

谐振式超磁致伸缩音频驱动器设计

王 霞,周建军*,孟爱华

(杭州电子科技大学 机械工程学院,浙江 杭州 310018)

摘要:超磁致伸缩驱动器具有输出振幅过小导致转换效率不高的问题,针对此问题提出了谐振式超磁致伸缩音频驱动器的理念,利用音叉的机械结构实现了超磁致伸缩驱动器振幅的放大,同时利用音叉的频响曲线去修正超磁致伸缩驱动器的频响曲线,以提升扬声器响度。研究了音叉的选择,及其中超磁致伸缩驱动器的具体设计过程,并在专业消音室对谐振式超磁致伸缩音频驱动器进行了性能测试,测试结果表明驱动器改进后超磁致伸缩扬声器在音响上有显著提升。

关键词:谐振式;超磁致伸缩材料;音频驱动器

中图分类号:TH7;TG14

文献标识码:A

文章编号:1001-4551(2010)06-0035-05

Resonate giant magnetostrictive audio actuator

WANG Xia, ZHOU Jian-jun, MENG Ai-hua

(College of Mechanical Engineering, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: The giant magnetostrictive actuator has a problem of limited output amplitude, and this problem causes low transform efficiency. In order to solve the problem, resonate giant magnetostrictive actuator was put forward, which using the tuning fork's mechanical structure to improve the output amplitude and using the tuning fork's frequency response to improve giant magnetostrictive actuator's frequency response. The choosing of tuning fork was studied and the design process of giant magnetostrictive actuator was described in detail. Finally, some performance test was made in professional anechoic chamber for the resonate giant magnetostrictive actuator. The result shows that the giant magnetostrictive with audio actuator has a remarkable improvement in loudness.

Key words: resonant; giant magnetostrictive material; flat panel loudspeaker

0 引 言

超磁致伸缩材料目前已成功地应用于声纳系统、超声换能器、致动器、减振系统及大扭矩低速马达等方面^[1]。不同于传统的扬声器,超磁致伸缩扬声器是以超磁致伸缩材料在外部激励磁场的作用下,改变材料内部磁畴的排列,达到材料长度或体积的改变以直接驱动音板发声,设计上突破了传统扬声器采用音圈驱动和振膜发声的方式^[2]。

本研究针对目前超磁致伸缩音频驱动器存在的不足,提出全新解决方法。

1 谐振式超磁致伸缩音频驱动器发声原理

不同于传统扬声器,超磁致伸缩扬声器利用超磁致伸缩棒击打硬质物品,使其振动再通过振动媒介如空气、水等发音。其首要任务就是选择超磁致伸缩棒的固定点,本设计采用固定在调音音叉上的方式,利用音叉的调音谐振性能驱动硬质平面振动发音,以提高音质。利用音叉对于某范围内极佳的频率响应曲线去修正当前仍有较多缺陷的磁致伸缩驱动器频率响应曲线,采用多点驱动,将音叉的频响曲线与原磁致伸缩驱动器的曲线叠加使最终的频响曲线较平坦^[3-5]。解决

收稿日期:2009-09-07

作者简介:王 霞(1985-),女,浙江绍兴人,主要从事智能故障辨识、GMM 平板扬声器及驱动器等方面的研究。E-mail: wangx_0918@126.com

通信联系人:周建军,男,教授,硕士生导师。E-mail: zhoujj@hdu.edu.cn

了目前单一加大功放倍数使得功率消耗大、成本高,易产生失真等问题。

发音原理为:音源信号经功率放大,通过电磁感应将交变电流信号转化为交变磁场,再由超磁致伸缩材料转化为机械振动信号,机械振动信号直接加载在音叉上,使音叉受迫振动,多点音叉谐振信号叠加激励硬质物体将信号放大,最终实现扬声的功能。采用多点互补的方式实现单点发音缺陷的弥补,在具体设计过程中,除了音叉选择外,如何获得最佳驱动器的输出也是研究重点。

2 机械结构设计

谐振式超磁致伸缩音频驱动器机械结构如图 1 所示,主要包括音叉、垫片、超磁致伸缩驱动器等。

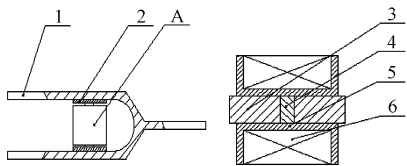


图 1 谐振式音频驱动器机械结构

1—音叉;2—垫片;A—超磁致伸缩驱动器;3—超磁致伸缩棒;4—永久磁铁;5—线圈骨架;6—线圈

其中,音叉作为驱动器输出的放大装置,起到直接线性放大振幅的作用,并由其频响修正超磁致伸缩驱动器频响的缺陷部分。在驱动器设计中,永久磁铁施加了适当的偏置磁场可消除倍频现象,增大磁致伸缩线性段,减小驱动器响应的不灵敏区,此时驱动磁场由驱动线圈产生的交变磁场和永久磁铁产生的恒定偏置磁场叠加而成。

适当轴向预紧力可使超磁致伸缩棒内部的磁畴在零磁场强度时尽可能地沿着与轴向垂直的方向排列,当外加激励磁场时即可获得更大的轴向磁致伸缩应变。同时对磁机耦合系数和场耦合系数也有影响,适当大小的预紧力可以提高超磁致伸缩驱动器的输出位移和能量转换效率^[6]。本研究选择由垫片及音叉双臂的夹紧力给超磁致伸缩棒施加轴向预紧力,从而获得较大的磁致伸缩,提高驱动器的位移输出。通过控制输入电流可以控制驱动器的输出位移和输出力。

3 音叉的选择

考虑到本设计使用方式,其作为超磁致伸缩驱动器伸缩幅度的放大装置,为起到机械杠杆的效果,选材需满足一定硬度与弹性要求;最终音频驱动器需与硬质平面相贴合,且超磁致伸缩驱动器安装在双臂之间,

这都给叉臂的形状与间距提出了相应要求。

本研究所选音叉为标准调音音叉,材料为弹簧钢,叉臂长度为 1.3 cm 方型,开口尺寸为 1.8 cm,叉柄长度为 4 cm,谐振频率为 512 Hz。

4 磁致伸缩驱动器具体设计

4.1 线圈设计

以最小的电流,产生尽可能大的磁场是驱动线圈设计的基本出发点。由螺线管磁场公式^[7]可知,要求电流和线圈的匝数 N 尽可能大;线圈通过电流 I 时,发热量应尽可能小,由 $Q = I^2 R$ 可知线圈电阻应尽量小。

4.1.1 绕线方式设计

由有限长径比螺线管磁场公式推导,并将多层螺线管视为长度相同的而长径比 (l/r) 不同的多个线圈叠加,其轴线中心处磁感应强度经推导可得:

$$B = 4\pi\mu_0 n_1 n_2 I l \ln \frac{r_2 + \sqrt{r_2^2 + l^2}}{r_1 + \sqrt{r_1^2 + l^2}} \quad (1)$$

式中 μ_0 —真空磁导率; n_1 —每层绕线单位长度上的匝数; n_2 —单位厚度上的绕线层数; I —线圈中通过的电流; l —线圈长度; r_1 、 r_2 —螺线管内、外径。

若螺线管足够细长,即 $l \geq r_1$, $l \geq r_2$,则在多层螺线管轴线中心点处的磁场强度可近似为:

$$B = 4\pi n_1 n_2 I (r_2 - r_1) = 4\pi n I \quad (2)$$

其中, $n = n_1 n_2 (r_2 - r_1)$, 是螺线管单位长度上的总匝数。

多层线圈的 l/r 比值因层数不同而不同,最内层的 l/r_1 最大,而最外层的 l/r_2 最小,因此,线圈中磁场的平坦区的宽度与层数相关。在总匝数相同的条件下,层数愈多,平坦区愈窄,轴向气隙利用率愈低。对驱动器的要求是线性工作区要大,强而均匀的激励磁场。从几何尺寸考虑,螺线管应尽可能做得细而长,保证螺线管内磁场强度的均匀。考虑到驱动器不能太大,对于 $l/r < 6$ 的螺线管的磁场分布在 100 Oe 的驱动磁场下,如图 2 所示,可得磁场分布很不均匀,中间较高,而靠近螺线管两端磁场很低,因此要使线圈轴向磁场较均匀,绕线时两端的匝密度应该大于中间部分的匝密度。

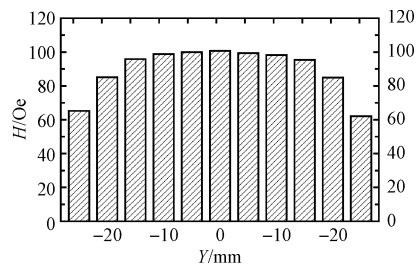


图 2 螺线管磁场分布

4.1.2 线圈长度和内径设计

驱动线圈的长度应略大于超磁致伸缩棒的设计长度;内腔直径应尽可能接近超磁致伸缩棒的直径。本研究选取超磁致伸缩棒的规格为 $\Phi 2.5 \text{ mm} \times 12 \text{ mm}$, 根据所得音叉间距为 18 mm , 骨架长度直接决定了线圈的长度, 选择 $L = 15 \text{ mm}$ 的线圈长度, 17 mm 的骨架长度, 预留 1 mm 的间隙。由于选择的永久磁铁的尺寸为 $\Phi 5.5 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$, 在尽可能减小线圈骨架又同时使永久磁铁与骨架不产生摩擦力的情况下, 选择骨架的内径为 6.5 mm , 骨架外径为 7.5 mm 。线圈的内径与骨架的外径相等, 即 $d_1 = 7.5 \text{ mm}$ 。

4.1.3 电流密度选取

电流密度 J 取得越高, 则驱动线圈发热越厉害。电流密度 J 需根据驱动线圈磁路的工作制、对超磁致伸缩棒温升的整体要求以及冷却方式来选择。

由于本研究中设计的超磁致伸缩驱动器, 属于长期工作制, 并且温度升高会引起驱动器的性能缓慢下降。根据磁路在各种工作制下允许的电流密度值范围, 其中长期工作制: $J = 2 \text{ A/mm}^2 \sim 4 \text{ A/mm}^2$, 故实际取值为 $J = 2 \text{ A/mm}^2$ 。

4.1.4 激励电流与线圈裸线直径确定

根据电源设备, 即可选取激励电流 I 。将选取的电流密度 J 和工作电流 I 代入下式可得线圈导线裸线直径为:

$$d_n = 1.13 \sqrt{\frac{I}{J}} \quad (3)$$

最终选取激励电流 $I = 0.08 \text{ A}$, 得到导线裸线直径 $d_n = 0.226 \text{ mm}$, 在线规表上查得相应的带皮导线的线径为 $d_j = 0.23 \text{ mm}$ 。

4.1.5 估算驱动线圈厚度和总匝数

电磁线圈的几何尺寸是影响电磁转化效率的一个主要因素, 电磁线圈几何形状对所产生的磁场强度的影响可表示为:

$$H_{qd} = G_{qd} \sqrt{\frac{P_{qd} F}{\rho a_1}} \quad (4)$$

式中 H_{qd} —电磁线圈产生的磁场强度; G_{qd} —几何形状参数; $P_{qd} = RI^2$ (R —电磁线圈电阻; I —励磁电流强度); F —线圈导线系数, 导线横截面为圆形或方形时其值分别为 $\frac{\pi}{4}$ 或 1 ; ρ —导线电阻率。

且:

$$G_{qd} = \frac{1}{5} \left[\frac{2\pi\beta}{(\alpha^2 - 1)} \right]^{\frac{1}{2}} \ln \left[\frac{\alpha + (\alpha^2 + \beta^2)^{\frac{1}{2}}}{1 + (1 + \beta^2)^{\frac{1}{2}}} \right] \quad (5)$$

$$\text{其中: } \alpha = \frac{b}{a}; \beta = \frac{l}{2a}; \gamma = \frac{a}{r}.$$

式中 a 、 b —电磁线圈内圆半径、外圆半径, a 越小越好; r 、 l —磁致伸缩材料棒的外圆半径和长度。

电磁线圈的几何形状如图3所示, G_{qd} 参数示意图如图4所示^[8]。

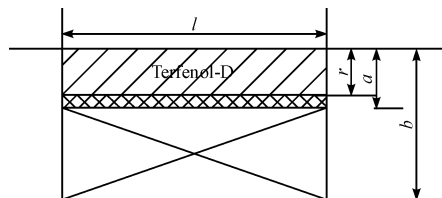


图3 电磁线圈几何形状

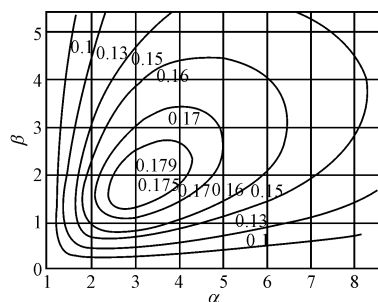


图4 G_{qd} 参数示意图

由 G_{qd} 参数图可知, 当 $G = 0.179$, 即 $\alpha = 3, \beta = 2$ 时电磁线圈具有优化的几何形状, 即 $b = 3a, l = 2a$, 当线圈壁厚与线圈内径相同, 线圈长度也与线圈内径相同时, 该几何形状的电磁线圈磁能耗最低, 电磁转化效率最高, 所产生的磁场强度相对最大。

根据 G_{qd} 参数, 对直径为 2.5 mm Terfenol-D 试样, 相应电磁线圈的优化尺寸应为线圈壁厚 7.5 mm , 长度 7.5 mm 。但根据试样尺寸、偏置磁铁的尺寸以及提高磁-机械耦合率两方面考虑, 选取 $G_{qd} = 0.175$, 即 $\alpha = 2.5, \beta = 2, b = 2.5a = 9.375, l = 4a = 15$, 而确定线圈尺寸为线圈厚度 5.625 mm , 长度 15 mm 。由于试样尺寸限制, 故确定线圈尺寸: 线圈壁厚 e 为 4.3 mm , 长度为 15 mm 。

线圈每排所绕匝数:

$$n_1 = \frac{L}{k_\eta d_j} \quad (6)$$

线圈高度上的层数:

$$n_2 = \frac{e}{k_\beta d_j} \quad (7)$$

式中 d_j —线圈导线的外径; k_η —线圈的排绕系数; k_β —线圈的叠绕系数。

排绕系数与叠绕系数的值随导线直径不同而变化。查不同导线直径条件下线圈的排绕系数和叠绕系

数取值表可由导线直径,查得 $k_\eta = 1.16, k_\rho = 1.10$ 。将系数代入参数后得: $n_1 = 56.22$ 匝, $n_2 = 17$ 层。

线圈的总匝数 N 为:

$$N = n_1 n_2 \quad (8)$$

最终得到:试样 $\Phi 2.5$ mm, $e = 4.3$ mm, $L = 15$ mm, $N = 955$ 。

4.2 偏置磁场设计

参考超磁致伸缩棒的 $\lambda - H$ 曲线,笔者选择了线性度、陡峭程度均较优的一段曲线作为研究对象,确定驱动磁场下限 H_l 与上限 H_h ,则驱动磁场的范围为 $H_l \sim H_h$ 。根据选择的驱动磁场范围,偏置磁场 H_b 为:

$$H_b = (H_l + H_h) / 2 \quad (9)$$

激励磁场 H_e 为:

$$H_e = (H_h - H_l) / 2 \quad (10)$$

选定驱动磁场范围为 12 kA/m ~ 30 kA/m,可得到偏置磁场 $H_b = 21$ kA/m,激励磁场 $H_e = 9$ kA/m。

本研究采用永久磁铁产生偏置磁场的方法。磁铁为片状稀土钕铁硼磁体,厚度为 2 mm。由两片永久磁铁和材料棒轴向交替排列,并采用 3 块永久磁铁组成偏置磁场,如图 5 所示。

从图 5(b)中可以看出,该方式可以有效地约束由电磁线圈产生地磁力线,进而增强其磁场强度,而使驱动器获得较大的输出力。

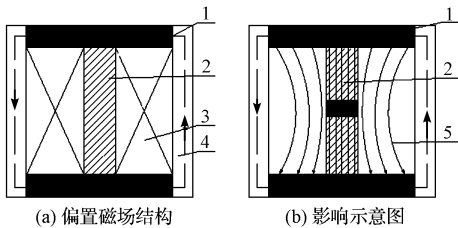


图 5 驱动器偏置磁场结构及影响示意图

1—永久磁铁;2—超磁致伸缩棒;3—电磁线圈;4—套筒;
5—磁力线

4.3 预紧力选择

轴向预紧力使超磁致伸缩棒内部磁畴在零磁场时尽可能地沿着与轴向垂直地方向排列;当外加磁场激励时,大部分磁畴突然转向外磁场方向,以此获得更大的应变,从而增大驱动器的位移输出。此外超磁致伸缩材料为脆性材料,能承受约 700 MPa 的压力,但其抗拉强度只有约 28 MPa,施加一定的预紧力可以避免材料工作时受到拉伸作用。根据现有资料,依据不同预紧力下 Terfenol-D 的 $\lambda - H$ 曲线,确定预紧应力大小为 7 MPa。

为实现调整的简便性与美观性,本研究直接利用音叉叉臂来施加预紧力,在叉臂与超磁致伸缩棒之间

装有弹性垫片,通过调整垫片厚度,来调整预紧力大小。鉴于蝶形弹簧做垫片可能会影响到磁致伸缩棒纵向伸缩与音频信号的线性关系,因此本研究选用弹性橡胶。

5 设计成果

依据上述设计方法,研制的谐振式超磁致伸缩音频放大机构如图 6 所示,音源信号通过功放后输入超磁致伸缩音频放大机构,将该机构粘贴于任意硬质平面上即可发出音乐。

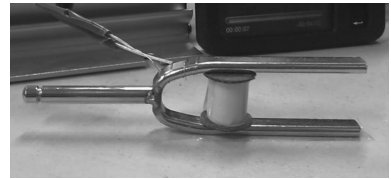


图 6 谐振式超磁致伸缩音频驱动器实物图

经实验测试,将谐振式超磁致伸缩音频放大机构粘贴于木质平板上会取得较优良的音质,因此笔者选用吉他的发声板做硬质媒介。在专业消音室进行测试,如图 7 所示,所得频响曲线如图 8 所示,实线为谐振式超磁致伸缩音频驱动器的频响曲线,虚线为普通超磁致伸缩音频驱动器的频响曲线,相比之下改进后的驱动器在响度上有明显提升,尤其在 512 Hz 频率处,提升显著。



图 7 测试现场照片

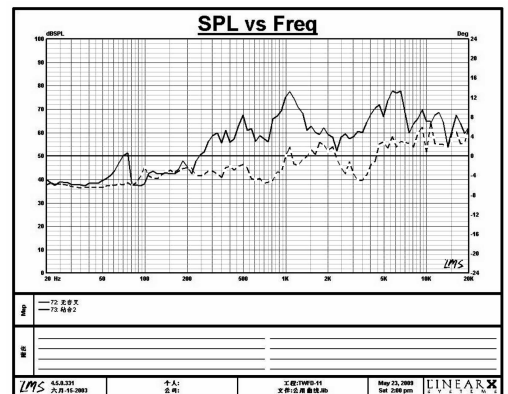


图 8 测试结果

6 结束语

笔者研制了谐振式超磁致伸缩音频驱动器,讨论了谐振式驱动器的设计过程,包括音叉选择、线圈设计、磁路设计等具体计算过程。测试结果表明,音叉的引入确实提高了超磁致伸缩驱动器的输出幅度,达到了提升音响的效果。由于时间及各项条件的限制,在多点分布式谐振补偿方面的探索,有待进一步研究解决。

参考文献 (References):

[1] CLAEYSSSEN F, LHERMET N, LETTY R L, et al. Actuators, transducers and motors based on giant magnetostrictive materials[J]. **Journal of Alloys and Compounds**, 1997, 25(8):61-73.

[2] 王博文,闫荣格. 稀土超磁致伸缩材料、应用和器件[J].

河北工业大学学报,2004,33(2):16-22.

[3] 邵忍平. 机械系统动力学[M]. 北京:机械工业出版社, 2005:150-176.

[4] 冯秉铨. 电声学基础[M]. 北京:高等教育出版社,1957: 130-144.

[5] VRANISH J M, NAIK D P, RESTORFF J B, et al. Magnetostrictive direct drive rotary motor development[J]. **IEEE Transactions on Magnetics**,1991,27(6).5355-5357.

[6] 郭义杰,刘楚晖. 超磁致伸缩驱动器设计准则的建立[J]. 工程设计学报,2004,11(4):187-191.

[7] 贾振元,郭东明. 超磁致伸缩材料微位移执行器原理与应用[M]. 北京:机械工业出版社,2005.

[8] 杨斌堂,陶华,PRELLE C,等. 磁致伸缩微小驱动器驱动电磁线圈的设计研究[J]. 机械科学与技术,2004,23(8):982-985.

[编辑:张翔]

(上接第34页)

$$\theta = \pi - \arctan \theta_1 - \arctan \theta_2 = \pi - \arctan \frac{BD}{AD} - \arctan \frac{CE}{AE} = \pi - \arctan \frac{y_2 - y_1}{x_1 - x_2} - \arctan \frac{y_3 - y_1}{x_3 - x_1} \quad (6)$$

基于以上测量公式,可测得车刀角度的最佳估计值。实验结果如表1所示(其中的角度参考值通过附加实验机构测得)。

表1 车刀角度实验数据

车刀名	车刀一	车刀二	车刀三	车刀四
角度测量值/deg	106.28	104.08	109.78	108.46
角度参考值/deg	105.42	103.26	108.91	107.68
角度误差值/deg	0.86	0.82	0.87	0.78

从表1可以看出,本研究采用的车刀角度测量方法能将角度误差值控制在1°范围之内,能较好地测量车刀的角度值。因此,本研究适用于零件自动加工场合^[10],根据测得的车刀角度,可以自动判断刀具的磨损情况并及时换刀,从而避免零件加工质量的下降以及其他损失。

5 结束语

本研究提出了一种基于图像处理的车刀角度测量系统。实验证明,采用本研​​究所述方法测量车刀角度是可行的,且本研究提出的方法在图像数据不大、图像处理实时性要求不高的场合比较适合。随着实时图像

处理的发展趋势,工业上对图像处理的要求越来越高。因此,本设计方案还可以作进一步的改进,如采用更高分辨率的CCD相机,选择运算速度更快的器件等,从而更好地提高测量精度。

参考文献 (References):

[1] 郑秀莲,徐振浩,张利. 基于纹理的刀具状态检测技术[J]. 机电工程,2009,26(8):27-29.

[2] 任翀,侯学元,韩淑华. 高速铣削铣刀切削受力的有限元分析[J]. 机电工程技术,2008,37(6):20-22.

[3] 陈颖,张伟,李志伟,等. 基于图像处理的直线刃刀具角度测量[J]. 工具技术,2007,41(5):86-88.

[4] 张国雄. 测控电路[M]. 北京:机械工业出版社,2008.

[5] DELLECKER R. Boundary scan bursts into the modern production facility[J]. **IEEE Aerospace and Electronics Systems**,2001(6):21-22.

[6] 曾欢,王浩. 图像边缘检测算法的性能比较与分析[J]. 现代电子技术,2006,29(1):255-258.

[7] 邱英. Matlab在线性参数最小二乘法处理中的应用[J]. 科技广场,2007,15(5):165-166.

[8] 李建跃,杨丰. 螺旋锥齿轮齿面接触区边缘提取算法研究[J]. 机械,2007,34(1):57-59.

[9] 严慧敏,何炳蔚. 机械零件二维几何尺寸和形状检测系统研究与开发[J]. 机械,2008,35(10):70-72.

[10] PAULI J. Learning to Recognize and Grasp Objects[M]. Kluwer Academic Publishers,1998.

[编辑:张翔]