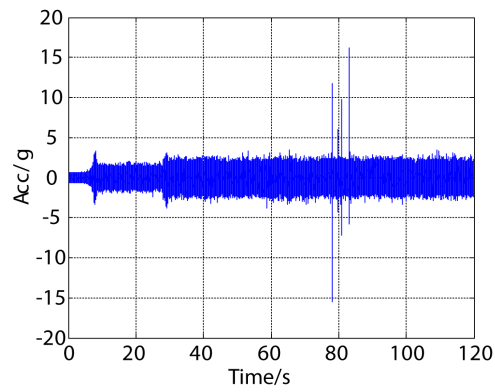


Figure 3. Acceleration sensor test results

图 3. 加速度传感器测试结果

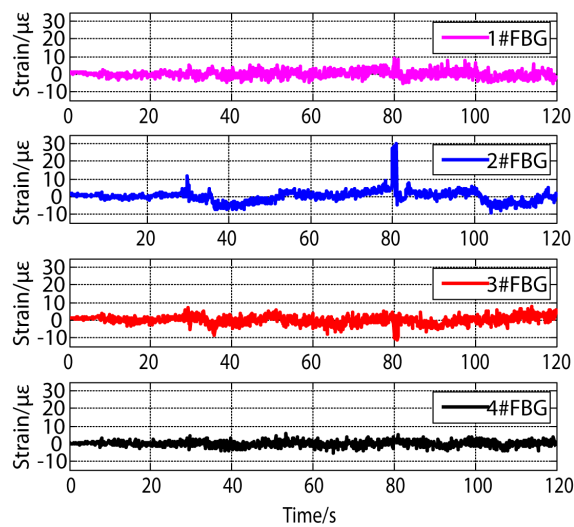


Figure 4. Four optical measuring point detection time domain when clamp 2 loose and fall off

图 4. 卡箍 2 松动与脱落时 4 个光纤测点的检测时域图

4.1.1. 卡箍松脱 EMD 分析

对于测点 2 处的卡箍出现故障时, 图 5 为测点 1, 2, 3, 4 处光纤测得的振动信号的 EMD 分解, 图 7 为振动信号的 IMF 分量频谱图。试验过程中 30 s 与 80 s 处出现故障, 即在 30 s 时刻, 2 号卡箍出现松动故障; 在 80 s 左右, 2 号卡箍出现脱落故障。从图 5、图 6 可知, 在 EMD 分析过程中, 在 30 秒处和 80 秒处可以看出有能量的变化, 且能量主要集中在 IMF1-3 层处。由于测点 2 距离卡箍距离较近, 其能量更大些。测点 4 距离卡箍松脱处较远, 测得的振动信号 EMD 分量不明显。

4.1.2. 卡箍松脱边际谱分析

根据得到的瞬时频率特征, 可以进一步得到 Hilbert 边际谱, 如图 7 所示。可知航空发动机液压管路卡箍从松脱到脱落变化过程中, 测点 2 和测点 3 距离卡箍较近, 呈现两个尖峰, 以 0.4 Hz 和 0.8 Hz 处能量最大, 在其附近也存在着一定的能量分布; 测点 2 处的应力要高于测点 3 处的应力, 测点 4 距离卡箍较远, 没有明显的边际谱应力尖峰出现。

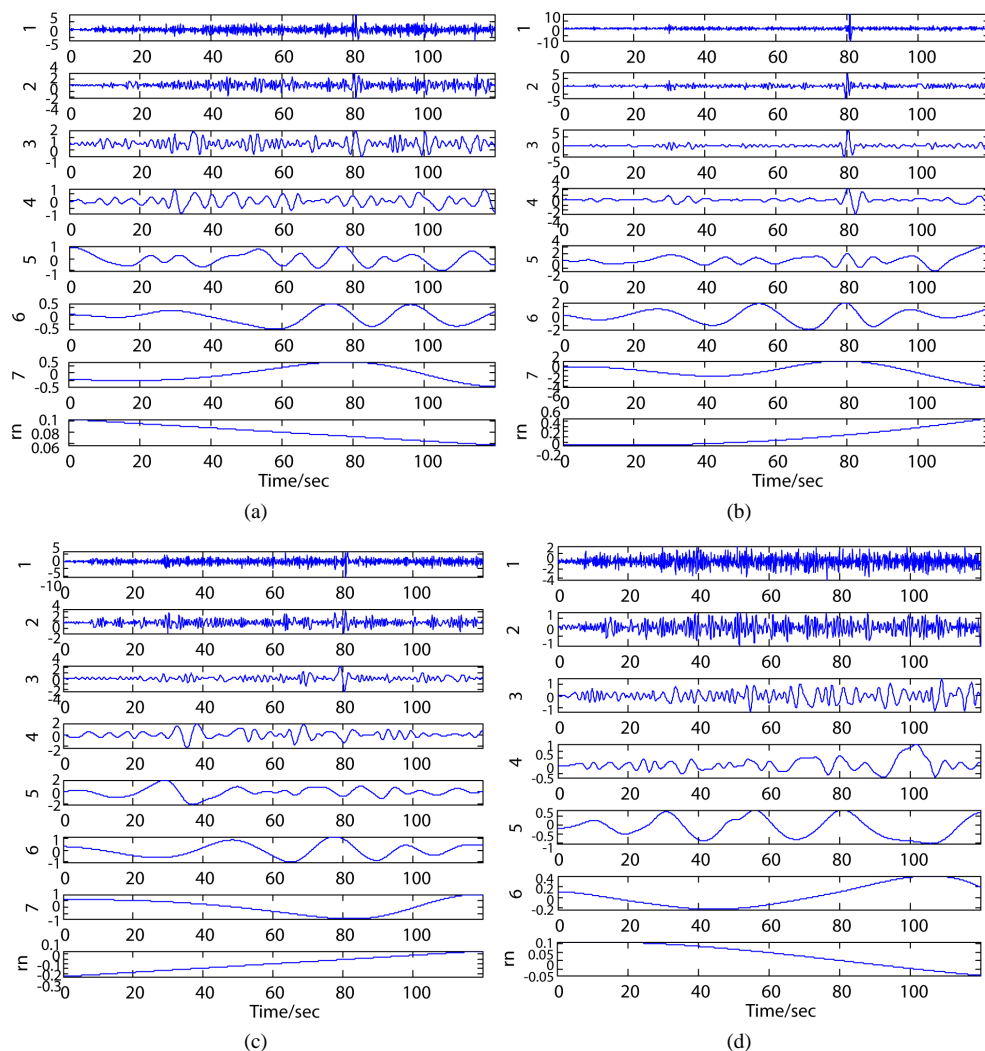


Figure 5. The EMD decomposition of vibration signal of aero-engine hydraulic pipeline clamp from loose to fall off. (a) Point 1; (b) Point 2; (c) Point 3; (d) Point 4

图 5. 航空发动机液压管路卡箍从松脱到脱落振动信号的 EMD 分解。(a) 测点 1; (b) 测点 2; (c) 测点 3; (d) 测点 4

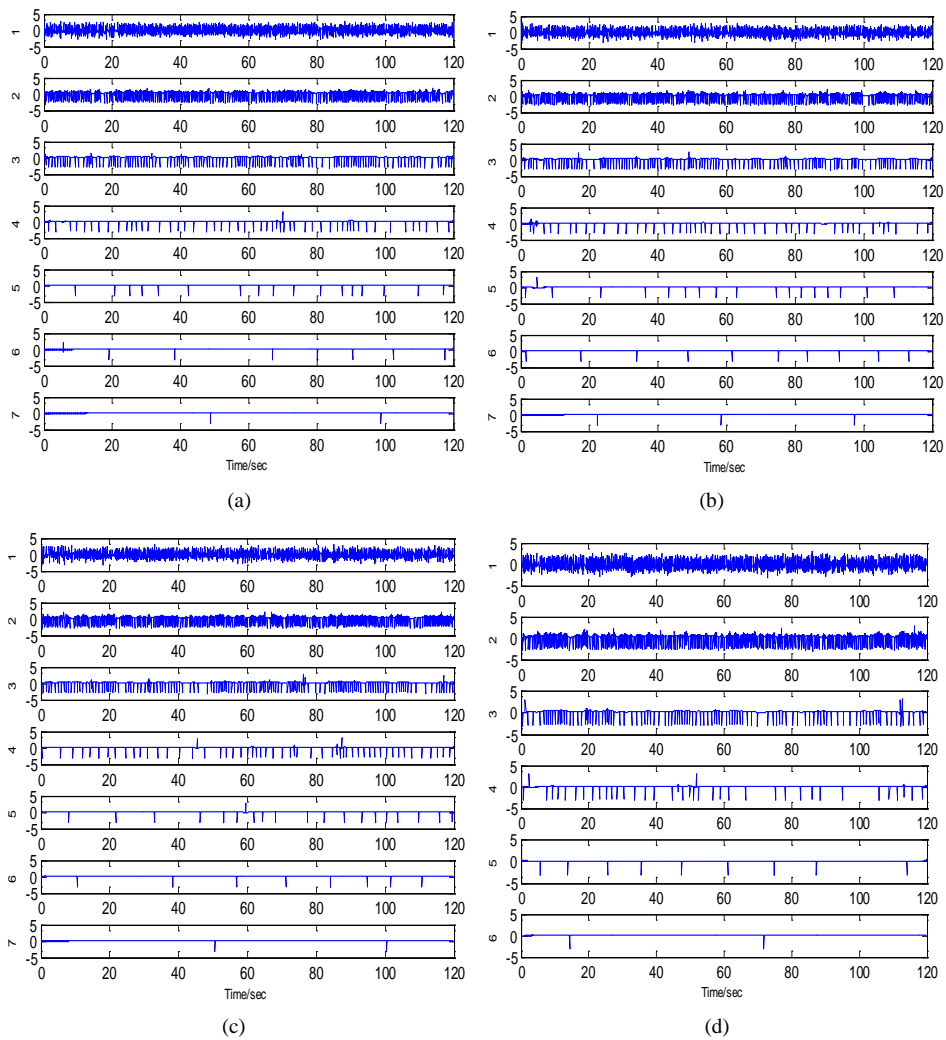
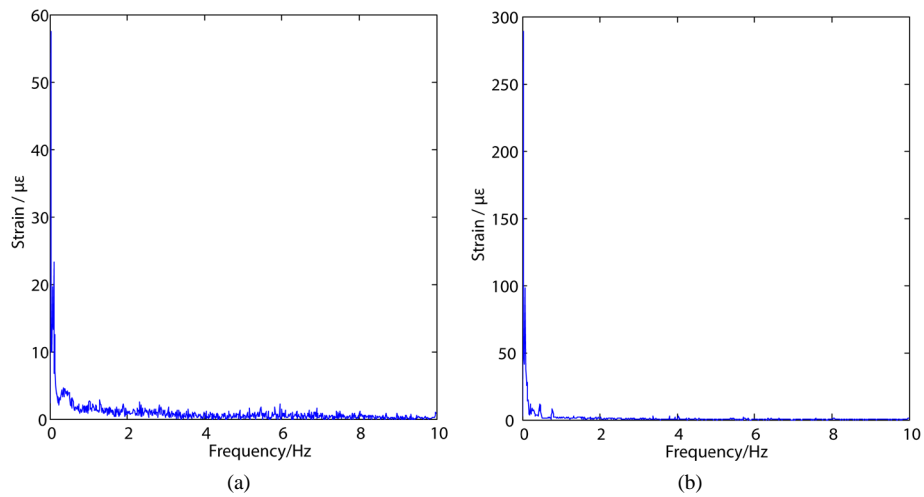


Figure 6. IMF components of the vibration signal spectrum of the Aero-Engine hydraulic pipeline clamp failure from loose to fall off. (a) Point 1; (b) Point 2; (c) Point 3; (d) Point 4

图 6. 航空发动机液压管路卡箍故障从松脱到脱落振动信号的 IMF 分量频谱图。(a) 测点 1; (b) 测点 2; (c) 测点 3; (d) 测点 4



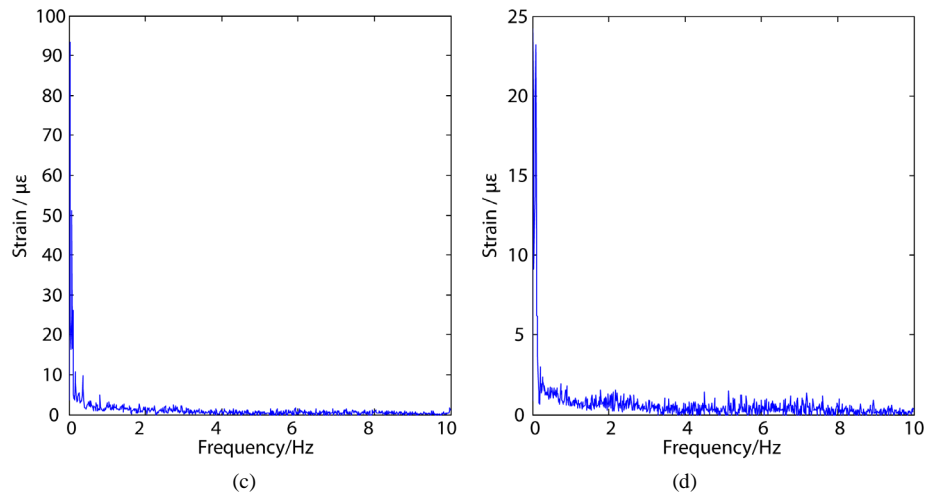


Figure 7. Hilbert marginal spectrum of the vibration signals of different measuring points of the Aero-Engine hydraulic pipeline clamps from loose to fall off (a) Point 1; (b) Point 2; (c) Point 3; (d) Point 4

图 7. 航空发动机液压管路卡箍从松动到脱落不同测点振动信号的 Hilbert 边际谱。(a) 测点 1; (b) 测点 2; (c) 测点 3; (d) 测点 4

5. 小结

本文将基于光纤光栅传感器的航空发动机液压管路振动响应的 HHT 分析方法实现监测航空发动机液压管路出现故障振动信号的检测方法。通过分析航空发动机液压管路卡箍的从松动到脱落过程的 EMD 与边际谱分析, 可以很好地完成航空发动机液压管路突变振动信号的故障诊断。

参考文献 (References)

- [1] Mao, X.Y., Ding, H. and Chen, L.Q. (2016) Steady-State Response of a Fluid-Conveying Pipe with 3:1 Internal Resonance in Supercritical Regime. *Nonlinear Dynamics*, **86**, 795-809. <https://doi.org/10.1007/s11071-016-2924-9>
- [2] 孙海东, 傅强. 航空发动机振动监测研究[J]. 机械设计与制造, 2007(2): 127-129.
- [3] Bab, S., et al. (2016) Dynamic Stability and Nonlinear Vibration Analysis of a Rotor System with Flexible/Rigid Blades. *Mechanism and Machine Theory*, **105**, 633-653.
- [4] Feng, Z.P., Liang, M. and Chu, F.L. (2013) Recent Advances in Time-Frequency Analysis Methods for Machinery Fault Diagnosis: A Review with Application Examples. *Mechanical Systems and Signal Processing*, **38**, 165-205.
- [5] Lei, Y.G., Lin, J., He, Z.J. and Zuo, M.J. (2013) A Review on Empirical Mode Decomposition in Fault Diagnosis of Rotating Machinery. *Mechanical Systems and Signal Processing*, **35**, 108-126.
- [6] Yan, J.H. and Lu, L. (2014) Improved Hilbert-Huang Transform Based Weak Signal Detection Methodology and Its Application on Incipient Fault Diagnosis and ECG Signal Analysis. *Signal Processing*, **98**, 74-87.
- [7] Zoukaneri, I. and Porsani, M.J. (2015) A Combined Wigner-Ville and Maximum Entropy Method for High-Resolution Time-Frequency Analysis of Seismic Data. *Geophysics*, **80**, O1-O11. <https://doi.org/10.1190/geo2014-0464.1>
- [8] Iatsenko, D., McClintock, P. and Stefanovska, A. (2015) Linear and Synchrosqueezed Time-Frequency Representations Revisited: Overview, Standards of Use, Resolution, Reconstruction, Concentration, and Algorithms. *Digital Signal Processing*, **42**, 1-26.
- [9] Pandya, D.H., Upadhyay, S.H. and Harsha, S.P. (2013) Fault Diagnosis of Rolling Element Bearing with Intrinsic Mode Function of Acoustic Emission Data Using APF-KNN. *Expert Systems with Applications*, **40**, 4137-4145.
- [10] Liu, L.B., et al. (2015) Applications of the Hilbert-Huang Transform for Microtremor Data Analysis Enhancement. *Journal of Earth Science*, **26**, 799-806. <https://doi.org/10.1007/s12583-015-0594-z>

期刊投稿者将享受如下服务：

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：jast@hanspub.org