

文章编号 1004-924X(2013)04-1000-11

含金属芯压电纤维的测试标准与夹具设计

罗 俊, 裘进浩*, 朱孔军, 季宏丽, 杜建周

(南京航空航天大学 机械结构力学及控制国家重点实验室, 江苏 南京 210016)

摘要:针对新型压电器件—含金属芯压电纤维(MPF)—结构尺寸细小,很难找到合适的测量夹具和测试方法等问题,提出了一种操作方便的 MPF 测试方法。首先,通过 MPF 的压电方程得到其测试模型,并确定了 MPF 的电学性能测试步骤。然后,研究了测量夹具对测量结果的影响。实验显示:夹持位置在 MPF 的中间时容易产生偏离,影响测量结果;夹持位置在端部时,谐振频率和反谐振频率的相对导纳值较小,也不利于准确测量。另外,MPF 尺寸细小,夹持力也会影响 MPF 的谐振,使测量结果产生误差。最后,提出一种不需要夹持测量 MPF 的方法。采用该方法对 PZN-PZT 压电陶瓷的 MPF 进行了测量,结果显示其压电应变常数 d_{31} 为 -97 pC/N,机电耦合系数 k_{31} 为 0.197,介电常数 ϵ_{33}^T 为 1458。这种方法测试准确,操作简单,不易损伤 MPF,可作为 MPF 压电性能测试标准。

关键词:金属芯压电纤维;压电陶瓷;夹具设计;谐振;测试标准;电学性能

中图分类号: TN384; TG75 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20132104.1000

Test standards and fixture design for piezoelectric ceramic fibers with Pt cores

LUO Jun, QIU Jin-hao*, ZHU Kong-jun, JI Hong-li, DU Jian-zhou

(State Key Laboratory of Mechanics and Control of Mechanical Structures,
Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

* Corresponding author, E-mail: qiu@nuaa.edu.cn

Abstract: As Metal-core Piezoelectric Ceramic Fibers (MPFs), one types of the new piezoelectric devices, have smaller structures and sizes, it is difficult to find proper measurement method and corresponding measuring fixture. Therefore, this paper proposed a precise and easily operated method to measure the MPFs. First, the test model was deduced by using the constitutive equations of a MPF, and the measuring steps for electrical performance of the MPF were established. Then, the effect of test fixture on the measurement results was investigated. Experiments show that it is easy to produce deviation when the clamping positions in the middle of the MPF, which can influence the measurement results. When the clamping position is at the end of the MPF, the relative admittance values of resonance and anti-resonance frequency are smaller, which is hard to be measured either. Furthermore, an

收稿日期: 2012-10-24; **修订日期:** 2012-11-27.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 51161120326, No. 90923029); 长江学者和创新团队发展计划资助项目 (No. IRT0968); 江苏省普通高校研究生科研创新计划资助项目 (No. CXZZ11-0194); 南京航空航天大学博士学位论文创新与创优基金资助项目 (No. BCXJ11-02); 江苏高校优势学科建设工程资助项目 PAPP

improper clamping pressure have a strong effect on the measured value due to the smaller size of MPF. Finally, a measurement method without clamping for the MPF was presented. By the proposed method, the PZN-PZT MPFs were measured, obtained results give the piezoelectric property values by piezoelectric strain d_{31} of -97pC/N , electromechanical coupling coefficients k_{31} of 0.197, and dielectric constant ϵ_{33}^T of 1458. This kind of method is accurate, simple operation, and not damage to MPFs, and can be used as a test standard for MPFs.

Key words: Metal-core Piezoelectric Fiber(MPFs); PZT; fixture design; resonance; test standard; electrical property

1 引 言

压电材料因优良的压电、铁电和介电性能而得到了广泛的应用。传统的压电功能器件因体积较大,不易与基体结构集成,作为功能元件埋入基体中会对主体结构产生较大的影响。因此,压电功能器件的小型化是目前的一个研究热点^[1-2]。

美国麻省理工学院(MIT)成功制备出纤维状压电材料(AFC: Active Fiber Composite, fiber-shaped piezoelectric material)后,压电纤维材料引起了研究者的广泛关注^[3-7],之后美国宇航局(NASA)又成功制作了MFC(Macro Fiber Composite)^[8]。MFC的纤维是矩形,压电材料与电极的接触面积远大于纤维为圆形的AFC,因此机电转换效率明显提高。另外MFC还具有较高的柔性,可以在航空航天结构中得到应用。

裘进浩等人成功制作了直径为 $300\ \mu\text{m}$ 左右的含金属芯压电陶瓷纤维MPFs(Metal Core Piezoelectric Fibers)。与MFC和AFC相比,MPFs尺寸小,可以很容易埋入到基体材料内部;单根MPF既可作为传感器也可作为驱动器。MPFs是金属芯,由圆柱状的压电陶瓷包裹着金属芯,陶瓷周围溅射一层金属电极,金属电极与中间的金属芯形成了2个电极。MPFs全部使用的PZT纤维材料,为中间为金属芯,所以提高了纤维的机械性能。MPF研制成功后,立刻受到广泛的关注^[9-23]。

很多学者已对MPFs的压电性能和机械性能进行了分析^[17-18,22],对其在振动控制和结构损伤监测等方面的应用也进行了相关研究^[23]。制备MPF的压电材料时,考虑PZN-PZT具有较高

的压电常数,因此裘进浩等人首次将其用于制备MPF;随后,Abdelowahed Hajjaji等人使用PMN-PT压电陶瓷成功制备了MPF^[19]。为了提高MPF的温度稳定性,本文使用居里点较高的PZN-PZT压电陶瓷成功制备MPF。

由于MPF是一种新型的压电器件,出现的时间比较短,测试方法和专用的测试夹具目前还没有统一,也没有测量性能参数的标准。但测试方法和测试夹具对各项性能的测量有很大影响,所以急需制定测量标准和方法。虽然Gael Sebald等人建立了MPF的有限元模型和纵向振动物理模型,对MPF进行了一些性能测试;边义祥等人基于MPF动态力-电本构关系方程,推导出动态测试模型,并设计了悬臂杆结构MPF的参数测试方法和夹具^[20-21]。但是在实际测试过程中,尤其是测量大批量MPF性能时,由于MPF细小容易损伤,而且MPF的电极与夹具接触极易松动,因此上述方法测试结果不准确,甚至无法测试。

由于MPF结构尺寸细小,很难找到合适的测量夹具,研制专门的测试夹具也很困难。本文作者结合以前的研究,对MPF进行了性能测试,研究了测量夹具对测量结果的影响,并提出了一种操作方便且不需要夹持的测试方法作为测试标准,以便用于以后的MPF压电性能测量。

2 理论研究

2.1 MPF的压电方程

MPF的几何形状以及坐标系如图1所示。MPF中间是金属芯,周围是压电陶瓷。在陶瓷周

围溅射一层金属电极,与中间的金属芯形成了 2 个电极。极化方向沿着径向分布。在 2 个电极之间加上外部电压,MPF 则会产生振动。由于 MPF 直径一般在 $300\ \mu\text{m}$ 左右,而其长度 $l=2L$ 远大于其直径,所以产生的振动以轴向为主。这里主要分析第一阶的纵向振动模式。

压电方程反映了压电材料的力学量(T —应力, S —应变)和电学量(D —电位移, E —电场强度)之间的相互关系。在柱坐标系中的 z, θ, r 分别对应直角坐标系的 1, 2, 3, MPF 的压电方程为:

$$\begin{pmatrix} S_{rr} \\ S_{\theta\theta} \\ S_{zz} \\ S_{r\theta} \\ S_{\theta z} \\ S_{rz} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} s_{33}^E & s_{13}^E & s_{13}^E & 0 & 0 & 0 \\ s_{13}^E & s_{11}^E & s_{12}^E & 0 & 0 & 0 \\ s_{13}^E & s_{12}^E & s_{11}^E & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & s_{55}^E & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & s_{66}^E & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & s_{55}^E \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} T_{rr} \\ T_{\theta\theta} \\ T_{zz} \\ T_{r\theta} \\ T_{\theta z} \\ T_{rz} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} d_{33} & 0 & 0 \\ d_{31} & 0 & 0 \\ d_{31} & 0 & 0 \\ 0 & d_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & d_{15} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} E_r \\ E_{\theta} \\ E_z \end{pmatrix}, \quad (1)$$

$$\begin{pmatrix} D_r \\ D_{\theta} \\ D_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} d_{33} & d_{31} & d_{31} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & d_{15} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} T_{rr} \\ T_{\theta\theta} \\ T_{zz} \\ T_{r\theta} \\ T_{\theta z} \\ T_{rz} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \epsilon_{33}^T & 0 & 0 \\ 0 & \epsilon_{11}^T & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_{11}^T \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} E_r \\ E_{\theta} \\ E_z \end{pmatrix}, \quad (2)$$

其中 ϵ_{ij}^T 为自由介电常数; d_{ij} 是压电应变常数; s_{ij}^E 为短路弹性柔顺系数。

因为长度远大于直径,为了简化模型,忽略圆周方向和径向的应力:

$$T_{rr} = T_{\theta\theta} = T_{r\theta} = T_{\theta z} = T_{rz} = 0, \quad (3)$$

电场加在内外电极上,垂直于径向方向,有:

$$E_{\theta} = E_z = 0, \quad (4)$$

$$D_r \neq 0, \quad (5)$$

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

因此,压电方程(1),(2)中压电陶瓷部分的应变和电位移可以简化为:

$$S_{zz}^c = s_{11}^E T_{zz}^c + d_{31} E_r, \quad (7)$$

$$D_r^c = d_{31} T_{zz}^c + \epsilon_{33}^T E_r, \quad (8)$$

式中上标 c 表示压电陶瓷相。

考虑到金属芯的影响,可以认为金属芯和压电陶瓷部分的应变相同。整个 MPF 应力为金属

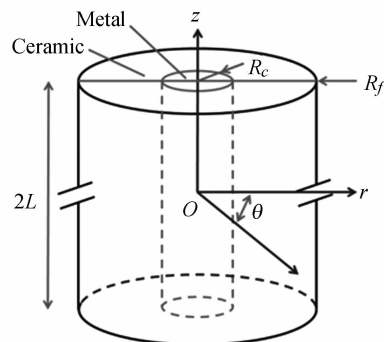


图 1 MPF 几何形状和坐标系

Fig. 1 Geometry and coordinate system of MPF

芯和压电陶瓷部分应力之和,有:

$$\bar{T}_0 = \alpha^2 T_0^m + (1 - \alpha^2) T_0^c, \quad (9)$$

$$\bar{S}_0 = S_0^m = S_0^c, \quad (10)$$

$$\rho = \alpha^2 \rho_m + (1 - \alpha^2) \rho_c, \quad (11)$$

\bar{T}_0, \bar{S}_0 和 ρ 为 MPF 整体的应力,应变和密度。式中上标 m 表示金属芯。式(9)可以写成^[18]:

$$\bar{T}_0 = c_h \bar{S}_0 - e_h V, \quad (12)$$

其中,

$$\alpha = \frac{R_c}{R_f}, \quad (13)$$

$$c_h = \alpha^2 Z + \frac{1 - \alpha^2}{s_{11}^E}, \quad (14)$$

$$e_h = \frac{d_{31}(1 - \alpha^2)}{s_{11}^E \ln\left(\frac{1}{\alpha}\right)}. \quad (15)$$

式中 Z 是金属芯的杨氏模量,为 168 GPa。

运动方程简化为,

$$\rho \frac{\partial^2 u_z}{\partial t^2} = \frac{\partial T_{zz}}{\partial z}, \quad (16)$$

将式(12)的应力代入式(16),并有:

$$\frac{\partial V}{\partial z} = 0, \quad (17)$$

$$S_{zz} = \frac{\partial u}{\partial z}, \quad (18)$$

故可得到波动方程:

$$\frac{\partial^2 u_z}{\partial t^2} = v^2 \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}, \quad (19)$$

式中:

$$v = \sqrt{\frac{c_h}{\rho}}, \quad (20)$$

为 MPF 中纵波速。对于简谐激励,式(19)成为:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + k^2 u = 0, \quad (21)$$

式中

$$k = \frac{\omega}{v}, \quad (22)$$

式(21)的解为:

$$u = A \sin(kz) + B \cos(kz), \quad (23)$$

式中 A, B 为待定常数。取 MPF 中心为坐标原点,由于 MPF 做对称振动,因此,当 $z=0$ 时,由 $u_z=0$ 可定出 $B=0$,则:

$$u = A \sin(kz). \quad (24)$$

当 $z = \pm L$ (MPF 长度 $l=2L$) 时, u_z 最大, $\bar{T}_0=0$,则由式(12)得:

$$\bar{S}_0 = \frac{e_h}{c_h} V, \quad (25)$$

由式(24)有:

$$S_{zz} = Ak \cos(kz), \quad (26)$$

式(25)和(26)应变相等,得到幅值 A:

$$A = \frac{e_h}{c_h k \cos(kL)} \frac{V}{k \cos(kL)}, \quad (27)$$

波数 k 为:

$$k = \omega \sqrt{\frac{\rho}{c_h}}, \quad (28)$$

通过以上分析可以得到导纳^[15,18]:

$$Y = j\omega A \pi \left(\frac{d_{31} e_h \tan(kL)}{s_{11}^E c_h k} + \frac{L(\epsilon_{33}^T - \frac{d_{31}^2}{s_{11}^E})}{\ln(\frac{1}{\alpha})} \right). \quad (29)$$

2.2 MPF 的测试模型

测量 MPF 电容,由 MPF 的圆柱形状可知其电容为:

$$C_f = \frac{4\pi L \epsilon_{33}^T}{\ln(\frac{1}{\alpha})}, \quad (30)$$

得到介电常数:

$$\epsilon_{33}^T = \frac{C_f \ln(\frac{1}{\alpha})}{4\pi L}, \quad (31)$$

谐振时,导纳在谐振频率 f_r 处趋近于无穷大,由导纳公式(29)得:

$$\cos(kL) = 0, \quad (32)$$

求得 MPF 的第一阶谐振频率为:

$$f_r = \frac{1}{4L} \sqrt{\frac{c_h}{\rho}}, \quad (33)$$

计算得到:

$$c_h = 16L^2 f_r^2 \rho, \quad (34)$$

将式(34)代入式(14)就可以求得压电陶瓷的弹性柔顺系数 s_{11}^E :

$$s_{11}^E = \frac{1 - \alpha^2}{16L^2 f_r^2 \rho - \alpha^2 Z}, \quad (35)$$

反谐振时,导纳在反谐振频率 f_a 处趋近于零,由导纳公式(29)得

$$\frac{d_{31} e_h \tan(kL)}{s_{11} c_h k} + \frac{L(\epsilon_{33}^T - \frac{d_{31}^2}{s_{11}^E})}{\ln(\frac{1}{\alpha})} = 0, \quad (36)$$

得到 d_{31} :

$$d_{31} = \sqrt{\frac{L \epsilon_{33}^T (s_{11}^E)^2 c_h k}{L s_{11}^E c_h k - (1 - \alpha^2) \tan(kL)}}, \quad (37)$$

$$k = 2\pi f_a \sqrt{\frac{\rho}{c_h}}, \quad (38)$$

机电耦合系数 k_{31} 为:

$$k_{31} = d_{31} \sqrt{\frac{1}{s_{11}^E \epsilon_{33}^T}}. \quad (39)$$

2.3 MPF 的电学性能测试步骤

由上面对 MPF 性能测试公式的推导,确定了 MPF 性能的测试方法,其测试步骤为:

(1) 首先利用阿基米德原理测出 MPF 的密度 ρ ;

(2) 测量 MPF 的几何尺寸,得到半径 R_f ,金属芯的半径 R_c 为固定值 25×10^{-6} m,测量 MPF 的长度 l ;

(3) 用阻抗分析仪在 1 kHz 频率下测量 MPF 的电容 C_f ,由式(31)计算出 MPF 的介电常数 ϵ_{33}^T ;

(4) 用阻抗分析仪测导纳 Y ,得到一阶谐振

频率 f_r , 由式 (35) 得压电陶瓷的弹性柔顺系数 s_{11}^E 。

(5) 用阻抗分析仪测导纳 Y , 得到一阶反谐振频率 f_a , 由式 (37) 得到压电常数 d_{31} 。

(6) 由式 (39) 计算出 MPF 的机电耦合系数 k_{31} 。

3 实验

3.1 夹持位置对测试的影响

目前测试 MPF 所用的是一种简易的测试夹具, 结构如图 2 所示。夹持的位置可以在 MPF 的中间, 也可在 MPF 的端部。首先需要引出 MPF 的金属芯电极, 将 MPF 的两个电极放置与导电铜箔接触位置, 导电铜箔粘接在底座上。用细小的弹簧铜片压住 MPF 的金属芯电极, 与导电铜箔接触好, 以便测量。这样就固定了 MPF 的一个电极, MPF 的外电极也用同样的方法夹持。测试电压加在两边的导电铜箔上。用这种简易的夹具测量 MPF, 虽然可以较方便的测量 MPF 的性能, 但是其精确性和稳定性不能得到保证。

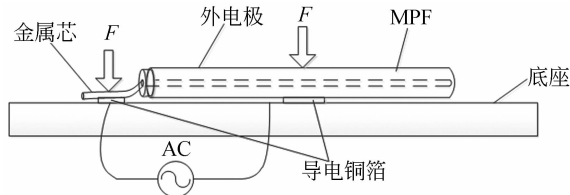


图 2 MPF 测试夹具示意图
Fig. 2 Test fixture of MPF

3.1.1 夹持位置在中心

夹持在 MPF 的中心, MPF 在第一阶谐振时, 其振动节点位置在 MPF 的正中心位置, 夹持力不会对谐振产生影响。测量时选择压电材料为 PNN-PZT, 长度为 62 mm 的 MPF。图 3 中曲线 (a) 是 MPF 在第一阶谐振附近的导纳-频率曲线。表 1 是测量 MPF 的参数和电学性能。

虽然这种夹具可以初步测量 MPF 的性能, 但是在具体的测试过程中, 使用这种夹具还有许多问题需要解决。比如夹持外电极时, 很难确定 MPF 长度的中心位置。每根 MPF 的长度都不一样, 准确夹持在长度中心位置难。经常出现的情况是夹持位置偏离中心, 这时就会出现图 3 中曲线 (b) 情况。谐振峰 (b_2) 位置由原来导纳-频率曲线 (a) 的谐振峰 (a_1) 向高频位置移动, 并且峰幅值下降。而在低频位置也出现了一个小谐振峰 (b_1)。

出现这种现象, 与夹持位置偏离有关。夹持位置在 MPF 正中心时, MPF 在第一阶谐振实际是由长度为 L (MPF 长度 $l=2L$) 的两段 MPF 分别在同一频率下振动, 图 3 的谐振峰 (a_1) 实际上是 2 个谐振峰的叠加。夹持位置偏离中心时, 两段长度不相等的 MPF 分别产生振动。图 3 中曲线 (b) 中出现了 2 个谐振峰, 是因为两段长度不相等的 MPF 产生的谐振频率不同, 从而出现了 2 个谐振峰。

表 1 MPF 测量参数和电学性能

Tab. 1 Measuring parameters and electrical properties of MPF

参数	$l/$ mm	$R_f/$ μm	谐振峰	$f_r/$ kHz	$f_a/$ kHz	$C_f/$ nF	$s_{11}^E/$ 10^{12}Pa^{-1}	$\epsilon_{33}^T/$ ϵ_0	k_{31}	$-d_{31}/$ pC/N	$N_r/$ kHz * mm
夹持在中心 (a)	62	175	(a_1)	21.70	21.96	4.07	17.4	2.297	0.176	105	1.345
偏离中心 (b)	62	175	(b_1)	18.54	18.87	4.07	24.4	2.297	0.214	151	1.150
			(b_2)	22.27	22.67	4.07	16.5	2.297	0.213	123	1.381

表 2 不同夹持位置时预测谐振频率与实际谐振频率

Tab. 2 Predicted and actual resonant frequencies in various clamping positions

参数	$l/$ mm	$L_1/$ mm	$L_2/$ mm	谐振峰	$N_r/$ kHz * mm	谐振长度/ mm	预测 $f_r/$ kHz	实际 $f_r/$ kHz
偏离中心 c (5 mm)	62	36	26	c_1	1345	36	18.68	17.18
				c_2	1.345	26	25.87	24.03
偏离中心 d (13 mm)	62	44	18	d_1	1.345	44	15.28	13.69
				d_2	1.345	18	37.36	32.14

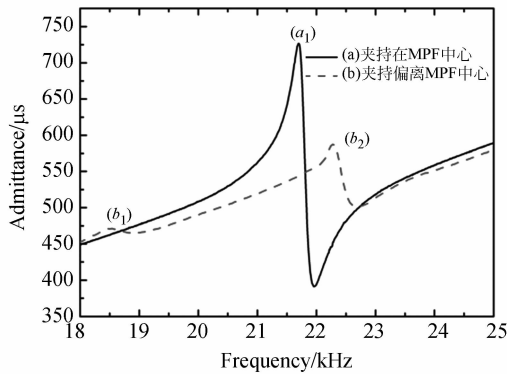


图 3 MPF 一阶谐振附近的导纳-频率曲线

Fig. 3 Frequency characteristic of admittance of MPF on first-order resonance

表 1 中的频率常数 N_r 是 MPF 长度 ($l=2L$) 与谐振频率的乘积。

$$N_r = 2L \times f_r, \quad (28)$$

压电器件的频率常数仅与材料性质有关,与外形尺寸无关;而谐振频率不仅与材料性质有关,而且也与外形尺寸有关。表 1 谐振峰 (b_1) 对应的压电常数与谐振峰 (a_1) 的相比,误差几乎达到 50%。频率常数 N_r 也明显下降。因此夹持位置偏离中心时,不管以哪个谐振频率为准,都会对测量结果产生极大的误差。

为了验证 MPF 中两段不同长度纤维产生不同谐振频率这一观点,对前面测试的同一根 MPF (长度 $l=62$ mm) 选择不同的夹持位置,测量两段

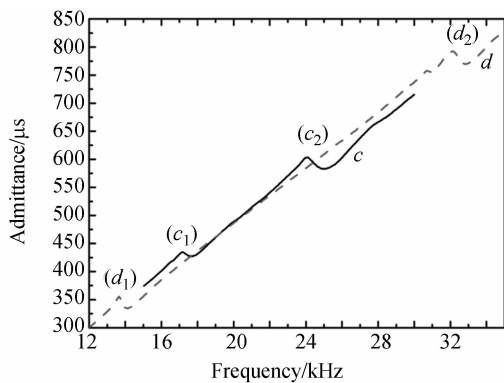


图 4 夹持位置偏离 MPF 中心的导纳-频率曲线 [$c(5$ mm), $d(13$ mm)]

Fig. 4 Admittance vs frequency curve with clamping off MPF center [$c(5$ mm), $d(13$ mm)]

纤维的长度 L_1, L_2 (MPF 长度 $l=L_1+L_2$), 表 1 中频率常数 N_r 为 1 345, 根据式 (28) 预测谐振频率。图 4 是在不同夹持位置测得的导纳-频率曲线。表 2 是得到的实际谐振频率与预测谐振频率。从表中数据可看到预测的谐振频率与实际测量得到的谐振频率相符的较好。而其中的误差可能是夹持时, 弹簧铜片本身具有一段宽度引起的, 另外不同的夹持力也可能有影响。

综上所述, 夹持力加在 MPF 的中心位置时, 经常出现夹持位置偏离中心, 从而造成测量的误差。要找到准确的中心位置需花费时间, 不利于准确测量 MPF 性能参数, 而且测量的稳定性也不能保证。

3.1.2 夹持位置在端部

需要指出的是, 夹持在 MPF 一端时的参数计算公式与夹持在中间时不同。边义祥等人推导出夹持在 MPF 一端时的参数计算公式^[20-21]。图 5 是夹持位置在 MPF 一端时, MPF 一阶谐振附近的导纳-频率曲线。从图 5 中可以看到, 虽然可以得到较好的曲线, 但是出现很多“毛刺”, 信号较小, 容易受到外界影响。而在图 3 中曲线 (a), 夹持在 MPF 中心时, 曲线很光滑, 没有出现图 5 中的现象。表 3 是夹持在 MPF 端部和在中心时, 谐振频率和反谐振频率的导纳值。可以看到夹持在中心与夹持在端部时谐振频率和反谐振频率的相对导纳值 $Y(f_r)-Y(f_a)$ 相差 15 倍以上。在测量时一般希望测量信号较大, 因此夹持在 MPF 中心时信号更好, 更容易分辨。

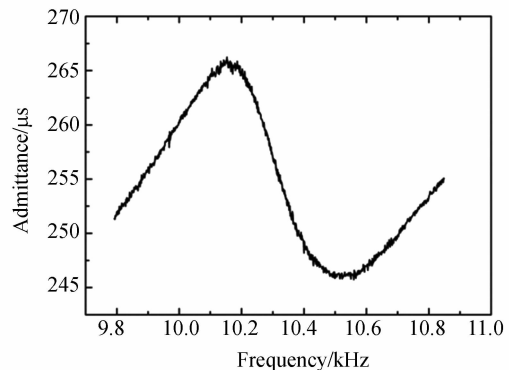


图 5 夹持在 MPF 端部时的导纳-频率曲线

Fig. 5 Admittance vs frequency curve with clamping at the end of MPF

表 3 夹持在 MPF 端部及在中间时谐振频率和反谐振频率的导纳值

Tab. 3 Admittance of MPF on first-order resonance with clamping positions in center and at end of MPF

参数	$f_r/$	$Y(f_r)/$	$f_a/$	$Y(f_a)/$	$Y(f_r) - Y(f_a)$
	kHz	10^{-4} s	kHz	10^{-4} s	10^{-4} s
夹持在中心	21.70	7.266	21.96	3.913	3.353
夹持在端部	10.15	2.662	10.55	2.457	0.205

3.2 夹持力的影响

不管夹持位置在 MPF 端部还是在中心,都有一个需要解决的问题,就是夹持力的大小。由于 MPF 比较细小,夹持力太大时,很容易损伤 MPF。但是夹持力较小时,对测量的影响也很大。图 6 是夹持力较小,夹持在 MPF 中心时的

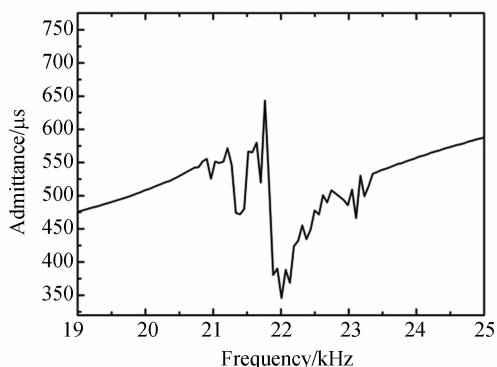


图 6 夹持在 MPF 中心的导纳-频率曲线(夹持力较小)

Fig. 6 Frequency vs admittance curve with clamping at center of MPF in a low clamping pressure situation

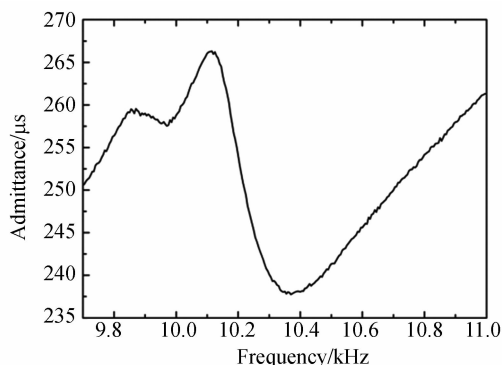


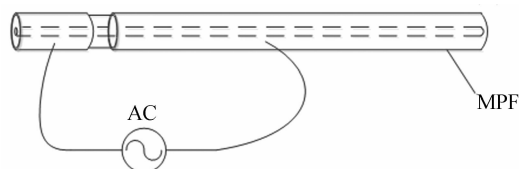
图 7 夹持在 MPF 端部的导纳-频率曲线(夹持力较小)

Fig. 7 Frequency vs admittance curve with clamping at end of MPF in a low clamping pressure situation

第一阶谐振频率导纳-频率曲线。由于夹持力太小,在 MPF 发生谐振时,电极的接触部分变得不稳定,从而难以准确测定的谐振和反谐振频率。夹持在端部时,也会出现夹持力太小而影响测量结果。如图 7 所示,在谐振频率前面出现了一个小的谐振峰。大的谐振峰是 MPF 自由振动部分谐振产生的,前面的小峰是夹持力较小时,弹簧铜片容易松动,整根 MPF 长度谐振产生的。

3.3 MPF 测量的无夹持设计与性能测试

从前面的分析可知,MPF 的夹持位置在中间时容易产生偏离,影响测量结果;夹持位置在端部时,谐振频率和反谐振频率的相对导纳值较小,也不利于准确测量。夹持力对 MPF 测量影响也很大。因为 MPF 尺寸细小,夹持力也会影响 MPF 的谐振,使测量结果产生误差。用来测量 MPF 谐振的夹具必须考虑到夹持力的问题,同时也要使用方便,而且不损伤 MPF。本文提出一种不需要夹持的测量 MPF 方法。将含金属芯的压电纤维表面溅射一层金属电极,其中一端的金属电极接着金属芯,并与纤维表面电极分开,如图 8(a)所示。使用细导线连接 2 个电极,为了增加接触导电性可以再涂上导电银胶或粘贴一小片导电铜箔,图 8(b)是细导线连接其中一端电极的实物图。由于导线很细小,产生的阻力很小,对 MPF 的振动影响可以忽略不计。



(a) MPF 无夹持测试

(a) Measurement method without clamping



(b) 其中一端连接导线实物图

(b) End of MPF connecting wire

图 8 无夹持测试方案

Fig. 8 Scheme of measurement method without clamping

表 4 PZN-PZT 压电陶瓷 MPF 测量参数和电学性能

Tab. 4 Measuring parameters and electrical properties of PZN-PZT MPF

参数	$l/$ mm	$R_f/$ μm	$f_r/$ kHz	$f_a/$ kHz	$C_f/$ nF	$s_{11}^E/$ 10^{-12}Pa^{-1}	$\epsilon_{33}^T/$ ϵ_0	k_{31}	$-d_{31}/$ pC/N	$N_r/$ kHz * mm
MPF	21	150	61.81	62.72	0.95	18.9	1 458	0.197	97	1 298

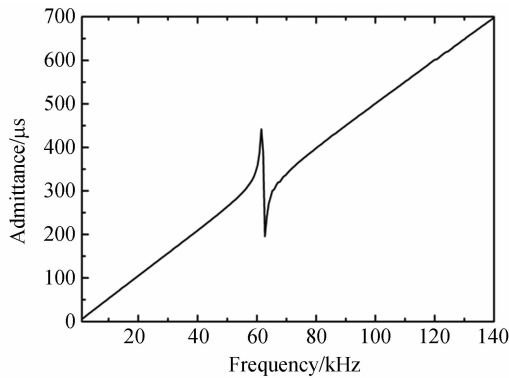


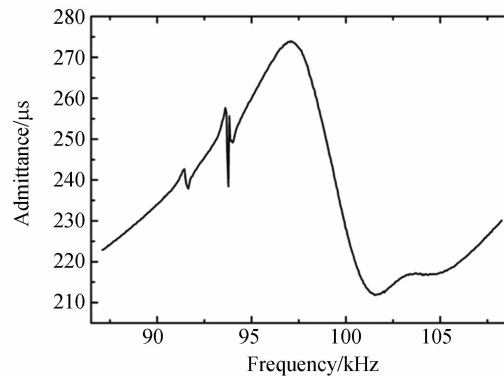
图 9 PZN-PZT MPF 在频率为 0~140 kHz 的导纳测试

Fig. 9 Admittance vs frequency curve of PZN-PZT MPF (0~140 kHz)

MPF 在第一阶谐振时,实际是由两段长度 L (MPF 长度 $l=2L$) 的 MPF 分别在同一频率下振动,谐振曲线实际上是 2 个谐振峰的叠加。如果 MPF 谐振时受到了阻力或者两段长度不相等,两段纤维的谐振频率就不一样,所以会出现谐振曲线不对称或者出现杂峰。图 9 为测量的 PZN-PZT 压电陶瓷 MPF 在频率为 0~140 kHz 的导纳-频率曲线,可以看到曲线光滑对称,没有出现杂峰。这说明连接的导线没有对 MPF 自由振动产生的影响。表 4 为 PZN-PZT 压电陶瓷 MPF 测量参数和电学性能。使用这种不需要夹持的方法测量 MPF,测试准确,操作简单,不易损伤 MPF,得到 PZN-PZT 压电陶瓷 MPF 的压电性能为 $d_{31} = -97 \text{ pC/N}$, $k_{31} = 0.197$, $\epsilon_{33}^T = 1 458$ 。

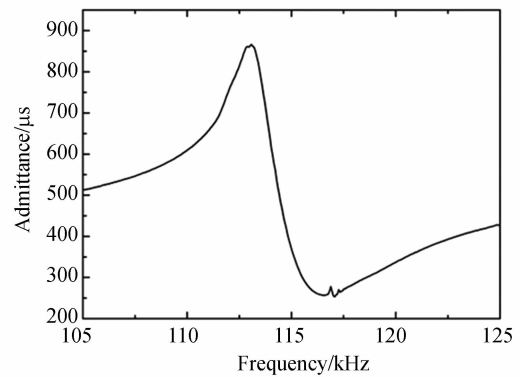
值得注意的是,当 MPF 长度较长时(大于 20 m,图 9 中 MPF 长度为 21 mm),无论外层电极导线接触在端部还是中心,对 MPF 振动的影响可以忽略不计。但是当 MPF 长度较小时(小于 15 mm,图 10 中 MPF 长度为 12 mm),导线接触的位置对测试结果也有较大影响。如图 10(a)所示,当外层电极的导线接在 MPF 的端部时,在谐振峰前面出现了许多小峰,而且反谐振峰附近也有杂峰。这对准确测量谐振和反谐振峰的频率有

较大的影响。而图 10(b)则是外层电极的导线接触在纤维中部时的导纳-频率曲线,可以看出比外层电极的导线接触在端部时,测量结果更好。因此,外层电极的导线应该接触在纤维中部。但是图 10(b)反谐振附近还是有些很小的杂峰,这说明当 MPF 长度较小时,导线的存在对振动产生的影响不能忽略。目前 MPF 用于传感和驱动时,为了获得更大的信号,以及在实验测试时为了方便测试,MPF 的长度一般在 20~60 mm。将来使用 MPF 的长度较小时,应考虑无导线测试方法,进一步减小导线对谐振频率的影响。



(a) 外层电极的导线接触端部

(a) Wire contacting position at the end of MPF



(b) 外层电极的导线接触中部

(b) Wire contacting position in center of MPF

图 10 导纳-频率曲线(MPF 长度 12 mm)

Fig. 10 Admittances vs frequency curves (length of MPF is 12 mm)

4 结 论

本文基于 MPF 的压电方程得到其测试模型,并确定了 MPF 的电学性能测试步骤。研究了测量夹具对测量结果的影响,研究显示:夹持 MPF 的位置在中心时容易产生偏离,影响测量结果;夹持位置在端部时,谐振频率和反谐振频率的

相对导纳值较小,也不利于准确测量。MPF 尺寸细小,任何小的一点加持力都会对 MPF 的谐振产生很大影响,使测量结果产生误差。提出一种不需要夹持的测量 MPF 的方法,并对 PZN-PZT 压电陶瓷的 MPF 进行了测量,其压电性能为 $d_{31} = -97 \text{ pC/N}$, $k_{31} = 0.197$, $\epsilon_{33}^T = 1458$ 。这种方法测试准确,操作简单,不易损伤 MPF,可作为 MPF 压电性能测试标准。

参考文献:

- [1] 朱孔军,孟兆磊,裘进浩,等. $\text{K}_{0.5}\text{Na}_{0.5}\text{NbO}_3$ 无铅压电陶瓷的烧结特性[J]. 光学精密工程,2009,17(01):132-136.
ZHU K J, MENG ZH L, QIU J H, *et al.*. Sintering properties of $\text{K}_{0.5}\text{Na}_{0.5}\text{NbO}_3$ lead-free piezoelectric ceramics[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009,17(1): 132-137. (in Chinese)
- [2] 裘进浩,姜皓,季宏丽,等. 功能梯度压电驱动器的结构设计、制备与功能验证[J]. 光学精密工程,2009;17(1):118-125.
QIU J H, JIANG H, JI H L, *et al.*. Design, fabrication and performance evaluation of functionally gradient piezoelectric actuator[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009,17(1): 118-125. (in Chinese)
- [3] BENT A A. *Active Fiber Composites for structural Applications*[D]. Massachusetts Institute of Technology,1997.
- [4] WILKIE W, BRYANT R G, HIGH J W, *et al.*. Low-Cost Piezocomposite Actuator for Structural Control Applications[C]. *Proceedings, SPIE's 7th International Symposium on Smart Structures and Materials, Newport Beach, California, March 5-9,2000.*
- [5] BENT A A, HAGOOD N W. Piezoelectric fiber composites with interdigitated electrodes[J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 1997,. 8(11):903-19.
- [6] CASS R B, DHAN A, MOHAMMADI F. Innovative ceramic-fiber technology energizes advanced ceramics[J]. *American Ceramic Society Bulletin*, 2003, V82(11):9701-9706.
- [7] WICKRAMASINGHE V K, HAGOOD N W. Durability characterization of active fiber composite actuators for helicopter rotor blade application[J]. *Journal of Aircraft*, 2004,V41(4): 931-937.
- [8] ARON A BENT, NESBITT W HAGOOD, JOHN P RODGERS. Anisotropic Actuation with Piezoelectric Fiber Composites[C]. *Proceedings of the DGLR Conference, Germany*,1993.
- [9] 季宏丽,裘进浩,赵永春,等. 基于 TMS320F2812 的悬臂梁振动半主动控制[J]. 光学精密工程,2009;17;1:126-131.
JI H L, QIU J H, ZHAO Y CH, *et al.*. Semi-active control for structural vibration of cantilever beam based on TMS320F2812[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009,17(1):126-131. (in Chinese)
- [10] LUO J, QIU J, ZHU K, *et al.*. Effects of the Calcining Temperature on the Piezoelectric and Dielectric Properties of 0.55PNN-0.45PZT Ceramics [J]. *Ferroelectrics*, 2011,425(1): 90-97.
- [11] QIU JH, TANI J, YAMADA N, *et al.*. Fabrication of piezoelectric fibers with metal core [J]. *Smart. Mater. Struct.* 2003,5053: 475-483.
- [12] QIU JH, TANI J. Vibration Control of a Cylindrical Shell using Distributed Sensors and Actuators [J]. *J. Inter. Mat. Sys. Struc.* 1995, 6: 474-481.
- [13] QIU JH, TANI J, YANADA N, *et al.*. Fabrication of $\text{Pb}(\text{Nb}, \text{Ni})\text{O}_3\text{-Pb}(\text{Zr}, \text{Ti})\text{O}_3$ piezoelectric ceramic fibers by extrusion of a sol-powder mixture[J]. *J. Intell. Mater. Syst. Struct.* 2004, 15:643-653.
- [14] QIU JH, TANI J, YAMADA N, *et al.*. Fabrication of piezoelectric fibers with metal core [J].

- Smart. Mater. Struct.* 2003,5053: 475-483.
- [15] SEBALD G, BENAYAD A, QIU J, *et al.*. Electromechanical characterization of 0.55Pb(Ni_{1/3}Nb_{2/3})O₃-0.45Pb(Zr_{0.3}Ti_{0.7})O₃ fibers with Pt core[J]. *J. Appl. Phys.* 2006,100: 054106.
- [16] 罗俊, 裘进浩, 朱孔军, 等. 烧结温度对 0.55Pb(Ni_{1/3}Nb_{2/3})O₃-0.45Pb(Zr_{0.3}Ti_{0.7})O₃ 压电陶瓷性能的影响[J]. *功能材料*, 2010, 7:1274-77.
- LUO J, QIU J, ZHU K, *et al.*. Effects of sintering temperature on piezoelectric property of 0.55Pb(Ni_{1/3}Nb_{2/3})O₃-0.45Pb(Zr_{0.3}Ti_{0.7})O₃ ceramics[J]. *Journal of Functional Materials*, 2010,7:1274-77. (in Chinese)
- [17] SEBALD G, QIU JH, GUYOMAR D. Modelling the lateral resonance mode of piezoelectric fibres with metal core[J]. *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2005,38: 3733-40.
- [18] SEBALD G, QIU J, GUYOMAR D, *et al.*. Modeling and Characterization of Piezoelectric Fibers with Metal Core[J]. *Jpn. J. Appl. Phys.* 2005, 44: 6156-63.
- [19] HAJJAJI A, BENAYAD A, SEBALD G, *et al.*. Synthesis and characterization of 0.65Pb(Mg_{1/3}Nb_{2/3})O₃ - 0.35PbTiO₃ fibers with Pt core [J]. *Mater. Res. Bull.* 2008,43: 493-501.
- [20] 边义祥, 裘进浩. 半电极含金属芯压电纤维的弯曲振动模型[J]. *光学精密工程*, 2011,19(6): 1298-1305.
- BIAN Y X, QIU J H. Bending vibration model for half coated metal core piezoelectric fiber[J]. *Editorial Office of Optics and Precision Engineering*, 2011,19(6):1298-1305. (in Chinese)
- [21] 边义祥, 裘进浩, 王鑫伟, 等. 半电极含金属芯压电纤维的驱动性能[J]. *光学精密工程*, 2009;17: 1:109-117.
- BIAN Y X, QIU J H, WANG X W, *et al.*. Characterization of actuator of half coated metal piezoelectric fiber[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(1): 109-117. (in Chinese)
- [22] HIROSHI SATO, MASARU NAGAMINE. Mechanical properties of metal-core piezoelectric fiber [C]. *Smart Structures and Materials 2005, Proceedings of SPIE Vol. 5764* (SPIE, Bellingham, WA, 2005):623-629.
- [23] KIYOSHI TAKAGI, HIROSHI SATO, MUNEHARU SAIGO. Robust vibration control of the metal-core assisted piezoelectric fiber embedded in CFRP composite[C]. *Smart Structures and Materials 2004, Proceedings of SPIE Vol. 5383* (SPIE, Bellingham, WA, 2004):376-385.

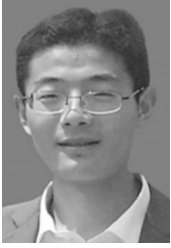
作者简介:



罗俊(1984—),男,湖南永州人,博士研究生,2008年于济南大学获得学士学位,现为南京航空航天大学航空宇航学院博士生,主要从事压电陶瓷及器件、含金属芯压电陶瓷纤维制备和应用等方面的研究。E-mail: luojun96@126.com



季宏丽(1983—),女,江苏盐城人,工学博士,讲师,2004年7月于太原科技大学机械设计及其自动化专业获得工学学士学位,主要从事智能材料与结构的研究。E-mail: jihongli@nuaa.edu.cn



杜建周(1985—),男,山东省临沂人,博士研究生,2007年于临沂师范学院获得学士学位,2009年于南京航空航天大学获得硕士学位,现为南京航空航天大学航空宇航学院博士生,主要从事智能材料与结构的研究。E-mail: dujianzhou123@nuaa.edu.cn

导师简介:



裘进浩(1963—),男,浙江省人,航空宇航学院教授,博士生导师,智能材料与结构专家,教育部“长江学者”特聘教授,1983年、1986年于南京航空学院分别获得工学学士、工学硕士学位,1996年3月于日本东北大学获得博士学位,2004年4月起日本东北大学流体科学研究所教授,也是日本七所帝国大学第一位华人正教授,长期从事智能材料与结构的研究,包括高性能压电材料与器件、结构的振动与噪声控制、流动控制、健康监测、能量回收、自适应结构、压电器件的精密传感与驱动技术等。E-mail: qiu@nuaa.edu.cn



朱孔军(1971—),男,山东临沭县人,教授,理学博士,博士生导师,2005年3月于日本国立高知大学获得博士学位;05年4月—10月日本国立高知大学博士后,05年11月—06年12月日本国立东北大学助理教授,07年1月至今在南京航空航天大学航空宇航学院从事教学和科研工作。主要从事压电材料的研究。E-mail: kjzhu@nuaa.edu.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)