文章编号：1006-1355(2018)06-0225-06

电磁炉噪声成分分析及贡献度计算

陆煜桦[1]，石蓝富[1]，汪志钢[2]，何柏锋[2]，杜平安[1]

（1. 电子科技大学 机械电子工程学院，成都 611731
2. 广东美的生活电器制造有限公司，广东 佛山 528311）

摘 要：电磁炉在工作过程中会产生较大噪声。对电磁炉噪声进行测试，对噪声时域测试数据进行处理和对比，分析不同水位和不同工况下时域噪声信号的变化特点；对时域数据进行频谱变换，分析噪声频谱结构，识别噪声成分。锅具悬空时，电磁炉加热噪声的频谱分析进一步证实电磁噪声的特点。将不同时间点的噪声频谱进行对比，分析水沸腾在不同时间段引起的噪声变化；通过声功率占比的计算求得各类噪声的贡献度。研究成果可为电磁炉噪声控制提供依据。

关键词：声学；电磁炉；频谱分析；电磁噪声；沸腾噪声；贡献度
中图分类号：TB52+6 **文献标志码**：A **DOI编码**：10.3969/j.issn.1006-1355.2018.06.044

Analysis of Noise Components of Induction Cookers and Their Contribution Degrees

LU Yuhua[1], *SHI Lanfu*[1], *WANG Zhigang*[2], *HO Pofeng*[2], *DU Pingan*[1]

（1. College of Mechanical and Electrical Engineering, University of Electronic Science and Technology, Chengdu 611731, China
2. GD Midea Consumer Electric MFG. CO. Ltd., Foshan 528311, Guangdong China）

Abstract : Induction cookers can generate large noise in use. In this paper, the noises of an induction cooker are tested. The time-domain test data is analyzed by means of Matlab software to obtain the variation characteristics of the time-domain noise under different operating conditions. Using LMS Test. Lab software, the time-domain data is transformed into frequency-domain date to analyze the characteristics of noise spectrum in order to recognize the noise components. Especially, when the cookware is suspended, the spectral analysis of the heating noise can confirm the characteristics of the electromagnetic noise. The noise variation characteristics caused by water boiling at different time periods are analyzed by mutually comparing the noise spectra at different time points. According to the calculation of the proportion of acoustic power, the contribution degrees of various noise components are obtained. These results provide a scientific basis for effectively controlling the noise of induction cookers.

Keywords : acoustics; induction cooker; spectral analysis; electromagnetic noise; boiling noise; contribution

电磁炉具有热效率高、使用方便等优点，在日常生活中的应用越来越广。但电磁炉在工作过程中会产生较大噪声，严重影响使用的舒适度，因此如何控制噪声已成为电磁炉开发中重点关注的技术问题。

收稿日期：2018-01-17
基金项目：广东美的集团科技开发资助项目
作者简介：陆煜桦（1991–），女，江苏省南通市人，硕士研究生，主要研究方向为噪声信号处理分析、电磁振动噪声仿真。
E-mail: luyuhuafighting@163.com
通信作者：杜平安（1962–），男，教授，博士生导师，主要研究方向为机电系统多物理场特性数值仿真与设计。
E-mail: dupingan@uestc.edu.cn

电磁炉噪声包括电磁振动噪声、机械振动噪声、风扇气动噪声、水沸腾噪声等。声源类型不同，其频率特征也各不相同。频谱分析就是将噪声信号的各种频率成分进行分解，以便对声源特征进行识别，从而分辨出各类噪声成分，进而计算各种成分的贡献大小[1–3]。

本文对某型电磁炉烧水过程进行噪声测试，通过时域数据对比，分析不同水位及不同工况下烧水过程中噪声变化特点；通过对时域数据的频谱变换，分析噪声频谱结构，识别噪声成分并计算各类噪声的贡献度。研究成果可为降低电磁炉噪声提供依据。

1 噪声测试与特征时域分析

噪声测试环境见图1，分别进行电磁炉噪声与风扇噪声两项测试，测试方案见表1，根据不同水位以及不同工况共进行9次测试。电磁炉工作10 s后停止加热，风扇持续工作1分钟左右，从而测得风扇噪声。在电磁炉烧水过程中，将盛水锅具提起一定高度，噪声增大，且水中出现有序波纹，由此判断电磁炉晶板与锅具之间相互遏制振动，所以测试方案中加入了将锅具悬空2 mm工况的测试。

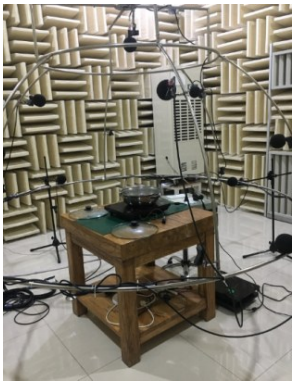


图1 噪声测试环境

表1 电磁炉噪声测试方案

工况/水位	1 000 W 贴合晶板	2 100 W 贴合晶板	2 100 W 悬空2 mm
500 ml	√	√	√
1 000 ml	√	√	√
1 500 ml	√	√	√

使用MATLAB软件对测得的噪声数据进行处理，获得噪声时域变化曲线，部分结果如图2所示（其中“2 100 W×k”为2 100 W悬空加热）。

从噪声时域数据可以看出电磁炉噪声具有以下特点：

（1）整体变化趋势：初期小幅波动，某一刻开始快速增大至最大，然后缓慢下降，最后较快速下降至稳定后小幅波动。

（2）加热功率高，加热快，噪声越大（见图2(a)）。这是由于功率增加，激励电流增大，电磁力增加，电磁振动加剧。

（3）在悬空2 mm状态下，加热变慢，但噪声加大，这是因为锅具悬空后没有晶板对锅底振动的抑制，锅具电磁振动加剧。

（4）水量越多，加热时间越久，但噪声最高值基本相近（见图2(b)）。

（5）贴合晶板情况下水完全沸腾时，噪声随水量增大而小幅增大。悬空状态下完全沸腾时，水量少噪声反而大。

2 电磁炉噪声成分的频谱分析

2.1 噪声成分特征

通过电磁炉工作原理和结构分析，可以判断电磁炉噪声包括电磁振动噪声、风扇气动噪声、机械振动噪声以及水的沸腾噪声等。

电磁振动噪声是由于交变电磁场在锅具底部产生交变电磁力、而交变电磁力引起锅具振动产生的噪声。变频器输出的电压和电流会影响电磁力的幅值和频率，从而决定电磁振动噪声的大小和频率[4]。

交变电磁力频率为激励电流频率的两倍[5]。若激励电流为工频电流，则电磁力频率为

$$f_1 = 2f_0 = 2 \times 50 = 100\ \text{Hz} \tag{1}$$

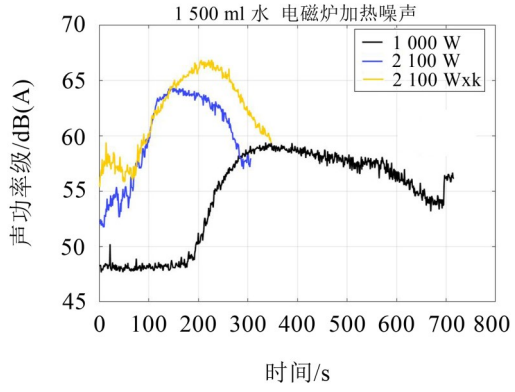
式中：f_0为工频电流频率，f_0=50 Hz。

风扇噪声为空气动力噪声，根据产生机理分为旋转噪声和涡流噪声，根据频谱特性分为离散噪声和宽频噪声[6]。其中旋转噪声频率为

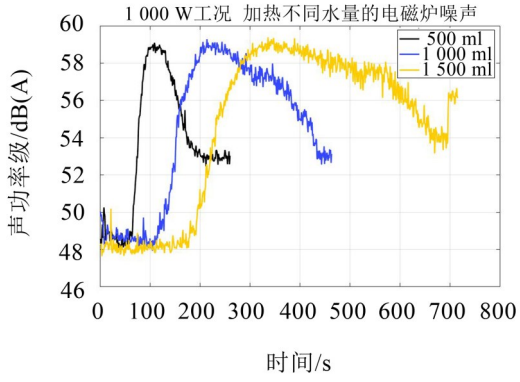
$$f_{2_i} = \frac{nz}{60} i \tag{2}$$

式中：n为叶轮转速，单位为r/min；z为叶片数；i为谐波序号，i=1,2,3…，i=1为基频。

机械噪声是风扇叶轮旋转时不平衡冲击、摩擦



(a) 1 500 ml水在不同工况下加热噪声对比



(b) 1 000 W工况下不同水量的加热噪声对比

图2 电磁炉噪声的时域变化

引起的振动噪声，噪声频率为

$$f_{3_i} = \frac{n}{60} i \qquad (3)$$

式中：n为叶轮转速，单位为r/min；i为谐波序号，i=1，2,3…，i=1为基频。

旋转不平衡噪声基频一般较低，其本身往往不辐射空气声，但会作为振动能源通过支撑结构迫使结构振动，辐射空气声[5]。

随着加热面的过热度以及液体的过冷度变化，水中气泡行为也随之变化。根据气泡行为特点，沸腾状态可分成过冷沸腾、核态沸腾和过渡沸腾三种。加热面气泡的快速形成及高频脱离引起剧烈的流体振动使噪声增大。当过热度增大，气泡形成加速导致气泡相互干扰和合并，减小水体对器壁的振荡冲击强度，噪声降低[7]。

2.2　噪声频谱分析

1 500 ml水在1 000 W功率工况下加热，时间较长，测试过程较稳定。利用LMS Test. Lab软件对噪声时域数据进行频谱变换，并转换为功率谱以便分析[7]，结果如图3所示。可观察得噪声主要集中在0～1 kHz的中低频区和19 kHz～20 kHz的高频区。高频区噪声频率在电磁炉的工作频率范围内。

将图3(a)的低频区放大得到图3(b)，可以观察到中低频区两个主要的噪声成分：

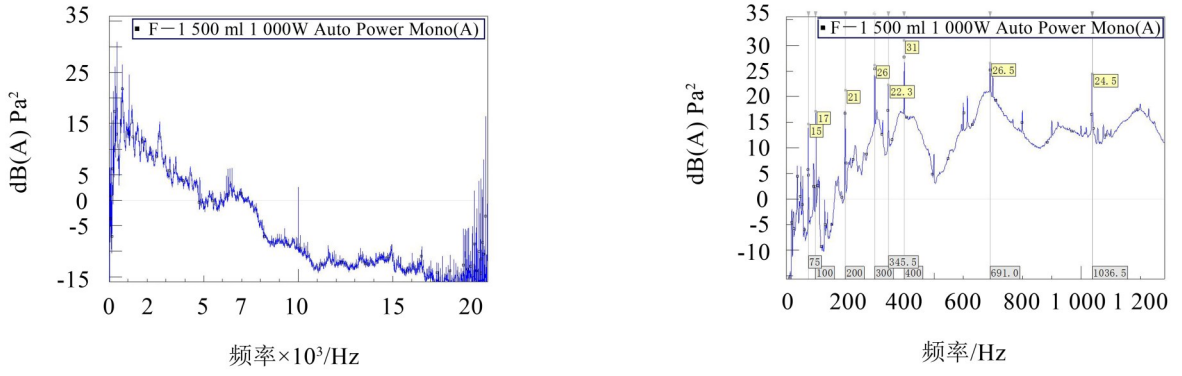
(1) 具有100 Hz基频及其高阶倍频的离散噪声。此噪声为电磁“嗡嗡”声，其动力源为50 Hz工频电流引起的电磁线圈磁场与锅之间的交变电磁力。

(2) 具有345.5 Hz基频及其高阶倍频的离散噪声。电磁炉风扇为9扇叶直流无刷风扇，转速为2 300 r/min，由式(1)算得风扇旋转噪声基频为345 Hz，因此可以判定具有345.5 Hz基频及其高阶倍频的噪声为风扇旋转噪声。

此外，风扇转速为2 300 r/min，根据式(3)可得机械噪声基频约为38.3 Hz，并且锅具的2阶模态为75 Hz。因此，75 Hz处峰值为机械振动的2次谐波噪声，其贡献度较小。

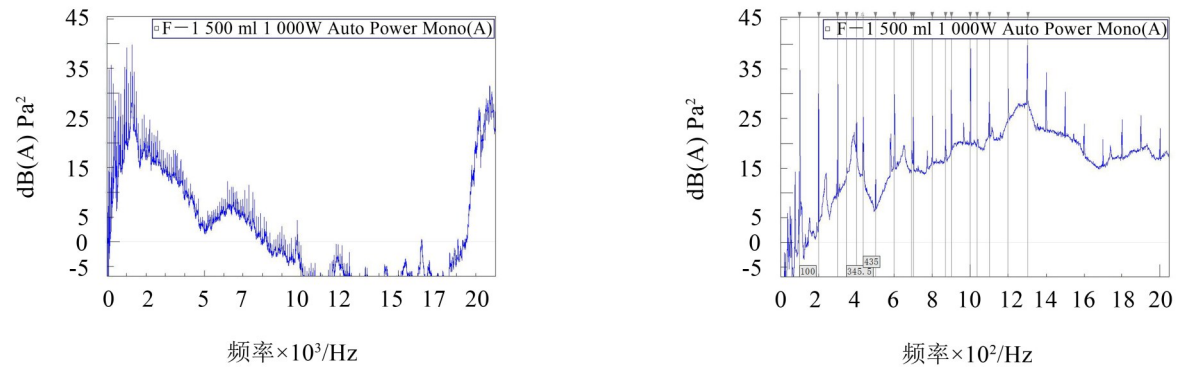
图4为1 500 ml水在2 100 W工况下悬空加热的噪声频谱图。电磁炉温度升高至一定值，风扇转速升至2 900 r/min。因此，旋转噪声基频由345.5 Hz变为435 Hz。此外，相比未悬空加热的噪声频谱，两处明显区别可进一步证实噪声中所具有的电磁噪声成分：

(1) 大量“毛刺”为100 Hz基频及其高次倍频。



(a) 总体噪声频谱　　(b) 低频区放大

图3 1 500 ml水在1 000 W工况下加热时的噪声频谱图



(a) 总体噪声频谱　　(b) 中低频区放大

图4 1 500 ml水在2 100 W工况下悬空加热噪声分析

（2）19 kHz～20 kHz高频处噪声明显增大。

3 各噪声成分的贡献度计算

3.1 水沸腾对综合噪声的影响

电磁炉在整个加热过程中噪声有明显的时间变化特点。图5为1 500 ml水在1 000 W工况下噪声时域图。

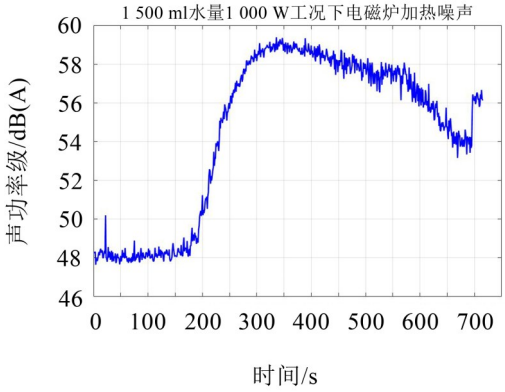


图5 1 500 ml水在1 000 W工况下噪声时域图

0～175 s噪声在48 dB上下波动，这时水未沸腾，因此噪声主要为风扇噪声与电磁噪声。175 s～350 s噪声逐渐增大至59 dB，水中气泡快速形成并高频脱离，进入核态沸腾状态，噪声达到最大。350 s之后由核态沸腾向过渡沸腾转化，噪声缓慢下降，450 s～580 s噪声下降幅度较小，580 s之后噪声加速下降。

图6为1 500 ml水在10 00 W工况下加热噪声彩色图，可观察噪声随时间和频率的变化。可发现200 s～450 s增大的噪声频率分布于200 Hz～8 kHz，这是由水的核态沸腾以及过渡沸腾引起锅具的中高频振动。

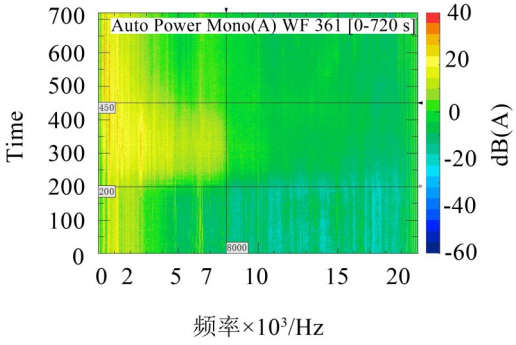
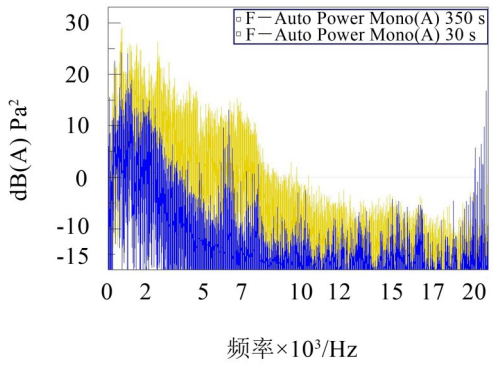


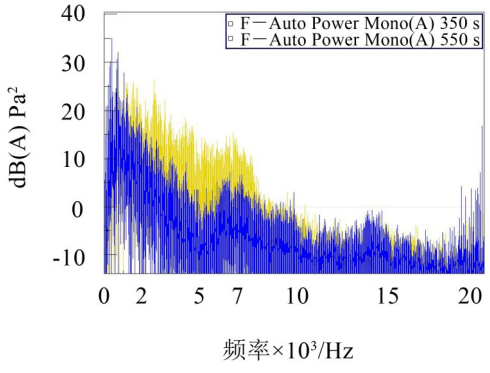
图6 15 00 ml水在1 000 W工况下加热噪声彩色图

通过不同时刻噪声频谱对比，可观察到水沸腾对噪声的影响，即耦合振动现象[8-9]。

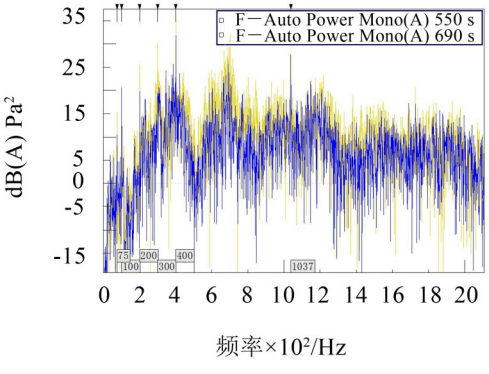
图7(a)为30 s与350 s声功率频谱对比，30 s时噪声以风扇噪声和电磁噪声为主，350 s时综合噪声



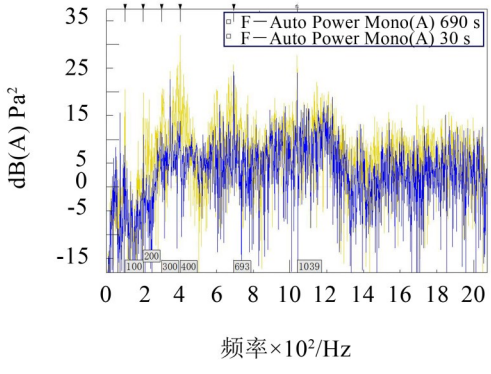
(a) 30 s与350 s声功率频谱对比



(b) 350 s与550 s声功率频谱对比



(c) 550 s与690 s中低频声功率频谱对比



(d) 690 s与30 s中低频声功率频谱对比

图7 不同时刻噪声频谱对比

最大。根据两者对比可得由水核态沸腾引起的锅具振动及液体振动的噪声量，其中宽频噪声明显增大。

图7(b)为350 s与550 s声功率频谱对比，550 s时综合噪声降低，水沸腾气泡增大，出现相互扰动情况，此时增强了低频处的电磁振动(100 Hz、200 Hz、300 Hz、400 Hz)，而中高频的噪声明显降低。

图7(c)为550 s与690 s中低频声功率频谱对比，690 s时沸腾气泡进一步增大，相互扰动增强，振荡冲击有所抑制，宽频噪声和离散噪声都有所下降。

图7(d)为690 s与30 s中低频声功率频谱对比，690 s时水完全沸腾，相比于初始，宽频噪声和电磁离散噪声(100 Hz、200 Hz、300 Hz、400 Hz)都有所增加。

3.2 噪声贡献度计算

电磁炉启动初期，水中尚未出现明显气泡，噪声成分主要为风扇噪声和电磁噪声。

声功率级计算公式为

$$L_W = 10\lg\frac{W}{W_0} \tag{4}$$

式中：L_W为声功率级，dB；W为声功率，W；W_0为基准声功率，W；$W_0=10^{-12}$ W。

1 000 W工况下加热1 500 ml水，前10 s内综合噪声的平均声功率级约为48.16 dB。由式(4)可算得总的声功率$W_1=6.55\times10^{-8}$ W。

测得风扇噪声声功率级值约47.09 dB(其中机械噪声较小可忽略)。由式(4)可算得风扇噪声的声功率$W_2=5.12\times10^{-8}$ W。

因此，电磁噪声的声功率为

$$W_3=W_1-W_2=1.43\times10^{-8}\text{W}$$

从而可估算综合噪声中风扇噪声的贡献度$W_2/W_1=78.2$ %和电磁噪声贡献度$W_3/W_1=21.8$ %。

同理，可计算1 500 ml水在2 100 W工况下各噪声成分的贡献度如表2所示。

由此可知，低功率加热情况下风扇噪声贡献度较大；随着功率增大，电磁噪声贡献度增大。这是由于功率增加，电磁力加大，电磁振动加剧。

由于耦合振动现象和风扇转速变化，后期各噪声成分不定量变化。难以直接通过计算声功率占比来说明噪声成分的贡献度。通过噪声增量的计算可看出水沸腾对综合噪声的影响。

如表3所示，1 000 W工况下加热15 00 ml水，第350 s时噪声最大值为59.38 dB。算得声功率$W_{max}=8.670\times10^{-7}$ W。相对初始噪声，声功率增量$W_{increase1}=W_{max}-W_1=8.015\times10^{-7}$ W。增量占比为$W_{increase1}/W_{max}=92.4$ %。

风扇变速前沸腾噪声约为53.78 dB，其声功率$W_{boiling}=2.388\times10^{-7}$ W。相对初始噪声，声功率增量$W_{increase2}=W_{boiling}-W_1=1.733\times10^{-7}$ W。增量占比为$W_{increase2}/W_{boiling}=72.6$ %。

同理可计算1 500 ml水在2 100 W工况下的数据，结果如表4所示。

4 结 语

(1) 通过对电磁炉噪声测试数据的时域和频域分析，得电磁炉噪声主要由4部分组成：

① 以100 Hz为基频、以其高阶倍频为特征的电磁振动噪声；

② 19 kHz～20 kHz的高频载波噪声；

③ 风扇气动噪声；

④ 水的沸腾噪声。

(2) 锅具悬空时，缺少电磁炉晶板对锅具底部振动的抑制，锅具受交变电磁力的影响增大，振动明显加剧。

表2 加热初期主要噪声成分贡献度

工况	初始噪声/dB	风扇声功率/W	电磁声功率/W	风扇噪声贡献度/(%)	电磁噪声贡献度/(%)
1 500 ml/1 000 W	48.161	5.12×10^{-8}	1.428×10^{-8}	78.2	21.8
1 500 ml/2 100 W	52.018	5.12×10^{-8}	1.078×10^{-7}	68.8	32.2

表3 1 500 ml水在1 000 W工况下沸腾引起的噪声贡献度

时刻	噪声值/dB	声功率/W	噪声增量/W	增量贡献度/(%)
噪声最大时	59.38	8.67×10^{-7}	8.015×10^{-7}	92.4
完全沸腾时	53.78	2.388×10^{-7}	1.733×10^{-7}	72.6

表4 1 500 ml水在2 100 W工况下沸腾引起的噪声贡献度

时刻	噪声值/dB	声功率/W	噪声增量/W	增量贡献度/(%)
噪声最大时	64.41	2.758×10^{-6}	2.599×10^{-6}	94.2
完全沸腾时	57.30	5.365×10^{-7}	3.775×10^{-7}	70.4

(3) 电磁炉噪声变化的特点是先低后高再降低。噪声增大主要是因为水的核态沸腾与过渡沸腾引起的振动噪声，频率范围较宽，约为200 Hz～8 kHz。

(4) 电磁炉噪声成分贡献度

① 加热初期，噪声主要为电磁噪声与风扇噪声。低功率加热时，风扇噪声贡献度较大。随加热功率增大，电磁噪声贡献度增大。

② 加热中期，中高频噪声增大，水沸腾对综合噪声的贡献度在90 %以上。

③ 加热后期，低频的大气泡扰动增强电磁频点噪声，即为耦合振动现象。水沸腾对综合噪声贡献度在70 %以上。

参考文献：

[1] 杜丽萍，王双维，化晓茜，等. 基于现代谱估计的噪声源在线识别方法研究[J]. **噪声与振动控制**，2008，28(1)：60-63.

[2] 张德满，李舜酩，尚伟燕，等. 工程机械机外噪声声源分析及降噪处理[J]. **振动、测试与诊断**，2011，31(3)：362-365.

[3] 胡越，李富才，邵威，等. 工程机械噪声源识别技术研究进展[J]. **噪声与振动控制**，2015，35(5)：1-15.

[4] SENOUSY M, LARSEN P, DING P. Electromagnetics, Structural harmonics and acoustics coupled simulation on the stator of an electric motor[J]. **SAE International Journal of Passenger Cars-Mechanical Systems**, 2014, 7 (2): 822-828.

[5] 周新祥. 噪声控制技术及其新进展[M]. 北京：冶金工业出版社，2007：64-65，235.

[6] 王斌，吴锦武，陈志军. 风扇系统噪声对发动机整机噪声的影响[J]. **内燃机工程**，2005，25(6)：52-54.

[7] 张擎，董克，黄正梁，等. 池内水沸腾状态的声发射测量[J]. **化工学报**，2013，64(10)：3527-3533.

[8] 费朝阳，陈长征，周勃，等. 声振耦合声场分析与结构隔振降噪[J]. **噪声与振动控制**，2012，32(2)：54-58.

[9] 王珺，张景绘，宁玮. 复合环境激励下的声振耦合分析[J]. **振动与冲击**，2011，30(2)：15-18.

（上接第189页）

以电磁作动器作为执行机构。通过台架实验的检测和保存数据进行建模，实验结果表明，设计的动力装置主动隔振系统硬件控制器不仅可以到达主动隔振预期的要求，也为后期船舶主动隔振硬件技术的深入开发提供了更多的帮助和参考依据。

参考文献：

[1] 黄梅志. 柴油机振动的半主动控制研究[D]. 武汉：武汉理工大学，2008.

[2] 王君锋. 精密主动隔振台控制系统设计与研究[D]. 武汉：华中科技大学，2013.

[3] 陈安华. 被动隔振的非线性动力学研究[J]. **中国机械工程**，2008，19(9)：1022-1025.

[4] 陈玉强. 双层隔振系统振动主动控制技术研究[D]. 哈尔滨：哈尔滨工程大学，2003.

[5] 王俊芳. 自适应主动隔振的理论和实验研究[D]. 上海：上海交通大学，2008.

[6] 范威. 主动隔振器及自适应控制方法研究[D]. 上海：上海交通大学，2008.

[7] 张洪田. 电动式主动吸振技术研究[J]. **振动工程学报**，2001，14(1)：113-117

[8] 宋虎. 基于FPGA的振动主动控制技术研究[D]. 南京：南京理工大学，2005.

[9] WATTERS B G, COLEMAN R B , DUCKWORTH G L, et al. A perspective on active machice isolation[C]. Proceeding of the 27 th conference on decision and control. Austin, Texas, 1988(12): 2033-3038.

[10] 张洪田. 电磁式主动隔振装置性能实验研究[J]. **噪声与振动控制**，1996，16(1)：15-17.

[11] 刘杰. 基于FPGA控制器的隔振技术研究[D]. 南京：南京理工大学，2014.

[12] 郭锐靖. FPGA开发板设计与研究[D]. 广州：华南理工大学，2013.

[13] 齐海超. 基于LMS自适应滤波算法的振动主动控制仿真软件开发及试验研究[D]. 哈尔滨：哈尔滨工程大学，2012.

[14] 王谦. 基于LMS算法的自适应次声滤波器设计[D]. 武汉：华中科技大学，2008.

[15] 夏晓. 自适应滤波器中LMS算法的研究及应用[D]. 北京：北京邮电大学，2013.

[16] 杨雅清. 动力装置单层隔振系统的主动控制算法研究[D]. 武汉：武汉理工大学，2014.