

发电机组橡胶柱销联轴器异常振动噪声诊断*

温华兵, 彭子龙, 孟繁林

(江苏科技大学能源与动力工程学院 镇江, 212003)

摘要 为诊断某型柴油发电机组产生的异常噪声故障, 将经验模态分解方法(empirical mode decomposition, 简称 EMD)和 Hilbert 变换用于发电机主轴承的非平稳振动信号处理, 有效提取了主轴承振动信号的时频特征, 对机组振动噪声信号、发电机主轴承振动和轴系扭振信号进行了分析。诊断结果表明, 由于柴油机激励下机组轴系扭振幅值过大, 引起柱销联轴器橡胶件表面的相对运动, 产生干摩擦作用力, 导致机组轴系产生间歇性的异常振动噪声。该方法对旋转轴系部件摩擦引起的振动噪声故障诊断具有参考价值。

关键词 振动噪声; 经验模态分解; Hilbert 变换; 时频特征; 诊断

中图分类号 U664.22; TH117.1

引 言

内燃机中蕴含着多种型式的摩擦副部件与系统, 其摩擦学行为既影响内燃机的工作性能与运行效率, 又对动力性、经济性、排放及稳定性和使用寿命有着举足轻重的影响^[1]。古典摩擦理论认为: 摩擦因数取决于材料性质。现代摩擦学认为摩擦因数与滑动速度、载荷大小和温度等有关。文献^[2]根据古典摩擦理论和机械-分子摩擦理论开展柴油机拉缸故障的扭振诊断技术探索。由于摩擦引起的振动特征难以有效提取, 文献^[3]采用小波分析对柴油机滑动主轴承接触摩擦进行故障诊断。文献^[4]提出利用连续小波变换时频图像处理技术提取摩擦振动特征参数的方法。

Hilbert-Huang 变换^[5-8]是一种非线性非平稳信号处理方法, 是对以傅里叶变换为基础的对线性和稳态谱分析的一个重大突破, 可以提供清晰的局部时频特征, 适合对非线性非平稳信号进行分析。文献^[9]针对螺旋桨梢涡空泡所引起的尾部振动具有脉动性波动的非平稳特点, 提出将 Hilbert-Huang 变换用于船舶尾部振动信号处理。笔者将 Hilbert-Huang 变换用于船用发电机组振动响应信号处理, 有效提取了发电机组橡胶柱销联轴器内部摩擦产生的非平稳振动信号时频特征, 诊断发电机组产生的间歇性异常振动噪声。

1 发电机组异常振动噪声诊断

1.1 发电机组振动噪声

某船用柴油发电机组额定转速为 750 r/min, 怠速为 400 r/min, 额定功率为 610 kW, 柴油机为 4 冲程 5 缸机。柴油机和发电机刚性安装在公共底座上, 公共底座采用 8 个隔振器弹性安装, 垂向固有频率为 8.5 Hz。为补偿轴系的不对中, 柴油机飞轮与发电机惯性块采用 4 个橡胶弹性柱销联轴器连接, 如图 1 所示。销轴的一端与发电机惯性块过盈配合刚性连接, 销轴的另一端通过橡胶件与柴油机飞轮弹性连接。机组在试车台架运行时, 在 400~600 r/min 转速范围内, 机组发出有节奏的高频异常噪声, 疑似旋转部件碰撞产生的摩擦噪声。转速在 700 r/min 以上时, 异常噪声消失。现场测试表明, 柴油机机体的结构振动正常, 机组隔振系统的振动隔离效果良好。初步分析认为, 异常噪声是由发电机风扇叶片的碰擦或叶片旋转不稳定气流产生的。由于柴油发电机组的噪声源众多、频谱特性复杂, 现场难以辨识异常噪声的准确来源, 需要对机组开展异常振动噪声的故障诊断。

机组振动噪声测试仪器为丹麦 B&K 振动噪声测试分析系统。测试工况为: 发电机不加负荷, 柴油机转速为 400~820 r/min 时进行振动噪声测试。

* 江苏省自然科学基金资助项目(BK2012278)
收稿日期: 2013-04-27; 修回日期: 2013-08-05

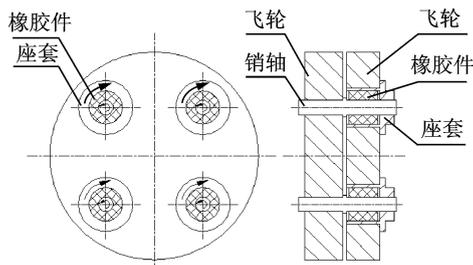


图 1 柱销联轴器示意图

Fig. 1 Schematic diagram of pin coupling

测点布置为：在靠近柴油机端的发电机主轴承布置一个加速度传感器，测试轴承垂向振动加速度；在柱销弹性联轴器端面 0.1 m 处布置一个传声器；发电机风机出口 0.1 m 处布置一个传声器，测试发电机风机出口处噪声；在柴油机自由端位置布置 1 个扭转传感器，测试机组轴系扭振特性。

图 2 为机组在不同转速下发电机主轴承振动加速度级(基准值为 1.0)。在 400~550 r/min 转速范围内，发电机主轴承振动加速度与机组的转速有密切关系，随着转速的上升而增加。在 460 r/min 时加速度级达到最大值 38.4 dB(加速度为 8.5g)，超出了轴承振动的允许范围，然后随着转速的上升而下降。图 3 为机组在不同转速下高弹端面和风机出口 0.1 m 处的声压级。可见，高弹端面和风机出口的总声压级与机组转速的关系不大，高弹端面距离 0.1 m 处的声压级接近 110 dB(A)，而风机出口距离 0.1 m 处的声压级在 100 dB(A)左右。分析认为，高弹端面测点靠近柴油机，由于柴油机的噪声远高于发电机噪声，因而高弹端面测点的噪声比风机出口噪声大。柴油机的噪声源包括燃烧噪声、机械噪声和气流噪声等，噪声源众多，幅值大，频率特性复杂。尽管机组在 400~550 r/min 转速范围内能明显听到有节奏的高频异常噪声存在，但这种异常噪声对总声压级的贡献并不大。图 4 为柴油机分别在 480 r/min 和 800 r/min 工况时高弹端面的声压级频谱图对比。图中没有出现与电机内部风机叶频

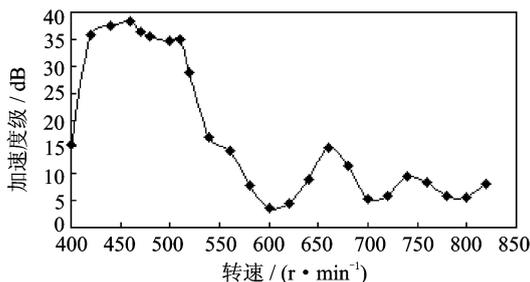


图 2 发电机主轴承振动加速度级

Fig. 2 Vibration acceleration level of generator main bearing

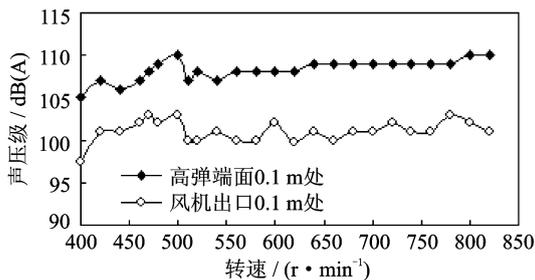


图 3 高弹端面和风机出口位置的声压级

Fig. 3 Sound pressure levels of high-elastic coupling face and fan outlet

相关的特征频率成分，可以排除异常噪声产生于发电机风机的空气动力性噪声。

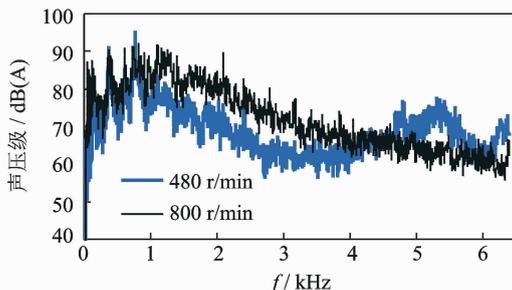


图 4 高弹端面位置的声压级频谱图

Fig. 4 Sound pressure levels of high-elastic coupling face

1.2 发电机主轴承振动信号

图 5,6 为机组转速在 480 r/min 和 800 r/min 时，发电机主轴承振动加速度的波形和快速傅里叶变换 (fast Fourier transform, 简称 FFT) 频谱图。机组转速为 480 r/min 时，发电机主轴承振动波形具有非线性、非平稳特征。FFT 频谱图中峰值主要集中在 6~7 kHz 频率范围内。在 0.25 s 内，约有 10 次高频脉动“冲击”，每次脉动“冲击”的幅值变化很大，最大值为 480 m/s²。机组转速在 800 r/min 时，发电机主轴承振动的波形平稳，频谱图中包含了多个柴油机和发电机稳态激励引起的简谐振动，加速度级最大值较小，属于正常现象。

1.3 发电机主轴承振动时频特征

机组转速为 480 r/min 时，发电机主轴承振动加速度信号为 Hilbert-Huang 变换，得到的时频图如图 7 所示。图 7 中部的三维谱图为振动加速度的 Hilbert 谱等高线图(功率谱为表征量)，谱图颜色深浅为信号功率谱幅值的大小。中间的 Hilbert 谱图在时间刻度上可以观察到 10 次幅值不同的脉动“冲击”波动信号，“冲击”的时间间隔大致为 0.025 s，出

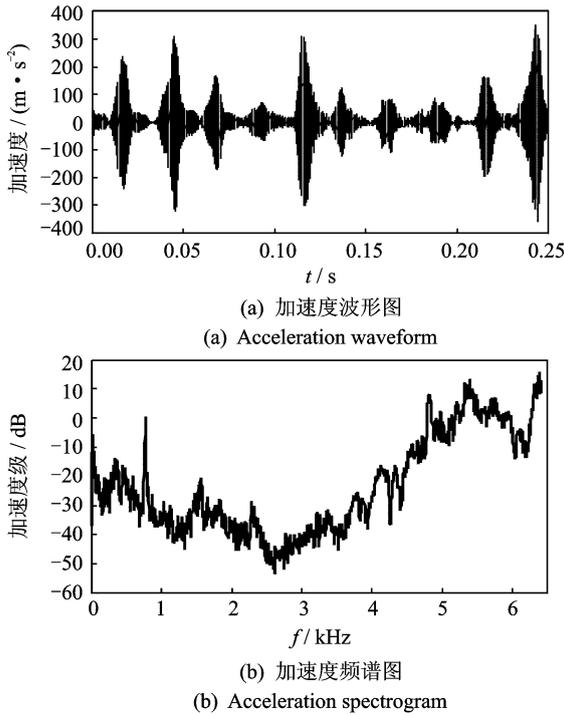


图 5 发电机转速为 480 r/min 时主轴承振动加速度波形与频谱图

Fig. 5 Vibration acceleration waveform and spectrogram of generator main bearing at speed of 480 r/min

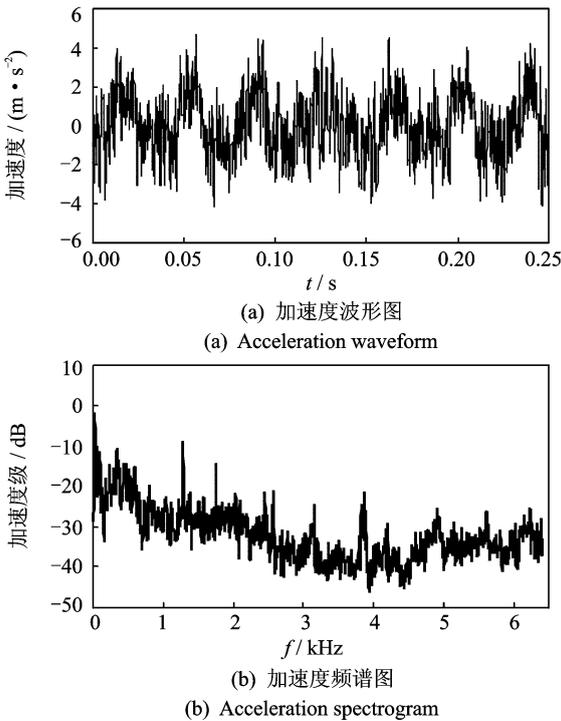


图 6 发电机转速为 800 r/min 时主轴承振动加速度波形与频谱图

Fig. 6 Vibration acceleration waveform and spectrogram of generator main bearing at speed of 800 r/min

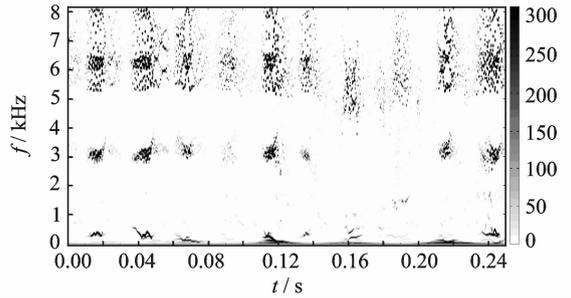


图 7 转速为 480 r/min 时发电机主轴承振动加速度 Hilbert 谱

Fig. 7 Vibration acceleration Hilbert spectrogram of generator main bearing at speed of 480 r/min

现频率为 40 Hz,相当于轴系 5 阶次振动。在频率刻度上,振动能量包括 400 Hz 以内的低频分量以及 2.5~3.5 kHz 和 5~8 kHz 的高频宽带分量。与图 5 中的时域波形和 FFT 频谱图相比,Hilbert 谱图能突出表现信号的局部频率特征和时变特性,是处理非线性非平稳信号的有效途径。

Hilbert-Huang 变换的中高频瞬时频率与 FFT 功率谱分析结果一致,并得到了 FFT 分析中无法清晰分辨的若干个低频瞬时频率,克服了在信号处理过程中遇到的 FFT 混叠、泄漏和频谱分辨率不高等可能出现的问题。可见,对于含有非稳态的振动响应信号处理,Hilbert-Huang 变换的分辨率更高,能够更好地提取信号的局部特征和时变特性。

当机组转速为 800 r/min 时,发电机主轴承振动加速度信号作 Hilbert-Huang 变换得到的时频图如图 8 所示。在时间刻度上,不同时刻的振动加速度波形平稳;在频率刻度上,包含了多个 200 Hz 以下的低频成分,是柴油机正常工作时往复惯性和气体力激励所引起的低频简谐振动。

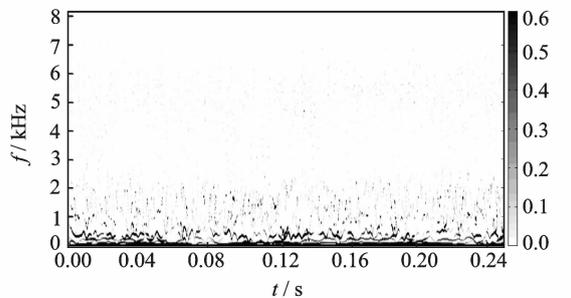


图 8 转速为 800 r/min 时发电机主轴承振动加速度 Hilbert 谱

Fig. 8 Vibration acceleration Hilbert spectrogram of generator main bearing at speed of 800 r/min

1.4 发电机组轴系扭振信号

在对机组轴系扭振转速跟踪测试时,发现空载时轴系 2.5 谐次(主谐次)的扭振振幅较大,柴油机自由端达到 0.015 rad,峰值出现在 465 r/min(如图 9 所示),可推算出机组轴系扭振的共振转速为 1 170 r/min。第 1 阶固有频率计算结果为 1 176 r/min,两者误差为 0.5%。由于该型号柴油机的自由端没有安装阻尼减振器,而轴系转子自身的结构阻尼很小,导致图 9 中轴系扭振的共振波峰较尖,扭振幅值较大。在轴系扭振测试时的主观感受表明,在调节机组转速时,机组的异常噪声伴随着轴系扭振幅值的升高而增大,随着扭振幅值的下降而减弱。机组异常噪声主要出现在 410~600 r/min 转速范围内,该转速范围恰好是轴系扭振的共振转速区间且扭振幅值较大。分析认为,机组异常噪声的来源与轴系扭振有关。其原因是在轴系扭振共振转速下,轴系扭振角过大,导致轴系运行转速的波动,引起联轴器中橡胶柱塞安装面与惯性飞轮之间产生相对挤压、滑动与干摩擦,从而导致间歇性非平稳振动,产生辐射噪声。

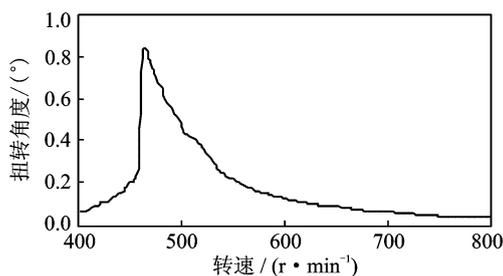


图 9 机组轴系自由端的扭转角振幅

Fig. 9 Torsional vibration angle amplitude of diesel generating set shaft system free end

2 柱销联轴器表面摩擦故障机理

当动静部件摩擦或者运动部件相对运动产生摩擦时,转轴表面将会受到摩擦力的冲击作用,产生非连续、非稳态冲击力。在摩擦力的冲击作用下,还有可能激发转子自由振动响应^[10]。严重摩擦状态下,力冲击效应产生的振动频谱很丰富,振动信号包含大量的低频和高频成分。高速旋转的转轴表面线速度高,摩擦时会产生高温。摩擦不均匀还会导致转子表面温度分布不均匀,引起转子热变形,产生摩擦故障引起的热冲击效应。当橡胶柱塞内、外表面一侧产生摩擦时,摩擦冲击力的特征频率为激励频率

的 1 倍;当橡胶柱塞内、外表面同时产生摩擦时,摩擦冲击力的特征频率为激励频率的 2 倍。

通过对机组振动噪声信号、发电机主轴承振动信号和轴系扭振信号的分析表明,在轴系 2.5 谐次扭振共振转速下,扭振角过大,导致轴系旋转转速的波动,引起联轴器中橡胶柱塞与惯性飞轮安装面之间产生相对挤压、滑动与干摩擦。该轴系产生摩擦冲击力的激励频率为 2.5 谐次,摩擦冲击力发生次数的特征频率为 5 阶(2.5 谐次 \times 2 倍),说明橡胶柱塞内、外表面同时产生了摩擦现象。每次摩擦冲击力的大小不均匀,引起的振动包括 400 Hz 以内的低频分量以及 2.5~3.5 kHz,5~8 kHz 频率范围内的高频宽带分量,这些低频分量和高频宽带分量在时间上不连续,随着摩擦冲击力的消失而消失,振动能量主要集中在高频。

机组在试车台架运行不到 100 h,停车拆开联轴器检查时发现,橡胶柱塞件表面颜色变深、发黑,可能是由于橡胶柱塞件受到了热冲击的影响。为了验证异常噪声诊断结果的正确性,采用提高联轴器橡胶柱塞硬度的方法增加联轴器的扭转刚度,提高发电机组轴系扭振第 1 阶固有频率。实验表明,发电机组在更高转速范围仍然出现异常噪声现象。将联轴器中橡胶柱塞替换为钢构件时,由于轴系扭振的共振转速提高到 2 926 r/min,避开了机组 2.5 主谐次扰动力的共振,在机组正常转速范围内异常噪声现象消失。

3 结束语

Hilbert-Huang 变换可有效处理非线性非平稳信号,提取由于构件表面干摩擦引起的轴承振动信号时频特征,从而诊断构件表面干摩擦引起的振动噪声故障。

柴油机动力装置轴系扭振在共振转速下过大的振幅,可能导致联轴器中橡胶柱销件表面与钢构件之间的滑动与摩擦,产生间歇性摩擦冲击力,引起高频振动噪声。通过避开轴系扭振的共振转速或控制扭振幅值,可以避免这类振动噪声故障。

参 考 文 献

- [1] 尹必峰. 内燃机关键摩擦副表面微织构润滑与摩擦机理及应用研究[D]. 镇江:江苏大学,2011.
- [2] 李玩幽,蔡振雄,刘妍. 柴油机拉缸故障的扭振诊断技

术探索[J]. 船舶工程,2003,25(5):19-23.

Li Wanyou, Cai Zhenxiong, Liu Yan. Research on diagnosis method for diesel cylinder score using torsion vibration signal[J]. Ship Engineering, 2003, 25(5): 19-23. (in Chinese)

[3] 秦萍,阎兵,李辉. 小波分析在柴油机滑动主轴承接触摩擦故障诊断中的应用[J]. 内燃机工程,2003(3):56-60.

Qin Ping, Yan Bing, Li Hui. The application of wavelet analysis in the fault diagnosis for the plain bearing's contact friction of diesel engine[J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2003(3): 56-60. (in Chinese)

[4] 黄朝明,于洪亮,关德林,等. 摩擦振动时频图像特征提取[J]. 振动与冲击,2012,312(7):46-49.

Huang Chaoming, Yu Hongliang, Guan Delin, et al. Feature extraction of frictional vibration based on time-frequency image[J]. Journal of Vibration and Shock, 2012, 312(7):46-49. (in Chinese)

[5] Huang N E, Zheng S, Long S R. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis [J]. Proceeding of Royal Society London, 1998, A454:903-995.

[6] Datig M, Schlurmann T. Performance and limitations of the Hilbert-Huang transformation (HHT) with an application to irregular water waves[J]. Ocean Engineering, 2004(31):1783-1834.

[7] 熊妍,杨世锡,甘春标. 运用 BF-HHT 的转子径向碰摩故障特征提取方法[J]. 振动、测试与诊断, 2012(2):

192-196.

Xiong Xin, Yang Shixi, Gan Chunbiao. Fault feature extraction method for rotor system under radial impact based on BF-HHT[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2012(2): 192-196. (in Chinese)

[8] 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(4):465-469.

Wang Chuntao, Lu Jinming. Fault diagnosis of diesel engine based on HHT marginal spectrum [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2010(4): 465-469. (in Chinese)

[9] 温华兵,鲍苏宁. 船舶螺旋桨空泡激励振动信号时频特征分析[J]. 武汉理工大学学报,2010(9): 348-352.

Wen Huabing, Bao Suning. Research on time-frequency characteristic of vibration signals excited by the propeller vortex cavitations[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2010(9): 348-352. (in Chinese)

[10] 杨建刚. 旋转机械振动分析与工程应用[M]. 北京:中国电力出版社,2007:76-77.



第一作者简介:温华兵,男,1977 年 6 月生,副教授。主要研究方向为振动噪声控制。曾发表《基于小波变换的水下爆炸压力时频特征分析》(《振动、测试与诊断》2008 年第 28 卷第 2 期)等论文。
E-mail:wen-huabing@163.com



欢迎订阅《振动、测试与诊断》

《振动、测试与诊断》由工业和信息化部主管,南京航空航天大学 and 全国高校机械工程测试技术研究会联合主办,是反映振动、动态测试及故障诊断学科领域的科研成果及其应用情况的技术性刊物。主要刊登国内外以振动测试与故障诊断为中心的动态测试理论、方法和手段的研究及应用方面的技术文献,包括实验测试技术、测试仪器的研制、方法和系统组成、信号分析、数据处理、参数识别与故障诊断以及有关装置的设计、使用、控制、标定和校准等,不拘泥于行业和测试项目。

本刊为 EI Compendex 数据库收录期刊和中文核心期刊,双月刊,每逢双月末出版,每本定价 20 元,全年 120 元。欢迎订阅和投稿,欢迎在本刊刊登各类广告和科技信息。

编辑部地址:南京市御道街 29 号 邮政编码:210016 电话:(025)84893332
传真:(025)84893332 E-mail:qchen@nuaa.edu.cn 网址:http://zdc.nuaa.edu.cn