**文章编号:**1004-2474(2017)06-0856-04

# 电荷驱动在高速压电致动平台中的应用

张 康,李 伟,陈 建,冯志华

(中国科学技术大学 工程科学学院,安徽 合肥 230027)

摘 要:一个高速压电驱动平台的性能经常被支撑结构的低谐振频率所限制。采用一种非对称致动器可消除 传到基座上的惯性力,但传统的电压驱动方法会引起严重的率相关迟滞,惯性力补偿效果不佳。该文提出采用电 荷驱动法来消除非对称致动器产生的惯性力。实验表明,在激励电压峰-峰值为 20 V时,采用电荷驱动法,在 110 Hz~10 kHz 内惯性力基本消除,补偿效果比电压驱动方法好。

# Application of Charge Drive to High-speed Piezoelectric-Actuated Platforms

### ZHANG Kang, LI Wei, CHEN Jian, FENG Zhihua

(Department of Precision Machinery and Precision Instrumentation, School of Engineering

Science, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China)

**Abstract**: The performance of a high-speed piezoelectric drive platform is often limited by the low resonant frequency of the support structure. The use of an asymmetric actuator can eliminate the inertial force transmitted to the base. But the traditional voltage drive method can cause severe rate-dependent hysteresis, and the inertial force compensation is not effective. In this paper, the charge drive method is proposed to eliminate the inertial force generated by the asymmetric actuator. The experiments show that the inertial force can be eliminated substantially in the range of 110 Hz to 10 kHz by the charge drive method at an excitation voltage of 20 V. The compensation effect is significantly advantageous over the voltage drive method.

Key words: piezoelectric drive platform; asymmetric actuator; inertial force; rate-dependent hysteresis; charge drive

0 引言

压电致动器因具有紧凑的结构、较大的刚度和 较快的响应速度,被广泛应用于各种微定位平台上。 对于具有大带宽的高速压电驱动平台,一般设计小 尺寸的致动器来获得高谐振频率。但用于安装致动 器的支撑底座由于各种非理想因素的影响,经常呈 现很低的谐振频率<sup>[1]</sup>。低频时,基座的大振动对致 动器的定位影响较大,因此,在驱动过程中这个振动 必须被消除。对传递到基座上的惯性力进行补偿是 一种最常用的思路。最简单的方法是采用对称驱动 结构,即把两个相同的致动器安装在基座两侧同时 激励<sup>[2]</sup>,但此法操作较复杂。文献[3]提出采用一种 非对称致动结构进行惯性力补偿,整个致动器可安 装在基座的同一侧<sup>[3]</sup>。这种方式操作简便,且有利 于实现与其他驱动级的连接<sup>[4]</sup>。由于压电材料具有 动态迟滞效应<sup>[5]</sup>,如果采用传统的电压驱动方式,严 重的率相关迟滞会使惯性力补偿效果较差。基于 压电致动器的应变和电荷成线性关系,本文提出 采用电荷驱动法来激励压电堆以达到更优的补偿 效果。

1 非对称致动结构

由两个相同的压电堆组成的非对称致动器如图 1(a)所示,图中,ε<sub>1</sub>、ε<sub>2</sub>分别是压电堆 P1 和 P2 的应 变。不同于一般的对称结构(见图 1(b)),非对称结

收稿日期:2017-02-13

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51175488);国家科技支撑计划资助项目(2015BAK34B02)

作者简介:张康(1991-),男,江苏海门人,硕士生,主要从事压电高速驱动器的研究。通信作者:冯志华(1964-),男,教授,博士生导师,博士,主要从事压电致动器与传感器、压电变压器、涡流传感、探针显微及微磁场探测的研究。

构中两个压电堆粘在一起,且安装在基座的同一侧。 压电堆 P2 负责驱动,压电堆 P1 用来补偿 P2 产生 的惯性力。压电堆 P2 伸长时,压电堆 P1 按一定的 比例缩短,以使整个致动器的质心相对于基座保持 恒定,这样就没有惯性力传递到基座上引起基座的 振动。



2 电荷驱动

在工作过程中压电堆会有动态迟滞效应,其高 速运动会引起率相关迟滞,这种迟滞强烈依赖于驱 动频率。文献[6]提到在800 Hz时压电堆的满量程 迟滞误差超过了35%。在非对称结构中,两个压电 堆的应变是反相的,如果采用电压驱动,其严重的动 态迟滞会影响惯性力补偿效果。此时如果要使驱动 器在基座上产生的惯性力较小,加在压电堆上的激 励电压必须幅值极小,频率极低,这限制了致动器的 行程和性能,故而必须采用线性驱动的方法,可选择 前馈法<sup>[7]</sup>、反馈法<sup>[8]</sup>和电荷驱动3种方法。在前馈 法中,压电堆的迟滞模型较难建立,且缺少鲁棒性; 反馈法需要使用精度传感器及额外的安装空间,代 价较高;电荷驱动成本较低,适用于高频的场合,故 本文采用此法来激励压电堆。

电荷驱动法主要是基于压电致动器的应变与其 电荷成正比。一个典型的带有电阻作直流反馈的电 荷驱动电路如图 2 所示<sup>[9]</sup>。压电堆被简化为一个可 变电容 *C*<sub>act</sub>,其容值随激励电压和频率呈非线性 变化。



图 2 电荷驱动电路

图 2 中电路的输出电压为

$$V_{\text{out}} = -\frac{R_{\text{f}}}{R_{1}} \times \frac{R_{1}C_{1}j\omega + 1}{R_{\text{f}}C_{\text{act}}j\omega + 1} \times V_{\text{in}}$$
(1)

如果激励频率满足  $\omega \gg 1/(R_1C_1)$ 和  $\omega \gg 1/(R_1C_2)$ ,则式(1)可简化为

$$V_{\rm out} = -\frac{C_1}{C_{\rm act}} \times V_{\rm in} \tag{2}$$

$$Q_{\rm act} = V_{\rm out} \times C_{\rm act} = -C_1 \times V_{\rm in} \tag{3}$$

在这种情况下,压电堆上的电荷 Q<sub>act</sub>和电路的 输入电压 V<sub>in</sub>成线性关系。

根据文献[3],如果两个相同的压电堆的应变满 足  $\epsilon_1 = -\epsilon_2/3$ ,则整个致动器的质心和基座的距离 将保持恒定,如此将无惯性力传到基座上。此时,两 个压电堆的电荷比应满足 1:-3。基于式(3),两个压 电堆的电荷驱动电路的输入电压比也应满足 1:-3。

3 实验结果及分析

## 3.1 实验装置

实验装置示意图如图 3 所示。两个相同的压电 堆(1.22 mm×1.30 mm×1.70 mm,45 nF)粘贴于 悬臂梁的自由端,具有很高品质因数(Q)值的悬臂 梁(45 mm×4.4 mm×0.39 mm)用来放大惯性力 的作用效果。两个幅值比为 1:3的反相驱动电压分 别加载到两个电荷驱动电路的输入端,电路的输 出信号直接驱动两个压电堆。在电荷驱动电路中 使用高功率运放 OPA541(偏置电流为4 pA)。使 用涡流传感器测量悬臂梁的振动,锁定放大器用 来排除外界的干扰。





#### 3.2 悬臂梁的模态仿真

悬臂梁的振动模态采用有限元软件 ANSYS 仿 真获得,结果如图 4 所示。在 110 Hz~10 kHz 共 有 9 个谐振频率,分别为 120.33 Hz、776.51 Hz、 1 324.8 Hz、2 201.4 Hz、2 246.3 Hz、4 323.1 Hz、 6 779.8 Hz、7 097.0 Hz 和 8 578.7 Hz。



图 4 悬臂梁的振动模态

#### 3.3 实验结果

为了突出电荷驱动的优势,本文采用对比试验, 即分别用电压驱动和电荷驱动的方法去激励压电 堆,比较它们的惯性力补偿效果。首先采用电压驱 动法。压电堆 P2 的激励电压峰-峰值设为 20 V,且 在 110 Hz~10 kHz 保持恒定。在不加补偿,即不 驱动 P1 的情况下,由于 P2 的惯性力,悬臂梁自由 端的振幅很大(见图 5 中的实线);加上补偿后,调整 施加在 P1 上的电压来达到最优的补偿效果,此时, 悬臂梁的频响特性如图 5 中的短划线所示。悬臂梁 的振动虽被抑制了,但仍有很大的残余分量。



图 5 最优电压和电荷比下悬臂梁的残余振动

采用电荷驱动的方法。在图 2 中, $C_1 = 100$  nF,  $R_1 = 10 M_{\Omega}$ , $R_f = 20 M_{\Omega}$ 。当压电堆 P2 的电荷驱动 电路的输入电压峰-峰值  $V_{2in} = 10.8$  V 时,在不加 补偿的情况下悬臂梁的振动响应基本和电压驱动一 样,如图 6 所示。同样地,如果调整压电堆 P1 的电 荷驱动电路的输入电压来达到最优的补偿效果,则 悬臂梁的频率响应如图 5 中的点虚线所示。由图 5 可看出,采用电荷驱动法可极大地消除致动器产生 的惯性力,且几乎所有的振动模态都被抑制了。在 不加平衡的情况下,悬臂梁的第三阶和第九阶模态 并没有出现,其主要原因是在这两个模态中悬臂梁



实验中,当悬臂梁的振动在 110 Hz~10 kHz 的每个频率点都达到最小值时,负责驱动和补偿的 压电堆的电压比和电荷比并不是一个常数。理论 上,电荷比应该是恒定的。这种情况可能是两个压 电堆不对心引起的,因为实验中两个压电堆是手工 粘在一起的。这也解释了为什么图 5 中会出现扭转 模态。实验中采用悬臂梁主要是为了放大惯性力的 作用,在实际情况中,必须使用刚度较大的基座。

#### 3.4 讨论

如图 5 所示,采用电荷驱动的方法,致动器对基 座的惯性力并没有被完全消除,其原因可能有两个:

一、两个压电堆的不对心。如图7所示,即使惯性力可以被完全抵消,但因其不在一条直线上,会产生一个额外的扭矩(T)或弯矩(M),或两者都存在,这同样可以引起悬臂梁的振动。



2)剪切力的影响。在理论分析中,两个压电堆的变形被认为是均匀的,且相互独立。事实上,两个压电堆粘在一起,在它们的接触面上会出现一个存在剪切应变的区域,如图 8 所示。在这个区域内压



图 8 非对称致动器的 z 向应变

电堆的应变是不均匀的,只有离该区域较远部分的 应变才是均匀的,且满足  $\epsilon_1 = -\epsilon_2/3$ 。这种情况会 造成理论和实际的误差。

虽然采用电荷驱动法无法完全消除惯性力,但 残余分量已极小,它对致动器性能的影响可忽略,因 为支撑结构的阻尼也会耗散掉大部分的残余能量。

4 结束语

本文鉴于压电材料严重的动态迟滞,以及消除 致动器产生的对基座的惯性力的必要性,采用了电 荷驱动法来激励压电堆。电荷驱动的电路易实现, 且效果显著。实验结果表明,采用电荷驱动法补偿 惯性力比电压驱动法好,这种方法对于大带宽和大 量程的应用非常有效。实验中,施加在负责驱动的 压电堆上的电压峰-峰值只有 20 V。在大部分的场 合,所施加的电压峰-峰值远大于 20 V,可以预见此 时电荷驱动法的优越性将更突出。

#### 参考文献:

- [1] YONG Y K, MOHEIMANI S O R. A compact xyz scanner for fast atomic force microscopy in constant force contact mode[C]//S. l. : 2010 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, IEEE, 2011: 225-230.
- [2] FLEMING A J, KENTON B J, LEANG K K. Bridging the gap between conventional and video-speed scanning probe microscopes [J]. Ultramicroscopy, 2010, 110(9):1205-1214.
- [3] YAN G Y, LIU Y B, FENG Z H. Asymmetric actuating structure generates negligible influence on the supporting base for high performance scanning probe mi-

(上接第 855 页)

[7] 程耀庆,张闯,贺学锋,等.基于压电振动能采集器的无 线频率检测节点[J]. 压电与声光,2014,36(6): 981-986.

CHENG Yaoqing, ZHANG Chuang, HE Xuefeng, et al. A wire-less frequency detection node based on piezoelectric vibration energy harvesters[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2014, 36(6):981-986.

[8] 楼梦麟,谭广宝.公路交通运行引起的振动实测及其衰减分析[J].力学季刊,2013,34(4):663-672.
 LOU Menglin, TAN Guangbao. In situ experiment and attenuation analysis of environmental vibration by tunnel and road traffic[J]. Chinese Quarterly of Mechanics,2013,34(4): 663-672.

croscopies[J]. Applied Physical Letters, 2014, 104 (6): 3-5.

- YAN G Y, LIU Y B, FENG Z H. A dual-stage piezoelectric stack for high-speed and long-range actuation
   [J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2015, 20(5): 2637-2641.
- [5] WONG P K, XU Q S, VONG C M, et al. Rate-dependent hysteresis modeling and control of a piezostage using online support vector machine and relevance vector machine[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2012, 59(4):1988-2001.
- [6] HU H, MRAD R B. On the classical Preisach model for hysteresis in piezoceramic actuators [J]. Mechatronics, 2003, 12(2): 85-94.
- [7] 赵广义,王伟国,李博,等. 压电陶瓷迟滞逆模型的 前馈 PID 控制[J]. 压电与声光,2014,36(6): 914-916.
  ZHAO Guangyi, WANG Weiguo, LI Bo, et al. The feed-forward and PID control of piezoelectric ceramic hysteresis inverse model[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2014, 36(6): 914-916.
- [8] 陈奇,武秀东,任峰,等. 压电陶瓷驱动器迟滞非线性的改善方法[J]. 压电与声光,2013,35(5):694-697.
  CHEN Qi, WU Xiudong, REN Feng, et al. The improvement methods of hysteretic nonlinear property of piezoelectric ceramic driver [J]. Piezoelectrics &.
- [9] YI K A, VEILLETTE R J. A charge controller for linear operation of a piezoelectric stack actuator [J].
   IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2005, 13(4): 517-526.

Acoustooptics, 2013, 35(5): 694-697.

[9] 钱德生,马筠,辜小安,等.铁路环境振动的特性及其频 率分析[J].铁道劳动安全卫生与环保,1990,5(4): 45-49.

QIAN Desheng, MA Yun, GU Xiaoan, et al. Characteristics and frequency analysis of railway environmental vibration[J]. Railway Occupational Safety Health & Environmental Protection, 1990, 5(4): 45-49.

[10] 刘建达,苏晓梅,陈国兴,等. 地铁运行引起的地面振动 分析[J]. 自然灾害学报,2007,16(5):148-154.
LIU Jianda,SU Xiaomei,CHEN Guoxing, et al. Analysis of ground vibration induced by passing trains in subway tunnel[J]. Journal of Natural Disasters,2007, 16(5):148-154.