

基于 MEEMD-AIC 的簇绒地毯织机噪声源识别方法*

徐 洋, 张晓蕾, 盛晓伟, 赵锦艳, 孙志军

(东华大学机械工程学院 上海, 201620)

摘要 簇绒地毯织机噪声信号由多个噪声源信号混叠而成,为实现簇绒地毯织机噪声源识别,提出了一种基于改进集总平均经验模态分解(modified ensemble empirical mode decomposition,简称 MEEMD)和赤池信息量准则(Akaike information criterion,简称 AIC)的噪声源识别方法。首先,利用 MEEMD 将测得的噪声信号分解为有限个本征模态函数(intrinsic mode function,简称 IMF)分量;其次,对分量矩阵的协方差矩阵进行奇异值分解(singular value decomposition,简称 SVD),得到矩阵特征值;然后,利用 AIC 准则估计有效分量的个数,同时结合能量特征指标和皮尔逊相关系数法筛选出有效分量;最后,对筛选出的有效分量逐一进行时频分析,实现簇绒地毯织机噪声源识别。结果表明,耦联轴系中钩轴振动是簇绒地毯织机最主要的噪声源,该方法适用于簇绒地毯织机噪声源识别,对实现簇绒地毯织机主动降噪提供了理论支持。

关键词 改进集总平均经验模态分解;赤池信息量准则;簇绒地毯织机;噪声源识别

中图分类号 TN911; TH17; TS103

引 言

2013 年,我国新修订的 GB/T 50087—2013《工业企业噪声控制设计规范》^[1]中规定,生产车间噪声限值为 85dB。经调研知,目前纺织车间的噪声一般均在 85 dB 以上。长年暴露在此环境下,纺织工人的身心健康会受到严重伤害。纺织企业降噪措施主要分为声源控制、噪声传播控制、个体防护和管理制度 4 种^[2],其中最根本的方法就是声源控制。因此,对簇绒地毯织机主要噪声源进行定位识别,对实现簇绒地毯织机的主动降噪具有重要意义。

簇绒地毯织机结构复杂,其噪声主要由主轴及连杆机构传动噪声、针刺基布噪声及电子罗拉转动噪声等叠加而成。传统的时频分析方法受 Heisenberg 测不准原理限制,无法对信号中包含的多个噪声源信息进行有效识别。经验模态分解(empirical mode decomposition,简称 EMD)^[3]算法能克服该缺陷,不受 Heisenberg 测不准原理约束,具有自适应性,能将混合信号分解为有限个具有不同物理意义的 IMF 分量^[4]。笔者采用郑旭等^[5]提出的 MEEMD 算法,能够解决 EMD 的模态混叠问题和集总平均经验模态分解(ensemble empirical mode decomposition,简称 EEMD)^[6]的模态分裂问题。

但是由于 MEEMD 算法中人为地添加了白噪声,使得分解得到的所有 IMF 分量中既包含有效分量,也包含一部分虚假分量^[7],降低了主要噪声源识别的准确性。

笔者结合 MEEMD 算法,将得到的各 IMF 分量视为新的观测信号,基于 AIC 准则^[8]进行源数估计,得到信号分解后有效分量的个数,筛选出有效分量,最后再对得到的有效 IMF 分量进行时频分析,识别出主要噪声源,提高噪声源识别的准确性。

1 MEEMD-AIC 算法

MEEMD-AIC 方法的核心是 MEEMD 算法与 AIC 准则,MEEMD-AIC 算法流程图如图 1 所示,具体步骤如下。

1) 将单通道观测信号 $x(t)$ 进行 MEEMD 分解,得到有限个(m 个)IMF 分量。

利用 EMD 在白噪声背景下的二进滤波器作用^[9],在待分解信号 $x(t)$ 中加入绝对值相等的正负两组白噪声信号 $n(t)$,使信号的时间尺度连续,再分别对其进行集总平均次数相等的 EEMD 分解

$$x(t) + n(t) \xrightarrow{\text{EEMD}} c_{\pm}(t) \quad (1)$$

* 国家自然科学基金资助项目(51675094);中央高校基金重点资助项目(2232017A3-04)

收稿日期:2017-04-20;修回日期:2017-06-27

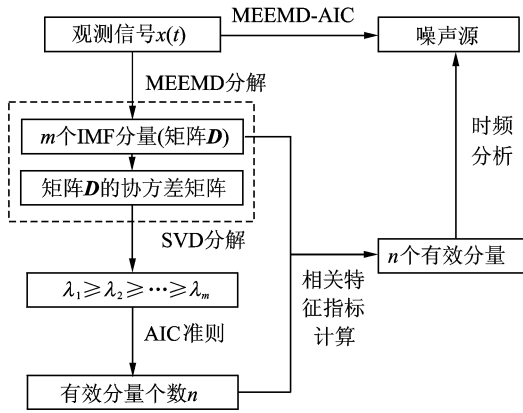


图 1 MEEMD-AIC 算法流程图

Fig. 1 Flow chart of the MEEMD-AIC algorithm

$$x(t) - n(t) \xrightarrow{\text{EEMD}} c_{i-}(t) \quad (2)$$

其中: $c_{i+}(t)$ 和 $c_{i-}(t)$ ($i=1,2,\dots,m$) 分别代表加入正负两组白噪声信号后经过 EEMD 分解得到的两组结果。

对分解得到的两组结果中的对应分量做平均, 可以在最大程度上消除白噪声残余

$$c_i(t) = 0.5(c_{i+}(t) + c_{i-}(t)) \quad (3)$$

由于 $c_i(t)$ 不一定为标准的 IMF 分量, 且可能存在着模态分裂现象, 因此需要再对这组分量进行 EMD 分解

$$c_1(t) \xrightarrow{\text{EMD}} d_1(t) + q_1(t) \quad (4)$$

$$h_k(t) = [q_{k-1}(t) + c_k(t)] \xrightarrow{\text{EMD}} d_k(t) + q_k(t) \quad (5)$$

其中: $d_1(t)$ 为 $c_1(t)$ 经过 EMD 分解得到的第 1 个 IMF 分量; $q_1(t)$ 为剩余分量的叠加; $h_k(t)$ 由残余分量 $q_{k-1}(t)$ 和分量 $c_k(t)$ 组成; $d_k(t)$ 表示由 $h_k(t)$ 分解得到的第 k 个 IMF 分量; $q_k(t)$ 为相应的残余分量, 其中 $k=2,3,\dots,m$ 。

最终的 MEEMD 可以表示为

$$x(t) \xrightarrow{\text{MEEMD}} \sum_{l=1}^m [d_l(t)] + r(t) \quad (6)$$

其中: $d_l(t)$ 为最终得到的 IMF 分量, $l=1,2,\dots,m$; $r(t)$ 为最终的残余分量。

2) 信号经过 MEEMD 分解后, 得到 IMF 分量矩阵 $D=[d_1(t), d_2(t), \dots, d_m(t)]$ 。对矩阵 D 的协方差矩阵进行 SVD 分解, 即可得到 IMF 分量对应的 m 个特征值 $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_m$ 。

3) 基于赤池信息量准则, 通过最小化目标函数 AIC, 即可完成有效 IMF 分量数的估计。AIC 计算公式如下

$$\text{AIC}(k) = -2N(m-k) \lg \left[\frac{\prod_{i=k+1}^m \lambda_i^{\frac{1}{m-k}}}{\frac{1}{m-k} \sum_{i=k+1}^m \lambda_i} \right] + 2k(2m-k) \quad (7)$$

其中: N 为样本数; $k=1,2,\dots,m-1$ 。

簇绒地毯织机观测信号的噪声背景不是白噪声, 为有色噪声。然而基于 AIC 准则的方法在色噪声背景下准确估计信源数的准确性较差。为解决这一问题, 文献[10]通过对协方差矩阵对角加载来平滑噪声特征值, 使得改进后的方法能够应用于色噪声背景下。校正后的特征值 $\mu_i = \lambda_i + \lambda_{DL}, i=1,2,\dots,m$, 式中加载量 $\lambda_{DL} = \sqrt{\sum_{i=1}^m \lambda_i}$ 。特征值校正后

$$\text{AIC}(k) = -2N(m-k) \lg \left[\frac{\prod_{i=k+1}^m \mu_i^{\frac{1}{m-k}}}{\frac{1}{m-k} \sum_{i=k+1}^m \mu_i} \right] + 2k(2m-k) \quad (8)$$

计算 k 从 1 到 $m-1$ 的 AIC 值, 最小的 AIC 值对应的 k 即为有效分量的个数 n 。

4) 结合能量特征指标和皮尔逊相关系数法^[7], 分别计算各阶 IMF 分量的总能量以及各阶 IMF 分量与原始信号的相关系数, 对信号分解后得到的所有 IMF 分量重新排序, 从而找出相关特征指标最大的 n 个有效分量。

5) 对 n 个有效分量依次进行时频分析, 完成噪声源识别。

2 MEEMD-AIC 算法的应用

2.1 噪声信号采集及预处理

实验对象为 4 m 幅簇绒地毯织机, 簇绒机主轴转速为 350 r/min。依照 GB/T 7111.6—2002《纺织机械噪声测试规范 第 6 部分: 织造机械》^[11] 的规定, 测点距机器表面 1 m, 距工作台高度 1.6 m。实验采用 BK4961 声传感器, 结合 DH5922 动态信号测试分析系统和 DHDAS 动态信号采集分析系统采集工人耳旁噪声信号。采样频率设置为 51 200 Hz, 采样时间为 10 s, 共进行 6 次实验, 实验现场布置如图 2 所示。

初步分析采集到的工人耳旁噪声信号, 正常工作状态下, 该信号整体特征不变, 笔者选择第 1 次采集的信号中较为典型的 5~6 s 内的数据作为分析对象, 以提高计算效率。信号波形图、信号经过快速

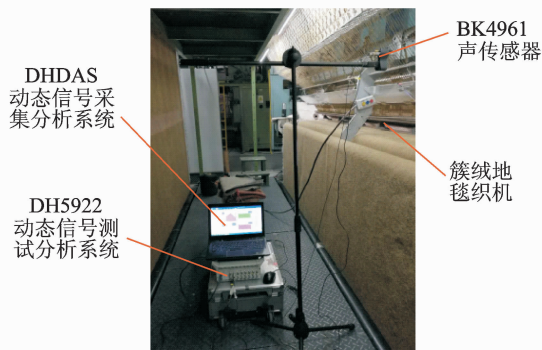
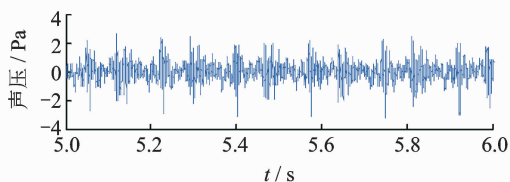


图 2 现场布置图

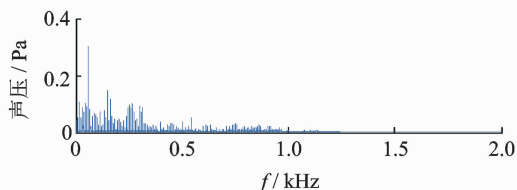
Fig. 2 Experimental arrangement

傅里叶变换后得到的频谱图以及信号经过短时傅里叶变换得到的时频图如图 3 所示。

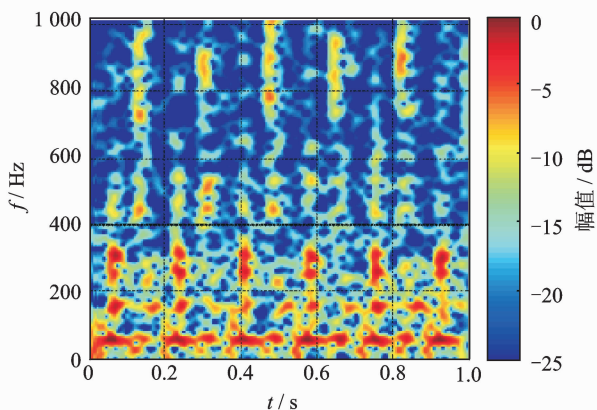
由图 3(a)可以看出,信号周期冲击特征明显;图 3(b)显示测得的噪声信号主要在 1 000 Hz 以下;由图 3(c)可明显可以看出,噪声信号噪声源不止一



(a) 信号波形图
(a) Waveforms of the signal



(b) 信号频谱图
(b) Spectrum of the signal



(c) 信号时频图
(c) Time-frequency of the signal

图 3 噪声信号预处理图形

Fig. 3 Figures for the pretreatment of the noise signal

个,且主要噪声均为 350Hz 以下的低频噪声信号。

2.2 信号的 MEEMD-AIC 分解

MEEMD-AIC 算法包括以下几个阶段。

1) 对采集到的工人耳旁噪声信号进行 MEEMD 分解,添加的白噪声的均方根值为噪声信号的 0.2 倍,两次 EEMD 分解各集总平均 200 次,得到 10 阶 IMF 分量,分解结果如图 4 所示。

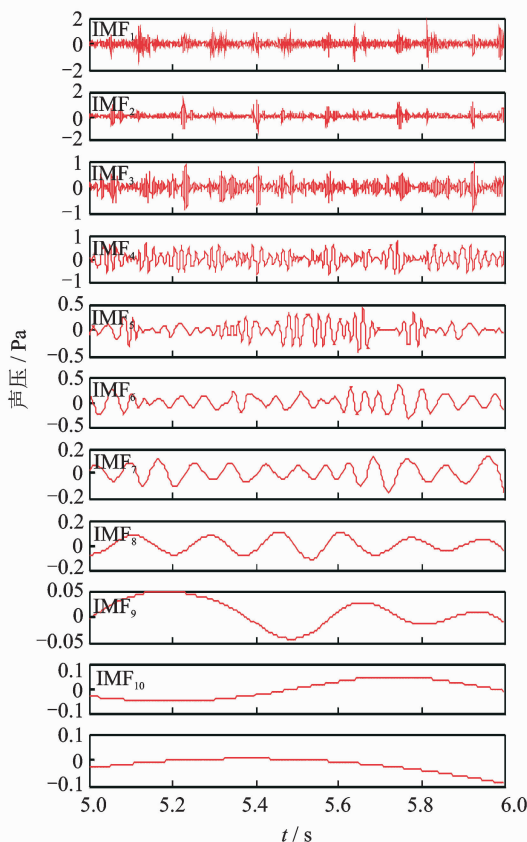


图 4 MEEMD 分解结果

Fig. 4 Results of MEEMD decomposition

2) 计算 k 从 1 到 9 的 AIC 值,结果如图 5 所示。最小的 AIC 值对应的 $k=4$,所以有效分量的数目估计值为 4。

为了确定 MEEMD 分解得到的所有 IMF 分量

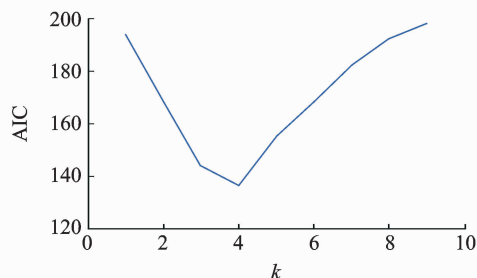


图 5 AIC 值计算结果

Fig. 5 The calculation results of AIC

中的 4 个有效分量,笔者结合能量特征评价指标和皮尔逊相关系数法,分别计算各阶 IMF 分量的总能量以及各阶 IMF 分量与原始信号的相关系数,计算结果如表 1 所示。

由表 1 可知,IMF₁~IMF₄ 分量的总能量和相关系数均较大,为有效分量;而 IMF₅~IMF₁₀ 的总能量和相关系数很小,为虚假分量。

表 1 所有 IMF 分量计算结果

Tab. 1 Calculation results of all the IMF components

分量	总能量/Pa ²	相关系数	分量	总能量/Pa ²	相关系数
IMF ₁	146.4	0.491	IMF ₆	35.5	0.202
IMF ₂	134.6	0.508	IMF ₇	8.4	0.112
IMF ₃	97.5	0.409	IMF ₈	6.7	0.063
IMF ₄	158.4	0.483	IMF ₉	1.5	0.013
IMF ₅	37.3	0.234	IMF ₁₀	2.7	0.006

3 簇绒地毯织机噪声源识别

簇绒地毯织机主要由进布部件、出毯部件、平圈送纱部件、提花部件、主功能部件和箱体等组成。簇绒地毯织机各部件同时运动,进布出毯传动、电子罗拉转动及针刺基布传动等均为可能的噪声源。

簇绒地毯织机的主功能部件包括主轴和一组连杆机构。主轴由主轴电机驱动,通过连杆机构传动,将主轴的旋转运动转换为簇绒针的上下往复运动和成圈钩的左右摆动,机构示意图如图 6 所示。织机在 350 r/min 的工况下,实测主轴电机转动频率为 5.8 Hz。主功能部件结构复杂,机构运动幅度大,是簇绒地毯织机的主要噪声来源。

对 IMF₁~IMF₄ 采用快速傅里叶变换进行处理,得到 IMF₁~IMF₄ 的频谱图如图 7 所示;再选用合适的窗函数进行短时傅里叶变换处理,得到 IMF₁~IMF₄ 分量的时频图如图 8 所示。

IMF₁ 分量频率随时间周期性变化,频带宽,能量分散,如图 8(a) 所示。图 7 的频谱图中显示 IMF₁ 分量频率幅值远小于其他 3 个分量,但表 1 中

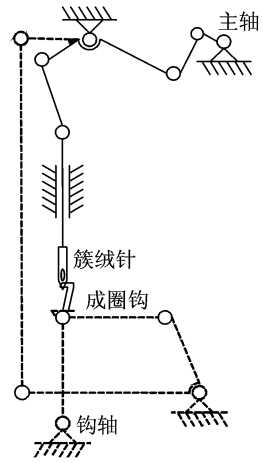


图 6 主功能部件示意图

Fig. 6 Schematic diagram of the main function

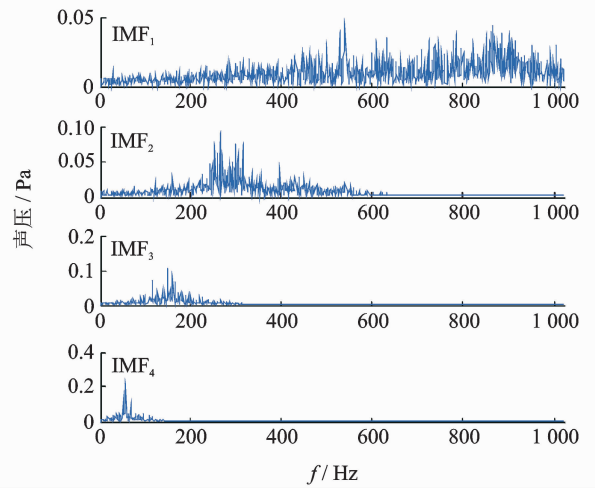


图 7 IMF₁~IMF₄ 分量的频谱图

Fig. 7 Spectrum of the IMF₁~IMF₄ components

IMF₁ 的相关系数和总能量均较大,所以该分量为一个频带较宽的高频噪声源,其频率变化周期与主轴转动频率相同。由地毯机主功能部件的工作原理可知,主轴每转动一圈,簇绒针与成圈钩就发生一次撞击摩擦。同时,已知摩擦噪声是一种典型的随机噪声,其波形和频谱都具有随机信号的特点^[12],其频

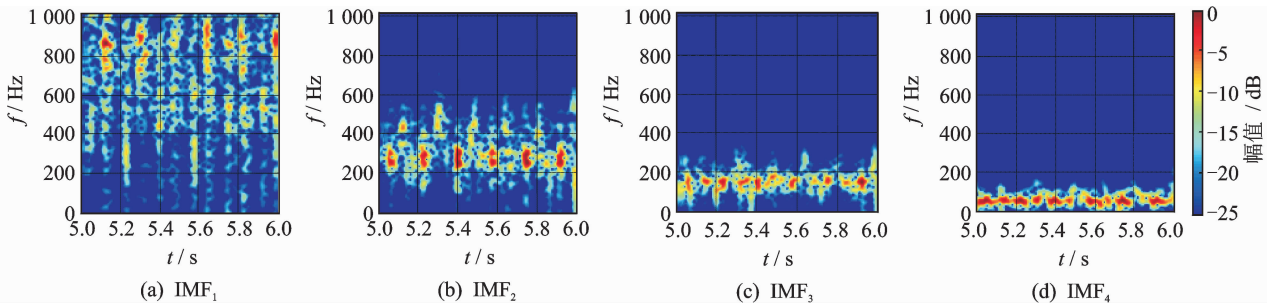


图 8 IMF₁~IMF₄ 分量的时频图

Fig. 8 Time-frequency of the IMF₁~IMF₄ components

带宽,能量分散。因此判断 IMF_1 分量所示噪声源为簇绒针排与成圈钩排之间的撞击摩擦噪声。

IMF_2 分量时频图如图 8(b)所示。对比图 8(a)可以看出, IMF_2 分量频率变化周期与 IMF_1 分量相同,但同一周期内频率在时间上的分布不同,两者间隔恰为半个周期。分析图 6 所示地毯机主功能部件的工作原理,簇绒针与成圈钩的摩擦发生在成圈钩成圈过程中, IMF_2 分量所示噪声发生在簇绒针簇绒过程中,因此推断该分量所示噪声源为簇绒针刺穿基布产生的噪声。

IMF_3 分量频率随时间变化不明显,无周期冲击特征,频率分布集中,如图 8(c)所示。对比图 9 实验测得工厂内背景噪声时频图,可以确认 IMF_3 分量所示噪声源为背景噪声。

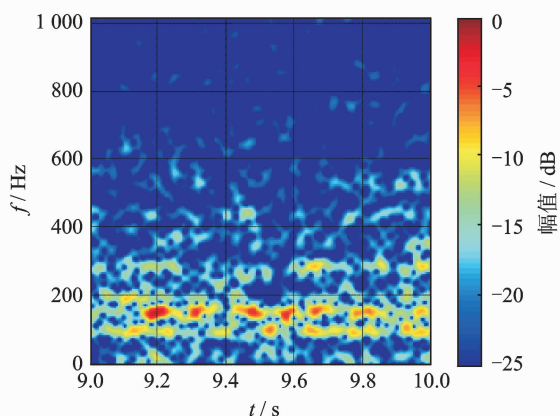


图9 背景噪声时频图

Fig. 9 Time-frequency of the background noise

IMF_4 分量频率不随时间变化,无周期冲击特征,频率分布集中,主要频率为 58 Hz,如图 8(d)所示。由图 7 各分量频谱图可知,58 Hz 的信号幅值在整个频域内最大,占噪声信号的能量比也最大,为簇绒地毯织机噪声中最主要的噪声源。已知主轴电机转动基频为 5.8 Hz,实验测得主功能系统中钩轴振动信号的频谱图如图 10 所示。钩轴振动频率有两个峰值,分别为 1 倍和 10 倍基频(5.8 和 58 Hz),

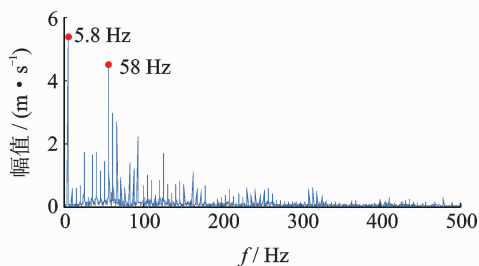


图10 钩轴振动频谱图

Fig. 10 Spectrum of the vibration of the hook shaft

因此, IMF_4 分量所示噪声源为钩轴在摆动过程中由摆动倍频引起的共振噪声。

4 结论

1) 笔者结合了 MEEMD 算法和 AIC 准则,提出了一种适用于簇绒地毯织机噪声源识别的 MEEMD-AIC 算法。实验表明,该算法能从单通道噪声信号中有效识别出主要噪声源的个数,适用于簇绒地毯织机噪声信号的分析。

2) 采用 MEEMD-AIC 算法对实验测得的簇绒地毯织机工人耳旁噪声进行处理,并基于 AIC 准则对有效分量个数进行估计,得出簇绒地毯织机噪声信号主要是由 4 个噪声源信号混叠而成的结论。

3) 通过对 4 个有效分量进行时频分析,得出簇绒地毯织机的主要噪声源有簇绒针排与成圈钩排摩擦、簇绒针刺穿基布以及耦联轴系的振动等。其中,耦联轴系中钩轴振动是最主要的噪声源,振动频率为 58 Hz 左右。

参 考 文 献

- [1] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB/T 50087—2013 工业企业噪声控制设计规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2014.
- [2] 王淑云,匡雅,曾向璟,等. 纺织企业噪声职业危害风险评估及降噪措施[J]. 中国安全生产科学技术, 2014,10(2):141-146.
Wang Shutun, Kuang Ya, Zeng Xiangjing, et al. Risk assessment on occupational noise hazard and noise reduction measures in a textile mill[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2014, 10(2): 141-146. (in Chinese)
- [3] Huang N E, Shen Z, Long S R, et al. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for non-linear and non-stationary time series analysis[J]. Proceeding of the Royal Society of London Series, 1998, 454A:903-995.
- [4] 杨永锋,吴亚峰. 经验模态分解在振动分析中的应用[M]. 北京:国防工业出版社,2013:5-42.
- [5] 郑旭,郝志勇,卢兆刚,等. 基于 MEEMD 的内燃机机体活塞敲击激励与燃烧爆发激励分离研究[J]. 振动与冲击,2012,31(6):109-113.
Zheng Xu, Hao Zhiyong, Lu Zhaogang, et al. Separation of piston-slap and combustion shock excitations via MEEMD method[J]. Journal of Vibration and Shock, 2012, 31(6): 109-113. (in Chinese)

- [6] Wu Zhaohua, Huang N E. Ensemble empirical mode decomposition; a noise-assisted data analysis method [J]. *Advances in Adaptive Data Analysis*, 2009, 1 (1): 1-41.
- [7] 王丽. 工程机械司机室内噪声信号盲源分离及特性研究[D]. 济南: 山东大学, 2014.
- [8] Akaike H. A new look at the statistical model identification[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1974, 19(6): 716-723.
- [9] Wu Zhaohua, Huang N E. A study of the characteristics of white noise using the empirical mode decomposition method [J]. *Proceedings of the Royal Society*, 2004, 460(2046): 1597-1611.
- [10] 谢纪岭, 司锡才. 基于协方差矩阵对角加载的信源数估计方法[J]. *系统工程与电子技术*, 2008, 30(1): 46-49. Xie Jiling, Si Xicai. Determining the number of sources based on diagonal loading to the covariance matrix[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2008, 30(1): 46-49. (in Chinese)
- [11] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB/T 7111.6—2002 纺织机械噪声测试规范 第6部分: 织造机械[S]. 北京: 中国标准出版社, 2002.
- [12] 谭佳丰, 傅攀. 机械设备摩擦噪声的信号测试与处理[J]. *中国测试技术*, 2006(3): 45-47. Tan Jiafeng, Fu Pan. Signal testing and processing for frictional noise of mechanical equipment [J]. *China Measurement Technology*, 2006(3): 45-47. (in Chinese)



第一作者简介: 徐洋, 女, 1977年8月生, 教授、博士生导师。主要研究方向为大型复杂机械结构动力学建模与仿真技术以及结构振动、噪声分析与控制技术。曾发表《主动柔性耦合隔振系统的直接速度反馈实验研究》(《振动与冲击》2010年第29卷第4期)等论文。

E-mail: xuyang@dhu.edu.cn

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 30 元, 全年 180 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.s.nuaa.edu.cn>

