

基于压电陶瓷的减振器的设计

史翔,管仁忠,杜慧玲

(西安科技大学 材料学院, 陕西 西安 710054)

摘要:在有限元软件 ANSYS 软件进行模态分析和静力结构分析的基础上,设计制作了一种家电用压电主动减振器。该减振器由压电陶瓷、Diamond-Shape 位移放大机构构成。对该减振器进行了放大率的计算,其放大率可达 3.30;并对减振器进行阻抗分析、低温性能检测及减振降噪测试。通过减振降噪测试数据表明,该减振器可对一定频段的家电振动与噪音起到抑制作用,最大可降低噪音 32%。

关键词:压电驱动器;模态分析;静力学分析;谐振峰;减振降噪

中图分类号: TH7;TN4 **文献标识码:** A

The Design of Shock Absorber Based on the Piezoelectric Ceramic

SHI Xiang, GUAN Renzhong, DU Huiling

(College of Materials Science and Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

Abstract: A new type of home appliances of shock absorber is designed based on the modal analysis and the static structure analysis of finite element software ANSYS software. This shock absorber is consisted of piezoelectric ceramic and Diamond-Shape displacement amplification. The magnification of the shock absorber is calculated to above 3.30. Next test on the impedance analysis, low temperature performance detection, vibration and noise reduction test are carried on. Test results show that the shock absorber can inhibit the vibration and noise of the appliance with certain frequency band, the maximum reduction can be 32%.

Key words: piezoelectric drive; modal analysis; static analysis; resonance peak; noise and vibration reduction

0 引言

近年来,由于电子产品的广泛应用,使人们用在家务上的劳动时间缩短,人们的空闲时间越来越多,这就使人们的生活内容、生活方式和生活节奏发生了许多变化。另外,由于以通信为核心的高度信息化社会的到来,商业环境和社会环境也发生了巨大的变化,环境问题也日益突出,从而使白色家电市场面临萎缩。为保护地球环境,国际公约要求减少或禁止一切破坏地球环境和生活环境的做法。白色家电节能、减震、降噪已成为时代发展不可避免的步伐。然而关键部位元件的开发,便成为制约白色家电革命行发展的关键之处。因此,本项目从实际市场出发,以推动白色家电行业发展为目的,开发用于白色家电的减震降噪的元件^[1-3]。

本文利用有限元方法对基于压电陶瓷的家电用减振器进行模态分析与静力学分析,设计并制造了压电陶瓷减振器,并对其振动特性进行了测试与分析。

1 模拟与设计

1.1 模态分析

模态分析所得最终目标是识别出系统的模态参数,为结构系统的振动特性分析、振动故障诊断和预报以及结构动力特性的优化设计提出依据。模态分析技术可用于很多领域。如评价现有结构系统动态特性、在新产品设计中进行结构动态性的预估和优化设计、诊断及预报结构系统的故障、控制结构的辐射噪声、识别结构系统的载荷^[4]。图 1 为模态分析建立的有限元分析模型与器件结构。

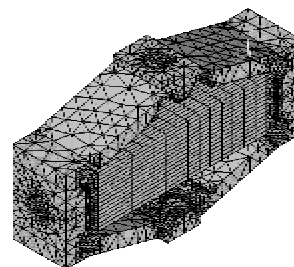


图 1 减振器有限元模型与器件结构

收稿日期:2012-07-24

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51072162);陕西省国际合作基金资助项目(2012KW-10)

作者简介:史翔(1976-),男,青海西宁人,讲师,硕士。主要从事电子材料测试技术及压电器件的研究。E-mail: xsung@xjtu.edu.cn。管仁忠(1986-),男,山东日照人,硕士生,主要从事材料物理与化学的研究。E-mail: guangrenzhong@126.com。

该器件内部方形柱体为压电陶瓷叠层驱动器,利用压电材料的逆压电效应在电场激励下产生伸缩;外部菱形部分为 Diamond-Shape 位移放大器,材料为 45# 钢,用来放大压电陶瓷驱动器的位移,二者共同组成了家电减振器^[5-6]。

外壳材料的密度为 7 750 kg/m³,弹性模量为 2.1×10⁵ MPa,泊松比为 0.3;压电陶瓷的密度为 7 500 kg/m³,相对介电常数张量 ϵ 为

$$\epsilon = \begin{bmatrix} 804.6 & 0 & 0 \\ 0 & 804.6 & 0 \\ 0 & 0 & 659.7 \end{bmatrix} \quad (1)$$

压电材料的压电应力系数矩阵及弹性柔顺系数矩阵分别为

$$e = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -4.1 \\ 0 & 0 & -4.1 \\ 0 & 0 & 14.1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 10.5 & 0 \\ 10.5 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (\text{C/m}^2) \quad (2)$$

$$c = \begin{bmatrix} 13.2 & 7.1 & 7.3 & 0 & 0 & 0 \\ 7.1 & 13.2 & 7.3 & 0 & 0 & 0 \\ 7.3 & 7.3 & 11.5 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 3.0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2.6 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2.6 \end{bmatrix} \times 10^{10} \quad (\text{N/m}^2) \quad (3)$$

对模型进行求解,在求解过程中模型处于完全自由的状态下进行求解。在模态分析时,不考虑载荷的作用,将模型作为完全自由振动即忽略预压力对模型的作用,且认为不存在阻尼,即单元的节点力载荷矢量 $F=0$, 阻尼矩阵 $C=0$, 单元的电荷矢量 $Q=0$, 在此假设下,模态分析的有限元模型为

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} \mathbf{M} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\mathbf{u}} \\ \ddot{\Phi} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{K} & \mathbf{K}_d \\ \mathbf{K}_d & \mathbf{K}_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{u} \\ \Phi \end{bmatrix} = \mathbf{0} \\ \mathbf{u}|_{r=R_z} = 0 \\ \Phi|_{r=R_z} = 0 \end{cases} \quad (4)$$

式中: \mathbf{M} 为单元的质量矩阵; \mathbf{K} 为单元的刚度矩阵; \mathbf{K}_d 与 \mathbf{K}_z 分别为单元的介电系数矩阵和压电系数矩阵; \mathbf{u} 为单元节点的位移矢量; Φ 为单元的节点电势矢量。在模型几何参数方面, R_z 为模型固定端距原点的距离。

将振动假设为符合正弦曲线运动,故有

$$\begin{bmatrix} \mathbf{u} \\ \Phi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_{\max} e^{j\psi_u} \\ \Phi_{\max} e^{j\psi_\Phi} \end{bmatrix} e^{j\omega t} \quad (5)$$

式中: ψ_u 为节点位移矢量的相位角; ψ_Φ 为节点电势

矢量的相位角; ω 为电载荷圆频率。则

$$\begin{bmatrix} \ddot{\mathbf{u}} \\ \ddot{\Phi} \end{bmatrix} = \frac{\partial^2}{\partial t^2} \left(\begin{bmatrix} u_{\max} e^{j\psi_u} \\ \Phi_{\max} e^{j\psi_\Phi} \end{bmatrix} e^{j\omega t} \right) = -\omega^2 \begin{bmatrix} u_{\max} e^{j\psi_u} \\ \Phi_{\max} e^{j\psi_\Phi} \end{bmatrix} e^{j\omega t} = -\omega^2 \begin{bmatrix} \mathbf{u} \\ \Phi \end{bmatrix} \quad (6)$$

将式(6)代入式(4)可得

$$\begin{cases} \left(-\omega^2 \begin{bmatrix} \mathbf{M} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{K} & \mathbf{K}_d \\ \mathbf{K}_d & \mathbf{K}_z \end{bmatrix} \right) \begin{bmatrix} \mathbf{u} \\ \Phi \end{bmatrix} = \mathbf{0} \\ \mathbf{u}|_{r=R_z} = 0 \\ \Phi|_{r=R_z} = 0 \end{cases} \quad (7)$$

对模型在 0~20 000 Hz 的频率范围内进行模态分析,共提取 20 阶模态。获得求解结果如表 1 所示。

表 1 模型-模态分析阶次、频率表

阶次	1	2	3	4	5
频率/Hz	2 016.3	2 734.5	3 958.1	5 127.6	6 073.6
阶次	6	7	8	9	10
频率/Hz	8 042.4	8 143.4	9 298.0	9 987.8	10 511.0
阶次	11	12	13	14	15
频率/Hz	11 181.0	12 766.0	13 192.0	13 380.0	14 040.0
阶次	16	17	18	19	20
频率/Hz	14 258.0	16 554.0	19 081.0	19 586.0	19 850.0

表中,在阶次为 2、频率为 2 734.5 Hz 的谐振点时,压电陶瓷驱动器伸缩振动导致位移放大器在垂直方向表现出大位移,此为本文需要的谐振方式,其谐振状态的位移分布云图如图 2 所示。

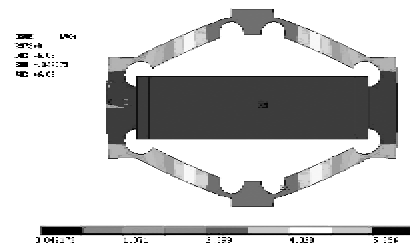


图 2 模型位移分布云图

1.2 结构静力分析

静力分析用于计算那些不包括惯性和阻尼效应的载荷作用于结构或部件的位移、应力、应变和力。固定不变的载荷和响应是一种假定;即假定载荷和结构的响应随时间的变化很缓慢。静力学分析结果表明,该驱动机构的位移放大比(垂直方向位移/水平方向位移)为 3.30,有较显著的位移放大效果。

2 器件测试

2.1 器件加工

在模态分析与结构静力分析基础上进行设计,

并加工组装完成的减振器如图 3 所示。图中,器件由压电叠层驱动器和位移放大机构组成,利用螺钉调节二者的结合紧密程度,同时达到调节安装预应力的目的。应用中利用压电陶瓷产生一定频率的谐振补偿家电的振动,达到减振的目的。

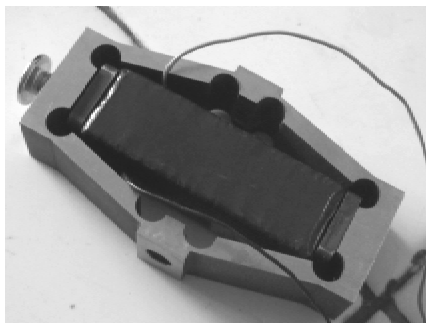


图 3 加工组装成型的减振器

2.2 器件性能测试

当外电场的频率与弹性波在压电体内传播时的固有振动频率一致时,压电体便进入了机械谐振状态,成为压电振子。压电体中能产生被外电场激活的振动模式,首先必须要有适当的机电耦合途径,把电场能转换成与该种振动模式相对应的弹性能。

利用 Angilent 4294 阻抗分析仪在室温下测定器件的阻抗频谱,得到阻抗-频率变化图如图 4 所示。2.7 kHz 出现谐振峰,前述模态分析结果表明该谐振峰出现于 2.734 kHz,存在误差,这是因为在进行模拟时环境都是理想化的,且外壳和压电柱紧密粘在一起,而在进行测试时,放大器的外壳和压电柱通过螺杆固定在一起,所以实际测试数据与模拟数据有误差,但在误差允许范围内。测试表明,该减振器可用于振动频率约 2.7 kHz 的家电(如空调)的减振。

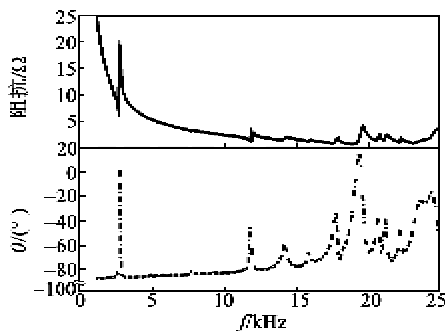


图 4 阻抗-频率变化图

针对家用电器可能工作的极端环境,对该减振器的低温性能进行了检测,在 -30 °C、-20 °C、-10 °C、0 环境温度下对器件进行阻抗频率测试,

测试结果如图 5 所示。由图可知,减振器的谐振频率随着温度的升高而升高,这与压电陶瓷体的特性相符。减振器谐振频率随温度升高而升高的范围很小,其谐振频率约为 2.7 kHz,不影响其工作状态。

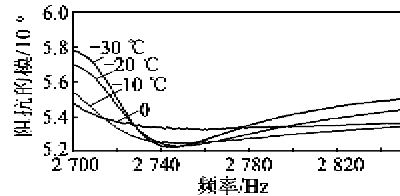


图 5 不同温度下的谐振频率

为检验该减振器在一定频段的减振效果,设计实验模拟白色家电振动噪音环境并测试该减振器降噪效果。实验设计如图 6 所示。(图 1 中 PZT 陶瓷激振噪音源由极化后的 PZT 陶瓷与 0.5 mm 厚铜片粘贴而成,沿周向固定。)

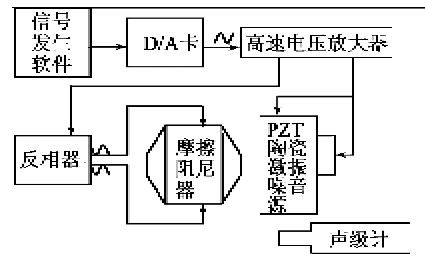


图 6 减振降噪测试示意图

如图 6 所示,利用 LABVIEW 编制信号发生软件驱动 PCI2306 数据采集卡的 D/A 模块产生一定频率的正弦信号,trek610E 高速电压放大器将上述正弦信号电压峰-峰值放大至 75 V;分两路引出,其中一路直接接入 PZT 陶瓷激振噪音源,另一路信号经反相器接入减振器,噪音源与减振器利用环氧树脂粘链接。其测试效果如图 7 所示(降噪比=(减振前一减振后)/(减振前一背景噪音)×100%),在 2.7 kHz 时减振器降噪效果最明显达到 32%。

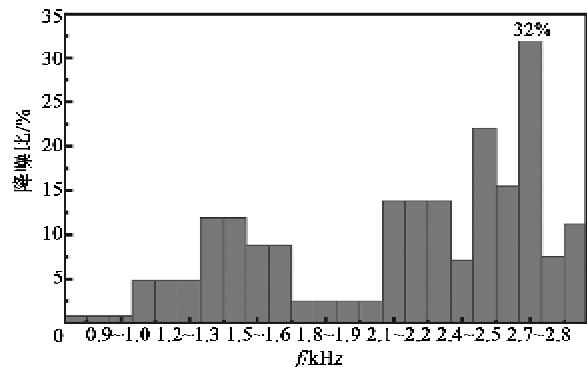


图 7 减振降噪效果图

2.3 测试结果分析

通过实验测试结果可知,该减振器在家电的工作环境温度下能正常工作,且谐振频率受温度影响变化不大在可接受范围内。该减振器在 2.7 kHz 的频段减振降噪效果最好,最大减振降噪百分比可达 32%。

3 结论

1) 利用有限元法对基于压电陶瓷的减振器进行模态分析与静力学分析,得到较准确的结构参数。

2) 试验表明利用有限元法指导设计与制造的减振器可用于振动频率约 2.7kHz 的家电减振降噪。

参考文献:

- [1] 杨宜民,李传芳,周学才,等.高精度压电旋转驱动器的研制[J]. 机器人,1995,17(6):321-324.
YANG Yimin, LI Chuanfang, ZHOU Xuecai, et al. Research on piezoelectrical rotary actuator with high precision[J]. Robot, 1995, 17(6): 321-324.
- [2] 吴欣慧,杨军平,秦长海. 压电微位移驱动器的高精度控制系统设计[J]. 中国科技信息, 2009(14): 163-164.
WU Xinhui, YANG Junping, QIN Changhai. High precision control system for piezoelectric motors[J]. China Science and Technology Information, 2009(14): 163-164.
- [3] 王勇,刘志刚,薄锋,等.大行程高分辨率微定位机构的设计分析[J],机械设计,2005,22(5):22-24.
WANG Yong, LIU Zhigang, BO Feng, et al. Design and analysis of micro-positioning mechanism with large travel range and high revolution[J]. Machinery Manufacturing Engineer, 2005, 22(5): 22-24.
- [4] 崔艳梅,刘向锋,高志.大位移压电陶瓷驱动器的设计与试验[J]. 功能材料与器件学报, 2007, 13(6): 507-511.
CUI Yanmei, LIU Xiangfeng, GAO Zhi. Design and experiment research on the actuators for large displacement[J]. Journal of Functional Materials and Devices, 2007, 13(6): 507-511.
- [5] 魏晓勇,李国荣,陈大任. RAINBO 压电驱动器的制备及性能[J]. 功能材料与器件学报, 2000, 6(2): 71-76.
WEI Xiaoyong, LI Guorong, CHEN Daren. Preparation and properties of rainbow actuator[J]. Journal of Functional Materials and Devices, 2000, 6(2): 71-76.
- [6] 朱海霞.基于压电元件的振动主动控制系统[J]. 重庆工学院学报:自然科学版, 2009(2): 137-141.
ZHU Haixia. Research on Active Vibration Control System Based on Piezoelectric Element[J]. Journal of Chongqing Institute of Technology: Natural Science, 2009(2): 137-141.
- (上接第 646 页)
- [6] 李霞,李立京,张朝阳.一种具有互易光路的光学电压传感器[J]. 电子测量与仪器学报, 2008(增刊 1): 293-296.
LI Xia, LI Lijing, ZHANG Chaoyang. An optical voltage sensor with reciprocal light path[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2008(Suppl1): 293-296.
- [7] 李彦,章敏,冯秀娟,等.准互易光学电压互感器数字闭环信号处理办法[J]. 电测与仪表, 2011, 48(547): 32-36.
LI Yan, ZHANG Min, FENG Xiujuan, et al. Digital closed-loop signal processing system for the quasi-reciprocal optical voltage sensor[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2011, 48(547): 32-36.
- (上接第 689 页)
- [8] CHU H Q, WU G M, CHEN J M, et al. Design and simulation of self-powered radio frequency identification (RFID) tags for mobile temperature monitoring [J]. Science China Technological Sciences, 2013, 56(1): 1-7.
- [9] DIMITRIS K. Development of novel matrices for bio-molecule immobilisation on sensor surfaces [D]. UK: Cranfield University, 2009.
- [10] WINGQVIST G. Thin film electroacoustic devices for biosensor applications[D]. Sweden: Uppsala University, 2009.
- [11] ZHANG H. Micromachined bulk acoustic resonators for radio-frequency systems and biochem mass sensing [D]. USA: University of Southern California, 2006.
- [8] 陈阳,徐晓光,陈跃东.基于嵌入式系统的电能采集终端设计与实现[J]. 重庆理工大学学报:自然科学版, 2011(3): 101-105.
CHEN Yang, XU Xiaoguang, CHEN Yuedong. Design and implementation of electric energy acquisition terminal based on embedded system [J]. Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science), 2011(3): 101-105.
- [9] 李开成,叶妙元,詹琼华,等.光纤电压互感器中电光晶体对测量精度的影响[J]. 光电工程, 2000, 27(4): 67-70.
LI Kaicheng, YE Miaoyuan, ZHAN Qionghua, et al. The influence of electro-optic in optic fiber voltage transformer on measuring accuracy[J]. Opto-Electronic Engineering, 2000, 27(4): 67-70.