

四电极含芯压电纤维简谐振动传感特性研究

边义祥, 张 弋, 孙凯旋, 王汝梦, 何 灿

(扬州大学 机械工程学院, 江苏 扬州 225127)

摘 要:受到水黽等动物能感知身体振动的毛发感受器的启发,设计了一种能感知外部振动的仿生纤维振动传感器。采用模具干压成型法制备了含铂金芯的压电陶瓷纤维胚体,经过高温烧结、涂镀表面电极、极化后,制成表面四电极含金属芯压电纤维(MMPF)振动传感器。并建立了悬臂梁结构,2对表面电极用作传感电极的传感器理论模型。把纤维固定在基体上,验证传感器对基体结构受到简谐激励的传感性能。结果表明,MMPF能够感知基体结构受到简谐激励的频率、幅值和方向。这种具有感知幅值和方向的仿生纤维振动传感器将有广泛的应用前景。

关键词:仿生纤维;振动传感器;悬臂梁结构;简谐激励;压电纤维

中图分类号:TM282

文献标识码:A

Study on the Simple Harmonic Vibration Sensing Characteristics of a Four-electrodes Core Piezoelectric Fiber

BIAN Yixiang, ZHANG Yi, SUN Kaixuan, WANG Rumeng, HE Can

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

Abstract: Inspired by the water strider and other animals can perceive the body vibration by the hair sensors, a bionic fiber sensor is designed that can perceive the external vibration. The preparation of the piezoelectric ceramic fiber embryo body containing platinum core is prepared by the dry pressing molding in module, after high temperature sintering, coated electrode on the surface, after the polarization, the MMPF vibration sensor is fabricated. The cantilever beam structure is fabricated. Two pair of surface electrodes are used as the theoretical models of the sensing electrodes. The fiber is fixed on the substrate to verify the sensing performance of the sensor in which the substrate structure excited by the simple harmonic vibration. The results show that the MMPF can perceive the matrix structure under simple harmonic excitation frequency, amplitude and direction. This bionic fiber vibration sensors which can perceive the amplitude and direction will have a wide range of application prospects.

Key words: bionic fiber; vibration sensor; cantilever beam structure; simple harmonic excitation; piezoelectric fiber

0 引言

感应周围环境的微小振动是自然界昆虫生存的一项必要的生存本领^[1]。一些生活在树上的昆虫通过树梢上的振动信号追捕猎物、躲避捕食者的追击、选择配偶及参与其他的社交活动^[2]。一些生活在水里的昆虫(如水黽)使用毛发感受器感应水面的波纹来确定猎物的落水位置或避免障碍物。水黽的毛发感受器生长在腿部,呈悬臂梁结构,一端呈自由状,另一端与神经网络相连。水的振动使水黽的感受器

毛发弯曲,产生神经输出信号传递给大脑,大脑对这些信号进行判断,进而作出相应的反应^[3]。

近些年,许多研究学者已作了关于仿生毛发传感器的研究工作,并取得了一些成果。Chen, N等把微型悬臂梁的底部连接到一个微型可变电容器上,通过测量电容的变化,能计算悬臂梁的弯曲变化。Stocking J. B等利用电容感应原理制备了人造毛发传感器,通过监测电容值的变化检测外部的振动情况^[4]。Liu Chang等成功制备了压阻式仿生毛

收稿日期:2017-01-13

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51275447);江苏省研究生实践创新计划基金资助项目(SJLX16_0589)

作者简介:边义祥(1973-),男,江苏沐阳人,副教授,博士,主要从事生物机械感知生理、仿生传感器及智能传感器的研究。E-mail: yxbian@yzu. edu. cn.

发气流传感器,使用微机电系统(MEMS)技术制备的悬臂梁的根部和电阻应变片相连,通过惠斯通电桥测量出电阻变化值,通过其电阻的变化值可计算出悬臂梁的弯曲程度^[5]。把多个这样的仿生气流传感器排列成阵列,也可测量气流的方向和大小^[6]。B. T. Dickinson 和 Francesco Rizzi 等采用类似的结构制备了仿生毛发气流传感器^[7]。关于这方面的研究和发展已被用来提高不同种类机器人的感应能力。具有探测振动的方向和振动幅值能力的仿生毛发传感器,能满足不同机器人设备的需求^[8]。总之,传感器能感知振动和弯曲影响很重要。

电容式和压阻式的仿生传感器是通过测试电容或压阻的变化间接测量悬臂梁的弯曲角度和变形。本文使用的含金属芯压电纤维具有直接的机电转换性能,可直接测量悬臂梁的变形,获得外部振动的信息,且制备过程方便、简单,可用作简谐振动传感器。此前作者已制备出了表面部分电极含金属芯压电陶瓷纤维和表面对称电极含金属芯压电陶瓷纤维,但在使用时都存在一些局限性。表面部分电极含金属芯压电陶瓷纤维,只可感知基体简谐振幅的大小;虽然表面对称电极含金属芯压电陶瓷纤维可感知基体简谐振幅的大小和方向,但只可感知一个方向的大小和方向。本文制备的表面四电极含金属芯压电陶瓷纤维,既可同时感知基体简谐振幅的大小和方向,又可感知两个方向的振动信号,存在较多优点。

1 MMPF 简谐振动传感器设计与制备

本文设计、制备的表面四电极含金属芯压电纤维(MMPF)振动传感器为细长状的含金属芯压电陶瓷纤维,主要的参数如表 1 所示。表中, L 为长度, R_c 为纤维直径, R_m 为金属芯直径, α 为每片电极涂镀角度。外观形貌如图 1(a)所示。主要由表面电极、压电陶瓷和金属芯组成。制备时,首先称取适量的压电陶瓷粉末和截取适量长度的铂金丝,之后通过自制的模具,在小型压力机的作用下压制成圆柱型。压制好后,放在 1 100 ℃ 烧结炉中烧结 1 h 后,关闭电源,待炉内温度冷却到室温时取出,然后在已烧结好的压电陶瓷表面均匀地涂镀 4 片电极,通过吹风机吹干或自然晾干。此时,MMPF 的胚体已基本制备好,但其还不具有压电性,需进行极化处理。

表 1 MMPF 含金属芯压电陶瓷纤维的主要参数

L/mm	R_c/mm	R_m/mm	$\alpha/(\text{^\circ})$	电极片数/片
18	2	0.5	60	4

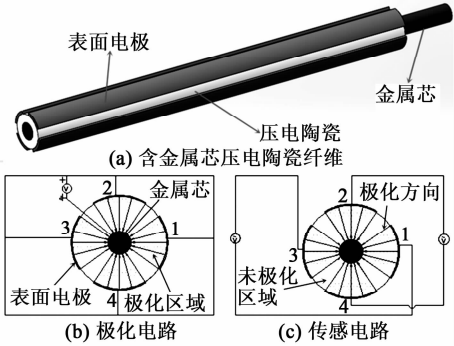


图 1 含金属芯压电陶瓷纤维外观形貌、极化及传感电路

极化时,金属芯连接电源的负极作负极使用,表面电极连接电源正极作正极使用,极化电路如图 1(b)所示。极化后纤维具有压电性,传感电路如图 1(c)所示,1 和 3 组成 1 对对称电极,2 和 4 组成 1 对对称电极,在测试时两片电极分别作此传感器的正、负极使用。

2 MMPF 振动传感器理论模型

仿照昆虫感觉毛的结构,把 MMPF 一端固定在基体上,另一端自由,使其呈悬臂梁结构。当基体受简谐振动时,MMPF 会产生相应的变形,根据变形量的不同就会产生不同的电信号,根据这种电信号可判断出基体受到的振动情况。因此,MMPF 可用作简谐振动传感器,感知基体的简谐振动,其振动理论模型如图 2 所示。

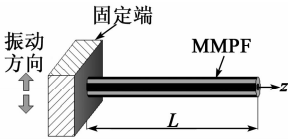


图 2 MMPF 理论模型

若基体受到简谐振动时,其位移 $u(t) = U_0 \cdot \sin \omega t \cos \gamma^{[9]}$,则悬臂梁的受力可等效为受到垂直于长度方向的均布载荷作用 F ,且

$$F = U_0 \omega^2 \sin \omega t \cos \gamma \tag{1}$$

式中: U_0 为初始振幅; ω 为简谐振动频率; γ 为激振方向与截面中 y 轴的夹角(见图 3)。

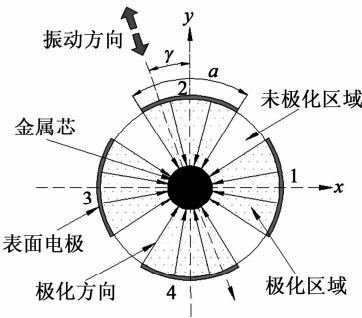


图 3 MMPF 振动传感器截面图

由于压电材料的压电效应,在纤维的表面4片电极上将产生电荷。

本文采用圆柱坐标系代替常规的直角坐标系对其进行理论研究。圆柱坐标系压电方程中的 z 、 θ 和 r 方向分别对应直角坐标系压电方程中的1、2和3方向。

MMPF 中环形压电陶瓷极化部分在圆柱坐标下的压电方程为

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} S_{rr} \\ S_{\theta\theta} \\ S_{zz} \\ S_{r\theta} \\ S_{\theta z} \\ S_{rz} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} S_{33}^E & S_{13}^E & S_{13}^E & 0 & 0 & 0 \\ S_{13}^E & S_{11}^E & S_{12}^E & 0 & 0 & 0 \\ S_{13}^E & S_{12}^E & S_{11}^E & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & S_{55}^E & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & S_{66}^E & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & S_{55}^E \end{bmatrix} \times \\ &+ \begin{bmatrix} T_{rr} \\ T_{\theta\theta} \\ T_{zz} \\ T_{r\theta} \\ T_{\theta z} \\ T_{rz} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} d_{33} & 0 & 0 \\ d_{33} & 0 & 0 \\ d_{33} & 0 & 0 \\ 0 & d_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & d_{15} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} E_r \\ E_{\theta} \\ E_z \end{bmatrix} \quad (2) \\ \begin{bmatrix} D_3 \\ D_2 \\ D_1 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} d_{33} & d_{31} & d_{31} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & d_{15} \end{bmatrix} \times \\ &+ \begin{bmatrix} T_{33} \\ T_{22} \\ T_{11} \\ T_{32} \\ T_{21} \\ T_{31} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \epsilon_{33}^T & 0 & 0 \\ 0 & \epsilon_{11}^T & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_{11}^T \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} E_3 \\ E_2 \\ E_1 \end{bmatrix} \quad (3) \end{aligned}$$

式中: S_{ij} 为应变; T_{ij} 为应力; D_i 为电位移; E_i 为电场强度; s_{ij} 为弹性柔顺系数; d_{ij} 为压电常数; ϵ_{ij} 为介电常数。

此时,悬臂梁结构的 MMPF 表面受到载荷 F 作用时,产生的弯矩 M 为

$$M = \frac{1}{2} F(L-z)^2 \quad (4)$$

式中: L 为纤维总长; z 为沿纤维长度方向坐标。

为了简化计算,此时认为 MMPF 在其直径方向能自由伸缩,由于 MMPF 的长度一般是直径的几十倍,这种情况下其圆周方向和切向的应力可忽略。因此,在外加均布载荷后,MMPF 的应变和电位移的边界条件可分别表示为

$$S_{rr} = S_{\theta\theta} = S_{r\theta} = S_{\theta z} = S_{rz} = 0 \quad (5)$$

$$D_{\theta} = D_z = 0 \quad (6)$$

$$E_r = 0 \quad (7)$$

式中: θ 为纤维周向; r 为纤维径向; z 为纤维长度方向。

将式(5)、(7)代入式(2)中,得

$$T = \frac{S_{zz}}{s_{11}^E} \quad (8)$$

再将式(8)代入式(3)中,得

$$D_r = d_{31} \frac{S_{zz}}{s_{11}^E} \quad (9)$$

由于 MMPF 的长度远大于直径,可认为弯曲时 MMPF 在其轴向上各部分的曲率半径 κ 相同,且

$$\frac{1}{\kappa} = \frac{M}{EI} \quad (10)$$

式中: E 为纤维的弹性模量; I 为纤维的惯性矩。

$$EI = \frac{1}{4s_{11}^E S_m} \pi (S_m R_c^4 - S_m R_m^4 + s_{11}^E R_m^4) \quad (11)$$

式中 S_m 为金属芯应变。

而在纤维表面(R_c, θ)(θ 为偏转角)处的应变可表示为

$$S_{zz}(R, \theta) = \frac{MR_c \sin \theta}{EI} \quad (12)$$

将式(12)代入式(9)可得

$$D_r = d_{31} \frac{MR_c \sin \theta}{s_{11}^E EI} \quad (13)$$

表面电极1上的电荷为

$$Q_1 = \int_0^L \int_{2\pi-a/2}^{a/2} D_r R_c d\theta dz \quad (14)$$

表面电极2上的电荷为

$$Q_2 = \int_0^L \int_{\frac{\pi-a}{2}}^{\frac{\pi+a}{2}} D_r R_c dr d\theta dz \quad (15)$$

将式(13)代入(14)、(15)可得

$$Q_1 = \int_0^L \int_{2\pi-a/2}^{a/2} d_{31} \frac{MR_c \cos(\theta-\gamma)}{s_{11}^E EI} R_c d\theta dz = \frac{2}{3} d_{31} \frac{FL^3 R_c^2 \sin \frac{\alpha}{2} \cos \gamma}{s_{11}^E EI} \quad (16)$$

$$Q_2 = \int_0^L \int_{\frac{\pi-a}{2}}^{\frac{\pi+a}{2}} d_{31} \frac{MR_c \cos(\theta-\gamma)}{s_{11}^E EI} R_c d\theta dz = \frac{2}{3} d_{31} \frac{FL^3 R_c^2 \sin \frac{\alpha}{2} \sin \gamma}{s_{11}^E EI} \quad (17)$$

再把式(1)代入式(16)、(17)中,可得悬臂梁结构 MMPF 在冲击振动作用下,表面电极1、2产生的电荷为

$$Q_1 = \frac{U_0 d_{31} L^3 R_c^2 \omega^2 \sin \omega t \sin \frac{\alpha}{2} \sin \gamma}{3s_{11}^E EI} \quad (18)$$

$$Q_2 = \frac{U_0 d_{31} L^3 R_c^2 \omega^2 \sin \omega t \sin \frac{\alpha}{2} \sin \gamma}{3s_{11}^E EI} \quad (19)$$

当 MMPF 用作振动传感器时,其信号采集电路连接方式如图 1(c)所示,电极 1、3 组成一路输出信号电路,2 个电极间的电荷差设为 Q_a ;电极 2、4 组成的输出信号电路中,电荷差设为 Q_b ,则

$$Q_a = Q_1 - Q_3 = 2Q_1 = 2K \cos \gamma \quad (20)$$

$$Q_b = Q_2 - Q_4 = 2Q_2 = 2K \sin \gamma \quad (21)$$

$$\text{式中 } K = \frac{U_0 d_{31} L^3 R_c^2 \omega t \sin \frac{\alpha}{2}}{3s_{11}^E EI}。$$

由式(20)、(21)可看出,电极 1、3 组成的信号电路及电极 2、4 组成的信号电路测到的电荷差值分别为电极 1、2 上电荷的 2 倍。由此可看出,这种传感电路连接方式简化了采集电路,增加了传感器的灵敏度。

电极 1、3 组成的信号电路以及电极 2、4 组成的信号电路所测到的电荷差值,即 Q_a 和 Q_b 之间的关系为

$$\frac{Q_a}{Q_b} = \cot \gamma \quad (22)$$

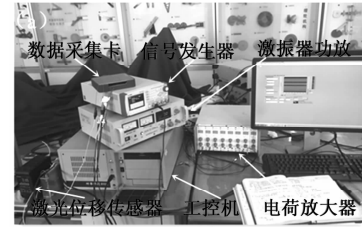
$$Q_a^2 + Q_b^2 = 4K^2 \quad (23)$$

由式(18)、(19)可看出,当悬臂梁结构的基体受到简谐振动激励时,MMPF 的电荷响应也是简谐信号,其频率和基体的振动频率相同,电荷幅值 Q 和激励振动幅值 U_0 成正比关系,和角度 γ 同样分别成余弦和正弦关系。

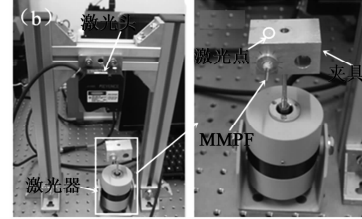
3 MMPF 的简谐振动传感实验

3.1 实验平台搭建

为了验证理论推导和假想的准确性,需对其进行验证。将 MMPF 的一端固定在激振器的激振头上,测试其简谐振动传感性能。信号发生器输出的简谐信号,通过激振器作用在夹具上,夹具带动 MMPF 纤维传感器输出电信号。总共输出 3 路电信号,1、3 对电极,2、4 对电极,激光位移传感器各输出一路电信号。其中激光位移传感器的激光点垂直地打在纤维的夹具上,随着夹具的运动产生电信号。1、3 对电极和 2、4 对电极输出的电信号经过电荷放大器放大,通过数据采集卡采集输入到工控机中。激光位移传感器产生的电信号直接通过数据采集卡采集输入到工控机中。这 3 路电信号通过工控机中 Labview 和 Origin 软件进行数据采集和处理,得到最终的实验数据和实验结果图形。实验装置如图 4 所示。



(a) 实验仪器



(b) 实验测试部分 (c) 实验主体

图 4 实验装置

3.2 实验结果分析和结论

3.2.1 实验前测试分析

设置激振器的振动频率为 5 Hz,启动激振器,即给纤维一个简谐信号,测得 MMPF 的固定端的位移信号和两对电极响应的电荷信号如图 5 所示。 Q_1 、 Q_2 分别为两电极输出的电荷信号。可见当固定端受到简谐激励时,MMPF 的响应电荷也是简谐电荷,频率和激振频率相同。

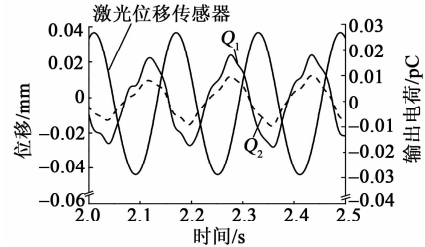


图 5 MMPF 的两电极的电荷信号

3.2.2 MMPF 输出电荷值与简谐振动幅值关系的实验研究

实验一,保证激振频率和激振角度不变,测试幅值与 MMPF 输出电荷值的关系。实验条件为保持在激励频率为 5 Hz 的条件下,不改变 γ 值即固定纤维的位置,多次改变激振器的振动幅值,以此测得 MMPF 两对电极在不同振动幅值下输出的正弦电荷信号值,多次测得的电荷信号如图 6 所示。由图

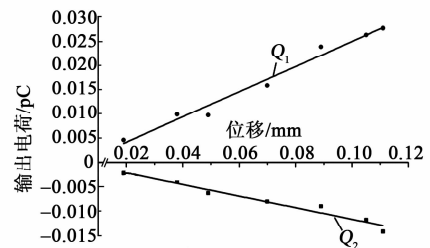


图 6 MMPF 输出电荷值与简谐振动幅值的关系

可见, Q 和 U_0 基本成线性关系。即随着幅值的增加, 输出的电荷值也随着增加, 这也验证了式(18)、(19)中 Q 和 U_0 的线性关系。

3.2.3 MMPF 输出电荷与 MMPF 转动角度关系实验研究

实验二, 保证激振频率和振幅不变, 测试 MMPF 角度变化与输出电荷值的关系。实验条件是保持激振频率为 5 Hz, 激振器振幅不变, 多次改变 γ 值, 即多次转动纤维 (每次转动 30°), 得到 MMPF 的多组输出电荷幅值 (见图 6)。由式(20)、(21)可知, 在其他条件不变的条件下, Q 和 γ 分别呈现余弦和正弦的关系。由于电荷值是取正弦、余弦电荷的幅值 (无负数), 所以由式(20)、(21)可得, Q 和 γ 是余弦和正弦绝对值的关系。图 7 为 MMPF 的电荷幅值与 γ 的关系。由图可看出, Q 和 γ 基本成“W”和“M”字, 即余弦和正弦绝对值的关系。

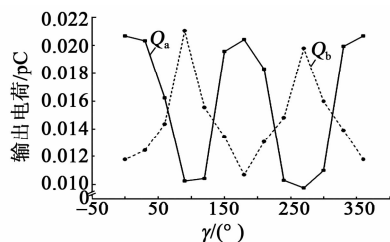


图 7 MMPF 的电荷幅值与 γ 的关系

由实验的数据在极坐标系下可作出 MMPF 两对电极输出电荷信号 Q_a 、 Q_b 与 γ 之间的关系, 如图 8 所示。由图可看出, Q_a 、 Q_b 与 γ 呈交叉的“8”字图, 即输出的电荷值随着 γ 的变化而有规律的变化。说明本文制备的 MMPF 具有感知方向的传感性能, 进一步验证了 MMPF 的传感性能。

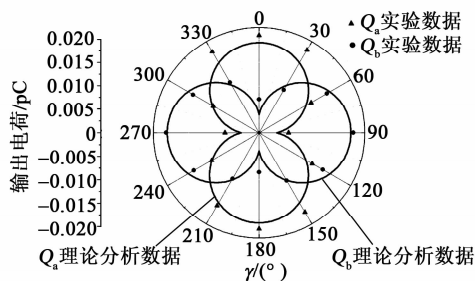


图 8 在极坐标系下, Q_a 、 Q_b 与 γ 的关系

由 Q_a/Q_b 可得 γ 的余切值, 在对其进行反余切可得 γ 的角度值。图 9 为 Q_a/Q_b 与 γ 的关系。由图可看出, Q_a/Q_b 与 γ 呈余切关系, 进而验证了式(22)的正确性。图 10 为 Q_a 和 Q_b 的关系。由图可看出, 随着角度的变化, 每次测量的电荷值都基本落在 1 个圆上, 这正好和式(23)得出的结论相吻合, 这种现

象说明只要冲击的幅值不发生改变, Q_a 和 Q_b 的平方和为一个定值, 是不随角度变化而变化的, 进而验证了式(23)的结论。

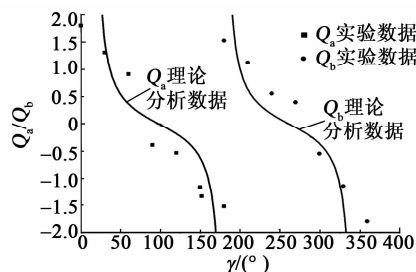


图 9 Q_a/Q_b 与 γ 的关系

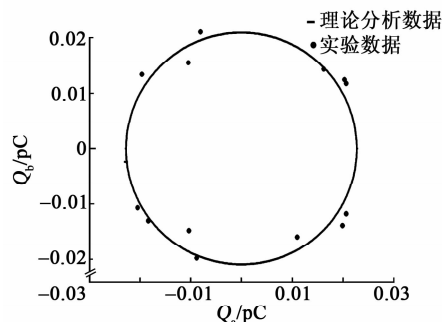


图 10 Q_a 和 Q_b 的关系

综上所述, 把 MMPF 固定在基体上, 用作简谐振动传感器时, 能较好地测试出基体所受的简谐激励。当基体受到简谐激励时, MMPF 能较准确地测量出激励频率和幅值, 也能感知激励方向。如果排除 MMPF 制备过程中金属芯的居中位置、表面电极大小和位置、电场分布不均匀等偏差, 可认为实验结果和理论模型具有较好的一致性。

4 结束语

本文通过理论分析, 建立表面四电极含金属芯压电纤维 (MMPF) 的简谐振动传感模型。通过自制的 MMPF, 感知基体的简谐振动, 搭建了实验测试平台, 验证了理论推导的正确性, 与实验前的假想完全吻合。得出 MMPF 在受到简谐激励的情况下输出电荷和振幅的关系, 以及输出电荷与激励角度的关系。进一步说明, 本文制备的 MMPF 能够感知基体所受简谐激励的幅值、方向及频率。同时, 本文提出的 MMPF 的制备方法也为简谐振动传感器的制备提出一种新的思路、方法, 可广泛应用于简谐振动的场合。

参考文献:

- [1] HILL P S. Vibration and animal communication: a review[J]. American Zoologist, 2001, 41(5): 1135-1142.