

# 超声电机孤极在冲击环境中的传感特性测试\*

孙 栋<sup>1</sup>, 唐玉娟<sup>2</sup>, 王新杰<sup>1</sup>, 王 昊<sup>1</sup>, 符昊旻<sup>1</sup>

(1. 南京理工大学机械工程学院 南京, 210094) (2. 金陵科技学院智能科学与控制工程学院 南京, 211169)

**摘要** 针对超声电机在冲击环境中的应用,提出了将旋转型超声电机中的孤极作为加速度传感器并进行了实验验证。基于圆环板的挠度微分方程与第 2 类压电方程得到孤极传感器电压灵敏度的理论表达式,并通过有限元方法得到传感器的谐振频率。搭建实验平台对传感器进行标定实验,结果表明,当冲击载荷的脉宽大于  $500 \mu\text{s}$  时,孤极传感器与冲击过载保持良好的线性关系,但输出信号存在着较大干扰。为了在保持加速度信号特征的同时有效地去除干扰信号,设计了相应的数字滤波器,滤波后的信号仍然与加速度之间保持良好的线性关系。研究结果实现了超声电机的功能拓展,促进了超声电机在冲击环境中的应用。

**关键词** 孤极; 传感器; 冲击; 信号处理

**中图分类号** TP212; TH132

## 引 言

超声电机作为一种压电驱动器,与传统电磁电机相比,有着体积小、响应快、结构紧凑及断电自锁等特点<sup>[1-2]</sup>。超声电机不仅在半导体制造、医疗器械等领域内应用广泛,还在航空航天<sup>[3-4]</sup>和武器系统<sup>[5-8]</sup>等特殊领域内发展迅速。研究超声电机在极端环境下的性能变化是将其应用在特殊领域之前必须克服的难题。冲击作为一种典型的极端环境,广泛存在于机械、航天和武器系统中。陈超等<sup>[9]</sup>利用 LS-dyna 进行了超声电机的冲击动力学模拟,并测试不同冲击过载后超声电机的机械特性。Hou 等<sup>[10]</sup>通过数值模拟得到新型电机在冲击环境中的动态响应过程,但缺乏实验验证。唐玉娟等<sup>[11]</sup>探索了典型引信环境力对直线型超声电机的影响,实验结果证实该电机能够耐受  $15\ 000g$  的过载。目前针对冲击环境下超声电机的研究集中在冲击过载对电机性能的影响及提升电机的抗过载能力上。

旋转型超声电机作为一种经典的超声电机,对压电陶瓷的极化与配置有着特殊的要求。压电陶瓷元件中有一块正向极化的四分之一波长区域,称为孤极,用于反馈频率自动跟踪所需的电压信号,实现固定负载下转速的稳定控制<sup>[12-13]</sup>。陈志华等<sup>[14]</sup>的研究结果表明,基于孤极的频率自动跟踪技术可降

低温度对超声电机的影响,电机表现出良好的控制特性。此外,陆旦宏<sup>[15]</sup>提出一种多孤极频率自动跟踪技术。目前,针对孤极的研究集中在频率自动跟踪技术上。

针对超声电机在冲击环境的应用,笔者提出将孤极作为加速度传感器,测量加速度信号。首先,基于第 2 类压电方程和圆板挠度微分方程推导了孤极传感器电压灵敏度的理论表达式;其次,通过实验标定传感器,并分析了信号特点;最后,设计了相应的数字滤波器去除信号中大量的噪音信号。

## 1 孤极传感器的理论分析

旋转型超声电机的定子由带有梳齿状的圆环形金属弹性体与压电陶瓷环组成,如图 1(a)所示。为了使定子表面产生 A, B 两相驻波并满足空间相位差  $\pi/2$ , 压电陶瓷环按图 1(b)中的方式进行极化和配置<sup>[13]</sup>。A, B 两相间留有  $\lambda/4$  正向极化区域,称为孤极。当超声电机正常工作时,孤极的输出电压与电机转速成正比,因此监测孤极电压可调整与控制超声电机转速<sup>[13]</sup>。孤极的输出电压实际上反馈的是定子在工作状态下的振幅。冲击环境中,定子由于惯性运动变形,孤极输出信号,孤极的输出信号同样反馈的是定子冲击环境中的变形量。笔者主要

\* 国家自然科学基金资助项目(51505204);江苏省研究生科研与实践创新计划资助项目(KYCX17\_0331)  
收稿日期:2018-01-31;修回日期:2018-05-16

研究孤极输出信号与加速度之间的关系,验证孤极传感器在冲击环境中的输出特性。

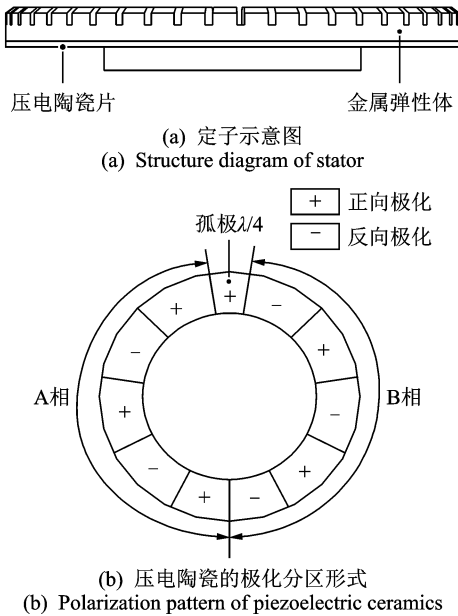


图 1 定子结构示意图与压电陶瓷的极化分区形式  
Fig. 1 Structure diagram of stator and polarization pattern of piezoelectric ceramics

1.1 孤极传感器的理论模型

理论上定子可简化成一个圆环板,如图 2(a)所示,在研究过程中采用柱坐标,圆环板的内外径分别为  $R_1$  与  $R_2$ 。对圆环板作一些基本假设,即克希霍夫假设<sup>[16]</sup>。

- 1) 变形前与中面垂直的直线,变形后仍然垂直于中面,且线段长度保持不变。
- 2) 薄板中面内各点没有平行于中面的位移,中面内任一点沿着  $r$  方向及  $\theta$  方向的位移均为 0,即  $u_0 = 0, v_0 = 0$ 。沿着中面法线的挠度为  $w_0$ ,并忽略挠度  $w$  沿着板厚的变化,即同一厚度各点的挠度都相同,等于中面挠度  $w_0$ 。
- 3) 在冲击环境中,整个圆板受到轴对称载荷,圆板中的变形与内力也一定是轴对称的,即有  $v = 0, \tau_{r\theta} = \tau_{\theta r} = 0$ 。应力分量  $\sigma_z$  和  $\tau_{rz}$  远小于其他应力分量  $\sigma_r$  和  $\sigma_\theta$ ,取  $\sigma_z = 0$ ,即平行板中各层互相不挤压。直法线假设认为  $\tau_{rz}$  很小,相应的变形可以忽略不计。

假设整个圆环板上有着均布载荷  $q$ ,且定义圆环板向下的弯曲挠度为正,如图 2(b)所示,则圆环板的挠度微分方程可以表示为

$$D \nabla^4 \omega(r) = q \tag{1}$$

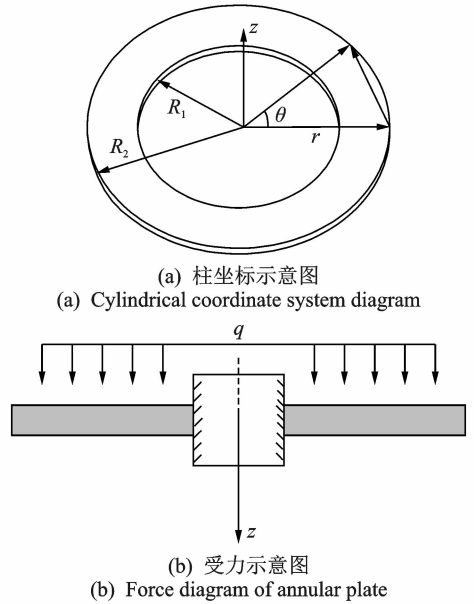


图 2 圆环板的柱坐标及受力示意图  
Fig. 2 Cylindrical coordinate system and force diagram of annular plate

其中: $D = Et^3/12(1 - \mu^2)$ 为圆环板的弯曲强度; $E$ 与  $\mu$  为圆环板的弹性模量与泊松比; $\rho$ 与  $t$  为圆环板的密度与厚度。

若圆环板承受的冲击加速度为  $a$ ,则均布载荷可以认为是  $q = \rho t a$ ,式(1)解的表达式为

$$\omega(r) = \rho t a (A_1 r^4 + A_2 r^2 \ln r + A_3 r^2 + A_4 \ln r + A_5) \tag{2}$$

其中: $A_1 = 1/64D; A_2 = -R_2^2/8D$ 。

定子的边界条件为内边界固支、外边界自由,利用相应的边界条件即可确定  $A_3, A_4, A_5$  的数值。令

$$f(r) = A_1 r^4 + A_2 r^2 \ln r + A_3 r^2 + A_4 \ln r + A_5 \tag{3}$$

则有

$$\omega(r) = \rho t a f(r) \tag{4}$$

孤极是压电陶瓷片中的一块扇形极化区域,因此孤极中的变形与位移也是轴对称。压电方程在柱坐标中的  $\theta$  方向、 $r$  方向和  $z$  方向分别对应直角坐标中的 1 方向、2 方向和 3 方向。孤极应变与电场的边界条件可表示为

$$s_{r\theta} = s_{rz} = s_{\theta z} = s_{zz} = 0 \tag{5a}$$

$$E_\theta = E_r = E_z = 0 \tag{5b}$$

其中: $s_{ij} (i, j = r, z, \theta)$ 为应变; $E_i (i = r, z, \theta)$ 为电场。根据第 2 类压电方程,孤极中任意一个微元体表面的电位移为

$$D_3 = e_{31} s_{rr} + e_{31} s_{\theta\theta} \tag{6}$$

圆环板中  $r$  方向与  $\theta$  方向的应变表达式为

$$s_{rr} = -z \frac{d^2 \omega}{dr^2} = -z \rho t a \frac{d^2 f(r)}{dr^2} \quad (7a)$$

$$s_{\theta\theta} = -z \frac{1}{r} \frac{d\omega}{dr} = -z \rho t a \frac{1}{r} \frac{df(r)}{dr} \quad (7b)$$

孤极表面在冲击过程中产生的电荷量为

$$q = \int_A D dA = \iint_A (e_{31} s_{rr} + e_{31} s_{\theta\theta}) r dr d\theta = -e_{31} \rho z_p t a \iint_A \left( \frac{d^2 f(r)}{dr^2} + \frac{df(r)}{r dr} \right) r dr d\theta \quad (8)$$

其中:  $A$  为孤极面积;  $z_p$  为孤极距离定子中面的距离。

孤极传感器的电压灵敏度为

$$S_U = U/a = q/Ca = \frac{-e_{31} \rho z_p t \iint_A \left( \frac{d^2 f(r)}{dr^2} + \frac{df(r)}{r dr} \right) r dr d\theta}{C} \quad (9)$$

其中:  $U$  为孤极输出电压幅值;  $C$  为孤极的等效电容;  $a$  为加速度幅值;  $S_U$  为孤极传感器的电压灵敏度。

由式(9)可知,孤极传感器的电压灵敏度取决于定子的密度、厚度、压电陶瓷的压电应力常数、孤极面积以及孤极固有电容。对于结构固定的定子而言,其  $f(r)$  以及定子的密度  $\rho$ 、厚度  $t$  等参数均是确定的,孤极传感器电压灵敏度取决于压电材料的本身属性。式(9)表明孤极的输出电压理论上与加速度幅值  $a$  成正比,这说明孤极作为加速度传感器是可行的。

### 1.2 定子的谐振频率

当压电加速度传感器的上限频率低于结构共振频率的 1/3 时,幅值误差低于 1 dB(12%)。当上限频率为共振频率的 1/5 时,才可保证幅值误差小于 0.5 dB(6%)<sup>[17]</sup>。笔者以直径为 30mm 的定子为分析对象,冲击时定子对应的振型如图 3 所示,有限元分析得到谐振频率为 5 577 Hz。这说明当加速度的脉宽大于 270  $\mu$ s 时,孤极输出信号的幅值误差小于 1 dB;当加速度信号的脉宽大于 450  $\mu$ s,孤极输出信号的幅值误差小于 0.5 dB。

## 2 标定实验

### 2.1 实验过程

搭建标定实验平台对孤极传感器进行标定测

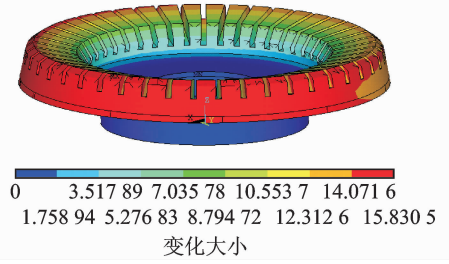


图 3 定子纵向振型

Fig. 3 Longitudinal vibration mode of stator

试,如图 4 所示。实验平台主要包括马歇特锤、示波器、标准加速度传感器及数据采集系统。其中:马歇特锤模拟冲击过载环境,通过改变马歇特锤中棘轮的齿数调整加速度幅值;示波器用于捕捉与采集孤极的输出电压信号;标准加速度传感器采集加速度信号。为保证加速度的脉宽大于 300  $\mu$ s,采用 1 块厚的橡胶垫作为缓冲材料。在每个棘轮下进行 5 次重复实验,共进行 60 次标定实验。

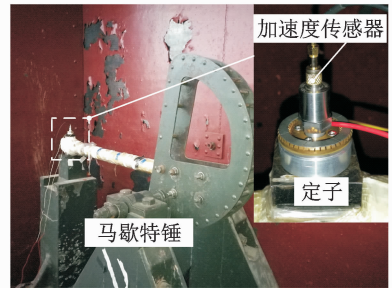


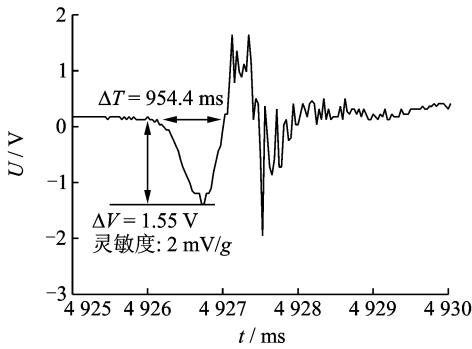
图 4 标定实验平台

Fig. 4 Calibration experiment platform

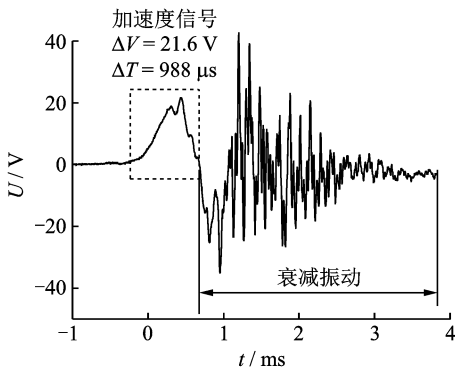
### 2.2 实验结果分析

当马歇特锤棘轮数为 9 时,标准加速度传感器测得的加速度幅值为 775g,脉宽为 954.4  $\mu$ s,如图 5(a)所示。孤极的输出信号如图 5(b)所示,主要由两部分组成:当冲击发生时,输出的信号与加速度信号相对应,信号幅值为 21.6V,脉宽为 988  $\mu$ s;随后定子进入衰减振动,孤极输出高频杂波干扰信号,部分杂波信号的幅值甚至超过加速度信号的幅值。

随着冲击过载从 120g 逐渐增加到 2 000g,孤极的输出信号幅值从 2V 逐渐增加到 50V。表 1 为部分实验数据。当冲击幅值较低时,加速度脉宽达到 1.87 ms;随着冲击幅值逐渐增加,加速度脉宽逐渐降低到 594  $\mu$ s。整个实验过程中,加速度脉宽均超过了 450  $\mu$ s,不会引起大的幅值误差。对孤极输出的信号幅值与加速度进行线性拟合,结果如图 6 所示。电压与加速度之间的拟合优度  $R^2$  达到了



(a) 标准加速度信号  
(a) Standard acceleration signal



(b) 孤极的信号输出  
(b) Signal of single-electrode

图 5 孤极与标准加速度传感器信号对比

Fig. 5 Signal comparison between single-electrode and standard acceleration sensor

0.978 44, 非常接近 1, 说明孤极传感器在冲击环境中具有良好的线性输出特性。拟合曲线的斜率为 0.026 88, 说明孤极传感器的电压灵敏度为 0.026 88 V/g。

表 1 孤极输出电压与加速度之间的关系

Tab. 1 The relationship between acceleration and output voltage of single-electrode

参数	幅值	脉宽/ $\mu\text{s}$	幅值	脉宽/ $\mu\text{s}$
标准	120.69g	1 870.0	306.06 g	1 580.0
孤极	2.2 V	1 800.0	10 V	1 542.0
标准	565 g	1 370.0	690 g	1 090.0
孤极	14.4 V	1 264.0	16.4 V	1 028.0
标准	950 g	998.8	1 015 g	957.6
孤极	21.2 V	1 004.0	22 V	928.0
标准	1 440 g	669.9	1 930 g	594.2
孤极	36 V	718.0	50.8 V	604.0

加速度传感器不仅需要识别加速度信号的幅值, 还需要识别加速度信号的脉宽。假设第  $i$  次实验时, 标准传感器测得加速度脉宽为  $T_i$ , 孤极传感器测得加速度脉宽为  $t_i$ , 总的实验次数为  $P$ , 则标准加速度传感器与孤极传感器测得加速度脉宽平均差

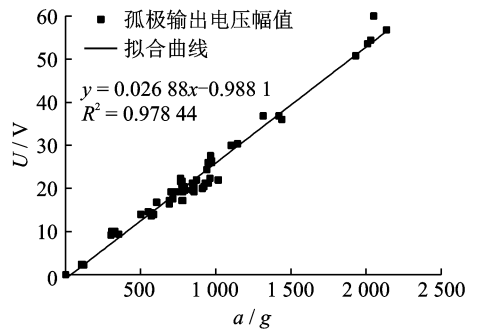


图 6 孤极输出电压与加速度的关系

Fig. 6 The relationship between the single-electrode output voltage and Acceleration

值为

$$\Delta t = \sum (T_i - t_i) / P \quad (10)$$

统计 60 次标定实验结果, 标准传感器探测的脉宽平均仅比与孤极传感器探测的脉宽多 6.3  $\mu\text{s}$ , 误差很小, 可认为孤极能够精确地测量加速度信号的脉宽。

### 3 信号数字滤波处理

实验结果表明, 孤极的输出信号包含大量的噪音。为提升孤极传感器的动态性能指标, 去除噪音, 需设计简单有效的数字滤波器, 并为模拟滤波器的设计提供基础。

#### 3.1 信号分析

设计合适的数字滤波器首先需要了解信号的组成, 利用 Matlab 对图 5(b) 信号进行频谱分析, 结果如图 7 所示。在 200~1 400 Hz 左右, 信号幅值较大, 这与加速度信号频率范围相对应。在 5 200~7 800 Hz 的频率范围内, 还存在着较强的干扰信号。由于定子结构谐振频率为 5 577 Hz, 说明干扰信号产生的主要原因是结构共振。此外, 在更高的频率范围内, 还存在着少量的高频杂波干扰信号。对采集的 60 组信号进行频谱分析, 发现信号组成具有相同的特点: 2 000 Hz 以下主要是有用的加速度信号; 4 500~8 000 Hz 内的干扰信号主要由结构共振产生; 在更高的频率范围内存在着少量干扰信号。

#### 3.2 数字滤波器设计及信号处理

数字滤波器按结构可以分为 FIR 数字滤波器与 IIR 数字滤波器。从信号处理的角度看, IIR 数字滤波器比 FIR 数字滤波器有着更大的优势。因

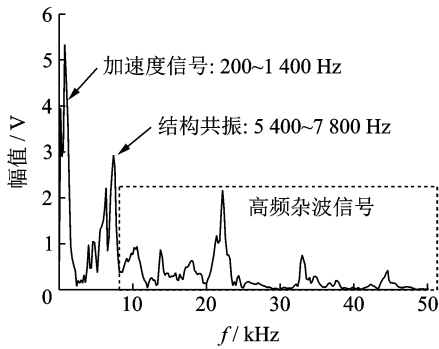


图 7 频谱分析结果

Fig. 7 Spectrum analysis results

此,利用 Matlab 中现成的 IIR 数字滤波器设计函数滤波器。为了有效去除信号中的噪音,设定通带的拐角频率为 3 000 Hz,通带内的最大衰减为 1 dB,阻带的拐角频率为 4 500 Hz,阻带最小衰减为 10 dB。滤波器的类型为巴特沃兹低通滤波器,得到了 5 阶低通滤波器的传递函数为

$$H(z) = \frac{\sum_{i=0}^M b_i z^{-i}}{\sum_{l=1}^N a_l z^{-l}} \quad (11)$$

其中:  $M = N = 5$ ;  $b = [0.000\ 882\ 66\ 0.004\ 4\ 0.008\ 8\ 0.008\ 8\ 0.004\ 4\ 0.000\ 882\ 66]$ ;  $a = [1\ -3.143\ 4\ 4.184\ 4\ -2.892\ 1\ 1.029\ 5\ -0.150\ 1]$ 。

滤波器的幅频特性如图 8 所示,3 000 Hz 时信号的衰减仅为 0.5 dB,4 500 Hz 时信号的衰减为 9.92 dB。滤波器的截止频率(信号衰减为 3 dB 的频率点)为 3 632 Hz。

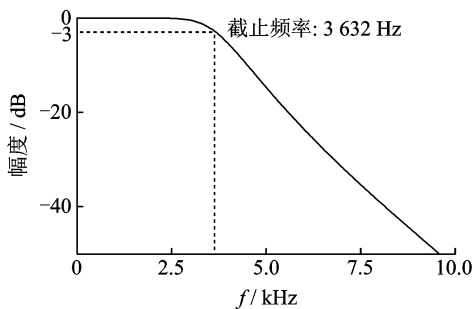


图 8 滤波器幅频特性

Fig. 8 Amplitude-frequency characteristics of filter

利用上述滤波器对图 5(b)中的信号进行滤波,滤波前后对比如图 9 所示。滤波后的曲线完整地保留了加速度信号的特征,并有效去除了结构共振信号与高频杂波干扰信号,滤波效果十分理想。该滤波器对采集到的所有信号均有着良好的滤波效果。拟合了滤波后的信号幅值与加速度之间的关系,如

图 10 所示。信号幅值与加速度之间的拟合优度  $R^2$  达到 0.941 26,说明滤波后的信号与加速度之间仍然保持着良好的线性关系。拟合曲线的斜率为 0.026 99,说明滤波之后的灵敏度为 0.026 99V/g,而滤波之前孤极传感器的灵敏度为 0.026 88V/g,二者误差很小,说明数字滤波处理没有对孤极传感器的灵敏度产生影响。

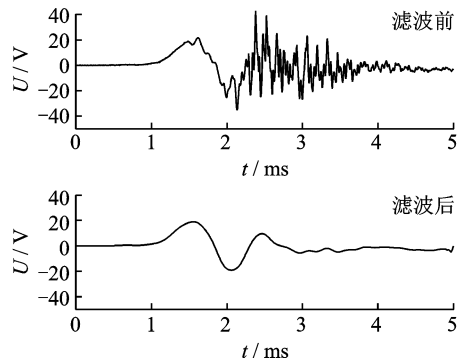


图 9 滤波前后的信号对比

Fig. 9 Signal comparison before and after filtering

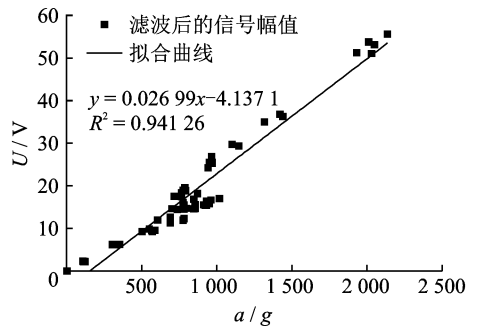


图 10 滤波后加速度与信号幅值之间的关系

Fig. 10 The relationship between signal amplitude and acceleration after filtering

## 4 结束语

针对超声电机应用在冲击环境中,提出将孤极作为加速度传感器这一设想。根据孤极的结构特点与极化方式,推导出孤极传感器电压灵敏度的表达式,并通过有限元方法分析孤极传感器的谐振频率。搭建标定实验平台,采集孤极在冲击环境中的输出信号并进行分析,结论如下:孤极输出信号主要由加速度信号与大量的杂波干扰信号组成;其中孤极输出信号的幅值与冲击过载之间有良好的线性关系;频谱分析结果表明杂波干扰信号产生的主要原因是结构共振。为了消除杂波信号的影响,设计了一种低通数字滤波器。该滤波器在有效保持加速度信号

特征的同时有效地滤除干扰信号,且滤波之后的信号幅值与加速度之间仍有着良好的线性关系。

### 参 考 文 献

- [1] Chen Weishan, Liu Yingxiang, Yang Xiaohui, et al. Ring-type traveling wave ultrasonic motor using a radial bending mode [J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2014, 61(1):197-202.
- [2] Yang Xiaohui, Liu Yingxiang, Chen Weishan, et al. A cylindrical traveling wave ultrasonic motor using bonded-type composite beam[J]. Ultrasonics, 2016, 65:277-281.
- [3] Harkness P, Lucas M. A brief overview of space applications for ultrasonics[J]. Ultrasonics, 2012, 52(8):975-979.
- [4] He Zhiping, Wang Binyong, Lü Gang, et al. Visible and near-infrared imaging spectrometer (VNIS) for Chang E-3[C] // SPIE Asia-Pacific Remote Sensing. Beijing: International Society for Optics and Photonics, 2014, 9263:92630D.
- [5] Tang Yujuan, Yang Zhong, Wang Xinjie, et al. Research on the piezoelectric ultrasonic actuator applied to smart fuze safety system[J]. International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, 2017, 53(2):1-11.
- [6] 薛成, 陈超. 新型多通道控制的微小型超声电机[J]. 机械与电子, 2017, 35(4):44-47.  
Xue Chen, Chen Chao. A new type of multi-channel servo control of miniature ultrasonic motor[J]. Machinery & Electronics, 2017, 35(4):44-47. (in Chinese)
- [7] 朱鹏飞. 新型微小压电作动器及其在多通道舵机控件中的应用[D]. 南京:南京航空航天大学, 2016.
- [8] Diwiny M E, Sayed A H E, Hassanen E S, et al. Implementation of anti stealth technology for safe operation of unmanned aerial vehicle [C] // 2014 IEEE/AIAA 33rd Digital Avionics Systems Conference (DASC). [S.l.]:IEEE, 2014.
- [9] 陈超, 任金华, 石明友, 等. 旋转行波超声电机的冲击动力学模拟及实验[J]. 振动、测试与诊断, 2014, 34(1):8-14.  
Chen Chao, Ren Jinhua, Shi Mingyou, et al. Impact dynamics simulation and experiment analysis of traveling wave type rotary ultrasonic motor[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2014, 34(1):8-14. (in Chinese)

- [10] Hou Xiaoyan, Lee H P, Ong C J, et al. Shock analysis of a new ultrasonic motor subjected to half-sine acceleration pulses[J]. Advances in Computational Design, 2016, 1(4):357-370.
- [11] 唐玉娟, 王昊. 典型引信环境力对压电驱动器的影响研究[J]. 振动与冲击, 2013, 32(19):170-175.  
Tang Yujuan, Wang Jiong. Influence of typically environmental force of a fuze on a piezoelectric actuator [J]. Journal of Vibration & Shock, 2013, 32(19):170-175. (in Chinese)
- [12] Zhao Chunsheng. Ultrasonic motors: technologies and applications[M]. Berlin, Germany: Springer Science & Business Media, 2011:396-399.
- [13] Zeng Jingsong, Luo Wenhua, Lei Xianghong. Researches on frequency tracking technology of ultrasonic motor [C] // Symposium on Piezoelectricity. China: IEEE, 2011:270-274.
- [14] 陈志华, 赵淳生, 黄卫清. 行波型超声电机速度控制技术的研究[J]. 压电与声光, 2005, 27(4):427-430.  
Chen Zihua, Zhao Chunsheng, Huang Weiqing. Research on the speed control techniques of a traveling-wave type ultrasonic motor [J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2005, 27(4):427-430. (in Chinese)
- [15] 陆旦宏. 多孤极型空间调相环形行波超声波电机的研究[D]. 南京:东南大学, 2016.
- [16] 徐秉业. 应用弹塑性力学[M]. 北京:清华大学出版社, 1995:318.
- [17] 李翠, 李效民, 钟美芳. 压电式加速度传感器的智能应用[J]. 实验室研究与探索, 2010, 29(10):244-247.  
Li Cui, Li Xiaoming, Zhong Meifang. Intelligent application of piezoelectricity type acceleration sensor [J]. Research and Exploration in Laboratory, 2010, 29(10):244-247. (in Chinese)



**第一作者简介:**孙栋,男,1991年3月生,博士生。主要研究方向为压电驱动器及其应用研究。曾发表《旋转型超声电机在冲击环境下的失效模式研究》(《振动与冲击》2018年第37卷第9期)等论文。

E-mail:sundong@njust.edu.cn

**通信作者简介:**王昊,男,1964年7月,教授、博士生导师。主要研究方向为智能材料与应用。

E-mail:wjiongz@njust.edu.cn