

基于分时驱动方法压电堆响应速度的研究

巴学杰,潘巧生,琚 斌,冯志华

(中国科学技术大学 工程科学学院,安徽 合肥 230027)

摘要:为提高压电驱动器响应速度,提出了一种超快速分时驱动方法。它通过考虑压电堆内部应力波传播对响应速度的影响,对各压电层进行分时驱动以提高其整体响应速度。通过 COMSOL Multiphysics 有限元仿真软件对所提出的模型进行了仿真分析,并通过实验结果得到了验证。相比于传统的同时驱动,分时驱动下压电驱动器的整体响应速度提高为原来的 1.92 倍;另外,分时驱动可以实现对各压电层产生应力的线性叠加,在不改变驱动器响应速度的前提下获得更大的输出位移。

关键词:压电陶瓷;应力波传播;COMSOL Multiphysics;分时驱动;响应速度

中图分类号: TN384 **文献标识码:** A

Research on the Response Speed of the Piezoelectric Stack Based on the Time-Sequence Driving Method

BA Xuejie, PAN Qiaosheng, JU Bin, FENG Zhihua

(College of Engineering Science, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China)

Abstract: In order to further improve the response speed of the piezoelectric stack, an ultra-fast time sequence driving method is proposed in this paper. The stress wave propagating in the PZT ceramic is considered in this method and all the piezoelectric layers are driven with different pulse voltages to improve the response speed. This method has been simulated by the COMSOL Multiphysics and verified by the experimental result. Compared with the conventional driving method, the time sequence driving method can improve the response speed to be 1.92 times. Besides, the time sequence driving method can achieve a linear superposition of stress generated by each piezoelectric layer, and larger displacement of the actuator can be achieved, whereas the response time remains unchanged.

Key words: piezoelectric stacks; stress wave propagate; COMSOL Multiphysics; time sequence driving; response speed

0 引言

压电驱动器具有响应迅速,体积小,推力大,精度高及位移分辨率高等优点,近年来得到了快速发展和应用^[1-3],其动态响应速度更是备受关注。目前,人们的研究主要是通过改进压电堆的驱动电路来提高其响应速度,但对压电堆在高速驱动时其内部应力波的传播对响应速度的影响则少有涉及和研究^[4-7]。本文基于高速驱动时压电陶瓷内部应力波的传播,提出了一种新型的分时驱动方法,可提升驱动器的响应速度,并通过 COMSOL Multiphysics 仿真和实验结果得

到了验证。

1 理论分析

由于单片压电陶瓷的位移输出较小(约为其尺寸的千分之一),因此,目前压电驱动器通常由多个压电陶瓷层叠加而成。其中压电陶瓷层依次被金属电极隔开,且相邻两层压电陶瓷的极化方向相反,这些电极依次连接到电源正、负两端从而驱动整个驱动器。当对驱动器两端施加激励电压时,逆压电效应会引起压电陶瓷沿轴向伸缩从而产生驱动^[8]。

如图 1(a)所示,目前普遍使用的激励方法是将

收稿日期:2016-02-25

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51305439)

作者简介:巴学杰(1990-),男,河南焦作人,硕士,主要从事压电高速驱动和分析的研究。通信作者:冯志华(1964-),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、涡流感感、探针显微及微磁场探测的研究。

整个驱动器的所有正电极都连接到相同的电源正端,负电极都连接到负端,所有的压电层都被同时激励。在这种情况下未考虑压电堆中应力波的传播对其输出的影响。应力波的波速一般在几千米每秒,因此,在静态和低速驱动时,可忽略。假定所有压电层产生的应力位移能在同一瞬间传播到压电堆顶端并输出,但由于应力波和质点惯性的存在,各层压电陶瓷产生的应变不可能在同一时间到达驱动器顶部,相邻层之间存在一个延时,这个延时在高速驱动时不能忽略^[9]。另外,由于应力波的折射和反射等会使各层产生的应力部分被抵消,也会延长整个驱动器的响应时间。

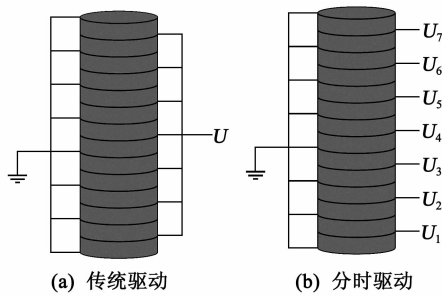


图1 压电堆驱动模型

为了改善这些问题,从而进一步提高压电堆的响应速度,本文提出了一种超快速分时驱动方法来驱动压电堆。与传统驱动方式不同,整个压电驱动器被划分为几部分,各部分依次被不同的脉冲信号驱动,如图1(b)所示。其中各个驱动信号之间具有特定的延时,从而使所有压电层产生的应变可以在同一时间传播到达驱动器顶端,实现线性叠加并提升驱动器的响应速度。

对于一个沿厚度方向极化的压电陶瓷层,其一维应力波方程如下:

$$T = c(\partial\xi/\partial z) \quad (1)$$

$$\frac{\partial T}{\partial z} = \rho \left(\frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} \right) \quad (2)$$

式中: T 为应力; c 为弹性常数; ξ 为质点的位移; ρ 为压电材料的密度; t 为时间。式(1)由胡克定律应力和应变之间的关系推导得到,式(2)是质点微元的牛顿第二定律。

结合式(1)、(2)可得

$$\left(\frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} \right) = v^2 (\partial^2 \xi / \partial z^2) \quad (3)$$

$$v^2 = c/\rho \quad (4)$$

式中 v 为应力波传播的波速。对压电材料而言, $c =$

E (E 为材料弹性模量),因此,其应力波波速 $v = \sqrt{E/\rho}$ 。

对式(3)进行Laplace变化,并假设其边界条件为 $\xi(z, 0)|_{z=0} = 0, \dot{\xi}(z, 0)|_{z=0} = 0$ 可得

$$\frac{d^2 \bar{\xi}(z, s)}{dz^2} = \frac{s^2}{v^2} \bar{\xi}(z, s) \quad (5)$$

故式(5)的解为

$$\bar{\xi} = Ae^{-zs/v} + Be^{zs/v} \quad (6)$$

式中: $Ae^{-zs/v}$ 为应力波沿 z 轴正向传播的情况; $Be^{zs/v}$ 为沿 z 轴负方向传播的应力波。常数 A, B 可通过边界条件计算^[10]。

此外,应力波在材料界面会像光一样发生反射和透射,其规律如下:

$$\frac{\sigma_R}{\sigma_I} = \frac{\rho_B c_B - \rho_A c_A}{\rho_B c_B + \rho_A c_A} \quad (7)$$

$$\frac{\sigma_T}{\sigma_I} = \frac{2\rho_B c_B}{\rho_B c_B + \rho_A c_A} \quad (8)$$

由式(7)、(8)可看出,应力波的反射和透射程度取决于材料的波阻抗,即密度与波速的乘积^[11]。

对于传统的同时驱动方法,所有压电层的上行波在同一时刻产生,因此,它们传播到驱动器顶端时各应力波间存在相位差,从而延长了驱动器的整体响应速度。分时驱动法则依次激励各压电层,使各应力波同时传播到驱动器顶端,实现了线性叠加且缩短了驱动器的响应时间;但各压电层产生的下行波经过界面反射后也会传播到驱动器顶端,由于距离不同,它们到达的时间也不相同,也会延长驱动器的响应时间。因此,为了更好地实现分时驱动,提高压电堆的响应速度,需要在驱动器下面加一个特定的基座用来吸收下行波。

为验证分时驱动的思想,我们利用有限元COMSOL Multiphysics仿真软件对压电堆的动态响应特性进行了仿真分析。

2 仿真分析

COMSOL Multiphysics软件是一款常用计算多物理场耦合的有限元仿真软件,广泛应用于各个研究领域^[12-14]。我们利用其瞬态分析模块仿真压电堆在阶跃脉冲激励下的动态响应。

2.1 模型建立

在COMSOL Multiphysics中利用其建模模块,建立如图2所示的压电堆模型。其共有16片压电陶瓷,相邻两片的极化方向相反,材料和结构参数如

表 1 所示。表中, d_{33} 为压电常数。

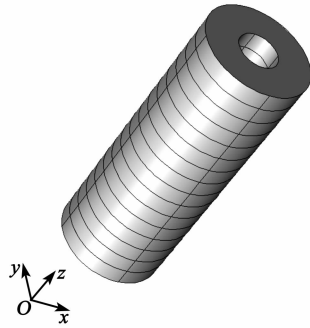


图 2 压电堆模型

表 1 压电堆模型参数

材料类型	内径/mm	外径/mm	厚度 h /mm	ρ /(kg/m^3)	E /GPa	d_{33} /(pC/N)
PZT-8	3	8	2.6	7 500	90	218

2.2 激励脉冲信号

将 16 层压电陶瓷分成 8 个部分, 两片极化方向相反压电陶瓷作为一组。每组压电陶瓷的中间电极

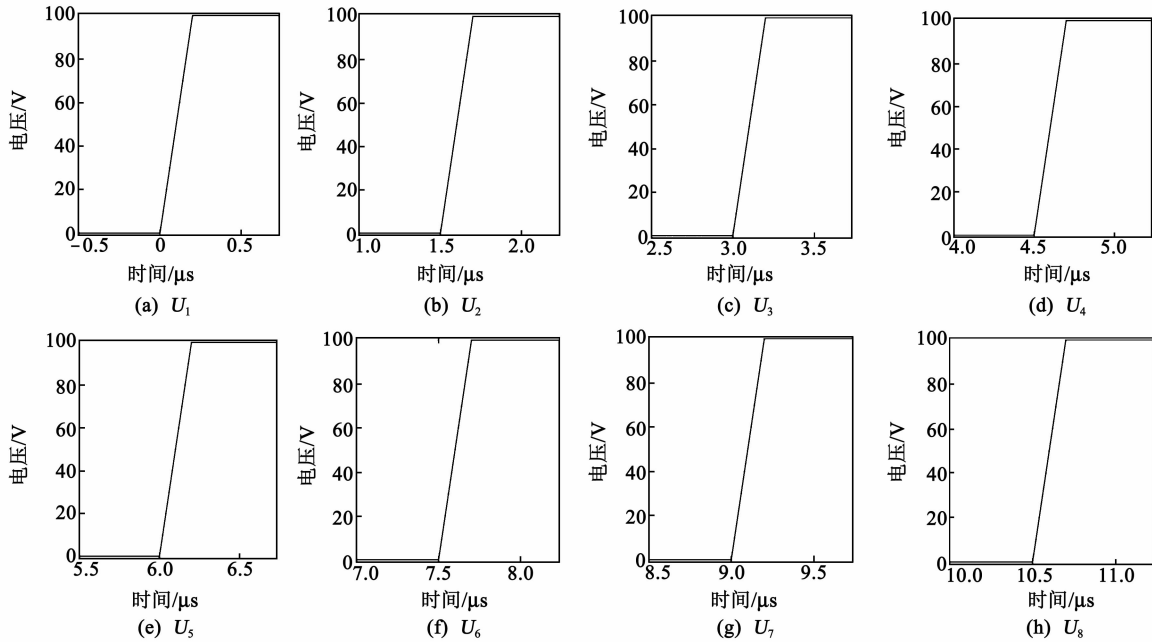


图 4 仿真激励脉冲信号

2.3 基座材料

根据对应力波传播的理论分析, 压电陶瓷被激励时会产生沿两个方向传播的应力波。分时驱动的思想是将其上行波同时传播到驱动器的顶端, 对其实现线性叠加, 但由于波的反射, 下行波经过地面反射后也会到达驱动器顶端从而干扰实验结果, 因此需要在压电堆下面加 1 个可吸收掉下行波的吸收

与正向激励信号相连, 上、下表面电极接地。为了实现分时驱动的思想, 需要特定的激励脉冲信号, 如图 3 所示。

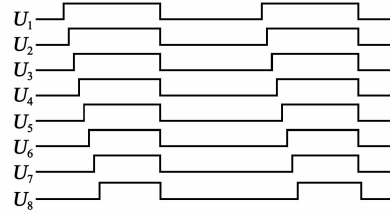


图 3 激励脉冲

相邻两组压电陶瓷的激励信号之间存在一个时差 Δt , 这个时差等于应力波传播经过每组压电陶瓷所需时间。这样可使所有层压电陶瓷产生的应变同时传播到驱动器的顶端, 实现一个线性的叠加, 从而提高驱动器的响应速度。

在 COMSOL Multiphysics 软件中, 我们利用阶跃函数作为激励脉冲, 设定其脉冲上升沿为 200 ns, $\Delta t = 2h/v = 1.5 \mu\text{s}$, 依次设定的激励脉冲如图 4 所示。

基座。

吸收基座一方面要求具有较好的阻尼吸收性能, 能在短时间内吸收掉下行波; 另一方面, 根据应力波在界面上的反射和透射规律, 要求基座的波阻抗与压电材料的波阻抗相匹配, 这样应力波才能透射进基座材料里, 不会有太多的下行波反射造成干扰。

经过 COMSOL Multiphysics 里的优化设计,我们最终选择铅材料作为吸收基座,其材料参数 $E=17\text{ GPa}$, $\rho=11\ 370\text{ kg/m}^3$ 。应力波在材料界面上的反射系数:

$$F_{\text{反}} = \frac{\rho_B c_B - \rho_A c_A}{\rho_B c_B + \rho_A c_A} = 0.29 \quad (9)$$

由式(9)可看出,应力波反射系数较小,因此,铅材料作为基座能较好地吸收下行波。

2.4 分时驱动仿真

在 COMSOL Multiphysics 软件中,利用瞬态分析模块,分别对所有压电陶瓷被同时激励和分时驱动时的驱动器响应情况进行了仿真计算。同时驱动和分时驱动下压电堆顶端输出位移如图 5 所示。由图可见,同时驱动情况下,压电堆需要 $23\ \mu\text{s}$ 位移输出才能达到最大;而在分时驱动时,压电堆只需要 $12\ \mu\text{s}$ 的响应时间,其前面的延时 $8\ \mu\text{s}$ 取决于压电堆本身的长度是一个固定值,因此,可将其并入前一个脉冲周期中,而不影响压电堆的响应速度。由图还可看出,分时驱动方法下压电堆的响应速度是原来的 1.92 倍。

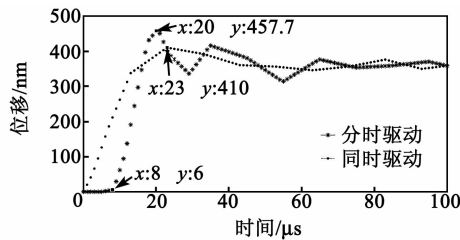


图 5 分时驱动与同时驱动响应比较

根据分时驱动的思想,将各层压电陶瓷产生的应力波同时传播到驱动器顶端,进行线性叠加。因此,激励压电陶瓷的数量不会对驱动器的响应速度产生影响。为了进一步验证分时驱动的思想,我们依次激励各压电陶瓷层,观测驱动器顶端位移输出并进行比较,如图 6 所示。由图可看出,随着被激励压电陶瓷数量的增加,驱动器的响应速度基本保持不变,位移输出规律相同,幅值实现线性叠加。

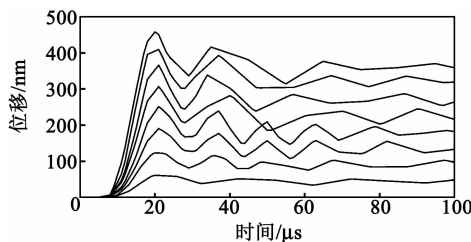


图 6 累加激励压电层时,压电堆顶端位移输出比较

3 实验

为了更确切地验证分时驱动的思想,我们自制了一个特定的压电堆,将其分成几部分,各自引出电极,采用分时驱动法激励,并利用聚偏氟乙烯(PVDF)压电薄膜作为传感器测量其动态响应,实验结果如图 7 所示。

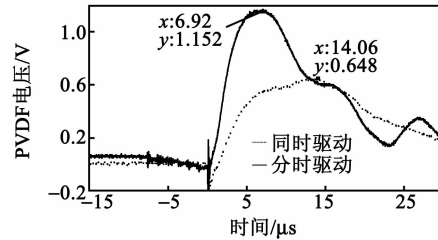


图 7 实验结果对比

由图 7 可看出,与传统的同时驱动相比,分时驱动下压电堆的动态响应速度更快,响应曲线的斜率更大。

4 结束语

本文依据压电堆高速驱动时其内部应力波传播规律,提出了一个全新的分时驱动方法。通过依次激励压电堆中各压电层,使各层产生的应力波同时传播到驱动器顶端,实现线性叠加从而提升驱动器的响应速度;通过 COMSOL Multiphysics 有限元仿真软件对分时驱动思想进行了仿真,并进行了相关的实验验证。仿真和实验结果都证明,分时驱动方法能将驱动器的响应速度提高到原来的 1.92 倍,且能实现各层应力的线性叠加;随着被激励压电陶瓷数量的增多输出位移的增大,驱动器的响应速度基本保持不变。

参考文献:

[1] 吴博达,鄂世举,杨志刚. 压电驱动与控制技术的发展与应用[J]. 机械工程学报, 2003, 39(10):79-85.
WU Boda, E Shiju, YANG Zhigang. Development and application of piezoelectric actuation and control [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2003, 39 (10):79-85.

[2] 贾宝贤,边文凤,赵万生. 压电超声换能器的应用与发展[J]. 压电与声光, 2005, 27(2):131-135.
JIA Baoxian, BIAN Wenfeng, ZHAO Wansheng. Application and development of piezoelectric ultrasonic transducers [J]. Piezoelectrics & Acousto-optics, 2005, 27(2):131-135.