

基于位移放大的压电致动器设计与仿真

王登攀^{1,2,3}, 向路^{1,2,3}, 王露^{1,2,3}, 王浩^{1,2,3}, 代里程^{1,2}

(1. 中国电科芯片技术研究院, 重庆 401332; 2. 国知创芯(重庆)科技有限公司, 重庆 401332;

3. 中国电子科技集团公司第二十六研究所, 重庆 400060)

摘要: 压电叠堆致动器广泛用于驱动智能变形装置, 由于压电叠堆输出位移小, 需要放大结构增大位移输出。设计了一种椭圆形位移放大结构, 分析了椭圆长轴、壳体厚度、X 方向位移和压电叠堆宽度等结构参数对 Y 方向的位移输出、应力强度和放大倍数等性能的影响规律, 优化了结构参数, 并制作了样品。测试数据表明, 位移放大结构实现了 5.3 倍以上的位移放大; 分析了放大结构在高频电压驱动下的瞬态响应, 模拟了驱动信号频率对位移输出的影响, 结果表明, 在周期 0.01 s 的交变电压驱动下, 结构的位移输出未出现失真。

关键词: 压电致动器; 位移放大结构; 高频驱动

中图分类号: TN384; TH765; TP412.13 **文献标识码:** A

Design and Simulation of Piezoelectric Actuator Based on Displacement Amplification

WANG Dengpan^{1,2,3}, XIANG Lu^{1,2,3}, WANG Lu^{1,2,3}, WANG Hao^{1,2,3}, DAI Licheng^{1,2}

(1. Academy of Chips Technology, China Electronics Technology Group, Chongqing 401332, China;

2. NIICAS (Chongqing) Technology Co., Ltd, Chongqing 401332, China;

3. The 26th Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Chongqing 400060, China)

Abstract: Piezoelectric stack actuators are widely used for driving intelligent deformation devices. Piezoelectric stacks have small displacement outputs, which can be increased using amplification structures. To this end, an elliptical displacement amplification structure was designed in this study, and the effect of structural parameters on the performance of displacement amplification structure was analyzed. The structural parameters include the major axis of the ellipse, thickness of the shell, displacement in the X direction, and width of the piezoelectric stack. The performance factors include displacement output, stress intensity, and amplification factor in the Y direction. The samples were fabricated based on the optimization results, and an amplification factor of approximately 5.3 was achieved. The transient response of the amplification structure driven by the high-frequency voltage was analyzed, and the influence of the frequency of driving signal on the displacement output was simulated. The results showed that the displacement output of the structure did not exhibit distortion driven by an alternating voltage with a period of 0.01 s.

Key words: piezoelectric actuator; displacement amplification structure; high-frequency driving

0 引言

压电驱动结构能够实现机械能与电能的相互转换, 广泛用于驱动智能变形装置, 是智能驱动的研究热点之一。目前, 智能驱动结构中常用的压电材料有压电聚合物、压电陶瓷和压电纤维复合材料等, 其中压电陶瓷具有出力大, 响应速度快, 刚度高及能量密度大等特点, 国外已有压电陶瓷智能变形

装置型结构的研究报道。压电陶瓷致动器具有位移控制精度高, 响应速度快, 功耗低及不受电磁干扰等优点, 广泛应用于微定位和微控制、超高精度定位、细胞操作、微/纳机电系统及超精密加工等领域^[1-8]。压电叠堆直接驱动时, 具有位移输出精度高, 输出载荷大和结构紧凑等优点, 但其最大输出位移有限, 需要设计放大结构以增大位移输出。国

收稿日期: 2024-02-26

作者简介: 王登攀(1985-), 男, 山东省新泰市人, 高级工程师, 硕士。

内外学者对杠杆放大机构、Scott-Russell 机构、多边形放大机构等进行研究,并取得了位移放大的效果^[9]。上述研究多采用铰链连接,降低了致动器的工作频率,限制了其高频应用。

针对压电陶瓷出力大的特点,通常利用杠杆原理放大其位移,提高形变能力。本文利用椭圆形壳体的位移放大效应,研究了其在准静态下的位移放大效果,以及该结构位移输出随驱动信号频率提高的变化规律,探索压电陶瓷智能驱动结构在智能变形装置中的应用潜力。

1 压电智能驱动结构设计

1.1 椭圆形位移放大效应

图 1 为椭圆形壳体位移放大效应示意图。图中实线和虚线的椭圆周长相同,通过改变长轴和短轴的长度来改变椭圆的形状。如图 1 所示,在保持周长不变的情况下,椭圆沿长轴方向发生形变时,短轴方向发生了更大的形变,说明该结构具有位移放大效应。

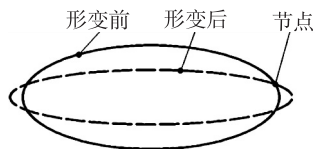


图 1 椭圆形位移放大效应示意图

基于上述位移放大效应设计了椭圆形壳体,其尺寸分布如图 2 所示。由图可见,压电叠堆采用方形结构,压电叠堆的宽度 w_1 与垂直于纸面方向的高度相同,而椭圆壳的高度与压电叠堆相同,均随着 w_1 变化。由图 1 可知,椭圆壳体长轴方向伸长时,短轴方向缩短,其位移形变方向关系如图 3 所示。下文采用位移幅值对长轴方向位移 UX 和短轴方向位移 UY 做对比分析。

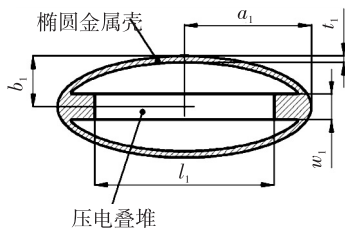


图 2 椭圆壳与压电叠堆尺寸分布图

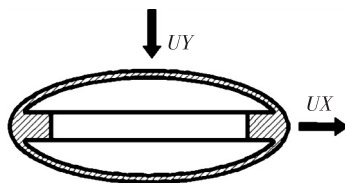


图 3 椭圆壳位移形变方向示意图

1.2 有限元仿真设计

利用有限元软件进行位移形变和应力强度的仿真,壳体材料为弹簧钢 60Si2MnA,压电陶瓷为 PZT5A,仿真用有限元模型如图 4 所示,得到的位移形变云图如图 5 所示,应力强度分布如图 6 所示。 Y 方向位移量和应力强度是本文主要的优化指标,在椭圆形结构下端固定的情况下,上端的位移量即结构的整体位移输出,而应力强度越小,结构越安全。

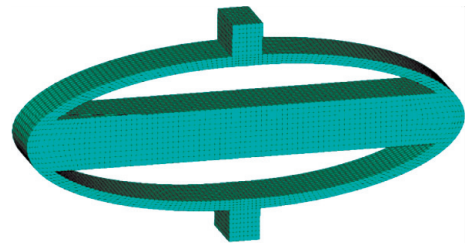


图 4 仿真模型图

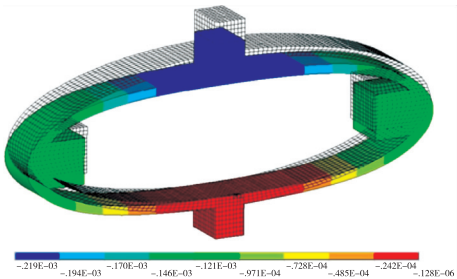


图 5 位移形变云图

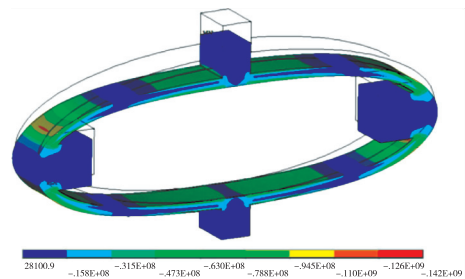


图 6 应力强度云图

1.3 结构优化设计

分别以 a_1 、 t_1 、 UX 和 w_1 为变量,对 Y 方向位移量 UY 、应力强度 $SINT$ 和放大倍数 UY/UX 进行了变化规律分析,结果如图 7-10 所示。由图 7 可见, a_1 增大时, UY 和放大倍数增大, $SINT$ 减小,说明在仅 a_1 增大而其他尺寸不变的前提下,长轴和短轴的比例越大,放大倍数越大。由图 8 可见, t_1 增大时, UY 和放大倍数减小, $SINT$ 增大,说明 t_1

增大会影响位移放大效果,而 t_1 决定了壳体强度,故在保证强度足够的情况下, t_1 应尽量小。由图 9 可见,当 UX 增大时, UY 和 $SINT$ 增大,位移放大倍数略有增大,说明当 UX 增大时,其作用与 a_1 增大类似。由图 10 可见, w_1 增大时, UY 、 $SINT$ 和放大倍数增大, $SINT$ 增加速度随 w_1 增大而加快,说明 w_1 易取值适中,否则会引起 $SINT$ 快速增大。

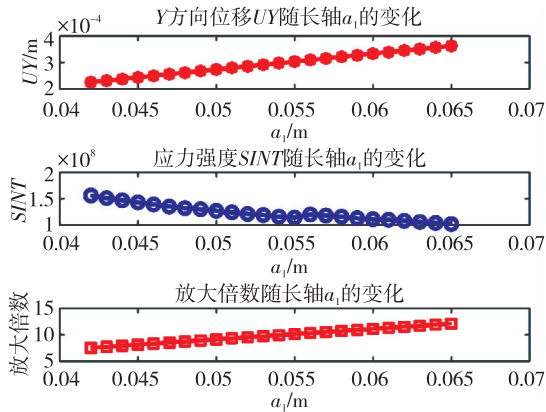


图 7 参数随 a_1 的变化曲线

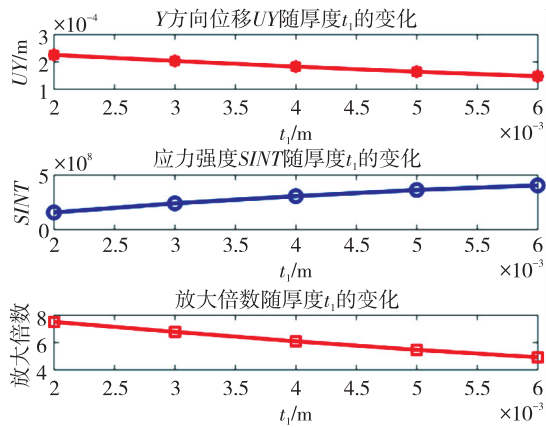


图 8 参数随 t_1 的变化曲线

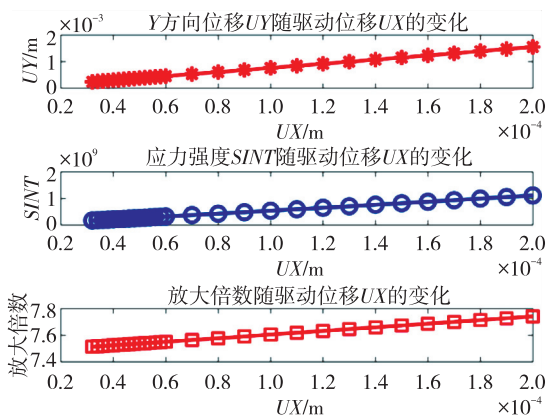


图 9 参数随 UX 的变化曲线

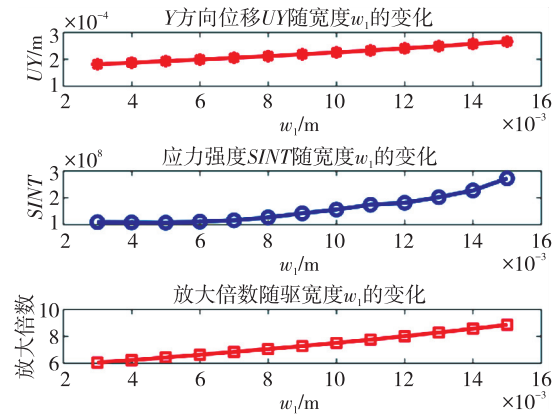


图 10 参数随 w_1 的变化曲线

1.4 结构瞬态分析

压电驱动结构用于智能变形装置时,其响应速度也是重要的设计指标。在 1.3 节优化设计的基础上,选择一组尺寸,利用有限元软件进行瞬态分析。在压电叠堆上施加正弦交变电压信号,压电叠堆在电压驱动下发生伸缩形变,提取压电叠堆与壳体接触面中心点 X 方向的位移 UX 和椭圆壳体顶端的 Y 方向位移 UY ,并绘制了时域变化曲线。图 11-14 分别为周期 1 s、0.1 s、0.01 s 和 0.001 s 的信号驱动时的瞬态仿真结果。

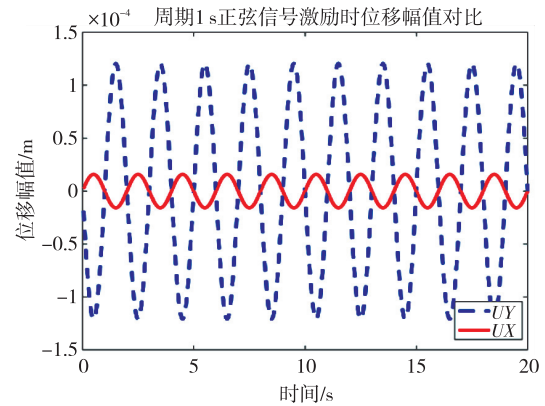


图 11 周期 1 s 的信号驱动时的瞬态仿真结果

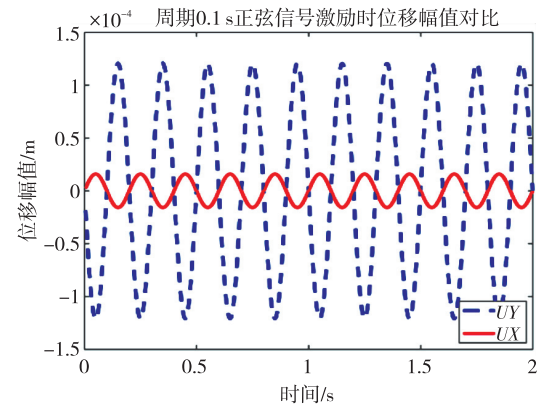


图 12 周期 0.1 s 的信号驱动时的瞬态仿真结果

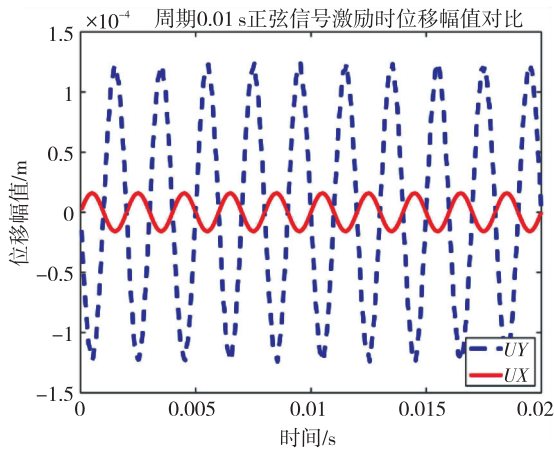


图 13 周期 0.01 s 的信号驱动时的瞬态仿真结果

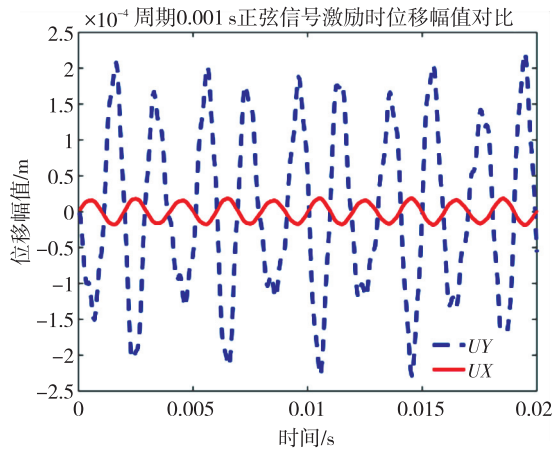


图 14 周期 0.001 s 的信号驱动时的瞬态仿真结果

由图 3 可见,当椭圆壳体长轴方向伸长时,短轴方向缩短,因此,UX 和 UY 的相位相反,这是由壳体形状决定的。作为一种可选择的设计,通过将图 3 椭圆壳中上下两个弧面做成凹形,可以实现 UX 和 UY 同相。由仿真结果可知,周期 1 s、0.1 s、0.01 s 时,UX 和 UY 的输出无显著变化;周期 0.001 s 时,即驱动信号频率为 1 kHz 时,UX 输出基本正常,而 UY 输出发生了明显变化。UY 数值增大,但每个周期数值不同,经模态分析,当前结构的一阶振动模态对应频率为 2 187.1 Hz,尽管 1 kHz 低于一阶谐振,但位移输出仍出现了显著变化,说明位移放大结构需要准静态位移输出时,驱动信号频率要远离一阶谐振频率。

2 椭圆形位移放大结构的制作及测试

经过优化设计,选择最优尺寸,其中 $a_1=42$ mm, $b_1=14$ mm, $t_1=2$ mm, $w_1=10$ mm,制作了样品如图 15 所示,这里采用 3 个压电叠堆串联方式进行椭圆壳的驱动。为了实现足够的位移输出,采用 2 个

椭圆壳串联方式,形成了最终的样品。利用测试平台(见图 16)分别对单个压电叠堆和位移放大结构进行测试,测试在单位内部完成,所用测试平台名称为压电陶瓷驱动器综合测试及分析系统。测试时,将所有压电叠堆的正极和负极导线分别并联,其中正极施加正电压,负极施加零电压,施加 1 Hz 驱动电压,电压幅值为 0~150 V,以电压为横坐标,位移为纵坐标,得到了位移-电压变化曲线。

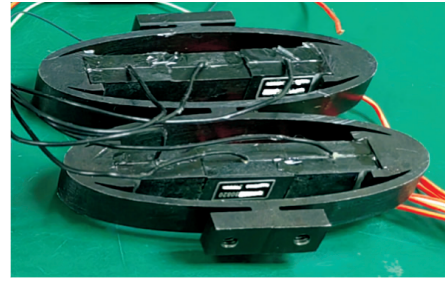


图 15 放大结构实物图

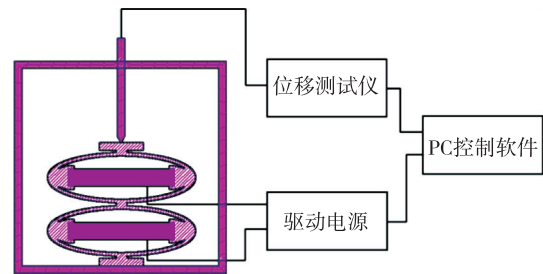


图 16 测试平台示意图

放大结构采用同样的测试方式,为了避免结构内部应力强度过大,采用测试电压 0~100 V。图 17 为压电叠堆的位移输出测试曲线,图 18 为放大结构的位移输出。由测试结果可见,经过放大结构后,将单个压电叠堆约 20 μ m 的形变量放大为 160 μ m 的位移输出,放大效果显著。与仿真结果对比,仿真结果显示单一椭圆壳体实现了约 6 倍的位移放大,两个椭圆壳串联则应实现约 12 倍的位移放大,实物中 UX 约为 30 μ m,实现了约 5.3 倍的位移放大。由于放大结构测试电压略低,故实际放大倍数应高于 5.3 倍,但与仿真结果的 12 倍存在一定的差距,其原因在于压电叠堆之间以及压电叠堆与壳体之间接触非理想刚性,导致位移传递效率低,进而使最终的输出位移低于仿真值。据调研,智能变形装置的工作频率通常低于 100 Hz。仿真结果显示,100 Hz 时放大结构的输出与 1 Hz 时无显著差别,预计能满足高频驱动的需求。由于现有压电致动器测试平台多对准静态测量,暂无能够测试致动

器高频工作的测试平台,后续将持续开展压电致动器高频工作的研究。

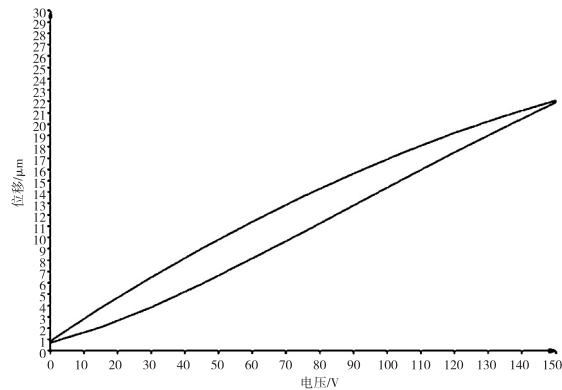


图 17 压电叠堆的位移输出测试曲线

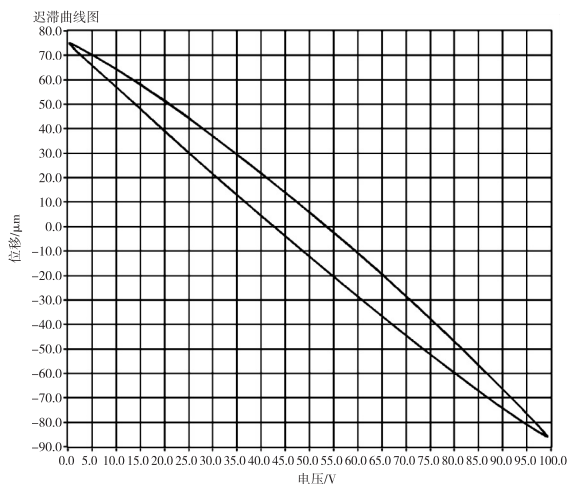


图 18 放大结构的位移输出测试曲线

3 总结与展望

本文基于椭圆形的位移放大效应,设计了一种位移放大结构,分析了椭圆的长轴、壳体厚度、X 方向位移和压电叠堆宽度等结构参数对 Y 方向位移输出、应力强度和放大倍数等性能的影响规律。优化结构参数,并制作样品,经测试,实现了 5.3 倍以上的位移放大。分析了放大结构在高频电压驱动下的瞬态响应,对比了 1 s、0.1 s、0.01 s、0.001 s 信号驱动下的位移输出,分析了高频驱动的应用潜力,为智能驱动结构提供了一种解决方案。后续将持续优化放大结构,并进一步研究高频驱动下放大结构的位移输出变化。

参考文献:

[1] 刘长利,胡守柱,郭海林,等. 叠堆式压电陶瓷驱动器的复合控制[J]. 光学·精密工程,2016,24(9):2248-2254.

- LIU C L, HU S Z, GUO H L, et al. Feed-forward control of stack piezoelectric actuator[J]. Optics and Precision Engineering,2016,24(9):2248-2254.
- [2] OUYANG P R, ZHANG W J, MADAN M, et al. Overview of the development of a visual based automated bio micro-manipulation system[J]. Mechatronics, 2007, 17:578-588.
- [3] LIU Y, LI J, HU X, et al. Modeling and control of piezoelectric inertia-friction actuators: review and future research directions[J]. Mechanical Science, 2015, 6:95-107.
- [4] 靳宏,金龙,徐志科,等. 压电叠堆位移放大致动器的动态特性[J]. 振动与冲击,2012,31(21):146-151.
- JIN H, JIN L, XU Z K, et al. Dynamic characteristics of a piezoelectric-stack displacement-amplifying actuator[J]. Journal of Vibration and Shock, 2012, 31(21):146-151.
- [5] 韩笑,袁俊杰,赵全亮. 一种微型机器鱼的压电驱动系统设计[J]. 压电与声光,2021,43(4):494-498.
- HAN X, YUAN J J, ZHAO Q L. Design of piezoelectric drive system for a fish-like underwater microrobot[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2021,43(4):494-498.
- [6] 常静静,冯志华. 多足并联型压电电机的柔性定子设计[J]. 压电与声光,2019,41(5):673-678.
- CHANG J J, FENG Z H. Design of an adaptive stator for bundled piezo-walk motors [J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2019,41(5):673-678.
- [7] 喻奇志,彭泰然,李文来,等. 基于电荷驱动的多通道压电变形镜电源设计[J]. 压电与声光,2019,41(2):217-220.
- YU Q Z, PENG T R, LI W L, et al. Design of power supply of charge driven multi-channel piezoelectric deformable mirror[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2019,41(2):217-220.
- [8] 孟凯,陈涛,杨湛,等. 基于压电驱动的多指微操作工具及实验研究[J]. 压电与声光,2018,40(1):42-46.
- MENG K, CHEN T, YANG Z, et al. Experimental study on piezoelectric driven micro-operating actuator with multi-fingered structure [J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2018,40(1):42-46.
- [9] 李建平. 步进式压电驱动基础理论与试验研究[D]. 吉林:吉林大学,2016.
- LI J P. Principle and experimental research on step-type piezoelectric actuators[D]. Jilin: Jilin University, 2016.