

# 圆柱形压电振子减振器的设计与性能测试

白 泉<sup>1</sup>, 魏克湘<sup>1,2</sup>, 程玉兰<sup>1</sup>

(1. 湖南工程学院 机械工程学院, 湖南 湘潭 411101; 2. 风电装备与电能变换协同创新中心, 湖南 湘潭 411101)

**摘要:**利用压电材料俘获振动能量与电流变弹性体的电流变效应设计了一种圆柱型压电振子减振器, 将其在压电发电、电场  $E=0$  和  $1\ 000\ \text{V}$  下进行减振实验测试, 结果发现, 在频率  $< 50\ \text{Hz}$  的低频率、低振幅下,  $d_{33}$  模式下减振器在  $E=1\ 000\ \text{V}$  和压电供电时的减振效果比无电场时好。研究表明, 减振器实现了自供能, 可利用压电材料去电控调节电流变弹性体的阻尼。

**关键词:**圆形压电振子; 电流变弹性体; 减振效果; 自供能;  $d_{33}$

**中图分类号:** TM282; TH113.1      **文献标识码:** A

## Design and Performance Test on Circular Piezoelectric Vibrator Damper

BAI Quan<sup>1</sup>, WEI Kexiang<sup>1,2</sup>, CHENG Yulan<sup>1</sup>

(1. College of Mechanical Engineering, Hunan Institute of Engineering, Xiangtan 411101, China;

2. Cooperative Innovation Center for Wind-power Equipment and Electricity-transformation, Xiangtan 411101, China)

**Abstract:** Based on the energy harvesting of the piezoelectric material and the electrorheological effect of the electrorheological elastomers, a circular piezoelectric vibrator damper is designed and manufactured in this work. The damping experiment has been carried out in the piezoelectric electric field, no electric field and  $E=1\ 000\ \text{V}$  electric field. The results show that at the conditions of low-frequency amplitudes of  $< 50\ \text{Hz}$ ,  $E=1\ 000\ \text{V}$  and being piezoelectric-powered, the damper in  $d_{33}$  mode has better damping effect than that of no electric field. This indicates that the damper has been self-powered, and the piezoelectric material can be used to electrically control and adjust the damping of the electrorheological elastomer.

**Key words:** circular piezoelectric vibrator; electrorheological elastomers; damping effect; self-powered function;  $d_{33}$

### 0 引言

压电材料和电流变材料是两大智能材料, 压电材料在施加外力的作用下会发生结构形变, 其不同表面上产生等量的异号电荷即带电, 因应变或应力而发生电极化的现象称为正压电效应<sup>[1]</sup>; 而电流变材料的性能参数如刚度、流变性、及阻尼等都可外部施加电场进行调节控制, 即产生了电流变效应<sup>[2]</sup>。基于此两种材料的“智能”特性, 所设计的减振器具有结构简化, 响应快, 性能稳定, 控制方便等优点<sup>[3]</sup>。目前已开始广泛用于各行各业的振动控制领域, 特别是汽车行业, 取得良好的控制效果<sup>[4-5]</sup>。Bridgestone<sup>[6]</sup>公司和魏宸官等<sup>[7]</sup>研究的电流变液减振器都是通过改变外部电场的强度来控制间隙流体(电流变液)的粘度, 来连续调节减振器的阻尼力。Seung-Bok Choi等<sup>[8]</sup>研发了一种圆筒型电流变减

振器, 以改善乘坐的舒适性, 它是通过调节外加电场来控制电流变液悬架系统。

而在耦合利用压电陶瓷和电/磁流变两大智能材料方面, 也是各国学者研究的热点。赵晓鹏<sup>[9]</sup>设计并制作的电流变液和压电陶瓷复合的自耦合阻尼器与其他电流变液阻尼器不同, 它是利用压电陶瓷形变产生的高电压(正压电效应)来改变电流变液的粘度, 实现自适应控制。刘曙<sup>[10]</sup>对设计制作的直压式自耦合电流变阻尼器进行了理论计算和实验测试, 结果表明, 压电陶瓷能改变电流变液的阻尼, 同时电流变液阻尼的变化又引起了阻尼器的共振频率和幅度的变化, 最高可使振幅下降 30%, 取得了良好的抑制振动效果。蒋学争<sup>[11]</sup>设计了一种基于压电陶瓷自供电磁流变减振器, 并设计了转换调理电路; 魏克湘等<sup>[12]</sup>设计了基于电流变弹性体的主被动

收稿日期: 2015-12-03

基金项目: 湖南工程学院青年科研基金资助项目(XJ1503); 湖南省教育厅一般研究基金资助项目(13C177); 国家自然科学基金资助项目(11172100); 湖南省自然科学基金资助项目(2015JJ6022)

作者简介: 白泉(1981-), 女, 湖南永州人, 讲师, 硕士, 主要从事智能材料及其结构控制的研究。E-mail: baiquan1119@163.com。

一体化减振器,实验证明了利用基于压电材料的压电效应为电/磁流变液减振器供电是可行的。

圆柱型压电振子工作在  $d_{33}$  模式下,压电发电装置的机电耦合系数较高,俘获的能力和俘能效率更高,电流变弹性体克服电流变液的沉降问题,且具有较强的电流变效应。本文利用此特点设计与制作了一种圆柱型压电振子减振器,并对其进行实验验证能否实现自供能和能否在压电电场条件下控制弹性体的阻尼,实现自适应环境。

## 1 圆柱型压电振子设计

### 1.1 圆柱型压电振子工作模式的选择

压电陶瓷的工作模式有 4 种,但不同的工作模式所产生的电压值区别较大,如圆柱型和 Cymba 型压电陶瓷工作在  $d_{33}$  模式下能产生较高的电压,但极高的固有频率使其与外界激励频率产生共振难;工作在  $d_{31}$  模式下的悬臂梁产生的电压虽小,但其较低的固有频率能与外界振动源频率进行匹配的较好<sup>[13-14]</sup>。根据本文减振器中自供能给电流变弹性体需高电压,所以选择圆柱型压电振子的工作模式为  $d_{33}$  模式。

### 1.2 圆柱型压电振子材料的选择

#### 1.2.1 压电方程

压电振子有四类边界条件,所以会形成四类不同的压电方程<sup>[15]</sup>,本文设计的减振器利用的是正压电效应,工作模式为  $d_{33}$ ,其边界条件是电学短路和机械自由,因此选择第一类压电方程,即

$$W = dT + \epsilon^T E \quad (1)$$

$$S = r^E T + d, E \quad (2)$$

式中: $W$  为电位移; $E$  为场强; $T$  为应力; $S$  为应变; $d$  为压电常数; $d_1$  为  $d$  的转置矩阵; $r$  为弹性柔顺常数。

由于压电材料具有压电性,在外力作用下,电位移随应力作线性变化,可得

$$W = dcS = eS \quad (3)$$

式中: $W = dT$ ,  $W$  为电位移张量,压电材料表面单位面积的电荷; $d$  为压电应变常数; $T$  为应力张量,是压电材料表面单位面积上的力。 $S = d^T E$  为应变张量, $E$  为电场强度张量; $e$  为压电应力常数矩阵。

因为  $W$  为电位移张量,所以压电材料表面单位面积的电荷数  $Q = W \cdot A$ 。因此,有极化方向的单向压力  $F = T \cdot A$ ,底面积  $A = \pi\phi^2/4$ ,  $\phi$ ,  $H$  分别为压电振子的直径和高。于是由式(3)可得  $Q = F \cdot d$ 。

用  $P$  代表极化方向,则有  $E = V/T$  ( $V$  为电压),且绝对介电常数  $\epsilon = D/E$ 。推导出所产生的最大电压方程为

$$V = F \times d \times \frac{4H}{\epsilon \times \pi \times \phi^2} \quad (4)$$

#### 1.2.2 压电材料选择

由式(4)可知,最大电压与圆柱状压电陶瓷的横截面积成反比,而与其高度成反比,原理上是直径越小,高度越高,其产生的电压越大,但考虑其应满足必要的力学性能及生产厂家的技术能力等综合因数,最后本实验决定采用直径  $\phi 5$  mm、高 15 mm 的 PZT-5H 圆柱状压电陶瓷,如图 1 所示。

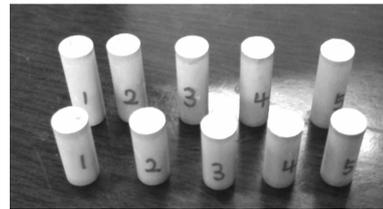
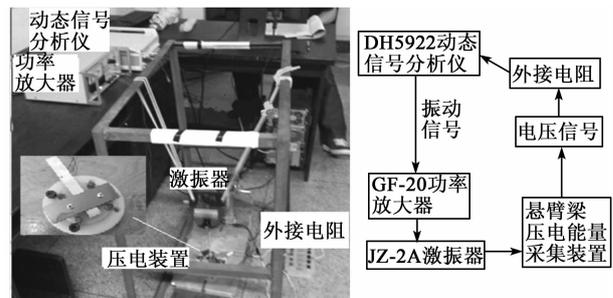


图 1 圆柱型压电陶瓷

### 1.3 圆柱型压电振子发电性能分析

为测试圆柱型压电陶瓷的发电性能,通过实验测试平台来进行验证。图 2 为圆柱型压电振子发电性能的实验平台。信号源为 DH5922 动态信号分析仪产生,通过 GF-20 功率放大器将信号放大,传递到激振器 JZ-2A,激振器对压电装置产生激励,使压电振子产生形变,并产生电压,通过串联外接电阻再将信号传送到信号接收装置 DH5922。



(a) 实验系统图

(b) 实验框架图

图 2 圆柱型压电振子发电性能的实验平台

由于压电陶瓷本身存在较大的内阻,因此,选择外接电阻为 200 k $\Omega$ ,测得电压为 18 V。采用这个电压值来进行实验数据采集<sup>[16]</sup>。图 3 为保持正弦激励信号的振幅不变,压电采集装置的电压峰值随频率的变化曲线。由图可看出,随着频率的增加,负载电阻两端的电压峰值增大,验证了圆柱型压电陶瓷的电压幅值与其激励信号的幅值和频率在一定范围内成正相关。

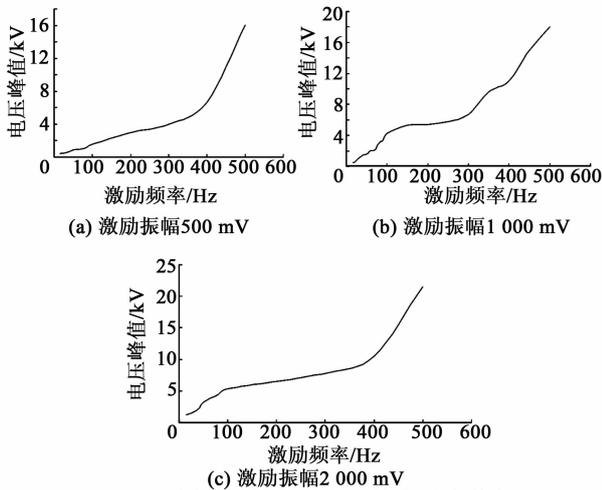


图 3 不同激励振幅下电压输出最大值与频率的关系曲线

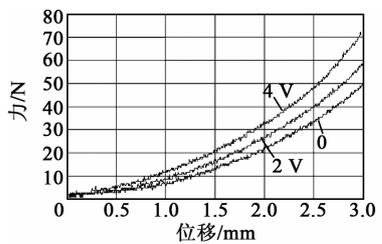
## 2 电流变弹性体的制备

为获得电控性能良好的弹性体,选择采用较优的配方来制备电流变弹性体,本文选取 704 硅橡胶作为基体材料,特点是在室温下可快速固化,金属氧化物钛酸钡颗粒或淀粉作为介电颗粒,颗粒直径为  $\varnothing(0.8 \sim 2) \mu\text{m}$ ,添加剂是二甲基硅油,具有绝缘性、润滑性和化学稳定性好的优点。电流变弹性体都是在有电场的情况下制备的,其配方比如表 1 所示。

表 1 电流变弹性体的各物体所占百分比

	A 类	B 类	C 类
钛酸钡	5%	0	1.5%
淀粉	0	5%	5%
硅橡胶	47.5%	47.5%	46.75%
二甲基硅油	47.5%	47.5%	46.75%

3 种配方的弹性体各制备了  $\varnothing 28 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$  数片。采用微机控制的电子万能实验机进行弹性体的压缩实验,以得到其力学性能与施加电场、压缩模量间的关系。图 4 为不同类型(A 类、B 类、C 类)的弹性体在不同场强(0、2 kV/mm、4 kV/mm)作用下,电流变弹性体的压缩量和力间的对比特性曲线。由图可知,由于介电颗粒的不同,不同类型弹性体的



(a) A 类电流变弹性体力与位移的关系

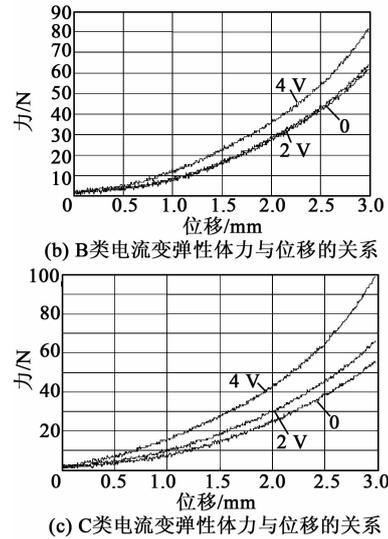


图 4 三类弹性体力与位移的曲线关系

压缩模量有所区别。同一电场强度下,从 0.5 ~ 2.5 mm 的增加过程中,各类弹性体的压缩量所需压力 C 类弹性体最大,A 类最小。实验表明,C 类配方中淀粉(5%)/钛酸钡(1.5%)/硅油(46.75%)/硅橡胶(46.75%)制作的电流变弹性体的刚度和阻尼的可调性明显,即电控性能最好。此类弹性体的可极化颗粒为钛酸钡和淀粉颗粒的混合物,在外界施加电场下,不仅存在同种颗粒间的相互作用力,两种不同颗粒间也存在相互作用力,可能正由于这种复合力的关系使 C 类弹性体所表现出的电控性能最优。C 类配方为电流变弹性体减振器工作中的阻尼调节提供了可能和前提条件。

## 3 圆柱型压电振子减振器结构设计和实验分析

### 3.1 减振器结构设计

本文设计的圆柱形压电振子减振器分为压电模块( $d_{33}$  式采集器)和电流变模块(减振),图 5 为减振器的二、三维图,包括绝缘尼龙外壳、圆柱压杆、上

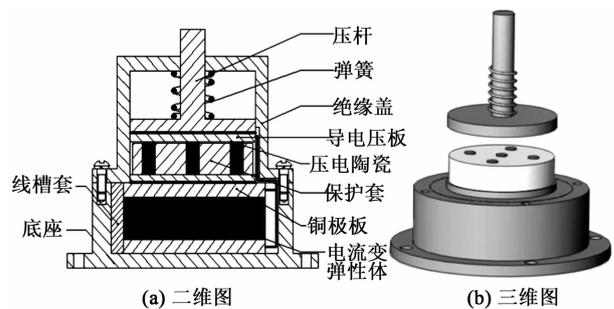


图 5 减振器的结构设计二维和三维图

下压板、数个圆柱形压电陶瓷( $\varnothing 5\text{ mm} \times 12\text{ mm}$ )、铜电极板及数块电流变弹性体( $\varnothing 28\text{ mm} \times 3\text{ mm}$ )。圆柱压杆将外界振动力传递到压电陶瓷发电模块上,压电陶瓷置于上、下压板两块铜极板间,压电陶瓷受压发生变形后产生电压;而电流变弹性体夹在相邻的两铜电极板间,分别通过线槽套用铜丝导线将上、下压板与电极板连接,电流变弹性体的上、下两铜电极板分别与压电发电模块的上、下压板相连。

本设计采用的是圆柱形压电陶瓷发电,可为新型智能电流变弹性材料体提供较强的电场,且电压随外部激励力的大小和频率而改变,可使减振器能很好的适应振动环境,达到减振降噪的目的。减振器的实物图如图6所示。

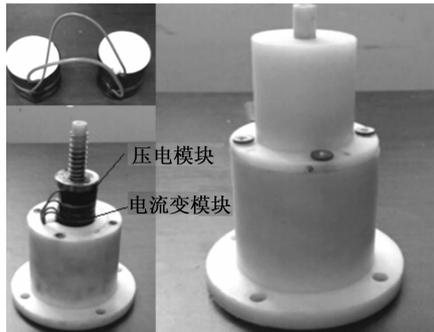


图6 圆柱型压电振子减振器实物图

### 3.2 试验系统设计

将装配好的圆柱型压电振子减振器置于基座和振动平台间。施加在减振器上正弦力的振幅和频率由计算机控制,激励器和传感器的数据采集由实验设备控制。本实验所需实验数据主要有减振前、后的加速度,以及减振器在减振过程中所受实时力。

图7为试验系统示意图。调节动态信号采集仪输出正弦信号,经过功率放大器,由激励器将力直接施加到减振器的压杆上,迫使压电陶瓷受压变形而产生电压,为电流变弹性体提供电场(信号的大小会影响电压产生的大小);压电压力传感器安装在减振头和压杆头上,实时测取压力;2个加速度传感器分别安装在减振器的压杆上和基座上,测量出减振前的信号和减振后的信号;3个传感器将测得的信号通过电荷适配器输入到信号采集仪上进行分析,分析的结果以动态曲线的形式显示在计算机界面上。直流稳压电源和高压放大器组成直流稳压高压电源,为后续实验提供稳定的高压。图8为试验平台实物图。

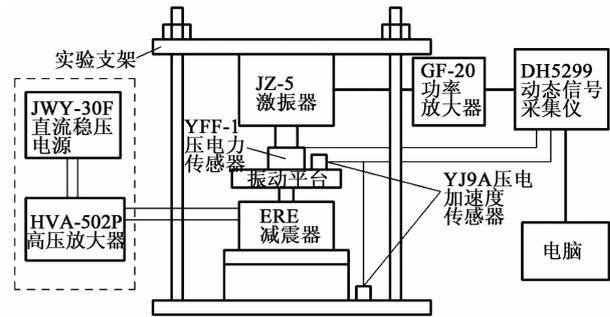


图7 减振器实验系统的示意图

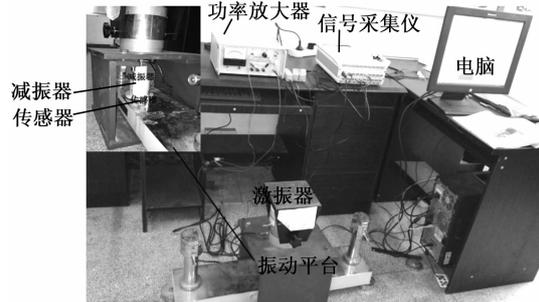


图8 试验平台实物图

### 3.3 实验结果与分析

本实验将在压电电场、无电场和  $E=1\ 000\text{ V}$  电场下进行减振效果验证。表2为压电电场在不同激励信号下减振前、后的实验数据。在无电场情况下,需切断连接在减振器内的压电发电模块和弹性体减振模块间的导线(避免压电电场施加在弹性体上),同时将弹性体上下两端的导线引出来(为后续实验准备),选取的激励信号同上;在  $E=1\ 000\text{ V}$  下,需将上一步引出的导线连接到高压稳压电源上,选取的激励信号也同上。

表2 压电电场时不同激励信号减振前、后的加速度

		加速度 / (m/s <sup>2</sup> )				
		20 Hz	50 Hz	80 Hz	150 Hz	200 Hz
200	减振前	11.0	38.0	30.0	42.0	23.5
	减振后	1.1	1.4	2.8	2.2	1.4
500	减振前	23.5	120	115	65	32.5
	减振后	1.2	5.0	7.0	2.7	1.7
1 000	减振前	90	260	230	53	70
	减振后	13.0	20.0	17.0	6.5	2.0
2 000	减振前	200.0	280.0	180.0	145.0	220.0
	减振后	20.0	40.0	15.0	11	4.0

由表2可看出,在压电电场条件下,减振前、后的加速度传感器数值相差较大,表示激励力产生后,圆柱型压电振子减振器中的压电模块对电流变弹性体起到了自供能的作用,达到了减振的效果。由表2还可看出,随着频率的增加,超过50 Hz后,幅值

比下降,说明减振器在高频时减振效果降低。

图 9 为在不同振幅时,激振力和频率在不同条件(压电电场、无电场和  $E=1\ 000\ \text{V}$  电场)下的响应曲线。由图可看出,激振力的大小和变化趋势基本一致;但激振力的大小却随着振幅的增加而增加;同时发现激振力在低频时较大,超过  $50\ \text{Hz}$  时,会随着频率的增加出现明显的下滑趋势,到  $150\ \text{Hz}$  后,振幅为  $200\ \text{mV}$ 、 $500\ \text{mV}$ 、 $1\ 000\ \text{mV}$  时,激振力趋向于某一数值,而  $2\ 000\ \text{mV}$  时,激振力又出现上升的趋势。

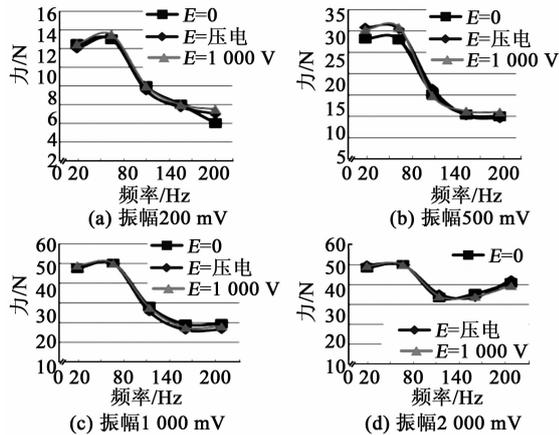


图 9 不同振幅下力的曲线图

图 10 为在不同振幅时,减振后的加速度和频率在不同条件(压电电场、无电场和  $E=1\ 000\ \text{V}$  电场)下的响应曲线。

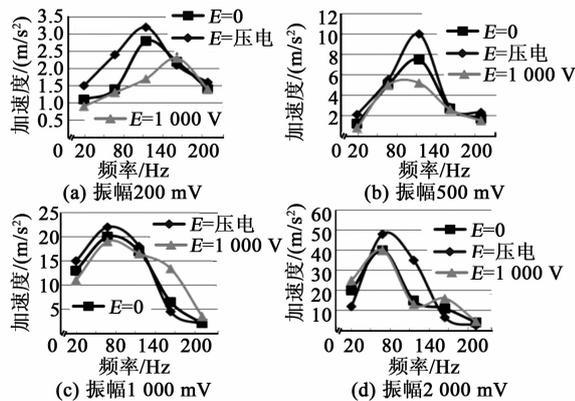


图 10 不同振幅下减振后的曲线对比图

由图 10 可看出,在不同激励频率和电场条件下,减振器的减幅作用存在较大差异。当频率小于  $50\ \text{Hz}$  时,减振器在压电电场和  $E=1\ 000\ \text{V}$  下的减振效果优于无电场;在频率大于  $150\ \text{Hz}$  时,减振效果不理想;在振幅为  $200\ \text{mV}$  和  $500\ \text{mV}$  激励下,处于频率  $80\ \text{Hz}$  附近,压电电场和  $E=1\ 000\ \text{V}$  减振后的加速度振幅比无电场低。研究发现,压电电场相对于  $E=0$  条件下降幅约  $25\%$ ,与  $E=0$  相比,

$E=1\ 000\ \text{V}$  条件下降幅约  $50\%$ 。研究发现,在  $1\ 000\ \text{mV}$  和  $2\ 000\ \text{mV}$  下,低频段时其他条件下的振幅相对于  $E=0$  时降幅较小,而在高频段内,减振效果相反。

减振器在低频率、低振幅下,其减振效果在  $E=1\ 000\ \text{V}$  和压电供电的两种条件下明显优于无电场情况,这主要是因为电流变弹性体的材料特性为非线性和受力模式采用  $d_{33}$  挤压式而形成。由于电流变弹性体属于各向异性的材料,在受压作用下,弹性模量和损耗因子受电场控制,随应变产生了非线性变化,实际改变了电流变弹性体原有的阻尼和刚度,所以在同等激励条件下要发生相同振动幅值所消耗的能量变大,其减振效果明显;相反,在较高频段和激励条件下,弹性体的阻尼和刚度的改变量对外界高水平激励产生的影响很小,能量消耗小,减振效果较差。对电流变弹性体减振器的减振效果产生影响的因素很多,如激励的水平、场强的施加、自身结构的设计及智能材料的电控性能等,可能因为改变了减振器自身的结构而起到相反的作用。

#### 4 结束语

本文利用圆柱型压电陶瓷和电流变弹性体的智能特性制作和设计了圆柱形压电振子减振器,对其压电振子发电性能和力学性能作了实验分析,同时搭建好试验平台,在 3 种条件(压电发电、 $E=1\ 000\ \text{V}$ 、无电场)下测取减振器实验数据并分析发现,压电发电条件下的减振效果介于后两者间,说明圆柱型压电振子减振器能实现自供能,利用压电材料对电流变弹性体进行自控调节可行,能达到减振目的。但为实现在高频率高振幅情况下,减振效果良好,需进一步寻找电控范围大的电流变弹性体和优化减振器的结构设计保证压电陶瓷的受力均匀,如选取其他结构参数的压电陶瓷、优化电流变弹性体的结构参数和对减振器结构进行改进等。

#### 参考文献:

- [1] 宋道仁. 压电效应与应用[M]. 北京:科学普及出版社,1987.
- [2] LOEWY R G. Recent developments in smart structures with aeronautical applications[J]. Smart Materials and Structures, 1997,6,11-42.
- [3] KIM S B, PARK J H, KIM S H, et al. Modeling and evaluation of  $d_{33}$  mode piezoelectric energy harvesters [J]. Journal of Micromechanics & Microengineering, 2012,22(10):1922-1931.