

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2016.01.08

# 基于压电陶瓷的大振幅振动台研究

殷亚东<sup>1</sup>, 杨慧玉<sup>2</sup>, 张大治<sup>1</sup>

(1. 中航工业北京长城计量测试技术研究所, 北京 100095; 2. 重庆建设工业(集团)有限责任公司, 重庆 400054)

**摘要:** 为实现对高频大振幅传感器的校准, 研制了一种基于压电陶瓷的大振幅振动台。用 PZT8 材料的压电陶瓷片堆叠作为动元件, 用功率放大器、电感箱和压电陶瓷片堆叠构成的 LC 谐振电路, 对信号源输出信号进行功率和电压放大, 驱动压电陶瓷堆叠振动。该振动台可以实现很小失真的振动, 工作频率范围 2 ~ 5 kHz, 振幅最大可达到 7  $\mu\text{m}$ , 失真度小于 5%。

**关键词:** 振动台; 压电陶瓷; 大振幅; LC 谐振

**中图分类号:** TB937; TP212.1

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1674-5795(2016)01-0034-04

## Research on Large Amplitude Vibrators Based on Piezoelectric Ceramic

YIN Yadong<sup>1</sup>, Yang Huiyu<sup>2</sup>, ZHANG Dazhi<sup>1</sup>

(1. Changcheng Institute of Metrology &amp; Measurement, Beijing 100095, China;

2. Jianshe Industries Co., LTD. (Group), Chongqing 400054, China)

**Abstract:** A large amplitude vibrator is designed based on piezoelectric ceramic to perform calibration of large amplitude vibrators. The actuating element is made of PZT8 material. A power amplifier and a LC resonant circuit which composes of inductance and piezoelectric ceramic magnify input signals and drive the vibration of piezoelectric ceramic. Vibration frequency ranges from 2 kHz to 5 kHz, the maximum amplitude reaches 7  $\mu\text{m}$  and the distortion is lower than 5%.

**Key words:** vibrator; piezoelectric ceramic; large amplitude; LC resonant

## 0 引言

压电陶瓷具有体积小, 位移分辨力高, 动态范围大, 承载能力强等特点, 用它制成的压电陶瓷振动台广泛应用于加速度计校准、微位移输出装置、力发生装置、机器人等领域。

利用压电陶瓷做位移台主要是利用压电陶瓷的逆压电效应, 即在压电陶瓷极化方向施加电压时, 压电陶瓷会在纵向产生形变, 且形变的大小与施加的电场大小成正比相关<sup>[1]</sup>。当施加的电场为交变电场时, 压电陶瓷的形变会随着电场的变化而变化, 且变化情况与电场变化情况一致<sup>[2]</sup>。压电陶瓷振动台的最大振幅、位移失真度等主要取决于压电陶瓷堆叠和电源驱动器<sup>[3]</sup>。目前, 电源驱动器主要是静态电源驱动器, 动态电源驱动器一般驱动频率低、驱动能力弱<sup>[4]</sup>; 驱动

能力强、动态范围大的电源驱动器价格非常昂贵。本文利用压电陶瓷的电容特性, 与电感组成 LC 谐振放大电路, 结合功率放大器组成交流驱动电源, 可以低成本实现大动态范围、大功率的驱动。

## 1 压电堆叠的工作原理

压电陶瓷位移台振动是利用压电陶瓷的逆压电效应, 即在压电陶瓷极化方向施加电压时, 压电陶瓷会在纵向产生形变, 且形变的大小与施加的电场大小成正比相关<sup>[5]</sup>。当多片陶瓷片叠加在一起, 电路上并联施加电场时, 位移与施加电场关系如式(1)所示。

$$S = nd_{33}V \quad (1)$$

式中:  $S$  为压电陶瓷位移大小;  $n$  为陶瓷片层数;  $d_{33}$  为陶瓷逆压电系数, 该系数与陶瓷片本身性质有关, 且与施加电压的频率有关;  $V$  为沿陶瓷片纵向所施加的电压。对同一陶瓷材料, 当频率不变时, 压电系数  $d_{33}$  为定值, 压电陶瓷的振幅与两端所加电压幅值成线性关系。较多层压电陶瓷片进行叠加可以提高位移台的振幅。本实验中选用单片厚度 1 mm, PZT8 材料的 72 层压电陶瓷堆叠。

收稿日期: 2015-12-11

**作者简介:** 殷亚东(1988-), 男, 硕士研究生, 研究方向为激光测振仪信号数字解调; 杨慧玉(1977-), 女, 研究方向为振动冲击计量。

2 方案设计

压电振动台的工作原理如图 1 所示,采用 72 片、单片厚度 1 mm 的 PZT8 压电陶瓷片组成压电叠堆,压电陶瓷片微容性负载与可调谐电感箱组成 LC 谐振回路。根据谐振电路公式

$$f_c = \frac{1}{2\pi \sqrt{LC}} \tag{2}$$

式中: $f_c$  为谐振频率; $C$  为压电陶瓷片的电容值; $L$  为电感箱的电感值。通过调节功率放大器的放大倍数和可调谐电感箱的电感值,使得压电振动台与电感箱产生谐振,从而使功率放大器输出电压达到最高值。

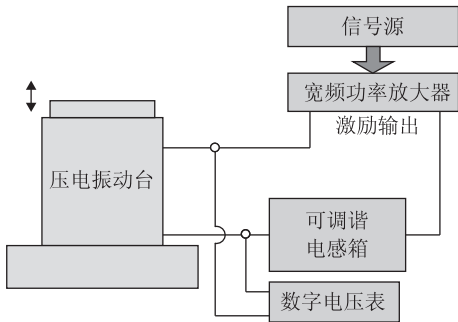


图 1 高频微振幅振动装置原理框图

图 2 所示为压电振动台的结构设计方案,压电叠堆为中空结构,采用贯通式的螺钉将台面与基座连接在一起,并对压电叠堆施加一定的预紧力,当压电叠堆在交变电流作用下膨胀和收缩时,就会带动台面产生相应频率的振动激励。

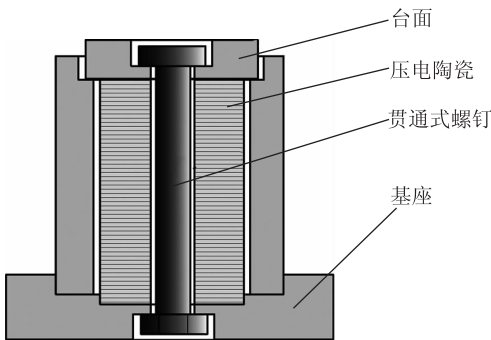


图 2 压电振动台的结构

3 LC 谐振电路

当使用电感箱与压电叠堆组成 LC 回路时,考虑到二者各自的损耗,实际的等效电路可简化为图 3,其中, $R_0$  包括功放的输出电阻、电感箱的静态电阻和动态损耗电阻, $R_m$  为压电陶瓷动态损耗电阻。

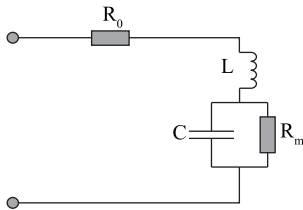


图 3 LC 谐振回路原理图

串联谐振电路的品质因数  $Q$ ,即谐振时电感或电容上电压有效值( $U_L$  或  $U_C$ )与电源上电压有效值  $U$  之比为<sup>[6]</sup>

$$Q = \frac{U_L}{U} = \frac{U_C}{U} \approx \frac{\omega_0 L}{R_0} = \frac{1}{\omega_0 C R_0} \tag{3}$$

式中: $\omega_0$  为谐振电压频率。由式(3)可知,谐振电路中压电陶瓷两端电压的放大倍数与电感箱的品质因数正相关,与电容大小负相关。

电感线圈由铜线绕制而成,有的还采用磁芯。这样,不仅有铜损耗还有铁涡流损耗与磁滞损耗。同时由于分布电容的存在,随频率升高,还会出现不可忽视的容抗。实际的电感总是由纯电感  $L$ 、直流电阻  $r_R$  和损耗电阻串联而成。电容是由金属极板间隔以介质而构成,它必然也有损耗即金属损耗和介质损耗。实际的电容也可以看作电容  $C$  及其损耗电阻串联而成<sup>[8]</sup>。在频率为  $10^3 \sim 10^4$  Hz 范围内已不能忽略,并且电感的损耗电阻随着频率的增高而增大,电容的损耗电阻随着频率的增高而减小。

实验中选用 GX9/0-3H 高  $Q$  高频电感箱, $Q$  值 90 ~ 100,直流电阻 1 ~ 5  $\Omega$ ,压电陶瓷电容为 1.5  $\mu$ F,电感的动态损耗为  $\sqrt{(\omega L)^2 + r_R^2}$  的 8% ~ 10%, $\omega$  为电感箱两端的电压频率。实验表明,该 LC 谐振电路对电压的放大倍数可达 100 倍以上,不同频率下的 LC 谐振电路对电压放大倍数如表 1 所示。

| 表 1 不同频率下 LC 电路对电压的放大倍数 |             |             |       |
|-------------------------|-------------|-------------|-------|
| 频率/kHz                  | 输入电压(有效值)/V | 输出电压(有效值)/V | 放大倍数  |
| 1                       | 0.5         | 83.6        | 167.2 |
| 2                       | 0.5         | 71.2        | 142.4 |
| 3                       | 0.5         | 67.4        | 134.8 |
| 4                       | 0.5         | 64.4        | 128.8 |
| 5                       | 0.5         | 56.7        | 113.4 |

4 关键问题解决

4.1 大振幅实现

压电陶瓷做振动台利用的是其逆压电效应(即在压电陶瓷极化方向施加电压时,压电陶瓷会在纵向产生

形变,且形变的大小与施加的电场大小成正相关),故增大压电陶瓷两端电压是产生大振幅的关键之一。本文采用功放结合 LC 谐振的方式,利用压电陶瓷的容性与高  $Q$  电感组成 LC 谐振电路,实现对电压的放大。结合大功率功放为整个电路提供的大电流,压电陶瓷两端电压有效值可达到 200 V。

由式(1)可知,压电陶瓷的振幅与陶瓷片的层数成正比,为提高振动台的最大振幅,本文采用 72 片陶瓷片进行堆叠,使最大振幅可以达到单层压电陶瓷的 72 倍。大电压与多层堆叠共同作用实现了振动台的大振幅。

#### 4.2 失真度的控制

功放的输出信号经过 LC 谐振电路直接加载到振动台两端,功放输出信号的失真度直接反应在振动台的振动信号上。LC 谐振电路对失真度影响很小,可以忽略。振动台振动信号的失真度主要由功率放大器决定。使用 QSA 公司的 GX5 和使用 BK 公司的 2719 两个失真度不同的功率放大器驱动情况下,失真度变化曲线如图 4 所示。

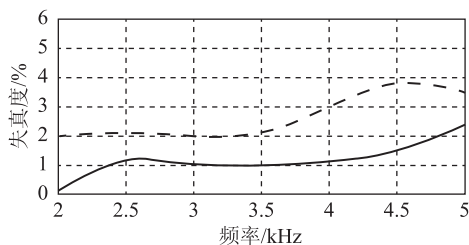


图4 两种功放驱动下失真度曲线

图4中虚线是GX5功放驱动时失真度曲线,实线是2719功放驱动时的失真度曲线。由此可见,功放对振动台位移失真度有较大影响。

实验中,当振动台中心的紧固螺栓松紧度不同时对振动信号的失真度会产生一定的影响。对此,本文做了相关的实验。在相同振幅、不相同频率、不同松紧度条件下分别测试,测试结果如图5所示。

图5中,曲线从上至下依次为2,3,4,5 kHz的失真度变化曲线,螺栓的松紧度从1至5逐渐递增。不难发现在同样振幅下,振动台振动的失真度随着螺栓松紧度的增加而逐渐降低。通过对振动信号频率谱分析,发现原因在于增加螺栓的松紧度会对高次谐波振动起到一定抑制作用,从而使失真度降低。由于实验条件限制,暂时未对松紧度量化测试。但是,增强

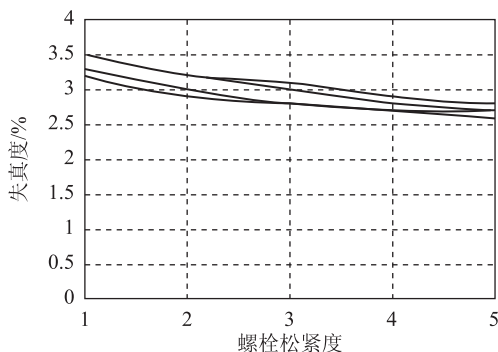


图5 螺栓松紧度—失真度曲线

紧固螺栓的松紧度会增加功率消耗,减小振幅<sup>[8]</sup>,所以在选择松紧度时需要平衡振幅、失真度和功率消耗。本文选用的GX5功放最大输出功率可达600 W,松紧度选取表2中的松紧度4,振幅、失真度和功耗可以同时满足需求。

#### 5 实验

在压电陶瓷堆叠两端加10 V(有效值)正弦激励时,不同频率下振动幅度如图6所示。

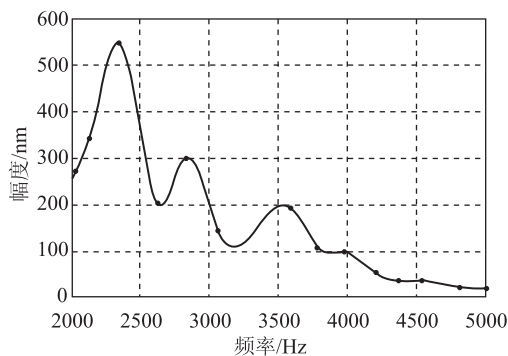


图6 10V正弦激励下幅频曲线

由图6可知,在同样的电压驱动下,不同频率下振幅不完全相同,2~5 kHz范围内振幅随频率增加整体呈下降趋势。振动位移失真度与振幅正相关,即振幅越大位移失真度越大,频率对于位移失真度影响很小。在2 kHz处最大振幅可达到7  $\mu\text{m}$ ,此时振动信号失真度为4.2%。位移曲线如图7所示。

实验结果表明该振动台振动范围覆盖2~5 kHz,最大振幅可达到7  $\mu\text{m}$ ,失真度小于5%。

#### 6 结束语

采用螺钉预紧的压电陶瓷片堆叠结构,LC谐振电路和大功率功率放大器设计驱动电路,设计了高频大

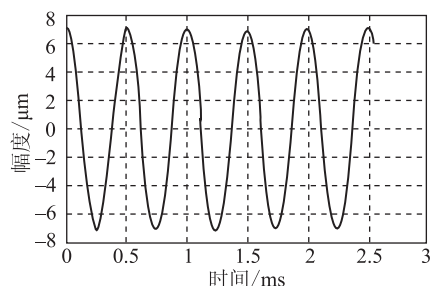


图7 2 kHz 振动位移曲线

振幅微振动台,具有良好的动态特性,较高的频率响应,较大的振动幅度,较低的位移失真度。该振动台的工作频率范围、最大振幅、位移失真度指标达到设计要求,适合高频传感器的校准。

### 参考文献

- [1] Gunnar Gnad, Roland Kasper. Power drive circuits for piezoelectric actuators in automotive applications[C]//IEEE International Conference on Industrial Technology. 2006: 1597-1600.

- [2] 陶继增,王中宇,李程. 压电叠堆在正弦电压激励下振动位移特性的研究[J]. 计测技术, 2006, 26(6): 20-22.
- [3] Agbossou K, Dion J L, Carignan S, et al. Class D amplifier for a power piezoelectric load. [J]. IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics and Frequency control, 2000, 47(4): 1036-1041.
- [4] Yan B, Prasad S E, Blacow R, et al. A linear high-voltage high-power amplifier for use with piezoelectric actuators. [C]//Proceedings of the 6th Cansmart Workshop Smart Materials and Structures. 2003: 247-252.
- [5] 鄢珂,胡敏强,金龙,等. 叠层型压电驱动器的应用研究[C]//第十二届中国小电机技术研讨会. 上海: 中国电子元件行业协会微特电机与组件分会, 2007.
- [6] 田健仲,朱虹,张俊方. 串联谐振电路Q值计算与仿真分析[J]. 首都师范大学学报(自然科学版), 2009(S1): 92-96.
- [7] 梁予,王社柱. 电感电容损耗电阻的讨论[J]. 物理测试, 2002(5): 17-19.
- [8] 陶继增,于娅楠,李金颖,等. 压电陶瓷厚度对硬度计力加载控制稳定度的影响[J]. 航空科学技术, 2010(6): 29-31.

(上接第4页)

- [18] 高磊,翟永成,梁清华,等. 红外焦平面读出电路集成数字输出[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(6): 1686-1691.
- [19] 尹爽,朱颖峰,黄一彬,等. 红外焦平面杜瓦冷屏挡光环杂散辐射的抑制[J]. 红外技术, 2015, 37(11): 916-920.
- [20] 覃钢,李东升. 分子束外延碲镉汞薄膜的砷掺杂技术[J]. 红外技术, 2015, 37(10): 858-863.
- [21] 郑鑫,江天,程湘爱. 波段外激光辐照光导型InSb探测器的一种新现象[J]. 物理学报, 2012, 61(4): 419-425.
- [22] 秦屹. 基于场景的红外焦平面阵列非均匀性校正[D]. 南京: 南京理工大学, 2014.
- [23] 高德红外. 产品中心[EB/OL]. [2016-01-20]. <http://www.wuhan-guide.com/default/category-134.html>.
- [24] 大立科技. 产品中心[EB/OL]. [2016-01-20]. <http://www.dali-tech.com/products>.
- [25] 张海龙. 专访高德红外董事长黄立: 成就百年老店必须让企业拥有核心竞争力[EB/OL]. (2015-09-10) [2016-01-20]. <http://www.c114.net/news/16/a918044.html>.
- [26] 邢素霞. 外热成像与信号处理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2010.
- [27] Rogalski A. Infrared Detectors for the Future[J]. Acta Physica Polonica, 2009, 116(3): 389-404.
- [28] Rogalski A. History of infrared detectors[J]. Opto-Electronics Review, 2012, 20(3): 279-308.
- [29] 岳桢干. 美国Raytheon公司研究人员谈下一代光电/红外探测器的发展(上)[J]. 红外, 2014, 35(8): 47-48.
- [30] 岳桢干. 美国Raytheon公司研究人员谈下一代光电/红外探测器的发展(下)[J]. 红外, 2014, 35(9): 48.
- [31] 岳桢干. 美国研究人员谈红外系统的最新进展(下)[J].

红外, 2015, 36(1): 46-48.

- [32] 岳桢干. 法国Sofradir公司总部将乔迁新址谋求全面发展—各类红外探测器研究现状简介(上)[J]. 红外, 2013, 34(12): 39-44.
- [33] 岳桢干. 法国Sofradir公司总部将乔迁新址谋求全面发展—各类红外探测器研究现状简介(中)[J]. 红外, 2014, 35(1): 45-48.
- [34] 岳桢干. 法国Sofradir公司总部将乔迁新址谋求全面发展—各类红外探测器研究现状简介(下)[J]. 红外, 2015, 36(6): 33-48.
- [35] 袁祥辉. 固体图像传感器及其应用[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 1996.
- [36] 代少升,李季碧,张天骐,等. 红外焦平面阵列成像及其非均匀性校正技术[M]. 北京: 科学出版社, 2015.
- [37] 陈锐,谈新权. 红外图像非均匀性校正方法综述[J]. 红外技术, 2002, 24(1): 1-3.
- [38] 代少升,袁祥辉. 红外图像非均匀性实时校正的新技术[J]. 光学精密工程, 2004, 12(2): 201-204.
- [39] Dai S H, Zhang T Q. A nonlinear piecewise scheme for non-uniformity correction in IRFPA[J]. IEICE transactions on Electronics, 2008, 10: 1698-1701.
- [40] 代少生,高健,张天琪. 一种红外焦平面阵列非均匀性校正的新方法[J]. 半导体光电, 2008, 29(4): 122-126.
- [41] 吴传玺,代少升. 基于中值滤波的红外焦平面阵列非均匀性神经网络校正[J]. 红外, 2010, 21(8): 14-18.
- [42] Dai S H, Zhang T Q. An improved non-uniformity correction algorithm for IRFPA based on neural network[J]. IEICE transactions on Electronics, 2009, 5(5): 736-739.
- [43] 杨立,杨桢. 红外热成像测温原理与技术[M]. 北京: 科学出版社, 2012.