

文章编号 1004-924X(2013)04-0941-07

## 共振型气体泵用压电振子的疲劳寿命

刘 焱<sup>1,2</sup>, 接 勳<sup>1,3</sup>, 谢海峰<sup>1</sup>, 杨志刚<sup>1\*</sup>

(1. 吉林大学 机械科学与工程学院, 吉林 长春 130022; 2. 东北电力大学 机械工程学院, 吉林 吉林市 132012;  
3. 吉林化工学院 机电工程学院, 吉林 吉林市 132022)

**摘要:**考虑压电振子的疲劳寿命与压电泵的使用寿命有关, 本文对其疲劳寿命进行了分析研究。首先, 对锆钛酸铅(PZT)陶瓷(文中使用 PZT-5)在力电耦合场作用下发生疲劳破坏时的极限应力与循环次数之间的对应关系进行了数值测定, 借助变异系数对所选子样个数的合理性进行了判别和修正。然后, 经数据处理, 得到置信度为 95%、存活率为 99.9% 时 PZT 的安全寿命,  $p$ - $S$ - $N$  双对数曲线及其对应的线性回归方程, 为压电振子的疲劳寿命计算提供了必要的数据基础。最后, 利用 ansys 和 miner 疲劳损伤累积假说对某共振型气体压电泵用压电振子的疲劳寿命进行计算, 结果显示其为 4461 h, 此时的安全系数为 1.25。得到的结果完善了共振型气体压电泵的技术参数, 该疲劳曲线和计算方法也可应用到其它泵用 PZT-5 压电振子的疲劳寿命计算。

**关键词:**共振型气体压电泵; 压电振子; 锆钛酸铅陶瓷;  $p$ - $S$ - $N$  曲线; 疲劳寿命

**中图分类号:** TH38; TN384 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20132104.0941

## Fatigue life of piezoelectric actuator used in resonance-type air pump

LIU Yan<sup>1,2</sup>, JIE Meng<sup>1,3</sup>, XIE Hai-feng<sup>1</sup>, YANG Zhi-gang<sup>1\*</sup>

(1. *Mechanical Science and Engineering College, Jilin University, Changchun 130022, China;*  
2. *School of Mechanical Engineering, Northeast Dianli University, Jilin 132012, China;*  
3. *College of Mechanical and Electrical Engineering,*  
*Jilin Institute of Chemical Technology, Jilin 132022, China)*

\* *Corresponding author, E-mail: yzgj@jlu.edu.cn*

**Abstract:** As the fatigue life of a piezoelectric actuator is relative to the service life of a piezoelectric pump, this paper carries out a fatigue life-related research. First, times of stress cycle corresponding to the ultimate stress is experimentally acquired when  $\text{Pb}(\text{Zr}, \text{Ti})\text{O}_3$  (PZT-5) ceramics suffers from the fatigue failure under an electro-mechanical coupling field. The number of samples selected at different levels of stress in the above experiment are discriminated and corrected by using the coefficient of variation. After data processing, a  $p$ - $S$ - $N$  double logarithm curve and its linear regression equation are obtained with the safety life at different levels of stress under conditions of 95% degree of confidence and 99.9% livability calculated respectively, which offers important and necessary data for the fatigue life calculation of piezoelectric actuator. Finally, the fatigue life of the piezoelectric actuator of a certain

收稿日期: 2012-11-03; 修订日期: 2013-01-04.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 51175213); 常州市应用基础研究计划资助项目(No. CJ20115014)

resonance-type air pump is calculated to be 4461 h with safety factor 1.25 by using ansys and hypothesis of fatigue damage accumulation. These results perfect the technical parameters of this air pump and the fatigue data, and the calculation method can be applied to the fatigue calculation of PZT-5 actuator in other kinds of piezoelectric pumps.

**Key words:** resonance-type piezoelectric air pump; piezoelectric actuator; PZT ceramics;  $p$ - $S$ - $N$  curve; fatigue life

## 1 引言

压电陶瓷是一种硬而脆的材料,在电压作用下的变形量极小<sup>[1-2]</sup>。所以一般情况下,压电陶瓷不单独使用,而是和某种弹性材料(一般为金属,故称其为金属基板)固连一起,组成压电振子<sup>[3]</sup>。金属基板的作用一是在压电陶瓷的综合作用下,提高压电振子的变形能力;二是增强压电振子的强度<sup>[2]</sup>。

吉林大学压电驱动研究所已设计制作了具有较好输出性能的共振型气体压电泵。由锆钛酸铅陶瓷(PZT-5)和 65Mn 金属基板构成的双晶片压电振子是共振型气体压电泵的驱动力源。给压电振子施加正弦交流电场,会使其产生周期性的轴向往复振动。处于往复振动的压电振子持续承受对称循环的交变应力作用,特别是处于力电耦合场中<sup>[4-6]</sup>,是典型的疲劳元件,疲劳破坏是其主要失效形式。显然,压电振子的疲劳寿命直接关系到压电泵的输出性能甚至使用寿命。然而,已有的共振型气体压电泵的技术参数中尚缺少这方面的数据。文献[7]针对压电振子中的金属基板进行疲劳寿命分析。实验研究发现,压电振子中的压电陶瓷多先于金属基板发生疲劳破坏,所以压电陶瓷的疲劳寿命是由其构成的压电振子的疲劳寿命。由于目前尚无可供压电陶瓷疲劳计算参考的疲劳曲线,所以寿命计算无法进行。本文针对压电陶瓷(PZT-5)展开疲劳特性研究,进而计算了该共振型气体压电泵用压电振子的疲劳寿命。

## 2 疲劳曲线

### 2.1 实验准备

选用单晶片压电振子,由直径为  $\phi 50$  mm、厚

度为 0.4 mm 的压电陶瓷(PZT-5)和直径为  $\phi 5$  mm、厚度为 0.4 mm 的铍青铜金属基板粘接而成。

压电振子的周边固定夹持机构用有机玻璃在精雕机上加工而成,结构如图 1 所示。

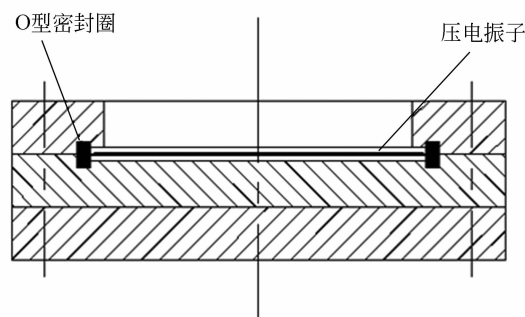


图 1 压电振子的周边固定夹持机构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of structure for peripherally fastening piezoelectric actuator

实验所用电源的最大输出电压为 260 V,输出频率为 40~400 Hz。实验中使用的输出频率  $f=250$  Hz。

实验分两阶段实施。第一阶段采用成组法,在低周部分选择 6 级应力水平,每级应力水平做 6~8 个试样。第二阶段采用升降法,寻找  $N_0=5.0 \times 10^9$  (即应力作用时间约为  $t=5\ 560$  h) 指定值下的极限应力。

每级应力水平可通过对压电振子施加不同电压幅值的正弦交流电场实现。待压电陶瓷出现疲劳失效时,记录下历时。

### 2.2 实验数据

电压幅值—历时数据如表 1 所示。

表 1 电压—历时实验数据表  
Tab. 1 Duration at different voltages

实验方法	电压/V	历 时
成组法	250	4,5,6,6,7,8 (s)
	220	21,24,25,25,32,35 (s)
	170	808, 1 067, 1 082, 1 360, 1 370, 1 380 (s)
	144	140, 150, 151, 175, 180, 210, 216, 220(min)
	100	400,440,470,475,478,479 (h)
	90	1 773,1 904,1 951,1 968,2 046, 2 097 (h)
升降法	87	3 955,4 185,4 339 (h)
	85	4 677,5 022,5 146,5 190,5 397,>5 560,>5 560,>5 560 (h)
	84	5 494,>5 560,>5 560,>5 560 (h)
	83	>5 560 (h)

2.3 实验数据处理

2.3.1 极限应力及相应的循环次数

在压电振子周边固支条件下,利用 ansys 处理某一电压幅值时压电陶瓷的极限应力  $\sigma_{max}$ 。因压电振子承受对称循环变应力,故  $\sigma_{max} = \sigma_a$ 。

以幅值为 100 V 交流电压为例,利用 ansys 处理此时压电陶瓷的极限应力<sup>[8]</sup>。如图 2 所示,云图中显示最大应力为 48.2 MPa。但通过查看 list results→nodal solution→stress→stress intensity 可知图 2 中所示最大应力 48.2 MPa 的作

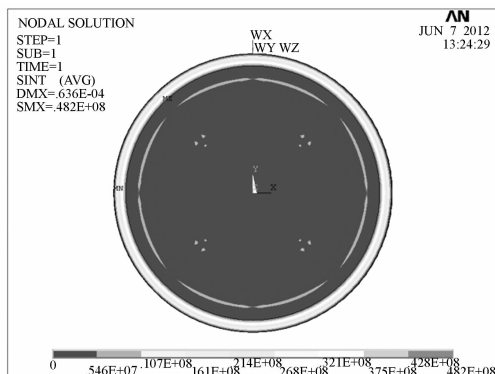


图 2 电压幅值为 100 V 时的应力云图

Fig. 2 Stress contour calculated by ANSYS at voltage of 100 V]

用在基板上,而非在压电陶瓷上。预求得压电陶瓷上的最大应力,需继续查表,为 38.79 MPa。其它电压幅值所对应的极限应力值只需修改命令流中的电压值即可求得。

利用公式  $N = t \cdot f$  求得历时所对应的循环次数(其中  $t$  为历时,单位为 s),  $f$  为所施加的频率,  $N$  为循环次数)。处理后的数据如表 2 所示。

表 2 各极限应力所对应的循环次数及子样平均值、子样标准差和变异系数

Tab.2 Times of stress cycle, averages, standard deviations and variation coefficients of sample at different ultimate stresses

$\sigma_a$ /MPa	循环次数	子样平均值 $\bar{x}$	子样标准差 $s$	变异系数 $\frac{s}{\bar{x}}$
96.99	1.0, 1.3, 1.5, 1.5, 1.8, 2.0 ( $\times 10^3$ )	3.170 4	0.106 4	0.033 6
85.36	5.3, 6.0, 6.3, 6.3, 8.0, 8.7 ( $\times 10^3$ )	3.823 9	0.081 1	0.021 2
65.96	2.02, 2.67, 2.71, 3.40, 3.43, 3.45 ( $\times 10^5$ )	5.461 6	0.092 3	0.016 9
55.87	2.10, 2.25, 2.27, 2.27, 2.70, 3.15, 3.24, 3.30 ( $\times 10^6$ )	6.426 1	0.077 6	0.012 1
38.79	3.60, 3.96, 4.23, 4.27, 4.30, 4.31 ( $\times 10^8$ )	8.613 1	0.030 9	0.003 6
34.91	1.60, 1.70, 1.76, 1.77, 1.84, 1.88 ( $\times 10^9$ )	9.244 4	0.025 0	0.002 7
32.98	3.55, 3.77, 3.91 ( $\times 10^9$ )			
32.59	4.20, 4.52, 4.63, 4.67, 4.86, >5.0, >5.0, >5.0 ( $\times 10^9$ )			指定寿命 $N_0 = 5.0 \times 10^9$
32.22	4.9, >5.0, >5.0, >5.0 ( $\times 10^9$ )			
32.19	>5.0 ( $\times 10^9$ )			

2.3.2 子样个数选取的合理性

求出各应力水平下子样的对数平均值( $\bar{x}$ )、子样对数标准差( $s$ )及变异系数( $\frac{s}{\bar{x}}$ )列于表 2 中。

根据各应力水平下所计算的变异系数  $\frac{s}{\bar{x}}$ , 借助公式  $\frac{s}{\bar{x}} = \frac{\delta \sqrt{n}^{[9]}}{t_a}$ , 求得所需子样个数。计算结

果表明,实验中所选取的子样个数均满足要求。

2.3.3 置信度 95%、存活率 99.9%时的循环次数

置信度为 95%时,与置信度有关的标准正态偏量可查表<sup>[10]</sup>得到:  $u_r = 1.645$ 。存活率为 99.9%时,与其有关的标准正态偏量可查表<sup>[10]</sup>得到:  $u_p = -3.090$ 。

查表可得不同应力水平下,各子样个数  $n$  所对应的单侧容限系数  $k$ ,如表 3 所示。

各应力水平下所对应的置信度为 95%、存活率为 99.9%时的循环次数可利用公式  $x_p = \bar{x} + k s$  求得,所得结果列于表 3 中。

表 3 各应力水平下所对应的单侧容限系数及  $\gamma=95\%, p=99.9\%$  时的应力循环次数

Tab. 3 One-side tolerance factors at different stress values and times of stress cycles under conditions of  $\gamma=95\%, p=99.9\%$

$\sigma_a$ /MPa	单侧容限系数 $k$	$\gamma=95\%, p=99.9\%$ 时的循环次数
96.99	-6.579	295
85.36	-6.579	1951
65.96	-6.579	71 509
55.87	-5.635	974 594
38.79	-6.579	256 926 499
34.91	-6.579	1 202 056 828

2.3.4 疲劳曲线及方程

基于上述数据,利用最小二乘法拟合数据点,可得 PZT-5 的线性回归方程:

$$\lg N = a + b \lg \sigma_a, \quad (1)$$

其中:  $b = \frac{\sum_{i=1}^n \lg \sigma_{ai} \lg N_i - \frac{1}{n} (\sum_{i=1}^n \lg \sigma_{ai}) (\sum_{i=1}^n \lg N_i)}{\sum_{i=1}^n (\lg \sigma_{ai})^2 - \frac{1}{n} (\sum_{i=1}^n \lg \sigma_{ai})^2}$ ;

$$a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \lg N_i - \frac{b}{n} \sum_{i=1}^n \lg \sigma_{ai}$$

$$\lg N = 32.3951 - 15.0534 \lg \sigma_a. \quad (2)$$

同时求得相关系数  $r = -0.9991$ , 其绝对值大于相关系数的起码值 0.811<sup>[10]</sup>, 说明直线拟合是有意义的。由此绘制 PZT-5 的双对数疲劳曲线如图 3 所示。

2.3.5 疲劳曲线数据表

借助上述疲劳曲线或利用插值法,可求得若干对  $\sigma_a - N$ , 数据如表 4 所示。

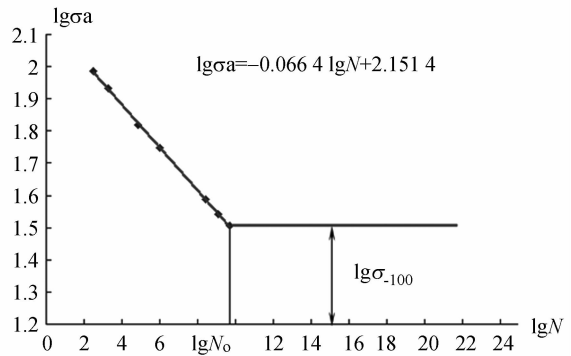


图 3 PZT-5 置信度为 95%时的  $p-S-N$  双对数曲线  
Fig. 3  $p-S-N$  double logarithm curve of PZT-5 under conditions of 95% degree of confidence and 99.9% livability

表 4 PZT-5  $r=-1$  时的疲劳曲线数据表

Tab. 4  $\sigma_a-N$  data obtained from fatigue curve of PZT-5 ( $r=-1$ )

$\sigma_a$ /MPa	循环次数 $N$
104.37	100
89.57	1000
76.88	10 000
65.98	100 000
56.62	1 000 000
48.59	10 000 000
41.71	100 000 000
35.79	1 000 000 000
32.19	5 000 000 000

3 疲劳寿命计算

吉林大学压电驱动研究所设计制作的气体共振型压电泵如图 4 所示,实物如图 5 所示。

组成压电振子的压电陶瓷(PZT-5)的尺寸:

内径为 8 mm,外径为 60 mm,厚度为 0.6 mm。

金属基板(65 Mn)的尺寸:

内径为 4 mm,外径为 80 mm,厚度为 2.5 mm。

经实验测得最优输出性能:工作电压为 200 V,共振频率为 245 Hz 时,输出流量为 1 456 ml/min,输出压力为 23.5 Kpa。

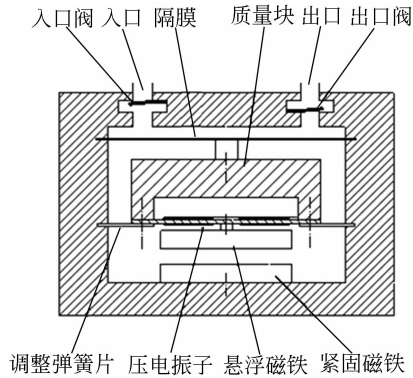


图 4 共振型气体压电泵示意图

Fig. 4 Schematic diagram of resonance-type air pump

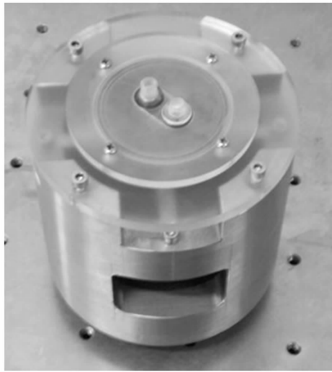


图 5 共振型气体压电泵实物图

(吉林大学压电驱动研究所设计制作)

Fig. 5 Resonance-type air pump designed and manufactured by Jilin University

### 3.1 疲劳寿命计算

利用 ansys 计算此时 PZT-5 的最大应力<sup>[8,11]</sup>。

压电振子的有限元网格划分结果如图 6 所示。

求得最大应力作用在压电陶瓷上的 841 节点,其值为 32.2 MPa,如图 7 所示。

利用式(2)或图 3 可求得该应力幅值所对应的交变应力循环次数为  $4.919 \times 10^9$  次,即该气体泵用压电振子的疲劳寿命约为 5 577 h。

根据 Miner 疲劳损伤累积假说,即:

$$\sum_{i=1}^{\infty} \frac{n_i}{N_i} = D, \quad (3)$$

式中:  $D$  为疲劳寿命耗用系数。

为安全起见,设定其值  $D \leq 0.8$  (安全系数为 1.25),则该气体泵用压电振子的疲劳寿命约  $3.935 \times 10^9$  次,即 4 461 h。

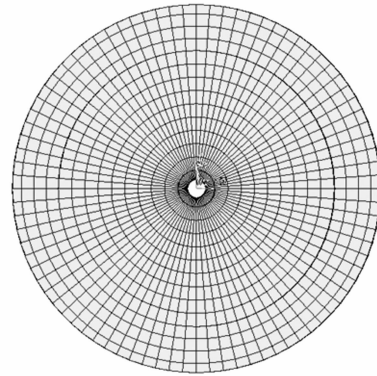


图 6 双晶片压电振子的有限元网格划分

Fig. 6 Finite element meshing of piezoelectric actuator with double pieces of PZT-5

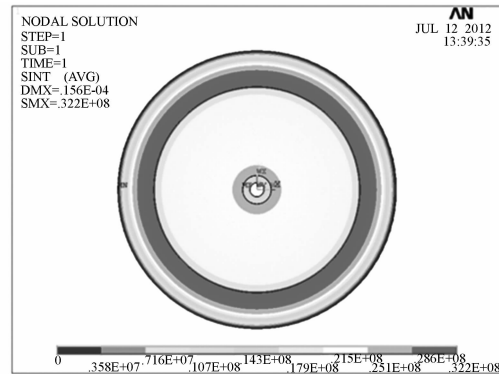


图 7 电压幅值为 200 V 时的应力云图

Fig. 7 Stress contour calculated by ANSYS at voltage of 200 V

### 3.2 ansys 疲劳寿命计算

本计算定义 1 个事件,2 个载荷,1 个位置。在 S-N table 中将表 4 数据输入,载荷位置定义为压电陶瓷上的危险节点 841,储存该节点的应力值,预设载荷循环次数  $3.935 \times 10^9$  次,进行疲劳计算<sup>[8,11]</sup>,结果如图 8 所示。

```
PERFORM FATIGUE CALCULATION AT LOCATION 1 NODE 0
*** POST1 FATIGUE CALCULATION ***
LOCATION 1 NODE 841
EVENT/LOADS 1 1 EVE1 AND 1 2 EVE1
PRODUCE ALTERNATING SI <SALT> = 0.32216E+08 WITH TEMP = 0.0000
CYCLES USED/ALLOWED = 0.3935E+10/0.4934E+10 = PARTIAL USAGE = 0.79755
CUMULATIVE FATIGUE USAGE = 0.79755
```

图 8 ANSYS-FATIGUE 疲劳寿命计算结果截图

Fig. 8 Results of fatigue life calculated by ANSYS-FATIGUE

由计算结果可知,节点 841 承受的应力值为

0.322 16 × 10<sup>8</sup> Pa, 疲劳寿命耗用系数为 0.797 55, 与 2.1 中的数据吻合。

说明 ANSYS-FATIGUE 模块对压电振子疲劳寿命计算的有效性。在指定安全系数的前提下, 可利用 2.1 的方法得知压电振子的疲劳寿命; 在预设疲劳寿命的前提下, 可优先选用 2.2 的方法得知安全系数或耗用系数, 便捷准确。

## 4 结 论

实验测得了力电耦合场作用下 PZT-5 的电

压-历时数据, 并经数据处理得到其疲劳曲线, 从而为 PZT-5 材质元件的疲劳寿命计算提供了重要的基础数据。在安全系数为 1.25 的前提下, 某共振型气体压电泵的疲劳寿命为 4 461 h, 完善了该共振型气体压电泵的技术数据。考虑到压电振子特别是国产压电振子的个体性能差异, 此共振型气体压电泵的疲劳寿命可能会在 4 461 h 基础上有些许波动。以上疲劳寿命计算, 特别是借助 ANSYS 的 FATIGUE 模块进行压电振子的疲劳寿命计算, 为其它泵用压电振子相关计算提供了范例。

## 参考文献:

- [1] 程光明, 杨志刚, 曾平, 等. 压电泵腔体体积变化量研究[J]. 压电与声光, 1998, 20(6): 389-392.  
CHENG G M, YANG ZH G, ZENG P, *et al.*. Research on the cavity volume fluctuations of piezoelectric pump [J]. *Piezoelectrics & Acousto-optics*, 1998, 20(6): 389-392. (in Chinese)
- [2] 程光明, 杨志刚, 曾平, 等. 压电薄膜流体泵的初步研究[J]. 压电与声光, 1998, 20(4): 233-236.  
CHENG G M, YANG ZH G, ZENG P, *et al.*. The Original study of the piezoelectric membrane fluid pump [J]. *Piezoelectrics & Acousto-optics*, 1998, 20(4): 233-236. (in Chinese)
- [3] 田丰君. 超声波推力轴承理论及实验的初步研究[D]. 吉林: 吉林大学, 2004.  
TIAN F J. *Theory and Experiment Study on Ultrasonic Thrust Bearing* [D]. Jilin: Jilin University, 2004. (in Chinese)
- [4] 邓启煌, 王连军, 王宏志, 等. 锆钛酸铅陶瓷在力电耦合场下疲劳性能的评价[J]. 无机材料学报, 2012, 27(4): 358-362.  
DENG Q H, WANG L J, WANG H ZH, *et al.*. Evaluation of fatigue of the lead zirconate titanate ceramics under electro-mechanical coupling field [J]. *Journal of Inorganic Materials*, 2012, 27(4): 358-362. (in Chinese)
- [5] FU R, QIAN C F, ZHANG T Y. Electrical fracture toughness for conductive cracks driven by electric fields in piezoelectric materials [J]. *Applied Physics Letters*, 2000, 76(1): 126-128.
- [6] TEIXEIRA E C, PIASCIK J R, STONER B R, *et al.*. Dynamic fatigue and strength characterization of three ceramic materials [J]. *Journal of Materials Science-Materials in Medicine*, 2007, 18(6): 1219-1224.
- [7] 何秀华, 毕雨时, 王健, 等. 基于 ANSYS/Fatigue 的泵用压电振子疲劳分析[J]. 排灌机械工程学报, 2011, 29(1): 35-38.  
HE X H, BI Y SH, WANG J, *et al.*. Fatigue analysis of piezoelectric vibrator for pump based on ANSYS/Fatigue [J]. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*, 2011, 29(1): 35-38. (in Chinese)
- [8] 胡仁喜, 王庆五, 闫石, 等. ANSYS 8.2 机械设计高级应用实例[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.  
HU R X, WANG Q W, YAN SH, *et al.*. *Example of Advanced Application of ANSYS 8.2 in Machine Design* [M]. Beijing: China Machine Press, 2005. (in Chinese)
- [9] 李舜酩. 机械疲劳与可靠性设计[M]. 北京: 科学出版社, 2006.  
LI SH M. *Mechanical Fatigue and Reliability Design* [M]. Beijing: Science Press, 2006. (in Chinese)
- [10] 高镇同. 疲劳性能测试[M]. 北京: 国防工业出版社, 1980.  
GAO ZH T. *Fatigue Performance Test* [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1980. (in Chinese)
- [11] 张朝晖. ANSYS 8.0 结构分析及实例解析[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.  
ZHANG ZH H. *Application of ANSYS 8.0 in Structure Design and Example Analysis* [M]. Beijing: China Machine Press, 2005. (in Chinese)

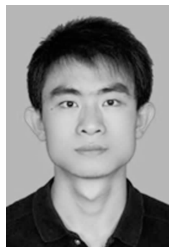
## 作者简介:



刘焱(1973—),女,吉林省吉林市人,博士研究生,副教授,1995年于吉林化工学院获得学士学位,2006年于西北工业大学获得硕士学位,主要从事压电驱动与控制技术、微小机械与精密机械的研究。E-mail:lyjlict@163.com



接勳(1980—),男,吉林省吉林市人,博士研究生,讲师,2003年于长春工业大学获得学士学位,2006年于新疆农业大学获得硕士学位,主要从事压电驱动与控制技术、微小机械与精密机械方面的研究。E-mail:jiemeng1980@126.com



谢海峰(1984—),男,山西繁峙人,博士研究生,2006年、2009年于吉林大学分别获得学士、硕士学位,主要从事压电驱动与控制技术、微小机械与精密机械方面的研究。E-mail: xhf821@126.com

## 导师简介:



杨志刚(1956—),男,吉林长春人,教授,博士生导师,1998年于吉林工业大学获得博士学位,主要从事压电驱动与控制技术、微小机械与精密机械方面的研究。E-mail: yzg@jlu.edu.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)