

# 基于 ANSYS 的面内压电微驱动器有限元分析

赵玉侠,任 森,狄杰建,赵全亮

(北方工业大学 机械与材料工程学院,北京 100041)

**摘 要:**设计了一种新型水平面内微驱动器,其具有结构简单,响应速度快,输出位移大的特点。通过 ANSYS 软件建立了微驱动器的有限元模型,并对其进行压电分析,获得  $y$ 、 $z$  向的变形图,其输出端的  $y$ 、 $z$  向位移分别为  $0.61 \mu\text{m}$  和  $1.13 \mu\text{m}$ 。经过模态分析获得微驱动器的前五阶共振频率,并提取了前三阶振型图,研究结果可知共振状态对微驱动器工作的影响状况。对微驱动器的关键尺寸进行了参数化研究,可对微驱动器的进一步设计提供理论指导。

**关键词:**水平面内;压电微驱动器;有限元分析;ANSYS 软件;模态

**中图分类号:**TM282 **文献标识码:**A

## Finite Element Analysis of a Piezoelectric Microactuator in Horizontal-plane Based on ANSYS

ZHAO Yuxia, REN Sen, DI Jiejian, ZHAO Quanliang

(School of Mechanical and Materials Engineering, North China University of Technology, Beijing 100041, China)

**Abstract:** A novel microactuator in horizontal-plane is designed, which has the features of simple structure, fast response and large output displacement. The finite element model was built based on ANSYS, the  $y$ -direction and  $z$ -direction deformation figures are obtained through piezoelectric analysis, they-direction displacement and  $z$ -direction displacement value of the driving end is  $0.61 \mu\text{m}$  and  $1.13 \mu\text{m}$  respectively. Through the modal analysis the first five nature frequencies and three nature mode shapes are gained, the resonance effect on the microactuator can be seen from the nature mode shapes. The parametric study of the critical size is carried out. It can provide a theoretical guidance for the future design of microactuator.

**Key words:** in horizontal-plane; piezoelectric microactuator; finite element analysis; ANSYS; modal

### 0 引言

传统的位移驱动器可产生毫米至厘米的位移量,但是无法提供微米或更小范围的位移输出。微驱动器具有大输出位移,低电压和快的响应速度等特点<sup>[1-3]</sup>,作为微机电系统的重要组成部分,一直伴随着微机电系统的发展而发展,可应用于航空航天、惯性制导、汽车电子、微型机器人、移动通信等领域。压电材料具有正逆压电效应,既可用于制造传感元件又可用于制造驱动元件,压电驱动器就是利用压电材料的逆压电效应,实现晶体的机械变形,从而提供驱动力或驱动位移,本文利用有限元软件 ANSYS15.0 对水平面内压电微驱动器进行了压电分析与模态分析,并对各尺寸参数对输出位移的影响

情况进行了研究。

### 1 微驱动器的结构设计与原理分析

图 1 为微驱动器的设计采用双层复合结构。上层为压电陶瓷材料,下层为多晶硅材料,硅基体设计为对称结构,其主要由位于根部的支撑端、输出端、中心横梁、四周斜梁及伸出部分构成,其尺寸参数如

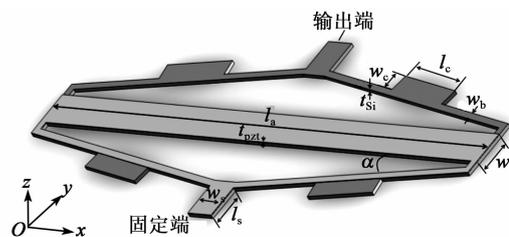


图 1 微驱动器结构简图

收稿日期:2015-11-26

基金项目:北京市市教委科技计划基金资助项目(KM201410009001);国家自然科学基金资助项目(51305005);北京市自然科学基金资助项目(3122013)

作者简介:赵玉侠(1974-),女,山东人,副教授,博士,主要从事微型管道机器人、机械制造及自动化的研究。E-mail: zhaoyx@ncut.edu.cn.

表1所示。

表1 结构尺寸参数

参数	多晶硅	PZT-4
弹性模量/GPa	179	
泊松比	0.3	
密度/(kg/cm <sup>3</sup> )	2 329	7 500
压电梁长度 $l_a/\mu\text{m}$		1 500
压电梁宽度 $w_a/\mu\text{m}$		100
斜梁宽度 $w_b/\mu\text{m}$	20	
伸出部分长度 $l_c/\mu\text{m}$	150	
伸出部分宽度 $w_c/\mu\text{m}$	50	
支撑端长度 $l_s/\mu\text{m}$	100	
支撑端宽度 $w_s/\mu\text{m}$	80	
斜梁倾斜角度 $\alpha/^\circ$	10	
多晶硅层厚度 $t_{\text{Si}}/\mu\text{m}$	10	
压电陶瓷厚 $t_{\text{PZT}}/\mu\text{m}$		2

压电薄膜上、下表面附着电极,在压电陶瓷下表面施加电压,上表面接地,在厚度方向上极化,通过压电陶瓷的逆压电效应,微驱动器产生自身形变,并在杠杆结构作用下实现水平  $x$  方向位移在  $y$  方向的位移放大。

### 2 微驱动器的有限元分析

本文选择 PZT-4 型压电陶瓷材料,分析中采用具有压电耦合属性的 SOLID226 单元,压电陶瓷材料弹性系数矩阵<sup>[4]</sup>为

$$c = \begin{bmatrix} 13.2 & 7.1 & 7.3 & 0 & 0 & 0 \\ 7.1 & 13.2 & 7.3 & 0 & 0 & 0 \\ 7.3 & 7.3 & 11.5 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 3.0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2.6 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2.6 \end{bmatrix} \times 10^{10} \text{N/m}^2 \quad (1)$$

压电应力矩阵<sup>[4]</sup>

$$e = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -4.1 \\ 0 & 0 & -4.1 \\ 0 & 0 & 14.1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 10.5 & 0 \\ 10.5 & 0 & 0 \end{bmatrix} \text{C/m}^2 \quad (2)$$

相对介电矩阵<sup>[4]</sup>

$$\epsilon_r = \begin{bmatrix} 804.6 & 0 & 0 \\ 0 & 804.6 & 0 \\ 0 & 0 & 659.7 \end{bmatrix} \quad (3)$$

### 2.1 微驱动器的压电分析

对微驱动器的支撑端施加全自由度固定约束,在压电薄膜的下表面施加 20 V 电压,上表面接地。图 2、3 分别为微驱动器在  $y$ 、 $z$  方向的变形图。微驱动器输出端  $y$  向位移为  $0.61 \mu\text{m}$ ,  $z$  向位移为  $1.13 \mu\text{m}$ 。

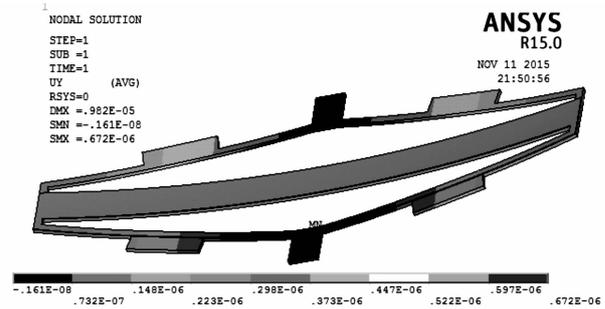


图2  $y$  向变形图

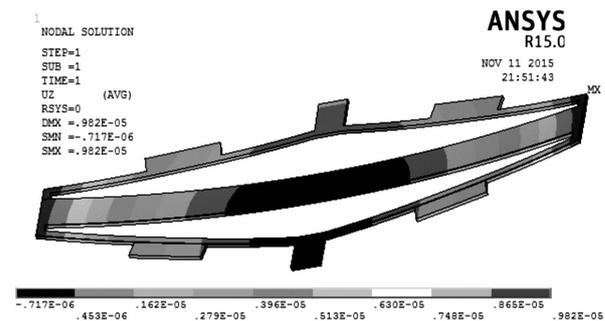


图3  $z$  向变形图

改变压电薄膜下表面激励电压的大小<sup>[5-6]</sup>,图 4 为输出端位移和激励电压间的关系曲线。输出端  $y$ 、 $z$  向位移都与输入电压成正比例线性关系。所以可通过增大激励电压来提高输出端水平面内  $y$  向位移的输出,但同时要考虑输出端  $z$  向位移增大对水平输出特性的影响。

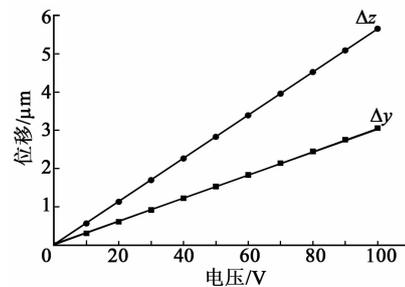


图4 电压-位移关系曲线

### 2.2 微驱动器的模态分析

通过模态分析<sup>[7,8]</sup>确定微驱动器的振动特性,以分析共振模态对微驱动器工作状态的影响情况。

模态分析采用计算精度和速度较高的 Block Lanczos 算法,前五阶固有频率值如表 2 所示。微驱动器的前三阶振型图如图 5~7 所示。

表 2 微驱动器的各阶固有频率

阶数	一阶	二阶	三阶	四阶	五阶
固有频率/Hz	11 804	14 476	17 443	38 835	55 713

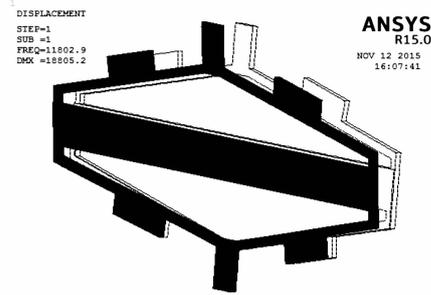


图 5 微驱动器一阶振型图

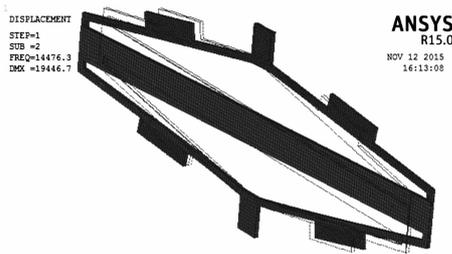


图 6 微驱动器二阶振型图

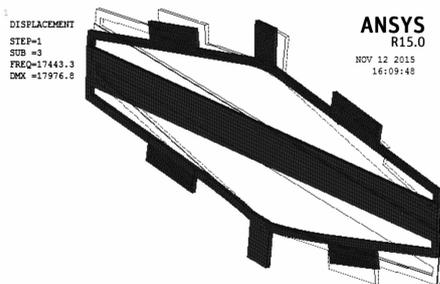


图 7 微驱动器三阶振型图

由图 5 可看出,微驱动器输出端在  $z$  向产生了较大位移。由图 6 可看出,微驱动器发生了偏转。由图 7 可看出,输出端在  $x$  方向产生了较大位移。这都会严重影响到微驱动器的水平输出性能,对微驱动器的工作产生不利影响。所以微驱动器的激励频率必须低于其自身的第一阶固有频率,以提高水平面内输出特性。

### 3 微驱动器的参数化研究

为更好的提高微驱动器的水平输出特性,通过

改变关键尺寸参数( $\alpha, l_a, w_a, t_{pz}$ )来分析各变量对输出端水平  $y$  向位移和竖直  $z$  向位移的影响情况。

#### 3.1 $\alpha$ 对输出端位移影响的研究

保证微驱动器其他结构尺寸参数不变,通过改变  $\alpha$  来观察其对输出端  $y, z$  向位移的影响情况,如图 8 所示。由图可知,随着  $\alpha$  的增大,输出端  $y$  向位移先增大后减小,在  $\alpha = 2^\circ$  附近位移达到最大值 ( $1.52 \mu\text{m}$ ),输出端  $z$  向位移随着  $\alpha$  的增大一直增大。可见在  $\alpha = 2^\circ$  附近输出端既有大的  $y$  向位移又不会产生较大的  $z$  向位移,其水平输出特性良好。

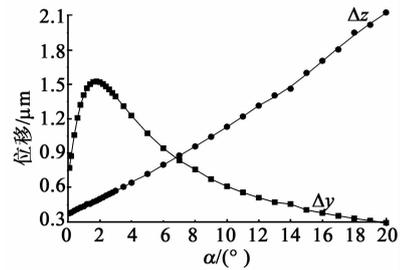


图 8  $\alpha$  与位移关系曲线

#### 3.2 $l_a$ 对输出端位移影响的研究

取  $\alpha = 2^\circ$ , 保证微驱动器其他结构尺寸参数不变,通过改变  $l_a$  来观察其对输出端  $y, z$  向位移的影响情况,如图 9 所示。由图可知,输出端  $y$  向位移与  $l_a$  成正比关系。另外,随着  $l_a$  的增大,输出端  $z$  向位移缓慢减小。所以可适当增大  $l_a$  以提高微驱动器输出端的水平输出特性。

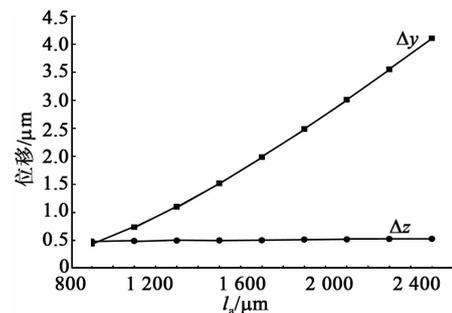
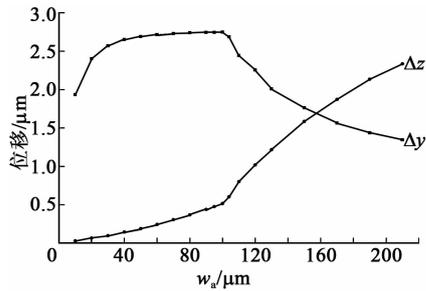


图 9  $l_a$  与位移关系曲线

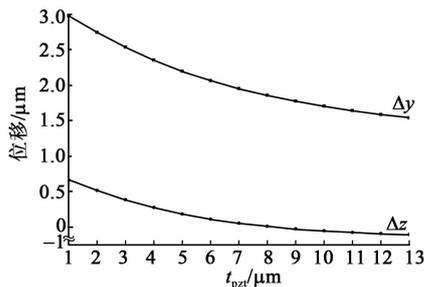
#### 3.3 $w_a$ 对输出端位移影响的研究

取  $\alpha = 2^\circ, l_a = 2000 \mu\text{m}$ , 保证微驱动器其他结构尺寸参数不变,通过改变  $w_a$  来观察其对输出端  $y, z$  向位移的影响情况,如图 10 所示。由图可知,在  $0 \sim 40 \mu\text{m}$  区间  $y$  向位移迅速增大,之后变化较平缓,在  $100 \mu\text{m}$  后迅速减小。另外,在  $0 \sim 100 \mu\text{m}$  内  $z$  向位移缓慢增大,随后增大速度加快。由此可知,在  $40 \sim 100 \mu\text{m}$  内水平输出特性良好。

图10  $w_a$  与位移关系曲线

### 3.4 $t_{pzt}$ 对输出端位移影响的研究

取  $\alpha=2^\circ$ ,  $l_a=2\ 000\ \mu\text{m}$ , 保证微驱动器其他结构尺寸参数不变, 通过改变  $t_{pzt}$  来观察其对输出端  $y$ 、 $z$  向位移的影响情况, 如图 11 所示。由图可知, 随着  $t_{pzt}$  的增大, 输出端  $y$ 、 $z$  向位移变化趋势一致, 都随之减小。所以, 在保证输出特性的情况下可取小厚度的压电薄膜。

图11  $t_{pzt}$ 与位移关系曲线

## 4 结束语

本文设计了一种压电式水平面内微驱动器, 利用 ANSYS 软件对其进行了有限元仿真, 由对微驱动器的压电仿真结果可知, 输出端  $y$  向位移  $0.61\ \mu\text{m}$ ,  $z$  向位移  $1.13\ \mu\text{m}$ , 并通过改变输入电压值的大小得到激励电压与输出端水平  $y$  向位移和竖直  $z$  向位移间的线性关系。模态分析得到微驱动器的前五阶固有频率和前三阶振型图, 由振型图可知共振状态对微驱动器的影响情况。为获得良好的水平输出特性, 通过参数化研究, 取斜梁倾斜角度为  $2^\circ$ , 压电梁长  $2\ 000\ \mu\text{m}$ , 压电梁宽  $100\ \mu\text{m}$ , 压电膜厚  $1\ \mu\text{m}$ , 此时输出端水平  $y$  向位移为  $3\ \mu\text{m}$ ,  $z$  向位移为  $0.7\ \mu\text{m}$ , 较原始结构的水平输出特性有显著提升。

### 参考文献:

[1] 宫峰飞. 微驱动器的原理与应用[J]. 电子元件与材料, 2007, 26(6): 33-36.

GONG Fengfei. The principle and application of micro-actuators [J]. Electronic Components & Materials, 2007, 26(6): 33-36.

- [2] 梁磊, 王少平, 焦宗夏, 等. 微驱动器的研究与发展[J]. 机械设计与制造, 2008(7): 227-229.  
LIANG Lei, WANG Shaoping, JIAO Zongxia, et al. The research and development of mictuator [J]. Machinery Design & Manufacture, 2008(7): 227-229.
- [3] UCHINO Kenji. Recent trend of piezoelectric actuator development [J]. International Symposium on Micromechatronics and Human Science, 1999: 3-9.
- [4] 范兴明, 马世伟, 张鑫, 等. 基于 ANSYS 的压电陶瓷镜片 PZT 仿真分析 [J]. 压电与声光, 2014, 36(3): 416-420.  
FAN Xingming, MA Shiwei, ZHANG Xin, et al. Simulation analysis of piezoelectric ceramic chip PZT based on ANSYS [J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2014, 36(3): 416-420.
- [5] 梁磊, 王少萍, 曹锋. 基于 ANSYS 的压电陶瓷 PLZT 特性仿真分析 [J]. 北京航空航天大学学报, 2008, 34(7): 853-856.  
LIANG Lei, WANG Shaoping, CAO Feng. Analysis of piezoelectric ceramics PLZT based on ANSYS [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2008, 34(7): 853-856.
- [6] 李康超, 肖莹, 宋佳, 等. 基于 ANSYS 的工形压电发电装置有限元分析 [J]. 压电与声光, 2015, 37(2): 262-265.  
LI Kangchao, XIAO Ying, SONG Jia, et al. The finite element analysis of a I-beam piezoelectric generator [J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2015, 37(2): 262-265.
- [7] 姜德义, 郑拯宇, 李林, 等. 压电陶瓷片耦合振动模态的 ANSYS 模拟分析 [J]. 传感技术学报, 2003, 4: 452-456.  
JIANG Deyi, ZHENG Zhengyu, LI Lin, et al. The analysis of the vibration model of piezoelectric ceramic piece based on ANSYS [J]. Journal of Transduction Technology, 2003, 4: 452-456.
- [8] 何学文, 黄国平. 基于 Ansys 的 0-3 型压电振子的有限元分析 [J]. 压电与声光, 2011, 33(6): 967-971.  
HE Xuewen, HUANG Guoping. Ansys-based finite element analysis of 0-3 model piezoelectric vibrator [J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2011, 33(6): 967-971.