

文章编号 1004-924X(2017)12-3089-07

表面对称电极含金属芯聚偏二氟乙烯纤维的 简谐振动传感器

边义祥*, 王汝梦, 孙凯旋, 刘榕榕, 陈文家
(扬州大学 机械工程学院, 江苏 扬州 225127)

摘要:模仿蜘蛛毛发感受器的结构和功能,设计制备了表面对称电极含金属芯聚偏二氟乙烯(PVDF)纤维(SMPF)的简谐振动传感器。用挤压拉伸的方法制备纤维胚体,将纵向表面涂镀形状完全对称的导电胶作为外部电极,经过极化后,制备成 SMPF 简谐振动传感器。基于压电方程和振动理论,建立了悬臂梁结构的 SMPF 简谐振动传感器的理论模型,分析了传感信号与简谐振动角度和幅值的关系。将 SMPF 简谐振动传感器固定在基体上,搭建了实验系统,测试了 SMPF 简谐振动传感器对简谐振动的响应,验证了理论模型。结果表明,SMPF 简谐振动传感器能够准确感知简谐振动的频率,传感信号和简谐振动的幅值呈线性关系,和振动方向成"8"字形关系,共振频率为 15.6 Hz,灵敏度为 0.019 pC/mm。该 SMPF 传感器能够测量简谐振动频率、幅值或方向,具有广泛的工程应用前景。

关键词: PVDF 纤维;简谐振动传感器;挤压拉伸;表面对称电极

中图分类号: TP212.12; TM282 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20172512.3089

Simple harmonic vibration sensor with symmetrical electrode metal-core PVDF fibers

BIAN Yi-xiang*, WANG Ru-meng, SUN Kai-xuan, LIU Rong-rong, CHEN Wen-jia

(College of Mechanical Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225127, China)

* Corresponding author, E-mail: yxbian@yzu.edu.cn

Abstract: Inspired by the structure and function of spider hair receptors, a simple harmonic vibration sensor with Symmetrical Electrode Metal-core Piezoelectric Fiber (SMPF) was designed and fabricated. The fiber body was prepared by extrusion-stretch method, and the symmetrical conductive adhesive was used as the external electrode in the longitudinal surface. After polarization, the simple harmonic vibration sensor with the SMPF was prepared. Based on the piezoelectric equation and the vibration theory, the theoretical model of harmonic vibration sensor with the SMPF based on a cantilever beam structure was established, and the relationship between the sensor signal and the angle and amplitude of simple harmonic vibration was analyzed. The SMPF was fixed on a substrate, and an experimental system was built. The response of the sensor to simple harmonic vibration was tested and the theoretical model was verified. The results show that the sensor with the SMPF can accurately sense the frequency of harmonic vibration, the sensor signal is linear related to the amplitude of simple

收稿日期:2017-05-11;修订日期:2017-07-07.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 51775483, No. 51275447)

harmonic vibration, and has an "8" shape relationship with the direction. Moreover, the resonance frequency of SMPF is 15.6 Hz, and the sensitivity is 0.019 pC/mm. In conclusion, the sensor with the SMPF can measure the frequency, amplitude or the direction of simple harmonic vibration and has prospect for engineering applications.

Key words: PVDF fiber; simple harmonic vibration sensor; extrusion stretching; surface symmetrical electrode

1 引言

在自然界中,蝎子、蜘蛛等节肢动物,能够利用身上的毛发感受器感知周围环境中的空气振动信息,经过大脑判断后作出相应的反应以逃避天敌的追捕、捕食猎物或进行求偶活动^[1-3]。动物的这种感知能力是在长时期的生物进化过程中逐渐形成的,对其生存和繁衍至关重要。蜘蛛感觉毛的结构,是一支从毛窝中伸出的直杆,直杆的根部与感觉神经细胞相连^[4]。当周围的空气振动使直杆产生偏转或弯曲变形时,与之相连的感觉神经细胞产生神经冲动,并通过神经纤维传递给大脑,使蜘蛛能够判断直杆的振动方向和幅值,进而感知气流的变化^[5]。

近十几年,很多研究者模仿动物感觉毛的结构,设计制备了多种仿生毛发传感器,能够感知周围环境的振动信息^[6]。这些人工毛发传感器基本上都是悬臂梁结构,按照悬臂梁变形不同进行分类,可以分为倾转型和弯曲型两类^[7-8]。倾转型人工毛发传感器的悬臂梁本身不具有传感功能,传感元件被固定在悬臂梁的根部,发生振动时,悬臂梁产生倾转变形,根部也随之变形,传感元件感知变形后产生传感信号,根据传感信号可以计算出振动的方向和幅值^[9-11]。固定根部的传感元件可以是压阻元件^[12],或是微型活动电容^[13]。压电材料具有直接的机电转换性能,可以直接感知弯曲变形^[14-15]。用压电材料做成的弯曲型人工毛发悬臂梁传感器,可以直接计算振动的方向和幅值^[16-17]。现有的大部分压电型人工毛发传感器,使用的都是压电陶瓷材料。压电陶瓷具有较高的压电常数,制成的人工毛发传感器具有较高的灵敏度。但是,由于压电陶瓷的脆性,此类人工毛发传感器在使用过程中容易损坏,丧失传感性能^[18]。

为了克服压电陶瓷的缺点,在前期工作的基

础上^[19-20],本文中使用的有机压电材料 PVDF (Poly vinylidene fluoride),设计制备了表面对称电极含金属芯 PVDF 纤维 (Symmetrical electrodes Metal-core Piezoelectric Fiber, SMPF) 简谐振动传感器,能够感知简谐振动的频率、方向或幅值。

2 SMPF 简谐振动传感器设计与制备

本文设计制备的 SMPF 简谐振动传感器,结构如图 1 所示,中间是直线型的金属丝,外面包裹有厚度均匀的 PVDF 层,表面沿纵向涂镀对称电极。其制备过程如下:



图 1 SMPF 的结构

Fig. 1 Structure of SMPF

首先截取适当长度的钨丝作为金属芯,并把钨丝放入拉制纤维模具的孔中;然后称取 PVDF 颗粒放入到已经放入钨丝的模具孔中,通过恒温加热炉加热模具至 260 °C,大约经过 40 min 后, PVDF 颗粒充分地融化成熔融状;之后通过拉丝装置,带动钨丝在模具孔中匀速运动,制备 SMPF 胚体;冷却成形后,截取适量长度的 SMPF 胚体,在其纵向表面涂镀两片对称形状的导电胶层用作表面电极;最后将 SMPF 胚体放入到温度为 100 °C 的恒温油浴锅中极化 60 min 后,关闭电源,使其随硅油冷却到室温,取出晾干(极化时给予 SMPF 胚体正负极加 1.5 KV 电压)。在极化过程中表面有电极的 2 片扇形区域的 SMPF 胚体被极化,具有压电性。而 2 片表面没有电极的扇形区域没有被极化,基本不具有压电性。制备好的 SMPF 横截面、极化电路和传感电路如图 2 所示。

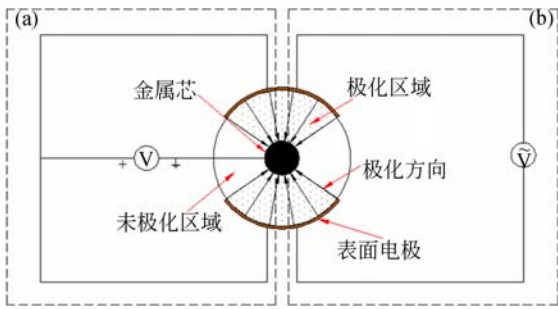


图 2 (a)极化电路,(b)传感电路

Fig. 2 (a) Polarization circuit, (b) Sensing circuit

3 SMPF 简谐振动理论分析

3.1 SMPF 简谐振动理论模型

将制备好的 SMPF 固定在基体上, 成悬臂梁结构, 如图 3 所示。当基体受到简谐激励时, SMPF 会随着简谐振动的方向来回摆动, 产生弯曲变形。由于 SMPF 的压电性, 表面电极上将产生电荷, 因此 SMPF 可以用作简谐振动传感器, 测量基体的简谐振动。

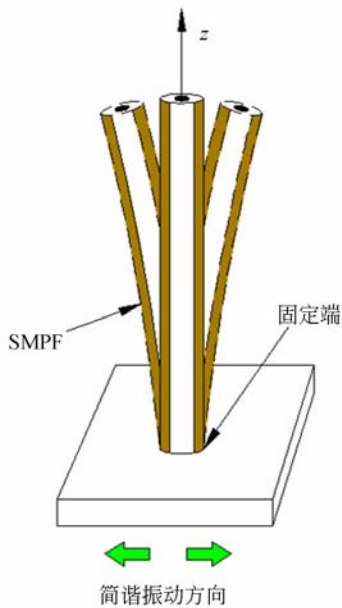


图 3 SMPF 振动传感器

Fig. 3 Vibration sensor of SMPF

3.2 SMPF 简谐振动理论模型分析

将 SMPF 用作简谐振动传感器时, 其横截面结构如图 4 所示。图中 α 为涂镀表面电极的包角, γ 为简谐振动的方向与和纤维中线之间的夹角, 简谐振动的方向与 SMPF 受力方向相同。

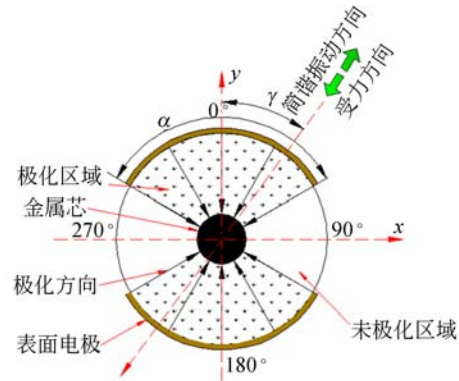


图 4 SMPF 截面

Fig. 4 Cross section of SMPF

PVDF 被极化的部分具有压电性, 第一类压电方程为:

$$[S] = [s^E][T] + [d]^T[E], \quad (1)$$

$$[D] = [d][T] + [\epsilon^T][E], \quad (2)$$

其中: S 代表应变, T 代表应力, D 是电位移, E 是电场强度, s 是弹性柔顺系数, d 是压电常数, ϵ 代表介电常数。

因为 SMPF 为悬臂梁结构, 受到简谐振动时, 固定端处的 SMPF 部分不发生变形。SMPF 沿轴线受到的力 F 可以等效为均布载荷, 故其受到的弯矩可以表示为:

$$M = \frac{1}{2} F(L - z)^2, \quad (3)$$

其中: L 是悬臂梁的总长, z 是距离固定端的长度。

为了简化计算, 假设 SMPF 可以沿着径向自由伸缩。因为本文制备 SMPF 的长度是直径的几十倍, 故其圆周应力和切应力可以忽略。当 SMPF 受到外加均布载荷时, SMPF 的应变和电位移的边界条件可以表示为:

$$S_{rr} = S_{\theta\theta} = S_{r\theta} = S_{\theta z} = S_{rz} = 0, \quad (4)$$

$$D_\theta = D_z = 0, \quad (5)$$

$$E_r = 0. \quad (6)$$

将公式(4), (5) 和 (6) 代入到公式(1)和(2)中, 可以得到:

$$D_r = d_{31} \frac{S_{zz}}{s_{11}^E}. \quad (7)$$

因为 SMPF 的长度远大于直径, 故假设 SMPF 每一处的曲率半径都是一样的, 因此:

$$\frac{1}{\kappa} = \frac{M}{EI}, \quad (8)$$

其中: E 代表 SMPF 的弹性模量, I 代表 SMPF 的惯性矩。

因此, 表面应变 S 可以表示为:

$$S_z(R_c, \theta) = \frac{MR_c \sin \theta}{EI}. \quad (9)$$

将式(9)代入到式(7)中得到表面电位移:

$$D_r = d_{31} \frac{MR_c \sin \theta}{s_{11}^E EI}. \quad (10)$$

故 SMPF 表面电极上产生的电荷可以表示为:

$$Q = \int_0^L \int_{\frac{\pi-\alpha}{2}}^{\frac{\pi+\alpha}{2}} D_r R_c d\theta dz. \quad (11)$$

将式(10)代入到式(11)中, 可以得到:

$$Q = \int_0^L \int_{\frac{\pi-\alpha}{2}}^{\frac{\pi+\alpha}{2}} d_{31} \frac{MR_c \sin \theta}{s_{11}^E EI} R_c d\theta dz = \frac{1}{3} d_{31} \frac{FL^3 R_c^2 \sin \frac{\alpha}{2}}{s_{11}^E EI}. \quad (12)$$

设基体受到的简谐激励为:

$$u(t) = U_0 \sin \omega t, \quad (13)$$

其中: ω 是振动频率, U_0 为初始振幅, 故悬臂梁沿长度方向受到的等效均布载荷为:

$$F = U_0 \omega^2 \sin \omega t \cos \gamma, \quad (14)$$

其中 γ 为简谐振动方向和纤维中线之间的夹角, 如图 4 所示。

代入式(12), 得到 SMPF 表面产生的电荷为:

$$Q = \frac{1}{3} d_{31} U_0 \omega^2 \sin \omega t \cos \gamma \frac{L^3 R_c^2 \sin \frac{\alpha}{2}}{s_{11}^E EI}. \quad (15)$$

从公式(15)可以看出, SMPF 输出的电荷信号 Q 与简谐振动的幅值 U_0 成线性关系, 与简谐振动的角度 γ 成余弦的关系。同样, 还可以看出当基体受到简谐振动时, SMPF 表面电极上产生的电荷也是简谐变化, 频率与基体的振动频率相同。

4 SMPF 简谐振动传感实验

4.1 单根悬臂梁结构 SMPF 扫频实验

因为外部所施加激励的频率越接近于传感器的固有频率, 输出的信号就会越大, 研究传感器的固有频率, 对传感器的应用具有很强的指导作用。本文使用扫频的实验方法测试 SMPF 的固有频率。

由振动理论可知, 悬臂梁结构的 SMPF 的弯曲振动共振频率^[10]:

$$f_i = \frac{(\lambda_i L)^2}{2\pi} \sqrt{\frac{EI}{\rho AL^4}}, \quad (16)$$

其中 λL 是悬臂梁结构 SMPF 的特征值。其前几阶特征值为: 1.875 1, 4.694 1, 7.854 8, 10.995 5, ...。

由上文可知, 在弯矩 M 的作用下各部分的曲率半径相同, 都为 ρ 。由参考文献[21]中的结论可知, 悬臂梁结构的 SMPF 的弯曲振动共振频率可以表示为:

$$f_i = \frac{(\lambda L)^2}{4\pi} \sqrt{\frac{s_m R_c^4 - s_m R_m^4 + s_{11}^E R_m^4}{s_{11}^E s_m L^4 (\rho_m R_m^2 + \rho_c R_c^2 - \rho_c R_m^2)}}, \quad (17)$$

其中: R_c 和 R_m 分别表示 PVDF 层的半径和中间金属芯半径, ρ_c 和 ρ_m 分别表示 PVDF 层和金属芯的密度。其中:

$$s_m = 1/E_m, \quad (18)$$

$$s_{11}^E = 1/E_c, \quad (19)$$

其中 E_c 和 E_m 分别表示 PVDF 层和金属芯的弹性模量。

以上各式中参数为: $R_c = 0.3$ mm, $R_m = 0.04$ mm, $L = 20$ mm, $E_m = 230$ GPa, $E_c = 27.5$ MPa, $\rho_m = 1780$ kg/m³, $\rho_c = 10000$ kg/m³, 经过计算得出 SMPF 的一阶弯曲振动共振频率为 16.1 Hz。

在保持激振器振动幅值不变, 只改变激振频率的情况下, 对 SMPF 进行简谐振动实验。实验时, 将制备好的 SMPF 固定在激振器激振头夹具上, 激振器带动 SMPF 做简谐振动, 测试 SMPF 的固有频率。SMPF 输出的电荷信号, 通过电荷放大器放大后, 再通过数据采集卡采集到工控机中。通过数据处理, 得到如图 5 所示的规律图。从图中可以看出, 随着激振频率的改变, SMPF 输出信号的大小也逐渐地变化。在 15.6 Hz 左右, SMPF 的输出电压值达到最大, 即本文制备 SMPF 的固有频率在 15.6 Hz 左右, 与理论计算的数据 16.1 Hz 比较接近。考虑到实验的误差和环境等因素的影响, 可以认为理论推导数据与实验数据基本吻合。

由于本文中的 SMPF 传感器体积小、质量轻且一阶共振频率较低, 可以将多个这样的传感器, 应用于微型飞行器、驱动器和机器人等领域, 用于低频振动传感。由公式(17)可知, SMPF 的共振频率和长度、纤维半径有关, 长度越短, 共振频率越高。通过改变 SMPF 的长度和金属芯半径, 可以调整 SMPF 传感器的共振频率, 使之适用于不同的应用场合。

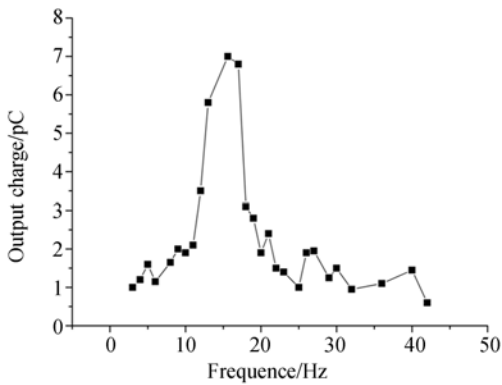


图 5 SMPF 输出信号与激励频率之间关系

Fig. 5 Relationship between output signal of SMPF and excitation frequency

4.2 SMPF 测试基体振动频率实验

在上一实验装置的基础上,在激振头夹具的正上方安装激光位移传感器,用于测试激振头的位移。激光位移传感器输出的信号,直接通过数据采集卡采集到工控机中。图 6 是在同一个激励信号作用下,激光位移传感器和 SMPF 在 2 s 内输出的信号图。从图中可以看出,在 2 s 内二者输出的波形和时间周期都是相同,即二者具有相同的频率,说明 SMPF 可以测量基体的振动频率。

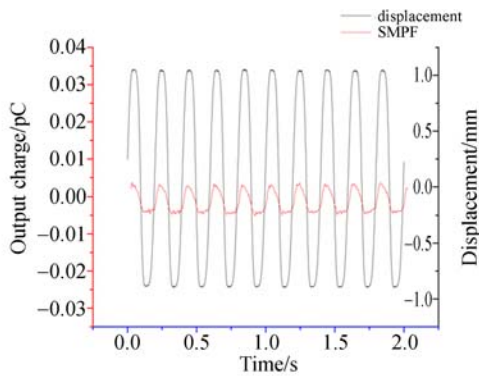


图 6 SMPF 输出信号与激励位移的关系

Fig. 6 Relationship between output signal of SMPF and excitation displacement

4.3 SMPF 输出信号和激振幅值关系实验

利用 4.2 实验搭建的实验装置,对 SMPF 进行不同激振幅值的简谐振动实验。实验时,控制激振频率不变,调节激振幅值使其依次增大。对 SMPF 输出信号通过数据采集卡进行采集,作出如图 7 所示的 SMPF 输出信号和激振幅值的关系图,图中横坐标为激振幅值,纵坐标为 SMPF

输出电压值。从图中可以看出,随着激振幅值的增大,SMPF 输出的电压值也随之增大,成线性关系,与公式(15)相符合,说明 SMPF 能够测量简谐振动的幅值。由图 7 可知,SMPF 传感器的灵敏度为 0.019 pC/mm。

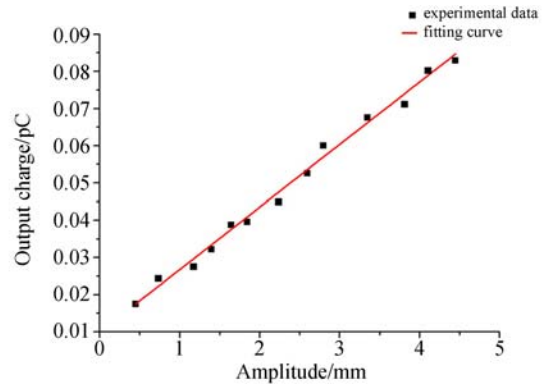


图 7 SMPF 输出信号和激励振动幅值的关系

Fig. 7 Relationship between output signal of SMPF and the amplitude of excitation vibration

4.4 SMPF 输出信号和激振角度关系实验

利用 4.2 实验搭建的实验装置,对 SMPF 进行不同激振角度的简谐振动实验。实验时,保持激振幅值不变,改变激振角度 γ ,每次改变 15° 。对数据进行采集、处理,取每次实验数据的峰值,作出如图 8 所示的 SMPF 输出信号和激振角度 γ 的关系图。图中横坐标为角度,纵坐标为 SMPF 输出电压值。从图中可以看出随着激振角度的改变,SMPF 输出的电压值成余弦变化,与公式(15)相符合,说明 SMPF 能够测量简谐振动方向。

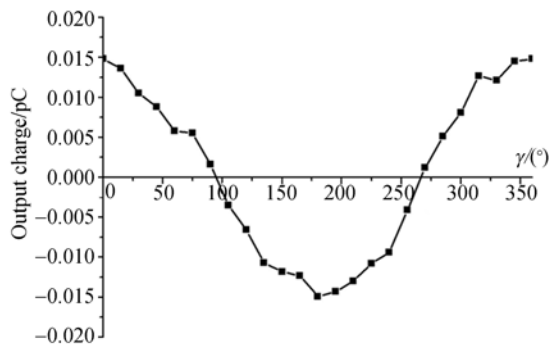


图 8 SMPF 输出信号和振动方向的关系

Fig. 8 Relationship between output signal of SMPF and direction of vibration

为了更好地说明本文制备的传感器能够测量简谐振动的方向,在极坐标下做出如图 9 所示的 SMPF 输出电压值和振动角度 γ 的极坐标关系图。从图中可以看出,SMPF 输出电压值在 $0^\circ \sim$

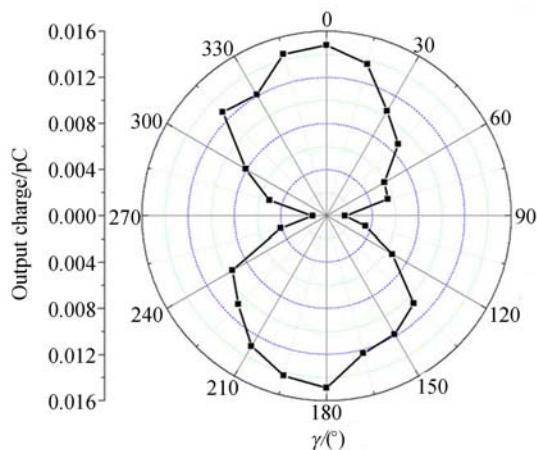


图 9 SMPF 输出信号和振动方向关系的极坐标表示
Fig. 9 Expressing by polar coordinates of relationship between SMPF output signal and direction of vibration

参考文献:

- [1] HILL P S M. Vibration and animal communication: a review[J]. *American Zoologist*, 2001, 41(5): 1135-1142.
- [2] LANDOLFA M A, MILLER J P. Stimulus-response properties of cricket cercal filiform receptors[J]. *Journal of Comparative Physiology A*, 1995, 177(6): 749-757.
- [3] JACOBS G A, MILLER J P, ALDWORTH Z. Computational mechanisms of mechanosensory processing in the cricket [J]. *Journal of Experimental Biology*, 2008, 211(Pt 11): 1819-1828.
- [4] 赵敬钊, 卢宝廉, 宋大祥. 蜘蛛听毛的电镜观察[J]. *蛛形学报*, 2001, 10(2): 8-11.
ZHAO J ZH, LU B L, SONG D X. Observation on trichobothria of nine spider species by scanning electron microscope (Araneae)[J]. *Acta Arachnologica Sinica*, 2001, 10(2): 8-11. (in Chinese)
- [5] CHANG Y C. Spider's sense and sense organs[J]. *Chinese Journal of Biology*, 1992, 27(3): 45-48.
- [6] TAO J L, YU X. Hair flow sensors: from bio-inspiration to bio-mimicking-a review[J]. *Smart Materials and Structures*, 2012, 21(11): 113001.
- [7] TRIANTAFYLLOU M S, WEYMOUTH G D, MI-
AO J M. Biomimetic survival hydrodynamics and flow sensing [J]. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 2016, 48: 1-24.
- [8] RIZZI F, QUALTIERI A, DATTOMA T, *et al.*. Biomimetics of underwater hair cell sensing[J]. *Microelectronic Engineering*, 2015, 132: 90-97.
- [9] YANG B, HU D, WU L. Design and analysis of a new hair sensor for multi-physical signal measurement[J]. *Sensors*, 2016, 16(7): 1056.
- [10] NAWI M N M, MANAF A A, ARSHAD M R, *et al.*. Review of MEMS flow sensors based on artificial hair cell sensor[J]. *Microsystem Technologies*, 2011, 17(9): 1417-1426.
- [11] JOYCE B S, TARAZAGA P A. Developing an active artificial hair cell using nonlinear feedback control[J]. *Smart Materials and Structures*, 2015, 24(9): 094004.
- [12] JUNG I, ROH Y. Design and fabrication of piezoceramic bimorph vibration sensors[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 1998, 69(3): 259-266.
- [13] FAN Z F, CHEN J, ZOU J, *et al.*. Design and fabrication of artificial lateral line flow sensors[J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2002, 12(5): 655-661.
- [14] 樊康旗, 刘朝辉, 王连松, 等. 从人体行走中收集

90° 区间逐渐递减,在 $90^\circ \sim 180^\circ$ 区间逐渐递增,在 $180^\circ \sim 270^\circ$ 区间逐渐递减,在 $270^\circ \sim 360^\circ$ 区间逐渐递增,两者之间呈现明显的“8”字图,同样说明 SMPF 能够测量简谐振动方向。

5 结 论

本文将 SMPF 简谐振动传感器用于测量基体的简谐振动。基于第一类压电方程和振动理论,建立了 SMPF 的简谐振动传感模型。搭建了实验系统,测试了 SMPF 的简谐振动传感能力。实验结果表明,受到简谐振动激励时,SMPF 也将产生简谐传感信号,其频率和激励频率相同,传感信号幅值和激励幅值成线性关系,与激励方向成余弦关系。通过传感信号,可以推导出基体的简谐振动频率、幅值和方向。实验结果验证了理论模型。本文设计制备的 SMPF 振动传感器具有体积小、质量轻、共振频率低等特点,具有较为广泛的工程应用前景。

- 能量的鞋上压电俘能器[J]. *光学精密工程*, 2017, 25(5): 1272-1280.
- FAN K Q, LIU ZH H, WANG L S, *et al.*. Shoe-mounted piezoelectric energy harvester for collecting energy from human walking[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2017, 25(5): 1272-1280. (in Chinese)
- [15] 程廷海, 刘文博, 赵宏伟, 等. 气动高压激励的阵列式盘型压电俘能器[J]. *光学精密工程*, 2017, 25(5): 1222-1228.
- CHENG T H, LIU W B, ZHAO H W, *et al.*. Array piezoelectric plate harvester excited by pneumatic compressed air[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2017, 25(5): 1222-1228. (in Chinese)
- [16] LI F, LIU W T, STEFANINI C, *et al.*. A novel bioinspired PVDF micro/nano hair receptor for a robot sensing system[J]. *Sensors*, 2010, 10(1): 994-1011.
- [17] HAN J S, OH K H, MOON W K, *et al.*. Bio-inspired piezoelectric artificial hair cell sensor fabricated by powder injection molding[J]. *Smart Materials and Structures*, 2015, 24(12): 125025.
- [18] TAO J L, SUN Y, WU G X, *et al.*. Emulating the directional sensitivity of fish hair cell sensor [J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2013, 24(12): 1484-1493.
- [19] BIAN Y X, LIU R R, HUANG X M, *et al.*. Design and fabrication of a metal core PVDF fiber for an air flow sensor[J]. *Smart Materials and Structures*, 2015, 24(10): 105001.
- [20] BIAN Y X, LIU R R, HUI S. Fabrication of a polyvinylidene difluoride fiber with a metal core and its application as directional air flow sensor [J]. *Functional Materials Letters*, 2016, 9(1): 1650001.
- [21] 边义祥. 含金属芯压电纤维的驱动和传感特性研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2009: 68-69.
- BIAN Y X. *Investigations on the actuating and sensing behavior of metal core piezoelectric fibers* [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2009: 68-69. (in Chinese)

作者简介:



边义祥(1973—),男,江苏沭阳人,博士,副教授,2002年于扬州大学获得学士学位,2005年、2009年于南京航空航天大学分别获得硕士、博士学位,主要从事仿生传感器与生物感知机理的研究。E-mail: yxbian@yzu.edu.cn

(本栏目编辑:曹金)